

# 层合板激光弯折区过渡层元素扩散及材料性能

张 攀 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** 分别对厚度为 1.0, 1.5, 2.0 mm 的不锈钢-碳钢层合板进行激光弯曲试验。采用金相显微镜、电子探针和扫描电镜能谱仪对激光弯折区的元素扩散现象进行分析;采用纳米压痕试验测得过渡层附近的纳米硬度及弹性模量分布,对过渡层处纳米硬度、弹性模量和屈服强度的变化进行了分析。结果表明,弯折区过渡层处元素沿板厚方向连续稳定扩散,Fe、Ni、Cr 元素扩散范围相近,1.0, 1.5, 2.0 mm 厚层合板的过渡层厚度分别增加了 2.5, 3.5, 3.0  $\mu\text{m}$ 。元素扩散促进了过渡层的冶金结合,保证了层合板过渡层的材料性能。

**关键词** 激光技术;激光弯曲;层合板;过渡层;元素扩散;材料性能

**中图分类号** TN249

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0702001

## Element Diffusion and Material Properties in Transition Layer of Bending Zone in Laminated Plates

Zhang Pan 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, Liaoning 116024, China*

**Abstract** Laser bending experiments are performed on stainless steel-carbon steel laminated plates with thickness of 1.0, 1.5, and 2.0 mm. The element diffusion in the transition layer of the bending zone is analyzed by means of metallographic microscope, electron microprobe and energy dispersive spectrometer, the nano-indentation tests are used to obtain the nano-hardness and elastic modulus of the transition layer, and the variation in elastic modulus, nano-hardness and yield strength is analyzed eventually. The results demonstrate that the element in the transition layer diffuses continuously and steadily along the plate thickness, the diffusion ranges for Fe, Ni, and Cr are similar, and the transition layer thickness for 1.0, 1.5, and 2.0 mm thick laminated plates increases by 2.5, 3.5, and 3.0  $\mu\text{m}$ , respectively. Good material properties in transition layer is ensured by element diffusion in the bending zone, and favorable metallurgical bond in laminated plates is also improved.

**Key words** laser technique; laser bending; laminated plates; transition layer; element diffusion; material properties

**OCIS codes** 140.3538; 140.3390; 160.3900; 290.1990

## 1 引 言

不锈钢-碳钢层合板是以不锈钢为覆层、碳钢为基层,利用爆炸、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的。作为层状金属复合板材,它既保持了碳钢的高强度、高热导率等性能,又具有不锈钢的耐高温、耐腐蚀性能;同时作为一种资源节约型产品,与同规格不锈钢板相比,铬、镍元素使用量可节约 70%~80%,成本仅为不锈钢板的 1/3 左右,实现了低成本与高性能的完美结合,具有良好的经济效益,已广泛应用于油气储运、电子器件、航空航天、汽车船舶等各个行业<sup>[1-3]</sup>。

激光弯曲成形是一种无模具、无外力的非接触式热态累积成形技术,利用高能激光束扫描板材表面形成

**收稿日期:** 2016-02-01; **收到修改稿日期:** 2016-03-14

**基金项目:** 国家自然科学基金(51375073, 51321004)

**作者简介:** 张 攀(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光弯曲成形方面的研究。E-mail: 478211865@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。

E-mail: wbzdz@dlut.edu.cn(通信联系人)

非均匀温度场所导致的热应力来实现板材塑性变形,通过合理控制输入能量、规划扫描路径可以得到预期形状<sup>[4]</sup>。激光弯曲成形后材料的成形质量、弯折区微观组织和材料性能一直都是国内外学者研究的重点。微观组织方面,刘顺洪等<sup>[5]</sup>发现钛合金板经激光作用后,弯折区出现相变区及晶粒长大区,并对弯折区显微组织及硬度进行了研究。马绪鹏等<sup>[6-7]</sup>对不锈钢-碳钢层合板激光弯折区微观组织热传导特性及增厚现象机理及规律进行了研究。材料性能方面,Carey等<sup>[8]</sup>研究了金属复合材料激光弯曲成形特性及增强型相对成形过程的影响,并与单一板材进行试验对比,通过试验发现复合板激光弯曲成形的加工参数应受到严格控制,否则复合板易遭到破坏。曹晓莲等<sup>[9]</sup>研究了 YG20/45# 钢的激光焊缝组织与元素扩散,发现硬质合金与钢中的元素发生了相互扩散,使整个接头实现了良好的冶金结合。

