

层合板激光往复扫描弯曲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:翘曲变形是影响层合板激光弯曲成形精度的重要因素,因此研究激光往复扫描过程中的翘曲变形具有重要的实际意义。文中使用 ANSYS 软件,建立不锈钢-碳钢层合板有限元模型,通过模拟激光作用下层合板的温度场、应力场分布,结合自由端的变形,分析了单道往复扫描翘曲变形机理。模拟结果表明:随着往复扫描次数的增加,温度场扫描线两端区域温度交替波动升高使两端热量均衡,中间区域热累积现象使热应力增大。每次激光扫描后,激光作用区板材下表面的残余应力场对下次扫描时的翘曲变形都有一定促进作用,使翘曲变形增大,1~6 次扫描后弦高从 0.217 mm 增大到 0.363 mm,但随着扫描次数增加,促进作用减弱,弦高增长量略降低,最大值为 0.058 mm。对比实验数据和模拟结果,温度场最大误差为 9.85%,翘曲线 Z 向位移最大误差为 4.33%,其中,弦高误差为 2.16%,为层合板激光弯曲成形的精确控制提供了计算依据。

关键词:激光弯曲; 层合板; 往复扫描; 翘曲变形; 数值模拟

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1206008

Numerical simulation of warping deformation on laminated plate during reciprocating 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 forming accuracy of laminated plate. Therefore, the research of warping deformation in laser reciprocating scanning process has practical significance. Based on ANSYS software, a finite element model (FEM) was built. By simulating temperature field, stress field distribution and the free end deformation of the laminated plate, the mechanisms of warping deformation in single-pass reciprocating scanning process were analyzed. The results show that with the increase of reciprocating scanning number, a large variation of temperature makes heat energy equally distribute at both ends of scanning line, and thermal stress increases due to the cumulative effect of heat in the middle area. After each laser scanning, the residual stress on the bottom surface has an accelerating effect on warping deformation of the next scanning in laser action zone, which makes chordal height increase from 0.217 mm to 0.363 mm after scanning one to six times.

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-08-03

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, 主要从事精密与特种加工方面的研究。Email: wbzzd@dlut.edu.cn

However, as scanning number increases, the reduction in the promotion effect slightly decreases the growth of chordal height, and its maximum value is 0.058 mm. The max error of temperature field between the experiment and simulation is 9.85%, the max error of Z-direction displacement on warping line is 4.33% and the error of chordal height is 2.16%, which lays a solid foundation of calculation for better bending quality of the laminated plate.

Key words: laser bending; laminated plate; reciprocating scan; warping deformation; numerical simulation

0 引言

不锈钢-碳钢层合板是通过爆炸、轧制等工艺使不锈钢(覆层)与碳钢(基层)在结合面处实现牢固冶金结合制备而成的。作为新型复合材料,它不仅保持了不锈钢的耐磨损、耐腐蚀性能,又具有碳钢的强度高、易加工等特点^[1]。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^[2-3],该成形技术在航空航天、海洋工程、汽车等领域具有广阔的应用前景^[4]。尤其在飞行器、深水潜水器的舱壁件领域,由不锈钢-碳钢层合板制成的槽型舱壁件直接决定着其性能和安全性,故对其加工成形精度要求高,需尽量避免翘曲变形。

近年来,国内外学者对激光一次扫描板材时存在的翘曲变形及单向式多次扫描时板材的弯曲变形研究已有一定进展。一次扫描时的翘曲变形方面,沈洪^[5]、Shi^[6]等人以 ANSYS 为分析平台研究了温度梯度机理下的翘曲变形,证明了“边界效应”现象的存在,总结出翘曲变形的主要原因:一是激光扫描过程中扫描线前端温度比准稳态温度低,而扫描线末端温度比准稳态温度高,二是不同位置钢板的冷态材料对加热区域的约束力不同。单向式多次扫描时板材弯曲变形方面,M.Marya^[7]、Ravi Kant^[8]、管延锦^[9]、裴继斌^[10]等人研究了扫描次数对激光板料弯曲角度及其增量的影响规律。鲁先法^[11]对 2 mm 厚的低碳钢单曲率板进行单道单向式多次激光扫描,发现随着扫描次数的增加,板材的变形在累积增大,但冗余变形也相应增大。

