

● 高等教育材料类专业“十二五”规划教材

金属材料表面技术

原理与工艺

JINSHU CAILIAO BIAOMIAN
JISHU YUANLI YU GONGYI

杨 川 高国庆 崔国栋 编著



化学工业出版社

014061633

TG176
05

高等教育材料类专业“十二五”规划教材

金属材料表面技术原理与工艺

杨 川 高国庆 崔国栋 编著
吴大兴 审



责任编辑：张 燕

责任编辑：同德祥

责任编辑：朱 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：北京印刷集团有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张18 字数448千字 2014年10月第1版第1次印刷

网上定价：50.00元（电话：010-64218828 传真：010-64218829 邮购部电话：010-64218809）



化学工业出版社

· 北 京 ·

定价：38.00元

定价：38.00元



北航

C1748097

01001033

本书针对材料三大类表面技术中的基本原理进行了归纳与论述。每类技术中选出一些典型技术进行详细分析,并列出一些常用表面技术规范。在一些章节中以具体零部件为例,尝试与其他学科交叉实现“表面技术的设计”。经过表面技术处理的零部件,一般均存在残余应力,也会出现失效情况,本书介绍了残余应力定性分析方法及一些失效案例。对一些表面技术中存在的污染问题也给予较详细说明。

本书供高等院校研究生、本科生或高职高专学生作为教材使用,适用于材料科学与工程、机械制造等与表面技术有关的专业。也可作为从事表面技术工作科技人员的参考书。

著者 杨国高 高国庆 杨川 崔国栋

审 兴大吴

图书在版编目(CIP)数据

金属材料表面技术原理与工艺/杨川,高国庆,崔国栋编著. —北京:化学工业出版社,2014.9

高等教育材料类专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-20927-6

I. ①金… II. ①杨…②高…③崔… III. 金属表面处理-教材 IV. ①TG176

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第125575号

责任编辑:陶艳玲

装帧设计:张 辉

责任校对:宋 玮

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 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张18¼ 字数449千字 2014年10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:39.00元

版权所有 违者必究

前言

几千年前我国人民就会利用表面技术提高零部件的某些性能，只不过当时是作为一门技艺代代相传，没有上升为一门学问。20 世纪 80 年代是材料表面技术飞速发展的阶段，导致一个新型学科——表面工程出现。虽然说表面工程是一个交叉学科，但表面技术是该学科中最为重要的核心内容，这是毋庸置疑的。正因如此，目前多个高校开设表面技术课程，这是当前科技与经济发

展的客观需要。

西南交通大学在 20 世纪 90 年代就为材料专业本科生开设表面技术课程并延续至今。1992 年曾由吴大兴教授为主编，编写出“材料表面改性”讲义。20 世纪 90 年代获得国家自然科学基金支持，进行相关表面技术的研究。近年来在国家科技支撑计划项目的支持下，分析了国外高铁零部件组织性能及设计理念，体会到如果对一些高铁关键部件设计时采用表面技术，对提高关键零部件抗疲劳、抗腐蚀性能，促进行车安全有极为重要的作用。在这些研究基础及多年的教学实践中，对表面技术教学形成下面一些理念。

1. 材料表面技术是理论性与实践性非常强的技术，在教学过程中即使有一些实验，学生也不可能熟练掌握哪怕是少数几种表面技术工艺细节。这个问题只能在将来由读者亲身实践去解决。大学阶段学习，仅能以学生掌握基本原理及培养应用意识为目的，以便在将来实践中起到指导性作用。

2. 目前一般将表面技术分为三大类，不同技术既然归属一类就必有“共性”。教学应该以这些“共性”为主，教学重点是分析出共性内容，使学生掌握其共性原理。教材中对典型工艺进行详细分析目的也是为了加深对共性原理认识。教材中对同一大类中一些工艺进行简单归纳，是为了方便读者自学，大致了解这些工艺工程。教材中通过介绍一些具体应用案例，是为了培养学生选择表面技术、解决生产问题的能力。

3. 表面工程定义是“将材料表面与整体作为一个系统进行设计”，利用表面技术使材料表面获得某些特殊性能。因此应将课程定位为工科类“设计型”课程，而不是文科类“叙述型”课程。在教学中应该体现这种思路。表面技术的应用，最后必然要落实到具体零部件上，而零部件是设计出来的。所以表面技术的应用与设计有密切联系。教学中应与设计过程联系，说明表面技术的具体应用。学生今后应用表面技术时，也应该有“设计”的理念。因此本教材一些章节中以具体零部件为例，尝试如何与其他学科交叉，实现“表面技术的