不同于单一板材及金属-非金属复合材料<sup>[10-11]</sup>,不锈钢-碳钢层合板结合界面处存在一定厚度的过渡层。目前,关于结合界面处过渡层的分析多集中于激光焊接方面<sup>[12]</sup>,对层合板激光弯折区过渡层的分析相对较少,有限元建模分析时过渡层力学性能参数也无处可查,一般将过渡层近似为理想平面或者利用插值法获得数值,误差相对较大<sup>[11]</sup>。本文对激光弯曲前后层合板过渡区域的组织成分及元素扩散现象进行研究,分析过渡层的力学性能参数,特别是硬度、弹性模量及屈服强度的变化,为层合板激光弯曲成形的质量控制提供参考,同时为有限元建模分析中过渡层的参数优化提供依据,以提高有限元模拟结果的准确性。

## 2 试验材料与检测条件

### 2.1 试验材料

试验材料为双面不锈钢-碳钢层合板(以下简称层合板),由大连理工大学机械工程学院工程力学系制备,制备方法为爆炸加轧制,上下覆层为 304 不锈钢,中间基层为 Q235A 碳钢,主要化学成分及物理力学性能参数如表 1、2 所示<sup>[13]</sup>。层合板厚度规格有 1.0,1.5,2.0 mm 三种,用剪板机将板材裁剪为所需尺寸。弯曲试验所用材料规格为 100 mm×50 mm×1.0 mm、100 mm×50 mm×1.5 mm 和 100 mm×50 mm×2.0 mm 三种。试验前先用细砂纸打磨表面去除油污、氧化膜及其他杂质,再用无水乙醇清洗表面,烘干备用。

表 1 不锈钢层合板化学成分(质量分数,%)

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

	C	Si	P	S	Mn	Cr	Ni
Surface layer (304)	≤0.07	≤1.00	≤0.035	≤0.03	≤2.00	17.00-19.00	8.00-11.00
Matrix (Q235A)	0.14-0.22	≤0.30	≤0.045	≤0.05	0.30-0.65	—	—

表 2 不锈钢层合板性能参数

Table 2 Characteristic parameters of stainless steel laminated plate

Parameter	Surface layer (304)	Matrix (Q235A)
Density /( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	7.93	7.86
Melting point / $^{\circ}\text{C}$	1398-1454	1400
Yield strength /MPa	205	235
Young's modulus /GPa	204	200-210
Specific heat /( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ )	500	465
Heat conductivity /( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	16.3	80.3
Coefficient of linear expansion /( $10^{-6} \text{K}^{-1}$ )	17.2	10.6

### 2.2 弯曲试验与材料检测条件

激光弯曲试验所用激光器为 JK701H 型 Nd:YAG 脉冲激光器(GSI Lumonics,英国),频率为 40 Hz,脉宽为 2 ms,试验采用单道往复扫描方式。为防止不锈钢层过热氧化,侧吹辅助氩气,气体压力约为 0.1 MPa,具体试验参数及结果如表 3 所示。激光参数按照典型槽型舱壁件所需的弯曲角度及试验所用层合板的弯曲角度综合确定,采用正离焦设置。金相试样需要用 4%(质量分数)硝酸酒精溶液腐蚀碳钢层,用王水腐蚀不锈钢层,在放大倍数为 20~1000 的共聚焦 MEF4 型显微镜下观察试样的组织形貌,利用金相互动系统采集图像。电子探针(EPMA)试样需要首先利用 Q150T ES 型镀膜仪对抛光后的试样进行镀金操作,导电胶粘接可使试样表面与金属夹具形成通路以增强其导电性;再利用二次电子分辨率为 6 nm 的 EPMA-1600 型电

