

# 激光与光电子学进展

## 基于正交试验的非均匀 Fe45 粉末激光熔覆工艺优化

张燊东<sup>1</sup>, 舒林森<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>陕西理工大学机械工程学院, 陕西 汉中 723001;

<sup>2</sup>陕西省工业自动化重点实验室, 陕西 汉中 723001

**摘要** 为了获得非均匀 Fe45 粉末激光熔覆的最优工艺参数, 采用 3 kW 机器人激光熔覆系统进行工艺试验。根据熔覆系统的工艺参数参考范围来设计 4 因素 3 水平的  $L_9(4^3)$  正交试验方案, 利用极差值  $R$  探讨各工艺参数对单道熔覆层表面形貌、内部缺陷和稀释率的影响规律以及单独目标对应的优化参数, 再通过多目标模糊综合评价法寻找综合最优的熔覆工艺参数组合, 最后以此为基础研究搭接率(取 30%、40% 和 50%)对多道熔覆表面形貌和内部质量的影响。结果表明: 工艺参数对熔覆层宏观形貌的影响从大到小为扫描速度(B)、激光功率(A)、离焦量(D)和送粉速度(C), 最优参数组合是  $A_3B_2CD_2$ ; 对熔覆层缺陷的影响从大到小为扫描速度/离焦量、激光功率和送粉速度, 最优参数组合是  $A_3B_1C_2D_2$ ; 对稀释率的影响从大到小为送粉速度、离焦量、激光功率和扫描速度, 最优参数组合是  $A_1B_1C_3D_2$ ; 综合最优工艺对应的参数是激光功率 2400 W、扫描速度 5 mm/s、送粉速度 20 g/min、离焦量 +5 mm, 在该工艺参数下按不同搭接率进行熔覆均能得到表面连续、内部无缺陷的致密熔覆结构, 而搭接率  $\eta$  取 40% 时的激光熔覆效果最好。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 非均匀 Fe45 粉末; 正交试验; 工艺优化

中图分类号 TG456.7 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0514006

## Optimization of a Non-Uniform Fe45 Powder Laser Cladding Process Based on Orthogonal Test

Zhang Candong<sup>1</sup>, Shu Linsen<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China;

<sup>2</sup>Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong, Shaanxi 723001, China

**Abstract** To optimize the process parameters of a non-uniform Fe45 powder laser cladding process, a 3-kW robot laser cladding system was used for the working process test. A 4-factor 3-level  $L_9(4^3)$  orthogonal test plan was designed according to the reference range of the process parameters of the cladding system, and the effects of each process parameter on the surface morphology, internal defects, and dilution rate of the single-pass cladding layer were discussed by using the extreme value  $R$  analysis. Furthermore, the optimized parameters corresponding to the individual targets were also analyzed. Thereafter, the comprehensive optimal cladding process parameter combination was found through a multi-objective fuzzy comprehensive evaluation method. Finally, the effect of overlap rate (30%, 40%, and 50%) on surface morphology and internal quality of the multi-layer cladding were studied. The

收稿日期: 2020-07-03; 修回日期: 2020-08-14; 录用日期: 2020-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(51505268)、装备预研领域基金重点项目(61400040404)、陕西省教育厅重点项目(20JS020)、陕西省工业自动化重点实验室开放基金(SLGPT2019KF01-16)

\*E-mail: shulinsen19@163.com

results show that the influence of the process parameters on the morphology of the cladding layer from large to small is scanning speed (B), laser power (A), defocusing amount (D), and powder feeding speed (C), and the optimal parameter is  $A_3B_2CD_2$ ; the influence of the process parameters on the defects of the cladding layer from large to small is scanning speed or defocusing amount, laser power, and powder feeding speed, and the optimal parameter is  $A_3B_1C_2D_2$ ; the influence of the process parameters on the dilution rate from large to small is powder feeding speed, defocusing amount, laser power and scanning speed, and the optimal parameter is  $A_1B_1C_3D_2$ . The optimal parameters for the comprehensive process are as follows: laser power is 2400 W, scanning speed is 5 mm/s, powder feeding speed is 20 g/min, and focal length is +5 mm. We could achieve a dense cladding structure with a continuous surface and no internal defects when cladding at different overlap rates with the optimized process parameters, and the laser cladding exhibited the best effect at the overlap rate ( $\eta$ ) of 40%.

