

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

博士学位论文

DOCTORAL DISSERTATION



论文题目 应力作用下金属点蚀与结构可靠性

分析方法研究

学科专业 机械电子工程

学 号 201111080102

作者姓名 谢朝阳

指导教师 黄洪钟 教授

分类号 TB31 密级

UDC ^{注1}

学 位 论 文

应力作用下金属点蚀与结构可靠性 分析方法研究

(题名和副题名)

谢朝阳

(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 机械电子工程

提交论文日期 2017.03.15 论文答辩日期 2017.05.30

学位授予单位和日期 电子科技大学 2017年6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 Pitting Corrosion of Metals with the Effects
of Mechanical Stress and Structural Reliability Analysis
Method

A Doctor Dissertation Submitted to
University of Electronic Science and Technology of China

Major: Mechatronics Engineering

Author: Xie Chaoyang

Advisor: 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

腐蚀作为金属材料常见的损伤方式之一，在石油管道、海洋结构、核反应堆、航空航天、武器装备等领域广泛存在。由于周围环境介质和所承受载荷的长期作用，金属材料与结构的服役性能会随着腐蚀的产生发展逐步退化，甚至造成突发性破坏导致重大经济损失和恶性事故，给关键零件与结构的安全服役带来风险。材料与结构的腐蚀是一个十分复杂的过程，科学认识含腐蚀损伤结构的服役状态，研究其相应的可靠性分析方法，对于我国机械行业重大装备的服役寿命评估、可持续安全发展等均具有重要意义。

当前随着机械零件与结构服役条件的日益复杂，无论是宏观大型构件的破坏还是微观元器件的失效，其失效机制均具有多尺度和多场耦合的特点，特别是化学-力学作用下的失效机制值得深入研究。本文以核工业和航空领域广泛应用的金属材料在腐蚀环境和力学载荷下的寿命预测与健康评估为研究背景，开展典型金属材料的点蚀试验、点蚀生长数值模拟方法、故障物理模型以及考虑混合不确定性的结构可靠性分析方法的研究；为相关装备的全寿命设计理论与安全可靠运行提供技术支撑。本文的主要研究工作及其创新点概括如下：

(1) 对 HR-2 不锈钢与 316L 不锈钢进行了含应力加载的点蚀实验，研究了应力加载对材料微观点蚀损伤以及宏观力学性能变化的影响。微观电镜扫描结果表明，不锈钢在腐蚀环境下仍有微观点蚀痕迹，在应力与环境耦合作用下的试样的腐蚀程度更为严重；宏观力学性能测试表明，试样材料极限强度有一定变化，可为实际核工程结构设计的选材和性能分析提供依据。

(2) 针对应力与腐蚀环境耦合作用下的点蚀生长过程，基于 Comsol Multiphysics 平台建立了应力场与腐蚀电位场以及点蚀坑几何形状生长的多物理场模拟模型，开发了相应的 MATLAB 与 COMSOL 计算耦合程序，能够实现单个点蚀坑在应力加载下的生长过程模拟。建模过程中采用时间离散计算策略建立了考虑应力加载效应的点蚀生长过程的有限元迭代算法，实现了力学加载与环境耦合作用下的点蚀生长多物理场建模与数值模拟。

(3) 基于腐蚀疲劳模型和断裂力学理论，针对恒定应力加载下的结构点蚀生长失效问题，建立了考虑应力加载效应的点蚀损伤演化导致开裂失效的故障物理模型。该模型涵盖点蚀生长、点蚀转化为裂纹、裂纹扩展三阶段，能够更接近工程实际情况。针对制约复杂结构可靠性分析中的计算效率与精度问题，建立了基于自适应抽样 Kriging 代理模型的结构含点蚀损伤可靠性分析方法和计算框架。与蒙

特卡洛方法、一阶可靠性方法的对比研究表明，自适应抽样 Kriging 代理模型计算方法具有较高的计算效率和精度。

(4) 针对腐蚀等实际工程问题中随机和认知不确定性同时存在时的结构可靠性分析，在讨论裕量与不确定性量化 (QMU) 相关概念的基础上，重点研究了基于证据理论和 Kriging 代理模型的混合不确定性传播计算方法，提出了证据理论框架下度量结构性能裕量和不确定性的计算表达式。在此基础上，应用上述方法分别对结构点蚀转裂纹断裂失效以及强度损减失效开展了算例研究，结果表明，本文建立的 QMU 度量方法能够有效求解结构腐蚀损伤导致的失效问题，同时，QMU 方法可作为传统可靠性理论的补充，用于度量系统可接受风险时的系统可靠性评估。

关键词：点蚀，应力腐蚀，多物理场建模，故障物理，Kriging 代理模型，混合不确定性，裕量与不确定性量化

ABSTRACT

Corrosion is one of the most critical failure mechanisms for engineering structures and systems, such as pipeline, marine structures, nuclear reactors, aerospace and weapons industries. The performance of metallic materials and structure will be deteriorated as the damage evolution with the coupled effects of mechanical stress and corrosion environment. Corrosion damages may result in catastrophic system hazards and economic losses in health management and long term safety services in many industries. The corrosion of materials and structures is a very complicated process, scientific understanding containing corrosion damage of the structure of the service state, the reasonable evaluating its reliability and service life, maximize its role and avoid unexpected accidents, major equipment service life evaluation for China's machinery industry and the sustainable development of security is of great significance. The corrosion of materials and structures is a very complex process, scientific understanding with the service state of corrosion damage of structure, a reasonable assessment of the reliability and service life, to maximize play its role and to avoid accidents, for China's machinery industry of major equipment service life assessment, sustainable development has important significance.

With the increasing of complexity of the service condition for mechanical parts and structures, the failure mechanism of both macro-structure and micro component has multi-scale and multi-physics coupling characteristics. Especially the effects of chemical and mechanical coupling mechanism is the very important for structure damage model research. This work focus on the life prediction and health assessment for materials and structures in nuclear industry and aviation industry, research the simulation model of pitting growth, the physics of failure model for structure with pitting corrosion and the reliability analysis method with mixed uncertainty, to provide the theoretical basis and technical support for the related equipment life cycle design theory and health management.

The main work and innovative contributions of this dissertation are as follows:

(1) The pitting corrosion experiments of HR-2 and 316L stainless steel were carried out, the micro damage and mechanical properties of materials with the stress effect during the corrosion experiments are studied. The SEM results show that the

corrosion of the stainless steel is still in the micro pitting corrosion stage, and the corrosion damage with stress loading is more serious. The tensile strength of the materials is decline after the corrosion experiment. This research can provide the basis for material selection and performance analysis of the actual engineering structure design.

(2) A numerical computation approach was developed in this work to simulate the stable pit growth process with the coupled effects of mechanical stress and corrosion environment through a multiphysics field coupling technique. An electric potential drop controlled corrosion is considered to governing the pit evolution process. The potential distribution in electrolyte was solved by the Laplace equations thus providing a time-dependent solution. As the metal equilibrium potential was varied by stress loads, a time-discrete stationary mechanical analysis was coupled with the corrosion modeling for stress distribution computation and updating. With the potential-stress-geometries coupled modeling, one case study of pitting corrosion growth with stress loads was implemented and the stress effects for pit depth, width and stress concentration factor are discussed

(3) A physics of failure model for pitting corrosion with the coupled effect of corrosion environment and mechanical stresses is presents in this work. With the developed model, corrosion damage growth can be projected and corrosion reliability can be analyzed. To carry out corrosion reliability analysis, the developed pitting corrosion model can be formulated as time-dependent limit state functions considering pit to crack transition, crack growth and fracture failure mechanics. A newly developed maximum confidence enhancement based sequential sampling approach is then employed to improve the efficiency of corrosion reliability analysis with the time-dependent limit state functions.

(4) An implementation framework to the reliability and safety assessment of systems through the use of quantification of margins and uncertainties (QMU) methodology is proposed in this work. The description of QMU concept is introduced, and then the Dempster-Shafer Theory of Evidence is used to present the presence of aleatory and epistemic uncertainties in the proposed QMU implementation framework. To alleviate the computational costs, a stochastic surrogate model based on Kriging model and adaptive sampling method has been implemented as the surrogate for the structure response. Then the structure reliability or safety was presented by a practical

ABSTRACT

quantification of margins and uncertainties metric in terms of confidence factor which defined as the ratio of margin and uncertainty. This method could provide technical support to the performance evaluation and certification for complex systems with mixed uncertainty.

Keywords: pitting corrosion, stress corrosion crack, multiphysics modeling, physics of failure, Kriging surrogate model, aleatory and epistemic uncertainty

目 录

第一章 绪 论.....	1
1.1 研究工作的背景与意义.....	1
1.2 研究现状.....	3
1.2.1 金属材料腐蚀模型及模拟方法.....	3
1.2.2 故障物理与性能退化技术.....	8
1.2.3 结构概率可靠性分析.....	10
1.2.4 不确定性理论与 QMU.....	11
1.2.5 存在的不足和问题.....	15
1.3 论文的主要研究工作.....	15
1.4 本文的结构安排.....	16
第二章 力学加载下不锈钢点蚀腐蚀试验研究.....	19
2.1 试验材料.....	19
2.2 应力环加载浸泡试验方法.....	20
2.3 静态加载腐蚀试验结果与分析.....	20
2.3.1 试验条件.....	20
2.3.2 试验前后形貌对比分析.....	21
2.3.3 HR-2 腐蚀后力学性能分析.....	24
2.4 本章小结.....	26
第三章 力学加载下点蚀生长多物理模拟研究.....	27
3.1 引言.....	27
3.2 点蚀生长数值模拟计算方法.....	28
3.2.1 点蚀模拟的 MC 方法.....	29
3.2.2 基于 CA 技术的模拟方法.....	29
3.3 基于 COMSOL 的点蚀生长多物理场建模研究.....	30
3.3.1 COMSOL MULTIPHYSICS 分析平台.....	30
3.3.2 点蚀生长数学模型与控制方程.....	31
3.3.3 几何建模与边界条件.....	33
3.3.4 基于 MATLAB 的计算求解方法.....	37
3.4 算例分析与讨论.....	40
3.4.1 网格划分与材料参数.....	40

3.4.2 模拟结果与分析	41
3.5 本章小结	50
第四章 力学加载下结构点蚀可靠性模型与概率分析方法	51
4.1 引言	51
4.2 考虑力学加载的点蚀失效模型研究	52
4.2.1 腐蚀中的力学效应	52
4.2.2 含点蚀损伤结构失效物理模型	54
4.3 基于 KRIGING 代理模型的高效可靠性分析方法	60
4.3.1 结构功能函数与失效概率	60
4.3.2 结构可靠性分析一般方法	61
4.3.3 自适应 KRIGING 代理模型	64
4.4 结构含点蚀损伤可靠性计算与分析	67
4.4.1 材料参数	67
4.4.2 计算结果分析	68
4.5 本章小结	72
第五章 QMU 方法及其在结构腐蚀失效分析中的应用	73
5.1 引言	73
5.2 QMU 基本概念	74
5.3 基于证据理论的混合不确定性分析	77
5.3.1 证据理论的基本原理	77
5.3.2 基于证据理论的不确定性传播模型	78
5.3.3 混合不确定性传播求解新方法	79
5.3.4 QMU 置信因子计算方法	81
5.3.5 曲柄滑块算例分析	85
5.4 基于 QMU 的结构腐蚀可靠性分析算例研究	88
5.4.1 结构点蚀转裂纹失效算例分析	88
5.4.2 含腐蚀损伤贮气罐强度失效分析	90
5.5 本章小结	94
第六章 全文总结与展望	95
6.1 全文总结	95
6.2 后续工作展望	96
致 谢	98
参考文献	99
攻读博士学位期间取得的成果	114

图目录

图 1-1	核反应堆失效的退化机制分布图	2
图 1-2	应力腐蚀发生三因素示意图	6
图 1-3	应力腐蚀裂纹发展过程示意图	6
图 1-4	论文总体结构图	17
图 2-1	试验件尺寸	19
图 2-2	应力环加载应力腐蚀试验装置	20
图 2-3	316L 应力环拉伸腐蚀试验前后的宏观形貌	21
图 2-4	HR-2 应力环拉伸腐蚀试验前后的宏观形貌	22
图 2-5	L-1 试样表面微观形貌	22
图 2-6	L-2 试样表面微观形貌	23
图 2-7	R-1 试样表面微观形貌	23
图 2-8	R-2 试样表面微观形貌	24
图 2-9	不同环境中 HR-2 不锈钢的抗拉强度变化	25
图 3-1	不锈钢点蚀过程示意图	27
图 3-2	MC 方法模拟点蚀生长示意图	29
图 3-3	CA 模拟点蚀过程示意图	30
图 3-4	COMSOL 物理模块框图	31
图 3-5	点蚀增长模拟参量之间的耦合关系	34
图 3-6	点蚀坑增长几何模型	34
图 3-7	腐蚀溶液部分边界条件	35
图 3-8	固体金属部分边界条件与载荷	36
图 3-9	ALE 移动网格边界条件	36
图 3-10	求解应力场分布设置	38
图 3-11	瞬态求解电势场和几何变化设置	38
图 3-12	点蚀坑生长模拟计算流程	39
图 3-13	模型初始网格	41
图 3-14	无应力 $t=30s$ 时点蚀坑周围电势场分布	42
图 3-15	无应力 $t=60s$ 时点蚀坑周围电势场分布	42
图 3-16	无应力 $t=120s$ 时点蚀坑周围电势场分布	43
图 3-17	无应力 $t=180s$ 时点蚀坑周围电势场分布	43
图 3-18	文献[38]中 180s 时的计算结果	44
图 3-19	有应力加载时点蚀坑模拟全视图	44
图 3-20	$P=50MPa$, $t=30s$ 时点蚀生长模拟结果	45
图 3-21	$P=50MPa$, $t=180s$ 时点蚀生长模拟结果	45

图 3-22	$P=100\text{MPa}$, $t=30\text{s}$ 时点蚀生长模拟结果	46
图 3-23	$P=100\text{MPa}$, $t=180\text{s}$ 时点蚀生长模拟结果	46
图 3-24	点蚀坑宽度和深度随时间变化	47
图 3-25	点蚀坑深度和宽度变化率随时间的变化	48
图 3-26	应力集中系数随时间的变化	48
图 3-27	不同离散时间间隔对计算结果的影响	49
图 4-1	点蚀损伤扩展过程示意图	55
图 4-2	基于变化率的点蚀坑转裂纹示意图	57
图 4-3	应力腐蚀开裂裂纹扩展曲线	59
图 4-4	有无应力加载时点蚀深度扩展曲线	59
图 4-5	代理模型的基本原理	63
图 4-6	自动加点 Kriging 代理模型求解可靠性流程	66
图 4-7	基于 MCE 抽样的结构点蚀损伤失效概率技术流程图	68
图 4-8	点蚀深度扩展曲线分布	69
图 4-9	有无应力加载时的可靠性分析结果	69
图 4-10	可靠性分析结果比较	70
图 4-11	计算精度比较	71
图 5-1	QMU 相关概念示意图	74
图 5-2	简单产品（雷管爆轰）QMU 分析示意图	75
图 5-3	QMU 方法的关键要素流程示意图	76
图 5-4	用于风险决策的系统 QMU 原理	77
图 5-5	命题的不确定性的证据理论表示	78
图 5-6	基于自适应 Kriging 方法求解似然函数计算流程	80
图 5-7	上边界阈值为精确值的 M 和 U 计算	82
图 5-8	上边界阈值为随机分布是的 M 和 U 计算	82
图 5-9	上边界阈值的证据结构分布时的 M 和 U	83
图 5-10	下边界阈值为精确值的 M 和 U 计算	83
图 5-11	下边界阈值为随机分布是的 M 和 U 计算	84
图 5-12	下边界阈值的证据结构分布时的 M 和 U	84
图 5-13	曲柄滑块系统示意图	85
图 5-14	系统响应函数和阈值的不确定性分布	87
图 5-15	腐蚀时间 200d 的最大应力强度因子分布	90
图 5-16	腐蚀时间 200d 的 QMU 分析	90
图 5-17	材料极限强度的分布情况	92
图 5-18	参数取均值时贮气罐应力分布及大小	93
图 5-19	最大截面平均应力的不确定性分布	93

表目录

表 2-1	316L 和 HR-2 不锈钢的化学成分	19
表 2-2	不锈钢的主要力学性能	19
表 2-3	试样编号及试验状态	21
表 2-4	HR-2 在不同介质中应力腐蚀后的力学性能	25
表 3-1	316 不锈钢点蚀生长模拟参数	40
表 4-1	随机变量参数	67
表 4-2	固定值变量参数	67
表 4-3	可靠性分析结果	70
表 4-4	自适应抽样代理模型与 FORM 计算效率比较	71
表 5-1	系统响应估计值和不确定性取值（上边界阈值）	81
表 5-2	系统响应估计值和不确定性取值（下边界阈值）	82
表 5-3	认知不确定性变量的证据结构	86
表 5-4	曲柄滑块机构随机变量 X 的分布参数	87
表 5-5	认知不确定性变量的联合 BPA	87
表 5-6	不同安全系数取值计算得到的 CF	88
表 5-7	证据结构变量	89
表 5-8	认知不确定性变量的联合 BPA	89
表 5-9	贮气罐观测参数及不确定性源分析	91

第一章 绪论

随着我国综合国力的不断提高、科学技术的不断发展和科技活动对未知探索需求的不断增长，作为我国核心竞争力和实现“中国制造 2025”战略集中体现的国防武器装备、新能源装备、空天运载装备、深海探测装备、大型基础工程等重大装备具有技术高度集成智能化、结构高度复杂系统化、服役环境恶劣甚至极端化的特点。针对复杂结构服役全寿命期内面临的恶劣环境和载荷，发展多学科交叉、多场耦合的失效理论，加强装备可靠性工程基础研究和技術储备，确保重大装备全寿命周期的可靠有效服役，避免由于装备失效导致的突发性、灾难性的事故风险既是当前可靠性工程领域的研究热点和前沿，也是可靠性工程技术发展的必然趋势。本章针对核工程和航空领域装备中广泛应用的金属材料结构的点蚀损伤演化和可靠性分析所涉及的问题的背景、技术发展现状以及本文的主要研究内容进行概述。

1.1 研究工作的背景与意义

重大装备及大型基础设施工程中的关键零件与结构的可靠安全服役对于我国实施的“中国制造 2025”制造强国战略和国防建设具有重要意义^[1]。腐蚀作为金属材料常见的损伤方式之一，在石油管道、海洋结构、核反应堆、航空航天、武器装备等领域广泛存在^[2]。由于周围环境介质和所承受载荷的长期作用，金属材料结构的服役性能会随着腐蚀的产生发展逐步退化，甚至造成突发性破坏，导致重大经济损失和恶性事故，给关键零件与结构的安全服役带来风险。

(1) 核电领域

作为清洁能源的核电是我国能源结构中的重要组成部分，到 2020 年我国核电占全部电力装机容量的比重将提高到 4% 以上。2011 年福岛核电站事故之后，核电运行的安全性和经济性更是我国核电发展的前提和基础。核电关键材料与结构在辐照环境和高温高压水作用下长期服役的可靠性和稳定性是影响核电站安全性和经济性的重要因素。我国目前在建和运行的核电站反应堆常用结构材料包括锆合金、镍基 690 合金、低合金钢、304 和 316 不锈钢、800 合金等^[3]。上述核电材料结构承受比较复杂的工作应力载荷，且服役环境包括高温高压的流动水，处于堆芯部位的材料还需承受强烈辐照作用。由于金属材料原子移位产生的辐照缺陷以及由核反应产生的氢、氦等气体杂质的作用，金属材料在高辐照环境下容易产生辐照硬化、辐照脆化和辐照蠕变等^[4]。因此上述苛刻的服役环境使材料对环境损

伤的敏感性大大增加。核电站运行数据以及相关研究表明^[5]，主回路的环境疲劳与应力腐蚀开裂（Stress Corrosion Cracking, SCC）、蒸汽发生器传热管的腐蚀与应力腐蚀开裂、压力容器的辐照脆化损伤、二回路的流动加速腐蚀等是影响核电站安全运行的主要材料环境损伤模式。在上述环境损伤模式中，应力腐蚀开裂和腐蚀疲劳是压水堆接头与蒸汽发生器传热管材料失效的主要原因，应力腐蚀裂纹和腐蚀疲劳裂纹常常是由点蚀坑损伤演化形成，因此研究金属点蚀对核电领域具有重要意义。图 1-1^[5-7]为瑞典核电监察机构对核电站材料的各种失效事件的统计数据图。从图中可以看出腐蚀是影响核反应堆安全运行的重要因素。

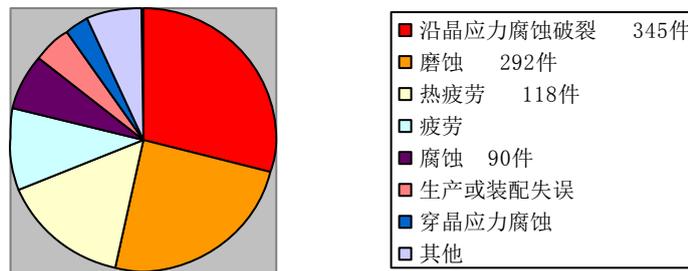


图 1-1 核反应堆失效的退化机制分布图

(2) 航空航天领域

航天飞机、卫星以及航空领域的飞机关键零件与结构在其服役寿命周期同样面临着腐蚀损伤的危害^[8]。美国对航天飞机的腐蚀历史调查与评估表明，航天飞机的腐蚀主要来自地面停留时的大气腐蚀，发生的部位主要集中在机翼前缘梁架、方向舵减速板、缘定隔热罩、外体箱舱门等部位，主要的腐蚀形式为点蚀和应力腐蚀^[9]。对于卫星而言，电池中的电解液、冷却循环系统在太空环境下也会导致电偶腐蚀、全面腐蚀和应力腐蚀等。此外太空中的原子氧、粒子辐射等会导致相关敏感材料的性能退化与功能失效。航空飞机发动机在不断的交变应力、高低温转变和循环介质的作用下，其冶金学和力学性能退化，进而导致机械部件功能和可靠性的下降而提前失效^[10,11]。相关研究表明，发动机涡轮叶片一般由力学和腐蚀两个因素同时作用才导致失效，叶片的前缘和尾部部位由于高密度的交变温度和应力作用引起疲劳裂纹发展，在叶片的中心部位出现高应力区和燃气中的环境腐蚀介质，主要由应力腐蚀和蠕变所致^[12]。除发动机外，飞机构架中的铝合金连接结构、机身的蒙皮等部位在长期使用过程中也会形成点蚀、腐蚀疲劳损伤^[13]。

(3) 能源化工领域

能源输送管道对于石油、天然气等能源消费大国具有重要作用。油气管道大多埋设于地下，容易受到环境腐蚀伤害，加之输送气体压力高，具有发生管道破

裂、穿孔泄漏的风险。美国油气管道因腐蚀原因发生的事故比例接近 30%^[14]。

由此可见，材料与结构的腐蚀损伤，特别是点蚀在传统工业以及现代高科技领域广泛存在。材料与结构的腐蚀受环境介质的组成与浓度、载荷种类与大小、温度以及材料属性的影响，可表现为点蚀、均匀腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳、氢脆、磨损腐蚀等多种损伤形式^[15,16]。因此，科学认识含腐蚀损伤结构的服役状态，合理评估其可靠性和服役寿命，最大限度地发挥其作用而又避免意外的事故，对于我国机械行业重大装备的服役寿命评估、安全可持续发展等均具有重要意义。

当前随着机械零件与结构服役条件的日益复杂，传统的强度理论已很难解释复杂多样的失效模式。无论是宏观大型构件的破坏还是微观元器件的失效，其失效机制均具有多尺度和多场耦合的特点，特别是化学-力学作用下的失效机制值得深入研究。本文以核工业和航空领域广泛应用的金属材料在腐蚀环境和力学载荷下的性能损伤为研究背景，重点研究机械载荷与腐蚀环境耦合作用下的点蚀生长模拟模型、结构失效故障物理建模以及考虑混合不确定性的结构可靠分析方法，为相关装备的全寿命设计理论与安全可靠运行提供理论基础和技术支撑。

1.2 研究现状

1.2.1 金属材料腐蚀模型及模拟方法

金属材料的腐蚀分类按照腐蚀形态可以分为全面腐蚀、无应力局部腐蚀和应力作用下的局部腐蚀。点蚀、缝隙腐蚀以及电偶腐蚀是常见的局部腐蚀，应力作用下的腐蚀主要包括应力腐蚀、腐蚀疲劳、氢脆、磨损腐蚀、微振腐蚀等^[17]。全面腐蚀可近似为均匀腐蚀，其计算可简化为结构件暴露在腐蚀环境中的部分尺寸随时间增加而减小，从而造成结构件性能退化。局部腐蚀以及应力作用下的局部腐蚀会导致金属材料的一些特殊腐蚀破坏现象，严重威胁着结构的服役安全。根据工程中腐蚀导致的失效事故数据统计，局部腐蚀引起的失效占 82.2%，纯点蚀引起的失效比例为 25%，应力腐蚀和腐蚀疲劳断裂比例为 38%^[18]。可见腐蚀裂纹（应力腐蚀开裂和腐蚀疲劳断裂）和点蚀是金属材料最常见的破坏形式。应力腐蚀和腐蚀疲劳裂纹的孕育和形成一般均由点蚀坑演化而来^[19-21]，因此以下分别论述金属材料点蚀、应力腐蚀以及腐蚀疲劳相关研究进展。

1.2.1.1 金属材料点蚀模型研究概述

点蚀是一种集中在金属表面很小的范围内并向其内部深入发展的孔洞状腐蚀。其萌生理论可以分为钝化吸附理论和钝化成相膜理论两大类。前者认为点蚀

是氧和卤素阴离子竞争吸附的结果，而后者则认为这是由于膜的某种形式的局部破裂所致^[22]。在点蚀成核研究方面，上世纪 20 年代 Evans^[23]最先提出了渗透理论，认为颗粒半径很小的卤素离子（Cl⁻）能通过渗透进入钝化膜内，并产生感应卤素离子，其半径很小，可穿过钝化膜进入膜内，并产生感应电荷使阳离子杂乱移动，局部形成较高的电流密度，当固液界面的电场达到某一临界值时，表明金属表面发生了点蚀。上世纪 60 年代 Hoar 和 Wood^[24]提出了吸附理论，认为金属表面的腐蚀是 Cl⁻和氧的吸附竞争导致。当金属表面上原本吸附氧的点被 Cl⁻所代替时，由于 Cl⁻的活性将与氧化膜中的阳离子以一定的几率生成可溶解的络合物溶解到溶液中并扩散，新暴露出的基体金属表面便形成微观点蚀坑。Bohni 和 Uhlig 等^[25]在吸附理论的基础上认为吸附过程发生在金属表面达到某一特点电位值时，即腐蚀电位（Pitting potential）。Lin 等^[26]认为金属表面的微缺陷会随着金属膜与溶液界面上阳离子的溶解而逐渐累积形成空洞，当空洞增长到一定的临界尺寸导致钝化膜破裂而形成点蚀并生长。基于很多学者在点蚀机理方面的研究，Frankel^[27]从物理化学上把点蚀过程分为钝化膜破裂、亚稳态点蚀和稳态点蚀坑生长三个阶段。钝化膜破裂即是点蚀的初始形成阶段。亚稳态点蚀可在远低于腐蚀电位时形成，发生在稳态点蚀形成之前。亚稳态点蚀可以向两个状态继续转化，一是由于某种原因被再次钝化，停止生长；另一个状态则是亚稳态点蚀持续生长进入稳态点蚀阶段。稳态点蚀坑将持续生长，其生长速率受材料成分、电解液浓度、点蚀坑底部电位、pH 值等因素影响。

由于点蚀的发生机理十分复杂，从工程角度看，宏观点蚀的生长及其对结构的潜在风险更为关键。Harlow 和 Wei^[28]通过研究金属铝表面点蚀分布，提出了点蚀坑生长的半长椭球体假设，并将等长径比作为主要特征参量描述半蚀坑的演变模型。Rokhlin^[29]将点蚀长短半径的比作为点蚀特征量，根据试验研究了该特征量随时间的下降模型，用于描述点蚀坑形貌随时间的变化过程。Hunkeler 和 Bohni^[30]建立了点蚀坑生长演化的动力学模型，通过对铝箔表面点蚀坑的腐蚀试验数据的统计特征和试验条件分析，提出了点蚀生长速度与电解液 Cl⁻浓度以及金属材料自身腐蚀电位的关系。Sehgal 和 Frankel^[31]使用金属薄片渗透技术研究了铝合金的点蚀演化。在海洋和管道等工程中常用到的点蚀模型主要包括幂函数模型、Paik 线性模型^[32]、Melchers 非线性多阶段模型^[33]，以及基于马尔科夫过程的随机模型等。崔维成等^[34]针对船体结构含点蚀损伤的时变可靠性问题，在对比分析已有模型的基础上，提出了威布尔函数形式的腐蚀概率模型。Melchers^[35]将点蚀最大坑深处理成极值分布，根据低碳钢在海水中全浸腐蚀数据，采用双概率密度模型来描述点蚀最大坑深的概率分布，建立了描述点蚀坑深度极值的腐蚀概率模型，并基于该

模型研究了管道受点腐蚀影响下的结构可靠性分析流程。马亚丽^[36]等以含氯离子环境下检测到的钢筋腐蚀数据为基础,用平均腐蚀深度对钢筋的锈蚀程度进行表征,分析了钢筋腐蚀深度的分布类型,建立了腐蚀钢筋的可靠性模型。邵煜等^[37]针对埋地管线在外部荷载和腐蚀联合作用下导致的失效问题,结合管线不同方向上实际受力载荷特性和腐蚀规律,建立了管线腐蚀失效预测模型。李英勇^[38]等基于对预应力锚固结构腐蚀影响因素的分析,选取 pH 值、时间、应力水平及材质作为加速腐蚀试验设计的考虑因素,依据正交试验设计方法建立各因素正交组合环境腐蚀试验条件进行加速试验。试验表明,施加应力大小对单位长度腐蚀量有一定的影响。针对力学加载下的点蚀损伤及结构可靠性问题,秦圣平^[39]等针对船舶中的典型受压平板结构件,研究了结构件极限强度随腐蚀时间的变化,并根据已有的腐蚀模型分析了受压平板单元结构件在船舶航行循环载荷作用下的可靠性。上述模型主要从实验数据统计和随机过程的角度对点蚀扩展进行建模。

随着数值模拟技术的发展,近年来点蚀的数值计算模型用于模拟点蚀增长过程也逐步得到了发展。Malki 和 Baroux 使用蒙特卡罗(MC)和元胞自动机(CA)技术来计算模拟点蚀坑的增长^[40]。Pidaparti 等^[41,42]利用腐蚀界面的控制方程和 CA 方法分别建立了点蚀增长的 2D 和 3D 仿真模型。基于 CA 技术的点蚀增长模拟方法主要将点蚀增长过程视为离散的动态过程,并在飞机用铝合金材料的多点蚀生成和增长过程模拟研究中得到了应用。随着有限元(FEM)技术的发展,相关学者开展了基于有限元的点蚀建模与模拟方法及其应用研究,这类方法通过点蚀的物理数学模型控制模拟点蚀坑的增长。Laycock 和 White^[43]首先针对点蚀在稳态下的增长建立了有限元模拟的 2D 模型用于模拟点蚀坑几何形状的演变,在此基础上针对点蚀的生成过程集成了点蚀萌生的随机模型。Scheiner 和 Hellmich^[44]忽略材料微结构的影响,分别用活化和扩散控制方程建立了 304 不锈钢稳态点蚀增长数值模拟模型。Xiao^[45]研究了镁铝合金的电化学腐蚀模型,通过插值函数模拟理想化的 α 和 β 相的材料微观结构在腐蚀过程中的影响。最近, Kota 等^[46]在研究 316 不锈钢点蚀的 2D 模型中,考虑了金属材料晶体方向对腐蚀电位的影响,模型中用电势差和溶液中的拉普拉斯方程描述腐蚀溶液中电势场的分布。在此基础上, Kota 和 Qidwei^[47]研究了非耦合的 316 不锈钢应力腐蚀分析,描述了腐蚀坑周围的应力集中现象,但是在点蚀坑增长模拟阶段,没有考虑应力对腐蚀电位的影响。Xu 和 Cheng^[48]通过建立有限元模型从宏观角度研究管道点蚀的机械电化学耦合效应。该模型能对点蚀坑的应力及腐蚀耦合环境进行稳态分析,但是不能模拟描述点蚀几何形状随时间的增长过程。由于工程结构的实际服役环境均要受到一定的力学载荷,面临着腐蚀损伤与应力载荷的耦合作用,因此点蚀生长过程中考虑应力与腐

蚀环境的耦合效应更符合工程实际。

1.2.1.2 应力腐蚀模型研究概述

在持续的应力和腐蚀介质耦合作用下，点蚀坑可能进一步向微裂纹转化发生应力断裂失效，给结构的服役带来安全风险。图 1-2 所示为应力腐蚀发生的三因素共同作用示意图^[49]。

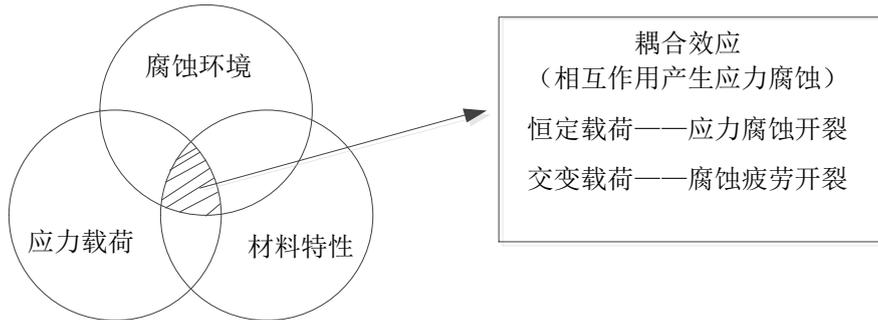


图 1-2 应力腐蚀发生三因素示意图

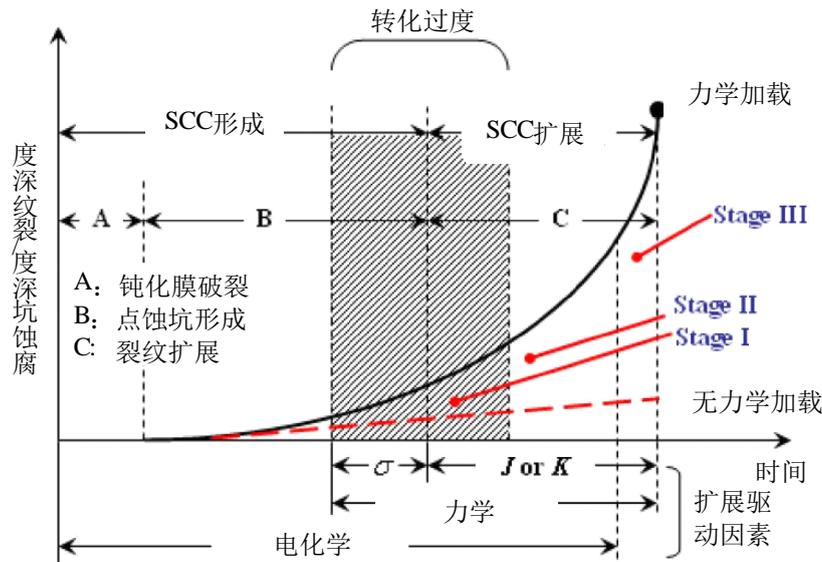


图 1-3 应力腐蚀裂纹发展过程示意图

应力腐蚀裂纹的形成与发展过程如图 1-3 所示^[18]，包括上节中描述的点蚀坑阶段和应力腐蚀裂纹阶段。在点蚀坑的萌生和生长阶段，电化学反应是金属溶解时腐蚀发展的主要驱动因素。随着向裂纹阶段的转化，电化学反应驱动的因素将逐渐减弱，应力作用因素逐渐增强。当裂纹进入快速扩展阶段，力学载荷将起支配作用。金属材料的应力腐蚀破坏过程一般基于金属阳极溶解理论，由于力学载

荷的作用，含有腐蚀坑的部位将形成应力集中，使金属局部被进一步撕开，形成力学效应与电化效应耦合作用，导致腐蚀损伤缺陷的增长加快。

对于应力腐蚀裂纹扩展的计算，目前比较常用的主要包括确定性模型和应力腐蚀寿命预测概率模型两类。确定性模型主要包括 Clark 模型、Paris 模型，用于描述裂纹扩展尺寸与速率。概率模型是在确定性模型的基础上引入概率参数，用于评估结构应力腐蚀失效的概率和可靠性。

(1) Clark 模型一般通过一系列的实验对特定的材料得到其腐蚀缺陷增长率与材料和环境关键因素之间的关系。文献[50]通过研究 NiCrMoV 材料提出了如下关系：

$$\ln \dot{a} = -9.69 - \frac{5145.3}{T} + 0.0337\sigma_y + 4.53Mn \quad (1-1)$$

式中， Mn 为材料中锰元素的百分比含量； \dot{a} 为裂纹深度变化率； σ_y 为材料的屈服强度； T 为环境温度。美国电力研究所针对核电合金材料 A-600 提出了类似的计算公式：

$$\dot{a} = \alpha \exp\left(-\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) (K - K_{th})^\beta \quad (1-2)$$

式中， α 与 β 为模型参数； K_{th} 为材料应力腐蚀开裂门槛值； Q 为材料活化能； R 为气体普适常数。Clark 模型能够通过实验引进其他敏感应力因素进一步发展（比如引进 pH 值等），从而反映影响材料应力腐蚀的关键因素，缺点是需要大量不同的实验数据支持。

(2) Paris 模型基于断裂力学理论，最初应用于疲劳裂纹扩展计算，在工程中应用广泛。当其应用于应力腐蚀问题时，其形式为^[51]：

$$\frac{da}{dt} = C(K)^m \quad (1-3)$$

式中， C 和 m 为模型参数， K 为静载荷作用下的应力强度因子，从而区别于疲劳问题的应力强度因子幅变值。

(3) 应力腐蚀寿命预测概率模型^[52]是以 Clark 模型为基础发展而来的一种概率可靠性分析模型。在计算应力腐蚀裂纹增长率方面，该模型以形同 Clark 模型的确定性经验模型为基础，但是模型的参数由试验统计数据得到其概率分布特征，包括裂纹初始尺寸、材料力学特性、损伤演化增长率、环境载荷等，通过结构的力学响应分析建立相应的失效评估极限状态方程，求解可得结构裂纹破坏的失效概率。

1.2.1.3 腐蚀疲劳模型研究概述

图 1-2 所示当腐蚀介质与交变载荷共同作用于金属材料时,会发生腐蚀疲劳失效。相关研究表明,与应力腐蚀裂纹类似,腐蚀疲劳裂纹仍然是从金属表面的点蚀损伤处开始形成微裂纹的^[53,54]。点蚀生长过程中,当点蚀坑的深度尺寸增加到一定程度时,微裂纹将从点蚀坑表面通过晶界向金属内部延伸^[55]。针对腐蚀疲劳裂纹扩展,Wei^[56]通过实验研究和理论分析认为外界腐蚀环境、循环载荷、金相特征以及几何形状是影响腐蚀疲劳裂纹扩展的主要因素。腐蚀疲劳裂纹形成之后,扩展过程根据扩展速率的主要因素可以分为短裂纹和长裂纹阶段^[57,58]。在一定尺寸范围内的短裂纹扩展阶段,其扩展速率要远远高于长裂纹,因为此时力学因素作用不明显,电化学作用占主导因素。计算腐蚀疲劳裂纹扩展速率的基本方法是根据叠加原理针对力学效应和电化学作用分别建模。比如,当应力强度因子幅变值大于开裂门槛值时,裂纹扩展速率由应力腐蚀裂纹扩展速率和机械疲劳裂纹扩展速率叠加表示^[59]。Simmons 和 Wei^[60]在上述研究的基础上,引入了腐蚀环境与循环载荷交互作用项,对计算模型进行了修正。Austen^[61]认为应力腐蚀和机械疲劳对腐蚀裂纹扩展的作用不能完全由线性叠加关系简单表示,而是两者竞争的结果,即由占支配因素的导致裂纹发展较快的过程来代表,提出了裂纹扩展过程的竞争模型。叠加模型和过程竞争模型均试图从理论上解释腐蚀疲劳中各种因素之间的关系,但是影响因素众多,不同金属材料差异性较大,使得工程中解决腐蚀疲劳裂纹扩展问题和寿命预测评估常常采用基于环境修正因子的 Paris 公式^[62]。王清远^[63,64]研究了航空材料的腐蚀疲劳和寿命预测计算模型。Suresh 和 Vasudevan^[65]考虑了微结构对高强度铝合金低速裂纹扩展过程的影响。王荣等^[66]在裂纹扩展静态断裂模型基础上,增加考虑了腐蚀过程中金属表面再次钝化过程对裂纹生长的影响,提出了钝化-断裂模型计算腐蚀疲劳裂纹的扩展速率。刘晶晶等^[67]针对软钢在海洋腐蚀环境下腐蚀疲劳问题,根据统计理论研究了其裂纹扩展速率和寿命预测。

1.2.2 故障物理与性能退化技术

随着人们对腐蚀物理化学过程以及点蚀-应力腐蚀-腐蚀疲劳等腐蚀模型认识的不断深入,针对结构腐蚀、磨损、自然老化等这类具有累积效应特点的损伤模式和失效分析,相应地基于故障物理和性能退化模型的结构可靠性分析方法在实际工程中获得较大发展。故障物理(Physics of Failure)技术^[68]是基于产品的失效机理和产品全寿命期内的环境载荷条件与响应进行可靠性设计分析。故障物理模型是机械结构或产品在使用过程中发生的失效与产品自身的某些性能特征量及环

境载荷条件之间的函数关系，其本质是对结构失效过程的物理机理进行认识和描述。在故障物理建模研究方面，美国马里兰大学计算机辅助寿命周期工程中心（CALCE）发展了基于故障物理技术的高加速试验和虚拟仿真试验方法^[69,70]。该方法首先在集成电路、电子仪器组件、电子设备的可靠性设计方面获得了很多成果。针对机械结构系统，马里兰大学 Modarres 和 Azarkhai^[71]通过对高压容器用钢进行故障物理可靠性建模和试验分析，建立了相关产品的故障物理可靠性评估方法，并应用于碳钢管道的腐蚀-疲劳寿命评估^[72]。Gray^[73]针对核电管道材料用钢开展了应力腐蚀失效故障物理建模研究，模型中考虑了 pH 值和应力载荷大小的影响。Chamberlain^[74]针对蒸汽发生器管道的微动磨损建立了概率故障物理模型用于寿命预测研究。此外，Modarres^[75]通过研究某碳钢管道材料的腐蚀退化机理，建立了寿命预测分析的概率故障物理方法。Goswami 和 Hoepfner^[76]针对腐蚀疲劳问题根据损伤演化过程发展了七阶段的腐蚀疲劳寿命预测模型，Harlow 和 Wei^[77]提出了包含裂纹成核、表面裂纹扩展、断裂破坏三阶段的概率预测模型。上述模型仅在疲劳裂纹阶段考虑了力学载荷的影响，而在点蚀扩展阶段没有考虑力学载荷的影响。国内朱顺鹏等^[78]以机械装备复杂结构为对象开展了基于故障物理的疲劳可靠性设计与寿命预测的相关研究，建立了航空发动机在高温低周疲劳载荷下的故障物理与寿命预测模型。从发展情况看，基于故障物理技术进行产品可靠性设计、建模与分析是可靠性工程发展的趋势之一。近年来，由于试验技术、建模手段、计算能力等的提高，基于退化的可靠性技术在模型、方法及应用方面得到快速发展。其中在基于退化的可靠性模型方面，以随机过程理论为基础，根据工程需要已经提出了多种类型的模型，包括退化轨道模型（Paris 模型、随机斜率模型、幂律模型、反应论模型）、基于 Wiener 过程的模型、基于 Gamma 过程的模型、累积损伤模型等^[79]。上述模型已在机械零部件、半导体器件、电子器件等的退化失效过程建模、可靠性评估、剩余寿命预测等方面得到应用。汪忠来和黄洪钟^[80]研究了同时含有退化和冲击损伤过程的系统可靠性建模方法。美国太平洋国家实验室^[81-83]以及 Zio 等^[84-87]针对核反应堆中被动组件的老化问题，集成了状态转移随机不确定性的理论与故障物理模型，提出了系统可靠性评估和长寿命预测的多状态故障物理建模方法，能够获得比较符合实际的可靠性评估结果。上述文献表明，基于多状态故障物理模型的可靠性评估方法是解决复杂系统长期服役可靠性评估的发展方向之一。

