

氩弧熔覆 TiC 颗粒增强 Fe 基涂层组织性能研究

王泽旺, 张寰, 赵程

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要: **目的** 研究氩弧熔覆条件下 TiC 颗粒增强 Fe 基涂层的组织和性能。**方法** 在 Fe45 自熔性合金粉末中添加 TiC 颗粒, 利用氩弧熔覆技术在 Q235 钢基材表面制备出含 TiC 颗粒增强的 Fe 基合金复合涂层, 并对熔覆层的显微组织结构、硬度分布及耐磨性能进行分析研究。**结果** 复合涂层是由 (Fe, Ni) 形成的枝晶和枝晶间的 $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}(\text{C}, \text{B})_6$, $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$ 共晶组织以及 TiC 增强颗粒组成, TiC 颗粒细小弥散分布在基体金属内, 部分 TiC 颗粒聚集生长为棒状、十字状和放射状。**结论** 熔覆层的显微硬度最高可达 980HV, 较 Q235 钢提高了 4 倍, 耐磨性提高了约 11 倍。

关键词: 氩弧熔覆; 铁基自熔性合金粉末; TiC 增强; 复合涂层; 耐磨性

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)05-0051-04

Study on Microstructure and Properties of TiC-Fe45-based Composite Coating by Argon Tungsten-arc Cladding

WANG Ze-wang, ZHANG Huan, ZHAO Cheng

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the microstructure and properties of TiC-Fe45-based composite coating by argon tungsten-arc cladding. **Methods** Through addition of Tic particles into the Fe45 self-fluxing alloy powder, the composite coating of Fe-based alloy reinforced by TiC particles was prepared by argon tungsten-arc cladding process. The microstructure, microhardness distribution and wear resistance of the coating were analyzed. **Results** The composite coating was composed of the dendritic (Fe, Ni)-based matrix, interdendritic $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}(\text{C}, \text{B})_6$, $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$ eutectic structure and TiC reinforcement particles. The TiC particles were dispersedly embedded into the matrix, and part of the particles were congregated into virgate, cross and radial shapes. **Conclusion** The microhardness of the composite coating could reach 980 HV, which was more than four times that of the substrate and the wear resistance was increased by nearly 11 times.

KEY WORDS: argon tungsten-arc cladding; Fe-base self-fluxing alloy powder; TiC reinforcement; composite coating; wear resistance

近年来,表面熔覆技术以其高质量的熔覆效果,通过调和、掺杂硬质颗粒的方式可以获得多变的复合

涂层等诸多优点,已成为国内外材料学的研究热点之一^[1-3]。该技术是利用热源对熔覆材料进行加热,将

收稿日期: 2014-04-17; 修订日期: 2014-05-10

Received: 2014-04-17; Revised: 2014-05-10

作者简介: 王泽旺(1990—),男,山东人,硕士,主要从事表面工程技术研究。

Biography: WANG Ze-wang, Male, Master, from Shandong, Research focus: surface engineering technology.

通讯作者: 赵程(1952—),男,山东人,教授,博士生导师,主要从事表面工程技术研究。

Corresponding Author: ZHAO Cheng(1952—), Male, from Shandong, Professor, Ph. D., Supervisor, Research focus: surface engineering technology.

材料熔覆在基体表面,从而提高表面耐磨耐蚀性的一种表面防护技术。表面熔覆技术得到的熔覆层与基体结合良好,组织性能优越,被广泛应用于工业领域^[4-6]。

在各种熔覆方法中,氩弧熔覆以其熔覆设备简单,便于操作,熔覆过程中合金元素烧损较轻等优点被广泛关注^[7-10]。氩弧熔覆技术是以氩弧为加热源,将合金焊丝或预制粉末熔覆在基体金属表面,获得性能优异的熔覆涂层,以达到表面强化目的的一种熔覆技术。氩弧熔覆的电极多采用钨合金棒,在熔覆过程中钨极不易熔化,能保证以固定的电弧长度稳定地维持热输入。熔覆过程中,氩弧能量密度介于自由电弧和压缩弧之间,热输入的功率受到一定限制,母材的稀释率较低,又能保证熔覆层组织的致密,这一工艺特点正好满足表面改性处理技术的基本要求,同时也可以制备出耐磨损、耐腐蚀、耐高温的高质量熔覆涂层。

