

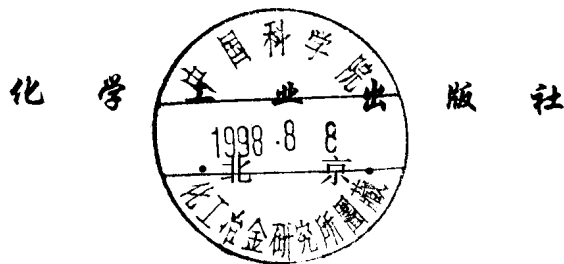
表面工程手册

曲敬信 汪泓宏 主编

化学工业出版社

表面工程手册

曲敬信 汪泓宏 主编



(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

表面工程手册/曲敬信,汪泓宏主编. —北京:化学工业出版社, 1998
ISBN 7-5025-1992-0

I. 表… I. ①曲…②汪… III. 表面精整-手册 IV.
TG176-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 16914 号

表面工程手册

曲敬信 汪泓宏 主编

责任编辑:周国庆 李志清

责任校对:王安达 麻雪丽

封面设计:于兵

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 57 字数 1599 千字

1998 年 3 月第 1 版 1998 年 3 月北京第 1 次印刷

印数:1—5000

ISBN 7-5025-1992-0/TQ·1001

定价:90.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

各章编写人员及工作单位

第1章	摩擦与磨损	曲敬信	中国矿业大学北京研究生部
第2章	金属的腐蚀	于福洲	北京化工大学
第3章	金属的高温氧化	于福洲	
第4章	疲 劳	王中光	中国科学院金属研究所
第5章	表面预处理	陈祝平	煤炭科学研究总院
第6章	电 镀	陈祝平	
第7章	自催化沉积	陈祝平	煤炭科学研究总院
第8章	表面转化	陈华辉	中国矿业大学北京研究生部
		陈祝平	煤炭科学研究总院
第9章	化学气相沉积	陈华辉	中国矿业大学北京研究生部
		吕反修	北京科技大学
第10章	真空蒸发	冯嘉猷	清华大学
第11章	溅射技术	王怡德	北京电子专用设备技术服务中心
第12章	离子镀	冯嘉猷	清华大学
第13章	离子注入	张通和	北京师范大学
第14章	电子束表面改性	唐传芳	机械工业部北京机电所
		冯燕武	
第15章	激光束表面改性	杨院生	中国科学院金属研究所
第16章	表面热处理	王捧柱	中国矿业大学北京研究生部
第17章	化学热处理	王捧柱	
第18章	热 浸 镀	刘邦津	北京钢铁研究总院
第19章	热 喷 涂	吴行义	北京航空材料研究所
第20章	堆 焊	郑笔康	中国科学院金属研究所
第21章	溶胶-凝胶法	徐志昌	清华大学
第22章	高分子涂层	赵安赤	清华大学
第23章	镀层质量检验与测试	于 力	中国科学院金属腐蚀与防护研究所
		谢中维	北京钢铁研究总院

2185/12
09

序 言

表面工程 (Surface Engineering) 也称为“表面技术”、“表面处理”或“表面改性”，是应用物理、化学、机械等方法改变固体材料表面成分或组织结构，获得所要求的性能，以提高产品的可靠性或延长使用寿命的各种技术的总称。

众所周知，磨损、腐蚀和疲劳是零件或构件在工作过程中失效的最主要的三种形式，由此产生的经济损失十分惊人；而这些失效现象大都发生在材料表面，因而采取各种手段以提高材料的表面性能，对于增加零件的安全可靠性或延长使用寿命，无疑是非常有效的。更为重要的是，通过表面工程可以大量节约资源和能源、充分发挥材料的潜力和降低生产成本，这在重视“环境材料”的今天来说，应该大力提倡。此外，表面工程用于修复因磨损、腐蚀而失效或因超差而报废的零部件使之继续服役，也是很有成效的，并得到了广泛应用。

由于以上各点，表面工程的发展极其迅速，特别是近二、三十年来，随着科学技术的进步与工业生产的大量需求，有关表面工程的新工艺、新技术层出不穷，一些传统工艺和技术也不断改进或创新。为此，国内知识界和工程技术界迫切需要一部能较全面反映当代表面工程技术的书籍。

在化学工业出版社的大力支持下，曲敬信和汪泓宏两位教授组织了国内 20 余名工作在第一线、具有较高理论水平和富有实践经验，并在表面工程有关领域卓有成就的专家学者编写了本书。

本书有以下几个特点：

(1) 基础性。本书首先 (第 1 章至第 4 章) 介绍了摩擦与磨损、金属的腐蚀、金属的高温氧化和疲劳的基本理论、规律及其与表面工程的关系。在介绍各种表面技术时，注意到阐明其基本原理和理论，力求深入浅出。

(2) 实用性。本书是一部大型专业性的技术手册，详细介绍了各种表面技术的基本设备、工艺规范、主要参数、标准和检验手段，便于读者参考、应用。

(3) 新颖性。本书力求反映当代表面工程的新技术、新成果、新趋势，在一定程度上体现了本领域的当代水平。

(4) 全面性。本书较全面、系统地介绍了表面工程的各个重要领域，以便读者从中分析比较、取长补短、为我所用。

表面工程涉及多种学科领域，是一个多学科交叉的新兴边缘学科。作者们虽然尽了很大努力，恐仍有不当之处，希望读者批评指正。

师昌绪

于香港回归日

1997.7.1, 北京

44054

内 容 提 要

本书是一部全面反映当代表面工程技术的大型书籍。它首先介绍了摩擦与磨损、金属的腐蚀、金属的高温氧化和疲劳等的基本理论、规律及其与表面工程的密切关系；然后详细地介绍了各种表面技术，包括电镀、自催化沉积、表面转化、化学气相沉积、真空蒸发、溅射镀膜、离子镀、离子注入、电子束表面改性、激光束表面改性、表面热处理、化学热处理、热浸镀、热喷涂、堆焊、溶胶-凝胶法、高分子涂层等的基本设备、工艺规范和标准、主要参数等；最后介绍了镀层质量检验与测试的方法。

