

纳米表面工程的进展与展望*

徐滨士 刘世参 梁秀兵

(装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室 北京 100072)

摘要: 表面工程经历了传统表面工程、复合表面工程、纳米表面工程三个发展阶段。获得纳米表面层的基本途径是表面气相沉积法、表面自身纳米化法和表面纳米涂覆法。目前已进入实用阶段的纳米表面工程技术有纳米热喷涂技术、纳米电刷镀技术、纳米减摩自修复技术、纳米固体润滑技术、纳米粘接技术、纳米薄膜气相沉积技术、纳米涂装技术以及金属表面纳米化加工技术。纳米表面工程是先进制造技术和再制造工程的重要组成部分, 又为先进制造技术与再制造工程的发展提供了技术支持。纳米表面工程对提高机电产品性能和质量、降低材料消耗以及节约能源、保护环境有重要意义。扩充其实现途径, 扩展其与传统表面工程的复合, 扩大其工业应用是纳米表面工程发展的重要方向。

关键词: 表面工程 纳米表面工程 再制造工程

中图分类号: TG17

0 前言

表面技术的发展历史悠久, 我国古代就已应用到了贴金、镏金和桐油防腐等表面技术。近代表面技术的门类更加齐全, 工业应用实效更加明显, 已成为先进制造技术的重要组成部分。1983 年英国 T.Bell 教授在国际上首先提出了表面工程的概念, 为表面工程学科的发展奠定了基础^[1]。1987 年徐滨士等积极倡导表面工程, 提出了完整的学科体系, 并以新的研究成果和专著推动我国表面工程事业的发展。随着纳米材料和纳米技术的进步, 2000 年徐滨士、欧忠文等首先提出了“纳米表面工程”的概念^[2], 标志着表面工程进入新的发展阶段。当前我国在纳米复合涂敷技术、纳米薄膜技术、金属表面纳米化加工技术及纳米润滑技术方面取得了有实用价值的成果。总结纳米表面工程的发展经验, 并进行展望, 对推动我国纳米表面工程的发展具有重要意义。

1 表面工程的发展

表面工程是指经表面预处理后, 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

固体材料表面的形态、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^[3]。表面工程的基本特征是综合、交叉、复合、优化。表面工程是由多个学科交叉、综合而发展起来的新兴学科, 它以“表面”为研究核心, 在有关学科理论的基础上, 根据零件表面的失效机制, 以应用各种表面工程技术及其复合为特色, 逐步形成了与其他学科密切相关的表面工程基础理论。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, 赋予零件耐高温、防腐蚀、耐磨损、抗疲劳和防辐射等性能, 这层表面材料与制作部件的整体材料相比, 厚度薄, 面积小, 但却承担着工作部件的主要功能。表面工程是 21 世纪工业发展的关键技术之一, 它是先进制造技术的重要组成部分, 同时又为其发展提供技术支撑。

表面工程概念的提出只是近 20 年的事情。1983 年英国伯明翰大学表面工程研究所的成立以及 1985 年国际刊物《表面工程》的发行成为表面工程学科发展的重要标志^[1]。1986 年在布达佩斯举行的国际材料与热处理第五届年会上根据联合会主席 T. Bell 教授的倡议, 将“国际材料与热处理联合会”改名为“国际热处理及表面工程联合会”, 有关表面工程国际会议随后连续不断召开。中国机械工程学会于 1987 年建立了学会性质的表面工程研究所, 1988 年出版了第一本中国《表面工程》期刊并连续出版至今(1998 年起改名为《中国表面工程》)。1993 年成立了中国机械工程学会表面工程分会, 国内已召开了 4 次国际表面工程学术会议, 国内表面工程方面的学术会议每年都有 5~6 次。许多院校和研究单位

