

# 中空激光内送粉熔覆成形悬垂薄壁件

石 拓<sup>1</sup> 王伊卿<sup>1\*</sup> 卢秉恒<sup>1</sup> 石世宏<sup>2</sup> 陆 斌<sup>2</sup> 傅戈雁<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049

<sup>2</sup>苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

**摘要** 基于激光光内同轴送粉技术和6轴机器人技术,采用熔覆头空间变姿态的成形方法,通过沿着生长的切线方向连续变角度送粉堆积的方法成形了悬垂薄壁件。建立了倾斜基面熔池受力与位移模型,并通过优化工艺参数抑制熔池的位移和流淌。实验结果表明,倾斜角可从0°逐渐变化至81°,实现了大倾角悬垂结构的无支撑成形。成形件表面平整光滑,完全消除了“台阶效应”,表面粗糙度 $Ra=6.3\ \mu\text{m}$ 。截面纹理图显示各熔层沿中轴线对称,无明显朝重力方向的偏移。成形件在不同倾角位置的显微组织无明显区别,皆达到晶粒细小,组织致密均匀。

**关键词** 激光技术;激光熔覆成形;光内同轴送粉;变姿态成形;悬垂薄壁件

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1003003

## Laser Cladding Forming of Cantilevered Thin-Walled Part Based on Hollow-Laser Beam Inside Powder Feeding Technology

Shi Tuo<sup>1</sup> Wang Yiqing<sup>1</sup> Lu Bingheng<sup>1</sup> Shi Shihong<sup>2</sup> Lu Bing<sup>2</sup> Fu Geyan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

<sup>2</sup>School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

**Abstract** Combining hollow laser beam inside powder feeding technology and 6-axis robot, a cantilevered thin-walled metal part is deposited layer by layer by means of continuously varying the attitude of laser cladding nozzle along the tangential direction of the thin wall. The modeling of force and displacement of the molten pool on an inclined surface is carried out. The shifting and flow of the molten pool are restrained by optimizing the laser cladding parameters in this model. The experimental results indicate that the forming of the cantilevered part with a changing incline angle from 0° to 81° is achieved without support. And, the surface of this part is flat and smooth, and the “step effect” is completely eliminated. The cladding layers are nearly symmetry along the central axis of the part, and the shifts of the layers influenced by gravity are not apparent. The microstructures of the part at different incline angles have no significant differences, and all achieve small grain size and compact texture.

**Key words** laser technique; laser cladding forming; hollow-laser beam inside powder feeding; variable attitude forming; cantilevered thin-walled part

**OCIS codes** 220.4610; 000.2170; 140.3390; 160.3900

### 1 引 言

金属件的3D成形具有重要的工程应用价值,现主要技术有激光选区熔化(SLM)、激光熔化沉积(LMD)、以及电子束选区熔化(EBSM)等。其中LMD也可称为激光熔覆成形<sup>[1-2]</sup>,它具有相对成本低,自由度大,成形件组织致密,强度高等优点,并可成形大尺寸结构部件<sup>[2-4]</sup>,在航天器件、飞机发动机零件、武器零件以及生物替代骨骼的制备上具有广阔的应用前景。然而,受到工艺条件和材料的限制,LMD难以形成悬垂或斜壁悬空等特征件<sup>[5]</sup>。

收稿日期:2015-04-07;收到修改稿日期:2015-06-04

基金项目:国家自然科学基金(61475107),陕西省工业攻关计划(2014K06-03)

作者简介:石 拓(1984—),男,博士研究生,主要从事激光熔覆快速成形方面的研究。E-mail: tuo.shi@qq.com

导师简介:卢秉恒(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事先进制造技术方面的研究。E-mail: bhlu@mail.xjtu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: yiqingw@mail.xjtu.edu.cn

许多零件具有倾斜薄壁的几何特征,如航空发动机叶片、机闸、燃烧室<sup>[6]</sup>、压缩机、涡轮机叶片<sup>[7]</sup>等。在采用LMD的方法堆积悬垂件时,许多研究采用水平分层层间错位法堆积悬垂面,即利用金属熔池的表面张力,将切片分层堆积的每一上层相对其下层都向外悬伸一部分以形成悬垂面,进而形成一定的倾斜角度。但悬伸过多会导致熔池塌陷,因此倾斜角度不可太大。文献[5]对金属粉末激光成形薄壁的倾斜极限进行了研究,推导出了旋转薄壁零件侧壁倾斜角度及层间搭接率的计算公式;文献[8]采用较小的Z轴增量,用三坐标数控机床堆积出了倾斜角为30°的薄壁件;文献[6]采用变Z轴提升量 $\Delta Z$ 的方法来适应实际堆高 $h$ 的变化,成形件的最大倾斜角 $\alpha_{\max}$ 达到了36.6°;文献[9]采用光内同轴送粉熔覆头进行偏移斜壁熔覆实验,成形件倾斜角 $\alpha_{\max}$ 为33.7°,相比光外同轴送粉技术,其成形件的侧壁表面粗糙度更低。

