

# 空间变姿态激光堆积变径回转体成形技术研究

孟伟栋 石世宏 石拓\* 傅戈雁 史建军 杨轶 王涛

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

**摘要** 基于激光内送粉技术,借助6轴机器人实现了光头空间变姿态/变方向分层激光堆积成形。重点研究了连续变换基板空间角度对熔道形貌的影响;分析了空间变姿态/变方向激光堆积的难点和关键技术;进行了空间连续变姿态/变方向实体成形试验,并对成形件的壁厚、组织、显微硬度进行了分析。结果表明,随基板倾斜角度增大,熔池最大偏移量为0.06 mm,重力对熔池的流动影响不明显;采用切向分层技术、熔道变角度生长自适应技术以及轴线偏移补偿技术有效地解决了“花瓶”状变径回转体激光成形堆积的难点。成形件与基板为冶金结合,熔道不同区域的组织和显微硬度各有不同,成形组织整体较为细密均匀,区域显微硬度变化较小;成形件大角度变化处,显微硬度有一定下降,成形件小角度变化处,显微硬度无明显改变。

**关键词** 激光技术;激光成形;光内送粉;空间;变姿态/变方向

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1003006

## Forming Technology Research of Laser Accumulation of Reducing Solid of Revolution with Changing Laserhead Posture

Meng Weidong Shi Shihong Shi Tuo Fu Geyan Shi Jianjun Yang Shi Wang Tao

*School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China*

**Abstract** Based on the internal powder feeding technology, laser forming of variable laserhead space posture/direction in the laser accumulation process is realized with 6-axis robot. The effects of continuously variable spatial angle of substrate on the cladding morphology are studied. The difficulties and key technologies of spatial variable posture in laser accumulation process are analyzed. Laser forming experiment of a metal part with continuously varying spatial angle of laserhead is conducted. The formed part microstructure, thickness and microhardness are analyzed. The experimental results show that the offset of cladding layers increase and the max value of offset is 0.06 mm. The difficult of space variable posture laser accumulation are solved effectively by tangential layering technology, axis offset compensation technology and cladding layer growth adaptive technology solve. The formed part combines well with the substrate metallurgy. The microstructure of the “vase” is dense and uniform relatively, and the overall microhardness value changes small. At large angle changes, the microstructure of formed parts has some porosity and slag, and with a larger microhardness decline. At small angle changes, microhardness has no clear downward.

**Key words** laser technique; laser forming; internal powder feeding; space; variable laserhead posture/direction

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 000.2170

## 1 引 言

激光同步送料熔覆成形技术是从20世纪90年代初期发展起来的一项先进制造技术,能够实现高性能复杂结构金属零件的无模具、快速、全致密近净成形<sup>[1-3]</sup>。印度的印多尔拉贾·拉曼拉先进技术中心的Paul等<sup>[4]</sup>利用专门为立面熔覆设计的光头实现在空心圆柱体表面进行激光熔覆试验。美国南卫理公会大学Dwivedi等<sup>[5]</sup>搭建了一种基于激光快速成形技术的制造系统,直接成形得到枝状结构的金属件。清华大学钟敏霖等<sup>[6]</sup>

收稿日期: 2015-04-23; 收到修改稿日期: 2015-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(61475107、50975187)

作者简介: 孟伟栋(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光快速成形方面的研究。E-mail: 467751479@qq.com

导师简介: 石世宏(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事激光快速成形方面的研究。E-mail: shishihong@suda.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: tuo.shi@qq.com

研制了垂直面送粉喷嘴和垂直面送粉激光强化系统,适合于内侧和外侧垂直面送粉激光和合金化及不送粉熔凝、相变硬化。天津工业大学杨洗陈等<sup>[7-8]</sup>开发出一种激光再制造平台,实现了光头小角度的摆动熔覆。

激光同步送料熔覆成形是指在激光成形过程中,使用专门的送料系统将熔覆材料直接输送到激光作用区,在聚焦激光束的作用下,使得基材和熔覆材料同时熔化形成熔池,而后急速冷却形成熔道<sup>[9]</sup>。这种方法的实质是通过多层水平平行的二维层片依次叠层垂直堆积成为三维实体。目前同步送料法激光三维熔覆成形方法一般基于水平分层堆积,存在以下不足:1)悬垂结构件分层三维成形中由于无支撑而造成悬垂边界处上下层错位,轻者造成成形精度降低,形成表面“阶梯效应”;重者造成光粉漏失、熔池流淌,堆积成形不能持续;2)仅能完成直立(或小角度外倾)等简单结构成形以及实现在水平面、立面或小角度倾斜面的熔覆加工或成形,不能完成大角度外倾、悬臂或空腔等复杂结构成形。

本文提出基于光内送粉空间变姿态激光堆积方法,实现了空间连续变方向变姿态三维堆积成形。相对于其他送粉方式,光内送粉方式在空间变姿态激光成形方面有如下优势:

1)送粉喷嘴位于中空环形激光内中心的竖直位置,达到了光与粉的完全同轴,粉末正向竖直地输送到熔池中,粉末流没有焦点,有好的集束性。在空间变姿态加工过程中,一定范围内的离焦量波动不会影响粉末与激光聚焦的变化<sup>[10]</sup>。

2)保护气均匀分布在单束粉末的周边,可调节气压大小的环形准直保护气形成紧紧包围粉末的同轴环形压力气帘,进一步对粉末进行约束,减少粉末的发散,使得粉末有良好的集束性。保护气与粉末喷射方向一致,不会造成干涉,粉末细、挺、准、直,进入熔池,入射角为零,出射反弹量降低<sup>[11]</sup>。

