

引文格式: 李金祥, 许成钦, 唐倩, 等. 基于RSM与NSGA-II算法的激光熔覆工艺参数多目标优化及其综合性能研究[J]. 航空制造技术, 2026, 69(19): 25010196.

LI Jinxiang, XU Chengqin, TANG Qian, et al. Multi-objective optimization of laser cladding progress parameters based on RSM and NSGA-II algorithms and its comprehensive performance research[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(19): 25010196.

基于RSM与NSGA-II算法的激光熔覆工艺参数多目标优化及其综合性能研究

李金祥¹, 许成钦², 唐倩³, 王彬生⁴, 聂云飞⁵, 罗天乐⁵, 褚汉良⁵, 杨灏轩⁵

(1. 深圳能源环保股份有限公司, 深圳 518052;

2. 深圳市宝安区深能环保有限公司, 深圳 518127;

3. 重庆大学, 重庆 400030;

4. 重庆赛力斯凤凰智创科技有限公司, 重庆 401335;

5. 重庆科技大学, 重庆 401331)

[摘要] 激光熔覆技术能够显著提升材料表面性能, 而工艺参数的合理选择是获得高质量熔覆层的关键。在激光熔覆过程中, 工艺参数变化对熔覆层的性能有较大影响。利用响应面法(RSM)与第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行工艺参数多目标优化, 并分析最优工艺参数下的综合性能。通过中心复合设计(CCD)试验方案, 搭建输入变量(激光功率、扫描速度、送粉速率)与响应值(稀释率、宽高比、显微硬度)之间的数学模型, 开展工艺参数交互性分析, 运用NSGA-II对工艺参数进行寻优, 测试最优工艺参数下的熔覆层综合性能。多目标优化结果表明, 在激光功率1250 W、扫描速度7.9 mm/min、送粉速率3.2 r/min的工艺组合下, 熔覆层稀释率为18.8%, 宽高比为4.712, 显微硬度为624.38HV_{0.5}, 目标响应值匹配最佳。最优工艺参数下的综合性能测试结果为: 熔覆层平均显微硬度为637.1HV_{0.5}, 约为基体的2.5倍; 在相同磨损条件下, 熔覆层体积磨损率仅为基体的13.5%; 电化学腐蚀试验结果表明, 熔覆层的耐腐蚀性能达基体的81.5%; 拉伸试验结果表明, 熔覆试样的屈服强度均达到420 MPa, 抗拉强度均达到810 MPa, 延伸率均达到25%。该优化方法及结果可为同类材料激光熔覆工艺的参数设计和性能调控提供参考依据。

关键词: 激光熔覆; 响应曲面法; 多目标优化; 耐磨性; 耐腐蚀性

中图分类号: V261.8; TG174.44 文献标志码: A DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010196

Multi-Objective Optimization of Laser Cladding Progress Parameters Based on RSM and NSGA-II Algorithms and Its Comprehensive Performance Research

LI Jinxiang¹, XU Chengqin², TANG Qian³, WANG Binsheng⁴, NIE Yunfei⁵, LUO Tianle⁵, CHU Hanliang⁵, YANG Haoxuan⁵

(1. Shenzhen Energy Environmental Protection Co., Ltd., Shenzhen 518052, China;

2. Shenzhen Bao'an District Shenneng Environmental Protection Co., Ltd., Shenzhen 518127, China;

3. Chongqing University, Chongqing 400030, China;

4. Chongqing Seres Phoenix Smart Innovation Technology Co., Ltd., Chongqing 401335, China;

5. Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

收稿日期: 2025-12-24; 退修日期: 2026-02-02; 录用日期: 2026-04-10

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项(CSTB2025TIAD-LYKJXZJSYYX0008); 重庆市自然科学基金创新发展联合基金(CSTB2023NSCQ-LZX0137)

通信作者: 李金祥, 本科, 研究方向为垃圾焚烧发电厂运营管理、高温防腐技术、激光熔覆技术。

[ABSTRACT] Laser cladding technology can significantly enhance the surface properties of materials, and the appropriate selection of process parameters is key to obtaining high-quality cladding layers. The changes in process parameters during laser cladding have a significant impact on the performance of the cladding layer. Subsequently, a multi-objective optimization of process parameters was conducted using response surface methodology (RSM) and the second-generation non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II), and the comprehensive performance under the optimal process parameters was analyzed. By utilizing a central composite design (CCD) experimental scheme, a mathematical model was established to analyze the interaction between input variables (laser power, scanning speed, and powder feed rate) and response values (dilution rate, aspect ratio, and microhardness). NSGA-II was employed to optimize the process parameters, and the comprehensive performance of the cladding layer under optimal parameters was tested. The results of multi-objective optimization indicate that under the conditions of 1250 W laser power, 7.9 mm/min scanning speed, and 3.2 r/min powder feed rate, the cladding layer had a dilution rate of 18.8%, an aspect ratio of 4.712, and a microhardness of 624.38HV_{0.5}, achieving the best match for the target response values. The cladding performance under optimal process parameters shows that the microhardness of the cladding layer reaches 637.1HV_{0.5}, 2.5 times that of the substrate. Under the same wear conditions, the volume wear rate of the cladding layer is only 13.5% of the substrate. Electrochemical corrosion results indicated that the corrosion resistance of the cladding layer reaches 81.5% of the substrate. Tensile test results show that the cladding samples achieve a yield strength of 420 MPa, a tensile strength of 810 MPa, and an elongation of 25%. This optimization method and its results can provide a reference for the parameter design and performance control of laser cladding processes for similar materials.

Keywords: Laser cladding; Response surface methodology; Multi-objective optimization; Wear resistance; Corrosion resistance

激光熔覆技术通过激光对金属粉末或丝材等快速熔凝后沉积到金属基板,其作为独特的表面强化和再制造技术,具有高效率、低稀释率、界面结合性好和精细显微组织等优点^[1-4]。然而,熔覆过程中激光能量过大会导致熔覆层内部出现应力过大、裂纹等缺陷,激光能量过小会导致粉末熔化不完全产生气孔及界面结合性太差^[5]。同时,激光熔覆单道试验是试样再制造的基础,单道熔覆质量的好坏直接决定最终试样成型的质量和速度,因此对单道熔覆工艺参数进行优化是熔覆工艺能广泛应用于实际生产中的必要措施^[6]。

目前国内外学者对激光熔覆高温合金工艺参数优化开展了一定的研究。镍基高温合金是先进材料家族的关键成分,具有稳定的微观结构、出色的强度、良好的加工性能,以及在 650 °C 以上温度下出色的抗疲劳、抗氧化性和耐腐蚀性^[7]。钴基高温合金由于其优异的高温性能,常用作汽车阀座表面、工具、蒸汽轮机等的耐腐蚀、耐磨和耐高温涂层材料^[8-9]。Yu 等^[10]通过田口-灰色关联分析法优化了激光熔覆工艺参数,得到了最佳工艺参数,并与试验对比发现误差值较小。Wu 等^[11]研究了 NiCrBSi 涂层的孔隙和裂纹,发现线能量密度可以消除大的孔隙,并利用响应曲面法得到了最优加工工艺参数。Knüttel 等^[12]利用人工神经网络(ANN)预测

沉积高度,同时考虑定义的刀具路径,通过打印包含多个曲率和几何形状的随机刀具路径来生成训练数据,基于经过训练的模型,可以成功预测整个刀具路径的显著局部几何偏差,并实现形貌尺寸预测。Li 等^[13]利用海洋捕食者算法优化的支持向量回归,提出了一种单轨包层形貌预测方法,随后利用自适应非支配分选遗传算法Ⅲ进行工艺参数优化,确定激光熔覆的最优工艺参数;试验验证表明,优化后的熔覆层长径比提高了 41.78%,稀释率提高了 22.30%,润湿角降低了 35.20%,所提出的激光熔覆工艺参数优化方法可以显著改善熔覆层的形貌。Ilanlou 等^[14]通过线性回归方法和遗传算法,成功预测了扫描速度、激光功率和送粉速率等工艺参数对 IN718 基板上成形 IN738 单道几何特性的影响。

激光熔覆样件质量的好坏取决于多工艺参数的相互作用,熔覆后的综合性能由多项性能指标进行评价^[15],因此,选择合适的多目标优化算法是十分重要的。常见的算法有鲸鱼优化算法(WOA)、粒子群优化算法(PSO)、遗传算法(GA)、蜂群优化算法(FA)、水母搜索算法(JS)等。WOA 存在收敛速度慢、参数设置敏感等缺点,而 PSO 虽然收敛较快,但容易陷入局部最优解,同时动态环境适应性较差。与之相比,第二代非支配排序

遗传算法(NSGA-II)使用精英策略能够同时处理多个目标函数,同时,拥挤距离排序可以保持种群多样性,防止个体过度聚集在某个区域,从而提高算法的全局搜索能力^[16]。NSGA-II算法收敛速度快、适应性强且存在独特的排序和选择机制,因此,选择其作为激光熔覆高温合金多目标优化算法十分合适。

