

氩气保护下碳化钨对镍基合金熔覆层组织及耐磨性的影响

杨勇^{1,2}, 赵靖宇¹, 李静¹, 杨景凤¹, 赵彬¹, 孙玉福¹

(1. 郑州大学 材料科学与工程学院, 郑州 450002;
2. 许昌烟草机械有限责任公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 目的 改善 Q235 钢板的耐磨性, 以取代 65Mn 在振动筛筛板中的应用。方法 采用电阻丝加热非真空熔覆技术, 在氩气保护条件下于 Q235 钢表面制备碳化钨/镍基合金复合熔覆层。通过 SEM 和 XRD 观察分析熔覆层与基体的结合方式、碳化钨分布、熔覆层组织及相组成, 通过硬度测试及磨损试验, 分析碳化钨对熔覆层耐磨性的影响。结果 熔覆层与钢基体达到冶金结合。熔覆层主要由奥氏体、碳化钨、碳化物及硼碳复合化合物等相组成, 碳化钨弥散分布其中。当碳化钨用量为熔覆粉末总质量的 35% 时, 熔覆层硬度为 47.3HRC, 磨损率为 0.08 mg/m, 约是钢基体耐磨性的 5 倍, 65Mn 耐磨性的 4 倍。结论 采用氩气保护制备的碳化钨熔覆层与基体结合良好, 提高了钢基体的耐磨性。

关键词: 氩气保护; 碳化钨; 熔覆层; 耐磨性

中图分类号: TG174.445 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2015)02-0055-05
DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.02.011

Effect of Tungsten Carbide on the Microstructure and Wear Resistance of the Nickel-based Alloy Cladding Layer under the Protection of Argon

YANG Yong^{1,2}, ZHAO Jing-yu¹, LI Jing¹, YANG Jing-feng¹, ZHAO Bin¹, SUN Yu-fu¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;
2. Xuchang Tobacco Machinery Company Limited, Xuchang 461000, China)

ABSTRACT: **Objective** To improve the wear resistance of Q235 steel sheet, and to replace the application of 65Mn in the sieve plate of shaker screen. **Methods** Tungsten carbide/Nickle-based alloy composite cladding layer was prepared on the surface of Q235 steel plate under the protection of argon gas by resistance wire heating non-vacuum cladding technique. SEM and XRD were used to observe and analyze the combination mode of the cladding layer and the substrate, tungsten carbide distribution, the organization of cladding layer and the phase composition, meanwhile, the Rockwell hardness tester and wear tester were used to test the rock hardness and the wear rate of cladding layer, and analyze the effect of tungsten carbide on the wear resistance of the cladding layer. **Results** The steel substrate and the cladding layer achieved metallurgical bonding, and the microstructure of the cladding layer mainly consisted of binding phase, tungsten carbide, carbide and boron carbon composite compounds, where the distribution

收稿日期: 2014-08-30; 修订日期: 2014-09-21
Received : 2014-08-30; Revised: 2014-09-21
作者简介: 杨勇(1986—), 男, 湖南人, 硕士, 主要研究铸造合金。
Biography: YANG Yong (1986—), Male, from Hunan, Master, Research focus: casting alloy.
通讯作者: 孙玉福(1958—), 男, 教授, 主要研究铸造合金。
Corresponding author: SUN Yu-fu(1958—), Male, Professor, Research focus: casting alloy.

of tungsten carbide was well-proportioned in the cladding layer. With 35% WC content in the cladding layer alloy powder, its rock hardness reached 47.3HRC and the wear rate was 0.08 mg/m, which was 5 folds higher than the wear resistance of the steel substrate and 4 folds higher than that of 65Mn. **Conclusion** The tungsten carbide composite cladding layer prepared with argon gas protection was well bonded with the steel substrate and improved the wear resistance of the steel substrate.

