

# 层状金属复合板的激光弯曲成形及边缘效应控制

王晓岗, 石永军\*, 郭延阔, 孙瑞

中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266580

**摘要** 为了进一步阐释激光弯曲成形以及边缘效应机理及其控制策略, 基于 ABAQUS 有限元分析软件, 建立了不锈钢-低碳钢-不锈钢层状复合板的激光热成形模型, 对激光扫描过程中复合板的层间温度场与应力应变场进行了量化分析。研究发现: 不锈钢与低碳钢导热性能的差异有利于弯曲角度的形成; 造成边缘效应的主要原因是加热路径上温度及板内约束的非均匀化分布; 重复加热的方式可以改善表面温度分布, 提高成形精度。提出了 4 种新的扫描策略, 最大可使表面温度的相对变化率降低 36%, 加热线上弯曲角的相对变化率降低 51.8%, 提高了成形精度, 为工业化生产中复合板弯曲成形扫描策略的选择提供了参考。

**关键词** 激光技术; 激光弯曲; 层状金属复合材料; 边缘效应; 成形精度; ABAQUS 软件

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0302004

## Laser Bending and Edge Effect Control of Laminated Metal Composite Plate

Wang Xiaogang, Shi Yongjun\*, Guo Yankuo, Sun Rui

College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China

**Abstract** To elucidate the mechanisms of laser bending and edge effect and its control strategy, we constructed a laser thermoforming model of stainless steel-low carbon steel-stainless steel laminated metal composite plate using finite element analysis software ABAQUS. The temperature field and stress and strain fields between composite plates in laser scanning were quantitatively analyzed. The results from our study show that the difference in thermal conductivity between stainless steel and low carbon steel results in the formation of a bending angle. The main cause of the edge effect is the nonuniform distribution of temperature and plate constraints along the heating path; repeated heating improves surface temperature distribution and increases forming accuracy. Four new scanning strategies are proposed; these strategies reduce the relative change rate of surface temperature by 36% and the relative rate of change of the bending angle along the heating line by 51.8%, which improves the forming precision. Our results provide a guideline for the selection of scanning strategy for composite metal plate bending formation in industrial production.

**Key words** laser technique; laser bending; layered metal composites; edge effect; forming precision; ABAQUS software

**OCIS codes** 350.3390; 160.3900

## 1 引 言

激光弯曲是通过移动激光束照射金属表面形成的温度场诱发不均匀热应力来实现弯曲变形的一种非接触成形技术, 具有无模具、非接触、无外力、精度高等优势, 适用于多品种、小批量、复杂结构件的成形, 在航空航天、汽车、造船、微电子领域得到了广泛应用<sup>[1-5]</sup>。层状金属复合材料的出现拓宽了激光弯

曲成形的应用范围, 层状金属复合材料是由两种或两种以上的金属通过爆炸、轧制等方式结合在一起, 发挥各自性能优势的一种复合板材, 其中的不锈钢-低碳钢复合材料在保持低碳钢(基材)强度和塑性的同时, 可以发挥不锈钢(覆材)耐腐蚀、耐磨、美观等优点<sup>[6]</sup>, 在石化、交通运输等领域得到了广泛应用。

目前, 国内外研究人员针对激光弯曲变形进行了大量的研究工作, 这些研究主要是通过建立解析

收稿日期: 2019-09-09; 修回日期: 2019-10-10; 录用日期: 2019-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(51175515)、中国石油科技创新基金(2017D-5007-0307)

\* E-mail: wxgang6688@163.com

模型、数值模型等方式进行的<sup>[3,7-8]</sup>。研究发现,在弯曲过程中金属板除了发生绕扫描线的变形外,扫描线上弯曲角、自由端位移均随位置的变化而变化,除此之外,扫描线上会出现局部增厚现象,以上现象均为非期望变形,称之为边缘效应<sup>[9-11]</sup>。在常规成形过程中可以忽略其对成形件精度的影响,但在高精度成形工况下,边缘效应将会影响装配精度,甚至会影响产品的使用性能及寿命。Bao等<sup>[3]</sup>利用数值模拟分析了板材在屈曲机理(BM)与温度梯度机理(TGM)下的成形规律,并进行了实验验证;Shen等<sup>[12]</sup>研究了变扫描速度方法对边缘效应的影响,结果发现,与匀加速、匀减速相比,阶梯式变速扫描方法可以大幅降低边缘效应;Shi等<sup>[13-15]</sup>从扫描路径间距、板材几何形状、集中力的位置、扫描线的路径规划等方面展开了相关研究,发现在保持激光输入能量不变的前提下,合理规划加热线的长度、方向、集中力施加位置以及板材的几何形状对非期望变形的抑制有显著影响;Hu等<sup>[9]</sup>提出了改进的温度及弯曲角预测解析模型,并提出了两端约束的固定方式,数值模拟与实验结果均表明两端约束的固定方式可明显降低边缘效应。然而,由于层状金属复合板材每层的材料不同,其热物理性能与力学性能各不相同,增大了精准化成形的难度;此外,边缘效应

也是影响激光弯曲成形精度的主要因素。因此,本文利用理论分析、数值模拟与实验验证相结合的方式对激光扫描过程中不锈钢-低碳钢-不锈钢层状复合材料的温度场、应力场、应变场进行研究,基于ABAQUS仿真软件对复合板弯曲成形过程中的层间应力、应变进行量化分析,为层状金属复合板材弯曲成形的精度控制提供理论及计算依据。

