

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

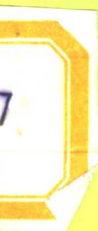
992096

表面强化技术基础

BIAOMIAN QIANGHUA JISHU JICHU

张黔 主编

华中理工大学出版社



(鄂)新登字第 10 号

图书在版编目(CIP)数据

表面强化技术基础/张黔主编
武汉:华中理工大学出版社, 1996. 11
ISBN 7-5609-1446-2

I. 表…

II. ①张… ②丁…

III. 金属材料-表面强化技术-高等学校-教材

IV. TG14

表面强化技术基础

张黔主编

责任编辑 漆文琰

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编:430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社照排室排版

第二炮兵指挥学院印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:7.5 字数:183 000

1996年11月第1版 1996年11月第1次印刷

印数:1-1 000

ISBN 7-5609-1446-2/TG·44

定价:8.00元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书介绍表面工程学科中各种强化技术的基本概念和主要用途,内容包括:金属表面及其制备、材料磨损和腐蚀形式及防护措施、化学热处理、表面薄膜强化、表面冶金强化、表面形变强化和特殊表面硬化方法、高能量密度表面强化等。书中还介绍了电力部门常用的一些防磨抗蚀措施。

本书可作为大专院校金属材料类专业的选修课教材,也可供有关部门技术人员参考。

EA:62107

前 言

“表面强化技术基础”一书是为深化和拓宽金属材料专业本科学生专业知识面而编写的，曾作为“表面工程”选修课（20学时）的教材进行过讲授。

金属表面工程学科是涉及范围较广的学科，总的目的是在保证材料整体强度的基础上赋予材料表面各种所需的性能。本书以赋予材料表面耐磨抗蚀性能为重点，介绍目前国内外常采用的各种表面处理手段的基本原理及其在工业上的应用。

表面工程学为解决材料的磨损和腐蚀提供了一种科学工具，对于提高产品质量、降低成本、节约材料和能源具有重大的意义。表面工程学的迅速发展，推动了近代机械产品的设计向着从材料断裂、磨损、腐蚀三方面综合考虑的方向发展；各种表面改性新工艺的出现以及由此所带来的巨大经济效益，已引起广大技术人员的极大兴趣。

本书在编写安排上，力图在较小的篇幅内阐明有关表面工程学的常用术语和基本概念；在内容安排上不在于对金属表面工程学科的各个方向进行深入的探讨，而力求使读者在较短的时间内，对这一领域具有一个整体的认识，为进一步的学习和研究打下基础。

本书的学习是在学过金属学、金属材料、金属腐蚀、金属力学性能、金属焊接等课程的基础上进行的，内容上具有较大的“压缩性”；采用本书作为教学参考书时，教师可根据教学要求增添有关的内容。

本书作者为武汉水利电力大学金属材料教研室的教师，具体的分工为：张黔编写绪论、第一、三、四、六章；丁辉编写第二、

五、七、八章。全书由张黔统一编排，由华中理工大学金属材料教研室崔崑教授主审。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者批评指正。

目 录

绪论	(1)
第一章 金属表面	(4)
1.1 金属表面的分类	(4)
1.2 金属表面的特性	(6)
1.2.1 金属的表面形貌	(6)
1.2.2 机械加工后金属的表面组织	(7)
1.2.3 金属表面晶体结构	(7)
1.3 表面准备	(12)
1.3.1 磨光(装饰磨)	(12)
1.3.2 机械抛光	(15)
1.3.3 喷砂与喷丸	(16)
1.3.4 成批光饰	(17)
1.3.5 除油	(18)
1.3.6 浸蚀	(21)
1.3.7 电解抛光和化学抛光	(27)
第二章 材料磨损和腐蚀形式及防护措施	(28)
2.1 磨损形式	(28)
2.1.1 磨料磨损	(29)
2.1.2 冲蚀(冲刷)磨损	(31)
2.1.3 粘着磨损	(35)
2.1.4 表面疲劳磨损	(38)
2.2 磨损失效分析	(41)
2.2.1 分析步骤	(41)
2.2.2 应用举例	(42)

