

# 等离子喷涂氧化铝基复合涂层研究进展

陈萌<sup>1</sup>, 刘昌永<sup>2</sup>, 周亮<sup>1</sup>, 高希贤<sup>1</sup>, 田小伟<sup>1</sup>, 昌花婷<sup>1</sup>

(1. 长安大学 材料科学与工程学院, 西安 710064;

2. 山东康达精密机械制造有限公司, 山东 龙口 265701)

**摘要:** 随着等离子喷涂技术的发展, 等离子喷涂氧化铝基复合涂层在防腐蚀、耐磨损和航天航空等领域得到了广泛应用。首先简要介绍了新型等离子喷涂技术(激光等离子喷涂、悬浮液等离子喷涂和超音速等离子等)和主要喷涂工艺参数(喷涂功率、送粉方式和喷涂距离等), 然后从改善涂层耐腐蚀性能的角度出发, 阐述了第二相、喷涂工艺参数和后处理工艺对涂层气孔率的影响及与涂层耐腐蚀性能的关系。重点分析了硬度、喂料特征和激光熔覆技术对氧化铝基复合涂层耐磨损性能的影响, 详述了影响硬度的因素, 以及喷涂粉末特征和激光熔覆处理对复合涂层微观结构的影响。在电磁波吸收性能研究方面, 论述了吸收剂含量、涂层厚度和多种电磁波吸收剂匹配以及喷涂参数的调整对等离子喷涂氧化铝基复合涂层吸波性能的影响。最后对以等离子喷涂技术制备性能更加优异的氧化铝基复合涂层提出了展望。

**关键词:** 等离子喷涂; 氧化铝基复合涂层; 耐腐蚀性能; 耐磨损性能; 吸波性能

**中图分类号:** TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)11-0241-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.11.033

## Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Based Composite Coatings Prepared by Plasma Spraying

CHEN Meng<sup>1</sup>, LIU Chang-yong<sup>2</sup>, ZHOU Liang<sup>1</sup>, GAO Xi-xian<sup>1</sup>, TIAN Xiao-wei<sup>1</sup>, CHANG Hua-ting<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Shandong Kangda Precision Machinery Manufacturing Co., Ltd, Longkou 265701, China)

**ABSTRACT:** With the development of plasma spraying technology, plasma-sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based composite coatings have been widely used in the fields of corrosion protection, wear resistance, aerospace, etc. Firstly, new plasma spraying technologies (laser plasma spraying, suspension plasma spraying and supersonic plasma spraying) and main spraying parameters (spraying power, powder feeding method, spraying distance, etc.) were briefly introduced. Then, from the perspective of improving corrosion resistance of the coatings, effects of the second phase, spraying parameters and post-treatment process on porosity of the coatings as well as the relationship between the three factors and corrosion resistance of the coatings were expounded. Then the effects of hardness, feeding characteristics and laser cladding technology on wear resistance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based composite coatings were analyzed emphatically. Factors affecting the hardness, as well as effects of characteristics of spraying powder and laser cladding treatment on microstructure of the composite coating were described in detail. In the aspect of study on electromagnetic absorption properties, effects of adjusting absorber content, coating thickness, various electromagnetic wave absorber matching and spraying parameters on wave absorbing properties of plasma-sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based composite coatings were discussed. Finally, prospect of preparing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based composite coatings exhibiting better performance by adopting plasma spraying tech-

收稿日期: 2017-07-17; 修订日期: 2017-09-22

Received: 2017-07-17; Revised: 2017-09-22

基金项目: 陈萌(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事热喷涂金属陶瓷涂层性能研究。

Fund: CHEN Meng (1993—), Female, Master graduate student, Research focus: thermally sprayed cermet coating.

作者简介: 周亮(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事热喷涂金属陶瓷涂层性能研究。

Biography: ZHOU Liang (1983—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: thermally sprayed cermet coating.

nology were proposed.

**KEY WORDS:** plasma spraying;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -based composite coatings; corrosion resistance; wear resistance; wave absorbing properties

金属或合金制造的工件在恶劣工作条件下很容易受到腐蚀、磨损破坏,这不仅影响其使用性能,还会造成能源的大量损耗和严重的工业污染<sup>[1]</sup>。氧化铝陶瓷作为一种典型的陶瓷材料,它具有硬度高、耐磨损性能好和耐高温等优点<sup>[2]</sup>。此外,氧化铝陶瓷因其良好的化学稳定性、耐腐蚀性和热稳定性而广泛应用于耐高温涂层。然而,氧化铝陶瓷涂层存在韧性差的缺点。目前,针对单一陶瓷材料使用性能的不足,引进增韧相形成氧化铝基复合材料成为研究的热点。此类材料包括  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CNTs}/\text{Al}_2\text{O}_3$  等,它们被广泛应用于高温、腐蚀等环境下的基体保护涂层材料。