## 2 实验研究

### 2.1 实验板材

实验所用板材为不锈钢-低碳钢-不锈钢三层复合板,其制造方式为轧制复合。上下表面是厚度为0.3 mm的0Cr18Ni9不锈钢,中间是厚度为2.4 mm的Q235B低碳钢,板材规格为100 mm×50 mm×3 mm。实验开始前将不锈钢-低碳钢-不锈钢层状金属板材表面用乙醇与丙酮的混合溶液进行清洗,以消除板材表面油垢对实验结果的影响。为了提高金属板材表面对激光能量的吸收率,用石墨沿激光扫描路径对板材进行黑化处理。金属板材一端用夹具固定,另一端自由,加工完成后,自然冷却至室温。表1所示为不锈钢与低碳钢的化学成分,表2所示为0Cr18Ni9不锈钢和Q235B低碳钢的性能参数。

表1 复合板的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of laminated composite plate (mass fraction)

Element	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Ti
Q235B	0.2	0.35	0.7	0.045	0.045	0.3	0.3	
0Cr18Ni9	0.07	1	2	0.03	0.035	19	10	0.4

表2 不锈钢和低碳钢的性能参数

Table 2 Characteristic parameters of stainless steel and low carbon steel

Parameter	Temperature / °C					
	200	400	600	800	1000	
Expansion / (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	Q235B	12	13.8	14.7	12.2	13.7
	0Cr18Ni9	12.3	13.2	10.7	13.7	15.9
Young's modulus / GPa	Q235B	200	182	157	126	106
	0Cr18Ni9	206	189	151	132	116
Specific heat / (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	Q235B	0.53	0.63	0.81	0.95	0.62
	0Cr18Ni9	6.8	0.88	1.06	0.61	0.63
Heat conductivity / (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	Q235B	52	42	34	27	28
	0Cr18Ni9	37	23	21	24	20
Yield strength / MPa	Q235B	152	123	109	80	22
	0Cr18Ni9	134	110	80	60	30

### 2.2 实验装置与方案

选用MFSC-2000型单模块连续光纤激光器进行激光成形实验,其最大输出功率为2 kW,波长范

围为1060~1100 nm;使用Flir-A615型红外热成像相机对实验过程中金属板材表面的温度进行采集,红外热成像摄像机的测温范围为-50~2000 °C,时

间响应为 8 ms,空间分辨率为0.68 mrad,红外热成像相机的测量误差范围在±2%以内;使用 HG-C1400 激光位移传感器对金属板材的位移进行测量,测量范围为±200 mm。图 1 所示为激光热成形实验平台。

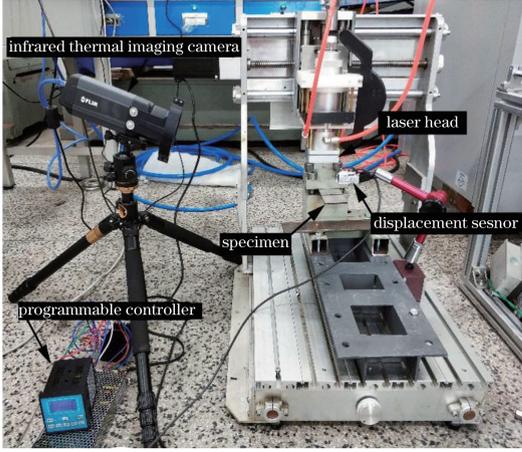


图 1 激光成形实验平台

Fig. 1 Experimental set-up of laser forming

### 3 数值模型

#### 3.1 模型假设

选用 ABAQUS 有限元软件作为分析工具,采用热力学间接耦合非线性有限元分析方法实现激光弯曲成形过程中温度场和变形场的仿真。为了简化计算,做出如下假设:环境温度保持在 25 ℃;板材为各向同性;忽略板材的重力;板材无预弯曲及残余应力;忽略塑性变形过程中产生的热量以及相变潜热;考虑成形过程中的对流与辐射;材料服从 Von-Mises 屈服准则。

#### 3.2 热成形有限元理论

激光加热成形过程中涉及温度快速升高及温度快速降低的过程,温变过程遵循傅里叶定律。板材中瞬态热传导方程为

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + g = \rho c T, \quad (1)$$

式中: $T$  为温度; $\rho$  为板材的密度; $k$  为热导率; $g$  为内热源强度,在激光成形过程中  $g=0$ 。

整个加工过程分为加热与冷却两部分,在板材上表面激光以热流密度的形式作用于辐照区域,热流密度  $Q$  服从高斯函数分布,即

$$Q = \frac{2PA}{\pi R^2} e^{-\left(\frac{2r^2}{R^2}\right)}, \quad (2)$$

式中: $P$  为激光输出功率; $A$  为金属板材对激光的吸收系数; $e$  为激光光斑中心的能量密度; $R$  为激光

能量密度衰减到  $e^{-2}$  时的半径; $r$  为激光束内某一点与光斑中心的距离。

冷却方式为自然冷却,通过对流与辐射方式散热,其中对流与辐射换热的边界条件为

$$q_c = h_c(T - T_e), \quad (3)$$

$$q_r = h_r(T^4 - T_e^4), \quad (4)$$

式中: $q_c$  为对流换热量; $q_r$  为辐射换热量; $h_c$  为表面对流换热系数; $h_r$  为表面辐射换热系数; $T$  为金属板表面温度; $T_e$  为环境温度。为了提高数值模拟的精度,考虑了板材的热物理参数(膨胀系数、比热容、密度、热导率)与力学性能参数(弹性模量、屈服强度、泊松比)随温度的变化。

