

金属扇形层合板激光圆弧扫描变形特征研究

王焕捷, 王续跃

(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: 针对不锈钢-碳钢扇形层合板, 采用激光同心圆弧扫描方式进行弯曲成形试验。用激光扫描仪对变形后的样件进行几何特征测量, 分析激光扫描线各位置的弯曲角度及扫描线两侧曲面变形特征。研究激光加工参数和板材几何参数对扇形层合板激光圆弧扫描弯曲成形的影响。结果表明: 经激光圆弧扫描后的扫描线变形区在空间呈三维曲线状, 在扫描线处的弯曲角度各不相同, 中线位置角度最小, 并向板材左右两侧逐渐增大, 于板材边缘处达到最大, 关于扇形板中心线基本对称; 扫描线径向两侧均产生明显曲面变形, 扫描线至扇形板外圆线的区域沿 y 轴正向内凹, 扫描线至扇形板内圆线的区域沿 z 轴正向外凸。研究结果为深入分析激光同心圆弧扫描三维变形机理提供试验依据。

关键词: 激光弯曲; 圆弧扫描; 扇形层合板; 曲面变形

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.S106005

Deformation characteristics of laser circular bending in sector metal laminated plates

Wang Huanjie, Wang Xuyue

(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: For stainless steel-carbon steel sector laminated plates, the laser concentric circular scanning method was used to bend the plates. The geometrical characteristics measurement of deformed sample were measured by laser scanner. The bending angle of each position of the laser scanning lines and the deformation characteristics of the curved surface on both sides of the scanning line were analyzed. The effects of laser processing parameters and sheet geometry parameters on laser arc scanning bending of sector laminates were studied. The results show that deformation zone of the scanning line after laser circular scanning is three-dimensional curve in space and the bending angles at the scanning line are different. The angle in central line is the smallest and increases gradually to the left and right sides of the plate, reaching the maximum at the edge of the plate. The angle is basically symmetrical along the center line of the plate; The surface is obviously deformed by a curved surface and the area from the scanning line to the outer circular line of the sector plate is inwardly recessed, and the area from the scanning line to the inner circular line of the sector plate is convex outward. The research results provide a basis for in-depth understanding of the three-dimensional deformation mechanism of laser circular scanning.

Key words: laser bending; circular scanning; sector laminated plates; curved surface deformation

收稿日期: 2018-11-06; 修订日期: 2018-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(51375073, 51621064)

作者简介: 王焕捷(1993-), 男, 硕士生, 主要从事激光弯曲成形方面的研究。Email: 751340869@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

不锈钢-碳钢层合板是以碳钢为基层,上下覆层为不锈钢,利用爆炸、轧制等工艺结合制备而成。层合板既具有碳钢的高强度,又具有不锈钢的耐腐蚀、耐高温等性能,相较于单一材料板材经济效益更高。广泛应用于电子器件、压力容器、航空航天等领域。激光弯曲成形是利用高能激光束扫描板件表面,在其内部产生不均匀分布的热应力来实现板材弯曲变形。由于其具有无模具、无外力、适于单件小批量生产等优势,被国内外研究者所青睐。近年来,直线扫描路径得到较充分的研究,而对圆弧扫描路径的成形研究较少。李紫慧、王续跃等^[1]利用有限元方法对不锈钢-碳钢层合板激光直线扫描时产生的翘曲变形进行数值模拟,扫描线中间区域的热累积导致了翘曲变形的产生。Thomas Hennige^[2]对矩形板激光直线扫描和扇形板、环形板激光圆弧扫描成形结果进行分析,得出板材的初始几何形状和扫描路径会对激光弯曲成形产生较大影响。张鹏等^[3-4]利用有限元方法对激光直线、正弦线和余弦线三种扫描轨迹下矩形板材变形行为进行模拟,得到三种扫描轨迹下,扫描线到约束端均出现圆形反向变形区,变形区面积以正弦扫描轨迹的为最大。Ravi Kant、Shrikrishna N Joshi 等^[5-8]对镁合金矩形板材的曲线激光弯曲进行了数值模拟,研究激光曲线弯曲过程的温度分布、应力应变分布、弯曲角度和边缘位移。在以屈曲机制为主的工艺条件下,研究了激光工艺参数对镀锌铁薄板激光曲线弯曲成形后弯曲角度的影响。Q. Nadeem、W. J. Seong 等^[9-10]运用基于距离法对半圆和 1/4 圆板进行多道次扫描成形,与目标样件较为吻合。同时分别比较了用圆弧和射线两种扫描策略对球冠面成形的影响。Rasoul Tarkesh Esfahani 等^[11]基于有限元模拟,提出一种确定扇形板激光圆弧扫描时最佳网格密度的方法,充分考虑分析时间和成形精度,使用遗传算法对所提出的模型进行深度优化。王懋露、杨立军^[12]对目前三维曲面件扫描策略规划普遍存在的问题进行了总结,认为要实现复杂曲面的精确成形,不仅要加强对三维成形机理的研究,还要加强热成形工艺实现自动数控反馈控制。用以往冲压方式对金属层合板成形时,容易产生分层

