**文章编号:**1000-8608(2017)03-0247-05

# 激光熔覆中工艺参数对形成层儿何特征及硬度影响分析

沈毅鸿,张元良\*,李 涛,王金龙

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**激光熔覆技术的实质是合金粉末快速熔化和凝固的过程,其形成层的形状和性能与 工艺参数密切相关.为了了解工艺参数对激光熔覆形成层几何特征及硬度的影响规律,根据 正交试验设计方法设计研究了工艺参数(激光功率、扫描速率、送粉速率)对单道单层熔覆层 几何特征(熔覆层高度、宽度与熔池深度)与硬度影响的试验,根据试验结果归纳了工艺参数 对单道单层熔覆层几何特征与硬度的影响规律,解释了造成这些影响的原因,试验表明激光 功率是影响熔覆层几何特征的最显著因素.此外,使用了一个激光熔覆层的几何特征数学模 型对照验证了试验结果.

关键词: 316L 不锈钢;激光熔覆;工艺参数;几何特征;正交试验设计 中图分类号:TG174.4 **文献标识码:**A **doi**:10.7511/dllgxb201703005

# 0 引 言

单道单层的激光熔覆技术是激光快速成型、 激光熔覆再制造技术的基础.激光熔覆通过激光 束使粉末与基体发生冶金化学反应,并形成性能 良好的结合层.它是一个多参数参与影响的工艺, 激光功率、送粉速率、扫描速率等工艺参数都将影 响喷入的金属粉末的熔化状态,并影响到熔覆层 的几何特征与显微硬度<sup>[1]</sup>.为了使熔覆层的几何 特征与性能达到技术要求,实现激光熔覆工艺规 划,建立激光熔覆的几何特征模型,研究工艺参数 对激光熔覆层几何特征及硬度的影响规律是很有 必要的.

席明哲等<sup>[2]</sup>研究了激光功率对 316L 不锈钢 熔覆层组织性能的影响,认为激光功率为 700 W 时,制备的不锈钢零件力学性能最优.黄小伟等<sup>[1]</sup> 研究了 316L 不锈钢工艺参数和单熔覆层截面几 何特征之间的定量关系,得出结论:增大扫描速度 将导致熔覆层高度、宽度减小;增大激光功率将导 致熔覆层高度、宽度增大. Marzban 等<sup>[3]</sup>基于正交 试验设计研究了激光熔覆加工 40 号钢时工艺参 数对熔覆层的影响,得到了激光功率、送粉速率和 扫描速率对熔覆层高度、宽度及熔池深度的影响 规律. Sun 等<sup>[4]</sup>在对 Ti6Al4V 的激光熔覆进行数 据分析与参数优化的基础上,得到了一系列工艺 参数对熔覆层几何特征的影响规律. 尽管上述研 究在有关激光快速成型中工艺参数对熔覆层几何 特征及性能的影响方面均取得了一定成果,但存 在未能使用有效的统计方法、考虑的工艺参数及 几何特征指标不全面等有待更新、补充之处.

本文使用具有良好焊接性能的 316L 不锈钢 作为熔覆的粉末与基体,使用正交试验设计的方 法,研究单道单层激光熔覆的激光功率、扫描速 率、送粉速率对熔覆层几何特征高度、宽度、熔池 深度及显微硬度的影响规律.

# 1 试验条件及方法

#### 1.1 试验材料

熔覆的基体与粉末材料均为 316L 不锈钢. 基体熔覆前已经进行过必要的除锈、干燥处理,表 面具有良好的熔覆性能.送入的 316L 不锈钢粉 末均已经过干燥处理,粒度为+150~-45 目,堆 积密度为 4.20 g/cm<sup>3</sup>,流动率为 18.3 s/50 g.

#### 1.2 试验设备

本试验采用鞍山煜宸科技有限公司为大连理

收稿日期: 2016-10-19; 修回日期: 2017-03-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375074);"九七三"国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB013401.1).

作者简介:沈毅鸿(1994-),男,硕士生,E-mail:hooray@mail.dlut.edu.cn;张元良\*(1959-),男,教授,E-mail:zylgzh@dlut.edu.cn.

工大学制造的 RS-LCD-4000-D-R 型光纤激光熔 覆系统,系统所使用的激光器是型号为 LDF-4000-100 的光纤耦合输出的半导体激光器,其最 大功率为 4 000 W,产生的激光波长为 900~ 1 070 nm.

#### 1.3 试验条件及工艺参数

本文采用正交试验法设计试验,选取的变量 为激光功率、扫描速率及送粉速率,研究的熔覆层 特征包括单道单层熔覆层的宽度 W、高度 H、熔 池深度 D 及显微硬度.试样横截面的几何示意图 如图 1 所示.根据加工过程中晶体组织是否改变, 可以把整个试样分为 4 个区域:增材制造的部分 称为熔覆层,原基体被熔化的部分称为熔池,受热 影响而未熔化的部分称为热影响区,未受热影响 的部分称为基体.

