

# 表面熔覆工艺的成形特征及粉末有效利用率研究

郝文超, 宋博学, 王钊, 张天琪, 于天彪, 王军

(东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819)

**摘要:** **目的** 针对激光熔覆层的表面形貌难以达到加工工艺要求和粉末利用率较低的问题, 对激光熔覆铁基合金粉末中的工艺参数与成形特征的关系以及粉末的有效利用率进行研究。**方法** 设计了激光表面熔覆试验方案, 分别采用不同的工艺参数在 45 号钢基板上进行铁基合金粉末单道激光熔覆试验。采用正交试验法对每道激光熔覆试验的工艺参数与成形特性之间的关系进行研究。**结果** 随着激光功率的增加, 熔宽、熔深、稀释率均呈上升趋势, 浸润角和熔覆层的高宽比呈下降趋势, 粉末的有效利用率由 12.9% 上升到 42.6%; 随着送粉速度的增加, 熔高呈现上升趋势, 熔深呈现下降趋势, 粉末的有效利用率由 27.9% 下降到 14.7%; 随着激光扫描速度的增加, 熔宽和熔高均呈下降趋势, 粉末的有效利用率先增加后下降。**结论** 送粉速度的增加造成粉末有效利用率的降低, 增加了激光熔覆的作业成本。适当增加激光功率不仅可获得更加良好的激光熔覆层形貌, 也使得粉末有效利用率增加。在激光功率为 450 W, 送粉速度为 9.6 g/min 和激光扫描速度为 390 mm/min 的条件下, 不仅可以使粉末有效利用率处于较高的状态, 也可以获得良好的熔覆层形貌。以上研究结果对激光熔覆的应用具有指导性作用。

**关键词:** 激光熔覆; 成形特征; 浸润角; 高宽比; 稀释率; 有效利用率

中图分类号: TG174.44 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2019)03-0211-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.03.029

## Forming Characteristics and Powder Effective Utilization Research of Surface Cladding Process

*XI Wen-chao, SONG Bo-xue, WANG Zhao, ZHANG Tian-qi, YU Tian-biao, WANG Jun*

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the relationship between processing parameters and forming characteristics in laser cladding of Fe-based alloy powder and powder effective utilization rate for the problem that surface geometry of cladding layer is difficult to reach the processing requirements and the utilization rate of powder is lower. Test plan of laser surface cladding was designed and Fe-based alloy powder was used for single track laser cladding on the 45# steel substrate with different processing parameters. The relationship between processing parameters and forming characteristics of each laser cladding test was researched by orthogonal test. With the increase of laser power, clad width, melt pool depth and dilution rate increased, but infil-

收稿日期: 2018-09-22; 修订日期: 2018-11-20

Received: 2018-09-22; Revised: 2018-11-20

基金项目: 国家工信部绿色制造系统集成项目 (201675514), 沈阳市重点实验室课题 (15153100)

Fund: Supported by Green Manufacturing System Integration Project of Ministry of Industry and Information Technology of China (201675514) and Project of Key Laboratory of Shenyang (15153100)

作者简介: 郝文超 (1991—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: XI Wen-chao (1991—), Male, Ph. D., Research focus: surface engineering.

通讯作者: 于天彪 (1969—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为增材制造与 3D 打印。邮箱: neutianbiaoyu2018@gmail.com

Corresponding author: YU Tian-biao (1969—), Male, Doctor, Professor, Research focus: additive manufacturing and 3D printing. E-mail: neutianbiaoyu2018@gmail.com

tration angle and aspect ratio of cladding layer decreased. Meanwhile, powder effective utilization increased from 12.9% to 42.6%. With the increase of powder feed rate, clad height increased. However, melt pool depth decreased, and powder effective utilization decreased from 27.9% to 14.7%. With the increase of laser scanning velocity, clad width and clad height decreased, and powder effective utilization increased first and then decreased. Therefore, effective utilization of powder decreases as powder feed rate increases, which increases the cost of laser cladding. However, the proper increase of laser power can not only obtain good cladding layer geometry, but also increase effective utilization of powder. Under the condition of 450 W, 9.6 g/min and 390 mm/min, the powder effective utilization is high and good geometry of cladding layer is obtained. These experiment results provide some references for the application of laser cladding.

**KEY WORDS:** laser cladding; forming characteristics; infiltration angle; aspect ratio; dilution rate; effective utilization

激光熔覆是一种先进的材料表面改性与修复技术,通过高能密度的激光束使待熔覆材料与基材表面冶金结合在一起<sup>[1,2]</sup>。待熔覆材料与基材表面形成的熔覆层具有比基材更为优异的耐磨性、耐蚀性、耐热性、抗氧化性及电气特性等性能,从而达到表面改性或修复的目的<sup>[3-5]</sup>。该种技术不仅满足了对材料表面特定性能的要求,也节约了大量的贵重元素<sup>[6,7]</sup>。