由于变形加工过程中不存在外力的影响,板材仅受温度载荷的作用<sup>[16]</sup>,因此激光扫描过程中的弹塑性变形服从 Von-Mises 屈服准则,其应力-应变本构方程为

$$\{d\sigma\} = [D^{ep}]\{de\} - [C^{th}][M][\Delta T], \quad (5)$$

式中: $[D^{ep}]$  为热弹塑性刚度矩阵; $[C^{th}]$  为热刚度矩阵; $[M][\Delta T]$  分别为温度形函数与温度变化量; $d\sigma$  与  $de$  分别为应力增量与应变增量。

在有限元仿真过程中,将温度载荷作为条件转化为相应的节点力。对于各向同性材料而言,其节点力可表示为

$$\{F^{th}\} = \sum \int_V [B]^T \frac{E \cdot \alpha_{th} \cdot \Delta T}{1 - 2\mu} \{\delta\} dV, \quad (6)$$

式中: $E$  为材料的弹性模量; $[B]$  为应变位移关系矩阵; $\mu$  为泊松比; $V$  为体积域; $\alpha_{th}$  为材料的线膨胀系数; $\delta$  为位移量。

图 2 所示为激光热弯曲加工过程示意图,加工过程中金属板材的一端被固定,另一端自由,激光束沿板材中心线进行加热。

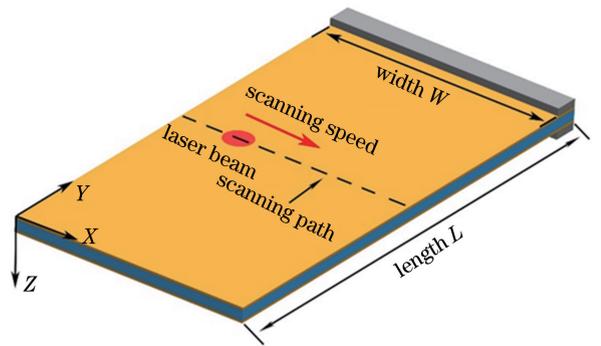


图 2 激光成形过程示意图

Fig. 2 Schematic of laser forming process

#### 3.3 数值模拟验证

图 3 所示为激光加工过程中的特征点示意图,

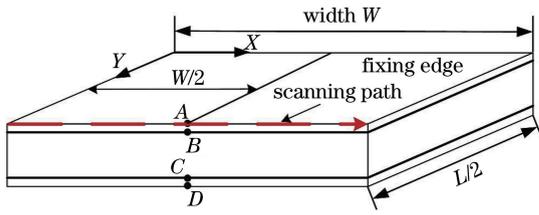


图 3 沿扫描线的特征点示意图

Fig. 3 Special points along the scanning line

A、D 分别为板材上下表面的中心点，B、C 分别为

表 3 激光成形实验工艺参数

Table 3 Experimental parameters of laser forming

No.	Laser power $P/W$	Scanning speed $v/(mm \cdot s^{-1})$	Spot diameter $D_1/mm$	Size $L \times W \times H /$ ( $mm \times mm \times mm$ )	Number of scanning
Case 1	750	20	6	$100 \times 50 \times 3$	1
Case 2	750	15	6	$100 \times 50 \times 3$	1
Case 3	850	20	6	$100 \times 50 \times 3$	1
Case 4	1000	20	6	$100 \times 50 \times 3$	1

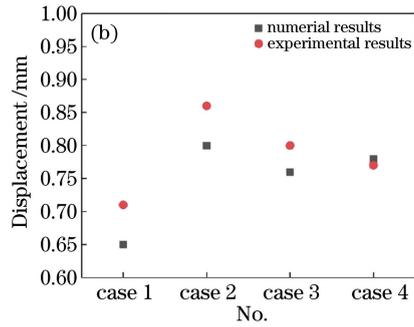
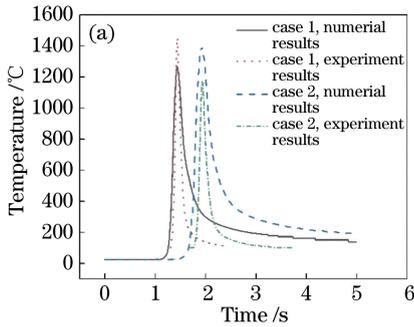


图 4 数值模拟与实验结果的比较。(a) A 点温度；(b)自由端中点处的位移

Fig. 4 Comparison between numerical simulated and experimental results.

(a) Temperature of point A; (b) displacement of the free end midpoint

## 4 分析与讨论

### 4.1 温度场分析

图 5(a)所示为在  $P = 650 \text{ W}$ ,  $v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $D_1 = 6 \text{ mm}$  工况下图 3 所示各点的温度变化历史。在 1.3 s 左右,上表面中心点(A)与不锈钢-低碳钢

上交界处(B)出现的最高温度分别为  $880.2 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $559.2 \text{ }^\circ\text{C}$ , 相对温差为 36.5%; 经过 0.2 s 后, 不锈钢-低碳钢下交界处(C)与板材下表面中心点(D)达到的最高温度分别为  $212.3 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $211.1 \text{ }^\circ\text{C}$ , 相对温差为 0.57%。光斑直径小, 热影响区域小, 因此光斑辐射区域内的温度迅速上升, 周围大量冷态材料的存