本书可供机械、化工、石化、能源、矿冶、电子、航空航天、装饰建材等工业领域的表面工程技术人员使用，也可供有关专业的大专院校师生学习参考。

目 录

第 1 章 摩擦与磨损	(1)	2.3 电化学腐蚀的热力学判据和电	
1.1 概述	(1)	位-pH 图	(46)
1.2 摩擦	(2)	2.3.1 利用金属标准电极电位和	
1.2.1 摩擦的定义和分类	(2)	阴极反应平衡电位估计腐	
1.2.2 古典摩擦定律	(3)	蚀的可能性	(46)
1.2.3 摩擦机理	(3)	2.3.2 电位-pH 图	(49)
1.2.4 影响摩擦的主要因素	(7)	2.3.3 电位-pH 腐蚀状态图	(49)
1.3 材料的磨损	(11)	2.3.4 实测的 E -pH 腐蚀状态图	(50)
1.3.1 磨损的定义	(11)	2.3.5 电位-pH 图的适用性和局	
1.3.2 磨损的分类	(11)	限性	(51)
1.3.3 磨损的评定方法	(12)	2.4 电化学腐蚀动力学与极化作用	(51)
1.4 磨料磨损	(13)	2.5 钝化作用	(52)
1.4.1 磨料磨损的定义和分类	(13)	2.6 金属与合金的耐蚀性特点	(53)
1.4.2 磨料磨损机理和简化模型	(14)	2.6.1 热力学稳定的金属材料的	
1.4.3 磨料磨损的主要影响因素	(15)	耐蚀性特点	(54)
1.5 粘着磨损	(23)	2.6.2 钝性金属材料的耐蚀性	
1.5.1 粘着磨损的定义和分类	(23)	特点	(54)
1.5.2 粘着磨损的模型和粘着磨		2.6.3 镀层金属的耐蚀性特点	(54)
损方程式	(24)	2.6.4 应力、应变对金属腐蚀的	
1.5.3 机械零件的磨损特性	(25)	影响	(55)
1.5.4 影响粘着磨损的主要因素	(26)	2.7 环境因素对腐蚀的影响	(55)
1.6 疲劳磨损	(28)	2.7.1 介质氧化还原性的影响	(55)
1.6.1 疲劳磨损的定义与特征	(28)	2.7.2 介质 pH 值和溶氧浓度的	
1.6.2 疲劳磨损的基本理论	(28)	影响	(55)
1.6.3 影响疲劳磨损的主要因素	(31)	2.7.3 介质中特异离子的影响	(55)
1.7 冲蚀磨损	(32)	2.7.4 介质流速的影响	(55)
1.7.1 冲蚀磨损的定义与特点	(32)	2.7.5 温度的影响	(56)
1.7.2 冲蚀磨损的基本理论	(33)	2.8 腐蚀过程的控制因素	(56)
1.7.3 影响冲蚀磨损的主要因素	(34)	2.9 防腐蚀途径的选择	(57)
1.8 腐蚀磨损与微动磨损	(38)	2.10 金属材料或镀层的耐蚀性评价	
1.8.1 腐蚀磨损	(38)	与试验方法	(58)
1.8.2 微动磨损	(40)	2.10.1 腐蚀速率或腐蚀程度的表	
参考文献	(42)	示方法	(58)
第 2 章 金属的腐蚀	(44)	2.10.2 耐蚀性评价	(60)
2.1 腐蚀的分类	(44)	2.10.3 常用腐蚀试验方法简介	(61)
2.2 电化学腐蚀机理	(44)	参考文献	(63)
2.2.1 原电池作用	(44)	第 3 章 金属的高温氧化	(64)
2.2.2 电解作用	(45)	3.1 金属高温氧化原理	(64)

