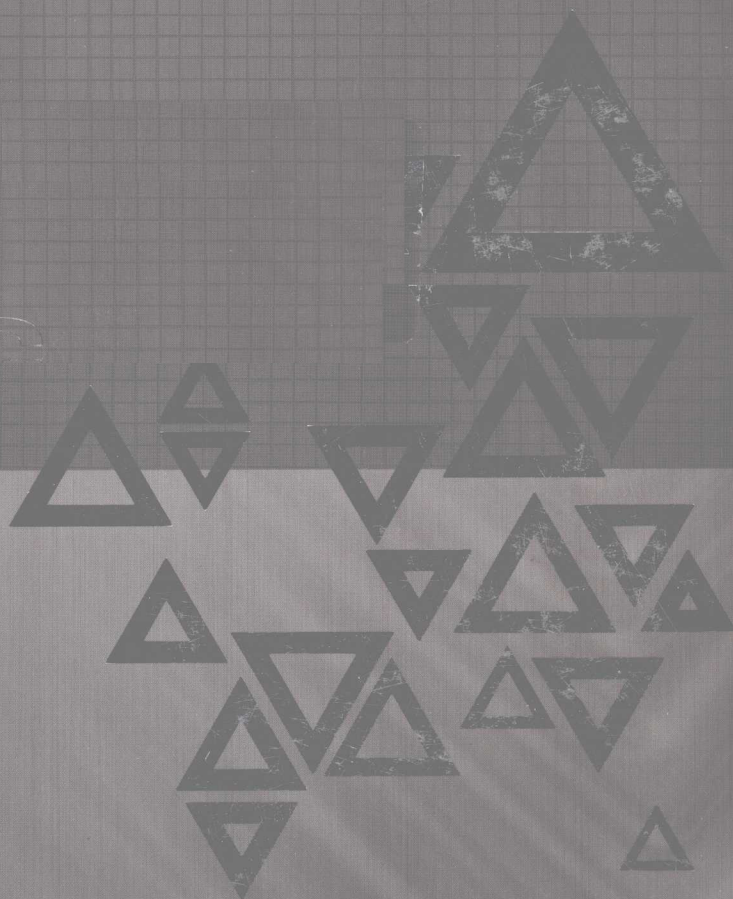




表面工程技术手册 下

徐滨士 刘世参 主编

BIANMIAN
GONGCHENG
JISHU
SHOUCE



化学工业出版社

面... 工... 程... 技... 术... 手... 册... [下]



表面工程技术手册

[下]

徐滨士 刘世参 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

表面工程 卷

160.00元

《表面工程技术手册》是反映当代表面工程技术水平的专业工具书。内容由三个部分组成。一是表面工程基础知识：阐述了表面工程的内涵、功能、分类、发展历程、材料服役中的表面失效及防治、表面覆层的界面结合机理。二是表面工程技术：介绍了涂装、热喷涂、堆焊、电镀、转化膜技术、化学热处理、热浸镀、气相沉积、高能束表面处理、纳米表面工程、材料的封存与包装等常用表面工程技术的基本原理、适用场合、工艺选择原则、材料选用原则、质量检测与控制、安全防护等内容。三是表面工程技术综合运用：介绍了单一表面工程技术和复合表面工程技术的选用原则、不同服役工况下的涂覆材料设计及表面工程技术经济分析。

本书以“全而精、新而准、实用便查”为特点，着力为现代企业正确选材、合理用材、启迪技术创新服务，全面系统地反映了我国表面工程的发展及取得的成就和经验，并汇集了国外表面工程的新进展。

本书主要供从事制造业、再制造业和材料工程的科学技术人员在工作中查阅使用，也可以供研究人员、管理人员和高等院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

表面工程技术手册. 下/徐滨士, 刘世参主编. —北京:
化学工业出版社, 2009. 6
ISBN 978-7-122-05324-4

I. 表… II. ①徐…②刘… III. 金属表面处理-技术手册 IV. TG17-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 057698 号

责任编辑：段志兵 周国庆
责任校对：李 林

装帧设计：尹琳琳

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：北京蓝海印刷有限公司
装 订：三河市前程装订厂
880mm×1230mm 1/16 印张 42½ 字数 1899 千字 2009 年 7 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：130.00 元

版权所有 违者必究

前 言

表面工程技术已渗透到各类机电产品制造、维修和再制造之中。对于机械零件，表面工程主要用于提高零件表面的耐磨性、耐蚀性、耐热性、抗疲劳强度等力学性能，以保证机械在高速、高温、高压、重载以及强腐蚀介质工况下可靠而持续地运行；对于电子电器元件，表面工程主要用于提高元器件表面的电、磁、声、光等特殊物理性能，以保证电子产品容量大、传输快、体积小、高转换率、高可靠性；对于机电产品的包装及工艺品，表面工程主要用于提高表面的耐蚀性和美观性，以实现机电产品优异性能、艺术造型与绚丽外表的完美结合；对生物医学材料，表面工程主要用于提高人造骨骼等人体植入物的耐磨性、耐蚀性，尤其是生物相容性，以保证患者的健康并提高生活质量。可以说，没有表面工程，就没有现代机电产品。

《表面工程技术手册》是反映当代表面工程技术水平的专业工具书，内容由三个部分组成。(1) 表面工程基础知识：阐述了表面工程的内涵、功能、分类、发展历程、材料服役中的表面失效及防治、表面覆层的界面结合机理；(2) 表面工程技术：介绍了涂装、热喷涂、堆焊、电镀、电刷镀、化学镀、转化膜技术、化学热处理、热浸镀、气相沉积、高能束表面处理、纳米表面工程、材料的封存与包装等常用表面工程技术的基本原理、适用场合、工艺选择原则、材料选用原则、质量检测与控制、安全防护等内容；(3) 表面工程技术综合运用：介绍了单一表面工程技术和复合表面工程技术的选用原则、不同服役工况下的涂覆材料设计及表面工程技术经济分析。

《表面工程技术手册》分上下册，共 16 篇。参加编写的主要单位有装甲兵工程学院、南京工业大学、西安交通大学、中国机械科学研究院、清华大学、哈尔滨工业大学、中国科学院金属研究所、英国伯明翰大学、钢铁研究总院、北京科技大学、北京工业大学等（以篇的顺序排序），参编作者达 50 多位。全书由徐滨士、刘世参负责统稿。各篇主编如下。

| | | |
|------------------------|--------|--------|
| 第 1 篇 概论 | 徐滨士院士 | 刘世参教授 |
| 第 2 篇 材料服役中表面的失效行为及防治 | 涂善东教授 | |
| 第 3 篇 表面覆层的形成与结合机理 | 徐滨士院士 | 朱绍华教授 |
| 第 4 篇 涂装 | 吴行教授 | |
| 第 5 篇 热喷涂 | 李长久教授 | 徐滨士院士 |
| 第 6 篇 堆焊 | 董祖珏教授 | |
| 第 7 篇 电镀与电刷镀 | 屠振密教授 | |
| 第 8 篇 化学镀与转化膜技术 | 姜晓霞研究员 | 董首山研究员 |
| 第 9 篇 化学热处理 | 董汉山教授 | |
| 第 10 篇 热浸镀 | 刘邦津教授 | |
| 第 11 篇 气相沉积技术及功能薄膜材料制备 | 吕反修教授 | |
| 第 12 篇 高能束表面处理技术 | 左铁钊教授 | |
| 第 13 篇 纳米表面工程 | 徐滨士院士 | |
| 第 14 篇 封存与包装 | 梁志杰高工 | |
| 第 15 篇 表面工程技术设计 | 徐滨士院士 | 朱绍华教授 |
| 第 16 篇 表面工程质量控制与检测 | 史耀武教授 | |

本书以“全而精、新而准、实用便查”为特点。在整体设计上，既立足全局，又突出重点。在取材上，以“基础、通用、先进、实用”为原则。本书全面系统地反映了我国表面工程的发展及取得的成就和经验，并汇集了国外表面工程的新进展，全书着力为现代企业正确选材、合理用材、启迪技术创新服务，具有“科学性、先进性和实用性”。本书主要供从事制造业、再制造业和材料工程的科学技术人员在工作中查阅使用，也可以供研究人员、管理人员和高等院校师生参考。