为了扩大氩弧熔覆的使用范围,人们在熔覆金属内掺杂了各种类型的硬质颗粒,如 WC、SiC 等,以进一步提高熔覆层的硬度和耐磨性,并对此进行了较深入的研究^[11-16]。笔者利用氩弧熔覆技术制备 TiC 颗粒增强 Fe 基合金熔覆层,并对熔覆层的组织结构和性能进行研究。

1 实验

实验选用工程中常用的 Q235 钢作为基体材料,试样尺寸为 30 mm×50 mm×5 mm。选用 Fe45 自熔性合金粉末制备熔覆金属,合金粉末平均粒径为 40 μm,其化学成分见表 1。熔覆层的增强相颗粒选用 TiC 粉末,纯度大于 99%,平均粒径为 2 μm。

表 1 Fe45 粉末的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Fe45 powder

元素	C	Cr	Ni	Si
质量分数/%	0.4~0.8	15~20	9.0~12	2.5~3.5
元素	B	W	Mo	Fe
质量分数/%	1.5~2.5	2.0~3.0	1.0~2.0	余量

试样表面先进行机械打磨处理,用胶水将 Fe45 合金粉末和 20% (质量分数) TiC 粉末调成糊状,均匀地涂在试样的表面,厚度约 1.5 mm。为防止水分蒸发太快而产生开裂,先将试样自然烘干 24 h 后,放入

真空干燥箱中 100 ℃ 烘干 2 h,然后取出冷却。用手工钨极氩弧熔覆的方法制备熔覆涂层,工艺参数为:熔覆速度 3 mm/s,脉冲熔覆电流 170 A,氩气流量 7 L/min。

用光学金相显微镜和 MX2600 型扫描电子显微镜观察熔覆层的组织和表面形貌;用 MAX200 型 X 射线衍射仪对熔覆层结构进行物相表征;用 HVS-1000 型显微硬度计测试熔覆层横断面的硬度,所用载荷为 0.25 N,保持时间为 10 s。熔覆层的耐磨性能试验法向加载载荷为 200 N,滑动摩擦时间为 15 min。用精度为 0.1 mg 的电子分析天平检查熔覆层的磨损量。

2 结果与分析

2.1 熔覆层组织分析

图 1 为氩弧熔覆 TiC 增强铁基涂层横截面的金相组织照片。从图 1a 可以看出,熔覆层与基体是冶金结合,熔覆层的组织均匀致密,没有气孔、夹渣等缺陷,靠近基体是细小的平面晶和树枝晶。熔覆过程中,氩弧的能量不断从表层输入到基体,使得在冷却时熔覆层内的枝晶逆热流方向垂直于熔合线向外生长。从图 1b 可以看出枝晶组织较细,这是由于氩弧熔覆冷却速度快,熔池中的热对流传递的时间短,大量的晶核来不及长大就凝成固态。

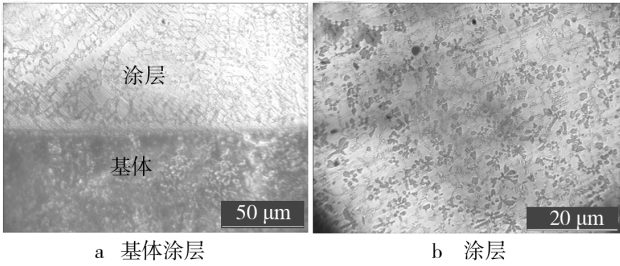


图 1 熔覆层横截面的金相组织

Fig. 1 Microstructure of cross-section of the clad coating

图 2 是熔覆层的 X 射线衍射图谱。分析表明,熔覆层由 α-(Fe, Ni), TiC, Fe₃C, (Fe, Cr)₂₃C₆ 等组成。铁基粉末中除 Fe 外,还含有 C, Cr, Si, B 等元素,这些元素在高温热源作用下形成 α 固溶体,在冷却过程中,非金属原子生成 Fe₂₃C₆, Fe₃(C, B) 等各种化合物。熔覆层中还存在 TiC 颗粒,这是由于 TiC 熔点很高,在熔覆过程中还以增强颗粒的形态存在于熔覆层中。