Hofman<sup>[8]</sup>等建立了激光熔覆的有限单元模型,并通过该模型对激光熔覆的稀释率进行控制。Kim<sup>[9]</sup>等建立了激光熔覆熔池形貌的有限元模型,并通过该模型对激光熔覆的熔池形貌和稀释率进行了研究,有效地预测到了熔池的形貌。李爱农<sup>[10]</sup>等对铁基- $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{MoS}_2$  熔覆层的显微组织和耐磨性进行了研究,结果表明  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{MoS}_2$  颗粒的加入可有效提高熔覆层的耐磨性。Lalas<sup>[11]</sup>等建立了激光熔覆层横截面形貌的分析模型,通过该模型能比较精确地对中低送粉速度下的熔高和熔深进行预测。Fathi<sup>[12]</sup>等提出了一种关于激光粉末沉积的数学模型,通过该模型可以预测熔覆层的温度场、熔池的深度以及稀释率。Näkki<sup>[13]</sup>等对合金粉末中的微量元素对熔覆层的热裂性和稀释率的影响进行了研究,结果表明在合金粉末中加入微量的硫、磷、硼元素能较为明显地降低熔覆层的开裂率。Jendrzewski<sup>[14]</sup>等建立了激光与粉末流相互作用的理论模型,通过该模型可知,随着粉末入射角的改变,粉末颗粒的温度分布以及激光的衰减程度均有较大差异。

虽然国内外对于激光熔覆的研究较多,但是对于激光熔覆的粉末有效利用率的研究依然较少且不够成熟。张庆茂<sup>[15]</sup>等对粉末的有效利用率进行了分析与计算,但该模型更适用于矩形光斑激光器的激光熔覆试验,而对于圆形光斑激光器的激光熔覆试验结果的计算与分析不够准确。在国外文献中,针对圆形光斑激光器粉末有效利用率的计算的研究非常少,并且熔覆层的形貌因其不够平整、精度低、有效利用率低、成本较高等问题,往往难以满足实际的加工工艺要求。针对于这个问题,本文通过采用不同的激光功率、送粉速度和激光扫描速度,分别在 45 号钢基板上进行铁基合金粉末单道激光熔覆试验。通过正交试验法选出了 16 组试验数据,并分别研究了激光功率、激

光扫描速度、送粉速度对熔高、熔宽、熔深、浸润角、熔覆层的高宽比、稀释率、粉末的有效利用率以及沿激光扫描速度方向熔覆层高度的波动的影响,并提出了一种新的粉末有效利用率算法。通过该算法计算出最佳工艺参数,在该工艺参数条件下,可有效提高粉末有效利用率以及降低激光熔覆的加工成本,获得更加良好的熔覆层形貌。

## 1 试验

试验采用 YLR-500 型 IPG 光纤脉冲式激光器,光斑直径为 1.1 mm,选用的激光喷嘴是定制的同轴送粉式激光喷嘴,为了解决一些非水平表面难以加工的问题,将其装置在一台德国 6 自由度库卡机器人上。该种设计可使激光以及粉末以不同的角度射出,可对难移动工件的多个表面进行激光熔覆。试验选用日本奥林巴斯株式会社的 3D 测量激光显微镜,通过该测量仪器,获得每道激光熔覆横截面上的熔覆层宽度( $W$ )、熔覆层高度( $H$ )、熔覆层深度( $D$ )和浸润角( $\theta$ ),见图 1。

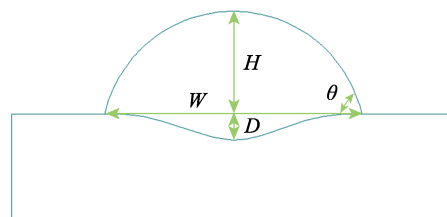


图 1 激光熔覆横截面形貌参数示意图  
Fig.1 Schematic diagram of morphological parameters of laser cladding cross section

试验选用的粉末为铁基合金粉末,采用的基板材料为 45 号钢,具体成分见表 1。在激光熔覆正交试验前,使用金刚石砂纸对基板表面进行打磨,并用丙酮和酒精对基板表面进行擦洗,以确保基板表面平整以及无油污。

试验采用 3 因素 4 水平正交试验表优化工艺参数,见表 2。其中, $P$  为激光功率, $V_Q$  为送粉速度, $V$  为激光扫描速度。

表 1 合金粉末和 45 号钢的化学组成成分  
Tab.1 Chemical composition of alloy powder and 45# steel

	wt%										
Model	C	Si	Mn	Ni	Cr	N	Mo	Nb	Cu	P, S	Fe
Alloy powder	0.05	0.9	0.4	6.5	15.5	0.22	1.0	0.31	—	—	Bal.
45# steel	0.42~0.5	0.17~0.37	0.5~0.8	≤0.25	≤0.25	—	—	—	≤0.25	≤0.045	Bal.

