

## 矩形金属层合板激光圆弧扫描弯曲曲面变形分析

王高峰,王续跃,王焕捷

(大连理工大学 机械工程学院 精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁 大连 116024)

**摘要:** 激光圆弧扫描弯曲可实现圆弧槽形舱壁件无模具成形, 研究其曲面变形规律以及其曲面变形特征具有重要的工程应用意义。首先, 详细分析了扫描次数  $n$ 、圆弧扫描半径  $R$ 、板材宽度  $W$  以及扫描基准线至自由端长度  $L$  对矩形金属层合板曲面变形的影响。同时, 结合各参数对曲面变形作用效果及曲面变形量试验测量数据, 求得各参数下曲面变形量经验函数, 并对其变化规律及趋势进行分析。最后, 利用激光圆弧扫描弯曲策略进行了圆弧槽形舱壁件样件试制, 其中单段圆弧槽两侧壁曲率半径均值分别为 84.51、86.77 mm。文中方法为矩形金属层合板激光圆弧扫描弯曲曲面变形规律分析及成形圆弧槽形样件提供了试验依据。

**关键词:** 激光弯曲; 圆弧扫描; 矩形层合板; 曲面变形; 圆弧槽

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0242003

## Analysis of curved surface deformation in laser circular scanning of rectangular metal laminated plates

Wang Gaofeng, Wang Xuyue, Wang Huanjie

(Key Laboratory of Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Circular groove bulkhead can be finished by laser circular scanning without mould. Therefore, research of the curved surface deformation rule and characteristics was of important significance for engineering applications. Firstly, the influence of the scanning number  $n$ , the circular scanning radius  $R$ , the plates' width  $W$  and the length from baseline to the free end  $L$  on the curved surface deformation were analyzed in detail. Secondly, combining with the effect of various parameters on the surface deformation and surface deformation test measurement data, obtained surface deformation experience function about the parameters. Then the surface deformation change rule and trend were analyzed. Finally, the strategy of laser circular scanning has obtained the circular groove bulkhead samples and its two side wall of the mean curvature radius are 84.51 mm and 86.77 mm respectively. This study lays a solid foundation of both the circular groove structure and the double circular grooved structure by laser circular scanning.

**Key words:** laser bending; circular scanning; rectangular laminated plates; curved surface deformation; circular groove structure

收稿日期: 2018-09-10; 修订日期: 2018-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(51375073, 51621064)

作者简介: 王高峰(1993-), 男, 硕士生, 主要从事激光弯曲层合板方面的研究。Email: 641196187@qq.com

导师简介: 王续跃(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事精密与特种加工方面的研究。Email: wbzzd@dlut.edu.cn

## 0 引言

激光弯曲成形由于其柔性、无模、无外力、非接触等技术特点,可与激光焊接、激光切割技术相结合,易于实现自动化,适用于快速成形制造以及其它柔性制造技术。利用金属层合板激光圆弧扫描弯曲成形技术可实现船舶舱壁件过渡区域圆弧槽结构无模具成形。管延锦等<sup>[1]</sup>建立了三维热机耦合有限元分析模型,研究了材料性能参数对成形的影响规律。随着激光弯曲成形技术研究不断进行,快速、柔性化制造技术的需求不断提出,采用激光弯曲技术直接成形特定曲面成为激光弯曲成形发展的重要方向之一。陈敦军等<sup>[2]</sup>模拟了板料激光曲线弯曲过程强烈的瞬态非线性特征,用热力学的角度揭示了板料曲线弯曲变形的内在机制。杨立军等<sup>[3]</sup>利用正方形薄板进行了激光直线扫描弯曲成形三维球冠面的技术分析,采用交叉线扫描策略制备了球冠面,并利用显式动态有限元方法分析了激光扫描弯曲过程中温度、应力、应变以及形变等的变化情况。邓春锋等<sup>[4]</sup>研究了约束对板料激光曲线扫描成形的影响,认为在激光曲线扫描成形实施中,有无约束以及约束的形式不同都会导致板材产生不同的变形效果。Kuntal Maji 等<sup>[5]</sup>利用激光直线扫描弯曲技术通过激光扫描路径规划对成形圆顶形曲面进行了研究。Mohammad Hoseinpour Gollo 等<sup>[6]</sup>对激光螺旋扫描路径弯曲成形帽状曲面进行了试验和模拟研究。Thomas Hennige<sup>[7]</sup>对激光三维成形扫描策略进行了研究,并利用环形试件以及圆形试件(扫描路径为同心圆弧)与直线扫描矩形试件进行了对比,认为几何因素的改变对弯曲行为有巨大的影响,进行了相关试验并对试验结果规律进行了分析,并利用激光曲线扫描成形了圆顶形样件。张立文等<sup>[8]</sup>对单曲率板材激光弯曲成形过程进行了有限元模拟,分析了激光弯曲成形过程中板材内部的温度场、应力场和位移场,并利用实验验证了有限元模型的可靠性。D.J. Chen 等<sup>[9]</sup>对金属薄板激光曲线弯曲变形行为进行了试验和模拟研究,发现弯曲角度随激光扫描曲率的增大而减小,约束较小一端发生三维变形并且产生了一定的延展和轻微的变薄。Peng Zhang 等<sup>[10]</sup>对金属薄板激光曲线扫描弯曲进行了有限元模拟,相关

