

变Z轴提升量法圆弧截面倾斜薄壁件激光熔覆成形研究

王续跃 江豪 徐文骥 郭东明

(大连理工大学机械工程学院, 辽宁大连 116024)

摘要 Z轴提升量与单层堆积高度的匹配是高质量倾斜薄壁件激光熔覆成形的关键因素,因此,提出变Z轴提升量法对圆弧截面倾斜薄壁件进行熔覆成形。在三轴开环条件下,通过熔覆成形竖直和倾斜薄壁件试验,得到偏移量 ΔX 与提升量 ΔZ 之间的关系曲线。结果表明,随着偏移量的增大,提升量逐渐减小,且当 ΔX 在0.06~0.08 mm区间段时 ΔZ 减小最快;成形的倾斜件最大倾斜角为 36.6° 。由关系曲线计算出圆弧等分点处的偏移量和提升量构成二维数组,再用Matlab对数组按圆弧形状筛选组合,模拟出优化的截面轨迹规划路径。采用模拟得到的逐层偏移量和提升量组合,熔覆136层,成形出圆弧截面倾斜薄壁件,成形高度尺寸最大偏差0.78 mm,与模拟结果相符,验证了变Z轴提升量法熔覆成形圆弧截面倾斜薄壁件的有效性。

关键词 激光技术;激光熔覆成形;圆弧截面倾斜薄壁件;变Z轴提升量;路径规划;形状精度

中图分类号 TG665;TG174.44 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1003007

Laser Cladding Forming of Arc-Section Inclined Thin-Walled Parts with Variable Z-Increments

Wang Xuyue Jiang Hao Xu Wenji Guo Dongming

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract The matching of Z-increment and single cladding layer height is a key factor for improving cladding quality of thin-walled parts, so arc-section inclined thin-walled parts are formed by laser cladding forming with variable Z-increments. Under three-axis and open-loop control, the relationship curve between offset and Z-increment is obtained by laser cladding vertical and inclined thin parts. The result shows that Z-increment decreases gradually with offset increasing and when the offset ΔX is between 0.06 and 0.08 mm, the Z-increment ΔZ reaches its maximum decreasing rate. The biggest slope angle of deposited inclined thin parts is 36.6° . The offsets and Z-increments at the quinquesection points calculated by the relationship curve compose two-dimensional arrays. The optimized cross-section path is simulated by filtering and combining the arrays in accordance with the arc shape through Matlab program. Using the arrays of offsets and Z-increments obtained, arc-section inclined thin-walled parts with 136 layers are formed, and the dimension error of cladding height is under 0.78 mm, which is in agreement with the simulation and demonstrates the feasibility of forming arc-section inclined thin-walled parts with the method of variable Z-increments.

Key words laser technique; laser cladding forming; arc-section inclined thin-walled parts; variable Z-increments; path planning; geometrical precision

OCIS codes 140.3390; 050.6875; 140.3580; 350.1515

1 引言

很多零件如航空发动机叶片、机匣、燃烧室等都具有圆弧截面倾斜薄壁结构。激光熔覆成形技术是

借助现代计算机技术将复杂零件进行建模、切片,再根据每层轮廓进行轨迹规划和数控编程,最后逐层堆积出所需的三维实体金属零件^[1~3],能快速制造

收稿日期: 2011-04-14; 收到修改稿日期: 2011-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(50975041)资助课题。

作者简介: 王续跃(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事特种加工和精密加工等方面的研究。

E-mail: wbzdz@dlut.edu.cn

出满足精度、性能要求的燃烧室等零件。因此,成形金属薄壁结构的能力对薄壁零件的制造十分重要^[4]。

为得到高质量的熔覆成形薄壁件,保证成形过程 Z 轴提升量等于单层堆积高度尤为重要。Li等^[5]研究了工艺参数对成形高度的影响,并在开环条件下成形出较高形状精度的“福”字薄壁件;姜淑娟等^[6]建立了误差反向传播神经网络用以预测各层熔覆高度。对激光熔覆成形过程进行闭环控制,实时监测熔池温度和大小、熔覆层高度等变化来调整激光功率、送粉速率、 Z 轴提升量等工艺参数,可有效提高薄壁结构件的几何形状精度。Song等^[7]将3个高速CCD摄像机分别安装在三角位置,实时监测熔覆层成形高度并通过激光功率对高度进行调整。宁国庆等^[8]采用两个具有瞄准功能的红外探测头检测熔覆层凹凸点,调节送粉量对熔覆高度进行闭环控制。

