

35CrMnSi 表面氩弧熔覆原位自生 TiC 复合涂层的组织及耐磨性

丁天, 孟君晟, 乔盛楠, 吕东亮, 宋永平, 李阳

(黑龙江科技大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150022)

摘要: 目的 提高截齿的耐磨性, 延长其使用寿命。方法 利用氩弧熔覆技术在35CrMnSi钢表面制备TiC增强镍基复合涂层, 分析涂层的显微组织和物相组成, 测试涂层在室温下的显微硬度和耐磨性, 并分析磨损机制。结果 氩弧熔覆涂层的显微组织致密均匀, 涂层与基体呈冶金结合, 主要由TiC, γ -Ni, $M_{23}C_6$ 等物相组成。TiC颗粒呈块状, 尺寸为 $1\sim2\mu m$, 弥散分布在涂层中。涂层硬度和耐磨性与(Ti+C)含量有关, 熔覆粉末中(Ti+C)质量分数为20%时, 涂层最高硬度可达1190HV, 耐磨性达到基体的7.5倍。**结论** 熔覆涂层的显微硬度较基体有显著提高。在室温冲击载荷作用下, 熔覆涂层的主要磨损机制为显微切削磨损, 可大大提高基体材料的耐磨性能。

关键词: 35CrMnSi; 氩弧熔覆; TiC; 显微组织; 耐磨性

中图分类号: TG174.44 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2014)05-0095-05

Microstructure and Wear Resistance of TiC Composite Coating in situ Synthesized on 35CrMnSi Steel by Argon Arc Cladding

DING Tian, MENG Jun-sheng, QIAO Sheng-nan, LYU Dong-liang, SONG Yong-ping, LI Yang

(Department of Material Science and Technology, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

ABSTRACT: **Objective** To improve the wear resistance of cutting tooth and to prolong its service life. **Methods** The TiC enhanced nickel-based composite coating was prepared on the surface of 35CrMnSi steel by argon arc cladding technique. The microstructure of the coating was analyzed by OM, SEM and XRD. Microhardness and wear resistance at room temperature of the composite coating were examined by means of microhardness testing and impact abrasion resistance testing, respectively. **Results** The compact microstructure was obtained in the composite coating, and good metallurgical bonding could be obtained between the 35CrMnSi steel and cladding coating, with the main phases of TiC, γ -Ni and $M_{23}C_6$. The majority of TiC was blocky. The TiC particles was about $1\sim2\mu m$ in size and the particles were dispersed in the coatings. The hardness and wear resistance of the coating were related with the (Ti+C) content. The highest hardness of 20% (Ti+C) coating was 1190HV. The relative wear resistance of the composite

收稿日期: 2014-04-15; 修订日期: 2014-05-04

Received : 2014-04-15; Revised: 2014-05-04

基金项目: 黑龙江省应用技术研究与开发计划项目(GC13A113); 黑龙江省大学生创业创新计划训练项目(201310219018); 黑龙江省教育厅项目(12541705)

Fund: Supported by the Technology Research and Development Program of Heilongjiang Provincial Science and Technology Department (GC13A113), the Heilongjiang Undergraduates Training Programs of Innovation and Entrepreneurship (201310219018), and the Scientific Research Fund of Heilongjiang Provincial Education Department (12541705)

作者简介: 丁天(1992—), 男, 安徽马鞍山人, 主要研究材料表面改性。

Biography: DING Tian(1992—), Male, from Maanshan, Anhui, Research focus: materials surface modification.

coating was 7.5 times higher than that of 35CrMnSi steel. **Conclusion** The cladding coating reinforced by TiC particle showed apparently improved surface hardness as compared to 35CrMnSi steel. The wear mechanism of the composite coating under impact loading at room temperature was micro-cutting wear. The wear resistance of coating was greatly increased by argon arc cladding.

