

球墨铸铁表面激光熔覆镍基合金试验研究

翟建华^{1,2}, 许慧印¹, 刘志杰¹, 沈成¹, 王乾宝¹

¹ 辽宁工程技术大学机械工程学院, 辽宁 阜新 123000;

² 辽宁工程技术大学先进制造技术研究院, 辽宁 阜新 123000

摘要 在不同工艺参数下,在球墨铸铁 QT450-10 表面激光熔覆了镍基合金,分析了熔覆层的显微组织和物相组成,研究了熔覆前、后试样的拉伸应力-应变曲线及试样的断口形貌。结果表明,当激光功率为 1.6 kW、激光扫描速率为 400 mm·min⁻¹、送粉速率为 3.2 r·min⁻¹时,熔覆结果较好,基体与熔覆层间形成了良好的冶金结合,无裂纹、气孔;在 25 °C 下,当熔覆层数为 1 时,熔覆层的显微硬度达到 265 HV,约为基体硬度的 1.5 倍;熔覆后试样的断裂部位在基体处,熔覆镍基合金的球墨铸铁的强度得到提高。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 球墨铸铁; 显微组织; 断裂截面

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.101412

Experimental Study on Laser Cladding of Ni-Based Alloys on Spheroidal Graphite Cast Iron Surface

Zhai Jianhua^{1,2}, Xu Huiyin¹, Liu Zhijie¹, Shen Cheng¹, Wang Qianbao¹

¹ College of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;

² Institute of Advanced Manufacturing Technology, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China

Abstract Under different process parameters, the laser cladding of Ni-based alloys on the spheroidal graphite cast iron QT450-10 surface is conducted, the microstructure and the phase compositions of cladding layers are analyzed, and the tensile stress-strain curves of samples with and without laser cladding and the fracture morphologies of samples are studied. The results show that, when the laser power is 1.6 kW, the laser scanning speed is 400 mm·min⁻¹ and the powder feeding speed is 3.2 r·min⁻¹, better quality cladding layer can be achieved and a good metallurgical bonding is formed between the matrix and the cladding layer where no cracks and pores are observed. Under the temperature of 25 °C and when the cladding layer number is 1, the microhardness of cladding layers is 265 HV, about 1.5 times of that of the matrix. The fracture site of cladding samples is in the matrix. After the laser cladding of Ni-based alloys, the strength of the spheroidal graphite cast iron is enhanced.

Key words laser technique; laser cladding; spheroidal graphite cast iron; microstructure; fracture section

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 160.3900

1 引言

激光熔覆是一种改变材料表面的方法,在 高能密度激光束产生的局部高温作用下,熔覆材料在基材表层快速凝固。影响激光熔覆层质量和性能的因素众多,包括熔覆材料、激光功率、激光光斑直径、激光扫描速率、送粉速率、周围环境温度,以及熔覆层数等^[1-2]。因为激光熔覆冷却速度极快,畸变和热输入较小,且基材与熔覆层属于冶金结合,所以熔覆后的基材和熔覆层材料的性能几乎不发生改变,这样熔覆材料的耐磨性、耐蚀性、耐高温和抗氧化等性能及基材的固有性能可以得到充分利用^[3-5]。因此,激光熔覆技术发展迅速,得到了国内外的广泛关注。

球墨铸铁基体中的石墨呈球状分布,与灰铸铁相比,其除了具有较高的强度、韧性和塑性外,还具有极好的润滑作用,故球墨铸铁经常代替合金钢和碳钢等材料应用于强度和韧性需求较高的环境中^[6]。但球墨铸

收稿日期: 2017-06-09; 收到修改稿日期: 2017-06-13

作者简介: 翟建华(1968—),男,博士,教授,主要从事三维打印方面的研究。E-mail: zhaijianhua308@163.com

铁类零件在铸造时经常会产生砂眼或缩孔现象^[7],这些缺陷会降低球墨铸铁的强度、韧性及塑性等力学性能,而传统的修复手段复杂,难度极大,且效果不太理想^[8]。目前,已有学者采用镍基、钴基、铁基等熔覆材料对球墨铸铁进行激光熔覆,并取得了较好的效果^[9-12]。在激光熔覆时,工艺参数的选择对熔覆效果起决定性作用,国内已有很多相关研究^[13-15],但针对球墨铸铁类零件的激光熔覆工艺参数的研究还比较少。