1.2.3 结构概率可靠性分析

研究结构含腐蚀损伤的可靠性一方面需要建立结构腐蚀模型，另一方面需要

结合结构可靠性理论发展高效的可靠性分析方法。传统的结构可靠性分析以概率统计理论为基础，主要包括数学近似解析方法、基于抽样的数值模拟法、基于代理模型（Surrogate model）的替代求解方法^[88,89]。其中近似解析方法包括矩方法^[90-92]、一阶可靠性方法（First Order Reliability Method, FORM）^[93-95]、鞍点近似法^[96-98]、二阶可靠性方法（Second Order Reliability Method, SORM）^[99]、通用函数生成法^[100-103]等。目前，一阶可靠性方法和二阶可靠性方法已在工程中被广泛用于结构优化设计和结构可靠性分析。Du 和 Sudjianto^[104]提出了一阶鞍点近似的可靠性分析方法，可减少随机变量非正态到正态的转换计算，该方法比 FORM 计算精度有较大提高，但是计算效率和鲁棒性不高。为解决上述不足，Huang 和 Du^[96]提出了均值一阶鞍点近似法，即在随机变量的均值点进行泰勒展开从而提高计算的鲁棒性。Zhao 和 One^[91]研究了结构功能函数前四阶矩的计算模型，提出了基于矩（Moment）的可靠性计算方法和结构可靠性指标的计算表达式。Abramov^[97]在此基础上提出了基于最大熵方法的结构可靠性计算算法。Li 和 Zhang^[105]建立的结构可靠性分析方法中采用了最大熵理论，结合数学近似处理能够较好的兼顾精度和效率。上述近似解析方法能较好的适用于线性简单结构的可靠性问题，但对于实际工程中结构的高度非线性复杂问题却有一定局限。

在数值模拟方法方面，蒙特卡洛方法原理简单，其计算过程不受输入变量以及结构功能函数线性程度的限制，能够解决高度非线性问题的失效概率与可靠性计算。随着高性能计算机的发展，该方法目前已在工程中得到广泛运用。但是对于工程实际结构中经常出现的小失效概率问题以及单次结构功能函数响应计算需要借助大型有限元进行分析时，该方法需要大量的样本数量，导致其需要消耗高额的计算成本和巨大的计算资源，从而限制了其在实际复杂工程结构中的应用^[106]。为了减小 Monte Carlo 方法大量样本所需的计算成本，有关学者从抽样方法方面提出了改进方法，通过提高计算的抽样效率来减小计算成本，主要包括局部 Monte Carlo^[107,108]、重要抽样方法^[109-111]、线抽样方法^[110]、自适应抽样^[111,112]等，加快了可靠性分析计算的收敛速度。

高效的抽样方法能够一定程度的减小样本量需求，但是针对结构系统的功能函数为隐函数，或系统响应计算是有限元模型分析，仅采用高效抽样方法仍不能显著减小计算成本。为此，基于代理模型代替真实的响应模型用于可靠性计算的方法逐渐得到了学者们的关注和发展。响应面方法^[113,114]（Response Surface Method, RSM）是最常见的代理模型之一，通常用于结构可靠性分析及优化设计。目前，已经出现了多种可以逼近响应模型的技术，应用比较广泛的有神经网络^{[115],[116]}、支持向量机方法^[117,118]，Kriging 方法^[119-121]等。其中，神经网络法是一

种非参数化方法，可以通过神经元和反馈层近似模拟非线性函数，但其模型训练时，可能存在收敛慢，计算量相对较大的问题。Foschi^[122]将神经网络代理模型用于大型抗震结构的可靠度计算中，用于减小计算成本消耗。Nie^[123]利用神经网络方法对抽样过程的优化方向进行了研究。Hurtado^[124]分析比较了不同类型神经网络模型的计算精度与效率。学习能力更强的 Kriging 代理模型是一种半参数化方法，能较好的兼顾全局与局部近似，适合非线性函数拟合^[125]。

在可靠性分析模型中结构的功能函数与时间一般是不相关的，即可靠性分析模型中的结构强度不会随时间退化、也不会考虑载荷的时间历程变化等，得到的可靠度也不会随时间发生变化。然而，对于实际工程问题常常需要考虑结构的服役全过程、全剖面，必须考虑长时间使用引起的材料性能、累积载荷等因素的影响，结构功能函数和参数是依赖于时间的（Time-dependent），结构可靠度表现为时变或动态特性^[126-128]。结构时变可靠性理论的研究最早开始于 20 世纪 40 年代。Sieger^[127]通过随机过程理论，发展了一种结构失效概率与时间相关时的计算方法。Iyengar^[129]分析了非随机平稳过程的结构动态可靠性。在时变可靠性分析方法方面，Zhang 和 Du^[130]将基于通用函数发生器的可靠性计算方法推广应用到时变可靠性分析中。Zhang 等^[131]研究了系统优化中引入时间可靠性的优化模型与算法。Thoft-Christensen^[132]通过建立结构可靠性指标随时间线性衰退关系，求解长期服役桥梁可靠性的衰退过程。Petcherdchoo 等^[133]建立了可靠性指标随时间非线性衰退的表示方法。Mourelatos^[134]具体阐述了时间区间内的可靠度与某一时刻可靠度两者之间的区别和联系，建立了结构随时间变化的可靠度计算公式。Savage 和 Son^[135]分析了产品性能衰退过程中相关参数具有单调性变化时的产品寿命周期可靠性模型。文献[136]分析了参数随时间非单调变化时系统可靠性随时间变化的计算方法，用串联可靠性思想建模计算动态系统不可修复时的可靠度。上述文献表明提高结构可靠性分析的效率和精度是结构可靠性关注的重要方向。

1.2.4 不确定性理论与 QMU

1.2.4.1 非概率不确定性理论

由于实际问题的复杂性、人类认识水平的局限性以及随机因素的影响、样本的缺乏等，常常导致结构功能模型中的材料、几何以及物理模型本身等参数表现为不确定性。针对不确定性的分类一般根据产生不确定性的缘由将其分为随机不确定性（Aleatory uncertainty）和认知不确定性（Epistemic uncertainty）^[137-142]。随机不确定性文献中也常称为偶然不确定性或者客观不确定性，用来描述事物固有变异性，这种变异性是客观存在不会减少的，常用概率论中的分布函数进行分析

表征。认知不确定性常称为主观不确定性，主要是由于对事物认识数据缺乏或者信息不充分引起的。因此可以通过认识的深入和信息量的增加而使认知不确定性减少。比如，反应堆服役初期，长时间辐照作用对材料的损伤行为变化掌握较为困难，但是随着时间的累积和数据的增多，相应地认识偏差会逐步降低。对于数据缺乏，掌握信息较少导致的认知不确定性常采用非概率理论来描述，主要包括：模糊理论、区间理论和证据理论等。

Brown^[143]较早将模糊性引入到结构安全分析中，在描述混凝土结构的强度和损伤变化时采用了模糊数学理论，并定义了包含模糊性的结构可靠性因子^[144]。随后相关学者完善并发展了结构模糊可靠性理论，用于实际工程问题的可靠性分析^[145-150]。Mon 和 Cheng^[151] 参考概率理论，根据置信度区间分析和模糊状态假设，建立了系统模型具有一定模糊性的可靠性分析方法。Cremona 等^[152]基于可能性理论提出一种模糊可靠性度量方法，与传统可靠性模型类似，能处理输入变量均为模糊变量结构系统的可靠性。黄洪钟^[149,153]采用模糊事件法和离散加权平均法求解模糊结构的失效概率。一些学者研究了模糊可靠性问题和概率可靠性问题之间的理论联系，建立相应的转化方程，实现模糊环境下结构的可靠性分析^[154-157]。目前模糊可靠性理论仍处于发展阶段，同时也促进了结构可靠性理论的丰富和进一步完善。

在结构可靠性分析的区间概率方面，学者 Ben-Haim^[158]利用凸集模型对不确定性进行建模，提出了非概率可靠性的概念。Elishakoff^[159,160]基于区间运算法则研究结构稳健性时提出结构稳健可靠性指标通过安全因子区间来定义，而不是具体的精确值。郭书祥、吕震宙等^[161,162]对于认知不确定性采用区间变量来表征，提出了与传统可靠性理论和可靠度指标相类似的结构非概率可靠性模型和非概率可靠性指标以及非概率可靠性指标的求解计算算法。邱志平和王晓军等^[163-165]在对稳健可靠性指标凸模型描述的基础上改进提出了新的稳健可靠性指标，研究了结构非概率稳健可靠性准则和非概率可靠性优化设计方法。黄洪钟^[166]针对认知不确定性采用区间变量，提出了基于区间满意度的非概率集合模型和结构可靠性分析方法。李永华和黄洪钟^[167]针对结构稳健可靠性分析，采用凸集模型定义了一种无量纲的稳健可靠性设计准则。

证据理论也被称为 Dempster-Shafer (DS) 证据理论，由 Dempster 和 Shafer 提出并完善。证据理论在描述随机不确定性和认知不确定性时，与概率论相比不需要更多的前提假设^[168]，具有较强的处理不确定信息的能力，已经成为结构可靠性分析和优化设计中处理不确定性信息的有效工具。Bae^[169]在结构模型变量中存在不精确数据时，采用证据理论来处理不精确数据并建立了基于证据理论的结构可靠

性计算方法。Zissinos^[170]结合证据理论和改进的优化算法进行了可靠性优化设计研究。对于系统可靠性评估，Simon^[171]提出了证据理论和 Bayes 网络相结合的方法表示系统逻辑关系并应用于电网可靠性评估。Helton^[172,173]针对模型预测中的认知不确定性的证据结构变量，建立了高效的抽样算法解决证据理论在不确定性分析中的巨大计算成本问题。为了解决复杂系统可靠性的评估问题，Wan^[174]将不同的变量类型转化为证据理论结构变量的形式，提出了多源信息融合方法。由于证据理论在处理不精确概率和认知不确定性方面的优势，在非概率可靠研究领域有着广泛的应用前景^[175-177]。

1.2.4.2 混合不确定分析方法

近年来，针对工程中常遇到的认知不确定性和随机不确定性同时存在时的结构可靠性分析和计算，相关学者开展了大量的工作并提出了结构可靠性分析的混合模型。如概率-模糊可靠性混合模型，P-BOX 概率盒混合可靠性分析模型，随机变量-证据变量等混合可靠性模型。Du^[178]采用证据理论对认知不确定性进行表征，概率分布对随机不确定性进行表征，提出了一阶可靠性的统一不确定性分析方法。随机不确定性和认知不确定性分别用随机变量和区间变量表示，建立了随机变量和区间变量同时存在时的结构统一可靠性分析模型，根据该模型采用一阶可靠性方法进行计算求解^[179]。Jiang 等^[180,181]对概率分布参数含有认知不确定性的情况，基于概率盒对认知不确定性进行建模，概率分布参数用区间数表示，提出了统一不确定性分析模型用于解决嵌套混合不确定性问题。Zaman 等^[182,183]提出用 Johnson 分布簇来描述区间变量，将区间变量通过抽样准则表示成概率分布函数，建立了基于概率框架的统一可靠性分析模型，模型的最终计算结果为一概率值。Sankararaman 和 Mahadevan^[184]将混合不确定性分析方法推广应用于模型的验证与确认研究，建立了考虑混合不确定性的系统模型验证方法。Zhang 等^[185]在概率盒描述混合不确定性的基础上，通过区间离散将概率盒转化为类似证据结构的小区间，提出了基于区间蒙特卡罗方法的可靠性统一分析模型。郭书祥等^[186]针对随机变量和模糊变量混合的情况，提出了基于可能性理论和非概率理论的结构混合不确定性分析方法。Gao 等^[187]基于摄动技术，采用一阶泰勒展开法建立了随机和区间混合变量下的可靠性分析方法。肖宁聪^[188]基于通用生成函数研究了同时含有随机变量、区间变量以及概率盒变量的结构可靠性分析模型与求解方法。李贵杰^[189]基于证据理论建立了混合不确定性下的结构可靠性灵敏度分析方法。

1.2.4.3 QMU 方法及应用研究现状

在上述混合不确定性理论和结构非概率可靠性发展过程中,美国三大武器国家实验室针对服役装备试验样本少、知识缺乏情况下的可靠性,提出了一种以数值模拟结果作为主要信息源、同时兼顾历史数据、专家判断等信息的系统可靠性评估方法和度量准则——裕量与不确定性量化(Quantification of Margins and Uncertainty, QMU)方法,用于具有随机和认知不确定性的禁试武库可靠性、安全性的评估认证以及风险决策^[190,191]。QMU方法的主要思想是首先识别出表征系统性能的关键参数,通过物理机理或试验研究建立系统正常运行情况下关键参数的许可范围,即建立性能通道。然后通过数值模拟或试验给出各关键参数值,并量化评估过程中存在的所有不确定性,通过裕量与不确定性的比值作为度量指标进而判断系统是否满足性能要求^[192-194]。圣地亚国家实验室于2002年发表了QMU白皮书^[191],系统地提出了QMU方法在电子学产品中的应用框架。后来,QMU方法已得到美国能源部核安全局的认可,并已用于持久武库型号的性能认证中^[195]。国内外学者围绕随机和认知不确定性分别研究了QMU理论及其应用于系统性能评估和分析时的具体实施流程。国际可靠性著名杂志《Reliability Engineering & System Safety》针对QMU方法的基础理论和应用于2011年出版了专刊,系统介绍QMU方法及其应用研究的最新成果^[195]。Eardley^[190]描述了如何采用QMU处理复杂系统的可靠性以及代替传统可靠性估计的置信度,提出了QMU方法的关键要素包括性能通道、裕量、不确定性。Pepin^[196]提出的QMU度量指标考虑了系统操作区域和性能要求的不确定性。Lucas等^[197]应用QMU方法研究了环状结构的可靠性。针对混合不确定性,Sentz和Ferson^[198]集成概率区间分析和证据理论研究了可应用于QMU的计算工具。Urbina^[199]基于Bayes网络充分考虑复杂分层系统各级组件的随机和认知不确定性,建立了QMU方法的Bayes网络框架。国内的彭忠明等^[192]系统研究了QMU方法概念及其在数值模拟和结构可靠性分析中的应用流程,初步建立了基于QMU方法的系统可靠性评估框架。从上述文献看,不确定性量化与传播是QMU方法应用于工程实际的关键环节,Eldred^[200]研究了基于配点法的随机响应面(NIPC)代理模型应用于证据理论框架下的系统性能QMU分析。Shah等^[201]采用证据理论和随机多项式混沌展开响应面法研究混合不确定性的计算流程,并应用于高速民用运输机的外形设计。

1.2.5 存在的不足和问题

重大机械装备在长期腐蚀服役环境下的点蚀损伤演化和结构可靠性研究是解决重大装备安全可靠服役和寿命预测分析的关键问题。以核反应堆蒸汽发生器管

道为例，高温高压的流动水环境、金属材料的高能辐照脆化效应使得这类结构的腐蚀失效机理异常复杂，可能表现为应力腐蚀、点蚀、腐蚀疲劳等多种损伤模式，同时各种损伤模式之间存在一定的相关、竞争性以及不确定性，至今仍有许多理论和实际问题未能解决。围绕结构腐蚀模拟与可靠性分析，仍有以下问题需要长期开展研究：

(1) 在点蚀行为数值模拟研究方面，由于点蚀过程本身涉及到材料学、物理学、电化学等多个学科，如何建立有效的数值模拟方法描述多种因素的共同作用，并能体现长期腐蚀过程的随机性特征，实现从微观结构变化到宏观性能跨尺度模拟是材料腐蚀模拟研究的重点。

(2) 在结构腐蚀失效机理研究方面，复杂载荷与多种环境因素以及多损伤模式耦合作用下导致的结构失效机理研究较少，针对单一环境和单一失效模式的腐蚀演变机理相对研究较多，使得现有的失效模型和可靠性方法工程适用性相对较差，无法充分描述重大机械装备服役的全寿命周期全剖面的失效机理。

(3) 针对结构腐蚀可靠性分析，如何考虑装备全寿命周期内的多状态和多失效模式特点，耦合随机过程的状态转移理论与故障物理学中的损伤演化失效模型，发展多状态故障物理学是解决复杂装备长期服役性能变化和可靠性评估的有效途径之一。

(4) 传统的基于概率方法研究结构腐蚀失效问题相对较多，在非概率框架下充分考虑随机和认知不确定性的研究相对较少。传统基于大量实验样本的统计方法对于实际工程中样本非常有限的机械装备存在一定的局限性，因此如何考虑混合不确定性以及减少混合不确定性分析中的计算成本是结构可靠性研究值得关注的方向之一。

1.3 论文的主要研究工作

由于腐蚀服役环境下机械装备中的关键材料与结构的可靠服役面临诸多问题，本文以核反应堆等核工程结构中常用到的不锈钢材料点蚀为研究背景，重点考虑力学加载与腐蚀环境的耦合效应，在点蚀试验、点蚀扩展数值模拟、含点蚀损伤的结构可靠性分析以及混合不确定性量化分析方法方面开展研究，主要内容如下：

(1) 典型不锈钢材料点蚀试验研究。设计并开展两种典型材料 HR-2 和 316L 不锈钢的点蚀和力学性能试验研究。针对不同腐蚀环境和力学加载情况，研究不锈钢材料点蚀行为和力学性能变化情况。初步分析了 pH 值、溶液介质浓度等因素

对腐蚀效应的影响。通过开展静态加载试验，研究 316L 和 HR-2 不锈钢在应力和腐蚀环境耦合作用下的点蚀损伤行为，为不锈钢材料的实际工程应用和结构性能参数不确定性源分析提供依据。

(2) 力学加载下点蚀扩展多物理模拟研究。从微观层面开展不锈钢材料点蚀生长过程的多物理场建模与模拟研究。针对应力与腐蚀环境耦合作用下的点蚀生长过程，介绍点蚀扩展的数学物理控制方程，在此基础上基于 Comsol 平台建立应力场与腐蚀电位场以及点蚀坑几何形状生长的多物理模拟模型，开发相应的 MATLAB 与 COMSOL 计算耦合程序。利用该数值模拟程序通过算例分析应力加载大小对点蚀坑形状以及应力集中因子的影响。

(3) 考虑应力效应的结构点蚀可靠性模型与概率分析方法。针对核工程结构中关键部件的长期腐蚀失效问题，开展结构含点蚀损伤的故障物理建模研究。基于相关文献，本文考虑点蚀生长阶段应力加载的影响，建立包括点蚀扩展、点蚀转化为裂纹、裂纹扩展三阶段的点蚀损伤演化失效的失效物理模型。基于该失效物理模型，建立概率框架下基于自适应抽样和 Kriging 代理模型的结构点蚀可靠性分析方法。通过结构点蚀可靠性分析算例研究，从计算效率和精度两个方面与传统的蒙特卡洛方法、一阶可靠性方法进行对比分析，验证该方法求解结构点蚀失效问题的适用性。

(4) 混合不确定性下基于证据理论和代理模型的 QMU 方法研究。针对随机和认知不确定性同时存在的情况，根据性能裕量与不确定性量化的概念，研究基于证据理论和 Kriging 代理模型的性能裕量与不确定性量化分析计算方法。在此基础上分别对结构点蚀转裂纹断裂失效以及强度损减失效开展算例应用研究，探讨基于置信因子度量结构可靠性和结构非概率可靠性之间的差异。

1.4 本文的结构安排

本文主要围绕金属材料的点蚀试验与数值模拟、含点蚀损伤结构的故障物理建模与可靠性分析方法开展研究。论文总体结构如图 1-4 所示，共包含为六章。

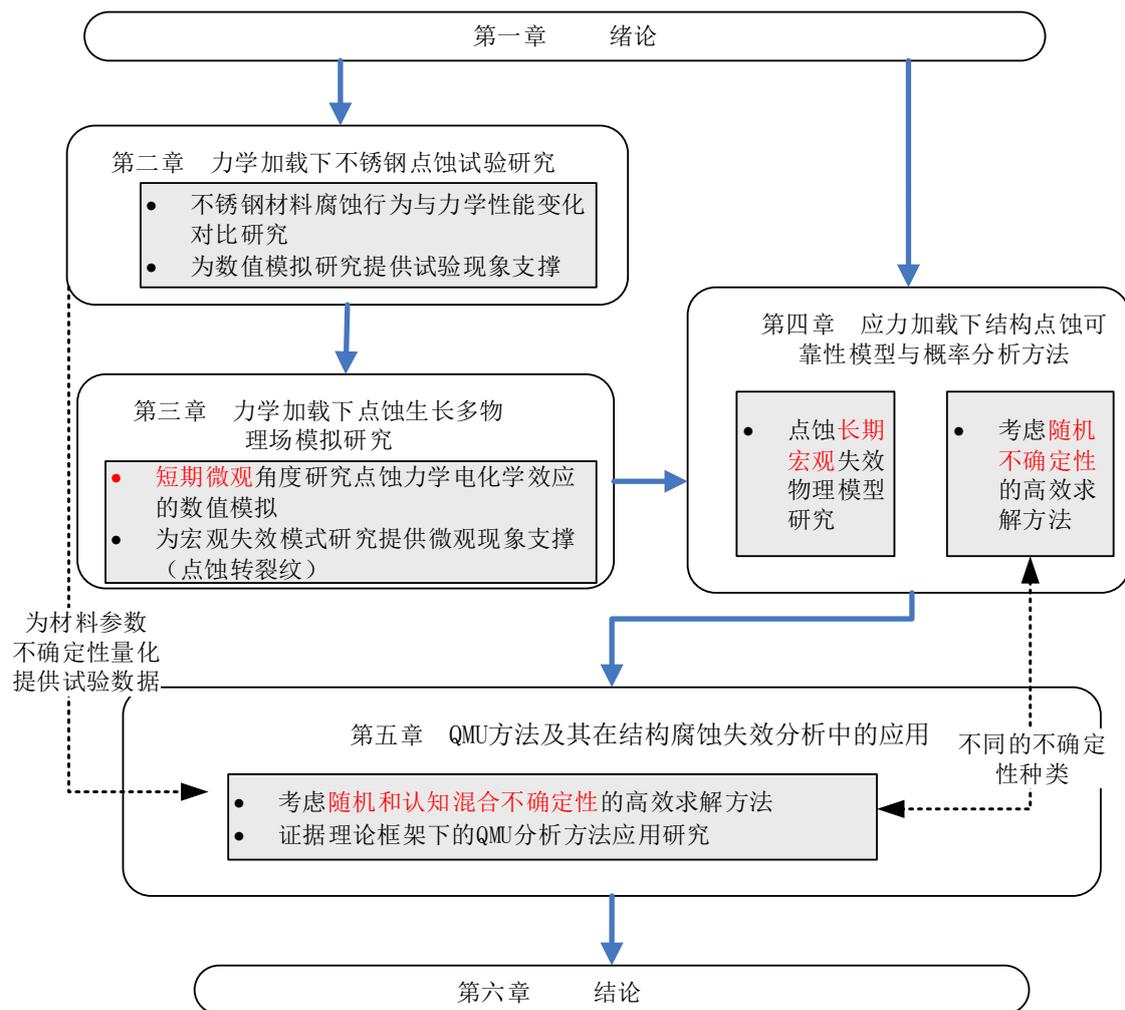


图 1-4 论文总体结构图

第一章为绪论，主要介绍本文研究背景和意义，并对金属腐蚀模型（包括点蚀、应力腐蚀以及腐蚀疲劳）以及结构可靠性等相关领域的现状和本文的研究内容进行概述。

第二章为点蚀试验研究。介绍考虑应力加载的不锈钢腐蚀试验，并对试验数据和应力加载效应和材料性能特征进行对比分析，相关的微观试验现象为数值模拟研究提供支撑，宏观力学性能试验数据为结构腐蚀可靠性分析中参数不确定性源的量化提供试验数据支撑。

第三章研究应力加载下点蚀生长的多物理场建模技术与数值模拟方法，从数值模拟的角度分析点蚀转微裂纹现象的可能性，为宏观点蚀失效模式研究提供一定支撑。

第四章为含点蚀损伤结构可靠性研究，通过考虑应力加载效应，建立点蚀失效物理模型。针对该失效模型，考虑随机不确定性研究高效求解方法，并通过算

例研究验证求解方法的效率和可行性。

第五章为混合不确定性下的 QMU 方法及其在腐蚀可靠性分析中的应用研究。针对第四章中仅考虑随机不确定性的不足，基于证据理论和 Kriging 代理模型，建立混合不确定性下结构可靠性度量的 QMU 框架和置信因子的计算方法。并以结构点蚀转裂纹断裂、腐蚀导致材料极限强度损减两种失效模式开展应用研究，进一步说明混合不确定性下 QMU 度量方法对结构腐蚀可靠性分析的适用性。

第六章对本文的研究工作进行总结，探讨研究中值得进一步提炼的问题，并对今后的研究工作进行展望。

第二章 力学加载下不锈钢点蚀腐蚀试验研究

在核工业、航空、航天、石油及化工等领域中，不锈钢是重要的结构材料之一，得到了广泛的应用。含钼元素的 316L 奥氏体不锈钢具有良好的耐酸性环境和含氯化物介质环境侵蚀的性能，在海洋等腐蚀环境中有很好的应用优势。HR-2 不锈钢具有良好的抗氢脆性能，对于含氢服役环境有很好的抗氢脆潜力，因而在航空和核工业等领域中有重要的应用优势。但是不锈钢的耐腐蚀性能是相对的，尤其是在核反应堆等复杂恶劣环境中经常发生点蚀并演化为裂纹^[202-204]。本章通过静态加载试验方法，研究 316L 和 HR-2 不锈钢在应力和腐蚀环境耦合作用下的点蚀损伤行为，为不锈钢材料的实际工程应用和结构性能分析提供依据。

2.1 试验材料

试验材料为 316L 奥氏体不锈钢和 HR-2 抗氢钢。两种材料的化学组分(质量%)、力学性能及试样加工尺寸如表 2-1、表 2-2 及图 2-1 所示。

表 2-1 316L 和 HR-2 不锈钢的化学成分

牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N	Fe
316L	0~0.03	0~0.75	0~0.2	0~0.045	0~0.03	16~18	10~14	0~9.99	—	余量
HR-2	0~0.045	0~0.3	8~10	0~0.05	0~0.1	19.5~21.5	5.5~8	—	0~0.36	余量

表 2-2 不锈钢的主要力学性能

牌号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
316L	309.8	630.3	58.10
HR-2	530.5	790.4	51.24

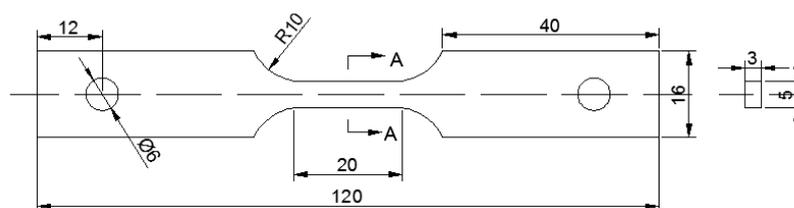


图 2-1 试验件尺寸

2.2 应力环加载浸泡试验方法

采用全浸法进行浸泡腐蚀试验，对比加载条件的影响，不加载的试样采用恒温水浴的方法进行浸泡腐蚀试验，浸泡环境条件（包括放置试样的烧杯内溶液温度、试样封装方法）与应力环加载试样完全一致。

施加应力的试样采用应力环加载。由于该载荷条件下应力腐蚀不敏感，分两次加载，一次为 216.9Mpa，另一次为 427.8 MPa 进行试验。拉伸试样尺寸如图 2-1 所示。应力环试验装置如图 2-2 所示。



图 2-2 应力环加载应力腐蚀试验装置

将加载好的试样放置于试验介质 NaCl 水溶液中，恒温浸泡 30d 后取出进行表面分析，对于不发生断裂的试样进行常规机械拉伸破坏试验，测试腐蚀对其力学性能的影响，同时利用扫描电镜（SEM）观察形貌。

2.3 静态加载腐蚀试验结果与分析

2.3.1 试验条件

为认识 316L 和 HR-2 在 NaCl 环境介质中的腐蚀行为，设计并开展了浸泡腐蚀试验。针对 HR-2 在不同 NaCl 浓度和 pH 值条件下的腐蚀损伤进行了应力腐蚀对比试验。每个试验环境为 3 件平行试样。腐蚀时间周期为 30d。预腐蚀结束后对试样进行拉伸力学性能测试。试验编号及状态如表 2-3 所示。

表 2-3 试样编号及试验状态

编号	材料	加载方式	加载应力	环境
L-1	316L	无	无	5%NaCl, 50℃, pH=7
L-2	316L	应力环	216.90MPa	5%NaCl, 50℃, pH=7
R-1	HR-2	无	无	5%NaCl, 50℃, pH=7
R-2	HR-2	应力环	216.90MPa	5%NaCl, 50℃, pH=7
R-3	HR-2	无	无	(空气)
R-4	HR-2	应力环	427.8MPa	15%NaCl, 50℃, pH=1
R-5	HR-2	应力环	427.8MPa	15%NaCl, 50℃, pH=7
R-6	HR-2	应力环	427.8MPa	3.5%NaCl, 50℃, pH=1
R-7	HR-2	应力环	427.8MPa	3.5%NaCl, 50℃, pH=7

2.3.2 试验前后形貌对比分析

2.3.2.1 宏观形貌对比分析

316L 和 HR-2 不锈钢采用应力环拉伸加载试验方法进行 720h (30d) 的应力腐蚀试验, 试验条件: 5%NaCl, 50℃, pH=7, $\sigma_{max}=216.9\text{MPa}$, 并与单纯预腐蚀试样进行对比, 试验结束时, 两种不锈钢的预腐蚀试样 (L-1、R-1) 与腐蚀和拉应力耦合作用试样 (L-2、R-2) 均未发生开裂或断裂现象, 试样腐蚀前后的宏观形貌特征如图 2-4 和图 2-5 所示。对比 316L 和 HR-2 不锈钢试样应力腐蚀试验前后的宏观形貌可以看出, L-1 与 L-2 试样工作段表面均未出现肉眼所能观察到的点蚀迹象, 工作段依旧光亮; R-1 与 R-2 试样的表面同样没有出现明显的点蚀迹象。为进一步分析外加拉应力对 316L 和 HR-2 不锈钢预腐蚀行为 (应力腐蚀) 的影响, 通过扫描电子显微镜 (SEM) 进行微观形貌分析。

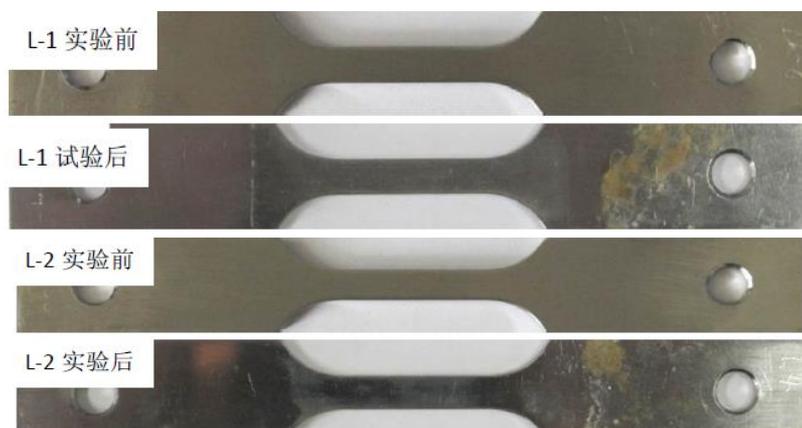


图 2-3 316L 应力环拉伸腐蚀试验前后的宏观形貌

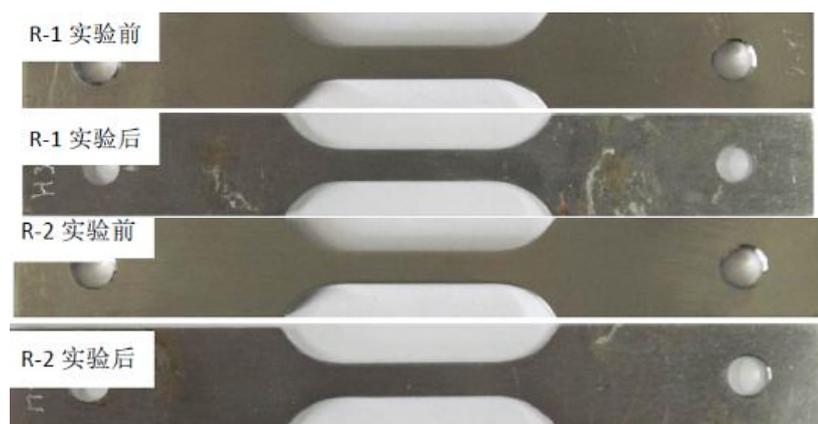


图 2-4 HR-2 应力环拉伸腐蚀试验前后的宏观形貌

2.3.2.2 微观形貌对比分析

图 2-6 和图 2-7 分别为 316L 不锈钢试样 L-1 和 L-2 的表面微观形貌，可以发现，两个试样的表面均出现了轻微的点蚀现象，其中 L-1 试样的蚀坑直径在 $10\sim 15\mu\text{m}$ 之间，L-2 试样点蚀坑直径在 $15\sim 20\mu\text{m}$ 之间，即在拉应力与环境耦合作用下的试样（L-2）的腐蚀程度更为严重。

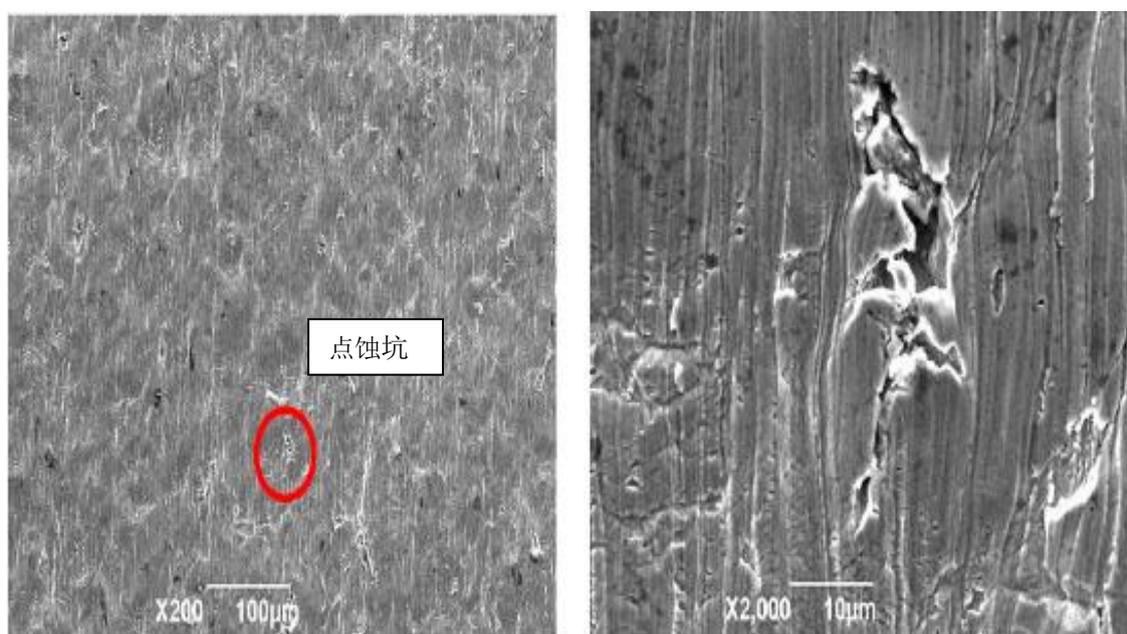


图 2-5 L-1 试样表面微观形貌

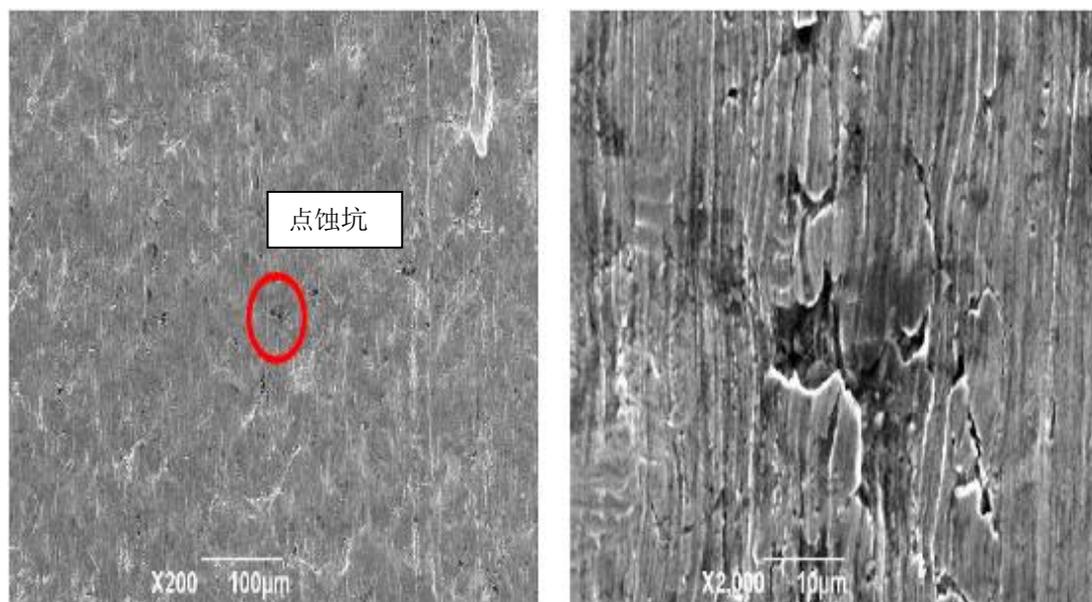


图 2-6 L-2 试样表面微观形貌

图 2-8 和图 2-9 分别为 HR-2 不锈钢试样 R-1 与 R-2 表面的微观形貌，可以发现，两类试样表面均出现了点蚀现象，其中 R-1 试样的蚀坑直径在 $5\mu\text{m}$ 之间，R-2 试样点蚀坑直径在 $10\mu\text{m}$ 之间。同样说明，在应力与环境耦合作用下的试样的腐蚀程度要严重些。

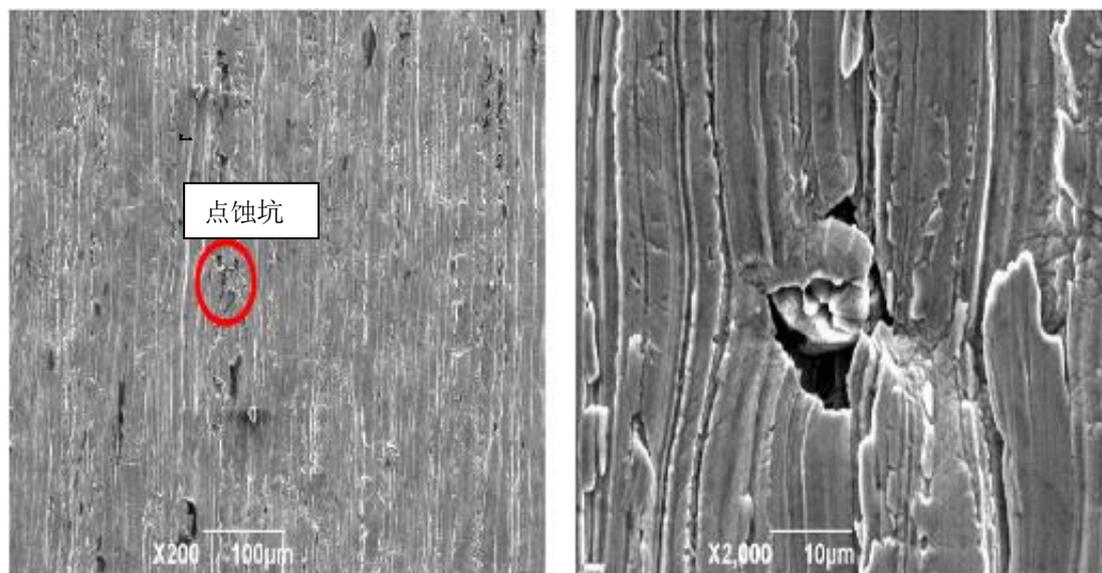


图 2-7 R-1 试样表面微观形貌

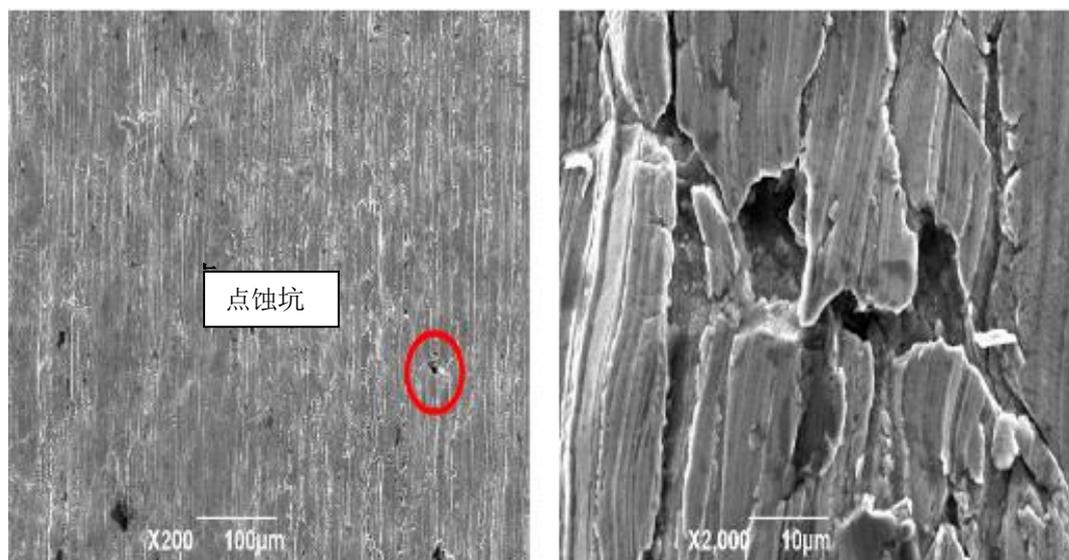


图 2-8 R-2 试样表面微观形貌

宏观形貌分析可以发现，虽然 316L 和 HR-2 不锈钢应力环拉伸加载试样在宏观上并未表现出明显的腐蚀现象，但经过扫描电镜的微观分析可以看出，试验后所有试样的表面均出现了点蚀现象，可以认为点蚀坑仍处于孕育过程而且腐蚀和应力耦合作用的试样表面的点蚀坑直径要略大于单纯预腐蚀试样，由此说明在应力与腐蚀环境因素耦合作用下，316L 和 HR-2 两种不锈钢材料腐蚀程度比单纯受腐蚀环境因素影响的要严重。由此不难推测，随着点蚀的萌生与扩展，试样的腐蚀程度会进一步加深，进而对试样的力学性能产生不利影响。