本文采用激光熔覆技术在IN718合金基板上熔覆Co12合金粉末。首先,通过中心复合设计试验方案设计了20组激光熔覆单道试验,基于响应曲面分析建立了工艺参数与熔覆层性能之间的数学模型,并且研究了工艺参数与熔覆性能之间的交互性影响;然后,利用NSGA-II算法对建立的模型在工艺区间内进行了多目标优化,结合工程应用得到了一组最优工艺参数并对其进行了验证,检验多目标优化工艺参数匹配的可靠性和准确性;最后,针对最优工艺参数下熔覆的多道试样,对比评价了基材与熔覆层的硬度、摩擦磨损性能、耐腐蚀性及拉伸性能,为实际工程应用中的激光熔覆高温合金多目标优化及其综合性能评价提供了参考。

1 激光熔覆试验

1.1 试验材料与设备

激光熔覆设备采用RC-LCD-6000-D-R型激光熔覆成套设备,如图1所示,主要由控制系统、双筒送粉器、6 kW半导体激光器、六轴KUKA机器人、OTS-5激光熔覆头及变位机等,组成其中激光器产生的圆形光斑直径为2.8 mm。

本次试验选用IN718镍基高温合金板材作为基体材料,其尺寸为150 mm×100 mm×10 mm;熔覆材料选用Co12钴基合金粉末,该粉末具有良好的耐磨性、耐腐蚀性及高温性能,粒度为150~300 μm,材料成分如表1所示。试验前用砂纸打磨基体表面,并用无水乙醇去除表面颗粒及油污。将熔覆粉末在65℃下保温45 min后烘干备用。

1.2 测试分析方法

试验结束后,用砂纸打磨抛光,酒精清洗后烘干,沿宽度方向对熔覆层进行线切割。对不同工艺参数的试样进行磨样、抛光,采用超景深光学显微镜观察试样微观形貌,得到熔覆截面示意图,并借助Image J软件测量各熔覆试样的几何结构参数。选用HV-1000Z维氏显微硬度仪测量硬度,从响应曲面显微硬度测试熔覆层表面开始,按照“十”字型测量5个点,每个点之间间隔0.25 mm,然后取平均值,采用测试力5 N、保荷时间10 s进行测试。

采用优化后的工艺参数进行搭接率为50%的多道试验,经线切割、打磨抛光后进行综合性能测试。硬度

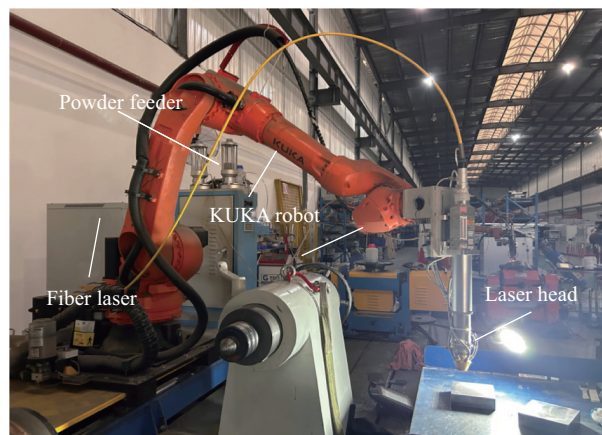


图1 激光熔覆设备

Fig.1 Laser cladding equipment

表1 Co12合金粉末成分(质量分数)

Table 1 Composition table of Co12 powder (mass fraction) %

C	Cr	Si	Ni	Fe	W	Mo	Mn	Co
1.37	29.69	1.47	2.64	2.33	8.40	0.16	0.10	余量

测试从熔覆层顶部往基体方向平均取点的方法,以分析优化后的熔覆试样显微硬度变化。

采用多功能摩擦磨损试验机进行往复摩擦条件下摩擦系数的测定,分析在一定载荷情况下摩擦系数和体积磨损率随工件材料的变化规律,测试方式采用边界润滑条件下摩擦磨损试验,为防止磨损过程中出现切削行为,在试样表面滴上一滴润滑油。摩擦副为碳化硅(SiC)陶瓷球(φ9.529 mm, HRC),磨痕长度为1.2 mm,载荷大小为50 N,频率大小为15 Hz,时间为30 min。按照式(1)计算体积磨损率^[17]。

$$K = \frac{S \cdot l}{L} \quad (1)$$

式中, l 为磨损轨道长度; S 为与磨损轨道相邻的初始表面下方的区域,可以从轮廓穿过磨损轨道进行积分; L 是滑动总长度。

使用PARSTAT 4000A电化学工作站(Versa Studio)对熔覆层与基体的动电位极化曲线与电化学交流阻抗谱进行测试。动电位极化曲线的电位扫描范围为-0.80~0.8 V,扫描速率为2 mV/s,电化学阻抗谱采用恒电位法进行测试,频率范围为10 mHz~100 kHz。

为验证激光熔覆对原始母材的拉伸性能影响,针对带有U形槽基体的拉伸试样,按照GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第一部分:室温试验方法》进行单轴拉伸性能检测。熔覆层拉伸性能取样方法如图2所示,参数设定为载荷100 kN、拉伸速率1 mm/min,取3个试样进行重复试验,获得拉伸曲线后,对比分析其与基

材拉伸性能,同时观察断裂位置。

1.3 RSM试验设计及分析

响应曲面(Response surface methodology, RSM)模型是一种解决多变量问题的统计方法,采用 Design-Expert 13.0 软件的中心复合设计模型(CCD)设计 3 因素 3 水平试验。将激光功率 P 、扫描速度 v 、送粉速率 v_f 作为优化变量,熔覆层稀释率 η 、宽高比 W/H 和显微硬度 $HV_{0.5}$ 作为响应变量,一共设计了 20 组试验,选取的各因素水平参数值如表 2 所示。

从图 3 所示的 20 组单道熔覆形貌可以看出,熔覆层表面平整,每道熔覆层形貌相近,表面没有明显的凹坑、断续或裂纹,且颜色与基体颜色相近,说明熔覆成形效果良好、与基体结合紧密。

熔覆层的几何特征直接影响着熔覆层的性能,因此熔覆层的几何结构参数需要进行工艺参数优化。图 4 展示了单道熔覆试样的截面结构。

适当宽高比对于多道熔覆的搭接形成至关重要,它直接决定多道熔覆表面平整度和每层熔覆层高度。稀

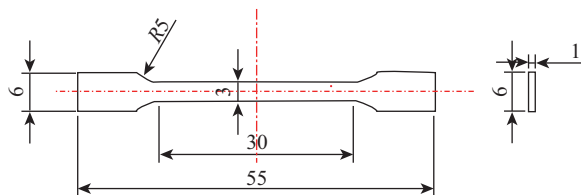


图2 熔覆层拉伸性能取样示意图

Fig.2 Schematic of tensile properties sampling from the laser cladding layer

表2 工艺参数与因素水平

Table 2 Process parameters and factor level

因素	水平		
	-1	0	1
P/W	1200	1400	1600
$v/(\text{mm}/\text{min})$	6	7	8
$v_f/(\text{r}/\text{min})$	2.5	3.0	3.5

释率能够评价熔覆层和基体冶金结合性能,一般以热影响区高度占熔覆层高度和热影响区高度之和的比值表示,即 $h/(H+h)$,也有用基体合金占熔覆层面积的百分比表示的,如式(2)所示。本文采用第二种表示方法,这样表示的稀释率更加准确。显微硬度则可以直观地衡量熔覆层以及基体熔化区质量的优劣性。

$$\eta = \frac{A_2}{A_1 + A_2} \quad (2)$$

式中, A_1 为熔覆区域面积; A_2 为基体熔化区域面积。

RSM 试验响应值如表 3 所示。

2 基于 RSM 的熔覆质量分析

2.1 RSM 模型分析

对表 3 中数据进行多元回归拟合建模,使用方差分析(ANOVA)法分析模型,模型可靠性可以通过残差图进行判断。最终 CCD 试验搭建出的工艺参数与熔覆层性能之间的二次多项式为

$$\left\{ \begin{aligned} \eta &= 157.2 + 0.197P - 45.29v - 74.6v_f - 0.0063Pv + \\ &\quad 0.0659Pv_f + 2.225vv_f - 1.05 \times 10^{-4}P^2 + \\ &\quad 3.398v^2 - 8.97v_f^2 \\ W/H &= 5 + 0.0042P + 0.585v - 3.963v_f - 2.08 \times \\ &\quad 10^{-4}Pv + 0.003Pv_f - 0.096vv_f - \\ &\quad 3.8 \times 10^{-6}P^2 + 0.04v^2 - 0.161v_f^2 \\ HV_{0.5} &= 88.266 - 0.33P - 6v + 504.65v_f + 0.02Pv - \\ &\quad 0.4Pv_f + 4.65vv_f + 3.55 \times 10^{-4}P^2 - \\ &\quad 3.11v^2 + 25.35v_f^2 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