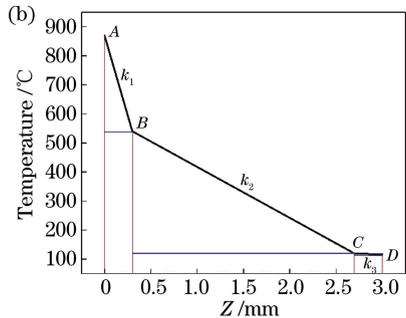
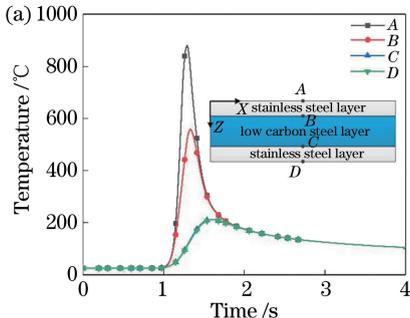


图 5 加热路径上各点温度变化的历史。(a)温度变化；(b)温度梯度

Fig. 5 Temperature changes of each point on the heating path. (a) Temperature variation; (b) temperature gradient

在使热量迅速扩散,因此加热区温度呈骤增骤降的现象。

图 5(b)所示为光斑中心到达 A 点时,厚度方向的温度梯度分布, $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 分别表示直线 AB、BC、CD 的斜率。首先,与低碳钢相比,不锈钢的热导率较低,温度降低的速率大,温度梯度最大;其次,由于中间层低碳钢的厚度相对较大,热量在厚度方向的传导致使低碳钢下表面温度降低的幅度大,但温度降低的趋势较上层不锈钢弱,温度梯度较上层不锈钢层小;当热量传导至 CD 两点时温差最小,温度梯度也最小。因此,在不锈钢-低碳钢-不锈钢三层复合板中形成的温度梯度各不相同,并且  $k_1 > k_2 > k_3$ 。

图 6 所示为激光束移动至加热线起始、中间与末端位置时的瞬态温度分布,图 7 所示为加热路径上钢板上下表面及交界面上的峰值温度分布。在加

热起始端与终止端温度变化剧烈,板材中间部分的温度分布较为稳定。由于不锈钢与低碳钢热导率的差异,上下表面与上交界面间的温度梯度明显。在扫描线起始端,由于激光光源不稳定,热量分布不均匀,且板材温度为室温,故而温升速度快。当光斑沿加热路径移动至 5 mm 处时,板材表面温度趋于稳定,在距离加热路径末端 3 mm 处,上表面的最高温度从 865.8 °C 跃至 959.9 °C,温度变化率为 10.9%。这是因为光斑在沿加热路径移动过程中,前端热量不断向后方流动,对后方冷却材料起到了持续加热的作用,导致热量不断积累;而在加热路径末端,热量传导的主要方式变为对流与辐射,热量在末端积聚,导致加热路径末端的温度升高。加热路径上温度分布不均匀是板材绕 Y 轴发生纵向弯曲的重要原因。

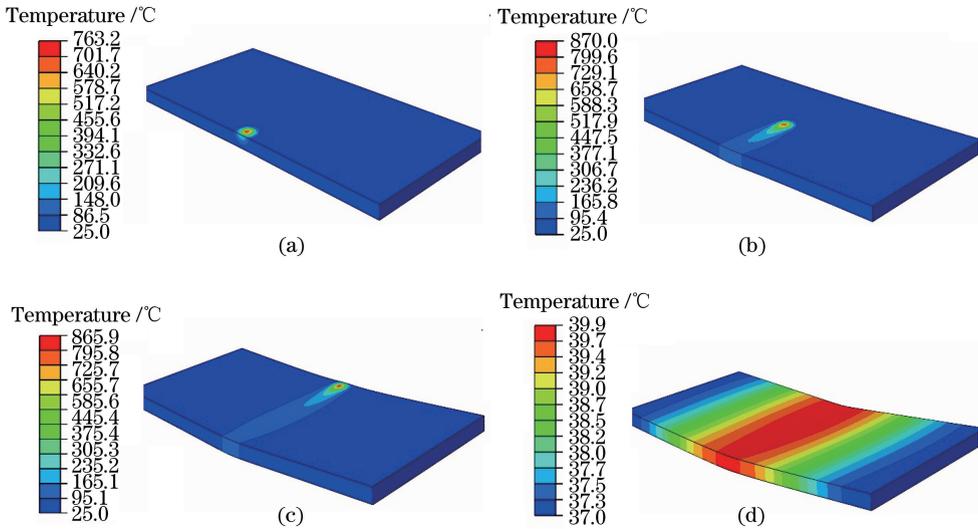


图 6 加热路径上板材上表面的温度分布。(a)起始;(b)中间;(c)末端;(d)冷却后

Fig. 6 Temperature profiles of top surface when the laser beam moves. (a) At the entering end; (b) at the middle end; (c) at the exiting end; (d) after cooling