镍元素具有较好的耐蚀性,可以促进铁元素的扩散^[16],本文在球墨铸铁上进行了激光熔覆镍基合金的试验研究。对试验结果进行了分析,获得了球墨铸铁激光熔覆的最佳工艺参数,利用该最佳参数对球墨铸铁拉伸试样进行了熔覆,获得了较好的熔覆效果。

2 试验材料与方法

试验基体材料采用球墨铸铁 QT450-10,其尺寸为 60 mm×20 mm×5 mm 和 60 mm×20 mm×10 mm,化学成分见表 1,力学性能见表 2。熔覆层材料采用镍基合金粉,其化学成分见表 3。

表 1 球墨铸铁 QT450-10 的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of spheroidal graphite cast iron QT450-10 (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr
Content	>2.5	2.1-3.1	0.1-1.0	<0.08	<0.02	<0.09	<0.13

表 2 球墨铸铁 QT450-10 的力学性能

Table 2 Mechanical properties of spheroidal graphite cast iron QT450-10

Tensile strength / (N·mm ⁻²)	Yield strength / (N·mm ⁻²)	Elongation / %	Microhardness / HV
≥450	≥280	≥10	147-217

表 3 镍基合金的化学成分(质量分数,%)

Table 3 Chemical compositions of nickel-based alloy (mass fraction, %)

Element	C	Cu	Ni	Fe	Si	B	O
Content	<0.05	18-22	Bal.	<1.5	1.7-2.3	0.9-1.2	0.025

试验的光源来自德国 Laserline 公司生产的 LDF 型大功率光纤耦合半导体激光器,其激光头输出的光斑直径为 3 mm,最大输出功率为 3 kW。以激光功率、激光扫描速率、送粉速率、熔覆温度、熔覆层数为基本工艺参数,进行了近似正交试验,具体的参数值见表 4。

表 4 球墨铸铁 QT450-10 激光熔覆工艺参数

Table 4 Process parameters of laser cladding on spheroidal graphite cast iron QT450-10

Sample No.	Laser power / kW	Laser scanning speed / (mm·min ⁻¹)	Powder feeding speed / (r·min ⁻¹)	Temperature / °C	No. of cladding layer
1	1.3	300	2.8	25	1
2	1.6	400	3.2	25	1
3	1.9	500	3.6	25	1
4	2.2	600	4.0	25	1
5	1.3	300	2.8	300	1
6	1.6	400	3.2	300	1
7	1.3	300	2.8	300	2
8	1.6	400	3.2	300	2
9	1.3	300	2.8	25	3
10	1.6	400	3.2	25	3
11	1.6	400	3.2	300	3

对获得的熔覆试样进行线切割,切割方向垂直于熔覆表面,获得金相试样。经过打磨、抛光后,采用硝酸与乙醇的混合溶液对试样进行腐蚀。采用德国蔡司公司生产的 Axiovert-40-MAT 型倒置显微镜观察熔覆层的显微组织。采用北京沃威科技有限公司生产的 HV-50 型显微硬度计测试熔覆层截面的显微硬度,其载荷为 5 N,测试时间为 10 s,测试间距为 0.2 mm。采用济南试验机厂生产的 WES-600D 型液压万能试验机对拉伸试样进行拉伸试验,其最大试验力为 600 kN。同时,采用日本岛津公司生产的 SSX-550 型扫描电子显微镜观察熔覆层的断裂形貌。

3 试验结果与分析

3.1 显微组织分析

对比 11 组样品的金相组织可以发现,球墨铸铁熔覆层整体结构分为熔化区、结合区和热影响区。综合比较发现,当激光功率为 1.6 kW、激光扫描速率为 $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、送粉速率为 $3.2 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,所得的熔覆结果较好,此时,样品的金相组织如图 1 所示。可以发现,基体与熔覆层之间无裂纹、气孔等缺陷,熔覆层和基体结合相对紧密,形成了极好的冶金结合,且基材的稀释率较低。球墨铸铁基体的显微组织如图 1(a) 所示,球状石墨减小了应力集中,基体中片状珠光体较多,铸铁强度极高。结合区的金相组织如图 1(b) 所示,基体与熔覆层的结合区在稀释作用下凝固,两者的凝固组织融合生长,形成了极好的冶金组织,熔化区靠近熔覆层与球墨铸铁接触面部分出现无规律的树枝状组织,这是熔覆层快速凝固所产生的溶质捕获效应导致的。结合区部分是互相重叠的界面,界面的互相重叠会增加熔覆层与基体之间的结合力,从而提高熔覆层的摩擦、磨损性能。熔覆层的金相组织如图 1(c) 所示,可以看出,细小的第二相粒子呈点状并均匀镶嵌在 γ -Ni 基体中,细化了熔覆层组织。

