

# 英国表面工程的现状及挑战

(英) 李小英, (英) 董汉山

(英国伯明翰大学 冶金与材料学院, 英国 伯明翰 B15 2TT)

**摘 要:** 近期英国权威机构对英国表面工程的现状和发展作出了系统的评估报告。文中根据这些报告扼要介绍了英国表面工程的现状、面临的挑战及将来发展的机遇。15 年来英国表面工程得到长足的发展, 表面工程技术已应用于 70 % 以上的终端产品。表面工程所创造的市场价值增加了 2 倍多。但英国表面工程面临很多挑战, 如传统制造业的萎缩和日益提高的环保标准以及可持续发展的要求。英国表面工程将在航天航空、医疗器械、新能源及其它高附加值市场得到进一步发展。

**关键词:** 英国表面工程; 现状; 挑战; 未来发展

中图分类号: TB3

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)06-0001-06

## Current State and Challenges of UK Surface Engineering

LI Xiao-ying, DONG Han-shan

(University of Birmingham, School of Metallurgical and Materials, Birmingham B15 2TT, UK)

**Abstract:** Recently, some UK authorities have published their reports on the current state and challenges of UK surface engineering. This paper briefly overviewed, based on these surveys, the current state, challenges and future opportunities of UK surface engineering industry. UK surface engineering has been developed rapidly in the last 15 years as evidenced by the fact that about 70 % of the products have been surface engineered and the market value conferred by UK surface engineering has increased by more than 2 times. However, the UK surface engineering industry is facing many challenges, such as the diminishing traditional manufacturing industry, ever-increasing environment standards and the soaring requirements of sustainable development. It is foreseen that UK surface engineering will make greater impact in aerospace, medical devices, new energy and other high added value market in future.

**Key words:** UK surface engineering; current state; challenges; future development

## 0 引 言

英国作为近代表面工程的发源地和发达的工业国, 其在表面工程领域的现状与发展代表了欧洲乃至世界表面工程的潮流。近期英国的 3 家权威机构<sup>[1-3]</sup>都对英国表面工程的现状和发展作出了系统的评估报告。3 个报告一致认为创造性, 科技性, 低成本性以及技术普及性是表面工程战略发展的四大支柱。基于 3 个最新的报告及其它信息, 文中扼要介绍了英国表面工程的现状、面临的挑战及将来发展的机遇。

收稿日期: 2010-10-16; 修回日期: 2010-10-25

作者简介: 李小英(1957—), 女(汉), 上海市人, 英国永久居民, 高级研究员, 博士。

## 1 表面工程的现状

### 1.1 表面工程对社会的贡献

表面工程技术的迅速发展使得设计低成本高性能并具有特殊表面性能的零件成为可能。表面工程以其特有的魅力正受到各行各业越来越多的青睐, 它正越来越广的应用于制造和工程领域以提高由廉价, 轻型和可持续材料制成的零部件的表面性能。

表面工程可以用于提高材料表面的许多性能, 诸如耐磨、耐热、抗氧化、耐腐蚀、电阻、导电性、疲劳强度和尺寸恢复等。而表面工程对经济发展的最大贡献在于它对材料腐蚀和磨损的有效降低。

1971年 Hoar 和 1998年 ERA Technology 报道,英国和美国每年腐蚀消耗占全民工业产值的 3.5%~4.0%,即英国每年由于腐蚀损失近 36 亿英镑。2007 年的评估表明,表面工程对腐蚀性能的改善可使英国减少每年近 7 亿英镑的损失。相对于腐蚀而言,磨损所造成的损失就更大了。据估算表面工程对磨损性能的提高,按 2007 年度国民总产值计算,英国能节约 14 亿~20 亿英镑的费用,即节约了近乎 2 倍于抗腐蚀节约的费用。

### 1.2 表面工程的市场和结构

Matthews 教授等在 1995、2005 和 2010 年对英国表面工程市场的调研结果表明 15 年来表面工程的市场价值由 10 亿英镑增长至 33 亿英镑。而相应的经过表面处理的产品价值也从 108 亿英镑增长至 181 亿英镑(见图 1)。值得注意的是经过表面处理的产品占有终端产品的百分比从 1995 年的 67% 递增至 2005 年的 71%,预期 2010 年将增加到 75% (见图 2)。在世界经济萧条的今天这样的增长是很可观的。这个增长主要是受到涂层在电子行业,工程以及医疗健康方面的扩大应用影响。图 3 和图 4 显示了 2010 年英国表面工程在各个领域的投资额度分布及表面工程各技术应用投资的分布。将数据与 1998 年的预期相比,航天航空业和建筑业有了明显的增长,而电子工业由于许多工厂的关闭和外移,投入比重下降。

