

# 带连接筋双层薄壁件激光直接成形工艺

方琴琴, 傅戈雁, 王 聪, 陆 斌, 周 斌

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

**摘要** 成形带连接筋双层薄壁件时,筋与薄壁连接处易产生凹凸缺陷。如控制不当,随着堆积的进行凹凸缺陷愈加明显,易导致堆积失败。提出等体积法侧向搭接工艺,通过控制喷头扫描路径中起、停偏移量控制侧向搭接量,从而获得了熔覆形貌平整的筋、壁相贯连接面。提出基于层高检测技术的功率控制工艺来保证堆积过程中熔覆层形貌不失稳,完成了带筋双层薄壁件激光直接成形实验。成形的带连接筋双层薄壁件间隙约为 2.6 mm,尺寸偏差在 5% 以内;显微组织致密均匀,无明显的气孔、裂纹等缺陷,显微硬度在 640~770 HV 之间。

**关键词** 激光技术; 激光直接成形; 侧向搭接; 等体积法; 功率控制; 双层薄壁件

**中图分类号** TN249

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0202005

## Laser Direct Forming Technology of Double Thin-Walled Parts with Connecting Ribs

Fang Qinqin, Fu Geyan, Wang Cong, Lu Bin, Zhou Bin

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

**Abstract** When double thin-walled parts with connecting ribs are formed, the bump defects are easy to occur in the connection between ribs and thin walls. The bump defects will be more obvious with the accumulation if the control is improper, and it is easy to lead to accumulation failures. We propose a lateral lap process by equal volume method, which can obtain intersecting surfaces of ribs and walls with flat cladding morphology by controlling the starting and stopping offset in the nozzle scan path to control the lateral overlap. We also propose a power control technology based on the height detection technique to ensure that the morphology of the cladding layer in the accumulation process remains stable until the laser direct forming of the double thin-walled parts with connecting ribs is completed. The gap of the formed double thin-walled parts with connecting ribs is about 2.6 mm, and the size deviation is less than 5%. The microstructure is dense and uniform, without obvious holes, cracks and other defects, and the microhardness is 650-770 HV.

**Key words** laser technique; laser direct forming; lateral lap; equal volume method; power control; double thin-walled parts

**OCIS codes** 140.3390; 140.3380; 160.3900

## 1 引 言

在工业上有一些具有保温、冷却作用的零件,例如带冷却流道的涡轮叶片、具有隔热作用的机舱、薄壁夹层喷嘴等,均具有带连接筋双层薄壁特征结构。激光直接成形是一种通过逐层熔覆堆积的方式成形零件的增材制造工艺<sup>[1-5]</sup>,可以快速成型结构复杂、性能好的零构件。Wadley 等<sup>[6]</sup>利用基于粉床铺粉的选区激光熔化技术制造出点阵夹层结构,上、下层之间通过多个柱状分支结构粘接起来;钟敏霖等<sup>[7]</sup>针对镍基合金和钨基合金等材料研究了基于直接金属沉积原理的激光快速柔性制造技术,制造出表面精度较高的 W/Ni 合金

**收稿日期:** 2016-07-27; **收到修改稿日期:** 2016-09-06

**基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFB1100300)、国家自然科学基金(51675359)、江苏省重点研发项目(BE2015067)

**作者简介:** 方琴琴(1992—),女,硕士研究生,主要从事增材制造方面的研究。E-mail: 731075895@qq.com

**导师简介:** 傅戈雁(1959—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事增材制造方面的研究。

E-mail: fugeyan@stu.suda.edu.cn(通信联系人)

太空望远镜准直器,零件壁厚约为 3 mm,主筋平行度不低于 2/1000。然而,现有技术成形的带连接筋双层薄壁件间隙较大,国内外对于小间隙带连接筋双层薄壁件熔覆成形工艺研究鲜有报道,尤其是筋与薄壁搭接处的成形。本文基于激光直接成形新工艺,对带连接筋双层薄壁件的成形展开研究。

本文基于光内送粉激光直接成形系统,成形了带连接筋双层薄壁件。采用光内送粉熔覆喷头进行堆积成形时,具有光粉耦合性好、成形件表面精度高的特点<sup>[8-9]</sup>。带筋薄壁件成形的难点在于保证筋与薄壁之间的平整相贯连接。本文提出了一种等体积法侧向搭接工艺,控制喷头起、停位置来规划扫描路径,实现筋与薄壁的平整连接;通过基于层高检测技术<sup>[10]</sup>的功率控制工艺,防止热累积造成的熔道形貌失稳,实现带连接筋双层薄壁件连续堆积成形。

