

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.04.016

# 激光熔覆工艺参数对熔覆层形貌的影响及优化

于天彪, 宋博学, 郝文超, 马哲伦  
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 应用 IPG-500 激光器对 45 号钢进行了激光熔覆, 研究了工艺参数对熔覆层形貌的影响, 采用极差分析找出影响熔覆层形貌的关键因素. 在此基础上, 提出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, 从而找出最佳的激光熔覆工艺参数组合. 结果表明, 激光功率与扫描速度是影响熔覆层形貌的主要因素, 并且在激光功率为 400 W, 扫描速度为 7 mm/s 及送粉速率为 0.7 r/min 的条件下, 所获得的熔覆层质量最优, 为激光熔覆工艺参数的选择提供理论支持.

**关 键 词:** 再制造; 激光熔覆; 极差分析; 参数优化; 灰色关联度

中图分类号: TH 17      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2019)04-0537-06

## Influence of Laser Cladding Process Parameters on Morphology of Cladding Layer and Its Optimization

YU Tian-biao, SONG Bo-xue, XI Wen-chao, MA Zhe-lun  
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: YU Tian-biao, E-mail: tbyu@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The IPG-500 laser was used to implement laser cladding on 45<sup>#</sup> steel. The influence of process parameters on the morphology of the cladding layer was studied, and the key factors affecting the morphology of the cladding layer were obtained by range analysis. On this basis, the gray correlation degree was used to analyze the correlation between the quality of the cladding layer and the ideal cladding layer quality under different parameter combinations, and the optimal combination of laser cladding process parameters can be found. The results show that the laser power and scanning speed are the main factors affecting the morphology of the cladding layer, and the optimized cladding layer is obtained under the conditions of laser power of 400 W, scanning speed of 7 mm/s and powder feeding rate of 0.7 r/min, which provides theoretical support for the selection of laser cladding process parameters.

**Key words:** remanufacturing; laser cladding; range analysis; parameter optimization; grey relational degree

对废旧机械零部件进行再制造,能够实现巨大的经济效益,是实现资源节约与可持续发展的重要手段之一<sup>[1-2]</sup>.近年来,随着我国再制造产业的发展,逐步形成了包括再制造成形技术、拆解与清洗技术及检测与评估技术在内的再制造技术体系<sup>[3]</sup>,有力推动了再制造技术的柔性化、智能化发展<sup>[4]</sup>.激光熔覆作为一种高效的再制造成形技术,已经被应用于多种不同类型的废旧零部件的修复实践中<sup>[5-6]</sup>.然而,激光熔覆所产生的熔覆层质量与激光熔覆工艺参数的选取密切相关,针对不同材料的基体与金属粉材,恰当的激光熔覆工艺参数的选取是获得高质量熔覆层的关键.

目前已有诸多学者从不同角度对激光熔覆参数进行了研究.朱刚贤等<sup>[7]</sup>研究了激光功率、扫描速率及送粉气流量对熔覆层表面平整度的影响;张庆茂等<sup>[8]</sup>从稀释率的角度出发,研究了稀释率与扫描速度和送粉速率之间的关系;Wang

等<sup>[9]</sup>采用有限元建模分析熔池温度场的分布情况,并指出激光功率与扫描速度均对熔池温度场有较大影响;Fan 等<sup>[10]</sup>对不同工艺参数下的熔覆层形貌、组织和性能等进行了研究,指出加入 Mo<sub>2</sub>C 可提高熔覆层硬度;Ansari<sup>[11]</sup>通过分析镍基合金粉末下的激光熔覆参数对熔覆层形貌的影响,提出利用回归模型对熔覆层形貌进行预测,并取得了良好的预测效果.在激光熔覆工艺参数优化方面,已经有诸多学者针对包括齿轮钢<sup>[12]</sup>、316 L 不锈钢<sup>[13]</sup>等不同种类的基体材料与不同种类的合金粉末进行了研究.

