



“十二五”国家重点出版规划
精品项目

先进航空材料与技术丛书

航空材料环境试验 及表面防护技术

Environmental Test and Surface Protection
Technology of Aeronautic Materials

陆峰 汤智慧 孙志华 张晓云 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划
精品项目

先进航空材料与技术丛书

航空材料环境试验 及表面防护技术

常州大学图书馆藏
陆 志 华 张 晓 云 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统地介绍了航空材料环境试验及表面防护技术的应用基础研究和工程应用方面取得的成果,着重对北京航空材料研究院近二十年来的重要或创新性成果进行了系统展示。

全书共分为 12 章。内容包括:高强度铝合金大气腐蚀模拟加速评价技术;树脂基复合材料环境适应性评价技术;飞机表面防护涂层环境适应性加速评价技术;结构试样防护涂层体系性能评价技术;大气腐蚀监测仪和 Kelvin 探针电化学检测技术;大气应力腐蚀试验技术;图像识别和电化学噪声大气腐蚀早期检测技术;高强度钢和钛合金表面镀覆层防护技术;有色金属表面转化膜技术;超音速火焰喷涂、爆炸喷涂及低温气动喷涂技术;飞机腐蚀维护与维修技术;航空高强度材料及构件表面强化技术等。

本书可供从事航空产品设计、研究、生产、检验、使用和维修等部门的有关工程技术人员使用,亦可供其他相关部门的有关技术人员及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空材料环境试验及表面防护技术 / 陆峰等著. —北京:

国防工业出版社, 2012. 3

(先进航空材料与技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 07895 - 4

I. ①航... II. ①陆... III. ①航空材料 - 环境试验 IV. ①V250. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 023377 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 插页 4 印张 28 1/4 字数 563 千字

2012 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 76.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

《先进航空材料与技术丛书》

编 委 会

主 任 戴圣龙

副主任 王亚军 益小苏

顾 问 颜鸣皋 曹春晓 赵振业

委 员 (按姓氏笔画为序)

丁鹤雁	王志刚	王惠良	王景鹤
刘 嘉	刘大博	阮中慈	苏 彬
李 莉	李宏运	连建民	吴学仁
张庆玲	张国庆	陆 峰	陈大明
陈祥宝	周利珊	赵希宏	贾泮江
郭 灵	唐 斌	唐定中	陶春虎
黄 旭	黄 敏	韩雅芳	骞西昌
廖子龙	熊华平	颜 悦	

序

一部人类文明史从某种意义上说就是一部使用和发展材料的历史。材料技术与信息技术、生物技术、能源技术一起被公认为是当今社会及今后相当长时间内总揽人类发展全局的技术,也是一个国家科技发展和经济建设最重要的物质基础。

航空工业领域从来就是先进材料技术展现风采、争奇斗艳的大舞台,自美国莱特兄弟的第一架飞机问世后的 100 多年以来,材料与飞机一直在相互推动不断发展,各种新材料的出现和热加工工艺、测试技术的进步,促进了新型飞机设计方案的实现,同时飞机的每一代结构重量系数的降低和寿命的延长,发动机推重比量级的每一次提高,无不强烈地依赖于材料科学技术的进步。“一代材料,一代飞机”就是对材料技术在航空工业发展中所起的先导性和基础性作用的真实写照。

回顾中国航空工业建立 60 周年的历程,我国航空材料经历了从无到有、从小到大的发展过程,也经历了从跟踪仿制、改进改型到自主创新研制的不同发展阶段。新世纪以来,航空材料科技工作者围绕国防,特别是航空先进装备的需求,通过国家各类基金和项目,开展了大量的先进航空材料应用基础和工程化研究,取得了许多关键性技术的突破和可喜的研究成果,《先进航空材料与技术丛书》就是这些创新

性成果的系统展示和总结。

本套丛书的编写是由北京航空材料研究院组织完成的。19 个分册从先进航空材料设计与制造、加工成形工艺技术以及材料检测与评价技术三方面入手,使各分册相辅相成,从不同侧面丰富了这套丛书的整体,是一套较为全面系统的大型系列工程技术专著。丛书凝聚了北京航空材料研究院几代专家和科技人员的辛勤劳动和智慧,也是我国航空材料科技进步的结晶。

当前,我国航空工业正处于历史上难得的发展机遇期。应该看到,和国际航空材料先进水平相比,我们尚存在一定的差距。为此,国家提出“探索一代,预研一代,研制一代,生产一代”的划代发展思想,航空材料科学技术作为这四个“一代”发展的技术引领者和技术推动者,应该更加强化创新,超前部署,厚积薄发。衷心希望此套丛书的出版能成为我国航空材料技术进步的助推器。可以相信,随着国民经济的进一步发展,我国航空材料科学技术一定会迎来一个蓬勃发展的春天。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '李锐' (Li Rui), written in a cursive style.