2.3.3 HR-2 腐蚀后力学性能分析

由于 HR-2 不锈钢材料有很高的抗腐蚀性能，为更好的认识 HR-2 经过腐蚀损伤后的力学性能，提高加载的应力水平为 $95\% \sigma_s$ （屈服强度），采用应力环加载进行应力腐蚀试验。表 2-3 所示的后四种腐蚀介质环境条件（编号为 R4-R7）。每个试验环境下 3 件平行试样。试验周期为 30d。试验结束后对于未发生断裂的试样测试拉伸力学性能。

试验 30d 后的试样在试验期间所有试样均未发生断裂现象。在温度最高、NaCl 溶液浓度最大、pH 值最低（15%NaCl，50℃，pH=1）的试验条件下，试样表面腐蚀最为严重。将试样进行常规拉伸，测试其力学性能，具体拉伸性能测试结果见表 2-4 所示。

表 2-4 HR-2 在不同介质中应力腐蚀后的力学性能

力学性能 试验条件	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断裂延伸率 /%	断面收缩率 /%
①空白试样（空气）	537.0	790.7	51.2	84.4
②3.5%NaCl, pH=7	586.6	751.4	42.9	81.5
③15%NaCl, pH=7	563.2	725.6	47.5	81.1
④3.5%NaCl, pH=1	550.3	717.9	49.2	83.2
⑤15%NaCl, pH=1	541.4	703.4	37.7	83.1

注：数据为平均值

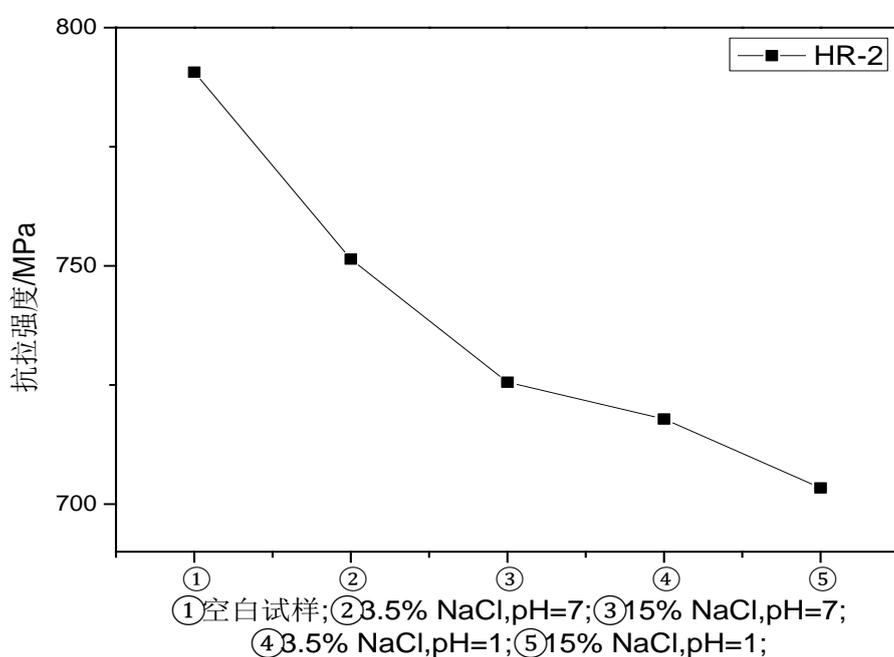


图 2-9 不同环境中 HR-2 不锈钢的抗拉强度变化

将表 2-4 中的各试样抗拉强度随腐蚀环境的变化绘制成图 2-10 所示形式。断裂延伸率也有类似的变化规律，其中腐蚀最为严重的试样（试验条件为 15%NaCl, 50℃, pH=1）强度和延伸率降低最为明显。由此表明该条件下 HR-2 不锈钢试样有一定的应力腐蚀敏感性。

由表 2-4 和图 2-10 所示结果可以得到，在经历 30d 的应力腐蚀试验后，HR-2 不锈钢的力学性能与未经历应力腐蚀试验的空白试样相比，都有小幅度的降低，且 pH 值对材料力学性能的影响程度要大于 NaCl 溶液浓度对力学性能的影响。

2.4 本章小结

本章以 HR-2 不锈钢与 316L 不锈钢为研究对象, 利用静态拉伸加载应力腐蚀试验方法研究了 316L 不锈钢与 HR-2 不锈钢在氯化物腐蚀环境中的应力腐蚀行为。本次试验腐蚀时间为 30d, 通过浸泡腐蚀的试验样品均未出现肉眼所能观察到的点蚀坑, 但是通过扫描电子显微镜进行表面微观形态分析表明, 试验均出现了不同程度的点蚀坑痕迹, 可以认为点蚀坑完成了孕育过程。对比表明, 在应力与环境耦合作用下的试样的腐蚀程度更为严重。

采用静态拉伸加载法对 HR-2 不锈钢进行应力腐蚀试验, 施加的拉伸应力为材料自身屈服强度的 95%, 结果表明 HR-2 不锈钢在不同浓度和酸度的 NaCl 溶液中进行 30d (720h) 试验, 均未发生断裂或开裂现象, 但是试样的力学性能指标呈现出不同程度退化, 随着 NaCl 溶液浓度的增大或 pH 值降低, 力学性能指标降低的程度增大。当 NaCl 溶液 pH=1 时, 水溶液中 NaCl 的浓度为 15% 时, HR-2 不锈钢拉伸强度降低 11%, 延伸率降低 26%, 即 HR-2 不锈钢对应力腐蚀有一定的敏感性。

第三章 力学加载下点蚀生长多物理模拟研究

在静态恒定载荷或周期性循环载荷作用下，点蚀的生长可能会导致应力腐蚀开裂或腐蚀疲劳破坏，从而降低结构的承载能力和使用寿命。因此，研究点蚀增长过程的建模和模拟方法对于工程材料与结构的完整性、耐久性以及可靠性等都具有重要意义。由于处于实际服役环境中工程结构常需要承载一定的载荷，面临着腐蚀损伤与应力载荷的耦合作用，因此考虑应力腐蚀耦合效应的点蚀扩展数值建模更符合工程实际。本章基于多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics 进行应力加载下的点蚀生长模拟研究，主要目标是针对单一点蚀坑的生长建立考虑应力加载耦合效应的多物理场模拟方法。

3.1 引言

通常点蚀过程包括孕育、发展和消亡三个阶段。由于不锈钢表面在非金属夹杂、孔穴、裂隙等缺陷部位容易发生侵蚀性阴离子吸附，使钝化膜发生破坏，因此即使不锈钢也不能完全避免腐蚀的发生^[203]。图 3-1 所示为蚀孔生长的自催化过程示意图。当金属表面钝化膜遭到破坏时，暴露出的金属基体处于活化状态，构成腐蚀微电池。蚀孔外发生还原反应造成 pH 升高；蚀孔内金属不断溶解成离子，造成阴性 Cl 向蚀孔内移动并形成高浓度氯浓缩物，导致孔内的 pH 降低并加速金属的溶解，形成点蚀^[204,205]。

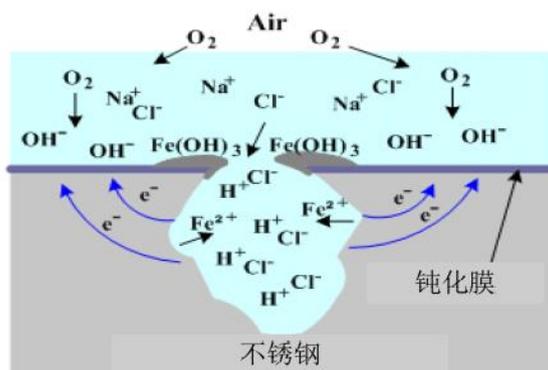


图 3-1 不锈钢点蚀过程示意图

点蚀生长过程是一个发生在金属材料与环境接触界面涉及扩散、电迁移、对流、化学反应、材料溶解等复杂的物理化学反应耦合现象^[46,47]。点蚀生成与生长过程的模型研究一直是腐蚀科学研究的重要方面。相关学者从点蚀的物理化学过

程本身出发, 针对单个点蚀基于微观尺度提出了生长过程的确定性模型^[44,207,208]。这些模型通常基于金属材料的溶解浓度、扩散定律和电化学动力学规律等。根据确定性数学模型, 用于模拟点蚀生长过程的数值计算模型与方法也逐步得到了发展。Malki 和 Baroux^[40]使用蒙特卡罗(MC)和元胞自动机(CA)技术来计算模拟点蚀坑的增长, 并研究了溶解概率参数对腐蚀坑生长及其形貌的影响。Pidaparti 等^[41,42]基于 CA 技术的点蚀增长模拟方法主要将点蚀增长过程视为离散的动态过程, 对铝合金材料表面多坑腐蚀的生长进行了模拟并分析电化学参数对其生长过程的影响, 并在飞机用铝合金材料的多点蚀生成和增长过程模拟研究中得到了应用。Caprio 等^[207]利用 CA 技术对金属材料表面的腐蚀损伤引起的粗糙度变化进行了模拟。Taleb 和 Vautrin 等^[208]对金属与电解液界面的坑蚀生长过程进行了模拟, 以此为基础, 通过实验数据对比分析了法拉第定律与实际电化学腐蚀之间的差异。国内刘静等^[209]基于元胞自动机模型, 构建了二维情况下模拟材料多点蚀过程的元胞自动机模型框架。王慧等^[210]针对点蚀尺寸与形貌的演化情况, 采用三维元胞自动机技术模拟研究了铝合金在腐蚀环境中的生长过程, 引入了质量转移、金属溶解与钝化的方程。通过模拟得到了在不同环境下蚀坑的腐蚀损伤形貌。韩恩厚等^[211]基于元胞自动机研究了机械载荷作用下的点蚀生长模拟方法。目前通过有限元模拟腐蚀演化的研究相对较少, Kota 和 Qidwai^[46]研究了非耦合的 316 不锈钢应力腐蚀分析, 描述了腐蚀坑周围的应力集中现象, 但是在点蚀坑增长模拟阶段, 没有耦合应力对腐蚀电位的影响。工程结构的实际服役环境常需要承载一定的载荷, 面临着腐蚀损伤与应力载荷的耦合作用。因此, 在研究点蚀生长建模过程中不能忽略力学载荷的影响。目前基于有限元方法的点蚀生长建模研究工作尚未考虑力学效应。

本章在 Kota 和 Qidwai 等研究的基础上, 考虑应力腐蚀耦合效应, 提出了基于多物理场建模的点蚀生长数值模拟方法, 能更好的反映材料或结构面临的实际腐蚀状况。首先回顾点蚀模拟的基本方法, 然后基于点蚀生长的数学模型及其控制方程, 建立考虑应力加载效应的点蚀生长多物理场数值模拟方法, 最后进行模拟算例分析。

3.2 点蚀生长数值模拟计算方法

随着计算机的发展, 数值模拟方法是解决工程问题的一种极其重要的方法。下面简要介绍基于概率理论的 Monte Carlo 点蚀模拟方法和点蚀生长的元胞自动机技术。

3.2.1 点蚀模拟的 MC 方法

点蚀模拟的 MC 方法是利用 Monte Carlo 原理来模拟微观点蚀的产生、死亡的随机过程以及宏观点蚀的形成和发展。点蚀模拟计算的主要规则如下：

计算模型建立若干单元格，代表与腐蚀环境相接触的金属表面，在每个 MC 时间步内，对每个不含点蚀的单元格产生一个 0-1 之间的随机数。如果这个随机数不超过所设定的金属溶解概率 P_i ，则在这个单元格中形成一个微观点蚀。同理，当微观点蚀寿命达到一定值时形成一个宏观点蚀，对每一个包含宏观点蚀的单元格将在产生一个随机数，如果小于所指定的生长概率，宏观点蚀才能继续生长。图 3-2 为采用 MC 方法模拟点蚀生长的示意图^[40]。

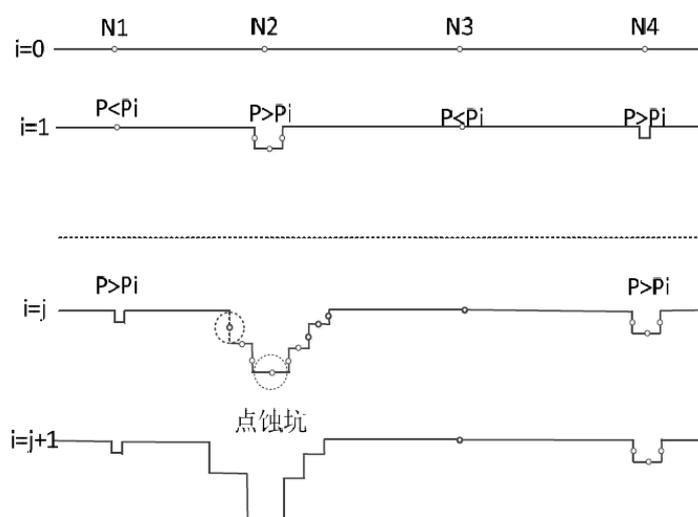


图 3-2 MC 方法模拟点蚀生长示意图

3.2.2 基于 CA 技术的模拟方法

元胞自动机是一个在空间和时间上都独立的动态系统。离散时间 $n+1$ 时单元的状态取决于计算模型中与它相邻单元在离散时间 n 时刻的状态，具体的状态转移映射关系根据实验获得相关参数。

设 $s(t, x)$ 代表了元胞 x 在 t 时刻的腐蚀状态离散函数。当相邻元胞的初始状态超过设定的临界值时便在元胞中产生点蚀，完成点蚀的萌生。而元胞中的点蚀一旦生成，则根据局部的 CA 法则计算每个元胞下一时间步时的状态。上述过程可以通过二维矩形点阵模拟金属-钝化膜-溶液组成的腐蚀系统。每一个单元格的特征包含单元格状态信息和方向两个参数（如图 3-3 所示）^[212]。图中 A 指溶液中具有腐蚀性的元胞单元，B 为溶液中不具有腐蚀性的元胞单元，M 指金属基底元胞单元，F 为钝化膜元胞单元，各元胞之间通过设定的转化规则进行转换。利用元胞

自动机技术和蒙特卡洛方法模拟点蚀能够对点蚀坑的发展变化进行动态模拟，但是不能描述反映点蚀过程的电化物理机理。

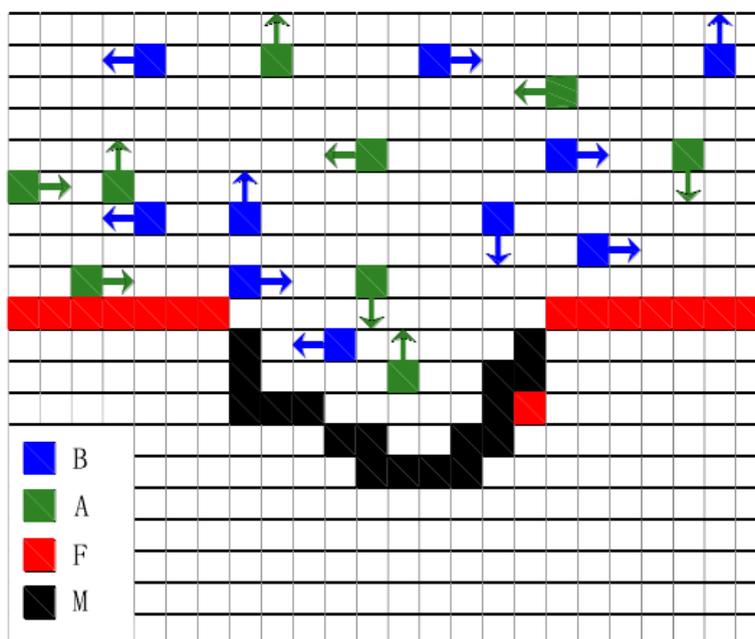


图 3-3 CA 模拟点蚀过程示意图

3.3 基于 COMSOL 的点蚀生长多物理场建模研究

3.3.1 COMSOL Multiphysics 分析平台

专业数值仿真平台 COMSOL Multiphysics 是由瑞典 COMSOL 公司开发的一款基于数学偏微分方程和有限元分析的高级数值仿真软件，广泛应用于各个学科领域的科学研究以及工程计算。COMSOL Multiphysics 具有开放、易用等优点，特别是能解决多物理场耦合问题，实现多物理场问题的数值模拟与仿真，适用于模拟科学和工程领域的多个学科^[213]。

COMSOL Multiphysics 发展源于 MATLAB 的数学工具箱，最初命名为 FEMLAB（FEM 代表有限元，LAB 为实验室）。2003 年命名为 COMSOL Multiphysics，目前已到 5.0 版本。COMSOL Multiphysics 软件从描述物理问题的数学方程出发，通过对描述物理过程的偏微分方程进行建模和求解。软件平台内部提供了丰富的内嵌物理模型，实际使用时可根据需解决的问题选择一定数量的模型并进行二次开发，能够实现多物理场、直接、双向实时耦合求解。COMSOL Multiphysics 内部包含多个学科领域的专业物理模块，如图 3-4 所示，包括电气、声学、生物科学、化学反应、流体动力学、结构力学、腐蚀等多个学科的模式库。

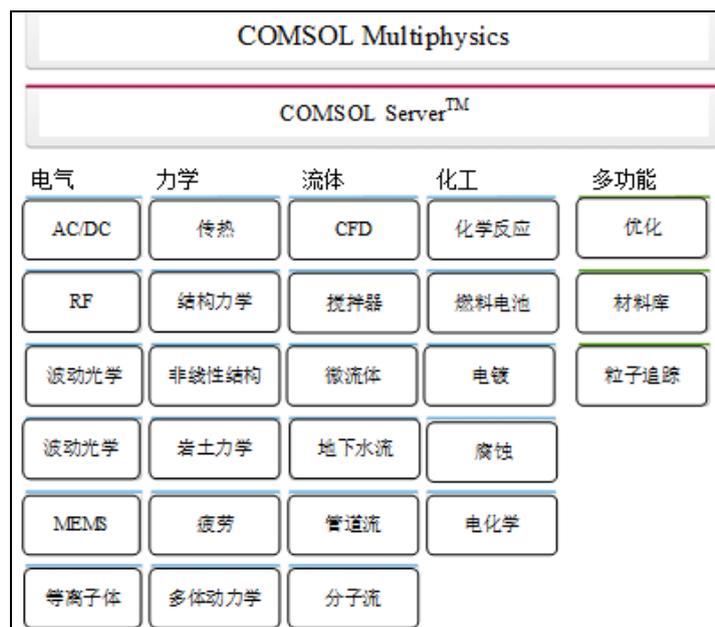


图 3-4 COMSOL 物理模块框图

从图 3-4 可以看出，COMSOL 不仅包括不同学科的内置物理模块，还包括其它工具的接口和 COMSOL Script 编程语言模块，为用户的二次开发提供了强大的支持。由于 COMSOL Multiphysics 起源于 MATLAB，因此在 COMSOL 的二次开发功能中可以通过 LiveLink™ for MATLAB 实现 COMSOL 与 MATLAB 的集成，COMSOL 可以视为 MATLAB 的工具箱，用户可以在 COMSOL 中建立物理求解模型后转化为 MATLAB 的文件，由 MATLAB 进行调用，同时 COMSOL 可以利用 MATLAB 及其工具箱进行预处理、模型设定和后处理等，使得 COMSOL 具有强大的多物理场仿真能力的同时拥有 MATLAB 编程功能，能够统计分析仿真结果，建立结合 Monte Carlo 方法与多物理场模型的集成算法，基于概率数据或图像资料建立几何模型，在 COMSOL Desktop 中调用 MATLAB 函数等功能，为用户解决实际工程问题的计算和应用带来方便。本文在研究点蚀生长的模拟计算中也利用了 COMSOL 与 MATLAB 的接口功能和二次开发 Script 工具，实现点蚀生长的多物理场耦合求解。

3.3.2 点蚀生长数学模型与控制方程

从 3.1 节的描述可知，点蚀一般可以分为成核和生长过程两个阶段，本文主要研究稳定点蚀坑的生长过程，不考虑点蚀的形成阶段。由于点蚀的生长是一个复杂的多物理场耦合作用过程，涉及到物质运输、电化学以及多尺度建模等，因此点蚀生长全过程仿真建模目前难以实现。一般的点蚀生长过程中金属离子的通量

可由 Nernst-Planck 方程描述^[47]:

$$J_i = -D_i \nabla c_i - z_i F u_i c_i \nabla \varphi + c_i \mathbf{v} \quad (3-1)$$

式中, J_i 为物质离子通量; D_i 为离子在电解溶液中的扩散系数; c_i 为物质在溶液中的浓度; F 为法拉第常数; u_i 为离子迁移速度; z_i 为离子带电荷数; φ 为溶液中的电势场分布; \mathbf{v} 为材料溶解速度。

式 (3-1) 描述了腐蚀界面总的离子通量由公式右边三项组成, 第一项代表物质扩散过程, 第二项代表电子迁移过程, 第三项代表物质对流过程。根据物质守恒原理, 每一种离子浓度及其通量满足下式关系:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\nabla J_i + R_i \quad (3-2)$$

式中, R_i 为通量中离子的源项。根据电化学腐蚀的电势差控制原理 (IR-controlled), 采用以下简化假设:

- (1) 金属材料腐蚀产生的离子能快速的溶进溶液中而忽略离子浓度梯度的影响;
- (2) 溶液是不可压缩的;
- (3) 溶液中保持电中性;
- (4) 腐蚀产物能全部溶于溶液中。

则溶液中的电势 φ 可通过 Laplace 方程描述:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (3-3)$$

Laplace 方程中没有直接描述腐蚀生长过程与时间有关的变化量。由于金属材料点蚀坑的腐蚀界面 (固态金属与液态溶液接触界面) 发生离子溶解, 溶解速度与腐蚀界面的电势密切相关。腐蚀界面上电势的通量可用阳极 (金属溶解) 电流密度 ($i(\varphi)$) 表示如下:

$$\nabla \varphi \cdot \mathbf{n} = \frac{i(\varphi)}{\sigma_c} \quad (3-4)$$

式中, \mathbf{n} 为腐蚀界面电势场的单位法向量; σ_c 为溶液介电常数。点蚀坑界面的法向腐蚀速度 (溶解速度) 可由法拉第定律表示为:

$$V_n = \frac{i(\varphi)}{z F c_{solid}} \quad (3-5)$$

式中, V_n 为点蚀腐蚀界面的法向生长速度; c_{solid} 为金属材料的原子质量。电流密

度可由电化学中的 Butler-Volmer 公式计算如下：

$$i(\varphi) = zFA_s \exp\left(\frac{zF(V_{corr} + \alpha(\eta_a))}{RT}\right) \quad (3-6)$$

式中， α 为传递系数； A_s 是材料溶解特性常数； T 表示温度； R 表示气体普适常数； V_{corr} 表示金属的腐蚀电位； η_a 为金属的极化电位。

$$\eta_a = V_{app} - V_{corr} - \varphi \quad (3-7)$$

式中， V_{app} 是腐蚀的施加电位。

上述公式没有考虑材料腐蚀过程中的应力加载效应。在实际工程应用中，金属材料在遭受到腐蚀损伤时常处于应力加载状态。基于热力学第一定律，在应力作用下，金属材料的活化能将发生变化，从而影响金属的腐蚀电位改变如公式(3-8)所示^[48,214]

$$\Delta\varphi_{eq} = -\left(\frac{V_m \Delta P}{zF}\right) \quad (3-8)$$

式中， V_m 为金属材料的摩尔体积； ΔP 为施加应力的体积分量。

考虑力学效应后，相应的阳极腐蚀电流密度可由式(3-9)获得：

$$i(\varphi) = zFA_s \exp\left(\frac{zF(V_{corr} + \alpha(\eta_a))}{RT}\right) \exp\left(\frac{V_m \Delta P}{RT}\right) \quad (3-9)$$

在模拟点蚀的生长过程中，点蚀坑的生长速率则可通过式(3-9)和(3-5)求得。从该公式可以看出，力学载荷以及溶液中的电位均对腐蚀速率有密切影响，是一个典型的多物理场耦合问题，因此采用 COMSOL Multiphysics 可实现对上述问题的多物理场建模仿真。

3.3.3 几何建模与边界条件

基于点蚀生长过程数学模型和控制方程，应力加载下点蚀生长过程中多物理场量的耦合关系如图 3-5 所示。腐蚀速率受到溶液中电势场和金属中应力分布场的共同影响，同时腐蚀速率直接决定了点蚀坑几何形状的变化，点蚀坑几何形状的改变将又反馈影响点蚀坑中溶液电势场以及金属材料应力场的分布情况。

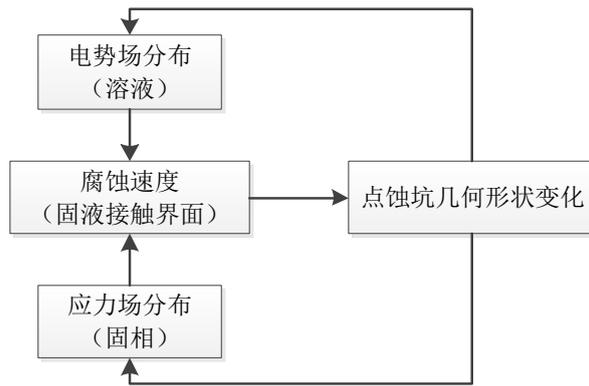


图 3-5 点蚀增长模拟参量之间的耦合关系

本文采用 COMSOL Multiphysics 求解上述耦合物理问题。模型建立过程如下：

(1) 根据物理问题建立几何模型

点蚀生长的物理模型的计算分析包括电解质域（溶液）和固体域（金属材料）两部分，因此首先建立 2 维几何模型如图 3-6 所示，图中半圆形状的初始点蚀坑位于固液连接界面的中部。其中 $W=500\mu\text{m}$ ，表示几何模型的宽度； $H=500\mu\text{m}$ ，为几何模型中液相和固相部分高度尺寸； $r=5\mu\text{m}$ ，表示初始点蚀坑的半径。

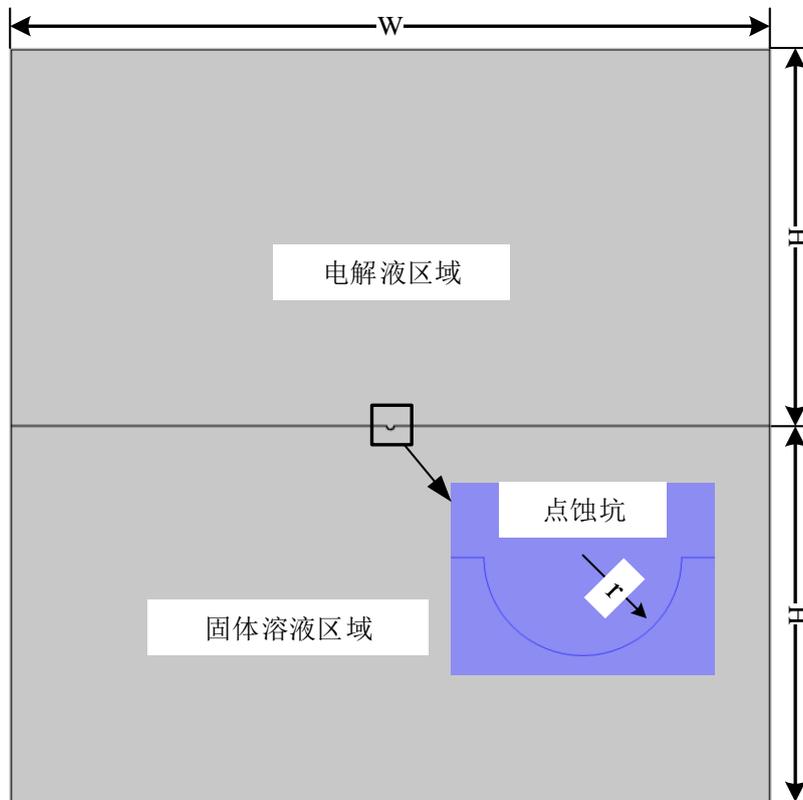


图 3-6 点蚀坑增长几何模型

(2) 选择物理模块及边界方程

点蚀增长物理建模主要包括三个物理模型，拉普拉斯模块（Laplace equation Module），任意拉格朗日-欧拉移动（Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE）网格模块和静力分析模型。拉普拉斯方程模块用于溶液域求解电势，相应的边界条件如图 3-7 所示。溶液部分远场的电势为 0，COMSOL 中对应的边界条件选项为 Boundaries——Dirichlet Boundary Condition。左右两边以及固液界面无点蚀坑的边界区域通量为 0，COMSOL 中对应的边界条件选项为 Boundaries——Zero Flux。点蚀坑底部的边界区域由式 (3-5) 描述其通量的变化，COMSOL 中对应的边界条件选项为 Boundaries——Flux/Source。

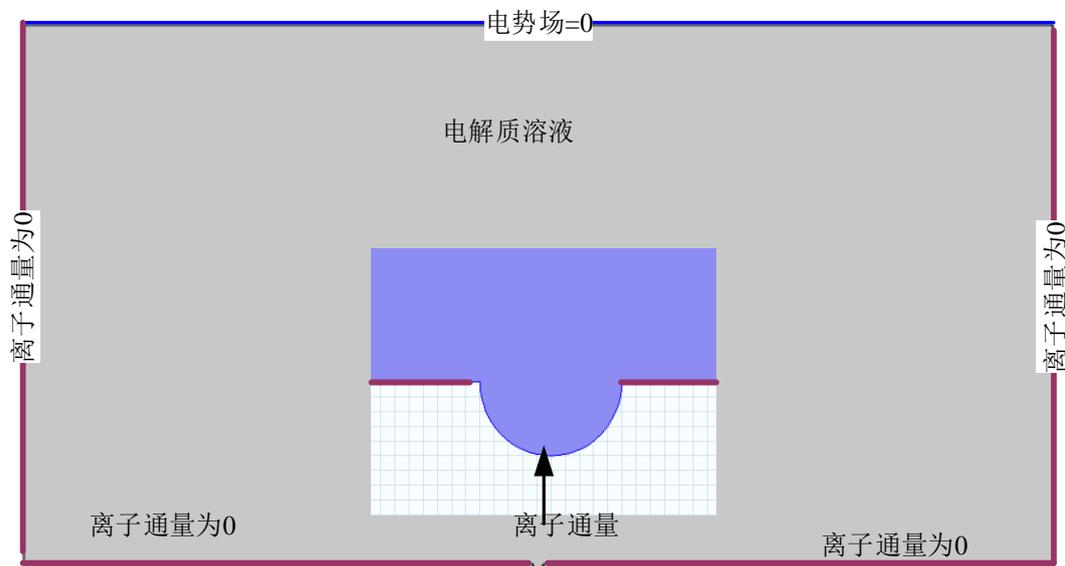


图 3-7 腐蚀溶液部分边界条件

固体金属材料部分的应力分析采用结构力学模块库中的 2 维静力分析模型用于计算金属材料点蚀坑周围的应力分布。固定边界条件应用于金属材料固体域的左侧，单轴加载应用于固体域的右侧，如图 3-8 所示。



图 3-8 固体金属部分边界条件与载荷

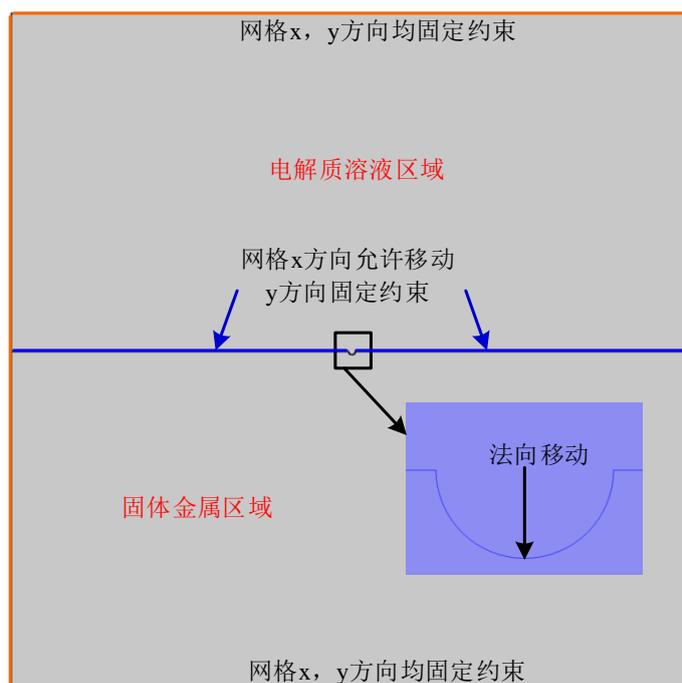


图 3-9 ALE 移动网格边界条件

点蚀生长过程中，点蚀坑的界面随着腐蚀时间的增加会不断向金属固相中移动，即求解域的几何界面随着时间移动，因此需采用变形网格技术对点蚀坑几何尺寸的变化进行处理。COMSOL 中提供变形几何（DG）和移动网格（ALE）两种

方法。变形几何网格主要用于计算一个物体在不同形状下的行为，材料不随形状一起改变，两个几何之间无任何关联，形状的改变可看做材料的添加或移除，在拓扑优化设计中应用较多。拉格朗日网格采用的是拉格朗日坐标系，反映了物体质点与时间的位置关系，物质材料与网格绑定，当材料流动时网格也会随之变形。欧拉方法网格是固定的，在计算物体的变形过程中网格保持不变。ALE 网格自适应方法结合了上述两种方法的特征，网格可以在空间中保持固定，也可以与物质点在任意方向上一起运动。

根据本文点蚀生长过程的数学控制模型，描述点蚀坑腐蚀几何边界的变化采用 ALE 模块，如图 3-9 所示。其中固相和液相的外围边界采用位移固定约束，在 COMSOL 中对应边界条件施加选项为 Prescribed Mesh Displacement——x 与 y 方向的位移约束均为 0。固液界面中非点蚀坑区域，允许 x 方向网格的自由位移，y 方向网格的位移约束为 0。点蚀坑界面部分施加法向位移约束，网格可以沿法向自由移动，其中移动速度由式 (3-5) 进行计算求得，在 COMSOL 中对应的施加选项为 Boundaries——Prescribed Normal Mesh Velocity。

3.3.4 基于 MATLAB 的计算求解方法

因为点蚀坑周围的应力分布会随着点蚀坑几何界面的变化而发生变化，即应力分布是随时间变化的，因此理论上应直接求解全过程耦合的瞬态应力分布用于模拟点蚀生长，但是由于直接求解计算收敛困难，因此通过时间离散假设时间 t 到 $t+dt$ 之间的应力场分布近似不变，即用 t 时刻的稳态应力场分布近似为 dt 时间间隔内的稳态应力场分布。相应的 COMSOL 内求解应力场分布的稳态计算步设置如图 3-10 所示，该计算步中只求解 Plate 力学模块，不求解 Laplace Equation 和 Moving Mesh 两个模块。获得应力场分布之后，将金属的应力场分布作为输入变量带入瞬态计算步求解 Laplace Equation 和 Moving Mesh，获得电势场分布，相应的 COMSOL 内计算步设置如图 3-11 所示。其中计算腐蚀总时间为 180s，时间离散步为 1s。此步骤中不求解力学 Plate 模块。

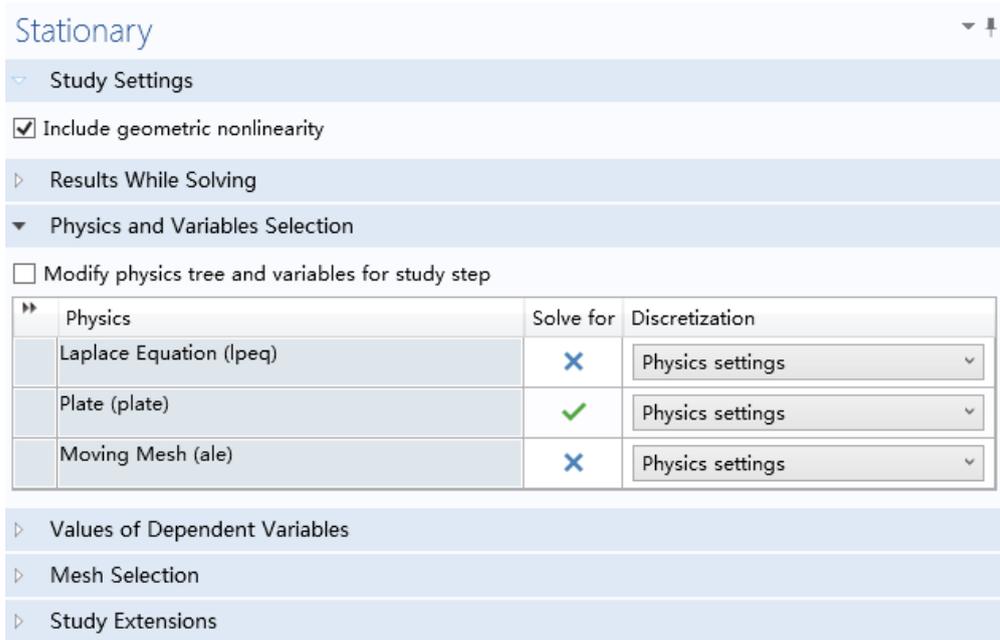


图 3-10 求解应力场分布设置

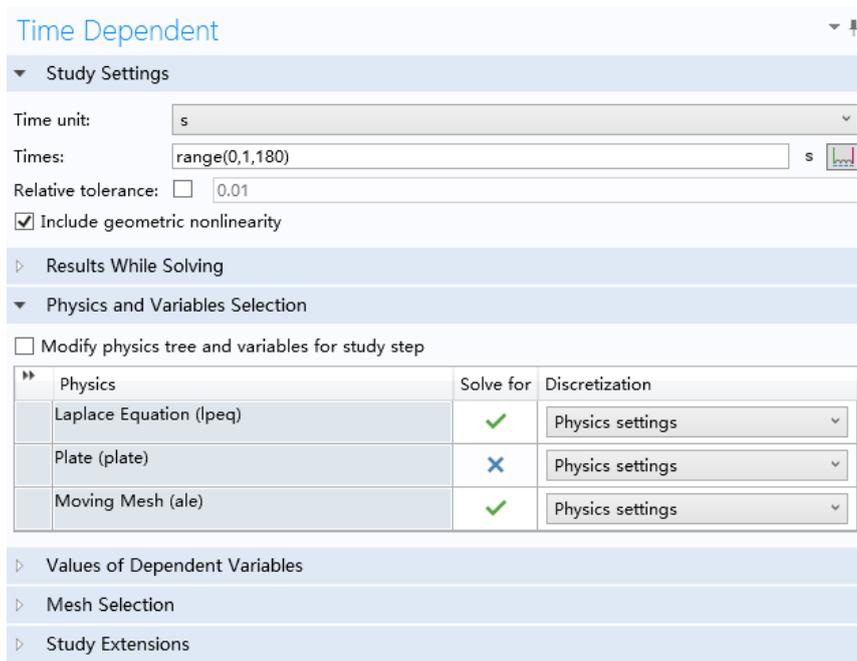


图 3-11 瞬态求解电势场和几何变化设置

相邻时间间隔 t 时刻和 $t+dt$ 时刻的点蚀坑几何形状变化更新则通过 MATLAB 与 COMSOL 的接口求解，整个二次开发编程求解的计算流程如图 3-12 所示。

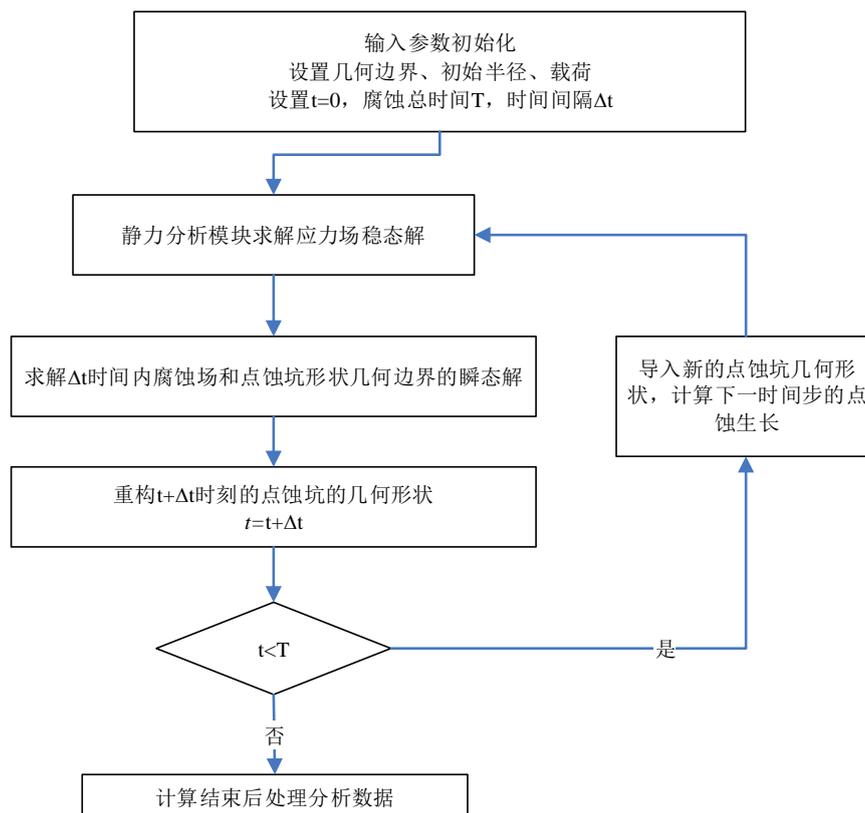


图 3-12 点蚀坑生长模拟计算流程

整个二次开发编程求解的 MATLAB 代码如下：

```

%%%%%%%%-时间离散后几何变化自动更新的 Matlab 代码-%%%%%%%%
import com.comsol.model.*; %导入模型接口函数
import com.comsol.model.util.* %导入模型接口函数
model = mphload('D:\Pitting Growth.mph'); %导入点蚀物理模型
t_start=1; t_end=180; %设置初始和结束时间
for i=t_start:t_end
    model.geom('geom1').feature.remove('imp1');
    model.geom('geom1').feature.create('imp1', 'Import'); %设置几何模型为导入
    model.geom('geom1').feature('imp1').set('filename', 'D:\ale_geo.mphbin');
    % 导入上一时间步结束时的几何模型
    model.geom('geom1').feature('imp1').importData;
    model.geom('geom1').run;
    model.physics('plate').feature('el1').set('FeperArea', {'100[MPa]' '0' '0'}); %边界载荷
    model.mesh('mesh1').run('ftri1');
end
    
```

```

model.mesh('mesh1').run;           %网格划分
model.sol().run;                   %模型求解技术
model.result.dataset('dset1').createDeformedConfig('deform1', 'mesh2');
                                     %提取结束时的几何模型
model.geom('deform1').export('ale_geo.mphbin'); %导出新的模型并存储到文件中
model.geom.remove('deform1');
end
mphplot(model,'pg1','rangenum',1); %显示最终计算结果
-----

```

3.4 算例分析与讨论

3.4.1 网格划分与材料参数

基于上述多物理场模拟方法，以 316 不锈钢材料作为算例研究对象，316 不锈钢点蚀模型的几何尺寸和材料参数见表 3-1 所示^[47]。计算过程中采用三角单元进行网格划分，整个数值模拟模型由 4062 个内部单位和 250 个边界单元组成，初始网格划分如图 3-13 所示。

