



材料延寿与可持续发展

材料环境适应性工程

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
蔡健平 刘建华 刘新灵 等编著



化学工业出版社



材料延寿与可持续发展

材料环境适应性 工程

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
蔡健平 刘建华 刘新灵 等编著



化学工业出版社

材料的环境适应性对装备的质量有重大影响,这在航空航天装备上表现得更为明显。本书以系统工程为方法论,以工程系统为理论框架,对材料环境适应性工程所涉及的基本概念和理论进行了分析,并主要针对航空航天材料,讨论了材料环境适应性工程所涉及的专业技术和工程技术,最后给出了材料环境适应性工程的案例。

本书可供各种行业研制、设计、制造、检验、储运、维护维修、供应、管理等部门的设计师、工程师和管理人员参考,尤为适合于装备论证、产品环境工程、可靠性工程、质量工程、产品总体等部门人员使用;本书也可作为工科大学生、研究生、博士生参考;另外本书还适合材料专业工作者、复杂性和技术哲学等学者和研究者参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料环境适应性工程/蔡健平,刘建华,刘新灵等编
著. —北京:化学工业出版社,2014.7
(材料延寿与可持续发展)
ISBN 978-7-122-20672-5

I. ①材… II. ①蔡…②刘…③刘… III. ①材料-环
境-适应性-研究 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 098570 号

责任编辑:段志兵 王清颢
责任校对:吴 静

文字编辑:孙凤英
装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张24 字数448千字 2014年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 69.00 元

版权所有 违者必究

《材料延寿与可持续发展》丛书顾问委员会

主任委员：师昌绪

副主任委员：严东生 王淀佐 干 勇 肖纪美

委 员（按姓氏拼音排序）：

安桂华	白忠泉	才鸿年	才 让	陈光章	陈蕴博
戴圣龙	俸培宗	干 勇	高万振	葛昌纯	侯保荣
柯 伟	李晓红	李正邦	刘翔声	师昌绪	屠海令
王淀佐	王国栋	王亚军	吴荫顺	肖纪美	徐滨士
严东生	颜鸣皋	钟志华	周 廉		

《材料延寿与可持续发展》丛书总编辑委员会

名誉主任（名誉总主编）：

干 勇

主 任（总主编）：

李金桂 张启富

副 主 任（副总主编）：

许淳淳 高克玮 顾宝珊 张 炼 朱文德 李晓刚

编 委（按姓氏拼音排序）：

白新德	蔡健平	陈建敏	程瑞珍	窦照英	杜存山
杜 楠	干 勇	高克玮	高万振	高玉魁	葛红花
顾宝珊	韩恩厚	韩雅芳	何玉怀	胡少伟	胡业锋
纪晓春	李金桂	李晓刚	李兴无	林 翠	刘世参
卢凤贤	路民旭	吕龙云	马鸣图	沈卫平	孙 辉
陶春虎	王 钧	王在建	武兵书	熊金平	许淳淳
许立坤	许维钧	杨卯生	杨文忠	袁训华	张 津
张 炼	张启富	张晓云	赵 晴	周国庆	周师岳
周伟斌	朱文德				

办 公 室：袁训华 张雪华

《材料延寿与可持续发展》丛书指导单位

中国工程院

中国科学技术协会

《材料延寿与可持续发展》丛书合作单位

中国腐蚀与防护学会

中国钢研科技集团有限公司

中航工业北京航空材料研究院

化学工业出版社

《材料环境适应性工程》编委会

主任：蔡健平

委员（按姓氏拼音排序）：

蔡健平 刘建华 刘新灵 孙祚东 王浩伟 吴俊升

吴有金 杨光付

I 总序言 I

在远古人类处于采猎时代，依赖自然，听天由命；公元前一万年开始，人类经历了漫长的石器时代，五千多年前进入青铜器时代，三千多年前进入铁器时代，出现了农业文明，他们砍伐森林、种植稻麦、驯养猪狗，改造自然，进入农牧经济时代。18 世纪，发明蒸汽机车、轮船、汽车、飞机，先进的人类追求奢侈的生活、贪婪地挖掘地球、疯狂地掠夺资源、严重地污染环境，美其名曰人类征服自然，而实际是破坏自然，从地区性的伤害发展到全球性的灾难，人类发现在无休止、不理智、不文明地追求享受的同时在给自己挖掘坟墓。