**Key words** laser technique; laser cladding; non-uniform Fe45 powder; orthogonal test; process optimization

**OCIS codes** 310.1515; 160.3900; 350.3390

## 1 引言

激光熔覆可获得高性能的冶金结合涂层,在机械构件的表面强化、再制造修复等领域具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。激光熔覆技术是一种经济性较高的表面涂层技术<sup>[2-3]</sup>,可以在低性能廉价钢零件表面制备出高性能的熔覆层,在提高零件力学性能的同时降低制造成本,延长零件的使用寿命。激光熔覆过程会受到激光功率、扫描速度、送粉速度、离焦量等因素的影响,所以工艺参数的选取将直接影响熔覆层的形貌、组织及性能<sup>[4-7]</sup>。陈菊芳等<sup>[8]</sup>在 45 钢表面制备了 Fe901 熔覆层,该熔覆层的平均硬度显著高于基体。叶四友等<sup>[9]</sup>通过在 45 钢表面熔覆 316L 不锈钢涂层提高了基体的耐磨性和耐蚀性。徐泽洲等<sup>[10]</sup>在 316 不锈钢表面熔覆了添加有  $CeO_2$  的改性 316L 不锈钢涂层,结果发现,激光功率不会改变熔覆层的结构,但会影响熔覆层晶粒的尺寸,晶粒尺寸随激光功率的增大呈先减小后增大的趋势。管少平等<sup>[11]</sup>在 304 不锈钢板上熔覆了 316L 不锈钢涂层,对该涂层进行研究后发现,单位时间内单位面积上激光能量的输入量是影响熔覆质量的关键。Fan 等<sup>[12]</sup>对 WC-Co50 金属陶瓷复合涂层进行优化后发现,熔覆层质量优良,组织均匀致密,生成了大量的晶间析出物。

目前,国内外学者对金属粉末激光熔覆工艺进行了大量研究,但很少有人针对非均匀粉末的激光熔覆工艺进行研究。与均匀度好的球形粉末相比,非均匀粉末的形状和尺寸相差较大,而且其流动性、稳定性和熔化均匀度都存在差异,这会影响激光熔覆的效果。但这种制造工艺简单、价格低廉的非均匀粉末的成本较低,恰好可以弥补激

光熔覆粉末材料利用率低带来的熔覆成本高和贵金属浪费严重的问题,更受生产企业的青睐。为了使非均匀粉末也能获得表面形貌良好、内部无缺陷且稀释率较小的熔覆层,本文采用功率为 3 kW 的机器人激光熔覆成形系统,将非均匀 Fe45 粉末熔覆到 45 钢表面,然后利用正交试验分析法探究了各工艺参数对熔覆层表面形貌、内部质量及稀释率的影响规律;之后采用多目标模糊综合评价法进行参数优化,以此为基础进行多道激光熔覆试验,探讨搭接率对熔覆品质的影响,并确定出最终优化的工艺参数。

## 2 正交试验设计

### 2.1 试验材料及设备

熔覆基材是尺寸为 100 mm×70 mm×10 mm 的 45 钢平板,基材经铣削后的表面粗糙度  $R_a$  为 3.6  $\mu\text{m}$ ,熔覆前先用酒精将基材表面的油污和杂质清洗干净。图 1 所示为激光熔覆试验选用的非均匀 Fe45 粉末,其化学成分(质量分数)如下:C 0.4%,

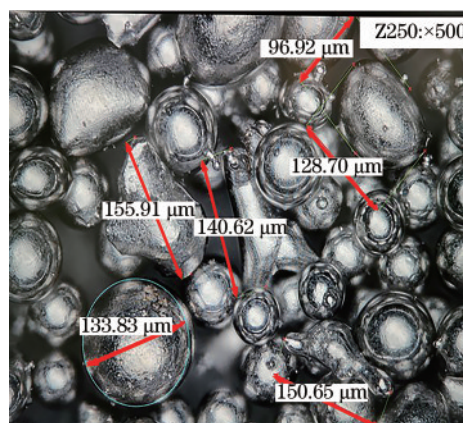


图 1 非均匀 Fe45 粉末的形貌图

Fig. 1 Morphology of non-uniform Fe45 powder

Si 2.5%, Cr 5.6%, Mn 1.3%, Mo 2.86%, 其余为 Fe。该粉末由部分球形颗粒和诸多异形颗粒共同组成, 颗粒的尺寸差异比较显著。

熔覆试验采用的是四路同步同轴送粉模式, 使用的激光熔覆系统由半导体激光器 (YLS-3000)、机器人手臂 (ABBIRB2600)、熔覆头 (ZF-KDPZ-001A)、水冷装置 (CWFL-3000) 和送粉装置 (RH-DFOM-01) 组成, 采用高纯度氩气作为送粉气体和保护气体。熔覆系统如图 2 所示。

### 2.2 多因素正交试验方案设计

在激光熔覆试验中, 选用激光功率(A)、扫描速度(B)、送粉速度(C)和离焦量(D)4个熔覆工艺参数作为研究参数, 在每个因素中选取3个水平, 每个因素的取值范围根据前期的试验得到。选用  $L_9(4^3)$



