

考虑结合面的不锈钢-碳钢层合板脉冲激光弯曲数值模拟

池闪闪 王续跃 徐文骥

(大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要 采用热-结构间接耦合方法,建立了含结合面的不锈钢-碳钢层合板(SCLS)脉冲激光弯曲多层有限元模型(FEM),通过分析脉冲激光扫描过程中不锈钢层、碳钢层及其结合面的温度场、应力应变场的分布情况,探讨了结合面对层合板激光弯曲角度和质量的影响。研究表明,整个激光弯曲过程中结合面处温度平滑传递,横向应力和应变均存在明显突变,变形结束后,上下覆层呈现横向残余拉应力,中间基层呈现横向残余压应力;当激光功率为 140 W、扫描速度为 800 mm/min、离焦量为 10 mm 时,结合面最大 Z 向应力为 87.5 MPa,小于层合板界面结合强度(≥ 210 MPa)。通过脉冲激光扫描实验和模拟,实现了层合板的有效弯曲,实验结果与模拟结果误差小于 5%,为层合材料激光弯曲成形提供了理论与实验依据。

关键词 激光技术; 激光弯曲; 不锈钢-碳钢层合板; 数值模拟; 结合面

中图分类号 TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1103002

Numerical Simulation on Stainless Steel-Carbon Steel Laminated Sheet Considering Interface During Pulsed Laser Bending

Chi Shanshan Wang Xuyue Xu Wenji

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

Abstract Behavior of stainless steel-carbon steel laminated sheet (SCLS) including interfaces during pulsed laser bending is investigated using a multi-layered finite element model (FEM) based on thermal-structure indirect couple method. Through the analysis on temperature field, stress-strain field and displacement of stainless steel layer, carbon steel layer and the bonding interface during laser bending process, the impact of interface on bending angles and bending quality are explored. The results show that during laser bending process, temperature transfers smooth across the bonding interface, while transverse stress and strain have obvious mutations. After deformation, tensile stress exists at both the top and bottom stainless steel layers and compressive stress exists at the middle carbon steel layer. When laser power is 140 W, scanning speed is 800 mm/min, the defocus amount is 10 mm, the maximum stress of Z-direction on the bonding interface is 87.5 MPa, which is smaller than the bonding strength of the laminate sheet (≥ 210 MPa). An effective curved laminate sheet is achieved using both experiment and simulation methods and the error is less than 5%. The simulation provides a good basis on both theory and experiment for better bending quality of SCLS.

Key words laser technique; laser bending; stainless steel laminated sheet; numerical simulation; bonding interface

OCIS codes 140.3390; 140.6810; 160.3900

1 引言

不锈钢-碳钢层合板(简称不锈钢层合板)是将

基层(碳钢)和覆层(不锈钢)两种材料通过轧制或爆炸复合工艺制备而成的层状金属复合材料,既具有

收稿日期: 2014-04-24; 收到修改稿日期: 2014-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(51375073)、创新研究群体科学基金(51321004)

作者简介: 池闪闪(1988—),女,硕士研究生,主要从事激光弯曲方面的研究。E-mail: 823731463@qq.com

导师简介: 王续跃(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事精密与特种加工等方面的研究。

E-mail: wbzzd@dlut.edu.cn(通信联系人)

不锈钢耐磨、耐蚀、耐磨损等特点,又兼具碳钢高强度、耐冲击、易加工等性能^[1-2]。不锈钢层合板以其优越的力学性能和低廉的价格成为单一板的良好替代品,被广泛应用在航天器、石化、船舶、电力、交通运输等领域。但相比于同质材料,层合板不同材料间性能存在差异且存在结合面,在成形过程中层合板内部应力过大容易产生结合面分层、覆层起皱、剥落等失效情况,使层合板的成形加工更加困难。