现象,且冲压变形区变薄,材料组织性能会降低,而且激光弯曲成形技术不但不会使扫描区分层还会稍有增厚,材料强度增加。并且激光圆弧扫描弯曲三维成形技术在未来的应用将更加突出,尤其是在航空航天等领域进行单间小批量生产时,该技术将更加适用,对三维弯曲成形机理及对样件的成形精度控制的研究将变得更加迫切。由于影响弯曲成形的因素较多,对成形机理和精度控制的研究也相对较困难。

针对以上存在的问题,有必要对激光圆弧扫描弯曲成形精度及三维变形机理进行研究。文中在温度梯度机理的条件下,以单因素试验研究扇形板圆心角度 θ 、自由端长度 L 和激光扫描线半径 R 三个板材几何参数对激光同心圆弧扫描弯曲成形角度的影响;利用激光扫描仪对金属扇形层合板激光圆弧扫描成形后的样件表面形貌进行测量,通过分析激光扫描线各位置的弯曲角度及扫描线两侧曲面变形行为,进一步探究激光同心圆弧扫描三维变形机理。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为不锈钢-碳钢层合板,以下简称不锈钢层合板。由大连理工大学工程力学系爆炸成形研究所制备,工艺方法为爆炸、热轧及冷轧。采用 1 mm 厚不锈钢层合板,如图 1 所示,其中间基层为

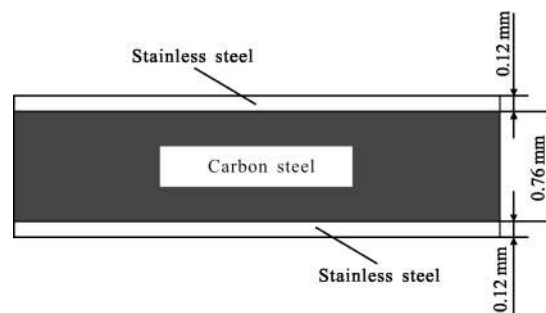


图 1 1.0 mm 厚不锈钢层合板示意图

Fig.1 Schematic of stainless steel laminated plate with 1.0 mm thickness

0.76 mm 厚的 Q235A 碳钢,两侧覆层为 0.12 mm 厚的 304 不锈钢,主要化学成分及物理力学性能参数如表 1、表 2 所示。弯曲试验板件为扇形不锈钢层合板,由线切割制得,规格为扇形外圆半径 R' 为 60 mm、80 mm,扇形圆心角度为 $15^\circ \sim 180^\circ$,以 15° 增量递增。

去掉扇形板尖端 $r'=5\text{ mm}$ 处的部分,以利于装夹。试验前用无水乙醇擦拭不锈钢层合板表面,去除油污及表面氧化物等杂质。

表 1 不锈钢层合板化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Composition of stainless steel laminated plate (mass fraction, %)

	C	Si	Mn	P	S	Cr
Matrix (Q235A)	≤ 0.22	≤ 0.35	≤ 1.40	≤ 0.04	≤ 0.05	0
Surface layer(304)	≤ 0.07	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.03	≤ 0.03	17.00-19.00

表 2 不锈钢-碳钢层合板性能参数

Tab.2 Characteristic parameters of stainless steel laminated plate

Parameters	Matrix(Q235A)	Surface layer(304)
Density/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	7.86	7.93
Melt point/ $^{\circ}\text{C}$	1 400	1 398-1 454
Specific heat/ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	465	500
Heat conductivity/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	80.3	16.3
Coefficient of linear expansion/K	10.6×10^{-6}	17.2×10^{-6}
Yield strength/MPa	235	205
Young's modulus/GPa	200-210	200

1.2 试验方法

该激光弯曲试验采用 JK701H 型脉冲 Nd:YAG 固体激光器,频率为 40 Hz,脉宽为 2 ms。板件一端用两块压板固定夹持,并用螺栓预紧,如图 2 所示。采

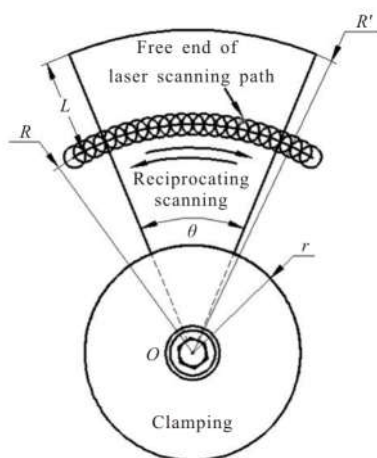


图 2 同心圆弧扫描路径

Fig.2 Path of the laser concentric circular scanning

用圆弧单道往复式扫描方式,轨迹路径与扇形板圆心同心,两次扫描间隔时间为 5 s,辅助氮气冷却,气体压力约为 0.2 MPa。 L 为自由端长度, θ 为扇形板圆心角度,为保证激光圆弧扫描起始时加工稳定,扫描线两端预留出部分距离。激光弯曲工艺参数如表 3 所示。

