

不等高弯曲弧形薄壁结构激光熔覆成形

邓志强, 石世宏, 周 斌, 傅戈雁, 王 聪

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

摘要 利用光内送粉熔覆喷头,对弧形工字梁结构件进行了激光熔覆成形,采用激光加载补能方法,避免了薄壁结构件的端部塌陷问题。利用不同离焦位置光束可熔覆不同层高熔道的特点,采用变姿态、径向扫描的方法,熔覆成形了结构件不等高扇形部分;采用变姿态、周向扫描的方法,熔覆成形了结构件的弯曲弧形部分。成形件的最大相对尺寸误差为 -5.9% ,硬度稳定在 690 HV 左右,显微组织致密均匀、无气孔、无裂纹。

关键词 激光技术;激光熔覆成形;光内送粉;弯曲复合结构;端部塌陷

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0902005

Laser Cladding Forming of Unequal-Height Curved Arc-Shaped Thin-Wall Structures

Deng Zhiqiang, Shi Shihong, Zhou Bin, Fu Geyan, Wang Cong

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

Abstract Arc-shaped flanged beam structural parts are formed by the laser cladding technology with an inside-laser powder feeding head. The collapse of ends in thin-wall structural parts is avoided with the method of laser energy loading. Due to the feature that tracks with different layer heights can be cladded by using laser beams at different defocus positions, the unequal-height fan-shaped parts can be formed with the variable-attitude radial-scanning method and the curved arc-shaped parts can be formed with the variable-attitude circular-scanning method. The maximum relative dimensional error of the formed parts is -5.9% , the hardness is stable at about 690 HV, and the microstructure is dense and uniform without holes and cracks.

Key words laser technique; laser-cladding forming; inside-laser powder feeding; curved composite structure; end collapse

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

薄壁部件具有质量轻、生产成本低等优势,被广泛应用于各工程领域。但薄壁部件一般稳定性较差且刚度较低^[1],解决这类问题的方法有两种:一种是通过布置加强筋板实现部件局部加厚,另一种是在特定位置沿特定的受力方向布置加强筋,通常第二种方法效果更好^[2-4]。复合加筋薄壁结构具有相接或相交贯穿等结构特征,加工较为复杂,传统的加工方法一般为焊接、轧制或铸造。

激光熔覆成形是在 20 世纪 90 年代初提出的一项新型制造技术^[5-6],具有一次成形、短流程、无模、组织性能优良等优点,被应用于复杂薄壁零构件和大型承力结构件的制造^[7-8]。钟敏霖等^[9]运用激光技术,制造了等高太空望远镜准直器结构件;方琴琴等^[10]运用激光直接成形技术,加工了等高带连接筋双层薄壁件;美国 GE 公司采用选择性激光熔化(SLM)技术,制备了不等高相交薄壁夹嘴^[11]。采用激光熔覆成形技术加工

收稿日期: 2017-03-21; 收到修改稿日期: 2017-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(51675359)、国家重点研发计划(2016YFB1100300)

作者简介: 邓志强(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆快速成形方面的研究。E-mail: 1174392379@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@stu.suda.edu.cn(通信联系人)

等高薄壁件的工艺较为成熟,一般不等高薄壁件加工采用 SLM 技术,但受到粉床尺寸限制不宜加工体积较大的零件。本文以不等高弯曲弧形工字结构件作为薄壁零件,采用激光加载防塌陷法解决了成形件可能出现的塌陷问题,利用不等高自适应原理实现了成形件的高度变化,并对结构件进行了成形研究与性能分析。

2 实验设备及材料

实验所用基板为 304 不锈钢,粉末为 Fe313,其具体化学成分见表 1。实验成形系统包括中空光光内送粉的激光熔覆喷头、德国 IGP Photonics 公司生产的 YLS-2000-TR 型光纤激光器、德国 GTV 公司生产的 GTV PF2/2 型送粉器,准直气与保护气均采用氮气。由 KUKA 机器人完成空间成形轨迹运动。

表 1 Fe313 合金粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of Fe313 alloy powder (mass fraction, %)

Element	C	Si	Cr	B	Fe
Content	About 0.1	2.5-3.5	13-17	0.5-1.5	Bal.

