

等离子喷涂制备典型涂层研究进展

史 昆¹, 刘天翼¹, 刘时兵¹, 岳 野¹, 徐 凯², 曲赫威¹, 李重阳¹, 倪 嘉¹

(1. 沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110022;

2. 空军装备部驻辽阳地区军事代表室, 辽宁辽阳 111000)

摘要: 从航空航天到交通运输、电子设备和医疗器械等, 大大小小的行业中均可见到涂层的应用, 涉及到这些领域的涂层种类主要有耐磨、耐蚀涂层、热障涂层、压电陶瓷涂层和生物陶瓷涂层等。等离子喷涂技术具有喷涂材料范围广、工艺简单等优点, 是制备上述典型涂层的常用工艺方法。虽然同种工艺可制备出不同种类涂层, 但由于所选的喷涂材料、喷涂参数不同, 所获得的涂层性能和涂层结构之间也存在着一定差异, 须对等离子喷涂各类涂层的研究进行分析与总结。基于此, 文中简要介绍了国内外等离子喷涂涂层的应用现状, 之后从不同种类涂层功能需求和技术特点出发, 分析喷涂工艺对涂层结构和性能的影响。最后对提升涂层性能的工艺方法进行总结, 并对今后等离子喷涂涂层技术的发展趋势进行了展望。

关键词: 等离子喷涂; 喷涂参数; 涂层性能; 研究现状

等离子喷涂是热喷涂工艺的一种, 其工作原理是利用等离子体焰流在短时间内加热并加速金属或陶瓷粉末, 在粉末为熔融或半熔融状态下高速撞击基体, 形成以片层叠层状态的涂层, 这种涂层会牢固附着在基体表面, 其结合方式主要以机械结合为主, 有时也可产生微区冶金结合和物理结合^[1-3]。等离子喷涂工艺具有喷涂效率高、喷涂工件形状尺寸不受限制、涂层厚度可控、涂层结合强度高且不影响基体性能等优点, 通过等离子喷涂制备的防护涂层对提高基体的耐磨、耐蚀、耐热等性能具有显著效果。经过几十年不断的发展, 等离子喷涂技术已成为航空、航天、汽车、船舶等高端领域中进行表面防护的一种重要表面处理工艺^[4-7]。近年来, 随着新材料的开发, 针对某些特定的喷涂材料, 可通过等离子喷涂技术制备出使基体获得特殊功能的涂层, 如压电涂层、吸波涂层和疏水涂层等, 应用领域涉及光伏、高铁、雷达等众多高新技术产业^[8-9]。同时, 利用等离子喷涂技术制备的生物陶瓷涂层, 不仅可以提高基体的生物相容性, 还可以起到一定的耐蚀、耐磨的防护作用, 是医用植入领域中必不可少的一道加工工序^[6, 10]。总之, 等离子喷涂作为一种表面改性工艺, 在该领域中占据着举足轻重的地位, 其制备的涂层不仅可以对基体起到防护作用, 提高基体材料的工作使用强度, 还能实现特殊材料在保留其特殊功能的前提下实现薄膜化、复杂化和小型化^[11]。经过数年不断地研究与实践, 等离子喷涂表面改性技术已日趋成熟, 制备出的涂层也能够满足绝大多数领域的应用需求, 但由于涂层种类较多, 不同种类的涂层从喷涂材料的选择到喷涂工艺和参数的确定都略有差别, 致使涂层结构与性能之间存在巨大差异。基于此, 本文简要介绍国内外等离子喷涂制备不同种类涂层的研究现状, 通过对不同种类涂层的工业需求和以及各涂层的技术特点出发, 综述喷涂材料、喷涂工艺和喷涂参数对涂层结构及性能影响, 并对提升等离子喷涂不同涂层性能的方法进行总结, 最后对等离子喷涂制备涂层技术进行了展望。

1 耐磨涂层

等离子喷涂耐磨涂层是以提高基体耐磨性并延长使用寿命的一类防护涂层, 涂

作者简介:

史昆(1982-), 男, 正高级工程师, 主要研究方向为钛合金铸造。E-mail: shikun77@163.com

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

03-0225-10

基金项目:

沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目(RC210302); 国家重点研发计划2020YFB2008303。

收稿日期:

2022-08-04 收到初稿,
2022-10-28 收到修订稿。

层与基体之间的结合强度和耐磨性作为耐磨涂层中最为重要的两个性能指标，决定了涂层的质量和使用年限^[12-13]。这主要与涂层自身材料、涂层的形态、涂层间的粘结强度、气孔、裂纹以及残余应力有关^[14-15]。耐磨涂层的工作环境多种多样，工作状态下主要面临高温疲劳、轻/重载荷、高/低转速等工况，因此需要选择合适的喷涂材料，以满足在不同环境下对耐磨性能的

需求。用于制备耐磨涂层的材料种类较多，大体可分为金属基材料和陶瓷基材料，主要有铁基、镍基、钼基、金属氧化物、碳化物和氮化物等^[16-25]。表1列举了近年来常用的耐磨涂层喷涂材料及涂层相关信息^[5, 12, 14-25]。其中，金属粉末具有良好的浸润性，可单独作为涂层喷涂材料，但其制备的涂层硬度一般低于陶瓷基涂层，常常添加硬质相或润滑相提高涂层耐磨性^[17-19, 21]。

表1 常见等离子喷涂耐磨涂层材料及其相关参数

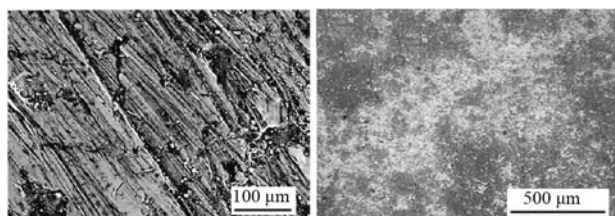
Table 1 Common wear-resistant coating materials and related parameters of the plasma spraying

涂层材料	粉末大小/ μm	相组成	硬度/GPa
FeCrBSi	32~38	(Fe, Ni) ₃ B\Cr ₇ C ₃ \Cr ₂₃ C ₆ \CrB	3.01~4.08
Fe-TiC	24	Fe\TiC\FeO/TiO ₂	4.13~5.60
NiCrBSi	45~60	γ -Ni\Ni ₂ Si\Ni ₃ B\Cr ₃ Ni ₂ Si	5.83~6.87
Mo-W	45~96	Mo\W	5.63~5.70
Mo-NiCrBSi	40~74	Mo\ γ -Ni\Ni ₃ B\Cr ₃ C ₂	6.83~7.65
AT13 (Al ₂ O ₃ +13%TiO ₂)	38~43	α -Al ₂ O ₃ \ γ -Al ₂ O ₃ \TiO ₂	8.9~10.61
Cr ₂ O ₃	20~50	Cr ₂ O ₃	15.9~20.7
WC-Co	5~45	WC\Co	10~12
TiC-Co	14.15~22.29	TiO\CoO\Ti\ γ -TiO ₂ \ α -Co	8.86~9.35