复合涂层不仅能很好地提高机械零部件的耐磨损和抗高温性能,而且还在很大程度上提高了能源的有效利用率<sup>[3]</sup>。目前,氧化铝基复合涂层的制备工艺有物理气相沉积、表面涂覆技术和等离子喷涂技术等。其中,等离子喷涂具有较高的火焰温度和喷涂速度,几乎可以熔化包括金属、合金、陶瓷在内的任何材料,从而制备出各种高硬度、耐磨损、耐高温、抗氧化和耐腐蚀的物理、化学性能稳定的功能涂层。因此等离子喷涂技术在航空航天、原子能、汽车工业等领域有着广阔的应用前景<sup>[4]</sup>。本文主要介绍等离子喷涂氧化铝基复合涂层的研究进展,着重从耐磨损性能、耐腐蚀性能和雷达吸波性等的提高,反映等离子喷涂技术的发展过程和研究现状,最后对等离子喷涂技术制备性能更加优异的氧化铝基复合涂层进行了总结和展望。

## 1 等离子喷涂氧化铝基涂层技术

### 1.1 等离子喷涂技术

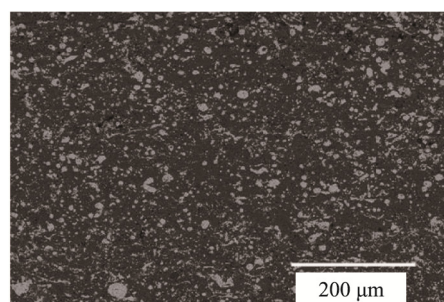
等离子喷涂技术<sup>[5]</sup>是以  $\text{Ar}$ 、 $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2$  等气体为产生等离子体的工作介质,并在大气环境下操作的热喷涂技术。它采用刚性非转移型等离子弧为热源,将涂层材料以粉末的形式引入到高温等离子体中,使粒子熔化并加速射向基板。等离子喷涂沉积涂层具备沉积效率高、灵活性高、功能多样<sup>[6]</sup>、耐久性好、有一定经济可行性等特点,是最常用的热喷涂技术。

近年来,随着等离子喷涂技术的发展,出现了许多新型等离子喷涂技术。其中,超音速等离子技术的喷涂火焰温度高、能源消耗效率高、粉末冲击速度高<sup>[7-10]</sup>,所沉积的涂层具有结构致密、硬度高和结合强度高的特点。悬浮液等离子喷涂技术则采用液态喂料代替粉末

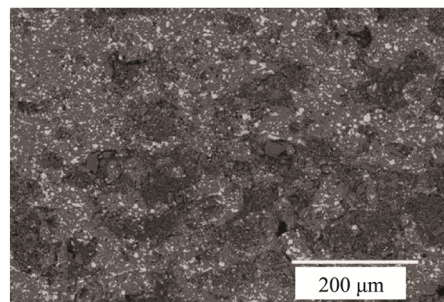
喂料,将液料注入等离子体后,可直接沉积纳米结构涂层<sup>[11-13]</sup>。目前,研究人员将注意力集中在保持纳米结构的前提下获得致密  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层。激光等离子喷涂技术很好地结合了等离子体和激光热源的优点,不仅可以用于沉积大面积涂层,而且高能量激光热源的引入使基体和涂层之间结合强度更高。在激光等离子喷涂过程中,未熔化的喂料颗粒可以在高能激光束的作用下完全熔化,从而得到更加致密的涂层。

### 1.2 等离子喷涂工艺参数

等离子喷涂的工艺参数主要包括喷涂功率、喷涂送粉方式(内送粉、外送粉)和喷涂距离等。不同等离子喷涂技术所采用的工艺参数有所不同。此外,同一种喷涂技术喷涂不同的涂层所采用的工艺参数也有区别<sup>[14-15]</sup>。其中,较高的喷涂功率有助于提高火焰温度,进而可以改善喂料颗粒的熔融情况。而喂料颗粒的温度和速度则随喷涂距离的改变而发生显著变化,适宜的喷涂距离能保证粒子既可以完全熔融,又具备足够的速度,在此条件下沉积的涂层致密、孔隙率低、显微硬度高<sup>[19-22]</sup>。此外,送粉方式对涂层的结构有显著影响。周亮等<sup>[17]</sup>研究了送粉方式对  $\text{NiCrAlY}/\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层性能的影响,结果表明(图1):喷枪内粉所沉积的涂层结构



a 内送粉



b 外送粉

图1 等离子喷涂  $\text{NiCrAlY}/\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层截面形貌<sup>[17]</sup>  
Fig.1 Cross-sectional morphology of plasma-sprayed  $\text{NiCrAlY}/\text{Al}_2\text{O}_3$  coating: (a) internal feedstock injection; (b) external feedstock injection