图 3 分别是熔覆层的 500 倍和 7000 倍扫描电镜照片,灰色基体是 α-(Fe, Ni) 相,黑色颗粒为 TiC。由

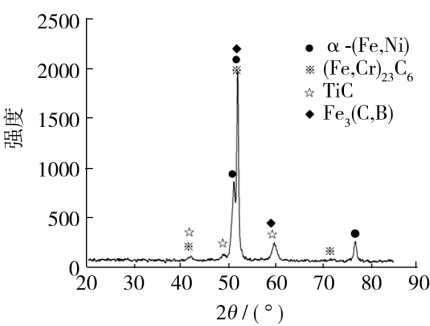


图 2 熔覆层的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD pattern of the clad coating

图 3a 可以看出,复合涂层中 TiC 颗粒呈弥散状分布在基体之中。结合图 1b 可以得出,部分 TiC 颗粒在熔覆过程中发生偏聚,形成的颗粒团主要为棒状、十字状和放射状。这是由于原始 TiC 颗粒的尺寸在 2 μm 左右,有很高的表面能,一旦受到钨极氩弧熔覆热输入的影响,TiC 颗粒向表面能减少的方向偏聚,使得距离较近的 TiC 颗粒发生聚集。

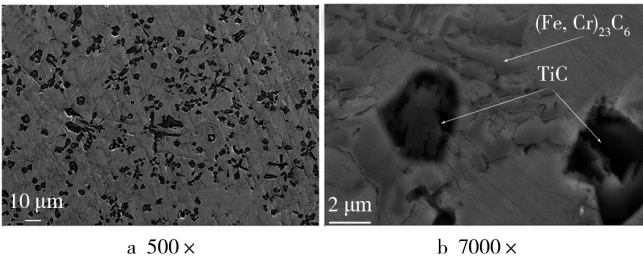


图 3 熔覆层横截面的 SEM 照片

Fig. 3 SEM image of the clad coating

2.2 熔覆层力学性能分析

对熔覆涂层进行硬度测试,图 4 是熔覆复合涂层横截面硬度分布曲线。由图 4 可以看出,基体区的显微硬度明显低于熔覆层显微硬度,熔覆层最高硬度可达 980HV,是基体硬度的 4 倍以上。熔覆层中硬度存在一定的波动,这是因为熔覆层里熔覆了大量 TiC 颗

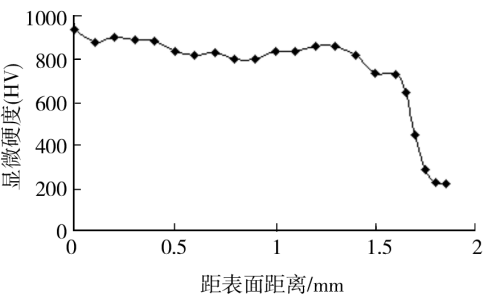


图 4 熔覆涂层的显微硬度分布曲线

粒,测试时,压痕随机打在硬质颗粒或者高硬度三元碳化物 $(Fe,Cr)_{23}C_6$ 上。熔覆层与基体之间有一个硬度梯度下降的过渡区,并且过渡区硬度值比较高,是因为在熔覆过程中,Ni,C,Cr 元素扩散熔入到了基体中。

