

等离子熔覆-注射B₄C铁基熔覆层组织耐磨性研究

王新帅, 静丰羽, 张喜冬, 赵靖宇, 孙玉福

(郑州大学 材料科学与工程学院, 郑州 450002)

摘要:目的 采用等离子熔覆-注射工艺在 Q235 基体上制备 B₄C 铁基熔覆层并研究其耐磨性。方法 通过 OM, SEM, EDS 等分析熔覆层及界面的组织特征, 并进行耐磨性测试。结果 当 B₄C 质量占主体熔覆材料质量的 18% 时, 注射熔覆层表面比较平整, 无裂纹。注射熔覆层组织致密, 界面呈现平直的亮白色过渡层, 稀释率小, 与基体形成了良好的冶金结合。B₄C 陶瓷颗粒表面溶解会形成 Fe, Cr 等元素的硼化物。等离子熔覆-注射 B₄C 熔覆层的耐磨性是 42CrMo 的 22 倍, 是 16Mn 钢的 41 倍。结论 等离子熔覆-注射 B₄C 工艺能够增强 B₄C 与熔覆层之间的结合力, 提高熔覆层的硬度和耐磨性。

关键词: 等离子熔覆-注射; B₄C; 铁基熔覆层; 耐磨性

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)05-0042-05

Study on Wear Resistance of Fe-based Clad Coating Prepared by Plasma Cladding-B₄C Injection

WANG Xin-shuai, JING Feng-yu, ZHANG Xi-dong, ZHAO Jing-yu, SUN Yu-fu

(Material Science and Engineering College, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

ABSTRACT: **Objective** Fe-based B₄C composite clad coating was prepared on the surface of Q235 steel by plasma cladding-injection process, and its wear resistance was studied. **Methods** The microstructure and dry-sliding wear behavior of the clad layer were investigated by means of optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometry (EDS) and ball-on-disc wear experiments. **Results** The experimental results showed that when the B₄C accounted for 18% of the quality of the main body cladding material, the surface of the clad coating was smooth, without cracks. In addition, the plasma cladding-injecting coating had a compact texture, a low dilution rate and a good metallurgical bonding with carbon steel substrate, and there was a bright white transition layer in the interface. During the dissolving of the surface of the B₄C ceramic particles, borides of Fe and Cr were formed. The wear resistance test showed that the plasma cladding-injecting coating had high wear resistance, which was twenty-two times that of the 42CrMo steel, and forty-one times that of the 16Mn steel. **Conclusion** The plasma cladding-injection B₄C process was beneficial to enhance the bonding force between the B₄C and the cladding layer, and improve the hardness and wear resistance of the plasma cladding-injecting coating.

KEY WORDS: plasma cladding-injection; B₄C; Fe-based cladding layer; wear resistance

收稿日期: 2014-05-08; 修订日期: 2014-08-18

Received: 2014-05-08; Revised: 2014-08-18

作者简介: 王新帅(1988—), 男, 河南人, 硕士生, 从事铸造合金研究。

Biography: WANG Xin-shuai (1988—), Male, from Henan, Master graduate student, Research focus: casting alloy.

通讯作者: 孙玉福(1958—), 男, 河南人, 教授, 从事铸造合金研究。

Corresponding author: SUN Yu-fu (1958—), Male, from Henan, Professor, Research focus: casting alloy.

等离子熔覆是一种表面改性技术,可有效地改善和提高材料的表面性能,并赋予材料新的性能^[1]。与其他熔覆用合金粉末相比,Fe 基合金粉末成本低廉,来源广泛,物理和力学性能优异^[2]。由于工程材料大多以钢铁材料为主,熔覆层与基体间有优良的结合性,因此研究和开发铁基熔覆层有重大意义。为了提高自熔性熔覆材料的性能,常在自熔性合金中添加高熔点的碳化物、氮化物、硼化物等陶瓷颗粒,如 WC, TiC, SiC 等,以不同程度地改变熔覆层的组织,提高其耐磨等性能^[3-5]。王长柏、张艳良等^[6-7]采用等离子熔化-注射工艺在 Q235 钢表面注射 WC 颗粒,制备出 WC-Co 金属基耐磨复合表层,大大提高了表面耐磨性能。Hosson 采用熔覆-注射工艺在 Ti-6Al-4V 表面制备了 SiC 和 WC 功能梯度涂层^[8-9]。B₄C 具有很高硬度和耐磨性,且 B、C 是常用的固溶粒子及化合物形成元素,加入 B₄C 能够改变熔覆层的组织及性能^[10-11]。文中采用等离子熔覆-注射 B₄C 陶瓷颗粒的方法,制备镶嵌有 B₄C 的熔覆层,并研究该熔覆层的组织及耐磨性能,探索改善截齿、中部槽等耐磨件耐磨性和使用寿命的方法。

