

等离子喷涂技术研究现状

朱 昱,魏金栋,周燕琴,张 宇,李小武,倪红军*

(南通大学机械工程学院,江苏南通 226019)

摘要:概述了等离子喷涂的基本原理,并介绍了大气等离子喷涂、超音速等离子喷涂和低压等离子喷涂3种常用的等离子喷涂技术。综述了该技术在制备保护性涂层、功能性涂层以及零件修复强化方面的应用,展望了等离子喷涂技术未来的发展趋势。

关键词:等离子喷涂;工艺参数;涂层

中图分类号: TG174

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)06-0046-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.06.011

Current situation of plasma spraying technology

ZHU Yu, WEI Jin-dong, ZHOU Yan-qin, ZHANG Yu, LI Xiao-wu, NI Hong-jun*

(School of Mechanical Engineering Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: The basic principle of plasma spraying is introduced. Three commonly used plasma spraying technologies, including air plasma spraying, supersonic plasma spraying and low pressure plasma spraying technology are introduced. The applications of plasma spraying technology in the preparation of protective coatings, functional coatings and remanufacturing area are reviewed. The development trend of plasma surfacing technology in the future are proposed as well.

Key words: plasma spraying; process parameters; coating

随着科技进步和现代制造业的飞速发展,对资源的需求量日益增加,并且对机械的性能要求也越来越高,金属作为生产、生活等方面不可或缺的材料,不仅资源存量不断减少,并且其基本性能也已经跟不上发展的需求,迫切需要寻求一种技术或材料来弥补传统金属材料的缺点和不足^[1]。在这样的大环境下,热喷涂技术应运而生,并得到了迅速的发展。利用热喷涂技术可以在金属表面制备出具有硬度高、耐磨、耐腐蚀等性能的涂层,金属基复合材料保留了金属的韧性和强度等基本性能,同时具备以上的优越性能,满足发展对机械使用性能的要求,延长使用寿命,并且缓解能源紧张的问题。

热喷涂技术(thermal spraying)在20世纪早期出现,由瑞士的M. U. Schoop博士在1910年最先完成其喷涂装置^[2],经过多年的研究发展,形成了火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂等不同热源热喷涂技术^[3-4],在生产制造业中产生了广泛的影响。其中等离子喷涂继火焰喷涂和电弧喷涂后发展起来,经过不断改进,已经在热喷涂技术领域中占据了重要的位置。广泛应用于矿产机械、航空航天、医学和再

制造等领域。

1 等离子喷涂技术的基本原理与工艺参数

1.1 基本原理

等离子喷涂技术是采用刚性非转移等离子电弧作为热源,将陶瓷、合金、金属等粉末材料加热到熔融或半熔融状态,并高速喷向经过预处理的工件表面而形成附着牢固的表面层的方法^[5-7],其原理如图1所示。工作气体在阴极与阳极形成的电弧中电离为等离子体,使从粉末口输送的粉末熔融或者半熔融,随着等离子流喷射到基体表面,形成涂层。该技术因其涂层质量好、结合强度高、涂层种类多以及对基体影响小等优点^[8-9]而得到广泛应用。

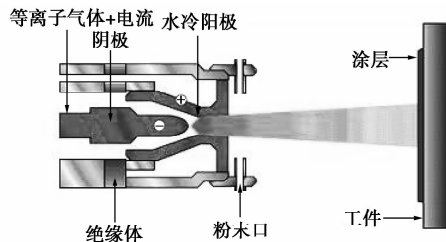


图1 等离子喷涂原理图

收稿日期:2015-11-10

基金项目:江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD);南通市应用研究计划项目(BK2014052)

作者简介:朱昱(1972-),男,教授,主要研究方向为新材料及CAD/CAM;倪红军(1965-),男,教授,主要研究方向为新能源汽车和燃料电池,通讯联系人,0513-85012671, hjni910@aliyun.com。

