

# Ni60 合金粉末炉内重熔工艺及耐磨性研究

樊巧芳<sup>1</sup>, 张波<sup>1</sup>, 林瑛<sup>2</sup>

(1. 江苏安全技术职业学院, 江苏 徐州 221011;

2. 斯凯孚(大连)轴承与精密技术产品有限公司, 辽宁 大连 116600)

**摘要:** **目的** 获得 45 钢表面重熔 Ni60 粉末的最佳重熔工艺,以期提高涂层的耐磨性能。**方法** 在 Ni60 合金粉末中加入 A 型、B 型两种胶,滴入适量酒精,制作 Ni60 预制涂层;采用预粘接法+炉内重熔二步法工艺,在 45 钢表面重熔镍基合金涂层,通过金相组织实验、显微硬度实验,分别研究重熔温度对所得试样基体至涂层组织形貌和显微硬度的影响,讨论温度对所获试样基体至涂层组织与耐磨性的影响。**结果** 重熔温度达到 1000 ℃、1100 ℃ 时,基体与涂层形成机械咬合的组织形态;1200 ℃ 时,基体与涂层形成机械咬合与冶金结合相结合的组织形态,涂层中硬化相数量增多,大小、分布均匀,缺陷最少。1100 ℃ 重熔所得涂层的平均显微硬度最高,达到 496HV;1200 ℃ 重熔所得试样分界线处的平均显微硬度最好,达到 389.7HV,且该温度下所得试样的硬度曲线分布最有规律。**结论** 45 钢基体表面重熔 Ni60 合金粉末,重熔温度为 1200 ℃ 时,可有效改善涂层与基体的结合方式,获得机械结合与冶金结合的组织形态;此温度下,涂层组织均匀、细密,试样硬度分布有规律、波动不大,耐磨性最好。

**关键词:** Ni60; 涂层; 重熔工艺; 显微金相; 显微硬度; 耐磨性

**中图分类号:** TG174.44

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3660(2016)04-0226-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.038

## Re-melting Process and Wear Resistance of Ni60 Alloy Powder in Furnace

FAN Qiao-fang<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, LIN Ying<sup>2</sup>

(1. Jiangsu College of Safety Technology, Xuzhou 221011, China;

2. SKF (Dalian) Bearings and Precision Technologies Co. Ltd, Dalian 116600, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To acquire the best re-melting process of Ni60 on the surface of 45 steel, and improve the wear resistance of the coating. **Methods** Prefabricated Ni60 coating was produced by adding two kinds of glue, type A and type B, into Ni60 alloy powder, and dripping a right amount of alcohol. This experiment adopted the two-step re-melting process of pre-cementation and re-melting in stove to prepare the nickel-base alloy coating on 45 steel surfaces, studied the impacts of re-melting temperature on the morphology and micro-hardness of the substrate and the coating structure of the samples, and discussed the impact of temperature on the micro-structure and wear resistance of the substrate and the coating structure of the sample. **Results** Mechanical interlocking were formed between the substrate and the coating at 1000 ℃ or 1100 ℃, while mechanical interlocking and metallurgical bond were formed between the substrate and the coating when the re-melting temperature was 1200 ℃. The number of coating hardening

收稿日期: 2015-11-23; 修订日期: 2016-01-22

Received: 2015-11-23; Revised: 2016-01-22

作者简介: 樊巧芳(1981—),女,硕士研究生,讲师,主要从事金属基复合材料表面强化及焊接技术的研究。

**Biography:** FAN Qiao-fang (1981—), Female, Master graduated student, Lecturer, Research focus: surface strengthening of metal matrix composites and welding technology.

phase increased, the size and distribution of which were even, with minimal amount of defects. Seen from a hardness distribution curve, the quality was the best. Based on the data, the average hardness of the re-melting coating prepared at 1100 °C was the highest, reaching 496HV, while the average micro-hardness at the dividing line of the sample obtained by re-melting at 1200 °C was the best, reaching 389.7HV, and the hardness distribution curve of the sample was the most regular. **Conclusion** Re-melting Ni60 alloy powder on 45 steel surface at 1200 °C could effectively improve the binding mode of the substrate and the coating, and gain access to machinery in conjunction with metallurgical bonding of structure morphology. At this temperature, the coating was homogeneous and fine, with regular and relatively stable distribution of the sample hardness as well as the best wear resistance.