很多零件不单有薄壁结构,而且带有倾斜的特征。对倾斜薄壁件激光熔覆成形进行研究无疑会很大程度地增加熔覆成形技术在薄壁件制造方面的应用。Wu等^[9]在三轴数控工作台上直接制造出具有 30° 倾角的薄壁件;Qi等^[10]采用二次回归传递函数对熔覆层宽度进行预测,在稳定的熔覆高度、搭接率下,结合适当的扫描路径,修复并直接制造了飞机发动机叶片;Dwivedi等^[11]在五轴数控系统下,成形出分枝与螺旋结构细长金属样件;尚晓峰等^[12]用成形旋转薄壁的方法对侧壁倾斜极限开展了研究,指出层间搭接率是产生倾斜极限和熔覆层塌陷的直接原因,推导出倾斜角度及层间搭接率的计算公式;郁玲玲等^[13]试验了不同工艺参数组合下斜壁的倾斜范围。他们都是对简单结构薄壁件进行激光熔覆成形,采用不变的 Z 轴提升量对倾斜角度进行探索,未见深入研究 Z 轴提升量与水平偏移量、倾斜角度的关系,容易造成 Z 轴总提升高度与成形高度不一致,影响最终的零件形状精度。本课题组针对激光熔覆成形斜坡薄壁件,提出变送粉量的方法克服了台阶效应^[14]。在此基础上,本文对 Z 轴提升量这个工艺参数进行了详细研究,得到 Z 轴提升量与水平偏移量的关系曲线;为成形出较高形状精度的圆弧截面倾斜薄壁熔覆件,采用变 Z 轴提升量的方法,通过Matlab对偏移量与提升量组合按圆弧截面进行优化和模拟,得到正确的扫描轨迹路径,然后按照轨迹路径在三轴开环条件下熔覆成形圆弧截面倾斜薄壁件。

2 基本原理

2.1 Z 轴提升量的选取

对于竖直薄壁件的熔覆成形,朱刚贤等^[15]在假设壁厚均匀的前提下建立了 Z 轴单层提升量 ΔZ 的数学模型。由于热累积的影响,薄壁件多层堆积的过程中单层堆积高度会有所增加,使得 ΔZ 小于单层堆积高度。但当采用正离焦时,激光光斑和粉末送入点的变化会不断减小 ΔZ 与单层堆积高度之间的差值直至达到新的平衡,形成一种系统自带的负反馈^[16]。本文将在上述理论基础上进行竖直薄壁件熔覆成形试验,选取竖直薄壁件成形的最佳 Z 轴单层提升量。

在三轴数控工作台上熔覆成形倾斜薄壁件,只能采取水平方向偏移的方法进行多层堆积,如图1所示。当存在水平偏移量 ΔX 时,进入熔池的粉末减少,同时重力和液态金属流动性使得悬空端熔覆层下滑,导致堆积高度 H 降低,当 ΔX 较大时 H 减小更加明显。为保证形状精度, Z 轴提升量 ΔZ 应接近堆积高度 H ,因此,熔覆成形倾斜薄壁件时, ΔZ 相应地减小。通过熔覆成形倾斜薄壁件,得到 ΔX 与 ΔZ 对应关系曲线。

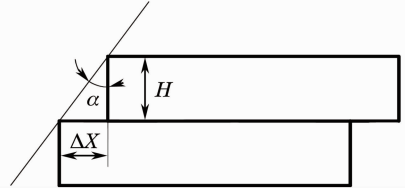


图1 熔覆层水平偏移示意图

Fig. 1 Diagram of horizontal offset

2.2 变 Z 轴提升量法熔覆成形

熔覆成形某些复杂的倾斜薄壁件如燃烧室等,它们的截面近似圆弧结构,如图2所示($\alpha_1 < \alpha_2$),倾斜角度向上连续增大。国外已有人使用五轴直接制造系统加工出半球薄壁样件^[17]。但在三轴开环系统下,现有研究通常是采用恒定的 Z 轴提升量熔覆成形竖直薄壁件或单一倾角薄壁零件^[13,18]。采取相同方法对图2结构倾斜薄壁件熔覆成形时, ΔZ 与 H 的差值会越来越远,喷嘴到熔覆层的距离越来越远,导致零件最终成形精度下降。为解决上述问题,这里采取变 Z 轴提升量的方法对圆弧截面倾斜薄壁件进行激光熔覆成形。由图1的几何关系可得出实际倾斜角度 α_a 与偏移量 ΔX 和堆积高度 H 的关系式为

$$\alpha_a = \arctan\left(\frac{\Delta X}{H}\right). \quad (1)$$

同时,理论倾斜角度 α_t 为

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{\Delta X}{\Delta Z}\right). \quad (2)$$