激光弯曲成形技术是一种利用高能激光束以特定的轨迹扫描工件表面形成的非均匀温度场所导致的热应力来实现塑性变形的柔性成形方法,具有能量密度高、热影响区小、无需模具、没有外力、成形过程无接触等优点,并且通过调节激光工艺参数能够很好的控制成形过程中产生的热应力进而控制其成形精度和成形质量^[3]。近年来国内外学者对板材激光弯曲成形进行了大量研究,但主要针对单一金属板、脆性材料及金属基复合材料,对异种材料组成的金属层合板研究较少^[4-9]。在数值模拟方面,Edwardson等^[10-12]对金属/纤维层合板连续激光弯曲过程进行了数值模拟,研究表明在温度梯度机理下可以实现层合板的弯曲且不会引起材料破坏,此时激光仅作用在表层材料。Shen等^[13]建立了A16061和SiC金属/陶瓷双层复合板有限元模型,研究了其在连续激光弯曲过程中温度场、应力场的分布规律以及激光功率、扫描速度对弯曲角度的影响规律。墨卫娟^[14]采用数值模拟方法研究了高温合金/低碳钢双层复合板连续激光弯曲成形过程,研究了不同厚度比下温度和应力的分布规律,并对照射不同材料时的模拟结果进行了比较。在实验研究方面,王续跃等^[15-16]对不锈钢-碳钢层合板脉冲激光弯曲进行了实验研究,得到了激光弯曲成形规律,通过改变工艺参数获得了85.6°的极限弯曲角,并对弯折区的热传导特性进行了研究。

以上学者主要针对连续激光作用的情况,且将结合面简化为没有厚度的理想界面,而实际结合面是具有一定厚度的过渡层。与连续激光相比,脉冲激光弯曲作用过程中激光能量从覆层经结合面再到基层的传导过程以及层合板内部应力应变的变化规律更为复杂。以ANSYS软件为分析平台,采用热-结构间接耦合非线性有限元分析方法,在考虑结合面厚度(0.02 mm)和材料性能的基础上,建立了含结合面的层合板多层有限元模型,实现了不锈钢层合板脉冲激光弯曲成形过程的有限元模拟,着重分析了层合板厚度方向结合面处的温度和应力应变分布情况;对

0.8 mm厚不锈钢层合板进行了单道扫描实验及数值模拟,实现了层合板的有效弯曲,两种方法得到的弯曲角度误差小于5%,对指导层合板激光弯曲成形、防止层合板结合面破坏具有重要意义。

2 不锈钢层合板激光弯曲有限元模型

2.1 脉冲移动热源与换热条件

激光束作为外加表面热流载荷对上层不锈钢(上覆层)表面进行加热,假定单脉冲激光能量为呈近似高斯分布的表面动态热源,则脉冲激光的能量分布可表示为

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

式中 A 为激光作用区材料对激光的吸收系数, I_0 为激光中心处功率密度, $f(x, y)$ 为激光脉冲的空间分布,对于基模高斯光束

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

式中 (x_0, y_0) 为光斑中心位置坐标, r_0 为光强下降到中心光强 $1/e$ 时的光斑半径。 $g(t)$ 为激光脉冲的时间分布, t_p 为激光的脉冲宽度。

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq t_p \\ 0, & t_p < t \leq 1/f \end{cases}, \quad (3)$$

初始条件为

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (4)$$

T_0 为初始环境温度,取室温 293 K。在激光加热和冷却过程中,层合板在空气中的冷却方式主要为对流换热和辐射换热,模拟中考虑用等效对流换热系数来表征

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_r(T - T_0), \quad (5)$$

式中 h_r 为等效对流换热系数, T 为试件温度。

2.2 不锈钢层合板几何模型及网格划分

本文以 1Cr18Ni9Ti/Q235A/1Cr18Ni9Ti 层合板为研究对象,试件规格为 60 mm(长)×30 mm(宽)×0.8 mm(厚),为双面复合不锈钢层合板,如图 1 所示。为了考虑结合面对激光弯曲过程中层合板温度、应力应变以及最终弯曲角度和质量的影响,在基层和覆层材料之间添加一层厚度为 0.02 mm 的过渡层^[17-18]。激光弯曲成形模拟过程中,基层和覆层材料均视为弹塑性材料,材料热物理性能参数随温度而变化。基层材料为 Q235A,密度 $\rho_{Q235A} = 7860 \text{ kg/m}^3$,熔点 $T_{Q235A} = 1741 \text{ K}$,覆层材料为 1Cr18Ni9Ti,密度 $\rho_{1Cr18Ni9Ti} = 7930 \text{ kg/m}^3$,熔点

$T_{1Cr18Ni9Ti} = 1693$ K, 材料成分和热物力学性能参数见表 1 及图 2^[19-20], 其中实线为不锈钢参数, 虚线为碳钢参数, k 为热传导系数, c 为比热容, α 为热膨胀系数, E 为弹性模量, σ_s 为屈服强度, 泊松比均为 0.3^[19-20]。过渡层不同于任一种材料, 其性能参数目前并没有很好的计算方法, 本文在综合考虑过渡层元素分布及不锈钢、碳钢体积比的基础上, 对不锈钢、碳钢的材料性能参数进行加权计算, 得到过渡层材料的性能参数。