2011 年 3 月

前 言

航空材料环境试验及表面防护技术是一门跨学科的实用科学技术,近年来发展非常迅速。它不仅涉及到众多的科学领域,而且其自身包含的内容也极其丰富。航空材料环境试验与评价是飞机、发动机及机载设备结构设计、防护及使用寿命评估的重要数据之一。表面防护技术是通过涂层、镀层、表面转化和表面强化等方式,大幅度提高材料的防腐能力或赋予材料表面特殊的物理、化学性能,从而满足产品高技术性能要求,极大地提高材料的耐腐蚀性能、耐磨性能、疲劳性能等,从而达到提高产品可靠性和延长使用寿命的作用。

北京航空材料研究院自 1956 年建院以来设置了腐蚀与防护、表面强化等专业,是国内最早从事航空材料腐蚀性能表征、环境适应性评价、表面防护和表面强化技术研究的专业化研究机构。55 年来,航空材料环境试验、表面防护技术研究与应用取得了长足的进步。在航空材料环境试验技术研究方面,特别是户内外腐蚀试验相关关系、大气腐蚀监测技术、航空材料在大气环境中的失效及破坏规律等取得了丰硕的成果;设有国防科技工业自然环境试验站网——北京大气环境试验站,国家科技部国家材料野外试验站网——北京大气试验站等;具有完整的腐蚀性能测试设备和高素质的研究、测试人员,获得中国实验室国家认可委员会(CNAS)颁发的认可证书,通过 GE 公司的 S400 认证,是 GE 公司认可的腐蚀实验室。表面防护技术从基础理论、工艺技术、防护方法和工程应用等方面形成了系统全面、具有航空特色的研究、开发及工程应用的体系,满足了我国新型飞机、发动机等航空装备对先进表面防护技术的要求,为我国航空工业的持续发展做出了重要贡献。

本分册囊括了北京航空材料研究院腐蚀与防护、表面强化专业成立 55 年来,在航空材料环境试验、表面防护技术的基础研究和工程应用方面取得的成果,着重对近二十年来的重要或创新性成果进行了系统展示。通过对我院航空

材料环境试验及表面防护技术在几十年发展过程中由无到有、由弱到强的发展过程的回顾与分析,对航空材料环境试验及表面防护的特色技术、关键技术研究过程及工程应用的总结,可以系统地总结航空材料环境试验及表面防护技术的发展规律、规划我国新型航空材料环境试验及表面防护技术的发展方向,特别是对提高科研人员的科研水平、开拓眼界等具有很好的指导作用。

本分册由陆峰进行全书的构思与设计,汤智慧、孙志华、张晓云进行全书的审定和订正。具体分工为:前言由孙志华、陆峰撰写;第1章由刘明、蔡健平撰写;第2,4,6,7和11章由张晓云、杨勇进、郭孟秋撰写;第3,5章由孙志华、王志申撰写;第8章由汤智慧、宇波、郭孟秋撰写;第9章由宇波、刘明辉、孙志华撰写;第10章由王长亮、汤智慧、崔永静撰写;第12章由宋颖刚、王强、王欣撰写,全书由孙志华、张晓云负责统稿。

北京航空材料研究院航空材料环境试验及表面防护技术的发展离不开各航空主机厂所、航空高等院校和其他从事材料研发、生产单位同行们的鼎力协助,愿借此书出版之际,向各行业、各单位的同行们致以诚挚的谢意。

