

激光熔覆镍铝青铜-哈氏合金涂层的工艺参数优化

杜娟¹ 李想² 徐宇亮² 胡楷雄² 韩明兴² 陈云²

(1. 武汉交通职业学院智能制造学院, 武汉 430065; 2. 武汉理工大学交通与物流工程学院, 武汉 430063)

摘要 采用预置粉末式激光熔覆技术在镍铝青铜(NAB)合金表面制备哈氏合金 C276 涂层, 利用响应面法系统分析了激光功率、扫描速率及铺粉厚度对涂层稀释率的影响。结果表明, 采用最佳参数组合(激光功率为 3 000 W、扫描速率为 11 mm/s、铺粉厚度为 0.8 mm), 所得熔覆层组织均匀致密, 晶粒尺寸显著减小, 微观组织由表层等轴晶逐渐过渡到中部柱状树枝晶, 底部形成粗大柱状树枝晶以及大量胞状晶。涂层的平均显微硬度(HV_{0.1})达到 303.9, 较 NAB 基体提高了约 91.1%。

关键词 镍铝青铜; 激光熔覆; 哈氏合金 C276; 响应面法

中图分类号 TG335.86; TG146.11

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250369

Process Parameter Optimization in Laser Cladding of Nickel-aluminum Bronze/Hastelloy Coatings

DU Juan¹, LI Xiang², XU Yuliang², HU Kaixiong², HAN Mingxing², CHEN Yun²

(1. College of Intelligent Manufacturing, Wuhan Technical College of Communication, Wuhan 430065; 2. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063)

Abstract: Pre-placed powder laser cladding technique was employed to fabricate Hastelloy C276 coatings on the surface of nickel - aluminum bronze(NAB), and the effects of laser power, scanning speed, and powder thickness on the dilution rate of coating were systematically analyzed using response surface methodology. The results indicate that the cladding layer is uniform and dense with significantly refined grains under optimal parameters (laser power of 3 000 W, scanning speed of 11 mm/s, and powder thickness of 0.8 mm). The microstructure is transformed from equiaxed grains at the surface to columnar dendrites at the center, and coarse columnar dendrites are formed with abundant cellular grains at the bottom. The average microhardness of coating reaches 303.9 HV_{0.1}, which is increased by 91.1% compared to that of NAB substrate.

Key Words: Nickel-aluminum Bronze, Laser Cladding, Hastelloy C276, Response Surface Methodology

镍铝青铜(NAB)合金因其优异的耐腐蚀性、良好的力学性能及抗生物附着能力^[1-4], 被广泛应用于船舶螺旋桨、泵阀等海洋工程部件^[5]。然而, 在长期复杂的海洋服役环境中, NAB 合金仍面临海水腐蚀、摩擦磨损及空蚀破坏等表面损伤问题^[6-8]。哈氏合金 C276 是一种以 Ni、Mo 和 Cr 为主要成分的高耐蚀合金, 具有优良的抗点蚀、抗应力腐蚀性能及高温强度等特点。采用激光熔覆技术将哈氏合金 C276 涂覆于 NAB 表面, 能有效提升构件表面的防护性能^[9-11], 而激光熔覆过程形成的冶金结合层组织致密、结合强度高, 在保持基体韧性的同时显著改善表面耐磨与耐腐蚀性, 从而延长构件在苛刻海洋环境中的服役寿命^[12-14]。预置粉末式激光熔覆工艺通过将合金粉末预先均匀铺覆于基体表面后

再进行熔覆, 具有粉末利用率高、铺粉厚度易控及组织均匀性好等特点, 有利于获得成分稳定、性能优异的熔覆层^[15]。

激光熔覆涂层性能高度依赖于工艺参数的精准控制。激光功率、扫描速率及铺粉厚度等均会显著影响熔池热行为及冷却条件, 进而决定涂层的几何形貌、稀释率及显微组织^[16-18]。近年来, 随着激光增材制造技术的发展, 国内外针对 NAB 合金的多道多层沉积行为及能量密度调控展开了相关研究。CAI X 等^[1]在多道沉积 NAB 过程中发现, 热输入累积与不同道次间的热循环会显著影响组织均匀性和耐腐蚀性能。JIA Z Y 等^[19]通过在多层激光沉积中引入层间强制冷却技术, 有效调控热循环强度, 改善了成形一致性并促进组织细化。这表明

收稿日期: 2025-10-12; 修订日期: 2025-11-20

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划指导性资助项目(B2023586)

第一作者: 杜娟, 女, 1979 年出生, 副教授, E-mail: 278096018@qq.com

引用格式: 杜娟, 李想, 徐宇亮, 等. 激光熔覆镍铝青铜-哈氏合金涂层的工艺参数优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(10): 1 543-1 550.

DU J, LI X, XU Y L, et al. Process parameter optimization in laser cladding of nickel-aluminum bronze/hastelloy coatings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(10): 1 543-1 550.