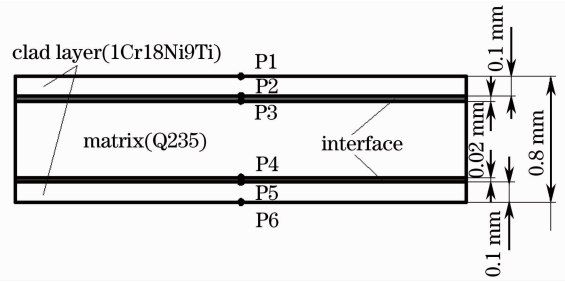


图 1 不锈钢层合板示意图

Fig. 1 Schematic of stainless steel laminate sheet

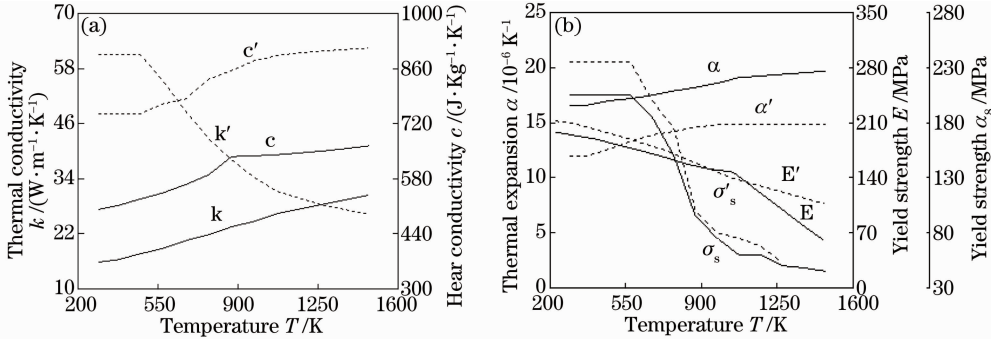


图 2 Q235A、1Cr18Ni9Ti 热物力学性能参数

Fig. 2 Physical and mechanical properties of Q235A and 1Cr18Ni9Ti

表 1 Q235A、1Cr18Ni9Ti 材料成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of Q235A and 1Cr18Ni9Ti (mass fraction, %)

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Ti
1Cr18Ni9Ti	≤0.09	≤1.31	0.026	0.007	≤0.87	≤17.8	≤9.7	≤0.65
Q235A	≤0.18	≤0.58	≤0.023	≤0.03	≤0.27			

不锈钢层合板(SCLS)脉冲激光弯曲成形的示意图如图 3 所示, 试件一端固定, 另一端自由悬空, 激光扫描线距自由端的距离为 25 mm。脉冲激光在层合板覆层表面沿扫描线匀速移动, 移动热源利用 ANSYS 中的 APDL 用户子程序编写, 并以热流密度的形式施加到层合板覆层表面, 热对流作为边界条件施加在表面效应单元上。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, 为了保证计算精度的前提下尽可能的减少计算时间, 在脉冲作用过程中采用小步长, 脉冲间隔步长增大, 且对

激光作用区内的网格进行加密, 最小时间步长为 $0.2 \mu s$, 最小单元尺寸为 0.02 mm。不锈钢层合板的有限元模型(FEM)如图 4 所示。

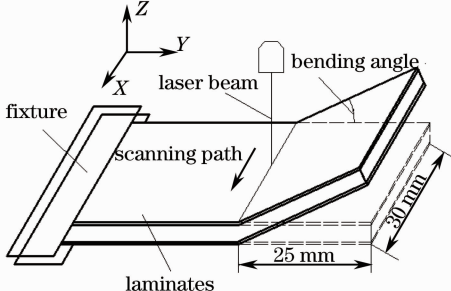


图 3 不锈钢层合板激光弯曲示意图

Fig. 3 Schematic of laser bending on SCLS

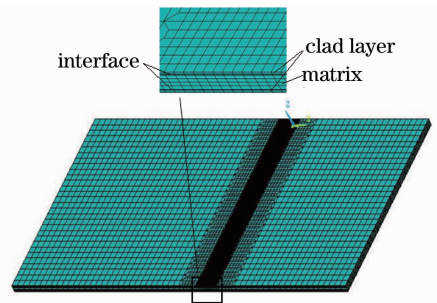


图 4 不锈钢层合板的有限元模型

Fig. 4 FEM model of SCLS

3 不锈钢层合板激光弯曲模拟结果分析

不锈钢层合板弯曲成形过程采用脉冲激光沿直线单道扫描方式, 激光波长 λ 为 $1.064 \mu m$, 脉冲宽度 t_p 为 2 ms, 脉冲频率 f 为 40 Hz, 激光功率 P 为 140 W, 扫描速度 V 为 800 mm/min, 离焦量 $Z = 10$ mm, 扫描所需时间为 2.25 s, 吸收系数 A 取 0.45,

