

# 超高速激光熔覆 Fe-Cr-B 基耐磨涂层工艺优化及性能研究<sup>①</sup>

刘志威<sup>1</sup>, 魏祥<sup>2</sup>, 汪力<sup>2</sup>, 石锋<sup>1</sup>, 陈志国<sup>1,2</sup>

(1.中南大学材料科学与工程学院,湖南长沙410083; 2.湖南人文科技学院能源与机电工程学院,湖南娄底417000)

**摘要:** 使用超高速激光熔覆在45钢表面制备了Fe-Cr-B基耐磨涂层。采用正交实验研究了激光功率、扫描速度和送粉速度对单道熔覆层宽高比和裂纹的影响,并研究了搭接率对熔覆层表面质量的影响。结果表明,适宜的工艺参数为:激光功率2300W、扫描速度250mm/s、送粉速度24g/min、搭接率70%,此工艺参数下涂层硬度在754HV<sub>0.2</sub>到831HV<sub>0.2</sub>之间(是基体硬度的2.36~2.60倍),在相同条件下铁基涂层的体积磨损量仅为电镀硬铬镀层的3.64%。

**关键词:** 表面改性; 激光熔覆; 铁基涂层; 正交实验; 摩擦磨损; 耐磨涂层

中图分类号: TG174

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.05.038

文章编号: 0253-6099(2023)05-0169-05

## Process Optimization and Property Investigation for Ultra-High-Speed Laser Cladded Fe-Cr-B Based Wear-Resistant Coating

LIU Zhiwei<sup>1</sup>, WEI Xiang<sup>2</sup>, WANG Li<sup>2</sup>, SHI Feng<sup>1</sup>, CHEN Zhiguo<sup>1,2</sup>

(1.School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2.School of Energy and Electromechanical Engineering, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi 417000, Hunan, China)

**Abstract:** Fe-Cr-B based wear-resistant coating was prepared on the surface of 45 steel by ultra-high-speed laser cladding. The effects of laser power, scanning speed and powder feeding speed on the aspect ratio and crack of single pass cladding layer were studied by orthogonal experimental method, and the effects of overlap rates on the surface quality of cladded layer was also studied. The optimal process parameters were determined as follows: laser power of 2300 W, scanning speed of 250 mm/s, powder feeding speed of 24 g/min, and overlap rate of 70%. The results show that the hardness of the coating is between 754HV<sub>0.2</sub> and 831HV<sub>0.2</sub>, which is 2.36 times to 2.60 times of the matrix hardness. Under the same conditions, the volume wear of the coating is only 3.64% of electroplated hard chromium coating.

**Key words:** surface modification; laser cladding; Fe-based coating; orthogonal experimental method; friction and wear; wear-resistant coating

矿物开采作业环境恶劣,液压支柱、油缸等设备长期在这种工况下运行会产生严重的磨损和腐蚀<sup>[1-2]</sup>。电镀硬铬是传统表面强化常用方法,但镀层与基体结合力弱,容易剥落,且电镀过程产生的废液对环境污染极大<sup>[3]</sup>,随着环保意识不断提高,电镀作业受到限制。激光熔覆技术是20世纪70年代随着大功率激光器的发展而兴起的一种表面改性技术,可以获得无气

孔、无裂纹的高质量涂层,制备的涂层与基体具有较为牢固的冶金结合,不易剥落<sup>[4]</sup>。激光熔覆还是一种绿色无污染的技术,对环境十分友好。已有许多学者对液压油缸和立柱的表面激光熔覆技术应用进行了探索,制备的涂层性能显著优于基体<sup>[5-8]</sup>。但传统的激光熔覆技术存在熔覆效率低、涂层过厚、表面质量差等问题,在实际应用中受到限制<sup>[9]</sup>。2017年,德国亚琛激

① 收稿日期: 2023-04-25

基金项目: 湖南省“双一流”学科建设项目(湘教通2018-469号); 湖南省自然科学基金(2020JJ5274)