3.1.1 金属高温氧化的热力学判 据	(64)	4.4.1 疲劳中的表面与内部形变	(102)
3.1.2 高温氧化机理	(66)	4.4.2 疲劳损伤的 X 射线测量	(104)
3.1.3 高温氧化速度	(68)	4.4.3 疲劳中的表面膜效应	(106)
3.1.4 氧化物的比容	(70)	参考文献	(107)
3.2 金属高温硫化	(70)	第 5 章 表面预处理	(110)
3.3 几种液态环境中的高温腐蚀	(73)	5.1 净化处理	(110)
3.3.1 钒侵蚀	(73)	5.1.1 表面沾污物	(111)
3.3.2 热腐蚀	(74)	5.1.2 净化原理	(111)
3.3.3 熔盐腐蚀	(76)	5.1.3 净化剂	(111)
3.3.4 液态金属中的腐蚀	(77)	5.1.4 净化方法	(115)
3.4 防止高温腐蚀的途径	(78)	5.1.5 净化度检验	(116)
3.4.1 使用惰性气体或保护气氛	(78)	5.2 除锈与活化	(117)
3.4.2 选用耐高温腐蚀的金属材 料	(79)	5.2.1 酸洗法除锈	(118)
3.4.3 使用高温防护涂层	(79)	5.2.2 电解法除锈	(119)
3.5 高温氧化的评价与试验方法简 介	(81)	5.2.3 喷砂法除锈	(119)
参考文献	(83)	5.2.4 活化处理	(120)
第 4 章 疲劳	(84)	5.3 光饰与粗糙化	(121)
4.1 疲劳强度与寿命	(84)	5.3.1 光饰处理	(121)
4.1.1 疲劳现象	(84)	5.3.2 粗糙化处理	(123)
4.1.2 应力疲劳寿命 ($S-N$ 曲线)	(84)	参考文献	(124)
4.1.3 应变疲劳寿命 (Coffin-Ma- nson 关系)	(85)	第 6 章 电镀	(125)
4.1.4 平均应力对疲劳寿命的影 响	(86)	6.1 基本理论	(125)
4.1.5 疲劳累积损伤	(87)	6.1.1 电沉积过程	(125)
4.1.6 疲劳的多阶段过程	(87)	6.1.2 阴极析出与极化	(125)
4.2 循环形变及其特征	(88)	6.1.3 电结晶及其影响因素	(126)
4.2.1 循环形变的硬化和软化	(88)	6.1.4 共沉积	(129)
4.2.2 循环应力应变曲线	(89)	6.1.5 快速电沉积	(130)
4.2.3 驻留滑移带与循环应变局 部化	(91)	6.2 单金属电镀	(131)
4.2.4 循环形变的位错结构	(92)	6.2.1 镀镉、锡、铅	(131)
4.3 疲劳裂纹的萌生和扩展	(94)	6.2.2 镀锌、铜	(134)
4.3.1 裂纹萌生的优先地点	(94)	6.2.3 镀镍、铁、钴	(136)
4.3.2 裂纹扩展的第 I 和第 II 阶 段	(96)	6.2.4 镀铬	(138)
4.3.3 近门槛的疲劳裂纹扩展	(98)	6.2.5 镀贵金属及其他单金属	(139)
4.3.4 裂纹的闭合现象及其机制	(100)	6.3 合金电镀	(140)
4.3.5 疲劳短裂纹行为	(101)	6.3.1 防护性合金电镀	(141)
4.4 循环形变和疲劳中的表面效应	(102)	6.3.2 耐磨性合金电镀	(144)
		6.3.3 减摩性合金电镀	(146)
		6.3.4 钎焊性合金电镀	(148)
		6.3.5 装饰性合金电镀	(148)
		6.4 复合电镀	(151)
		6.4.1 防护性复合电镀	(152)
		6.4.2 耐磨性复合电镀	(153)
		6.4.3 减摩性复合电镀	(155)
		6.5 电刷镀	(157)

6.5.1 概述	(157)	第8章 表面转化	(210)
6.5.2 电刷镀装备	(158)	8.1 概述	(210)
6.5.3 电刷镀溶液	(159)	8.1.1 表面转化膜的分类	(210)
6.5.4 电刷镀工艺及参数控制	(162)	8.1.2 表面转化处理方法	(211)
6.5.5 电刷镀技术应用简介	(163)	8.1.3 表面转化膜的用途	(211)
6.6 流镀	(164)	8.2 氧化处理	(212)
6.6.1 概述	(164)	8.2.1 铝及铝合金氧化处理	(212)
6.6.2 流镀装备	(164)	8.2.2 钢铁氧化处理	(215)
6.6.3 流镀工艺与应用	(167)	8.2.3 其他金属的氧化处理	(216)
6.6.4 流镀非晶态合金	(172)	8.3 磷化处理	(217)
6.6.5 复合流镀	(173)	8.3.1 钢铁磷化	(218)
参考文献	(175)	8.3.2 锌材磷化	(220)
第7章 自催化沉积	(176)	8.3.3 铝材磷化	(220)
7.1 概述	(176)	8.4 钝化处理	(221)
7.1.1 自催化沉积条件	(176)	8.4.1 铜及铜合金钝化处理	(221)
7.1.2 自催化沉积特点	(177)	8.4.2 不锈钢钝化处理	(221)
7.1.3 自催化沉积应用范围	(177)	8.4.3 锌及锌合金钝化处理	(222)
7.2 自催化镀液	(178)	8.4.4 其他金属的钝化处理	(222)
7.2.1 主盐	(179)	8.5 着色处理	(223)
7.2.2 还原剂	(180)	8.5.1 不锈钢着色	(223)
7.2.3 络合剂	(181)	8.5.2 铜及铜合金着色	(223)
7.2.4 稳定剂	(182)	8.5.3 银及银合金着色	(224)
7.2.5 其他添加剂	(183)	8.5.4 锌及锌合金着色	(224)
7.3 催化表面与参数控制	(183)	参考文献	(225)
7.3.1 固体表面的催化活性	(183)	第9章 化学气相沉积	(226)
7.3.2 参数控制	(184)	9.1 引言	(226)
7.4 磷系自催化沉积	(185)	9.2 化学气相沉积	(226)
7.4.1 磷系自催化镀镍	(186)	9.2.1 化学气相沉积理论基础	(226)
7.4.2 磷系自催化镀钴	(189)	9.2.2 化学气相沉积方法及装置	(243)
7.4.3 磷系自催化镀贵金属	(190)	9.3 等离子体增强 CVD	(270)
7.4.4 磷系自催化镀其他金属	(191)	9.3.1 原理	(270)
7.4.5 磷系自催化镀多元合金	(191)	9.3.2 等离子体 CVD 沉积装置	(275)
7.5 硼系自催化沉积	(195)	9.3.3 等离子体 CVD 沉积方法	(278)
7.5.1 硼系自催化镀镍	(195)	9.4 激光 CVD	(280)
7.5.2 硼系自催化镀钴	(198)	9.4.1 原理	(280)
7.5.3 硼系自催化镀贵金属	(200)	9.4.2 LCVD 方法	(281)
7.5.4 硼系自催化镀多元合金	(200)	9.5 金属有机化合物 CVD	(281)
7.6 醛系及肼系自催化沉积	(201)	9.5.1 原理	(281)
7.6.1 醛系自催化沉积	(202)	9.5.2 金属有机化合物	(282)
7.6.2 肼系自催化沉积	(203)	9.5.3 MOCVD 沉积装置及方法	(283)
7.7 自催化复合沉积	(204)	9.5.4 安全性考虑	(286)
7.7.1 软质点系自催化复合镀层	(205)	9.6 CVD 硬质涂层和耐腐蚀涂层	(287)
7.7.2 硬质点系自催化复合镀层	(207)	9.6.1 CVD 硬质涂层	(287)
参考文献	(209)	9.6.2 抗摩擦磨损及耐腐蚀 CVD	