表 2 工艺参数正交试验表  
Tab.2 Orthogonal test of process parameters

No.	P/W	$V/(mm \cdot min^{-1})$	$V_Q/(g \cdot min^{-1})$	$W/\mu m$	$D/\mu m$	$H/\mu m$	$\theta/(^{\circ})$
1	375	330	9.6	1087	138	381	38
2	375	360	10.2	1073	133	392	51
3	375	390	10.8	1043	130	431	47
4	375	420	11.4	1037	116	356	44
5	400	330	10.2	1066	128	290	42
6	400	360	9.6	1091	142	303	54
7	400	390	11.4	1063	120	318	38
8	400	420	10.8	1088	133	315	41
9	425	330	10.8	1168	134	295	36
10	425	360	11.4	1114	133	327	46
11	425	390	9.6	1185	144	304	36
12	425	420	10.2	1162	138	349	41
13	450	330	11.4	1198	161	313	37
14	450	360	10.8	1227	150	236	35
15	450	390	10.2	1207	155	183	29
16	450	420	9.6	1199	136	199	34

2 试验结果与讨论

2.1 数据分析

$K_{xy}$  为  $x$  因素  $y$  水平的正交试验结果,  $T_{xy}$  为第  $y$  水平时各因素正交试验结果之和,  $N_{xy}$  为第  $y$  水平下各因素正交试验结果总和的平均值。设激光功率为第 1 因素, 激光扫描速度为第 2 因素, 送粉速度为第 3 因素。激光功率的四个水平依次为: 375、400、425、450 W。激光扫描速度的四个水平依次为: 330、360、390、420 mm/min。送粉速率的四个水平依次为: 9.6、10.2、10.8、11.4 g/s。则第一水平 ( $P=375$  W) 下各个正交试验结果之和为:

$$T_{x1} = K_{11} + K_{21} + K_{31} + K_{41} \tag{1}$$

$$N_{xy} = \frac{T_{xy}}{4} = \frac{K_{11} + K_{21} + K_{31} + K_{41}}{4} \tag{2}$$

根据公式(2)可计算得出每一个同一水平下的正交试验结果的平均值, 并通过该值对各个因素与熔覆层形貌之间的关系进行研究。

2.2 激光扫描速度对熔覆层形貌参数的影响

如图 2 所示, 熔覆层高度、熔覆层宽度和熔池深度均随着激光扫描速度的增加而减小。因为激光扫描速度的增加, 使激光与基材相互作用的时间减小, 基材所吸收的能量减少, 从而导致熔池面积和深度都减小。同时, 随着激光扫描速度的增加, 被激光所熔化的粉末落入基材单位面积内的数量减小, 造成了熔覆层面积的减小, 因而熔覆层宽度和高度均减小。

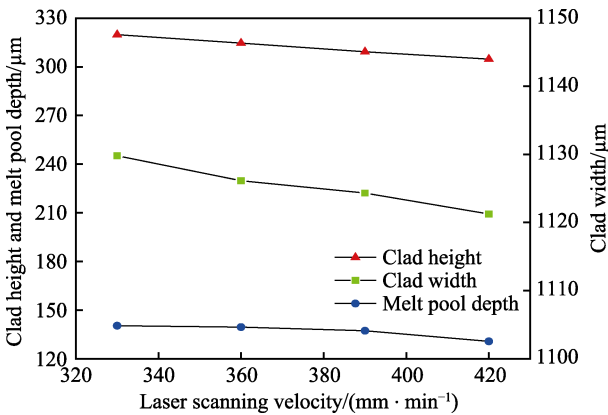


图 2 激光扫描速度对熔覆层形貌参数的影响  
Fig.2 Effect of laser scanning speed on geometry parameters of cladding layer

2.3 送粉速度对熔覆层形貌参数的影响

如图 3 所示, 随着送粉速度的增加, 熔池深度减小, 熔覆层高度增加, 熔覆层宽度在送粉速度为 10.2~10.8 g/min 区间内呈上升趋势, 但总体上依然呈现下降趋势。这是因为随着送粉速度的增加, 粉末流截面密度增加, 更多的能量被粉末流吸收, 基材所吸收的能量减少, 因而熔池深度、熔池宽度和熔池面积均减小。随着粉末流截面密度的增加, 粉末颗粒之间的碰撞现象增加, 更多的粉末颗粒射出激光束外, 从而导致熔覆层宽度小幅度增加。但是随着送粉速度的进一步增加, 由于送粉速度的增加远高于因相互碰撞而被射出激光束外的粉末颗粒数量的增加, 所以熔覆层宽度依然呈现下降趋势。同时, 随着送粉速度的增加, 被激光所熔化的粉末落入基材单位面积的数量增加, 因而造成熔覆层高度增加。同时, 随着送粉速度的增加, 熔覆层表面的形貌变得更加粗糙, 表面更容易出现粉末粘连的情况。因为当激光功率保持不变

时,随着送粉速度的增加,单位时间内进入激光束内的粉末数量增加,从而导致粉末因其他粉末遮挡而未被完全熔化的可能性增加,故而熔覆层表面出现粉末粘连的可能性增加。

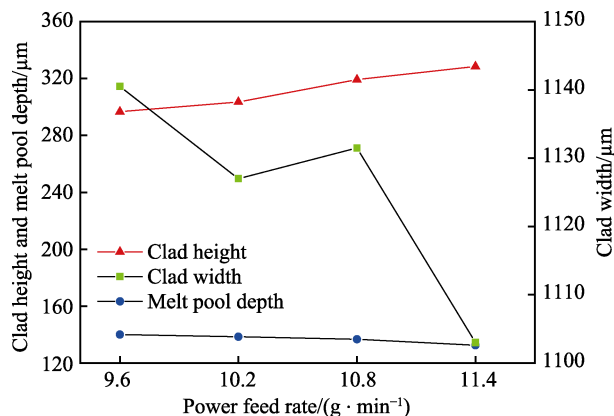


图3 送粉速度对熔覆层形貌参数的影响  
Fig.3 Effect of powder feed rate on geometry parameters of cladding layer

