

镍基钎料对 45[#]钢激光熔覆镍基 WC 合金熔覆层缺陷的影响

周昌欢, 林晨, 张娟娟, 王清春, 杜圣恩

(青岛理工大学 机械工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要:目的 改善 Ni60A+WC 合金粉末激光熔覆中裂纹和气孔等缺陷性能。方法 在 Ni60A+WC 合金粉末中添加膏状镍基钎料 (BNi-1a) 改善激光熔覆层的裂纹和气孔缺陷。使用 Rofin FL020 光纤激光器, 在 1 kW 功率、扫描速度为 4 mm/s、光斑直径约为 2 mm 的条件下, 对经过烘干的预涂覆合金熔覆层进行激光加工处理。通过显微硬度测试评价熔覆层的硬度, 通过扫描电子显微镜和 X 射线衍射仪对熔覆层形貌、相组织进行分析, 并通过 UMT 和表面形貌仪对熔覆层的摩擦系数和耐磨性进行评估。结果 在 Ni60A+WC 合金粉末中添加膏状镍基钎料 (BNi-1a), 优化了 Cr 和 C 合金相的组成, 使熔覆层的裂纹和气孔等缺陷明显减低。添加膏状镍基钎料的熔覆层的摩擦系数约为 0.45, 熔覆层的摩擦系数大约降低了 18%。同时熔覆层的耐磨性也有所提高, 未添加膏状镍基钎料的熔覆层磨痕横截面积约为 $0.70 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$, 而添加膏状镍基钎料的熔覆层横截面积约为 $0.50 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ 。结论 镍基钎料 (BNi-1a) 的加入可以有效减少熔覆层的裂纹和气孔等缺陷, 同时提高熔覆层的耐磨性, 但是使熔覆层的硬度有一定的降低。

关键词: 激光熔覆; 表面工程; 膏状镍基钎料; 缺陷; 摩擦磨损

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0091-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.015

Effect of Ni-based Solder on Defects of Laser Cladding WC Alloy Layers on 45[#] Steel

ZHOU Chang-huan, LIN Chen, ZHANG Juan-juan, WANG Qing-chun, DU Sheng-en

(School of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266520, China)

ABSTRACT: The work aims to reduce defects such as cracks and pores in laser cladding of Ni60A +WC alloy powder. Pasty Ni-based solder (BNi-1a) was added into Ni60A+WC alloy powder to reduce defects such as cracks and pores in laser cladding layers. Provided with power of 1 kW, scanning speed of 4 mm/s and spot diameter of nearly 2 mm, Rofin FL020 fiber laser was used for laser processing of baked pre-coated alloy cladding layers. Microhardness test was conducted to evaluate hardness of the cladding layers, morphology and phase structure of the layers were studied with SEM and XRD. Friction coefficient and wear resistance of the layers were evaluated with UMT and surface morphology tester. Composition of Cr and C alloy phase was optimized, and defects such as cracks and pores were reduced by as pasty Ni-based solder (BNi-1a) was added into Ni60A+WC alloy powder. For the cladding layer with pasty Ni-based solder, friction coefficient was nearly 0.45, friction coefficient of the cladding layer decreased by nearly 18%, wear resistance

收稿日期: 2017-10-08; 修订日期: 2017-11-30

Received: 2017-10-08; Revised: 2017-11-30

作者简介: 周昌欢 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: ZHOU Chang-huan (1992—), Male, Master, Research focus: surface engineering.

was also greatly increased, and cross-sectional area was nearly $0.50 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$. For the cladding layer without pasty Ni-based solder, cross-sectional area of the grinding crack was nearly $0.70 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$. The addition of Ni-based solder (BNi-1a) can effectively reduce defects including cracks and pores, and improve wear resistance and reduce hardness, but it may reduce hardness of cladding layers.