陶瓷基材料制备的耐磨涂层硬度高、脆性大，制备的涂层种类主要有陶瓷复合涂层和金属陶瓷涂层。陶瓷复合涂层主要由金属氧化物组成，常与一定比例的TiO₂、SiO₂粉末组合使用，可制备出在腐蚀环境下的耐磨涂层，也可通过纳米级颗粒，利用小尺寸效应制备出高温条件下的耐磨陶瓷涂层^[16, 20, 22-24]。金属陶瓷涂层是指用一种或数种陶瓷颗粒作为增强体与粘结相(Co、Ni、Fe、Mo、NiCr等)成一体，通过包覆形式作为涂层，这些增强相可起到弥散强化的作用，进而提高涂层的硬度和耐磨性。而粘结相可使涂层获得一定的韧性，降低涂层孔隙率，这种涂层不仅具有金属涂层的高韧性、塑性，还保留了陶瓷涂层的高硬度，常用在对耐磨性要求较高服役环境苛刻的零部件上^[22-23]。除此之外，耐磨涂层的磨损机制也主要与涂层材料有关，不同材料的磨损形貌如图1所示^[16]。金属基材料的磨损机制多为磨粒磨损和塑性变形，其特征形态是在摩擦副对偶表面沿滑动方向形成划痕，增加应力载荷会增加涂层塑性变形，加剧涂层表面沟槽和划

痕形貌，而陶瓷基材料的磨损机制多为磨粒磨损和粘着磨损，对于陶瓷等脆性材料来说，在涂层表面的微凸起会被逐渐去除，脱落的碎片在对磨辊的带动下使涂层表面形成微裂纹等缺陷，这些微裂纹在后续的摩擦过程中会沿着平行于涂层表面的方向扩展，最终形成一些微小的凹坑。

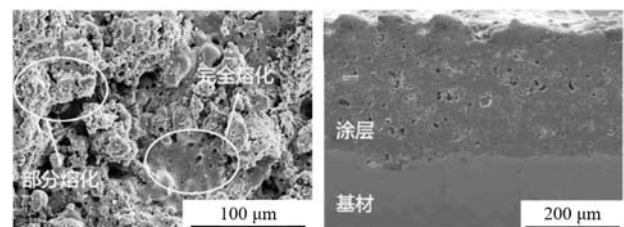
等离子喷涂耐磨涂层具有典型的层状结构，其微观结构如图2所示^[15]，涂层内部和表面存在一定的孔隙、裂纹和部分未完全熔化组织。这些孔隙和裂纹的形成是由于不同熔融液滴之间的飞行速度和温度不同，撞击基体后呈现出不同的铺展状态，各层之间不能完整贴合而导致的，因此等离子喷涂涂层中的缺陷不可避免^[26-27]。研究表明，这些缺陷会直接影响涂层性能，比如在工作状态下涂层中孔隙会因应力集中而产生疲劳裂纹，经过时间的积累，疲劳裂纹出现不断扩大，最终导致涂层出现分层而失效^[28]。通常认为，喷涂参数对涂层中孔隙和裂纹的大小及分布有较大



(a) FeCrBSi (b) Cr₂O₃-TiO₂

图1 不同材质涂层磨损形貌

Fig. 1 Wear morphologies of the coatings with different materials



(a) 涂层表面 (b) 涂层截面

图2 等离子喷涂涂层微观形貌

Fig. 2 The morphologies of the plasma spraying coating

影响。Gao Y^[29]等研究了在功率为2.5~4.0 kW条件下Al₂O₃涂层孔隙率、硬度、及相组成的变化,通过选用内部给粉的工艺在较低的功率下制备了高硬度的耐磨涂层,结果表明,随着喷涂功率的增加,涂层硬度和 γ -Al₂O₃相含量增加,孔隙率明显降低,涂层硬度最高可达15 GPa。Jiang X Y等^[30]研究了高焓大气等离子喷涂功率和进粉速率对Al₂O₃涂层组织结构和性能之间的关系,结果表明,降低喷涂功率或增加送粉速度均会提高涂层中未熔颗粒的含量,使涂层致密度降低,孔隙数量增加。而当功率较大时,粉末出现过热或气化,甚至发生相变的现象,使涂层中的硬质相含量降低,并降低涂层硬度。对比发现,后者的喷涂功率范围在55~95 kW,明显高于前者,但这两种喷涂方法制备的涂层孔隙含量均低于2%,主要原因在于前者使用了内部送粉的工艺,这种工艺使传输到粉末的能量高于传统的喷涂方法。内部送粉工艺消耗的能量虽然仅为传统喷涂的1/5,但效率较低,无法实现大规模批量生产,而高焓大气等离子喷涂能使粉末完全充分熔化,获得的涂层致密度高,现已成为高熔点陶瓷涂层的一种理想喷涂技术。

除了涂层缺陷,残余应力也会对涂层性能产生一定的影响,其主要是对涂层与基体之间结合强度的影响。大多数等离子喷涂过程中产生的残余应力均是由熔融或半熔融状态下的粉末在凝固收缩过程中产生的淬火应力以及冷却后基体与涂层之间热膨胀系数不匹配而导致的^[26]。目前来说,降低涂层残余应力工艺方法主要是通过多次预热基体,降低在沉积过程中产生的淬火应力,同时避免采用过高的喷涂功率,降低涂层的沉积温度,这种方法还可以减少涂层内由应力而引起的微观组织缺陷^[30]。总之,对于耐磨涂层来说,喷涂材料决定了该涂层的耐磨性,不同喷涂材料相组织成分和性能参数不同,应根据涂层自身服役需求进行选择,涂层结合强度与涂层孔隙、裂纹、残余应力有关,可通过优化喷涂参数、预热基体等方法减少涂层内部和表面的缺陷以及残余应力。

2 耐蚀涂层

耐蚀涂层是等离子喷涂的另一典型应用,其作用

是将材料与外界环境隔离开来,使基体在恶劣的环境下免受腐蚀介质的侵蚀和损害^[31]。大气腐蚀和热腐蚀是较为常见的腐蚀工况,大气腐蚀通常是在大气环境下发生的腐蚀,而热腐蚀主要发生在蒸汽锅炉、热交换器、航空发动机以及发电系统内。这两种腐蚀的腐蚀条件不同,但腐蚀机理相似,都是腐蚀介质从涂层中残留的孔隙和裂纹中穿透涂层,通过腐蚀产物在涂层和基体界面不断积累,最终使涂层脱粘和剥落,直至失效^[32-33]。因此对耐蚀涂层来说,消除喷涂涂层内部和表面上的孔隙和裂纹是提高涂层性能的主要途径。但等离子喷涂的涂层中必然存在一定的裂纹和孔隙,对于降低或消除耐蚀涂层缺陷的研究主要集中在喷涂参数、喷涂材料、复合涂层以及涂层后处理等几方面^[34-39]。前文综述结果表明,等离子喷涂的结构主要与熔融粉末的沉积温度和快速凝固有关,而粉末的状态主要受喷涂参数的影响。Sichani H R^[40]等研究了大气等离子喷涂电弧电流对Ni-Ti-Al涂层结构的影响,结果如图3所示,在电弧电流为600 A时,涂层密度最高,孔隙率最低,此时的涂层耐蚀性最好。电流过大或过低均出现较多孔隙,低电流下出现的孔隙是由未完全熔化的粉末导致的,而高电流下涂层出现孔隙是因为粉末在到达基体表面之前发生气化,而挥发的残留物在涂层中会形成大量孔隙。胡帅^[41]等通过正交实验方法研究了各喷涂参数对涂层性能影响,对涂层孔隙率的影响强弱顺序依次是主气流量>喷涂距离>喷涂功率,对涂层结合强度的影响则是喷涂距离>喷涂功率>主气流量。

