封闭空腔回转薄壁件的激光熔覆成形

王 聪[1],石世宏[1],方琴琴[1],石 拓[2],夏志新[1]

(1. 苏州大学 机电工程学院,江苏 苏州 215021;
2. 苏州天弘激光股份有限公司,江苏 苏州 215122)

摘 要:封闭空腔结构具有大倾角的特征,如采用传统的水平分层法堆积,大倾角部分的熔池易产生塌陷,使成形无法进行;采用变角度法向分层堆积大倾角封闭区域时,存在激光与已成形部分的干涉问题。文中基于中空激光光内送粉技术进行了空间堆积封闭半球壳体的研究。将封闭半球壳体划分为变角度法向成形区域和斜定向成形区域,前者采用变角度法向分层方法进行堆积,以消除阶梯效应;后者采用斜定向错位分层方法进行堆积,避免了封闭区堆积时激光与已成形部分的干涉。建立了斜定向分层堆积偏移模型,并通过斜墙试验验证了可行性,最终完成了封闭半球的熔覆成形。检测结果表明,成形件表面平整,尺寸误差在 5%以内,壁厚稳定在 2.7 mm 左右,两种成形区域的显微组织整体均匀致密,硬度和强度总体保持稳定。

关键词:激光熔覆; 光内送粉; 斜定向分层; 封闭回转件
中图分类号:TN249 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201746.0106006

Laser cladding forming of closed hollow cavity rotary thin-wall parts

Wang Cong[1], Shi Shihong[1], Fang Qinqin[1], Shi Tuo[2], Xia Zhixin[1]

(1. School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China;
2. Suzhou Tianhong Laser Co., Ltd., Suzhou 215122, China)

Abstract: Many parts with closed cavity structure are widely used in many fields. This kind of structure has large incline angle, the molten pool will collapse and even the forming is unable to continue, when the way of horizontal slices is adopted. Especially, there is interference between parts deposited and the laser beam by the method of variable angle normal direction slices without adjacent layers. Based on hollow laser beam inside powder feeding technology, the closed hemisphere shell parts was researched. The closed hemisphere shell parts were divided into two parts including normal direction slices area and oblique orientation slices area. Normal direction slices method was used to eliminate staircase effect when depositing normal direction area and the oblique orientation dislocation slices method was adopted to avoid interference between parts deposited and the laser beam. The offset model of oblique orientation oblique orientation was established and the feasibility was verified by inclined wall depositing

收稿日期:2017-06-10; **修订日期**:2017-08-20
基金项目:国家自然科学基金(51675359);国家重点研究发展计划(2016YFB1100300)
作者简介:王聪(1991-),男,硕士生,主要从事激光熔覆快速成形方面的研究。Email: 1182609970@qq.com
通讯作者: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。Email: shishihongstu.suda.edu.cn

experiment. The cladding forming of the closed hemisphere shell was finished. Results show that the surface of the formed parts is smooth, the size error is within 5%, the thickness is stable around 2.7 mm, the microstructure of two forming area is compact, the distribution of hardness and tensile strength are stable.

Key words: laser cladding; laser beam inside powder feeding; oblique orientation slices; closed cavity rotary parts

0 引 言

封闭空腔结构零件,如航空发动机壳体、薄壁压力容器封头等,在航空航天、核电、化工领域都有广泛应用。传统上采用锻造、机械铣削、焊接等方式进行加工生产周期长,材料浪费严重,某些情况下难以满足使用性能要求[1-2]。激光熔覆成形(LCF)技术是一种金属零件的快速成形技术,可进行高性能、结构复杂零件的快速、无模具制造[3-5],因此对激光熔覆成形高性能封闭薄壁件的研究具有重要意义。

封闭件大多含有较大倾斜角度的部分, 现有文献已对倾斜结构件熔覆成形做了许多研究[6-7]。SLM 技术堆积可采用添加支撑材料的方式支撑倾斜部位[8],但倾角过大(例如大于 75°)时难以成行;采用 LCF 水平分层堆积大倾角部分时,错位过多时将造成熔池塌陷,无法成形。尚晓峰等[9]研究得出金属零件堆积极限倾斜角为 30.4°的旋转薄壁件;王续跃等[10]采用变 Z 轴提升量法研究圆形倾斜薄壁件的成形, 获得最大倾角为 39.5°的薄壁件。文中封闭空腔零件结构最大倾角达到 90°,现有方法尚无法成形这类结构。