图 5 为 Q235 基体材料和 TiC/Fe45 复合涂层耐磨性能比较。可以看出,在相同磨损试验条件下,熔覆层的耐磨性相对 Q235 基体提高了近 11 倍。

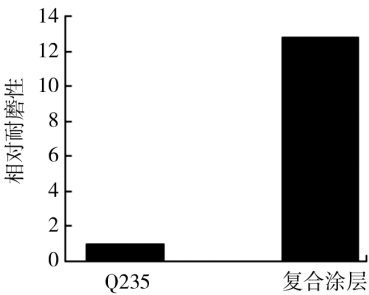


图 5 Q235,TiC/Fe45 复合涂层的相对耐磨性

Fig. 5 Comparison of wear resistance of Q235 steel and composite coating

图 6a 和图 6b 分别为基体材料 Q235 钢及 TiC/Fe45 复合涂层的磨损表面扫描电镜照片。由图 6a 可见,基体材料表面布满了深痕和大量的犁沟,表层材料剥落严重,是典型的粘着磨损;由图 6b 可见,复合涂层磨损表面没有较深的犁沟条纹,只有轻微的细且浅的磨痕。这是由于 TiC 颗粒弥散分布在熔覆层内,磨损过程中降低了摩擦系数,使得相同载荷条件下,熔覆层的磨损量大大减少,在接触应力作用下难以变形,只能轻微擦滑磨损表面。由于冷却过程中的快速凝固,可以得到均匀细小的涂层组织,而且 Fe 基固溶体中固溶了大量的 B,Ni,Si 等元素,赋予了熔覆层优良的强韧性。铁镍粘结相对 TiC 颗粒可以起到支撑和保护作用,保证熔覆层在磨损过程中 TiC 颗粒不会受到外力磨损而轻易脱落。上述原因使得氩弧熔覆 TiC 复合涂层具备了优异的耐磨性能。