根据以上分析,目前研究大多集中于激光功率参数与熔覆层形貌特征及微观组织等之间的关系,以实验研究为主,尚缺乏基于统计学的激光功率参数优化选择的相关研究.本文在研究不同激光功率参数对熔覆层形貌影响的基础上,探究影响熔覆层质量的主要因素.在此基础上,提出采用灰色关联度分析研究不同实验参数的组合与理想的熔覆层质量之间的关系,进而找出适应于当前实验材料的最佳激光功率参数.

### 1 灰色关联度分析

激光熔覆形成的熔覆层质量由多个工艺参数共同决定,而不同工艺参数之间存在复杂的相互关系.因此,激光熔覆是信息不完备系统,属于灰色系统,应采用灰色关联度分析不同工艺参数下熔覆层质量与理想质量之间的不确定性.

若激光熔覆实验结果包含  $n$  个评价指标,则第  $i$  个评价对象可描述为

$$X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{ij}, \cdots, x_{in}\},$$
$$i = 1, 2, \cdots, m.$$

(1)

式中,  $m$  为实验组数.同时定义理想实验指标为

$$X_0 = \{x_{01}, x_{02}, \cdots, x_{0n}\}.$$

(2)

通过式(3)与式(4)对由激光熔覆实验结果组成的决策矩阵进行标准化处理:

$$x_{ij}^{s+} = \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}}{\max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} - \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}},$$

(3)

$$x_{ij}^{s-} = \frac{\max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} - \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}}.$$

(4)

其中,正向指标由式(3)进行标准化处理,负向指标由式(4)进行标准化处理.在激光熔覆系统中,熔宽属于正项指标,熔深与熔高属于负向指标.

在指标标准化后计算各个指标与理想指标之间的差值:

$$\Delta_{ij} = |x_{ij}^s - x_{0j}^s|,$$
$$i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n.$$

(5)

因此可得两级最大差与两级最小差:

$$\Delta_{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} \{ \max_{1 \leq j \leq n} \{ \Delta_{ij} \} \},$$

(6)

$$\Delta_{\min} = \min_{1 \leq i \leq m} \{ \min_{1 \leq j \leq n} \{ \Delta_{ij} \} \}.$$

(7)

则第  $i$  个实验组的各个指标的关联系数为

$$\zeta_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \rho \Delta_{\max}}.$$

(8)

式中,  $\rho$  为分辨系数,一般在  $0 \sim 1$  之间,通常取 0.5.可得第  $i$  组实验与理想指标的关联度:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \zeta_{ij},$$
$$i = 1, 2, \cdots, m.$$

(9)

因此,与理想指标关联度最大的实验组对应的实验参数为理想实验参数.

### 2 实验设计

本实验采用的粉末为铁基合金粉末,主要成分如表 1 所示.

表 1 铁基合金粉末主要成分(质量分数)

Table 1 Main components of Fe-based alloy powder

%

C	Si	Mn	B	Cr	Ni	Mo	Nb	Fe
0.07	1.10	0.40	0.23	15.2	5.10	1.00	0.31	余量

在使用粉末之前,需对其进行至少 24 h 的干燥过程,从而降低粉末氧化产生的成分变化,并保证送粉过程中粉末不会黏着于送粉管内壁,从而影响送粉速率.

实验所用的基材为 45 号钢,其主要成分如表 2 所示.

表 2 基体主要成分(质量分数)

Table 2 Main components of substrate

%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
0.46	0.30	0.55	0.03	0.02	1.00	0.25	0.26	余量

实验中钢板尺寸为 110 mm × 120 mm × 10 mm.进行熔覆实验前,应先用砂纸将基板表面摩擦光滑,防止表面存在锈迹与杂质等对熔覆质量产生负面影响.

实验使用 IPG - 500 光纤激光器,激光头由一台库卡机器人进行控制.实验采用氩气作为运送粉末的送粉气及激光熔覆过程中的保护气,防止激光熔覆过程中熔池元素由于高温而产生的氧化作用.激光光斑直径固定为 1.1 mm,离焦量为

12 mm.

