

# 机械振动作用下铁基涂层熔覆角的模型构建及其变化规律研究

陶喜德 刘洪喜\* 张晓伟 蒋业华

昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093

**摘要** 采用机械振动辅助激光熔覆工艺在45钢表面制备了Fe55合金涂层,通过光学图像分析仪观察了熔覆层的几何形貌,结合AutoCAD软件标注了涂层高度、宽度和熔覆角等几何特征参数,探讨了激光比能、振幅、频率等工艺参数对涂层熔覆角的影响,借助响应面分析法提供的二阶多项式构建了能明确表征熔覆角与激光比能、振幅、频率之间隐式关系的函数模型。结果表明,机械振动作用下激光熔覆层的熔覆角大于无机械振动的涂层。在相同激光比能和振幅条件下,频率200 Hz比频率100 Hz的熔覆角大,且在振幅为0.10 mm时熔覆角最小。采用最小二乘法优化后的函数模型所计算的熔覆角优于现有几何模型计算值,更接近实际测量结果。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 机械振动; 涂层熔覆角; 函数模型; 几何形貌

中图分类号 TN249; TG156.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0303014

## Cladding Angle Model and Variation Law of Fe-Based Coating Fabricated by Mechanical Vibration Assisted Laser Cladding

Tao Xide Liu Hongxi Zhang Xiaowei Jiang Yehua

*School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology,  
Kunming, Yunnan 650093, China*

**Abstract** Fe55 alloy coating is fabricated on 45 steel surface through laser cladding assisted mechanical vibration process. The geometry morphology of cladding coating is observed by optical microscope. Utilizing AutoCAD, geometry parameters of cladding coating height, width and cladding angle are marked to explore the effects of laser specific energy, amplitude and frequency of mechanical vibration on cladding angle. By means of second-order polynomial of response surface analysis method, a function model being able to express the relationship among cladding angle, laser specific energy, amplitude and frequency is established. Results show that the cladding angle of laser cladding coating is greater when combined with mechanical vibration. Provided with the same laser specific energy and amplitude of vibration, the cladding angle under frequency of 200 Hz is larger than the one with frequency of 100 Hz, and the cladding angle reaches the minimum value when the amplitude is 0.10 mm. The calculated value of cladding angle using the least squares function models is superior to the existing geometry model by being closer to the actual measurement result.

**Key words** laser technique; laser cladding; mechanical vibration; cladding angle; function model; geometry morphology

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 310.1515

## 1 引 言

激光熔覆亦称激光包覆或激光熔敷,是通过在基材表面添加熔覆材料,利用高能密度的激光束使之与基材表面薄层一起熔凝,并快速凝固后形成稀释率极低、与基体呈冶金结合的表面涂层的一种表面改性技

收稿日期: 2014-09-15; 收到修改稿日期: 2014-11-10

基金项目: 陶喜德(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆表面改性方面的研究。E-mail: 516451187@qq.com

作者简介: 刘洪喜(1972—),男,博士,教授,主要从事离子束和激光束表面改性等方面的研究。E-mail: piiliuhx@sina.com

术。激光熔覆制备的涂层可显著改善基材的表面耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化及电气性能,以达到表面改性或修复的目的,既满足了在特定服役环境下对材料表面特殊性能的要求,又节约了大量贵重元素<sup>[1-3]</sup>。激光熔覆涂层的质量一般取决于激光功率、扫描速度、离焦量、送粉速度、保护气流和搭接率等工艺参数,而这些工艺参数之间又相互作用、相互影响、相互制约<sup>[4]</sup>。激光熔覆涂层的几何形貌特征主要有熔覆层高度、熔覆层宽度、熔覆层截面积和熔覆角。单道熔覆层的几何形貌对于多道大面积熔覆层的质量控制至关重要。其中,熔覆角影响着多道搭接涂层的搭接率以及单道涂层的致密性,而熔覆角本身又受熔覆粉末颗粒尺寸、粉末同基材的润湿性以及保护气流速度等因素影响。故有关激光熔覆涂层几何形貌对涂层质量影响的研究得到了国内外学者的普遍关注<sup>[5-8]</sup>。