除了优化喷涂参数外,改进喷涂材料也可有效提高涂层的耐蚀性。李水清等^[42]研究了Ni对Cr₂O₃涂层孔隙率及耐蚀性的影响,在制备涂层过程中,根据毛细管原理,低熔点的Ni会流向孔隙处填充孔隙,切断了腐蚀路径,提高涂层耐蚀性。李春福^[43]等通过纳米掺杂改善Al₂O₃+13%TiO₂涂层的耐蚀性能,由于纳米离子具有小尺寸效应,纳米包覆的微米级粉末熔点降低,在掺杂纳米粒子后涂层组织状态分布更加均匀,微孔数量和微裂纹的尺寸明显降低,同时在纳米材料界面效应下元素通过界面的扩散难度降低,Al元素局部偏聚程度降低。纳米含量与涂层孔隙率也有一定关系,

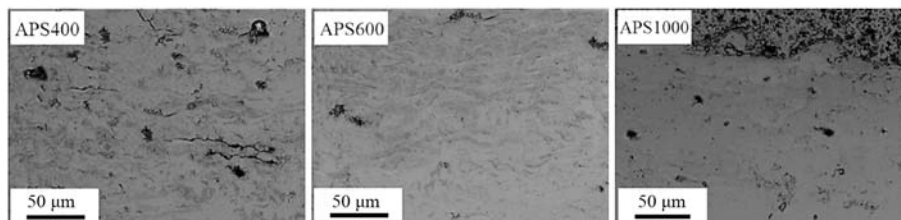


图3 不同电弧电流下涂层截面微观形貌

Fig. 3 The morphologies of the cross sections of the coatings at different arc currents

如图4所示^[43],随着纳米离子含量的增加,涂层孔隙含量减少,在腐蚀液中的耐蚀性提高。

复合涂层和后处理均是减少涂层孔隙和裂纹的有效方法,Fang M H^[38]等采用等离子喷涂工艺制备了Ni/Al-Al₂O₃梯度陶瓷涂层,并在5% HCl沸腾溶液中进行腐蚀试验,由于Ni/Al过渡层间涂层的存在,梯度涂层Ni/Al-Al₂O₃陶瓷涂层厚度大大增加,涂层之间无明显界线,涂层表面与基体之间几乎不存在通孔,腐蚀速率仅为216 mg/cm²,表明这种涂层对基体具有良好的耐腐蚀防护作用。林晓燕^[44]对等离子喷涂Ni包WC涂层进行激光重熔处理,在采用合适的激光参数后,涂层表面光洁,致密度得到了提高,耐蚀性明显高于喷涂后的涂层。总之,等离子喷涂耐蚀涂层因自身结构特点和腐蚀机制,应尽量减少涂层的孔隙和裂纹,主要是从优化喷涂材料、控制喷涂参数、复合涂层以及涂层后处理等方法来减少涂层的孔隙和裂纹数量。

3 热障涂层

热障涂层(Thermal barrier coatings, TBCs)是应

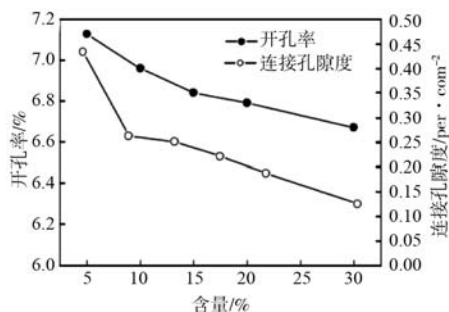


图4 涂层孔隙和耐蚀性与纳米颗粒含量的关系

Fig. 4 The relationship between the nanoparticle content and the porosity as well as the corrosion resistance of the coating



图5 双层、多层和梯度热障涂层结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the double layered, multiple layered and gradient TBCs

率降低,涂层热膨胀系数在原来基本保持不变的情况下,导热率降低^[54-55]。

热障涂层的服役环境十分恶劣,除相变以外,陶瓷层的残余应力以及高温环境对陶瓷层的热腐蚀等都会使涂层出现剥落提前失效^[56-57]。热腐蚀是热障涂层所面临的严重问题,在发动机的燃料中,大量的Na、V、S等元素在高温环境下会破坏涂层的内部结构,加速涂

用在航空发动机的涡轮叶片、燃烧室壁、尾喷管等高温环境下的一种防护涂层^[45-47]。与传统防护涂层结构不同,热障涂层通常由一层金属粘结层和一层陶瓷隔热层组成,有时也加入氧阻挡层、封闭层、梯度层,形成多层结构或梯度结构等,其结构图如图5所示^[47]。热障涂层中粘结层主要起到缓解陶瓷层与基体之间热膨胀系数不匹配的作用,改善两者之间的物理相容性,而最为主要的陶瓷层则直接面对外部高温环境,需要具有低热导率、高膨胀系数和高热稳定性^[48]。目前最为常用的陶瓷层材料是YSZ,但1 200℃是这种材料的使用极限,当温度超过极限温度后,ZrO₂会发生相变,导致涂层产生一定的膨胀,影响涂层的使用。近年来,开发适用于热障涂层的新型陶瓷层材料主要有YSZ、GdYSZ、La₂Zr₂O₇、CePO₄等,涂层具体物理参数见表2^[49-53, 61-62, 64]。从表中材料名称中可以看出,热障涂层陶瓷材料主要可分为稀土掺杂YSZ、稀土掺杂锆酸盐、以及稀土磷酸盐、稀土硅酸盐等。稀土掺杂YSZ材料使用温度明显高于传统的YSZ材料,这是因为掺杂稀土氧化物增大了ZrO₂的晶格畸变,使晶格热振动频

