

腐蚀 控制设计手册

CORROSION CONTROL
HANDBOOK FOR DESIGN

● 李金桂 主编



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

腐蚀 控制设计手册

CORROSION CONTROL
HANDBOOK FOR DESIGN

● 李金桂 主编



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

腐蚀控制设计手册/李金桂主编. —北京: 化学工业出版社, 2006. 3
ISBN 7-5025-7812-9

I. 腐… II. 李… III. 腐蚀-控制-设计-手册
IV. TB304-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 127574 号

腐蚀控制设计手册

CORROSION CONTROL HANDBOOK FOR DESIGN

李金桂 主编

责任编辑: 陈志良

文字编辑: 余纪军

责任校对: 李 林

封面设计: 于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 65½ 字数 1678 千字

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7812-9

定 价: 158.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

1978年8月中国国家科学技术委员会组建“腐蚀科学”学科组，笔者有幸受聘，成为其中一员，当时参与了两件大事，获得了两大学习、提高的机遇：(1) 筹建成立“中国腐蚀与防护学会”；(2) 在全国范围内进行腐蚀调查。前者，“中国腐蚀与防护学会”1979年11月成立起至2002年4月，笔者担任了学会的两届副秘书长、三届副理事长，得到了向全国同行学习的极好机会，收获颇多。后者，笔者作为“腐蚀科学”学科组的第三组副组长，负责航空航天领域内的腐蚀调查，1980年1月~1982年6月广泛涵调一百多个工厂，空军基地，并深入26个航空厂、所、部队，机场进行了实地考察，发现大多数的腐蚀问题并不是从事材料或腐蚀的工程技术人员所能解决的，而是必须从事设计、制造、使用、维护维修、管理的工程技术人员认真研究和工作的才能解决的，笔者在思想认识上发生了突破性的转变。第一次认识到“要真正控制腐蚀，必须由设计、科研、生产、使用、贮运、维修人员共同配合，层层把关，才能达到目的”(见1984年版《航空产品腐蚀及其控制手册》)，1982年9月作为中国腐蚀与防护学会航空航天专业委员会的秘书长借该委员会的名义，召开了“航空航天腐蚀故障分析研讨会”，交流了航空航天领域多年来出现的腐蚀故障，通过这些事实及其原因分析，进一步肯定了上述认识。接着，笔者在我国首次出版了《航空腐蚀故障事例集》，通过一件件重大的腐蚀故障，在我国第一次展示了航空腐蚀与设计、制造、使用、维护、管理各方面的关系。1984年12月主编出版了一百七十多万字的《航空产品腐蚀及其控制手册》(上、下册)，在航空航天领域对上述观点进行了广泛的宣传，该手册从腐蚀控制系统工程的角度，阐述了腐蚀与腐蚀控制方面的有关问题。1988年7月在全国公开出版了《腐蚀与腐蚀控制手册》，第一次在我国公开宣扬这个腐蚀控制系统工程的思想。同时发表了几十篇论文宣扬这种思想。

1991年得到中国科学院腐蚀与防护研究所《中国科学院学科发展战略研究报告》——《腐蚀科学与工程——国外情况调查》(1989年10月)，该报告指出：“为保证工程设施安全运行，20世纪80年代，国外已发展了防护系统工程学(Terotechnology)”。是不是可以说，这与我们想建立的腐蚀控制系统工程不谋而合，或者说，我们与国外同步研究了腐蚀控制系统工程问题。

1993年12月笔者与有关型号的飞机设计师、制造工程师、防腐蚀工程师经过几年的共同努力，主编出版了“××型飞机腐蚀控制指南”和“军用飞机腐蚀控制设计细则”的指导性文件，通过两型飞机有关专家的评审验收，在两型飞机的设计、制造、使用维护过程中全面执行。“军用飞机腐蚀控制系统工程技术的研究”及其管理得以应用和实施。

