doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2022.04.05

基于灰铸铁表面多道搭接熔覆成形质量及组织性能研究

郭士锐,赵 阳,崔陆军,郑 博,陈永骞
(中原工学院 机电学院,郑州 450007)

摘 要:为强化修复受损的铸铁件,提高其性能,延长服役寿命。采用高能量密度激光器在灰铸铁 HT250 表面制备多道搭接铁基合金熔覆层,通过熔覆层稀释率及表面平整度两个重要质量指标对搭接率进行优化,利用体式显微镜、光学显微镜和数显维氏硬度计等对熔覆层的横截面形貌特征、金相显微组织和显微硬度进行研究。结果表明,在搭接率为 35%时,熔覆层稀释率与表面平整度最优,稀释率仅为 5.16%;熔覆层显微组织由下而上依次为粗大的树枝晶与胞状晶、交叉生长的柱状晶、等轴晶,搭接区域经过重熔结晶后,形成分布较稀疏的胞状晶;平均显微硬度 $HV_{0.3}$ 达 834,性能相较于灰铸铁基体显著提高,为激光熔覆修复强化铸铁件提供了重要参考依据。

关键词:灰铸铁;激光熔覆;铁基合金;稀释率;表面平整度
中图分类号:TP174.4 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-1744(2022)04-0031-05

Study on Forming Quality, Microstructure and Properties of Multi-Lap Cladding on the Surface of Gray Cast Iron

GUO Shirui, ZHAO Yang, CUI Lujun, ZHENG Bo, CHEN Yongqian
(School of Mechanical & Electronic Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: In order to strengthen the repair of damaged iron castings, improve their performance, and extend service life. A high-energy density laser was used to prepare a multi-pass iron-based alloy cladding layer on the surface of gray cast iron HT250. The overlap rate was optimized by two important quality indicators, the dilution rate of the coating and the surface flatness. The cross-sectional morphology was measured with a stereo microscope, the metallographic structure was photographed with an optical microscope, and the digital Vickers hardness tester was used to test the microhardness. The results show that when the overlap rate is 35%, the dilution rate and surface flatness of the coating are the optimal, and the dilution rate is only 5.16%. The microstructure of the coating from bottom to top is coarse dendrites and cellular crystals, cross-grown columnar crystals, equiaxed crystals. After the overlapping area is remelted and crystallized, sparsely distributed honeycomb crystals are formed. The average microhardness is 834 $HV_{0.3}$, and the performance is significantly improved compared to the gray cast iron. It provides an important reference for repairing and strengthening cast iron by laser cladding.

Key words: gray cast iron; laser cladding; iron-based alloy; dilution rate; surface flatness

收稿日期:2021-08-30
基金项目:河南省科技攻关计划项目(202102210068);河南省自然科学基金面上项目(212300410422);河南省高等学校重点科研项目(20A460033,20A460031);河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(YJS2022AL057);中原工学院科研团队发展项目"激光增材制造技术团队"(K2021TD002);安徽理工大学矿山智能装备与技术安徽省重点实验室开放基金项目(KSZN202002003)
Fund: Supported by Henan Province Science and Technology Research Program (202102210068); General Project of Henan Natural Science Foundation (212300410422); Key Scientific Research Projects of Henan Province Colleges and Universities (20A460033, 20A460031); Postgraduate Education Reform and Quality Improvement Project of Henan Province (YJS2022AL057); "Laser Additive Manufacturing Technology Team" of Scientific Research Team Development Project of Zhongyuan University of Technology (K2021TD002); Anhui Province Open Fund Project of Anhui Provincial Key Laboratory of Mining Intelligent Equipment and Technology, University of Science and Technology (KSZN202002003)
作者简介:郭士锐(1986—),男,副教授,硕士生导师,博士,主要从事激光增材制造的研究。
引用格式:郭士锐,赵阳,崔陆军,等. 基于灰铸铁表面多道搭接熔覆成形质量及组织性能研究[J]. 有色金属工程,2022,12(4):31-35.
GUO Shirui, ZHAO Yang, CUI Lujun, et al. Study on Forming Quality, Microstructure and Properties of Multi-Lap Cladding on the Surface of Gray Cast Iron[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(4): 31-35.