3 实验方法

3.1 实验工艺参数与零件建模

实验的激光功率为 800 W,扫描速度为 $8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,送粉量为 $8 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$,离焦量为 -3.5 mm 。在此工艺参数条件下,熔覆单道的形貌特征见表 2。

表 2 熔覆单道特征

Table 2 Features of single cladding track

Parameter	Defocusing /mm	Width /mm	Height /mm
Value	-3.5	3.30	0.49

不等高弯曲弧形工字结构模型由内外两个弯曲弧形部分以及中间连接扇形部分组成,如图 1 所示。其中,内外两个弧形拥有相同的圆心与圆心角,连接筋沿圆弧径向堆积而成。

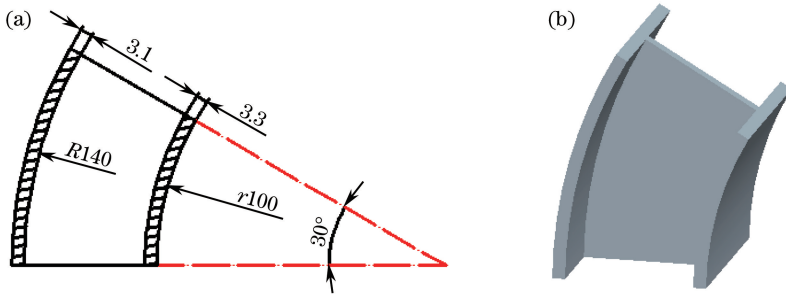


图 1 设计模型的(a)二维图和(b)三维图

Fig. 1 (a) Two-dimensional and (b) three-dimensional diagrams of designed model

3.2 激光加载防塌陷法

基于中空环形激光特征,加工平面上的大部分粉末位于环形激光内,如图 2 所示。在运动扫描阶段,环形激光内粉末吸收的能量主要来源于两方面:一方面是环形激光照射在基板上,基板吸收的热量热传递给粉末;另一方面是激光直接照射在粉末表面。环形激光内的粉末吸收足够多的能量,发生熔化并凝固成形。在扫描末端运动停止位置处,环形激光内的粉末吸收的能量为基板上热传递的热量,该热量不足以使环形激光内的粉末完全熔化,故熔道在关光位置处不够饱满,如图 3 所示。多层堆积后形状误差累积,导致成形件关光处塌陷。为了使熔道关光处足够饱满,需要在该处提供足够的能量,实验采用激光加载的方法使得熔道关光点处具有足够多的能量。

激光加载是指机器人运动到预定轨迹的端点时,保持空间姿态及位置不变,待激光停滞一定时间后再关闭激光执行下一条指令。为求得激光加载的具体时间,通过表 2 选定的工艺参数进行单道熔覆与直墙堆积

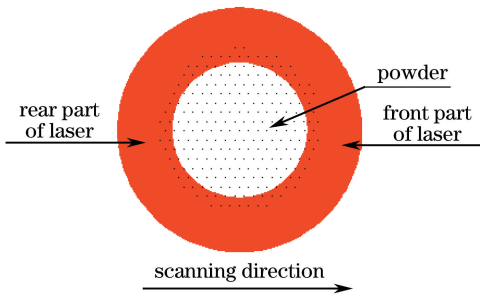


图 2 光粉耦合

Fig. 2 Coupling of laser and powder

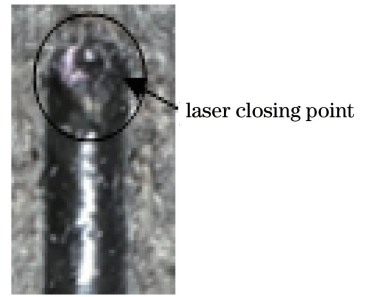


图 3 关光点

Fig. 3 Laser closing point

实验,并建立直墙模型,求取激光加载时间。

直墙堆积采用单向扫描方式避免开光端塌陷的影响,直墙堆积 N 层后,关光端出现图 4(a)所示的塌陷。利用 AutoCAD 软件对成形件塌陷边缘与理想成形件的边缘进行曲线拟合,可以获得直墙因塌陷而未生长成形的部分,如图 4(b)红色曲线所示。将未生长成形部分的形貌视为等截面体,通过“特征”命令可以获得该部分在主视图中的面积 s ,然后根据直墙的实际壁厚即熔覆单道的宽度 d ,求得未生长部分的体积,即塌陷后的直墙与理论直墙之间相差的体积 V 。