设计”。

4. 表面技术是利用各个学科基础知识发展而成,基础理论在新型表面技术的发展中占据极为重要的地位。教学中应尽量多结合基础知识分析表面技术。一方面使学生掌握表面技术基础,同时使学生认识到如何利用基础理论开发新型表面技术。因此将一些必要的基础知识融汇到本教材中。

5. 经过表面技术处理后的零部件,一般均存在内应力(残余应力),这些应力是影响表面性能的重要因素。学生应认识到其重要性、掌握其分析方法(定性)。经过表面技术处理后的零部件也会出现失效情况,这些均应该在教学中有所体现。

6. 表面技术的重要性与作用不言而喻,但很多表面技术也存致命弱点,即污染环境。过去一些表面技术教材很少涉及污染问题,本教材进行一些较详细说明,这对今后如何选择表面技术有重要的参考价值。

本书主要由杨川任编写,编写了第1章、第2章、第6章;高国庆编写第3章;崔国栋编写第4章、第5章;吴大兴对全书进行审阅与修改,书中图片与曲线编辑、文字整合由高国庆负责完成。

在本书编写过程中引用并参考了许多专家、学者出版的相关专著、教材及论文,在此向他们致以真诚的谢意。

本书出版得到西南交通大学学科建设经费支持,真诚致谢。

由于编者水平有限,书中不当之处,敬请读者批评指正。

编者 2001

2014年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 从表面技术到表面工程	1
1.2 表面技术在现代工业中发挥巨大作用的原因	4
1.2.1 采用表面技术可以解决某些零部件采用单一材料无法满足的性能要求	4
1.2.2 节约贵重材料,大幅度提高性价比	5
1.2.3 电子信息技术飞速发展的需要	6
1.2.4 节能、开发新能源的需求	6
1.3 表面工程中的设计概念	7
1.4 表面技术的发展与环境保护	9
1.4.1 开发各种材料表面防腐蚀新技术是重要的研究方向	9
1.4.2 应重视新型复合表面技术的研发	11
1.4.3 几种值得注意的表面改性技术	12
1.4.4 开发新型制备薄膜太阳能电池技术是研究热点	14
1.4.5 涂镀层技术中钢板、钢梁、钢管的镀层新技术开发	15
1.4.6 表面技术中的环保问题	15
习题	17
参考文献	18
第 2 章 利用相变原理设计表面改性技术	19
2.1 马氏体相变基本特征概述及在设计表面改性技术中应用	19
2.2 残余应力产生原理与分析方法	23
2.2.1 冷却过程中的残余应力产生原理	24
2.2.2 残余应力综合分析与控制	26
2.3 表面组织金相分析方法	29
2.3.1 阿贝原理	29
2.3.2 利用阿贝原理分析金相组织	31

2.4 表面相变强化工艺设计与典型工艺分析	33
2.4.1 工艺设计基本思路与一般规律	34
2.4.2 感应加热淬火工艺设计与分析	36
2.4.3 激光表面相变强化工艺	44
2.5 表面相变强化工艺设计案例	49
2.6 快速加热零部件失效案例分析	55
2.7 非钢铁材料表面相变强化工艺设计与贝氏体组织应用	58
2.8 几种常用表面改性工艺	60
习题	64
参考文献	67
第3章 利用扩散与相变原理设计表面改性工艺	68
3.1 基本原理概述	68
3.2 扩散基本规律	70
3.2.1 纯扩散理论	70
3.2.2 反应扩散理论	71
3.3 利用反应扩散方法设计表面改性工艺的思路	74
3.4 利用纯扩散理论设计表面改性工艺	75
3.4.1 钢的渗碳工艺分析	75
3.4.2 渗碳过程中炉内碳势的控制	80
3.4.3 渗碳件残余应力分析	83
3.4.4 渗碳的数值模拟技术简介	84
3.5 利用反应扩散理论设计表面改性工艺	89
3.5.1 设计思想与基本原理	89
3.5.2 典型工艺1——氮化工艺	91
3.5.3 渗硼工艺设计	98
3.5.4 固体粉末渗锌	100
3.5.5 盐浴渗金属方法 TD 技术	101
3.5.6 氮化与渗金属过程中产生的残余应力	102
3.6 工艺设计案例	105
3.6.1 案例1 齿轮表面改性工艺设计	105
3.6.2 案例2 导线夹制备工艺的设计	108
3.6.3 案例3 对小模数齿轮设计多元共渗代替渗碳的技术方案	112
3.6.4 案例4 利用 TD 方法提高热模具寿命	113
3.7 失效分析案例	114
3.7.1 案例1 轴承外圈裂纹分析	114
3.7.2 案例2 氮化裂纹问题	115
3.8 几种典型的表面改性工艺	117
3.8.1 碳氮共渗技术	117
3.8.2 真空渗碳	118
3.8.3 二段及三段氮化法	119

