

高效能超音速等离子喷涂粒子特性及涂层特点*

王海军, 谢兆钱, 郭永明, 李绪强

(装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘要: 超音速等离子喷涂技术是热喷涂技术的关键技术之一。从基础及应用的角度, 研究了高效能超音速等离子(HEPJet)喷涂粒子的特性, 探讨了高效能超音速等离子在制备 Ni/Al 等金属及其合金涂层、WC-Co 金属陶瓷涂层、ZrO₂ 等氧化物陶瓷涂层上的特点。结果表明, 高效能超音速等离子喷涂系统具有焰流温度高、射流速度快等特点; 制备的涂层粒子变形充分, 涂层均匀, 孔隙率低, 结合强度高, 涂层质量好; 可将适用于喷涂的所有粉末材料制备成高质量涂层。

关键词: 超音速等离子喷涂; 喷涂粒子特性; 涂层特点

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)03-0084-05

Characteristic of High Efficiency Supersonic Plasma Spraying Particles and Coatings

WANG Hai-jun, XIE Zhao-qian, GUO Yong-ming, LI Xu-qiang

(National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: The supersonic plasma spraying technique is one of the key thermal technologies. Some basic characteristics of the spray particles, such as Ni/Al coatings, WC-Co coatings and ZrO₂ ceramic coatings were studied, which were prepared with high efficiency supersonic plasma spraying system. The results show that supersonic plasma spray particles are completely flat, and coatings have excellent properties such as low porosity and high bonding strength. And all of the spraying materials can be used to prepare high quality coatings with HEPJet system.

Key words: supersonic plasma spraying; particles characteristic; coatings properties

0 引言

热喷涂技术是一种迅速发展的表面强化技术, 它是通过热源将喷涂材料加热至熔融或半熔融状态, 然后喷射到经预处理的基体表面, 形成优于基体的涂层, 从而使工件具有更优异的表面性能^[1]。经过近百年的发展, 热喷涂技术已广泛应用于军事、航空、航天、机械、电力、生物工程等领域。热喷涂涂层的性能取决于涂层扁平粒子的层间结合和扁平粒子内部的组织结构, 而粒子与基体碰撞后的扁平化过程主要受粒子碰撞速度、熔化状态等因素的制约^[2,3], 于是提高热喷涂射流和粒子的速度成为当今国内外热喷涂技术发展的新趋势, 相继出现了气体爆炸喷涂、超音速火焰喷涂、高速电弧喷

涂及超音速等离子喷涂技术^[4]。

超音速等离子喷涂是利用非转移型等离子弧与高速气流混合时出现的“扩展弧”, 得到稳定聚集的超音速等离子射流进行喷涂的方法^[4]。超音速等离子喷涂技术最早于20世纪80年代中期由美国率先研究, 90年代中期由TAFE公司将其商业化, 它代表了当时世界的先进水平。在国内, 装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室在多年研究国外超音速等离子喷涂技术的基础上, 结合国内实际, 率先研制成功了高效能超音速等离子喷涂系统(HEPJet)。此系统通过特殊的喷枪设计(单阳极拉法尔喷嘴), 采用以机械压缩为主、气动力压缩为辅的射流加速方案, 实现了在低功率(80 kW)、小气体流量(6 m³/h)下获得超音速射流的目标。高效能超音速等离子喷涂系统(HEPJet)的研制成功, 使我国成为继美国之后第二个能够生产

收稿日期: 2010-04-27; 修回日期: 2010-05-17

基金项目: *国防科技重点实验室基金项目(9140C850201080C8503, 9140C850205090C8502)

作者简介: 王海军(1956—), 男(汉), 河北玉田人, 副教授, 本科。

成套超音速等离子喷涂系统的国家,该系统总体达到国际先进水平,其核心技术——高效能超音速等离子喷枪属国际领先^[5],并获得国防发明专利(专利号:01101077.0)。