**KEY WORDS:** Ni60; coating; re-melting; micro-metallography; micro-hardness; wear resistance

表面粘接技术是一种使零件具有某些特殊功能的表面工程技术,特别适合于一些特殊材料和特殊工况下的零件(铸铁、硬化钢板、铸铝、铝合金、塑料和有橡胶涂层的金属零件等),以及采用热修复方法容易变形的薄壁零件和结构、形状复杂的零件,燃气罐、贮油箱、井下设备等具有爆炸危险的零件等的修复<sup>[1]</sup>。对于大面积、不规则外形和截面的零件及其某些批量生产零件的表面涂层重熔,采用炉内重熔,是一种非常好的方法<sup>[2]</sup>。实验通过在 45 钢表面粘接镍基合金粉末,置于电炉内加热实现重熔,通过控制重熔温度,观察重熔 Ni60 合金粉末后试样的显微组织,并对其组织性能进行了研究,获得最佳重熔工艺<sup>[3]</sup>。

## 1 试验

基材选用 45 钢,涂层材料选用 Ni60 合金粉末,其化学组成(以质量分数计)为: C 0.7% ~ 1.0%, Si 3.5% ~ 5.0%, B 3.0% ~ 4.5%, Cr 15% ~ 18%, Co、Mo、Fe 各 17%, Ni 余量。Ni60 是高硬度的合金粉末,自熔性、湿润性和焊接性良好,耐磨、耐腐蚀、切削困难,但适用于湿式磨削,粉末熔融温度为 950 ~ 1050 °C,喷焊沉积层硬度为 58 ~ 63HRC<sup>[4]</sup>。

将基体表面打磨出一定的粗糙度,易于粘接;取 30.00 g Ni60 合金粉末,加入 1 : 2 (A 型、B 型按体积比混合)的两种胶,滴入适量酒精搅拌均匀;试样表面用胶布包裹,使其高出表面 1 mm 左右;风干后将拌均匀的粘稠状合金粉末预置于试样表面,使其与胶布同高,并用试样把涂层震实,最后把已粘接的试样放入阴凉通风处晾干<sup>[5]</sup>。

选取 Ni60 1000、1100、1200 °C 进行重熔,并对其进行编号为试样 1—3。对重熔后的试样进行处理,用 XI-16A 型光学显微镜观察试样的显微金相组织,用 401MVD 型数显显微维氏硬度计测试样的显微硬度,分析并研究温度对重熔 Ni60 试样的显微组织和显微硬度的影响<sup>[6]</sup>。

## 2 结果及分析

### 2.1 金相组织分析

重熔后试样涂层的表面形状如图 1 所示。重熔时,炉内有氧气,发生了氧化反应,使涂层出现其它颜色;1 号试样在重熔时加热速度较快,受热不均,心部温度比四周低,涂层与基体之间脱层或有间隙<sup>[7]</sup>;2 号试样中孔隙较多,因为在重熔过程中胶的熔融温度比涂层低,在 1100 °C 时开始大量挥发,产生很多孔隙;3 号试样涂层较均匀,且涂层为银白色,说明在 1200 °C 完全熔融,胶完全挥发<sup>[8-9]</sup>。通过分析,涂层经过了氧化、挥发、重熔和保温等过程。