* 纪念《机械工程学报》创刊 50 周年——“机械工程技术的历史、进展与展望”主题征文。国家自然科学基金重点项目(50235030)、中国工程院 2002 年咨询项目(12/2002A)、国家 973 项目子项目(G1999065009)、国家重大技术创新项目(98k14)、中英政府科技合作项目(2002/209 M3)和中波政府科技合作项目(283-20)。20030708 收到初稿, 20030810 收到修改稿

的学术会议每年都有 5~6 次。许多院校和研究单位都设立了表面工程研究所,许多以表面工程命名的企业不断开拓市场。自第六个“五年计划”以来,通过在设备维修领域和先进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^[4]。

表面工程的推广作为国家“九五”规划中有关节能节材项目的重大措施之一,被列为节能、节材的示范项目。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”、“十五”优先资助领域^[5]。由于表面工程的重要作用 and 地位,许多先进的表面工程技术及其基础理论研究被列入了国家自然科学基金、“863”、“973”项目、国家重大技术创新项目、国家重点科技攻关项目等。

表面工程从诞生至今,经历了三个发展阶段:第一代为传统的单一表面技术阶段,包括热喷涂、电刷镀、激光熔覆、PVD、CVD 技术以及激光束、离子束、电子束表面改性等;第二代为复合表面工程阶段,即将两种或多种传统的表面技术复合应用,起到“1+1>2”的协同效果。例如,热喷涂与激光(或电子束)重融的复合,热喷涂与电刷镀的复合,化学热处理与电镀的复合,多层薄膜技术的复合等。这些技术复合已成为表面性能的“倍增器”;第三代即为现今的纳米表面工程阶段,它将纳米材料和纳米技术与传统表面工程进行了有机地结合与应用^[6]。

2 纳米表面工程的内涵及实现方法

纳米技术是 20 世纪 80 年代末期诞生并正在崛起的新技术。1990 年 7 月,在美国巴尔的摩召开了国际首届纳米科学技术会议(Nano-ST)。纳米科技研究范围是过去人类很少涉及的非宏观、非微观的中间领域(10^{-9} ~ 10^{-7} m),它的研究开辟了人类认识世界的新层次。研究发现,许多具有力、热、声、光、电、磁等特异性能的低维、小尺寸、功能化的纳米结构表面层,能够显著改善材料的组织结构或赋予材料新的性能。

将纳米材料、纳米技术运用到表面工程中,使表面工程的发展进入了新阶段,“纳米表面工程”这一全新的概念应运而生。2000 年,徐滨士等首先提出了“纳米表面工程”的概念^[2],指出“纳米表面工程”就是充分利用纳米材料和纳米技术提升改善传统表面工程,通过特定的加工技术或手段,改变固体材料表面的形态、成分、结构等,从而赋予表面全新功能的系统工程。2002 年国际表面工程学科创始人、中国工程院外籍院士、英国皇家工程院院

士、伯明翰大学 T. Bell 教授访华时对纳米表面工程的提法给予了充分肯定,并确定要与中国联合开展纳米表面工程研究。经双方努力,已将“用于高性能汽车零件的纳米复合涂层及复合表面工程”正式列为中英政府科技合作项目。

实现纳米表面工程的关键是使材料得到具有纳米特征的表面层。目前,实现的方法主要有三种^[7]:表面气相沉积法、表面自身纳米化法和表面纳米涂覆法,如图 1 所示。

(1) 表面气相沉积法。由 PVD、CVD 等方法,在基体表面气相沉积一层纳米结构表层,见图 1a。表层内晶粒比较均匀、晶粒尺寸可控;表层与基体之间存在着明显的界面。

(2) 表面自身纳米化法。对于多晶材料,采用非平衡处理方法增加材料表面的自由能,可以使粗晶组织逐渐细化至纳米量级,如图 1b。这种材料的主要特征是:晶粒尺寸沿厚度方向逐渐增大;纳米结构表层与基体之间没有明显的界面;处理前后材料的外形尺寸基本不变。由非平衡过程实现表面纳米化主要有两种方法,即表面机械(加工)处理法和非平衡热力学法,不同方法所采用的工艺和由其导致纳米化的微观机理均存在着较大的差异。