具有世界市场影响力的英国表面工程的主要用户有 ROLLS-ROYCE 公司,空中客车公司和 DePuy 公司。英国有世界先进水平的表面工程产业

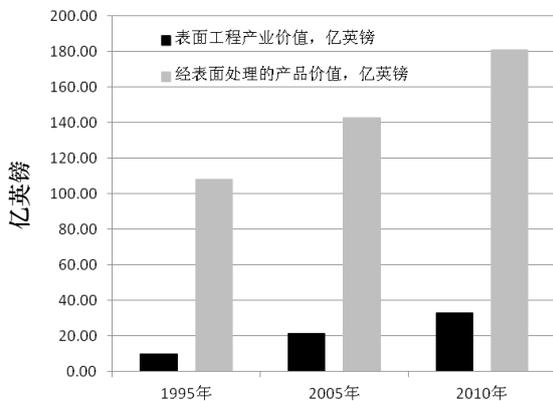


图 1 英国表面工程产业和其加工产品的市场价值在 15 年间的变化

Fig.1 Marketable values of UK surface engineering industry and products in the last 15 years

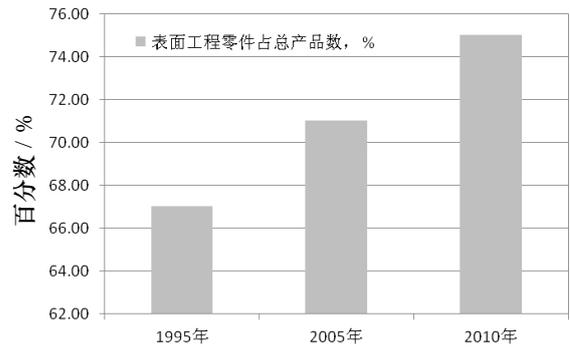


图 2 英国经表面处理过的终端产品占总终端产品数在 15 年间的百分比变化

Fig.2 Percentage change of the products affected by surface engineering within whole products in the last 15 years



图 3 英国 2010 年表面工程在各行业的应用投资结构  
Fig.3 Application sector values of UK surface engineering in 2010

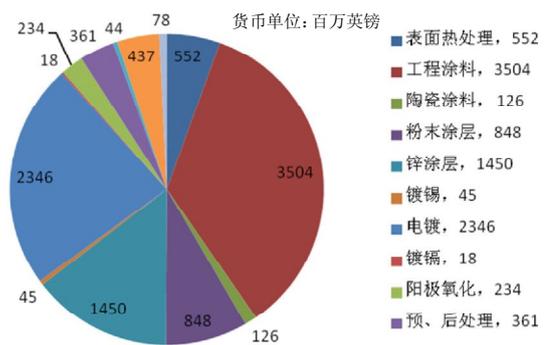


图 4 英国 2010 年表面工程各技术应用投资分布  
Fig.4 UK surface engineering technology sector values in 2010

和供应商,但它们主要由中小型企业担当。英国学术界,如伯明翰和谢菲尔德大学表面工程中心,引领世界表面工程的潮流。这支队伍和工业界有着紧密长期的合作研究,不断为表面工程提供新技术和新思想。

### 1.3 社会对表面工程的支持举措

材料矿冶协会 (IOM<sup>3</sup>) 表面工程分会和其它相关协会都确立了为表面工程企业服务的宗旨, 支持鼓励它们利用低成本低消耗可持续发展材料和环保工艺, 发展设计具有高表面性能的零件。英国工程物理科学研究基金会 (EPSRC) 和技术发展部门最近均设立了与表面工程有关的研究基金以支持学术界及工业界的新颖表面工程研发。同时由国家有关部门资助的实力雄厚的坐落于大学实验室的摩擦学中心, 如利兹大学的摩擦学研究所和南安普敦大学的国家先进摩擦学中心, 为表面工程的研发提供有力的支持。另外英国两家商业协会也通过会员和信息的交流来促进表面工程的发展。