本次实验设计了3因素4水平的单道激光熔覆正交试验,如图1所示,各因素水平如表3所示.

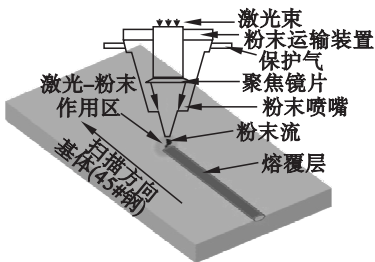


图1 单道激光熔覆实验

Fig. 1 Single-track laser cladding experiment

表3 各因素实验水平

Table 3 Experiment levels of factors

因素	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
激光功率/W	350	375	400	425
扫描速率/(mm·s <sup>-1</sup> )	5.5	6	6.5	7
送粉速率/(r·min <sup>-1</sup> )	0.6	0.7	0.8	0.9

其中,由于本实验所采用的送粉器为转盘式送粉器,金属粉末由粉盘旋转送入管道,因此送粉速率由粉盘的旋转速度控制.

实验完成后的基板如图2所示,每组实验均重复多次并取其均值.在进行后处理时,首先沿着熔道的横截面方向进行线切割,获得其熔道横截面;然后采用目数由小到大的砂纸对横截面进行摩擦,并对其进行镜面抛光处理;最后通过配制的盐酸-氯化铁腐蚀液对横截面进行腐蚀处理.获取熔道横截面的形貌后,通过显微镜获取熔道形貌的微观图像,并测量其熔宽、熔深及熔高.最终的实验结果如表4所示.

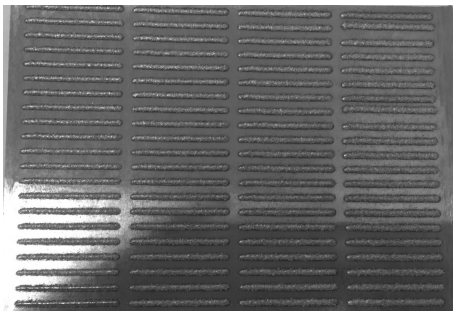


图2 实验后的基板

Fig. 2 Substrate after laser cladding

### 3 实验结果分析与优化

#### 3.1 极差分析

通过极差分析可以得到影响熔覆层形貌的主

要因素.若令 $S_{ij}$ 为 $i$ 因素在 $j$ 水平下的结果之和,则

$$S_{ij} = \sum_{j=1}^m v_{ij} . \tag{10}$$

式中: $v_{ij}$ 为 $i$ 因素 $j$ 水平的实验结果; $m$ 为水平数.令 $D$ 为极差,则有

$$D_i = \max_{1 \leq i \leq n} \{ S_{ij}/m \} - \min_{1 \leq i \leq n} \{ S_{ij}/m \} . \tag{11}$$

其中: $D_i$ 为极差; $n$ 为因素数量.各因素的极差如表5所示.

表4 实验结果

Table 4 Experiment results

组数	激光功率 W	扫描速率 mm·s <sup>-1</sup>	送粉速率 r·min <sup>-1</sup>	熔宽 μm	熔深 μm	熔高 μm
1	350	5.5	0.6	1 005.00	133.00	341.26
2	350	6.0	0.7	1018.78	126.28	306.74
3	350	6.5	0.8	880.06	120.00	264.71
4	350	7.0	0.9	903.76	115.01	266.51
5	375	5.5	0.7	1 085.02	142.57	362.24
6	375	6.0	0.6	1 027.51	136.37	338.77
7	375	6.5	0.9	1 005.17	126.27	271.28
8	375	7.0	0.8	954.35	120.03	282.64
9	400	5.5	0.8	1 216.25	151.74	377.28
10	400	6.0	0.9	1 076.25	139.85	355.69
11	400	6.5	0.6	1 107.87	121.29	320.00
12	400	7.0	0.7	1 076.25	118.21	297.50
13	425	5.5	0.9	1 177.54	159.68	410.03
14	425	6.0	0.8	1 135.06	146.52	403.80
15	425	6.5	0.7	1 140.01	133.27	371.25
16	425	7.0	0.6	1 122.73	125.58	333.77

