

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书·典藏版
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

航空铝合金腐蚀防护 与检测方法

于 美 刘建华 李松梅 编著



科学出版社

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书·典藏版

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

航空铝合金腐蚀防护 与检测方法

于 美 刘建华 李松梅 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书汇集了国内外有关航空铝合金腐蚀防护研究的资料,并对其进行归纳、整合和提炼。编写从航空铝合金组成、特性及其在飞机制造中的应用出发,主要介绍航空铝合金腐蚀类型、基本特征及产生条件、影响因素、典型腐蚀案例,航空工业铝合金常用表面防护技术,以及航空铝合金腐蚀检测与评价方法。全书分为五章:第一章航空铝合金概述,第二章铝合金腐蚀基础,第三章航空铝合金结构及结构件的腐蚀典型案例,第四章铝合金腐蚀防护技术,第五章航空铝合金腐蚀检测与评价方法。

本书可供航空铝合金材料研究和生产,飞机设计、制造、使用等领域的科研人员、生产技术人员使用,也可供航空、机械、材料等相关专业的本科生及研究生参考、学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书:典藏版/侯保荣主编. —北京:科学出版社, 2018.1

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-056255-5

I. ①中… II. ①侯… III. ①腐蚀-调查研究-中国 IV. ①TG17

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第002936号

责任编辑:李明楠 宁倩/责任校对:贾娜娜

责任印制:张伟/封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2018年1月第一次印刷 印张:21 1/4

字数:428 000

定价:3200.00元(全32册)

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书

顾问委员会

主任委员：徐匡迪 丁仲礼

委员（按姓氏笔画排序）：

丁一汇	丁仲礼	王景全	李 阳	李鹤林	张 偲
金翔龙	周守为	周克崧	周 廉	郑皆连	郝吉明
胡正寰	柯 伟	侯立安	聂建国	徐匡迪	翁宇庆
高从堦	曹楚南	曾恒一	缪昌文	薛群基	魏复盛

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书

总编辑委员会

总 主 编：侯保荣

副总主编：徐滨士 张建云 徐惠彬 李晓刚

编 委（按姓氏笔画排序）：

马士德	马化雄	马秀敏	王福会	尹成先	朱锡昶
任小波	任振铎	刘小辉	刘建华	许立坤	孙虎元
孙明先	杜 敏	杜翠薇	李少香	李伟华	李言涛
李金桂	李济克	李晓刚	杨朝晖	张劲泉	张建云
张经磊	张 盾	张洪翔	陈卓元	欧 莉	岳清瑞
赵 君	胡少伟	段继周	侯保荣	宫声凯	桂泰江
徐玮辰	徐惠彬	徐滨士	高云虎	郭公玉	黄彦良
常 炜	葛红花	韩 冰	雷 波	魏世丞	

丛 书 序

腐蚀是材料表面或界面之间发生化学、电化学或其他反应造成材料本身损坏或恶化的现象,从而导致材料的破坏和设施功能的失效,会引起工程设施的结构损伤,缩短使用寿命,还可能导致油气等危险品泄漏,引发灾难性事故,污染环境,对人民生命财产安全造成重大威胁。

由于材料,特别是金属材料的广泛应用,腐蚀问题几乎涉及各行各业。因而腐蚀防护关系到一个国家或地区的众多行业和部门,如基础设施工程、传统及新兴能源设备、交通运输工具、工业装备和给排水系统等。各类设施的腐蚀安全问题直接关系到国家经济的发展,是共性问题,是公益性问题。有学者提出,腐蚀像地震、火灾、污染一样危害严重。腐蚀防护的安全责任重于泰山!