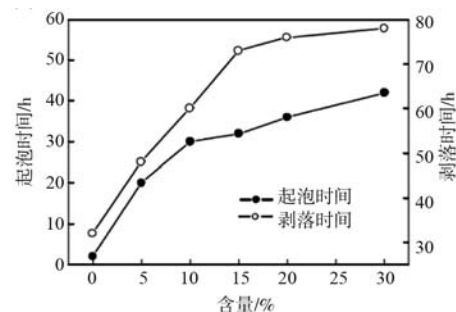
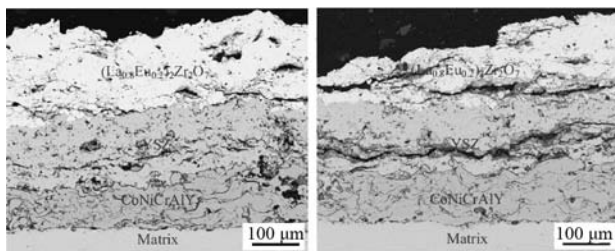


表2 部分热障涂层材料的热物理性能
Table 2 Thermal physical properties of the part TBCs

陶瓷层材料	导热系数/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	热膨胀系数/ (10 ⁻⁶ K ⁻¹)
YSZ	2.30 (700℃)	10.70 (20~1 000℃)
GdYSZ	1.60 (800℃)	11.6 (30~1 000℃)
ScYSZ	1.14 (700℃)	11.0 (20~1 300℃)
SnYSZ	1.98 (1000℃)	10.38 (25~1 000℃)
La ₂ Zr ₂ O ₇	1.56 (800℃)	9.10 (30~1 000℃)
La ₂ Ce ₂ O ₇	0.60 (1000℃)	12.30 (300~1 200℃)
Dy ₂ Zr ₂ O ₇	1.34 (800℃)	10.80 (1 000℃)
Yb ₂ Zr ₂ O ₇	1.58 (800℃)	10.40 (1 000℃)
CePO ₄	1.80 (700℃)	10.70 (1 200℃)
LaPO ₄	1.80 (700℃)	10.50 (1 000℃)
GdPO ₄	0.98 (1 000℃)	11.10 (1 200℃)
Re ₂ SiO ₅	1.10~1.60 (1 000℃)	6.94~8.84 (1 200℃)

层的失效。以YSZ涂层为例,热腐蚀的发生是氧化钇与腐蚀盐发生的化学反应,生成新的化合物,消耗了YSZ中 Y_2O_3 的含量的同时,会使YSZ产生一定的相变,相变应力的产生会加速涂层内部裂纹的扩展。热腐蚀是涂层结构发生破坏的起因,而残余应力则是陶瓷层发生剥落的主要原因,研究认为陶瓷层的剥落并不是界面上的突然开裂,而是残余应力诱发涂层沿厚度方向上的开裂^[52]。热障涂层中的残余应力主要来源于三方面,一是在等离子喷涂过程中熔融液滴冷却过程中所产生的热应力;二是热障涂层在经过热循环后冷却时因热膨胀系数不匹配而产生的热应力;三是粘结层在经过热循环氧化后所产生的高温生长应力^[26, 57-58]。对于第一种应力前文已说明采用预热基体并优化喷涂参数可降低喷涂过程中的残余应力,对于后两种残余应力,可利用双层陶瓷层结构的方法来解决。Ma W^[59]等采用大气等离子喷涂技术制备了 $La_2CeO_7/8YSZ$ 双层陶瓷热障涂层,与单独的 La_2CeO_7 和8YSZ涂层相比,这种双层陶瓷涂层的设计有效地克服了 La_2CeO_7 涂层与结合层之间的热膨胀失配,在高温循环条件下其寿命比单独的 La_2CeO_7 和8YSZ涂层得到明显提高。类似的,Liu Z G^[60]等制备了双层 $(La_{0.8}Eu_{0.2})_2Zr_2O_7/YSZ$,热循环试验后涂层部分区域出现剥落。涂层剥落区与非剥落区的微观形貌如图6所示,长条状裂纹大多发生在两种陶瓷层之间以及YSZ涂层内部,涂层的损伤主要发生在外表面的陶瓷层上,而结合层上的热生长氧化层并不明显,说明这种结构的涂层可以有效延缓涂层的损坏。双层陶瓷结构中,上层陶瓷层具有低导热系数和高相稳定性,可起到保温和保护内层的作用,这种双层陶瓷结构在新型热障涂层研究中表现出良好的发展潜力。



(a) 非剥落区 (b) 剥落区

图6 LEZ/YSZ涂层热循环后涂层截面SEM照

Fig. 6 SEM morphologies of the cross-sections of the LEZ/YSZ coatings after thermal shock tests

隔热效果是对陶瓷层的一个基本性能需求,这不仅与涂层材料本身的物理性能参数有关,还受涂层内部结构及涂层的相组成的影响。一般认为增加涂层内部的裂纹数量可以提高涂层的隔热性能。刘阳^[61]等模拟了孔隙率含量和组成与涂层隔热性之间的关系,

结果显示,陶瓷隔热性随着孔隙率以及孔隙纵横比的增加而增强,但涂层中孔隙含量过多会降低涂层的结合强度。李浩宇^[62]等在不同喷涂功率下制备了 $GdPO_4/YSZ$ 双陶瓷结构的超高温TBCs,低喷涂功率下由于粉末熔化不充分,涂层中出现一定的裂纹,这些裂纹可以提高涂层的韧性和隔热性,但过高的喷涂功率导致 $GdPO_4$ 相分解为 $GdPO_7$ 相,对涂层热导率、热膨胀系数和力学性能产生不利影响。

总之,热障涂层需要具有隔热性、耐高温等性能,通过掺杂稀土元素优化喷涂材料可以提高陶瓷层的耐高温性能。残余应力对热障涂层影响较大,可通过优化涂层结构,制备新型双层陶瓷隔热层等方法来减少涂层内部应力的产生。孔隙和裂纹对热障涂层具有一定的积极作用,优化喷涂参数控制涂层内部孔隙和裂纹或相组成等方法可以提高涂层的热导率,提升涂层耐热性能。

4 压电陶瓷涂层

压电陶瓷是一种特殊的信息功能陶瓷,具有压电/逆压电效应,可以将机械能和电能相互转换,其特点在于具有高的机电耦合系数、力-电转换效应和介电常数,广泛应用于压电传感器、微型压电马达、医学成像、声表面波器件等高端制造领域^[8]。近年来,对压电陶瓷的应用逐渐向小型化、精密化、复杂化方向发展,但传统制备压电陶瓷的工艺,如固相烧结、磁控溅射等方法制备出的压电陶瓷多为块状,难以满足对厚度有特殊要求的压电陶瓷元器件。等离子喷涂技术是制备压电陶瓷涂层的常用方法,不仅可以制备出厚度在几十微米至几百微米的压电陶瓷涂层,还可减少在应用过程中的黏贴环节,提高涂层可靠性^[63]。制备压电陶瓷涂层的材料均为钙钛矿结构如 $CaTiO_3$ 、 $BaTiO_3$ 、PZT,这种结构是涂层具有特殊功能的必要条件,而涂层的结构则是影响涂层压电性能和介电常数的关键因素。因此为了保证涂层质量,应尽可能减少喷涂过程中材料的分解以及内部缺陷的含量。超音速等离子喷涂焰流温度高、喷涂粒子速度快,可减少涂层中有效的化学成分的损失,国内外学者均对超音速等离子喷涂压电陶瓷涂层进行了研究,获得的涂层组织致密、孔隙率低、性能质量良好的压电陶瓷涂层^[64-65]。减少涂层内部缺陷是提高涂层性能的主要方法,Paksresht^[66]等研究了基体预热涂层结构的影响,结果表明,经过对基体进行600℃的预热处理后,涂层与基体之间结合面孔隙和裂纹明显减少,涂层介电常数达到505。涂层缺陷减少主要是因为预热处理去除了表面的附着物,同时预热改善了涂层与基体间热量的传输,提升熔滴在基体表面铺展的各向同性和湿