致密;而喷枪外送粉所制备的涂层结构疏松,气孔大且分布不均匀,同时还有大量未熔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒附着于涂层内部。

## 2 等离子喷涂氧化铝基复合涂层的耐腐蚀性能

耐腐蚀性是  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基复合涂层最重要的性能之一,提高表面耐腐蚀性可进一步增加金属零部件的使用寿命。目前,研究人员致力于在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基体中加入提高涂层致密度的第二相,以达到增强涂层耐腐蚀性能的目的。

研究发现,在等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基复合涂层时加入  $\text{TiO}_2$  可以显著提高涂层的耐腐蚀性能,并且  $\text{TiO}_2$  含量对复合涂层的性能影响显著,这是由于加入少量  $\text{TiO}_2$  可以获得致密的氧化铝涂层。JIA 等人<sup>[18]</sup>了不同  $\text{TiO}_2$  含量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  涂层的耐腐蚀性能,结果表明随着  $\text{TiO}_2$  含量的增加,涂层沉积效率提高,孔隙和裂纹减少,而孔隙和裂纹的存在会使腐蚀介质易于到达基体,降低涂层耐腐蚀性能,造成这种现象的原因是增加  $\text{TiO}_2$  含量会促进亚稳定的  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  转变为稳定的  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[19-22]</sup>。此外,  $\text{TiO}_2$  为助溶剂<sup>[23]</sup>,其在质脆氧化铝基体内的弥散分布起到了封孔、释放应力和减少裂纹的作用。Ayyappan Susila Praveen 等<sup>[24]</sup>研究了大气等离子喷涂  $\text{NiCrSiB}/\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层在 450 °C 时的耐冲击腐蚀性能,结果表明在冲击角为 30° 和 90° 时,沉积  $\text{NiCrSiB}/\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层样品的抗腐蚀能力分别是未沉积  $\text{NiCrSiB}/\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层样品的 2.5 和 1.5 倍。由于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  具有较好的钉扎作用,所以 30° 冲击角下的  $\text{NiCrSiB}/\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层相比 90° 下具有更高的耐冲击腐蚀性能。而冲击角为 90° 时,在结合处较弱的区域,位错累积加速了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的拉出,从而降低了涂层抗冲击腐蚀能力。

此外,由于  $\text{Cr}^{3+}$  与  $\text{Al}^{3+}$  具有相同的离子半径,从而容易形成  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Cr}_2\text{O}_3$  固溶体,因此在涂层中添加  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  成为另一种提高涂层耐腐蚀性的方法。经 Yang 等人研究表明,由等离子喷涂沉积的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层比纯  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层具有更好的耐热、耐腐蚀和力学性能,这是  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层在熔渣和盐中的溶解度低的缘故。

另外,无机密封胶处理  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层<sup>[25]</sup>可以显著减少涂层的孔隙,也可以减小热处理后涂层的收缩率。有研究发现,经封孔处理的  $\text{Al}$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  复合涂层对镁合金基体有较好的保护作用,能够提高镁合金的耐腐蚀性能。因此,经无机密封胶处理后的涂层具有较好的耐腐蚀性和耐高温性能,在恶劣腐蚀环境下具有广泛的应用前景。

除了添加第二相改善涂层耐腐蚀性之外,对等离

子喷涂工艺的调节或者涂层后处理工艺的选取,也是提高涂层耐腐蚀性的重要研究方向。通过研究热喷涂参数对  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  涂层受大气腐蚀性能的影响发现:受喷涂参数的影响,涂层内未熔化颗粒和气孔会加速空气腐蚀。经对比发现,送粉速度为 20 g/min、氢气流量为 16 L/min 时,涂层具有良好的耐气体腐蚀能力。毛杰等<sup>[26]</sup>研究了超音速喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层制备工艺对涂层性能的影响,得到的最佳工艺参数为:压强 3.5 MPa,电流 200 A,粉末粒径 15~45  $\mu\text{m}$ ,喷涂距离 230 mm。性能测试结果表明,以此参数沉积的涂层与基体之间可以形成很深且不规则的交错咬合和嵌入,涂层孔隙率极低(大约为 0.8%)并且表现出优异的耐腐蚀性能。激光重熔技术是在已有的金属或陶瓷涂层基础上利用激光束进行扫描熔化处理。Qian 等<sup>[27]</sup>利用等离子喷涂-激光熔覆的方法,在 AZ91D 基体表面制备了  $\text{NiAl}/\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层,所沉积的涂层表面光滑,可以显著改善等离子喷涂涂层气孔率高和微观结构连接性弱的缺点,并且涂层的耐腐蚀性能得到显著提高。

