

电子科技大学
UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

博士学位论文

DOCTORAL DISSERTATION

(电子科技大学图标)

论文题目 基于疲劳损伤累积理论的结构寿命预测

与时变可靠性分析方法研究

学科专业 机械工程

学号 201311080104

作者姓名 彭兆春

指导教师 黄洪钟 教授

分类号 _____ 密级 _____

UDC ^{注1} _____

学 位 论 文

基于疲劳损伤累积理论的结构寿命预测 与时变可靠性分析方法研究

(题名和副题名)

彭兆春

(作者姓名)

指导教师

黄洪钟

教 授

电子科技大学

成 都

(姓名、职称、单位名称)

申请学位级别 博士 学科专业 机械工程

提交论文日期 2017.03.13 论文答辩日期 2017.05.18

学位授予单位和日期 电子科技大学 2017年06月

答辩委员会主席 _____

评阅人 _____

注 1: 注明《国际十进分类法 UDC》的类号。

**Research on Methods for Structural Life Prediction
and Time-dependent Reliability Analysis Using
Cumulative Fatigue Damage Theories**

**A Doctoral Dissertation Submitted to
University of Electronic Science and Technology of China**

Major: **Mechanical Engineering**
Author: **Peng Zhaochun**
Supervisor: **Prof. Huang Hong-Zhong**
School: **School of Mechatronics Engineering**

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

作者签名：_____ 日期： 年 月 日

论文使用授权

本学位论文作者完全了解电子科技大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权电子科技大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后应遵守此规定）

作者签名：_____ 导师签名：_____

日期： 年 月 日

摘 要

随着航空航天、轨道交通、船舶海洋、机械制造等工业技术水平的提高，现代机械装备正逐步向大型化、高速化和高性能方向发展。许多机械装备关键零构件或结构的服役环境复杂，运行条件恶劣，导致各类破坏事故频繁发生。腐蚀、磨损和疲劳是机械结构破坏的主要表现形式，其中以疲劳破坏尤为突出。针对长期承受交变循环载荷作用的机械结构，疲劳断裂是其最主要的失效模式，占机械结构失效总数的 50%~90%。疲劳破坏具有很强的隐蔽性和突发性，破坏前无明显的征兆，对机械装备的安全运行构成了严重威胁，一旦发生破坏易于造成重大事故和生命财产损失。机械装备零构件或结构的疲劳寿命及其可靠性是制约装备整机寿命和系统可靠性水平的关键因素。因此，精确地预测和评估机械结构的寿命和可靠性，是确保其在服役期内安全、可靠运行的重要保障，对合理制定维修决策和健康管理计划，最大限度地发挥装备的使用价值，提高经济效益和抗疲劳设计等方面均具有重要的理论价值和现实意义。

由于疲劳失效过程的复杂性和随机性，传统的寿命预测理论和可靠性分析方法还不够完善，仍存在诸多尚未解决的难题和不足。针对此，本文以有限寿命设计方法和疲劳损伤累积理论为基础，深入开展疲劳损伤失效机理、寿命预测技术以及可靠性分析方法的研究，采用机械装备关键零构件的金属材料试件和焊接结构件的疲劳试验数据进行模型和方法验证，使现有疲劳分析理论日臻完善，拓展其应用范围。论文主要研究内容和成果如下：

(1) 提出了考虑载荷相互作用效应的疲劳损伤等效法则与剩余寿命预测方法。针对变幅加载载荷历程效应的复杂性以及 Miner 法则的内在缺陷，从损伤累积的角度出发，系统地研究了载荷加载顺序及载荷交互效应的作用机制。根据疲劳失效的“二元判据”，引入了疲劳损伤状态的概念定性地表征材料的受损程度。针对传统损伤等效方法的缺陷，提出了考虑载荷相互作用效应的疲劳损伤等效法则。在此基础上，结合韧性耗散模型，建立了改进型剩余寿命预测模型，该模型能综合考虑载荷顺序及载荷间交互作用对损伤发展和疲劳寿命的影响。

(2) 提出了基于疲劳驱动能损伤参数的非线性损伤累积模型与剩余寿命预测方法。针对传统损伤变量在描述上难以揭示失效过程能量耗散的本质，以疲劳驱动力模型为基础，运用能量准则，提出了一种描述疲劳失效全过程的驱动能损伤参数。从失效的能耗过程出发，建立了以驱动能耗散为状态参量的疲劳损伤定量方法和非线性损伤累积模型。在此基础上，运用损伤等效原理，推导出剩余寿命

预测模型表达式以及考虑载荷相互作用效应的改进模型，并通过试验设计研究了两种模型的典型非线性特征。

(3) 提出了基于动态剩余 S-N 曲线与材料记忆性能退化的修正线性损伤累积准则。针对非线性损伤理论计算量大的缺陷以及 Miner 法则在工程应用上的优势，从剩余寿命和 S-N 曲线的角度出发，研究了动态剩余 S-N 曲线和材料记忆性能的退化规律，通过引入材料记忆退化参数定量地表征动态剩余 S-N 曲线的斜率比，提出了一种修正的线性损伤累积准则。该准则保留了传统 Miner 法则形式上的简易性，便于疲劳损伤定量分析和寿命估算。通过对比三种线性损伤模型并结合试验设计，详细阐述了四种模型存在的共有属性以及线性损伤增长行为。

(4) 提出了基于双线性损伤累积理论的概率模型以及时变疲劳可靠性分析方法。疲劳失效是一个损伤不断累积的动态过程，传统的基于静态的可靠性分析方法无法体现载荷历程的时变特征，而基于动态的可靠性分析方法难以揭示失效过程裂纹萌生和裂纹扩展的两阶段特性。针对此，以双线性损伤累积理论为依据，分别在正态分布和对数正态分布假设下，构建了概率损伤累积模型。在此基础上，运用应力-强度干涉理论，建立了基于“累积损伤-临界损伤”时变可靠度模型，实现了疲劳全寿命周期内的可靠度预测。

关键词：疲劳损伤累积理论，载荷相互作用效应，疲劳驱动能，寿命预测，可靠性分析

ABSTRACT

With the improvement of industrial technology in aerospace, rail transport, naval architecture and marine, and mechanical manufacture, the modern mechanical equipments are gradually moving in a large, high-speed, and high performance direction. Most of critical components and structures undergo complex and harsh environments in service, which often causes a series of accidents. The typical failure modes for engineering structures and mechanical parts are corrosion, wear and fatigue, in which the fatigue failure is particularly prevalent. For engineering components under cyclic loadings, fatigue and fracture are the most common cause that comprises approximately 50% to 90% of mechanical failures. Owing to the concealment and sudden failure of fatigue, it will cause a serious threat to the safe operation of mechanical equipments. Once the failure occurs, it is easier to cause major accidents, human injury, and economic loss. The fatigue life and reliability of mechanical parts and structures are crucial to the development of the whole of equipments in life and system reliability. In order to guarantee the safety and reliability of equipments during service operation, it should be essential to accurately assessing and predicting the fatigue life and reliability of mechanical structures. Thus, it can contribute to making maintenance strategies and health management plans, maximizing the use of equipments, improving economic benefits, and fatigue resistant design.

Due to the complexity and stochasticity of fatigue process, the traditional life prediction models and reliability analysis methods cannot meet the demand of practical engineering. To date, there still have so many critical issues that need to be resolved in fatigue theory. According to the deficiencies and shortcomings in existing models, the objective of the dissertation is to deal with the challenges in fatigue damage mechanisms, life prediction, and reliability analysis for mechanical structures, which uses the finite life design method and cumulative fatigue damage theories. In this dissertation, the experimental data from the metallic specimens of critical components of equipments and welded structures are employed to demonstrate the effectiveness of the proposed methods. The main contributions and innovative outcomes of the dissertation are summarized as follows:

- (1) Development of an equivalent fatigue damage rule accounting for load

interaction effects for residual fatigue life prediction. Due to the complexity of loading histories under variable amplitude loading and the insufficiencies of Miner rule, the mechanisms on load sequences and load interactions are studied systematically from a point of damage accumulation. According to the double parameter fatigue criterion, a concept of fatigue damage state is introduced to characterize the damage degree of materials. In view of the limitations of traditional equivalent method, a new equivalent fatigue damage rule is developed to account for the load interaction effects between two consecutive stress amplitudes. By applying this method to a fatigue damage model based on static toughness exhaustion theory, a modified residual life prediction model is derived, which can consider both mechanisms of load sequences and load interactions on damage evolution and fatigue life.

(2) Development of a nonlinear damage accumulation model based on fatigue driving energy parameter for residual fatigue life prediction. The damage variable is typically used to describe the process of fatigue failure both qualitatively and quantitatively. In order to reveal the nature of energy dissipation on fatigue that conventional damage variable often ignores, by incorporating a fatigue driving stress model and strain energy density, a fatigue driving energy parameter is proposed to present the complete process of fatigue failure. By assessing the change of fatigue driving energy parameter, a fatigue damage quantitative method and a nonlinear damage accumulation model are thus established. According to the equivalent fatigue damage rule, a residual life prediction model as well as a modified model accounting for load interactions is also derived. Moreover, several typical nonlinear characteristics of two models are extracted and analyzed.

(3) Development of a modified linear damage accumulation rule based on dynamic residual S-N curve and material memory degeneration. Due to the expensive computation of nonlinear damage theories and the advantages of Miner rule in practical engineering, the dynamic residual S-N curve and material memory degeneration behaviors are studied from the perspective of residual life and S-N diagram. By introducing a material memory degeneration coefficient to quantify the slope ratio of dynamic residual S-N curve, a modified linear damage accumulation model is then obtained. This model not only maintains the simplicity of traditional Miner rule, but also can provide a quantitative analysis of fatigue damage and life assessment. In addition, three linear damage rules are used for model comparison, and some common

characteristics and linear damage behaviors are discussed in detail.

(4) Development of a probabilistic cumulative damage model based on double linear damage accumulation rule and a time-dependent fatigue reliability analysis method. Fatigue failure is a dynamic process of damage accumulation in nature, while the traditional static statistical model cannot consider the time-dependent characteristics due to fatigue loading. For dynamic statistical models, the Miner rule is generally used for reliability modeling, which fails to depict the two stages of fatigue process, i.e. crack initiation and crack propagation. In order to alleviate such deficiencies, by using the double linear damage rule, a probabilistic cumulative damage model is put forward under normal and lognormal distribution assumptions. Based on the stress-strength interference model, a time-dependent fatigue reliability model accounting for cumulative damage and critical damage is also developed, which can predict the reliability variation during the entire usage life.

Keywords: cumulative fatigue damage theories, load interaction effects, fatigue driving energy, life prediction, reliability analysis

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 疲劳与抗疲劳设计.....	2
1.2.1 疲劳研究发展概况.....	2
1.2.2 疲劳断裂失效机理.....	4
1.2.3 抗疲劳设计方法.....	6
1.3 疲劳寿命预测方法.....	7
1.4 疲劳损伤累积理论与疲劳可靠性分析.....	10
1.4.1 疲劳损伤累积理论研究现状.....	10
1.4.2 结构疲劳可靠性分析方法.....	13
1.4.3 存在的不足和问题.....	16
1.5 论文主要研究工作.....	18
第二章 考虑载荷相互作用效应的疲劳损伤等效与寿命预测	20
2.1 引言.....	20
2.2 载荷加载顺序效应的阐释.....	20
2.3 考虑载荷相互作用效应的疲劳损伤等效法则.....	24
2.4 改进型疲劳损伤累积模型与剩余寿命预测.....	29
2.5 算例分析.....	33
2.5.1 两级加载下模型验证.....	33
2.5.2 多级加载下模型验证.....	40
2.6 本章小结.....	43
第三章 基于疲劳驱动能损伤参数的非线性损伤累积与寿命预测	44
3.1 引言.....	44
3.2 疲劳驱动力模型及其缺陷.....	44
3.3 基于疲劳驱动能损伤参数的非线性损伤累积模型.....	46
3.3.1 疲劳驱动能损伤参数.....	46
3.3.2 疲劳驱动能损伤变量与剩余寿命预测模型.....	48
3.4 模型改进与典型非线性行为分析.....	50
3.5 算例分析.....	57

3.5.1 两级加载下模型验证	57
3.5.2 多级加载下模型验证	66
3.6 本章小结.....	72
第四章 基于动态剩余 S-N 曲线与材料记忆退化的线性损伤累积与寿命预测.....	74
4.1 引言.....	74
4.2 动态剩余 S-N 曲线与材料记忆退化行为分析	74
4.3 修正线性损伤累积模型.....	77
4.4 模型对比与线性损伤行为分析.....	80
4.4.1 三种典型的线性损伤法则	80
4.4.2 线性损伤行为分析	82
4.5 算例分析.....	88
4.5.1 两级加载下模型验证	88
4.5.2 多级加载下模型验证	97
4.6 本章小结.....	104
第五章 概率双线性损伤累积建模与时变疲劳可靠性分析	106
5.1 引言.....	106
5.2 两阶段线性疲劳损伤累积理论.....	106
5.2.1 Grover-Manson 双线性损伤法则.....	106
5.2.2 两阶段线性损伤累积的阐释	110
5.3 基于双线性损伤累积的概率模型.....	113
5.3.1 正态分布下概率损伤累积建模	114
5.3.2 对数正态分布下概率损伤累积建模	118
5.4 时变疲劳可靠性分析.....	121
5.4.1 正态分布下时变可靠度模型	121
5.4.2 对数正态分布下时变可靠度模型	127
5.5 算例分析.....	129
5.5.1 正态分布下时变疲劳可靠度模型验证	129
5.5.2 对数正态分布下时变疲劳可靠度模型验证	140
5.6 本章小结.....	156
第六章 总结与展望	157
6.1 全文总结.....	157
6.2 后续工作展望.....	159

致 谢	160
参考文献	161
攻读博士学位期间取得的成果	179

图目录

图 1-1 论文框架图.....	18
图 2-1 Miner 法则损伤曲线.....	21
图 2-2 非线性损伤曲线.....	22
图 2-3 考虑载荷水平相关的非线性损伤曲线.....	24
图 2-4 两级变幅加载退化为等效恒幅加载.....	26
图 2-5 两级高-低加载下非线性损伤演化规律.....	27
图 2-6 45 钢疲劳损伤演化曲线与试验值比较.....	30
图 2-7 16Mn 钢疲劳损伤演化曲线与试验值比较.....	30
图 2-8 三种模型预测结果与试验值比较（高-低加载）.....	35
图 2-9 三种模型预测结果与试验值比较（低-高加载）.....	35
图 2-10 不同加载顺序下三种模型累积损伤均值与试验值比较（45 号钢）.....	36
图 2-11 不同加载顺序下三种模型累积损伤均值与试验值比较（Al-2024-T42）.....	36
图 2-12 不同加载顺序下三种模型累积损伤均值与试验值比较（30CrMnSiA）.....	37
图 2-13 焊接接头类型示意图.....	37
图 2-14 两级加载下三种模型预测结果与试验值比较（铝合金焊接接头）.....	39
图 2-15 三种模型累积损伤均值与试验值比较（铝合金焊接接头）.....	39
图 2-16 三种模型疲劳损伤演化规律比较（CFD1 试验）.....	42
图 2-17 三种模型疲劳损伤演化规律比较（CFD2 试验）.....	42
图 3-1 不同应力水平下疲劳驱动力增长规律.....	45
图 3-2 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较（ $b = -0.05$ ）.....	52
图 3-3 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较（ $b = -0.15$ ）.....	52
图 3-4 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较（ $b = -0.25$ ）.....	53
图 3-5 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较（ $b = -0.35$ ）.....	53
图 3-6 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较（ $b = -0.45$ ）.....	54
图 3-7 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较（ $b = -0.55$ ）.....	54
图 3-8 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较（ $b = -0.65$ ）.....	55
图 3-9 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较（ $b = -0.75$ ）.....	55
图 3-10 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较（ $b = -0.85$ ）.....	56
图 3-11 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较（ $b = -0.95$ ）.....	56
图 3-12 三种模型预测结果与试验值比较（球墨铸铁 GS61）.....	59

图 3-13 三种模型预测结果与试验值比较 (钛合金 Ti-6Al-4V)	59
图 3-14 三种模型预测结果与试验值比较 (铝合金 Al-2024-T42)	60
图 3-15 三种模型预测结果与试验值比较 (动车铝合金车体焊接接头)	60
图 3-16 不同加载顺序下三种模型累积损伤均值比较 (球墨铸铁 GS61)	61
图 3-17 不同加载顺序下三种模型累积损伤均值比较 (Ti-6Al-4V)	61
图 3-18 不同加载顺序下三种模型累积损伤均值比较 (Al-2024-T42)	62
图 3-19 不同加载顺序下三种模型累积损伤均值比较 (铝合金焊接接头)	62
图 3-20 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 (GS61, 平面弯曲加载)	63
图 3-21 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 (GS61, 扭转加载)	63
图 3-22 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 (Ti-6Al-4V)	64
图 3-23 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 (Al-2024-T42)	64
图 3-24 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 (对接接头)	65
图 3-25 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 (角接头)	65
图 3-26 铝合金 6082T6 多级阶梯谱示意图	67
图 3-27 三种模型累积损伤值与试验值比较 (铝合金 6082T6)	68
图 3-28 三种模型疲劳损伤演化规律比较 (铝合金 6082T6, 递减加载)	69
图 3-29 三种模型疲劳损伤演化规律比较 (铝合金 6082T6, 递增加载)	69
图 3-30 三种模型疲劳损伤演化规律比较 (铝合金 6082T6, 随机加载)	70
图 3-31 钛合金 Ti-6Al-4V 试件程序块载荷谱	70
图 3-32 程序块谱加载下三种模型预测结果与试验值比较 (Ti-6Al-4V)	71
图 3-33 程序块谱加载下三种模型累积损伤均值与试验值比较 (Ti-6Al-4V)	72
图 4-1 双对数坐标下 S-N 曲线、剩余 S-N 曲线与动态剩余 S-N 曲线	75
图 4-2 两级循环加载下动态剩余 S-N 曲线的演化规律	77
图 4-3 三级循环加载下动态剩余 S-N 曲线的演化规律	79
图 4-4 不同试验条件下载荷效应系数变化规律 (Corten 模型)	83
图 4-5 不同试验条件下载荷效应系数变化规律 (Kwofie 模型)	84
图 4-6 不同试验条件下载荷效应系数变化规律 (所提模型)	84
图 4-7 高-低加载下四种模型损伤演化规律比较 ($N_{f1} / N_{f2} = 0.1$)	85
图 4-8 高-低加载下四种模型损伤演化规律比较 ($N_{f1} / N_{f2} = 0.2$)	85
图 4-9 高-低加载下四种模型损伤演化规律比较 ($N_{f1} / N_{f2} = 0.5$)	86
图 4-10 低-高加载下四种模型损伤演化规律比较 ($N_{f1} / N_{f2} = 2$)	86
图 4-11 低-高加载下四种模型损伤演化规律比较 ($N_{f1} / N_{f2} = 5$)	87
图 4-12 低-高加载下四种模型损伤演化规律比较 ($N_{f1} / N_{f2} = 10$)	87

图 4-13 四种模型的预测寿命与试验寿命比较 (300 CVM 马氏体时效钢)	91
图 4-14 四种模型的预测寿命与试验寿命比较 (Al-2024-T42)	92
图 4-15 四种模型的预测寿命与试验寿命比较 (30NiCrMoV12 钢)	92
图 4-16 四种模型临界损伤值统计分析 (300 CVM 马氏体时效钢)	95
图 4-17 四种模型临界损伤值统计分析 (Al-2024-T42, 高-低加载)	95
图 4-18 四种模型临界损伤值统计分析 (Al-2024-T42, 低-高加载)	96
图 4-19 四种模型临界损伤值统计分析 (30NiCrMoV12 钢, 高-低加载)	96
图 4-20 四种模型临界损伤值统计分析 (30NiCrMoV12 钢, 低-高加载)	97
图 4-21 焊接球节点网架结构	98
图 4-22 四种模型的预测寿命与试验寿命比较 (焊接球节点网架结构)	100
图 4-23 四种模型临界损伤值统计分析 (焊接球节点网架结构)	101
图 4-24 四种模型疲劳寿命预测值与相对预测误差 (41Cr4)	102
图 4-25 四种模型临界损伤预测值与试验值比较 (41Cr4)	103
图 4-26 四种模型疲劳损伤演化规律比较 (41Cr4, CFD1 试验)	103
图 4-27 四种模型疲劳损伤演化规律比较 (41Cr4, CFD2 试验)	104
图 5-1 疲劳裂纹增长阶段	107
图 5-2 两级加载下双线性疲劳损伤累积规律	107
图 5-3 不同加载顺序下双线性损伤累积路径	108
图 5-4 双线性疲劳损伤演化示意图	109
图 5-5 裂纹萌生阶段疲劳损伤演化曲线	111
图 5-6 多级循环加载下疲劳裂纹扩展	112
图 5-7 P-S-N 曲线示意图	114
图 5-8 概率双线性损伤累积建模示意图	115
图 5-9 不同应力水平下 σ_n 的增长规律	116
图 5-10 临界损伤当量化处理示意图	119
图 5-11 两级加载下双线性疲劳损伤累积路径	123
图 5-12 螺旋压缩弹簧	130
图 5-13 恒幅加载下螺旋压缩弹簧可靠度变化规律	131
图 5-14 恒幅加载下标准 45 钢可靠度曲线与试验值比较	132
图 5-15 恒幅加载下热轧 16Mn 钢可靠度曲线与试验值比较	133
图 5-16 螺旋压缩弹簧不同应力水平下可靠度曲线比较	134
图 5-17 标准 45 钢不同应力水平下可靠度曲线比较	134
图 5-18 热轧 16Mn 钢不同应力水平下可靠度曲线比较	135

图 5-19 不同加载模式下螺旋压缩弹簧可靠度曲线比较.....	136
图 5-20 变幅加载下标准 45 钢可靠度变化曲线与试验值比较.....	138
图 5-21 变幅加载下热轧 16Mn 钢可靠度变化曲线与试验值比较.....	139
图 5-22 白铜弹簧丝对数疲劳寿命概率纸.....	145
图 5-23 恒幅加载下白铜弹簧丝可靠度曲线与试验值比较.....	145
图 5-24 恒幅加载下 16Mn 钢可靠度曲线与试验值比较.....	146
图 5-25 恒幅加载下 15MnVN 钢可靠度曲线与试验值比较.....	147
图 5-26 恒幅加载下 LY12-CZ 光滑试件可靠度曲线与试验值比较.....	147
图 5-27 恒幅加载下 LY12-CZ 中心孔试件可靠度曲线与试验值比较.....	148
图 5-28 恒幅加载下带切口的 45 钢摩擦焊接头可靠度曲线与试验值比较.....	149
图 5-29 恒幅加载下经锤击的 16Mn 钢对焊接头可靠度曲线与试验值比较.....	150
图 5-30 白铜弹簧丝不同应力水平下可靠度曲线比较.....	150
图 5-31 16Mn 钢不同应力水平下可靠度曲线比较.....	151
图 5-32 15MnVN 钢不同应力水平下可靠度曲线比较.....	151
图 5-33 LY12-CZ 光滑试件不同应力水平下可靠度曲线比较.....	152
图 5-34 LY12-CZ 中心孔试件不同应力水平下可靠度曲线比较.....	152
图 5-35 带切口的 45 钢摩擦焊接头不同应力水平下可靠度曲线比较.....	153
图 5-36 经锤击的 16Mn 钢对焊接头不同应力水平下可靠度曲线比较.....	153
图 5-37 带切口的 45 钢摩擦焊接头程序块载荷谱.....	154
图 5-38 经锤击的 16Mn 钢对焊接头程序块载荷谱.....	154
图 5-39 程序块加载下带切口的 45 钢摩擦焊接头可靠度曲线与试验值比较.....	155
图 5-40 程序块加载下经锤击的 16Mn 钢对焊接头可靠度曲线与试验值比较.....	156

表目录

表 2-1 45 号钢试件两级加载下疲劳试验数据	33
表 2-2 Al-2024-T42 试件两级加载下疲劳试验数据	34
表 2-3 30CrMnSiA 试件两级加载下疲劳试验数据	34
表 2-4 铝合金材料 ENAW6005 的化学组分和机械性能	38
表 2-5 动车铝合金车体焊接接头两级加载下疲劳试验数据	38
表 2-6 41Cr4 带横向孔试件多级应力谱疲劳试验数据 (CFD1 试验)	40
表 2-7 41Cr4 带横向孔试件多级应力谱疲劳试验数据 (CFD2 试验)	41
表 2-8 三种模型预测结果与试验值比较 (41Cr4 带横向孔试件)	41
表 3-1 不同加载模式下模型非线性行为分析试验设计	51
表 3-2 球墨铸铁 GS61 两级加载下疲劳试验数据	58
表 3-3 钛合金 Ti-6Al-4V 两级加载下疲劳试验数据	58
表 3-4 铝合金 6082T6 的化学组分和机械性能	66
表 3-5 铝合金 6082T6 多级阶梯谱加载疲劳试验数据	67
表 3-6 铝合金 6082T6 多级阶梯谱加载下试验值与三种模型预测结果比较	68
表 3-7 钛合金 Ti-6Al-4V 程序块谱加载疲劳试验数据	71
表 4-1 四种模型载荷效应系数比较	83
表 4-2 300 CVM 马氏体时效钢疲劳试验数据	89
表 4-3 铝合金 Al-2024-T42 疲劳试验数据	89
表 4-4 30NiCrMoV12 钢疲劳试验数据	90
表 4-5 四种模型临界损伤预测值比较 (300 CVM 马氏体时效钢)	93
表 4-6 四种模型临界损伤预测值比较 (铝合金 Al-2024-T42)	93
表 4-7 四种模型临界损伤预测值比较 (30NiCrMoV12 钢)	94
表 4-8 焊接球节点网架结构疲劳试验数据	98
表 4-9 四种模型临界损伤预测值比较 (焊接球节点网架结构)	100
表 4-10 CFD1 试验加载参数与疲劳损伤估算结果	101
表 4-11 CFD2 试验加载参数与疲劳损伤估算结果	102
表 5-1 螺旋压缩弹簧力学性能参数	129
表 5-2 螺旋压缩弹簧恒幅加载下疲劳试验数据	130
表 5-3 标准 45 钢和热轧 16Mn 钢恒幅加载下疲劳试验数据	131
表 5-4 变幅加载下螺旋压缩弹簧试验参数	135

表 5-5 标准 45 钢和热轧 16Mn 钢变幅加载下疲劳试验数据	137
表 5-6 对数正态分布下恒幅疲劳试验数据	140
表 5-7 程序块载荷谱加载参数和试验结果	155

主要符号及缩略语

A	疲劳强度常数
a	裂纹长度
a_0	初始裂纹长度
a_c	临界裂纹长度
a_s	S-N 曲线的截距
a'	剩余 S-N 曲线的截距
a''	动态剩余 S-N 曲线的截距
b, C, d, m	材料常数
b_r	斜率比
b'	疲劳强度指数
Δb	动态剩余 S-N 曲线的斜率
c'	疲劳延性指数
D	损伤变量
D_c	临界损伤
D_{eq}	等效损伤
E	杨氏模量
$E[\cdot]$	随机变量的一阶矩
$G(n)$	结构功能函数
K	应力强度因子
k_I	阶段 I 疲劳损伤演化速率
k_{II}	阶段 II 疲劳损伤演化速率
N_f	疲劳寿命
$N_{f_i, \max}$	载荷历程中最大应力的疲劳寿命
N_{fr}	剩余寿命
N_i	裂纹萌生寿命
N_p	裂纹扩展寿命
n	加载循环次数
R	应力比
$R(n)$	可靠度函数
U_{T0}	材料的初始静态韧性

$U_{T(n)}$	材料经历 n 次循环后的剩余韧性
$Var[\cdot]$	随机变量的二阶矩
W_{D_0}	初始疲劳驱动能
W_{D_c}	临界疲劳驱动能
W_{D_n}	疲劳驱动能损伤参数
σ	应力水平
σ_a	循环应力幅
σ_e	疲劳极限
σ_D	疲劳驱动力
σ_{D_c}	临界驱动力
σ_{eq}	等效驱动力
$\sigma_{\ln N_f}$	疲劳寿命的对数标准偏差
σ_{\max}	最大应力
σ_{N_f}	疲劳寿命的标准偏差
$\sigma_{i,\max}$	载荷历程中的最大应力
σ_u	抗拉强度
σ_y	屈服强度
σ'_f	疲劳强度系数
$\Delta\sigma$	应力变程
ε'_f	疲劳延性系数
$\omega_{1,2}$	第 1 级和第 2 级载荷间交互因子
$\omega_{i-1,i}$	第 $i-1$ 级和第 i 级载荷间交互因子
α	材料记忆性能退化系数
α'	裂纹萌生寿命系数
β	可靠度指标
λ_i	载荷效应系数
μ_{N_f}	疲劳寿命的均值
$\mu_{\ln N_f}$	疲劳寿命的对数均值
CFD	累积疲劳损伤 (Cumulative Fatigue Damage)
FDS	疲劳损伤状态 (Fatigue Damage State)

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

随着科技的飞速发展和工业水平的不断提升，现代机械装备诸如高速列车、航空发动机、发电机组、重型压缩机等正逐步向高速化、大型化、复杂化和高性能化方向发展，这类机械装备的安全服役对保障国家经济利益和国防事业发展具有重要的意义和价值。在服役过程中，机械装备的运行条件愈加严苛，服役环境恶劣。由于需要在不同工况下不断完成启动、加速、减速、制动、停机等多重任务，机械装备的关键零部件或结构往往承受着一系列复杂交变循环载荷的作用，其破坏方式常以腐蚀、磨损、疲劳断裂等形式呈现。其中，腐蚀和磨损的发展过程较慢，可通过定期检修和更换予以解决，而疲劳断裂具有很强的隐蔽性和突发性，对机械装备的安全运行构成了严重威胁，一旦发生破坏易于造成重大甚至灾难性事故和生命财产损失。

疲劳破坏目前已成为大多数机械结构的主要失效模式之一。据统计，机械零构件由疲劳而引发的断裂破坏已高达 50%~90%^[1-2]。疲劳现象已遍布航空航天、船舶、轨道交通、桥梁建筑等多个领域，由此引发的破坏事故已层出不穷。二战期间，美国的货船在运输过程中频繁发生故障，甚至直接报废，其主要诱因就是金属疲劳。1954 年，英国的“彗星-I”号客机因铆钉的疲劳破坏导致巡航坠毁。1969 年，美军一架“F-111”战机在进行低空飞行训练时发生坠落，根据残骸检测报告发现机上某个接头部件存在约一英寸的初始裂纹，裂纹在飞机飞行过程中不断扩展并超过了临界尺寸，最终导致整机破坏。1979 年，美国一架巨型喷气客机在刚起飞不久就发生了引擎脱落，随即爆炸坠毁，机上人员无一幸免，造成此次事故的主要原因是引擎与机翼的螺栓连接处发生了金属疲劳，致使引擎燃烧爆炸。1998 年，德国发生了一起高速列车脱轨事故，造成重大人员伤亡，事故原因是由于列车车轮的轮箍部位发生疲劳破损所致，这也是德国史上最惨重的铁路事故。2005 年，台湾一架华航班机在航行过程中因飞机后部的金属疲劳，酿成了机毁人亡的惨剧。2007 年，美国的“F-15C”战斗机在一次缠斗飞行任务中突然解体，起因是机上起关键支撑作用的桁梁发生了金属疲劳。2011 年，北京发生了一起因地铁自动扶梯破坏致人伤亡的事故，事后分析发现连接电梯前座板与驱动主机的螺栓出现了疲劳裂纹，从而导致连环破坏。2012 年，哈尔滨阳明滩大桥在通车不到一年就发生了垮塌事故，这是由于大桥本身存在建筑质量缺陷，导致局部应力过高，引发疲劳断裂。因此，深入开展疲劳问题研究，精确地预测和评估机械结构的疲

劳寿命，保障其在服役期内安全可靠运行，避免或减少重大事故和灾害发生，制定合理的维修决策方案计划，最大限度地发挥装备的使用价值，提高经济效益，这对于促进我国社会经济建设和可持续发展均具有重大意义。

制造业是构成国家经济的主体，为了实现制造强国的战略目标，国务院颁发了《中国制造 2025》，其中明确指出要坚持“质量为先”的基本方针，将质量作为制造强国的生命线，发展先进质量技术，提高产品质量效益，实现以质取胜。可靠性技术在提高产品质量和产品设计中发挥着极其重要的作用，它贯穿了产品的设计制造、运输使用、维护保养等多个环节。结构可靠性研究是提高产品质量、创造经济效益的强大引擎和重要保证。针对疲劳问题，疲劳可靠性分析是结构抗疲劳设计的重要内容。由于疲劳现象的随机性和复杂性，疲劳演化过程中存在诸多不确定性，常规疲劳设计忽略了不确定性因素的影响，仅以安全系数为设计依据，这将造成物力和人力上的浪费。此外，在机械结构的服役过程中，由于实际载荷、工况、运行环境等具有时变或动态特性，传统的基于静态的可靠性分析理论已无法满足工程需求。因此，充分考虑疲劳过程中的动态不确定性，从全寿命周期角度出发，开展时变疲劳可靠性分析研究具有重要的理论价值和现实意义。

本文在国家自然科学基金项目“基于故障物理技术的结构疲劳可靠性设计理论及其应用研究”、国防科技工业技术基础项目“XX 装备系统剩余寿命预测及维护决策理论研究”、国家高技术研究发展计划项目（863 计划项目子课题）“大型矿用挖掘机可靠性分析及设计的关键技术研究”等的资助下，深入开展疲劳失效机理、寿命预测技术以及可靠性分析方法研究，以期拓展和完善现有疲劳分析理论。

1.2 疲劳与抗疲劳设计

1.2.1 疲劳研究发展概况

疲劳作为专业术语，在字面上的解释是“疲倦”或“劳损”。根据国际标准化组织（ISO）中关于《金属疲劳试验的一般原理》的报告，疲劳可描述为^[3]：金属材料在反复的应力或应变作用下所发生的性能劣化现象称为疲劳。1979 年，美国试验与材料协会（ASTM）根据 ASTM E206-72 标准对疲劳的解释为^[4]：“材料内部某点或某些点在反复的循环载荷作用下产生的局部永久性的结构变化，且在经历足够多的循环加载后形成裂纹并最终完全断裂”。疲劳问题由来已久，按照时间节点，疲劳研究的发展历程如下^[5-7]：

自 19 世纪初，随着蒸汽机车的问世以及其在航空航天、船舶、交通、桥梁建筑等领域的发展，疲劳现象已层出不穷。疲劳研究最早始于 1829 年，德国工程师 Albert 针对矿山升降机焊接链条开展了一系列重复载荷试验，并发表了第一份关于

疲劳研究的报告。“疲劳”术语最早是由法国的 Poncelent 提出，用于描述金属材料在承受交变循环载荷作用下的失效破坏过程。德国工程师 Wöhler 在 1847 年至 1889 年期间对金属疲劳现象做了全面系统的试验研究，被誉为“疲劳试验之父”，并于 1850 年首次研制了疲劳试验机用于机车车轴试验。通过大量的试验数据分析，Wöhler 在 1871 年发文系统地阐述了循环载荷与疲劳寿命之间的关系，指出应力幅是引起疲劳失效的主要原因，并提出了应力-寿命曲线（S-N 曲线）和疲劳极限的概念，为金属疲劳研究奠定了基础。1874 年，Gerber 在 Wöhler 试验数据的基础上研究了平均应力对材料疲劳寿命的影响，提出了描述应力幅和平均应力的抛物线方程。Goodman 对 Gerber 方程进行了简化，提出了古德曼图，该图至今仍是工程中进行平均应力修正的重要方法。此外，Soderberg 和 Morrow 也提出了相应的平均应力修正曲线。1884 年，Bauschinger 在 Wöhler 疲劳试验中发现了材料弹性极限衰减的“循环软化”现象，提出了应力-应变迟滞回线，该现象后来被称为“包辛格”效应。

20 世纪初，随着光学显微镜的发展和应用，人们开始着重研究疲劳破坏失效机理。1903 年，Ewing 和 Humfery 在金属材料中发现了循环载荷产生的滑移轨迹。1910 年，Basquin 提出了描述应力-寿命关系的经验公式，并指出应力与疲劳寿命的双对数图在较大的应力区域内呈线性关系。同年，Bairstow 通过程序疲劳试验研究了应力与应变的变化规律，对循环滞后回线进行了测定，发现疲劳破坏与形变滞后有关。1920 年，Griffith 提出了脆性断裂理论，根据试验研究得到玻璃的强度与微裂纹长度之间的计算公式，该式为断裂力学的发展奠定了基础，因此，Griffith 也被誉为“断裂力学之父”。1924 年，Gough 发表了《金属疲劳》专著，在弯扭复合疲劳和疲劳机理方面做了大量研究。1929 年，美国的 Peterson 研究了尺寸效应对疲劳寿命的影响，给出了理论应力集中系数。Haigh 研究了不同金属材料的缺口敏感性，根据缺口应变理论提出了内应力的概念，对缺口效应给出了合理解释。1930 年，Alman 阐述了喷丸工艺能提高疲劳强度的作用机制，即喷丸处理使结构表面产生了残余压应力，使结构疲劳性能得到显著提高。1936 年，Horger 和 Maulbetsch 指出结构表面辊压对裂纹形成有抑制作用。1937 年，Neuber 将应力梯度的概念应用于带缺口试件的疲劳强度分析，指出缺口根部的平均应力是决定疲劳强度的主要因素。

20 世纪 40 年代，前苏联人 Cepehceh 根据 S-N 曲线提出了等幅加载下的抗疲劳设计公式，将 S-N 曲线的倾斜段和水平段分别用于有限寿命设计和无限寿命设计，为常规疲劳设计奠定了基础。在变幅疲劳的有限寿命设计中，Miner 进行了大量关于疲劳损伤累积的试验研究，并基于 Palmgren 的研究工作，于 1945 年提出了

著名的 Palmgren-Miner 线性损伤累积理论, 该理论至今仍在工程上广泛应用。20 世纪 50 年代后, 随着伺服疲劳试验机和电子显微镜的问世, 人们对疲劳的认知和研究上升到了新的发展阶段。1954 年, Manson 和 Coffin 在 NASA 刘易斯研究所进行了大量低周疲劳试验, 提出了描述塑性应变幅与疲劳寿命的 Manson-Coffin 方程, 为局部应力应变法的研究奠定了基础。1956 年, Manson 和 Dolan 基于应变-寿命法和缺口根部分析理论, 建立了带缺口试件的疲劳寿命估算方法。1961 年, Neuber 运用局部应力应变理论对带缺口的棱柱体进行疲劳寿命分析, 提出了 Neuber 准则。1963 年, Paris 通过研究发现应力强度因子是控制裂纹扩展的重要参量, 提出了著名的裂纹扩展速率公式——Paris 公式, 为裂纹扩展寿命预测提供了有效途径, 之后又形成了损伤容限设计法, 使疲劳学与断裂力学逐渐融合。1967 年, Forman 将平均应力纳入 Paris 公式中, 提出了 Forman 公式。1964 年至 1969 年, Haugen 研究了正态分布随机变量的代数运算, 为应力-强度干涉模型求解可靠度提供了依据。1970 年, Kececioglu 基于强度干涉理论完善了疲劳可靠性设计方法。1971 年, Elber 根据裂纹闭合效应提出了有效应力强度因子的概念, 认为裂纹闭合和裂纹扩展与应力比的大小有关。同年, Wetzel 构建了一整套适用于随机疲劳寿命估算的局部应力应变法。1977 年, Janson 等基于损伤因子的概念提出了损伤力学方法, 通过定义损伤变量估算裂纹萌生寿命。1996 年, Schütz^[8]对疲劳研究的发展历史进行了综述性报道。

目前, 学术界和工程界正致力于解决材料和结构的疲劳问题, 并给予了高度的重视, 疲劳研究正进入快速发展阶段。总体上, 疲劳研究历经了从宏观唯象上的认识到微观物理机制的探究, 再到多种学科交叉融合并存的发展方向。由于疲劳演化及其发展规律十分复杂, 影响因素众多, 因此, 在机械结构的设计中要全面评估每个技术环节对疲劳过程的影响。随着现代机械装备日益向高速化、大型化和复杂化方向发展, 各种疲劳现象和事故屡屡发生, 对疲劳问题的深入研究势在必行, 结构抗疲劳设计始终是学术界和工程界的一项永恒课题。

1.2.2 疲劳断裂失效机理

疲劳断裂与静强度断裂有着本质的区别, 主要特征表现为^[9-10]: ①低应力性。疲劳断裂是由交变载荷的反复作用造成的, 载荷通常低于材料的抗拉强度或屈服强度。②渐变性。疲劳断裂并非一蹴而就, 需要经历相当长的时间历程或载荷循环才会发生, 而静强度断裂则是一次最大载荷加载下的破坏。③突发性。无论结构的材料特性是否具有塑性或脆性, 疲劳失效均表现为无显著塑性形变的突然破坏。④局部性。疲劳断裂通常发生在局部高应力集中区域, 对结构的几何尺寸、

形状、表面加工状况、环境条件等因素很敏感，而静强度断裂主要取决于构成材料的力学组织性能。⑤断口独特性。疲劳断口存在着明显的裂纹源、裂纹扩展区和瞬间断裂区，其中扩展区断面光滑，瞬断区断面粗糙。

根据断口的形貌特征，金属材料的断裂过程通常包括三个阶段，描述如下：

（1）疲劳裂纹萌生

疲劳裂纹萌生区与断口中的疲劳源区相对应，局部塑性应变是造成裂纹萌生的主要因素，这通常是由于结构设计、加工不合理导致应力集中或表面损伤，使裂纹在构件的局部薄弱区域萌生。疲劳裂纹的萌生方式分为三种，即滑移带开裂、晶界或孪生界开裂、夹杂物或第二相与基体的界面开裂^[7]。其中，滑移带开裂是疲劳裂纹最基本的萌生方式。金属内部的薄弱晶粒处首先会发生塑性形变，使金属表面产生滑移痕迹线。在经历一定的循环加载后，金属内部会发生循环硬化或循环软化，滑移线不断增加汇集成滑移带，并进一步发展为驻留滑移带，最终形成裂纹。疲劳裂纹萌生往往始于金属表面，这是由于实际构件的表面应力常高于内部应力；表面晶粒比内部晶粒受到的约束更少，易于产生滑移带；表面晶粒受环境介质因素的影响较大，如腐蚀、冲击、磨损等；构件表面在加工后常伴有划痕或擦伤，使构件疲劳强度下降。

（2）疲劳裂纹扩展

通常，疲劳裂纹扩展包含两个阶段，即第 I 阶段和第 II 阶段。在裂纹扩展的第 I 阶段，驻留滑移带上产生的裂纹首先沿着与应力成 45° 的滑移面方向扩展，具有结晶学特性，且裂纹扩展速度很慢。通常，在滑移带上会萌生多条微裂纹，但绝大部分微裂纹早已停止扩展，随着载荷循环的持续作用，只有部分微裂纹会继续扩展并相互连结，裂纹长度可超过几十微米。在裂纹扩展的第 II 阶段，裂纹扩展方向发生了改变，与应力保持垂直，继续延伸最终演变为宏观裂纹，此阶段裂纹已失去结晶学特性。针对第 I 阶段裂纹扩展，Kaplan 和 Laird 根据单晶铜试样的试验结果，提出了一种修正的钝化和锐化模型，并指出该阶段的裂纹扩展主要取决于应力的剪切分量。针对第 II 阶段裂纹扩展，Laird 根据材料裂纹尖端的形状特性分析，提出了一种范性钝化模型。

（3）失稳断裂

疲劳演进的最终阶段是失稳断裂。随着裂纹的不断增长，结构件的有效承载面积逐渐减小，直至剩余断面无法承受外载荷时，导致失稳断裂，且整个破坏过程表现为瞬间断裂。从疲劳损伤的角度分析，失稳断裂意味着构件内部积累的损伤已达到临界损伤值；从疲劳裂纹的角度分析，失稳断裂是裂纹扩展至临界裂纹尺寸的一种表现，此时，应力强度因子已达到临界值。失稳断裂与静强度脆断机

理类似，区别在于二者的加载速率不同，导致应力强度因子的临界值与静拉伸断裂塑性值有所差异。

1.2.3 抗疲劳设计方法

在机械设计中，工程结构与机械产品的设计方法大都仍以静强度设计为主。但对于服役载荷为循环加载的机械构件，除了采用传统的静强度设计方法外，更重要的是要进行抗疲劳设计，以提高构件乃至整机或系统的可靠性、安全性，降低制造成本、缩短研制周期，最大限度地发挥其使用价值。目前，机械结构的抗疲劳设计方法主要分为五种^[7, 11]，具体描述如下：

(1) 名义应力设计法

名义应力设计法又称为常规疲劳设计，它以名义应力为设计参数，结合材料的 S-N 曲线，通过考虑各种影响因素得到构件的 S-N 曲线，并以此进行抗疲劳设计。名义应力设计法包含无限寿命设计和有限寿命设计。其中，无限寿命设计以 S-N 曲线的水平段或疲劳极限为设计依据，它要求结构件在给定的设计应力下能够长期使用而不发生破坏，设计应力通常应小于或等于构件的疲劳极限，此类设计方法主要用于重型机械装备，如机床轴承、起重机臂架、汽缸阀门等；有限寿命设计又称安全寿命设计，它以 S-N 曲线的倾斜段为设计依据，要求结构件在一定的服役期限内能够安全使用，是一种比无限寿命设计更经济的设计方法，常用于轨道交通、压力容器和飞行器的结构设计中。

(2) 局部应力应变设计法

局部应力应变设计法是基于应变分析理论和低周疲劳失效而发展起来的一种抗疲劳设计方法。疲劳失效一般起源于应变集中区域的最大应变处，并在该处发生局部塑性形变，为裂纹萌生和裂纹扩展创造条件。结构的最大局部应力和局部应变是进行强度和寿命估算的关键因素。对于有应力集中的结构件，其寿命可通过与之具有相同局部应力应变状态的光滑试件得到。

(3) 耐久性设计法

耐久性设计法是指在规定的使用条件下，保障零部件或结构具有一定抵抗开裂、剥离、热退化、腐蚀等破坏能力的设计方法，它以寿命的经济性为设计目标。这种设计方法认为结构在使用前就已存在初始缺陷，随着载荷的持续施加，结构内部的裂纹和损伤不断增长，继续作用下去将导致结构性能劣化，增加维修费用。耐久性设计需要明确并合理度量疲劳过程中重要结构细节的状态特征，结合裂纹扩展理论预测结构的经济寿命，并以此制定相应的维修决策方案。目前，耐久性设计法已在飞机设计和重要的工程结构中得到应用。

(4) 损伤容限设计法

损伤容限设计法以断裂力学为基础,利用无损检测技术,对含有初始缺陷或裂纹的结构进行剩余寿命估算,根据断裂或强度失效判据,确保结构在服役期内安全使用。裂纹扩展能力、剩余强度以及损伤检测手段是构成损伤容限设计的三个基本要素。损伤容限设计允许结构内部存在初始缺陷或在一定的使用寿命后出现裂纹,但需要保证结构在下一检修阶段前具有一定的剩余强度并能正常工作,其设计的关键是要准确预测结构裂纹扩展寿命。因此,损伤容限设计需要制定严格的检修制度和安全措施。目前,该方法已在飞机设计、焊接结构、压力容器等方面得到了应用。

(5) 概率疲劳设计法

概率疲劳设计法又称疲劳可靠性设计,是机械可靠性设计的重要组成部分。它通过引入概率统计理论并结合疲劳设计方法,实现机械结构的抗疲劳设计。前述四种抗疲劳设计方法均为确定性方法,即按照强度、载荷等设计变量的均值进行设计,变量的选取大都依据主观经验。但在实际工程中,这些设计变量均具有一定的分散性,以变量均值进行设计显然并不安全,而概率疲劳设计能够综合考虑各个设计变量的随机性,给出相应的分布规律和可靠度指标,切实保证设计出的产品或结构安全、经济、可靠。

综上所述,以上五类抗疲劳设计方法各有所长,优势补充,不能相互替代。其中,名义应力设计在解决高周疲劳失效方面最为有效;局部应力应变设计在低周疲劳方面具有先天优势,但需要结合损伤容限设计对结构剩余寿命进行合理估算;耐久性设计是时下最具发展潜力的设计方法,它以确定结构的经济寿命为目标,综合考虑了结构的功能、安全性和经济性,并提供从设计制造到使用维护等多种技术细节;对于含初始缺陷或裂纹的结构件,损伤容限设计是行之有效的解决方法和途径;为了考虑设计变量的随机性或分散性,需要将概率统计理论与传统抗疲劳设计方法有效结合,实现疲劳可靠性设计,切实提高机械结构的可靠度。

1.3 疲劳寿命预测方法

疲劳寿命是指结构件在循环载荷作用下发生失效前所经历的循环次数,或从开始受载直至最终断裂破坏所持续的时间。一般地,构件承受的应力水平越高,其疲劳寿命越短。为了确保机械结构在服役期内能够安全、稳定运行,避免或减少疲劳事故的发生,必须开展疲劳寿命预测,它也是抗疲劳设计的一项重要内容。随着人们对疲劳研究的逐步深入,国内外许多学者针对不同研究领域、行业以及对象,在大量试验和理论研究的基础上,提出了多种寿命预测理论和分析方法^[12]。

按是否考虑失效过程的随机性或分散性, 疲劳寿命预测方法包含确定性的和不确定性的两大类^[13-14]。其中, 确定性疲劳寿命预测方法主要有以下几种:

(1) 应力寿命法

应力寿命法又称为 S-N 曲线法, 是现行使用最广的寿命预测方法, 主要用于高周疲劳分析。对于高周疲劳, 疲劳损伤和载荷历程由循环应力控制, 弹性应变起主导作用, 循环塑性应变很小可以忽略不计。在工程上, S-N 曲线常用 Basquin 公式表示。此外, S-N 曲线还有其他三种常用的表现形式^[6]: 幂函数式、指数函数式和三参数幂函数式。

(2) 应变寿命法

应变寿命法又称为 ϵ -N 曲线法, 在低周疲劳分析和寿命估算中应用广泛。在低周疲劳机制下, 应力水平较高, 塑性应变起主导作用, 材料或构件因塑性变形最终发生破坏, 应变寿命法能够真实地反映结构的局部塑性受力状态。在工程上, 塑性应变和疲劳寿命之间的关系常用 Manson-Coffin 方程表示。后来, Manson 和 Hirschberg^[15]将弹性应变也纳入考虑, 提出了总应变-寿命预测公式。

为了考虑平均应力对疲劳寿命的影响, 许多学者提出了相应的平均应力修正模型, 主要包括: Morrow 弹性应力修正法、Morrow 总应变修正法、Sachs 塑性修正法、Manson-Halforld 修正模型、SWT 最大应力修正法^[16]、Endogan-Roberts 修正模型^[17]等。

(3) 应力场强法

应力场强法以结构材料的循环应力应变曲线为基础, 根据弹塑性有限元法求解缺口根部的应力场强分布, 结合应力-寿命或应变-寿命曲线, 对含有缺口的结构件进行疲劳寿命估算。通常, 结构件的薄弱区域源于缺口处, 缺口部位的强度直接决定了整个结构的疲劳强度。根据疲劳失效机理和损伤发展的宏微观研究结果, 姚卫星^[3, 18]提出用应力场强来描述含缺口试件的损伤程度, 并指出: 若缺口试件的应力场强分布与光滑试件的场强分布相同, 则二者的疲劳寿命也相同。

(4) 基于能量准则的寿命预测法

在本质上, 疲劳是一个损伤不断累积和能量耗散的过程, 能量准则能够揭示疲劳破坏的物理本质, 可统一表征不同类型载荷产生的损伤。许多学者和专家根据应变能理论、能量耗散定律、熵守恒原理等能量准则, 针对不同材料、载荷类型、平均应力、失效判据、失效机理等诸多因素, 提出了大量疲劳寿命预测模型及其改进方法^[19-23]。其中, 基于应变能理论的寿命预测方法在工程中的应用最为广泛。应变能密度参数是描述疲劳过程的重要参量, 对于 Masing 材料, Morrow^[24]提出了基于塑性应变能理论的寿命预测模型。在疲劳演进过程中, 塑性应变能和

弹性应变能对裂纹萌生和裂纹扩展均有影响，Golos^[25]基于总应变能理论提出了一种修正的疲劳寿命预测模型。

(5) 基于断裂力学的寿命预测法

断裂力学是固体力学的一个分支学科，主要研究工程材料与结构的裂纹扩展规律，即裂纹起裂条件、裂纹扩展过程和断裂判据。该理论包含线弹性断裂力学和弹塑性断裂力学，前者以裂纹尖端应力强度因子 K 为控制参量，后者常用 J 积分和裂纹张开位移(COD)作为断裂控制参量。对于含初始缺陷或裂纹的结构件，断裂力学法可以有效地评估其剩余寿命。在工程上，裂纹扩展规律常用 Paris 公式^[26]描述。倪向贵等^[27]阐述了 Paris 公式与传统 S-N 曲线之间的关系，针对不同工程实际问题提出了相应的修正公式。为了反映平均应力和断裂韧性对裂纹扩展速率的影响，Forman^[28-29]提出了一种修正模型。此外，许多学者在 Paris 公式的基础上，通过考虑裂纹扩展过程中涉及到的诸多因素，提出了不同形式的修正方法，如 Walker 公式、Elber 公式、Kujawski 公式、Newman 公式、Willenberg 公式等。

(6) 基于连续损伤力学的寿命预测法

损伤力学也是固体力学的一个分支学科，它与断裂力学、疲劳分析理论都属于破坏力学的研究范畴。按照研究对象的特征尺度不同，损伤力学可分为连续损伤力学(Continuum Damage Mechanics, CDM)、细观损伤力学(Meso-Damage Mechanics, MDM)和基于细观的唯象损伤力学^[30]。其中，连续损伤力学是一种基于连续介质力学和连续介质热力学的唯象学理论，主要研究材料的宏观力学性能退化行为以及损伤的发展和演化规律，而不深究损伤的细观物理过程。在工程上，针对疲劳损伤的研究，Chaboche 等^[31-33]提出了一种连续损伤力学模型并用于疲劳寿命预测。对于含初始缺陷或损伤的结构，林有智等^[34]基于 Chaboche 模型通过理论推导得出了相应的寿命预测公式。

综上所述，以上六种确定性寿命预测方法均具有一定的理论基础，都属于基于力学的研究方法，它们在机械结构的寿命预测和抗疲劳设计中发挥着举足轻重的作用。应力寿命法主要用于高周疲劳分析和名义应力设计，该方法涉及的参数较少、分析简便，并已通过疲劳试验积累了大量数据，但经验性较强，缺乏考虑实际过程中裂纹、损伤等物理因素；应变寿命法主要用于低周疲劳分析和局部应力应变设计，能够反映载荷循环的应力应变特性，对缺口疲劳分析十分有效，但该方法同样也具有较丰富的经验性；应力场强法能综合考虑缺口根部的应力梯度和应力场分布，符合失效机理，可用于低周、高周和多轴的疲劳分析研究，但其计算过程相对复杂；基于能量准则的寿命预测法能够揭示疲劳破坏的本质，具有较强的物理基础，但目前该方法的研究体系还不够充分，工程应用较少；基于断裂

力学的寿命预测法是损伤容限设计的基础，它对裂纹扩展机制给予了很好的诠释，但由于初始裂纹尺寸难以确定以及裂纹扩展的随机性，断裂力学法在工程实际中的应用还存在一定距离；基于连续损伤力学的寿命预测法通过定义损伤变量定性地描述疲劳失效过程，并定量地表征结构材料的损伤程度，物理意义明确，但理论模型涉及的参数较多，损伤和寿命估算的计算量较大，其应用也受限于某些特定的材料或结构。

此外，除了上述确定性的方法外，人们根据实际需求还提出了考虑不确定性和基于信息新技术的疲劳寿命预测方法，前者的建模基础是概率统计理论^[35-55]、模糊集理论^[56-70]、Bayes 理论^[71-80]、区间理论^[81-84]等不确定性分析方法，后者则以遗传算法^[85-89]、神经网络^[90-97]、支持向量机^[98-102]等信息技术为建模依据。Santecchia^[103]、张小丽^[12]、姚卫星^[3]、朱顺鹏^[14]、王旭亮^[13]等对机械结构疲劳寿命预测方法进行了综述性报道。

1.4 疲劳损伤累积理论与疲劳可靠性分析

1.4.1 疲劳损伤累积理论研究现状

前述六种确定性寿命预测方法主要用于估算等幅加载下结构的疲劳寿命，而在实际工程中，大多数机械零构件的服役载荷通常为一系列幅值随时间变化的变幅载荷历程。现阶段已积累大量等幅载荷下结构或材料的疲劳寿命数据，从经济性的角度考虑，最大限度地利用等幅载荷寿命数据来估算变幅加载下结构的疲劳寿命是一种行之有效的方法，但这需要一个换算准则，此即疲劳损伤累积理论。该理论主要研究变幅加载下疲劳损伤的描述方法、损伤的累积规律以及失效判据，它是名义应力设计中有限寿命设计的核心内容。损伤的定义、损伤的累积形式以及临界损伤值是构成疲劳损伤累积理论的三个要素^[104-105]。国内外许多学者在大量试验和理论研究的基础上，提出了多种疲劳损伤累积理论，归纳起来，可分为三类，具体描述如下：

(1) 线性损伤累积理论

① Miner 法则

针对疲劳损伤的研究，Palmgren 最早提出了损伤累积的线性假说，后来 Miner 将该假说公式化，形成了 Palmgren-Miner 法则，简称 Miner 法则^[106]。该理论认为：疲劳损伤与加载循环比成正比关系；当材料在经历一定循环加载后所吸收的能量达到了某个能量极限值时，疲劳破坏就会发生；载荷历程中所有载荷产生的损伤可单独计算，并按线性累加。Miner 法则具有形式简易、计算方便的优点。但该法则对失效的过程机理进行了简化，其主要缺陷表现在：1) 疲劳损伤不依赖于载荷

水平；2) 缺乏考虑载荷加载顺序效应以及大、小载荷间的交互效应；3) 不计及疲劳极限以下小载荷对损伤累积的贡献。

② 相对 Miner 法则

针对 Miner 法则的临界损伤值，许多学者进行了大量试验研究，发现它并不是一个数值恒为 1 的常量，而是与结构的几何形状、载荷作用顺序等因素密切相关。据此，Buch^[107]提出了相对 Miner 法则，指出同类构件在类似的载荷谱作用下具有类似的临界损伤值 D_f 。相对 Miner 法则同样具有形式简易和计算方便的优点，但为了更准确地进行寿命估算，必须开展大量疲劳试验以获取各类零构件在典型工况和服役载荷谱下的 D_f 值。同时， D_f 受载荷水平、舍弃水平、截断水平等因素影响较大，其值只能在与之具有相同参考水平条件下使用，应用范围有限。

(2) 修正的线性损伤累积理论

修正的线性损伤累积理论是对 Miner 法则的缺陷进行改进，使其仍保留 Miner 法则形式上的简易性，工程中比较实用的是 Corten-Dolan 模型^[108-110]。Corten 和 Dolan 从疲劳破坏的物理过程出发，将裂纹萌生与裂纹扩展划分为三个阶段：局部区域硬化形成阶段；局部区域微裂纹或微空穴形成阶段；亚微裂纹或微空穴继续扩展发展为宏观裂纹，直至断裂。Corten-Dolan 模型的物理依据为^[5]：1) 疲劳损伤的产生需要经历一个形核期；2) 裂纹核的数目、损伤量、损伤增长率均随载荷循环不断增加；3) 在不同载荷水平下发生失效时所累积的损伤总量是一个常量；4) 即使外部载荷低于初始状态下的载荷水平，损伤累积仍就继续。

Corten-Dolan 模型与 Miner 法则的主要区别在于其将 S-N 曲线的斜率参数 m 用损伤指数 d 值替换，是一种修正的线性损伤累积理论。但实际上 d 值不仅与材料有关，还与载荷谱的应力状态有关，该模型在工程中的应用尚需大量试验验证。

此外，修正的线性损伤累积理论还包括 Grove-Manson 双线性损伤理论^[111-114]、Freudenthal-Heller 理论^[115]、Altus 化学-机械模型^[116]、Kramer 表面应力模型^[117-123]、Kwofie-Rahbar 疲劳驱动力模型^[124]、Aghoury-Galal 应力寿命模型^[125]以及考虑疲劳极限的模糊 Miner 法则^[59, 64, 126-128]、EM (Elementary Miner) 法则^[1]、CM (Consistent Miner) 法则^[129]和 Haibach 修正法则^[130]等。

(3) 非线性损伤累积理论

针对 Miner 法则的内在缺陷，通过改变损伤的积累形式，许多学者提出了大量非线性损伤累积理论。归纳起来，可分为六种，具体描述如下：

① 损伤曲线法

损伤曲线的概念最早是由 Richart 和 Newmark^[131]提出。据此，Marco 和 Starkey^[132]根据载荷顺序加载试验，提出了一种考虑载荷水平相关的损伤曲线模

型，但未给出损伤指数的具体形式。后来，Manson 和 Halford^[113]基于“有效裂纹增长模型”发展并完善了 Marco-Starkey 理论，将损伤定义为瞬时裂纹长度与最终裂纹长度之比。随后，Manson 和 Halford 在损伤曲线法和双线性损伤假说的基础上还提出了双损伤曲线法^[114]。

② 材料物理性能退化法

疲劳损伤的累积过程在宏观上表现为材料物理性能的不可逆退化。Kommers 和 Bennett 最早通过试验研究发现循环加载下材料的疲劳极限会不断减小，并指出疲劳极限的衰减可作为损伤的一种度量形式。据此，Henry^[133]提出了基于疲劳极限衰减的非线性损伤模型。后来，Gatts^[134-135]、Bui-Quo 等^[136-138]基于疲劳极限衰减理论分别提出了各自不同的非线性损伤模型。此外，许多学者还将失效过程中随材料性能变化较为敏感的状态参量用于疲劳损伤度量，如韧性^[139-142]、延性^[143-145]、剩余刚度^[146-149]、剩余强度^[150-155]、热力学熵^[156-159]、电阻^[160-164]等。

③ 寿命曲线转移法

S-N 曲线是等幅加载疲劳寿命估算的重要方法，许多学者通过改变 S-N 曲线的表达式用于变幅疲劳分析。其中，Subramanyan^[165]提出了一种基于 S-N 曲线拐点汇聚的损伤累积模型，指出 S-N 平面内所有等损伤曲线均汇聚于疲劳极限点处，且在其他各处损伤曲线彼此不相交。Hashin 等^[166-167]进一步拓展了 Subramanyan 理论，认为等损伤曲线簇可汇聚于静态强度点或疲劳极限点，并针对这两种假说所得出的损伤模型进行了详细阐述和试验验证。此外，基于寿命曲线转移的非线性损伤模型还包括 Ben-Amoz 模型^[168-169]、Leipholz 模型^[170-172]、胡明敏模型^[173]等。

④ 能量准则法

Inglis^[174]最早研究了材料疲劳性能与循环滞后能之间的关系，随后许多学者基于能量准则进行了一系列关于疲劳损伤的研究。其中，Niu 等^[175]在分析应变疲劳试验数据时发现：应变循环硬化系数与硬化指数随载荷循环的变化规律有所不同，前者变化较为显著，而后者几乎保持不变，由此构建了一种基于塑性应变能变化的疲劳损伤模型。Leis^[176]根据应变寿命公式将损伤参数与疲劳寿命之间建立联系，提出了一种与 SWT 参数模型类似的非线性损伤模型。此外，研究人员还基于不同的能量理论提出了各种不同形式的非线性损伤模型，如 Kujowski-Ellyin 模型^[177]、Golos-Ellyin 模型^[178-179]、Bui-Quoc 模型^[180]、Radhakrishnan 模型^[181-182]、Kliman 理论^[183-184]等。

⑤ 连续损伤力学法

Kachanov 和 Rabotnov 在进行蠕变损伤分析时，分别提出了“连续度”和“损伤因子”的概念，之后便逐步发展成为连续损伤力学理论。Chaboche 将该理论应

用于疲劳损伤研究和寿命预测,指出损伤的演化过程与载荷历程、材料属性、载荷循环等密切相关,并提出了一个非线性连续损伤力学模型。此外, Lemaitre^[185]、Dattoma^[186-187]、Wang^[188]、Li^[189]、Döring^[190]、Chamat^[191]、尚德广^[200-201]等基于连续损伤力学理论分别提出不同的损伤模型,这些模型在作用机理和形式的描述上均与 Chaboche 模型类似,其主要区别在于模型参数的数目、参数确定所需要的试验量、模型的复杂程度及其适用范围。

⑥ 损伤应力法

损伤应力的概念是在 S-N 曲线的基础上发展起来的,其物理背景为:如果损伤发展的物理状态相同,则疲劳寿命仅与载荷的加载状态有关。Garcia 等^[194]基于损伤应力的概念提出了一种损伤变量描述方法。近年来,许多学者^[195-199]针对损伤应力模型的合理性进行了大量试验验证,并将其拓展应用于多轴疲劳寿命预测。

综上所述,以上六类非线性损伤理论大多是宏观唯象的,都具有一定的适用范围,物理基础较好,能够解释多种疲劳现象,如载荷顺序效应、载荷间交互作用、过载效应、平均应力等。但大多数模型的形式复杂、未知参数较多,需要花费更多的试验进行参数校定,且在复杂载荷谱下其寿命和损伤的估算过程十分复杂,计算量大,工程实用性较差。

此外, Fatemi 和 Yang^[200-201]、Schijve^[202-203]、Hwang^[204-205]、Cui^[206]、Santecchia^[103]、姚卫星^[3, 104-105]、倪侃^[207]、赵少汴^[7, 208]、李瞬酩^[5, 209]、鞠杨^[210]、顾怡^[211]、朱晓阳^[212]、李荣^[213]等对疲劳损伤累积理论进行了综述性报道。但由于疲劳损伤的演化过程及其作用机理的复杂性,目前疲劳损伤累积理论还不够完善,尚需做深入研究。

1.4.2 结构疲劳可靠性分析方法

随着科技的飞速发展,现代机械装备结构日趋复杂、功能指标的要求逐渐提高以及服役环境更加严苛,人们发现传统的疲劳设计方法与工程实际的矛盾愈加凸显,这主要是由于传统设计方法无法描述实际过程中客观存在的不确定性因素^[214-216]。在常规疲劳设计中,材料的力学属性、零构件的几何尺寸、载荷、环境等设计参量均是确定不变的,此类设计准则通过定义安全系数或安全余量以确保结构安全服役,具有很强的经验性。由于疲劳演化过程表现出很强的随机性,用传统的确定性方法进行结构设计将带来很大的误差和资源的浪费。为了有效表征失效过程中的随机性或不确定性,将可靠性技术应用于结构疲劳分析势在必行。

结构可靠性设计是传统确定性设计的进一步拓展和深化,它引入了可靠性指标的概念并考虑了结构安全系数的不确定性,对失效过程的可能性给出了合理估

计。从结构的安全性评定角度分析,传统的结构设计只包含“安全系数”这一设计指标,而结构可靠性设计则同时考虑了安全系数和可靠度两种指标,更符合实际情况。疲劳可靠性分析是结构抗疲劳设计的重要内容,其目的是为了获取结构在服役载荷作用下的可靠性指标,分析结果包含两种^[3]:①在一定的可靠度下,估算结构的疲劳寿命,即概率寿命预测;②在一定的使用寿命下,估算结构的可靠度,即可靠度预测。目前,国内外许多学者和研究人员开展了大量有关结构疲劳可靠性分析的研究工作,主要以概率统计方法为主。归纳起来,结构疲劳可靠性分析方法可分为以下几种:

(1) 基于疲劳损伤累积的可靠性分析方法

疲劳破坏是结构材料内部损伤不断累积、能量逐渐耗散的不可逆演化过程。在循环载荷的反复作用下,材料内部会产生损伤,损伤的累积将导致材料的疲劳抗力逐渐下降。基于疲劳损伤累积的可靠性分析方法是以累积损伤作为控制参量,若累积损伤量小于发生失效时的临界损伤,则结构处于安全状态,否则处于失效状态。

在确定性疲劳损伤累积理论的基础上,研究人员通过引入概率统计理论表征损伤发展过程中的不确定性,提出了多种疲劳可靠性分析方法。Tanaka 等^[217-219]在 Miner 法则的基础上,将临界损伤视为一个均值为 1 的随机变量,由此提出了统计 Miner 法则,并给出了该法则成立的假设条件。Wirsching^[220]和 Martindale^[221]假设瞬时累积损伤和临界损伤均为随机变量,基于 Miner 法则提出了一个疲劳可靠性模型,该模型在桥梁建筑和海洋工程领域得到了广泛应用。Liao 等^[222]通过分析累积损伤和临界损伤的统计特性,提出了一种动态累积损伤干涉模型用于谱载荷下的疲劳可靠性分析。Xie^[223]基于等寿命分布模型建立了一种“等损伤-等寿命”的概率方法,实现结构在变幅加载下的疲劳可靠性评估。Shen 等^[224]根据损伤累积过程的随机性,提出了一个累积损伤概率分布模型,该模型能综合考虑载荷和材料疲劳性能的不确定性。董聪等^[225]从随机过程角度分析了随机疲劳损伤模型应满足的自洽条件,构建了一种不依赖于疲劳寿命分布类型的可靠性分析模型。倪侃等^[226-228]分析了损伤累积过程应满足的基本假设条件,建立了等幅加载下疲劳中值曲面方程和变幅加载下二维概率 Miner 法则,同时针对 Wirsching 模型存在的不自洽性提出了相应的改进方法。顾怡和吕海波^[229]依据 Miner 法则的定义,将临界损伤视为一个服从对数正态分布的随机变量,且认为任意时刻下的累积损伤是一个近似服从对数正态分布的随机过程,由此提出了一种结构元件疲劳可靠性分析模型。Liu 和 Mahadevan^[230-231]针对 Miner 法则的缺陷提出了一种改进模型,采用随机 S-N 曲线技术表征损伤累积过程中的不确定性,实现了变幅加载下的概率寿命

预测。Rathod 等^[232-233]结合概率 S-N 曲线、Miner 法则和概率密度转换技术, 构建了一种概率损伤累积模型应用于疲劳可靠度估算和可靠性设计优化。Pinto 等^[234]建立了一种数值模型, 分别在威布尔分布和对数正态分布假设下评估阶梯谱载荷下结构的疲劳寿命。Sun 等^[235]基于 Monte Carlo 抽样方法和 Miner 法则, 提出了一种统计疲劳损伤模型, 该模型适用于恒幅和变幅载荷并能定量地表征寿命与损伤的统计特性。谢里阳等^[236]针对复杂结构的多部位损伤特征, 通过分析寿命、损伤和临界损伤的概率分布属性, 提出了一种概率损伤累积准则, 并基于多层次统计原理和系统层可靠性建模方法进行概率寿命预测。

(2) 基于剩余强度退化的可靠性分析方法

疲劳失效在宏观上表现为材料性能的不断劣化。随着载荷循环的持续作用, 材料的抗疲劳能力逐渐衰减, 这种能力可用剩余强度进行度量。所谓剩余强度, 是指结构在经历一定的使用寿命后, 其还具有抵抗外部载荷的能力, 它与载荷作用次数以及载荷水平密切相关。不同种类材料的剩余强度退化规律往往不尽相同, 目前已形成了多种剩余强度模型^[237-241]。一般地, 对于金属材料, 其强度退化具有“突然死亡”的特性, 即剩余强度在失效前期衰减缓慢, 而当加载循环比逐渐趋近于 1 时会迅速衰减直至最终断裂。应力-强度干涉模型是结构疲劳可靠性分析的基本理论, 基于剩余强度退化的可靠性分析是在应力-强度干涉模型的基础上发展起来的。该方法以剩余强度作为控制参量, 若剩余强度大于外加载荷, 则结构处于安全状态, 否则处于失效状态。

Cater^[242]在研究 Kececioglu 提出的应力-强度可靠性模型时, 发现当疲劳寿命大于 10^3 时该模型的计算误差较大, 这可能是由于 Kececioglu 模型将 S-N 曲线的疲劳强度作为计算指标而非剩余强度。吕海波和姚卫星^[243]研究了剩余强度的退化规律, 提出了一种结构元件在恒幅和变幅加载下的疲劳可靠性分析模型。胡明敏等^[244]根据金属材料在全域疲劳加载下的剩余强度退化试验, 建立了一种剩余强度表达式, 并基于应力-强度干涉理论研究了恒幅和变幅加载下的疲劳可靠性分析方法。安宗文等^[245]假定结构的初始疲劳强度服从任意概率分布, 采用等损伤比剩余强度退化模型和通用生成函数法, 提出了一种多级载荷加载下的应力-强度干涉模型。黄洪钟等^[246]通过引入剩余强度退化系数对 Corten-Dolan 模型进行了修正, 由此构建了一种基于剩余强度退化的可靠性分析模型, 并将该模型推广至多级载荷加载进行概率寿命预测。李少宏等^[247]针对多级加载下的结构元件, 根据剩余强度退化模型和强度退化量等效原理, 推导得出多级载荷下的剩余强度退化公式, 并运用一次二阶矩法估算结构的可靠度。Yuan 等^[248]基于剩余强度退化模型和改进的 Manson-Halford 模型, 结合应力-强度干涉理论对等幅加载下结构元件的疲劳可靠

度变化规律进行了预测。

(3) 基于疲劳寿命的可靠性分析方法

基于疲劳寿命的可靠性分析方法是以疲劳寿命为控制参量, 根据裂纹扩展理论或疲劳损伤累积理论进行可靠性分析。按照结构的设计准则, 若结构的设计寿命大于其在特定载荷谱下的疲劳寿命, 则结构处于安全状态, 否则处于失效状态。

Wirsching^[220]基于 S-N 曲线和改进的 Miner 法则, 提出了一种疲劳寿命可靠性分析模型, 该模型形式简单并在船舶和海洋工程领域得到了广泛应用。在此基础上, Stahl 和 Geyer^[249]针对简化的并联系统, 将节点疲劳寿命进一步划分为独立分量和相关分量两部分, 由此估算节点的失效概率。Raju 等^[250]针对桥梁结构提出了一种疲劳寿命公式, 并以此进行桥梁结构的可靠性分析。罗毅和高镇同^[251]分析了疲劳强度失效准则中强度分布难以确定的缺陷, 运用“使用寿命 \geq 疲劳寿命”的失效准则, 建立了一种基于寿命分布的可靠性分析模型, 并在理论上验证了其与应用-强度干涉模型的一致性。郭盛杰和姚卫星^[252]以剩余寿命代替疲劳寿命构建安全余量方程, 依据恒幅载荷下疲劳寿命的概率分布, 分别探讨了恒幅和变幅加载下剩余寿命的分布形式, 并以此构建了结构元件在恒幅和多级载荷作用下的可靠性分析方法。

综上所述, 以上三类疲劳可靠性分析方法都围绕着结构可靠性问题进行建模, 主要区别在于描述失效过程所选取的控制参量不同, 由此建立的安全余量方程存在差异。其中, 基于疲劳损伤累积和基于剩余强度退化的可靠性建模方法均考虑了载荷历程的时变特征, 属于时变可靠性分析方法, 更符合工程实际。前者的建模基础是疲劳损伤累积理论, 它与结构的疲劳寿命联系紧密, 该方法建模简单, 模型涉及的统计信息较少, 能够正确反映失效过程的基本趋势, 但如何确定累积损伤和临界损伤的统计特征参量是此类方法建模的关键; 后者则以剩余强度模型为基础, 能够揭示失效过程的退化规律, 但该方法需要大量的试验数据来拟合强度退化轨迹。基于疲劳寿命的可靠性分析方法在恒幅加载下易于实现可靠度的估算, 但在随机载荷下疲劳寿命的概率分布却难以获取, 该模型在实际工程中的应用还存在一定困难。此外, 许多学者还基于断裂力学理论, 以应力强度因子、裂纹长度作为控制参量, 建立了不同类型的可靠性分析模型^[253-254]。姚卫星^[3]对结构疲劳可靠性分析方法进行了较详细的阐述。

1.4.3 存在的不足和问题

随着机械装备结构的服役环境日趋严苛, 疲劳失效机理和损伤发展规律异常复杂, 损伤累积过程受到来自多种物理及不确定性因素的影响。疲劳寿命预测和

疲劳可靠性分析是结构抗疲劳设计的重要内容，同时它们也是制约装备整机寿命与系统可靠性水平的关键。疲劳损伤累积理论为结构寿命预测和可靠性分析提供了有效途径，现阶段针对疲劳寿命预测及可靠性分析的研究，其存在的不足和问题主要表现在对损伤失效机理和宏细观演化规律的认知和把握不够透彻。

