

高性能陶瓷涂层及其制备工艺发展趋势

张继豪¹, 宋凯强², 张敏², 赵子鹏², 何庆兵², 李忠盛²

(1.北京理工大学, 北京 100081; 2.西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 从功能、用途方面分类综述了耐磨、耐蚀以及热障三大类高性能陶瓷涂层, 在此基础上, 介绍了高性能陶瓷涂层常用的制备工艺, 重点探讨了不同制备方法的特点和适用场合, 指出了制备方法的发展方向。物理气相沉积技术 (PVD) 制备的陶瓷涂层纯度高、致密性好, 并且与基体结合牢固, 但其生产成本高, 生产效率低, 因此物理气相沉积技术向着高效率、低成本的方向发展。化学气相沉积技术 (CVD) 制备的陶瓷涂层涂覆率高、致密性好, 但其反应温度高, 并且伴随着有毒有害气体产生, 因此化学气相沉积技术向着低温、环保的方向发展。等离子喷涂技术 (PS) 制备陶瓷涂层成本低、效率高、适应性强, 但涂层孔隙率高, 并且涂层与基体的结合强度低, 因此等离子喷涂技术向着高致密、高结合强度的方向发展。激光熔覆技术制备的陶瓷涂层组织细小、力学性能优良, 但其操作工艺复杂, 产品质量很难控制, 因此激光熔覆技术向着工艺简单、质量可控的方向发展。最后, 展望了高性能陶瓷涂层及其制备工艺的发展方向和可能的研究内容。

关键词: 陶瓷涂层; 耐磨; 耐蚀; 热障; 物理气相沉积; 化学气相沉积; 等离子喷涂; 激光熔覆

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)12-0096-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.12.017

Development Trend of High Performance Ceramic Coatings and Preparation Technologies

ZHANG Ji-hao¹, SONG Kai-qiang², ZHANG Min², ZHAO Zi-peng², HE Qing-bing², LI Zhong-sheng²

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: Three types of high performance ceramic coating, namely, wear-resistant ceramic coatings, corrosion-resistant coatings and thermal barrier coatings, were reviewed in terms of function and application. On this basis, common preparation techniques of high performance ceramic coatings were introduced, characteristics and applications were investigated emphatically, and development direction of different preparation methods was pointed out. Ceramic coatings prepared in PVD method featured in high purity, high compactness and good cohesion with substrate, but they had such disadvantages as high production cost and low production efficiency, so the PVD technology was developed in the direction of high efficiency and low cost. The ceramic coatings prepared in CVD method featured in high coating rate and high density, but they had such disadvantages as high reaction temperature, so the CVD technology was developed in the direction of low temperature and environmental protec-

收稿日期: 2017-10-11; 修订日期: 2017-11-01

Received: 2017-10-11; **Revised:** 2017-11-01

基金项目: 国防技术基础科研项目 (JSCG2016209B005); 装备预先研究项目 (41423040601)

Fund: Supported by Project of National Defense Technology Research (JSCG2016209B005) and Equipment Pre-research Project (41423040601)

通讯作者: 李忠盛 (1980—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为特种复合材料及表面工程。

Corresponding author: LI Zhong-sheng (1980—), Male, Ph. D., Senior engineer, Research focus: special composite material and surface engineering.

tion as poisonous and harmful gases were produced. The ceramic coatings prepared in PS method featured in low cost, high efficiency and good adaptability, but they had such disadvantages as high coating porosity, and low coating-substrate bonding strength, so PS was developed in the direction of high density and high bonding strength. The ceramic coatings prepared in PS method featured in fine microstructure and good mechanical properties, but they had such disadvantages as complex operation technique and uncontrollable product quality, so laser cladding technology was developed in the direction of simple process and controllable quality. Finally, the development direction and potential research content of high performance ceramic coatings and their preparation technologies were prospected.

KEY WORDS: high performance ceramic coatings; wear-resistant; corrosion-resistant; thermal barrier; physical vapor deposition; chemical vapor deposition; plasma spraying; laser cladding

陶瓷涂层具有优异的耐磨、耐腐蚀、耐高温以及高热阻等优点，并且在工作过程中基本不影响基体的力学性能，因此广泛应用于航空航天、兵器装备、机械工程等领域^[1,2]。近年来，在传统结构件表面制备陶瓷涂层的研究得到飞速发展，很多相关研究成果已实现工业化应用^[3]。比如在船舰的高压泵柱塞和机械密封环表面制备 Cr₂O₃-TiO₂-SiO₂ 陶瓷涂层，极大提高了其抗海水腐蚀能力^[4]；在 Si₃N₄ 刀具表面沉积 TiN、TiAlN、TiCN 陶瓷薄膜，使其耐磨性和使用寿命提高了 5~10 倍^[5]；在航空发动机叶片上制备 ZrO₂-Y₂O₃ 热障涂层，将涡轮进口温度提高到 1500 ℃以上^[6]。可以看到，陶瓷涂层的发展对于工业进步至关重要。

