

不锈钢-碳钢层合板激光弯曲试验研究

杨冰冰 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 层状金属复合板以优良的材料和结构性能在舰船、汽车和飞行器等装备中显示了广阔的应用前景。为研究工艺因数对层状金属复合板激光弯曲成形的影响,以不锈钢-碳钢层合板为研究对象,对这种层状金属复合板的激光弯曲角度和规律进行了系统的试验研究。结果表明,不锈钢-碳钢层合板和不锈钢板激光弯曲存在共性,弯曲角度随着激光功率增加而增大,随着扫描速度增加而减小,随着扫描次数增加而增大,随着板厚增大而减小。同时二者也存在差异;随着不锈钢-碳钢层合板宽度的增加,弯曲角度先减小后增大;在相同工艺条件下,不锈钢-碳钢层合板弯曲角度大于不锈钢板的弯曲角度,并在一次固定安装下获得 85.6° 这一接近直角的极限弯曲角度。

关键词 激光技术;激光弯曲;层状金属复合板;工艺因数;弯曲角度

中图分类号 TG665;TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.091403

Experiments on Laser Bending of Stainless Steel-Carbon Steel Laminated Sheet

Yang Bingbing Wang Xuyue Xu Wenji Guo Dongming

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

Abstract Metal laminated sheets with fine material and structural performance reveal broad application prospects in ships, automobiles, aircrafts and other equipments. In order to study the influence of process factors on laser bending of metal laminated sheets, a stainless steel-carbon steel laminated sheet is chosen as the object of the research and a systematic experimental study is conducted to investigate the bending angle and transformative law of this metal laminated sheet by laser bending. The results reveal that, there are common features between stainless steel-carbon steel laminated sheet and stainless steel sheet during laser bending. For instance, the bending angle increases with the increase of laser power, scanning times and decreases with the increase of scanning velocity, the sheet thickness. Meanwhile, there are differences between them. With the increase of the sheet width, the bending angle of stainless steel-carbon steel laminated sheet decreases at first, and then increases. The bending angle of stainless steel-carbon steel laminated sheet is bigger than that of the stainless sheet in the same processing condition. And the ultimate bending angle, 85.6° , which approximates right angle, is obtained in one clamping.

Key words laser technique; laser bending; metal laminated composite sheet; processing factor; bending angle

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引言

层状金属复合材料是一种新型的工程材料,利用复合技术使两种或两种以上物理、化学和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、化学和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)通过复合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,并以其较高的强度、耐腐蚀性和良好的导

收稿日期: 2012-05-27; 收到修改稿日期: 2012-06-05; 网络出版日期: 2012-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(50975041)资助课题。

作者简介: 杨冰冰(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光弯曲成形方面的研究。E-mail: bbingy520@163.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)

热、导电性能,在舰船、飞行器、石油、汽车和水利等领域得到广泛的应用^[2]。

激光弯曲成形是一种新兴的激光加工技术,它利用高能激光束扫描板材表面形成的非均匀温度场所导致的热应力来实现板材塑性变形,将有效解决层状金属复合板成形的关键技术问题^[3,4]。目前,国内外研究人员在激光弯曲的成形机理、解析模型、数值模拟、影响因素和三维复杂曲面成形路径规划等方面获得了大量的研究成果^[5~8],但成形材料主要集中在传统工程材料(如不锈钢^[9])、合金材料(如铝合金^[10])和脆性材料(如陶瓷、玻璃^[11]),而对层状金属复合板则涉及很少。Edwardson等^[12]对层状金属复合材料进行了激光诱导成形,结果表明如果完全温度梯度机理(TGM)作用,激光仅仅作用于最上层材料,而对下层材料影响很小;Shen等^[13]研究了金属-陶瓷双层复合板材的激光弯曲成形,在将金属层视为弹塑性材料、陶瓷层视为弹性材料的基础上,建立了6061 Al和SiC陶瓷的双层有限元模型。这些文献从弯曲机理和数值仿真方面研究了层状金属复合板的激光弯曲,但它们都是单层材料发生塑性变形,不同于层状金属复合板,而且对层状金属复合板激光弯曲角度极限值和影响规律的研究也有所欠缺。研究弯曲角度极限值对实际工程应用具有很大的价值,研究其影响规律对于认识激光弯曲过程和预测其他工艺条件下的板材变形具有重要意义。