我国在腐蚀防护领域的发展水平总体上仍落后于发达国家,它不仅表现在防腐蚀技术方面,更表现在防腐蚀意识和有关的法律法规方面。例如,对于很多国外的房屋,政府主管部门依法要求业主定期维护,最简单的方法就是在房屋表面进行刷漆防蚀处理。既可以由房屋拥有者,也可以由业主出资委托专业维护人员进行防护工作。由于防护得当,许多使用上百年的房屋依然完好、美观。反观我国的现状,首先是人们的腐蚀防护意识淡薄,对腐蚀的危害认识不清,从设计到维护都缺乏对腐蚀安全问题的考虑;其次是国家和各地区缺乏与维护相关的法律与机制,缺少腐蚀防护方面的监督与投资。这些原因就导致了我国在腐蚀防护领域的发展总体上相对落后的局面。

中国工程院“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目工作的开展是当务之急,在我国经济快速发展的阶段显得尤为重要。借此机会,可以摸清我国腐蚀问题究竟造成了多少损失,我国的设计师、工程师和非专业人士对腐蚀防护了解多少,如何通过技术规程和相关法规来加强腐蚀防护意识。

项目组将提交完整的调查报告并公布科学的调查结果,提出切实可行的防腐蚀方案和措施。这将有效地促进我国在腐蚀防护领域的发展,不仅有利于提高人们的腐蚀防护意识,也有利于防腐技术的进步,并从国家层面上把腐蚀防护工作的地位提升到一个新的高度。另外,中国工程院是我国最高的工程咨询机构,没有直属的科研单位,因此可以比较超脱和客观地对我国的工程技术问题进行评估。把这样一个项目交给中国工程院,是值得国家和民众信任的。

这套丛书的出版发行,是该重大咨询项目的一个重点。据我所知,国内很多领域的知名专家学者都参与到丛书的写作与出版工作中,因此这套丛书可以说涉及

了我国生产制造领域的各个方面,应该是针对我国腐蚀防护工作的一套非常全面的丛书。我相信它能够 为各领域的防腐蚀工作者提供参考,用理论和实例指导我国的腐蚀防护工作,同时我也希望腐蚀防护专业的研究生甚至本科生都可以阅读这套丛书,这是开阔视野的好机会,因为丛书中提供的案例是在教科书上难以学到的。因此,这套丛书的出版是利国利民、利于我国可持续发展的大事情,我衷心希望它能得到业内人士的认可,并为我国的腐蚀防护工作取得长足发展贡献力量。

徐匡迪

2015 年 9 月

丛 书 前 言

众所周知,腐蚀问题是世界各国共同面临的问题,凡是使用材料的地方,都不同程度地存在腐蚀问题。腐蚀过程主要是金属的氧化溶解,一旦发生便不可逆转。据统计估算,全世界每 90 秒钟就有一吨钢铁变成铁锈。腐蚀悄无声息地进行着破坏,不仅会缩短构筑物的使用寿命,还会增加维修和维护的成本,造成停工损失,甚至会引起建筑物结构坍塌、有毒介质泄漏或火灾、爆炸等重大事故。

腐蚀引起的损失是巨大的,对人力、物力和自然资源都会造成不必要的浪费,不利于经济的可持续发展。震惊世界的“11·22”黄岛中石化输油管道爆炸事故造成损失 7.5 亿元人民币,但是把防腐蚀工作做好可能只需要 100 万元,同时避免灾难的发生。针对腐蚀问题的危害性和普遍性,世界上很多国家都对各自的腐蚀问题做过调查,结果显示,腐蚀问题所造成的经济损失是触目惊心的,腐蚀每年造成损失远远大于自然灾害和其他各类事故造成损失的总和。我国腐蚀防护技术的发展起步较晚,目前迫切需要进行全面的腐蚀调查研究,摸清我国的腐蚀状况,掌握材料的腐蚀数据和有关规律,提出有效的腐蚀防护策略和建议。随着我国经济社会的快速发展和“一带一路”倡议的实施,国家将加大对基础设施、交通运输、能源、生产制造及水资源利用等领域的投入,这更需要我们充分及时地了解材料的腐蚀状况,保证重大设施的耐久性和安全性,避免事故的发生。