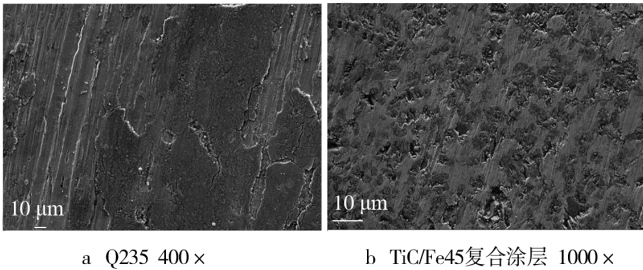


图 6 Q235 和复合涂层磨损表面扫描电镜

Fig. 6 SEM images of worn surface of Q235 steel and composite coating

3 结论

1) 以 TiC 和 Fe45 粉末为原料,采用氩弧熔覆技术在 Q235 钢基体表面制备出了 TiC 颗粒增强的 Fe 基金属复合涂层。

2) TiC 颗粒在熔覆层内发生聚集生长的现象,颗粒形状主要为棒状、十字状和放射状。

3) 较基体 Q235 钢,熔覆层的硬度提高了 4 倍,耐磨性提高了近 11 倍。

参考文献

- [1] WANG K L, ZHANG Q B, SUN M L, et al. Microstructure and Corrosion Resistance of Laser Cladded Coatings with Rare Earth Elements[J]. Corrosion Science, 2001(43): 255—267.
- [2] 王彬, 苏艳. 铝合金大气腐蚀行为及其防腐措施研究进展[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 64—68.
WANG Bin, SU Yan. Research Progress in Atmospheric Corrosion Behavior and Anticorrosion Measures of Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 64—68.
- [3] 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.
ZHANG Yan, ZHANG Hang, LIU Zhao-hui, et al. Development Status of Thermal Spray Technology and Thermal Spray Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 59—62.
- [4] 高俊国, 陆峰, 汤智慧, 等. 喷涂距离对超音速火焰喷涂 CoCrAlYTa 涂层组织性能的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 1—4.
GAO Jun-guo, LU Feng, TANG Zhi-hui. The Influence of Spraying Distance on Structure and Properties of CoCrAlYTa Coating Prepared by HVOF[J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 1—4.
- [5] 邱宇. 激光熔覆中不同激光热源对熔池表面形状的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(2): 40—43.
QIU Yu. The Effect of Different Heat Source in Laser Cladding on Surface Configuration of Melting Pool[J]. Surface Technology, 2013, 42(2): 40—43.
- [6] 王永东, 刘兴, 朱艳, 等. Q235 钢表面氩弧熔覆 Mo-Si 复合涂层组织和性能分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(5): 42—44.
WANG Yong-dong, LIU Xing, ZHU Yan, et al. Analysis on Property and Microstructure of Mo-Si Composite Coating Deposited by Argon Shielded Arc on Q235 Steel Surface[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2009, 30(5): 42—44.
- [7] 郭国林, 张娜, 王俊杰, 等. Q235 钢氩弧熔覆铁基金属涂层的耐磨性研究[J]. 铸造技术, 2012(6): 41—43.
GUO Guo-lin, ZHANG Na, WANG Jun-jie, et al. Investigation on Wear Resistance of Fe-based Alloy Coating Prepared by Argon Arc Cladding on Q235[J]. Foundry Technology, 2012(6): 41—43.
- [8] 刘喜明, 连建设, 赵宇. 氩弧熔覆层的强化和耐磨性[J]. 机械工程材料, 2000(3): 16—19.
LIU Xi-ming, LIAN Jian-she, ZHAO Yu. The Strengthening and Wear Resistance of Argon Arc Cladding Layer[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2000(3): 16—19.
- [9] 杨皓宇, 杜晓东, 王建峰. 氩弧熔覆制备 WC 颗粒增强复合涂层及其组织性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(9): 856—858.
YANG Hao-yu, DU Xiao-dong, WANG Jian-feng. Microstructure and Properties of WC Particle Reinforced Steel Matrix Composites Prepared by Gas Tungsten Arc Welding[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30(9): 856—858.
- [10] 唐琳琳, 张元彬, 罗辉. Fe 基氩弧熔敷层的组织及性能[J]. 焊接技术, 2010(10): 14—16.
TANG Lin-lin, ZHANG Yuan-bin, LUO Hui. Microstructure and Properties of Fe-based Cladding Layer by Gas Tungsten Arc Welding[J]. Welding Technology, 2010(10): 14—16.
- [11] 王永东, 李柏茹, 王淑花, 等. 氩弧熔覆原位自生 NbC 增强镍基复合涂层分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(3): 206—208.
WANG Yong-dong, LI Bai-ru, WANG Shu-hua, et al. Analysis of in-situ NbC Reinforced Ni-based Composite Coating by Argon Arc Cladding[J]. Special Casting & Nonferrous Alloy, 2011, 31(3): 206—208.
- [12] 马壮, 李剑, 张璐, 等. 氩弧熔覆技术特点及研究现状[J]. 热加工工艺, 2012, 41(10): 162—165.
MA Zhuang, LI Jian, ZHANG Lu, et al. Characteristics and Research Status of Argon Arc Cladding Technology[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(10): 162—165.
- [13] 刘宗德, 刘辉, 侯世香. 原位反应合成 Mo-Ni-B 系三元硼化物熔覆层的研究[J]. 金属热处理, 2009, 34(7): 71—74.
LIU Zong-de, LIU Hui, HOU Shi-xiang. In-situ Synthesis of Mo-Ni-B Ternary Boride Cladding[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(7): 71—74.
- [14] 张传明, 尚丽娟, 胡南昌. 氩弧熔覆镍基自熔合金的工艺研究[J]. 焊接技术, 2006(1): 37—40.