我国可用于制备陶瓷涂层的源材料储量丰富，其中 W、Mo、Ta 等均位居世界前列^[7]，同时我国也是陶瓷涂层制品的生产大国。但是，随着现代工业的发展，对陶瓷涂层的服役性能提出了更高的要求。比如先进航空发动机的推重比将达到 20 以上，即燃气进口温度超过 2000 ℃，使用传统的 ZrO₂-Y₂O₃ 热障涂层将无法满足工况的要求^[8]；超音速飞行器在 10 Ma 以上，其关键结构件既要承受剧烈的空气摩擦，也要经受高于 2000~3000 ℃的热气流冲击；陶瓷涂层刀具在使用时既要满足耐磨、耐热性要求，也要具备一定的强度和韧性，防止崩刃或破损^[9]。目前，美国、德国、日本等发达国家掌握了高性能陶瓷涂层的制备技术^[10]，这些国家的相关研究起步较早，技术水平高，产品质量稳定，占据全球大部分的市场份额。而我国制备技术的限制导致了中低端产品产能过剩，高端产品严重匮乏，高性能的陶瓷涂层制品还主要依赖进口。因此，借助我国的资源优势研发出具有高性能的陶瓷涂层产品，有利于推动工业的进一步发展。

近年，人们对陶瓷涂层的研究非常活跃与深入，开发出了多种高性能陶瓷涂层^[11,12]。但对比发现，这些研究更多的是侧重于成分和结构的优化。相比而言，陶瓷涂层的制备工艺则发展较为缓慢。要想获得高性能的陶瓷涂层产品，制备工艺非常关键。基于此，

本文从功能、用途方面分类综述高性能陶瓷涂层的种类，在此基础上介绍高性能陶瓷涂层常用的制备工艺，重点探讨不同制备方法的特点和适用场合，指出制备方法的发展方向。

1 高性能陶瓷涂层的分类

高性能陶瓷涂层种类繁多，按其功能特性不同，大致可分为耐磨陶瓷涂层、耐蚀陶瓷涂层和热障陶瓷涂层三大类，如表 1 表示。每一类陶瓷涂层都各具特点，因此了解其特性将对相关研究和应用起到很好的指导作用。

表 1 高性能陶瓷涂层的分类

Tab.1 Classification of high performance ceramic coatings

类别	代表
耐磨陶瓷涂层	Al ₂ O ₃ 、WC、MoSi ₂ 、AlN、ZrB ₂
耐蚀陶瓷涂层	Al ₂ O ₃ -TiO ₂ 、TiN、WC-Co-Cr
热障陶瓷涂层	MCrAlY/ZrO ₂ -Y ₂ O ₃ 、 MCrAlY/ZrO ₂ -CeO ₂

耐磨陶瓷涂层主要包括一些氧化物、碳化物、硅化物、氮化物及硼化物，其代表有 Al₂O₃、WC、MoSi₂、AlN、ZrB₂ 等。耐磨陶瓷涂层的最大特点是化学性质稳定，并且具有较高的硬度、较好的抗高温氧化性和优异的耐磨损性能，目前主要应用于刀具、硬质工具、耐磨耐蚀部件等。汪家华等^[13]研究了 TiN-Al₂O₃ 涂层 Si₃N₄ 刀具的切削性能，结果发现，与无涂层的刀具相比，其切削用量和加工效率显著提高，并且使用寿命得到成倍增加。孙万昌等^[14]采用超音速火焰喷涂技术在 42CrMo 钢表面制备 WC-17Co 涂层并进行热处理，研究发现，当热处理温度为 900 ℃时，涂层中析出的 Co₆W₆C 相细小且弥散分布，涂层表现出最小的磨损量。Liu H W 等^[15]在 Ti-Al-Zr 合金表面喷涂 WC-25Co 涂层，有效提高了基体在高温下的耐磨性能，且随测试温度的升高，涂层的磨损量显著减少。Kiruykhantsev 等^[16]在刀具表面制备 Cr-B-N 陶瓷涂

层，并与 WC-Co 涂层作性能对比，结果发现，Cr-B-N 涂层表现出更优的摩擦学性能，并且刀具的使用寿命提高 1.3~2 倍。

耐蚀陶瓷涂层用于保护基体零件不受各种环境腐蚀，例如海上装备的海洋环境、刀具的切削液环境、镀锌沉没辊的熔融锌液环境等。耐蚀陶瓷涂层没有特定的种类，大多数耐磨陶瓷涂层也具较好的耐腐蚀性能。农毅等^[17]在钢基体表面原位合成 Al₂O₃-TiO₂ 复相陶瓷涂层并进行耐蚀行为研究，结果发现，试样在流动的高温液态 Pb-Bi 合金中 1000 h 仍未发生明显腐蚀，并且涂层的物相保持稳定，而没有涂层保护的基材表面则发生严重的氧化腐蚀，生成具有疏松结构的 Fe₃O₄ 氧化层。陈文等^[18]采用超音速火焰喷涂技术制备 WC-10Co-4Cr 涂层并进行中性盐雾腐蚀试验，结果发现，其腐蚀速率是传统镀 Cr 层的 1/5。吕艳红等^[19]采用等离子喷涂制备 Al₂O₃-TiB₂ 陶瓷涂层，结果发现，涂层经 30 d 的熔融 Zn 液浸泡，未发生腐蚀现象。