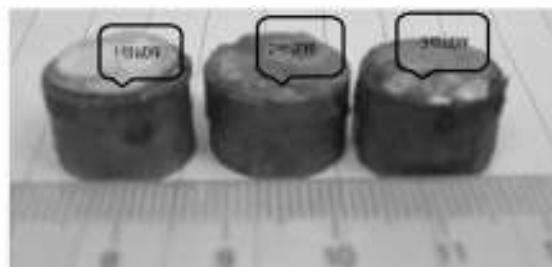


图 1 涂层的外观形貌

Fig. 1 The appearance and morphology of the coating

图 2 是试样 1 所得涂层的横截面显微图。从图 2a 看出,涂层中含有直径为 10 ~ 100 μm 的气孔,且分布不均,靠近基体部分的气孔较少。原因是:涂层重熔时,涂层内的胶因加热产生气体,体积膨胀,此时镍合金还未加热到熔融状态,涂层内的气体不易挥发出来,使得气孔的直径远大于晶粒的直径。气孔的存在使涂层的组织疏松,硬度降低,改变涂层的应力分布,还容易导致应力集中,降低涂层的抗拉强度;气孔分布在基体与涂层之间,使得结合强度降低,涂层易脱落;气孔本身就是缺陷,还是裂纹源,使得涂层抗疲劳强度降低,影响涂层的使用寿命。气孔唯一的优点是它能储油,使得摩擦时润滑界面,提高耐磨性<sup>[10]</sup>。

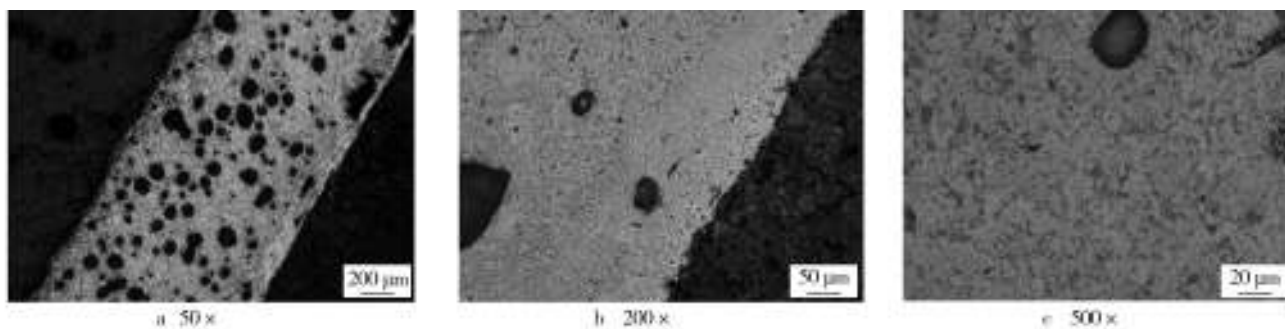


图2 试样1涂层的显微组织

Fig. 2 The micro-structure of the coating of specimen 1

观察图2b,涂层与基体结合区分界线不清,涂层与基体交错为机械结合。说明涂层并未熔融,只与基体发生微融合。从图2c可以清晰看到晶粒内弥散分布着少量的强化相。可能是涂层重熔时,由于温度较低,涂层未熔融,且在未达到熔融状态前,涂层组织已经开始发生化学反应或固溶反应<sup>[11]</sup>。

图3是试样2所得涂层的显微组织。在图3a中可以清晰地看见比晶粒直径大的气孔,直径大小不等。气孔的形成一方面是在1000~1100℃时涂层流动性较差不易挥发,气孔相互结合形成更大的气孔;另一方面气孔在相互结合时产生了其他小气孔,气孔对涂层性能的影响同上。图3b中涂层与基体犬牙交

错,没有形成清晰的融合线,在图的左侧还有直径较大的气孔,原因是重熔温度低于涂层的熔融温度,使得Ni60涂层未熔融,但发生了微融合。图3c的右侧可看见清晰的疏松相,还有晶粒中分布的强化相,且强化相的直径大小不一,小的有几微米,大的有十几微米。强化相的大小不同是因为从1000℃到1100℃之间有的强化相开始长大还有的开始形成。疏松的形成是气孔未完全挥发和Ni60合金的流动所造成的<sup>[12]</sup>。