表 3-1 316 不锈钢点蚀生长模拟参数

变量	变量值（单位）	物理含义
V_{corr}	-0.24 (V)	材料的腐蚀电位
V_{app}	-0.14 (V)	施加的应用电位
z	2.19	316 不锈钢腐蚀的平均电荷数
A_s	4 (mol/cm ² s)	材料溶解系数
α	0.65	电势转化系数
σ_c	5 (S/m)	介电系数
R	8.315 J/(mol K)	气体普适量
F	96485 (C/mol)	法拉第常数
T	298.15 (K)	温度
r	5 (μm)	点蚀坑初始半径
W	1000 (μm)	金属和腐蚀溶液的宽度
H	500 (μm)	固相和液相的模型高度
P	0/100/200 (Mpa)	E 固相中的边界载荷
E	210 (Gpa)	杨氏模量
V_m	7×10 ⁻⁶ (m ³ /mol)	摩尔体积

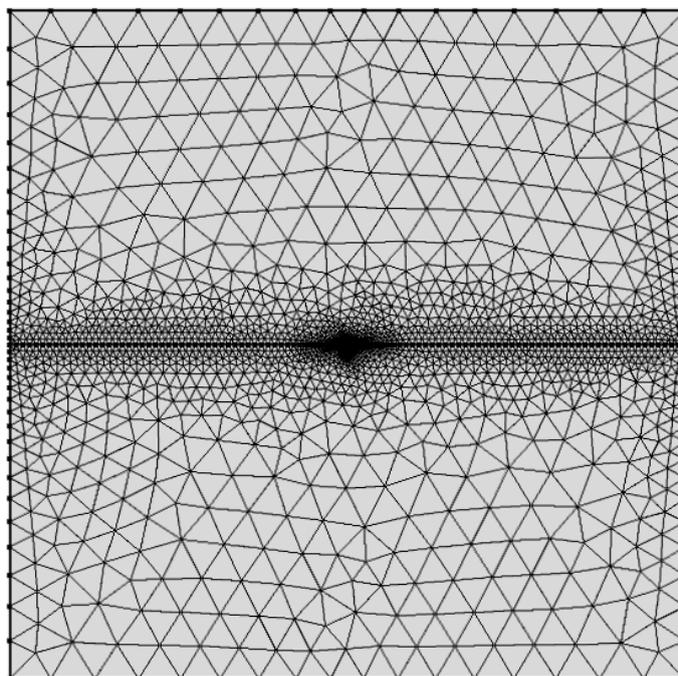


图 3-13 模型初始网格

3.4.2 模拟结果与分析

3.4.2.1 无应力加载模拟结果

图 3-14 至图 3-17 所示分别为在不同的腐蚀时刻 ($t=30\text{s}$, 60s , 120s , 180s) 无应力载荷 ($P=0\text{MPa}$) 下, 316 不锈钢点蚀坑的生长情况局部放大图。溶液部分的彩色云图表示电势场分布 (每幅图的上半区域, 对应右边的云图), 单位为伏特。从图中可以看出点蚀坑底部的电势比点蚀坑外部的电势有明显增加。固体材料部分的彩图表示 Von Mises Stress (MPa) 应力场分布 (每幅图的下半区域)。由于没有应力加载, 固体材料中的应力为 0MPa 。从图 3-17 可以看出, 在 $t=180\text{s}$ 时的点蚀坑深度由开始时的 $5\mu\text{m}$ 生长到 $12\mu\text{m}$, 电势场分布的最大值由 0.0128V 上升到 0.0175V 。图 3-18 为文献[47]直接采用瞬态分析获得 $t=180\text{s}$ 时的计算结果, 电势场分布最大值为 0.0176V 。文献[47]中没有给出图 3-18 中点蚀坑深度的精确值, 但从图中可以估算点蚀坑深度也约为 $12\mu\text{m}$ 。对比表明, 尽管两者的计算模型不同, 但计算结果比较一致, 说明在应力输入为 0MPa 时, 考虑应力场的计算模型结果与不考虑应力场的计算模型结果相同, 验证了本文采用时间离散策略计算应力场与电势场的耦合分布的正确性。与文献中的方法相比, 本文建立的有限元模拟方法不仅能够计算电势场的分布, 而且能够反映应力场随时间的变化。

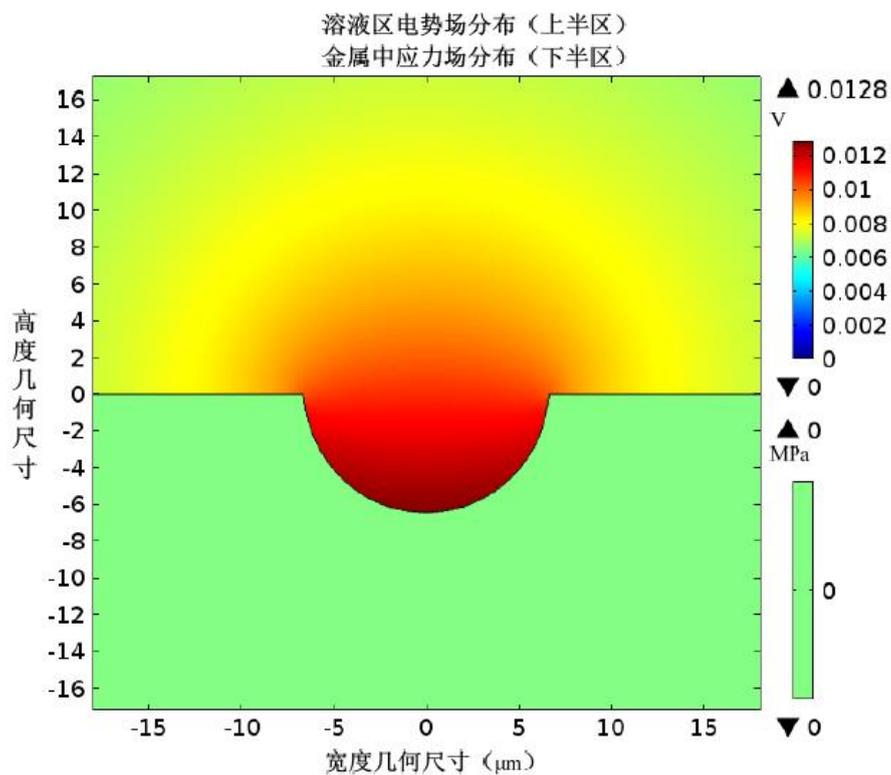


图 3-14 无应力 $t=30\text{s}$ 时点蚀坑周围电势场分布

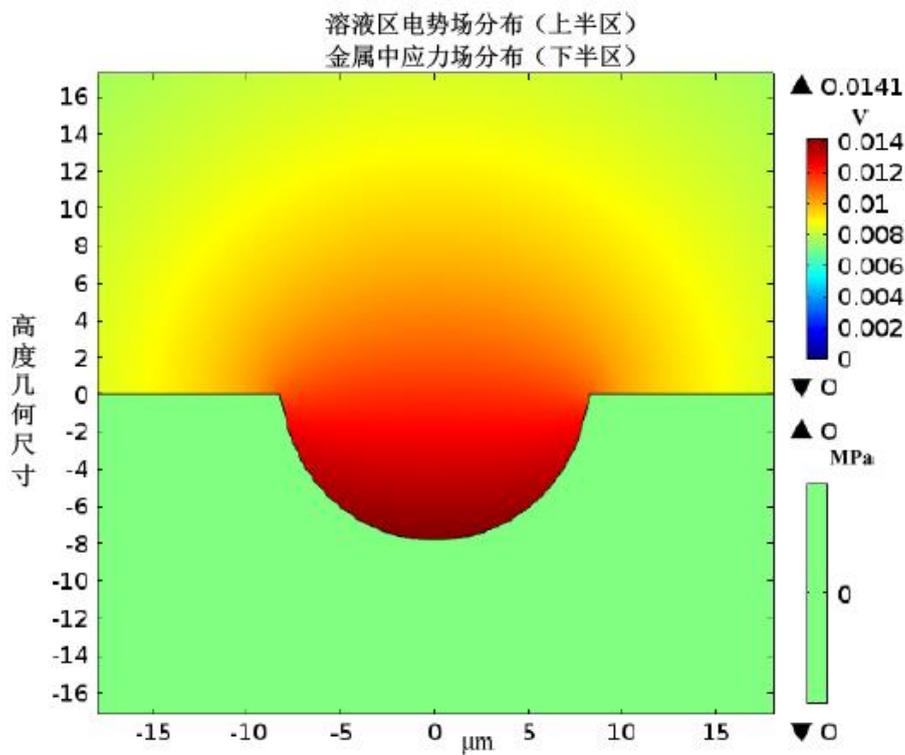


图 3-15 无应力 $t=60\text{s}$ 时点蚀坑周围电势场分布

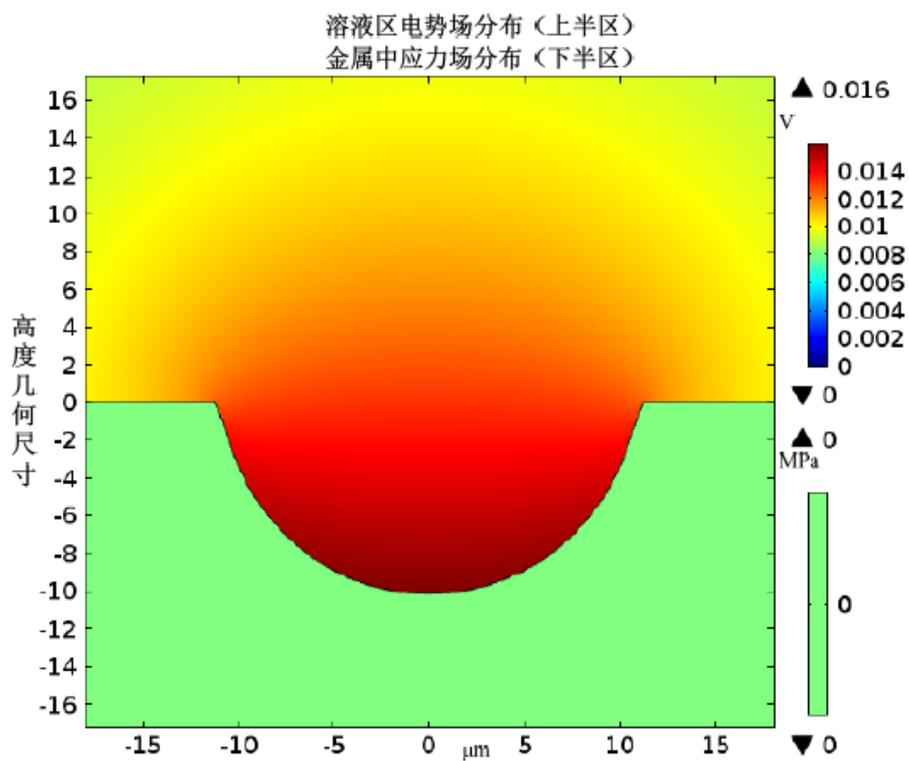


图 3-16 无应力 $t=120\text{s}$ 时点蚀坑周围电势场分布

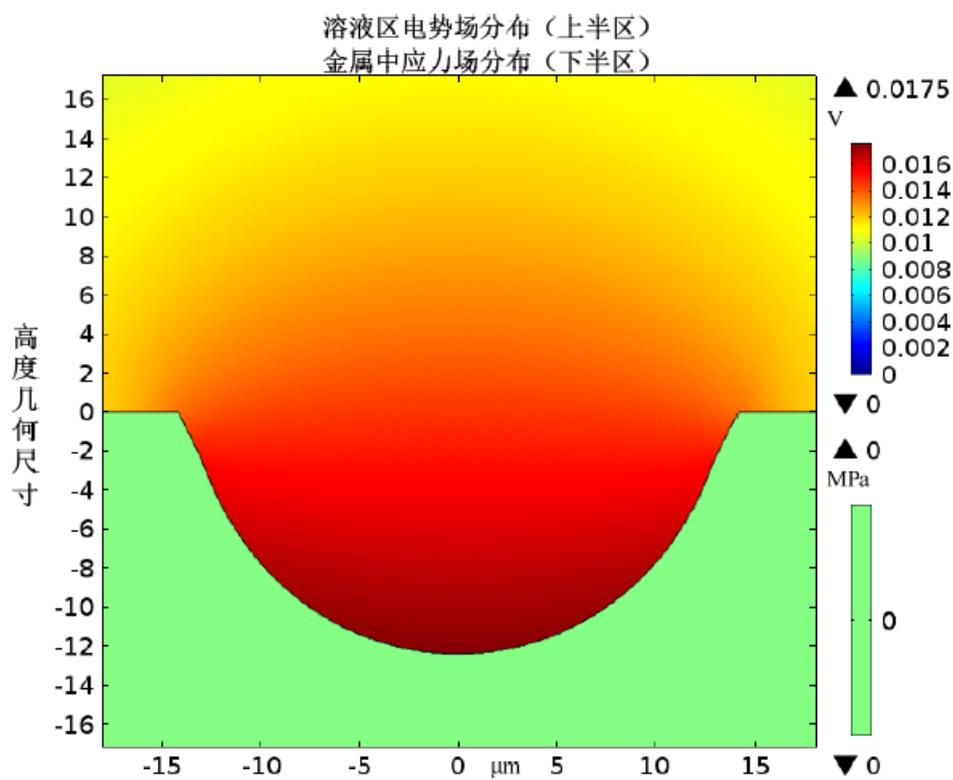


图 3-17 无应力 $t=180\text{s}$ 时点蚀坑周围电势场分布

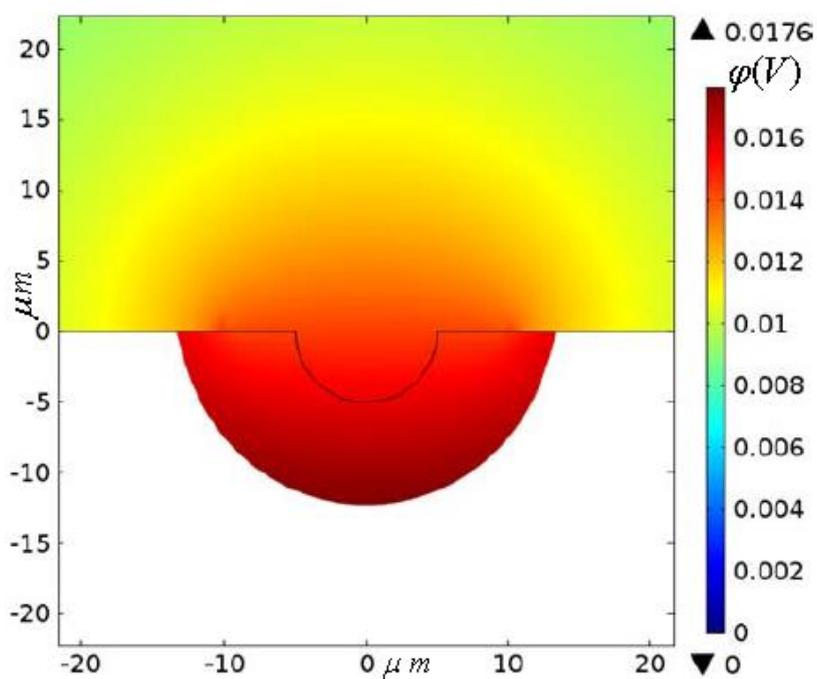


图 3-18 文献[38]中 $t=180s$ 时的计算结果

3.4.2.2 有应力加载模拟结果

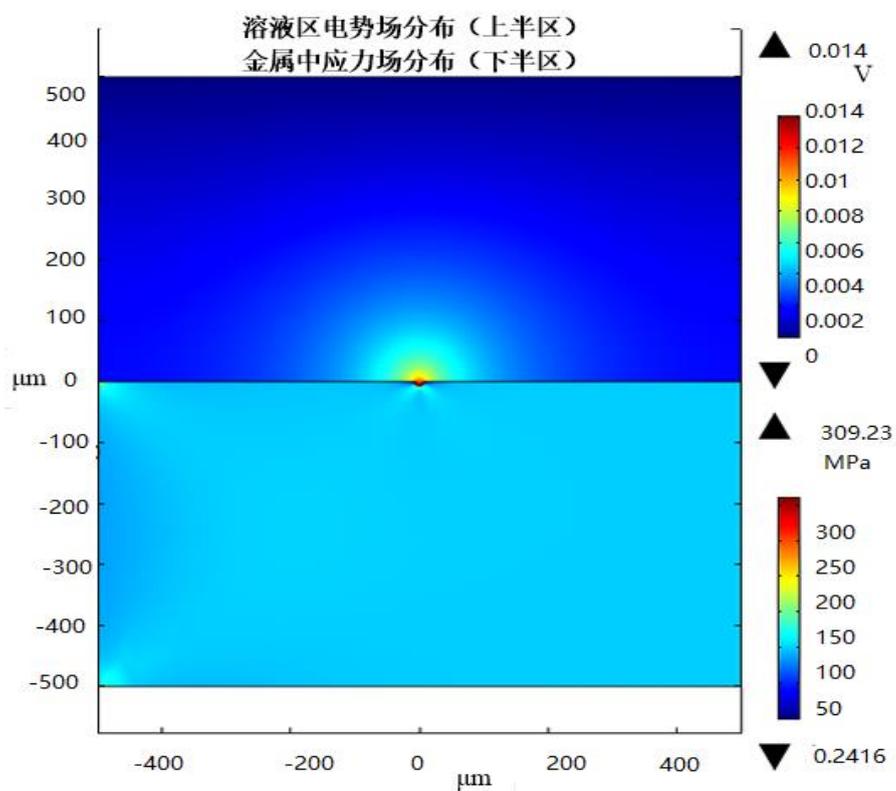


图 3-19 有应力加载时点蚀坑模拟全视图

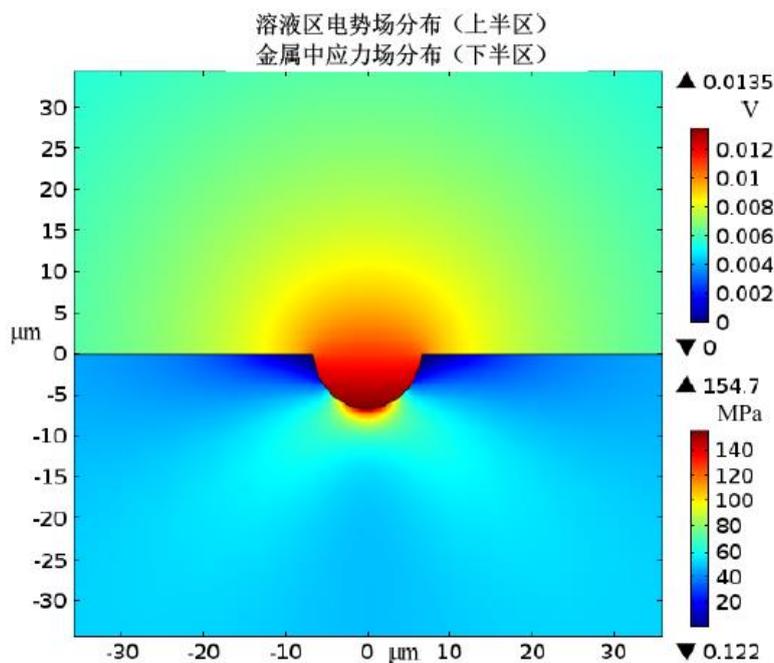


图 3-20 $P=50\text{MPa}$, $t=30\text{s}$ 时点蚀生长模拟结果

图3-19为应力加载为50MPa、腐蚀时间为30s、离散时间间隔步长为1s的点蚀坑模拟全视图。图3-19上半部分溶液区域的彩色云图为电势场分布，下半部分固体区域的彩色云图为Von-Mises应力分布。图3-20和图3-21为应力加载50MPa不同时刻的模拟仿真结果。从图3-20可以看出，随着点蚀坑深度的增长，金属材料中的最大应力值也在不断增加，从154.7MPa逐渐增大为160.23MPa。

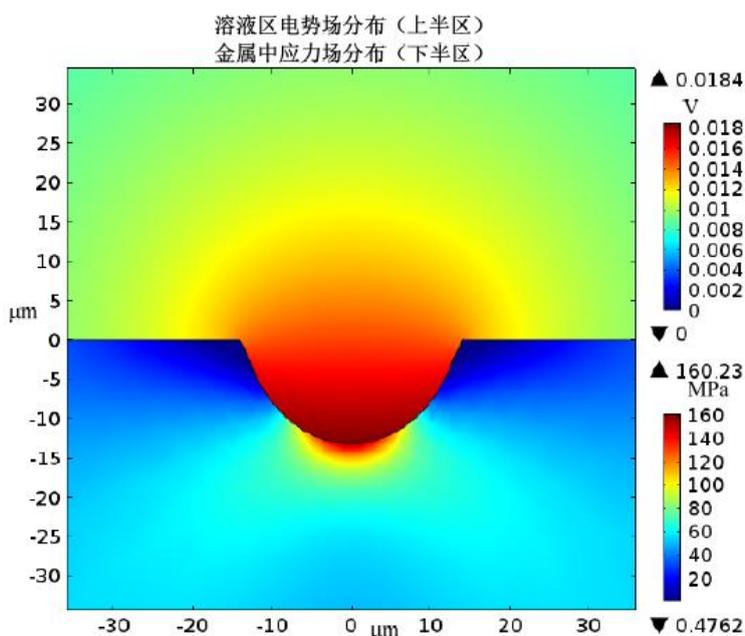


图 3-21 $P=50\text{MPa}$, $t=180\text{s}$ 时点蚀生长模拟结果

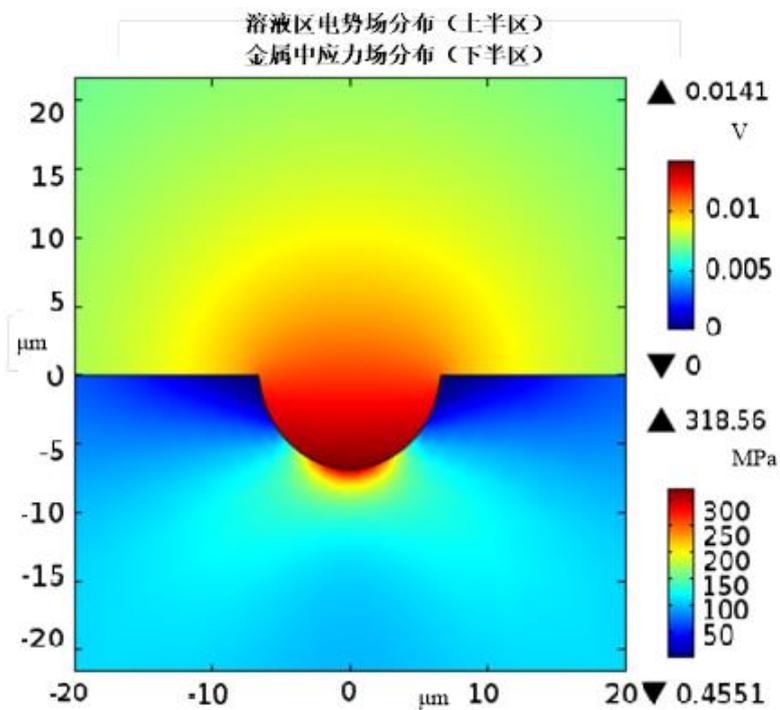


图 3-22 $P=100\text{MPa}$, $t=30\text{s}$ 时点蚀生长模拟结果

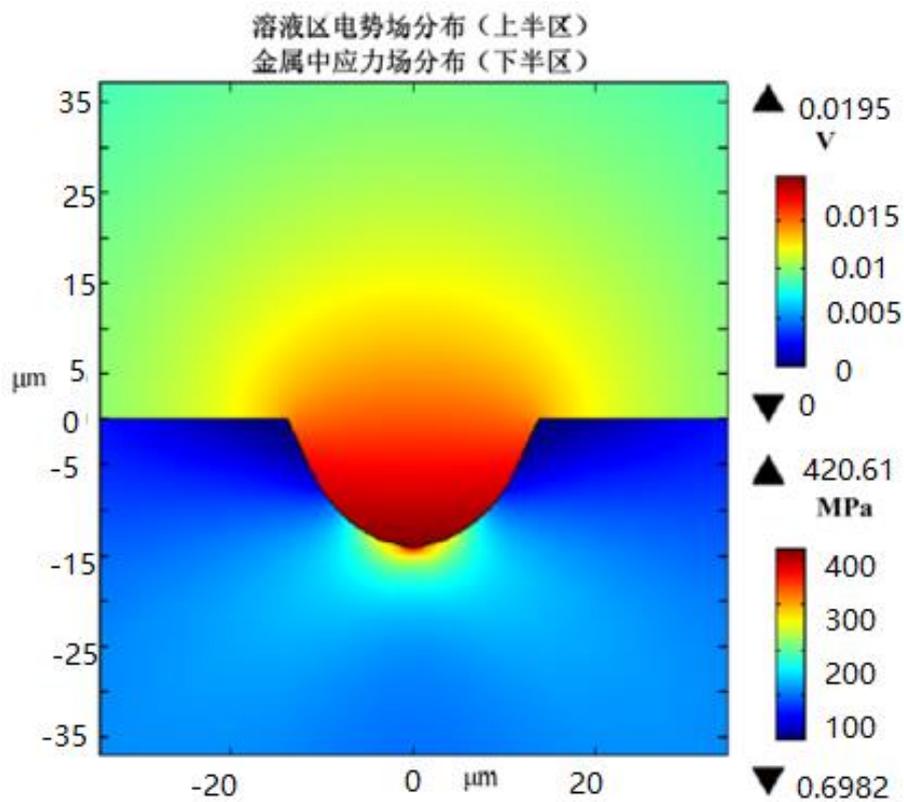


图 3-23 $P=100\text{MPa}$, $t=180\text{s}$ 时点蚀生长模拟结果

图3-22和图3-23为应力加载100MPa时不同时刻的模拟仿真结果，应力最大值从318MPa增大为420.61MPa。对比表明，施加的应力越大，应力最大值增加越快。从上述图中可以看出由于载荷的影响，点蚀坑周围出现了显著的应力集中现象，且随着腐蚀时间的增加，点蚀坑深度以及金属材料中的最大应力值均不断增加。应力加载对深度生长率的影响显著大于对宽度的影响。

3.4.2.3 结果分析与讨论

上述模拟结果反映了应力加载对点蚀坑生长具有一定的影响，为了更详细的分析点蚀生长过程中的应力效应，图3-24对比分析了不同应力加载条件下（0MPa，50MPa，100MPa）点蚀坑宽度和深度随时间的变化情况，结果表明基于本文的腐蚀模拟，在相同时刻，应力加载较高的点蚀坑的深度大于应力加载较低点蚀坑深度，而点蚀坑的宽度则恰恰相反，即应力加载较高的点蚀坑宽度小于应力加载较低点蚀坑宽度。说明应力加载条件下点蚀坑更容易向深度生长。

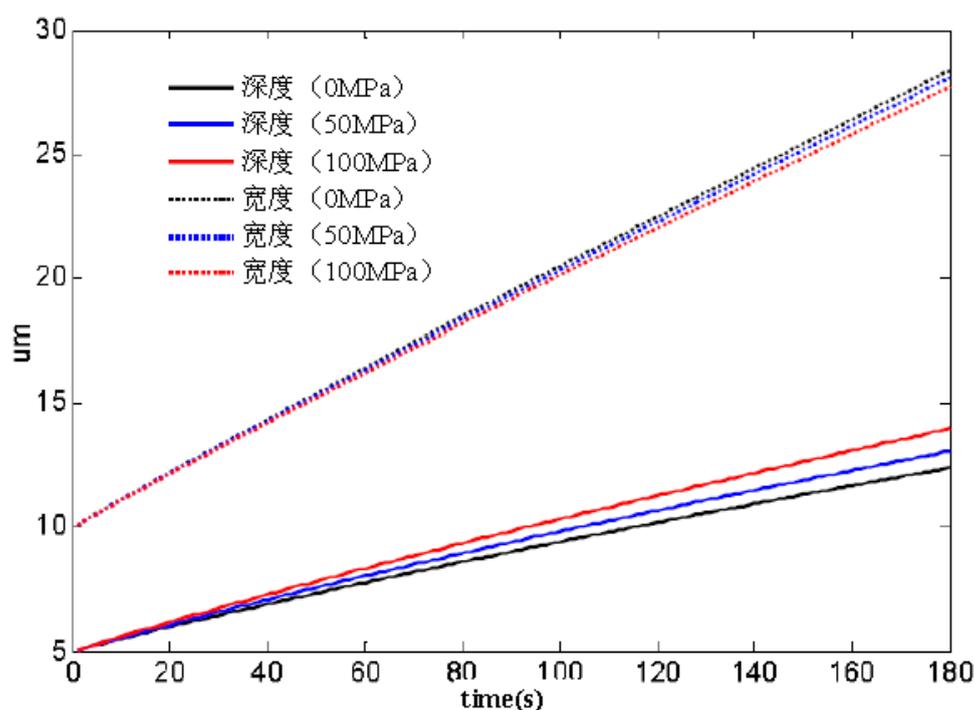


图 3-24 点蚀坑宽度和深度随时间变化

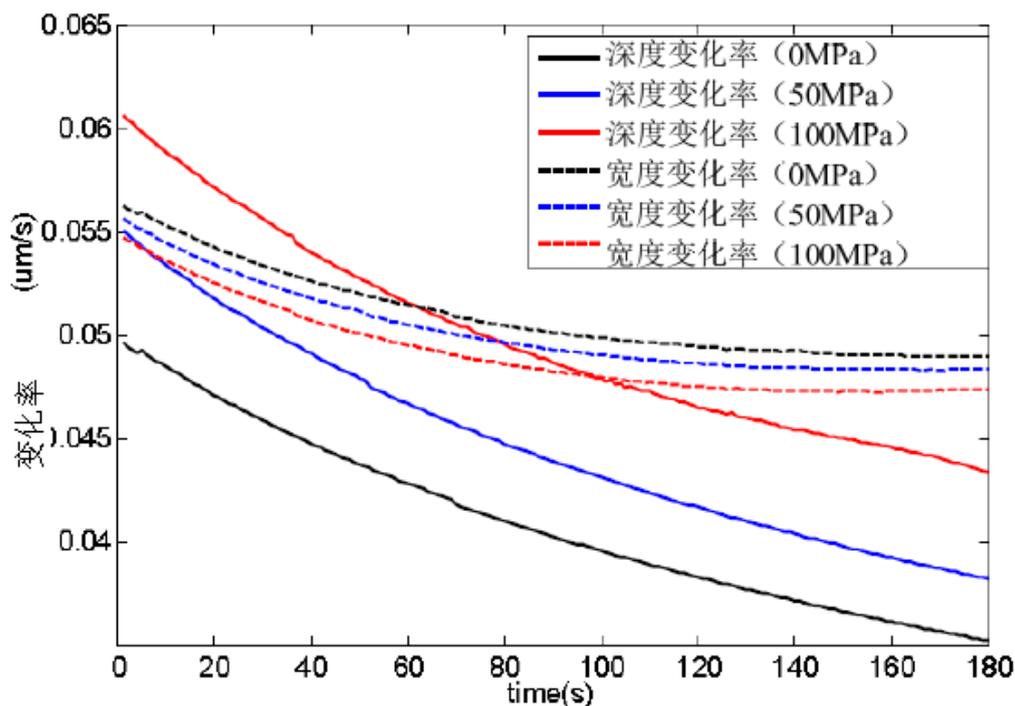


图 3-25 点蚀坑深度和宽度变化率随时间的变化

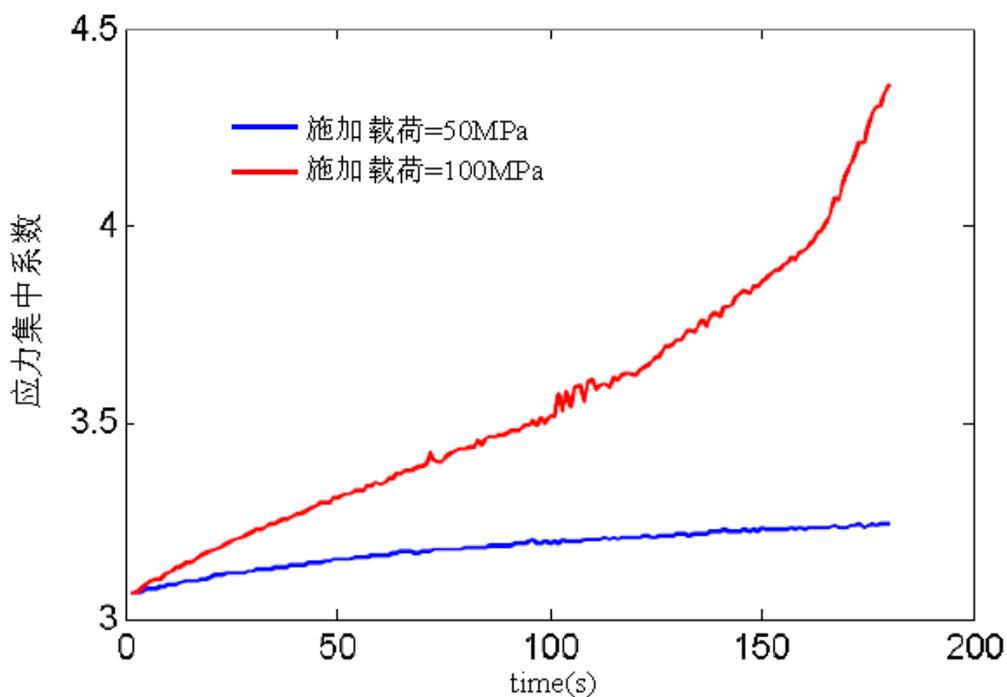


图 3-26 应力集中系数随时间的变化

图3-25所示为不同应力加载下的点蚀坑深度和宽度的变化率随时间变化的曲线。从图中可以看出，点蚀坑深度和宽度的变化率随时间都逐渐降低，主要原因

是随着腐蚀的进行，点蚀坑内的溶液区腐蚀电位逐渐增高，相对于点蚀过程中的应力效应，电化学腐蚀效应是点蚀扩展的主要因素，其对点蚀坑生长过程的控制远大于应力加载效应。同样对比表明，应力效应对于点蚀坑深度变化率的影响大于对点蚀坑宽度变化率的影响。

由于金属材料点蚀在工程结构应用中常常产生应力集中现象，对结构的可靠安全服役带来风险。图3-26对比分析了不同应力加载条件下单个点蚀坑由于点蚀坑生长导致的应力集中系数的变化情况。图中表明，应力加载为100MPa时其应力集中系数的增长情况要远大于应力加载为50MPa时的应力集中系数，因此可以推断，有应力加载时点蚀坑的生长更容易向微裂纹转化。

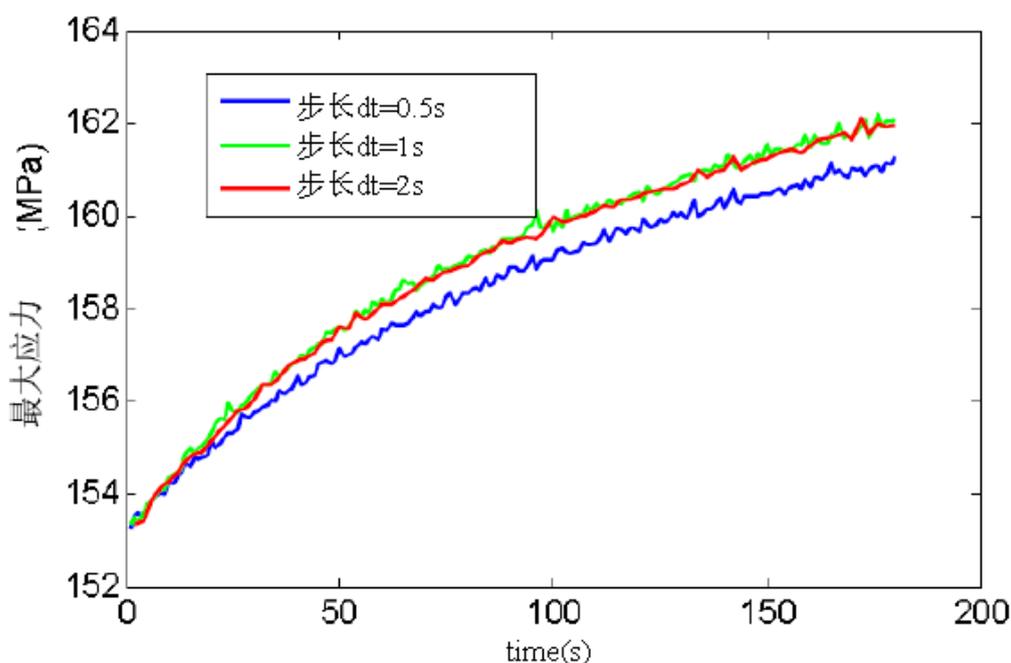


图 3-27 不同离散时间间隔对计算结果的影响

在本文的模拟计算方法中，固体域的应力分布并不是通过瞬态响应计算的实时分布，而是通过时间离散方法，用每一个时间步内的稳态响应计算结果近似为该时间间隔内的应力瞬态分布值。因此时间离散间隔步长对模拟计算的精度具有一定的影响。本文分别选择0.5s，1s和2s作为时间步长，以最大应力值作为计算目标，对比分析了不同时间间隔步长对计算结果的影响，如图3-27所示。

3.5 本章小结

本章根据应力加载下的点蚀生长数学物理模型，应用多物理场建模技术，基于COMSOL Multiphysics软件平台，建立了应力加载下考虑力学与电化学耦合效应的点蚀生长多物理场耦合数值模拟方法。根据腐蚀物理和电化学过程，分别选用静力分析模块和拉普拉斯方程模块求解金属中的应力场分布和溶液中的电势场分布。通过ALE网格技术由COMSOL与MATLAB的接口进行二次开发，模拟点蚀几何形状随时间的变化。建立的方法能够实现单个点蚀坑在应力加载下的生长过程模拟。通过算例研究，分析了点蚀坑深度、宽度以及它们的变化率、应力集中系数等在不同应力加载下的变化规律。结果表明，随着点蚀坑的生长，点蚀坑周围的应力将会变大，有可能导致点蚀坑向应力腐蚀裂纹转化。

第四章 力学加载下结构点蚀可靠性模型与概率分析方法

基于多物理场建模与仿真的数值模拟技术虽然能根据电化学等物理机理对点蚀的生长过程进行模拟，正如绪论中论述的，但由于腐蚀过程的复杂性，目前的数值模拟只能在一定的简化条件下对短时间内的腐蚀过程模拟，研究认识点蚀生长的规律。对于工程结构长期腐蚀损伤以及由此带来的可靠性问题，仍需要研究相应的结构可靠性模型和分析方法。第三章研究表明由于点蚀的生长，在力学加载作用下应力集中系数会越来越大，有向微裂纹转化的趋势。本章针对结构长时间腐蚀作用，研究力学加载作用下结构点蚀转为裂纹失效的物理模型，在此基础上研究并建立高效的概率可靠性求解方法，计算结构含点蚀损伤可靠度的变化。

4.1 引言

含腐蚀损伤结构的失效与可靠性研究是其安全设计、维修规划、安全监测以及服役延寿的基础与前提。由前述章节可知，由于腐蚀发生机理和演变过程的复杂性与随机性，尽管学者们已经对点蚀的基本物理化学过程有了深入的研究，但是对于点蚀生长过程的划分、点蚀演化过程的驱动等均还没有完全达成共识。完全基于确定论机理无法解释工程中面临的实际问题。对于复杂工程结构，宏观点蚀的生长及其对结构产品的潜在威胁更需关注。基于微观点蚀的研究目前很难有效描述实际工况条件下点蚀坑长时间的生长特征与宏观规律。同时，由于材料特性与环境条件等方面不确定因素的影响，点蚀坑尺寸分布、数目分布、腐蚀速率等与点蚀相关的数值呈现出很大的时变随机性。促使相关学者综合运用概率论和腐蚀物理的知识对点蚀生长的模拟以及结构可靠性进行评价和预测。

目前腐蚀的概率模型可根据研究方法的不同分为随机变量模型和随机过程模型两类。前者是在确定性模型的基础上引入随机变量，首先需建立损伤退化特征量（如点蚀坑尺寸深度或生长速率）随时间的关系公式，再通过实验数据等将公式中的参数随机化，最后通过模拟方法得出计算结果。目前的确定性模型又可分为两种，一种是完全基于统计规律建立的，即以数据为驱动拟合出的模型，包括幂函数模型、线性模型以及 Melchers 提出的非线性多阶段模型等是这类模型的代表，常用于结构可靠性评价与寿命预测中^[31]。另一种是基于损伤演化的物理机理过程建立的确定性模型，即以物理模型为驱动描述腐蚀损伤特征量随时间的变化关系，这类模型以故障物理模型为代表，模型中的相关参数服从一定的随机分布，比如 Modarres 等^[71]建立的腐蚀疲劳、应力腐蚀等概率故障物理模型，已在核电站

工程结构中得到较好的应用。随机过程模型则把系统损伤与退化处理为完全的随机数学过程，系统损伤特征量随时间变化直接通过随机过程状态模拟获得。利用随机过程研究腐蚀主要集中在宏观点蚀坑的生长模型。Provan 和 Rodriguez^[215]建立了基于非齐次马尔科夫链的单个点蚀深度增长的随机过程模型，在此基础上又分别采用非齐次泊松过程和非齐次马尔科夫链对点蚀的萌发和生长过程进行了建模并综合模拟。Valor^[216]采用 Gumbel 极值分布函数将多个点蚀的生长过程进行综合考虑，通过改进非齐次马尔科夫链的转移概率矩阵对点蚀的演化过程进行更全面的描述。采用随机过程模型模拟点蚀增长必须将材料离散成若干个独立的区间，使得建立精确的状态转移概率矩阵计算量巨大，并且无法反映腐蚀过程的物理含义。

基于上述腐蚀概率模型研究结构腐蚀损伤带来的可靠性和寿命预测问题是力学与可靠性专家学者们长期关注的热点问题之一。已有的研究工作主要集中在单一腐蚀现象以及单一的失效机理，比如腐蚀疲劳寿命预测、应力腐蚀开裂、点蚀穿孔等，已形成较为完整的技术方法，能够描述裂纹状态的断裂参数和失效判据。实际工程中材料和结构在长期服役环境下的腐蚀损伤演变过程常常涉及到点蚀、应力腐蚀、磨损腐蚀等多种损伤状态，不同的腐蚀状态之间具有一定的相关性甚至竞争性。尺度上则涉及微观点蚀向宏观裂纹发展的跨尺度过程，因此目前针对单一失效机制的腐蚀损伤结构可靠性分析和寿命预测模型不能综合有效地评估材料或结构整个服役寿命过程中带来的安全风险。为此，针对结构腐蚀可靠性问题，需要研究从腐蚀萌生到结构失效的全过程模型。

本章采用概率故障物理建模的方法，在参考相关文献研究腐蚀疲劳故障物理模型的基础上，针对恒定应力载荷下的点蚀损伤与演化，考虑力学载荷效应对点蚀生长阶段的影响，建立包括点蚀生长、点蚀转裂纹以及裂纹扩展失效多阶段故障物理（失效物理）模型。首先从热力学定理出发分析应力加载对点蚀生长过程的影响，然后根据断裂力学理论建立结构失效分析的故障物理模型，最后针对建立的含点蚀损伤结构可靠性模型，结合 Kriging 代理模型和抽样算法建立概率框架下结构可靠性分析的高效计算方法框架。

