

不锈钢-碳钢层合板激光弯折区的热传导特性

马绪鹏 王续跃 徐文骥 郭东明

(大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要 金属层合板复层与基层物理特性存在差异,激光弯折区特性异于单一板材。为研究层间热传导特性,选取不锈钢-碳钢层合板进行激光弯曲实验。观察分析不同累积线能量下不锈钢层合板弯折区的金相组织,利用 IPP 图像处理软件划分热影响区,分析层间热传导特性。层间热导率差异使得层间热传导速率减缓,碳钢层热影响区呈现扁平抛物线梯度分布,并于下界面处出现热累积现象。层间热传导特性通过影响层间温度梯度及塑性变形区域实现层合板不同角度的弯曲。热传导特性研究为提高层合板激光弯曲精度与质量提供理论和实验依据。

关键词 激光弯曲; 金属层合板; 热传导; 金相组织

中图分类号 TG161; TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.101401

Heat Conduction Characteristics of Stainless Steel-Carbon Steel Laminated Sheet Bending Position

Ma Xupeng Wang Xuyue Xu Wenji Guo Dongming

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

Abstract Due to difference in the physical property between the base layer steel and the cover layer steel, laser bending area characteristics of the dissimilar metal laminated plates are different with the single sheet. Metallographic structures of laser bending areas in stainless steel-carbon steel laminated sheets under different accumulative line energy are analysed in order to study heat conduction mode between the layers. By using IPP image processing software to divide the heat-affected zone (HAZ), then energy transfer mode is analyzed. Heat transfer rate slows down because of thermal conductivity difference between the layers. Heat-affected areas present flat parabolic graded distribution in the mild carbon steel layer, and heat accumulation occurs on the lower surface. Bending angles of laminated sheets are determined by plastic deformation area and temperature gradient between the layers affected by heat conduction mode. Studies of heat conduction mode of stainless steel-carbon steel laminated sheets provide the basis of theory and experiment for better bending precision and quality.

Key words laser bending; laminated sheet; heat conduction; metallographic structure

OCIS codes 140.3535; 140.6810; 160.3900

1 引言

层状金属复合材料是一种新型的工程材料,它是利用轧制等技术手段使两种或两种以上物理、化学、力学性能不同的金属在界面上实现牢固的冶金结合,使其既保持各层金属各自原有的特性,又使其物理、化学、力学性能比单一金属更加优越^[1]。不锈钢-碳钢层合板是一种以基体(碳钢)和表层(不锈钢)通过轧制技术在结合面处形成牢固冶金结合的层状金属复合板材。它作为一种资源节约型产品,与不锈钢板相比可节约铬、镍元素 70%~80%,实现低成本和高性能完美结合,具有良好的经济效益,并有较高的强度、耐腐蚀性和良好的导热、导电性能^[2],已经广泛运用于化工、电力、机械、船舶等行业。

激光弯曲成形是一种较为新颖的激光加工技术,它通过利用高能激光束扫描板材表面形成非均匀温度场

收稿日期: 2013-05-24; 收到修改稿日期: 2013-05-29; 网络出版日期: 2013-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(50975041)

作者简介: 马绪鹏(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光弯曲成形方面的研究。E-mail: shuzhicheng@126.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等方面的研究。

E-mail: wbzzd@dlut.edu.cn(通信联系人)

所导致的热应力来实现板材塑性变形^[3],以得到预期形状。影响激光成形的因素主要分为三个方面,即能量参数、材料的热物理性能及力学性能、板材的几何参数。弯折区组织特性主要受到能量参数的影响,弯折区组织特性及热影响分布一直是国内外学者研究的重点,杨立军等^[4-8]分别对低碳钢与不锈钢单一板材弯折区组织特性进行了研究,Hu等^[7]研究 AISI304 不锈钢及 AISI1008 碳钢经 YAG 激光束照射 4 次后的表面组织结构,发现被加热的表面区域已再结晶,再结晶后的晶粒尺寸及方向与未加热的区域不同,弯折区热影响区(HAZ)分布可以通过组织分布清晰的显现出来,分布区域呈现“抛物线”形状。不锈钢-碳钢层合板碳钢层与不锈钢层物理特性(热导率、元素含量等)存在差异,同时激光弯曲过程中存在层间剪切应力,因此其热传导、分布形式及热影响区组织特性将异于单一板材。

