

激光与光电子学进展

镍基高温合金激光熔覆数值模拟及回归正交试验优化

杨思瑞¹, 白海清^{1,2*}, 李超凡¹, 张鑫何¹, 贾宗强¹

¹陕西理工大学机械工程学院, 陕西 汉中 723001;

²陕西省工业自动化重点实验室, 陕西 汉中 723001

摘要 研究了高温镍基合金增材制造过程工艺参数与熔覆形貌、质量之间的关系。首先,利用 ANSYS 分析软件,采用 APDL 编程和生死单元技术在 45° 钢表面建立 Inconel718 激光熔覆模型,通过比较数值模拟和试验结果得到的熔池尺寸,从而验证模型的准确性,以减少后续的试验成本。然后,以熔覆层质量(成形系数)为指标,利用回归正交试验设计建立一次回归方程,研究工艺参数对熔覆层质量的影响次序,依次为激光功率、送粉速率、扫描速度。由方差分析可知,多因素交互作用对熔覆层质量影响不显著,而激光功率和送粉速率对熔覆质量影响最显著。因此,设计单因素试验分析其对熔覆层硬度、稀释率以及熔覆形貌的影响规律。通过方差分析预测最优方案为激光功率 1200 W、扫描速度 23 mm/s、送粉速率 20 g/min,其与试验得到的结果一致,并对最优参数进行多道搭接试验验证,发现其组织致密细小,熔覆层与基体有良好的冶金结合性,该研究对后续的实践生产工作有一定的指导作用。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 数值模拟; 回归正交试验设计; 方差分析; 参数优化

中图分类号 TG174.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220699

Numerical Simulation and Regression Orthogonal Experiment Optimization of Laser Cladding of Nickel-Based Superalloy

Yang Sirui¹, Bai Haiqing^{1,2*}, Li Chaofan¹, Zhang Xinhe¹, Jia Zongqiang¹

¹School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi, China;

²Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong 723001, Shaanxi, China

Abstract The study aimed to examine the relationship between the process parameters of the high-temperature nickel-based alloy additive manufacturing process and the cladding morphology and quality. First, an Inconel718 laser cladding model was established on the surface of 45° steel by using ANSYS analysis software, APDL programming, and life and death unit technology. By comparing the size of the molten pool obtained by numerical simulation and experimental results, the accuracy of the model was verified to reduce subsequent test cost. Second, taking the quality of the cladding layer (forming coefficient) as the index, a regression equation was established by using the regression orthogonal experimental design, and the order of influence of the process parameters on the quality of the cladding layer was studied, followed by laser power, powder feeding rate, and scanning speed. Our results showed insignificant effect of the interaction on the quality of the cladding layer. However, the laser power and powder feeding rate exhibited the most significant impact on the quality of the cladding layer. Therefore, a single factor test is designed to analyze the influence of laser power and powder feeding on the hardness, dilution rate, and cladding morphology of the cladding layer. Through the analysis of variance, the optimal solution to the test is predicted to be as follows: laser power 1200 W, scanning speed 23 mm/s, powder feeding rate 20 g/min. These findings are consistent with the results obtained in the experiment. Moreover, the optimal parameters are verified by multi-pass lap experiments, and the structure is dense and fine. The cladding layer was found to have a good metallurgical bond with the substrate, which has a certain guiding effect on the follow-up practical production work.

Key words laser technique; laser cladding; numerical simulation; regression orthogonal experiment design; variance analysis; parameter optimization

收稿日期: 2022-01-09; 修回日期: 2022-02-10; 录用日期: 2022-02-28; 网络首发日期: 2022-03-14

基金项目: 陕西省技术创新引导项目(2021QFY05-03)、陕西理工大学研究生创新基金项目(SLG YCX2124)

通信作者: *bretmail@snut.edu.cn

1 引言

激光熔覆是动态的瞬间熔化和凝固过程,其形成过程中的物理、化学现象相当复杂^[1]。激光增材过程中工艺参数与熔覆温度有一定的关系,通常以温度变化来表征熔覆参数是否能形成高质量的熔覆层,然而,现阶段的试验条件不足以实现实时对熔池内部温度变化的监测,采用有限元分析技术,进行参数化仿真模拟可以有效得到熔覆过程内部温度场变化情况,为工艺选择和优化提供了可靠的手段^[2-3]。

激光熔覆过程中工艺参数与熔覆层形貌、质量之间有必然的关联,如何选择合适的参数是研究激光增材制造的基础,因为熔覆参数与熔覆形貌、质量之间存在复杂的非线性关系^[4]。有限元分析手段对选择合适的工艺参数有极大的帮助,利用数值模拟研究增材制造中参数对温度变化的影响,可以为激光熔覆实际应用及参数选择提供理论指导^[5-6],国内外很多学者研究了熔覆参数与熔覆形貌、质量的关系。于天彪等^[7]以 45# 钢为基材研究参数对熔覆形貌的影响,利用极差分析找出对形貌影响最大的因素,采用灰色关联度分析不同参数组合下的熔覆层质量与理想的熔覆层质量之间的关联度,并找到最优参数。顾赛男等^[8]采用同轴送粉法进行了 W-Cu 复合粉末的激光熔覆试验,研究了不同工艺参数对单道熔覆层几何特性和颗粒分布的影响,提出了有效质量能量密度概念。Kong 等^[9]通过数值模拟和试验验证,研究了 H13 工具钢粉末激光多层熔覆过程中的传热传质现象。建立了多相瞬态模型,研究了熔池内液相的温度场和流速的演变规律,验证了模型对试验指导的准确性。张天刚等^[10]通过 ABAQUS 软件建立了 TC4 涂层的有限元模型,温度场模拟熔池出现“彗尾”现象,与实际激光热源的运行特点吻合,并进行了 TC4 合金基材表面制备单道 Ni 基激光熔覆层试验研究,结果发现数值模拟与试验结果高度吻合。