1998年8月以国际上著名的材料科学家师昌绪先生为首的专家组对“军用飞机腐蚀控制系统工程的研究及其应用”进行了评审，指出：该项目“通过腐蚀调查、故障分析、揭露出飞机的腐蚀不是一个单纯防锈问题，而是与设计、生产、制造、使用、维护各个环节密切相关的问题，是腐蚀科学、腐蚀工程、飞机设计、制造技术与管理科学相结合才能解决的大问题。从而转变观念，立项研究，形成了我国军用飞机腐蚀控制系统工程，表明腐蚀科学与工程进入了我国航空高技术领域，并得以全面实施，这在我国是一个重大创举，开创了我国的腐蚀控制系统工程学，丰富和发展了我国的腐蚀科学与工程；开创了我国飞

机设计制造必须执行腐蚀控制系统工程的原理、原则和技术措施的新篇章，丰富和发展了我国的飞机制造业。”荣获2002年中国航空工业第一集团科技进步二等奖，笔者还荣获了型号研制三等功。

在实施我国飞机设计制造腐蚀控制系统工程过程中，由于笔者所具有的“中国腐蚀与防护学会”的位置，在冶金、石油、化工、建筑、轻工、水电等领域频频得到学习与提高的机会，有可能顾及我国许多行业的腐蚀及其控制问题，通过多年努力，编著了这本《腐蚀控制设计手册》，一是对二十多年来，在我的两大学习提高的机遇中给予我培养、教育和帮助的人们表达衷心感谢；二是诚恳希望我国各个行业都能推行腐蚀控制系统工程管理，从而，能显著地减少腐蚀对我国各个行业所造成的损失，对国家、对人类做出贡献，这本手册能起到一点点作用；三是希望各位同行或非同行能指出其中的错误和不足。

这是一部毕生之作：对于个人来说，如果把大学6年（1956~1962年）“腐蚀与防护”专业为主的学习及其后18年（1962~1980年）的“腐蚀与防护”领域的技术准备计算在内，再从1980开始的腐蚀调查，到1998年“军用飞机腐蚀控制系统工程技术的研究及其应用”通过鉴定，获奖，又是一个18年，总共42年，可以说，把个人毕生的精力都献给了航空腐蚀控制系统工程事业，献给了我国的腐蚀科学。尤其，在这18年期间，常常会因为航空腐蚀控制系统工程中的某个技术细则把我从梦中惊醒，起来记上一段。我特别珍惜这份辛苦、这份心血，也特别感谢这18年与我共同战斗的朋友，给我献计献策的同行。

这是一部联合之作：（1）这是付出了重大代价所带来的认识，每年我国以至全球因为腐蚀造成了国民生产总值中的2%~4%的损失，教育了我们；触目惊心的航空、航天空难以及各种各样的腐蚀故障，震惊了我们；各个行业的腐蚀与防护科学家、工程师的研究和工作的结晶，提高了我们；（2）从1984年出版第一部专著《航空产品腐蚀及其控制手册》（上、下册），至今二十余年，与我合作出版了许多这方面专著的各位同事，都对本手册做出了贡献；（3）本手册还特地邀请了我国著名的阴极保护工程专家胡士信先生编著了第5章《阴极保护的原理及应用》；我国著名的防锈专家张康夫先生编著了第13章《防锈包装》；我国著名的密封技术专家曹寿德先生全面订正了第2章；（4）还特别邀请四川省化学工业研究设计院的何北超研究员编著了第15章《腐蚀经济学》、选用了美国E. D. VERINK教授所著的《Economics of Corrosion》，经北京科技大学教授路民旭博士精心翻译，又经博时基金会副总裁李全先生和李剑虹女士译校作为本手册《腐蚀经济学》国外部分，以与读者共享；（5）本手册还引用和参考了许多研究所、工厂、院校有关文献、资料和图片；此外，还得到了北京世纪比蒙商用信息系统技术有限公司邱志松副总经理等人在计算机技术方面给予的许多帮助。对以上各位专家和同事为本手册所作的贡献，表示衷心的感谢。

