

金属复合板激光弯曲过程中翘曲变形数值模拟

李紫慧, 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: 翘曲变形是影响复合板激光弯曲成形精度的重要因素。基于 ANSYS 软件和电子探针面扫描实验, 建立了含结合面的不锈钢-碳钢复合板激光弯曲有限元模型, 对一次扫描过程中产生的翘曲变形进行数值模拟。通过模拟激光作用下复合板的温度场、应力场及残余应力分布, 结合自由端的变形, 分析了翘曲变形产生的过程及原因。模拟结果表明: 激光扫描过程中, 受初始温度及边界效应的影响, 扫描线上各点最高温度分布的不均匀百分比为 18.33%。经 0.2 s 热传导及热量散失的共同作用后, 扫描线中间区域出现热累积现象, 热应力增大, 产生了翘曲变形。对扫描线到自由端整体区域进行残余应力模拟分析可知, 板材在其区域内部产生了翘曲作用力与区域周边约束反作用力, 其大小和方向与翘曲的变形吻合。对比实验数据和模拟结果, 翘曲线最大误差为 3.90%, 其中, 弦高误差为 3.33%, 为复合板激光弯曲成形的角度控制提供了计算依据。

关键词: 激光弯曲; 复合板; 翘曲变形; 热累积; 残余应力; 数值模拟

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0506004

Numerical simulation of warping deformation on metal composite plate during laser bending

Li Zihui, 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: In laser bending forming, the warping deformation influences the forming accuracy. Based on ANSYS software and electron microprobe, process of the warping deformation for stainless steel-carbon steel composite plate including interfaces bended by pulsed laser was simulated using a multi-layered finite element model (FEM) in single-pass scanning. By simulating temperature field, stress field, residual stress distribution and the free end deformation of the composite plate, the process and the reason of warping deformation were analyzed. The results show that during laser scanning, the uneven rate of the highest temperature on the scanning line is 18.33%, which is influenced by initial temperature and edge effect. After 0.2 s heat conduction and heat loss, heat accumulation phenomenon appears in middle area, which leads to warping deformation caused by increased thermal stress. Simulation results of the residual stress from scanning line to free end show that, warping force within the region and constraint counterforce at the edges of the region are produced, warping deformation matches both the magnitude

收稿日期: 2017-12-10; 修订日期: 2018-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(51375073, 51621064)

作者简介: 李紫慧(1989-), 女, 博士生, 主要从事激光弯曲层合板方面的研究。Email: 827565184@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: wbzdd@dlut.edu.cn

and direction of the simulation result. The max error of warping line between the experiment and simulation is 3.90% and the error of chordal height is 3.33%, which provides the calculation basis for better bending angle control of the composite plate.

Key words: laser bending; composite plate; warping deformation; heat accumulation; residual stress; numerical simulation

0 引言

不锈钢-碳钢复合板通过爆炸、轧制等工艺使不锈钢与碳钢在结合面处实现牢固冶金结合制备而成。不锈钢-碳钢复合板作为新型复合材料,已广泛应用于飞行器^[1-2]、石油化工^[3]等各个行业。尤其在飞行器、深水潜水器的舱壁件领域,不锈钢-碳钢复合板制成的槽型舱壁件直接决定着其性能与安全,需尽量避免翘曲变形。

激光弯曲成形技术是利用高能激光束扫描板材表面时形成的非均匀温度场诱发的热应力实现板材塑性变形的工艺方法,具有无模、非接触、热影响区小等特点^[4-5],该技术在航空航天等领域具有广阔的应用前景^[6]。在板材激光弯曲同时,也会产生沿激光扫描线的纵向弯曲变形,即翘曲变形。

近年来,国内外学者对激光加工板材时存在的翘曲变形研究已取得一定进展。在翘曲变形量描述方面, Gopal^[7]、魏裕君^[8]、Zahrani E G^[9]等仅从扫描线上弯曲角度入手,对翘曲变形进行了描述,并未对自由端的翘曲变形进行描述。温度场方面,裴继斌等^[10]通过有限元软件分析扫描线上最高温度分布,但未考虑热量传递及散失的具体影响。应力场方面,上海交通大学^[11-12]及中国石油大学^[13]均以 ANSYS 为分析平台对板材进行激光热成形翘曲变形数值模拟,对扫描线上应力、应变及残余应力进行了分析。实际上,板材的翘曲变形是从扫描线到自由端的整体变形,因此,应对其整个翘曲区域进行深入分析。