为此,中国工程院设立“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目,这是一件利国利民的大事。该项目的开展,有助于提高人们的腐蚀防护意识,为中央、地方政府及企业提供可行的意见和建议,为国家制定相关的政策、法规,为行业制定相关标准及规范提供科学依据,为我国腐蚀防护技术和产业发展提供技术支持和理论指导。

这套丛书包括了公路桥梁、港口码头、水利工程、建筑、能源、火电、船舶、轨道交通、汽车、海上平台及装备、海底管道等多个行业腐蚀防护领域专家学者的研究工作经验、成果以及实地考察的经典案例,是全面总结与记录目前我国各领域腐蚀防护技术水平和发展现状的宝贵资料。这套丛书的出版是该项目的一个重点,也是向腐蚀防护领域的从业者推广项目成果的最佳方式。我相信,这套丛书能够积极地影响和指导我国的腐蚀防护工作和未来的人才培养,促进腐蚀与防护科研成果的产业化,通过腐蚀防护技术的进步,推动我国在能源、交通、制造业等支柱产业上的长足发展。我也希望广大读者能够通过这套丛书,进一步关注我国腐蚀防护技术的发展,更好地了解和认识我国各个行业存在的腐蚀问题和防腐策略。

在此,非常感谢中国工程院的立项支持以及中国科学院海洋研究所等各课题承担单位在各个方面的协作,也衷心地感谢这套丛书的所有作者的辛勤工作以及科学出版社领导和相关工作人员的共同努力,这套丛书的顺利出版离不开每一位参与者的贡献与支持。

侯保荣

2015年9月

序

我国幅员辽阔、人口众多，客机运载十分繁忙。大型客机有效载员多、飞行时间长，因此其安全可靠性和寿命尤为重要。腐蚀破坏是影响飞机服役安全、可靠、寿命的重要因素。铝合金材料在飞机制造中非常重要，如蒙皮、框架、桁条等大量使用铝合金。在飞机制造中，航空铝合金品种多、用量大，在飞机许多关键部位的使用影响整个飞机的安全性和寿命。调查发现，许多关键部位的铝合金容易腐蚀。腐蚀轻微时需进行维修保养，比较严重时需更换部件。如果发现不及时，腐蚀严重时可能会引起事故，造成机毁人亡的悲剧。

北京航空航天大学（简称“北航”）材料科学与工程学院长期进行飞机结构材料设计、研制和测试，特别是铝合金的设计和研制，取得了重要的研究进展。在本次咨询项目中北航项目组进行了国内外飞机腐蚀损失状况调查，获得了许多有效的腐蚀数据，在此基础上进行了系统的归纳、分析。

《航空铝合金腐蚀防护与检测方法》主要介绍了铝合金组成、结构、特性及其在航空工业中的应用，铝合金腐蚀的基本类型，各个腐蚀类型的基本特征及产生的条件，航空铝合金典型腐蚀案例，航空工业铝合金常用表面防护方法与技术；另外还介绍了航空铝合金腐蚀检测方法与实验方法。

该书汇集了作者研究工作的重要成果和宝贵经验，并对国内外铝合金腐蚀与防护领域的研究成果进行了归纳、整合和提炼，可为航空工业飞机防腐设计、制造和维护等提供防腐科学理论和实验技术参考，具有重要的学术价值和实际应用意义。

侯保荣

2017年5月

前 言

腐蚀是指材料与环境之间相互作用而致使材料失效的破坏现象。在工业发达、科学技术先进的今天，腐蚀引起的材料损失、构件失效、装备破坏的问题常突显出重大的破坏性、危害性、灾难性。腐蚀引起的重大事故和环境破坏，特别是导致的重大人员伤亡和重要的经济损失显示出腐蚀科学问题研究及腐蚀控制工程研究的重要性和紧迫性。