作者简介: 刘志威(1998—),男,湖南娄底人,硕士研究生,主要研究方向为超高速激光熔覆涂层。

通信作者: 魏祥(1988—),男,湖南安化人,副教授,主要研究方向为高性能耐磨材料。

光技术研究提出了超高速激光熔覆技术<sup>[10]</sup>,该技术解决了传统激光熔覆的缺点,引起了学者们的广泛关注。与传统激光熔覆涂层相比,超高速激光熔覆涂层较薄,具有更低的粗糙度和更小的晶粒尺寸,耐腐蚀性能显著提高,耐磨性能更优异<sup>[11-12]</sup>。在涂层制备过程中,影响涂层性能的主要因素除熔覆粉末外,工艺参数也起着决定性作用<sup>[13-14]</sup>,因此对工艺参数的研究至关重要。本文采用超高速激光熔覆在45钢表面制备了Fe-Cr-B基耐磨涂层,研究了超高速激光熔覆工艺参数对熔覆层性能的影响,并对比研究了其与电镀硬铬镀层的摩擦磨损性能。

## 1 实验材料及方法

实验选用经调质处理的45钢棒作为基材,尺寸为 $\Phi 50\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ ,对基材使用车床进行精车,并用无水乙醇清洗其表面。熔覆材料为 $50\sim 75\text{ }\mu\text{m}$ 铁基合金粉末和 $15\sim 50\text{ }\mu\text{m}$  FeB合金粉末,粉末化学成分如表1所示。将2种粉末使用球磨机混合均匀,其中FeB合金粉末含量为12.66%(质量分数)。熔覆前将混合粉末在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中干燥2 h。

表1 粉末化学成分(质量分数) %

粉末名称	C	Cr	Ni	B	Si	Fe
铁基合金粉末	0.19	17.5	2.32	0.89	0.96	余量
FeB合金粉末	0.29	—	—	15.8	0.25	余量

激光熔覆设备为南京辉锐光电科技有限公司开发的移动式激光熔覆设备Fumu4kw。本次实验首先选用三因素三水平的正交实验方案进行单道熔覆,如表2所示。筛选出合适工艺参数后,使用该工艺参数

进行多道熔覆实验,多道熔覆实验的搭接率分别为70%、80%和90%。

在熔覆层上切出块状样品进行后续微观组织和性能检测。使用徕卡DM4M金相显微镜和SIRION200场发射扫描电镜观察涂层截面显微组织,采用D/Max2550 X射线衍射仪表征涂层物相,采用HMV-2T硬度计测量涂层截面硬度,载荷1.96 N,保压时间10 s。在UMT-3摩擦磨损试验机上进行了干滑动摩擦磨损实验,磨球为直径9.5 mm的 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷球,载荷为30 N,往复摩擦距离为10 mm,摩擦时间为40 min,频率为30 Hz,根据二维轮廓数据计算涂层体积磨损量。采用Quanta-200环境扫描电子显微镜对摩擦磨损表面形貌进行表征。

表2 单道熔覆正交实验表

水平	激光功率/W	扫描速度/( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	送粉速度/( $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ )
1	2 000	200	16
2	2 300	250	20
3	2 600	300	24

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 单道熔覆形貌分析

图1为不同工艺参数下的单道熔覆层横截面光学显微镜照片。由图1可知,不同工艺参数下制备的单道熔覆层宽高比明显不同,除图1(c)、(d)、(f)、(h)和(j)出现裂纹外,其他单道熔覆层都十分致密。随着激光功率增大,粉末吸收的能量增加,熔覆层增厚,但激光功率2 600 W时,单道熔覆层又显著变薄,这是因为2 600 W时激光能量密度过大,导致粉末颗粒气化、飞溅,熔覆在基体表面的粉末变少。