感谢有关单位和个人的热情帮助，并向书中参考文献的作者致以敬意。由于编写时间紧迫和编者水平有限，书中不当之处，恳请读者指正并提出宝贵意见。

徐滨士 刘世参

编辑委员会^①

顾问：师昌绪 严东生 李恒德 何光远 陆燕荪 徐匡迪 李学勇 栾恩杰
王淀佐 朱道本 颜鸣皋 黄培云 周廉 左铁镛

主任：路甬祥

副主任：李成功（常务） 钟群鹏 干勇 黄伯云 江东亮 徐滨士 王占国
潘健生 杜善义 胡正寰 柳百成 徐祖耀 陈立泉

总策划：宋天虎 黄远东

总编辑：李骏带

秘书长：黄远东（兼）

委员（按姓氏笔画排列）：

| | | | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 丁辛 | 丁传贤 | 干勇 | 于月光 | 才鸿年 | 马世宁 | 马冲先 | 马济民 | 马眷荣 |
| 马福康 | 王占国 | 王务同 | 王尔德 | 王永岩 | 王亚军 | 王至尧 | 王克光 | 王克俭 |
| 王高潮 | 王淀佐 | 王琦安 | 王新林 | 王德志 | 方禹之 | 尹志民 | 邓炬 | 左铁钊 |
| 左铁镛 | 石力开 | 石春山 | 卢世刚 | 叶小玲 | 叶光斗 | 田志凌 | 田荣璋 | 史耀武 |
| 冯涤 | 冯稷 | 冯春祥 | 宁远涛 | 邢建东 | 师昌绪 | 吕炎 | 吕反修 | 同继锋 |
| 曲文生 | 朱万森 | 朱如瑾 | 朱绍华 | 朱道本 | 仲维卓 | 任家烈 | 华林 | 刘明 |
| 刘正才 | 刘世参 | 刘占阳 | 刘邦津 | 刘作信 | 刘其贤 | 刘郁丽 | 刘治国 | 刘建章 |
| 刘晋春 | 刘清友 | 刘献明 | 齐从谦 | 闫洪 | 江东亮 | 许祖泽 | 许祖彦 | 阳明书 |
| 孙坚 | 孙加林 | 杜善义 | 杨合 | 杨武 | 杨乃宾 | 杨才福 | 杨鸣波 | 杨忠民 |
| 杨晓华 | 杨海波 | 杨焕文 | 杨德仁 | 李强 | 李晋 | 李楠 | 李长久 | 李龙土 |
| 李成功 | 李光福 | 李志刚 | 李明哲 | 李明辉 | 李学勇 | 李虹霞 | 李恒德 | 李贺军 |
| 李海军 | 李骏带 | 李鹤林 | 严东生 | 连克仁 | 肖亚庆 | 吴行 | 吴昆 | 吴诚 |
| 吴永声 | 吴伟仁 | 吴性良 | 吴科如 | 吴恩熙 | 吴谊群 | 吴智华 | 吴德馨 | 何光远 |
| 何季麟 | 佟晓辉 | 邱勇 | 邱冠周 | 邱德仁 | 余金中 | 邹广田 | 汪明朴 | 沈真 |
| 沈万慈 | 沈德忠 | 宋天虎 | 张力 | 张杨 | 张华 | 张杰 | 张金 | 张峥 |
| 张子龙 | 张用宾 | 张立同 | 张永俐 | 张吉龙 | 张旭初 | 张佐光 | 张晋远 | 张康侯 |
| 张道中 | 张新民 | 陆燕荪 | 陈琦 | 陈文哲 | 陈世朴 | 陈立泉 | 陈运远 | 陈志良 |
| 陈国钧 | 陈治明 | 陈南宁 | 陈祝年 | 陈晓慈 | 陈涌海 | 陈祥宝 | 陈超志 | 林慧国 |
| 欧阳世翁 | 卓尚军 | 易建宏 | 罗祥林 | 罗豪甦 | 果世驹 | 周廉 | 周伟斌 | 周国庆 |
| 郑有焯 | 柳玉起 | 柳百成 | 胡玉亭 | 胡正寰 | 南策文 | 赵万生 | 赵有文 | 赵国群 |
| 赵金榜 | 赵梓森 | 赵慕岳 | 钟群鹏 | 施东成 | 施剑林 | 姜不居 | 姜晓霞 | 祖荣祥 |
| 姚燕 | 贺守华 | 耿林 | 聂大钧 | 贾成厂 | 顾冬红 | 夏巨谏 | 夏志华 | 俸培宗 |
| 徐匡迪 | 徐廷献 | 徐建军 | 徐祖耀 | 徐家文 | 徐跃明 | 徐滨士 | 殷树言 | 翁宇庆 |
| 郭会光 | 郭景杰 | 高瑞萍 | 栾恩杰 | 唐仁政 | 唐汝钧 | 唐志玉 | 唐昌世 | 益小苏 |
| 涂善东 | 黄勇 | 黄天佑 | 黄玉东 | 黄本立 | 黄远东 | 黄伯云 | 黄校先 | 黄培云 |
| 曹勇家 | 曹湘洪 | 龚七一 | 崔健 | 康喜范 | 梁齐 | 梁军 | 梁志杰 | 屠海令 |
| 隋同波 | 韩凤麟 | 彭艳萍 | 葛子干 | 董瀚 | 董汉山 | 董首山 | 董祖珏 | 董湘怀 |
| 蒋力培 | 蒋建平 | 傅绍云 | 储君浩 | 谢邦互 | 谢里阳 | 谢建新 | 鄢国强 | 雷天民 |
| 路甬祥 | 解应龙 | 解思深 | 雍歧龙 | 蔡中义 | 漆玄 | 谭抚 | 熊守美 | 靳常青 |
| 樊东黎 | 黎文献 | 颜永年 | 颜鸣皋 | 潘正安 | 潘叶金 | 潘振甦 | 潘健生 | 燕璜 |
| 戴国强 | | | | | | | | |

① 本书是原《中国材料工程大典》其中的一卷。《中国材料工程大典》由中国机械工程学会、中国材料研究学会组织编写，中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会及中国复合材料学会参加组织编写。本编辑委员会即为《中国材料工程大典》编委会。