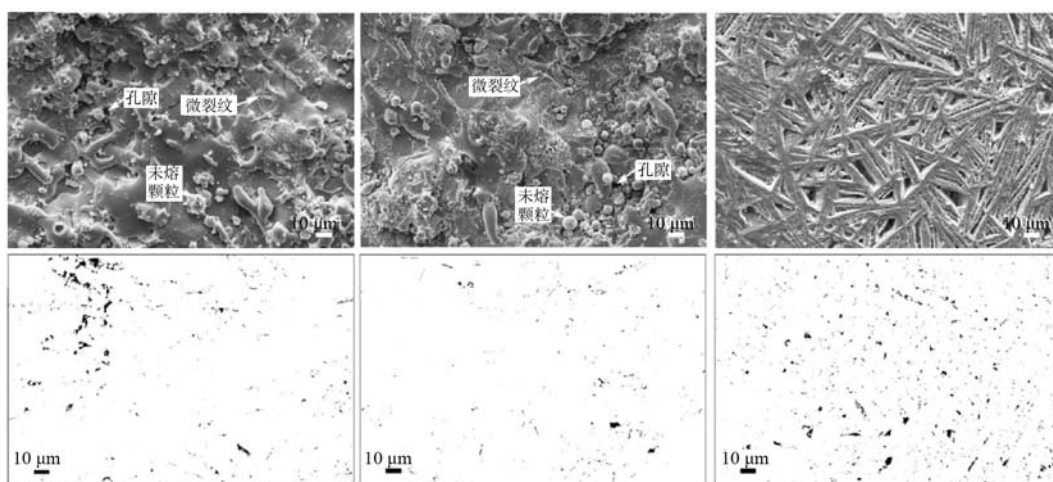
润性，缓解涂层内部热应力的积累。涂层中晶相含量是影响涂层电学性能的另一指标，一般来说，非晶相含量的增加会导致涂层电阻率的增加和介电常数的降低。Jiri Kotlan^[67]等通过控制大气等离子喷涂距离来获得具有不同晶相含量的(Ba, Sr)TiO₃涂层，由于喷涂距离越近，喷涂焰流对于涂层存在持续加热的作用，促使涂层内部非晶相组织发生再结晶，研究结果表明，晶相含量的增加使涂层的介电性能得到了提高。Pavel C^[68-71]对等离子喷涂压电陶瓷涂层进行了系统研究，讨论了不同喷枪类型、喷涂工艺参数和后处理对涂层结构和性能的影响，通过在较高的喷涂功率下得到了高含量非晶相的压电陶瓷涂层，之后对涂层进行热处理，实现了全部非晶相向晶相的转变，最终涂层性能明显得到提高。

总之，压电陶瓷涂层是功能性涂层，其性能与喷涂材料有直接的关系，喷涂过程中会造成材料的分解，因此也应通过控制喷涂功率，避免过多的材料损耗而造成涂层性能的下降，同时对于涂层缺陷的数量也应加以控制。对涂层进行后处理，将涂层的非晶相转变为晶相也是提高涂层的压电性能和介电常数的常用工艺方法。

5 生物陶瓷涂层

生物陶瓷涂层是专门用于医用植入体的一种防护涂层，由于植入材料的植入周期较长，在其服役期间需要涂敷一层涂层来保护基体完整性不受体液或血液的侵蚀。因此生物活性涂层不仅需要具有生物相容性，还应具有较高的结合强度、耐磨性和耐腐蚀性能，有时作为承力的植入体还需要涂层具备一定的力学性能^[1-2]。羟基磷灰石[Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂]简称HA，

具有无毒、良好的生物相容性以及骨导电性，是目前制备生物陶瓷涂层最为常用的一种材料^[10, 72]。但HA陶瓷材料脆性高、硬度大，通过等离子喷涂制备的羟基磷灰石陶瓷层常常面临涂层与基体结合强度低、孔隙和裂纹等缺陷较多、涂层耐蚀性较差等问题。解决等离子喷涂生物陶瓷涂层的上述问题也主要通过优化喷涂工艺、喷涂材料以及涂层的后处理等来解决^[73-74]。Huang L P^[75]等在钛合金表面制备了等离子喷涂HA/Ta复合涂层，利用Ta与HA的熔点差异，使涂层中未熔化的Ta颗粒填充了HA涂层表面及内部的气孔，提高涂层致密度。同时Ta的加入也削弱了涂层和钛合金之间的热膨胀系数的失配度，提高了涂层与基体的结合强度。此外Ta也具有很好的抗菌性能，有效减少组织感染的发生。优化喷涂材料也可以减少涂层内部缺陷提高涂层耐蚀性。Singh J^[76]等研究了硅酸钙增强羟基磷灰石(HA-CS)涂层和HA涂层，对比发现，纯HA涂层表面存在一定的微裂纹，而HA-CS涂层上无明显的裂纹，且随着CS含量的提高，涂层的耐蚀性得到了提高。这是因为在HA涂层的凝固过程中只存在快速均匀的单相冷却，而HA-CS涂层中，HA和CS的热导率不同，会产生跨HA/CS边界的温度梯度，使HA-CS涂层的冷却速度减慢，减少裂纹的产生。等离子喷涂热流温度高，HA材料在等离子喷涂后会产生明显的分解、非晶化、失羟等现象。通常非晶相在热力学上处于亚稳定状态，是容易发生分解和失效的，因此对涂层进行晶化处理，提高涂层中HA晶相比例，可以提高涂层的结构稳定性^[74, 77-78]。刘晋京^[79]研究了热处理和激光重熔对等离子喷涂涂层组织和结构的影响，结果表明，喷涂过程中HA发生了分解和非结晶化，经过处理后，涂层显微结构和孔隙含量如图7所示，HA结晶度明显提高，



(a)、(d)原始涂层；(b)、(e)热处理涂层；(c)、(f)激光重熔涂层

图7 后处理对等离子喷涂生物陶瓷涂层微观结构的影响

Fig. 7 The effect of the post-treatment on microstructure of the plasma sprayed bioceramic coatings