当Z轴提升量接近堆积高度时($\Delta Z \approx H$),可以认为实际倾斜角度 α_a 由偏移量和提升量决定

$$\alpha_a = \arctan\left(\frac{\Delta X}{H}\right) = \alpha_t. \quad (3)$$

只要得到 ΔX 与 ΔZ 的关系曲线,便可通过合理控制 ΔX 和 ΔZ 成形出所需的倾斜角度。根据倾角的变化对每一层偏移量和提升量进行规划,层层堆积出图2所示结构的薄壁件。

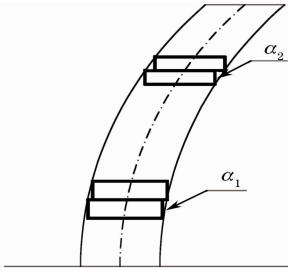


图2 圆弧截面薄壁件

Fig. 2 Arc cross section of thin-walled parts

3 试验方法与试验结果分析

3.1 试验条件

试验装置为激光熔覆成形系统,该系统由1200 W连续Nd:YAG激光器、三轴数控工作台、DSPF-3型同步送粉器和同轴喷嘴组成,激光光斑直径0.6~1 mm。载粉气体和保护气体均为高纯(99.999%)Ar气。基体材料为普通低碳钢,尺寸为100 mm×100 mm×10 mm。金属粉末为316 L不锈钢,粒度大小为45~90 μm。量具为电子数显卡尺,分辨率0.01 mm。

3.2 试验方法

通过基础试验对工艺参数进行优化,选取其中一组较好的工艺参数作为薄壁件试验的试验参数:激光功率390 W,扫描速度500 mm/min,送粉量2 g/min,载粉气体和保护气体压力、流量分别为0.2 MPa、5 L/min和0.1 MPa、15 L/min。激光光斑为正离焦,离焦量为+2.5 mm。

本试验研究Z轴提升量与水平偏移量之间的关系,为下一步激光熔覆成形圆弧截面倾斜薄壁件做准备。试验熔覆成形竖直薄壁件和采用不同偏移量的倾斜薄壁件,扫描路径为1/4圆,圆半径为25 mm,每个薄壁件均沉积30层,沉积过程采用“Z”字形往返扫描方式。为了减小沉积过程中热累积对

成形结果的影响,避免起始点缺陷累积,采取每熔覆完一层停留2 s,熔覆完第11、20层时,等待10 min使基体冷却。试验后用数显卡尺测量薄壁件顶部不同位置处的高度,并对倾斜薄壁件偏移距离进行多次测量求得平均值。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 Z轴提升量对竖直薄壁件熔覆成形质量的影响

试验过程中保持其他工艺参数不变,只改变Z轴提升量 ΔZ 。由单道试验得到熔覆层高度和宽度分别为0.2和0.845 mm,代入文献[15]中公式得理论Z轴提升量为0.1391 mm。故依次取提升量0.20,0.17,0.16,0.15,0.14 mm做5组试验,熔覆成形的竖直薄壁件如图3所示,试验结果见表1。由于激光移动到薄壁零件两端时扫描速度减小,激光能量密度增加,薄壁件两端高度均高于中间部位。 ΔZ 取第一层沉积高度0.2 mm时[图3(a)],熔覆件呈现明显的高低起伏,成形高度与提升总高度相差较大;随着 ΔZ 的不断减小,成形质量得到提高,成形高度与提升总高度差值不断减小[图3(b)~(e)]。选用0.14 mm的提升量熔覆成形的薄壁件表面质量和尺寸精度最佳,除两端点外其他部位成形高度与提升总高度相差不超过0.1 mm,与理论提升量0.1391 mm接近。由表1可见,随着提升量的增大成形高度先增大后减小,这是因为当激光能量密度足够大且喷出粉末充足时,适当地增大提升量增加了激光光斑大小及粉末在激光中受照射的时间,使得更多的粉末受热熔化进入熔池,成形高度增加;但当 ΔZ 过大时,离焦量快速增大,粉末送入点的变化和激光能量密度的减小使得熔覆高度降低、熔覆过程不稳定,出现波浪状起伏。