2.3	耐磨表面的选择	(44)
2.4	腐蚀失效	(50)
2.4.1	腐蚀的类型及形式	(50)
2.4.2	电化学腐蚀过程	(53)
2.4.3	影响腐蚀的因素	(55)
2.4.4	耐腐蚀材料	(59)
2.4.5	金属零构件腐蚀失效的一些防范措施	(63)
2.4.6	腐蚀失效实例	(67)
第三章	表面热处理强化	(69)
3.1	化学热处理强化(表面渗、热渗镀)	(69)
3.1.1	常用的化学热处理方法	(69)
3.1.2	提高耐磨性的表面渗	(77)
3.1.3	以减摩为目的的表面渗	(85)
3.1.4	提高抗蚀性的化学热处理	(88)
3.1.5	渗铝提高金属抗高温氧化的能力	(98)
3.2	多元共渗简介	(102)
3.2.1	铬铝共渗	(102)
3.2.2	铝硅共渗	(104)
3.2.3	铬硅共渗	(105)
3.2.4	铬铝硅共渗	(106)
3.3	等离子体化学热处理	(106)
3.3.1	概述	(106)
3.3.2	辉光放电	(107)
3.3.3	等离子体渗氮原理及渗层组织	(108)
3.3.4	离子渗碳	(110)
3.3.5	应用实例	(111)
第四章	表面薄膜强化	(116)
4.1	化学和电化学沉积法	(116)
4.1.1	电镀	(116)

4.1.2	化学镀	(121)
4.1.3	复合镀	(123)
4.1.4	刷镀(无槽镀)	(124)
4.2	转化处理(化成处理)	(126)
4.2.1	铝的阳极氧化	(126)
4.2.2	钢铁的磷化处理	(129)
4.2.3	钢件的氧化(发蓝、发黑)	(133)
4.3	物理气相沉积(PVD)	(135)
4.3.1	真空蒸镀	(135)
4.3.2	溅射镀膜	(136)
4.3.3	离子镀	(137)
4.3.4	PVD在工业中的应用	(139)
4.4	离子注入	(140)
4.5	化学气相沉积(CVD)	(142)
第五章 表面冶金强化		(147)
5.1	热喷涂	(147)
5.1.1	火焰喷涂法	(148)
5.1.2	电弧法	(151)
5.2	喷焊堆焊方法	(153)
5.2.1	电弧焊	(153)
5.2.2	气体焊和复合焊	(156)
5.3	焊覆材料	(157)
5.3.1	自熔性合金	(157)
5.3.2	复合粉末	(161)
5.3.3	陶瓷	(162)
第六章 表面形变强化和特殊表面硬化		(166)
6.1	表面形变强化	(166)
6.2	特殊表面硬化	(168)
6.2.1	硬面粘结	(168)

6.2.2	耐磨损瓷面	(169)
6.2.3	电火花熔渗	(169)
6.2.4	可熔化的碳化物织物	(170)
6.2.5	离心铸造耐磨表面层	(171)
6.2.6	装磨损套和磨损板	(171)
6.2.7	铸渗和铸镶复合技术	(172)
第七章 高能量密度表面强化		(174)
7.1	激光表面强化	(174)
7.1.1	激光相变硬化	(175)
7.1.2	激光熔化-结晶处理	(177)
7.1.3	激光熔化-非晶态处理	(178)
7.1.4	激光表面合金化及涂敷	(178)
7.2	电子束表面强化	(180)
第八章 表面强化技术在电力工业中的应用		(183)
8.1	表面强化技术在锅炉受热面管道等部件上 的应用	(183)
8.1.1	用于锅炉管道的喷涂防护技术	(183)
8.1.2	锅炉管道的热浸渗铝技术	(186)
8.1.3	锅炉燃烧器的表面防磨	(187)
8.2	表面技术在电站风机防磨中的应用	(188)
8.2.1	引风机叶片的耐磨合金堆焊	(188)
8.2.2	排粉风机叶片等离子喷涂金属陶瓷耐 磨涂层	(190)
8.3	制粉系统金属零部件的表面强化技术	(200)
8.3.1	铸渗的应用	(201)
8.3.2	耐磨合金堆焊	(201)
8.3.3	高锰钢表面爆炸硬化	(202)
8.4	轴、辊类件的表面强化技术	(203)
8.4.1	轴、辊类部件喷涂防磨补修工艺导则	(203)