为得到激光作用区截面的金相微观图像。采用线切割方法将目标区域切成 $15\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的样件,经砂纸、金刚石磨粒将样件截面磨成镜面,选择 4% 的硝酸酒精溶液将碳钢层腐蚀,并用放大倍数为 20~1 000 的共聚焦 MEF4 型显微镜观察样件的微观组织形貌。

1.3 检测方法

选用激光扫描仪对弯曲成形后的样件进行测量。仪器采用大连理工大学工程训练中心的 INFINITE-Scan 七轴关节臂三坐标测量机,除具有三坐标测量机的测量功能外,还具备激光扫描对复杂曲面的快速、非接触的测量功能,激光采样为每秒 23 000 点,分辨率 0.057 mm,可将特征测量和曲面扫描有机结合起来。故可将激光扫描仪测量的结果导入 MATLAB 软件,拟合曲面变形,并计算出各测量线在弯折区的角度值。

2 激光工艺参数及板材几何参数对弯曲成形的影响

2.1 激光工艺参数对弯曲成形的影响

板材的成形与激光工艺参数有较大的关联,故研究了激光功率 P 、离焦量 H 及扫描速度 V 对板材弯曲成形的影响。定义板材弯曲角度 α 和扫描线两端的曲面变形量 Δ 衡量 P 、 H 、 V 对板材弯曲成形的影响。如图 3 所示, α 为板材弯曲角度, Δ_1 为板材外圆线中点到基准面 2 的距离, Δ_2 为扫描线中点到基准面 1 的距离。

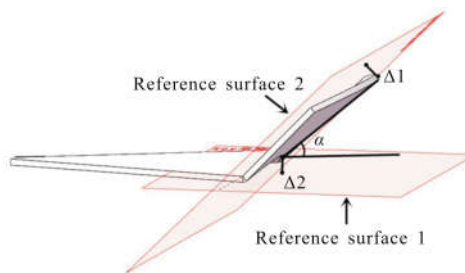
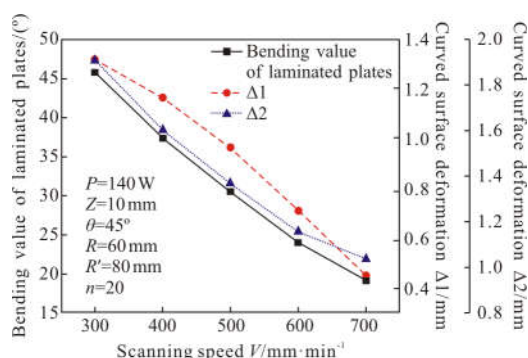


图 3 弯曲角度及曲面变形量示意图

Fig.3 Sketch of bending angle and surface deformation

实验参数在保证激光辐照路径表面不发生烧蚀且激光能量密度能使板材发生弯曲的范围内进行。图 4(a)为激光功率 P 对弯曲成形的影响, P 从 80 W 增加到 160 W 时, α 、 Δ_1 、 Δ_2 分别增加 $37^\circ 22'$ 、0.96 mm、1.43 mm。功率变大, 相同时间内激光输入的能量变大, 板材上、下表面温度梯度增大, 塑性变形增大, 弯曲角度变大, 曲面变形也越明显。图 4(b)为离焦量 H 对弯曲成形的影响, H 从 8.5 mm 增加到 13 mm 时, α 、 Δ_1 、 Δ_2 分别减小 $8^\circ 43'$ 、0.43 mm、0.31 mm。离焦量的改变, 一方面使激光照射区域面积改变, 另一方面激光能量密度也会变化。离焦量变大, 光斑随之变大, 激光能量密度也随之减小, 温度梯度降低, 弯曲角度变小, 曲面变形也减小。图 4(c)为扫描速度 V 对弯曲成形的影响, V 从 300 mm/min 增大到 700 mm/min 时, α 、 Δ_1 、 Δ_2 分别减小 $26^\circ 46'$ 、0.86 mm、1.12 mm。扫描速度增大, 单位时间内输入能量减少, 温度梯度降低, 弯曲角度减小, 曲面变形量也随之减小。弯曲角度与扫描速度近似呈反比。