3)空间变姿态下粉末具有较好的挺度。光头做变姿态空间运动时,环形准直保护气托载中心粉末形成射流垂直熔池表面喷向熔池并压向基面,大大减小了重力的影响,排除了光外送粉的多粉末、保护气方向相互干涉的影响,保证了光粉空间耦合稳定性。同时,形成的气托对空间熔池起到正压支撑作用,环形准直保护气能在熔池正面和侧面同时形成“气托”,使熔池紧贴基面凝固成形<sup>[12]</sup>。

## 2 光内送粉成形系统

如图1所示,光内送粉成形系统由IPG YLS-2000-CT光纤激光器、6轴联动(6个自由度)和可旋转式控制台(1个自由度)组成,机械手夹持光内送粉激光熔覆成形光头做空间运动,KUKA机器人运动的重复精度范围为0.015~0.2 mm,旋转式控制台转速范围为0°/s~30°/s。基于现有送粉方式中存在的不足之处和激光成形对送粉技术的要求,本实验室提出了“光束中空,粉管居中,光内送粉”的光内送粉方案及装置<sup>[13-16]</sup>,原理如图2所示。光纤激光器发出的激光束通过圆锥镜变换为环形光,再用环形聚焦镜聚焦成为环锥形激光束,实现了光、粉、气真正意义上的同轴,提高了粉末的利用率和光粉耦合的稳定性<sup>[17-18]</sup>。

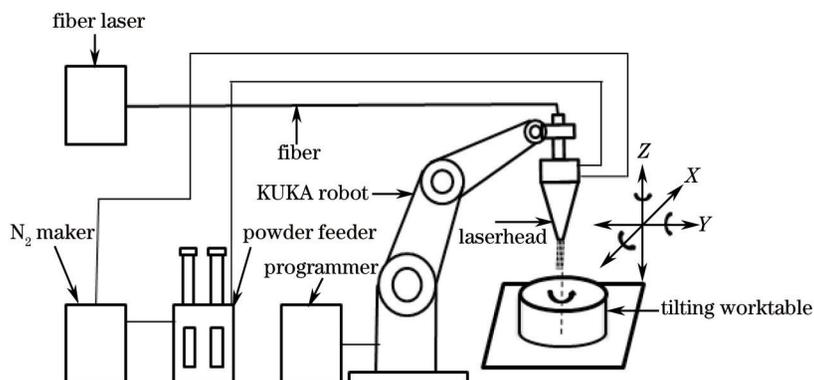


图1 空间变姿态激光堆积成形系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of laser accumulation system

成形试验用基材选用304不锈钢,经砂纸打磨、丙酮清洗对待加工表面进行预处理。成形材料选用-140/+200目(75~106 μm)的Fe313合金粉,化学成分(质量分数:%)为:0.1 C, 2.5~3.5 Si, 13~17 Cr, 0.5~1.5 B,余量为Fe;采用氮气作为保护气体。

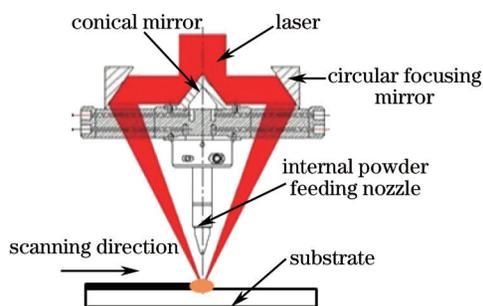


图2 光内送粉技术示意图

Fig.2 Schematic diagram of internal powder feeding technology

### 3 单道试验

试验过程中,在表1工艺参数下,基体固定在可倾式旋转工作台上,从 $0^{\circ}$ ~ $90^{\circ}$ 范围内每隔 $15^{\circ}$ 调整基体的倾斜角度 $\theta$ ,并通过编程相应地调整KUKA机器人使光头始终与基体表面垂直。基体倾斜角度及光头调整的角度如图3所示。试验后将成形试样沿垂直于扫描方向线切割,获得不同基板倾斜角度的截面如图4所示,将获得的截面试样放在金相显微镜下观察测量出单层熔道宽度 $w$ 、单层熔道高度 $h$ 以及偏移量(熔道最高点轴线位置偏离激光束轴线位置间的距离) $x$ ,具体结果分别如图5(a)和(b)所示

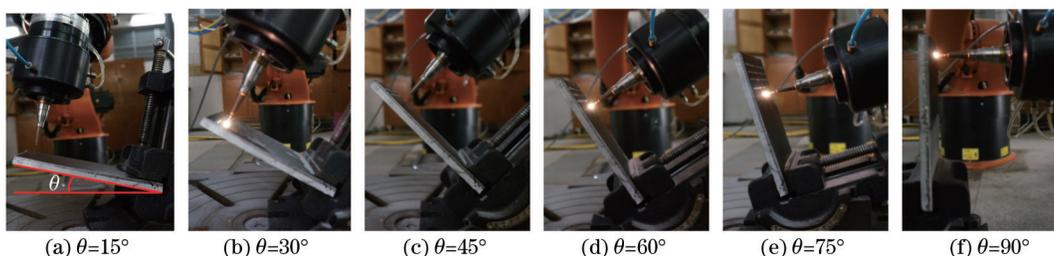


图3 基板不同倾斜角度下单道成形试验照片

Fig.3 Photos of cladding layer with different substrate inclined angles  $\theta$

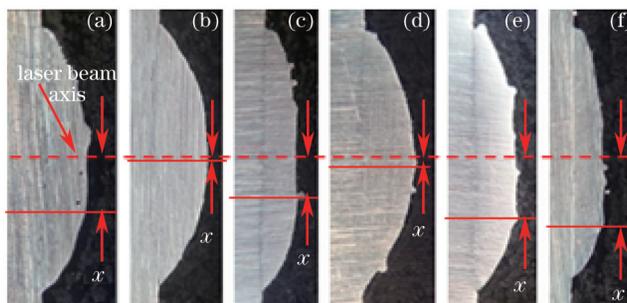


图4 不同倾斜角度下熔道单道截面轮廓图。(a)  $\theta=15^{\circ}$ ; (b)  $\theta=30^{\circ}$ ; (c)  $\theta=45^{\circ}$ ; (d)  $\theta=60^{\circ}$ ; (e)  $\theta=75^{\circ}$ ; (f)  $\theta=90^{\circ}$

Fig.4 Photos of cladding layer outline with different substrate inclined angles.