## 2 实验设备及材料

### 2.1 激光直接成形系统组成

激光直接成形系统包括 IPG-YLS 系列光纤激光器、GTV PF2/2 型程控送粉器、6 轴 KUKA 机械手、光内送粉激光熔覆喷头、回转工作台以及制氮系统。其中回转工作台、激光器、送粉器以及 KUKA 机械手集成于 KUKA 控制柜;KUKA 机械手操控中空激光熔覆喷头;制氮系统一方面为送粉器提供输送粉末的载气,另一方面为激光熔覆喷头喷嘴提供输送粉束的准直气。

### 2.2 实验材料

实验用基体材料为 304 不锈钢, Fe313 粉末作为熔覆材料,粒度为 -140/+200 目(75~106 μm)。Fe313 材料成分(质量分数)组成为:C 约 0.1%,Si 为 2.5%~3.5%,Cr 为 13%~17%,B 为 0.5%~1.5%,其余为 Fe。

## 3 实验方法

### 3.1 熔覆工艺参数及零件建模

设计图 1 所示带连接筋双层薄壁件模型。该模型为内外两层环形薄壁,其间加以 4 根与薄壁成 90°角的连接筋。设计喷头成形内层环形薄壁时扫描回转半径为 15 mm,成形外层环形薄壁时扫描回转半径为 20 mm,根据熔覆层宽度  $w=2.5$  mm 得到零件的尺寸模型(图 1)。

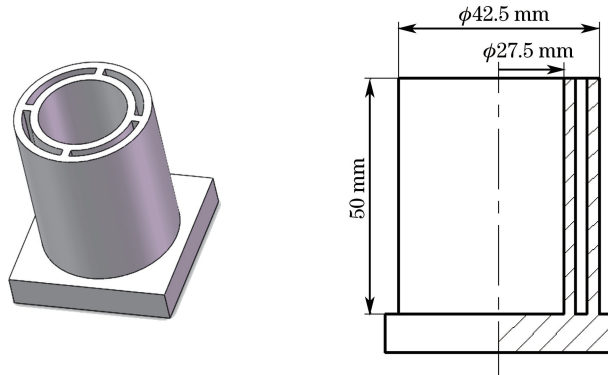


图 1 带筋双层薄壁件模型

Fig. 1 Model of ribbed double thin-walled parts

### 3.2 侧向搭接工艺

图 2 为带连接筋的双层薄壁件模型,薄壁 1 与薄壁 2 之间连有与薄壁成不同角度的筋。筋与薄壁连接处(图 2 中虚线位置)易产生凹凸缺陷,随着堆积的进行,凹凸缺陷程度加剧,最终影响堆积的顺利进行。建立等体积法侧向搭接工艺,以控制喷头扫描路径中起、停偏移量来控制侧向搭接量的方式,保持筋、壁之间连接形貌的平整。

陆斌等<sup>[11]</sup>在光内送粉激光变斑直接成形实验中,对单道熔道的截面轮廓建立了图 3 所示的几何模型。

熔覆层轮廓解析式为

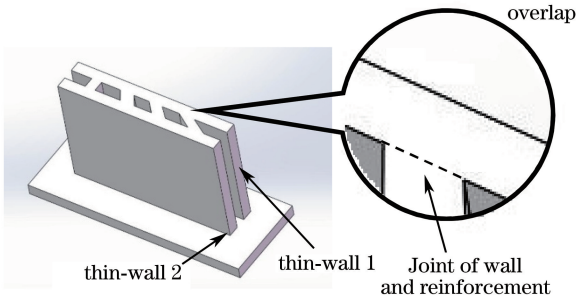


图 2 连接筋与双层薄壁搭接示意图

Fig. 2 Joint of wall and reinforcement with double thin-wall lap

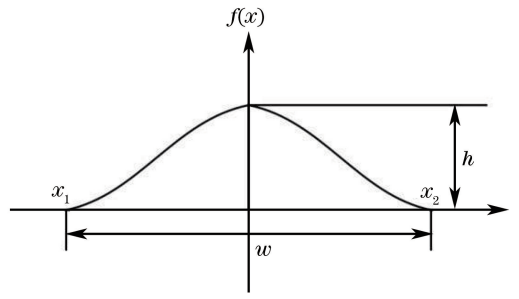


图 3 熔覆层轮廓数学模型

Fig. 3 Mathematical model of cladding layer.

$$f(x) = -\frac{2^\alpha h}{\tau w^\alpha} |x|^\alpha + h, \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为曲线阶数, 待定求解;  $h = 0.318 \text{ mm}$  为熔覆层高度;  $w = 2.5 \text{ mm}$  为熔覆层宽度。通过调整  $\alpha$  的值可以调整曲线的形貌, 进而拟合实际熔覆层轮廓。将表 1 中熔道截面尺寸参数代入(1)式, 得到  $\alpha = 2.0625$ 。