热障陶瓷涂层^[6]是由金属粘结底层和陶瓷隔热面层组成的涂层系统，其代表有 MCrAlY/ZrO₂-Y₂O₃ 和 MCrAlY/ZrO₂-CeO₂ (M 指 Co、Ni 或它们的合金) 等，目前主要应用在航空发动机上。刘丽荣等^[20]采用等离子喷涂在发动机铝合金活塞表面制备 NiCrAlCoY/ZrO₂ 梯度热障陶瓷涂层，结果发现该涂层具有良好的热稳定性和抗热冲击性。吕艳红等^[21]采用等离子喷涂在 Ni₃Al 合金表面制备 NiCoCrAlY 陶瓷涂层并进行高温烧蚀试验，结果发现，涂层表面生成了致密的 Al₂O₃ 和 Cr₂O₃ 薄膜，显著提高了基体合金的抗热气烧蚀能力。赵子鹏等^[22]采用等离子喷涂在 30CrMnSiA 钢表面制备 NiCoCrAlY/ZrO₂-Y₂O₃ 热障陶瓷涂层，研究发现，该涂层具有较好的抗热震性能，经 900 °C 热震循环试验 10 次后，涂层仍保持完好。王娇等^[23]采用等离子喷涂在 K4169 镍基合金表面制备 NiCoCrAlYTa/CeO₂-Y₂O₃-ZrO₂ 热障陶瓷涂层，并与传统的 NiCrAlY/ZrO₂-Y₂O₃ 陶瓷涂层进行性能对比，发现 NiCoCrAlYTa/CeO₂-Y₂O₃-ZrO₂ 涂层具有更多的孔隙和微裂纹，表现出更优的隔热性能。

2 高性能陶瓷涂层的制备工艺

高性能陶瓷涂层的制备工艺在很大程度上决定了其性能，目前最常见的制备工艺有气相沉积、高能喷涂和激光熔覆三大类，如表 2 所示。不同的制备方法都有其优缺点，在实际应用时需要根据所制备的陶瓷涂层材料以及所需要达到的性能来选择。基于此，本文结合工业应用，介绍目前最常用的高性能陶瓷涂层的制备方法，并对不同方法的特点和所适用的场合作阐述。

表 2 高性能陶瓷涂层的制备工艺
Tab.2 Preparation techniques of high performance ceramic coatings

种类	代表
磁控溅射、离子镀、真空蒸镀、激光CVD、气相沉积	电子束物理气相沉积、化学气相沉积、等离子增强化学气相沉积 (PE-CVD)
高能喷涂	等离子喷涂 (PS)、超音速火焰喷涂 (HVOF)
激光熔覆	激光熔覆

2.1 气相沉积

2.1.1 物理气相沉积

物理气相沉积 (Physical Vapor Deposition, PVD) 是指在真空条件下利用加热或高能束轰击，将镀层材料气化成原子、分子或离子，并通过低压气体或等离子体作用在基体表面沉积成涂层的工艺，目前最常用的有磁控溅射和离子镀。

磁控溅射^[24]是稀薄 Ar 气在辉光放电中产生等离子体，在电场作用下对阴极靶材进行轰击，使靶材表面的分子、原子、离子或电子发生溅射，被溅射出来的粒子沿一定的方向射向基体表面形成镀层。黄佳木等^[25]采用磁控溅射在 AZ31 镁合金表面沉积 Al、Zr、Ti 膜及其与 SiNx 的复合薄膜，研究发现，该方法有利于获得致密的薄膜，并且复合膜的耐蚀性明显优于镁合金基体和单一金属膜。王晓静等^[26]采用磁控溅射制备 ZrSiN-ZrO₂ 复合梯度涂层，以此作为钛瓷结合的中间层，研究发现，该涂层能避免 Ti 金属表面过度氧化，有效提高了钛瓷的结合强度。韩士萍等^[27]采用磁控溅射在 TC4 合金表面制备 W-Al-N 复合膜，研究发现，Al 的加入有效提高了复合膜的抗高温氧化性能，起始氧化温度由 WN 单层膜的 400 °C 提高到复合膜的 800 °C。DAI 等^[28]采用磁控溅射制备 W/DLC (类金刚石膜)/W-S-C 复合膜，研究了不同 WS_x 含量对复合膜结构以及结合强度的影响，研究发现，复合膜结构致密，WS_x 有利于提高膜与基体的结合强度，并且在 N₂ 环境下，复合膜的耐磨性能随 WS_x 的增加而增强。采用磁控溅射制备陶瓷涂层时，涂层源材料以单个原子的方式沉积到基体表面，因此涂层的致密度较高并且表面粗糙度低。同时，磁控溅射技术的沉积温度低 (一般不超过 300 °C)，不易产生基体变形，涂层与基体的结合力好，涂层组织及性能在一定范围内可控，目前常被用于制备超耐磨陶瓷涂层中^[6]。但磁控溅射设备昂贵，投资成本极高，并且对于一些形状结构复杂、尺寸较大的零部件还无法采用。

多弧离子镀^[6]是把真空弧光放电应用于蒸发源的涂层技术，其原理是基于冷阴极弧光放电理论。王蕾等^[29]采用多弧离子镀在奥氏体不锈钢表面制备 Ti-Al-N 涂层，研究了工艺参数对涂层厚度的影响，

结果发现, 负偏压对涂层厚度的影响最大, 其次为时间和靶电流, 而氮气通量对涂层厚度的影响最小。黄美东等^[30]采用多弧离子镀在高速钢表面沉积 TiAlN/TiN 多层膜, 研究了调制周期对薄膜结构和性能的影响, 结果发现, 随着调制周期的减小, 样品的表面质量提高, 并且显微硬度也明显增大。张启沛等^[31]采用多弧离子镀在 3Cr13 不锈钢表面制备 TiN 薄膜, 研究了大颗粒、氮气流量对膜层颜色性能的影响, 结果发现, 大颗粒较少时不会影响膜层的颜色性能, 而膜层的颜色会随氮气流量的增加逐渐由银灰色变为深黄色。章杨荣等^[32]采用多弧离子镀在 316L 不锈钢表面沉积 AlCrN 涂层, 并研究了其在大气和海水环境下的摩擦学性能, 结果发现, AlCrN/SiC 相比于 AlCrN/Si₃N₄ 具有更低的摩擦系数和磨损率。多弧离子镀在制备陶瓷涂层时, 其入射粒子能量较高, 所获得的涂层致密度高, 并且镀层与基体的结合良好。但是, 多弧离子镀设备也非常昂贵, 作为生产应用时需投入大量的成本。此外, 多弧离子镀目前所能适用的陶瓷材料非常有限, 今后还需进一步开发。