图4是试样3所得涂层的显微组织。从图4a看出,涂层中有相互连接的气孔群。这是因为涂层在粘接时,涂层与基体之间有间隙,在重熔过程中,由于Ni60

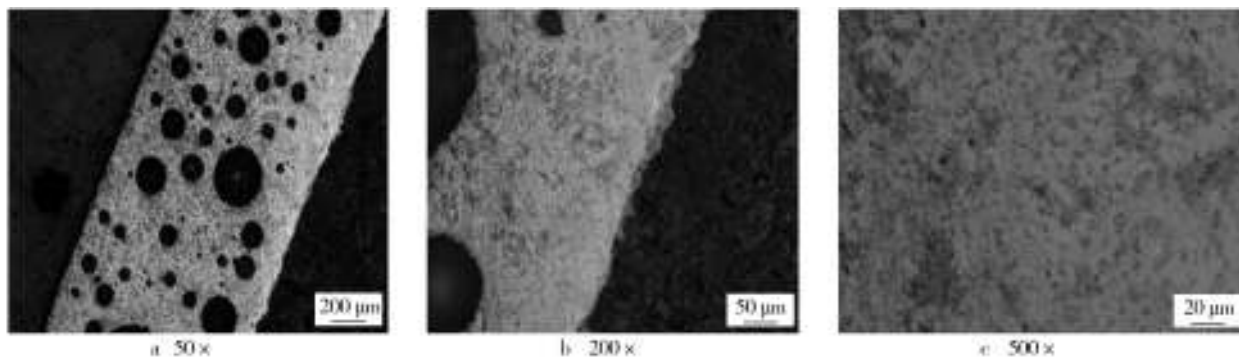


图3 试样2的显微组织

Fig. 3 The micro-structure of the coating of specimen 2

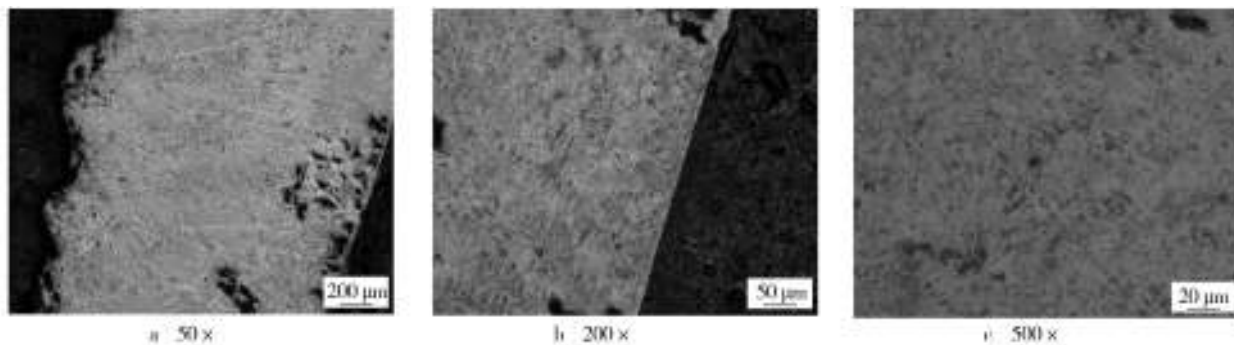


图4 试样3的显微组织

Fig. 4 The micro-structure of the coating of specimen 3

合金的流动性较差,导致间隙的形成。涂层的疏松本身就是缺陷和裂纹源,不仅降低涂层的硬度,使得涂层结合强度不够,易使涂层脱落,还影响涂层的使用寿命<sup>[13]</sup>。图 4b 中,左侧为涂层,右侧为基体,涂层与基体有明显的熔合线,宽度约为十几微米,使得涂层与基体结合更紧密。原因是 Ni60 合金原子与基体原子相互扩散,使涂层与基体之间不仅有相互咬合的机械结合,还形成了冶金结合,这也使得涂层与基体的结合强度更高。图 4c 中晶粒大小均匀,银灰色的基体上分布着许多小黑点强化相,且基体相和强化相结合良好,强化相直径大小均匀,直径为几微米到十几微米,组织中还弥散分布着少量的褐色固熔相。机理是:涂层合金在 1200 ℃ 重熔时, Ni60 合金经过熔融,使合金组织原子发生固熔反应,形成固溶体<sup>[14]</sup>。