目前,国内外学者对层合板的研究主要侧重于金属-陶瓷、铝-纤维、Al-SiC_p 等金属-非金属层合板激光弯曲规律与温度场数值模拟^[9-11],对异种金属层合板组织特性及热影响区分布的研究还较少。激光辐照板材表面,激光能量转换为热并在板材内部进行传导,板材组织发生变化。本文对激光弯曲后的不锈钢层合板的组织特性进行分析,确定层间热传导方式。

2 实验条件

实验材料为不锈钢-碳钢层合板,简称不锈钢层合板。尺寸规格为 100 mm×30 mm×1 mm。图 1 为不锈钢层合板的示意图,其表层为 0Cr18Ni9Ti 不锈钢,基层为 Q235A 低碳钢,主要化学成分及热物理力学参数如表 1、表 2 所示^[12]。

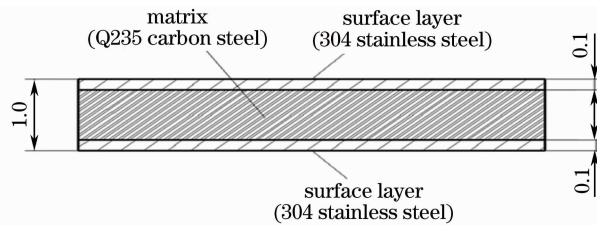


图 1 厚度 1.0 mm 不锈钢层合板示意图

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

表 1 不锈钢层合板化学成分(质量分数,%)

Table 1 Composition of stainless steel laminated sheet (mass fraction, %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Matrix (Q235A)	≤0.22	≤0.35	≤1.40	≤0.045	≤0.050	0	0
Surface layer (304)	≤0.07	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00~11.00	17.00~19.00

表 2 不锈钢层合板材料性能参数

Table 2 Characteristic parameters of stainless steel laminated sheet

Parameters	Matrix (Q235A)	Surface layer (304)
Density / (g/cm ³)	7.86	7.93
Melt point / °C	1400	1398~1454
Specific heat / [J/(kg·K)]	465	500
Heat conductivity / [W/(m·K)]	80.3	16.3
Coefficient of linear expansion / (10 ⁻⁶ /K)	10.6	17.2
Yield strength / MPa	235	205
Young's modulus / GPa	200~210	200

弯曲实验采用 JK701H 型脉冲 Nd:YAG 固体激光器,频率是 40 Hz,脉宽是 2 ms,光斑直径为 1 mm,单道扫描。为了防止不锈钢层合板表面氧化,将试件置于图 2 所示的装置中进行实验。盒子中充满流动的氩气,气压为 0.1 MPa。金相试样的制备包括切样、镶嵌、磨样、抛光等步骤。用体积分数为 4% 的硝酸酒精腐蚀碳钢层,放置 24 h 的浓王水(硝基盐酸)腐蚀不锈钢,在放大倍数为 20~1000 倍的共聚焦 MEF4 型显微镜下观察试样的组织形貌,用金相互动系统采集照片。

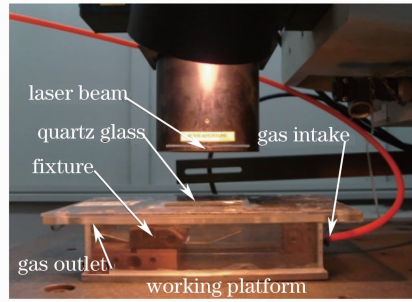


图2 激光弯曲实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of laser bending

激光弯曲层合板时,扫描路径附近组织受热尺寸发生变化,同时弯曲应力与层间剪切应力作用使得晶粒方向发生改变,热影响区组织呈现不同形态。利用 Image pro-Plus6.0 图像处理软件分析组织图像,以晶粒横截面积 S 、区域晶粒平均横截面积 S_m 等参数评价晶粒尺寸,根据热影响区组织、区域组织表征及晶粒尺寸划分热影响区,确定热在层合板内的传导方式与分布情况。

