

氧乙炔火焰喷焊制备自熔性合金涂层及其性能研究

王建萍¹, 唐菊¹, 王灿², 李小武²

(1. 江苏工程职业技术学院, 江苏 南通 226007; 2. 南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: **目的** 研究镍基自熔性合金喷焊涂层成形机理, 比较不同合金材料制备涂层的综合性能, 以获得综合性能最佳的喷焊材料。**方法** 以四种不同成分的镍基自熔性合金粉末作为喷焊材料, 通过氧乙炔火焰在 45 钢基材表面进行喷焊。使用金相显微镜、X 射线衍射、扫描电子显微镜等对喷焊层进行显微结构分析, 并利用维氏硬度计、磨损试验机等对喷焊涂层性能进行对比分析。**结果** 氧乙炔火焰制备的涂层与基体呈现良好的冶金结合, 涂层和基体在喷焊过程中发生元素扩散, 生成了金属间化合物, 基体的整体性能有显著改善。随着材料中 Cr、B、Si 等合金元素含量的增加, 喷焊时涂层中生成的 BCr、Ni₁₇Si₃ 等共晶硬质相含量上升, 促使涂层的显微硬度、耐磨性能等得到显著提升。其中, Ni60A 涂层提升最为显著, 其涂层硬度相当于基体硬度的 2.5 倍, 耐磨性为基体的 18.1 倍。Ni25A 涂层提升最小, 其显微硬度是基体的 1.3 倍, 耐磨性是基体的 6.6 倍。**结论** 喷焊状态下的 Ni60A 涂层与基体冶金结合良好, 涂层表面质量好, 涂层性能最佳。

关键词: 火焰喷焊; 自熔性合金; 耐磨涂层; 磨损试验; 显微硬度; 表面强化

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)02-0117-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.019

Properties of Self-fluxing Alloy Coating Prepared by Oxy-Acetylene Flame Spray Welding

WANG Jian-ping¹, TANG Ju¹, WANG Can², LI Xiao-wu²

(1. Jiangsu College of Engineering and Technology, Nantong 226007, China;

(2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

ABSTRACT: The work aims to study forming mechanism of nickel-based self-fluxing alloy coating prepared by spray welding, and compare overall properties of coatings made from different alloy materials, and find out the spray welding material exhibiting the best overall properties. With four pieces of nickel-based self fluxing alloy powder made of different components as spray welding materials, spray welding was applied to the surface of 45[#] steel substrate with oxygen acetylene flame. Microstructures of the spray welding layers were analyzed with metallographic microscope, X-ray diffractometer, scanning electron microscope, etc., and properties of the spray welding coatings were comparatively analyzed with Vickers hardness tester and wear tester. Good metallurgical bonding could be obtained between coatings prepared with oxyacetylene flame and substrate. Elemental diffusion occurred on the coatings and substrate during the process of spray welding, intermetallic compound was produced, and overall properties of the substrate were improved remarkably. With the increase of alloy elements including Cr, B and Si in the materials, content of eutectic carbide phases including BCr and Ni₁₇Si₃ in the coatings increased during spray welding, thus microhardness and wear resistance were of the coatings were significantly improved. Among all, those of Ni60A coating were improved most significantly, its hardness was 2.5 times as high as that of the substrate, wear resistance was 18.1 times as high as

收稿日期: 2017-08-12; 修订日期: 2017-11-10

Received: 2017-08-12; Revised: 2017-11-10

基金项目: 南通市应用基础研究计划 (GY12016056, GY12016054)

Fund: Supported by Project of Nantong Applied Basic Research Program (GY12016056, GY12016054)

作者简介: 王建萍 (1970—), 女, 副教授, 主要研究方向为新材料及 CAD/CAM。

Biography: WANG Jian-ping(1970—), Female, Associate professor, Research focus: new materials and CAD/CAM.

that of the substrate; and those of Ni25A coating were improved least, its hardness was 1.3 times as high as that of the substrate, and wear resistance was 6.6 times as high as that of the substrate. The Ni60A coating subject to spray welding has good metallurgical bonding with the substrate, exhibits good surface quality and best coating properties.