NAB 合金激光熔覆的组织与性能受到多参数耦合作用及层间热历史的综合控制。鉴于工艺参数间普遍存在复杂的非线性交互效应,仅依靠经验或单因素试验已难以实现熔覆层性能的系统优化。因此,有必要引入多参数、多目标的优化方法以识别关键因素并寻求最佳工艺窗口。响应面法(Response surface methodology, RSM)因其能够揭示多因素交互作用、建立显性数学模型并实现多目标优化^[20],被广泛应用于激光熔覆工艺研究。已有研究表明,RSM可有效降低模型预测误差,并实现成形质量、稀释率及硬度等性能的综合优化,展现出良好的可靠性与适用性。ALIMOHAMMADI A 等^[21]利用响应面法对 Hastelloy-X 合金激光熔覆过程进行建模与优化,发现扫描速率、激光功率和占空比对熔覆几何形貌及稀释率有显著影响。在最优参数(激光功率为 321.3 W、扫描速率为 6.3 mm/s 和占空比为 76%)下建立的模型预测精度较高,误差低于 9%。GUO S R 等^[22]针对 HT250 灰铸铁开展激光熔覆试验,采用响应面法建立了回归预测模型,并通过优化获得最大稀释率仅为 7.296% 的工艺参数组合,预测精度可靠。ZOU Y 等^[23]在针对 Stellite12 钴基合金粉末的研究中,通过响应面法建立的多目标优化模型能够在保证显微硬度的同时兼顾稀释率与宽高比,预测值与实测值误差小于 8%。

现有研究多集中于铁基、镍基或钴基合金体系,针对 NAB 合金基体与 C276 镍基合金体系之间的界面行为及参数优化研究报道仍较少,且以往研究多针对单一工艺指标的优化。本研究以 NAB 合金为基体材料,采用预置粉末激光熔覆技术制备 C276 涂层。基于响应面法,以激光功率、扫描速率及铺粉厚度作为输入变量,将稀释率作为核心响应目标,综合考虑激光功率、扫描速率与铺粉厚度的交互作用,全面考虑各参数的非线性耦合作用,建立精确的回归预测模型,确定最佳工艺参数组合,揭示工艺参数对 NAB/C276 熔覆体系稀释行为与界面组织特征的耦合调控机制,旨在为 C276 涂层在复杂海洋环境中的工程化应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 材料和装置

基体材料为 ZQA19-4-4-2 合金,熔覆材料为 C276 哈氏合金粉末(粒径为 65~150 μm),成分见表 1 和表 2。图 1 为哈氏合金粉末的微观结构和成分表征。选用尺寸为 200 mm $\times$ 200 mm $\times$ 10 mm 的铸造镍铝青铜合金,在熔覆处理前,通过精密磨削加工去除材料表面的氧化层,并确保基体上下表面达到规定的平面度要求。

表 1 ZQA19-4-4-2 镍铝青铜的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZQA19-4-4-2 nickel-aluminum bronze %

w_B								
Ni	Al	Fe	Mn	Si	Pb	P	Sn	Cu
4.3	9.03	4.1	1.95	0.1	0.01	0.01	0.004	余量

表 2 哈氏合金 C276 粉末的化学成分

Tab.2 Chemical composition of Hastelloy C276 powder %

w_B									
Cr	Si	Mn	Mo	Co	W	C	Fe	V	Ni
15.00	0.15	0.40	15.50	2.50	4.00	0.02	6.50	0.14	余量

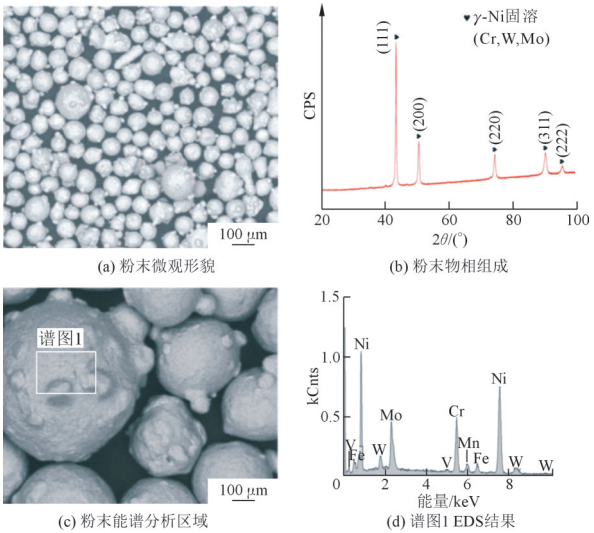


图 1 粉末的微观结构和成分表征

Fig.1 Microstructure and composition characterization of powder

图 2 为激光熔覆试验设备, KUKA KR60 HA 机器臂具体技术参数见表 3。系统核心控制单元采用原厂配套 KRC4 控制柜,负责设备供电管理、通信协议转换及整个激光熔覆系统的集成控制。YLS-6000-K 型光纤激光器具体技术参数见表 4。粉末输送系统选用双筒式送粉装置,见图 2c,配合同轴四点式熔覆喷嘴,见



图 2 激光熔覆试验设备

Fig.2 Laser cladding device

图2d。由于本研究采用预制粉末工艺,实际运行中仅启用喷嘴输送保护气以避免熔覆过程中发生氧化。此外,系统配备海利HL-2000型专用冷水机为激光器提供循环冷却保障,见图2e。

表3 KUKA KR60 HA 机器人性能参数

Tab.3 Performance parameters of KUKA KR60 HA robot				
质量/kg	最大负载/kg	自由度/个	最大速度/(m·s ⁻¹)	作业半径/mm
665	60	6	6	2 033

表4 YLS-6000-K 激光器性能参数

Tab.4 Performance parameters of YLS-6000-K laser				
最大功率/W	光束发散角度/(mrad)	波长/nm	最大单位脉冲能量/J	作业温度/℃
6 000	< 8	1 068~1 080	500	5~45

1.2 试验方案设计

响应曲面法(RSM)是一种基于统计学的多变量回归与优化方法,通过试验设计和多项式回归模型对工艺参数与响应变量之间的非线性关系进行逼近与预测,并借助曲面图、等高线图直观呈现因素交互效应,在工艺优化和质量控制中应用广泛。其中,二次回归模型最常见,兼顾线性、二次及交互效应,表达式为:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \epsilon$$