(3) 表面纳米涂覆法。如图 1c 所示,利用热喷涂、电刷镀和粘涂等技术制备涂覆层时,在制备材料中添加纳米颗粒以改变涂覆层本身的综合性能或制备出特殊的功能涂层。

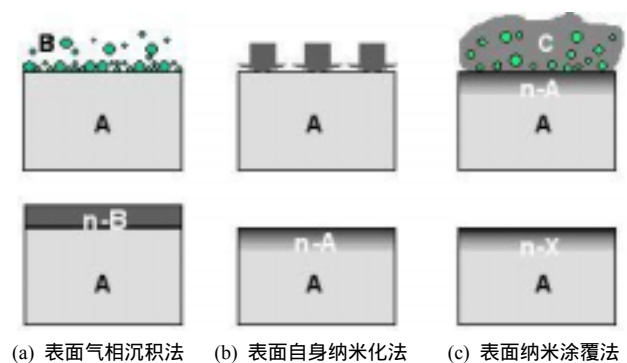


图 1 纳米表面工程的实现方法

3 实用纳米表面工程技术

目前,围绕以上三种方法,尤其是围绕技术相对成熟、适用范围相对广泛的表面纳米涂覆法,已开发出多种具体而实用的纳米表面工程技术。

3.1 纳米热喷涂技术

热喷涂技术在表面工程领域中应用十分广泛,

如超音速火焰喷涂(HVOF)、高速电弧喷涂、气体爆燃式喷涂、电熔爆炸喷涂、超音速等离子喷涂和真空等离子喷涂等。纳米热喷涂技术就是以现有热喷涂技术为基础,通过喷涂纳米材料而得到纳米涂层。

热喷涂纳米涂层可分三类:单一纳米材料涂层体系;两种(或多种)纳米材料构成的复合涂层体系;添加纳米颗粒材料的复合体系,其中添加陶瓷或金属陶瓷颗粒的复合体系较容易实现。目前,完全的纳米材料涂层由于技术繁杂、难度大,离应用还有相当距离。大部分的研究开发工作集中在第三种,即在传统涂覆层技术基础上,添加复合纳米材料,可在较低成本下,使涂覆层功能得到显著提高。例如,美国纳米材料公司通过特殊粘结处理制备的专用热喷涂纳米粉,用等离子喷涂方法获得了纳米结构的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 涂层,致密度达 95%~98%,结合强度比传统喷涂粉末涂层提高 2~3 倍,耐磨性提高 3 倍^[7, 8]。电弧喷涂纳米结构涂层(如图 2)也呈现出良好的耐磨性^[9]。

