doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2010.05.010

超音速等离子喷涂超细 WC-12Co 涂层的性能*

谢兆钱,王海军,郭永明,刘晓亭,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:采用超音速等离子喷涂系统,分别制备了超细 WC-12Co 涂层和普通 WC-12Co 涂层。研究了喷涂粒子在射流中的特性,分析了涂层形貌、成分和相组成,并对两涂层的常规性能(结合强度、显微硬度、孔隙率和耐冲蚀性能)进行了表征。结果表明,超细 WC-12Co 喷涂粒子在束流中速度更快(500 m/s),两涂层中 WC 相的氧化、失碳和分解程度比普通等离子喷涂时低。相比之下,超细 WC-12Co 涂层显微硬度(1350 HV_{0.3})和结合强度(65 MPa)更高,孔隙率(0.6%)更低,耐冲蚀磨损性能相当。

关键词:超音速等离子喷涂;WC-12Co;涂层性能 中图分类号:TG174.442 文献标识码:A

文章编号: 1007-9289(2010)05-0054-05

Performance of Ultrafine WC-12Co Coatings Sprayed by Supersonic Plasma Spraying

XIE Zhao-qian, WANG Hai-jun, GUO Yong-ming, LIU Xiao-ting, LI Xu-qiang (National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: Ultrafine WC–12Co and common WC–12Co coatings were prepared by Supersonic Plasma Spraying system. The particles velocity and temperature in supersonic plasma jet were tested. It adopted some instruments to analyze for the coatings' component, structure and phase structure, and to measure the conventional performance of coatings (bonding strength, micro–hardness porosity and erosion–resistant wear performance). The results show that the velocity of ultrafine WC–12Co is faster than common WC–12Co in supersonic plasma jet. Both WC–12Co coatings have little decomposability and oxidation. Compared with common WC–12Co coatings, ultrafine WC–12Co coating has higher micro–hardness (1350 $HV_{0.3}$) and bonding strength (65 MPa), lower porosity (0.6 %) and almost excellent erosion–resistant wear performance.

Key words: supersonic plasma spraying; WC–12Co; coatings performance

0 引 言

粉末粒度对喷涂粒子的速度、温度及涂层的组 织结构有着较大的影响。粉末粒度越小,在相同条 件下,越容易被加热和加速。研究表明^[1, 2]在WC-12Co材料中,涂层硬度随颗粒尺寸的减小而增大。 然而细颗粒WC-12Co粉末在普通等离子喷涂过程 中更容易氧化、失碳和烧损,从而影响涂层的性能, 并且在喷涂过程中易出现喷嘴管壁结瘤现象,致使 超细WC-12Co粉末喷涂工艺性差。

与其它喷涂方法相比,超音速等离子喷涂气、 电参数可调控范围宽,能保证在高射流速度的前提

作者简介: 谢兆钱(1985—), 男(汉), 湖南湘潭人, 硕士研究生。

下,大幅度调节射流的温度,制备的涂层具有硬度 和结合强度高、孔隙率低、涂层质量好等特点^[3,4]。 文中采用粒度为11~21 μm (超细)和44~53 μm WC-12Co (普通)粉末作为材料,利用超音速等离 子喷涂技术进行喷涂。分析了两种喷涂粒子在焰流 中的飞行状态及其涂层的组织结构,探讨了粉末尺 寸对涂层性能的影响,为超音速等离子喷涂超细粒 度WC-12Co提供了理论依据。

1 试验方法

以45钢为基体(尺寸为15 mm×10 mm×3 mm),采用自行研制的超音速等离子喷涂系统进行喷涂,喷涂参数见表 1。利用Spray Watch CCD 系统对喷涂粒子的飞行速度和温度进行在线监测。 在IIMT-3型显微硬度计上测量涂层硬度。采用WE-

收稿日期: 2010-03-25; 修回日期: 2010-04-28 基金项目: *国防科技重点实验室基金项目 (9140C8502010803) (9140C850205090C8502)