KEY WORDS: flame spray welding; self-fluxing alloy coating; wear-resistant coating; wear test; microhardness; surface strengthening

随着科学技术的不断发展,各行各业对设备综合性能的要求与日俱增^[1-4]。重载、强腐蚀、高磨损等恶劣工况会严重缩短设备的使用寿命,为避免由于设备关键部件损坏而造成设备报废情况的出现,修复并提高装备关键零部件的综合性能显得尤为重要。氧乙炔火焰喷焊因其工艺简单、操作方便、涂层性能优异等优点,已经被广泛应用于石油化工、矿山机械、水利工程等领域^[5,6]。

目前,在实际生产中应用最广泛的是镍基自熔性合金材料。该材料自熔成渣性好,对各种基体具有较好的润湿能力,能够与基材实现良好的冶金结合。其喷焊涂层的耐热性、耐蚀性及耐磨损性优异,且价格相对适中。朱步生等^[7]研究了镍基自熔性合金喷焊涂层的耐泥沙磨损性能,实验表明 Ni60A 的火焰喷焊工艺可用于磨损严重的疏浚过流部件表面的修复与强化。宋文龙等^[8]研究了液压支架活塞杆表面 Ni60 合金的喷焊组织性能,喷焊涂层的耐煤水腐蚀性能良好,能够有效保证柱塞表面的质量。

本文以四种不同牌号的镍基自熔性合金粉末为喷焊材料,从显微结构和物相分析着手,综合比较其硬度、耐磨性等性能,旨在寻找综合性能最优的喷焊材料。

1 实验

1.1 实验材料

基体材料为 45#钢,利用锯床、磨床将试样加工至 20 mm×20 mm×10 mm,并用丙酮去除其表面的油渍,在干燥箱中烘干后进行粗化喷砂。喷焊材料为四种不同牌号的镍基自熔性合金粉末,具体成分见表 1。

表 1 镍基自熔性合金材料化学成分

Powder	C	Cr	Si	B	Fe	Ni
Ni60A	0.5 ~ 1.0	14 ~ 19	3.5 ~ 5.0	3.0 ~ 4.5	<8.0	Bal.
Ni50A	0.2 ~ 0.6	7.0 ~ 12.0	3.0 ~ 4.5	2.0 ~ 3.0	<8.0	Bal.
Ni45	0.2 ~ 0.6	7.0 ~ 12.0	3.0 ~ 4.5	2.0 ~ 3.0	<15.0	Bal.
Ni25A	<1.0	<0.5	2.5 ~ 3.5	1.3 ~ 1.6	<6.0	Bal.

利用金相显微镜对粉末的微观结构及形貌进行表征,结果如图 1 所示。由图可见,四种镍基自熔性合金粉末均具有较好的球形度,且表面光洁,说明其具备较好的流动性^[9]。与其他三种材料相比, Ni60A 的粒度最均匀,粒径大多分布在 30 ~ 50 μm ,这在一定程度上对其制备的喷焊涂层的综合性能有积极作用。