目前利用有限元手段对高温镍基合金熔覆层形貌、质量与参数的关系研究相对较少,本文基于 ANSYS 软件和参数化语言 (APDL) 模拟激光熔覆移动热源及生死单元仿真技术,建立单道激光熔覆 Inconel718 仿真模型,设置合理模型参数,模拟得到熔覆过程中熔池的尺寸。同时,以相应的参数进行试验验证,并对比分析试验结果与模拟结果,从熔池宏观尺寸方面验证所建立的模型可行性,以减少后续的试验成本。然后,以熔覆层成形系数为指标通过回归正交

试验设计建立一次回归方程,分析熔覆参数对熔覆层质量的影响次序,利用方差分析各因素及因素交互作用对熔覆层质量的影响显著性,并设计单因素试验分析激光功率和送粉速率对熔覆形貌以及熔覆层硬度、稀释率的影响规律,利用方差分析预测最优试验方案,发现其与试验结果一致。最后,以最优参数进行多道搭接试验验证,该研究结果可以为后续的实际生产提供理论指导。

2 激光熔覆数值模拟

2.1 数值模拟理论分析

激光熔覆过程是一个传热、传质和流动耦合变化高度复杂的动态物理冶金过程,但熔池中温度及传热过程变化很难通过试验进行测量,采用有限元数值模拟的方法可以更好地表征熔池温度的变化规律。目前,数值模拟技术很难把所有因素考虑周全,因此需要对该试验过程做出合理的简化和假设。相关的假设和简化如下:1) 假设熔覆材料具有各向同性,且温度高于熔点时依旧为固态处理;2) 材料的比热、导热系数等热物性参数随温度变化,但物理性能不随温度变化^[11];3) 高能激光束假设为高斯分布的移动热源^[12]。

激光热流密度服从正态分布的高斯热源模型,满足密度表达方程,表达式为

$$Q = \frac{3\eta P}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right), \quad (1)$$

式中: Q 为距离热源中心 r 处的热流密度; η 为工件对激光能量的吸收率; R 为激光光斑半径; P 为激光功率; r 为高斯热源分布的外径^[13]。

设置激光熔覆过程的边界条件方程时,需要根据试验的具体环境来给定初始的温度分布以及边界条件,以便于温度场的计算求解。边界条件设置为

$$K_x(T) \frac{\partial(T)}{\partial(x)} n_x + K_y(T) \frac{\partial(T)}{\partial(y)} n_y + K_z(T) \frac{\partial(T)}{\partial(z)} n_z = \begin{cases} T_s(x, y, z, t) \\ q_s(x, y, z, t) \\ h(T_a - T_s) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: T_s 为边界温度; q_s 为热源与表面热流密度; T_a 为环境温度设为 22 °C; h 是对流系数; n_x 、 n_y 、 n_z 为边界外法线得到方向余弦^[14]。

2.1.1 激光熔覆材料及性能

本次数值模拟选择 45# 钢板和 Inconel718 合金熔覆粉末,基本物理参数如表 1 所示,通过查阅文献可知,45# 钢和 Inconel718 合金的热物性参数^[15]如表 2、表 3 所

表 1 基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters

Material	Density / (kg·m ⁻³)	Melting point / °C	Phase transition temperature region / °C
45# steel	7850	1495	1490—1530
Inconel718 alloy powder	8240	1260	1260—1320

表 2 45#钢热物性参数

Table 2 Thermal physical properties of 45# steel

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200	1400	1600
Specific heat / $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	472	480	798	560	586	615	700	806	637	602	587	576
Coefficient of thermal conductivity / $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	47.68	43.53	40.44	38.13	36.02	34.16	21.98	26.49	25.92	24.02	23.51	22.66

表 3 Inconel718 合金热物性参数

Table 3 Thermal physical parameters of Inconel718 alloy

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200	1400	1600
Specific heat / $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	421	442	453	472	481	502	527	562	606	628	636	649
Coefficient of thermal conductivity / $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	11.9	12.4	13.7	15.2	16.9	18.7	21.7	25.6	22.9	19.1	17.7	15.8

示,未知的参数值可以通过现有温度点的参数值采用插值法计算得到。

2.1.2 热源加载及模型设置

基于前期试验结果,本文设置模型中基板为 $150\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,单道熔覆层为 $5\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 。当激光光斑以恒定的速度沿着 X 方向在基板上移动时,粉末随着激光器的移动不断送粉到基板上。随着激光器不断移动,粉末和基板温度急速上升后快速下降,形成熔覆层。利用 ANSYS 软件建立的三维(3D)模型如图 1 所示。

激光增材制造中采用同轴送粉方式,粉末随着激光束的不断移动逐渐在基板形成熔覆层。采用数值模拟熔覆过程需利用软件中“生死单元”技术,同轴送粉时激光束移动到某单元块,该单元块被激活,而激光束未经理过的区域,单元块不被激活,不参与前面的熔覆材料冶金结合过程,从而实现同步式激光熔覆过程^[16]。

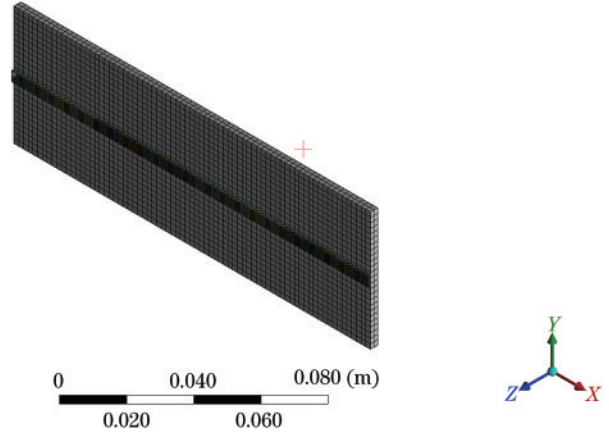


图 1 三维模型
Fig. 1 3D model

2.2 激光熔覆温度场分析

根据熔覆层几何特征可以将熔覆层横截面分为熔覆层、基体熔化层、热影响层、基体四部分,如图 2(a)