在疲劳寿命预测方面，服役在动载荷作用下的机械结构无法直接利用等幅疲劳寿命公式进行寿命估算，而是需要借助于疲劳损伤累积理论实现寿命的等效转换。首先，载荷历程效应的复杂性直接关系到寿命评估的准确性。在实际工程中，Miner 线性损伤累积理论在寿命评估中占据重要地位，是现行应用最广的疲劳准则，但该理论缺乏考虑诸如载荷顺序、载荷幅值波动引起的交互作用等载荷历程效应的影响。目前针对变幅载荷历程效应，特别是载荷间相互作用的演变机制研究较少，在进行疲劳损伤等效计算时，现有损伤理论大多忽略大、小载荷交互作用对损伤发展和疲劳寿命的影响，导致估算结果往往过于保守或危险，寿命预测精度难以得到保证。其次，损伤累积模型需要以具有明确物理内涵的损伤变量为基础。针对损伤变量的描述，工程上常采用基于宏观力学性能退化的状态参量进行疲劳损伤度量，所建立的物理模型多属于非线性理论，能较好地解释载荷顺序效应，但难以揭示失效过程物质结构内部能量耗散的本质规律，对模型的非线性特征行为及其演化的内在规律研究不够深入，且有些模型引入的未知参数较多，物理意义不够明确。最后，损伤累积模型应尽可能保持形式上的简易性。由于非线性损伤理论在复杂载荷下进行寿命和损伤估算时，不同级别载荷需要进行损伤等效折算，计算工作量较大，工程实用性和可操作性较差。针对 Miner 线性法则在工程应用上的优越性，如何综合考虑线性和非线性损伤理论各自的优势，构建一个既符合失效机制又具有形式简易的疲劳损伤准则仍是当前结构抗疲劳设计和寿命评估的一项重要研究内容，目前尚缺乏这方面的考量。

在疲劳可靠性分析方面，由于疲劳失效是一个损伤不断累积的动态过程，载荷作用具有时变特征，传统的应力-强度干涉理论已无法满足实际需求。相对于以剩余强度退化、疲劳寿命、应力强度因子、裂纹长度等为基础的可靠性建模方法，基于疲劳损伤累积的时变可靠性分析已成为当前结构疲劳可靠性分析的主流方法。疲劳全寿命包括裂纹萌生和裂纹扩展两个阶段，目前基于疲劳损伤累积的可靠性分析方法大多仍以 Miner 法则为建模依据，对失效机理过分简化，无法体现裂纹萌生和裂纹扩展的两阶段特性。双线性损伤理论能正确描述失效过程的两个阶段，因此，亟待从疲劳全寿命周期角度出发，开展以双线性损伤理论为基础的概率损伤累积建模以及疲劳可靠性分析的相关研究。

1.5 论文主要研究工作

针对当前结构疲劳寿命预测理论和可靠性分析方法发展中存在的诸多难题和不足, 本文以机械装备关键零构件的金属材料试件和焊接结构件为研究对象, 拟围绕基于有限寿命设计方法和疲劳损伤累积理论, 开展机械装备结构定寿和疲劳可靠性分析研究, 使现有疲劳分析理论不断完善。论文研究框架如图 1-1 所示。

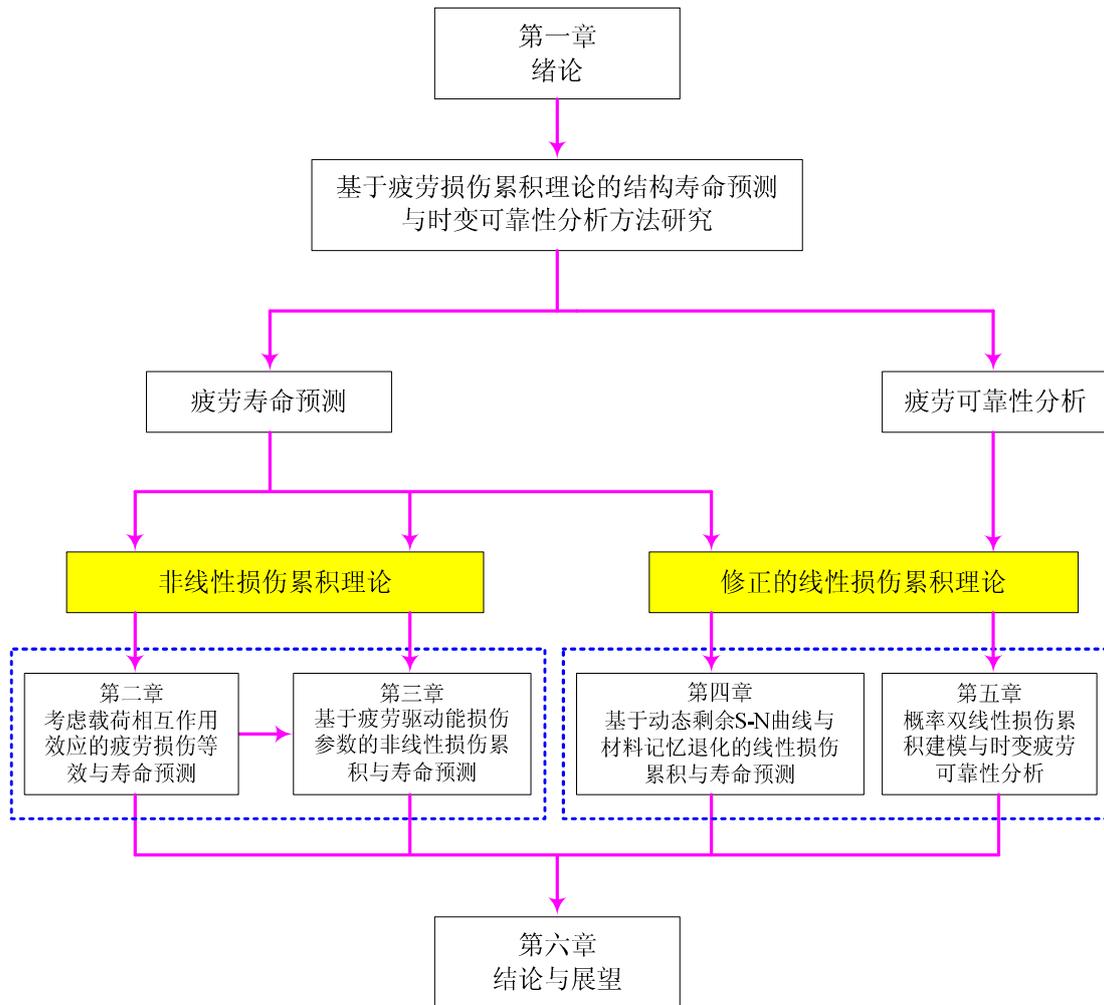


图 1-1 论文框架图

全文共分为六章, 各章主要研究内容为:

第一章为绪论, 首先介绍了论文的研究背景及意义, 详细阐述了疲劳研究发展历程、疲劳断裂失效机理、现行抗疲劳设计方法、疲劳寿命预测方法、疲劳损伤累积理论研究现状、结构疲劳可靠性分析方法等, 并对论文研究工作进行概述。

第二章研究载荷加载顺序和载荷间交互效应的作用机制, 针对传统损伤等效方法的缺陷, 建立一种考虑载荷相互作用效应的疲劳损伤等效法则, 并基于韧性

耗散模型进行寿命预测。

第三章以现有失效力学模型为基础，基于能量准则，提出一种以驱动能耗散为状态参量的非线性损伤累积模型进行寿命预测，并通过试验设计研究该模型的典型非线性特征。

第四章从剩余寿命的角度出发，基于动态剩余 S-N 曲线和材料记忆性能退化分析，提出一种修正的线性损伤累积准则进行寿命预测，并通过试验设计对该准则的线性损伤行为进行分析。

第五章以双线性损伤理论为基础建立概率损伤累积模型，结合应力-强度干涉理论，提出一种基于“累积损伤-临界损伤”动态干涉模型，进行时变疲劳可靠性分析研究。

第六章对全文工作进行总结，并就后续研究计划进行展望。

第二章 考虑载荷相互作用效应的疲劳损伤等效与寿命预测

2.1 引言

在工程实际中，机械零构件所承受的载荷大多为交变循环载荷，疲劳破坏是造成其失效的一个主要诱因。在循环载荷作用下，结构内部会产生损伤并不断积累，直至达到某个阈值时发生破坏。疲劳破坏一般不发生显著的塑性形变，破坏前无明显的征兆，而一旦发生则表现为突然断裂。这种破坏常常会导致灾难性的事故和重大经济损失，严重威胁到人们的生命安全。因此，精确地预测机械结构的疲劳寿命是确保其在服役期内安全、可靠运行的重要保障。

在实际服役过程中，机械结构承受的载荷通常为变幅载荷，即载荷的峰谷值随时间不断变化。从经济性的角度考虑，直接采用试验的方法测定此类服役载荷下的疲劳寿命显然并不现实。相比之下，恒幅加载下的疲劳试验简单易行，且目前已积累大量试验数据，这样可以通过疲劳损伤累积准则将恒幅载荷下的寿命数据进行等效转换，进而估算结构在变幅载荷下的剩余寿命。疲劳损伤累积理论是结构抗疲劳设计和寿命预测的核心内容，许多学者在大量试验和理论分析的基础上，提出了多种损伤累积模型。其中，Miner 法则由于其形式简易在工程上得到了广泛应用，但该法则未考虑载荷历程中载荷加载的先后顺序以及大、小载荷间交互作用的影响，导致寿命预测结果往往过于保守或危险。通过改变损伤积累的形式，许多非线性损伤理论可以有效解决载荷作用顺序的缺陷，但载荷间的交互作用经常被忽略。已有研究表明^[108, 115, 255]，载荷相互作用效应对疲劳寿命预测精度的提升有重要影响。在不同加载顺序下，载荷幅值的突变会引起后续载荷循环的损伤演化发生改变，进而影响结构的剩余寿命。本章针对 Miner 法则的主要缺陷，研究载荷顺序效应和载荷间交互作用对损伤演化规律的影响，从疲劳损伤状态的等效性着手，建立一种考虑载荷相互作用效应的疲劳损伤等效法则，结合材料韧性耗散模型，运用该法则进行剩余寿命预测。

2.2 载荷加载顺序效应的阐释

疲劳损伤累积理论是估算变幅载荷下结构疲劳寿命的重要方法，实际工程中应用最广的是 Miner 线性损伤法则。尽管 Miner 法则具有形式简易和计算方便的优点，但大量研究表明^[197-198, 200, 256-257]，该法则的预测结果与试验数据之间往往存在较大差异，且结构在发生失效时所累积的损伤总量并不为 1，通常在 0.01~10 较大

范围内波动^[3]。在 Miner 法则的假设中，各级载荷之间相互独立，损伤累积与载荷的加载历程无关，忽略了载荷加载顺序和载荷相互作用效应，这是造成其寿命预测偏差较大的主要原因。

为了探究载荷顺序对疲劳损伤的影响，以两级循环载荷为例，构件首先在第一级载荷 σ_1 下加载 n_1 次，然后转入第二级载荷 σ_2 加载 n_2 次后发生破坏。根据 Miner 法则的定义，损伤与载荷循环次数之间具有线性关系，分别以加载循环次数和循环比为横坐标，绘制相应的损伤曲线，如图 2-1 所示。

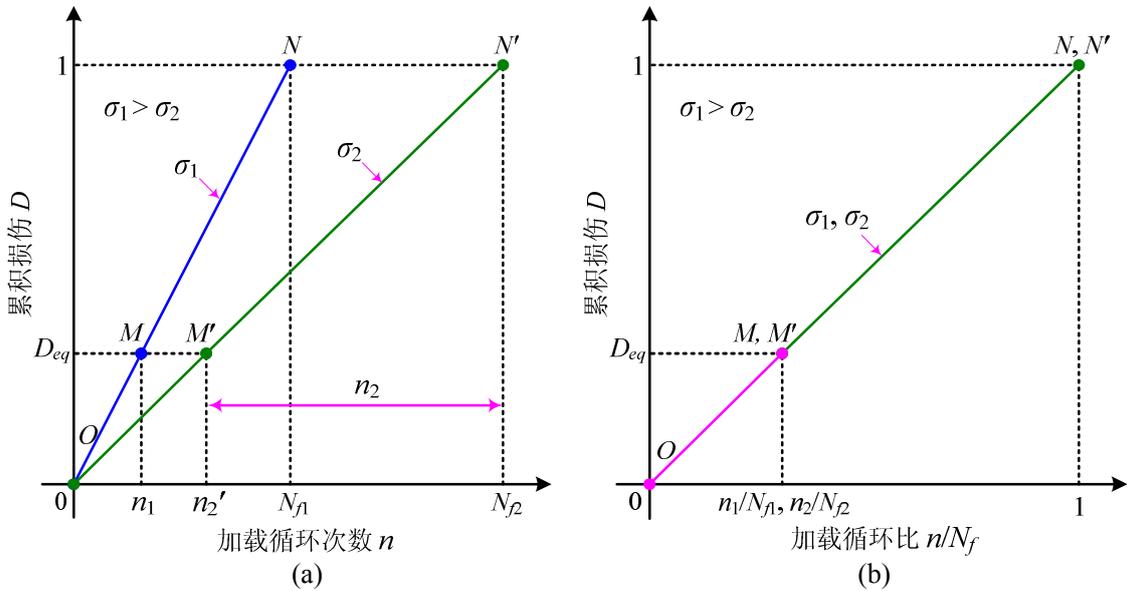


图 2-1 Miner 法则损伤曲线。(a) $D-n$ 曲线；(b) $D-n/N_f$ 曲线

由图 2-1(a)，不同应力水平下的 $D-n$ 曲线是不同的，在高-低加载下，损伤累积路径为 $OM \rightarrow MM' \rightarrow M'N'$ 。构件在应力 σ_1 下经历 n_1 次循环后的累积损伤为 D_{eq} （等效损伤），利用损伤等效原理，将 D_{eq} 在应力 σ_2 下进行折算得到相应的等效循环次数为 $n_2' = (n_1 / N_{f1}) N_{f2}$ 。由此，估算构件的累积损伤为：

$$\sum \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} = \frac{n_1}{N_{f1}} + \left(1 - \frac{n_2'}{N_{f2}}\right) = 1 \quad (2-1)$$

同理，在低-高加载下，损伤累积路径为 $OM' \rightarrow M'M \rightarrow MN$ ，所得结果与式(2-1)相同。然而，大量试验结果表明，载荷加载顺序对损伤和疲劳寿命的影响较大。一般地，在高-低加载下，累积损伤 $\sum n_i / N_{fi} < 1$ ；在低-高加载下，累积损伤 $\sum n_i / N_{fi} > 1$ 。由图 2-1(b)，不同应力水平下的 $D-n/N_f$ 曲线是完全重合的，无论加载顺序如何，均有 $\sum n_i / N_{fi} = 1$ 。这表明 Miner 法则是一个与载荷水平无关的损伤模型，无法解释载荷顺序效应。

另外, Miner 法则对疲劳失效过程进行了简化, 对于大多数金属材料, 损伤与载荷循环之间不能用简单的线性函数来描述, 而是表现出高度的非线性特性。在实际过程中, 疲劳损伤会受到来自内部和外部等多种因素的影响, 损伤变量可描述为^[204]:

$$D = F(n, \sigma, f, T, \vartheta, \kappa, \tau, \zeta) \quad (2-2)$$

式中, f 是加载频率, T 是温度, ϑ 是湿度, κ 是与材料属性相关的参数, τ 是与结构细节相关的参数, ζ 是其他环境因素。

若载荷加载频率、材料性能、结构细节和环境等因素已给定, 则式(2-2)可简化为:

$$D = F(n, \sigma) \quad (2-3)$$

在两级循环加载下, 非线性损伤曲线可用图 2-2 表示。

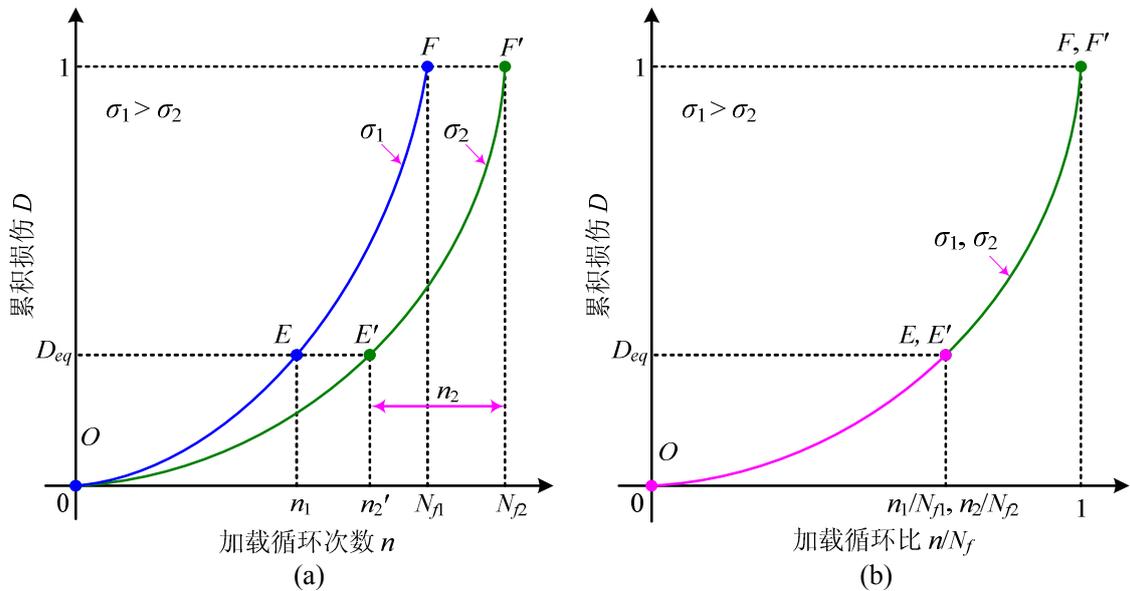


图 2-2 非线性损伤曲线。(a) $D-n$ 曲线; (b) $D-n/N_f$ 曲线

由式(2-3), 将加载循环次数用疲劳损伤表示, 则损伤演化方程为:

$$\frac{dD}{dn} = f(D, \sigma) \quad (2-4)$$

若不考虑初始损伤, 根据损伤定义的边界条件, 即 $n = 0, D = 0; n = N_f, D = 1$ 。对式(2-4)两边积分, 可得:

$$n = \int_0^D \frac{1}{f(D, \sigma)} dD \quad (2-5)$$

则 σ_1 和 σ_2 所对应的疲劳寿命分别为:

$$N_{f1} = \int_0^1 \frac{1}{f(D, \sigma_1)} dD \quad (2-6)$$

$$N_{f2} = \int_0^1 \frac{1}{f(D, \sigma_2)} dD \quad (2-7)$$

由图 2-2(a), 在高-低加载下, 损伤累积路径为 $OE' \rightarrow E'E \rightarrow EF$ 。由式(2-5), 应力 σ_1 所作用的循环次数可表示为:

$$n_1 = \int_0^{D_{eq}} \frac{1}{f(D, \sigma_1)} dD \quad (2-8)$$

构件的剩余寿命为:

$$n_2 = \int_{D_{eq}}^1 \frac{1}{f(D, \sigma_2)} dD \quad (2-9)$$

将式(2-6)-(2-9)代入式(2-1), 可得累积损伤为:

$$\sum \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} = \frac{\int_0^{D_{eq}} \frac{1}{f(D, \sigma_1)} dD}{\int_0^1 \frac{1}{f(D, \sigma_1)} dD} + \frac{\int_{D_{eq}}^1 \frac{1}{f(D, \sigma_2)} dD}{\int_0^1 \frac{1}{f(D, \sigma_2)} dD} \quad (2-10)$$

根据损伤等效原理, 构件在应力 σ_2 下的等效循环次数为:

$$n_2' = \int_0^{D_{eq}} \frac{1}{f(D, \sigma_2)} dD \quad (2-11)$$

注意到 $n_2 = N_{f2} - n_2'$, 则式(2-10)可写作:

$$\sum \frac{n_i}{N_{fi}} = 1 + \left(\frac{\int_0^{D_{eq}} \frac{1}{f(D, \sigma_1)} dD}{\int_0^1 \frac{1}{f(D, \sigma_1)} dD} - \frac{\int_0^{D_{eq}} \frac{1}{f(D, \sigma_2)} dD}{\int_0^1 \frac{1}{f(D, \sigma_2)} dD} \right) \quad (2-12)$$

若 $\int_0^{D_{eq}} \frac{1}{f(D, \sigma_1)} dD / \int_0^1 \frac{1}{f(D, \sigma_1)} dD = \int_0^{D_{eq}} \frac{1}{f(D, \sigma_2)} dD / \int_0^1 \frac{1}{f(D, \sigma_2)} dD$, 则式

(2-12)将退化为 Miner 法则, 即在任意应力加载下, $\int_0^{D_{eq}} \frac{1}{f(D, \sigma_i)} dD / \int_0^1 \frac{1}{f(D, \sigma_i)} dD$

是与载荷水平无关的量, 用 $\psi(D)$ 表示, 则:

$$\int_0^{D_{eq}} \frac{1}{f(D, \sigma_i)} dD = \psi(D) \int_0^1 \frac{1}{f(D, \sigma_i)} dD = \psi(D) \varphi(\sigma_i) \quad (2-13)$$

式(2-13)两端对 D 求偏导, 可得:

$$f(D, \sigma_i) = \frac{1}{\psi'(D)} \times \frac{1}{\varphi(\sigma_i)} \quad (2-14)$$

同理, 在低-高加载下, 推导结果与式(2-14)相同。由式(2-14)可知, $f(D, \sigma_i)$ 是关于 D 和 σ_i 的可分离函数, 这使得非线性损伤累积的结果与 Miner 法则的形式相同。由图 2-2(b)可知, 不同应力水平下的损伤曲线是重合的, 疲劳损伤与循环比之间具有唯一对应关系, 与载荷水平无关。这表明, 即使疲劳损伤按非线性方式累积, $f(D, \sigma_i)$ 的可分离性使得损伤变量仍保留了载荷水平的独立性, 无法考虑载荷顺序效应。特别地, 对于 Miner 法则, 其损伤演化方程为 $f(D, \sigma_i) = 1/N_{fi}$, 具有可分离性, 因而有 $\sum n_i/N_{fi} = 1$ 。

综上所述, 无论损伤累积形式是线性的或非线性的, 疲劳损伤与应力水平的不可分离性是导致载荷顺序效应的主要原因。对于试验结果符合 Miner 法则的材料或结构, 可选用某种可分离函数描述其损伤演化规律。

2.3 考虑载荷相互作用效应的疲劳损伤等效法则

如前所述, 疲劳损伤与应力水平间的相关性是产生顺序效应的必要条件, 这样不同应力水平下的 $D-n/N_f$ 曲线是不同的, 且应力水平越高, 损伤的累积速率越快。在两级循环加载下, 考虑载荷水平相关的非线性损伤曲线可用图 2-3 表示。

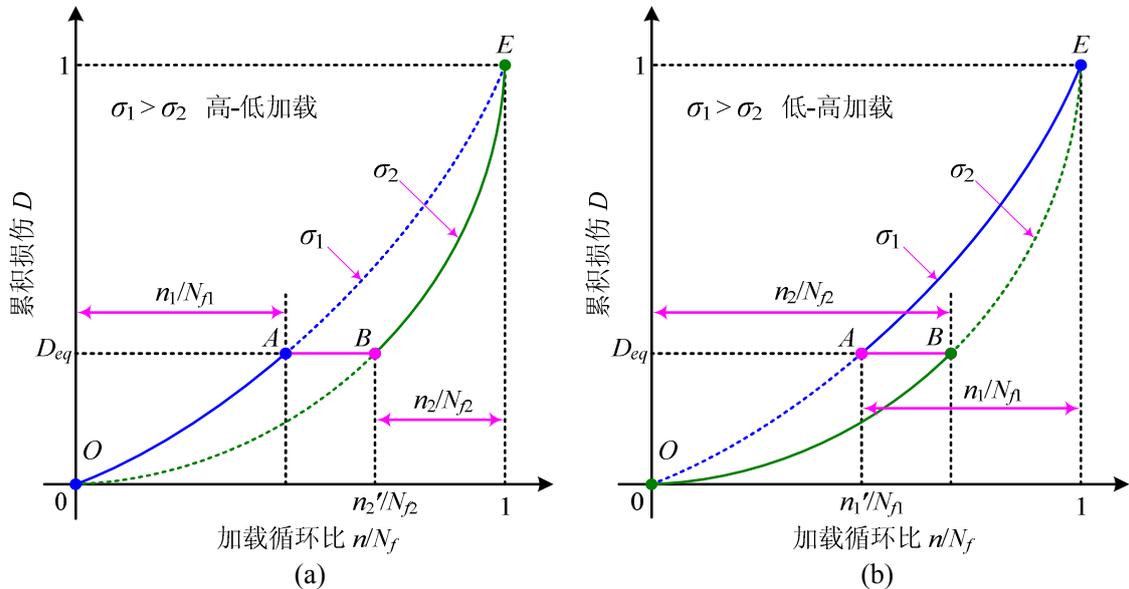


图 2-3 考虑载荷水平相关的非线性损伤曲线。(a)高-低加载下损伤曲线; (b)低-高加载下损伤曲线

由图 2-3 可知, 在高-低加载下, 损伤累积路径为 $OA \rightarrow AB \rightarrow BE$, 累积损伤为 $\sum n_i / N_{fi} < 1$; 在低-高加载下, 损伤累积路径为 $OB \rightarrow BA \rightarrow AE$, 累积损伤为 $\sum n_i / N_{fi} > 1$ 。上述分析与大多数金属材料的试验结果是一致的, 从而解释了载荷作用的顺序效应。

疲劳是一个损伤不断累积的过程, 其破坏准则是累积损伤达到或超过某个损伤阈值。Miner 法则用单一损伤参量来表征损伤, 即循环比或损伤度 (n / N_f), 其失效准则属于“一元判据”, 这是 Miner 法则的根本缺陷。实际上, 疲劳损伤的演化规律十分复杂, 单一损伤参量不足以描述整个失效过程。根据断裂力学理论, 应力强度因子 $K(\sigma, a)$ 是描述疲劳失效的控制参量。其中, σ 为外加载荷, 是导致失效的外因; a 为裂纹长度, 相当于损伤度, 是导致失效的内因。当 $K > K_{IC}$ 时, 发生破坏, 这种失效准则称为“二元判据”^[258-259]。因此, 疲劳失效可认为是由损伤度 (内因) 和载荷 (外因) 共同作用的结果。由式(2-3), 将循环次数用损伤度代替, 则损伤变量可描述为:

$$D = F(n / N_f, \sigma) \quad (2-15)$$

通常, 变幅加载下的损伤分析和寿命预测是以损伤等效为基础的, 即认为材料在不同载荷水平下存在着等效的损伤状态。疲劳失效是一个动态的损伤累积过程, 如果外部载荷作用消失, 损伤累积也将停止, 载荷历程中的每个时刻都对应着材料的一种损伤状态。若材料在不同应力下所历经的循环次数相同, 则应力水平越高, 材料的受损程度越大。为了描述材料的损伤程度, 引入疲劳损伤状态 (Fatigue Damage State, FDS) 的概念, 将其定义为与载荷水平、加载循环次数以及累积损伤有关的参量, 用以下符号表示:

$$FDS : \{ \sigma, n, F(n / N_f, \sigma) \} \quad (2-16)$$

式(2-16)涵盖了材料的瞬时损伤特征以及当前载荷的加载状态。由图 2-3(a), 按照损伤等效原理, 构件在应力 σ_1 下加载 n_1 次产生的损伤与其在 σ_2 下加载 n_2' 次的损伤相等, 即认为 A、B 两点具有相同的疲劳损伤状态, 有:

$$FDS_1 : \{ \sigma_1, n_1, F(n_1 / N_{f1}, \sigma_1) \} = FDS_2 : \{ \sigma_2, n_2', F(n_2' / N_{f2}, \sigma_2) \} \quad (2-17)$$

则构件在 σ_2 下的剩余寿命分数可由下式确定:

$$F(n_1 / N_{f1}, \sigma_1) = F(1 - n_2 / N_{f2}, \sigma_2) \quad (2-18)$$

根据式(2-17), 两级变幅加载将退化为以第二级载荷单独作用的等效恒幅加载, 如图 2-4 所示。

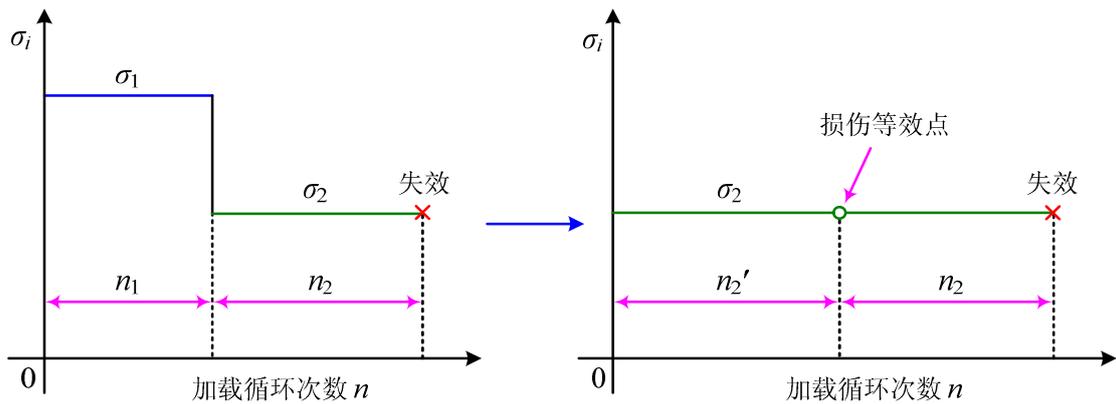


图 2-4 两级变幅加载退化为等效恒幅加载

图 2-4 表明，构件在高载荷下循环 n_1 次与其在低载荷下循环 n_2' 次具有完全相同的损伤状态。然而，针对不同应力水平下疲劳损伤等效的合理性，文献[260-261]指出：①对于高层错能金属材料，较高载荷与较低载荷作用下的位错结构存在差异，由此产生的疲劳机理是不同的；②对于低层错能材料，尽管位错结构发展缓慢，但高、低载荷下的位错结构也不完全相同，相应的损伤状态也是有差别的；③从统计学角度分析，损伤等效并不意味着发生失效的概率相等；④在不同应力水平下，传统意义上的损伤等效状态并不存在。根据这种观点，按式(2-17)进行损伤等效是不充分的。

相比恒幅加载，变幅加载下的损伤演化规律更加复杂，载荷的幅值具有波动性，损伤与当前载荷的大小以及过去的加载历程有关，不同载荷下的损伤累积存在相互作用效应。由于载荷幅值的突变，前级载荷循环对后级载荷循环的损伤演化具有干涉作用。一般地，在高-低加载下，高载荷使疲劳裂纹提前形成，为低载荷下的裂纹扩展创造了条件，促进了损伤的发展，使疲劳寿命变短；在低-高加载下，低载荷的反复作用使材料产生了强化作用（“锻炼效应”），延缓了损伤累积进程，使疲劳寿命得到延长。由此可见，无论载荷加载顺序如何，载荷间的相互作用效应会使后续载荷循环的损伤累积规律发生某种程度的变化。由图 2-3(a)，按式(2-17)进行损伤等效，损伤演化路径为 $OABE$ ，但第二级载荷仍保留了其在恒幅加载下的损伤演化趋势，忽略了第一级载荷的影响，即没有考虑载荷间的相互作用效应。因此，采用式(2-18)进行剩余寿命预测可能引起较大的误差。

为了研究载荷相互作用效应对损伤累积的影响，以两级高-低加载为例进行分析。在经历高载荷循环作用后，低载荷循环下的损伤演化将在其恒幅加载损伤趋势的基础上发生偏移，且这种偏移对损伤累积有促进作用，可假设偏移后的损伤曲线为 AN ，如图 2-5 所示。

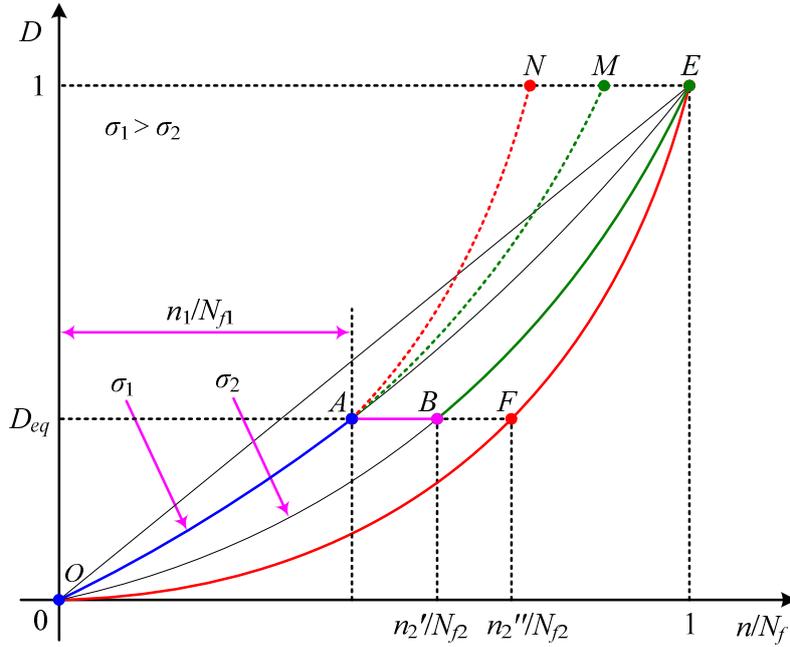


图 2-5 两级高-低加载下非线性损伤演化规律

将损伤曲线 AN 进行平移和延伸, 最终得到一条以低载荷单独作用的等效损伤曲线 OFE 。与 OBE 不同的是, 该损伤曲线考虑了高、低载荷间的交互影响, 假设其损伤方程与式(2-15)类似, 可表示为:

$$D = \xi\left(n / N_f, \sigma_2\right) \quad (2-19)$$

根据损伤等效原理, 构件在应力 σ_1 下加载 n_1 次产生的损伤与其在 σ_2 下按损伤曲线 OFE 产生的损伤相等, 等效循环比为 n_2'' / N_{f2} , 如图 2-5 所示。因此, 考虑载荷相互作用效应的损伤累积路径为 $OA \rightarrow AF \rightarrow FE$, 相应的疲劳损伤等效状态可描述为:

$$FDS_1 : \left\{ \sigma_1, n_1, F\left(n_1 / N_{f1}, \sigma_1\right) \right\} = FDS_2 : \left\{ \sigma_2, n_2'', \xi\left(n_2'' / N_{f2}, \sigma_2\right) \right\} \quad (2-20)$$

由图 2-5 可知, 损伤曲线 OFE 是以 OBE 为基础构建的, 则式(2-19)应满足以下基本条件:

$$0 \leq \xi\left(n / N_f, \sigma_2\right) \leq 1 \quad (2-21)$$

$$\xi\left(n / N_f, \sigma_2\right) \Big|_{n=0} = 0 \quad (2-22)$$

$$\xi\left(n / N_f, \sigma_2\right) \Big|_{n=N_f} = 1 \quad (2-23)$$

$$\xi\left(n / N_f, \sigma_2\right) < F\left(n / N_f, \sigma_2\right) \quad (2-24)$$

在低-高加载下，式(2-24)应写为：

$$\xi(n/N_f, \sigma_2) > F(n/N_f, \sigma_2) \quad (2-25)$$

同时， $\xi(n/N_f, \sigma_2)$ 和 $F(n/N_f, \sigma_2)$ 与 n/N_f 之间均可用某种幂函数形式描述，例如 Marco-Starkey 模型^[132]或 Manson 模型^[113]。因此， $\xi(n/N_f, \sigma_2)$ 可通过改变 $F(n/N_f, \sigma_2)$ 的幂指数得到，表示如下：

$$\xi(n/N_f, \sigma_2) = [F(n/N_f, \sigma_2)]^{\omega_{1,2}} \quad (2-26)$$

式中， $\omega_{1,2}$ 是交互因子，用于表征载荷 σ_1 和 σ_2 之间的相互作用效应。

由式(2-20)可知，两级变幅加载也同样退化为以第二级载荷单独作用的等效恒幅加载。同理，对于含有三个应力级别的疲劳加载，前两级加载将退化为以第二级载荷单独作用的等效加载，然后按第三级载荷大小进行折算，最终得到以第三级载荷单独作用的恒幅加载。根据此法进行等效，按照载荷作用的先后顺序，任意相邻两级载荷之间均存在交互作用，且交互因子主要取决于相邻的两级载荷作用。根据式(2-24)和式(2-25)，在高-低加载下， $\omega_{1,2} > 1$ ；在低-高加载下， $\omega_{1,2} < 1$ ；若外加载荷相同，即在恒幅加载下，载荷相互作用效应不存在，即 $\omega_{1,2} = 1$ 。此外，已有研究表明^[108, 115, 262]，载荷相互作用效应可用载荷大小的比值描述，且载荷水平间的差距越大，交互作用越显著。根据以上分析，本文将交互因子定义为相邻两级载荷之比，两级加载下的交互因子为 $\omega_{1,2} = \sigma_1 / \sigma_2$ ，则式(2-26)可写为：

$$\xi(n/N_f, \sigma_2) = [F(n/N_f, \sigma_2)]^{\sigma_1/\sigma_2} \quad (2-27)$$

根据式(2-20)，构件在第二级载荷下的剩余寿命分数由下式确定：

$$F(n_1/N_{f1}, \sigma_1) = [F(1-n_2/N_{f2}, \sigma_2)]^{\sigma_1/\sigma_2} \quad (2-28)$$

同理，在三级循环加载下，构件的剩余寿命分数可描述为：

$$\left[F\left(\left(n_2'' + n_2\right) / N_{f2}, \sigma_2\right) \right]^{\sigma_1/\sigma_2} = \left[F\left(1-n_3 / N_{f3}, \sigma_3\right) \right]^{\sigma_2/\sigma_3} \quad (2-29)$$

式(2-29)可进一步推广到多级载荷加载，为了书写方便，定义以下符号：

$$\begin{cases} \tilde{n}_{i-1} / N_{f(i-1)} = \left(n_{i-1}'' + n_{i-1}\right) / N_{f(i-1)} \\ \omega_{i-1,i} = \sigma_{i-1} / \sigma_i \end{cases} \quad (2-30)$$

式中， $\tilde{n}_{i-1} / N_{f(i-1)}$ 表示前 i 级载荷作用的等效循环比， $\omega_{i-1,i}$ 是第 $i-1$ 级和第 i 级载荷间的交互因子。由此，多级载荷下的剩余寿命分数可由下式求得：

$$\left[F(\tilde{n}_{i-1} / N_{f(i-1)}, \sigma_{i-1}) \right]^{\omega_{i-2,i-1}} = \left[F(1 - n_i / N_{fi}, \sigma_i) \right]^{\omega_{i-1,i}} \quad (2-31)$$

式(2-31)即为考虑载荷相互作用效应的疲劳损伤等效法则的一般形式, 该式同时考虑了载荷作用顺序和载荷间交互作用的影响。

2.4 改进型疲劳损伤累积模型与剩余寿命预测

从宏观唯象角度看, 疲劳失效是在交变循环载荷作用下, 材料物理性能不断退化、损伤逐渐累积和能量耗散的不可逆演化过程^[104]。损伤变量是描述疲劳演化的重要参量, 由于疲劳损伤不能直接测量, 工程上常根据伴随材料损伤变化的状态参量对其进行间接度量, 如杨氏模量、疲劳极限、强度、刚度、韧性、断面收缩率、里氏硬度等。文献[141]指出, 在疲劳失效过程中, 杨氏模量和屈服强度的衰减是由于在循环载荷作用下裂纹不断萌生和扩展, 使材料的有效承载面积减小所致; 塑性性能衰减与材料内部可动位错不断耗竭以及位错壁垒的形成有关; 韧性衰减能综合描述屈服强度与塑性性能的退化行为。据此, Ye 等^[140]根据失效过程的能耗分析, 将损伤变量定义为材料的韧性耗散, 描述如下:

$$D = 1 - \frac{U_{T(n)}}{U_{T0}} \quad (2-32)$$

式中, U_{T0} 是材料的初始静态韧性, $U_{T(n)}$ 是材料经历 n 次循环后的剩余韧性。其中, 剩余韧性随载荷循环的演化规律为:

$$U_{T(n)} = U_{T0} + \frac{U_{T0} - U_{T(N_f-1)}}{\ln N_f} \ln \left(1 - \frac{n}{N_f} \right) \quad (2-33)$$

或

$$U_{T(n)} = U_{T0} + \frac{U_{T0} - \frac{\sigma_a^2}{2E}}{\ln \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b}} \right)} \ln \left(1 - 2n \left(\frac{\sigma_a}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b}} \right) \quad (2-34)$$

式(2-34)所表征的是材料具有吸收形变功和断裂功的能力, 物理内涵明确。将式(2-33)代入式(2-32), 可得如下损伤累积模型:

$$D = - \frac{D_{N_f-1}}{\ln N_f} \ln \left(1 - \frac{n}{N_f} \right) \quad (2-35)$$

式中, D_{N_f-1} 是材料经历 $N_f - 1$ 次循环后的损伤值, 相当于临界损伤。

叶笃毅等^[141]通过分析认为 D_{N_f-1} 在理论上可近似为 1。此外, Liakat 和

Khonsari^[159]根据 API 5L X52 高强度钢和碳钢 1018 两种金属材料的疲劳试验发现,在不同的载荷水平下,测得该值也非常接近于 1,即 $D_{N_f-1} \approx 1$ 。因此,式(2-35)可简化为:

$$D \approx -\frac{1}{\ln N_f} \ln \left(1 - \frac{n}{N_f} \right) \quad (2-36)$$

为了验证式(2-36)的合理性,选取 45 钢和 16Mn 钢疲劳损伤试验数据^[192]进行分析,两种试样在不同应力水平下的损伤演化规律分别如图 2-6 和图 2-7 所示。

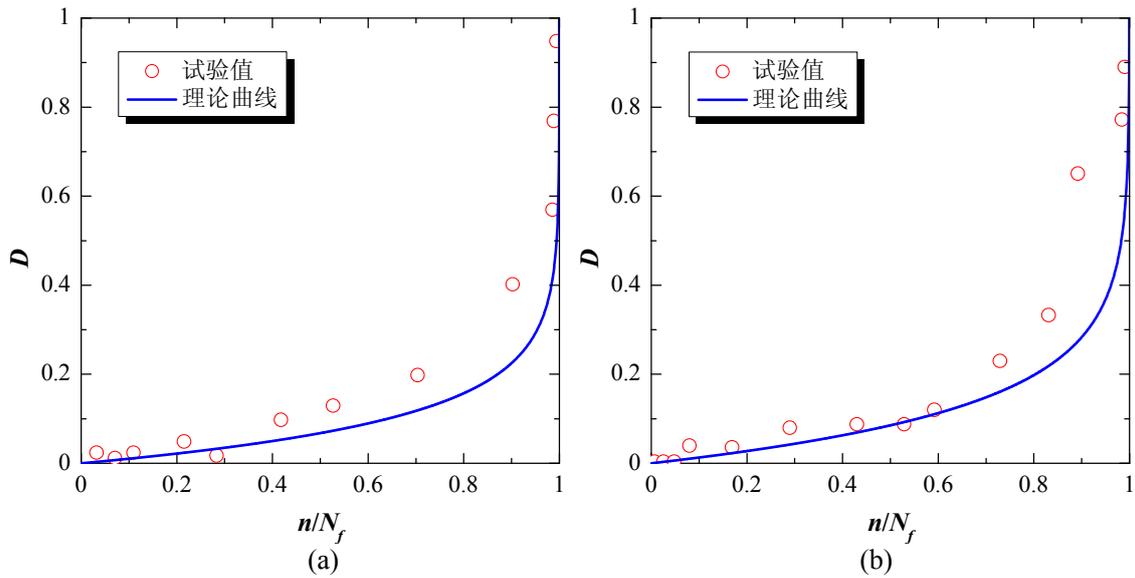


图 2-6 45 钢疲劳损伤演化曲线与试验值比较。(a) $\sigma_a=330.9$ MPa; (b) $\sigma_a=405.8$ MPa

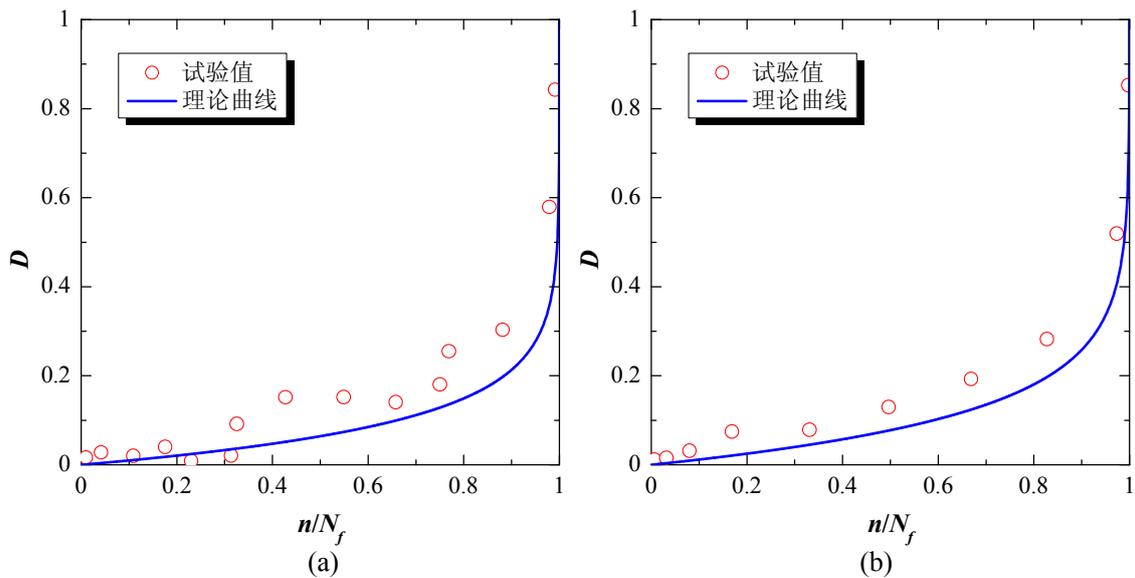


图 2-7 16Mn 钢疲劳损伤演化曲线与试验值比较。(a) $\sigma_a=337.1$ MPa; (b) $\sigma_a=373.5$ MPa

由以上结果可知,理论损伤演化曲线与试验数据的吻合性良好,这表明式(2-36)所定义的损伤函数是合理的。根据前述载荷加载顺序效应产生的条件,对式(2-36)求导得到损伤演化方程为:

$$\frac{dD}{dn} = \frac{1}{(N_f - n) \ln N_f} = \frac{1}{\ln N_f} \left(\frac{1}{N_f} \right)^{1-D} \quad (2-37)$$

将 Basiquin 公式代入式(2-37),整理得:

$$\frac{dD}{dn} = \frac{1}{\ln \left(\frac{1}{2} \left(\sigma_a / \sigma'_f \right)^{\frac{1}{b'}} \right)} \left[2 \left(\sigma'_f \right)^{\frac{1}{b'}} \right]^{1-D} \left(\frac{1}{\sigma_a} \right)^{\frac{1-D}{b'}} \quad (2-38)$$

式(2-38)所述损伤演化函数无法写成关于 σ_a 和 D 的可分离函数,因此,式(2-36)能够考虑载荷加载顺序效应。在两级加载下,按照传统损伤等效法则,即式(2-18),估算构件的剩余寿命分数为:

$$\frac{n_2}{N_{f2}} = \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}} \right)^{\frac{\ln N_{f2}}{\ln N_{f1}}} \quad (2-39)$$

由式(2-39)可知,在高-低加载下,累积损伤 $\sum n_i / N_{fi} < 1$; 在低-高加载下,累积损伤 $\sum n_i / N_{fi} > 1$,符合客观实际。同时这也为载荷顺序效应的产生机制提供了依据,即载荷与损伤具有不可分离性。

在多级加载下,估算构件的剩余寿命分数为:

$$\frac{n_i}{N_{fi}} = \left\{ \left[\left[\left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}} \right)^{\frac{\ln N_{f2}}{\ln N_{f1}}} - \frac{n_2}{N_{f2}} \right]^{\frac{\ln N_{f3}}{\ln N_{f2}}} - \frac{n_3}{N_{f3}} \right]^{\frac{\ln N_{f4}}{\ln N_{f3}}} \dots - \frac{n_{i-1}}{N_{f(i-1)}} \right]^{\frac{\ln N_{fi}}{\ln N_{f(i-1)}}} \quad (2-40)$$

式(2-40)形式简单、计算方便,但缺乏考虑各级载荷间交互作用的影响。由于疲劳现象的复杂性,载荷相互作用效应是描述损伤发展和疲劳演进的重要因素。为了有效评估复杂载荷下结构件的剩余寿命,本章将载荷相互作用效应纳入传统寿命预测模型对其加以修正。

在两级加载下,根据式(2-28)和式(2-36),可得构件在第二级载荷下的剩余寿命分数:

$$\left(\frac{n_2}{N_{f2}}\right)_{mp} = \left(\frac{1}{N_{f2}}\right) \left[\frac{\ln\left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right)}{\ln N_{f1}} \right]^{\frac{\sigma_2}{\sigma_1}} \quad (2-41)$$

式中，下标 mp 表示改进模型的预测结果。

在高-低加载下， $\sigma_1 > \sigma_2$ ， $\frac{\ln N_{f2}}{\ln N_{f1}} > 1$ ， $0 < \left[-\frac{1}{\ln N_{f1}} \ln\left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right) \right]^{1 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1}} < 1$ ，则有：

$$\frac{\ln N_{f2}}{\ln N_{f1}} > \left[-\frac{1}{\ln N_{f1}} \ln\left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right) \right]^{1 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1}} \quad (2-42)$$

整理式(2-42)可得：

$$\left(\frac{1}{N_{f2}}\right) \left[\frac{\ln\left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right)}{\ln N_{f1}} \right]^{\frac{\sigma_2}{\sigma_1}} < 1 - \frac{n_1}{N_{f1}} \Leftrightarrow \frac{n_1}{N_{f1}} + \left(\frac{n_2}{N_{f2}}\right)_{mp} < 1 \quad (2-43)$$

同理，在低-高加载下，有：

$$\frac{n_1}{N_{f1}} + \left(\frac{n_2}{N_{f2}}\right)_{mp} > 1 \quad (2-44)$$

上述推导结果与大多数金属疲劳试验得出的结论是一致的，从而验证了改进模型的合理性。相比式(2-39)，式(2-41)综合考虑了载荷顺序效应以及前后级载荷间交互作用对剩余寿命的影响。

在三级循环加载下，将式(2-36)代入式(2-29)，利用第二级载荷下的预测结果，通过迭代计算推导得出剩余寿命分数为：

$$\left(\frac{n_3}{N_{f3}}\right)_{mp} = \left(\frac{1}{N_{f3}}\right) \left[\frac{-\ln\left(\left(\frac{n_2}{N_{f2}}\right)_{mp} - \frac{n_2}{N_{f2}}\right)}{\ln N_{f2}} \right]^{\frac{\sigma_1 \times \sigma_3}{\sigma_2 \times \sigma_2}} \quad (2-45)$$

同理，在多级载荷作用下，有：

$$\left(\frac{n_i}{N_{fi}}\right)_{mp} = \left(\frac{1}{N_{fi}}\right) \left[\frac{-\ln\left(\left(\frac{n_{i-1}}{N_{f(i-1)}}\right)_{mp} - \frac{n_{i-1}}{N_{f(i-1)}}\right)}{\ln N_{f(i-1)}} \right]^{\frac{\sigma_i - 2 \times \sigma_i}{\sigma_{i-1} \times \sigma_{i-1}}} \quad (2-46)$$

式(2-46)即为考虑载荷相互作用效应的剩余寿命预测模型的一般式, 模型涉及的未知参数较少, 主要是外加载荷及其疲劳寿命, 它们可通过应力-寿命公式确定。特别地, 当外加载荷水平相同时, $\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_i$, $N_{f1} = N_{f2} = \dots = N_{fi}$, 则式(2-46)与 Miner 法则的预测结果一致, 即:

$$\frac{n_i}{N_{fi}} = 1 - \left(\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} + \dots + \frac{n_{i-1}}{N_{f(i-1)}} \right) \quad (2-47)$$

2.5 算例分析

2.5.1 两级加载下模型验证

为了验证本章所提方法的有效性, 通过收集和整理文献中的疲劳试验数据, 本节选取四种试样进行剩余寿命预测, 分别是 45 号钢、铝合金 Al-2024-T42、30CrMnSiA 和动车铝合金车体焊接接头。同时, 为了反映模型的预测精度, 将改进模型的预测结果与原始模型以及工程上常用的 Miner 法则的计算结果进行比较。

(1) 45 号钢、Al-2024-T42、30CrMnSiA 算例分析

① 45 号钢算例。45 号钢是机械零构件的常用材料, 机械性能良好, 广泛应用于机械加工与制造领域。以文献[193]中 45 号钢试件两级循环加载试验为例进行分析。试验材料的机械性能为: 屈服强度 $\sigma_y = 371.7 \text{ MPa}$, 抗拉强度 $\sigma_u = 598.2 \text{ MPa}$, 疲劳极限 $\sigma_e = 262.8 \text{ MPa}$ 。试件在 PQ1-6 型疲劳试验机上进行旋转弯曲加载, 加载方式为应力控制, 应力比 $R = -1$, 试验加载参数见表 2-1。

表 2-1 45 号钢试件两级加载下疲劳试验数据

加载应力	加载顺序	试验编号	试验数据实测值			
			n_1	n_1/N_{f1}	n_2	n_2/N_{f2}
$\sigma_1=331.5 \text{ MPa}$ $\sigma_2=284.4 \text{ MPa}$	高-低加载	1	500	0.0100	423,700	0.8474
		2	12,500	0.2500	250,400	0.5008
		3	25,000	0.5000	168,300	0.3366
		4	37,500	0.7500	64,500	0.1290
$\sigma_1=284.4 \text{ MPa}$ $\sigma_2=331.5 \text{ MPa}$	低-高加载	5	125,000	0.2500	37,900	0.7580
		6	250,000	0.5000	38,900	0.7780
		7	375,000	0.7500	43,400	0.8680

② Al-2024-T42 算例。Al-2024-T42 材料具有强度高、耐高温等优点, 能够制造各种承载高负载的零部件, 如飞机上的蒙皮、翼肋、螺旋桨等, 主要应用于航

空航天领域。以文献[263]中 Al-2024-T42 试件两级疲劳试验为例进行分析，加载频率为 25 Hz，应力比 $R = -1$ ，试验加载参数见表 2-2。

表 2-2 Al-2024-T42 试件两级加载下疲劳试验数据

加载应力	加载顺序	试验编号	试验数据实测值			
			n_1	n_1/N_{f1}	n_2	n_2/N_{f2}
$\sigma_1=200$ MPa $\sigma_2=150$ MPa	高-低加载	1	30,000	0.2000	228,700	0.5319
		2	60,000	0.4000	101,050	0.2350
		3	90,000	0.6000	76,050	0.1769
$\sigma_1=150$ MPa $\sigma_2=200$ MPa	低-高加载	4	86,000	0.2000	144,500	0.9633
		5	172,000	0.4000	133,500	0.8900
		6	258,000	0.6000	81,700	0.5447

③ 30CrMnSiA 算例。30CrMnSiA 材料强度高、抗疲劳性能好，主要用于制造汽车、飞机的轴承、齿轮等各种耐磨性零配件。以文献[264]中 30CrMnSiA 试件两级疲劳试验为例进行分析，试验加载参数如表 2-3 所示。

表 2-3 30CrMnSiA 试件两级加载下疲劳试验数据

加载应力	加载顺序	试验编号	试验数据实测值			
			n_1	n_1/N_{f1}	n_2	n_2/N_{f2}
$\sigma_1=586$ MPa $\sigma_2=482$ MPa	高-低加载	1	1200	0.1670	36,911	0.6620
		2	1800	0.2080	32,450	0.5820
		3	3000	0.4170	16,002	0.2870
		4	5000	0.6940	6969	0.1250
$\sigma_1=482$ MPa $\sigma_2=586$ MPa	低-高加载	5	13,000	0.2330	6602	0.9170
		6	15,000	0.2690	6501	0.9030
		7	25,000	0.4480	5400	0.7500
		8	35,000	0.6280	4428	0.6150
		9	45,000	0.8070	3254	0.4250

根据表 2-1、2-2 和 2-3 中试验数据，分别采用改进模型式(2-41)、原始模型式(2-39)和 Miner 法则进行剩余寿命估算，三种模型在高-低和低-高加载顺序下的预测结果与试验值的比较分别如图 2-8 和图 2-9 所示。此外，为了研究加载顺序对疲劳损伤的影响，对累积损伤进行统计分析，得到 3 种试样在不同加载顺序下的累

积损伤均值，并与试验值进行比较，如图 2-10、2-11 和 2-12 所示。

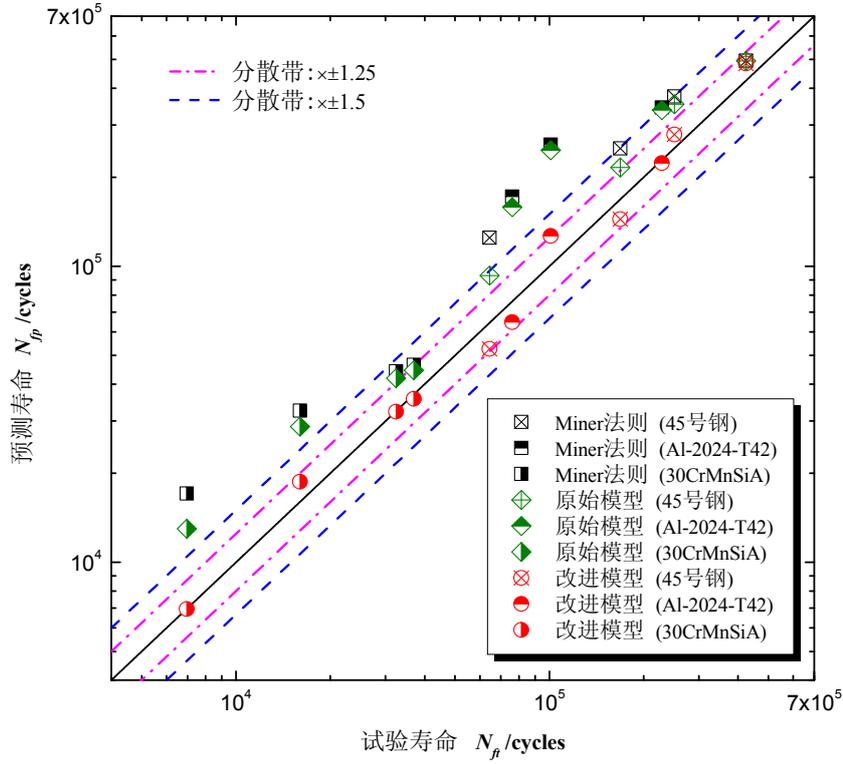


图 2-8 三种模型预测结果与试验值比较（高-低加载）

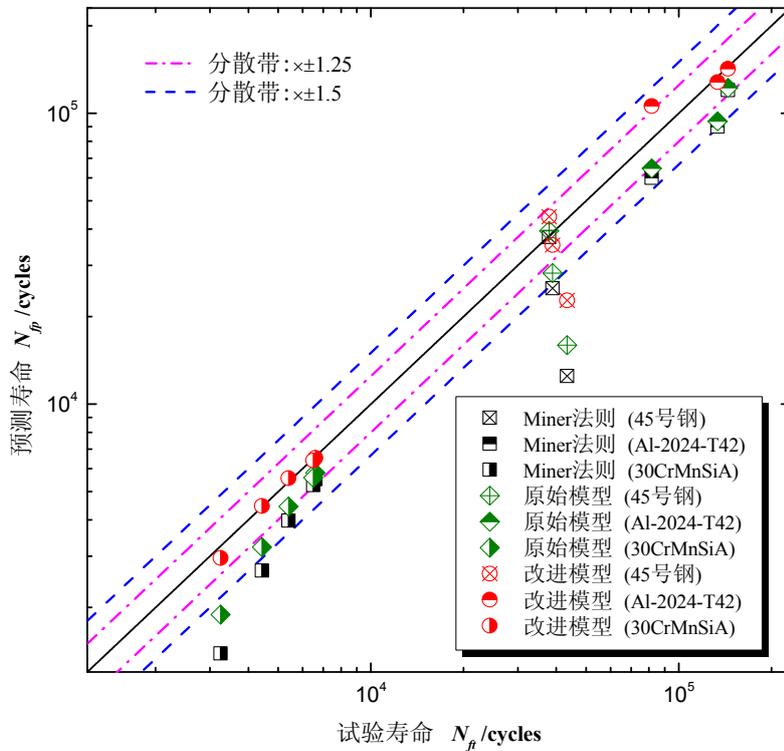


图 2-9 三种模型预测结果与试验值比较（低-高加载）

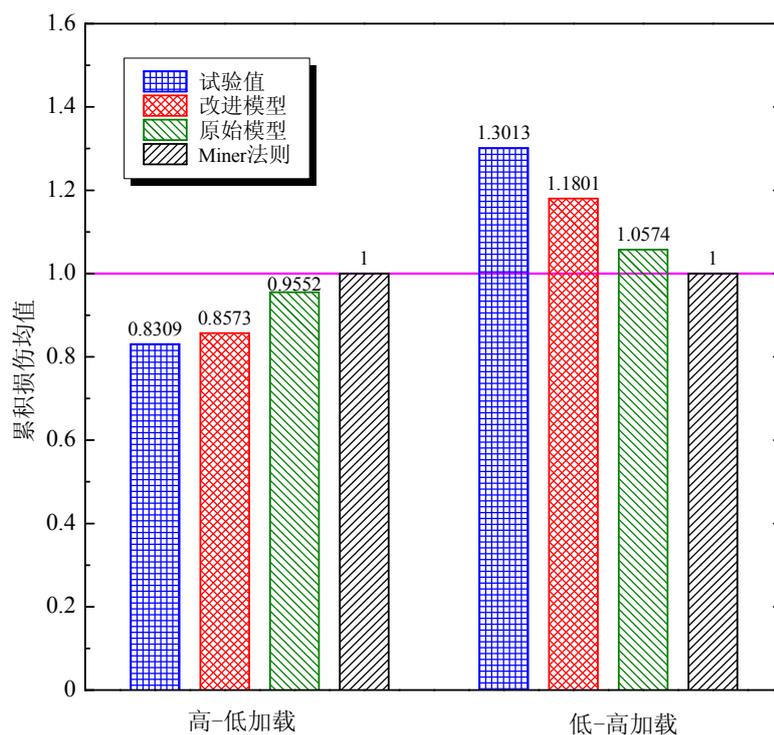


图 2-10 不同加载顺序下三种模型累积损伤均值与试验值比较 (45 号钢)

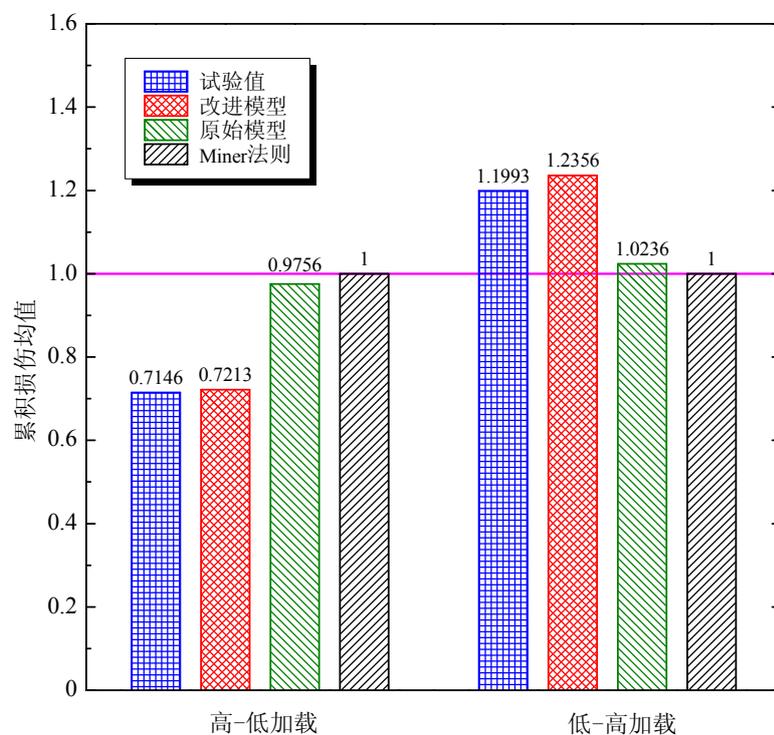


图 2-11 不同加载顺序下三种模型累积损伤均值与试验值比较 (Al-2024-T42)

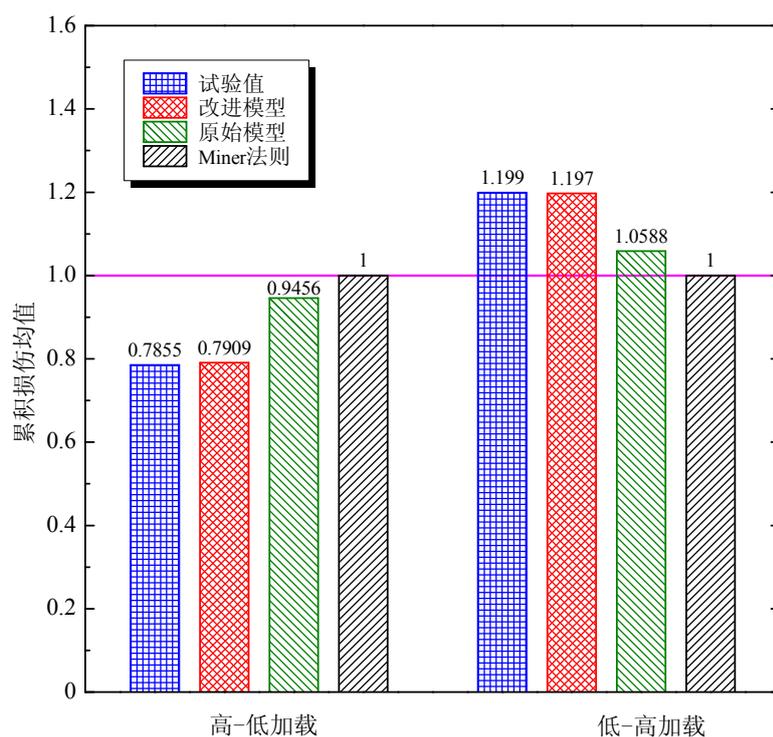


图 2-12 不同加载顺序下三种模型累积损伤均值与试验值比较 (30CrMnSiA)

(2) 动车铝合金车体焊接接头算例分析

铝合金材料材质轻、强度高、塑性好，具有良好的热传导性和抗腐蚀性，广泛应用于航空、航天、船舶、车辆及化工行业，是制造和加工各类焊接结构件的理想材料。以文献[265-266]中高速动车组铝合金车体焊接接头疲劳试验为例进行分析，试验所用的焊接接头包含对接和角接两种焊接类型，如图 2-13 所示。两种接头试件的外形和尺寸一致，表面加工良好，无明显缺陷。

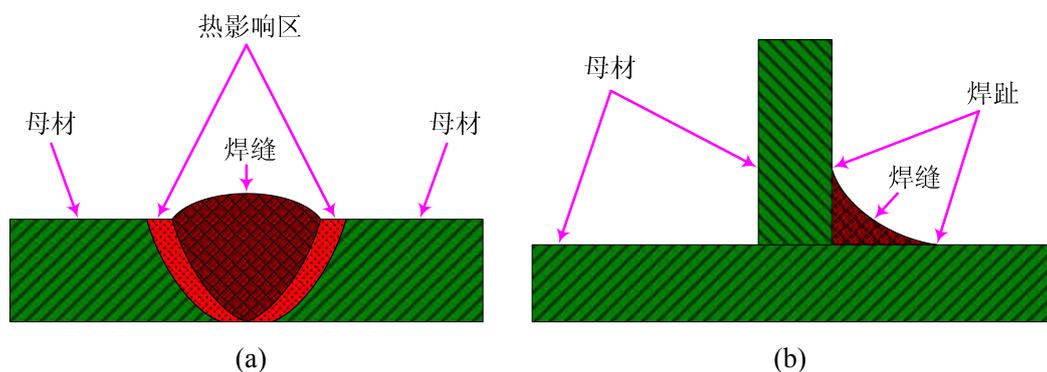


图 2-13 焊接接头类型示意图。(a)对接接头；(b)角接接头

试件母材选用 CRH2 型高速动车组的铝合金车体材料 ENAW6005，其化学组分和机械性能见表 2-4。焊接接头试件在 PLG-200 型高频疲劳试验机上进行四点弯

曲加载，加载频率为 105~115 Hz，应力比 $R = -1$ ，两种接头的试验加载参数见表 2-5。根据第一级载荷加载的试验数据，分别采用式(2-41)、式(2-39)和 Miner 法则进行剩余寿命预测，预测结果如图 2-14 所示。三种模型在不同加载顺序下的累积损伤均值与试验值的比较如图 2-15 所示。

表 2-4 铝合金材料 ENAW6005 的化学组分和机械性能

化学组分 (%)	Si	Mg	Fe	Cr	Mn	Cu	Zn	Ti
		0.6~0.9	0.4~0.6	0.35	0.1	0.1	0.1	0.1
机械性能	抗拉强度 σ_u (MPa)			屈服强度 σ_y (MPa)			伸长率 δ (%)	
	≥ 270			≥ 225			≥ 8	

表 2-5 动车铝合金车体焊接接头两级加载下疲劳试验数据

接头类型	加载顺序	加载应力	试验编号	试验数据实测值			
				$n_1/10^3$	n_1/N_{f1}	$n_2/10^3$	n_2/N_{f2}
对接接头	高-低加载	$\sigma_1=104$ MPa $\sigma_2=74$ MPa	1	109.9	0.2000	797.6	0.5179
		$\sigma_1=89$ MPa $\sigma_2=74$ MPa	2	176.1	0.2000	1029.2	0.6683
	低-高加载	$\sigma_1=74$ MPa $\sigma_2=89$ MPa	3	770.1	0.5000	545.6	0.6196
		$\sigma_1=74$ MPa $\sigma_2=104$ MPa	4	770.1	0.5000	418.9	0.7626
角接头	高-低加载	$\sigma_1=93$ MPa $\sigma_2=73$ MPa	5	309.9	0.5000	587.5	0.3800
		$\sigma_1=83$ MPa $\sigma_2=73$ MPa	6	476.1	0.4999	681.1	0.4405
	低-高加载	$\sigma_1=73$ MPa $\sigma_2=83$ MPa	7	509.2	0.3293	708.2	0.7437
		$\sigma_1=73$ MPa $\sigma_2=93$ MPa	8	773.0	0.5000	426.4	0.6880

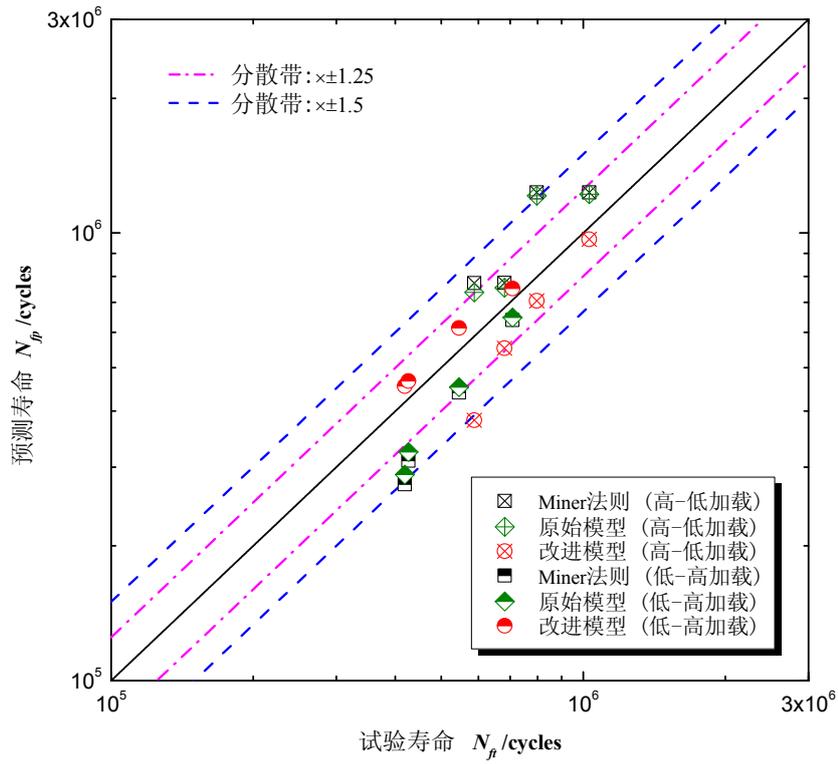


图 2-14 两级加载下三种模型预测结果与试验值比较（铝合金焊接接头）

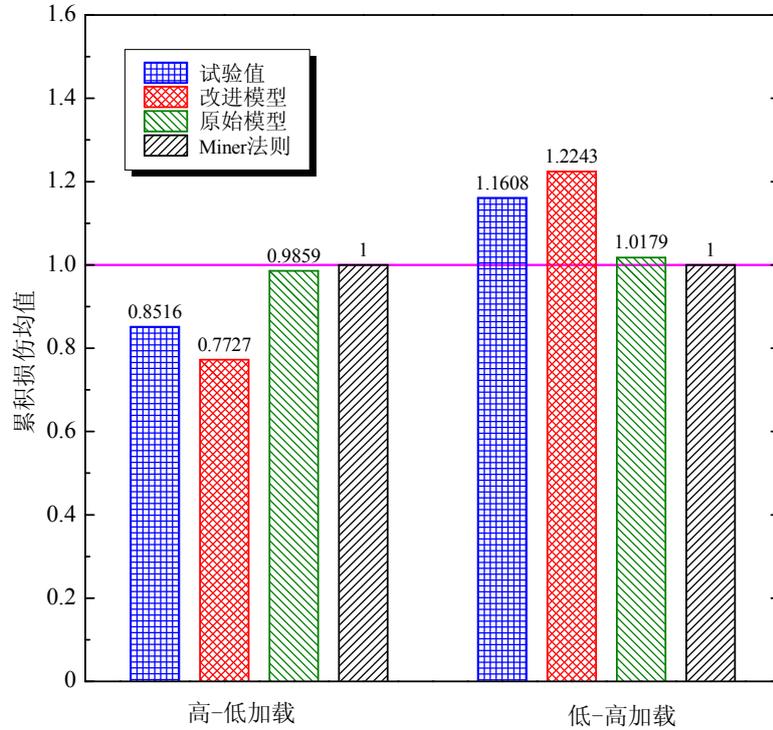


图 2-15 三种模型累积损伤均值与试验值比较（铝合金焊接接头）

根据图 2-8、2-9 和 2-14，在不同的加载顺序下，改进模型的预测能力明显优于原始模型和 Miner 法则。通过对比图 2-10、2-11、2-12 和 2-15 中三种模型累积损伤均值与试验值可知，在高-低加载下，改进模型和原始模型估算的累积损伤和均小于 1；在低-高加载下，其预测结果均大于 1。而对于 Miner 法则，无论载荷加载顺序如何，累积损伤总和均等于 1。同时，改进模型的预测结果与试验值最接近，原始模型次之，Miner 法则最差。在上述三种模型中，Miner 法则尽管形式简易，但载荷历程的影响因素未纳入考虑，从而导致较大的预测误差；原始模型由于考虑了载荷加载顺序效应，寿命预测能力得到了提升，但总体上预测结果稍优于 Miner 法则，这表明仅单一地考虑载荷作用顺序难以揭示疲劳损伤累积及其演化过程的复杂性；在原始模型的基础上，改进模型综合考虑了载荷顺序以及载荷间交互作用的影响，使寿命预测精度得到了明显提升。综上所述，本章提出的改进型剩余寿命预测模型是有效的、合理的。

2.5.2 多级加载下模型验证

为了进一步验证改进模型在多级载荷加载下的适用性，本节以文献[1]中 41Cr4 带横向孔试件的多级应力谱累积疲劳损伤（Cumulative Fatigue Damage, CFD）试验为例进行分析。41Cr4 材料强度高、淬透性好，主要用于制造各类调质零件，如齿轮、曲轴、套筒、轴承等耐磨性较高的结构件。试验材料的机械性能为：抗拉强度 $\sigma_u = 850\sim 900$ MPa，疲劳极限 $\sigma_e = 173.5$ MPa。试件的应力集中系数为 $K_t = 2.15$ ，加载方式为循环弯曲加载，应力比 $R = -1$ 。整个试验分为 CFD1 试验和 CFD2 试验，两组试验的加载条件和相关参数分别如表 2-6 和表 2-7 所示。