10A万能拉伸试验机和LeiCa DMIMR仪器分别测量涂层的结合强度和孔隙率。使用Quanta 200型扫描电镜(SEM)、X射线衍射仪(XRD)分析粉末和涂层断面形貌、成分及相组成。在自行研制的GW/CS-MS装置上进行冲蚀磨损试验。试验条件:

大气环境,常温,磨料为棕刚玉(粒度为220~350 μm),压缩空气压力为0.2 MPa时磨粒速度为130 m/s,每40 g磨粒量为一个冲蚀单位,攻角为90°。 试样尺寸:25 mm×16 mm×6 mm,涂层厚0.5 mm。 采用BS210S型分析天平称量试样的冲蚀磨损量。

表 1 超音速等离子喷涂(HEPJet)工艺参数 Table 1 HEPJet process parameters

材料	电流/A	电压/V	喷涂距离/mm	主气(Ar)流量/m ³ ·h ⁻¹	次级气(H ₂)流量/m ³ ·h ⁻¹	送粉量/g·min ⁻¹
普通 WC-12Co	400	140	100	4.0	0.20	40
细 WC-12Co	360	145	100	4.4	0.18	40

2 结果与讨论

2.1 粉末形貌和成分分析

从图1 (a、b) 可看出两种WC-12Co粉末球型

度较好,但粒度分布不均匀。球型度越好,粉末流动性就越好,在等离子射流中飞行状态更加稳定集中。由图1(c)可看出粉末中只含有WC和Co两种相。



(a) 超细WC-12Co

(b) 普通WC-12Co粉末(c) 超细WC-12G图 1 WC-12Co 粉末的 SEM 形貌和 X 射线衍射谱

(c) 超细WC-12Co粉末的XRD谱

Fig.1 SEM micrographs and XRD patterns of WC–12Co powder

2.2 喷涂粒子在超音速等离子射流中的喷涂特性

图2表示的是WC-Co粒子在超音速等离子射 流中的状态。从图中可以看出超细WC-12Co粒子在 束流中的速度为500 m/s左右,温度约2500 ℃。普 通WC-12Co粉末粒子的速度为425 m/s左右,温度 约2700 ℃。相比于普通WC-12Co,喷涂超细 WC-12Co时,由于主气流量增大(4.4 m³·h⁻¹),一 方面使得主气对射流的气动力压缩增强,促进了射 流的加速^[5],另一方面主气对射流的吸热能力增大, 增强了对射流的压缩效应,电弧被拉伸得更长,提 高了射流速度;同时WC-12Co粉末颗粒尺寸越小越 利于加速,从而使得超细WC-12Co粉末粒子在射流 中的速度较普通WC-12Co粒子速度高。超细 WC-12Co 在粒子射流中表面温度的降低,主要是 由于功率减小造成,并且射流速度提高,使细 WC-12Co在焰流中停留的时间减少,粒子加热时间 相对缩短。但粉末颗粒尺寸越小越利于加热,这使 得超细WC-12Co粒子也能较好的熔化。

2.3 涂层断面SEM形貌和XRD分析

图3、4分别为两涂层在不同倍数下断面的SEM 形貌(图(b)是图(a)的局部放大图),从图中可以看 出,两种涂层都非常的致密,无分层、裂纹和大的 孔隙,涂层与基体结合紧密,粒子熔化状态好,而 超细WC-12Co涂层表面更细密、粗糙度更小。在图 3(b)和图4(b)中,通过能谱分析,A浅色区为WC相, B深色区为Co相,WC相与Co相互交错分布,形成典 型的"硬质相+软基体"的耐磨组织,适宜于在540 ℃







图 3 普通 WC-12Co 涂层断面 SEM 形貌 Fig.3 Cross-sectional image of common WC-12Co coating



图 4 超细WC-12Co涂层断面SEM形貌 Fig.4 Cross-sectional image of ultrafine WC-12Co coating

下作耐冲蚀磨损和磨粒磨损材料。两涂层相比,超 细颗粒WC-12Co涂层更为致密,Co的富集区没有 普通WC-12Co涂层明显,主要是因为WC-12Co颗 粒尺寸小,比表面积大,球化状好,各向受热均匀, 钴的熔点低,熔化状态好,打在基体上时钻液发生 飞溅和流散,Co铺展在基体上的程度更好,使裸露的WC相弥散分布在钴基上更均匀。由于WC细颗粒越小,塑性变形更充分,在钴液上WC粒子间堆垛更加紧密,从而Co富集的程度减小。