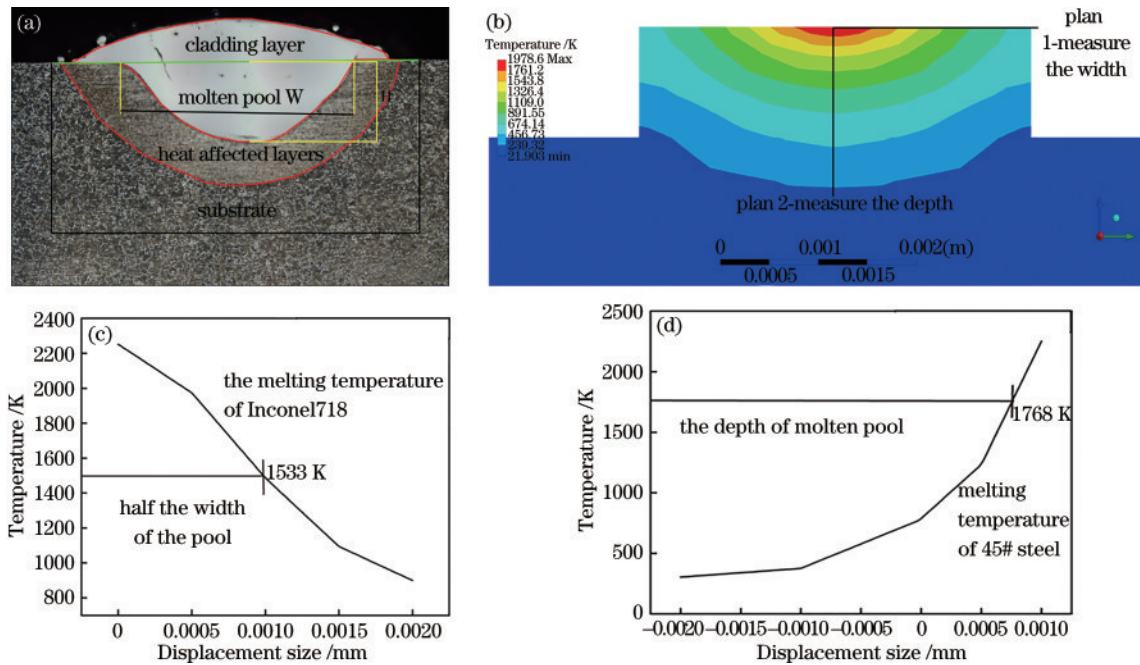


图 2 测温示意图。(a)熔覆层截面几何特征;(b)测温位置及方向;(c)熔池宽度的测定;(d)熔池深度的测定

Fig. 2 Schematic diagram of temperature measurement. (a) Geometrical characteristics of cladding layer cross section; (b) position and direction of temperature measurement; (c) determination of molten pool width; (d) determination of molten pool depth

所示,其中 W 为熔池宽度, H 为熔池深度。

为了验证所建立的模型温度场分布是否与实际情况下得到的结果一致,根据试验方案数值模拟得到的熔池尺寸与相同参数下试验得到的熔池尺寸进行对比,通过有限元软件的后处理系统对 4 s 时,熔池中心区域在垂直扫描路径宽度和深度方向进行温度随位移

分布绘制,如图 2(b)~(d)所示,可以看出,高于熔点温度的范围为熔池宽度、深度。

试验与仿真得到的熔池尺寸如表 4 所示,可以看出,两种方法得到的熔池结果误差较小,可以近似地认为所建立的三维模型、热源函数以及边界条件设置较为合理。

表 4 熔池尺寸比较及误差

Table 4 Comparison and error of molten pool size

Experimental scheme			Simulation results /mm		Experimental results /mm		Error /%	
Laser power /W	Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	Powder feeding rate x_3 / (g·min ⁻¹)	Width	Depth	Width	Depth	Width	Depth
1200	15	18	1.73	0.44	1.64	0.42	5.6	5.3
1500	21	19	1.89	0.53	1.87	0.51	1.1	3.9
1800	15	17	1.99	0.67	1.98	0.65	0.3	2.7
2100	23	20	1.83	0.39	1.83	0.38	0.3	3.9
2400	17	16	2.22	0.88	2.17	0.88	2.2	0.2

3 激光熔覆试验

3.1 试验设备与材料

激光熔覆试验选用 3 kW 光纤同轴送粉激光熔覆机如图 3 所示,其系统主要包括软件系统、激光器、数控系统、粉末输送系统、保护气体输送装置及工作台。基材尺寸为 100 mm×100 mm×10 mm 的 45# 钢试件,

熔覆前利用磨砂纸细磨抛光以提高工件平整度,使用乙醇擦拭以去除表面油污。试样观测设备采用超深显微镜如图 4 所示,测量硬度设备选择显微维氏硬度计 (HV-1000) 如图 5 所示,熔覆材料为 Inconel718 合金粉末如图 6 所示,粒度为 35~50 μm ,松装密度为 4.1~4.6 g/cm³,粉末均匀度较高。

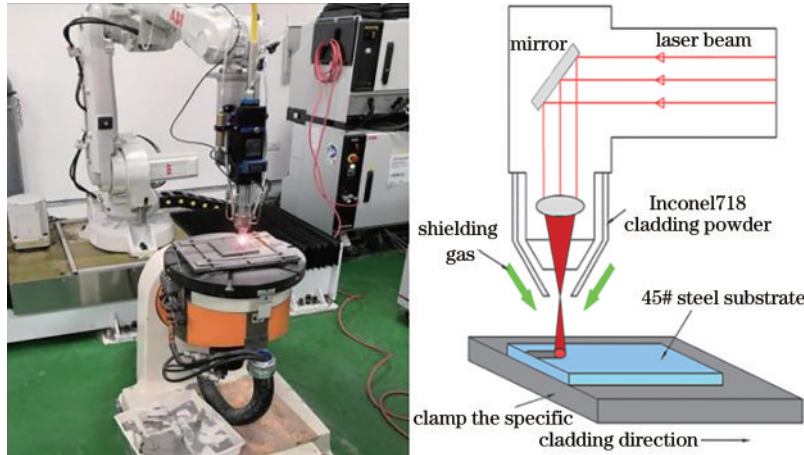


图 3 3 kW 光纤激光熔覆机

Fig. 3 3 kW fiber laser cladding machine



图 4 超景深显微镜

Fig. 4 Ultra depth of field microscope

根据前期试验研究调整喷头距离工作台表面为 15 mm,激光光斑半径为 2 mm,初始预热温度设置为 22 $^{\circ}\text{C}$,在熔覆过程中采用氩气 (Ar) 作为保护气,保护气流量 6~10 L/min。