## 3 等离子喷涂氧化铝基复合涂层耐磨损性能

硬度是决定涂层耐磨损性能的重要因素。D. T 等人研究发现,影响热喷涂涂层硬度的主要参数有输入功率、喷涂距离和喂料速度。在等离子喷涂过程中,输入功率由电弧电流的变化来控制,选择合适的喷涂功率,确保  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13% $\text{TiO}_2$  粉末能完全熔化,并在基体上充分铺展而形成涂层<sup>[28]</sup>。而选择合适的喷涂距离,既能满足熔融液滴的动能要求,又能减少液滴飞溅,还会减少气孔率和微裂纹,对涂层硬度有较显著的影响。此外,在等离子喷涂过程中,合适的喂料速度可以使涂层表面粗糙度降低,气孔率减少,进而提高涂层的耐磨损性能。喂料速度过小会导致  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒气化,温度过高会使涂层产生裂纹,喂料速度过快则会使颗粒不能完全熔化,涂层表面粗糙度和孔隙率增加。

此外,热喷涂粉末特征对涂层的耐磨损性能有显著影响。相比包覆和烧结破碎粉末而言,以团聚粉末沉积的金属陶瓷涂层具有均匀的结构,且耐磨损性能较好<sup>[29]</sup>。通过对不同初级颗粒尺寸粉末所沉积的涂层进行研究发现<sup>[30]</sup>,颗粒尺寸的降低可显著提高金属陶瓷的耐磨损性能。从目前的文献报道发现,纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等离子喷涂涂层组织致密,表现出了优异的力学性能和耐磨损性能<sup>[31]</sup>。杜三明等<sup>[32]</sup>通过对比等离子喷涂纳米和微米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基复合涂层的性能发现:纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层层间结合更紧密,显微结构比微米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基复合涂层得到了很大改善,并表现出更好的均匀性,从而

使纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基复合涂层具有较低的摩擦系数、光滑平整的表面磨损形貌和较低的磨损速率。同时, 纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子具有细晶强化的作用, 这在一定程度上更有助于增加涂层的强度和耐磨性能。此外, 纳米相的存在不仅可以提高陶瓷涂层和基体之间的粘结度, 还可以减少裂纹和气孔的产生。

由于等离子喷涂涂层孔洞、夹杂物较多, 导致涂层致密性差<sup>[33]</sup>。因此后处理工艺成为有效改善涂层结构、提高涂层耐磨性能的有效方法。目前, 激光熔覆技术已广泛应用于热喷涂陶瓷涂层的后处理, 其可以达到消除涂层片层状组织、提高涂层致密度的目的<sup>[34]</sup>。田宗军<sup>[35]</sup>对等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13% $\text{TiO}_2$  纳米涂层进行了激光重熔处理后发现, 经激光重熔处理的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13% $\text{TiO}_2$  纳米涂层的强度和韧性得到了进一步提高, 并且在激光熔覆过程中, 氧化铝会由亚稳定的  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  转变为稳定的  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[36]</sup>。与此同时, 激光熔覆可消除部分孔隙和氧化物夹杂, 从而形成均匀致密的陶瓷涂层。此外, 激光熔覆在消除涂层孔洞和夹杂物等缺陷的同时, 也可以使涂层晶粒细化, 从而显著提高涂层的致密度。后处理对激光熔覆的工艺参数有较高的要求, 通过 WANG 等人<sup>[37]</sup>的研究发现: 降低激光束的移动速率可以降低涂层的孔隙率, 同时对基体进行预热也可以达到抑制涂层裂纹产生的目的。然而, 在激光熔覆过程中, 涂层内部非常容易产生裂纹<sup>[38]</sup>。因此, 许多研究人员的工作集中在激光熔覆等离子喷涂陶瓷涂层的工艺参数优化中, 以争取在最佳工艺参数下得到结构致密、裂纹少、结合强度和耐磨性能优异的复合陶瓷涂层。

## 4 等离子喷涂氧化铝基复合涂层吸波性能

近年来, 通信和军事电磁干扰问题日益严重, 电磁波吸收材料引起了研究人员的极大关注<sup>[39]</sup>。越来越多的研究人员致力于大气等离子喷涂沉积吸波陶瓷涂层性能的研究。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  基复合材料具有较好的抗氧化性, 可以用于耐高温雷达吸波材料。此外, 等离子喷涂吸波陶瓷涂层还有沉积效率高、力学性能好(强度、硬度高)、耐腐蚀性好等优点。