(c) 扫描速度

(c) Scanning speed

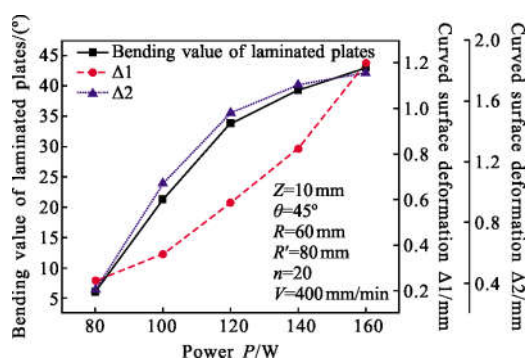
图 4 激光工艺参数对弯曲角度的影响

Fig.4 Effects of laser process parameters on the bending angle

2.2 板材几何参数对弯曲成形的影响

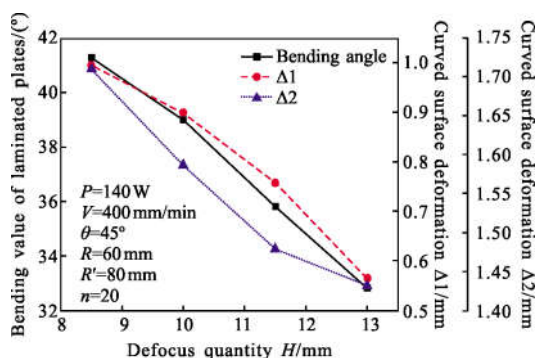
激光圆弧扫描弯曲成形时, 激光扫描线两侧板材均产生明显曲面变形。同时由于激光圆弧扫描弯曲变形复杂, 还需要对其板材影响参数以及各参数的影响机制进行进一步的分析。选择扇形板圆心角度 θ 、自由端长度 L 和激光扫描线半径 R 三个参数研究板材几何参数对弯曲成形角度的影响。图 5(a)表示弯曲角度随扇形板圆心角度 θ 的变化规律。从图中可以看出, 在 $\theta < 45^\circ$ 时, 弯曲角度随 θ 的增大而增大。 θ 增加, 激光扫描路径变长, 激光能量输入增多, 弯曲角度变大; 此外, 圆心角度的增大, 板材自身几何约束在一定程度上抑制了弯曲角度的继续增大; 因而弯曲角度的增量逐渐减小, 当 $\theta = 45^\circ$ 时, 弯曲角度达到最大值为 41.73° 。当 $45^\circ < \theta < 90^\circ$ 时, 激光扫描路径的变长, 使得在扫描线上某一点处相邻两次扫描时间间隔增加, 利于热量传递, 上表面的热累积相对减少, 从而使温度梯度降低, 弯曲角度减小。板材初始形状对板材的弯曲变形的影响也在逐渐变大, 激光圆弧扫描路径上的径向弯矩亦对板材弯曲变形起抑制作用, 在二者的共同作用下, 弯曲角度逐渐减小。当 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 时, 弯曲角度近乎呈线性递减。在 $\theta < 90^\circ$ 范围内, Δ_1 、 Δ_2 均在不断增大, 当 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 时, Δ_2 变化过大, 翘曲现象严重, 已不符合工程实际要求。

在其他工艺参数一定的条件下, 仅改变板材自由端长度 L , 得到弯曲角度与自由端长度的变化规律, 如图 5(b)所示。自由端长度从 10~50 mm 时的弯曲角度分别为 42.73° 、 39.67° 、 38.37° 、 38.54° 、 38.5° 。