激光作用区的等效对流换热系数 h_r 为 $30 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。为研究脉冲激光扫描对层合板试样变形效果的影响,需分析和讨论层合板内部尤其是厚度方向温度场、应力/应变场的变化形式及分布特征。

3.1 温度场模拟与分析

图 5 为层合板垂直扫描线中点沿厚度方向各点温度分布曲线,由图 5(a)可知,层合板上覆层及上结合面的温度随时间交替震荡,这是因为在每一个激光脉冲作用时,上覆层吸收激光能量经结合面传递给部分基层材料,导致温度迅速升高,当 $t = 1.127 \text{ s}$ 时,P1 点温度达到最大,其值为 1606 K ;在

脉冲间隔,上覆层受周围冷态材料的约束迅速冷却,温度又急剧下降,震荡周期为一个脉冲周期,最大震荡幅度为 1115 K 。由图 5(b)可知,层合板下覆层及下结合面的温度变化比较平缓,变化趋势及各时刻的温度值大体相同。综合可知,脉冲激光作用过程中,由于脉冲激光作用时间很短,同时不锈钢的热导率比碳钢低,热量扩散速度慢,上覆层受激光照射吸收的大量激光能量来不及向周围扩散,故高温范围主要集中在上覆层。在整个激光作用过程中,层合板上下结合面处均未发生明显的温度突变,温度平滑传递,如图 5(c)所示。

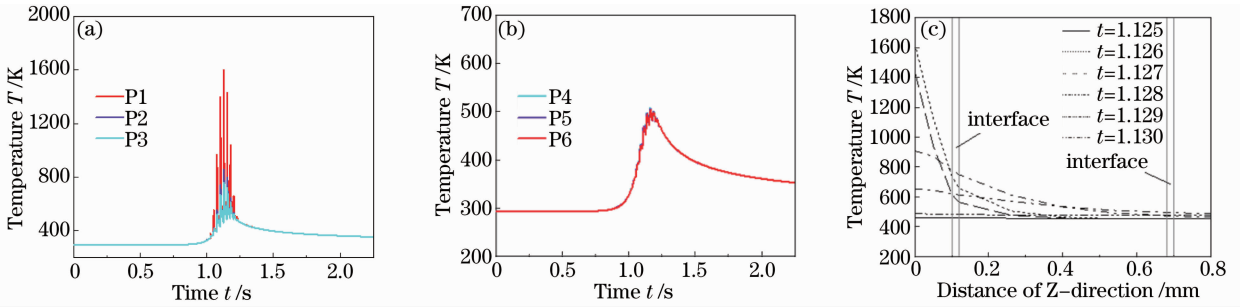


图 5 扫描线中点厚度方向温度分布曲线。(a) 上覆层和上结合面温度循环; (b) 下覆层和下结合面温度循环; (c) 不同时刻结合面处温度分布

Fig. 5 Curve of midpoint temperature of scanning line. (a) Upper clad layer and interface; (b) lower clad layer and interface; (c) interface

3.2 应力应变场模拟与分析

图 6 为层合板结合面处横向应力应变云图,其中正值代表受拉,负值代表受压。由图 6(a)和图 6(b)可知,在脉冲激光作用过程中,塑性应变(ϵ_y)主要集中在上覆层,沿层合板厚度方向,由负应变逐渐转变为正应变,在上下结合面均发生明显的应变突变,且在激光作用区外缘呈阶梯状分布;变形结束后,层合板厚度方向应变趋于稳定,最大横向残余应

变出现在上覆层表面,其值为 -0.0126 。在脉冲激光作用时,层合板覆层和结合面呈现压应力状态,基层沿厚度方向由拉应力变为压应力,上下结合面均发生应力突变;最大应力突变发生在上结合面处,靠近上覆层一侧为压应力,靠近基层一侧为拉应力,应力突变值为 87.4 MPa ,横向应力突变随与光斑中心距离的增大而减小,如图 6(c)。图 7 为垂直扫描线厚度方向各点横向应力循环曲线,随着激光逐渐靠