模型与试验结果吻合良好,并利用有限元模型对温度场以及弯曲变形进行了分析。Ravi Kant<sup>[11]</sup>建立了镁合金薄板激光曲线扫描弯曲数值模型并进行了试验验证,认为激光扫描路径曲率影响板材的边界位移和成形形状。

由于金属层合板以其兼顾基层和覆层材料优点,在满足优异综合性能的情况下实现节约贵重金属,降低材料成本的目的,金属层合板替代单一金属层合板已成为一种趋势。文中选定激光弯曲成形对象为不锈钢-碳钢层合板。以激光圆弧扫描弯曲样件曲面成形结果为分析基础,概括分析激光圆弧扫描弯曲扫描线两侧变形特征。并详细分析激光圆弧扫描弯曲过程中激光扫描次数  $n$ 、激光扫描圆弧半径  $R$ 、板材宽度  $W$  及激光扫描基准线至自由端长度  $L$ ,对板材曲面变形量的影响。从而总结出各加工参数下层合板激光圆弧扫描弯曲曲面变形量经验函数及其变化规律。最终,依据激光圆弧扫描弯曲成形特征试制圆弧槽形件,为金属层合板激光圆弧扫描弯曲成形圆弧槽提供试验基础。

## 1 试验内容及金属层合板曲面变形分析

### 1.1 试验材料及方法

试验用板材样品为不锈钢-碳钢层合板,1 mm 厚度,由大连理工大学工程力学系制备,上下层为 304 不锈钢,中间层为 Q235A 碳钢。激光加工设备为英国 GSI Lumonics 公司 JK701H 型 Nd:YAG 脉冲激光器,并侧吹辅助气体 N<sub>2</sub>,吹气压力为 0.2 MPa,以防止板材过热及氧化,试验中激光参数如表 1 所示。

表 1 激光弯曲试验参数<sup>[12]</sup>

Tab.1 Parameters of laser bending experiment<sup>[12]</sup>

Power/W	Scanning speed/ mm·min <sup>-1</sup>	Defocus distance/mm	Pulse frequency/Hz	Pulse width/ms
140	400	10	40	2

激光弯曲试验基于温度梯度机理,板材样品采用单端固定方式,激光沿圆弧线往复扫描,扫描圆弧线与基准线相切,在每次激光圆弧扫描开始时为使激光加工稳定与板材预留一段距离,激光圆弧曲线扫描路径如图 1 所示, $O$ 、 $R$  分别为激光圆弧扫描路径的圆心与半径, $L$  为激光扫描基准线至板材自由

端长度,  $W$  为板材宽度,  $\Delta w$  为激光扫描起始点到板材边缘预留长度。

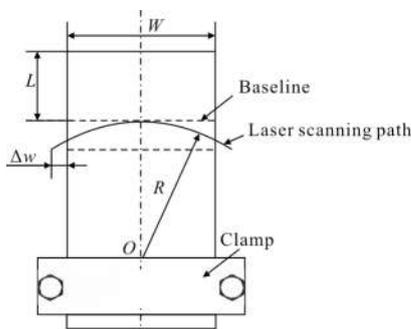


图 1 激光圆弧扫描路径

Fig.1 Path of laser circular scanning

基于验证试验结果文中层合板激光圆弧扫描弯曲试验主要研究参数为:激光扫描次数  $n$ 、激光扫描圆弧半径  $R$ 、板材宽度  $W$  及激光扫描基准线至自由端长度  $L$ 。其主要加工参数值如表 2 所示。

表 2 层合板主要加工参数值

Tab.2 Main parameters of laminated plates forming

Parameters	Value of parameters/mm
Scanning number $n$	8/16/24/32
Laser scanning radius $R$	30/50/100/150
Plates' width $W$	30/50/70/90
Length from baseline to the free end $L$	15/30/45/60