式中,y为目标响应(因变量);x_i为自变量(因素);β₀为常数项(截距);k为实验因素(自变量)的数量;β_i为自变量x_i的回归系数(线性项);β_{ii}为自变量x_i²的回归系数(二次项);β_{ij}为交互项x_ix_j的回归系数,i≠j;ε为误差项,通常假设为独立同分布的随机噪声。为构建该模型,常用的试验设计包括中心复合设计(CCD)和Box-Behnken设计(BBD)。与CCD相比,BBD试验点更少,避免极端条件组合,既能降低试验成本与风险,又能保证模型精度,是优选方案。

为确保响应面法试验设计的合理性,前期通过工艺窗口的探索确定了主要参数范围,其中激光功率为2 200~3 000 W,扫描速率为8~14 mm/s,铺粉厚度为0.8~1.2 mm。在此基础上,采用响应面法开展系统的多因素试验设计与优化分析。利用Design Expert软件进行3因素3水平Box-Behnken设计,以研究激光功率、扫描速率以及铺粉厚度对熔覆层稀释率的耦合作用,工艺参数水平见表5。基于BBD建立的3因素3水平模型见图3。

表5 工艺参数水平设置

Tab.5 Levels of process parameters			
水平	激光功率P (A)/W	扫描速率v(B)/ (mm·s ⁻¹)	铺粉厚度d (C)/mm
低水平(-1)	2 200	8	0.8
零水平(0)	2 600	11	1.0
高水平(+1)	3 000	14	1.2

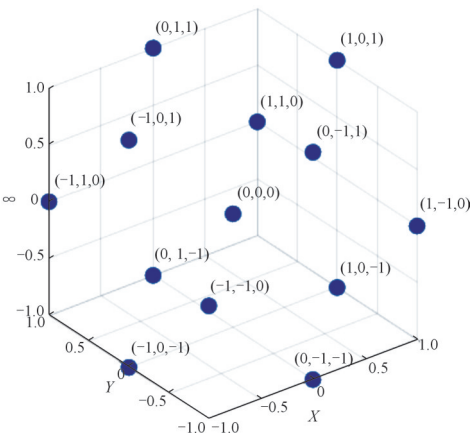


图3 3因素3水平BBD设计结构图

Fig.3 Designed structure of three-factor and three-level BBD

1.3 试样制备

将适量的质量分数为4%的聚乙烯醇溶液倒入干净烧杯中,加入一定量的哈氏合金C276粉末并充分搅拌,使其形成均匀的糊状物。静置片刻排除气泡后,利用尼龙毛刷蘸取糊状物,并在经处理的NAB基体表面放置相应厚度的不锈钢方框,将糊状物均匀涂覆于方框内,刮去多余部分后置于100℃烘箱中保温2 h,以获得平整的预置粉末层。随后,将预置粉末层的NAB基体固定于工作台,通过机械臂实现激光加工位置的精确定位,并在控制系统中启动激光熔覆程序,在NAB基体表面制备哈氏合金C276涂层。加工完成后,使用丙酮清洗去除表面残余粉末,并使用电火花线切割出尺寸为10 mm×10 mm×10 mm的试样。将切割后的试样进行超声清洗,依次使用600、1 000、1 500和2 000目的耐水砂纸进行打磨,使用粒径为2.5 μm的金刚石抛光剂抛光至镜面。最后,在无水乙醇中进行超声清洗,吹干后备用。金相试样采用王水腐蚀20 s,使用蔡司Axiolab 5型光学显微镜(OM)和Quanta FEG 450型场发射扫描电镜(FESEM)观察微观结构,检测裂纹、气孔等缺陷。显微硬度测试使用AAV-502型显微硬度计,加载载荷为1 N,加载时间为15 s,结果取3次测量的平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 响应面试验分析

通过BBD的方案完成激光熔覆试验,并计算涂层稀释率,结果见表6。模型可靠性由方差分析检验,验证输入因子与输出响应之间的关系,参数和分析数值分别见表7和表8。可以看出,模型的F值为29.94,对应P值为0.000 8,远小于0.05,说明模型整体在统计学上高度显著;失拟度检验的P值为0.642 8,大于0.05,进

表 6 试验参数设计及相应稀释率

Tab.6 Experimental parameter design and corresponding dilution rates

试样序号	激光功率 P (A)/W	扫描速率 v (B)/ (mm·s ⁻¹)	铺粉厚度 d (C)/mm	稀释率 η /%
1	2 200	8	1.0	13.75
2	2 200	11	0.8	19.53
3	2 200	11	1.2	12.26
4	2 200	14	1.0	12.31
5	2 600	8	0.8	28.74
6	2 600	8	1.2	19.49
7	2 600	11	1.0	16.03
8	2 600	14	0.8	22.92
9	2 600	14	1.2	18.86
10	3 000	8	1.0	22.57
11	3 000	11	0.8	28.75
12	3 000	11	1.2	24.13
13	3 000	14	1.0	19.55

表 7 稀释率方差分析结果

Tab.7 Variance analysis results for dilution rate

模型参数	F 值	P 值	结果
模型	29.94	0.000 8	显著
A	111.07	0.000 1	显著
B	9.58	0.027 0	显著
C	51.11	0.000 8	显著
AB	0.40	0.554 0	不显著
AC	1.13	0.336 3	不显著
BC	4.34	0.091 8	不显著
A^2	0.81	0.409 7	不显著
B^2	8.75	0.031 6	显著
C^2	86.75	0.000 2	显著
失拟度	0.68	0.642 8	不显著