图 2 试验设备

Fig. 2 Test equipment

正交试验设计方案得到 9 组正交试验参数, 具体参数如表 1 所示。

表 1 正交试验方案

Table 1 Orthogonal test scheme

No.	Laser power /W	Scanning speed / $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Powder feeding rate / $(\text{g}\cdot\text{min}^{-1})$	Defocusing amount /mm
1	1800	5	15	-5
2	1800	10	20	0
3	1800	15	25	+5
4	2100	5	25	0
5	2100	10	15	+5
6	2100	15	20	-5
7	2400	5	20	+5
8	2400	10	25	-5
9	2400	15	15	0

### 2.3 试验结果的宏观判定标准

熔覆表面形貌、内部裂纹、气孔、未熔颗粒等缺陷以及对基体材料的稀释程度是反映熔覆品质的主要指标, 故本文采用表面宏观形貌、缺陷以及稀

释率作为表征熔覆层质量的关键因素。由于宏观形貌和表面缺陷没有具体的数值描述方案, 因此本文参考文献[13]制定了具体的宏观表面质量的判定标准, 如表 2 所示。

表 2 宏观表面质量的判定标准

Table 2 Judgment criteria of macro surface quality

Item	Excellent 100-90	Very good <90-80	Good <80-70	Accepted <70-60	Failed <60
Surface topography	The cladding layer is completely combined with the matrix, the surface of the cladding layer is smooth and the slag is very little	The cladding layer is completely combined with the matrix, the surface of cladding layer is smooth, and the slag is little	The cladding layer is completely combined with the substrate, the surface of cladding layer is rough, and the slag is relatively large	There is a small amounts of non-fusion between the cladding layer and the matrix, the surface of cladding layer is rough, and the slag is large	There is a lot of unfused defects between the cladding layer and the matrix, the surface of cladding layer is rough and the slag is very large
Defect	No cracks, no pores	No cracks, few pores	No cracks, few pores	Small cracks, lots of pores	Large cracks, lots of pores
Dilution rate	6%-13%	14%-20%	21%-29%	30%-37%	38%-48%



稀释率采用截面面积计算法进行计算,计算公式为

$$D = \frac{A_m}{A_m + A_c}, \quad (1)$$

式中: $A_c$ 为熔覆层截面面积; $A_m$ 为熔池截面面积。熔覆层和熔池截面面积如图3所示。使用基恩士超景深显微镜软件中的面积测定模块对 $A_c$ 、 $A_m$ 进行测定。

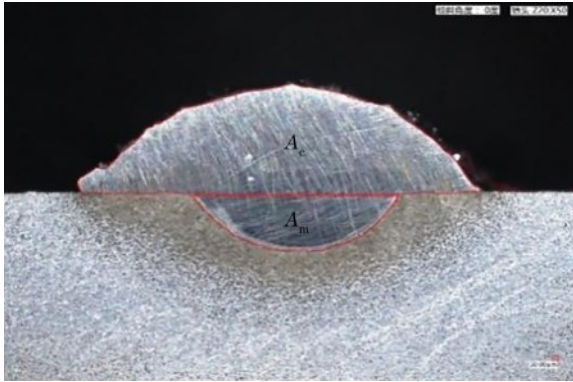


图3 截面面积的定义

Fig. 3 Definition of cross-sectional area

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 宏观形貌

图4为单道激光熔覆的宏观形貌图。可见,所有单道熔覆层均匀连续,没有出现孔洞、剥落等现象,但是在不同工艺参数下制备的熔覆层形貌有较大差异:3号、6号和8号试件表面粉末飞溅严重,熔

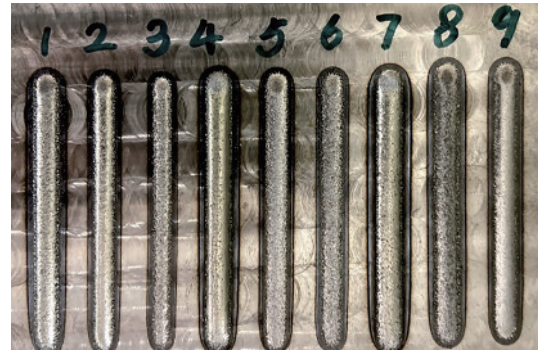


图4 单道激光熔覆的宏观形貌

Fig. 4 Macro morphology of single pass laser cladding

渣较多,具有较大的表面粗糙度;1号和5号试件表面熔渣较少;2号、4号、7号和9号试件表面熔渣少,表面光滑平整,边缘整齐均匀,宏观形貌较好。

图5所示为单道熔覆层表面的三维形貌。3号、6号、8号试件表面的未熔粉末较多,这是因为这三组试样熔覆参数中的扫描速度和送粉速度均较大,使得粉末还未熔融便落在已熔覆表面形成熔渣,从而使得试样的表面粗糙度较大。2号、7号、9号试件的表面光泽度较好,这表明熔覆过程中的粉末飞溅较少,是实际生产中期望的熔覆层表面形貌。4号试件的熔覆层高度明显高于其他8组试件,这是因为第4组试验的扫描速度慢、送粉速度快、激光功率较大,较快的送粉速度使得激光能量被金属粉末吸收,因此形成的熔覆层较高。