目前,国内外学者对多次扫描板材的翘曲变形研究较少。在实际工程应用中,往往需要板材弯曲角

度较大,这就需要沿同一扫描线多次扫描。而往复式较单向式多次扫描可有效均衡扫描线两端热量分布,减缓翘曲变形。因此,深入研究多次往复式扫描的翘曲变形对于将该技术推向实用化具有重要意义。文中利用 ANSYS 软件建立了不锈钢-碳钢层合板有限元模型,模拟了激光往复式扫描 6 次时板材的温度场及应力场,重点分析了往复扫描时上一次扫描形成的残余应力场对翘曲变形的影响,研究了扫描次数对板材翘曲变形的影响规律及翘曲机理,为工程应用中提高板材成形精度提供理论依据。

1 不锈钢-碳钢层合板激光弯曲有限元模型

1.1 不锈钢-碳钢层合板几何模型及网格划分

研究对象为双面对称不锈钢-碳钢层合板。层合板的上、下覆层材料为 304 不锈钢,基层材料为 Q235A 碳钢,试件规格为 60 mm(长)×50 mm(宽)×1 mm(厚)。根据试件实际尺寸,结合不锈钢复合钢板及钢带国家标准 GB/T 8165-2008,考虑到过渡层的影响,有限元模型和实际试样尺寸一致,如图 1(a)所示。不锈钢层、过渡层和碳钢层厚度分别为 120、7、746 μm 。其中,过渡层厚度利用 EPMA-1600 电子探针仪器测量得到。

为提高计算精度和效率,采用网格非均匀划分方式。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 的激光作用区网格进行细分,单元尺寸为 0.33 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。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。文中模型单元数目和节点数目分别为 60 450 和 61 724。温度场及结构

场分析分别选用 SOLID70 和 SOLID45 单元。层合板与周围环境的对流换热辐射加在热表面效应单元 surf152 上。不锈钢-碳钢层合板有限元模型如图 1(b) 所示。

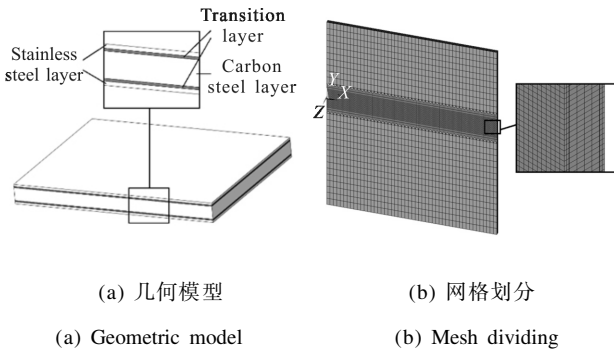


图 1 不锈钢-碳钢层合板的有限元模型
Fig.1 FEM of stainless steel-carbon steel laminated plate

1.2 不锈钢-碳钢层合板热源模型及其加载

脉冲激光热源沿着扫描线匀速移动，对上层不锈钢表面进行加热。文中假定单脉冲激光能量为高斯分布的动态热源，则脉冲激光的能量分布可以表示为：

$$I(x, y) = AI_0 f(x, y) g(t) \quad (1)$$

式中： A 为不锈钢材料对激光的吸收系数，取值为 0.25^[12]； I_0 为激光中心处功率密度，在单脉冲内：

$$I_0 = \frac{2P}{\pi r_0^2 t_p} \quad (2)$$

式中： $f(x, y)$ 为激光脉冲的空间分布； $g(t)$ 为激光脉冲的时间分布，对于基模高斯光束：

$$f(x, y) = \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{0.5r_0^2}\right) \quad (3)$$

$$g(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq t_p \\ 0 & t_p < t \leq 1/f \end{cases} \quad (4)$$

初始条件：

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (5)$$

式中： T_0 为初始环境温度，取值 293 K。激光参数为激光功率 $P=140$ W，激光频率 $f=40$ Hz，脉冲宽度 $t_p=2$ ms，扫描速度 $v=400$ mm/min，激光光斑半径 r_0 为 0.000 9 m。模拟脉冲激光弯曲层合板时，层合板在空气中的冷却方式主要为辐射和对流换热，其混合形式的边界条件为：