据研究报道^[6],超音速等离子喷涂制备的WC-

12Co涂层可与超音速火焰喷涂和爆炸喷涂制备的 涂层相媲美。图5为WC-12Co涂层的X射线衍射图 谱,与喷涂前(见图1(b))相比,两涂层中均出现 了W₂C和钴的碳化物相,但各主峰基本没变,说明 两涂层氧化、失碳和烧损程度比较轻,能与前人研 究的相吻合^[6]。相比较而言,图5(b)的W₂C峰值比 5(a)涂层的高,说明超细WC-12Co粉末喷涂时氧 化、失碳较严重。虽然通过调节气、电参数,使超 细WC-Co在焰流中停留的时间相对更短,焰流温度 更低,但WC-12Co颗粒尺寸小,更容易加热熔化, 比表面积相对更大,与氧气接触的可能性更大,并 且WC-12Co本来是易氧化、失碳的材料,故出现了 WC氧化、失碳较普通WC-Co严重。



图 5 普通 (a) 和细颗粒 (b) WC-12Co涂层的XRD衍 射图谱

Fig.5 XRD patterns of WC–12Co coating common (a) and ultrafine (b)

2.4 涂层的常规性能

表 2 所示为普通WC-12Co与超细WC-12Co 涂层结合强度、显微硬度和孔隙率的测量值。两者 相比之下,超细WC-Co涂层结合强度(65 MPa) 和显微硬度更高(1350 HV_{0.3}),孔隙率更低(0.6%)。 这主要是因为超细WC-12Co粒子在束流中熔化较 好、速度更快,粒子与基体碰撞的动能更大,粒子 扁平化程度更好,涂层更为致密且颗粒越小,在相 同的区域里涂层叠加的程度更好,晶粒分布更加均 匀,从而形成的涂层更加致密,硬度更高。

表 2 涂层的性能							
Table 2 Coatings performance							
	结合强度/MPa	显微硬度/HV _{0.3}	孔隙率/%				
普通WCCo	55	1250	1				
超细WC-Co	65	1350	0.6				

如图 6 表示的是两WC-12Co涂层耐冲蚀磨损 试验结果。试验表明,两涂层耐冲蚀性能相差不大 且涂层耐冲蚀磨损性能良好,是因为两涂层主要是 WC、Co和少量W₂C相,而WC和W₂C本身是硬质相, 其具有优良的耐磨粒磨损和冲蚀磨损性能。



Fig.6 Erosion-resistant wear of WC-12Co coating

3 结 论

(1)超音速等离子喷涂能制备出高质量的超细 WC-12Co涂层,解决了普通等离子喷涂工艺性差的 问题。

(2)用超音速等离子制备的两种WC-12Co涂层 均匀、致密,孔隙率低(<1%),结合强度高(> 55 MPa),显微硬度高(>1200 HV_{0.3})。超细 WC-12Co涂层比普通WC-12Co涂层的硬度和结合 强度更高、孔隙率更低,这主要是由于颗粒尺寸越 小,喷涂粒子越易加热加速,WC相分布更均匀, 涂层更致密的原因。

(3) 两涂层WC相的失碳、分解和氧化程度较

低,相比之下,超细WC-12Co涂层稍多,在冲蚀磨 损试验中,超细WC-12Co涂层与普通WC-12Co涂 层耐冲蚀性能相当。

参考文献:

58

- [1] 赵辉, 王群, 丁彰雄, 等. HVOF 喷涂纳米结构
 WC-12Co涂层的组织结构分析 [J]. 表面技术, 2007, 36(4): 1-3.
- [2] 叶雄林,马世宁,李长青,等.超音速等离子喷涂
 WC-12Co 纳米结构涂层性能研究 [J].表面工程, 2004,(1): 31-38.
- [3] 王海军,韩志海,王建,等.超音速等离子喷涂
 WC-12Co 涂层性能研究 [J]. 装甲兵工程学院学报,2006,20(1): 85-89.
- [4] 张平, 王海军, 朱胜, 等. 高效能超音速等离子喷涂系统的研制 [J]. 表面工程, 2003, (3): 12-16.
- [5] 杨晖, 王良. 等离子喷涂的电弧伏安特性 [J]. 焊接 学报, 2007, 28(12): 77-80.
- [6] 韩志海,徐滨士,王海军,等.三种超音速热喷涂工
 艺制备 WC-12Co 涂层的组织结构分析 [J]. 表面工
 程,2005,18(3): 23-27.

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

参考文献:

- [1] 陈冬,陈南春. 莫来石的研究进展 [J]. 矿产与地质, 2004, 18(101), 52-54.
- [2] Brunauer G, Frey F, Boysen H, et al. High temperature thermal expansion of mullite:an in situ neutron diffraction study up to 1600 °C [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2001, 21, 2563-2567.
- [3] Schneider H, Okada K,Pask J A. Mullite and mullite ceramics [M]. Wiley, New York, 1994.
- [4] Colombel L, Bouchetou M L, Poirier J. Behaviour of andalusite and mullitized andalusite crystals under thermal shock [J]. Refractories Application and News, 2009, 4(5):4-18.
- [5] Treadwell D R, Dabbs D M, Aksay I A. Mullite (3Al₂O₃·2SiO₂) synthesis with aluminosiloxanes [J]. American Chemical Society, 996, (8) 056-2060.

- [6] Anggono J, Derby B. Mullite formation from the pyrolysis of aluminium–loaded polymethylsiloxanes: the influence of aluminium powder characteristics [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2006, 26, 1107-1119.
- [7] Bouchetou M L, Ildefonse J P, Poirier J, et al. Mullite grown from fired andalusite grains: the role of impurities and of the high temperature liquid phase on the kinetics of mullization and consequences on thermal shocks resistance [J]. Ceramics International, 2005, 31, 999-1005.
- [8] 侯平均, 王汉功, 汪刘应, 等. 微弧等离子喷涂制备 空心莫来石隔热涂层研究 [J]. 兵工学报, 2009, 30(8), 1108-1113.
- [9] Ramaswamy P, Seetharamy S, Varma K B R, et al. Thermal shock characteristics of plasma sprayed mullite coatings [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1998, 7(4), 497-504.
- [10] 王文权,等. 离子喷涂纳米陶瓷热障涂层组织与性能研究 [D]. 吉林大学博士学位论文, 2005, 23-30.
- [11] Cano C, Garcia E, Fernandes A L, et al. Mullite/ZrO₂ coatings produced by flame praying [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2008, 28, 191-2197.
- [12] 曹雪强. 热障涂层材料 [M]. 科学出版社, 北京: 2007, 63-64.

作者地址:中国科学院兰州化学物理研究所 730000 Tel: (0931) 4968085 E-mail: csuayl@sohu.com

俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录《中国表面工程》

俄罗斯《文摘杂志》(英文名称Journal Abstracts, 缩 写为AJ. 俄文缩写为P达),创刊于1953年,是由全俄科 学技术信息研究所(VINITI)编辑出版的一套完整的综合 性检索刊物。据报导是国际六大著名检索系统之一,也 是世界三大综合检索期刊之一。2010年本刊接到我国国 际检索系统咨询部通知,已被常规收录入VINITI数据库。

据此,收录本刊的检索系统有:中国期刊全文数据 库、中国学术期刊综合评价数据库、中国科学引文数据 库、《中国学术期刊文摘》、美国《化学文摘》(CA)、美 国《剑桥科学文摘(工程技术)》(CSA(Tech.))、《剑桥 科学文摘(自然科学)》(CSA(NS))、俄罗斯《文摘杂志》 (AJ)、美国《乌利希期刊指南》(UPD)。