8.4.2	轴套喷焊防磨工艺导则	(207)
8.5	火电厂其他部件的表面强化技术	(210)
8.5.1	阀门部件	(210)
8.5.2	汽机叶片	(219)
8.5.3	输变线路金属构件	(222)
8.6	表面强化技术在水电站金属部件上的应用	(222)
8.6.1	聚合物耐磨蚀保护层	(223)
8.6.2	长效防蚀复合涂层	(224)
参考文献		(226)

绪 论

表面工程学是近年来引入的新术语。它涉及到一个多学科的领域，主要致力于改变工程材料的表面性能以满足生产技术发展的要求。

机器零件失效多数发生于表面，或者是先从表面开始。各类磨损，腐蚀引起的失效首先发生于表面，而不是整体材料发生失效。因此，不断地改进表面性能是现今解决抗磨和耐蚀问题的流行趋势。表面强化技术是在保证材料整体强度的基础上赋予材料表面各种所需的性能，如高的硬度、耐磨性、耐蚀性、耐高温氧化性，耐疲劳性能以及磁学、光学性能等。这对于发挥材料潜力、提高零件使用性能，延长使用寿命起着重要的作用。

在国民经济和国防建设中，由于磨损和腐蚀造成的能源与材料的消耗是十分惊人的。如美国每年由于摩擦磨损和腐蚀造成的损失在1 000亿美元以上；我国据有关部门的不完全统计，每年由于摩擦失效损失达400亿元，腐蚀方面的损失也将近200亿元。火力发电厂磨煤粉设备每年消耗的易磨配件在20万吨以上，直接用于购耐磨件费用不少于5亿元。此外，材料的磨损与腐蚀也是影响近代机械产品的性能和质量，从而影响其竞争能力的重要问题。作为机械产品的设计原则，目前已从单纯的强度设计发展到针对材料断裂，磨损与腐蚀三大失效原因的综合设计。表面工程学为解决磨损，腐蚀等表面问题提供一种科学工具，和力学、传热学等其他应用科学一样重要。

材料的磨损与腐蚀是相当复杂的边缘学科，它受到一系列因素的影响。解决的途径应从分析失效的原因出发，从调整或改变工况条件、改善构件设计，合理选择材料，改进工艺措施和进行

表面防护等各个方面，由整个系统角度去确定解决方案。总的原则是从实际出发且经济有效，为此需要通过近代研究方法，弄清系统中各因素的相关关系，即弄清楚磨损与腐蚀的基本规律和失效机理，以便正确指导这方面的工程实践。

金属材料表面强化具有悠久的历史。最初的表面强化方法之一是将硬石头嵌于木犁尖部，以抗御土壤的磨粒磨损。我国近年来出土的秦兵马俑佩带的长箭，箭簇等，向人们展示了在当时钢件已经采用渗碳、淬火等工艺，并掌握了精湛的表面保护处理技术，因而保持数千年不锈。令人惊异的是，秦俑二号坑中出土的青铜剑，表面附着一层约 $12\mu\text{m}$ 的氧化膜，其中铬含量为 2%。而采用铬盐氧化处理的方法，只是近代才出现的工艺。在本世纪初，随着硬质焊条、火焰硬化、热喷涂、气体渗碳、氮化、硬沉积电镀、冷激铸造和许多其他工艺的发展，表面工程得到相当的发展。近二三十年来，由于许多科学技术领域，如激光、电子束，CVD（化学气相沉积）PVD（物理气相沉积）等渗透到表面强化技术方面，使这门学科极为活跃，成为材料科学中发展最快的部分。美国商业界对 21 世纪占优势的关键技术提出有 7 项，其中一项就是表面技术如下表所示。