人类终于惊醒了，1987 年世界环境及发展委员会发表的《布特兰报告书》确定人类应该保护环境、善待自然，提出了“可持续发展战略”，表达了人类应该清醒地、理智地、文明地处理好人与自然关系的大问题，指出“既满足当代人的需求，又不对后代人满足其需求的能力构成危害的发展”，称之为可持续发展。其核心思想是“人类应协调人口、资源、环境与发展之间的相互关系，在不损害他人和后代利益的前提下追求发展。”

这实际上是涉及到我们人类所赖以生存的地球如何既满足人类不断发展的需求，又不被破坏、不被毁灭这样的大问题；涉及到人口的不断增长、生活水平的不断提高、资源的不断消耗、环境的不断恶化；涉及矿产资源的不断耗竭、不可再生能源资源的不断耗费、水力资源的污染、土地资源的破坏、空气质量的不断恶化等重大问题。

在“可持续发展”战略中，材料是关键，材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类社会进步的标志和里程碑，是社会不断进步的先导、是可持续发展的支柱。如果不断发现新矿藏，不断研究出新材料，不断延长材料的使用寿命，不断实施材料的再制造、再循环、再利用，那么这根支柱是牢靠的、坚强的、是能够维护人类可持续发展的！

在我国，已经积累了许许多多预防和控制材料提前失效（其因素主要是腐蚀、摩擦磨损腐蚀、疲劳与腐蚀疲劳）的理论、原则、技术和措施，需要汇总和提供应用，《材料延寿与可持续发展》丛书以多个专题力求解决这一课题项目。有一部分专题阐述了材料失效原理和过程，另一部分涉及工程领域，结合我国已积累的材料失

效的案例和经验，更深入系统地阐述预防和控制材料提前失效的理论、原则、技术和措施。丛书总编辑委员会前后花费五年的时间，将分散在全国各个研究院所、工厂、院校的研究成果经过精心分析研究、汇聚成一套系列丛书，这是一项研究成果、是一套高级科普丛书、是一套继续教育实用教材。希望对我国各个工业部门的设计、制造、使用、维护、维修和管理人员会有所启示、有所参考、有所贡献；希望对提高全民素质有所裨益、对国家各级公务员有所参考。

我国正处于高速发展阶段，制造业由大变强，材料的合理选择和使用，以达到装备的高精度、长寿命、低成本的目的，这一趋势应该受到广泛的关注。

中国科学院院士
中国工程院院士

师昌绪

I 总前言 I

材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类社会进步的标志和里程碑，是社会不断进步的先导，是国家实现可持续发展的支柱。然而，地球上的矿藏是有限的，而且需要投入大量的能源，进行复杂的提炼、处理，产生大量污染，才能生产成为人类有用的材料，所以，材料是宝贵的，需要科学利用和认真保护。

半个多世纪特别是改革开放三十多年来，我国材料的研究、开发、应用有了快速的发展，水泥、钢铁、有色金属、稀土材料、织物等许多材料的产量多年居世界第一。我国已经成为世界上材料的生产、销售和消费大国。“中国材料”伴随着“中国制造”的产品，遍布全球；伴随着“中国建造”的工程项目，遍布全国乃至世界上很多国家。材料支撑我国国民经济连练 30 多年 GDP 年均 10% 左右的高速发展，使我国成为全球第二大经济体。但是，我国还不是材料强国，还存在诸多问题需要改进。例如，在制造环境、运行环境和自然环境的作用下，出现过早腐蚀、老化、磨损、断裂（疲劳），材料及其制品在使用可靠性、安全性、经济性和耐久性（简称“四性”）方面都还有大量的工作要做。

“材料寿命”是指对材料及其制品在服役环境作用下出现腐蚀、老化、磨损和断裂而导致的过早失效进行预防与控制，以尽可能地提高其“四性”，也就是提高水平，提高质量，延长寿命。目标是节约资源、能源，减少对环境的污染，支持国家可持续发展。

材料及制品的“四性”实质上是材料及制品水平高低和质量好坏的最终表征和判断标准。追求“四性”，就是追求全寿命周期使用的高水平、高质量，追求“质量第一”，追求“质量立国”，追求“材料强国”、“制造强国”、“民富、国强、美丽国家”。