除以上方法外, PVD 技术近年来还发展了很多新方法, 如电子束物理气相沉积 (EB-PVD)^[33]、离子束辅助沉积 (IBAD)^[34] 等。总的来说, PVD 技术所制备的陶瓷涂层纯度高、致密性好, 并且与基体结合牢固。但与此同时, PVD 设备价格昂贵, 生产效率低, 在面向工业生产时需要投入高额成本。因此, 未来的 PVD 技术在制备高性能陶瓷涂层时向着高效率、低成本的方向发展。

2.1.2 化学气相沉积

化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 是一种借助于多元气体在加热零件表面发生化学反应, 由此获得所需涂层的工艺^[35]。采用 CVD 技术制备涂层时, 由于反应气体的流动可使涂层元素到达复杂零件或腔体零件的任何部位, 因此该工艺最大的特点是具有极高的表面涂覆率, 并且目前没有一种工艺能将之取代。陈明伟等^[36]以 CH₃SiCl₃ 和 H₂ 为反应气体, 采用 CVD 技术在石墨基体上制备 SiC 涂层, 研究发现, 较低的体系压力更利于在较低温度下获得高纯 SiC 涂层, 并且当 $n(\text{H}_2)/n(\text{CH}_3\text{SiCl}_3)=10$ 、 $t=1100\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $p=10\text{ kPa}$ 时, 所获得的 SiC 涂层结构致密且晶型完整。苗建旺等^[37]以 NH₃ 和 TiCl₄ 为反应气体, 采用 CVD 技术在 K3 镍基合金表面获得 TiN 薄膜, 研究发现, 相比于基体合金, 沉积 TiN 薄膜的试样的耐磨性能得到显著提高, 并且当沉积温度为 600 °C、沉积时间为 60 min 时, 其耐磨性提高了 100 倍以上。郝振华等^[38]以 ZrCl₄、CO₂ 和 H₂ 为反应气体, 于 900~1500 °C 下采用 CVD 技术分别在 C/C-SiC 和 C/C-ZrC 基体上沉积 ZrO₂ 涂层, 研究发现, ZrO₂ 涂层与 C/C-SiC 基体之间具有更高的结合强度。

CVD 技术在制备陶瓷涂层时能均匀涂覆在任何形状复杂的零件表面, 所获得的涂层纯度高、致密度高, 并且与基体结合良好。相比于 PVD 技术, CVD 技术还具有更高的生产效率和更低的生产成本。但也需指出, CVD 技术反应温度较高, 容易导致涂层与基体结合不牢或基体变形。此外, CVD 技术常伴随着有毒有害气体产生, 如果处理不当, 会对健康和环境造成损害。因此, 未来的 CVD 技术在制备高性能陶瓷涂层时的发展方向是低温、环保。

2.2 高能喷涂

高能喷涂是利用高温、高速焰流将经过设计和特别处理的粉末粒子喷射到基体零件表面来获得所需涂层的技术, 其主要方法有电弧喷涂、火焰喷涂、等离子喷涂等。本文主要介绍等离子喷涂技术。

等离子喷涂 (PS)^[39,40] 是利用高温等离子体焰流将喷涂粉末加热到熔融或高塑性状态, 然后被高速喷射到零件表面形成涂层的工艺, 主要方法有大气等离子喷涂、低压等离子喷涂、超音速等离子喷涂等。等离子喷涂所产生的温度可高达 20 000 K, 几乎可以喷涂所有的陶瓷涂层材料^[6]。李健等^[41]采用等离子喷涂在铸铁表面制备 WC-Co 涂层, 并对其进行中性盐雾腐蚀试验, 结果发现, 铸铁表面发生了严重的腐蚀, 而涂层表面腐蚀轻微, 并且主要物相未发生变化。刘朝辉等^[42]采用等离子喷涂在 201 不锈钢上喷涂 NiCrAlY/ZrO₂-Y₂O₃ 复合涂层, 研究了其抗烧蚀性能, 结果发现, 该涂层经烧蚀后仍能保持较大的附着力, 基体合金在火焰环境中的使用寿命提高了约 6 倍。李任伟等^[43]采用大气等离子喷涂技术在高温合金钢表面分别制备 NiCrAlY/ZrO₂-Y₂O₃ 和 NiCrAlY/ZrO₂-Y₂O₃-CeO₂ 两种陶瓷涂层, 并且对比了两种涂层在 900 °C 下的抗热震性能, 结果发现, NiCrAlY/ZrO₂-Y₂O₃ 在热循环第 21 次失效, 而 NiCrAlY/ZrO₂-Y₂O₃-CeO₂ 可提高到 63 次。杜三明等^[44]采用等离子喷涂在 20 钢表面制备纳米和微米 Al₂O₃ 涂层, 并且对比了其摩擦学性能, 结果发现, 纳米 Al₂O₃ 涂层更加致密, 表现出更优的摩擦与减摩性能。