由导电材料和绝缘基体组成的复合材料具有电磁波吸收潜力, 合适的阻抗匹配和衰减特性是吸波材料具有优异微波吸收性能的必备条件。一般来说, 电磁波的衰减损耗由电损耗和磁损耗组成。因此吸波材料的电磁特性常用复数介电常数和复磁导率表征。其中, 复介电常数实部代表吸波材料的极化程度, 复介电常数虚部代表吸波材料的损耗程度<sup>[40]</sup>。

通过在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷基体中加入磁性吸收剂调控其介电性能, 使之满足所需波段的电磁波吸收要求, 是

当前行之有效的方法之一<sup>[41]</sup>。QING<sup>[42]</sup>对  $\text{FeSiAl}/\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层中  $\text{FeSiAl}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  进行不同配比, 比较了复介电常数和复磁导率的变化, 由于其内部边界层的电容率和导电网络较大, 因此  $\text{FeSiAl}/\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层具有较高的复介电常数, 且当  $\text{FeSiAl}$  含量增加时, 复介电常数逐渐升高。相比于其他结构的吸收剂, 层叠片状式  $\text{FeSiAl}$  形成了周期结构的介电层。ZHOU<sup>[48]</sup>研究了  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Nb}$  涂层的微波吸收性能, 发现复介电常数的实部和虚部会随着  $\text{Nb}$  含量的增加而增加, 这分别是由空间电荷极化和电导损耗造成的。通过对比发现: 当  $\text{Nb}$  含量为 10% 时, 涂层的反射损耗值在 10~11.8 GHz 范围内低于 -10 dB。除吸波剂含量对吸波性能有显著影响外, 涂层厚度对涂层吸波性能也起到至关重要的作用。通过对不同厚度的涂层的反射率进行计算, 结果表明: 涂层厚度为 1.3 mm 时, 反射损耗值在 9.1~10.6 GHz 范围内低于 -10 dB。因此, 通过以上研究发现, 改变涂层中吸收剂的含量和涂层厚度可以达到调控涂层吸波性能的目的。

此外, 在基体中添加多种电磁吸收剂也是目前热喷涂氧化铝基复合涂层重要的研究内容之一。刘顾等<sup>[49]</sup>研究了微弧等离子喷涂技术制备的  $\text{CNTs-SiC-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合涂层的吸波性能。其中, 碳纳米管和碳化硅均为介电损耗材料, 其介电常数可以反映电磁波和介电吸收剂之间的相互作用。他们的研究表明: 随着涂层厚度的增加, 吸波能力有较大提高, 并且谐振频率不断向低频移动。另外, 喷涂参数不仅会影响涂层的耐磨损和耐腐蚀性能, 也会导致涂层吸波性能的变化。ZHAO 等人<sup>[50]</sup>研究了不同喷涂参数下(参见公式 1)等离子喷涂  $\text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层的微波吸收性能, 结果表明:  $\text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层的复介电常数的实部和虚部会随着关键等离子喷涂参数的增加而增加, 同时其电磁波吸收性能受电磁波吸收阻抗匹配条件和相应电磁参数的影响。

$$\text{关键等离子喷涂参数} = \frac{\text{输入功率 (kW)}}{\text{主气流量 (slpm)}} \quad (1)$$

## 5 结语

目前, 等离子喷涂氧化铝基复合涂层制备技术已日趋成熟, 并且涂层具有良好的耐腐蚀性、耐磨损性和电磁波吸收性能, 因此其在航空航天、能源等领域具有广泛应用。然而, 为了提高涂层的综合使用性能, 还需在以下几个方面进行深入研究: (1) 后处理是改善涂层耐腐蚀性能的有力手段之一, 因此研究各种后处理方法(如激光重熔、感应重熔等)是非常必要的; (2) 进一步研究添加第二相的含量和颗粒尺寸对氧化铝基涂层耐摩擦磨损性能的影响; (3) 通过研究电磁波吸收剂对氧化铝基涂层性能的影响, 改善涂层的