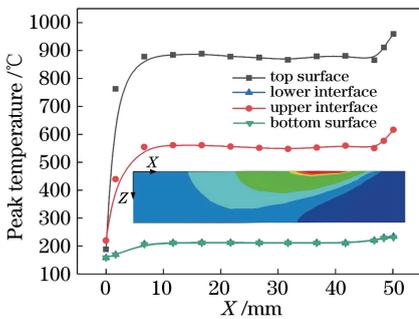


图 7 加热路径上板材各界面处峰值温度的变化

Fig. 7 Variation of peak temperature at each interface along heating path

#### 4.2 板材弯曲的机理分析

复合板材层间温差的存在使得热应力分布不均

匀,图 8 为 A、B、C、D 各特征点的应力、应变变化历史。将加热过程分为 I、II 两个阶段,冷却过程为第 III 阶段。第 I 阶段为塑性拉伸过程,激光光斑到达中心点之前,前端材料受热膨胀,推动周边冷态材料沿扫描线向两侧运动,激光能量沿加热路径向后流动,在中心点产生拉应力,并且拉应力逐渐增大。在 1 s 左右,A、B 两点处的拉应力先后达到最大值(分别为 81.5 MPa 和 97.1 MPa),并开始发生拉伸塑性应变;光斑继续向板材中心点运动,中心点附近材料的温度逐渐升高,并发生膨胀变形,从而受到周围冷态材料的挤压,拉应力迅速减小并转化为压应力。在此过程中,A、B 两点虽然为压应力,但并未达到材料的屈服极限,因此变形形式仍为塑性拉伸

变形,在 1.2 s 左右压应力达到最大值(分别为 167.2 MPa和 176.7 MPa),此时 A、B 两点的拉伸应变达到最大值,分别为  $0.3 \times 10^{-3}$  和  $0.16 \times 10^{-3}$ ,由于上下表面温差较大,C、D 两点的温度低,此时尚未出现塑性变形。第 II 阶段为塑性压缩阶段,光斑移动至上表面中心处,中心点处所受压应力到达材料的屈服极限,屈服强度随温度升高急剧降低,并发生剧烈的塑性压缩应变。第 II 阶段完成后,A、B 两点的压应变达到最大值,分别为  $-7.01 \times 10^{-3}$  和  $-5.27 \times 10^{-3}$ ,C、D 两点则表现为热膨胀变形。第 III 为冷却阶段,光斑离开中心点后,上表面温度急剧

下降,加热区域的材料收缩,而此时下表面温度逐渐升高,故出现热膨胀变形,C、D 两点发生塑性拉伸变形。冷却结束后,上表面的塑性应变为  $-3.89 \times 10^{-3}$ ,下表面的塑性应变为  $0.79 \times 10^{-3}$ ,上下表面的塑性应变差为  $4.68 \times 10^{-3}$ ,板材发生朝向激光方向的弯曲变形。图 9 所示为冷却后厚度方向的残余应力分布,复合板层间的应力分布梯度大,上下不锈钢覆层的残余应力相差一个数量级,基层低碳钢中间层受压,压应力以中间层为对称面逐渐减小并转化为拉应力,下表面的拉应力最大,上表面受压有利于弯曲成形。

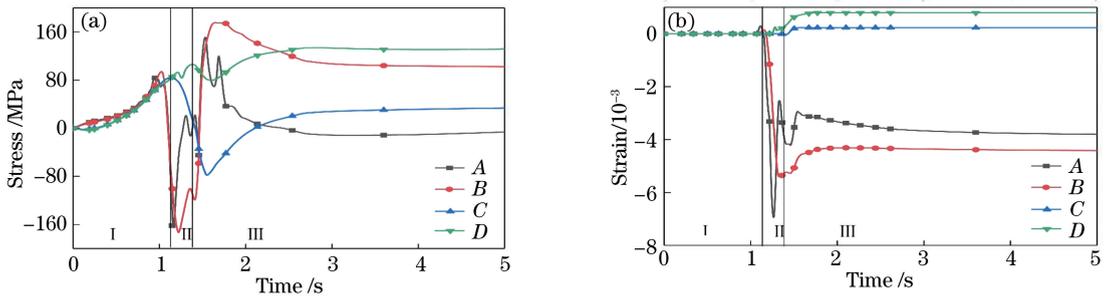


图 8 各个特征点在 Y 方向的应力、应变分布。(a)应力分布;(b)应变分布

Fig. 8 Distribution of stress and strain of each special point in Y-direction. (a) Stress distribution; (b) strain distribution

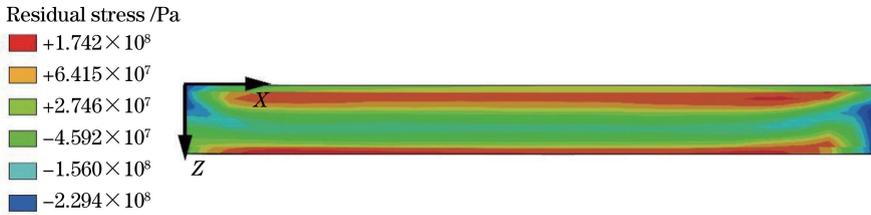


图 9 厚度方向的残余应力分布

Fig. 9 Distribution of residual stress in thickness direction

### 4.3 边缘效应的机理分析

在激光加热过程中,沿加热线方向的温度分布使板材上的点受到压应力,从而产生了压缩应变,进而产生垂直于加热路径的弯曲变形,图 10 所示为加热路径方向上的层间应变与形变。板材上下表面的温差使各金属层间的压缩应变存在差异,上下表面的平均应变分别为  $-1.37 \times 10^{-3}$  和  $-0.55 \times 10^{-3}$ ,上下表面的应变差为  $-0.82 \times 10^{-3}$ ,板材发生了绕 Y 轴朝向激光方向的纵向弯曲变形。

在扫描方向上,弯曲角与位移的变化趋势相吻合,弯曲角与位移均呈先减小后增大的特点。最大的弯曲角与位移均出现在板材末端,最小的弯曲角与位移出现在板材中心处,弯曲角与自由端位移沿加热路径的变化说明在成形过程中金属板不仅发生了绕 X 轴的横向弯曲,还产生了绕 Y 轴的纵向弯