表1 Z轴提升量 ΔZ 对成形高度的影响

Table 1 Cladding height of vertical thin walls with different Z-increments ΔZ

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Z-increment ΔZ /mm	0.20	0.17	0.16	0.15	0.14
Total Z-increment /mm	6.0	5.1	4.8	4.5	4.2
Total wall height /mm	4.1~4.7	4.6~4.9	4.5~4.8	4.4~4.8	4.2~4.4

3.3.2 熔覆成形倾斜薄壁件水平偏移量与Z轴提升量的关系

前面试验得到熔覆成形竖直薄壁件的最佳Z轴单层提升量为0.14 mm,因此熔覆倾斜薄壁件

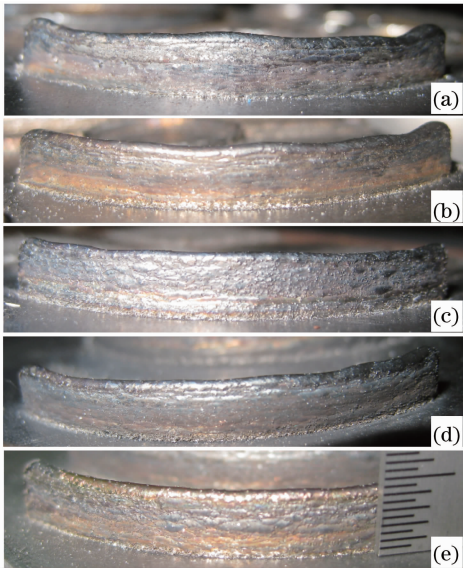


图 3 不同 Z 轴提升量熔覆成形的竖直薄壁件照片
Fig. 3 Photos of laser cladding forming of vertical thin parts with different Z-increments ΔZ

ΔZ 的选取应小于 0.14 mm。图 4 为成形的倾斜薄壁件正面和端面,选取的参数及测量结果如表 2 所示。可以看出,Z 轴总提升高度近似等于成形高度,且随着偏移量的增加, ΔZ 逐渐减小,成形高度逐渐降低,倾斜角度逐渐增大。熔覆的薄壁件顶端较平整,外表面随 ΔX 增大变得更加光泽,这是因为熔覆道的横向偏移使更少的激光能量进入熔池,且边缘

熔覆层不易发生重熔,氧化现象减弱,可清楚辨别每层分界线[图 4(e)、(g)]。当 ΔX 较小时,薄壁件壁厚均匀[图 4(b)、(d)]; ΔX 增大到 0.08 mm 时,壁厚出现上窄下宽,掉落在基体上的熔化粉末量增多[图 4(f)、(h)],图 4(h)中薄壁件的倾斜角度达到 36.6° ,已接近极限倾斜角,继续增大偏移量将会导致熔覆件塌陷;薄壁件上端变窄也使得实际倾斜角度与理论倾斜角度的差值增大。由于采取等待冷却的措施造成熔覆过程不连续,熔覆层表面呈现几层形状和颜色明显变化的过渡层。

表 2 Z 轴提升量与偏移量的关系
Table 2 Relationship between offset ΔX and Z-increment ΔZ

	(a)	(c)	(e)	(g)
Offset ΔX /mm	0.04	0.06	0.08	0.09
Z-increment ΔZ /mm	0.13	0.12	0.105	0.1
Total offset distance /mm	1.1	1.6	2.1	2.3
Total wall height /mm	3.8~4.1	3.5~3.8	3.1~3.3	3~3.3
Theoretical slope angle /($^\circ$)	17.1	26.56	37.3	42
Experimental slope angle /($^\circ$)	16.5	24	34.1	36.6