KEY WORDS: laser cladding; surface engineering; pasty Ni-based solder; defect; friction and wear

激光熔覆作为一种表面改性技术, 具有快速熔化、快速凝固的特点, 是能在普通金属材料表面制造出高合金、高性能表面熔覆层的强化新技术^[1]。然而由于 Ni 基合金与 WC 硬质相之间存在明显的界面和较大的性能差异, 容易出现 WC 颗粒脱落、应力集中及产生裂纹等问题, 成为困扰其工程化应用的最大障碍, 这也是文献中普遍反映出的问题^[2]。镍基钎料具有良好的湿润性和流动性, 且经常用于裂纹修复^[3]。本文通过在 Ni 基合金粉末和 WC 粉末中添加镍基钎料来制备熔覆层, 研究膏状镍基钎料对激光熔覆层缺陷的影响。

1 实验

1.1 熔覆层制备基材及粉末的选取和预处理

实验基材取 45#钢, 尺寸为 $100 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 实验前使用砂纸打磨去除表面氧化层, 再用无水乙醇清洗晾干。试样一: 预涂覆 10%WC+Ni60A, 粘结剂为无水乙醇, 厚度为 1 mm, 120°C 烘烤 24 h。试样二: 预涂覆 10%WC+45%Ni60A+BNi-1a, 粘结剂为膏状镍基钎料本身, 厚度为 1 mm, 120°C 烘烤 24 h。

膏状镍基钎料 BNi-1a 和 Ni60A 的化学成分见表 1, BNi-1a 与 Ni60A 的化学成分较为相似, 因此选为实验配方。

表 1 BNi-1a 和 Ni60A 化学成分
Tab.1 Chemical composition of BNi-1a and Ni60A coatings

Element	Cr	Fe	Si	B	C	Mo	Mn	Ni
BNi-1a	14	4.5	4.5	3.4	—	—	—	Bal.
Ni60A	15	4	4.3	3.1	0.65	0.1	0.1	Bal.

1.2 激光器及参数设定

使用的激光器为 Rofin FL020 型光纤激光器, 优化的激光熔覆实验参数为: 激光功率 1 kW, 扫描速度 4 mm/s, 搭接率 45%, 激光光斑直径 2 mm, 保护气体采用氮气 (直吹)。

1.3 测试方法

将经过加工的两个试样, 在垂直熔覆层的方向上线切割成 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 试样块, 熔覆层的横截面从

粗金相砂纸到细金相砂纸依次打磨, 再用金刚石抛光剂在抛光机上抛光, 用无水乙醇清洗表面, 制成金相试样, 用 FUTURE-TECH 的 FM-700 型显微硬度仪在距离熔覆层表面 0.35~0.40 mm 的实际接触表面进行测量, 从首道熔覆处到末道熔覆处测量熔覆层的显微硬度。随后对试样纵向剖面进行打磨、抛光, 用腐蚀液腐蚀 17 s 后, 用日立 S-3500N 型扫描电子显微镜观察熔覆层的组织结构, 之后将表面腐蚀层去除, 通过 X 射线衍射仪对平行过渡层的横向表面进行相结构分析, 并通过美国 CETR 公司的 UMT-3 多功能摩擦磨损实验机和粗糙度仪分析熔覆层的摩擦磨损性能。

2 结果及分析

2.1 熔覆层的宏观形貌

观察熔覆层的表面, 试样一表面有较多纵向裂纹, 并且有很多硬颗粒渣子 (如图 1a); 试样二的熔覆层表面平整连续, 表面光滑度较好, 厚度足够, 横向裂纹极少, 渣子数量极少 (如图 1b)。两试样宏观形貌的差别是由于膏状镍基钎料提升了涂层中的 Fe 含量, 降低了镍基系的熔点, 增加了熔覆层的流动性^[4], 同时镍基钎料有较好的湿润性, 这就意味着在涂层融化的过程中, 能更好地与基体进行浸润和扩散, 使熔覆层中的 Fe 含量再次提高, 降低熔覆层的熔点, 提升熔覆层的流动性, 使得宏观表面的光滑度更好。另外镍基钎料中的硬质渣子含量少, 这是熔覆层表面光滑度较好、渣子少的另外一个因素。