还要说的是，在这18年期间，笔者还承担了许多行政技术职务和社会学术兼职，我把繁重的业务管理和课题研究之外的全部业余时间都投入了这些专著的工作之中，而无暇顾及其他，所以，在这本专著即将出版之际，我要衷心地感谢我的夫人对我的全力支持和帮助，是她解决了我的一切后顾之忧。

特别值得欣慰的是，从1984年开始宣扬航空腐蚀控制系统工程，1994~1995年开始在两个飞机型号的设计、研制、生产的过程中实施腐蚀控制系统工程管理以来，短短的二十几年，我国的飞机腐蚀控制取得了显著的成就，由于腐蚀问题造成的损失和引发的故障已明显的下降，尤其是重大的腐蚀故障已基本上没有发生，这是我国科学技术全面、蓬勃发

展的结果，是我国航空工业建设水平、设计能力、制造技术、维护保养能力全面提升的结果，也是在我国航空工业实施航空腐蚀控制系统工程管理的结果。在这里，我想特别要感谢那些在各个方面，从不同角度实施或支持航空腐蚀控制系统工程技术和管理的设计师、工程师、工人和领导，由于他们的辛勤劳动，才取得如此可喜的成果。

这本手册虽经许多专家和同事的多年帮助，仍感有许多的缺点和不足，敬请广大读者惠心指正。

编 者

2005 年 3 月 28 日

目 录

第1章 腐蚀学概论与系统控制学	1
1.1 腐蚀定义	1
1.2 腐蚀学概论	3
1.2.1 微观腐蚀学	4
1.2.2 宏观腐蚀学	4
1.2.3 电化学腐蚀理论	4
1.2.4 金属氧化理论	8
1.3 腐蚀环境	11
1.3.1 周围外界环境	11
1.3.2 使用工作环境	11
1.3.3 总体环境	12
1.3.4 局部环境	13
1.3.5 具体环境	14
1.4 腐蚀分类	15
1.4.1 按被腐蚀的材料分类	15
1.4.2 按腐蚀机理分类	15
1.4.3 按腐蚀环境分类	15
1.4.4 按腐蚀介质的分类	19
1.4.5 按腐蚀形态分类	20
1.4.6 工业上常见腐蚀类型	20
1.5 常见腐蚀形态	20
1.5.1 均匀腐蚀	20
1.5.2 电偶腐蚀, 也称接触腐蚀	22
1.5.3 点腐蚀	24
1.5.4 晶间腐蚀	25
1.5.5 缝隙腐蚀	28
1.5.6 选择性腐蚀	30
1.5.7 生物和微生物腐蚀	32
1.5.8 应力腐蚀开裂	33
1.5.9 氢损伤 (又名氢脆)	35
1.5.10 腐蚀疲劳	37
1.5.11 磨蚀	38
1.5.12 高温腐蚀	41
1.5.13 非金属材料的腐蚀	42
1.6 腐蚀危害	45
1.6.1 腐蚀造成损失	45