表 4 为 3 个响应值的方差分析结果。熔覆层稀释率、宽高比和显微硬度模型的 p 值均小于 0.0001, F 值均大于 50, 同时失拟项值均大于 0.1, 这表明模型的置信区间选取合理且效果显著。熔覆层稀释率、宽高比和显微硬度的决定系数 R^2 分别为 0.9866、0.9894 和 0.9861, 表明模型能够解释超过 98% 的试验数据。信噪比用于评估试验结果的可靠性和稳定性, 信噪比越高, 表示信号中的有用信息相对于噪声成分越多, 试验结果的可靠性越高。稀释率、宽高比和显微硬度的信噪比均大于 25,

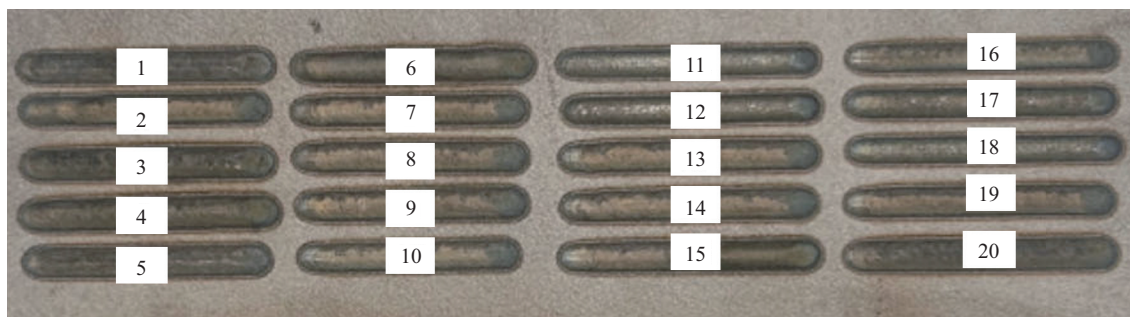


图3 单道熔覆形貌

Fig.3 Morphology of single-pass cladding

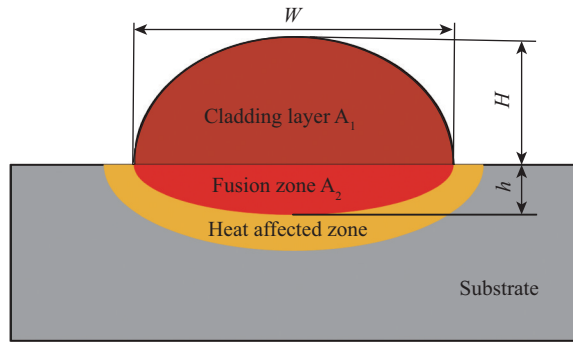


图4 激光熔覆界面示意图

Fig.4 Interface schematic diagram of laser cladding

表3 RSM试验设计的输入变量及其响应值

Table 3 Input variable and its response values of RSM experimental design

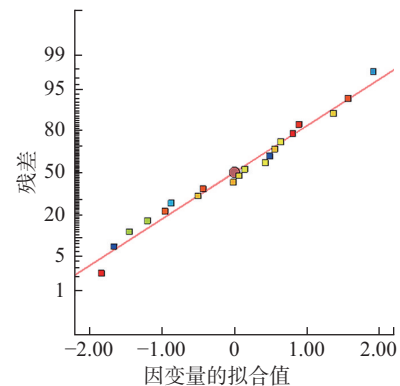
试验 序号	输入变量			响应值		
	激光功率/W	扫描速度/(mm/min)	送粉速率/(r/min)	稀释率/%	宽高比	显微硬度(HV _{0.5})
1	1400	7	2.16	45.1	5.904	414.66
2	1400	7	3	33.8	4.646	518.12
3	1600	6	2.5	44.7	4.657	435.38
4	1600	6	3.5	36.6	3.881	467.8
5	1600	8	2.5	41.8	5.775	414.62
6	1400	5.32	3	43.6	3.954	524.98
7	1200	6	2.5	35.4	4.733	494.84
8	1400	7	3	35.7	4.979	513.08
9	1600	8	3.5	37.2	4.928	485.04
10	1400	8.68	3	41.3	5.951	491.28
11	1200	8	3.5	6.6	3.973	686.4
12	1200	6	3.5	0	2.881	714.14
13	1400	7	3	29.9	4.666	523.48
14	1400	7	3	30.4	4.716	508.14
15	1400	7	3	33.2	4.932	483.4
16	1200	8	2.5	36.6	6.138	486.5
17	1400	7	3.84	7.9	3.539	655.02
18	1063.64	7	3	0	3.949	691.44
19	1400	7	3	34.3	4.836	513.52
20	1736.36	7	3	41.9	4.860	422.62

说明试验结果有用信息很多、可靠性很高。通过对熔覆层稀释率、宽高比和显微硬度的残差图(图5)进行分析,可以看出,残差基本均匀分布在拟合曲线的周围,没有显著的偏差,表明模型拟合效果良好。综上所述,通过响应面法构建的激光熔覆代理模型误差小、可靠性高、

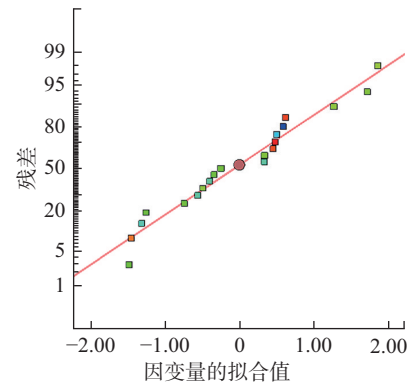
表4 响应值方差分析结果

Table 4 Response value analysis of variance results

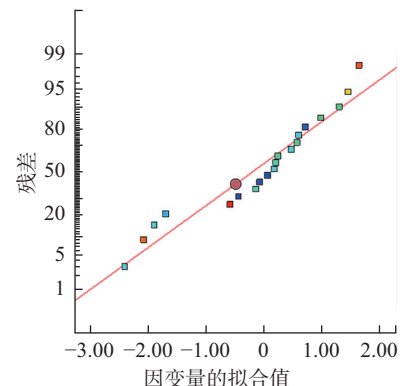
方差	响应值		
	熔覆层稀释率	宽高比	显微硬度(HV _{0.5})
Model	4049.80	13.30	157700
F值	81.94	103.65	78.63
p值	<0.0001	<0.0001	<0.0001
失拟项值	0.4567	0.8077	0.3991
R ²	0.9866	0.9894	0.9861
信噪比	28.7463	38.6588	28.9198



(a) 稀释率



(b) 宽高比



(c) 显微硬度

图5 各响应值对应残差图

Fig.5 Residual plots for each response value

预测精度高。

2.2 RSM模型工艺参数交互性分析

图6为熔覆层稀释率与工艺参数的交互作用图。由图6(b)可以看出,随着激光功率的增大、送粉速率的减小,在一定激光照射时间下,单位粉末吸收的激光能量增大,熔化的粉末数目增多,且基体熔化吸收的激光能量也增大,从而导致熔池变大,稀释率显著增大,反之稀释率减小;扫描速度对稀释率的影响较小,在一定激光功率和送粉速率下,随着扫描速度的增大,稀释率在很小的区间范围内变化,在7 mm/min时表现为最小,如图6(a)和(c)所示。这是因为扫描速度的变化范围相对于激光能量密度的变化范围太小,所以扫描速度对稀释率的影响很小。因此,激光功率和送粉速率这两种因素的交互作用最为显著。

图7为熔覆层宽高比与工艺参数的交互作用图。由图7(c)可以看出,随着扫描速度的增大、送粉速率的减小,在一定激光功率下,粉末熔化数目减小,熔池宽度和高度都减小,但由于单位粉末的能量密度增大导致熔池变大,

因此宽高比增大,反之宽高比减小;由图7(a)可以看出,随着扫描速度的减小和激光功率的增大,熔覆层的宽高比逐渐减小;由图7(b)可以看出,随着激光功率的增大、送粉速率的减小,熔覆层宽高比逐渐增大,这是因为,在一定扫描速度下,单位时间熔化的粉末数目小且激光能量密度大,从而使熔池变大,宽度增长速度高于高度增长速度,导致宽高比增大。送粉速率和扫描速度这两种因素的交互作用最为显著,激光功率次之。

图8为熔覆层显微硬度与工艺参数的交互作用图。由图8(b)可以看出,随着激光功率的增大和送粉速率的减小,在一定扫描速度下,单位粉末吸收的激光能量密度越大,导致熔池增大,由于熔覆层Co12中含有大量强化的 γ 固溶体,导致其硬度高于基体IN718合金。熔池越大,元素扩散程度越大,导致熔覆层的显微硬度越小;反之,熔覆层显微硬度越大。如图8(a)和(c)所示,扫描速度对熔覆层显微硬度影响较小,这是因为扫描速度对激光能量密度的影响较小,从而对熔池大小影响较小,使显微硬度变化不大。因而送粉速率和激光功率这两

