

异形基面平顶薄壁结构激光熔覆成形工艺研究

李东升¹, 石拓^{2*}, 石世宏¹, 蒋伟伟¹, 李刚¹, 苏昊¹, 王曙光¹

¹苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021;

²苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006

摘要 采用中空激光光内送粉技术, 在异形基面上成形平顶薄壁结构。针对在不平整异形面上采用传统等高分层存在扫描起始端搭接缺陷、效率低等问题, 提出了一种随形分层的方法: 利用在一定范围内熔覆层高度与扫描速度之间、熔覆层宽度与离焦量之间的线性关系, 采用分段变速以达到分段变熔高的方法使基底低点变高, 从而在异形基面上逐渐堆积出平顶结构。检测结果表明: 基面与层间实现了冶金结合, 成形的薄壁墙顶面基本平整, 最大绝对误差在 0.2 mm 左右, 尺寸误差在 8% 以内; 成形区域的组织致密均匀, 无明显的气孔、裂纹等缺陷, 显微硬度为 685~720 HV。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 薄壁结构; 分段变速; 异形基面; 光内送粉

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1102002

Laser Cladding Forming Technology of Flat-Top Thin-Walled Part Based on Special-Shaped Base Surface

Li Dongsheng¹, Shi Tuo^{2*}, Shi Shihong¹, Jiang Weiwei¹, Li Gang¹,
Su Hao¹, Wang Shuguang¹

¹School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China;

²School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract A flat-top thin-walled structure is formed on a special-shaped base surface using hollow laser-light internal powder-feeding technology. A method of fractal stratification is proposed to solve problems of lap defects of scanning initiating terminal and low efficiency when the traditional equal-high stratification is used on uneven special surfaces. This method uses the linear relationship among the cladding height, scanning speed, cladding layer width, and defocusing amount in a certain range. A segmented variable speed is used to achieve the segmented melting height, so that the substrate low point is raised and a flat top structure is gradually added on the top of the special-shaped base surface. Test results demonstrate that, by combining the base surface and interlayer, the top surface of the thin-walled structure is typically flat. It has a maximum absolute error of approximately 0.2 mm, with a size error within 8%; the forming region's microstructure is dense and uniform without obvious pores, cracks, or other defects; the range of microhardness is 685-720 HV.

Key words laser technique; laser cladding; thin-walled structure; segmented variable speed; special-shaped base surface; light internal powder-feeding

OCIS codes 140.3390; 140.3460

1 引言

在飞机发动机整流罩、航天机载设备、汽车组装机等零件中存在许多基于异形面生长的薄壁结构。此类结构一般采用铸造、焊接、组装等方法进行

加工, 存在生产周期长、工艺繁琐、结合强度低、材料浪费严重等不足^[1-2]。激光熔覆成形(LCF)是一种金属零件快速成形的技术, 可进行复杂形状零件的高致密、快速无模制造^[3-5]。申屹豪等^[6]利用光内同轴送粉激光快速成形技术, 在水平基板上成形出表

收稿日期: 2019-04-11; 修回日期: 2019-04-12; 录用日期: 2019-06-21

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

* E-mail: shituo@suda.edu.cn

面光滑、平整且厚度均匀的薄壁结构;刘东晓等^[7]总结了复杂结构薄壁异形零件数控加工的共性规律;Mumtaz 等^[8]等利用脉冲整形成功制造出薄壁零件。LCF 一般从水平基面开始堆积,但如果基面是起伏、凸凹不平的异形面,就容易出现路径规划复杂、搭接堆积缺陷多,甚至出现凸处越凸、凹处越凹等问题。

本文采用随形分层法在非平整异形基面上堆积出平顶薄壁结构。利用光内送粉熔覆喷头进行堆积成形,具有光粉耦合效果好、材料利用率高、成形件表面精度高等特点^[9-10]。利用端部设置减速段,从低向高的熔覆方向可以保证薄壁结构的端部质量;采用分段变速的方法实现随形分层后随扫描线高度变化的熔道成形,达到异形基面上薄壁结构堆积成形的平整化。

2 实验方法与条件

2.1 随形分层法

LCF 在异形面上成形薄壁结构的分层方法原理如图 1 所示。先基于水平分层的方法把异形基面的凹处填平,再在其上成形平顶的薄壁结构。这种方法虽然简单,但在实施过程中存在很多不足:在异形基面凹处填平过程中,激光启停处会产生搭接缺陷^[11];如果异形基面的凹处较多,则需填平每一处,再进行薄壁结构的堆积,这样会导致分层数量增加,效率变低。