2.2 显微硬度分析

试样在 200 kg 的加载下的显微硬度见表 1。从表 1 中可以看出, Ni60 涂层在不同重熔温度下的显微硬度分布各不相同, 试样 3 的基体硬度最高, 平均显微硬度为 231.6HV; 试样 2 的涂层的硬度最高, 平均显微硬度达到 496HV; 试样 3 的分界线显微硬度最

高, 平均显微硬度达到 268HV。

试样的显微硬度分布如图 5 所示, 从图 5a 中可看出分界面的硬度最低, 涂层上的硬度分布不均, 没有规律; 从工艺角度分析, 是因为涂层中含有大量的气孔、夹杂和疏松等缺陷, 没缺陷的区域硬度高, 有缺陷的区域硬度相对就低, 这也使得涂层显微硬度时高时低<sup>[15]</sup>。图 5b 是 2 号试样在重熔温度为 1100 ℃ 时的显微硬度分布曲线, 从图可知基体的硬度变化不大, 在靠近涂层的硬度有所上升, 这是由于重熔时涂层合金原子扩散到基体中, 与基体形成固溶体。在涂层的显微硬度先是升高, 然后降低, 这也是因为涂层中存在气孔等缺陷。图 5c 是 3 号试样在 1200 ℃ 的重熔温度下的显微硬度分布曲线, 涂层部分的硬度是一直上升的, 这是由于在涂层中涂层内的气孔等因 Ni60 合金的流动性差, 而造成的不易排出<sup>[16]</sup>。

从 1 号和 2 号试样的硬度分布曲线可看出涂层中因缺陷的存在使得其硬度时高时低, 不能确定其使用的硬度, 工作时易造成因硬度的不够而使工件使用寿命不高。而 3 号试样中硬度分布有规律, 且硬度波动不大。

综上所述, 单从涂层的平均显微硬度来说, 2 号试

表 1 试样显微硬度 (HV) 的原始数据  
Tab.1 The original data of the micro-hardness of specimen

距界面 距离/mm	1 号试样			距界面 距离/mm	2 号试样			距界面 距离/mm	3 号试样		
	基体	分界线	涂层		基体	分界线	涂层		基体	分界线	涂层
0.2	215.0		452.2	0.2	220.3		551.4	0.3	239.4		308.5
0.4	225.2		396.9	0.4	221.1		617.1	0.6	245.0		354.4
0.6	219.3	171.1	444.5	0.6	220.6	264.1	387.1	0.7	219.8	268.0	408.1
0.8	210.3		365.7	0.8	220.9		428.5	1.2	228.1		442.8
1.0	210.5							1.5	225.5		434.8
平均	216.1		391.7	平均	220.7		496.0	平均	231.6		389.7