苏州大学石世宏等发明了一种中空激光光内送粉技术。其单粉束从光束中心送入,具有优异的的粉末汇聚性和可控性,特别适合空间变姿态熔覆成形[11]。朱刚贤等[12]利用光内送粉熔覆喷头研究了基板不同倾斜角度下对熔覆层截面尺寸及组织的影响规律,为非水平基面熔覆成形提供了基础。石拓[13]等采用变角度法向分层技术无支撑成形出 0°~81°变化的悬垂件,表面无“阶梯效应”。

对文中涉及的大倾角封闭件堆积问题, 若采用变角度法向分层法在接近封口处会出现光束与已成形部分的相互干涉问题。文中利用中空激光光内送粉技术, 采用变角度法向分层法和斜定向错位分层法相结合的方式成形封闭回转薄壁件, 完成了封闭半球壳体的堆积。

1 试验条件与工艺参数

试验采用的基体材料为 304 不锈钢。成形金属粉末为 Fe313,粉末粒度为 45~74 μm,粉末化学成分(%)为 0.1C,2.5~3.5Si,13~17Cr,0.5~1.5B,余 Fe。

中空激光光内送粉喷头的原理如图 1 所示。光路转换系统将圆柱形光束转化为锥形中空光束,单根粉管居中,外侧设置有环状准直气管。粉束受到载气和保护气压力作用克服了重力对粉末的影响,光粉达到精准耦合。光内送粉具有优异的粉束集束性能,可在空间任意角度熔覆,满足文中非水平分层成形封闭回转薄壁件的要求。

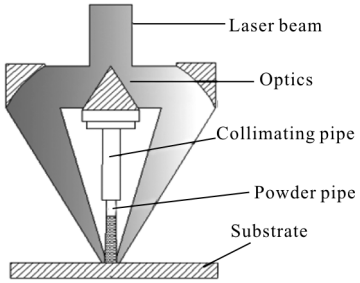


图 1 中空激光光内送粉原理图

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

成形试验采用IPG YLS-2000-TR 型 2 kW 光纤激光器,配 GTVPF2/2 型送粉器。运动装置由 6 轴 KUKA 机器人和旋转工作台组成。使用氮气作为送粉载气和保护气体。

选用成形工艺参数为:激光功率 630 W,送粉量为 8 g/min, 扫描线速度 V=5 mm/s, 激光离焦量为-3.5 mm。使用笔者所在实验室研发的层高检测系统[13]测量并反馈控制每层熔覆层的高度。

2 分层模型

2.1 封闭件分层方法

目前一般采用的分层方式为水平分层法。熔覆

喷头始终沿竖直和水平方向运动。倾角 β 是侧面与竖直面之间的夹角,由下式确定:

$$\beta=\arctan(\Delta x/h) \tag{1}$$

式中:Δx 为层间水平偏移量;h 为单道高度。

由公式(1)可以看出,偏移量 Δx 增大到一定程度时熔道发生塌陷,熔覆无法继续进行,所以倾角 β 存在极限值,即水平错位分层堆积倾斜结构件时受到倾斜极限的限制[7]。

孟伟栋、石拓等[13-14]提出了法向分层法成形出大角度开放端面倾斜的结构件,熔覆过程中使得光束、粉束的轴线与待加工平面的法向始终保持一致。但是对于封闭空腔回转薄壁件而言,由于光束几何尺寸的限制,采用法向分层法使得在大倾角封闭处光束与已成形部分发生相互干涉,导致成形过程无法进行,如图2 所示。

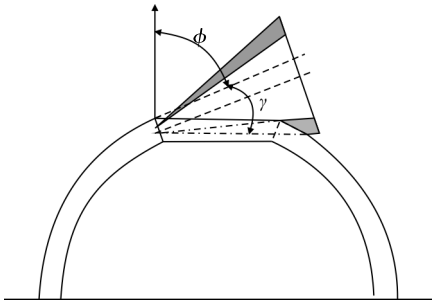


图 2 激光光束与成形部分的干涉示意图

Fig.2 Schematic of interference between laser beam and parts deposited

光束干涉范围主要与加工位置零件倾角 ϕ 和光束半锥角 γ 有关。熔覆喷头光束半锥角 20°,按照几何关系光束倾角大于 70°时发生干涉。由于通常在激光离焦下熔覆和激光存在衍射现象,实际最大倾斜角小于 70°,文中根据实际情况主要研究最大倾角为 60°的部分。