Cheikh等<sup>[9]</sup>通过定义单道激光熔覆层截面形状特征参数,采用线性相关法处理截面数据,建立了工艺参数组合与截面形状特征参数的函数关系。张庆茂等<sup>[10]</sup>研究了单位质量熔覆材料激光比能和作用时间对熔覆层高度、宽度的影响。结果表明,随着激光比能和作用时间的增加,涂层横截面积呈线性规律增加,且涂层的横截面积随着送粉速度的增加更为显著。Huang等<sup>[11]</sup>探讨了激光功率、送粉速度、扫描速度对熔覆层高度和深度的影响。结果显示,扫描速度和激光功率增加会导致熔覆层高度减小、深度增加;送粉速度增加则导致熔覆层高度增大、深度减少。高士友等<sup>[12]</sup>建立了单一参数控制横截面形貌的曲线方程,并用所测得的面积和熔覆角数据验证了横截面形貌曲线方程。Onwubolu等<sup>[13]</sup>利用响应面分析法(RSM)和分散搜优技术研究了横截面形貌并预测了最优条件下熔覆角与各工艺参数之间的相互关系。

有关机械振动在工业领域的应用,已有通过机械振动来改善铸造合金晶粒度,并证明机械振动对金属凝固过程中显微组织和晶粒细化有着明显促进作用的报道<sup>[14]</sup>。同时,由于机械振动影响熔池内部的流动,减少成分过冷区大小,打碎枝晶而促进等轴晶形成,大大降低了焊缝宏观偏析、气孔和夹杂等缺陷,故后来这项技术也逐渐被应用到焊接领域。在激光熔覆方面,本课题组近几年将机械振动引入到涂层制备过程中,发现机械振动辅助作用下的激光熔覆涂层中晶粒生长形态和显微组织不同于普通激光熔覆,熔覆层气孔和裂纹明显减少,涂层耐磨耐蚀性能和使用寿命得到了显著提高<sup>[15-16]</sup>。但机械振动对熔覆涂层几何形貌,尤其是涂层与基体界面之间熔覆角的研究还鲜见涉及。鉴于此,本文探讨了机械振动作用下激光比能、振幅、频率等工艺参数对单道熔覆层宽度、高度和熔覆角的影响,分析了不同工艺参数下熔覆角的变化规律,构建了能明确表达熔覆角与激光比能、振幅、频率之间隐式关系的二阶多项式函数模型,以期在改善激光熔覆涂层质量和性能方面提供理论和工艺基础。

## 2 实验材料和方法

基体材料采用尺寸为100 mm×40 mm×6 mm的45钢,经配置好的酸洗液酸洗除锈,表面打磨去氧化皮,然后分别用无水乙醇和丙酮各超声清洗15 min,以除去表面残存的氧化物和油污等杂质。熔覆材料选用Fe55自熔性合金粉末(粉末粒度100 μm),粉末熔覆前置于干燥箱中,在100 ℃环境下干燥24 h。

熔覆涂层制备在GS-TFL6000A型6 kW横流多模CO<sub>2</sub>激光器及其配套的五轴四联动西门子数控机床上完成。采用同步侧向送粉,送粉速度16 g/min,离焦量50 mm,圆形光斑尺寸5 mm,氩气(纯度99.99%)侧向保护,气流量25 L/min,单道扫描长度80 mm。激光熔覆过程中,引入ESS-025型标准振动系统同步施加机械振动(正弦波模式)。振幅分别选0.05、0.10、0.15 mm,振动频率为100 Hz和200 Hz。涂层制备时,通过调节激光功率和扫描速度来控制涂层质量。有关激光功率和扫描速度等参数对涂层质量(包括宏观几何形貌和熔覆角)的影响可用激光比能来表示<sup>[17]</sup>,即

$$E_s = \frac{kP}{D \cdot V_s} \quad (1)$$

式中 $k = 1.27$ ,  $E_s$ 为激光比能(J/mm), $D$ 为圆形光斑直径(mm), $V_s$ 为激光扫描速度(mm/s), $P$ 为激光功率(W)。