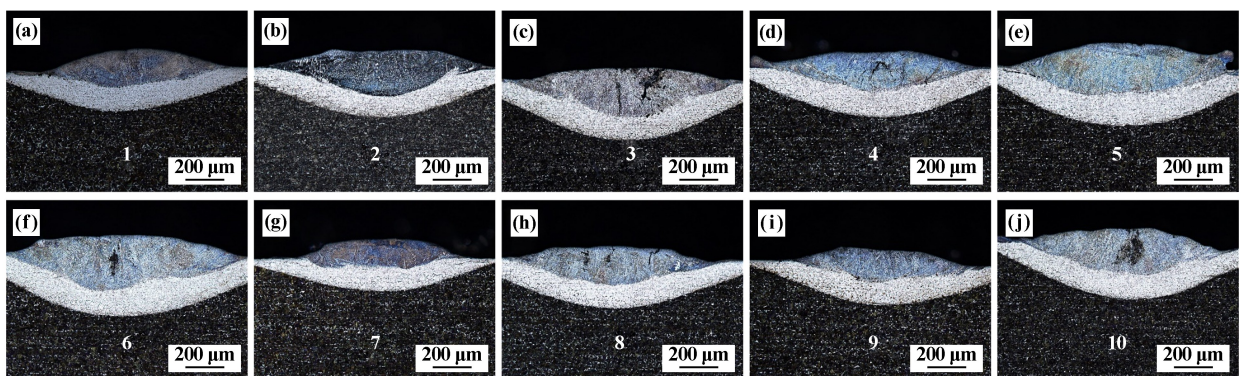


图1 单道熔覆层横截面光学显微镜图像

图2为单道熔覆层示意图,其中 $W$ 为单道熔覆层宽度, $H$ 为单道熔覆层高度,对熔覆层宽高比( $W/H$ )进行计算,具体数据与极差分析结果如表3所示。极

差分析可以确定影响试验结果的主次因素,极差值 $R$ 越大,表示该因素对试验结果的影响越大。可以看出工艺参数对熔覆层宽高比的影响从大到小依次为:激

光功率>扫描速度>送粉速度。激光功率越大,扫描速度越小,宽高比越大;送粉速度对宽高比的影响没有明显规律。超高速激光熔覆的多道搭接率都较高,可达 70%~90%<sup>[15-16]</sup>,选择宽高比小的工艺参数,可以减少搭接时熔覆层的重熔面积,使(Fe,M)<sub>2</sub>B 相分布更均匀,从而保证熔覆层的性能<sup>[17]</sup>。无裂纹和孔洞是制备高性能涂层的前提条件,因此在筛选时首先排除易产生裂纹的单道熔覆工艺参数。由表 3 可知,6 号样宽高比最小,但单道熔覆层存在裂纹;5 号样宽高比稍大于 6 号样且无裂纹生成,所以将 5 号样的工艺参数暂定为较佳的工艺。再由表 3 可知,宽高比最小的参数组合为:激光功率 2 300 W、扫描速度 250 mm/s、送粉速度 16 g/min,但正交实验表中没有这组参数组合,因此采用该参数进行了单道熔覆的验证实验,其截面形貌如图 2(j)所示,该工艺参数的单道熔覆层宽高比为 4.506,可以看到该单道熔覆层存在裂纹,过低的送粉速度不匹配当前的激光功率,激光能量过剩导致单道熔覆层热积累严重,产生裂纹。结合表 3 数据分析,适宜的工艺参数为:激光功率 2 300 W、扫描速度 250 mm/s、送粉速度 24 g/min,对应 5 号样品。

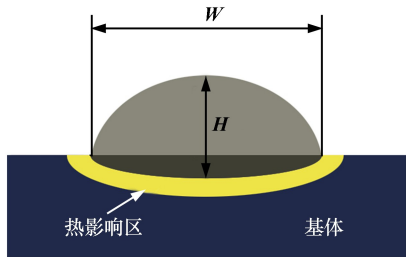


图 2 单道熔覆层示意图

表 3 正交试验结果

试验号	激光功率/W	扫描速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	送粉速度/(g·min <sup>-1</sup> )	宽高比(W/H)	裂纹
1	2 000	200	16	5.411	无
2	2 000	250	20	5.136	无
3	2 000	300	24	4.891	有
4	2 300	200	20	5.970	有
5	2 300	250	24	4.695	无
6	2 300	300	16	4.569	有
7	2 600	200	24	6.392	无
8	2 600	250	16	5.598	有
9	2 600	300	20	6.084	无
K <sub>1</sub>	15.438	17.773	15.578		
K <sub>2</sub>	15.234	15.429	17.190		
K <sub>3</sub>	18.074	15.544	15.978		
k <sub>1</sub>	5.146	5.924	5.193		
k <sub>2</sub>	5.078	5.143	5.730		
k <sub>3</sub>	6.025	5.181	5.326		
R	0.947	0.781	0.537		

### 2.2 不同搭接率下多道熔覆层的形貌分析

图 3 为适宜工艺参数下不同搭接率的多道熔覆层表面形貌,可以看出搭接率 70%时,熔覆层表面质量较好,表面无孔洞,较为平整。搭接率 80%时,熔覆层从熔覆起点到熔覆终点方向呈现左低右高的形貌,随着搭接率继续增加,这种现象更加严重;搭接率 90%时,熔覆层右端开始出现凹凸不平的孔洞,这种现象是搭接率过高、熔覆层反复重熔所致,适宜的搭接率为 70%,后续均按此搭接率进行实验。