子探针对过渡层元素扩散现象进行分析;最后采用 SUPAR™55 型场发射扫描电镜能谱仪测定过渡区域的组织成分,利用纳米压痕试验获得层合板过渡区域硬度与弹性模量分布。

表 3 激光弯曲试验参数及结果

Table 3 Parameters and results of laser bending experiment

Sample size /(mm×mm×mm)	Power /kW	Scanning speed /(mm·min <sup>-1</sup> )	Defocus distance /mm	Impulse frequency /Hz	Number of scanning	Bending angle /(°)
100×50×1.0	140	400	10	40	40	69.1
100×50×1.5	140	400	10	40	40	41.5
100×50×2.0	140	400	10	40	40	22.2

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 过渡层及其结合机制

图 1(a)为王水腐蚀后的层合板金相组织图。从图中可以看出,层合板结合质量良好,结合界面无缺陷产生。上层不锈钢组织主要为奥氏体晶粒,由于板材轧制过程中发生了动态再结晶,奥氏体晶粒尺寸较小。不锈钢层靠近界面附近存在一条宽度为(10±1) μm 的深色区域,为不锈钢和碳钢结合处的过渡区域。图 1 (b)为电子探针系统采集的结合界面处微观形貌图。从图 1 可明显看出,层合板在结合界面处存在一定厚度的过渡层,过渡层是基层和覆层金属中元素相互扩散的区域,其质量是评价弯曲成形质量的主要依据。目前研究认为过渡层的结合机制主要为冶金结合,主要在界面物理接触阶段、界面化学作用阶段以及界面元素扩散阶段完成<sup>[14]</sup>。过渡层的组织成分及性能不同于覆层和基体,其材料性能参数在手册中无法查到,因此有必要对过渡层进行试验分析。

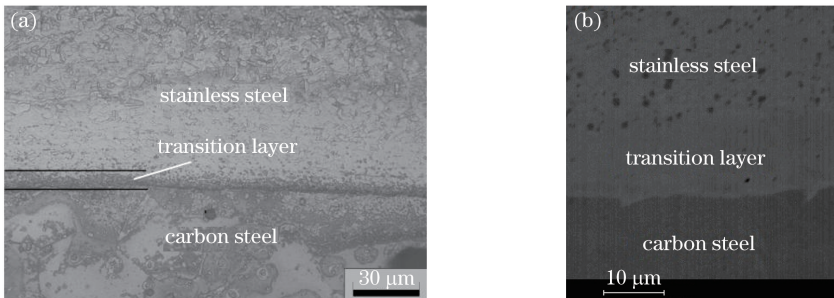


图 1 过渡层显微图像。(a) 王水腐蚀后层合板金相组织图(500×); (b) 电子探针系统下的显微图像(5000×)

Fig. 1 Microscopic images of transition layer. (a) Metallographic structure of laminated plate corroded with nitrohydrochloric acid (500×); (b) microscopic image under electronic probe system (5000×)

#### 3.2 过渡层元素扩散分析

过渡层的元素分布是影响层合板结合性能的重要指标。为了解其元素分布特征,采用电子探针线扫描检测未腐蚀的层合板在厚度方向的宏观元素,绘制 Fe、Ni、Cr 和 C 元素分布曲线,结果如图 2 所示。由于碳钢中不含 Cr 和 Ni 元素,Cr 元素相对计数强度从不锈钢中的均值 200 过渡到碳钢中的 0;Ni 元素相对计数强度从不锈钢中的均值 70 过渡到碳钢中的 0;Fe 元素相对计数强度从碳钢中的均值 1100 过渡到不锈钢中的均值 800,由于不锈钢和碳钢中 C 元素含量不高,当元素的原子序数小于 12 时,电子探针灵敏度较差,所以 C 元素曲线波动较大,可信度不高。根据元素曲线的变化,可以看出不锈钢和碳钢中的元素沿板厚方向发生了扩散,在结合界面处形成了一段元素相互扩散的过渡区域,各元素在过渡区域的扩散是连续的,且存在一定的规律性;过渡层元素分布均匀,没有发生大量元素的偏聚现象。