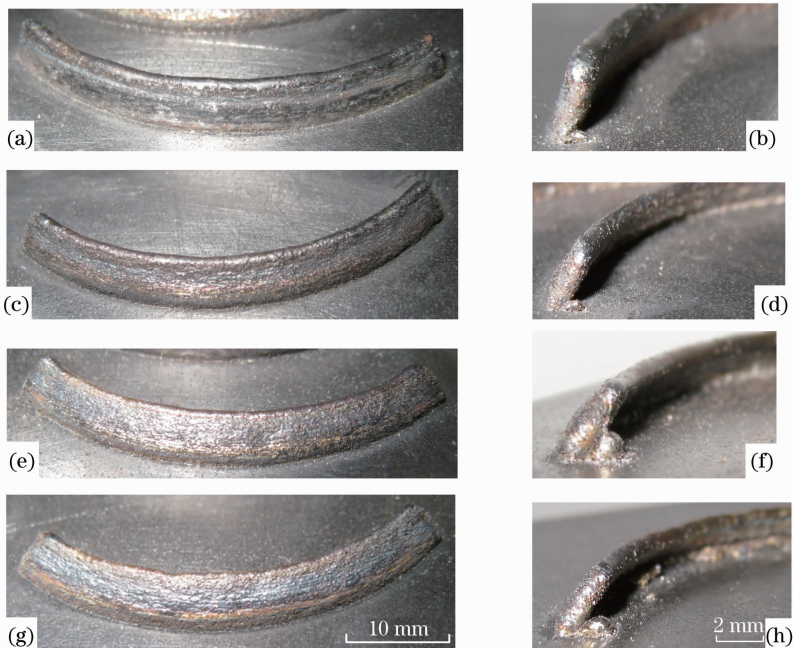


图 4 不同偏移量熔覆成形的倾斜薄壁件照片
Fig. 4 Photos of laser cladding forming of inclined thin parts with different offsets ΔX

通过以上试验得到了水平偏移量与 Z 轴提升量之间的对应关系,以 $(\Delta X, \Delta Z)$ 的形式表示为 $(0, 0.14)$ 、 $(0.04, 0.13)$ 、 $(0.06, 0.12)$ 、 $(0.08, 0.105)$ 、 $(0.09, 0.1)$ 5 组数组。用 Matlab 对这 5 组数据进行三次样条插值,结果如图 5 所示。可以看出, ΔZ 随着 ΔX 增大而不断减小,下降速度先增大后减小, ΔX 在 $0.06 \sim 0.08$ mm 区间段时 ΔZ 下降得最快。

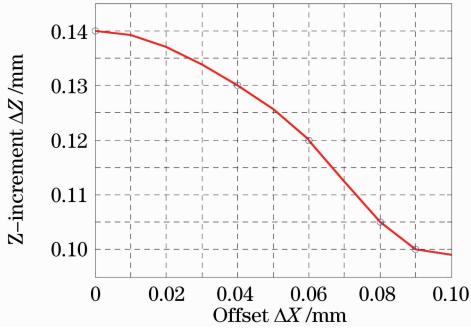


图 5 偏移量与 Z 轴提升量对应关系曲线

Fig. 5 Relationship between offset ΔX and Z-increment ΔZ

4 圆弧截面倾斜薄壁件变 Z 轴提升量法成形轨迹规划与试验验证

4.1 圆弧截面倾斜薄壁件成形轨迹规划

由倾斜薄壁件试验可知,当水平偏移量达到 0.09 mm,对应单层提升量为 0.1 mm 时,倾斜件仍能成功堆积,理论倾斜角度 $\alpha_n = \arctan(\Delta X/\Delta Z) = 42^\circ$ 。按照变 Z 轴提升量法的思想熔覆成形半径 25 mm、最大理论倾角 42° 的圆弧截面倾斜薄壁件,设计并选取优化的逐层偏移量和提升量。图 5 中选取的点并非均匀地分布在 42° 圆弧上,现将 42° 圆弧五等分,并结合已得到的三次样条插值分段函数,算出等分点处的偏移量和提升量(见表 3),构成新的数据。

每层偏移量与提升量组合均从表 3 中选取,以保证 Z 轴提升量接近堆积高度。用 Matlab 对这 6 组数据按照 42° 圆弧形状进行筛选组合。为比较数组得到每层最佳参数,由

$$P = \begin{cases} \left| \sqrt{(25 - \Delta X_n)^2 + \Delta Z_n^2} - 25 \right|, & n = 1 \\ \left| \sqrt{(25 - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta X_i - \Delta X_n)^2 + (\sum_{i=1}^{n-1} \Delta Z_i + \Delta Z_n)^2} - 25 \right|, & n > 1 \end{cases} \quad (4)$$