曲。主要原因有三:一,温度沿加热线分布不均匀,加热起始端温度低于准态温度,板材末端由于热量的积累,温度最高;二,板内约束的非对称特性使得板材内部的冷态材料产生的约束作用从中间向两端逐渐减小;三,板材厚度方向上存在的温差使得板材上表面产生的塑性压缩变形大于下表面,所以弯曲角与位移形成了由板材中心向两端逐渐增大的趋势。图 11 所示为复合板边缘效应示意图。

### 4.4 边缘效应控制策略研究

综合以上研究可以发现,虽然激光光斑在加热线上匀速移动,但热量在移动路径上的分布并不均匀。为了改善扫描线上温度分布不均匀的现象,采用了重复扫描的方式。图 12 所示为在功率  $P = 750 \text{ W}$ ,  $v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $D_1 = 6 \text{ mm}$  的工况下,复合板上下表面的峰值温度分布、弯曲角相对变化  $\Delta\alpha$ 、上

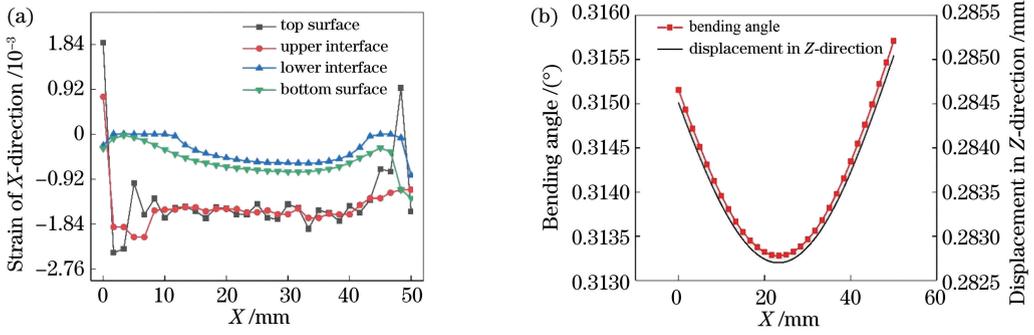


图 10 复合板在加热路径上的应变与形变。(a) X 方向的应变;(b)弯曲角和位移

Fig. 10 Strain and deformation of laminated plate along the heating path.

(a) Strain in X-direction; (b) bending angle and displacement

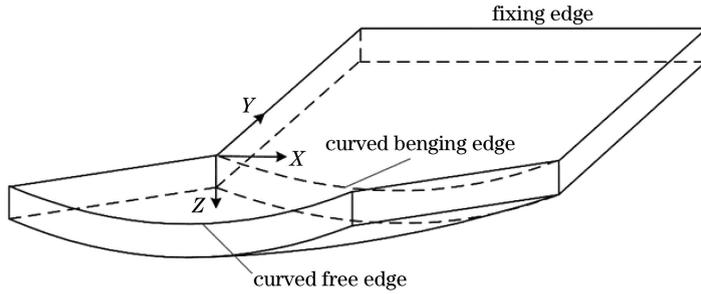


图 11 复合板边缘效应示意图

Fig. 11 Schematic of edge effect of composite plate

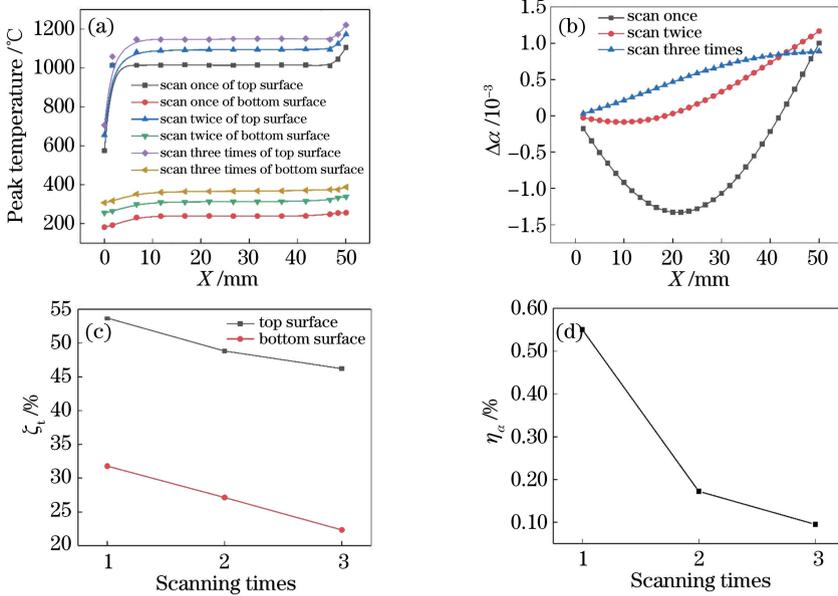


图 12 扫描次数与成形精度的关系。(a)峰值温度分布;(b)  $\Delta\alpha$ ;(c)  $\zeta_t$ ;(d)  $\eta_\alpha$

Fig. 12 Relation between scanning times and forming accuracy.