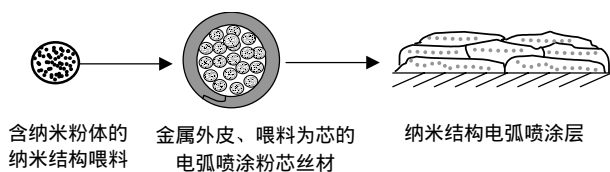


图 2 电弧喷涂纳米结构涂层的制备

纳米热喷涂技术为零件表面强化提供了最新技术手段,提升了装备再制造的技术水平,扩大了装备再制造的使用范围,使重要装备关键零部件的再制造成为可能,效果非常显著。

3.2 纳米电刷镀技术

电刷镀技术具有设备轻便、工艺灵活、镀覆速度快和镀层种类多等优点,被广泛应用于机械零件表面修复与强化,尤其适用于现场及野外抢修。纳米电刷镀就是在镀液中添加特种纳米颗粒的新型电刷镀技术。装备再制造技术国防科技重点实验室的研究表明,纳米电刷镀复合涂层可显著提高材料的摩擦学性能,尤其提高了耐高温磨损及抗接触疲劳性能。例如在快速镍镀层中添加经改性处理的纳米 Al_2O_3 、 SiC 和金刚石粉后,其显微硬度和抗微动磨损性能明显高于传统快速镍刷镀层。纳米电刷镀层的硬度是不含纳米颗粒电刷镀层的 1.5~1.7 倍,耐磨性是 1.6~2.5 倍,抗接触疲劳寿命由 10^5 周次提高到 10^6 周次,可服役温度由 200 °C 提高到 400 °C^[10, 11]。纳米电刷镀技术已在装备再制造中得到具体运用,解决了重载车辆、舰船和飞机发动机再制造中的一些关键技术难题。

图 3a、b、c 分别是普通快镍镀层表面形貌、添

加了纳米三氧化二铝($n\text{-Al}_2\text{O}_3$)颗粒的镍基复合镀层表面形貌及复合镀层的透射组织,可见 $n\text{-Al}_2\text{O}_3$ 颗粒在镀层表面的弥散沉积,阻碍了基相镍金属的连续生长,从而使纳米镀层组织更细小,表面更光洁平整。

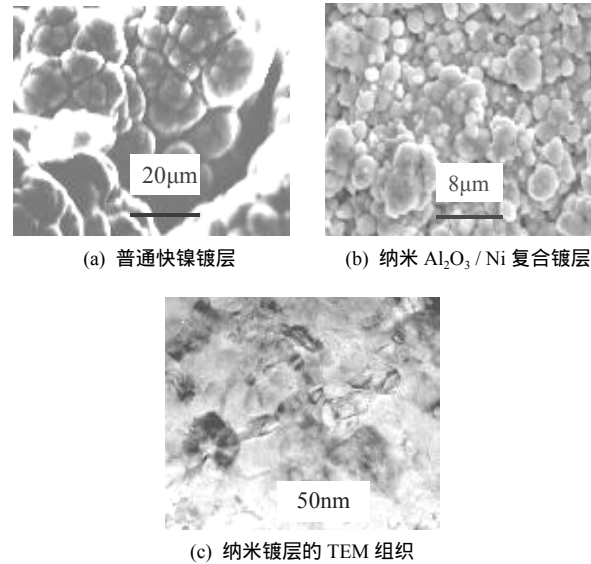


图 3 镀层表面形貌及 TEM 组织

3.3 纳米固体润滑技术

固体润滑是指利用固体材料本身的润滑性来减轻接触表面之间磨损程度的润滑方式,它是对流体润滑的有力补充,一般用于高温、高负荷、超低温、超高真空、强氧化和强辐射等特殊工况。固体润滑不仅可用于无油润滑的干摩擦场合,也可以广泛用于有油润滑的情况,形成润滑效果更好的“流体+固体”的混合润滑^[12]。对黑色金属材料进行低温离子渗硫处理,可在材料表面得到厚度不超过 10 μm,并具有纳米结构特征的 FeS 固体润滑涂层(表面形貌如图 4a)。摩擦学试验表明,该涂层的摩擦学性能非常优异,其摩擦因数明显低于原始钢表面和普通电解渗硫 FeS 涂层(如图 4b)。纳米固体润滑技术已用于发动机缸套—活塞环、喷油嘴针阀及滚动轴承等精密偶件的减摩,寿命延长均在 1 倍以上。

3.4 纳米减摩自修复添加剂技术

减摩、耐磨、自修复问题是摩擦副需解决的关键问题,润滑油添加剂技术是延长零件摩擦副寿命的重要手段,也是国外表面工程的重要发展方向。纳米减摩自修复添加剂技术就是将含有纳米铜粉等金属颗粒在内的复合添加剂加入润滑油中,纳米颗粒随润滑油分散于各个摩擦副接触表面,在一定温度、压力、摩擦力作用下,摩擦副表面产生剧烈摩擦和塑性变形,添加剂中的纳米颗粒就会在摩擦表