表 2-6 41Cr4 带横向孔试件多级应力谱疲劳试验数据（CFD1 试验）

应力级别	加载应力 σ_i /(MPa)	试验加载参数		
		n_i	N_{fi}	n_i/N_{fi}
1	505	4	9.00×10^3	0.0004
2	475	32	1.16×10^4	0.0028
3	423	560	2.10×10^4	0.0267
4	362	5,440	4.70×10^4	0.1157
5	287	40,000	1.55×10^5	0.2581
6	212	184,000	8.70×10^5	0.2115
7	137	560,000	∞	0
8	63	1,210,000	∞	0

表 2-7 41Cr4 带横向孔试件多级应力谱疲劳试验数据 (CFD2 试验)

应力级别	加载应力 σ_i /(MPa)	试验加载参数		
		n_i	N_{fi}	n_i/N_{fi}
1	350	44	5.60×10^4	0.0008
2	332	352	7.40×10^4	0.0048
3	298	6160	1.30×10^5	0.0474
4	254	59,840	2.80×10^5	0.2137
5	201	440,000	1.25×10^6	0.3520
6	149	2,024,000	∞	0
7	96	6,160,000	∞	0
8	44	13,310,000	∞	0

根据表 2-6 和表 2-7 中试验数据, 分别采用 Miner 法则、原始模型式(2-40)和改进模型式(2-46)进行剩余寿命估算。在不考虑疲劳极限以下小载荷损伤的情况下, CFD1 试验中第 7 级和第 8 级载荷以及 CFD2 试验中第 6、7、8 级载荷对损伤累积的贡献可以忽略不计, 在此选取 CFD1 试验中第 6 级载荷和 CFD2 试验中第 5 级载荷下的寿命分数作为预测值, 预测结果与试验值的比较如表 2-8 所示。

表 2-8 三种模型预测结果与试验值比较 (41Cr4 带横向孔试件)

试验类别	预测项目	试验值	模型预测值		
			Miner 法则	原始模型	改进模型
CFD1 试验	n_6 / N_{f6}	0.2115	0.5963	0.5348	0.3935
	$\sum(n_i / N_{fi})$	0.6152	1.0000	0.9385	0.7972
CFD2 试验	n_5 / N_{f5}	0.3520	0.7333	0.7028	0.6066
	$\sum(n_i / N_{fi})$	0.6187	1.0000	0.9695	0.8733

由于两组试验加载顺序均为高-低加载, 根据表 2-8, 改进模型和原始模型预测的累积损伤总和均小于 1, 体现了载荷顺序效应, 符合客观实际; 而 Miner 法则的预测结果为 1。相比 Miner 法则, 原始模型的预测能力稍有提升, 而改进模型的预测结果更接近于试验值。这是由于原始模型仅考虑了载荷顺序效应的影响, 改进模型在原始模型的基础上融合了载荷间的交互效应, 且该效应对寿命预测能力的提升影响较大。此外, 为了描述载荷交互作用对损伤累积的影响, 将三种模型的损伤演化规律作对比分析, 如图 2-16 和 2-17 所示。其中, 试验值的损伤演化曲线

是按 Miner 法则的累积损伤和计算得到。

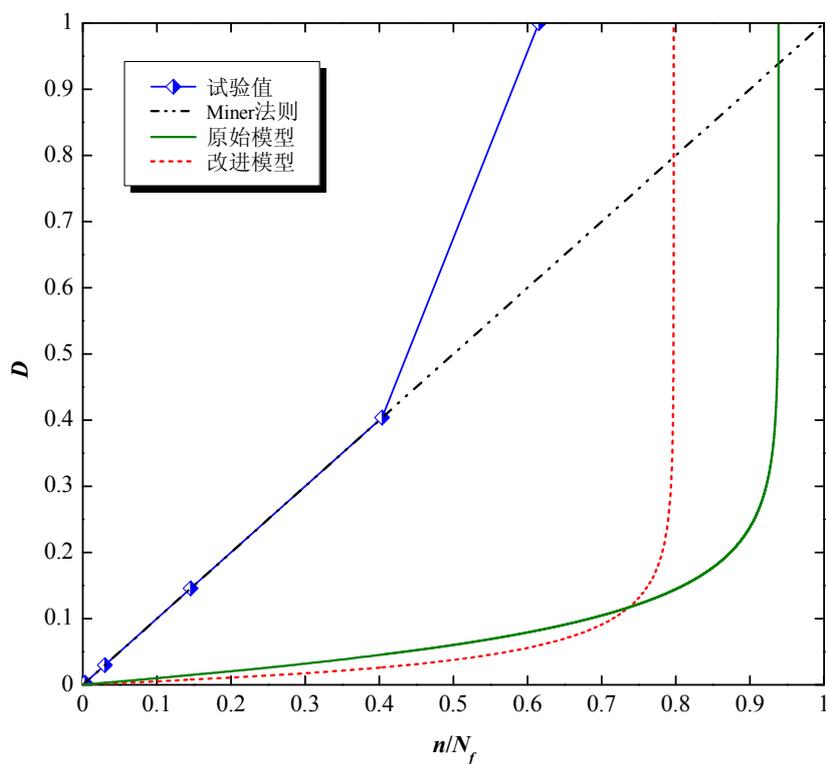


图 2-16 三种模型疲劳损伤演化规律比较 (CFD1 试验)

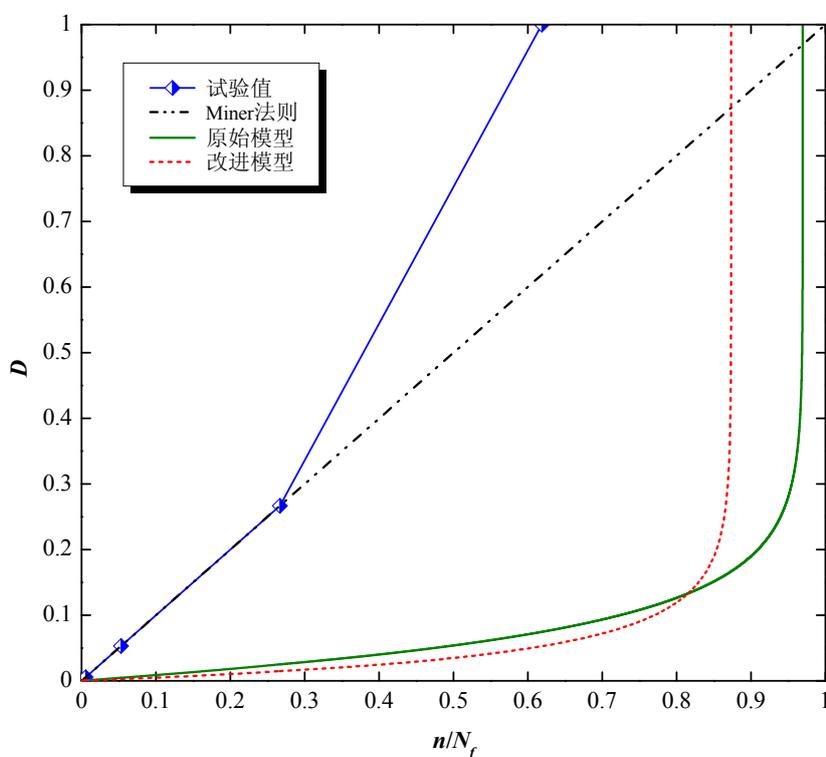


图 2-17 三种模型疲劳损伤演化规律比较 (CFD2 试验)

由图 2-16 和图 2-17 可知, 在多级载荷作用下, 由于 Miner 法则是线性损伤累积模型, 其损伤演化始终为一条直线。在整个寿命周期内, 改进模型和原始模型的损伤曲线均呈现出非线性增长的“凹形”趋势。这表明疲劳失效前期占据了整个寿命周期的绝大部分, 损伤累积量较少, 损伤演化速率较低; 而在失效后期, 损伤速率迅速上升, 直至最终断裂。上述现象与大多数金属材料的疲劳演化行为相吻合, 疲劳失效的前期和后期分别对应着裂纹萌生和裂纹扩展的两个阶段。与此同时, 改进模型保留了原始模型的损伤演化趋势, 并在其基础上进一步提高了寿命预测精度。在高-低加载顺序下, 由于载荷间交互作用的影响, 高载荷对后续的低载荷损伤演化有促进作用, 从而加快了疲劳失效进程, 使预测的寿命更短。因此, 本章提出的改进模型对载荷历程影响因素的考虑更加全面, 更符合失效过程的一般规律。

2.6 本章小结

针对变幅加载载荷历程效应的复杂性, 本章首先从 Miner 法则的缺陷着手, 系统地阐释了载荷加载顺序效应的作用机制, 即损伤与载荷水平的不可分离性是产生顺序效应的主要原因, 而与损伤的累积形式无关。其次, 根据疲劳失效的“二元判据”, 引入了疲劳损伤状态的概念表征材料的损伤程度。针对传统损伤等效方法存在的缺陷, 提出了考虑载荷相互作用效应的疲劳损伤等效法则。然后, 将该法则应用到材料韧性耗散损伤模型中, 推导得出改进型剩余寿命预测模型。该模型综合考虑了载荷加载顺序和载荷交互作用对疲劳寿命的影响。最后, 通过多组疲劳试验算例, 验证了改进模型的有效性和准确性。在多级加载算例中, 改进模型在原始模型的基础上进一步提高了寿命预测精度, 同时其损伤演化也体现了损伤增长的一般规律, 更符合疲劳失效的物理本质。

第三章 基于疲劳驱动能损伤参数的非线性损伤累积与寿命预测

3.1 引言

结构疲劳研究的主要目的是为了准确地预测结构的在役使用寿命，即定寿。疲劳寿命预测应当以失效或破坏理论为基础，损伤作为描述疲劳失效的重要参量，是寿命预测理论的核心内容，一直备受学术界和工程界所关注。

结构或材料内部产生了损伤意味着其使用价值的减少或失去完整性，如微观裂纹或微孔隙的萌生与扩展、物理性能退化等^[104]。根据连续损伤力学理论，疲劳损伤是材料在循环载荷作用下其内部组织结构不可逆演化的宏观连续变量。由于疲劳损伤在物理形式上的多样性，这给寿命预测分析造成了一定的困难。按照损伤力学的观点，损伤变量是描述材料劣化程度的状态参量，损伤的不可逆演化会直接影响材料的微观组织结构或宏观物理性能，因此，损伤变量的定义有微观和宏观两种途径。在微观上，疲劳损伤可描述为裂纹数目或长度、微孔洞的面积或体积、显微硬度、声发射量等。在宏观上，疲劳损伤表现为材料的力学性能退化，包括机械性能和物理性能^[159]。其中，描述机械性能退化的状态变量有杨氏模量、静态韧性、剩余刚度、剩余强度、抗拉强度、材料延性、断面收缩率、屈服极限等；与物理性能退化相关的状态变量有电阻、电势、电磁特性、阻尼系数、熵等。任何一个损伤累积理论都是以损伤变量的定义为基础的，损伤变量的选取直接关系到物理模型的合理性。尽管损伤变量有多种度量方法，但从工程应用的角度，损伤变量应尽量选择那些在损伤发展中力学性能变化较为敏感的状态参量，且便于识别和试验测定，同时应具有明确的物理内涵^[145]。

从热力学的观点考虑，疲劳损伤是一种内部状态参量，它所反映的是物质结构内部能量耗散的不可逆退化过程。在根本上，材料的宏观力学性能退化是其所承载的应力或应变的动态响应，这种响应最终将演变为材料内部能量的不断耗竭。近年来，应变能密度参数在疲劳损伤和寿命预测中得到了广泛应用^[198, 267-268]，这种基于能量准则的分析理论能够揭示疲劳破坏的物理本质。为此，本章以现有失效力学模型^[124]（疲劳驱动力模型）为基础，运用能量准则，构建一种新的疲劳损伤定量方法，为现阶段结构疲劳分析与剩余寿命预测提供有效途径。

3.2 疲劳驱动力模型及其缺陷

在现行抗疲劳设计方法中，S-N 曲线是名义应力法中有限寿命设计和无限寿命

设计的重要依据。在有限寿命设计中，S-N 曲线常用 Basquin 公式描述，应力与疲劳寿命之间的关系还可以写成以下形式：

$$\sigma N_f^{-b} = A \quad (3-1)$$

式中， A 为疲劳强度常数，是材料的固有属性； b 为材料常数。

疲劳损伤的累积是外部载荷持续作用的结果。由于疲劳寿命的量纲为 1，则式 (3-1) 的左边可以看作是一种外部驱动载荷，它是引起失效的外因；当材料在应力水平 σ 下经历 N_f 次循环后，驱动载荷将达到其疲劳强度，进而发生破坏，则 A 是引起失效的内因。式 (3-1) 还可以看作是材料发生失效时所对应的一种临界状态。据此，Kwofie 和 Rahbar^[124] 指出：尽管外加载荷是恒定的，但瞬时驱动载荷是随疲劳加载不断变化的，它是造成损伤累积的主要诱因，并将其定义为疲劳驱动力，其表达式为：

$$\sigma_D = \sigma N_f^{-b \frac{n}{N_f}} \quad (3-2)$$

式 (3-2) 中， σ_D 是关于 n/N_f 的非线性递增函数。在初始状态下， $n/N_f = 0$ ， $\sigma_D = \sigma$ ；在临界状态下， $n/N_f = 1$ ， $\sigma_D = A$ 。以两级循环加载为例，不同应力水平下疲劳驱动力的增长规律如图 3-1 所示。

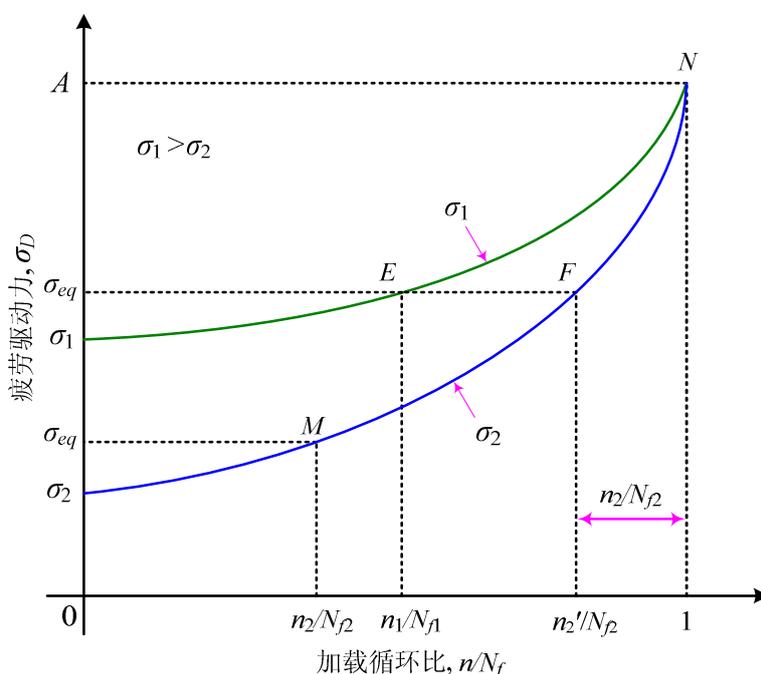


图 3-1 不同应力水平下疲劳驱动力增长规律

根据图 3-1，在高-低加载顺序下，构件首先在 σ_1 下加载 n_1 次循环，疲劳驱动

力到达 E 点，则有：

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 N_{f1}^{-\frac{b}{n_1}} \quad (3-3)$$

式中， σ_{eq} 为等效驱动力。

按照驱动力等效原理，将 σ_{eq} 在应力水平 σ_2 下进行等效折算，则有：

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 N_{f1}^{-\frac{b}{n_1}} = \sigma_2 N_{f2}^{-\frac{b}{n_2'}} \quad (3-4)$$

此后，构件在 σ_2 下继续作用，疲劳驱动力将在 σ_{eq} 的基础上沿路径 FN 逐渐增长，直至达到临界驱动力 σ_{D_c} ，有：

$$\sigma_{D_c} = \sigma_2 N_{f2}^{-b \left(\frac{n_2'}{N_{f2}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \right)} = \sigma_1 N_{f1}^{-\frac{b}{n_1}} N_{f2}^{-\frac{b}{n_2}} = A \quad (3-5)$$

由式(3-1)，将疲劳强度 $A = \sigma_1 N_{f1}^{-b}$ 代入式(3-5)，可得剩余寿命分数为：

$$\frac{n_2}{N_{f2}} = \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}} \right) \frac{\ln N_{f1}}{\ln N_{f2}} \quad (3-6)$$

在低-高加载顺序下，其推导结果与式(3-6)相同。由此，在高-低加载下，累积损伤 $\sum n_i / N_{fi} < 1$ ；在低-高加载下，累积损伤 $\sum n_i / N_{fi} > 1$ 。这表明式(3-6)所示的剩余寿命模型对载荷加载顺序效应给出了合理解释，同时该模型的未知参数较少，形式简单便于计算，具有一定的工程实用价值。

然而，特别地，考虑一种低-高加载情况：若假定构件在低载荷下的加载循环比足够小，使其产生的驱动力小于高载荷下的初始驱动力（ $\sigma_{eq} < \sigma_1$ ，见图 3-1），则 σ_{eq} 是无效的，即高、低载荷间不存在等效的疲劳驱动力。此外，式(3-6)是在驱动力等效的基础上所推导的，从损伤累积的角度分析，驱动力等效也并不等同于累积损伤等效。因此，在某种意义上，按式(3-6)进行寿命估算是合理的。

3.3 基于疲劳驱动能损伤参数的非线性损伤累积模型

3.3.1 疲劳驱动能损伤参数

从能量的角度来看，疲劳损伤的累积是材料或结构内部能量不断耗散的过程，能量法则能够揭示疲劳破坏的物理本质，是一种基于失效物理的描述方法。应变能密度参数是描述疲劳失效过程的重要参量，常用于疲劳损伤分析和寿命估算。在弹性区域内，应变能密度^[198, 267]可用下式描述：

$$W = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon \quad (3-7)$$

在时域上, 式(3-7)可写为:

$$\begin{aligned}
 W(t) &= \frac{1}{2} \sigma(t) \varepsilon(t) \\
 &= \frac{1}{4} \sigma(t) \varepsilon(t) \operatorname{sgn}[\sigma(t)] + \frac{1}{4} \sigma(t) \varepsilon(t) \operatorname{sgn}[\varepsilon(t)] \\
 &= \frac{1}{2} \sigma(t) \varepsilon(t) \frac{\operatorname{sgn}[\sigma(t)] + \operatorname{sgn}[\varepsilon(t)]}{2} \\
 &= \frac{1}{2} \sigma(t) \varepsilon(t) \operatorname{sgn}[\sigma(t), \varepsilon(t)]
 \end{aligned} \tag{3-8}$$

在不考虑平均应力的情况下, 由式(3-8)可得应变能密度的幅值:

$$W_a = \frac{1}{2} \sigma_a \varepsilon_a \tag{3-9}$$

结合 Basquin 公式和 Manson-Coffin 方程, 得到总应变能与疲劳寿命之间的关系表达式:

$$W_a = \frac{1}{2} \left[\frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b'} + \sigma'_f \varepsilon'_f (2N_f)^{2b'+c'} \right] \tag{3-10}$$

通常, S-N 曲线主要用于高周疲劳分析与寿命预测。在高周疲劳机制下, 疲劳损伤和载荷历程由循环应力控制, 弹性应变起主导作用, 循环塑性应变很小可以忽略不计, 则式(3-10)可简化为:

$$W_a = \frac{1}{2} \left[\frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b'} \right] = \frac{1}{2E} \sigma_a^2 \tag{3-11}$$

将疲劳驱动力式(3-2)代入式(3-11), 可得疲劳驱动能损伤参数模型:

$$W_{D_n} = \frac{1}{2E} \sigma^2 N_f^{-2b \frac{n}{N_f}} \tag{3-12}$$

在初始状态下, $n/N_f = 0$, 则:

$$W_{D_0} = \frac{1}{2E} \sigma^2 \tag{3-13}$$

式中, W_{D_0} 称为初始疲劳驱动能, 它与外加载荷有关, 是引起损伤的初始外部能量, 属于失效外因。

在临界状态下, $n/N_f = 1$, 有:

$$W_{D_c} = \frac{1}{2E} \sigma^2 N_f^{-2b} = \frac{1}{2E} A^2 \quad (3-14)$$

式中, W_{D_c} 称为临界疲劳驱动能, 它是一个与疲劳强度有关的常量, 可以描述为材料内部存储的固有能量或导致失效的门槛值, 属于失效内因。

疲劳驱动能 W_{D_n} 是一个中间状态量, 整个失效过程可描述为: 在循环载荷作用下, 初始驱动能会不断累积, 在经历中间态的过渡后最终将达到一个临界阈值, 此时维系物质结构内部的能量平衡状态将被打破, 进而发生失效。

3.3.2 疲劳驱动能损伤变量与剩余寿命预测模型

在疲劳研究中, 损伤变量常用于描述疲劳的发展状态及其演化规律, 它是构筑疲劳损伤累积理论的基础。一个合理的损伤变量既要能正确反映失效过程的物理规律, 又需要便于试验测量和工程应用。

根据损伤变量定义的一般概念, 任何一种随载荷作用呈单调递增或递减趋势的状态参量都可用于损伤度量。从损伤累积和能量耗散的角度出发, 结合疲劳驱动能随载荷作用的变化规律, 本章采用驱动能的增量来描述损伤, 将其定义为:

$$D = \frac{\Delta W_{D_n, D_0}}{\Delta W_{D_c, D_0}} = \frac{W_{D_n} - W_{D_0}}{W_{D_c} - W_{D_0}} = \frac{N_f^{-2b \frac{n}{N_f}} - 1}{N_f^{-2b} - 1} \quad (3-15)$$

式中, $\Delta W_{D_n, D_0}$ 表示材料在经历 n 次循环加载后所累积耗散的应变能; $\Delta W_{D_c, D_0}$ 表示材料在失效状态下所累积耗散的总应变能。

式(3-15)即为疲劳驱动能损伤变量, 其中, $\Delta W_{D_n, D_0}$ 和 $\Delta W_{D_c, D_0}$ 可根据材料的杨氏模量和应力-寿命公式确定, 便于试验测量, 且物理意义明确。在初始状态下, $n/N_f = 0$, $W_{D_n} = W_{D_0}$, 则 $D = 0$; 在一定的损伤状态下, $0 < n/N_f < 1$, $W_{D_n} < W_{D_c}$, 有 $0 < D < 1$; 在临界状态下, $n/N_f = 1$, $W_{D_n} = W_{D_c}$, 则 $D = 1$ 。该模型满足损伤变量定义的边界条件, 且模型形式简便、未知参数较少, 主要是疲劳寿命 N_f 和材料常数 b , 它们可通过应力-寿命公式计算确定。

此外, D 是关于 n/N_f 的非线性函数, 因此, 式(3-15)是一个非线性损伤累积模型, 其损伤演化方程为:

$$\frac{dD}{dn} = \frac{-2b N_f^{-2b \frac{n}{N_f}}}{N_f (N_f^{-2b} - 1)} \ln N_f = \frac{-2b \ln N_f}{N_f} \left(D + \frac{1}{N_f^{-2b} - 1} \right) \quad (3-16)$$

将式(3-1)代入式(3-16), 整理后可得:

$$\frac{dD}{dn} = 2(\ln A - \ln \sigma) \left(\frac{A}{\sigma} \right)^{\frac{1}{b}} \left(D + \frac{\sigma^2}{A^2 - \sigma^2} \right) \quad (3-17)$$

上述损伤演化方程是关于载荷和损伤的不可分离函数，因此，式(3-17)能够考虑载荷加载顺序效应。

在两级循环加载下，根据损伤等效原理，可得剩余寿命预测模型：

$$\left(\frac{n_2}{N_{f2}} \right)_{pp} = 1 - \frac{1}{-2b \ln N_{f2}} \ln \left(\frac{(N_{f2}^{-2b} - 1) \left(N_{f1}^{-2b \frac{n_1}{N_{f1}}} - 1 \right)}{N_{f1}^{-2b} - 1} + 1 \right) \quad (3-18)$$

式中，下标 pp 表示所提模型的预测结果。

根据式(3-15)，若假定 $N_f^{-2b} \gg 1$ ，则损伤变量可简化为：

$$D \approx \left(\frac{1}{N_f} \right)^{-2b \left(1 - \frac{n}{N_f} \right)} \quad (3-19)$$

同样，利用损伤等效原理，可得：

$$\frac{n_2}{N_{f2}} = \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}} \right) \frac{\ln N_{f1}}{\ln N_{f2}} \quad (3-20)$$

式(3-20)与式(3-6)的结果一致，这表明疲劳驱动力模型是本章所提出的驱动力损伤模型的一个特例，所提模型更具有一般性，从而实现了模型由特殊向一般的形式转变。

在三级循环加载下，结合式(3-18)，通过迭代计算，推导得出构件在第三级载荷下的剩余寿命分数：

$$\left(\frac{n_3}{N_{f3}} \right)_{pp} = 1 - \frac{1}{-2b \ln N_{f3}} \ln \left(\frac{(N_{f3}^{-2b} - 1) \left(N_{f2}^{-2b \left[\frac{n_2}{N_{f2}} + 1 - \left(\frac{n_2}{N_{f2}} \right)_{pp} \right]} - 1 \right)}{N_{f2}^{-2b} - 1} + 1 \right) \quad (3-21)$$

同理，在多级载荷作用下，有：

$$\left(\frac{n_i}{N_{fi}} \right)_{pp} = 1 - \frac{1}{-2b \ln N_{fi}} \ln \left(\frac{\left(N_{fi}^{-2b} - 1 \right) \left(N_{f(i-1)}^{-2b} \left[\frac{-2b \left[\frac{n_{i-1}}{N_{f(i-1)}} + 1 - \left(\frac{n_{i-1}}{N_{f(i-1)}} \right)_{pp} \right] - 1}{N_{f(i-1)}^{-2b} - 1} \right) + 1}{N_{f(i-1)}^{-2b} - 1} \right) \right) \quad (3-22)$$

式(3-22)即为基于疲劳驱动能损伤参数的剩余寿命预测模型的一般式，模型涉及的未知参数较少，主要包含加载历程中载荷的疲劳寿命以及材料常数 b ，它们可由S-N曲线确定。

3.4 模型改进与典型非线性行为分析

在第二章已述及载荷交互效应对损伤累积和寿命预测的重要性，为了有效评估复杂载荷下结构件的剩余寿命，本节运用2.3节考虑载荷相互作用效应的疲劳损伤等效法则对所提寿命预测模型进行修正。

在两级加载下，将式(3-13)代入式(2-28)，得到改进的剩余寿命预测模型：

$$\left(\frac{n_2}{N_{f2}} \right)_{mp} = 1 - \frac{1}{-2b \ln N_{f2}} \ln \left(\left(N_{f2}^{-2b} - 1 \right) \left(\frac{N_{f1}^{-2b} \left(\frac{-2b \frac{n_1}{N_{f1}} - 1}{N_{f1}^{-2b} - 1} \right)^{\frac{\sigma_2}{\sigma_1}} + 1}{N_{f1}^{-2b} - 1} \right) \right) \quad (3-23)$$

在三级加载下，结合式(3-13)和式(2-29)，利用式(3-23)的预测结果，通过迭代计算，可得剩余寿命分数为：

$$\left(\frac{n_3}{N_{f3}} \right)_{mp} = 1 - \frac{1}{-2b \ln N_{f3}} \ln \left(\left(N_{f3}^{-2b} - 1 \right) \left(\frac{N_{f2}^{-2b} \left[\frac{-2b \left[\frac{n_2}{N_{f2}} + 1 - \left(\frac{n_2}{N_{f2}} \right)_{mp} \right] - 1}{N_{f2}^{-2b} - 1} \right]^{\frac{\sigma_1 \times \sigma_3}{\sigma_2 \times \sigma_2}} + 1 \right) \right) \quad (3-24)$$

以此类推，在多级加载下，有：

$$\left(\frac{n_i}{N_{fi}} \right)_{mp} = 1 - \frac{1}{-2b \ln N_{fi}} \ln \left(\left(N_{fi}^{-2b} - 1 \right) \left(\frac{N_{f(i-1)}^{-2b} \left[\frac{-2b \left[\frac{n_{i-1}}{N_{f(i-1)}} + 1 - \left(\frac{n_{i-1}}{N_{f(i-1)}} \right)_{mp} \right] - 1}{N_{f(i-1)}^{-2b} - 1} \right]^{\frac{\sigma_{i-2} \times \sigma_i}{\sigma_{i-1} \times \sigma_{i-1}}} + 1 \right) \right) \quad (3-25)$$

式(3-25)即为改进型剩余寿命预测模型的一般式，模型参数包含外加载荷、疲劳寿命以及材料常数 b ，可根据应力-寿命公式确定。对比式(3-25)和式(3-22)，改进模型在所提模型的基础上引入了交互因子 $\sigma_{i-2}\sigma_i / \sigma_{i-1}^2$ 来表征载荷间的相互作用效应，对载荷历程信息的把握更为全面，其物理意义更加明确。

一般来说，非线性损伤模型在形式上都具有某些典型的非线性特性。为了进一步揭示模型的物理内涵，针对本章提出的疲劳驱动能损伤模型，以两级循环加载为例研究模型的非线性特征行为。选取三组疲劳载荷进行试验设计，相应的疲劳寿命分别为 $N_f = 1.0 \times 10^5$ 、 $N_f = 5.0 \times 10^5$ 、 $N_f = 1.0 \times 10^6$ ，规定第一级载荷加载的寿命分数为初始寿命分数 n_1 / N_{f1} ，第二级载荷下的寿命分数为剩余寿命分数 n_2 / N_{f2} 。按照载荷作用的先后顺序，可设计6种加载模式，每种加载模式均采用疲劳寿命的比值 N_{f1} / N_{f2} 描述。为了反映模型的预测能力，将Miner法则、所提模型和改进模型的剩余寿命分数进行比较，并选取10组典型的 b 值以研究其对剩余寿命的影响，如表3-1所示。根据以上组合，以初始寿命分数为横坐标、剩余寿命分数为纵坐标绘图，得到不同加载模式下三种模型的预测曲线，如图3-2至图3-11所示。

表 3-1 不同加载模式下模型非线性行为分析试验设计

编号	模型	剩余寿命分数						b 取值
		高-低加载			低-高加载			
		模式 1	模式 2	模式 3	模式 4	模式 5	模式 6	
		0.2	0.5	0.1	5	2	10	
1	Miner 法则	$\frac{n_2}{N_{f2}} = 1 - \frac{n_1}{N_{f1}}$						-0.05 -0.15 -0.25
2	所提模型	$\frac{n_2}{N_{f2}} = 1 - \frac{1}{-2b \ln N_{f2}} \ln \left[\frac{(N_{f2}^{-2b} - 1) \left(\frac{N_{f1}^{-2b}}{N_{f1} - 1} \right)}{N_{f1}^{-2b} - 1} + 1 \right]$						-0.35 -0.45 -0.55 -0.65
3	改进模型	$\frac{n_2}{N_{f2}} = 1 - \frac{1}{-2b \ln N_{f2}} \ln \left[(N_{f2}^{-2b} - 1) \left(\frac{N_{f1}^{-2b}}{N_{f1} - 1} \right)^{\left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^{-b}} + 1 \right]$						-0.75 -0.85 -0.95

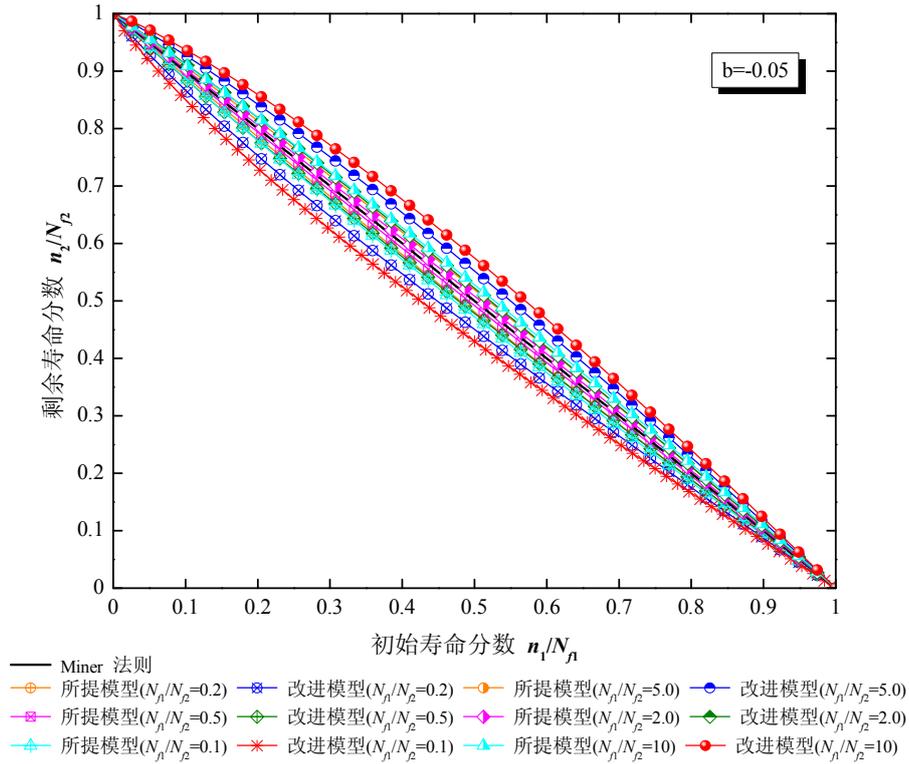


图 3-2 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 ($b = -0.05$)

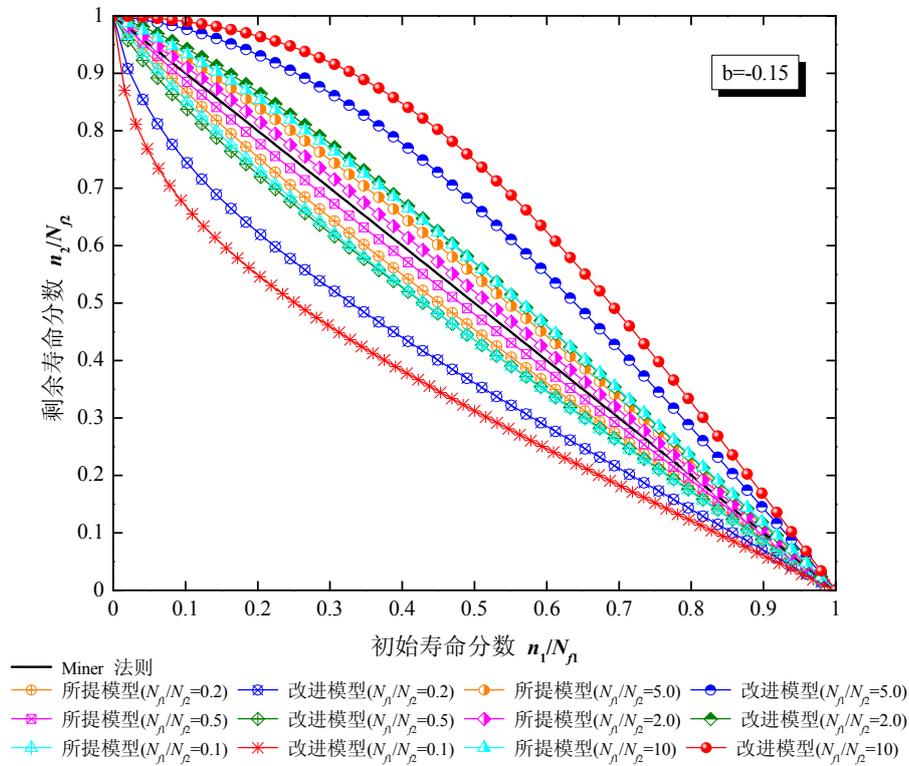


图 3-3 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 ($b = -0.15$)

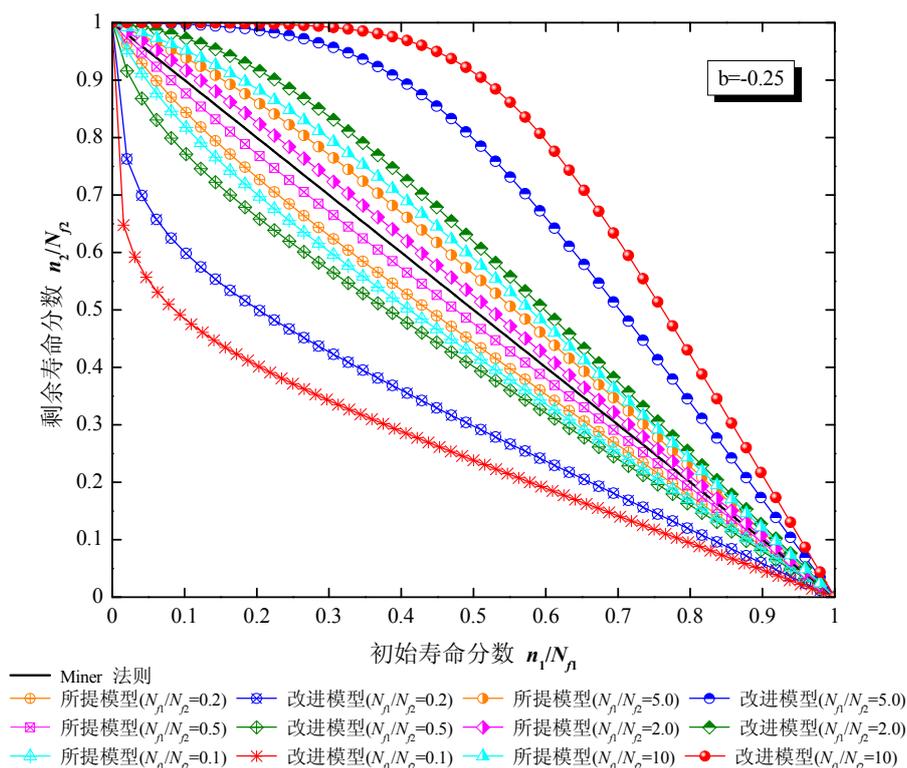


图 3-4 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 ($b = -0.25$)

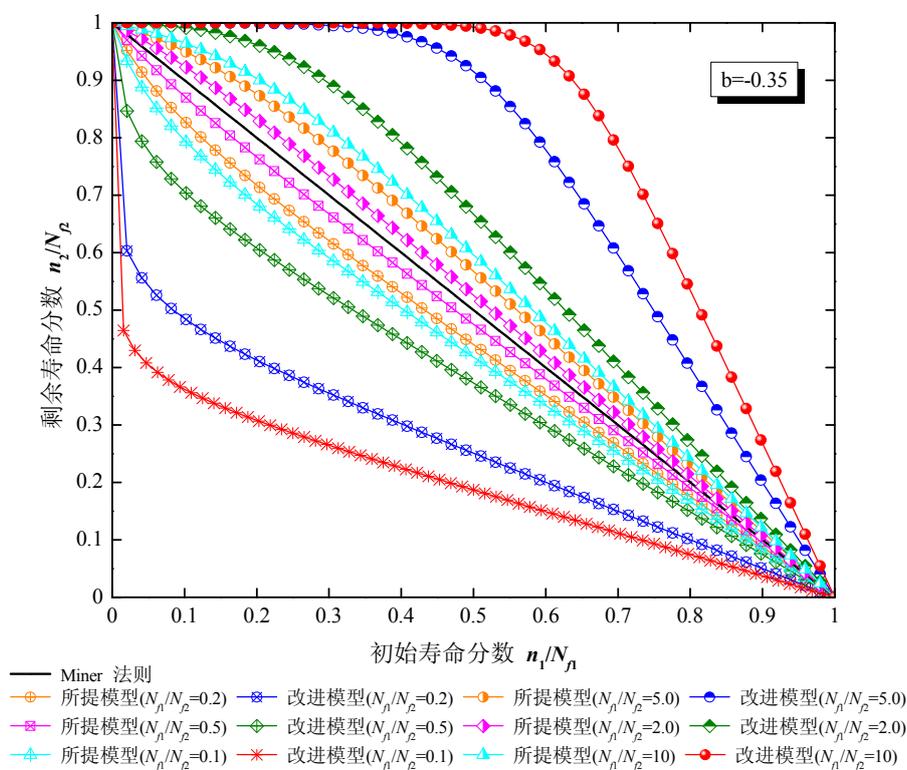


图 3-5 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 ($b = -0.35$)

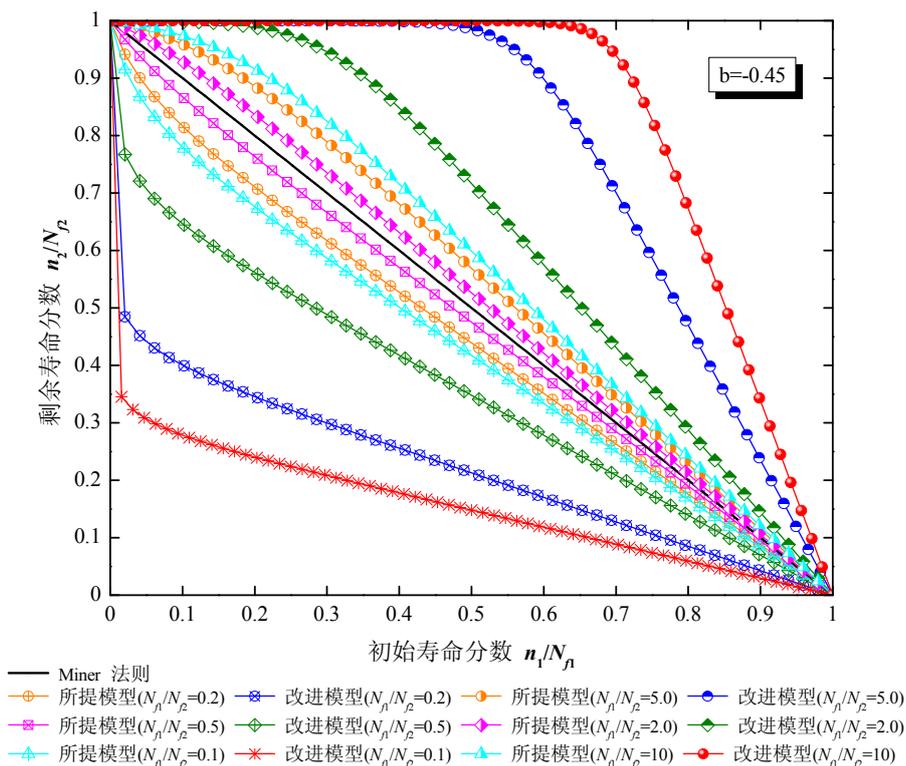


图 3-6 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 ($b = -0.45$)

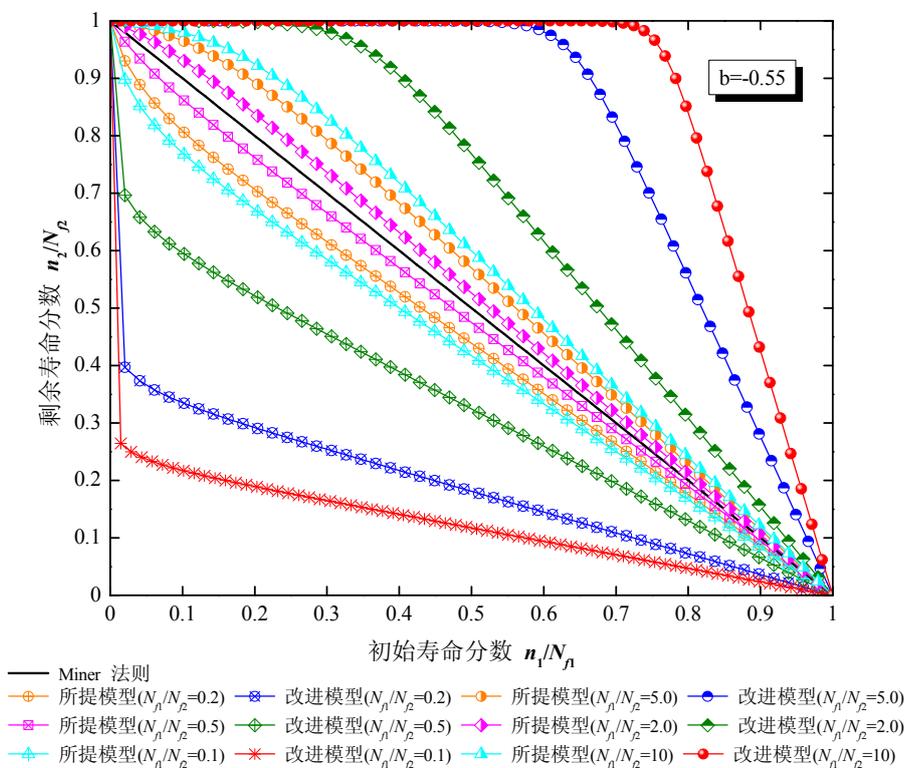


图 3-7 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 ($b = -0.55$)

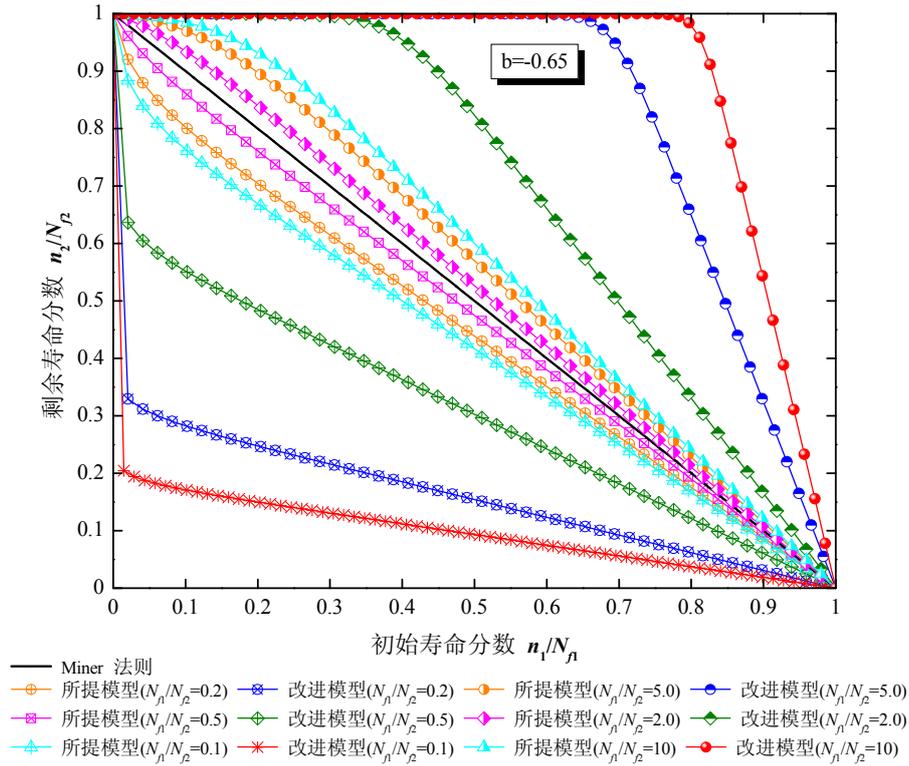


图 3-8 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 ($b = -0.65$)

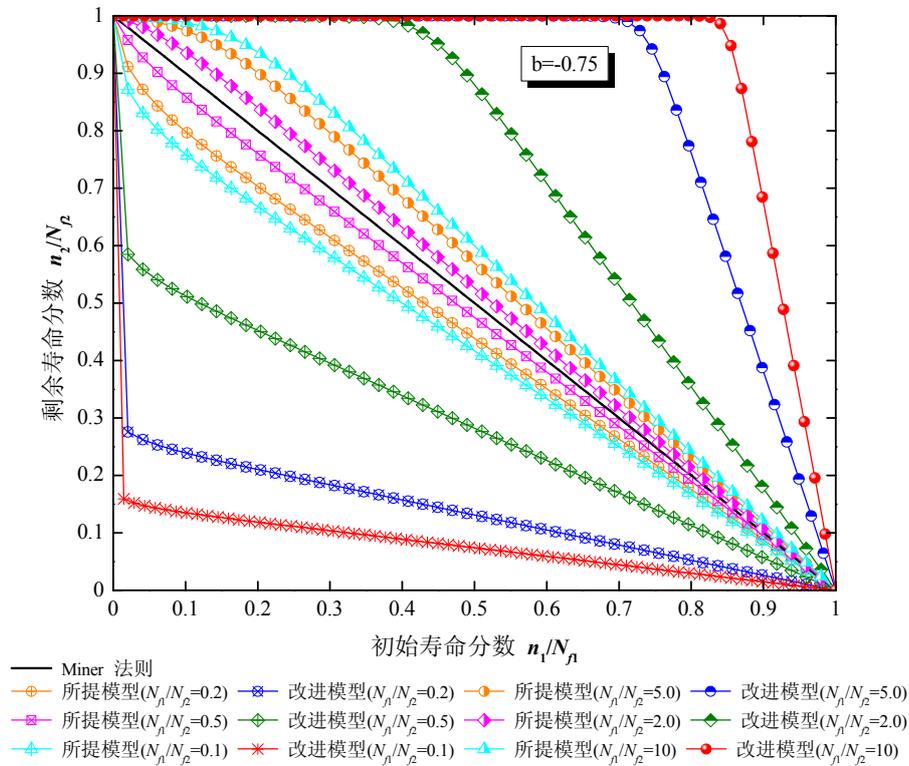


图 3-9 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 ($b = -0.75$)

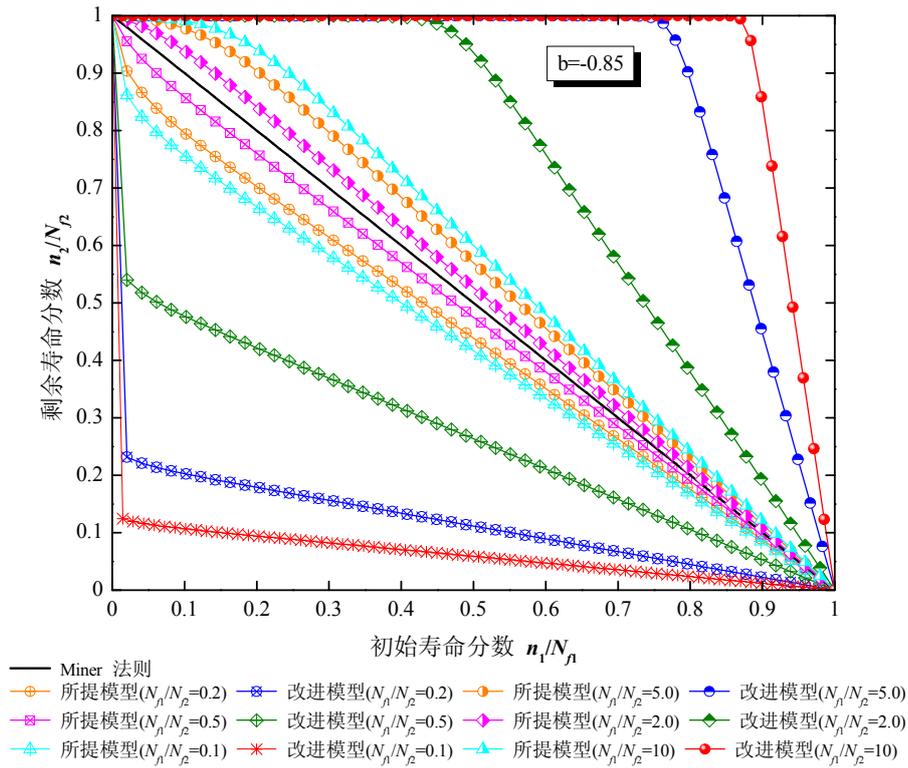


图 3-10 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 ($b = -0.85$)

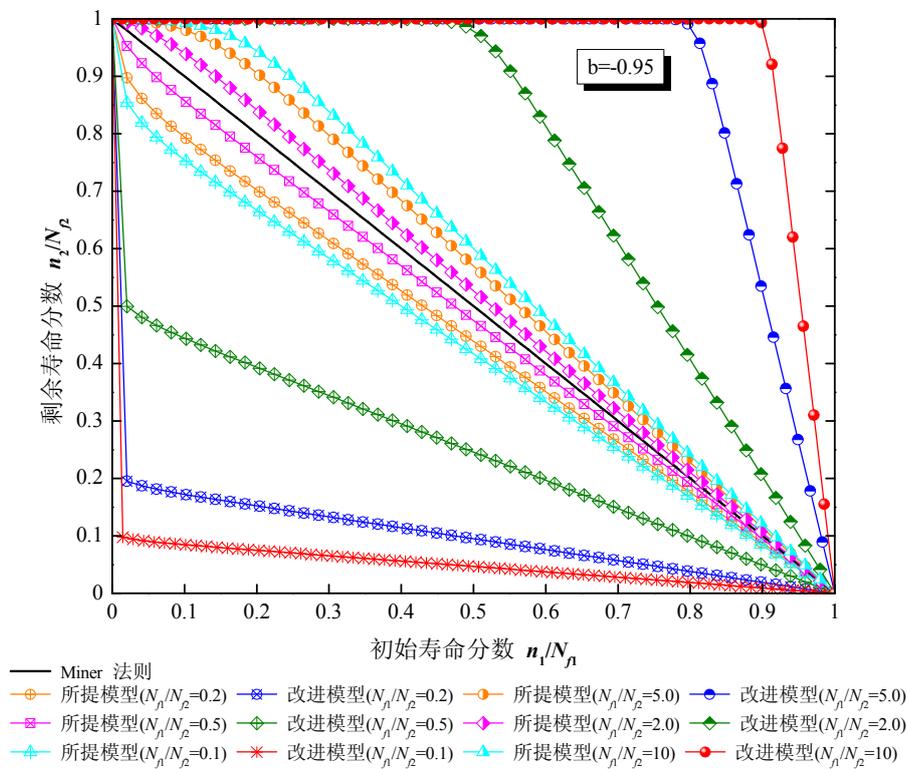


图 3-11 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 ($b = -0.95$)

根据以上结果，总结得出模型的典型非线性特征，具体描述如下：

(1) 所提模型和改进模型的预测曲线在不同加载顺序下均呈现出不同的演化规律，而 Miner 法则的预测结果始终为一条直线，与载荷加载顺序无关。这是因为 Miner 法则是一个线性损伤模型，而本章提出的模型属于非线性模型，载荷与损伤之间具有不可分离性，能对载荷顺序效应给出合理阐释。

(2) 所提模型和改进模型在高-低和低-高加载下的预测曲线分别位于 Miner 法则预测曲线的两侧，且关于该曲线成轴对称。

(3) 当 b 取值非常接近于 0 时，所提模型和改进模型将退化为 Miner 法则；随着 b 值不断减小，两种模型的预测曲线将逐渐偏离对称轴并向外扩张，相对于所提模型，改进模型对 b 值的变化更敏感。另一方面，当 b 取值一定时，载荷水平间的差异越大，两种模型的预测曲线距离对称轴的偏差就越大。同时，对于同组载荷水平，改进模型比所提模型的偏离程度更大，这是由于改进模型在原模型的基础上进一步将载荷交互作用纳入考虑的结果。

(4) 无论加载顺序以及 b 的取值如何变化，所有模型的预测曲线均落在(0,0)至(1,1)范围之内，即横、纵坐标轴是构成这些预测曲线的边界带。

3.5 算例分析

3.5.1 两级加载下模型验证

为了验证本章提出的疲劳驱动能损伤模型的可行性和有效性，本节以两级疲劳试验为例进行分析。试验对象分别是球磨铸铁 GS61、钛合金 Ti-6Al-4V、铝合金 Al-2024-T42 以及动车铝合金车体焊接接头。其中，球墨铸铁 GS61 是一种高强度、高塑性和高韧性的铸铁材料，在经过球化和孕育加工后，铸铁的机械性能得到了大幅提升，主要用于制造各种承力复杂的零部件，如汽车、内燃机等的凸轮轴或曲轴；Ti-6Al-4V 是首次研制成功并投入使用的钛合金材料，它具有优良的抗热性、耐腐蚀性、强度、韧性以及生物相容性，主要用于制造航空发动机的压气机构件、导弹或火箭的结构件等。

文献[196]给出了球墨铸铁 GS61 两级疲劳加载试验数据，加载方式分平面弯曲加载和扭转加载，试验参数见表 3-2。文献[269]以钛合金 Ti-6Al-4V 试件进行了两级疲劳试验，试验材料的机械性能为：杨氏模量 $E = 126 \text{ GPa}$ ，屈服强度 $\sigma_y = 930 \text{ MPa}$ ，抗拉强度 $\sigma_u = 978 \text{ MPa}$ ；试验加载参数详见表 3-3。铝合金 Al-2024-T42 和动车铝合金车体焊接接头试验数据分别来源于文献[263]和文献[265]，试验加载参数见表 2-2 和表 2-5。

表 3-2 球墨铸铁 GS61 两级加载下疲劳试验数据

加载方式	加载顺序	加载应力	试验编号	试验数据实测值			
				n_1	n_1/N_{f1}	n_2	n_2/N_{f2}
平面弯曲 加载	低-高加载	$\sigma_1=320$ MPa $\sigma_2=352$ MPa	1	110,000	0.341	82,830	0.734
		$\sigma_1=303$ MPa $\sigma_2=352$ MPa	2	160,000	0.272	116,650	1.030
	高-低加载	$\sigma_1=352$ MPa $\sigma_2=320$ MPa	3	50,000	0.443	130,510	0.405
		$\sigma_1=352$ MPa $\sigma_2=303$ MPa	4	50,000	0.443	205,040	0.349
扭转加载	低-高加载	$\sigma_1=233$ MPa $\sigma_2=249$ MPa	5	160,000	0.535	46,310	0.386
	高-低加载	$\sigma_1=249$ MPa $\sigma_2=233$ MPa	6	50,000	0.417	154,270	0.516

表 3-3 钛合金 Ti-6Al-4V 两级加载下疲劳试验数据

加载应力	加载顺序	试验编号	试验数据实测值			
			n_1	n_1/N_{f1}	n_2	n_2/N_{f2}
$\sigma_1=217$ MPa $\sigma_2=121$ MPa	高-低加载	1	16,500	0.199	202,145	0.543
		2	20,740	0.250	94,951	0.255
		3	20,740	0.250	82,900	0.223
		4	33,210	0.400	107,566	0.289
		5	47,300	0.570	126,142	0.339
		6	62,000	0.747	46,440	0.125
$\sigma_1=121$ MPa $\sigma_2=217$ MPa	低-高加载	7	93,000	0.250	77,646	0.936
		8	186,000	0.500	52,863	0.637
		9	279,000	0.750	50,745	0.612
		10	298,000	0.801	32,000	0.386

根据表 3-2、3-3、2-2、2-5 中试验数据，分别采用 Miner 法则、所提模型式(3-18)和改进模型式(3-23)进行剩余寿命预测，预测结果如图 3-12 至图 3-15 所示。为了研究载荷加载顺序对疲劳损伤的影响，对累积损伤进行统计分析，得到 4 种试样在不同加载顺序下的累积损伤均值，并与试验值作比较，如图 3-16 至图 3-19 所示。此外，对模型的非线性行为进行研究，预测曲线如图 3-20 至图 3-25 所示。

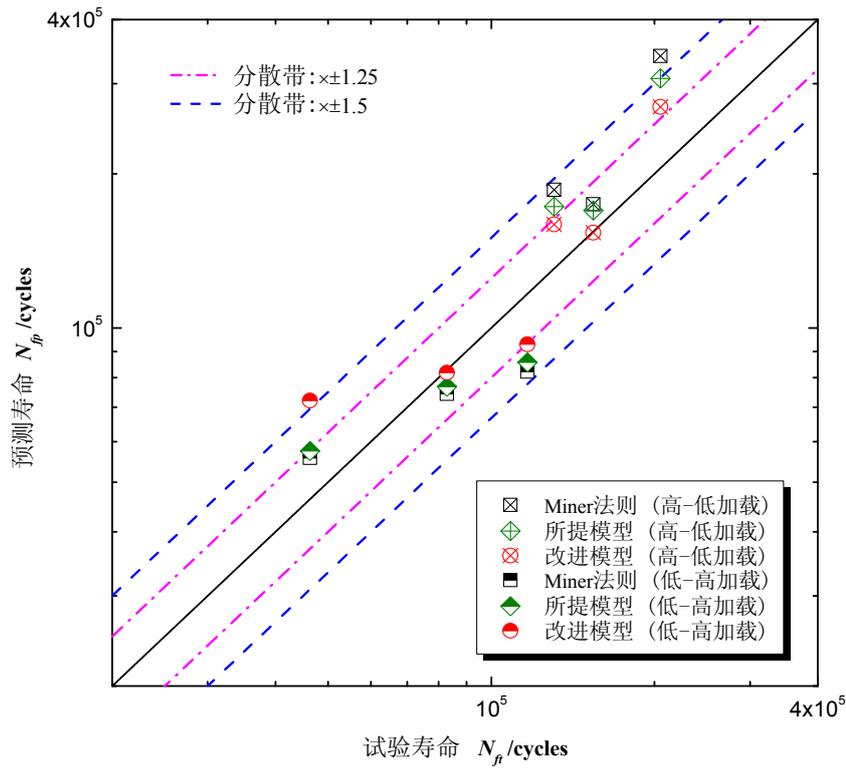


图 3-12 三种模型预测结果与试验值比较（球墨铸铁 GS61）

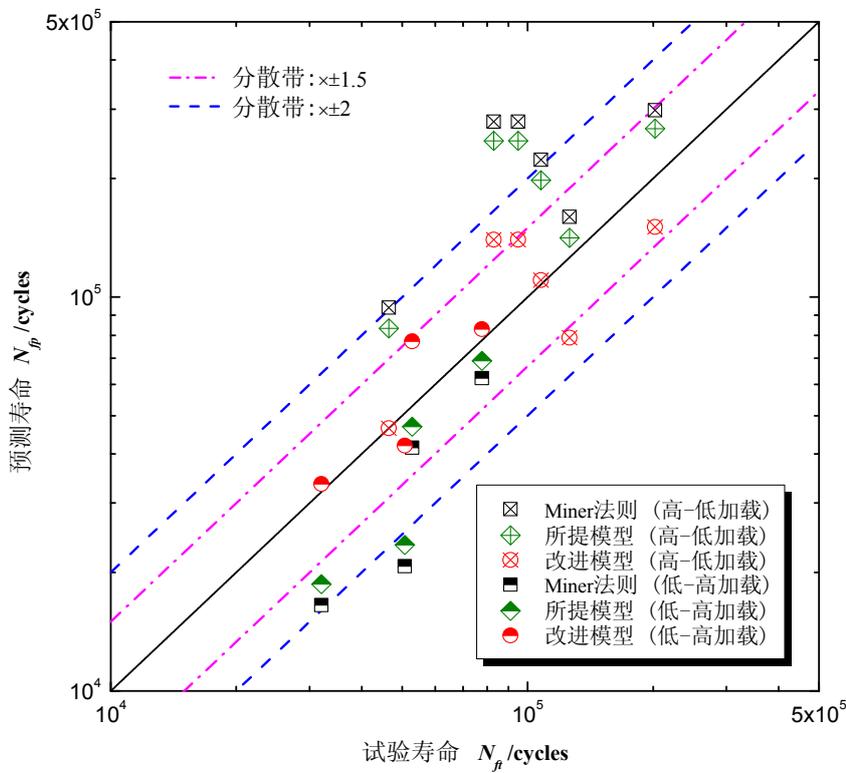


图 3-13 三种模型预测结果与试验值比较（钛合金 Ti-6Al-4V）

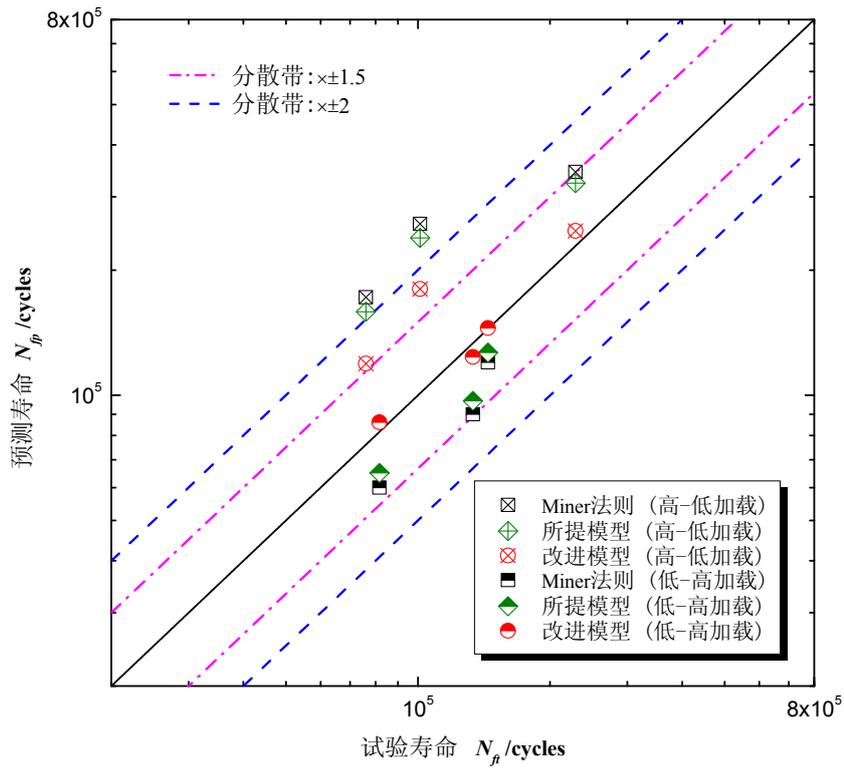


图 3-14 三种模型预测结果与试验值比较（铝合金 Al-2024-T42）

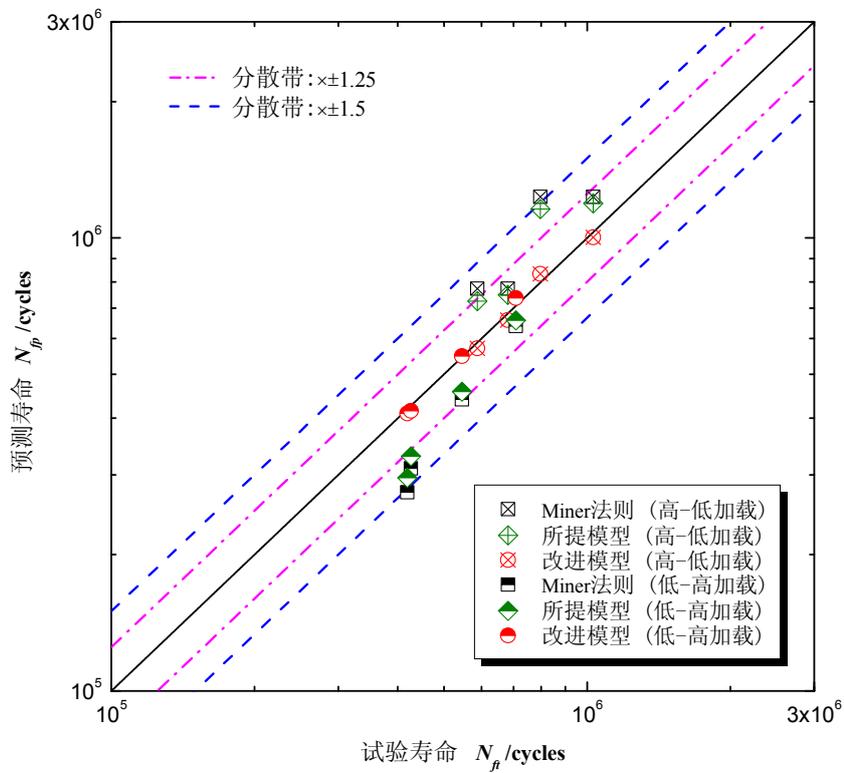


图 3-15 三种模型预测结果与试验值比较（动车铝合金车体焊接接头）

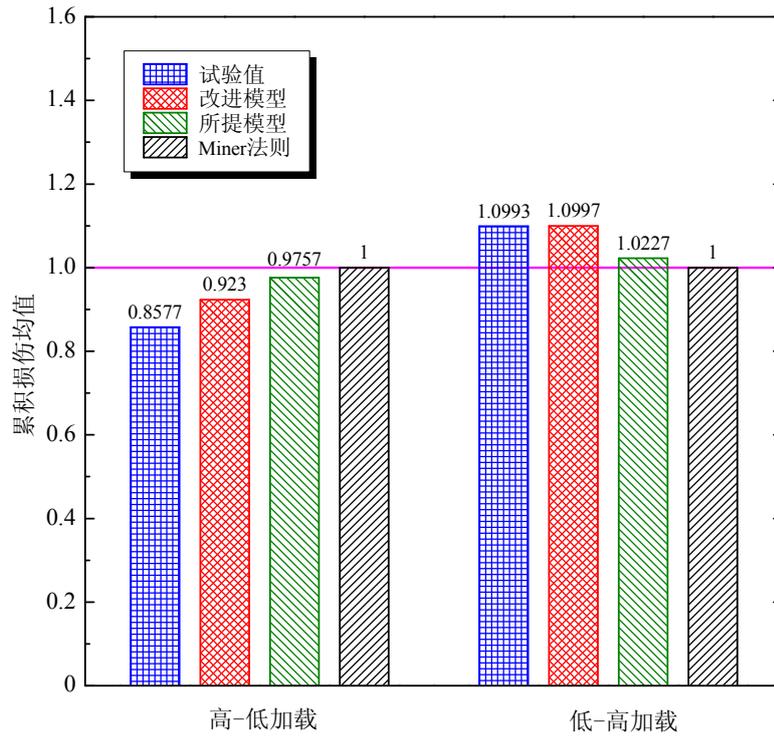


图 3-16 不同加载顺序下三种模型累积损伤均值比较（球墨铸铁 GS61）

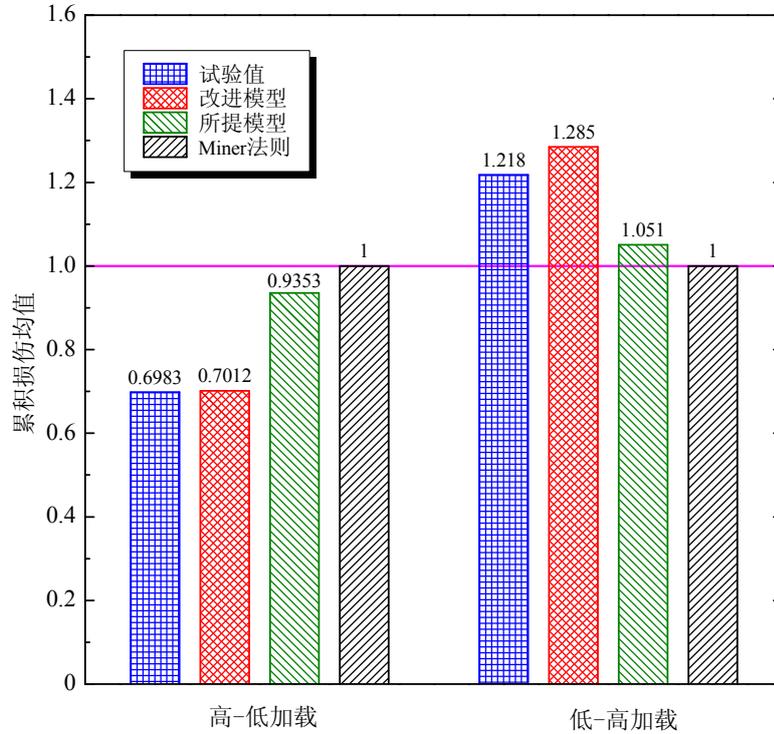


图 3-17 不同加载顺序下三种模型累积损伤均值比较（Ti-6Al-4V）

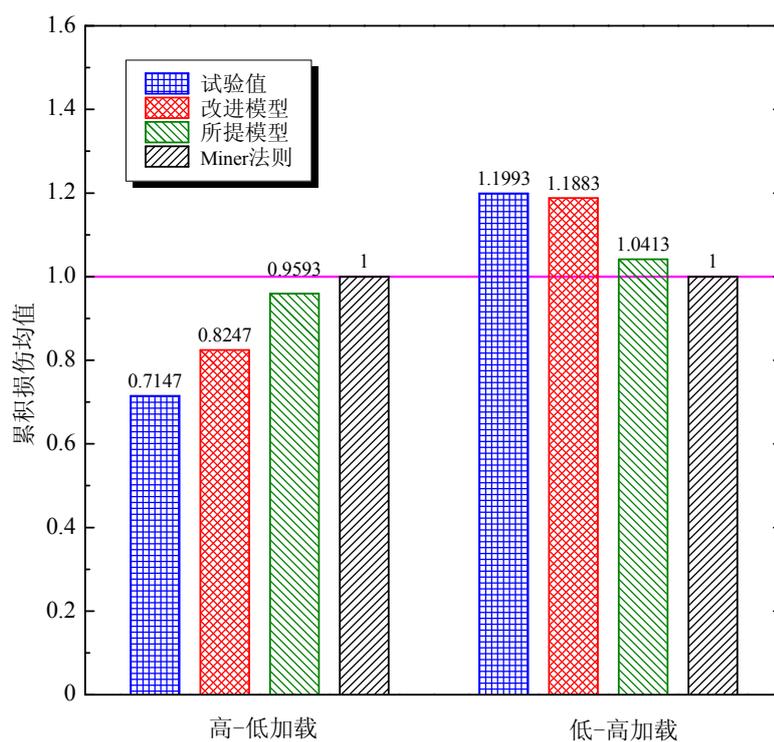


图 3-18 不同加载顺序下三种模型累积损伤均值比较 (AI-2024-T42)

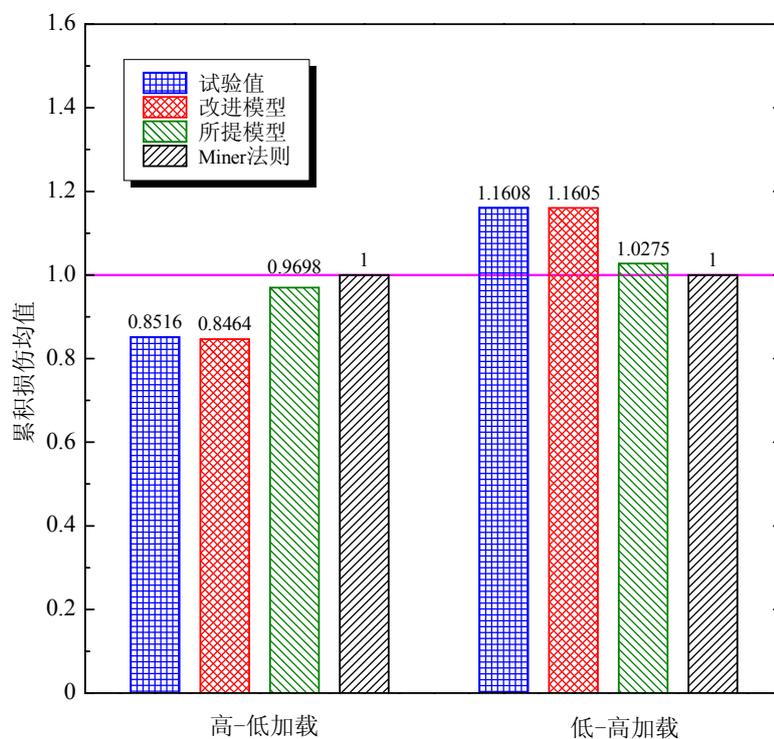


图 3-19 不同加载顺序下三种模型累积损伤均值比较 (铝合金焊接接头)

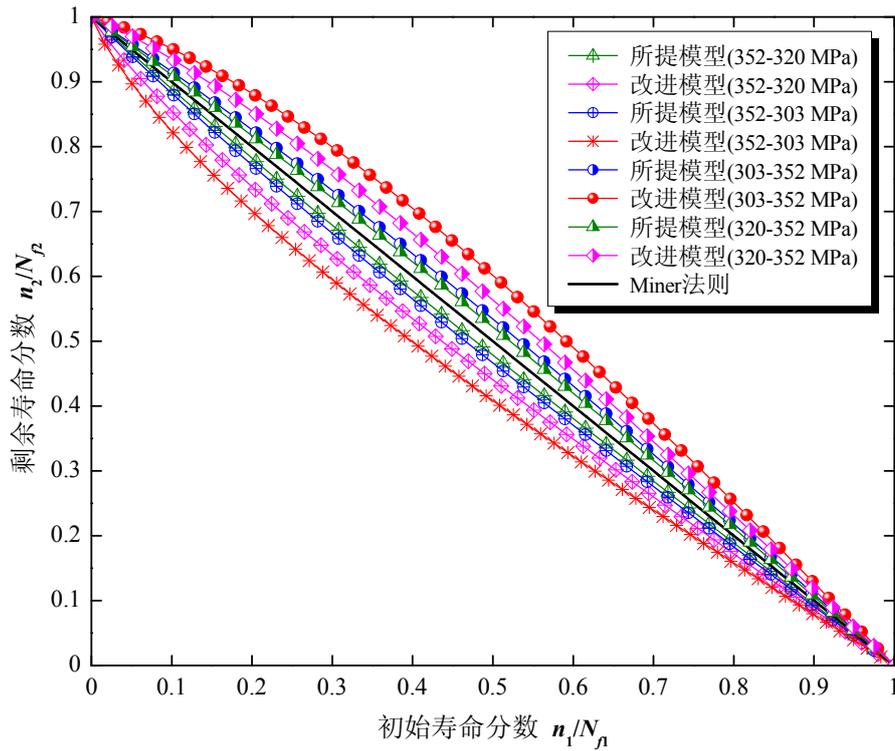


图 3-20 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 (GS61, 平面弯曲加载)

