

## 表面工程技术的发展和應用\*

徐滨士 马世宁 刘世参 张振学 张伟

(装甲兵工程学院 北京 100072)

**摘要** 介绍了表面工程在中国的最新发展,表面工程的学科体系与特色,表面工程技术在维修、节能、节材、降耗和高技术发展方面的作用及应用,并提出了对发展表面工程的建议。

**关键词** 表面工程,表面工程技术,复合

### APPLICATION AND DEVELOPMENT OF SURFACE ENGINEERING

Xu Binshi Ma Shining Liu Shican Zhang Zhenxue Zhang Wei

(Armored Force Engineering Institute, Beijing 100072)

**Abstract** The latest developments, subfields and characteristics of surface engineering in China are described including the application of surface engineering on maintenance, material - saving, energy - saving and high technology. Some suggestions for future development are given.

**Key words** surface engineering, surface engineering technologies, complex

#### 1 表面工程的发展历史

表面工程是经表面预处理后,通过表面涂覆、表面改性或多种表面工程技术复合处理,改变固体金属表面或非金属表面的形态、化学成分、组织结构和应力状态等,以获得所需要表面性能的系统工程<sup>[1]</sup>。表面工程学科发展的重要标志是1983年英国伯明翰大学沃福森表面工程研究所的建立和1985年《表面工程》国际刊物的发行。鉴于此,国际热处理联合会也改名为国际热处理及表面工程联合会<sup>[2]</sup>。中国机械工程学会1987年建立了学会性质的表面工程研究所,1988年出版了中国的《表面工程》期刊,1997年经国家科委正式批准更名为《中国表面工程》,面向国内外公开发行。1989年召开了第一届全国表面工程学术交流会,1991年召开了第二届全国表面工程学术会,同时举办了首届中日表面工程学术研讨会,1993年成立了中国

机械工程学会表面工程分会,1995年在北京召开了国际表面科学与工程学术会议,1997年11月在上海召开了第一届表面工程国际会议,使表面工程的发展达到了一个新的高度。近年来,表面工程发展异常迅速,在我国的大专院校、科研院所、工矿企业里相继建立了数以百计的以“表面工程”或“表面技术”冠名的研究机构。一些国内外知名专家预言,表面工程将成为主导21世纪工业发展的关键技术之一。

工业现代化的发展,对各种设备零部件表面性能的要求越来越高,特别是在高速、高温、高压、重载、腐蚀介质等条件下工作的零件,其材料的破坏往往自表面开始,诸如磨损、腐蚀、高温氧化等,表面的局部损坏又往往造成整个零件失效,最终导致设备停产。因此,改善材料的表面性能会有效地延长其使用寿命,节约资

\* 国家经贸委1998年第一批技术创新项目  
1998 - 11 - 30收到初稿,1999 - 03 - 10修回

源,提高生产力,减少环境污染.表面工程的最大优势是能够以多种方法制备出优于本体材料性能的表面功能薄层,其厚度一般为几微米到几毫米,仅为结构尺寸的几百分之一到几十分之一,却使零件具有了比本体材料更高的耐磨性、抗腐蚀性和耐高温等能力,采用表面工程技术的平均效益高达5—20倍以上.表面工程能直接针对许多贵重零部件的失效原因实行局部表面强化、修复、预保护,以达到延长使用寿命或重新恢复使用价值的目的.我国自第六个五年计划以来,通过在设备维修领域和制造领域推广应用表面工程已取得了几百亿元的经济效益.在国家的节能、节材“九五”规划中建议将发展表面工程作为重大措施之一,并列为节能、节材示范项目.国家计委已决定建立国家表面工程研究中心.材料表面改性作为传统材料性能优化的基础研究也被列入国家自然科学基金“九五”优先资助领域.

## 2 表面工程学科体系与特色

### 2.1 表面工程学科的形成与发展

根据英国与德国的统计资料,目前,表面工程研究在摩擦学各个领域中的地位已上升到第一二位<sup>[3]</sup>.