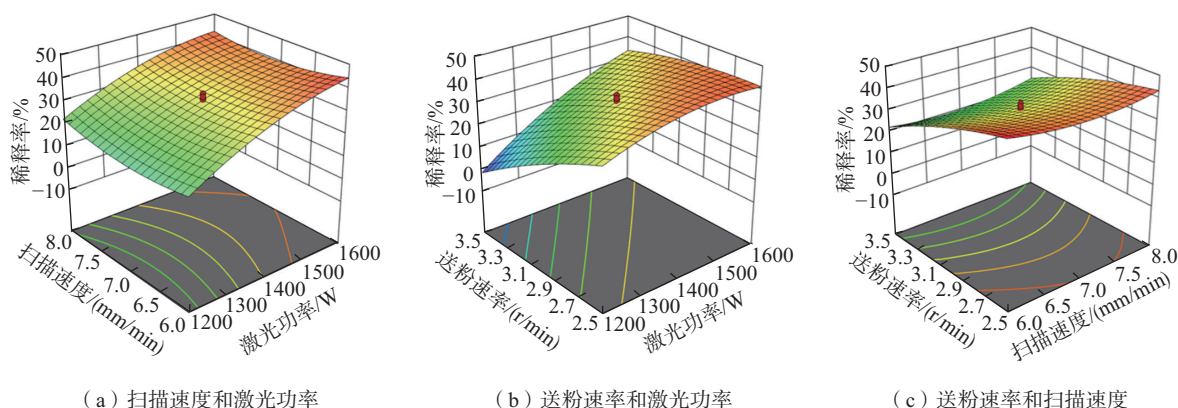


图6 工艺参数对稀释率的交互影响
Fig.6 Interactive influence of process parameters on dilution rate

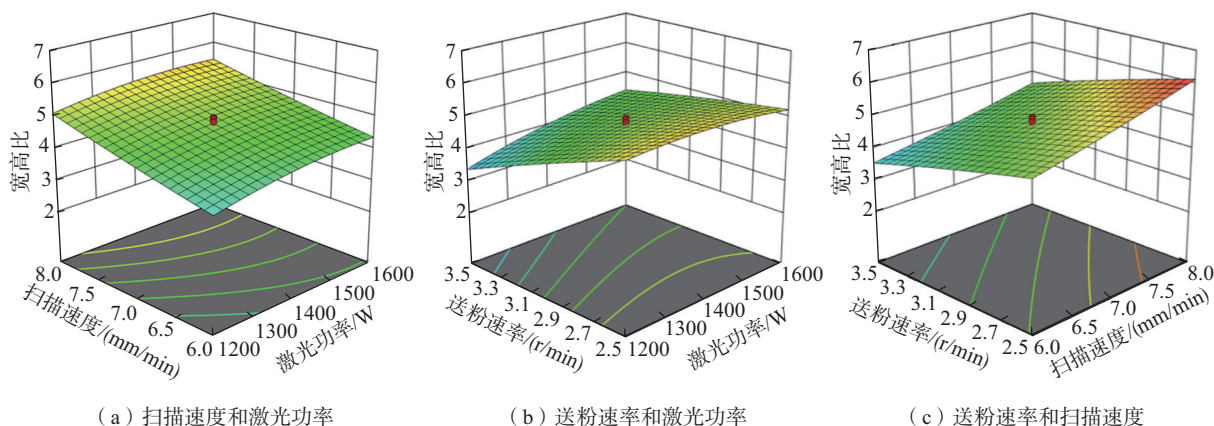


图7 工艺参数对宽高比的交互影响
Fig.7 Interactive influence of process parameters on aspect ratio

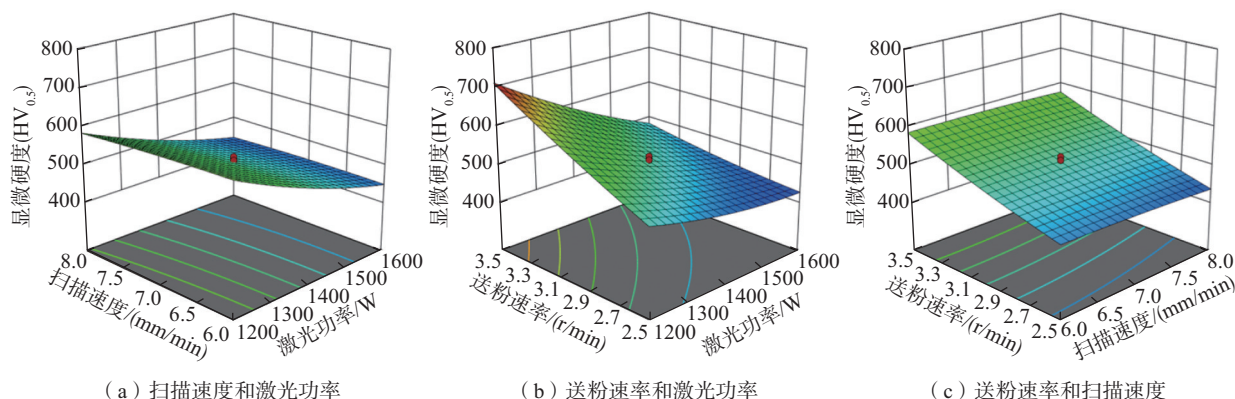


图8 工艺参数对显微硬度的交互影响

Fig.8 Interactive influence of process parameters on microhardness

种因素的交互作用最为显著。

3 工艺参数优化与验证

3.1 NSGA-II算法原理

NSGA-II是在第一代遗传算法的基础上引入了非支配排序、拥挤度计算的理念。非支配排序是为了让NSGA-II用于识别种群中的个体并将其分为不同的非支配集,拥挤度计算是为了控制个体在其Pareto层内的稀疏程度,从而帮助保持种群的多样性,其中,非支配解集需要满足以下条件^[18]。

$$\begin{cases} M_x \subset \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} Q=R \\ \forall i, j \in \{1, 2, 3, \dots, n\}, i \neq j, x_i \cap x_j = \emptyset \\ x_1 > x_2 > x_3 > \dots > x_n \end{cases} \quad (4)$$

式中, R 为非支配集合; M 为种群; Q 为子代在空间中的位置。

NSGA-II算法首先将种群中的个体进行非支配排序,将其划分为不同的Pareto前沿层次,层次越低表示解越优。接着,拥挤距离用于评估个体在同一层内的稀疏度,以优先选择拥挤距离较大的个体。通过选择、交叉和变异操作结合后代种群,确保优质解的保留和多样性的提高,然后通过不断迭代逐渐提升整个种群的质量。NSGA-II算法流程如图9所示。

3.2 多目标优化模型

在多目标优化模型中,将熔覆层的稀释率 η 、宽高比 W/H 、显微硬度 $HV_{0.05}$ 作为3个优化目标。在工程实践中,高稀释率通常意味着激光能量密度过大,容易导致熔覆层产生微小裂纹,因此应尽量降低稀释率^[19]。熔覆层的宽高比过小会降低其表面的平整度,不利于多道多层的搭接过程,因此宽高比应尽量取大^[20]。显微硬度是影响熔覆层性能的重要因素,在实际应用中,熔覆层的显微硬度与其耐磨性能有着十分紧密的联系(通常硬度

越大,耐磨性能越好),所以显微硬度应尽可能取大。本文采用最大值解法求解优化后的各工艺参数,需对稀释率目标模型取反,因此,激光熔覆工艺参数多目标优化模型为

$$\begin{cases} \max [f(P, v, v_f)] = \begin{bmatrix} -\eta(P, v, v_f), \mu \\ (P, v, v_f), v(P, v, v_f) \end{bmatrix}^T \\ X = [P, v, v_f]^T \end{cases} \quad (5)$$

式中, η 为稀释率函数; μ 为宽高比函数; v 为显微硬度函数; X 为输入变量的集合。

3.3 优化结果与验证

在利用NSGA-II算法对激光熔覆工艺参数进行优化前,需设置合适的种群大小和迭代次数,这样才能保证算法运行具有较高的准确性和速度。经过多次试验,该模型种群大小设为160、迭代次数设为200次时效果最好。优化后得到的Pareto前沿解集及对应工艺参数如图10所示,共得到96个满足工程要求的点。

Pareto前沿解集代表了该多目标优化问题数学上的所有可行解。理论上,该解集中的任意一组工艺参数都可以作为实际问题的最优工艺参数。然而,在工程实际中,稀释率过大会导致熔覆层开裂,过小会导致熔覆层与基体结合性不好;宽高比过大会导致熔覆效率降低,过小会不利于多道搭接。因此,本文将单道熔覆层的稀释率限制在15%~25%范围内,宽高比限制在3.5~5.5范围内,显微硬度按照取大原则要求至少达到600HV_{0.05}。