KEY WORDS: argon gas protection; tungsten carbide; cladding layer; wear resistance

为了减少能源浪费,实现资源重复利用,我国加强了机械零部件报废品的再制造^[1]。再制造是将部分报废的零部件通过专业修复,使其达到,甚至超过新产品性能。再制造技术主要包括激光熔覆、热喷涂、堆焊、感应熔覆、真空熔覆等修复技术,虽然在修复和提高零部件耐磨损、耐腐蚀和抗氧化等性能方面广泛应用^[2-8],但还具有一定的局限性^[9-11]。文中在考虑生产成本的前提下,选择电阻丝加热非真空熔覆技术,研究硬质相含量对熔覆层组织、结合性能和耐磨性能的影响规律,拟获得具有优良性能的熔覆层。

1 实验

熔覆材料为镍基自熔性合金粉末和硬质相,硬质相选择碳化钨。碳化钨具有高熔点、高强度、高硬度、高耐磨性、高弹性模量以及良好的化学稳定性等优异性能,在提高涂层硬度和耐磨性方面具有显著的优势^[12]。镍基自熔性合金粉末的成分(以质量分数计)如下: C 0.3% ~ 0.5%, Si 3.4% ~ 4.5%, B 2.5% ~ 3.0%, Cr 9.0% ~ 12.0%, Fe 21.0% ~ 23.0%, Ni 余量。

将镍基自熔性合金粉末分别与 25%, 30%, 35%, 40% (均为占粉末总质量的百分比)碳化钨混合均匀,然后加入一定量稀释的粘结剂(水玻璃)。将混合物涂覆在 20 mm×20 mm×15 mm 的 Q235 钢板上,干燥后放入氩气保护炉中,加热至 1230 °C,保温 10 min,随炉冷却至室温,取出。熔覆层表面平整,无流淌现象。

将熔覆试样线切割成 10 mm×10 mm×15 mm, 10 mm×10 mm×2 mm, $\phi 5$ mm×17 mm 等尺寸的检测试样,进行组织性能检测。采用 Philips-quanta-2000 型扫描电子显微镜进行微观组织分析,采用 HRS-150 型数显洛氏硬度计测量熔覆层洛氏硬度;采用 ML-100 销盘型回转式磨料磨损试验机进行磨损试验^[13]。

2 结果与分析

2.1 过渡层分析

含 35% 碳化钨的试样在 100 倍扫描电子显微镜

下的截面形貌如图 1 所示。可见钢基体和熔覆层之间存在过渡层,过渡层组织致密,颜色比较均匀,呈灰色,其宽度在 150 ~ 250 μm 之间。过渡层是在熔覆过程中,熔覆层与钢基体之间发生元素互扩散而形成的。

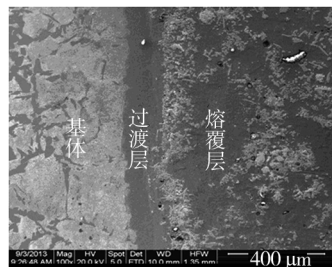


图 1 试样截面形貌

Fig. 1 Cross-section morphology of samples

过渡层及其两侧的线扫描结果如图 2 所示。由图 2 可以看出,过渡层内及两侧的 C, B 含量比较接近,说明在熔覆过程中,熔覆层内的 C 和 B 元素发生比较充分的扩散,并通过过渡层进入基体。这是因为 C, B 原子半径小,高温时活性高,扩散能力强,易于从熔覆层向钢基体中扩散。Cr, Ni, W, Si, Fe 等元素也发生类似的扩散,但是由于这些元素的原子半径远大于 C 和 B 元素,扩散能力较弱,扩散不充分,因此在过渡层两侧形成了较高的浓度差。Cr 和 W 无明显扩散,这是因为 Cr, W 原子半径大,在熔覆层中主要以碳化物的形式存在,稳定性好,扩散阻力大,不易发生扩散。基体与熔覆层发生明显元素互扩散说明达到冶金结合,有利于过渡层组织均匀化和结合强度的提高^[7]。

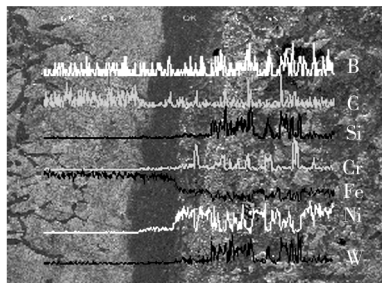


图 2 过渡层线扫描分析

Fig. 2 The line scanning analysis of the transition layer

2.2 碳化钨分布

在 50 倍扫描电子显微镜下,采用背散射方式对

含 35% 碳化钨的试样进行观察,分析熔覆层中碳化钨的分布情况,结果如图 3 所示。图 3 中左边黑色区域为钢基体,右边黑色区域为熔覆层的边界,中间为熔覆层。熔覆层由白亮颗粒及颗粒之间的黑色部分组成,白亮颗粒为碳化钨,黑色部分为粘结相。在熔覆层中,碳化钨颗粒大小不一,但分布弥散且无偏聚现象。