1.6.2	腐蚀引发事故	46
1.6.3	腐蚀原因分析	48
1.7	腐蚀控制系统工程学	50
1.7.1	研究过程	51
1.7.2	腐蚀调查结果	52
1.7.3	认识和技术上的准备	54
1.7.4	腐蚀控制系统工程学的形成	54
1.7.5	腐蚀控制系统工程纲要	55
1.7.6	腐蚀控制系统工程设计原则	58
1.7.7	腐蚀控制设计细则举例	59
	参考文献	63
第2章	腐蚀故障与启迪	65
2.1	前言	65
2.2	航空腐蚀故障	66
2.2.1	高强度钢 (18Mn2CrMoBA) 机身框架的氢致开裂	66
2.2.2	高强度钢 (30CrMnSiA) 压气机盘的“镉脆”	69
2.2.3	高强度钢 (30CrMnSiA) 螺栓的“镉脆”断裂	72
2.2.4	高强度钢 (40CrNiMoA) 襟翼滑轨的氢致开裂	74
2.2.5	高强度钢 (40CrNiMoA) 主联杆腐蚀诱发断裂	75
2.2.6	高强度钢 (40CrNiWA) 连接螺钉氢脆断裂	78
2.2.7	高强度钢 (40CrNiMoVA) 传动轴腐蚀疲劳断裂	79
2.2.8	超高强度钢 (30CrMnSiNi2A) 主起落架腐蚀疲劳断裂	81
2.2.9	超高强度钢 (30CrMSiNi2A) 起落架螺桩蚀腐后断裂	86
2.2.10	超高强度钢 (40CrMnSiMoVA) 主起活塞杆氢致开裂	88
2.2.11	超高强度钢 (30CrMnSiNi2A) 机翼主梁腐蚀疲劳断裂	90
2.2.12	超高强度钢 (30CrMnSiNi2A) 摇臂腐蚀疲劳断裂	94
2.2.13	不锈钢 (Cr17Ni2) 压气机转子叶片点腐蚀叠加应力腐蚀断裂	96
2.2.14	马氏体不锈钢 (1Cr11Ni2W2MoV) 一级压气机叶片点蚀萌生应力腐蚀 断裂	102
2.2.15	奥氏体不锈钢 (1Cr18Ni9Ti) 波纹管氧化失效	103
2.2.16	奥氏体不锈钢 (1Cr18Ni9Ti) 加力总管晶界氧化诱发疲劳断裂而失效	107
2.2.17	渗碳钢 (18Cr2Ni4WA) 液压泵斜盘氧化损伤断裂	108
2.2.18	渗碳钢 (12Cr2Ni4A) 齿轮早期麻点剥落	110
2.2.19	50CrVA 弹簧钢氢损伤断裂	113
2.2.20	H62 黄铜接头应力腐蚀开裂	115
2.2.21	铝合金叶片剥蚀损伤折断	117
2.2.22	铝合金 (LY12C2、LD2) 空调部件冲蚀失效	119
2.2.23	镁合金 (ZM5) 活门支架应力腐蚀断裂	122
2.2.24	高温合金 (GH2036) 涡轮盘榫齿晶间腐蚀引发断裂	124
2.2.25	高温合金 (GH36) 涡轮盘应力腐蚀断裂	133
2.2.26	高温铸造合金 (K9、K17G) 涡轮叶片热腐蚀失效	135

2.2.27 某机的反流断路器有机气氛腐蚀导致操纵失灵	139
2.3 腐蚀故障引发的思考	140
2.3.1 46个腐蚀故障的启示	140
2.3.2 27个腐蚀故障的再启示	144
2.3.3 一点结论	146
参考文献	147
第3章 防腐蚀密封设计	148
3.1 概述	148
3.2 密封防腐蚀设计的基本要求	149
3.3 密封通用要求	150
3.3.1 密封表面准备	150
3.3.2 有效密封形状和尺寸	151
3.4 密封剂及其选用原则	153
3.4.1 密封剂	153
3.4.2 适宜供密封防腐蚀用的各类密封剂的特性	154
3.4.3 密封剂的分类选择	156
3.5 密封设计标注及典型密封设计	158
3.5.1 密封符号与标注	158
3.5.2 密封标注示例	158
3.5.3 密封工艺对密封设计的影响	159
3.5.4 排水设计	160
3.6 典型结构件防腐蚀密封设计	161
3.6.1 外表皮铆接、胶接-铆接、焊接结构防腐蚀密封设计	161
3.6.2 可卸口盖防腐蚀密封设计	162
3.6.3 外表蒙皮与气动有关结构防腐蚀密封设计	162
3.6.4 整体油箱防腐蚀密封设计	162
3.6.5 金属蜂窝结构件防腐蚀密封设计	164
3.6.6 金属胶接结构防腐蚀密封设计	165
3.6.7 轮胎舱内钣金结构防腐蚀密封设计	165
3.6.8 紧固件防腐蚀密封设计	166
3.6.9 电缆、电器装置防腐蚀密封设计	167
3.6.10 隔热结构防腐蚀密封设计	168
3.6.11 复合材料件防腐蚀密封设计	168
附件一 波音公司典型组合件的密封设计	168
参考文献	184
第4章 防腐蚀结构设计	185
4.1 概述	185
4.1.1 腐蚀影响因素	185
4.1.2 防腐蚀结构设计的职责	186
4.1.3 防腐蚀结构设计的一般性原则	187
4.1.4 防腐蚀结构设计的具体原则	188