1 高效能超音速等离子喷涂粒子特性

高效能超音速等离子技术具有高热源、高动能,功率可调范围宽的特点,其喷涂射流速度最高可达3 000 m/s,温度10 000 °C。超音速等离子喷涂的粒子速度、温度与喷涂工艺参数(电功率、电压和电流等)和喷涂粒子的属性(形貌、粒度等)等因素有非常密切的关系。图1表示超音速等离子喷涂功率为64 kW时,Al₂O₃粒子(粒度20 μm~30 μm)在90 mm喷涂距离处的温度与速度。从图中可以看出,Al₂O₃粒子平均温度约3200 °C,粒子平均速度高达600 m/s左右,远高于普通等离子喷涂(200 m/s~300 m/s)。图2表示在61 kW恒定功率下,不同电压与电流匹配对Al₂O₃粒子温度速度的影响。从图中可以看出,功率一定的情况下,粒子速度、温度随电流增大(电压减小)而增大,说明电流对温度

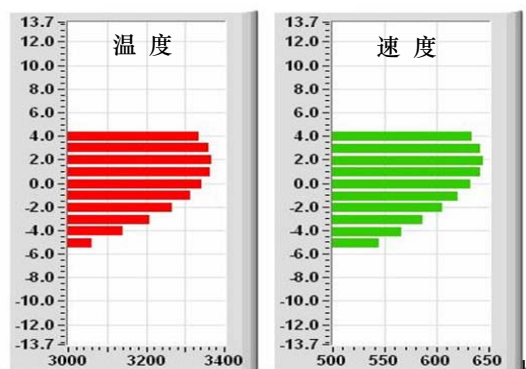


图1 64 kW时Al₂O₃粒子的状态

Fig.1 Al₂O₃ particles state of 64 kW

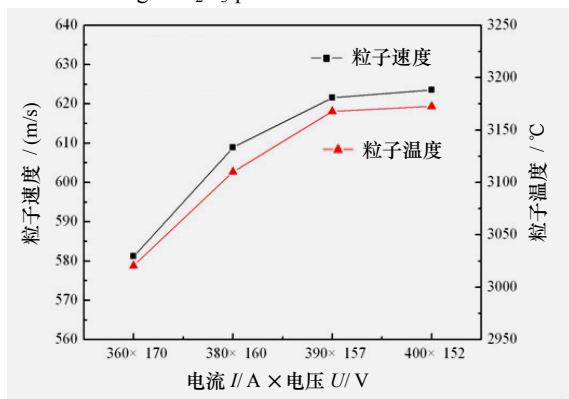


图2 电流与电压的匹配对喷涂粒子状态的影响

Fig.2 Variation of particles velocity and temperature with the current and voltage at the same power

的影响要大于电压。且随着电流增大到一定程度,这种变化逐渐趋于平缓。因此在喷涂过程中选择较大的电流值,能保证粒子有较高的速度和温度^[6]。

2 高效能超音速等离子喷涂制备氧化物陶瓷涂层的特点

氧化物陶瓷是热喷涂技术应用最广、用量最多的陶瓷喷涂材料^[7]。它一般具有硬度高、熔点高、热稳定性及化学稳定性好的特点,常用的氧化物陶瓷材料主要有:Al₂O₃、TiO₂、ZrO₂、Cr₂O₃等。高效能超音速等离子喷涂系统制备Al₂O₃涂层、Nano-ZrO₂梯度复合涂层和Cr₂O₃涂层的特点如下:

Al₂O₃涂层具有良好的耐磨性、耐热性、耐腐蚀性、耐氧化性以及电绝缘性,被广泛用作隔热涂层、绝缘涂层以及耐滑动摩擦磨损涂层。图3为采用高效能超音速等离子喷涂系统在功率为64 kW时制备的Al₂O₃涂层的表面图(a)和截面图(b)形貌,从图中可以看出,粒子熔化状态好,变形充分,涂层组织致密,无分层和明显的裂纹等特点,经检测涂层孔隙率为0.8%,显微硬度>1 000HV_{0.3},沉积效率高达50%以上^[6]。

