

# 堆焊工艺对高铬合金粉体堆焊层组织 及耐磨性能的影响

刘 跃<sup>1</sup>, 张国赏<sup>1,2</sup>, 魏世忠<sup>1,2</sup>, 李继文<sup>1,2</sup>, 徐流杰<sup>1,2</sup>

(河南科技大学 1. 材料科学与工程学院; 2. 河南省耐磨材料工程技术研究中心, 洛阳 471003)

**摘 要:** 分别采用焊丝粉末堆焊和焊丝粉块堆焊工艺, 在 Q235 钢基体表面制备了高铬合金粉体堆焊层, 利用扫描电镜、X 射线衍射仪、磨料磨损试验机和洛氏硬度仪等对两种堆焊层的微观组织、硬度及耐磨性能等进行了研究。结果表明: 两种工艺制备的堆焊层组织均由奥氏体、铁素体和碳化物组成; 其中采用焊丝粉块堆焊时的飞溅少、碳化物析出多、脱渣性好, 其制备堆焊层的洛氏硬度和相对耐磨性比焊丝粉末工艺的好, 且分别为 Q235 钢的 3 倍和 2 倍。

**关键词:** 焊丝粉末堆焊工艺; 焊丝粉块堆焊工艺; 显微组织; 硬度; 耐磨性能

**中图分类号:** TG455      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3738(2013)08-0027-04

## Effects of Surfacing Technologies on Microstructure and Wear Resistance of High Chromium Alloy Powder Surfacing Layers

LIU Yue<sup>1</sup>, ZHANG Guo-shang<sup>1,2</sup>, WEI Shi-zhong<sup>1,2</sup>, LI Ji-wen<sup>1,2</sup>, XU Liu-jie<sup>1,2</sup>

(1. School of Material Science & Engineering, 2. Henan Engineering Research Center for Wear of Material, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** Two surfacing technologies, welding wire-alloy powder surfacing and welding wire-alloy powder block surfacing, were used to prepare high chromium alloy powder surfacing layers on Q235 steel surface, and the microstructure and wear resistance of the surfacing layers were studied by scanning electron microscopy, X-ray diffraction, wear and hardness testing. The results show that the microstructure of surfacing layers prepared by the surfacing technologies mainly consisted of austenite, ferrite and carbide. The welding wire-alloy powder block technology had many advantages, such as less sputtering, more carbide precipitate and good slag detachability. The hardness and wear resistance of the surfacing layers prepared by welding wire-alloy powder block surfacing technology were better than those by welding wire-alloy powder block surfacing technology, and were 3 times and 2 times higher than those of Q235 steel, respectively.

**Key words:** welding wire-alloy powder surfacing technology; welding wire-alloy powder block surfacing technology; microstructure; hardness; wear resistance

## 0 引 言

圆锥破碎机轧臼壁是圆锥破碎机中的主要消耗部件, 采用合适的材料及工艺对轧臼壁进行堆焊修复是延长其使用寿命、降低成本的一个重要手段。粉末堆焊是一种以等离子弧、碳弧、电弧等为热源,

使合金粉熔敷于基材表面上的一种堆焊方法, 该方法焊接的产品可具备较佳的强度、韧性、耐磨性、耐腐蚀性、耐热性和抗冲击性, 能显著提高产品的使用寿命; 也可以采用该方法修复已磨损报废的零部件, 实现报废零部件的再生利用。该方法在国防工业、冶金工业、建材、能源、电力、矿山机械等行业的制造、维修方面具有很大的应用潜力。关于合金粉末堆焊方面的研究已有很多报道, 而将合金粉制作成粉块, 然后利用高温热源使其熔敷在工件表面的粉块堆焊工艺的相关研究报道较少。为了提高堆焊层的性能, 作者分别采用焊丝粉末堆焊和焊丝粉块堆焊两

收稿日期: 2012-06-11; 修订日期: 2013-03-01

基金项目: 河南省科技攻关项目(112102213117)