试验结束后利用线切割机沿垂直熔覆层方向进行切割,制成 10 mm×10 mm×2 mm 的试样,清洗、打磨和抛光。在进行数据测量时,选择测量靠近中间段熔覆层高度和宽度,在切割后对截面进行打磨抛光处理,利用体积分数 4% 的硝酸乙醇对试样进行腐蚀约 30 s,利用乙醇擦拭试样表面并吹干,使用超景深显微



图 5 显微维氏硬度计

Fig. 5 Microvickers hardness tester

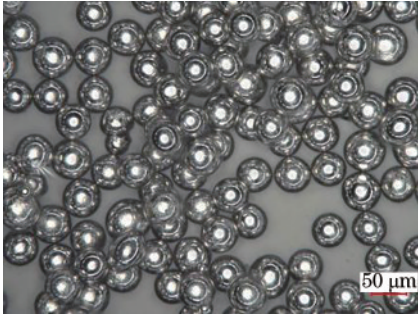


图 6 Inconel718 合金粉末微观图

Fig. 6 Microstructure of Inconel718 alloy powder

镜对熔覆层截面进行观察,并测量其熔池的尺寸。

利用显微维氏硬度计(HV-1000)测量每组试件硬度,从熔覆层表面开始,每一组试件在同一水平位置处测量三次取平均值,硬度测试过程中力值大小为 500 gf(1 gf=0.0098 N),加载时间为 10 s,测量时会在熔覆层横截面上压出一个锥形压痕,测量压痕双对角线长度,输入仪器后自动计算显示出维氏硬度值(HV)^[17]。

在激光熔覆过程中,在基体表面和熔覆粉末施加不同的工艺参数,使得基体和熔覆粉末吸收到不同的能量,导致基体和粉末出现不同程度的熔化效果。部分熔化的基体材料会扩散到熔化的粉末中,对已熔化的粉末熔体产生一定的稀释作用,通常用稀释率来表示基体材料扩散的结果。在一定范围内,稀释率越低熔覆层质量越好,其表达式为

$$\eta = \frac{H}{h+H}, \quad (3)$$

式中: H 为熔池深度(mm); h 为熔覆高度(mm)。

采用熔覆层成形系数来表示熔覆层的综合质量^[18],在一定范围内,熔覆层成形系数越大,表示熔覆层成形质量更好。成形系数用熔覆层宽度与熔池深度的比值来表示,具体计算公式为

$$\varphi = \frac{W}{H}, \quad (4)$$

式中: W 为熔覆层宽度(mm)。

3.2 回归正交试验设计及结果分析

利用回归正交试验设计可以不必局限在已定的水平上进行寻优,在各因素的试验范围内选择适当的试验点,采用较少的试验次数建立精度高、统计性质好的回归方程,并解决试验优化的问题^[19]。

设置试验指标为熔覆层成形系数,选择考察的因素为激光功率、扫描速度及送粉速率,通过数值模拟初步得到各工艺参数的范围:激光功率为 1200~2400 W、扫描速度为 15~23 mm/s、送粉速率为 16~20 g/min。对上述各因素水平进行编码,为了使每个因素的水平在编码空间内是平等的,即其取值范围均在 $[-1,1]$ 之间变化^[20],设计回归正交的因素水平编码表,如表 5 所示。

表 5 因素水平编码表
Table 5 Factor level coding table

Factor x_j	Laser power x_1 / W	Scan speed x_2 / (mm·s ⁻¹)	Powder feeding rate x_3 / (g·min ⁻¹)
Upper level (1)	2400	23	20
Lower level (-1)	1200	15	16
Zero level (0)	1800	19	18
Varying pitch Δ_j	600	4	2

为了更加贴合实际情况,考虑各因素之间的交互作用影响,根据因素水平编码表设计回归正交试验及试验结果,如表 6 所示。

建立一次回归方程,关键在于确定回归系数,设总试验 $[L_8(2^7)]$ 次数为 $n=8$,根据最小二乘原理和回归正交表的特点,建立试验指标(y)与 m 个试验因素 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 之间的一次回归方程,表示为

$$y = a + \sum_{j=1}^m b_j Z_j + \sum_{k < j} b_{kj} Z_k Z_j, \quad m = 3, k = 1, 2, j = 1, 2, 3. \quad (5)$$

回归方程系数的计算公式为

$$a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j, b = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z_j y_j, \quad b_{kj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_j Z_k)_i y_i, k = 1, 2, j = 1, 2, 3. \quad (6)$$

计算得到回归方程为

$$y = 4.17125 - 1.07375Z_1 + 0.39625Z_2 + 0.65875Z_3 - 0.08875Z_1Z_2 - 0.23625Z_1Z_3. \quad (7)$$

通过该回归方程中偏回归系数绝对值可以得到各因素和交互作用的主次顺序为 Z_1 、 Z_3 、 Z_2 、 Z_1Z_3 、 Z_1Z_2 ,由此可以得出,熔覆层成形系数影响大小依次为激光功率、送粉速率、扫描速度,而各因素之间交互作用的影响最小。表 7 为三元一次回归正交设计计算表。

3.3 方差分析

总平方和、总自由度、一次平方和、一次自由度、回

表 6 三元一次回归正交试验方案及试验结果
Table 6 Ternary linear regression orthogonal test scheme and test results

Number	Z_1	Z_2	Z_1Z_2	Z_3	Z_1Z_3	X_1	X_2	X_3	Cladding layer width /mm	Depth of molten pool /mm	Forming factor y
1	1	1	1	1	1	2400	23	20	1.78	0.45	3.95
2	1	1	1	-1	-1	2400	23	16	2.03	0.71	2.86
3	1	-1	-1	1	1	2400	15	20	1.98	0.64	3.09
4	1	-1	-1	-1	-1	2400	15	16	2.17	0.87	2.49
5	-1	1	-1	1	-1	1200	23	20	1.31	0.20	6.55
6	-1	1	-1	-1	1	1200	23	16	1.52	0.31	4.91
7	-1	-1	1	1	-1	1200	15	20	1.49	0.26	5.73
8	-1	-1	1	-1	1	1200	15	16	1.67	0.44	3.79