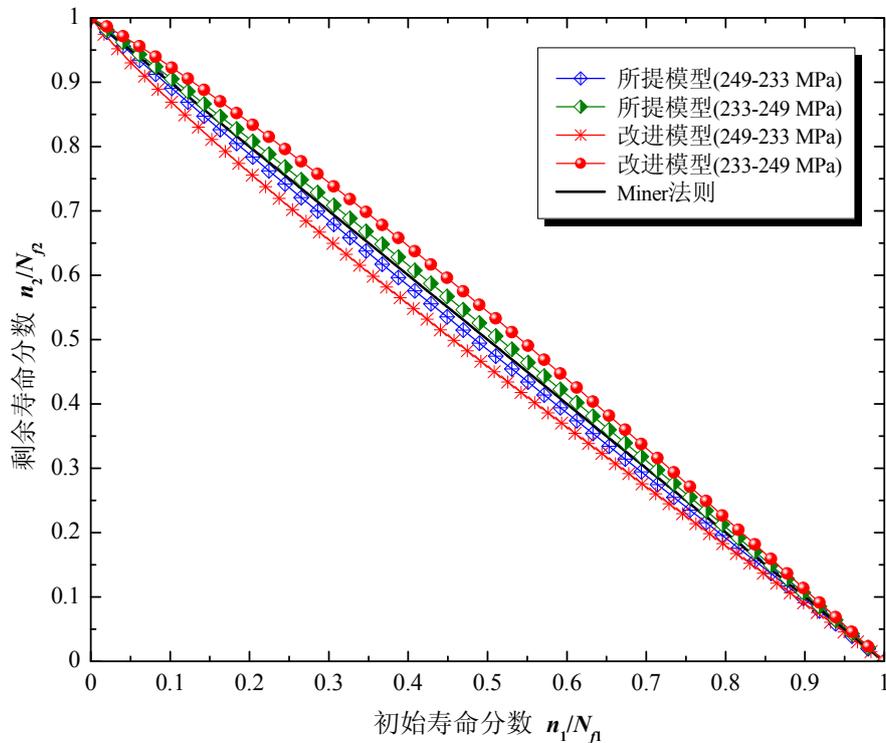


图 3-21 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 (GS61, 扭转加载)

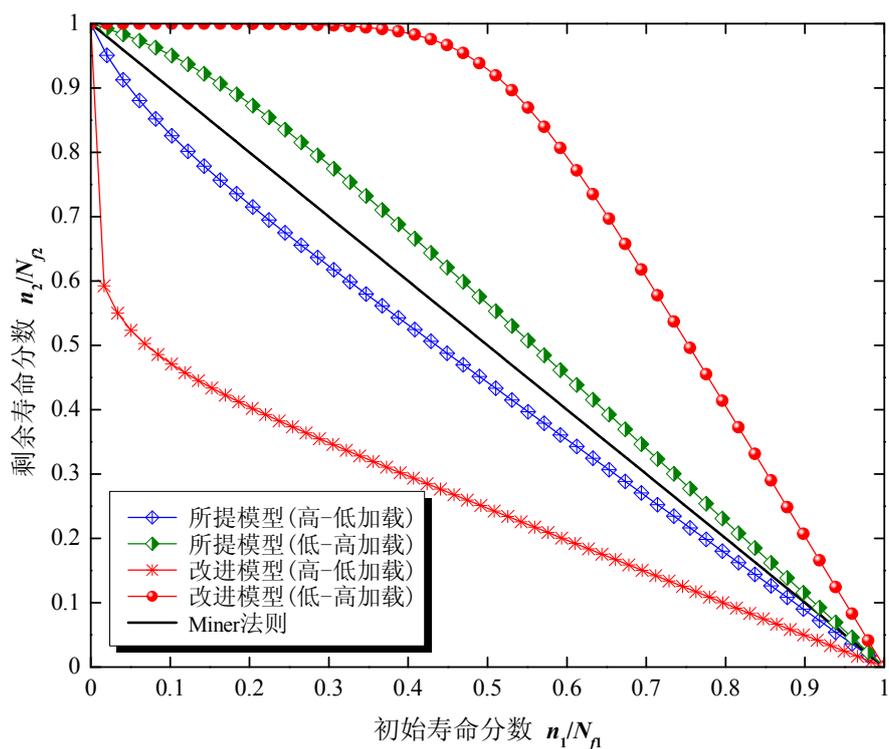


图 3-22 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 (Ti-6Al-4V)

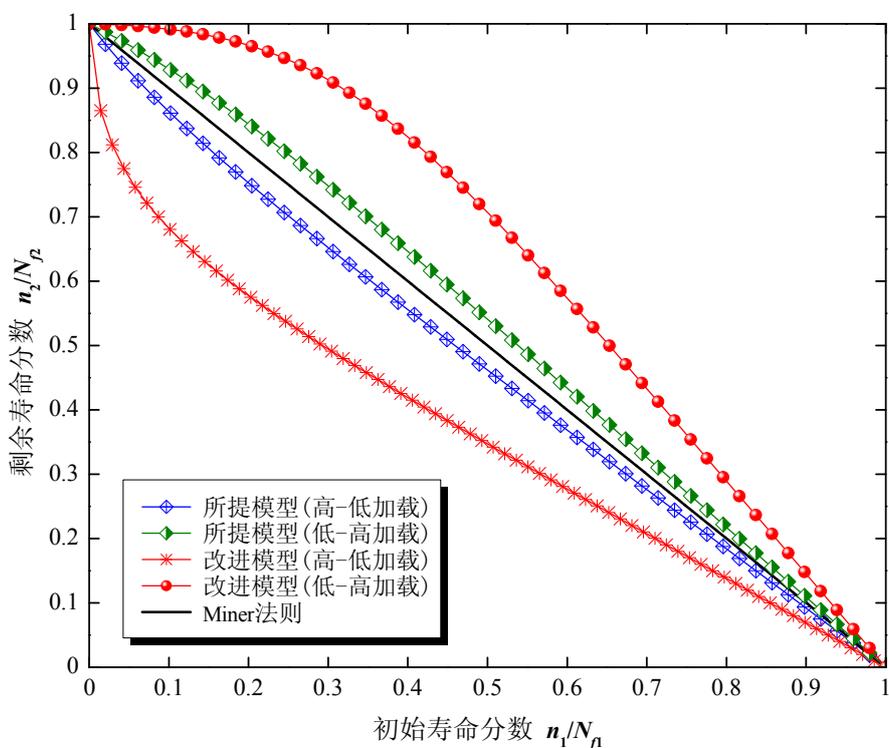


图 3-23 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较 (Al-2024-T42)

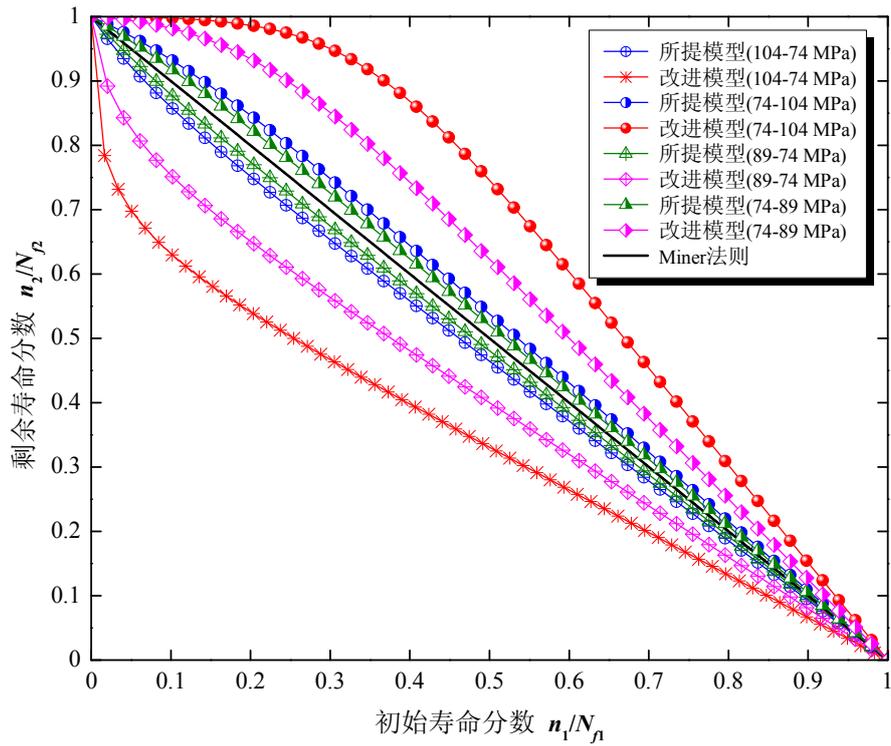


图 3-24 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较（对接接头）

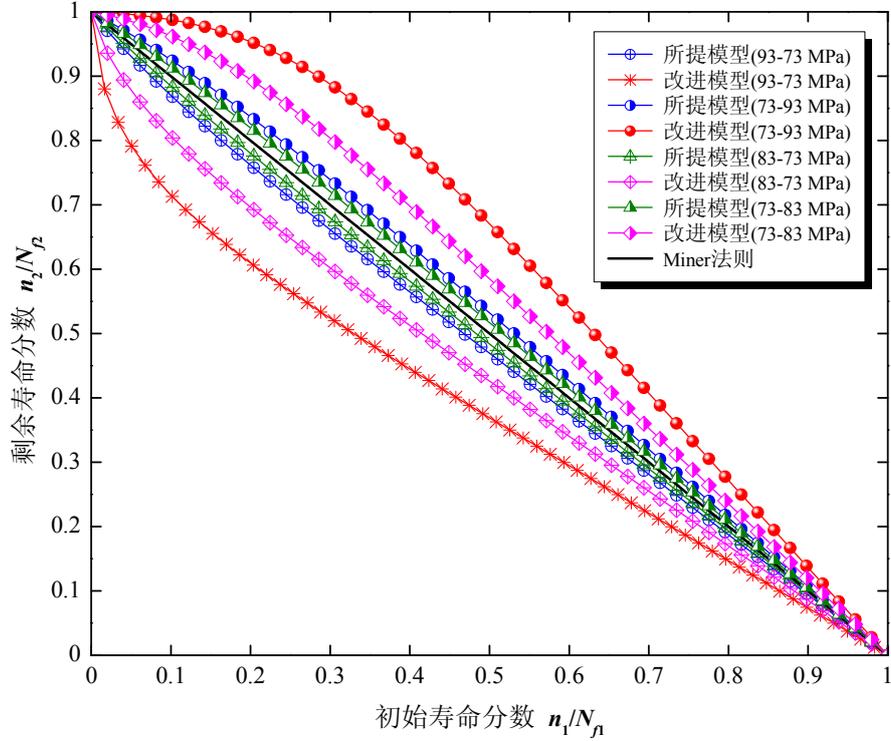


图 3-25 不同加载模式下三种模型的预测曲线比较（角接头）

通过对比图 3-12 至图 3-15 中三种模型的预测结果与试验值可知,对于不同试样或不同加载条件下,所提模型和改进模型的预测能力均优于 Miner 法则,且改进模型的预测结果更接近于试验值。由图 3-16 至图 3-19 可以看出,所提模型和改进模型的预测结果与载荷加载顺序有关,在高-低加载下,累积损伤均值均小于 1,在低-高加载下,预测结果均大于 1,而基于 Miner 法则的预测结果始终为 1。通过与累积损伤均值的试验结果比较发现,改进模型的预测精度最高,所提模型次之,Miner 法则最差。针对以上三种模型,所提模型和改进模型均为非线性模型,考虑了载荷水平的相关性以及载荷顺序效应,而 Miner 法则是一个与载荷水平无关的线性模型,未考虑载荷顺序对损伤和寿命的影响。相比所提模型,改进模型同时将载荷顺序以及载荷交互两种影响因素纳入考虑,其寿命预测精度得到了显著提升。此外,通过对比图 3-20 至图 3-25 中三种模型的预测曲线可知,在不同加载模式下,Miner 法则的预测结果始终为一条直线;所提模型及改进模型在高-低和低-高加载下的预测曲线关于 Miner 法则预测曲线对称,且所有预测曲线均落在 (0,0)至(1,1)范围内;改进模型由于考虑了载荷交互效应,其预测结果对载荷水平的差异性变化更敏感。上述结果与之前分析得到的模型非线性行为相吻合。综上所述,本章提出的疲劳驱动损伤模型以及剩余寿命预测模型是可行且有效的。

3.5.2 多级加载下模型验证

为了进一步验证所提模型及改进模型在多级载荷下的适用性,本节以铝合金 6082T6 多级阶梯谱试验和钛合金 Ti-6Al-4V 程序块载荷谱试验为例进行分析。

(1) 铝合金 6082T6 多级阶梯谱疲劳试验

文献[196]以铝合金 6082T6 试件进行了三组多级阶梯谱应力疲劳试验,试验材料的化学组分和机械性能见表 3-4。试验加载顺序分为递减加载、递增加载和随机加载,相应的载荷谱如图 3-26 所示。试验参数详见表 3-5,其中“X”表示最后一级载荷加载下的剩余寿命。

表 3-4 铝合金 6082T6 的化学组分和机械性能

化学组分 (%)	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti
	0.6	0.7	0.24	0.06	0.9	0.02	0.06	0.02
机械性能	杨氏模量 E (GPa)	抗拉强度 σ_u (MPa)	屈服强度 σ_y (MPa)	疲劳极限 σ_e (MPa)	伸长率 δ (%)			
	73	370	334	220	12			

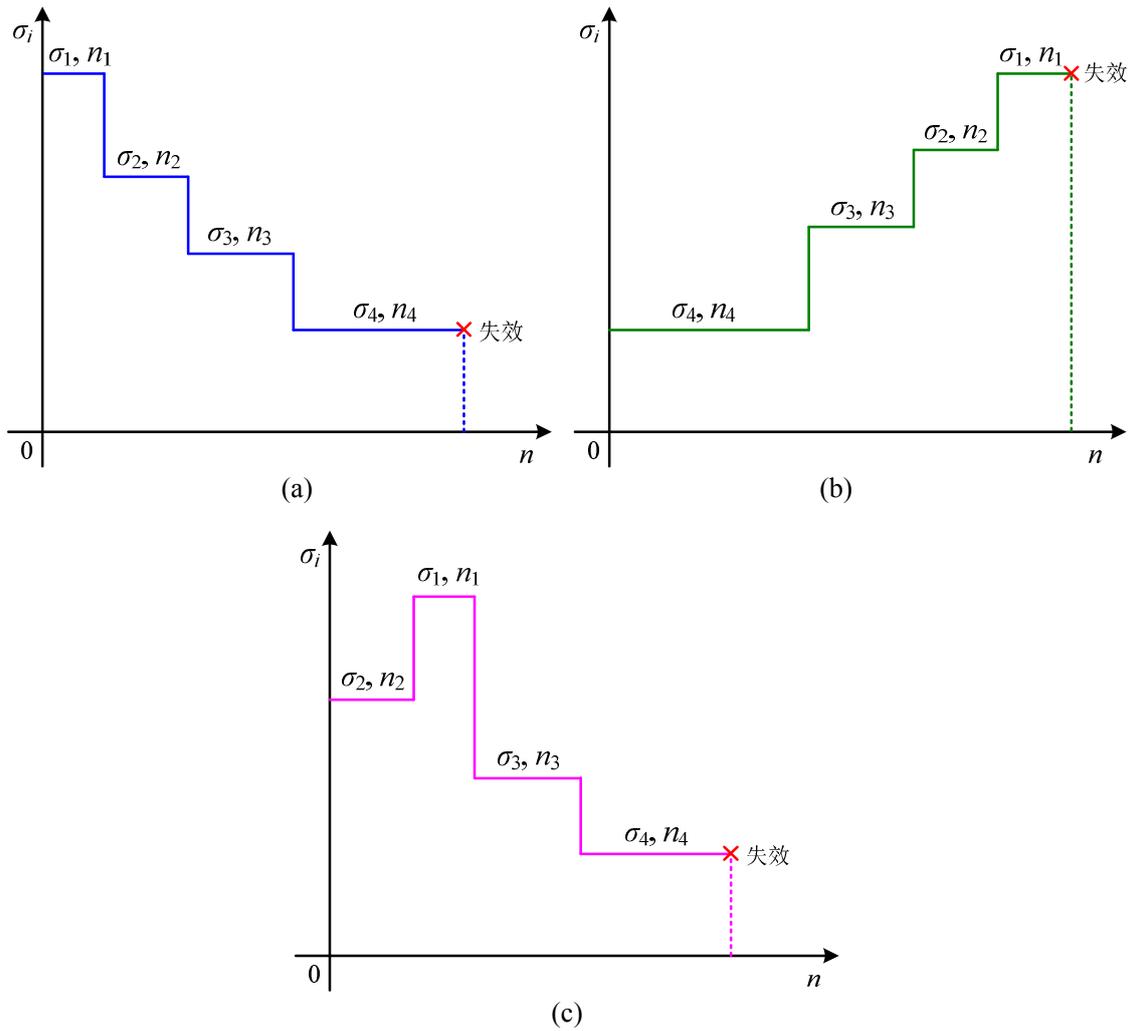


图 3-26 铝合金 6082T6 多级阶梯谱示意图。(a)递减加载顺序；(b)递增加载顺序；(c)随机加载顺序

表 3-5 铝合金 6082T6 多级阶梯谱加载疲劳试验数据

加载应力	试验编号	加载顺序	载荷谱	加载循环次数			
				n_1	n_2	n_3	n_4
$\sigma_1=305 \text{ MPa}$	1	递减加载	$\sigma_1(n_1) \rightarrow \sigma_2(n_2) \rightarrow \sigma_3(n_3) \rightarrow \sigma_4(n_4)$	10,950	19,427	26,258	X
$\sigma_2=280 \text{ MPa}$ $\sigma_3=260 \text{ MPa}$	2	递增加载	$\sigma_4(n_4) \rightarrow \sigma_3(n_3) \rightarrow \sigma_2(n_2) \rightarrow \sigma_1(n_1)$	X	19,427	26,258	103,000
$\sigma_4=240 \text{ MPa}$	3	随机加载	$\sigma_2(n_2) \rightarrow \sigma_1(n_1) \rightarrow \sigma_3(n_3) \rightarrow \sigma_4(n_4)$	10,950	19,427	26,258	X

根据表 3-5 中试验数据，分别采用 Miner 法则、所提模型式(3-22)和改进模型式(3-25)进行剩余寿命估算，结果如表 3-6 所示。根据剩余寿命分数的预测结果，可得三种模型的累积损伤值，并与试验值作对比，如图 3-27 所示。此外，为了研究载荷加载顺序和载荷交互作用对损伤累积的影响，对三种模型的损伤演化规律进行比较，如图 3-28、3-29 和 3-30 所示。

表 3-6 铝合金 6082T6 多级阶梯谱加载下试验值与三种模型预测结果比较

试验编号	加载顺序	试验值		模型预测结果		
		n_1/N_1	n_4/N_4	Miner 法则	所提模型	改进模型
1	递减加载	—	0.133	0.345	0.297	0.261
2	递增加载	0.442	—	0.372	0.423	0.463
3	随机加载	—	0.110	0.345	0.312	0.271

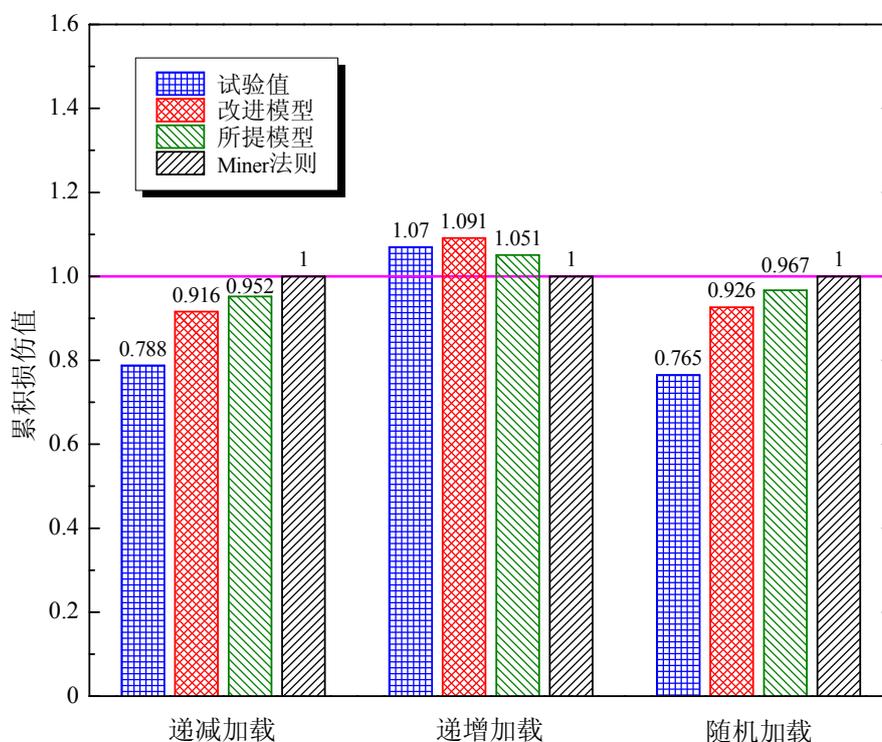


图 3-27 三种模型累积损伤值与试验值比较（铝合金 6082T6）

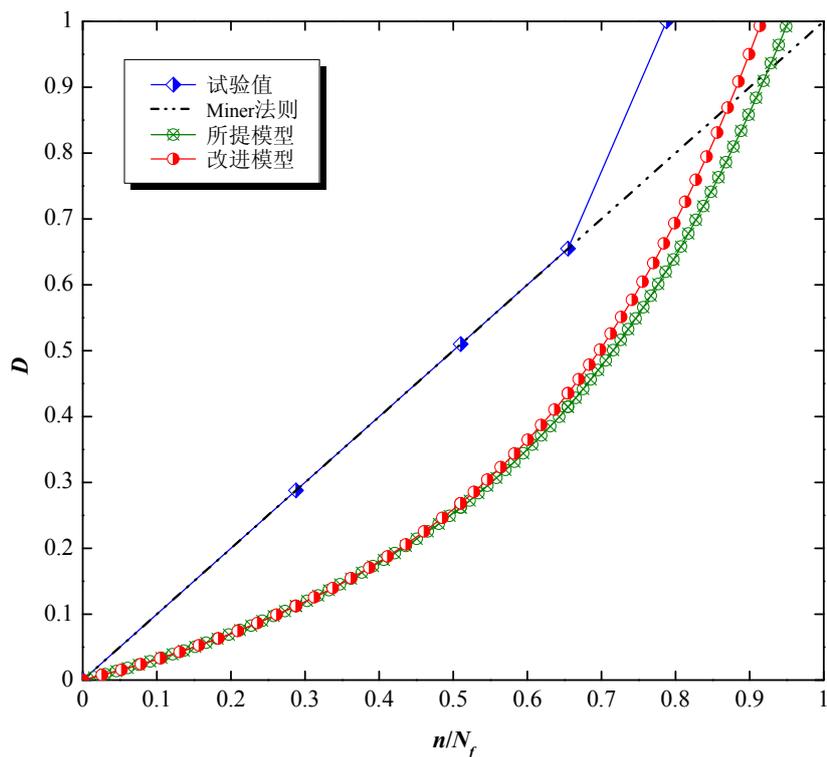


图 3-28 三种模型疲劳损伤演化规律比较（铝合金 6082T6，递减加载）

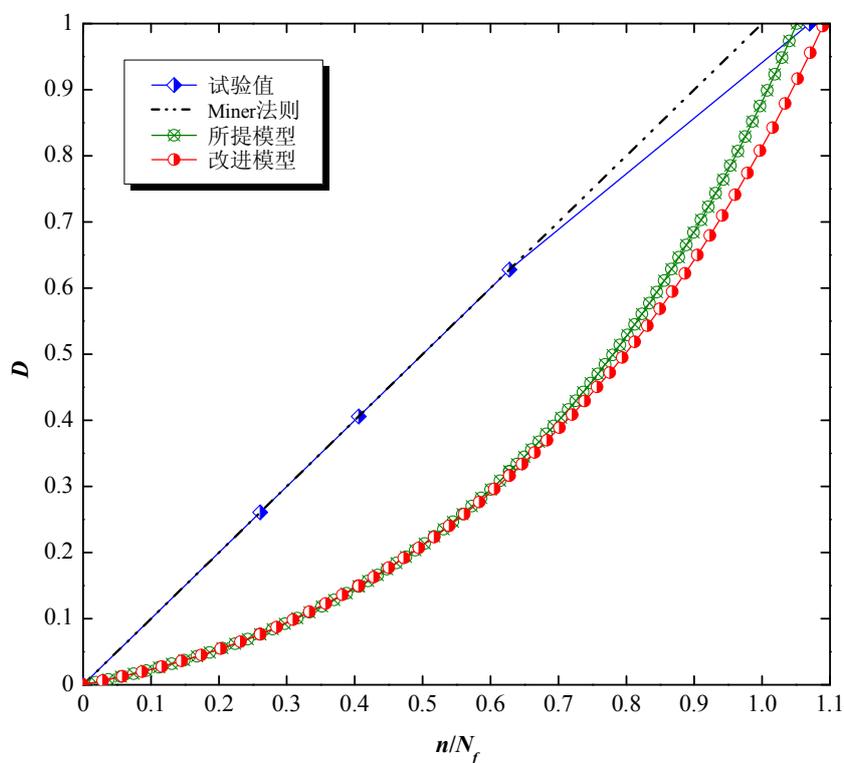


图 3-29 三种模型疲劳损伤演化规律比较（铝合金 6082T6，递增加载）

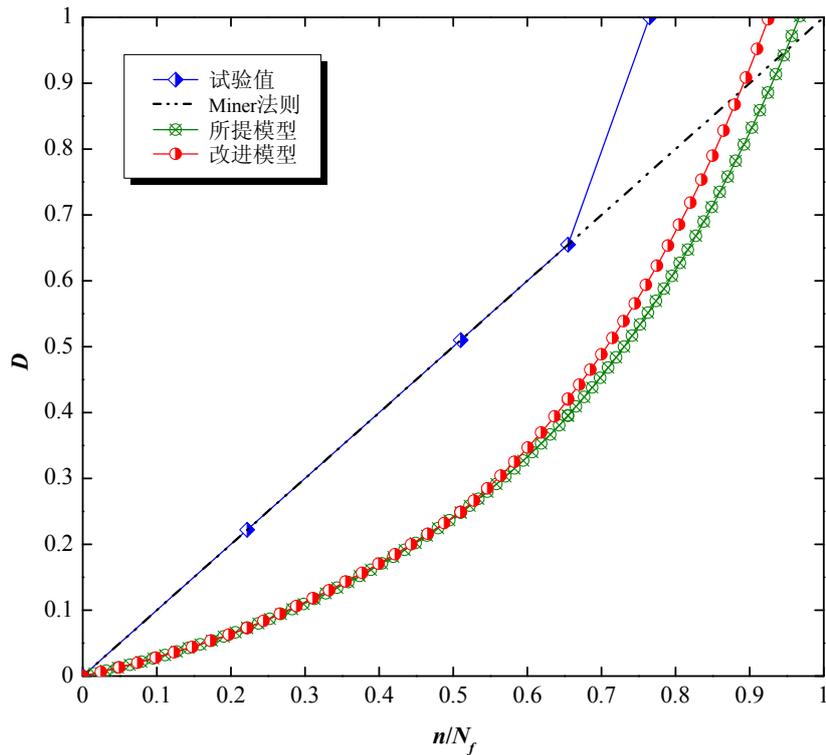


图 3-30 三种模型疲劳损伤演化规律比较（铝合金 6082T6，随机加载）

(2) 钛合金 Ti-6Al-4V 程序块载荷谱疲劳试验

文献[269]以钛合金 Ti-6Al-4V 试件进行了微动磨损疲劳试验，试验载荷谱为两级高-低载荷组成的程序块谱，如图 3-31 所示。试验加载频率为 50 Hz，试验条件和加载参数详见表 3-7。其中， n_{1T} 和 n_{2T} 分别表示试件发生断裂时高载荷和低载荷各自作用的累积循环次数。

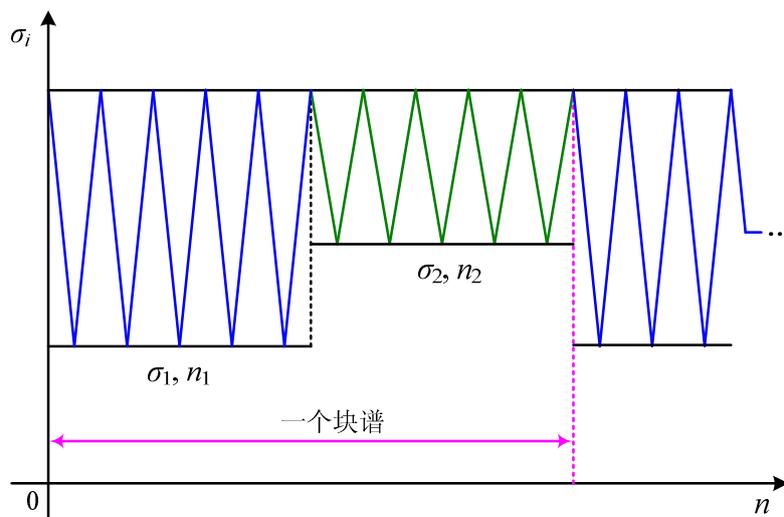


图 3-31 钛合金 Ti-6Al-4V 试件程序块载荷谱

表 3-7 钛合金 Ti-6Al-4V 程序块谱加载疲劳试验数据

加载应力	程序块	试验编号	加载循环次数		累积循环次数	
			n_1	n_2	n_{1T}	n_{2T}
$\sigma_1=217$ MPa $\sigma_2=121$ MPa	$\sigma_1(n_1) \rightarrow \sigma_2(n_2)$	1	300	15,000	3600	179,310
		2	300	15,000	5100	251,464
		3	1000	15,000	15,000	225,000
		4	3000	15,000	24,000	119,295
		5	3000	3000	47,520	45,000
		6	4000	1000	52,652	13,000

根据表 3-7，分别采用 Miner 法则、所提模型和改进模型进行寿命预测，将三种模型的预测结果与试验值进行比较，结果如图 3-32 所示。同时，对预测结果进行统计分析，得到不同加载条件下三种模型的累积损伤均值，并与试验值作比较，如图 3-33 所示。

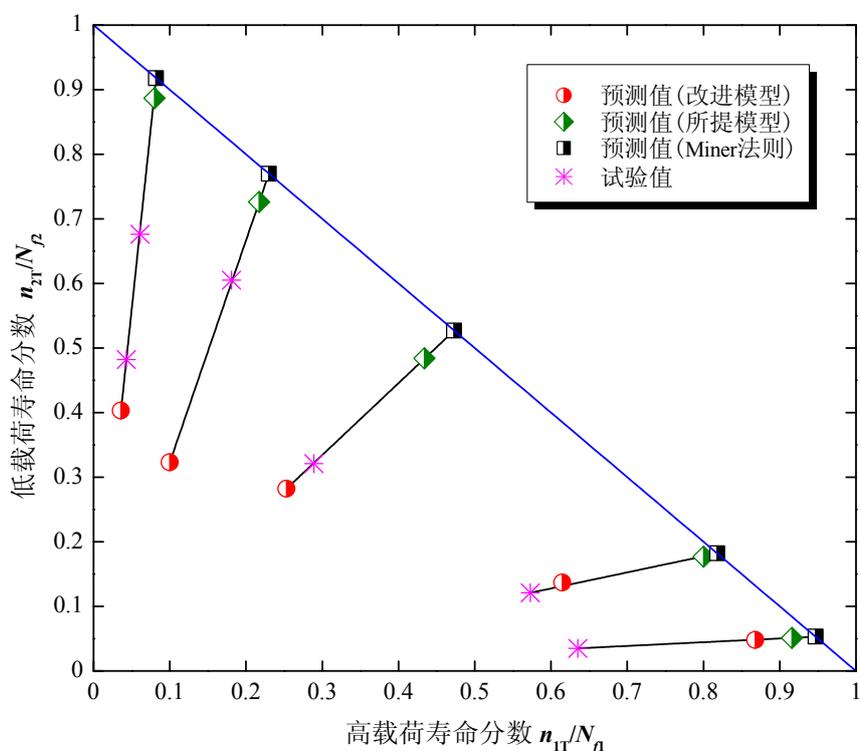


图 3-32 程序块谱加载下三种模型预测结果与试验值比较 (Ti-6Al-4V)

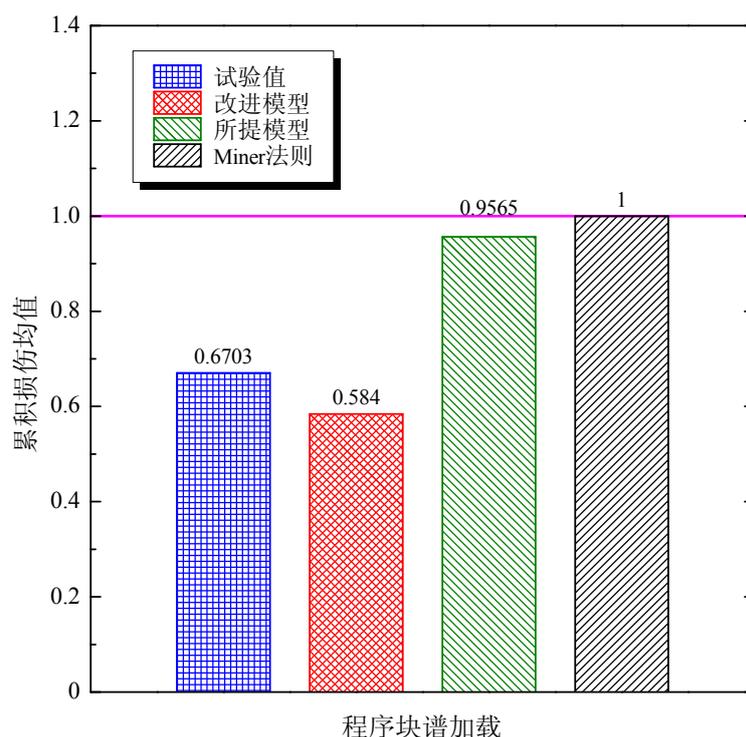


图 3-33 程序块谱加载下三种模型累积损伤均值与试验值比较 (Ti-6Al-4V)

由表 3-6 和图 3-32 的预测结果可以看出，所提模型和改进模型的预测能力均优于 Miner 法则，且在总体上改进模型的预测结果与实际值更吻合。通过对比图 3-27 中三种模型的累积损伤值与试验值发现，在递减加载下，所提模型和改进模型的预测值均小于 1，在递增加载下，其结果均大于 1，符合客观实际；在随机加载下，图 3-26(c)中载荷作用顺序在总体上呈递减趋势，因此，累积损伤的预测结果均小于 1。同时，针对图 3-33 中的程序块谱加载，以上两种模型的累积损伤均值均小于 1，这可能是由于程序块内的载荷顺序为高-低加载，其在总体上对损伤的累积有促进作用。而对于 Miner 法则，累积损伤始终为 1。此外，根据图 3-28、3-29、3-30 可知，在不同载荷的作用阶段，所提模型的损伤演化呈非线性递增，改进模型的损伤曲线在其基础上朝着与试验失效点的方向发生偏移，而 Miner 法则的损伤增长呈线性累积。在上述两组算例中，改进模型由于考虑了各级载荷间的交互作用，使寿命预测精度得到了一定程度的提升。综上所述，相比 Miner 法则，本章提出的非线性损伤模型更适用于剩余寿命评估，且考虑载荷交互效应的改进模型更契合疲劳失效的物理规律。

3.6 本章小结

针对传统驱动力模型存在的缺陷和不足，本章基于能量准则提出了一种疲劳

驱动能损伤参数，根据该参数随载荷作用的变化规律，从失效的能耗过程出发，建立了以驱动能耗散为基本状态参量的非线性损伤累积模型。据此建立的损伤变量形式简单、便于试验定量测定，且物理意义明确。然后，运用损伤等效原理，提出了一种剩余寿命预测模型以及考虑载荷交互作用的改进模型，通过选取三组疲劳载荷进行试验设计，对这两种模型的典型非线性特征作了分析和总结。最后，通过多组疲劳试验算例，验证了模型的有效性和准确性。

第四章 基于动态剩余 S-N 曲线与材料记忆退化的线性损伤累积与寿命预测

4.1 引言

在结构疲劳分析中，损伤常用于定量表征结构的受损程度，如何准确地评估结构内部产生的累积损伤直接关系到寿命预测的精度。一个精确的累积损伤准则是进行结构完整性分析、可靠性设计和安全性评定的前提和依据。同时，它在维修决策方案的制定中也发挥着十分重要作用，即最大限度地利用服役载荷下的受损元件或部件，使其在到达失效前得以更换以保障整机或系统的安全性。

结构疲劳理论研究的内容包含疲劳失效的微观物理机理和宏观力学模型^[270]。前者从微尺度角度研究裂纹萌生和裂纹扩展行为，如晶界开裂、滑移带的挤入和挤出、位错、空穴、裂纹聚合等，主要为宏观力学模型的建立提供物理依据；后者从宏观唯象角度研究疲劳寿命公式和损伤累积准则，并服务于工程实际。前几章中的损伤累积准则均为非线性理论，该理论将疲劳损伤描述为关于载荷循环的某种非线性函数，在处理复杂载荷谱时不同级别载荷间需要进行大量损伤等效折算，其寿命估算过程过于复杂。相比之下，线性损伤累积理论，如 Miner 法则，仍是工程实际中应用最广的疲劳准则，该模型的主要优势在于其形式上的简易性以及损伤累积的线性特征，易于实现损伤和寿命的有效预测。

高周疲劳是机械结构最常见的失效模式，S-N 曲线是进行高周疲劳寿命预测和抗疲劳设计的重要方法。近年来，基于 S-N 曲线的疲劳损伤建模在寿命预测中得到了广泛应用^[165-166, 168, 172]，但这些建模方法大都基于非线性损伤理论。另一方面，从宏观唯象角度，损伤累积过程主要表现为材料性能的不可逆退化，而现有模型多缺乏考虑退化机制对损伤累积的影响。针对此，本章通过综合考虑线性和非线性损伤理论的优势，基于 S-N 曲线和材料记忆性能退化分析，构建一种修正的线性损伤累积法则，为结构疲劳寿命及损伤定量估算提供有效方法。

4.2 动态剩余 S-N 曲线与材料记忆退化行为分析

在名义应力法中，S-N 曲线是评估材料疲劳性能与疲劳寿命的重要依据。根据疲劳试验数据的拟合方式和分布规律，S-N 曲线常用幂函数形式描述，在双对数坐标下（如图 4-1），其表达式为：

$$\log(\sigma) = a_s + b \log(N_f) \quad (4-1)$$

式中， a_s 和 b 分别是 S-N 曲线的截距和斜率。

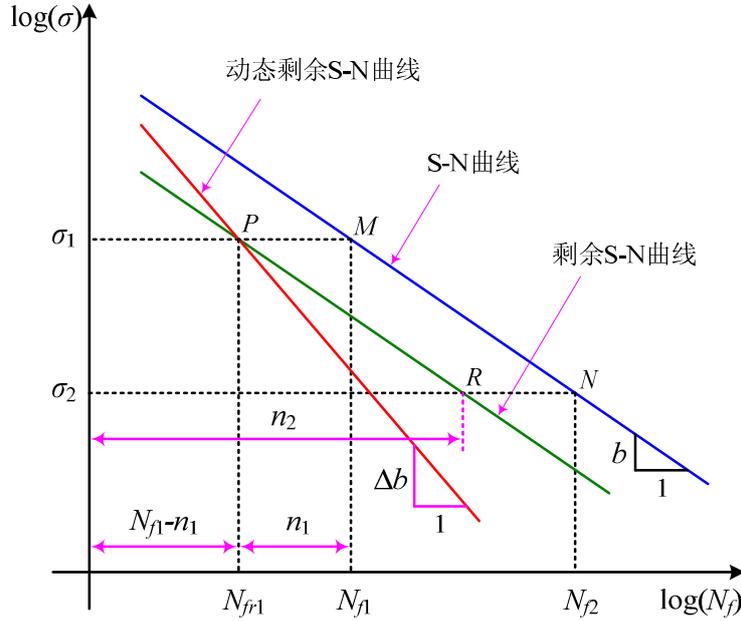


图 4-1 双对数坐标下 S-N 曲线、剩余 S-N 曲线与动态剩余 S-N 曲线

根据图 4-1，假设构件存在初始损伤，即认为在一定的损伤状态下，构件在应力水平 σ_1 下已作用 n_1 次循环，则其在 σ_1 下的剩余寿命为 $N_{f1} = N_{f1} - n_1$ 。对于无损伤构件，其在 σ_1 下的剩余寿命为 N_{f1} 。因此，S-N 曲线所表征的是结构或材料在完好状态下的应力寿命关系。从疲劳损伤的角度，Hashin 和 Rotem^[166]提出了损伤曲线的概念，即 S-n 曲线，且认为 S-n 曲线与 S-N 曲线具有相似的数学表达式。同理，从剩余寿命的角度分析，剩余 S-N 曲线所表征的是剩余寿命与外加载荷之间的关系，其数学形式也可假设与 S-N 曲线类似。在保持斜率不变的条件下，剩余 S-N 曲线（如图 4-1）可描述为：

$$\log(\sigma) = a' + b \log(N_{fr}) \tag{4-2}$$

式中， a' 是剩余 S-N 曲线的截距， N_{fr} 是应力水平 σ 所对应的剩余寿命。

由图 4-1，在两级循环加载下，结合式(4-1)和式(4-2)，可得构件的累积损伤表达式为：

$$\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} = 1 \tag{4-3}$$

式(4-3)即为 Miner 线性损伤法则，因此，式(4-2)可称为 Miner 剩余 S-N 曲线，它与原始 S-N 曲线保持平行。由于式(4-2)和式(4-1)的斜率相同，使得式(4-3)的预测结果无法考虑载荷历程的影响。由此可见，剩余 S-N 曲线的斜率是描述载荷和

损伤的一个重要参量。谢里阳等^[271]通过试验研究发现：材料的剩余 S-N 曲线是在其原始 S-N 曲线的基础上经过平移和旋转叠加作用的结果，其斜率与材料的初始损伤状态有关，并随损伤的积累逐渐增加。因此，剩余 S-N 曲线的斜率应当是一个与载荷加载状态有关的变量，所反映的是损伤增长的动态过程。由此形成的 S-N 曲线称为动态剩余 S-N 曲线，如图 4-1 所示，其表达式可描述为：

$$\log(\sigma) = a'' + \Delta b \log(N_{fr}) \quad (4-4)$$

式中， a'' 与 Δb 分别表示动态剩余 S-N 曲线的截距和斜率。

式(4-4)所描述的失效过程如下：在初始条件下，材料处于无损伤状态， $N_{fr} = N_f$ ，此时剩余 S-N 曲线与原始 S-N 曲线重合， $\Delta b = b$ ；在外加载荷的持续作用下，材料的剩余寿命不断减小， Δb 不断增加；在临界状态下，材料的剩余寿命已消耗殆尽，此时， $\Delta b \rightarrow \infty$ 。上述演化过程是材料从完好状态逐渐向临界状态过渡的过程。根据 Δb 的变化规律，在此定义斜率比 $b_r = b / \Delta b$ 来表征材料的损伤程度，其值随载荷作用不断减小，取值范围为 $[0,1]$ 。在初始状态下， $b / \Delta b = 1$ ；在临界状态下， $b / \Delta b = 0$ 。因此，整个失效过程可用 b_r 描述，其演化规律是量化疲劳损伤的关键。

在宏观唯象上，疲劳损伤累积是材料物理性能不断劣化的过程。最近，Böhm 等^[272-273]从心理学角度出发，提出了一种材料记忆的概念，将材料记忆性能退化用于疲劳损伤分析。与人脑的记忆功能类似，材料被赋予具有记忆或遗忘的能力。通常，人脑的记忆性能是一个关于时间的指数衰减函数，如艾宾浩斯遗忘曲线^[274]。若将时间函数用载荷循环替换，可得材料的记忆性能函数^[272-273]：

$$M = (A_m - B_m) e^{-\frac{n}{d_m}} + B_m \quad (4-5)$$

式中， M 为材料记忆性能； A_m 为记忆因子； B_m 为函数渐近线； d_m 是遗忘因子的倒数，在此可取 $d_m = N_f$ 。

由式(4-5)可知，在循环加载下材料的记忆性能是不断退化的，它包含三个历经状态：①初始状态， $n = 0$ ， $M|_{n=0} = A_m$ ；②中间状态， $M|_n = (A_m - B_m)e^{-n/N_f} + B_m$ ；③临界状态， $n = N_f$ ， $M|_{n=N_f} = (A_m - B_m)e^{-1} + B_m$ 。基于材料记忆性能退化分析，在此引入一个衰变系数定量地表征材料的退化程度，即：

$$\alpha = \frac{M|_n - M|_{n=N_f}}{M|_{n=0} - M|_{n=N_f}} = \frac{\left[(A_m - B_m) e^{-\frac{n}{N_f}} + B_m \right] - \left[(A_m - B_m) e^{-1} + B_m \right]}{A_m - \left[(A_m - B_m) e^{-1} + B_m \right]} = \frac{e^{-\frac{n}{N_f}} - e^{-1}}{1 - e^{-1}} \quad (4-6)$$

式中， α 为材料记忆性能退化系数，与加载循环比有关，取值范围为 $[0,1]$ 。在初

始加载下, $n/N_f = 0$, $\alpha = 1$, 材料处于无损伤状态, 无退化发生; 随着载荷的持续作用, 材料处于损伤状态, α 不断减小; 在临界条件下, $n/N_f = 1$, $\alpha = 0$, 此时材料处于完全退化状态。上述退化过程同时也是一个损伤累积的过程, 反映了材料在循环载荷作用下由完好状态向失效状态过渡的转变。

4.3 修正线性损伤累积模型

如前所述, 动态剩余 S-N 曲线中 b_r 的演化规律是构建疲劳损伤模型的关键, 基于此, 本节利用退化系数 α 对 b_r 进行量化。在两级循环加载下, 构件首先在 σ_1 下经历 n_1 次循环后, 动态剩余 S-N 曲线的斜率变为 Δb_1 , 构件在 σ_2 下的剩余寿命为 $N_{f2} = n_2$, 如图 4-2 所示。

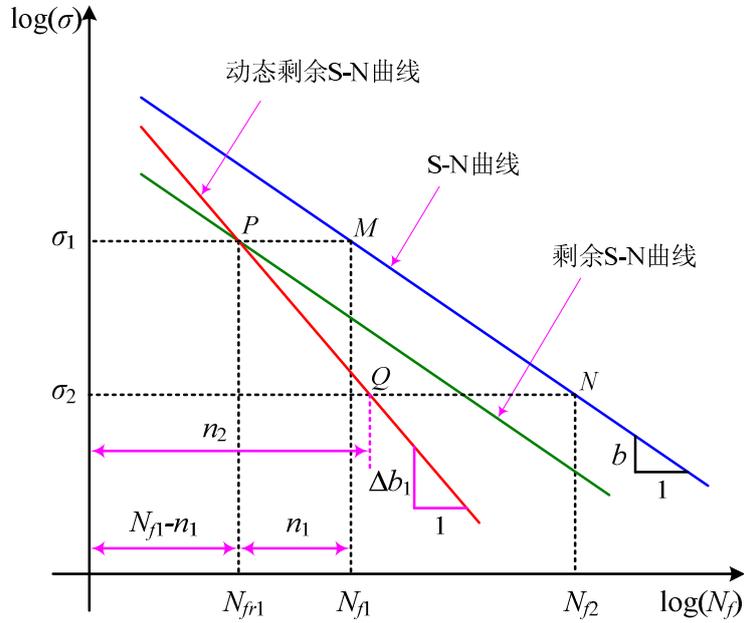


图 4-2 两级循环加载下动态剩余 S-N 曲线的演化规律

在经历第一级载荷作用后, S-N 曲线的斜率变化可描述为:

$$b_{r1} = \frac{b}{\Delta b_1} = \alpha_1 = \frac{e^{-\frac{n_1}{N_{f1}}} - e^{-1}}{1 - e^{-1}} \quad (4-7)$$

由图 4-2, $M(\sigma_1, N_{f1})$ 和 $N(\sigma_2, N_{f2})$ 满足式(4-7), 则有:

$$\log(\sigma_1) = a_s + b \log(N_{f1}) \quad (4-8)$$

$$\log(\sigma_2) = a_s + b \log(N_{f2}) \quad (4-9)$$

结合式(4-8)和式(4-9), 可得:

$$\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right) = b \log\left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right) \quad (4-10)$$

在动态剩余 S-N 曲线中, $P(\sigma_1, N_{f1})$ 和 $Q(\sigma_2, N_{f2})$ 满足式(4-4), 则有:

$$\log(\sigma_1) = a'' + \Delta b_1 \log(N_{f1} - n_1) \quad (4-11)$$

$$\log(\sigma_2) = a'' + \Delta b_1 \log(n_2) \quad (4-12)$$

由式(4-11)和式(4-12)可得:

$$\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right) = \Delta b_1 \log\left(\frac{N_{f1} - n_1}{n_2}\right) \quad (4-13)$$

结合式(4-10)和式(4-13)得:

$$\frac{b}{\Delta b_1} \log\left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right) = \log\left(\frac{N_{f1} - n_1}{n_2}\right) = \log\left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \times \frac{1 - \frac{n_1}{N_{f1}}}{\frac{n_2}{N_{f2}}}\right) \quad (4-14)$$

将式(4-7)代入式(4-14), 有:

$$\frac{n_2}{N_{f2}} = \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right) \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{1-\alpha_1} = \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right) \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{\frac{1-e^{-\frac{n_1}{N_{f1}}}}{1-e^{-1}}} \quad (4-15)$$

根据式(4-15), 在高-低加载下, $N_{f1} < N_{f2}$, $0 < 1 - \alpha_1 < 1$, 累积循环比为:

$$\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} = \frac{n_1}{N_{f1}} + \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right) \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{1-\alpha_1} < 1 \quad (4-16)$$

同理, 在低-高加载下, 有:

$$\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} = \frac{n_1}{N_{f1}} + \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right) \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{1-\alpha_1} > 1 \quad (4-17)$$

式(4-16)和式(4-17)与大多数金属疲劳的试验结果相吻合, 这表明式(4-15)能够考虑载荷加载顺序效应。

在疲劳演进过程中, 当累积损伤达到或超过临界损伤时, 疲劳破坏即将发生。通常, 临界损伤值取为 $D_c = 1$, 对式(4-15)进行重排, 可得两级加载下累积损伤失效准则:

$$\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^{\alpha_1 - 1} = 1 \quad (4-18)$$

在三级载荷作用下，动态剩余 S-N 曲线的演化规律如图 4-3 所示。

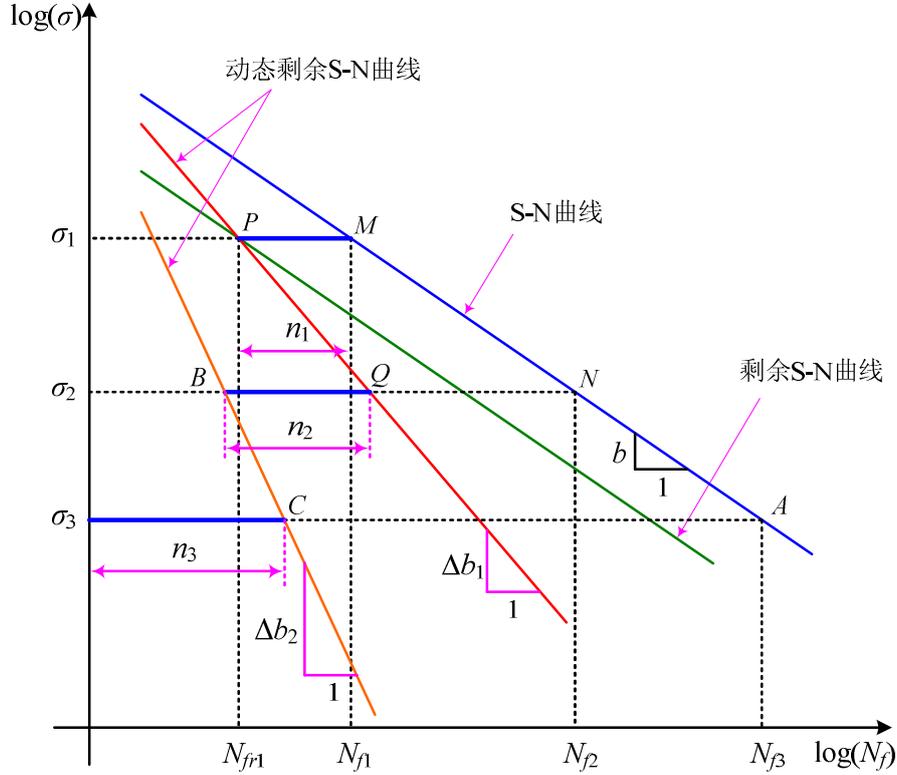


图 4-3 三级循环加载下动态剩余 S-N 曲线的演化规律

按照两级加载的计算方法和分析步骤，可推导出构件在三级加载下的斜率比以及剩余寿命分数表达式，分别如式(4-19)和式(4-20)所示。

$$b_{r2} = \frac{b}{\Delta b_2} = \frac{b}{\Delta b_1} \times \frac{\Delta b_1}{\Delta b_2} = \alpha_1 \times \alpha_2 = \frac{e^{\frac{n_1}{N_{f1}} - 1} - e^{-1}}{1 - e^{-1}} \times \frac{e^{\frac{n_2}{N_{f2}} - 1} - e^{-1}}{1 - e^{-1}} \quad (4-19)$$

$$\frac{n_3}{N_{f3}} = \left(\left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}} \right) \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^{1 - \alpha_1} - \frac{n_2}{N_{f2}} \right) \left(\frac{N_{f2}}{N_{f3}} \right)^{1 - \alpha_1 \alpha_2} \quad (4-20)$$

由式(4-20)，将临界损伤设定为 $D_c = 1$ ，对其进行重排，可得三级加载下累积损伤失效准则：

$$\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^{\alpha_1 - 1} + \frac{n_3}{N_{f3}} \left(\frac{N_{f2}}{N_{f3}} \right)^{\alpha_1 \alpha_2 - 1} \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^{\alpha_1 - 1} = 1 \quad (4-21)$$

同理，将式(4-19)和式(4-21)推广至多级载荷加载，可得：

$$b_{r(i-1)} = \frac{b}{\Delta b_{i-1}} = \frac{b}{\Delta b_1} \times \frac{\Delta b_1}{\Delta b_2} \times \cdots \times \frac{\Delta b_{i-2}}{\Delta b_{i-1}} = \alpha_1 \times \alpha_2 \times \cdots \times \alpha_{i-1} = \prod_1^{i-1} e^{\frac{n_i}{N_{fi}} - e^{-1}} \quad (4-22)$$

$$\begin{aligned} \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^{\alpha_1-1} + \frac{n_3}{N_{f3}} \left(\frac{N_{f2}}{N_{f3}} \right)^{\alpha_1 \alpha_2-1} \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^{\alpha_1-1} \\ + \frac{n_4}{N_{f4}} \left(\frac{N_{f3}}{N_{f4}} \right)^{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3-1} \left(\frac{N_{f2}}{N_{f3}} \right)^{\alpha_1 \alpha_2-1} \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^{\alpha_1-1} + \cdots = 1 \end{aligned} \quad (4-23)$$

针对式(4-23)中的每一项，可得损伤变量的广义表达式：

$$D_i = \frac{n_i}{N_{fi}} \times \prod_{j=1}^{i-1} \left(\frac{N_{fj}}{N_{f(j+1)}} \right)^{\left(\prod_{k=1}^j \frac{e^{\frac{n_k}{N_{fk}} - e^{-1}}}{1 - e^{-1}} \right)^{-1}} \quad (4-24)$$

由此得到一种新的疲劳损伤累积准则：

$$\sum_1^i D_i = \sum_1^i \frac{n_i}{N_{fi}} \times \prod_{j=1}^{i-1} \left(\frac{N_{fj}}{N_{f(j+1)}} \right)^{\left(\prod_{k=1}^j \frac{e^{\frac{n_k}{N_{fk}} - e^{-1}}}{1 - e^{-1}} \right)^{-1}} = \sum_1^i \frac{n_i}{N_{fi}} \times \lambda_i = 1 \quad (4-25)$$

式中， λ_i 为载荷效应系数。

由式(4-25)可知，疲劳损伤的累积形式按线性累加，该式与 Miner 法则的公式框架相似，并在其基础上引入了载荷效应系数 λ_i 表征载荷历程效应。因此，式(4-25)称为修正的线性损伤累积模型，该模型形式简单，模型未知参数只与载荷历程中的疲劳寿命有关，并可由 S-N 曲线确定。特别地，当外加载荷水平相同时， $N_{f1} = N_{f2} = \cdots = N_{fi}$ ， $\lambda_i = 1$ ，则式(4-25)将退化为 Miner 法则。因此，Miner 法则是本章所提模型的一个特例。

4.4 模型对比与线性损伤行为分析

4.4.1 三种典型的线性损伤法则

所提模型式(4-25)属于线性损伤累积理论，为此本节选取三种典型的线性损伤法则进行模型对比与分析，分别是 Miner 法则、Corten-Dolan 模型以及 Kwofie-Rahbar 模型。

(1) Miner 法则

Miner 法则^[106]是线性损伤累积理论中的典型代表，在工程实际中应用最为广

泛。该理论的物理背景为：材料在循环载荷下吸收的能量会不断地累积并最终达到某个能量极值时发生破坏。Miner 法则的失效准则为：

$$\sum D_i = \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} + \frac{n_3}{N_{f3}} + \frac{n_4}{N_{f4}} + \dots = 1 \quad (4-26)$$

由式(4-26)可知，损伤变量为：

$$D_i = \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (4-27)$$

式(4-27)将疲劳损伤定义为加载循环比，其载荷效应系数可视为 1，未考虑载荷历程对损伤发展的影响。

(2) Corten-Dolan 模型

Corten-Dolan 模型^[108]通过对传统 S-N 曲线进行修正，考虑了载荷相互作用对损伤累积的影响，在此简称 Corten 模型。其失效准则如下：

$$\sum_1^i \frac{n_i}{N_{fi, \max} \left(\frac{\sigma_{i, \max}}{\sigma_i} \right)^d} = 1 \quad (4-28)$$

假设第一级载荷为载荷历程中的最大应力，即 $\sigma_{i, \max} = \sigma_1$ ，则式(4-28)可写为：

$$\sum D_i = \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \frac{N_{f2}}{N_{f1}} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^d + \frac{n_3}{N_{f3}} \frac{N_{f3}}{N_{f1}} \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1} \right)^d + \frac{n_4}{N_{f4}} \frac{N_{f4}}{N_{f1}} \left(\frac{\sigma_4}{\sigma_1} \right)^d + \dots = 1 \quad (4-29)$$

根据式(4-29)中的每一项，损伤变量可描述为：

$$D_i = \frac{n_i}{N_{fi}} \times \frac{N_{fi}}{N_{f1}} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_1} \right)^d \quad (4-30)$$

式(4-30)与 Miner 法则形式相似，其载荷效应系数与当前载荷、最大载荷以及损伤指数 d 有关。特别地，当 d 取值与 S-N 曲线的斜率相同时，则式(4-29)将退化为 Miner 法则。

(3) Kwofie-Rahbar 模型

Kwofie-Rahbar 模型^[124]以 S-N 曲线为建模基础，通过引入疲劳驱动力的概念来描述疲劳破坏过程，在此简称 Kwofie 模型。根据驱动力等效原理，可得累积损伤失效准则为：

$$\sum D_i = \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \frac{\ln(N_{f2})}{\ln(N_{f1})} + \frac{n_3}{N_{f3}} \frac{\ln(N_{f3})}{\ln(N_{f1})} + \frac{n_4}{N_{f4}} \frac{\ln(N_{f4})}{\ln(N_{f1})} + \dots = 1 \quad (4-31)$$

根据式(4-31)，损伤变量为：

$$D_i = \frac{n_i}{N_{fi}} \times \frac{\ln(N_{fi})}{\ln(N_{f1})} \quad (4-32)$$

式(4-32)与 Miner 法则形式相近，该模型同样在 Miner 法则的基础上引入了一个载荷效应系数，它与当前载荷和初始载荷的疲劳寿命有关。在恒幅加载下，式(4-31)与 Miner 法则的结果保持一致。

通过分析以上三种模型，并对比所提模型式(4-24)和式(4-25)，四种模型存在某些共有属性以及各自的特征，具体描述如下：

① 从损伤的累积形式上看，四种模型定义的损伤变量在形式上可统一表征载荷历程中不同载荷水平产生的损伤当量，且损伤累积按线性叠加，因此这些模型都属于线性损伤累积理论。相比大多数非线性理论，它们形式简单，且在复杂载荷下无需进行损伤等效折算，易于实现损伤和寿命估算。

② 从损伤变量的描述上看，Miner 法则将损伤定义为循环比或寿命分数，未考虑载荷加载历程的影响，简化了疲劳失效机理。其他三种模型均在 Miner 法则的基础上通过引入载荷效应系数以表征载荷顺序或载荷相互作用效应，更符合损伤发展的物理规律。

③ 从模型的失效准则上看，四种模型的失效判据均为 $D_c = 1$ 。尽管 Corten 模型、Kwofie 模型以及所提模型的理论基础不同，但这些模型的形式框架均与 Miner 法则相似。特别地，在恒幅载荷下，Corten 模型、Kwofie 模型和所提模型均退化为 Miner 法则。因此，Miner 法则是构筑这三个模型的物理基础，同时它们也是 Miner 法则形式上的衍生物。

4.4.2 线性损伤行为分析

针对 Miner 法则、Corten 模型、Kwofie 模型和所提模型等线性损伤累积理论，本节以两级循环加载为例研究四种模型的线性损伤特征及其演化规律。选取三组疲劳载荷进行试验设计，它们的疲劳寿命分别取 $N_f = 1.0 \times 10^5$ 、 $N_f = 5.0 \times 10^5$ 、 $N_f = 1.0 \times 10^6$ 。按照载荷的加载顺序，可设计 6 种加载模式，并用疲劳寿命的比值 N_{f1} / N_{f2} 表示。对四种模型的载荷效应系数进行比较，分别研究它们对损伤累积的影响，见表 4-1。根据模型中待定参数的选取不同，可得不同试验条件下 Corten 模型、Kwofie 模型及所提模型的载荷效应系数的变化规律，分别如图 4-4 至 4-6 所示。此外，以第一级载荷加载的寿命分数为 $n_1 / N_{f1} = 0.2$ ，可得四种模型在不同加载模式下的损伤演化规律，如图 4-7 至图 4-12 所示。

表 4-1 四种模型载荷效应系数比较

编号	模型	载荷效应系数					
		高-低加载			低-高加载		
		模式 1	模式 2	模式 3	模式 4	模式 5	模式 6
		0.2	0.5	0.1	5	2	10
1	Miner 法则	$\lambda = 1$					
2	Corten 模型	$\lambda = \frac{N_{f2}}{N_{f1}} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^d = \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^{-5.8b-1}$					
3	Kwofie 模型	$\lambda = \frac{\ln(N_{f2})}{\ln(N_{f1})}$					
4	所提模型	$\lambda = \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^{\frac{e^{\frac{\eta}{N_{f1}} - e^{-1}}}{1 - e^{-1}} - 1}$					

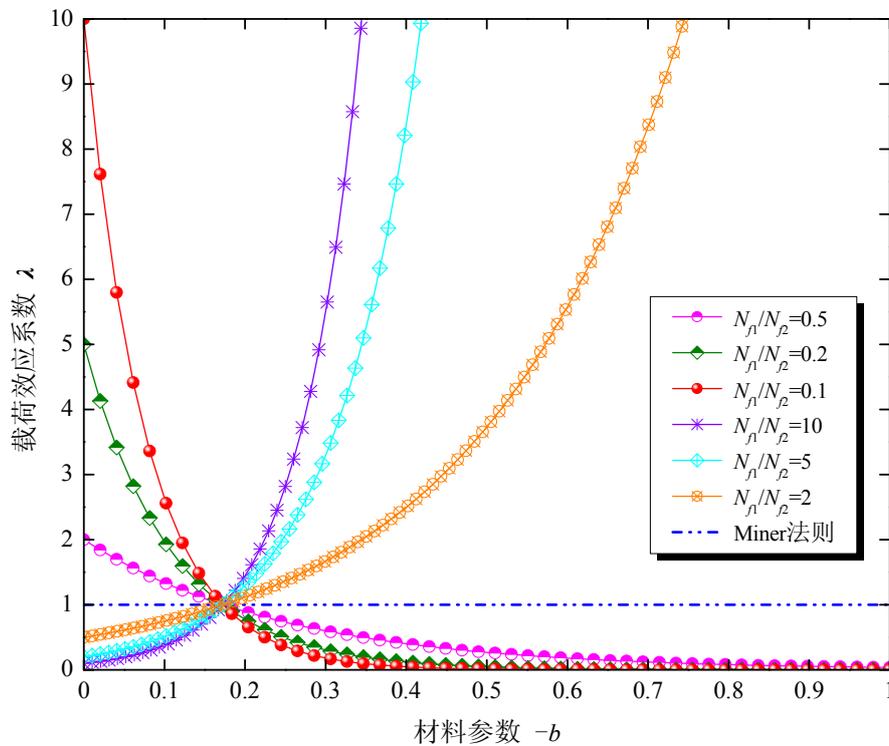


图 4-4 不同试验条件下载荷效应系数变化规律 (Corten 模型)

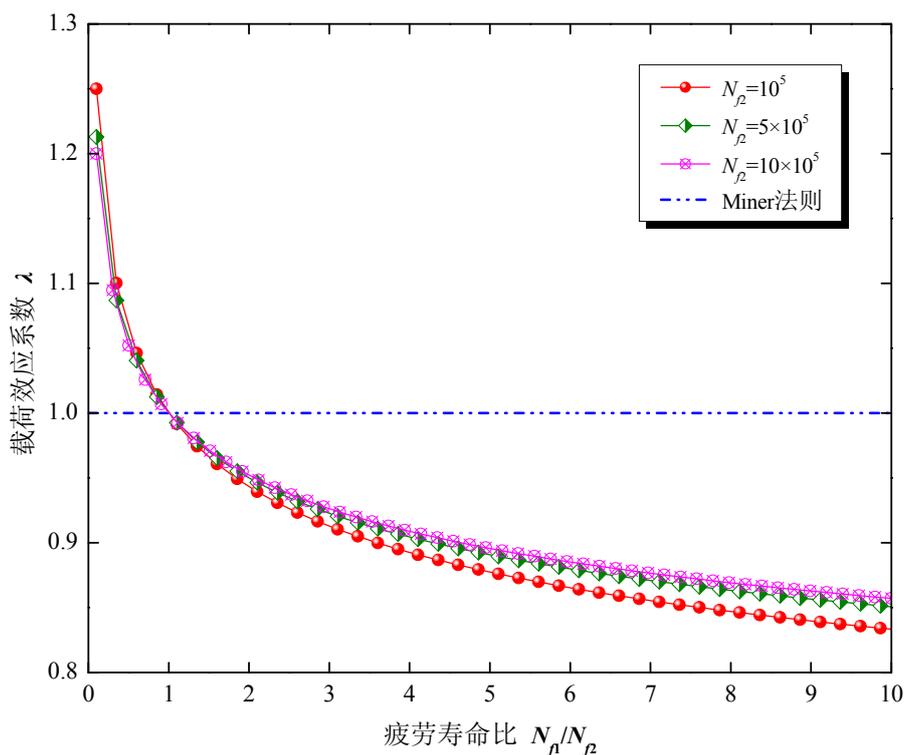


图 4-5 不同试验条件下载荷效应系数变化规律 (Kwofie 模型)

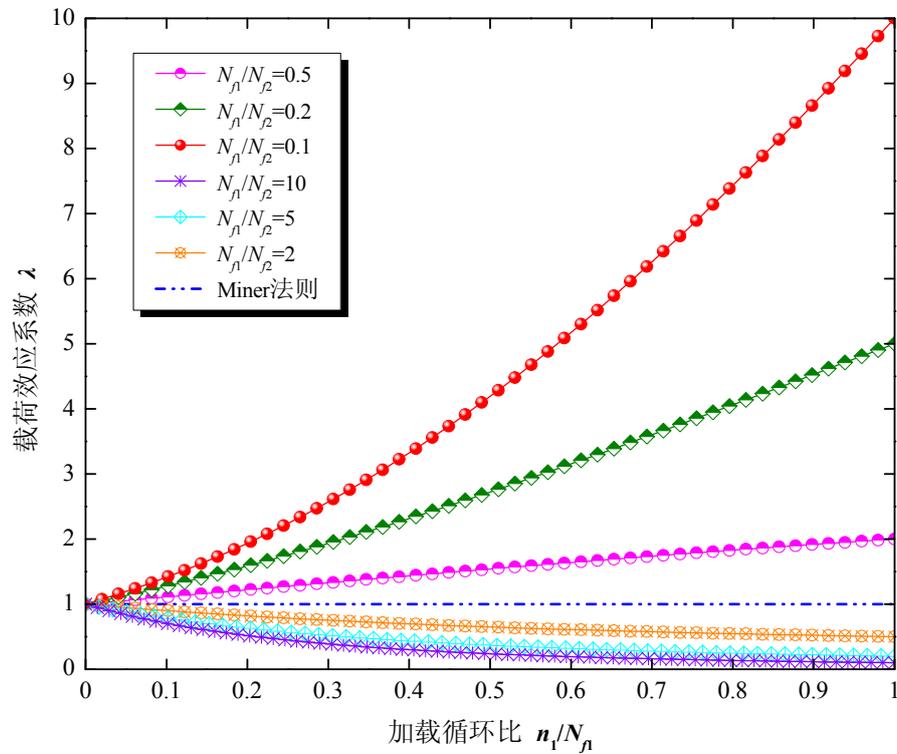


图 4-6 不同试验条件下载荷效应系数变化规律 (所提模型)

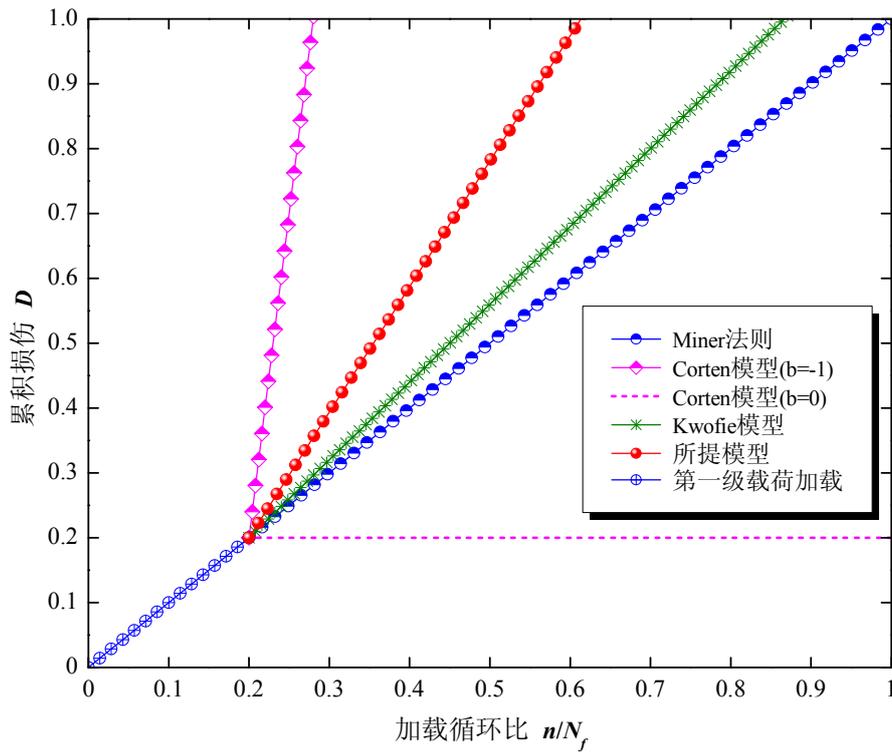


图 4-7 高-低加载下四种模型损伤演化规律比较 ($N_{f1} / N_{f2} = 0.1$)

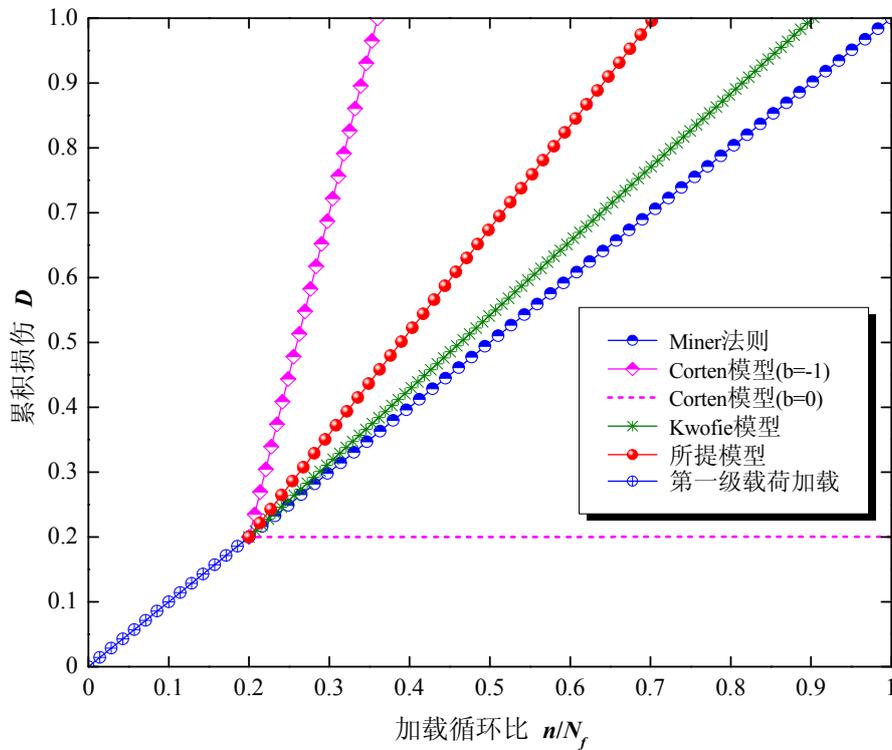


图 4-8 高-低加载下四种模型损伤演化规律比较 ($N_{f1} / N_{f2} = 0.2$)

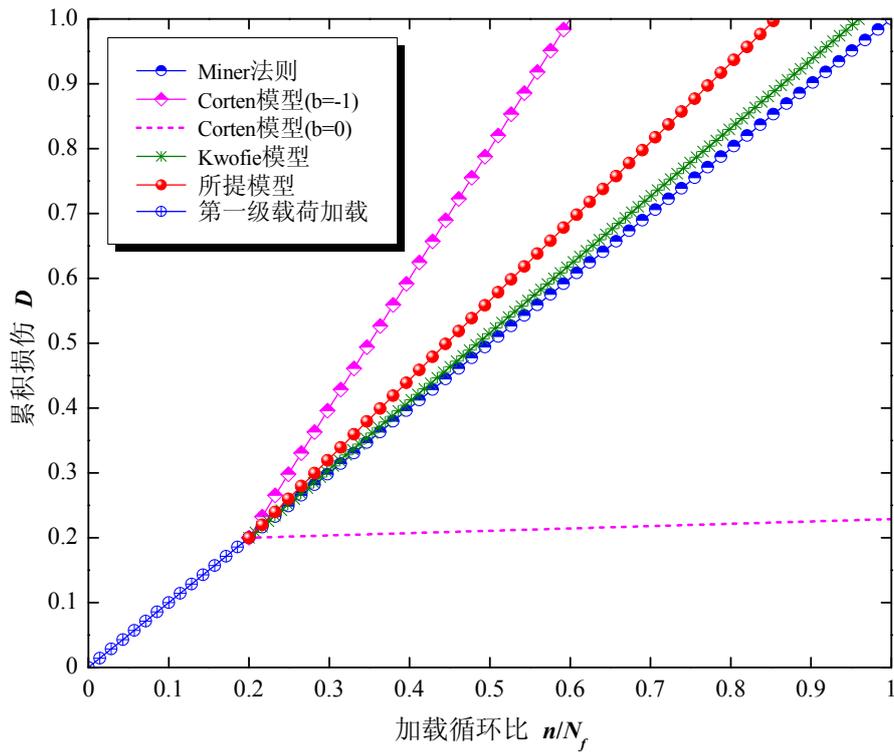


图 4-9 高-低加载下四种模型损伤演化规律比较 ($N_{f1} / N_{f2} = 0.5$)