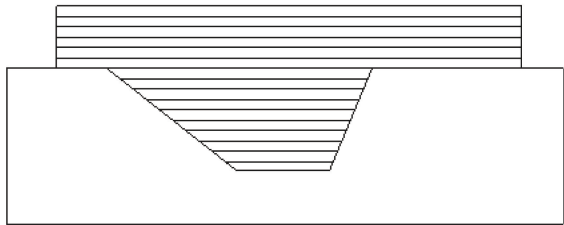


图 1 水平等高分层方法示意图

Fig. 1 Horizontal equal-high stratification method

针对等高分层方法的不足,本文提出了随形分层的方法,原理如图 2 所示。随形分层的原理是根据基体形状来确定熔覆层的形状,然后利用扫描速度对熔覆层高度的影响,在不同位置处根据扫描速度得到不同的高度。采用随形分层法不需先将凹处填平,可以不考虑基体的复杂程度即可直接成形,可简化分层规划过程,明显提高成形效率,大大减少凹处填平分层的搭接缺陷。

2.2 实验条件

激光熔覆成形系统主要包括 KUKA 机器人、

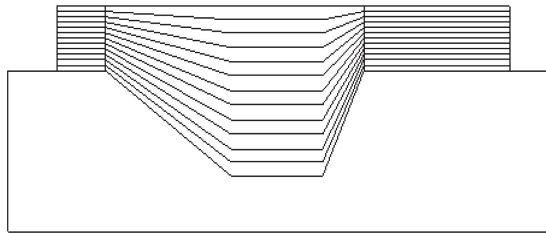


图 2 随形分层方法示意图

Fig. 2 Diagram of fractal stratification method

激光器、送粉器、光内送粉熔覆喷头、制氮系统、3D 层高控制系统和回转工作台。KUKA 机器人、激光器、送粉器和回转工作台通过 KUKA 控制柜控制。激光从激光器发出后,通过光纤传输到与激光熔覆喷头连接的准直镜内,通过准直镜准直后到达激光熔覆喷头。粉末和准直气体分别从送粉器和制氮室传输到激光熔覆喷头,并且制氮室提供的气体一部分作为载粉气传输到送粉器。光、粉、气同时从激光熔覆喷头发出,在基体上耦合形成熔池,通过 KUKA 机器人带动激光熔覆喷头移动形成单道熔覆层。3D 层高控制系统通过 CCD 相机采集熔池图像信息,利用算法处理图像,得到熔池每层的高度,并将此信息反馈给 KUKA 机器人,KUKA 机器人带动激光熔覆喷头提升一个熔覆层的堆高^[12]。通过多层堆积最终成形三维实体零件。

实验用基体材料为 304 不锈钢。成形材料为 Fe313 粉末,其粒度为 75~106 μm ,化学成分(质量分数)为: $<0.1\% \text{C}$, $2.5\% \sim 3.5\% \text{Si}$, $13\% \sim 17\% \text{Cr}$, $0.5\% \sim 1.5\% \text{B}$,其余为 Fe。

3 成形工艺过程

3.1 几何模型

在图 3 所示的异形非水平基面上成形薄壁结构,如图 3 所示,基板原始尺寸为 100 mm \times 100 mm \times 10 mm,加工后上表面分为水平面、圆弧面和斜面。左边水平面的长度为 25 mm,圆弧面长度为 30 mm,高度为 5 mm,右端水平面长度为 20 mm,斜面的水平长度为 25 mm,高度也是 5 mm,熔覆成形的薄壁结构顶端与基板水平面之间的距离为 36.6 mm。

3.2 工艺参数对熔道形貌的影响

激光熔覆是一个复杂的冶金过程。单道熔覆的尺寸精度受各种工艺参数的影响,直接影响成形件的质量。其中影响较大的工艺参数为激光功率、扫描速度、送粉量、离焦量以及保护气压力。