3.8.4	提高钢件抗腐蚀能力的氮化法	119
3.8.5	TD 方法渗金属	120
3.8.6	抗蚀、抗氧化表面改性工艺设计	121
3.8.7	多元共渗工艺设计	123
3.8.8	快速电加热渗铝金	123
3.9	表面改性技术中的污染问题	124
	习题	125
	参考文献	127
第 4 章	薄膜技术	128
4.1	薄膜的定义与薄膜形成	128
4.1.1	薄膜定义及在现代科技中作用	128
4.1.2	薄膜形成过程简介	129
4.2	化学气相沉积技术基本原理与典型工艺分析	132
4.2.1	化学原理在化学气相沉积中作用与典型工艺分析	132
4.2.2	TCVD 薄膜沉积过程与特点	137
4.2.3	CVD 技术的应用	138
4.2.4	TCVD 应用范围探讨	140
4.3	真空技术基础	141
4.3.1	真空的定义与单位	141
4.3.2	气体分子能量运动速度与分子间碰撞	142
4.3.3	真空的获得	143
4.3.4	真空系统配置简介	145
4.4	等离子体技术基础	148
4.4.1	等离子体基本概念	148
4.4.2	等离子体产生方法	150
4.5	粒子间碰撞	156
4.5.1	弹性碰撞能量转移	156
4.5.2	非弹性碰撞的能量转移	157
4.6	等离子体化学气相沉积技术	160
4.7	物理气相沉积——真空蒸发镀膜技术	163
4.7.1	基本原理	163
4.7.2	蒸发源与合金膜的蒸发镀	166
4.8	物理气相沉积——离子镀技术	167
4.8.1	基本原理	167
4.8.2	典型工艺分析	169
4.9	物理气相沉积技术——溅射镀膜	170
4.9.1	离子溅射中一些理论问题	170
4.9.2	典型溅射镀膜技术	172
4.9.3	磁控溅射技术	173
4.10	离子注入与离子束合成薄膜技术原理	178

4.10.1	离子注入的原理*	178
4.10.2	离子注入机与注入工艺	184
4.10.3	离子束与镀膜复合技术	185
4.10.4	离子注入技术实际应用状况	190
4.11	薄膜中的应力分析	192
4.11.1	薄膜内应力	192
4.11.2	薄膜的附着力	196
4.12	薄膜设计应用案例	197
案例 1	用 TCVD 技术沉积 TiN 提高硬质合金刀具切削速度	197
案例 2	在蓝宝石上沉积 TiN 薄膜	198
案例 3	光盘记录系统	200
案例 4	太阳能电池原理与薄膜材料设计	203
4.13	几种气相沉积镀膜技术	204
4.13.1	反应蒸发镀膜工艺	204
4.13.2	三级与四级溅射	205
4.13.3	高频溅射镀	205
4.13.4	多弧离子镀	206
4.13.5	离子团束镀	207
4.13.6	离子辅助沉积	207
4.13.7	双离子束镀	208
	习题	208
	参考文献	209
第 5 章	涂镀层技术	210
5.1	电沉积技术基本原理与典型工艺	210
5.1.1	金属电化学腐蚀模型与标准电极电位	210
5.1.2	电沉积的基本过程	212
5.1.3	电沉积中的定量计算	213
5.1.4	电沉积的后处理与镀层残余应力	216
5.1.5	典型电沉积工艺分析——电镀锌工艺	217
5.1.6	电沉积技术中的污染问题	221
5.2	电刷镀技术	222
5.2.1	基本原理	222
5.2.2	电刷镀工艺步骤与应用领域	226
5.3	电沉积技术在高科技中应用	229
案例 1	利用电沉积技术制备薄膜太阳能电池材料	229
案例 2	利用电沉积技术制备镍网材料	229
案例 3	电沉积铜用于 IC 铜布线	230
5.4	电沉积零件的失效分析	231
案例 4	电沉积汽车调节螺杆失效分析	231
5.5	化学镀技术	233