本文以304/Q235A不锈钢-碳钢层合板为研究对象,以防止表层不锈钢氧化和熔化为前提,以获得大的弯曲角度为目标,系统研究激光弯曲成形能量因素、板材几何参数以及材料性能对不锈钢-碳钢层合板弯曲角度的影响规律,开拓激光弯曲成形技术的应用范围,促进该技术在工程中的应用,以期该技术应用于日益广泛使用的层合复合材料领域提供借鉴和帮助。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验材料为1.0 mm和1.5 mm厚304/Q235A不锈钢-碳钢层合板,简称不锈钢层合板。图1所示为厚度1.0 mm不锈钢层合板的示意图,其表层是304不锈钢,基体是Q235A碳钢,主要化学成分与材料性能参数如表1、表2^[14]所示。

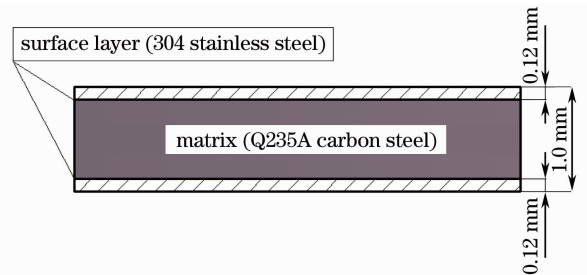


图1 厚度1.0 mm的不锈钢层合板示意图

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

Parameter	Matrix (Q235A)	Surface layer (304)
Density / (g·cm ⁻³)	7.86	7.93
Melting point / °C	1400	1398~1454
Specific heat / (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	465	500
Heat conductivity / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	80.3	16.3
Coefficient of linear expansion / (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	10.6	17.2
Yield strength / MPa	235	205
Young modulus / GPa	200~210	200

2.2 试验方法

本试验采用JK701H型脉冲Nd:YAG固体激光器,简单工艺试验结果表明激光频率对弯曲角度影响不大,考虑到激光器本身的稳定性,选用稳定的输出参数,频率40 Hz;而较大的脉宽对材料损伤较大,故选较小的脉宽2 ms。为了控制不锈钢层合板的表层质量,需要防止表面氧化和熔化。一方面,为了防止表面氧化,将试件放置于图2所示的装置中进行试验。该装置是一个150 mm×90 mm×40 mm的六面体盒子,四

周透明便于观察;上表面中心区域镶有一块 60 mm×60 mm 的石英玻璃,便于激光透过聚焦到试件表面完成弯曲。盒子的右侧底部有一个进气孔,而左侧顶部有一个出气孔,当缓缓通入保护气体(试验中用氩气)一段时间后,盒内将充满氩气,这样既能防止氧化又能保证加工环境的一致;试验中气压不需太大,只需将盒内充满,故所有试验气压均为 0.1 MPa。另一方面,为了防止表面熔化,就要合理控制激光能量的输入。通过简单工艺试验确定了激光弯曲的加工参数,如表 3 所示。

表 3 激光弯曲加工参数

Table 3 Parameters of laser bending

Parameter	Value
Pulse frequency /Hz	40
Pulse width /ms	2
Laser power /W	60~160
Scanning velocity /($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	300~1000
Defocusing distance /mm	7~12
Scanning times	5~50

试验中所有试件的长度均为 100 mm;试件宽度除研究板宽对弯曲的影响外均为 30 mm;试件厚度为 1.0 mm 和 1.5 mm 两种规格。试验前,用棉球沾取少量无水乙醇擦拭试件表面,以清除试件表面的油污及其他有机物。试件长度方向一端夹持固定在数控工作台上,另一端悬空处于自由状态。激光扫描方向沿着板材的宽度方向,如图 3 所示。试验中,激光扫描线距自由端边缘均为 25 mm,采用往返式单道扫描,一个往返为两次,相邻两次扫描无间隔时间。激光弯曲试件表面形貌如图 4 所示。板宽两端都留有 3 mm 的空走部分,其主要作用是避免激光的突然作用而使边缘产生明显的烧蚀现象。