4.2 考虑应力加载的点蚀失效模型研究

4.2.1 腐蚀中的力学效应

金属材料在腐蚀环境和应力的共同作用下，腐蚀损伤的驱动力除了电化学驱动外还有机械力驱动。机械力的作用对金属腐蚀速度的影响，实质上是金属化学

位（热力学势）的影响导致腐蚀平衡电位的变化。在第三章腐蚀多场物理建模研究中已经给出了力学效应的式 (3-9)，并在模拟中得到应用，本节主要从电化学腐蚀电位出发，推导分析力学作用对腐蚀过程的影响。

无应力加载时，由金属的热力学和电化学理论可得，金属的化学位 μ 和电化学位 $\tilde{\mu}$ 可分别由式 (4-1) 和式 (4-2) 表示为^[19]：

$$\mu = \mu_0 + RT \ln a \quad (4-1)$$

$$\tilde{\mu} = \mu_0 + RT \ln a + ZF\varphi \quad (4-2)$$

式中， R 为气体常数， μ_0 为标准状态下金属电化学位的标值， T 为体系的绝对温度值， a 为金属的热力学活度， Z 为金属变化为离子后的化合价， F 为法拉第常数。 φ 为腐蚀体系的电位。

当固体金属在力学作用下处于弹性变形时，由于没有宏观塑性变形将不会引起位错滑动，但受激的金属原子将增加其位能，不考虑位错滑动引起的化学能，则该位能将使金属原子热力学化学位增加^[17]。金属化学位的变化将引起腐蚀电极电位的改变，从而影响腐蚀速率。对固体金属而言，由吉布斯等压等温位与压力 P 之间的直线关系可得化学位和压力的线性关系为：

$$\Delta\mu = \int_{P_1}^{P_2} V(P)dP = \int_{P_1}^{P_2} V_0 \exp(-\chi P)dP \approx V_0\Delta P \quad (4-3)$$

式中， χ 为固体金属的可压缩系数，一般为 10^{-6} 。因此当金属只承受压力 ΔP 无腐蚀因素作用时，根据热力学能量原理，其化学位将变为^[18,19]：

$$\tilde{\mu} = \mu_0 + RT \ln a + V\Delta P \quad (4-4)$$

式中， V 为金属的摩尔体积。当电化学因素与力学因素同时作用时，对于只有单一阳离子氧化产物系统，根据式 (4-2) 和 (4-4) 可得系统的力学电化学位可叠加表示为：

$$\tilde{\mu} = \mu_0 + RT \ln a + ZF\varphi + V\Delta P \quad (4-5)$$

参照式 (4-1)，金属的力学电化学位可改写为：

$$\tilde{\mu} = \mu_0 + RT \ln \tilde{a} \quad (4-6)$$

式中， \tilde{a} 为金属离子的力学电化学活度：

$$\tilde{a} = a \exp\left(\frac{V\Delta P + ZF\varphi}{RT}\right) \quad (4-7)$$

平衡状态下，腐蚀体系的力学电化学位将趋于 0，平衡电势 φ_0 为：

$$\varphi_0 = \frac{RT}{ZF} \ln \frac{a^0}{a_0} - \frac{V\Delta P}{ZF} \quad (4-8)$$

式中， a_0 为平衡态下的热力学活度， a^0 为标准活度。对于金属离子系统的平衡电势，由于力的作用而引起的变化为：

$$\Delta\varphi_0 = -\frac{V\Delta P}{ZF} \quad (4-9)$$

相应地，金属阳极的反应速度用腐蚀电流密度表示为：

$$I_a = I_0 \exp\left(\frac{\alpha n F \eta + V \Delta P}{RT}\right) = I_0 \exp\left(\frac{\alpha n F \eta}{RT}\right) \exp\left(\frac{\Delta P V}{RT}\right) \quad (4-10)$$

阴极的反应速度可表示为：

$$I_c = I_0 \exp\left(\frac{(1-\alpha)nF\eta}{RT}\right) \quad (4-11)$$

式中， I_0 为反应处于平衡状态时阳极的腐蚀电流密度。从该式可以看出，金属阳极的电流密度与极化电位和力学因素均密切相关，而阴极的腐蚀电流密度则与力学因素无关。当金属处于弹性变形范围内，力学载荷将使金属的热力学化学位及活度增大，作为腐蚀电池阳极的金属电极电势变负，使得回路中腐蚀电流强度比没有力学载荷时增大，从而加快了金属溶解的速度，即加速腐蚀进程。

4.2.2 含点蚀损伤结构失效物理模型

在恒定力学载荷作用下，点蚀坑会向微裂纹转化形成应力腐蚀，随着应力腐蚀裂纹的扩展最终会造成结构的失效。Harlow 和 Wei 等^[28,56,59,60]针对交变载荷作用下的腐蚀疲劳失效从点蚀过程进行建模，提出了包括点蚀生长与疲劳裂纹扩展在内的七阶段模型，点蚀坑生长阶段没有考虑力学载荷的影响。本文针对恒定载荷作用考虑点蚀生长阶段力学加载的影响，在参考上述腐蚀疲劳失效的基础上，将点蚀演变为应力腐蚀开裂的过程概括为四个阶段，包括点蚀萌生、点蚀生长、点蚀转裂纹、裂纹扩展，如图 4-1 所示。

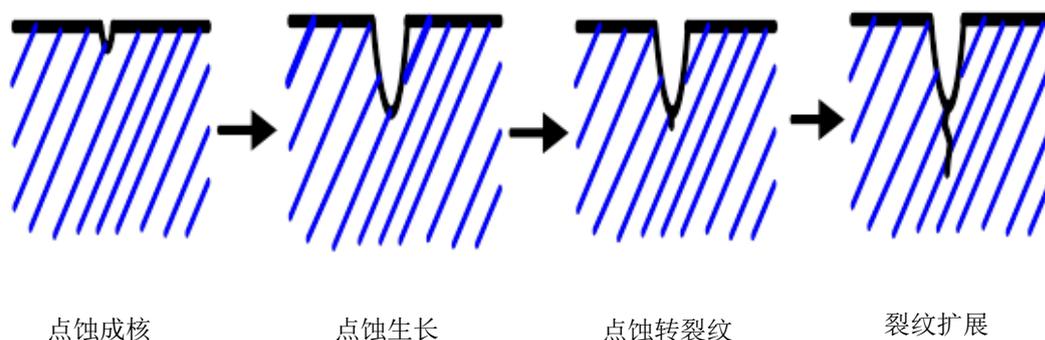


图 4-1 点蚀损伤扩展过程示意图

(1) 点蚀萌生

点蚀的形成是点蚀损伤演化过程的第一阶段。由于点蚀的发生与金属材料的钝化膜破裂紧密联系，具有较复杂的物理化学过程以及统计特性，因此在工程实践中描述点蚀形成相关的两个重要参数蚀坑初始大小和蚀坑生成时间常被假设为随机变量遵循一定的统计参数分布。Turnbull^[20]将点蚀成核萌生的初始深度在 $[0, x]$ 间的概率用三参数 Weibull 分布表示：

$$F(x) = 1 - \exp[-a_1(x - x_0)^{a_2}] \quad (4-12)$$

式中， x_0 为稳态点蚀坑的最小深度， a_1 和 a_2 为 Weibull 分布参数。对于 $F(x)$ 随机取得的某个特定值，对式(4-12)求反函数可得点蚀坑初始深度值：

$$x = x_0 + \left[\frac{1}{a_1} \ln \left(\frac{1}{1 - F(x)} \right) \right]^{1/a_2} \quad (4-13)$$

由于点蚀萌生过程的建模存在较大难度，因此本文将点蚀的初始尺寸假设为服从某一分布特征的随机参数，以便进行结构可靠性分析。

(2) 点蚀生长

点蚀坑的增长与形状受到材料的腐蚀介质、应力大小、加工缺陷、微观结构等多种环境因素及载荷的影响。全面评价腐蚀损伤的点蚀坑模型应包含最大点蚀深度、蚀点形状、平均点蚀深度、蚀点径深比、以及点蚀坑数目分布情况等。由于最大点蚀坑深度的增长会引起应力集中降低结构可靠性，因此描述点蚀坑深度的变化模型对结构可靠性分析至关重要。一般情况下，点蚀坑深度随时间的变化可用幂函数模型进行描述^[22]：

$$d(t) = C_1(t - t_1)^{C_2} \quad (4-14)$$

式中 $d(t)$ 为点蚀坑深度， t_1 为点蚀产生时间， t 为暴露时间， C_1 、 C_2 为模型常数，一般通过对实测数据进行曲线拟合得到。Hoepfner 根据试验数据对上述模型进行

了改进^[23]:

$$d(t) = C_1 t^{1/3} \quad (4-15)$$

Melchers 根据海水全浸低碳钢、低合金钢的腐蚀实验数据提出了多阶段腐蚀模型^[35]。Turnbull^[54]通过统计分析蒸汽轮机叶片钢材的实验结果,认为点蚀坑的发展规律可用生长率描述点蚀坑深度的变化:

$$g(x) = \frac{dx}{dt} = \beta \alpha^{1/\beta} x^{(1-1/\beta)} \quad (4-16)$$

式中, x 为点蚀坑深度, t 为时间, α 和 β 为常数。上述模型没有反应点蚀损伤发展的物理机理。

Harlow 和 Wei^[28]假设点蚀坑的形状在生长过程中保持半椭球体或半球体,其增长速率与蚀坑体积成一定的比例,在无应力加载下,由点蚀坑生长的电化学反应及法拉第定律,点蚀坑的体积增加变化率为:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{MI}{zF\rho} \quad (4-17)$$

式中, I 为点蚀坑腐蚀电流强度, V 为腐蚀坑的体积, M 为金属材料的原子量, z 为材料腐蚀为离子时的电子转移数, F 为法拉第常数, ρ 为材料密度。根据金属材料的活化度,设 ΔH 表示材料的活化能, I_0 为点蚀坑腐蚀电流密度强度系数,则腐蚀电流可通过 Arrhenius 关系表示为:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (4-18)$$

相应地,式(4-17)可变为:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{MI_0}{zF\rho} \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (4-19)$$

由于假设点蚀坑保持球形状不变,则

$$V = \frac{2}{3} \pi a^3 \quad (4-20)$$

式中, a 表示点蚀坑球体的半径。将式(4-20)带入式(4-19)并积分可得:

$$a(t) = \left(\frac{3MI_0}{2\pi zF\rho} \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) * t + a_0^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4-21)$$

式中, a_0 为点蚀坑的初始半径。通过式(4-19)和材料的相关参数后,就可对某时刻点蚀坑的腐蚀深度(半球体的半径)半径进行计算。

上述点蚀生长模型中没有区分结构受到力学载荷的影响，本节考虑应力大小对点蚀增长的影响，建立相应的模型描述点蚀坑深度的变化。根据小节 4.2.1 分析可知，点蚀在腐蚀环境和应力载荷耦合作用下，应力大小将改变金属的腐蚀电位，从而改变腐蚀电流密度系数，如式（4-22）所示：

$$i_0 = I_0 \exp\left(\frac{V_{mol}\Delta P}{RT}\right) \quad (4-22)$$

式中， V_{mol} 是材料的摩尔体积， ΔP 为材料承受的应力矢量的体积分量， i_0 为考虑应力腐蚀后的腐蚀电流系数。

根据式（4-22）和式（4-20）可得，考虑应力加载情况下点蚀坑半球体积随时间的变化率可表示为：

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \frac{Mi_0}{zF\rho} \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \\ &= \frac{MI_0}{zF\rho} \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \exp\left(\frac{V_{mol}\Delta P}{RT}\right) \end{aligned} \quad (4-23)$$

同理，点蚀坑的深度随时间的变化关系可由式（4-24）描述：

$$a(t) = \left(\frac{3Mi_0}{2\pi zF\rho} \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \exp\left(\frac{V_{mol}\Delta P}{RT}\right) * t + a_0^3\right)^{\frac{1}{3}} \quad (4-24)$$

式中，各符号的物理含义见前述公式。

(3) 点蚀转微裂纹

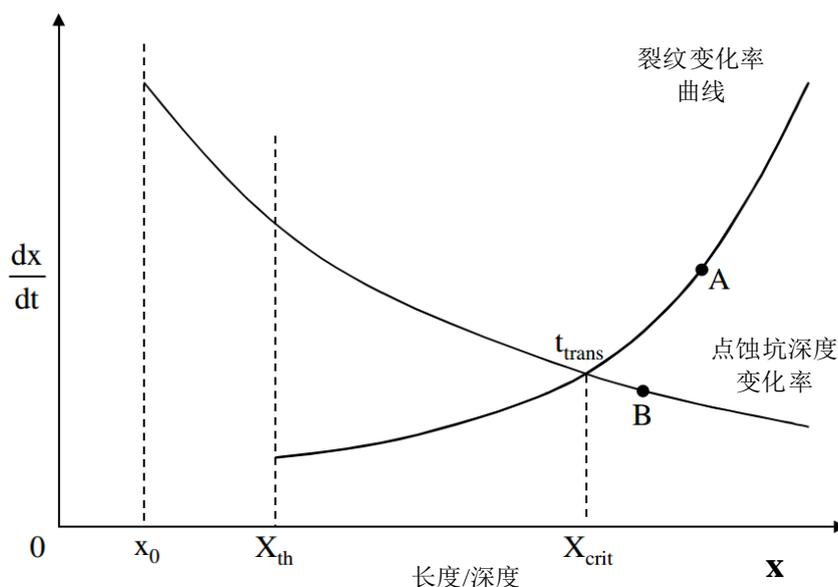


图 4-2 基于变化率的点蚀坑转裂纹示意图

随着点蚀坑深度的增长，点蚀坑底部的应力强度因子将会逐渐变大。当应力强度因子大于材料发生应力腐蚀开裂的门槛值时，点蚀坑将有一定的可能转为微裂纹并发生应力腐蚀开裂，如图 4-2 所示。根据断裂力学理论，应力腐蚀开裂门槛值和断裂韧性都是材料的特性参数，两者之间有如下关系^[16]：

$$K_{ISCC} = K_{IC} \left(1 - \eta \frac{\rho z F}{\alpha M \sigma_s} \right)^{1/2} \quad (4-25)$$

式中， K_{ISCC} 为材料应力腐蚀开裂门槛值， K_{IC} 为材料断裂韧性， η 为材料阳极极化电势， α 为经验常数系数， σ_s 为材料屈服应力。

本文采用 Harlow 和 Wei^[28] 提出的点蚀转裂纹判据模型，即当点蚀坑产生的应力强度因子大于应力腐蚀门槛值时，点蚀坑便向微裂纹转化，可表示为：

$$K_{pit} \geq K_{ISCC} \quad (4-26)$$

式中， K_{pit} 为点蚀坑应力强度因子。

点蚀坑应力强度因子可根据断裂力学理论由式（4-27）计算得：

$$K_{pit} = \frac{1.12k_t \Delta \sigma \sqrt{\pi a}}{\Phi} \quad (4-27)$$

式中， Φ 为点蚀坑形状因子参数， k_t 为应力集中系数， $\Delta \sigma$ 为应力大小， a 为点蚀坑尺寸深度。

由式（4-25），（4-26），（4-27）可得，点蚀坑转化为裂纹的临界深度为：

$$a_{ci} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC} \Phi}{1.12k_t \Delta \sigma} \right)^2 \left(1 - \eta \frac{\rho z F}{\alpha M \sigma_s} \right) \quad (4-28)$$

式中， a_{ci} 表示点蚀坑转化为裂纹的临界尺寸，其他符号含义同前述公式。

(4) 裂纹扩展

点蚀坑转化为裂纹后将进入应力腐蚀裂纹扩展阶段，一般地，应力腐蚀裂纹扩展速率如图 4-3 所示。

本文参考文献[73]，假设应力腐蚀裂纹扩展类似于 Paris 公式，能用以下经验模型描述：

$$\frac{da}{dt} = C (K_I - K_{ISCC})^m \quad (4-29)$$

式中： m 为模型参数， a 为裂纹尺寸， C 为模型蚀坑形状因子参数， K_I 为裂纹应力强度因子。

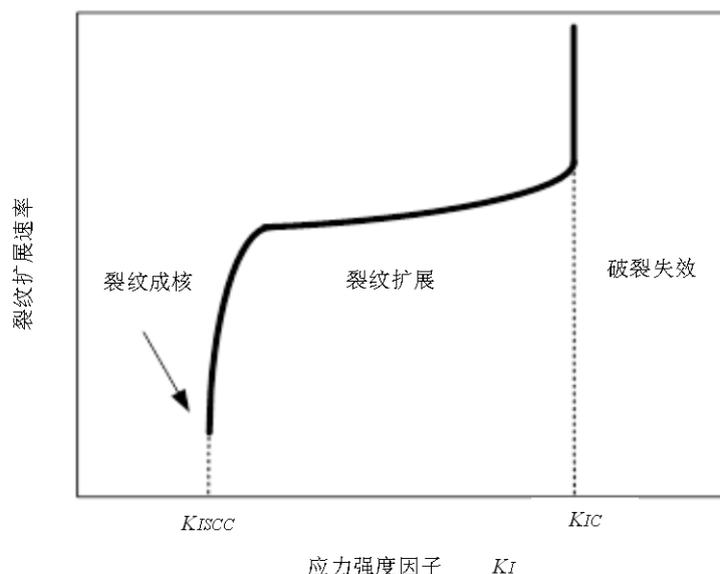


图 4-3 应力腐蚀开裂裂纹扩展曲线

由于初始点蚀坑形成的物理化学机理相对复杂，本文以初始点蚀坑形成后作为点蚀扩展的起点，点蚀坑的初始深度采用随机分布参数表示。分别可由前述公式(4-22)，(4-24)和(4-27)所表示的模型描述点蚀生长、点蚀转化为裂纹、裂纹扩展三阶段。图 4-4 所示为有应力加载和无应力加载下，点蚀损伤扩展典型曲线，由图可知，经历相同腐蚀作用时间后，有拉应力作用下的点蚀损伤深度要比纯化学腐蚀大。

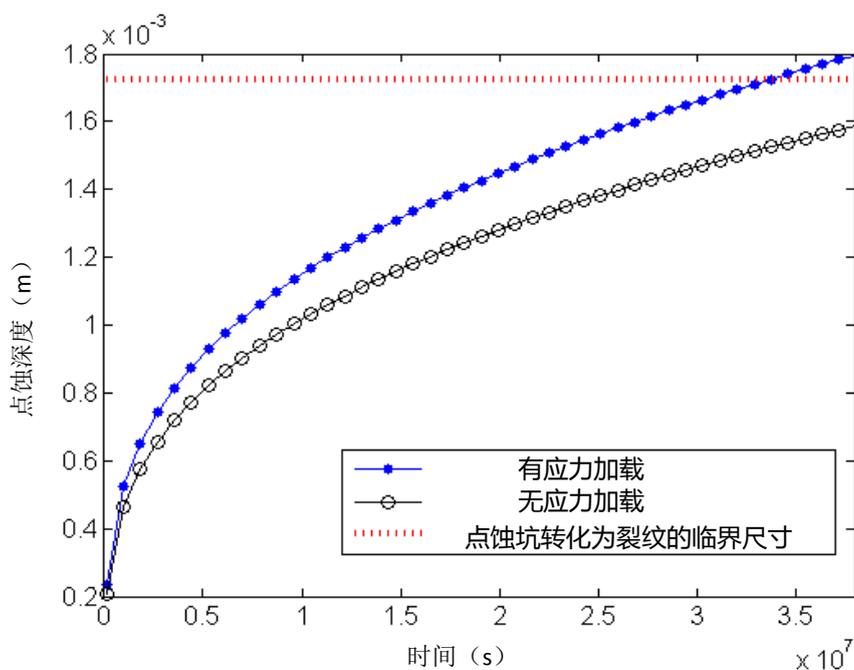


图 4-4 有无应力加载时点蚀深度扩展曲线

(5) 失效判据与故障物理模型

考虑到点蚀坑会向应力腐蚀裂纹发展，因此本文针对含点蚀损伤结构可靠性分析问题，以应力强度因子作为失效的判据，即当点蚀扩展为裂纹后当应力强度因子大于材料的断裂韧性时，则视为结构破坏失效，根据上述点蚀损伤的物理模型描述，结构含时间变化影响的失效物理模型（极限状态方程）可定义为：

$$G(\mathbf{x}, t) = K_{IC} - \beta\sigma\sqrt{\pi a(t)}$$

$$= \begin{cases} K_{IC} - \beta\sigma\sqrt{\pi\left(\frac{3Mi_0}{2\pi zF\rho}\exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right)\exp\left(\frac{V_m\Delta P}{RT}\right)^*t + a_0^3\right)^{\frac{1}{3}}} & \text{(Pit stage)} \\ K_{IC} - \beta\sigma\sqrt{\pi\left(a_{ci} + \int_{t_{ci}}^t C(K_I - K_{ISCC})^m dt\right)} & \text{(Crack stage)} \end{cases} \quad (4-30)$$

式中， \mathbf{x} 为极限状态方程的输入参数集合， K_{IC} 为材料断裂韧性， $a(t)$ 为点蚀坑（裂纹）深度， β 为形状参数因子， σ 为结构所承受的应力载荷值。当 $G(\mathbf{x}, t) > 0$ ，则表示结构处于安全状态，当 $G(\mathbf{x}, t) < 0$ ，则表示结构处于失效状态。

4.3 基于 Kriging 代理模型的高效可靠性分析方法

4.3.1 结构功能函数与失效概率

结构可靠性是指结构在规定的服役条件下和设计的工作服役期内满足相应规定功能要求的能力，结构可靠度是表示结构可靠性大小的度量。为了满足结构规定功能的要求，在结构进行可靠度分析时，需建立描述结构功能的数学函数，即结构的功能函数^[88]。设 $G(\mathbf{x})$ 表示结构的功能函数， \mathbf{x} 表示结构的几何尺寸、材料物性、外界载荷等随机变量参数。 $G(\mathbf{x})=0$ 的状态称为结构的极限状态方程，该方程所构成的曲面称为失效面。根据该失效面，结构的参数空间可分为安全域和失效域两部分。

结构失效概率的大小 P_f 可以表示为随机向量 $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ 的联合概率密度函数 $f(\mathbf{x})$ 在失效域（ $G(\mathbf{x}) < 0$ ）中的多重积分：

$$P_f = \Pr(G(\mathbf{x}) < 0) = \int_{G(\mathbf{x}) < 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) dx \quad (4-31)$$

结构可靠度 R 可表示为：

$$R = 1 - P_f = \Pr(G(\mathbf{x}) > 0) = \int_{G(\mathbf{x}) > 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) dx \quad (4-32)$$

因为在实际工程中，由于联合概率密度函数通常由多个变量构成多维数据，极限状态方程也可能没有显示的表达式，需要数值求解隐性函数，使得直接通过式(4-32)直接求解变得较为困难。因此在工程实际中建立了多种较为简单的近似计算方法计算结构的失效概率。下小节将对结构可靠性分析中常用到的计算方法进行简要回顾。

4.3.2 结构可靠性分析一般方法

常用的结构可靠性分析方法包括蒙特卡洛仿真方法(MCS)、一阶可靠性方法、代理模型等计算方法。

(1) 蒙特卡洛仿真^[93]

MCS 是最基本的数值模拟法，对结构变量的形式、功能函数的维数等均没有限制。MCS 方法通过从基本变量的联合概率密度函数 $f(\mathbf{x})$ 中抽取 N 个随机样本 x_i ($i=1, 2, \dots, N$)，经过功能函数分析计算得到其响应值 y_i ，统计计算响应值落入失效域 $G(\mathbf{x}) < 0$ 内样本点的总数 N_f ，失效概率 P_f 的估计值则可表示为失效样本点总计数与总样本点数 N 之比，具体表达式为：

$$P_f = \frac{N_f}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_f(x_i) = E[I_f(x_i)] \quad (4-33)$$

式中 $E[\cdot]$ 表示期望算子， $I_f(x_i)$ 为指示函数，定义如下：

$$I_f(x_i) = \begin{cases} 1, & G(x_i) < 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4-34)$$

由数理统计可知，当样本总数 N 增加到足够大时，由 MCS 法求得的失效概率近似值 P_f 将收敛于真实失效概率。因此 MCS 方法获得的结果在理论上可作为精确解，用来评估其它近似计算方法的计算精度。但是该方法需要大量样本进行功能函数响应值的计算，对于目前工程中结构响应值常采用的有限元模拟计算，则该方法的计算量十分巨大，难以满足计算效率的需求。

(2) 一阶可靠性方法^[94]

一阶可靠性方法是基于验算点 (Most Probable Point, MPP) 的近似计算方法，其主要计算过程包括如下步骤。

步骤一：通过把随机变量转化为标准正态分布变量简化联合概率密度函数，这种类型转换也被称为 Rosenblatt 转化。随机变量 $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ 的初始空间为 X-空间，标准正态分布空间为 U-空间。随机变量从 X-空间转化为 U-空间的基础是随机变量在转化前、后的概率累积函数保持相同。转化的方程为：

$$F_{x_i}(x_i) = \Phi(u_i) \quad (4-35)$$

式中， $\Phi(\cdot)$ 表示标准正态分布的累积分布函数。转化后的标准正态变量可表示为：

$$u_i = \Phi^{-1}[F_{x_i}(x_i)] \quad (4-36)$$

转化后的功能函数可表示为：

$$Y = g(\mathbf{u}) \quad (4-37)$$

可靠度的概率积分为：

$$R = \Pr\{g(\mathbf{u}) \geq 0\} = \int_{g(\mathbf{u}) \geq 0} \Phi_{\mathbf{u}}(\mathbf{u}) d(\mathbf{u}) \quad (4-38)$$

步骤二：搜索极限状态函数的 MPP 点。可通过优化问题求解：

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{u}} \|\mathbf{u}\| \\ \text{s.t. } g(\mathbf{u}) = 0 \end{cases} \quad (4-39)$$

式中， $\|\mathbf{u}\| = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2}$ ，表示向量的长度。满足上式的解为 \mathbf{u}^* 。

最后，通过将功能函数在 MPP 点处一阶泰勒展开近似计算可靠度。

$$R \approx \Phi\left(-\sum_{i=1}^n \alpha_i u_i^*\right) = \Phi\left(-\sum_{i=1}^n \alpha \mathbf{u}^{*T}\right) \quad (4-40)$$

其中

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \frac{\nabla g(\mathbf{u}^*)}{\|\nabla g(\mathbf{u}^*)\|} \quad (4-41)$$

比较类似的近似计算方法还有二阶可靠性方法、鞍点近似法等。这类方法对于一般的线性问题有着较高的计算效率与精度，但是对于非线性问题可能会导致搜索 MPP 点不收敛。

(3) 代理模型方法

代理模型方法是通过少量训练样本构造一个计算成本小、效率高、但计算结果与原模型分析结果或物理试验结果相近的数学模型，如图 4-5 所示。即通过在变量空间中的若干训练样本点的真实分析值，实现用代理模型建立近似的结构响应量 \mathbf{Y} 与变量参数 \mathbf{X} 之间的函数关系，用以替换复杂的多次结构有限元分析过程，从而提高计算效率。代理模型方法在结构可靠性分析、优化设计等领域有着广泛应用。目前常用的代理模型近似技术包括响应面模型、人工神经网络、支持

向量机、径向基函数和 Kriging 模型等^[217,218]。下面以响应面模型为例，介绍基于代理模型技术在结构可靠性分析中的应用。

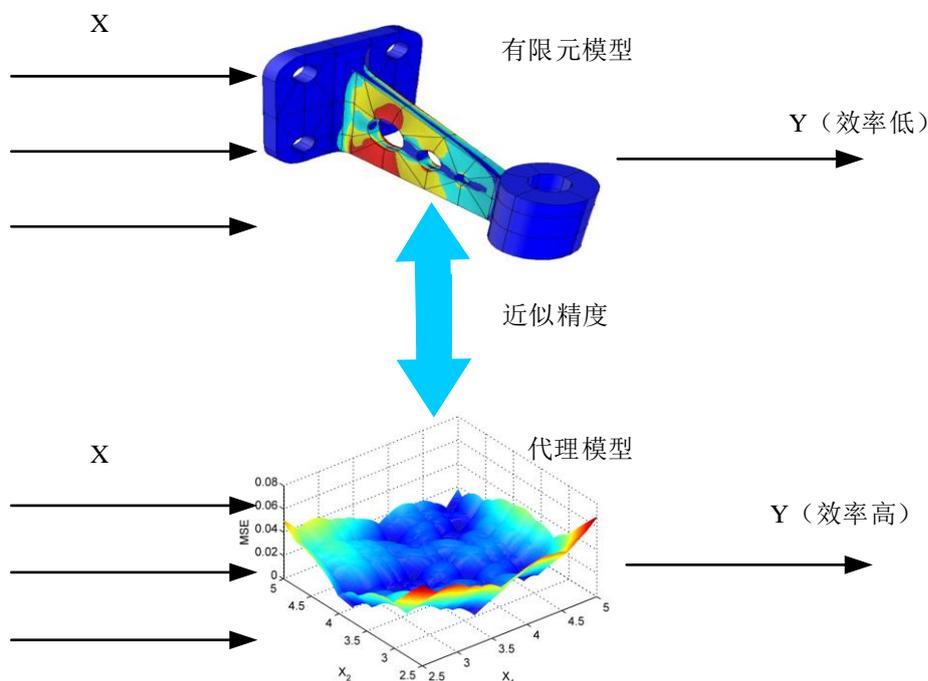


图 4-5 代理模型的基本原理

以响应面模型为例，设结构的功能函数为：

$$Z = G(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4-42)$$

取二次拟合响应面函数为：

$$G(\mathbf{x}) = b_0 + \sum_{i=1}^{i=n} b_i x_i + \sum_{i=n+1}^{i=2n} b_i x_i^2 \quad (4-43)$$

可靠性计算步骤为：(1) 以随机变量的均值为中心，在其分布区间内抽取训练样本（训练样本个数大于随机参数的长度），并得到功能函数的响应值。由训练样本点计算出待定系数 b_i 的值，建立响应面；(2) 选择 MCS 或一次二阶距等近似方法计算结构可靠度指标。

基于不同类型的代理模型在处理隐式极限状态问题时具有高效性，对不同分布类型的随机变量其计算结果具有稳健性，目前也成为可靠性分析领域的研究热点。因此本文重点针对应用广泛的 Kriging 代理模型研究其训练样本的自适应抽样方法，结合蒙特卡洛抽样实现自动加点构建高精度 Kriging 代理模型。

4.3.3 自适应 Kriging 代理模型

4.3.3.1 Kriging 代理模型

Kriging 模型最早由南非地质学家 Krige 提出，实际上是一种基于随机过程的统计方法，根据预测模型方差最小准则在有限区域内对区域化变量的取值进行无偏最优估计^[219-222]。对于结构时变可靠性问题，系统的功能函数 $G(\mathbf{x}, t)$ 是时间相关的，可通过代理模型表示为：

$$G(\mathbf{x}, t) = \mathbf{f}^T(\mathbf{x}, t)\mathbf{a} + S(\mathbf{x}, t) \quad (4-44)$$

式中， $\mathbf{f}^T(\mathbf{x}, t)=[f_1(\mathbf{x}, t), \dots, f_b(\mathbf{x}, t)]$ 为回归模型的基函数，是一个确定性部分提供对模拟全局的近似，一般用 \mathbf{x} 的多项式表示， \mathbf{a} 为回归模型对应基函数的系数， $S(\mathbf{x}, t)$ 是一个高斯随机过程，提供对模拟局部偏差的近似，具有均值为 0、方差为 σ^2 。通常情况下对于对于某时刻 t ，多项式 $f(\mathbf{x}, t)$ 可以取为平均响应值 μ ，而不影响模拟的精度，式(4-44)可改写为：

$$G(\mathbf{x}, t) = \mu(t) + S(\mathbf{x}, t) \quad (4-45)$$

其中

$$E(S(\mathbf{x}, t)) = 0 \quad (4-46)$$

空间不同两点的输入向量 \mathbf{x}_i 和 \mathbf{x}_j 之间的协方差矩阵为

$$\mathbf{Cov}_{(i,j)} = \sigma^2 \mathbf{R}_{(i,j)}(\theta, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \quad (4-47)$$

式中， θ 为关联模型参数， \mathbf{R} 为 n 个样本点中任何两个样本点的空间相关方程矩阵，表示训练样本点之间的空间相关性，由用户自己定义。高斯相关函数是最常用的相关函数之一，其表达式为：

$$\mathbf{R}_{(i,j)} = \text{Corr}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp \left[- \sum_{p=1}^k a_p |x_i^p - x_j^p|^{b_p} \right] \quad (4-48)$$

其中， Corr 表示相关函数， a_p 和 b_p 是 GP 模型的模型参数， k 为输入空间向量 \mathbf{x} 的维数。根据模拟过程的无偏性和极大似然估计可得：

$$\mu = [\mathbf{A}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G} \quad (4-49)$$

$$\sigma^2 = \frac{(\mathbf{G} - \mathbf{A}\mu)^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{G} - \mathbf{A}\mu)}{n} \quad (4-50)$$

式中， \mathbf{A} 是 $n \times 1$ 的单位向量。对于空间某点 \mathbf{x}' ，功能函数的响应值可通过 Kriging 代理模型预测值和预测均方差分别表示为：

$$\hat{G}(\mathbf{x}') = \boldsymbol{\mu} + \mathbf{r}^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{G} - \mathbf{A}\boldsymbol{\mu}) \quad (4-51)$$

$$\hat{e}(\mathbf{x}') = \sigma^2 \left[1 - \mathbf{r}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} + \frac{(1 - \mathbf{A}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r})^2}{\mathbf{A}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{A}} \right] \quad (4-52)$$

式中， \mathbf{r} 为待测点和样本点之间的相关向量。

4.3.3.2 自动加点抽样方法

基于已构建的 Kriging 代理模型，可通过 MCS 计算结构的可靠性时，假设通过随机抽样得到 N 个输入样本向量 $\mathbf{X}_m = [\mathbf{x}_{m,1}, \dots, \mathbf{x}_{m,i}, \dots, \mathbf{x}_{m,N}]$ ，代理模型在点 $\mathbf{x}_{m,i}$ 的预测值 $G(\mathbf{x}_{m,i})$ 为服从分布 $N(\hat{G}(\mathbf{x}_{m,i}), \hat{e}(\mathbf{x}_{m,i}))$ 的随机变量。参照公式 (4-33)，可靠性可表示为

$$R = 1 - P_f = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_f(\mathbf{x}_{m,i}) \quad (4-53)$$

对于样本空间中的第 i 个样本向量 $\mathbf{x}_{m,i}$ 的结构响应值可直接划分为安全和失效两个集合。由于 GP 模型的不确定性，对于样本 $\mathbf{x}_{m,i}$ 的响应值正确分类的概率可表示为

$$CL(\mathbf{x}_{m,i}) = \Phi\left(\frac{|\hat{G}(\mathbf{x}_{m,i})|}{\sqrt{\hat{e}(\mathbf{x}_{m,i})}}\right) \quad (4-54)$$

式中， $\Phi(\cdot)$ 表示标准正态分布函数， $|\cdot|$ 为求绝对值符号。式 (4-54) 表示在响应预测值 $\hat{G}(\mathbf{x}_{m,i}) < 0$ 的条件下，实际真实值 $G(\mathbf{x}_{m,i}) < 0$ 的概率。对于由 MCS 产生的 N 个样本点，根据极限状态正确分类概率获得的置信水平期望为

$$ECL = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N CL(\mathbf{x}_{m,i}) \quad (4-55)$$

ECL 表示代理模型替代原响应函数的近似精度。如果 Kriging 代理模型 M 计算可靠性的近似精度低于设定的目标值，则需添加新的训练样本点构建新的代理模型 M^* 。设响应函数在点 $\mathbf{x}_{m,i}$ 处的真实响应值为 $G(\mathbf{x}_{m,i})$ ，增加 $(\mathbf{x}_{m,i}, G(\mathbf{x}_{m,i}))$ 为训练数据后构建的代理模型 M^* ，其近似精度的置信水平期望提高可表示为：

$$EI(\mathbf{x}_{m,i}) = ECL(M^*) - ECL(M) \quad (4-56)$$

由于尚未获得样本点 $\mathbf{x}_{m,i}$ 处的真实响应值 $G(\mathbf{x}_{m,i})$ ，公式 (4-54) 无法直接计算获得，因此通过置信水平定义 EI 计算表达式为^[220,222]：

$$EI(\mathbf{x}_{m,i}) = (1 - CL(\mathbf{x}_{m,i})) \times f_X(\mathbf{x}_{m,i}) \times \sqrt{\hat{e}(\mathbf{x}_{m,i})} \quad (4-57)$$

式中 $CL(\mathbf{x}_{m,i})$ 是样本 $\mathbf{x}_{m,i}$ 的响应值正确分类的概率, $f_X(\mathbf{x}_{m,i})$ 是样本 $\mathbf{x}_{m,i}$ 的概率密度函数值, $\hat{e}(\mathbf{x}_{m,i})$ 为响应预测值的均方差。第一项表示 $\mathbf{x}_{m,i}$ 成为训练样本后代理模型针对该点预测置信水平提高的潜在值。前两项相乘表示增加样本点 $\mathbf{x}_{m,i}$ 后获得置信水平提高潜在值的可能性。第三项表示响应预测值的均方差对置信水平期望提高的影响。通过式 (4-57) 计算 MCS 样本 \mathbf{x}_m 中每个点 $\mathbf{x}_{m,i}$ 的置信水平的期望提高, 其中使得该值最大的点作为下一个加入 Kriging 代理模型的训练样本点, 即

$$\mathbf{x}^* = \max EI(\mathbf{x}_{m,i}) \quad (4-58)$$

4.3.3.3 可靠性计算流程

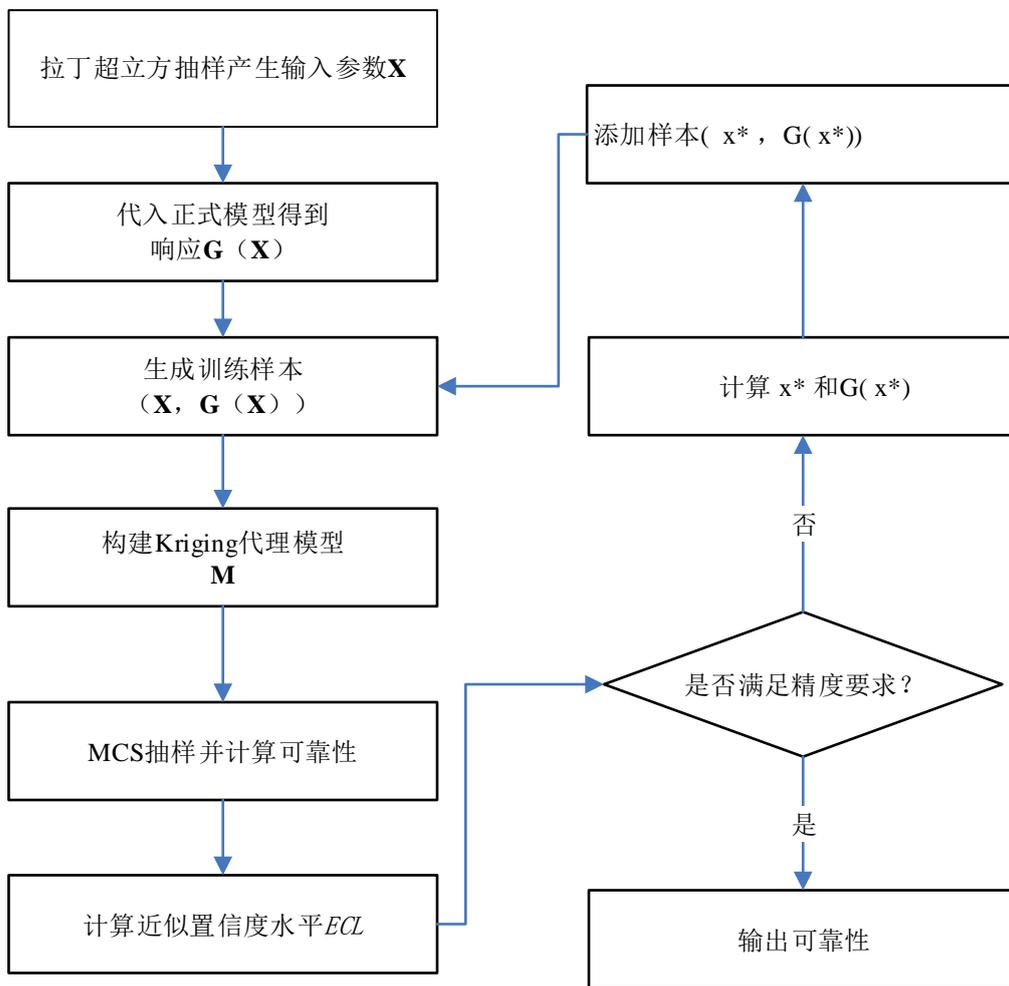


图 4-6 自动加点 Kriging 代理模型求解可靠性流程

根据上述方法计算结构可靠性的流程图如图4-6所示。主要的计算步骤如下:

- (1) 根据输入随机变量的维数和分布类型, 采用拉丁超立方抽样(Latin Hypercube Sample)方法抽取初始输入样本矩阵 \mathbf{X} 。

- (2) 将初始输入样本矩阵中的每个样本向量代入真实的功能函数模型，计算得到相应的输出响应值 $G(X)$ 。
- (3) 将输入 X 与输出 $G(X)$ 作为训练样本构建 Kriging 代理模型 M 。
- (4) 采用 MCS 方法得到输入样本矩阵 X_{mcs} ，将 X_{mcs} 代入代理模型 M 计算可靠性和近似精度置信度水平均值 ECL 。
- (5) 如果 ECL 满足设定的精度要求，则结束，输出可靠性结果。
- (6) 如果 ECL 不满足设定的精度要求，则计算 $EL(X_{mcs})$ 寻找 x^* 。
- (7) 计算 $G(x^*)$ ，并添加 $\{x^*, G(x^*)\}$ 至训练样本集，生成新的训练样本集，返回到步骤(3)。

4.4 结构含点蚀损伤可靠性计算与分析

4.4.1 材料参数

本文以某航空产品用金属材料作为算例研究对象，应用上述章节中的结构点蚀故障物理模型和可靠性分析框架，计算考虑应力加载效应的结构腐蚀可靠性。假设一无限大金属平板表面上有一点蚀初始缺陷，相关的不确定性参数包括材料参数，模型参数等均服从正态随机分布，相应的随机变量和非随机变量如表 4-1 和表 4-2 所示^[221]。算例中，点蚀损伤不包括点蚀坑的萌生阶段，即从点蚀坑生成后作为初始条件和损伤扩展的起始时间。

表 4-1 随机变量参数

随机变量符号	单位	均值	标准差 (均值*%)
a_0	m	1.98e-6	10%
I_0	c/s	6.5e-6	10%
K_{IC}	MPa*m ^{1/2}	35	10%
s	MPa	470	10%
Δ	MPa	90	10%
C	-	2.8e-11	10%
m	-	1.16	10%

表 4-2 固定值变量参数

变量符号	变量值
k_t	2.6

α	1.15
η	0.12V
β	2.6
M	27 g/mol
R	8.314J/mol K
z	3
ρ	2.7e6 g/m ³
F	96514 C/mol
ΔH	50 KJ/mol
T	293K
Vmol	10 cm ³ /mol