表 7 三元一次回归正交设计计算表
Table 7 Ternary linear regression orthogonal design calculation table

Number	Z_1	Z_2	Z_1Z_2	Z_3	Z_1Z_3	y	y^2	Z_1y	Z_2y	Z_3y	$(Z_1Z_2)y$	$(Z_1Z_3)y$
1	1	1	1	1	1	3.95	15.6025	3.95	3.95	3.95	3.95	3.95
2	1	1	1	-1	-1	2.86	8.1796	2.86	2.86	-2.86	2.86	-2.86
3	1	-1	-1	1	1	3.09	9.5481	3.09	-3.09	3.09	-3.09	3.09
4	1	-1	-1	-1	-1	2.49	6.2001	2.49	-2.49	-2.49	-2.49	-2.49
5	-1	1	-1	1	-1	6.55	42.9025	-6.55	6.55	6.55	-6.55	-6.55
6	-1	1	-1	-1	1	4.91	24.1081	-4.91	4.91	-4.91	-4.91	4.91
7	-1	-1	1	1	-1	5.73	32.8329	-5.73	-5.73	5.73	5.73	-5.73
8	-1	-1	1	-1	1	3.79	14.3641	-3.79	-3.79	-3.79	3.79	3.79
Σ						33.37	153.7379	-8.59	3.17	5.27	-0.71	-1.89

归平方和、回归自由度、残差平方和、残差自由度、均方差的计算公式分别为

$$S_{SST} = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2, \quad (8)$$

$$f_{dR} = n - 1, \quad (9)$$

$$S_{SSj} = nb_j^2, j = 1, 2, 3, \quad (10)$$

$$f_{dfj} = 1, j = 1, 2, 3, \quad (11)$$

$$S_{SSR} = S_{SS1} + S_{SS2} + S_{SS3}, \quad (12)$$

$$f_{dR} = f_{d1} + f_{d2} + f_{d3}, \quad (13)$$

$$S_{SSE} = S_{SST} - S_{SSR}, \quad (14)$$

$$f_{dE} = f_{dR} - f_{dfj}, \quad (15)$$

$$E_{MS} = S_{SSE} / f_{dE}. \quad (16)$$

上述计算式可以得出各因素方差及残差值,并用 F 检验法判断其显著性,如表 8 所示。

表 8 方差分析表
Table 8 Analysis of variance table

Source of difference	S_{SS}	f_{df}	E_{MS}	F	Significance
Z_1	9.2235	1	9.2235	223.431	***
Z_2	1.2561	1	1.2561	30.428	*
Z_3	3.4716	1	3.4716	84.096	**
Z_1Z_2	0.0630	1	0.0630	1.526	
Z_1Z_3	0.4465	1	0.4465	10.816	
Return	14.4607	5	2.8921	70.059	**
Residual	0.0826	2	0.4128		
Sum	14.5433	$n-1=7$			

通过查 F 检验表可知, $F_{0.05}(1,2)=18.51, F_{0.01}(1,2)=98.49, F_{0.05}(5,2)=19.30, F_{0.01}(5,2)=99.30$ 。通常情况:若 $F > F_{0.01}(f_{dA}, f_{dR})$, 则因素 A 对试验结果的影响非常显著,用三个“*”表示;若 $F_{0.05}(f_{dA}, f_{dR}) < F <$

$F_{0.01}(f_{dA}, f_{dR})$, 则在该范围内更接近 $F_{0.01}(f_{dA}, f_{dR})$ 表示因素 A 对试验结果的影响较显著,用两个“*”表示,更接近 $F_{0.05}(f_{dA}, f_{dR})$ 表示因素 A 对试验结果的影响显著,用一个“*”表示;若 $F < F_{0.05}(f_{dA}, f_{dR})$, 则因素 A 对试验结果的

影响不显著。由此可知,三个因素对熔覆层成形系数的影响最显著的是激光功率,送粉速率次之,而扫描速度的显著性最低,各因素之间的交互作用对熔覆层成形系数的影响不显著,因此,只需考虑单因素对熔覆层质量的影响。所建立的回归方程显著性较高,可以使用。

根据编码公式可知:

$$Z_j = \frac{x_j - x_{j0}}{\Delta_j}, j = 1, 2, 3. \quad (17)$$

计算并代入回归方程,各因素交互作用的影响不显著,故回归方程中忽略交互作用的影响,因此得到的回归方程为

$$y = -0.41825 - 0.001789x_1 + 0.0991x_2 + 0.3294x_3. \quad (18)$$

由于回归方程为多元线性回归方程,所以可以直接根据回归系数的正负来预测最优试验方案,由式(18)回归方程可知,当 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别取激光功率下水平、扫描速度和送粉速率上水平,即激光功率为1200 W、扫描速度为23 mm/s、送粉速率为20 g/min时,试验指标成形系数取得最大,预测最优试验方案刚好对应第5组试验,试验结果与预测结果一致。故该回归方程可以有效指导实际生产活动。

3.4 最优参数试验验证

利用上述结论得到最优参数为激光功率1200 W、扫描速度23 mm/s、送粉速率20 g/min,选择搭接率为50%进行多道熔覆试验^[21],得到的熔覆层微观组织如图7所示。