由于编写者水平有限,如有错误或疏漏之处,衷心期望读者不吝指正。

作者

2011年11月10日

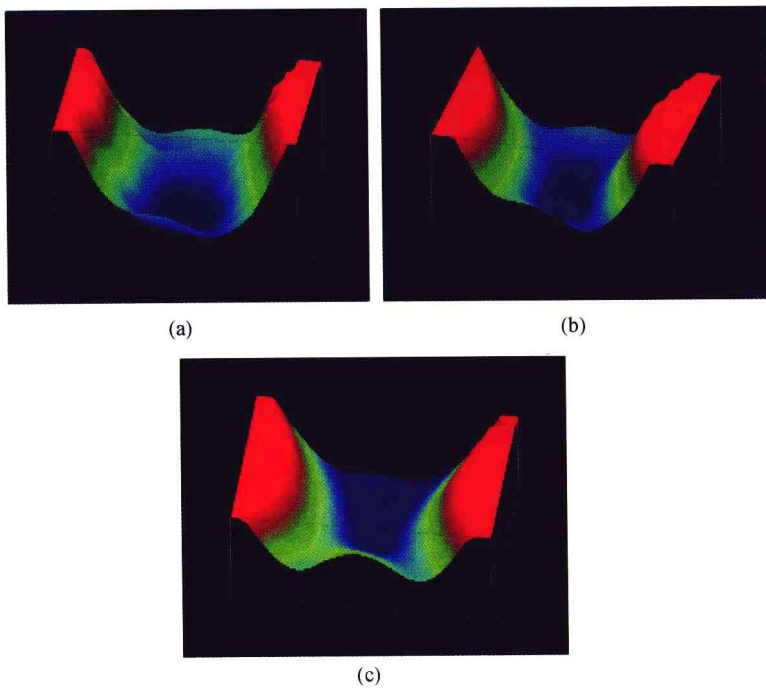
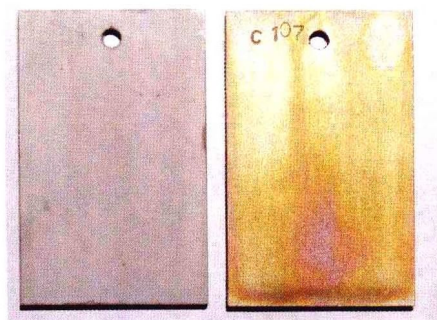