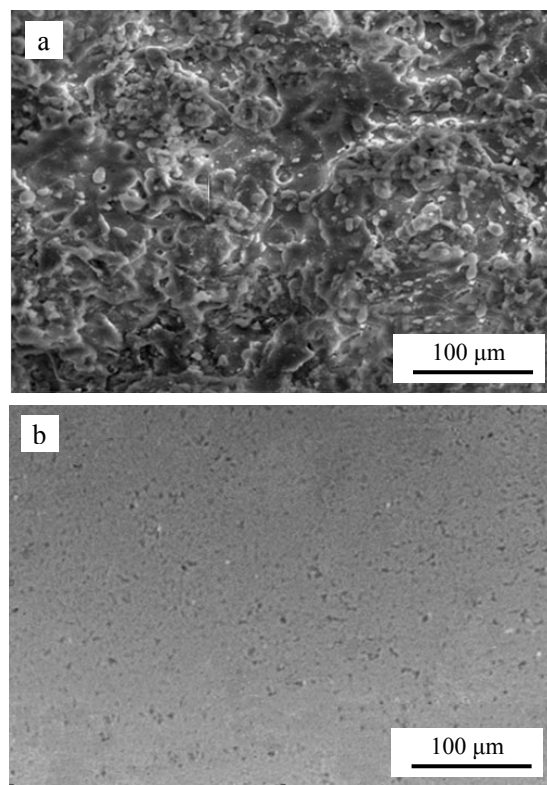


图3 Al₂O₃涂层的表面(a)和截面(b)SEM形貌

Fig.3 SEM surface (a) and cross section (b) morphology of Al₂O₃ coating

热障涂层是目前热喷涂领域研究的热点,是最有发展潜力的涂层之一。采用高效能超音速等离子喷涂系统在功率为71 kW时制备了Nano-ZrO₂梯度复合涂层,如图4所示。从图4(a)看出,Nano-ZrO₂复合涂层呈现了良好的连续梯度分布,合金相(NiCoCrAlY)和陶瓷相(Nano-ZrO₂)熔化良好,并结合紧密。图4(b)表明涂层中仍然保持大量的纳米晶组织,且相对稳定。其中梯度复合层中的金属和陶瓷相界面分明,结合良好^[8]。