为进一步研究层合板激光弯曲前后过渡层的元素扩散现象,采用精度较高、误差相对较小的电子探针进行面扫描。分别对厚度为 1.0、1.5、2.0 mm 的层合板在激光弯曲前后的过渡层进行面扫描分析。由于过渡层厚度较小,电子探针试验放大倍数较高,弯曲前后试件相对位置和图像采集位置无法完全一致,所以上下两图同一横坐标处的数据是不对应的(图 3)。为了分析上下两图曲线所反映的规律,采用相同宽度区域对比的方法。图 3(a)、(b)分别为 2.0 mm 厚的层合板在激光弯曲前、后经面扫描元素分析的结果图。图 3(a)

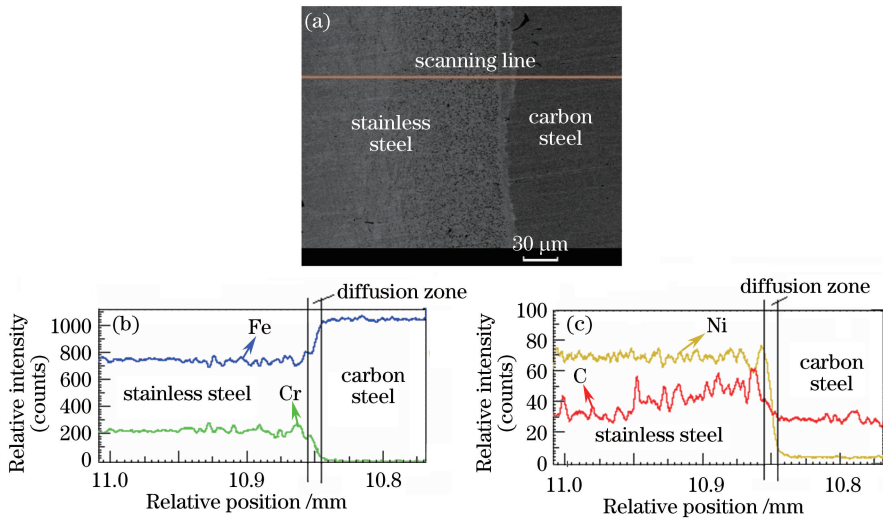


图 2 层合板(1.0 mm 厚)线扫描数据。(a) 扫描路径；(b) Fe、Cr 元素分布曲线；(c) C、Ni 元素分布曲线  
 Fig. 2 Line scanning data of laminated plate (1 mm thick). (a) Scanning path; (b) distribution curves of Fe and Cr; (c) distribution curves of C and Ni