图 3-9 加速老化试验期间底漆试样划痕及其周围涂层的阻抗分布
(a) 1 周期; (b) 4 周期; (c) 5 周期。



未钝化

钝化

图 8-8 钛钎镀层外观

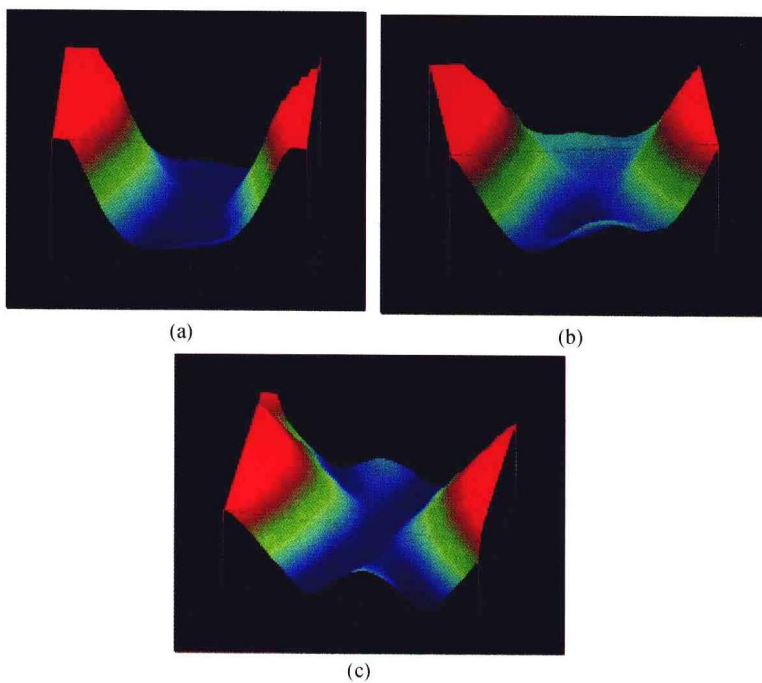


图 3-10 加速不同时间面漆划痕及其周围涂层的阻抗分布
(a) 1 周期; (b) 4 周期; (c) 5 周期。

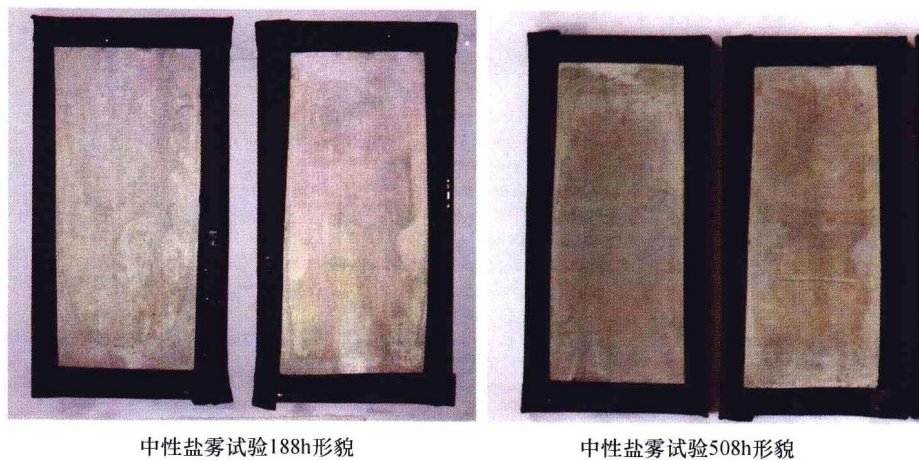


图 8-12 镉钛镀层耐蚀性检测



图 8-17 300M 钢离子镀铝后外观

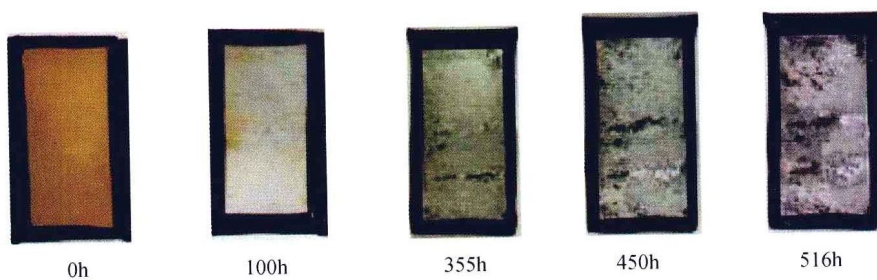


图 8-20 300M 钢离子镀铝($8\mu\text{m} \sim 12.5\mu\text{m}$)不同盐雾时间后外观

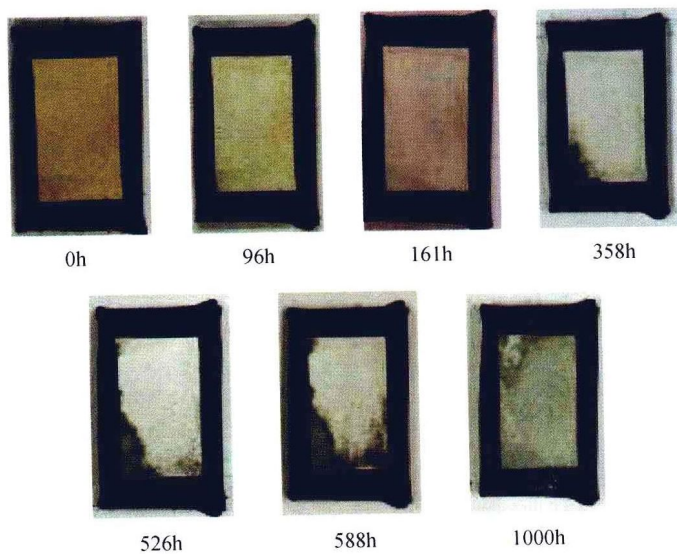


图 8-21 300M 钢离子镀铝($22\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$)不同盐雾时间后外观