- [6] 高阳,代明江,向兴华,等. AZ91D 镁合金磷酸盐转化膜的制备及性能[J]. 电镀与涂饰,2010,29(10):32—36.
GAO Yang, DAI Ming-jiang, XIANG Xing-hua, et al. Preparation and Properties of AZ91D Magnesium Phosphate Conversion Coating[J]. Electroplating and Finishing, 2010, 29(10):32—36.
- [7] 高福勇,赵明,李婷婷,等. AZ31 镁合金化学转化膜形成的原位成像研究[J]. 表面技术,2012,41(4):118—121.
GAO Fu-yong, ZHAO Ming, LI Ting-ting, et al. AZ31 Magnesium Alloy Chemical Conversion Coating Formed in situ Imaging Studies[J]. Surface Technology, 2012, 41(4):118—121.
- [8] 金华兰,杨湘杰. AZ91D 镁合金磷酸盐化学转化膜的组织及性能[J]. 特种铸造及有色合金,2009,29(5):441—443.
JIN Hua-lan, YANG Xiang-jie. Microstructure and Properties of AZ91D Magnesium Phosphate Chemical Conversion Coating[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2009, 29(5):441—443.
- [9] BIKULCIUS G, BUROKAS V, MARTUSIENE A, et al. Effects of Magnetic Fields on the Phosphating Process[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 172:139—143.
- [10] 苗斌,贾卫平,吴蒙华,等. 磁场作用下电沉积镍层织构及表面形貌分析[J]. 表面技术,2012,41(5):30—33.
MIAO Bin, JIA Wei-ping, WU Meng-hua, et al. Magnetic Field under the Action of Nickel Electrodeposition Layer Texture and Surface Morphology Analysis[J]. Surface Technology, 2012, 41(5):30—33.
- [11] ZHOU Wan-qiu, SHAN Da-yong, HAN En-hou, et al. Structure and Formation Mechanism of Phosphate Conversion Coating on Die-cast AZ91D Magnesium Alloy[J]. Corrosion Science, 2008, 50:329—337.
- [12] KWO Z C. Conversion-coating Treatment for Magnesium Alloys by a Permanganate-Phosphate Solution[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 80:191—200.
- [13] 胡九龙,杭凌侠,周顺. PECVD 技术制备低折射率光学薄膜[J]. 表面技术,2013,42(2):95—97.
HU Jiu-long, HANG Ling-xia, ZHOU Shun. PECVD Technology Preparation of Low Refractive Index of Optical Thin Film Technique[J]. Surface Technology, 2013, 42(2):95—97.
- [14] 余京松,马青松,葛曼珍,等. 氮化硅薄膜的制备技术[J]. 中国陶瓷工业,1999,6(1):20—22.
YU Jing-song, MA Qing-song, GE Man-zhen, et al. Preparation Methods of Silicon Nitride Thin Films[J]. China Ceramic Industry, 1999, 6(1):20—22.
- [15] ISHIZAKI T, HIEDA J, SAITO N, et al. Corrosion Resistance and Chemical Stability of Super-hydrophobic Film Deposited on Magnesium Alloy AZ31 by Microwave Plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition[J]. Electrochemical Acta, 2010, 55:7094—7101.
- [16] 刘志平,徐征,刘金虎,等. PECVD 沉积氮化硅的工艺研究[J]. 太阳能学报,2011,32(1):54—59.
LIU Zhi-ping, XU Zheng, LIU Jin-hu, et al. Research on the Process of PECVD Deposit Silicon Nitride[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(1):54—59.
- [17] 肖葵,董超芳,李晓刚,等. AZ91D 镁合金电偶腐蚀的扫描 Kelvin 探针研究[J]. 稀有金属材料与工程,2011,40(9):1589—1593.
XIAO Kui, DONG Chao-fang, LI Xiao-gang, et al. Study on Galvanic Corrosion of AZ91D Magnesium Alloys Scanning Kelvin Probe[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(9):1589—1593.
- [18] 安英辉,董超芳,肖葵,等. Kelvin 探针测量技术在电化学研究中的应用进展[J]. 腐蚀科学与防护技术,2008,20(6):440—444.
AN Ying-hui, DONG Chao-fang, XIAO Kui, et al. Kelvin Probe Measurement Technology in the Application of Electrochemical Research Progress[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2008, 20(6):440—444.
- [19] ROHWERDER M, HORNUNG E, STRATMANN M. Microscopic Aspect of Electrochemical Delamination: an SKPFM Study[J]. Electrochemical Acta, 2003, 48:1235—1243.
- [20] 周强,谢中,黄桂芳,等. 化学镀层的扫描开尔文力显微镜(SKFM)研究[J]. 电子显微学报,2005,24(3):192—195.
ZHOU Qiang, XIE Zhong, HUANG Gui-fang, et al. Journal of Chinese Electron Microscopy Society[J]. Academic Journal of Electron Microscopy, 2005, 24(3):192—195.

(上接第54页)

- ZHANG Chuan-ming, SHANG Li-juan, HU Nan-chang. Investigation on Argon Arc Cladding Technology of Ni-based Self-fluxing Alloy[J]. Welding Technology, 2006(1):37—40.
- [15] 李炳,王顺兴,李玮. 氩弧熔覆工艺参数对 Ni60+WC 系熔覆层组织和耐磨性的影响[J]. 热加工工艺,2004(11):50—51.
LI Bing, WANG Shun-xing, LI Wei. Effect of Argon Arc Cladding Means on Microstructure and Wear Properties of Argon Arc Cladded Ni60+WC Alloy Coating[J]. Hot Working Technology, 2004(11):50—51.
- [16] 王旭,温家伶,高芹. 氩弧熔覆 Ni-SiC 熔覆层组织与性能研究[J]. 材料热处理技术,2009(8):90—91.
WANG Xu, WEN Jia-ling, GAO Qin. Study on Microstructure and Performance of Ni-SiC Cladding by Argon Arc Cladding[J]. Material & Heat Treatment, 2009(8):90—91.