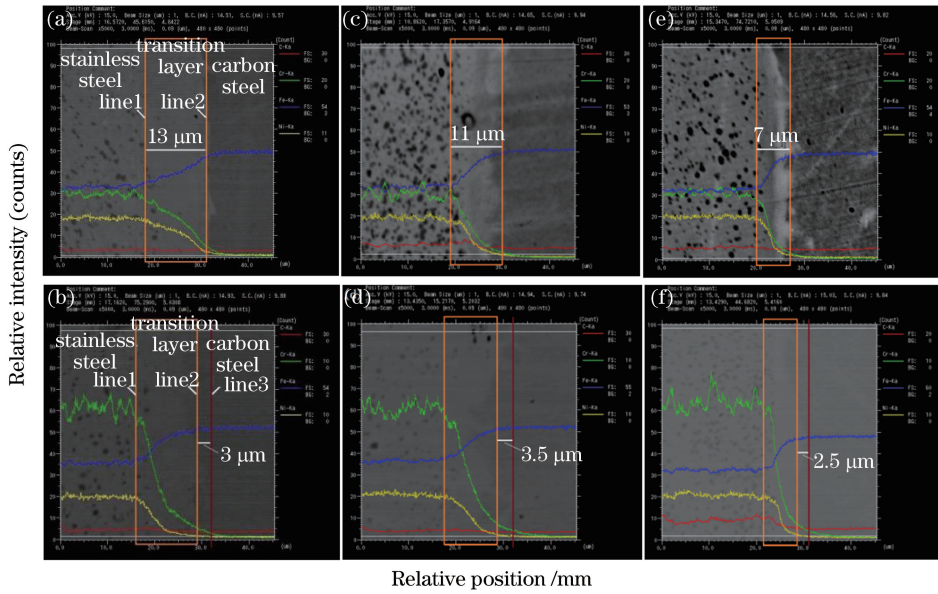


图 3 弯折区过渡层电子探针面扫描数据。(a)(b) 2.0 mm 厚层合板弯曲前、后元素分布规律图；  
 (c)(d) 1.5 mm 厚层合板弯曲前、后元素分布规律图；(e)(f) 1.0 mm 厚层合板弯曲前、后元素分布规律图  
 Fig. 3 EPMA plane scanning data of transition layer in bending zone. (a)(b) Element distribution curves of 2.0 mm thick laminated plate before and after bending; (c)(d) element distribution curves of 1.5 mm thick laminated plate before and after bending; (e)(f) element distribution curves of 1.0 mm thick laminated plate before and after bending

中线 1 是曲线开始明显上升或下降时的位置,线 2 是曲线变化趋于平稳的位置,线 1 与线 2 即为过渡层的边界,两线之间的方框区域即为综合考虑曲线变化及微观形貌所得到的过渡层厚度(经三次测量获得其均值)。图 3(b)中线 1 是曲线开始明显上升和下降时的位置,线 3 是曲线变化趋于平稳的位置,两线之间的区域即为层合板激光弯曲后的过渡层厚度。

分析试验数据可得,层合板厚度为 1.0 mm 时,过渡层厚度从 7  $\mu\text{m}$  增加至 9.5  $\mu\text{m}$ ;层合板厚度为 1.5 mm 时,过渡层厚度从 11  $\mu\text{m}$  增加至 14.5  $\mu\text{m}$ ;层合板厚度为 2.0 mm 时,过渡层厚度从 13  $\mu\text{m}$  增加至 16  $\mu\text{m}$ 。层合板激光弯曲后过渡层厚度均有所增加,同时微观图中过渡区域边界变得模糊分散。这是因为激光弯曲时层合板受热使温度上升,由原子扩散原理可知,当外界温度升高到使原子自身能量大于某一个临

界值时,原子就能从一个位置迁移到相邻的位置,从而发生扩散<sup>[15]</sup>。经过单道多次扫描,持续稳定的能量输入使层合板过渡层的元素得到了充分扩散。由于 Fe、Cr、Ni 的原子半径相近,其扩散方式主要为置换扩散,因此它们在过渡层内的扩散范围十分接近。以 Cr 元素为例,图 4(a)、(b)分别为激光弯曲作用前、后过渡层内 Cr 元素的分布云图(图中左侧为不锈钢,右侧为碳钢)。从图中可以直观地看到,激光弯曲作用前元素扩散分界线明显,近似为直线。而激光弯曲作用后,元素分界线变得不规则,Cr 元素进一步向碳钢层扩散,扩散距离有所增加;同时激光弯曲后结合界面附近不锈钢中 Cr 元素相对含量有所增加,这与一定温度下 304 不锈钢中晶界处富 Cr 碳化物的析出有关<sup>[16]</sup>。