试验过程采用多层熔覆工艺,后一道工序对前一道工序制备的熔覆层起到近似回火的作用,降低了熔池快速冷却产生的内应力,这为球墨铸铁力学性能的提高奠定了基础。

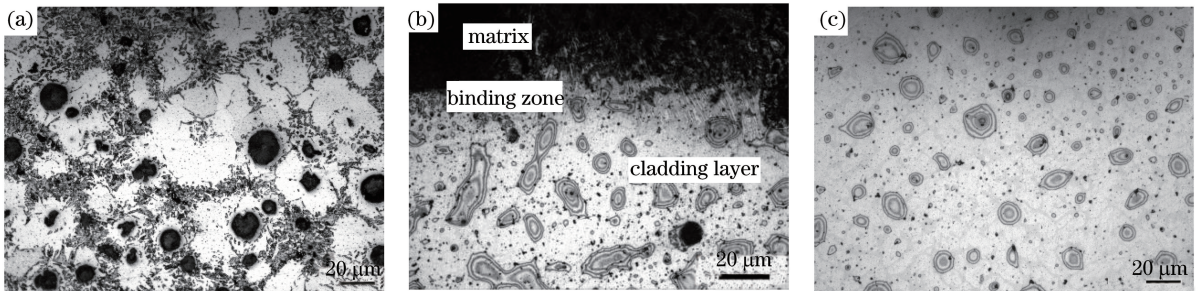


图 1 激光熔覆球墨铸铁 QT450-10 试样的显微组织。(a) 基体;(b) 结合区;(c) 熔覆层

Fig. 1 Microstructure of spheroidal graphite cast iron QT450-10 sample processed by laser cladding.

(a) Matrix; (b) bonding zone; (c) cladding layer

3.2 熔覆层物相组成分析

图 2 所示为球墨铸铁 QT450-10 试样熔覆层的 X 射线衍射(XRD)谱,可以看出,合金熔覆层主要由 γ -Ni 固溶体、NiCu 相、 $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$ 相、 Ni_3Fe 相及少量的 Fe_5C_2 、 Fe_3C 化合物组成。结合金相组织分析可知,在凝固过程中, γ -Ni 固溶体中首先析出热力学稳定性较高的 Ni_3Fe 相,并以此作为形核基底,随着冷却温度的降低, γ -Ni 固溶体中的 Cu 原子向晶粒边界扩散,最终析出 NiCu 和 $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$ 相,将 Ni_3Fe 包覆起来;同时,还有少量的 Fe_5C_2 、 Fe_3C 化合物呈点状镶嵌在镍基固溶体基体中。 NiCu 、 $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$ 和 Ni_3Fe 都具有面心立方晶体结构,赋予了合金熔覆层良好的抗塑性变形能力。

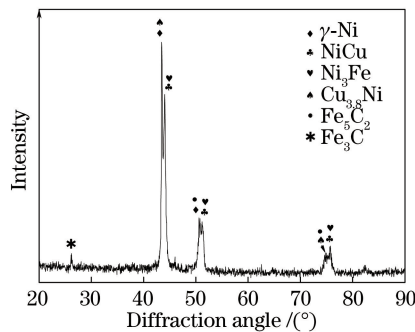


图 2 球墨铸铁 QT450-10 试样熔覆层的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of cladding layer of spheroidal graphite cast iron QT450-10 sample

3.3 熔覆层硬度分析

当激光功率为 1.6 kW、激光扫描速率为 $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、送粉速率为 $3.2 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,在不同熔覆温度和熔覆层数下,获得的试样硬度曲线如图 3 所示。当熔覆温度为 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 、熔覆层数为 3 时,可以发现,距表层 $0.1 \sim 0.6 \text{ mm}$ 处的显微硬度为 $245 \sim 255 \text{ HV}$,该部分为熔化区,由于熔覆速度极快,其组织均匀、细小且密集,故该区域硬度极高;距表层 $0.8 \sim 1.4 \text{ mm}$ 处的显微硬度为 $235 \sim 247 \text{ HV}$,该部分为结合区和热影响区,显微硬度接近基体;距表层 1.4 mm 及更远处为基体区域,显微硬度接近 190 HV 。可以看出,球墨铸铁在激光熔覆后,熔覆层的硬度远高于基体,达到了预期的效果。综合分析可以发现,当温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,熔覆层可以获得更高的显微硬度,且随着熔覆层数的增加,熔覆层的显微硬度明显下降,这与李宝灵等^[13]所得结论一致。