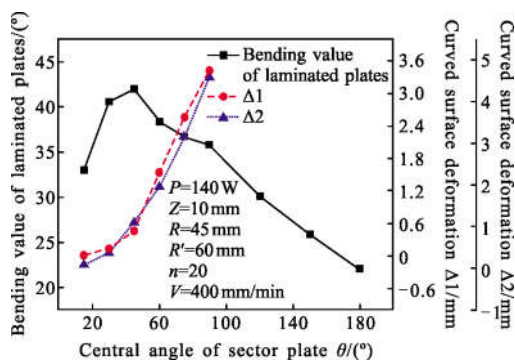
(a) 激光功率

(a) Laser power



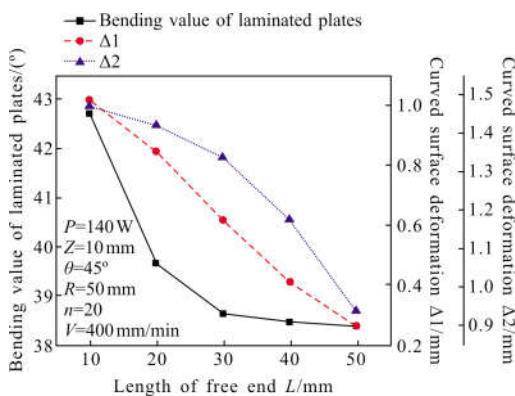
(b) 离焦量

(b) Defocus quantity



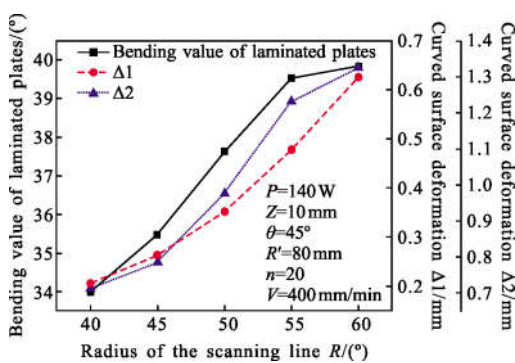
(a) 扇形板圆心角度

(a) Center angle of the sector plate



(b) 自由端长度

(b) Length of the free end



(c) 扫描线半径

(c) Radius of the scanning

图 5 激光工艺参数对弯曲角度的影响

Fig.5 Effects of laser process parameters on the bending angle

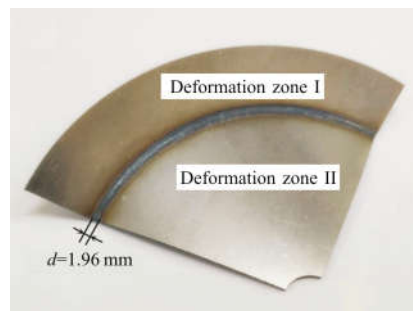
随着自由端长度 L 的增加,弯曲角度先减小,后趋于平稳。自由端长度 L 的增加,扫描线到自由端材料增多,板材自身对弯曲变形起到限制作用,且自由端处自身重力也应考虑在内,弯曲角度逐渐减小,曲面变形程度降低, $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 也随之减小。图 5(c)为激光扫描

线半径 R 对弯曲角度的影响。 R 增大,弯曲角度先增大后趋于稳定。激光扫描半径增大,扫描路径长度也随之增加,可供散热的冷态材料增多,一定程度上增大了温度梯度,弯曲角度增大;随着 R 增大,约束端材料与自由端材料比值增大,越易产生边界效应,使弯曲角度增量逐渐减小,整体角度是在增大,曲面变形程度增大, $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 也随之增加。

3 扇形板曲面变形特征分析

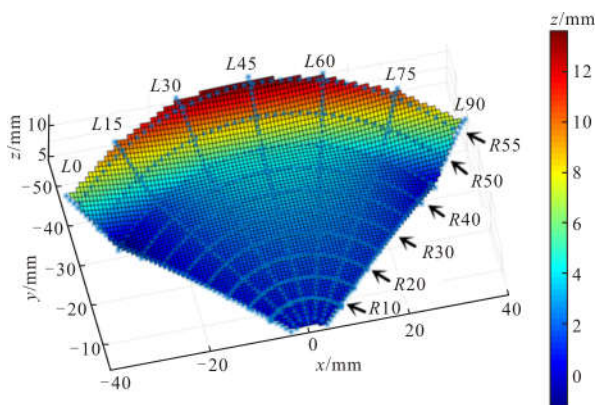
激光圆弧扫描弯曲与激光直线扫描弯曲成形具有较显著的区别。激光圆弧扫描时,扫描线两端均产生较明显变形。扇形板曲面变形后的特征测量及变形机理分析对角度规律变化及单一板件成形精度的研究具有重要意义。故选取 $R'=60$ mm、 $\theta=90^\circ$ 、 $R=45$ mm 的板件经 $P=140$ W、 $H=10$ mm、 $V=400$ mm/min 的激光加工参数扫描 20 次后的成形件进行测量,该工艺参数下曲面变形明显,利于观察分析,如图 6(a)所示。在 $H=10$ mm 的参数下光斑直径为 1.8 mm,图中样件的扫描路径宽 1.96 mm,两者相差 0.16 mm,在单道多次往复扫描过程中可忽略其误差,可认为在多次往复扫描过程中扫描路径不变,保证了实验的一致性。

利用激光扫描仪对样件进行三维轮廓扫描,得到点云数据,通过 Geomagic 软件处理,在径向截取七条测量线,周向截取 10 条测量曲线,如图 6(b)所示。其中 L_{xx} 表示用垂直于 xoy 平面的平面所截取的径向测量线与扇形板左端面所夹角度的测量线; R_{xx} 为用垂直于 xoy 平面的圆柱面所截取的周向圆弧测量线的半径的测量线。将 17 条测量线导入 Matlab 中进行曲面拟合,拟合结果如图 6(b)所示。