(a)  $\theta=15^{\circ}$ ; (b)  $\theta=30^{\circ}$ ; (c)  $\theta=45^{\circ}$ ; (d)  $\theta=60^{\circ}$ ; (e)  $\theta=75^{\circ}$ ; (f)  $\theta=90^{\circ}$

表1 激光熔覆试验工艺参数

Table 1 Process parameters of laser cladding

Laser power/W	Powder mass flow rate /(g/min)	Laser defocusing distance /mm	Scanning speed /(mm/s)	Carrier gas flow rate /(L/min)	Shielding gas pressure /MPa
600	8	-4	5	3	0.2

通过大量单道试验得到的空间熔道最优工艺参数,如表1所示。由图5可以看出,随基板倾斜角度增大,单层熔道高度逐渐降低;单层熔道宽度变化不大,几乎稳定在激光光斑直径2.2 mm左右(离焦量为-4时光斑直径为2.2 mm);熔道最高点轴线位置相对于激光轴线的偏移量的影响也不是很大,均在0.06 mm以下。说明在此工艺参数下随基板倾斜角度增大,重力对熔池的流动影响不明显。当激光功率增大、送粉速

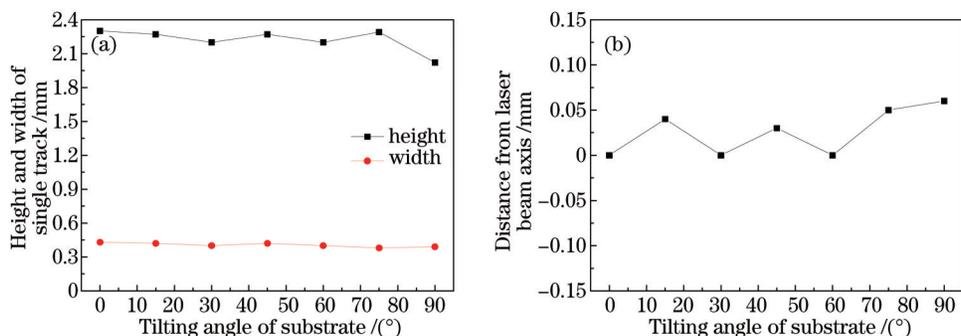


图5 基板不同倾斜角度的熔道尺寸。(a) 熔道宽度和高度; (b) 熔道偏移量

Fig.5 Cladding layer sizes with different inclined angles of substrate. (a) Width and height of cladding layer; (b) offset of cladding layer

## 4 变径回转体成形试验

空间变姿态激光堆积过程中,光头的姿态需要不断地变化来适应成形件的不同曲面的堆积。应用空间变姿态切向分层、空间变姿态轴线偏移补偿、空间熔道变角度生长自适应等技术,成功进行了“花瓶”状变径回转体成形试验。

### 4.1 空间变姿态切向分层技术

在传统激光堆积成形过程中,光头一般保持竖直,在水平方向上做不同的路径扫描,从而获得具有一定形状的成形件。从扫描路径上看,下一层的路径是上一层路径的重复或者是某些位置的路径减少。实际中有很多零部件有倾斜面,甚至悬臂,重复路径扫描的方式显然无法获得此类成形件。如图6(a)所示,在激光堆积过程中,光头始终保持竖直方向,而在水平方向相对已成形体表面给出不同的偏移量,即水平分层的方式进行空间堆积成形。但是随着角度的变大,层与层之间的错位量越来越大,逐渐达到半错位甚至全错位,导致熔池流淌,无法继续堆积,同时熔道上下层的错位增大了成形件的表面粗糙度。

切向分层法如图6(b)所示:成形件沿着轮廓的切线方向分层,同时改变光头的姿态,使得光头轴线方向始终与已成形基体表面的中心轴线方向一致。成形件轮廓的切线方向连续变化,则光头的姿态需要连续变化,才能保证与中心轴线的方向保持一致。该方法使得激光堆积过程中,上下层熔道完全结合,有效解决了因错层分层造成的成形件表面粗糙以及成形件形状受限制等问题。

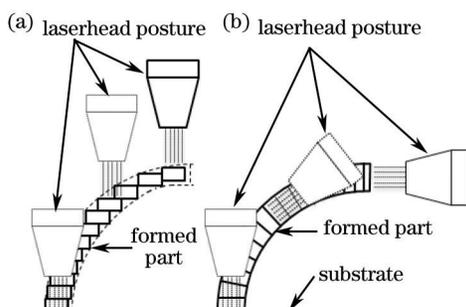


图6 不同分层方式激光堆积示意图。(a) 水平分层堆积; (b) 法向分层堆积模型

Fig.6 Schematic diagram of laser accumulation with different layered ways. (a) Horizontal layered accumulation; (b) normal direction layered accumulation

对于空间曲面,目前由于受到设备以及控制方面的限制,无法实现连续光滑曲面的过渡。本试验对于曲面的处理采用多段小直线拟合曲面的方式,即光头做间断性连续角度变化。图7中每段直线对应一个光头角度,将不同的角度下堆积得到的成形体合成后看作是曲面的拟合体。每段直线长度越小,角度变换越多,拟合效果也越好。