所得 P 值作为判定依据。式中 n 为当前熔覆层, ΔX_n 与 ΔZ_n 为代入的数组, ΔX_i 与 ΔZ_i ($i = 1, \dots, n-1$) 为已得到的第 i 层最佳偏移量与提升量, P 为选用参数 $(\Delta X_n, \Delta Z_n)$ 熔覆第 n 层时截面圆弧最高点到圆心距离与半径的差的绝对值。依次将表 3 数组代入(4)式,所得 P 值最小的数组为当前层最佳偏移量和提升量组合,成形高度大于 $Z_{\text{total}} = 25 \times \sin 42^\circ = 16.725$ mm 时模拟停止。模拟得到的倾斜薄壁件截面形状如图 6 所示,零件一共分 136 层,总高度 16.776 mm,偏移距离 6.455 mm。图 6 模拟了薄壁件前 30, 60, 90 层及全部 136 层截面形状,并对不同倾角处的连续 6 层轨迹进行了放大,分别用点线和实线表示不同的参数组合选取。可以看出,用变 Z 轴提升量法模拟的倾斜薄壁件截面形状

表 3 圆弧等分点处的水平偏移量和 Z 轴提升量
Table 3 Offsets ΔX and Z-increments ΔZ at the quinquesection points of the arc

$\alpha / (^\circ)$	0	8.4	16.8	25.2	33.6	42
ΔX /mm	0	0.02	0.0393	0.0573	0.0731	0.09
ΔZ /mm	0.14	0.136	0.1302	0.1218	0.11	0.1

与圆弧非常接近。如果通过试验获取更多偏移量与提升量的组合,提高偏移量与提升量关系曲线精度,同时细分圆弧段增加二维数组个数,则可提高模拟的圆弧截面倾斜薄壁件的截面形状精度。

4.2 变 Z 轴提升量法试验验证

为了验证变 Z 轴提升量法激光熔覆成形圆弧截面倾斜薄壁件的有效性,进行了圆弧截面倾斜薄壁件的激光熔覆成形试验。试验采用与前面相同的工艺参数组合,选用轨迹规划得到的各层偏移量和提升量组合,分别以 $1/4$ 圆和整圆为单层扫描路径,均堆积 136 层。根据试验经验在熔覆过程中改变激光功率和扫描速度来控制熔池大小。 $1/4$ 圆试验采用“Z”字形往返扫描,层间停留 2 s,因改变激光功率需暂停激光中断熔覆过程,为避免起始点缺陷累积,每熔覆 11 层改变激光参数;整圆试验每层逆时针移动 $1/4$ 圆变换起点,每 10 层改变激光参数。前 50 层由于热累积效应较为明显,激光功率降低、扫描速度增加;继续堆积,热累积趋于平衡,随着偏移量的增大,熔覆层宽度变窄,这里通过适当增大激光功率、减小扫描速度来保证壁厚均匀。