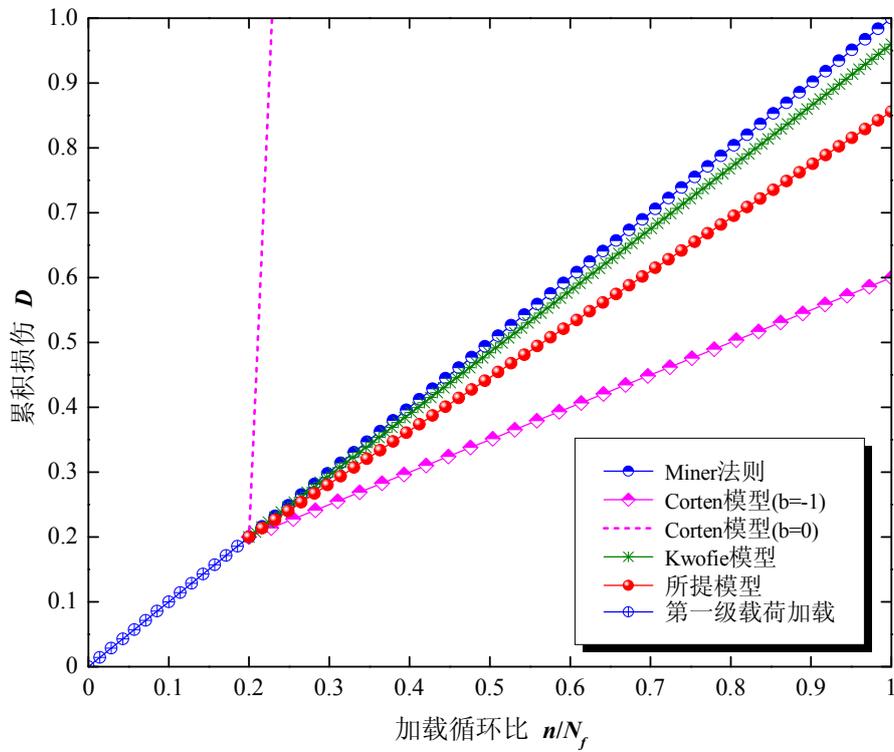


图 4-10 低-高加载下四种模型损伤演化规律比较 ($N_{f1} / N_{f2} = 2$)

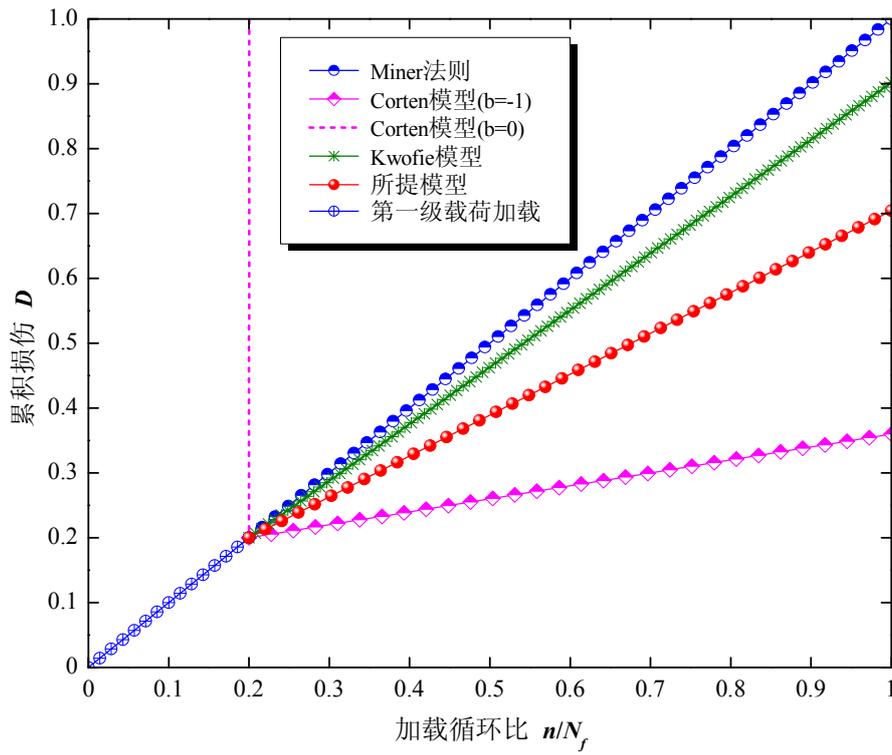


图 4-11 低-高加载下四种模型损伤演化规律比较 ($N_{f1} / N_{f2} = 5$)

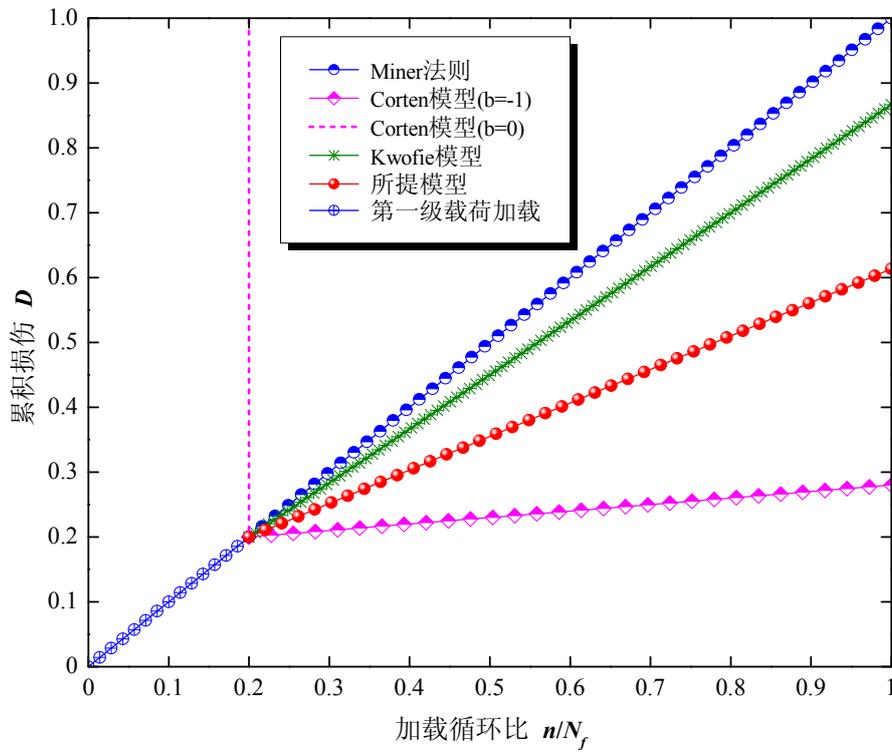


图 4-12 低-高加载下四种模型损伤演化规律比较 ($N_{f1} / N_{f2} = 10$)

由图 4-4、4-5、4-6 可知, Miner 法则的载荷效应系数 λ 为常数 1。针对 Corten 模型, λ 与寿命比 N_{f1}/N_{f2} 和材料参数 $-b$ 的取值有关, 当 $-b = 0.172$ 时, $\lambda = 1$, 该模型退化为 Miner 法则, 且高-低和低-高加载曲线关于 $-b = 0.172$ 对称; 在高-低加载下, $N_{f1}/N_{f2} < 1$, 且当 $-b > 0.172$ 时, $\lambda < 1$, 而当 $0 < -b < 0.172$ 时, 有 $\lambda > 1$; 低-高加载的结果与之相反。同时, 当 $-b$ 取值一定时, 且 $-b > 0.172$, λ 随 N_{f1}/N_{f2} 的增加而增大; 若 $0 < -b < 0.172$, λ 将随之减小。针对 Kwofie 模型, λ 与 N_{f1}/N_{f2} 的取值有关, 当 $N_{f1}/N_{f2} = 1$ 时, $\lambda = 1$, 该模型退化为 Miner 法则; 当 $N_{f1}/N_{f2} < 1$ 时, $\lambda > 1$, 且 λ 随 N_{f1}/N_{f2} 单调递减; 反之, $\lambda < 1$, λ 随 N_{f1}/N_{f2} 单调递增。对于所提模型, λ 与 N_{f1}/N_{f2} 和 n_1/N_{f1} 的取值有关, 若 $N_{f1}/N_{f2} = 1$, 该模型也退化为 Miner 法则; 当 $N_{f1}/N_{f2} < 1$, 则 $\lambda > 1$, 且 λ 随 n_1/N_{f1} 单调递增, 反之, $\lambda < 1$, λ 随 n_1/N_{f1} 单调递减。根据图 4-7 至图 4-12, Miner 法则的损伤曲线始终为一条直线, 它与载荷大小和加载顺序无关, 而其他三个模型所得损伤曲线的斜率均在第一级载荷作用后发生偏转。Corten 模型的损伤曲线与 $-b$ 的取值有关, 且 $-b = 0$ 和 $-b = 1$ 分别对应着损伤曲线的两个边界带。针对 Kwofie 模型和所提模型, 在高-低加载下, 损伤曲线均上偏, 对损伤发展有促进作用; 在低-高加载下, 损伤曲线均下偏, 对损伤发展有迟滞作用。同时, 载荷间寿命水平的差异越大, 损伤曲线的偏离程度就越大, 体现了载荷间的相互作用效应。

4.5 算例分析

4.5.1 两级加载下模型验证

针对本章提出的修正线性损伤累积模型, 即式(4-25), 本节选取三组疲劳试验数据进行模型验证, 试验对象分别是 300 CVM 马氏体时效钢、铝合金 Al-2024-T42 和 30NiCrMoV12 钢。其中, 300 CVM 马氏体时效钢具有高韧性、高强度、低硬化指数、冷加工性能好以及优良的焊接性能, 广泛应用于航空航天、原子能、海洋、工业化工等领域, 如飞机起落架、箭体发动机壳体、高强度螺栓、压力容器、发动机阀簧以及各类工业用材料等; 30NiCrMoV12 钢在轨道交通领域中应用广泛, 主要用于制造铁路机车车轴, 如我国 CRH5 系列高速动车组转向架轮对的轮轴^[275]。

文献[112]以 300 CVM 马氏体时效钢开展了一系列两级加载疲劳试验, 在此选用高周疲劳阶段试验数据进行分析, 试验加载方式为旋转弯曲加载, 试验材料的机械性能为: 屈服强度 $\sigma_y = 2098$ MPa, 抗拉强度 $\sigma_u = 2590$ MPa; 试验加载参数见表 4-2。文献[263]以铝合金 Al-2024-T42 试件进行了多组两级疲劳试验, 试验数据见表 4-3。30NiCrMoV12 钢疲劳试验来源于文献[186], 试验材料经硬化和回火处理, 其机械性能为: 杨氏模量 $E = 201.4$ GPa, 屈服强度 $\sigma_y = 755$ MPa, 抗拉强

度 $\sigma_u = 1035 \text{ MPa}$ ，疲劳极限 $\sigma_e = 391 \text{ MPa}$ 。试件在 MTS 810 伺服液压疲劳试验机上进行拉-压加载，加载方式为应力控制，应力比 $R = -1$ ，试验数据详见表 4-4。

表 4-2 300 CVM 马氏体时效钢疲劳试验数据

加载顺序	加载应力	试验编号	加载循环次数		试验寿命 N_{fi}
			n_1	n_2	
高-低加载	$\sigma_1=1111 \text{ MPa}$ $\sigma_2=833 \text{ MPa}$	1	11,968	49,044	61,012
		2	16,412	33,672	50,084
		3	24,420	21,228	45,648
		4	31,900	9028	40,928
高-低加载	$\sigma_1=1372 \text{ MPa}$ $\sigma_2=1111 \text{ MPa}$	5	960	24,684	25,644
		6	948	40,832	41,780
		7	4944	12,364	17,308
		8	7404	8580	15,984
高-低加载	$\sigma_1=1303 \text{ MPa}$ $\sigma_2=751 \text{ MPa}$	9	971	367,810	368,781
		10	1991	93,560	95,551
		11	3790	45,610	49,400
		12	7166	19,300	26,466
		13	10,001	18,130	28,131
高-低加载	$\sigma_1=1095 \text{ MPa}$ $\sigma_2=751 \text{ MPa}$	14	3953	479,500	483,453
		15	11,811	183,610	195,421
		16	15,192	90,640	105,832
		17	31,575	26,900	58,475

表 4-3 铝合金 Al-2024-T42 疲劳试验数据

加载顺序	加载应力	试验编号	加载循环次数		试验寿命 N_{fi}
			n_1	n_2	
高-低加载	$\sigma_1=200 \text{ MPa}$ $\sigma_2=150 \text{ MPa}$	1		259,100	289,100
		2	30,000	233,400	263,400
		3		193,500	223,500

续表 4-3 铝合金 Al-2024-T42 疲劳试验数据

加载顺序	加载应力	试验编号	加载循环次数		试验寿命 N_{fi}
			n_1	n_2	
高-低加载	$\sigma_1=200$ MPa $\sigma_2=150$ MPa	4		90,300	150,300
		5	60,000	98,250	158,250
		6		114,600	174,600
		7		86,000	176,000
		8	90,000	42,300	132,300
		9		99,800	189,800
		10		138,000	224,000
		11	86,000	147,000	233,000
		12		148,500	234,500
低-高加载	$\sigma_1=150$ MPa $\sigma_2=200$ MPa	13		138,000	310,000
		14	172,000	139,500	311,500
		15		123,000	295,000
		16		89,000	347,000
		17	258,000	81,000	339,000
		18		75,000	333,000

表 4-4 30NiCrMoV12 钢疲劳试验数据

加载顺序	加载应力	试验编号	加载循环次数		试验寿命 N_{fi}
			n_1	n_2	
高-低加载	$\sigma_1=485$ MPa $\sigma_2=400$ MPa	1	13,749	51,304	65,053
		2	27,499	45,765	73,264
		3	41,249	16,032	57,281
	$\sigma_1=465$ MPa $\sigma_2=420$ MPa	4	17,013	66,845	83,858
		5	34,027	30,405	64,432
		6	51,040	38,262	89,302
	$\sigma_1=450$ MPa $\sigma_2=420$ MPa	7	20,082	79,372	99,454
		8	40,165	24,711	64,876
		9	60,248	15,943	76,191

续表 4-4 30NiCrMoV12 钢疲劳试验数据

加载顺序	加载应力	试验编号	加载循环次数		试验寿命 N_{ft}
			n_1	n_2	
低-高加载	$\sigma_1=400$ MPa $\sigma_2=485$ MPa	10	36,440	53,348	89,788
		11	72,870	45,373	118,243
		12	109,310	46,693	156,003
	$\sigma_1=420$ MPa $\sigma_2=465$ MPa	13	28,469	58,594	87,063
		14	56,938	56,416	113,354
		15	85,407	48,998	134,405
	$\sigma_1=420$ MPa $\sigma_2=450$ MPa	16	28,469	70,530	98,999
		17	56,938	39,362	96,300
		18	85,407	10,523	95,930

根据上述试验数据，本节分别运用 Miner 法则、Corten 模型、Kwofie 模型以及所提模型进行损伤和寿命估算。三种试样的寿命预测结果分别如图 4-13、4-14、4-15 所示，累积损伤临界值的计算结果分别见表 4-5、4-6 和 4-7。此外，对四种模型估算的临界损伤值进行统计分析，在不同加载条件下绘制临界损伤值的盒须图，如图 4-16 至图 4-20 所示。

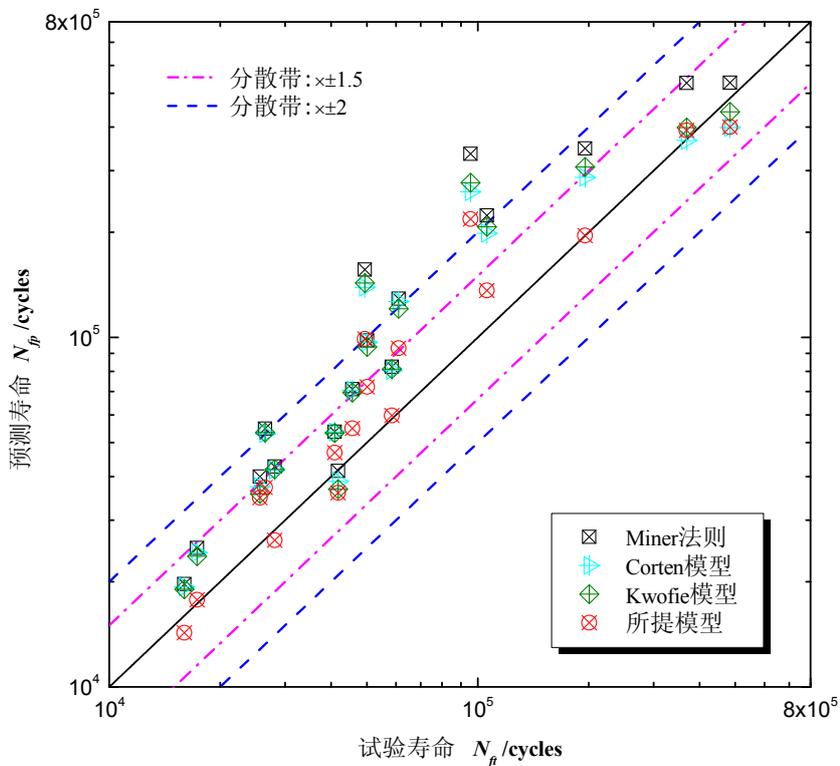


图 4-13 四种模型的预测寿命与试验寿命比较 (300 CVM 马氏体时效钢)

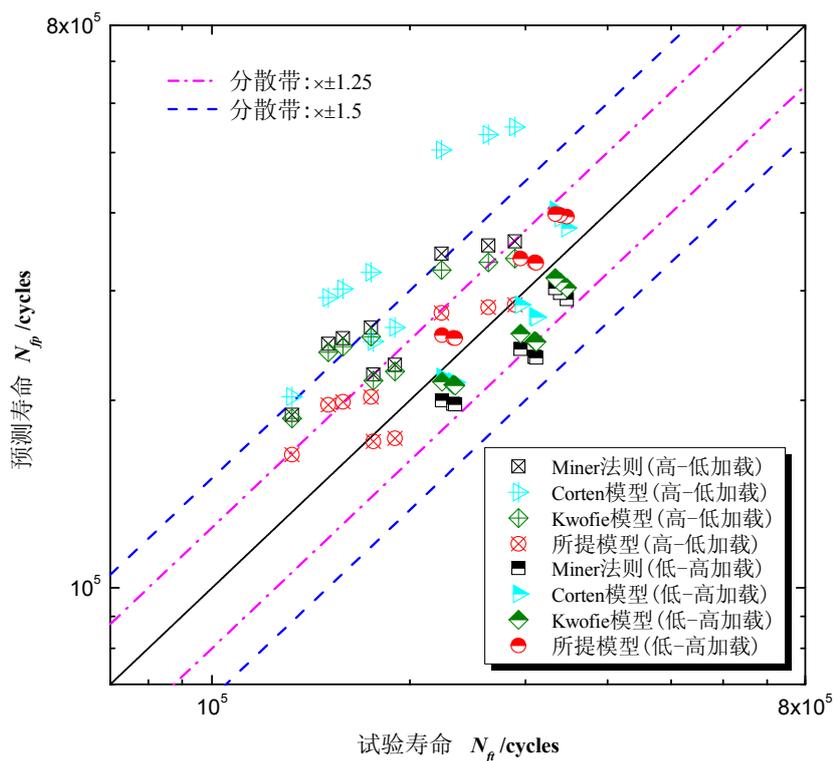


图 4-14 四种模型的预测寿命与试验寿命比较 (Al-2024-T42)

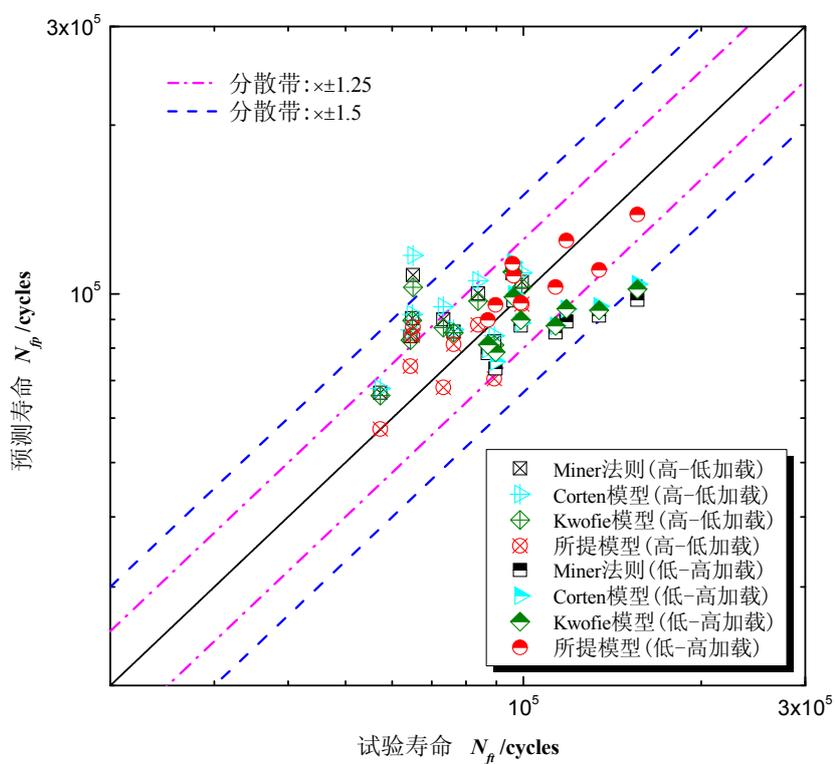


图 4-15 四种模型的预测寿命与试验寿命比较 (30NiCrMoV12 钢)

表 4-5 四种模型临界损伤预测值比较（300 CVM 马氏体时效钢）

试验编号	模型临时损伤预测值			
	Miner 法则	Corten 模型	Kwofie 模型	所提模型
1	0.4730	0.4818	0.5052	0.6552
2	0.5110	0.5170	0.5331	0.6938
3	0.6420	0.6458	0.6559	0.8309
4	0.7620	0.7636	0.7679	0.8747
5	0.6410	0.6850	0.7186	0.7370
6	1.0070	1.0797	1.1354	1.1638
7	0.6930	0.7150	0.7319	0.9745
8	0.8120	0.8273	0.8390	1.1194
9	0.6900	1.0063	0.9242	0.9424
10	0.2850	0.3655	0.3446	0.4376
11	0.3160	0.3552	0.3450	0.4989
12	0.4830	0.4996	0.4953	0.7104
13	0.6590	0.6746	0.6705	1.0704
14	0.9030	1.2129	1.0939	1.2077
15	0.5620	0.6807	0.6351	0.9985
16	0.4740	0.5326	0.5101	0.7771
17	0.7090	0.7264	0.7197	0.9777

表 4-6 四种模型临界损伤预测值比较（铝合金 Al-2024-T42）

加载顺序	试验编号	不同模型临时损伤预测值			
		Miner 法则	Corten 模型	Kwofie 模型	所提模型
高-低加载	1	0.8030	0.5260	0.8560	1.0150
	2	0.7430	0.4930	0.7910	0.9340
	3	0.6500	0.4430	0.6900	0.8090
	4	0.6100	0.5140	0.6290	0.7640
	5	0.6290	0.5240	0.6490	0.7960
	6	0.6670	0.5440	0.6900	0.8620
	7	0.8000	0.7080	0.8180	1.0240
	8	0.6980	0.6530	0.7070	0.8090
	9	0.8320	0.7250	0.8530	1.0920

续表 4-6 四种模型临界损伤预测值比较（铝合金 Al-2024-T42）

加载顺序	试验编号	不同模型临时损伤预测值			
		Miner 法则	Corten 模型	Kwofie 模型	所提模型
低-高加载	10	1.1200	1.0280	1.0450	0.8800
	11	1.1800	1.0880	1.1000	0.9250
	12	1.1900	1.0980	1.1100	0.9320
	13	1.3200	1.1360	1.2450	0.9310
	14	1.3300	1.1460	1.2550	0.9370
	15	1.2200	1.0360	1.1530	0.8730
	16	1.1930	0.9180	1.1450	0.8800
	17	1.1400	0.8640	1.0960	0.8550
	18	1.1000	0.8240	1.0590	0.8360

表 4-7 四种模型临界损伤预测值比较（30NiCrMoV12 钢）

加载顺序	试验编号	不同模型临时损伤预测值			
		Miner 法则	Corten 模型	Kwofie 模型	所提模型
高-低加载	1	0.6020	0.5551	0.6334	0.7451
	2	0.8140	0.7722	0.8420	1.0760
	3	0.8600	0.8453	0.8698	0.9981
	4	0.8370	0.7943	0.8642	0.9529
	5	0.7670	0.7476	0.7794	0.8679
	6	1.0860	1.0616	1.1015	1.2664
	7	0.9470	0.9122	0.9685	1.0375
	8	0.7170	0.7062	0.7237	0.7696
	9	0.8900	0.8830	0.8943	0.9373
低-高加载	10	1.2200	1.1867	1.1405	0.9397
	11	1.3250	1.2584	1.2574	0.9498
	12	1.5990	1.4991	1.5294	1.1264
	13	1.1110	1.0928	1.0729	0.9691
	14	1.3290	1.2926	1.2923	1.1017
	15	1.4700	1.4154	1.4382	1.2185
	16	1.1280	1.1155	1.1017	1.0271
	17	0.9900	0.9650	0.9753	0.8943
	18	0.8810	0.8436	0.8771	0.8479

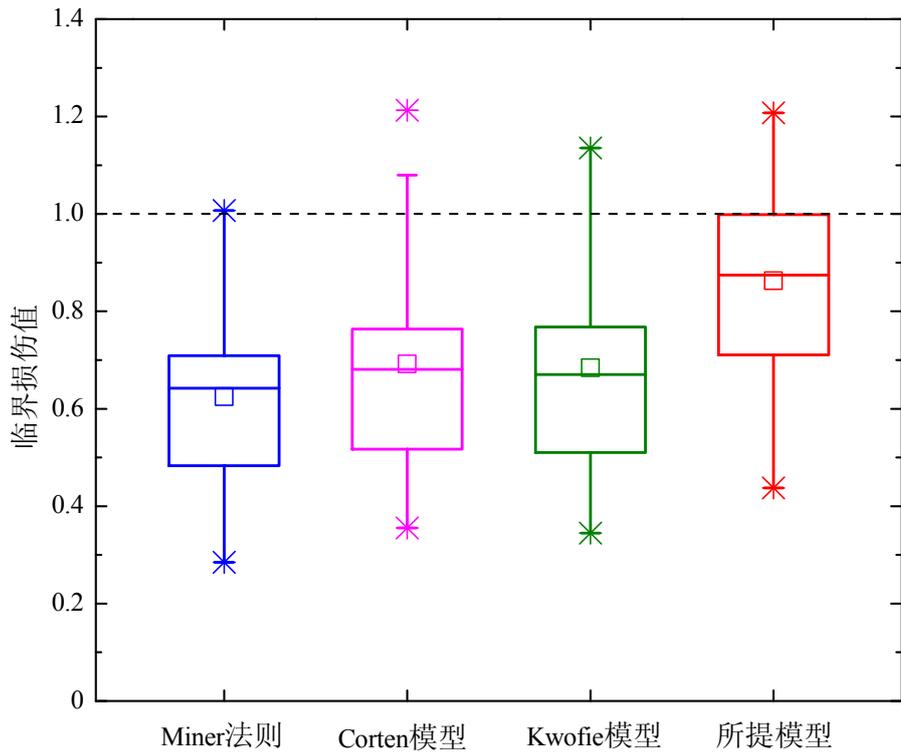


图 4-16 四种模型临界损伤值统计分析 (300 CVM 马氏体时效钢)

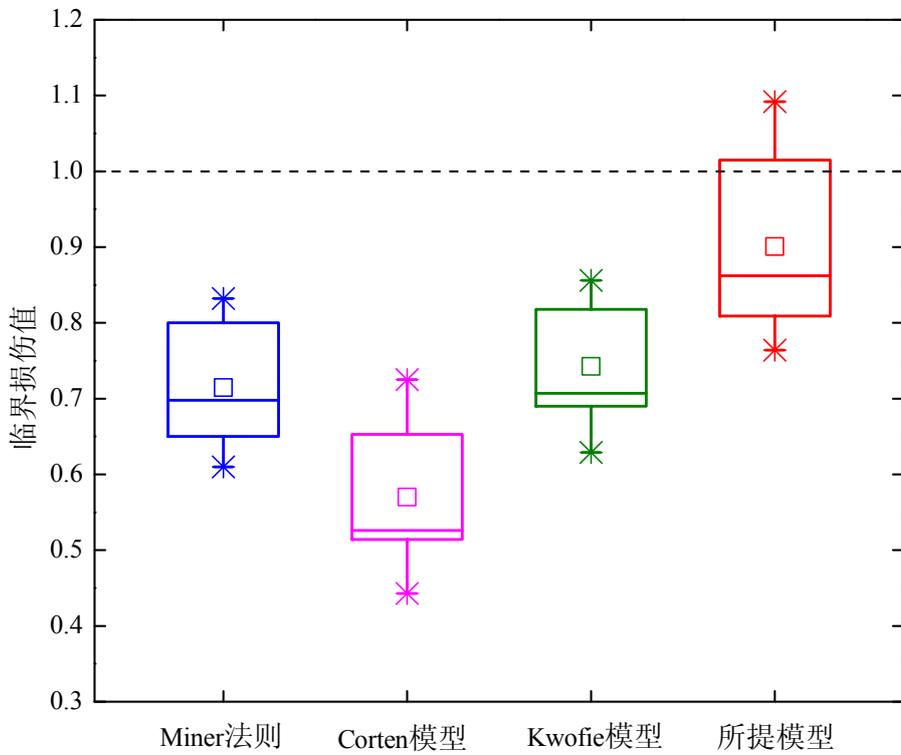


图 4-17 四种模型临界损伤值统计分析 (Al-2024-T42, 高-低加载)

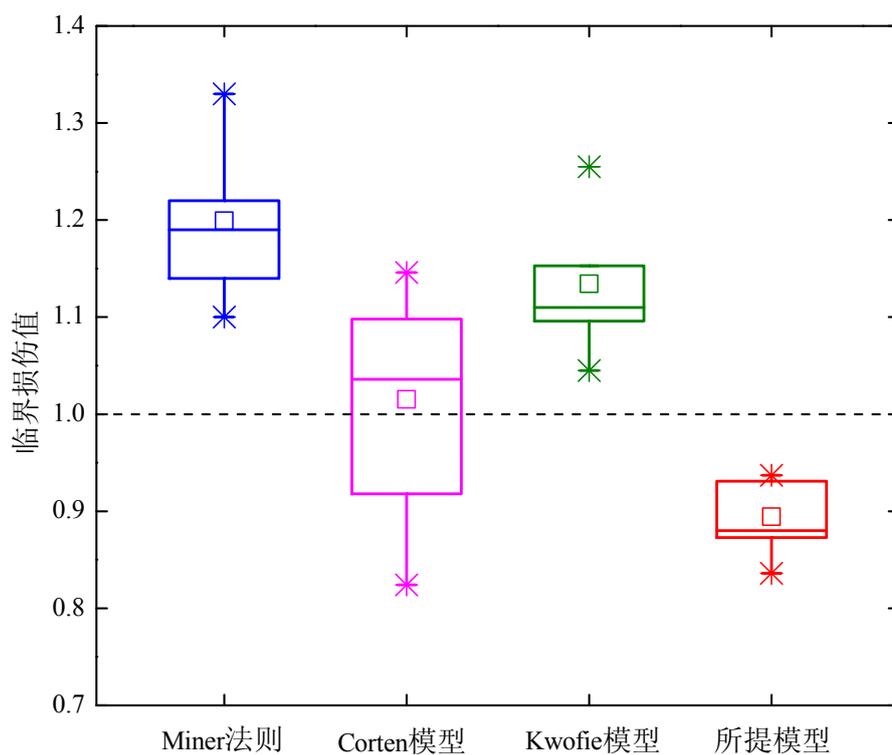


图 4-18 四种模型临界损伤值统计分析 (Al-2024-T42, 低-高加载)

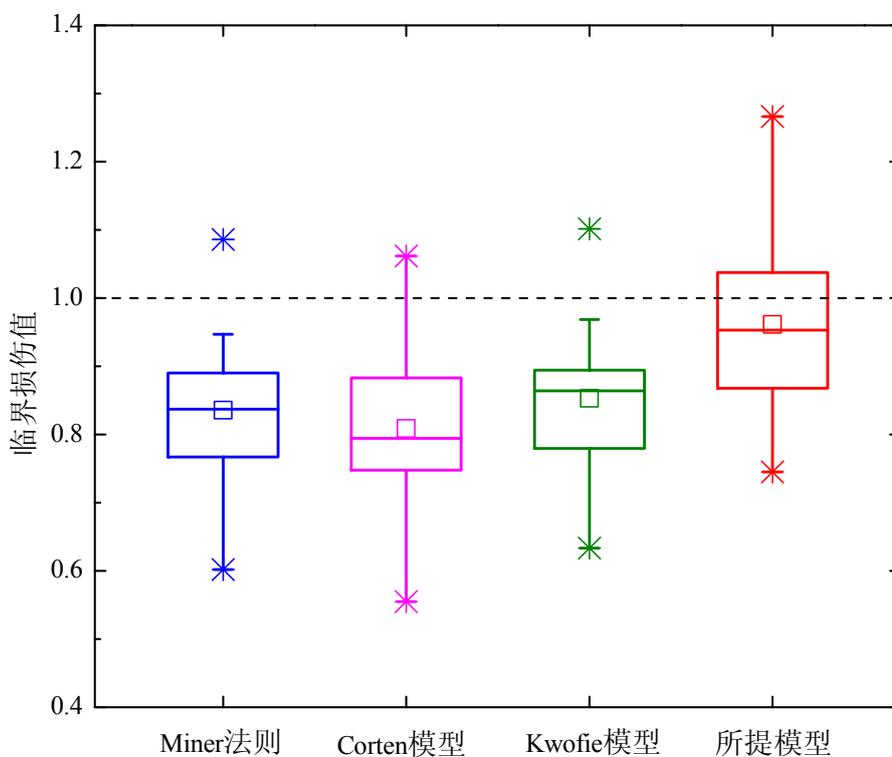


图 4-19 四种模型临界损伤值统计分析 (30NiCrMoV12 钢, 高-低加载)

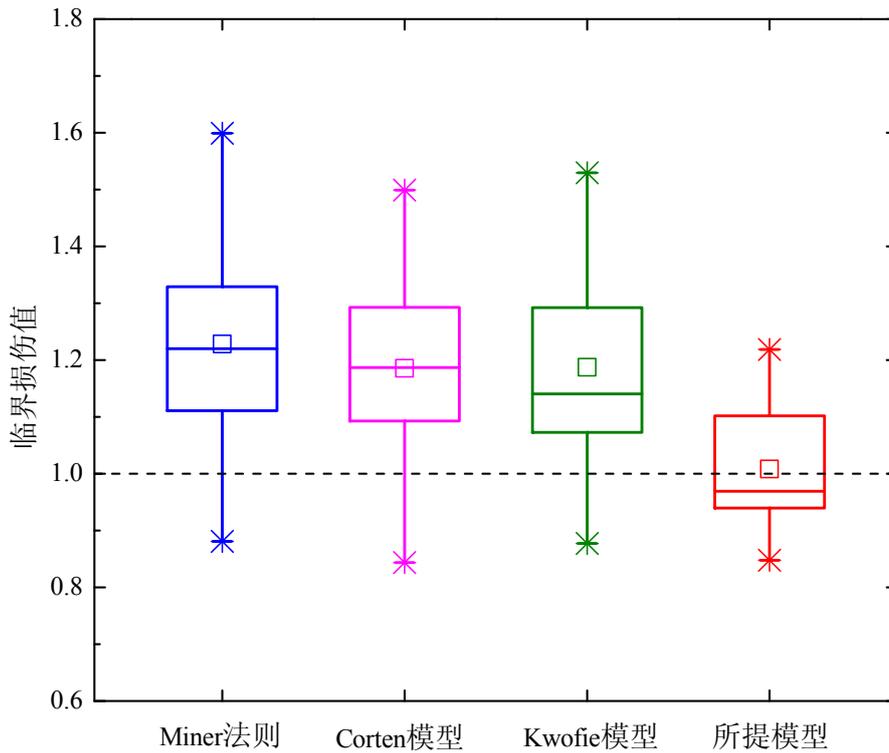


图 4-20 四种模型临界损伤值统计分析 (30NiCrMoV12 钢, 低-高加载)

对比图 4-13 至图 4-15 中四种模型的寿命预测值与试验值可知, 本章提出的修正线性损伤累积模型的预测能力明显优于 Miner 法则、Corten 模型和 Kwofie 模型。上述四种模型的失效判据均为 $D_c = 1$, 从图 4-16 至图 4-20 中临界损伤的统计分析结果来看, 所提模型的预测值在总体上更接近于 1, 因此, 其寿命预测精度具有更高的准确性。在上述四种模型中, Miner 法则将疲劳损伤定义为加载循环比, 简化了疲劳失效机理, 未能考虑载荷历程对损伤累积的影响, 导致寿命预测误差较大。Corten 模型通过改变 S-N 曲线的斜率, 将载荷相互作用效应纳入寿命预测中, 但其预测结果与实际值仍存在较大偏差。这主要是由于该模型将损伤指数 d 视为一个材料常数, 而已有研究表明^[110, 276], d 取值不仅与材料属性有关, 还与载荷谱中的应力状态有关。Kwofie 模型在 Miner 法则的基础上进一步提高了寿命预测精度, 但总体上提升幅度较小, 这是由于该模型的载荷效应系数只考虑了当前载荷和初始载荷的寿命信息, 无法揭示损伤累积的动态特性。相比之下, 所提模型的载荷效应系数综合考虑了载荷历程中所有载荷的寿命水平以及此前载荷的损伤状态, 更符合损伤发展的物理过程。

4.5.2 多级加载下模型验证

为了进一步验证所提模型在多级载荷下的适用性和准确性, 本节以焊接球节

点网架结构和 41Cr4 横向孔试件多级应力谱疲劳试验为例进行分析。

(1) 焊接球节点网架结构疲劳试验

焊接球节点网架属于空间网格结构，具有较高的刚度和承载能力，广泛应用于机场维修机库、水电站、工业厂房等工业建筑以及剧院、体育馆、火车站等大型公用设施。文献[277]以焊接球节点网架结构开展了一系列多级载荷疲劳试验，试件是由无缝钢管、空心球和十字板组成的焊接结构，材质均为 Q235B，如图 4-21 所示。试验加载方式为应力控制，加载顺序为递增加载，试件破坏部位主要发生在管-球连接处和十字板-球连接处，试验加载参数详见表 4-8。



图 4-21 焊接球节点网架结构^[277]

表 4-8 焊接球节点网架结构疲劳试验数据

试验编号	加载应力	加载循环次数					试验寿命 $N_{ff}/10^4$	破坏部位
		$n_1/10^4$	$n_2/10^4$	$n_3/10^4$	$n_4/10^4$	$n_5/10^4$		
1	$\sigma_1=38$ MPa						104.75	管-球连接处
	$\sigma_2=40$ MPa	40	40	24.75	—	—		
	$\sigma_3=42$ MPa							

续表 4-8 焊接球节点网架结构疲劳试验数据

试验 编号	加载应力	加载循环次数					试验寿命 $N_{fi}/10^4$	破坏部位
		$n_1/10^4$	$n_2/10^4$	$n_3/10^4$	$n_4/10^4$	$n_5/10^4$		
2	$\sigma_1=40$ MPa						107.63	管-球连 接处
	$\sigma_2=42$ MPa	40	40	27.63	—	—		
	$\sigma_3=44$ MPa							
3	$\sigma_1=23.3$ MPa						76.56	十字板- 球连接处
	$\sigma_2=25.1$ MPa	12.97	44.35	19.24	—	—		
	$\sigma_3=26.0$ MPa							
4	$\sigma_1=20.6$ MPa						180.44	十字板- 球连接处
	$\sigma_2=21.5$ MPa	49.6	50.3	40.6	39.94	—		
	$\sigma_3=22.4$ MPa							
	$\sigma_4=23.3$ MPa							
5	$\sigma_1=28.95$ MPa						128.24	十字板- 球连接处
	$\sigma_2=30.48$ MPa	40	40	40	8.24	—		
	$\sigma_3=32.00$ MPa							
	$\sigma_4=35.05$ MPa							
6	$\sigma_1=30.48$ MPa						134.05	十字板- 球连接处
	$\sigma_2=33.52$ MPa	40	40	40	14.05	—		
	$\sigma_3=35.05$ MPa							
	$\sigma_4=38.10$ MPa							
7	$\sigma_1=22.4$ MPa						158.05	十字板- 球连接处
	$\sigma_2=23.3$ MPa							
	$\sigma_3=25.1$ MPa	25.03	53.07	44.35	21.56	14.04		
	$\sigma_4=26.0$ MPa							
	$\sigma_5=30.9$ MPa							
8	$\sigma_1=32.76$ MPa						173.03	十字板- 球连接处
	$\sigma_2=34.29$ MPa							
	$\sigma_3=35.81$ MPa	40	40	40	40	13.03		
	$\sigma_4=37.33$ MPa							
	$\sigma_5=38.86$ MPa							

根据表 4-8 中试验数据，分别应用 Miner 法则、Corten 模型、Kwofie 模型和所提模型进行疲劳寿命和损伤估算。其中，寿命预测结果如图 4-22 所示，四种模型临界损伤预测值及其统计结果分别如表 4-9 和图 4-23 所示。

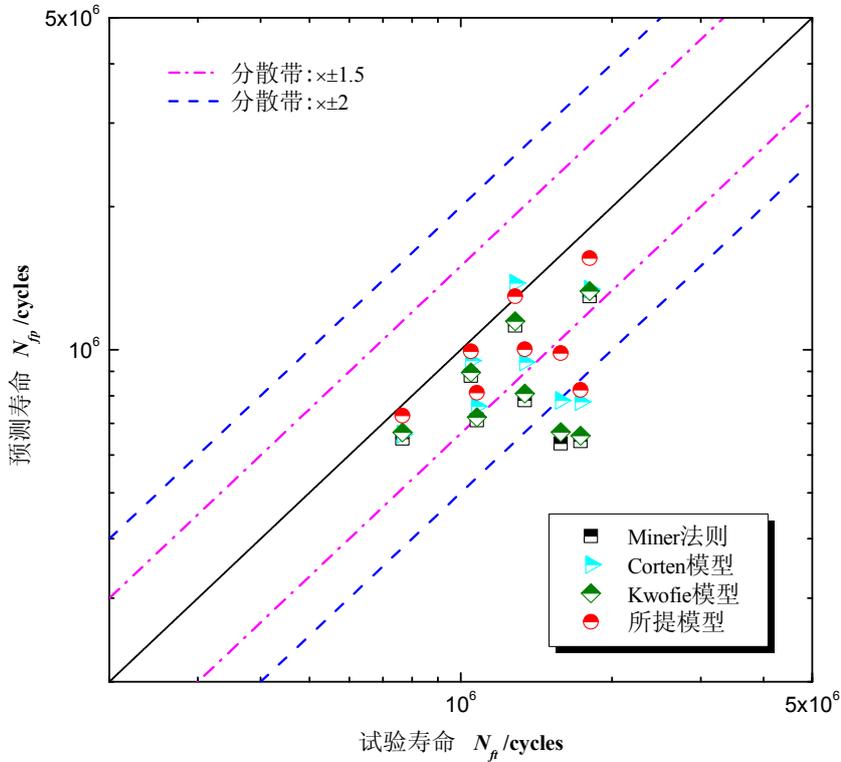


图 4-22 四种模型的预测寿命与试验寿命比较（焊接球节点网架结构）

表 4-9 四种模型临界损伤预测值比较（焊接球节点网架结构）

试验编号	模型临时损伤预测值			
	Miner 法则	Corten 模型	Kwofie 模型	所提模型
1	1.1876	1.1032	1.1693	1.0555
2	1.5158	1.4156	1.4926	1.3258
3	1.1767	1.1523	1.1429	1.0531
4	1.3926	1.3458	1.3583	1.1575
5	1.1404	0.9289	1.1172	0.9888
6	1.7129	1.4235	1.6566	1.3372
7	2.4894	2.0209	2.3552	1.6059
8	2.6932	2.2250	2.6247	2.1033

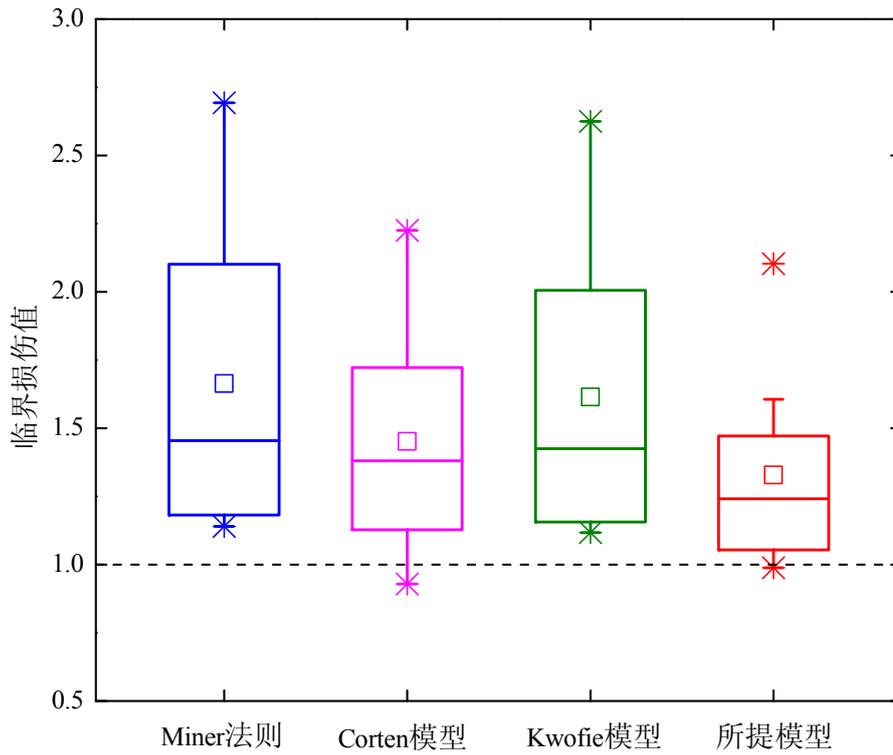


图 4-23 四种模型临界损伤值统计分析 (焊接球节点网架结构)

(2) 41Cr4 横向孔试件疲劳试验

文献[1]以 41Cr4 横向孔试件进行了两组 CFD (CFD1 和 CFD2) 试验。试验加载参数及损伤估算结果见表 4-10 和表 4-11。疲劳寿命与临界损伤的预测结果分别如图 4-24 和图 4-25 所示。两组试验的损伤演化规律分别如图 4-26 和图 4-27 所示。

表 4-10 CFD1 试验加载参数与疲劳损伤估算结果

应力级别	应力幅 σ_i /(MPa)	试验加载参数		不同应力级别下疲劳损伤估算值			
		n_i	N_{fi}	Miner 法则	Corten 模型	Kwofie 模型	所提 模型
1	505	4	9.00×10^3	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
2	475	32	1.16×10^4	0.0028	0.0025	0.0029	0.0028
3	423	560	2.10×10^4	0.0267	0.0223	0.0292	0.0268
4	362	5,440	4.70×10^4	0.1158	0.0877	0.1368	0.1206
5	287	40,000	1.55×10^5	0.2580	0.1676	0.3387	0.3458
6	212	184,000	8.70×10^5	0.2110	0.1328	0.3169	0.6645
7	137	560,000	∞	0	0.0322	0	0
8	63	1,210,000	∞	0	0.0008	0	0

表 4-11 CFD2 试验加载参数与疲劳损伤估算结果

应力级别	应力幅 $\sigma_i / (\text{MPa})$	试验加载参数		不同应力级别下疲劳损伤估算值			
		n_i	N_{fi}	Miner 法则	Corten 模型	Kwofie 模型	所提 模型
1	350	44	5.60×10^4	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008
2	332	352	7.40×10^4	0.0047	0.0046	0.0048	0.0047
3	298	6160	1.30×10^5	0.0475	0.0434	0.0512	0.0477
4	254	59,840	2.80×10^5	0.2140	0.1667	0.2455	0.2290
5	201	440,000	1.25×10^6	0.3520	0.3149	0.4520	0.6468
6	149	2,024,000	∞	0	0.2552	0	0
7	96	6,160,000	∞	0	0.0607	0	0
8	44	13,310,000	∞	0	0.0014	0	0

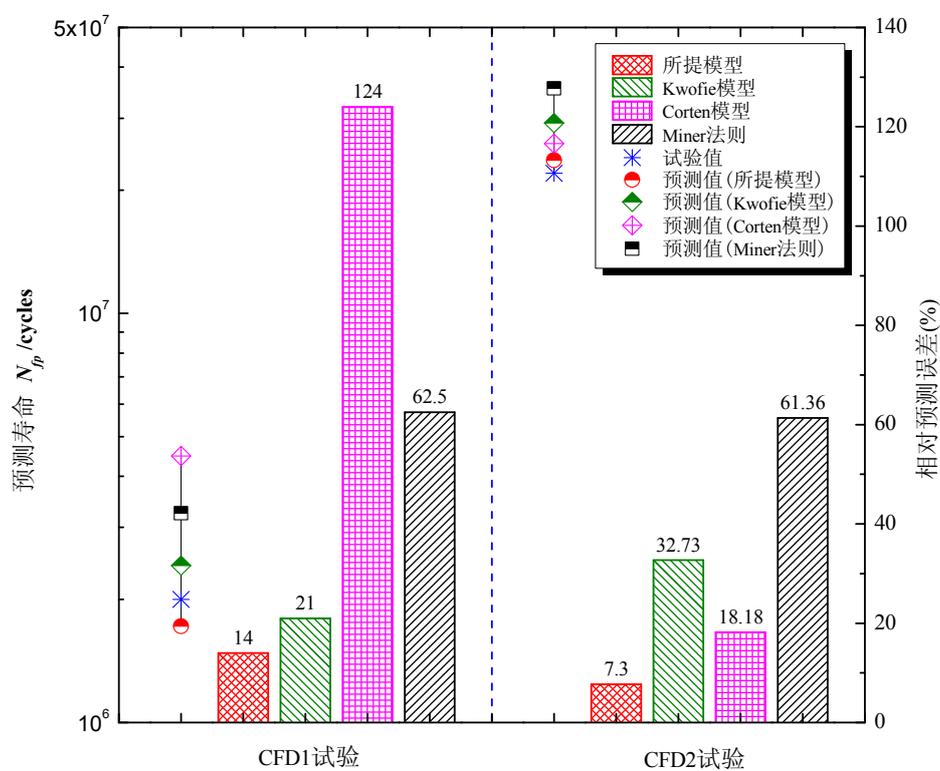


图 4-24 四种模型疲劳寿命预测值与相对预测误差 (41Cr4)

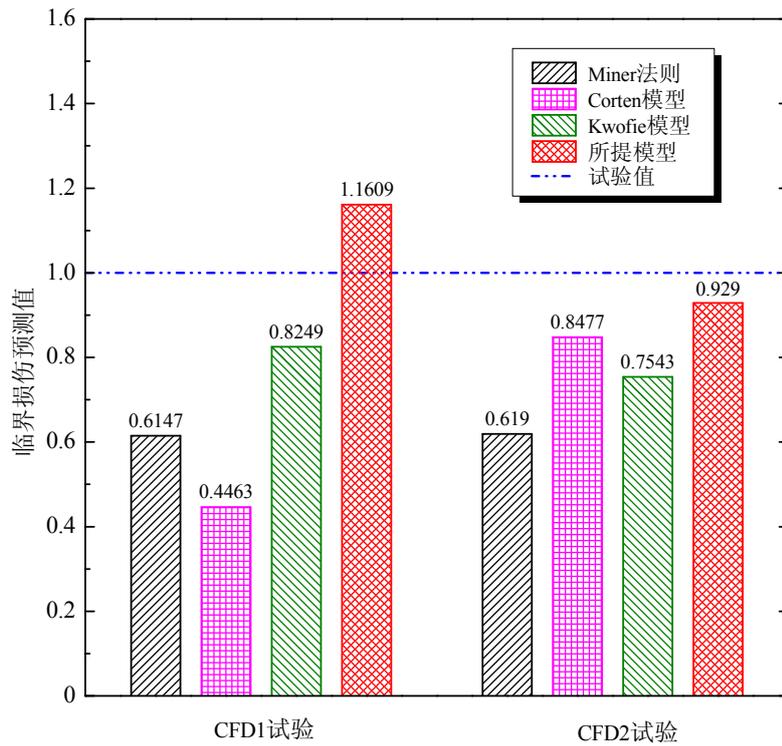


图 4-25 四种模型临界损伤预测值与试验值比较 (41Cr4)

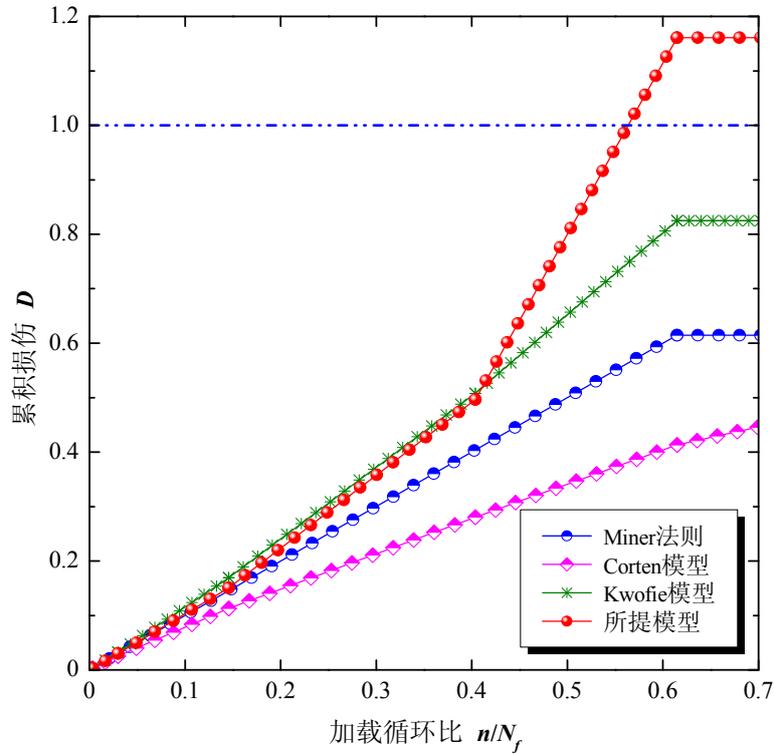


图 4-26 四种模型疲劳损伤演化规律比较 (41Cr4, CFD1 试验)

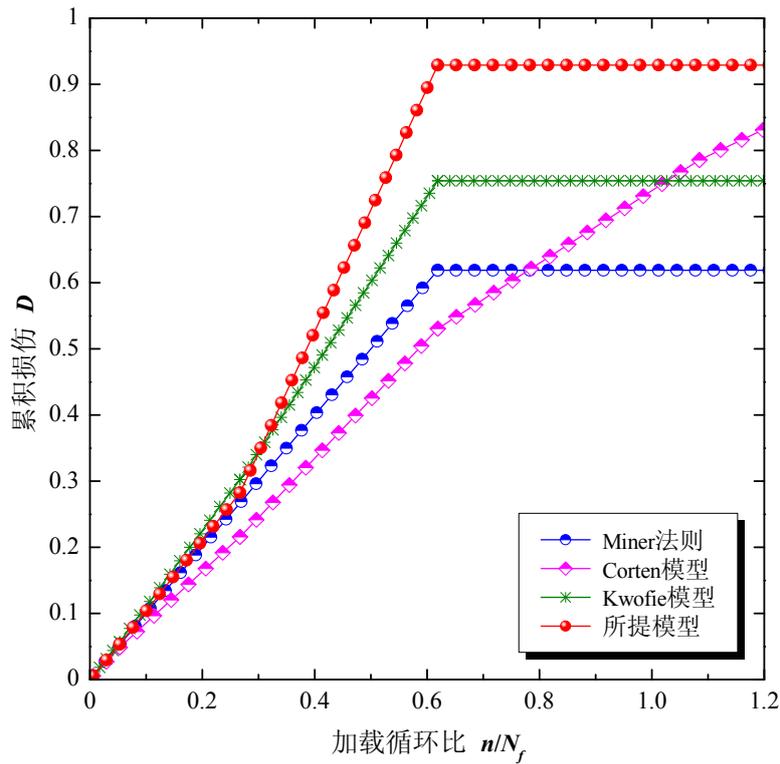


图 4-27 四种模型疲劳损伤演化规律比较 (41Cr4, CFD2 试验)

由图 4-22 和图 4-24, 相比 Miner 法则、Corten 模型和 Kwofie 模型, 所提模型在不同的试验条件下较好地估算了构件的疲劳寿命。从图 4-23 和图 4-25 中四种模型临界损伤的预测结果来看, 所提模型的预测值更接近于试验值。通过对比图 4-26 和图 4-27 中损伤演化规律发现, 四种模型的损伤增长均为线性累积。其中, Kwofie 模型和所提模型的预测曲线均在 Miner 法则的基础上向上偏转, 由于载荷加载顺序为递减加载, 这两种模型对损伤发展有促进作用; 相比 Miner 法则, Corten 模型的预测曲线向下偏转, 对损伤发展有迟滞作用, 但由于该模型考虑了疲劳极限以下小载荷对损伤的贡献, 其在 CFD2 试验中的寿命预测精度得到了提升。从上述四种模型的形式来看, Miner 法则未考虑载荷历程效应的影响; Corten 模型和 Kwofie 模型的载荷效应系数只涉及当前载荷与最大载荷或初始载荷的加载信息, 不能充分描述多级复杂载荷损伤发展的演变历程; 而所提模型由于考虑了更多的载荷历程信息, 其寿命预测能力得到了显著提升。综上所述, 相比其他三种线性法则, 本章提出的修正模型在损伤定量分析和寿命估算方面均具有更高的准确性。

4.6 本章小结

针对非线性损伤理论的缺陷以及线性损伤累积的优势, 本章从剩余寿命的角

度出发，基于动态剩余 S-N 曲线和材料记忆的概念，通过引入材料记忆性能退化参数表征动态剩余 S-N 曲线的斜率比，提出了一种修正的线性损伤累积模型。该模型保留了 Miner 法则形式上的简易性，便于疲劳损伤定量分析和寿命估算。然后，以现有三种典型的线性损伤法则为例进行模型比较，归纳总结得出四种模型的共有属性和基本特征，并选取三组疲劳载荷进行试验设计，研究了这些模型的线性损伤增长规律。最后，通过多组试验算例对所提模型进行了验证，相比其他三种模型，所提模型综合考虑了载荷历程中所有载荷的寿命水平以及此前载荷的损伤状态，使寿命预测精度得到显著提升，且物理意义更加明确。

第五章 概率双线性损伤累积建模与时变疲劳可靠性分析

5.1 引言

结构的疲劳失效是其内部损伤不断累积的过程，当累积损伤达到损伤阈值时即发生疲劳破坏。前述章节中的损伤累积模型都是在确定性的基础上建立的。在工程实际中，疲劳损伤的特征表现为损伤累积的不可逆性和随机性，其随机性包含构成材料疲劳属性的内在分散性和与服役载荷、环境等因素相关的外在分散性。由于疲劳失效过程具有随机性和不确定性，疲劳可靠性分析已成为结构抗疲劳设计的关键问题，基于疲劳损伤累积的可靠性建模既要符合失效的物理规律，还要能正确描述损伤累积过程中的不确定性。

疲劳损伤累积理论为结构寿命预测和可靠性分析提供了有效途径，根据损伤累积的形式，该理论可分为线性、非线性和双线性损伤法则。其中，线性损伤法则或 Miner 法则因其形式简单在结构疲劳分析中得到了广泛应用，但该法则存在以下两个缺陷^[3, 235]：①它对失效机理进行了简化，未考虑载荷加载的顺序效应；②它是一个确定性的损伤累积理论，不能反映疲劳损伤的分散性和不确定性。针对第一个缺陷，许多学者提出了各种形式的非线性损伤理论对 Miner 法则进行修正，所建立的非线性模型都具有特定的物理基础，能够较好地解释载荷顺序效应。但是，该理论同样属于确定性理论，且模型参数较多，可靠性建模过程复杂，难以在工程实际中得到应用。针对第二个缺陷，现有常用的方法^[217-224, 228, 232-235]是通过引入概率统计理论进行不确定性建模与分析，以量化或表征损伤累积过程中的随机性。但这些建模方法大多仍以 Miner 法则为依据，难以揭示失效过程的物理本质。从微观物理角度分析，疲劳失效包含裂纹萌生和裂纹扩展两个阶段。双线性损伤累积理论正是以这两个阶段为基础，在每个阶段下均按线性损伤累积进行建模。该理论形式简单，能正确描述失效过程的两阶段特性，物理意义明确。为此，本章以双线性损伤理论为基础建立概率损伤累积模型。同时，考虑到疲劳过程载荷作用的时变特性，应用应力-强度干涉理论，构建基于“累积损伤-临界损伤”动态干涉模型，进行时变疲劳可靠性分析研究。

5.2 两阶段线性疲劳损伤累积理论

5.2.1 Grover-Manson 双线性损伤法则

疲劳断裂的失效过程一般包括裂纹成核、微观裂纹萌生与扩展、宏观裂纹萌

生与扩展以及失稳断裂四个阶段，如图 5-1 所示。

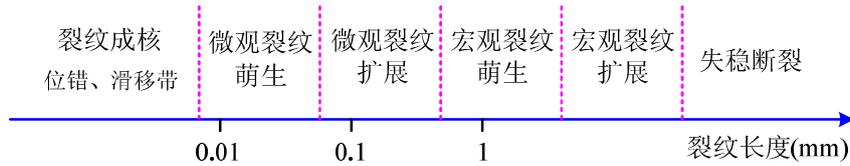


图 5-1 疲劳裂纹增长阶段

在工程实际中，通常裂纹萌生阶段包含裂纹成核和微观裂纹增长，裂纹扩展阶段则是宏观裂纹增长直至最终断裂的过程。相应地，疲劳损伤的累积过程也应包含裂纹萌生和裂纹扩展两个阶段。在 Langer^[278]和 Miner^[106]研究的基础上，Grover^[111]提出了一种概念性的两阶段线性损伤累积理论，将疲劳损伤划分为两个独立的阶段，且每个阶段都遵循 Miner 法则。该理论能有效解释载荷顺序效应，同时保留了 Miner 法则在形式上的简易性。Manson 和 Holford^[112-114]进一步量化了该理论，提出了双线性损伤法则。

在两级循环加载下，构件首先在第一级载荷 σ_1 下加载 n_1 次，然后在第二级载荷 σ_2 下加载 n_2 次后发生断裂失效，双线性损伤累积规律可用图 5-2 表示。

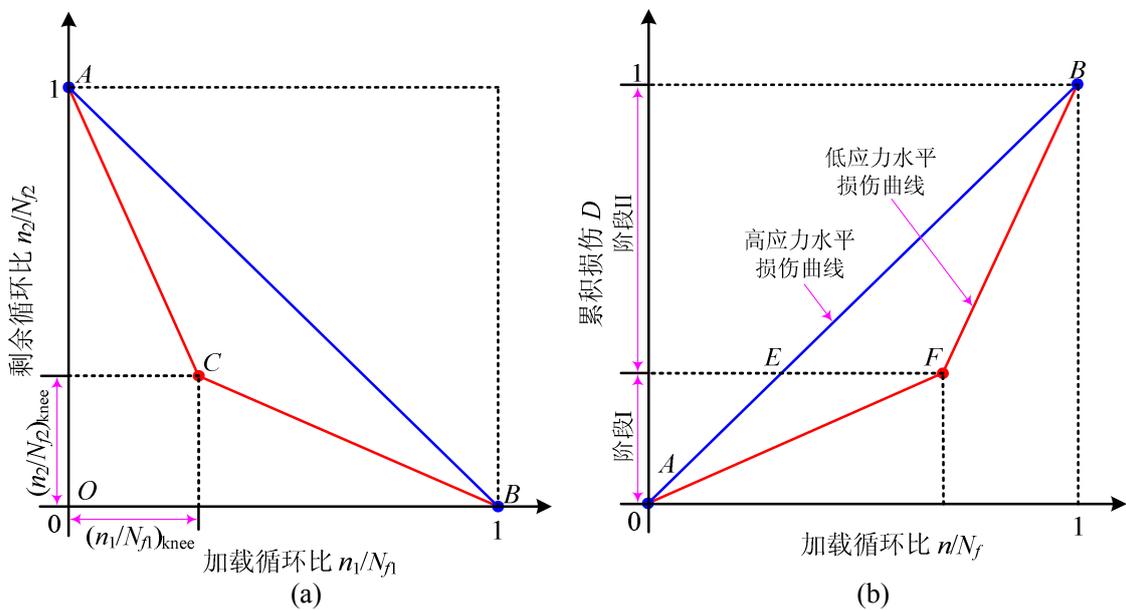


图 5-2 两级加载下双线性疲劳损伤累积规律。(a)循环比包络线；(b)高、低应力水平下的损伤增长曲线

将图 5-2(a)中的循环比包络线按逆时针旋转 90° 可得到图 5-2(b)所示的双线性损伤曲线，其中 AEB 和 AFB 分别表示高应力和低应力加载下的损伤曲线。双线性累积将整个疲劳过程划分为两个相互独立的阶段，其中阶段 I 代表疲劳裂纹萌生，

阶段 II 代表疲劳裂纹扩展。高应力水平下的损伤曲线是以 Miner 法则为基础构建的，不存在两个阶段的过渡；而低应力水平下的损伤曲线存在过渡拐点，表明裂纹萌生和裂纹扩展存在不同的损伤增长规律。在图 5-2(a)中，C 点坐标可由以下经验公式确定：

$$\begin{cases} \left(\frac{n_1}{N_{f1}}\right)_{\text{knee}} = 0.35 \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{0.25} \\ \left(\frac{n_2}{N_{f2}}\right)_{\text{knee}} = 0.65 \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{0.25} \end{cases} \quad (5-1)$$

为了阐释加载顺序对损伤累积的影响，构件分别在两级高-低加载和低-高加载下进行试验，损伤累积路径如图 5-3 所示。其中，高-低加载路径为 $AM \rightarrow MP \rightarrow PB$ ，低-高加载路径为 $AP \rightarrow PM \rightarrow MB$ 。

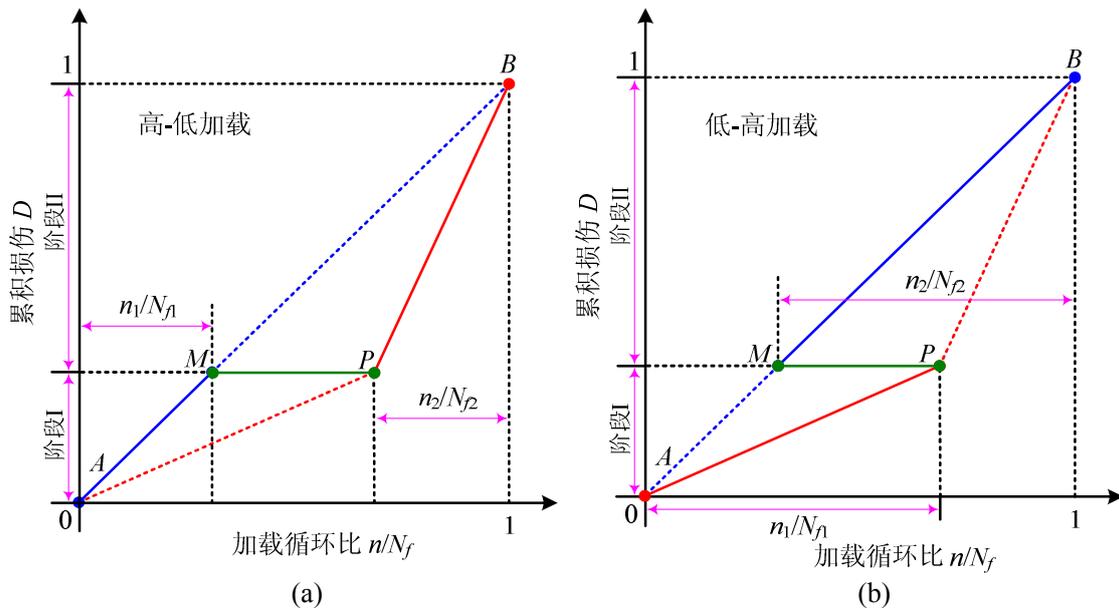


图 5-3 不同加载顺序下双线性损伤累积路径。(a)高-低加载；(b)低-高加载

由图 5-3 可以看出，在高-低加载下，累积循环比 $n_1 / N_{f1} + n_2 / N_{f2} < 1$ ，在低-高加载下， $n_1 / N_{f1} + n_2 / N_{f2} > 1$ ，体现了载荷作用的顺序效应。

根据损伤累积的两阶段特性，疲劳寿命在不同的阶段也相应地具有不同的表达形式。为此，以加载循环次数为横坐标，将图 5-2(b)中的损伤曲线 AFB 重新绘制于图 5-4 中。

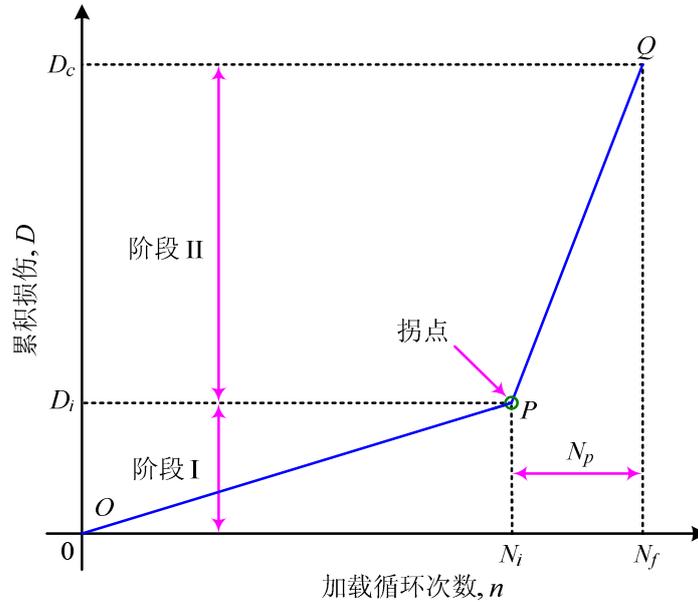


图 5-4 双线性疲劳损伤演化示意图

在阶段 I 下, 疲劳损伤不断累积直至达到该阶段下的损伤阈值, 即萌生损伤 D_i , 此阶段消耗的寿命 (N_I) 称为裂纹萌生寿命 N_i ; 在阶段 II 下, 当累积损伤达到临界 D_c 时, 构件发生疲劳破坏, 此阶段消耗的寿命 (N_{II}) 称为裂纹扩展寿命 N_p 。因此, 疲劳总寿命可表示为:

$$N_f = N_I + N_{II} = N_i + N_p \quad (5-2)$$

在图 5-4 中, 拐点 P 可由式(5-1)求得:

$$D_i = 0.35 \left(\frac{N_{ref}}{N_f} \right)^{0.25} \quad (5-3)$$

$$N_i = \alpha' N_f = \left(1 - 0.65 \left(\frac{N_{ref}}{N_f} \right)^{0.25} \right) N_f \quad (5-4)$$

式中, N_{ref} 是参考应力水平 σ_{ref} 所对应的疲劳寿命, 称为参考寿命; α' 是裂纹萌生阶段的寿命系数, $\alpha' \in [0, 1]$ 。

按照双线性损伤法则的计算约定, 其他应力水平下的拐点坐标可通过插值公式确定。为了计算方便, 使萌生损伤的计算结果保持不变, 则裂纹萌生寿命可由下式求得:

$$N_i = \alpha' N_f = N_f \exp(ZN_f^\phi) \quad (5-5)$$

其中,

$$\phi = \frac{1}{\ln\left(\frac{N_{ref}}{N_{fb}}\right)} \ln \left(\frac{\ln\left(0.35\left(\frac{N_{ref}}{N_{fb}}\right)^{0.25}\right)}{\ln\left(1-0.65\left(\frac{N_{ref}}{N_{fb}}\right)^{0.25}\right)} \right) \quad (5-6)$$

$$Z = \frac{\ln\left(0.35\left(\frac{N_{ref}}{N_{fb}}\right)^{0.25}\right)}{N_{ref}^{\phi}} \quad (5-7)$$

式中, N_{fb} 是选取的另一个参考寿命, 在此记作基准寿命。

通常, 参考寿命和基准寿命分别用载荷谱中的最小寿命水平和最大寿命水平表示, 且最小寿命水平下的损伤曲线被简化为 Miner 法则。随着载荷寿命水平的提高, 裂纹萌生寿命占据总寿命的比例也逐渐增加。若未来载荷谱中出现高于基准寿命的寿命水平, 则该寿命水平下的拐点需要通过外推计算确定, 或改变基准寿命水平重新计算载荷谱中所有寿命水平的拐点。为此, 在不考虑疲劳极限以下的小载荷对损伤贡献的情况下, 选取疲劳极限附近的寿命水平 (如循环基数 10^7) 作为基准寿命, 这样载荷谱中所有其他寿命水平下的拐点可直接利用插值公式 (5-5)-(5-7) 计算得到。

根据式(5-2)和式(5-5), 裂纹扩展寿命可表示为:

$$N_p = N_f - N_i = \left(1 - \exp(ZN_f^{\phi})\right) N_f \quad (5-8)$$

在进行双线性损伤累积计算时, 首先按阶段 I 进行损伤累积, 当 $\sum(n_i / N_{li}) = 1$ 时, 然后转入阶段 II, 直至 $\sum(n_i / N_{li}) = 1$, 发生疲劳破坏。

5.2.2 两阶段线性损伤累积的阐释

结构疲劳全寿命周期包括裂纹萌生寿命和裂纹扩展寿命。由于萌生阶段裂纹增长过程复杂, 一般采用基于唯象的损伤力学理论估算裂纹萌生寿命, 在裂纹扩展阶段采用断裂力学理论估算裂纹扩展寿命。针对双线性损伤累积的两阶段特性, 下面从损伤力学和断裂力学角度分别阐释裂纹萌生和裂纹扩展两个阶段下的损伤累积规律。

(1) 裂纹萌生阶段

在裂纹萌生阶段, 假设构件在多级循环应力水平 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_k$ 下分别加载 $n_1, n_2, n_3, \dots, n_k$ 次后达到萌生损伤临界值 D_{lc} , 相应的裂纹萌生寿命分别为 $N_{11}, N_{12}, N_{13}, \dots, N_{1k}$, 整个加载过程如图 5-5 所示。

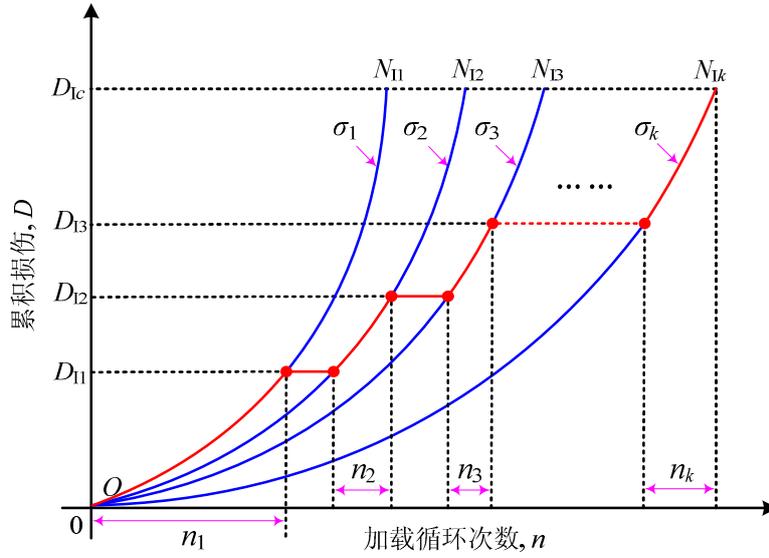


图 5-5 裂纹萌生阶段疲劳损伤演化曲线

按照损伤力学理论，损伤演化方程可描述为：

$$dD = G(\sigma, D) dn = \frac{1}{g(\sigma, D)} dn \quad (5-9)$$

式中， $G(\sigma, D)$ 为损伤演化速率函数。

对式(5-9)两端积分，得到裂纹萌生寿命表达式为：

$$N_{li} = \int_0^{D_{lc}} g(\sigma_i, D) dD \quad (5-10)$$

当构件在第一级载荷 σ_1 下循环 n_1 次，损伤累积量为 D_{11} ，由式(5-10)可得：

$$n_1 = \int_0^{D_{11}} g(\sigma_1, D) dD \quad (5-11)$$

构件继续在 σ_2 下循环 n_2 次后，损伤累积量为 D_{12} ，有：

$$n_2 = \int_{D_{11}}^{D_{12}} g(\sigma_2, D) dD \quad (5-12)$$

同理，若构件在 σ_i 下加载 n_i 次，此时损伤累积量为 D_{li} ，则有：

$$n_i = \int_{D_{l(i-1)}}^{D_{li}} g(\sigma_i, D) dD \quad (5-13)$$

将疲劳损伤定义为加载循环次数与裂纹萌生寿命之比，则裂纹萌生阶段下的损伤累积总量为：

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_{li}} = \frac{\int_0^{D_{11}} g(\sigma_1, D) dD}{\int_0^{D_{lc}} g(\sigma_1, D) dD} + \frac{\int_{D_{11}}^{D_{12}} g(\sigma_2, D) dD}{\int_0^{D_{lc}} g(\sigma_2, D) dD} + \dots + \frac{\int_{D_{l(k-1)}}^{D_{lc}} g(\sigma_k, D) dD}{\int_0^{D_{lc}} g(\sigma_k, D) dD} \quad (5-14)$$