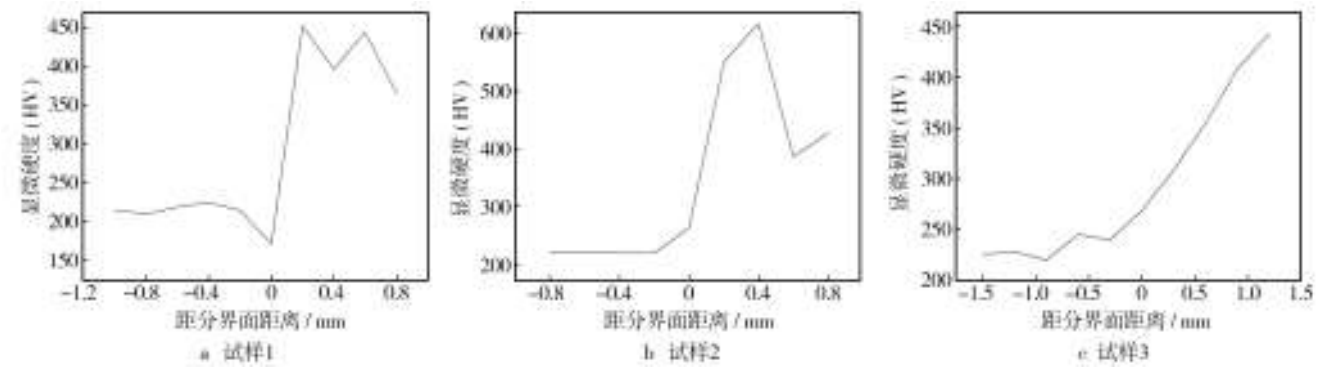


图 5 试样的显微硬度曲线图  
Fig.5 Micro-hardness curves of the test specimens



样最好;从分界线的平均硬度来看,3号试样最好,结合试样1、2、3的显微组织,3号试样的综合耐磨性最好。

### 3 结论

1) 不同的重熔温度下,试样的品质不同。1000℃重熔,气孔形成并开始挥发,形成气孔多而大,且分布不均;1100℃重熔,气孔随着合金的流动,相互结合、分离和挥发,涂层内气孔大的大、小不一,气孔含量较少;1200℃重熔,气孔再随合金流动,大部分挥发完,只留下少量的气孔聚集在涂层与基体结合处附近。

2) 不同重熔温度,涂层组织中硬化相的分布不同,1000℃时,硬化相少,均匀弥散分布,1100℃时,硬化相密度有所增加,但大小不一;1200℃时,硬化相数量增多,且大小、分布均匀;涂层组织的致密度随着重熔温度的升高而提高。

3) 涂层与基体的结合形式与结合强度随重熔温度的升高而不同,1200℃下形成的机械咬合与冶金结合的组织形态;该温度下,所获试样的硬度分布曲线最有规律性,综合耐磨性最好。