铸铁具有良好的切削性、可铸性和减震性等优点，被广泛的用于制造形状复杂的零部件，然而铸铁中石墨含量高，游离石墨与铸铁基体之间存在间隙及恶劣的工作环境等因素，致使铸铁表面开裂，进而失效。灰铸铁常用于发动机汽缸盖、缸套及汽车制动盘等，剧烈磨损、腐蚀等工况使工件提前失效，造成资源浪费[1]。

发动机汽缸盖是常用的铸铁件之一，用于将汽缸中的废气排出和新鲜空气的交换，在密闭的空间里快速循环往复地改变工作温度，产生交替变化的热应力，工作环境恶劣，又由于灰铸铁的强度和刚度较低，在汽缸盖顶部进气口和排气口的阀座之间，因应力较大易产生裂纹缺陷[2]。

激光熔覆技术可以将老旧的铸铁件进行再制造修复，从而达到绿色环保、节约资源的目的[3]。为提高铸铁件的性能，国内外专家学者对应用激光熔覆技术提高铸铁件的性能展开了一系列的研究。张坤[4]分别对灰铸铁和球墨铸铁进行激光修复研究，发现稀释率是控制裂纹缺陷的重要参数。ZHU等[5]使用多组工艺参数在灰铸铁表面制备单道熔覆Cu-Ti-Ni合金涂层，发现工艺参数不合理时，经常会出现气孔和裂纹缺陷。杨鹏聪等[6]研究了不同扫描速度对球墨铸铁表面熔覆铁基合金涂层稀释率与组织性能的影响，发现扫描速度较大时，稀释率较小，且裂纹敏感性降低。童文辉等[7]在球墨铸铁表面制备了钴基碳化钛合金涂层，发现工艺参数对枝晶数量、枝晶间距和硬度影响显著。从上述研究可发现，工艺参数对铸铁件表面激光修复质量具有重大影响，而目前对于多道修复工艺参数优化以降低稀释率，提高熔覆层表面平整度，从而保证熔覆层质量鲜有研究。

本文在灰铸铁表面单道激光熔覆铁基合金工艺探究的基础上，采用大功率半导体光纤耦合激光器在灰铸铁基材上进行多道搭接熔覆，以稀释率及表面平整度为评价指标，优化出成形质量最佳的搭接率，并对熔覆层的显微组织、显微硬度等进行分析，为修复受损的铸铁件提供重要参考依据。

1 实验

本次实验采用大功率半导体光纤耦合激光器在平板基材上进行搭接熔覆，激光束光斑直径为3 mm，同轴四路送粉，基材是灰铸铁HT250，尺寸为100 mm×50 mm×20 mm，实验前将基体打磨至光整，酒精擦拭，去除表面油污。粉末选用铁基定制合金，具体成分为C、Si、Cr、Mo、Ni、Mn、P、Fe，其对应的质量分数分别为0.2%～0.3%、0.5%、17%～20%、0.1%、0.3%、0.5%、1.5%、Bal，粉末粒度尺寸范围为53～150 μm，粒度分布以微米为单位，成分均匀，有利于形成致密组织，实验前在干燥箱中烘干，温度为120 ℃，持续2 h，保证粉末的流动性较好，保护气体为N_2。结合之前对于单道熔覆工艺优化的研究结果，进行4次搭接熔覆，激光功率为1 400 W，扫描速度为6 mm/s，送粉速率为17.2 g/min，搭接率分别为25%、35%、45%、55%、65%。熔覆后切割、镶嵌制样，磨抛至表面无划痕，王水腐蚀。使用体式显微镜对搭接熔覆层截面宏观形貌进行拍摄，图像处理软件测量熔覆层几何特征，光学显微镜和显微硬度计对熔覆层的组织性能进行测试。

