

普通高等教育材料成形及控制工程专业改革教材

表面工程学

主编 曾晓雁 吴懿平

参编 王菊荣 李新立 宋武林

陶锡骐 熊刚 潘牧

(以姓氏笔画为序)

主审 张黔



机械工业出版社

本书是普通高等教育材料成形及控制工程专业改革教材之一。书中介绍了表面热处理、表面形变强化、电镀与化学镀、热扩渗、热喷涂与喷焊、涂装技术、转化膜与着色技术、气相沉积、微细加工技术、高能束技术以及其它表面工程技术。兼顾基础知识与学科前沿,在有限的篇幅内对“表面工程学”的内涵进行了拓宽,更加丰富、全面地反应出表面工程技术的特点。含盖了材料学、材料加工工程、物理、化学、冶金、机械、电子与生物等学科领域,题材广泛,内容丰富。

本书可作为高等院校材料学、材料加工工程、材料物理、材料化学等专业的本科生、研究生教材,也可供相关专业的师生和有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

表面工程学 吴懿平主编 北京:机械工业出版社,2005
普通高等教育材料成形及控制工程专业改革教材
ISBN 7-111-16111-1

I. ①表... II. ①吴... ②吴... III. ①金属材料表面保护 高等学校 教材
IV. ①TB39

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第161111号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码 100037)
责任编辑:王霄飞 张祖凤 张祖凤 张祖凤 张祖凤
封面设计:姚毅 姚毅 姚毅 姚毅 姚毅
北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2005年 月第 版·第 次印刷
开本 毫米×毫米 印张·千字
字数—插页
定价:元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68995166

普通高等教育材料成形及控制工程专业 改革教材编审委员会

摇摇摇摇摇主编单位：华中科技大学

策划单位：华中科技大学摇机械工业出版社

顾摇摇问：杨叔子摇院士

周摇济摇院士

崔摇摇院士

参编单位：西北工业大学摇摇摇摇武汉理工大学

武汉大学摇 吉林大学

重庆工业大学摇 太原理工大学

湖北工学院摇 华南理工大学

太原重型机械学院摇 武汉科技大学

大连理工大学摇 上海交通大学

湖北汽车工业学院摇 武汉凯奇公司

机械科学研究院武汉材料保护研究所

审稿单位：武汉大学摇 东南大学

武汉理工大学摇 山东大学

合肥工业大学摇 中国科学院计算所

西安交通大学摇 浙江大学

福州大学

(排名不分先后)

序摇摇言

我国社会主义现代化建设浪潮不断高涨，高等教育与教学改革不断深入发展，长江后浪推前浪。

培养基础宽、素质高、能力强、适应面广、具有创新能力的人才，教材建设是一大关键。新的专业目录颁布以来，经过摸索和探讨，对一些改革力度大的专业组建和教材建设，各高校的观点和看法逐渐趋于大同。在这个基础上，编写一套适合于普通高等教育“材料成形与控制工程”专业系列改革教材是适时的，也是非常必要的。

该系列教材与内容合理而先进，充分体现了专业重心下移，着重于专业的基础性、共性课程的设置。而反映铸、锻、焊、热处理专业方向性的课程，绝大部分作为选修课程设置。其主要特点，一是系列教材覆盖面宽，不仅覆盖了源个老专业近源门专业教材的内容，而且还延伸到材料热加工的最新技术及发展的前沿；二是内容精练，选材新颖，结构合理，源门教材平均每门不足猿园万字，仅为源个老专业教材篇幅的员源~员缘，且近一半的内容选自近员园余年来的科研成果、国内外文献和国外原版教材；三是源门专业主干教材中，有源门是与计算机和信息技术相结合的教材，突出了计算机和信息技术的学习与应用。

我相信，通过这套专业系列教材的学习，可使材料成形与控制工程专业的学生较为充分掌握系统的专业基础与共性知识，在先进的材料加工新技术和发展趋势方面较好了解乃至有所掌握，在计算机应用和外语水平方面能形成优势，这有利于培养较高的综合素质和较强的创新能力。

当然，任何事情不能一蹴而就。这套专业系列教材也有待于在教学实践中不断修改与完善。好的开始等于成功的一半。我祝愿在著者与读者的共同努力下，这套教材有一个更为美好的明天，谨此为序。