4.2 合理的结构构型设计	189
4.2.1 合理构型设计的通用原则	189
4.2.2 介质流动管道及容器内腔的设计	191
4.2.3 避免冷热不均诱发腐蚀的设计	193
4.2.4 结构组合件的装配设计	195
4.2.5 合理设计连接结构	196
4.3 通风与侵蚀介质排除的设计	202
4.3.1 通风设计	202
4.3.2 排水设计	202
4.4 预防电偶腐蚀的设计	210
4.4.1 概述	210
4.4.2 电偶腐蚀的控制原理	211
4.4.3 电偶腐蚀控制一般原则	212
4.4.4 具体措施	212
4.4.5 腐蚀敏感性分类	214
4.5 预防应力作用下的腐蚀断裂	224
4.5.1 概述	224
4.5.2 应力的作用 and 影响	225
4.5.3 预防应力腐蚀的设计	230
4.5.4 防止零、部件腐蚀疲劳的设计	233
附录 欧洲空间局 (ESA) 标准 ESA PSS-01-736 (1981.5) 抑制应力腐蚀开裂	
材料的选择	233
参考文献	243
第5章 阴极保护的原理及应用	244
5.1 金属腐蚀的电化学原理	244
5.1.1 从热力学和动力学两方面来看腐蚀反应	244
5.1.2 腐蚀反应的热力学	246
5.1.3 电位-pH 平衡图	250
5.1.4 腐蚀的电化学机理	259
5.1.5 原电池和腐蚀电池	265
5.1.6 腐蚀速度的图解分析法	270
5.1.7 腐蚀过程的阴极反应	272
5.1.8 阳极 $E-i$ 曲线	278
5.1.9 土壤中的腐蚀问题	283
5.2 阴极保护原理	285
5.2.1 应用原理	286
5.2.2 电化学机理	287
5.2.3 保护准则	288
5.2.4 牺牲阳极	290
5.2.5 电位分布	291
5.3 牺牲阳极保护法	294

5.3.1	一般要求	294
5.3.2	制造方法	298
5.3.3	阳极输出电流	299
5.3.4	设计参数	302
5.3.5	铝阳极和锌阳极的重量和数量的选择	302
5.3.6	钢的保护电流密度	302
5.3.7	牺牲阳极法阴极保护的应用	303
5.3.8	带状牺牲阳极的应用	303
5.4	强制电流法阴极保护	304
5.4.1	强制电流用的辅助阳极	304
5.4.2	铂和镀铂阳极	305
5.4.3	铁素材料	309
5.4.4	铅材料	310
5.4.5	碳素材料	312
5.4.6	碳素回填料	313
5.4.7	活性金属	314
5.4.8	柔性阳极	315
5.4.9	结语	316
5.5	阴极保护技术的实际应用	317
5.5.1	可采用阴极保护的构筑物	317
5.5.2	装置的类型	317
5.5.3	阴极保护系统的设计	320
5.5.4	外加电流装置	321
5.5.5	埋地构筑物的阴极保护	322
5.5.6	电站或炼油厂海水冷却水循环水系统的保护	328
5.5.7	海洋构筑物	329
5.5.8	船舶	330
5.5.9	贮罐	331
5.5.10	管道的内保护	331
5.5.11	经济性	331
5.5.12	应用实例	332
5.6	杂散电流腐蚀及其对策	333
5.6.1	直流杂散电流腐蚀机理	334
5.6.2	交流杂散电流腐蚀	334
5.6.3	控制方法	334
5.7	阴极保护干扰	336
5.7.1	评价干扰的方法	337
5.7.2	防止和降低干扰的方法	338
5.8	阴极保护测量仪表	339
5.8.1	基本要求	339
5.8.2	直流指示仪表原理	339