5.5.1	化学镀原理	233
5.5.2	化学镀典型工艺与组织性能及应用	235
5.5.3	化学镀中残余应力问题	238
5.6	热浸镀技术	239
5.6.1	热浸镀基本原理与工艺过程	239
5.6.2	热浸镀典型工艺分析——热浸锌工艺	241
5.7	化学转移膜技术*	243
5.7.1	化学转移膜基本原理与用途	243
5.7.2	典型化学转移膜技术分析	245
5.7.3	化学转移膜技术中污染问题	251
5.8	热喷涂技术	252
5.8.1	热喷涂技术基本原理	252
5.8.2	喷涂层中的残余应力	255
5.8.3	典型喷涂技术	256
5.9	几种涂层技术简介	259
5.9.1	电镀铬工艺	259
5.9.2	电刷镀工艺	260
5.9.3	热镀铝工艺	263
5.9.4	爆炸喷涂	265
5.9.5	超音速喷涂	266
5.9.6	铝合金阳极氧化	267
	习题	270
	参考文献	270
第6章	复合表面处理技术	272
6.1	表面技术复合的设计原则	272
6.2	几种复合表面技术	275
6.2.1	硫与氮共渗复合处理	275
6.2.2	渗氮与感应表面淬火复合	275
6.2.3	溅射 Al 膜与离子氮化工艺复合	276
6.2.4	多元共渗与高分子材料复合	276
6.2.5	喷涂与激光、火焰快速加热复合	279
6.2.6	铸渗复合处理工艺	279
	习题	280
	参考文献	281

第 1 章

绪 论

1.1 从表面技术到表面工程

表面技术 (surface technology) (或称表面处理技术等) 顾名思义就是处理材料表面的一门技术。对表面进行处理的目的, 当然是希望材料表面获得需要的某种性能。这类技术并非近代科学的产物, 早在远古时期人类就采用了这种技术。

中国祖先将表面技术作为一门绝技, 用于生产中已经有几千年的辉煌历史。例如, 3000 多年前, 我们的祖先就会使用油漆 (称大漆) 用于保护一些器皿及工件的表面。与目前状况完全类似, 一些先进的技术均首先应用于国防工业, 我们的祖先也是将先进技术用于战争器件。1965 年在湖北江陵望山 1 号墓出土的越王勾践剑表面无明显锈蚀 (见图 1-1), 可以切断 19 层白纸。



图 1-1 越王勾践剑照片

研究表明剑本身的主要成分是铜-锡，还含有少量的 Al、Fe、Ni。不锈的原因一是由于青铜本身不易腐蚀，同时宝剑长期在地下与空气隔绝有良好的环境。研究者认为剑本身不锈的另一个重要原因是表面经过硫化处理，表面形成硫化物。

无独有偶，1994 年 3 月在秦始皇二号墓中发现一把青铜剑，出土后该宝剑光亮如新，锋利无比，据说还可以切断头发，见图 1-2。在地下沉睡 2000 多年前的宝剑不被腐蚀实属奇迹。经过研究发现宝剑不锈的一个重要原因是在宝剑表面镀了一层特殊的钝化膜，该钝化膜中含有铬。后经过进一步研究发现钝化膜中还含有硫。我们的祖先是如何在青铜剑表面形成这种钝化膜的，至今尚无明确答案。

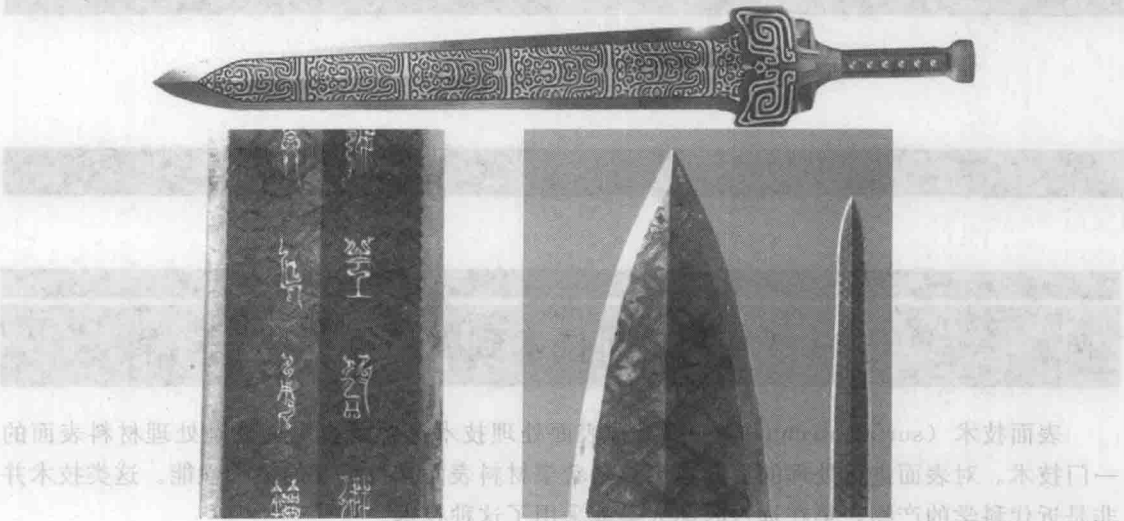


图 1-2 秦始皇二号墓出土的青铜剑

我国在战国时代就掌握了淬火技术用于兵器中，在辽阳三道壕出土的西汉时代的宝剑是经过淬火处理的。图 1-3 是宝剑金相组织照片。而我国明代科学家宋应星所著“天工开物”一书中介绍了渗碳淬火表面技术。