激光成形堆积圆弧段处,以 $\alpha$ 为单位角度将圆弧等分成数段,用每等分段的弦来拟合圆弧,当 $\alpha$ 较小时,可以近似圆弧为

$$\omega \approx L = 2R \sin(\alpha/2), \quad (1)$$

式中 $\omega$ 为弧长, $L$ 为弦长, $R$ 为圆弧半径。

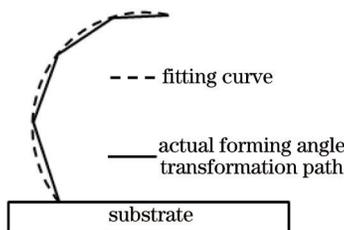


图7 曲面成形光头角度变换示意图

Fig.7 Schematic diagram of laserhead angle change with curved surface accumulation

#### 4.2 空间变姿态轴线偏移补偿技术

在空间变姿态激光堆积成形过程中,光头的姿态需要不断地变化来适应成形件的不同形状。由于本试验采用的是KUKA 机器人,所以光头的角度变化是由机器人绕其坐标基点(角度变换基点)旋转来实现的,角度变换之后要求光斑能够完全覆盖成形基体的表面,否则容易形成阶梯状凸点,导致成形件的表面粗糙度增大。角度变换基点一般是固定的,通常情况下可将之定义为某一离焦量的位置。在实际成形过程中,不同的成形件需要选择不同的离焦量,而机器手在旋转的过程中无法通过自动判断光斑的位置来调整光头的位置。

如图8(a)所示,位置1为已成形的基体,接下来需要将光头变换一个角度至位置2进行成形,由于角度变换基点与实际离焦量的位置不重合,导致角度变换后的光斑无法完全覆盖已成形基体表面,这样容易在新的成形体和已成形成基体的连接处形成凸点。为解决这一问题,需要在光头位置变换到位置2后调整机器手,使光斑位置完全覆盖成形基体表面,即移动到位置3[如图8(b)所示],即以成形基体表面的中心为理想变换基点旋转后得到的位置。

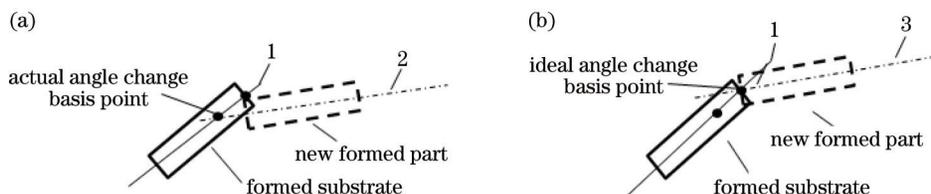


图8 光头变姿态过程中光斑位置变化示意图。(a)调整前;(b)调整后

Fig.8 Schematic diagram of laser spot position change in laserhead posture change process. (a) Before adjustment; (b) after adjustment

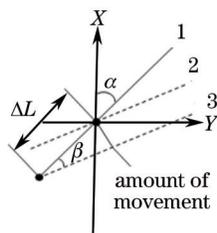


图9 光头位置调整示意图

Fig.9 Schematic diagram of laserhead position adjustment

为计算光头由位置2变换到位置3的移动量,将图8中描述的过程简化成如图9所示的示意图。图8中,假设光头在位置1与竖直方向的夹角为 $\alpha$ ,从位置1变换到位置2的角度变化为 $\beta$ (实际过程中 $\beta$ 值一般较小,这里做了放大处理),角度变换基点与实际离焦量的距离差值为 $\Delta L$ ,移动量为光头变换后光斑的中心点移动到理想变换基点的位移。在实际操作过程中,移动量是沿 $y$ 和 $z$ 方向分别移动后来完成的。通过几何计算可以得到

$$\Delta y = 2\Delta L \sin(\beta/2)\cos(\alpha + \beta/2), \quad (2)$$

$$\Delta z = 2\Delta L \sin(\beta/2)\sin(\alpha + \beta/2), \quad (3)$$

实际成形时,将(2)式和(3)式编写到机器人的控制程序中,即可对光头的位置变换实现自动控制。

#### 4.3 空间熔道变角度生长自适应技术

在空间变姿态激光堆积过程中,由于对成形件进行切向分层,使得成形件每一层内外部分的体积不同,

外部体积大于内部体积,如图10所示熔道内外侧截面面积  $S_{abef} > S_{bcde}$ ,这就要求角度变化后,熔道外侧生长量大,内侧生长量少,来适应成形件内外部分体积的不同。

如图10(a)所示,当激光堆积完成第  $n$  层时,此时的熔道表面为弧  $\widehat{abc}$ ,光头轴线  $L_1$  与熔道表面轴线一致。如图10(b)所示,堆积第  $n+1$  层之前,光头姿态在原有姿态基础上变化角度  $\theta$ ,使得变化后的光头轴线  $L_1$  与第  $n+1$  层熔道表面中心轴线  $L_2$  平行,并通过光头轴线的偏移补偿,使得角度变换之后的光斑能够完全覆盖已成形成基体第  $n$  层的表面即弧  $\widehat{abc}$ ,保证了变化后的光头轴线通过第  $n$  层基体表面中心点  $b$ ,同时也保证了成形件中心线上的离焦量保持不变。  $L_3$  是与  $b$  处具有相同离焦量的等离焦量线,可以明显看出离焦量  $a > b > c$  (激光堆积在负离焦量下进行),能量密度  $E_a > E_b > E_c$ ,在光内送粉量充足的条件下,  $a$  处熔覆的粉末量最多,其次是  $b$  处,  $c$  处熔覆的粉末量最小,使得熔道外侧 ( $abef$  区域) 的生长量大,内侧 ( $bcde$  区域) 的生长量小,适应了成形件内外部分体积不同的要求。