面沉积, 并与摩擦表面作用, 填补表面微观沟谷, 从而形成一层具有抗磨减摩作用的修复膜。装甲兵工程学院已开发出具有自主知识产权的纳米减摩自修复添加剂, 减摩、抗磨性能好, 成本低、污染少, 自修复性能非常优异。发动机台架试验表明, 该技术可使整车的动力性、经济性以及尾气排放量都得到改善, 燃油消耗率也降低 5%~10%^[13, 14]。

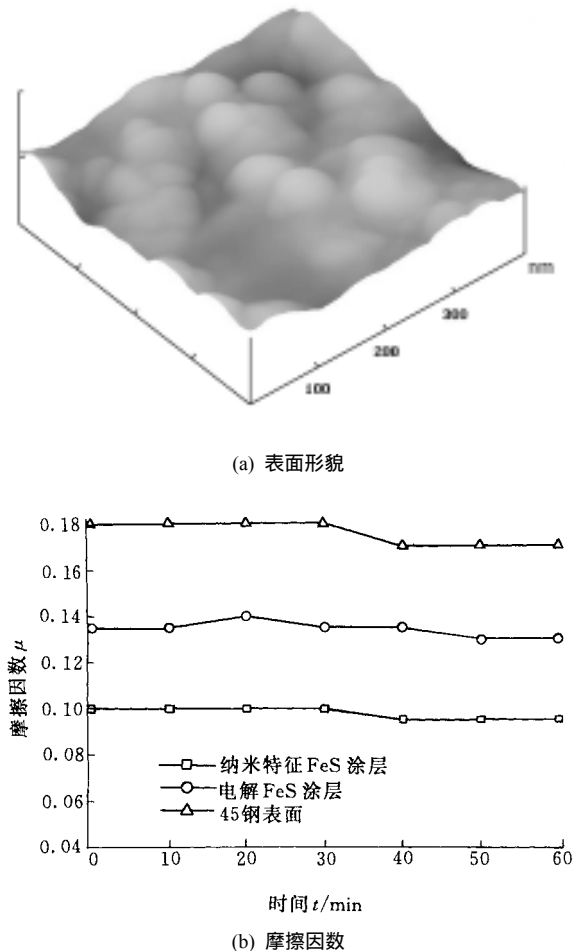


图 4 纳米固体润滑涂层的表面形貌和摩擦学性能

3.5 纳米粘接技术

纳米粘接技术是指将特殊功能纳米颗粒和常规填料(如石墨、二硫化钼、陶瓷粉末等)与高分子聚合物相混合并涂敷于零件表面实现特定用途(如耐磨、抗蚀等)的一种表面工程技术。例如, 含纳米金刚石的胶粘剂具有优异的耐磨性和很高的胶接强度, 耐磨性和胶接强度随着纳米金刚石粉在胶粘剂中加入量的增加而增加, 当加入量为 8% 时, 耐磨性是未添加的 2.2 倍, 拉伸强度可达 50 MPa, 比未添加的提高 27.5%^[15]。

3.6 纳米薄膜气相沉积技术

纳米薄膜气相沉积技术是指通过气相沉积的方法在材料表面沉积具有特殊性能的纳米薄膜, 以实现其功能要求的表面工程技术。薄膜包括纳米多层

膜和纳米复合膜。纳米多层膜一般是由两种以上厚度在纳米尺度上的不同材料层交替排列而构成的涂层体系。纳米复合膜是由两相或两相以上的固态物质组成的薄膜材料, 其中至少有一相是纳米晶, 其他相可以是纳米晶, 也可以是非晶态。纳米超硬膜已在刀具上获得应用。俄罗斯工程院院士切赫伏依教授采用纳米结构强化处理法, 将普通硬质合金刀片经纳米结构强化处理后, 刀片耐磨性提高 1 倍以上。