1.2 等离子喷涂重要工艺参数

在喷涂过程中采用合理的电弧功率和送粉量、等离子气体、喷涂距离、角度和与工件相对速度等参数对于涂层质量的提高是至关重要的。

(1)电功率和送粉量。电功率是等离子喷涂最重要的工艺参数,在喷涂过程中应当经常调整变动,否则电功率过高,使喷涂温度过高,引起粉料的过热和气化,导致熔融和气化粉料混合附着在基体表面,形成涂层中会含有过多的气孔和粉料溅射,从而影响涂层质量,出现硬度降低,空隙率过高,甚至开裂的问题,并且可能造成对喷枪的烧损情况;当电功率过低时,等离子火焰温度不够,粉料熔化不充分,液滴附着力降低,涂层结合强度降低,并且使喷涂效率低下。其必须与喷涂粉料的种类、送粉量等因素变化相适应,如与供粉量适应,若供粉相对过高,同样会引起熔化不充分的问题,反之供粉少,则使粉末熔化严重,影响涂层质量和造成基体过热。

(2)喷涂距离和喷涂角度。喷涂距离以及角度对涂层的结合强度、涂层质量和喷涂效率有重要的影响。喷涂距离影响粉料的熔融程度、飞行时间、速度和温度,对涂层质量的影响非常大,当喷涂距离过大时,粉末的飞行时间会增加,降低喷涂效率,并且引起粉料速度和温度降低,液滴堆积时压力过小,流动性降低,导致涂层的结合力和致密度降低;反之,飞行时间短、速度快,导致加热不充分,对基体的冲击力大,使涂层结合强度低,并且可能对基体造成损坏。喷涂距离的选择应该在不影响涂层质量和基体的前提下,尽可能地减小,提高工作效率。喷涂角度

影响粉料的沉积效率和涂层结构,一般越接近垂直喷涂,喷涂效果越好,如果喷涂角度偏小,涂层结构恶化,出现空穴,导致孔隙率过高,涂层硬度和结合强度偏低。

(3)喷涂速度。喷涂速度指喷枪和工件运动的相对速度,决定喷涂一次涂层的厚度,喷涂速度过快,每次喷涂的涂层厚度偏薄,并且涂层之间不能充分搭叠,使涂层表面不平整;反之,则可能使工件局部温度过高,对零件造成烧伤。

(4)喷涂气体和流量。喷涂气体包括主气体和送粉气体,主气作用是形成等离子体,影响喷涂火焰温度和速度,结合其他参数,会影响喷涂效率和涂层致密度、硬度等,应选取合适的气体和流量。而送粉气体应与主气体匹配,约为主气的20%~30%,否则不仅会影响喷涂质量,可能会造成喷涂设备的损坏。

2 常用等离子喷涂技术

按照形成等离子体的介质和环境气氛的不同可以分成多种等离子喷涂技术,目前最常用的等离子喷涂技术主要有大气等离子喷涂、超音速等离子喷涂和真空等离子喷涂。

2.1 大气等离子喷涂

大气等离子喷涂(atmospheric plasma spraying, APS)出现最早并且应用较为普遍,是一种较为常规的等离子喷涂技术,该技术是以Ar、N₂和H₂作为工作介质,喷涂过程在大气环境下进行^[10]。其中工艺参数是影响APS对零件修复强化质量的关键因

(上接第45页)

[14] Hasegawa Y, Tanaka T, Watanabe K, *et al.* Separation of CO₂-CH₄ and CO₂/N₂ system using ion-exchanged zeolite membranes with different Si/Al ratios[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2002, 19(2): 309-313.

[15] Kusakabe K, Kuroda T, Murata A, *et al.* Formation of a Y-Type zeolite membrane on a porous α -Alumina tube for gas separation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1997, 36(3): 649-655.

[16] Yong H H, Park H C, Kang Y S, *et al.* Zeolite-filled polyimide membrane containing 2, 4, 6-triaminopyrimidine [J]. Journal of Membrane Science, 2001, 188(2): 151-163.