等离子喷涂在制备陶瓷涂层时, 其优势非常明显, 主要有以下几点: 1) 热源温度高, 可制备各种陶瓷涂层材料; 2) 喷涂过程中基体升温小, 对基体零件性状影响小; 3) 操作程序少, 施工灵活, 既可以喷涂大型构件, 也可以喷涂局部区域; 4) 喷涂效率高, 成本低, 适合于工业生产。目前, 采用等离子喷涂制备的陶瓷涂层制件已广泛应用于刀具、导流热端部件、航空发动机叶片等。虽然如此, 等离子喷涂也有明显缺点, 最大的不足为喷涂粉末是通过机械啮合与基体形成的特殊层状结构, 这一方面导致涂层与基体的结合不牢, 另一方面导致涂层中有较多孔隙,

制约其力学性能的提高。因此,未来的等离子喷涂技术制备高性能陶瓷涂层向着高致密、高结合强度的方向发展。

2.3 激光熔覆

激光熔覆^[45]是以激光束为热源将涂覆在基体表面的涂层材料融化并快速凝固,获得所需涂层。黄旺华等^[46]采用激光熔覆法在Ti合金表面制备纳米ZrO₂-Y₂O₃涂层,研究发现,熔覆层与基体结合良好,平均硬度为基材的3.5倍。Wu等^[47]采用激光熔覆在钢基表面制备VC-Cr₇C₃涂层,并研究了其摩擦学性能,结果发现,与基体相比,该涂层的耐磨性能提高了3倍。高雪松等^[48]利用激光熔覆技术在镍基高温合金表面制备Al₂O₃-TiO₂涂层,结果发现,降低温度梯度以及提高粉末密度有助于提高涂层的成形性。Sun等^[49]研究了激光熔覆中激光能量、送粉速度、扫描速度等工艺参数对TC4涂层的影响,结果发现,在适当的送粉速度下,提高扫描速度和降低激光能量有利于提高涂层质量。

相比于传统涂层技术,激光熔覆在制备陶瓷涂层时冷却速度非常快,属于非平衡结晶,这有利于获得高强度的细晶甚至纳米晶组织^[50,51]。但需要指出,激光熔覆由于强烈的热应力作用容易造成涂层开裂,并且激光参数对涂层质量的影响非常复杂,因此熔覆层的质量很难控制。基于此,未来的激光熔覆技术制备高性能陶瓷涂层向着工艺简单、质量可控的方向发展。

3 展望

随着我国工业的进步,特别是航天航空、舰船、兵器工业的发展,对高性能陶瓷涂层提出了更高的要求,其相关制件在服役时所需要承受的环境也更加恶劣。目前,高性能陶瓷涂层及其制备工艺种类繁多,并且在各个领域发挥着其巨大作用,但仍存在很多问题亟待解决。从陶瓷涂层来说,其力学性能和与基体的结合强度仍是问题的关键点;从制备工艺来说,发展简便、高效率、高质量、低成本、环境友好的方法是需要努力的方向。基于此,未来的高性能陶瓷涂层可以从以下几方面进行研究:1)开展复合、梯度化的陶瓷涂层研究,提高涂层综合性能和与基体的结合强度;2)加强陶瓷涂层制备的理论研究,改善现有工艺的不足;3)加强多学科研究者合作,开发更优的制备工艺。

参考文献:

- [1] CHEN D, HE L, SHANG S. Study on Aluminum Phosphate Binder and Related Al₂O₃-SiC Ceramic Coatings[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 348(1/2): 29-35.
- [2] 汪欣, 李争显, 杜继红, 等. 难熔金属表面高温防护涂层研究进展与技术展望[J]. 装备环境工程, 2016, 13(3): 1-11.
WANG Xin, LI Zheng-xian, DU Ji-hong, et al. Recent Development Progress and Prospect of High Temperature Protection Coatings for Refractory Metals[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(3): 1-11.
- [3] 武伟, 陈桂明, 刘建友. 耐高温涂层及其性能表征的研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(3): 1-7.
WU Wei, CHEN Gui-ming, LIU Jian-you. Research Progress of High-temperature Resistance Coating and Their Performance Characterization[J]. Materials Review, 2016, 30(3): 1-7.
- [4] 王海声, 李德远, 吴汪洋. 陶瓷涂层技术在舰船上的应用[J]. 表面工程资讯, 2011(1): 28-29.
WANG Hai-sheng, LI De-yuan, WU Wang-yang. Application of Ceramic Coating Technology in Ship[J]. Information of Surface Engineering, 2011(1): 28-29.
- [5] 杨义勇, 彭志坚, 苗赫濯, 等. 脉冲高能量密度等离子体陶瓷刀具表面改性研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(a02): 102-105.
YANG Yi-yong, PENG Zhi-jian, MIAO He-zhuo, et al. Progress of Surface Modification for Ceramic Cutting Tools by Pulsed High Energy Density Plasma[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(a02): 102-105.
- [6] 何利民. 高温防护涂层技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [7] HE Li-min. High Temperature Protective Coating Technology[M]. Beijing: National Defense Industry, 2012.
- [8] 刘彩利, 赵永庆, 田广民, 等. 难熔金属材料先进制备技术[J]. 中国材料进展, 2015, 34(2): 163-169.
LIU Cai-li, ZHAO Yong-qing, TIAN Guang-min, et al. Advanced Manufacturing Technology for Refractory Metals[J]. Materials China, 2015, 34(2): 163-169.
- [9] 李志明, 钱士强, 王伟. 热障涂层陶瓷材料的研究现状与展望[J]. 材料保护, 2011, 44(1): 38-41.
LI Zhi-ming, QIAN Shi-qiang, WANG Wei. Current Status of Research and Prospect of Ceramic-matrix Thermal Barrier Coatings[J]. Materials Protection, 2011, 44(1): 38-41.
- [10] 张鹏, 杜劲, 衣明东, 等. 陶瓷涂层刀具切削灰铸铁的试验研究[J]. 工具技术, 2017, 51(1): 22-26.
ZHANG Peng, DU Jin, YI Ming-dong, et al. Experimental Study on Cutting Gray Cast Iron with Ceramic Coated Cutting Tools[J]. Tool Engineering, 2017, 51(1): 22-26.
- SCHULZ U, FRITSCHER K, PETERS M. EB-PVD Y₂O₃-and CeO₂-Y₂O₃-stabilized Zirconia Thermal Barrier Coatings—Crystal Habit and Phase Composition [J]. Surface and Coatings Technology, 1996, 82(3): 259-269.