由表5可知,熔宽主要受激光功率的影响,其次为扫描速率,而送粉速率对熔宽的影响较小.熔深主要由扫描速率决定,而激光功率对熔深也有一定影响,送粉速率对熔深的影响较小.熔高主要由激光功率与扫描速率所决定,而送粉速率对熔高影响较小.由正交实验可知,熔覆层形貌由不同的工艺参数共同决定,因此,在选取工艺参数时应综合考虑不同的工艺参数对熔覆层形貌所造成的不同影响.基于此,通过对影响熔覆层形貌较大的前两个工艺参数进行交互作用分析,以确定单一的工艺参数对熔覆层的影响.

#### 3.2 单因素分析

1) 熔宽:对于熔宽,由表5可知其主要由激光功率与扫描速率所决定.由于激光功率是影响熔宽的主要因素,因此绘制在不同扫描速率下的激光功率趋势曲线,如图3所示.

表 5 极差分析  
Table 5 Range analysis

水平	熔宽/ $\mu\text{m}$			熔深/ $\mu\text{m}$			熔高/ $\mu\text{m}$		
	激光功率	扫描速率	送粉速率	激光功率	扫描速率	送粉速率	激光功率	扫描速率	送粉速率
1	951.9	1120.95	1065.79	123.57	146.75	129.06	294.81	372.70	333.45
2	1018.01	1064.40	1080.02	131.31	137.26	130.08	313.73	351.25	334.43
3	1119.16	1033.28	1046.43	132.77	125.21	134.57	337.62	306.81	332.11
4	1143.84	1014.27	1040.68	141.26	119.71	135.20	379.71	295.11	325.88
极差	191.94	106.68	39.34	17.69	27.04	6.14	84.91	77.58	8.56

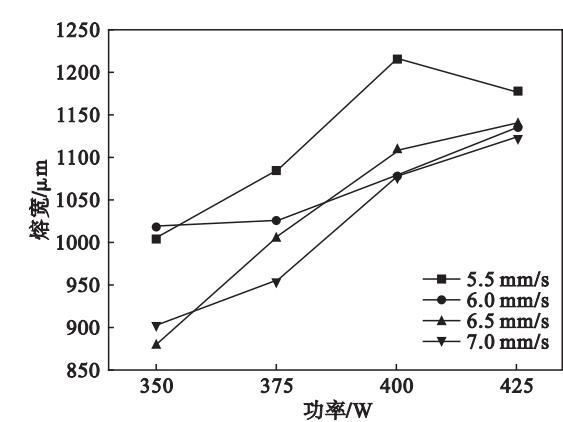


图 3 激光功率对熔宽的影响

Fig. 3 Effect of laser power on cladding width

由图 3 可知,在扫描速率一定的前提下,随着激光功率的增加,熔宽呈现增加的趋势.这是由于,随着激光功率的增加,主要影响两个方面:一是输入到基板的能量增加,导致熔池的面积增大,熔宽随着熔池面积的增加而增加;二是激光熔化的金属粉材的数量增加,导致参与形成熔覆层的材料增加,这同样会增加熔宽.

2) 熔深:对于熔深而言,由表 5 可知其主要取决于激光功率与扫描速率.由于扫描速率是影响熔深的主要因素,因此,绘制在不同激光功率下的扫描速率趋势曲线,如图 4 所示.