在现有研究中,另一种无支撑生成斜面熔覆层的方法是将激光熔覆头倾斜,多用于大型金属零部件的倾斜面、立面的激光熔覆强化。Paul等<sup>[10]</sup>对套筒内外表面进行了立面熔覆强化的实验研究,光路通过反射聚焦到熔覆平面上,粉末从侧向送入。文献[11]研究开发出了一种激光再制造平台,该平台结合机器人技术及视觉检测技术,成功对受损叶片、模具等进行了修复,其中包含有小倾角的斜面的加工。目前,关于倾斜熔覆技术的研究多用于表面熔覆强化<sup>[10-12]</sup>,但因受到熔覆头结构的限制,尚未实现倾斜面上的直接成形。

本文将研究通过改变激光熔覆头的倾斜角度来直接堆积成形悬垂薄壁件的方法。由于Fe313铁基合金粉末具有流动性和工艺性好、与基体结合好、抗磨性好、价格适中等优点,因而在实验中选择了Fe313铁基合金粉末。

## 2 光内同轴送粉熔覆成形

### 2.1 变角度熔覆成形基本原理

试验采用苏州大学激光制造技术研究所研制的中空激光光内送粉熔覆头<sup>[9,13-15]</sup>。如图1和图2所示的环形中空激光内送粉原理,光束、粉末和准直保护气完全同轴,消除了光、粉、气喷射方向不一致造成的相互干涉、光粉耦合精度低的问题。特别在熔覆头大角度倾斜成形的工况下,气载粉受到环形同轴准直保护气的束缚,可细、挺、直地正向喷入熔池<sup>[14,16]</sup>,显著减小重力对粉末的影响,并且粉末发散小、准直度高。同时准直保护气还可对以熔池形成托举作用,减小熔池在重力作用下的位移,降低或避免熔体流淌。图2中占空比 $d/D$ , $d$ 为激光光斑内环直径, $D$ 为外环直径。

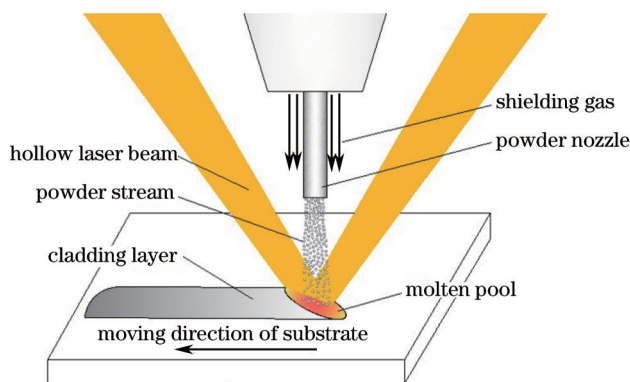


图1 环形中空激光内送粉原理

Fig.1 Principle of hollow-laser beam inside powder feeding

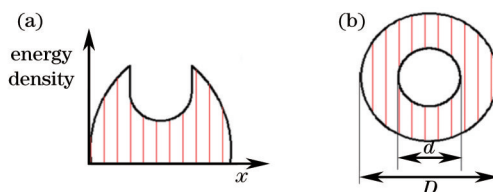


图2 (a) 光斑扫描能量分布; (b) 环形激光光斑, 占空比为 $d/D$

Fig.2 (a) Energy distribution of laser scanning; (b) hollow-laser beam with duty ratio of  $d/D$

如图3所示为采用水平分层层间错位堆积与法向分层无错位堆积两种方法,堆积一个1/4圆弧形截面的悬臂薄壁件的对比。图3(a)采用传统水平分层层间错位堆积的方法,熔覆头始终竖直向下并进行水平位

移。其中,倾斜角度  $\alpha$  为单层悬伸量  $\Delta x$  与该层熔覆层高度  $h$  之比:

$$\alpha = \arctan(\Delta x/h). \quad (1)$$

在图3(a)中,  $\alpha$  由下至上逐渐增大,当  $\alpha$  超过极限角  $\alpha_{\max}$  以后,上下层错位太大,导致熔池悬伸端塌陷<sup>[9]</sup>。图3(a)中虚线为因熔池塌陷造成无法继续成形的部分。