表 1 21 世纪的关键技术

• 新材料	• 电子学
• 自动化和传感技术	
• 生物工程学	• 计算机技术
• 医药技术	• 表面技术

金属表面强化技术分类很多，按物理化学过程的分类如下：

- (1) 形变强化，如喷丸、滚压，内孔挤压等。
- (2) 表面硬化（表面淬火），如高频淬火，火焰淬火等。
- (3) 化学热处理强化（扩散法），如渗碳、碳氮共渗、氮化、离

子氮化、渗硼、渗硅、渗金属、渗硫等工艺。

(4) 薄膜强化，如电镀、磷化、氧化、化学气相沉积、物理气相沉积、离子注入等。

(5) 表面冶金强化，如喷涂、喷焊、激光处理等。

以上内容在金属腐蚀、金属热处理、金属材料学、金属力学性能，金属焊接等课程均有所涉及。本课程的目的在于深化和开拓知识面，因此尽量做到与已讲授的内容不致重复，重点在于材料的耐磨和抗蚀。通过学习，了解一些解决磨损和腐蚀问题的途径和表面强化技术手段，为进一步的学习和研究提供帮助。

第一章 金属表面^[1,3,4,6~8]

1.1 金属表面的分类

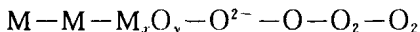
金属表面通常是指金属与周围环境（气相、液相、真空）间的过渡区。由于环境不同，过渡区的组成及深度也不相同，通常有以下几种情况：

(1) 纯净表面 大块晶体的三维周期结构与真空空间的过渡区被称为纯净表面，它包括所有不具有体内三维周期性的原子层，一般是1个到几个原子层，厚度约为0.5~2nm。

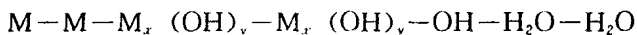
(2) 清洁表面 如果在金属表面上不存在表面化合物，仅有气体或洗涤物质的残留吸附层，这种表面可称为清洁表面或工业纯净表面。在表面强化技术中（如电镀、喷涂、氧化处理等），其预处理工艺的主要目的是得到清洁的金属表面。

(3) 污染表面 我们所见到的大部分金属表面都是污染表面。金属与环境介质作用而形成的吸附层、表面化合物以及金属表面层内的复杂过渡层等为污染表面层。在污染表面上存在着原金属以外的物质，如纯净金属表面与空气、水、润滑油、酸、碱等介质作用可形成各种类型的污染表面：

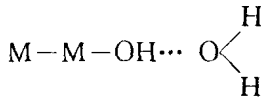
① 氧化物层 金属与氧气之间的过渡层可表示为：



② 氢氧化物层 金属与水之间形成的过渡层可表示为：



③ 水吸附层 可表示为：



④ 有机污染层 高分子、低分子有机物与金属表面所形成的过渡层。

⑤ 无机污染层 氯、硫等元素被吸附于金属表面形成的过渡层。

⑥ 碳、氮、硫等元素渗入型污染表面（又称内污染）在一定温度下，碳、氮、硫等元素被金属表面吸附、吸收，形成具有一定深度的表面污染层。与一般污染层不同，这种污染表面仍可保持金属光泽。

把污染表面制备为纯净表面、清洁表面的过程称为表面净化。为了得到纯净的金属表面，需要去掉表面吸附层与表面化合物并防止二次污染，因此必须在高真空条件下进行。目前应用最多的是离子溅射法，把金属置于压力为 $133.32 \times 10^{-9} \text{Pa}$ 的高真空室内、以氩离子进行轰击溅射；为防止二次污染，减少因轰击造成的表面损伤，通常氩气压力为 $133.32 \times 10^{-9} \text{Pa}$ 以下，离子加速高压取 $200 \sim 500 \text{V}$ 。为进一步减少表面损伤，同时避免在真空退火中内部杂质向表面聚集，可采用离子溅射与真空退火交替进行的方法。离子溅射表面净化方法，不仅可以得到纯净表面，而且可以对金属表面进行逐层剥离，对一定深度的表面层进行分层研究。离子溅射表面净化可直接用于离子镀、离子渗氮等表面强化技术中。