3 实验结果与分析

图3为弯曲前层合板的组织照片,以水平方向为 X 方向,厚度方向为 Y 方向。由3(a)可以看出,复合界面沿轧制方向近似为直线,低碳钢的组织主要为大量的铁素体与极少量的珠光体。界面附近铁素体晶粒尺寸差异较大,最大晶粒横截面积 $S_{max}=4376 \mu\text{m}^2$,区域晶粒平均横截面积 $S_m=565 \mu\text{m}^2$;中间位置晶粒尺寸均匀,多为等轴晶粒, $S_m=441 \mu\text{m}^2$ 。图3(b)为不锈钢层的组织,主要为奥氏体晶粒,奥氏体晶粒细小;界面处有一条宽度为 $10 \mu\text{m}$ 的铁素体带,同时,界面被一条黑色的窄带覆盖,其成分为轧制过程引入的氧化铬、氧化镁等氧化物。

在板材几何参数与物理特性不变的条件下,能量参数将决定弯曲角度。选取 $\alpha_1=19.2^\circ$ 、 $\alpha_2=43.5^\circ$ 、 $\alpha_3=85.6^\circ$ 三种代表性弯曲角度,观察分析热影响区组织特性,研究小角度、中角度及大角度下热在层合板弯折区的传导方式与分布特性。为综合分析不同能量参数下的能量输入对层合板弯曲特性的影响,引入累积线能量的概念。线能量为单位长度材料上的热输入,累积线能量 E_{ALE} 定义为多次扫描的线能量累加,其表达式为

$$E_{ALE} = NP/V. \quad (1)$$

它综合反映了扫描次数 N 、激光功率 P 和扫描速度 V 对弯曲角度的影响^[13]。

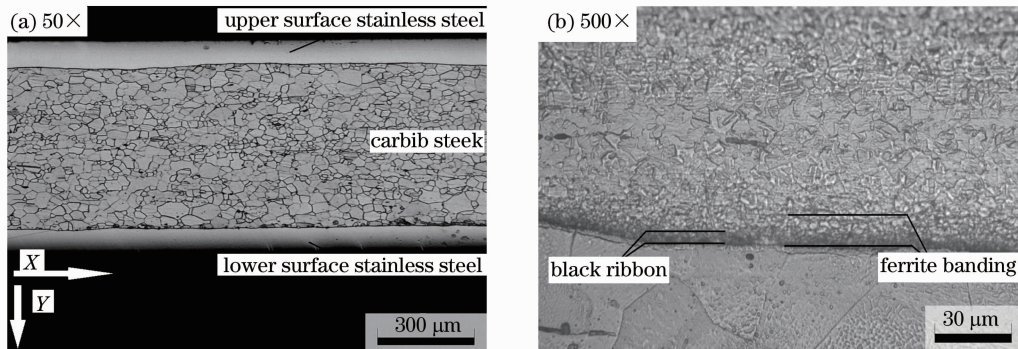


图3 激光弯曲前层合板组织。(a) 碳钢层组织;(b) 不锈钢层组织

Fig. 3 Microstructure of laminate before laser bending. (a) Microstructure of carbon steel;
(b) microstructure of stainless steel

3.1 $E_{ALE}=2 \text{ J/mm}$ 层合板弯折区的热传导特性

激光功率为 120 W ,扫描速度为 600 mm/min ,光斑直径为 1 mm ,扫描次数为 10 , $E_{ALE}=2 \text{ J/mm}$ 时,可以得到一个较小的角度 $\alpha_1=19.2^\circ$,如图4(a)所示。

激光辐照板材表面,热量由温度较高的不锈钢层向碳钢层热传导。热传导路径上的晶粒受热生长,晶粒

横截面积增大。利用 IPP 软件选出生长晶粒,晶粒生长区即为热影响区,如图 4(a)所示。热影响区组织仍为铁素体,宽约为 1.5 mm,深度约为 $210\ \mu\text{m}$ 。在此能量参数下,激光弯曲相当于对板材进行退火热处理,铁素体晶粒生长,尺寸增大, $S_m=604\ \mu\text{m}^2$,相比激光作用前晶粒增大 7%。 Y 方向上,晶粒长大区下方的组织相比于弯曲前变化不大,表明当热量经由不锈钢层、晶粒长大区传导到此区域时,温度远低于共析温度。上表面不锈钢层发生塑性变形,界面出现轻微褶皱,奥氏体晶粒在弯曲应力的作用下变为细长条状,界面处的窄条铁素体带变宽,最宽处达到 $20\ \mu\text{m}$,如图 4(b)所示。下表面不锈钢层组织基本没有变化。