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_r(T - T_0) \quad (6)$$

式中： k 为导热系数； h_r 为等效对流换热系数，参考不同环境下等效对流换热系数取值范围，结合实验中有空气自然对流及吹气带来的气体强制对流，取值为 $30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[13]， T 为板材温度。激光弯曲成形的边界条件：激光加载阶段主要为激光热源热量输入、空气自然对流换热及辐射换热；10 s 冷却阶段边界条件主要为空气自然对流换热及辐射换热。

图 2 为激光加工层合板的示意图，层合板一端为固定端，另一端为自由端，激光扫描线与自由末端平行且相距 25 mm。通过编写 ANSYS 中的 APDL 程序使脉冲激光热源加载到层合板上表面的扫描线上并沿其均匀移动。

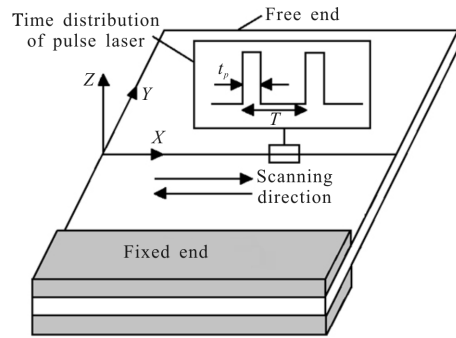


图 2 激光弯曲层合板示意图
Fig.2 Schematic of laser bending laminated plate

激光热源的移动是激光弯曲成形有限元模拟的关键，它是依靠分步循环加载实现的。移动热源利用 ANSYS 中的 APDL 编写用户子程序，模拟时需要捕捉每一个脉冲及其间隔对层合板的作用过程。在加载过程中（即脉冲宽度 t_p 时间段内），把脉冲热源离散到每个载荷步中，在卸载过程中（即 $T-t_p$ 时间段内），把热载荷删掉，在层合板上表面加载空气对流。通过 *DO 循环语句实现多载荷按时间步长将热源加载到层合板模型上，就能够模拟真实热源移动。

2 不锈钢-碳钢层合板翘曲变形分析

2.1 翘曲变形的定义

当激光扫描不锈钢-碳钢层合板时，层合板除了产生绕扫描线的弯曲变形外，还会产生沿扫描线的纵向弯曲变形即翘曲变形，即扫描线两端弯曲角度小，中间区域弯曲角度大。翘曲变形发生在从扫描线 AC 到自由端 DF 整个区域，文中利用自由端的变形

表征翘曲变形,并提出两个相应定义:

(1) 非对称翘曲线,即曲线 $D'E'F'$ 。层合板自由端 DF 经过激光加工后弯曲成曲线 $D'E'F'$, 曲线 $D'E'F'$ 的 Z 向位移分布即为翘曲线,如图 3 所示。翘曲线不仅可以判定模拟结果的有效性,更可以直观地表示翘曲变形机理。