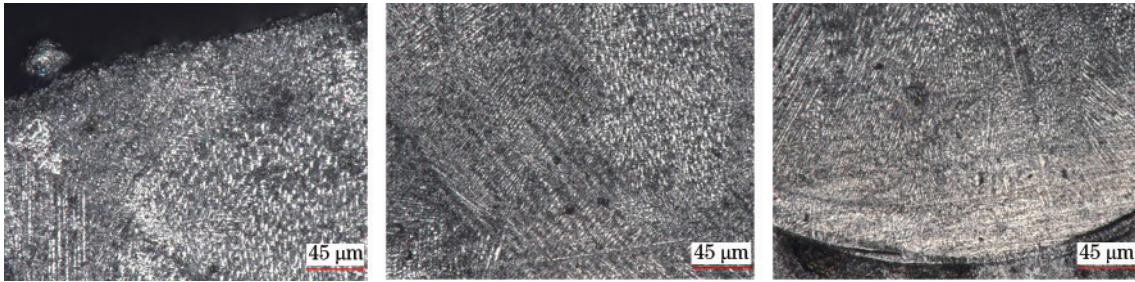


图7 熔覆层微观组织图

Fig. 7 Microstructure of cladding layer

从图7可以看出,熔覆层组织致密细小,组织过渡平滑,熔覆层内部多为树枝晶组织和柱状晶组织,说明其熔覆层质量较高。而且所测得的熔池宏观尺寸与数值模拟相近,说明数值模拟可以有效地指导实际生产工作。

4 激光工艺参数影响规律分析

由回归正交试验设计及方差分析可知,各因素交

互作用对熔覆层质量影响不显著,因此只需考虑单因素对熔覆层质量的影响,其中激光功率和送粉速率对熔覆层质量影响最大,设计单因素试验分别研究激光功率和送粉速率分别对熔池形貌及熔覆层质量的影响规律。固定扫描速度为23 mm/s,单因素试验方案及结果如表9所示。

表9 单因素试验方案及结果

Table 9 Single factor experimental scheme and results

Serial number	Laser power /W	Powder feeding rate / $(g \cdot \min^{-1})$	Depth of molten pool /mm	Molten pool width /mm	Height of cladding layer /mm	Dilution rate	Hardness of cladding layer /HV
1	1200		0.42	1.64	0.59	0.416	119.0
2	1500		0.54	1.83	0.67	0.446	196.1
3	1800	16	0.67	1.98	0.75	0.472	222.8
4	2100		0.72	2.05	0.80	0.474	258.4
5	2400		0.88	2.18	0.94	0.483	292.5
6		16	0.64	1.98	0.65	0.496	196.1
7		17	0.57	1.87	0.60	0.487	219.4
8	1800	18	0.48	1.81	0.54	0.471	238.3
9		19	0.43	1.73	0.49	0.467	255.2
10		20	0.38	1.66	0.45	0.458	267.8

4.1 激光功率、送粉速率对熔覆层硬度的影响规律

固定送粉速率情况下,硬度随激光功率的变化如图8所示。总体来看,硬度随激光功率的增大而增大,这是因为激光功率增大时,激光束能量输出增加,单位

面积上基板和粉末吸收到的能量增加,单位面积上Inconel718粉末熔化的量增多,由于熔覆材料其性能优于基体,故熔化的粉末量越多,熔覆层硬度越大。固定激光功率情况下,硬度随送粉速率的变化如图9所示,

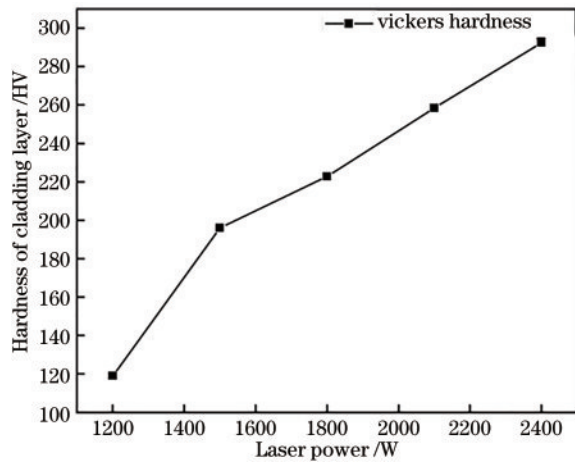


图 8 硬度随激光功率的变化

Fig. 8 Variation of hardness with laser power

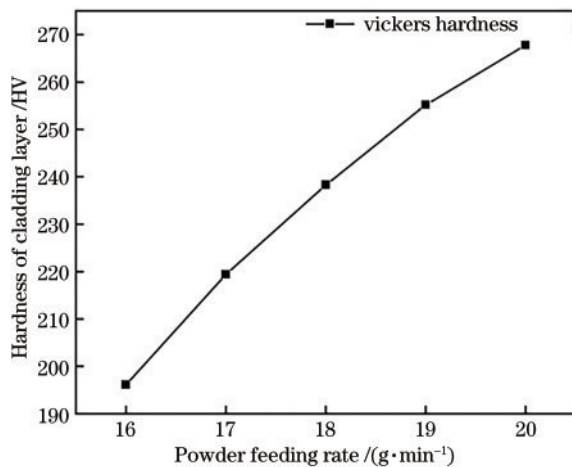


图 9 硬度随送粉速率的变化

Fig. 9 Variation of hardness with powder feeding rate

可以看出,随着送粉速率的增大,熔覆层硬度也随之增大,这是因为送粉速率增大时,单位时间内到达基板的粉末量增大,熔覆层内所含有的 Inconel718 粉末量也逐渐增多,熔覆层硬度随之增大。在激光功率和扫描速度不变的情况下,基板和粉末单位时间、面积上吸收的能量不改变,但由于熔化的粉末总量增多,故硬度随之增大。

4.2 激光功率、送粉速率对熔覆形貌的影响规律

固定送粉速率时,激光功率反映激光束的能量输出大小,5组试验结果如图 10 所示。当激光功率较低时,激光束仅融化一部分光斑内的粉末形成熔覆道,熔池面积较小。随激光功率的增加,基板照射区域能量递增,熔池深度、宽度迅速增加,同时更多的粉末材料熔化形成熔覆层,熔覆层高度也逐渐递增,因此,熔池深度、宽度以及熔覆层高度随着激光功率增加而增加。固定激光功率时,送粉速率影响单位时间内到达基板上粉末量,5组试验结果如图 11 所示。送粉速率越高,虽然单位时间内到达基板上的 Inconel718 粉末的数量越多,但是激光功率不变时,其激光束输出的总能量不