[17] Li X, Ma L, Zhang H, *et al.* Synergistic effect of combining carbon nanotubes and graphene oxide in mixed matrix membranes for efficient CO₂ separation[J]. Journal of Membrane Science, 2015, 479: 1-10.

[18] Li J R, Ma Y, McCarthy M C, *et al.* Carbon dioxide capture-related

gas adsorption and separation metal-organic frameworks[J]. Coordination Chemistry Reviews, 2011, 255: 1791-1823.

[19] An J, Geib S J, Rosi N L. High and selective CO₂ uptake in a cobalt adeninate metal-organic framework exhibiting pyrimidine- and amino-decorated pores[J]. Journal of the American Chemical Society, 2010, 132(1): 38-39.

[20] 王霞, 陈浩, 瞿如敏, 等. 燃煤烟气中共存杂质对膜分离CO₂性能影响的实验研究[J]. 燃料化学学报, 2015, 43(1): 100-107.

[21] 陈浩, 瞿如敏, 王霞, 等. 膜法分离燃煤烟气中CO₂的研究进展[J]. 膜科学与技术, 2014, 34(3): 135-139.

[22] 迟东辉. 油田伴生气酸性气体脱除技术研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2007.

[23] 方梦祥, 徐志康, 骆仲洪, 等. 中空纤维膜接触器分离烟气中二氧化碳的方法及系统: CN, 03142048. 6[P]. 2004-04-14.

[24] 郭春雷. 百万吨二氧化碳捕集系统能耗分析[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012.

[25] Merkel T C, Lin H, Wei X, *et al.* Power plant post-combustion carbon dioxide capture: An opportunity for membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2010, 359(1/2): 126-139. ■

素,因此在零件进行喷涂前首先要对基体进行预热,约 200℃,这样对于减少基体与涂层温差,提高结合强度等方面具有很好的效果。喷涂电功率和送粉量参数设置得不适宜将会出现破坏粉末的成分或者加热供粉不足等问题,导致工作效率低、结合强度低、涂层质量差等后果,常用电功率为 20 ~ 35 kW;喷涂距离一般可以在基体能够承受的温度的情况下适当缩小,最佳喷涂角度为 90°,可以降低,但是最低不得低于 45°;相对移动速度则与涂层每次沉积的厚度有着紧密的关系,一般情况下在 30.5 ~ 100 m/min,根据不同的喷涂材料进行选择。Thirumalai-kumarasamy 等^[11]在 AZ31B 镁合金表面大气等离子喷涂制备氧化铝涂层,研究喷涂参数对涂层孔隙率的影响,结果显示,最佳参数为 22.27 kW、113 mm、81 L/min,制备涂层的孔隙率最低为 4.44%,其中电功率对孔隙率的影响最大。刘前等^[12]利用大气等离子喷涂技术制备 Al₂O₃-40% TiO₂ 陶瓷涂层,研究喷涂电压、电流、距离和主气流量对涂层的孔隙率、结合强度和硬度的影响。结果表明,在最佳参数为 65 V、500 A、90 mm 和 30 L/min 的情况下,制备的涂层孔隙率仅为 0.9%,硬度达到 1 036 HV_{0.1},结合强度为 37.8 MPa。