试验样件激光圆弧扫描弯曲结果如图 2 所示,加工参数从左至右依次为:激光扫描次数  $n$ 、激光扫描圆弧半径  $R$ 、板材宽度  $W$  及激光扫描基准线至自由端长度  $L$ 。



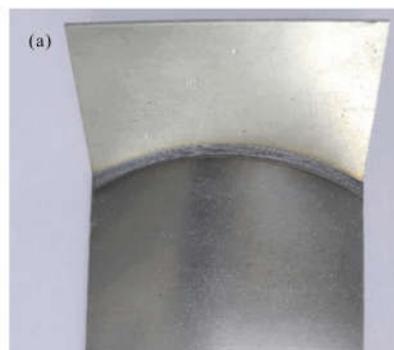
图 2 激光圆弧扫描弯曲样件

Fig.2 Bending samples of laser circular scanning

## 1.2 金属层合板激光圆弧扫描曲面变形分析

在金属层合板曲面变形结果分析中,选定样件参数为:激光圆弧扫描半径  $R=50$  mm,扫描次数  $n=32$  次。该参数条件下层合板曲面变形明显,板材宽度适中便于试验进行。同时,该参数条件下激光成形弯曲角度最大,若其层合板各层间不发生分层失效,则可保障后续试验的有效性。如图 3(a)所示利用三坐标测量仪对激光扫描弯曲成形后样件激光扫描线两侧进行测量,利用 MATLAB 对测量点进行拟合并对变形结果进行分析,拟合结果如图 3(b)所示。

利用三坐标测量仪测量激光扫描线至自由端间板材变形时,每条测量线均保持  $z$  坐标值不变,测得  $x$  及  $y$  坐标值,然后移动  $z$  轴至下一测量位置,同理测得  $x$  及  $y$  坐标值;测量激光扫描线至固定端间板材变形时,每条测量线均保持  $y$  坐标值不变,测得  $x$  及  $z$  坐标值,然后移动  $y$  轴至下一测量位置,同理测得其  $x$  及  $z$  坐标值。由测量拟合结果可知,激光圆弧扫描弯曲成形样件变形呈三维状,激光扫描线两侧板材发生明显的曲面变形。如图 3(c)所示,对图 3(b)中激光扫描线至自由端间板材 5 处测量位置三坐标测量线  $r1\sim r5$  进行拟合,各测量位置变形结果近似为圆弧,随  $z$  向位移增加曲面变形圆弧半径由 119.86 mm 增大至 270.31 mm,圆弧半径增长近似呈线性。激光扫描线到板材自由端,板材变形逐渐减小,激光扫描线至自由端间板材变形最大处位于激光扫描线附近。由图 3(d)可知,激光扫描线至固定端也存在明显曲面变形,其中间长度向测量线从固定端到激光扫描线处,其  $z$  轴坐标值随  $y$  轴坐标值增大而增大;从固定端到激光扫描线处,测量线  $l3$  的  $z$  轴坐标值整体大于左、右两侧测量线的  $z$  轴坐标值。测量线  $l3$  在激光扫描线处  $z$  坐标值为 1.91 mm,测量线  $l1$ 、测量线  $l2$ 、测量线  $l4$ 、测量线  $l5$  在激光扫描