(2) 弦高 h ,即直线 $E'G$ 。如图 3 所示,定义非对称翘曲线最高点 E' 到最低点 D' 的垂直距离为弦高 h ,用来表征翘曲变形大小。

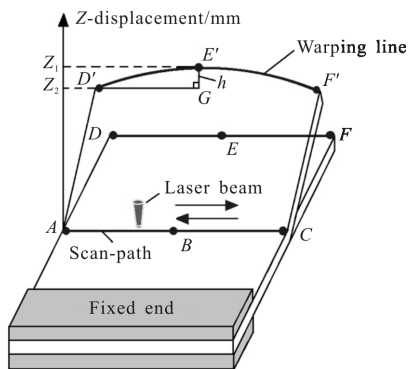


图 3 层合板翘曲变形示意图
Fig.3 Warping deformation schematic

2.2 温度场模拟与分析

文中扫描次数为 6 次,激光扫描一道时间为 7.5 s,每次扫描后冷却时间为 10 s,共计 105 s。图 4 为 A、B、C 三点随扫描次数变化的最高温度曲线。由图 4 可知, A 点和 C 点最高温度交替波动上升,这是单道往复式扫描加工方式决定的。扫描线上 A 点和 C 点依次交替作为激光的开始点和结束点,开始点受初始温度接近室温的影响,温度较结束点低,故两条曲线依次交叉波动,出现如图 4 中所示曲线分布。由图 4 还可知,第 1、3、5 次扫描时 A 点和 C 点温度差平均值为 232.18 K,第 2、4、6 次扫描时其温度差平均值为 43.71 K,由此可见第 2、4、6 次的扫描有效减小了第 1、3、5 次扫描中扫描线两端温度差值过大的问题,所以激光往复扫描的加工方式可以有效均衡扫描线两端热量分布,使翘曲变形增量减小。而单向式扫描中,激光扫描一次后结束点最高温度较扫描线上其他点温度高,多次累积扫描后 A、C 点温差逐渐增大,最大值为 359.74 K,扫描线上热量分布更加不均匀。因此,往复式较单向式扫描更能减缓翘曲变

形的发生,提高工件成形质量。

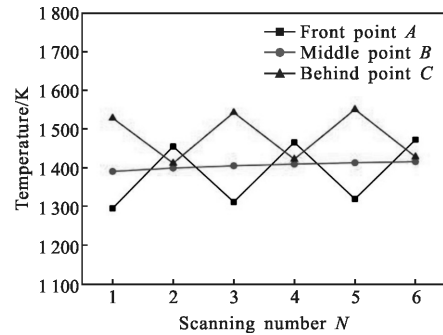
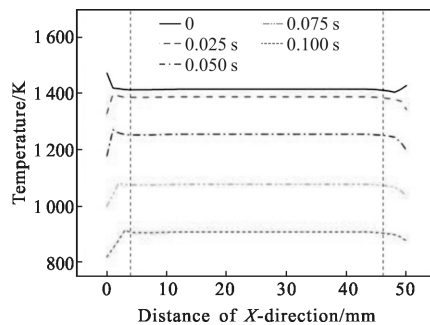
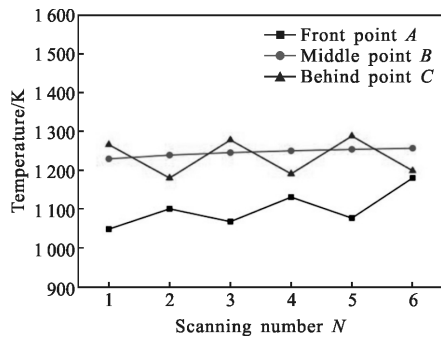


图 4 A、B、C 三点最高温度随扫描次数的变化曲线
Fig.4 Maximum temperature for A, B and C with scanning number

图 5(a)为扫描线上 6 次激光扫描后各点散热整数个脉冲时刻的温度分布曲线。0 曲线为扫描线上各点最高温度分布曲线。虽然激光在功率和速度一定的情况下加工层合板,但每次扫描后扫描线两端最高温度分布并不均匀。受边界效应影响,板材两端传热方式从层合板内固体热传导变为空气中对流换热及热辐射,依据非稳态导热理论^[14],热流密度在边界处降低,温升率变大,温度急剧上升,在扫描线两端宽约 4 mm 区域出现边界效应现象。由图可知,随着各点散热时间的增加,热量最终散失在空气中,扫描线两端散热面积大,所以温度降低比中间区域快。图 5(b)为不同扫描次数下 A、B、C 点散热 0.050 s 时温度分布曲线。由图可知,随着扫描次数的增加,B 点温度升高,而 A、C 点温度虽有所波动上升,但往复扫描平衡了两端热量且两端散热较中间区域快。因此,结合图 4、5 可知,由于每次扫描时扫描线上都存在中间区域热累积以及扫描线两端散热更快的现象,即每次扫描都存在不均匀的热量分布,所以随着扫描次数增加,翘曲变形总量叠加增大。