表 1 熔覆工艺参数与熔道截面尺寸

Table 1 Cladding process parameters

Power feeding rate / (g/min)	Carrier gas flow / MPa	Collimating gas speed / (m/s)	Laser defocusing distance / mm	Scanning speed / (mm/s)	Laser power / W
8	0.3	4	-4	10	800

激光一次扫描得到的熔覆层可以看作是由两个半熔点和一个熔道所组成, 如图 4 所示。喷头起停形成半熔点, 喷头扫描形成熔道, 熔道的长度反映了喷头的扫描距离。

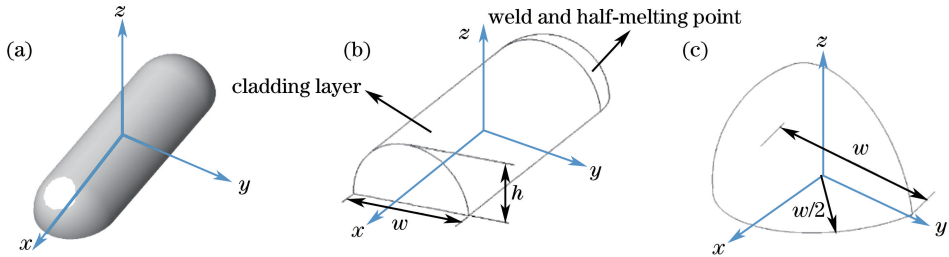


图 4 熔覆层模型。(a)熔覆层;(b)熔道与一个半熔点;(c)半熔点

Fig. 4 Cladding layer model. (a) Cladding layer; (b) weld road and half-melting point; (c) half-melting point

将(1)式拟合得到的熔道截面曲线与 Creo 软件相结合, 建立单道熔覆模型。图 4 为单道熔覆模型示意图, 其中图 4(a)为单道熔覆着色示意图, 图 4(b)为扫描熔道与一个半熔点的组合, 图 4(c)为一个半熔点。使用 Creo 软件的分析模块可计算出半熔点的体积  $V_0 = 0.404133 \text{ mm}^3$ 、熔覆层截面积  $J = 0.540654 \text{ mm}^2$ 。

以图 4 熔覆层模型为基础, 建立图 5 所示任意角度侧向搭接模型。其中熔覆层 1 是待搭接熔覆层, 熔覆层 2 为与熔覆层 1 成  $\beta$  角的搭接熔覆层。

图 6 为侧向搭接熔覆层扫描路径示意图, 其中虚线表示喷头扫描路径。S 为参考平面,  $O_2$  为侧向搭接熔覆层 2 扫描起、停点, 熔覆层 1、2 扫描路径的延长线交于  $O_1$  点、夹角为  $\beta$ ;  $O_1$  与 S 的距离为 L, 熔道长度  $L_1$ ,  $O_1$  与  $O_2$  之间的距离为  $L_2$ 。

为了便于研究, 作如下简化:

- 1) 省略熔覆层部分熔道, 保留与扫描路径起、停点相邻的熔道;
- 2) 忽略筋搭接处熔池因冶金结合而造成的体积变化。

设搭接前熔覆层体积为  $V_1$ , 搭接后熔覆层体积为  $V_2$ , 熔覆层截面积设为 J。由于搭接前后熔覆层仅仅是形态发生改变, 理论搭接筋与实际搭接筋在搭接前后保持体积不变, 即  $V_1 = V_2$ , 如图 7 所示。结合图 5、6 的搭接模型可以看出: 当  $L_2$  过大时, 熔覆层 1、2 搭接的部位将出现凸起; 当  $L_2$  过小时, 熔覆层 1、2 搭接的部位将出现欠熔的现象, 表面凹陷。因此需控制  $L_2$  的大小, 实现筋、壁的平整连接。设  $O_1$  与 S 的距离 L 为