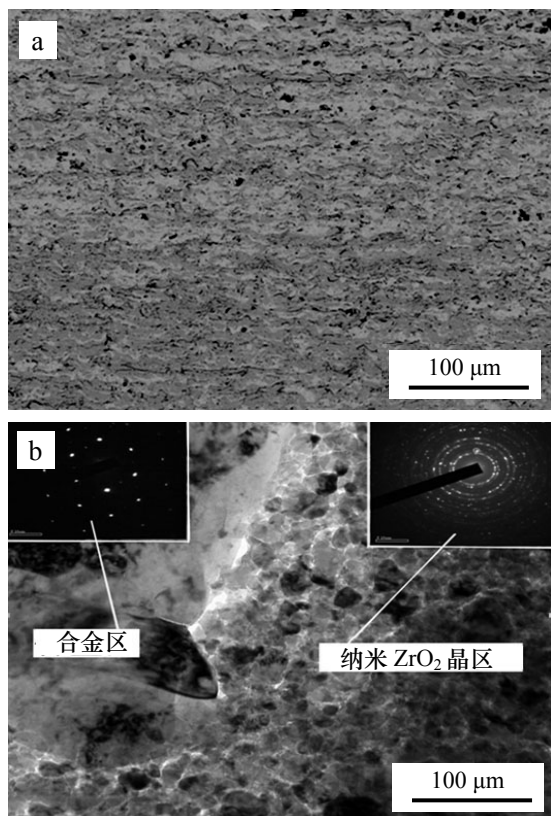


图4 Nano-ZrO₂梯度复合涂层的SEM断面形貌和TEM分析

Fig.4 SEM morphologies (a) and TEM analysis (b) of nano-ZrO₂ graded coating

Cr₂O₃涂层广泛应用于耐磨损、耐腐蚀领域,常采用普通等离子喷涂方法制备。图5为不同倍数下,超音速等离子喷涂制备Cr₂O₃(粒度30 μm~53 μm)涂层的形貌,(b)为(a)的局部放大图。从图中可以看出,涂层十分致密,涂层孔隙率极低(小于0.5%),显微硬度高达1 230HV_{0.2}^[9]。

3 超音速等离子制备金属陶瓷涂层的特点

碳化物金属陶瓷不仅具有熔点高、硬度高、化学性能稳定等典型的陶瓷材料特点,同时又显示出

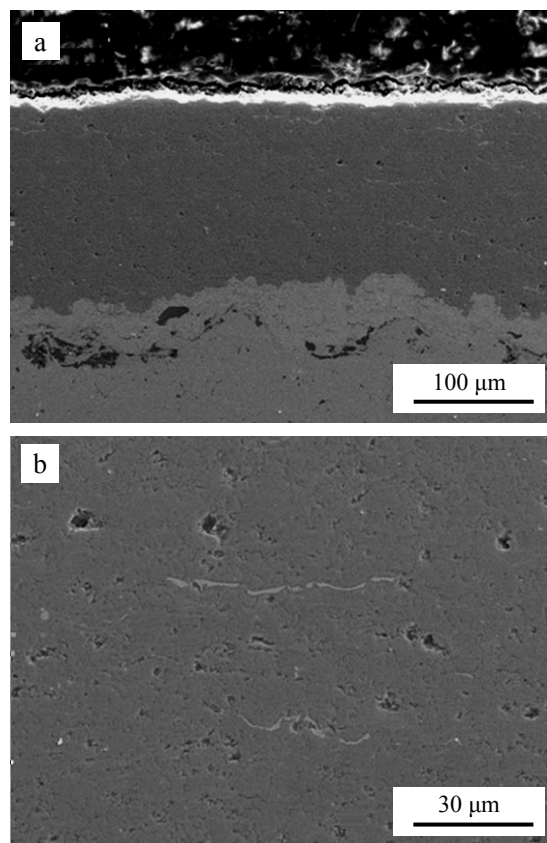


图5 Cr₂O₃陶瓷涂层的SEM断面形貌

Fig.5 SEM cross-section morphologies of Cr₂O₃ coating

一定的金属性能。目前,以WC-Co、Cr₃C₂-NiCr等为代表的碳化物金属陶瓷广泛应用于制造耐磨涂层以提高零部件的使用寿命^[10,11]。

采用高效能超音速等离子喷涂系统(HEPJet)在功率为56 kW时制备的WC-Co涂层,如图6所示。图6表明粒子熔化状态好,涂层均匀,非常致密,涂层与基体结合好。经检测,涂层孔隙率为0.66%,显微硬度值>1 200HV_{0.3},与基体的结合强度大于65 MPa。图7为HVOF与HEPJet制备的WC-12Co涂层的XRD图谱,结果表明高效能超音速等离子喷涂系统制备WC-Co涂层的氧化和失碳情况与超音速火焰喷涂相当^[12]。