假设损伤演化速率函数具有可分离性，如写成以下形式：

$$\frac{1}{g(\sigma_i, D)} = f(\sigma_i) / m(D) \quad (5-15)$$

将式(5-15)代入式(5-14)，可得：

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_{Li}} = \frac{\int_0^{D_{i1}} m(D) dD + \int_{D_{i1}}^{D_{i2}} m(D) dD + \dots + \int_{D_{i(k-1)}}^{D_{ic}} m(D) dD}{\int_0^{D_{ic}} m(D) dD} = 1 \quad (5-16)$$

式(5-16)与 Miner 法则形式相同，因此，在裂纹萌生阶段，疲劳损伤累积满足线性损伤法则。

(2) 疲劳裂纹扩展阶段

若扩展阶段的初始裂纹尺寸为 a_0 ，构件在多级应力变程 $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3, \dots, \Delta\sigma_k$ 下分别加载 $n_1, n_2, n_3, \dots, n_k$ 次循环后，裂纹达到临界尺寸 a_c 时发生断裂破坏，加载过程如图 5-6 所示。

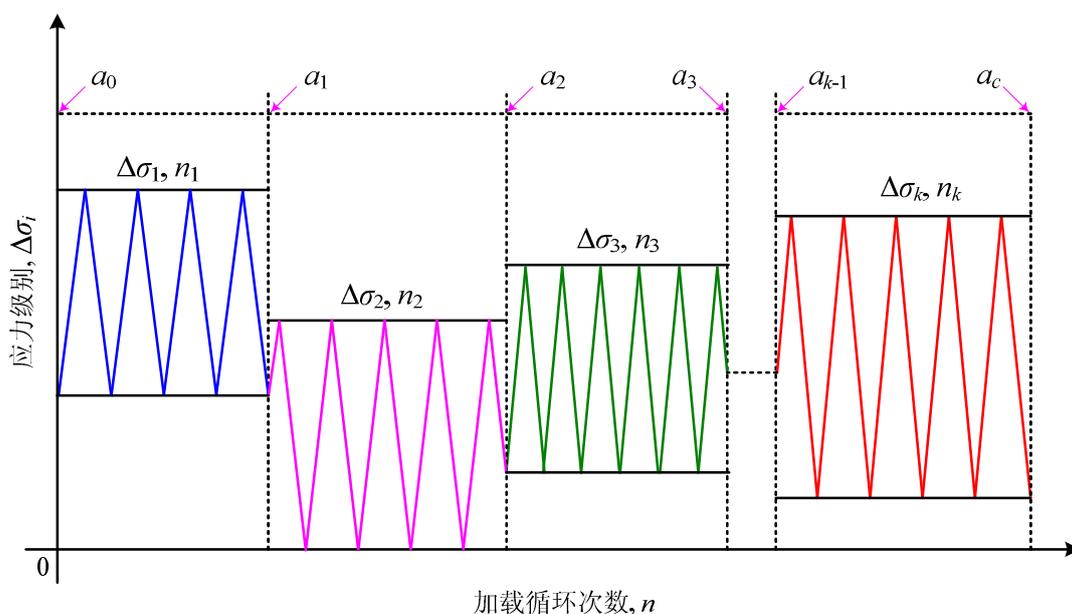


图 5-6 多级循环加载下疲劳裂纹扩展

在裂纹扩展阶段，由裂纹扩展速率公式可估算出裂纹扩展寿命，对 Paris 公式直接积分，可得裂纹扩展寿命为：

$$N_{pi} = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C(Y\Delta\sigma_i\sqrt{\pi a})^m} \quad (5-17)$$

式中， Y 为修正系数。

根据图 5-6, 构件首先在 $\Delta\sigma_1$ 下加载 n_1 次, 疲劳裂纹从 a_0 增长到 a_1 , 由式(5-17) 可得:

$$n_1 = \int_{a_0}^{a_1} \frac{da}{C(Y\Delta\sigma_1\sqrt{\pi a})^m} \quad (5-18)$$

然后, 构件继续在 $\Delta\sigma_2$ 下加载 n_2 次, 疲劳裂纹从 a_1 增长到 a_2 , 则有:

$$n_2 = \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{C(Y\Delta\sigma_2\sqrt{\pi a})^m} \quad (5-19)$$

同理, 若在 $\Delta\sigma_i$ 下加载 n_i 次, 裂纹长度从 a_{i-1} 增长到 a_i , 有:

$$n_i = \int_{a_{i-1}}^{a_i} \frac{da}{C(Y\Delta\sigma_i\sqrt{\pi a})^m} \quad (5-20)$$

同样, 将疲劳损伤定义为加载循环次数与裂纹扩展寿命之比, 结合式(5-17)和式(5-20), 可得 $\Delta\sigma_i$ 下的疲劳损伤表达式:

$$\frac{n_i}{N_{pi}} = \frac{\int_{a_{i-1}}^{a_i} \frac{da}{C(Y\Delta\sigma_i\sqrt{\pi a})^m}}{\int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C(Y\Delta\sigma_i\sqrt{\pi a})^m}} = \frac{\int_{a_{i-1}}^{a_i} \frac{da}{C(Y\sqrt{\pi a})^m}}{\int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C(Y\sqrt{\pi a})^m}} \quad (5-21)$$

在 k 级载荷加载下, 损伤累积总量为:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_{pi}} = \frac{\int_{a_0}^{a_1} \frac{da}{C(Y\sqrt{\pi a})^m} + \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{C(Y\sqrt{\pi a})^m} + \cdots + \int_{a_{k-1}}^{a_c} \frac{da}{C(Y\sqrt{\pi a})^m}}{\int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C(Y\sqrt{\pi a})^m}} = 1 \quad (5-22)$$

根据上述推导, 裂纹扩展阶段的损伤累积规律也满足线性损伤法则。

5.3 基于双线性损伤累积的概率模型

在工程实际中, 材料的力学属性和亚显微组织结构具有不均匀性, 使得结构疲劳抗力、裂纹萌生与裂纹扩展速率、疲劳寿命等呈现出统计特性。即使在良好的试验环境下, 材料的疲劳强度和寿命也往往具有较大的分散性。在传统疲劳设计中, 通常以应力和寿命的均值构建 S-N 曲线。由于实际疲劳试验数据的分散性, 应力与寿命之间不再是单纯地一一对应关系, 而是具有一定存活率的应力-寿命曲

线簇 (P-S-N 曲线), 如图 5-7 所示。

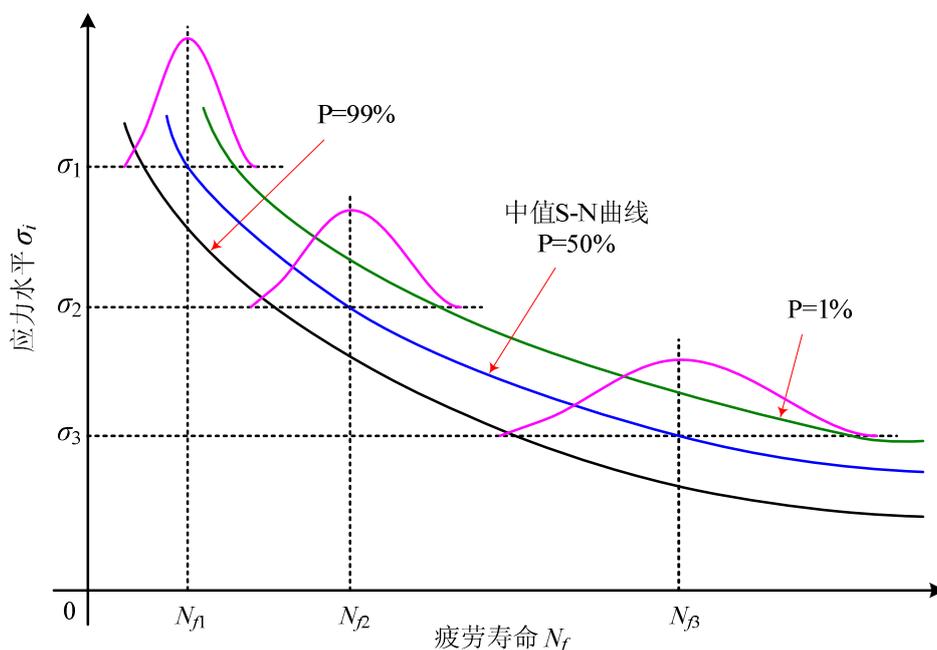


图 5-7 P-S-N 曲线示意图

在 P-S-N 曲线中, 中值 S-N 曲线的存活率仅为 50%, 这意味着在达到设计寿命前, 可能有一半的试件已发生失效, 这显然是不安全的。疲劳寿命的分布区域不同, 寿命数据的分散性也不尽相同, 其分散性随应力水平的减小逐渐增大。因此, 在结构疲劳分析中, 疲劳寿命应视为一个随机变量, 它具有特定的统计分布规律。已有研究表明^[232], 在恒幅或随机载荷下, 疲劳寿命多服从正态分布或对数正态分布。此外, 威布尔分布也经常用于拟合机械疲劳失效数据。由于正态分布和对数正态分布具有良好的线性特征, 本章主要基于这两种分布假设进行疲劳损伤分析与概率建模。

在恒幅加载下, 直接利用 P-S-N 曲线就可以获取结构的疲劳寿命及相应的失效概率。而在变幅加载下, 除了需要引入概率统计理论外, 还要借助于疲劳损伤累积理论, 建立累积损伤概率统计模型。基于概率统计的疲劳损伤建模主要包括两个方面内容^[230]: ①一个能正确描述失效过程的物理模型; ②一种合理的不确定性建模技术以表征或量化损伤累积过程的随机性。如前所述, 双线性损伤理论能正确描述疲劳失效的两阶段特性, 具有一定的物理基础, 在此本章基于该理论构建概率损伤累积模型。

5.3.1 正态分布下概率损伤累积建模

在本质上, 材料的疲劳演化过程具有随机性和不可逆性, 疲劳损伤累积是一

个随机过程，任意加载时刻所对应的瞬时累积损伤可认为是一个随机变量。概率损伤累积建模的目的是为了获取瞬时损伤和临界损伤的概率分布及其统计特征参量。在疲劳寿命服从正态分布的假设条件下，双线性损伤累积的概率建模过程如图 5-8 所示。

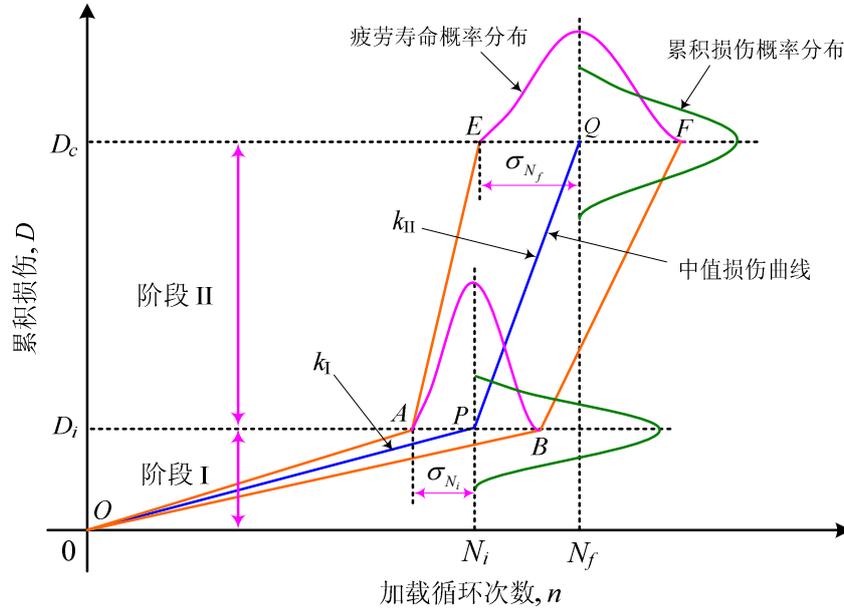


图 5-8 概率双线性损伤累积建模示意图

由图 5-8，损伤累积过程分为裂纹萌生和裂纹扩展两个阶段，且每个阶段下的累积损伤与载荷循环次数之间均具有线性关系。其中，中值损伤增长曲线为 OPQ ，累积损伤模型可描述为：

$$D = \begin{cases} k_1 n, & n \leq N_i \\ k_1 \alpha' N_f + k_{II} (n - \alpha' N_f), & N_i < n \leq N_f \end{cases} \quad (5-23)$$

式中， k_1 和 k_{II} 分别表示阶段 I 和阶段 II 下的损伤演化速率，且 $k_{II} > k_1$ 。

根据拐点坐标公式， k_1 与 k_{II} 的表达式如下：

$$k_1 = \frac{D_i}{N_i} = \frac{0.35 \left(\frac{N_{ref}}{N_{fb}} \right)^{0.25}}{N_f \exp(ZN_f^\phi)} \quad (5-24)$$

$$k_{II} = \frac{D_c - D_i}{N_p} = \frac{1 - 0.35 \left(\frac{N_{ref}}{N_{fb}} \right)^{0.25}}{N_f (1 - \exp(ZN_f^\phi))} \quad (5-25)$$

由于疲劳失效寿命 N_f 具有统计特性，对于给定应力水平下的使用寿命或加载循环次数 n ，相应地也是具有某种统计特征的随机变量。在概率建模过程中，如何确定使用寿命的变异性或标准差 (σ_n) 是求解累积损伤分布的关键。根据文献[232]，可假设初始状态下使用寿命 ($n=0$) 的变异性为 0，其值随载荷循环单调递增，其增长趋势又可进一步假设服从线性增长规律^[279]。在疲劳寿命服从正态分布假设下，Rathod 等^[232]给出了 σ_n 的表达式：

$$\sigma_n = \frac{n}{N_f} \sigma_{N_f} \quad (5-26)$$

式中， σ_{N_f} 是疲劳寿命的标准偏差。

由式(5-26)，使用寿命的概率分布与疲劳失效寿命的概率分布相同，都服从正态分布。根据图 5-8，随着载荷循环的不断累积， σ_n 按线性规律增长首先达到阶段 I 下的临界值 σ_{N_i} ，此后转入阶段 II， σ_n 仍按线性规律增长，当达到 σ_{N_f} 时发生疲劳破坏。

在不同应力水平下，疲劳寿命的分散性不尽相同，应力水平越高，疲劳寿命的变异性越小。根据双线性损伤累积的特点，不同应力水平下 σ_n 的增长规律可用图 5-9 描述。

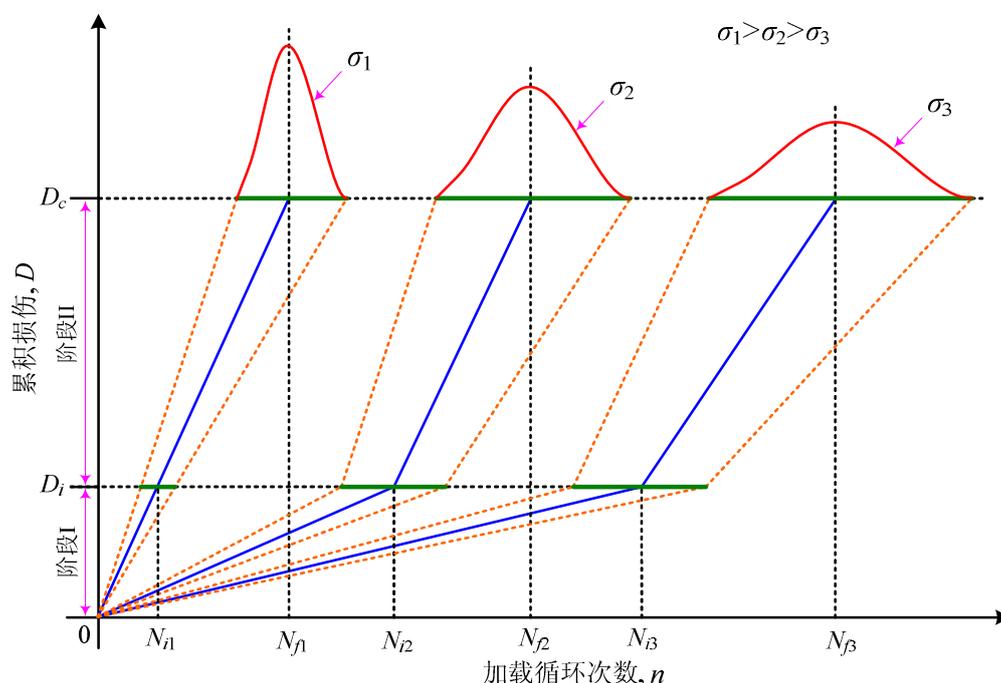


图 5-9 不同应力水平下 σ_n 的增长规律

当使用寿命达到预设的失效寿命时，材料内部累积的损伤将达到临界损伤 D_c 。现有关于临界损伤的研究主要有以下两种观点：① D_c 是材料的固有属性，是一个

确定性的常量， $D_c = 1$ ；② D_c 是一个均值为 1 的随机变量。在此，本文持后一种观点，即认为临界损伤的变异性是由材料的疲劳性能和载荷加载状态共同决定。

为了获取临界损伤的概率分布，应用概率密度函数（Probability Density Function, PDF）转换方法^[280]，由已知随机变量的概率分布可推导出未知随机变量的分布特征。由于临界损伤与疲劳寿命都对应着结构的失效状态，二者之间的函数关系可描述为：

$$D_c = q(N_f) \quad (5-27)$$

由式(5-27)，可得 D_c 的累积分布函数（Cumulative Distribution Function, CDF）为：

$$F_d(D_c) = F_n(q^{-1}(D_c)) \quad (5-28)$$

对式(5-28)两边求导，得到 D_c 的概率密度函数为：

$$\begin{aligned} f(D_c) &= \frac{d}{dD_c} F_n(q^{-1}(D_c)) \\ &= \frac{d}{dD_c} \left[\int_{-\infty}^{q^{-1}(D_c)} f(q^{-1}(D_c)) d(q^{-1}(D_c)) \right] \\ &= \frac{d(q^{-1}(D_c))}{dD_c} f(q^{-1}(D_c)) \\ &= \frac{dN_f}{dD_c} f(N_f) \end{aligned} \quad (5-29)$$

根据双线性损伤法则，临界损伤 D_c 包含阶段 I 下裂纹萌生累积损伤 D_I 和阶段 II 下裂纹扩展累积损伤 D_{II} 。由式(5-23)，临界损伤可表示为：

$$D_c = D_I + D_{II} = k_I N_i + k_{II} N_p = [k_I \alpha' + k_{II} (1 - \alpha')] N_f = k' N_f \quad (5-30)$$

式中， k' 是常数。

如前所述，疲劳寿命 N_f 的统计特性可用正态分布描述，即 $N_f \sim N(\mu_{N_f}, \sigma_{N_f})$ ，其概率密度函数为：

$$f(N_f) = \frac{1}{\sigma_{N_f} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{N_f - \mu_{N_f}}{\sigma_{N_f}}\right)^2\right) \quad (5-31)$$

式中， μ_{N_f} 是 N_f 的均值。

将式(5-30)和式(5-31)代入式(5-29)，可得：

$$f(D_c) = \frac{1}{k'\sigma_{N_f}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{D_c - k'\mu_{N_f}}{k'\sigma_{N_f}}\right)^2\right) \quad (5-32)$$

由此可知, D_c 也服从正态分布, 其均值和标准差为:

$$\begin{cases} \mu_{D_c} = [k_1\alpha' + k_{II}(1-\alpha')]\mu_{N_f} \\ \sigma_{D_c} = [k_1\alpha' + k_{II}(1-\alpha')]\sigma_{N_f} \end{cases} \quad (5-33)$$

根据以上推导与分析, 可以得到任意使用寿命下瞬时累积损伤 $D(n)$ 的概率分布, 其均值和标准差分别用式(5-34)和式(5-35)表示。

$$\mu_{D(n)} = \begin{cases} k_1n, & n \leq N_i \\ \left[k_1\alpha' + k_{II}\left(\frac{n}{N_f} - \alpha'\right) \right] \mu_{N_f}, & N_i < n \leq N_f \end{cases} \quad (5-34)$$

$$\sigma_{D(n)} = \begin{cases} k_1\frac{n}{N_f}\sigma_{N_f}, & n \leq N_i \\ \left[k_1\alpha' + k_{II}\left(\frac{n}{N_f} - \alpha'\right) \right] \sigma_{N_f}, & N_i < n \leq N_f \end{cases} \quad (5-35)$$

由此可见, 累积损伤的均值和标准差均是载荷循环次数的线性函数, 其值与损伤演化速率、裂纹萌生寿命系数以及疲劳寿命的均值和标准差有关。

5.3.2 对数正态分布下概率损伤累积建模

在工程实际中, 对数正态分布应用广泛, 本节假设疲劳寿命是服从对数正态分布的随机变量, 即 $N_f \sim LN(\mu_{\ln N_f}, \sigma_{\ln N_f})$ 或 $\ln N_f \sim N(\mu_{\ln N_f}, \sigma_{\ln N_f})$, 其中 $\mu_{\ln N_f}$ 和 $\sigma_{\ln N_f}$ 分别是 N_f 的对数均值和对数标准差。

类似于式(5-26), Zhu 等^[281]通过理论推导得到对数使用寿命的变异性为:

$$\sigma_{\ln n} = \frac{\ln n}{\ln N_f} \sigma_{\ln N_f} \quad (5-36)$$

式中, $\ln n$ 是随机变量, 其概率分布与 $\ln N_f$ 一致, 都服从正态分布。

根据式(5-23), 不同阶段下的累积损伤可描述为:

$$\begin{cases} D(n)_I = k_1n_I, & \text{阶段I: } n_I \leq N_i \\ D(n)_{II} = k_{II}n_{II}, & \text{阶段II: } n_{II} \leq N_p \end{cases} \quad (5-37)$$

式中, n_I 和 n_{II} 分别表示阶段 I 和阶段 II 下的加载循环次数, $D(n)_I$ 和 $D(n)_{II}$ 分别是相应阶段下的累积损伤。

对式(5-37)两边取对数可得:

$$\begin{cases} \ln D(n)_I = \ln k_I + \ln n_I, & n_I \leq N_i \\ \ln D(n)_{II} = \ln k_{II} + \ln n_{II}, & n_{II} \leq N_p \end{cases} \quad (5-38)$$

由式(5-38), $\ln D(n)$ 与 $\ln n$ 之间具有线性关系。由于 $\ln n$ 服从正态分布, 则 $D(n)_I$ 和 $D(n)_{II}$ 均服从对数正态分布, 即 $D(n)_I \sim LN(\mu_{\ln D(n)_I}, \sigma_{\ln D(n)_I})$ 和 $D(n)_{II} \sim LN(\mu_{\ln D(n)_{II}}, \sigma_{\ln D(n)_{II}})$ 。 $\ln D(n)_I$ 和 $\ln D(n)_{II}$ 的统计特征参数描述如下:

$$\begin{cases} \mu_{\ln D(n)_I} = \ln k_I + \ln n_I, & n_I \leq N_i \\ \sigma_{\ln D(n)_I} = \frac{\ln n_I}{\ln N_f} \sigma_{\ln N_f}, & n_I \leq N_i \end{cases} \quad (5-39)$$

$$\begin{cases} \mu_{\ln D(n)_{II}} = \ln k_{II} + \ln n_{II}, & n_{II} \leq N_p \\ \sigma_{\ln D(n)_{II}} = \frac{\ln n_{II}}{\ln N_f} \sigma_{\ln N_f}, & n_{II} \leq N_p \end{cases} \quad (5-40)$$

由式(5-23)和式(5-37), 累积损伤公式可改写为:

$$D(n) = \begin{cases} D(n)_I, & n \leq N_i \\ D(N_i)_I + D(n - N_i)_{II}, & N_i < n \leq N_f \end{cases} \quad (5-41)$$

在疲劳失效状态下, 临界损伤 D_c 由两个阶段的累积损伤构成, 即裂纹萌生损伤 $D(N_i)_I$ 和裂纹扩展损伤 $D(N_p)_{II}$, 且 $D(N_i)_I$ 和 $D(N_p)_{II}$ 均是服从对数正态分布的随机变量, 因此 D_c 的概率分布无法用显式描述。在工程上, 可对 D_c 进行当量化处理^[282], 使其仍服从对数正态分布, 如图 5-10 所示。

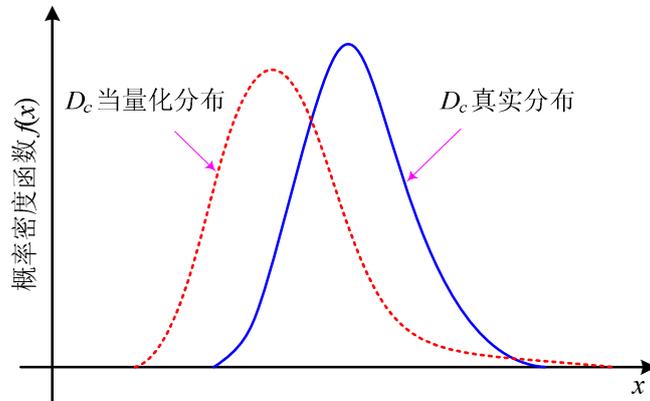


图 5-10 临界损伤当量化处理示意图

当量化处理的条件是要保持变量当量化前后的矩相等，即：

$$\begin{cases} E[D_c] = E[D(N_i)_I] + E[D(N_p)_{II}] \\ Var[D_c] = Var[D(N_i)_I] + Var[D(N_p)_{II}] \end{cases} \quad (5-42)$$

式中， $E[\cdot]$ 和 $Var[\cdot]$ 分别表示变量的一阶矩（均值）和二阶矩（方差）。

根据对数正态分布的性质， $D(N_i)_I$ 的均值和方差可通过 $\mu_{\ln D(N_i)_I}$ 和 $\sigma_{\ln D(N_i)_I}$ 转换得到，即：

$$\begin{cases} E[D(N_i)_I] = \exp\left(\mu_{\ln D(N_i)_I} + \frac{1}{2}\sigma_{\ln D(N_i)_I}^2\right) \\ Var[D(N_i)_I] = \left[\exp(\sigma_{\ln D(N_i)_I}^2) - 1\right] \exp(2\mu_{\ln D(N_i)_I} + \sigma_{\ln D(N_i)_I}^2) \end{cases} \quad (5-43)$$

同理，可得 $D(N_p)_{II}$ 的均值和方差：

$$\begin{cases} E[D(N_p)_{II}] = \exp\left(\mu_{\ln D(N_p)_{II}} + \frac{1}{2}\sigma_{\ln D(N_p)_{II}}^2\right) \\ Var[D(N_p)_{II}] = \left[\exp(\sigma_{\ln D(N_p)_{II}}^2) - 1\right] \exp(2\mu_{\ln D(N_p)_{II}} + \sigma_{\ln D(N_p)_{II}}^2) \end{cases} \quad (5-44)$$

将式(5-43)和式(5-44)代入式(5-42)，可得：

$$\begin{cases} \mu_{D_c} = \exp\left(\mu_{\ln D(N_i)_I} + \frac{1}{2}\sigma_{\ln D(N_i)_I}^2\right) + \exp\left(\mu_{\ln D(N_p)_{II}} + \frac{1}{2}\sigma_{\ln D(N_p)_{II}}^2\right) \\ \sigma_{D_c} = \sqrt{\left[\exp(\sigma_{\ln D(N_i)_I}^2) - 1\right] \exp(2\mu_{\ln D(N_i)_I} + \sigma_{\ln D(N_i)_I}^2) + \left[\exp(\sigma_{\ln D(N_p)_{II}}^2) - 1\right] \exp(2\mu_{\ln D(N_p)_{II}} + \sigma_{\ln D(N_p)_{II}}^2)} \end{cases} \quad (5-45)$$

再次利用对数正态分布的性质， $\ln D_c$ 的统计参数可由 μ_{D_c} 和 σ_{D_c} 转换得到，有：

$$\begin{cases} \mu_{\ln D_c} = \ln \mu_{D_c} - \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\sigma_{D_c}^2}{\mu_{D_c}^2}\right) \\ \sigma_{\ln D_c} = \sqrt{\ln \left(1 + \frac{\sigma_{D_c}^2}{\mu_{D_c}^2}\right)} \end{cases} \quad (5-46)$$

上述分析过程可推广到任意使用寿命下的瞬时累积损伤。根据损伤累积的两阶段特性，累积损伤的统计参量可分阶段表示，描述如下：

(1) 阶段 I: 裂纹萌生阶段， $n \leq N_i$ ， $\ln D(n)$ 的均值和标准差为：

$$\begin{cases} \mu_{\ln D(n)} = \ln k_1 + \ln n - \frac{1}{2} \left(\frac{\ln n}{\ln N_f} \sigma_{\ln N_f} \right)^2 \\ \sigma_{\ln D(n)} = \frac{\ln n}{\ln N_f} \sigma_{\ln N_f} \end{cases} \quad (5-47)$$

(2) 阶段 II: 裂纹扩展阶段, $N_i < n \leq N_f$, 有:

$$\begin{cases} \mu_{D(n)} = \exp \left(\mu_{\ln D(N_i)_I} + \frac{1}{2} \sigma_{\ln D(N_i)_I}^2 \right) + \exp \left(\mu_{\ln D(n-N_i)_{II}} + \frac{1}{2} \sigma_{\ln D(n-N_i)_{II}}^2 \right) \\ \sigma_{D(n)} = \sqrt{\left[\exp \left(\sigma_{\ln D(N_i)_I}^2 \right) - 1 \right] \exp \left(2\mu_{\ln D(N_i)_I} + \sigma_{\ln D(N_i)_I}^2 \right) + \left[\exp \left(\sigma_{\ln D(n-N_i)_{II}}^2 \right) - 1 \right] \exp \left(2\mu_{\ln D(n-N_i)_{II}} + \sigma_{\ln D(n-N_i)_{II}}^2 \right)} \end{cases} \quad (5-48)$$

对式(5-48)进行对数转换, 可得:

$$\begin{cases} \mu_{\ln D(n)} = \ln \mu_{D(n)} - \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\sigma_{D(n)}^2}{\mu_{D(n)}^2} \right) \\ \sigma_{\ln D(n)} = \sqrt{\ln \left(1 + \frac{\sigma_{D(n)}^2}{\mu_{D(n)}^2} \right)} \end{cases} \quad (5-49)$$

式(5-47)和式(5-49)的统计参数可根据疲劳损伤演化速率、疲劳寿命的对数均值及其对数标准差求出, 并用于疲劳可靠性分析。

5.4 时变疲劳可靠性分析

在结构疲劳设计中, 应力-强度干涉模型是疲劳可靠性分析的基础, 但它是一个静态统计模型, 无法考虑疲劳过程载荷作用的时变特性。根据应力-强度干涉模型的建模思想, 本节将概率双线性损伤累积模型用于结构疲劳可靠性分析, 分别在正态分布和对数正态分布假设下构建“累积损伤-临界损伤”动态干涉模型。

5.4.1 正态分布下时变可靠度模型

结构疲劳的失效是损伤不断积累的结果。若结构内部累积的损伤量小于临界损伤, 则结构处于安全状态, 否则处于失效状态。若以累积损伤为设计参量, 则结构的功能函数可描述为:

$$G(n) = D_c - D(n) \quad (5-50)$$

式中, $G(n) > 0$, 结构处于安全状态; $G(n) < 0$, 结构处于危险状态; $G(n) = 0$,

结构处于极限状态。

根据正态分布假设下的概率损伤建模, 可知 D_c 和 $D(n)$ 均是服从正态分布的随机变量, 则结构可靠度函数为:

$$\begin{aligned} R(n) &= \text{Prob}(G(n) > 0) \\ &= 1 - \text{Prob}(D_c - D(n) \leq 0) \\ &= \Phi(\beta) = \Phi\left(\frac{\mu_{D_c} - \mu_{D(n)}}{\sqrt{\sigma_{D_c}^2 + \sigma_{D(n)}^2}}\right) \end{aligned} \quad (5-51)$$

式中, β 是可靠度指标。

在恒幅加载下, 将式(5-33)、(5-34)和(5-35)代入式(5-51), 结构可靠度函数可分别用以下两个阶段描述。

(1) 阶段 I: 裂纹萌生阶段, $n \leq N_i$, 可靠度函数为:

$$R(n) = \Phi\left(\frac{1 - k_1 n}{\sqrt{\left\{[k_1 \alpha' + k_{II}(1 - \alpha')] \sigma_{N_f}\right\}^2 + \left(k_1 \frac{n}{N_f} \sigma_{N_f}\right)^2}}\right) \quad (5-52)$$

(2) 阶段 II: 裂纹扩展阶段, $N_i < n \leq N_f$, 有:

$$R(n) = \Phi\left(\frac{1 - \left[k_1 \alpha' + k_{II} \left(\frac{n}{N_f} - \alpha'\right)\right] N_f}{\sqrt{\left\{[k_1 \alpha' + k_{II}(1 - \alpha')] \sigma_{N_f}\right\}^2 + \left\{k_1 \alpha' + k_{II} \left(\frac{n}{N_f} - \alpha'\right)\right\} \sigma_{N_f}^2}}\right) \quad (5-53)$$

在变幅加载下, 结构承受的外载为非稳态循环载荷历程, 疲劳损伤累积应视为一个非稳态随机过程。临界损伤的概率分布是由载荷历程中所有载荷的加载状态以及累积损伤的统计特征参量决定, 可描述为:

$$f(D_c) = f\left(\left\{\sigma_1, n_1, D(n_1)\right\}, \left\{\sigma_2, n_2, D(n_2)\right\}, \dots, \left\{\sigma_i, n_i, D(n_i)\right\}, \dots, \left\{\sigma_k, n_k, D(n_k)\right\}\right) \quad (5-54)$$

式中, $D(n_i)$ 是载荷历程中第 i 级加载阶段下的累积损伤。

不同加载阶段下的累积损伤均假设是服从正态分布的随机变量, 临界损伤变量是所有阶段下的累积损伤总和。根据正态分布的可加性, 临界损伤也服从正态分布。因此, 式(5-51)可推广到多级载荷加载情况, 写成一般式为:

$$R(n) = \Phi \left(\frac{\mu_{D_c} - \sum_{i=1, i \leq j \leq k}^j \mu_{D(n_i)}}{\sqrt{\sum_{i=1}^k \sigma_{D(n_i)}^2 + \sum_{i=1, i \leq j \leq k}^j \sigma_{D(n_i)}^2}} \right) \quad (5-55)$$

式(5-52)、(5-53)和(5-55)所述可靠度模型均是使用寿命的函数，体现了损伤累积过程的动态特性。两级变幅加载下的可靠性分析是疲劳可靠性理论中的基本问题，按第一级载荷作用产生的累积损伤是否大于萌生损伤，则不同的加载顺序分别对应着两种损伤累积路径，如图 5-11 所示。

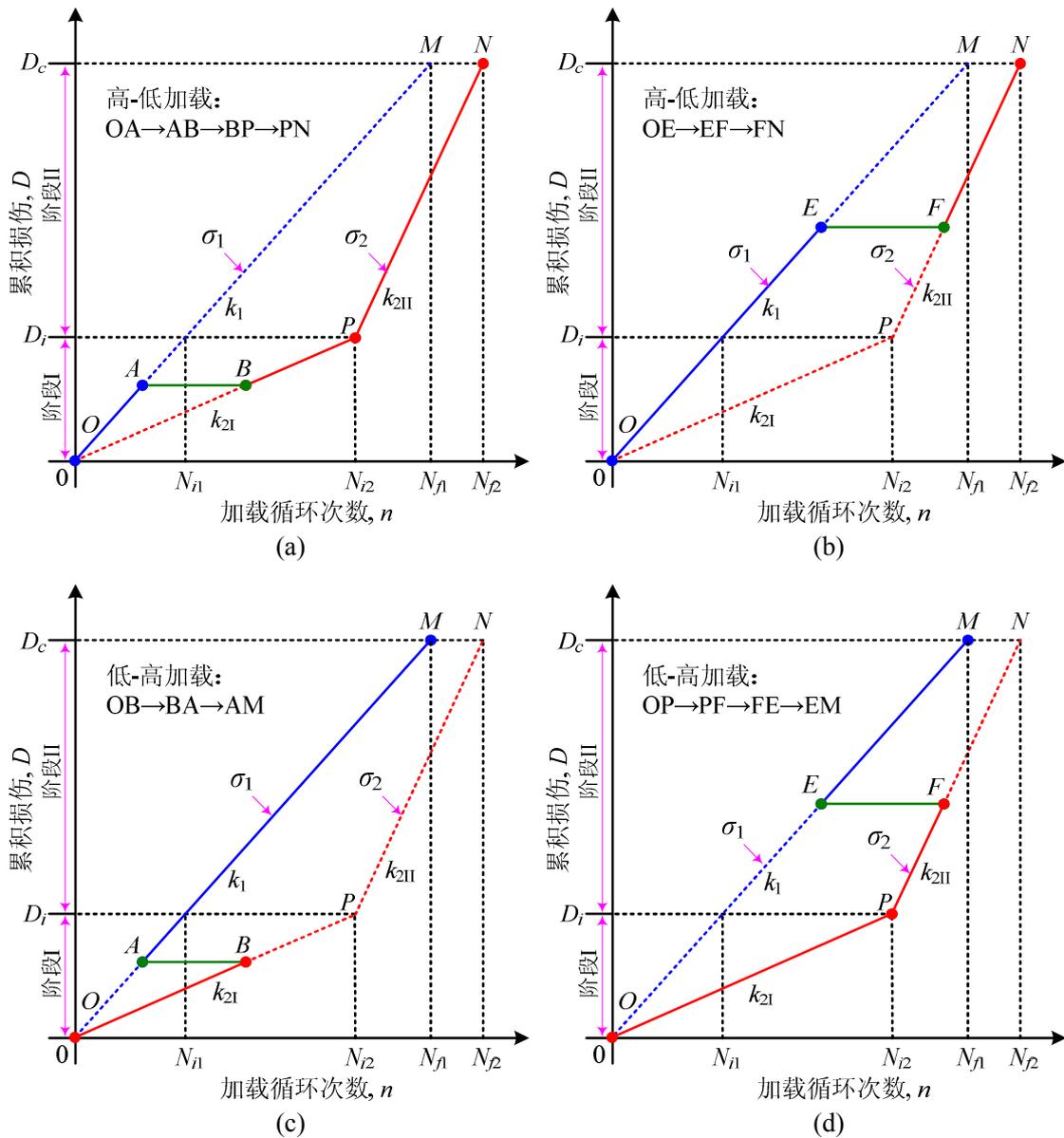


图 5-11 两级加载下双线性疲劳损伤累积路径。(a) $D(n_1) < D_i$; (b) $D(n_1) > D_i$;
(c) $D(n_2) < D_i$; (d) $D(n_2) > D_i$

(1) 高-低加载路径: $OA \rightarrow AB \rightarrow BP \rightarrow PN$, 如图 5-11(a)。

根据式(5-35), $D(n_1)$ 和 $D(n_2)$ 的变异性为:

$$\begin{cases} \sigma_{D(n_1)} = k_1 \frac{n_1}{N_{f1}} \sigma_{N_{f1}} \\ \sigma_{D(n_2)} = \left[k_{21} \left(\frac{n_2}{N_{f2}} - (1-\alpha') \right) + k_{2II} (1-\alpha') \right] \sigma_{N_{f2}} \end{cases} \quad (5-56)$$

计算 D_c 的变异性为:

$$\sigma_{D_c} = \sqrt{\left(k_1 \frac{n_1}{N_{f1}} \sigma_{N_{f1}} \right)^2 + \left[k_{21} \left(\frac{n_2}{N_{f2}} - (1-\alpha') \right) + k_{2II} (1-\alpha') \right]^2 \sigma_{N_{f2}}^2} \quad (5-57)$$

根据使用寿命在不同载荷水平下的作用阶段, 可靠度函数分以下两个节段(此处的节段不同于疲劳损伤的两个阶段):

1) 节段 1: 高载荷加载阶段, $n \leq n_1$, 有:

$$R(n) = \Phi \left(\frac{1 - k_1 n}{\sqrt{\sigma_{D_c}^2 + \left(k_1 \frac{n}{N_{f1}} \sigma_{N_{f1}} \right)^2}} \right) \quad (5-58)$$

2) 节段 2: 低载荷加载阶段, $n_1 < n \leq n_1 + n_2$, 可靠度用以下分段函数描述:

① 当 $n_1 \leq n \leq n_1 + n_2 - N_{f2}(1-\alpha')$, 有:

$$R(n) = \Phi \left(\frac{1 - [k_1 n_1 + k_{21} (n - n_1)]}{\sqrt{\sigma_{D_c}^2 + \left(k_1 \frac{n}{N_{f1}} \sigma_{N_{f1}} \right)^2 + \left(k_{21} \frac{n - n_1}{N_{f2}} \sigma_{N_{f2}} \right)^2}} \right) \quad (5-59)$$

② 当 $n_1 + n_2 - N_{f2}(1-\alpha') < n \leq n_1 + n_2$, 有:

$$R(n) = \Phi \left(\frac{1 - \{k_1 n_1 + k_{21} [n_2 - N_{f2}(1-\alpha')] + k_{2II} [n - n_1 - n_2 + N_{f2}(1-\alpha')]\}}{\sqrt{\sigma_{D_c}^2 + \left(k_1 \frac{n_1}{N_{f1}} \sigma_{N_{f1}} \right)^2 + \left[k_{21} \left(\frac{n_2}{N_{f2}} - (1-\alpha') \right) + k_{2II} \left(\frac{n - n_1 - n_2}{N_{f2}} + (1-\alpha') \right) \right]^2 \sigma_{N_{f2}}^2}} \right) \quad (5-60)$$

(2) 高-低加载路径: $OE \rightarrow EF \rightarrow FN$, 如图 5-11(b)。

累积损伤 $D(n_1)$ 和 $D(n_2)$ 的变异性为:

$$\begin{cases} \sigma_{D(n_1)} = k_1 \frac{n_1}{N_{f1}} \sigma_{N_{f1}} \\ \sigma_{D(n_2)} = k_{2II} \frac{n_2}{N_{f2}} \sigma_{N_{f2}} \end{cases} \quad (5-61)$$

则 D_c 的变异性为:

$$\sigma_{D_c} = \sqrt{\left(k_1 \frac{n_1}{N_{f1}} \sigma_{N_{f1}}\right)^2 + \left(k_{2II} \frac{n_2}{N_{f2}} \sigma_{N_{f2}}\right)^2} \quad (5-62)$$

根据疲劳损伤的累积路径, 可靠度函数可用两个节段函数表示, 分别对应着高载荷加载和低载荷加载, 描述如下:

1) 节段 1: 高载荷加载阶段, $n \leq n_1$

$$R(n) = \Phi \left(\frac{1 - k_1 n}{\sqrt{\sigma_{D_c}^2 + \left(k_1 \frac{n}{N_{f1}} \sigma_{N_{f1}}\right)^2}} \right) \quad (5-63)$$

2) 节段 2: 低载荷加载阶段, $n_1 < n \leq n_1 + n_2$

$$R(n) = \Phi \left(\frac{1 - [k_1 n + k_{2II} (n - n_1)]}{\sqrt{\sigma_{D_c}^2 + \left(k_1 \frac{n_1}{N_{f1}} \sigma_{N_{f1}}\right)^2 + \left(k_{2II} \frac{n - n_1}{N_{f2}} \sigma_{N_{f2}}\right)^2}} \right) \quad (5-64)$$

(3) 低-高加载路径: $OB \rightarrow BA \rightarrow AM$, 如图 5-11(c)。

累积损伤 $D(n_1)$ 和 $D(n_2)$ 的变异性为:

$$\begin{cases} \sigma_{D(n_1)} = k_1 \frac{n_1}{N_{f1}} \sigma_{N_{f1}} \\ \sigma_{D(n_2)} = k_{2I} \frac{n_2}{N_{f2}} \sigma_{N_{f2}} \end{cases} \quad (5-65)$$

计算 D_c 的变异性为:

$$\sigma_{D_c} = \sqrt{\left(k_1 \frac{n_1}{N_{f1}} \sigma_{N_{f1}}\right)^2 + \left(k_{2I} \frac{n_2}{N_{f2}} \sigma_{N_{f2}}\right)^2} \quad (5-66)$$

在不同载荷加载阶段，可靠度函数进一步分为以下两个节段：

1) 节段 1：低载荷加载阶段， $n \leq n_2$

$$R(n) = \Phi \left(\frac{1 - k_{2I} n}{\sqrt{\sigma_{D_c}^2 + \left(k_{2I} \frac{n}{N_{f2}} \sigma_{N_{f2}}\right)^2}} \right) \quad (5-67)$$

2) 节段 2：高载荷加载阶段， $n_2 < n \leq n_2 + n_1$

$$R(n) = \Phi \left(\frac{1 - [k_{2I} n + k_1 (n - n_2)]}{\sqrt{\sigma_{D_c}^2 + \left(k_{2I} \frac{n_2}{N_{f2}} \sigma_{N_{f2}}\right)^2 + \left(k_1 \frac{n - n_2}{N_{f1}} \sigma_{N_{f1}}\right)^2}} \right) \quad (5-68)$$

(4) 低-高加载路径： $OP \rightarrow PF \rightarrow FE \rightarrow EM$ ，如图 5-11(d)。

累积损伤 $D(n_1)$ 和 $D(n_2)$ 的变异性为：

$$\begin{cases} \sigma_{D(n_1)} = k_1 \frac{n_1}{N_{f1}} \sigma_{N_{f1}} \\ \sigma_{D(n_2)} = k_{2II} \frac{n_2}{N_{f2}} \sigma_{N_{f2}} \end{cases} \quad (5-69)$$

得 D_c 的变异性为：

$$\sigma_{D_c} = \sqrt{\left(k_1 \frac{n_1}{N_{f1}} \sigma_{N_{f1}}\right)^2 + \left(k_{2II} \frac{n_2}{N_{f2}} \sigma_{N_{f2}}\right)^2} \quad (5-70)$$

在不同载荷作用阶段，可靠度函数表示如下：

1) 节段 1：低载荷加载阶段， $n \leq n_2$ ，按载荷循环是否达到裂纹萌生寿命，此节段下的可靠度可进一步用以下分段函数描述：

① 当 $n \leq N_{i2}$ ，有：

$$R(n) = \Phi \left(\frac{1 - k_{21}n}{\sqrt{\sigma_{D_c}^2 + \left(k_{21} \frac{n}{N_{f2}} \sigma_{N_{f2}} \right)^2}} \right) \quad (5-71)$$

② 当 $N_{i2} < n \leq n_2$, 有:

$$R(n) = \Phi \left(\frac{1 - [k_{21}\alpha'N_{f2} + k_{2II}(n - \alpha'N_{f2})]}{\sqrt{\sigma_{D_c}^2 + \left\{ \left[k_{21}\alpha' + k_{2II} \left(\frac{n}{N_{f2}} - \alpha' \right) \right] \sigma_{N_{f2}} \right\}^2}} \right) \quad (5-72)$$

2) 节段 2: 高载荷加载阶段, $n_2 < n \leq n_2 + n_1$, 有:

$$R(n) = \Phi \left(\frac{1 - [k_{21}\alpha'N_{f2} + k_{2II}(n_2 - \alpha'N_{f2}) + k_1(n - n_2)]}{\sqrt{\sigma_{D_c}^2 + \left\{ \left[k_{21}\alpha' + k_{2II} \left(\frac{n_2}{N_{f2}} - \alpha' \right) \right] \sigma_{N_{f2}} \right\}^2 + \left(k_1 \frac{n - n_2}{N_{f1}} \sigma_{N_{f1}} \right)^2}} \right) \quad (5-73)$$

5.4.2 对数正态分布下时变可靠度模型

根据对数正态分布下的概率损伤累积建模, 累积损伤 $D(n)$ 和临界损伤 D_c 均是服从对数正态分布的随机变量。若不考虑 $D(n)$ 与 D_c 之间的相关性, 则功能函数可表示为:

$$G(n) = \ln D_c - \ln D(n) \quad (5-74)$$

由于 $\ln D_c$ 和 $\ln D(n)$ 服从正态分布, 则 $G(n)$ 也服从正态分布, 得可靠度函数:

$$\begin{aligned} R(n) &= \text{Prob}(G(n) > 0) \\ &= 1 - \text{Prob}(\ln D_c - \ln D(n) \leq 0) \\ &= \Phi(\beta) = \Phi \left(\frac{\mu_{\ln D_c} - \mu_{\ln D(n)}}{\sqrt{\sigma_{\ln D_c}^2 + \sigma_{\ln D(n)}^2}} \right) \end{aligned} \quad (5-75)$$

在恒幅加载下, 根据双线性损伤的特性, 式(5-75)可分别用以下两个阶段描述。

(1) 阶段 I: 裂纹萌生阶段, $n \leq N_i$, 将式(5-47)代入式(5-46)得:

$$R(n) = \Phi \left(\frac{\ln \mu_{D_c} - \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\sigma_{D_c}^2}{\mu_{D_c}^2} \right) - \left[\ln k_1 + \ln n - \frac{1}{2} \left(\frac{\ln n}{\ln N_f} \sigma_{\ln N_f} \right)^2 \right]}{\sqrt{\ln \left(1 + \frac{\sigma_{D_c}^2}{\mu_{D_c}^2} \right) + \left(\frac{\ln n}{\ln N_f} \sigma_{\ln N_f} \right)^2}} \right) \quad (5-76)$$

(2) 阶段 II: 裂纹扩展阶段, $N_i < n \leq N_f$, 将式(5-49)代入式(5-46)得:

$$R(n) = \Phi \left(\frac{\ln \mu_{D_c} - \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\sigma_{D_c}^2}{\mu_{D_c}^2} \right) - \left[\ln \mu_{D(n)} - \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\sigma_{D(n)}^2}{\mu_{D(n)}^2} \right) \right]}{\sqrt{\ln \left(1 + \frac{\sigma_{D_c}^2}{\mu_{D_c}^2} \right) \times \left(1 + \frac{\sigma_{D(n)}^2}{\mu_{D(n)}^2} \right)}} \right) \quad (5-77)$$

在变幅加载下, 不同载荷阶段下的疲劳损伤均假设服从对数正态分布, 因此累积损伤变量是由一系列对数正态分布的随机变量组成, 其概率密度函数无法用显式表征。由图 5-10, 采用当量化处理方法, 将累积损伤和 $\sum D(n)$ 简化为服从对数正态分布的随机变量。在疲劳失效状态下, 根据当量化处理的条件, 可得临界损伤 D_c 的均值和标准差为:

$$\begin{cases} \mu_{D_c} = \sum_{i=1}^k \exp \left(\mu_{\ln D(n_i)} + \frac{1}{2} \sigma_{\ln D(n_i)}^2 \right) \\ \sigma_{D_c} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left\{ \left[\exp(\sigma_{\ln D(n_i)}^2) - 1 \right] \exp(2\mu_{\ln D(n_i)} + \sigma_{\ln D(n_i)}^2) \right\}} \end{cases} \quad (5-78)$$

利用对数正态分布的性质, 有:

$$\begin{cases} \mu_{\ln D_c} = \ln \left(\sum_{i=1}^k \exp \left(\mu_{\ln D(n_i)} + \frac{1}{2} \sigma_{\ln D(n_i)}^2 \right) \right) - \\ \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^k \left\{ \left[\exp(\sigma_{\ln D(n_i)}^2) - 1 \right] \exp(2\mu_{\ln D(n_i)} + \sigma_{\ln D(n_i)}^2) \right\}}{\sum_{i=1}^k \exp \left(\mu_{\ln D(n_i)} + \frac{1}{2} \sigma_{\ln D(n_i)}^2 \right)} \right) \\ \sigma_{\ln D_c} = \sqrt{\ln \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^k \left\{ \left[\exp(\sigma_{\ln D(n_i)}^2) - 1 \right] \exp(2\mu_{\ln D(n_i)} + \sigma_{\ln D(n_i)}^2) \right\}}{\sum_{i=1}^k \exp \left(\mu_{\ln D(n_i)} + \frac{1}{2} \sigma_{\ln D(n_i)}^2 \right)} \right)} \end{cases} \quad (5-79)$$

同理, 可得 $\ln(\sum D(n))$ 的统计特征参量:

$$\left\{ \begin{aligned} \mu_{\ln(\sum D(n))} &= \ln \left(\sum_{i=1, i \leq j \leq k}^j \exp \left(\mu_{\ln D(n_i)} + \frac{1}{2} \sigma_{\ln D(n_i)}^2 \right) \right) - \\ &\quad \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\sum_{i=1, i \leq j \leq k}^j \left\{ \left[\exp(\sigma_{\ln D(n_i)}^2) - 1 \right] \exp(2\mu_{\ln D(n_i)} + \sigma_{\ln D(n_i)}^2) \right\}}{\sum_{i=1, i \leq j \leq k}^j \exp \left(\mu_{\ln D(n_i)} + \frac{1}{2} \sigma_{\ln D(n_i)}^2 \right)} \right) \\ \sigma_{\ln(\sum D(n))} &= \sqrt{\ln \left(1 + \frac{\sum_{i=1, i \leq j \leq k}^j \left\{ \left[\exp(\sigma_{\ln D(n_i)}^2) - 1 \right] \exp(2\mu_{\ln D(n_i)} + \sigma_{\ln D(n_i)}^2) \right\}}{\sum_{i=1, i \leq j \leq k}^j \exp \left(\mu_{\ln D(n_i)} + \frac{1}{2} \sigma_{\ln D(n_i)}^2 \right)} \right)} \end{aligned} \right. \quad (5-80)$$

将式(5-79)和式(5-80)代入式(5-75)，得结构可靠度函数为：

$$R(n) = \Phi \left(\frac{\mu_{\ln D_c} - \mu_{\ln(\sum D(n))}}{\sqrt{\sigma_{\ln D_c}^2 + \sigma_{\ln(\sum D(n))}^2}} \right) \quad (5-81)$$

5.5 算例分析

如前所述，概率损伤累积建模是为了有效获取累积损伤和临界损伤的统计特征参量，进而为可靠性分析中时变可靠度模型的确定奠定基础，本节基于概率损伤累积建模的两种分布假设分别进行相应假设条件下的可靠度模型验证。

5.5.1 正态分布下时变疲劳可靠度模型验证

5.5.1.1 恒幅加载下时变疲劳可靠性分析

为了验证正态分布下式(5-52)和式(5-53)的有效性，本节采用螺旋压缩弹簧、标准 45 钢和热轧 16Mn 钢疲劳试验算例进行可靠性分析。螺旋压缩弹簧是压缩机的主要承力部件，力学性能参数见表 5-1，其形状为圆柱形结构，如图 5-12 所示。

表 5-1 螺旋压缩弹簧力学性能参数

名称	符号	数值
线径	d_0	1.5 mm
自由长度	l_0	29.55 mm
有效长度	l_{eff}	19.0 mm
线圈匝数	N_a	7
外径	W_0	14.8 mm
轴向刚度	K_0	2.91 N/mm
剪切模量	G	79300 MPa

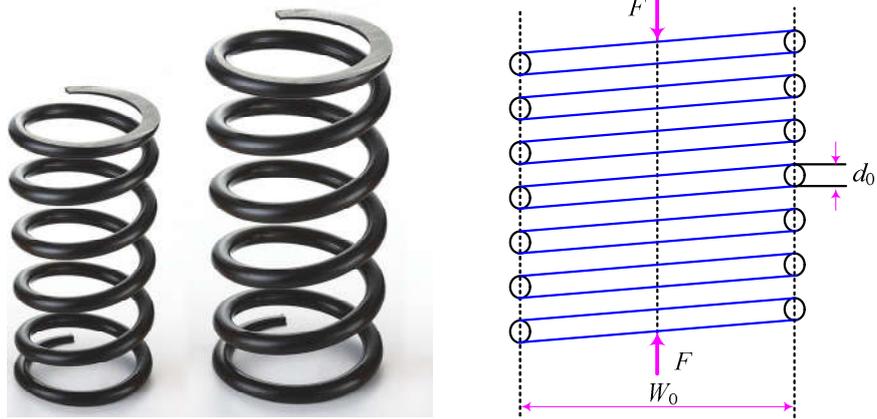


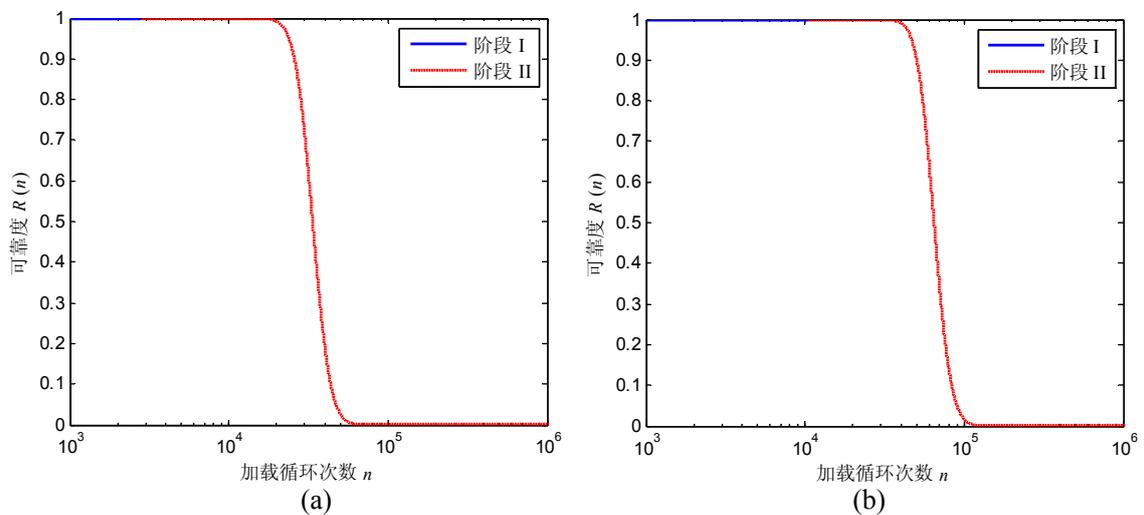
图 5-12 螺旋压缩弹簧

文献[232]给出了压缩弹簧在 5 个不同应力幅下的疲劳寿命数据，且认为疲劳寿命服从正态分布，统计结果如表 5-2 所示。

表 5-2 螺旋压缩弹簧恒幅加载下疲劳试验数据

应力级别	应力幅 σ_i /(MPa)	疲劳寿命统计参量 (N_f)	
		均值	标准差
1	470	33,581	4785
2	435	64,616	9692
3	395	146,101	23,291
4	360	320,222	53,947
5	320	867,130	156,303

在恒幅加载下，根据正态分布假设下的概率损伤建模分析与时变可靠度计算模型，可得压缩弹簧在 5 级应力水平下的可靠度变化曲线，如图 5-13 所示。



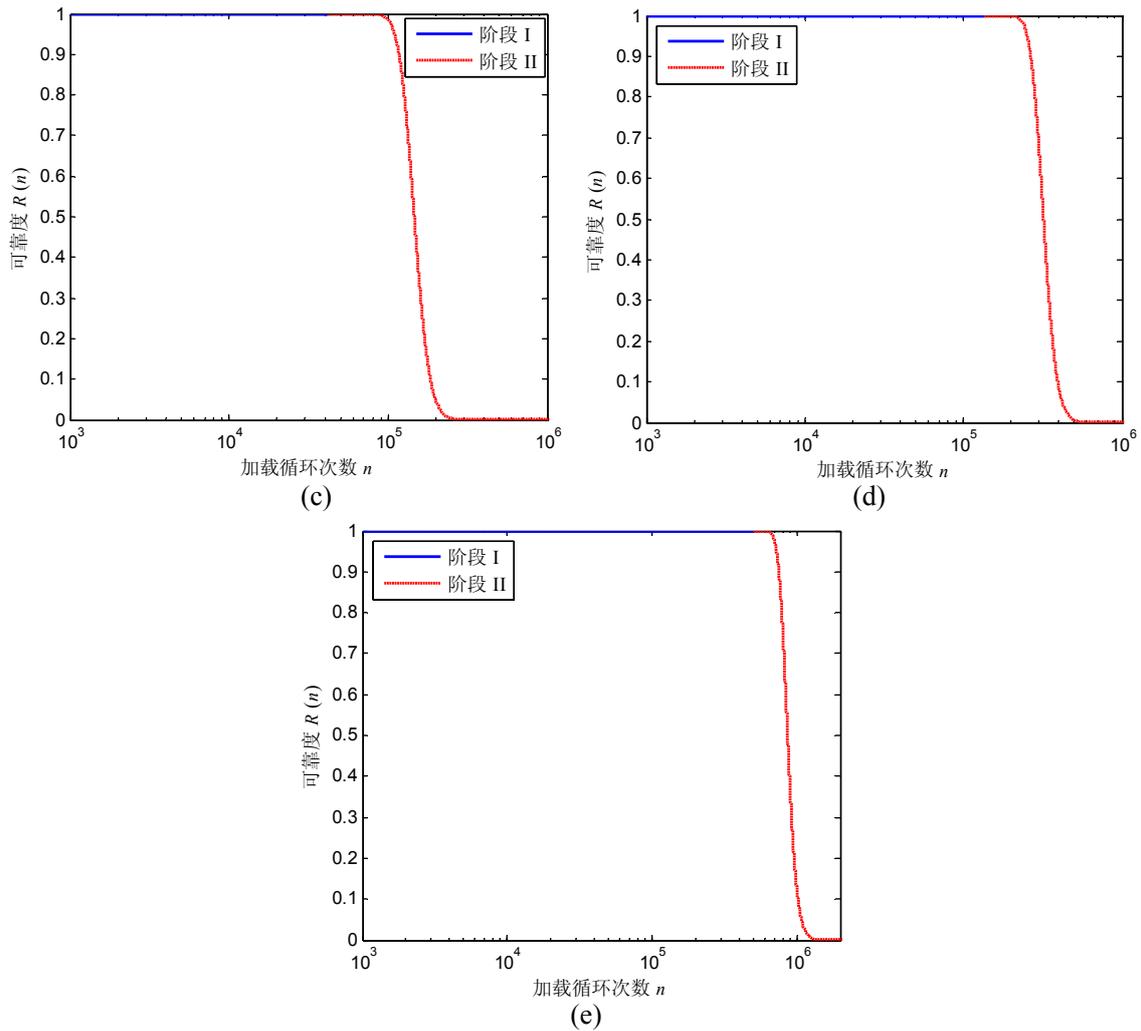


图 5-13 恒幅加载下螺旋压缩弹簧可靠度变化规律。(a) 470 MPa; (b) 435 MPa; (c) 395 MPa; (d) 360 MPa; (e) 320 MPa

文献[223]以标准 45 钢和热轧 16Mn 钢开展了一系列旋转弯曲疲劳试验，两种试样分别在 3 个不同应力幅下加载，试验加载参数和统计结果如表 5-3 所示。

表 5-3 标准 45 钢和热轧 16Mn 钢恒幅加载下疲劳试验数据

试样	应力幅 σ_f (MPa)	样本量	疲劳寿命 (10^2)	统计参量 (N_f)	
				均值	标准差
标准 45 钢	366	15	444, 397, 533, 368, 487, 433, 305, 665, 395, 403, 449, 638, 344, 431, 462	45,027	9917
	331	18	2063, 1197, 1168, 1354, 1282, 1564, 1508, 1324, 1159, 1724, 1053, 1364, 2620, 2556, 799, 906, 1975, 1743	151,422	52,286
	309	16	6021, 2910, 7099, 9355, 6429, 8790, 6752, 7236, 9042, 9618, 5893, 5519, 7047, 7089, 3274, 3531	658,944	209,045

续表 5-3 标准 45 钢和热轧 16Mn 钢恒幅加载下疲劳试验数据

试样	应力幅 σ_i (MPa)	样本量	疲劳寿命 (10^2)	统计参量 (N_f)	
				均值	标准差
热轧 16Mn 钢	394	15	915, 1382, 1066, 1444, 712, 1120, 953, 1422, 916, 1532, 903, 1310, 1350, 919, 1149	113,893	25,130
	373	15	2087, 1817, 2262, 1788, 1929, 2113, 1685, 1744, 1646, 2632, 1764, 1833, 2312, 1903, 2011	196,720	27,322
	344	15	6944, 6818, 8631, 7631, 5725, 5941, 9868, 6825, 8919, 5305, 7597, 8101, 6933, 6911, 6178	722,200	125,800

文献[223]进一步指出这两组试样的疲劳寿命统计特性可用正态分布描述，根据正态分布下恒幅加载疲劳可靠度计算模型，可得标准 45 钢和热轧 16Mn 钢在不同应力水平下的可靠度曲线，分别如图 5-14 和图 5-15 所示。

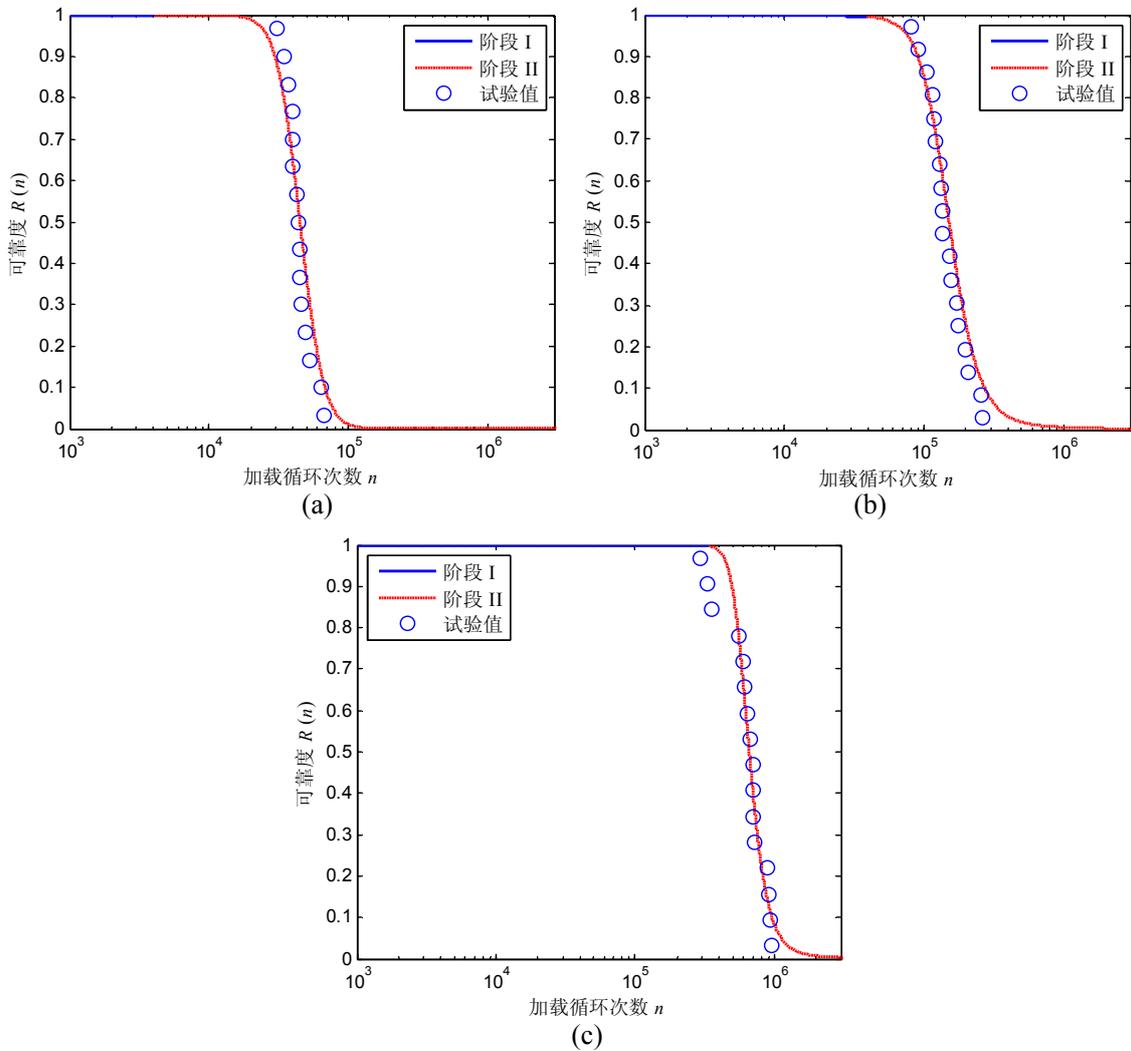


图 5-14 恒幅加载下标准 45 钢可靠度曲线与试验值比较。(a) 366 MPa; (b) 331 MPa; (c) 309 MPa

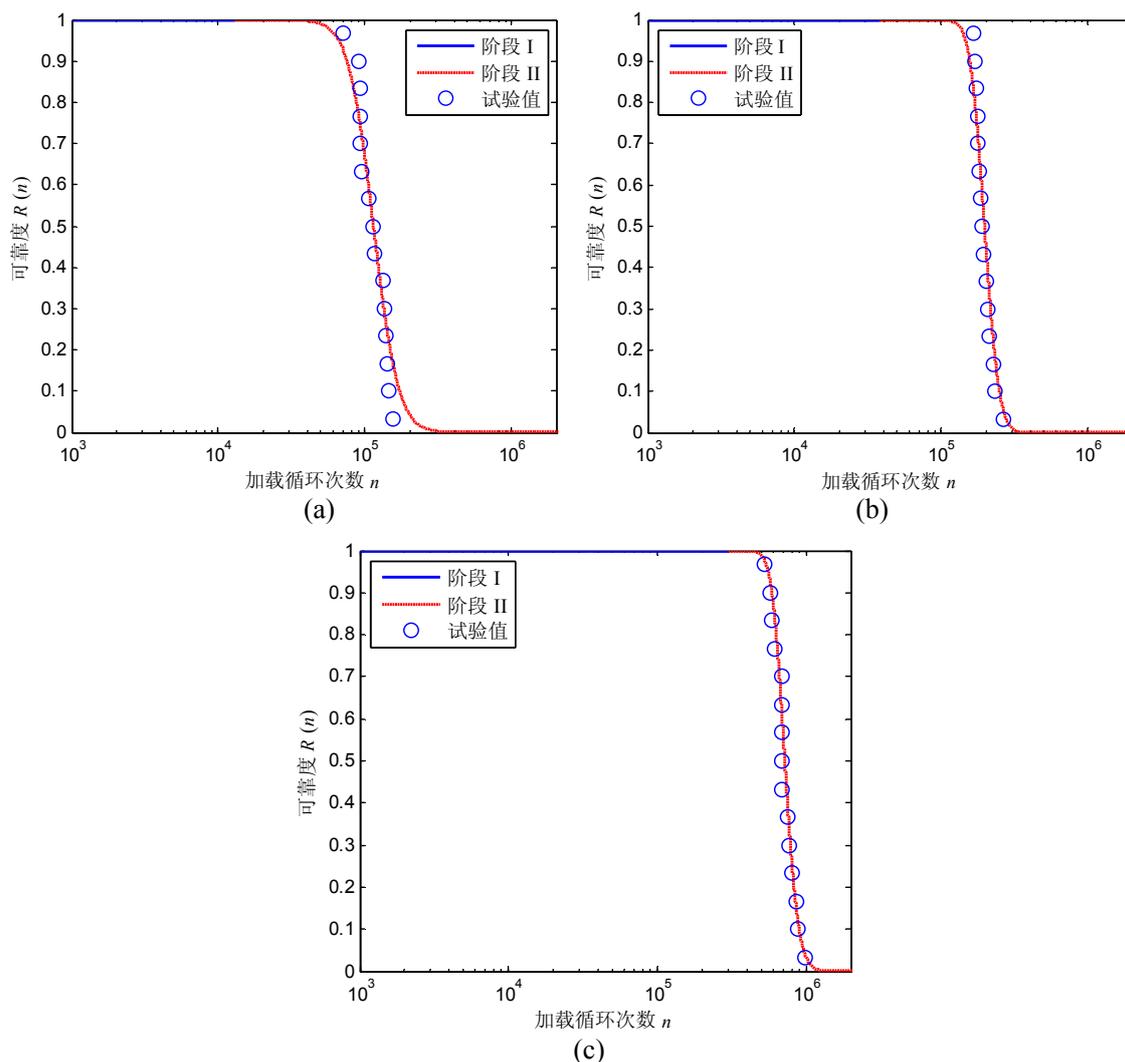


图 5-15 恒幅加载下热轧 16Mn 钢可靠度曲线与试验值比较。(a) 394 MPa; (b) 373 MPa; (c) 344 MPa

根据图 5-14 和图 5-15, 对于不同试样或在不同的应力水平加载下, 由式(5-52)和式(5-53)计算得到的理论可靠度曲线与试验结果吻合良好, 从而验证了所提模型的有效性。由图 5-13、5-14 和 5-15 可知, 可靠度函数随载荷循环增加单调递减, 具有时变特性。在全寿命周期内, 可靠度曲线分为两个阶段, 其中阶段 I 和阶段 II 分别代表裂纹萌生和裂纹扩展。在裂纹萌生阶段, 可靠度水平很高, 处于稳定状态, 其值与初始寿命状态下的可靠度值 ($R=1$) 几乎相同; 同时, 随着应力水平的衰减, 裂纹萌生寿命不断增加, 此阶段下的可靠度周期也随之延长。在裂纹扩展阶段, 可靠度曲线急剧下降。上述现象的解释为: 在裂纹萌生阶段, 损伤累积速率相对较低, 构件内部累积的损伤量较少, 发生失效的概率较小, 使该阶段下的可靠度仍保持在较高水平且变化平稳; 在进入裂纹扩展阶段时, 裂纹增长速率和

损伤累积速率迅速增加，导致累积损伤快速趋于临界损伤，其发生失效的概率大大增加，因此该阶段对应的可靠度急剧下降。

为了进一步研究应力级别对可靠度变化的影响，将螺旋压缩弹簧、标准 45 钢和热轧 16Mn 钢在不同应力水平下的可靠度曲线合并，分别如图 5-16、5-17 和 5-18 所示。