文中基于 ANSYS 软件对不锈钢-碳钢复合板建立有限元模型,模拟了一次扫描过程中产生的翘曲变形,讨论了温度场热量传递及散失对翘曲变形的影响,对扫描线到自由端整体区域分区并进行了残余应力模拟分析,从而提出了局部扫描校正方法,为复合板激光弯曲成形的角度控制提供理论依

据,也为下一步研究激光多次扫描复合板的翘曲变形打下基础。

1 不锈钢-碳钢复合板有限元模型

研究对象为双面对称不锈钢-碳钢复合板。复合板上、下覆层为 304 不锈钢,基层为 Q235A 碳钢,试件规格为 1 mm (厚)×50 mm (宽)×60 mm (长)。1:1 建立复合板的几何模型,不锈钢/碳钢/不锈钢各层厚度按照不锈钢复合钢板及钢带国家标准 GB/T 8165-2008 为 120 μm/760 μm/120 μm。由于复合板的不锈钢层和碳钢层为爆炸加轧制工艺制备而成,故在两层之间存在过渡层,亦称之为结合面。结合面影响着温度及应力的传递,对翘曲变形有很大影响。为了精确建立复合板过渡层模型,利用 EPMA-1600 电子探针仪器对复合板截面进行了面扫描实验,测得过渡层厚度为 7 μm。由实验可知从不锈钢层到碳钢层的元素含量是均匀过渡的,即近似认为材料性能是均匀变化的,所以对不锈钢和碳钢材料性能参数进行算数平均法计算,得到结合面的材料性能参数。ANSYS 建模时在不锈钢和碳钢层中间加一层厚度为 7 μm 的过渡层,不锈钢层、过渡层和碳钢层厚度分别为 120、7、746 μm,如图 1 所示。

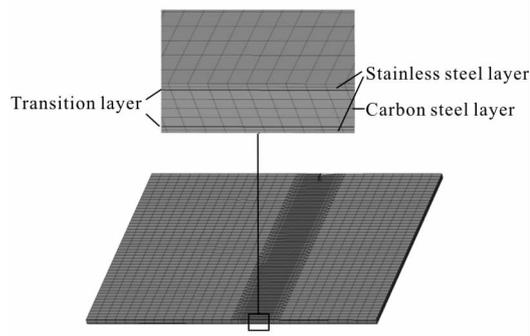


图 1 不锈钢-碳钢复合板的有限元模型

Fig.1 FEM of stainless steel-carbon steel composite plate

在激光弯曲不锈钢-碳钢复合板 ANSYS 模拟

中, 网格划分密度对模拟精度和效率有重要影响。图 1 中, 模型单元数目和节点数目分别为 60 450 和 61 724。板材厚度方向温度变化对整体热应力分析有较大影响, 不锈钢层及结合面均沿厚度方向划分为 2 层单元, 碳钢层划分为 4 层, 共 12 层。在激光直径范围内及靠近光斑两侧的温度和应力均发生很大变化, 对宽度为 6 mm 的激光作用区网格细致划分, 单元尺寸为 1/3 mm, 其中最小单元尺寸出现在结合面处, 为 7 μm, 而非作用区温度和应力很小, 此区域网格划分最粗, 单元尺寸为 1 mm。这种局部细分网格的方法不仅能够提高激光热源区温度计算精度且有效提升计算效率。

材料模型为双线性等向强化模型, 采用关联流动法则, 热物理力学材料性能等参数参见参考文献[14]。模型的边界约束条件为一端固定。

2 不锈钢-碳钢复合板翘曲变形分析

2.1 翘曲变形的定义

采用脉冲激光一次扫描方式沿直线加载到不锈钢-碳钢复合板上, 扫描时间为 3.75 s, 冷却时间为 6.25 s。扫描后, 复合板除了产生绕扫描线弯曲的变形外, 还会产生沿扫描线的纵向弯曲变形即翘曲变形, 且扫描线两端的弯曲角度小, 中间部分弯曲角度大。文中利用自由端处变形描述和定义翘曲的变形。根据翘曲变形的特征, 提出了两个相应的定义:

(1) 翘曲线, 即曲线 $C'E'D'$ 。自由端直线 AB 经过激光加工后弯曲成曲线 CED , 曲线 CED 在 XOZ 平面上的投影 $C'E'D'$ 即为翘曲线, 如图 2 所示。翘曲线不仅可以判定模拟结果的有效性, 更能通过其直观地表示阐述翘曲变形机理。

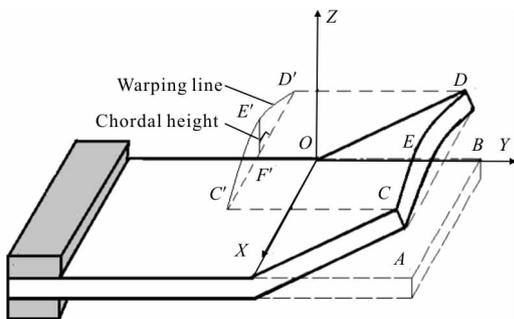


图 2 复合板翘曲变形示意图

Fig.2 Schematic of warping deformation on composite plate

(2) 弦高 h , 即直线 $E'F'$ 。如图 2 所示, 翘曲线近似对称, 定义翘曲线最高点 E' 到翘曲线两端点连线 $C'D'$ 的垂直距离为弦高 h , 用来表征翘曲变形大小。

2.2 温度场模拟与分析

(1) 考虑初始温度及边界效应的热量输入分析

图 3 为扫描线上各点及对应下表面各点最高温度值曲线。从最高温度曲线可以看到激光刚作用到扫描线上时的输入能量分布。虽然激光沿扫描线匀速加载热源, 但是温度并没有均匀分布在扫描线上, 温度分布的不均匀百分比为 18.33%。由曲线可知, 上下表面温度在靠近边界处存在突然升高的现象。以上表面为例, 扫描线前端 3 mm 处, 最高温度从 927.60 °C 迅速上升到 1 192.65 °C。扫描线末端 3 mm 处, 最高温度最高值从 1 197.11 °C 上升到 1 306.99 °C。温度曲线在前端温度迅速上升, 是因为激光作用板材前初始温度为室温, 随着激光的扫描, 扫描线上出现热累积现象, 导致温度升高。在板材末端边界的温度曲线曲率较大, 主要因为其边界效应, 即在扫描线末端, 传热方式从复合板内固体热传导变为空气对流换热及热辐射, 依据非稳态导热理论, 热流密度在边界处降低, 温升率变大, 体现为上、下表面温度曲线末端温度急剧上升。

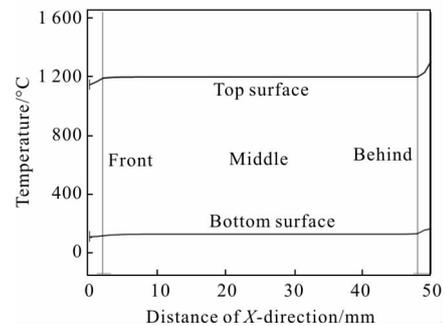


图 3 上表面和下表面温度分布曲线

Fig.3 Temperature distribution curve on top and bottom surface

(2) 中间区域热累积现象分析

图 4 中曲线 1 为扫描线上各点出现最高温度时刻后 0.2 s 的温度分布, 曲线 2 为翘曲线 Z 向位移分布。由曲线 1 可知前端和末端温度较中间区域温度低, 这是由于各点经过约 0.2 s 的热平衡后, 随着热量向中间区域流动及扫描线两端热量散入空气中, 板材中间宽约 42 mm 区域出现热量累积现