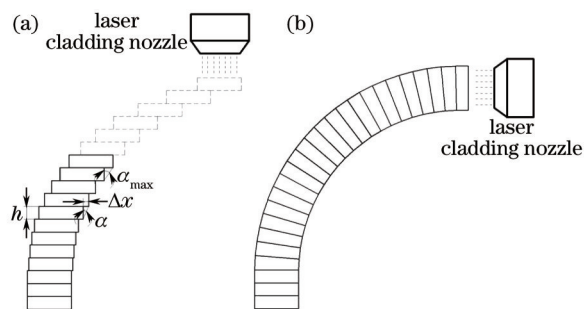


图3 两种金属弯曲薄壁件熔覆堆积方式对比。(a) 水平分层层间错位堆积;(b) 法向分层无错位堆积

Fig.3 Comparison of two laser cladding deposition methods of curving metal thin-walled part. (a) Deposition by horizontal slices and displacement between adjacent layers; (b) deposition by normal direction slices without adjacent layers

而在图3(b)中,熔覆头连续改变姿态,通过改变空间倾斜角度,使光束、粉束的轴线方向始终沿曲壁当前加工位置的切线方向移动,上下层全覆盖无错位,熔池始终有足够面积的基体支撑,只要能够保持熔池不流淌,就可在倾斜表面冷却成形,熔覆角度即可以不断增大,直至在立面上成形,而不再受到极限倾斜角的限制。由图3(a)可看出,水平分层层间错位堆积成形件有明显的梯度曲面和“台阶效应”,随着斜度的增加,上下层错位加大,薄壁件的厚度逐渐变窄,直到超过极限堆积角而中止成形。而采用图3(b)所示的法向分层无错位堆积成形技术时,可以理论上保持薄壁件的厚度不变,在成形件的表面消除“锯齿痕迹”实现平整化。

液态金属熔池在空间的倾斜或悬挂将受到重力影响,熔池熔体可能会发生位移、流淌甚至滴落,因而需要对倾斜面熔池进行受力分析,通过优化工艺参数来抑制熔池的位移和流淌。

## 2.2 倾斜面激光熔覆熔池建模

图4所示为斜面熔池受力与流淌示意图,假设存在一定的中空激光光束离焦量下,并且激光熔覆头的扫描速度为  $v$ 。图4(a)和(b)所示分别为移动光斑在  $t=0$  时刻和在离开熔池的  $t=D/v$  时刻的熔池形变,在  $x-z$  平面对熔池进行受力分析。其中,熔池表面的法向与重力  $G$  成  $\theta$  角,熔覆头朝薄壁切向加工;  $\gamma$  为熔池外边界的表面张力,随温度的升高而减小;  $\mu_L$  为动力粘度,  $u_x(z)$  为熔池距基体表面  $z$  处的流速,  $F_{\text{gas}}$  为载粉气和保护气对熔池的作用力,与熔池流动方向垂直。

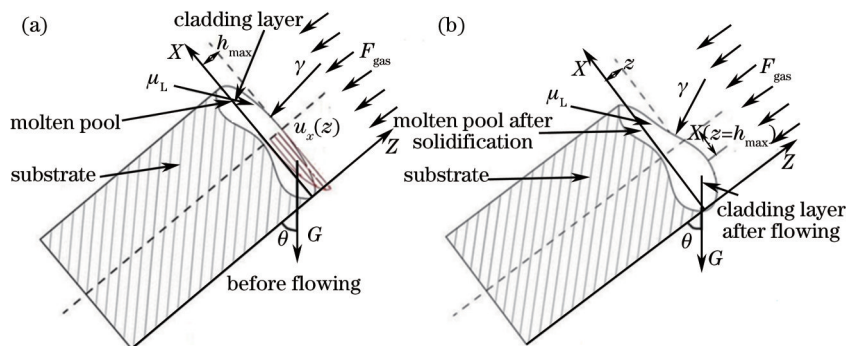


图4 斜面熔池受力与流淌示意图。(a)  $t=0$ ; (b)  $t=D/v$

Fig.4 Force and flow analysis of the molten pool on an inclined surface. (a)  $t=0$ ; (b)  $t=D/v$

根据牛顿内摩擦定律及文献[10,17]中的熔池受力模型,建立倾斜面的熔池位移模型:

$$\mu_L \frac{\partial u_x(z)}{\partial z} = \rho_L g z \sin \theta - \frac{d\gamma}{dT} \frac{\partial T}{\partial s}, \quad (2)$$

式中  $\rho_L$  为熔池液态金属材料的密度,  $T$  为熔池温度,  $\partial u_x(z)/\partial z$  为沿  $z$  方向熔池流体层的速度梯度,  $s$  为熔池表面边界的长度元素,  $(d\gamma/dT)(\partial T/\partial s)$  为表面张力分量。根据文献[17]可知:

$$\frac{d\gamma}{dT} = \gamma_1 = -A_\gamma - R_g \Gamma_s \ln(1 + Ka_i) - \frac{Ka_i}{(1 + Ka_i)} \frac{\Gamma_s \Delta H_0}{T}, \quad (3)$$