涂层制备后,沿激光扫描的垂直方向用线切割截取10 mm×10 mm×6 mm的试块制成金相试样,试样表面均经砂纸研磨抛光后用王水(体积比 $V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HCl}} = 1:3$ )腐蚀。利用LEICADFC280型光学图像分析仪观察熔覆层几何形貌,并将横截面形貌图以光栅形式导入AutoCAD软件按比例1:1来标注熔覆层高度 $H$ 、宽度 $W$ 和熔覆角 $\alpha$ 。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 机械振动对熔覆角影响

熔覆层横截面几何形貌与熔池内部热力学、动力学和凝固特性相关。图1所示的是激光比能为92.21 J/mm<sup>2</sup>,施加机械振动前后熔覆 Fe55 涂层横截面的几何形貌。可看出,机械振动前后熔覆层的轮廓线均为一段圆弧,这是因为在相同送粉速度下,基于质量守恒,使得横截面轮廓保持基本一致。未加机械振动[图1(a)]的熔覆层高度高于机械振动作用下[图1(b)]的熔覆层高度,但机械振动作用下熔覆层的宽度却比未施加机械振动的熔覆层要宽,尤其是图1(b)中熔覆层的熔覆角(144.83°)明显大于图1(a)(134.77°)。在机械振动作用下,激振力改变了熔池内部的对流,熔覆层更加致密,故使得熔覆层高度降低。同时,由于在单位时间内的粉末输送量相等,到达熔池内的粉末质量亦相等,因而导致熔覆层宽度增加。

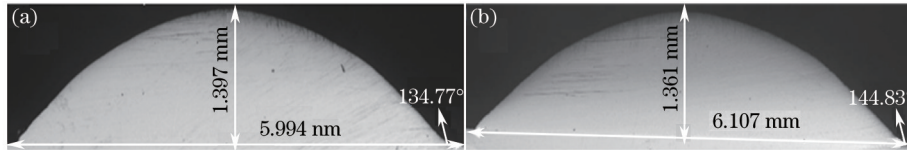


图1 激光熔覆 Fe55 涂层横截面几何形貌( $E_s=92.21 \text{ J/mm}^2$ )。(a) 无机械振动; (b) 机械振动( $A=0.05 \text{ mm}$ ,  $f=200 \text{ Hz}$ )

Fig.1 Cross-section geometric morphology of laser cladding Fe55 coating ( $E_s=92.21 \text{ J/mm}^2$ ).

(a) Without mechanical vibration; (b) mechanical vibration ( $A=0.05 \text{ mm}$ ,  $f=200 \text{ Hz}$ )

一般情况下,激光熔覆层与基体之间熔覆角的几何模型可用图2表示。根据图2和文献[18],引入如下数学计算公式:

$$\alpha = 180^\circ - 2 \arctan \frac{2H}{W} \quad (2)$$

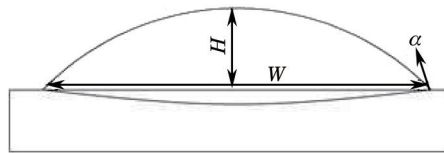


图2 激光熔覆层几何模型

Fig.2 Geometric model of laser cladding coating

由(2)式可知,当激光熔覆层高度  $H$  减少,宽度  $W$  增加时,  $\frac{2H}{W}$  减少,  $\arctan \frac{2H}{W}$  减少,  $\alpha$  增大。这与图1所示的实际测量结果符合。