象。前端温度分布曲线斜率的绝对值较末端小,这是由前端激光输入能量分布决定的,由于扫描线前端初始温度为室温,且前端边界又有一定程度的散热,故在前端宽约 5 mm 处均有一定的热量散失。而末端温度曲线虽有一定上升趋势,但靠近边界宽约 3 mm 处温度依然下降,且下降速度更快,这是由于末端输入能量温度急剧上升,使扫描线上末端点有一定温升,但随着边界散热更快,靠近边界处温度下降,且由于末端输入热量较多,故散热速率更大。对比曲线 1 和 2 可知,扫描线上分布的热量越多,热应力越大,弯曲角度越大,使翘曲线 Z 向位移越大,故热量分布与翘曲线 z 向位移曲线存在密切联系。

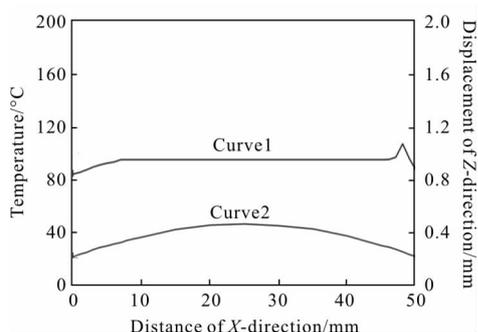


图 4 温度分布及翘曲线位移对比图

Fig.4 Comparison diagram of temperature distribution and displacement on warping line

综上所述,激光能量输入后,受初始温度及边界效应的影响,温度分布不均匀,经 0.2 s 热平衡后,扫描线中间区域出现热累积现象。可见,虽然激光能量均匀等量作用在扫描线上,但经过热量的传递与散失,扫描线上的热量并不均匀,在扫描线中间区域出现一定程度的热累积,是板材发生翘曲的重要原因。

2.3 应力场模拟与分析

为了分析复合板沿扫描线方向上各点的 X 向应力随时间变化的规律,对扫描线前 endpoint、中间点及末端点进行分析,如图 5 所示。当激光扫描到各点前端时,对激光作用区域有约束的作用且为很小的拉应力状态。当激光束离扫描点越来越近时,由脉冲激光的周期性特点可知,各点发生周期性震荡。当激光作用在扫描点时,扫描点附近区域均承受压应力,因为此区域吸收热膨胀,故周围材料对其有挤压作用。此时,对比三点可知中间点的压应

力最大,其值为 -4.07×10^8 Pa,这是温度分布不均匀的结果,因为热累积与热扩散的作用,中间点热累积温度最高,故其压应力最大。末端点压应力次之,其值为 -3.81×10^8 Pa,前端点压力最小,为 -3.77×10^8 Pa。因为激光作用末端前的初始温度比前端高,故其压应力比前端大。当激光扫过扫描点后,扫描线上的下一点开始膨胀,根据力的平衡,随着下一点膨胀越来越大,扫描点压力越来越小,最后变成拉力,且越来越大,最后趋于稳定。温度场的中间区域热累积现象使 X 向应力场中间点应力大于两端,导致板材产生翘曲变形。

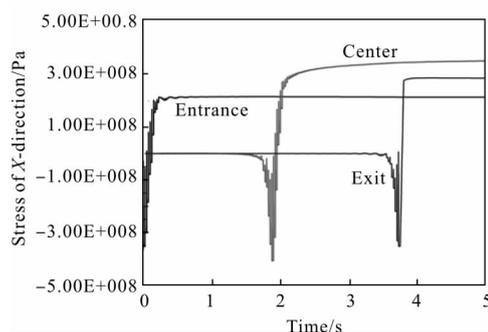


图 5 三个特征点 X 向应力变化曲线

Fig.5 X-direction stress of three special points

2.4 残余应力模拟与分析

脉冲激光的每一次作用都会带来复合板上应力的重新分布,故从残余应力角度分析翘曲的变形可以不受激光作用时的影响而直观了解翘曲变形的发生。残余应力是消除外力或不均匀的温度场等作用后仍留在物体内的自相平衡的内应力。因为 X 向应力对板材翘曲有直接的影响,故接下来将分析从扫描线($Y=0$)到自由端($Y=25$ mm)上、下表面的 X 向残余应力分布。为了方便了解残余应力具体分布,根据残余应力的拉、压应力及变化规律将自由悬空端板材分为三个残余应力区。残余应力 I 区为残余拉应力区,范围从 $Y=0$ 到 $Y=1$ mm,区域宽度为 1 mm,激光光斑作用在此区域内,沿 Y 轴正方向残余拉应力分布是越来越小的。如图 6(a)所示,对比上下表面分布曲线可知,其残余应力值差了一个数量级,这是因为上下表面存在很大的温度梯度,导致上下表面存在明显的残余应力差。从沿扫描线 X 向分布来看,上、下表面曲线两端拉应力小于中间部分,且中间大部分分布均匀,这是扫描线中间区域热累积