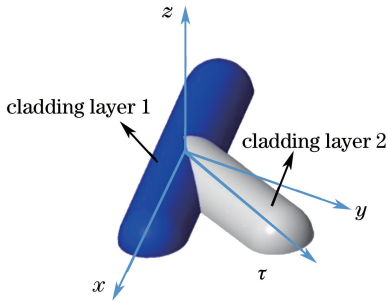


图 5 任意角度搭接模型

Fig. 5 Model of arbitrary angle overlap

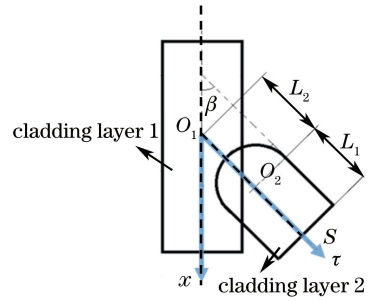


图 6 侧向搭接熔覆喷头扫描路径规划示意图

Fig. 6 Diagram of lateral lap cladding nozzle scanning path

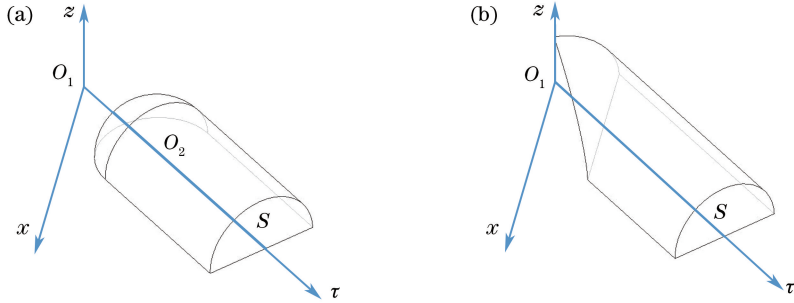


图 7 搭接筋熔道模型。(a)理论搭接筋;(b)实际搭接筋

Fig. 7 Connecting rib weld model. (a) Theoretical; (b) actual

已知,通过计算  $L_1$  的值可以得到偏移量  $L_2$ ,从而控制侧向搭接量。

据图 3 模型可得  $V_1$  表达式为

$$V_1 = V_0 + J \times L_1, \tag{2}$$

由理论搭接筋与实际搭接筋体积不变原则得熔覆长度  $L_1$  的表达式为

$$L_1 = \frac{V_1 - V_0}{J} = \frac{V_2 - V_0}{J}, \tag{3}$$

偏移量  $L_2$  的表达式为

$$L_2 = L - L_1 = L - \frac{V_2 - V_0}{J}. \tag{4}$$

特别地,当  $\beta=90^\circ$  时,设  $L=3\text{ mm}$ ,代入(2)式得  $V_1=V_2=1.107627\text{ mm}^3$ ,由(4)式计算出偏移量  $L_2=1.70\text{ mm}$ 。对图 1 设计的零件模型进行路径规划,成形与双层薄壁成  $90^\circ$  的连接筋,根据等体积法侧向搭接工艺计算出合理的扫描路径偏移量,进行实验,得到图 8 所示的单层截面熔覆形貌,由图 8 可以看出筋、壁连接处较为平整,未出现明显的凹凸不平。



图 8 带筋双层薄壁件截面熔覆形貌

Fig. 8 Sectional cladding morphology of ribbed double thin-walled parts

### 3.3 基于层高检测技术的激光功率控制工艺

进行连续堆积成形实验过程中,发现连接筋处堆积高度与内外层圆环薄壁并不一致,连接筋处产生了凹



陷,凝固的熔池大部分用以填充凹陷,致使筋的高度偏低。随着堆积的进行,筋与内外层圆环的高度差越来越大,如图 9 所示。在相同的工艺参数条件下堆积直壁墙,实验发现,随着堆积的进行,熔覆层的截面轮廓将逐步变宽而失稳<sup>[1]</sup>,如图 10 所示。这是因为在堆积成形起始阶段时,热量经由基板、空气进行散热,热量损失较快,熔池能量密度较为稳定。随着堆积层数的增加,散热状态逐渐转变为向空气传递热量以及经由成形件向基板传递热量,散热效率极大降低,能量逐层累积,相当于激光功率逐渐升高,熔覆层形貌发生改变。筋、壁连接处凹凸形貌主要依靠侧向搭接工艺计算的路径规划中起、停偏移量来控制,双层薄壁间的间距直接影响到扫描路径偏移量计算的准确与否。因此通过调节激光功率的方法来获得稳定的熔覆层形貌,使得堆积过程能够顺利进行。

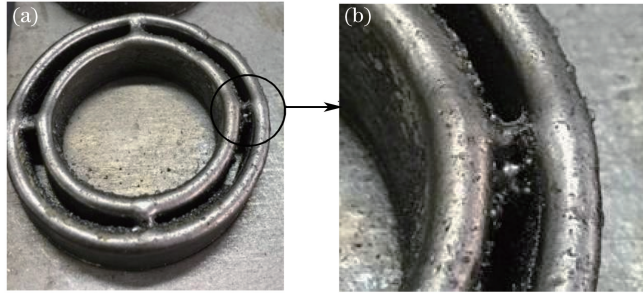


图 9 功率不变条件下的筋、壁搭接处形貌。(a)整体;(b)局部放大

Fig. 9 Connection morphology at constant power. (a) Overall; (b) local amplification