基于本章前述小节所建立的应力加载下的点蚀损伤故障物理模型和 Kriging 代理模型计算方法，相应的计算流程如图 4-7 所示。

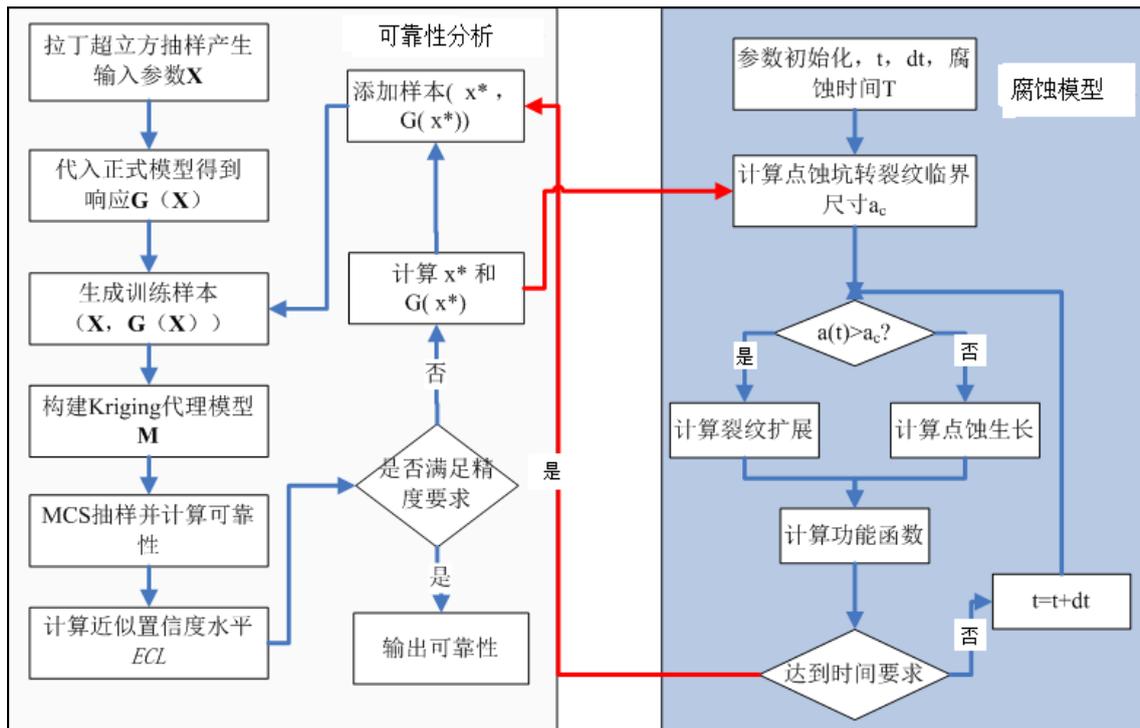


图 4-7 基于 MCE 抽样的结构点蚀损伤失效概率技术流程图

4.4.2 计算结果分析

分别采用 MCS, FORM 和本文基于自适应抽样的代理模型方法计算考虑应力加载效应的结构含点蚀损伤的失效概率。MCS 方法采用随机抽样方法，样本空间 $N=1 \times 10^5$ ，计算结果作为计算精度比较的标准。图 4-8 所示为 500 个随机样本点通

过蒙特卡洛模拟获得的点蚀深度在 200d 内的扩展模拟曲线，由图中可知，随机参数输入会导致点蚀坑深度有较大的分布范围，随着点蚀坑深度的增加，点蚀坑转化为裂纹后尺寸快速增加。

图 4-9 所示为有无应力加载时的可靠性分析结果。从图中可知，在输入随机参数的分布特征相同的情况下，有应力加载时的结构可靠度比无应力加载的可靠度在经历相同腐蚀时间后要低。

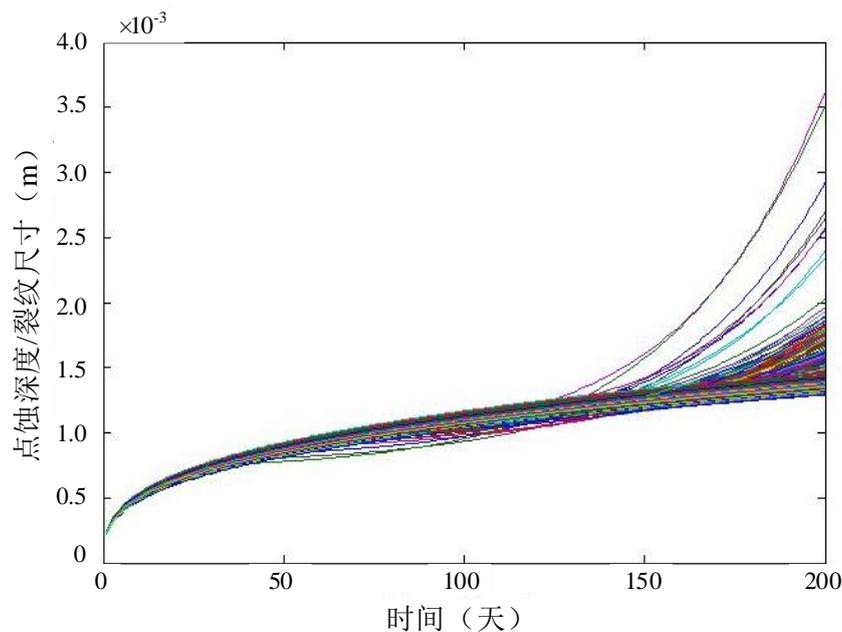


图 4-8 点蚀深度扩展曲线分布

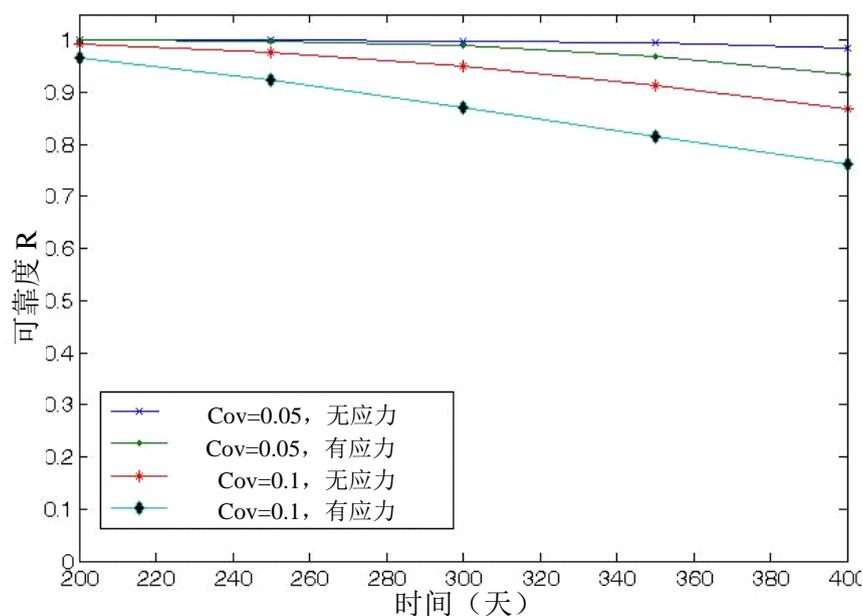


图 4-9 有无应力加载时的可靠性分析结果

表 4-3 可靠性分析结果

腐蚀时间 (d)	可靠度 R				
	MCS	自适应 抽样代 理模型	代理模型误差 (%)	FORM	FORM 误差 (%)
250	0.99815	0.99733	0.08215	0.99868	0.05310
300	0.99113	0.99220	0.10796	0.99496	0.38643
350	0.97036	0.97025	0.01134	0.98297	1.29952
400	0.93395	0.93868	0.50645	0.95372	2.11682
450	0.88074	0.87941	0.15101	0.90589	2.85555
500	0.81476	0.81750	0.33630	0.84112	3.23531

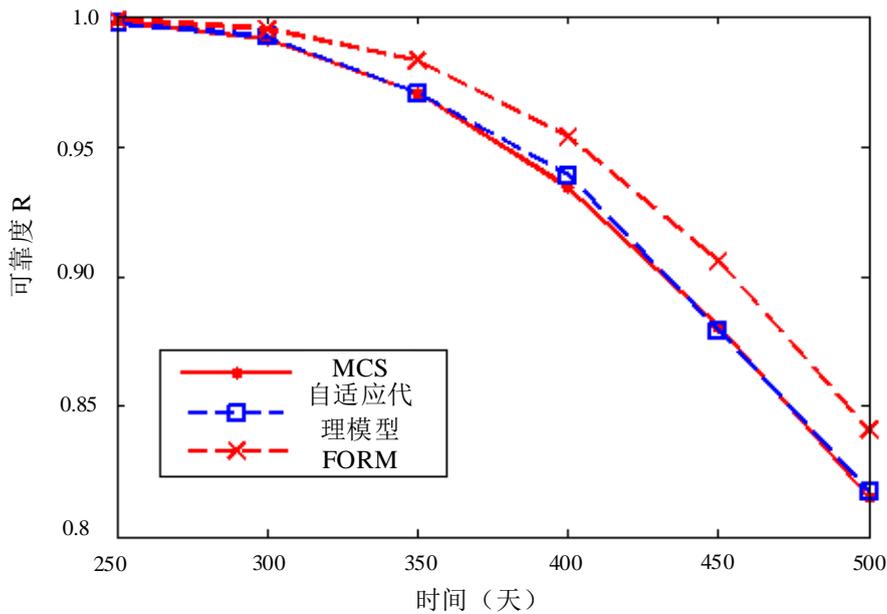


图 4-10 可靠性分析结果比较

采用上述三种方法分别计算不同腐蚀时间后的可靠性分析结果如表 4-3 所示。FORM 方法和自适应抽样代理模型方法的计算精度比较如图 4-10 和图 4-11 所示。从图中可以看出，基于自适应抽样的代理模型计算结果与蒙特卡洛仿真计算的结果非常接近。随着腐蚀时间的增加，FORM 算法的相对误差逐步增大。

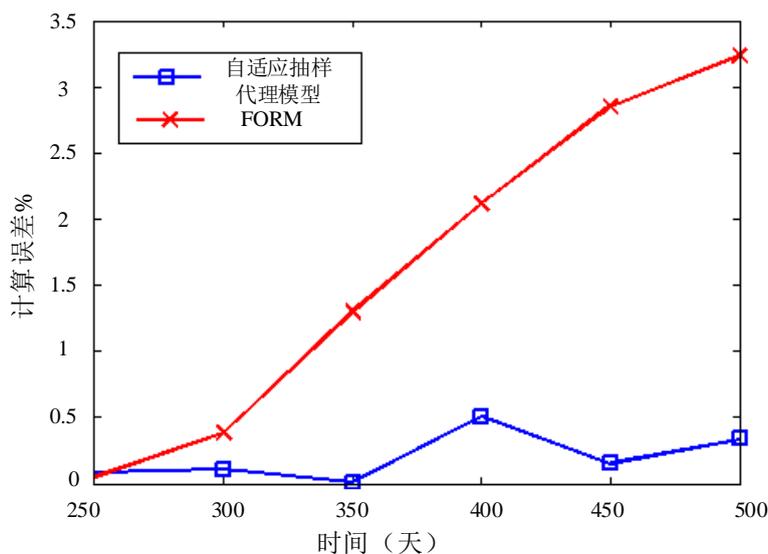


图 4-11 计算精度比较

表 4-4 自适应抽样代理模型与 FORM 计算效率比较

Corrosion Time (days)	Adaptive Sampling Proxy Model			FORM
	Initial Sample Size	Additional Sample Size	Total Sample Size	
250	28	26	54	800
300	28	18	46	800
350	28	33	61	136
400	28	42	70	232
450	28	50	78	288
500	28	60	88	128

表 4-4 所示为计算效率的比较。在计算结构可靠性时，一个样本点需调用一次结构失效的功能函数。本算例研究中 MCS 方法为 10^5 个样本，FORM 方法在搜寻验算点（MPP 点）的过程中所需样本数量大于本文所提出的自适应抽样代理模型所需的样本量。自适应抽样代理模型方法中初始样本为拉丁超立法抽样获得的 28 个数据点（7 个随机变量，每个变量 4 个初始样本值）。通过图 4 所示自适应抽样流程根据计算精度要求增加样本空间。表 4 表明基于自适应抽样的 Kriging 代理模型所需的总样本数比 FORM 方法要少，能够一定程度上提高计算分析的效率。特别是对于没有显示功能函数的结构可靠性分析，该方法能够大大降低数值模拟有限元分析的计算次数，从而提高可靠性分析效率。算例研究也表明，自适应抽样 Kriging 代理模型方法求解结构含点蚀损伤失效模型是适用可行的。

4.5 本章小结

本章针对有应力加载的点蚀转化为应力腐蚀开裂失效的问题，基于相关文献，考虑了点蚀扩展阶段应力加载的影响，建立了包括点蚀生长、点蚀转化为裂纹、裂纹扩展三阶段的失效物理模型。本文在点蚀扩展中考虑了应力加载的影响，研究表明，应力加载能加速点蚀腐蚀扩展，从而使结构可靠性退化更快，因此考虑应力加载效应的结构点蚀可靠性分析更适合工程实际情况。基于上述结构含点蚀损伤失效物理模型，建立了基于自适应抽样和 **Kriging** 代理模型的结构点蚀可靠性分析方法框架。通过算例研究，从计算效率和精度两个方面与传统的蒙特卡洛方法、一阶可靠性方法进行了对比分析。算例结果研究表明，自适应抽样的 **Kriging** 代理模型计算方法具有较高的计算效率和精度，能够有效求解结构含点蚀损伤失效模型。

第五章 QMU 方法及其在结构腐蚀失效分析中的应用

针对工程实际中面临的随机和认知不确定性问题,研究混合不确定性下的结构可靠性理论已受到国内外众多学者和工程界的极大关注。美国三大武器实验室为解决复杂装备库存性能认证所面临的数据缺乏和不确定性问题,提出了裕量与不确定性量化(Quantification of Margins and Uncertainty, QMU)方法。针对结构含点蚀损伤的失效模型,第四章从随机不确定性的角度建立了高效的可靠度求解方法。本章根据 QMU 方法的基本思想,在随机和认知不确定性同时存在的情况下,研究基于证据理论框架和 Kriging 代理模型的混合不确定性传播计算新方法。在此基础上提出证据理论框架下的结构性能评估 QMU 度量方法,并针对结构点蚀可靠性问题开展应用研究。

5.1 引言

在工程结构可靠性或性能评估时,由于缺乏整体级试验数据以及理论认知的不完备,导致随机和认知不确定性存在于工程中。完全基于传统概率统计理论的可靠性方法在使用过程中受到一定的限制,为此国内外学者提出并发展了非概率可靠性理论,用于解决工程中面临的随机和认知混合不确定性给结构性能评估带来的困难,比如区间可靠性理论、模糊可靠性理论等。近年来,美国圣地亚等武器实验室提出了 QMU 的概念并用于具有随机和认知不确定性的禁试武库可靠性、安全性的评估认证以及风险决策^[190]。国内外学者围绕随机和认知不确定性分别研究了 QMU 理论及其应用于系统性能评估和分析时的具体实施流程。Eardley^[190]描述了如何采用 QMU 处理复杂系统的可靠性以及代替传统可靠性估计的置信度,提出了 QMU 方法的关键要素包括性能通道、裕量、不确定性。Pepin^[196]提出的 QMU 度量指标考虑了系统操作区域和性能要求的不确定性。针对混合不确定性, Sentz 和 Ferson^[198]集成概率区间分析和证据理论研究了可应用于 QMU 的计算工具。Urbina^[199]基于 Bayes 网络充分考虑复杂分层系统各级组件的随机和认知不确定性,建立了 QMU 方法的 Bayes 网络框架。

从上述文献看,不确定性量化与传播是 QMU 方法应用于工程实际的关键环节,而实际工程中系统性能响应常常由隐式模型进行模拟分析,因此需要建立代理模型进行不确定性传播分析从而降低计算成本。在代理模型和 QMU 集成方面, Eldred^[200]研究了基于配点法的随机响应面代理模型,并将其应用于证据理论框

架下的系统性能 QMU 分析。Shah 等^[201]采用证据理论和随机多项式混沌展开响应面研究混合不确定性的计算流程，并应用于高速民用运输机的外形设计。

本章首先对 QMU 和证据理论的基本概念进行介绍，然后针对工程结构可靠性分析中常常面临的混合不确定性的情况，研究混合不确定性高效传播计算的一般通用方法。在此基础上，建立基于证据理论的混合不确定性 QMU 度量模型和计算框架。最后，应用该度量模型和计算方法，针对结构腐蚀后的可靠性评估进行应用算例研究，并对求解方法的效率和适用性进行验证。

5.2 QMU 基本概念

QMU 是一套基于传统安全裕度的概念，考虑系统运行和操作过程中的所有不确定性，并以性能裕量及其不确定性为关键点的复杂系统风险决策支持方法，为高危险要害系统的风险评估与决策提供信息输入。如图 5-1 所示，性能裕量 (M) 可表示为系统性能名义值和性能通道边界阈值之间的距离^[194,195]。

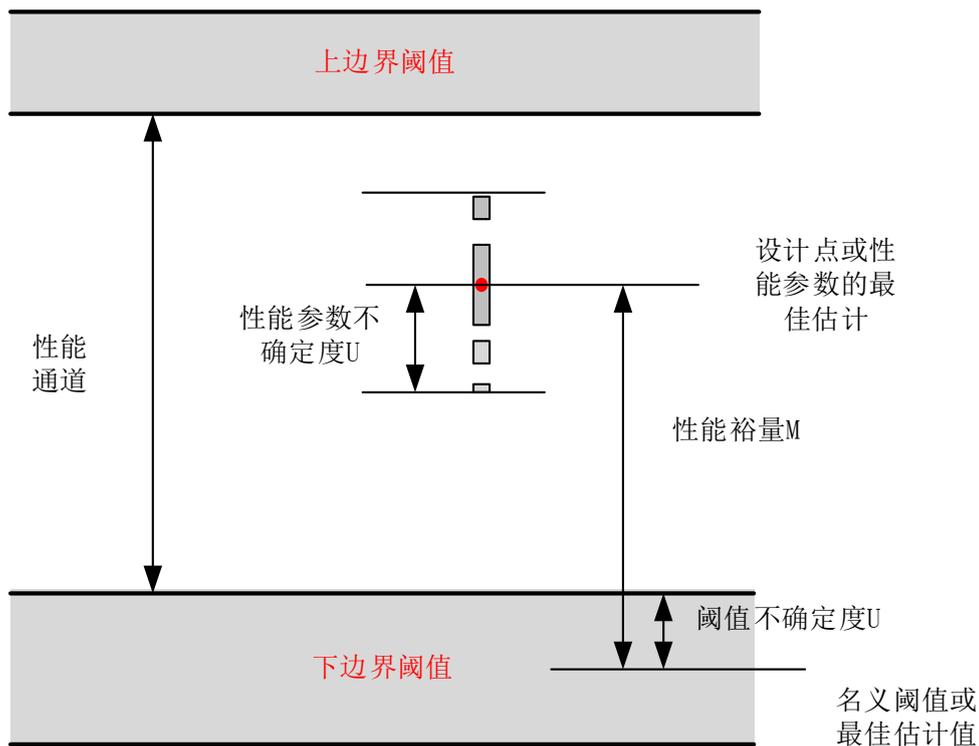


图 5-1 QMU 相关概念示意图

系统的设计或服役结构的性能是否满足设计要求通过置信因子 CF (Confidence Factor) 进行度量， CF 定义为性能裕量与评估该性能的不确定度 U 之比：

$$CF = M/U \quad (5-1)$$

如果对系统评估过程中的不确定性认识量化足够充分，则置信因子 CF 大于 1 时，就判定为可靠；当置信因子 CF 小于等于 1 时，就判定系统存在失效风险。图 5-2 为典型点火系统雷管的性能 QMU 分析图^[191]。图中性能曲线在操作阈值点表现为一悬崖状。通过实验得到雷管工作的阈值电压 $V_{T, BE}$ 为 100V，需求电压的变化值不会超过 5V。点火系统的输出电压设计点为 150V，相应的不确定性为 10V。总的 uncertainty 可直接相加，则 $M/U=50/15=3.3$ 。该值就是雷管能按设计工作的置信度衡量。

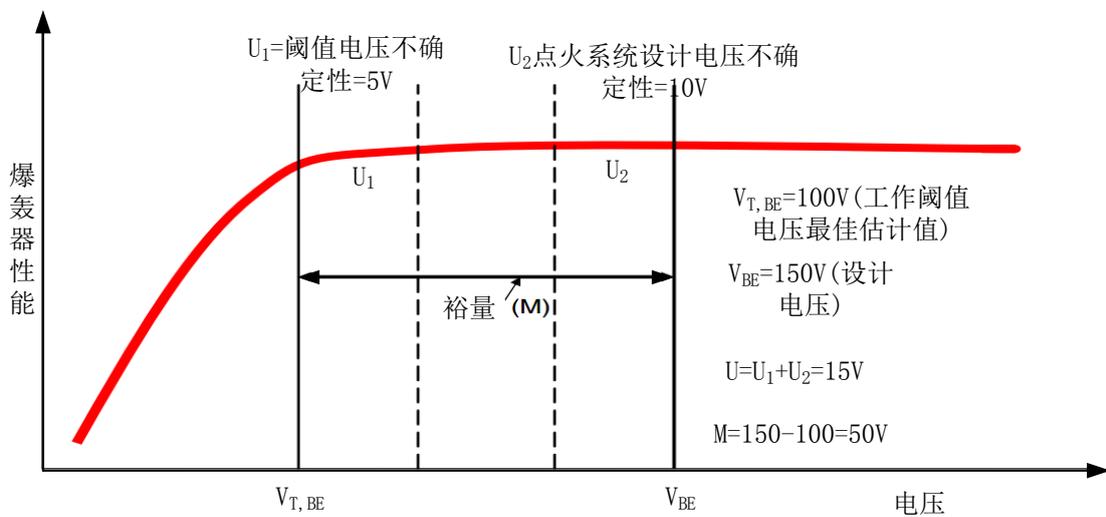


图 5-2 简单产品（雷管爆轰）QMU 分析示意图

如图 5-3 所示，对于复杂系统或大型结构，运用 QMU 方法评估其性能状态的完整分析流程涉及三个关键要素：

- (1) 建立观测清单；
- (2) 建立性能通道；
- (3) 性能裕量预测及其不确定性量化。

观测清单是一套精炼的，表征系统在规定条件下完成其规定功能能力的，能够测量（通过试验测量或建模仿真（M&S）计算）的特征参数。建立观测清单和性能通道的目的是对不确定性输入源和阈值要求进行分析。如果影响结构系统的失效由多个独立的性能参数及通道组成，则系统的置信因子可用式（5-2）表示：

$$CF_{system} = \min(CF_1, CF_2, \dots, CF_n) = \min\left(\frac{M_i}{U_i}\right) \quad (5-2)$$

式中， M_i 和 U_i 分别表示第*i*个性能通道的裕量和不确定性。

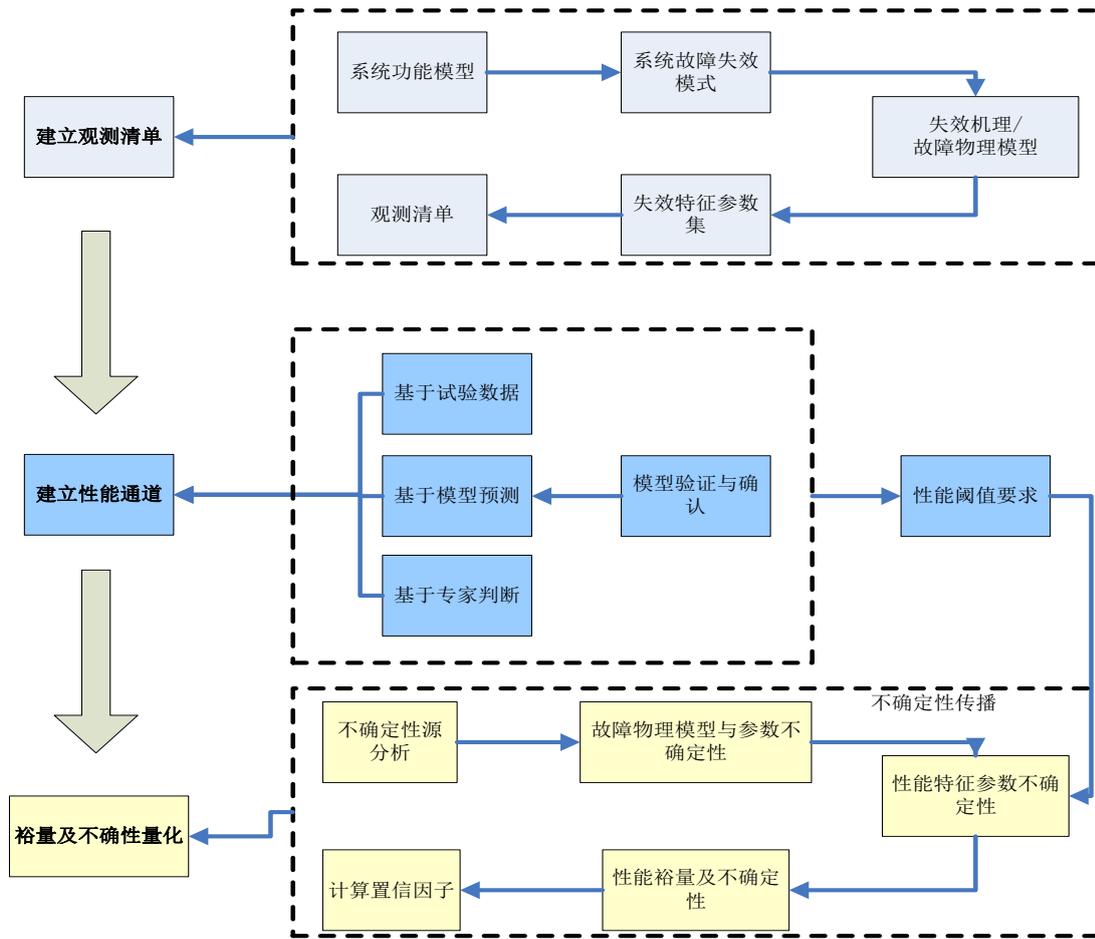


图 5-3 QMU 方法的关键要素流程示意图

对于复杂系统风险决策的 QMU 基本原理如图 5-4 所示。对于一般的结构可靠性分析，如果已知结构性能通道特征方程，即性能响应的功能函数，则采用 QMU 进行评估的关键是通过不确定性传播计算结构响应的不确定性分布。对于随机和认知混合不确定性同时存在时，如何降低计算成本并保证计算精度是不确定性分析的关键。本章针对该问题研究证据理论框架下混合不确定性传播模型和高效求解方法。

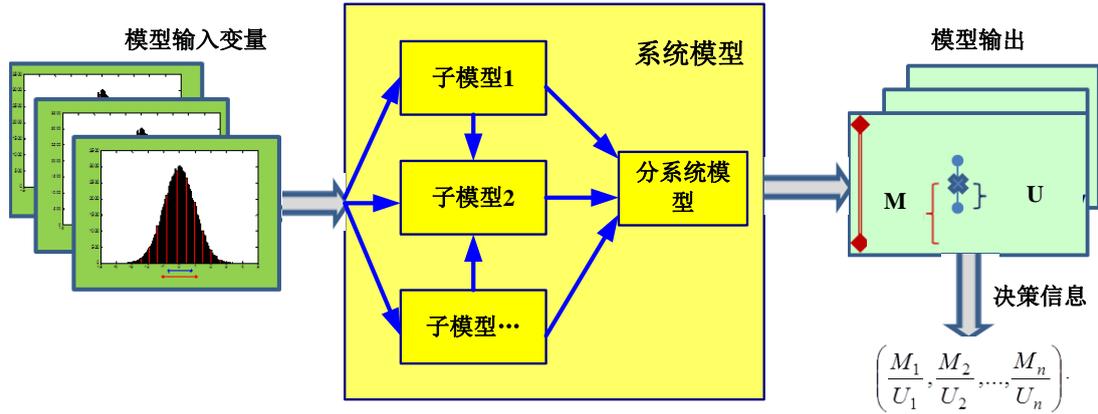


图 5-4 用于风险决策的系统 QMU 原理

5.3 基于证据理论的混合不确定性分析

5.3.1 证据理论的基本原理

D-S 证据理论源于 Dempster 和 Shafer 提出的一套最早应用于专家系统中处理不确定性推理问题的数学方法，其假设前提比概率论更弱，能直接表达信息的“不确定”和“不知道”。由于证据理论能够对各种不完全信息、不确定信息、不可靠信息甚至冲突信息进行合理的描述和处理，因而被广泛应用于各种领域的不确定性研究。其基本原理主要包括基本可信度分配函数、信任与似然函数^[168]。

设 Θ 为识别框架，是对于某一问题或事物所能认识到的所有可能结果的集合。函数 m 为从 Θ 的幂集 2^Θ 到 $[0,1]$ 的映射且满足以下三条性质：

$$\begin{cases} m(A) \geq 0, \forall A \in 2^\Theta \\ m(\phi) = 0 \\ \sum_{A \in 2^\Theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (5-3)$$

式中，函数 m 为识别框架 Θ 上的基本概率分配 (Basic Probability Assignment, BPA)。 $m(A)$ 称为集合 A 的基本概率分配值，表示对 A 的信任程度，其中 $m(A) > 0$ 的集合称为该分配函数的焦元。若 B 表示识别框架的任一子集，则 B 的真实程度由信任函数和似然函数表示：

$$Bel(B) = \sum_{A \subseteq B} m(A) \quad (5-4)$$

$$Pl(B) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m(A) \quad (5-5)$$

$Bel(B)$ 表示完全支持命题 B 的证据的基本概率函数值之和, $Pl(B)$ 则是完全或者部分支持命题 B 的基本概率函数之和。 $Bel(B)$ 和 $Pl(B)$ 分别构成现有信息对命题 B 信任度的下限值和上限值, 可用区间表示为 $[Bel(B), Pl(B)]$ 。基于信任函数和似然函数对命题的信任区间、似然区间以及不确定性区间的表示如图 5-5 所示。

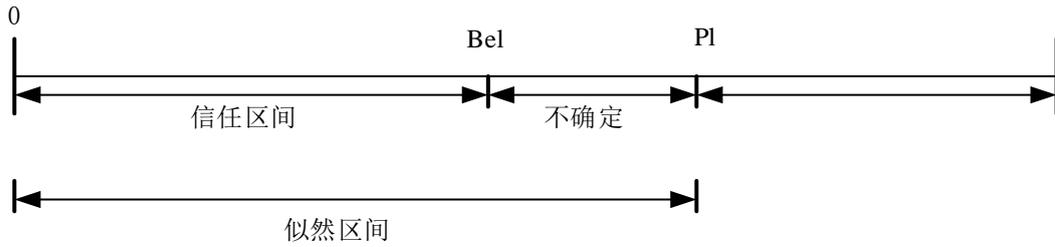


图 5-5 命题的不确定性的证据理论表示

5.3.2 基于证据理论的不确定性传播模型

根据证据理论, 设不确定性变量 Y 的描述用证据空间 $(\mathcal{Y}, \mathbb{Y}, m)$ 表示。其中 \mathcal{Y} 表示不确定性变量 Y 的所有可能值的集合, 构成 Y 的样本空间。令 \mathcal{U} 表示集合 \mathcal{Y} 的子集, \mathbb{Y} 表示子集 \mathcal{U} 的可数集合, 即 \mathcal{Y} 的焦元的集合。 m 为子集 \mathcal{U} 的基本概率分配函数, 满足当 $\mathcal{U} \in \mathbb{Y}$ 时, $m(\mathcal{U}) \geq 0$; 当 $\mathcal{U} \notin \mathbb{Y}$ 时, $m(\mathcal{U}) = 0$ 且对所有 $\mathcal{U} \in \mathbb{Y}$, $\sum m(\mathcal{U}) = 1$ 。

在结构可靠性以及系统性能分析中, 需要通过不确定性传播研究输入参数的不确定性对系统响应的影响, 获得系统响应的不确定性。工程实际中随机和认知不确定性同时存在, 设结构系统的响应函数抽象为:

$$G(\mathbf{Z}) = g(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = g(X_1, X_2, \dots, X_{n_X}, Y_1, Y_2, \dots, Y_{n_Y}) \quad (5-6)$$

其中, $\mathbf{X}(X_1, X_2, \dots, X_{n_X})$ 为客观不确定性向量, 采用概率分布来描述其不确定性; $\mathbf{Y}(Y_1, Y_2, \dots, Y_{n_Y})$ 为 n 个证据空间 $(\mathcal{Y}_1, \mathbb{Y}_1, m_1), (\mathcal{Y}_2, \mathbb{Y}_2, m_2), \dots, (\mathcal{Y}_n, \mathbb{Y}_n, m_n)$ 描述的不确定性变量, 其联合证据空间可表示为 $(\mathcal{Y}, \mathbb{Y}, m_Y)$ 。其中, (i) $\mathcal{Y} = \mathcal{Y}_1 \times \mathcal{Y}_2 \times \dots \times \mathcal{Y}_{n_Y}$, (ii) $\mathcal{U} = \mathcal{U}_1 \times \mathcal{U}_2 \times \dots \times \mathcal{U}_{n_Y}$, $\mathcal{U} \in \mathbb{Y}$, $\mathcal{U}_k \in \mathbb{Y}_k$, ($k = 1, 2, \dots, n_Y$), (iii) $m_Y(\mathcal{U})$ 为联合 BPA, 可以通过下式计算:

$$m_Y(\mathcal{U}) = \begin{cases} \prod_{k=1}^{n_Y} m_k(\mathcal{U}_k), & \mathcal{U} = \mathcal{U}_1 \times \mathcal{U}_2 \times \dots \times \mathcal{U}_{n_Y} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (5-7)$$

根据全概率理论, G 小于某个阈值 c 的概率 P 可以写为:

$$\begin{aligned}
P &= \sum_{i=1}^n \Pr\{G(\mathbf{Z}) < c | \mathbf{Z} \in \mathcal{U}_{XYi}\} \Pr\{\mathbf{Z} \in \mathcal{U}_{XYi}\} \\
&= \sum_{i=1}^n \Pr\{G(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) < c | \mathbf{Y}_i \in \mathcal{U}_i\} \Pr\{\mathbf{Y}_i \in \mathcal{U}_i\} \\
&= \sum_{i=1}^n \Pr\{G(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) < c | \mathbf{Y}_i \in \mathcal{U}_i\} m_Y(\mathcal{U}_i)
\end{aligned} \tag{5-8}$$

式中，乘积空间 \mathcal{Y} 中的焦元 \mathcal{U}_i 的概率等于 \mathcal{U}_i 的联合 BPA，即 $\Pr\{\mathbf{Y}_i \in \mathcal{U}_i\} = m_Y(\mathcal{U}_i)$ 。根据认知不确定性变量的性质，响应 G 小于某个阈值 c 的概率将会是一个区间，其边界用信任函数和似然函数度量：

$$\text{Bel}(F) = P_{\min} = \sum_{i=1}^n m_Y(\mathcal{U}_i) \Pr\{G_{\max}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) < c | \mathbf{Y}_i \in \mathcal{U}_i\} \tag{5-9}$$

$$\text{Pl}(F) = P_{\max} = \sum_{i=1}^n m_Y(\mathcal{U}_i) \Pr\{G_{\min}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) < c | \mathbf{Y}_i \in \mathcal{U}_i\} \tag{5-10}$$

改变不同的阈值 c ，即可得到系统响应 G 的不确定性描述。

5.3.3 混合不确定性传播求解新方法

根据证据理论，可由式 (5-7) 求得多个变量的联合 BPA，记为 $m_Y(\mathcal{U}_i)$ ，但 $\Pr\{G_{\min}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) < c | \mathbf{Y}_i \in \mathcal{U}_i\}$ 中针对每一个焦元计算含有随机变量和区间变量的混合情况，其概率的信任值和似然值很难直接求解。针对随机和区间混合变量，双重循环抽样方法对于大型复杂的工程问题计算成本太大。本文上一章中针对结构可靠性分析建立了基于自适应抽样方法的 Kriging 代理模型用于求解随机不确定性分布。本章在求解每个焦元的信任函数和似然函数时，通过集成自适应抽样 Kriging 代理模型，建立求解混合不确定性传播的新方法，提高 QMU 分析中计算不确定性传播时的计算效率。

第 4.3 节中建立的 Kriging 代理模型以及自适应的抽样加点方法用于失效概率的计算，在计算代理模型近似精度的置信水平时是通过功能函数响应值大于 0 或者小于 0 进行分类求解式 (4-52)，在本章中计算不确定性传播是需要按照功能函数响应值是大于阈值 c 还是小于阈值 c 进行分类。基于自适应抽样方法的 Kriging 代理模型和证据理论，以计算式(5-10)的似然函数为例，计算混合不确定性传播的主要步骤如下：

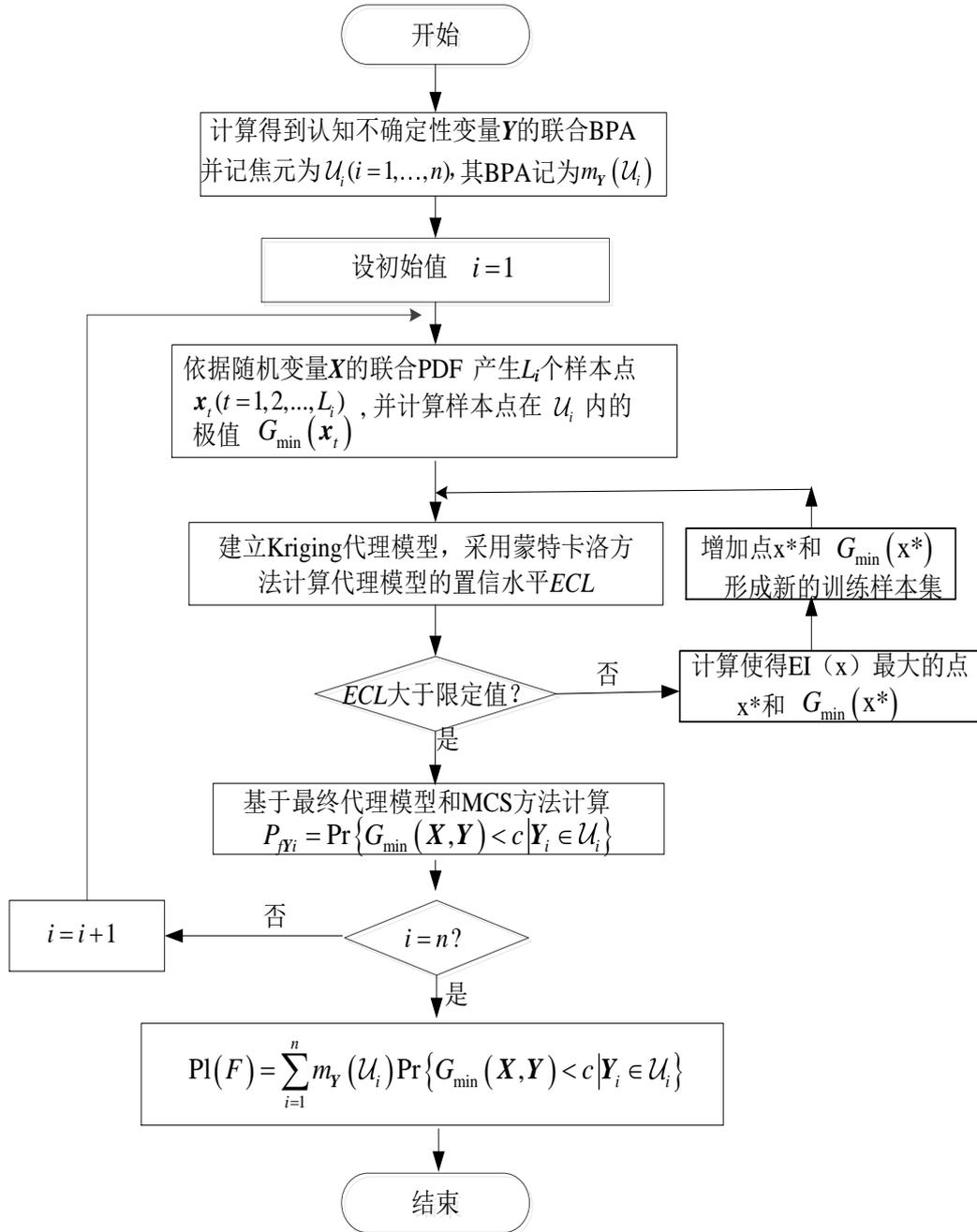


图 5-6 基于自适应 Kriging 方法求解似然函数计算流程

(1) 根据认知不确定性变量（证据结构）的个数，确定焦点空间，计算焦点空间中认知不确定性变量 y 的联合 BPA，并确定每个焦点 u_i 的边界。

(2) 根据随机变量 x 的分布类型，采用拉丁超立方抽样方法抽取 $L=(n+1)(n+2)/2$ 个样本点 $x_t (t=1,2,\dots,L)$ ，其中 n 为随机变量 x 的维数。

(3) 采用优化方法计算所抽取样本点在焦点 u_i 内对应的响应函数的极值 $G_{\min}(x_t)$ 。

- (4) 根据 x_t 和 $G_{\min}(x_t)$ 建立 Kriging 代理模型, 记为 M 。
- (5) 根据 MCS 抽样和代理模型, 采用 MCEI 准则搜寻点 x^* 并计算 $G_{\min}(x^*)$ 。将该数据加入到原样本中返回第四步, 更新代理模型。
- (6) 重复(4)-(5)步直至满足 ECL 大于设定的限制。
- (7) 根据 MCS 样本计算响应函数小于阈值 c 的概率边界。
- (8) 重复(3)-(7)步计算出每个焦元 u_i 内响应函数的输出不确定性小于某一阈值 c 的概率边界。
- (9) 根据联合 BPA 和第(8)步计算结果, 求解在随机和认知混合不确定性输入下响应函数的不确定性分布。

上述求解似然函数的计算流程如图 5-6 所示, 所得的似然函数为系统响应小于某一特定阈值 c 的概率上限。计算式 (5-9) 表示的信任函数则需将步骤(3)-(5)中的求最小值 $G_{\min}(x_t)$ 替换为求最大值 $G_{\max}(x_t)$, 即可获得系统响应小于某一特定阈值 c 的概率下限。

5.3.4 QMU 置信因子计算方法

从 QMU 的概念和流程可知, 性能裕量 M 由系统响应和阈值的估计值描述, 不确定性 U 也由系统响应和阈值的不确定性进行确定。在证据理论的框架下, 结构性能响应的不确定性分布用似然函数和信任函数表示。引入安全系数 γ , 从支撑风险决策的角度保守估计, 针对性能通道上边界阈值要求定义系统响应估计值和不确定性取值见表 5-1 所示。相应的裕量与不确定性分布如图 5-7-图 5-9 所示。下边界阈值要求对应的系统响应估计值和不确定性取值见表 5-2, 分布如图 5-10 到 5-12 所示。 $Bel_{P=0.5}$ 表示系统响应信任函数值为 0.5 时所对应的系统性能参数响应值。

表 5-1 系统响应估计值和不确定性取值 (上边界阈值)

上边界阈值不确定性类型	系统响应估计值 $Y_{function}$	阈值估计值 Y_T	系统响应不确定性 $U_{function}$	阈值不确定性 U_T
精确值 (固定住)	$Bel_{P=0.5}$	F_{TH}	$Bel_{P=(1+\gamma)/2} - Pl_{P=0.5}$	——
随机不确定性 (分布函数)	$Bel_{P=0.5}$	$F_{P=0.5}$	$Bel_{P=(1+\gamma)/2} - Pl_{P=0.5}$	$F_{P=0.5} - F_{P=(1-\gamma)/2}$
混合不确定性 (似然函数和信任函数)	$Bel_{P=0.5}$	$Pl_{P=0.5}^*$	$Bel_{P=(1+\gamma)/2} - Pl_{P=0.5}$	$Bel_{P=0.5}^* - PL_{P=(1-\gamma)/2}^*$