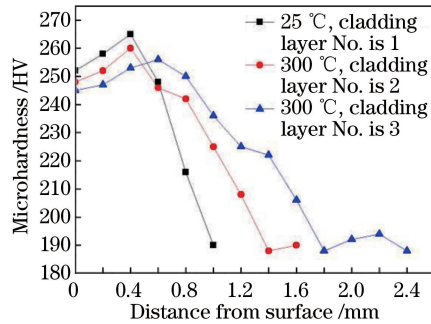


图 3 球墨铸铁 QT450-10 试样熔覆层显微硬度曲线

Fig. 3 Microhardness curves of cladding layer of spheroidal graphite cast iron QT450-10 sample

3.4 拉伸曲线与断口形貌分析

根据前述试验分析可知,当激光功率为 1.6 kW、激光扫描速率为 $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、送粉速率为 $3.2 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、熔覆层数为 1、熔覆温度为室温时,熔覆效果较好,故选取该工艺参数来修复棒状球墨铸铁拉伸试样。拉伸试样的尺寸如图 4 所示。拉伸时,加载变形速率为 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

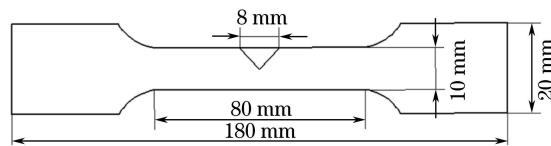


图 4 拉伸试样的尺寸

Fig. 4 Size of tensile sample

对激光熔覆后得到的棒状拉伸试样和未进行激光熔覆的基体拉伸试样进行拉伸试验。被拉断的熔覆试样如图 5 所示,从宏观来看,熔覆层呈银白色、发亮,组织断口较为平齐;而基体为暗灰色纤维状组织,断口稍有倾斜,并且出现明显的缩颈现象。



图 5 被拉断的激光熔覆拉伸棒

Fig. 5 Snapped laser-cladding tensile rod

激光熔覆前、后的试样应力应变曲线如图 6 所示,可以看出,熔覆前,试样的屈服强度约为 320 MPa ,抗拉强度为 444 MPa ,延伸率为 10% ;熔覆后,试样的屈服强度约为 410 MPa ,抗拉强度为 500 MPa ,延伸率为

10%。可以发现,球墨铸铁熔覆镍基合金后,各项力学性能都得到了提升,熔覆前、后的试样均出现明显的塑性变形,且熔覆后试样的抗塑性变形能力要优于熔覆前的。

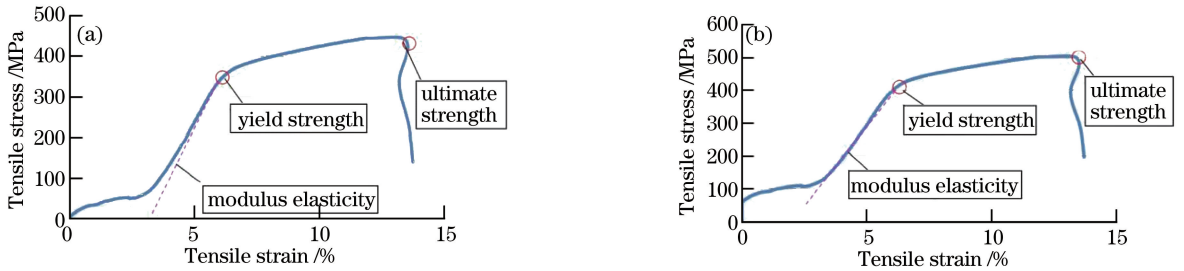


图 6 激光熔覆(a)前和(b)后的试样应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of samples (a) before and (b) after laser cladding

激光熔覆的拉伸试样的断口形貌如图 7 所示,可以看出,基体韧窝数量较多,局部韧窝尺寸较大且较深,甚至出现撕裂带,说明基体在断裂前发生了较大的塑性变形。随着基体向熔覆层过渡,韧窝逐渐消失;熔覆层组织主要呈剪切断裂特征,这是由于受到切应力的作用,试样在拉伸过程中沿滑移面分离,出现滑移面分离断裂。由于镍基合金中 Cu 元素含量较高,而 Cu 具有面心立方晶体结构,具有更多的滑移面,在拉伸过程中,随着拉伸强度的增加,晶体沿滑移面滑动而产生塑性变形,其断口呈解理与准解理混合断裂特征,且在白色条纹带上存在少量韧窝,呈韧性断裂的特征,白色条纹带周边部分呈河流、舌状花样,为脆性断裂。