KEY WORDS: 35CrMnSi; argon arc cladding; TiC; microstructure; wear resistance

采煤机截齿直接与煤层及岩石进行接触摩擦,是关键性零部件之一。实际生产中,要求采煤机截齿在满足高耐磨性的同时,还要具备较好的强韧性和耐冲击性能^[1-2]。通过大量的现场调查发现,合金齿头脱落会直接导致截齿失效,而截齿齿体的磨损则导致硬质合金齿头脱落,因此改善截齿齿体的耐磨性是提高截齿使用寿命的关键。

材料表面改性技术是改善材料表面使用性能和延长材料使用寿命的重要手段,已被大量应用^[3-4]。近年来,许多研究人员利用热喷涂(火焰喷涂、等离子喷涂和电弧喷涂)、激光熔覆和化学气相沉积等技术对材料表面进行改性^[5-13],但这些表面强化方法存在涂层厚但不致密,或涂层致密但较薄的缺点^[14],不利于截齿表面强化的应用推广。氩弧熔覆技术是在氩气的保护作用下,利用电弧热熔化材料的方法。其特点是热量相对集中,在熔覆过程中材料表面受氩气保护,不形成氧化和气孔等缺陷,并且具有设备便宜,操作容易,成本低,利于推广等优点^[15-17]。笔者利用氩弧熔覆原位自生技术,在35CrMnSi合金表面制备原位自生耐磨涂层,并对熔覆涂层的组织结构和耐磨性进行研究。

1 试验

1.1 涂层制备

基体材料选用35CrMnSi合金,试样加工尺寸为100 mm×20 mm×20 mm,表面用砂轮和粗砂纸进行打磨,然后用无水乙醇和丙酮进行清洗处理。

选用钛粉、碳粉和Ni60A的混合粉末为熔覆材料。钛粉的纯度为99.5%,粒度约为400目,(Ti+C)粉末的质量占熔覆粉末总质量的5%、10%和20%,其中Ti与C的摩尔比为1:1。将熔覆粉末在球磨机中进行球磨混合,然后用粘结剂将其制成平均直径为2.0 mm的陶瓷棒。将陶瓷棒放置在DHG-9070A型电热恒温鼓风干燥箱中于100~150℃烘烤3 h。

选用MW3000型TIG焊机进行熔覆试验,工艺参数为:电流120 A,电压16 V,气体流量12 L/min,熔覆速度34 mm/s。

1.2 分析检测

1) 对熔覆涂层试样的横截面进行磨光、抛光等,制成金相试样,使用V(HF):V(HNO₃):V(H₂O)=1:9:20的腐蚀液进行腐蚀。采用NS-2B光学显微镜、CamScan MX2600型热场发射扫描电子显微镜和能谱分析仪对涂层的显微组织进行分析。

2) 利用RigakuD/max2200型X射线衍射仪对涂层表面进行物相分析。

3) 采用MHV2000型显微硬度计测定熔覆涂层表面及横截面的显微硬度。

4) 利用MLD-10型冲击磨损试验机进行室温磨损试验,下试样摩擦副采用淬火态的GCr15(硬度为56~58HRC),磨粒为平均尺寸(0.75±0.25)mm的石英砂。磨损试验力为98 N,时间为60 min,冲击次数为每分钟200次,下试样转数为200 r/min。称取试样磨损前后的质量,通过“相对耐磨性”来说明熔覆涂层的耐磨性能,相对耐磨性 $\varepsilon_{\text{相}} = m_b/m_a$ (m_b 、 m_a 分别为熔覆涂层、基体的磨损质量)。

2 结果与讨论

2.1 涂层组织及相组成

氩弧熔覆TiC增强Ni基涂层横截面的光学显微照片如图1所示。从图1可以看出,熔覆涂层与基体的结合良好,涂层及界面没有气孔、夹渣等缺陷。涂层内组织细小,分布均匀,在结合面上存在白亮层,说明涂层与基体达到冶金结合^[18]。图2所示为熔覆涂

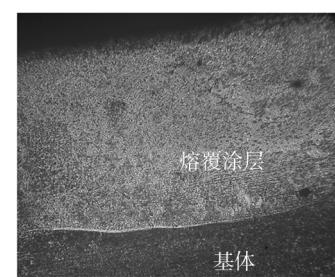


图1 涂层横截面光学显微照片(100×)

Fig. 1 The cross-section microstructure of composite coating (100×)

层的X射线衍射图谱。从图2可以看出,涂层表面主要由 TiC , $\gamma\text{-Ni}$, Cr_7C_3 和 M_{23}C_6 组成,说明获得了 TiC 颗粒。