表 5-2 系统响应估计值和不确定性取值（下边界阈值）

上边界阈值不确定性类型	系统响应估计值 Yfunction	阈值估计值 YT	系统响应不确定性 Ufunction	阈值不确定性 UT
精确值	$Pl_{P=0.5}$	F_{TL}	$Bel_{P=0.5} - Pl_{P=(1-\gamma)/2}$	——
随机不确定性	$Pl_{P=0.5}$	$F_{P=0.5}$	$Bel_{P=0.5} - Pl_{P=(1-\gamma)/2}$	$F_{P=(1+\gamma)/2} - F_{P=0.5}$
混合不确定性	$Pl_{P=0.5}$	$Bel^*_{P=0.5}$	$Bel_{P=0.5} - Pl_{P=(1-\gamma)/2}$	$Bel^*_{P=(1+\gamma)/2} - Pl^*_{P=0.5}$

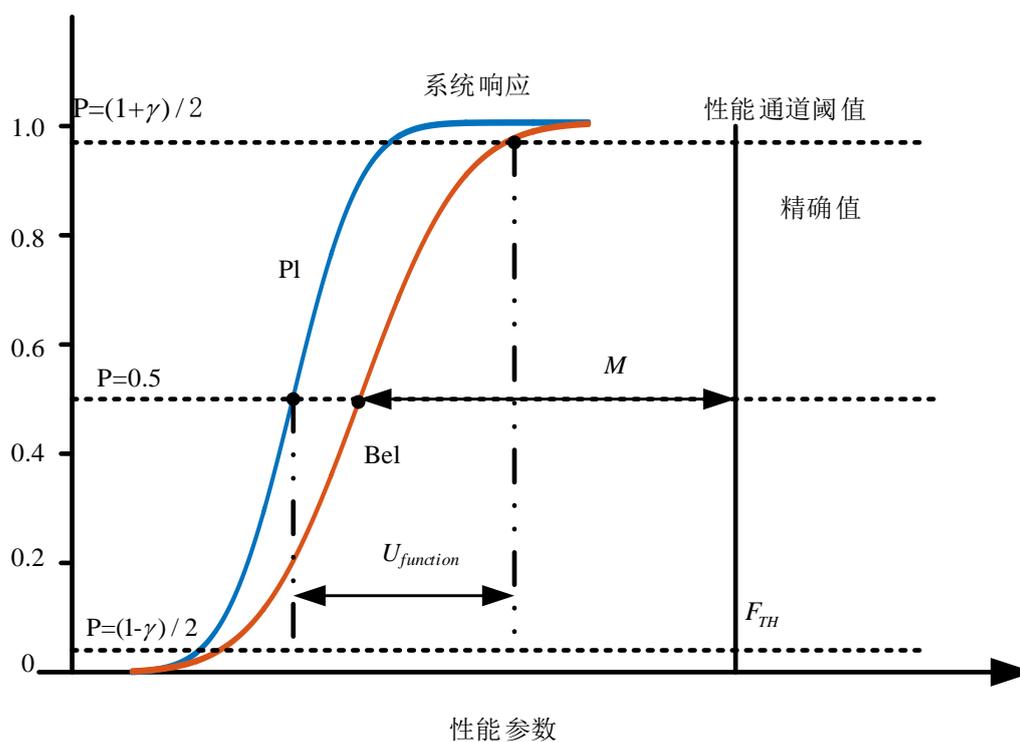


图 5-7 上边界阈值为精确值的 M 和 U 计算

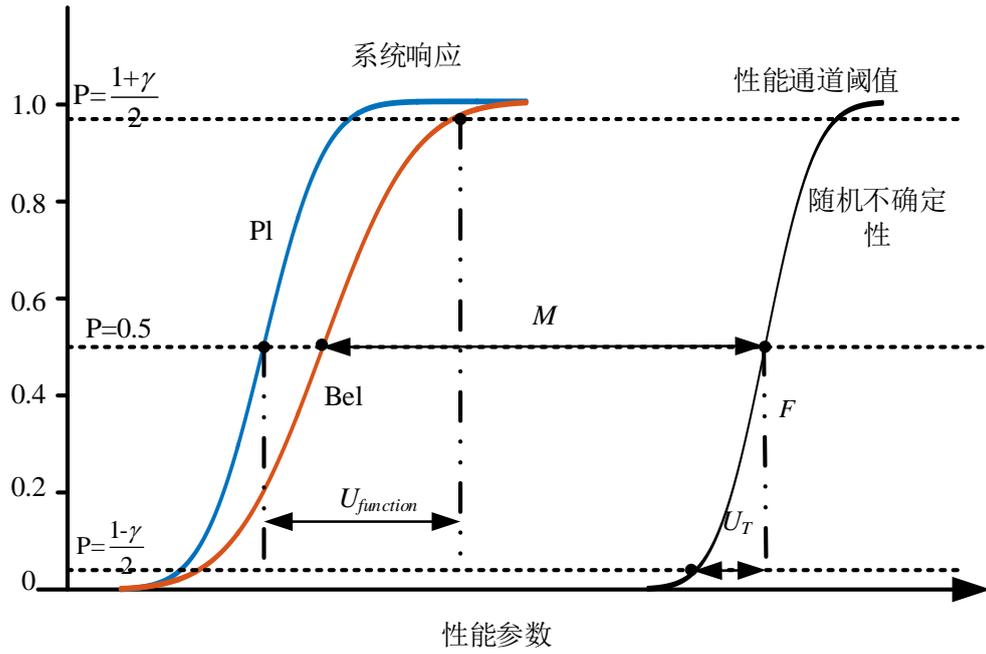


图 5-8 上边界阈值为随机分布是的 M 和 U 计算

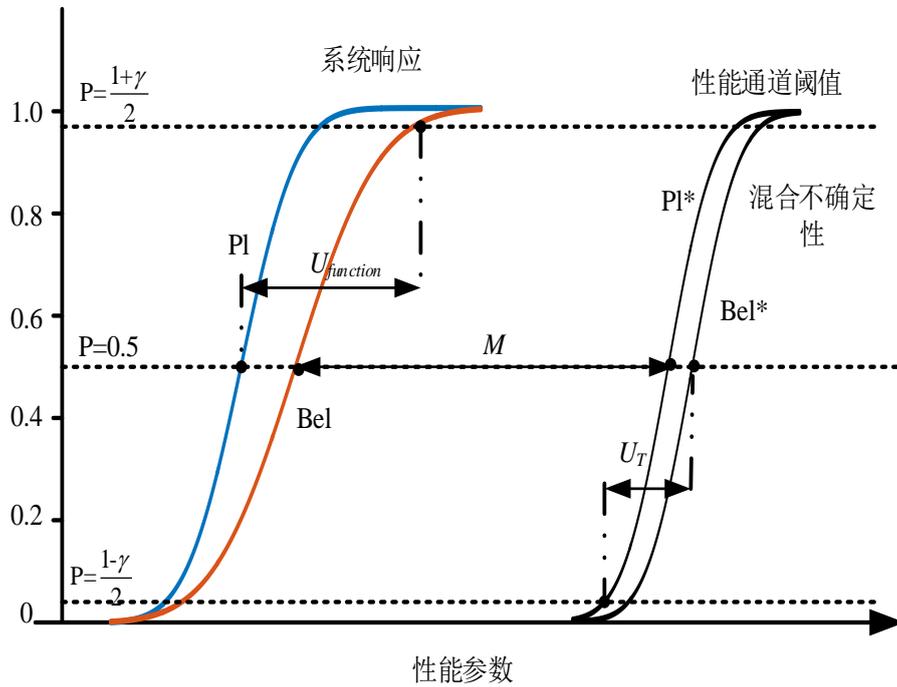


图 5-9 上边界阈值的证据结构分布时的 M 和 U

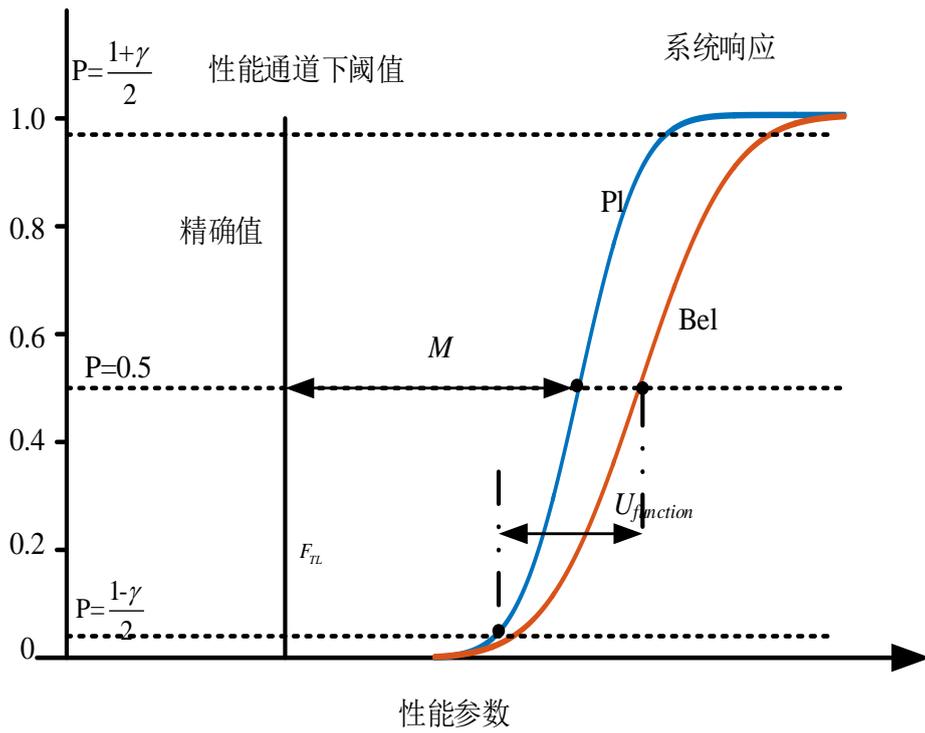


图 5-10 下边界阈值为精确值的 M 和 U 计算

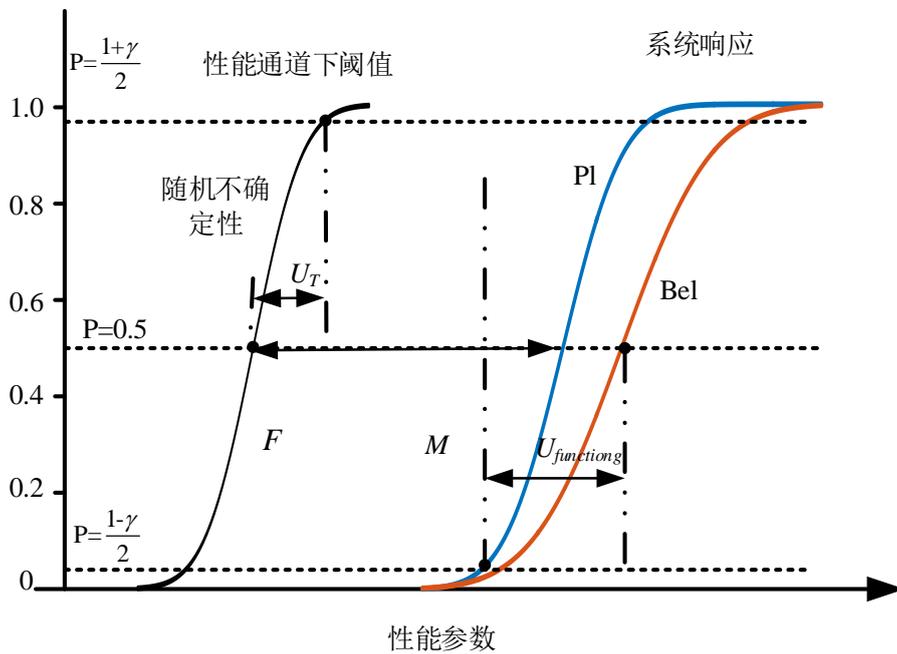


图 5-11 下边界阈值为随机分布是的 M 和 U 计算

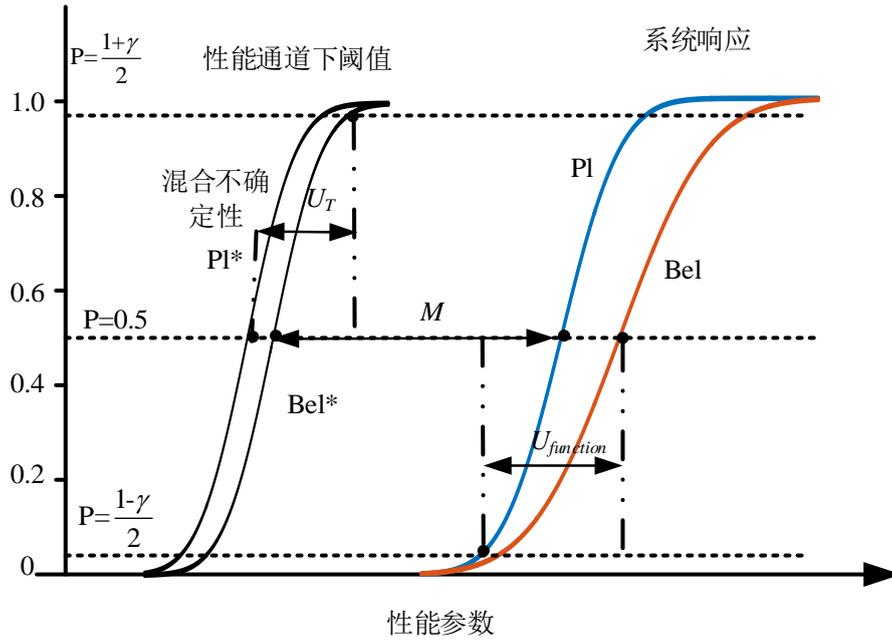


图 5-12 下边界阈值的证据结构分布时的 M 和 U

基于表 5-1 和表 5-2 的取值，上下边界的性能裕量 M 和不确定性 U 均可由下式计算：

$$M = |Y_{function} - Y_T| \tag{5-11}$$

$$U = U_{function} + U_T \tag{5-12}$$

如果性能通道同时有上下边界阈值要求，则表征系统 QMU 度量的置信因子为上下边界置信因子的最小值，如式(5-2)所示。

5.3.5 曲柄滑块机构算例分析

本节以简单的曲柄滑块机构作为算例，采用上述方法计算置信因子，并与非概率可靠性计算结果进行对比。图 5-13 为曲柄滑块机构示意图^[178]。设滑块与地面的摩擦力系数 μ 和偏移量 e 的精确分布不可获知，根据专家经验和判断，可以获得摩擦力系数和偏移量的证据区间及其 BPA，如表 5-3 所示。其余参数包括曲柄几何尺寸、连杆几何尺寸、外力载荷、材料参数等均为随机变量，其分布参数列于表 5-4 中。通过多个变量的 BPA 计算方法可得联合变量空间中每个焦元的联合 BPA 见表 5-5 所示。针对连杆的强度，传统的结构可靠性定义极限状态函数为材料的强度与最大应力之间的差，即

$$g_1(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = S - \frac{4P(b-a)}{\pi \left(\sqrt{(b-a)^2 - e^2} - \mu e \right) (d_2^2 - d_1^2)} \tag{5-13}$$

文献[19]基于证据理论采用 UAA 方法求解了上述极限状态函数的非精确概率可靠性。本文根据 QMU 方法的框架,以连杆的最大应力 $g_2(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 作为系统的性能响应函数 Y , S 作为性能响应函数的上边界阈值,采用置信因子评估机构的可靠性。

$$\begin{cases} Y = g_2(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{4P(b-a)}{\pi(\sqrt{(b-a)^2 - e^2} - \mu e)(d_2^2 - d_1^2)} \\ Y_T = S \end{cases} \quad (5-14)$$

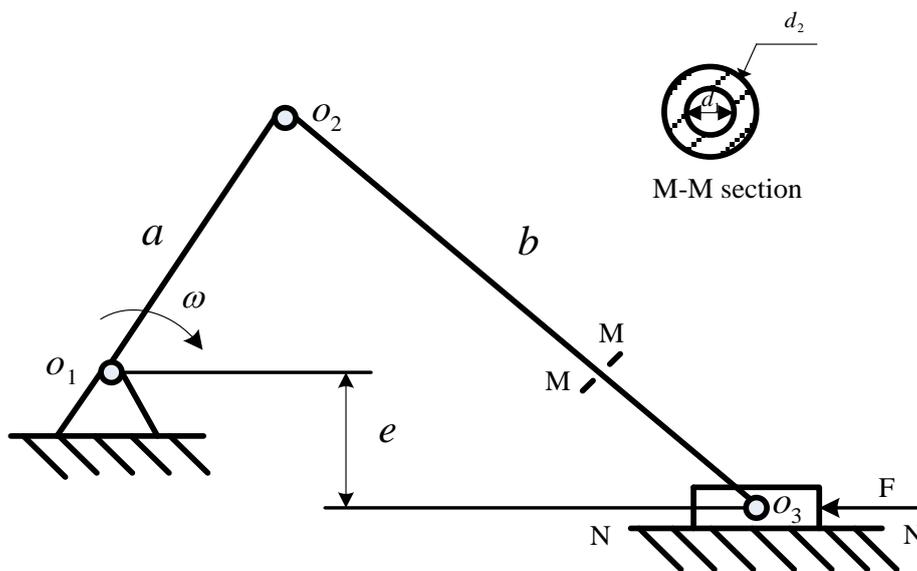


图 5-13 曲柄滑块机构示意图

表 5-3 证据结构变量

主观变量	变量符号	符号含义	区间	BPA
Y_1	e	偏移量	[100,120]	0.2
			[120,140]	0.4
			[140,150]	0.4
Y_2	μ	摩擦力系数	[0.15,0.18]	0.3
			[0.18,0.23]	0.3
			[0.23,0.25]	0.4

表 5-4 曲柄滑块机构随机变量 X 的分布参数

随机变量	变量和符号	均值	标准差
X_1	滑块长度 a (mm)	100	0.01
X_2	连杆长度 b (mm)	400	0.01
X_3	外界载荷 P (KN)	280	28
X_4	杨氏模量 E (GPa)	200	10
X_5	屈服强度 S (MPa)	290	29
X_6	连杆外径 d_1 (mm)	60	3
X_7	连杆内径 d_2 (mm)	25	2.5

表 5-5 认知不确定性变量的联合 BPA

Y_1 Y_2	$m_1([100,120]) = 0.2$	$m_1([120,140]) = 0.4$	$m_1([140,150]) = 0.4$
$m_2([0.15,0.18]) = 0.3$	0.06	0.12	0.12
$m_2([0.18,0.23]) = 0.3$	0.06	0.12	0.12
$m_2([0.23,0.25]) = 0.4$	0.08	0.16	0.16

由上述自适应抽样 Kriging 代理模型方法计算得到的系统响应函数的不确定性分布由信任函数和似然函数描述,如图 5-14 所示。其中虚线表示系统响应 Y 的信任函数和似然函数,实线表示阈值 Y_T 的累积概率分布函数。

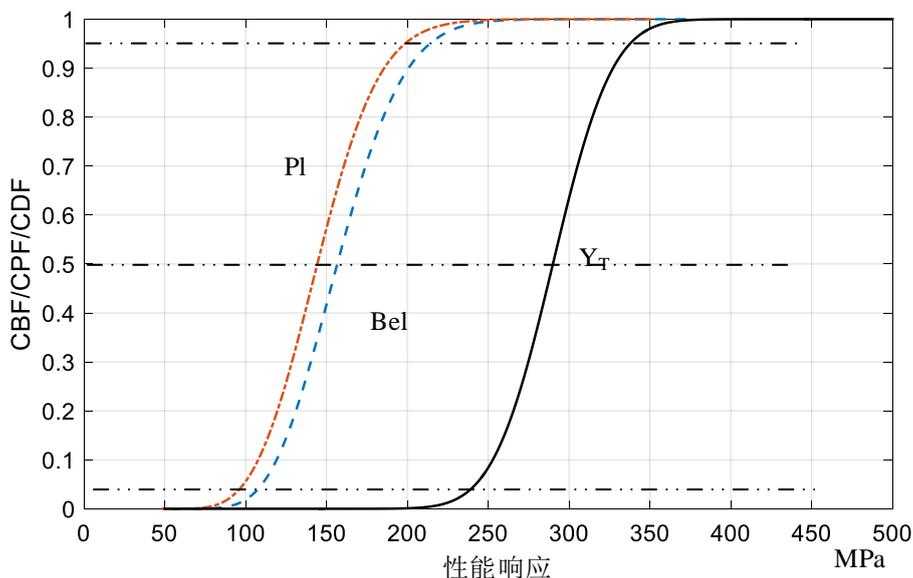


图 5-14 系统响应函数和阈值的不确定性分布

根据表 5-1、式 (5-11) 和 (5-12) 提供的计算方法,取不同的安全系数 γ 得到的系统 QMU 分析结果如表 5-6 所示。根据 QMU 的概念,当置信因子 CF 大于

1 时，就判定为可靠；当置信因子 CF 小于等于 1 时，就判定系统存在失效风险。表 5-6 中当风险决策时的安全系数 $\gamma=0.95$ 时，置信因子 CF 小于 1，说明系统存在失效风险，当可接受的决策风险变大，即安全系数降低时，置信因子 CF 大于 1，说明系统可靠，为可接受状态。算例表明，安全系数的大小与 QMU 分析得到的置信因子密切相关，从一定程度上表示风险决策者对系统决策风险的可接受程度。

表 5-6 不同安全系数取值计算得到的 CF

γ	M	U	CF
0.95	133.5	138	0.9674
0.9	133.5	117.5	1.136
0.8	133.5	93.5	1.428

从机构可靠性分析的视角出发，根据蒙特卡洛方法计算式 (5-13) 定义的极限状态方程，可得到响应失效概率的真实值介于信任函数与似然函数值之间，即 $4.68 \times 10^{-4} \leq P_f \leq 1.1648 \times 10^{-3}$ 。说明滑块存在较低的失效概率。 $\gamma=0.95$ 时的置信因子 CF 能够反映出系统的失效状态，这与传统可靠性分析的结果相一致。

由于本例中系统响应函数为线性函数，认知不确定性变量 e 和 μ 是单调函数，函数的极值分别出现在两个变量每个焦元区间的端点处。因此不考虑优化求极值过程，则采用基于 Kriging 方法调用系统响应函数的次数为 $2 \times 9 \times 50 = 900$ （每个焦元建立代理模型的训练样本数为 50），而采用 MCS 方法 9 个焦元计算信任与似然函数分布共需极限状态函数次数为 9×10^6 。基于 Kriging 代理模型方法计算不确定性传播的计算效率大大高于 MCS 方法，这说明所提的基于 Kriging 方法用于随机和认知混合不确定性下的 QMU 分析具有很好的可行性。

5.4 基于 QMU 的结构腐蚀可靠性分析算例研究

5.4.1 结构点蚀转裂纹失效算例分析

本节以第四章中的金属平板含点蚀缺陷作为算例研究对象，采用 QMU 方法评估混合不确定性下的结构可靠性。假设一无限大金属平板表面上有一点蚀初始缺陷，考虑点蚀转裂纹过程，相应的结构失效极限状态方程如式 (4-30) 所示，式中反映的点蚀损伤不包括点蚀坑的萌生阶段，即从点蚀坑生成后作为初始条件和损伤扩展的起始时间。根据本章所建立的 QMU 方法框架，点蚀缺陷处的最大应力强度因子为系统性能响应函数 Y ，材料断裂韧性 K_{Ic} 为性能要求的上边界阈值，如式 (5-15) 所示。当系统性能响应函数大于性能要求的上边界阈值时，则结构系统处于失效状态。考虑到初始点蚀坑的尺寸分布 a_0 和腐蚀电流密度 I_0 难以获得其分布

值，相应的不确定性表现为认知不确定性，用证据变量表示，如表 5-7 所示。表 4-1 中的其余不确定性变量仍为随机变量且服从正态分布。

$$Y = \begin{cases} \beta\sigma\sqrt{\pi\left(\frac{3Mi_0}{2\pi zF\rho}\exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right)\exp\left(\frac{V_m\Delta P}{RT}\right)*t + a_0^3\right)^{\frac{1}{3}}} \text{ (点蚀阶段)} \\ \beta\sigma\sqrt{\pi\left(a_{ci} + \int_{t_{ci}}^t C(K_I - K_{ISCC})^m dt\right)} \text{ (裂纹阶段)} \end{cases} \quad (5-15)$$

$$Y_T = K_{IC}$$

表 5-7 证据变量

主观变量	变量符号	符号含义	区间 (10 ⁻⁶)	BPA
Y ₁	a ₀	点蚀坑初始尺寸	[1.4, 1.8]	0.2
			[1.8, 2.2]	0.7
			[2.2, 2.6]	0.1
Y ₂	I ₀	腐蚀电流密度	[4.5, 5.8]	0.2
			[5.8, 7.1]	0.7
			[7.1, 8.4]	0.1

表 5-8 认知不确定性变量的联合 BPA

Y ₁ \ Y ₂	m ₁ ([1.4,1.8]) = 0.2	m ₁ ([1.8, 2.2]) = 0.7	m ₁ ([2.2, 2.6]) = 0.1
m ₂ ([4.5, 5.8]) = 0.2	0.04	0.14	0.02
m ₂ ([5.8, 7.1]) = 0.7	0.14	0.49	0.07
m ₂ ([7.1, 8.4]) = 0.1	0.02	0.07	0.01

由 5.3 节所建立的自动加点更新 Kriging 代理模型方法计算得到的系统响应函数的不确定性分布由信任函数和似然函数描述。图 5-15 为腐蚀时间 200d 时应力强度因子不确定性分布的信任函数 (Bel) 和似然函数 (Pl)。图 5-16 为腐蚀时间 200d 时系统响应和阈值要求的不确定性分布，根据图 5-8 所定义裕量 (M) 和不确定性 (U) 的计算方法， $CF=M/U=(35-15.8)/[(35-28)+(18-15.7)]=2.06$ 。计算结果表明，在安全系数 $\gamma=0.95$ 的情况下，系统的置信因子大于 1，说明系统处于风险可接受范围内。算例结果也表明，本章所建立的混合不确定性下的系统 QMU 能够有效求解含点蚀损伤结构的可靠性评估。

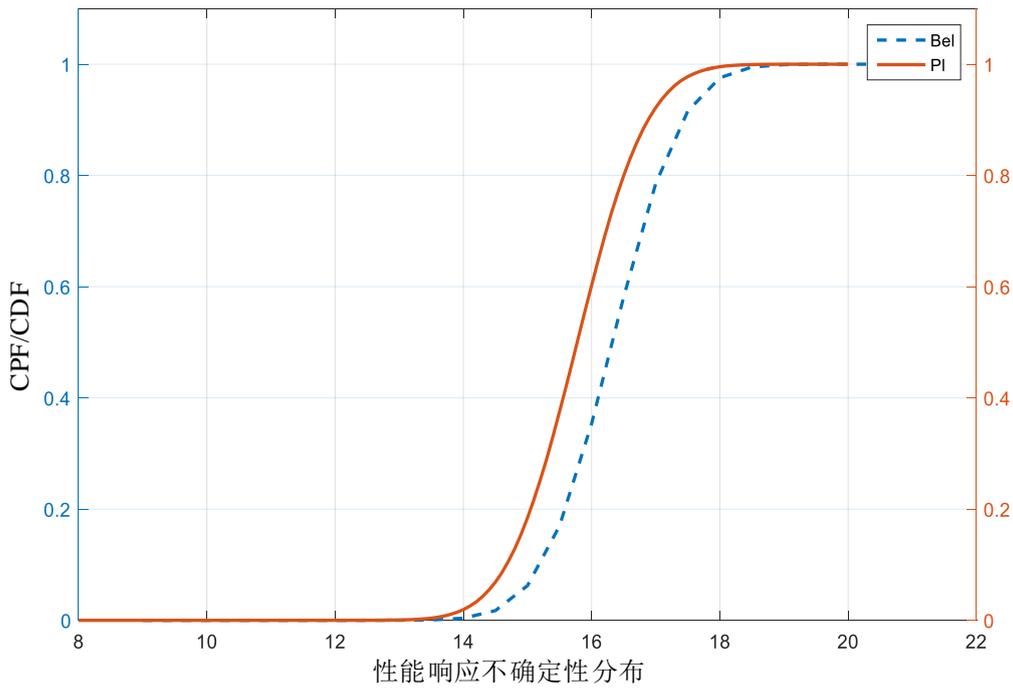


图 5-15 腐蚀时间 200d 的最大应力强度因子分布

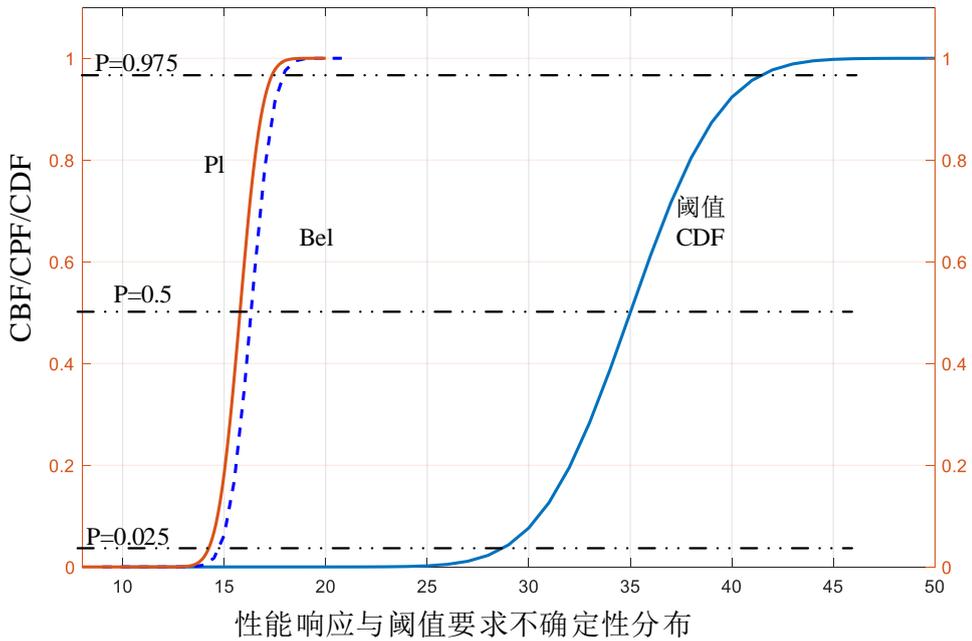


图 5-16 腐蚀 200d 的 QMU 分析

5.4.2 含腐蚀损伤贮气罐强度失效分析

含腐蚀损伤结构的裂纹扩展断裂失效是其主要的失效方式之一，从第二章的试验可知，金属材料经历长期腐蚀后期拉伸强度会有一定程度下降，可能发生强度失效。本节以某工程贮气罐为对象，针对其受腐蚀后的强度进行 QMU 分析。针

对贮气罐的强度功能，结合应力强度干涉理论，贮气罐在正常使用过程中结构失效包含的观测参数如表5-9所示。其中腐蚀损伤参数 X_2 的不确定性由第二章样品力学性能测试结果从偏保守的角度量化所得。

根据应力强度干涉理论，设“贮气罐材料极限强度”为性能通道的阈值，“贮气罐最大截面等效应力”为性能响应特征参数值。贮气罐材料极限强度的不确定性主要由材料性能参数和腐蚀损伤影响构成，为线性解析函数关系：

$$Y_T = X_1(1 - X_2) \quad (5-15)$$

由于材料极限强度为线性解析关系，通过MATLAB直接抽样获得的不确定性分布如图5-17所示。贮气罐工作压力下最大截面等效应力最佳估计值计算采用有限元法。材料模型取值： $E=200\text{GPa}$ 、 $\nu=0.3$ 、 $\sigma_{0.2}=400\text{MPa}$ 、 $\sigma_b=735\text{MPa}$ 、硬化模量为弹性模量的1%（双线性模型）；结构尺寸取值：壳体外径 $\Phi 75\text{mm}$ 、壳体内径 $\Phi 68\text{mm}$ ；工作压力取值 35MPa 。计算结果见图5-18所示，最大截面平均应力为 227.38MPa ，图中所示的最大应力为节点的最大应力值。

表 5-9 贮气罐观测参数及不确定性源分析

序号	特征参数	不确定性源	类型	表征	参考值	说明
1	材料性能参数 (X_1)	U_1	正态	均值	735MP	极限强度
			分布	均方差	15MPa	
2	腐蚀损伤参数 (X_2)	U_2	证据	0.7	[5%,10%]	极限强度的损减比例
			结构	0.3	[10%,18%]	
3	内径尺寸 (X_3)	U_3	正态	均值	68mm	贮气罐壳体的内外尺寸（应力主要影响因素）
			分布	均方差	0.2mm	
4	外径尺寸 (X_4)	U_4	正态	均值	75mm	
			分布	均方差	0.2mm	
5	工作压力 (X_5)	U_5	证据	0.3	[30, 33]	加注气体精度及工作压力随温度波动
			结构	0.5	[33, 36]	
				0.2	[36, 38]	

根据应力强度干涉理论，设“贮气罐材料极限强度”为性能通道的阈值，“贮气罐最大截面等效应力”为性能响应特征参数值。贮气罐材料极限强度的不确定性主要由材料性能参数和腐蚀损伤影响构成，为线性解析函数关系：

$$Y_T = X_1(1 - X_2) \quad (5-15)$$

由于材料极限强度为线性解析关系，通过MATLAB直接抽样获得的不确定性分布如图5-17所示。贮气罐工作压力下最大截面等效应力最佳估计值计算采用有限元法。材料模型取值： $E=200\text{GPa}$ 、 $\nu=0.3$ 、 $\sigma_{0.2}=400\text{MPa}$ 、 $\sigma_b=735\text{MPa}$ 、硬化模量为弹性模量的1%（双线性模型）；结构尺寸取值：壳体外径 $\Phi 75\text{mm}$ 、壳体内径 $\Phi 68\text{mm}$ ；工作压力取值 35MPa 。计算结果见图5-18所示，最大截面平均应力为 227.38MPa ，图中所示的最大应力为节点的最大应力值。

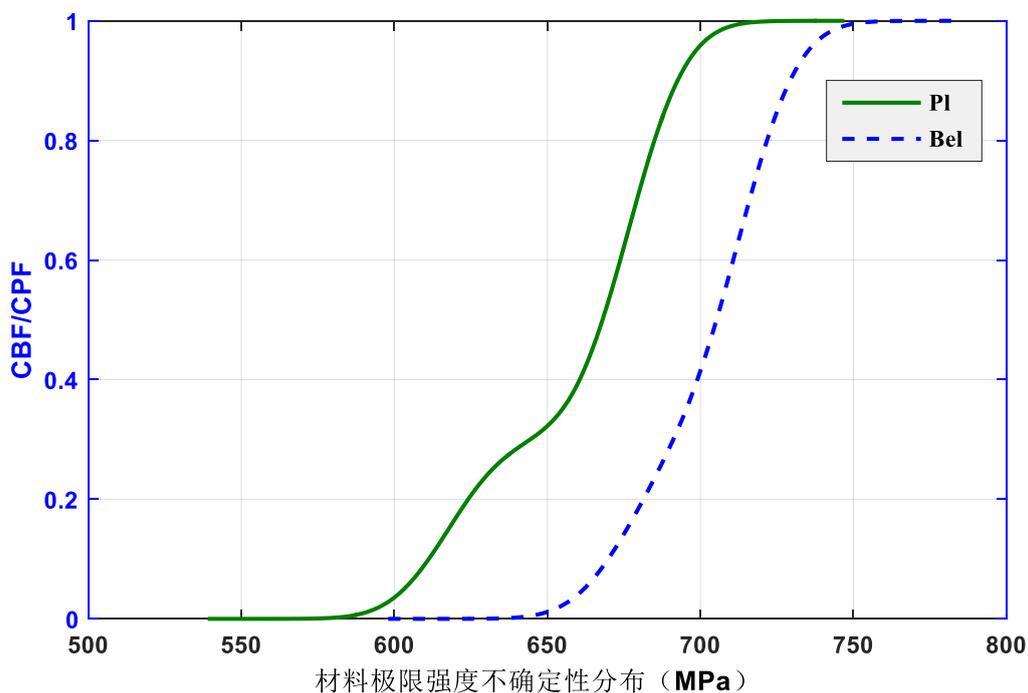


图 5-17 材料极限强度的分布情况

考虑到随机变量和证据变量的混合情况，通过MATLAB和COMSOL编程实现基于Kriging代理模型的结构响应应力不确定性分析。最大截面平均应力的不确定性分布如图5-19所示。产生Kriging代理模型训练样本共计调用COMSOL进行有限元计算60次，与直接抽样进行计算相比大大降低了计算资源的消耗。

由于极限强度和最大截面平均应力的不确定性均为似然函数和信任函数表示，根据表 5-1 和图 5-9 所示的裕量和不确定性计算方法，取安全系数为 0.95，则裕量 $M=668.5-217.4=451.1\text{MPa}$ 。极限强度的不确定性约为 $705-572=132\text{MPa}$ ，最大截面平均应力的不确定性约为 $247-217.4=29.6\text{MPa}$ 。总的 uncertainty U 约为 $132+29.6=161.6\text{MPa}$ 。置信因子 $CF=M/U=451.1/161.6=2.79$ 。分析表明，考虑腐蚀损伤使得材料极限强度损减后，裕量与不确定性的置信因子仍大于 1，能够满足系

统功能的要求。

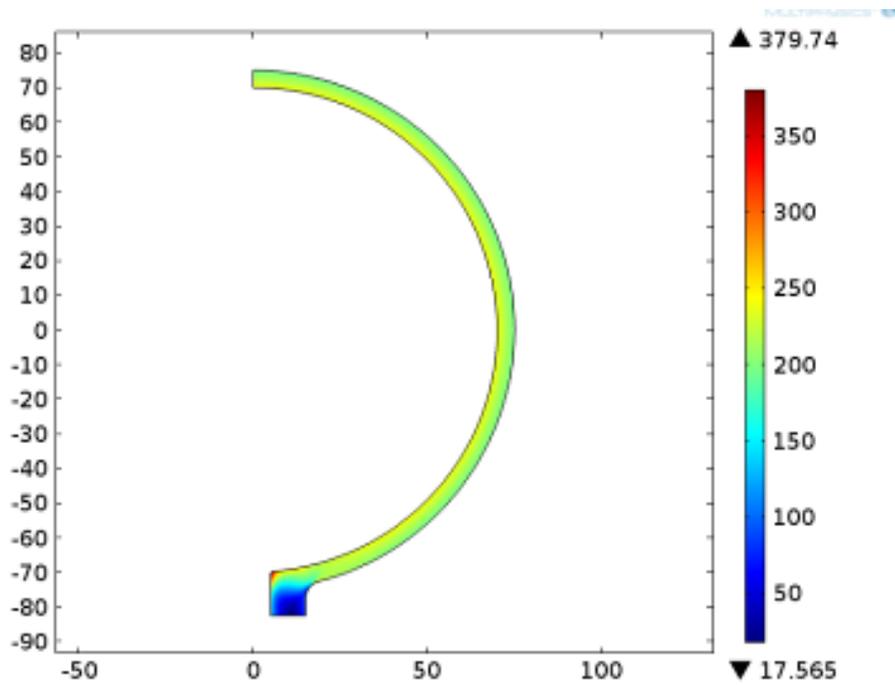


图 5-18 参数取均值时贮气罐应力分布及大小

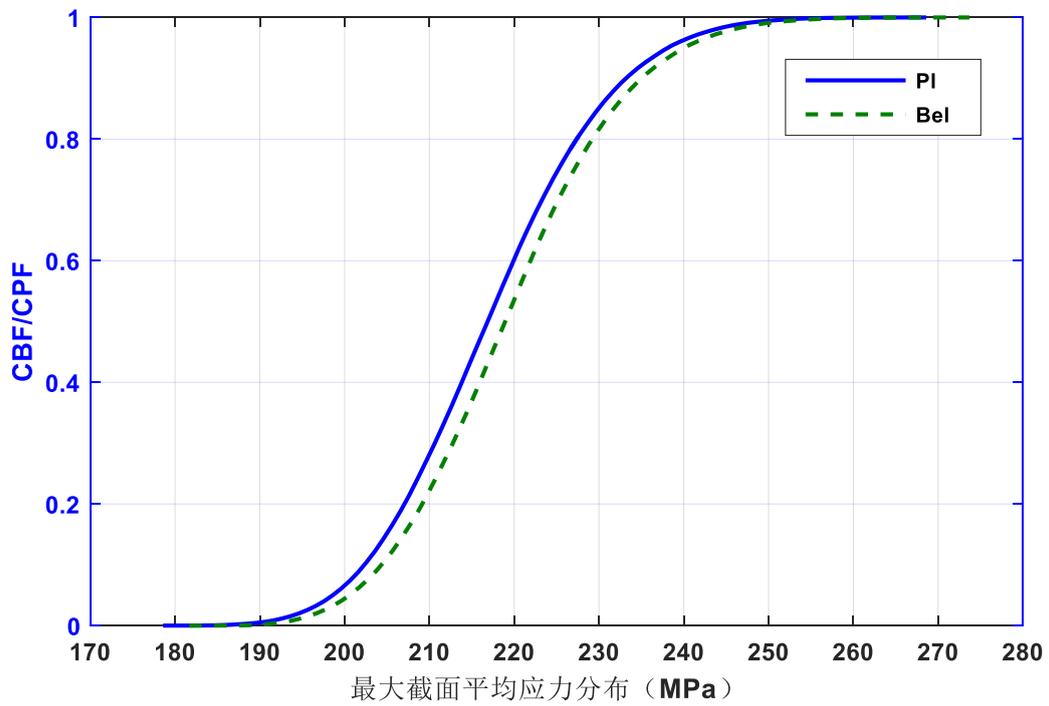


图 5-19 最大截面平均应力的不确定性分布

5.5 本章小结

本章针对实际工程面临的随机和认知不确定性同时存在的情况，提出了基于证据理论和 Kriging 模型的混合不确定性传播方法，并根据 QMU 的相关概念探讨了系统性能响应为信任函数和似然函数分布时的系统 QMU 度量方法。在此基础上，分别对结构点蚀转裂纹断裂失效以及强度失效开展了算例应用研究，算例研究表明，本章建立的 QMU 度量方法能够有效求解结构腐蚀损伤导致的失效问题，同时，基于自适应抽样的 Kriging 模型在混合不确定传播计算方面具有较高的精度和效率，QMU 方法可作为传统可靠性理论的补充，用于度量系统可接受风险时的系统可靠性评估。

第六章 全文总结与展望

6.1 全文总结

由于周围环境介质和所承受载荷的长期作用，金属结构的服役性能会随着腐蚀的产生发展逐步退化，甚至造成突发性破坏导致重大经济损失和恶性事故，给关键零件与结构的安全服役带来风险。当前随着机械零件与结构服役条件的日益复杂，无论是宏观大型构件的破坏还是微观元器件的失效，其失效机制均具有多尺度和多场耦合的特点，特别是化学-力学作用下的失效机制值得深入研究。本文以核工业和航空领域应用广泛的金属材料在腐蚀环境和力学载荷下的安全服役为研究背景，重点针对金属点蚀和结构可靠性分析方法开展了研究，主要研究内容和取得的成果包括：

(1) 设计并开展了两种典型材料 HR-2 和 316L 不锈钢的点蚀和力学性能试验。针对不同腐蚀环境和力学加载情况，研究了不锈钢材料点蚀行为和力学性能变化情况，初步分析了 pH 值、溶液介质浓度等因素对腐蚀效应的影响。通过开展静态加载试验，初步获得了 316L 和 HR-2 不锈钢在应力和腐蚀环境耦合作用下的腐蚀损伤行为特征，为不锈钢材料的实际工程应用选材和结构性能参数不确定性源的分析提供依据。