结合水平错位分层和法向分层的特点,提出变角度法向分层和斜定向错位分层相结合的分区分层法来解决塌陷和干涉问题,原理如图 3 所示。将零件分为变角度法向成形区和斜定向成形区,ϕ_{max} 为无干涉变角度法向堆积最大倾角。变方向成形区采用法向分层方法堆积;斜定向成形区采用斜定向错位分层法堆积,光束倾角固定且轴线与堆积平面法线形成一定的夹角,光束在层间沿光束轴线和轴线垂直方向进行偏移,避免光束与已成形区域发生干涉。

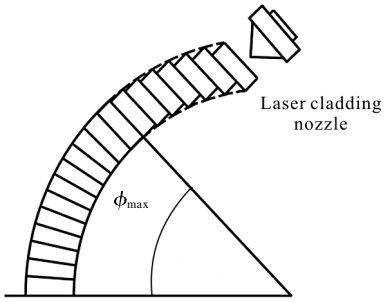


图 3 斜定向错位分层堆积原理图

Fig.3 Principle diagram of oblique orientation dislocation slices

2.2 斜定向错位分层偏移模型

以倾斜薄壁墙为研究对象,建立光束的偏移模型。为方便数学模型的建立,假设:将熔覆层横截面简化为矩形,且工艺参数稳定时,每层熔覆层的状态完全相同。

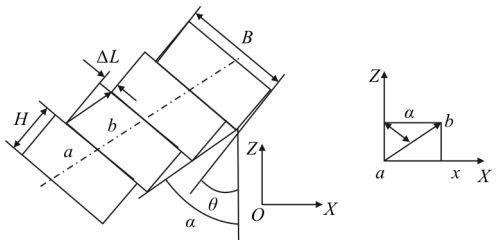
图 4(a)为斜墙堆积偏移模型示意图,α 为斜墙倾角,θ 为光束倾角,H 为熔覆层高度,ΔL 为下一层在光束轴线垂直方向偏移量,x、z 分别为光束加工位置在坐标系 X 轴和 Z 轴方向的偏移量。每成形完一层,光束在轴线方向的提升量熔覆层的高度 H,偏移量 ΔL 满足下面关系:

$$\Delta L=H\tan(\alpha-\theta) \tag{2}$$

如图 4(b)将光束加工位置偏移向量 $\overrightarrow{ab}$ 向 X 轴和 Z 轴投影可得到 x、z 的计算公式:

$$x=H/\cos(\alpha-\theta)*\sin\alpha \tag{3}$$

$$z=H/\cos(\alpha-\theta)*\cos\alpha \tag{4}$$



(a) 斜墙偏移模型 (b) 偏移向量分解

(a) Offset model of inclined wall (b) Offset vector decomposition

图 4 斜向错位分层偏移模型

Fig.4 Offset model of oblique orientation slices

斜定向错位分层是一种层间错位分层,零件能够成功堆积的条件为悬伸部分的熔池不发生塌陷。

如图 5 为相邻两层堆积的示意图，熔池不产生塌陷的临界条件为悬伸部分的重力等于熔池对该部分的粘性力 F,设熔道的长度为 L,悬伸部分的重力 G 为：

$$G=mg=\frac{1}{2}\rho gLH(2\Delta l+H\tan\theta) \tag{5}$$

式中：ρ、g 分别为材料的密度和重力加速度。

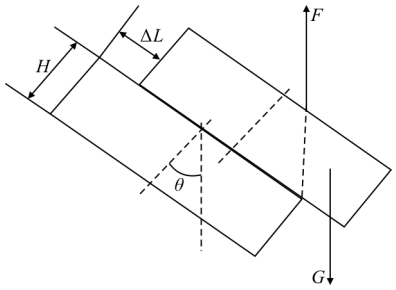


图 5 斜定向堆积示意图

Fig.5 Schematic of oblique orientation forming

悬伸部分受到的粘性力 F 为：

$$F=\sigma S=\sigma LH/\cos\theta \tag{6}$$

式中：σ 为单位面积的粘性力。

当 $G=F$ 时有：

$$\Delta L=\sigma/(\rho g\cos\theta)-\frac{1}{2}H\tan\theta \tag{7}$$

将公式(7)带入公式(2)可得：

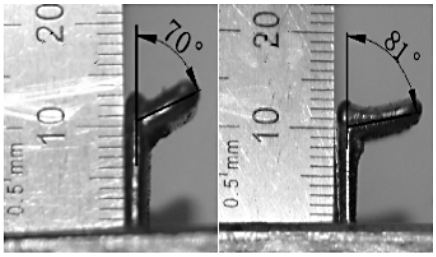
$$\alpha=\arctan(\sigma/(\rho Hg\cos\theta))-\frac{1}{2}\tan\theta+\theta \tag{8}$$

根据公式(2)、(8)可知，斜墙成形角度随光束倾角 θ 和层间偏移量 ΔL 增加而增大，斜定向法层间最大偏移量与材料粘度和光束倾斜角 θ 有关。当斜墙倾角 α 一定时，采用斜定向错位分层时熔覆层的无支撑悬伸量 ΔL 比水平错位分层悬伸量 Δx 要小。当偏移量 ΔL 满足熔道不塌陷条件且一定时，可堆积最大倾角 α 随光束倾角 θ 的增加而增加，随熔覆层高度的减小而增加，可通过增加光束倾角和减小层高以增加斜定向堆积角度。

3 堆积试验

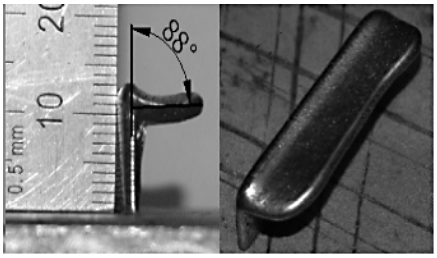
3.1 模型验证

利用第 1 节中模型在光束倾角为 60°时堆积倾角为 70°、80°、90°的斜直墙以验证斜定向分层法的可行性。选用第 2 节中的工艺参数时，熔道质量良好，此时熔道的高度 H 为 0.4 mm，试验结果如图 6 所示，斜墙的剖面如图 7 所示。



(a) 70° (b) 80°

(a) 70° (b) 80°



(c) 90° (d) 80°成形件侧视图

(c) 90° (d) Side view of inclined wall of 80°

图 6 不同角度下的斜墙堆积试验结果

Fig.6 Inclined wall experiment results with different angle

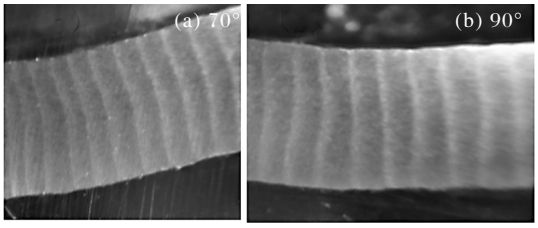


图 7 斜墙熔道轮廓

Fig.7 Cladding contour of inclined wall

可见堆积的斜直墙表面平整，角度误差较小。熔道基本上沿着设计的方向生长，未出现熔道塌陷现象，说明悬伸部分重力小于熔池对其的粘性力。试验结果表明，采用斜定向错位分层堆积时，可以进行倾角为 90°以内结构的堆积，较水平分层相比具有更大的倾斜极限。因此利用此方法适于处理无干涉堆积封闭件的大倾角部分。

3.2 封闭半球的堆积

实验堆积一个封闭半球，剖截面如图 8 所示。零件设计壁宽为 2.7 mm，底部为 3 mm 直墙作为过渡段，上部为中心半径为 25 mm 的封闭半球。

熔覆喷头在竖直平面内作圆弧运动，转台每转动一周，喷头移动一次，将每层的轨迹信息用 OrangeEdit 软件进行高级编程，然后导入 KUKA 机器人。

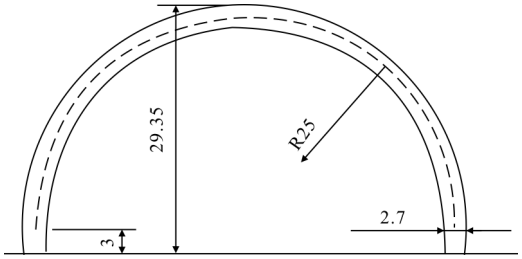


图 8 半球成形件设计模型

Fig.8 Design model of hemisphere forming part

在圆心角 60°以内弧段采用法向分层堆积方法,大于 60°的部分采用斜定向错位堆积法,光束的倾角始终为 60°。

0°~60°弧段内单个熔覆层高度 H 看做圆弧的弦长,所以每层的偏转角度为:

$$\Delta\alpha=360\arcsin(H/(2R))/\pi \tag{9}$$

如图 9 所示, 大于 60°的部分层数计算从零开始记为 n_1,假设每个熔覆层高度均为 H,根据勾股定

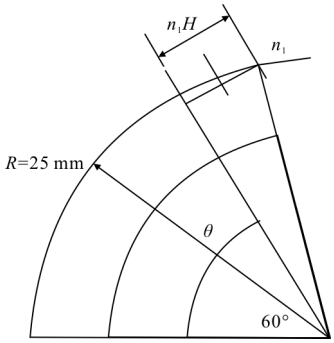


图 9 斜定向区域当前层切线倾角计算原图

Fig.9 Tangent tilt angle calculation principle diagram in current layer of oblique orientation slices area

理可计算第 n_1 层所在位置的切线倾角为:

$$\alpha=180\arcsin(n_1H/R)/\pi+60 \tag{10}$$

代入偏移计算公式得:

$$x=H/\cos(180\arcsin(n_1H/R)/\pi)\cdot \sin(180\arcsin(n_1H/R)/\pi+60) \tag{11}$$

$$z=H/\cos(180\arcsin(n_1H/R)/\pi)\cdot \cos(180\arcsin(n_1H/R)/\pi+60) \tag{12}$$

根据偏移计算公式可以获得每一层的偏移量,写入机器人控制程序进行封闭件的堆积。

在熔覆过程中熔覆喷头需根据熔覆层生长高度进行提升以保持加工位置光斑大小不变, 获得壁厚稳定的成形件。法向分层区每层的转角按照公式(9)给定,熔覆层高度由层高检测系统给定,斜定向错位分层区的偏移按照公式(11)、(12)给定,熔覆层高度为法向分层区域层高的平均值。

每层扫描线速度保持为 5 mm/s,回转半径减小到 9.5 mm 时,转台达到最大转速 5 r/min,扫描线速度将逐渐减小。为避免层间热累积对熔覆层质量的影响, 每完成一层堆积关闭激光冷却 2 s 后进行下一层熔覆。为减少层内热量积累的影响, 设定在回转半径小于 9.5 mm 时,每层的扫描分段进行,每层共分为四段,每完成一段后关闭,旋转到对称位置继续,如图 10 所示,数字为扫描次序,箭头方向为旋转台方向。图 11(a)、(b)为堆积完成的封闭回转件,成形件在斜定向分层区表面比法向分层区域表面略显粗糙,成形件整体表面良好。

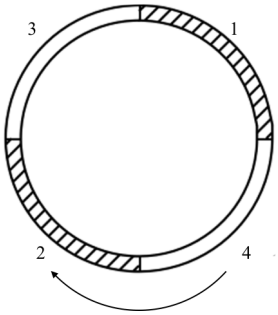
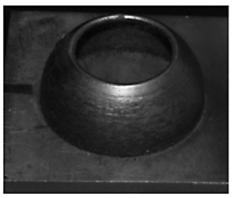


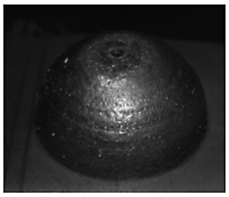
图 10 层内分段扫描顺序图

Fig.10 Scanning order diagram of piecewise within layer



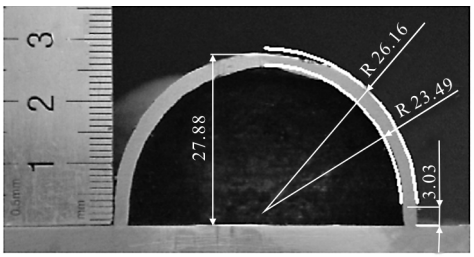
(a) 法向成形部分

(a) Formed part by normal direction slices



(b) 法向成形和斜定向成形半球

(b) Hemisphere formed parts by normal direction and oblique orientation slices



(c) 成形件剖面形貌

(c) Profile morphology of the formed part

图 11 成形件侧视图及剖面图

Fig.11 Side view and profile of the formed parts

4 成形件的检测

4.1 尺寸检测

用线切割机沿一个过轴线的平面切开，截面形貌如图 11(c)所示。成形件尺寸如表 1 所示。从底部开始测量壁厚，在圆弧段每隔 10°测量一次，壁厚测量结果如图 12 所示。