基于多目标优化的结果和实际工程应用,本文选择激光功率1250 W、扫描速度7.9 mm/min、送粉速率3.2 r/min的点作为本文的最优解,其对应的Pareto解集中的目标值为熔覆层稀释率18.8%,宽高比4.712,显微硬度624.38HV_{0.05}。

对最佳工艺参数组合进行二次工艺验证试验,熔

覆层稀释率、宽高比、显微硬度预测结果及试验结果见表5,最优工艺参数对应的截面如图11所示。最终测得熔覆层稀释率为19.9%,宽高比为4.683,显微硬度为618.74HV_{0.5},计算出的熔覆层稀释率、宽高比、显微硬度的预测值与实测值之间的误差分别为5.9%、2.7%、2.3%,误差均较小,验证了本模型的准确性和可

靠性。

4 激光熔覆成形综合性能研究

4.1 显微硬度分析

从熔覆层往基体方向每隔0.15 mm取一个点,得到最优工艺参数下的熔覆层显微硬度(图12)。熔覆层和

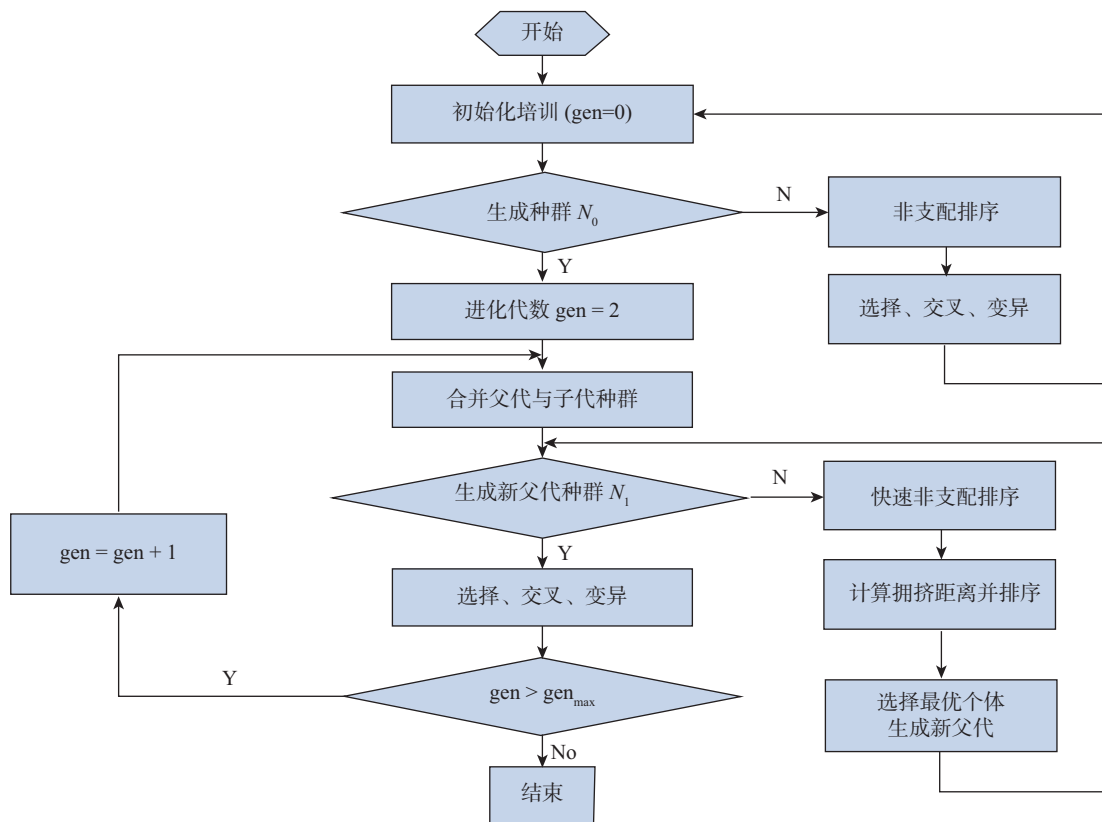


图9 NSGA-II算法流程图

Fig.9 Flow chart of NSGA-II algorithm

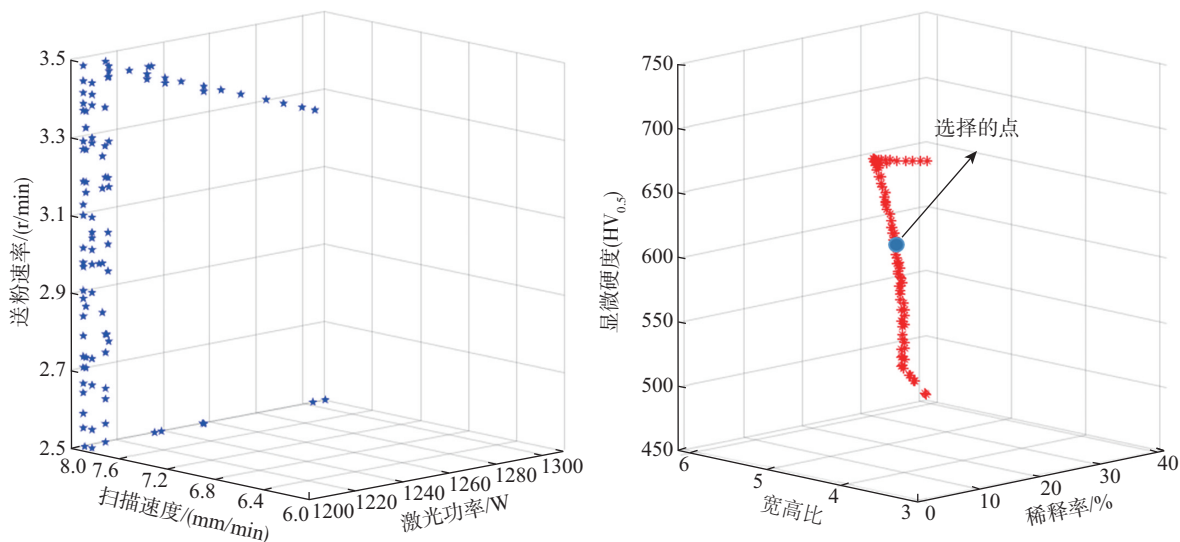


图10 优化结果的 Pareto 前沿解集

Fig.10 Pareto front solution set of optimization results

基体的显微硬度趋于平稳,热影响区域显微硬度呈现下降趋势,有利于基体与熔覆层金属之间的牢固结合,以及厚度方向上的力学性能转变。从图12可以看出,熔覆层平均显微硬度较高,为 $637.1\text{HV}_{0.5}$;沿截面到基体距离增加,硬度逐渐降低,基体显微硬度最低,为 $271.7\text{HV}_{0.5}$,熔覆层显微硬度较基体提升了约1.34倍。根据重庆川仪调节阀有限公司陈林^[21]的研究结果,熔覆层和热影响区相对于基体,显微硬度显著提升,这是由于熔覆过程中,熔覆材料在基体表面形成熔池,生成大量已被强化的 γ 固溶体,其次,熔覆层显微组织还有少量 M_{23}C_6 和 M_7C_3 碳化物从晶界析出,变形过程中,碳化物对晶界具有钉扎作用,也使得熔覆层显微硬度得以提高。同时,本文工艺参数下的熔覆层平均显微硬度较文献^[21]提升了近30HV,间接证明了工艺参数优化效果较好;而激光熔覆具有快速冷凝的特点,熔覆层微观组织细小均匀,导致细晶强化作用明显。

4.2 摩擦磨损性能分析

基体和熔覆层的磨损参数和摩擦系数如表6和图13所示,磨痕的三维超景深图像、磨痕深度如图14所示。由图13可知,基体和熔覆层的摩擦过程分为初始磨损阶段和稳定磨损阶段,在0~5 min处于初始磨损阶段,摩擦系数曲线呈现线性减小趋势,这是因为摩擦副刚开始磨损时,表面存在微小的凸起和不平整,又由于接触力较大,导致一开始摩擦系数较大,进入稳定磨损阶段后,摩擦系数又逐渐减小。由图13可知,基体平均摩擦系数为0.0989,熔覆层平均摩擦系数为0.0857,基体的摩

擦系数是熔覆层的1.16倍。熔覆层的摩擦系数低于基体摩擦系数,说明熔覆层有较好的减摩性。由表6可知,基体的体积磨损率为 $25.96\times 10^{-2}\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$,熔覆层的体积磨损率为 $3.51\times 10^{-2}\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$,熔覆层的体积磨损率仅为基体的13.5%。摩擦系数是摩擦力与垂直载荷的比值,主要由表面粗糙度、载荷、滑动速度、温度、摩擦副材料等因素决定^[22]。基体和熔覆层在高速往复摩擦磨损中具有相同的初始条件和表面粗糙度,但基体在摩擦过程中磨损较大,致使基体的摩擦系数大于熔覆层。