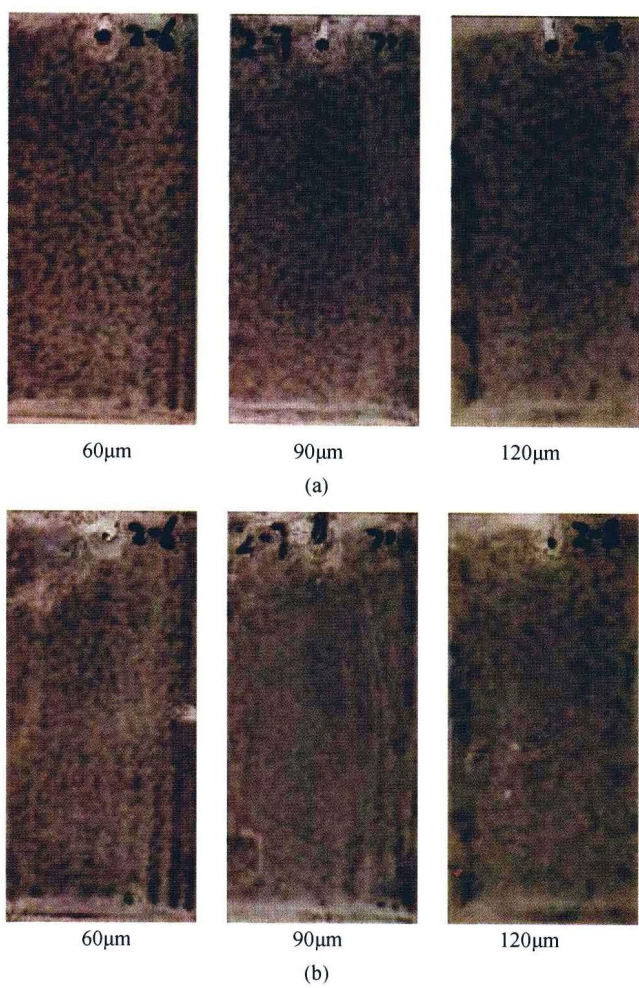
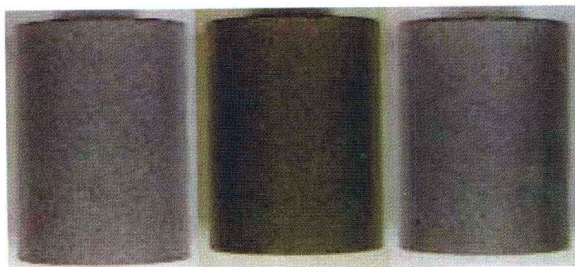
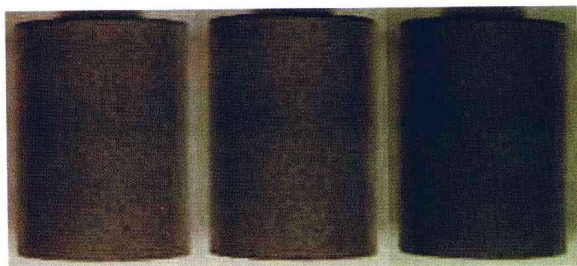


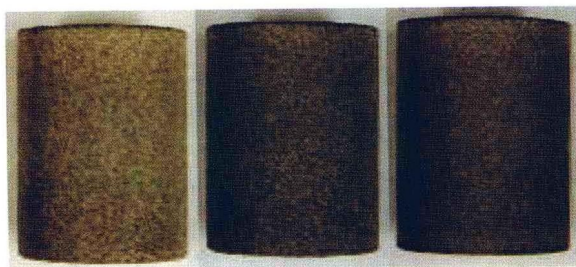
图 9-37 不同厚度微弧氧化涂层耐盐雾试验结果
(a) 盐雾试验前; (b) 盐雾试验 2016h。



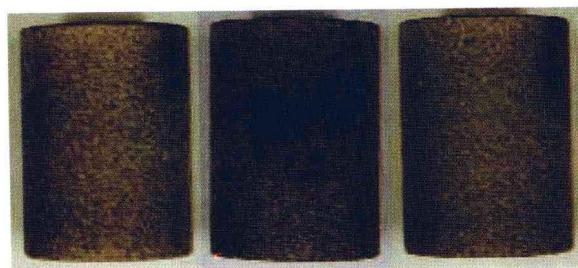
试验前



试验后
(a)



试验前



试验后
(b)