## 2 英国表面工程的驱动力、挑战和机遇

工业界和学术界的问卷调查表明表面工程在环境保护、可持续发展、降低成本、更新技术、降低消耗、研究经费的集资和融资诸方面对英国经济、工业和制造业产生重要的影响。同时这些也是表面工程发展的驱动力所在。英国技术发展部门在其《2008年至2011年先进材料及关键技术领域》报告<sup>[4]</sup>中指出能源、可持续性发展及高附加值市场是未来的3个具有挑战性的重要领域。而这些领域在如下几个方面的发展给表面工程的发展带来极大的契机。

### 2.1 能源方面

权威人士预测<sup>[5,6]</sup>不仅在英国, 甚至在世界范围内大量的资金将会投入新电力资源的开发, 因为全球对电力资源的需求在2030年将会达到现在的两倍。虽然英国的需求只会增加25%, 但大量陈旧燃煤和核电站的退役会使得在这方面的投资相当大。新设备的发展对材料以及表面的性能都提出了新的要求, 而这些性能要求只能通过表面工程来达到, 这就给表面工程带来了契机。例如, 预测表明不管在英国还是全球, 75%~80%的高容量发电设备将基于火力发电。如何使用涂层来防止表面由于高温、高压而产生的腐蚀和氧化来防止涡轮机部件在极端高温高压下遇到的蒸汽滴侵蚀以及剥落氧化物颗粒的冲蚀就是一个值得研究的课题。同时表面工程在涡轮机部件的绝热、密封和维修再制造等方面也大有可为。利用可再生能源发电(如水力发电和风力发电), 也对表面工程提出了新的挑战。如何提高水

力发电涡轮机和风力发动机叶片的使用寿命是表面工程需要聚焦的重点。用沉积金属的方法来维修和提高水力涡轮机的使用寿命是目前已经应用的方法之一。对风力发电而言, 预测表明最新设计将会使用无齿轮箱同步电机以降低维护需求。该种新型设计将会大量应用高效 Nb-Fe-B 永久磁铁。如何设计一种涂层来有效防止这些永久磁铁的腐蚀是保证这一先进技术发展的关键, 而这又对表面工程提出了新的挑战。

### 2.2 航空航天领域

表面工程对航空航天领域的发展有着极其重要的贡献。它长期以来为机身材料、系统控制结构和动力装备提供表面处理以满足不同的表面性能要求。

70多年来, 铝合金一直用于空中客机的主要部件, 例如机身, 机翼和支承机构。虽然近年来复合材料被越来越多的用于新客机, 铝合金将还会在今后继续大量用作机身材料。传统的表面工程, 如铬酸阳极氧化外加锌铬酸盐封合处理正用来提高机翼横杆, 肋条及肋板的耐腐蚀性能。越来越多的新颖的环保型化学处理正在发展中, 有些已应用于航空业。例如一种无毒酒石硫酸 (Tartaric Sulphuric Acid) 处理法现已替代了铬酸阳极氧化处理。镉电镀层长期以来一直用于飞机上频繁开关的紧固和联接件表面, 主要是因为这种涂层的低摩擦系数和抗电偶腐蚀性。目前无毒性的热喷铝涂层正在研发中, 以期尽快取代有毒的镉镀层。

表面工程在飞行控制系统领域的主要目标是提高钢和铝材料的防腐性能和运动件的耐磨性能。用于飞行驱动控制系统零件上的传统镀镉和铬酸盐化学涂层正在被锌-镍涂层所代替。而沿用已久的硬质铬涂层也已经几乎完全被用高速氧燃气喷涂 (HVOF) 法喷涂的 WC<sub>10</sub>Co<sub>4</sub>Ni 涂层所替代。这种用于活塞的涂层不仅可以在  $3.5 \times 10^7$  Pa 压力下耐磨损而且还具有优异的抗冲蚀、耐磨粒磨损和耐腐蚀性能。由于该涂层的上述优异特性, 它也被波音和空客公司用于起落架机构的各个零部件。在刹车机构中的钢铁部件上沿用已久的有毒镉镀层亦已经被锌/镍电镀所取代。飞机跑道上的除冰剂含有大量的钾, 会引起碳刹车片的氧化。一种专门为碳刹车片设计的含有磷酸、铝和硅酸盐的具有抗氧化特性的涂层正在研发中<sup>[7]</sup>。