中国工程院 2015 年下达的重大咨询项目“我国腐蚀状况及控制战略研究”，由侯保荣院士领导，在全国范围内有 32 个大行业、数百家企事业单位参与，广泛开展了腐蚀调查和腐蚀控制战略的研究，取得了重要成果。

本书作为该重大咨询项目之一——交通运输领域的工作，针对航空领域常用的铝合金的腐蚀与防护问题进行了一些调研工作。

作为飞机制造使用的重要材料之一的铝合金，常被称为航空铝合金。本书是在长期研究航空铝合金的基础上编写的。铝合金的腐蚀是铝合金本身问题、环境问题、铝合金与环境之间的相互作用问题集中体现的结果。因此，本书的编写，从铝合金本身特点、性质及其在飞机制造中的用途出发，结合飞机飞行涉及的环境，飞机用典型铝合金腐蚀特点、类型，典型结构腐蚀及腐蚀原因、原理，总结了腐蚀检测的常规方法、腐蚀现象及等级评价方法，同时还涉及航空工业铝合金常用的表面防护技术与方法等。

本书分五章，第一章主要介绍铝合金组成、结构、特性及其在航空工业中的应用；第二章介绍铝合金腐蚀的基本类型，各个腐蚀类型的基本特征及产生的条件；第三章主要介绍航空铝合金腐蚀典型案例；第四章主要介绍航空工业铝合金常用表面防护方法与技术；第五章介绍航空铝合金腐蚀检测与评价方法。

本书第一章、第二章主要由美编写，第三章、第四章主要由刘建华编写，第五章主要由李松梅编写，全书由于美统稿。

徐惠彬院士对本书的编写提供了宝贵的指导意见和建议，并对全书初稿提出了许多具体修改意见，在此表示衷心感谢。参与本书参考资料收集、整理、编排等工作的还有孔祥鑫、于晴、刘玥、赵纯谊、岑帅、祖航、刘瑞丽、田婷和吴学科等，在此表示感谢。本书资料除研究工作外，还引用了国内外发表的相关论文、专著等文献，在此对这些作者表示衷心感谢。

本书作为中国工程院重大咨询项目系列丛书的一个分册，可供先进铝合金材

料研究、生产及设计、应用领域的科研人员、生产技术人员以及相关专业的本科生及研究生参考、学习。

由于作者的能力和水平有限，加之时间仓促，难免有疏漏与不足之处，敬请同行和广大读者批评指正。

作 者

2017年5月

重要符号列表

(某些符号在不同章节意义不同)

符号	意义	符号	意义
A	应力-应变曲线下的面积	HV	维氏硬度
B	试样(或面积)最大点蚀深度的排列位置编码	$h\nu$	光子的能量
b_A	阳极塔费尔直线斜率	I	电流强度
C	辅助电极	I_{corr}	腐蚀电流
C	浓度	I_g	电偶电流密度
C_H	氢浓度	I_N	阳极金属 N 的腐蚀电流
D	扩散系数	I_{N_0}	未偶接前阳极金属 N 的腐蚀电流
D	最大点蚀深度	I_{pit}	蚀孔表观电流
D	C 形环平均直径 (OD-t)	i^0	交换电流密度
d	被氧化元素的密度	$i_{C, N}$	阳极金属 N 还原电流密度
da/dt	裂纹扩展速率	i_{corr}	腐蚀电流密度
E	弹性模量	i_g	阳极金属电偶电流密度
E_A	阳极金属偶接前的稳定电位	i_k	电流阶跃幅值
E_b	击破电位	i_M	金属 M 的自腐蚀速率
E_C	阴极金属偶接前的稳定电位	i_N	金属 N 的自腐蚀速率
E_{corr}	腐蚀电位	K	与水及合金成分有关的常数
E_g	混合电位	K_I	应力场强度因子
E_k	动能	K_{ISCC}	临界强度因子值
E_M	金属 M 自腐蚀电位	$\bar{K}$	平均应力场强度因子
E_N	金属 N 的自腐蚀电位	L	两点弯曲试样长度
E_p	钝化电位	M	Al-Mg-Zn 合金时效过程形成的 MgZn_2 稳定有序相
E_{SCC}	SCC 发生的电位范围	$\bar{M}$	1mol 金属的相对原子质量
E_T	探针电位	m	质量
F	法拉第常数	N	试样总数(或区域总数)
f	交变应力的频率	N_p	发生点蚀的试样(或区域)数
G.P.	时效过程中形成的溶质富集区	n	点蚀试验平行试样总数
H	铝合金加工硬化状态	O	铝合金退火状态
H	两点弯曲试样两支点间距离	OD	受力前的 C 形环外径
H_1	三点弯曲试样两外支点间的距离	OD_f	受应力的 C 形环最终外径
H_2	四点弯曲试样内外支点间的距离	P	极化电源