由图14可知,基体的磨痕宽度为 $783.6\text{ }\mu\text{m}$;熔覆层的磨痕宽度为 $403.3\text{ }\mu\text{m}$;基体的磨痕深度为 $12.4\text{ }\mu\text{m}$;熔覆层的磨痕深度为 $4.4\text{ }\mu\text{m}$ 。结果表明,熔覆层的耐磨性

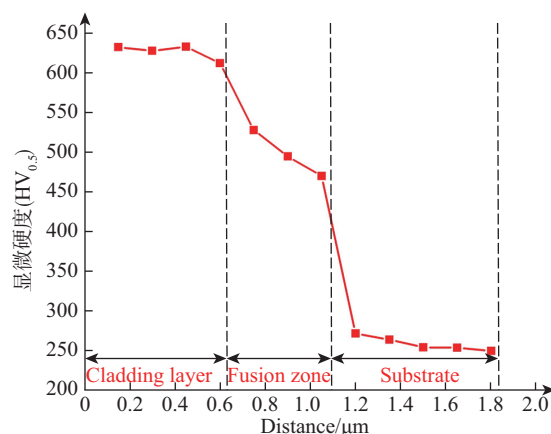


图12 激光熔覆试样显微硬度纵向分布

Fig.12 Longitudinal distribution of microhardness of laser cladding specimen

表6 基体和熔覆层的磨损参数对比

Table 6 Comparison of wear parameters of substrate and cladding layer

试样	磨损体积/ (10^{-3}mm^3)	体积磨损率/ ($10^{-2}\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$)
IN718	81.53	25.96
Co12	5.68	3.51

表5 优化预测结果与试验结果对比

Table 5 Comparison of optimized prediction results and experimental results

参数	稀释率/%	宽高比	显微硬度 ($\text{HV}_{0.5}$)
预测值	18.8	4.712	624.38
实测值	19.9	4.583	609.74
误差/%	5.9	2.7	2.3

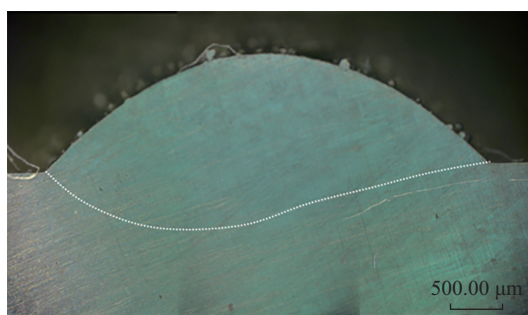


图11 最优工艺参数截面图

Fig.11 Section diagram of optimal process parameters

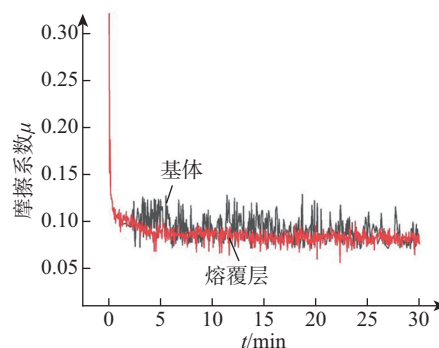


图13 基体和熔覆层摩擦系数对比

Fig.13 Comparison of frictional coefficient of substrate and coating

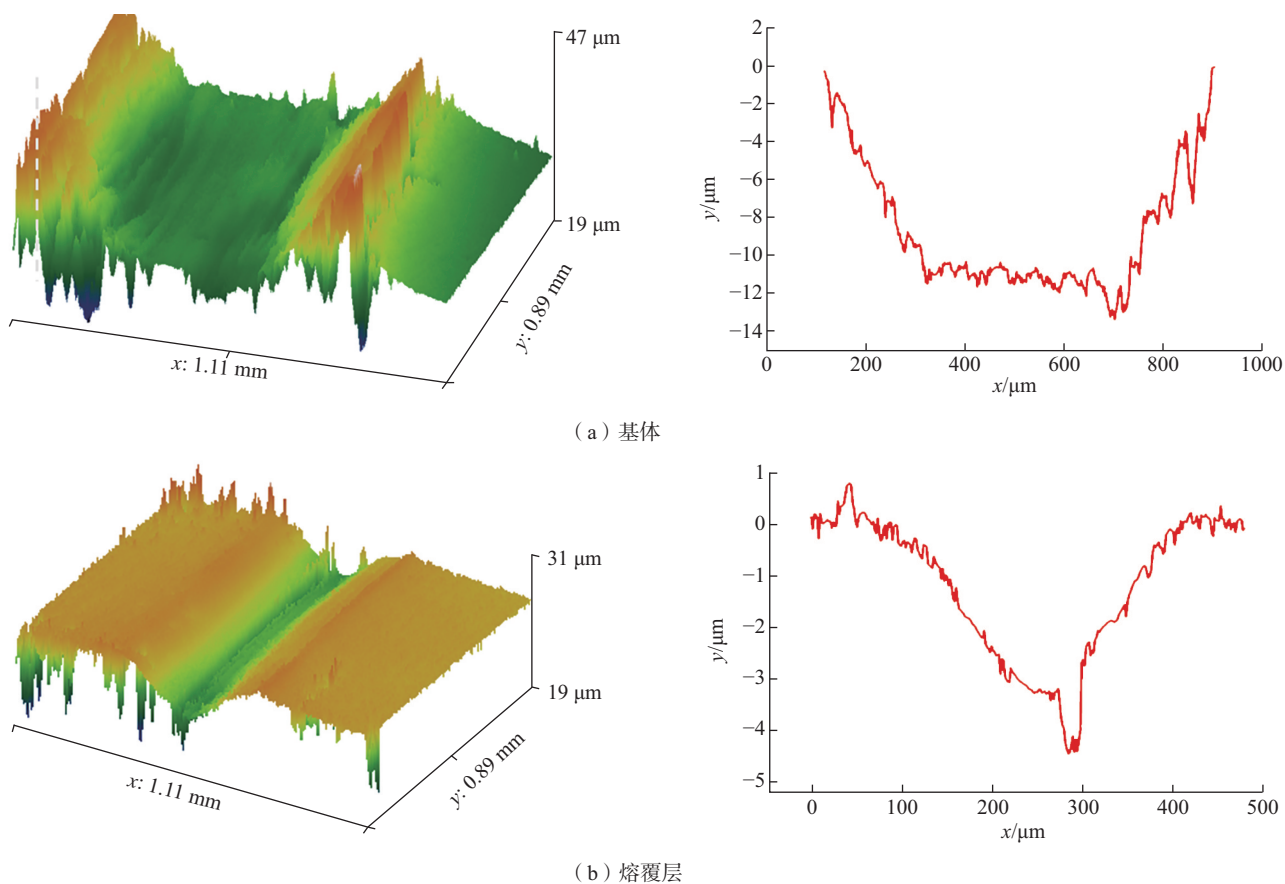


图 14 磨痕三维形貌及磨痕深度对比

Fig.14 Comparison of three-dimensional morphology and worn depth of wear marks

能远好于基体,说明在最优工艺参数下的熔覆钴基合金耐磨损性比基体镍基合金好,在提升基体表面性能同时起到保护作用。

4.3 耐腐蚀性能分析

将基体各熔覆层置于 3.5% NaCl 溶液中进行耐腐蚀性能测试,并采用动电位极化曲线测试方法进行分析,极化曲线如图 15(a)所示。基体和熔覆层的极化曲线在不同电压范围的阳极区均出现了钝化现象,表明基体和熔覆材料表面均存在钝化膜结构。根据塔菲尔外推法计算了不同工艺制备涂层的腐蚀电位(E_{corr})和腐蚀电流密度(I_{corr}),如表 7 所示。腐蚀电流密度属于动力学范畴,与腐蚀速率有关,是熔覆层耐腐蚀性能重要的评价指标^[23]。试样的腐蚀电流密度越高,说明其腐蚀速度越快、耐腐蚀性能越差,反之则较好。熔覆层和基体材料的腐蚀电流密度分别为 $4.76 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 和 $2.93 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,基体材料腐蚀电流密度低于熔覆层,说明其耐蚀性好于熔覆层。熔覆层和基体的腐蚀电位分别为 -0.541 V 、 -0.458 V 。因此,基体材料 IN718 具有较低的腐蚀电流密度和腐蚀电位。

图 15 描述了基体和熔覆层材料的奈奎斯特图和相

表 7 基体和熔覆材料的电化学腐蚀工艺参数

Fig.7 Electrochemical corrosion process parameters of substrate and cladding materials

试样	腐蚀电位/V	腐蚀电流密度/ $(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$
Co12	-0.541	4.76
IN718	-0.458	2.93