通常,熔覆层表面形状由材料热物性参数、表面张力、润湿特性和激光熔覆工艺等共同决定。其中,表面张力变化对熔覆层形貌的影响尤为显著,而表面张力又与涂层与基体之间的熔覆角密切相关。激光熔覆时,做周期性上下简谐振动的激振力垂直于基材表面,粉末颗粒刚好到达基材表面就受到高能激光束照射,使之很快熔化形成熔滴向两边摊开。由于受到一定液态表面张力的束缚,熔化的熔滴并不会摊开形成一个平面,而且随着粉末向熔池的持续输送,熔覆层高度逐渐增加。激光熔覆快速熔化和凝固的特点决定了熔池内部的温度并非均匀一致,高斯热源下的激光束,中间温度高,四周温度低,大的温度梯度使得熔池内液态金属表面产生很高表面张力。机械振动提供的激振力改变了熔池内液态金属的流动形式,从而改变了熔池内部的温度梯度,使得温度趋于一致,温度梯度得以减少。根据文献[19],表面张力梯度与温度之间存在着如下关系:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial T} \quad (3)$$

式中  $\frac{\partial \gamma}{\partial x}$  为表面张力梯度,  $\frac{\partial T}{\partial x}$  为温度梯度,  $\frac{\partial \gamma}{\partial T}$  为材料本身的特征常数。可见,  $\frac{\partial T}{\partial x}$  减少时,  $\frac{\partial \gamma}{\partial x}$  亦减少。

激光熔覆时,熔覆层表面受到如图3所示的气-液、气-固、固-液三相表面张力约束。处于平衡状态时,三相表面张力之间存在着由 Yong-Laplace 方程确定的关系式:

$$\cos \theta = \frac{\delta_{CS} - \delta_{LS}}{\delta_{CL}} \quad (4)$$



式中  $\delta_{GS}$ 、 $\delta_{LS}$ 、 $\delta_{GL}$  分别为气-固、液-固、气-液之间的表面张力,  $\theta$  为接触角(与熔覆角互补)。在机械振动作用下,由于  $\delta_{LS}$  和  $\delta_{GL}$  减少,故  $\cos\theta$  增大,  $\theta$  减少,因而熔覆角  $\alpha$  增大。这也反应了机械振动情况下熔覆角  $\alpha$  变化与实际测量值变化的一致性。

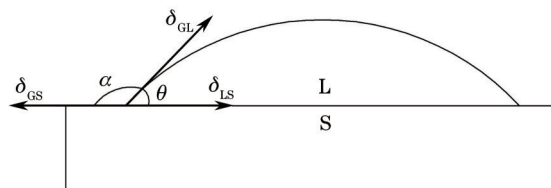


图3 接触角与表面张力之间的关系

Fig.3 Relationship between contact angle and surface tension

图4所示为激光比能为  $E_s=83.02 \text{ J/mm}^2$ , 施加机械振动前后激光熔覆多道搭接涂层的宏观形貌。从图4(a)可看出,相邻两道之间存在缺陷,搭接效果不好,且涂层边缘存在夹杂,而对于施加机械振动的图4(b),则每道之间搭接致密,涂层边角无夹杂,涂层完整性好。产生这种现象的原因是:施加机械振动后,涂层表面张力减少,致使熔池束缚减弱,熔覆层宽度增加、高度减少,继而熔覆角增大。因此,可以认为熔覆角适当增大有利于大面积多道搭接。

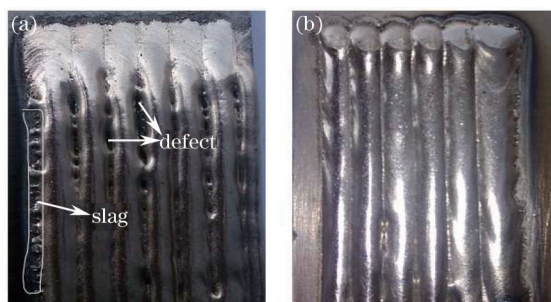


图4 (a)无机械振动和(b)机械振动( $A=0.05 \text{ mm}$ ,  $f=200 \text{ Hz}$ )作用下激光熔覆多道搭接涂层的宏观形貌