表 1 成形件外形尺寸测量

Tab.1 Size measurement of the formed part

Features of Fig.10	Designed size / mm	Actual size / mm	Relative error
Total height	29.35	27.88	−5 %
Line wall height	3	3.03	1 %
External radius	26.35	26.16	−0.7 %
Internal radius	23.65	23.49	−0.68 %

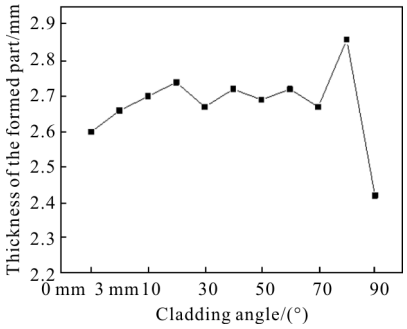


图 12 不同角度下的壁厚

Fig.12 Thickness of different angle

在接近封口的部分由于回转线速度太小，熔池寿命较长，受到重力作用熔道向下偏移，但成形截面依然为圆弧，最大偏移误差为−5 %。靠近基体部分由于开始基板温度较低，熔池传热快，寿命短，熔道的宽度小于设计尺寸，如图 12 所示。零件的整体壁厚稳定在 2.7 mm 左右，在斜定向分层区由于速度的减慢和热量的积累，熔池的寿命增加，对熔道具有宽化作用，消除分层方式带来的影响，熔道宽度仍能保持相对稳定，最大绝对误差为 0.4 mm，在误差允许范围内。

4.2 组织分析

沿过某轴线的平面切取 1/4 弧段，图 13 为整体剖面图，图 13(a)、(b)为变角度法向分层区域，图(c)、(d) 为斜定向分层区域。在 SU500 型扫描电镜下进行观察，图 14(a)~(d)分别为图 13 *a*、*b*、*c*、*d* 标示位置的电镜组织图片。

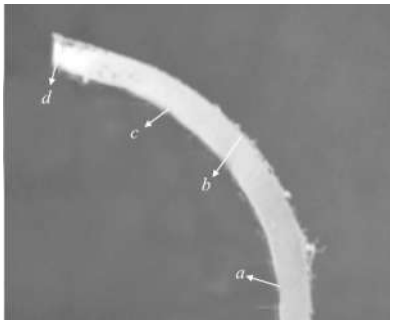


图 13 成形件切样剖面图

Fig.13 Cut sample section from formed part

激光熔覆成形是快速熔化快速凝固的过程，凝固过程中具有较大的冷却速度和较大的过冷度，晶粒较为细小。图 13(a)~(d)的位置，组织为方向不明显的枝晶和胞晶。随着熔覆过程的进行，成形件受到热循环作用而产生热量积累，此时温度较高，过冷度减小，冷却速度降低，熔池寿命增长，晶粒尺寸略有增大。法向分层区和斜定向分层区组织无明显差别，成形件整体组织过度均匀，组织致密，具有良好的成形质量。

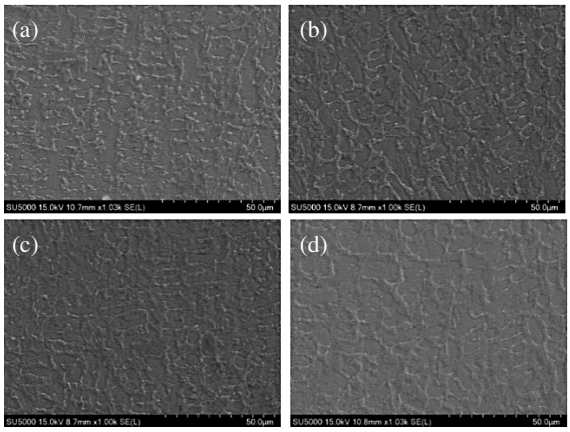


图 14 成形件图 13 标示部位 SEM 照片

Fig.14 SEM photo of marked area of formed part in Fig.13

4.3 显微硬度分析

使用 MH5 型显微硬度计测量不同角度下的显微硬度值，结果图 15 所示。

由测量结果可知，靠近基体的直墙部分硬度较低，最小为 584.8 HV。随着熔覆层的生长硬度值逐渐增加，倾角在 0°~ 80°基本保持在 690 HV 附近，最大为 708 HV。大于 80°时，硬度值有所下降，主要