表面工程学科的形成和发展,是与其在生产中的作用分不开的.可以概括为以下5个方面:首先,它是发展生产,提高产品质量和经济效益的需要;第二,它为高新技术的发展提供了特殊的材料;第三,它是设备技术改造与维修的有效手段;第四,它是节约能源和资源的重要途径;第五,它还是装饰与美化人民生活的得力措施.正是由于这些重要作用,使表面工程已被许多传统学科(如材料学、摩擦学、冶金学、固体力学等)列为重要研究方向,成为学科的基本组成部分,一些大专院校的相关专业已把表面工程列为本科生、研究生的教学内容,表面工程的教材和学术专著不断问世,以表面工程为主题的学术活动得到各行业专家及工程技术人员的支持与参与,一个独立的表面工程学科体系正在逐步形成,表面工程学科成为令世人瞩目的新

领域.

### 2.2 表面工程的学科特色及其与表面物理和界面物理的关系

表面工程是由多个学科交叉、综合、复合,以系统为特色,逐步发展起来的新兴学科.它以“表面”及“界面”为研究核心,在有关学科理论的基础上,根据材料表面的失效机制,以应用各种表面技术及其复合表面技术为特点,逐步形成了与其他学科密切相关的表面工程基础理论,主要有:表面失效分析理论、表面摩擦与磨损理论、表面腐蚀与防理论、表面(界面)结合与复合理论等.表面工程的发展不仅在学术上丰富了材料学、冶金学、机械学、电子学等学科,而且开辟了新的研究领域,如高能束冶金学、等离子体物理学、动态金属学、摩擦化学、微观摩擦学、纳米摩擦学等.表面工程的学科体系可初步概括为如图1所示.

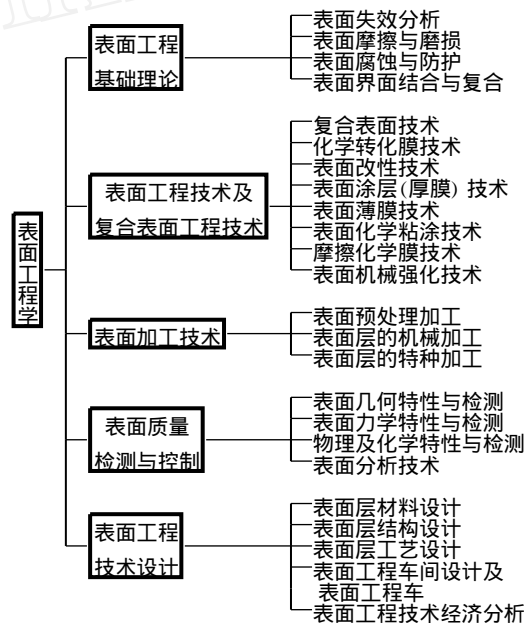


图1 表面工程的学科体系

从图中可以看出,研究表面与界面的结合及复合理论是表面工程基础理论的重要支柱之一,它是发展新型表面工程技术、研究涂层性能、开拓其应用的理论基础.

### 2.3 表面工程的技术特色

表面工程的重要技术特色是由多种表面技术的复合所形成的新型复合表面工程技术.由

于其固有的局限性,应用单一的表面技术所获得的材料表面性能往往不能满足日益苛刻的工况条件的要求.随着科学技术的进步,国际上发展了综合运用两种或多种表面技术的复合表面工程技术,并称为第二代的表面工程技术<sup>[4]</sup>.实践证明,这种复合表面工程技术通过最佳协同效应解决了一系列高新技术发展中特殊的工程技术问题.

常用的表面工程技术有:堆焊技术、熔结技术(低真空熔结、激光熔敷等)、电镀、电刷镀及化学镀技术、非金属镀技术、热喷涂技术(火焰喷涂、电弧喷涂、等离子弧喷涂、爆炸喷涂、超音速喷涂、低压等离子弧喷涂等)、塑料喷涂技术、粘涂技术、涂装技术、物理与化学气相沉积(真空蒸镀、离子溅射、离子镀等)、摩擦化学膜、化学热处理、激光相变硬化、激光重熔、激光非晶化、激光合金化、电子束相变硬化、离子注入等.