式中  $A_\gamma$  为表面张力梯度常数,  $R_g$  为气体常数,  $\Gamma_s$  为饱和状态下的表面吸附量,  $a_i$  为熔池中第  $i$  种材料的比重,  $\Delta H_0$  为标准吸附热量,  $K$  的表达式为

$$K = k_1 \exp\left(-\frac{\Delta H_0}{R_g T}\right), \quad (4)$$

式中  $k_1$  为熔隔离的相关常数。(2) 式中

$$\frac{\partial T}{\partial s} = D_{TS} = \frac{h_c(T - T_{amb})}{k}, \quad (5)$$

式中  $h_c$  为辐射与对流边界条件的组合传热系数,  $T_{amb}$  为环境温度,  $k$  为材料的热导率。将(3)式中的  $\gamma_1$  和(5)式中的  $D_{TS}$  代入(2)式, 并对  $z$  积分可得:

$$\mu_l u_x(z) = \rho_l g \frac{z^2}{2} \sin \theta - \gamma_1 D_{TS} z, \quad (6)$$

式中边界条件  $z=0$ ,  $u_x(z)=0$ 。那么从  $t=0$  至  $t=D/v$  时刻, 熔池在不同高度  $z$  产生的位移量  $x$  为

$$x(z) = u_x(z)t = \frac{D}{v\mu_l} \left( \rho_l g \frac{z^2}{2} \sin \theta - \gamma_1 D_{TS} z \right). \quad (7)$$

由(7)式可知, 熔池沿重力方向的位移与激光光斑直径  $D$ 、熔道堆高  $z=h_{max}$  的平方以及倾斜角度  $\theta$  成正比, 而与扫描速度  $v$  以及动力粘度  $\mu_l$  成反比。在薄壁件三维堆积过程中, 薄壁基体宽度应始终与光斑直径  $D$  保持一致, 并保持熔道宽度不变。因此, 减少送粉速率可以降低熔道堆高, 从而减少熔池的位移。提高扫描速度也可以减小位移量, 使得光斑快速离开熔池, 使其还没有来得及流淌时, 就迅速冷却凝固。根据牛顿内摩擦定律,  $F_{gas}$  对液态金属熔池的拖曳力形成的正压力不会对熔池流体层间的剪应力产生影响, 然而  $F_{gas}$  的拖曳力可使熔池更为扁平, 高度分布更为均匀, 使最高点  $z=h_{max}$  降低。此外,  $F_{gas}$  须控制在一定范围内, 防止气压过大导致熔池被吹散。

### 3 实 验

#### 3.3 实验条件与参数

实验堆积一个悬垂弯曲薄壁件, 其侧面轮廓如 5(a) 所示。设计宽度为 63 mm, 厚度为 2.5 mm。在图 5(a) 中, 零件底部为 20 mm 的直壁, 上部为一个半径为 50 mm 的圆弧曲壁, 角度变化范围为  $0^\circ \sim 81^\circ$ 。

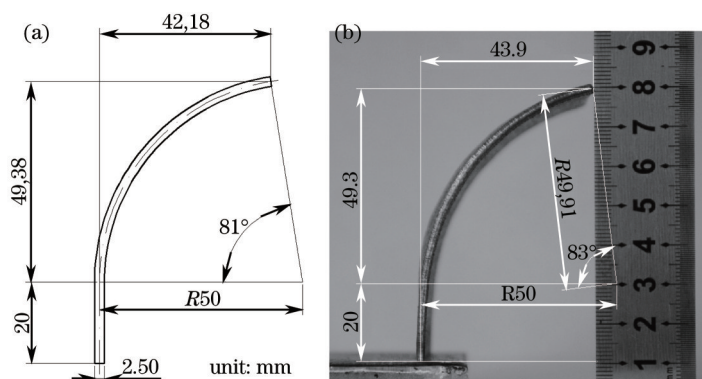


图 5 设计尺寸与成形件尺寸对比。(a) 侧面轮廓设计尺寸;(b) 成形件侧面轮廓尺寸测量

Fig.5 Comparison of design size and formed part size. (a) Design size of profile; (b) measured size of formed part profile

实验采用中空激光光内送粉熔覆头。运动机构为 6 轴 KUKA 机器人 KR 60-3F, 利用其高柔性, 带动熔覆头完成直线插补运动与空间旋转运动。试验中采用 IPG YLS-2000-TR 型 2 kW 光纤激光器, 采用 GTV PF2/2 型送粉器。保护气和载粉气均使用氮气。

设定激光功率为 600 W, 熔覆头扫描速度为 6 mm/s, 送粉器载气流量为 3 L/min, 送粉速率为 8 g/min, 保护气压强为  $1.5 \times 10^5$  Pa。调整熔覆头离焦量为 -3 mm, 在此离焦量下, 光斑外环直径  $D = 2.5$  mm。

基材材料为45钢。本实验选用Fe313铁基合金粉末,它的颗粒直径在75~106 μm范围,具体成分见表1。

表1 Fe313成分表(质量分数,%)

Table.1 Composition of Fe313 (mass fraction, %)

Composition	C	Si	Cr	B	Fe
mass fraction /%	≈0.1	2.5~3.5	13~17	0.5~1.5	Bal.