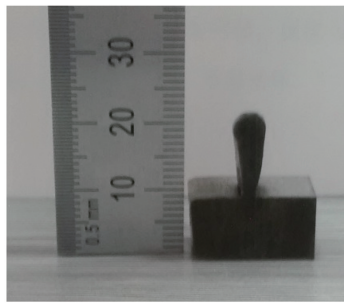


图 10 功率不变情况下直壁墙堆积形貌

Fig. 10 Straight wall morphology at constant power

进行激光功率对熔覆层形貌影响的实验,得到表 2 所示数据。

离焦量  $f$  为  $-4$  mm,扫描速度  $v$  为  $10$  mm/s, $\lambda$  为熔道的宽高比。当激光功率  $P \in [800 \text{ W}, 1800 \text{ W}]$  时,随着激光功率的增加,单道熔覆宽度、高度均略有增大,但宽高比稳定在  $7.2 \sim 7.9$  之间。根据上述分析,将保持熔覆层形貌稳定的问题简化为保持熔覆层高度稳定。根据研究发现,熔覆层高度确定时,喷头的理论提升量为一个定值<sup>[1]</sup>,因此只需保持喷头实际提升量稳定为理论提升量,即可保持熔覆层截面轮廓的稳定。基于层高检测技术,可以获得准确的喷头提升量,这为控制熔覆层形貌稳定提供了途径。基于层高检测技术的功率控制过程如图 11 所示。

表 2 激光功率对熔覆层形貌的影响

Table 2 Effect of laser power on cladding layer morphology

$P / \text{W}$	$w / \text{mm}$	$h / \text{mm}$	$\lambda$	$P / \text{W}$	$w / \text{mm}$	$h / \text{mm}$	$\lambda$
600	2.52	0.20	12.6	700	2.54	0.25	10.16
800	2.50	0.32	7.81	900	2.60	0.33	7.88
1000	2.66	0.34	7.82	1100	2.76	0.35	7.89
1200	2.80	0.36	7.78	1300	2.86	0.38	7.53
1400	3.02	0.40	7.55	1500	3.10	0.42	7.38
1600	3.20	0.42	7.62	1700	3.28	0.45	7.29
1800	3.34	0.46	7.26	1900	3.40	0.49	6.39

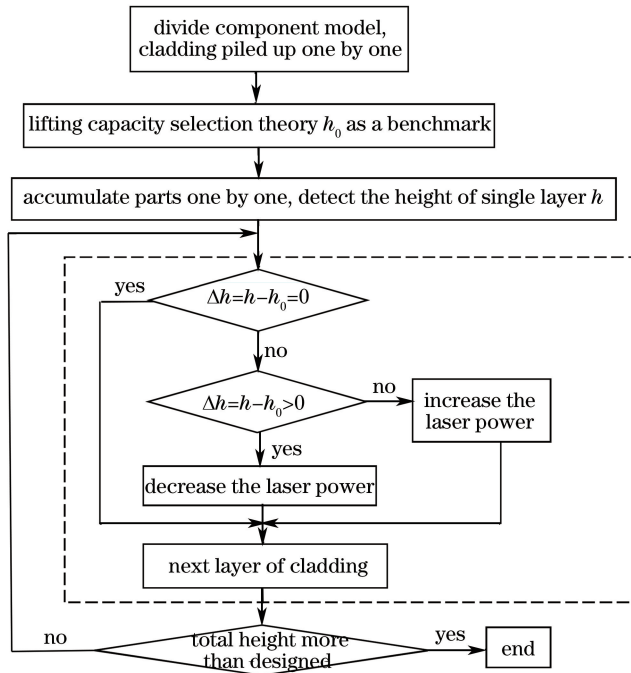


图 11 功率控制流程图

Fig. 11 Power control flow chart

喷头理论提升量  $h_0$  的表达式为<sup>[11]</sup>

$$h_0 = \frac{\alpha}{\alpha + 1} h, \quad (5)$$

代入数据得到理论提升量  $h_0 = 0.2412 \text{ mm}$ 。

根据表 2 所测数据可以看出,随着激光功率的增加,熔覆层高度  $h$  逐渐增大,当  $P \in [800 \text{ W}, 1800 \text{ W}]$  时近似为线性关系。建立  $P$  关于  $h$  的经验回归方程为

$$P = 6250h - 1114. \quad (6)$$

图 12 为功率与熔覆层高度关系图,图中直线表示  $P$  关于  $h$  的一元回归方程。由图可以看出当  $P \in [800 \text{ W}, 1800 \text{ W}]$  时,离散的点基本稳定在回归直线的附近,因此逐层功率调整模型为  $\Delta P = 6250 \times \Delta h$ 。