表面工程在飞机动力装置方面的最早应用始于将铜皮包在木质螺旋桨的前缘以防木浆被气流冲蚀。如今表面工程已经发展成为提高发动机效力和性能的主要技术手段。所有在飞机引擎中的燃气涡轮片都通过表面工程来达到设计目标。表面工程的费用占整个制造费用的30%以上<sup>[8]</sup>。长期以来,涂层已成功地应用于发动机的零件上以提高性能并延长使用寿命。成功应用的重要涂层有热障涂层(TBCs), 清洁控制(磨耗)涂层, 抗氧化/耐腐蚀的涂层和耐磨涂层。热障涂层用于保护引擎中承受高温气体的金属零部件。目前的TBCs是以加入氧化钇稳定剂的氧化锆, 通过热喷涂或电子束物理气相沉积方法制作。目前正在研究一系列的新技术如电泳沉积, 以期达到低成本并能对复杂的三维零件进行有效涂层处理。TBCs的应用使得引擎的工作温度提高了100~150℃, 这将直接提高发动机效率。如何进一步提高引擎工作温度以使发动机的效率进一步提高是当前对TBCs涂层研究的新挑战。

早在1960年后期间隙控制涂层已用于压缩机与涡轮片以及曲径式密封片之间的顶端接触配合处。它是通过接触动配合处的磨粒涂层在旋转过程中消耗来自动调节动接触配合处的间隙以确保精确的密封间隙达到降低燃气泄漏的目的。这些涂层多以复合材料为主, 它的磨粒的磨耗性是通过采用低剪切强度材料或疏松结构涂层来实现的。D.Sponer 等报道了陶瓷磨耗涂层在这方面的发展和应用<sup>[9]</sup>。为了防止沙漠中使用的军用飞机引擎面临的极端冲蚀环境, 陶瓷或陶瓷+金属的多层涂层系统亦已得到发展。通过改变涂层的层数或每一层的厚度和化学成分, 多层涂层可以显著有效地降低沙子对压缩机翼的冲蚀损坏。最近由英国技术发展部(Technology Strategy Board) 资助的 Cranfield 大学和 Teer Coating 公司合作研究的一种新一代超弹性涂层对极端苛刻条件下的重载传输件的磨耗具有极大的防护性。这种涂层的超高弹性变形量能减少不可恢复的塑性变形量。在最理想的条件下, 如果所有的变形都是弹性的, 则变形会完全回复, 这样磨损为零和磨擦系数近乎于零的梦想就能得以实现。这种多层涂层由硬质陶瓷和金属层交替组成, 而该金属层由专门研发的新型 Ni-Ti-X 形状记忆合金组成<sup>[10]</sup>。

### 2.3 环境保护

许多传统的涂层和表面热处理引起重大的环境保护方面的关注, 特别是那些使用六价铬和镉的涂层。近期欧共体将要实施的注册评估及化学限制核准法将在短期内限制某些物质的应用。这一规定引起英国制造业极大的关注。2010年1月, 在牛津大学召开了由英国各与材料相关的部门, 航空工业界, 涂层公司和学术界代表参加的讨论会。与会代表们深感环境保护对表面工程提出的挑战性及发展环境保护表面涂层的紧迫性。同时这也正是表面工程的又一契机—发展环保新涂层以替代对环境有害的涂层。

环保对建筑行业提出了所谓的“绿色建筑”理念, 即新建筑必须是节能低耗型的。这个要求对建筑涂料的“绿色”化提出了新的挑战, 应运而生的是节能降耗的功能性涂料的研发和投资。英国 BASF 公司发明了一种由硅化处理的聚酯涂层, 将其用于屋顶具有高反射/热量控制功能。日本 PULSE-DENSHI 公司发明的 YANECOAT 涂层亦具同样的降温功能。它与普通屋顶涂层相比, 可降温达15~20℃。其它诸如抗菌、控制空气污染、自洁净、耐腐蚀、变色、抗老化、透光、防滑、增阻等功能性新涂层的研究也很活跃。2010年三月由 SIGMA COATINGS 公司发展的新颖抗尘涂层是世界上第一个无溶剂型的水剂环保涂层。该涂层利用纳米技术使表面异常光洁, 从而能非常有效地抗尘埃和沙粒。从图3中可以发现表面工程在建筑行中的投资额占总投资额的三分之一之多。虽然“绿色建筑”的发展很具挑战性, 但它却是一个超级巨大的市场, 前景无限。相对于其它国家在这方面的研发, 英国在这方面的发展占较小比例。这主要受到英国已有法律条文的限制, 因为所发展的涂料都很特别, 英国还没有相应的法律条文覆盖这些领域。