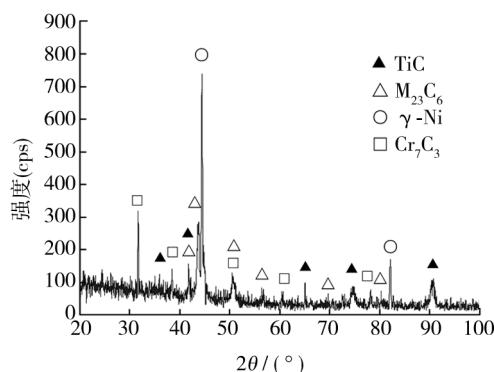


图2 涂层X射线衍射图谱

Fig. 2 XRD pattern of composite coating

图3为粉末配比不同的氩弧熔覆涂层SEM照片,可以看出,熔覆涂层的形貌主要是黑色基体上弥散分布着颗粒细小的灰白色物质。图3a中的颗粒数量较少,分布不均匀;图3b中的颗粒数目较图3a有明显增加;图3c中的颗粒数目较多,且分布较为均匀。由此可以看出,熔覆层组织中的颗粒数量与熔覆粉末中($\text{Ti}+\text{C}$)的含量有关,随着($\text{Ti}+\text{C}$)含量的增加,涂层中的颗粒相明显增多,且颗粒主要分布于涂层中。随着颗粒增多及颗粒在涂层中的分布趋于均匀,涂层显微硬度将升高,从而提高基体材料的性能。

图4是含20%($\text{Ti}+\text{C}$)的熔覆粉末熔覆后的 TiC

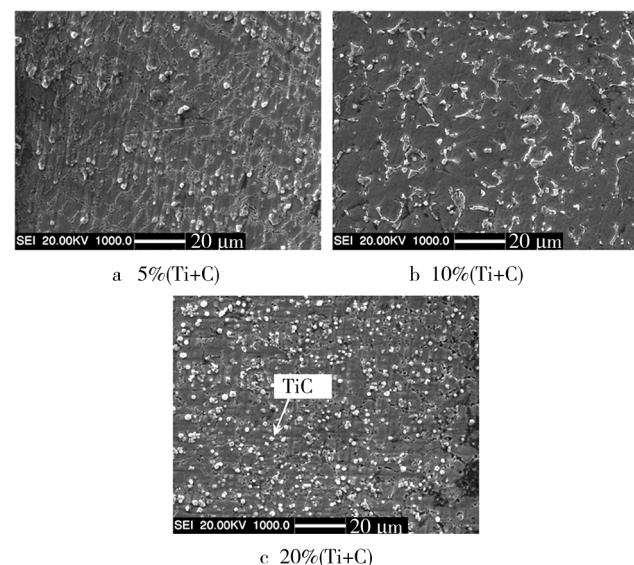
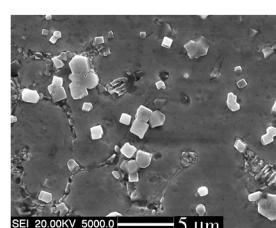
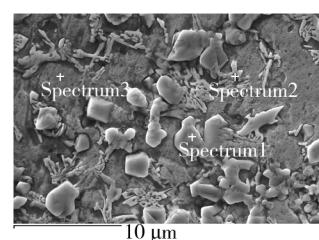


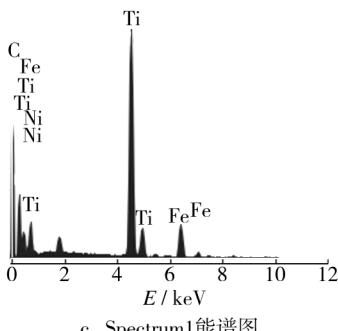
图3 氩弧熔覆复合涂层SEM形貌

Fig. 3 SEM micrographs showing the microstructure of argon shielded arc clad coating