通过线切割方法切割试样并用砂纸打磨, 发现试

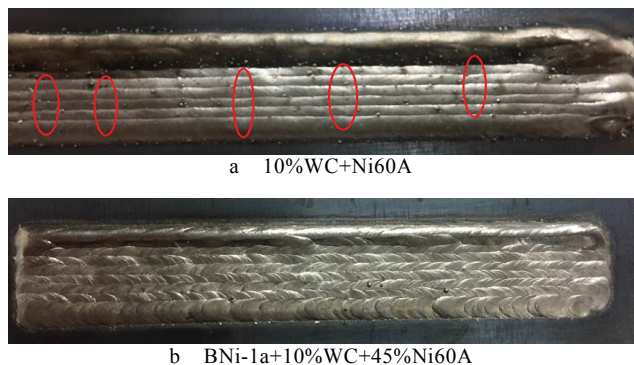


图 1 熔覆层表面宏观形貌

Fig.1 Surface macro-morphology of cladding layers

样一、试样二均在结合面处形成了良好的冶金结合。平行于过渡层打磨熔覆层, 发现试样一有较多的气孔等缺陷, 并且在初道熔覆轨迹处的缺陷较集中, 而试样二未见明显缺陷 (如图 2)。在手工涂覆过程中, 颗粒之间依旧存在一定的空隙, 因为膏状镍基钎料增加了熔覆层的流动性, 所以这些气体在融化凝固过程中能够及时地上浮排除。试样一气孔集中的原因是, 初始加热时, 基体和熔覆层温度差较大, 冷却速度较快, 气体溢出时间少。而在中后期, 激光加工本身使基体温度再次提升, 温差变小, 凝固速度相应减慢, 留给气体溢出的时间更长, 所以之后的熔覆层的气孔数量较少。

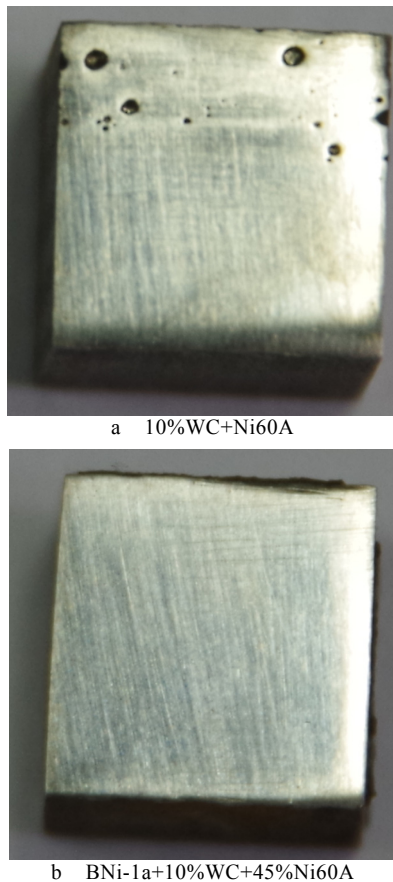


图 2 不同成分的熔覆层内部宏观形貌

Fig.2 Internal macro-morphology of cladding layers with different composition

2.2 熔覆层的相结构及分析

从图 3 可以看到, 熔覆层与基体之间形成白亮带, 说明形成了良好的冶金结合。熔覆区内大多分布着胞状晶组织, 结合 X 射线衍射仪分析激光熔覆层的相结构, 如图 4 所示, 试样一中的相有 MoNi_4 、 Mn_2B 、 Ni_3W 、 Cr_{23}C_6 , 试样二中的相有 MoNi 、 Cr_3C_2 、 Fe_5C_2 、 Cr_{23}C_6 。镍基钎料的加入, 进一步减少了 Mn、B 的含量, 减少了极易造成裂纹的硬质相, 之所以没有发现 WC 相, 是因为使用大功率激光进行一次处