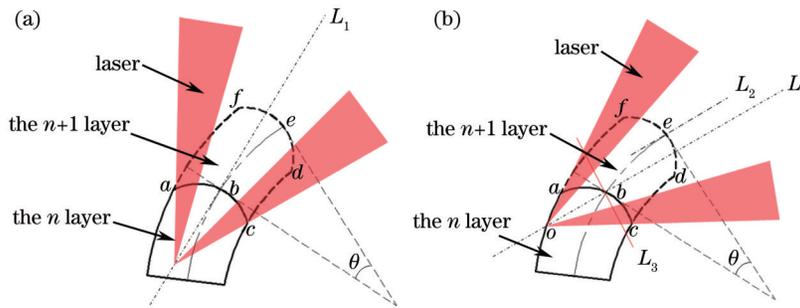


图10 空间熔道变角度生长自适应示意图。(a) 角度变换前; (b) 角度变换后

Fig.10 Schematic diagram of spatial cladding layer growth adaptive technology. (a) Before angle change; (b) after angle change

#### 4.4 试验结果与分析

本试验设计了“花瓶”状变径薄壁回转体,如图11所示。将回转体分为4个部分,依据堆积顺序分别用  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  表示。  $a$  段为平面堆积回转体;  $b$  段为半径为 50 mm 的内圆弧堆积;  $c$  段为半径为 100 mm 的外圆弧堆积;  $d$  段为平面堆积回转体和翻边;回转体壁厚为 2.2 mm。  $a$  段和  $b$  段的交界处为光头大角度变姿态堆积,变化角度为  $63^\circ$ ;  $b$  段和  $c$  段分别为光头连续小角度变姿态堆积,每次角度变化为  $2^\circ$ ;  $d$  段的翻边采用小圆弧过渡。

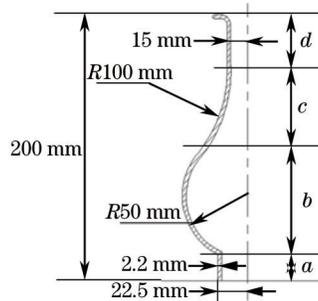


图11 “花瓶”状模型示意图

Fig.11 Schematic diagram of “vase” model

“花瓶”状变径回转体堆积过程中圆弧面的成形由小段直线拟合而成,每段直线的角度变换量  $\alpha = 2^\circ$ 。其基本的工艺参数如表1所示。图12为成形件堆积照片。从图13实物成形件可见,成形件表面较为光滑无裂纹,其中  $b$  段下部与  $c$  段上部分的表面粗糙度较大;其余区域表面光滑。

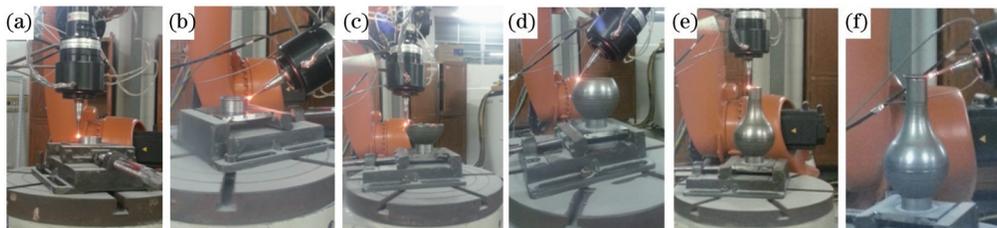


图12 “花瓶”状模型成形过程照片

Fig.12 Photos of “vase” model forming process



图13 成形件尺寸

Fig.13 Size of "vase"

#### 4.4.1 成形件壁厚分析

沿成形件堆积生长顺序,等距离地测量成形件壁厚,得到整体壁厚数值如图14所示。图14可见,其壁厚范围为2.1~2.5 mm,整体壁厚分布较为均匀。

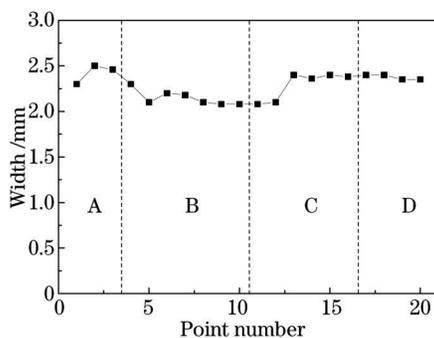


图14 “花瓶”状模型不同位置的壁厚

Fig.14 Thickness at different points of "vase" model

A区域的壁厚由起始2.3 mm增大到2.5 mm,后稳定在2.5 mm。这是由于基体没有经过预热,其温度为室温,熔池的热量迅速传向基体,熔道的宽度较小。随着熔道数的增加,熔池由三维散热变成二维散热,熔池温度逐渐上升,粉末的液态相变大,熔道的宽度变大。继续堆积,当熔池达到热平衡,熔池的温度趋于稳定,使得熔道的宽度趋于稳定。

B区域的壁厚由起始2.5 mm逐渐减少到2.1 mm。从图11可见,“花瓶”状变径回转体中心线为旋转中心,b部分的旋转半径由22.5 mm逐渐增大到50 mm,旋转一圈的时间由28.3 s增大到62.8 s。随着旋转半径的变大,成形件旋转一圈的时间变长,同一点处的上下层熔道的时间间隔变长,熔道的散热充分,熔池的热量累计减少,熔道宽度变小。

C区域的壁厚由起始2.1 mm逐渐增大到2.5 mm,后稳定在2.5 mm。从图11可见,c部分的旋转半径由35 mm逐渐减少到15 mm,旋转一圈时间由44 s减少到19 s。随着旋转半径的变小,成形件旋转一圈的时间减少,同一点处的上下层熔道的时间间隔变短,熔池的热量累计增加,熔池温度上升,熔道宽度变大。继续堆积,旋转半径的变化趋势变缓,变径堆积近似于半径为15 mm的圆筒堆积,当熔池达到热平衡,熔池的温度趋于稳定,熔道的宽度稳定在2.5 mm。