Fig.4 (a) Without mechanical vibration and (b) with mechanical vibration ( $A=0.05 \text{ mm}$ ,  $f=200 \text{ Hz}$ ) macro morphologies of overlap coating

### 3.2 工艺参数对熔覆角的影响

图5所示为不同激光比能下熔覆角  $\alpha$  与振幅  $A$  和频率  $f$  之间的对应关系。可看出,在相同激光比能  $E_s$  和振幅  $A$  下,频率  $200 \text{ Hz}$  比  $100 \text{ Hz}$  时的熔覆角要大  $1^\circ \sim 10^\circ$ 。由于  $f$  是单位时间内的作用次数,  $f$  越高时,振动作用次数越多,熔覆层致密度也相应提高,高的频率会加速熔池内部原子团簇的无规则运动,使得原子间结合力削弱,从而表面内能和表面张力降低,接触角减少,熔覆角增大。在相同激光比能和频率条件下,振幅为  $0.05$ 、 $0.10$ 、 $0.15 \text{ mm}$  时,熔覆角也在发生变化,且振幅为  $0.10 \text{ mm}$  时,熔覆角最小。这是因为选用的正弦模式振动方程为

$$y = A \sin(2\pi ft), \quad (5)$$

$$a = y'' = -4\pi^2 A f^2 \sin(2\pi ft), \quad (6)$$

式中  $y$  为位移( $\text{mm}$ ),  $A$  为振幅( $\text{mm}$ ),  $f$  为频率( $\text{Hz}$ ),  $t$  为时间( $\text{s}$ ),  $y''$  为位移二阶导数,  $a$  为加速度( $\text{mm/s}^2$ )。

从(6)式可看出,频率改变对原子团簇加速度影响较大。这也说明了在机械振动辅助作用下,频率对于熔覆角的影响作用更加显著。从理论上分析,随着激光比能  $E_s$  增加,熔覆角  $\alpha$  减少,粉末开始熔化的时间缩短,粉末熔入基材更多,熔池深度增加。但实际上,熔覆层高度  $H$  和宽度  $W$  并非单调性变化,熔覆角  $\alpha$  也存在波动。激光比能  $E_s$  越大,熔覆角随着频率  $f$  和振幅  $A$  变化的波动范围越小。出现这种现象的原因是熔覆层宽度  $W$  与光斑直径  $d$  之间存在着  $W=0.85d$  的对应关系<sup>[20]</sup>,在振动情况下,基材于垂直方向作振幅微小的简谐振动,离焦量存在稍许变动,导致光斑直径也在一个小范围内变动,亦即熔覆层宽度  $W$  的改变会影响高度  $H$  变化,从而导致熔覆角  $\alpha$  变化。