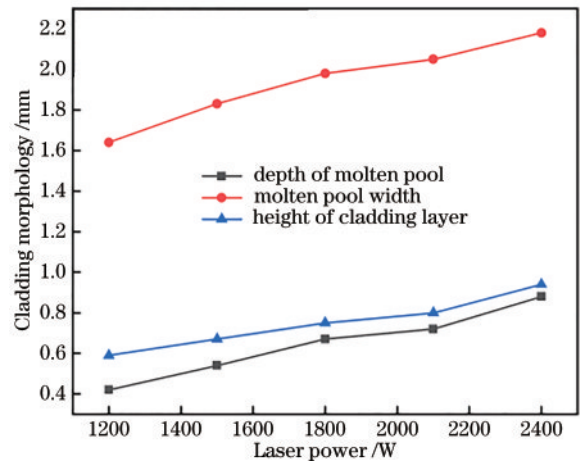


图 10 熔覆层形貌随激光功率的变化

Fig. 10 Variation of cladding layer morphology with laser power

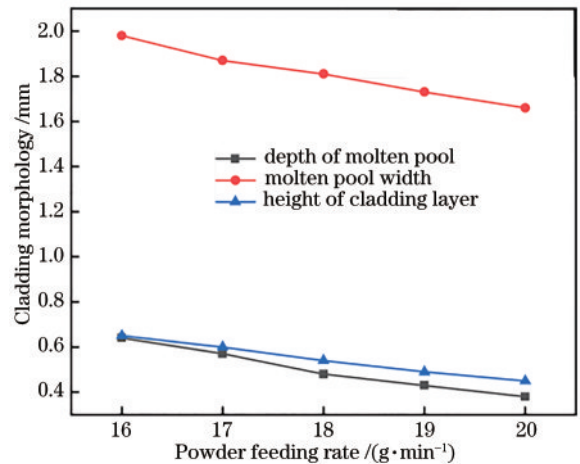


图 11 熔覆层形貌随送粉速率的变化

Fig. 11 Variation of cladding layer morphology with powder feeding rate

变。虽然单位时间内到达基板上的粉末量增多,但熔化的粉末量反而会减少,这是因为多余的粉末之间会发生碰撞反而使熔覆的粉末减少,所以熔池深度、宽度以及熔覆层高度都会有小幅度降低。因此,熔池深度、宽度以及熔覆层高度随着送粉速率的增大而减少。

4.3 激光功率、送粉速率对熔覆层稀释率的影响规律

从图 12 可以看出,稀释率随着激光功率的增大而增大。激光功率增加,使得激光束照射在基板上的能量增加,从而导致基板的材料成分进入熔覆层中的含量增加,降低了 718 合金涂层的性能,因此,功率越高,越不利于形成性能优良的熔覆层。从图 13 可以看出,随着送粉速率的增大,熔覆层稀释率明显减少。送粉速率增大,单位时间内到达基板上粉末量增多,熔覆层内熔化的 Inconel718 粉末量相对基体材料熔化的数量有所增加,熔覆层稀释率逐渐减小,使得 718 合金性能得以充分发挥,故送粉速率越高越有利于形成低稀释率的熔覆层,有利于提高熔覆层质量。在一定范围内,激光功率越低,送粉速率越高,更有利于形成高质量熔覆层,这与回归正交试验的结论一致。

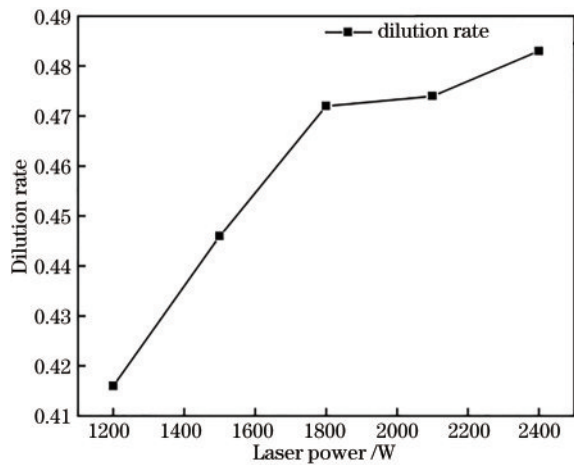


图 12 稀释率随激光功率的变化

Fig. 12 Variation of dilution rate with laser power

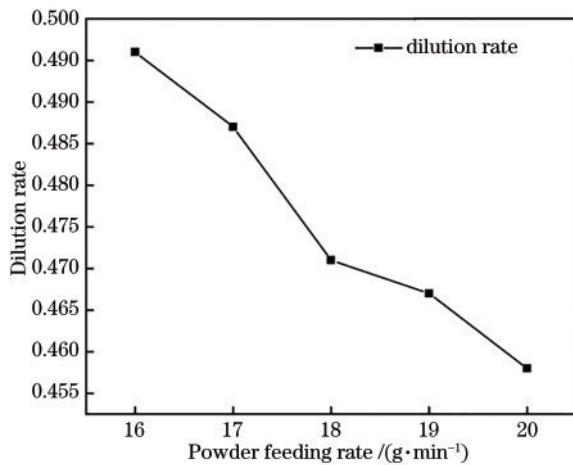


图 13 稀释率随送粉速率的变化

Fig. 13 Variation of dilution rate with powder feeding rate

5 结 论

本文数值模拟了 45# 钢表面单道熔覆 Inconel718 合金粉末的温度分布情况,以熔池宏观尺寸进行验证,数值模拟结果发现,其最大误差仅在 5% 左右,说明所建立的模型的精度较高。

通过回归正交试验设计建立一次回归方程,经检验该方程显著性较高,可以使用。对熔覆层质量影响从大到小依次为激光功率、送粉速率、扫描速度。由方差分析可知,各因素交互作用对熔覆层质量的影响不显著,而激光功率和送粉速率对熔覆层质量影响最显著。通过单因素试验可知,熔覆层硬度与激光功率、送粉速率成正比,熔覆层稀释率与激光功率成正比,与送粉速率成反比。熔池深度、宽度以及熔覆层高度随着激光功率的增加和送粉速率的增大而呈减小的趋势。

通过方差分析可知,最适合在 45# 钢表面熔覆 Inconel718 粉末的参数为激光功率 1200 W、扫描速度 23 mm/s、送粉速率 20 g/min。并对最优参数进行了