作者简介: 刘跃(1986—), 男, 河南周口人, 硕士研究生。

导师: 张国赏教授

种工艺在 Q235 钢表面进行堆焊,并对堆焊层的宏观形貌、显微组织、硬度和耐磨性能进行了研究。

## 1 试样制备与试验方法

### 1.1 试样制备

试验用自动堆焊机由焊接操作机、焊接变位机、自动焊接摆动器、CPXD600 型气体保护焊接电源、水冷自动气保焊枪和触摸屏电气控制系统组成。堆焊基材为 200 mm×100 mm×16 mm 的 Q235 低碳钢板。所用堆焊合金粉为粒径 70~180 μm 的高铬铬铁粉,其化学成分(质量分数/%)为 5.0C, 60Cr, 0.64Ti, 3.35Al, 1.16Mn, 余 Fe。气体保护焊丝牌号为 JQ·MG50-6,其名义化学成分(质量分数/%)为 0.06~0.15C, 1.4~1.85Mn, 0.8~1.15Si, 余 Fe。

粉末堆焊工艺:称取 20 g 合金粉置于 V 型混料机中,混合均匀后放入 DZF-6053 型真空干燥箱中烘干,然后加热至 30~40 °C 预热 12 h,再升温至 170 °C 保温 24 h。然后将其按 90 mm×25 mm(长×宽)均匀地平铺在已清除氧化皮的 Q235 钢板上,按表 1 中的焊接参数进行粉末堆焊试验,制备焊丝粉末堆焊层试样。

表 1 堆焊工艺参数

Tab. 1 Surfacing technology parameters

焊丝直径 /mm	焊接 电流/A	焊接 电压/V	焊接速度 /(mm·s <sup>-1</sup> )	堆焊宽度 /mm	保护 气体
1.2	350~400	30~34	3	25	CO <sub>2</sub>

粉块堆焊工艺:称取 20 g 合金粉末置于 V 型混料机中,混合均匀后,加入适量的经高锰酸钾钝化的水玻璃作为粘结剂,研磨均匀后,放进自制的模具中,再用液压机在 4 MPa 压力下保压 3 min,压制尺寸为 90 mm×25 mm×2 mm 的合金粉块,然后将其置于 DZF-6053 型真空干燥箱中烘干,先加热至 30~40 °C 预热 12 h,然后升温至 170 °C 保温 24 h。取出粉块,放置在已去除氧化皮的 Q235 钢板上,按表 1 中的焊接参数进行粉块堆焊试验,制备焊丝粉块堆焊层试样。

### 1.2 试验方法

堆焊试验结束后,用抛光机除去堆焊层表面的氧化皮,然后利用线切割制取尺寸为 10 mm×10 mm×20 mm 的试样,经砂纸磨平和金刚石研磨膏抛光后,用三氯化铁盐酸溶液(由 5 g 三氯化铁、50 mL 盐酸和 100 mL 蒸馏水组成的混合溶液)腐

蚀 50 s,在 XJP-3A 型光学显微镜下观察试样的显微组织;采用 M5000 型台式 CCD 直读光谱仪测堆焊层的化学成分;采用 D8 型多晶 X 射线衍射仪分析堆焊层中合金元素的相结构;采用 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜观察堆焊层的组织形貌;采用 HRC-150 型洛氏硬度计测堆焊层的洛氏硬度,每个试样测 5 个点,取平均值,采用金刚石压头,载荷为 1 471 N,加载时间 5 s,其中测点之间的距离或任一测点距试样边缘的距离不小于 3 mm。

采用 ML-10 型磨料磨损试验机进行磨损试验。试样先在磨损试验机上预磨 5 个周期(1 个周期为 100 s),然后清洗干净并烘干后用 SARTORIUS-BS201S 型电子天平称量质量( $m_0$ ),之后按表 2 中的磨损试验参数进行磨损试验,磨损试验结束后再称量质量( $m_1$ ),磨损量  $\Delta m = m_0 - m_1$ ,取 3 个试样磨损量的平均值。

表 2 磨损试验参数

Tab. 2 Wear test parameters

试样尺寸 /mm	磨料 类型	磨料 粒径/μm	磨轮转速 /(r·min <sup>-1</sup> )	磨损周期 /个	载荷 /N
φ6×20	碳化硅砂纸	100	240	15	20