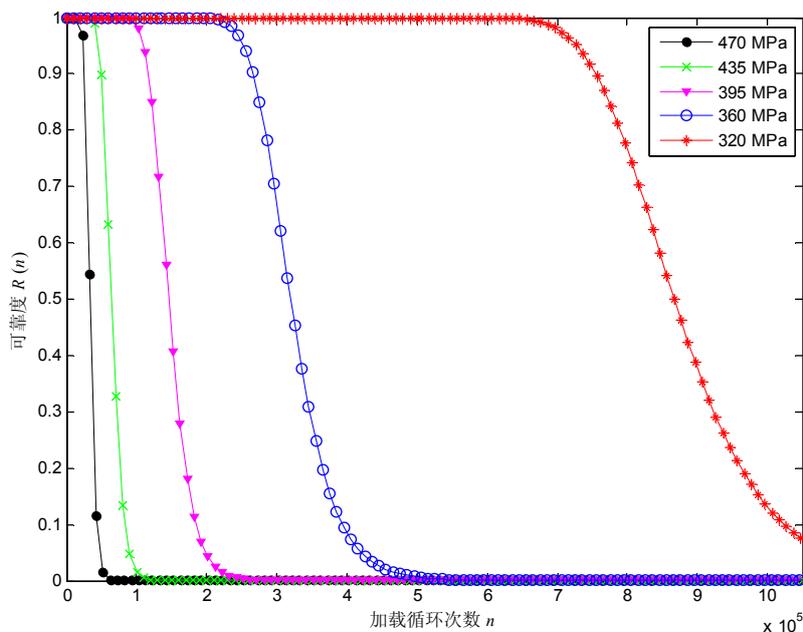


图 5-16 螺旋压缩弹簧不同应力水平下可靠度曲线比较

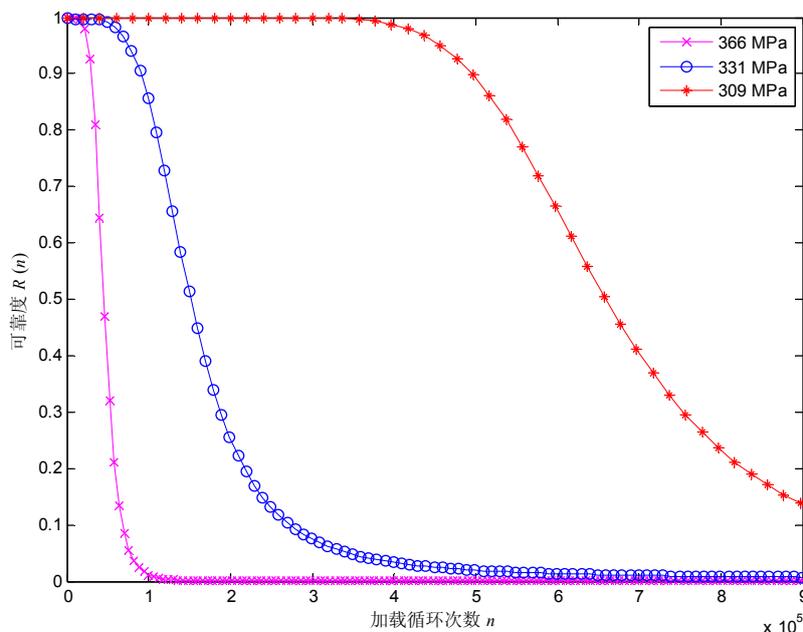


图 5-17 标准 45 钢不同应力水平下可靠度曲线比较

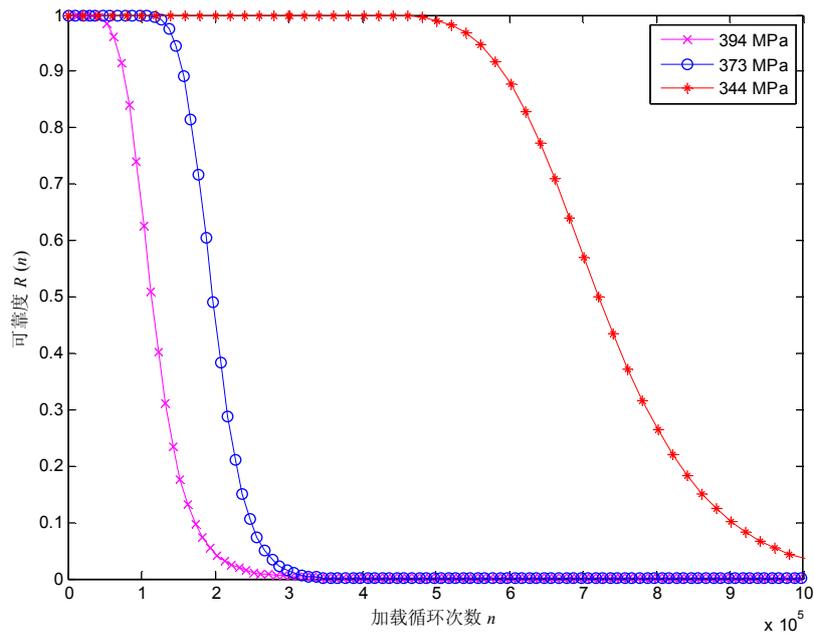


图 5-18 热轧 16Mn 钢不同应力水平下可靠度曲线比较

由上述结果可知，应力级别对可靠度变化有显著影响，应力水平越高，可靠度曲线越陡峭，在相同的使用寿命区间，较高的应力水平导致更多的可靠度损失。

5.5.1.2 变幅加载下时变疲劳可靠性分析

为了验证变幅加载下式(5-55)的正确性，本节仍以螺旋压缩弹簧、标准 45 钢和热轧 16Mn 钢为例进行时变可靠性分析。

(1) 螺旋压缩弹簧算例

根据文献[232]，螺旋压缩弹簧在三个连续的应力水平下加载直至失效，应力级别为 $\sigma_1 = 435 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_2 = 360 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_3 = 320 \text{ MPa}$ ，相应的加载循环次数分别用 n_1 、 n_2 和 n_3 表示。根据以上组合，可设计 6 种加载模式，试验加载参数如表 5-4 所示。

表 5-4 变幅加载下螺旋压缩弹簧试验参数

加载模式	加载顺序	加载应力	加载循环次数		
			n_1	n_2	n_3
模式 1	高-低加载	$\sigma_1(n_1) \rightarrow \sigma_2(n_2) \rightarrow \sigma_3(n_3)$	40,000	60,000	X
模式 2	随机加载	$\sigma_1(n_1) \rightarrow \sigma_3(n_3) \rightarrow \sigma_2(n_2)$	40,000	X	167,750
模式 3	随机加载	$\sigma_2(n_2) \rightarrow \sigma_1(n_1) \rightarrow \sigma_3(n_3)$	40,000	60,000	X

续表 5-4 变幅加载下螺旋压缩弹簧试验参数

加载模式	加载顺序	加载应力	加载循环次数		
			n_1	n_2	n_3
模式 4	随机加载	$\sigma_2(n_2) \rightarrow \sigma_3(n_3) \rightarrow \sigma_1(n_1)$	X	60,000	167,750
模式 5	随机加载	$\sigma_3(n_3) \rightarrow \sigma_1(n_1) \rightarrow \sigma_2(n_2)$	40,000	X	167,750
模式 6	低-高加载	$\sigma_3(n_3) \rightarrow \sigma_2(n_2) \rightarrow \sigma_1(n_1)$	X	60,000	167,750

根据正态分布下概率损伤建模分析，结合表 5-2 中的恒幅疲劳寿命数据，最终得到 6 种不同加载模式下的可靠度曲线，如图 5-19 所示。

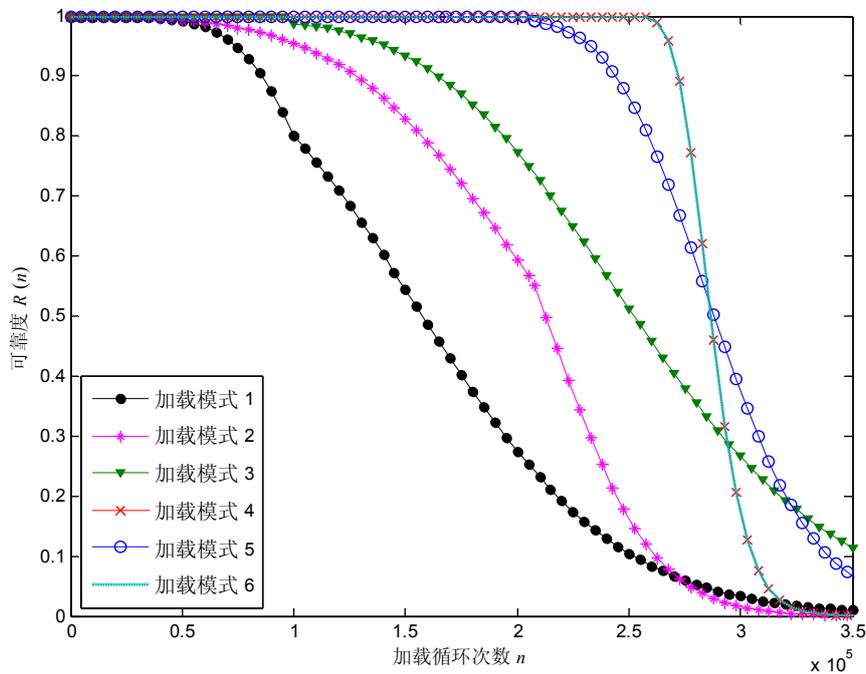


图 5-19 不同加载模式下螺旋压缩弹簧可靠度曲线比较

由图 5-19 可知，在全寿命周期内，可靠度随载荷作用次数逐渐减小，体现了载荷历程的时变性。可靠度曲线分为高可靠度稳态阶段和快速衰减阶段，载荷加载顺序对可靠度曲线变化有显著影响。高-低加载下的可靠度稳态周期最短，可靠度衰减平缓；低-高加载下的稳态周期最长，可靠度衰减剧烈。上述现象的解释为：①可靠度稳定变化主要发生在裂纹萌生阶段，高-低加载效应对损伤累积有促进作用，使裂纹萌生周期变短，而低-高加载延缓了损伤累积进程，使裂纹萌生周期变长；②可靠度衰减主要发生在裂纹扩展阶段，由于高-低加载下最后一级载荷较小，裂纹扩展速率较低，因此可靠度变化较平缓，反之亦然。同时，注意到加载模式 4 与加载模式 6 下的可靠度曲线基本重合，这是因为这两种模式下的前两级加载均

处于裂纹萌生阶段，可靠度水平很高，变化不显著。

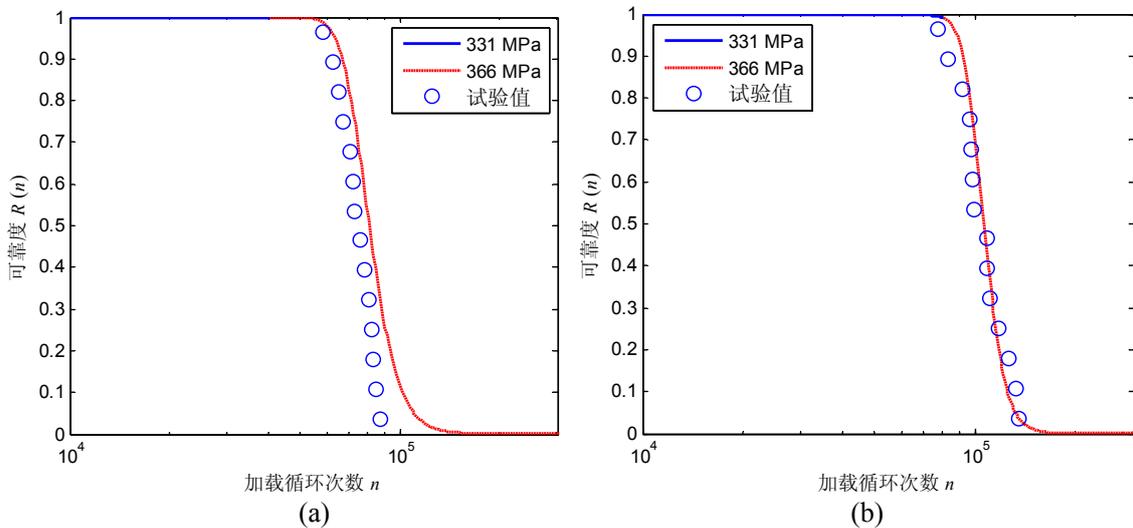
(2) 标准 45 钢和热轧 16Mn 钢算例

文献[223]以标准 45 钢和热轧 16Mn 钢进行了两级循环加载试验，试验载荷选用表 5-3 中的 6 种应力幅，加载顺序包括高-低加载和低-高加载。两种加载顺序分别对应着 3 种加载模式，试验参数如表 5-5 所示。

表 5-5 标准 45 钢和热轧 16Mn 钢变幅加载下疲劳试验数据

试样	应力幅 σ_i /(MPa)	加载顺序	加载模式	样本量	加载循环次数	
					n_1	n_2
标准 45 钢	$\sigma_1=366$ MPa $\sigma_2=331$ MPa	低-高加载: $\sigma_2(n_2) \rightarrow \sigma_1(n_1)$	模式 1	14	X	40,300
			模式 2	14	X	80,600
			模式 3	15	X	120,900
	$\sigma_1=331$ MPa $\sigma_2=309$ MPa	高-低加载: $\sigma_1(n_1) \rightarrow \sigma_2(n_2)$	模式 1	13	40,300	X
			模式 2	13	80,600	X
			模式 3	12	120,900	X
热轧 16Mn 钢	$\sigma_1=394$ MPa $\sigma_2=373$ MPa	低-高加载: $\sigma_2(n_2) \rightarrow \sigma_1(n_1)$	模式 1	10	X	62,500
			模式 2	10	X	95,200
			模式 3	10	X	146,000
	$\sigma_1=394$ MPa $\sigma_2=373$ MPa	高-低加载: $\sigma_1(n_1) \rightarrow \sigma_2(n_2)$	模式 1	10	26,000	X
			模式 2	10	44,000	X
			模式 3	10	75,000	X

根据正态分布下变幅加载时变可靠度模型计算公式，可得标准 45 钢和热轧 16Mn 钢在不同试验条件下的可靠度曲线，分别如图 5-20 和图 5-21 所示。



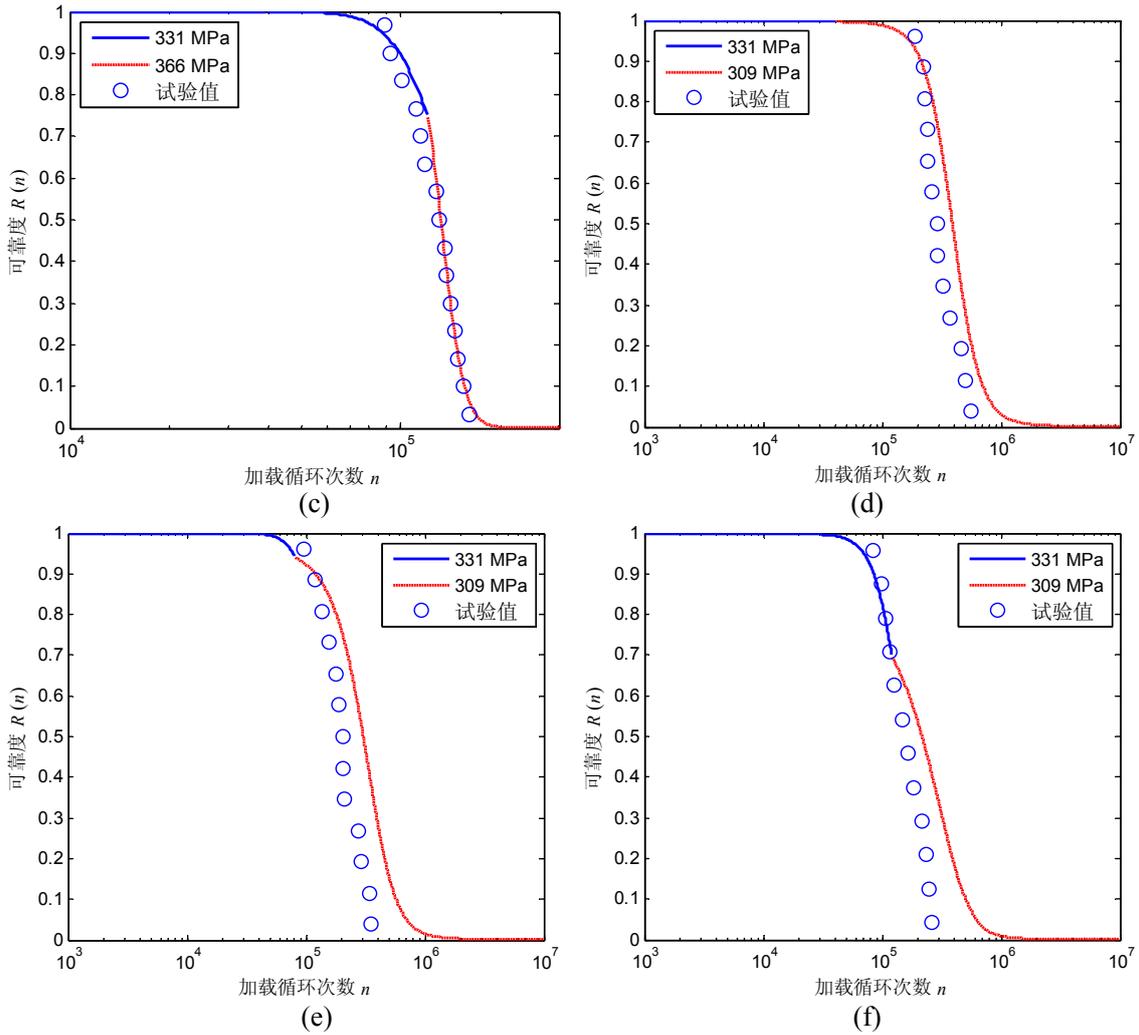
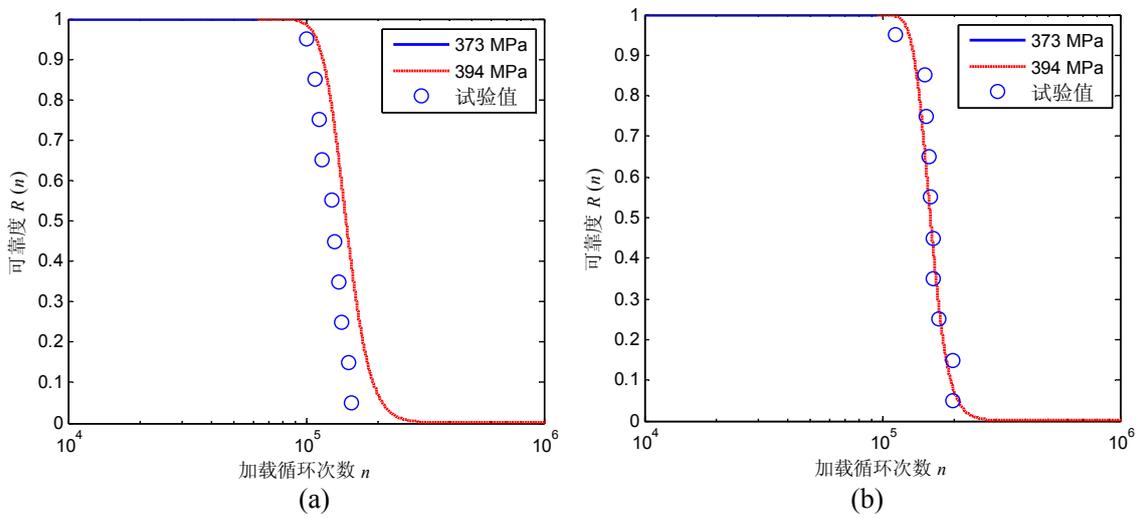


图 5-20 变幅加载下标准 45 钢可靠度变化曲线与试验值比较。(a)低-高加载：模式 1；
 (b)低-高加载：模式 2；(c)低-高加载：模式 3；(d)高-低加载：模式 1；(e)高-
 低加载：模式 2；(f)高-低加载：模式 3



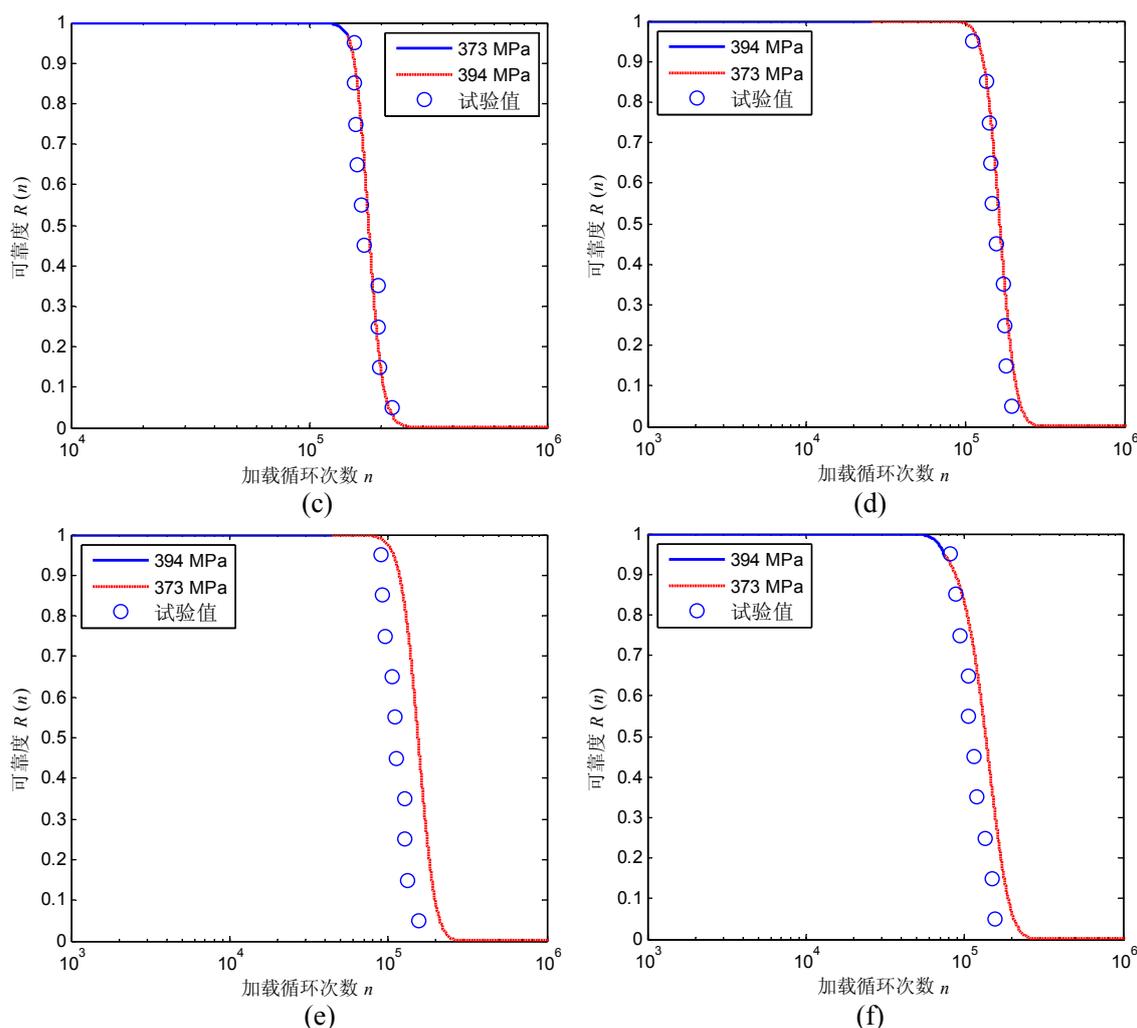


图 5-21 变幅加载下热轧 16Mn 钢可靠度变化曲线与试验值比较。(a)低-高加载：模式 1；(b)低-高加载：模式 2；(c)低-高加载：模式 3；(d)高-低加载：模式 1；(e)高-低加载：模式 2；(f)高-低加载：模式 3

根据以上结果可知，在不同加载顺序和加载模式下，两种试样的可靠度曲线均呈现出随载荷循环逐渐衰减的时变特征，理论可靠度曲线与由试验数据计算的经分布可靠度变化趋势大体吻合，从而验证了所提模型在变幅加载下的适用性。在整个疲劳加载过程中，由于载荷水平发生了跳变，可靠度曲线存在拐点，且被分割为 2 个节段，分别对应着第一级载荷加载（节段 1）和第二级载荷加载（节段 2）。第一级载荷加载下的使用寿命越长，节段处的拐点变化越明显。同时，节段 1 下的可靠度水平较高，变化平缓，而节段 2 下的可靠度迅速衰减。这表明第一级载荷加载主要消耗在裂纹萌生阶段，第二级载荷加载消耗在裂纹扩展阶段，体现了失效过程的两阶段特性。

5.5.2 对数正态分布下时变疲劳可靠度模型验证

5.5.2.1 恒幅加载下时变疲劳可靠性分析

为了验证对数正态分布下式(5-76)和式(5-77)的有效性，本节选用 7 组恒幅疲劳试验数据进行模型验证，分别是白铜弹簧丝^[219]、16Mn 钢^[283]、15MnVN 钢^[284]、LY12-CZ 光滑试件^[285]、LY12-CZ 中心孔试件^[285]、带切口的 45 钢摩擦焊接头^[286]和经锤击的 16Mn 钢对焊接头^[287]。上述试验得到的疲劳寿命数据均服从对数正态分布，试验加载参数和统计结果见表 5-6。

表 5-6 对数正态分布下恒幅疲劳试验数据

试样	应力幅 σ_i (MPa)	样本量	疲劳寿命 (10^3)	统计参量 ($\ln N_f$)	
				均值	标准差
白铜 弹簧丝	666	200	34.788, 37.339, 37.696, 40.136, 40.249, 40.702, 41.052, 41.386, 41.541, 42.061, 42.267, 42.605, 42.738, 43.061, 43.572, 43.614, 44.032, 44.333, 44.610, 44.660, 44.717, 44.933, 45.195, 45.402, 45.808, 45.818, 45.986, 46.204, 46.239, 46.690, 46.721, 47.130, 47.163, 47.170, 47.225, 47.317, 47.400, 47.414, 47.498, 47.646, 47.665, 47.773, 48.139, 48.273, 48.451, 48.805, 49.013, 49.073, 49.116, 49.153, 49.223, 49.292, 49.664, 49.816, 49.833, 49.856, 49.988, 50.134, 50.343, 50.445, 50.660, 50.693, 50.858, 50.870, 51.120, 51.188, 51.313, 51.322, 51.442, 51.642, 51.692, 51.708, 51.775, 51.799, 51.939, 52.003, 52.363, 52.495, 52.623, 52.659, 52.711, 52.974, 53.102, 53.150, 53.174, 53.346, 53.352, 53.382, 53.562, 53.572, 53.593, 53.636, 53.916, 53.982, 54.040, 54.055, 54.450, 54.466, 54.475, 54.477, 54.484, 54.563, 54.607, 54.627, 54.761, 54.881, 55.081, 55.192, 55.206, 55.264, 55.369, 55.775, 55.964, 56.244, 56.276, 56.384, 56.412, 56.718, 56.800, 56.969, 57.249, 57.511, 57.708, 57.884, 57.891, 58.077, 58.238, 58.361, 58.510, 58.615, 58.736, 58.869, 58.963, 59.012, 59.122, 59.140, 59.606, 59.726, 59.846, 59.962, 60.020, 60.057, 60.199, 60.402, 60.404, 60.412, 60.480, 60.844, 60.849, 61.048, 61.241, 61.252, 61.518, 61.518, 62.012, 62.116, 62.157, 62.544, 62.571, 62.597, 62.601, 62.811, 63.628, 63.932, 63.956, 64.142, 64.394, 64.523, 64.784, 64.865, 65.235, 65.493, 65.757, 65.776, 66.160, 66.206, 66.275, 66.465, 66.573, 66.593, 67.261, 67.329, 67.331, 67.836, 68.243, 68.549, 68.687, 68.792, 69.701, 69.942, 70.567, 71.000, 71.250, 71.515, 72.389, 74.109, 74.352, 75.443, 77.295, 78.358	10.9105	0.1554

续表 5-6 对数正态分布下恒幅疲劳试验数据

试样	应力幅 σ_i (MPa)	样本量	疲劳寿命 (10^3)	统计参量 ($\ln N_f$)	
				均值	标准差
白铜 弹簧丝	583	200	61.939, 74.288, 76.327, 77.945, 78.132, 78.145, 78.486, 80.385, 81.451, 81.978, 82.553, 86.175, 88.194, 88.648, 89.146, 89.558, 91.846, 92.686, 92.739, 92.811, 94.743, 95.474, 95.984, 96.224, 96.445, 96.611, 97.012, 97.139, 98.006, 98.073, 98.196, 98.307, 98.952, 99.994, 100.046, 101.805, 102.855, 103.199, 103.207, 103.234, 103.255, 103.368, 103.611, 104.331, 105.358, 105.641, 106.180, 106.211, 106.772, 107.535, 107.783, 108.007, 108.381, 108.417, 108.852, 108.905, 110.608, 110.693, 111.049, 111.522, 111.613, 111.914, 112.350, 112.869, 113.365, 114.057, 114.375, 114.540, 115.247, 116.210, 116.466, 116.601, 117.220, 118.191, 118.700, 118.953, 119.052, 119.552, 119.891, 120.383, 120.408, 121.128, 121.941, 122.023, 122.112, 122.191, 122.312, 122.421, 122.542, 123.193, 123.238, 123.497, 123.516, 123.517, 124.483, 124.507, 124.870, 124.926, 124.965, 125.869, 126.003, 126.128, 126.507, 126.640, 127.141, 127.219, 128.313, 128.463, 128.936, 128.971, 129.243, 129.312, 129.578, 129.685, 129.691, 130.016, 130.578, 130.981, 131.002, 131.375, 132.253, 132.574, 132.716, 132.806, 132.911, 133.244, 133.467, 133.618, 133.742, 133.817, 134.154, 134.955, 135.651, 135.731, 135.875, 136.086, 136.088, 136.442, 136.707, 136.790, 138.254, 138.891, 139.843, 140.153, 140.207, 140.528, 140.656, 140.697, 141.241, 141.391, 141.455, 141.653, 141.723, 143.425, 143.433, 143.910, 144.630, 145.417, 145.503, 145.839, 146.183, 146.258, 146.911, 147.397, 147.908, 148.336, 148.388, 148.508, 149.069, 149.302, 149.757, 150.120, 150.155, 150.248, 150.855, 152.928, 154.048, 155.016, 155.307, 155.721, 157.752, 159.794, 161.237, 163.480, 164.115, 164.515, 164.517, 164.987, 165.034, 165.440, 166.126, 166.654, 167.268, 167.986, 169.777, 172.365, 172.629, 177.006, 185.415, 190.854	11.7181	0.2028

续表 5-6 对数正态分布下恒幅疲劳试验数据

试样	应力幅 σ_i (MPa)	样本量	疲劳寿命 (10^3)	统计参量 ($\ln N_f$)	
				均值	标准差
白铜 弹簧丝	478	200	228.090, 252.808, 263.086, 274.702, 275.028, 276.080, 277.337, 293.104, 294.570, 296.754, 303.167, 303.806, 304.512, 307.029, 309.553, 309.743, 310.117, 310.534, 318.575, 319.109, 322.132, 322.251, 325.720, 327.842, 328.296, 332.018, 332.186, 333.941, 337.233, 340.753, 342.124, 343.913, 345.569, 349.410, 349.972, 354.212, 355.683, 357.198, 362.020, 363.156, 363.422, 365.780, 370.334, 370.437, 372.329, 372.689, 375.275, 377.510, 377.690, 380.709, 383.257, 384.206, 384.727, 385.917, 388.871, 389.319, 389.578, 389.744, 390.331, 390.591, 391.493, 392.431, 394.488, 396.653, 398.485, 399.625, 401.386, 401.598, 403.680, 404.156, 404.298, 404.337, 405.174, 406.858, 407.678, 408.416, 409.155, 410.266, 411.405, 411.828, 412.055, 416.766, 417.386, 417.566, 422.890, 424.608, 425.026, 426.815, 428.615, 432.091, 432.807, 433.439, 434.787, 435.255, 435.596, 435.669, 438.174, 438.808, 439.236, 439.463, 440.785, 442.737, 443.856, 444.045, 446.245, 446.701, 447.631, 447.717, 452.082, 454.119, 455.858, 457.554, 458.212, 458.274, 458.932, 459.820, 460.384, 460.425, 462.949, 464.084, 465.654, 465.820, 466.993, 470.926, 470.960, 471.133, 471.579, 474.083, 474.844, 475.793, 477.775, 481.090, 481.735, 481.776, 481.976, 483.010, 483.126, 483.815, 487.676, 489.207, 491.716, 492.554, 493.706, 494.963, 496.056, 498.749, 500.222, 502.064, 503.118, 505.977, 508.467, 508.533, 511.498, 513.913, 517.179, 520.724, 521.954, 528.197, 528.360, 530.381, 530.420, 530.771, 535.606, 536.763, 538.543, 538.582, 539.207, 543.692, 545.907, 546.060, 552.206, 558.713, 562.981, 564.384, 567.748, 568.592, 571.040, 575.302, 576.733, 577.639, 581.810, 582.503, 582.603, 585.904, 588.051, 588.126, 603.511, 603.874, 605.240, 613.740, 614.834, 617.473, 622.531, 622.927, 633.377, 640.306, 646.316, 647.900, 648.079, 659.302	12.9832	0.2174

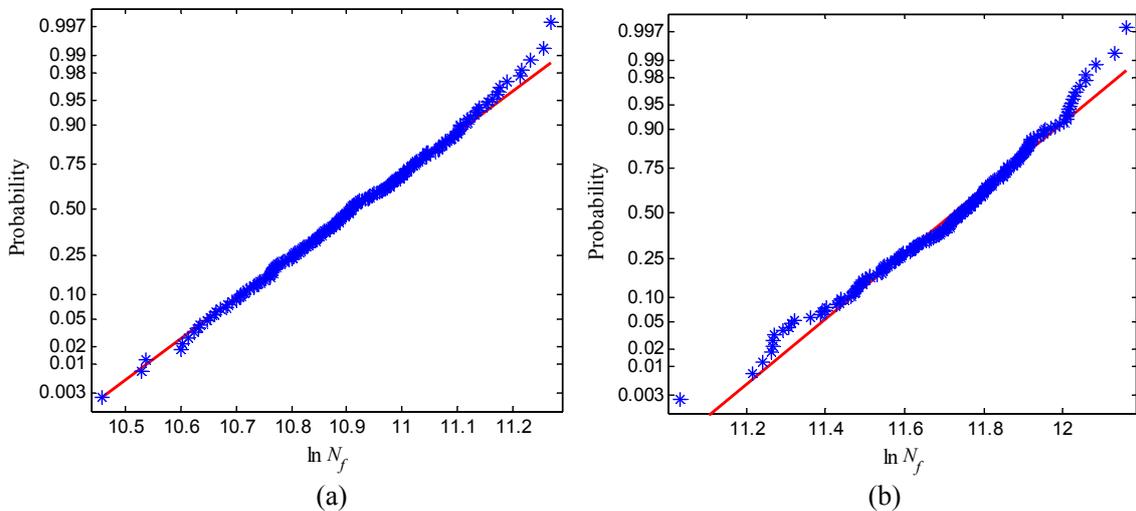
续表 5-6 对数正态分布下恒幅疲劳试验数据

试样	应力幅 σ_i /(MPa)	样本量	疲劳寿命 (10^3)	统计参量 ($\ln N_f$)	
				均值	标准差
16Mn 钢	312.7	15	100.8, 104.2, 105.4, 114.3, 115.4, 116.5, 118.6, 119.9, 123.2, 123.5, 124.5, 130.7, 160.1, 257.4, 268.3	11.7925	0.2992
	302.2	15	155.6, 159.7, 176.3, 183.7, 189.4, 196.1, 197.6, 204.1, 210.4, 223.8, 247.1, 251.4, 275.7, 283.6, 336.5	12.2755	0.2198
	291.7	15	334.1, 336.1, 338.2, 347.3, 354.9, 370.0, 406.2, 437.3, 444.8, 472.9, 483.8, 611.9, 645.0, 680.3, 730.9	13.0155	0.2761
	282.3	15	689.1, 751.9, 780.1, 860.5, 938.3, 949.0, 1044.2, 1059.0, 1099.1, 1279.3, 1332.0, 1575.2, 1662.3, 1686.9, 1764.7	13.9228	0.3112
15MnVN 钢	554.2	7	83.77, 95.30, 96.96, 104.35, 112.31, 116.44, 118.41	11.5449	0.1255
	476.6	7	238.56, 256.63, 281.38, 308.60, 344.75, 350.75, 363.41	12.6210	0.1642
	424.9	7	442.08, 502.92, 561.95, 582.51, 638.85, 893.10, 908.24	13.3473	0.2742
	388	7	78.90, 106.22, 140.38, 156.86, 165.69, 174.98, 177.99	14.1375	0.3034
LY12-CZ 光滑 试件	203.84	6	40.0, 30.0, 25.0, 40.0, 37.0, 61.0	10.5277	0.3031
	144.06	6	75.0, 120.0, 67.0, 76.0, 58.0, 137.0	11.3446	0.3398
	125.44	7	136.0, 138.0, 211.0, 207.0, 115.0, 125.0, 193.0	11.9592	0.2557
	105.84	7	439.0, 263.0, 305.0, 193.0, 336.0, 465.0, 262.0	12.6459	0.3088
LY12-CZ 中心孔 试件	125.44	6	37.0, 22.0, 20.0, 19.0, 24.0, 23.0	10.0670	0.2377
	101.92	5	60.0, 54.0, 66.0, 51.0, 55.3	10.9513	0.1004
	78.79	6	118.0, 120.0, 196.0, 172.0, 141.0, 137.0	11.8832	0.2011
	49.98	7	379.0, 252.0, 584.0, 440.0, 726.0, 506.0, 391.0	13.0087	0.3406

续表 5-6 对数正态分布下恒幅疲劳试验数据

试样	应力幅 σ_i /(MPa)	样本量	疲劳寿命 (10^3)	统计参量 ($\ln N_f$)	
				均值	标准差
带切口的 45 钢摩 擦焊接头	750	10	20.802, 22.151, 24.300, 25.498, 27.002, 29.000, 34.698, 37.801, 46.100, 60.996	10.3423	0.3433
	650	10	49.40, 81.75, 85.90, 96.29, 102.00, 108.69, 112.69, 118.30, 119.29, 168.50	11.5122	0.3190
	630	10	70.89, 90.41, 92.81, 94.30, 96.16, 100.30, 119.81, 120.20, 153.21, 189.19	11.5944	0.2884
	590	10	132.19, 141.29, 152.69, 156.78, 164.21, 170.02, 178.48, 192.80, 246.38, 262.72	12.0757	0.2241
	520	10	196.7, 209.5, 323.7, 456.2, 461.3, 473.8, 523.4, 548.2, 655.7, 1292.1	13.0118	0.5474
经锤击的 16Mn 钢 对焊接头	192	5	53.4, 67.0, 80.0, 107.0, 142.0	11.3464	0.3849
	160	5	150.0, 220.0, 243.5, 486.5, 535.0	12.5815	0.5441
	140	5	719.0, 750.2, 1275.2, 1464.0, 2203.0	13.9749	0.4724

为了验证表 5-6 中疲劳寿命数据是否服从对数正态分布，以白铜弹簧丝为例绘制概率纸，得到 3 种不同应力水平下对数寿命与失效概率之间的关系，如图 5-22 所示。从图中可以看出，对数寿命数据点基本都位于一条直线上，表明对数疲劳寿命比较接近于正态分布。对于其他 6 种试样，分析过程类似，结果都表明疲劳寿命可认为服从对数正态分布。根据对数正态分布下概率损伤累积建模，结合式 (5-76) 和式 (5-77)，可得 7 种试样在不同应力水平下的可靠度曲线，并与试验数据计算的经验分布可靠度进行比较，结果如图 5-23 至图 5-29 所示。此外，为了研究应力级别对可靠度变化的影响，将不同应力水平下的可靠度曲线进行合并比较，如图 5-30 至图 5-36 所示。



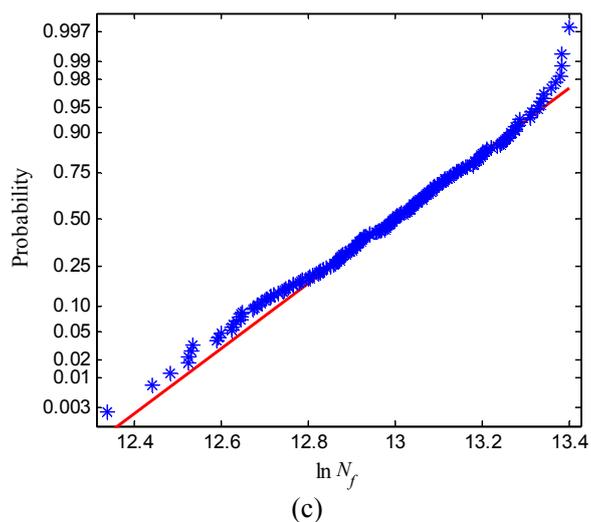


图 5-22 白铜弹簧丝对数疲劳寿命概率纸。(a) 666 MPa; (b) 583 MPa; (c) 478 MPa

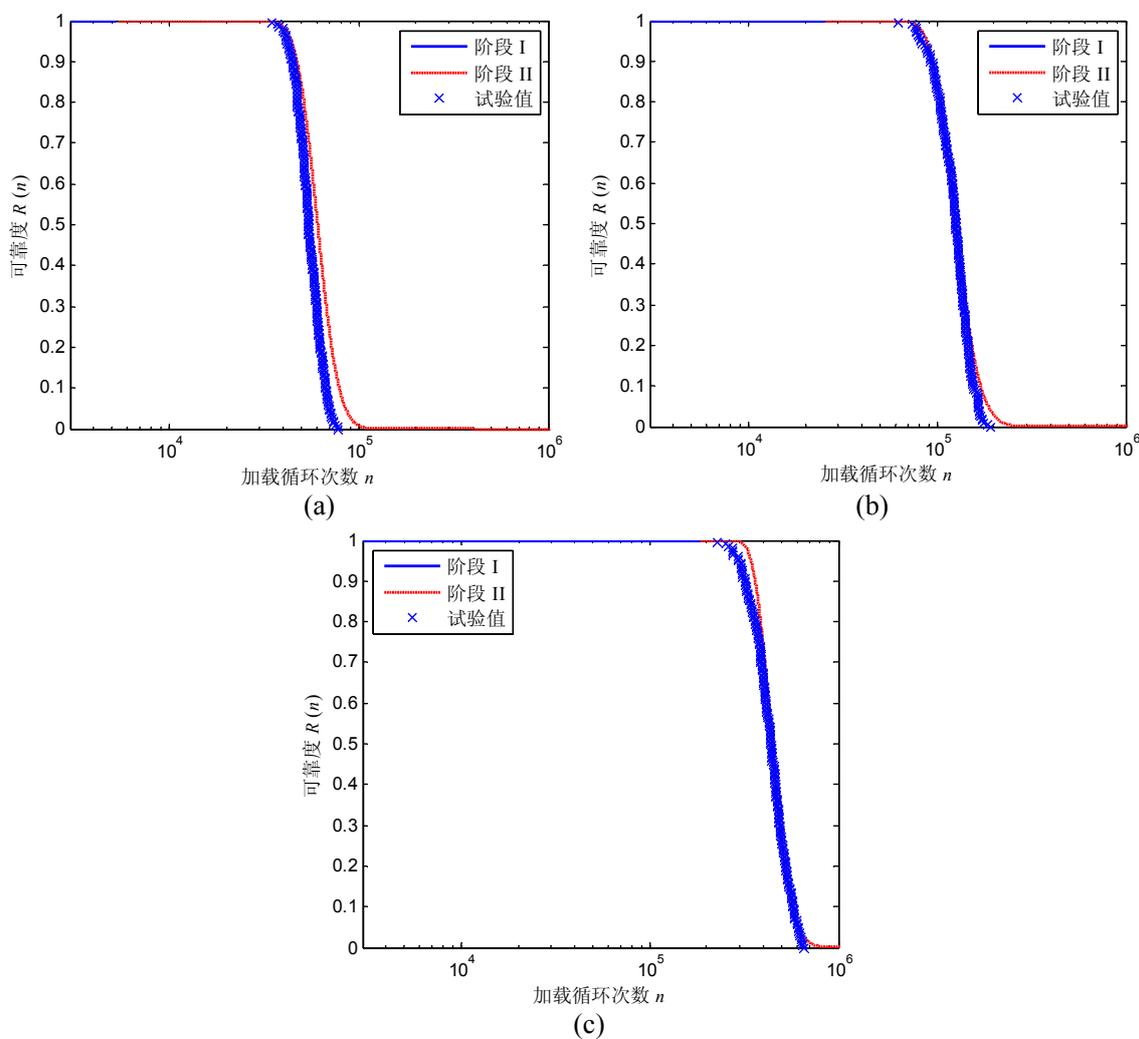


图 5-23 恒幅加载下白铜弹簧丝可靠度曲线与试验值比较。(a) 666 MPa; (b) 583 MPa; (c) 478 MPa

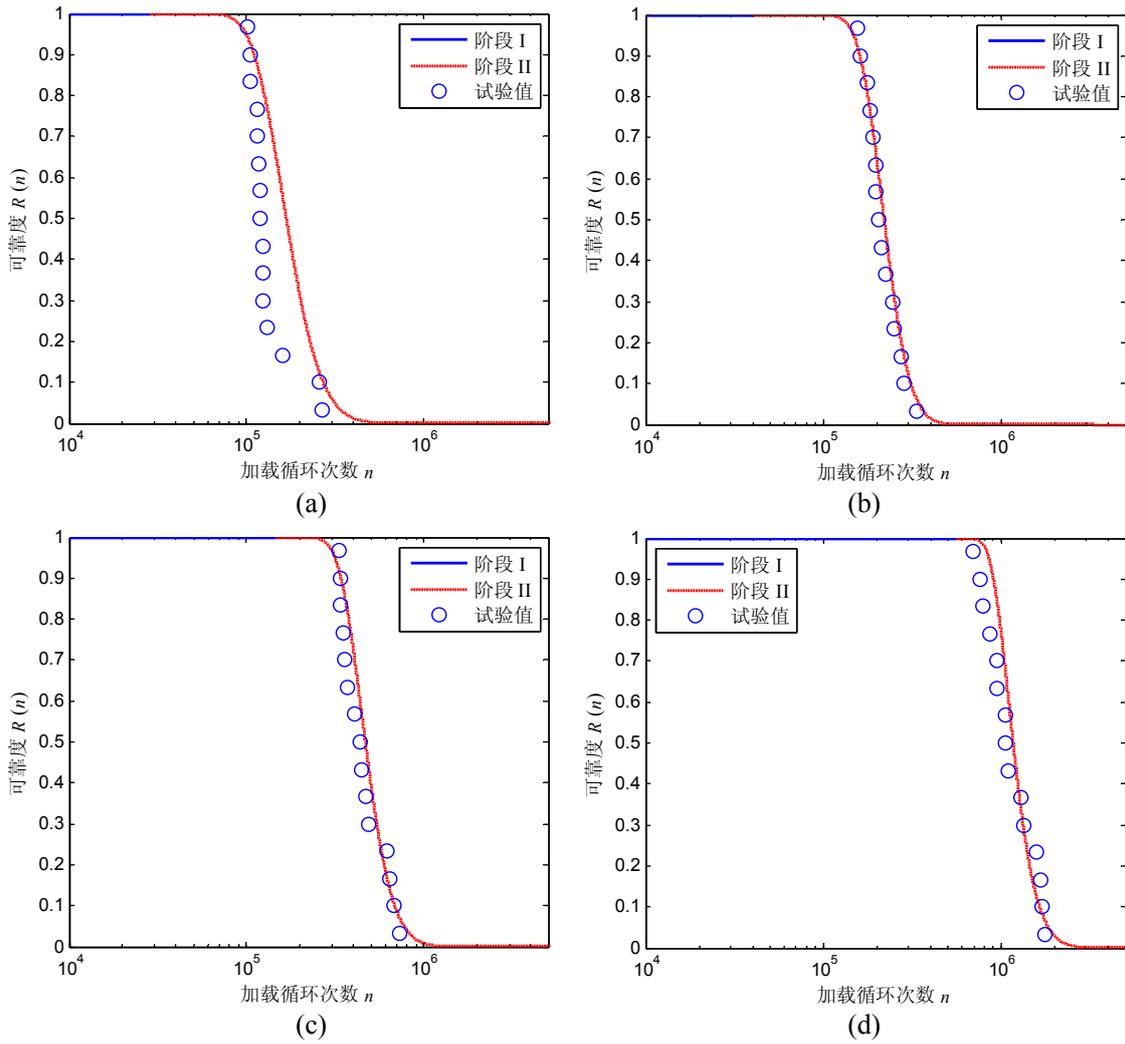
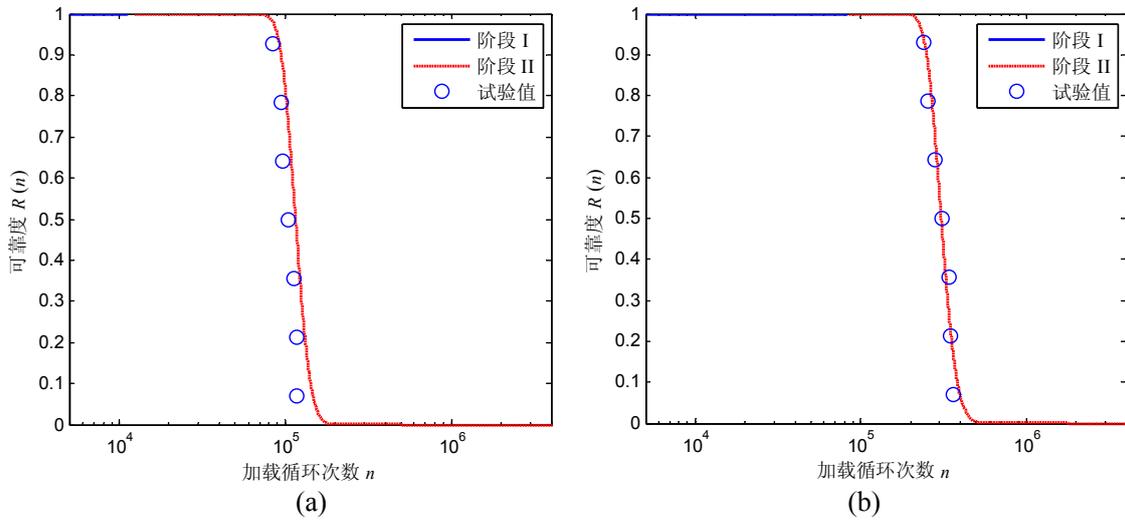


图 5-24 恒幅加载下 16Mn 钢可靠度曲线与试验值比较。(a) 312.7 MPa; (b) 302.2 MPa;
(c) 291.7 MPa; (d) 282.3 MPa



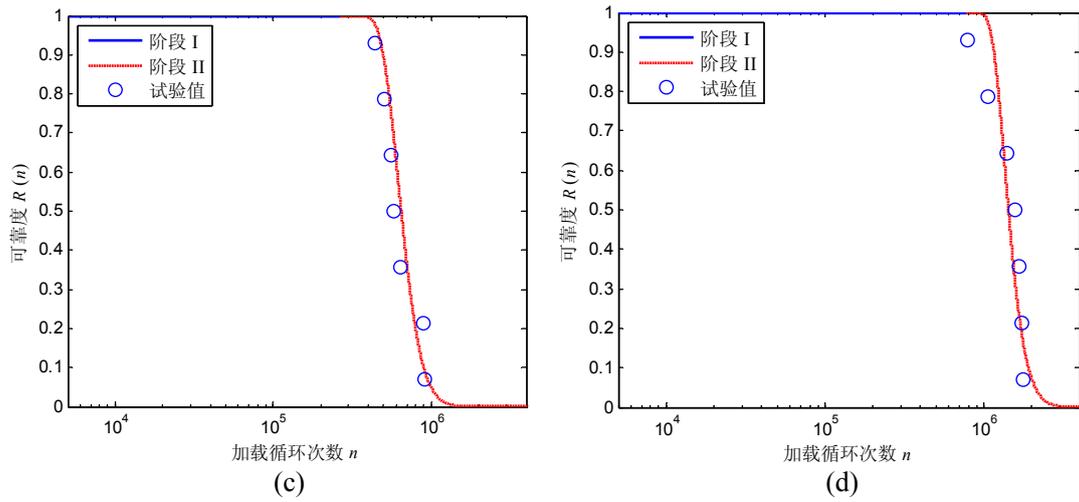


图 5-25 恒幅加载下 15MnVN 钢可靠度曲线与试验值比较。(a) 554.2 MPa; (b) 476.6 MPa; (c) 424.9 MPa; (d) 388 MPa

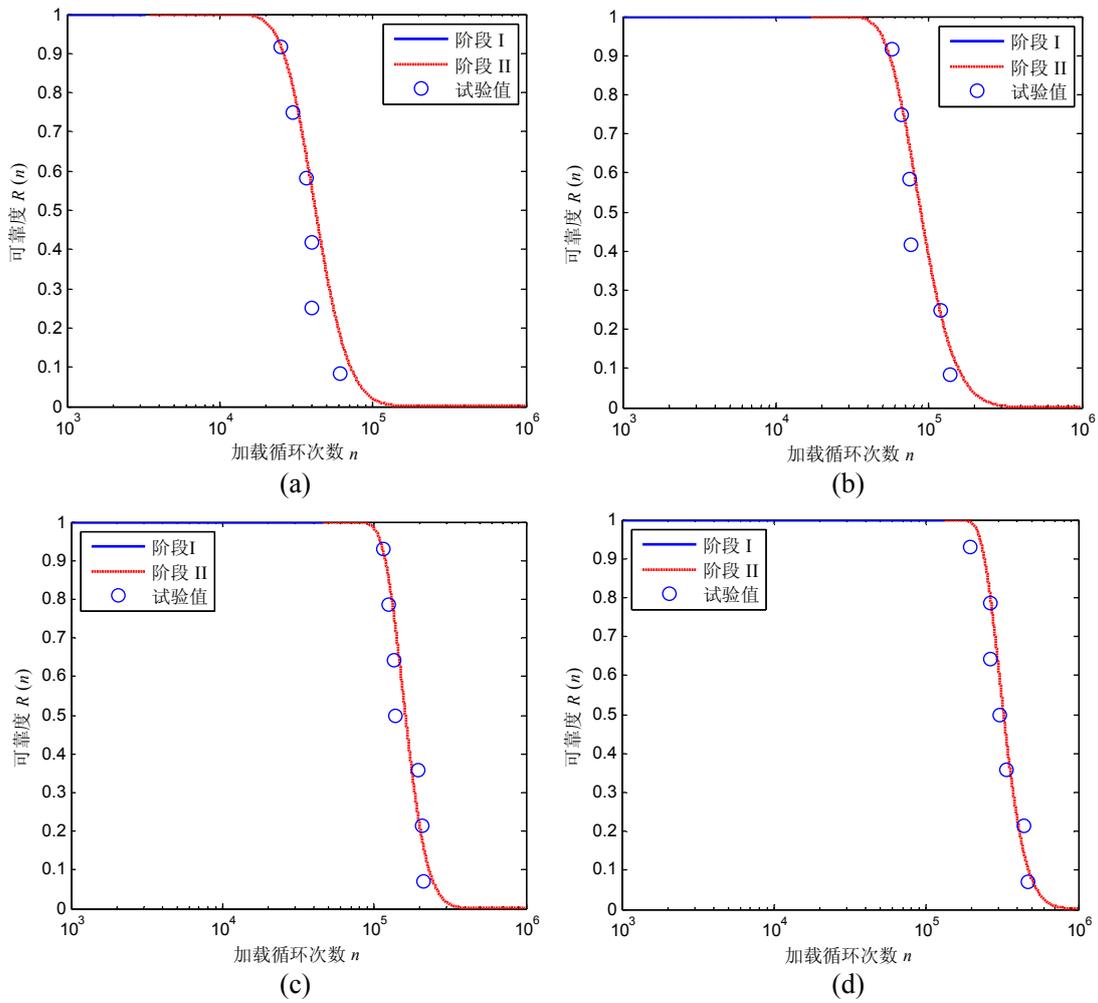


图 5-26 恒幅加载下 LY12-CZ 光滑试件可靠度曲线与试验值比较。(a) 203.84 MPa; (b) 144.06 MPa; (c) 125.44 MPa; (d) 105.84 MPa

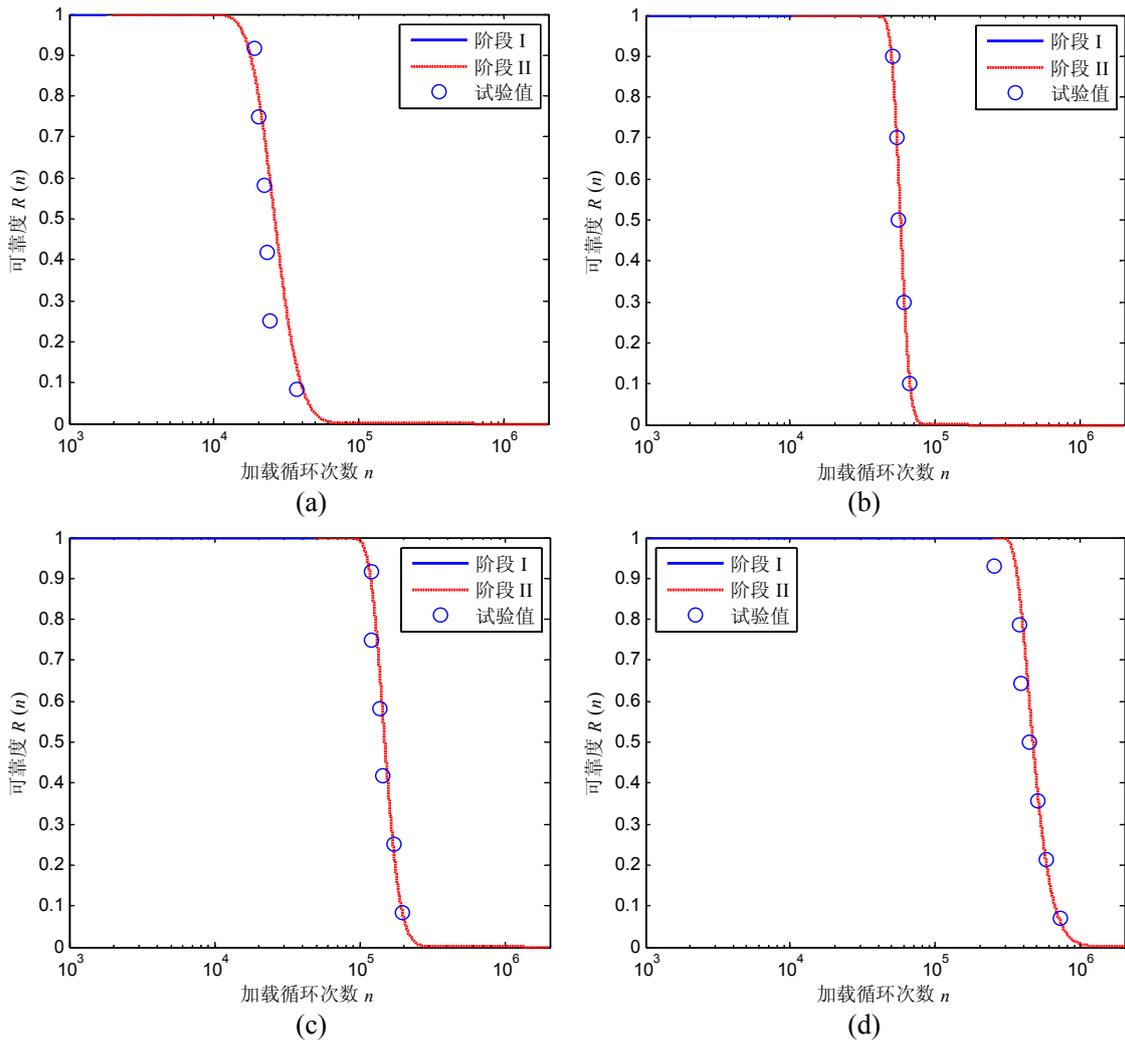
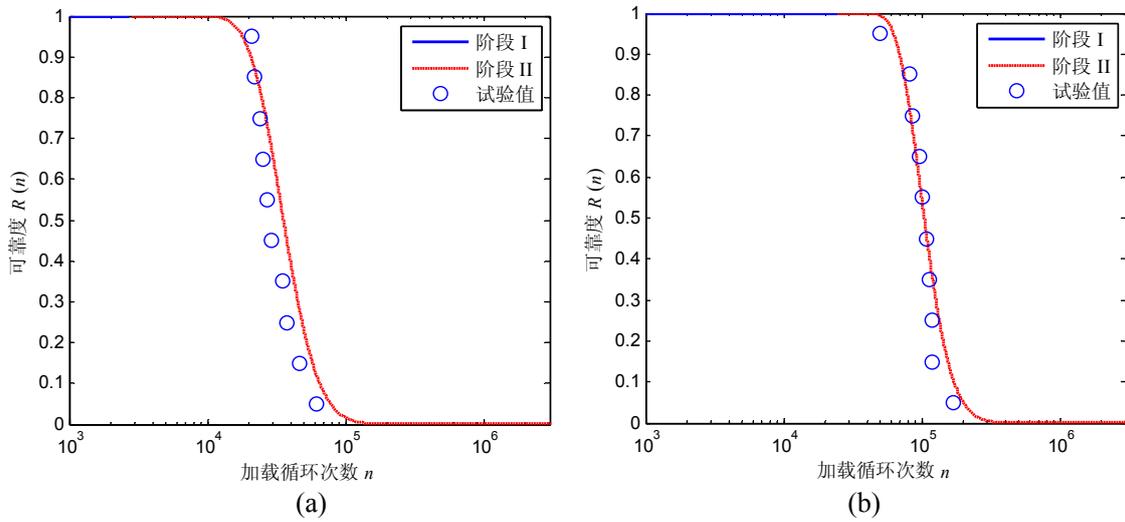


图 5-27 恒幅加载下 LY12-CZ 中心孔试件可靠度曲线与试验值比较。(a) 125.44 MPa;
(b) 101.92 MPa; (c) 78.79 MPa; (d) 49.98 MPa



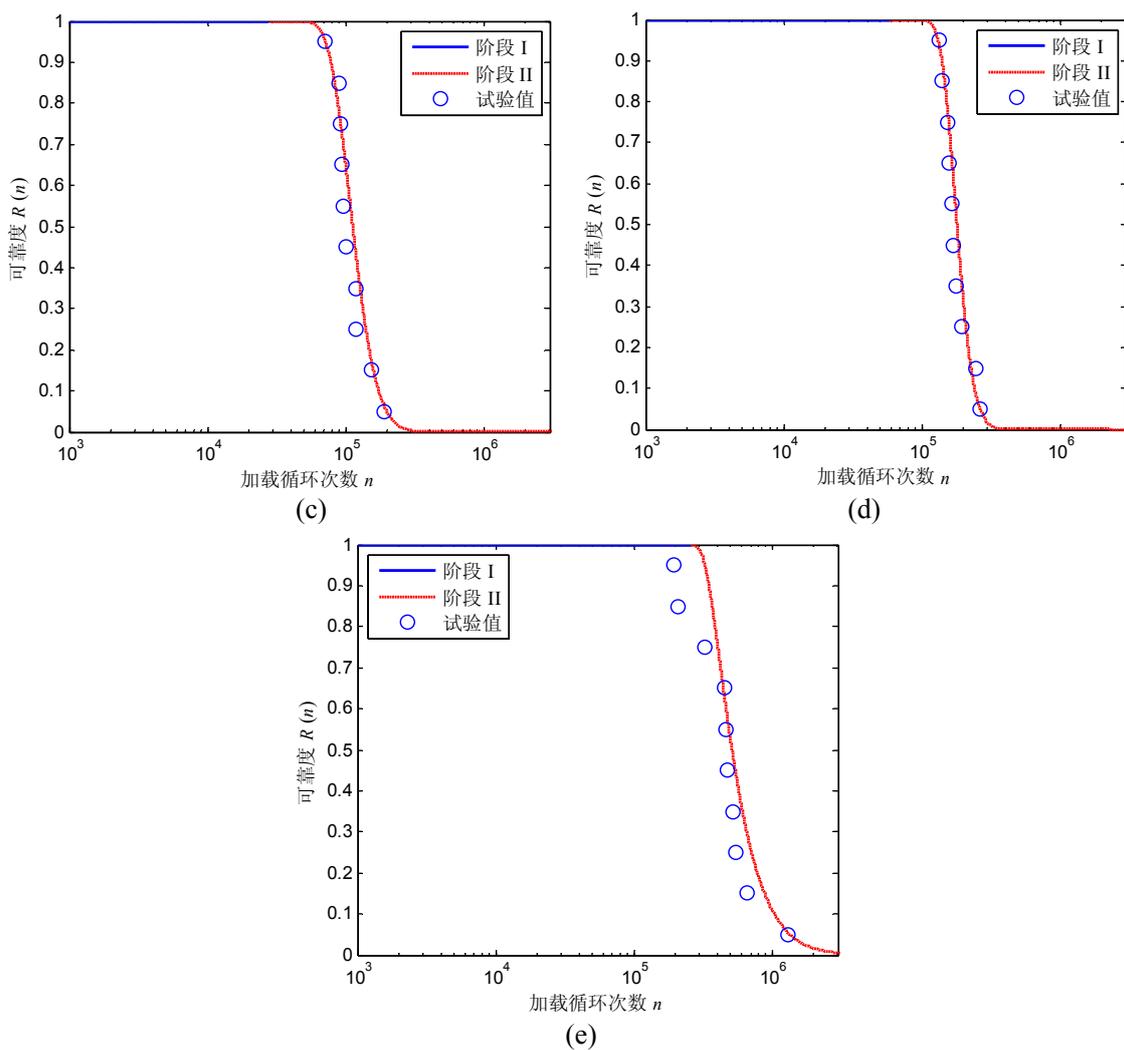
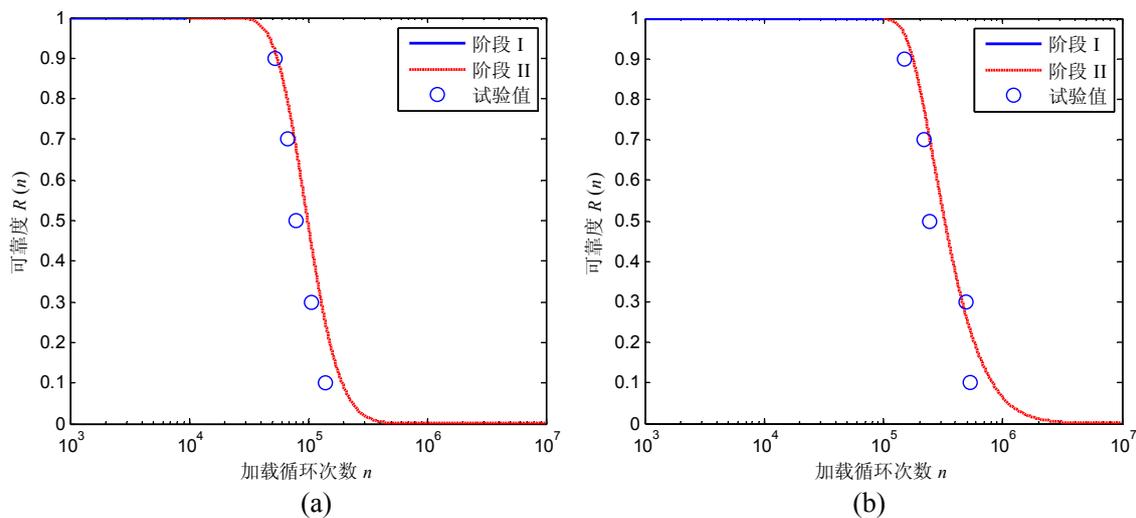


图 5-28 恒幅加载下带切口的 45 钢摩擦焊接头可靠度曲线与试验值比较。(a) 750 MPa; (b) 650 MPa; (c) 630 MPa; (d) 590 MPa; (e) 520 MPa



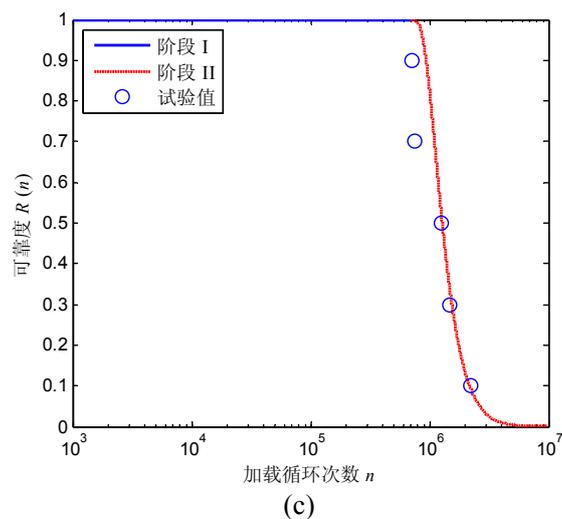


图 5-29 恒幅加载下经锤击的 16Mn 钢对焊接头可靠度曲线与试验值比较。(a) 192 MPa; (b) 160 MPa; (c) 140 MPa

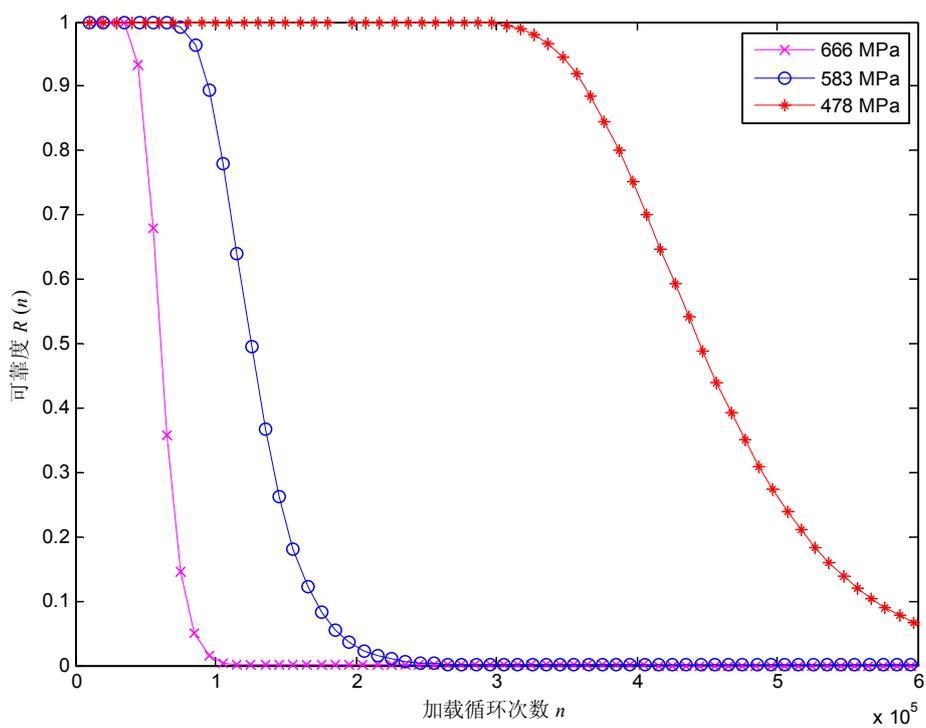


图 5-30 白铜弹簧丝不同应力水平下可靠度曲线比较

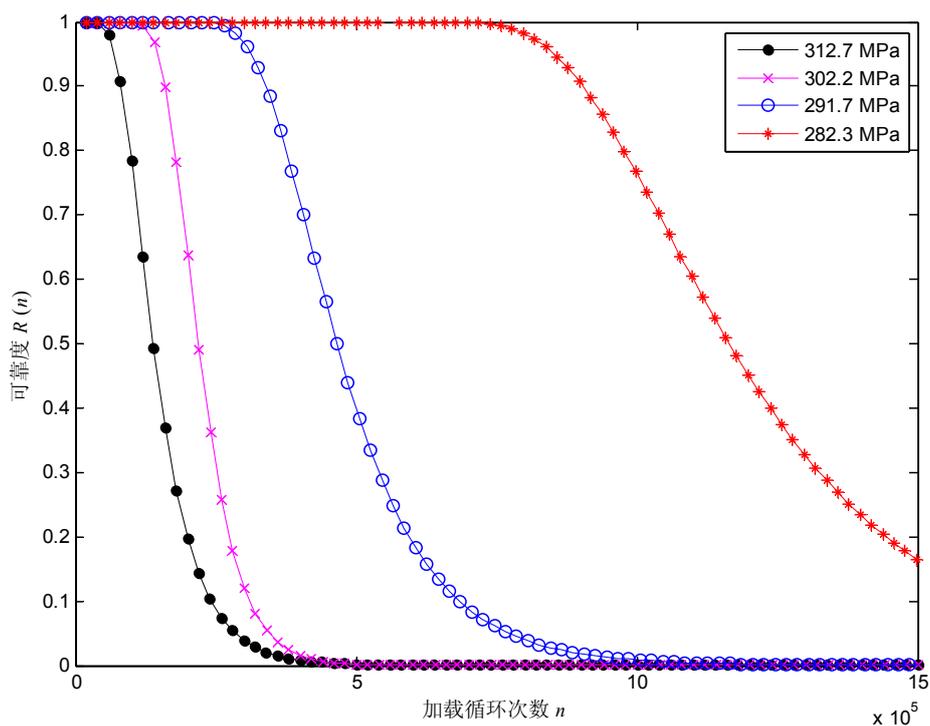


图 5-31 16Mn 钢不同应力水平下可靠度曲线比较

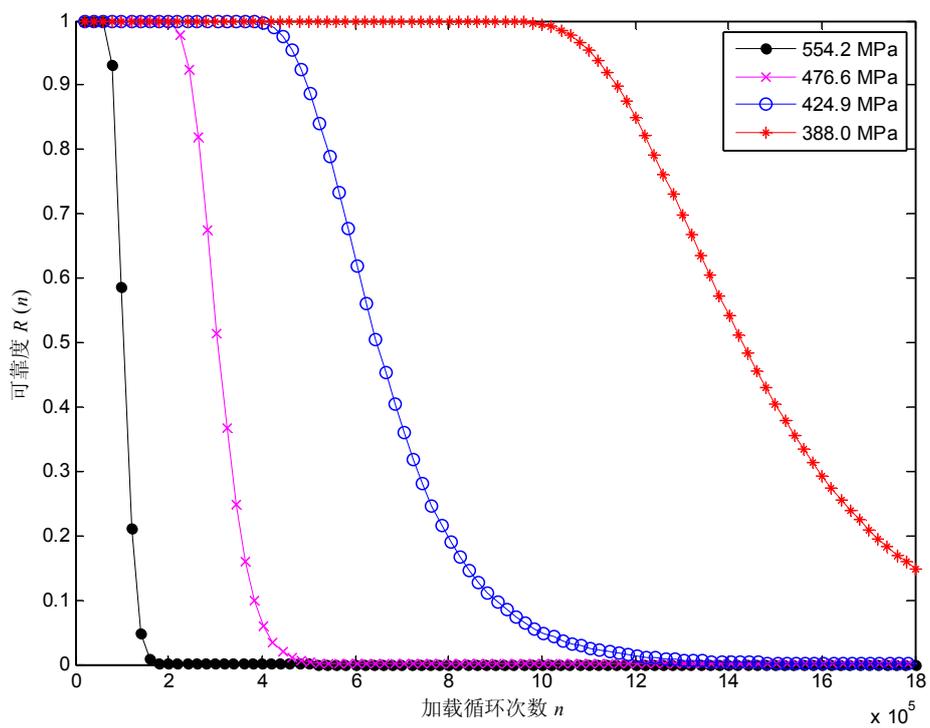


图 5-32 15MnVN 钢不同应力水平下可靠度曲线比较

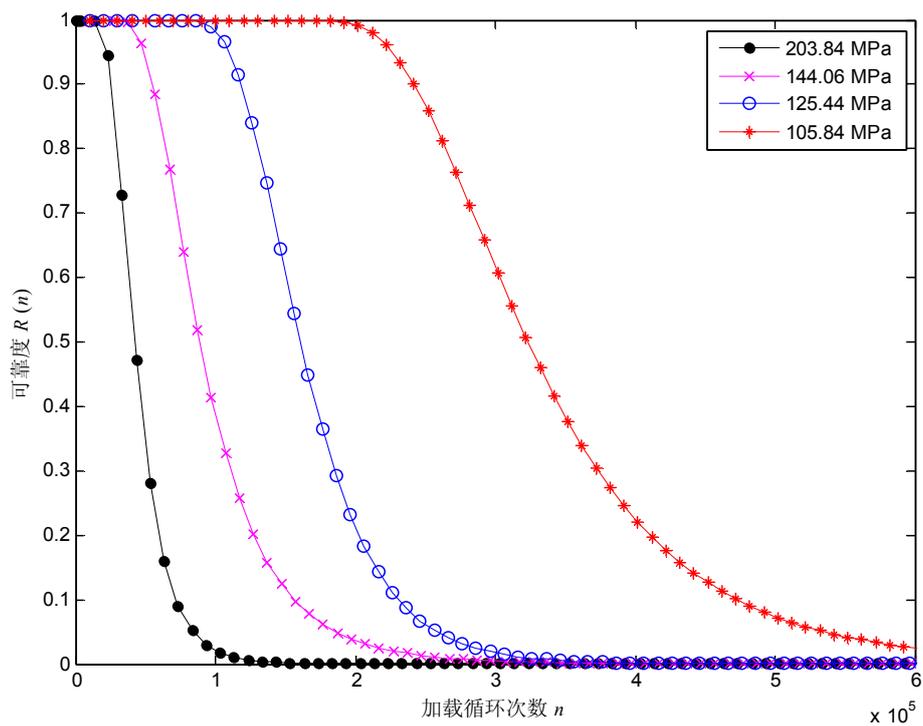


图 5-33 LY12-CZ 光滑试件不同应力水平下可靠度曲线比较

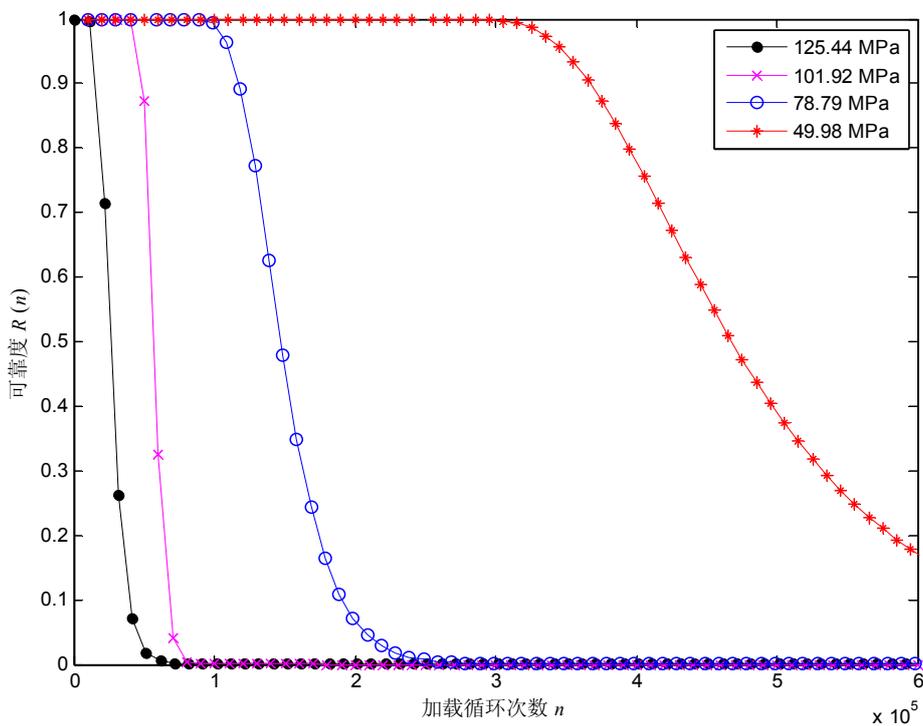


图 5-34 LY12-CZ 中心孔试件不同应力水平下可靠度曲线比较

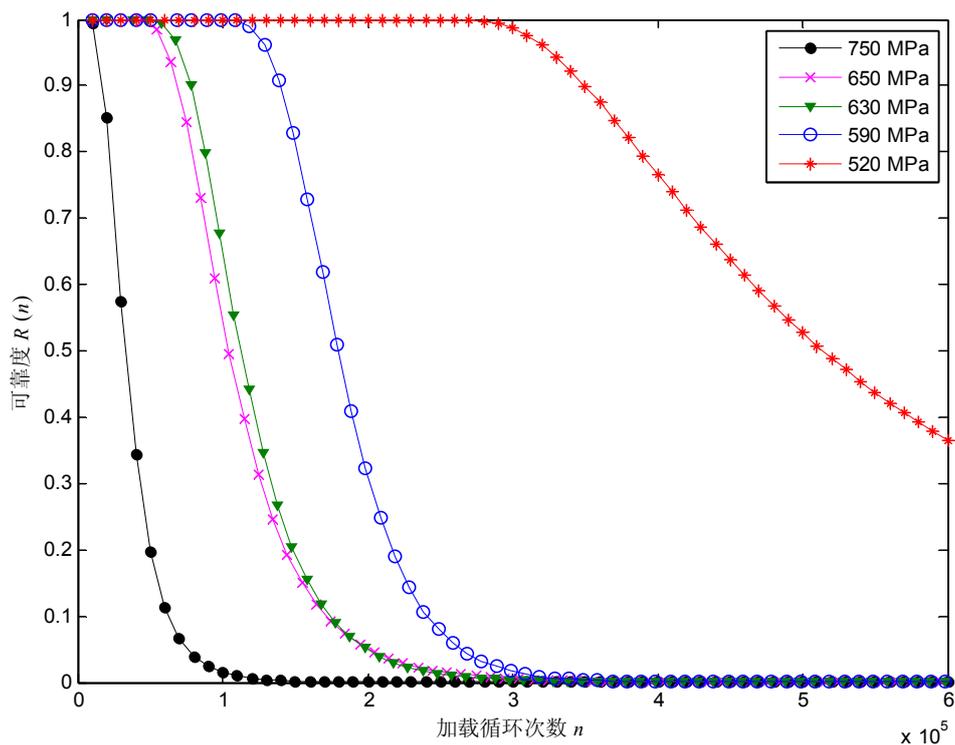


图 5-35 带切口的 45 钢摩擦焊接头不同应力水平下可靠度曲线比较

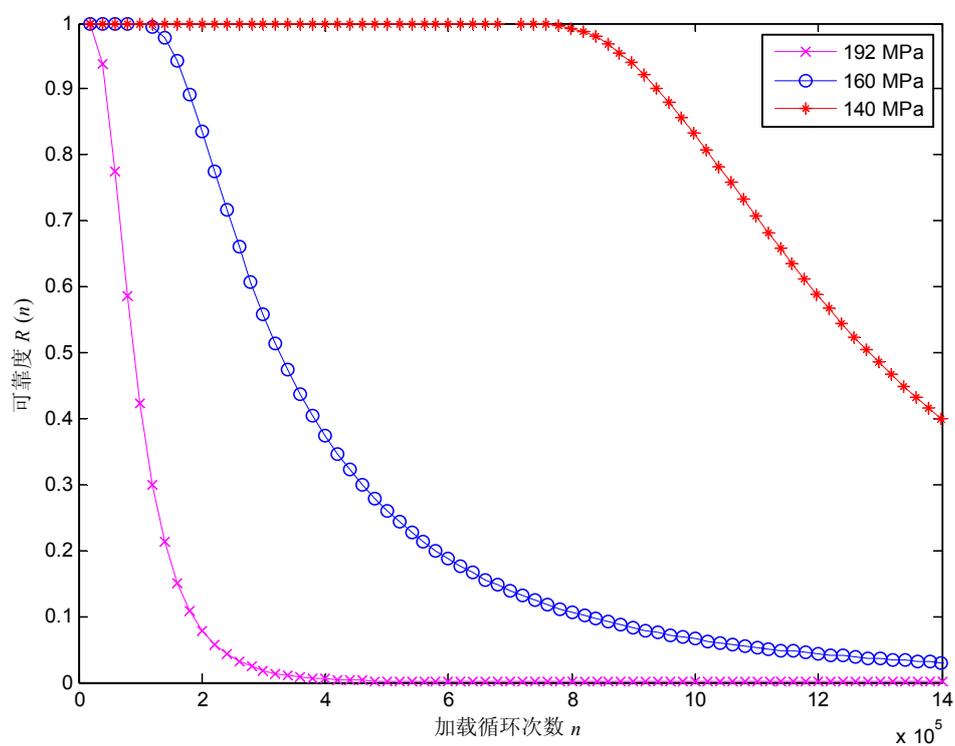


图 5-36 经锤击的 16Mn 钢对焊接头不同应力水平下可靠度曲线比较

根据以上结果，对于不同试样或不同加载条件下，可靠度预测曲线与试验

结果的吻合性较好，从而验证了式(5-76)和式(5-77)的有效性和正确性。与正态分布下恒幅加载可靠度曲线类似，对数正态假设下的可靠度曲线也呈现出失效过程裂纹萌生与裂纹扩展的两阶段特性。由图 5-30 至图 5-36 可知，最小应力水平和最大应力水平下的可靠度曲线分别构成了可靠度上边界带和下边界带，其他可靠度曲线按应力级别从小到大依次介于上、下边界带之间。这是因为应力水平越高，损伤累积速率越快，从而加快了疲劳失效进程。