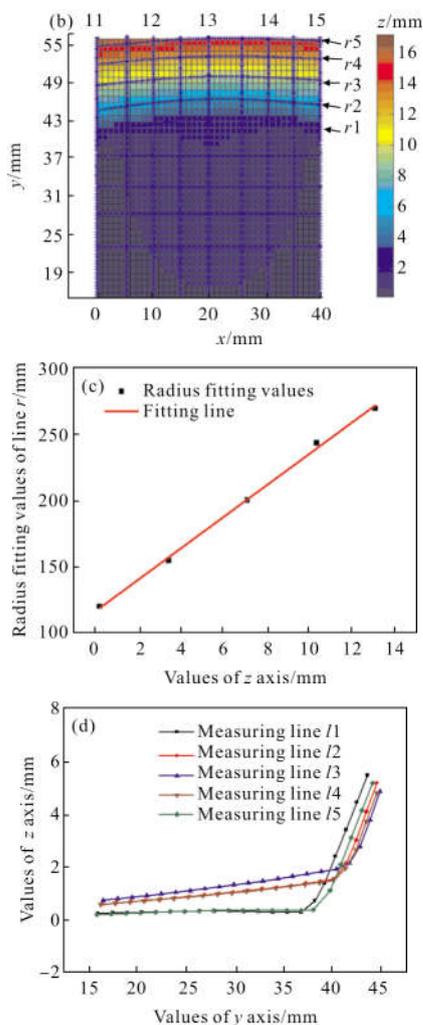


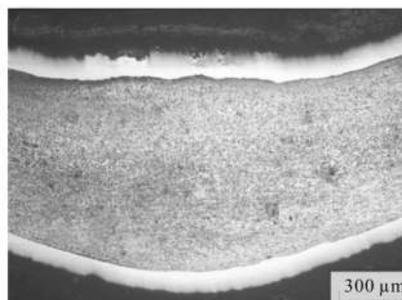
图 3 (a)激光圆弧扫描弯曲样件;(b)三坐标测量数据拟合结果;  
(c)测量线  $r$  半径拟合;(d)测量线  $l$  的  $z$  坐标值

Fig.3 (a) Bending samples of laser circular scanning; (b) data fitting results of three coordinates measuring; (c) fitting radius of measuring line  $r$ ; (d)  $z$  coordinate values of measuring line  $l$

线处  $z$  坐标值分别为:0.27、1.54、1.48、0.35 mm。由此可知激光扫描线至固定端变形量最大值位于测量中线  $l3$  激光扫描线处,沿测量中线  $l3$  向固定端方向及两侧测量线方向变形量均逐渐减小。基于温度梯度机理,金属层合板激光圆弧扫描弯曲时,激光作用热应力沿圆弧扫描线分布,并作用于板材使得扫描线各点法平面内发生弯曲变形。由于板材扫描线处各点弯曲角度方向及弯曲变形位置随激光圆弧扫描线发生变化,进而使得激光扫描线各脉冲点作用处板材  $x$ 、 $y$  向位移增量不一致,扫描线两侧板材随激光圆弧扫描线曲率方向发生曲面变形。其中,激光扫

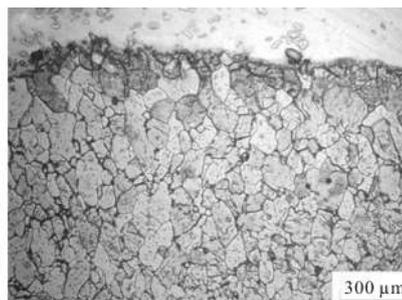
描线上部分板材长度方向中线  $y$  向位移增量大于其左右两侧,激光扫描线上部分板材呈现凹面;激光扫描线下部分板材长度方向中线  $y$  向位移增量小于其左右两侧,激光扫描线下部分板材呈现凸面。试验检测结果与变形分析结果趋势一致。

金属层合板激光扫描弯曲角度为  $43^{\circ}30'$ ,由微观组织图 4(a)可知,进行 32 次激光圆弧扫描弯曲后,激光圆弧扫描线处出现明显弯曲以及增厚现象。激光圆弧扫描弯曲时层合板上层不锈钢受到激光热作用及弯曲挤压作用,由图 4(b)可知,激光圆弧扫描弯曲后上层不锈钢无裂纹,与基层碳钢无分层现象,验证了激光圆弧扫描弯曲成形在复杂应力状况下,未出现层合板失效现象,为后续激光圆弧扫描弯曲成形圆弧槽形提供保障。



(a) 50倍放大图

(a) Magnified 50 X



(b) 500 倍放大图

(b) Magnified 500 X

图 4 激光扫描线区域沿长度方向中线截面微观组织

Fig.4 Microstructure of laser scanning area section along the length direction of central line

## 2 激光加工参数对板材曲面变形影响

为分析板材曲面变形量定义两基准面:基准面 1 为自由端至激光扫描线段板材两侧边所在平面;基准面 2 为固定端至激光扫描线段板材两侧边所在平

面。点  $a$  为自由端边缘中点,点  $a'$  为点  $a$  在基准面 1 内垂直投影点;点  $b$  为激光扫描线中点,点  $b'$  为点  $b$  在基准面 1 内垂直投影点,点  $b''$  为点  $b$  在基准面 2 内垂直投影点。自由端变形量  $\Delta_1$  为自由端边缘中点  $a$  至基准面 1 内点  $a'$  直线距离,扫描线变形量  $\Delta_2$  为激光扫描线中点  $b$  到基准面 1 内点  $a'$  直线距离;扫描线变形量  $\Delta_3$  为激光扫描线中点  $b$  到基准面 2 内点  $b''$  直线距离,测量位置如图 5 所示。