### 3.3 工艺参数和熔覆角之间的函数模型

在机械振动作用下,单道熔覆层的熔覆角  $\alpha$  与激光熔覆工艺和振动参数等诸多因素密切相关,而激光熔

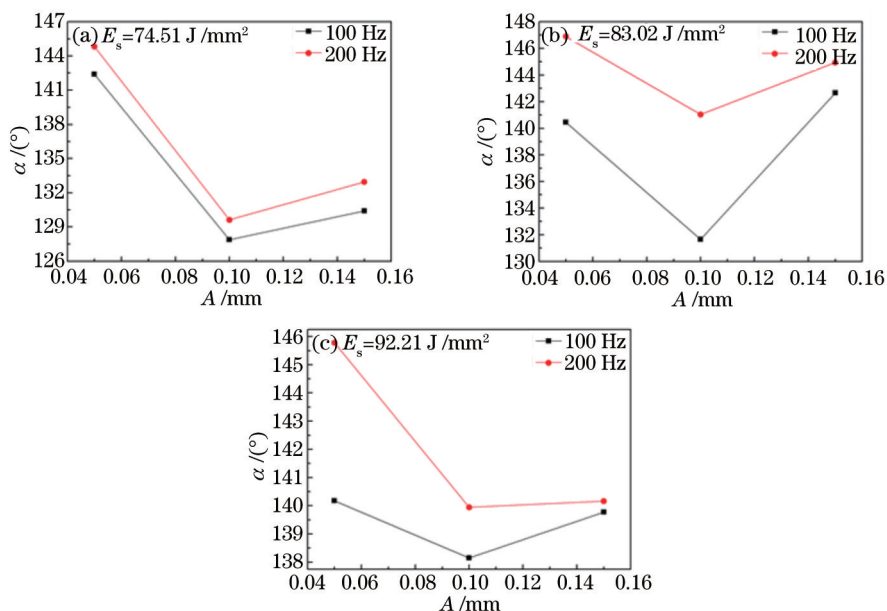


图5 不同激光比能 $E_s$ 下熔覆角角度 $\alpha$ 与振幅 $A$ 和频率 $f$ 之间的关系

Fig.5 Relationship among angle  $\alpha$ , amplitude  $A$  and frequency  $f$  under different  $E_s$  conditions

覆工艺可通过激光比能来综合体现,机械振动参数则主要涉及到振幅和振动频率,如果能建立一个反映激光比能 $E_s$ 、振幅 $A$ 、频率 $f$ 与熔覆角 $\alpha$ 之间的对应关系式,对于工艺参数优化选择和熔覆层质量控制无疑会起到非常重要的作用。因此,根据熔覆角 $\alpha$ 与激光比能 $E_s$ 、振幅 $A$ 、频率 $f$ 之间存在的非线性关系,结合文献[13]中利用响应面分析法提供的二阶多项式数学响应模型,构造了能明确表达机械振动作用下激光熔覆涂层熔覆角 $\alpha$ 与激光比能 $E_s$ 、振幅 $A$ 、频率 $f$ 之间的隐式功能函数多项表达式(即假设函数模型):

$$\alpha = kE_s^m A^n f^l, \tag{7}$$

式中 $k$ 为系数, $m$ 、 $n$ 、 $l$ 均为参数。将(7)式边取对数得

$$\ln \alpha = \ln k + m \ln E_s + n \ln A + l \ln f. \tag{8}$$

(8)式转换成了一个关于 $E_s$ 、 $A$ 、 $f$ 三因素的多项式。依据表1所示不同工艺下实际测得的激光熔覆层几何特征参数,采用最小二乘法处理,可求得(7)式中各参数值分别为: $k=291.56$ , $m=-0.0381$ , $n=0.0468$ , $l=-0.2417$ 。

表1 工艺参数和测量值

Table 1 Processing parameters and measured values

Sample No.	Processing parameters			Geometric parameters of cladding layer			
	$A$ / mm	$f$ / Hz	$E_s$ / (J·mm <sup>-2</sup> )	Measured angle ( $\alpha_1$ ) / (°)	Height of coating ( $H$ ) / mm	Width of coating ( $W$ ) / mm	Theoretical angle ( $\alpha_3$ ) / (°)
1	0.05	100	75.41	140.46	6.128	1.379	131.54
2	0.05	200	75.41	146.89	6.096	1.321	133.17
3	0.05	100	83.02	140.17	6.092	1.336	133.17
4	0.05	200	83.02	145.78	6.032	1.185	137.10
5	0.05	100	92.21	142.40	6.326	1.281	135.90
6	0.05	200	92.21	144.83	6.107	1.361	131.95
7	0.10	100	75.41	131.66	6.036	1.201	136.60
8	0.10	200	75.41	141.04	6.062	1.186	137.26
9	0.10	100	83.02	138.15	5.988	1.246	134.81
10	0.10	200	83.02	139.94	6.023	1.204	136.42
11	0.10	100	92.21	127.89	5.899	1.565	124.10
12	0.10	200	92.21	129.63	6.031	1.515	126.65
13	0.15	100	75.41	142.66	5.914	1.350	130.92
14	0.15	200	75.41	144.94	5.776	1.149	136.61
15	0.15	100	83.02	139.78	5.772	1.393	128.47
16	0.15	200	83.02	140.16	5.741	1.288	131.67
17	0.15	100	92.21	130.41	6.019	1.312	132.89
18	0.15	200	92.21	132.95	5.875	1.420	128.40