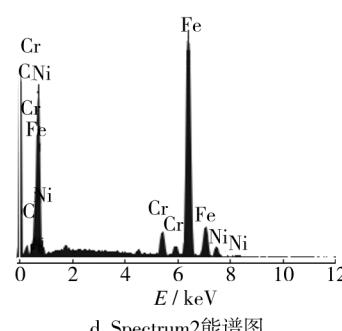
颗粒高倍扫描电镜照片及涂层能谱分析结果。由图4a可见, TiC 颗粒具有立方系结构,主要是以八面体状存在,尺寸为 $1\sim2\text{ }\mu\text{m}$,分布较均匀。图4b中标明了微区能谱分析位置,分别为颗粒相(Spectrum1)、合金化合物(Spectrum2)和基体相(Spectrum3)。Spectrum1的能谱分析可见,颗粒强化相主要含有 Ti 和 C 元素,其质量分数分别为47.73%,23.37%;Spectrum2的能谱分析可见,合金化合物主要含有 $\text{Fe},\text{Cr},\text{C},\text{Ni}$ 等元素,其质量分数分别为56.41%,23.28%,12.49%,

a TiC 颗粒扫描电镜照片

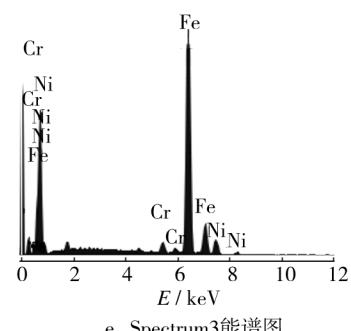
b 能谱分析位置



c Spectrum1能谱图



d Spectrum2能谱图



e Spectrum3能谱图

图4 氩弧熔覆复合涂层SEM形貌及能谱分析

Fig. 4 SEM micrographs and energy spectra showing the microstructure of argon shielded arc clad coating

7.82%; Spectrum3 的能谱分析可见, 基体相的主要组成元素是 Fe, Cr 和 Ni, 其质量分数分别为 30.37%, 24.38%, 34.53%。结合 X 射线衍射分析结果可以确定, 颗粒相为 TiC, 合金化合物为 $M_{23}C_6$, 黑色基体为 γ -Ni。

2.2 涂层的硬度及耐磨性

图 5 为含 20% (Ti+C) 的熔覆粉末熔覆后, 涂层到基体的横截面显微硬度分布曲线。可以看出, 熔覆涂层的显微硬度较高, 最高可达 1190HV, 是基体 35CrMnSi 合金的 3 倍以上, 且涂层的硬度分布较为均匀。整个横截面主要分为熔覆区、热影响区和基体。熔覆区生成了大量的硬质颗粒相 TiC, 且呈均匀弥散分布, 同时还固溶了大量的合金元素, 形成固溶体, 实现了固溶强化和弥散强化, 使得硬度和强度较高。热影响区的硬度高于基体硬度, 是由于氩弧熔覆的快速加热和快速冷却过程使得部分组织发生了相变。

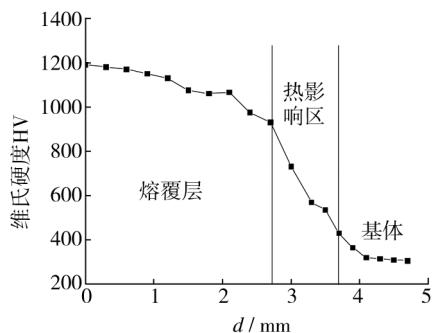


图 5 熔覆涂层显微硬度曲线

Fig. 5 Microhardness profile of argon shielded arc clad coating

粉末配比不同的氩弧熔覆涂层与 35CrMnSi 合金基体的相对耐磨性如图 6 所示。从图 6 可看出, 熔覆涂层的耐磨性较基体均有所提高, 并且随着 (Ti+C) 含量的增加, 耐磨性逐渐提高, 20% (Ti+C) 熔覆涂层的耐磨性是基体的 7.5 倍。

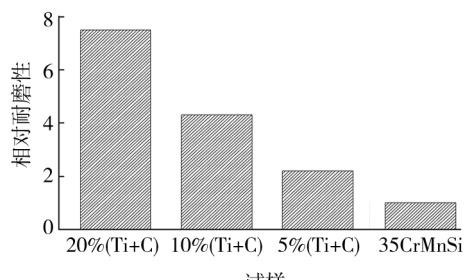


图 6 熔覆涂层与 35CrMnSi 合金的相对耐磨性

Fig. 6 Wear resistance comparison between 35CrMnSi alloy and composite coating

图 7 为 35CrMnSi 合金试样与 20% (Ti+C) 熔覆试样的磨损表面形貌。由图 7a 可见, 35CrMnSi 合金表面产生了严重的塑形变形, 犁沟较深。这是由于对磨环 GCr15 的硬度相对较高, 其上的硬质点容易压入合金基体表面, 基体表面在冲击载荷和石英砂磨粒的共同作用下, 产生了严重的塑形变形并被切削下来形成磨屑, 从而形成了较深的犁沟, 并有磨屑粘附。可见 35CrMnSi 合金基体在冲击载荷和磨粒作用下, 呈现出典型的磨粒磨损和粘着磨损特征。