对清洁表面进行真空退火也可得到纯净表面。对于具有易分晶面的单晶体，可在高真空中用劈分法得到纯净表面，但劈分法不适用于金属。

在表面强化技术中，为得到清洁的金属表面常采用磨削、酸洗、喷砂、用氢还原等方法去除金属表面的氧化物，用各类洗涤剂和水进行脱脂和清洗。这些净化方法是在空气介质中进行的，不

能防止气体吸附等二次污染，但对电镀、氧化处理等表面强化工艺已可获得良好结果。

1.2 金属表面的特性

1.2.1 金属的表面形貌

金属表面形貌的基本特征 由表面粗糙度与波度构成了金属表面形貌，其中粗糙度是指加工表面所具有的微小凸凹和微小谷峰所组成的微观几何形状的尺寸特征，波度是有规律或无规律反复结构误差，呈波浪形。粗糙度的波距与波深的比一般为 $150:1 \sim 5:1$ ，对于波度则可达 $1000:1 \sim 100:1$ 。

金属的表面形貌可以用地球表面的山峰与峡谷相比拟。在金属表面上具有某些高度的峰与某些深度的谷，在相邻峰间有一段距离，就是那些经过极仔细研磨过的金属表面，也存在着由峰、谷构成的粗糙不平度。

表面粗糙度的评定有：轮廓算术平均偏差 (R_a)、微观不平十点高度 (R_z)、轮廓最大高度 (R_y) 3 项参数，使用时优先选用 R_a 参数。例如 R_a 为 $6.3\mu\text{m}$ 时表面上可见加工痕迹；当采有精加工（精车、精铰、粗磨等）时 R_a 可达 $0.2 \sim 0.4\mu\text{m}$ ，此时表面上微辨加工痕迹方向；采用抛光研磨等加工时 R_a 可达 $0.06 \sim 0.010\mu\text{m}$ ，此时获暗光泽面到镜面状态。

上述金属表面形貌特征对金属表面自由能及对于金属与金属之间，金属与环境介质的接触面积，甚至对表面化学成分及组织均会产生影响，具体表现为：

(1) 处于粗糙不平区域的原子比具有正常相邻原子数目的原子有更高的能量，具有更高的表面自由能和表面流动性。

(2) 影响金属表面间的实际接触面积和接触性质。金属表面间的接触，实际上是微凸体间的接触，因此，实际接触面积小于表观（几何）接触面积。微凸体间接触可为弹性接触，也可为塑性接

触。实际接触面积与接触性质除与表面形貌有关外，还与材料的弹性模量 E 、硬度及外加载荷有关。

(3) 金属的实际表面积大于表观表面积，如经磨削的实际表面积比表观表面积大 2 倍以上，增加了与介质的实际接触面积，降低了抗蚀性能。

(4) 粗糙不平的金属表面常具有与内部不同的成分及组织，这是由于机械加工时的高应力、高温造成的，也可在金属间摩擦时形成。

在研究金属的疲劳强度、耐磨性、耐蚀性能时，金属表面形貌的上述影响是很重要的。

1.2.2 机械加工后金属的表面组织

工程金属表面层在加工过程中发生了强烈的塑性变形与加工硬化。其最外一层由于切削过程中分子层的熔化与流动被淬硬成为微晶或非晶体的结构层，称为贝氏层；接着是严重变形和轻微变形层。大部分金属在大气中表面都受到氧化，形成一层氧化膜，而且根据环境条件的不同，可形成其他表面膜（如氮化物、硫化物和氯化物膜等）。这些化学膜对表面相互作用的性质影响极大，而实际效应则根据膜的性质有很大区别。在活性环境中，除了化学腐蚀膜外，还有吸附膜；在空气中的吸附膜主要为水气，此外还有油膜与脂膜；同时金属表面常有裂纹与空洞。图 1-1 为金属表面层特性的剖面示意图。

1.2.3 金属表面晶体结构

理想的表面晶体结构是无限晶体中插进一个平面后将其分成两部分所形成的，原子和电子的状态和原来无限晶体中的情况一样。显然，这种理想表面是不存在的。

实际表面的晶体结构有以下特点：

1) 表面原子产生弛豫及重构

在形成新表面时，由于晶格的三维对称性、连续性被破坏，表面会产生表面自由能和表面张力。固体表面上的原子虽然不能像