将(1)式代入(8)式可求得

$$\alpha = 295.56 \left( \frac{1.27P}{DV_s} \right)^{-0.0381} A^{0.0468} f^{-0.2417} \quad (9)$$

图6所示为实际测量值与(2)式所示函数模型计算值和(8)式所建立的函数模型计算值三者之间的对应关系。从关系曲线可以看出,所构建的函数模型计算值更贴近实际测量值,误差较小,优于根据常规公式(2)式的计算值。可见,所构建的函数关系式具有一定的参考计算意义,即可通过(9)式来优化机械振动作用下的振动参数和激光熔覆工艺参数,以便更合理地控制熔覆层质量。

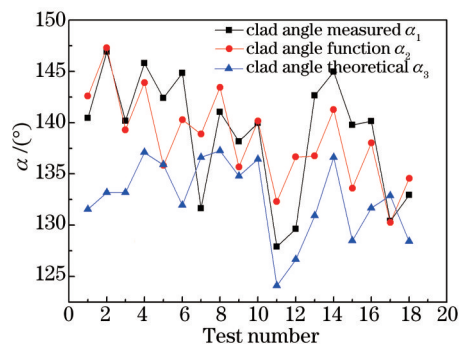


图6 实际测量、函数计算和模型计算的熔覆角

Fig.6 Cladding angle value of actual measurement, function and model calculation

## 4 结 论

1) 采用机械振动辅助激光熔覆新工艺在45钢表面制备了Fe55涂层。机械振动作用下的熔覆角大于无机械振动的熔覆角,说明机械振动对激光熔覆层形貌影响较大。同时,熔覆角适当增大时有利于大面积多道搭接。

2) 机械振动的振幅和频率等参数对熔覆角均有影响。频率高时熔覆角大,振幅对熔覆角的影响是先减小后增大,在振幅为0.10 mm时,熔覆角最小。

3) 构建了能明确表征熔覆角与激光比能、振幅、频率之间隐式关系的函数模型。与常规熔覆角计算数学模型相比,所构建的函数模型计算值更接近实际测量值,误差较小,更利于合理控制熔覆层质量和进行大面积多道搭接。

## 参 考 文 献

- 1 Li Meiyang, Han Bin, Gao Ning, *et al.*. Microstructure, composition and corrosion resistance of laser cladding Fe-based coatings with high hardness[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503003  
李美艳, 韩彬, 高宁, 等. 高硬度铁基熔覆层组织、成分及耐腐蚀性[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503003.
- 2 Peilei Zhang, Hua Yan, Chengwu Yao, *et al.*. Synthesis of Fe-Ni-B-Si-Nb amorphous and crystalline composite coatings by laser cladding and remelting[J]. Surf Coat Tech, 2011, 206(6): 1229-1236.
- 3 Xinhong Wang, Min Zhang, Shiyao Qu. Development and characterization of (Ti, Mo) C carbides reinforced Fe-based surface composite coating produced by laser cladding[J]. Opt Laser Eng, 2010, 48(9): 893-898.
- 4 Yuan Qinglong, Feng Xudong, Cao Jingjing, *et al.*. Research progress in laser cladding technology[J]. Mater Rev, 2010, 24(2): 112-116.  
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(2): 112-116.
- 5 Wenyan Gao, Shusen Zhao, Falan Liu, *et al.*. Effect of defocus manner on laser cladding of Fe-based alloy powder[J]. Surf Coat Tech, 2014, 248(15): 54-62.
- 6 J T Hofman, D F Lange, B Pathiraj, *et al.*. FEM modeling and experimental verification for dilution control in laser cladding[J]. J Mater Process Technol, 2011, 211(2): 187-196.
- 7 S Santhanakrishnan, F R Kong, R Kovacevic. An experimentally based thermo-kinetic hardening model for high power direct diode laser cladding[J]. J Mater Process Technol, 2011, 221(7): 1247-1259.
- 8 Liu Hao, Yu Gang, He Xiuli, *et al.*. Three-dimensional numerical simulation of transient temperature field and coating geometry in