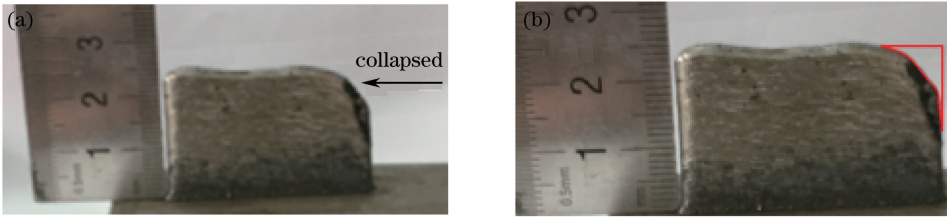


图 4 直墙。(a)塌陷后的直墙;(b)导入 AutoCAD 的直墙

Fig. 4 Thin wall. (a) Thin wall after collapse; (b) thin wall after AutoCAD introduction

采用线切割方式,沿扫描垂直方向切割相同工艺参数条件下成形的熔覆单道,用砂纸打磨后,利用金相电镜拍取熔覆单道横截面的轮廓照片,如图 5(a)所示。将照片导入 AutoCAD 软件,并对熔覆单道边缘进行曲线拟合,如图 5(b)所示,提取轮廓边界线,通过 AutoCAD 软件“特征”命令,获得熔覆单道的横截面面积 s_1 。

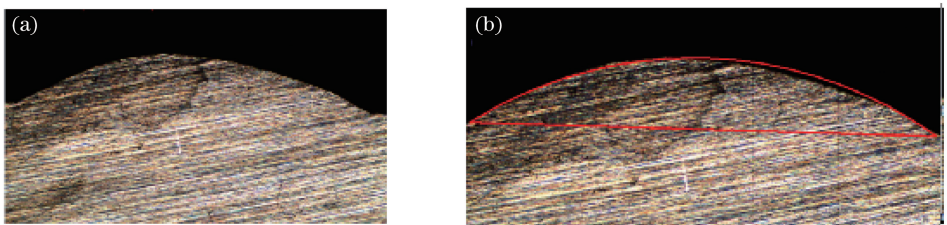


图 5 熔覆单道横截面。(a)横截面轮廓;(b)横截面拟合曲线

Fig. 5 Cross section of single cladding track. (a) Profile of cross section; (b) fitting curve of cross section

为获得激光加载时间,现建立如下假设:零件关光末端的塌陷全由熔道关光点处不够饱满导致;堆积的每一层熔道具有相同的形状特征;塌陷部分的体积等于堆积 N 层加载总时间内熔化粉末的体积,则

$$V = V_1, \quad (1)$$

$$V = sd, \quad (2)$$

$$V_1 = s_1 f T, \quad (3)$$

式中 T 为激光加载 N 层的总时间, f 为激光扫描速度, V_1 为激光加载生成的体积。从而可以获得每一层激光加载时间,即

$$t = T/N. \quad (4)$$

在上述工艺条件下堆积 50 层后,将图形导入 AutoCAD 软件,测得 $s = 20.12 \text{ mm}^2$, $d = 3.3 \text{ mm}$, $s_1 =$

1.66 mm²。根据(4)式可以计算出单层加载时间 $t=0.09$ s。

为验证理论的正确性,在同样的工艺参数下,使用激光加载的方法进行熔覆单道与直墙堆积实验,加载时间为 0.1 s,得到的熔覆单道与直墙分别如图 6,7 所示。实验得到的熔覆单道光处饱满,堆积成形的直墙也有效地避免了塌陷的产生。