中科院院士摇摇摇摇摇

圆园园年 愿月

前摇摇言

为了适应国家教育改革形势的发展，根据教育部最新颁布的新的专业目录，全国大部分工科院校已将原热加工专业的铸造、焊接、锻压、热处理四个专业合并为材料成形及控制工程大专业。1995年10月，教育部热加工专业教学指导委员会在哈尔滨召开年会，探讨了专业改造和教材建设的问题。

推行专业改革，为社会培养综合素质高、知识结构全面的栋梁之材，在很大程度上取决于教材建设。教育部颁布新的专业目录已两年多，经过这一阶段的摸索和探讨，对材料成形及控制工程专业的改造和教材建设，各高校观点和方法逐渐趋于大同，在这个基础上，编写一套普通高等教育材料成形及控制工程专业系列教改教材是适时的。为此，机械工业出版社教材编辑室成立了以华中科技大学为牵头单位的系列教改教材编审委员会，共同组织编写材料成形及控制工程专业系列教材。

近二十年来，随着表面工程技术在各个工业领域得到越来越广泛的应用，人们对表面工程学知识的认识也在不断深化。特别是近几年来，高等院校各学科、专业向宽口径化方向调整以后，表面工程学的内涵显然不能再局限于“金属材料的表面工程”、“陶瓷材料的表面工程”或者少数几种表面工程技术之上了，而必须更加丰富、全面地反映表面工程技术的特点。

华中科技大学自1993年起面向材料学专业及材料加工工程专业的本科生、研究生开设了“表面工程学”课程，受到了学生们的普遍欢迎。机械、动力、地质、化学、物理等专业的学生也常选修此课。

本书是在多年来的教学实践基础上，参考国内外有关书籍与文献编写而成的。参编的作者都是正在从事某一领域表面工程技术研究，熟悉本领域中学术发展的最新动态的中青年学者。然而，表面工程技术题材太广泛，内容太丰富，每一种技术都可以写成厚厚的专著。因此，我们在编写时尽量注意兼顾基础知识与学科前沿，力争在有限的篇幅内使读者能够对各种表面工程技术有一个基本的了解。书后的参考文献也为读者进一步深入掌握有关技术提供了信息。

本书第一章至第四章、第十一章、第十三章由华中科技大学曾晓雁教授编写，第五章由机械科学研究院武汉材料保护研究所陶锡骥高工编写，第六章由武汉理工大学（原武汉工业大学）潘牧教授编写，第七章由机械科学研究院武汉材料保护研究所熊刚研究员编写，第八章由武汉材料保护研究所王菊荣高工编写，第九章由武汉材料保护研究所李新立研究员编写，第十章和第十二章由华中

科技大学的吴懿平副教授编写。华中科技大学的宋武林副教授参加了本书第二章、第十章、第十一章部分内容的前期编写工作。全书由曾晓雁、吴懿平进行统稿，由武汉大学张黔教授主审。

本书可作为高等院校材料学、材料加工工程、材料物理、材料化学等专业的本科生、研究生“表面工程学”课程的教材，也可供相关专业的师生和有关工程技术人员参考。

鉴于作者水平所限，书中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

编者

2006年 12月

目 录

序言	
前言	
第一章 绪论	员
第一节 表面工程学的定义和内涵	员
第二节 表面工程技术的特点与意义	圆
第三节 表面工程技术的分类	猿
第二章 表面工程技术的物理、化学基础	缘
第一节 固体的表面与界面	缘
第二节 材料磨损原理及其耐磨性	苑
第三节 金属腐蚀原理与防护技术	愿
第三章 表面工程技术的预处理工艺与作业环境	源
第一节 表面预处理工艺	源
第二节 表面工程技术的作业环境	源
第四章 表面淬火和表面形变强化技术	源
第一节 表面淬火技术的原理与特点	源
第二节 感应加热淬火技术	缘
第三节 火焰加热表面淬火技术	缘
第四节 激光淬火与电子束淬火技术	缘
第五节 电阻加热表面淬火技术	源
第六节 几种典型表面淬火工艺的特点比较	源
第七节 表面形变强化技术	源
第五章 热扩散	源
第一节 热扩散技术的基本原理	源
第二节 热扩散工艺的分类	源
第三节 气体热扩散工艺	源
第四节 液体热扩散	源
第五节 固体热扩散	源
第六节 等离子体热扩散	源
第七节 热扩散的发展	源
第六章 热喷涂、喷焊与堆焊技术	源
第一节 热喷涂技术	源
第二节 热喷焊工艺与特点	源