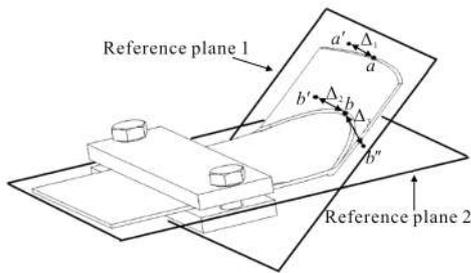


图 5 板材曲面变形量测量位置

Fig.5 Measurement location of plates' surface deformation

基于温度梯度机理,金属层合板激光圆弧扫描弯曲时,将激光对板材弯曲作用假定为激光扫描线各点法平面内的等效弯矩。点  $A$  激光扫描线起点、点  $A'$  激光扫描线终点与点  $B$  激光扫描线中点,各点处弯矩大小相等,弯矩作用正方向如图 6 中  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  所示。激光圆弧扫描弯曲时,沿长度方向中线,层合板左右弯曲变形近似对称。以板材长度中线右侧激光作用对曲面变形量  $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$  影响为例,推定激光圆弧扫描弯曲加工参数对板材曲面变形量影响函数类型,分析过程如下。

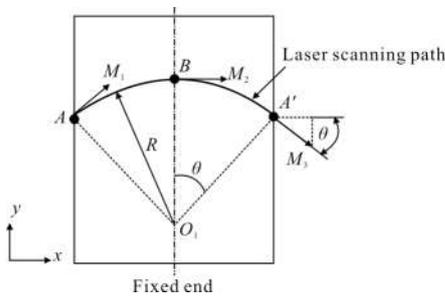


图 6 激光加工弯矩作用示意图

Fig.6 Effect diagram of bending moment of laser forming

结合激光圆弧扫描弯曲后曲面变形量  $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$  结果,在 32 次激光圆弧扫描弯曲范围内,将扫描次数  $n$  对曲面变形量  $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$  的影响看作单次扫描弯曲结

果的线性叠加。激光圆弧扫描半径  $R$  与板材宽度  $W$  通过影响激光热应力等效弯矩的分布曲率以及分布长度进而影响层合板曲面变形量  $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$ 。其影响结果计算如下:

$$M_R = \int_0^\theta M \sin \alpha d\alpha = M(1 - \cos \theta) \quad (1)$$

$$\cos \theta = \sqrt{\frac{R^2 - \frac{W^2}{4}}{R^2}} = \sqrt{1 - \frac{W^2}{4R^2}} \quad (2)$$

扫描基准线至自由端长度  $L$  影响沿长度方向中线板材截面惯性矩,进而影响板材曲面变形量  $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$ ,可得绕  $y$  轴弯曲截面惯性矩为:

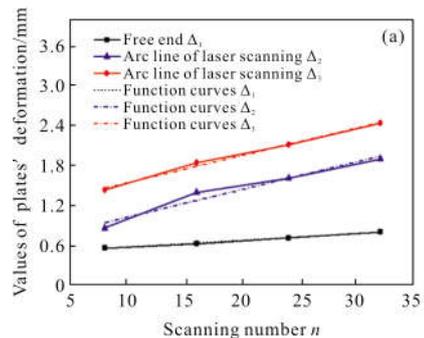
$$I_y = \frac{L \cdot h^3}{12} \quad (3)$$

可认为扫描基准线至自由端长度  $L$  与层合板曲面变形量近似呈反比。其中,  $h$  为板材厚度。故激光圆弧扫描弯曲曲面变形量  $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$  影响函数类型总结为:

$$\Delta = k_1 \frac{n}{L} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{W^2}{4R^2}} \right) + k_2 \quad (4)$$

式中:  $\Delta$  为曲面变形量;  $k_1$ 、 $k_2$  为待定系数;  $n$  为激光扫描次数;  $L$  为基准线至自由端长度;  $W$  为板材宽度;  $R$  为激光扫描圆弧半径。同理可得加工参数对曲面变形量  $\Delta_3$  影响的经验函数类型。

由曲面变形量试验数值及公式(4)所示经验公式类型。数值拟合求得各个加工参数下,自由端变形量  $\Delta_1$ 、扫描线变形量  $\Delta_2$  以及扫描线变形量  $\Delta_3$ ,经验公式中待定系数  $k_1$ 、 $k_2$  值。分别以扫描次数  $n$ 、圆弧扫描半径  $R$ 、板材宽度  $W$  以及扫描基准线至自由端长度  $L$  为自变量,依据拟合公式结果绘制曲线,结果如图 7 中虚线所示。