D区域的壁厚分布较为均匀,稳定在2.5 mm左右,这是由于d部分变径范围小,熔池的散热变化小,熔道厚度趋于稳定。

#### 4.4.2 成形件组织分析

沿成形件的母线方向线切割,经打磨、抛光,获得成形件与基体结合区的横截面试样,采用HNO<sub>3</sub>与HCL(体积比为1:3)混合溶液对横截面进行腐蚀,并采用了扫描电镜(SEM)观察熔道组织。

由图15可见,熔道与基体的熔合区域较小,这是由于基体在堆积之前没有预热处理,基体温度为室温,当熔覆第一层熔道时,熔化的基体较少,所以熔道与基体的过渡区较小。成形件底部熔道与基体的显微组织如图15(b)所示,基体为304不锈钢。在激光堆积成形“花瓶”状变径回转体第一道熔道时,由于基体的温

度为室温,较低,熔池受基体冷却作用影响较大,热量主要沿着基体法向相反方向迅速散失,温度梯度在此方向上最大,而在平行于基体的方向冷却速度较小,因此熔池在凝固过程中具有明显的方向性,形成彼此相互平行且与基体表面较垂直的树枝晶。

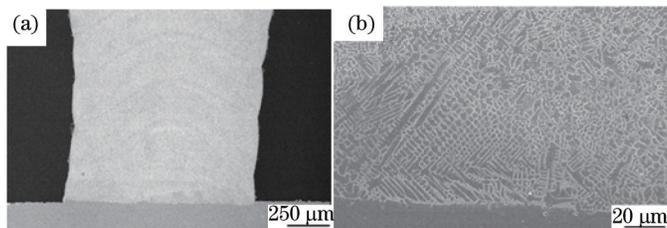


图 15 成形件与基体结合处SEM照片。(a) 低倍轮廓照片; (b) 高倍组织照片

Fig.15 SEM micrograph of microstructure of melting zone between formed part and substrate. (a) Outline photo; (b) microstructure photo

随着熔道层数增加,成形件熔池散热逐渐达到平衡状态。平衡状态下的熔道由多层不同特点的组织组成,如图 16 所示,其中(b)、(c)、(d)依次为(a)中区域 2、3、4 的高倍显微组织。区域 3 是上下两层熔道的熔合区,该区域组织较为粗大、疏松,这是由于在堆积下一层熔道时,当前层熔道表面受到激光的二次辐照,熔道的上部分再次熔化与新输入的金属粉末一起重新凝固成新的一层熔道,导致当前层熔道的上部分枝晶受到破坏,晶粒变得粗大,其硬度较低,如图 16(c)所示。如图 16(b)所示,区域 2 是当前层熔道的次表层,由于该区域受到重熔作用的热影响,原本枝晶组织的形态和生长方向发生了改变,形成致密的组织,其硬度较高,且在低倍下表现为熔道层与层之间的“分界线”。区域 1 是上层熔道中间部分,区域 4 是下层熔道的中间部分,两区域均为较细密的枝晶组织,如图 16(d)所示。这是由于激光快速成形过程是一个高温梯度、高冷却速度的凝固过程,在“花瓶”的堆积过程中,熔池受到已成形基体的冷却作用影响,热量主要沿着基体方向迅速散失,温度梯度在此方向上较大,而在平行于基体的方向冷却速度较小,因此熔池在凝固过程中有明显的方向性,导致熔道中部呈现外延生长的特征。

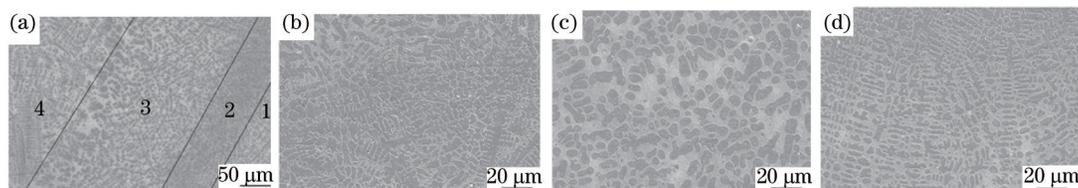


图 16 成形件熔道不同区域的SEM照片。(a) 熔道间SEM低倍照片; (b) 区域 2 高倍显微组织; (c) 区域 3 高倍显微组织; (d) 区域 4 高倍显微组织

Fig.16 SEM micrograph of different zones of cladding layer of formed part. (a) SEM micrograph of cladding layers; (b) SEM micrograph of zone 2; (c) SEM micrograph of zone 3; (d) SEM micrograph of zone 4

由于成形件尺寸较大,所以如图 17 所示取 a、b、c、d、e 5 个部分,采用 MH-5 型号的显微维氏硬度计进行测量,沿熔道的生长方向,从下至上每隔 1 mm 选取一层测试,每层取 3 个点进行测试(相邻两点间隔 0.5 mm),取 3 个点硬度的平均值作为该层的平均硬度值,测量结果如图 18、19 所示。