4 超音速等离子制备金属及其合金涂层的特点

金属及其合金喷涂材料熔点相对较低、韧性好、结合强度高、导电导热性能好,根据成分的不同还具有一定的耐腐蚀能力,因而在热喷涂领域的应用非常广泛。

图8为功率在51 kW时,采用高效能超音速等离子喷涂制备的Mo-70%NiCrBSi涂层。从图中可以

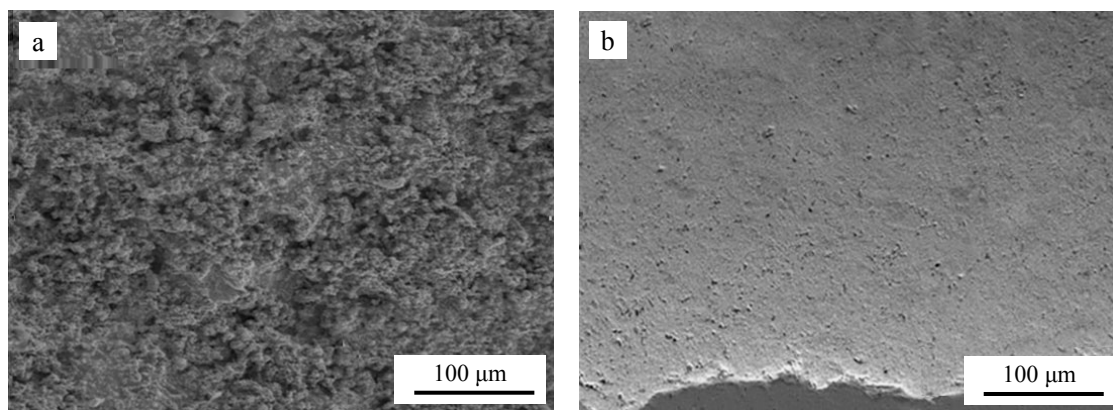


图6 WC-Co 涂层的表面 (a) 和截面 (b) SEM 形貌

Fig.6 SEM surface (a) and cross section (b) morphology of WC-Co coating

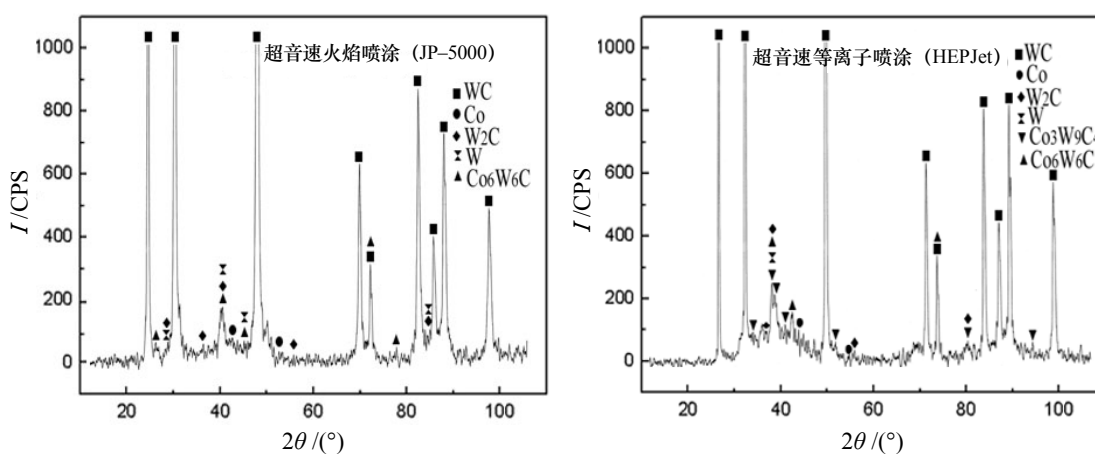


图7 WC-Co 涂层的 XRD 衍射图谱

Fig.7 XRD patterns of WC-Co coating

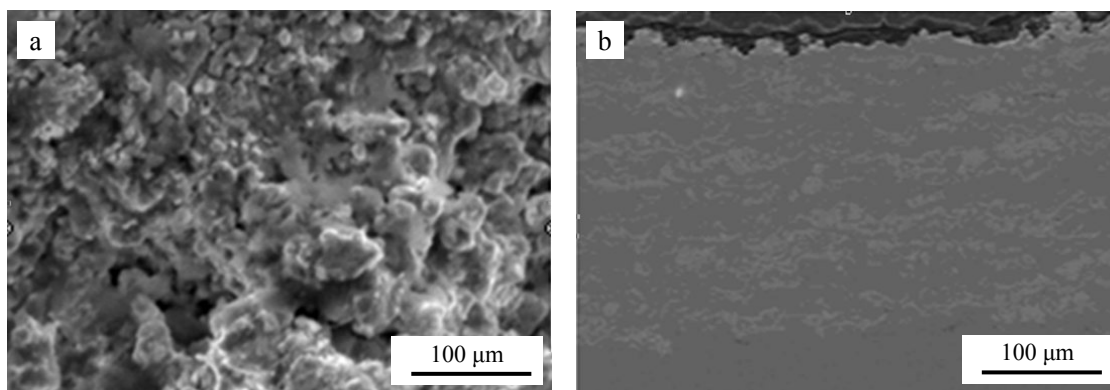


图8 Mo-70 % NiCrBSi 涂层表面 (a) 和截面 (b) SEM 形貌

Fig.8 SEM surface (a) and cross section (b) morphology of Mo-70 % NiCrBSi coating

看出, Mo-70 % NiCrBSi 熔化充分, 涂层致密。经检测, 涂层孔隙率小于1 %, 显微硬度值965.27HV_{0.1}。EDAX能谱分析表明, 图8 (b)中浅色区域为NiCrBSi, 深色区域为Mo, 两者交替均匀分布。图9表明涂层摩擦因数小 (<0.005), 起到自润滑和保护作用, 达到改善摩擦学性能的目的^[13]。

Al/Ni粉是典型的放热包覆型粉末, 常用作打

底层, 涂层具有抗氧化性, 适合700 °C下的工作, 也可作为工作涂层或工件的表面修复, 起到耐磨、防水冲蚀、抗热震性能。图10为高效能超音速等离子喷涂系统在功率为54 kW和喷涂距离为180 mm时制备的Al/Ni涂层。从图中可知Al/Ni熔化较好, 涂层组织致密, 与基体结合较好, 结合强度大于65 MPa, 能起到具有较好的粘结过渡层效果。