该正交试验为一个三因素三水平的正交试验,可使用 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)正交表.各因素均根据经验设置了3个恰当的参数水平,如表1所示.根据正交表确定的试验安排如表2所示.

熔覆层的几何特征尺寸使用尼康 MA100 型 倒置金相显微镜来测量,显微硬度为取熔覆层中 央部分一点使用 MVC-1000B 维氏硬度计在 3 N 力下作用 15 s 测量 3 次后取平均值得到.此外, 试验采用同轴送粉的方式,送粉的承载气与保护 气均为氩气,承载气的流量为 400 L/h,保护气的 流量为 600 L/h,每道熔覆层的长度均为 30 mm.



图1 单道单层熔覆层横截面示意图

Fig. 1 Cross section diagram of single-line single-level cladding layer

表1 因素与水平

Tab. 1 Parameters and levels

	因素					
水平L	激光功率 P/W	扫描速率 v-/(mm•s <sup>-1</sup> )	送粉速率 $v_{\rm r}/(g \cdot s^{-1})$			
	<b>x</b> /	087 (11111 0 )	op/(8 0 /			
1	1 000	6	0.078			
2	1 500	9	0.100			
3	2 000	12	0.133			

Orthogonal experimental arrangements and results Tab. 2 扫描速率/ 送粉速率/ 熔覆层高度/ 熔覆层宽度/ 熔池深度/ 试验编号 激光功率/W 硬度 HV  $(mm \cdot s^{-1})$  $(g \cdot s^{-1})$ mm mm mm 1 1 000 6 0.078 0.307 2.748 0.528 230.5 2 1 000 9 0.100 0.215 2.720 0.220 336.2 3 1 000 12 0.133 0.189 2.399 0.103 377.4 4 1 500 6 0.100 0.251 3.261 0.880 185.5 5 1 500 9 0.133 0.412 3.092 0.698 282.5 6 1 500 120.078 0.135 2.747 0.698 203.2 7 2 000 6 0.789 260.7 0.133 3.539 1.389 8 2 000 9 0.078 0.367 3.351 1.288 190.1 9 2 000 12 0.100 0.612 3.377 0.940 313.0

Ch 2 Orthe end on a immediation of the state of the second second

表 2

正交试验安排与结果

# 2 试验结果及分析

试验结果如表 2 所示,对每一组试验结果均 使用正交试验的分析方法进行分析.对于每一形 成层特征,每一工艺参数在不同水平下的试验结 果平均值为  $K_{1j}$ 、 $K_{2j}$ 、 $K_{3j}$ .例如,不同水平激光功 率对于熔覆层高度的  $K_{1j} = 0.237$  mm, $K_{2j} =$ 0.266 mm, $K_{3j} = 0.589$  mm,同理可求得扫描速 率与送粉速率的 $K_{1j}$ 、 $K_{2j}$ 、 $K_{3j}$ .将 3 个工艺参数的 低、中、高水平作为横轴,对应的平均值为纵轴做 折线图 2(a),可直观看出工艺参数对熔覆层高度 的影响规律,随着激光功率的增加,熔覆层高度增 加,这是因为激光功率的增加使更多的粉末被熔 化参与到熔覆过程之中;扫描速率的增加将会导 致熔覆层高度的下降,这是因为激光束扫描过快 导致基体受热减少、参与熔化的粉末数量减少;送 粉速率的增加导致参与熔覆的粉末增多,熔覆层 高度提升.使用正交试验的方差分析计算每一工



- 图 2 工艺参数对熔覆层高度、熔覆层宽度、 熔池深度、熔覆层显微硬度的影响
- Fig. 2 Process parameters' effect on cladding layer's height, width, melting pool's depth, micro hardness

艺参数试验结果的因素  $S_j^2$ 、误差  $S_e^2$  与总结果的 离差  $S_i^2$  后,由 a=0.05 时的 F 比可知,3 个工艺 参数对熔覆层高度的影响从大到小依次为激光功 率、送粉速率和扫描速率,三者的影响均不显著.

同理可做工艺参数对形成层其他特征影响的

折线图 2(b)~(d).从图 2(b)中可以看出,随着激 光功率的增加,熔覆层宽度近似线性增加,这是因 为激光功率增加,能够熔化的粉末离激光中心的 距离增加,熔覆层宽度增加;扫描速率的增加将会 导致熔覆层宽度的下降,这是因为扫描速率变快导 致粉末受激光照射时间变短,能够熔化的粉末变 少;随着送粉速率的增加,熔覆层宽度先增后减,这 与粉末增多导致参与熔覆的金属粉末与遮光率均 增加之间的相互影响有关.从方差分析可知,3 个 工艺参数对宽度的影响从大到小依次为激光功 率、送粉速率和扫描速率. a=0.05 时的 F 比表 明,激光功率对熔覆层宽度的影响具有显著性.