是由于热量的积累晶粒尺寸变大所致，两种分层区域硬度值无较大差别。

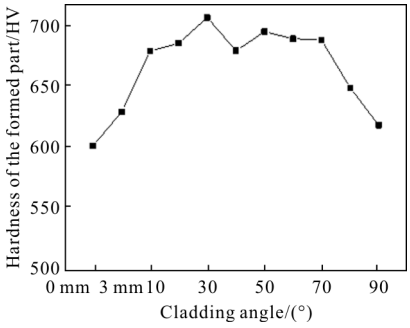
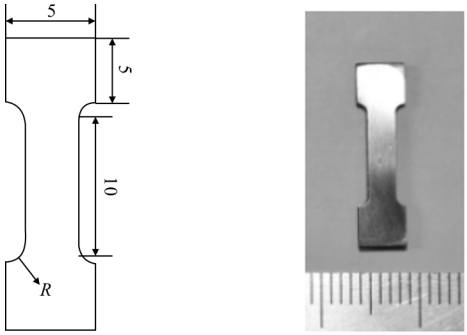


图 15 不同角度下的显微硬度

Fig.15 Microhardness with different angles

4.4 拉伸强度分析

采用 3.1 节的熔覆工艺参数和堆积方式堆积直墙和斜墙，然后分别在直墙和斜墙的中部沿扫描方向和垂直扫描方向取样制备拉伸试样，试样信息如图 16 所示。利用 WDW-100 型电子万能实验机对试样进行拉伸实验，图 17 为直墙和倾角为 80°斜墙的拉伸试验结果。