P	发生点蚀的概率	α	低溶质含量铝的固溶体在常温下的稳定相
P_A	阳极金属极化率	β	Al-Mg-Si 合金时效过程形成的 Mg_2Si 稳定有序相
P_C	阴极金属极化率	Δ	C 形环外加应力导致的 OD 变化
Q	基体金属腐蚀所占总面积的百分数	δ	试样的延伸率
R	参比电极	ΔK	应力场强度因子范围
R	U 形试样顶部弧段的半径	ΔK_{th}	条件腐蚀疲劳临界应力场强度因子范围
R_A	外观评级数	Δm	时间 t 内溶解掉的金属的质量
R_f	稀土转化膜所引起的电阻	ΔW	试样腐蚀前后质量变化
R_n	噪声电阻	ε	U 形试样弯曲外表面上的总应变
R_p	保护评级数	ε_c	C 形环试样周向应变
R_p	极化电阻	ε_t	C 形环试样切向应变
R_r	电化学反应电阻	ε_0	惰性气氛中应变量
r	电偶腐蚀效应	ε_{SCC}	腐蚀介质中应变量
r_{pit}	蚀孔表观半径	ϕ	直径
S	电极实际表面积	θ	Al-Cu 合金时效过程形成的 $CuAl_2$ 稳定有序相
S_A	阳极金属的表面积	θ	覆盖率
S_C	阴极金属的表面积	θ'	Al-Cu 合金时效过程形成的软相
T	铝合金的热处理状态	θ''	Al-Cu 合金时效过程形成强化相
t	点蚀暴露时间	$\sigma_{0.2}$	屈服强度
t_0	在惰性气氛中的拉断时间	σ_{0max}	惰性气氛中最大应力
t_c	C 形环壁厚	σ_{ad}	氢致附加应力
t_c	在腐蚀介质中的拉断时间	σ_b	抗拉强度
t_F	试样的断裂寿命	σ_c	C 形环试样周向应力
t_U	U 形试样的厚度	σ_c	条件临界腐蚀疲劳极限应力
t_w	试样厚度	σ_{max}	腐蚀介质中最大应力
V	加在针尖和样品之间的偏置电压	σ_{min}	腐蚀介质中最小应力
v	阳极穿透实验中金属腐蚀速率	σ_s	屈服强度
v_d	深度法表示的腐蚀速率	σ_{SCC}	SCC 临界应力
v_w	重量法表示的腐蚀速率	σ_t	C 形环试样横向应力
W	研究电极	σ	C 形环外加应力
W_0	试样腐蚀前质量	$\bar{\sigma}$	平均应力
$w_B\%, w$	质量分数	ρ	密度
x	金属阳离子的价数	φ_1, φ_2	针尖和样品的功函数
y	弯曲试样最大挠度	Ψ	试样的断面收缩率
z	C 形环试验修正系数		