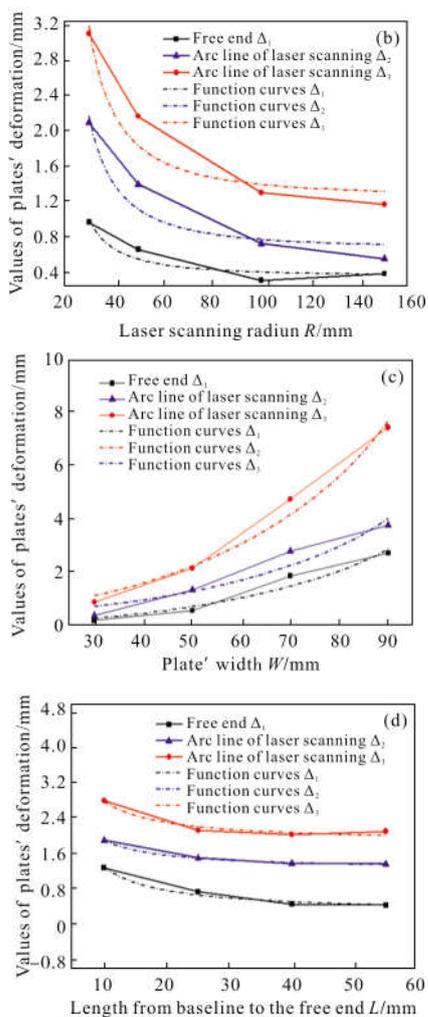


图 7 (a)扫描次数  $n$ ; (b) 圆弧扫描半径  $R$ ; (c) 板材宽度  $W$ ; (d) 扫描基准线至自由端长度  $L$ , 对板材曲面变形量的影响  
Fig.7 (a) Scanning number  $n$ ; (b) circular scanning radius  $R$ ; (c) plates' width  $W$ ; (d) length from baseline to the free end  $L$ , influence on the surface deformation

根据千分表测量结果,利用 origin 画图软件,分别以激光扫描次数  $n$ 、激光圆弧扫描半径  $R$ 、板材宽度  $W$  以及扫描基准线至自由端长度  $L$ ,以板材曲面变形量为因变量绘制曲线图。

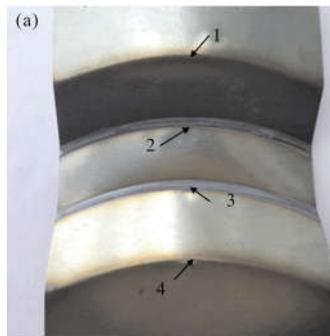
由图 7(a)可知,激光圆弧扫描弯曲次数增加,层合板曲面变形量随之增加,扫描次数从 8 次增至 32 次时,板材自由端  $\Delta_1$ 、扫描线变形量  $\Delta_2$  以及扫描线变形量  $\Delta_3$  分别增大 0.25、1.04、1.01 mm; 由图 7(b)可知,圆弧扫描半径  $R$  从 30 mm 增至 150 mm,板材自由端  $\Delta_1$ 、扫描线变形量  $\Delta_2$  以及扫描线变形量  $\Delta_3$  分别减小 0.49、1.45、2.18 mm,开始时曲面变形

减小迅速后逐渐趋于平稳;由图 7(c)可知,板材宽度由 30 mm 增至 70 mm,板材自由端  $\Delta_1$ 、扫描线变形量  $\Delta_2$  以及扫描线变形量  $\Delta_3$  分别增大 1.85、2.76、3.83 mm;由图 7(d)可知,扫描基准线至自由端长度由 10 mm 增至 50 mm,板材自由端  $\Delta_1$ 、扫描线变形量  $\Delta_2$  以及扫描线变形量  $\Delta_3$  分别减小 0.61、0.51、0.27 mm。

随试验参数变化板材曲面变形量发生明显变化:板材曲面变形是激光扫描线处板材变形结果的传递,激光扫描线处变形最大,其变形向上上传递并逐渐减小;板材激光曲面变形结果为激光作用效果的累加,在该试验研究范围内曲面变形量随激光扫描次数  $n$  近似呈线性增加;激光圆弧扫描半径  $R$  增大,激光热应力分布发生变化并趋于直线,曲面变形量先迅速减小后趋于平稳;板材宽度  $W$  增大,激光扫描线增长部分热应力分布有利于板材曲面变形,曲面变形量迅速增大;由于曲面弯曲变形受截面惯性矩影响,扫描基准线至自由端长度  $L$  变大截面惯性矩随之增大,曲面变形量与扫描基准线至自由端长度  $L$  近似呈反比。