2 结果与分析

2.1 宏观形貌

经过优化后的单道工艺参数进行多道搭接熔覆涂层特征如图1所示，搭接熔覆后熔覆层无宏观裂纹缺陷，但在搭接率为55%和65%时，在搭接处出现大尺寸孔洞缺陷。当搭接率为65%，熔覆层成形质量较差，不适宜进行后续搭接工艺。为进一步优化多道搭接熔覆工艺搭接率(25%～55%)，引入稀释率与表面平整度的理论概念。稀释率(DR)反映了基材对熔覆层的稀释程度，定义如式(1)所示：

$$DR = \frac{A_d}{A_c + A_d} \times 100\% \tag{1}$$

式中，DR为熔覆层稀释率；A_c为熔覆层面积；A_d为熔覆层稀释面积；在实际工程需求中，稀释率需小于10%(5%左右为最佳)。

表面平整度(SR)定义如式(2)所示：

$$SR = \frac{A_c}{W \times H} \tag{2}$$

式中，SR为熔覆层表面平整度；A_c为熔覆层面积；W为熔覆层宽度；H为熔覆层高度。

表面平整度越大，熔覆层质量越好，对后续加工生产越有利。熔覆层稀释率及表面平整度测量计算结果如表1所示，由表1可知，随着搭接率的增大，稀释率在25%～35%内缓慢降低，这是因为，搭接率的增大，输入的激光能量束被粉末、基材及前一道熔覆层共同吸收，搭接率的增大使基材吸收的能量降低，同时由于粉末的遮蔽作用，熔覆层稀释面积减小。但当搭接率大于35%时，稀释率开始缓慢增

大,这是因为后续搭接的涂层重熔区域随搭接率增大而增大,进而使熔池的温度增大,熔融液体流动性增强,熔覆层的稀释面积增大,熔覆层面积减小,因此稀释率呈缓慢增大趋势。相反的是,搭接率在25%~35%内,表面平整度增大,这是由于搭接率增大时,整体温度将持续增大,一定程度上降低了两端的热量集中,同时,熔池温度的升高会加剧流动,样品表面趋于平整,表面平整度增大;但随着搭接率的持续增大,熔覆层面积先急剧减小而后趋于平缓,$W\times H$值具有相同的趋势但不显著,导致表面平整度减小,但作用并不明显。由表 1 可发现,当搭接率为 35%时,熔覆层稀释率最小且接近最优,根据 LI 等[9]的研究,稀释率越小,熔覆层性能越优,且搭接率为 35%时熔覆面积最大、平整度最优,熔覆面积最大、粉末利用率高且后加工处理便利,降低成本,因此可得出结论,最优搭接率为 35%。

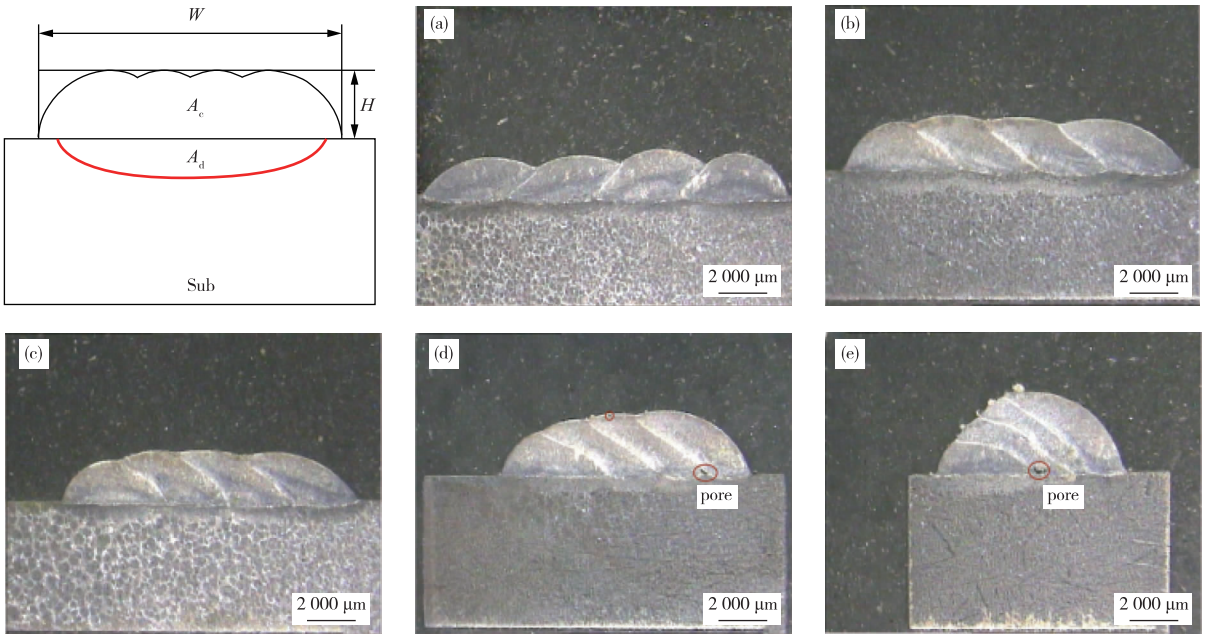

图 1　多道搭接熔覆层横截面形貌:

(a)搭接率 25%;(b)搭接率 35%;(c)搭接率 45%;(d)搭接率 55%;(e)搭接率 65%

Fig. 1　Cross-sectional morphology of multi-pass cladding:

(a)Overlap rate 25%;(b)Overlap rate 35%;(c)Overlap rate 45%;(d)Overlap rate 55%;(e)Overlap rate 65%

表 1　不同搭接率下熔覆层几何特征数据

Table 1　Geometry characteristic data of cladding layer under different overlap ratios

Overlap rate /%	Cladding area /mm²	Dilution area /mm²	Dilution rate/%	Melting width/mm	Melting height/mm	Surface flatness
25	21.1	1.69	7.42	15.17	1.9	0.73
35	24.08	1.31	5.16	14.27	1.92	0.88
45	19.62	1.57	7.41	12.23	1.99	0.81
55	18.69	1.60	7.89	10.17	2.35	0.78

2.2　显微组织

涂层的微观结构直接影响激光熔覆零件的性能和使用寿命。显微组织分析是控制熔覆层内部质量的主要手段之一。将熔覆层横截面试样用王水腐蚀后得到图 2 所示的金相组织,涂层与基材之间具有良好的冶金效果。在热影响区域,由于基体产生了淬火作用,存在少量的马氏体等冷硬组织[10]。晶体的形态取决于合金成分和冷却条件,熔覆层底部温度梯度(G)最大且结晶速率(R)最小,且实际温度低于液相线温度,因此液体可以在低于液相线温度的情况下过冷,但熔覆层底部过冷度小,同时基体在熔覆过程中热传导良好,因此结合区附近的粗大晶体很好地黏附在基体上,如图 2(c)所示,在熔覆过程开始时,由于温度梯度较高,可观察到胞状晶和树枝晶,枝体的生长方向与界面呈一定角度。伴随着熔覆结晶的进行,在熔覆层中部结晶放热导致 G 减小和 R 的增大,过冷度增大,胞状晶开始向柱状晶体转变,形成图 2(b)所示结构。如图 2(a)所示,在熔覆层顶部 G 最小,R 最大,成分过冷度进一步增大,因此形成

了以等轴晶为主的显微组织。图 2(d)为熔覆层中部搭接位置显微组织,搭接位置显示为一条明亮带,由于搭接熔覆时会将前一道熔覆层的表层熔化重新结晶,主要为分布较稀疏的胞状晶。