### 2.4 可持续发展

表面工程的设计就是以低成本材料通过表面处理获得理想的表面和综合机械性能。它本身就是一项可持续发展工程。英国目前重新重视 3R (Reduce, Reuse and Recycle) 即: 减量化—再使用—回收再利用, 并将其纳入可持续发展的理念。目前对表面工程的可持续发展的进一步要求是新工艺设计中要全盘综合考虑, 充分利用现有资源, 包括加工工具、新老产品及工程标准的协调性, 降低消

耗,使现有的资源得到持续性发展。对表面磨损的零件进行修复再制造,使其能够重新应用就是对表面工程提出的新的发展方向。

## 2.5 高附加值市场

表面工程已经在高附加值市场作出了巨大的贡献,最成功的是在医疗保健方面的应用。如非骨水泥固定型关节的植入件表面的空隙状涂层,使得人体骨能嵌生在上面从而固定假体不需要用水泥来固定。而如果在表面再加一层羟基磷灰石(HA)则可进一步促进骨质在上面生长并增强结合强度。硅作为添加剂可以进一步提高HA的生物活性,但会影响其强度。若用高频雷达磁控溅射法则可将含Si的羟基磷灰石沉积于钛合金表面,其涂层厚度小于 $2\mu\text{m}$ ,具有致密和牢固的结合特性<sup>[11]</sup>。

近期由英国健康技术与医疗知识传播(KTN)部门召开的“提高医疗器件表面特性”的研讨会上<sup>[12]</sup>提出了对表面工程在医疗器械领域的研发重点:①新一代具有高耐磨性的表面;②新颖的用于人造关节的高结合强度涂层以应对病人体重增加的趋势;③具有抗细菌能控制感染的涂层;④用于药物控制释放支架和人工心脏瓣膜的表面工程技术;⑤发展用于医用导管表面的抗感染、除结垢的新涂层。

表面装饰设计是表面工程应用的另一个广阔的高附加值市场。表面工程在这方面的应用涵盖我们日常生活的每一个方面,诸如盥洗室配件、建筑装潢、汽车表面装饰、电视手机计算机等的表面装饰等等。表面工程在外观设计方面的发展前景无限,也许受限的只是设计者的想象力。

## 3 英国表面工程领域亟需解决的问题

经过对大量的问询和采访调查的分析,报告列出表面工程领域存在的问题及解决方法:

(1) 各表面工程协会的活动存在重复,需要统一筹划以减少不必要的浪费。

(2) 政府部门的政策和基金要着力支持技术创新以及学术界与工业界的合作。

(3) 必须建立完整的表面工程数据库为表面工程的模拟设计提供依据,同时可以提高产品质量的控制。

(4) 提高媒体宣传力度,使表面工程企业和用户了解新信息和市场机遇,以保持在全球市场中的竞争力。

(5) 亟需建立多方合作,尽快研发涂层中有毒

金属元素铬、镉和镍的替代物。

(6) 充分详细宣传新的欧共体环保条例,并以此作为新工艺发展的指南。

## 4 结 语

在过去十五年间,英国表面工程得到长足的发展,表面工程技术已用于百分之七十以上的终端产品。表面工程所创造的市场价值增加了二倍多。但英国表面工程也面临很多挑战,如传统制造业的萎缩和日益提高的环保标准以及可持续发展的要求。英国表面工程将在航天航空、医疗器械、新能源及其它高附加值市场得到进一步发展。

## 参考文献:

- [1] Materials knowledge transfer network and materials UK: challenges and priorities for the UK surface engineering industry [J/OL]. 2010, 06. <http://www.matuk.co.uk>.
- [2] Artley R J, Matthews A. The UK surface engineering industry 2010 [R]. The Surface Engineering Association, August, 2010.
- [3] Clarke A, Partridge A. A strategic review of the surface engineering industry in the UK [R]. NAMTEC, 2006.
- [4] Technology Strategy Board: Advanced materials—key technology areas 2008~2011 [J/OL]. Crown: 2008. <http://www.innovateuk.org>.
- [5] Energy Information Administration (EIA). The international energy outlook 2007, IEO 2007 [R]. DOE/EIA-0484, 2007.
- [6] Energy Information Administration: Projections—system for the analysis of global energy markets [R]. The International Energy Annual 2004 (May~July 2006). EIA, 2007.
- [7] Williams A. Airbus SAS. Industry Report: SAE G12F carbon brake oxidation working group [R]. <http://www.sae.org/events/icing/presentations/2007s2awilliams.pdf>, 2007.
- [8] Rickerby D S. Surface engineering in the gas turbine—current and future state. International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films [C]. San Diego, 2007.
- [9] Sporer D, Dorfman M, Xei L, et al. Processing and

properties of advanced ceramic abradable coatings. Proceedings of the 2007 International Thermal Spray Conference Beijing China [C]. ASM International, 2007.