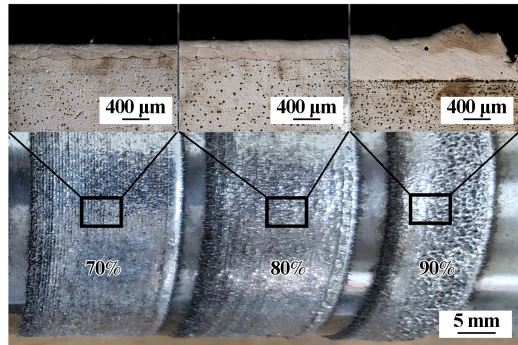


图 3 不同搭接率下涂层表面形貌

### 2.3 涂层显微组织分析

涂层金相和扫描电镜观察结果分别如图 4~5 所示。由图 4 可见,涂层与基体形成了良好的冶金结合,涂层致密,无裂纹、孔洞等缺陷,合适的搭接率使得涂层表面平整,粗糙度低。从图 5(b)可以看到,涂层底部晶粒有明显取向特征,大部分晶粒都垂直于基体生长,这是因为在涂层底部只能通过基体进行热传导,有明显的温度梯度方向。如图 5(a)所示,涂层上部晶粒更加细小,甚至出现纳米尺寸晶粒,晶粒取向杂乱,有等轴晶也有树枝晶,这是因为在涂层顶部区域除了通过基体导热外,还可以借助空气进行对流传热,冷却速度更快,因此出现了细小的等轴晶;涂层上部可以看到鱼骨状(Fe,M)<sub>2</sub>B 共晶组织,超高速激光熔覆具有极高的冷却速度,在这种冷却速度下晶粒来不及长大就已经完成凝固,且 B 元素在钢中的固溶度很低,超过

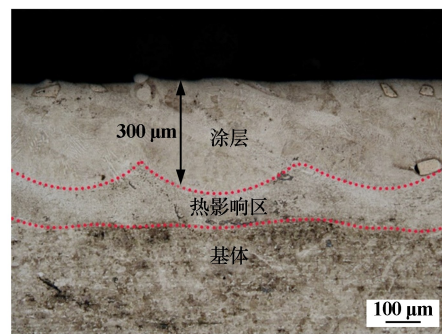
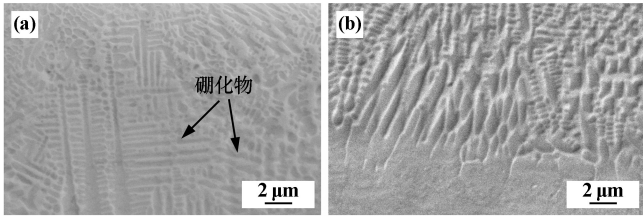


图 4 涂层横截面金相组织



(a) 涂层上部; (b) 涂层底部  
图5 涂层横截面 SEM 图像

固溶度后会优先在晶界处形成金属硼化物<sup>[18]</sup>,进一步阻止了晶粒的长大,这些细小的晶粒起到了细晶强化的作用,提高了涂层的性能。

图6为涂层X射线衍射图。由图6可知,涂层主要由马氏体和通过超高速激光熔覆原位形成的 $(Fe, M)_2B$ 相组成,并且还可能含有极少量的 $\gamma-Fe$ 。其中, $(Fe, M)_2B$ 相中的M以Cr为主,可能还含有少量Ni。

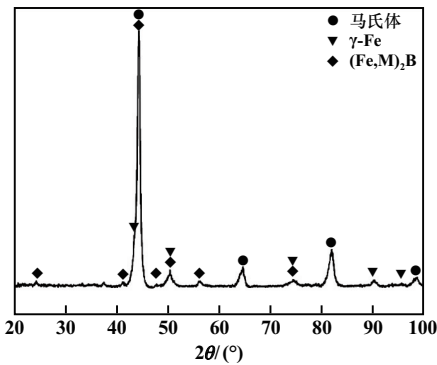


图6 涂层 XRD 图谱

### 2.4 涂层显微硬度

图7为涂层沿深度方向硬度变化曲线。从图7可以看出,涂层硬度在 $754HV_{0.2}$ 到 $831HV_{0.2}$ 之间,基体硬度 $320HV_{0.2}$ 左右,涂层硬度是基体的2.36~2.60倍,涂层硬度主要与涂层中的 $(Fe, M)_2B$ 、马氏体<sup>[12]</sup>和晶粒尺寸有关,极高的冷却速度以及合适的搭接率有助于晶粒细化,B元素的加入也能提高涂层的淬透性,