3.7 金属表面自身纳米化技术

金属表面纳米晶化可以通过不同方法实现。例如, 应用超声冲子冲击工艺, 可在 Fe 或不锈钢表面获得晶粒平均尺寸为 10~20 nm 的表面层。超声冲子冲击 450 s 后纯 Fe 表面层的显微组织形成了结晶位向为任意取向的纳米晶相, 晶粒平均尺寸为 10 nm, 而 Fe 的原始晶粒尺寸约为 50 μm ^[16]。该技术的优点之一是在复杂形状零部件表面获得纳米晶表面层。该技术将为整体材料的纳米晶化处理提供一个基本途径, 此项工作具有重大的创新意义。

4 纳米表面工程展望

十六大报告明确提出: “坚持以信息化带动工业化, 以信息化促进工业化, 走出一条科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的新兴工业化路子。”党中央提出的新兴工业化道路, 就是要充分运用最新科技成果和依靠科技进步并节约资源、保护生态环境的工业化。只有依靠先进的制造和再制造业持续不断地改造和提升各产业部门的装备及生产运行水平, 实现对环境友好的可持续发展, 才能实现新型的工业化^[17]。

纳米表面工程既是先进制造和再制造技术的重要组成部分, 又促进了先进制造和再制造技术的发展。纳米表面工程可以有效提升传统表面工程技术, 大幅度提高产品质量和性能。纳米表面工程的研究及应用将会极大地推动我国先进制造与再制造技术的创新与发展。

尽管纳米表面工程已得到初步发展, 离成熟化、产业化却还有相当大的差距, 仍有许多问题亟待解决。但是, 只要能够很好地解决以下两方面的问题, 在未来的 5~10 年内, 纳米表面工程就有可能取得跨越式的发展。

4.1 在应用基础理论研究方面取得进展

理论是实践的基础, 不在机理上搞清楚纳米表

面工程的本质,就很难将实践应用推向深入。以下三方面的理论问题,是未来一段时间内研究的重点^[18]。

(1) 纳米材料的三大效应对纳米结构涂层的结构和性能的影响机理问题。当颗粒尺寸小到纳米量级后,会出现小尺寸效应、比表面效应和量子效应,表现出与宏观物体和原子分子截然不同的特性。由于纳米材料位错运动受限,表面能显著增加,电子能级由连续变为离散,从而具有很高的活性,极不稳定。因此,在不同的纳米结构涂层中,纳米材料如何起作用,对涂层界面有何影响,纳米材料如何避免团聚、吸附等问题,都需要认真研究解决。

(2) 金属材料表面纳米化的机理问题。通过对金属表面采用机械(加工)处理法、超声冲子冲击法及非平衡热力学法等可以获得表面纳米层,但是不同处理方法、不同金属材料,所得到的纳米化层不论在金相组织还是在理化性能方面都存在很大的差异,这是因为目前对纳米化过程的规律还未掌握。因此,建立起对不同处理方法、不同金属材料均适用的纳米化过程表面热力学和动力学模型显得十分必要。

(3) 环境对纳米材料的行为影响问题。工艺环境对纳米结构涂层的性能也有较大影响。例如复合镀层中纳米颗粒在涂层中的沉积机理以及纳米颗粒与基体的相容性、匹配性等问题。

4.2 在实用化技术方面取得更大进展

(1) 研究纳米颗粒的表面修饰和包覆。针对热喷涂纳米结构涂层中颗粒易长大、易团聚等问题,对纳米颗粒进行表面修饰和包覆。例如在纳米 ZrO_2 颗粒表面包覆 Al_2O_3 , 在纳米 Al_2O_3 表面包覆 ZrO_2 , 纳米 SiO_2 表面的有机包覆等。包覆的小颗粒不但消除了颗粒表面的带电效应,防止团聚,同时,形成了一个势垒,使它们在热喷涂过程中颗粒不易长大。