熔覆层表面形貌、缺陷的评分结果如表3所示。

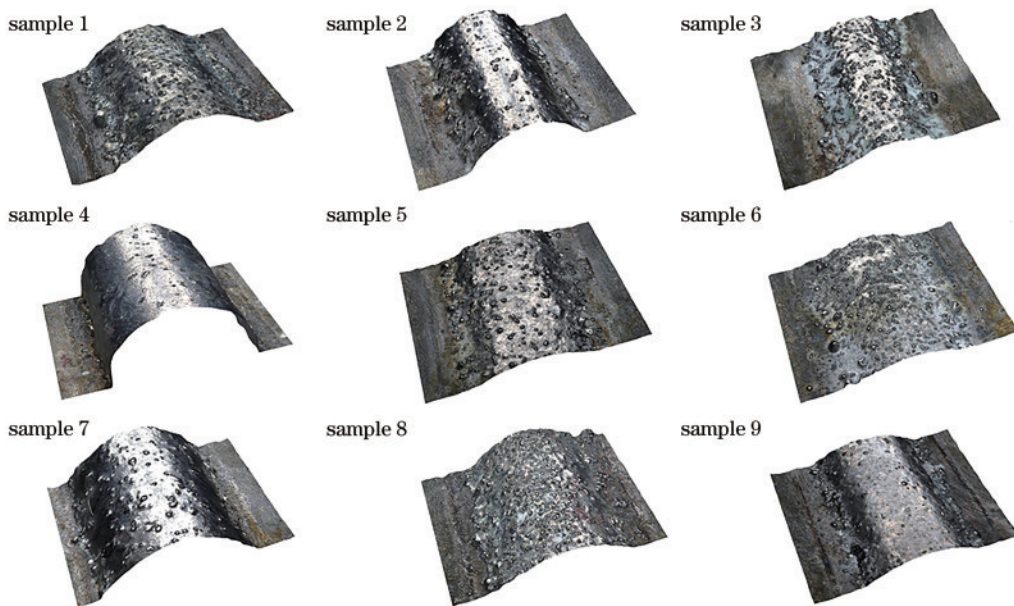


图5 熔覆层的微观形貌

Fig. 5 Morphologies of cladding layer

表 3 熔覆层的表面形貌评分、缺陷评分以及稀释率  
Table 3 Surface morphology and defect scores and dilution rate of the cladding layer

No.	Surface topography score	Defect score	Dilution rate /%
1	75	70	16.1
2	80	80	0
3	60	65	4.1
4	80	75	0
5	75	70	46.4
6	65	60	18.3
7	80	85	22.8
8	85	70	24.0
9	75	75	21.4

### 3.2 熔覆稀释率分析

为了观察单道熔覆层与基体的结合情况,在图 4 试样熔道中部切割取样,将试件打磨抛光并用 4% 硝酸酒精溶液对截面进行轻度腐蚀,对其横截面的形貌及轮廓进行显微观测,结果如图 6 所示。可见,所有试件与基体表面结合处均未出现气孔或裂纹,熔覆层组织分布均匀。熔覆层的结合性能可以根据稀释率进行判别,当稀释率在 15%~25% 之间时,基体与熔覆层的结合度较好;当稀释率足够小时,基材与熔覆层的混合不会损害基体的力学性能<sup>[14]</sup>。对所得试样的熔覆层面积和熔池面积进行测定,将测定结果代入(1)式可得各组熔覆层的稀释率,如表 3 所示。