涂层	(290)	11.2.9 离子束溅射镀膜	(386)
9.6.3 CVD 硬质涂层的工具应用	(291)	11.3 溅射镀膜技术的应用实例	(389)
9.6.4 CVD 耐腐蚀涂层	(293)	11.3.1 纯金属与合金溅射镀膜的	
9.7 CVD 金刚石膜	(296)	应用实例——集成电路 (IC)	
9.7.1 金刚石膜化学气相沉积	(297)	芯片制造中的电极引线	(391)
9.7.2 金刚石膜 CVD 工艺	(298)	11.3.2 化合物溅射镀膜的应用实	
9.7.3 类金刚石膜 (DLC) 的化		例——硬质涂层溅射镀膜	
学气相沉积	(301)	工艺	(393)
9.7.4 金刚石和类金刚石膜的应		11.3.3 在幕墙玻璃产品上的应用	
用	(303)	实例	(397)
参考文献	(307)	11.3.4 在透明导电玻璃生产方面	
第 10 章 真空蒸发	(315)	的应用实例	(400)
10.1 概述	(315)	参考文献	(403)
10.2 真空蒸发的物理原理	(315)	第 12 章 离子镀	(406)
10.2.1 蒸发热力学	(315)	12.1 概述	(406)
10.2.2 蒸发动力学	(325)	12.2 离子镀的物理原理	(406)
10.2.3 薄膜厚度的均匀性	(328)	12.2.1 离子镀的成膜条件	(407)
10.3 真空镀膜工艺	(333)	12.2.2 离子镀的离化率	(407)
10.3.1 真空蒸发装置	(333)	12.2.3 粒子轰击对薄膜生长的	
10.3.2 蒸发源	(334)	影响	(408)
10.4 真空蒸发技术的应用	(345)	12.2.4 离子镀的特点	(409)
10.5 特殊蒸发技术	(346)	12.3 离子镀的类型及应用	(410)
10.5.1 多源蒸发	(346)	12.3.1 直流二极管型离子镀	(410)
10.5.2 瞬时蒸发	(346)	12.3.2 三极型离子镀	(411)
10.5.3 反应蒸发	(347)	12.3.3 射频离子镀	(413)
10.5.4 分子束外延	(348)	12.3.4 磁控溅射离子镀	(414)
参考文献	(356)	12.3.5 反应离子镀	(414)
第 11 章 溅射技术	(357)	12.3.6 空心阴极放电离子镀	(421)
11.1 溅射技术基础	(357)	12.3.7 多弧离子镀	(426)
11.1.1 溅射	(357)	12.3.8 离子束辅助沉积	(431)
11.1.2 溅射原理	(357)	12.3.9 离化团束沉积	(437)
11.1.3 溅射系数	(358)	参考文献	(442)
11.1.4 溅射产物和溅射时靶表		第 13 章 离子注入	(444)
面的变化	(363)	13.1 科学意义和应用前景	(444)
11.2 溅射镀膜工艺与装备	(368)	13.2 离子注入的特点和离子注入机	(445)
11.2.1 直流辉光放电	(369)	13.2.1 离子注入原理	(445)
11.2.2 射频辉光放电	(371)	13.2.2 离子注入的特点	(446)
11.2.3 等离子体电位、浮动电		13.2.3 离子注入系统和离子注	
位和偏压	(371)	入机	(446)
11.2.4 从二极溅射到磁控溅射	(372)	13.3 射程和能量淀积	(452)
11.2.5 磁控溅射技术	(376)	13.3.1 阻止本领和能量损失	(452)
11.2.6 磁控溅射的工作原理	(378)	13.3.2 离子射程	(453)
11.2.7 各种磁控溅射源	(380)	13.3.3 入射离子在固体中的分布	(453)
11.2.8 反应溅射镀膜	(385)	13.3.4 能量淀积和辐射损伤	(454)