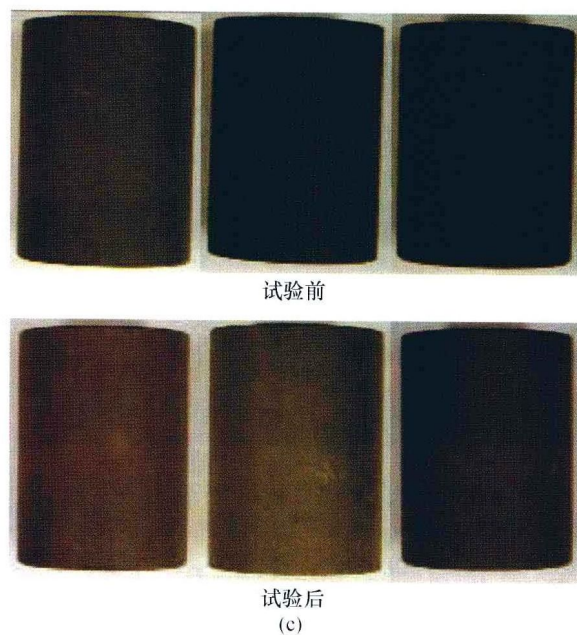


图 9-42 微弧氧化和脉冲阳极化涂层热冲击结合力测试前后的外观
 (a) 微弧氧化软膜陶瓷层试样；(b) 微弧氧化硬膜陶瓷层试样；
 (c) 脉冲阳极化涂层试样。

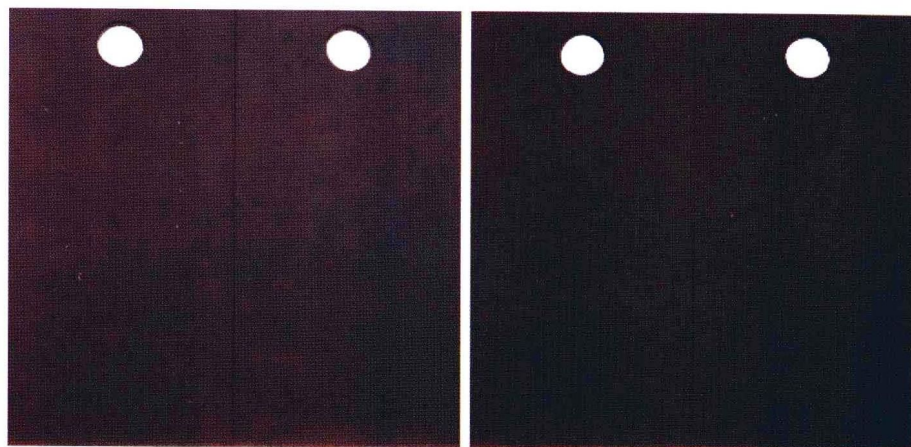


图 9-60 钛合金脉冲阳极氧化工艺制备的 $2\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ (灰色)
 和 $8\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ (褐色) 氧化膜照片