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 化学成分及宏观形貌

从表 3 中可以看出,焊丝粉块堆焊工艺制备的堆焊层中的碳含量明显较高,这表明采用焊丝粉末堆焊工艺堆焊时的飞溅较大,且碳的烧损较多。

焊丝粉末堆焊工艺制备的堆焊层中存在较多的气孔和夹杂,如图 1(a)所示;焊丝粉块堆焊工艺制备的堆焊层中缺陷较少,且脱渣性良好,肉眼观察堆焊层及热影响区均未发现焊接裂纹,但是堆焊层表面存在表面气孔和焊瘤,如图 1(b)所示。清理干净焊道表面的焊渣后,取样观察亦均未发现未熔合、裂纹、气孔和夹渣等缺陷,如图 1(c)所示。

表 3 不同堆焊工艺制备堆焊层的化学成分(质量分数)

Tab. 3 Chemical composition of surfacing layers prepared by differnt surfacing technologies (mass) %

工艺	C	Cr	Mn	Si	Fe
焊丝粉末堆焊	0.15	10	0.80	0.33	余
焊丝粉块堆焊	0.39	18	1.16	0.42	余

### 2.2 组织形貌及物相

由图 2(a)和图 3(a)可以看到,两种堆焊工艺制

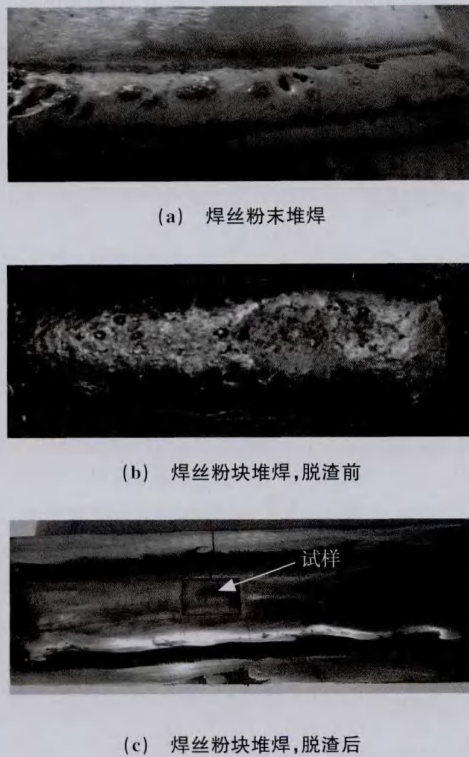


图 1 不同堆焊工艺制备堆焊层的宏观形貌

Fig. 1 Macro morphology of hardfacing layers prepared by different surfacing technologies: (a) welding wire-alloy powder surfacing; (b) welding wire-alloy powder block surfacing, before clearing slag and (c) after clearing slag

备的堆焊层和基体间的熔合区均很窄,且结合紧密,没有气孔,基体与堆焊层之间属冶金结合。焊丝粉末堆焊工艺制备的堆焊层主要由针状铁素体、奥氏体和少量碳化物组成,针状铁素体组织纵横交错,位向分布不均匀。采用焊丝粉末堆焊工艺进行堆焊时,熔滴温度很高,突遇温度较低的粉体后,冷热不均,造成合金粉体飞溅,同时碳的烧损及其在熔池中的充分扩散使粉体中的碳化物熔化后形成的碳元素富集区消失,因此有少量碳化物析出。焊丝粉块堆焊工艺制备的堆焊层主要由奥氏体、碳化物及少量铁素体组成。采用焊丝粉块堆焊工艺进行堆焊时,温度较高的熔滴落到合金粉块上,由于大量合金粉体粘连在一起,热量迅速向四周传输,碳元素的烧损程度较低,因此飞溅少且有较多碳化物析出<sup>[1]</sup>,如图3(b)所示。

从图2中还可以看到,可能由于电弧过长,熔池面积过大,堆焊机操作不熟练等原因造成焊丝粉末堆焊工艺制备的堆焊层中出现了孔洞缺陷。

由图4可知,两种堆焊工艺制备的堆焊层组织

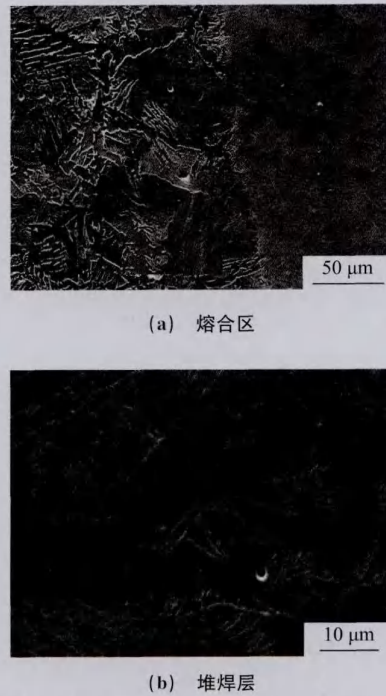


图 2 焊丝粉末堆焊工艺制备堆焊层的 SEM 形貌  
Fig. 2 SEM morphology of surfacing layer prepared by welding wire-alloy powder surfacing technology: (a) fusion zone and (b) surfacing layer