综合试样应力-应变曲线和断口形貌分析可知,在试样拉伸强度高于抗拉强度时,由于大量缩颈的存在,基体组织最小截面处受到不同方向的力的作用,其中轴向应力最大,这些力会使晶界、局部缺陷等逐步延伸,形成显微孔洞,最后石墨球脱离基体出现孔洞现象。随着拉伸应力的提高,孔洞渐渐长大并相互连接,导致裂纹缓慢长大,留下部分灰色纤维状的区域,其中,石墨球所在的孔洞被拉长是微裂纹萌生的重要原因。当拉伸强度高于基体的而低于熔覆层的时,裂纹逐渐向熔覆层组织的晶粒、晶界过渡,熔覆层开始发生塑性变形。当拉伸强度高于熔覆后基体试样的抗拉强度时,试样发生断裂,其断口主要呈解理与准解理混合断裂特征。因此,激光熔覆拉伸试样的断裂发生在球墨铸铁基体处的结论再次得到验证。

以上试验结果表明,采用该镍基合金粉末材料和最终确定的熔覆工艺参数能够实现球墨铸铁件缺陷的修复。

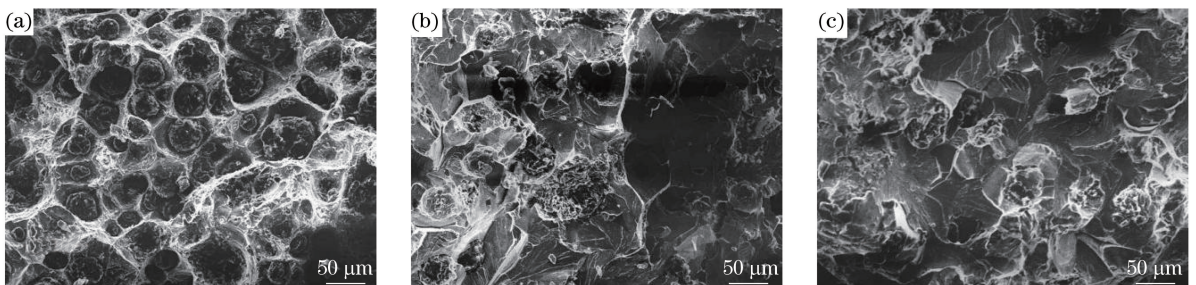


图 7 激光熔覆拉伸试样的断口形貌。(a)基体;(b)结合区;(c)熔覆层

Fig. 7 Fracture morphologies of tensile sample processed by laser cladding. (a) Matrix; (b) bonding zone; (c) cladding layer

4 结 论

采用镍基合金粉对球墨铸铁 QT450-10 进行激光熔覆时,基体与熔覆层之间形成了极好的冶金结合,无裂纹、气孔等缺陷。熔覆层组织比基体的更加细小、均匀,基体的稀释率较很低。当熔覆层数为 1、激光功率为 1.6 kW、激光扫描速率为 $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、送粉速率为 $3.2 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、熔覆温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,熔覆效果良好,其表面硬度达到 265 HV,高于球墨铸铁基体的硬度。熔覆后试样的屈服强度和抗拉强度更高,且抗塑性变形能力优异,试样断裂始于球墨铸铁基体处。所得的激光熔覆工艺参数能够满足对球墨铸铁缺陷修复的要求。