摇第三节摇堆焊工艺及特点	页苑
第七章摇电镀和化学镀	页圆
摇第一节摇电镀的基本原理与工艺	页猿
摇第二节摇常用单金属电镀	页员
摇第三节摇合金电镀	页苑
摇第四节摇化学镀	页员
摇第五节摇复合镀技术	页苑
摇第六节摇非金属电镀	页圆
摇第七节摇电铸成型技术	页员
摇第八节摇电镀层的质量评价	页源
摇第九节摇电镀的发展趋势	页缘
第八章摇转化膜与着色技术	页苑
摇第一节摇转化膜的基本特性及用途	页苑
摇第二节摇磷化	页愿
摇第三节摇铬酸盐钝化膜	页圆
摇第四节摇化学氧化	页缘
摇第五节摇草酸盐钝化	页远
摇第六节摇电化学氧化	页苑
摇第七节摇着色技术	页猿
摇第八节摇转化膜与着色技术的发展趋势	页怨
第九章摇涂装技术	页圆
摇第一节摇涂料的基本组成及其作用	页员
摇第二节摇涂料成膜机理	页缘
摇第三节摇涂装材料	页愿
摇第四节摇涂装工艺与设备	页怨
摇第五节摇几种典型产品涂装	页愿
摇第六节摇涂膜质量评价	页员
摇第七节摇涂装技术的发展趋势	页圆
第十章摇气相沉积技术	页猿
摇第一节摇物理气相沉积 (孕爰)	页猿
摇第二节摇化学气相沉积 (悦爰)	页远
摇第三节摇分子束外延制膜方法	页猿
第十一章摇高能束表面改性技术	页苑
摇第一节摇常用工业激光器及激光加工系统	页苑
摇第二节摇激光表面改性技术	页圆
摇第三节摇离子束表面改性技术	页员
摇第四节摇电子束表面改性技术的特点及应用	页圆
第十二章摇表面微细加工技术	页源

摇第一节摇常用微细加工技术	圆缘
摇第二节摇微细加工技术典型实例一——集成电路芯片制造	圆源
摇第三节摇微细加工技术典型实例二——微型机电系统	圆远
摇第四节摇纳米工艺	圆忽
摇第五节摇生物芯片技术	圆员
第十三章摇其它表面工程技术	圆猿
摇第一节摇溶胶 原凝胶工艺	圆猿
摇第二节摇搪瓷涂覆技术	圆远
摇第三节摇粘涂技术	猿员
参考文献	猿圆

第一章 绪论

第一节 表面工程学的定义和内涵

表面工程学是材料科学与工程中发展最为迅速的学科之一，在机械制造、冶金、电子、汽车与船舶制造、能源与动力、航空航天等工业领域中起着举足轻重的作用，因此越来越受到广大工程技术人员的高度重视。

现有的表面工程技术种类繁多，曾分属于不同的学科。如化学热处理、表面淬火技术曾属于金属材料学，电镀与电刷镀、涂装技术属应用化学或化工工程学，而真空镀膜、离子镀等常归类于物理电子学等。由于发展过程不同，人们习惯于将表面工程技术的内涵限定于与结构材料的耐磨、耐腐蚀、抗氧化等相关的内容，而忽略了其在许多重要领域如微电子、光学领域中的广泛应用。

根据表面工程学学科特点及发展规律，以往的定义偏狭窄，没有全面反映该学科的基本特点。我们认为，表面工程技术应该是指为满足特定的工程需求，使材料或零部件表面具有特殊的成分、结构和性能（或功能）的化学、物理方法与工艺。按此定义，表面工程技术的内涵应该包括如下几个方面：

① 表面改性技术。即能够提高零部件（或器件）表面的耐磨性、耐蚀性、抗高温氧化性能，或装饰零部件（或器件）表面，或者使材料表面具有各种特殊功能（如电性能、磁性能和光电性能等）的有关工程技术。