1 实验

实验采用的基体材料为热轧 Q235A 钢板。目前,国内外等离子熔覆技术采用的熔覆合金粉末材料主要包括自熔性合金粉末和复合型粉末两大类^[12-15]。自熔性合金粉末中含有大量的硼或硅元素,粉末熔点低,具有强烈的脱氧、造渣能力及良好的浸润性能,复合型粉末是指在自熔性合金粉末的基础上添加高熔点的碳化物、氮化物、硼化物等陶瓷颗粒的混合物。实验的主体熔覆材料选用市售的 Fe 基自熔性合金粉末,通过二次注射陶瓷颗粒的工艺,达到复合型粉末的强化效果,其具体成分见表 1,注射用 B₄C 陶瓷颗粒微观形貌如图 1 所示。

表 1 合金粉末成分

Tab.1 Chemical composition of alloy powder

元素	C	Cr	Mo	Si	B	Mn	Fe
质量分数/%	0.16	12.5	0.5	0.8	1.0	≤0.05	余量

熔覆层制备采用增加送粉注射装置的 IGA-500 型数控等离子耐磨熔覆设备,设备简易构造如图 2 所示。当等离子炬在预处理过的金属表面移动时,基材

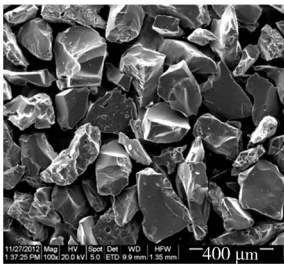


图 1 B₄C 颗粒形貌

Fig.1 Morphology of the B₄C particle

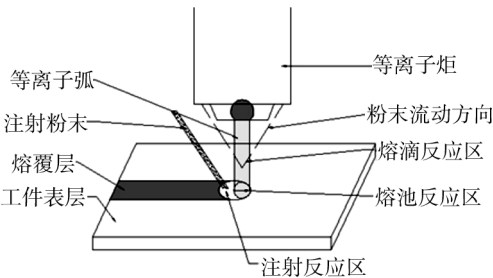


图 2 等离子熔覆-注射工艺示意

Fig.2 Schematic diagram of plasma cladding-injection process

和熔化的合金粉末形成一个移动的熔池,这时将 B₄C 陶瓷颗粒注射到熔池拖尾中,热源离开后,熔池迅速冷却凝固形成熔覆层。

利用 Philips-quanta-2000 型扫描电镜观察试样的显微组织,利用扫描电镜和能谱对熔覆层组织进行分析。在 ML-100 型销盘型回转式磨料磨损试验机上进行耐磨试验,通过 SEM 分析磨损机理。

2 结果与分析

2.1 熔覆层的形貌与组织分析

研究表明,当 B₄C 质量占主体熔覆材料质量的 18% 时,熔覆层表面没有裂纹。注射熔覆层的宏观形貌如图 3a 所示,表面粗糙度比较大,这是由于注射熔覆层的注射层镶嵌了粒度较大的 B₄C 陶瓷颗粒,且注射层厚度为 10 μm 左右;熔覆层下层组织不含 B₄C 颗粒。注射熔覆层断面 SEM 形貌如图 3b 所示。对图 3b 中黑色块状物进行 EDS 分析,可以确定该块状物是 B₄C 陶瓷相,分析结果见表 2。

图 4 和图 5 分别是注射 B₄C 前后,熔覆层及结合面的金相形貌。从图 4a 和图 5a 对比可以看出,注射熔覆层组织比未注射 B₄C 的熔覆层更致密。这是由