多道搭接熔覆层的验证试验,所得到的组织致密细小,基体与熔覆层结合性较好,这表明在最优参数下得到的多道熔覆层形貌优良。

参 考 文 献

- [1] Xu M S, Zhou C H, Zhang Z, et al. Temperature distribution of powder-gas-optical coupling temperature field in laser cladding processes[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(1): 70-77.
许明三,周春辉,张正,等.激光熔覆过程中的粉、气、光耦合温度场[J].中国机械工程,2022,33(1):70-77.
- [2] 谢映光,王成磊,张可翔,等.数值模拟和稀土调控改性结合优化铝合金表面激光熔覆[J].表面技术,2020,49(12):144-155.
Xie Y G, Wang C L, Zhang K X, et al. Optimizing laser cladding on aluminum alloy surface with numerical simulation and rare earth modification[J]. Surface Technology, 2020, 49(12): 144-155.
- [3] 赵亮,王丽芳,朱刚贤,等.多阶模半导体激光增材制造工艺参数对熔覆层残余应力影响的数值模拟[J].应用激光,2021,41(2):366-373.
Zhao L, Wang L F, Zhu G X, et al. Numerical simulation on the influence of process parameters on residual stress in cladding layer by multi-mode semiconductor laser additive manufacturing[J]. Applied Laser, 2021, 41(2): 366-373.
- [4] 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 W H, Zhang X Y, Li W X, 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.
- [5] 丁前峰,庞铭.抽油泵内筒材料激光熔覆高熵合金的热力耦合仿真研究[J].激光与光电子学进展,2021,58(5):0514002.
Ding Q F, Pang M. Thermal-mechanical coupling simulation of high-entropy alloy laser cladding for inner barrel of an oil pump[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0514002.
- [6] 李金华,安学甲,姚芳萍,等.H13 钢激光熔覆 Ni 基涂层热应力循环的仿真研究[J].中国激光,2021,48(10):1002104.
Li J H, An X J, Yao F P, et al. Simulation on thermal stress cycle in laser cladding of H13 steel Ni-based coating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002104.
- [7] 于天彪,宋博学,郝文超,等.激光熔覆工艺参数对熔覆层形貌的影响及优化[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(4):537-542.
Yu T B, Song B X, Xi W C, et al. Influence of laser cladding process parameters on morphology of cladding layer and its optimization[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2019, 40(4): 537-542.
- [8] 顾赛男,王广原,秦渊,等.激光熔覆 W-Cu 复合材料的组织形貌与工艺参数的相关性[J].中国激光,2018,45

- (4): 0402005.
Gu S N, Wang G Y, Qin Y, et al. Correlation between process parameters and microstructure morphologies of W-Cu composites fabricated by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0402005.
- [9] Kong F R, Kovacevic R. Modeling of heat transfer and fluid flow in the laser multilayered cladding process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2010, 41(6): 1310-1320.
- [10] 张天刚, 张倩, 姚波, 等. TC4 表面 Ni 基激光熔覆层温度场和应力场的数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0314003.
Zhang T G, Zhang Q, Yao B, et al. Numerical simulation of temperature field and stress field of Ni-based laser cladding layer on TC4 surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0314003.
- [11] 李美艳, 蔡春波, 韩彬, 等. 预热对激光熔覆陶瓷涂层温度场和应力场影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(12): 197-203.
Li M Y, Cai C B, Han B, et al. Numerical simulation of preheating on temperature and stress fields by laser cladding Ni-based ceramic coating[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(12): 197-203.
- [12] 李凯凯. 激光熔覆 304 不锈钢及其热挤压强化研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
Li K K. Study on laser cladding 304 stainless steel and its enhancement by hot extrusion[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [13] Liu H M, Li M B, Qin X P, et al. Numerical simulation and experimental analysis of wide-beam laser cladding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(1): 237-249.
- [14] 舒林森, 王家胜, 白海清, 等. 磨损轴面激光熔覆过程的数值模拟及试验[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 217-223.
Shu L S, Wang J S, Bai H Q, et al. Numerical and experimental investigation on laser cladding treatment of wear shaft surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(9): 217-223.
- [15] 高士友, 李健, 李臣光, 等. 激光熔覆单道沉积轨迹横截面形貌变化规律研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503010.
Gao S Y, Li J, Li C G, et al. Research on the variation regularity of single laser tracks cross-section morphology during laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(5): 0503010.
- [16] 赵盛举, 祁文军, 黄艳华, 等. TC4 表面激光熔覆 Ni60 基涂层温度场热循环特性数值模拟研究[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 301-308.
Zhao S J, Qi W J, Huang Y H, et al. Numerical simulation study on thermal cycle characteristics of temperature field of TC4 surface laser cladding Ni60 based coating[J]. Surface Technology, 2020, 49(2): 301-308.
- [17] 赵彦华, 孙杰, 李剑峰. KMN 钢激光熔覆 FeCr 合金修复层组织性能及耐磨、耐蚀性研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(8): 37-43.
Zhao Y H, Sun J, Li J F. Research on microstructure properties and wear and corrosion resistance of FeCr repaired coating on KMN steel by laser cladding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(8): 37-43.
- [18] 范福杰. 激光熔覆 718 高温合金涂层的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
Fan F J. Research on laser cladding coating of 718 superalloy[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.
- [19] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2017: 204-216.
Li Y Y, Hu C R. Experiment design and data processing [M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2017: 204-216.
- [20] 卫浪, 蒲红宇, 向辉, 等. 基于二次回归正交组合设计的 MDEA 脱硫工艺参数优选[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2020, 45(3): 75-79.
Wei L, Pu H Y, Xiang H, et al. Optimization of MDEA desulfurization process parameters based on quadratic regression orthogonal combination design[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2020, 45(3): 75-79.
- [21] 安相龙, 王玉玲, 姜芙林, 等. 搭接率对 42CrMo 激光熔覆层温度场和残余应力分布的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002110.
An X L, Wang Y L, Jiang F L, et al. Influence of lap ratio on temperature field and residual stress distribution of 42CrMo laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002110.