应的伯德图。奈奎斯特图中的容抗弧表示涂层与电解质界面之间的腐蚀反应,其半径的大小反映了涂层的阻抗水平。通常情况下,半径较大的涂层具有更优秀的耐腐蚀性能。如图 15(b)所示,IN718 的电容弧半径大,表明其具有更好的耐腐蚀性能。图 15(c)为阻抗幅值-频率图。可以看出,Co12 表现出的最大阻抗值为 135854Ω ,IN718 表现出的最大阻抗值为 166707Ω ,基体材料的最大阻抗值约是熔覆材料的 1.23 倍。图 15(d)为 Bode 相角图。可知,熔覆材料 Co12 的最大相角为 79.37° ,其所对应的频率为 3.16 Hz ;基体材料 IN718 的最大相角为 78.01° ,其所对应的频率为 3.17 Hz 。由此可见,熔覆层材料 Co12 和基体材料 IN718 具有近乎相同

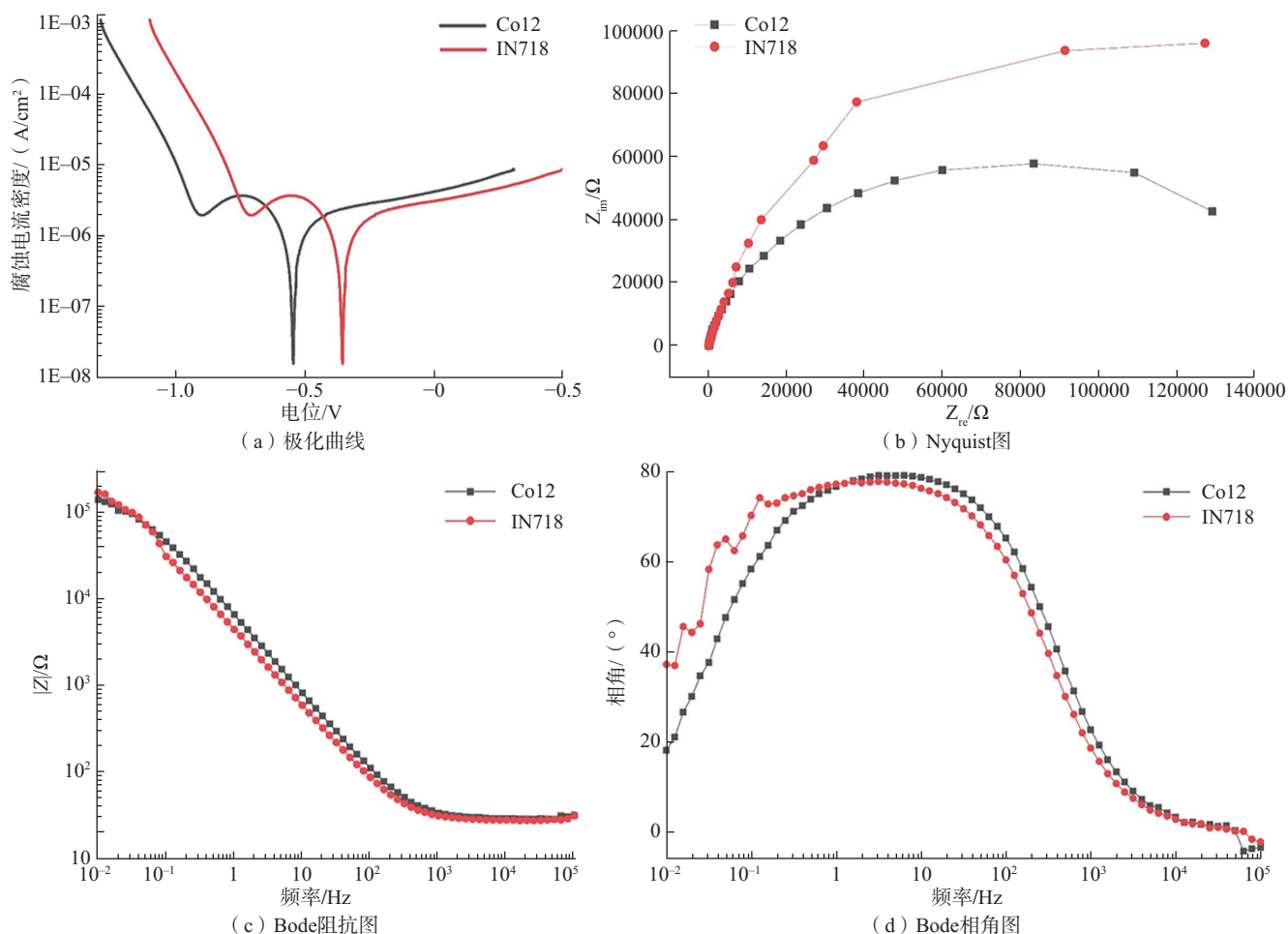


图15 基体和熔覆层材料极化曲线

Fig.15 Polarization curves of the substrate and cladding layer materials

的最大相角和频率,但由于基体材料IN718的相角在低频区的下降速度较慢,说明其表面更容易形成较高稳定性的钝化膜,从而表现出更强的耐腐蚀性。

4.4 拉伸性能分析

在相同环境下对熔覆层的3个重复试样分别进行拉伸试验,表8给出了重复试样的屈服强度、抗拉强度。可以看出,试样的屈服强度达到420 MPa以上,抗拉强度达到810 MPa以上,延伸率达到25%以上,抗拉强度和延伸率均达到母材的80%以上,说明材料的塑性性能较好。

拉伸试样应力-应变曲线如图16所示。可以看出,试样均在材料的塑性硬化阶段突然断裂,说明材料断裂方式是以脆性断裂为主的复合断裂。通过对试样断裂位置的宏观分析,断裂位置均在熔覆层与基材的结合处,断面收缩率小,说明该位置断口属于脆性断口。

图17为试样在放大300倍、600倍、1200倍、2400倍下的断口形貌图。由图17(a)可以看出,低放大倍数下的宏观形貌存在中间部分韧性断裂区域及右上角的脆

表8 拉伸试验结果及母材性能

Table 8 Tensile test results and base material properties

试样	屈服强度 R_{eL}/MPa	拉伸强度 R_m / MPa	延伸率 $A/\%$
1	438.45	812.19	26.67
2	425.68	815.92	28.33
3	451.49	814.08	27.67
母材	590	980	32

性晶间断裂区域,表明试样在室温下的断裂模式是韧性断裂和脆性断裂的混合模式。继续观察图17(b)所示中等放大倍数的图像可以看出,断裂面呈现出部分微孔,这正是在形成及长大的韧窝结构,韧性区域尽管存在大量韧窝,但韧窝整体表现为浅韧窝且韧窝较小,韧窝没有向四周移动和向更深处扩展形成明显的纤维状花纹,同时存在一定数量的未熔化粉末颗粒和未熔孔,这就解释了试样塑性性能较差和强度较小的原因。进一步从图17(c)和(d)可以看出,图17(c)中存在许多大小不一

的未熔化粉末,这是激光沉积过程中最容易产生的缺陷特征,同时图 17(d)中韧窝附近明显观察到少量微裂纹和未熔化颗粒。

5 结论

本研究在 IN718 合金表面熔覆 Co12 合金粉末,采用中心复合试验设计进行试验,建立了以稀释率、宽高比和显微硬度为响应目标的 RSM 模型,研究了激光功率、扫描速度和送粉速率工艺参数对响应目标的交互性影响;然后基于 RSM 模型,利用 NSGA-II 算法进行多目

标优化,得到了最优工艺参数组合并进行了验证;最后基于多目标优化试验结果进行多道熔覆,并对分析基体和熔覆层的显微硬度、摩擦磨损性能、耐腐蚀性能、拉伸性能。得出以下结论。

(1)方差分析结果表明,构建出的 RSM 预测模型的准确度超过 98%。交互性分析结果表明;激光功率和送粉速率交互对稀释率影响较大;扫描速度和送粉速度交互对宽高比影响较大;扫描速度和激光功率交互对显微硬度影响较大。

(2)NSGA-II 算法多目标优化结果得到最优工艺参数组合为激光功率 1250 W、扫描速度 7.9 mm/min、送粉速率 3.2 r/min;对最佳工艺参数组合进行二次工艺验证,熔覆层稀释率、宽高比、显微硬度的预测值与实测值计算偏差分别为 5.9%、2.7%、2.3%,说明了预测模型的准确性,为工程中激光熔覆 Co12 合金的工艺参数多目标优化提供理论支撑。

(3)性能测试结果表明,熔覆层的平均硬度是 637.1HV_{0.5},基体的平均硬度是 271.7HV_{0.5},熔覆层较基体提升了 1.34 倍;基体的摩擦系数是熔覆层的 1.16 倍,熔覆层的体积磨损率仅为基体的 13.5%,说明熔覆层的耐磨性能远强于基体材料;IN718 上激光熔覆 Co12 合金的耐腐蚀性能达到 IN718 的 80% 以上,熔覆层和基体材料均具有较强的耐腐蚀性能;熔覆试样的屈服强度均达到 420 MPa