有机包覆使无机小颗粒能与有机物和有机试剂达到浸润状态。这为无机颗粒掺入高分子塑料、橡胶、涂料中奠定了良好的基础。在纳米复合电刷镀、纳米涂装、纳米粘涂等技术中也都要进一步解决纳米颗粒的表面改性问题。这些基础研究工作,将有力地推动纳米复合材料的发展。

(2) 开发纳米功能薄膜和涂层。材料表面纳米化技术将从根本上改变材料和器件的生产方式。在纳米尺度上,通过精确地控制尺寸和成分来制备高性能的表面,进而将它们组装成具有独特性质和功能的更大结构。纳米表面技术可望给人们带来更轻、更强和可自主设计的材料。纳米薄膜

和涂层材料的设计与合成是近 1~2 年来纳米表面工程在国际上研究的热点之一,主要研究在特殊功能薄膜、传统材料、纤维和颗粒表面的纳米化涂层,为解决重大工程问题,开发新的纳米涂覆层奠定基础。

(3) 扩展传统表面工程与纳米表面工程之间的技术复合。纳米表面工程是传统表面工程知识创新和技术创新的源泉,新规律新原理的发现和理论的建立,给纳米表面工程的建立和发展提供了新的机遇。通过纳米表面工程和传统表面工程结合,大力开展纳米表面工程向其他各个领域的创新,明确纳米表面工程的不同应用目标,以市场为推动力,带动纳米表面工程理论和技术的成熟。

纳米表面工程是先进制造工程和再制造工程的重要组成部分,又为先进制造工程与再制造工程的发展提供了技术支撑。纳米表面工程对提高机电产品性能和质量、降低材料消耗以及节约能源、保护环境有重要意义。扩充其实现途径,扩展其与传统表面工程的复合,扩大其工业应用是纳米表面工程发展的重要方向。

5 结论

(1) 表面技术经历了由技艺向理论、向学科发展的历程,形成了表面工程学科。表面工程又经历了三个发展阶段:第一代传统的表面工程;第二代复合表面工程;第三代纳米表面工程。

(2) 纳米表面工程的研究与应用目前仍属起始阶段。但是,纳米复合涂层技术、纳米薄膜技术、金属表面纳米化加工技术及纳米润滑技术等四大方面已取得了多项有实用价值的成果,展现出了纳米表面工程优异的性能及突出的工程应用效果。

(3) 在继承表面工程丰硕成果的基础上,不断吸收纳米材料、纳米科技方面的研究成果,扩展传统表面技术与纳米表面技术之间的复合,拓展材料表面纳米化的途径,攻克纳米表面工程的技术难点并积极推广纳米表面工程的研究成果,是纳米表面工程近期的发展思路。

参 考 文 献

- 1 Bell T. 英国表面工程研究所所长 T. Bell 教授访问北京. 表面工程, 1989(4): 1
- 2 徐滨士, 欧忠文, 马世宁, 等. 纳米表面工程. 中国机械工程, 2000, 11(6): 707~712
- 3 徐滨士. 表面工程与维修. 北京: 机械工业出版社, 1996
- 4 徐滨士. 表面工程新技术. 北京: 国防工业出版社, 2002