目 录

| | | | |
|--------------------------------|----|--------------------------------------|----|
| 第10篇 热浸镀 | 1 | 4.2 耐蚀性 | 31 |
| 第1章 概述 | 3 | 4.3 对光和热的反射性 | 32 |
| 第2章 热镀锌 | 5 | 4.4 镀铝钢材的加工性和焊接性 | 33 |
| 1 热镀锌层的形成 | 5 | 5 镀铝钢材的用途 | 33 |
| 1.1 Fe-Zn 二元系相图及镀锌层的相结构 | 5 | 第5章 热镀锌铝合金 | 34 |
| 1.2 镀锌层的形成 | 5 | 1 Zn-Al 合金镀层成分及镀层结构 | 34 |
| 2 钢基成分、锌液成分及工艺因素对镀锌层结构和性能的影响 | 6 | 1.1 Zn-Al 二元系相图 | 34 |
| 2.1 钢基化学成分的影响 | 6 | 1.2 镀层成分及第三组分 | 34 |
| 2.2 锌液成分的影响 | 7 | 1.3 Zn-Al 合金镀层的显微结构 | 34 |
| 2.3 工艺因素的影响 | 10 | 2 Zn-55% Al 合金镀层钢板的性能与用途 | 35 |
| 2.4 钢带表面状态的影响 | 11 | 2.1 耐蚀性 | 35 |
| 3 镀锌钢材的性能 | 11 | 2.2 耐热性及对光和热的反射性 | 36 |
| 3.1 耐蚀性 | 11 | 2.3 力学性能及焊接性 | 37 |
| 3.2 力学性能 | 13 | 2.4 Zn-55% Al 镀层钢板的用途 | 37 |
| 3.3 焊接性能 | 13 | 3 Zn-5% Al-RE 合金镀层钢板的性能和用途 | 37 |
| 4 镀锌钢材的用途 | 13 | 3.1 盐雾试验结果 | 37 |
| 第3章 汽车用合金化镀锌板 | 15 | 3.2 SO ₂ 加速腐蚀试验结果 | 37 |
| 1 概述 | 15 | 3.3 大气曝晒试验结果 | 37 |
| 1.1 汽车用合金化镀锌板性能与镀层相结构 | 15 | 3.4 Zn-5% Al 镀层钢板的用途 | 38 |
| 1.2 热镀锌及合金化过程中 Fe-Zn 合金相的形成机理 | 15 | 4 Zn-0.5% Mg 镀层钢板 | 38 |
| 1.3 热镀锌及合金化处理装备的发展 | 15 | 4.1 镀层中镁含量的确定 | 38 |
| 1.4 高强度高深冲性合金化镀锌板的开发 | 15 | 4.2 Zn-0.5% Mg 镀层钢板的性能 | 38 |
| 2 IF 钢的特性 | 15 | 4.3 Zn-0.5% Mg 镀层钢板镀层的结构 | 39 |
| 3 IF 钢合金化镀锌板使用性能与镀层相结构和铁含量的关系 | 16 | 4.4 腐蚀产物的组成和结构 | 39 |
| 3.1 汽车用合金化镀锌板的使用性能及其检测方法 | 16 | 5 Zn-6% Al-3% Mg 镀层钢板 | 40 |
| 3.2 冲压成形时镀层附着性与镀层相结构和铁含量的关系 | 16 | 5.1 镀层成分的确定 | 40 |
| 3.3 IF 钢合金化镀锌板焊接性与镀层相结构和铁含量的关系 | 20 | 5.2 Zn-6% Al-3% Mg 镀层结构 | 40 |
| 3.4 IF 钢合金化镀锌板的最佳铁含量和相结构 | 21 | 5.3 对 Zn-6% Al-3% Mg 镀层耐蚀性的评价 | 40 |
| 4 高强度合金化镀锌板 | 21 | 6 Zn-11% Al-3% Mg-0.2% Si 镀层钢板 | 41 |
| 4.1 高强度超深冲性钢板 | 21 | 6.1 镀层组成的确定 | 41 |
| 4.2 高强度超深冲性合金化镀锌板的进展 | 22 | 6.2 Zn-11% Al-3% Mg-0.2% Si 镀层钢板的耐蚀性 | 42 |
| 第4章 热镀铝 | 25 | 7 特殊用途的锌基合金镀层 | 42 |
| 1 热镀铝层的形成 | 25 | 7.1 热镀 Zn-Ni 及 Zn-Ni-Sn-Bi 镀层 | 42 |
| 1.1 铁铝和铁铝硅相图及镀层相结构 | 25 | 7.2 热镀 Zn-Bi 合金镀层 | 43 |
| 1.2 铁与熔融铝的反应及镀铝层的形成 | 26 | 第6章 热镀铅锡和锌锡合金 | 45 |
| 2 钢基体及铝液化学成分和热镀铝工艺参数对镀层特性的影响 | 26 | 1 热镀铅锡合金镀层钢板 | 45 |
| 2.1 钢基体化学成分的影响 | 26 | 1.1 铅锡合金镀层结构 | 45 |
| 2.2 铝液化学成分的影响 | 27 | 1.2 铅锡合金镀层钢板的性能 | 45 |
| 2.3 热镀铝工艺参数对镀铝层特性的影响 | 28 | 1.3 镀铅钢板的用途 | 46 |
| 3 镀铝钢板的发展 | 29 | 2 热镀锡锌合金镀层钢板 | 46 |
| 3.1 改变钢基体成分 | 29 | 2.1 耐蚀性试验 | 46 |
| 3.2 改变镀层成分 | 31 | 2.2 冲压成形性试验 | 46 |
| 4 镀铝钢材的性能 | 31 | 2.3 焊接性试验 | 47 |
| 4.1 耐热性 | 31 | 第7章 热浸镀层的选用原则及应用实例 | 48 |
| | | 1 使用介质的腐蚀性 | 48 |
| | | 2 热浸镀层对钢材的防护性 | 48 |
| | | 3 镀层对钢材使用性能的影响 | 48 |
| | | 4 镀层的表观特性 | 48 |
| | | 5 镀层金属及热镀工艺的经济性 | 48 |
| | | 6 应用实例 | 48 |
| | | 第8章 热浸镀工艺及安全防护 | 50 |
| | | 1 热浸镀工艺 | 50 |

| | | | |
|--------------------------|-----|-----------------------------|-----|
| 1.1 氢还原法 | 50 | 5.3 陶瓷薄膜 | 127 |
| 1.2 熔剂法 | 51 | 5.4 III-V族和II-VI族化合物 | 130 |
| 2 热浸镀工艺中的安全与防护 | 51 | 第3章 薄膜材料的制备及应用 | 132 |
| 2.1 氢还原法的安全与防护 | 51 | 1 硬质薄膜和装饰性硬质薄膜 | 132 |
| 2.2 熔剂法的安全与防护 | 52 | 1.1 硬质膜的种类和性质 | 132 |
| 参考文献 | 53 | 1.2 硬质薄膜的制备、性能与应用 | 133 |
| 第11篇 气相沉积技术及功能 | | 1.3 硬质装饰涂层 | 137 |
| 薄膜材料制备 | 55 | 1.4 超硬薄膜的性质和应用 | 140 |
| 第1章 物理气相沉积 | 57 | 2 电磁功能薄膜的制备和应用 | 144 |
| 1 真空蒸镀薄膜制备技术 | 57 | 2.1 超导薄膜 | 144 |
| 1.1 物质的热蒸发现象 | 57 | 2.2 压电与铁电薄膜 | 147 |
| 1.2 蒸镀薄膜的厚度均匀性及薄膜的纯度 | 59 | 2.3 磁性薄膜 | 149 |
| 1.3 真空蒸发装置 | 61 | 3 微电子与光电子薄膜的制备和应用 | 151 |
| 1.4 真空蒸镀薄膜沉积技术的应用实例 | 64 | 3.1 介电薄膜 | 151 |
| 2 溅射技术 | 66 | 3.2 半导体薄膜 | 153 |
| 2.1 气体放电现象与等离子体 | 67 | 3.3 导电薄膜 | 154 |
| 2.2 物质的溅射现象 | 69 | 3.4 电阻薄膜 | 155 |
| 2.3 溅射沉积装置 | 72 | 3.5 光生伏特薄膜 | 157 |
| 2.4 溅射薄膜沉积技术的应用实例 | 78 | 3.6 光电导薄膜 | 157 |
| 3 离子镀膜技术 | 80 | 3.7 透明导电薄膜 | 157 |
| 3.1 概述 | 80 | 3.8 发光薄膜 | 158 |
| 3.2 离子镀的原理和特点 | 81 | 4 光学薄膜与集成光学薄膜 | 159 |
| 3.3 活性反应离子镀 | 84 | 4.1 基本光学薄膜 | 159 |
| 3.4 溅射离子镀 | 86 | 4.2 控光薄膜 | 162 |
| 3.5 离化团束离子镀 | 86 | 4.3 光波导薄膜 | 166 |
| 3.6 热阴极离子镀 | 87 | 4.4 光开关薄膜 | 167 |
| 3.7 空心阴极离子镀 | 87 | 4.5 光调制薄膜 | 168 |
| 3.8 真空电弧离子镀 | 88 | 5 金刚石膜 | 168 |
| 3.9 离子镀的综合技术 | 91 | 5.1 化学气相沉积金刚石膜 | 168 |
| 第2章 化学气相沉积 | 94 | 5.2 化学气相沉积金刚石膜的工业化应用 | 173 |
| 1 化学气相沉积(CVD)理论基础 | 94 | 5.3 金刚石膜的质量控制与监测 | 182 |
| 1.1 化学气相沉积原理 | 94 | 5.4 金刚石膜发展趋势 | 182 |
| 1.2 化学气相沉积过程热力学 | 98 | 第4章 功能薄膜材料发展趋势 | 183 |
| 1.3 化学气相沉积过程动力学 | 99 | 1 功能薄膜材料的小型化、多功能和高集成 | 183 |
| 1.4 气体输运过程 | 100 | 1.1 集成铁电器件 | 183 |
| 2 化学气相沉积装置 | 101 | 1.2 微电子机械系统及微电子机械系统(MEMS)器件 | 183 |
| 2.1 CVD沉积装置设计参数 | 101 | 2 信息功能薄膜材料 | 184 |
| 2.2 CVD装置实例 | 103 | 3 兰格缪尔-布洛奇特薄膜 | 184 |
| 3 化学气相沉积工艺 | 104 | 4 超硬薄膜的进展 | 184 |
| 3.1 化学气相沉积工艺参数对薄膜沉积的影响 | 104 | 5 功能薄膜异质结构 | 185 |
| 3.2 化学气相沉积中的工艺-组织-性能关系 | 105 | 6 功能薄膜制备技术发展趋势 | 185 |
| 3.3 化学气相沉积过程测试和监控 | 108 | 6.1 功能薄膜制备技术的发展 | 185 |
| 4 化学气相沉积(CVD)类型 | 109 | 6.2 功能薄膜表征技术的发展 | 186 |
| 4.1 热激活CVD(TACVD) | 110 | 6.3 功能薄膜材料制备过程诊断和原位实时监控 | 186 |
| 4.2 等离子体增强CVD(PECVD) | 110 | 7 快速原型化 | 187 |
| 4.3 金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD) | 113 | 第5章 气相沉积技术选用原则及应用实例 | 188 |
| 4.4 光辅助CVD(PACVD) | 117 | 1 薄膜气相沉积技术的选用原则 | 188 |
| 4.5 原子层外延(ALE) | 118 | 1.1 薄膜制备技术的分类 | 188 |
| 4.6 气溶胶辅助化学气相沉积(AACVD) | 119 | 1.2 薄膜材料的应用领域 | 190 |
| 4.7 火焰辅助化学气相沉积(FACVD) | 120 | 1.3 薄膜制备技术的选用原则 | 190 |
| 4.8 化学气相渗透(CVI) | 120 | 2 薄膜沉积技术应用实例 | 192 |
| 4.9 电化学气相沉积 | 121 | 2.1 薄膜沉积技术在半导体工业中的应用 | 192 |
| 5 材料的化学气相沉积 | 122 | 2.2 硬质合金工具涂层 | 194 |
| 5.1 金属薄膜 | 122 | 第6章 气相沉积工艺的安全与防护 | 198 |
| 5.2 非金属薄膜 | 125 | 1 工业有害气体处理的原则 | 198 |
| | | 1.1 总体方案的确定 | 198 |
| | | 1.2 处理装置的选定 | 198 |