13.4	溅射理论及其对保留注入量 和注入原子分布的影响	(455)	13.11.1	硅化物的特性	(489)
13.4.1	离子溅射	(455)	13.11.2	硅化物生长动力学	(489)
13.4.2	溅射对杂质分布的影响	(456)	13.11.3	离子束混合硅化物的合 成	(490)
13.4.3	饱和保留量的计算	(456)	13.11.4	离子注入合成硅化物	(490)
13.5	辐射相的形成	(457)	参考文献		(491)
13.5.1	空位、间隙原子和无序相的 形成	(457)	第14章 电子束表面改性		(493)
13.5.2	激烈的热峰碰撞与淬火相的 形成	(458)	14.1	电子束表面改性工艺	(493)
13.6	离子注入大规模集成电路微 细加工技术	(459)	14.1.1	电子束表面淬火	(493)
13.6.1	大规模集成电路与离子束微 细加工技术的发展	(459)	14.1.2	电子束表面合金化	(496)
13.6.2	离子注入半导体集成电路和 器件	(460)	14.1.3	电子束表面熔凝处理	(501)
13.6.3	离子注入浅结工艺	(462)	14.1.4	电子束表面熔覆	(504)
13.7	金属离子注入	(463)	14.2	电子束表面改性装置	(505)
13.7.1	离子注入摩擦学特性	(463)	14.2.1	电子枪	(505)
13.7.2	离子注入强化机理	(464)	14.2.2	高压油箱	(506)
13.7.3	离子注入强化规则	(470)	14.2.3	聚焦系统	(508)
13.7.4	离子注入抗腐蚀特性	(471)	14.2.4	扫描系统	(508)
13.7.5	离子注入抗氧化研究	(473)	14.2.5	低真空工作室	(509)
13.7.6	离子注入抗疲劳特性	(474)	14.2.6	真空系统	(509)
13.7.7	离子注入的工业应用	(476)	14.2.7	监控系统	(510)
13.8	离子注入陶瓷	(477)	参考文献		(510)
13.8.1	离子注入陶瓷机械性能的 变化	(478)	第15章 激光束表面改性		(511)
13.8.2	离子注入增强韧性	(479)	15.1	激光束表面改性的原理	(511)
13.8.3	离子注入陶瓷的摩擦学 特性	(479)	15.1.1	激光及其特性	(511)
13.9	离子注入聚合物	(480)	15.1.2	激光束与材料表面的交互 作用	(513)
13.9.1	离子辐照分子交联和降解	(481)	15.2	激光表面改性设备	(519)
13.9.2	离子辐照下聚合物电特性 变化	(482)	15.2.1	激光器	(519)
13.9.3	离子注入聚合物表面硬化	(483)	15.2.2	激光器的外围装置	(521)
13.9.4	离子注入PN结的制备	(485)	15.2.3	机械系统	(522)
13.10	离子注入SOI技术	(486)	15.2.4	辅助系统	(522)
13.10.1	SIMOX的制备	(486)	15.3	激光表面改性的种类和特点	(523)
13.10.2	SIMNI的制备	(487)	15.3.1	激光表面改性的分类	(523)
13.10.3	多重注入	(488)	15.3.2	激光表面改性的特点	(523)
13.10.4	低能注入	(488)	15.4	激光表面相变硬化	(524)
13.10.5	SOI的应用	(488)	15.4.1	激光相变硬化的工艺基础	(524)
13.11	离子注入硅化物的合成	(488)	15.4.2	激光相变硬化的组织转变 特点	(525)
			15.4.3	表面预处理	(526)
			15.4.4	激光扫描方式	(528)
			15.4.5	激光相变硬化的工艺参数 选择	(528)
			15.4.6	常用钢铁材料的激光相变 硬化	(529)

15.4.7 激光相变硬化层的性能	(529)	17.1 化学热处理概论	(562)
15.4.8 应用	(531)	17.1.1 化学热处理的分类与特点	(562)
15.5 激光表面熔凝处理	(533)	17.1.2 化学热处理的基本过程	(563)
15.5.1 激光熔凝工艺	(533)	17.1.3 化学热处理过程的控制及 加速	(564)
15.5.2 激光熔凝时的加热和冷却	(534)	17.2 渗碳	(565)
15.5.3 激光熔凝组织	(534)	17.2.1 渗碳的目的及应用范围	(565)
15.5.4 几种激光熔凝层的硬度及 耐磨性	(535)	17.2.2 渗碳基本原理	(566)
15.6 激光表面合金化	(536)	17.2.3 渗碳方法	(567)
15.6.1 激光合金化工艺	(537)	17.2.4 渗碳用钢及渗碳后热处理	(576)
15.6.2 显微组织特征	(538)	17.2.5 渗碳件质量检验及常见缺 陷的防止措施	(578)
15.6.3 硬度和耐磨性及应用	(538)	17.3 碳氮共渗	(579)
15.7 激光表面熔覆	(539)	17.3.1 碳氮共渗的特点	(579)
15.7.1 熔覆工艺	(539)	17.3.2 气体碳氮共渗	(580)
15.7.2 激光熔覆显微组织	(540)	17.3.3 液体碳氮共渗	(580)
15.7.3 激光熔覆层的性能	(540)	17.3.4 碳氮共渗用钢及渗后热处 理	(581)
15.8 激光冲击硬化	(541)	17.3.5 碳氮共渗层的组织与性能	(582)
15.9 激光表面改性技术展望	(541)	17.3.6 碳氮共渗层的质量检查及 常见缺陷与预防	(583)
参考文献	(542)	17.4 渗氮	(583)
第 16 章 表面热处理	(544)	17.4.1 渗氮的特点与渗氮常用钢 种	(583)
16.1 表面热处理的基本原理	(544)	17.4.2 渗氮工艺	(584)
16.1.1 表面热处理的特点与分类	(544)	17.4.3 渗氮层的组织与性能	(587)
16.1.2 快速加热的相变特点	(544)	17.4.4 渗氮的常见缺陷与防止措 施	(588)
16.1.3 表面淬火的组织	(545)	17.5 氮碳共渗	(588)
16.1.4 表面淬火硬化层厚度的测 定	(545)	17.5.1 氮碳共渗及其主要特点	(588)
16.1.5 零件表面淬火后的性能	(545)	17.5.2 氮碳共渗工艺	(588)
16.2 感应加热淬火	(546)	17.5.3 氮碳共渗后的性能特点	(589)
16.2.1 感应加热的基本原理	(546)	17.6 渗金属及渗硼	(589)
16.2.2 感应加热淬火工艺	(547)	17.6.1 渗铝	(589)
16.2.3 感应器	(556)	17.6.2 渗铬	(591)
16.3 脉冲表面淬火	(556)	17.6.3 渗硅	(592)
16.3.1 超高频脉冲感应加热淬火	(556)	17.6.4 渗钒渗铌渗钛	(592)
16.3.2 大功率脉冲感应加热淬火	(556)	17.6.5 渗硼	(593)
16.4 火焰淬火	(557)	17.6.6 渗硫	(595)
16.4.1 火焰淬火特点	(557)	17.7 共渗、复合渗与复合处理	(596)
16.4.2 火焰淬火前的准备工作	(557)	17.7.1 概述	(596)
16.4.3 火焰淬火工艺	(558)	17.7.2 含铝共渗、复合渗与复合 处理	(596)
16.5 电解液加热表面淬火	(558)	17.7.3 含铬共渗与复合渗	(598)
16.6 高频感应与电阻加热相结合的 表面淬火工艺	(559)		
16.7 电接触加热表面淬火	(560)		
参考文献	(560)		
第 17 章 化学热处理	(562)		