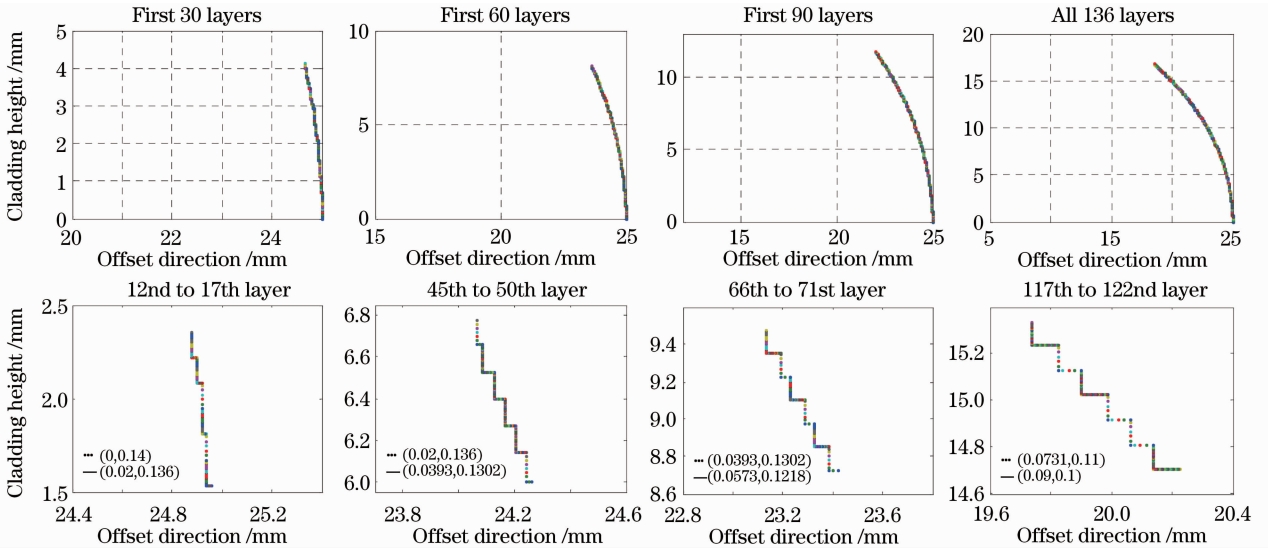
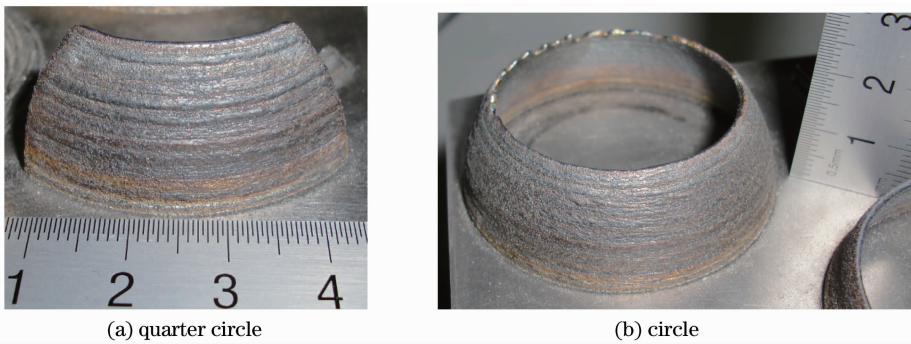


图 6 Matlab 模拟的圆弧轨迹路径

Fig. 6 Simulation of arc path with Matlab

试验结果如图 7 所示,两次试验均成功熔覆成形出圆弧截面倾斜薄壁件,倾斜角度连续增大与模拟相符。可以看出,采用整圆扫描路径[图 7(b)]成形质量要明显优于 1/4 圆[图 7(a)],扫描路径的延长减小了热累积对成形质量的影响;熔覆件外表面出现波浪状起伏,这是由于试验过程中需要关闭激光改变激光参数造成熔覆状态不均匀;熔覆成形件位于下部和上部的熔覆层成形质量与氧化程度要好于中间部位熔覆层,这是因为下部熔覆层的散热效

果最好,而上部熔覆层较大的偏移量不利于氧化现象的产生。图 7(b)中有 1/4 圆路径熔覆到顶部时发生塌陷现象,塌陷部分均靠近基板边缘,散热效果最差,不利于粉末的快速凝固,当偏移量大到一定值时由重力作用发生塌陷,而散热效果好的部分则没有塌陷。图 7(a)薄壁件成形高度为 16.85 mm,偏移距离 6.4 mm,顶部倾斜角度 37.7°;图 7(b)薄壁件成形高度 16 mm,偏移距离 6.5 mm,与设计值的尺寸误差均小于 0.8 mm,顶部倾斜角度 39.5°。



(a) quarter circle

(b) circle

图 7 熔覆成形的圆弧截面倾斜薄壁件

Fig. 7 Laser cladding forming of arc-section inclined thin-walled parts

5 结 论

1) 在保证 Z 轴总提升高度等于成形高度的前提下,通过试验得到水平偏移量 ΔX 与 Z 轴提升量 ΔZ 关系曲线,结果表明 ΔZ 随 ΔX 的增大而减小,且当 ΔX 在 0.06~0.08 mm 区间段时 ΔZ 减小得最快。