表 8 稀释率拟合分析结果

Tab.8 Fitting results for dilution rate

标准差	决定系数 (R^2_{adj})	校正决定系 数(R^2_{adj})	预测决定 系数 (R^2_{pred})	变异系数 ($C_V/\%$)	信噪比
1.25	0.981 8	0.949 0	0.832 9	6.53	16.590

一步表明模型不存在显著失拟,能够较为准确地反映实际数据规律。在拟合优度方面,模型的决定系数 R^2 为 0.981 8,可解释绝大部分响应变量的变异;校正决定系数 R^2_{adj} 为 0.949 0,说明在考虑自变量数量的情况下,模型保持较强的解释能力;预测决定系数 R^2_{pred} 为 0.832 9,且与 R^2 及 R^2_{adj} 差值均小于 0.2,显示出模型不仅拟合效果好,而且具有较强的泛化性和预测能力。此外,模型的变异系数 C_V 为 6.53%,低于 10%,说明试验数据离散度较低、稳定性较好;信噪比达到 16.590,远高于常用阈值 4,表明模型具有较高的信号强度和预测精度。

方差分析结果表明,激光功率、扫描速率和铺粉厚度 3 个工艺参数均对熔覆层稀释率表现出显著的影响,其中激光功率的 F 值最大,表明其对稀释率的影响最

显著。此外,二次回归分析显示,扫描速率和铺粉厚度的二次项同样对稀释率具有重要调控作用。在参数交互效应方面,扫描速率与铺粉厚度的交互项呈现出相对显著的耦合效应。通过剔除不显著项后,建立的熔覆层稀释率与工艺参数间的二次响应面模型如下:

$$\eta = 242.47 - 0.012A - 6.451B - 363.110C + 0.213B^2 + 151.021C^2 \quad (2)$$

图 4 为模型验证和工艺参数对稀释率参数的影响。由图 4a 可以看出,试验数据点紧密分布在响应面模型拟合的回归直线附近,这与模型 R^2 接近于 1 的统计分析结论相互印证,验证了所建立响应面模型具有较高的预测可靠性。由图 4b 可以看出,在设计空间中心点条件下,激光功率、扫描速率和铺粉厚度对稀释率均有显著影响。稀释率随激光功率升高呈线性上升,这是由于激光功率增大提高了激光能量密度,使熔池温度与熔深升高,从而强化基材熔化与融合。扫描速率总体上与稀释率负相关,扫描速率增加降低能量输入,熔深减小,稀释率下降;但当扫描速率过高时,能量密度过低导致熔高减小,熔池形态发生变化,稀释率略有回升。铺粉厚度的作用表现为随因子水平升高稀释率先降后增,适度加厚粉末层能起到隔离作用,减少基材熔化量,但过厚的粉末层则因能量难以穿透、熔池加热不均,反而导致基材熔化比例增加,引起稀释率上升。整体而言,激光功率是影响稀释率的主导因素,扫描速率与铺粉厚度对稀释率产生次要影响。

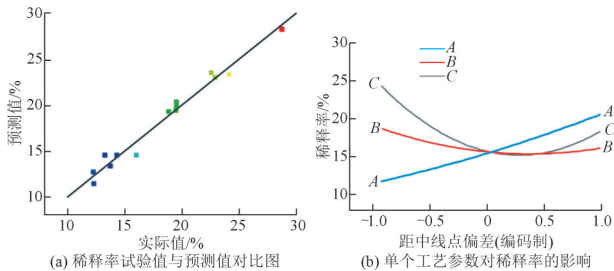


图 4 模型验证和工艺参数对稀释率参数的影响

Fig.4 Model validation and parameter influence on dilution rate

铺粉厚度 d 为 1 mm 时,激光功率与扫描速率对熔覆层稀释率的三维映射曲面图及等高线图见图 5。可以看出,稀释率随激光功率的增加而增加,随扫描速率增加先略减后略增。相较于扫描速率,激光功率对稀释率的影响更为显著。稀释率随激光功率显著升高,在功率方向上的曲面坡度更大、等高线更密集,表明激光功率是主控因素。相比之下,扫描速率的影响呈现“先略降后略升”的非单调变化,在三维曲面上表现为沿速度方向的轻微凹形起伏,在等高线图中对应为等高线间距先增大后略有收敛。颜色分布进一步显示,低稀释率区域主要出现在低功率与较高扫描速率的组合,而高稀释率

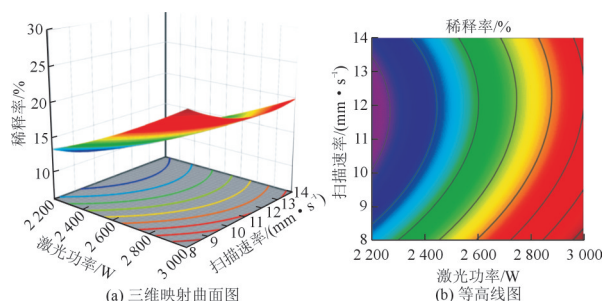


图5 激光功率和扫描速率在铺粉厚度为1 mm时的交互作用
Fig.5 Interaction effect of laser power and scanning speed at a powder thickness of 1.0 mm