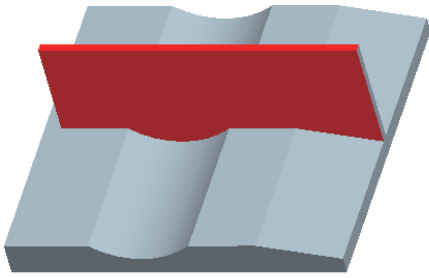


图 3 异形基面上薄壁结构模型

Fig. 3 Thin-wall structural model on special-shaped base surface

3.2.1 扫描速度对熔道宽度和高度的影响

在送粉量为 8 g/min、激光功率为 800 W、扫描速度为 1~14 mm/s 的条件下进行单道熔覆实验, 实验结果如图 4 所示。

由图 4(a)可知:随着扫描速度由 1 mm/s 增加到 3 mm/s, 熔覆层宽度急速下降;当扫描速度大于 3 mm/s 后, 熔覆层宽度稳定在 2.95 mm 左右。这是因为扫描速度较小时, 单位时间内熔池内的能量过于集中, 能量密度大, 熔池凝固所需时间较长, 同时进入熔池的粉末量也多, 对熔道具有一定的宽化效果;随着扫描速度继续增大, 虽然进入熔池的能量和粉量都在减少, 熔池凝固所需的时间变短, 但熔池的宽度主要取决于激光光斑的大小, 故熔覆层宽度趋于稳定。由图 4(b)可知:随着扫描速度的增大, 熔覆层高度总体趋于下降;随着扫描速度从 1 mm/s 增加到 2 mm/s, 熔覆层高度急速下降;当扫描速度大于 2 mm/s 时, 熔覆层宽度的下降速率有所缓解, 且相对平稳。这是由于扫描速度从 1 mm/s 增大到 2 mm/s 的过程中, 熔池获得充足的能量来熔化粉末, 而速度在成倍数增大的过程中, 单位时间进入熔池的粉量明显减少, 因此, 熔覆层高度下降明显;随着扫描速度继续增加, 激光能量密度降低, 熔池没有足够的能量熔化粉末, 同时单位时间内进入熔池的粉量也在减少, 故熔覆层高度降低。由此可以得出, 扫描速度对熔覆层宽度的影响较小, 而对熔覆层高度的影响非常明显。

设熔覆层高度与扫描速度在一定范围内近似呈线性关系, 数学关系为

$$H = a + b \times v, \quad (1)$$

式中: H 为熔覆层高度; a 与 b 为待定系数; v 为熔覆喷头的扫描速度。

取激光功率 $P = 800$ W, 送粉速度 $M_p = 8$ g/min, 离焦量 $f = -3.5$ mm, 得到不同扫描速度 (2~14 mm/s) 下单道熔覆层的高度, 然后对单道熔

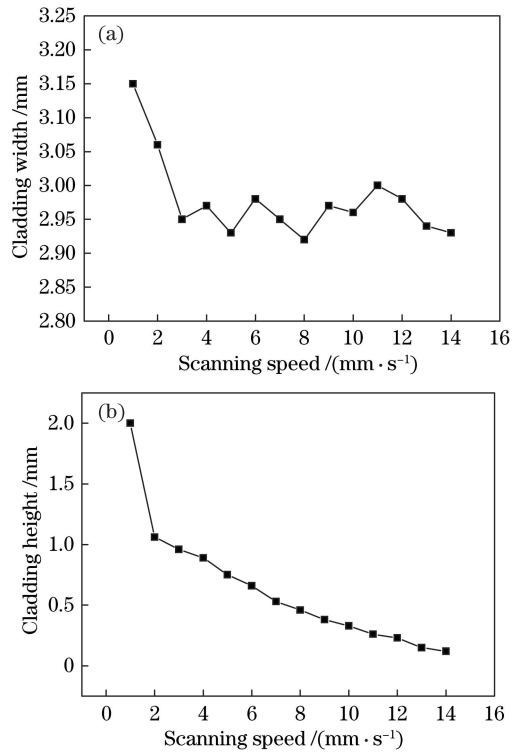


图 4 扫描速度对熔道宽度和高度的影响。(a)宽度;(b)高度

Fig. 4 Effect of scanning speed on height and width of cladding layer. (a) Width; (b) height

道的高度数据进行回归, 得到 H 关于 v 的数学关系为

$$H = 1.162 - 0.08 \times v. \quad (2)$$

3.2.2 离焦量对熔道宽度和高度的影响

在送粉量为 8 g/min、激光功率为 800 W, 扫描速度为 6 mm/s, 离焦量为 -5~1 mm 的条件下进行单道熔覆实验, 实验结果如图 5 所示。

由图 5(a)可以看出:随着离焦量由 -5 mm 变化到 0 mm, 熔覆层的宽度随着负离焦量的减小而呈现近似线性减小的变化趋势;当离焦量为 0~1 mm 时, 熔覆层宽度与离焦量呈正相关。这是因为随着负离焦量的减小, 光斑直径不断变小, 所以熔覆层宽度不断减小;在正离焦量变大的过程中, 光斑直径不断变大, 所以熔覆层宽度增大。由 5(b)可以看出:随着离焦量由 -5 mm 变化到 -2 mm, 熔覆层高度随着负离焦量的减小而呈现近似线性增大的趋势, 并且在离焦量为 -2 mm 时, 熔覆层高度最大, 光粉耦合达到最佳状态。这是因为随着负离焦量减小, 光斑直径变小, 熔池能量密度变大, 虽然熔池获得的粉量相对变少, 但是熔池获得的粉末熔化量在增加, 所以熔覆层的高度逐渐增大。随着离焦量由 -2 mm 变化到 0 mm, 熔覆层高度随着负离焦量的减小呈现近似线性减小的趋势, 这是因为随着负离焦量