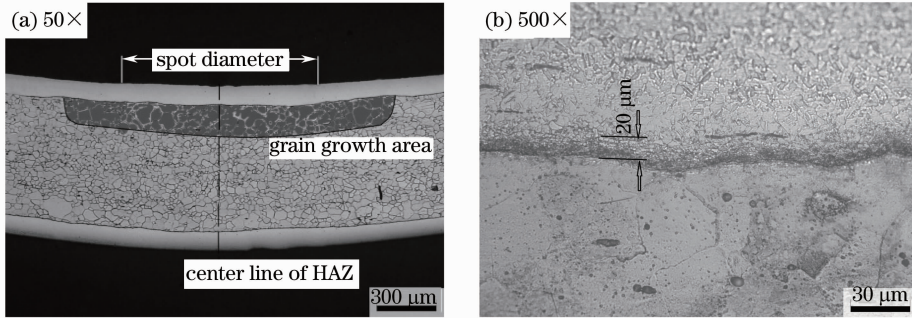


图 4 $\alpha_1=19.2^\circ$ 层合板组织。(a) IPP 分析结果;(b) 上表面不锈钢层组织

Fig. 4 Microstructure of laminate for $\alpha_1=19.2^\circ$. (a) Result of IPP; (b) microstructure of upper surface stainless steel

碳钢层热量是由不锈钢层在大于光斑直径的宽度范围传导而来,而非直接受到激光热冲击,同时不锈钢热导率与碳钢层热导率存在差异(碳钢 $80.3\ \text{W/m}\cdot\text{K}^{-1}$ 大于不锈钢 $16.3\ \text{W/m}\cdot\text{K}^{-1}$),一定程度减缓了热传导的速率,导致碳钢层无法形成大温度梯度,热影响区深度较浅,热影响区分布近似为扁平状抛物线区域,区域面积为 $86372\ \mu\text{m}^2$ 。

3.2 $E_{\text{ALE}}=5.25\ \text{J/mm}$ 层合板热的传导特性

激光功率为 $140\ \text{W}$,扫描速度为 $800\ \text{mm/min}$,光斑直径为 $1\ \text{mm}$,扫描次数为 30, $E_{\text{ALE}}=5.25\ \text{J/mm}$,形成弯曲角度 $\alpha_2=43.5^\circ$,如图 5(a)所示。扫描次数增加,扫描路径单位体积内输入的热量增加,温度升高,奥氏体生长,晶粒尺寸变大,铁素体带变宽,如图 5(b)所示。上表面不锈钢层厚度由 $100\ \mu\text{m}$ 增厚到 $140\ \mu\text{m}$,

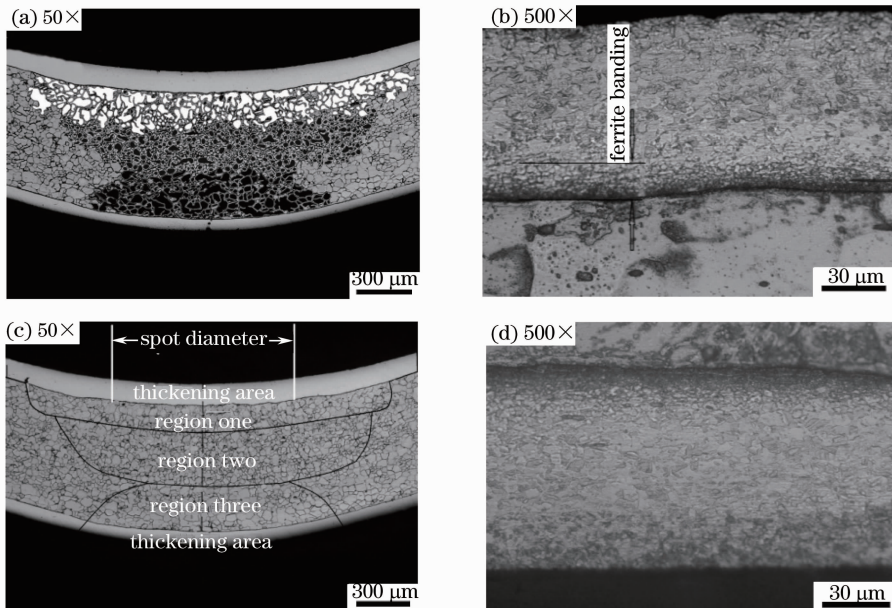


图 5 $\alpha_2=43.5^\circ$ 层合板组织。(a) IPP 分析结果;(b) 上表面不锈钢层组织;