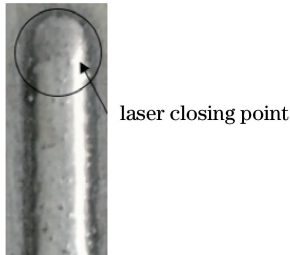


图 6 激光加载后的关光点

Fig. 6 Laser closing point after laser loading

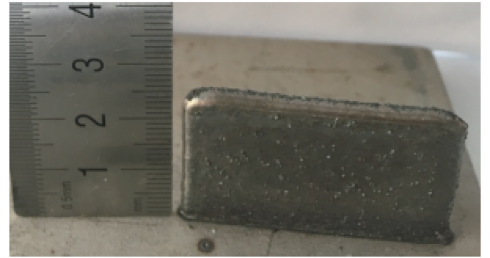


图 7 激光加载后的直墙

Fig. 7 Thin wall after laser loading

3.3 不等高自适应原理

在不改变其他工艺参数条件下,通过改变离焦量进行单道熔覆实验,得到的熔覆单道高度随离焦量的变化曲线如图 8 所示。

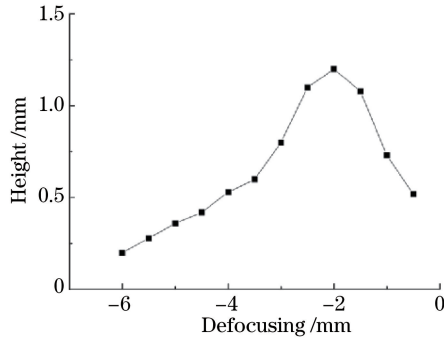


图 8 熔覆单道高度随离焦量变化

Fig. 8 Height of single cladding track versus defocusing

当离焦量在 $-5.5 \sim -2.5$ mm 时,熔覆单道高度随离焦量的变化呈线性变化。对其线性拟合,得到方程为

$$y = -0.167x + 1.26, \quad (5)$$

式中 x 为激光离焦量, y 为熔覆单道生长高度。

3.4 轨迹规划

不等高弯曲弧形工字薄壁的结构模型由内侧半径分别为 140 mm 和 100 mm 的弧形结构 1, 2 以及介于两者之间的扇形结构组成,如图 9 所示。

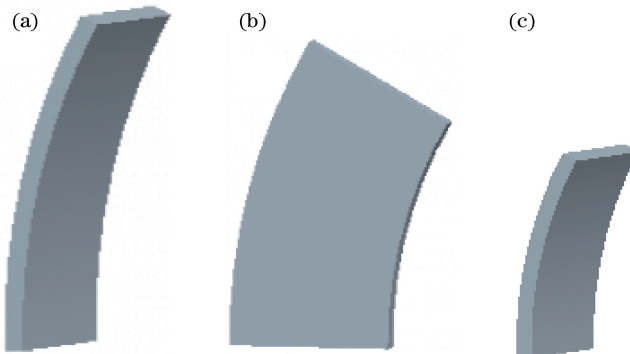


图 9 模型结构。(a)弧形结构 1; (b)扇形结构; (c)弧形结构 2

Fig. 9 Model structure. (a) Arc-shaped structure 1; (b) fan-shaped structure; (c) arc-shaped structure 2

采用法向分层的方法,将每个弧形结构划分为若干小的扇形单元。如图 10 所示,每个扇形单元任意半径 r 处的弧长 l 满足

$$l = r\alpha, \tag{6}$$

式中 α 为扇形单元所成夹角。

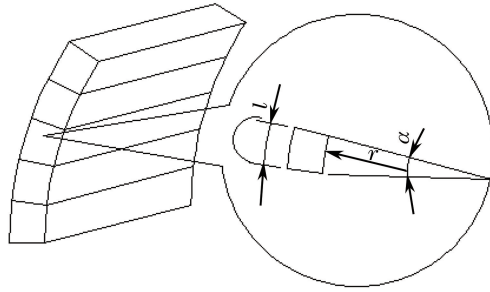


图 10 弧形结构

Fig. 10 Arc-shaped structure

弧形结构件成形条件需满足扇形实体单元任意半径处的弧长与该处工作点位置的的生长高度一致的条件,即

$$l = y. \tag{7}$$

由于扇形实体单元的熔层高度沿径向线性增加,因此,针对弧形结构件成形提出了一种变姿态熔覆、周向扫描的方法。在变姿态熔覆过程中,激光轴线与已成形成表面成一定夹角 θ ,如图 11(a)所示,使得激光离焦量由外至内沿径向线性增加。根据图 8 可知,此时的熔道生长高度呈线性减小,故待成形单元表面与激光轴线垂直。激光沿周向扫描示意图如图 11(b)所示,在变姿态熔覆过程中,已成形成扇形实体单元上表面与待成形扇形实体单元下表面完全接触,有效避免了分层错位带来的阶梯效应问题^[10],可得到表面质量较好的成形件。

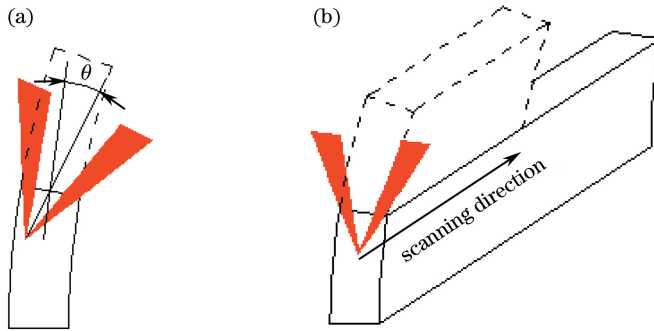


图 11 弧形结构件熔覆扫描。(a)变姿态熔覆;(b)周向扫描

Fig. 11 Cladding and scanning of arc-shaped structural parts. (a) Variable-attitude cladding; (b) circular scanning