的减小,光斑直径不断减小,且在焦点位置达到最小,虽然光斑直径变小,熔池能量密度变大,熔池获取的粉末能够完全熔化,但熔池所能获得的粉量逐渐减少,并在焦点位置达到最少,所以熔覆层的高度不断减小。在正离焦量变大的过程中,随着光斑直径变大,熔池获取的粉量增多,所以熔覆层高度有所增大。但在正离焦实验过程中,产生的火花较为明显,熔覆层质量差,所以通常选择负离焦进行激光熔覆实验。

$$D = a + b \times f, \quad (3)$$

式中: D 为熔覆层的宽度; f 为离焦量。

取激光功率 $P = 800 \text{ W}$, 送粉速度 $M_p = 8 \text{ g/min}$, 扫描速度 $v = 8 \text{ mm/s}$, 得到不同离焦量 ($-5 \sim 0 \text{ mm/s}$) 下单道熔覆层的宽度。对单道熔道的宽度数据进行回归, 得到 D 关于 f 的数学关系为

$$D = 1.11 - 0.407 \times f. \quad (4)$$

3.3 分段变速规划

由于加工基面为异形面, 故随形分层后在扫描线不同位置处的分层高度是变化的。据前述熔道高度与扫描速度成反比的规律, 采用分段变速的方法适应层高的变化。分段是为了减小离焦量的改变对薄壁结构厚度和每层高度的影响; 随着扫描速度减小, 单位时间内熔池吸收的激光能量与粉末质量增加, 熔覆层高度增大; 反之, 扫描速度越快, 熔覆层高度越小。

如图 6 所示, 根据扫描速度对熔覆层高度的影响, 采用分段变速的方法在异形面上成形薄壁结构。图 6 给出了第一层各段熔覆高度示意图, 分段原理如下: 异形面上各个位置的高度可能不同, 为了得到基本相同的厚度, 根据 (2) 式可知, 设每一段的起始位置和末尾位置在竖直方向的高度差为 0.5 mm , 此时熔覆层厚度的变化在 0.16 mm 左右, 厚度变化相对较小。但厚度也不能无限小, 因为厚度越小, 得到的分段数量就越多, 喷头在运动时停顿的次数越多, 会使表面成形质量难以控制。

根据 (1) 式所示的熔覆层高度与扫描速度的函数关系式, 结合每段的高度值匹配每段的熔覆速度, 3D 层高控制系统在分段变速过程中, 根据每一段熔池的高度进行相应提升, 从而可以保证熔覆过程中离焦量的稳定, 直到薄壁结构上表面水平。

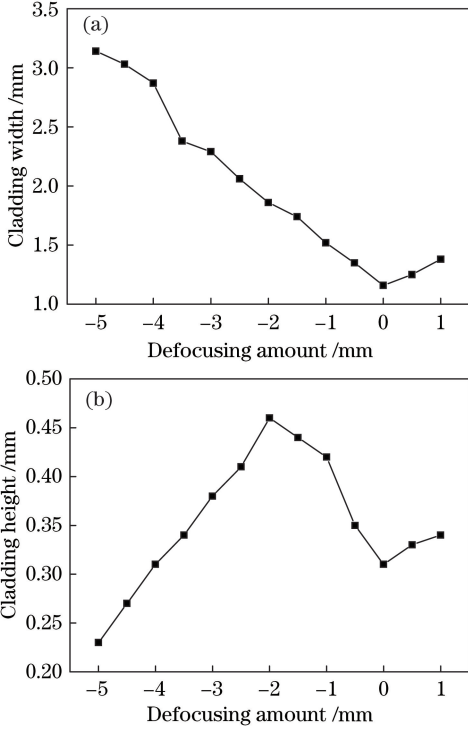


图 5 离焦量对熔道宽度和高度的影响。(a) 宽度; (b) 高度
Fig. 5 Effect of defocusing amount on width and height of cladding layer. (a) Width; (b) height

设熔覆层的宽度与离焦量在一定范围内近似呈线性关系, 宽度与加工离焦量间的数学关系为

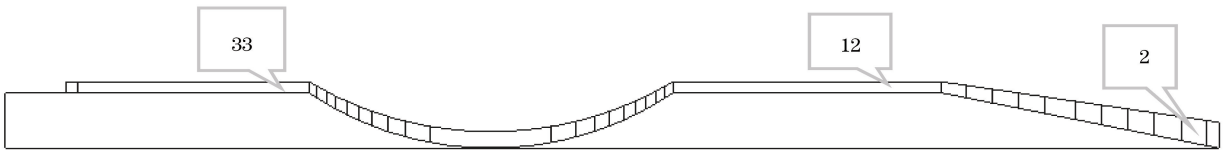


图 6 薄壁结构成形路径规划
Fig. 6 Thin-wall forming path planning

3.3.1 分段数量的确定

异形面基板倾斜部分的分段情况如下: 倾斜面与水平面之间的夹角为 11.3° , 首段需要设置 1 mm 的减速段, 由数学关系可得分段数量为

$$N_1 = 1 + \frac{\left(L - \frac{1}{\cos \alpha}\right) \sin \alpha}{0.5}, \quad (5)$$