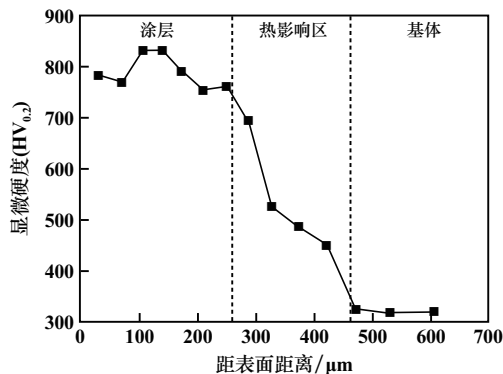


图7 涂层沿深度方向硬度变化曲线

促进马氏体转变<sup>[19]</sup>。

### 2.5 耐磨性能

图8为铁基涂层与电镀硬铬镀层磨痕二维轮廓图,表4为两种涂层的体积磨损量。铁基涂层的耐磨性能显著优于电镀硬铬镀层,铁基涂层表面仅有轻微磨损,且由于磨损表面生成了磨屑膜,涂层表面部分区域厚度有所增加,而电镀硬铬镀层的磨损深度明显大于铁基涂层,通过计算可得,铁基涂层的体积磨损量仅为电镀硬铬镀层的3.64%。

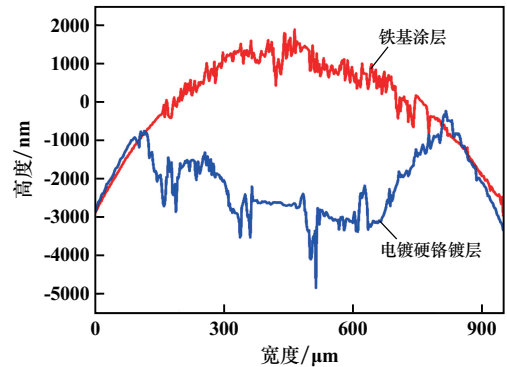
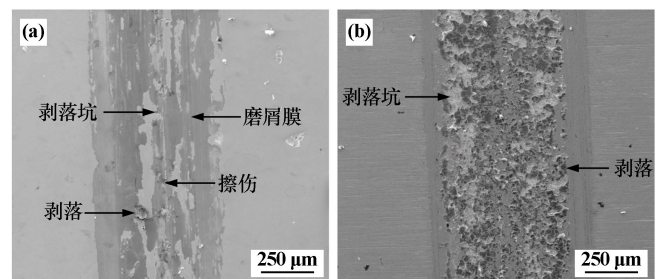


图8 铁基涂层与电镀硬铬镀层磨痕二维轮廓图

表4 铁基涂层与电镀硬铬镀层体积磨损量

样品名称	体积磨损量 ( $\times 10^{-3} \text{ mm}^3$ )
铁基涂层	1.02
电镀硬铬镀层	28.01

铁基涂层和电镀硬铬镀层磨损表面整体形貌如图9所示。铁基涂层表面仅存在少量剥落、擦伤,有大面积的磨屑膜,这主要归因于涂层的高硬度以及 $(Fe, M)_2B$ 对涂层的强化作用,硬质相阻止了涂层的进一步磨损,且磨损表面形成的磨屑膜可以对涂层起一定的保护作用,涂层的磨损机理主要为黏着磨损。电镀硬铬镀层表面出现了大量剥落,磨损机理为疲劳磨损,这主要是因为电镀硬铬镀层与基体的结合力弱,在反复摩擦下,镀铬层与基体的结合处开始萌生裂纹,最终导致镀铬层剥落。



(a) 铁基涂层; (b) 电镀硬铬镀层

图9 铁基涂层与电镀硬铬镀层磨损形貌 SEM 图像

### 3 结 论

1) 工艺参数对单道熔覆层宽高比的影响从大到小依次为:激光功率>扫描速度>送粉速度;激光功率越大、扫描速度越小,单道熔覆层的宽高比越大;送粉速度对于宽高比的影响无明显规律。搭接率过高会导致涂层表面倾斜不平整,适宜的工艺参数组合为:激光功率 2 300 W、扫描速度 250 mm/s、送粉速度 24 g/min、搭接率 70%。