区域集中于高功率与低扫描速率的区域。综上,在 d 为1 mm条件下,稀释率对激光功率更为敏感。

扫描速率 v 为11 mm/s时,激光功率与铺粉厚度对熔覆层稀释率的影响见图6。可以看出,稀释率随激光功率的增加整体上呈持续上升趋势,这是典型的热输入增强导致熔池加深、基体熔化量增加的结果。铺粉厚度的影响则表现为非单调变化,在较小铺粉厚度范围内,随厚度的增加稀释率下降,这是因为预制粉末量增加了能量吸收体积并降低单位能量密度,但当铺粉厚度继续增加至一定水平后,涂层堆积高度增加、激光对基体的有效作用深度减弱,熔池稳定性可能受到影响,导致稀释率再次升高。等高线在激光功率和铺粉厚度方向上的间距均较小,说明两者对稀释率均具有显著影响,且敏感度均高于扫描速率因素。

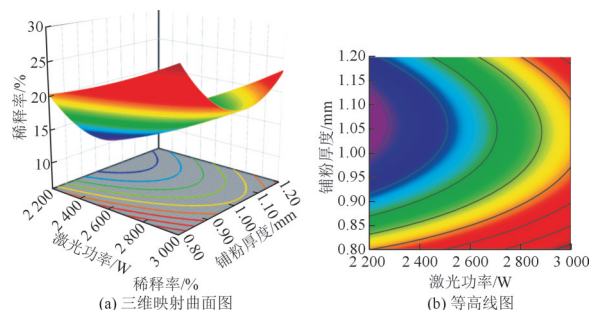


图6 激光功率和铺粉厚度在扫描速率为11 mm/s时的交互作用
Fig.6 Interaction effect of laser power and powder thickness at a scanning speed of 11 mm/s

图7为扫描速率和铺粉厚度在 P 为2 600 W时的交互作用。可以看出,扫描速率与铺粉厚度对熔覆层稀释率的影响呈现典型的“双因子非单调”变化趋势,两者均表现为随因子水平增加先降低、后升高的变化规律,这通常与热输入分布和熔池稳定性共同作用有关,即在较低扫描速率或较小铺粉厚度下,单位能量密度较高,导致稀释率偏大,而随扫描速率提升或铺粉厚度增加,基体熔化深度下降,使稀释率降低。但当两者继续增大至较高水平时,过大的扫描速率会使熔池能量不足、过厚的粉层会影响激光能量有效传递,稀释率出

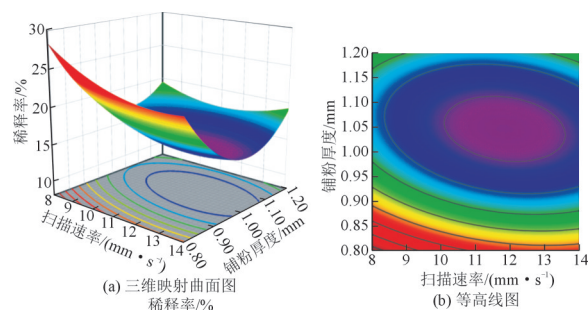


图7 扫描速率和铺粉厚度在激光功率为2 600 W时的交互作用

Fig.7 Interaction effect of scanning speed (v) and powder thickness (d) at a laser power of 2 600 W

现回升。从影响强度来看,由于铺粉厚度会直接改变粉末吸能量及熔池形态,其对稀释率的影响更显著,而扫描速率的影响相对温和,但在较高速度区域同样会显著改变热输入平衡。值得注意的是,在扫描速率与铺粉厚度均处于较高水平的区域,二者共同降低了激光对基体的有效作用深度,使熔覆过程趋向于表面熔化,因而稀释率保持在相对较低的水平。

综上,激光功率、扫描速率和铺粉厚度对熔覆层稀释率均表现出显著影响,其中激光功率作用最为显著。基于BBD的二次回归模型具有较高的拟合精度和预测可靠性,能准确揭示稀释率的变化规律,为工艺优化提供了理论支撑。在此基础上,进一步结合熔覆层的表面形貌、显微组织特征及显微硬度分布进行研究,可更全面地评价工艺参数对涂层性能的影响。

2.2 熔覆层表面与截面形貌

各单道熔覆层的表面形貌见图8。可以看出,当铺粉厚度为1.0 mm和1.2 mm时,大部分熔覆层表面均出



图8 各个工艺参数下熔覆层的表面形貌

图8 Surface morphologies of cladding layers under different process parameters

现明显的球化现象,导致涂层粗糙,进而降低涂层的耐腐蚀性和耐磨性,而在铺粉厚度为0.8 mm时,除激光功率为2 200 W对应的熔覆层外,其余均表现出较好的成形质量,这说明较小的铺粉厚度更有利于获得平整表面。在激光功率为2 200 W时,对应的4道熔覆层均出现严重的球化现象。相较之下,当激光功率升高至3 000 W时,除铺粉厚度为1.2 mm的熔覆层外,其余均未出现明显球化,表明该功率水平更为适宜。此外,当扫描速率较低(8 mm/s)时,熔覆层表面易形成明显的鱼鳞状纹理,导致表面粗糙度增加,因此应优先选取相对较大的扫描速率。

各个单道熔覆层的截面形貌见图9。分析发现,试样6(2 600 W、8 mm/s、1.2 mm)截面形貌存在明显气孔,而其他多数参数组合下未观察到同等程度的孔洞。该差异可主要归因于熔池热输入特性、熔池流动状态以及粉层厚度条件的共同作用。试样6的线能量密度处于较高水平,在高功率与低扫描速率条件下,熔池获得的单位长度能量显著上升,更易形成深熔型熔孔,并表现出强烈且不稳定的熔池对流。剧烈蒸发导致的蒸气回压以及熔孔的周期性塌陷常常在凝固过程中形成封闭孔洞,这与截面中观察到的大尺寸气孔特征一致。