化简后可得

$$N_1 = 1 + 2L \sin \alpha - 2 \tan \alpha, \quad (6)$$

式中: N_1 为倾斜面上分段的数量; L 为倾斜面的长度; α 为倾斜面与水平面的夹角。代入相应数值可得 $N_1 = 9.85$, 故取 $N_1 = 11$ 。

圆弧面关于垂直于基板水平面的直径对称, 所以分段总数等于其中一半的分段数量的 2 倍。圆弧

段上下底面的高度差为 5 mm,故一半的段数为 10,所以圆弧段的分段总数 $N_2=20$ 。

异形面中还有两部分为水平面,分别作为一段,再加上末端 1 mm 减速段,所以异形面上薄壁结构的分段总数 $N=N_1+N_2+3=34$ 。

3.3.2 各段速度的确定

图 6 所示薄壁结构第 2 段和第 12 段初始位置之间的高度差为 4.8 mm,计划熔覆 30 层使筋结构表面达到水平。由计算可得第 2 段与第 12 段每层熔覆层之间的高度差为 0.16 mm。根据(2)式熔覆层高度与扫描速度之间的关系可得第 2 段与倒数第 2 段之间的速度差为 2 mm/s。第 13 段和第 33 段初始位置之间的高度差为 5 mm,在熔覆层数为 30 层的情况下,第 13 段和第 33 段每层熔覆层之间的高度差为 0.167 mm,根据(2)式可得第 2 段与倒数第 2 段之间的速度差为 2.08 mm/s。具体如表 1 所示。

4 实验及检测

4.1 异形基面薄壁堆积

采用前述随形分层、分段变速方法以及选定的工艺参数进行成形实验,过程如图 7(a)~(c)所示。经过分段变速、多层变高熔覆堆积后,薄壁结构的上表面最终趋于水平,如图 7(d)所示。

表 1 各段的扫描速度

Table 1 Scanning speed for each segment

Part No.	Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	Hight of cladding layer /mm
1	3.50	0.882
2	5.00	0.762
3	5.22	0.744
4	5.44	0.727
5	5.66	0.701
6	5.88	0.692
7	6.10	0.674
8	6.32	0.656
9	6.54	0.639
10	6.76	0.621
11	6.98	0.604
12	7.00	0.600
13,32	6.76	0.621
14,31	6.57	0.636
15,30	6.37	0.652
16,29	6.16	0.669
17,28	5.95	0.686
18,27	5.74	0.700
19,26	5.53	0.720
20,25	5.33	0.736
21,24	5.12	0.752
22,23	4.91	0.769
33	6.99	0.603
34	4.89	0.771