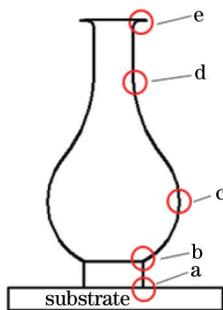


图 17 选取不同区域示意图

Fig.17 Schematic diagram of different selected regions

图 18(a)为成形件与基体结合处 a 沿堆积方向的显微硬度曲线,可以看出从基体到成形件的显微硬度值

呈上升趋势,不同区域的显微硬度有所不同。基体显微硬度最低,平均显微硬度为 240 HV,热影响区(HAZ)的显微硬度值上升,逐渐过渡到熔道,显微硬度值均为 600 HV。沿熔道的生长方向,成形件的硬度从 600 HV 缓慢地上升。这是由于在激光堆积成形过程中,每熔覆新的一层熔道时,已形成的熔道都会经历一次升温 and 降温的过程,不仅对紧邻的前一层熔道进行重熔,而且对其他的熔道进行了回火处理,这样的往复循环,由于对前熔道的多次回火处理,越是底部,次数越多,从而造成了熔道底部的硬度值较低,从底部往上部呈现增加的趋势。

图 18(b)为成形件 5 个不同区域的硬度分布,各个区域的显微硬度有所不同。其中 a 区域上节已经分析过,从 b、e 两区域中可见,激光光头大角度变化处,熔道的显微硬度会下降至 500 HV 左右,继续堆积熔道的显微硬度又上升到平均值。这是由于光头大角度的变化,破坏了之前堆积的平衡状态,继续堆积,变换角度后的光斑和粉斑辐照在已成形熔道表面,导致已成形熔道表面不同位置的能量密度、粉末量发生变化,使该区域存在一些夹渣和气孔缺陷[如图 19(b)中 A 所示],最终使得显微硬度下降。随着激光继续堆积,这一差别逐渐变缓,熔道的显微硬度上升到平均值。

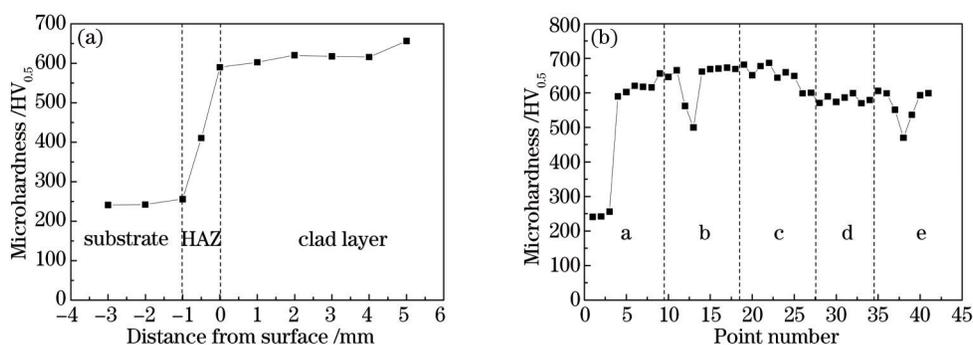


图 18 成形件沿堆积生长方向的显微硬度曲线。(a) 结合区显微硬度; (b) 整体显微硬度

Fig.18 Microhardness profile of laser-cladding coating along depth direction. (a) Melting zone microhardness; (b) whole microhardness

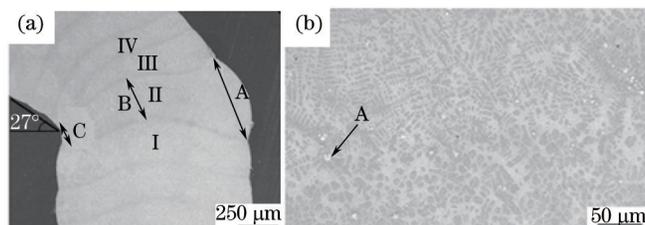


图 19 成形件区域 b 光头大角度变化处 SEM 照片。(a) 低倍轮廓照片; (b) 高倍组织照片

Fig.19 SEM micrograph of microstructure of laserhead large angle change zone. (a) Outline photo; (b) microstructure photo

图 18(b)中 c、d 区域成形件的显微硬度由均值 640 HV 下降至均值 550 HV,并呈现“波浪”现象。“波浪”现象的原因如上述章节成形件组织分析所述,成形件是由熔道叠加而成,熔道由多层不同特点的组织组成,组织粗大层的显微硬度低,组织细密层的显微硬度大,导致沿着 Z 轴方向,成形件硬度呈现“波浪”现象。而整体显微硬度下降是由于成形件旋转一圈的时间减少,熔道受到激光二次辐照的时间间隔减少,熔池的散热变缓,热影响区变大,前熔道受到回火处理的次数和时间增多,导致成形件的显微硬度下降。

图 19(a)所示为成形件区域 b 中大角度变化处的轮廓。当光头平面堆积完成 I 层后,光头的左旋 63° 后(与水平面夹角为 27°),继续堆积完成 II 层,保持光头姿态不变继续堆积 III、IV 层。当光头变角度后,通过光头轴线的偏移补偿,使得角度变换之后的光斑能够完全覆盖已成形基体 I 层的表面,此时离焦量 A>B>C,能量密度 A>B>C,使得熔道生长高度从 A 到 C 逐渐减小[图 19(a)中双向箭头所示],最终使得熔道外侧生长量大,内侧生长量小,验证了空间熔道变角度生长自适应技术的可行性。从 II、III、IV 层对比中可以看出,熔道生长高度的变化逐层减少,IV 层熔道不同位置的的生长高度基本保持一致,满足成形件大角度变化处对熔道内侧生长量小、外侧生长量大的要求,实现了空间变姿态、变角度处的熔道过渡。

## 5 结 论

1) 基于光内送粉技术,通过对空间变姿态成形系统的程序控制实现光头姿态 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围内的连续变化,试验研究了基体在不同倾斜角度下熔道的截面尺寸,发现随倾斜角度的增大,熔道高度降低;熔道宽度稳定在激光光斑直径左右(2.2 mm);熔道的偏移量增大,最大值为0.06 mm。