较大的粉层厚度(1.2 mm)进一步增强了缺陷生成的可能性。厚粉层会使激光能量在粉末区发生更明显的散射与非均匀吸收,导致熔池受热分布不稳定;同时,粉层阻碍了熔池内部气体的逸散路径,使粉末表面吸附气体、蒸发产生的气体以及挥发性组分更易滞留在熔池中,从而增加了气体困陷的概率。低扫描速率带来的较长高温驻留时间亦会强化金属蒸发与飞溅行为,使形成气孔的风险进一步增大。相比之下,试样5(2 600 W、8 mm/s、0.8 mm)在相同功率与扫描速率条件下由于粉层较薄,激光能量更易充分熔化粉末,熔池气体排出也更为顺畅,因此未出现类似孔洞。在试样7~试样9中,扫描速率提高或功率与粉层厚度的匹配关系得到改善,降低了线能量密度或增强了熔池流动稳定性,使得截面中未出现明显气孔。综上,试样6的气孔形成为高线能量密度与较大铺粉厚度耦合造成的热动力不稳定与气体逸散受阻的结果。气孔的存在会在截面处形成应力集中和局部断裂起始点,可能导致涂层的连接性、耐疲劳性与局部密封性下降。因此,对于出现气孔的参数区间,在工程应用中可通过降低激光功率、提高扫描速率或适当减薄铺粉厚度来抑制气孔生成。

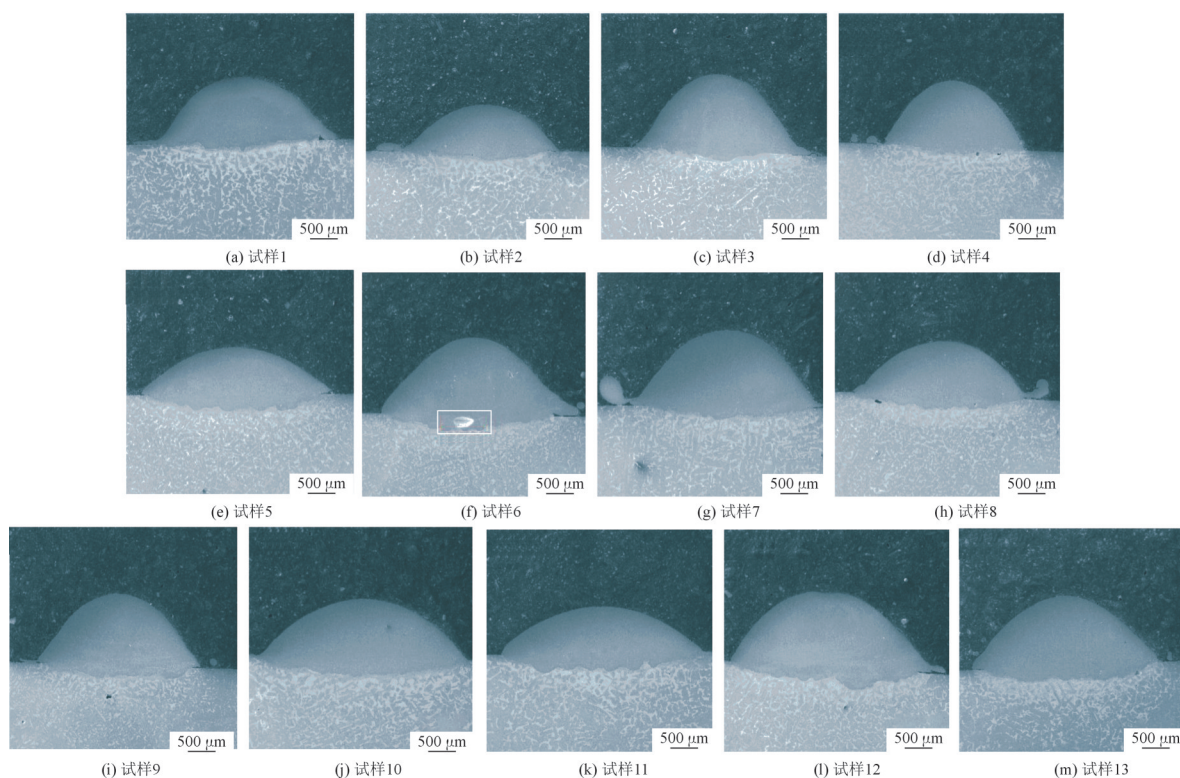


图9 单道熔覆层截面图

Fig.9 Cross-sectional morphologies of single-pass cladding layer

2.3 熔覆层微观组织结构与显微硬度

经响应面法优化分析,在综合考虑熔覆层表面形

貌以及熔池截面形貌后,激光功率为3 000 W、扫描速率为11 mm/s、铺粉厚度为0.8 mm的参数组合表现最佳,能够在保证熔覆层表面与截面成形质量的同时,获

得较好的几何特征与组织结构。该参数条件下形成的熔覆层在不同区域呈现出典型的凝固组织演变规律,见图10。可以看出,涂层底部因与基体直接接触,温度梯度大、冷却相对缓慢,形成粗大的柱状树枝晶和胞状晶。随着凝固界面的推进,熔池中部以柱状树枝晶为主,晶粒沿热流方向有序排列,显示出良好的定向生长

特征。至涂层顶部,冷却速率显著提高,过冷度增强,晶粒难以充分长大,最终形成细小的等轴树枝晶^[24]。整体来看,涂层自下而上晶体形貌逐渐细化,分布均匀、方向性清晰,析出物尺寸与数量适中,组织致密且无明显宏观偏析,体现了优化工艺参数下熔覆层的优良显微组织特征。