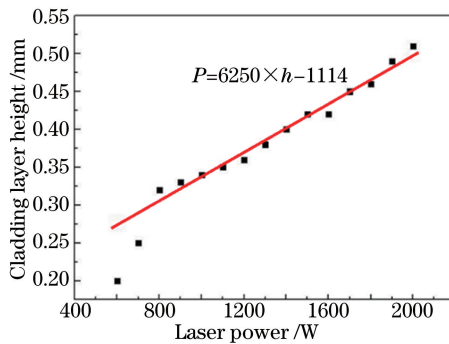


图 12 激光功率与熔覆层高度的关系

Fig. 12 Relationship between laser power and height of the cladding layer

激光功率不断调整,直到喷头单次提升量接近  $h_0 = 0.2412 \text{ mm}$  时,表明激光功率输入与散热保持平衡,此时激光功率基本稳定不变,熔道截面形貌趋于稳定。

#### 4 实验结果与讨论分析

图 13 为带筋双层薄壁件激光直接成形件,成形件表面形貌良好,无宏观裂纹、变形等缺陷。

对带连接筋双层薄壁成形件进行粗糙度检测得到  $R_a \approx 24.6 \mu\text{m}$ , 对成形件的尺寸进行测量, 得到表 3 所示成形件尺寸偏差表, 可知尺寸偏差最大为 4.72%。

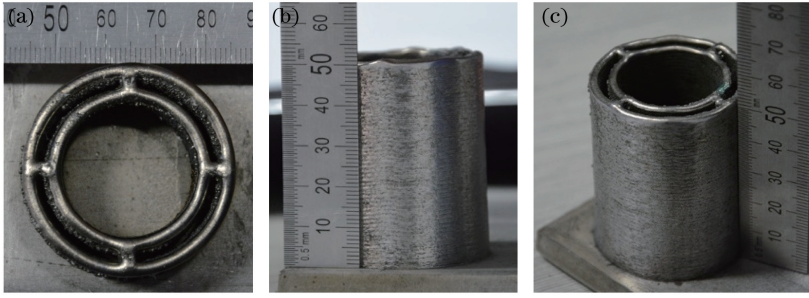


图 13 带筋双层薄壁件激光直接成形件

Fig. 13 Laser direct formed ribbed double thin-walled parts

表 3 带筋双层薄壁成形件尺寸偏差表

Table 3 Dimensional deviation table of ribbed double thin-walled parts

Item	Height /mm	Maximum diameter /mm	Minimum inner diameter /mm	Wall thickness /mm	Gap /mm
Measured	50.8	42.8	28.8	2.5000	2.6
Designed	50.0	42.5	27.5	2.5248	2.5
Deviation /%	1.60	0.71	4.72	0.98	4.0

从成形件距离基板 30 mm 处不同位置制备金相试样, 先进行打磨、抛光, 再用质量分数为 65%~68% 浓硝酸与质量分数为 36%~38% 浓盐酸配制体积比为 1:3 的溶液, 对试样进行腐蚀处理, 在 SU5000 型扫描电镜 (SEM) 下观测显微组织。图 14(a) 所示为筋、壁搭接处金相试样宏观形貌, 整体并无裂纹、气孔等缺陷; 图 14(b) 所示为薄壁处显微组织, 图 14(c) 为筋、壁搭接处显微组织, 图 14(d) 为筋显微组织, 由图可看出显微组织以致密均匀的树枝晶为主, 筋搭接处成形组织致密, 无裂纹、气孔等缺陷。

采用 MH-5 型维氏显微硬度仪, 测量成形件  $z$  轴方向的硬度。测试原理为依靠菱形锥头对金相试样施压, 通过施加的载荷以及压痕面积得到维氏显微硬度值, 实验测试时加载载荷为 200 g, 加载时间为 15 s。对成形件进行剖切并取样, 图 15 为硬度测量试样示意图, 图 15(b) 为连接筋试样, 图 15(c) 为内、外环薄壁试样。以距离基板高度  $z=30 \text{ mm}$  处取样为例, 连接筋处试样是尺寸为  $5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的矩形块, 内、外环薄壁试样均为  $2.5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的矩形块, 试样经过打磨、镶样处理后测量硬度。图 15(b) 中 a、b、c 位置处分别为筋与外环薄壁搭接处、连接筋中部、筋与内环薄壁搭接处, 图 15(c) 中的 d、e 位置分别为外