2) 空间变姿态激光堆积“花瓶”状变径回转体过程中,空间变姿态切向分层技术对成形件进行切向分段分层,降低了成形件表面的粗糙度,通过空间变姿态轴线偏移技术和空间熔道变角度生长自适应技术实现了成形件的空间变姿态、变角度处的熔道过渡。有效地完成了“花瓶”状变径回转体的激光堆积成形试验。

3) 对成形件宏观形貌和内部组织分析得到:成形件表面较为光滑,壁厚分布均匀;上下两层熔道的熔合区的晶粒较为粗大疏松,硬度较低;熔道的次表层受到重熔作用的影响,形成致密的组织,硬度较高,且在低倍下表现为熔道层与层之间的“分界线”;成形件与基体结合处的显微硬度沿Z轴方向逐渐增加,成形件大角度变化处,内部组织中存在少量气孔和夹渣,显微硬度有一定下降,成形件小角度变化处,显微硬度无明显改变。

## 参 考 文 献

- 1 M Zhong, W Liu. Laser surface cladding: the state of the art and challenges[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, 224(5): 1041-1060.
- 2 Wang Xuyue, Wang Yanfei, Jiang Hao, *et al.*. Laser cladding forming of round thin-walled parts with slope angle[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0103006.  
王续跃,王彦飞,江 豪,等.圆形倾斜薄壁件的激光熔覆成形[J].中国激光,2014,41(1):0103006.
- 3 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 296-301.  
朱刚贤,张安峰,李涤尘.激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J].中国激光,2010,37(1):296-301.
- 4 C P Paul, S K Mishra, A Kumar, *et al.*. Laser rapid manufacturing on vertical surfaces: Analytical and experimental studies[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 224: 18-28.
- 5 R Dwivedi, R Zekovic, R Kovacevic. A novel approach to fabricate uni-directional and branching slender structures using laser-based direct metal deposition[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(7): 1246-1256.
- 6 Zhong Minglin, Liu Wenjin, Li Fengsheng. Vertical laser cladding powder feeding nozzle[P]. Chinese Patent: 021236453[P]. 2002-07-05.  
钟敏霖,刘文今,李凤生.垂直面送粉激光熔覆喷嘴[P].中国专利:021236453,2002-07-05.
- 7 Yang Xichen, Li Huishan, Wang Yunshan, *et al.*. Laser refabricating technology for repairing expensive and important equipments[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2003, 40(10): 53-57.  
杨洗陈,李会山,王云山,等.用于重大装备修复的激光再制造技术[J].激光与光电子学进展,2003,40(10):53-57.
- 8 Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial applications[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2780-2798.  
杨洗陈.激光加工机器人技术及工业应用[J].中国激光,2009,36(11):2780-2798.
- 9 Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing, *et al.*. Laser Solid Forming-Fast Free Forming of High Performance Dense Metal Parts[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 11.  
黄卫东,林 鑫,陈 静,等.激光立体成形—高性能致密金属零件的快速自由成形[M].西安:西北工业大学出版社,2007:11.
- 10 Yang Shi, Shi Shihong, Fu Geyan, *et al.*. The impact of hollow ring laser defocused amount on melting channel bump defect self healing effect[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0503002.  
杨 轼,石世宏,傅戈雁,等.中空环形激光离焦量对熔道凹凸缺陷自愈合效应的影响[J].中国激光,2015,42(5):0503002.
- 11 Wang Lifang, Zhu Gangxian, Shi Shihong, *et al.*. Influence of shielding gas pressure on flow field of the inside-laser powder feeding nozzle[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(s1): s103007.  
王丽芳,朱刚贤,石世宏,等.保护气压力对光内送粉喷嘴粉末流场的影响研究[J].中国激光,2013,40(s1):s103007.
- 12 Zhu Gangxian, Shi Shihong, Fu Geyan, *et al.*. Research on variable reference plane cladding based on laser processing robot with the inside-laser powder feeding[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303010.  
朱刚贤,石世宏,傅戈雁,等.基于激光加工机器人的光内送粉变基面熔覆研究[J].中国激光,2015,42(3):0303010.
- 13 Shi Shihong, Fu Geyan, Wang Anjun, *et al.*. Laser Forming Manufacturing Process and Nozzle of Inside-Laser Powder Feeding[P]. Chinese Patent: 200610116413, 2006-09-22.

- 石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉光头[P]. 中国专利: CN 200610116413.1, 2006-09-22.
- 14 Shi Shihong, Shi Tuo, Fu Geyan, *et al.*. A Method and Apparatus for Space Laser Processing and Three-Dimensional Forming[P]. Chinese Patent: CN201410391418.5, 2014.  
石世宏, 石 拓, 傅戈雁, 等. 一种同步送粉空间激光加工与三维成形方法及装置[P]. 中国专利: CN201410391418.5, 2014.
- 15 Shi Shihong, Fu Geyan, Li Long, *et al.*. Realization and research of laser cladding with method of internal wire feeding through a hollow laser beam[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 266-270.  
石世宏, 傅戈雁, 李 龙, 等. 中空激光光内同轴送丝熔覆工艺的实现及其试验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 266-270.
- 16 Xiao Junyan. The Characteristics of Molten Pool and Cladding Layer inside the Ring Laser Beam[D]. Suzhou: Soochow University, 2009: 3-8.  
肖军艳. 环形激光光内送粉熔池特征与熔层性能[D]. 苏州: 苏州大学, 2009: 3-8.
- 17 Li Chunsheng. Modeling for Transmission and Conversion of Hollow Circular Laser and Analysis on Coupling between Laser and Materials in Three-Dimensional Laser Manufacturing [D]. Suzhou: Soochow University, 2010: 44-58.  
李春生. 三维成形中空环形激光传输转换建模及光料耦合分析[D]. 苏州: 苏州大学, 2010: 44-58.

栏目编辑: 宋梅梅