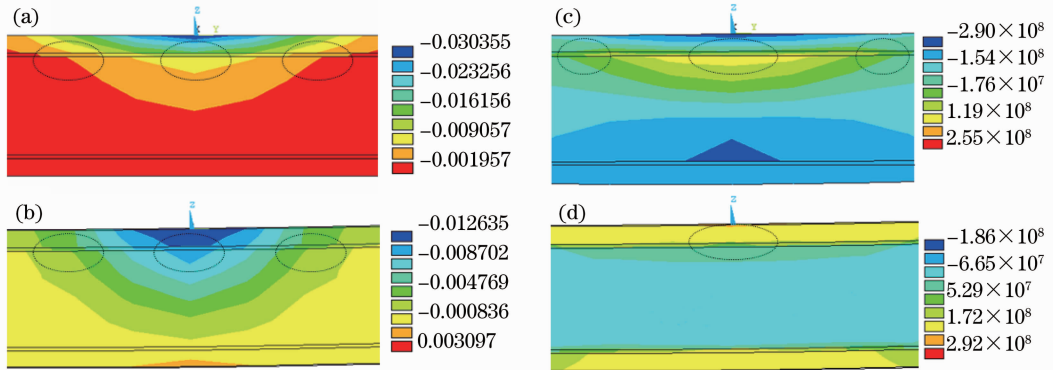


图 6 层合板结合面处横向应力应变云图。(a) $t=1.127 \text{ s}$ 时 ϵ_y ; (b) $t=100 \text{ s}$ 时 ϵ_y ; (c) $t=1.127 \text{ s}$ 时 σ_y ; (d) $t=100 \text{ s}$ 时 σ_y

Fig. 6 Transverse stress distribution of laminates' interfaces. (a) ϵ_y of $t=1.127 \text{ s}$; (b) ϵ_y of $t=100 \text{ s}$; (c) σ_y of $t=1.127 \text{ s}$; (d) σ_y of $t=100 \text{ s}$

近,覆层和结合面压应力值不断增大,当激光逐渐远离,层合板开始冷却收缩,覆层和结合面处应力逐渐由压应力变为拉应力并不断增大;变形结束后,层合

板厚度方向应力达到平衡,覆层和结合面呈现残余拉应力状态,基层呈现残余压应力状态,如图 6(d)。

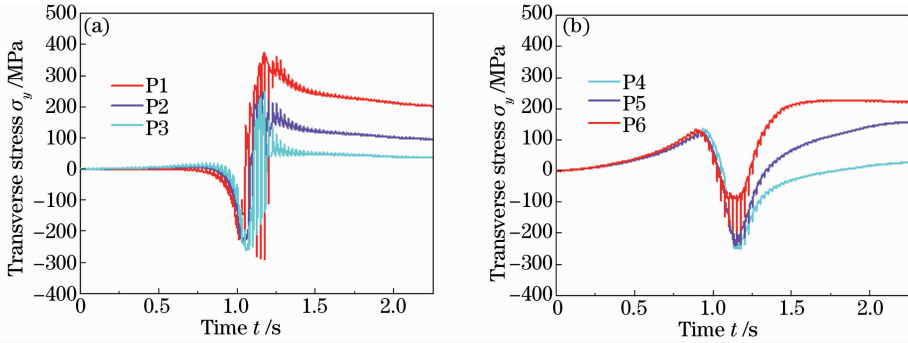


图 7 扫描线中点厚度方向横向应力循环曲线。(a) 上覆层和上结合面横向应力循环;(b) 下覆层和下结合面横向应力循环
Fig. 7 Transverse stress cycle on middle point of scanning line. (a) σ_y of upper clad layer and interface; (b) σ_y of lower clad layer and interface

层合板的界面结合强度包括界面剪切强度和界面剥离强度。在激光弯曲过程中,激光作用范围小,且垂直于板面方向,主要考虑界面剥离应力(z 向应力)。图 8 为层合板结合面处 Z 向应力云图,其中正值代表拉应力,负值代表压应力。脉冲激光作用时[图 8(a)],由于激光作用区温度分布不均且层合板不同材料间热膨胀系数存在差异,层合板上结合面 Z 向