- 5 徐滨士. 现代制造科学之 21 世纪的再制造工程技术及理论研究. 机械工程科学前沿及优先领域研讨会. 广州, 1999: 63~67
- 6 徐滨士. 表面工程的应用与展望. 见: 中国科技前沿(中国工程院版). 北京: 高等教育出版社, 2000: 337~357
- 7 Xiao T D, Jiang S, Wang Y, et al. Thermal spray of nano-structured alumina/titania feedstock for improved properties. Thermal Spraying Processing of Nanoscale Materials (2). Quebec City, 1999: 43
- 8 陈煌, 丁传贤. 等离子喷涂制备氧化锆纳米涂层. 全国第二届纳米材料和技术应用会议论文集(下卷). 杭州, 2001: G38
- 9 梁秀兵, 邓智昌, 许一. 热喷涂纳米粉体材料及其涂层制备. 材料工程, 2002 (11): 38~41
- 10 徐龙堂, 徐滨士, 周美玲, 等. 电刷镀镍/镍纳米 Al_2O_3 颗粒复合镀层微动磨损性能研究. 摩擦学学报, 2001, 21 (1): 24~27
- 11 蒋斌, 徐滨士, 董世运, 等. n- Al_2O_3/Ni 复合镀层的组织与滑动磨损性能研究. 材料工程, 2002 (9): 33~36
- 12 王海斗, 庄大明, 王昆林, 等. 高速钢离子渗硫层的干摩擦学性能研究. 摩擦学学报, 2002, (4): 250~253
- 13 乔玉林, 徐滨士. 表面修饰的硼酸盐润滑添加剂的制备与分析. 材料保护, 1997 (6): 25~31
- 14 薛群基, 党鸿辛. 摩擦学研究的发展概况与趋势. 摩擦学学报, 1993 (1): 1~5
- 15 原津萍, 梁志杰. 纳米金刚石粉胶粘剂性能的初步研究. 粘接, 1991 (1): 9~12
- 16 Tao N R, Sui M L, Lu J, et al. Surface Nanocrystallization of Iron Induced by Ultrasonic Shot Peening. NanoStructured Materials, 1999, 11 (4): 433~440
- 17 中国工程院. 新世纪如何提高和发展我国制造业, 2001
- 18 徐滨士, 马世宁, 梁秀兵, 等. 纳米粉体材料与表面工程. 材料导报, 2001 (11): 7~9

PROGRESS AND PROSPECT OF NANO-MATERIALS SURFACE ENGINEERING

Xu Binshi Liu Shican Liang Xiubing
(*The Academy of Armored Forces Engineering*)

Abstract: Surface engineering has gone through three stages: traditional surface engineering, composite surface engineering and nano-materials surface engineering. The basic methods obtaining the nano-surfaces are gas depositing, surface nano-crystallized and nano-coated. By now the practical nano-materials surface engineering includes the techniques as follows: nano-films depositing, nano-materials thermal spraying, nano-materials electric brush plating, nano-materials self-repaired antifriction, solid lubrication nano-films, nano-materials gluing, nano-materials painting and metal surface nano-crystallized. Nano-materials surface engineering is the key component for advanced manufacturing and remanufacturing engineering, and that provides the technological supports to the development of advanced manufacturing and remanufacturing engineering. Nano-materials surface engineering is significant in promoting the properties and qualities of electromechanical products, decreasing the cost of materials, conserving energy and protecting environments. It is the important development trend for nano-materials surface engineering that enlarging the implementation methods of nano-surfaces, further extending the compounding between nano-materials surface engineering and traditional surface engineering, and broadening the industrial application of nano-materials surface engineering.

Keywords: Surface engineering

Nano-materials surface engineering

Remanufacture engineering

作者简介: 徐滨士, 男, 1931 年出生, 兵器运用工程及装备维修表面工程专家, 中国工程院院士, 装甲兵工程学院教授, 少将, 波兰理工大学荣誉教授。现兼任中国设备管理协会副会长、中国工程机械学会副理事长、国家产学研设备工程开发推广中心主任、总装备部装备维修工程技术专业组顾问、《机械工程学报》编委会副主任委员。长期从事维修工程、表面工程和再制造工程研究, 是我国表面工程学科的倡导者和开拓者之一。1996 年获得中国机械工程学会科技成就奖, 出版 16 部专著, 发表学术论文 200 多篇。曾获国家科技进步一等奖 1 项、二等奖 2 项, 军队科技进步一等奖 6 项, 二等奖 4 项。