(a) Distribution of peak temperature; (b)  $\Delta\alpha$ ; (c)  $\zeta_t$ ; (d)  $\eta_\alpha$

下表面温度相对变化率  $\zeta_t$ 、弯曲角相对变化率  $\eta_\alpha$  随扫描次数的变化。其中： $\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_0$ ， $\alpha_i$  为加热路径上各点的弯曲角， $\alpha_0$  为加热起始点的弯曲角； $\zeta_t = (T_{\max} - T_{\min}) / T_{\text{ave}}$ ， $T_{\max}$  为面上的最高温度， $T_{\min}$  为面上的最低温度， $T_{\text{ave}}$  为平均温度； $\eta_\alpha =$

$(\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) / \alpha_{\text{ave}}$ ，其中  $\alpha_{\max}$ 、 $\alpha_{\min}$ 、 $\alpha_{\text{ave}}$  分别为扫描线上弯曲角的最大值、最小值与平均值。经过三次重复扫描后，上下表面的温度变化率分别从 53.7%、31.8% 降至 46.2%、22.3%，自由端弯曲角沿加热路径的相对变化率从 0.55% 降至 0.095%，成形精度得

到提升。

在激光加工过程中,板材的弯曲变形主要取决于温度场。为了减小加热线上弯曲角的变化,本文通过进一步改善复合板上的温度分布来平衡板内的机械约束力,提出了如图 13 所示的新扫描策略,其中策略 1 作为对照组。激光束均在  $L/2$  处沿宽度

方向移动,用“ $a-b$ ”的形式表示扫描次数与加热顺序,其中“ $a$ ”表示扫描次数,“ $b$ ”表示加热顺序,箭头表示激光束的移动方向。仿真参数如下:激光功率  $P$  为 750 W,扫描速度  $v$  为  $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,激光直径  $D_1$  为 6 mm,板材尺寸为  $100 \text{ mm}\times 50 \text{ mm}\times 2 \text{ mm}$ 。

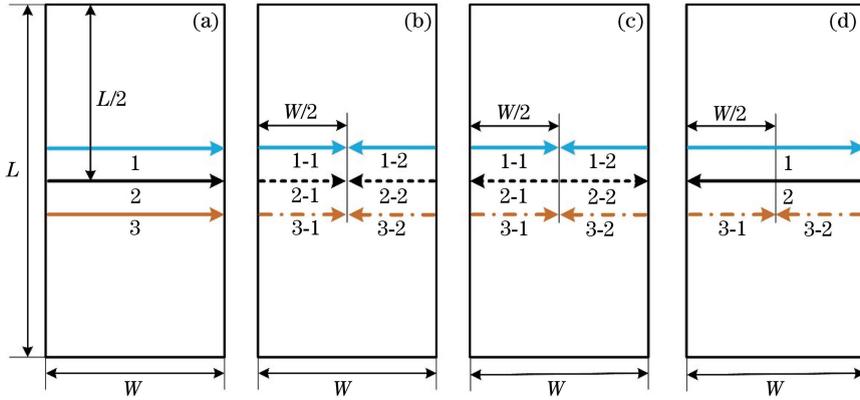


图 13 新的扫描策略示意图。(a)扫描策略 1;(b)扫描策略 2;(c)扫描策略 3;(d)扫描策略 4  
Fig. 13 Schematics of new scanning strategies. (a) Scan strategy 1; (b) scan strategy 2;  
(c) scan strategy 3; (d) scan strategy 4

图 14 所示为 4 种扫描策略下复合板上表面峰值温度与弯曲角度沿加热线的分布。扫描策略 2 可以在板材两端得到较其他扫描策略更低的温度。与扫描策略 1、2 相比,扫描策略 3、4 在一定程度上改善了板材前端热量低与末端热量积累的现象,而且扫描策略 3 下复合板表面温度的相对变化率最低,为 17.7%,表面温度相对变化率降低了 36%。扫描

策略 1 形成的弯曲角最大,策略 4 形成的弯曲角最小,扫描策略 1、2、3、4 形成的弯曲角度相对变化率  $\eta_a$  分别为 0.95%、0.74%、0.75%、0.41%。与其他扫描策略比,扫描策略 4 的成形精度最高,沿加热线弯曲角的相对变化率降低了 51.8%。图 15 所示为新扫描策略下的成形试样,可见,加工前后试样表面并未发生熔化现象。

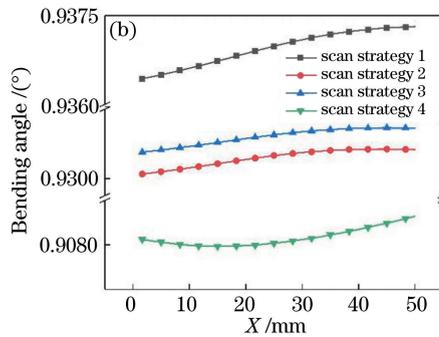
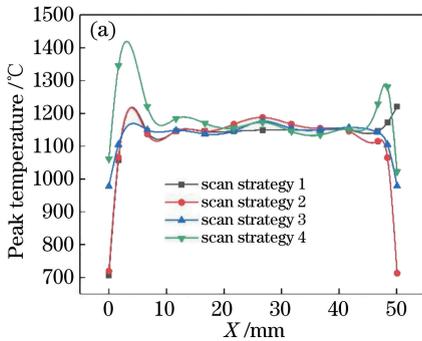


图 14 不同扫描策略下复合板上表面峰值温度与弯曲角沿加热线的分布。(a)峰值温度;(b)弯曲角

Fig. 14 Peak temperature on the top surface and bending angle along the heating line at different scanning strategies.  
(a) Peak temperature; (b) bending angle

## 5 结 论

基于 ABAQUS 有限元软件,以移动激光束为热源,建立了 0Cr18Ni9/Q235B 复合板激光弯曲的数值模型,并进行了实验验证。对激光直线扫描作用下的层间温度场以及应力应变场的空间分布和时