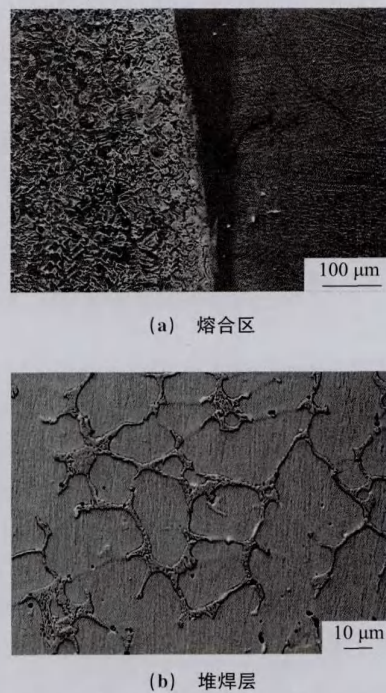


图 3 焊丝粉块堆焊工艺制备堆焊层的 SEM 形貌  
Fig. 3 SEM morphology of surfacing layer prepared by welding wire-alloy powder block surfacing technology: (a) fusion zone and (b) surfacing layer

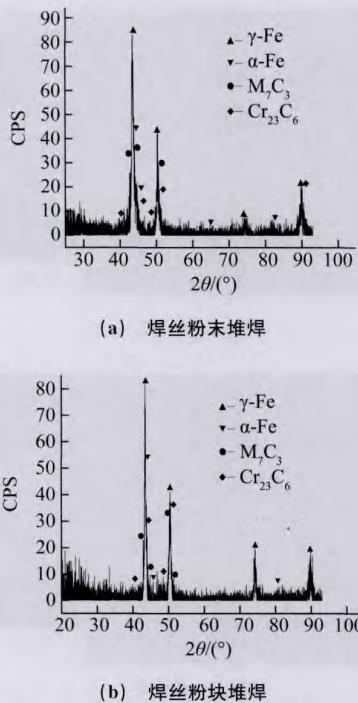


图4 采用不同堆焊工艺制备堆焊层的 XRD 谱  
Fig. 4 XRD patterns of surfacing layers prepared by welding wire-alloy powder surfacing technology (a) and welding wire-alloy power block surfacing technology (b)

均由奥氏体 ( $\gamma$ -Fe)、铁素体和碳化物 ( $M_7C_3$ 、 $Cr_{23}C_6$ ) 组成, 其二者最为显著的不同点是, 前者的奥氏体 (220) 晶面特征峰的衍射峰强度比后者对应的晶面特征峰的更高。可知, 焊丝粉块堆焊可促进奥氏体组织的形成。另外, 采用焊丝粉块堆焊工艺制备堆焊层的  $(Fe, Cr)_7C_3$  相的 (402) 面的衍射峰强度比采用焊丝粉末堆焊工艺制备的高, 这表明前者中的  $(Fe, Cr)_7C_3$  相数量较多, 与图 3 吻合。

### 2.3 硬度

采用焊丝粉末堆焊工艺和焊丝粉块堆焊工艺制备堆焊层的硬度分别为 31, 40.3 HRC, 均高出母材 (13.7 HRC) 很多。文献 [2] 的研究表明, 碳质量分数在 4.0%~6.0% 范围内时, 初始碳化物数量和堆焊层的硬度均随着碳含量的增加而增大。分析认为, 采用焊丝粉块堆焊时, 熔池温度较高, 加入的碳、铬、钛和硅等合金元素一方面溶解进入固溶体起强化作用, 另一方面在冷却过程中能形成一些细小的共晶化合物, 这些硬质相弥散在固溶体间起第二相强化作用, 因此采用焊丝粉块堆焊工艺制备的堆焊层具有较高的硬度 [3]。从原始堆焊粉末中的碳化物熔化后形成的局部碳元素富集区中可直接析出  $(Fe, Cr)_7C_3$  相。而  $Cr_{23}C_6$  相是液相与  $(Cr, Fe)_7C_3$