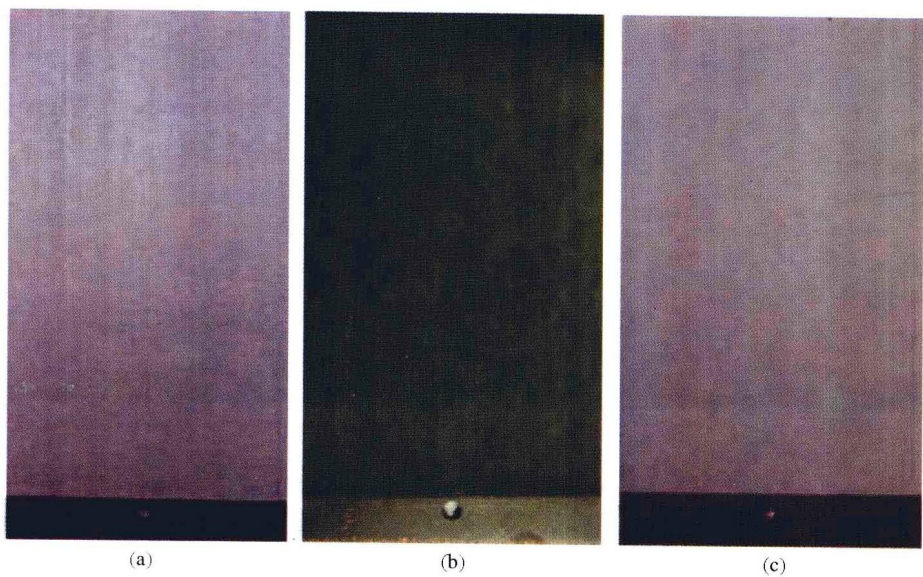


图 10-38 低温气动喷涂涂层的外观形貌

(a) 低温气动喷涂 Al 涂层；(b) 低温气动喷涂 Zn 涂层；(c) 低温气动喷涂 Al-Zn 涂层。

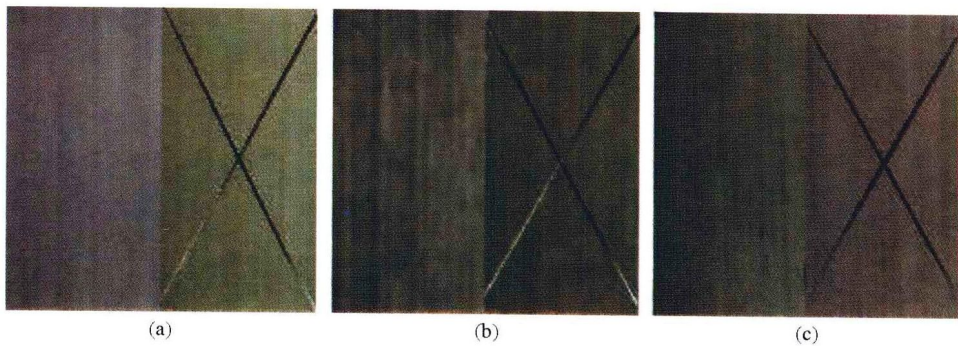


图 10-45 三种低温气动喷涂涂层盐雾试验前的表面宏观形貌

(a) 低温气动喷涂 Al；(b) 低温气动喷涂 Zn；(c) 低温气动喷涂 Al-Zn。



图 10 - 11 500h 盐雾试验后涂层外观

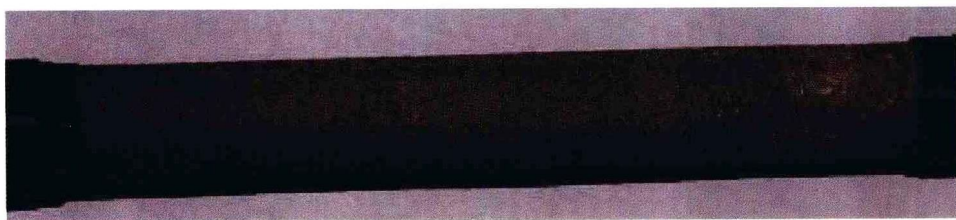


图 10 - 37 镁合金(低温气动喷涂铝防护)经过 336h 盐雾试验后外观照片

目 录

第 1 章 高强度铝合金大气腐蚀模拟加速评价技术	1
1.1 概述	1
1.2 国内外大气腐蚀模拟加速评价技术的进展	2
1.3 高强度铝合金大气腐蚀模拟加速评价技术的总体思路	5
1.4 铝合金大气腐蚀简介	5
1.5 大气腐蚀模拟加速试验环境谱	7
1.5.1 模拟加速试验环境谱的编制	7
1.5.2 典型高强度铝合金大气腐蚀模拟加速试验环境谱	8
1.5.3 高强度铝合金大气腐蚀模拟加速试验环境谱的监控 和评价	11
1.6 大气腐蚀模拟加速评价技术的实现	14
1.6.1 周期浸润试验机的研制	15
1.6.2 人工气候复合加速腐蚀试验机的研制	17
1.6.3 CET-2000 综合环境试验机的研制	20
1.7 高强度铝合金大气腐蚀模拟加速试验的加速性和模拟性分析	22
1.7.1 腐蚀失重动力学分析	22
1.7.2 大气腐蚀形貌观察	25
1.7.3 大气腐蚀产物成分分析	33
1.7.4 大气腐蚀的电化学分析	34
1.8 典型高强度铝合金加速试验与户外暴露结果相关关系研究	37
1.8.1 灰色关联法	37
1.8.2 加速因子法	39
1.8.3 加速转换因子法	39
参考文献	40
第 2 章 树脂基复合材料环境适应性评价技术	42
2.1 概述	42