② 表面加工技术。即能够在材料表面加工或制作各种功能结构元器件的有关技术，如能够在单晶硅表面制作大规模集成电路的光刻技术、离子刻蚀技术等。

③ 表面合成材料技术。即借助各种手段在材料表面合成新材料的技术，如纳米粒子制备过程中的表面工程技术、离子注入制备或合成新材料等。

④ 表面加工三维合成技术。即将二维表面加工累积成三维零件的快速原型制造技术等。

⑤ 上述几个要点的组合或综合。

显然，上述定义下的表面工程技术，由单纯表面改性（~~表面处理~~）扩展到表面加工和合成新材料，其实施对象由“结构材料”扩展到“功能材料”，涵盖材料学、材料加工工程、物理、化学、冶金、机械、电子与生物领域的有关技术与科学，交叉学科的特征名副其实。

表面工程技术所涉及的基材包括几乎所有的工程材料，如金属、陶瓷、半导体材料、高分子材料、混凝土、木材和各类复合材料等，所涉及的工艺方法数以百计，各具特点。同样的工艺应用于不同的材料，或相同的材料采用不同的工

艺, 所得效果可能会相去甚远。有时, 错误地选择了工艺或材料, 不仅达不到预期的目的和效果, 甚至可能破坏零件的表面, 使产品报废。

《表面工程学》是系统介绍表面工程技术原理与特点、应用现状与发展趋势的一本综合性书籍。阅读本书后, 读者可以初步掌握各种表面工程技术的基本特点, 能够根据工程需要, 快速、有效、经济地选择相应的表面工程技术或几种技术的组合, 选择所用材料和制定最佳工艺来解决工程问题, 并具有研究与开发表面工程新技术的能力。

第二节 表面工程技术的特点与意义

概括起来, 表面工程技术的特点与意义体现在如下几个方面:

第一, 它主要作用在基材表面, 对远离表面的基材内部组织与性能影响不大。因此, 可以制备表面性能与基材性能相差很大的复合材料。这对于一些要求综合力学性能良好的零部件(如要求表面耐磨性好、心部韧性好)来说十分重要, 有时甚至是制造这类零部件的唯一工艺手段。

第二, 采用表面涂(镀)、表面合金化技术取代整体合金化, 使普通、廉价的材料表面具有特殊的性能, 不仅可以节约大量贵重金属, 而且可以大幅度提高零部件的耐磨性和耐蚀性, 提高劳动生产率, 降低生产成本。因此, 表面工程技术被广泛应用于提高材料的耐磨、耐蚀、抗高温氧化性能, 零部件的表面装饰以及各类零件的修复等方面。据统计, 全世界各发达国家仅仅因磨损、腐蚀而造成的经济损失就占各国国民生产总值的 $\frac{1}{10}$ ~ $\frac{1}{5}$ 。我国的表面工程技术的运用水平与世界先进水平尚有一定差距, 因磨损、腐蚀而造成的经济损失所占比重更大。采用表面工程技术, 即使只使上述损失降低 $\frac{1}{10}$, 经济效益也是相当可观的。

第三, 表面工程技术可以兼有装饰和防护功能, 在人们的周围创造了一个五彩缤纷的世界, 推动了产品的更新换代。采用表面工程技术还可以在大气与水质净化、抗菌灭菌和疾病治疗等方面发挥重要作用。

第四, 以化学气相沉积、物理气相沉积、掩膜、光刻技术为代表的表面薄膜沉积技术和表面微细加工技术是制作大规模集成电路、光导纤维和集成光路、太阳能薄膜电池等元器件的基础技术。没有它们, 就不可能有今天的微电子工业和光纤通信的辉煌, 当然也就没有今天的信息社会。

第五, 计算机技术与材料科学、精密机械和数控技术相结合, 使二维的表面处理技术发展成为三维零件制造技术, 创造了全新的制造方法——生长型制造法, 不仅大幅度降低了零部件的制造成本, 亦使设计与生产速度成倍提高。