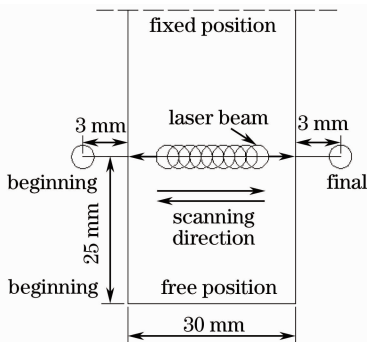


图 3 扫描路径示意图

Fig. 3 Schematic of scanning path

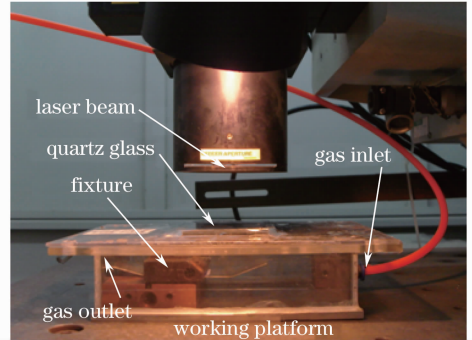


图 2 激光弯曲试验装置

Fig. 2 Experimental setup of laser bending



图 4 弯曲件表面形貌

Fig. 4 Surface appearance of bended sheet

试验中,采用在氩气环境中的自然冷却方式。待试验结束后试件冷却至室温,用多功能量角器测量弯曲角度,其精度为 0.1° 。

3 试验结果与分析

3.1 激光能量因素对弯曲角度的影响

图 5 是 100 mm×30 mm×1.0 mm 试件在扫描速度 $v=600$ mm/min,离焦量 $Z=10$ mm,扫描次数 $N=10$ 的工艺参数下,弯曲角度 α 随激光功率 P 的变化曲线。从图中可以看出,随着 P 的增加, α 增大。增加 P ,使得板材上表面在相同时间内加热区域的温度增加,因热传导而下表面的温度变化不大,由此导致厚度方向上的温度梯度增加,产生的热应力增加,故 α 增大。还可以看出, α 随 P 近似呈线性增加,说明不同功率下弯曲角度增量趋于一致。当 $P=160$ W 时,试件表面有熔化迹象。

图 6 是 100 mm×30 mm×1.0 mm 试件在激光功率 $P=140$ W,离焦量 $Z=10$ mm,扫描次数 $N=10$ 的工艺参数下,弯曲角度 α 随扫描速度 v 的变化曲线。从图中可以看出,随着 v 的增加, α 减小。这是因为随

着 v 的增加,激光作用在试件上的时间减少,试件吸收的激光能量降低,导致试件上下表面间温度梯度下降,因而产生的热应力减小,故 α 减小。仅从图中似乎还可以得出这个结论:采用越小的扫描速度可以获得越大的弯曲角度。其实不然, v 越小,激光作用在试件上的时间越长,板材吸收激光能量大幅增加,当能量达到一定程度时,试件表面产生熔化现象,这样不仅不能获得大的弯曲角度,而且还破坏了不锈钢层合板表层的防锈、防腐蚀性能。经试验发现,扫描速度不宜小于 300 mm/min。