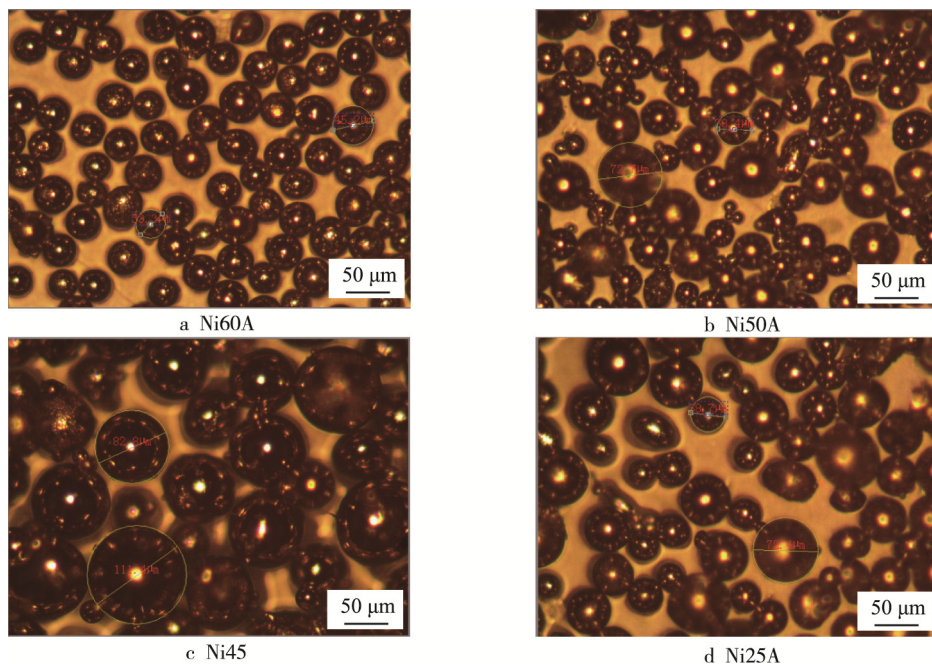


图 1 镍基自熔性合金粉末显微结构
Fig.1 Microstructure of Ni-based self-fluxing alloy powder

1.2 实验方法

利用氧乙炔火焰喷焊技术,采用“一步法”进行喷焊试验,制备镍基自熔性合金耐磨层。喷枪型号为 QH-2h,乙炔、氧气压力分别为 0.5、0.07 MPa,预热温度控制在 150~200 ℃,喷焊距离为 180~200 mm,喷焊角度为(90±5)°。

喷焊完成后,利用线切割制作金相试样若干。首先利用 MP-2B 研磨抛光机对试样进行粗磨、精磨、抛光,然后采用配制的腐蚀溶液(2 mL 盐酸溶液+99 mL 无水酒精+5 g 氯化铁)腐蚀 5~6 s 并烘干。利用金相显微镜、S-3400N 型扫描电镜、UltimaIV 185/E 型 X 射线衍射对涂层进行显微结构、微观形貌以及物相分析等。

采用 MM-H 环块三体磨损试验机进行磨损实验,试样尺寸为 20 mm×20 mm×10 mm,对磨件为 80#的氧化铝砂纸,单轴试验压力为 30 N,磨损时间为 20 min。磨损完毕,试样经清洗烘干后,利用 1 mg 精度的 BSA224S 型电子天平进行称量,从而计算出合金层的磨损量。利用 TMVS-1 型数显显微维氏硬度计检测显微硬度,施加压力为 100 g,保压时间为 15 s。

2 结果与分析

2.1 显微组织

图 2 为四种自熔性合金粉末喷焊涂层截面的金相显微组织。由图可见,试样的截面由四个部分组成,自下而上分别为钢基体、基体热影响区、冶金结合带和喷焊涂层。其中, Ni60A、Ni50A 和 Ni45 样块的冶金结合带明亮且连续,涂层与基体结合良好。其原因主要是喷焊时, B、Si 等元素形成的硼硅酸盐熔渣因密度小、黏性低、流动性好,易上浮至液态金属表面,有效地避免了液态合金被氧化,改善了其润湿性,从而使喷熔的液态合金与基体相互渗透、扩散,最终形成固溶体^[10,11]。而 Ni25A 涂层的冶金结合带较窄且不连续,热影响区与冶金结合带难以区分,表明涂层与基体结合较差。此外, Ni60A 涂层的表面平整、组织致密,无明显孔隙和喷涂态的层状结构,而其他三种涂层均存在部分孔隙,尤其是 Ni50A 中的孔隙较多。这主要是由于试样面积较小,喷焊时的冷却速度过快导致气体未能及时排出。该缺陷会影响涂层的综合性能。