采用法向分层的方法,同样可以将每个扇形结构划分为若干小的扇形单元。由于扇形结构与弧形结构的圆心相同,因此,在任意半径处的弧长仍然满足(6)式,且该处所需的生长高度也满足(5)式。

针对扇形结构件的成形,提出了一种变姿态熔覆、径向扫描的实验方法,如图 12 所示。熔覆喷头沿径向由外至内扫描,使得离焦量线性增加,熔覆层生长高度由内至外线性减小。

采用变姿态熔覆、周向扫描的方法成形弧形结构,并使激光束在弧形关光端停留 0.1 s,以防止端部塌陷;采用变姿态熔覆、径向扫描的方法成形扇形结构。逐层扫描内侧弧形、外侧弧形以及中间连接扇形,进而堆积成形。

4 实验及检测

4.1 实 验

在其他工艺参数不变的条件下,选用激光离焦量为 -3.5 mm 进行实验,熔覆单道的生长高度为

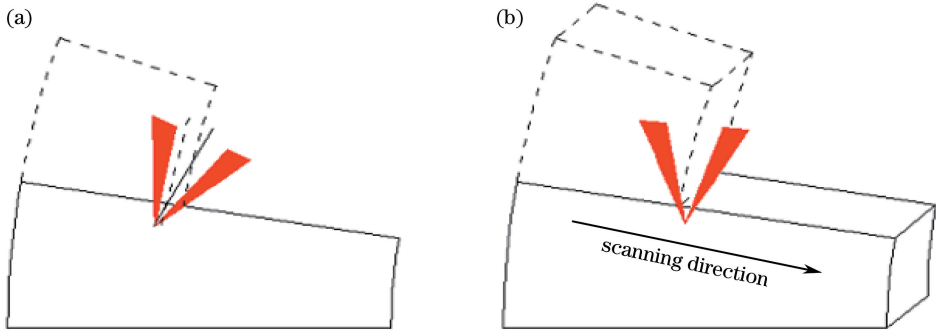


图 12 扇形结构件熔覆扫描。(a)变姿态熔覆;(b)径向扫描

Fig. 12 Cladding and scanning of fan-shaped structural parts. (a) Variable-attitude cladding; (b) radial scanning

0.49 mm,代入(6)式得,半径 r 为 100 mm 时,弧形夹角 α 为 0.281° ,即熔覆喷头轴线与已成形表面法线夹角为 0.281° 。在相同熔覆层半径 R 为 140 mm 处,熔覆喷头比半径 r 为 100 mm 时提升了 $(R-r)\sin\theta$,代入数据得其值为 0.196 mm,即熔覆层在半径 R 为 140 mm 处,激光离焦量增大了 0.196 mm。此时熔覆单道宽度为 3.1 mm,故建模设计外侧弧形宽度为 3.1 mm。

采用上述规划轨迹与实验参数进行熔覆成形,实验过程中熔覆喷头光粉耦合性良好,即使在大倾角时也没有火花飞溅,如图 13(a)所示。通过调整熔覆喷头姿态使激光轴线与已成形面法线成 θ 角,如图 13(b)所示。

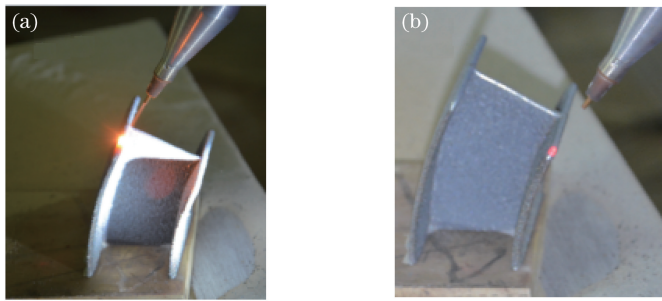


图 13 成形过程。(a)激光熔覆;(b)调整姿态

Fig. 13 Forming process. (a) Laser cladding; (b) adjusting attitude

4.2 成形件检测

4.2.1 尺寸误差分析

不等高弯曲弧形工字薄壁结构成形件如图 14 所示,成形件表面过渡平缓,无阶梯效应出现,侧面厚度均匀。半径为 100 mm 和 140 mm 的弧形高度的相对误差分别为 -5.9% 和 -1.9% 。两弧形高度均小于理论高度,这是由于在实际成形过程中,熔池表面张力作用会向外扩张,而建模是以弧形的最高处为理想端面进行计算的,故实际生长高度小于理论生长高度。连接部分扇形的圆心角为 28.1° ,与理论圆心角 30° 的相对误差为 -2.1% 。