| | | | |
|-----------------------------|-----|--|-----|
| 2 气相沉积中使用的有害气体及防护 | 199 | 2.6 激光诱导等离子体 | 247 |
| 3 气相沉积中工件(衬底)清洗中的有机溶剂 | 199 | 3 激光表面处理系统 | 249 |
| 4 气相沉积设备的腐蚀和防护 | 199 | 3.1 激光器 | 249 |
| 参考文献 | 200 | 3.2 激光的光学变换与传输系统 | 454 |
| 第12篇 高能束表面处理技术 | 207 | 3.3 填充材料的输送系统 | 275 |
| 第1章 概述 | 209 | 3.4 激光熔覆的控制系统 | 279 |
| 1 高能束表面处理的能源 | 209 | 4 激光表面处理工艺 | 281 |
| 2 高能束表面处理技术及其特点 | 209 | 4.1 激光表面淬火 | 281 |
| 2.1 高能束表面处理技术 | 209 | 4.2 激光表面重熔 | 286 |
| 2.2 高能束表面处理技术的特点 | 209 | 4.3 激光表面合金化 | 289 |
| 2.3 高能束表面处理技术的比较 | 210 | 4.4 激光表面熔覆 | 295 |
| 第2章 电子束表面处理技术 | 212 | 4.5 激光表面非晶化 | 299 |
| 1 电子束表面处理技术主要特点 | 212 | 4.6 激光表面冲击强化 | 301 |
| 2 电子束与材料的相互作用 | 212 | 4.7 激光表面清洗 | 304 |
| 2.1 电子发射 | 212 | 4.8 激光化学气相沉积(LCVD) | 305 |
| 2.2 热电子发射 | 212 | 4.9 激光表面烧蚀 | 310 |
| 2.3 电子的加速 | 212 | 4.10 激光表面处理应用 | 312 |
| 2.4 电子束的控制 | 213 | 5 激光加工安全防护 | 316 |
| 2.5 真空 | 213 | 5.1 激光加工环境中可能的危害 | 316 |
| 2.6 电子束和材料相互作用机理 | 213 | 5.2 强制性安全标准 | 319 |
| 2.7 电子束加热的效率 | 215 | 5.3 防护器具 | 319 |
| 2.8 加热和冷却速率 | 215 | 5.4 管理条例与防护操作 | 320 |
| 3 电子束表面处理装置 | 216 | 参考文献 | 321 |
| 3.1 电子枪 | 216 | 第13篇 纳米表面工程 | 327 |
| 3.2 电子束加热器的设计 | 216 | 第1章 概述 | 329 |
| 3.3 电子束的类型和加工的轨迹形状 | 217 | 1 纳米材料的特性 | 329 |
| 4 电子束表面处理方法及工艺 | 218 | 1.1 小尺寸效应 | 329 |
| 4.1 电子束热处理技术 | 219 | 1.2 量子尺寸效应 | 329 |
| 4.2 电子束重熔技术 | 222 | 1.3 界面与表面效应 | 329 |
| 4.3 蒸发技术 | 223 | 2 纳米表面工程的内涵 | 329 |
| 5 电子束表面处理的应用 | 223 | 3 纳米化表层的四条途径 | 330 |
| 第3章 离子束表面处理技术 | 225 | 4 实用纳米表面工程技术 | 330 |
| 1 离子束表面处理技术及特点 | 225 | 5 纳米表面工程的优越性 | 331 |
| 1.1 等离子体和离子束注入 | 225 | 第2章 纳米颗粒的表面改性 | 332 |
| 1.2 离子束注入的特点 | 226 | 1 概述 | 332 |
| 2 离子束与材料的相互作用 | 226 | 2 纳米颗粒的团聚与分散 | 332 |
| 2.1 连续的离子束注入 | 226 | 2.1 纳米颗粒团聚的原因 | 332 |
| 2.2 脉冲离子束注入 | 229 | 2.2 液体介质中纳米颗粒的存在行为 | 332 |
| 3 离子注入设备 | 229 | 2.3 改善液体介质中纳米颗粒分散性的途径 | 333 |
| 3.1 连续离子束注入机 | 229 | 3 纳米颗粒表面改性方法 | 334 |
| 3.2 脉冲离子注入机 | 232 | 3.1 纳米颗粒表面物理改性 | 334 |
| 4 离子束注入工艺 | 234 | 3.2 纳米颗粒表面化学改性 | 334 |
| 5 离子注入材料性能的改变 | 235 | 3.3 机械/化学复合改性 | 335 |
| 5.1 被注入材料的摩擦性能 | 236 | 3.4 沉淀反应改性 | 335 |
| 5.2 被注入材料的强度 | 239 | 3.5 胶囊化改性 | 335 |
| 5.3 被注入材料的硬度及附着力 | 239 | 3.6 高能表面改性 | 336 |
| 5.4 被注入材料的耐蚀性 | 239 | 4 纳米颗粒表面改性技术应用实例 | 336 |
| 5.5 被注入材料的其他性能 | 241 | 4.1 纳米 TiO ₂ 颗粒的表面改性 | 336 |
| 6 离子注入技术的应用 | 241 | 4.2 纳米 SiO ₂ 颗粒的表面改性 | 337 |
| 第4章 激光表面处理技术 | 243 | 4.3 纳米 CaCO ₃ 颗粒的表面改性 | 338 |
| 1 激光表面处理的分类 | 243 | 4.4 其他纳米颗粒的表面改性 | 338 |
| 2 激光与材料相互作用 | 244 | 第3章 纳米复合电刷镀技术 | 341 |
| 2.1 材料对激光的反射与吸收 | 244 | 1 纳米复合电刷镀技术概述 | 341 |
| 2.2 表面状态对金属光学特性的影响 | 245 | 2 纳米复合电刷镀溶液 | 341 |
| 2.3 金属吸收率随温度的变化 | 246 | 2.1 对纳米复合电刷镀溶液的要求 | 341 |
| 2.4 反常吸收效应 | 246 | 2.2 纳米不溶性固体颗粒的选择原则 | 341 |
| 2.5 金属的激光加热 | 247 | 2.3 纳米复合电刷镀溶液的配制工艺 | 341 |
| | | 2.4 纳米复合电刷镀溶液的特点 | 342 |