APS 具有喷涂效率高、涂层致密平整、结合强度高、工艺参数范围广以及工艺可实现自动化等优点^[13],主要用于机械零件的表面防护与修复强化^[14]。

韩建军等^[15]利用等离子喷涂技术制备 Fe 基非晶涂层对锅炉管束进行性能改进,并通过腐蚀试验测试涂层耐腐蚀性,结果表明,在 1 000 h 的盐雾腐蚀作用下,涂层基本无腐蚀现象,并且具有较高的腐蚀电位,相对于基体,耐腐蚀性有显著的提高。Lu 等^[16]采用大气等离子喷涂技术制备氧化锆涂层,表面涂层厚度 200 ~ 400 μm,通过热循环和热冲击的方法研究涂层的抗热疲劳和抗热冲击性能,结果显示,在 1 429 个周期热循环下,涂层结构基本无明显的开裂和脱落,然而在较薄涂层区域出现部分脱落现象;之后在承受 150 个周期后涂层完全脱落,说明增加涂层厚度可以提高其抗热疲劳和热冲击性能。Al-Mutairi 等^[17]通过大气等离子喷涂和高超音速燃料喷涂 (HVOF) 纳米级和微米级粉末制备了 WC-12% Co 涂层,研究 4 组涂层的粗糙度、硬度、黏结力等性能,结果显示,在粗糙度、硬度等方面,2 种喷涂方法制备的纳米级材料涂层都优于微米级材料涂层,粗糙度为 3.1 ~ 4.3 μm,硬度为 1 367 HV。

大气等离子喷涂是最早最普遍的喷涂技术,因此工艺较为成熟,同时存在对人体伤害大、小长孔无法喷涂等等离子喷涂普遍存在的问题。

2.2 超音速等离子喷涂

超音速等离子喷涂 (supersonic plasma spraying, SPS) 是利用超音速等离子射流对喷涂材料加热并加速,从而制备出高质量涂层的技术。该技术出现于 20 世纪 80 年代,工艺与常规等离子喷涂相同,但工艺参数有着很大的区别,主要包括电功率、送粉量、主气与辅气流量、喷涂距离^[18],如表 1 所示。

表 1 超音速等离子喷涂与常规等离子喷涂主要参数

主要参数	SPS	APS
电功率/kW	>50	20 ~ 35
送粉量/(kg·h ⁻¹)	3 ~ 5	—
主气体/(L·min ⁻¹)	15 ~ 30	30 ~ 50
次级气体/(L·min ⁻¹)	100 ~ 200	—
喷涂距离/mm	60 ~ 80	经验值
送粉气体/(L·min ⁻¹)	—	6 ~ 14

欧猷等^[19]利用超音速等离子喷涂技术制备 Cr₂O₃ 涂层,研究喷涂电流、距离和空气压力对涂层硬度的影响。结果表明,500 A、200 mm 和 0.4 MPa 为最佳参数,制备的涂层品质最优,硬度达到 2 067 HV_{0.3}。Wang 等^[20]采用 52、54、58、60 kW 电功率的 SPS 分别制备氧化铝涂层,通过 XRD、SEM 测定物相和组织形貌,以及在 50 N 压力下保持 15 s 测得涂层硬度,研究电功率变化对涂层组织和性能的影响,结果表明,随着功率的增加,涂料颗粒融化更完全,涂层组织气孔减少,致密度、硬度和抗弯强度有明显提高,在 58 kW 时达到最优,抗弯强度为 112.8 MPa,维氏硬度为 2.8 GPa,但是进一步提高电功率,残余应力也随之增加而导致出现开裂等问题,涂层对基体的增强趋势开始减弱。范文超等^[21]利用超音速等离子喷涂技术制备 AlSi-20% Al/Ni 涂层,研究喷涂电压、电流、距离和主气流量对涂层结合强度的影响。结果表明,130 V、380 A、90 mm 和 3.2 m³/h 为最佳参数,制备的涂层具有较好的致密度,结合强度达到 65.5 MPa。

相比其他等离子喷涂,SPS 具有高温、高速的优势,拓宽了可喷涂材料范围,并且加热时间短、粒子速度快,降低了对喷涂材料的氧化和烧伤等影响,并且使涂层更加致密,结合强度等性能有明显的改善,常用于喷涂高熔点材料、陶瓷和金属陶瓷^[22]。