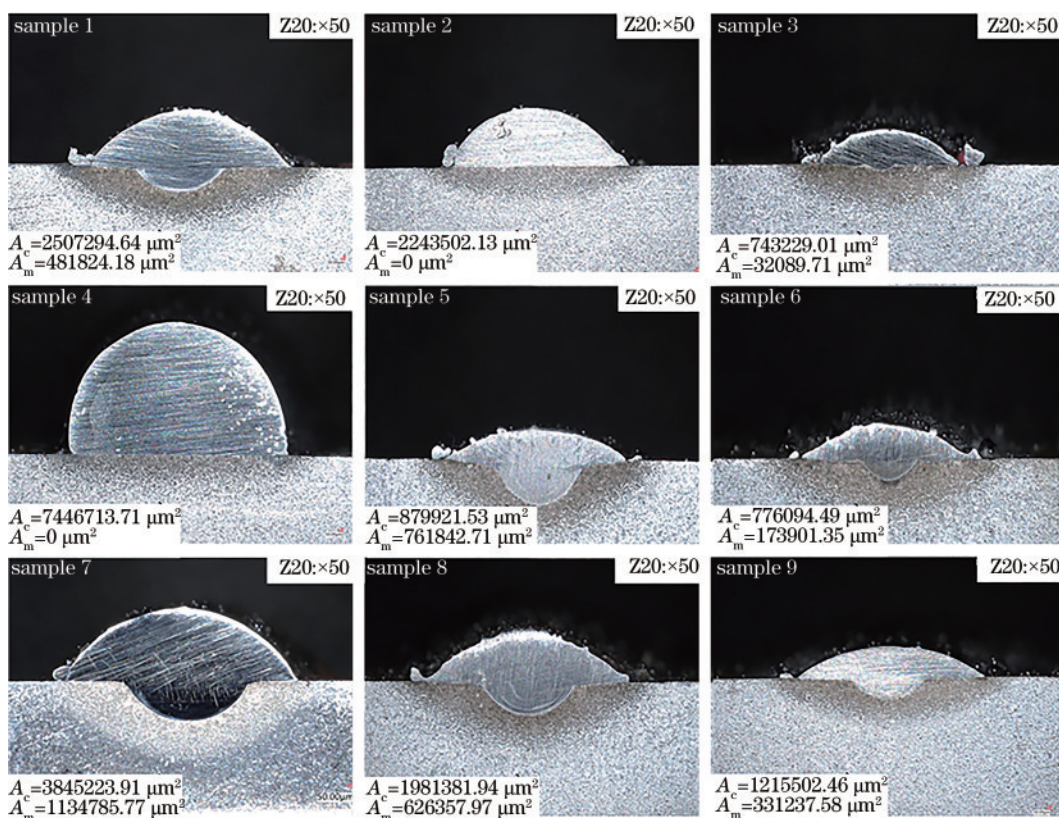


图 6 熔覆层面积的测量结果

Fig. 6 Measurement results of cladding area

激光比能量为单位面积内接收到的激光能量。激光比能量的大小会影响熔覆层稀释率的大小,即随着激光比能量增大,熔覆层的稀释率增大。熔覆层激光比能量的计算公式为

$$E = \frac{P}{Dv}, \quad (2)$$

式中: $P$ 为激光熔覆功率; $D$ 为光斑直径; $v$ 为扫描速度。

对各熔覆层的激光比能量进行计算,结果发现:2号试件熔覆层的稀释率为0;3号试件熔覆层的稀释率仅为4.1%;4号试件熔覆层的激光比能量较高,粉末吸能充分,试件的表面粗糙度小,但由于送粉速度快,传递到基体的能量低,所以未能形成有效熔池;5号试件熔覆层的稀释率为46.4%,这是因为较大的激光功率和较小的送粉速度使得激光的能量大部分被基体吸收,形成了较大的基材



熔深;其余 5 组试件熔覆层的稀释率均在 16%~24% 之间,这表明熔覆层与基体之间的结合性能较好。

### 3.3 单道熔覆结果分析

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,反之越小<sup>[15]</sup>。根据极差分析可以确定各个因素对熔覆层宏观形貌、缺陷及稀释率影响的大小。结合宏观形貌、缺陷以及稀释率的评分结果进行极差分析,结果如表 4 所示。

表 4 极差分析  
Table 4 Range analysis

Project	Laser power(A)	Scanning speed(B)	Powder feeding rate (C)	Defocusing amount(D)
Macroscopic feature	8.3	13.3	0	6.6
	Order of influence: $R_B > R_A > R_D > R_C$ Superior level combination: $A_3 B_2 C D_2$			
Imperfection	8.3	10	5	10
	Order of influence: $R_B = R_D > R_A > R_C$ Superior level combination: $A_3 B_1 C_2 D_2$			
Dilution rate	16	10.5	18.6	17.3
	Order of influence: $R_C > R_D > R_A > R_B$ Superior level combination: $A_1 B_1 C_3 D_2$			