### 参考文献

- [1] 彭惠民. 对金属表面改性的新方法[J]. 轨道交通装备与技术, 2005(4): 35—36.  
PENG Hui-min. A New Method for Surface Modification of Metal[J]. Railway Locomotive & Rolling Stock, 2005(4): 35—36.
- [2] 邱长军. 热喷涂自熔合金的炉内重熔工艺[J]. 焊接, 1996(12): 8—9.  
QIU Chang-jun. Furnace Remelting Procedure to Produce Self-melting Alloy Powder for Hot Spraying[J]. Welding, 1996(12): 8—9.
- [3] 常铁军, 马茂元, 姜树立. 重熔工艺对热喷涂层性能的影响[J]. 机械工程材料, 1990(1): 27—28.  
CHANG Tie-jun, MA Mao-yuan, JIANG Shu-li. Remelting Process Affect the Performance of Thermal Spray Coating[J]. Mechanical Engineering Material, 1990(1): 27—28.
- [4] 陈学定, 韩文政. 表面涂层技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.  
CHEN Xue-ding, HAN Wen-zheng. Surface Coating Technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1994.
- [5] 赵文转. 金属材料表面新技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.  
ZHAO Wen-chuan. New Technology of Metal Material Surface[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University of Technology Press, 1991.
- [6] 徐滨士, 朱绍华, 刘世参. 材料表面工程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.  
XU Bin-shi, ZHU Shao-hua, LIU Shi-can. Materials Surface Engineering[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005.
- [7] 王振霞, 陈丽红, 单小林. TC4表面等离子Ni改性层摩擦磨损研究[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 92—95.  
WANG Zhen-xia, CHEN Li-hong, SHAN Xiao-lin. Study on Friction and Wear of Plasma Ni Modified Layer on Surface of TC4[J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 92—95.
- [8] 唐艳茹, 潘利华, 常宇. 微弧氧化提高铝合金耐磨性能的研究[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 48—54.  
TANG Yan-ru, PAN Li-hua, CHANG Yu. Improving the Wear Resistance of Aluminum Alloy through the Micro-arc Oxidation Technology[J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 48—54.
- [9] 高志恒, 付扬帆. 32Cr2Mo2NiVNb钢盐浴氮化工艺[J]. 表面技术, 2015, 44(10): 68—73.  
GAO Zhi-heng, FU Yang-fan. Salt-bath Nitriding Process for 32Cr2Mo2NiVNb Steel[J]. Surface Technology, 2015, 44(10): 68—73.
- [10] 金永中, 杨奎, 曾宪光. 温度对化学镀Ni-P合金层形貌、硬度及耐蚀性的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 23—26.  
JIN Yong-zhong, YANG Kui, ZENG Xian-guang. Influence of Plating Temperature on the Morphology, Hardness and Corrosion Resistance of Electroless Ni-P Alloy Plating[J]. Surface Technology, 2015, 44(4): 68—73.
- [11] 袁涛, 屈轶, 史萌. 汽轮机超音速火焰喷涂NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>涂层[J]. 表面技术, 2013, 42(6): 63—65.  
YUAN Tao, QU Yi, SHI Meng. High Velocity Oxygen Fuel Spraying NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> Coating on Stesam Turbine[J]. Surface Technology, 2013, 42(6): 63—65.
- [12] 张培, 赵旭辉, 唐聿明. 铝合金氧化膜的微观结构及沸水封闭处理对膜层显微硬度的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 45—51.  
ZHANG Pei, ZHAO Xu-hui, TANG Yu-ming. Influence of Microstructure and Water Sealing on Microhardness of the Anodic Film on Aluminum Alloys[J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 45—51.
- [13] 顾伟. 激光熔覆Ni包Al+1%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>覆层的组织分析[J]. 表面技术, 2012, 41(6): 22—25.  
GU Wei. Analysis of Laser Cladding Ni Coated Al + 1% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coating Organization[J]. Surface Technology, 2012, 41(6): 22—25.

- [14] 杜纪富,孙彩霞. 预沉积 Cu 膜对不锈钢基体上沉积 C-90% SiC 涂层的影响[J]. 表面技术, 2012, 41(6): 4—6.  
DU Ji-fu, SUN Cai-xia. Effect of Cu Pre-deposition on C-90% SiC Coating Deposited on Stainless Steel[J]. Surface Technology, 2012, 41(6): 4—6.
- [15] 杨剑冰, 杨阳, 李伟洲等. 施镀条件和热处理对铝合金 Ni-P-SiO<sub>2</sub> 复合镀层微观结构及显微硬度的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 6—12.  
YANG Jian-bing, YANG Yang, LI Wei-zhou, et al. Effects of Plating Conditions and Heat Treatment on Microstructures and Microhardness of Electroless Plating Ni-P-SiO<sub>2</sub> Coating on Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 6—12.
- [16] 向新华, 穆晓冬, 刘正义. Ni 基自熔合金涂层与钢基材的界面形态及其作用[J]. 焊接, 2002, 23(6): 45—47.  
XIANG Xin-hua, MU Xiao-dong, LIU Zheng-yi. Transactions of the China Welding Institution [J]. Welding, 2002, 23(6): 45—47.