| | | | |
|---|-----|-------------------------------------|-----|
| 2.5 纳米复合电刷镀溶液的性能 | 342 | 1.5 光滑或超光滑表面滚动摩擦作用机制 | 365 |
| 2.6 常用纳米复合电刷镀溶液体系 | 342 | 1.6 表面自修复作用机理 | 365 |
| 3 纳米复合电刷镀层的组织与成形机理 | 343 | 2 纳米润滑材料的主要分类及摩擦学性能 | 365 |
| 3.1 纳米复合电刷镀层的组织 | 343 | 2.1 单质纳米粉体的摩擦学性能 | 365 |
| 3.2 纳米复合电刷镀层的成形机理 | 344 | 2.2 纳米硫属化合物的摩擦学性能 | 366 |
| 3.3 纳米复合镀层的性能 | 345 | 2.3 纳米硼酸盐的摩擦学性能 | 367 |
| 3.4 纳米复合镀层的结合机理 | 346 | 2.4 纳米氧化物和氢氧化物的摩擦学性能 | 367 |
| 3.5 纳米复合镀层的强化机理 | 347 | 2.5 纳米稀土化合物的摩擦学性能 | 368 |
| 4 纳米复合电刷镀工艺 | 348 | 2.6 高分子纳米微球的摩擦学性能 | 369 |
| 4.1 纳米复合电刷镀的一般工艺过程 | 348 | 2.7 矿物微粉的磨损自修复功能 | 369 |
| 4.2 纳米复合电刷镀工艺参数选择 | 348 | 3 纳米润滑材料的应用 | 369 |
| 5 纳米复合电刷镀技术的应用 | 349 | 第7章 纳米固体润滑技术 | 371 |
| 5.1 纳米复合镀技术的应用范围 | 349 | 1 纳米固体润滑技术的产生前景 | 371 |
| 5.2 纳米复合电刷镀技术展望 | 349 | 2 纳米固体润滑技术分类 | 371 |
| 第4章 微/纳米热喷涂技术 | 350 | 3 纳米固体润滑系统的组成及其摩擦学设计 原则 | 371 |
| 1 概述 | 350 | 3.1 纳米固体润滑系统的组成 | 371 |
| 1.1 热喷涂技术及其分类 | 350 | 3.2 摩擦学设计原则 | 372 |
| 1.2 热喷涂技术的应用特点 | 350 | 4 纳米固体润滑组元的制备方法 | 374 |
| 1.3 热喷涂技术的工艺流程 | 350 | 5 润滑特性分子有序膜和高分子聚合物超薄 膜的自组装 | 375 |
| 1.4 微/纳米热喷涂 | 351 | 5.1 LB膜 | 375 |
| 2 热喷涂纳米结构颗粒喂料的制备 | 351 | 5.2 SAMs膜 | 375 |
| 2.1 制备方法 | 351 | 5.3 MD膜 | 377 |
| 2.2 实例: Al ₂ O ₃ -TiO ₂ 纳米结构颗粒喂料 | 352 | 5.4 高分子聚合物超薄膜 | 377 |
| 3 等离子喷涂技术制备微/纳米结构涂层 | 353 | 6 纳米固体润滑/耐磨超薄膜 | 378 |
| 3.1 等离子喷涂纳米结构涂层 | 353 | 6.1 纳米固体润滑单层膜 | 378 |
| 3.2 国内外纳米材料等离子喷涂研究状况 | 355 | 6.2 纳米固体润滑/耐磨多层膜 | 380 |
| 4 超音速火焰喷涂制备微/纳米结构涂层 | 356 | 6.3 纳米润滑/耐磨多层叠膜 | 380 |
| 5 电弧喷涂微/纳米结构涂层 | 356 | 7 超固体润滑膜 | 380 |
| 6 微/纳米热喷涂技术的应用前景 | 357 | 7.1 超固体润滑发展现状 | 381 |
| 第5章 纳米复合功能涂料技术 | 358 | 7.2 超润滑的实现条件 | 381 |
| 1 功能涂料基本概念 | 358 | 7.3 MEMS中的摩擦问题 | 381 |
| 2 纳米复合功能涂料 | 358 | 7.4 超固体润滑在 MEMS 装置中的应用 前景 | 382 |
| 2.1 纳米改性涂料 | 358 | 8 金属基原位加工的纳米润滑/耐磨涂层 | 382 |
| 2.2 纳米结构涂料 | 358 | 9 非金属基纳米润滑/耐磨涂层 | 383 |
| 2.3 纳米颗粒填充复合功能涂料 | 358 | 9.1 高分子基纳米润滑/耐磨涂层 | 383 |
| 3 涂料用纳米颗粒填料及在树脂中的分散 问题 | 358 | 9.2 陶瓷基纳米耐磨涂层 | 385 |
| 3.1 纳米颗粒填料 | 358 | 第8章 纳米粘接粘涂技术 | 386 |
| 3.2 纳米颗粒填料在树脂中的分散技术 | 359 | 1 粘接粘涂技术的组成及形成机理 | 386 |
| 4 涂料制备设备 | 359 | 1.1 粘接涂层的组成 | 386 |
| 5 涂料结构及性能表征 | 359 | 1.2 粘接剂与被粘表面产生粘接力的过程 | 387 |
| 6 纳米复合功能涂料应用 | 360 | 1.3 粘接剂产生粘接力的基本理论 | 387 |
| 6.1 纳米复合抗紫外线涂料 | 360 | 2 有机胶黏剂的主要分类以及基本性能 | 387 |
| 6.2 纳米复合热障涂料 | 361 | 2.1 环氧树脂胶黏剂 | 387 |
| 6.3 纳米复合电磁涂料 | 361 | 2.2 酚醛树脂胶黏剂 | 393 |
| 6.4 纳米复合抗静电涂料 | 361 | 2.3 聚氨酯胶黏剂 | 394 |
| 6.5 纳米复合抗菌防污涂料 | 361 | 2.4 有机硅树脂胶黏剂 | 394 |
| 6.6 纳米复合透明耐磨涂料 | 362 | 3 无机胶黏剂 | 395 |
| 6.7 纳米复合阻燃涂料 | 362 | 3.1 磷酸盐型无机胶黏剂 | 395 |
| 7 纳米复合功能涂料研究进展 | 362 | 3.2 硅酸盐型无机胶黏剂 | 395 |
| 7.1 纳米复合激光涂料 | 362 | 4 纳米胶黏剂 | 395 |
| 7.2 纳米复合界面涂料 | 362 | 4.1 纳米有机胶黏剂的制备方法 | 395 |
| 7.3 纳米复合高强度涂料 | 362 | 4.2 纳米粒子对有机胶黏剂性能的影响 | 396 |
| 第6章 纳米润滑材料 | 364 | 5 被粘材料的粘接工艺及常见缺陷的处理 | 396 |
| 1 纳米润滑材料的摩擦学作用机理 | 364 | 5.1 被粘材料的粘接工艺 | 396 |
| 1.1 沉积膜作用机制 | 364 | 5.2 纳米胶黏剂应用实例 | 397 |
| 1.2 润滑膜增强机制 | 364 | 5.3 常见缺陷的处理方法 | 398 |
| 1.3 填充条件修复作用机制 | 364 | | |
| 1.4 表面优化作用机制 | 365 | | |