(c) 碳钢层热影响区组织;(d) 下表面不锈钢层组织

Fig. 5 Microstructure of laminate for $\alpha_2=43.5^\circ$. (a) Result of IPP; (b) microstructure of upper surface stainless steel; (c) microstructure of mild carbon steel HAZ; (d) microstructure of lower surface stainless steel

宽度约为 2 mm。

依据金相组织及晶粒尺寸,根据 IPP 软件将热影响区划分为三个区域,如图 5(a)、(c)所示,靠近上界面区域为塑性变形区,中间区域为晶粒细化区,下界面区域为晶粒生长区。热量由不锈钢层传导到区域一,热流密度大,组织达到塑性状态,在热与塑性变形力的共同作用下,晶粒被拉长,指向弯曲中心部位。热量传导到区域二时,热流密度降低,温度随之降低,晶粒得到细化。区域三为晶粒生长区, $S_m = 966 \mu\text{m}^2$ 。当热传导到下表面不锈钢层时,热流密度仅在弯折区中心区域满足奥氏体晶粒生长的温度条件,奥氏体晶粒尺寸增大,不锈钢层弯折区中心区域出现增厚现象,如图 5(d)所示。

热量由上表面不锈钢向碳钢层传导时,由于不锈钢热导率较小,热量无法迅速传导到碳钢层,热量沿不锈钢层传导并向区域一进行热传导,使得区域一形状为宽为 1.9 mm,深度仅为 $145 \mu\text{m}$ 的扁平抛物线区域。热量 Y 向传导,碳钢热导率虽然由于温度梯度存在差异,但差异较小,对热传导速率影响可忽略不计。区域二抛物线轮廓弧度增大,开口宽度减小至 1.5 mm,深度增加为 $245 \mu\text{m}$ 。当热量由区域三向下表面不锈钢层传导时,低热导率的不锈钢延缓了热量由区域三向下表面不锈钢层的传导,热在下界面处出现热累积,且在 X、Y 方向进行传导,呈现为开口向下的抛物线区域。

弯曲过程中,扫描路径上局部区域间歇受热,热量首先在碳钢层上界面处累积传导,形成热影响区;多次扫描后,区域热流密度升高至一定水平,热影响区深度增加,形成新的热影响区域。最终,弯折区横截面热影响区呈现扁平抛物线梯度分布。相比于 $\alpha_1 = 19.2^\circ$ 层合板,此弯曲角度下热影响区域面积增大,碳钢层热影响区域面积是其 6.5 倍。

3.3 $E_{\text{ALE}} = 8.75 \text{ J/mm}$ 层合板的热传导特性

激光功率 140 W,扫描速度 800 mm/min,光斑直径为 1 mm,扫描次数 50, $E_{\text{ALE}} = 8.75 \text{ J/mm}$ 时,弯曲角度 $\alpha_3 = 85.6^\circ$ 。能量参数增加,细小的奥氏体晶粒生长为窄条状大晶粒,如图 6(a)所示,不锈钢层厚度增加,扫描路径上的厚度增加到 $170 \mu\text{m}$;扫描路径外的热影响区不锈钢层厚度增加到 $130 \mu\text{m}$,如图 6(b)所示。弯曲过程中,处于高温状态的上界面附近组织受到弯曲应力及界面剪切应力,致使上界面出现褶皱现象,但没有出现裂纹、空隙等缺陷。

碳钢层组织在热与弯曲应力的作用下呈现不同的组织形态,如图 6(b)、(c)所示。区域一为脱碳区,受热温度达到共晶温度以上,碳原子由碳钢间隙扩散到不锈钢层^[14],形成脱碳层,区域晶粒粗大,晶粒朝向弯