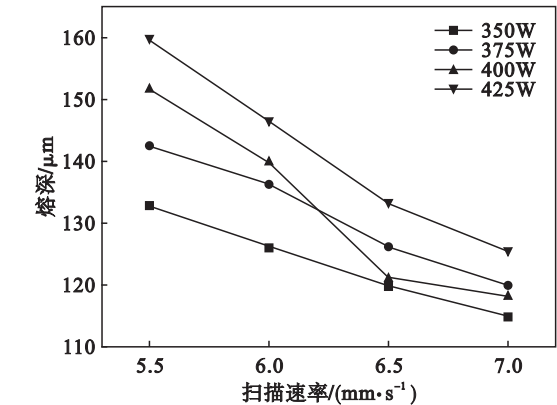


图 4 扫描速率对熔深的影响

Fig. 4 Effect of scanning speed on cladding depth

由图 4 可知,在激光功率一定的前提下,随着扫描速率的提高,熔深逐渐减小.随着扫描速率的提高,激光能量在单位时间内在某一区域的停留时间逐渐降低,因此该区域吸收的激光能量同样随之降低,因此激光能量所能熔化的基板材料随之降低,造成熔深随之降低.较低的熔深有助于降低稀释率,从而提高熔覆层质量.

3) 熔高:对于熔高,由表 5 可知激光功率与扫描速率对熔高均有较大影响.由于激光功率与扫描速率的影响相当,因此分别绘制二者的影响趋势曲线,如图 5 与图 6 所示.

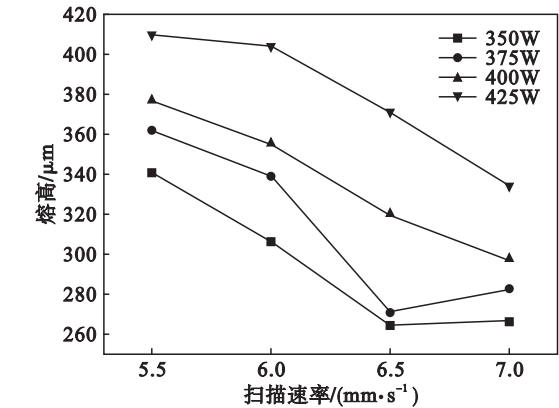


图 5 扫描速度对熔高的影响

Fig. 5 Effect of scanning speed on cladding height

由图 5 可知,在激光功率一定的前提下,熔高随着扫描速率的增加而减小.通过分析可知,由于提高了扫描速率,激光在基板熔道的某一位置的停留时间缩短,造成激光能够熔化的金属粉末数量降低,即参与形成熔覆层的粉末数量降低,造成熔高的下降.同理,如图 6 所示,在扫描速率一定的前提下,随着激光功率的提高,熔高随之增加.在激光光斑直径一定的条件下,增加激光功率即增加了单位能量密度,使激光能够熔化的金属粉末的数量增加,进而使参与形成熔覆层的粉末数量增加,最终提高了熔高.然而,过高的熔高不利于零件的成型.因此,结合激光功率对熔宽的影



响,在保证一定大小的熔宽前提下,应找出适当的激光功率使熔覆层不至于过高.

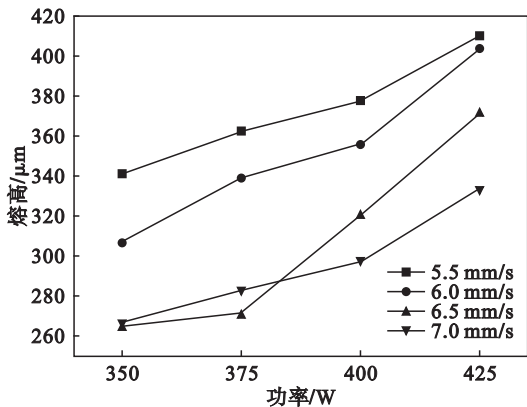


图 6 激光功率对熔高的影响

Fig. 6 Effect of laser power on cladding height

### 3.3 实验结果优化

根据单因素分析结果,理想的熔覆层应在具有较大熔宽的同时,适当降低熔高与熔深,结合实际需求与先前对齿轮导轨等零部件的修复经验,确定所需熔覆层的宽度为 1 120 μm,高度为 300 μm,深度为 120 μm.