韧性, 优化吸波涂层的吸波、耐高温和抗热震性能等。

# 参考文献:

- [1] CHEN D, HUANG A, GU H Z, et al. Corrosion of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$  Refractory Lining for High-temperature Solid Waste Incinerator[J]. *Ceramic international*, 2015, 41(10): 14748-14753.
- [2] YANG K, RONG J, LIU C G, et al. Study on Erosion-Wear Behavior and Mechanism of Plasma-sprayed Alumina Based Coatings by a Novel Slurry Injection Method[J]. *Tribology International*, 2016, 93: 29-35.
- [3] 华绍春, 王汉功, 汪刘应. 微弧等离子喷涂碳纳米管纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合涂层的吸波性能研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(9): 6534-6541.  
HUA Shao-chun, WANG Han-gong, WANG Liu-ying. Absorption Properties of Micro-plasma Sprayed Carbon Nanotube Nanostructure  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  Composite Coatings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(9): 6534-6541.
- [4] 徐心洁, 贺毅, 马东林, 等. 等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13%TiO}_2$  复合陶瓷涂层的组织及热氧化性能的研究[J]. *表面技术*, 2010, 39(1): 15-19.  
XU Xin-jie, HE Yi, MA Dong-lin, et al. Study on the Structure and Thermal Oxidization Properties of Plasma-sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13%TiO}_2$  Composite Ceramic Coating[J]. *Surface Technology*, 2010, 39(1): 15-19.
- [5] SURE J, SHANKAR A R, UPADHYAY B N, et al. Microstructural Characterization of Plasma Sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40%TiO}_2$  Coatings on High Density Graphite with Different Post-treatments[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2012, 206(23): 4741-4749.
- [6] THIRUMALA KUMARASAMY D, KAMALAMORTHY K S, VISVALINGAM V B. Effect of Experimental Parameters on the Micro Hardness of Plasma Sprayed Alumina Coatings on AZ31B Magnesium Alloy[J]. *Journal of Magnesium & Alloys*, 2015, 3(3): 237-246.
- [7] LI G L, MA J L, WANG H D, et al. Effect of Argon Gas Flow Rate on the Microstructure and Micromechanical Properties of Supersonic Plasma Sprayed Nanostructured  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13wt%TiO}_2$  Coatings[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 311: 124-130.
- [8] SUN J, FU Q G, LIU G N, et al. Thermal Shock Resistance of Thermal Barrier Coatings for Nickel-based Superalloy by Supersonic Plasma Spraying[J]. *Ceramic International*, 2015, 41(8): 9972-9979.
- [9] WANG C, FAN L, FAN J P, et al. Effect of Spraying Power on Microstructure and Properties of Supersonic Plasma Sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Coating on Porous  $\text{Si}_3\text{N}_4$  Substrate[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2013, 559(19): 152-157.
- [10] TINGAUD O, BACCIOCHINI A, MONTAVON G, et al. Suspension DC Plasma Spraying of Thick Fine-ly-structured Ceramic Coatings Process Manufacturing Mechanisms[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2009, 203(15): 2157-2161.
- [11] DONG Z, THOMES W, COYLE K C. Phase Composition and Microstructure of Yttrium Aluminum Garnet(YAG) Coatings Prepared by Suspension Plasma Spraying of  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  Powders[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 235(22): 303-309.
- [12] PAWLOWSKI L. Suspension and Solution Thermal Spray Coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2009, 203(19): 2807-2829.
- [13] OLIKER V E, TERENCEV A E, SHVEDOVA L K, et al. Use of Aqueous Suspensions in Plasma Spraying of Alumina Coatings[J]. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2009, 48(1-2): 115-120.
- [14] GAO Y, JIE M, LIU Y. Mechanical Properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Ceramic Coatings Prepared by Plasma Spraying on Magnesium Alloy[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 315: 214-219.
- [15] VICENT M, BANNIER E, CARPIO P, et al. Effect of the Initial Particle Size Distribution on the Properties of Suspension Plasma Sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  Coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 268: 209-215.
- [16] KOTLAN J, SESHADRI R C, SAMPATH S, et al. On the Dielectric Strengths of Atmospheric Plasma Sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2\text{-7%Y}_2\text{O}_3$  and  $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$  Coatings[J]. *Ceramics International*, 2015, 41: 11169-11176.
- [17] 周亮, 罗发, 张勇, 等. 送粉方式对等离子喷涂  $\text{NiCrAlY/Al}_2\text{O}_3$  涂层介电性能的影响[J]. *宇航材料工艺*, 2015, 45(3): 59-62.  
ZHOU Liang, LUO Fa, ZHANG Yong, et al. Effects of Powder Injection Method on Dielectric Properties of Pplasma Sprayed  $\text{NiCrAlY/Al}_2\text{O}_3$  Coatings[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2015, 45(3): 59-62.
- [18] JIA S K, ZOU Y, XU J Y, et al. Effect of  $\text{TiO}_2$  Content on Properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Thermal Barrier Coatings by Plasma Spraying[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(1): 175-183.
- [19] 胡传恒, 杜三明, 牛永平, 等. 等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  防滑涂层制备及其耐磨性[J]. *材料热处理学报*, 2014, 35(5): 171-175.  
HU Chuan-heng, DU San-ming, NIU Yong-ping, et al. Fabrication and Wear Resistance of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  Non-skidding Coating by Plasma Spraying[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2014, 35(5): 171-175.
- [20] 宋仁国, 王超, 卢果. 等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40%TiO}_2$  陶瓷复合层的微观结构及耐磨性能[J]. *材料保护*, 2012, 45(8): 58-59.  
SONG Ren-guo, WANG Chao, LU Guo. Microstructure and Wear Resistance of Plasma Sprayed  $\text{TiO}_2\text{-40%Al}_2\text{O}_3$  Ceramic Composite[J]. *Materials Protection*, 2012, 45(8): 58-59.
- [21] CHEN Y X, WU D J, MA G Y, et al. Coaxial Laser