从图 2(c)中可以看出工艺参数对熔池深度 的影响规律.激光功率与熔池深度呈正比例关系; 扫描速率的增加将会导致熔池深度的下降,因为 扫描速率增加会减少激光对单位区域的照射时 间,导致熔池深度减小;随着送粉速率的增加,熔 池深度先减后增,这也与粉末增多带来二重影响 相关.从方差分析可知,3个工艺参数对熔池深度 的影响从大到小依次为激光功率、扫描速率和送 粉速率.a=0.05时的F比表明,激光功率与扫描 速率对熔池深度的影响均具有显著性.

显微硬度主要取决于材料的化学成分与显微 组织,根据快速凝固理论,熔覆形成的熔覆层显微 组织形态主要由金属粉末的性质与冷却条件决 定.快速凝固形成的组织形态主要取决于温度梯 度与凝固速率以及它们的比值<sup>[5]</sup>.从图 2(d)中可 以看出,随着扫描速率的增加,显微硬度增加.这 是因为扫描速率增加时,温度梯度与冷却速率的 比值降低,晶体组织随之变小,熔覆层的晶体由粗 大的柱状晶、树枝晶向细密的树枝晶、胞状晶转 变,硬度随着晶粒细化提升<sup>[5]</sup>;送粉速率增加,显 微硬度增加,这是因为单个粉末颗粒的受热减少, 冷却变快,晶粒组织细化;随着激光功率增加,显 微硬度随之先降后升.

#### 3 激光熔覆的几何特征模型

本文在国内外关于激光熔覆几何特征模型研究的基础上<sup>[6-8]</sup>,理论推导得出激光熔覆的几何特 征模型.在考虑激光束的功率密度、粉末流对激光 的衰减率及辐射、对流导热散失的能量,忽略熔池 的内部对流与表面张力、承载气与保护气对熔池 的扰动等影响因素后,假设熔覆层的边界由距激 光束最远的被完全熔化的粉末决定,并根据熔覆 层质量守恒及激光能量守恒,可以理论推导得到 熔覆层宽度 W、高度 H 及熔池深度 D 的表达式:

$$W = R \left( -2\ln\left(\frac{\pi R^2}{\eta P \alpha} \left(\frac{r_{\rm p} \rho(c(T-T_0) + \Delta H_{\rm m})}{3\Delta t} + \right) \right)^{1/2} \right)^{1/2}$$

$$\varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) + h^*(T - T_0)))) \tag{1}$$

$$H = \frac{3kv_{\rm p}}{2Wv_{\rm s}\rho} \tag{2}$$

$$D = \frac{3(1-\eta)P\alpha\beta}{2Wv_{s}\rho(c(T-T_{0})+\Delta H_{m})}$$
(3)

式中: $\eta$  为粉末流的遮光率, $\alpha$  为激光吸收率,R 为 光斑半径, $r_p$  为单个粉末颗粒球的半径, $\rho$  为金属 粉末的密度,c 为金属粉末的比热容, $\Delta H_m$  为金 属粉末的熔化相变热,T 为粉末熔点, $T_o$  为环境 温度, $\Delta t$  为粉末颗粒在激光束中受照射时间的最 大值, $\epsilon$  为全发射系数, $\sigma$  为史蒂芬-玻尔兹曼常 数, $h^*$  为热交换系数,k 为粉末有效利用系数, $\beta$  为热有效利用率, P 为激光功率, v<sub>p</sub> 为送粉速率, v<sub>s</sub> 为扫描速率.

本试验所使用的模型所需工艺参数如表 3 所 示.将各组工艺参数代入模型计算后得到的理论 值与试验值进行比较,作折线图 3.