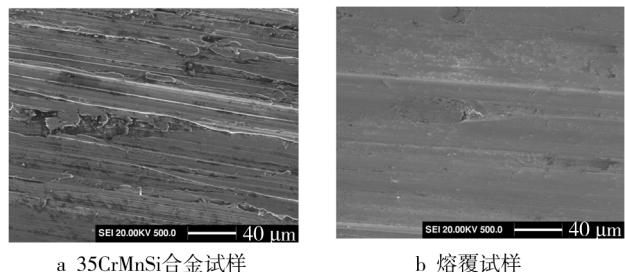


图 7 磨损表面形貌

Fig. 7 Micrographs showing the worn surface morphology

由图 7b 可见, 熔覆试样表面比较干净, 几乎没有粘着痕迹, 且犁沟较浅, 其磨损机理主要是显微切削磨损。这主要是由于熔覆涂层表面生成了硬度很高、尺寸很小的 TiC 颗粒, 均匀、弥散分布的细小 TiC 颗粒发挥了细晶强化作用, 使涂层获得较高的硬度, 对磨环表面的微凸体不能有效压入涂层表层, 相反涂层表面的硬质颗粒反作用于 GCr15 表面, 所以摩擦副只能对涂层产生轻微切削; 同时, 涂层内固溶了大量的合金元素, 形成固溶体, 产生固溶强化, 而原位合成的颗粒相与合金基体强韧性配合良好, 使涂层具有良好耐磨性能。图 7b 中存在少量较深的划痕, 是由于磨下来的硬质颗粒镶嵌于 GCr15 表面反作用于涂层所形成的。

3 结论

1) 采用氩弧熔覆技术, 以 Ti 粉、C 粉和 Ni60 粉为原料, 在 35CrMnSi 合金表面成功制备出 TiC 颗粒增强 Ni 基复合涂层。

2) 氩弧熔覆层主要由 TiC, Cr_7C_3 , γ -Ni 和 $M_{23}C_6$ 相组成, 颗粒相 TiC 呈方块状, 尺寸约为 1~2 μm , 均匀弥散分布在涂层中。

3) 熔覆涂层的显微硬度及耐磨性随 (Ti+C) 含量的增加而提高, 20% (Ti+C) 涂层的最高硬度可达到 11.9 GPa。在室温冲击磨粒磨损条件下, 20% (Ti+C)