表面质量较好,孔隙含量均低于初始涂层。

总之,生物陶瓷涂层需要具有生物相容性和耐腐蚀性,所选择的喷涂材料因此受到限制,目前主要是以羟基磷灰石为主或在此材料基础上对其进行改性处理。对于提升生物陶瓷涂层性能的方法有制备复合涂层来减少涂层内部的通孔数量,也可以通过热处理或激光重熔对涂层进行晶化处理,降低涂层非晶相的含量。

6 结束语

等离子喷涂技术具有喷涂材料广、不受零件形状尺寸限制且喷涂效率高等优点,在制备各种防护和功能涂层中占据着重要地位,但涂层种类较多,目前涂层材料和喷涂工艺的发展仍会使涂层的应用受到一定的限制。文中通过简要介绍国内外等离子喷涂技术制备的耐磨、耐蚀涂层、热障涂层、压电涂层、生物陶瓷涂层的应用背景和性能需求,分析喷涂材料、喷涂工艺和参数对涂层结构和性能的影响,探究等离子喷涂各种典型涂层的发展方向。

耐磨和耐蚀涂层应用广泛,是最为常见的防护性涂层,这两种涂层的性能也主要与喷涂材料和喷涂参数密切相关。喷涂材料对涂层的防护效果起着决定性作用,现阶段对它们的研究也多集中在新的涂层材料的研发中,如在现有耐磨涂层材料中添加不同硬质

相,制备出多相复合涂层来提高涂层的耐磨性。对耐蚀涂层来说,较少含量的孔隙和裂纹可提高涂层耐蚀性,优化喷涂参数是减少涂层缺陷含量的有效途径,同时复合涂层或封孔处理技术也是提高耐蚀涂层性能的另一方向。

热障涂层的结构复杂,多用于航空航天等领域,因此对热障涂层的性能提出了较高的要求。现阶段对热障涂层研究主要集中在新型涂层材料、涂层结构、以及喷涂工艺上,其中开发的新型稀土氧化物涂层材料和具有双层陶瓷结构的涂层均可有效提高热障涂层的工作温度和使用寿命,具有较大的发展潜力。

压电陶瓷涂层属于功能涂层,其功能性与涂层材料和结构的完整性有直接关系,超音速等离子喷涂技术因其自身特点,制备出的涂层孔隙含量低,且喷涂过程中材料分解少,在制备压电陶瓷涂层中有着巨大的优势,未来可通过对喷涂参数的深入研究,并不断改进喷涂工艺,制备出性能稳定的压电陶瓷涂层。

最后对于生物陶瓷涂层来说,可供选择的材料有限,目前主要是以羟基磷灰石为主或在此材料基础上添加其他元素对其进行改性处理,提高生物陶瓷涂层耐蚀性是其主要研究方向,目前主要方法是通过复合涂层技术实现封孔效果,或涂层后处理,如热处理以及激光重熔技术对涂层进行晶化处理,降低涂层非晶相的含量,以实现延长涂层使用寿命的目的。

参考文献:

- [1] 宋长虹,张亚然,李世明,等.等离子喷涂技术制备陶瓷涂层新进展[J].热喷涂技术,2017,9(4):1-6.
- [2] 李霞,杨效田.超音速等离子喷涂技术的特点及其在表面工程中的应用[J].机械研究与应用,2017,30(5):188-190.
- [3] LI C J, LUO X T, DONG X Y, et al. Recent research advances in plasma spraying of bulk-like dense metal coatings with metallurgically bonded lamellae[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022: 1-23.
- [4] 王少鹏,李争显,杜继红.钛合金表面等离子喷涂涂层材料的研究进展[J].表面技术,2013,42(5):93-97.
- [5] 徐红艳,薛俊鹏,袁建鹏.等离子喷涂WC-12Co涂层制备及耐磨耐蚀性研究[J].热喷涂技术,2013,5(3):44-48.
- [6] 殷亚康,孙耀宁.等离子喷涂陶瓷涂层的应用[J].电焊机,2015,45(2):132-136.
- [7] 倪嘉,史昆,薛松海,等.航空发动机用热障涂层陶瓷材料的发展现状及展望[J].材料导报,2021,35(S1):163-168.
- [8] ZHOU L, ZHOU W C, CHEN M L, et al. Dielectric and microwave absorbing properties of low power plasma sprayed Al_2O_3/Nb composite coatings[J]. Materials Science and Engineering: B, 2011, 176(18):1456-1462.
- [9] 苏进步.等离子喷涂耐高温吸波涂层的制备及性能研究[D].西安:西北工业大学,2016.
- [10] 尹瀛月,乌日开西·艾依提,张建杰,等.离子喷涂技术在骨科植入物表面改性的应用[J].热加工工艺,2016,45(6):33-35,41.
- [11] 顾林松,李国禄,王海斗,等.超音速等离子喷涂PZT涂层及其表征[J].粉末冶金材料科学与工程,2013,18(4):560-565.
- [12] CHENG Z F, WANG F C, MA Z. Wear morphology and mechanism analysis of plasma spraying nanometer Al_2O_3 -13%wtTiO₂ coating material[C]//Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2012, 164: 174-177.
- [13] 欧献,邓畅光,王日初,等.超音速等离子喷涂涂层耐磨性能研究进展[J].材料导报,2013,27(S1):104-106,114.
- [14] 李万青.等离子喷涂WC-17Co纳米涂层的工艺及组织性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [15] 毛俊宏.等离子喷涂TiO₂-SiAlON复合涂层组织结构及性能与耐磨实验研究[D].苏州:江苏大学,2020.
- [16] 韩冰源,杜伟,朱胜,等.等离子喷涂典型耐磨涂层材料体系与性能现状研究[J].表面技术,2021,50(4):159-171.
- [17] 闫涛,刘贵民,朱硕,等.磁场环境中的Mo-W喷涂层摩擦磨损性能[J].中国表面工程,2018,31(2):138-147.