应力发生突变,且激光作用中心靠近上覆层的一侧 Z 向应力最大, Z 向应力突变值为 64.8 MPa,随着与光斑中心距离的增大, Z 应力突变逐渐减小,下结合面的 Z 向应力突变不明显。层合板变形结束后[图 8(b)],上下结合面处的 Z 向应力突变减小。整个激光弯曲过程中,结合面处 Z 向最大拉应力值为 87.5 MPa,小于层合板界面强度(≥ 210 MPa)。

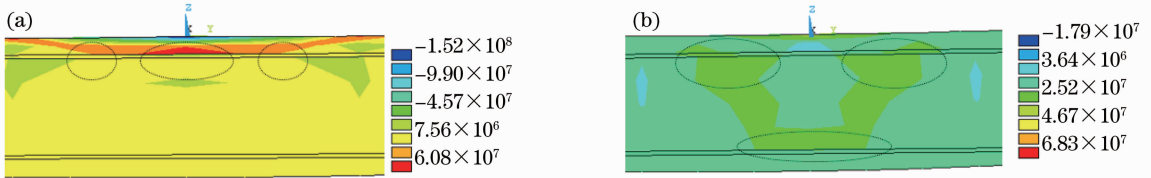


图 8 层合板结合面处 Z 向应力云图。(a) $t=1.127$ s 时 σ_z ; (b) $t=100$ s 时 σ_z

Fig. 8 Stress distribution of Z -direction on laminates' interfaces. (a) σ_z of $t=1.127$ s; (b) σ_z of $t=100$ s

3.3 位移场模拟与分析

图 9 为沿长度方向层合板不同时刻 Z 向位移分布,当激光束开始作用时,层合板受热膨胀发生反向弯曲,随着激光继续扫描移动,层合板开始发生正向弯曲并不断增大。图 10 为层合板自由端上表面中点弯曲角度随时间的变化曲线。由图可知,随着脉冲次数的增加,层合板弯曲角度逐渐增加,层合板最终弯曲角度是每次脉冲作用累加的结果,当激光扫描终止时,板材累积了一定的余热,随着冷却过程,弯曲角度缓慢增加,最终达到平衡,冷却到 10 s 后,层合板的弯曲角为 1.34° 。

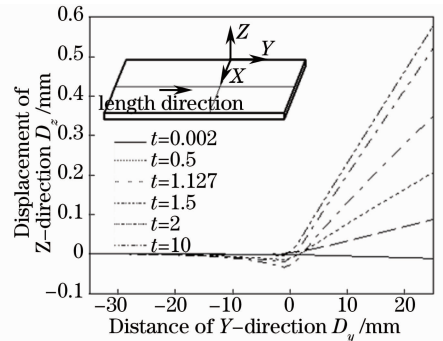


图 9 沿长度方向不同时刻 Z 向位移
Fig. 9 Displacement of Z -direction in different time along length direction

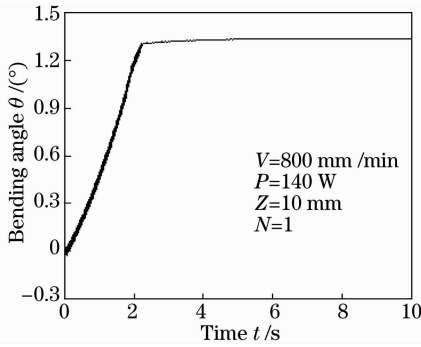


图 10 自由端中点弯曲角随时间的变化
Fig. 10 Bending angle of midpoint of the free end in different time

4 弯曲角度实验验证

采用英国 GSI Lumonics 公司生产的 JK701H 型 Nd:YAG 脉冲激光器进行层合板激光弯曲验证实验,其输出的激光波长为 $1.064 \mu\text{m}$,实验所用激光工艺参数、材料及其几何尺寸如表 2 所示。实验前,将制备好的不锈钢层合板试件用酒精清洗吹干,

表 2 不锈钢层合板激光弯曲实验验证工艺参数

Table 2 Laser bending process parameters for experimental verification of SCLS

No.	Laser power P / W	Scanning rate $V / \text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Defocusing amount Z / mm	Scanning times N	Sries $L \times W \times H / \text{mm}^3$
1	100	600	10	10	$60 \times 30 \times 0.8 (0.1+0.6+0.1)$
2	140	600	10	10	$60 \times 30 \times 0.8 (0.1+0.6+0.1)$
3	140	800	10	10	$60 \times 30 \times 0.8 (0.1+0.6+0.1)$
4	140	800	10	5	$60 \times 30 \times 0.8 (0.1+0.6+0.1)$