熔覆涂层具有优异的耐磨性能,是基体的7.5倍。

参考文献

- [1] 王云霞,王软平,姚文萍.采煤机和掘进机截齿的失效分析[J].煤,2002,11(2):59—60.
WANG Yun-xia, WANG Ruan-ping, YAO Wen-ping. Failure Analysis of Pick on Coal Machine and Advance Machine [J]. Coal, 2002, 11(2):59—60.
- [2] 申胜利.采煤机和掘进机截齿的失效分析及对策[J].煤矿机械,2005(7):53—55.
SHEN Sheng-li. Investigation and Development the Cut Tooth's Invalidation of the Excavate Coal Machine and Advance Machine [J]. Coal Mine Machinery, 2005(7):53—55.
- [3] 肖恩忠.原位制备金属基复合材料的研究进展[J].潍坊学院学报,2007,7(2):10—13.
XIAO En-zhong. Development in the Research in-situ Preparation of Metal Matrix Composites [J]. Journal of Weifang University, 2007, 7(2):10—13.
- [4] 孟君晟,丁天.氩弧熔敷原位自生WC复合涂层组织及耐磨性[J].黑龙江科技学院学报,2013,23(4):345—349.
MENG Jun-sheng, DING Tian. Microstructure and Wear Resistance of WC Composite Coating in-situ Synthesized by Argon Arc Cladding [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology, 2013, 23(4):345—349.
- [5] CUI Cheng-yun, GUO Zuo-xing, WANG Hong-ying, et al. In situ TiC Particles Reinforced Grey Cast Iron Composite Fabricated by Laser Cladding of Ni-Ti-C System [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 3(183):380—385.
- [6] ALEMOHAMAD H, ESMAEILI S, TOYSERKANI E. Deposition of Co-Ti Alloy on Mild Steel Substrate Using Laser Cladding [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 2(456):156—161.
- [7] XU Jiang, LIU Wen-jin. Wear Characteristic of in-situ Synthetic TiB₂ Particulate-reinforced Al Matrix Composite Formed by Laser Cladding [J]. Wear, 2006, 5(260):486—492.
- [8] MA Sheng-li, LI Yan-huai, NAN Jun-ma, et al. Pulsed DC Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposited TiN/TiC(C, N) Multi-layer Coatings [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2000, 10(4):489—492.
- [9] 陈瑶,王华明.激光熔覆TiC/FeAl复合材料涂层显微组织及初生TiC生长机制研究[J].稀有金属材料与工程,2003,32(7):92—95.
CHEN Yao, WANG Hua-ming. Microstructure of Laser Clad TiC/FeAl Composite Coating and Growth Mechanism of Primary TiC Carbide [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(7):92—95.
- [10] 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,2013,24(1):1—4.
GAO Jun-guo, LU Feng, TANG Zhi-hui, et al. The Influence of Spraying Distance on Structure and Properties of CoCrAlYTa Coating Prepared by HVOF [J]. Surface Technology, 2013, 24(1):1—4.
- [11] 陈东,罗明波,陈晓琴,等.等离子喷涂NiCr-Cr₃C₂基复合自润滑涂层的组织及摩擦学性能[J].表面技术,2013,42(3):52—55.
CHEN Dong, LUO Ming-bo, CHEN Xiao-qin, et al. Microstructure and Frictional Behaviour of Plasma-sprayed NiCr-Cr₃C₂ Based Self-lubricating Composite Coatings [J]. Surface Technology, 2013, 42(3):52—55.
- [12] 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.
- [13] 刘世念,苏伟,魏增福,等.热喷涂防腐涂层在大气环境中的应用[J].装备环境工程,2013,10(6):72—76.
LIU Shi-nian, SU Wei, WEI Zeng-fu, et al. Application of Corrosion Resistant Coating of Thermal Spraying in the Atmospheric Environment [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6):72—76.
- [14] 孙彩云,何庆兵,李立,等.化学气相沉积法制备TiB₂涂层工艺的研究[J].表面技术,2013,42(1):81—84.
SUN Cai-yun, HE Qing-bing, LI Li, et al. Study on Chemical Vapor Deposition Process for TiB₂ Coating [J]. Surface Technology, 2013, 42(1):81—84.
- [15] 徐峰,李文虎,艾桃桃,等.Q235钢表面氩弧熔覆TiC复合涂层的组织与性能[J].表面技术,2013,41(5):53—55.
XU Feng, LI Wen-hu, AI Tao-tao, et al. The Microstructure and Property of TiC Composite Coating on Q235 Steel Surface [J]. Surface Technology, 2013, 41(5):53—55.
- [16] 董刚,严彪,李翔,等.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—72.
DONG Gang, YAN Biao, LI Xiang, et al. Progress in Preparation Methods of TiC Reinforced Fe-based Coating [J]. Surface Technology, 2009, 38(1):69—72.
- [17] 孟君晟,王振廷,邝栗山,等.氩弧熔敷原位自生TiC增强Ni基复合涂层的显微组织及工艺[J].中国表面工程,2009,22(1):33—36.