| | | | |
|---|-----|--------------------------------|-----|
| 第9章 纳米硬膜技术 | 399 | 2 油脂类防锈材料 | 446 |
| 1 纳米多层膜(纳米超点阵膜) | 399 | 2.1 防锈作用原理 | 446 |
| 1.1 纳米多层膜的制备方法 | 399 | 2.2 防锈油脂选用原则 | 447 |
| 1.2 纳米多层膜的分类 | 399 | 2.3 防锈油脂的种类及品种 | 447 |
| 1.3 典型的纳米多层膜体系以及对超硬性起源的各种探讨 | 399 | 2.4 典型配方及配制工艺 | 451 |
| 2 纳米复合膜 | 401 | 2.5 国外防锈油脂 | 459 |
| 2.1 沉积纳米复合涂层的方法 | 401 | 3 气相防锈封存材料 | 461 |
| 2.2 纳米复合涂层体系的分类 | 401 | 3.1 防锈作用原理 | 461 |
| 2.3 典型的纳米复合涂层体系 | 401 | 3.2 选用原则 | 461 |
| 2.4 超硬纳米复合涂层高硬度、高弹性恢复以及高断裂韧度的起源 | 404 | 3.3 分类及主要品种 | 462 |
| 2.5 超硬纳米复合涂层的结构 | 404 | 3.4 典型配方及配制工艺 | 465 |
| 2.6 硬及超硬纳米复合涂层的力学性能 | 405 | 3.5 国外材料的种类、性能 | 465 |
| 3 典型纳米硬膜的制备工艺 | 406 | 4 高分子防锈封存材料 | 468 |
| 3.1 TiN/Si ₃ N ₄ 纳米超硬复合薄膜的沉积制备 | 406 | 4.1 防锈作用原理 | 468 |
| 3.2 WC-Ti _(1-x) Al _x N 纳米超晶格薄膜的沉积制备 | 407 | 4.2 选用原则 | 468 |
| 第10章 金属材料的表面自身纳米化 | 409 | 4.3 分类及主要品种 | 469 |
| 1 表面自身纳米化的基本原理与制备方法 | 409 | 4.4 典型配方及制备工艺 | 475 |
| 1.1 表面机械处理法 | 409 | 第3章 典型机械零部件防锈封存工艺 | 482 |
| 1.2 非平衡热力学法 | 410 | 1 机械零部件通用防锈封存工艺要点 | 482 |
| 2 微观变形方式 | 410 | 1.1 防锈工艺的一般技术要求 | 482 |
| 2.1 形变组织 | 410 | 1.2 机械零部件防锈封存工艺实施要点 | 482 |
| 2.2 形变机制 | 410 | 2 典型机械制品的防锈封存工艺 | 483 |
| 2.3 影响塑性变形的因素 | 410 | 2.1 轴承防锈 | 484 |
| 3 组织结构特征 | 412 | 2.2 大型机械防锈封存与包装 | 485 |
| 3.1 表面纳米化的结构特征 | 412 | 2.3 刀具与量具防锈封存与包装 | 486 |
| 3.2 表面纳米化的组织演变 | 412 | 2.4 光学仪器防锈封存与包装 | 486 |
| 3.3 表面纳米化的微观机理 | 418 | 2.5 机械配件的防锈封存与包装 | 487 |
| 4 表面纳米化对性能的影响 | 420 | 2.6 库存产品的防锈封存与包装 | 488 |
| 4.1 表面性能 | 420 | 2.7 露天存放产品防锈封存与包装 | 488 |
| 4.2 整体性能 | 422 | 第4章 环境防锈封存 | 490 |
| 5 表面纳米化加工与化学热处理 | 423 | 1 充氮封存防锈 | 490 |
| 5.1 纯铁的气体渗氮 | 423 | 2 干燥空气封存防锈 | 490 |
| 5.2 38CrMoAl 钢的气体渗氮 | 424 | 2.1 干燥剂的选用 | 491 |
| 6 表面纳米化的应用前景 | 426 | 2.2 干燥剂用量计算 | 491 |
| 参考文献 | 428 | 2.3 包装吸湿性产品的防潮性计算 | 493 |
| 第14篇 封存与包装 | 433 | 2.4 干燥空气封存分类 | 494 |
| 第1章 概述 | 435 | 3 除氧封存 | 494 |
| 1 封存与包装的意义 | 435 | 3.1 概述 | 494 |
| 1.1 含义 | 435 | 3.2 除氧包装材料 | 494 |
| 1.2 封存包装的重要性 | 435 | 3.3 除氧封存包装方法 | 495 |
| 2 封存与包装原理 | 435 | 4 环境监控防锈 | 496 |
| 2.1 影响金属制品锈蚀的原因 | 435 | 4.1 测量与控制仪表的选择 | 496 |
| 2.2 防锈技术 | 436 | 4.2 执行机构的选择 | 497 |
| 3 封存包装技术 | 436 | 4.3 温湿度控制系统 | 497 |
| 3.1 技术要求 | 436 | 参考文献 | 498 |
| 3.2 防锈封存包装的等级 | 436 | 第15篇 表面工程技术设计 | 499 |
| 3.3 防锈封存包装方法 | 437 | 第1章 概述 | 501 |
| 第2章 封存材料 | 441 | 1 表面技术设计与选择的一般原则 | 501 |
| 1 水溶性防锈封存材料 | 441 | 1.1 适应性原则 | 501 |
| 1.1 防锈作用原理 | 441 | 1.2 耐久性原则 | 502 |
| 1.2 选用原则 | 442 | 1.3 经济性原则 | 502 |
| 1.3 分类及主要品种 | 442 | 2 表面强化工艺规程的编制 | 502 |
| 1.4 典型配方及配制工艺 | 444 | 第2章 表面覆层技术的设计与选择 | 505 |
| 1.5 国外材料的种类、性能 | 445 | 1 堆焊技术的设计与选择 | 505 |
| 2 油脂类防锈材料 | 446 | 1.1 堆焊方法的选择原则 | 505 |
| 2.1 防锈作用原理 | 446 | 1.2 堆焊材料的选择原则 | 507 |
| 2.2 防锈油脂选用原则 | 447 | 2 热喷涂技术的设计与选择 | 507 |
| 2.3 防锈油脂的种类及品种 | 447 | 2.1 热喷涂方法的选择原则 | 507 |
| 2.4 典型配方及配制工艺 | 451 | | |
| 2.5 国外防锈油脂 | 459 | | |

| | | | |
|--------------------------------|-----|--------------------------------------|-----|
| 2.2 热喷涂材料的选择原则 | 507 | 1.1 表面缺陷的类型及其特征 | 573 |
| 3 镀敷技术的设计与选择 | 508 | 1.2 检测条件 | 574 |
| 3.1 镀敷技术的选择原则 | 508 | 1.3 检测方法 | 574 |
| 3.2 镀层的设计与选择 | 510 | 2 涂覆层表面光泽度的检测 | 574 |
| 4 涂装技术的设计与选择 | 519 | 2.1 目测评定法 | 574 |
| 4.1 涂层体系的设计和涂料的选择原则 | 519 | 2.2 样板对照法 | 574 |
| 4.2 涂装工艺的选择原则 | 520 | 2.3 光度计测量法 | 574 |
| 第3章 复合表面技术的设计与选择 | 522 | 第2章 涂覆层组织及表面微观形貌的光学显微分析 | 575 |
| 1 复合表面技术设计与选择原则 | 522 | 1 光学显微分析样品的制备 | 575 |
| 1.1 概述 | 522 | 1.1 取样 | 575 |
| 1.2 复合表面技术设计与选择原则 | 522 | 1.2 制样 | 575 |
| 2 以增强耐磨性为主的复合表面技术 | 523 | 2 定量金相分析 | 582 |
| 2.1 电镀、化学镀复合材料 | 523 | 2.1 定量金相的常用符号及基本公式 | 582 |
| 2.2 多层涂层 | 527 | 2.2 常用测量方法 | 582 |
| 2.3 功能梯度涂层 | 529 | 2.3 定量金相计算公式及其应用 | 583 |
| 2.4 含表面热处理的复合强化层 | 529 | 2.4 定量金相数据的统计分析 | 583 |
| 2.5 含激光处理的复合强化层 | 534 | 2.5 自动图像分析仪 | 584 |
| 2.6 其他表面技术的复合 | 537 | 第3章 涂覆层组织及表面形貌的电子显微分析 | 585 |
| 3 以增强耐腐蚀性为主的复合表面技术 | 537 | 1 透射电子显微分析 | 585 |
| 3.1 耐蚀复合镀层 | 537 | 1.1 透射电子显微镜的样品制备 | 585 |
| 3.2 多层镍-铬镀层 | 538 | 1.2 透射电镜成像操作及像衬度 | 586 |
| 3.3 镍镉扩散镀层 | 538 | 1.3 透射电镜在显微分析中的应用 | 587 |
| 3.4 金属-非金属复合涂层 | 539 | 2 扫描电子显微镜在显微组织分析中的应用 | 588 |
| 3.5 有机复合膜层 | 541 | 3 其他电子(离子)显微分析方法 | 588 |
| 3.6 自蔓延技术制备钢基陶瓷复合材料 | 542 | 3.1 扫描透射电镜(STEM)分析 | 588 |
| 3.7 耐高温热腐蚀复合涂层 | 543 | 3.2 扫描隧道显微镜(STM)分析 | 588 |
| 4 以增强固体润滑性为主的复合表面技术 | 546 | 3.3 原子力显微镜分析 | 589 |
| 4.1 概述 | 546 | 3.4 场发射显微镜分析 | 589 |
| 4.2 复合镀固体润滑材料 | 547 | 3.5 场离子显微镜(TFIM)分析 | 590 |
| 4.3 气相沉积复合膜和多层膜 | 548 | 3.6 原子探针-场离子显微镜(AP-FIM) | 590 |
| 4.4 含扩渗处理的表面膜层 | 550 | 第4章 涂覆层的晶体及分子结构分析检测 | 591 |
| 4.5 金属塑料复合材料 | 551 | 1 X射线衍射结构分析方法 | 593 |
| 4.6 粘结固体润滑膜 | 552 | 1.1 X射线衍射的基本原理 | 593 |
| 第4章 表面工程技术经济分析 | 556 | 1.2 X射线衍射分析的应用 | 595 |
| 1 设备的磨损及其补偿 | 556 | 2 电子衍射结构分析方法 | 596 |
| 1.1 设备的有形磨损 | 556 | 2.1 概述 | 596 |
| 1.2 设备的无形磨损 | 556 | 2.2 电子衍射的基本原理 | 597 |
| 1.3 设备磨损的度量 | 556 | 2.3 多晶电子衍射花样及其标定 | 597 |
| 1.4 设备磨损的补偿 | 557 | 2.4 单晶电子衍射花样及其标定 | 597 |
| 1.5 设备的寿命 | 557 | 2.5 样品制备及其他问题 | 598 |
| 1.6 表面工程和再制造工程对补偿设备磨损的作用 | 557 | 第5章 涂覆层及其表面的成分分析检测 | 599 |
| 2 技术经济的基本原理 | 558 | 第6章 涂覆层表面粗糙度的检测 | 601 |
| 2.1 技术经济分析的基本要素 | 558 | 1 样板对照法检测 | 602 |
| 2.2 可比原则 | 561 | 2 轮廓仪法(触针法)检测 | 603 |
| 2.3 资金的时间价值 | 561 | 3 干涉显微镜法 | 603 |
| 3 技术经济评价的基本方法 | 564 | 4 散斑法 | 604 |
| 3.1 静态评价方法 | 564 | 5 显微镜调焦法 | 604 |
| 3.2 动态投资评价法 | 565 | 6 扫描隧道显微镜法 | 605 |
| 3.3 其他效益型指标评价法 | 566 | 第7章 涂覆层的孔隙率检测 | 606 |
| 4 设备修理、改造与更新的技术经济分析 | 566 | 1 滤纸法 | 606 |
| 4.1 设备大修的经济界限 | 566 | 2 涂膏法 | 607 |
| 4.2 设备经济寿命的确定 | 567 | 3 浮力法 | 607 |
| 4.3 设备更新方案的评价与选择 | 567 | 4 直接称量法 | 608 |
| 参考文献 | 570 | 5 孔隙率的其他测定方法 | 608 |
| 第16篇 表面工程质量控制与检测 | 571 | 第8章 涂覆层的硬度检测 | 609 |
| 第1章 涂覆层的外观质量检测 | 573 | 1 宏观硬度检测 | 610 |
| 1 涂覆层表面缺陷及外观质量检测 | 573 | 1.1 布氏硬度试验法 | 610 |
| | | 1.2 洛氏硬度试验法 | 610 |