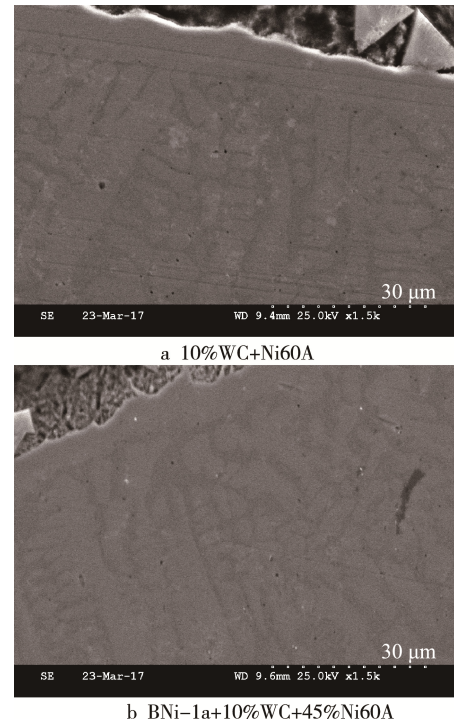


图 3 不同成分的熔覆层内部形貌

Fig.3 External morphology of cladding layers with different composition

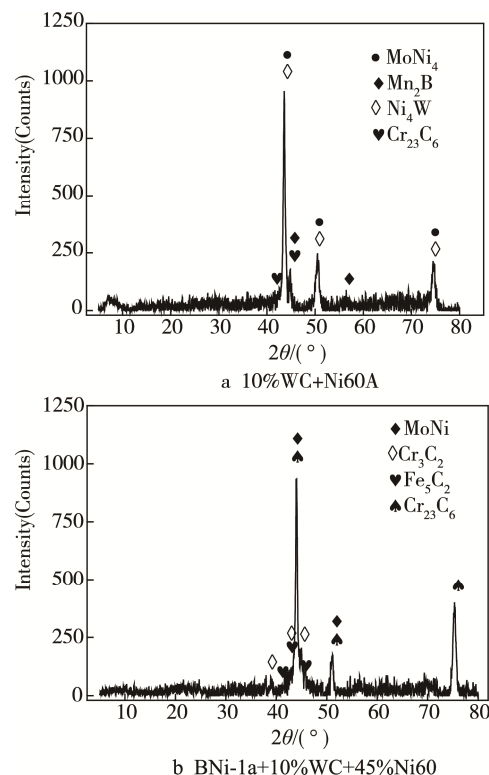


图 4 不同成分的熔覆层内部形貌

Fig.4 Internal morphology of cladding layers with different composition

理, 表面的 WC 极易烧损和分解生成新的碳化物^[5]。

由表 1 可以看出, 相比于试样一, 试样二熔覆层配方中的 Mn 含量较少, 会减少 Mn 和 B 化合相的出

现概率,这种化合物硬度高,脆性大,极易使熔覆层产生裂纹,对熔覆层的性能具有一定的危害性^[6]。合金中的Cr和C在适合的温度下发生反应,当Cr充足时生成 Cr_{23}C_6 ,多余的Cr因含量不足则与剩余的C生成 Cr_3C_2 ^[7]。结合图4 XRD的分析结果可以得出,试样二中Cr的碳化物含量更少, Cr_{23}C_6 属于硬质相,增加了熔覆层的硬度和脆性,提高了裂纹产生的可能性,而试样二中的 Cr_3C_2 可以使产生应力集中的花状和鱼骨状组织消失,减小开裂的倾向,并且阻止气孔裂纹源的产生^[8]。这是裂纹产生较少的重要原因。