- WANG Wei-wei, GUO Wei-min, ZHANG Hui-xia. Research on the Corrosion of Stainless Steel in Deep Ocean [J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(5): 79—83.
- [4] SHEN L, WANG L, WANG Y Z, et al. Plasma Nitriding of AISI 304 Austenitic Stainless Steel with Pre-shot Peening [J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204: 3222—3227.
- [5] SINGH G P, ALPHONSA J, BARHAI P K, et al. Effect of Surface Roughness on the Properties of the Layer Formed on AISI 304 Stainless Steel after Plasma Nitriding [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200: 5807—5811.
- [6] 杨富国, 廖丽萍, 邓应财, 等. 不锈钢化学镀镍工艺研究 [J]. 表面技术, 2011, 39(6): 84—86.
- YANG Fu-guo, LIAO Li-ping, DENG Ying-cai, et al. Study on Electroless Nickel Plating Process on Stainless Steel [J]. Surface Technology, 2011, 39(6): 84—86.
- [7] 赵霞, 党振乾, 程玲. 奥氏体不锈钢热浸镀铝层的抗氧化特性 [J]. 表面技术, 2009, 38(2): 10—11.
- ZHAO Xia, DANG Zhen-qian, CHENG Ling. Oxidation Resistance of 0Cr18Ni9Ti Austenitic Stainless Steel by Hot-dip Aluminizing [J]. Surface Technology, 2009, 38(2): 10—11.
- [8] 陈康, 赵玮霖. 304 奥氏体不锈钢氮离子注入层的组织与性能研究 [J]. 表面技术, 2011, 40(2): 18—20.
- CHEN Kang, ZHAO Wei-lin. Study on Organization and Performance of Nitrogen Ion Implantation Layer of 304 Austenitic Stainless Steel [J]. Surface Technology, 2011, 40(2): 18—20.
- [9] LIANG J H, WANG C S, TSAI W F, et al. Parametric Study of Nitrided AISI 304 Austenite Stainless Steel Prepared by Plasma Immersion Ion Implantation [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(15): 6638—6642.
- [10] 袁琳, 高原, 张维, 等. 负偏压对多弧离子镀 TiN 薄膜的影响 [J]. 表面技术, 2012, 41(1): 20—22.
- YUAN Lin, GAO Yuan, ZHANG Wei, et al. Effect of Negative Bias Voltage on TiN Coating Deposited by MAIP [J]. Surface Technology, 2012, 41(1): 20—22.
- [11] 李新领, 周志男, 孙维连, 等. 氮气流量对 ZrN/Zr 薄膜色度特性的影响 [J]. 表面技术, 2013, 42(3): 13—15.
- LI Xin-ling, ZHOU Zhi-nan, SUN Wei-lian, et al. Effect of Nitrogen Flow on the Chromaticity Properties of ZrN/Zr Thin Films [J]. Surface Technology, 2013, 42(3): 13—15.
- [12] 徐成伟, 王振全, 胡欣, 等. 1Cr17Ni2 不锈钢表面激光熔覆层的微观组织和性能研究 [J]. 表面技术, 2011, 40(1): 11—13.
- XU Cheng-wei, WANG Zhen-quan, HU Xin, et al. Research on Microstructure and Property of Laser Cladding Layer on 1Cr17Ni2 Stainless Steel [J]. Surface Technology, 2011, 40(1): 11—13.
- [13] ZHANG X Y, HUANG X B, JIANG L, et al. Surface Microstructures and Antimicrobial Properties of Copper Plasma Alloyed Stainless Steel [J]. Applied Surface Science, 2011, 258: 1399—1404.
- [14] 王冰莹, 袁霄梅, 王文慧. 双层辉光等离子表面共渗 Cr-Ni-Mo-Co 工艺研究 [J]. 表面技术, 2012, 41(1): 83—85.
- WANG Bing-ying, YUAN Xiao-mei, WANG Wen-hui. Double Glow Plasma Surface Metallurgy Cr-Ni-Mo-Co Technology Research [J]. Surface Technology, 2012, 41(1): 83—85.
- [15] 张翔宇, 唐宾, 范爱兰, 等. AISI304 不锈钢表面渗 Cu 层对其摩擦学行为的影响 [J]. 材料热处理学报, 2011, 32(9): 136—140.
- ZHANG Xiang-yu, TANG Bin, FAN Ai-lan, et al. Tribological Behavior of AISI304 Stainless Steel after Surface Permeating Cu by Plasma Alloying Process [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(9): 136—140.

(上接第 99 页)

- MENG Jun-sheng, WANG Zhen-ting, KUANG Li-shan, et al. Microstructure and Technology of in-situ Synthesis TiCp/Ni Composite Coatings by Argon Arc Cladding [J]. China Surface Engineering, 2009, 22(1): 33—36.
- [18] 黄永俊, 曾晓雁. 激光感应复合熔覆的界面形态及其作用 [J]. 材料热处理学报, 2009, 30(2): 178—182.

- HUANG Yong-jun, ZENG Xiao-yan. The Morphology and Action of Interface in Laser and Induction Hybrid Cladding [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30(2): 178—182.