我国在“材料延寿与可持续发展”方面，做过大量的研究，取得了显著的成绩，积累了丰富的实践经验，凝练出了一系列在材料全寿命周期中提高“四性”的重要理论、原则、技术和措施，可以总结，服务于社会。

“材料延寿与可持续发展”丛书的目的就在于：总结过去，总结已有的系统控制材料提前损伤、破坏和失效的因素，即腐蚀、老化、磨损和断裂（主要是疲劳与腐蚀疲劳）的理论、原则、技术和措施，使各行业产品设计师，制造、使用和管理工程师有所启示、有所参考、有所作为、有所贡献，以尽可能地提高产品的“四性”，

延长使用寿命。丛书的目的还在于：面对未来、研究未来，推进材料的优质化、高性能化、高强度、长寿命化，多品质、多规格化、标准化，传统材料的综合优化，材料的不断创新，并为国家长远发展，提出成套成熟可靠的理论、原则、政策和建议，推进国家“节约资源、节能减排”、“可持续发展”和“保卫地球”“科学、和谐”发展战略的实施，加速创建我国“材料强国”、“制造强国”。

在中国科协和中国工程院的领导与支持下，一批材料科学工作者不懈努力，不断地编写和出版系列图书。衷心希望通过我们的努力，既能对设计师，制造、使用和管理工程师“材料延寿与可持续发展”的创新有所帮助，又能为国家成功实施“可持续发展”、“材料强国”、“制造强国”的发展战略有所贡献。

中国工程院院士

中国工程院副院长



I 前言 I

材料是人类社会发展水平的标志之一，现代社会中随着人类活动范围的扩大和装备复杂程度的提高，材料服役环境日益复杂和恶劣，同时为支撑人类社会可持续发展，人们还对材料提出了高性能、长寿命、低成本、高可靠等要求。在装备的研制、使用过程中实现上述要求，已经成为相关技术和管理人员的一项长期工作。

人们常说，提出一个问题往往比解决一个问题更重要。在工程实践中实现材料这些要求的过程中，人们遇到了各种各样的困难。本书试图通过总结问题，提出一些解决问题的思路。本书提出的第一个问题是：如果把材料及其服役的环境视为一个整体，并称这个材料在此整体中的表现为材料的环境适应性的话，是否在装备研制和使用过程中，甚至在整个社会活动中要把材料的环境适应性作为一项工程活动？过去，材料环境适应性问题往往被归结为研制更先进材料或材料选择的工作，但是材料服役环境日益复杂，装备所使用的材料种类日渐繁多，材料的选择及其加工、制造和防护的工艺日益精细，这就要求技术人员和管理人员通过分工合作来确保材料的环境适应性；另外为了确保型号研制成功，过去往往通过增加材料的尺寸和重量来增加安全系数，但这不可避免地导致产品粗笨，影响产品的质量水平；另外在产品（装备）使用维修过程中，还存在材料环境适应性考虑不足，造成技术和管理失误，从而造成不必要损失的案例。鉴于上述问题所涉及的技术的复杂性和范围复杂性，一个好的解决方案往往需要设计人员、制造人员和其他专业技术人员通力合作，并需要相应的管理手段来配合。因此本书认为应该把材料环境适应性作为一项系统性的工程活动，通盘考虑相关的技术和管理工作。

本书提出的第二个问题是：材料环境适应性工程的应用范围是什么？目前在产品研制过程中，已经部分开展了材料环境适应性工程的工作，但从工程活动的要求来看，在产品论证初期就应该开始考虑材料环境适应性方面的问题，并在产品的研制过程中加以落实，在产品使用维护过程中也应该开展相应的技术和管理活动。如果把材料也看做一个产品的話，材料环境适应性工作应贯穿于材料的寿命周期内。鉴于材料环境适应性技术作为一项共性的、基础性的技术，它并不局限于某一个产品（或装备），而存在于各种物质产品研制和使用过程中，材料环境适应性工程的组织程度和管理深入程度越高，其效果越明显。从国外的经验看，甚至在必要时需要在国家层面上以立法的形式来提出材料环境适应性工作的要求。尽管在微观层面，

在某一个具体应用技术层面，材料环境适应性工作的效益似乎并不明显，但是作为一项公益性、基础性和普遍性的工作，通过技术和管理集约化，完全可以积少成多、集腋成裘，取得巨大的经济和社会效益，这对于减少浪费，提高经济和社会效益，促进社会的可持续发展都有重要意义。当然对于具体产品（装备）而言，材料环境适应性工程有可能是一个独立的工程项目，也可能含在其他更大的系统范围内，从而有不同的范围和形式。