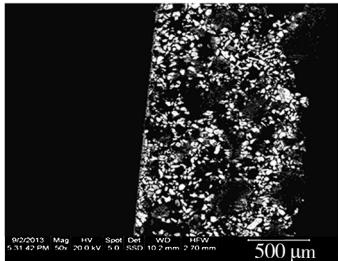


图 3 碳化钨的分布

Fig. 3 The distribution of tungsten carbide

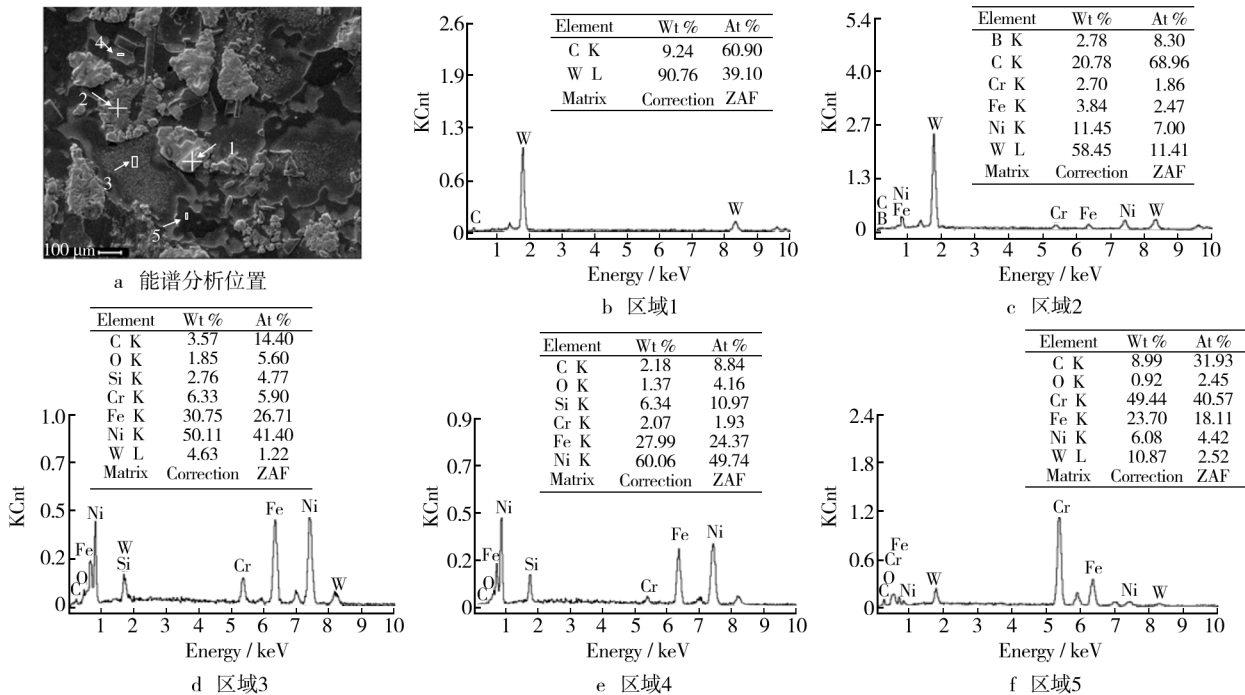


图 4 组织能谱分析

Fig. 4 The energy spectrum analysis of the organization

为确定熔覆层中的相组成,对熔覆层进行 XRD 分析,结果见图 5。由图 5 可知,熔覆层主要由奥氏体、碳化钨、碳化物及硼碳复合化合物组成。碳化钨主要包括 W_2C 和 WC 两种形式。碳化物存在 $M_{23}C_6$ 和 M_7C_3 两种形式,其中 $M_{23}C_6$ 主要是由镍基自熔性合金粉末中的 B,Fe,C 和碳化钨分解出的部分 C 形成的复合碳化物 $Fe_{23}(C,B)_6$, M_7C_3 主要是由 Cr,Fe,C 形成的碳化物 $(Cr,Fe)_7C_3$ 。熔覆层中的基体相主要是由 Ni 或 Ni,Fe 为主体形成的 $Fe_{0.64}Ni_{0.36}$, $Ni_{2.9}Cr_{0.7}Fe_{0.36}$ 等奥氏体相,有少量 Si 等其他元素固溶其中。