5.8.3 仪表类型	340
参考文献	347
第6章 耐蚀材料及选择应用	349
6.1 前言	349
6.1.1 选材依据	350
6.1.2 设计选材原则	351
6.2 不锈钢	352
6.2.1 马氏体不锈钢	354
6.2.2 铁素体不锈钢	357
6.2.3 奥氏体不锈钢	361
6.2.4 双相不锈钢	367
6.2.5 沉淀硬化不锈钢	370
6.2.6 不锈钢适用和不适用环境	372
6.3 铸铁、碳钢及低合金钢	373
6.3.1 铸铁	373
6.3.2 碳钢和低合金钢	383
6.4 有色金属及合金	394
6.4.1 铝和铝合金	394
6.4.2 镁及镁合金	400
6.4.3 铜及铜合金	402
6.4.4 钛和钛合金	405
6.5 耐热钢与高温合金	408
6.5.1 耐热钢与铁基高温合金	408
6.5.2 镍基高温合金	412
6.5.3 钴基高温合金	414
6.5.4 粉末高温合金	415
6.5.5 金属间化合物	415
6.6 通用高分子材料	417
6.6.1 聚氯乙烯	417
6.6.2 聚乙烯	418
6.6.3 聚丙烯	419
6.6.4 环氧树脂	419
6.6.5 酚醛树脂	420
6.6.6 呋喃树脂	422
6.7 特种高分子材料	422
6.7.1 氟碳材料与涂料	422
6.7.2 聚苯硫醚	424
6.7.3 氯化聚醚	426
6.7.4 聚酰亚胺	426
6.8 无机非金属材料	427
6.8.1 硅酸盐玻璃	427

6.8.2	硅酸盐陶瓷	427
6.8.3	硅酸盐水泥	428
6.8.4	结构陶瓷耐火材料	430
6.8.5	碳素材料	431
6.9	复合材料	431
6.10	非金属材料对金属的腐蚀	433
6.10.1	腐蚀类型	433
6.10.2	腐蚀气氛源	434
6.10.3	气氛腐蚀作用	438
6.10.4	气氛腐蚀产物	441
6.10.5	气氛腐蚀的影响因素	443
6.10.6	预防措施	448
HB/Z 32—82	中华人民共和国航空工业部标准 有机材料挥发气氛对锌、镉镀层的 腐蚀与防护指南	451
	参考文献	455
第7章	金属电镀层性能及适用范围	456
7.1	概述	456
7.2	单金属镀层	459
7.2.1	锌镀层	459
7.2.2	镉镀层	462
7.2.3	铜镀层	466
7.2.4	镍镀层	468
7.2.5	铬镀层	470
7.2.6	铅镀层	475
7.2.7	锡镀层	476
7.2.8	银镀层	479
7.2.9	钯镀层	481
7.2.10	铑镀层	482
7.3	合金镀层	483
7.3.1	金和金合金镀层	483
7.3.2	铜-锌合金镀层	486
7.3.3	铜-锡合金镀层	487
7.3.4	铅-锡合金镀层	488
7.3.5	镉-钛镀层	489
7.3.6	镍镉扩散镀层	492
7.3.7	其他合金镀层	495
7.4	化学镀	496
7.5	复合镀层	499
7.5.1	耐磨复合镀层	501
7.5.2	抗氧化复合镀层	502
7.5.3	自润滑复合镀层	503