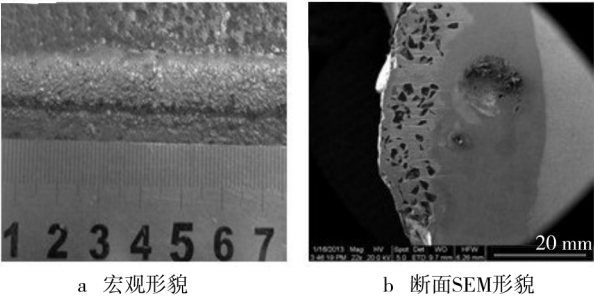


图 3 注射熔覆层形貌

Fig. 3 Morphology of plasma cladding-injecting coating

表 2 黑色块状物 EDS 能谱分析

Tab. 2 Analysis of energy dispersion spectrum

元素	B	C	Si	Fe
质量分数/%	88.36	11.34	0.11	0.18

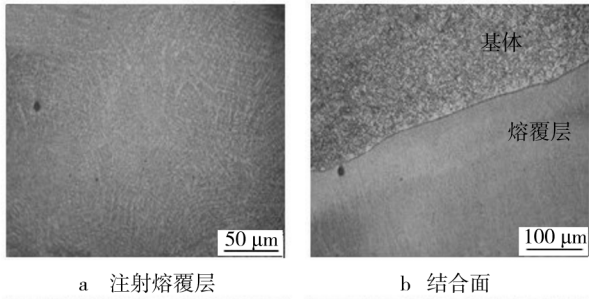


图 4 注射熔覆层及结合面金相组织

Fig. 4 Microstructures of plasma cladding-injecting coating and the interface

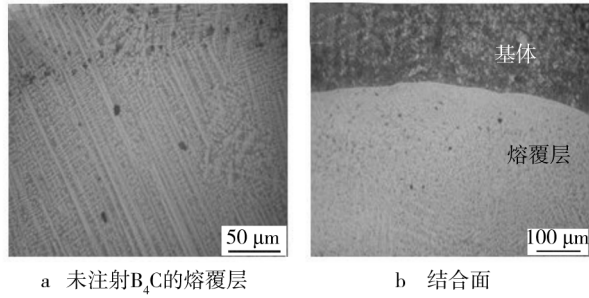


图 5 未注射 B₄C 熔覆层及结合面金相组织

Fig. 5 Microstructures of plasma clad coating without injection of B₄C and the interface

于 B₄C 陶瓷颗粒以较高的速度注射到熔池时,一方面降低了熔池的温度,震动、打碎了熔池中粗大的枝晶结构;另一方面,由于部分 B₄C 颗粒的溶解,致使异质形核数量增加,组织细化程度提高。从图 4b 和图 5b 对比可以看出,注射熔覆层结合面熔合线较普通熔覆

层结合面的熔合线平直,说明注射熔覆层的稀释率较小,能保证主体熔覆材料的熔覆层成分和所设计的粉末成分相差不大,这对于达到所设计的预定性能非常重要。

图 6 是注射熔覆层与基体结合面的 SEM 形貌。可以看到熔覆层与基体界面有一条呈亮白色的过渡层。过渡层与基体、熔覆层界面有部分凸起,说明熔覆层与基体形成了良好的冶金结合。等离子束扫描时,熔覆材料和基体材料表面熔化形成熔池。当扫描结束后,由于基体材料的激冷作用,热量通过金属基体快速热传导散失,熔池底部与基体交界处迅速形成核结晶,由于散热方向垂直于界面基底方向,导致散热方向不明显,晶体生长方向随之紊乱^[16]。

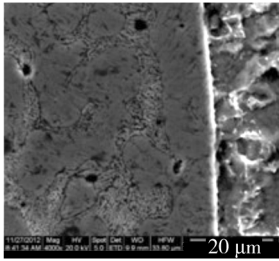


图 6 注射熔覆层与基体结合面的 SEM 形貌

Fig. 6 SEM morphology of the interface between the plasma cladding-injecting coating and the matrix

图 7 是注射熔覆层横断面镶嵌 B₄C 颗粒的 SEM 形貌,可以看出 B₄C 与熔覆层结合良好, B₄C 表面发生了溶解,增强了 B₄C 陶瓷相与熔覆层间的结合力,有利于 B₄C 镶嵌在主体熔覆材料中,防止其脱落。对 B₄C 溶解部分进行能谱分析,结果见表 3。分析表明主要有 Fe、B 和少量的 Cr,说明在等离子熔覆-注射工艺中, B₄C 被等离子弧加热导致部分熔化,与粘结相中的合金元素 Fe、Cr 发生冶金反应形成硼化物,有利于提高注射熔覆层的硬度和耐磨性。

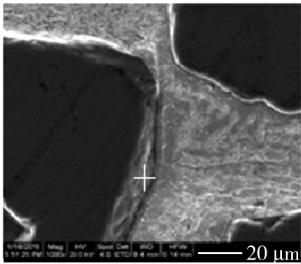


图 7 注射熔覆层横断面镶嵌 B₄C 颗粒的 SEM 形貌

Fig. 7 SEM morphology of B₄C inlaid in the plasma cladding-injecting coating

表 3 B₄C 溶解部分 EDS 能谱分析

Tab.3 Analysis of energy dispersion spectrum

元素	B	C	Cr	Fe
质量分数/%	24.50	2.60	9.10	61.51

2.2 熔覆层硬度分析

分别对注射熔覆层与未注射 B₄C 熔覆层的样品选取 7 个点进行洛氏硬度测试并取平均值,注射熔覆层平均洛氏硬度为 60.77HV,未注射 B₄C 的熔覆层平均洛氏硬度为 48.19HV。可以看出,未注射 B₄C 熔覆层的洛氏硬度明显低于注射熔覆层,这主要是未注射 B₄C 的熔覆层中形成的硬质相少,而注射熔覆层中形成了 Fe,Cr 的硼化物,有利于提高注射熔覆层的硬度和耐磨性。