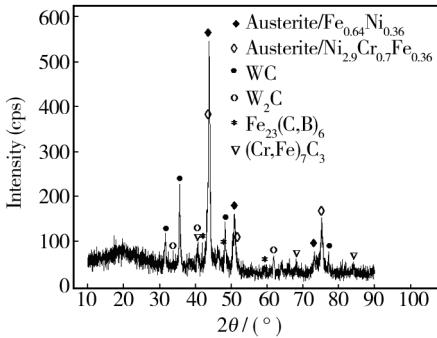


图 5 熔覆层 XRD 图谱

Fig. 5 The X-ray diffraction pattern of the cladding layer

2.4 熔覆层性能分析

2.4.1 碳化钨对硬度的影响

在各熔覆试样表面均匀选取 5 个点(点与点之间保持一定距离),测试硬度值后取平均值。各试样的硬度测试值见表 1,为作比较,对钢基体及 65Mn 的硬度值也进行了测量,一并列于表 1。

表 1 各试样的硬度值

Tab.1 The Rockwell hardness of the samples

试样	硬度(HRC)	试样	硬度(HRC)
钢基体	15.00	含 30% 碳化钨	46.06
65Mn	38.56	含 35% 碳化钨	47.30
含 25% 碳化钨	44.50	含 40% 碳化钨	48.62

由表 1 数据可见,熔覆层硬度是钢基体的 3 倍,含 35% 碳化钨的熔覆层比 65Mn 高出 8.74HRC。熔覆层由碳化钨和镍基自熔性合金组成,碳化钨是硬质相,有利于提高熔覆层的硬度;镍基自熔性合金中的 Fe,Cr,C 和 B 形成的高硬度碳化物(以块状或板条状形式存在,硬度高)以及 Si,Cr 元素对熔覆层基体起到固溶强化作用。此外还可以看出,随着碳化钨含量的增加,熔覆层的硬度不断提高。

2.4.2 碳化钨对耐磨性的影响

磨损试验的加载压力为 15 N。对各熔覆试样、65Mn 及钢基体进行磨损测试,每组 3 个 $\phi 5\text{ mm}\times 17\text{ mm}$ 的圆柱形试棒,实验后计算其平均磨损率,结果见表 2。由表 2 数据可知,4 种熔覆层的平均磨损率均小于 0.13 mg/m ,远低于钢基体和 65Mn。这是因为熔覆后,熔覆层由奥氏体基体、碳化钨、碳化物组成,其中碳化钨和碳化物弥散分布在基体中,提高了熔覆层的硬度,在磨损过程中对熔覆层基体起保护作用,增强了熔覆层抵抗磨料破坏的能力,从而使熔覆层具有良好的耐磨性。

表 2 各试样的磨损率

Tab.2 The wear rate of the samples

试样	磨损率/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-1})$
钢基体	0.508
65Mn	0.394
含 25% 碳化钨	0.108
含 30% 碳化钨	0.100
含 35% 碳化钨	0.080
含 40% 碳化钨	0.126

随着熔覆层中碳化钨含量的增加,熔覆层磨损率先减小,后增大。熔覆层耐磨性的好坏取决于硬质相的间距及基体相对硬质颗粒的固定作用。基体相将硬质颗粒均匀固定,减少磨损过程中硬质相的脱落;硬质颗粒对基体相起保护作用,硬质颗粒之间的距离越小,保护作用越强。同时,硬质颗粒的大小、形状和弥散分布程度对熔覆层在磨损过程中的裂纹产生、长大具有重要影响^[14]。当碳化钨含量低于 35% 时,随着碳化钨含量的增加,熔覆层中硬质颗粒数量增多,颗粒间的距离减小,对熔覆层粘结相的保护作用增强,从而能够减少基体相的磨损脱落,提高熔覆层的耐磨性。当碳化钨含量达到 40% 时,含量过高,虽然提高了熔覆层的硬度,但同时削弱了基体相对硬质相的固定作用,在磨损过程中,硬质颗粒极易脱落,因此熔覆层的耐磨性反而降低。