在距离端面 15 mm 处,利用线切割方法将成形件沿曲线 1,2,3 剖开,如图 15 所示。利用游标卡尺,测

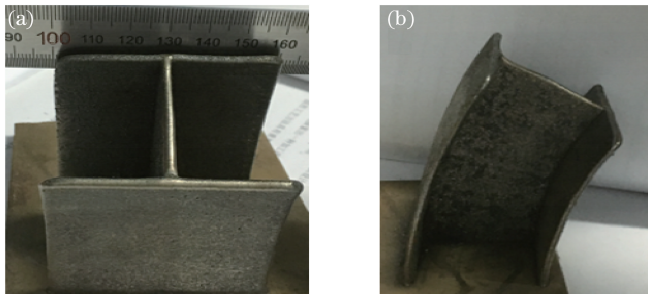


图 14 成形件。(a)主视图;(b)侧视图

Fig. 14 Formed part. (a) Front view; (b) side view

得成形件壁厚随圆心角变化的规律,如图 16 所示。在只改变离焦量的条件下,弧形 1、扇形、弧形 2 三者的壁厚保持大致相同的变化规律。即圆心角为 $0^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 时,三者壁厚均呈增加的趋势;圆心角为 $12^{\circ}\sim 28^{\circ}$ 时,三者的壁厚相对稳定。这是因为在熔覆初期,由于基板的散热作用,粉末所吸收的能量较小,因此成形件壁厚略薄;随着堆积的继续,热量不断累积,最终使系统达到热平衡,故随着成形角度的增大,所得成形件厚度也相对稳定。稳定后弧形 2、扇形、弧形 1 的壁厚依次减小。这是由于成形时,三者之间的离焦量依次减小,粉末吸收激光的区域随激光光斑半径的变小而减小,故三者壁厚呈现递减趋势。

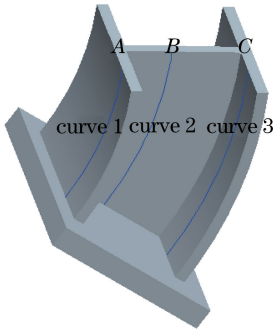


图 15 测试位置

Fig. 15 Test positions

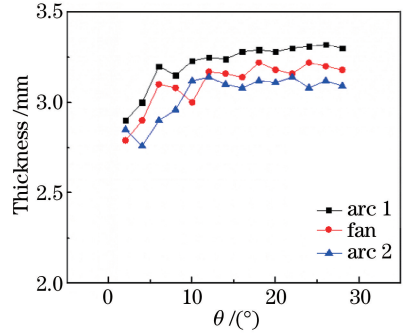


图 16 不同角度下成形件厚度

Fig. 16 Thickness of formed part versus angle

4.2.2 硬度分析

采用显微硬度计测得弧形 1、扇形、弧形 2 处硬度随角度的变化关系,如图 17 所示。弧形 1、扇形、弧形 2 的硬度随角度的变化保持大致相同的变化规律。当圆心角为 $0^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 时,硬度逐渐增大,且该区域内的硬度介于基体与熔覆材料之间。当圆心角 $12^{\circ}\sim 28^{\circ}$ 时,三者硬度基本保持在 690 HV,说明在相同工艺参数下,离焦量的变化对材料显微硬度的改变不大。

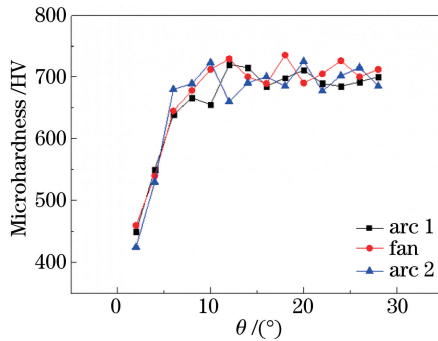


图 17 不同角度下成形件硬度

Fig. 17 Microhardness of formed part versus angle

4.2.3 组织分析

利用线切割方式,获取图 15 所示弧形结构与扇形结构的顶层搭接位置 A、C 以及扇形结构中部顶层位置 B,制样后打磨、抛光并腐蚀,利用扫描电镜分别拍摄其显微组织,如图 18 所示。组织表现为等轴晶,组织