(a) 实际成形样件

(a) Bending sample



(b) Matlab 拟合曲面

(b) Fitting surface by Matlab

图 6 激光扫描成形样件

Fig.6 Laser bending prototype

3.1 激光扫描线上的角度分布

由拟合结果可知,扇形板经激光圆弧扫描弯曲变形后,呈现三维形状,激光扫描线两侧均存在曲面变形。用 Matlab 分别对截取的 7 条径向测量线在激光扫描线处计算弯曲角度,得到其弯曲角度分别为 37.3°、35.9°、35.1°、35.2°、35.3°、37.5°、39.4°,拟合曲线如图 7 所示。从图中可以看出,越靠近板材中间,弯曲角度也越小。在距扇形板中线左右各 15° 范围内,弯曲角度基本趋于一致,但左右两端测量线处的弯曲角度相差较大,左端面 L0 处弯曲角度为 37.3°,右端面 L90 处弯曲角度为 39.4°, $\Delta=2.1^\circ$ 。这是由于板材两端处相较于中间部位散热快,上下表面产生的温度梯度大,并且往复扫描时,扫描过的区域的曲面变形会对下次扫描成形产生较大影响,因而弯曲角度大。

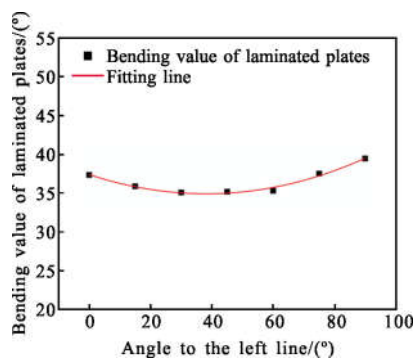


图 7 测量线 L0~L90 在扫描线处的弯曲角度

Fig.7 Bending angle of the measuring line L0~L90 at the scanning line

3.2 径向测量线在 z 向的位移

图 8 描述了径向测量线 L0~L90 z 坐标值的分布。在激光扫描线至自由端区域,产生明显曲面变形,测量线基本呈直线状,从扫描线到自由端其 z 坐标值逐渐增大;在激光扫描线至约束端区域,也产生曲面变形,测量线 L45 的 z 坐标值大于其他测量线,使得曲面呈拱状。测量线 L0、L15、L75 和 L90 呈曲线状,其中 L0 和 L90 弯曲程度更为明显,测量线 L30~L60 则近似呈直线状。由于扫描线两端弯曲角度大,且板材中间部位的刚性约束较大,使得两端处的弯曲变形更明显。测量线 L0~L90 在扫描线处的 z 坐标值分别为 -1.02、2.21、4.18、5.57、4.64、2.91、-0.11 mm,因而激光扫描线作用区域为空间分布的三维曲线。在扫描线至约束端区域,变形量最大值为 6.59 mm,位于扇形板中心线 L45 上,并沿着径向和周向逐渐减小,至约束端边缘处变形量几乎为零。

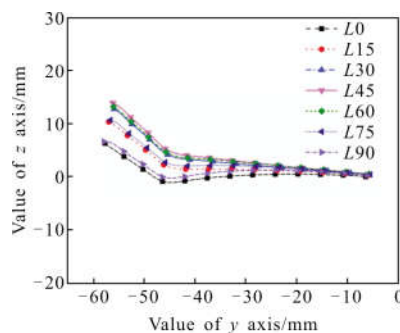


图 8 测量线 L0~L90 的 z 向坐标

Fig.8 z coordinate value of the measuring line L0~L90

3.3 激光圆弧扫描三维变形分析

将扫描线至扇形板外圆线的区域定义为变形区 I,用距 xoy 平面分别为 5、7、9、11、13 mm 的平面截得曲线 r1~r5(图 9),基本呈圆弧形,得到其在中心线处的半径变化拟合曲线,见图 10(a)。曲线 r1~r5 在中心线处的半径值分别为 125.29、134.39、148.12、164.72、179.89 mm。随着 z 坐标值的增大,半径在逐渐增大,近似呈线性,激光扫描线到自由端处,曲面变形量逐渐减小。将扫描线至扇形板内圆线的区域定义为变形区 II,用距 yoz 平面分别为 6、12、18、24、30、36 mm 的平面截得曲线 r1'~r6'(如图 9 所示),基本呈圆弧形,绘制其在中心线处的半径变化拟合曲线,如图 10(b)所示。曲线 r1'~r6' 在中心线处的半径值为 490.78、325.73、222.88、176.50、137.65、101.64 mm。