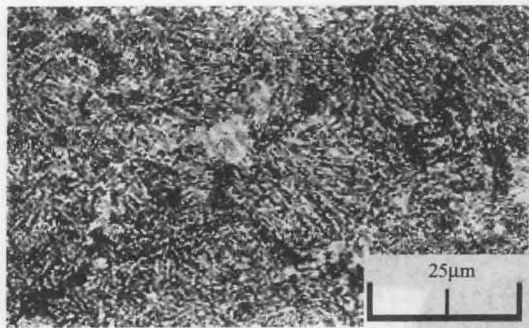


图 1-3 三道壕出土宝剑金相组织照片^[1]

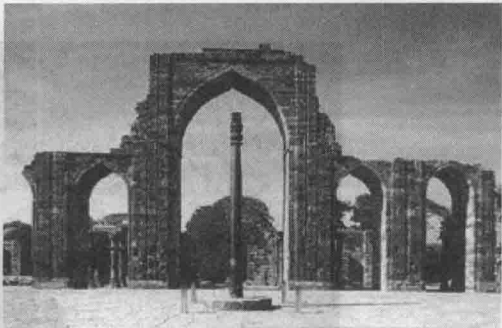


图 1-4 印度新德里顾特卜塔

国外也有类似案例。印度新德里有一称为顾特卜塔的铁塔（见图 1-4），据说至今已经有千年历史，至今没有锈蚀。经研究认为其主要原因是该铁塔表面有一层 Fe-N 化合物。

可见国内外对于表面技术的应用均有很久的历史，均有各自的绝技。而表面技术真正引起人们高度重视并发展为一个新型学科的时间却是在 20 世纪 80 年代，并于 80 年代初期提

出了表面工程概念 (Surface Engineering)^[2]。1984年英国伯明翰大学 Bell 教授在英国建立了第一个表面工程学会,并创办了表面工程杂志。1985年召开了第一届国际表面工程学术会议。

1986年国际热处理学会,在分析了表面工程的现状,预测了其发展趋势后,决定学会更名为国际热处理与表面工程联合会。

1987年中国机械工程学会成立了表面工程研究所。1988年《中国表面工程杂志》创刊。

表面工程定义如下:表面工程是将材料表面与基体一起作为一个系统进行设计,利用表面改性技术、薄膜技术与涂镀层技术使材料表面获得材料本身原来没有,而又希望具有某种性能的系统工程^[2]。

此定义涵盖的核心概念可以归纳为下面几点。

① 表面工程是一个具有设计性的系统工程,设计的目的是使材料表面获得具有人们希望得到的某些特殊性能。

② 此处的“设计”涵盖的内容应该非常广泛,即包括工艺设计、基体材料的选择也应包括设备设计、质量保证体系设计及工艺控制、过程控制等均应属于“设计”范畴。

③ 表面工程中的核心内容是表面改性技术、薄膜技术与涂镀技术这三类表面技术。

④ 既然是设计工程,最后必须经过实践检验设计效果,所以对设计后产品的检测方法、经过设计后产品的失效分析也应该属于表面工程内容。

可见表面工程是一个跨学科的系统工程体系,其核心内容是表面技术。

表面技术定义如下:通过各种工艺手段改变材料表面的组织结构,从而赋予材料表面具有与心部不同的特殊性能的技术。

根据表面工程定义,表面技术可以分成表面改性技术、薄膜技术、涂镀层技术三大类。经过表面技术处理后材料表面组织一定会与心部不同,这种分类主要是根据表面组织形成的原理不同及应用范围差别而进行的分类。

第一类表面改性技术的特点是:通过基体材料表面发生相变,或表面成分变化加相变,或形变,或通过化学反应改变表面的成分、组织结构与性能。此类技术在应用方面的特点是:主要用于提高材料表面的机械性能,例如提高疲劳性能、耐磨损性能等。尤其是为了提高疲劳性能,一般均采用此类技术。

表面改性技术的发展与工艺设计基于材料的相变理论、形变理论、扩散理论及材料表面的化学反应等理论。这类技术主要包括:表面形变强化、表面相变强化、表面扩散渗入及离子注入强化、表面化学反应等技术。这类技术中很多属于热处理技术领域。