2.3 耐磨性分析

耐磨实验采用未注射 B₄C 的熔覆层材料、截齿齿体材料(42CrMo)以及刮板输送机中部槽材料(16Mn)与 B₄C 注射熔覆层材料作对比,结果见表 4。

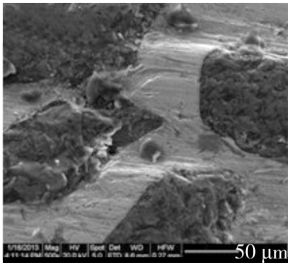
表 4 各试样的磨损量

Tab.4 Wear mass loss of samples

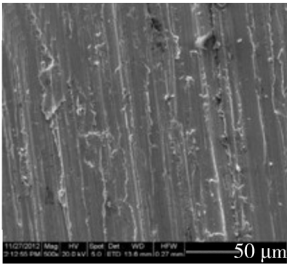
试样	次数	原始质量/mg	磨损后质量/mg	平均磨损量/mg
注射熔覆层	1	13 574	13 503	82
	2	13 591	13 498	
未注射 B ₄ C 的熔覆层	1	14 832	13 140	1686
	2	14 598	12 918	
42CrMo	1	13 217	11 419	1806
	2	14 158	12 345	
16Mn	1	13 180	9 820	3357
	2	13 241	9 887	

从表 4 中各试样的磨损量可以看到,注射熔覆层的平均磨损量最小,耐磨性能最好;注射熔覆层的理论耐磨性是未注射 B₄C 的熔覆层的 20 倍,是 42CrMo 的 22 倍,是 16Mn 钢的 41 倍。

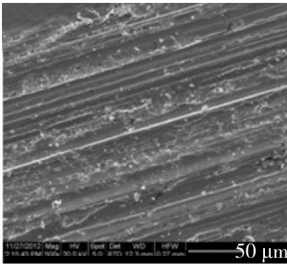
图 8 是各试样磨损实验之后的 SEM 形貌。从图 8a 中可以看出,注射熔覆层中的块状 B₄C 在耐磨实验中并未脱落,说明 B₄C 和主体熔覆材料的结合良好。与图 8b 和图 8c 对比可知,注射熔覆层磨损面犁沟较浅,磨损轻微。在耐磨实验中,作用在带有棱角的磨粒上的法向分力促使磨粒的棱角刺入试样的磨



a 注射熔覆层



b 未注射B₄C的熔覆层



c 42CrMo

图 8 各试样磨损形貌

Fig. 8 Wear morphology of samples

损面,在切向力作用下对试样的磨损面产生明显的切削作用,产生磨屑,故未注射 B₄C 的熔覆层、42CrMo 磨损面切削痕迹比较明显。注射熔覆层中由于含有大量的 B₄C 陶瓷相,充当了骨架作用,保护了陶瓷间隙中的主体熔覆材料不被切削,大大限制了磨粒的磨损作用。

3 结论

1) 当 B₄C 质量占主体熔覆材料质量的 18% 时,注射熔覆层表面比较平整,无裂纹。由于镶嵌了粒度较大的 B₄C 陶瓷颗粒,宏观表面粗糙度较大。

2) 注射熔覆层与基体的结合界面形成了良好的冶金结合,与不含 B₄C 普通熔覆层组织相比,组织更加致密。注射熔覆层稀释率小,保证了其成分的稳定性。B₄C 颗粒表面部分溶解,形成 Fe,Cr 等元素的硼化物,保证 B₄C 不会脱落,有利于提高熔覆层的硬度和耐磨性,增强了 B₄C 与熔覆层之间的结合力。

3) 硬度和耐磨试验表明,注射熔覆层具有很高的硬度和耐磨性。熔覆层中 B₄C 陶瓷相的存在能够显著提高熔覆层的耐磨性。注射熔覆层的磨损面仅有轻微的切削和较浅的犁沟,B₄C 颗粒没有脱落,与主体熔覆材料结合良好。