目前,复合表面工程技术的研究和应用已

取得了重大进展,如热喷涂与激光重熔的复合、热喷涂与刷镀的复合、化学热处理与电镀的复合、表面强化与固体润滑膜的复合、多层薄膜技术的复合、金属材料基体与非金属材料涂层的复合等等,复合表面工程技术使本体材料的表面薄层具有了更加卓越的性能.

## 2.4 表面工程的技术设计

为了更有效地发挥表面工程的应用效果,在确定采用某种表面工程技术之前,要进行科学的表面工程技术设计.在进行技术设计之前,要了解加工或修复的零件的性能要求或零件失效分析的结果,如磨损、腐蚀失效分析,针对上述要求进行表面工程技术的工艺设计,选择相应的表面技术及涂层材料、表面层成分、组织结构、机械性能、工艺参数以及各种表面层的性能检测方法等.表面工程的技术设计体系如图2所示.

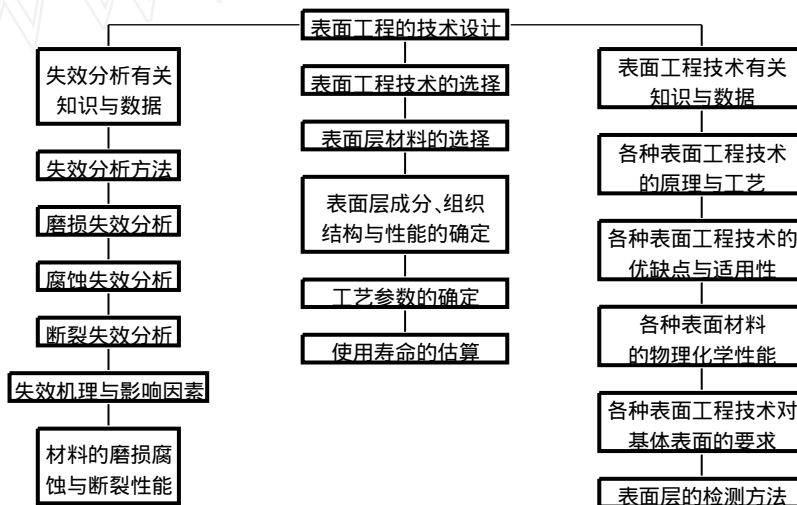


图2 表面工程的技术设计体系

## 3 表面工程技术的应用

表面工程在生产 and 实践中得到了广泛的应用,下面简单介绍一下表面工程技术在设备维修和改造,节能、节材、降耗及高新技术方面的应用.

### 3.1 表面工程技术在设备维修和改造中发挥了重大的作用

随着先进制造技术及设备工程学的不断发展,制造与维修将越来越趋于统一.“维修”已被赋予了更广泛的含义,1984年美国“技术评论”提倡旧品翻新或再生,并称为“重新制造”<sup>[5]</sup>.重新制造所需能源约为制造新品的20%—