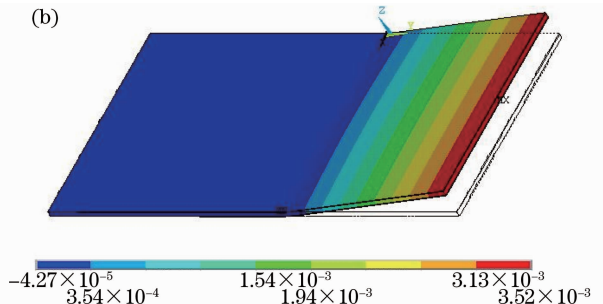
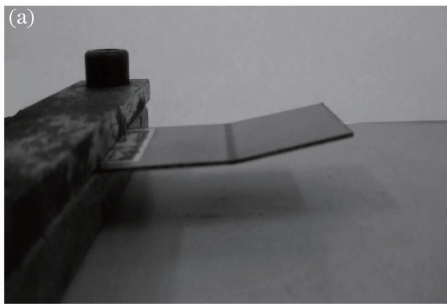


图 12 第四组工艺参数下实验与模拟结果的效果图。(a) 实验结果;(b) 模拟结果

Fig. 12 Schematic of experimental and simulated results under the fourth group. (a) Experimental results; (b) simulated results

5 结 论

针对结合面具有一定厚度(0.02 mm)的层合板,考虑结合面对层合板弯曲性能的影响,对基层、覆层材料性能进行加权计算得到结合面性能参数,建立了含结合面的不锈钢-碳钢层合板脉冲激光弯曲多层有限元模型,分析了不锈钢层合板结合面处

试件一端用夹具固定,另一端悬空;实验中,激光沿图 1 所示的扫描线在试件表面往复扫描,每两次扫描间隔 10 s。图 11 为相同工艺参数下数值模拟与实验结果的对比,图 12 为第四组工艺参数下的实验与模拟的弯曲效果。实验结果与模拟结果最大误差为 4.54%,两者结果具有一致性,故所建立的有限元模型可以用于层合板激光弯曲模拟研究。

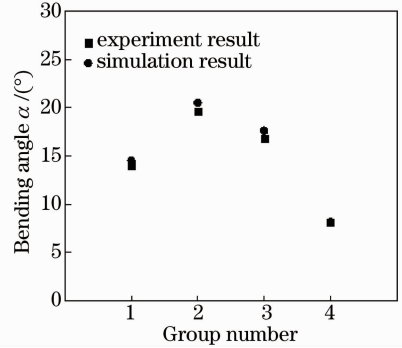


图 11 不同工艺参数下实验结果与模拟结果对比
Fig. 11 Comparison of experimental and simulated results under different parameters

温度场、应力应变场的分布以及激光弯曲过程中位移场的分布情况,并得到以下结论:

- 1) 由温度分布可以看出,激光作用区内上覆层及上结合面伴随着温度震荡,震荡周期为一个脉冲周期,最大震荡幅度为 1115 K,下覆层及下结合面温度变化平滑,结合面处没有出现明显的温度突变,

厚度方向温度平滑传递；

2) 由应力应变分布可以看出,激光作用区的结合面处发生应力和应变的突变,且随着与光斑中心距离的增大突变值逐渐减小,最终上下不锈钢层和结合面呈现拉应力状态,中间碳钢层呈现压应力状态;当 $P=140\text{ W}$, $Z=10\text{ mm}$, $V=800\text{ mm/min}$ 时,结合面处最大 z 向应力值为 87.5 MPa ,小于不锈钢层合板界面结合强度($\geq 210\text{ MPa}$)。

3) 采用相同工艺参数进行了层合板脉冲激光弯曲验证性实验和数值模拟,实验结果与模拟结果的最大误差小于 5% ,与不考虑结合面的模拟结果相比,精度提高 1.49% 。