17.7.4	含硼共渗与复合渗	(599)	18.4.8	Zn-5% Al-Re 合金镀层钢板的用途	(648)
17.7.5	含硫共渗	(602)	18.5	热镀锌	(649)
17.7.6	碳氮硼三元共渗和氧硫碳氮硼五元共渗	(604)	18.5.1	铁-铅合金状态图及镀铅层的形成	(649)
17.7.7	氮碳共渗+氧化抛光复合处理	(605)	18.5.2	热镀锌锡合金钢板的生产工艺	(650)
参考文献	.....	(606)	18.5.3	镀铅层的性能	(652)
第18章 热浸镀	.....	(607)	18.5.4	用途	(653)
18.1	概述	(607)	18.6	热镀锌	(653)
18.2	热镀锌	(608)	18.6.1	铁-锡合金状态图及工艺因素对镀锡层的影响	(653)
18.2.1	铁与熔融锌的反应	(608)	18.6.2	钢材热镀锌生产工艺	(654)
18.2.2	钢基体及锌液化学成分对镀锌层特性的影响	(610)	18.6.3	马口铁生产	(657)
18.2.3	镀锌钢板	(611)	18.6.4	镀锡层的特性	(657)
18.2.4	镀锌钢丝	(615)	18.6.5	用途	(658)
18.2.5	镀锌钢管	(618)	参考文献	.....	(659)
18.2.6	玛钢件热镀锌	(619)	第19章 热喷涂	.....	(661)
18.2.7	锌锅及其加热热源	(620)	19.1	概述	(661)
18.2.8	硅镇静钢热镀锌	(623)	19.1.1	简介	(661)
18.2.9	镀锌钢材的贮运	(624)	19.1.2	热喷涂的分类	(661)
18.3	热镀锌	(625)	19.1.3	热喷涂的特点	(662)
18.3.1	铁与熔融铝的反应	(625)	19.2	热喷涂的原理、工艺及设备	(662)
18.3.2	钢基及铝液的化学成分和镀铝工艺参数对镀层特性的影响	(627)	19.2.1	电弧喷涂	(662)
18.3.3	镀铝钢板	(628)	19.2.2	等离子喷涂	(663)
18.3.4	镀铝钢板的发展	(630)	19.2.3	火焰喷涂	(665)
18.3.5	镀铝钢丝	(634)	19.2.4	爆炸喷涂	(667)
18.3.6	镀铝钢管	(636)	19.2.5	超音速火焰喷涂	(668)
18.3.7	存在问题及对策	(639)	19.2.6	激光喷涂	(669)
18.3.8	镀铝钢材的性能和用途	(639)	19.3	喷焊	(670)
18.4	热镀锌铝合金	(642)	19.3.1	喷焊的原理与特点	(670)
18.4.1	锌-铝合金状态图	(642)	19.3.2	喷焊设备	(670)
18.4.2	镀层成分及第三组分	(643)	19.4	喷涂方法的选用及工艺操作过程中的注意事项	(672)
18.4.3	55% Al-Zn 合金镀层钢板生产	(644)	19.5	喷涂前对零件基体表面的预处理	(673)
18.4.4	55% Al-Zn 镀层钢板的性能	(644)	19.5.1	喷砂处理	(673)
18.4.5	55% Al-Zn 镀层钢板的用途	(647)	19.5.2	机加工	(673)
18.4.6	Zn-5% Al-Re 合金镀层钢板的生产	(647)	19.6	零件喷涂后的处理	(674)
18.4.7	Zn-5% Al-Re 合金镀层钢板的性能	(648)	19.6.1	手工打磨	(674)
			19.6.2	车床切削	(674)
			19.6.3	涂层的封孔处理	(674)
			19.6.4	涂层的高温扩散处理	(676)
			19.6.5	热等静压处理	(676)