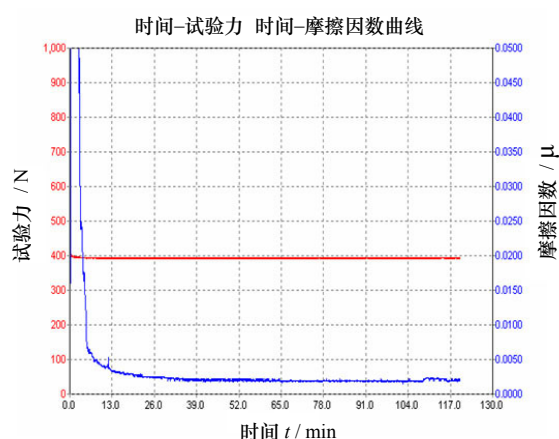


图9 Mo-70 % NiCrBSi涂层时间-摩擦因数曲线

Fig.9 The friction coefficient and time curves of Mo-70 % NiCrBSi coating

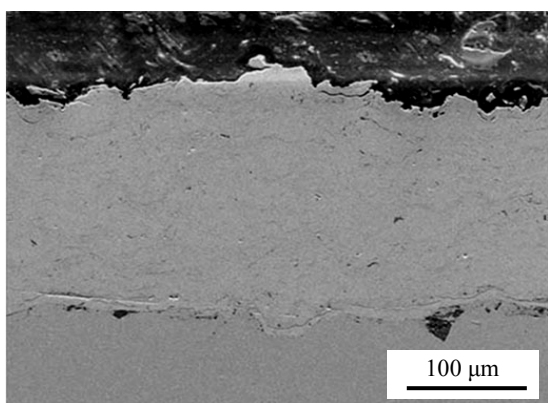


图10 Ni/Al涂层截面SEM形貌

Fig.10 SEM cross-section morphologies of Ni/Al coating

5 结语与展望

热喷涂技术是再制造工程的关键支撑技术之一。作为热喷涂技术的最新代表,高效能超音速等离子喷涂技术在普通等离子喷涂技术和超音速火焰喷涂技术之间架起了一座桥梁。它不仅适合喷涂低熔点金属及其合金材料,也适合喷涂高熔点陶瓷材料。由于热焓值高,能量集中,较好地解决了半熔融或未融化粒子造成喷涂材料和喷涂涂层成分不一致的问题。高效能超音速等离子喷涂技术(HEPJ)具有耗能少、喷涂材料广、沉积效率高、涂层质量好等优点,现已广泛应用于国防、航空航天、能源、交通运输、工业等各经济领域。

基于高效能超音速等离子拉法尔喷嘴的设计思路,通过不断改进喷枪结构,进一步拉长电弧长度,提高电弧的能量密度和温度梯度,开发新一代喷涂非晶材料和纳米材料的新工艺,将为大面积非晶纳米晶涂层的制备提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 王汉功, 袁小静, 查柏林. 热喷涂技术的现状与发展趋势 [C]. 涂料涂装技术交流推广会论文集(西安). 2004, 07: 34-37.
- [2] 纪纲昌, 李长久, 武涛, 等. 喷涂工艺条件对超音速火焰喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 粒子速度的影响 [J]. 材料保护, 2004, 37(11): 29-31.
- [3] Stoltenhoff T, Voyger J, Kreye H. Cold spraying—state of the art and applicability [C]. Proceedings of ITSC2002, Essen, Germany, 2002(5): 366-374.
- [4] 饶琼, 周香林, 张济山, 等. 超音速喷涂技术及其应用 [J]. 热加工工艺, 2004, (10): 49-52.
- [5] Abukawa S, Takabatake T, Tani K. Effects of powder injection on deposit efficiency in p lasma spraying [A]. ITSC2006 [C] SeattleWashington, 2006(10): 55-59.
- [6] 陆欢, 王海军, 郭永明. 超音速等离子喷涂参数对粒子速度温度的影响 [J]. 中国表面工程, 2008, 21(1): 19-23.
- [7] Barbezat G, Folio F, Coddet C, et al. The benefits of the protal process on the adhesion of thermal sprayed coating [C]. Proceedings of ITSC 2000, Montreal, Canada. 2000(6): 57-61.
- [8] Marpe B R, Voyer J, Bisson J-F, et al. Processing and characterisation of nano-structured cermet coatings [C]. Proceedings of ITSC 2001, Singapore, Singapore. 2001 (5): 343-352.
- [9] 韩志海, 王海军, 王斌利等. 超音速等离子喷涂制备先进陶瓷涂层的特点 [J]. 有色金属(增刊), 2008: 61-66.
- [10] LugscheiderE, RemerP, Herbst Cetal. NiCr- Cr_3C_2 and NiCr-TiC-High wear resistant coatings for protective applicationsin steam turbines [C]. Procofthe14th ITSC, Kobe: [s.n.], 1995(1): 235-240
- [11] BeczkowiakJ, FischerJ, KellerHetal. Advanced carbide sand borides for wear resistant coatings—powder sand coating properties [C]. Proc of the 14th ITSC. Kobe: [s.n.], 1995(2): 1053-1057.
- [12] 王海军, 韩志海, 周世魁, 蔡江. HEPJet 超音速等离子喷涂系统制备 WC-Co 涂层的性能特点 [C]. 第七届国际热喷涂研讨会(ITSS'2004)(青岛). 2004, 7: 31-36.
- [13] 王海军, 潘荣辰, 韩志海. 超音速等离子喷涂 Mo 及 Mo + 30 % (NiCrBSi)涂层的耐磨性能研究 [J]. 金属热处理, 2005, 30(5): 16-19.

作者地址: 装甲兵工程学院 装备再制造工程系 100072

Tel: 151 2002 9105

E-mail: xzq7865023@yahoo.com.cn