2.3 熔覆层的显微硬度及分析

利用显微硬度计测试硬度,在垂直于熔覆的方向上,选取搭接熔覆层首道熔覆痕作为参考点,并设为零点。从首道激光熔覆痕至末道激光熔覆痕等距选取10个点进行测试,加载100 g,保压5 s,两组共测试20个点。所测硬度结果如图5所示,在激光功率、扫描速度等各参数相同的条件下,试样一的平均硬度值为795.56HV,试样二的平均硬度值为698.53HV。

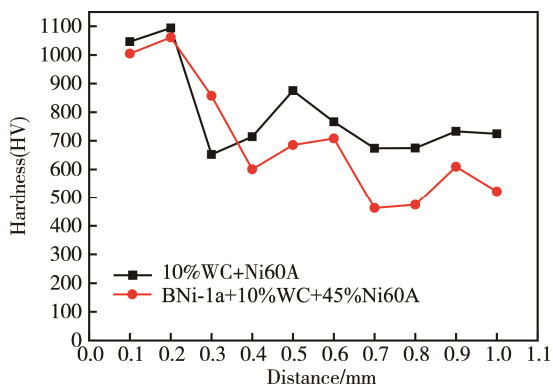


图5 熔覆层硬度曲线

Fig.5 Hardness curves of cladding layers

试验结果表明,镍基钎料的添加在一定程度上降低了熔覆层的硬度,是因为镍基钎料含有较少的锰、铬,进而减少锰硼与铬碳化相等硬质相的存在,使熔覆层的硬度降低。其次,由于涂层中Fe含量的增加,使熔覆层的浸润性和流动性提升^[9-10],增强了熔覆过程中熔覆层与基体的扩散效应,使基体中的成分大量进入到熔覆层中,稀释熔覆层成分,硬度进一步降低^[11],导致添加镍基钎料的熔覆层硬度提升不如原配方明显。

2.4 熔覆层的摩擦磨损性能及分析

实验对偶件选用直径3 mm的硬质陶瓷球(Si_3N_4),对磨时间为30 min,运动方式为往复直线运动,频率为2 Hz,载荷为4 N,实验环境为不添加任何介质的干摩擦。对比试样一和试样二的摩擦系数(如图6)发现,添加了膏状镍基钎料的熔覆层的摩擦系数约为 0.45×10^{-3} mm,比未添加的熔覆层的摩

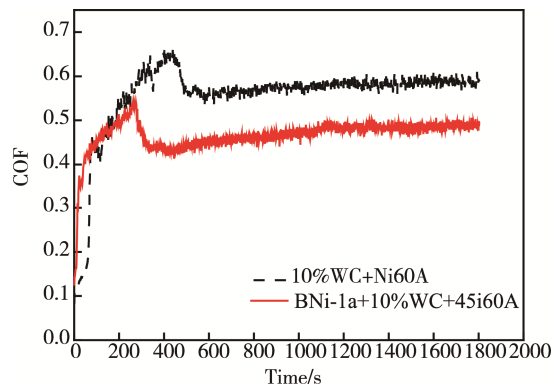


图6 摩擦系数曲线

Fig.6 Friction coefficient curve

擦系数大约降低了18%,减磨性更好。

在经过UMT的摩擦磨损试验后,用粗糙度测量仪对磨痕形貌进行测量,图7为粗糙度测量仪垂直于划痕方向测量的表面波纹曲线,曲线深度意味着熔覆层的磨损深度,凹陷面积即为该截面的磨损量,并用该截面的磨损量对比来表示整个熔覆层耐磨性的好坏,凹陷面积越小,表明熔覆层的耐磨损性能越好^[12]。从图7可以看出,试样二的耐磨性能更好,磨痕横截面积约为 0.45×10^{-3} mm,而未添加膏状镍基钎料的熔覆层的磨痕横截面积约为 0.70×10^{-3} mm。