第六, 表面工程技术已成为制备新材料的重要方法, 如可以在材料表面制备整体合金化难以做到的特殊性能合金等。

正是由于表面工程技术的上述特点, 使其在科学技术的发展中占有举足轻重

的作用。早在 20 世纪 80 年代后期，美国商业部就将表面工程技术列入影响 21 世纪人类生活的七大关键技术之一，与计算机科学、生命科学、新能源技术、新材料技术、信息技术和先进制造技术并列。我国也非常重视表面工程技术的发展、创新与应用。科技人员在表面工程技术的研究与开发方面已拥有相当强的实力，一些相关的产业如雨后春笋，蓬勃发展，在国民经济建设中发挥着重要的作用。

第三节 表面工程技术的分类

如前所述，按照表面工程技术的特点，可以将其分为表面改性、表面加工、表面加工三维成型、表面合成新材料等几大类。

表面改性技术

表面改性技术主要指赋予材料（或零部件、元器件）表面以特定的物理、化学性能的表面工程技术。材料的表面性能包括高强度、高硬度、耐蚀性、导电性、磁性能、光敏、压敏、气敏特性等。按照工艺特点的不同，表面改性技术又可分为表面组织转化技术，表面涂层、镀层及堆焊技术（以下简称表面涂镀技术）和表面合金化（包括掺杂）技术等三大类。

（1）表面组织转化技术 它不改变材料的表面成分，只是通过改变表面组织结构特征或应力状况来改变材料性能，如激光表面淬火和退火技术，感应加热淬火技术和喷丸、滚压等表面加工硬化技术等。

（2）表面涂镀技术 它主要利用外加涂层或镀层的性能使基材表面性能优化，基材不参与或者很少参与涂层的反应，对涂层的成分贡献很小。典型的表面涂镀技术包括：气相沉积技术（如物理气相沉积和化学气相沉积等）、化学溶液沉积法（如电镀、化学镀、电刷镀）、化学转化膜技术（如磷化、阳极氧化、金属表面彩色化技术、溶胶-凝胶法等）、各种现代涂装技术、热喷涂和喷焊技术、堆焊技术等。由于表面涂镀技术可以根据零部件或元器件的用途方便地选择或设计表面材料成分，控制表面性能，因此应用很广。

（3）表面合金化和掺杂技术 它主要是利用外来材料与基材相混合，形成成分既不同于基材也不同于添加材料的表面合金化层，如热扩渗技术、离子注入技术、激光表面合金化技术等。当添加的元素含量很微量时，常称之为掺杂。如在微电子技术器件制作时的单晶硅片中热扩渗硼、磷，可以大幅度地改变基材的导电性并形成晶体二极管、三极管等。

表面微细加工技术

表面微细加工技术主要指在材料表面（不大于 1mm）区域内进行各种形状或尺寸的精密、微细加工，使其成为具有各种功能的元器件（或零部件）的技术。

在各种功能元器件的制备过程中，常常需要在特定性能的薄膜上加工、制作

源

各种形状，如导电路径等。这些加工的特点是精度要求高，且主要集中于元器件的表面。如微电子线路板制作的关键基础技术：光刻和腐蚀技术、离子束精密刻蚀技术等，它们和薄膜沉积技术一起，成为微电子工业中的基本制造工艺。近年来，由于微细加工技术在微机电系统（MEMS）中所起的关键作用，产业界正以高度的热情关注该技术的发展动向。

表面加工三维成型技术——快速原型制造

表面加工三维成型技术主要指通过计算机控制，在材料表面不断实现特定形状的涂镀加工与堆积，形成三维零部件（或元器件）的快速原型制造技术。

现代表面工程技术与计算机、自动控制技术相结合，在三维零部件的原型制造方面正发挥越来越重要的作用。典型的例子是各类模具的无模快速制造技术。它一改传统机械制造技术从整体块状毛坯起逐渐除去多余的部分，并最终形成产品成品的过程，而采用逐层堆积，计算机控制使每层形状与该零部件的相应解剖面相同，最终形成产品成品。这两个过程顺序完全相反，得到的结果相同。后者在单件或小批量原型制作时速度远高于前者，制造成本又远低于前者。快速原型制造技术已成为近年来发展最快的表面工程技术或先进制造技术之一。