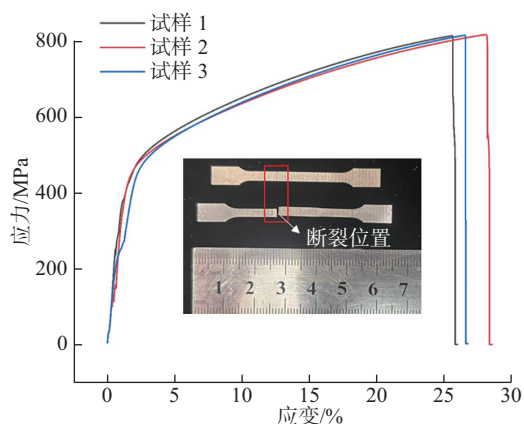


图 16 拉伸试样应力-应变曲线

Fig.16 Stress-strain curves of tensile specimens

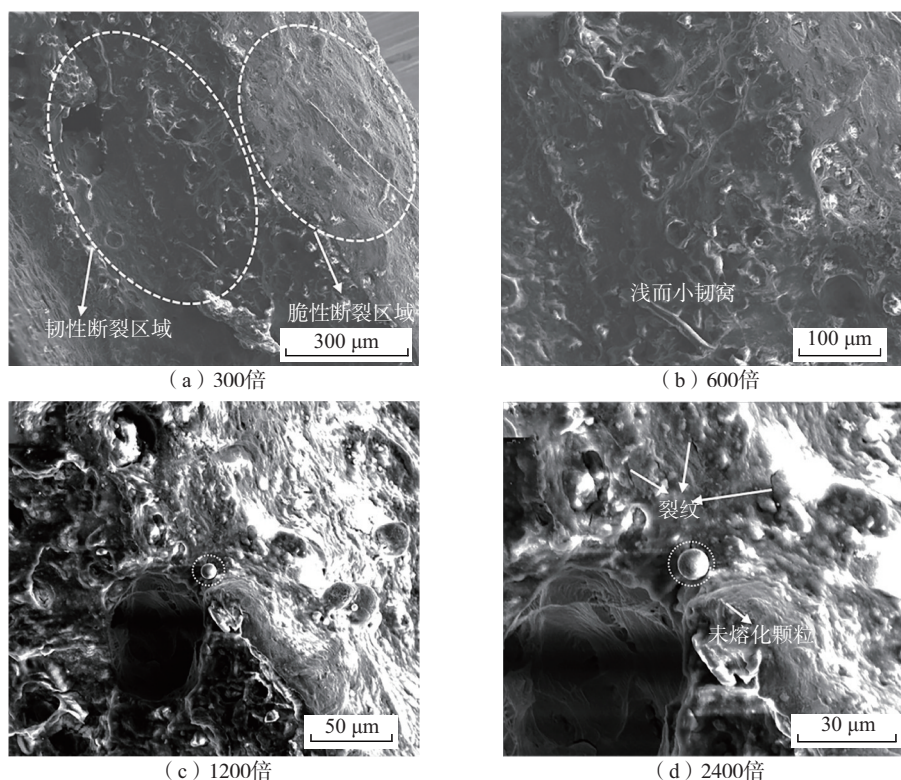


图 17 试样不同放大倍数下的断口形貌

Fig.17 Fracture morphology of the specimen at different magnifications

以上,抗拉强度均达到810 MPa以上,延伸率均达到25%以上,抗拉强度和延伸率均达到母材的80%以上。

参考文献

- [1] Zeng Y Z, Wang J D, Liu X R, et al. Laser additive manufacturing of ceramic reinforced titanium matrix composites: A review of microstructure, properties, auxiliary processes, and simulations[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 177: 107941.
- [2] Nie Y F, Qin C L, Tang Q, et al. Numerical simulation of heat and mass transfer in laser directed energy deposition[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 176: 111024.
- [3] Kanishka K, Acherjee B. A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 89: 220–283.
- [4] 刘亚楠, 孙荣禄, 牛伟, 等. Ti811 表面激光熔覆复合涂层的微观组织及摩擦磨损性能[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0102010.
- Liu Yanan, Sun Ronglu, Niu Wei, et al. Microstructure and friction and wear resistance of laser cladding composite coating on Ti811 surface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0102010.
- [5] Chen Y, Zhang K, Huang J, et al. Characterization of heat affected zone liquation cracking in laser additive manufacturing of Inconel 718[J]. *Materials & Design*, 2016, 90: 586–594.
- [6] Shamsaei N, Yadollahi A, Bian L K, et al. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing: Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control[J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 8: 12–35.
- [7] Nie Y F, Tang Q, Li Z H, et al. Laser powder bed fusion of GH4099 superalloy: Parameter optimization and effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties[J]. *Additive Manufacturing Frontiers*, 2024, 3(2): 200133.
- [8] Smoqi Z, Toddy J, Halliday H S, et al. Process-structure relationship in the directed energy deposition of cobalt-chromium alloy (Stellite 21) coatings[J]. *Materials & Design*, 2021, 197: 109229.
- [9] Ding H T, Cao Y, Hua K, et al. Fretting wear resistance at ambient and elevated temperatures of 316 stainless steel improved by laser cladding with co – based alloy/WC/CaF₂ composite coating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 163: 109428.
- [10] Yu T B, Yang L, Zhao Y, et al. Experimental research and multi-response multi-parameter optimization of laser cladding Fe₃₁₃[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 108: 321–332.
- [11] Wu Z P, Li T, Li Q, et al. Process optimization of laser cladding Ni60A alloy coating in remanufacturing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 120: 105718.
- [12] Knüttel D, Baraldo S, Valente A, et al. Height prediction in directed metal deposition with artificial neural networks[J]. *Procedia CIRP*, 2022, 113: 312–317.
- [13] Li Z Q, Du Y B, He G H, et al. Parameters optimization for single-track laser cladding based on MPA-SVR and A-NSGA-III [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 169: 110069.
- [14] Ilanlou M, Shoja Razavi R, Nourollahi A, et al. Prediction of the geometric characteristics of the laser cladding of Inconel 718 on the Inconel 738 substrate via genetic algorithm and linear regression[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 156: 108507.
- [15] Yang S R, Bai H Q, Li C F, et al. Numerical simulation and multi – objective parameter optimization of Inconel718 coating laser cladding[J]. *Coatings*, 2022, 12(5): 708.
- [16] 王燕燕, 李家豪, 舒林森, 等. 基于RSM与NSGA-II算法的激光熔覆参数多目标优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(7): 0714004.
- Wang Yanyan, Li Jiahao, Shu Linsen, et al. Multi-objective optimization of laser cladding parameters based on RSM and NSGA-II algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(7): 0714004.
- [17] Liao Z Q, Zhong F P, Zhang Z Q, et al. Comparative study on the wear resistance and corrosion resistance of NiW and NiCoW composite coatings with micro-and nano-SiC particles[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 33: 104769.
- [18] 郭星星, 帅美荣, 王建梅, 等. 基于NSGA-II算法的激光熔覆单道成形工艺参数多目标优化[J]. *中国表面工程*, 2023, 36(3): 87–100.
- Guo Xingxing, Shuai Meirong, Wang Jianmei, et al. Multi-objective optimization of laser cladding single-pass forming process parameters based on NSGA-II algorithm[J]. *China Surface Engineering*, 2023, 36(3): 87–100.
- [19] 郭士锐, 赵阳, 崔陆军, 等. 灰铸铁表面单道激光熔覆 Ni45A+5%WC 合金形貌研究[J]. *应用激光*, 2022, 42(3): 21–27.
- Guo Shirui, Zhao Yang, Cui Lujun, et al. Study on the morphology of single-pass laser cladding Ni45A+5% WC coating on the surface of gray cast iron[J]. *Applied Laser*, 2022, 42(3): 21–27.
- [20] Guo C G, He S Z, Yue H T, et al. Prediction modelling and process optimization for forming multi-layer cladding structures with laser directed energy deposition[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 134: 106607.
- [21] 陈林, 蒋永兵, 尚洪宝, 等. S31000 不锈钢表面激光熔覆 Stellite12 合金层的组织和性能[J]. *金属热处理*, 2023, 48(2): 289–294.
- Chen Lin, Jiang Yongbing, Shang Hongbao, et al. Microstructure and properties of laser clad Stellite12 alloylayer on S31000 stainless steelo[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2023, 48(2): 289–294.
- [22] 翁益青, 薛瑞雷, 满蛟, 等. 热处理对高速激光熔覆不锈钢熔覆层组织性能的影响[J]. *金属热处理*, 2023, 48(2): 276–283.
- Weng Yiqing, Xue Ruilei, Man Jiao, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of stainless steel coating by high-speed laser cladding[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2023, 48(2): 276–283.
- [23] Li K Y, Liang J, Zhou J S. Effects of WS₂ and Cr₃C₂ addition on microstructural evolution and tribological properties of the self-lubricating wear-resistant CoCrFeNiMo composite coatings prepared by laser cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 163: 109442.

(责编 阳光)