各熔覆试样端面磨损形貌如图 6 所示。由图 6 可知,各试样经过磨损后,均出现了少量的犁沟和硬质颗粒剥落。随着熔覆层中碳化钨含量的增加,犁沟减少并变浅,当碳化钨含量为 35% 时,犁沟最少,且硬质颗粒脱落少。分析原因如下:碳化钨含量增加,熔覆层表面硬度增大,熔覆层中的硬质颗粒含量提高,硬质颗粒之间的距离小,对粘结相保护作用增强。在磨损试验中,受到压力的磨料与硬度高的硬质相碰撞,难以形成犁沟,已形成的犁沟则在硬质相处中断,从而减轻了熔覆层在磨损过程中的塑性变形,提高了熔覆层的耐磨性。当碳化钨含量为 40% 时,熔覆层

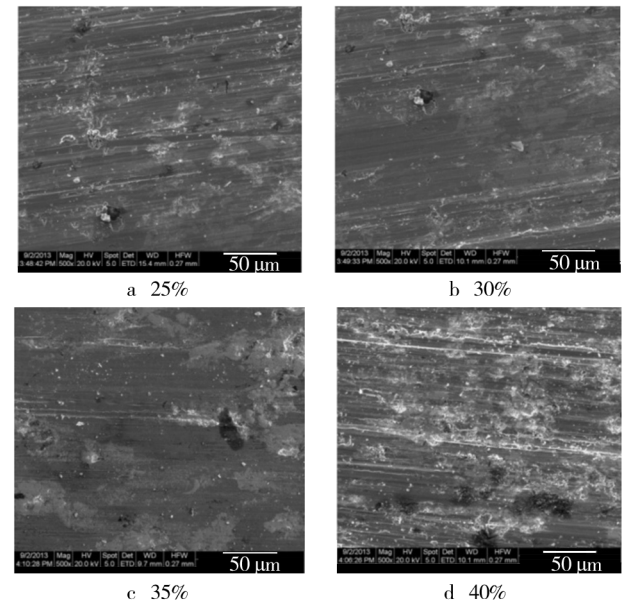


图 6 不同碳化钨含量熔覆层的磨损形貌

Fig.6 The wear morphology of the cladding layer with different contents of tungsten carbide

中的硬质相含量最高,熔覆层表面硬度高,但镍基自熔性合金基体相比比例相对较少,对硬质相的固定作用降低,熔覆层内部疏松^[15],在磨料磨损试验中,硬质颗粒受到磨料的冲击后,容易从熔覆层中剥落。

3 结论

1) 熔覆层表面平整,碳化钨弥散分布在熔覆层中。熔覆层与钢基体之间发生了明显的相互扩散,形成了宽150~250 μm的过渡层,已达到冶金结合。

2) 熔覆层硬度随着碳化钨含量的增加而增大,当碳化钨含量为40%时,硬度值达到48.6HRC,远高于钢基体,比65Mn高10.06HRC。

3) 在磨损试验中,熔覆层的平均磨损率均小于0.13 mg/m。随着熔覆层中碳化钨含量的增加,磨损率呈现先减小、后增加的规律。碳化钨含量在35%时耐磨性最好,磨损率为0.08 mg/m,不到钢基体磨损率的1/5,耐磨性是65Mn的4倍。