本书提出的第三个问题是：材料环境适应性工程的理论体系是什么？本书提出了材料环境适应性工程理论体系的三维结构，并试图对各个维度进行阐述。由于材料环境适应性工程是一个整体，各个部分存在着千丝万缕的密切联系，因此在讨论各个维度时，不可避免地重复一些议题，但是这些议题是从不同角度来展开讨论的，这实际上更有利于从不同角度来理解材料环境适应性工程的理论；另外在本书中，讨论了一些材料环境适应性工程系统层面的理论如腐蚀宏观经济学模型，但是总的来说，这方面的论述较少，例如没有材料环境适应性指标综合优化模型、材料环境适应性评价模型等。造成这种现象的原因一方面是由于编著者的水平有限，另一方面是由于材料环境适应性工程的理论体系来源于工程实践，在国内工程实践案例较少的情况下，只能部分地提出相关理论。应该承认本书提出的材料环境适应性工程的理论体系依然是不完整的，但是勾画出了大致的轮廓。

全书由蔡健平统一策划，其中第1章、第2章、第7章、第10~12章由蔡健平编写，第3章和第6章由刘新灵编写，第4章、第5章由刘建华、李松梅、于美、文陈编写，第8章由王浩伟、孙祚东、吴有金编写，第9章由蔡健平、刘建华、吴俊升、李松梅、于美、文陈合写。全书由蔡健平统稿，李金桂、陶春虎主审。

在本书编写过程中，编著者跟踪了大量的文献，参考融合了不同学者的研究成果，在此对学者们和先辈们深表谢意，尤其要感谢李金桂研究员、杨光付高工以及责任编辑在本书的概念、结构等方面提出的建议。另外要感谢朱敏输入部分文字。

本书是编著者对个人的工程经验以及搜集的各种素材反复组织后形成的。深入探讨后发现，本书涉及的命题庞大，资料繁杂，由于编著者的学科领域和学术水平十分有限，且书不尽言，言难尽意，所以编著者只能管中窥豹，用特例来说明普遍性。书中存在的种种不足、疏漏，恳请广大专家、学者提出建议，予以指正。如果本书对人们有所启发，有所思考，对材料实际工程应用有所贡献，我们就感到莫大荣幸了。

编著者

2014年3月

I 目录 I

第1章 绪言

- 1.1 材料与人类社会的发展 /001
- 1.2 材料环境适应性概念的出现 /001
- 1.3 航空航天工业中材料环境适应性问题的典型案例 /002
- 1.4 材料环境适应性的方法论 /004
- 1.5 材料环境适应性系统工程的意义 /006
- 1.6 本书的内容和章节安排 /007
- 参考文献 /008

概念与方法篇

第2章 材料环境适应性工程基础

- 2.1 材料环境适应性工程的内涵 /010
- 2.2 一般系统论简介 /012
 - 2.2.1 一般系统论在材料环境适应性工程中的作用 /012
 - 2.2.2 系统论的发展历史 /013
 - 2.2.3 系统论中的基本概念 /016
 - 2.2.4 一般系统论的原理 /017
 - 2.2.5 构造系统的方法 /019
 - 2.2.6 研究一般系统的方法 /020
- 2.3 工程系统的基本原理 /024
 - 2.3.1 工程要素 /024
 - 2.3.2 工程的系统特征、工程系统及其复杂性 /025
 - 2.3.3 工程系统组成和结构 /027
 - 2.3.4 工程系统的协调器 /027
- 2.4 材料环境适应性工程的组成和指标 /028
 - 2.4.1 材料环境适应性工程的子系统 /028
 - 2.4.2 材料环境适应性工程的指标 /029
 - 2.4.3 材料环境适应性工程理论的三维结构 /029
 - 2.4.4 工程技术维的逻辑结构 /030
 - 2.4.5 专业知识维的演化模式 /031
- 2.5 材料环境适应性工程的特点 /032

- 2.6 材料环境适应性工程与相关学科的关系 /033
 - 2.6.1 材料环境适应性工程与系统工程 /033
 - 2.6.2 材料环境适应性工程与材料科学与工程 /034
 - 2.6.3 材料环境适应性工程与装备环境工程 /034
 - 2.6.4 环境适应性、可靠性和材料环境适应性工程与可靠性工程 /034
 - 2.6.5 材料环境适应性工程与管理科学 /037
- 2.7 材料环境适应性在装备全寿命周期中的地位 /038
- 2.8 材料环境适应性工程中的剪裁原理 /039
- 参考文献 /040