- Cladding of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13% $\text{TiO}_2$  Powders on Ti-6Al-4V Alloy [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 228(9): S452-S459.
- [22] WAHAB J A, GHAZALI M J, SAJURI Z, et al. Effects of Micro-grooves on Tribological Behaviour of Plasma-sprayed Alumina-13% Titania Coatings[J]. Ceramics International, 2017, 43(8): 6140-6146.
- [23] KLYAESKINA E, RAYON E, DARUT G, et al. A Study of the Influence of  $\text{TiO}_2$  Addition in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Coatings Sprayed by Suspension Plasma Spray[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 278(s1-s2): 25-29.
- [24] AYYAPPAN S P, SARANGAN J, SURESH S, et al. Erosion Wear Behaviour of Plasma Sprayed NiCr-SiB/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  Composite Coating[J]. Int Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, 52: 209-218.
- [25] SHAO F, YANG K, ZHAO H, et al. Effects of Inorganic Sealant and Brief Heat Treatments on Corrosion Behavior of Plasma Sprayed  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  Composite Ceramic Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 276: 8-15.
- [26] 毛杰, 刘敏, 邓畅光, 等. 超音速等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -3% $\text{TiO}_2$  涂层的耐磨性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2015(6): 5-8.
- MAO Jie, LIU Min, DENG Chang-guang, et al. Wear-resisting Property of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -3% $\text{TiO}_2$  Coating Prepared by Supersonic Plasma Spraying Technology [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015 (6): 5-8.
- [27] QIAN J, YIN Y, LI T, et al. Structure Micro-hardness and Corrosion Behaviour of the AlFeSi/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  Coatings Prepared by Laser Plasma Hybrid Spraying on Magnesium Alloy[J]. Vacuum, 2015, 117: 55-59.
- [28] RAMAZANI M, KHALI-ALLAF J, MOZAFFARINIA R. Grindability Evaluation and Fatigue and Wear Behavior of Conventional and Nanostructured  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13wt% $\text{TiO}_2$  Air Plasma Sprayed Coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(3): 611-619.
- [29] 周亮, 崔珊, 张勇, 等. 热喷涂技术金属陶瓷涂层摩擦磨损性能研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(7): 15-19.
- ZHOU Liang, CUI Shan, ZHANG Yong, et al. Research Development of the Friction and Wear Properties of Thermally Sprayed Cermet Coating[J]. Materials Review, 2015, 29(7): 15-19.
- [30] FAUCHAIS P, MONTAVON G, BERTRAND G. From Powders to Thermally Sprayed Coatings [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(1-2): 56-80.
- [31] ZHAI C S, WANG J, LI F, et al. Thermal Shock Properties and Failure Mechanism of Plasma Sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  Nanocomposite Coatings[J]. Ceramics International, 2005, 31: 817-824.
- [32] 杜三明, 靳俊杰, 肖宏滨, 等. 纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等离子喷涂涂层的制备及性能分析[J]. 表面技术, 2015, 44(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, 44(6): 1-6.
- [33] 许中林, 李国禄, 董天顺, 等. 等离子喷涂层磨损/接触疲劳失效行为研究现状[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 126-133.
- XU Zhong-lin, LI Guo-lu, DONG Tian-shun, et al. Research on Wear/Fatigue Failure Behavior of Plasma Spray Coating: A Review[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 126-133.
- [34] AFZAL M, AJMAL M, KHAN A N. Surface Modification of Air Plasma Spraying WC-12%Co Cermet Coating by Laser Melting Technique [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 56: 202-206.
- [35] 田宗军, 王东生, 沈理达, 等. TiAl 合金表面激光重熔纳米陶瓷涂层[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(2): 128-132.
- TIAN Zong-jun, WANG Dong-sheng, SHEN Li-da, et al. Laser Remelting of Nanostructured Ceramic Coatings on TiAl Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(2): 128-132.
- [36] 王一博, 应丽霞, 董国军, 等. 激光熔覆技术研究进展及其工业应用[J]. 中国材料进展, 2009, 28(3): 17-21.
- WANG Yi-bo, YING Li-xia, DONG Guo-jun, et al. Development and Industrial Application of Laser Cladding Technology[J]. Materials China, 2009, 28(3): 17-21.
- [37] WANG D, TIAN Z, WANG S, et al. Microstructural Characterization of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13wt%  $\text{TiO}_2$  Ceramic Coatings Prepared by Squash Presetting Laser Cladding on GH4169 Superalloy[J]. Surface & Coating Technology, 2014, 254(10): 195-201.
- [38] 王东生, 田宗军, 沈理达, 等. 激光熔覆技术研究现状及其发展[J]. 应用激光, 2012(6): 85-91.
- WANG Dong-sheng, TIAN Zong-jun, SHEN Li-da, et al. Research Status and Development of Laser Cladding Technology[J]. Applied Laser, 2012(6): 85-91.
- [39] 王佳文, 刘敏, 邓春明, 等. 等离子喷涂制备  $\text{ZrB}_2$ -SiC 复合涂层及其静态烧蚀性能[J]. 装备环境工程, 2016(3): 43-47.
- WANG Jia-wen, LIU Min, DENG Chun-ming, et al. Static Ablation Resistance of  $\text{ZrB}_2$ -SiC Composite Coatings Prepared by Atmospheric Plasma Spraying[J]. Equipment Environment Engineering, 2016(3): 43-47.
- [40] 陈虹曲. 纳米金属钴基/碳复合吸波材料的设计合成[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- CHEN Hong-qu. The Design and Preparation of Nanostructured Cobalt-based/Carbon Composite Absorber Material[D]. Haerbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [41] 张有凤, 周玉, 贾德昌, 等.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量对  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{LiTaO}_3$  复合陶瓷介电性能的影响[J]. 无机材料导报, 2009, 24(6): 1189-1192.