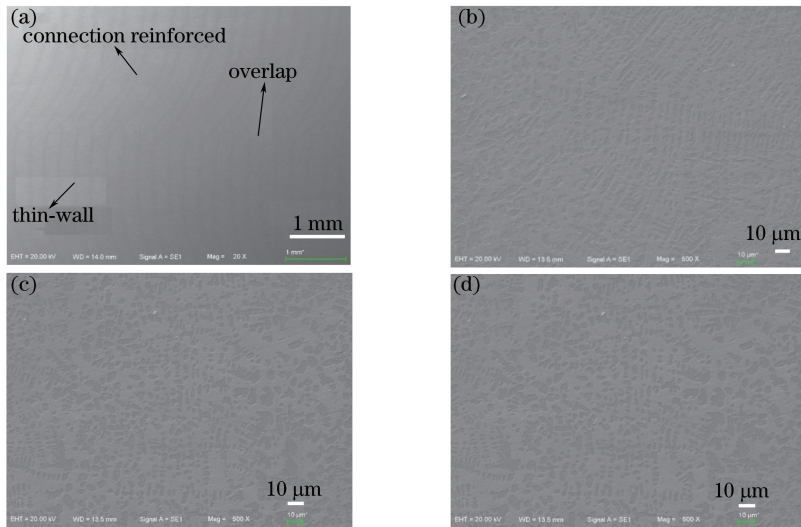


图 14 带连接筋双层薄壁件 SEM 图片。(a) 筋、壁搭接处宏观形貌; (b) 薄壁处; (c) 筋搭接处; (d) 连接筋

Fig. 14 Microstructure of ribbed double thin-walled parts. (a) Morphology of overlap; (b) thinwall;

(c) overlap; (d) joint of wall and reinforcement

环薄壁、内环薄壁处,在 a、b、c、d、e 每个位置处各测量 3 个点的硬度,计算硬度平均值作为该位置处的硬度, a 与 c 位置处硬度的平均值作为筋、壁搭接处的硬度,d 与 e 位置处硬度的均值为薄壁的硬度,b 位置处的硬度即为连接筋的硬度。从成形件距离基板不同高度处进行取样、打磨、镶样,测量硬度,得到图 16 所示显微硬度分布折线图。

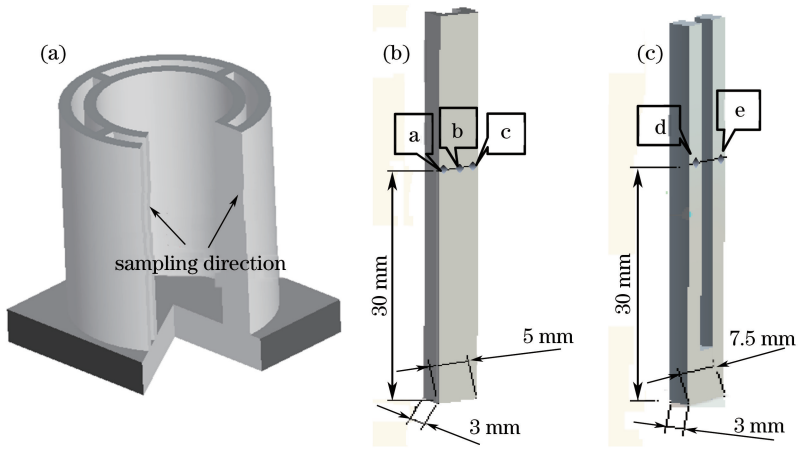


图 15 硬度测量试样示意图。(a)连接筋;(b)(c)内、外环薄壁处

Fig. 15 Hardness measurement sample diagram. (a) Connection reinforced; (b)(c) inner and outer thinwalls