专业知识篇

第3章 材料种类和性质

- 3.1 高温合金 /043
 - 3.1.1 概述 /043
 - 3.1.2 主要的高温合金 /044
 - 3.1.3 高温合金的发展趋势 /045
- 3.2 铝合金 /047
 - 3.2.1 概述 /047
 - 3.2.2 主要的铝合金 /049
 - 3.2.3 铝合金的发展趋势 /051
- 3.3 钛合金 /051
 - 3.3.1 概述 /051
 - 3.3.2 主要的钛合金 /053
 - 3.3.3 钛合金的发展趋势 /054
- 3.4 超高强度钢 /056
 - 3.4.1 概述 /056
 - 3.4.2 主要的超高强度钢 /056
 - 3.4.3 超高强度钢发展趋势 /058
- 3.5 复合材料 /059
 - 3.5.1 概述 /059
 - 3.5.2 主要的复合材料 /062
 - 3.5.3 复合材料的发展趋势 /064
- 3.6 高分子材料 /065
 - 3.6.1 概述 /065
 - 3.6.2 主要高分子材料 /066
 - 3.6.3 高分子材料的发展趋势 /069

3.7 功能材料及其他材料 /071

参考文献 /071

第4章 材料环境损伤理论

4.1 材料环境损伤的类别 /073

4.2 材料疲劳理论 /074

4.2.1 材料疲劳的概念 /074

4.2.2 材料疲劳的分类 /074

4.2.3 影响材料疲劳的因素 /076

4.2.4 疲劳发生过程 /081

4.2.5 疲劳裂纹萌生机理 /083

4.2.6 疲劳裂纹扩展机理 /084

4.3 材料摩擦磨损理论 /086

4.3.1 基本概念 /086

4.3.2 摩擦磨损的分类 /087

4.3.3 磨料磨损 /089

4.3.4 黏着磨损 /092

4.3.5 疲劳磨损 /093

4.3.6 腐蚀磨损 /094

4.3.7 微动磨损 /096

4.3.8 影响磨损的因素 /098

4.4 材料腐蚀理论 /098

4.4.1 材料腐蚀的概念 /098

4.4.2 金属腐蚀的分类 /099

4.4.3 金属的电化学腐蚀电池理论 /101

4.4.4 电极电位和电化学腐蚀倾向 /102

4.4.5 极化和极化曲线 /103

4.4.6 影响金属腐蚀的因素 /104

4.4.7 高分子材料的腐蚀 /105

4.5 综合环境下材料损伤理论 /106

4.5.1 金属腐蚀疲劳 /107

4.5.2 氢脆 /107

4.5.3 综合环境下材料损伤的进一步讨论 /108

参考文献 /108

第5章 材料加工工艺与表面工程技术

5.1 材料加工工艺 /110

5.1.1 加工工艺对材料环境适应性的意义 /110

- 5.1.2 主要加工工艺中材料环境适应性考虑 /110
- 5.2 表面工程技术 /112
 - 5.2.1 表面工程分类 /113
 - 5.2.2 表面形变强化技术 /118
 - 5.2.3 电化学转化 /119
 - 5.2.4 电镀 /122
 - 5.2.5 涂覆有机涂料 /126
 - 5.2.6 热喷涂技术 /129
- 参考文献 /129

第6章 失效分析技术

- 6.1 失效分析基本概念 /130
- 6.2 失效分析目的和意义 /130
- 6.3 基本失效模式 /132
- 6.4 失效分析的基本思路 /132
 - 6.4.1 失效过程的特点 /132
 - 6.4.2 失效原因的特点 /134
 - 6.4.3 几种典型的失效分析思路 /134
 - 6.4.4 失效分析的一般程序 /137
- 6.5 失效分析技术 /138
 - 6.5.1 常规失效分析技术 /138
 - 6.5.2 定量分析技术 /145
 - 6.5.3 计算机模拟分析技术 /146
 - 6.5.4 其他失效分析技术 /150
- 6.6 失效分析案例 /158
 - 6.6.1 应力腐蚀 /158
 - 6.6.2 液态金属致脆 /159
 - 6.6.3 氢脆 /162
 - 6.6.4 腐蚀疲劳 /163
- 6.7 失效和故障分析的发展方向 /165
- 参考文献 /167