- ZHANG You-feng, ZHOU Yu, JIA De-chang, et al. Effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Content on Dielectric Properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{LiTaO}_3$  Composite Ceramics[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2009, 24(6): 1189-1192.
- [42] 班国东, 刘朝辉, 叶圣天, 等. 新型涂覆型雷达吸波材料的研究进展[J]. *表面技术*, 2016, 45(6): 140-146.
- BAN Guo-dong, LIU Zhao-hui, YE Sheng-tian, et al. Research Progress of New Radar Absorbing Coating[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(6): 140-146.
- [43] KOTLAN J, SESHADRI R C, SAMPATH S, et al. On the Dielectric Strengths of Atmospheric Plasma Sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ -7% $\text{Y}_2\text{O}_3$ , and  $(\text{Ba},\text{Sr})\text{TiO}_3$  Coatings [J]. *Ceramics International*, 2015, 41(9): 11169- 11176.
- [44] JIAO B X, QIU T, LI C C, et al. Microstructure and Mechanical Properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$  Composites Prepared by Gelcasting[J]. *Key Engineering Materials*, 2005, 280-283(5): 1057-1060.
- [45] ZHOU L, CUI S, ZHAI Y, et al. Dielectric and Microwave Absorption Properties of Low Power Plasma Sprayed  $\text{NiCrAlY}/\text{Al}_2\text{O}_3$  Coatings[J]. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 2015, 26(6): 3853-3860.
- [46] ZHOU L, DONG Y, WANG Z, et al. Influence of Cr Content and Initial Cr Particle Size on the Dielectric Properties of Plasma-sprayed  $\text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3$  Coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 313: 374-380.
- [47] QING Y C, SU J B, WEN Q L, et al. Enhanced Dielectric and Electromagnetic Interference Shielding Properties of  $\text{FeSiAl}/\text{Al}_2\text{O}_3$  Ceramics by Plasma Spraying[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 651: 259.
- [48] ZHOU L, ZHOU W C, CHEN M L, et al. Dielectric and Microwave Absorbing Properties of Low Power Plasma Sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Nb}$  Composite Coatings[J]. *Material Science and Engineer B*, 2011, 176: 1456- 1462.
- [49] 刘顾, 汪刘应, 陈桂明, 等. CNTs-SiC/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  复合涂层的制备及其性能[J]. *无机材料导报*, 2011, 26(11): 1187-1192.
- LIU Gu, WANG Liu-ying, CHEN Gui-ming, et al. Preparation and Properties of SiC-CNTs/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  Coating[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2011, 26 (11): 1187-1192.
- [50] ZHAO D, LUO F, ZHOU W C, et al. Effect of Critical Plasma Spray Parameter on Complex Permittivity and Microstructure by Plasma Spraying  $\text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3$  Coatings[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 264: 545-551.