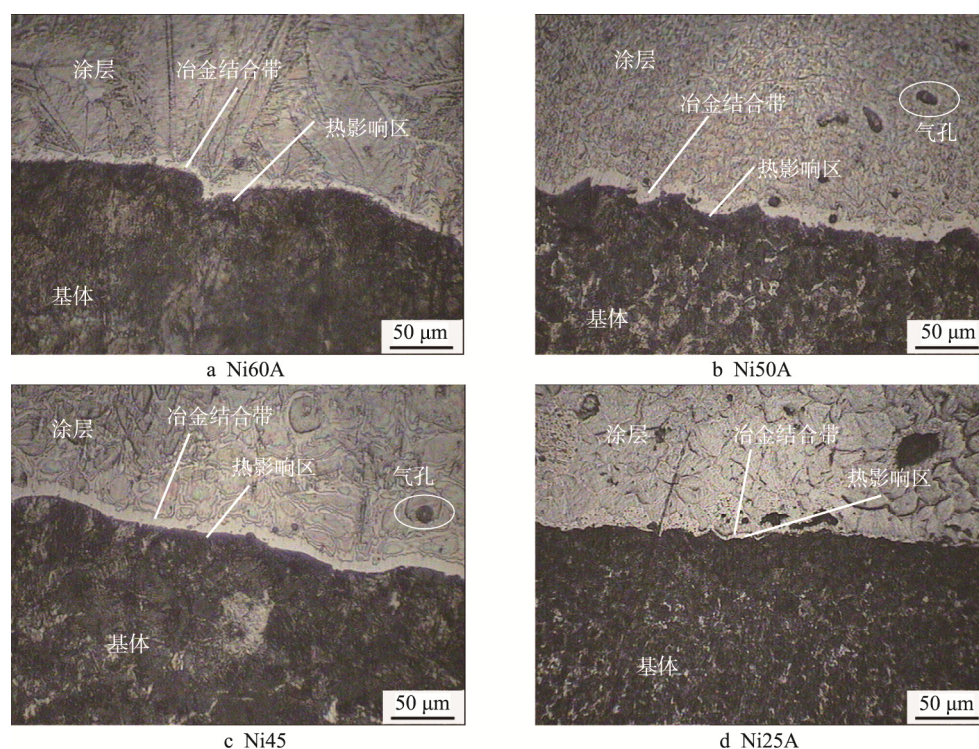


图 2 涂层横截面金相显微组织

Fig.2 Metallographic microstructure of cross section

分别对 Ni60A、Ni50A、Ni25A 喷焊涂层进行 EDS 分析,结果如图 3 和表 2 所示。由结果可知, Ni60A 喷焊涂层以 Fe、Ni 元素为主,说明涂层和基体的冶金结合层即为结构致密的 Ni-Fe 金属间化合物。这不但提升了涂层质量,还增强了涂层与金属基体间的结

合强度。Ni50A 涂层中缺陷处的 O 元素占据较大比例,主要是由于合金在喷焊过程中被未及时排除的空气氧化了,对喷焊涂层的综合性能有一定的负面影响。Ni25A 涂层则以 Fe 元素为主, Cr、Si 等元素含量极少,固溶强化效果不佳,导致涂层的硬度较低。

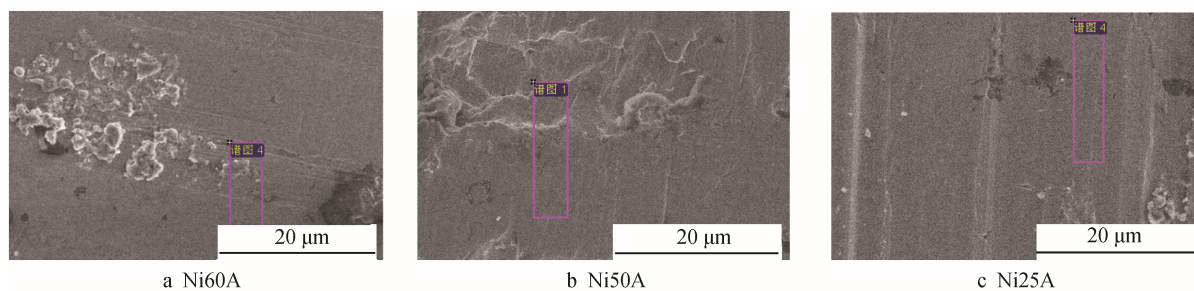


图3 涂层能谱分析

Fig.3 Energy spectrum analysis of coatings

表2 图3中涂层能谱元素含量

Tab.2 Content of energy spectrum elements in coatings as shown in figure 3

Coatings	wt%				
	Ni	Fe	Cr	Si	O
Ni60A	43.54	48.90	3.67	3.89	—
Ni50A	21.83	53.98	6.66	1.33	16.20
Ni25A	20.16	78.45	0.73	0.66	—

2.2 物相结构分析

图4为四种涂层的XRD图。从图中可知,镍基自熔性合金材料经氧乙炔火焰喷焊到基体表面后,主相为 FeNi_3 、 $\gamma\text{-Ni}$ 、 $\text{Cr}_{1.12}\text{Ni}_{2.88}$ 、 $\text{Ni}_{17}\text{Si}_3$ 、BCr等^[12-14]。另外,喷焊层中存在多种金属间化合物,说明喷焊过程中发生了复杂的冶金反应。分析发现,四种涂层中的铁、镍化合物以及铬的硼化物所对应的衍射峰强度均较高,说明其含量较大。其中,铬的硼化物作为硬质相弥散分布在固溶体上,起到弥散强化的作用,极大地提高了喷焊层的显微硬度和抗磨粒磨损性能^[15]。