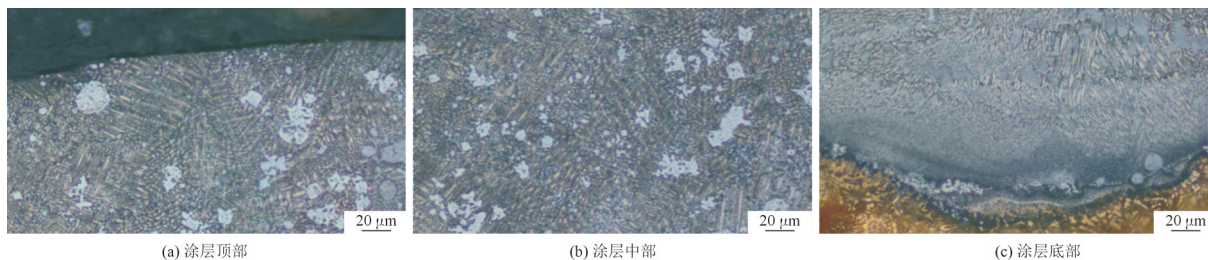


图10 涂层横截面微观组织

Fig.10 Cross-sectional microstructure of coating

在此组织演变过程中,由粗大柱状晶向细小等轴晶的逐层过渡不仅反映了典型的快速凝固规律,也为涂层力学性能的提升奠定了结构基础。底部的柱状树枝晶为熔覆层提供连续致密的支撑框架;中部定向组织具有明显的晶界取向一致性,有助于保持结构稳定性;而顶部细小等轴晶的形成显著增加晶界数量,使晶粒尺寸减小,强化了晶粒细化与晶界阻碍效应。此外,快速凝固产生的枝晶间距细密、局部微应变及亚结构特征,有利于提高固溶强化与晶界强化贡献,而自下而上连续平滑的组织过渡则避免了涂层内部性能突变,使整体力学响应更加稳定。由此可见,优化工艺所获得的“柱状-定向-等轴”梯度组织不仅保证了显微组织致密均匀,也为涂层硬度及耐磨性能的提升提供显著的组织支撑^[25-26]。

显微硬度测试路径沿熔覆层横截面垂直方向,自表层向基体方向以0.1 mm间距连续打点测量,检测位置和最终硬度见图11。可以看出,大多数测点硬度($HV_{0.1}$)的重复性误差为10~60,整体平均误差约为44。该误差水平与显微硬度测试中因压痕位置微偏移、局部组织不均匀性及硬度梯度变化所导致的典型离散性一致;部分位置虽存在相对较大的偏差,但主要与显微组织突变区域相关,属于可接受的局部离散现象,说明整体硬度测试结果具有良好的重复性。

在激光功率为3 000 W、扫描速率为11 mm/s、铺粉厚度为0.8 mm的优化工艺参数下,涂层平均硬度($HV_{0.1}$)达到303.9,相较于基体NAB的159.0提升了约91.1%,表明熔覆层显著改善了材料的力学性能。硬度的提升主要归因于熔覆层晶粒尺寸明显小于基体。根据Hall-Petch关系可知^[27],细晶强化导致位错运动受到有效阻碍,从而提高材料的强度与硬度。此外,在距

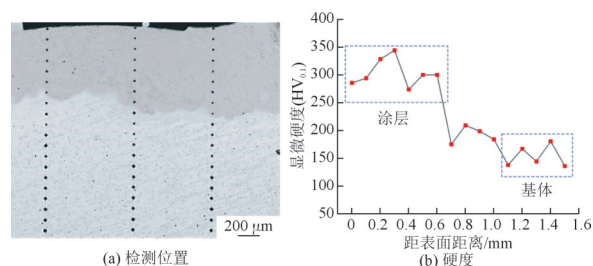


图11 显微硬度检测位置及硬度测试结果

Fig.11 Locations and results of microhardness measurement

表面约0.4 mm位置处,硬度曲线出现一定程度下降,这是由于等轴晶逐渐过渡为柱状树枝晶,晶粒尺寸增大,而在熔覆层底部,枝晶间固溶体的析出增加了位错运动阻力,使该区域硬度有所回升。整体来看,该优化工艺参数下制备的熔覆层组织细密、成分均匀,硬度显著优于基体。

3 结 论

(1)响应面分析结果显示,激光功率对稀释率的影响显著高于扫描速率;激光功率与铺粉厚度均对稀释率有较大影响,而扫描速率与铺粉厚度的交互作用中,以铺粉厚度的影响更为显著,当二者同时处于较高水平时,稀释率保持在较低范围。

(2)确定最佳工艺参数组合是激光功率为3 000 W、扫描速率为11 mm/s、铺粉厚度为0.8 mm。在该参数下,熔覆层的稀释率较低,且成形质量良好,熔覆层的微观组织呈现从表层细小等轴晶到中部柱状和树枝晶、底部粗大柱状树枝晶和胞状晶的逐渐过渡,组织致密且无明显宏观偏析。涂层的平均显微硬度($HV_{0.1}$)为303.9,相较于基体材料的159.0,硬度提升了约91.1%。