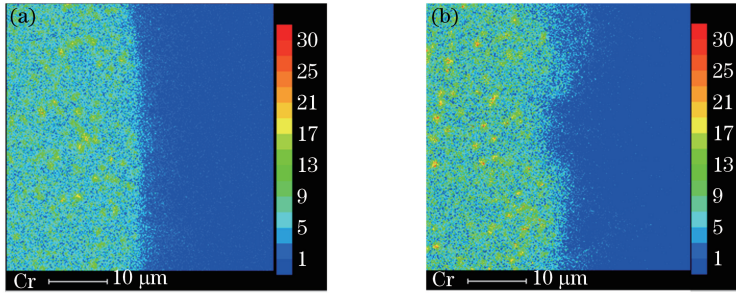


图 4 过渡层 Cr 元素分布云图。(a) 弯曲前;(b) 弯曲后

Fig. 4 Distribution of Cr near transition layer. (a) Before laser bending; (b) after laser bending

由菲克第一定律可知<sup>[15]</sup>

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (1)$$

式中  $J$  为扩散量,  $D$  为扩散系数,  $\frac{\partial C}{\partial x}$  为结合界面两侧成分的浓度梯度。扩散系数的表达式为

$$D = D_0 \exp(-\Delta E/kT), \quad (2)$$

式中  $D_0$  为扩散常数,  $\Delta E$  为扩散激活能,  $k$  为气体常数,  $T$  为绝对温度。

结合(1)、(2)式分析可得,激光弯曲多道扫描过程中产生的持续高温以及高温下金属的塑性变形,必然会使结合界面两侧金属的温度升高;扩散的温度、时间以及两侧元素存在的浓度梯度都会直接或间接影响扩散系数和激活能,从而促进结合界面两侧元素的扩散,因此激光弯曲后过渡层厚度会相应增加。对元素扩散的研究表明不锈钢层合板在结合界面处形成了冶金结合的过渡层,元素扩散使两金属板中原子相互作用机会增加,有利于促进过渡层的冶金结合,对提高层合板结合强度、提升层合板性能有很大作用。

### 3.3 过渡层材料性能分析

通过能谱仪对厚度为 2.0 mm 的层合板进行激光弯曲后各区域元素成分及含量的分析,数据如表 4 所示。通过纳米压痕试验得到层合板硬度及弹性模量变化曲线,如图 5 所示。

由表 4 可知,过渡层各组分含量介于表层不锈钢与基层碳钢之间,各组成元素稳定扩散。结合舍夫勒相图<sup>[17]</sup>可计算推知过渡层的主要成分为奥氏体、马氏体和铁素体。在钢材料中,Ni 元素对碳的亲合力较弱,为非碳化物形成元素,主要溶于铁素体中形成合金铁素体,可提高塑变抗力,产生固溶强化效果,适当提高钢的强度和韧性;Cr 元素对碳的亲合力较强,为碳化物形成元素,主要与碳结合形成特殊的碳化物,如  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 、 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  等,可适当提高钢的硬度、耐磨性以及稳定性。

表 4 能谱仪结果分析(质量分数,%)

Table 4 Analysis of energy dispersive spectrometer results (mass fraction, %)

Measuring position	Element content				
	Fe	Cr	Ni	Si	Rest
Stainless steel	70.24	17.66	9.63	0.36	Rest
Transition layer	85.02	8.63	5.18	0.18	Rest
Carbon steel	97.64	0.11	0.09	0.06	Rest