## 2.4 激光功率对熔覆层形貌参数的影响

如图4所示,熔覆层宽度和熔池深度均随激光功率的增加而增加,熔覆层高度呈现下降的趋势。因为随着激光功率的增加,基材所吸收的激光能量增加,从而导致热影响区的面积增大,被激光所熔化的粉末数量增加,因而熔覆层宽度、熔池深度和熔池面积均随着激光功率的增加而增加。随着熔池面积的增加,单位时间内更多的粉末进入熔池中,从而导致熔覆层高度呈现下降的趋势。

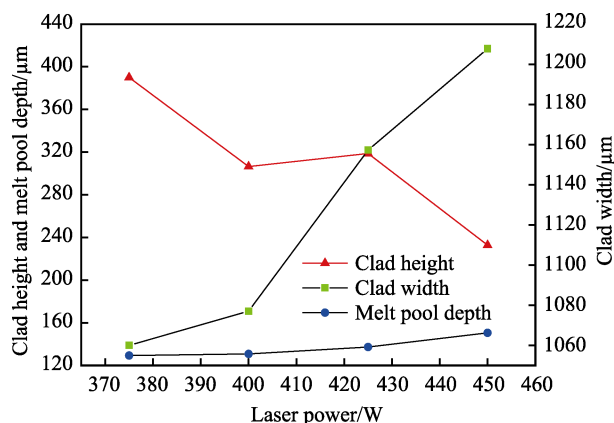


图4 激光功率对熔覆层形貌参数的影响  
Fig.4 Effect of laser power on geometry parameters of cladding layer

根据前期研究,激光扫描速度和送粉率对熔覆层的高宽比、稀释率、浸润角以及熔覆层高度稳定性的影响较小,而激光功率对其的影响较大,故进一步研究激光功率对高宽比、稀释率、浸润角以及熔覆层高度稳定性的影响。如图5所示,浸润角随激光功率的

增加而减小,这说明伴随着激光功率的增加,熔覆层的延展性也在增强<sup>[16]</sup>。同时,随着激光功率的增加,高宽比呈现减小的趋势,稀释率呈现增加的趋势。这是因为随着激光功率的增加,熔池深度和熔池面积增加,而影响熔覆层高度的因素分别为送粉速度和激光功率,送粉速度对熔覆层高度的影响较为明显,激光功率对熔覆层高度的影响并不明显,所以在熔池深度明显增加的情况下,高宽比随着激光功率的增加而下降。而随着熔池面积的增大,单位时间内注入熔池的粉末增多,促使更多的粉末与基材融合,因而稀释率随着功率的增加而增加。

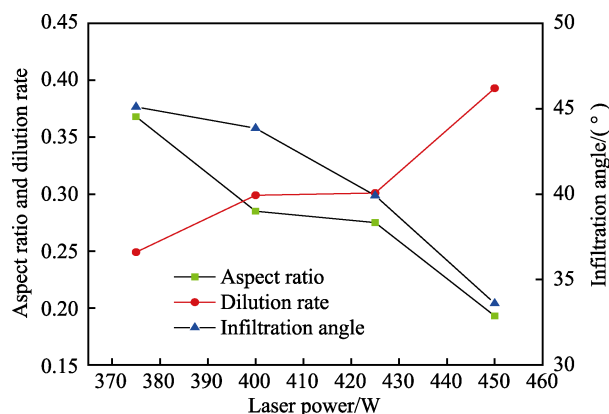


图5 激光功率对成形特征参数的影响  
Fig.5 Effect of laser power on forming characteristic parameters

从图5中还可以看出,随着激光功率的增大,浸润角和高宽比明显减小,稀释率明显增大。这说明激光功率对浸润角、高宽比以及稀释率均有较为显著的影响。由浸润角和高宽比的减小可知,随着激光功率的增大,熔覆层的横向延展性增强,熔覆层变得更为扁平。而稀释率的增大则证明合金粉末与基体的熔合更加充分。