的结果。因为当扫描线上能量较小时,热应力和弯曲变形较小,对应的残余应力也较小。由模拟结果中残余应力 I 区的拉应力分布可知,此区域中间部分应产生凸起或凹陷变形,其中凸凹方向是由材料性能及热源加载综合影响决定的。这与实验中板材加工后产生的沿扫描线纵向弯曲的翘曲变形是吻合的。残余应力 II 区为残余压应力区,范围从 $Y=1\text{ mm}$ 到 $Y=7\text{ mm}$,区域宽度为 6 mm ,此区域离开了激光光斑作用区,根据力的平衡,为压应力区域。如图 6(b)和 6(c)所示,上、下表面残余应力曲线差值减小,这是因为此区域上下表面温差较低,所以应力差较扫描区小。沿着 Y 轴正方向,残余压应力值越来越大,直到 $Y=7\text{ mm}$ 时出现最大残余压应力值。从残余压应力在 X 轴分布的曲线来看, $X=0\text{ mm}$ 和 $X=50\text{ mm}$ 两端的残余压应力速率沿 Y 轴的增值比中间区域高很多,这是由于扫描线温度分布不均匀使板材内部发生不均匀的塑性变形,从而在板材翘曲时导致了板材内部翘曲作用力与区域周边约束反作用力的产生,故温度分布的不均匀是导致翘曲变形的主要原因。由两端压应力比中间区域压应力大,同样可知板材中间区域产生了凸起或凹陷变形,其方向也取决于材料性能参数和板材温度分布。残余应力 III 区范围从 $Y=7\text{ mm}$ 到 $Y=25\text{ mm}$,虽然也为压应力区,但是随着 Y 值增大,曲线上残余压应力值越来越小,如图 6(d)所示。这是由于此区域距离热源很远,温度较低,故由其导致的应力场的值也随之减小。

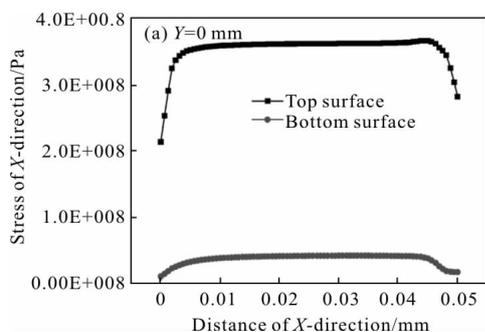


表 1 复合板激光弯曲实验工艺参数

Tab.1 Parameters of laser bending experiment of composite plate

Process parameters	Wavelength/ μm	Pulse width/ms	Impulse frequency/Hz	Power/W	Scanning speed/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Defocus distance/mm	Number of scanning
1	1.064	2	40	140	800	10	1
2	1.064	2	40	30	800	10	1