7.6 电刷镀层	504
参考文献	507
第8章 有机涂层及其典型应用	508
8.1 概述	508
8.1.1 涂料的组成	508
8.1.2 涂料的分类	509
8.1.3 涂料的命名与编号	510
8.1.4 防腐蚀涂装系统设计程序	511
8.2 有机涂料用漆料和颜料	512
8.2.1 漆料	512
8.2.2 颜料	519
8.3 不同材料表面涂层系统	524
8.3.1 钢铁零件涂层系统	524
8.3.2 铜合金零件涂层系统	524
8.3.3 铝合金零、部件涂层系统	525
8.3.4 镁合金零件涂层系统	526
8.3.5 钛合金零件涂层系统	527
8.3.6 碳纤维增强树脂基复合材料零、部件涂层系统	527
8.3.7 玻璃钢表面涂层系统	529
8.3.8 塑料表面涂层系统	529
8.3.9 本质材料涂装	531
8.3.10 玻璃、人造革、橡胶用涂装	531
8.4 不同行业用途的涂装体系	531
8.4.1 耐大气腐蚀涂装体系	531
8.4.2 汽车涂装体系	534
8.4.3 航空涂装体系	539
8.4.4 船舶及海洋工程涂装体系	543
8.4.5 钢结构桥梁涂装体系	553
8.4.6 埋地钢管与贮罐的涂装体系	563
8.4.7 重型机械用涂料	582
8.4.8 海洋防污涂料	584
8.4.9 重防蚀涂料	586
8.4.10 零件制造过程中使用的涂料	590
参考文献	592
第9章 热喷涂与热浸涂层	594
9.1 概述	594
9.1.1 火焰喷涂	594
9.1.2 电弧喷涂	596
9.1.3 等离子喷涂	597
9.1.4 气体爆燃式喷涂(爆炸喷涂)	598
9.1.5 超音速火焰喷涂	599

9.1.6	激光喷涂	600
9.1.7	热喷涂工艺比较	601
9.1.8	热浸镀	604
9.2	耐腐蚀涂层	604
9.2.1	金属涂层	604
9.2.2	陶瓷涂层	610
9.3	耐磨耐蚀涂层	611
9.3.1	耐撞击磨损涂层	611
9.3.2	耐微动磨损涂层	614
9.3.3	耐黏着磨损涂层	615
9.3.4	耐磨粒磨损涂层	618
9.4	热喷涂涂层的设计与选择	621
9.4.1	根据使用要求设计热喷涂涂层	622
9.4.2	喷涂工艺的选择原则	623
9.4.3	喷涂材料的选择原则	624
9.4.4	喷涂抗磨材料的选择	624
9.4.5	可供选用的热喷涂涂层材料	625
9.5	热浸镀	649
9.5.1	热浸镀锌	649
9.5.2	热浸镀铝	652
9.5.3	热浸镀锌铝合金	653
9.5.4	热浸镀铅和镀锡	655
9.5.5	热浸镀层产品标准编号	656
	参考文献	659
第 10 章	薄膜与表面转化改性	660
10.1	概述	660
10.2	化学氧化膜	660
10.2.1	钢铁化学氧化膜	660
10.2.2	铜及铜合金化学氧化膜	662
10.2.3	铝和铝合金化学氧化膜	662
10.2.4	镁合金化学氧化膜	664
10.3	钝化膜	665
10.3.1	铜及铜合金的钝化膜	665
10.3.2	不锈钢钝化膜	666
10.4	磷化膜	666
10.5	电化学转化膜	669
10.5.1	铝及铝合金硫酸阳极氧化膜	670
10.5.2	铝合金铬酸阳极氧化膜	672
10.5.3	铝合金硬质阳极氧化膜	674
10.5.4	铝及铝合金磷酸阳极氧化膜	677
10.5.5	铝及铝合金草酸阳极氧化膜	678