根据表 4 可知:工艺参数对熔覆层宏观形貌的影响从大到小的顺序为扫描速度(B)、激光功率(A)、离焦量(D)和送粉速度(C),最优参数组合为  $A_3 B_2 C D_2$ ;工艺参数对熔覆层缺陷的影响从大到小的顺序为扫描速度/离焦量(B/D)、激光功率(A)和送粉速度(C),最优参数组合为  $A_3 B_1 C_2 D_2$ ;工艺参数对熔覆层稀释率的影响从大到小的顺序为送粉速度(C)、离焦量(D)、激光功率(A)和扫描速度(B),最优组合参数为  $A_1 B_1 C_3 D_2$ 。根据极差分析结果可知,对熔覆层宏观形貌、缺陷以及稀释率影响的最优参数组合存在差异。因此,极差分析不能得到统一的最优参数组合,需要结合模糊综合评定方法对非均匀粉末 Fe45 的激光熔覆工艺参数进行综合分析。

在本文使用的模糊评价法中,评价集为{极好,好,一般,差,极差},权重矢量为  $A = \{ \text{表面形貌, 缺陷, 稀释率} \} = (1/3, 1/3, 1/3)$ 。然后根据表 4 得到的数据计算出评价矩阵  $B$ ,并进行归一化处理。最终的模糊矩阵如表 5 所示。

由表 5 可知,  $B_7$  和  $B_9$  两组数据中的“极好”和“好”的数值较高,这说明单道熔覆试验中第 7 组试验和第 9 组试验参数比较合适。再对比  $B_7$  和  $B_9$  两组数据可以发现,第 7 组的结果更好,因此第 7 组试验参数为最优工艺参数。最优工艺参数如下:激光功率 2400 W,扫描速度 5 mm/s,送粉速度 20 g/min,离焦量 +5 mm。

表 5 模糊矩阵评判结果

Table 5 Fuzzy matrix evaluation results

No.	Matrix
1	$B_1 = [0.07, 0.20, 0.50, 0.20, 0.03]$
2	$B_2 = [0.10, 0.20, 0.43, 0.17, 0.10]$
3	$B_3 = [0.0, 0.10, 0.43, 0.47]$
4	$B_4 = [0.10, 0.10, 0.37, 0.27, 0.17]$
5	$B_5 = [0.0, 0.07, 0.23, 0.37, 0.33]$
6	$B_6 = [0.0, 0.07, 0.13, 0.53, 0.27]$
7	$B_7 = [0.23, 0.33, 0.40, 0.03, 0]$
8	$B_8 = [0.07, 0.10, 0.27, 0.23, 0.33]$
9	$B_9 = [0.17, 0.23, 0.40, 0.17, 0.03]$

## 4 考虑搭接率的多道熔覆试验

### 4.1 试验方案

在单层多道熔覆中,搭接率是影响搭接熔覆层宏观质量的关键因素,因此优选出合适的搭接率至关重要<sup>[16-17]</sup>。图 7 所示为搭接示意图,搭接率的计算公式为

$$\eta = (D - d) / D, \quad (3)$$

式中: $\eta$ 为搭接率; $D$ 为单道熔覆层的宽度; $d$ 为相邻熔覆层中心线的距离。

当  $S_1 = S_2$  时,搭接率取最佳理论值,而文中最优参数组合对应的理论搭接率  $\eta = 29.2\%$ 。理论搭接率计算时未考虑熔池表面张力、金属颗粒冲击动能和热累积等的影响,实际的熔覆搭接率宜大于理论

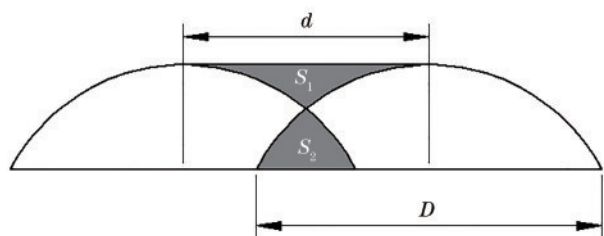


图 7 搭接示意图

Fig. 7 Schematic of overlap

值,故本文选取 30%、40% 和 50% 的搭接率进行多道搭接试验,激光扫描路径如图 8 所示。

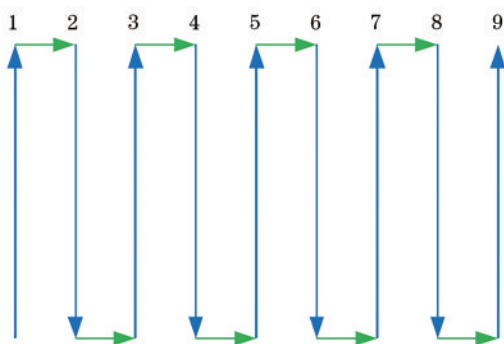


图 8 单层多道熔覆路径

Fig. 8 Single-layer multi-pass cladding path

#### 4.2 宏观形貌分析

图 9 所示为单层多道熔覆表面的宏观形貌。可见,在三种搭接率下,熔覆表面均连续,相邻两道熔覆层连接紧密,没有出现表面裂纹。三种熔覆层表面均附着有粉末颗粒,这是粉末在熔覆过程中飞溅到未完全冷却的熔覆层上形成的。对比后可以发现:以搭接率 30% 进行熔覆时,熔覆层的表面粗糙度小,搭接部位凹陷明显,表面平整度较低,熔覆层上表面最高点和最低点之间的差值为 461.18  $\mu\text{m}$ ;以搭接率 40% 进行熔覆时,熔覆层的表面粗糙度小,平整度较高,熔覆层上表面最高点和最低点之