随着 y 坐标值的增大,半径在逐渐减小,靠近激光扫描线处的曲面变形最明显,随着远离激光扫描线,曲面变形减小。

由温度梯度机理可知,激光按圆弧路径扫描扇形层合板弯曲时,层合板上表面受热,温度迅速升

高,而下表面温度变化较低,因而产生的温度梯度使得层合板向上弯曲。在此期间,由温度梯度产生的热应力不仅会产生使层合板正向弯曲的弯曲应变,还会产生使层合板径向收缩的平面应变。圆弧扫描时,脉冲激光在扫描线处的热应力分布不均匀,扫描线各位置处的形变方向和平面应变也不同,层合板在激光扫描线两端材料分布不尽相同,因而扫描线两侧板材刚度不同,进而使得激光扫描线沿径向产生弯曲变形;激光圆弧扫描时,不仅会产生绕扫描线方向的周向弯矩,也会产生垂直于扫描线方向的径向弯矩,层合板左右两端处的刚度小于中间部位刚度,会使激光扫描线在板厚方向产生弯曲变形。经两者的共同作用,激光扫描线作用区域呈三维曲线。由于扫描线为空间分布的三维曲线,板材边界形状的刚性约束进一步导致激光扫描线两侧产生曲面变形,激光扫描线至自由端曲面沿 y 轴正向内凹,激光扫描线至约束端曲面沿 z 轴正向外凸。

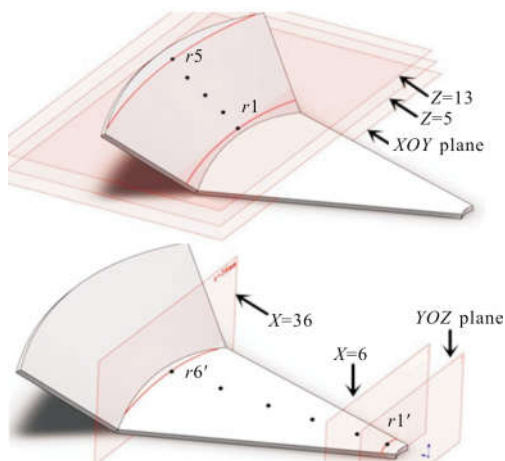
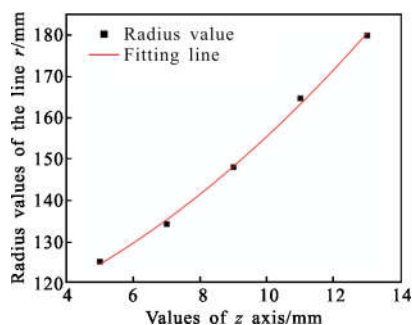


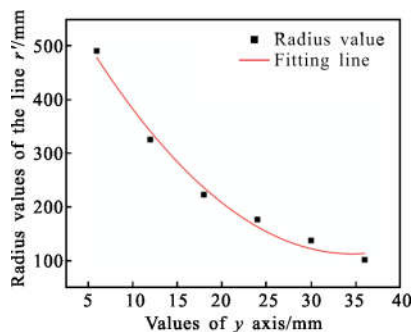
图 9 曲线 $r1\sim r5$ 、 $r1'\sim r6'$ 示意图

Fig.9 Schematic diagram of curves $r1\sim r5$, $r1'\sim r6'$



(a) 自由端测量线 r 在中线处的半径

(a) Radius of measuring line r at the middle line in the free end



(b) 约束端测量线 r' 在中线处的半径

(b) Radius of measuring line r' at the middle line in the constraint end

图 10 样件曲面变形

Fig.10 Sample curved surface deformation

3.4 层合板结合质量检测

为确保层合板经激光圆弧扫描后不产生开裂、分层等缺陷,选取图 6(a)所示样件进行金相组织制备,在此工艺条件下,能得到较大弯曲角度,为 41.2° 。经制样、磨样、抛光、腐蚀等步骤,得到激光扫描线中点弯折区截面处的微观组织。从图 11(a)可以看出,上不锈钢层出现增厚现象,经激光多次扫描作用后,能量逐渐累积,温度升高,奥氏体晶粒生长进而增厚;碳钢层由上到下可分为塑性变形区、晶粒细化区和晶粒生长区三个区域^[13]。当热流传到区域一时,温度较高,达到塑性状态,经过热和塑性变形的作用下晶粒变大。当热流传到区域二时,温度降低,晶粒得到细化。区域三为晶粒生长区。通过改变激光加工参数以及扫描次数,可改变板材上下表面温度梯度,

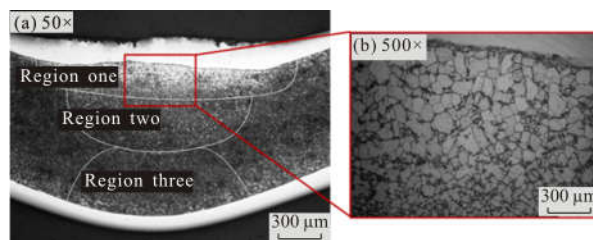


图 11 激光扫描线中点弯折区截面处微观组织

Fig.11 Microstructure of bending area at midpoint of laser scanning line

三个划分区域的范围也随之改变,将改变弯曲角度 α 及曲面变形量 $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 的大小,进而控制扇形板成形精度。由图 11(b)也可以看出上不锈钢层与碳钢层没有出现分层现象,结合质量良好。由于冲压成形层合板易产生分层现象,激光弯曲成形技术则解决了此问题。