表面合成新材料技术

表面合成新材料技术主要指采用特定的表面工程技术，在材料表面合成常规工艺方法无法获得的新材料，或者利用材料的表面加工过程获得全新材料的工艺。

由于表面工程技术具有一般整体材料加工技术不具备的优点，如气相沉积技术可从气相原子直接凝固成固相，离子注入技术的粒子可强行注入基材，从而形成相图上无法得到的非平衡材料。

本书将按照各类技术的基本原理进行系统介绍。作为表面工程技术的基础与预备知识，本书还将简要介绍固体表面的基本物理、化学基础知识，影响材料耐磨性、耐蚀性的基本规律，以便为正确选择和运用表面工程技术奠定基础。

第二章 表面工程技术的物理、化学基础

表面工程技术是赋予材料或零部件表面以特殊的成分、结构和性能（或功能）的化学、物理方法与工艺，它的实施对象是固体材料的表面。因此，掌握材料表面与界面的基础知识是正确选择与运用表面工程技术的基础。而成功运用表面工程技术的另外两个要素就是：第一，掌握各种表面工程技术的特点，这将在本书的后续章节中介绍；第二，了解与掌握影响材料表面性能的主要因素。其中，材料的耐磨性和耐蚀性属于系统性质，影响因素众多，本章将重点进行介绍。而材料的电、磁、光学特性等，一般属于材料的本征性能，在以前的课程中或者其它参考书中已有过大量介绍，因此只在以后的章节中附带简要介绍。熟悉本章内容的读者可以跳过本章，而直接阅读其它章节。

第一节 固体的表面与界面

工程材料中，大部分材料属于晶体，如金属、陶瓷和许多高分子材料。一般地，将固相和气相之间的分界面称为表面，把固相之间的分界面称为界面。不同凝聚相之间的分界面称为相界面，同一相中晶粒之间的分界面称为晶界。晶粒尺寸小到微米级以下的晶粒，称为微晶；当晶粒尺寸小到原子数量级时，则晶体结构的远程有序消失，物质呈非晶态。

一、典型固体表面

理想表面

理想表面是理论探讨的基础，它可以想象为无限晶体中插进一个平面，将其分成两部分后所形成的表面，并认为半无限晶体中的原子位置和电子密度都和原来的无限晶体一样。显然，自然界中很难获得这种理想表面。

由于在垂直于表面方向上，晶内原子排列呈周期性的变化，而表面原子的近邻原子数减少，使得其拥有的能量大于晶体内部原子的能量，超出的能量正比于减少的键数，该部分能量即为材料的表面能。表面能的存在使得材料表面易于吸附其它物质。

洁净表面与清洁表面

尽管材料表层原子结构的周期性不同于体内，但如果其化学成分仍与体内相同，这种表面就称为洁净表面，它是相对于理想表面和受环境气氛污染的实际表面而言的。洁净表面允许有吸附物，但其覆盖的几率应该非常低。显然，洁净表面只有用特殊的方法才能得到，如高温热处理、离子轰击加热退火、真空沉积、场致蒸发等。在高洁净度的表面上，可以发生多种与体内不同的结构和成分变化，如弛豫、重构、台阶化、偏析和吸附。弛豫指表面附近的点阵常数在垂直方向上较晶体内部发生明显的变化；重构则是指表面原子在水平方向的周期性不同于体内的晶面；台阶化是指实际晶体的外表面由许多密排面的台阶构成；偏析则是指化学组分在表面区的变化。偏析和析出的区别在于前者结构不变，后者则伴

有新相的形成。

与洁净表面相对应的概念是清洁表面。清洁表面一般指零件经过清洗（脱脂、浸蚀等）以后的表面，与洁净表面必须用特殊的方法才能得到不同。工业上，清洁表面易于实现，只要经过常规的清洗过程即可。洁净表面的“清洁程度”比清洁表面高。

洁净表面与清洁表面这一对概念很重要。在表面工程技术中获得各种涂层或镀膜之前，为了保证涂镀层与基体材料之间有良好的结合，常常需要采取各种预处理工艺获得清洁表面；微电子工业中的气相沉积技术和微细加工技术一般需要洁净表面甚至超洁净表面。