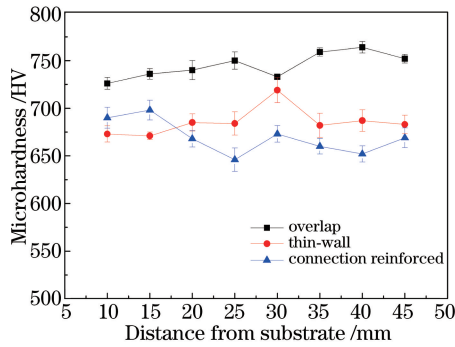


图 16 显微硬度分布

Fig. 16 Microhardness distribution

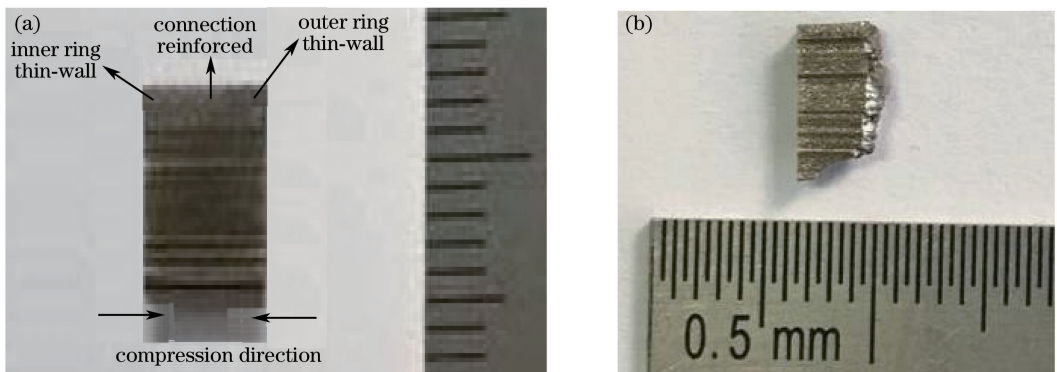


图 17 筋搭接处压缩实验。(a)试样制备;(b)断裂后试样

Fig. 17 Compression test. (a) Sample preparation; (b) sample after fracture

由图 16 可以看出成形件沿 z 轴方向硬度值在 640~770 HV 区间,硬度较高。同一结构特征不同高度处显微硬度有略微波动但整体较为平稳,不同结构特征在同一高度处的硬度分布存在差异。筋、壁搭接处的硬度较其他部位的硬度略高,这是由于成形连接筋时对已成形内、外环薄壁进行了重熔,使得筋、壁搭接处以及薄壁的高度硬度略高于连接筋中部。



$z = 30$  mm 位置的带筋双层薄壁成形筋搭接处制备压缩实验标准试样,如图 17(a)所示,试样为矩形薄片,厚度为 1.48 mm、长度 7.14 mm、截面积  $10.56 \text{ mm}^2$ 。进行压缩实验,压缩速度为  $0.2 \text{ mm/s}$ ,随着应变增加,最终发生脆性断裂。压缩断裂后试样如图 17(b)所示,由图可知断裂位置距离薄壁边界约 3 mm,即试样断裂后筋仍与薄壁相连接,据此可以得出筋搭接处抗压强度大于薄壁处。

## 5 结 论

通过控制熔覆路径规划中起、停偏移量来控制侧向搭接量。筋、壁连接处夹角  $\beta = 90^\circ$  时,采取偏移量  $L_2 = 1.70 \text{ mm}$  进行成形时,筋、壁连接处形貌平整。利用层高检测技术获得喷头的实际提升量,比较喷头实际提升量  $h$  与理论提升量  $h_0$  的大小关系,逐层调整功率来稳定熔道的生长量,保证了熔覆层轮廓稳定,实现了连续堆积成形。完成了高度大于 50 mm 的带筋双层薄壁件激光直接成形实验。双层薄壁件间隙约为 2.6 mm,成形件形貌良好,表面平整;尺寸偏差控制在 5% 以内;显微组织致密均匀,无裂纹、气孔等缺陷,筋、壁连接处熔道结合良好,过渡平整。

## 参 考 文 献

- [1] 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: 57-60.
- [2] Wang Junwei, Chen Jing, Liu Yanhong, *et al.* Research on microstructure of TC17 titanium alloy fabricated by laser solid forming[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 847-851.  
王俊伟, 陈 静, 刘彦红, 等. 激光立体成形 TC17 钛合金组织研究[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 847-851.
- [3] Zhou Chaojun, Sun Wenlei. Review on laser remanufacturing research based on laser cladding[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(9): 5-9.  
周超军, 孙文磊. 基于激光熔覆的激光再制造研究综述[J]. 矿山机械, 2015, 43(9): 5-9.
- [4] Griffith M L, Harwell L D, Romero J A, *et al.* Multi-material processing by LENS<sup>TM</sup> [C]. Solid Freeform Fabrication Symposium, 1997.
- [5] Dong Peng, Chen Jilun. Current status of selective laser melting for aerospace application abroad [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014, 2(1): 1-5.  
董 鹏, 陈济轮. 国外选区激光熔化成形技术在航空航天领域应用现状[J]. 航天制造技术, 2014, 2(1): 1-5.
- [6] Wadley H N G, Fleck N A, Evans A G. Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63(16): 2331-2343.
- [7] Zhong Minlin, Yang Lin, Liu Wenjin, *et al.* Laser direct manufacturing W/Ni telescope collimation component [J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(4): 482-486.  
钟敏霖, 杨 林, 刘文今, 等. 激光快速直接制造 W/Ni 合金太空望远镜准直器[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 482-486.
- [8] 石世宏, 傅戈雁, 王安军. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头: CN200610116413.1[P]. 2008-03-26.
- [9] Di Keyun. Primary study of lean parts on inside-laser coaxial powder feeding device and process of laser cladding rapid prototyping[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] Wang Tao, Fu Geyan, Shi Shihong. Embedded machine vision online measure-control system of defocusing amount in laser cladding forming [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303011.  
王 涛, 傅戈雁, 石世宏. 基于嵌入式机器视觉的激光熔覆成形熔池离焦量在线测控系统[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303011.
- [11] Lu Bin, Zhu Gangxian, Wu Jizhuo, *et al.* Laser direct forming process of thin-walled blade using variable spot by inside-beam powder feeding [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1203003.  
陆 斌, 朱刚贤, 吴继璋, 等. 基于光内送粉激光变斑直接成形薄壁叶片的工艺研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1203003.