19.6.6	激光束处理	(676)	20.3.5	奥氏体钢堆焊金属	(718)
19.7	涂层材料及选择	(676)	20.3.6	合金铸铁堆焊金属	(722)
19.7.1	涂层材料的分类	(676)	20.3.7	镍基合金堆焊金属	(724)
19.7.2	涂层材料的供应及特点	(680)	20.3.8	钴基合金堆焊金属	(727)
19.8	涂层的性能及测定	(682)	20.3.9	铜基合金堆焊金属	(728)
19.8.1	影响涂层性能的因素	(682)	20.3.10	碳化物复合材料堆焊金属	(731)
19.8.2	涂层的微观分析	(682)	20.3.11	堆焊件的基材及其影响	(734)
19.8.3	涂层机械性能的测定	(684)	20.3.12	堆焊合金的选择及应用实例	(735)
19.8.4	涂层的热性能测定	(686)		参考文献	(737)
19.8.5	耐腐蚀试验	(686)	第21章 溶胶-凝胶法		(739)
19.8.6	涂层的无损检验	(687)	21.1	溶胶-凝胶法的基本概念	(739)
19.9	热喷涂的应用	(687)	21.1.1	引言	(739)
19.9.1	航空工业上的应用	(688)	21.1.2	溶胶和凝胶化学	(739)
19.9.2	机械工业防腐工程的应用	(688)	21.1.3	干燥	(741)
19.9.3	机械工业耐磨损的应用	(689)	21.1.4	煅烧与烧结	(742)
19.9.4	用热喷涂的方法制造新材料	(690)	21.1.5	涂覆方法	(742)
19.9.5	生物医学工程的应用	(690)	21.1.6	溶胶-凝胶工艺的应用	(744)
19.10	热喷涂设备与人身的安全防护	(691)	21.2	金属基材涂层	(747)
19.10.1	设备的防护	(691)	21.2.1	金属基材涂层的内容及意义	(747)
19.10.2	人身的安全防护	(692)	21.2.2	单组分氧化物涂层	(747)
	参考文献	(693)	21.2.3	双组分氧化物涂层	(757)
第20章 堆焊		(694)	21.2.4	多组分氧化物薄膜	(758)
20.1	概述	(694)	21.3	非金属基材薄膜	(760)
20.1.1	堆焊的定义和类型	(694)	21.3.1	非金属基材薄膜的内容及意义	(760)
20.1.2	堆焊在生产中的应用	(694)	21.3.2	单组分氧化物薄膜	(761)
20.1.3	堆焊中的几个冶金问题	(695)	21.3.3	双组分氧化物薄膜	(767)
20.2	几种常用的堆焊方法	(696)	21.3.4	多组分氧化物薄膜	(769)
20.2.1	火焰堆焊	(696)	21.4	碳纤维的包覆	(770)
20.2.2	手弧堆焊	(697)	21.4.1	二氧化硅包覆碳纤维	(770)
20.2.3	钨极氩弧堆焊(TIG堆焊)	(699)	21.4.2	氧化铝包覆碳纤维	(771)
20.2.4	熔化极气体保护电弧堆焊(MIG堆焊)	(699)	21.4.3	SiO ₂ /ZrO ₂ 包覆玻璃纤维	(772)
20.2.5	埋弧堆焊	(702)	21.5	粉体与沉淀的包覆	(772)
20.2.6	等离子弧堆焊	(704)	21.5.1	粉体与沉淀包覆的内容及意义	(772)
20.2.7	电渣堆焊	(707)	21.5.2	粉体的包覆	(772)
20.2.8	堆焊方法选择	(708)		参考文献	(781)
20.3	金属材料堆焊	(711)	第22章 高分子涂层		(785)
20.3.1	堆焊合金的使用性	(711)	22.1	概述	(785)
20.3.2	堆焊合金的分类	(711)	22.2	高分子涂装技术	(785)
20.3.3	珠光体钢堆焊金属	(713)	22.2.1	静电喷涂	(786)
20.3.4	马氏体钢堆焊金属	(714)			

22.2.2	电泳涂装	(793)	23.2.4	显微硬度测量实验条件	(862)
22.2.3	粉末涂装	(801)	23.2.5	显微硬度的误差分析	(865)
22.3	特种高分子涂层	(829)	23.3	表面粗糙度检测	(865)
22.3.1	耐高温涂料	(829)	23.3.1	概述	(865)
22.3.2	烧蚀涂料	(830)	23.3.2	粗糙度的取样长度与评定 长度	(867)
22.3.3	伪装涂料	(830)	23.3.3	评定基准及表征参数	(867)
22.3.4	示温涂料	(831)	23.3.4	粗糙度的标注方法	(869)
22.3.5	“隐身”涂料	(832)	23.3.5	检测方法	(869)
22.3.6	防污涂料	(834)	23.3.6	检测中的注意事项	(873)
	参考文献	(837)	23.4	附着力测量	(873)
第 23 章	镀层质量检验与测试	(839)	23.4.1	镀层的附着力	(873)
23.1	厚度测量	(839)	23.4.2	附着力的测量方法	(875)
23.1.1	概述	(839)	23.5	应力测量	(885)
23.1.2	膜厚测量方法	(840)	23.5.1	内应力与热应力	(885)
23.2	硬度测量	(856)	23.5.2	内应力的测量方法	(885)
23.2.1	概述	(856)		参考文献	(891)
23.2.2	显微硬度测量原理	(858)			
23.2.3	显微硬度测量仪器	(860)			

第 1 章 摩擦与磨损

1.1 概述

摩擦与磨损 (Friction and Wear) 是一种普遍存在的现象, 凡两个或两个以上物体相互接触并相对运动的表面都会发生摩擦与磨损。

摩擦与磨损又是材料失效的三种主要形式 (磨损、腐蚀和断裂) 之一。据不完全统计, 能源的 1/3 到 1/2 消耗于摩擦与磨损; 约 80% 的机器零件失效是由于摩擦与磨损引起的^[1]。

摩擦与磨损之间存在密切的内在联系。摩擦是产生磨损的原因, 磨损是摩擦的结果。

摩擦与磨损对人类的生产和生活有着深远的影响。原始人类的“摩擦取火”可能是人类对摩擦的最早应用。摩擦取火第一次使人类支配了一种自然力, 从而最终把人类和动物分开。我国古代车的发明则是由滚动摩擦代替滑动摩擦而减少摩擦磨损的光辉范例。此外摩擦轮、皮带轮传动, 各种车辆制动器等都是利用摩擦为人类服务的典型实例。然而摩擦与磨损给人类社会造成的损失也是十分惊人的。例如美国 1981 年公布的数字, 每年由于磨损造成的损失高达 1000 亿美元, 其中材料消耗约为 200 亿美元, 相当于材料年产量的 7%。前苏联由于磨损造成的损失, 每年约为 120~140 亿卢布。据前联邦德国技术研究联邦部 (BMFT) 调查, 前联邦德国 1974 年钢铁工业的维修费约 30 亿马克, 其中直接由于磨损造成的损失约占 47%, 停机修理所造成的损失与磨损直接造成的损失相当。