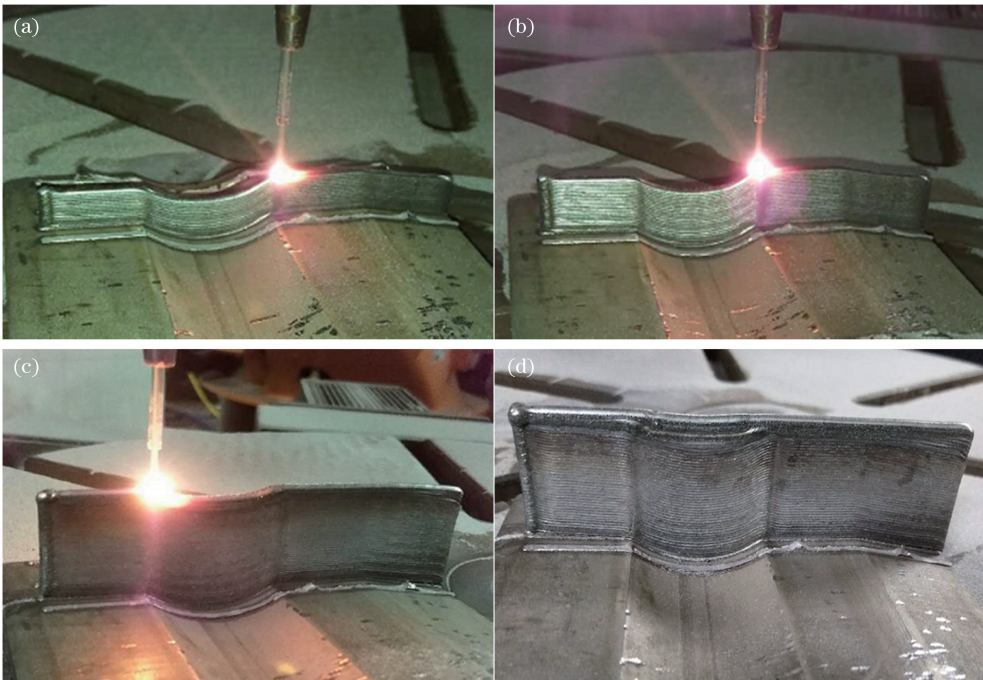


图 7 成形实验。(a)~(c)实验过程;(d)实验结果

Fig. 7 Forming experiment. (a)-(c) Experimental processes; (d) experimental result

4.2 成形件检测

4.2.1 尺寸误差分析

薄壁结构的设计厚度为 2.5 mm,由图 8 可见,沿熔覆扫描方向,成形件厚度在设计尺寸附近波动,最大绝对误差约为 0.2 mm,最大相对误差在 8%左右。厚度浮动的原因在于每段扫描速度不相同,速度较慢的端部以及圆弧段最低处的熔池存在时间较长,对熔覆层宽度有一定的宽化作用,所以宽度较大。另外,分段时每一小段需要设置离焦量,实际离焦量的改变也会导致成形件厚度上下浮动。

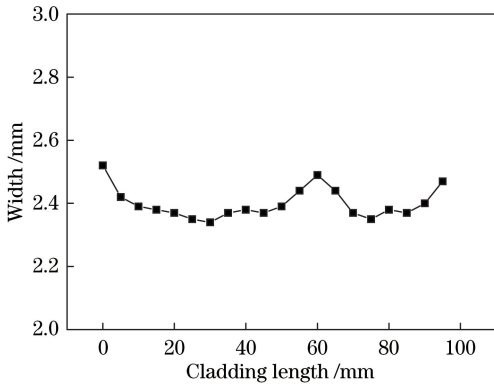


图 8 成形件宽度沿熔覆方向的变化

Fig. 8 Variation of width of formed part along cladding direction

4.2.2 显微硬度分析

采用显微硬度计测得了薄壁结构硬度沿熔覆方向的变化,如图 9 所示。成形件的硬度保持在 685~720 HV,倾斜面最低处和圆弧面最低处的硬度稍微偏低,这是因为这两处的扫描速度小,熔覆层厚度相对较大,稀释率偏大,所以硬度偏低。其余部分的硬度略有波动,但整体较为平稳。

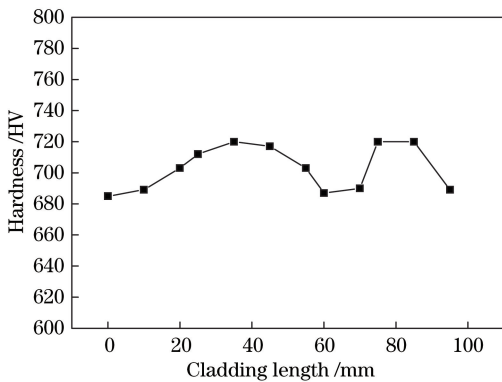


图 9 成形件硬度沿熔覆方向的变化

Fig. 9 Variation of hardness of forming part along cladding direction

4.2.3 高度误差分析

文中薄壁结构的设计高度为 36 mm,不同位置

测量的高度的平均值为 36.6 mm,因此高度的绝对误差为 0.6 mm,相对误差为 1.7%。

采用高精度双柱带表高度尺沿着熔覆方向每隔 10 mm 测量一次薄壁结构顶部到基板水平面的高度,并绘制成点线图,如图 10 所示。由图 10 可知,薄壁结构的高度基本稳定在 36.5 mm 左右,高度最大值与最小值之差为 0.21 mm。

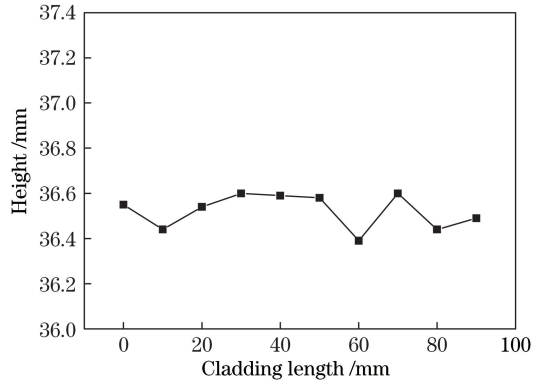


图 10 成形件高度沿熔覆方向的变化

Fig. 10 Variation of height of formed part along cladding direction

4.2.4 纹理分析

纵向切取薄壁结构的熔覆层样品,进行镶样、打磨、腐蚀后,观察图 11 所示三个局部区域的显微组织,如图 12 所示。从图 12 中可以看出:熔覆层搭接的纹理较为清晰;每层高度相对均匀,具有比较明显的倾斜生长纹路;在拐点处(f 区域)可以看出熔覆层高度变化的纹路;在圆弧最低处,熔覆层的生长纹路为非常明显的弧形。