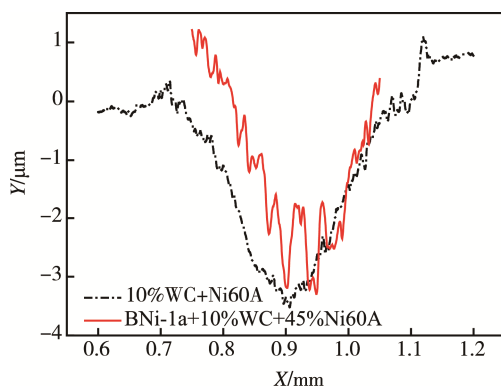


图7 划痕波纹曲线

Fig.7 Scratch corrugated curve

两熔覆层摩擦系数不同的原因是,试样一比试样二有更多的孔隙,将打磨过的表层磨损之后,未添加膏状镍基钎料的熔覆层因为存在孔隙,导致其摩擦系数较高。试样二摩擦系数降低,减磨性更好,意味着熔覆层的粘附能力降低,即在相同摩擦条件下,其表面材料去除程度更小,意味着熔覆层的耐磨性更高^[13-14],这可以通过图7的划痕波纹曲线来验证。从图6可以看出,未添加膏状镍基钎料的熔覆层比添加膏状镍基钎料的熔覆层的摩擦系数较晚达到稳定值,这说明未添加膏状镍基钎料的熔覆层硬度更高。

激光熔覆中最难克服的是裂纹和气孔等缺陷,在激光熔覆工艺的实际使用过程中,硬度高并不代表工艺先进,应考虑其综合性能的高低。虽然添加镍基钎

料降低了熔覆层整体的硬度, 但是其减磨性和耐磨性得到了较大的提高, 对实际生产应用有更多的价值。

3 结论

1) 添加膏状镍基钎料的熔覆层能减少锰硼和 Cr_{23}C_6 等硬质合金相的生成, 减少裂纹的产生。

2) 添加膏状镍基钎料的熔覆层中会生成 Cr_3C_2 , 这种合金相可以使花状和鱼骨状组织消失, 减小开裂的倾向, 并且阻止气孔裂纹源的产生。

3) 对添加膏状镍基钎料的熔覆层进行金相组织分析, 发现试样二的熔覆层与基体结合界面出现白亮层, 说明两者形成了冶金结合, 微观裂纹、气孔、烧结孔洞等缺陷明显少于试样一, 能满足较好的性能要求。

4) 对添加膏状镍基钎料的熔覆层进行摩擦磨损性能分析, 发现试样二的摩擦系数和耐磨性相较于试样一都有所提升。

参考文献:

- [1] 李建, 曾庆生, 杨毅, 等. 45# 钢激光熔覆镍基 WC 合金的组织与性能研究[J]. 机械工程师, 2016(2): 52-53.
LI Jian, ZENG Qing-sheng, YANG Yi, et al. Microstructure and Properties Study on Laser Cladding Layer of Ni-based Tungsten Carbide Alloy on 45# Steel Surface[J]. Mechanical Engineering, 2016(2): 52-53.
- [2] 戎磊. 激光熔覆碳化钨颗粒增强镍基合金梯度熔覆层的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
RONG Lei. Research of Laser Cladding Ni-based Alloy Gradient Coating Reinforced by WC Particles[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011.
- [3] 周玉林. 镍基钎料粉末的应用与发展[J]. 粉末冶金技术, 1985(2): 29-33.
ZHOU Yu-lin. The Application and Development of Ni-based Solder Powder[J]. Powder Metallurgy Technology, 1985(2): 29-33.
- [4] 张勇, 张国庆, 何志勇, 等. Cr 与 B 对镍基高温钎料在 Cf/SiC 陶瓷基复合材料上润湿性的影响[J]. 焊接学报, 2007(12): 93-96.
ZHANG Yong, ZHANG Guo-qing, HE Zhi-yong. Effect of Cr and B on Wettability of Nickel-based High-temperature Solder on Cf/SiC Ceramic Matrix Composites[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007(12): 93-96.
- [5] 吴萍, 周昌炽, 唐西南. 激光合金化熔覆制备耐磨陶瓷梯度熔覆层[J]. 金属学报, 1994(23): 508-512.
WU Ping, ZHOU Chang-zhi, TANG Xi-nan. Preparation of Wear-resistant Ceramic Gradient Coating by Laser Alloying Cladding[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1994(23): 508-512.
- [6] 王元瑞. 镍基钎料的相组成及其显微组织[J]. 理化检验(物理分册), 2008(12): 669-672.
- [7] 杨志波, 徐九华, 徐鸿钧, 等. 镍基钎料激光钎焊金刚石磨粒的试验研究[J]. 粉末冶金技术, 2007(4): 251-255.
YANG Zhi-bo, XU Jiu-hua, XU Hong-jun, et al. Experimental Research on Laser Brazing of Diamond Grits with a Ni-based Filler Alloy[J]. Powder Metallurgy Technology, 2007(4): 251-255.
- [8] 徐家乐, 李忠国, 郭华锋, 等. 激光熔覆层裂纹缺陷的研究进展[J]. 热加工工艺, 2013(8): 6-9.
XU Jia-le, LI Zhong-guo, GUO Hua-feng, et al. Research Progress of Crack Defect in Laser Cladding Layer[J]. Hot Working Technology, 2013(8): 6-9.
- [9] 钟文华, 刘贵仲, 葛大梁, 等. Cr_3C_2 对镍基碳化钨激光熔覆层组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2012(7): 45-48.
ZHONG Wen-hua, LIU Gui-zhong, GE Da-liang, et al. Effect of Adding Cr_3C_2 on Microstructure and Properties of Ni/WC Cladding Layer[J]. Heat Treatment of Metals, 2012(7): 45-48.
- [10] 郭华锋, 李志, 熊永超, 等. 激光熔覆成形 Ni 基合金层的缺陷分析及控制[J]. 热加工工艺, 2008(19): 126-129.
GUO Hua-feng, LI Zhi, XIONG Yong-chao, et al. Analysis and Control of Ni-based Alloy Coating Defect Formed by Laser Cladding[J]. Hot Working Technology, 2008(19): 126-129.
- [11] 翁铸, 伍丽峰, 陆文雄. 激光熔覆与合金化层的缺陷产生及其防止[J]. 激光与光电子学进展, 2003(10): 58-59.
WENG Zhu, WU Li-feng, LU Wen-xiong. Produce and Prevention of Laser Cladding and Alloying Layer[J]. Laser & Optoelectronics Progress Las Optoelect Prog, 2003(10): 58-59.
- [12] 何力佳, 高睿, 赵晓杰, 等. 光纤激光熔覆铁基合金粉末对 45# 钢表面组织和性能的影响[J]. 铸造技术, 2016(1): 44-47.
HE Li-jia, GAO Rui, ZHAO Xiao-jie, et al. Effects of Fiber Laser Cladding Fe-based Alloy Powder on Microstructure and Properties of 45# Steel Surface[J]. Foundry Technology, 2016(1): 44-47.
- [13] SONG Wu-lin, ECHIGOYA J, ZHU Bei-di, et al. Vacuum Laser Cladding and Effect of Hf on the Cracking Susceptibility and the Microstructure of Fe-Cr-Ni Laser-clad Layer[J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 126(1): 76-80.
- [14] 李海潮, 林晨, 周昌欢, 等. Ni60A+20WC 于水刀喷嘴耐磨层的应用工艺[J]. 材料科学与工艺, 2016(6): 79-84.
LI Hai-chao, LIN Chen, ZHOU Chang-huan, et al. Ni60A+20WC in Water Jet Nozzle Application Process Wear Layer[J]. Materials Science Technology, 2016(6): 79-84.