| | | | |
|---------------------------------|-----|------------------------------|-----|
| 1.3 维氏硬度检测 | 611 | 4.2 基体拉伸法 | 635 |
| 2 微观硬度检测 | 612 | 5 其他测量方法 | 635 |
| 2.1 微观硬度检测方法 | 612 | 5.1 冲击试验法 | 635 |
| 2.2 显微硬度测量仪器 | 613 | 5.2 杯突试验法 | 636 |
| 2.3 显微硬度测量中的几个重要问题 | 614 | 5.3 热振试验法 | 636 |
| 2.4 显微硬度的间接检测法 | 615 | 5.4 超离心力法 | 636 |
| 3 纳米涂覆层硬度检测 | 616 | 5.5 超声波法 | 636 |
| 3.1 压痕测试原理 | 616 | 5.6 冲击波法 | 636 |
| 3.2 压痕的测量 | 617 | 5.7 磨损法 | 636 |
| 3.3 纳米划痕硬度 | 618 | 5.8 电磁力法 | 636 |
| 第9章 涂覆层的厚度检测 | 619 | 5.9 X射线法 | 636 |
| 1 概述 | 619 | 第11章 涂覆层耐蚀性能的检测 | 637 |
| 1.1 涂覆层厚度的定义 | 619 | 1 盐雾试验法检测 | 638 |
| 1.2 涂覆层厚度测量方法的种类与特点 | 619 | 1.1 中性盐雾试验 (NSS) | 638 |
| 1.3 涂覆层厚度测量方法的选择 | 620 | 1.2 铜盐加速醋酸盐雾试验 (CASS) | 640 |
| 2 光学金相显微镜检测法 | 620 | 2 湿热试验 | 641 |
| 2.1 检测样品制备 | 620 | 2.1 测试设备技术参数 | 641 |
| 2.2 检测方法 | 621 | 2.2 测试方法 | 641 |
| 3 扫描电子显微镜检测 | 621 | 2.3 试验结果评定 | 641 |
| 3.1 样品制备 | 621 | 3 腐蚀膏试验 | 642 |
| 3.2 测量要点 | 621 | 3.1 方法原理 | 642 |
| 4 射线法检测 | 622 | 3.2 腐蚀膏的制备 | 642 |
| 4.1 X射线荧光测厚法 | 622 | 3.3 试验方法 | 642 |
| 4.2 β 射线反(背)散射测厚法 | 622 | 3.4 试验结果评定 | 642 |
| 5 测厚仪法检测 | 622 | 4 二氧化硫工业气体腐蚀试验 | 642 |
| 5.1 磁性法涂覆层厚度检测 | 622 | 4.1 方法原理 | 642 |
| 5.2 涡流法涂覆层厚度检测 | 623 | 4.2 测试设备 | 642 |
| 6 软廓仪(触针)法检测 | 624 | 4.3 测试条件 | 642 |
| 7 化学溶解法检测 | 624 | 4.4 试验方法 | 643 |
| 7.1 点滴法 | 624 | 4.5 试验结果评定 | 643 |
| 7.2 计时液流法 | 624 | 4.6 二氧化硫气体的制备和分析 | 643 |
| 7.3 溶解法 | 626 | 5 周期浸润腐蚀试验 | 643 |
| 7.4 阳极溶解库仑法 | 627 | 5.1 测试设备 | 643 |
| 8 光干涉法检测 | 628 | 5.2 测试溶液和补给溶液 | 643 |
| 8.1 测量原理 | 628 | 5.3 试样 | 644 |
| 8.2 样品制备 | 628 | 5.4 试验周期 | 644 |
| 8.3 膜厚的测定 | 628 | 5.5 试验结果的检查与评定 | 644 |
| 9 纳米薄膜厚度的精密测量方法 | 628 | 6 大气暴露腐蚀试验法检测 | 644 |
| 9.1 微量天平法 | 628 | 6.1 大气条件分类 | 644 |
| 9.2 石英振子法 | 629 | 6.2 暴露方式 | 645 |
| 10 涂覆厚度的其他检测方法 | 629 | 6.3 大气暴露场的选择和要求 | 645 |
| 10.1 椭圆偏振法 | 629 | 6.4 试样的要求和暴露方法 | 645 |
| 10.2 微波法 | 629 | 6.5 试验结果的定性评定 | 645 |
| 10.3 电容法 | 629 | 6.6 试样暴露结果的定量评定 | 646 |
| 第10章 涂覆层与基体结合强度的检验 | 630 | 7 其他人工加速腐蚀试验 | 646 |
| 1 对涂覆层和基体直接加载法 | 630 | 7.1 电解腐蚀试验 | 646 |
| 2 使用黏结剂的检验方法 | 631 | 7.2 全浸腐蚀试验 | 647 |
| 2.1 直接拉伸试验法 | 631 | 7.3 硫化氢试验 | 647 |
| 2.2 改进的直接拉伸检测法 | 632 | 7.4 硫代乙烯胺腐蚀试验 | 647 |
| 2.3 抗剪强度检测法 | 632 | 第12章 涂覆层残余应力的检测 | 649 |
| 2.4 拉导剥离法 | 632 | 1 挠度法 | 649 |
| 2.5 扭矩法 | 633 | 2 弯曲率检验法 | 649 |
| 3 涂覆层局部变形法 | 633 | 3 螺旋收缩仪法 | 650 |
| 3.1 划痕法 | 633 | 4 电阻应变法 | 650 |
| 3.2 压痕法 | 634 | 5 X射线分析法检测 | 650 |
| 3.3 刮剥法 | 635 | 6 涂覆层残余应力的其他检测 | 651 |
| 3.4 动态拉伸法 | 635 | 第13章 涂覆层耐磨性能的检测 | 652 |
| 4 基片变形法 | 635 | 1 磨损试验方法 | 652 |
| 4.1 弯曲法 | 635 | 2 耐磨性的评价 | 653 |

| | | | |
|-------------------------|-----|----------------|-----|
| 第 14 章 涂覆层其他性能的检测 | 654 | 2 涂层的绝热性 | 654 |
| 1 涂层的耐热性 | 654 | 参考文献 | 656 |

第 10 篇

热 浸 镀

■ 主 编 刘 邦 津

■ 编 写 刘 邦 津

第 1 章 概 述

将被镀金属材料浸于熔点较低的其他液态金属或合金中进行镀层的方法称为热浸镀, 简称热镀。此法的基本特征是在基体金属与镀层金属之间有合金层形成。因此, 热镀层是由合金层与镀层金属构成的复合镀层。被镀金属材料一般为钢、铸铁及不锈钢等。用于镀层的低熔点金属有锌、铝、铅、锡及他们的合金等。