发生包晶的方式生成反应或从液相中直接析出形成的, 但  $Cr_{23}C_6$  具有一次碳化物的形态, 从液相中直接析出的可能性更大。在堆焊层中大量高硬度碳化物相的析出必将提高其宏观硬度, 并有利于改善堆焊层的耐磨性 [4]。

### 2.4 耐磨性能

从表 4 可以看出, 母材 Q235 钢在 20 N 载荷作用下的磨损量最大, 说明母材的耐磨性能最差。采用两种堆焊工艺制备的堆焊层在相应载荷下的磨损量较母材的明显降低, 相对耐磨性能分别约为母材的 1.3 倍和 2 倍, 这说明制备的堆焊层可显著提高母材表面的耐磨性能。通常认为堆焊层的耐磨性能与其硬度、显微组织有密切的关系, 在相同的磨料磨损试验条件下, 堆焊层表面的洛氏硬度越高, 其耐磨性能越好 [5]。由此可知, 焊丝粉块堆焊工艺比焊丝粉末堆焊工艺更能提高堆焊层的耐磨性能 [6]。

表 4 母材及堆焊层的耐磨性能

Tab. 4 Wear resistance of base metal and surfacing layers

材料	$\Delta m/g$	相对耐磨性
母材	0.725 7	1
焊丝粉末堆焊层	0.540 9	1.341 6
焊丝粉块堆焊层	0.356 3	2.036 7

## 3 结论

(1) 焊丝粉末堆焊和焊丝粉块堆焊两种工艺都能实现堆焊层与母材的冶金结合, 堆焊层成形良好; 采用焊丝粉末堆焊时飞溅大, 碳元素烧损严重, 碳化物析出量少; 而采用焊丝粉块堆焊时飞溅少, 且碳化物的析出量较多、脱渣性好。

(2) 两种堆焊层组织中均含有奥氏体、铁素体和碳化物; 采用焊丝粉末堆焊工艺和焊丝粉块堆焊工艺制备堆焊层的硬度分别为 31, 40.3 HRC, 它们的相对耐磨性分别为 Q235 钢的 1.3 倍和 2 倍。

### 参考文献:

- [1] 朱文东. 合金粉块碳弧堆焊层成形与耐磨性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [2] 杨威. 超高碳高铬耐磨堆焊合金微观组织研究 [D]. 郑州: 机械科学研究总院郑州机械研究所, 2007.
- [3] 刘勇, 王顺兴, 田保红. 硬质合金堆焊层经热处理后的耐磨性研究 [J]. 中国表面工程, 2002(3): 17-19.
- [4] 单际国, 张迪, 任家烈. 镍基合金粉末光束堆焊层的微观组织及强化机理 [J]. 材料研究学报, 2002, 16(2): 151-157.

(下转第 58 页)

GB 1591—2008可知,两种试验钢都达到了 Q690 钢的性能要求,但是试验钢 2 的屈服强度富余不多,而试验钢 1 则获得了强度与塑性更优的综合力学性能。

### 3 结论

(1) 试验钢在两种不同工艺条件下均获得了由板条贝氏体、粒状贝氏体与针状铁素体的组成混合组织,并以板条贝氏体为主;终轧后经弛豫处理的试验钢,其组织比未经弛豫处理的更加细小。