试验中使用KUKA机器人的KRL语言编程。为了保持离焦量不变,需实时控制熔覆头的单层提升量 $\Delta z$ ,使之与实际堆高 $h$ 一致。采用以文献[18,19]为原理的层高控制装置,装置反馈的层高测量值以模拟电压的形式传输给以太网输入输出(I/O)模块,再通过以太网实时传输给KUKA机器人控制器。实验中堆积零件侧面圆弧由多条直线段组成。熔覆头按照反馈的实际堆高 $h$ 同步提升,每当累积提升量大于等于1.7 mm时,熔覆头旋转 $2^\circ$ 。由于加工光斑离焦量位置与机器人的工具中心点TCP位置不重合,因此在熔覆头旋转时还需要进行位置补偿。为了防止成形件两端塌陷,实验中采取了熔覆头运行至端部时减慢扫描速度的方法。在-3 mm的离焦量下,薄壁墙的形貌如果出现起伏不平,会出现“自愈合”的现象,在堆积若干层后逐渐变平整<sup>[20]</sup>。在成形过程中,薄壁墙表面始终保持比较平整。成形件侧面如图5(b)所示。

在熔覆堆积的过程中,倾斜角度不断增大,始终未出现火花飞溅,熔池流淌、滴落等现象。熔覆头及成形零件如图6所示。

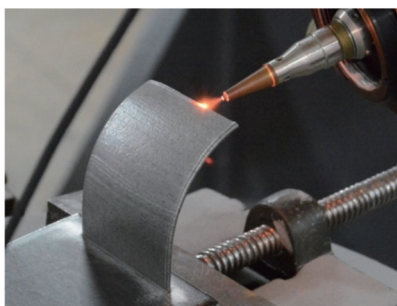


图6 熔覆堆积中的零件

Fig.6 Part in deposition process

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 表面粗糙度与尺寸精度

利用TR200手持式粗糙度仪测得成形件外表面平均粗糙度值尺寸 $Ra=6.3 \mu\text{m}$ 。根据实验得到的成形件侧面[图5(b)]与CAD设计尺寸[图5(a)]的对比,二者的尺寸、角度误差如表2所示。

表2 成形件外形尺寸误差

Table 2 Size error of formed part

Features in Fig.6	Design size	Absolute error	Relative error
Bottom height	20 mm	0 mm	0 %
Arc height	49.38 mm	-0.08 mm	-0.16 %
Arc width	42.18 mm	1.72 mm	4.08 %
Initial radius	50 mm	0 mm	0 %
End radius	50 mm	-0.09 mm	-0.18 %
Incline angle	$81^\circ$	$2^\circ$	2.47 %

由图5和表2可知,成形件外形尺寸主要的误差出现在42.18 mm弧宽和 $81^\circ$ 倾斜角度。这主要是由于在熔覆层高反馈控制程序中,熔覆头每转动 $2^\circ$ 的前提条件是累积提升量大于等于1.7 mm。实际累积提升量一般会少许超过1.7 mm,这样经过多次累积,导致成形件总长度大于设计值。

如图5(a)所示,设计的零件壁厚为2.5 mm。图7为成形件壁厚沿高度方向变化图。在最底部的直壁0~5 mm处的壁厚只有2.16 mm。这是由于激光功率一开始就是600 W,在基板上开始熔覆时,基板温度为室温,高温熔池在基板上,它的热量迅速传给基板,传热方式为三维传热,传热速度过快导致熔池温度略低,其边缘温度更

低,熔池面积偏小,使得熔道宽度小于设计值。随着薄壁件不断成长高,熔池向薄壁传热的方式为二维传热,传热速度减慢,熔池温度升高,熔池面积增大,壁厚也逐渐稳定到2.5 mm左右。图7中壁厚的最大绝对误差为2.16 mm-2.5 mm=-0.34 mm,最大相对误差为-0.34/2.5=-13.6%。

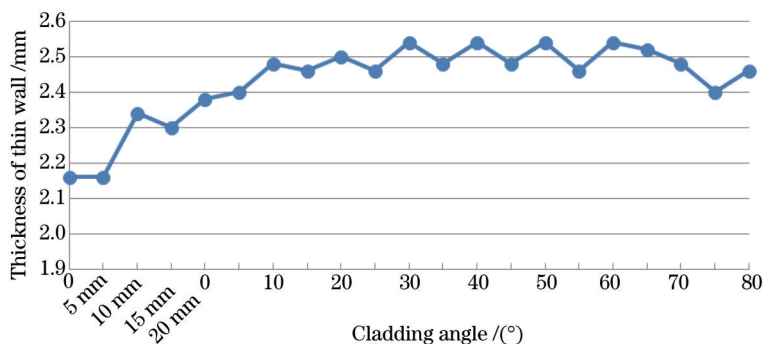


图7 成形件壁厚沿高度及角度方向的变化

Fig.7 Thickness variation of formed thin wall part along direction of height and angle