2) 适宜的工艺参数下制备的涂层无裂纹和孔洞等缺陷,涂层晶粒细小,在涂层顶部甚至出现了纳米晶粒,对涂层起到了细晶强化作用。

3) Fe-Cr-B 基耐磨涂层的硬度在 754HV<sub>0.2</sub> 到 831HV<sub>0.2</sub> 之间,是基体硬度的 2.36~2.60 倍。铁基涂层的体积磨损量仅为电镀硬铬镀层的 3.64%。

#### 参考文献:

- [1] 白永胜. 矿用活柱表面激光熔覆强化技术的研究[J]. 煤矿机械工艺, 2020,41(9):66-68.
- [2] 朱红波,白海明,汤利利. 液压支架油缸激光熔覆粉末性能研究[J]. 煤矿机械, 2022,43(9):96-98.
- [3] HUANG C Y, CHEN Y, LIN C S. High-temperature oxidation resistance of hot stamping steel with chromium coating electroplated in trivalent chromium bath[J]. Materials Today Communications, 2022, 33:104663.
- [4] 李聪玮,刘 泽,王 明,等. 铁基激光熔覆层的微观结构和摩擦磨损性能研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):149-152.
- [5] 王 璐,胡树兵,单炜涛,等. 激光熔覆 NiCrMn-WC 复合涂层的组织与耐磨性[J]. 中国有色金属学报, 2014,24(1):145-151.
- [6] 王义猛. 液压油缸活柱表面激光熔覆技术研究[J]. 热加工工艺, 2018,47(18):137-140.
- [7] 崔英浩,谢 聪,崔陆军,等. 液压立柱铁基合金激光熔覆层组织及耐腐蚀性能分析[J]. 应用激光, 2022,42(3):8-14.
- [8] 王 成,王 伟,丁士杰,等. 激光熔覆铁基耐磨涂层的制备及摩擦学性能研究[J]. 中国激光, 2022,49(22):137-147.
- [9] Schopphoven T, Gasser A, Wissenbach K, et al. Investigations on ultra-high-speed laser material deposition as alternative for hard chrome plating and thermal spraying[J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2):022501.
- [10] Schopphoven T, Gasser A, Backes G. EHLA: Extreme high-speed laser material deposition[J]. Laser Technik Journal, 2017,14(4):26-29.
- [11] YUAN W, LI R, CHEN Z, et al. A comparative study on microstructure and properties of traditional laser cladding and high-speed laser cladding of Ni45 alloy coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2021,405:126582.
- [12] 陈书楠,姜丽艳,纪 纲,等. 超高速与常规激光熔覆 Fe 基涂层微观组织及性能研究[J]. 表面技术, 2022,51(12):358-370.
- [13] 谭米雪,王 臻,赵凤君,等. 激光熔覆工艺参数对高速钢涂层性能的影响[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):202-206.
- [14] 刘德来,王 博,周攀虎,等. 激光功率对高速激光熔覆 Ni/316L 层组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2021,46(5):213-218.
- [15] 李俐群,申发明,周远东,等. 超高速激光熔覆与常规激光熔覆 431 不锈钢涂层微观组织和耐蚀性的对比[J]. 中国激光, 2019,46(10):174-183.
- [16] XU X, DU J L, LUO K Y, et al. Microstructural features and corrosion behavior of Fe-based coatings prepared by an integrated process of extreme high-speed laser additive manufacturing[J]. Surface and Coatings Technology, 2021,422:127500.
- [17] MENG L, SHENG P H, ZENG X Y. Comparative studies on the Ni60 coatings deposited by conventional and induction heating assisted extreme-high-speed laser cladding technology: formability, microstructure and hardness [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022,16:1732-1746.
- [18] MA S, XING J, LIU G, et al. Effect of chromium concentration on microstructure and properties of Fe-3.5B alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010,527(26):6800-6808.
- [19] 张 涛,侯华兴,衣海龙,等. 硼含量及热处理对低碳贝氏体钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2011,36(11):76-80.

引用本文: 刘志威,魏 祥,汪 力,等. 超高速激光熔覆 Fe-Cr-B 基耐磨涂层工艺优化及性能研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(5):169-173.