(a) 不同散热时间
(a) Different heat dissipation time



(b) 不同扫描次数

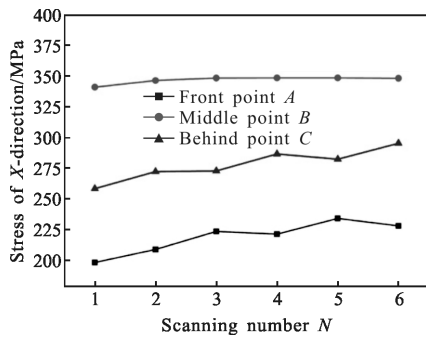
(b) Different scanning number

图 5 扫描线上温度分布

Fig.5 Temperature distribution on scanning line

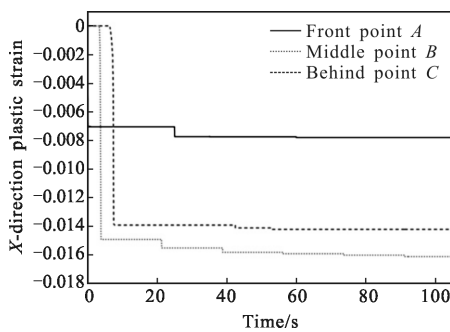
2.3 应力、应变场模拟与分析

图 6 (a)、(b) 为 A、B、C 点不同扫描次数的 X 向热应力及塑性应变曲线。受激光作用后板材扫描线上温度分布不均的影响，热应力及塑性应变分布也呈现不均匀现象。B 点 X 向应力及应变最大，C 点其次，A 点最小。温度越高，X 向热应力越大，屈服强度



(a) 热应力

(a) Thermal stress



(b) Plastic strain

(b) 塑性应变

图 6 A、B、C 三点 X 向应力及应变变化曲线

Fig.6 Curve of X-direction stress and strain for A, B and C points

越低，塑性应变越大。扫描线上 X 向塑性应变大小不均，使板材产生了翘曲变形，即非期望变形。一方面，B 点受往复扫描热累积影响，X 向应力随扫描次数增加而变大，B 点与 A、C 点应变差值增大，故翘曲变形变大。另一方面，随着往复扫描次数增加，A 点和 C 点温度波动升高，所以其应力曲线也波动上升，塑性应变随之增大。由于 A 点和 C 点热应力增速较大，A、C 点与 B 点应变差值增长率减小，故翘曲变形增速减小。

往复扫描激光弯曲成形过程与一次扫描的区别在于，往复扫描中除第一次扫描以外，其余每次扫描加工均受上一次扫描后残余应力场的影响。激光扫描后上表面的残余应力分布对下次扫描时变形的影响不大，因为下次扫描时上表面受高温作用，形成的应力很快超过材料的屈服极限，释放了上表面的残余应力。而激光对板材作用时，板材厚度方向温度梯度很大，下表面温度较低，发生塑性变形后下表面材料产生的残余应力不能释放到初始状态，其残余拉应力对下一次扫描时的翘曲变形有一定影响。图 7 为 1~6 次每次扫描后扫描线对应下表面的 X 向残余应力分布曲线。由图可知，受热量分布不均及几何约