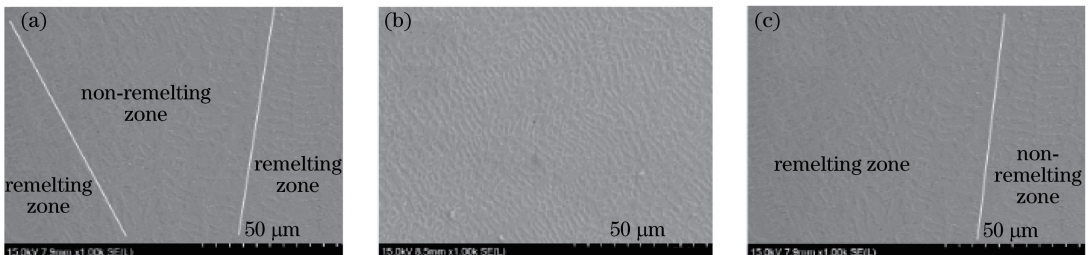


图 18 成形件显微组织。(a) A 处;(b) B 处;(c) C 处

Fig. 18 Microstructures of formed parts. (a) Location A; (b) location B; (c) location C

致密均匀、无气孔、无裂纹。图 18(a)、(c)中重熔区相当于比非重熔区多了回火处理,故其晶粒比非重熔区略大。

5 结 论

针对熔覆层扫描末端的塌陷现象,提出了激光加载防塌陷方法,实现了端部堆积的平整化。当聚焦光束离焦量为 $-5.5\sim-2.5$ mm时,通过线性拟合,得到了熔道生长高度与离焦量的线性回归方程,成功堆积出了由不等高熔道组成的扇形结构。对成形件进行检测,得到成形件尺寸高度的相对误差最大值为 -5.9% ,且不同半径处的厚度略有不同,但相同半径处厚度相对均匀;成形件组织致密均匀、无气孔、无裂纹。

参 考 文 献

- [1] Ji Xuerong, Ding Xiaohong. Design optimization method of stiffeners on plane and shell structures[J]. Journal of Mechanical Strength, 2012, 34(5): 692-698.
季学荣, 丁晓红. 板壳结构加强筋优化设计方法[J]. 机械强度, 2012, 34(5): 692-698.
- [2] Morello L, Rossini L R, Pia G, *et al.* The automotive body[M]. Heidelberg: Springer Verlag, 2011: 275-310.
- [3] Chen Dongmin, Wang Lijuan, Chen Zongyu, *et al.* Stiffener design method for plates and shells based on equivalence principle[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(12): 1841-1845.
陈冬民, 王丽娟, 陈宗渝, 等. 基于等效原理的板壳结构加强筋设计方法[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(12): 1841-1845.
- [4] 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.
- [5] Li X Q, Chen Z G, Xia J A, *et al.* Amorphous structures in laser cladding of ZL111 aluminum alloy: Semi-quantitative study by differential thermal analysis(DTA)[J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, B9(1): 85-90.
- [6] Fu Y C, Martin B, Loreda A, *et al.* Velocity distribution of the powder particles in laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, B11(6): 469-474.
- [7] Wang Binxiu, Tian Xinguo. The application and development direction of laser cladding forming technology[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2011(11): 57-59.
王斌修, 田新国. 浅析激光熔覆成形技术的应用及其发展方向[J]. 制造技术与机床, 2011(11): 57-59.
- [8] Chivel Y A. Cone-shaped beam in selective laser cladding[J]. Technical Physics Letters, 2015, 31(1): 1-3.
- [9] 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.
- [10] Fang Qinqin, Fu Geyan, Wang Cong, *et al.* Laser direct forming technology of double thin-walled parts with connecting ribs[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(2): 0202005.
方琴琴, 傅戈雁, 王 聪, 等. 带连接筋双层薄壁件激光直接成形[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0202005.
- [11] Dong Peng, Chen Jilun. Current status of selective laser melting for aerospace applications abroad[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014(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(1): 1-5.