(上接第 217 页)

- [13] 李瑞云. 氧化石墨烯对聚合物分离膜的亲水改性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.  
LI Rui-yun. Hydrophilically Modification of Polymer Membrane with Graphene Oxide[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [14] 史真真. 氧化石墨烯对 PET 聚酯膜亲水性改性的研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2014.  
SHI Zhen-zhen. The Study on Hydrophilic Modification of Graphene Oxide to PET Polyester Film[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2014.
- [15] HSIEH Y L, PUGH C, ELLISON M S. The Effects of Selected Organic Solvents on the Polymerization of Acrylic Acid to Poly(Ethylene, Phthalate) by Glow Discharge[J]. J Appl Polym Sci, 1984, 29(11): 3547—3560.
- [16] BLANCHEMAIN N, HAULONS, MARTEL B, et al. Vascular Pet Prostheses Surface Modification with Cyclodextrin Coating: Development of a New Drug Delivery System[J]. Eur J Vasc Endovasc Surg, 2005, 29(6): 628—32.
- [17] 郭双桢. 氧化石墨烯和纳米二氧化硅对 PET 聚酯膜亲水性改性的研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2015.  
GUO Shuang-zhen. The Study on Hydrophilic Modification of Graphene Oxide and Nano-silica to PET Polyester Membrane[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2015.

(上接第 225 页)

- [50] 马壮, 张焱鑫, 韦宝权, 等. 氩弧重熔 Q235 钢 B-C-N 共渗层的组织结构及耐磨性[J]. 金属热处理, 2015, 40(8): 92—95.  
MA Zhuang, ZHANG Yan-xin, WEI Bao-quan, et al. Microstructure and Wear Resistance of Boron-carbonitrided Layer on Q235 Steel by Argon Arc Remelting[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(8): 92—95.
- [51] 马壮, 张焱鑫, 李玲, 等. 氩弧重熔对 Q235 钢 B-C-N 渗层冲蚀磨损性能的影响[J]. 材料导报, 2015, 29(7): 116—119.  
MA Zhuang, ZHANG Yan-xin, LI Ling, et al. Effect of Argon Arc Remelting on Erosive Wear of B-C-N Boride on Q235 Iron[J]. Materials Review, 2015, 29(7): 116—119.
- [52] MADADI F, ASHRAFIZADEH F, SHAMANIAN M. Optimization of Pulsed TIG Cladding Process of Stellite Alloy on Carbon Steel Using RSM[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 510(1): 71—77.
- [53] 杨庆祥, 赵斌, 员霄, 等. 纳米 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对过共晶 Fe-Cr-C 堆焊合金表面微观组织与耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 42—53.  
YANG Qing-xiang, ZHAO Bin, YUAN Xiao, et al. Influence of Nano-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on Microstructure and Wear Resistance of Fe-Cr-C Hardfacing Alloy Surface [J]. Surface Technology, 2015, 44(4): 42—53.
- [54] 彭军波, 陈冰泉, 邓旅成. 45# 钢氩弧表面强化及其灰关联分析[J]. 武汉交通科技大学学报, 2000, 24(1): 86—88.  
PENG Jun-bo, CHEN Bing-quan, DENG Lyu-cheng. Ar-arc Surface Hardening and Its Grey Relational Interval Analysis of 45 Steel[J]. Journal of Wuhan Transportation University, 2000, 24(1): 86—88.
- [55] 徐桂芳, 秦敏明, 雷玉成, 等. Fe-Cr-Ni-Co 合金堆焊和重熔层的空蚀性能[J]. 材料研究学报, 2011, 25(1): 61—66.  
XU Gui-fang, QIN Min-ming, LEI Yu-cheng, et al. Cavitation Erosion Resistance of Fe-Cr-Ni-Co Overlaying and Remelting Layer [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2011, 25(1): 61—66.
- [56] 臧伟, 徐桂芳, 吴浩, 等. 热处理对新型 Fe-Cr-Mn-Co 合金堆焊层磨粒磨损性能的影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(20): 164—169.  
ZANG Wei, XU Gui-fang, WU Hao, et al. Effects of Heat Treatment on Abrasive Wear Performance of New Type of Fe-Cr-Mn-Co Alloy Welding Layer [J]. Hot Working Technology, 2014, 43(20): 164—169.