- [11] TERRACCIANO A C, DE OLIVEIRA S, VAZQUEZ-MOLINA D, et al. Effect of Catalytically Active Ce_{0.8}Gd_{0.2}O_{1.9} Coating on the Heterogeneous Combustion of Methane within MgO Stabilized ZrO₂ Porous Ceramics[J]. Combustion and Flame, 2017, 180: 32-39.
- [12] GUO L, LI M, ZHANG Y, et al. Improved Toughness and Thermal Expansion of Non-stoichiometry Gd_{2-x}Zr_{2+x}O_{7+x/2} Ceramics for Thermal Barrier Coating Application[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(1): 28-33.
- [13] 汪家华, 伍尚华. 涂层 Si₃N₄ 陶瓷刀具切削性能研究 [J]. 机电工程技术, 2014, 43(8): 41-44.
WANG Jia-hua, WU Shang-hua. Cutting Performance of Coated Si₃N₄ Ceramic Cutting Tool[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2014, 43(8): 41-44.
- [14] 孙万昌, 张峰, 张佩, 等. 热处理对 HVOF WC-17Co 涂层组织结构及耐磨性能的影响 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 476-480.
SUN Wan-chang, ZHANG Feng, ZHANG Pei, et al. Influence of Heat Treatment on Microstructure and Wear Resistance of HVOF WC-17Co Coatings[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 476-480.
- [15] LIU H W, XU X J, ZHU M H, et al. High Temperature Fretting Wear Behavior of WC-25Co Coatings Prepared by D-gun Spraying on Ti-Al-Zr Titanium Alloy [J]. Tribology International, 2011, 44(11): 1461-1470.
- [16] KIRYUKHANTSEV-KORNEEV P V, PIERSON J F, BYCHKOVA M Y, et al. Comparative Study of Sliding, Scratching, and Impact-Loading Behavior of Hard CrB₂ and Cr-B-N Films[J]. Tribology Letters, 2016, 63(3): 44.
- [17] 农毅, 邱长军, 杨育洁, 等. Al₂O₃-TiO₂ 复相陶瓷涂层在动态 LBE 中的耐腐蚀行为 [J]. 表面技术, 2017, 46(4): 235-239.
NONG Yi, QIU Chang-jun, YANG Yu-jie, et al. Anti-corrosion Behavior of Al₂O₃-TiO₂ Composite Ceramic Coating in Flowing LBE[J]. Surface Technology, 2017, 46(4): 235-239.
- [18] 刘建武, 张雪莹, 张吉阜, 等. 热喷涂碳化钨涂层对 40CrNiMoA 钢耐腐蚀与抗疲劳性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2015, 44(8): 125-128.
LIU Jian-wu, ZHANG Xue-ying, ZHANG Ji-fu, et al. Effect of Thermal Sprayed Tungsten Carbide Coating on Corrosion Properties and Fatigue Resistance of 40CrNiMoA Steel[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(8): 125-128.
- [19] 吕艳红, 武旭升, 刘焱飞, 等. Al₂O₃-TiB₂ 复合陶瓷涂层制备及耐液锌腐蚀性能 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(4): 30-33.
LYU Yan-hong, WU Xu-sheng, LIU Yan-fei, et al. Preparation of Al₂O₃-TiB₂ Composite Ceramic Coating and Corrosion-resistant Property to Molten Zinc[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(4): 30-33.
- [20] 刘丽荣, 张国华, 张所信, 等. 铝合金上等离子喷涂 NiCrAlCoY/ZrO₂ 梯度热障层连接的研究 [J]. 淮海工学院学报, 2002, 11(2): 30-32.
- [21] LIU Li-rong, ZHANG Guo-hua, ZHANG Suo-xin, et al. The Binding of Graded NiCrAlCoY/ZrO₂ Thermal Barrier Coatings by Plasma Spraying on Aluminum Pistons[J]. Journal of Huaihai Institute of Technology, 2002, 11(2): 30-32.
- [22] 吕艳红, 张启富, 吴子健. 高能高速等离子喷涂 NiCoCrAlY 涂层抗燃气热腐蚀性能 [J]. 表面技术, 2016, 45(9): 126-133.
LYU Yan-hong, ZHANG Qi-fu, WU Zi-jian. High-temperature Gas Corrosion Resistance of NiCoCrAlY Coating Prepared by High-energy and High-speed Plasma-spraying[J]. Surface Technology, 2016, 45(9): 126-133.
- [23] 赵子鹏, 李忠盛, 张新华, 等. 合金钢热障涂层等离子喷涂及高温力学特性研究 [J]. 表面技术, 2017, 46(5): 88-93.
ZHAO Zi-peng, LI Zhong-sheng, ZHANG Xin-hua, et al. Preparation and Mechanical Behavior at High Temperature of Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings on Alloyed Steel[J]. Surface Technology, 2017, 46(5): 88-93.
- [24] 王娇, 邓畅光, 邓姝皓, 等. CeO₂-Y₂O₃-ZrO₂ 热障涂层的组织结构及隔热性能 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(1): 29-35.
WANG Jiao, DENG Chang-guang, DENG Shu-hao, et al. Microstructures and Thermal Insulation Capability of CeO₂-Y₂O₃-ZrO₂ Thermal Barrier Coatings[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(1): 29-35.
- [25] 刘晓慧, 薛伟, 夏庆成, 等. 磁溅射法制备 TiO₂/PTFE 复合膜及其性能研究 [J]. 装备环境工程, 2016, 13(6): 15-22.
LIU Xiao-hui, XUE Wei, XIA Qing-cheng, et al. Magnetron Sputtering for Preparing TiO₂/PTFE Composite Membrane and Its Properties[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(6): 15-22.
- [26] 黄佳木, 罗先盛, 邹阳, 等. AZ31 镁合金表面磁控溅射 Zr(Al,Ti)-SiN_x 复合薄膜及其耐蚀性能 [J]. 材料保护, 2010, 43(1): 1-4.
HUANG Jia-mu, LUO Xian-sheng, ZOU Yang, et al. Preparation and Corrosion Resistance of Zr(Al,Ti)-SiN_x Composite Films on AZ31 Magnesium Alloy[J]. Materials Protection, 2010, 43(1): 1-4.
- [27] 王晓静, 王国伟, 惠光艳, 等. 磁控溅射 ZrSiN/ZrO₂ 复合梯度涂层纯钛表面对钛瓷结合强度的影响 [J]. 实用口腔医学杂志, 2016, 32(5): 635-639.
WANG Xiao-jing, WANG Guo-wei, HUI Guang-yan, et al. The Effects of Magnetron-sputtered ZrSiN/ZrO₂ Gradient Coating on the Bonding Strength of Titanium to Porcelain[J]. Journal of Practical Stomatology, 2016, 32(5): 635-639.
- [28] 韩士萍, 马辉. TC4 合金表面磁控溅射 W-Al-N 复合膜的摩擦磨损和高温抗氧化性能 [J]. 材料保护, 2016, 49(4): 14-18.