沿激光扫描轨迹方向取10个点,分别测得每一个点的熔覆层高度,如图6所示。由图6可知,激光

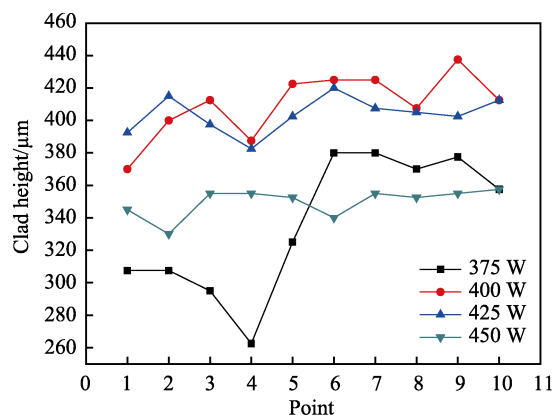


图6 激光功率对熔覆层高度的影响  
Fig.6 Effect of laser power on the height of cladding layer



扫描轨迹方向的熔覆层高度并不相同。造成这种现象的原因是当对工件进行激光熔覆加工时, 工件内部会形成并不均匀的温度场, 该温度场会导致熔池内部形成热对流现象, 但当激光源移走时, 熔池与熔覆层快速凝固。凝固速度较快以及温度场的不均匀导致各部分的膨胀与凝固情况各不相同, 从而使熔覆层内部产生了内应力, 内应力导致了沿激光扫描轨迹方向的熔覆层高度不同<sup>[17]</sup>。

计算出各个功率下熔高的方差值, 当  $P=375\text{ W}$  时,  $\sigma^2=1.6\times 10^{-3}$ ; 当  $P=400\text{ W}$  时,  $\sigma^2=3.6\times 10^{-4}$ ; 当  $P=425\text{ W}$  时,  $\sigma^2=1.1\times 10^{-4}$ ; 当  $P=450\text{ W}$  时,  $\sigma^2=6.9\times 10^{-5}$ 。由上述结果可知, 随着激光功率的增加, 沿激光扫描轨迹方向的熔覆层高度波动减小。因为随着激光功率的增加, 熔池内部的粉末与基体的熔合更加充分, 当激光源移走时, 熔池和熔覆层的冷却时间加长, 从而减小了熔覆层内部的内应力, 故而沿激光扫描轨迹方向的熔覆层高度波动减小。所以适当地增加激光功率, 可以使熔覆层形貌变得更加光滑、平整。

## 2.5 粉末有效利用率的计算

激光熔覆相对于传统加工工艺的优势在于耗材

利用率较高, 可以较低的成本实现工件的加工工艺要求, 但在激光熔覆的实际应用过程中, 粉末的利用率却较低, 低成本优势无法实现。这是因为在激光熔覆过程中, 一部分粉末在激光光束中熔化并与基体冶金结合形成熔覆层; 另一部分粉末由于在喷射过程中发生了飞溅、碰撞等现象, 散落在激光光束之外, 从而造成粉末的损失。假设激光的作用时间为  $t$ , 时间  $t$  的表达式为:

$$t = \frac{S}{V} \quad (3)$$

式 (3) 中:  $S$  为激光光束的行程,  $V$  为激光扫描速度。

粉末的有效利用率可表示为:

$$\varepsilon = \frac{U}{A} \quad (4)$$

式 (4) 中:  $U$  为熔覆层质量,  $A$  为作用时间内输出粉末的质量。

其中, 由于本次试验采用的激光束为圆形光斑, 并且由图 7 和后文图 12 可知, 熔覆层的两端近似为四分之一球形, 熔覆层的中间部分可近似为半个圆柱形, 故熔覆层的形貌示意图如图 8 所示。

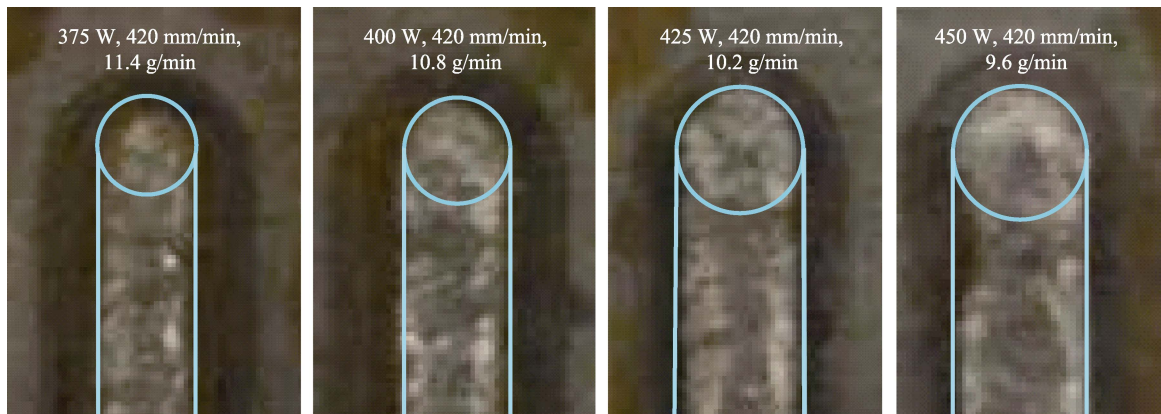


图 7 不同参数下熔覆层的形貌

Fig.7 Morphology of cladding layer under different parameters

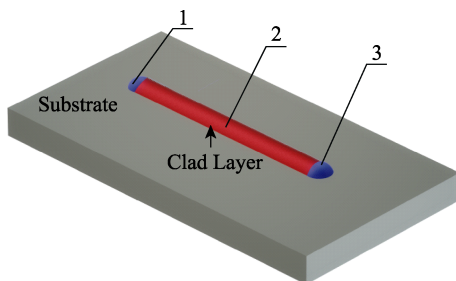


图 8 熔覆层形貌示意图

Fig.8 Schematic diagram of morphology of cladding layer

熔覆层的质量可表示为:

$$U = \frac{1}{2} \rho \left( \pi R^2 S + \frac{4}{3} \pi R^3 \right) \quad (5)$$

$$R = \frac{W^2 + 4H^2}{8H} \quad (6)$$

式 (5) 和 (6) 中:  $W$  为熔覆层宽度,  $H$  为熔覆层高度,  $\rho$  为熔覆层的密度,  $R$  为球体体积半径。

将式 (6) 代入式 (5) 中, 可得式 (7):

$$U = \frac{\pi \rho (W^2 + 4H^2)^2}{128H^2} \cdot \left( S + \frac{W^2 + 4H^2}{6H} \right) \quad (7)$$

作用时间内输出的粉末质量可由送粉速度与激光作用时间的乘积表示:

$$A = V_Q \cdot t \quad (8)$$

将式 (7) 和式 (8) 代入式 (4) 中, 得:

$$\varepsilon = \frac{\pi \rho (W^2 + 4H^2)^2 \cdot (W^2 + 4H^2 + 6HS)}{768H^3 \cdot V_Q \cdot t} \quad (9)$$

由上式可推导出多道搭接的粉末有效利用率的计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{\rho[4(n-(n-1)\lambda)\pi R^3 + 6n(n-1)(1-\lambda)WHS + 3n\pi R^2 S]}{6n \cdot V_Q \cdot t} \quad (10)$$

式(10)中:  $n$  为搭接的道数,  $\lambda$  为搭接率。

通过将该合金粉末激光熔覆为  $1 \text{ cm}^3$  的金属块, 并测其质量, 可得该种合金粉末的平均密度为  $7.79 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。由式(9)可计算得出不同速度、不同送粉速度以及不同激光扫描速度下的粉末利用率, 如图9所示。由图9可知, 当激光功率由  $375 \text{ W}$  增加到  $450 \text{ W}$  时, 粉末的有效利用率由  $12.9\%$  上升到  $42.6\%$ 。因为随着激光功率的增加, 被熔化的粉末数量增加, 基材所吸收的能量增加, 更多的粉末与基体形成冶金结合的熔覆层, 故粉末的有效利用率增加。同时从图9还可以看出, 粉末有效利用率的计算值与实测值比较相近, 总体趋势基本相同。该实验结果表明, 适当地增加激光功率, 可以提升激光熔覆中的粉末利用率, 从而达到降低激光熔覆成本的目的。

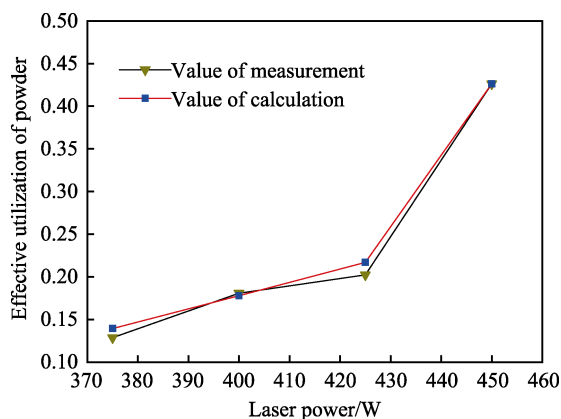


图9 激光功率对粉末有效利用率的影响

Fig.9 Effect of laser power on effective utilization of powder

如图10所示, 粉末有效利用率的计算值与实测值均随送粉速度的增加而减小, 两者趋势基本相同。当送粉速度由  $9.6 \text{ g/min}$  上升到  $11.4 \text{ g/min}$  时, 粉末的有效利用率由  $27.9\%$  下降到  $14.7\%$ 。因为随着送粉速度的增加, 粉末流的密度增加, 粉末与粉末之间的碰撞与遮挡现象增加。同时, 由于粉末流密度的增加, 更多的激光能量被粉末流吸收, 从而导致基材所吸收的能量下降以及熔池的面积减小, 该种现象造成更多的粉末未被完全熔化, 无法与基体形成冶金结合的熔覆层, 从而导致粉末有效利用率下降。

由图11可知, 当激光扫描速度由  $330 \text{ mm/min}$  提升到  $390 \text{ mm/min}$  时, 粉末的有效利用率由  $17.5\%$  上升到  $27.8\%$ , 但是当激光扫描速度由  $390 \text{ mm/min}$  提升到  $420 \text{ mm/min}$  时, 粉末的有效利用率由  $27.8\%$  下降到  $26.9\%$ , 粉末有效利用率的计算值也呈现先增