60%,价格只有新品的40%—60%<sup>[6]</sup>。许多采用表面技术处理过的旧零部件,其性能要优于新品。中国设备管理协会技术委员会应用电弧喷涂技术成功地修复了长江三峡工程中挖泥船的发动机曲轴,当时如从日本购买新轴,加上运费和进口关税等需人民币120多万元,而采用电弧喷涂技术修复,总费用仅3.5万元,不足曲轴价格的3%,其经济效益是十分明显的<sup>[7]</sup>。1994—1995年期间,铁道部大桥工程局承建的汕头海湾大桥和西陵长江大桥的悬索鞍座位于桥两端近百米高的桥墩上,架设主缆后,为调整力的平衡,必须多次推移承受上万吨正压力的鞍座。国外的办法是在鞍座摩擦副中安装数千枚滚针,这对几十吨重的鞍座支撑板、鞍座及数千枚滚针的制造精度、热处理工艺、加工质量要求极高,而我国的制造工艺还达不到要求。因此,减小重载下摩擦副的摩擦系数及解决施工工艺是建桥的关键。为此,全军装备维修表面工程研究中心提出了复合减摩涂层设计及相应的现场施工方案,采用复合减摩技术使摩擦系数降低1倍以上,施工费用减小10倍以上,使鞍座顺利推移到位,该技术达到了国际先进水平<sup>[8]</sup>。北京邮票厂从瑞士进口的七色机是高速轮转印邮票机,一个辊筒原来只能打50—150万张,之后,孔的质量严重下降,不能继续使用。近年来,七色机主要由于打孔器辊筒质量的原因,每年只能完成1000万张左右,而且还需要经常更换辊筒,距完全发挥七色机的应有效率相差很远,直接影响邮票的发行量。清华大学和北京机电研究院利用高能密度的激光对邮票打孔器的辊筒的表层辐照,其表层被迅速加热至奥氏体化温度以上,并在激光停止辐射后快速自淬火得到马氏体组织,实现了固态相变硬化,即激光淬火,孔刃部硬度可达Rc60以上,经处理后,一个辊筒就可以打1000万张,而且仍可继续使用。每年直接经济效益为250—500万元<sup>[9,10]</sup>。

### 3.2 表面工程是节约能源和资源的重要途径

表面工程可以补救加工超差废品,大大减少废品,节约能源和材料。如1988年,首钢冶金

机械厂制造的7.5吨钢包回转台,其 $\phi 500\text{mm}$ 的柱塞尺寸小了0.12mm。在安装时间紧迫,用其他工艺很难修复的情况下,装甲兵工程学院利用电刷镀在工件表面沉积形成铜镍复合镀层,修复了工件,按时完成安装任务,并节约了能源和材料。

近年来,表面工程中的一系列防腐防护技术在节材中发挥了举足轻重的作用。全军装备维修表面工程研究中心研究开发了新型铝合金防腐材料,以电弧为热源,将两根金属丝均匀、连续地分别送进电弧喷涂枪中的导电嘴内,导电嘴分别接电源的正负极,当两金属丝材端部由于送进而互相接触时,在端部之间短路并产生电弧,使丝材端部瞬间熔化并用压缩空气把熔化金属雾化成微熔滴,以很高的速度喷射到工件表面,形成电弧喷涂层。将此涂层应用于南海地区高温、高湿、高盐雾恶劣环境下中修舰船的钢结构防腐,经过5年考核,防腐效果明显,经测算预计寿命可提高到15年以上。该项技术可大大延长舰船防腐寿命,减少舰船涂装次数和换板量。在一个中修期内,采用该项技术的防腐费用,仅为原有技术的20%,投入产出比在中修时为1:3;在新造时为1:6。这对节约材料和经费,延长舰船寿命有重要意义<sup>[11]</sup>。1995年,该中心又首次在海军新建造的油污水监测处理船上采用电弧喷涂技术成功地进行了防腐综合治理。该技术还成功地应用于电站、造纸、化学工业锅炉水冷壁管道热腐蚀和煤矿井筒大面积防腐蚀<sup>[12]</sup>。

### 3.3 表面工程在高新技术上的应用

表面工程是随着高新技术的出现而发展起来的一项工程技术,不仅被用于一般设备零部件的防护、强化和修复,而且还为高新技术的发展提供了工艺及材料支持。

在电子信息技术中,表面工程可为其提供关键的薄膜材料及功能器件,如利用真空溅射镀膜的方法,通过荷能离子束轰击Si靶材,使靶材表面的原子飞逸出来,然后在大规模集成电路中以SiO<sub>2</sub>为基的绝缘衬底上生长Si的薄膜技术已得到应用<sup>[13]</sup>。金刚石薄膜具有极为优