工程技术篇

第7章 环境条件及其效应分析

- 7.1 材料所面临的环境条件 /170
- 7.2 获取材料的服役环境数据的方法 /171

7.3 环境严酷度分类和材料的服役环境谱 /173

7.4 常见环境因素对材料的影响 /175

参考文献 /183

第8章 材料环境适应性设计

8.1 材料环境适应性设计的基本原则 /185

8.1.1 材料抗疲劳设计的基本原则 /186

8.1.2 材料抗摩擦磨损设计的基本原则 /187

8.1.3 材料抗腐蚀损伤的基本原则 /187

8.2 材料选择 /189

8.2.1 金属材料的选择 /189

8.2.2 非金属材料的选择 /190

8.3 控制环境设计 /191

8.3.1 通风设计 /192

8.3.2 排水设计 /192

8.3.3 密封设计 /193

8.3.4 缓蚀剂应用 /194

8.4 结构设计 /196

8.4.1 典型机械紧固连接件设计 /196

8.4.2 特殊结构/机构设计 /201

8.4.3 典型零组件设计 /209

8.5 制造工艺性设计 /224

8.5.1 材料表面防护设计 /225

8.5.2 材料制造工艺设计 /225

8.5.3 工序间防锈 /229

8.5.4 清洗、干燥和除油 /230

8.5.5 装配工艺设计 /232

8.6 对海军用材料环境适应性设计的展望 /233

参考文献 /233

第9章 材料环境适应性试验与评价

9.1 概述 /235

9.2 实验室疲劳试验技术 /237

9.3 摩擦磨损试验技术 /239

9.4 金属腐蚀试验技术 /243

9.5 自然环境试验技术 /244

9.5.1 大气暴露试验 /244

9.5.2 我国自然环境试验条件资源及数据积累和共享现状 /253

- 9.6 加速试验与材料环境适应性评价 /258
 - 9.6.1 加速试验方法 /258
 - 9.6.2 实验室加速试验的重现性及其与现场试验相关性讨论 /262
- 9.7 加速试验评价案例 /266
 - 9.7.1 通过加速试验评价导弹橡胶密封圈贮存寿命案例 /266
 - 9.7.2 通过加速试验方法评价铝合金大气腐蚀案例 /267
 - 9.7.3 通过加速试验方法评价有机防护涂层性能案例 /270
 - 9.7.4 通过加速试验方法评价材料疲劳寿命案例 /273
 - 9.7.5 固体润滑球轴承寿命试验评价案例 /274
- 参考文献 /274

第 10 章 使用过程中材料环境适应性控制

- 10.1 概述 /276
- 10.2 飞机结构材料的损伤 /276
- 10.3 飞机结构材料损伤的检查 /277
 - 10.3.1 一般结构材料损伤的检查方法 /277
 - 10.3.2 对复合材料损伤的检查 /278
 - 10.3.3 腐蚀的主要检查部位和损伤形式 /279
 - 10.3.4 疲劳、断裂等机械损伤的主要损伤形式和检查部位 /280
- 10.4 外场使用维护过程中腐蚀的预防性控制措施 /280
- 10.5 飞机结构的损伤修理准则和修理方案 /282
 - 10.5.1 飞机结构损伤修理准则 /282
 - 10.5.2 飞机结构损伤修理方案 /282
- 10.6 飞机结构损伤修理的方法 /283
 - 10.6.1 飞机一般结构损伤的修理方法 /283
 - 10.6.2 飞机复合材料损伤的修理方法 /284
- 10.7 使用维护中信息采集和使用 /285
 - 10.7.1 采集使用维护信息的目的 /285
 - 10.7.2 使用维护信息采集的要求 /286
 - 10.7.3 使用维护信息采集的主要项目 /286
- 10.8 使用维护过程中材料环境适应性控制案例 /287
 - 10.8.1 使用维护过程中发动机腐蚀的控制 /287
 - 10.8.2 使用维护过程中起落架疲劳损伤的控制 /288
 - 10.8.3 使用维护过程中涡轮叶片疲劳的控制 /290
 - 10.8.4 使用维护过程中航空发动机磨损的控制 /291
- 参考文献 /295