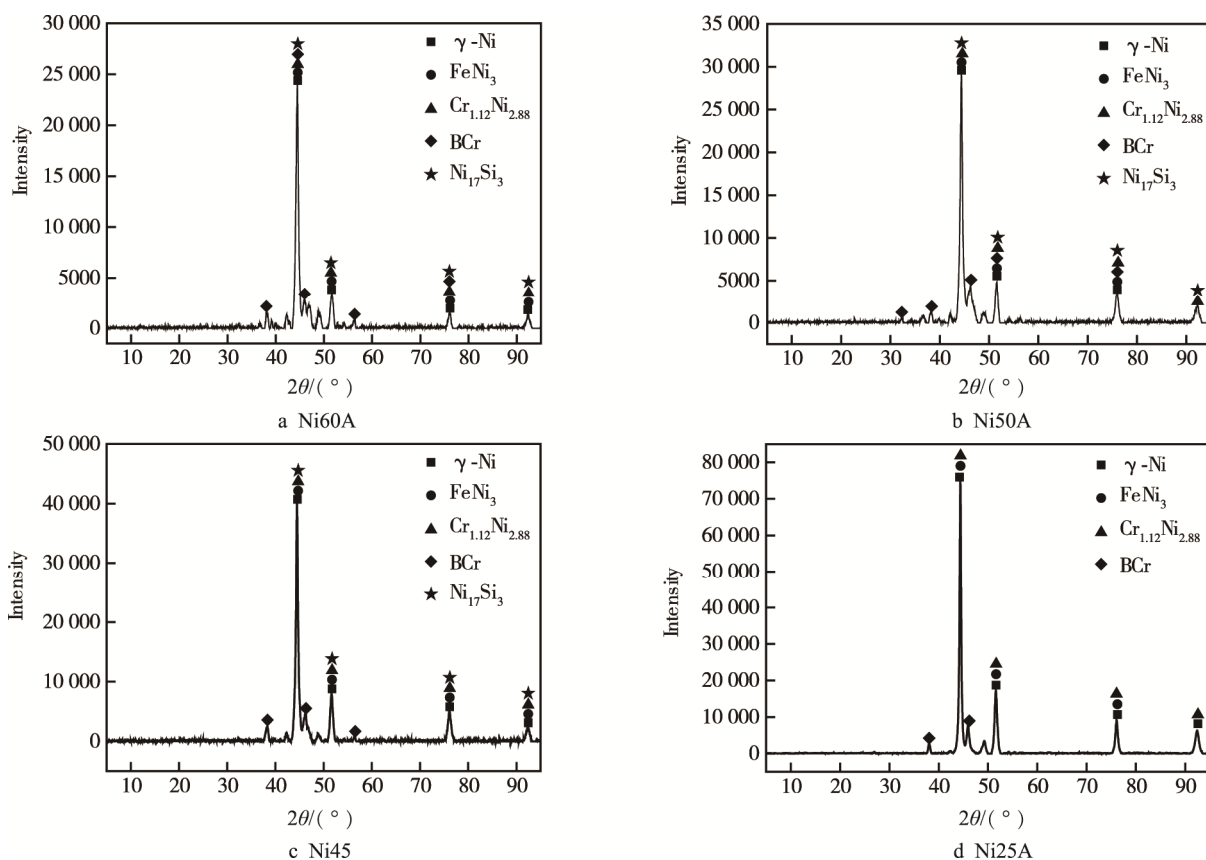


图4 涂层X射线衍射分析

Fig.4 X-ray diffraction analysis of coatings

2.3 显微硬度

涂层的显微硬度如图 5 所示。由图可见, Ni25A、Ni45、Ni50A、Ni60A 涂层的显微硬度分别达到了 463.0、584.5、746.9、874.2HV_{0.1}。与基材 45 钢(显微硬度 350.7HV_{0.1})相比, Ni60A、Ni50A、Ni45、Ni25A 的显微硬度分别是其硬度的 2.5、2.1、1.7、1.3 倍。这是因为 Ni60A 粉末成分中的 Cr、B、Si 元素占比较多, 而且这些合金元素在喷焊熔融过程中发生了冶金反应, 生成的 BCr、Ni₁₇Si₃ 等细小硬质相共晶化合物弥散分布在固溶体间, 起到了第二相强化作用, 使涂层的硬度明显被提高。同时, 由于 Ni60A 涂层中的 BCr 增强相含量最高, 故其硬度最高, 而 Ni25A 喷焊层中的 BCr 增强相含量最低, 导致其硬度最低。