第二类薄膜技术的特点是:利用近代发展起来的新技术,使外来物质在基体材料表面形成一层薄膜。而薄膜(表面组织)形成特点一般是:通过外来物质沉积到基体材料表面,通过沉积物质间反应形成薄膜,而并非是通过基体材料表面相变、形变得到的,这是与表面改性技术的主要差别。在近代工业生产中虽然也采用薄膜技术提高材料表面的力学性能、抗腐蚀性能等,但是薄膜技术主要应用于电子信息领域,薄膜材料最重要的应用是将其作为功能材料使用。有些学者提出“没有薄膜技术就没有今天的计算机技术”。近年来一些学者将薄膜技术用于生物材料,提高生物材料表面的性能(如血液相容性),获得良好的效果。

薄膜技术涉及的基础理论非常广泛,与固体物理、物理化学、界面理论、化学反应等理论密切相关。薄膜技术主要包括物理气相沉积技术与化学气相沉积技术,这类技术是表面

技术中最重要的一类。近年来表面技术之所以受到极大重视,与这类技术的发展有密切联系。薄膜技术在当今高科技产业中有举足轻重的地位。需要说明的是:对于薄膜的厚度有不同定义,一般在 100nm 至微米级之间。有的研究者认为薄膜尺寸在微米以下,有的研究者以 $25\mu\text{m}$ 为界限,小于 $25\mu\text{m}$ 的为薄膜,大于 $25\mu\text{m}$ 的为厚膜。

第三类涂镀层技术的特点是:利用经典技术或现代技术或两者结合,在基体材料表面形成一层或多层结构与基体材料不同的组织(称为涂层)。在这类技术中,有些是外来物质与基体材料发生反应甚至基体材料表面发生相变(如热浸镀技术),从这点看与表面改性技术有类似之处。有些技术又与薄膜技术类似,外来物质与基体材料不发生反应,类似厚膜涂覆在基体表面。但所获得的涂层比薄膜厚得多,在数微米至几毫米之间,这是与薄膜技术的区别。此类技术主要应用在防护功能方面。例如防腐蚀、抗高温氧化等。

这类技术主要包括:电沉积技术(俗称电镀技术)、热浸镀技术、热喷涂技术及涂料技术等。

此类技术的基础理论与电沉积理论、液态材料形核长大理论、高分子物理、高分子化学等理论密切相关。

1.2 表面技术在现代工业中发挥巨大作用的原因

表面技术为什么会受到人们重视?为什么会发展成表面工程这样一个新兴学科?为什么表面工程这个新兴学科会出现在 20 世纪 80 年代?这些现象出现并非偶然,是人类历史发展的必然产物,是与生产实践发展有必然的内在联系,是有着深刻的历史原因的。其原因可以归纳成如下几点。

1.2.1 采用表面技术可以解决某些零部件采用单一材料无法满足的性能要求

人类在长期的生产实践中很早就意识到,对许多零部件表面与心部的性能要求是完全不同的。我国祖先很早就采用渗碳技术提高兵器的性能。现代生产中人们越来越认识到采用表面技术与整体材料性能匹配的重要性。为说明此问题举例如下。

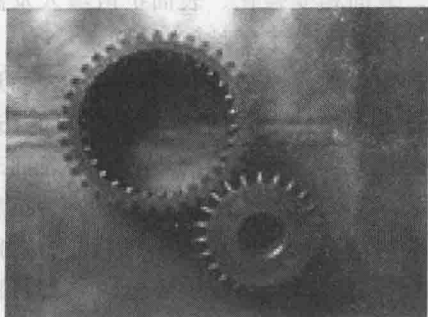


图 1-5 齿轮相互咬合照片

例 1-1 齿轮类零件损坏形式分析与解决方案。 齿轮传动是现代机械传动中应用最广泛的一种传动模式。在工作状态下齿之间要发生摩擦,同时轮齿为传递动力要承受一定的弯曲载荷,而且这种载荷是交变载荷,见图 1-5。在这种服役条件下,齿轮的损坏方式主要是:齿面的过度磨损、齿面点蚀与轮齿断裂。齿面的点蚀实际是在接触应力作用下的疲劳破坏。为保证齿轮表面耐磨性能与硬度,应该采用高碳钢制作,采用淬火+低温回火工艺,获得高碳马氏体+碳化物组织。