由图 5 可知,不锈钢层平均纳米硬度为 4.61 GPa,平均弹性模量为 202.41 GPa,过渡层(图 5 中方框区域)平均纳米硬度为 5.12 GPa,平均弹性模量为 204.67 GPa,碳钢层平均纳米硬度为 2.31 GPa,平均弹性模量为 202.28 GPa。过渡层内纳米硬度较高,平均纳米硬度比不锈钢高 11%,最高为 5.31 GPa,向两侧逐渐降低。原因是两金属结合界面处发生塑性变形产生加工硬化,且有特殊碳化物形成;同时由于激光弯曲作用后冷却速度较快,过渡层内产生马氏体组织,而马氏体的硬度、强度均较高,所以过渡层处硬度较高,而过渡层靠近碳钢侧出现一定的脱碳区导致硬度有所下降。由文献[18]可知,钢的硬度与屈服强度成正比,所以过渡层处硬度升高的同时屈服强度也相应提高;过渡层处平均弹性模量略高,但总体变化不大,这是因为不锈钢与碳钢本身的弹性模量非常接近,且弹性模量是一个对组织不敏感的力学性能指标,合金化、热处理、塑性变形等对弹性模量的影响很小。综上所述,从某种程度上来说,合理参数下的激光弯曲成形相当于对层合板进行了一次热处理,使得过渡层厚度相应增加,硬度和屈服强度增大,弹性模量变化不大。激光弯曲作用不仅不会使层合板产生分层开裂等缺陷,反而有利于提高层合板过渡层的综合性能和结合强度。同时,层合板过渡层处的组织成分、元素扩散规律以及材料参数等为有限元建模分析中过渡层的参数优化提供了一定的理论基础及试验依据。

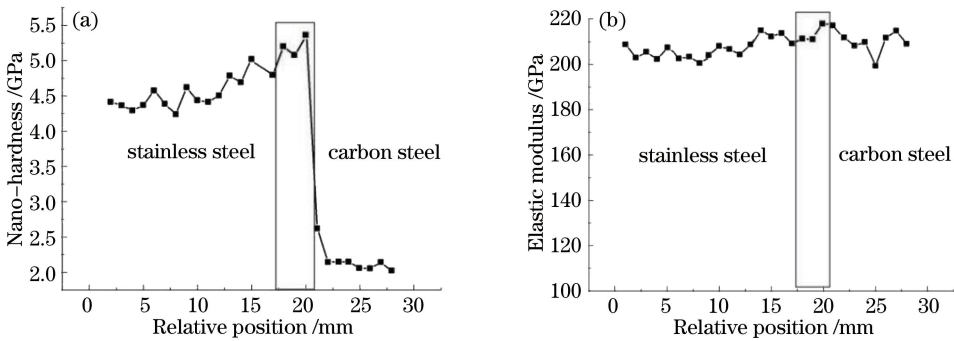


图 5 过渡层附近(a)纳米硬度及(b)弹性模量变化曲线

Fig. 5 Variation curves of (a) nano-hardness and (b) elastic modulus near the transition layer

## 4 结 论

当激光功率为 140 W、扫描速度为 400 mm/min、正离焦量为 10 mm、扫描次数为 40 次时,分别对厚度为 1.0,1.5,2.0 mm 的层合板进行激光弯曲试验,对样件进行分析检测得到以下结论。

1) 激光弯曲后各组成元素沿板厚方向进一步发生扩散,过渡层厚度有所增加,1.0 mm 厚层合板的过渡层厚度增加了 2  $\mu\text{m}$ ,1.5 mm 厚层合板的过渡层厚度增加了 3.5  $\mu\text{m}$ ,2.0 mm 厚层合板的过渡层厚度增加了 3  $\mu\text{m}$ 。过渡层厚度的增加有利于促进层合板的冶金结合,提升层合板过渡层的材料性能。

2) 层合板弯折区过渡层沿板厚方向元素扩散稳定,无偏聚现象;Fe、Cr、Ni 元素扩散范围接近,1.0 mm 厚层合板沿板厚方向扩散范围为 9.5  $\mu\text{m}$ ,1.5 mm 厚层合板为 14.5  $\mu\text{m}$ ,2.0 mm 厚层合板为 16  $\mu\text{m}$ 。

3) 以 2.0 mm 厚层合板为例,由于塑性变形及特殊碳化物的形成,弯折区过渡层的平均纳米硬度为 5.12 GPa,高于不锈钢的 4.61 GPa,增大了 11%,屈服强度相应增大;弯曲后过渡层平均弹性模量变化不大。