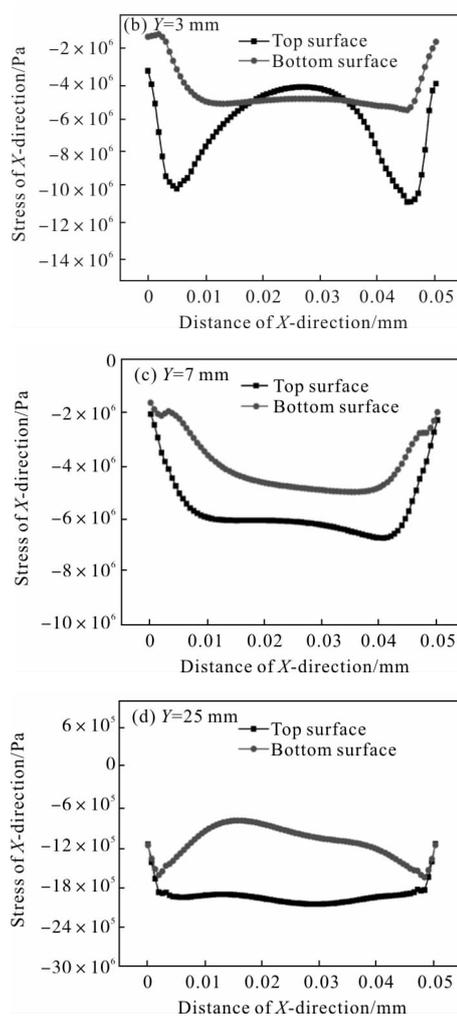


图 6 X 向残余应力

Fig.6 Residual stress of X-direction

3 翘曲变形实验验证

采用 JK701H 型 Nd:YAG 脉冲激光器对三个 1 mm (厚) $\times 50$ (宽) $\text{ mm} \times 60$ (长) mm 的不锈钢-碳钢复合板进行激光一次扫描弯曲实验,扫描线与自由端平行且相距 25 mm ,实验参数如表 1 中工艺参数 1 所示。文中针对如图 7 不锈钢-碳钢复合板的翘曲变形,利用数显千分表对自由端翘曲线进行测量。数显千分表可以用来测量微小位移量,精度为

1 μm 。由图 8 可以看到三组实验取的平均值与 ANSYS 模拟 Z 向位移值的曲线对比, 其结果与实验测得结果的变化规律一致, 最大误差百分比为 3.90%。其中, 三组实验弦高平均值和模拟中弦高值分别为 0.240 mm 和 0.248 mm, 误差百分比为 3.33%, 模拟与实验具有较好的一致性。

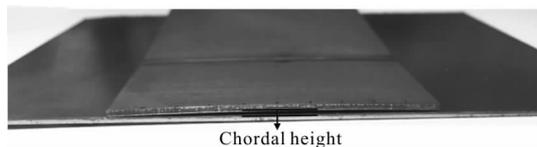


图 7 脉冲激光一次扫描弯曲实验中的翘曲变形

Fig.7 Warping deformation during pulsed laser bending in single-pass scanning process

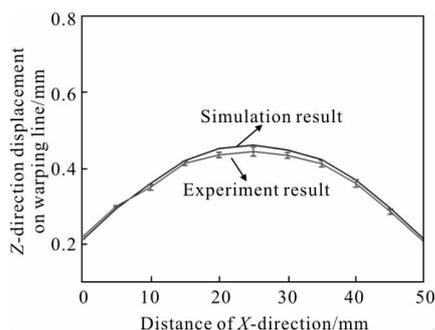


图 8 翘曲线 Z 向位移实验值与模拟值对比

Fig.8 Comparison of experimental and simulated results of Z-direction displacement on warping line

复合板在激光弯曲的过程中避免不了发生翘曲变形, 这是热量在传递与散失后分布不均匀导致的。基于扫描线上热量均匀分布思想, 提出一种在工件加工后减小翘曲变形的办法, 为局部扫描校正方法, 即在扫描线两边局部扫描各 20 cm 的长度, 加工参数为表 1 中工艺参数 2。经实验设计发现翘曲变形明显减小, 三组实验数据的翘曲线弦高平均值从 0.240 mm 降低到 0.094 mm。因此, 局部扫描校正方法可以有效校正复合板的翘曲变形, 提高了板材成形的精度。

4 结 论

利用 ANSYS 软件及电子探针面扫描结合面实验, 建立了含厚度为 7 μm 过渡层的 1 mm 板厚的不锈钢-碳钢复合板有限元模型, 对其进行一次激光扫描实验, 分析了翘曲变形过程中的温度场、应

力场及残余应力的分布及变化, 得到以下结论:

(1) 激光能量加载到扫描线各点时, 受初始温度及边界效应影响, 扫描线前端和末端宽约 3 mm 处温度呈上升趋势, 扫描线最高温度分布不均匀百分比为 18.33%。各点热量经 0.2 s 的传递与散失后, 扫描线中间宽约 42 mm 区域出现热累积现象。由此可知, 温度的不均匀是造成翘曲变形的主要原因。