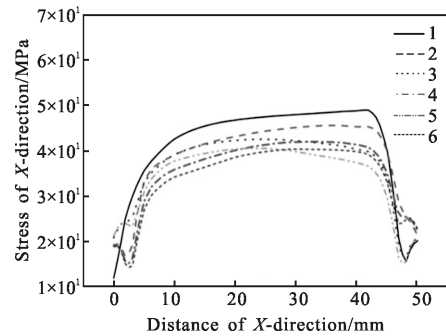


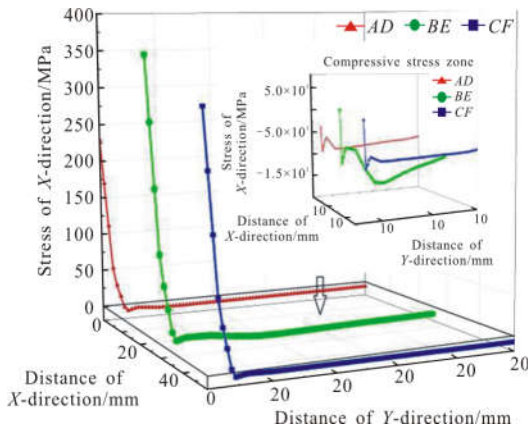
图 7 X 向残余应力分布

Fig.7 Distribution of residual stress of X-direction

束影响，下表面残余拉应力沿 X 轴呈现两边小中间大的分布。下一次扫描时，一方面上表面受高温释放残余应力，下表面受两边小中间大残余应力分布影响，促进了翘曲变形的发生，故随着扫描次数的增加，翘曲变形增大。以第 1 次扫描为例，扫描线中间区域最大残余拉应力为 48.96 MPa，两端最小残余拉应力为 11.89 MPa，残余拉应力分布差为 37.08 MPa，此分布差促进了翘曲变形的发生。另一方面，随着扫描次数的增加，下表面温度升高，释放了部分残余应力，残余应力及分布差值减小，第 1~6 次分布差值从

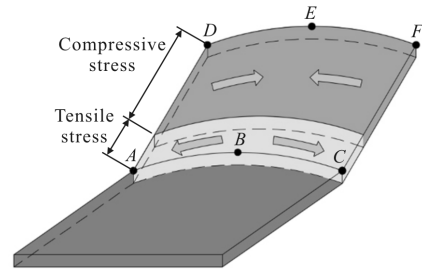
37.08 MPa 下降到 26.13 MPa, 所以残余应力对翘曲变形的促进作用减小, 翘曲变形增量略减小。

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。从残余应力角度分析翘曲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。由于翘曲变形从扫描线开始一直延伸到自由端, 故对板材整个悬空端进行残余应力分析, 研究翘曲变形行为。图 8(a) 为 6 次扫描并冷却后即 $t=105\text{ s}$ 时 AD 、 BE 和 CF 路径上层合板 X 向残余应力分布图, 图中放大了压应力区域。从图中可以看到, 激光作用区从 $Y=0$ 到宽约 1.8 mm 区域内, 为残余拉应力区, 且扫描线上中间区域残余拉应力较两端大, 最大值为 348.23 MPa 。温度分布的不均匀使应力场和位移场分布不均匀, 导致扫描线上 X 向残余应力分布不均匀。这种中间拉应力较大的自身相互平衡的内应力分布保持了翘曲变形的状态, 如图 8(b) 所示。在激光非作用区内, 即从 $Y=1.8\text{ mm}$ 到自由端 $Y=25\text{ mm}$ 区域内为残余压应力区。由于此区域离激光作用区较远, 压应力值均小了一个数量级, 故将压应力区放大, 可看到压应力沿 Y 方向变化趋势。 BE 上, 应力在 $Y=9\text{ mm}$ 到 $Y=12\text{ mm}$ 区域内压应力较 AD 、 CF 大, 最大值为 15.52 MPa , 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, 其残余应力分布与翘曲变形的方向吻合, 如图 8(b) 所示。结合温度场可知, 扫描线上激光能量分布不均匀, 使扫描线上产生翘曲变形。由于板材结构具有连续性, 即自由端区域整体满足变形协调关系, 故扫描线上的翘曲变形会通过力的作用与反作用传递至自由端, 使整个区域发生非期望的翘曲变形。