参 考 文 献

- [1] CAI X, YANG M M, RUI Y P, et al. Investigation of mechanical and corrosion behavior of multi-pass nickel-aluminum bronze fabricated through wire-arc directed energy deposition [J]. Additive Manufacturing, 2024, 80: 103 967.
- [2] WANG L X, LIU K, LI J, et al. A review on corrosion behavior and surface modification technology of nickel aluminum bronze alloys: Current research and prospects [J]. Advanced Engineering Materials, 2025, 27(1): 2 401 779.
- [3] XU C, PENG Y, CHEN L Y, et al. Advanced cavitation erosion-corrosion resistance of nickel-aluminum bronze prepared by directed energy deposition [J]. Corrosion Science, 2024, 231: 111 982.
- [4] 吕维洁, 王立强. 镍铝青铜合金组织结构优化及腐蚀疲劳性能 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [5] CARLTON J. Marine propellers and propulsion [M]. Fourth ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018.
- [6] ZHANG L M, MA A L, YU H, et al. Correlation of microstructure with cavitation erosion behaviour of a nickel-aluminum bronze in simulated seawater [J]. Tribology International, 2019, 136: 250-258.
- [7] SONG Q N, LI H L, XU N, et al. Selective phase corrosion and cavitation erosion behaviors of various copper alloys in 3.5% NaCl solutions with different pH values [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(10): 3 039-3 053.
- [8] DENG Q, ZHANG P, LI X Z, et al. Effect of seawater salinity on the fretting corrosion behavior of nickel-aluminum bronze (NAB) alloy [J]. Tribology International, 2024, 193: 109 357.
- [9] MA G Y, NIU F Y, WU D, et al. Electrochemical corrosion properties of pulsed laser welding Hastelloy C-276 [J]. Physics Procedia, 2013, 41: 31-37.
- [10] SUVIN P S, SINGH A, PATRO B D K, et al. Effect of laser surface modification on texture, roughness, wettability and surface energy of hastelloy C22, C276 & X [J]. Defect and Diffusion Forum, 2024, 430: 3-16.
- [11] 张凯奕, 韩宏升, 杨川, 等. 铸铁表面激光熔覆哈氏合金 C276 组织及性能 [J]. 表面技术, 2021, 50(6): 109-115.
- [12] QU C C, LI J, BAI L L, et al. Effects of the thickness of the pre-placed layer on microstructural evolution and mechanical properties of the laser-clad coatings [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 644: 450-463.
- [13] ZUO P F, CHEN S Y, WEI M W, et al. Thermal behavior and grain evolution of 24CrNiMoY alloy steel prepared by pre-laid laser cladding technology [J]. Optics and Laser Technology, 2019, 119: 105 613.
- [14] 杨杰, 贺春林, 孙宇海璇, 等. 铜合金表面激光熔覆技术的研究现状 [J]. 材料保护, 2022, 55(11): 133-141, 177.
- [15] 朱明, 王博, 颜步云, 等. 激光熔覆过程预置粉末熔化行为的动态检测与分析 [J]. 中国激光, 2021, 48(14): 135-144.
- [16] HU K X, HUANG Q Y, WANG L, et al. Optimization of multi-track, multi-layer laser cladding process parameters using Gaussian process regression and improved multi-objective particle swarm optimization [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 137(7): 3 503-3 523.
- [17] ZHU M Y, CHEN Y J, CHEN Y, et al. Application of Taguchi-grey relational analysis for optimizing process parameters of laser cladding for 316L stainless steel [J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2025, 19(9): 6 417-6 428.
- [18] 董鹏飞, 吴保磊, 俞伟元. 激光熔覆工艺参数对铁基非晶涂层性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(4): 536-541.
- [19] JIA Z Y, WANG Z D, CHEN M Z, et al. Tailoring microstructural evolution in laser deposited nickel-aluminum bronze alloy by controlling water cooling condition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2025, 335: 118 659.
- [20] 李鑫, 张开铭, 王克鲁, 等. 基于响应面法的 TC21 钛合金热变形参数优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(11): 1 478-1 484.
- [21] ALIMOHAMMADI A, KHORRAM A, ARAEE A. Statistical modeling and optimization of clad geometry in laser cladding of Amdry 365 on Hastelloy X superalloy with response surface methodology [J]. Vacuum, 2024, 230: 113 665.
- [22] GUO S R, ZHAO Y, CUI L J, et al. Using response surface methodology (RSM) to optimize the key laser processing parameters for laser cladding of grey cast iron [J]. Lasers in Engineering, 2021, 51(1-5): 75-95.
- [23] ZOU Y, SHI S Q, YANG Z F, et al. Multi-objective optimization of key process parameters in laser cladding Stellite12 cobalt-based alloy powder [J]. Journal of Laser Applications, 2024, 36(1): 12 006.
- [24] 刘峰, 肖海峰, 叶四友. 激光熔覆 WC 增强镍基复合涂层的组织与性能研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(8): 1 071-1 075.
- [25] XIANG K, CHEN L Y, CHAI L J, et al. Microstructural characteristics and properties of CoCrFeNiNb_x high-entropy alloy coatings on pure titanium substrate by pulsed laser cladding [J]. Applied Surface Science, 2020, 517: 146 214.
- [26] GUAN H T, CHAI L J, WANG Y Y, et al. Microstructure and hardness of NbTiZr and NbTaTiZr refractory medium-entropy alloy coatings on Zr alloy by laser cladding [J]. Applied Surface Science, 2021, 549: 149 338.
- [27] WEI F X, CHENG B S, CHEW L, et al. Grain distribution characteristics and effect of diverse size distribution on the Hall-Petch relationship for additively manufactured metal alloys [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 4 130-4 136.

(编辑: 刘晨辉)

欢迎登陆期刊官网

投稿、查稿、审稿

欢迎登陆《特种铸造及有色合金》杂志官方网站投稿、阅读、审稿, 期刊论文彩色版本均可在网站免费在线阅读或下载 pdf 文件, 并可体验 AI 导读功能, 网址: www.special-cast.com, 欢迎访问!