- powder feeding laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1203007.
- 刘 昊, 虞 钢, 何秀丽, 等. 送粉式激光熔覆中瞬态温度场与几何形貌的三维数值模拟[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1203007.
- 9 H E Cheikh, B Courant, S Branchu, *et al.*. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process[J]. Opt Laser Eng, 2012, 50(3): 412-413.
- 10 Zhang Qingmao, Zhong Minlin, Yang Sen, *et al.*. The relationship between the processing parameters and the qualities of the coatings formed by powder feeding laser cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(4): 51-55.
- 张庆茂, 钟敏霖, 杨 森, 等. 送粉式激光熔覆层质量与工艺参数之间的关系[J]. 焊接学报, 2001, 22(4): 51-55.
- 11 Huang Yongjun. Characterization of dilution action in laser-induction hybrid cladding[J]. Opt Laser Technol, 2011, 43(2): 965-973.
- 12 Gao Shiyu, Li Jian, Li Chenguang, *et al.*. Research on the variation regularity of single laser tracks cross-section morphology during laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503010.
- 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.
- 13 C Onwubolu, J P Davim, C Oliveira, *et al.*. Prediction of clad angle in laser cladding by powder using response surface methodology and scatter search[J]. Opt Laser Technol, 2007, 39(6): 1130-1134.
- 14 Zhong Zhao, Zitian Fan, Xuanpo Dong, *et al.*. Influence of mechanical vibration on the solidification of a lost foam cast 356 alloy[J]. China Foundry, 2010, 7(1): 24-29.
- 15 Hongxi Liu, Chuanqi Wang, Xiaowei Zhang, *et al.*. Improving the corrosion resistance and mechanical property of 45 steel surfaces by laser cladding with Ni60CuMoW alloy powder[J]. Surf Coat Tech, 2013, 228(8): 296-300.
- 16 Wang Chuanqi, Liu Hongxi, Zhou Rong, *et al.*. Characteristic behaviors of particle phases in NiCrBSi-TiC composite coating by laser cladding assisted by mechanical vibration[J]. Acta Metall Sin, 2013, 49(2): 221-228.
- 王传琦, 刘洪喜, 周 荣, 等. 机械振动辅助激光熔覆 NiCrBSi-TiC 复合涂层中颗粒相行为特征[J]. 金属学报, 2013, 49(2): 221-228.
- 17 Zhang Xiaowei, Liu Hongxi, Jiang Yehua, *et al.*. Laser *in situ* synthesized TiN/Ti<sub>3</sub>Al composite coatings[J]. Acta Metall Sin, 2011, 47(8): 1086-1093.
- 张晓伟, 刘洪喜, 蒋业华, 等. 激光原位合成 TiN/Ti<sub>3</sub>Al 基复合涂层[J]. 金属学报, 2011, 47(8): 1086-1093.
- 18 H J Bartsch. Handbook of Mathematical Formulas[M]. New York: Academic Press, 1974. 528.
- 19 Zhenxia Liu. Modeling and numerical simulation on laser remelting and cladding[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003: 81-100.
- 20 Shengfeng Zhou, Xiaoqin Dai, Haizhong Zheng. Analytical modeling and experimental investigation of laser induction hybrid rapid cladding for Ni-based WC composite coatings[J]. Opt Laser Technol, 2011, 43(6): 613-621.

栏目编辑: 宋梅梅