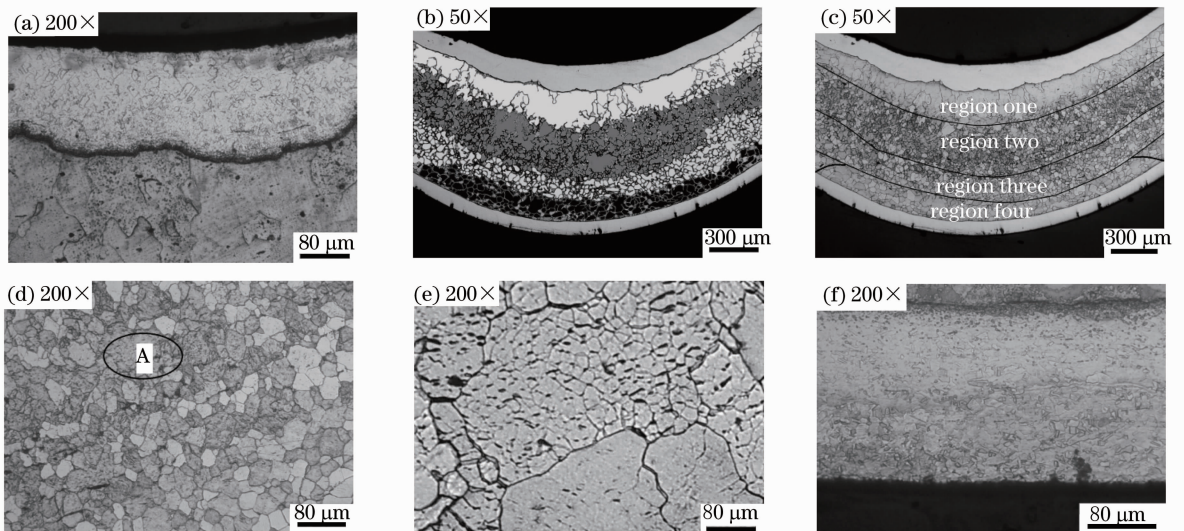


图 6 $\alpha_3 = 86.5^\circ$ 层合板组织。(a) 上表面不锈钢层组织;(b) IPP 分析结果;(c) 低碳钢热影响区组织;

(d) 区域二碳钢组织;(e) 区域二 A 区组织放大图;(f) 下表面不锈钢层组织

Fig. 6 Microstructure of laminate for $\alpha_3 = 86.5^\circ$. (a) Microstructure of upper surface stainless steel; (b) result of IPP; (c) microstructure of mild carbon steel HAZ; (d) mild carbon steel microstructure of region two; (e) mild carbon steel microstructure enlarged view of area A for region two; (f) microstructure of lower surface stainless steel

折区中心。脱碳层区域中心位置深度达到 $210\ \mu\text{m}$, 两侧深度逐渐减小至 $150\ \mu\text{m}$ 。区域二为动态再结晶区, 大尺寸铁素体晶粒结晶后形成 $4\sim 10\ \mu\text{m}$ 细小铁素体晶粒, 晶间分布渗碳体, 如图 6(d)、6(e) 所示。完全动态再结晶最大深度为 $340\ \mu\text{m}$, 中心两侧区域深度减小, 动态再结晶程度亦逐渐降低。区域三为深度约为 $160\ \mu\text{m}$ 的晶粒细化区。层间热导率差异使得热量于下界面处累积, 晶粒受热时间增长, 尺寸增大, 形成区域四所示的晶粒生长区。下表面的不锈钢层组织主要为长大的奥氏体晶粒, 伴有孪晶分布。铁素体带消失, 如图 6(f) 所示, 只在弯折区中心区域有轻微增厚现象。

脉冲激光光斑能量分布为准高斯分布, 且热流方向性明显, 扫描路径发生脉冲重叠, 单一金属板材在弯曲过程中的温度梯度和塑性变形区随弯曲过程发生变化, 弯折区横截面最终形成脉冲式的作用点, 表现为抛物线梯度分布。层合板由于复层的存在, 且不锈钢热导率小于碳钢热导率, 当热量由上表面不锈钢层向碳钢层传导时, 热传导速率相对单一碳钢板降低, 使得碳钢层界面热影响区域为扁平的抛物线区域; 当热量由碳钢层向下表面不锈钢层传导时, 热量在下界面处出现热累积, 形成开口向下的抛物线区域。碳钢层热影响区整体呈现抛物线梯度分布, 相对于单一金属板, 抛物线弧度较小, 呈扁平状。