Fu 等^[23]通过包埋渗法和超音速等离子喷涂技术制备 SiC/Si-Mo-Cr/MoSi₂ 和 SiC/Si-Mo-Cr 涂层,并在 1 337 K 大气中放置 200 h 测试其抗氧化性和在温度为 1 873 K、风速为 200 m/s 的风洞中测试耐腐蚀性,结果显示,涂层对 C/C 复合材料基体的抗氧化和耐腐蚀性有明显的提高,并且在添加 MoSi₂ 后的涂层抗氧性提高了 2.3 倍,耐腐蚀性提高了 1.3 倍。牛永辉等^[24]通过超音速等离子喷涂技术在 CrZrCu 基体表面制备 ZrO₂-MoSi₂/CoNiCrAlY 复合涂层,研究该涂层与 NiCo 电镀层的耐磨性差异,通过磨损试验测试,结果表明,该涂层耐磨性是 NiCo 电镀层的 5 倍,并且涂层组织致密,孔隙率较低。王东生等^[25]通过等离子喷涂和激光熔覆 2 种技术分别制备常规陶瓷涂层和纳米结构涂层,对 4 组涂层进行热障性能对比,结果表明,相同条件下,等离子喷涂制备纳米结构涂层的隔热性能优于其他 3 组涂层,在 1 100℃ 时,350 μm 厚的等离子纳米结构涂层隔热温度达到 113℃,隔热性能良好,有效降低了零件的温度。

超音速等离子喷涂技术集合了常规等离子喷涂高温和超音速火焰喷涂高速的特点,扩大其应用范围,但是由于涂料加热时间过短,因此对于涂料颗粒的粒度要求较高,需要较细的粉末,另外超音速的情况下带来噪声和能耗比普通等离子喷涂更大的缺点,提高了涂层生产成本,因此需要加大研究力度,进一步改进该技术。

2.3 低压等离子喷涂

低压等离子喷涂 (low pressure plasma spraying, LPPS) 又称真空等离子喷涂,是指在气氛可控的低压密封的情况下进行的喷涂技术^[26],应用于 20 世纪 70 年代。LPPS 与普通等离子喷涂原理等方面基本一致,主要区别是工作气氛是低压环境,致使在工艺参数方面也有所不同,主要是为了适应在低真空条件工作,工作压力一般为 4~40 kPa,在不同压力环境下需要采用不同的工艺参数,一般压力越低,粒子的速度越快,因此可以适当增加喷涂的距离,使喷涂材料能够更充分地融化,如 6.5 GPa 时喷涂距离为 300~350 mm。杨焜等^[27]测试低压等离子喷涂在不同压力 [6.7、13.3、26.7、40 kPa 等和大气压 (101.3 kPa)] 下的制备涂层的性能,研究压力对该技术的影响,结果显示,随着压力的降低,喷涂沉积物中的气孔减少,结合强度更高,喷涂距离增加,表面精度等级提高,在 6.7 kPa 时,几乎无气孔,结合强度达到 55 MPa。

该技术弥补了常规等离子喷涂等离子流不稳定、不能喷涂有毒和无法暴露在大气中的材料的局限性,并且喷涂真空气氛可控,因此对医学领域的技术突破具有显著的促进作用。

黄平等^[28]在一段股骨上采用等离子喷涂纳米氧化钛涂层并在兔左右股骨髁分别植入有涂层与无涂层 2 种股骨,在经过 4、8、12、24 周后取出,进行剪切强度测试,结果显示,无涂层组不具有统计意义,而中长期对比中,氧化钛涂层的剪切强度不断增大,在 12 周达到最大,表明随时间推移,有涂层骨显示了牢固的骨面结合力,更具有生物稳定性。易德亮等^[29]对真空和大气等离子喷涂制备镁黄长石陶瓷涂层稳定性进行比较,试验中发现,APS 制备涂层中含有大量无定形相,该相溶解度高,因此 SBF 溶液中容易形成富硅层,使涂层脆性大,产生断裂,而 VPS 制备涂层结晶度高,不会产生上述状况,化学稳定性较高,并且细胞在 VPS 涂层上有较快的增殖,因此,VPS 制备镁黄长石陶瓷涂层是一种良好的骨科涂层。黄利平等^[30]利用真空等离子喷涂制备掺钽 HA 涂层,在模拟体液中浸泡,研究该涂层的结合强度较 HA 涂层的变化,结果显示,掺 Ta 后的涂层结构更为致密,并且 Ta 降低了涂层的膨胀系数,使其能够更好地与 Ti 合金基材匹配,因此 Ta 使涂层的结合强度有明显的提高,结合强度为 37.2 MPa,是 HA 涂层的 1.9 倍。