- [18] CHANG X T, SUN S B. Effect of Mo on phase composition, microstructure and tribological property of TiC reinforced plasma sprayed coatings [J]. *Surface Engineering*, 2013, 27 (4): 300-305.
- [19] ZHANG C, LIU L M, XU HAIFENG, et al. Role of Mo on tribological properties of atmospheric plasma-sprayed Mo-NiCrBSi composite coatings under dry and oil-lubricated conditions [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 727: 841-850.
- [20] DU Y, CHEN H, YANG G, et al. Effect of cobalt content on high-temperature tribological properties of TiC-Co coatings [J]. *Ceramics International*, 2018, 44 (12): 14186-14194.
- [21] 司洪娟, 徐滨士, 王海斗, 等. FeCrBSi/FeS层真空辐照环境下的组织结构与摩擦学性能研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2011, 31 (5): 560-564.
- [22] ZHAO X Q, AN Y L, HOU G L, et al. Friction and wear behavior of plasma-sprayed Al_2O_3 -13wt.% TiO_2 coatings under the lubrication of liquid paraffin [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, 23 (4): 666-675.
- [23] WANG C M, SUN H F, SONG Q, et al. Application of wear resistant coating technology on coating blade[C]//Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2007, 353: 1761-1764.
- [24] 欧献, 邓畅光, 王日初, 等. 超音速等离子喷涂工艺参数对 Cr_2O_3 涂层硬度的影响 [J]. *表面技术*, 2014, 43 (1): 81-85, 102.
- [25] LIU L M, XU H F, XIAO J K, et al. Effect of heat treatment on structure and property evolutions of atmospheric plasma sprayed NiCrBSi coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 325: 548-554.
- [26] Wang Z L, LI Q, LI Q X, et al. Study on microstructure and friction and wear properties of wear-resistant coatings prepared by thermal spraying [J]. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*. 2022, 17 (2): 383-402.
- [27] DONG T S, LIU M, FENG Y, Et al. Microstructure and properties of a wear resistant Al-25Si-4Cu-1Mg coating prepared by supersonic plasma spraying [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2020, 27 (9): 1287-1294.
- [28] PIAO Z Y, XU B S, WANG H D, et al. Investigation of fatigue failure prediction of Fe-Cr alloy coatings under rolling contact based on acoustic emission technique [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257 (7): 2581-2586.
- [29] GAO Y, XU X, YAN Z, et al. High hardness alumina coatings prepared by low power plasma spraying [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 154 (2-3): 189-193.
- [30] JIANG X Y, HU J, JIANG S L, et al. Effect of high-enthalpy atmospheric plasma spraying parameters on the mechanical and wear resistant properties of alumina ceramic coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 418: 1-11.
- [31] SINGH H, SIDHU B S, PURI D, et al. Use of plasma spray technology for deposition of high temperature oxidation corrosion resistant coatings-a review [J]. *Materials and Corrosion*, 2007, 58 (2): 92-102.
- [32] NITHIN H S, DESAI V, RAMESH M R. Hot corrosion behaviour of refractory and rare earth oxide reinforced CoCrAlY APS coatings at 700 °C [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2018, 71 (10): 2403-2413.
- [33] ARUNA S T, BALAJI N, SHEDTHI J, et al. Effect of critical plasma spray parameters on the microstructure, microhardness and wear and corrosion resistance of plasma sprayed alumina coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2012, 208: 92-100.
- [34] 宋仁国, 王超, 姜彦, 等. 等离子喷涂 Al_2O_3/TiO_2 纳米陶瓷复合涂层的微观结构及性能 [J]. *材料热处理学报*, 2012, 33 (S2): 145-150.
- [35] CHEBBI A, GUIPONT V, ELLEUCH K, Et al. Effects of 316SS addition on the properties of the coatings based on Al_2O_3 applied by plasma spraying [J]. *Journal of Composite Materials*, 2018, 52 (19): 2597-2608.
- [36] 李成龙, 李文戈, 赵远涛, 等. 降低等离子喷涂涂层孔隙率的研究进展 [J]. *机械工程材料*, 2020, 44 (5): 60-65.
- [37] 侯岩枫, 许立坤, 沈承金, 等. 封孔处理等离子喷涂 Cr_2O_3 涂层耐蚀性的电化学表征 [J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2012, 32 (6): 473-477.
- [38] FANG M H, LIU Y G, Huang Z H. Microstructure and corrosion behavior of Ni/Al- Al_2O_3 gradient ceramic coatings on Q235 steel[C]//Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2007, 336: 2647-2648.
- [39] CHAWLA V, SIDHU B S, RANI A, et al. High-temperature corrosion behavior of some post-plasma-spraying-gas-nitrided metallic coatings on a Fe-based superalloy [J]. *Materials and Corrosion*, 2019, 70 (12): 2157-2178.
- [40] SICHANI H R, SALEHI MI, EDRIS H, et al. The effect of APS parameter on the microstructural, mechanical and corrosion properties of plasma sprayed Ni-Ti-Al intermetallic coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 309: 959-968.
- [41] 胡帅, 温永红, 吕喜鹏, 等. 工艺参数对大气等离子喷涂C276-Ni60涂层性能的影响 [J]. *热喷涂技术*, 2021, 13 (03): 72-79.
- [42] 李水清, 糜亮, 丁毅, 等. Ni对 Cr_2O_3 涂层孔隙率及耐蚀性的影响 [J]. *表面技术*, 2011, 40 (3): 8-10.
- [43] 李春福, 王戎, 牛艳花, 等. 纳米掺杂对 $Al_2O_3+13\%TiO_2$ 等离子喷涂涂层耐蚀性能的影响 [J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2008, 28 (6): 331-336.
- [44] 林晓燕. 重熔回复等离子喷涂Ni包WC涂层微观结构及耐蚀性研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [45] THAKARE J G, PANDEY C, MAHAPATRA M M, et al. Thermal barrier coatings-a state of the art review [J]. *Metals and Materials*