(2) 终轧后经弛豫处理的试验钢比未经弛豫处理的具有更优的综合力学性能,且二者均符合 GB 1591—2008的要求。

#### 参考文献:

- [1] 贺信莱,尚成嘉,杨善武,等.高性能低碳贝氏体钢[M].北京:冶金工业出版社,2008.
- [2] RODRIGUES P C M, PERELOMA E V, SANTOS D B. Mechanical properties of HSLA bainitic steel subjected to controlled rolling with accelerated cooling[J]. Mater Sci Eng A, 2000, 283:136-138.
- [3] 尚成嘉,杨善武,王学敏,等. RPC 对 800MPa 级低合金高强度钢的影响[J]. 北京科技大学学报,2002,24(2):129-132.
- [4] 王学敏,尚成嘉,杨善武,等.组织细化的控制相变技术机理研究[J]. 金属学报,2002,38(6):661-666.
- [5] 武会宾,杨善武,尚成嘉,等.低碳钢中微细非平衡组织的热稳定性[J]. 北京科技大学学报,2003,25(5):419-421.
- [6] SHANG C J, WANG X M, HE X L, *et al.* A Special TMCP used to develop an 800MPa grade HSLA steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2001,8(3):224-228.
- [7] SHANG C J, YANG S W, HE X L, *et al.* Influence of refinement processing on the microstructure and mechanical properties of HSLA plate steel [C]//First International Conference on Advanced Structural Steels (ICASS 2002). Tsikuba, Japan: [s. n.],2002:37-38.
- [8] 李鹤林,郭生武,冯耀荣,等.高强度微合金管线钢显微组织分析与鉴别图谱[M].北京:石油工业出版社,2001:8.
- [9] 齐俊杰,黄运华,张跃.微合金化钢[M].北京:冶金工业出版社,2006.
- [10] SHANG C J, YANG S W, HE X L, *et al.* A new 800MPa grade ultra-fine composite microstructure HSLA plate steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2000:304.
- [24] MARYA M, EDWARDS G R. Chloride contributions in flux-assisted GTA welding of magnesium alloys[J]. Welding Journal,2002,81(12):292-298.
- [25] 刘凤尧,林三宝,杨春利,等.活性化 TIG 焊中活性剂和焊接参数对焊缝深宽比的影响[J]. 焊接学报,2002,23(2):1-5.
- [26] 陈莉,胡伦曦.活性剂焊接技术的研究[J]. 新技术工艺,2005(4):39-42.
- [27] LIU L M, CAI D H, ZHANG Z D. Gas tungsten arc welding of magnesium alloy using activated flux-coated wire [J]. Scripta Materialia,2007,57:695-698.
- [28] KOU S, SUND K. Fluid flow and weld penetration stationary arc welds[J]. Metall Trans: A,1985,16(1):203-213.
- [29] TSAI N S, EAGAR T W. Distribution of the heat and current fluxes in gas tungsten arcs[J]. Metall Trans: B,1985,16(4):841-846.
- [30] ZACHARIA T, DAVID S A. Weld pool development during GTA and laser beam welding of Type 304 stainless steel: Part I - theoretical analysis[J]. Weld J,1989,68(12):499-509.
- [31] ZACHARIA T, DAVID S A. Weld pool development during GTA and laser beam welding of Type 304 stainless steel: Part II-experimental correlation[J]. Weld J,1989,68(12):5105-5185.
- [32] WANG Y, SHI Q, TSAI H L. Modeling of the effects of surface active elements on flow patterns and weld penetration[J]. Metall Trans: B,2001,32(2):145-161.
- [33] WANG Y, TSAI H L. Effects of surface active elements on weld pool fluid flow and weld penetration in gas metal arc welding[J]. Metall Trans: B,2001,32(6):501-515.
- [34] XU Y L, DONG Z B, WEI Y H, *et al.* Marangoni convection and weld shape variation in A-TIG welding process[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2007,48(2):178-186.
- [35] 赵玉珍,雷永平,史耀武.表面活性元素硫对焊接熔池流动方式和深宽比的影响[J]. 机械工程学报,2004,40(9):138-143.
- [36] 张瑞华,尹燕,樊丁,等. A-TIG 焊熔深增加机理的数值模拟[J]. 机械工程学报,2008,44(5):175-180.
- [37] 雷永平,史耀武,田村英一.表面活性元素对 Marangoni 流和熔池形状影响的数值分析[J]. 机械工程学报,1999,35(5):29-32.
- [38] 张瑞华,樊丁. PHOENICS 在焊接数值模拟中的应用[J]. 甘肃工业大学学报,2003,12(4):26-28.
- [39] PASKELL T, LUNDIN C, CASTNER H. GTAW flux increase weld joint penetration [J]. Welding Journal,1997,76(4):57-62.

#### (上接第 30 页)

- [5] 邵荷生,张清.金属的磨料磨损与耐磨材料[M].北京:机械工业出版社,1988.
- [6] 宇文利,刘秀丽,李伟华.等离子堆焊 Ni 基金属粉末熔覆层性能研究[J]. 金属热处理,2006,31(10):41-43.