2) 试验熔覆成形出倾斜角度 36.6° 的倾斜薄壁件。

3) 通过 Matlab 对最终零件路径轨迹进行优化模拟,为激光熔覆成形圆弧截面倾斜薄壁件试验提供正确的逐层偏移量和提升量组合。

4) 运用变 Z 轴提升量的方法熔覆出 136 层圆弧截面倾斜薄壁件,熔覆件顶部倾斜角 39.5°,成形高度及偏移距离尺寸最大偏差 0.78 mm,验证了该方法的有效性,为更复杂零件的熔覆成形打下基础。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhijian, Dong Shiyun, Xu Binshi *et al.*. Three-dimensional characterizing technique for geometrical features of single laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 581~585
王志坚, 董世运, 徐滨士等. 单道激光熔覆层几何特征的三维表征方法[J]. 中国激光, 2010, **37**(2): 581~585
- 2 Yanmin Li, Haiou Yang, Xin Lin *et al.*. The influences of processing parameters on forming characterizations during laser rapid forming[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, **360**(1-2): 18~25
- 3 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 296~301
朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 296~301
- 4 Liu Jichang, Li Lijun. Experimental study on fabrication of thin-wall metallic features by laser cladding[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, **40**(10): 185~188
刘继常, 李力钧. 激光熔覆成形金属薄壁结构的试验研究[J]. 机械工程学报, 2004, **40**(10): 185~188
- 5 Li Peng, Ji Shengqin, Zeng Xiaoyan *et al.*. Direct laser fabrication of thin-walled metal parts under open-loop control[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, **47**(6): 996~1002
- 6 Jiang Shujuan, Liu Weijun, Nan Liangliang. Laser cladding height prediction based on neural network[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, **45**(3): 269~275
姜淑娟, 刘伟军, 南亮亮. 基于神经网络的激光熔覆高度预测[J]. 机械工程学报, 2009, **45**(3): 269~275
- 7 Lijun Song, V. Baquvath-Sinqh, J. Mazumder *et al.*. Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, doi: 10.1007/s00170-011-3395-2
- 8 Ning Guoqing, Zhong Minlin, Yang Lin *et al.*. Research about close-loop control system during laser direct manufacturing metallic components[J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2): 172~176
宁国庆, 钟敏霖, 杨林等. 激光直接制造金属零件过程的闭环控制研究[J]. 应用激光, 2002, **22**(2): 172~176
- 9 X. Wu, J. Mei. Near net shape manufacturing of components using direct laser fabrication technology[J]. *Materials Processing Technology*, 2003, **135**(2-3): 266~270
- 10 H. Qi, M. Azer, P. Singh. Adaptive toolpath deposition method for laser net shape manufacturing and repair of turbine compressor airfoils [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, **48**(1-4): 121~131
- 11 R. Dwivedi, S. Zekovic, R. Kovacevic. A novel approach to fabricate uni-directional and branching slender structures using laser-based direct metal deposition[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, **47**(7-8): 1246~1256
- 12 Shang Xiaofeng, Liu Weijun, Wang Wei *et al.*. Slope limit of part made in metal powder laser shaping[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, **44**(8): 97~100
尚晓峰, 刘伟军, 王维等. 金属粉末激光成形零件倾角极限[J]. 机械工程学报, 2008, **44**(8): 97~100
- 13 Yu Lingling, Shi Shihong, Di Keyun. Research on the laser cladding inclined wall accumulation based on the internal laser coaxial powder feeding technology [J]. *Laser and Infrared*, 2009, **39**(3): 264~266
郁玲玲, 石世宏, 狄科云. 基于光内同轴送粉技术的激光熔覆斜壁堆积成形研究[J]. 激光与红外, 2009, **39**(3): 264~266
- 14 Wang Xuyue, Guo Huiru, Xu Wenji *et al.*. Laser cladding forming of a ramp thin wall with variable powder feed rate[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, **22**(6): 701~705
王续跃, 郭会茹, 徐文骥等. 变送粉量法斜坡薄壁件的激光熔覆成形研究[J]. 中国机械工程, 2011, **22**(6): 701~705
- 15 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen *et al.*. Model of layer thickness of thin-walled parts in laser metal direct manufacturing [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, **31**(8): 57~60
朱刚贤, 张安峰, 李涤尘等. 激光金属制造薄壁零件z轴单层行程模型[J]. 焊接学报, 2010, **31**(8): 57~60
- 16 Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Laser Solid Forming Technology[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007. 51~52
黄卫东, 林鑫, 陈静等. 激光立体成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007. 51~52
- 17 J. O. Milewski, G. K. Lewis, D. J. Thoma. Directed light fabrication of a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition [J]. *J. Materials Processing Technology*, 1998, **75**: 165~172
- 18 Lu Yaojun, Chen Guangxia, Hu Qianwu *et al.*. Research of direct laser fabrication of metallic materials by Nd:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(s1): 180~184
卢尧君, 陈光霞, 胡乾午等. Nd:YAG激光熔覆快速制造技术研究[J]. 中国激光, 2007, **34**(s1): 180~184