异的导热性、高介电性和半导体性能,是制作超大规模集成电路中最理想的功能材料,它主要是采用化学气相沉积的方法制备<sup>[14]</sup>。

表面工程在制备新型材料方面具有特殊的效应。非晶态金属或合金具有优异的耐蚀性、耐磨性、高导磁性、高强韧性、低膨胀性等。采用气相沉积、电镀、刷镀、激光等表面技术都可以获得非晶态薄膜或特种性能涂层。例如,应用离子镀膜、溅射镀膜、化学气相沉积、离子束辅助沉积等方法制备的 TiN、TiC、TiNC、ZrN、CrN 等硬质或超硬质涂层,这些涂层已广泛应用于刀具、模具等的强化<sup>[15]</sup>。在超导材料研究方面,日本已开发了用激光制备高性能超导材料的技术,可制成超导带材料。另外还有采用热喷涂技术制备超导涂层的报道。

离子注入,是把某种元素的原子电离成离子,并使其在几十到几百千伏电压下进行加速,在获得较高速度后射入放在真空靶室中的工件表面的一种离子束加工技术。离子注入技术可以改善材料表面质量,使一些金属生物材料、陶瓷等表面质量具有优异的性能。通过在人造生物器官中注入钛等离子可以大大提高器官的适应性,解决了人造器官与人体肌肉生物相容性的难题。现在,人造骨、关节、牙齿、皮肤、血管等人造生物材料已经开发成功<sup>[16]</sup>。用等离子弧加热法喷涂制造人工齿根的技术也已得到应用。

#### 4 表面工程中的物理问题

各种表面工程技术的发展是与物理的发展紧密相连、息息相关的,热喷涂技术最早采用的是氧气和燃料气体燃烧的火焰作为热源进行喷涂,由于热源的温度只有 3000 左右,所以喷涂的材料及喷涂效率都受到严重的限制;随着电的普及,人们又开发了以电弧为热源的电弧喷涂技术;当人们发现了物质的第四态——等离子态,又将等离子体应用于热喷涂技术,发明了等离子喷涂技术,等离子体温度可以高达 6000—12000,而且热源集中,该技术特别适用于喷涂薄壁零件;后来随着人们对激光技术

的开发和利用,又发明了激光喷涂技术,大大提高了喷涂的效率<sup>[17]</sup>。

研究表面和界面的机理和物理现象,有助于推动表面工程技术的发展。例如类金刚石薄膜是一种性能优异的薄膜,具有高硬度、高导热率、低摩擦系数、低热膨胀系数、化学稳定性较高等优点,是一种理想的刀具材料。CVD 金刚石薄膜用作刀具涂层被认为是最早能实现其工业化应用的领域之一,但是薄膜涂层与基体的结合力很差,还有,像高速钢等钢类材料还存在碳的扩散问题,如何选择合适的基体或过渡层材料并深入研究涂层与基体的结合机理以提高金刚石薄膜与基体的结合能力是摆在许多物理学家和材料学家面前的一个重要问题<sup>[18]</sup>。立方氮化硼也是一种仅次于金刚石的优质的硬质膜,但是由于许多材料与它的膨胀系数相差悬殊,所以大大影响了其应用<sup>[19]</sup>。

#### 5 开拓表面工程,迎接新世纪的挑战

目前,许多发达国家都在努力研究和应用各种提高零件表面性能的新技术、新工艺,使得诸多表面工程技术不仅成为了先进制造技术中的重要工艺方法,而且在设备的技术改造和维修方面发挥了重要作用。我国的表面工程在过去的十几年中,已获得了重大发展,在国民经济中发挥了重要作用。在研究水平与规模方面,可与国际水平相比,并有自己的独创和特色,在重大工程中的部分应用已达到国际先进水平。为了发展表面工程,支持先进制造技术发展,现提出如下建议:

(1) 加强表面工程学科的建设,深入开展表面工程基础理论的研究,全面了解表面(界面)层的显微结构与其性能的关系,为逐步建立表面科学的体系奠定基础;

(2) 加强产学研的联合,承担对国民经济建设具有重大影响的关系全局的重点工程项目和关键技术的攻关,对关键项目进行系统的表面工程技术设计;