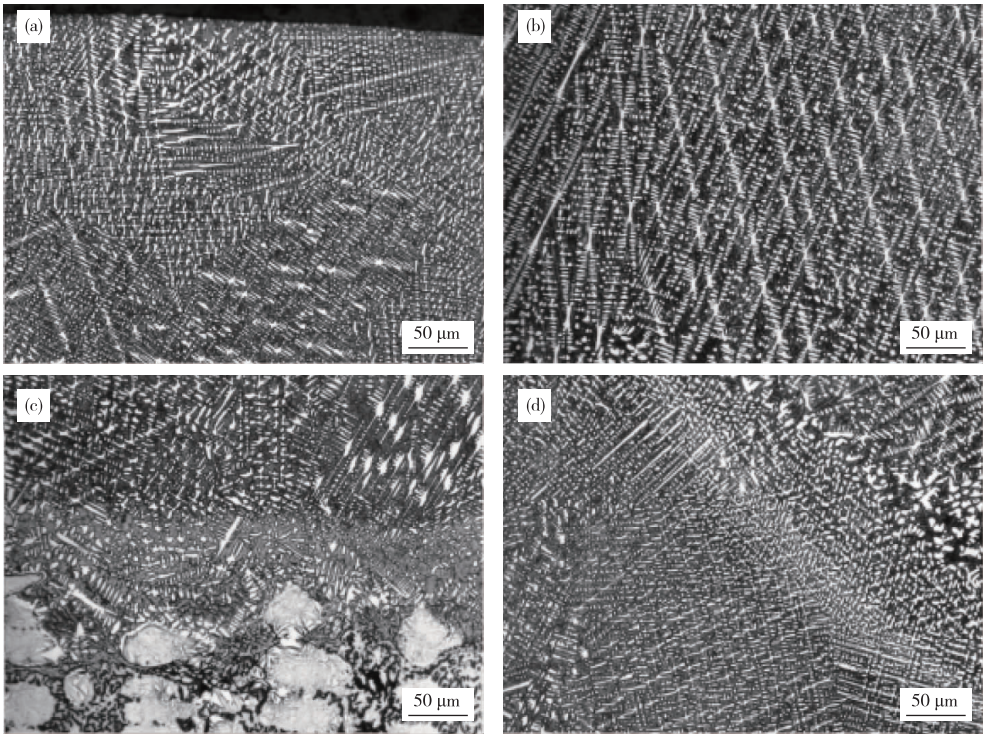

图 2 熔覆层显微组织:(a)顶部;(b)中部;(c)底部;(d)搭接区域

Fig. 2 Microstructure of cladding layers: (a) Top; (b) Middle; (c) Bottom; (d) Overlap area

2.3 显微硬度

显微硬度是反映熔覆层微观结构和力学性能的一个重要指标。为了研究多道搭接显微硬度的变化,对垂直于扫描方向的样品横截面试样沿垂直方向采用数显维氏硬度计进行测量,间隔 0.1 mm,结果如图 3(a)所示。显微硬度由基材到熔覆层的上表面呈现梯度上升趋势,这种趋势对修复后的质量是极其有利的。基材(Sub)的 $HV_{0.3}$ 硬度在 160~210内波动,热影响区(HAZ)由于产生了淬火作用,发生了马氏体相变,因此硬度较基材显著提高,在熔覆层的稀释区域(DZ),由于石墨相溶解生成了高碳含量的马氏体、渗碳体等,因此硬度急剧增

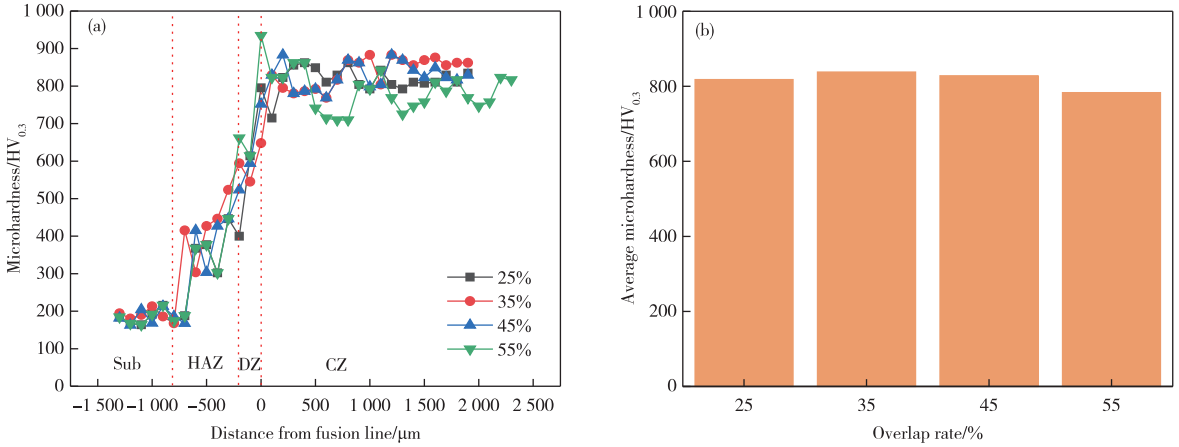

图 3 熔覆层显微硬度:(a)不同搭接率下熔覆层硬度分布;(b)平均硬度

Fig. 3 Microhardness of cladding layer: (a) The hardness distribution of the cladding layer under different lap ratios; (b) The average hardness