- HAN Shi-ping, MA Hui. Friction-Wear and High Temperature Oxidation Resistance of W-Al-N Films Deposited on TC4 Alloy by Reactive Magnetron Sputtering Technique[J]. Materials Protection, 2016, 49(4): 14-18.
- [28] DAI Ming-jiang, WEI Chun-bei, ZHOU Ke-song, et al. Properties of W/DLC/W-S-C Composite Films Fabricated by Magnetron Sputtering[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(9): 3002-3011.
- [29] 王蕾, 陈楠. 多弧离子镀对涂层厚度的影响[J]. 石化技术, 2017, 24(6): 71-72.
- WANG Lei, CHEN Nan. Effect of Multi-arc Ion Plating on Coating Thickness[J]. Petrochemical Industry Technology, 2017, 24(6): 71-72.
- [30] 黄美东, 李云珂, 王萌萌, 等. 多弧离子镀沉积 TiAlN/TiN 多层膜的结构与性能[J]. 天津师范大学学报: 自然科学版, 2015, 35(1): 26-29.
- HUANG Mei-dong, LI Yun-ke, WANG Meng-meng, et al. Structure and Properties of TiAlN/TiN Multilayers by Arc Ion Plating[J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2015, 35(1): 26-29.
- [31] 张启沛, 钟喜春, 杨怡帆, 等. 多弧离子镀 TiN 薄膜颜色性能的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(7): 694-699.
- ZHANG Qi-pei, ZHONG Xi-chun, YANG Yi-fan, et al. Synthesis and Color Performance of Multi-arc Ion Plated TiN Coatings[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(7): 694-699.
- [32] 章杨荣, 陈颢, 熊伟. AlCrN/硅系陶瓷在大气、海水环境下的摩擦学性能[J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(1): 99-104.
- ZHANG Yang-rong, CHEN Hao, XIONG Wei. Tribological Performance of AlCrN Coating Sliding Against Si-based Ceramic Balls in Ambient Air and Seawater Conditions[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2017, 8(1): 99-104.
- [33] ZHU D, MILLER R A, NAGARAJ B A, et al. Thermal Conductivity of EB-PVD Thermal Barrier Coatings Evaluated by a Steady-state Laser Heat Flux Technique[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 138 (1): 1-8.
- [34] 曹猛. 离子束辅助沉积 ZrN/TiAlN 和 CN_x/TiAlN 纳米多层膜的研究[D]. 天津: 天津师范大学, 2008.
- CAO Meng. Study of ZrN/TiAlN and CN_x/TiAlN Nanoscale Multilayered Coating Synthesized Using Ion Beam Assisted Deposition[D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2008.
- [35] 王占考, 许振华, 戴建伟, 等. 铂改性铝化物涂层的高温防护性能研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(3): 76-81.
- WANG Zhan-kao, XU Zhen-hua, DAI Jian-wei, et al. High-temperature Anti-oxidation Behavior of Pt Modified Aluminide Coating[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(3): 76-81.
- [36] 陈明伟, 邱海鹏, 焦健, 等. SiC 热防护涂层制备工艺研究[J]. 航空制造技术, 2014, 459(15): 90-92.
- CHEN Ming-wei, QIU Hai-peng, JIAO Jian, et al. Research on Preparation Process of SiC Thermal Protection Coatings[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 459(15): 90-92.
- [37] 苗建旺, 王超, 周春根. 化学气相沉积 TiN 薄膜及其耐磨性能[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1687-1691.
- MIAO Jian-wang, WANG Chao, ZHOU Chun-gen. Preparation and Wear-resistant Properties of TiN Films by CVD[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1687-1691.
- [38] 郝振华, 孙威, 熊翔, 等. 常压化学气相沉积 ZrO₂ 涂层的显微结构与微观力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(7): 1937-1943.
- HAO Zhen-hua, SUN Wei, XIONG Xiang, et al. Microstructure and Micro-mechanical Properties of Zirconia Coating by Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(7): 1937-1943.
- [39] 孙方红, 马壮, 刘应瑞, 等. 等离子喷涂制备热障涂层的研究进展[J]. 材料保护, 2013, 46(5): 45-47.
- SUN Fang-hong, MA Zhuang, LIU Ying-rui, et al. Research Progress of Plasma Spray Techniques for Preparing Thermal Barrier Coatings[J]. Materials Protection, 2013, 46(5): 45-47.
- [40] 崔永静, 陆峰, 高俊国, 等. 等离子喷涂 YSZ 涂层瞬态超高温冲蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(3): 31-36.
- CUI Yong-jing, LU Feng, GAO Jun-guo, et al. Transient Ultra-high Temperature Erosion Resistance of Plasma Spray YSZ Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(3): 31-36.
- [41] 李健, 夏建飞. 等离子喷涂 WC/Co 涂层耐中性盐雾腐蚀性能[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(1): 35-40.
- LI Jian, XIA Jian-fei. Salt Spray Corrosion Resistance of WC/Co Coating Prepared by Plasma Spraying[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2014, 26(1): 35-40.
- [42] 刘朝辉, 班国东, 刘娜, 等. 201 不锈钢上等离子喷涂 ZrO₂/NiCrAlY 复合涂层的抗烧蚀性能[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(2): 114-118.
- LIU Zhao-hui, BAN Guo-dong, LIU Na, et al. Ablation Resistance of Plasma-sprayed ZrO₂/NiCrAlY Composite Coating on 201 Stainless Steel[J]. Electroplating & Finishing, 2017, 36(2): 114-118.
- [43] 李任伟, 宫文彪. 等离子喷涂 CeO₂/ZrO₂-Y₂O₃ 纳米陶瓷涂层的热震性能的研究[J]. 陶瓷学报, 2016, 37(5): 478-481.
- LI Ren-wei, GONG Wen-biao. Thermal Shock Resistance of Nanostructured CeO₂/ZrO₂-Y₂O₃ Ceramic Coating Prepared by Plasma Spraying[J]. Journal of Ceramics, 2016, 37(5): 478-481.
- [44] 杜三明, 靳俊杰, 肖宏滨, 等. 纳米 Al₂O₃ 等离子喷