5.5.2.2 变幅加载下时变疲劳可靠性分析

为了进一步验证所提模型在变幅加载下的有效性，本节选用 2 组程序块载荷谱试验数据进行时变可靠性分析，分别是带切口的 45 钢摩擦焊接头^[286]和经锤击的 16Mn 钢对焊接头^[287]。两种接头的载荷谱分别如图 5-37 和图 5-38 所示，加载参数和试验结果见表 5-7。

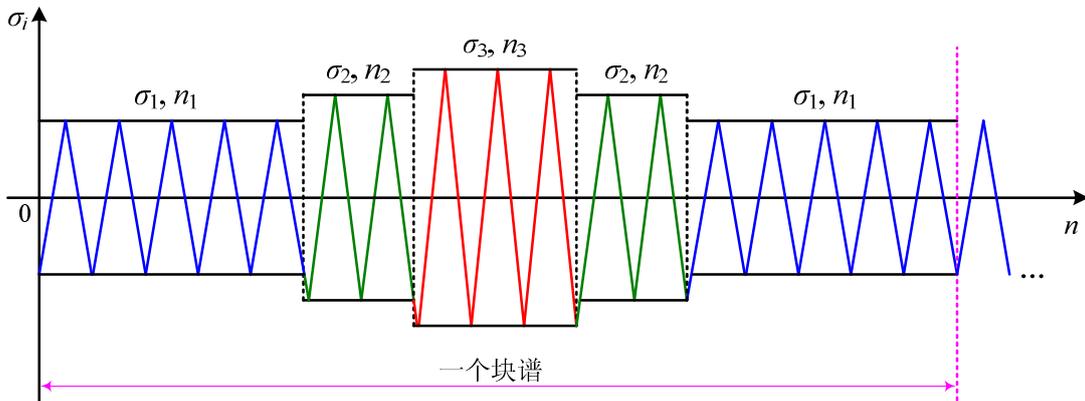


图 5-37 带切口的 45 钢摩擦焊接头程序块载荷谱

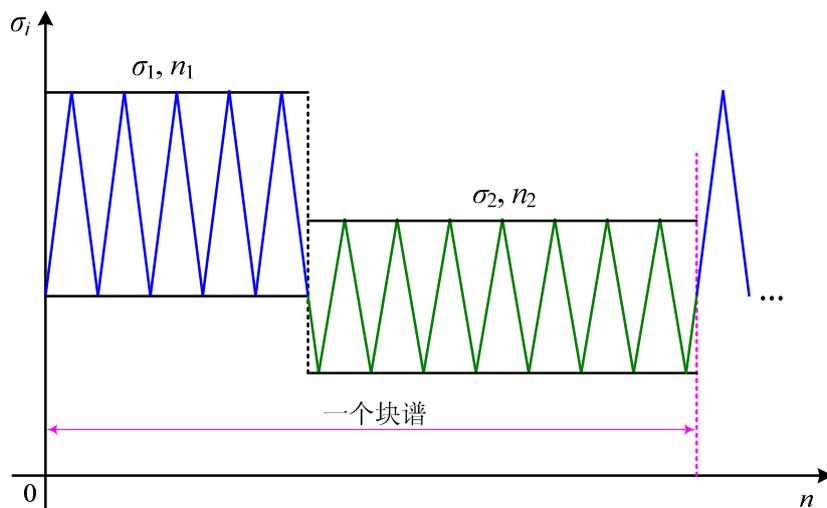


图 5-38 经锤击的 16Mn 钢对焊接头程序块载荷谱

表 5-7 程序块载荷谱加载参数和试验结果

试样	加载应力	程序块	加载循环次数			试验寿命 N_{fi} (块)
			n_1	n_2	n_3	
带切口的 45 钢摩 擦焊接头	$\sigma_1=626.6$ MPa	$\sigma_3(n_3) \rightarrow \sigma_2(n_2) \rightarrow \sigma_1(n_1)$ $\rightarrow \sigma_2(n_2) \rightarrow \sigma_3(n_3)$	5000	4000	15,000	3.717, 5.189, 6.729, 7.452, 7.943, 12.151
	$\sigma_2=590$ MPa					
	$\sigma_3=500$ MPa					
经锤击的 16Mn 钢 对焊接头	$\sigma_1=192.3$ MPa $\sigma_2=166.8$ MPa	$\sigma_1(n_1) \rightarrow \sigma_2(n_2)$	10,000	35,000	—	2.34, 2.45, 2.85, 2.91, 4.53, 8.13

根据对数正态分布假设下概率损伤累积建模分析及其可靠度计算过程, 可得 2 种接头试件随载荷循环变化的可靠度曲线, 并与试验结果进行比较, 如图 5-39 和图 5-40 所示。

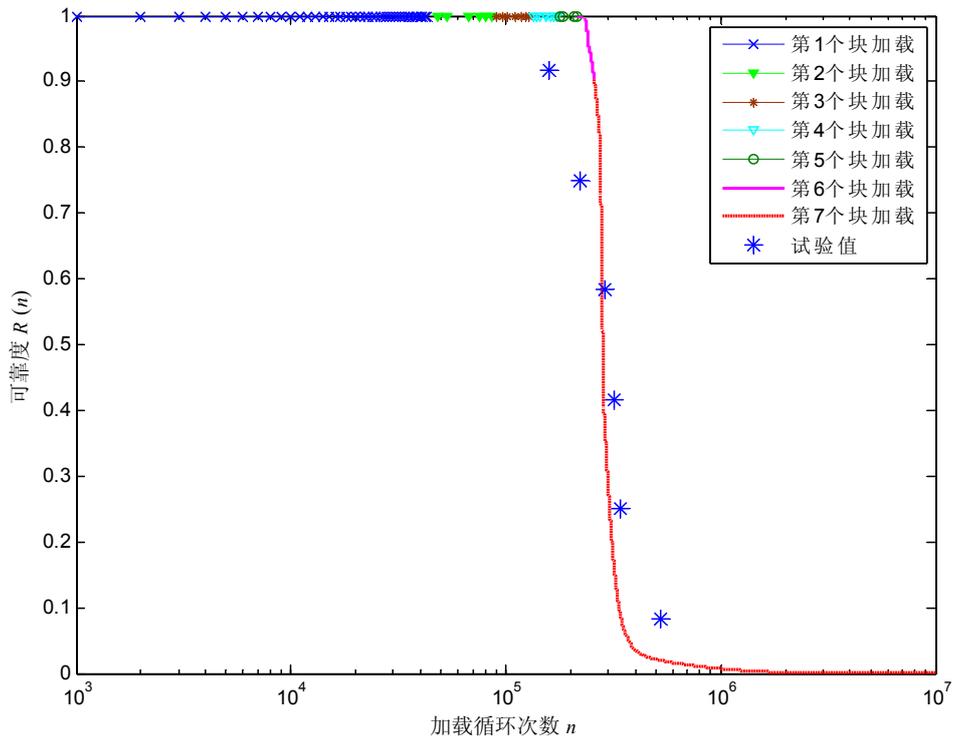


图 5-39 程序块加载下带切口的 45 钢摩擦焊接头可靠度曲线与试验值比较

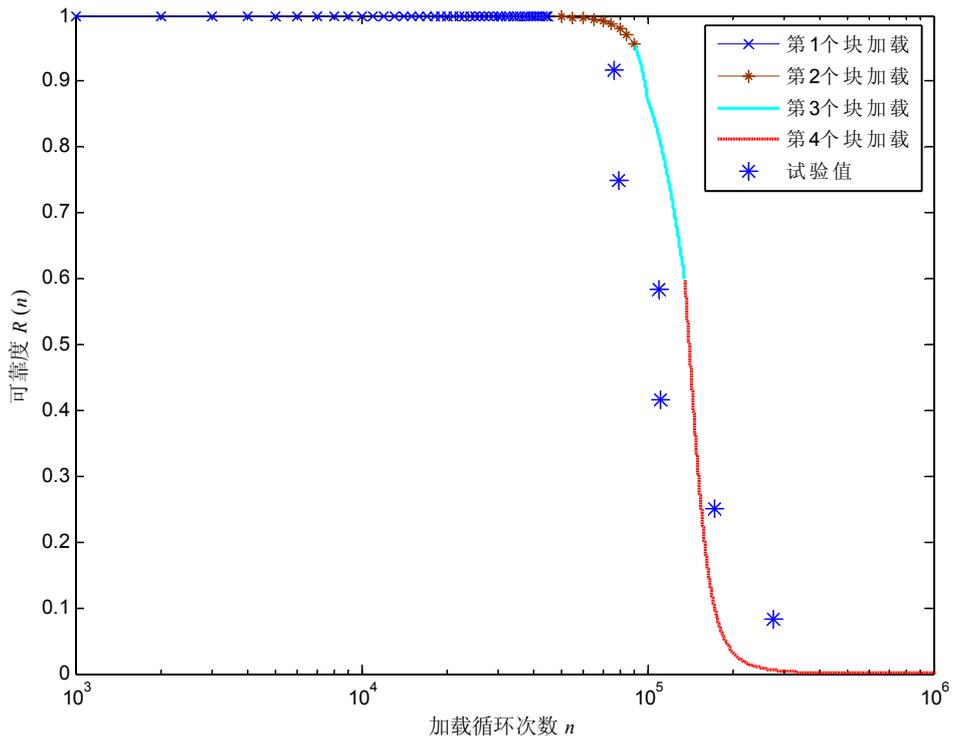


图 5-40 程序块加载下经锤击的 16Mn 钢对焊接头可靠度曲线与试验值比较

由图 5-39 和图 5-40，可靠度随载荷循环逐渐衰减，体现了载荷历程的时变特性，模型预测曲线与试验结果大致吻合，验证了所提模型在变幅加载下的适应性。在初始的几个程序块加载下（疲劳失效前期），可靠度水平很高，几乎无变化；在最后两个程序块加载下（疲劳失效后期），可靠度曲线迅速下降。在疲劳失效前期，构件处于裂纹萌生阶段，损伤累积量较少；而在失效后期，构件进入裂纹扩展阶段，此时损伤累积速率大大增加，损伤累积量快速趋于临界值，导致可靠度水平迅速降低。上述程序块谱下的可靠度变化也同时体现了疲劳失效的两阶段特性。

5.6 本章小结

针对疲劳失效过程的两阶段特性和随机性，本章以双线性损伤理论为基础，分别在正态分布和对数正态分布假设下，建立了概率损伤累积模型。通过使用概率密度转换技术和当量化分布的方法，推导得到累积损伤和临界损伤在恒幅和变幅加载下的统计特征参量。在此基础上，结合应力-强度干涉理论，构建了基于“累积损伤-临界损伤”时变可靠度模型。该模型体现了疲劳过程载荷作用的时变特性以及损伤累积的动态行为，实现了全寿命周期内的可靠度预测。最后，通过多组试验算例，验证了所提模型的有效性和正确性，同时预测结果体现了失效过程裂纹萌生和裂纹扩展的两阶段特性。

第六章 总结与展望

6.1 全文总结

随着现代机械装备逐步向大型化、高速化和高性能方向发展,机械装备关键零构件或结构的服役环境愈加恶劣,导致各类破坏事故不断发生,其中疲劳是机械结构最常见的失效模式。由于疲劳失效具有很强的隐蔽性和突发性,它对机械装备的安全服役构成了严重威胁,一旦发生破坏易于造成重大事故和生命财产损失。机械疲劳的研究已长达一个半世纪左右,人们通过开展大量试验,综合运用多种学科和理论知识,取得了一系列研究成果。机械结构的疲劳寿命及其可靠性已成为制约装备整机寿命与系统可靠性水平的关键。因此,如何有效实现寿命及可靠性的精确预测和评估,对于保障结构在服役期内安全可靠运行,充分发挥装备的使用价值,制定维修决策方案,提高经济效益等均具有重大现实意义。

由于疲劳现象的复杂性和随机性,传统的寿命预测与可靠性分析理论对失效机理和宏细观演化规律的认知和把握不够透彻,仍存在诸多尚未解决的难题和不足。针对此,本文基于有限寿命设计和疲劳损伤累积理论,在疲劳损伤失效机理、寿命预测技术以及可靠性分析方法等方面开展了一系列探索性的研究工作,主要研究成果总结如下:

(1) 提出了考虑载荷相互作用效应的疲劳损伤等效法则与剩余寿命预测方法。针对工程上常用的 Miner 法则缺乏考虑诸如载荷加载顺序、载荷幅值波动引起的交互作用等载荷历程效应,从损伤累积的角度出发,阐述了载荷顺序效应的产生机理,即损伤与载荷水平的不可分离性是导致顺序效应的主要因素,而与损伤的累积形式无关。针对现有非线性损伤累积理论多缺乏考虑大、小载荷交互作用的缺陷,研究了载荷相互作用效应的形成机制,根据疲劳失效的“二元判据”,引入了疲劳损伤状态的概念定性地表征结构材料的损伤程度,通过分析损伤状态等效的合理性,提出了考虑载荷相互作用效应的疲劳损伤等效法则。在该法则的框架下,基于材料韧性耗散模型,提出了改进型剩余寿命预测模型。研究表明,改进模型能综合考虑载荷顺序以及载荷交互作用对损伤累积和疲劳寿命的影响,使寿命预测精度得到了显著提升。

(2) 提出了基于疲劳驱动能损伤参数的非线性损伤累积模型与剩余寿命预测方法。从能量的角度分析,疲劳损伤的累积是结构材料内部能量不断耗散的结果。针对工程中疲劳损伤度量方法难以揭示失效过程能量耗散的本质规律,以现有失效力学模型为基础,基于能量准则,建立了一种描述疲劳破坏全过程的驱动能损

伤参数。通过分析该参数随载荷作用的变化规律，从失效的能耗过程出发，构建了以驱动能耗散为基本状态参量的损伤定量新方法和非线性损伤累积模型。在此基础上，运用损伤等效原理，提出了一种剩余寿命预测模型以及考虑载荷相互作用效应的改进模型，通过选取三组疲劳载荷进行试验设计，对模型的典型非线性特征及其演化行为作了分析和总结。研究表明，相比 Miner 法则，本文提出的基于疲劳驱动能损伤参数的非线性模型及其改进模型更适用于剩余寿命评估，且物理意义更加明确。

(3) 提出了基于动态剩余 S-N 曲线与材料记忆性能退化的修正线性损伤累积准则。通过综合考虑非线性损伤理论在寿命估算中的缺陷以及工程上 Miner 法则线性损伤累积的优势，从剩余寿命和 S-N 曲线的角度出发，研究了基于动态剩余 S-N 曲线的疲劳失效过程。通过分析材料记忆的退化规律，引入材料记忆性能退化参数定量地表征动态剩余 S-N 曲线的斜率比，建立了一种修正的线性损伤累积准则。该准则能有效克服传统 Miner 法则的缺陷，并保留了其形式上的简易性，易于实现损伤定量分析和寿命估算。通过对比三种典型线性损伤模型，结合损伤累积的三个要素，归纳总结得出四种模型存在的基本属性及共有特征，并根据试验设计对模型的线性损伤行为进行了分析。研究表明，相比现有方法，所提模型的寿命预测能力有显著优势，它综合考虑了载荷历程中所有载荷的寿命水平以及此前载荷的损伤状态，更符合损伤发展的物理过程。

(4) 提出了基于双线性损伤累积的概率模型以及时变疲劳可靠性分析方法。疲劳失效是一个动态的损伤累积过程，损伤演化具有很强的随机性和分散性。传统的静态可靠性分析方法缺乏考虑载荷作用的时变特征，而现有动态可靠性分析方法多以 Miner 法则进行建模，难以揭示裂纹萌生和裂纹扩展的物理过程。由于双线性损伤理论能较好地描述失效过程的两个阶段，本文以此为依据，分别建立了正态分布和对数正态分布假设下的概率损伤累积模型。在此基础上，运用应力-强度干涉理论，建立了基于“累积损伤-临界损伤”动态干涉模型。该模型体现了损伤累积的动态行为以及载荷作用的时变性，实现了疲劳全寿命周期内的可靠度预测。研究表明，所提模型的预测结果与试验数据吻合良好，且能正确反映失效过程裂纹萌生和裂纹扩展的两阶段特性。

综上所述，本文研究工作可概括为“一种疲劳损伤等效法则”、“两个确定性疲劳损伤累积模型”以及“一种时变疲劳可靠性分析方法”，深入研究了疲劳损伤失效机理、寿命预测和可靠性建模方法，拓展并完善了现有疲劳分析理论，可为机械装备的安全评定、维修决策和健康管理提供理论支撑。

6.2 后续工作展望

随着现代高新技术和工业水平的不断发展,结构疲劳仍是当前工程界和学术界所致力解决的重要问题。在现实世界中,疲劳现象及其作用机理十分复杂,疲劳理论涉及多个学科领域,如损伤力学、断裂力学、振动力学、材料力学、冶金学、数理统计学、可靠性工程等,且影响疲劳的因素众多,迄今疲劳问题尚未能得到很好解决。疲劳寿命预测和疲劳可靠性分析是结构抗疲劳设计的重要内容,机械结构的寿命预测和可靠性评估仍是一项长期而艰巨的任务。本文以有限寿命设计和疲劳损伤累积理论为研究基础,在损伤失效机理、寿命预测理论及可靠性分析方法等方面开展了一些探索性的研究,但仍存在许多问题尚需做深入探索并不断完善。在现有研究的基础上,后续将从以下几个方面开展研究工作:

(1) 具有多部位损伤特征的机械结构疲劳寿命预测与可靠性分析方法研究。机械装备在服役过程中,由于受到载荷、工况、环境等多种因素的影响,其结构内部会产生大量损伤。即使对于同一结构或零构件,其内部也可能同时存在多条相邻的微裂纹或微空洞,形成多部位损伤,导致结构的疲劳强度和寿命大幅降低。相对于只含一条主裂纹的结构件,多部位损伤结构更容易发生疲劳破坏,其寿命和可靠性问题已上升至系统级层面,需要进行系统可靠性建模与分析。由于多部位损伤结构的典型性,研究此类结构的寿命预测和可靠性评估方法,对于现有机械装备的维护保养、延寿以及对新型装备进行损伤容限设计和耐久性设计等方面都具有重要的研究意义。

(2) 基于人工智能技术的机械结构疲劳寿命预测方法研究。构建一个能真实描述实际过程的物理模型是机械结构寿命预测的基础。现有物理模型难以综合考虑实际过程中诸如非线性、随机、突变等多种因素的影响,削弱了模型的预测精度。随着信息新技术的发展,人工智能技术作为 21 世纪的尖端技术已在众多学科领域中得到了广泛应用。人工智能通过计算机对人的意识和思维过程进行模拟,在描述多种不确定性因素、复杂随机物理过程等方面具有显著优势。相对于以力学和概率统计为基础的寿命预测方法,目前基于人工智能技术的疲劳寿命预测尚不够成熟,还有待耕耘和开拓。

(3) 小样本下机械结构疲劳可靠性分析方法研究。疲劳寿命试验往往受到时间和经费的制约,很难满足大样本的统计需求,特别是针对高可靠性、长寿命的大型机械装备。随着样本量的减少,概率统计结果的精度也越来越难以保证。如何利用小样本下的试验数据并综合利用历史信息 and 专家经验是进行可靠性评估的关键。小样本问题引起数据不足的不确定性及其处理方法仍需做进一步研究。

致 谢

岁月荏苒，流光飞逝，恰如窗间过马、白驹过隙，咄嗟之间，已步入而立之年。还依稀记得那是 2007 年 8 月，我满载行囊，不远千里，来到了这座享有“天府之国”美称的成都市，正式开启了我成电的求学之路。金黄色的银杏叶和那沁人心脾的栀子花香满满地承载着我在成电历经的种种美好记忆与怀念。时至今日，已九载有余，从本科到硕博，我目睹了成电的日益壮大和崛起。“求实求真、大气大为”是每个成电人所传承的精神和信仰，也是我不断进取的动力源泉，使我在科学研究上由初窥堂奥到游刃有余。在博士四年生涯即将告罄之时，谨向在学业上给予我关怀和帮助的师长、同门和亲友们表示最诚挚的谢意。

首先，我要将浓浓的敬意和爱戴献给我的导师黄洪钟教授。恩师知识渊博、学贯中西，在可靠性工程领域享誉盛名，为了团队建设废寝忘食、呕心沥血。在学业上，恩师始终秉承勤勤恳恳和孜孜不倦的工作态度、求真务实的科研风范，每当遇到困难，他总能语重心长地给予指导和点拨。在生活上，他俨然是一位慈父，时刻教导我要学会感恩、与人为善。他的循循善诱、高尚的操守和品行始终感染着我，让我受益无穷。

感谢朱顺鹏老师为我博士求学之路指明了方向，引领我步入疲劳可靠性研究的殿堂。朱老师见闻广博、作风严谨，对待科研精益求精，是疲劳研究领域的佼佼者。朱老师同时也是我的师兄，在每一次论文的撰写和修改中都毫无保留地倾囊相授，是我学习的榜样和楷模。他的言传身教和兢兢业业的精神时刻鞭策并激励着我要不断进取。

感谢系统可靠性与安全性研究中心的李彦锋老师、刘宇老师、汪忠来老师、何俐萍老师、凌丹老师、张小玲老师等在学业上对我的悉心指导与关怀；感谢师兄吕志强博士、孟德彪博士、彭卫文博士、王海琨博士，师姐甘露萍博士、高会英博士、左芳君博士、刘征博士；感谢与我一起并肩奋斗的同窗好友米金华博士、付国忠博士、殷毅超博士、任丹博士、姜忠博士等以及可靠性团队所有的师弟和师妹们。感谢能和他们在成电相聚，领略求知、探索真谛，荣幸之至。

最后深深地感谢在背后一直默默为我付出和鼓励的父母和亲人们，他们无私的奉献和温存的关爱让我在求索路上勇气倍增，一路披荆斩棘，顺利完成学业，此等恩泽无以为报，谨以此文献上。在此，衷心祝愿他们健康永葆、四季平安。

参考文献

- [1] 酈明, 奥脱·布克斯鲍姆. 结构抗疲劳设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987
- [2] 亚伯·斯海维. 结构与材料的疲劳(第二版)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014
- [3] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003
- [4] ASTM E206-72. ASTM American National Standard, ANSI/ASTM, E206-72, 1979
- [5] 李舜酩. 机械疲劳与可靠性设计[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- [6] 张彦华. 焊接结构疲劳分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013
- [7] 赵少汴. 抗疲劳设计手册(第二版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015
- [8] W. Schütz. A history of fatigue[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1996, 54(2): 263-300
- [9] 张安哥, 朱成九, 陈梦成. 疲劳、断裂与损伤[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006
- [10] 秦大同, 谢里阳. 疲劳强度与可靠性设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013
- [11] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002
- [12] 张小丽, 陈雪峰, 李兵, 等. 机械重大装备寿命预测综述[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(11): 100-116
- [13] 王旭亮. 不确定性疲劳寿命预测方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009
- [14] 朱顺鹏. 高温复杂结构的混合概率故障物理建模与疲劳寿命预测[D]. 成都: 电子科技大学, 2011
- [15] S. S. Manson, M. H. Hirschberg. *Fatigue: An Interdisciplinary Approach*[M]. Syracuse: Syracuse University Press, 1964
- [16] K. N. Smith, P. Watson, T. H. Topper. A stress-strain function for the fatigue of metals[J]. *Journal of Materials*, 1970, 5(4): 767-778
- [17] M. Nihei, P. Heuler, Ch. Boller, et al. Evaluation of mean stress effect on fatigue life by use of damage parameters[J]. *International Journal of Fatigue*, 1986, 8(3): 119-126
- [18] 姚卫星. 金属材料疲劳行为的应力场强法描述[J]. *固体力学学报*, 1997, 18(1): 38-48
- [19] J. Park, D. Nelson. Evaluation of an energy-based approach and a critical plane approach for predicting constant amplitude multiaxial fatigue life[J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, 22(1): 23-39
- [20] K. O. Lee, S. G. Hong, S. B. Lee. A new energy-based fatigue damage parameter in life prediction of high-temperature structural materials[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 496(1-2): 471-477

- [21] M. Naderi, M. Amiri, M. M. Khonsari. On the thermodynamic entropy of fatigue fracture[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2010, 466(2114): 423-438
- [22] S. P. Zhu, H. Z. Huang. A generalized frequency separation-strain energy damage function model for low cycle fatigue-creep life prediction[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 33(4): 227-237
- [23] S. P. Zhu, H. Z. Huang, L. P. He, et al. A generalized energy-based fatigue-creep damage parameter for life prediction of turbine disk alloys[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 90(90): 89-100
- [24] J. D. Morrow. Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals[C]. In: Internal Friction Damping and Cyclic Plasticity, ASTM, STP 378, 1965, pp. 45-84
- [25] K. M. Golos. A total strain energy density model of metal fatigue[J]. Strength of Materials, 1995, 27(1): 32-41
- [26] P. C. Paris, F. Erdogan. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, 1963, 85(4): 528-533
- [27] 倪向贵, 李新亮, 王秀喜. 疲劳裂纹扩展规律 Paris 公式的一般修正及应用[J]. 压力容器, 2006, 23(12): 8-15
- [28] R. G. Forman, V. E. Kearney, R. M. Engle. Numerical analysis of crack propagation in cyclic loaded structures[J]. Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, 1967, 89(3): 459-464
- [29] F. Erdogan, M. Ratwani. Fatigue and fracture of cylindrical shells containing a circumferential crack[J]. International Journal of Fracture Mechanics, 1970, 6(4): 379-392
- [30] 余寿文. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997
- [31] J. L. Chaboche. Continuum damage mechanics: Part I—General concepts[J]. Journal of Applied Mechanics, 1988, 55(1):59-64
- [32] J. L. Chaboche. Continuum damage mechanics: Part II—Damage growth, crack initiation, and crack growth[J]. Journal of Applied Mechanics, 1988, 55(1): 65-72
- [33] J. L. Chaboche, P. M. Lesne. A non-linear continuous fatigue damage model[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1988, 11(1): 1-17
- [34] 林有智, 傅高升, 李雷, 等. 钛合金非线性疲劳损伤工程模型研究[J]. 船舶力学, 2013, 17(11): 1300-1308
- [35] K. Ni, S. Mahadevan. Strain-based probabilistic fatigue life prediction of spot-welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(7): 763-772

- [36] Y. Liu, S. Mahadevan. Probabilistic fatigue life prediction of multidirectional composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2005, 69(1): 11-19
- [37] Y. Xiang, Y. Liu. Application of inverse first-order reliability method for probabilistic fatigue life prediction[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2011, 26(2): 148-156
- [38] Y. Xiang, Y. Liu. Inverse first-order reliability method for probabilistic fatigue life prediction of composite laminates under multiaxial loading[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2009, 24(2): 189-198
- [39] R. Kapoor, V. S. H. Rao, R. S. Mishra, et al. Probabilistic fatigue life prediction model for alloys with defects: Applied to A206[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(9): 3447-3462
- [40] X. Guan, J. He, E. M. Rasselkorde, et al. Probabilistic fatigue life prediction and structural reliability evaluation of turbine rotors integrating an automated ultrasonic inspection system[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2014, 33(1): 51-61
- [41] Z. Liu, T. Guo, S. Chai. Probabilistic fatigue life prediction of bridge cables based on multiscale and mesoscopic fracture mechanics[J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(4): 9
- [42] Y. J. Lee, S. Cho. SHM-based probabilistic fatigue life prediction for bridges based on FE model updating[J]. *Sensors*, 2016, 16(3): 317
- [43] S. P. Zhu, H. Z. Huang, W. Peng, et al. Probabilistic physics of failure-based framework for fatigue life prediction of aircraft gas turbine discs under uncertainty[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 146: 1-12
- [44] S. P. Zhu, H. Z. Huang, V. Ontiveros, et al. Probabilistic low cycle fatigue life prediction using an energy-based damage parameter and accounting for model uncertainty[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2012, 21(8): 1128-1153
- [45] Z. R. Wu, X. T. Hu, Z. X. Li, et al. Probabilistic fatigue life prediction methodology for notched components based on simple smooth fatigue tests[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(1): 181-188
- [46] D. Wang, J. He, W. Zhang. Lamb wave-based probabilistic fatigue life prediction for riveted lap joints[J]. *Vibroengineering Procedia*, 2014, 4: 235-240
- [47] K. W. Kim, D. H. Shin, J. H. Choi, et al. A study on application of probabilistic fatigue life prediction for aircraft structures using the PoF based on Bayesian approach[J]. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 2013, 16(5):631-638
- [48] 胡绪腾, 辛朋朋, 宋迎东. 基于最弱环理论的缺口件概率疲劳寿命预测方法[J]. *机械科学与技术*, 2013, 32(2): 164-169
- [49] S. Mahadevan, K. Ni. Probabilistic fatigue life prediction of spot-welded joints[J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2003, 19(6): 479-497

- [50] Y. Liu, S. Mahadevan. Probabilistic fatigue life prediction using an equivalent initial flaw size distribution[J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31(3): 476-487
- [51] W. A. Grell, P. J. Laz. Probabilistic fatigue life prediction using AFGROW and accounting for material variability[J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32(7): 1042-1049
- [52] S. K. Jha, J. M. Larsen, A. H. Rosenberger, et al. Dual fatigue failure modes in Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo and consequences on probabilistic life prediction[J]. *Scripta Materialia*, 2003, 48(12): 1637-1642
- [53] S. Mahadevan, H. Mao. Probabilistic fatigue creep life prediction of composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2004, 23(4): 361-371
- [54] J. Luo, P. Bowen. A probabilistic methodology for fatigue life prediction[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(12): 3537-3550
- [55] S. K. Jha, M. J. Larsen, A. H. Rosenberger. Towards a physics-based description of fatigue variability behavior in probabilistic life-prediction[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, 76(5): 681-694
- [56] A. Bardossy, I. Bogardi. Fuzzy fatigue life prediction[J]. *Structural Safety*, 1989, 6(1): 25-38
- [57] M. A. Jarrah, Y. Alassaf, H. E. Kadi. Neuro-fuzzy modeling of fatigue life prediction of unidirectional glass fiber/epoxy composite laminates[J]. *Journal of Composite Materials*, 2002, 36(6): 685-700
- [58] Y. Zhang. A fuzzy residual strength based fatigue life prediction method[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2015, 56(2): 201-221
- [59] S. P. Zhu, H. Z. Huang, Z. L. Wang. Fatigue life estimation considering damaging and strengthening of low amplitude loads under different load sequences using Fuzzy sets approach[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2011, 20(6): 876-899
- [60] X. M. Tan, Y. L. Chen, J. I. N. Ping. Corrosion fatigue life prediction of aircraft structure based on fuzzy reliability approach[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2005, 18(4): 346-351
- [61] A. P. Vassilopoulos, R. Bedi. Adaptive neuro-fuzzy inference system in modelling fatigue life of multidirectional composite laminates[J]. *Computational Materials Science*, 2008, 43(4): 1086-1093
- [62] A. Muc, P. Kędziora. A fuzzy set analysis for a fracture and fatigue damage response of composite materials[J]. *Composite Structures*, 2001, 54(2): 283-287
- [63] A. Muc. A fuzzy set approach to interlaminar cracks simulation problems[J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24(2): 419-427
- [64] 朱顺鹏, 黄洪钟, 谢里阳. 考虑小载荷强化的模糊疲劳寿命预测理论[J]. *航空学报*, 2009, 30(6): 1048-1052

- [65] 陈胜军. 模糊疲劳寿命预测理论的建立与验证[J]. 机械设计, 2003, 20(12): 42-45
- [66] 王旭亮, 聂宏. 疲劳寿命估算中的模糊性研究[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(9): 1139-1141
- [67] 温洁明, 陈家权, 陈国军, 等. 疲劳损伤状态的模糊等效性试验研究[J]. 机械设计与制造, 2012(1): 88-90
- [68] 刘小云. 疲劳损伤的模糊性研究[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(4): 107-110
- [69] 刘小云, 丛方媛, 王小陈. 模糊可靠性疲劳寿命的分析与计算[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2007, 27(1): 99-102
- [70] 刘克格, 阎楚良, 张书明. 模糊数学在疲劳寿命估算中的应用[J]. 航空学报, 2006, 27(2): 227-231
- [71] A. Bezazi, S. G. Pierce, K. Worden, et al. Fatigue life prediction of sandwich composite materials under flexural tests using a Bayesian trained artificial neural network[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(4): 738-747
- [72] D. An, J. Choi, N. H. Kim, et al. Fatigue life prediction based on Bayesian approach to incorporate field data into probability model[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2011, 37(4): 427-442
- [73] S. P. Zhu, H. Z. Huang, R. Smith, et al. Bayesian framework for probabilistic low cycle fatigue life prediction and uncertainty modeling of aircraft turbine disk alloys[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2013, 34(10): 114-122
- [74] G. Mustafa, C. Crawford, A. Suleman. Fatigue life prediction of laminated composites using a multi-scale M-LaF and Bayesian inference[J]. Composite Structures, 2016, 151: 149-161
- [75] F. Guerin, R. Hambli. Bayesian method approach for fatigue life distribution estimation of rubber components[J]. International Journal of Product Development, 2009, 7(3-4): 199-217
- [76] S. Mohanty, A. Chattopadhyay, P. Peralta, et al. Bayesian statistic based multivariate gaussian process approach for offline/online fatigue crack growth prediction[J]. Experimental Mechanics, 2011, 51(6): 833-843
- [77] 孙玉武, 聂武. 潜艇耐压壳体低周疲劳分析及贝叶斯法寿命估算[J]. 中国造船, 2000, 41(4): 40-45
- [78] 陈勃, 鲍蕊, 张建宇, 等. 疲劳强度分布参数的贝叶斯分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(3): 233-236
- [79] 万宏强, 高刚, 丁锋. 基于贝叶斯评估的航空发动机涡轮盘疲劳寿命可靠性研究[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(5): 13-15
- [80] 刘扬, 张海萍, 邓扬, 等. 公路桥梁车辆荷载建模方法及疲劳寿命评估[J]. 应用力学学报, 2016, 33(4): 652-658

- [81] 邱志平, 王晓军. 结构疲劳寿命的区间估计[J]. 力学学报, 2005, 37(5): 653-657
- [82] 曹珊珊, 雷俊卿. 考虑区间不确定性的钢结构疲劳寿命分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(3): 804-810
- [83] 王军, 邱志平, 金延伟. 疲劳寿命的区间名义应力法及灵敏度分析[J]. 飞机设计, 2012, 32(6): 42-46
- [84] 孙作振. 基于区间法的结构非概率可靠性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014
- [85] M. Kamal, M. M. Rahman. Multiaxial fatigue life modelling using hybrid approach of critical plane and genetic algorithm[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2016, 39(4): 479-490
- [86] M. Kamal, M. M. Rahman. Fatigue life estimation based on continuum mechanics theory with application of genetic algorithm[J]. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 2015, 11: 2686-2698
- [87] S. T. S. Bukkapatnam, K. Sadananda. A genetic algorithm for unified approach-based predictive modeling of fatigue crack growth[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(10-12): 1354-1359
- [88] 任如飞. 基于遗传算法的接触部位疲劳寿命可靠性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007
- [89] 闫楚良, 郝云霄, 刘克格. 基于遗传算法优化的BP神经网络的材料疲劳寿命预测[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(6): 1710-1715
- [90] V. Venkatesh, H. J. Rack. Neural network approach to elevated temperature creep-fatigue life prediction[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(3): 225-234
- [91] I. S. Sohn, D. H. Bae. Fatigue life prediction of spot-welded joint by strain energy density factor using artificial neural network[J]. Key Engineering Materials, 2000, 183-187: 957-962
- [92] Y. I. Kwon, B. S. Lim. A study of creep-fatigue life prediction using an artificial neural network[J]. Metals and Materials International, 2001, 7(4): 311-317
- [93] H. E. Kadi, Y. Al-Assaf. Prediction of the fatigue life of unidirectional glass fiber/epoxy composite laminae using different neural network paradigms[J]. Composite Structures, 2002, 55(2): 239-246
- [94] I. A. Azid, L. K. Oon, O. K. Eu, et al. Application of artificial neural network for fatigue life prediction[J]. Key Engineering Materials, 2005, 297-300: 96-101
- [95] A. Bezazi, S. G. Pierce, K. Worden, et al. Fatigue life prediction of sandwich composite materials under flexural tests using a Bayesian trained artificial neural network[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(4): 738-747

- [96] J. R. Mohanty, B. B. Verma, P. K. Ray, et al. Application of artificial neural network for fatigue life prediction under interspersed mode-I spike overload[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2010, 38(2): 177-187
- [97] J. C. F. Pujol, J. M. A. Pinto. A neural network approach to fatigue life prediction[J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(3): 313-322
- [98] Y. Ma, X. Wang, A. Lun. Fatigue life prediction of ductile iron based on DE-SVM algorithm[J]. *Physics Procedia*, 2012, 33: 1309-1315
- [99] H. Guo, J. Yin, J. Zhao, et al. Prediction of fatigue life of packaging EMC material based on RBF-SVM[J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2014, 49(1): 5-17
- [100] T. B. Moghaddam, M. Soltani, H. S. Shahraki, et al. The use of SVM-FFA in estimating fatigue life of polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures[J]. *Measurement*, 2016, 90: 526-533
- [101] 纪冬梅, 轩福贞, 涂善东, 等. 基于支持向量机的 P91 钢蠕变-疲劳寿命预测[J]. *压力容器*, 2011, 28(10): 15-21
- [102] 洪杰, 苗学问, 马艳红. 航空发动机主轴承使用状态寿命预测模型[J]. *南京航空航天大学学报*, 2012, 29(2): 18-21
- [103] E. Santecchia, A. M. S. Hamouda, F. Musharavati, et al. A review on fatigue life prediction methods for metals[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 2016: 1-26
- [104] 杨晓华, 姚卫星, 段成美. 确定性疲劳累积损伤理论进展[J]. *中国工程科学*, 2003, 5(4): 81-87
- [105] 嵇应凤, 姚卫星, 夏天翔. 线性疲劳累积损伤准则适用性评估[J]. *力学与实践*, 2015, 37(6): 674-682
- [106] M. A. Miner. Cumulative damage in fatigue[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1945, 12(3): 159-164
- [107] A. Buch. *Fatigue Strength Calculation*[M]. Switzerland: Trans Tech Publications, 1988
- [108] H. T. Corten, T. J. Dolan. Cumulative fatigue damage[C]. In: *Proceedings of the International Conference on Fatigue of Metals*, Institution of Mechanical Engineers, ASME, London, 1956, pp. 235-246
- [109] 徐灏. *疲劳强度设计*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [110] S. P. Zhu, H. Z. Huang, Y. Liu, et al. A practical method for determining the Corten-Dolan exponent and its application to fatigue life prediction[J]. *International Journal of Turbo & Jet Engines*, 2012, 29(2): 79-87

- [111] H. J. Grover. An observation concerning the cycle ratio in cumulative damage[C]. In: Symposium on Fatigue of Aircraft Structures, ASTM STP 274, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1960, pp. 120-124
- [112] S. S. Manson, J. C. Freche, C. R. Ensign. Application of a double linear damage rule to cumulative fatigue[C]. In: Fatigue Crack Propagation, ASTM STP 415, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA, 1967, pp. 384-412
- [113] S. S. Manson, G. R. Halford. Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage[J]. International Journal of Fracture, 1981, 17(2): 169-192
- [114] S. S. Manson, G. R. Halford. Re-examination of cumulative fatigue damage analysis—an engineering perspective[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1986, 25: 539-571
- [115] A. M. Freudenthal, R. A. Heller. On stress interaction in fatigue and a cumulative damage rule[J]. Journal of the Aerospace Sciences, 1959, 26(7): 431-442
- [116] E. Altus. Fatigue, fractals, and a modified Miner's rule[J]. Journal of Applied Mechanics, 1991, 58(3): 571-579
- [117] I. R. Kramer. A mechanism of fatigue failure[J]. Metallurgical Transactions, 1974, 5(8): 1735-1742
- [118] I. R. Kramer. Prediction of fatigue damage[C]. In: Proceedings of the 2nd International Conference on the Mechanical Behavior of Materials, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1976, pp. 812-816
- [119] S. Jeelani, M. Musial. A study of cumulative fatigue damage in AISI 4130 steel[J]. Journal of Materials Science, 1986, 21(6): 2109-2113
- [120] S. Jeelani, M. A. Scott. How surface damage removal affects fatigue life[J]. International Journal of Fatigue, 1988, 10(4): 257-260
- [121] M. Aslam, S. Jeelani. Prediction of cumulative fatigue damage[J]. Journal of Materials Science, 1985, 20(9): 3239-3244
- [122] S. Jeelani, P. A. Reddy. A study of cumulative fatigue damage in aluminum alloy 2011-T3[J]. Materials Science and Engineering, 1982, 56(3): 253-258
- [123] S. Jeelani, M. Aslam. A study of cumulative fatigue damage in aluminum alloy 2024-T4[J]. Wear, 1984, 93(2): 207-217
- [124] S. Kwofie, N. Rahbar. A fatigue driving stress approach to damage and life prediction under variable amplitude loading[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2013, 22(3): 393-404

- [125] I. E. Aghoury, K. Galal. A fatigue stress-life damage accumulation model for variable amplitude fatigue loading based on virtual target life[J]. *Engineering Structures*, 2013, 52(9): 621-628
- [126] 贾星兰, 刘文斑. 谱载下基于模糊 Miner 法则的疲劳寿命估算[J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, 29(3): 218-220
- [127] 王旭亮, 聂宏. 考虑载荷加载顺序的模糊 Miner 理论研究[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(22): 2725-2728
- [128] 胡楷, 谷正气, 米承继, 等. 基于模糊理论的矿用自卸车车架疲劳寿命估算[J]. *汽车工程*, 2015, 37(9): 1047-1052
- [129] A. Ahmadi, H. Zenner. Lifetime simulation under multiaxial random loading with regard to the microcrack growth[J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28(9): 954-962
- [130] T. Svensson. Cumulative fatigue damage taking the threshold into account[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2002, 25(8-9): 871-875
- [131] F. E. Richart, N. M. Newmark. A hypothesis for the determination of cumulative damage in fatigue[C]. In: *Proceedings of the American Society for Testing and Materials*, ASCE, 1948, pp. 279-312
- [132] S. M. Marco, W. L. Starkey. A concept of fatigue damage[J]. *Transaction of the ASME*, 1954, 76(4): 627-632
- [133] D. L. Henry. A theory of fatigue damage accumulation in steel[J]. *Transaction of the ASME*, 1955, 77: 913-918
- [134] R. R. Gatts. Application of a cumulative damage concept to fatigue[J]. *Journal of Basic Engineering*, *Transactions of the ASME*, 1961, 83(4): 529-534
- [135] R. R. Gatts. Cumulative fatigue damage with random loading[J]. *Journal of Basic Engineering*, *Transactions of the ASME*, 1962, 84(3): 403-408
- [136] T. Bui-Quoc, J. Dubuc, A. Bazergui, et al. Cumulative fatigue damage under stress-controlled conditions[J]. *Journal of Basic Engineering*, *Transactions of the ASME*, 1971, 93(4): 691-698
- [137] T. Bui-Quoc. Cumulative damage with interaction effect due to fatigue under torsion loading[J]. *Experimental Mechanics*, 1982, 22(5): 180-187
- [138] T. Bui-Quoc. A simplified model for cumulative fatigue damage with interaction effect[C]. In: *Proceedings of 1982 Joint Conference on Experimental Mechanics*, Society for Experimental Stress Analysis, Brookfield Center, CT, 1982, pp. 144-149
- [139] D. Ye, Z. Wang. Change characteristics of static mechanical property parameters and dislocation structures of 45# medium carbon structural steel during fatigue failure process[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, 297(1): 54-61

- [140] D. Ye, Z. Wang. A new approach to low-cycle fatigue damage based on exhaustion of static toughness and dissipation of cyclic plastic strain energy during fatigue[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23(8): 679-687
- [141] 叶笃毅, 王德俊. 一种基于材料韧性耗散分析的疲劳损伤定量新方法[J]. *实验力学*, 1999, 14(1): 80-88
- [142] 胡明敏. 基于韧性耗散模型的损伤定量分析方法[J]. *力学季刊*, 2000, 21(3): 387-391
- [143] G. X. Cheng, Z. W. Lou, Z. B. Kuang. A new damage variable for low-cycle fatigue of metallic materials[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1994, 48(2): 281-287
- [144] G. X. Cheng, A. Plumtree. A fatigue damage accumulation model based on continuum damage mechanics and ductility exhaustion[J]. *International Journal of Fatigue*, 1998, 20(7): 495-501
- [145] 程光旭, 楼志文. 一种基于材料延性耗散模型的疲劳损伤研究方法[J]. *力学学报*, 1993, 25(4): 496-499
- [146] M. Jen, F. L. Teng, T. C. Teng. Two-stage cumulative bending fatigue behavior for the adhesively bonded aluminum honeycomb sandwich panels[J]. *Materials & Design*, 2014, 54: 805-813
- [147] 冯培锋, 杜善义, 王殿富, 等. 层板复合材料的疲劳剩余刚度衰退模型[J]. *固体力学学报*, 2003, 24(1): 46-52
- [148] 冯培锋, 王殿富, 杜善义, 等. 层板复合材料的疲劳剩余刚度统计分布模型[J]. *应用力学学报*, 2003, 20(3): 52-55
- [149] 翟洪军, 姚卫星. 纤维增强树脂基复合材料的疲劳剩余刚度研究进展[J]. *力学进展*, 2002, 32(1): 69-80
- [150] D. R. Carter, W. C. Hayes. Compact bone fatigue damage—I. Residual strength and stiffness[J]. *Journal of Biomechanics*, 1977, 10(5-6): 325-337
- [151] A. Rotem. Residual strength after fatigue loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 1988, 10(1): 27-31
- [152] K. I. Tserpes, P. Papanikos, G. Labeas, et al. Fatigue damage accumulation and residual strength assessment of CFRP laminates[J]. *Composite Structures*, 2004, 63(2): 219-230
- [153] Z. Hashin. Cumulative damage theory for composite materials: residual life and residual strength methods[J]. *Composites Science and Technology*, 1985, 23(1): 1-19
- [154] W. X. Yao, N. Himmel. A new cumulative fatigue damage model for fibre-reinforced plastics[J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60(1): 59-64
- [155] T. P. Philippidis, V. A. Passipoularidis. Residual strength after fatigue in composites: Theory vs. experiment[J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(12): 2104-2116

- [156] M. Naderi, M. M. Khonsari. A thermodynamic approach to fatigue damage accumulation under variable loading[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(23): 6133-6139
- [157] M. Amiri, M. M. Khonsari. On the role of entropy generation in processes involving fatigue[J]. *Entropy*, 2011, 14(1): 24-31
- [158] M. Amiri, M. Naderi, M. M. Khonsari. An experimental approach to evaluate the critical damage[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2011, 20(1): 89-112
- [159] M. Liakat, M. M. Khonsari. An experimental approach to estimate damage and remaining life of metals under uniaxial fatigue loading[J]. *Materials & Design*, 2014, 57: 289-297
- [160] B. Sun, L. Yang, Y. Guo. A high-cycle fatigue accumulation model based on electrical resistance for structural steels[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2007, 30(11): 1052-1062
- [161] 姜菊生, 许金泉. 金属材料疲劳损伤的电阻研究法[J]. *机械强度*, 1999, 21(3): 232-234
- [162] 孙斌祥, 郭乙木. 基于电阻变化的高周疲劳寿命预测[J]. *机械强度*, 2002, 24(4): 579-583
- [163] 孙斌祥, 郭乙木. 结构钢高周疲劳寿命预测的电阻模型[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2003, 37(3): 372-376
- [164] 孙斌祥, 郭乙木. 基于电能耗散的金属材料疲劳损伤测量[J]. *力学季刊*, 2003, 24(3): 416-422
- [165] S. Subramanyan. A cumulative damage rule based on the knee point of the S-N curve[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 1976, 98(4): 316-321
- [166] Z. Hashin, A. Rotem. A cumulative damage theory of fatigue failure[J]. *Materials Science and Engineering*, 1978, 34(2): 147-160
- [167] Z. Hashin, C. Laird. Cumulative damage under two level cycling: some theoretical predictions and test data[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1979, 2(4): 345-350
- [168] M. Ben-Amoz. A cumulative damage theory for fatigue life prediction[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1990, 37(2): 341-347
- [169] M. Ben-Amoz. Prediction of fatigue crack initiation life from cumulative damage tests[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1992, 41(2): 247-249
- [170] H. H. E. Leipholz, T. Topper, M. E. Menoufy. Lifetime prediction for metallic components subjected to stochastic loading[J]. *Computers & Structures*, 1983, 16(1-4): 499-507
- [171] H. H. E. Leipholz. Lifetime prediction for metallic specimens subjected to loading with varying intensity[J]. *Computers & Structures*, 1985, 20(1-3): 239-246

- [172] H. H. E. Leipholz. On the modified S-N curve for metal fatigue prediction and its experimental verification[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1986, 23(3): 495-505
- [173] 胡明敏, 唐静静, 魏平. 一种 S-N 曲线移动法的寿命分析模型[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(1): 60-63
- [174] N. P. Inglis. Hysteresis and fatigue of Wohler rotating cantilever specimen[J]. *The Metallurgist*, 1927, 1(1): 23-27
- [175] X. Niu, G. Li, L. Hao. Hardening law and fatigue damage of a cyclic hardening metal[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1987, 26(2): 163-170
- [176] B. N. Leis. A nonlinear history-dependent damage model for low cycle fatigue[C]. In: *Low Cycle Fatigue*, ASTM STP 942, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1988, pp. 143-159
- [177] D. Kujawski, F. Ellyin. A cumulative damage theory for fatigue crack initiation and propagation[J]. *International Journal of Fatigue*, 1984, 6(2): 83-88
- [178] K. Golos, F. Ellyin. Generalization of cumulative damage criterion to multilevel cyclic loading[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1987, 7(3): 169-176
- [179] K. Golos, F. Ellyin. A total strain energy density theory for cumulative fatigue damage[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, *Transactions of the ASME*, 1988, 110(1): 36-41
- [180] T. Bui-Quoc. Cyclic stress, strain, and energy variations under cumulative damage tests in low-cycle fatigue[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 1973, 1(1): 58-64
- [181] V. M. Radhakrishnan. Cumulative damage in low-cycle fatigue[J]. *Experimental Mechanics*, 1978, 18(8): 292-296
- [182] V. M. Radhakrishnan. An analysis of low cycle fatigue based on hysteresis energy[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1980, 3(1): 75-84
- [183] V. Kliman. Fatigue life prediction for a material under programmable loading using the cyclic stress-strain properties[J]. *Materials Science and Engineering*, 1984, 68(1): 1-10
- [184] V. Kliman, M. Bílý. Hysteresis energy of cyclic loading[J]. *Materials Science and Engineering*, 1984, 68(1): 11-18
- [185] J. A. Lemaitre, A. Plumtree. Application of damage concepts to predict creep-fatigue failures[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, *Transactions of the ASME*, 1979, 101(3): 284-292
- [186] V. Dattoma, S. Giancane, R. Nobile, et al. Fatigue life prediction under variable loading based on a new non-linear continuum damage mechanics model[J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28(2): 89-95

- [187] S. Giancane, R. Nobile R, F. W. Panella, et al. Fatigue life prediction of notched components based on a new nonlinear continuum damage mechanics model[J]. *Procedia Engineering*, 2010, 2(1): 1317-1325
- [188] J. Wang. A continuum damage mechanics model for low-cycle fatigue failure of metals[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1992, 41(3): 437-441
- [189] C. Li, Z. Qian, G. Li. The fatigue damage criterion and evolution equation containing material microparameters[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1989, 34(2): 435-443
- [190] R. Döring, J. Hoffmeyer, T. Seeger, et al. A plasticity model for calculating stress-strain sequences under multiaxial nonproportional cyclic loading[J]. *Computational Materials Science*, 2003, 28(3-4): 587-596
- [191] A. Chamat, M. Abbadi, J. Gilgert, et al. A new non-local criterion in high-cycle multiaxial fatigue for non-proportional loadings[J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(8): 1465-1474
- [192] D. G. Shang, W. X. Yao. A nonlinear damage cumulative model for uniaxial fatigue[J]. *International Journal of Fatigue*, 1999, 21(2): 187-194
- [193] 尚德广, 姚卫星. 单轴非线性连续疲劳损伤累积模型的研究[J]. *航空学报*, 1998, 19(6): 8-17
- [194] S. Garcia, A. Amrouche, G. Mesmacque, et al. Fatigue damage accumulation of cold expanded hole in aluminum alloys subjected to block loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(10-12): 1347-1353
- [195] G. Mesmacque, S. Garcia, A. Amrouche, et al. Sequential law in multiaxial fatigue, a new damage indicator[J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(4): 461-467
- [196] A. Aid, A. Amrouche, B. B. Bouiadjra, et al. Fatigue life prediction under variable loading based on a new damage model[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(1): 183-191
- [197] A. Aid, M. Bendouba, L. Aminallah, et al. An equivalent stress process for fatigue life estimation under multiaxial loadings based on a new nonlinear damage model[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 538: 20-27
- [198] A. Djebli, A. Aid, M. Bendouba, et al. A non-linear energy model of fatigue damage accumulation and its verification for Al-2024 aluminum alloy[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2013, 51: 145-151
- [199] S. Benkabouche, H. Guechichi, A. Amrouche, et al. A modified nonlinear fatigue damage accumulation model under multiaxial variable amplitude loading[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 100: 180-194

- [200] A. Fatemi, L. Yang. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials[J]. *International Journal of Fatigue*, 1998, 20(1): 9-34
- [201] L. Yang, A. Fatemi. Cumulative fatigue damage mechanisms and quantifying parameters: a literature review[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 1998, 26(2): 89-100
- [202] J. Schijve. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art[J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(8): 679-702
- [203] J. Schijve. *Fatigue of Structures and Materials*[M]. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001
- [204] W. Hwang, K. S. Han. Cumulative damage models and multi-stress fatigue life prediction[J]. *Journal of Composite Materials*, 1986, 20(2): 125-153
- [205] W. Hwang, K. S. Han. Fatigue of composites—fatigue modulus concept and life prediction[J]. *Journal of Composite Materials*, 1986, 20(2): 154-165
- [206] W. Cui. A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2002, 7(1): 43-56
- [207] 倪侃. 随机疲劳累积损伤理论研究进展[J]. *力学进展*, 1999, 29(1): 43-65
- [208] 赵少汴. 常用累积损伤理论疲劳寿命估算精度的试验研究[J]. *机械强度*, 2000, 22(3): 206-209
- [209] 袁熙, 李舜酩. 疲劳寿命预测方法的研究现状与发展[J]. *航空制造技术*, 2005, (12): 80-84
- [210] 鞠杨, 樊承谋. 疲劳累积损伤理论研究[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1994, 27(5): 115-120
- [211] 顾怡. FRP 疲劳累积损伤理论研究进展[J]. *力学进展*, 2001, 31(2): 193-202
- [212] 朱晓阳. 疲劳累积损伤理论的研究及其发展[J]. *机械工程材料*, 1987, (3): 11-16
- [213] 李荣, 邱洪兴, 淳庆. 疲劳累积损伤规律研究综述[J]. *金陵科技学院学报*, 2005, 21(3): 17-21
- [214] 高镇同. *疲劳应用统计学*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986
- [215] 高镇同. *疲劳可靠性*[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000
- [216] 高镇同, 熊峻江. 疲劳/断裂可靠性研究现状与展望[J]. *机械强度*, 1995, 17(3): 61-82
- [217] T. Shimokawa, S. Tanaka. A statistical consideration of Miner's rule[J]. *International Journal of Fatigue*, 1980, 2(4): 165-170
- [218] S. Tanaka, M. Ichikawa, S. Akita. Statistical aspects of the fatigue life of nickel-silver wire under two-level loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 1980, 2(4): 159-163
- [219] S. Tanaka, M. Ichikawa, S. Akita. A probabilistic investigation of fatigue life and cumulative cycle ratio[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1984, 20(3): 501-513
- [220] P. H. Wirsching. Fatigue reliability for offshore structures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1984, 110(10): 2340-2356

- [221] S. G. Martindale, P. H. Wirsching. Reliability-based progressive fatigue collapse[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1983, 109(8): 1792-1811
- [222] M. Liao, X. Xu, Q. X. Yang. Cumulative fatigue damage dynamic interference statistical model[J]. *International Journal of Fatigue*, 1995, 17(8): 559-566
- [223] L. Xie. Equivalent life distribution and fatigue failure probability prediction[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1999, 76(4): 267-273
- [224] H. Shen, J. Lin, E. Mu. Probabilistic model on stochastic fatigue damage[J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, 22(7): 569-572
- [225] 董聪, 何庆芝. 自洽型随机疲劳累积损伤可靠性分析模型[J]. *机械强度*, 1995, 17(1): 6-8
- [226] 倪侃, 张圣坤. 疲劳可靠性二维统计 Miner 准则[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(7): 65-69
- [227] 倪侃, 张圣坤. 二维统计 Miner 准则与 Wirsching 模型[J]. *船舶力学*, 2002, 6(5): 38-43
- [228] K. Ni, S. Zhang. Fatigue reliability analysis under two-stage loading[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2000, 68(2): 153-158
- [229] 顾怡, 吕海波. 结构元件疲劳可靠性分析的累积损伤模型[J]. *机械强度*, 2000, 22(3): 228-230
- [230] Y. Liu, S. Mahadevan. Stochastic fatigue damage modeling under variable amplitude loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(6): 1149-1161
- [231] Y. Liu, S. Mahadevan. Efficient methods for time-dependent fatigue reliability analysis[J]. *AIAA Journal*, 2012, 47(3): 494-504
- [232] V. Rathod, O. P. Yadav, A. Rathore, et al. Probabilistic modeling of fatigue damage accumulation for reliability prediction[J]. *International Journal of Quality, Statistics, and Reliability*, 2011, 2011: 1-10
- [233] V. Rathod, O. P. Yadav, A. Rathore, et al. Reliability-based design optimization considering probabilistic degradation behavior[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2012, 28(8): 911-923
- [234] J. M. A. Pinto, J. C. F. Pujol, C. A. C. Jr. Probabilistic cumulative damage model to estimate fatigue life[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2014, 37(1): 85-94
- [235] Q. Sun, H. N. Dui, X. L. Fan. A statistically consistent fatigue damage model based on Miner's rule[J]. *International Journal of Fatigue*, 2014, 69: 16-21
- [236] 谢里阳, 任俊刚, 吴宁祥, 等. 复杂结构部件概率疲劳寿命预测方法与模型[J]. *航空学报*, 2015, 36(8): 2688-2695
- [237] J. R. Schaff, B. D. Davidson. Life prediction methodology for composite structures. Part I—Constant amplitude and two-stress level fatigue[J]. *Journal of Composite Materials*, 1997, 31(2): 128-157

- [238] J. R. Schaff, B. D. Davidson. Life prediction methodology for composite structures. Part II—Spectrum fatigue[J]. *Journal of Composite Materials*, 1997, 31(2): 158-181
- [239] 敖波, 张定华, 赵歆波, 等. 多级载荷作用下剩余强度的估算[J]. *机械强度*, 2007, 29(3): 463-467
- [240] 苏志霄, 刘宏昭, 王建平, 等. 基于剩余强度退化规律的疲劳损伤非线性演化模型[J]. *机械强度*, 2000, 22(3): 238-240
- [241] 吕文阁, 谢里阳, 徐灏. 复杂载荷下的疲劳寿命估算[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 1996, 17(6): 633-636
- [242] A. D. S. Carter. *Mechanical Reliability*[M]. London: Macmillan Education, 1986
- [243] 吕海波, 姚卫星. 元件疲劳可靠性估算的剩余强度模型[J]. *航空学报*, 2000, 21(1): 75-78
- [244] 胡明敏, 魏平, 唐静静. 由剩余强度全域测试建立的疲劳可靠性估算模型[J]. *机械强度*, 2003, 25(1): 102-104
- [245] 安宗文, 郑堃, 黄建龙. 多级疲劳载荷作用下的应力-强度干涉模型[J]. *电子科技大学学报*, 2010, 39(6): 956-960
- [246] 黄洪钟, 朱顺鹏, 汪忠来, 等. 基于剩余强度衰减退化的非线性累积损伤准则及其可靠性定寿[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(2): 323-334
- [247] 李少宏, 陈建军, 方永锋. 多级载荷作用下剩余强度模型的结构元件疲劳可靠性分析[J]. *机械科学与技术*, 2013, 32(6): 791-795
- [248] R. Yuan, H. Li, H. Z. Huang, et al. A nonlinear fatigue damage accumulation model considering strength degradation and its applications to fatigue reliability analysis[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2015, 24(5): 646-662
- [249] B. Stahl, J. F. Geyer. Fatigue reliability of parallel member systems[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1984, 110(10): 2307-2323
- [250] S. K. Raju, F. Moses, C. G. Schilling. Reliability calibration of fatigue evaluation and design procedures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1990, 116(5): 1356-1369
- [251] 罗毅, 高镇同. 疲劳寿命可靠性分析模型[J]. *机械强度*, 1994, 16(3): 64-66
- [252] 郭盛杰, 姚卫星. 结构元件疲劳可靠性估算的剩余寿命模型[J]. *南京航空航天大学学报*, 2003, 35(1): 25-29
- [253] 郭盛杰, 姚卫星. 常幅载荷下结构元件断裂可靠度估算的应力强度因子模型[J]. *计算力学学报*, 2005, 22(4): 465-469
- [254] 吕箴, 郭盛杰, 姚卫星. 常幅载荷下结构元件断裂可靠性分析的裂纹长度模型[J]. *机械强度*, 2008, 30(1): 144-147
- [255] 陈景杰, 黄一, 李玉刚. 考虑疲劳载荷相互影响的修正的 Miner 准则研究[J]. *中国造船*, 2014, 55(3): 36-42

- [256] S. Taheri, L. Vincent, J. C. Le-Roux. A new model for fatigue damage accumulation of austenitic stainless steel under variable amplitude loading[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 66: 575-586
- [257] S. Taheri, L. Vincent, J. C. Le-Roux. Classification of metallic alloys for fatigue damage accumulation: A conservative model under strain control for 304 stainless steels[J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 70: 73-84
- [258] 谢里阳, 林晨, 平安. 疲劳过程中强度退化与平均应力修正[J]. *机械强度*, 1996, 18(3): 41-44
- [259] 朱顺鹏, 黄洪钟, 谢里阳. 基于二元疲劳失效判据的非线性疲劳损伤累积模型及其强度退化研究[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(22): 2753-2757
- [260] 谢里阳, 吕文阁. 两级载荷作用下疲劳损伤状态的试验研究[J]. *机械强度*, 1994, 16(3): 52-54
- [261] 谢里阳. 疲劳损伤状态的等效性[J]. *机械强度*, 1995, 17(2): 100-104
- [262] Z. Lv, H. Z. Huang, S. P. Zhu, et al. A modified nonlinear fatigue damage accumulation model[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2015, 24(2): 168-181
- [263] D. G. Pavlou. A phenomenological fatigue damage accumulation rule based on hardness increasing, for the 2024-T42 aluminum[J]. *Engineering Structures*, 2002, 24(11): 1363-1368
- [264] 方义庆, 胡明敏, 罗艳利. 基于全域损伤测试建立的连续疲劳损伤模型[J]. *机械强度*, 2006, 28(4): 582-586
- [265] 田军, 刘志明, 何如. 动车铝合金车体焊接接头非线性疲劳累积损伤模型[J]. *铁道学报*, 2012, 34(3): 40-43
- [266] 何如. 高速列车铝合金焊接接头疲劳性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008
- [267] T. Łagoda. Energy models for fatigue life estimation under uniaxial random loading. Part I: The model elaboration[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23(6): 467-480
- [268] T. Łagoda. Energy models for fatigue life estimation under uniaxial random loading. Part II: Verification of the model[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23(6): 481-489
- [269] O. Jin, H. Lee, S. Mall. Investigation into cumulative damage rules to predict fretting fatigue life of Ti-6Al-4V under two-level block loading condition[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, *Transactions of the ASME*, 2003, 125(3): 315-323
- [270] 郑修麟, 王泓, 鄢君辉, 等. 材料疲劳理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013
- [271] 谢里阳, 徐灏. 一个新的连续损伤累积模型[J]. *机械工程学报*, 1991, 27(1): 52-57
- [272] E. Böhm, M. Kurek, G. Junak, et al. Accumulation of fatigue damage using memory of the material [J]. *Procedia Materials Science*, 2014, 3: 2-7

- [273] E. Böhm, M. Kurek, T. Łagoda. Accumulation of fatigue damages for block-type loads with use of material memory function[J]. *Solid State Phenomena*, 2014, 224: 39-44
- [274] H. Ebbinghaus. *Memory*[M]. New York: Teachers College, Columbia University, 1913
- [275] 薛振峰, 赵兴龙, 王艳芳. 30NiCrMoV12 钢车轴的热处理工艺[J]. *金属热处理*, 2016, 41(7): 139-141
- [276] 陈德广. 确定 Corten-Dolan 疲劳损伤公式指数 d 的试验方法探讨[J]. *机械强度*, 1996, 18(1): 21-24
- [277] 刘晓娟. 基于累积损伤理论的焊接球节点网架结构疲劳寿命估算[D]. 山西: 太原理工大学, 2010
- [278] B. F. Langer. Fatigue failure from stress cycles of varying amplitude[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1937, 59: A160-A162
- [279] D. W. Coit, J. L. Evans, N. T. Vogt, et al. A method for correlating field life degradation with reliability prediction for electronic modules[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2005, 21(7): 715-726
- [280] J. R. Benjamin, C. A. Cornell. *Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers*[M]. New York: McGraw-Hill, 1970
- [281] S. P. Zhu, H. Z. Huang, Y. Li, et al. Probabilistic modeling of damage accumulation for time-dependent fatigue reliability analysis of railway axle steels[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2015, 229(1): 23-33
- [282] 吕海波. 结构疲劳可靠性分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2000
- [283] X. Zheng, B. Lu, H. Jiang. Determination of probability distribution of fatigue strength and expressions of P-S-N curves[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1995, 50(4): 483-491
- [284] X. Zheng, Z. Li, B. Lu. Prediction of probability distribution of fatigue life of 15MnVN steel notched elements under variable-amplitude loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 1996, 18(2): 81-86
- [285] 伍义生. Miner 累积损伤理论的试验验证和统计分析[J]. *航空学报*, 1985, 6(4): 351-361
- [286] J. H. Yan, X. Zheng, K. Zhao. Prediction of fatigue life and its probability distribution of notched friction welded joints under variable-amplitude loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, 22(6): 481-494
- [287] 李臻, 郑修麟. 经锤击后的 16Mn 钢对焊件的疲劳寿命估算[J]. *焊接学报*, 1997, 18(3): 151-158

攻读博士学位期间取得的成果

一、在学期间参与的项目研究

- [1] 国家自然科学基金项目：“基于故障物理技术的结构疲劳可靠性设计理论及其应用研究”，项目编号：11272082
- [2] 国防科工局技术基础项目：“XX 装备系统剩余寿命预测及维护决策理论研究”，项目编号：1420130001
- [3] 国家高技术研究发展计划项目（863 计划项目子课题）：“大型矿用挖掘机可靠性分析及设计的关键技术研究”，项目编号：2012AA062001
- [4] 国家自然科学基金委与中国工程物理研究院联合基金项目：“基于混合不确定性信息处理的复杂分层系统健康评估”，项目编号：U1330130

二、在学期间发表的论文与专利申请

- [1] **Z. Peng**, H. Z. Huang, H. K. Wang, S. P. Zhu, Z. Lv. A new approach to the investigation of load interaction effects and its application in residual fatigue life prediction[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2016, 25(5): 672-690 (SCI 收录)
- [2] **Z. Peng**, H. Z. Huang, S. P. Zhu, H. Gao, Z. Lv. A fatigue driving energy approach to high-cycle fatigue life estimation under variable amplitude loading[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2016, 39(2): 180-193 (SCI 收录)
- [3] **Z. Peng**, H. Z. Huang, S. P. Zhu, C. G. Huang, B. Zheng. A new cumulative fatigue damage rule based on dynamic residual S-N curve and material memory concept[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2016 (已录用, SCI 源刊)
- [4] **Z. Peng**, H. Z. Huang, H. Gao, Z. Lv, S. P. Zhu. A modified model for non-linear fatigue damage accumulation with load interaction effects[C]. In: Proceedings of ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (ASME IDETC/CIE 2015), Boston, Massachusetts, USA, Aug. 2-5, pp. V010T12A006, 2015 (EI 收录)
- [5] **Z. Peng**, H. Z. Huang, S. P. Zhu, Z. Lv, H. Gao, F. J. Zuo. Fatigue life prediction using dynamic residual S-N curve and material memory function[C]. In: Proceedings of the International Conference on Materials and Reliability (ICMR 2015), Jeju, Korea, Nov. 23-25, pp. 232-233, 2015

- [6] **Z. Peng**, H. Z. Huang, S. P. Zhu, G. Z. Fu, Y. C. Yin. Probabilistic modeling of double linear damage accumulation for fatigue reliability analysis[C]. In: Proceedings of 2016 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering and 2016 World Congress on Engineering Asset Management (QR2MSE 2016 & WCEAM 2016), Sichuan, China, July 25-28, 2016
- [7] **Z. Peng**, S. P. Zhu, Z. Lv, H. Gao, H. Z. Huang. A novel damage criterion based on the S-N curve approach for fatigue life prediction[C]. In: Proceedings of 2015 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE 2015), Beijing, China, July 21-24, 2015
- [8] **Z. Peng**, H. Z. Huang, N. C. Xiao, X. Wang, A. Li. FMEA analysis of electrical control system for large mining excavators[C]. In: Proceedings of 2014 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE 2014), Dalian, China, July 22-25, 2014
- [9] **Z. Peng**, H. Z. Huang, Y. F. Li. A probabilistic double linear damage rule based time-dependent fatigue reliability analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016 (已投稿, SCI 源刊)
- [10] 黄洪钟, **彭兆春**, 李彦锋, 朱顺鹏, 米金华, 郭骏宇, 李贺. 一种基于双线性累积损伤的时变疲劳可靠性分析方法[P]. 中国, 发明专利, 申请号: 201710290972.9