机械加工过的表面

实际零件的加工表面不可能绝对平整光滑，而是由许多微观不规则的峰谷组成。评价实际加工零件表面的微观形貌，一般从垂直于表面的二维截面上测量、分析其轮廓变化。表面的不平整性包括波纹度和粗糙度两个概念，前者指在一段较长距离内出现一个峰和谷的周期，后者指在较短距离内（圆）出现的凹凸不平（圆）。此外，零件的加工表面还与基体内部在物理、力学性能方面有关。实践表明，材料表面的粗糙度与加工方法密切相关，尤其是最后一道加工工序起着决定性的作用。如图圆所示为不同加工方法的材料表面轮廓曲线。

材料表面粗糙度的表示方法有很多。最常用的是采用轮廓的算术平均偏差，其表达式为

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i| \quad (圆)$$

式中， Z_i 为波峰或者波谷的绝对值， n 为测量的波峰或者波谷的个数。

描述材料表面粗糙度的另一个表达式为

$$Rf = \frac{A_{实际}}{A_{投影}} \quad (圆)$$

式中， $A_{实际}$ 为真实面积， $A_{投影}$ 为 $A_{实际}$ 的投影面积，亦即理想的几何学面积。显然，表面粗糙度

材料的表面粗糙度是表面工程技术中最重要的概念之一。它与表面工程技术的特征及实施前的预备工艺紧密联系，并严重影响材料的摩擦磨损、腐蚀性能、表面磁性能和电性能等。例如，在气相沉积技术实施之前，要求加工材料表面有很低的粗糙度，以提高膜的连续性和致密性；热喷涂工艺施工前则要求表面有一定的粗糙度，以

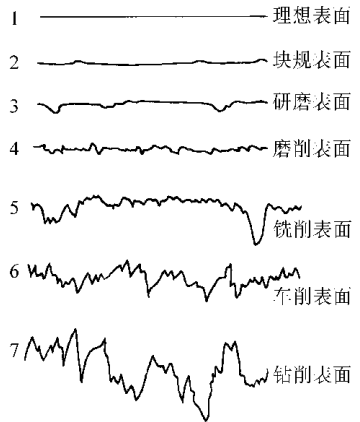


图 圆 不同加工方法形成的材料表面轮廓曲线

提高涂层与基材的结合强度。

灑一般表面

由于表面原子的能量处于非平衡状态，一般会在固体表面吸附一层外来原子。对金属而言，除金以外，其它金属表面在常温常压下会被氧化。因此，一般的零件经过机械加工以后，表面上有各种氧化物覆盖。为此，大部分表面覆层技术在工艺实施之前，都要求对表面进行预处理，清除掉表面的氧化皮，以便提高覆层与基材的结合强度。这些预处理工艺往往是表面工程技术能否成功实施的关键，必须引起充分重视。

二、典型固体界面

材料科学所定义的界面通常指两个块体相之间的过渡区，其空间尺度决定于原子间力作用影响范围的大小，其状态决定于材料和环境条件特性。按照界面的形成过程与特点，最常见的界面类型为如下几种：

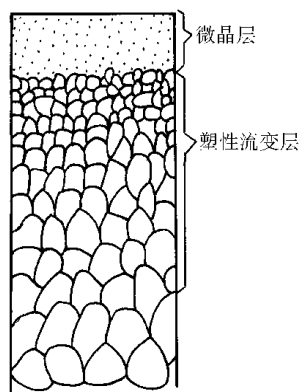
灑基于固相晶粒尺寸和微观结构差异形成的界面

当外力作用于金属表面时，在距离表面几微米范围内，其显微组织有较大的变化。如图 圆原圆所示为抛光金属的表面组织，在离表面约 缘皂的区域内，点阵发生强烈畸变，形成厚度约 员~ 苑皂的晶粒极微小的微晶层，亦称为比尔比层（月透增层），它具有粘性液体膜似的非晶态外观，不仅能将表面覆盖得很平滑，而且能流入裂缝或划痕等表面不规则处。在比尔比层的下面为塑性流变（简称塑变）层，塑变程度与深度有关。例如用 透皂号 杂砂纸研磨黄铜时，其塑变层一般可达 员~ 苑皂。单晶体的塑变层比多晶体的塑变层深，大致与材料的硬度成反比。钢的塑变层内珠光体中的碳化物破碎成微细粒状组织。此外，在机械加工中高应力、高温度的作用下还可能产生孪晶、诱导相变和再结晶等。