大,甚至高于熔覆区域(CZ),熔覆层硬度距测量位置不同的位置硬度也有所差异,这是由于在熔覆层中存在着细晶强化和固溶强化两种强化作用,多道搭接熔覆层内晶体组织大小不同且硬质相分布弥散,因此熔覆区域内硬度曲线出现跳动。4 种搭接率下的熔覆层平均 $HV_{0.3}$ 分别为 818、834、828 和 783,如图 3(b)所示,在搭接率 35%时,平均硬度最大,55%时最低,这是因为在搭接率为 55%时,熔覆层存在气孔缺陷且熔覆层重熔区域增宽,二次加热范围增大,影响熔覆层内组织生长,进而使熔覆层硬度降低,但搭接率在 25%～45%内,熔覆层整体平均硬度变化不太显著。

3　结论

1)在灰铸铁表面进行多道搭接熔覆铁基合金涂层时,在搭接率超过 55%时,搭接位置易出现大尺寸孔洞缺陷,且搭接率为 65%时,熔覆层成型质量差,不适用于后续搭接。

2)在搭接率为 25%～55%内,随着搭接率的增大,稀释率先减小后增大,表面平整度先增大后减小,在搭接率为 35%时,熔覆层稀释率最优且表面平整度最高,稀释率仅 5.16%,表面平整度为 0.88,熔覆层质量最优,为试验最佳多道搭接工艺。

3)最优多道搭接工艺下的熔覆层显微组织由下而上依次为粗大的树枝晶与胞状晶、交叉生长的柱状晶、等轴晶,搭接区域经过重熔结晶后,形成大量分布较稀疏的胞状晶;熔覆层平均显微硬度 $HV_{0.3}$ 达 834,相较于灰铸铁基体显著提高。

参考文献:

[1] 邓猛,王义强,谷岩,等.激光强化灰铸铁导轨的微观组织及磨损性能[J].中国激光,2014(4):109-114.
DENG Meng, WANG Yiqiang, GU Yan, et al. Microstructure and wear behavior of laser hardened grey cast iron guideway[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014(4):109-114.

[2] LIU Z C, JIANG Q H, LI T, et al. Environmental benefits of remanufacturing: A case study of cylinder heads remanufactured through laser cladding [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 133: 1027-1033.

[3] DONG S Y, YAN S X, XU B S, et al. Laser cladding remanufacturing technology of cast iron cylinder head and its quality evaluation[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2013, 27(1): 90-93.

[4] 张坤.铸铁激光再制造技术的研究[D].杭州:浙江工业大学,2017.
ZHANG Kun. Study on laser remanufacturing of cast iron[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.

[5] ZHU L J, LIU Y H, LI Z W, et al. Microstructure and properties of Cu-Ti-Ni composite coatings on gray cast iron fabricated by laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 122: 105879. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105879.

[6] 杨鹏聪,宋雨来,刘耀辉,等.扫描速度对球墨铸铁激光熔覆层组织的影响[J].表面技术,2018,47(9):196-201.
YANG Pengcong, SONG Yulai, LIU Yaohui, et al. Effect of scanning speed on microstructure of laser cladding layer of nodular cast iron [J]. Surface Technology, 2018, 47(9): 196-201.

[7] 童文辉,张新元,李为轩,等.激光工艺参数对 TiC 增强钴基合金激光熔覆层组织及性能的影响[J].金属学报,2020,56(9):1265-1274.
TONG Wenhui, ZHANG Xinyuan, LI Weixuan, et al. Effect of laser process parameters on the microstructure and properties of TiC reinforced Co-based alloy laser cladding layer[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(9): 1265-1274.

[8] 李嘉宁.激光熔覆技术及应用[M].北京:化学工业出版社,2016.
LI Jianing. Laser cladding technology and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.

[9] LI Y J, DONG S Y, LIU X T, et al. Interface phase evolution during laser cladding of Ni-Cu alloy on nodular cast iron by powder pre-placed method[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 135: 106684. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106684.

[10] 闫世兴,董世运,徐滨士,等.预热温度对灰铸铁表面激光熔覆镍基涂层组织与性能的影响[J].材料工程,2015,43(1):30-36.
YAN Shixing, DONG Shiyun, XU Binshi, et al. Effect of preheating temperature on microstructure and property of laser clad Ni-based alloy coating on gray cast iron substrate[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(1): 30-36.

(编辑　金开生)