(a) 模拟结果

(a) Simulation result



(b) 应力分布模型

(b) Stress distribution model

图 8 X 向残余应力分布

Fig.8 Distribution of residual stress of X -direction

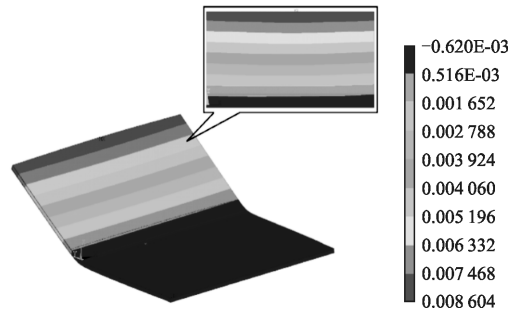
3 翘曲变形实验验证

采用 JK701H 型 Nd:YAG 脉冲激光器对每组 6 个 60 mm (长) $\times 50\text{ mm}$ (宽) $\times 1\text{ mm}$ (厚)的不锈钢-碳钢层合板进行激光往复扫描弯曲实验, 扫描次数为 1~6 次, 扫描线与自由端平行且相距 25 mm , 扫描实验参数如表 1 所示, 共计三组。温度场验证方面, 利用 K 型热电偶测量距 B 点 1 mm 处温度随时间变化的曲线, 并对比模拟结果, 如图 9 所示。实验结果与模拟结果变化趋势大体相同, 温度场模拟结果最大误差为 9.85% 。位移场验证方面, 针对不锈钢-碳钢层合板的翘曲变形, 由德国蔡司公司生产的型号为 Prismo navigator 的三坐标测量机测量样件自由端, 并利用 MATLAB 软件对测量点数据进行拟合, 如图 10(a)、(b) 所示。三坐标测量机对 6 次扫描后样件的几何量进行精准测量, 精度为 $1\text{ }\mu\text{m}$, 输出数据单位为毫米。对比图 10(b) 和 (c) 中模拟与实验的翘曲曲线位移可知, 模拟结果与实验结果的变化规律一致, 最大误差为 4.33% 。弦高可以反映翘曲变形的大小, 由图 11 可知随着扫描次数的增加, 模拟中弦高值从 0.217 mm 增大到 0.363 mm , 翘曲变形总量增大, 第 2、4、6 次弦高增量为 0.018 、 0.015 、 0.008 mm , 第 3、5 次弦高增量为 0.058 mm 和 0.047 mm , 翘曲变形增量略减小。而 6 次单向扫描后, 模拟弦高值从 0.217 mm 增大到 0.439 mm , 所以往复扫描相比于单向扫描可以有效减缓翘曲变形的发生。扫描次数 $N=6$ 的 3 个试样实验弦高平均值和模拟中弦高值分别为 0.371 mm 和 0.363 mm , 误差为 2.16% , 模拟与实验具有较好的一致性。

表 1 层合板激光弯曲实验工艺参数

Tab.1 Parameters of laminated plate of laser bending experiment

Process parameters	Value
Wavelength/ μm	1.064
Pulse width/ms	2
Impulse frequency/Hz	40
Power/W	140
Scanning speed/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	400
Defocus distance/mm	10
Number of scanning	1-6



(c) 模拟结果

(c) Simulation result

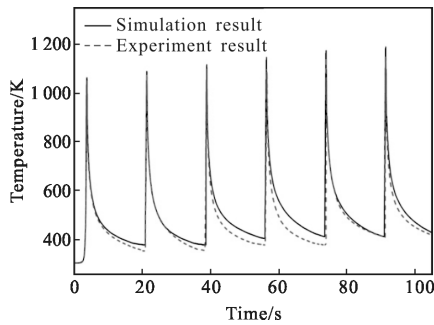


图 9 距 B 点 1 mm 处实验与模拟结果的温度曲线对比

Fig.9 Comparison of temperature curves between experimental and simulated results at the distance of 1 mm from B point

图 10 脉冲激光 6 次扫描弯曲实验中的翘曲变形

Fig.10 Warping deformation during pulsed laser bending in six-pass scanning process

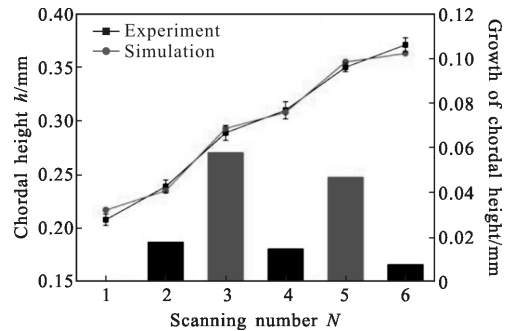
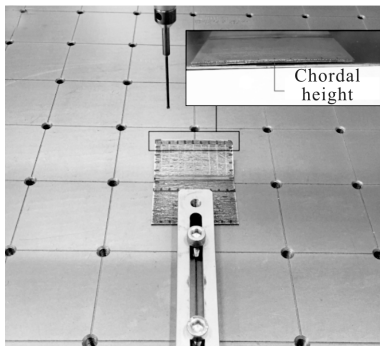