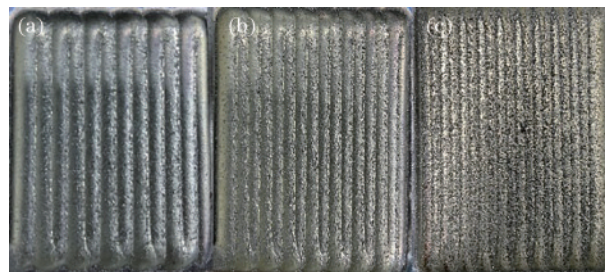


图 9 单层多道熔覆形貌。(a)搭接率 30%;(b)搭接率 40%;(c)搭接率 50%

Fig. 9 Single-layer multi-pass cladding topography. (a) Overlap rate of 30%; (b) overlap rate of 40%; (c) overlap rate of 50%

间的差值为 344.10  $\mu\text{m}$ ,熔覆层表面附着有少量粉末颗粒;以搭接率 50% 进行熔覆时,熔覆层表面的平整度更高,上表面最高点和最低点之间的差值为 228.10  $\mu\text{m}$ ,但表面粗糙度明显下降,表面粉末附着最多。从表面形貌来看,单层多道熔覆时的搭接率选取 40% 最为适宜。

#### 4.3 内部缺陷检验

在图 9 所示试样熔道中部切割取样,样品的截面形貌如图 10 所示。先将熔覆层端面进行磨抛处理,然后用 4% 硝酸酒精进行轻度腐蚀,使熔覆层和基材的结合边界显现,然后将样品放到 VHX-7000 超景深显微镜下进行观察。三种搭接熔覆层的内部结构都很致密,且均无微裂纹和气泡等缺陷,但各熔覆层与基体结合面存在差异。随着搭接率增大,重熔区宽度增加并且熔池温度升高,促进了熔池中液态金属的流动,使不同搭接率下熔覆层与基体的结合面产生了差异。与其他两组相比,搭接率为 40% 的熔覆层与基体的结合界面具有更好的均匀性和连续性,而且熔覆层中的气孔更少,具有更优异的结合强度。

综上所述,在最优熔覆参数下搭接率取 40% 的熔覆层质量最好。

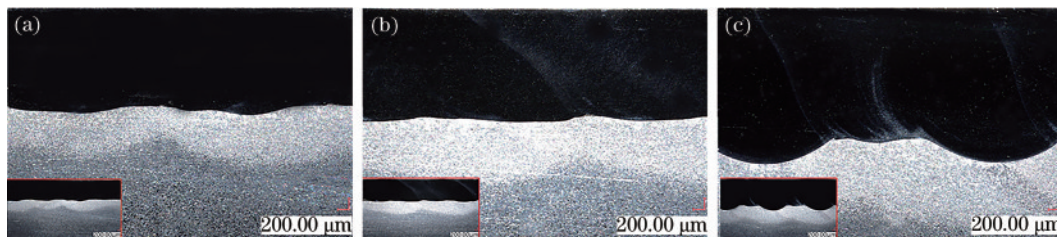


图 10 多道熔覆的微观截面图。(a)搭接率 30%;(b)搭接率 40%;(c)搭接率 50%

Fig. 10 Micro-section of multi-layer cladding. (a) Overlap ratio of 30%; (b) overlap ratio of 40%; (c) overlap ratio of 50%

## 5 结 论

本文基于多因素正交试验和多目标模糊综合评价法,研究了非均匀 Fe45 粉末的激光熔覆工艺参数优化,得到的主要结论如下:

1) 根据多因素正交试验的极差分析可以得到工艺参数对熔覆层表面形貌的影响从大到小的顺序为扫描速度、激光功率、离焦量和送粉速度,对熔覆层缺陷的影响从大到小的顺序为扫描速度/离焦量、激光功率和送粉速度,对熔覆层稀释率的影响从大到小的顺序为送粉速度、离焦量、激光功率和扫描速度。

2) 利用正交试验优化结果进行多目标模糊综合评价,得到的综合最优激光熔覆工艺参数组合是激光功率 2400 W、扫描速度 5 mm/s、送粉速度 20 g/min、离焦量 +5 mm。