表 3 激光熔覆工艺参数及几何特征模型系数

Tab. 3 Process parameters and geometric model's parameters of laser cladding

R/ mn	$r_{ m p}/$ n mm	$\Delta H_{\rm m}/$ $(J \cdot kg^{-1})$	c/ (J • g <sup>-1</sup> • K <sup>-1</sup>	ε)	T/K	$T_0/\mathrm{K}$
2	0.08	294 000	0.502	0.64	1 673	293
k	ho/ (kg • m <sup>-3</sup> )	) h/mm	$h^*$ / $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-2}$	α <sup>1</sup> )	β	$v_0/$ m • s <sup>-1</sup> )
0.3	7 980	14	100	0.4	0.1	2

注:h 为喷嘴到基体的距离;vo 为粉末速度.



width and melting pool's depth in different process parameters

图 3 表明,虽然模型的预测结果基本符合实际试验情况,但仍存在一定误差.利用理论值和试验值计算可得,熔覆层高度的平均相对误差为42%,熔覆层宽度的平均相对误差为14%,熔池深度的平均相对误差为60%,总平均相对误差约为38%.模型精度低的原因,除了与随机误差有关以外,还可能是建模过程中简化模型做出假设、忽略了一些可能对熔覆层几何特征有影响的因素所造成.例如,建模中提出各参数,如粉末利用系数、基体热利用率,均为根据实验条件设置的常数,而在实际过程中这些参数有可能随着工艺参数的改变而发生变化,可通过引入修正函数<sup>[6]</sup>等方法对模型进行进一步优化.

## 4 结 论

(1)随着激光功率与送粉速率的增加,熔覆层

高度增加;扫描速率的增加将会导致熔覆层高度的下降.

(2)随着激光功率的增加,熔覆层宽度近似线 性增加;扫描速率的增加将会导致熔覆层宽度的 下降;送粉速率的增加则会导致熔覆层宽度先增 后减.激光功率对熔覆层宽度的影响具有显著性.

(3)随着激光功率的增加,熔池深度近似线性 增加;扫描速率的增加将会导致熔池深度的减小; 送粉速率的增加将会导致熔池深度先减后增.激光 功率与扫描速率对熔池深度的影响均具有显著性.

(4)激光功率增加,显微硬度随之先降后升; 送粉速率与扫描速率增加,显微硬度提高.

#### 参考文献:

[1] 黄小伟,习俊通,LEBRUNJL,等.工艺参数对激 光熔覆成形 316L 不锈钢形状的影响规律[J].激光 与光电子学进展,2011,48(7):114-119.

HUANG Xiaowei, XI Juntong, LEBRUN J L, et al. Influences of processing parameters on geometric characterizations of laser cladding forming 316L stainless steel [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(7):114-119. (in Chinese)

[2] 席明哲,张永忠,章萍芝,等.工艺参数对激光快速 成型 316L 不锈钢组织性能的影响[J].中国激光, 2002, 29(11):1045-1048.

> XI Mingzhe, ZHANG Yongzhong, ZHANG Pingzhi, *et al.* Influence of processing parameter on the microstructure and properties of the 316L SS fabricated by laser direct deposition [J]. **Chinese Journal of Lasers**, 2002, **29** (11): 1045-1048. (in Chinese)

- [3] MARZBAN J, GHASEMINEJAD P, AHMADZADEH M H, et al. Experimental investigation and statistical optimization of laser surface cladding parameters [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(5/6/7/8):1163-1172.
- [4] SUN Yuwen, HAO Mingzhong. Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd; YAG laser [J]. Optics and

Lasers in Engineering, 2012, 50(7):985-995.

[5] 黄凤晓、激光熔覆和熔覆成形镍基合金的组织与性能研究[D]. 长春:吉林大学,2011.
HUANG Fengxiao. An investigation on microstructure and properties of Ni-based alloy by laser cladding and laser cladding forming [D].
Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)

[6] 许 波. 面向绿色再制造的单道激光熔覆几何特征的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
XU Bo. The geometrical features of single laser cladding for the green remanufacturing [D].
Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)

- [7] FARAHMAND P, KOVACEVIC R. Parametric study and multi-criteria optimization in laser cladding by a high power direct diode laser [J].
   Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2014, 1(1/2/3/4):1-20.
- [8] LIU Shuang, KOVACEVIC R. Statistical analysis and optimization of processing parameters in highpower direct diode laser cladding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(5/6/7/8):867-878.

# Analysis of effect of process parameters on forming layer's geometric characteristics and hardness in laser cladding

SHEN Yihong, ZHANG Yuanliang\*, LI Tao, WANG Jinlong

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract**: Laser cladding is the process that alloy powders get melted and solidified rapidly. The shape and properties of forming layer are closely related to process parameters. To study the effect rules of laser cladding process parameters on forming layer's geometric characteristics and hardness, an orthogonal experiment is designed to explore the influence of laser power, scanning speed and powder feed rate on single-line single-level cladding layer's geometric characteristics, including the height and width of the cladding layer, the depth of the melting pool and the hardness. The effect patterns of those process parameters on single-line single-level cladding layer's geometric characteristics and hardness are concluded and their underlying reasons are explained. The experiment results show that laser power is the parameter with the most significant effect on the cladding layer's geometric characteristics is used to validate the results of the experiments.

Key words: 316L stainless steel; laser cladding; process parameters; geometric characteristic; orthogonal experimental design