参考文献

[1] 陈颖. 等离子束表面冶金机理研究及铁基稀土涂层制备

- [D]. 北京:北京科技大学,2007.
- CHEN Hao. Mechanism Study of Plasma Jet Surface Metallurgy and Iron Based Coating with RE Formed[D]. Beijing: University of Science Technology Beijing,2007.
- [2] 董刚,严彪,李翔. TiC 增强铁基熔覆层制备方法的研究进展[J]. 表面技术,2009,38(1):69—71.
- DONG Gang, YAN Biao, LI Xiang. Process in Preparation Method of TiC Reinforced Fe-based Coating[J]. Surface Technology,2009,38(1):69—71.
- [3] 徐峰,李文虎,艾桃桃. Q235 钢表面氩弧熔覆 TiC 复合涂层的组织与性能[J]. 表面技术,2012,41(5):53—55.
- XU Feng, LI Wen-hu, AI Tao-tao. The Microstructure and Property of TiC Composite Coating Deposited by Argon Arc Cladding on Q235 Steel Surface[J]. Surface Technology, 2012,41(5):53—55.
- [4] SEXTON L, LAVIN S, BYRNE G, et al. Laser Cladding of Aerospace Materials[J]. Journal of Materials Processing Technology,2002,122(1):63—68.
- [5] 于有生,倪火炬,温家伶. 铁基合金激光熔覆的研究[J]. 中国表面工程,2004(4):24—27.
- YU You-sheng, NI Huo-ju, WEN Jia-ling. A Study on Laser Cladding of Iron-based Alloy[J]. China Surface Engineering,2004(4):24—27.
- [6] 王长柏. 等离子熔化-注射 WC-Co 耐磨复合表层研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- WANG Chang-bai. Research of WC-Co Wear-resistant Composite Surface Layer by Plasma Melt Injection Process[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2006.
- [7] 张艳良. 等离子熔-喷制备 WC 增强表层复合材料[D]. 北京:中国农业大学,2005.
- ZHANG Yan-ling. Preparation of WC Reinforced Surface Composite by Plasma Deposition-Spraying Process[D]. Beijing:China Agricultural University,2005.
- [8] OCELIK V. SiCp/Ti6Al4V Functionally Graded Materials Produced by Laser Melt Injection[J]. Acta Materialia, 2002, 50(8):2035—2051.
- [9] VREELING J A, OCELIK V, HOSSON J. Ti-6Al-4V Strengthened by Laser Melt Injection of WC Particles[J]. Acta Materialia,2002,50(19):4913—4924.
- [10] 斯松华,袁晓敏,徐锟. B₄C 对激光熔覆钴基合金涂层组织与耐磨性的影响[J]. 焊接学报,2004,25(3):61—64.
- SI Song-hua, YUAN Xiao-min, XU Kun. Effect of B₄C on Microstructure and Wear Resistance of Cobalt-based Alloy Laser Cladding Coating[J]. Transactions of the China Welding Institution,2004,25(3):61—64.
- [11] 崔泽琴,王文先,曹国光,等. 碳钢表面激光熔覆铁基 B₄C 陶瓷涂层的组织与性能[J]. 材料热处理学报,2011,32(3):134—138.
- CUI Ze-qin, WANG Wen-xian, CAO Guo-guang, et al. Microstructure and Properties of Fe-based Alloy and B₄C Ceramics Composite Coating on Low Carbon Steel by Laser Cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2011, 32(3):134—138.
- [12] 王建青. 等离子喷焊超厚耐磨涂层的研究[D]. 泰安:山东矿业学院,1999.
- WANG Jian-qing. Research of Super Thick Wear-resisting Coating by Plasma Spray Welding[D]. Taian: Shandong College of Mining Technology,1999.
- [13] 钱苗根. 材料表面技术及其应用手册[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- QIAN Miao-gen. Technology and Application of Material Surface Manual[M]. Beijing:China Machine Press,1998.
- [14] 徐滨士,朱绍华. 表面工程的理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- XU Bin-shi, ZHU Shao-hua. The Theory of Surface Engineering and Technology[M]. Beijing:National Defense Industry Press,1999.
- [15] 侯清宇,高甲生. 铁基合金等离子堆焊研究进展[J]. 安徽工业大学学报,2003,20(1):14—16.
- HOU Qing-yu, GAO Jia-sheng. Research Development of Iron-based Plasma Surfacing[J]. Journal of Anhui University of Technology,2003,20(1):14—16.
- [16] 马虎,吴玉萍,王国桐. 等离子熔覆高硼 Fe-Cr 基涂层的组织与性能[J]. 焊接学报,2009,30(7):65—68.
- MA Hu, WU Yu-ping, WANG Guo-tong. Microstructure and Properties of High Boron Fe-Cr Based Coating by Plasma Cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009,30(7):65—68.