图8为成形件在45°左右沿宽度方向的壁厚测量值。为保持端部平整,成形过程中采用两端减速工艺,使端部宽度增大。在5~55 mm处宽度比较稳定。图8中壁厚的最大绝对误差为2.78 mm-2.5 mm=0.28 mm,最大相对误差为0.28/2.5=11.2%。

图9为成形件宽度随高度及角度的变化图。在图9中,宽度在60°以前基本稳定在63 mm左右,而在60°~80°间逐渐减小,这是由于KUKA机器人TCP的标定误差,使熔覆头在旋转时形成了一定的偏角,导致在端部时部分激光、粉末射出,未能形成熔池。

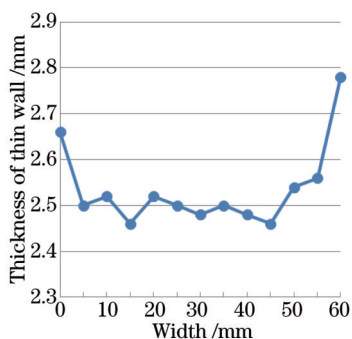


图8 成形件壁厚沿宽度方向的变化

Fig.8 Thickness variation of formed thin wall part along direction of width

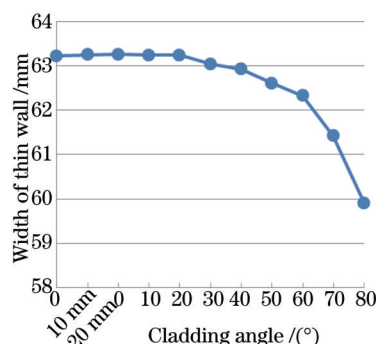


图9 成形件宽度沿高度及角度方向的变化

Fig.9 Width variation of formed thin wall part along direction of height and angle

## 4.2 组织与硬度分析

### 4.2.1 剖面图

纵向切取0°~81°熔覆层4片,进行镶样,打磨。图10所示为薄壁件整体剖面图,分别对其中a、b、c、d 4个局部区域进行了放大,如图11(a)、(b)、(c)、(d)所示。4张放大图中熔覆层搭接的弧形纹理清晰可见。其中,较深色纹理为成形区,较浅色纹理为二次重熔区。图11(c)和(d)的位置已经达到很大的倾斜角度,然而熔覆层的纹理基本沿中轴线对称,表明熔池并未发生过明显的位移。测得图11(a)~(d)中在各角度的单层堆高分别为0.300、0.268、0.256、0.232 mm。单层堆高随堆积角度增长呈下降趋势。这是因为高层的熔道比底层熔道宽,在送粉速率、扫描速度等参数保持不变的情况下,单位时间落入熔池的粉量恒定,如图7所示。根据质量守恒,高层的熔道较宽则堆高较低。

### 4.2.2 电镜分析

将镶样打磨的试件腐蚀后,采用S-4700场发射扫描电子显微镜(SEM)进行拍摄。图12(a)~(d)所示分别为图10 a、b、c、d 4个局部区域放大图,放大倍数均为1000倍。图12中重力方向并不是朝下,其左至右都是沿薄壁侧面弧线的切线方向,即在图片中都是从左向右生长。

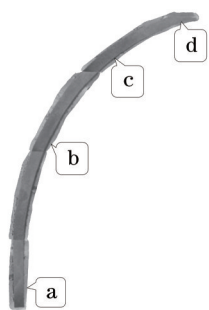


图 10 成形件剖面图

Fig.10 Sectional view of formed part

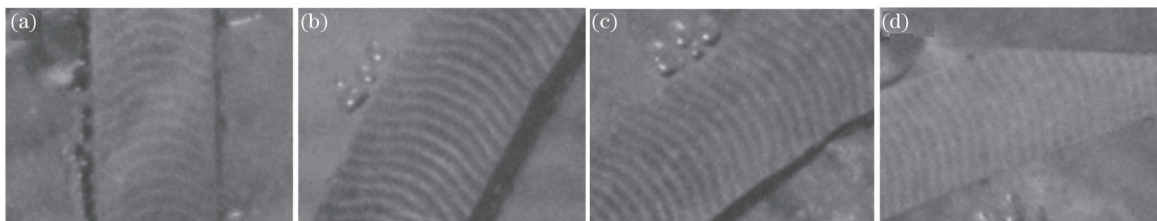


图 11 图 10 中标示的 4 个局部区域的放大图。(a)下部;(b) 30°区域;(c) 65°区域;(d) 75°区域

Fig.11 Detail with enlarged view of the 4 areas marked in Fig.10. (a) Low side; (b) around 30°; (c) around 65°; (d) around 75°