参考文献

- [1] 杜彦斌,刘飞. 退役机床再制造评价与再设计方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
DU Yan-bin, LIU Fei. Study on Evaluation and Redesign Methods of Machine Tool Remanufacturing[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [2] 孙希泰. 材料表面强化技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
SUN Xi-tai. Material Surface Strengthening Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [3] 张增志,韩桂泉,付跃文,等. 高频感应熔涂、激光熔覆与氧乙炔喷焊 GNi-WC25 涂层的性能研究[J]. 材料工程, 2003(2): 3—6.
ZHANG Zeng-zhi, HAN Gui-quan, FU Yue-wen, et al. A Study on Properties of GNi-WC25 Coating by High Frequency Induction Cladding, Laser Cladding and Oxygen-acetylene Spraying-fusing[J]. Journal of Materials Engineering, 2003(2): 3—6.
- [4] XIE Guo-zhi, LI Xiao-yan, WANG Ke-yu, et al. Corrosion Characteristics of Plasma-sprayed Ni-coated WC Coatings Comparison with Different Post-treatment [J]. Corrosion Science, 2007, 49(2): 662—671.
- [5] ZHOU Sheng-feng, HUANG Yong-jun, ZENG Xiao-yan. A Study of Ni-based WC Composite Coatings by Laser Induction Hybrid Rapid Cladding with Elliptical Spot[J]. Applied Surface Science, 2008, 254(10): 3110—3119.
- [6] RAJA K S, NAMJOSHI S A, MISRA M. Improved Corrosion Resistance of Ni-22Cr-13Mo-4W Alloy by Surface Nanocrystallization[J]. Materials Letters, 2005, 59: 570—574.
- [7] SHRESTHA S, HODGKIESS T, NEVILLE A. Erosion-corrosion Behaviour of High-velocity Oxy-fuel Ni-Cr-Mo-Si-B Coatings under High-velocity Seawater Jet Impingement [J]. Wear, 2005, 259: 208—218.
- [8] 王慧萍,戴建强,张光钧,等. 喷涂与激光重熔技术制备镍基纳米钴包碳化物复合涂层的研究[J]. 热处理, 2007, 22(3): 24—28.
WANG Hui-ping, DAI Jian-qiang, ZHANG Guang-jun, et al. Study on Nickel-based Nano-WC/Co Composite Coating Prepared by Spraying and Laser Cladding[J]. Heat Treatment, 2007, 22(3): 24—28.
- [9] 贺定勇,许静,马然,等. 高频感应熔覆 WC 增强 Ni60 合金涂层性能研究[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(3): 138—141.
HE Ding-yong, XU Jing, MA Ran, et al. Properties of WC Reinforced Ni60 Coating Prepared by High Frequency Induction Cladding [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(3): 138—141.
- [10] 张忠礼,丁勇. 热喷涂涂层与电镀层的结合与界面[J]. 沈阳工业大学学报, 2011(4): 363—364.
ZHANG Zhong-li, DING Yong. Bonding and Interface between Thermal Sprayed Coating and Electroplated Layer [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2011(4): 363—364.
- [11] 魏鑫. 45 钢表面感应熔覆 Ni60 涂层及 WC-Ni60 复合涂层的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010.
WEI Xin. Study on the Complex Coating of Ni60 and WC-Ni60 on the 45 Steel Surface by Induction Cladding[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [12] 李文虎. 氩弧熔覆钢表面 WC/NiCo 硬质覆层的组织与性能[J]. 表面技术, 2011, 40(5): 35—37.
LI Wen-hu. Microstructure and Properties of WC/NiCo Cladding on Steel Matrix by Argon Arc Cladding [J]. Surface Technology, 2011, 40(5): 35—37.
- [13] 杨会龙,孙玉福,赵靖宇,等. 截齿表面感应熔覆 WC 增强 Fe 基熔覆层的研究[J]. 表面技术, 2011, 40(4): 26—29.
YANG Hui-long, SUN Yu-fu, ZHAO Jing-yu, et al. Study on the Fe-based Coating Reinforced by WC on Cutting Pick Surface Formed by High Frequency Induction Cladding [J]. Surface Technology, 2011, 40(4): 26—29.
- [14] 黄新波,贾建援,林化春,等. 钴基合金-碳化钨复合涂层耐磨抗蚀性能的研究[J]. 材料工程, 2004(8): 36—38.