(2) 将扫描线到自由端残余应力的分布分为三个区域: I 区为残余拉应力区, 宽度为 1 mm 且扫描线两端拉应力小于中间区域拉应力, $Y=0$ 时出现最大拉应力, 为 367.00 MPa; II 区为残余压应力区, 区域宽度为 6 mm 且扫描线两端压应力大于中间区域压应力, $Y=7$ mm 时出现最大压应力, 为 67.73 MPa; III 区也为压应力区, 区域宽度为 18 mm 且两端压应力值大于中间区域。

(3) 对比实验与 ANSYS 模拟的翘曲线可知, 翘曲线最大误差百分比为 3.90%。其中, 三组实验弦高的平均值和模拟的弦高分别为 0.240 mm 和 0.248 mm, 误差百分比为 3.33%, 模拟与实验具有较好地一致性。利用局部扫描校正方法使弦高平均值从 0.240 mm 降低到 0.094 mm, 有效地校正了翘曲变形, 提高了板材成形的精度。

参考文献:

- [1] Chen Zhenye. Production practice of hot rolled single sided stain-less steel clad plate[J]. *Hot Working Technology*, 2016 (15): 160-163. (in Chinese)
陈振业. 热轧单面不锈钢复合板的生产实践[J]. 热加工工艺, 2016(15): 160-163.
- [2] He Minbo, Ma Zhiliang, Wei Chenghua, et al. Influence of pyrolysis on the laser ablation of carbon-fiber/ epoxy composite[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0306001. (in Chinese)
贺敏波, 马志亮, 韦成华, 等. 热解对碳纤维/环氧树脂材料激光烧蚀的影响[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0306001.
- [3] Song Youbao, Li Long, Zhou Dejing. Research status and prospect of welding of laminated metal composite plate[J]. *Welding*, 2016(10): 18-22. (in Chinese)
宋友宝, 李龙, 周德敬. 金属层状复合板焊接研究现状与展望[J]. 焊接, 2016(10): 18-22.
- [4] Li Rui, Yang Xiaojun, Zhao Wei, et al. Effect of

- femtosecond laser micromachining on the roughness of cladding sidewalls [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3244–3249. (in Chinese)
- 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.
- [5] Wu Dongjiang, Zhang Qiang, Guo Dongming. Experiment on bending of Al_2O_3 ceramic slice with CO_2 CW-laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(10): 2473–2479. (in Chinese)
- 吴东江, 张强, 郭东明. Al_2O_3 陶瓷薄片 CO_2 连续激光弯曲试验[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2473–2479.
- [6] Zhang Pan, Wang Xuyue. Element diffusion and material properties in transition layer of bending zone in laminated plates[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(7): 0702001. (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): 0702001.
- [7] Jha G C, Nath A K, Roy S K. Study of edge effect and multi-curvature in laser bending of AISI 304 stainless steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 197(1): 434–438.
- [8] Wei Yujun. Research on the laser induced thermoforming of lightweight aluminum alloy plate [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- 魏裕君. 铝合金轻量化壁板的激光诱导热成形研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [9] Zahrani E G, Marasi A, Zahrani E G, et al. Experimental investigation of edge effect and longitudinal distortion in laser bending process[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45(1): 301–307.
- [10] Pei Jibin. Research on the mechanism and deformation behavior of laser bending of shipbuilding steel plate [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- 裴继斌. 船用钢板激光弯曲成形机理及成形规律的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [11] Shen H, Hu J, Yao Z. Analysis and control of edge effects in laser bending [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2010, 48(3): 305–315.
- [12] Dang Dongxian. The reducing methods research of unexpected deformations in laser bending [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese)
- 党东显. 激光弯曲成形非期望变形抑制方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [13] Shi Yongjun, Zhang Chen, Sun Guidong, et al. Study on reducing edge effects by using assistant force in laser forming [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 227: 169–177.
- [14] Chi Shanshan, Wang Xuyue, Xu Wenji. Numerical simulation on stainless steel-carbon steel laminated sheet considering interface during pulsed laser bending[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1103002. (in Chinese)
- 池闪闪, 王续跃, 徐文骥. 考虑结合面的不锈钢-碳钢层合板脉冲激光弯曲数值模拟[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103002.