参 考 文 献

- 1 Yu Jiuming, Xiao Yunzhen, Wang Qunjiao, *et al.*. New development of technology of clad metal[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2000, 1(14): 12-16.
于九明, 孝云祯, 王群骄, 等. 金属层状复合技术及其新进展[J]. 材料研究学报, 2000, 1(14): 12-16.
- 2 Yang Munan, Zuo Xiaoqing, Zhao Mingwei, *et al.*. Research progress of manufacturing technology for stainless steel clad plate[J]. Material & Heat Treatment, 2012, 20(41): 93-96.
杨牧南, 左孝青, 赵明伟, 等. 不锈钢复合板制备技术研究进展[J]. 材料热处理技术, 2012, 20(41): 93-96.
- 3 Li Weimin, M Geiger, F Vollertsen. Study on laser bending of metal sheets[J]. Chinese J Lasers, 1998, A25(9): 859-864.
李纬民, M Geiger, F Vollertsen. 金属板材激光弯曲成形规律的研究[J]. 中国激光, 1998, A25(9): 859-864.
- 4 Ding Lei, Liu Huixia, Wang Hejun, *et al.*. Experimental study of thin aluminum-lithium alloy sheet laser forming with semiconductor laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2143-2148.
丁磊, 刘会霞, 王鹤军, 等. 铝-锂合金薄板半导体激光弯曲成形试验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2143-2148.
- 5 D P Shidid, M Hoseinpour Gollo, M Brandt, *et al.*. Study of effect of process parameters on titanium sheet metal bending using Nd: YAG[J]. Laser Optics & Laser Technology, 2013, 47: 242-247.
- 6 Wang Xuyue, Xu Weixing, Xu Wenji, *et al.*. Simulation and experiment of laser bending of silicon sheet[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(4): 605-610.
王续跃, 许卫星, 徐文骥, 等. 硅片激光弯曲成形的数值模拟与实验[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 605-610.
- 7 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.
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.
- 8 F R Liu, K C Chan, C Y Tang. Theoretical analysis of deformation behavior of aluminum matrix composites in laser forming[J]. Materials Science and Engineering, 2005, 396(1):

172-180.

- 9 F R Liu, K C Chan, C Y Tang, *et al.*. Numerical modeling of the thermo-mechanical behavior of particle reinforced metal matrix composites in laser forming by using a multi-particle cell model[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(9): 1943-1953.
- 10 S P Edwardson, G Dearden, P French, *et al.*. Laser forming of metal laminate composite materials[C]. Proceeding of ICALEO, 2003. 107.
- 11 S P Edwardson, P French, G Dearden, *et al.*. Laser forming of fiber metal laminates[J]. Lasers in Eng, 2005, 15: 233-255.
- 12 C Carey, W J Cantwell, G Dearden, *et al.*. Towards a rapid non-contact shaping method for fiber metal laminates using a laser source[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2010, 47(5-8): 557-565.
- 13 Hong Shen, Zhenqiang Yao, Jun Hu. Numerical analysis of metal/ceramic bilayer materials systems in laser forming[J]. Computational Materials Science, 2009, 45(2): 439-442.
- 14 Mo Weijuan. Research on Forming of a Composite Plate with Laser Bending[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
墨卫娟. 复合板材激光弯曲成形规律的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
- 15 Yang Bingbing, Wang Xuyue, Xu Wenji, *et al.*. Experiments on laser bending of stainless steel-carbon steel laminated sheet[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(9): 091403.
杨冰冰, 王续跃, 徐文骥, 等. 不锈钢-碳钢层合板激光弯曲试验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(9): 091403.
- 16 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.
马绪鹏, 王续跃, 徐文骥, 等. 不锈钢-碳钢层合板激光弯折区的热传导特性[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 101401.
- 17 Wenqing Song, Wenji Xu, Xuyue Wang, *et al.*. Numerical simulation of temperature field in plasma-arc flexible forming of laminated-composite metal sheets[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19: 61-67.
- 18 Mechanical properties of engineering materials data sheet Editorial. Mechanical Engineering Materials Performance Data Manual[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1995. 141-148.
机械工程材料性能数据手册编委会. 机械工程材料性能数据手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995. 141-148.
- 19 Ding Haimin, Fan Xiaoliang, Wang Jinfeng, *et al.*. Interface characterization of hot/rolled stainless steel/carbon steel clad[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(11): 18-22.
丁海民, 范孝良, 王进峰, 等. 热轧复合不锈钢-碳钢复合板界面特征[J]. 材料热处理学报, 2010, 32(11): 18-22.
- 20 Xie Guoliang, Han Jingtao, Liu Jianbin. Comparison of interfacial properties of composite metal plates produced by different processes[C]. Symposium of Production Technology Development and Application of Double (Multiple) Metal Composite Pipe/Plate, 2008.
解国良, 韩静涛, 刘建彬. 不同工艺生产的复合金属板界面结合特性的比较[C]. 双(多)金属复合管/板材生产技术开发与应用学术研讨会论文集, 2008.

栏目编辑:张浩佳