对表 4 中的实验数据所组成的决策矩阵按照式(3)与式(4)进行标准化处理,并由式(5)计算差值.由式(6)与式(7)可得两级最大差与两级最小差:

$$\Delta_{\max}=0.8883\text{ ,}$$
$$\Delta_{\min}=0\text{ .}$$

由式(8)计算出第  $i$  个实验组各个指标的关联系数,从而由式(9)得各个实验组的灰色关联度,如图 7 所示( $\rho=0.5$ ).

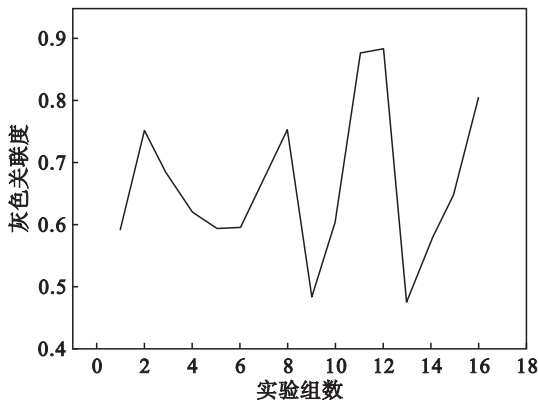


图 7 灰色关联度

Fig. 7 Grey relational degree

由图 7 可知,第 12 实验组对应的激光熔覆工艺参数为最佳工艺参数组合,与理想工艺指标最为接近.第 12 组实验对应的熔道横截面如图 8 所示.

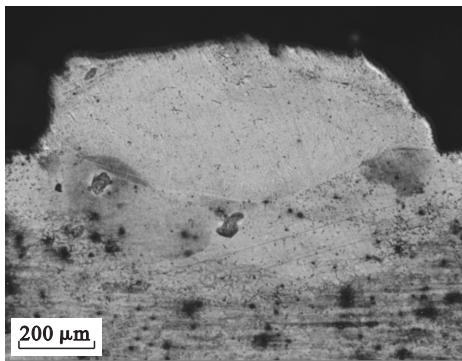


图 8 熔覆层形貌

Fig. 8 Morphology of cladding layer

通过观察其熔覆层形貌可知,其熔宽达到了 1 000 μm 以上,有利于搭接以形成大面积的熔覆层,并且其熔高小于 350 μm,有利于零件的成型工艺.因此,无论从实验的角度分析,还是理论计算,该工艺参数组合具备较高的实践性.

## 4 结 论

1) 通过极差分析可知熔宽主要取决于激光功率,熔深主要取决于扫描速度,而熔高主要取决于激光功率与扫描速度的共同作用.通过单因素分析可知,熔宽随着激光功率的增加而增加,熔深随着扫描速度的增加而减小,而熔高随着激光功率的增加而增加,随着扫描速度的增加而降低.

2) 通过对各个实验组进行灰色关联度分析,可知激光功率 400 W,扫描速度 7 mm/s,送粉速率 0.7 r/min 为最佳激光熔覆工艺参数组合.

### 参考文献:

- [1] McMath I. Remanufacturing: sustaining industry in the 21st century[J]. *Engineering Technology*, 2005, 8(2): 18–20.
- [2] 徐滨士,李恩重,郑汉东,等.我国再制造产业及其发展战略[J]. *中国工程科学*, 2017, 19(3): 61–65.  
(Xu Bin-shi, Li En-chong, Zheng Han-dong, et al. The remanufacturing industry and its development strategy in China [J]. *Engineering Sciences*, 2017, 19(3): 61–65.)
- [3] Yao J K, Zhu S, Cui P Z. Study on flexible remanufacturing system and framework [C]//Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA). Changsha: IEEE Computer Society, 2010: 516–519.
- [4] 朱胜,周超极.面向“中国制造 2025”的增材再制造技术[J]. *热喷涂技术*, 2016(3): 1–4.  
(Zhu Sheng, Zhou Chao-ji. Additive remanufacturing for “made in China 2025” [J]. *Thermal Spray Technology*, 2016 (3): 1–4.)
- [5] Wu G P, Hu Y Z, Zhu W N, et al. Research status and development trend of laser additive manufacturing technology [C]//4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE). Changsha: Institute of