参 考 文 献

- [1] Zan Shaoping, Jiao Junke, Zhang Wenwu. Study on laser cladding process of 316L stainless steel powder [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 061406.
 竺少平, 焦俊科, 张文武. 316L 不锈钢粉末激光熔覆工艺研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 061406.
- [2] Fu Fuxing, Chang Gengrong, Zhao Xiaoxia, *et al.* Influence of laser spot diameter on cladding layer cracking [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 031401.
 付福兴, 畅庚榕, 赵小侠, 等. 激光光斑直径对熔覆层裂纹的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 031401.
- [3] Zhao Jingmei, Gao Shiyong, Mu Mingqiang, *et al.* Ni-based alloy surface layer on copper fabricated by combination of laser cladding and friction stir welding [J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(1): 0106003.
 赵静梅, 高士友, 牟明强, 等. 铜合金表面搅拌摩擦焊和激光熔覆制备镍基合金涂层 [J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0106003.
- [4] Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida, *et al.* Research status and development of laser cladding technology [J]. Applied Laser, 2012, 32(6): 538-544.
 王东生, 田宗军, 沈理达, 等. 激光熔覆技术研究现状及其发展 [J]. 应用激光, 2012, 32(6): 538-544.
- [5] Cheng Gaiqing, Mu Yahui, Li Baozeng. Research progress of laser cladding repairing technology [J]. Hot Working Technology, 2010, 39(18): 129-133.
 程改青, 穆亚辉, 李宝增. 激光熔覆修复技术研究进展 [J]. 热加工工艺, 2010, 39(18): 129-133.
- [6] Hao Baohong, Chen Fangfang, Li Yan. Study on the casting mechanism and functions of graphite ball [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology, 2007, 15(3): 52-55.
 郝保红, 陈方方, 李艳. 球墨铸铁的球化机理及其性能研究 [J]. 北京石油化工学院学报, 2007, 15(3): 52-55.
- [7] Lu Binbin, Xu Jingfeng, Li Yonggang. Analysis of nodular graphite cast iron shrinkage [J]. China Foundry Machinery & Technology, 2017(1): 46-48.
 卢彬彬, 许景峰, 李永刚. 球墨铸铁缩松浅析 [J]. 中国铸造装备与技术, 2017(1): 46-48.
- [8] 刘凯, 李英梅. 球墨铸铁表面堆焊层组织与硬度分析 [J]. 焊接技术, 2017, 46(2): 13-14.
- [9] Yang Jiaoxi, Zuo Tiechuan, Xu Wenqing, *et al.* The research of laser cladding Co-base alloy coating on ductile cast iron [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 517-519.
 杨胶溪, 左铁钊, 徐文清, 等. 球墨铸铁表面激光熔覆钴基合金涂层的研究 [J]. 激光技术, 2006, 30(5): 517-519.
- [10] Li Yangliang, Pan Dong, Gan Chunfei, *et al.* Microstructure and properties of surface laser clad Ni-base alloy layer on QT-500 ductile cast iron [J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(2): 106-109.
 李养良, 潘东, 甘春飞, 等. QT-500 球墨铸铁表面激光熔覆镍基合金的组织与性能 [J]. 金属热处理, 2012, 37(2): 106-109.
- [11] Tong Wenhui, Zhao Zilong, Wang Jie, *et al.* Microstructure and property of laser cladding cobalt based alloy coatings on ductile cast iron [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2016: 1-5.
 童文辉, 赵子龙, 王杰, 等. 球墨铸铁表面激光熔覆钴基合金涂层的组织与性能 [J]. 稀有金属, 2016: 1-5.
- [12] Zhang Jing, Liu Jichang, Zhang Fuquan, *et al.* Fe-Cr-Si-B coating by laser cladding on nodular cast iron [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(5): 133-137.
 张静, 刘继常, 张福全, 等. 球墨铸铁表面激光熔覆 Fe-Cr-Si-B 熔覆层 [J]. 材料热处理学报, 2010, 31(5): 133-137.
- [13] Li Baoling, Wen Zongyin, Feng Shuqiang, *et al.* Research and application of laser cladding Ni-based alloy on ductile cast iron [J]. Laser Journal, 2012, 33(3): 35-36.
 李宝灵, 温宗胤, 冯树强, 等. 球墨铸铁激光熔覆镍基合金的研究与应用 [J]. 激光杂志, 2012, 33(3): 35-36.
- [14] Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 296-301.
 朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响 [J]. 中国激光, 2010, 37(1): 296-301.
- [15] Lu Qinglong, Wang Yanfang, Li Li, *et al.* Effects of scanning speed on microstructures and properties of laser cladding Fe-based amorphous composite coatings [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0203007.
 鲁青龙, 王彦芳, 栗荔, 等. 扫描速度对激光熔覆铁基非晶复合涂层组织与性能的影响 [J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0203007.

- [16] Yang Jiaoxi, Wen Qiang, Li Ziyang, *et al.* Influence of Ni additions on the microstructures and properties of laser clad CuAl10 coatings[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0306006.
杨胶溪, 文强, 李子阳, 等. 添加 Ni 对激光熔覆 CuAl10 铜合金组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0306006.