热镀锌在 1742 年于法国出现, 约在 1836 年工业生产。热镀锌层具有良好耐大气腐蚀性, 由于锌的电化学特性, 对钢基体有牺牲性保护作用, 而且价廉, 因而广泛用作钢材的保护镀层。

热镀锡是最早出现的热镀层, 在 16 世纪欧洲一些国家用简单的方法生产镀锡板。由于锡资源短缺, 目前镀锡薄板均采用电镀工艺。热镀锡仅少量用于电器元件及线材上。

热镀铅的出现也很早, 1830 年美国有镀铅钢板生产。由于铅的化学稳定性好, 很适于作钢材的保护镀层。然而, 由于铅与钢不发生反应, 必须在铅液中添加一定数量的锡或锑, 才能形成镀层。为减少锡的加入数量, 近年开发出电镀镍后再热镀铅的新工艺, 使锡的添加量从原来的 15% 下降到 8% 以下。镀铅板主要用作汽车油箱及建筑材料, 由于铅对环境的污染, 镀铅已逐渐被其他镀层取代。

热镀铝发展较晚, 在 20 世纪 30 年代出现于美国。从 50 年代起, 随着汽车工业的发展, 镀铝钢板被大量用作汽车排气系统用材。镀铝钢材不仅耐大气腐蚀性优异 (特别工业大气和海洋大气), 且还具有较好耐热性。其应用领域正在扩大。

20 世纪 70 年代开发出热镀锌铝合金镀层, 其耐蚀性优于纯热镀锌层, 并取得了较快的发展。其中有 55% Al - Zn 合金镀层 (商品名为 Galvalume) 和 Zn - 5% Al - RE 合金镀层 (商名为 Galfan)。它们的耐蚀性约为传统镀锌层 2~3 倍, 因而将逐渐取代现有传统镀锌层。

此外, 20 世纪 90 年代日本新日铁公司开发的 Zn - 0.5% Mg 镀层 (商品名: Dymazinc) 和日新制钢公司开发的 Zn - 6% Al - 3% Mg 镀层 (商品名: ZAM) 均具有比传统镀锌层好得多的耐蚀性。特别是后者的试验室循环腐蚀试验的耐蚀性比传统镀锌层高出 15 倍以上, 堪称跨世纪的高耐蚀镀层。

在解决含硅钢 (活性钢) 热镀锌时产生的镀锌层过厚、疏松及色差问题上, 开发出在锌液中添加合金化元素的锌合金镀层, 例如 Zn - 0.05% Ni 镀层 (称 Technigalva) 及 90 年代后期出现的 Zn - 0.05% Ni - 1.8% Sn - 0.5% Bi 多元锌基镀层 (商品名: Galveco)。这些镀层不仅可解决含硅钢热镀锌的所谓森德林效应, 而且也对锌液回流及消除锌瘤有利, 后者的这一作用更大。

在分批式热镀锌情况下, 为解决钢结构的螺栓孔眼、复合结构件缝隙内及棱边处锌液回流不畅问题, 开发一种 Zn - 0.5% Bi 镀层 (商品名: Galva Flow)。实践证明, 此种镀层不仅节约锌, 而且对减轻锌锅锅壁腐蚀及降低锌渣生成量有利。

20 世纪 60 年代, 国外汽车工业飞速发展, 汽车面板冲压成形的连续化和高速化, 要求提供成形稳定性高和加工性优异的钢板。随着冶金技术的进步, 采用真空脱气制取高纯度钢和连续退火技术, 使这一要求成为现实, 从而开发出深冲性极好超低碳无间隙原子钢, 称为 IF 钢。这种钢由于添加 Ti、Nb 元素而使残余微量的 C 和 N 被固定, 使铁素体变成纯净的组织, 从而大大提高其加工成形性。

用 IF 钢板经热镀锌并合金化处理所得的合金化镀锌板, 由于其成本低和优异的耐蚀性而倍受汽车业的重视。通过对镀层性能与微观组织的研究, 不断改善其在冲压成形时镀层的耐粉化性和耐剥离性, 使合金化镀锌板大量取代了已经使用多年的电镀锌合金钢板。

进入 20 世纪 90 年代, 随着合金化镀锌板被大量用作汽车面板, 汽车界又提出减轻车体重量、提高抗撞击性及安全性的要求。为此, 需要开发适用于此目的的高强度超深冲级合金化镀锌板。然而, 钢材的研究必须与热镀锌工艺相结合, 否则即使原板达到要求的性能, 热镀锌工艺不能满足要求, 也达不到目的。为此, 必须注意两个问题: ①为提高钢材强度, 向钢中添加合金化元素时, 必须考虑他们对此钢板的热镀锌性和合金化性的影响; ②钢板的热处理工艺必须考虑与钢板热镀锌工艺及合金化工艺相协调。

目前用于高强度合金化镀锌板的基板主要有以下三种强化型钢板: ①固溶强化型钢板; ②烘烤强化型钢板; ③组织强化型钢板 (包括双相钢和相变诱发塑性钢等)。

热镀工艺主要分为熔剂法和氢气还原法两大类。其中氢气还原法多用于镀钢带, 少量用于热镀钢丝和钢管。它可实现连续热镀。典型森吉米尔法和美钢联法即属于此类工艺。钢带通过预热炉被快速加热到 500~600℃, 并除去表面轧制油, 随即进入还原退火炉, 在此被辐射管间接加热到退火温度, 同时表面上的氧化膜被通入炉内的含 H₂ 的保护气体还原成纯铁, 然后在隔绝空气条件下冷却到一定温度后进入锌锅中浸镀。美钢联法钢带先经电解脱脂除去油污, 然后直接进入还原退火炉进行再结晶退火, 其加热速度低, 使产量提高受到限制。80 年代引入立式退火炉后, 使这一问题得以解决。由于美钢联法的镀层质量优于改良的森吉米尔法, 目前新建的热镀锌生产线大都采用美钢联法。

熔剂法主要用于钢丝、钢管和钢结构件的镀层。该法在钢件浸入镀锅之前, 先在净化的钢表面上涂一层熔剂, 镀前, 此熔剂层可保护钢表面不被氧化, 在浸镀时受热分解或挥发, 使新鲜的钢表面与熔融金属直接接触发生反应形成镀层。

熔剂法又分为干法与湿法。湿法是较早使用的方法。它是将酸洗净化的钢材浸涂水熔剂后, 不经烘干直接浸入熔融金属中热镀, 但需在液体的金属表面覆盖一层熔融的熔剂。干法是在浸涂水熔剂后经烘干除去水分, 然后再浸镀。由于干法工艺简单, 镀层质量好, 目前钢结构件热镀锌均采用干法, 湿法趋于淘汰。

20 世纪 90 年代, 镀锌钢板特别是合金化镀锌板被大量用于汽车和家电制造, 而获得很大的发展。由此相继建立起超大型 (处理钢带最大宽度达 2 000 mm)、超高速 (生成线工艺段钢带运行速度达 180 m/min) 及高度自动化的热镀锌生产线。由于出现了先进的高灵敏度传感器和先进测试方法, 就可进行在线及时调整与控制合金化程度, 达到所需的相结构, 使合金化镀锌板质量大幅度提高。同时, 由于热镀工艺自身具有成本低的特点, 而使合金化镀锌板比目前汽车上大量使用的电镀锌合金钢板更具市场竞争力。一些汽车生产大国汽车界决定在未来数年内将用前者全部取代后者。

在热镀设备方面, 出现了立式高温退火炉, 改善了钢带的退火质量。炉内设有加热、均热、快速冷却及保温四个段, 以控制镀层钢带达到所需的力学性能。炉内设置了钢带张力调整装置, 使钢带的振动减小到最低限度, 而使镀层厚

4 第10篇 热浸镀

度均匀性大大提高。这对提高合金化镀锌板质量起到了重要的作用。

此外，由于热轧技术的进步，热轧钢带厚度可轧到0.5 mm。对于一些对镀锌钢板表面质量及力学性能要求不高的用途，可用热轧镀锌板代替。用涂漆保护热轧板材防锈的方法已不能满足用户的要求，也促进了热轧板、热镀锌取得

了快速的发展。目前在镀锌板中占有10%以上的市场份额。

在钢丝、钢管和钢构件的镀锅上也取得了较大进步。由过去的外加热式铁锅改为内加热的陶瓷锅。不仅简化了炉体结构，且大大延长了锅体使用寿命。

编写：刘邦津（钢铁研究总院）