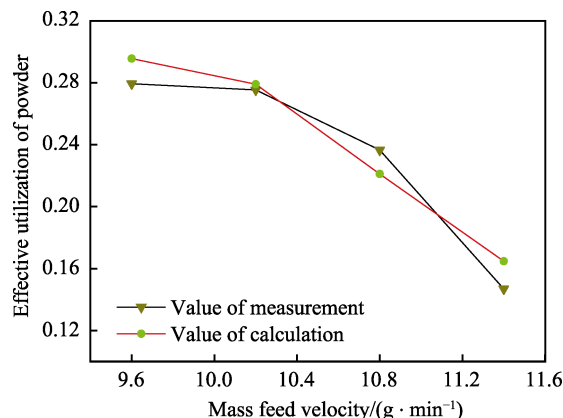


图10 送粉速度对粉末有效利用率的影响

Fig.10 Effect of mass feed velocity on effective utilization of powder

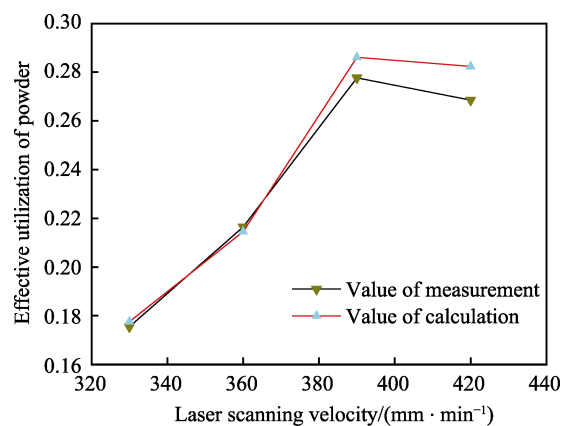


图11 激光扫描速度对粉末有效利用率的影响

Fig.11 Effect of laser scanning velocity on effective utilization of powder

加后减小的趋势。因为随着激光扫描速度的增加, 单位时间内进入激光束的粉末数量减少, 激光束内的粉末密度降低, 粉末与粉末之间的碰撞与遮挡现象减少, 从而导致更多的粉末被充分熔化, 并与基体形成冶金结合的熔覆层, 故而粉末的有效利用率增加。但是随着激光扫描速度的进一步增加, 激光与基体的作用时间减少, 造成了熔池面积的减小, 从而导致更多的粉末与未熔化的基体表面发生碰撞并被弹出, 故而导致粉末的有效利用率降低。

由图5、图6和图9可知, 激光功率的增加使熔覆层的形貌更加扁平, 表面更加光滑, 并且粉末的有效利用率也显著提升。该试验结果表明, 适当地增加激光功率, 不仅可以得到良好的熔覆层形貌, 也可以提高粉末的有效利用率, 降低激光熔覆的工作成本。

由图9、图10和图11可知, 在不同的加工工艺条件下, 该粉末有效利用率的计算值均能较为真实地反映出粉末有效利用率的变化趋势, 说明本文提出的算法具有一定的可靠性和实用性。

通过上述粉末有效利用率的计算可知, 激光功率  $450 \text{ W}$ 、送粉速度  $9.6 \text{ g/min}$ 、激光扫描速度  $390 \text{ mm/min}$

为获得粉末最佳有效利用率的工艺参数。鉴于激光功率对稀释率以及熔覆层的性能影响较大,还分别对不同激光功率条件下的熔覆层显微硬度进行了测量。当激光功率分别为 375、400、425、450 W 时,熔覆层的显微硬度分别为 557、544、537、530HV。随着激光功率的增加,稀释率增大,从而导致熔覆层的显微硬度呈现下降趋势,但下降速度比较缓慢,并且均达到基体显微硬度(237HV)的两倍以上,均能满足性能要求。同时,通过观察图 12 可知,该熔覆层的浸润角较小,延展性较强,形貌良好,这样更有利于熔覆层之间的搭接。由以上分析可知,在该工艺参数条件下,不仅可以获得良好的熔覆层形貌,还可以提高粉末的有效利用率,减少激光熔覆的工作成本。

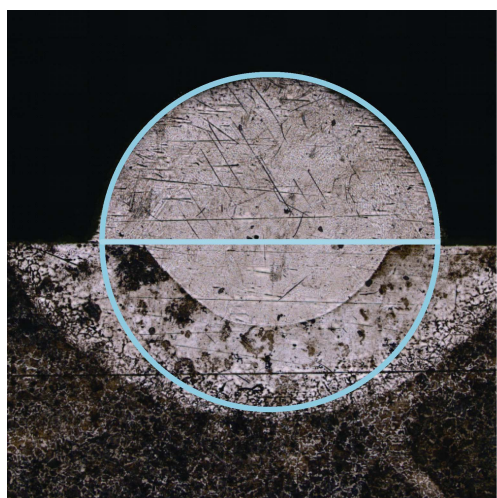


图 12 熔覆层剖面  
Fig.12 Cross-section of cladding layer

### 3 结论

1) 激光功率对熔覆层的横向延展性以及合金粉末与基体的熔合性能均有较大影响,激光功率的提升,可以使熔覆层的横向延展性以及合金粉末与基体的熔合性能得到显著提升。

2) 送粉速度的增加导致粘粉率的增加以及粉末有效利用率的降低。适当增加激光功率和激光扫描速度,不仅使熔覆层的表面更加平整,也可以提高粉末的有效利用率。

3) 当激光功率为 450 W,送粉速度为 9.6 g/min,激光扫描速度为 390 mm/min 时,不仅可以获得形貌更加良好的熔覆层,也可以提高粉末的有效利用率,降低激光熔覆作业的成本。

#### 参考文献:

[1] LIU H, HU Z, QIN X, et al. Parameter optimization and experimental study of the sprocket repairing using laser

cladding[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2017, 91(9-12): 3967-3975.