$E_{\text{ALE}}=2\ \text{J}/\text{mm}$ 时, 热量仅在上表面附近传导, 且温度较低, 塑性变形区仅发生在不锈钢层, 碳钢层热影响区面积较小, 层间温度梯度较小, 形成 19.2° 的弯曲角度; $E_{\text{ALE}}=5.25\ \text{J}/\text{mm}$ 时, 热影响区内温度升高至共析温度以上, 不锈钢层与碳钢层界面处发生塑性变形, 板材热膨胀, 材料屈服应力下降明显, 层间温度梯度增大, 形成 43.5° 的弯曲角度; $E_{\text{ALE}}=8.75\ \text{J}/\text{mm}$ 时, 板材出现热透性, 层间温度梯度虽有所降低, 但热影响区面积增大, 参与塑性变形的金属量增大, 弯曲角度达到 85.6° 。

4 结 论

激光照射不锈钢-碳钢层合板表面, 板材发生弯曲, 依据弯折区金相组织及晶粒尺寸划分热影响区, 通过各区域的组织形态与分布分析热传导特性, 建立不锈钢层合板激光弯曲过程中热传导与弯曲角度关系, 得到以下结论:

- 1) 激光扫描层合板, 能量在 X、Y 方向进行热传导传递, 能量传递路径上的晶粒尺寸与方向发生改变。由于不锈钢层的热导率小于碳钢层的热导率, 层间热传导速率减缓, 使得碳钢层受到热冲击程度减小, 热影响区为扁平的抛物线区域; 当热量由碳钢层向下表面不锈钢层传导时, 下界面处出现热累积现象, 形成开口向下的抛物线区域。
- 2) 碳钢层热影响区呈现抛物线梯度分布, 相对于单一金属板材热影响区分布, 抛物线弧度较小, 呈扁平状。
- 3) 随着累积线能量参数增加, 层合板弯折区组织变化层数增加, 热影响区面积加大, 塑性变形金属量增加, 在层间温度梯度机理的作用下弯曲角度随之增大。

参 考 文 献

- 1 Liu Xiaotao, Zhang Ting'an, Cui Jianzhong. Technology of clad metal production and its latest progress[J]. Materials Review, 2002, 16(7): 41-43.
- 2 刘晓涛, 张延安, 崔建忠. 层状金属复合材料生产工艺及其新进展[J]. 材料导报, 2002, 16(7): 41-43.
- 3 Hou Yingwu. The FEM Simulation of Stainless Clad Strip in Cool-Rolled Process[D]. Yanshan; Yanshan University, 2003. 1-4.
- 4 侯英武. 不锈钢复合板冷轧过程有限元模拟[D]. 燕山: 燕山大学, 2003. 1-4.
- 5 J A Vaccari. The Promise of Laser Forming[M]. American: American Machinist, 1993. 36-38
- 6 Yang Lijun. Study on Technology of Laser Induced Dieless Forming of Stainless Steel Sheet[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. 94-98.
- 7 杨立军. 不锈钢薄板激光诱导无模成形技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007, 94-98.
- 8 J Dutta Majumdar, A K Nath, I Manna. Studies on laser bending of stainless steel[J]. Materials Science and Engineering, 2004, 385(1-2): 113-122.
- 9 Gareth Thomson, Mark Pridham. Material property changes associated with laser forming of mild steel components[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 118(1-3): 40-44.
- 10 Z Hu, M Labudovic, H Wang, et al.. Computer simulation and experimental investigation of sheet metal bending using

- laser beam scanning[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(4): 589–607.
- 8 Hong Shen, Zhenqiang Yao. Study on mechanical properties after laser forming[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(1): 111–117.
- 9 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.
- 10 Christian Carey, Wesley J, Cantwell, *et al.*. Towards a rapid, non-contact shaping method for fibre metal laminates using a laser source[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2010, 47(5-8): 557–565.
- 11 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(1-2): 172–180.
- 12 Yang Jiabin, Zhang Likun. Handbook of steel and iron material [M]. Beijing: Chinese Standard Press, 2007, 75–77/141–148.
杨家斌, 张丽坤. 钢铁材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2007. 75–77/141–148.
- 13 Li Liqun, Chen Yanbin, Zhang Liwei. Laser bending characteristics of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(6): 842–848.
李俐群, 陈彦斌, 张立伟. Ti-6Al-4V 的激光弯曲特性[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(6): 842–848.
- 14 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, 2010, 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.