但是齿轮作为传递力的零部件,根部要受到弯曲应力,在变速时往往受到冲击载荷,因

此为保持这种性能，又要求轮齿有一定抵抗断裂的能力及韧性，即达到一定的强度与韧性配合。从这点出发应该采用中碳钢调质处理，或低碳钢淬火+低温回火处理。得到强韧性较高的回火索氏体组织或板条马氏体组织。这就产生了矛盾，如果不采用表面技术难于解决这个矛盾。

解决这个矛盾可以有多种设计方案，主要根据齿轮受力分析，选取较佳的方案。方案之一是采用中碳钢或者中碳合金钢制造齿轮，一般采用下面的工艺路线

粗加工→调质→精加工→齿面感应加热淬火+低温回火→磨削加工

通过调质处理材料心部为回火索氏体组织，有良好的综合机械性能，硬度大约在 HRC30 左右，表面通过感应加热淬火+低温回火提高表面硬度，使表面的硬度在 HRC50 左右。达到了材料表面与心部性能要求不一致的要求。

1.2.2 节约贵重材料，大幅度提高性价比

在很多情况下，苛刻的环境与服役条件对表面组织性能要求很高，而对于心部性能要求并不高。这时如果采用贵重材料制作零部件，有时虽然可以解决问题，但是结果是不但效果不佳，还导致成本大幅度升高。例如对于腐蚀失效零部件就是如此，举例说明如下。

例 1-2 铁路防腐蚀弹条的研制。众所周知列车在钢轨上运行，而钢轨是通过螺旋道钉、弹条扣件等部件固定在水泥轨枕上的。在某些环境下如隧道内部、沿海地区、化工厂附近等地域，由于环境恶劣，弹条扣件发生严重腐蚀，严重影响行车安全。弹条的腐蚀情况见图 1-6。

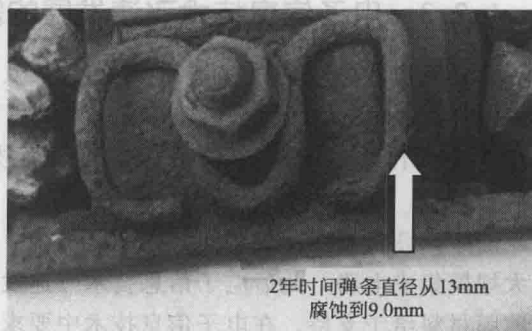


图 1-6 在某化工厂附近固定钢轨的弹条扣件的腐蚀情况照片

弹条一旦发生腐蚀就必须更换，不但耗费资金同时影响列车运行时间。如何解决此问题？可以采用表面技术解决，也有人提出采用不锈钢材料制造弹条，暂且不论不锈钢材料是否能够满足力学性能要求，仅从经济角度进行分析，对比采用不锈钢材料与采用表面技术处理带来的经济效益见表 1-1。

表 1-1 铁路弹条采用不锈钢材料制造与表面处理技术制造经济效益对比分析

弹条类型	价格	5 年时间	效益分析
普通弹条	3.0 元/件	需要换 5 次； 费用 15 元	
不锈钢弹条	12 元/件 原材料价格约为弹簧钢的 4 倍	12 元 认为 5 年不需要更换	5 年产生效益 3.0 元
普通弹条+表面技术处理	4.5 元/件	实践证明采用这种技术可以保证 5 年不需要更换；4.5 元	5 年产生效益 10.5 元

从表 1-1 数据可以看到，采用表面技术解决铁轮弹条防腐蚀问题，可以带来显著的经济效益。如果采用不锈钢不但成本高，还会存在其他问题。例如不锈钢一般很难保证弹性要求，还存在加工成型困难的问题。目前一些铁路弹条就是采用低温液体多元共渗的技术解决。在 450~480℃ 温度范围进

行液体共渗处理，获得大幅度提高抗腐蚀性能的效果，该技术已经大量应用于地铁弹条的防腐处理、出口弹条的防腐处理等，获得良好的经济与社会效益。弹条处理后的照片见图 1-7(a)、(b)。



图 1-7 铁路弹条经过低温液体多元共渗后外形与表面组织照片

1.2.3 电子信息技术飞速发展的需要

上述问题自有大规模工业生产就存在，人们早就有所认识并且提出解决方案，所以很早开发出各类表面技术解决这些问题。例如我国古代就会采用渗碳技术，氮化技术出现在 1923 年。为什么 20 世纪 80 年代人们对表面技术格外重视，以致发展出一个表面工程新型学科？

回顾计算机发展历史可知，在 20 世纪 60 年代出现实用化的计算机技术，到 70 年代出现大规模集成电路，此后电子信息技术飞速发展。为满足计算机技术发展的需要，必须要各种薄膜材料给予支持。在电子信息技术中要求的一些薄膜材料见表 1-2。