3) 在综合最优熔覆工艺参数下进行了多道搭接激光熔覆,结果发现,搭接率为 30%、40% 和 50% 时均可得到较高的熔覆质量,当搭接率为 40% 时,熔覆层的结合界面最好。

## 参 考 文 献

- [1] Haldar B, Saha P. Identifying defects and problems in laser cladding and suggestions of some remedies for the same[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(5): 13090-13101.
- [2] Chen W J, Chen H, Li C C, et al. Microstructure and fatigue crack growth of EA4T steel in laser cladding remanufacturing [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 79: 120-129.
- [3] Li Q T, Fu H G, Lei Y P. Research development of iron-based wear-resistant coating fabricated by laser cladding technique[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2013, 39(10): 1552-1560.  
李庆棠, 符寒光, 雷永平. 激光熔覆铁基耐磨合金技术的研究进展[J]. *北京工业大学学报*, 2013, 39(10): 1552-1560.
- [4] Zhu H M, Hu J P, Li B C, et al. Research progress of laser cladding stainless steel coating on Fe-based substrate[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(3): 74-84.  
朱红梅, 胡际鹏, 李柏春, 等. 铁基材料表面激光熔覆不锈钢涂层的研究进展[J]. *表面技术*, 2020, 49(3): 74-84.
- [5] Guo W, Zhang Y P, Chai R X. Numerical simulation and experimental study of single-track laser cladding of 304 stainless steels [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(9): 091401.  
郭卫, 张亚普, 柴蓉霞. 单道次激光熔覆 304 不锈钢数值模拟与实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(9): 091401.
- [6] Weng F, Chen C Z, Yu H J. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: a review [J]. *Materials & Design*, 2014, 58: 412-425.
- [7] Wang J S, Shu L S. Laser cladding remanufacturing and repair of agricultural tractor spindle[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 071404.  
王家胜, 舒林森. 农业拖拉机主轴激光熔覆再制造修复研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(7): 071404.
- [8] Chen J F, Li X P, Xue Y P. Friction and wear properties of laser cladding Fe901 alloy coating on 45 steel surface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0502001.  
陈菊芳, 李小平, 薛亚平. 45 钢表面激光熔覆 Fe901 合金的摩擦磨损性能[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0502001.
- [9] Ye S Y, Liu J Y, Yang W. Microstructure and properties of laser clad 316L stainless steel layer [J]. *Surface Technology*, 2018, 47(3): 48-53.  
叶四友, 刘建永, 杨伟. 激光熔覆 316L 不锈钢涂层组织和性能的研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(3): 48-53.
- [10] Xu Z Z, Wang Z Y, He Z J, et al. Effect of laser power on microstructure and properties of laser cladding CeO<sub>2</sub> modified 316L coating[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2020, 44(3): 281-286.  
徐泽洲, 王志英, 何志军, 等. 激光功率对激光熔覆 CeO<sub>2</sub> 改性 316L 涂层组织与性能的影响[J]. *稀有金属*, 2020, 44(3): 281-286.
- [11] Zan S P, Jiao J K, Zhang W W. Study on laser cladding process of 316L stainless steel powder[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 061406.  
詹少平, 焦俊科, 张文武. 316L 不锈钢粉末激光熔覆工艺研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6): 061406.
- [12] Fan P F, Zhang G. Study on process optimization of WC-Co50 cermet composite coating by laser cladding [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2020, 87: 105133.
- [13] Li C L. Research on comprehensive evaluation method of the quality of CBN coating on the surface of titanium alloy parts[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016.  
李成龙. 钛合金零件表面 CBN 涂层质量的综合评价方法研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.



- [14] Reddy L, Preston S P, Shipway P H, et al. Process parameter optimization of laser clad iron based alloy: predictive models of deposition efficiency, porosity and dilution[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349: 198-207.
- [15] Wang B, Shu L S. Optimization of process parameters of laser cladding 304L alloy powder based on orthogonal experiment[J]. Applied Laser, 2019, 39(4): 580-585.  
王波, 舒林森. 基于正交试验的 Q235/316 薄钢板激光焊接工艺优化[J]. 应用激光, 2019, 39(4): 580-585.
- [16] Zhao Y, Chen L Y, Sun J Y, et al. Mechanical property of YCF101 coating under different overlap modes by laser cladding[J]. Optik, 2020, 212: 164714.
- [17] Lian G F, Yao M P, Chen C R, et al. Control of the quality and efficiency of multi-track overlapping laser cladding[J]. Surface Technology, 2018, 47(9): 229-239.  
练国富, 姚明浦, 陈昌荣, 等. 激光熔覆多道搭接成形质量与效率控制方法[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 229-239.