灑基于固相组织或晶体结构差异形成的界面

这种界面的典型特征是两相之间的微观成分与组织存在很大的差异，但无宏观成分上的明显区别。例如，钢中的珠光体是由铁素体与渗碳体组成，两者的微观成分与性能存在明显差别。又如，钢表面淬火时，表层的显微组织以马氏体为主，而心部组织仍然保持着原来的退火或正火状态。在表层与心部之间存在一过渡区，它由部分马氏体和部分铁素体、珠光体混合而成。这种相界面虽然在微观尺度的晶体结构上有明显的突变，但从宏观来看，组织的变化存在一个渐变区域。因此，材料在服役过程中不存在表面层剥落等情况。

灑基于固相宏观成分差异形成的界面



播图 圆原圆 金属表层组织形貌示意图

(员) 冶金结合界面当覆层与基体材料之间的界面结合是通过处于熔融状态的覆层材料沿处于半熔化状态下的固体基材表面向外凝固结晶而形成时, 覆层与基材的结合就称为“冶金结合”。冶金结合的实质是金属键结合, 结合强度很高, 可以承受较大的外力或载荷, 不易在服役过程中发生剥落。能够获得这种冶金结合的表面工程技术包括激光熔覆技术、各种堆焊与喷焊技术等。

(圆) 扩散结合界面当两个固相直接接触, 通过抽真空、加热、加压、界面扩散和反应等途径所形成的结合界面即为扩散结合界面, 其特点是覆层与基材之间的成分梯度变化, 并形成了原子级别的混合或合金化。可以获得扩散结合界面的表面工程技术主要为热扩渗工艺。离子注入工艺获得的界面可以看成扩散结合界面的一种特殊形式, 有时也称为“类扩散”界面, 因为它是靠高能量的粒子束强行进入基材内部的。

(猿) 外延生长界面当工艺条件合适时, 在单晶衬底表面沿原来的结晶轴向生成一层晶格完整的新单晶层的工艺过程, 就称为外延生长, 形成的界面称为外延生长界面。外延生长工艺主要有两类: 一种是气相外延, 如化学气相沉积技术; 另一种是液相外延, 如电镀技术等。实际工艺过程中, 外延的程度取决于基体或衬底材料与外延层的晶格类型和常数。以电镀为例, 在两种金属是同种或晶格常数相差不大的情况下都可以出现外延, 外延厚度可达 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ cm。由于外延生长界面在覆层与基材或衬底之间的晶体取向一致, 因此两者原则上应有较好的结合强度。但具体的结合强度高则应该取决于所形成的单晶层与衬底的结合键类型, 如分子键、共价键、离子键或金属键等。

(源) 化学键结合界面当覆层材料与基材之间发生化学反应, 形成成分固定的化合物时, 两种材料的界面就称为化学键结合界面。例如, 在钛合金的表面气相沉积一层 TiC 和 TiN 薄膜, TiC 和 TiN 中的碳原子将部分与基体金属中的 Ti 原子作用, 形成 Ti-C 和 Ti-N 化学键。可以获得化学键结合的表面工程技术主要有物理和化学气相沉积技术、离子注入技术、热扩渗技术、化学转化膜技术、阳极氧化和化学氧化技术等。化学键结合的优点是结合强度较高; 缺点是界面的韧性较差, 在冲击载荷或热冲击作用下, 容易发生脆性断裂或剥落。此外, 材料表面发生粘连、氧化、腐蚀等化学作用也会产生化学键结合界面。

(缘) 分子键结合界面当分子键结合界面是指涂(镀)层与基材表面以范德华力结合的界面。这种界面的特征是覆层与基材(或衬底)之间未发生扩散或化学作用。部分物理气相沉积层、涂装技术中有机粘结涂层与基材的结合界面等均属于典型的分子键结合界面。

(远) 机械结合界面当机械结合界面指覆层与基材的结合界面主要通过两种材料相互镶嵌的机械连接作用而形成。表面工程技术中覆层与基体之间以机械结合的主要包括热喷涂与包镀技术等。