### 3 圆弧槽弯曲成形试验

夹持方法为一端固定,一端自由,对板材进行激光圆弧扫描,从自由端到固定端共在 4 个位置进行激光扫描,扫描圆弧半径  $R$  均为 50 mm,扫描次数  $n$  为 20 次,依次进行激光弯曲扫描。激光弯曲后单段槽形样件如图 8(a)所示。此外,对槽形件加工路径进行柔性化设计,从自由端到固定端共在 4 个位置进行激光扫描,各段扫描圆弧半径  $R$  均为 50 mm,扫描次数  $n$  为 20 次,两段圆弧平滑连接,双段柔性圆弧槽形件成形结果如图 8(b)所示。板材弯曲结果呈明显圆弧槽形,板材圆弧变形结果随激光扫描路径变化。



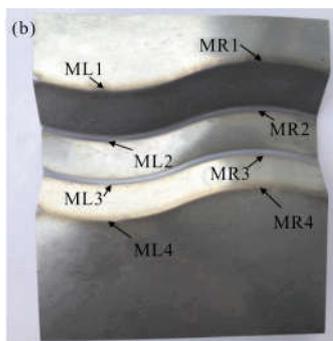


图 8 单段圆弧槽弯曲成形结果(a)及双段圆弧槽测量结果(b)

Fig.8 Forming results of single circular groove structure (a) and forming results of double circular groove structure (b)

依据三坐标测量仪测量结果,对图 8 所示样件由上往下单段圆弧槽形样件长度中线 4 处(图 8 中编号 1-4)弯曲角度值及双段圆弧槽形样件左(图 8 中编号 ML1-ML4)、右(图 8 中编号 MR1-MR4)两侧圆弧槽长度中线各 4 处弯曲角度值测量分析。结果如图 9 所示。

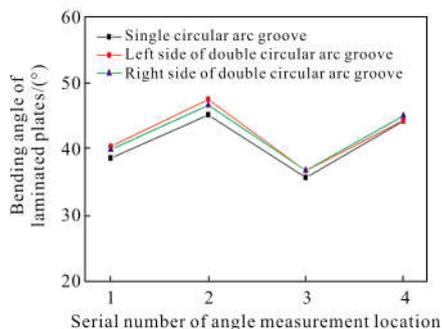


图 9 圆弧槽 4 处弯曲位置角度值

Fig.9 Angle value of 4 bending position of circular groove structure

在相同加工参数下,单段槽形与双段槽形 4 处弯折区弯曲角度趋势一致。其中,第 2 处测量位置弯曲角度值最大,单段槽形与双段槽形左右两侧弯曲角度值分别为:45°14'、47°38'、46°24';第 3 处测量位置弯曲角度值最小,单段槽形与双段槽形左右两侧弯曲角度值分别为:35°44'、36°48'、36°50'。这是由于不同激光加工阶段变形对后续变形的影响。第 1 处弯曲变形后板材形状与第 2 处弯曲变形趋势一致,有利于第 2 处变形的产生。第 3 处弯曲变形情况则与之相反。同时,由于板材变形抗力影响其变形后圆

弧槽壁曲率半径大于激光扫描路径半径,且由于不同激光加工阶段变形对后续变形的影响,单段圆弧槽上下侧壁曲率半径不一致,均值分别为 84.51、86.77 mm。激光双段圆弧槽弯曲结果,其槽形侧壁呈双段圆弧特征,槽形上侧壁左右两段曲率半径分别为:83.53、99.92 mm,槽形下侧壁左右两段曲率半径分别为:85.66、83.58 mm,变形后曲面变形分析数值均呈明显曲面状,为激光圆弧扫描弯曲成形复杂槽形结构提供了试验依据。

### 4 结 论

针对金属层合板激光圆弧扫描弯曲成形特征,分析了激光扫描次数  $n$ 、激光扫描圆弧半径  $R$ 、板材宽度  $W$  以及扫描基准线至自由端长度  $L$  对板材变形的影响规律,并利用其曲面成形特征试制圆弧槽形件,得出以下结论:

(1) 由于圆弧扫描热应力分布呈圆弧状,各激光脉冲点作用处板材弯曲变形方向及弯曲变形位置不一致使得激光扫描线两侧板材发生明显三维变形形成曲面,激光圆弧扫描线圆心所在侧变形曲面为凸面,另一侧变形曲面为凹面。激光扫描圆弧半径  $R$  为 50 mm,扫描次数  $n$  为 32 次时,激光扫描线至自由端呈曲面状,随  $z$  向坐标值增加测量线  $r1\sim r5$  圆弧半径由 119.86 mm 增大至 270.31 mm;激光扫描线至固定端,测量线  $l1\sim l5$  激光扫描线处  $z$  坐标值分别为 0.27、1.54、1.91、1.48、0.35 mm,沿测量中线  $l3$  向固定端方向及两侧测量线方向板材变形量均逐渐减小;

(2) 试验参数中,受激光能量输入、热应力分布及金属层合板曲面变形抗力影响,层合板曲面变形量显著变化。其中,层合板曲面变形量随扫描次数  $n$  近似呈线性增长;激光圆弧扫描半径  $R$  增大,层合板曲面变形量随之减小,并最终趋于直线;随板材宽度  $W$  增大,层合板曲面变形量随之增大;激光扫描基准线至自由端长度  $L$  增大,金属层合板曲面变形量随之减小,近似呈反比。圆弧扫描半径  $R$  从 30 mm 增至 150 mm,板材自由端变形量  $\Delta_1$  减小 0.49 mm。板材宽度  $W$  由 30 mm 增至 70 mm,板材自由端变形量  $\Delta_1$  增大 1.85 mm;

(3) 依据激光圆弧扫描弯曲成形后激光扫描线

至自由端间材料最终呈曲面形状,采用一端固定一端自由夹持方式,在4处不同位置进行激光扫描弯曲直接成形了圆弧槽形结构。基于激光扫描路径柔性化特征,利用激光圆弧扫描弯曲成形了双段圆弧槽结构。

#### 参考文献:

- [1] Guan Yanjin, Ji Zhong, Hao Binhai, et al. Influence of material properties on laser bending process of sheet metal [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2001, 12(1): 87-90. (in Chinese)  
管延锦, 季忠, 郝滨海, 等. 材料性能参数对板料激光弯曲成形的影响[J]. 光电子·激光, 2001, 12(1): 87-90.
- [2] Chen Dunjun, Long Li, Wu Shidun, et al. Numerical simulation of sheet metal laser curve bending forming [J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(13): 78-80. (in Chinese)  
陈敦军, 龙丽, 吴诗惇, 等. 板料激光曲线弯曲成形的数值模拟[J]. 中国机械工程, 2003, 14(13): 78-80.
- [3] Yang Lijun, Wang Yang. Technique of three-dimensional laser forming of thin square metal sheet to spherical dome [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(1): 131-136. (in Chinese)  
杨立军, 王扬. 正方形薄板激光弯曲三维成形球冠面的技术分析[J]. 中国激光, 2008, 35(1): 131-136.
- [4] Deng Chunfeng, Zhang Peng, Ma Yanxia. Effect of restraint on the deformation of sheet metal in laser curve forming [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2008(4): 85-86. (in Chinese)  
邓春锋, 张鹏, 马艳霞. 约束对板料激光曲线扫描成形的影响[J]. 锻压装备与制造技术, 2008(4): 85-86.
- [5] Maji K, Pratihar D K, Nath A K. Laser forming of a dome shaped surface: Experimental investigations, statistical analysis and neural network modeling [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 53(2): 31-42.
- [6] Gollo M H, Nadi G, Mehdi M, et al. Experimental and numerical study of spiral scan paths on cap laser forming[J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(1): 4900795.
- [7] Hennige T. Development of irradiation strategies for 3D-laser forming [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 103(1): 102-108.
- [8] Zhang Liwen, Zhu Zhi, Gu Sendong, et al. Finite element simulation of laser bending forming process for singly curved plate [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2012, 37(1): 46-48. (in Chinese)  
张立文, 朱智, 顾森东, 等. 单曲率板材激光弯曲成形过程的有限元模拟[J]. 锻压技术, 2012, 37(1): 46-48.
- [9] Chen D J, Wu S C, Li M Q. Studies on laser forming of Ti-6Al-4V alloy sheet [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 152(1): 62-65.
- [10] Zhang P, Guo B, Shan D, et al. FE simulation of laser curve bending of sheet metals [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 184(1-3): 157-162.
- [11] Kant R, Joshi S N. Numerical modeling and experimental validation of curvilinear laser bending of magnesium alloy sheets [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2014, 228(9): 1036-1047.
- [12] Zhang Pan, Wang Xuyue. Element diffusion and material properties in transition layer of bending zone in laminated plates [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 82-88. (in Chinese)  
张攀, 王续跃. 层合板激光弯折区过渡层元素扩散及材料性能[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 82-88.