- lia, 2002, 50: 4603—4616.
- [6] 田峰, 杨辉. 40Cr 钢表面高能喷丸纳米化及其耐磨性能[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 52—54.
TIAN Feng, YANG Hui. Experimental Study on Wear Behavior of Nano-crystallization Surface of 40Cr[J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 52—54.
- [7] ZHANG Tao, WANG Dong-po, WANG Ying, et al. Surface Alloying Method of Ultrasonic Shot Peening on Iron Surface[J]. Applied Surface Science, 2013, 265(5): 671—676.
- [8] 张聪惠, 何晓梅, 杨占林, 等. 退火对表面机械研磨处理纳米化工业纯钛性能的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(4): 69—73.
ZHANG Cong-hui, HE Xiao-mei, YANG Zhan-lin, et al. Effect of Annealing on Property of CP-Ti Nanocrystallized by Surface Mechanical Attrition Treatment[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(4): 69—73.
- [9] CHEN A Y, JIA Y Q, PAN D, et al. Reinforcement of Laser-welded Stainless Steels by Surface Mechanical Attrition Treatment[J]. Materials Science and Engineering, 2013, 571(5): 161—166.
- [10] 李玉荣, 林万明, 卫英慧, 等. 表面机械研磨处理对 Cu-10wt% Ni 合金组织及性能的影响[J]. 功能材料, 2011, 45(S5): 766—769.
LI Yu-rong, LIN Wan-ming, WEI Ying-hui, et al. Characteristic and Properties of Nanocrystalline Surface Layer in Cu-10wt% Ni Alloy Induced by Surface Mechanical Attrition Treatment[J]. Functional Materials, 2011, 45(S5): 766—769.
- [11] 邹途祥, 卫英慧, 侯利锋, 等. 纯铝表面机械研磨纳米化后的显微组织和硬度[J]. 机械工程材料, 2009, 33(1): 40—43.
ZOU Tu-xiang, WEI Ying-hui, HOU Li-feng, et al. Microstructure and Hardness of Pure Aluminum Surface Nanocrystallization after SMAT[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2009, 33(1): 40—43.
- [12] KLUG H P, ALEXANDER L E. X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials[M]. 2nd Edition. New York: Wiley, 1974.
- [13] 唐锋林. 表面纳米化处理对铝镁合金性能的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2008.
TANG Feng-lin. Al Alloy and Mg Alloy's Performance Influenced by Surface Nano-technology[D]. Nanning: Guangxi University, 2008.
- [14] 田志宏, 张秀华, 田志广. X 射线衍射技术在材料分析中的应用[J]. 工程与试验, 2009, 49(3): 40—42.
TIAN Zhi-hong, ZHANG Xiu-hua, TIAN Zhi-guang. Application of X-ray Diffraction Technology in Material Analysis[J]. Engineering & Test, 2009, 49(3): 40—42.
- [15] 侯利锋, 卫英慧, 刘宝胜, 等. AZ31B 镁合金表面纳米化处理后的显微结构特征[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(S): 214—217.
HOU Li-feng, WEI Ying-hui, LIU Bao-sheng, et al. Microstructure and Characterization of Surface Nanocrystallization of AZ31B Magnesium Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(S): 214—217.
- [16] 徐开东. 镁合金高能撞击表面纳米化与激光合金化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
XU Kai-dong. Study on Magnesium Alloy of Self-surface nanocrystallization Induced by High-energy Bombarding and Laser Alloying[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [17] 余琨, 黎文献, 王日初. 镁合金塑性变形机制[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(7): 1081—1086.
YU Kun, LI Wen-xian, WANG Ri-chu. Plastic Deformation Mechanism of Magnesium Alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(7): 1081—1086.
- [18] SUN H Q, SHI Y N, ZHANG M X, et al. Plastic Strain-induced Grain Refinement in the Nanometer Scale in a Mg Alloy[J]. Acta Materialia, 2007, 55(3): 975—982.
- [19] 刘宝胜. 镁合金表面纳米化显微结构和晶粒细化机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
LIU Bao-sheng. Microstructure and Grain Refinement Mechanism of Surface Nanostructure Magnesium Alloys[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007.

(上接第 59 页)

- HUANG Xin-bo, JIA Jian-yuan, LIN Hua-chun, et al. Corrosion Resistance Wear Resistance of VFS Cobalt Based Alloy-Tungsten Carbide Composite Coating[J]. Journal of Materials Engineering, 2004(8): 36—38.
- [15] 贺定勇, 许静, 马然, 等. 微米 WC 增强 Ni60 合金高频感应熔覆涂层耐磨性能[J]. 焊接学报, 2008, 29(8): 56—60.
- HE Ding-yong, XU Jing, MA Ran, et al. Wear Resistance Properties of Micron-WC Reinforced Ni60 Coating by High Frequency Induction Cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(8): 56—60.