表 1-2 电子信息技术中需要的各类薄膜材料

类 别	薄膜材料
半导体薄膜	Si, Ge, SiC, GaAs, ZnO, ZnSe, 约 20 余种
导电薄膜	Au, Al, Cu, Ni, SnO ₂ , TiO ₂ , Al-Si, 约 20 余种
电阻薄膜	Cr, NiCr, SiCr, TiN, TiCr, 约 20 余种

同时为制备这些薄膜及工业生产的需要，在 20 世纪 70 年代出现三束技术。即利用激光束、电子束、离子束高能量、可控性好、加工精细的独特优点，开发出多种薄膜制备技术及表面改性技术，在工业上获得巨大成功。因此在 20 世纪 70~80 年代出现了电子信息技术需要薄膜制备技术支撑而求发展而电子信息技术的飞速发展又带动薄膜新型制备技术层出不穷的格局。这应该是在 20 世纪 80 年代表面技术飞速发展、引起人们高度重视的关键原因。

1.2.4 节能、开发新能源的需求

能源问题是世界性的大问题，如何节能及开发新能源越来越受到人们的重视。在热工设备上涂覆隔热层，可以大幅度减少热损失起到节能的作用。在核发电中，原子核反应器在运行时必须采用高温抗氧化涂料将核燃料与受热介质严格隔开。众所周知太阳能是取之不尽的能源，并且对环境无任何污染，为有效利用太阳能必须采

用表面技术。举例如下。

例 1-3 太阳能电池设计。半导体材料分成 p 形半导体与 n 形半导体，将两者连接构成 p-n 结半导体。太阳能电池是利用半导体材料的特性将光能转换为电能的。n 型半导体靠电子导电、p 型半导体靠空穴导电，n 型如果丧失电子将出现正电中心；p 型如丧失空穴将呈负电中心见图 1-8。

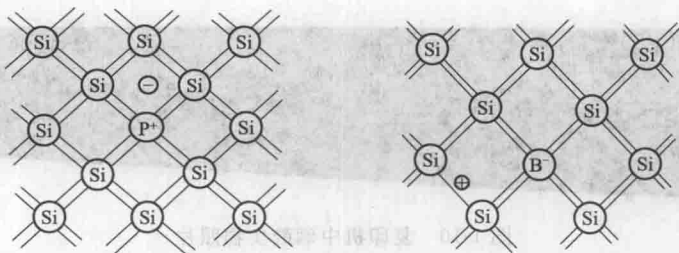


图 1-8 p 形半导体与 n 形半导体导电原理图

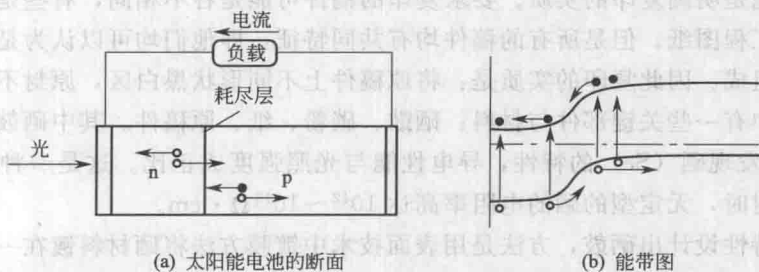


图 1-9 光伏效应示意图

在光照射情况下 p 形半导体与 n 形半导体中均产生电子与空穴，p 中电子越界面进入 n 区，n 中空穴越界面进入 p 区。p 端电势升高，n 端电势降低，建立稳定电势差；p-n 与外界导通形成电流，光照不停电流不止；p-n 结起到电源作用，见图 1-9。这就是所谓光生伏特，构成太阳能电池。太阳能电池采用薄膜材料有很大的优势，因为薄膜仅需 $1.0\mu\text{m}$ ，所以具有光吸收率高的优势，基体镀膜后电池就同时形成，大幅度节约电池的制造成本。薄膜可以低温形成，因此可以采用廉价材料为衬底（玻璃）降低能耗与成本，可见采用薄膜材料制备太阳能电池有巨大优势。

从上述分析可见，正是这种现代化生产的需求，尤其是电子信息技术发展、节能及新能源技术的出现，离不开现代表面技术的发展，这就是为什么会在 20 世纪 80 年代出现研究表面技术的热潮，出现表面工程新型学科的主要原因。

1.3 表面工程中的设计概念

为了说明表面工程中的设计概念，列举一些具体的实际案例进行说明。

例 1-4 静电复印机中设计问题。静电复印机是目前生活学习中重要的一种工具，其中关键的部件是硒鼓，见图 1-10。