低压等离子喷涂因其工作气氛的独特性,而被应用于其他喷涂技术不能加工的空白领域,并且因不接触大气而避免了涂料被氧化和成分变化的缺点,但是同时因为其低真空的气氛特点,使其喷涂受低压室大小限制,因此加工零件的大小和形状受限,并且投资相对较大,因而主要应用于航空航天、医学等高新技术领域。

3 总结

等离子喷涂技术经过不断地发展,已经逐步走向成熟,新型功能材料和装备也在不断发展更新,然而目前等离子技术以下方面还需要研究和改进。

(1) 实现绿色制造。生产制造利用等离子技术进行涂层的制备时,会产生高分贝的噪音以及刺眼的强光,对生产工人造成严重的听力和视力的损伤,需要通过装备等方面的改进来弥补这方面的缺陷,并实现自动化生产来降低其危害。

(2) 制备更高品质的涂层,不断改进涂层配方以及研究最佳的喷涂参数,提高涂层在传统保护功

能方面的性能,开发具有更多特殊功能的涂层,满足社会和生产的需要。

(3)加深涂层形成的耦合机理的认知,研究喷涂过程中涂层的形成过程沉积物和物相的变化过程和规律,能够有效控制其变化,增大有利于涂层性能提高的物相比例,从而得到更加优越的涂层。

(4)结合现代科技及其他表面工程技术,如采用计算机控制喷涂过程、喷涂技术与 SHS 技术的结合等,提高等离子喷涂效率、涂层质量,将等离子技术推向专业化、高效化、产业化。