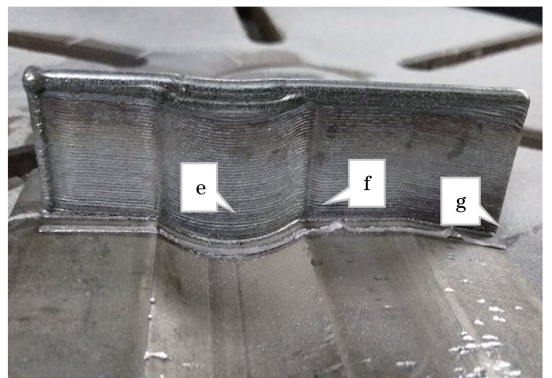


图 11 薄壁结构实物图

Fig. 11 Physical diagram of thin-walled structure

4.2.5 组织分析

在成形薄壁结构上取样,镶样、打磨、腐蚀后,采用高倍显微镜观察不同分段区域的组织,如图 13 所示。图 13(a)、(b)为倾斜区域的金相图,13(a)中的晶粒相对于图 13(b)较大,这是因为前者的扫描速

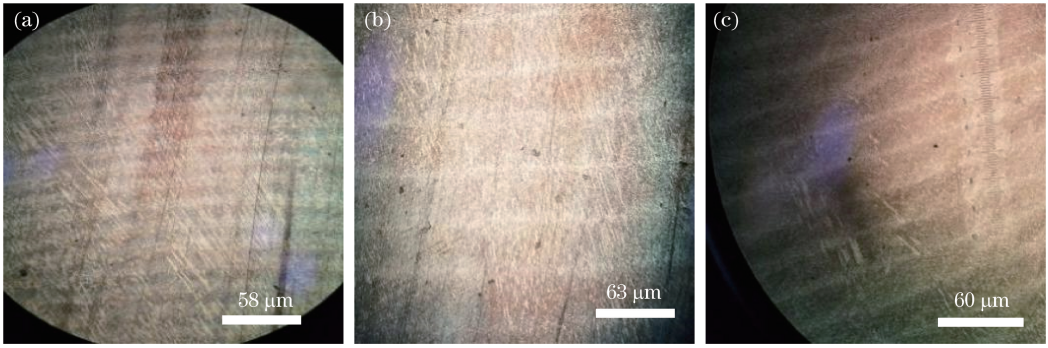


图 12 图 11 中标示处 3 个位置的显微照片。(a) e 区;(b) f 区;(c) g 区

Fig. 12 Microscopic illustrations of three positions at the marks in Fig. 11. (a) Region e; (b) region f; (c) region g

度较小,熔池存在时间长,晶粒有更充足时间生长,所以晶粒较大。图 13(c)、(d)为水平区域的金相图,两图中晶粒的大小基本一致。图 13(e)、(f)为圆弧区域的金相图,后者的扫描速度较小,故晶粒尺寸大于前者。从整体上可以看出,在不同分段区域,因为扫描速度不同,晶粒大小略有不同,但整体差别较小,故能够保证组织、性能具有较好的一致性。各部分组织致密,无明显的裂纹、气孔等缺陷。

杂程度而直接成形。采用光内送粉熔覆喷头完成了以异形面为基板的水平薄壁结构的堆积成形。通过线性回归得到了在一定范围内熔覆层高度与扫描速度的线性回归方程,以及熔覆层宽度与离焦量的线性回归方程,采用分段变速的方法,根据线性回归方程得到分段数量、每段速度,最终成功堆积成形上表面基本水平的薄壁结构。成形件的检测结果如下:堆积表面平整,成形件厚度(沿着熔覆方向)的相对误差最大为 8%,每一段的厚度略有不同;成形件的高度基本稳定在 36.5 mm 左右,高度相对误差为 1.7%,高度最大值与最小值之差为 0.21 mm;不同位置处的硬度稍有不同,基本稳定在 685 ~ 720 HV;成形件不同分段区域的组织无明显区别,各部分致密均匀,无气孔和裂纹。