10.5.6	铝及铝合金瓷质阳极氧化膜	680
10.5.7	铝及铝合金微弧氧化陶瓷膜	681
10.6	金属表面着色	683
10.7	表面形变强化	684
10.7.1	定义、术语与符号	684
10.7.2	喷丸强化原理	686
10.7.3	喷丸工艺	692
10.7.4	喷丸强化的应用	695
10.7.5	孔挤压强化	696
10.7.6	孔挤压强化应用范围	699
10.8	表面相变硬化	700
10.8.1	感应加热表面淬火	701
10.8.2	激光表面相变硬化层	705
10.9	钢铁表面化学热处理	709
10.9.1	铁和钢的渗碳层	710
10.9.2	渗氮层	717
10.9.3	碳氮共渗层与氮碳共渗层	720
10.9.4	渗碳、渗氮及其复合共渗的比较与应用	724
10.10	离子注入	726
10.10.1	离子束改善表面摩擦磨蚀特性	727
10.10.2	离子注入在改进摩擦磨蚀方面的应用	729
10.10.3	改善金属表面腐蚀特性	732
10.11	薄膜技术	733
10.11.1	沉积金属膜	734
10.11.2	沉积陶瓷膜	736
10.11.3	化学气相沉积金刚石膜	736
	参考文献	737
第 11 章	高温防护涂层和选择	740
11.1	前言	740
11.2	钢铁表面渗金属	741
11.2.1	渗锌层	741
11.2.2	渗铝层	742
11.2.3	渗铬层	744
11.2.4	渗硅层	747
11.2.5	渗硼层	748
11.2.6	渗钹层	749
11.2.7	渗锡层	749
11.2.8	渗钼层	750
11.2.9	渗钒层	750
11.2.10	二元和三元共渗层	750
11.3	镍和钴基高温合金渗金属层	754

11.3.1	渗铝层	754
11.3.2	渗铝铬层	757
11.3.3	渗铝硅层	758
11.3.4	铂铝渗层	759
11.4	难熔金属渗金属层	760
11.4.1	渗硅层	760
11.4.2	改性渗硅(硅化物)层	761
11.5	高温珐琅涂层	762
11.5.1	W-2 高温珐琅涂层	763
11.5.2	T-1 珐琅涂层	764
11.5.3	B-1000 珐琅涂层	765
11.5.4	418 珐琅涂层	765
11.6	多元合金包覆涂层	766
11.7	自黏结材料涂层	767
11.7.1	自黏结镍铝复合材料涂层	767
11.7.2	自黏结不锈钢材料涂层	767
11.8	高温封严涂层	768
11.8.1	可磨损封严涂层	768
11.8.2	磨料封严涂层	769
11.9	热障涂层	770
11.9.1	氧化铝热障涂层	771
11.9.2	氧化锆热障涂层	771
11.10	金属表面渗入元素的原理和实用工艺	773
11.10.1	元素渗入原理	773
11.10.2	元素渗入工艺	775
11.10.3	钢铁表面渗层实用工艺简介	780
11.10.4	镍和钴基高温合金的渗层实用工艺	780
11.10.5	渗金属工艺过程质量控制	780
	参考文献	787
第 12 章	制造与使用维护过程中的腐蚀控制	789
12.1	概述	789
12.2	制造过程中预防腐蚀	790
12.2.1	制造过程预防腐蚀原则	790
12.2.2	进厂金属原材料的腐蚀控制	790
12.2.3	机加过程中产品零件的临时性保护	792
12.2.4	锻造过程中的腐蚀控制	794
12.2.5	铸造过程中的腐蚀控制	801
12.2.6	热处理过程中的腐蚀控制	802
12.2.7	焊接过程中的腐蚀控制	804
12.2.8	胶接、胶焊和胶铆过程中的腐蚀控制	806
12.2.9	特种加工过程中的腐蚀控制	808