参考文献

- [1] Khan, Shamim. Effect of operating parameters on a dual-stage high velocity oxygen fuel thermal spray system[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2014, 23(6): 910-918.
- [2] 蔡宏图, 江涛, 周勇. 热喷涂技术的研究现状与发展趋势[J]. 装备制造技术, 2014, (6): 28-31.
- [3] Taheri K, Gadow R, Killinger A. Exergy analysis as a developed concept of energy efficiency optimized processes: The case of thermal spray processes[J]. Procedia CIRP, 2014, 17: 511-516.
- [4] 张燕, 张行, 刘朝辉, 等. 热喷涂技术与热喷涂材料的发展现状[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 59-62.
- [5] 徐玄, 顾进跃, 顾伟华, 等. 等离子喷涂成形技术的研究现状和应用进展[J]. 中国钨业, 2015, 30(3): 43-51.
- [6] 毛杰, 邓畅光, 杨焜, 等. 大气等离子喷涂 Cr_2O_3 涂层的响应曲面法工艺优化[J]. 机械工程材料, 2014, 38(6): 100-104.
- [7] Vincent S, Le C Bot, Sarret F, et al. Penalty and Eulerian-Lagrangian VOF methods for impact and solidification of metal droplets plasma spray process[J]. Computers & Fluids, 2014, 10(4): 1-10.
- [8] 许中林, 李国祿, 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.
- [9] 王吉孝, 蒋士芹, 庞凤祥. 等离子喷涂技术现状及应用[J]. 机械制造文摘: 焊接分册, 2012, (1): 18-22.
- [10] An Y, Hou G, Chen J, et al. Microstructure and tribological properties of iron-based metallic glass coatings prepared by atmospheric plasma spraying[J]. Vacuum, 2014, 107(18): 132-140.
- [11] Thirumalaikumarasamy D, Shanmugam K, Balasubramanian V. Influences of atmospheric plasma spraying parameters on the porosity level of alumina coating on AZ31B magnesium alloy using response surface methodology[J]. Progress in Natural Science Materials International, 2012, 22(5): 468-479.
- [12] 刘前, 王优强, 苏新勇, 等. 工艺参数对大气等离子喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3-40\% \text{TiO}_2$ 涂层性能影响[J]. 热喷涂技术, 2014, 6(4): 40-44.
- [13] 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.
- [14] 张伟, 郭永明, 陈永雄. 热喷涂技术在产品再制造领域的应用及发展趋势[J]. 中国表面工程, 2011, 24(6): 1-10.
- [15] 韩建军, 高振, 鲁元, 等. 等离子喷涂制备锅炉管束用非晶涂层及耐蚀性研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(22): 159-160.
- [16] Lu Z, Myoung S W, Kim E H, et al. Microstructure Evolution and Thermal Durability with Coating Thickness in APS Thermal Barrier Coatings[J]. Materials Today: proceedings, 2014, 1(1): 35-43.
- [17] Al-Mutairi S, Hashmi M S J, Yilbas B S, et al. Microstructural characterization of HVOF/plasma thermal spray of micro/nano WC-12% Co powders[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 264: 175-186.
- [18] 马建龙, 李国祿, 王海斗, 等. 超音速等离子喷涂工艺对纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3-13\% \text{TiO}_2$ 涂层的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(2): 126-130.
- [19] 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.
- [20] Wang C, Fan L, Fan J, et al. Effect of spraying power on microstructure and properties of supersonic plasma sprayed Al_2O_3 coating on porous Si_3N_4 substrate[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2013, 559(19): 152-157.
- [21] 范文超, 谭俊, 王海军, 等. 超音速等离子喷涂工艺参数对 $\text{AlSi}-20\% \text{Al/Ni}$ 涂层结合强度的影响[J]. 中国表面工程, 2012, 5(1): 71-71.
- [22] Piao Z, Xu B, Wang H, et al. Characterization of Fe-based alloy coating deposited by supersonic plasma spraying[J]. Fusion Engineering and Design, 2013, 88(11): 2933-2938.
- [23] Fu Q, Shan Y, Cao C, et al. Oxidation and erosion resistant property of $\text{SiC/Si-Mo-Cr/MoSi}_2$ multi-layer coated C/C composites[J]. Ceramics International, 2015, 41(3): 4101-4107.
- [24] 牛永辉, 杨军, 朱浪涛, 等. 超音速等离子喷涂 $\text{ZrO}_2-\text{MoSi}_2$ 涂层的组织及耐磨性能[J]. 金属热处理, 2015, 40(8): 83-87.
- [25] 王东生, 田宗军, 张少伍, 等. 等离子喷涂和激光熔覆热障涂层隔热性能比较[J]. 焊接学报, 2012, 33(8): 5-8.
- [26] Vautherin B, Planche M P, Bolot R, et al. Vapors and Droplets Mixture Deposition of Metallic Coatings by Very Low Pressure Plasma Spraying[J]. Journal of thermal spray technology, 2014, 23(4): 596-608.
- [27] 杨焜, 刘敏, 邓畅光, 等. 环境压强对低压等离子喷涂熔滴沉积行为及涂层性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(3): 708-717.
- [28] 黄平, 董宇启, 曹聪, 等. 等离子喷涂纳米氧化钛涂层骨界面剪切强度的研究[J]. 脊柱外科杂志, 2008, 6(4): 234-236.
- [29] 易德亮, 吴成铁, 马旭兵, 等. 真空和大气等离子喷涂镁黄长石生物活性涂层的对比研究[J]. 无机材料学报, 2014, 29(2): 172-178.
- [30] 黄利平, 谢有桃, 季珩, 等. 真空等离子喷涂 HA/Ta 复合涂层[J]. 热喷涂技术, 2013, 2(2): 10-15. ■