[10] Secuewa-advanced wear resistant coatings [C]. TSB founded project 'Dissemination Event' Cranfield University (unpublished work). 2009,October 6.

[11] Grant D M. Silicon doped hydroxyapatite thin films for orthopaedic applications [C]. Plas MAG III Conference. Worcester, 2008, July 2~3.

[12] Health Technologies KTN: HiPer nano workshop enhanced surface performance of medical devices [C]. Aston University. 2009, September 24.

作者地址: School of Metallurgy and Materials, University of Birmingham, Edgbaston B15 2TT UK

Tel: 00441214145243 E-mail: x.li.1@bham.ac.uk

\*\*\*\*\*

• 本刊讯 •

### 伯明翰大学教授董汉山任本刊副主编

董汉山(男, 1957年出生于上海)教授, 现任教于英国伯明翰大学, 在伯明翰表面工程中心从事材料表面工程的教学和研究工作。先后承担和主持包括英国政府、欧共体、中英政府合作项目等20余项科研项目, 已获得英国、欧共体及美国专利4项, 发表学术论文180多篇(SCI收录100多篇), SCI引用达1125多次。2004年荣获英国材料学会'Harvey Flower'钛合金科学奖。主编学术专著(Surface Engineering of Light Alloys-Aluminum, Magnesium and Titanium Alloys)并参加编写学术著作两部。2005年, 其指导的1名博士生获Bodycote国际论文竞赛第一名。

董汉山教授担任英国材料学会理事, 表面工程委员会委员; 中国自然科学基金会海外评委; 英国工程与物理研究基金会评委; 国际杂志 Surface Engineerin, International Journal of Surface Science and Engineering, Journal of Micro and Nanomanufacturing 编委。在国际表面工程领域拥有较大的影响力。经编委会主任徐滨士院士推荐、中国机械工程学会表面工程分会批准, 董汉山教授兼任《中国表面工程》副主编, 重点负责与国际编委的联系及境外学者的约稿工作。

(刘晓亭 供稿)

\*\*\*\*\*

• 行业动态 •

### 再制造产业被国家列为战略性新兴产业

2010年10月10日《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》([2010] 32号)文件中战略性新兴产业主要包括节能环保产业、新一代信息技术产业、生物产业、高端装备制造产业、新能源产业、新材料产业、新能源汽车产业。

作为重点领域之一的节能环保产业, 强调要统筹部署集中力量, 加快推进。要重点开发推广高效节能技术装备及产品, 实现重点领域关键技术突破, 带动能效整体水平的提高。加快资源循环利用关键共性技术研发和产业化示范, 提高资源综合利用水平和再制造产业化水平。加快建立以先进技术为支撑的废旧商品回收利用体系。

\*\*\*\*\*

• 行业动态 •

### 第六届表面工程国际学术会议将在西安召开

由中国机械工程学会表面工程分会和国际热处理与表面工程联合会共同主办的第六届表面工程国际学术会议定于2011年5月10~13日在古城西安的西安交通大学学术交流中心举办。大会将邀请国内外表面工程领域著名学者和企业工程技术人员参会, 共同研讨近年来材料表面科学与技术领域的最新进展和未来发展方向。

会议专题包括: ①表面工程的历史回顾与展望; ②表面与界面科学; ③热喷涂技术; ④化学及微弧氧化技术; ⑤物理气相沉积和化学气相沉积技术; ⑥三束表面改性技术; ⑦化学热处理技术; ⑧微纳米薄膜与分子薄膜技术; ⑨涂装、涂饰与防护技术; ⑩涂层的摩擦、磨损与润滑; ⑪涂层的防腐机理与应用; ⑫表面工程的模拟与仿真技术; ⑬生物学中的表面工程问题; ⑭集成电路中的表面工程问题; ⑮新能源材料的表面工程问题。

录用论文全部收入会议论文集, 会后部分优秀论文在国际期刊 International Heat Treatment and Surface Engineering 发表。

会议联系方式: (029) 8266 8395

电子邮箱: icse2011@mail.xjtu.edu.cn

联系人: 马飞 马胜利