[2] 尹泉, 彭如恕, 朱红梅. 激光熔覆原位生成增强相强化铁基涂层性能研究[J]. 表面技术, 2016, 45(4): 99-104.

YIN Q, PENG R S, ZHU H M. Performance improvement of iron base coating by laser cladding in-situ generated reinforced phase[J]. Surface technology, 2016, 45(4): 99-104.

[3] 臧辰峰, 赵鹏飞, 张小彬, 等. 碳钢表面激光熔覆镍基合金涂层及其高温磨损行为[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(10): 1437-1440.

ZANG Chen-feng, ZHAO Peng-fei, ZHANG Xiao-bin, et al. Laser cladding of Ni-based alloy on #20 steel surface and its high-temperature abrasive-wear behavior[J]. Journal of Northeastern University (Natural science), 2009, 30(10): 1437-1440.

[4] PARTES K. Analytical model of the catchment efficiency in high speed laser cladding[J]. Surface and coatings technology, 2009, 204(3): 366-371.

[5] OCELIK V, DE OLIVEIRA U, DE BOER M, et al. Thick Co-based coating on cast iron by side laser cladding: analysis of processing conditions and coating properties[J]. Surface and coatings technology, 2007, 201(12): 5875-5883.

[6] 宋建丽, 李永堂, 邓琦林, 等. 激光熔覆成形技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 29-39.

SONG Jian-li, LI Yong-tang, DENG Qi-lin, et al. Research progress of laser cladding forming technology[J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(14): 29-39.

[7] 袁庆龙, 冯旭东, 曹晶晶, 等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(3): 112-116.

YUAN Qing-long, FENG Xu-dong, CAO Jing-jing, et al. Research progress in laser cladding technology[J]. Materials review, 2010, 24(3): 112-116.

[8] HOFMAN J T, DE LANGE D F, PATHIRAJ B, et al. FEM modeling and experimental verification for dilution control in laser cladding[J]. Journal of materials processing technology, 2011, 211(2): 187-196.

[9] KIM J D, PENG Y. Melt pool shape and dilution of laser cladding with wire feeding[J]. Journal of materials processing technology, 2000, 104(3): 284-293.

[10] 李爱农, 魏成靓, 刘娇姣, 等. 激光熔覆铁基  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{MoS}_2$  覆层的组织和摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2015, 28(5): 77-85.

LI Ai-nong, WEI Cheng-liang, LIU Jiao-jiao, et al. Microstructure, friction and wear properties of laser cladding Fe-based  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{MoS}_2$  coatings[J]. China surface engineering, 2015, 28(5): 77-85.

[11] LALAS C, TSIRBAS K, SALONITIS K, et al. An analytical model of the laser clad geometry[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2007, 32(1): 34-41.

[12] FATHI A, TOYSERKANI E, KHAJEPOUR A, et al. Pre-

- diction of melt pool depth and dilution in laser powder deposition[J]. Journal of physics D: applied physics, 2006, 39(12): 2613.
- [13] NAKKI J, TUOMINEN J, VUORISTO P. Effect of minor elements on solidification cracking and dilution of alloy 625 powders in laser cladding[J]. Journal of laser applications, 2017, 29(1): 012014.
- [14] JENDRZEJEWSKI R, KREJA I, SLIWINSKI G. Temperature distribution in laser-clad multi-layers[J]. Materials science and engineering: A, 2004, 379(1): 313-320.
- [15] 张庆茂, 刘喜明, 孙宁, 等. 送粉式宽带激光熔覆——搭接基础理论的研究[J]. 金属热处理, 2001(2): 25-28.
- ZHANG Qing-mao, LIU Xi-ming, SUN Ning, et al. Fundamental investigation on overlapping coating formed by broad-beam powder feeding cladding[J]. Heat treatment of metals, 2001(2): 25-28.
- [16] 顾玉芬, 苏艳文, 朱明, 等. 激光-氩弧焊电弧复合热源表面熔覆工艺及成形特征[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(12): 1902-1905.
- GU Yu-fen, SU Yan-wen, ZHU Ming, et al. Technology and forming characteristics of laser tungsten inert gas hybrid heat source surface cladding[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(12): 1902-1905.
- [17] 闫世兴, 董世运, 徐滨士, 等. Fe314 合金熔覆层残余应力激光冲击消除机理[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 102-107.
- YAN Shi-xing, DONG Shi-yun, XU Bin-shi, et al. Mechanics of removing residual stress of Fe314 cladding layers with laser shock processing[J]. Chinese journal of laser, 2013, 40(10): 102-107.