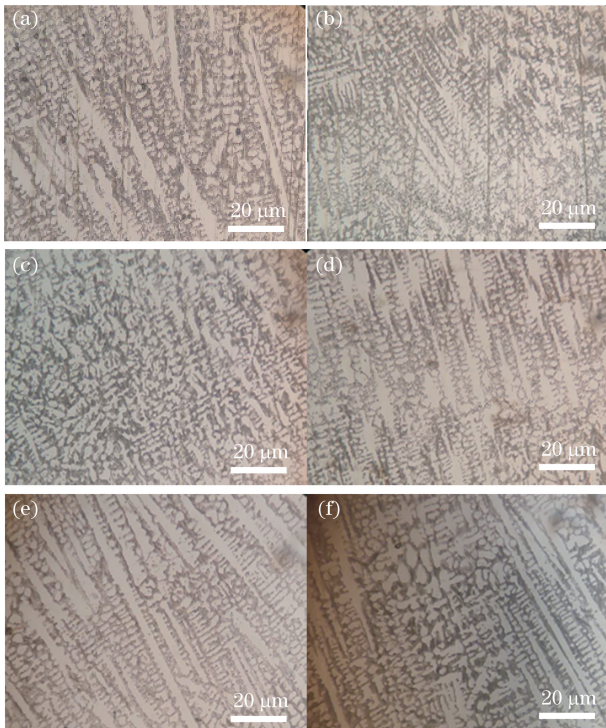


图 13 不同分段区域的金相图。(a)(b)倾斜段;
(c)(d)水平段;(e)(f)圆弧段

Fig. 13 Metallograph of different segmented regions.
(a)(b) Inclined segments; (c)(d) horizontal segments;
(e)(f) arc segments

5 结 论

本文提出的随形分层方法可以不考虑基板的复

参 考 文 献

- [1] Fan Z, Zuo S C. Buckling analysis of dished head under external pressure [J]. Pressure Vessel Technology, 2014, 31(1): 34-39, 74.
范章, 左树春. 碟形封头在外压作用下的屈曲分析 [J]. 压力容器, 2014, 31(1): 34-39, 74.
- [2] OuYang H B, Yu Z H, Chen T, *et al.* Sub-regional process planning for large nuclear power head [J]. Machinery Design & Manufacture, 2014, 5: 253-255.
欧阳华兵, 于忠海, 陈田, 等. 核电水室封头的分区区域加工路径规划 [J]. 机械设计与制造, 2014, 5: 253-255.
- [3] Huang W D. Laser solid forming [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2007.
黄卫东. 激光立体成形 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
- [4] Li J Z, Li X F, Zuo D W, *et al.* Influence of defocusing amount on the process of Al/Ti cladding above 7050 aluminum alloy based on numerical simulation study [J]. Infrared and Laser Engineering,

- 2015, 44(4): 1126-1133.
- 李建忠, 黎向锋, 左敦稳, 等. 模拟研究离焦量对7050 铝合金 Al/Ti 熔覆过程的影响[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1126-1133.
- [5] Li R, Yang X J, Zhao W, *et al.* Effect of femtosecond laser micromachining on the roughness of cladding sidewalls [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3244-3249.
- 李睿, 杨小君, 赵卫, 等. 飞秒激光加工对熔覆层侧壁粗糙度的影响[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3244-3249.
- [6] Shen Y H, Zhang K, Zhai W, *et al.* Adjustment of accumulation process for thin-wall part by laser cladding rapid forming [J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(24): 39-42.
- 申屹豪, 张轲, 翟伟, 等. 激光快速成型薄壁墙堆积工艺调控[J]. 热加工工艺, 2016, 45(24): 39-42.
- [7] Liu D X, Zhang C L, Cui Z Y, *et al.* NC machining of thin-walled irregular shaped parts with complex structure[J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 18(9): 91-93, 97.
- 刘东晓, 张成立, 崔震宇, 等. 复杂结构薄壁异形零件数控加工技术初探[J]. 电光与控制, 2011, 18(9): 91-93, 97.
- [8] Mumtaz K A, Hopkinson N. Selective laser melting of thin wall parts using pulse shaping[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(2): 279-287.
- [9] Shi S H, Fu G Y, Wang A J, *et al.* Laser processing and forming to produce internal powder feeding process and internal powder feeding nozzle: 200610116413.1[P]. 2008-03-26.
- 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喷头: 200610116413.1[P]. 2008-03-26.
- [10] Di K Y. 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.
- [11] Deng Z Q, Shi S H, Zhou B, *et al.* Laser cladding forming of unequal-height curved arc-shaped thin-wall structures[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0902005.
- 邓志强, 石世宏, 周斌, 等. 不等高弯曲弧形薄壁结构激光熔覆成形[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0902005.
- [12] Shi T, Lu B H, Wei Z Y, *et al.* Research of closed-loop control of deposition height in laser metal deposition[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0702004.
- 石拓, 卢秉恒, 魏正英, 等. 激光金属沉积堆高闭环控制研究[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0702004.