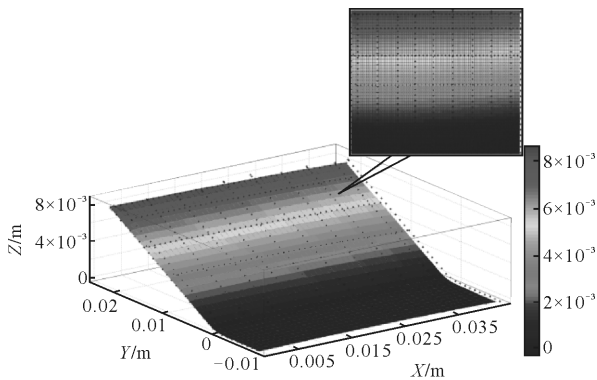
图 11 弦高 h 及弦高增量随扫描次数的变化曲线

Fig.11 Curve of chordal height h and growth of chordal height with scanning number



(a) 检测实验

(a) Measurement experiment



(b) 检测结果

(b) Measurement result

4 结论

基于 ANSYS 软件,利用电子探针面扫描过渡层实验数据,建立了过渡层厚度为 $7\mu\text{m}$ 的 1mm 厚不锈钢-碳钢层合板有限元模型,模拟激光往复扫描 6 次层合板的作用过程,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) 第 1、3、5 次扫描时 A 点和 C 点温度差平均值为 232.18K , 第 2、4、6 次扫描时其温度差平均值为 43.71K ,因此激光往复扫描的加工方式可以有效均衡扫描线两端不均匀的热量分布,相比于单向扫描减缓了翘曲变形发生。随着扫描次数的增加,扫描线中间区域热累积现象越来越明显。

(2) 激光作用后的残余应力场对下次扫描时的翘曲变形有一定促进作用,所以 1~6 次扫描后弦高从 0.217mm 增大到 0.363mm ,即翘曲变形增大。随扫描次数增加,残余应力值减小,对翘曲变形促进作用

减弱,由弦高数据可知,第 2、4、6 次弦高增量为 0.018、0.015、0.008 mm,第 3、5 次弦高增量为 0.058 mm 和 0.047 mm,弦高增量值略减小,即翘曲变形增量减小。

(3) 对比实验与 ANSYS 模拟结果可知,温度场模拟结果最大误差为 9.85%,翘曲线位移最大误差为 4.33%。其中,扫描次数 $N=6$ 的三个试样实验弦高平均值和模拟中弦高值分别为 0.371 mm 和 0.363 mm,误差为 2.16%,模拟与实验具有较好的一致性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Marya M, Edwards G R. Study on the laser forming of near-alpha and metastable beta titanium alloy sheets [J]. *Journal of Materials Processing Tech*, 2001, 108(3): 376–383.
- [8] Kant R, Joshi S N. Thermo-mechanical studies on bending mechanism, bend angle and edge effect during multi-scan laser bending of magnesium M1A alloy sheets [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, 23: 135–148.
- [9] Guan Yanjin, Zhao Guoqun, Sun Sheng, et al. Study on influence of the number of scans on laser bending of sheet metals by FEM simulation [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2004(1): 55–57. (in Chinese)
管延锦, 赵国群, 孙胜, 等. 扫描次数对板料激光弯曲成形影响的有限元仿真研究[J]. 航空制造技术, 2004(1): 55–57.
- [10] Pei Jibin. Research on the mechanism and deformation behaviour 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] Lu Xianfa. Process research on metal plate deformation laser thermal correction [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2014. (in Chinese)
鲁先法. 金属板材变形的激光热矫正工艺研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2014.
- [12] Li Weimin, Lu Xiuchun, Liu Zhubai. Influences of sheet thickness in laser bending [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1999, 9(1): 39–44. (in Chinese)
李纬民, 卢秀春, 刘助柏. 激光弯曲工艺中板材厚度的影响规律[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(1): 39–44.
- [13] 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.
- [14] Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.