## 参 考 文 献

- Lee J E, Bae D H, Chung W S, *et al.*. Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187-188(3): 546-549.
- Liu Xiaotao, Zhang Tingan, Cui Jianzhong. Technology of clad metal production and its latest progress[J]. Materials Review, 2002, 16(7): 41-43.  
刘晓涛, 张廷安, 崔建忠. 层状技术复合材料生产工艺及其新进展[J]. 材料导报, 2002, 16(7): 41-43.
- Tian Guangmin, Li Xuanming, Zhao Yongqing, *et al.*. Research status of processing technology of laminated metal composite[J]. Materials China, 2013, 32(11): 696-700.  
田广民, 李选明, 赵永庆, 等. 层状金属复合材料加工技术研究现状[J]. 中国材料进展, 2013, 32(11): 696-700.

- 4 Vaccari J A. The promise of laser forming[M]. Cleveland: American Machinist, 1993: 36-38.
- 5 Liu Shunhong, Hu Qianwu, Zhou Longzao, *et al.*. Investigation on micro-structure and property of laser bent Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(11): 1049-1053.  
刘顺洪, 胡乾午, 周龙早, 等. 激光弯曲成形 Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V 的组织及性能研究[J]. 中国激光, 2002, 29(11): 1049-1053.
- 6 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热传导特性[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 101401.
- 7 Ma Xupeng, Wang Xuyue, Xu Wenji, *et al.*. Study on thickening of laser bending zone for stainless steel-carbon steel laminated sheet[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0803001.  
马绪鹏, 王续跃, 徐文骥, 等. 不锈钢-碳钢层合板激光弯折区增厚现象研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0803001.
- 8 Carey C, Cantwell W J, Dearden G, *et al.*. Towards a rapid, non-contact shaping method for fiber metal laminates using a laser source[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 47(5): 557-565.
- 9 Cao Xiaolian, Xu Peiquan, Cao Zhuoyue, *et al.*. Research on micro-structure and element diffusion in YG20/45 # steel laser welds[J]. Chinese J Lasers, 2014, 42(3): 0303006.  
曹晓莲, 徐培全, 曹卓玥, 等. YG20/45 # 钢激光焊焊缝组织与界面元素扩散研究[J]. 中国激光, 2014, 42(3): 0303006.
- 10 Edwardson S P, French P, Dearden G, *et al.*. Laser forming of fiber metal laminate[J]. Laser in Engineering, 2005, 15: 233-255.
- 11 Shen H, Yao Z Q, Hu J. Numerical analysis of metal/ceramic bilayer materials systems in laser forming [J]. Computational Materials Science, 2009, 45(2): 439-442.
- 12 Zhao Lin, Tsukamoto Susumu, Arakane Goro, *et al.*. Distribution of wire feeding elements in laser-arc hybrid welds[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0406006.  
赵琳, 塚本进, 荒金吾郎, 等. 激光-电弧复合焊焊缝合金元素分布的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0406006.
- 13 Yang Jiabin, Zhang Likun. Handbook of steel and iron material[M]. Beijing: Chinese Metrology 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.
- 14 Wu Jiaqi. Study on the interface micro-structure and mechanical properties for the Mg/Ti composite [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015: 19-23.  
武佳琪. 镁/钛异种金属爆炸焊接界面微观组织及性能的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015: 19-23.
- 15 Huang Jihua. The diffusion in metals and alloys[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996: 1-3.  
黄继华. 金属及合金中的扩散[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 1-3.
- 16 Li Hui. Study of grain boundary segregation and precipitation in Ni-Cr-Fe alloys [D]. Shanghai: Shanghai University, 2011: 66-97.  
李慧. Ni-Cr-Fe 合金中晶界偏聚与晶界析出的研究[D]. 上海: 上海大学, 2011: 66-97.
- 17 Chen Li. Study on microstructure and mechanical property in welded joint of stainless steel/low alloy steel [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 1-3.  
陈力. 不锈钢/低合金钢焊接接头微观组织及力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 1-3.
- 18 王印培. 钢的硬度值与屈服强度之间的经验关系式[J]. 化工与通用机械, 1982(12): 59-61.