4 结论

利用激光扫描仪对金属扇形层合板激光圆弧扫描样件进行特征测量。分析了激光加工参数和板材几何参数对扇形层合板激光圆弧扫描弯曲成形的影响规律。激光作用后,层合板整体没有出现裂纹和分层剥落等缺陷,结合质量良好,提高对成形精度的控制。并得出以下结论:

(1) 激光工艺参数和板材几何参数均对激光弯曲成形产生强烈影响。其中板材弯曲角度 θ 、 $\Delta 1$ 和 $\Delta 2$ 随激光功率 P 、扫描线半径 R 的增大而增大,随离焦点 H 、扫描速度 V 和自由端长度 L 的增大而减小;随着 θ 的增大,弯曲角度先增大后减小。

(2) 在以温度梯度机理为主的工艺条件下,即 $P=140\text{ W}$ 、 $H=10\text{ mm}$ 、 $V=400\text{ mm/min}$ 、 $\theta=90^\circ$, 激光圆弧扫描半径 R 为 45 mm , 扫描次数 n 为 20 次时,在激光扫描线处的弯曲角度各不相同,测量线 $L_0\sim L_{90}$ 上弯曲角度分别为 37.3° 、 35.9° 、 35.1° 、 35.2° 、 35.3° 、 37.5° 、 39.4° , 两侧大、中间小,关于扇形板中心线基本对称;测量线 $L_0\sim L_{90}$ 在扫描线处的 z 坐标值分别为 -1.02 、 2.21 、 4.18 、 5.57 、 4.64 、 2.91 、 -0.11 mm , 变形量最大值为 6.59 mm , 沿测量线 L_{45} 向约束端方向及其他测量线方向的板材变形量均减小。

(3) 扇形板激光同心圆弧扫描在产生弯曲应变的同时,也会有平面应变的产生,经平面应变及径向弯矩的共同作用,使得圆弧扫描线的作用区域在空间上呈现三维曲线。进而使得激光扫描线两端均产生明显曲面变形,在变形区 I 中,即扫描线至扇形板外圆线区域,测量线 $r_1\sim r_5$ 在扇形板中心线上的曲率半径由 125.29 mm 增大至 179.89 mm , 沿 y 轴正向呈凹陷状;在变形区 II 中,即扫描线至扇形板内圆线区域,测量线 $r_1'\sim r_6'$ 在扇形板中心线上的曲率半径由 490.78 mm 减小至 101.64 mm , 沿 z 轴正向呈外凸状。

参考文献:

[1] Li Zihui, Wang Xuyue. Numerical simulation of warping deformation on metal composite plate during laser bending

[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0506004. (in Chinese)

- [2] Hennige T. Development of irradiation strategies for 3D-laser forming[J]. *Journal of Materials Process Technology*, 2000, 103(1): 102-108.
- [3] Zhang Peng, Gao Hongliang, Chu Guannan. Study on laser sine forming of sheet metals [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2007(3): 35-38. (in Chinese)
- [4] Deng Chunfeng, Zhang Peng, Ma Yanxia. Deformation behavior of sheet metal during laser sine cosine scanning[J]. *China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology*, 2008, 43(5): 93-95. (in Chinese)
- [5] Kant R, Bhuyan P M, Joshi S N. Experimental studies on TGM and BM dominated curvilinear laser bending of aluminum alloy sheets [C]//Lasers Based Manufacturing, 2015: 69-91.
- [6] 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(9SI): 1036-1047.
- [7] Kant R, Bhuyan P M, Joshi S N. Experimental studies on curvi-linear laser bending of thin sheets [C]//ICATSA 2016, 2016: 539-548.
- [8] Kant R, Joshi S N. Numerical investigations into influence of scanning path curvature on deformation behavior during curvilinear laser bending of magnesium sheets[J]. *Journal of Thermal Stresses*, 2018, 41(3): 313-330.
- [9] Nadeem Q, Seong W J, Na S J. Process designing for laser forming of circular sheet metal [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(2): 021405.
- [10] Nadeem Q, Na S J. An approach to form the dome shape by 3D laser forming[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(2): 021402.
- [11] Esfahani R T, Golabi S, Zojaji Z. Optimization of finite element model of laser forming in circular path using genetic algorithms and ANFIS [J]. *Soft Computing*, 2016, 20(5SI): 2031-2045.
- [12] Wang Maolu, Yang Lijun. Investigation on the scanning strategy of 3D laser forming of sheet metal [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2013(6): 51-55. (in Chinese)
- [13] Ma Xupeng, Wang Xuyue, Xu Wenji, et al. Heat conduction characteristics of stainless steel-carbon steel laminated sheet bending position [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 101401. (in Chinese)