目 录

丛书序

丛书前言

序

前言

重要符号列表

第一章 航空铝合金概述	1
第一节 绪论	1
一、铝及铝合金的特点	2
二、航空铝合金的分类和牌号	3
三、航空铝合金的发展趋势	6
第二节 航空铝合金性能	11
一、两类铝合金的性能概述	12
二、铝合金的热处理	13
三、常见铝合金的性能	27
第三节 铝合金在飞机上的应用	32
一、铝合金在飞机上的应用概述	32
二、常见航空铝合金的应用状况	34
三、铝合金在飞机上的应用举例	44
参考文献	46
第二章 铝合金腐蚀基础	48
第一节 铝合金腐蚀类型及其原理	48
一、均匀腐蚀	51
二、电偶腐蚀	53
三、点蚀	59
四、晶间腐蚀与剥蚀	65
五、缝隙腐蚀	71
六、铝合金的应力腐蚀和腐蚀疲劳	75
七、不同牌号铝合金的腐蚀	83
第二节 航空铝合金腐蚀环境特点	95

一、自然环境	96
二、飞机内环境特点	99
第三节 铝合金涂层腐蚀	101
一、铝合金涂层简介	101
二、涂层下金属腐蚀行为及涂层失效机理	102
三、防腐涂层失效类型	108
四、涂层腐蚀的影响因素	110
五、铝合金涂层腐蚀实例	113
参考文献	116
第三章 航空铝合金结构及结构件的腐蚀典型案例	119
第一节 飞机蒙皮铝合金腐蚀	119
一、飞机结构主体材料腐蚀损伤特点分析	120
二、民用飞机蒙皮腐蚀	122
三、飞机机腹蒙皮腐蚀原因分析	124
四、直升机结构中 6A02 铝合金腐蚀案例分析	128
五、7075-T6 铝合金壁板的腐蚀案例分析	132
六、飞机框接头处 2A50 铝合金的应力腐蚀案例分析	140
第二节 铝合金连接件的腐蚀	144
一、铝合金结构连接部位的腐蚀行为	144
二、铝合金连接件的腐蚀疲劳	146
三、铝合金连接件的电偶腐蚀	150
参考文献	155
第四章 铝合金腐蚀防护技术	157
第一节 阳极氧化处理	157
一、硫酸阳极氧化	159
二、铬酸阳极氧化	162
三、草酸阳极氧化	167
四、硬质阳极氧化	169
五、硼酸-硫酸阳极氧化	174
六、酒石酸-硫酸阳极氧化	178
第二节 铝合金的涂层防护	179
一、航空涂层发展现状	179
二、铝合金涂装工艺	180
三、飞机整机涂装工艺	189

四、先进航空涂料研究进展	200
第三节 化学转化	202
一、化学氧化膜	202
二、铬酸盐法	204
三、磷酸-铬酸盐法	209
四、无铬化学转化处理	214
五、磷化处理	218
第四节 其他防护方法	224
一、激光表面处理	225
二、气相沉积技术	228
三、离子注入技术	234
参考文献	236
第五章 航空铝合金腐蚀检测与评价方法	238
第一节 化学分析方法	238
一、航空铝合金成分分析	238
二、腐蚀产物成分分析	244
三、腐蚀产物结构分析	252
第二节 电化学测试技术	256
一、电位测量技术	257
二、稳态测量技术	259
三、暂态测量技术	265
四、阻抗分析技术	267
五、电化学噪声测试技术	270
六、其他先进电化学分析技术	273
第三节 形貌观察方法	278
一、宏观检查	278
二、微观检查	280
三、标准评定方法	288
四、腐蚀形貌的图像识别	289
第四节 腐蚀性能评价方法	290
一、全面腐蚀评价方法	290
二、电偶腐蚀实验评价方法	292
三、点蚀实验评价方法	295
四、缝隙腐蚀实验评价方法	299

五、晶间腐蚀实验评价方法	302
六、应力腐蚀开裂实验评价方法.....	303
七、腐蚀疲劳实验评价方法	311
参考文献.....	314
附录.....	317