间变化历史进行分析,进一步阐释了复合板材弯曲成形机理及边缘效应机理,在此基础上提出了边缘效应的控制策略,主要得到以下结论:1)复合板层间温度梯度导致层间的塑性应变差,从而引起板材发生朝向激光方向的弯曲,同时不锈钢与低碳钢热导率的差异使层间的温度梯度加剧,有利于弯曲角度

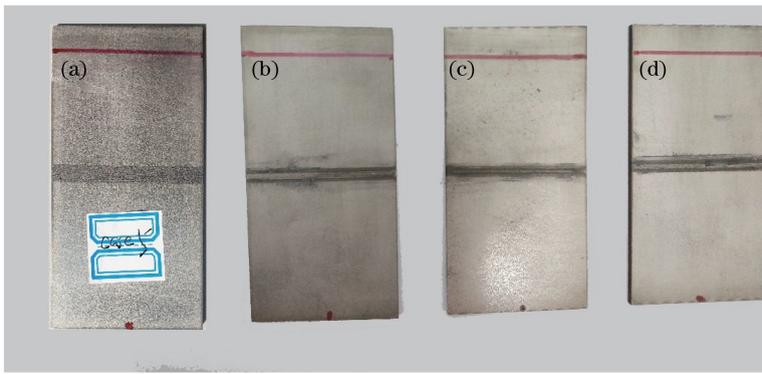


图 15 不同扫描策略下的成形试样。(a)加工前;(b)扫描策略 2;(c)扫描策略 3;(d)扫描策略 4

Fig. 15 Forming samples at different scan strategies. (a) Before processing; (b) scan strategy 2; (c) scan strategy 3; (d) scan strategy 4

的增大,提高了成形能力。2)加热路径上温度及板内约束的非均匀化分布是造成边缘效应的主要因素,弯曲角沿加热路径呈现两端大、中间小的特征。3)通过合理规划重复扫描加热的路径及顺序可大幅降低加热线上弯曲角的相对变化率,提高成形精度;策略 1 获得的弯曲角度最大,策略 3 获得的表面温度的相对变化率最低,策略 4 的成形精度最高。4)重复加热的方式可以改善边缘效应,但扫描时间间隔、激光功率等参数对板材成形角度及表面质量的影响还有待进一步研究。

### 参 考 文 献

[1] Yu G, Anderson R J, Maekawa T, et al. Efficient simulation of shell forming by line heating [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(10): 2349-2370.

[2] Chen D J, Wu S C, Li M Q. Deformation behaviours of laser curve bending of sheet metals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148(1): 30-34.

[3] Bao J C, Yao Y L. Analysis and prediction of edge effects in laser bending[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123(1): 53-61.

[4] Che Jamil M S, Sheikh M A, Li L. A study of the effect of laser beam geometries on laser bending of sheet metal by buckling mechanism [J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(1): 183-193.

[5] Shi M X, Chen S J, Hu Q X, et al. Effect of interlayer on microstructures and properties of 304 stainless steel/Nb joints by laser welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1102005.  
石铭霄, 陈书锦, 胡庆贤, 等. 中间层对 304 不锈钢/铌激光焊接头组织及性能的影响 [J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1102005.

[6] Li L, Yin F X, Nagai K. Progress of laminated

materials and clad steels production [J]. Materials Science Forum, 2011, 675/676/677: 439-447.

[7] Shen H, Shi Y J, Yao Z Q, et al. An analytical model for predicting the bending angle in laser straight line forming [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2006, 40(9): 1525-1528.  
沈洪, 石永军, 姚振强, 等. 板料激光直线扫描弯曲角度的解析模型 [J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(9): 1525-1528.

[8] Shi Y, Hu J, Dong C. Analysis of the geometric effect on the forming accuracy in laser forming [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(10): 1792-1800.

[9] Hu J, Xu H B, Dang D X. Modeling and reducing edge effects in laser bending [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(11): 1989-1996.

[10] Li Z H, Wang X Y. Numerical simulation of warping deformation on metal composite plate during laser bending [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(5): 115-121.  
李紫慧, 王续跃. 金属复合板激光弯曲过程中翘曲变形数值模拟 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(5): 115-121.

[11] Shi Y J, Yang M, Mou P L, et al. Numerical investigation on undesirable deformation of metal plate in laser forming [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(11): 1825-1829.  
石永军, 杨民, 贲平利, 等. 金属板材激光热成形非期望变形的数值模拟研究 [J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1825-1829.

[12] Shen H, Hu J, Yao Z Q. Analysis and control of edge effects in laser bending [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(3): 305-315.

[13] Shi Y J, Lu X F, Yi P, et al. Effect of heating paths on strain distribution of plate in laser forming [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing

- Technology, 2013, 66: 515-521.
- [14] Shi Y J, Zhang C, Sun G D, et al. Study on reducing edge effects by using assistant force in laser forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 227: 169-177.
- [15] Shi Y J, Zhang C, Sun G D, et al. Study on reducing edge effects by using assistant force in laser forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 227: 169-177.
- [16] Guo X Z, Liu W, Wang C K et al. Numerical analysis of elastic-plastic deformation evolution and fracture behavior in tensile process of laser lap welded 301L joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45 (12): 1202003.  
郭相忠, 刘伟, 王昌坤, 等. 301L 搭接激光焊接接头拉伸过程的弹塑性演变及断裂数值分析[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1202003.