- International, 2021, 27 (7) : 1947–1968.
- [46] LASHMI P G, ANANTHAPADMANABHAN P V, UNNIKRISHNAN G, et al. Present status and future prospects of plasma sprayed multilayered thermal barrier coating systems [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40 (8) : 2731–2745.
- [47] 张宝鹏, 朱申, 王宇, 等. 热障涂层典型制备技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2021, 64 (13) : 36–44.
- [48] 金圣皓, 王博翔, 赵长颖. 热障涂层热物性研究进展 [J]. 航空制造技术, 2021, 64 (13) : 59–76+87.
- [49] ZHAO M, REN X, PAN W. Low thermal conductivity of SnO₂-doped Y₂O₃-stabilized ZrO₂: effect of the lattice tetragonal distortion [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2015, 98 (1) : 229–235.
- [50] LIU H, LI S, LI Q, et al. Investigation on the phase stability, sintering and thermal conductivity of Sc₂O₃-Y₂O₃-ZrO₂ for thermal barrier coating application [J]. Materials & design, 2010, 31 (6) : 2972–2977.
- [51] FENG J, XIAO B, ZHOU R, et al. Anisotropy in elasticity and thermal conductivity of monazite-type REPO₄ (RE= La, Ce, Nd, Sm, Eu and Gd) from first-principles calculations [J]. Acta Materialia, 2013, 61 (19) : 7364–7383.
- [52] KARABAŞ M, BAL E, KILIC A, et al. Effect of air plasma spray parameters on the properties of YSZ and CYSZ thermal barrier coatings [J]. Journal of the Australian Ceramic Society, 2016, 52 (2) : 175–182.
- [53] JANG B K, KIM S, OH Y S, et al. Effect of Gd₂O₃ on the thermal conductivity of ZrO₂-4 mol.% Y₂O₃ ceramics fabricated by spark plasma sintering [J]. Scripta Materialia, 2013, 69 (2) : 165–170.
- [54] FENG J, REN X, WANG X, et al. Thermal conductivity of ytterbia-stabilized zirconia [J]. Scripta materialia, 2012, 66 (1) : 41–44.
- [55] 冀晓鹏, 宫声凯, 徐惠彬, 等. 添加稀土元素对热障涂层YSZ陶瓷层晶格畸变的影响 [J]. 航空学报, 2007 (1) : 196–200.
- [56] SCHLICHTING K W, PADTURE N P, JORDAN E H, et al. Failure modes in plasma-sprayed thermal barrier coatings [J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 342 (1-2) : 120–130.
- [57] BÄKER M, RÖSLER J, HEINZE G. A parametric study of the stress state of thermal barrier coatings Part II: cooling stresses [J]. Acta Materialia, 2005, 53 (2) : 469–476.
- [58] 周雳, 邢志国, 王海斗, 等. 等离子喷涂金属/陶瓷梯度热障涂层研究进展 [J]. 表面技术, 2020, 49 (1) : 122–131.
- [59] MA W, DONG H Y, GUO H B, et al. Thermal cycling behavior of La₂Ce₂O₇/8YSZ double-ceramic-layer thermal barrier coatings prepared by atmospheric plasma spraying [J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204 (21-22) : 3366–3370.
- [60] LIU Z G, ZHANG W H, OUYANG J H, et al. Novel double-ceramic-layer (La_{0.8}Eu_{0.2})₂Zr₂O₇/YSZ thermal barrier coatings deposited by plasma spraying [J]. Ceramics International, 2014, 40 (7) : 11277–11282.
- [61] 刘阳, 蔡洪能, 魏志远, 等. 等离子喷涂热障涂层内孔隙对其隔热性能的影响 [J]. 材料保护, 2021, 54 (11) : 1–9.
- [62] 李浩宇, 程玉贤, 刘礼祥, 等. 等离子喷涂工艺参数对GdPO₄热障涂层组织结构和结合强度的影响 [J]. 航空材料学报, 2022, 42 (1) : 25–32.
- [63] 李国禄, 顾林松, 王海斗, 等. 超音速等离子喷涂PZT涂层的结构与性能研究 [J]. 功能材料, 2014, 45 (11) : 11118–11122.
- [64] 顾林松, 李国禄, 王海斗, 等. 超音速等离子喷涂PZT涂层及其表征 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2013, 18 (4) : 560–565.
- [65] LI G L, GU L S, WANG H D, et al. Microstructures and dielectric properties of PZT coatings prepared by supersonic plasma spraying [J]. Journal of thermal spray technology, 2014, 23 (3) : 525–529.
- [66] PAKSERESHT A H, RAHIMPOUR M R, VAEZI M R, et al. Effect of splat morphology on the microstructure and dielectric properties of plasma sprayed barium titanate films [J]. Applied Surface Science, 2015, 324 : 797–806.
- [67] KOTLAN J, SESHADRI R C, SAMPATH S, et al. The role of amorphous phase content on the electrical properties of atmospheric plasma sprayed (Ba, Sr) TiO₃ coatings [J]. Ceramics International, 2016, 42 (9) : 11010–11014.
- [68] CTIBOR P, AGEORGES H, SEDLACEK J, et al. Structure and properties of plasma sprayed BaTiO₃ coatings [J]. Ceramics international, 2010, 36 (7) : 2155–2162.
- [69] CTIBOR P, SEINER H, SEDLACEK J, et al. Phase stabilization in plasma sprayed BaTiO₃ [J]. Ceramics International, 2013, 39 (5) : 5039–5048.
- [70] CTIBOR P, AGEORGES H, STENGL V, et al. Structure and properties of plasma sprayed BaTiO₃ coatings: Spray parameters versus structure and photocatalytic activity [J]. Ceramics International, 2011, 37 (7) : 2561–2567.
- [71] CTIBOR P, SEDLACEK J, PALA Z. Structure and properties of plasma sprayed BaTiO₃ coatings after thermal posttreatment [J]. Ceramics International, 2015, 41 (6) : 7453–7460.
- [72] VAHABZADEH S, ROY M, BANDYOPADHYAY A, et al. Phase stability and biological property evaluation of plasma sprayed hydroxyapatite coatings for orthopedic and dental applications [J]. Acta biomaterialia, 2015, 17 : 47–55.
- [73] LIU X, HE D, WANG Y, et al. The influence of spray parameters on the characteristics of hydroxyapatite in-flight particles, splats and coatings by micro-plasma spraying [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2018, 27 (4) : 667–679.
- [74] CHEN C C, DING S J. Effect of heat treatment on characteristics of plasma sprayed hydroxyapatite coatings [J]. Materials transactions,

2006, 47 (3) : 935-940.

- [75] HUANG L P, XIE Y T, JI H, et al. Characterization of HA/Ta composite coatings fabricated by vacuum plasma spraying [C]//Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2013, 761: 113-116.
- [76] SINGH J, CHATHA S S, SINGH H. Characterization and corrosion behavior of plasma sprayed calcium silicate reinforced hydroxyapatite composite coatings for medical implant applications [J]. Ceramics International, 2021, 47 (1) : 782-792.
- [77] ZHANG Q, CHEN J, FENG J, et al. Dissolution and mineralization behaviors of HA coatings [J]. Biomaterials, 2003, 24 (26) : 4741-4748.
- [78] LIU X, HE D, ZHOU Z, et al. Effect of post-heat treatment on the microstructure of micro-plasma sprayed hydroxyapatite coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 367: 225-230.
- [79] 刘晋京. 钛合金表面复合工艺制备稀土掺杂梯度生物陶瓷涂层的研究 [D]. 衡阳: 南华大学, 2021.

Research Progress of Typical Coatings Prepared by Plasma Spraying

SHI Kun¹, LIU Tian-yi¹, LIU Shi-bing¹, YUE Ye¹, XU Kai², QU He-wei¹, LI Chong-yang¹, NI Jia¹

(1. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., National Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Liaoyang, Liaoyang 111000, Liaoning, China)

Abstract:

Applications of coatings can be found in industries large and small, from aerospace to transportation to electronic equipment and medical devices. The types of the coatings involved in these fields can be mainly divided into wear and corrosion resistance coatings, thermal barrier coatings, piezoelectric ceramic coatings and bioceramics coatings. Plasma spraying is a common process for these typical coatings with the advantages of wide spray material range and simple process. Although the same process can produce different kinds of the coatings, there are some differences among different coatings in the properties and structures of the coating because of the different spraying materials and spraying process parameters. It is necessary to analyze and summarize the research of various kinds of plasma spraying coatings. Therefore, the application status of the plasma spraying coatings at home and abroad is briefly introduced, as well as the effect of spraying process on the structure and performance of the coating is analyzed from the functional requirements and technical characteristics of different kinds of the coatings in this paper. Finally, the technological methods to improve the coating performance are summarized, and the development trend of the plasma spraying coating technology in the future is prospected.

Key words: plasma spraying; spraying parameters; coating performance; research status