(3) 深入研究和发 展各种表面工程技术和物理

复合表面工程技术、表面材料,充分发挥各种表面工程技术和材料的综合优势;

(4) 逐步建立和健全表面工程技术设计,全面、优化、综合、系统地应用各种表面工程技术;

(5) 大力开展维修表面工程技术或重新制造技术的应用及研究,为表面工程技术在设计新设备和制造新产品过程中应用新技术、新材料积累经验,建立相应的维修表面工程技术中心,面向全社会服务;

(6) 加强表面工程设备的研制工作,注重应用微电子等技术对设备进行改造,逐步实现各种表面工程技术装备的机械化、自动化、系列化、标准化、配套化,不断提高表面工程的装备水平;

(7) 大力推广应用节能、节材、有利于环境的量大面广、成熟配套的表面工程新技术、新材料;

(8) 加强表面工程技术在设备制造和新产品制造过程中的研究与应用,以国民经济建设中关键装备的重要零部件及关键机电产品的表面质量的提高为目标,尽快为机电行业等部门提供一批实用、成熟、先进的表面工程技术;

(9) 办好《中国表面工程》杂志,跟踪国际科技前沿,积极开拓国际交流与合作。

表面工程在制造业中的应用及发展方兴未艾、前景广阔。相信在我国表面工程专家及工程技术人员共同努力下,随着表面工程学科和技术的发展及其向现实生产力的转化,各种表面工程技术将促进我国先进制造技术的发展,并有力地推动产品制造和设备维修技术的进步,从而全面提高我国经济增长质量和我国产

品在国际市场上的竞争能力,并建立起具有我国特色的表面工程学科体系。

## 参 考 文 献

- [1] 师昌绪. 表面工程与维修. 北京:机械工业出版社, 1996. 序言
- [2] Bell T. Surface Engineering Materials and Technologies for the Twenty-first Century. Advanced Manufacturing Technology. CMES, Beijing, 1996
- [3] Czacchos H. Wear, 1984, 100:579—589
- [4] Bell T. 表面工程, 1989, (4): 1—2
- [5] 徐滨士, 马世宁. 见: 全国第二届表面工程学术讨论会论文集. 1991. 1—6
- [6] 徐滨士. 表面工程, 1991, (1): 1—27
- [7] 马世宁, 毕志夫, 王保田. 表面工程, 1994, (4): 7—10
- [8] 马世宁, 徐滨士. 表面工程, 1997, (3): 5—7
- [9] 闫毓禾, 钟敏霖. 高功率激光加工及其应用. 天津: 天津科学技术出版社, 1994. 75—165
- [10] 李志忠. 激光表面强化. 北京: 机械工业出版社, 1992. 90—260
- [11] Xu Binshi, Ma Shining, Wang Jianjun. Surface Engineering, 1995, 11(1): 38—40
- [12] Xu Binshi, Ma Shining, Liu Jiujun. 见: 香港第四届国际制造科技会议论文集(CD版), 香港蒋氏基金会, 1997
- [13] 唐伟忠. 薄膜材料制备原理、技术及应用. 北京: 冶金工业出版社, 1998. 41—72
- [14] 曲敬信, 汪鸿宏. 表面工程手册. 北京: 化学工业出版社, 1998. 296—306
- [15] 中国机械工程学会热处理学会主编. 表面沉积技术. 北京: 机械工业出版社, 1989. 92—204
- [16] 汪泓宏, 田民波. 离子束表面强化. 北京: 机械工业出版社, 1992. 291—411
- [17] 刘江南. 金属表面工程学. 北京: 兵器工业出版社, 1995. 215
- [18] 田民波, 刘德令编译. 薄膜科学与技术手册. 北京: 机械工业出版社, 1991. 850—865
- [19] 刘正义, 匡同春. 见: '98 全国材料表面与界面的科学与工程研讨会论文摘要集. 中国金属学会材料科学专业委员会等, 1998. 20—27