(2) 从微观层面开展了不锈钢材料点蚀生长过程的多物理场建模与模拟研究。针对应力与腐蚀环境耦合作用下的点蚀生长过程，分析了点蚀扩展的数学物理控制方程，在此基础上基于 COMSOL 平台建立了应力场与腐蚀电位场以及点蚀坑几何形状生长的多物理模拟模型，开发了相应的 MATLAB 与 COMSOL 计算耦合程序，能够实现单个点蚀坑在应力加载下的生长过程模拟。利用该数值模拟程序通过算例分析了应力加载大小对点蚀坑形状以及应力集中因子的影响，为点蚀转裂纹的宏观失效模式研究提供支撑。

(3) 针对核工程等领域广泛应用的金属材料长期腐蚀失效问题，开展了结构含点蚀损伤的故障物理建模研究。考虑了点蚀生长阶段应力加载的影响，建立了包括点蚀生长、点蚀转化为裂纹、裂纹扩展三阶段的点蚀损伤演化失效的故障物理模型，可为结构腐蚀的寿命预测提供支持。

(4) 在结构可靠性分析算法方面，建立了基于自适应抽样和 Kriging 代理模型的结构可靠性分析方法框架和计算流程。从计算效率和精度两个方面与传统的蒙

特卡洛方法、一阶可靠性方法进行了对比分析，并以应力加载下点蚀转化为应力腐蚀开裂的故障物理模型为例进行了算例研究。算例结果表明，自适应抽样的 Kriging 代理模型计算方法具有较高的计算效率和精度。该研究成果可为工程实际结构的可靠性分析提供高效求解算法。

(5) 针对结构腐蚀可靠性或性能评估中的随机和认知不确定性同时存在的情况，根据 QMU 的概念，研究了基于证据理论和 Kriging 代理模型的性能裕量与不确定性量化分析计算方法。通过构建代理模型提高裕量与不确定性量化分析过程中计算不确定性传播的效率和精度。基于上述方法对结构点蚀转裂纹断裂失效和一般的强度失效两种模式开展了算例应用研究。该研究成果为混合不确定性下复杂系统的性能评估提供了技术支持。

6.2 后续工作展望

重大装备和结构在复杂服役环境下的性能损伤与退化、失效机理和寿命预测将是学术界和工程中需要长期关注并不断发展的热点研究方向之一。结合本文已有的研究工作基础和对相关问题的思考，以下有关腐蚀建模与评估的研究内容值得进一步开展：

(1) 目前的点蚀生长多物理场模拟研究中，忽略了浓度梯度的影响，这与实际情况存在差异。由于点蚀生长过程复杂，影响因素较多，因此后续的研究工作中可以考虑溶液中的离子浓度、pH 值的大小等因素，使建模过程能更接近真实的腐蚀过程。另一方面考虑腐蚀生长的 3D 模型以及基于扩展有限元法模拟点蚀坑转应力腐蚀开裂的全物理过程值得进一步研究。

(2) 在腐蚀故障物理建模研究工作中，本文采用应力强度因子作为判据，判断点蚀坑是否向微裂纹转化，采用的是确定性理论，而工程实际上点蚀坑是否向微裂纹转化存在一定的不确定性，从宏观上讲具有一定的随机性，因此如何考虑点蚀扩展中的随机性值得深入研究。

(3) 结构在长期腐蚀服役环境下的损伤演化过程会经历多个损伤状态，失效可表现为多失效模式。各个损伤状态与失效模式之间存在一定的相关性、竞争性和随机性，如何有效地建立能反应装备结构长期服役环境下多状态故障物理模型是结构寿命预测的关键问题，因此需要根据结构服役损伤物理过程结合随机过程理论建立结构性能的多状态演化空间。

(4) 在随机和认知混合不确定性下的结构可靠性研究方面，由于工程实际中的

大型复杂结构系统，常常是多种不确定性变量同时存在。由于各种不确定性的描述方法各有不同，需要开展基于多源信息融合的不确定性分析方法研究，以便有效地处理多种不确定性。此外针对结构可靠性度量的参量或指标，由于度量指标不一样，比如可靠度、置信因子、概率区间等，需要建立统一的度量标准用于评估多种混合不确定性结构的安全可靠服役。

致 谢

在论文完成之际，内心感慨万千。首先，感谢我的导师黄洪钟教授，是黄老师把我带入可靠性研究领域的前沿，让我有机会融入到电子科技大学可靠性工程研究所这个优秀的研究团队，拓展专业知识和学术视野。本文是在黄老师的严格要求和悉心指导下完成的。黄老师渊博的学识、高瞻远瞩的学术思想、严谨的治学态度、敬事而信的工作精神、宽以待人的崇高风范使我受益匪浅。在此向老师致以最崇高的敬意和诚挚的感谢！向电子科技大学可靠性工程研究所致以最美好的祝福！

特别感谢中物院四所魏发远研究员多年来对我学习和工作的指导和帮助。魏发远研究员敏锐的洞察力和积极负责的工作态度是我学习的楷模。

论文的顺利完成离不开工作单位给予我的宽松环境。感谢中物院四所给予我的这次在职学习机会，使自己能轻松投入到学位论文工作中。论文写作期间得到了中物院四所 411 室、人教处领导的关心和有力督促，在此表示感谢！

衷心感谢美国 Wichita State University 的王平峰副教授，在出国访学一年期间给予我的关怀和鼓励，让我在学术的道路上不断进步。

感谢电子科技大学机电学院领导和老师们在我的学习过程中所给予的关心和帮助。特别是电子科技大学可靠性工程研究所的老师和同学们，营造的“让优秀成为一种习惯”的氛围让我在潜移默化中受益颇多，在此表示深深的感谢！

本文研究内容与实验基于总装技术基础项目（2013ZK1.2）和中物院发展基金项目（2013B0203028），在此对总装和中物院的支持表示感谢。

衷心感谢参加论文评阅和答辩的教授和专家，感谢他们的肯定、支持和鼓励！

求学生涯暂告段落，求知道路却永无停滞！六年的学习生活让我学会了坦然面对成功，坚韧面对挫折。“求实求真、大气大为”——这八字箴言将在今后人生道路上伴我前行。最后谨向所有关心和帮助过我的师长、同事、同学、朋友们表示深深的谢意！

参考文献

- [1] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2011-2020)[M]. 北京: 科学出版社, 2010
- [2] 黄永昌, 张建旗. 现代材料腐蚀与防护[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2012
- [3] 马成, 彭群家, 韩恩厚, 等. 核电结构材料应力腐蚀开裂的研究现状与进展. 中国腐蚀与防护学报[J], 2014, 34(1): 37-45
- [4] 肖厦子, 宋定坤, 楚海建, 等. 金属材料力学性能的辐照硬化效应[J]. 力学与实践, 2015 (03): 89-98
- [5] G. Karen. Cracking data base as a basis for risk informed inspection[C]. Proceedings of 10th International Conference on Environmental Degradation on Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, August, 2001, USA
- [6] R. Staehle, J. Gorman. Quantitative assessment of submodes of stress corrosion cracking on the secondary side of steam generator tubing in pressurized water reactors[J]. Corrosion, 2003, 59(11): 931-994
- [7] R. M. Horn, G. M. Gordon, F. P. Ford, et al. Experience and assessment of stress corrosion cracking in L-grade stainless steel BWR internals[J]. Nuclear Engineering Design, 1997, 174(3): 313-325
- [8] 穆志韬, 李旭东, 刘治国. 飞机结构材料环境服饰与疲劳分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2014
- [9] T. S. Balint, E. Kolawa, A. Cuts. Extreme environment technologies for NASA's robotic planetary exploration[J]. Acta Astronautica, 2008, 63: 285-298
- [10] 蔡健平, 陆峰, 吴小梅. 我国航空材料的腐蚀与防护现状与展望[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 271-275
- [11] R. Dilger, H. Hickethier, M. D. Greenhalgh. Eurofighter a safe life aircraft in the age of damage tolerance[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(6): 1017-1023
- [12] N. Eliaz, G. Shemesh, R. M. Latanision. Hot corrosion in gas turbine components[J]. Engineering Failure Analysis, 2002, 9(1): 31-43
- [13] F. Bagnoli, F. Dolce, M. Colavita, et al. Fatigue fracture of a main landing gear swinging lever in a civil aircraft[J]. Engineering Failure Analysis, 2008, 15(6): 755-765
- [14] 石仁委, 龙媛媛. 油气管道防腐蚀工程[M]. 北京:中国石化出版社, 2008
- [15] 范兆廷. 新型输油气双金属复合管道腐蚀及可靠性研究[D]. 重庆大学, 2013

- [16] 王凤平. 腐蚀电化学原理、方法及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008
- [17] 刘秀晨, 安成强. 金属腐蚀学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- [18] 谈尚炯. 核电汽轮机低压转子的应力腐蚀寿命预测建模及计算分析[D]. 上海交通大学, 2013
- [19] 毋玲. 环境腐蚀及其应力耦合的损伤力学方法与结构性能预测研究[D]. 西北工业大学, 2006
- [20] A. Turnbull, D. A. Horner, B. J. Connolly. Challenges in modelling the evolution of stress corrosion cracks from pits[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, 76(5): 633-640
- [21] R. P. Wei, D. G. Harlow. Corrosion-enhanced fatigue and multiple-site damage[J]. *AIAA Journal*, 2003, 41(41): 2045-2050
- [22] 王燕舞, 黄小平, 崔维成. 船舶结构钢海洋环境点蚀模型研究之一: 最大点蚀深度时变模型[J]. *船舶力学*, 2007, 11(4): 577-586
- [23] D. W. Hoepfner, C. A. Arriscorreta. Exfoliation corrosion and pitting corrosion and their role in fatigue predictive modeling: state-of-the-art review[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2012, 2012:1-16
- [24] T. P. Hoar. The production and breakdown of the passivity of metals[J], *Corrosion Science*, 1967: 341-355
- [25] H. Bohni, H. H. Uhlig. Environmental factors affecting the critical pitting potential of aluminum[J], *Journal of the Electrochemical Society*, 1969, 18: 906-910
- [26] L. F. Lin, C. Y. Chao, and D. D. Macdonald, A point defect model for anodic passive films II. Chemical breakdown and pit initiation[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1981: 30: 1194-1198
- [27] Frankel. Pitting corrosion of metals: A review of the critical factors[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1998, 145(6): 2186-2197
- [28] D. G. Harlow, R. P. Wei. A probability model for the growth of corrosion pits in aluminum alloys induced by constituent particles[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1998(32), : 305-325
- [29] S. I. Rokhlin, J. Y. Kim, H. Nagy, et al. Effect of pitting corrosion on fatigue crack initiation and fatigue life[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1999(33), : 425-444
- [30] F. Hunkeler, H. Bohni. Determination of pit growth rates on aluminum using a metal foil technique[J]. *Corrosion*, 1981, 37(11): 645-650
- [31] A. Sehgal, G. S. Frankel, B. Zoofan, et al. Pit growth study in Al alloys by the foil penetration technique[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2000, 147(1): 140-148
- [32] J. K. Paik, S. K. Kim, S. K. Lee. Probabilistic corrosion rate estimation model for longitudinal strength members of bulk carriers[J]. *Ocean Engineering*, 1998, 25(10): 837-860

- [33] R. E. Melchers. Corrosion uncertainty modeling for steel structures[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1999, 52: 3-19
- [34] 王燕舞, 崔维成. 考虑腐蚀影响的船舶结构可靠性研究现状与展望[J]. *船舶力学*, 2007, 11(2): 307-320
- [35] R. E. Melchers. Representation of uncertainty in maximum depth of marine corrosion pits[J], *Structural Safety*, 2005: 2391-2410
- [36] 马亚丽, 李锐. 均匀腐蚀钢筋的可靠性分析[J]. *腐蚀与防护*, 2012, 33(8): 702-704
- [37] 邵煜, 虞介泽, 俞亭超. 埋地管线均匀腐蚀失效力学模型及随机分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(6): 1225-1230
- [38] 李英勇, 张思峰. 预应力锚固结构腐蚀介质作用下的耐久性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(8): 1626-1633
- [39] S. P. Qin, W. C. Cui. Effect of corrosion model on the time-dependent reliability of steel plated elements[J]. *Marine Structure*, 2003, 16: 15-34
- [40] B. Malki, B. Baroux. Computer simulation of the corrosion pit growth[J]. *Corrosion Science*, 2005, 47(1): 171-182
- [41] R. M. Pidaparti, M. J. Palakal, L. Fang. Cellular automation approach to model aircraft corrosion pit damage growth[J]. *AIAA Journal*, 2004, 42(12): 2562-2569
- [42] R. M. Pidaparti, P. Anuj, M. J. Palakal, et al. Three-dimensional computational simulation of surface corrosion damage[J]. *AIAA Journal*, 2007, 45(10): 2575-2579
- [43] N. J. Laycock, J. S. Noh, S. P. White, et al. Computer simulation of pitting potential measurements[J]. *Corrosion Science*, 2005, 47 (12): 3140-3177
- [44] Stefan S, Christian H. Finite volume model for diffusion and activation- controlled pitting corrosion of stainless steel[J]. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, 2009, 37(12), : 2898-2910
- [45] J. Xiao, S. Chaudhuri. Predictive modeling of localized corrosion: an application to aluminum alloys[J]. *Electrochimica Acta*, 2011 25(6), : 5630-5641
- [46] N. Kota, S. M. Qidwai, V. G. Degiorgi. Modeling the influence of microstructure on corrosion pit growth and resulting stress concentration[J]. *ECS Transactions*, 2014, 58 (31): 35-44
- [47] N. Kota, S. M. Qidwai, A. C. Lewis, et al. Microstructure-based numerical modeling of pitting corrosion in 316 stainless steel[J]. *ECS Transactions*, 2013, 50(31): 155-164
- [48] L. Y. Xu, Y. F. Cheng. Development of a finite element model for simulation and prediction of mechano-electrochemical effect of pipeline corrosion[J]. *Corrosion Science*, 2013, (73): 150-160
- [49] 李庆芬. 断裂力学及其工程应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007

- [50] S. Q. Zhou, A. Turnbull. Steam turbine operating conditions, chemistry of condensates and environment assisted cracking-a critical review[R]. NPL Report MATC (A), 1995
- [51] T. Shoji, Z. P. Lu, H. Murakami. Formulating stress corrosion cracking growth rates by combination of crack tip mechanics and crack tip oxidation kinetics[J]. Corrosion science, 2010, 52: 769-779
- [52] A. Bagaviev, A. Ulbrich. Life assessment of turbine components based on deterministic and probabilistic procedures[J]. Inter. Journal of Pressure Vessels and Piping, 2004, 81: 855-859
- [53] 黄小光. 腐蚀疲劳点蚀演化与裂纹扩展机理研究[D]. 上海交通大学, 2013
- [54] A. Turnbull. Issues in modeling of environment assisted cracking[J]. Corrosion Science, 1993, 34(6): 921-960
- [55] S. I. Rokhlin, J. Y. Kim, H. Nagy, et al. Effect of pitting corrosion on fatigue crack initiation and fatigue life[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 62: 425-444
- [56] R. P. Wei, M. O. Speidel. In corrosion fatigue: chemistry, mechanics, and microstructure[R]. America: National Association of Corrosion Engineers, 1972
- [57] K. Tanaka, R. P. Wei. Growth of short fatigue crack in HY-130 steel in 3.5% NaCl solution[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(2): 293-305
- [58] Y. Nakai, A. Alavi, R. P. Wei. Effect of frequency and temperature on short fatigue crack growth in aqueous environments[J]. Metall. Trans. A, 1988, 19(3): 543-548
- [59] R. P. Wei, I. D. Landes. Correlation between sustained-load and fatigue crack growth in high-strength steel[J]. Mater. Res. Stand, 1969, 9(1): 25-27
- [60] R. P. Wei, G. W. Simmons. Recent progress in understanding environment assisted fatigue crack growth[J]. International Journal of Fracture, 1981, 17: 235-247
- [61] I. M. Austen, P. McIntyre. Corrosion fatigue of high strength steel in low pressure hydrogen gas[J]. Metal Science, 1979, 13(7): 420-428
- [62] 穆志韬. 飞机结构材料环境腐蚀与疲劳分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014
- [63] Q. Y. Wang, R. M. Pidaparti, M. J. Palakal. Comparative study of corrosion-fatigue in aircraft materials[J]. AIAA Journal, 2001, 39(39): 325-330
- [64] Q. Wang, N. Kawagoishi, Q. Chen, et al. Evaluation of the probability distribution of pitting corrosion fatigue life in aircraft materials[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 19(3): 247-252
- [65] H. P. Seifert, S. Ritter. Corrosion fatigue crack growth behaviour alloy reactor pressure vessel steels under boiling water reactor conditions[J]. Corrosion Science, 2008, 50: 1884-1899
- [66] R. Wang. A fracture model of corrosion fatigue crack propagation of aluminum alloys based on the material elements fracture ahead of a crack tip[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30: 1376-1386

- [67] 刘晶晶, 孙俊君, 胡海云, 等. 海洋腐蚀条件下材料环境失效的寿命预测[J]. 物理学报, 2005, 54(5): 2414-2417
- [68] 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]. 电子科技大学, 2011
- [69] M. Pecht, A. Dasgupta. Physics-of-failure: an approach to reliable product development[J]. Journal of the Institute of Environmental Sciences, 1995, 38(5): 30-34
- [70] P. Lall, M. Pecht. An integrated physics-of-failure approach to reliability assessment. Advances in Electronic Packaging[J], ASME EEP, 1993, 4(1): 509-524
- [71] M. Azarkhail. Agent autonomy approach to physics-based reliability modeling of structures and mechanical systems[D]. University of Maryland, 2007
- [72] M. Chookah, M. Nuhi, M. Modarres. A probabilistic physics-of-failure model for prognostic health management of structures subject to pitting and corrosion-fatigue[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(2): 1601-1610
- [73] G. Wu. A probabilistic-mechanistic approach to modeling stress corrosion cracking propagation in alloy 600 components with applications[D]. University of Maryland, 2012
- [74] S. S. Chamberlain. Development of a physics of failure model and quantitative assessment of the fire fatality risk of compressed natural gas bus cylinders[D]. University of Maryland, 2009
- [75] M. Chookah, M. Nuhi, M. Modarres. A probabilistic physics-of-failure model for prognostic health management of structures subject to pitting and corrosion-fatigue[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(2): 1601-1610
- [76] S. Pan, S. Mahadevan. Damage tolerance approach for probabilistic pitting corrosion fatigue life prediction[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001, 68(13): 1493-1507
- [77] D. G. Harlow, R. P. Wei. Probability approach for prediction of corrosion and corrosion fatigue life[J], AIAA Journal, 1994, 32(10): 2073-2079
- [78] 朱顺鹏, 黄洪钟, 何俐萍, 等. 高温低周疲劳-蠕变的改进型广义应变能损伤函数方法[J]. 航空学报, 2011, 32(8): 1445-1452
- [79] 金光. 基于退化的可靠性技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014
- [80] Z. Wang, H. Z. Huang, Y. Li, et al. An approach to reliability assessment under degradation and shock process[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60(4): 852-863
- [81] S. D. Unwin, P. P. Lowry, R. F. Layton, et al. Multi-state physics models of aging passive components in probabilistic risk assessment[J]. American Nuclear Society, La Grange Park, IL, United States, 2011
- [82] A. Tunc. Uncertainty evaluation in multi-state physics based aging assessment of passive components, PSA Conference, 2012

- [83] T. Aldemir, R. Denning. Methodology development for passive component reliability modeling in a multi-physics simulation environment[R]. DOE/NEUP--11-3030
- [84] F. D. Maio, D. Colli, E. Zio, et al. A multi-state physics modeling approach for the reliability assessment of nuclear power plants piping systems[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 80: 151-165
- [85] Y. H. Lin, Y. Li, E. Zio. Multi-state physics model for the reliability assessment of a component under degradation processes and random shocks[J]. *Proceedings of ESREL 2013*, 2013
- [86] Y. H. Lin, Y. Li, E. Zio. Integrating random shocks into multi-state physics models of degradation processes for component reliability assessment[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2014, 64(1): 154-166
- [87] C. M. Rocco, E. Zio. Global sensitivity analysis in a multi-state physics model of component degradation based on a hybrid state-space enrichment and polynomial chaos expansion approach[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2013, 62(62): 781-788
- [88] 李良巧, 顾唯明. 机械可靠性设计与分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [89] 刘惟信. 机械可靠性设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996
- [90] Y. G. Zhao, T. Ono. Moment method for structural reliability [J]. *Structural Safety*, 2001, 23(1): 47-75
- [91] Y. G. Zhao, T. Ono. On the problems of the fourth moment method [J]. *Structural Safety*, 2004, 26(3): 343-347
- [92] Y. G. Zhao, Z. H. Lu. Applicable range of the fourth-moment method for structural reliability [J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2007, 6(1): 151-158
- [93] M. D. Sciuva, D. Lomario. A comparison between Monte Carlo and FORMs in calculating the reliability of a composite structure [J]. *Composite Structures*, 2003, 59(1): 155-162
- [94] Y. G. Zhao, T. Ono. A general procedure for first/second-order reliability method (FORM/SORM) [J]. *Structural Safety*, 1999, 21(2): 95-112
- [95] A. D. Kiureghian. The geometry of random vibrations and solutions by FORM and SORM[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2000, 15(1): 81-90
- [96] B. Q. Huang, X. Du. Probabilistic uncertainty analysis by mean value first order saddlepoint approximation[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2008, 93(2): 325
- [97] R. V. Abramov. An improved algorithm for the multidimensional moment-constrained maximum entropy problem[J]. *Journal of Computational Physics*, 2007, 226(1): 6-21
- [98] S. D. Koduru, T. Haukaas. Feasibility of FORM in finite element reliability analysis[J]. *Structural Safety*, 2010, 32(2): 145-153

- [99] M. Hohenbichler, S. Gollwitzer, W. Kruse. New light on first and second order reliability methods [J]. *Structural Safety*, 1987, 4(4): 267-284
- [100] I. A. Ushakov. Universal generating function. *Soviet Journal of Computer and Systems Sciences*[J]. 1986, 24(5): 118-129
- [101] 安宗文. 基于通用生成函数的离散化应力-强度干涉模型研究[D]. 电子科技大学, 2009
- [102] G. Levitin. *The Universal Generating Function in Reliability Analysis and Optimization*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2005
- [103] A. Lisnianski, G. Levitin. *Multi-state system reliability: assessment, optimization and applications*[M]. New Jersey: World Scientific, 2003
- [104] X. Du, A. Sudjianto. First order saddlepoint approximation for reliability analysis[J]. *AIAA Journal*, 2004, 42(6): 1199-1207
- [105] G. Li, K. Zhang. A combined reliability analysis approach with dimension reduction method and maximum entropy method[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2011, 43(1): 121-134
- [106] 吕震宙, 宋述芳, 李洪双, 等. *结构机构可靠性及可靠性灵敏度分析*[M]. 北京: 科学出版社, 2009
- [107] H. J. Pradlwarter, G. I. Schuëler. Local domain monte carlo simulation[J]. *Structural Safety*, 2010, 32(5): 275-280
- [108] G. J. Li, Z. Z. Lu, C. C. Zhou. Discussion on: local domain Monte Carlo simulation: H.J. Pradlwarter and G.I.Schueller, *Structural Safety*, 32(2010) 275-280[J]. *Structural Safety*, 2012, 40: 78-80
- [109] R. E. Melchers. Importance sampling in structural system[J]. *Structural Safety*, 1989, 6(1): 3-10
- [110] A. Harbitz. An efficient sampling method for probability of failure calculation[J]. *Structural Safety*, 1986, 3(2): 109-115
- [111] C. G. Bucher. Adaptive sampling an iterative fast sampling fast Monte Carlo procedure[J]. *Structural Safety*, 1988, 5(2): 119-126
- [112] G. I. Schuëler, H. J. Pradlwarter, P. S. Koutsourelakis. A critical appraisal of reliability estimation procedures for high dimensions[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2004, 19(4): 463-473
- [113] M. R. Rajashekhar, B. R. Ellingwood. A new look at the response surface approach for reliability analysis[J]. *Structural Safety*, 1993, 12(3): 205-220

- [114] H. P. Gavin, S. C. Yau. High-order limit state functions in the response surface method for structural reliability analysis[J]. *Structural Safety*, 2008, 30(2): 162-179
- [115] J. E. Hurtado, D. A. Alvarez. Neural network based reliability analysis: a comparative study[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2001, 191(1-2): 113-132
- [116] J. V. Chapman, A. D. Crossland. Neural networks in probabilistic structural mechanics, in: *Probabilistic Structural Mechanics Handbook*[M]. New York: Chapman & Hall, 1995
- [117] C. M. Rocco, J. A. Moreno. Fast Monte Carlo reliability evaluation using support vector machine[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2002, 76(3): 237-243
- [118] J. E. Hurtado, D. A. Alvarez. Classification approach for reliability analysis with stochastic finite-element modeling[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(8): 1141-1149
- [119] I. Kaymaz. Application of kriging method to structural reliability problems[J]. *Structural Safety*, 2005, 27(2): 133-151
- [120] B. J. Bichon, M. S. Eldred, L. P. Swiler. Efficient global reliability analysis for nonlinear implicit performance functions[J]. *AIAA Journal*, 2008, 46: 2459-2468
- [121] B. J. Bichon, J. M. McFarland, S. Mahadevan. Efficient surrogate models for reliability analysis of systems with multiple failure modes[J], *Reliability Engineering & System Safety*, 2011, 96: 1386-1395
- [122] J. Zhang, R. O. Foschi. Performance-based design and seismic reliability analysis using designed experiments and neural networks[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2004, 19(3): 259-267
- [123] J. Nie, B. R. Ellingwood. A new directional simulation method for system reliability. part 2: application of neural networks[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2004, 19(4): 437-447
- [124] J. E. Hurtado. An examination of methods for approximating implicit limit state functions from the viewpoint of statistical learning theory[J]. *Structural Safety*, 2004, 26(3): 271-293
- [125] A. H. Elhewy, Mesbahi E, Pu Y. Reliability analysis of structures using neural network method[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2006, 21(1): 44-53
- [126] 张小玲. 复杂系统的目标层解分析法及时变可靠性优化设计研究[D]. 电子科技大学, 2011
- [127] A. J. Siegert. On the first passage time probability problem[J]. *Physical Review*, 1951, 81(4): 617-628
- [128] C. W. Helstrom. C. T. Isley. Two notes on a Markov envelope process[J]. *Transactions on Information Theory*, 1959, 5: 139-140
- [129] R. Iyengar. First passage probability during random vibration[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1973, 31(2): 185-193

-
- [130] J. Zhang, X. Du. Time-dependent reliability analysis for function generator mechanisms[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2011, 133(3): 031005
- [131] X. L. Zhang, H. Z. Huang, Z. L. Wang, et al. System optimization design under time variant reliability constraints[C]. Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2011
- [132] P. Thoft-Christensen. Reliability profiles for concrete bridges. Structural Reliability in Bridge Engineering. New York: McGraw-Hill, 1996
- [133] A. Petcherdchoo, J. S. Kong, D. M. Frangopol, et al. New life-cycle analysis of deteriorating structures[R]. Structural Engineering and Structural Mechanics Research Series No.CU/SR-04/3, Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, 04/3, 2004
- [134] J. Li, Z. P. Mourelatos. Time-dependent reliability estimation for dynamic problems using a niching genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Design, 2009, 131(7): 1-13
- [135] G. J. Savage, Y. K. Son. Dependability-based design optimization of degrading engineering Systems[J]. Journal of Mechanical Design, 2009, 131: 1-10
- [136] A. Singh, Z. P. Mourelatos. On the time-dependent reliability of non-monotonic, non-repairable systems. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2010, 3(1): 425-444
- [137] A. D. Kiureghian, O. Ditlevsen. Aleatory or epistemic Does it matter? [J]. Structural Safety, 2009, 31(2): 105-112
- [138] K. J. Zhang, G. Achari. Correlations between uncertainty theories and their applications in uncertainty propagation[C]. Proceeding of the tenth international conference on structural safety and reliability (ICOSSAR2009), Osaka, Japan, 2009, 1337-1344
- [139] S. Samson, J. A. Reneke, M. M. Wiecek. A review of different perspectives on uncertainty and risk and an alternative modeling paradigm[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(2): 558-567
- [140] M. S. Eldred, L. P. Swiler, G. Tang. Mixed aleatory-epistemic uncertainty quantification with stochastic expansions and optimization-based interval estimation [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(9): 1092-1113
- [141] J. C. Helton, J. D. Johnson, W. L. Oberkampf, et al. Representation of analysis results involving aleatory and epistemic uncertainty [J]. International Journal of General Systems, 2010, 39(6): 605-646

- [142] J. C. Helton. Alternative representations of epistemic uncertainty [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2004, 85(1-3): 1-10
- [143] C. B. Brown. A fuzzy safety measure [J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1979, 105(5): 855-872
- [144] C. B. Brown, T. P. James, F. Yao. Fuzzy sets and structure engineering [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1983, 109(5): 1211-1225
- [145] B. Li, M. L. Zhu, K. Xu. A practical engineering method for fuzzy reliability analysis of mechanical structures [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2000, 67(3): 311-325
- [146] M. Savoia. Structural reliability analysis through fuzzy number approach with application to stability [J]. *Computers and Structures*, 2002, 80(12): 1087-1102
- [147] H. C. Wu. Bayesian system reliability assessment under fuzzy environments [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2004, 83(3): 277-286
- [148] B. Fabio, B. Franco, G. M. Pier. Fuzzy reliability analysis of concrete structures [J]. *Computers and Structures*, 2004, 82(13-14): 1033-1052
- [149] 黄洪钟, 田志刚. 基于广义模糊随机强度的模糊可靠性计算理论[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(8): 50-53
- [150] 郭书祥, 吕震宙, 冯立富. 基于可能性理论的结构模糊可靠性方法[J]. *计算力学学报*, 2002, 19(1): 89-93
- [151] C. H. Cheng, D. L. Mon. Fuzzy system reliability analysis by interval of confidence [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1993, 56(1): 29-35
- [152] C. Cremona, Y. Gao. The possibilistic reliability theory: theoretical aspects and applications [J]. *Structural Safety*, 1997, 19(2): 173-201
- [153] 黄洪钟, 孙占全, 郭东明, 等. 随机应力模糊强度时模糊可靠度的计算理论[J]. *机械强度*, 2001, 23(3): 305-307
- [154] 董玉革, 陈心昭, 赵显德, 等. 模糊可靠性的一种计算方法[J]. *机械科学与技术*, 2003, 22(1): 15-17
- [155] S. Chakraborty, P. C. Sam. Probabilistic safety analysis of structures under hybrid uncertainty [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006, 70(4): 405-422
- [156] 雷震宇, 陈虬. 模糊结构有限元分析的一种新方法[J]. *工程力学*, 2001, 18(6): 47-53
- [157] 赵彦, 张新锋, 施许立. 模糊随机混合不确定性结构系统可靠度计算[J]. *机械强度*, 2008, 30(1): 72-77
- [158] Y. Ben-Haim. A non-probabilistic concept of reliability [J]. *Structural Safety*, 1994, 14(4): 227-245

- [159] I. Elishakoff. Discussion on: A non-probabilistic concept of reliability [J]. *Structural Safety*, 1995, 17(2): 195-199
- [160] Y. Ben-Haim. A non-probabilistic measure of reliability of linear systems based on expansion of convex models [J]. *Structural Safety*, 17(2), 1995: 91-109
- [161] 郭书祥, 吕震宙. 结构体系的非概率可靠性分析方法[J]. *计算力学学报*, 2002, 19(3): 332-336
- [162] 郭书祥, 张陵, 李颖. 结构非概率可靠性指标的求解方法[J]. *计算力学学报*, 2005, 22(2): 227-232
- [163] 王晓军, 邱志平, 武哲. 结构非概率集合可靠性模型[J]. *力学学报*, 2007, 39(5): 641-646
- [164] 邱志平, 陈山奇, 王晓军. 结构非概率鲁棒可靠性准则[J]. *计算力学学报*, 2004, 21(1): 1-6
- [165] 王晓军, 杨海峰, 邱志平, 等. 基于非概率集合可靠性的结构优化设计[J]. *计算力学学报*, 2011, (6): 827-833
- [166] H. Z. Huang, Z. L. Wang, B. Huang, et al. A nonprobabilistic set model of structural reliability based on satisfaction degree of interval[J]. *Mechanics*, 2011, 17(1): 85-92
- [167] 李永华, 黄洪钟, 刘忠贺. 结构稳健可靠性分析的凸集模型[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2004, 12(4): 383-391
- [168] 杨建平. 证据理论及其复杂系统可靠性分析方法与应用研究[D]. 电子科技大学, 2012
- [169] H. R. Bae, R. V. Grandhi, R. A. Canfield. Epistemic uncertainty quantification techniques including evidence theory for large-scale structures[J]. *Computers and Structures*, 2004, 82(13-14): 1101-1102
- [170] P. M. Zissimos, J. Zhou. A design optimization method using evidence theory [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2006, 128(7): 901-908
- [171] C. Simon, P. Weber, A. Evsukoff. Bayesian networks inference algorithm to implement Dempster Shafer theory in reliability analysis[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2008, 93(7): 950-963
- [172] J. C. Helton, J. D. Johnson, W. L. Oberkampf, et al. A sampling-based computational strategy for the representation of epistemic uncertainty in model predictions with evidence theory[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2007, 196(37-40): 3980-3998
- [173] J. C. Helton, J. D. Johnson, W. L. Oberkampf, et al. Sensitivity analysis in conjunction with evidence theory representations of epistemic uncertainty [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2006, 91(10-11): 1414-1434
- [174] J. B. Wan, T. M. Jiang, X. Y. Li. An information fusion method for reliability based on Dempster Evidential theory. *Proceedings of 2010 IEEE the 17th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2010, (1): 920-923

- [175] Z. P. Mourelatos, Z. Jun. A design optimization method using evidence theory [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2006, 128(4): 901-907
- [176] R. Sadiq, M. J. Rodriguez. Interpreting drinking water quality in the distribution system using Dempster-Shafer theory of evidence [J]. *Chemosphere*, 2005, 59(2): 177-188
- [177] 郭惠昕, 夏力农, 戴娟. 基于证据理论的结构失效概率计算方法[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2008, 16(03): 457-464
- [178] X. Du. Unified uncertainty analysis by the first order reliability method[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2008, 130(9): 091401-091410
- [179] X. Du, P. Venigella, D. Liu. Robust mechanism synthesis with random and interval variables[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2009, 44(7): 1321-1337
- [180] C. Jiang, W. X. Li, X. Han, et al. Structural reliability analysis based on random distributions with interval parameters[J]. *Computers and Structures*, 2011, 89(23-24): 2292-2302
- [181] C. Jiang, X. Han, W. X. Li, et al. A hybrid reliability approach based on probability and interval for uncertain structures[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2012, 134(3): 0310011-03100110
- [182] K. Zaman, S. Rangavajhala, McDonald M P, et al. A probabilistic approach for representation of interval uncertainty[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2011, 96(1): 117-130
- [183] K. Zaman, M. P. McDonald, S. Mahadevan. Probabilistic framework for uncertainty propagation with both probabilistic and interval variables[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2011, 133(2): 0210101-02101014
- [184] S. Sankararaman, S. Mahadevan. Model validation under epistemic uncertainty[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2011, 96(9): 1232-1241
- [185] H. Zhang, R. L. Mullen, R. L. Muhanna. Interval monte carlo methods for structural reliability[J]. *Structural Safety*, 2010, 32(3): 183-190
- [186] S. X. Guo, Z. Z. Lu. Procedure for computing the possibility and fuzzy probability of failure of structures [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2003, 24(3): 338-343
- [187] W. Gao, C. M. Song. Probabilistic interval analysis for structures with uncertainty[J]. *Structural Safety*, 2010, 32(3): 191-198
- [188] 肖宁聪. 随机和认知不确定性下的结构可靠性方法研究[D]. 电子科技大学, 2012
- [189] 李贵杰. 主客观不确定性结构可靠性分析方法研究[D]. 西北工业大学, 2015
- [190] D. Eardley. Quantification of margins and uncertainties (QMU)[R]. JSR-04-330(JASON), March 2005

- [191] NAS/NRC(National Academy of Science/National Research Council). Evaluation of quantification of margins and uncertainties for assessing and certifying the reliability of the nuclear stockpile. Washington, DC: National Academy Press; 2008
- [192] 彭忠明, 梁天锡, 魏发远. QMU 与概率可靠性:区别与联系[C]. 技术融合创新·可靠服务企业 安全产品制胜——2013 年全国机械行业可靠性技术学术交流会暨第四届可靠性工程分会第五次全体委员大会论文集, 2013
- [193] C. Y. Xie, H. Z. Huang, F. Y. Wei. Application of QMU to structural analysis considering uncertainty[C]. 2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (ICQR2MSE2012),. IEEE, 2012: 1152-1155
- [194] 谢朝阳, 魏发远, 罗景润, 等. 基于 QMU 的结构安全评估方法研究[C], 中国力学大会论文集. 2013
- [195] J. C. Helton, P. Martin. Quantification of Margins and Uncertainties. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96: 959-964
- [196] J. E. Pepin, A. C. Rytherford, F. M. Hemez. Dening a practical QMU metric. 49thAIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Schaumburg, IL, April 2008
- [197] L. J. Lucas, H. Owhadi, M. Ortiz. Rigorous verification, validation, uncertainty quantification and certification through concentration-of-measure inequalities[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2008, 197(51): 4591-4609
- [198] K. Sentz, S. Ferson. Probabilistic bounding analysis in the quantification of margins and uncertainties[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96: 1126-1136
- [199] A. Urbina, S. Mahadevan, T. L. Paez. Quantification of margins and uncertainties of complex systems in the presence of aleatory and epistemic uncertainty[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96: 1114-1125
- [200] M. S. Eldred, L. P. Swiler, G. Tang. Mixed aleatory-epistemic uncertainty quantification with stochastic expansions and optimization-based interval estimation[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(9): 1092-1113
- [201] H. Shah, S. Hosder, T. Winter. Quantification of margins and mixed uncertainties using evidence theory and stochastic expansions[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 138: 59-72
- [202] 吴恒. 316L 不锈钢在工业应用海水中的电化学和应力腐蚀研究[D]. 中国海洋大学, 2012
- [203] I. K. Kenj. Failure analysis and prevent ion in SCC and corrosion fatigue cases[J]. Int J Fatigue, 1998, 145-154

- [204] 宋光雄, 张晓庆, 常彦衍, 等. 压力设备腐蚀失效案例统计分析[J]. 材料工程, 2004, 2: 6-9
- [205] G. Engelhardt, D. D. Macdonals. Unification of the deterministic and statistical approaches for predicting localized corrosion damage, I. Theoretical foundation[J]. Corrosion Science, 2004, 46: 2755-2780
- [206] G. Engelhardt, M. U. Macdonald, D. D. Macdonald. A simplified method for estimating corrosion cavity growth rates[J]. Corrosion Science, 1997, 39(3): 419-441
- [207] D. Caprio, J. Stafiej. Cellular automata approach to corrosion and passivity phenomena[C]. Proceedings of the 2010 International Conference on Scientific Computing, 2010, 62-67
- [208] A. Taleb, C. Vautrin, H. Mendy, et al. Mesoscopic modeling of corrosion processes: pitting morphology evolution[J]. WIT Transactions on Engineering Sciences, 2007, 54: 13-21
- [209] 刘静, 李自力, 侯蕾, 等. 元胞自动机方法模拟材料点蚀过程的建模过程[J]. 化工机械, 2011, 38(2): 206-209
- [210] 王慧, 宋笔锋, 王乐, 等. 蚀坑几何形貌的三维模拟[J]. 航空学报, 2009, 30(11): 2185-2192
- [211] H. Wang, E. Han. Computational simulation of corrosion pit interactions under mechanochemical effects using a cellular automaton/finite element model[J]. Corrosion Science, 2016, 103: 305-311
- [212] 曹治栓. 油罐底板点蚀深度的数值模拟预测研究[D]. 中国石油大学(华东), 2013
- [213] 王雷, 董丽娜. 基于 COMSOL Multiphysics 的杂散电流腐蚀仿真分析[J]. 新技术新工艺, 2014(1): 15-20
- [214] E. M. Gutman. Mechanochemistry of Solid Surfaces. Singapore: World Scientific Publications, 1994
- [215] 周炳海, 翟子青. 基于随机过程的镍基 690 合金点蚀建模方法[J]. 金属学报, 2011(9): 1159-1166
- [216] F. Caleyó, L. Alfonso. Stochastic modeling of pitting corrosion: a new model for initiation and growth of multiple corrosion pits[J]. Corrosion Science, 2007, 2007(49): 559-579
- [217] 赵威. 结构可靠度分析代理模型方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2012
- [218] 李坚. 代理模型近似技术研究及其在结构可靠度分析中的应用[D]. 上海交通大学, 2013
- [219] L. Zhao, K. K. Choi, I. Lee. Metamodeling method using dynamic kriging for design optimization[J]. AIAA Journal, 2011: 2034-2046
- [220] C. Xie, P. Wang, Z. Wang. Corrosion reliability analysis considering the coupled effect of mechanical stresses[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering, 2016, 2(3): 031001-031009

- [221] Z. Wang, P. Wang. A nested extreme response surface approach for time-dependent reliability-based design optimization[J]. Journal of Mechanical Design, 2012, 134(12): 121007-1014
- [222] Z. Wang, P. Wang. A maximum confidence enhancement based sequential sampling scheme for simulation-based design[J]. Journal of Mechanical Design, 2014, 136(14): 021006-1013

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] 中国工程物理研究院发展基金项目：含点蚀损伤结构时变可靠性研究，起止时间：2013.08-2015.08，项目编号：2013B0203028，主持（结题优秀）。
- [2] 总装备部技术基础质量与可靠性项目：高压容器结构腐蚀可靠性研究，起止时间：2013.01-2015.12，项目编号：2013ZK1.1，主持。
- [3] 国家自然科学基金委和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，起止时间：2014.01-2016.12，项目编号：U13301055，主研。

二、在学期间的论文与奖励

- [1] C. Xie, P. Wang, H. Z. Huang. Corrosion reliability analysis considering the coupled effect of mechanical stresses[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering, 2016, 2(3): 031001-031009.
- [2] C. Xie, G. J. Li. Quantification of margins and uncertainties approach for structure analysis based on evidence theory[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016(2016): 6419058. (SCI 收录)
- [3] C. Xie, J. R. Luo, L. L. Guo. The probabilistic analyze of radioactive materials release in transport accidents[J]. Information-An International Interdisciplinary Journal, 2012, 15(12B): 5711-5718. (SCI 收录)
- [4] C. Xie, H. Z. Huang. A probabilistic physics of failure approach for structure corrosion reliability analysis[J]. International Journal of Corrosion, 2016, 2016(2016): 134587. (EI 收录)
- [5] C. Xie, P. Wang, Z. Wang, et al. Probability of corrosion failure analysis using an adaptive sampling approach[C], 2015 IEEE Conference on Prognostics and Health Management. Austin, USA, 2015. (EI 收录)
- [6] C. Xie, P. Wang, F. Y. Wei, et al. Modeling of corrosion pit growth for prognostics and health management. 2015 IEEE Conference on Prognostics and Health Management. Austin, USA, 2015. (EI 收录)
- [7] C. Xie, F. Y. Wei, H. Z. Huang. Application of QMU to structural analysis considering uncertainty[C]. 2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE2012), Chengdu, China, 2012: 1152-1155. (EI 收录)
- [8] 谢朝阳. 复杂系统可靠性研制试验技术与应用研究，军队科技进步三等奖，2015.