- 涂涂层的制备及性能分析[J]. 表面技术, 2015(6): 1-6.
- DU San-ming, JIN Jun-jie, XIAO Hong-bin, et al. Preparation and Properties Analysis of Plasma Sprayed Nano Alumina Coatings[J]. Surface Technology, 2015 (6): 1-6.
- [45] MOLIAN P A, HUALUN L. Laser Cladding of Ti-6Al-4V with BN for Improved Wear Performance[J]. Wear, 1989, 130(2): 337-352.
- [46] 黄旺华, 李崇桂, 潘斌, 等. 激光熔覆法制备 $ZrO_2-Y_2O_3$ 涂层的显微组织与性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(4): 1192-1197.
- HUANG Wang-hua, LI Chong-gui, PAN Bin, et al. Microstructure and Properties of $ZrO_2-Y_2O_3$ Coating Prepared by Laser Cladding[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(4): 1192-1197.
- [47] WU Q, LI W, ZHONG N, et al. Microstructure and Wear Behavior of Laser Cladding VC-Cr₇C₃ Ceramic Coating on Steel Substrate[J]. Materials & Design, 2013, 49: 10-18.
- [48] 高雪松, 田宗军, 黄因慧, 等. 镍基高温合金表面激光熔覆制备 $Al_2O_3-TiO_2$ 陶瓷涂层[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2011, 32(6): 720-723.
- GAO Xue-song, TIAN Zong-jun, HUANG Yin-hui, et al. $Al_2O_3-TiO_2$ Ceramic Coating Prepared by Laser Cladding on Nickel-base Superalloy[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2011, 32(6): 720-723.
- [49] SUN Y, HAO M. Statistical Analysis and Optimization of Process Parameters in Ti6Al4V Laser Cladding Using Nd: YAG Laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(7): 985-995.
- [50] DUAN X, GAO S, DONG Q, et al. Reinforcement Mechanism and Wear Resistance of $Al_2O_3/Fe-Cr-Mo$ Steel Composite Coating Produced by Laser Cladding [J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 291: 230-238.
- [51] LI M, HAN B, WANG Y, et al. Investigation on Laser Cladding High-hardness Nano-ceramic Coating Assisted by Ultrasonic Vibration Processing[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(11): 4596-4600.