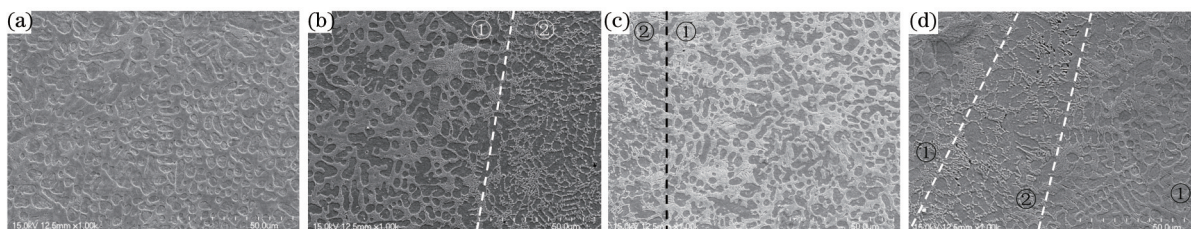


图 12 图 10 中标示的 4 个局部结构的扫描电子显微镜图

Fig.12 SEM analysis of 4 areas marked in Fig.10

金属粉末在熔池瞬间熔化,再瞬间凝固。在极快的冷却速度下,过冷度极大,因此形成的晶粒非常细小。图 12(a)位于薄壁件底部,组织均匀致密,一般为等轴晶,没有明显的生长方向,晶粒直径在 2~10  $\mu\text{m}$  之间。图 12(b)~(d)中的①区晶粒粗细度与图 12(a)相近,基本无变化。图 12(b)~(d)中的②区的晶粒明显更细小。这是由于该区域为上下熔层之间的结合区,凝固时由于基体的散热作用过冷度更大,因而该区域晶粒更为细小。仔细观察图 12(d)中②区的上部重熔区,可发现了一些细小孔洞。这是由于对应图 10 的 d 处,熔覆头的倾斜角已接近 80°,近似立面悬臂生长,重力对熔池的拉力作用使其在快速凝固的同时稍向下垂,从而对组织致密度产生轻微影响所致。细小孔洞直径不到 1  $\mu\text{m}$ ,且大都呈圆形非扩展型,因此对组织性能基本没有影响。

#### 4.2.3 显微硬度分析

实验分析装置为 MH5 型显微硬度计。图 13 所示为成形件在不同高度/角度的硬度变化曲线。由图 13

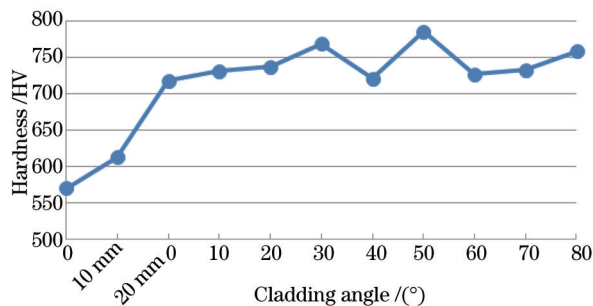


图 13 成形件硬度沿高度及角度方向的变化

Fig.13 Hardness variation of formed thin wall part along direction of height and angle

可知,其平均硬度为714.4 HV,其中靠近基体材料处的硬度值较低,为569.8 HV。随着熔覆高度的增长,从20 mm高度开始,在 $0^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 区域内,硬度值保持在700~800 HV之间。最大硬度为785.5 HV,最小硬度为717.7 HV,晶粒越细小,硬度越高,这与图12(b)~(d)的分析是一致的。

## 5 结 论

1) 实现了喷头空间连续变姿态对大倾角弯曲悬垂薄壁结构的无支撑堆积成形。堆积的弯曲悬臂件倾角从 $0^{\circ}$ 逐渐变化至 $81^{\circ}$ ,表面平整光滑,消除了台阶效应,表面粗糙度 $Ra=6.3\ \mu\text{m}$ 。成形件最大尺寸误差为4.08%,最大厚度误差为-13.6%。

2) 建立了倾斜基面激光熔覆熔池在重力作用下位移流淌模型,熔池位移量与熔道堆高的平方、倾斜角度以及送粉速率呈正比,而与熔覆头扫描速度呈反比,可通过优化这些工艺参数抑制熔池的流淌位移。此外,光、粉、气一体同轴并垂直作用于熔池,可以对熔池起到部分托举作用。

3) 各熔层的弧形熔道基本保持沿轴线对称,无明显朝重力方向的偏移。在不改变主要工艺参数的情况下,熔道单层堆高随倾斜角度的增大有所降低。电镜分析结果表明,成形件在不同倾角位置处的熔覆组织无明显变化,且晶粒细小,组织均匀致密。成形件靠近基体处硬度较低,随着角度的增大,硬度基本稳定在700~800 HV之间。