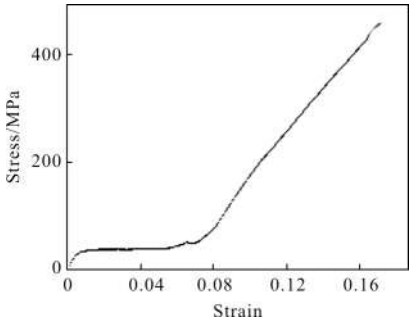


(a) 试样模型 (b) 试样实物

(a) Sample model (b) Sample object

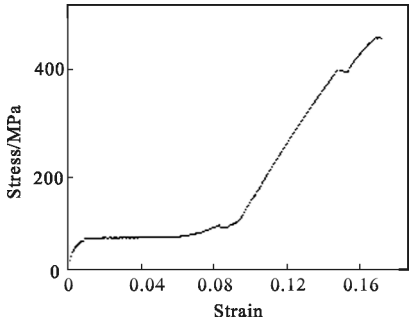
图 16 试样拉伸实验

Fig.16 Tensile test of sample



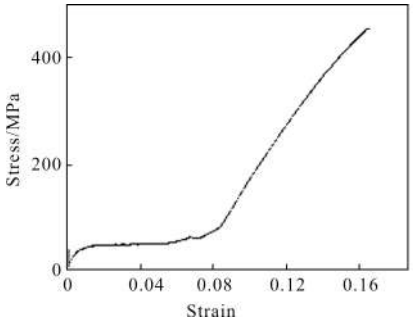
(a) 直墙扫描方向应力曲线

(a) Stress-strain curve of the straight wall in vertical scanning direction



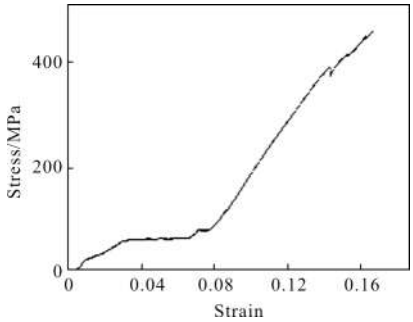
(b) 直墙垂直扫描方向应力的曲线

(b) Stress-strain curve of the straight wall in vertical scanning direction



(c) 斜墙扫描方向应力曲线

(c) Stress-strain curve of the inclined wall in scanning direction



(d) 斜墙垂直扫描方向应力曲线

(d) Stress-strain curve of the inclined wall in vertical scanning direction

图 17 直墙和斜墙应力—应变曲线

Fig.17 Stress-strain curve of the straight wall and inclined wall

直墙沿扫描方向的抗拉强度为 474.27 MPa,垂直扫描方向的抗拉强度为 469.92 MPa,斜定向堆积斜直墙沿扫描方向的抗拉强度为 461.95 MPa,沿扫描方向垂直方向的抗拉强度为 456.90 MPa。两种方式成形部分沿扫描垂直方向的强度略小于沿扫描方向的强度,抗拉强度总体稳定。

5 结 论

(1) 基于光内送粉技术,根据封闭空腔零件的特点提出分区分层的方法。将封闭空腔零件划分为变角度法向成形区域和斜定向成形区域，克服了表面台阶效应和光束与已成形部分的干涉问题，实现了封闭内腔回转薄壁件的激光熔覆成形。成形件整体表面良好,尺寸误差在 5%以内。

(2) 建立了斜定向错位分层偏移模型。熔道基本按所设计的方向生长，熔池未产生流淌。采用斜定向错位分层法可堆积 90°以内的悬垂结构，比水平分层法具有更大的倾角极限。

(3) 成形件在变角度法向分层区和斜定向分层区域组织主要为方向不明显枝晶和胞晶，整体组织均匀致密；倾角在 0°~ 80°基本保持在 690 HV 附近,大于 80°时,硬度值有所下降;拉伸强度总体能够保持稳定。两种分层区域内的组织、硬度和拉伸强度均无明显差别。

参考文献:

[1] Fan Zhang, Zuo Shuchun. Buckling analysis of dished head under external pressure [J]. ***Pressure Vessel Technology***, 2014, 31(1): 34–39. (in Chinese)

[2] Ouyang Huabing, Yu Zhonghai, Chen Tian, et al. Sub–regional process planning for large nuclear power head [J]. ***Machinery Design & Manufacture***, 2014 (5): 253–255. (in Chinese)

[3] Huang Weidong. Laser Solid Forming [M]. Xi′an: North–western Polytechnic University Press, 2007. (in Chinese)

[4] Li Jianzhong, Li Xiangfeng, Zuo Dunwen, et al. Influence of defocusing amount on the process of Al/Ti cladding above 7050 aluminum alloy based on numer–ical simulation study [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(4): 1126–1133. (in Chinese)

[5] Li Rui, Yang Xiaojun, Zhao Wei, et al. Effect of femtosecond laser micromachining on the roughness of cladding sidewalls[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(11): 3244–3249. (in Chinese)

[6] Rajeev Dwivedi, Srdja Zekovic, Radovan Kovacevic. A novel approach to fabricate un –directional and branching slenderstructures using laser –based direct metal deposition [J]. ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, 2007, 47: 1246 – 1256.

[7] Rajeev Dwivedi, Radovan Kovacevic. An expert system for generation of machine inputs for laser–based multi–directional metal deposition [J]. ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, 2006, 46: 1811–1822.

[8] Song Changhui, Yang Yongqiang, Zhang Manhui, et al. Redesign and selective laser melting manufacturing of femoral component based on digital 3D technology [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2014, 22 (8): 2117–2126. (in Chinese)

[9] 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. (in Chinese)

[10] 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. (in Chinese)

[11] Shi Shihong, Fu Geyan, Wang Anjun, et al. Laser forming manufacturing process and nozzle of inside – laser powder feeding: China, Chinese Patent 200610116413[P]. 2006–09–22. (in Chinese)

[12] Zhu Gangxian, Shi Shihong. Research on variable reference plane cladding based on laser Processing robot with inside–laser powder feeding [J]. ***Chinese J Lasers***, 2015, 42(3): 1003003. (in Chinese)

[13] Shi Tuo, Wang Yiqing. Laser cladding forming of cantilevered thin –walled part based on hollow –laser beam inside powder feeding technology [J]. ***Chinese J Lasers***, 2015, 42(10): 0703003. (in Chinese)

[14] Meng Weidong, Shi Shihong. Forming technology research of laser accumulation of reducing solid of revolution with changing laser head posture[J]. ***Chinese J Lasers***, 2015, 42(10): 1003006. (in Chinese)