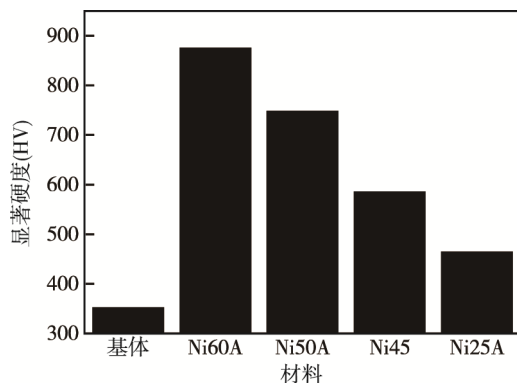


图 5 显微硬度
Fig.5 Microhardness

2.4 耐磨性能

图 6 为试样磨损量。由图可见, 基材、Ni60A、Ni50A、Ni45 和 Ni25A 的磨损量分别为 326、18、36、28、49 mg。与基体材料相比, 四种涂层的耐磨性都有了很大的提高。其中, Ni60A 自熔性合金粉末涂层的耐磨性最好, Ni45、Ni50A 的耐磨性依次有所降低, 而 Ni25A 自熔性合金材料的耐磨性最低。Ni50A 涂层的磨损量比 Ni45 涂层的磨损量大, 主要是因为 Ni50A 涂层中的孔隙缺陷明显多于 Ni45 涂层, 在磨粒磨损

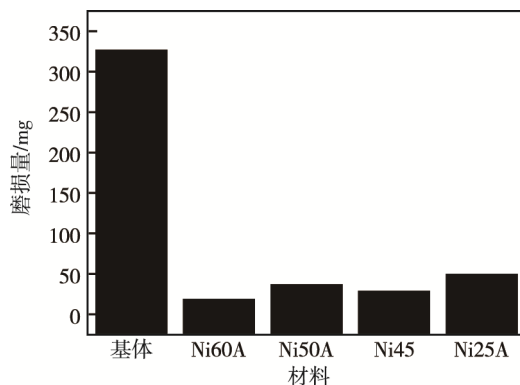


图 6 磨损量
Fig.6 Wear extent

过程中, 孔隙处的合金材料因氧化导致结合力下降, 从而使磨损量增加。与基体相比, Ni60A、Ni50A、Ni45、Ni25A 等涂层的耐磨性能分别提高了 18.1、9.1、11.6、6.6 倍。

3 结论

1) 氧-乙炔火焰制备的四种镍基自熔性合金涂层能够与基体形成良好的冶金结合, 涂层的结构较致密, 虽然有少量的缺陷和孔隙, 但对基体的整体性能有显著的改善, 并且结合界面处的 Fe 和 Ni 元素有较大幅度的扩散。

2) XRD 物相分析显示镍基粉末中的合金元素经过火焰喷焊到基体表面可形成一些细小的如 Ni₁₇Si₃、BCr 等硬质相的共晶化合物, 其弥散分布在固溶体间, 起到了强化作用, 使涂层的硬度和抗磨损性能明显提升。

3) 四种材料中, Ni60A 自熔性合金粉末材料的综合性能优异, 其硬度值最大、耐磨性能最优。其中, 其显微硬度高达 874.2HV_{0.1}, 相当于基体硬度的 2.5 倍; 抗磨损性能最佳, 大约是基体表面的 18.1 倍。

参考文献:

- [1] 金华军, 黄瑞峰. Ni60A 基复合涂层的制备及其耐蚀性能研究[J]. 中国新技术新产品, 2016(7): 44-46.
JIN H J, HUANG R F. Preparation and Corrosion Resistance of Ni60A-based Composite Coating[J]. New Technology & New Products of China, 2016(7): 44-46.
- [2] HOU Q Y, GAO J S, ZHOU F. Microstructure and Wear Characteristics of Cobalt-based Alloy Deposited by Plasma Transferred Arc Weld Surfacing[J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 194(2-3): 238-243.
- [3] 赵龙志, 刘武, 刘德佳, 等. SiC 含量对激光熔覆 SiC/Ni60A 复合涂层显微组织和耐磨性能的影响[J]. 材料工程, 2017(3): 88-94.
ZHAO L Z, LIU W, LIU D J, et al. Effect of SiC Content on Microstructure and Wear Resistance of Laser Cladding SiC/Ni60A Composite Coating[J]. Journal of Materials Engineering, 2017(3): 88-94.
- [4] VENKATARAJ S, SEVERIN D, DRESE R, et al. Structural, Optical and Mechanical Properties of Aluminium Nitride Films Prepared by Reactive DC Magnetron Sputtering[J]. Thin Solid Films, 2006, 502(1): 235-239.
- [5] 徐红勇, 王文权, 黄诗铭, 等. NiCr-Cr₃C₂/Ni60B 等离子喷焊层的组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2015(4): 221-225.
XU H Y, WANG W Q, HUANG S M, et al. Microstructure and Properties of Plasma Surfaced NiCr-Cr₃C₂/Ni60B Layers[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015(4): 221-225.

- [6] 王佳杰, 张颖, 朱晓智. 固井水泥车柱塞表面热喷焊强化技术[J]. 焊接, 2010 (7): 58-61.
WANG J J, ZHANG Y, ZHU X Z. Strengthening Technology for Plunger Piston Cement Truck of Fixed Well Based on Flame Spray Welding[J]. Welding, 2010 (7): 58-61.
- [7] 朱步生, 郑伟, 彭永富, 等. 镍基喷焊覆层抗泥沙磨损性能实验研究[J]. 中国水运, 2014(3): 145-147.
ZHU B S, ZHENG W, PENG Y F, et al. Study on the Abrasive Wear Resistance of Ni Based Spray Welded Coatings[J]. China Water Transport, 2014(3): 145-147.
- [8] 宋文龙, 丁成钢, 徐常恩. 液压支架活塞杆表面喷焊组织性能研究[J]. 热加工工艺, 2016(12): 142-144.
SONG W L, DING C G, XU C E. Study on Microstructure and Properties of Spray Welding Layer on Piston Rod of Hydraulic Support[J]. Hot Working Technology, 2016(12): 142-144.
- [9] 张振宇, 王智平, 梁补女, 等. 含稀土油浆泵耐磨涂层合金粉体材料的研究[J]. 粉末冶金技术, 2006(2): 98-101.
ZHANG Z Y, WANG Z P, LIANG B N, et al. Investigation of Oil Slurry Pump Powder Material Containing Rare-earth Elements[J]. Powder Metallurgy Technology, 2006(2): 98-101.
- [10] 李于朋, 李宁, 王世君, 等. 等离子喷焊 Ni60A 合金的组织与性能研究[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2010(4): 399-402.
LI Y P, LI N, WANG S J, et al. Microstructure and Properties of Plasma Spray Welding Ni60A Alloy[J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2010(4): 399-402.
- [11] SHIN J C, DOH J M, YOON J K, et al. Effect of Molybdenum on the Microstructure and Wear Resistance of Cobalt-base Stellite Hardfacing Alloys[J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 166(2-3): 117-126.
- [12] 张野, 王文权, 徐红勇. Mo 对等离子喷焊 Ni60A 涂层组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2016(7): 185-190.
ZHANG Y, WANG W Q, XU H Y. Effect of Molybdenum on Microstructure and Properties of Ni60A Coatings Produced by Plasma Spaying Welding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016 (7): 185-190.
- [13] 曾凡检. Ni60 合金真空烧结熔覆涂层的组织和性能[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.
ZENG F J. Microstructure and Properties of Ni60 Alloy Coating by Vacuum Sintering Cladding[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.
- [14] CELIK H, KAPLAN M. Effects of Silicon on the Wear Behaviour of Cobalt-based Alloys at Elevated Temperature[J]. Wear, 2004, 257(5-6): 606-611.
- [15] 于美杰, 王成国, 孙宏飞, 等. WC 增强镍基复合喷焊层的组织与磨粒磨损性能研究[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(3): 116-120.
YU M J, WANG C G, SUN H F, et al. Microstructure and Wear Performance of WC Reinforced Ni-based Composite Coating[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(3): 116-120.