我国关于摩擦磨损所造成的损失尚缺乏全面的统计数字。据电力、建材、冶金矿山、煤炭和农机五个工业部门的不完全统计, 每年仅备件消耗的钢材就在 150 万吨以上。据机械工业部 1974 年到 1975 年的调查报告, 仅汽车备件消耗的钢材就达 23 万吨, 其中 2/3 用于维修, 大部分是由于磨损所致。煤炭工业用的刮板输送机中部槽的磨损所造成的损失每年即高达 1 亿元。

摩擦与磨损不仅消耗大量能源和材料, 而且由于磨损更换零部件时的停工、维修以及由于磨损使产品质量降低造成的设备及人身事故等严重地影响了工业技术向现代化自动化发展。所以对摩擦与磨损的研究, 特别是在工业发达国家, 越来越引起人们的重视。

1966 年约斯特 (Jost) 等人受英国科学研究教育部的委托, 提出的一项调查报告中指出, 如果充分运用摩擦学知识, 可使英国工业一年内节约 5 亿多英镑, 相当于当时国民经济总收入的 1%。美国机械工程师学会 (ASME) 和美国能源发展局 (ERDA) 提出的一项摩擦和磨损发展计划, 可使国家每年节省 160 亿美元, 约为能源消耗的 11%。1979 年约斯特来华访问时曾提出, 如果应用摩擦学知识可使我国当时由于摩擦磨损所造成的损失减少 150 亿美元。

摩擦磨损是研究材料相对运动和相互作用的表面科学技术, 涉及的影响因素很多, 是一门多学科、跨学科的边缘科学。它主要涉及材料学、冶金学、机械学、固体力学、表面物理、表面化学等诸多学科。同时摩擦磨损过程又极其复杂, 在摩擦学系统中任一外部因素 (如载荷、速度、运动形式、持续时间、环境温度、介质、润滑条件、接触面状况等) 和内部因素

(如材料成分, 组织结构, 表面物理、化学、力学性能等) 稍有变化, 都可能引起材料摩擦磨损性能的变化。

由于摩擦磨损是在相互接触和相对运动的固体表面进行的。因此接触体表面及其性能对材料的摩擦磨损性能十分重要, 近些年来各种表面技术迅速发展。大量研究结果表明, 摩擦副材料表面采用某种或某些表面技术处理后, 可使材料的摩擦磨损性能有显著的改善。由此不难看出表面工程与摩擦磨损之间的密切关系。

1.2 摩擦

1.2.1 摩擦的定义和分类

两个相互接触的物体在外力作用下产生相对运动或具有相对运动趋势时, 在接触面间产生的切向运动阻力称为摩擦力, 这种现象称为摩擦 (Friction)^[2]。这种摩擦与两物体接触部分表面的相互作用有关, 而与物体的内部状态无关, 所以又称为外摩擦。阻碍同一物体 (如液体和气体) 各部分间相对移动的摩擦称为内摩擦。

摩擦可以按不同的方法进行分类, 主要有如下数种。

1.2.1.1 按摩擦副的运动状态分类

按摩擦副的运动状态可分为:

(1) 静摩擦 一物体沿另一物体表面有相对运动趋势时产生的摩擦称为静摩擦 (Static Friction)。这种摩擦力称为静摩擦力。静摩擦力随作用于物体上的外力而变化, 当外力达到能克服最大静摩擦力时, 物体才开始宏观运动。

(2) 动摩擦 一物体沿另一物体表面相对运动时产生的摩擦称为动摩擦 (Dynamic Friction)。阻碍物体运动的切向力称为动摩擦力。动摩擦力通常小于静摩擦力。

1.2.1.2 按摩擦副的运动形式分类

按摩擦副的运动形式可分为:

(1) 滑动摩擦 物体接触表面相对滑动时产生的摩擦称为滑动摩擦 (Sliding Friction)。

(2) 滚动摩擦 在力矩作用下, 物体沿接触表面滚动时产生的摩擦称为滚动摩擦 (Rolling Friction)。

1.2.1.3 按摩擦副表面的润滑状况分类

按摩擦副表面的润滑状况可分为:

(1) 纯净摩擦 摩擦表面没有任何吸附膜或化合物时产生的摩擦称为纯净摩擦 (Pure Friction)。这种摩擦只有在接触面产生塑性变形使表面膜破坏或在真空中摩擦时才能发生。

(2) 干摩擦 (无润滑摩擦) 在大气条件下, 摩擦表面间名义上没有润滑剂存在时产生的摩擦称为干摩擦 (Dry Friction) 或无润滑摩擦。

(3) 流体 (润滑) 摩擦 相对运动的两物体表面完全被流体隔开时产生的摩擦称为流体 (润滑) 摩擦 (Hydrolubricant Friction)。当流体为液体时称为液体摩擦; 流体为气体时称为气体摩擦。流体摩擦时摩擦发生在流体内部。

(4) 边界 (润滑) 摩擦 摩擦表面间存在一层极薄的润滑膜时产生的摩擦称为边界 (润滑) 摩擦 (Boundary Lubricant Friction)。润滑膜的厚度约为 $0.01\mu\text{m}$ 或更薄。

(5) 混合摩擦 混合摩擦 (Mixed Friction) 一般是指过渡状态的摩擦, 如半干摩擦、半流体摩擦等。半干摩擦是指同时存在边界摩擦和干摩擦的情况; 半流体摩擦是指同时存在流体摩擦和边界摩擦的情况。

另外, 许多机器装置中的摩擦副处于高温、高速、低温、真空、辐射等特殊环境条件下工作, 因此又可将摩擦分为正常工况条件下的摩擦和特殊工况条件下的摩擦。此外也有人根据产生摩擦的程度, 将摩擦分为轻微摩擦与严重摩擦等。