## 参 考 文 献

- 1 Santos E C, Shiomi M, Osakada K, *et al.*. Rapid manufacturing of metal components by laser forming[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(12): 1459-1468.
- 2 Huang Weidong. Laser Solid Forming Technology: Rapid Freeform Fabrication of High Performance and Compact Metallic Component [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007.  
黄卫东. 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.
- 3 Song Jianli, Li Yongtang, Deng Qilin, *et al.*. Research progress of laser cladding forming technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 29-39.  
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.
- 4 Chen Yongcheng, Zhang Shuquan, Tian Xiangjun, *et al.*. Microstructure and microhardness of 4045 aluminum alloy fabricated by laser melting deposition[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303008.  
陈永城, 张述泉, 田象军, 等. 激光熔化沉积4045铝合金显微组织及显微硬度[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303008.
- 5 Shang Xiaofeng, Liu Weijun, Wang Wei, *et al.*. Slope limit of part made in metal powder laser shaping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43 (8): 97-100.  
尚晓峰, 刘伟军, 王 维, 等. 金属粉末激光成形零件倾斜极限[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 97-100.
- 6 Wang Xuyue, Jiang Hao, Xu Wenji, *et al.*. Laser cladding forming of arc-section inclined thin-walled parts with variable Z-increments[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1003007.  
王续跃, 江 豪, 徐文骥, 等. 变Z轴提升量法圆弧截面倾斜薄壁件激光熔覆成形研究[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1003007.
- 7 Zhu Yongwei, Xu Jiawen, Zhao Jianshe. Key technology of electrochemical machining integral impeller with big-twisted blades[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(5): 783-787.  
朱永伟, 徐家文, 赵建社. 大扭曲叶片整体涡轮盘电解加工关键技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(5): 783-787.
- 8 X Wu, J Mei. Near net shape manufacturing of components using direct laser fabrication technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135(2): 266-270.
- 9 Di Keyun. Elementary Research on Laser Rapid Prototyping of Inclined Wall Using Hollow Laser Beam inside Powder Feeding Technology[D]. Suzhou:Soochow University, 2008.  
狄科云. 激光熔覆快速成形光内同轴送粉斜壁堆积的初步研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2008.
- 10 Paul, C P, Mishra S K, Kumar A, *et al.*. Laser rapid manufacturing on vertical surfaces: Analytical and experimental studies[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 224(12): 18-28.
- 11 Dong Ling, Yang Xichen, Zhang Haiming, *et al.*. Path generation for repairing damaged parts of free-form surfaces in laser remanufacturing[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0703007.  
董 玲, 杨洗陈, 张海明, 等. 自由曲面破损零件激光再制造修复路径生成[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0703007.



- 12 He Jinjiang, Zhong Minling, Liu Wenjin. Investigation on laser modification with powder feeding for vertical surfaces[J]. Applied Laser, 2005, 24(6): 322-326.  
何金江, 钟敏霖, 刘文今. 垂直面送粉激光强化系统与应用研究[J]. 应用激光, 2005, 24(6): 322-326.
- 13 Shi Shihong, Wang Chen, Xu Aiqin, *et al.*. Temperature field numerical simulation of laser cladding based on internal powder feeding through a hollow laser beam[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0303002.  
石世宏, 王 晨, 徐爱琴, 等. 基于环形光内送粉激光熔覆温度场的数值模拟[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0303002.
- 14 Shi Tuo, Wang Yongkang, Fu Geyan. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow field of laser cladding with coaxial inside-beam composite powder and wire feeding[J]. Applied Laser, 2013, 33(3): 254-258.  
石 拓, 王永康, 傅戈雁. 激光光内复合送粉送丝熔覆气固两相流场数值模拟[J]. 应用激光, 2013, 33(3): 254-258.
- 15 Liu Shuang, Kong Fanrong, Shi Shihong, *et al.*. Study of a hollow laser beam for cladding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(1-4): 147-159.
- 16 Wang Lifang, Zhu Gangxian, Shi Shihong, *et al.*. Influence of shielding gas pressure on flow field of 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.
- 17 W H Kim, S J Na. Heat and fluid flow in pulsed current GTA weld pool[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(98): 3213-3227.
- 18 Song L, Bagavath-Singh, V Dutta, *et al.*. Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(1-4): 247-256.
- 19 Corbin, Stephen F, Amir Khajepour, Ehsan Toyserkani. System and method for closed-loop control of laser cladding by powder injection [P]. US patent: US 20040133298A1, 2004.
- 20 Yang Shi, Shi Shihong, Fu Geyan, *et al.*. 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.

栏目编辑: 宋梅梅