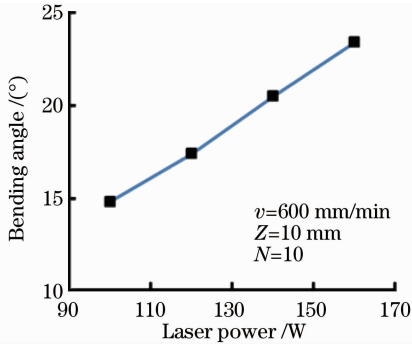


图 5 激光功率对弯曲角度的影响

Fig. 5 Effect of laser power on bending angle

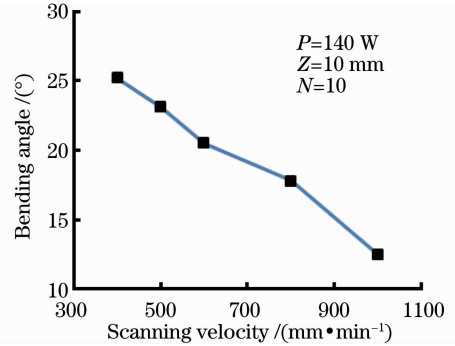


图 6 扫描速度对弯曲角度的影响

Fig. 6 Effect of scanning velocity on bending angle

通过离焦可以改变光斑直径,且随着离焦量的增加光斑直径增大,故可直接研究离焦量对激光弯曲的影响。经过理论计算,表 4 给出了离焦量与光斑直径的对照值。图 7 是 100 mm \times 30 mm \times 1.0 mm 试件在激光功率 P 为 140 W 和 100 W,扫描速度 $v=600$ mm/min,扫描次数 $N=10$ 的工艺参数下,弯曲角度 α 随离焦量 Z 的变化曲线。从图中可以看出,当 $P=140$ W 时, $Z \leq 10$ mm, α 随着 Z 的增加而增大, $Z \geq 10$ mm, α 随着 Z 的增加而减小;当 $P=100$ W 时, α 随着 Z 的增加而减小。由文献[10]可知,随着 Z 的增加,一方面光斑辐射区的能量密度降低,另一方面光斑辐射区的面积增大。若能量密度较高,足以使板材达到较高的温度,降低屈服强度,则辐射区面积增大有利于弯曲角度增加;若能量密度较低,不能降低屈服强度,即使增大辐射区面积也难以提高弯曲角度。那么,当 $P=140$ W, $Z \leq 10$ mm 时,可以获得较高的能量密度,足以使试件达到较高的温度,降低不锈钢层合板的屈服强度,随着 Z 从 7 mm 增加到 10 mm,辐射区面积增大,弯曲角度增大;当 $Z \geq 10$ mm 时,随着 Z 的增加,光斑辐射区的能量密度较低,不足以降低不锈钢层合板的屈服强度,即使辐射区的面积增加,弯曲角度也减小。当 $P=100$ W 时,即使 $Z=7$ mm,辐射区的能量密度也较低,随着 Z 的增加,能量密度进一步降低,更不能降低不锈钢层合板的屈服强度,因此,随着 Z 的增加, α 减小。

表 4 离焦量与光斑直径的对照表

Table 4 Mapping table from defocusing distance to spot diameter

Defocusing distance /mm	Spot diameter /mm
7	0.94
8	1.27
10	1.54
12	1.78

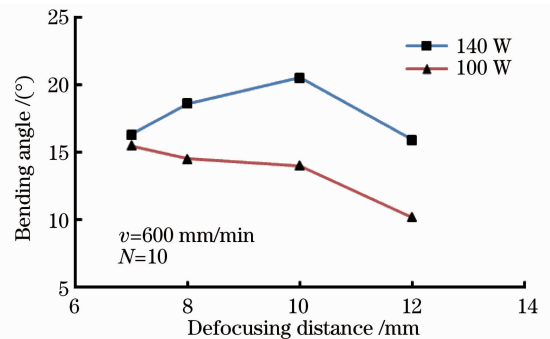


图 7 离焦量对弯曲角度的影响

Fig. 7 Effect of defocusing distance on bending angle

图 8 是 100 mm \times 30 mm \times 1.0 mm 试件在激光功率 $P=140$ W,扫描速度 $v=800$ mm/min,离焦量 $Z=10$ mm 的工艺参数下,弯曲角度 α 随扫描次数 N 的变化曲线。从图中可以看出,随着 N 逐渐增加, α 逐渐增大,甚至当 $N=50$ 时,弯曲角度可以到达 85.6 $^{\circ}$ 。当弯曲角度趋于 90 $^{\circ}$ 时,圆形的激光光斑辐射在扫描区内非常不均匀,弯曲部分辐射面积非常小,引起的变形也很小,弯曲角度几乎不增加。可以认为,当 $N \geq 50$ 时,弯曲角度增量很小,由此得到不锈钢层合板激光弯曲的极限弯曲角度为 85.6 $^{\circ}$,近似于直角。这一试验结果对工程需求有很大的应用价值。图 9 是在图 8 的基础上绘制的角度增量与 N 的关系曲线。可以看出,角度增量呈现先增长、下降再增长、下降的趋势。从 $N=30$ 到 $N=40$ 角度增量发生了最大幅度的增长,增幅达 25.9 $^{\circ}$ 。

当 $N \geq 40$ 时,多次扫描后加热区域出现较明显的增厚现象(图 10 所示为弯曲试件的截面图),增大了弯曲阻力矩,角度增量减小。

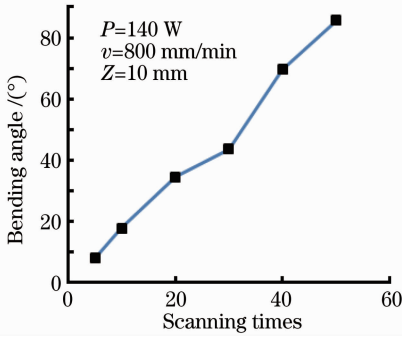


图 8 扫描次数对弯曲角度的影响

Fig. 8 Effect of scanning times on bending angle

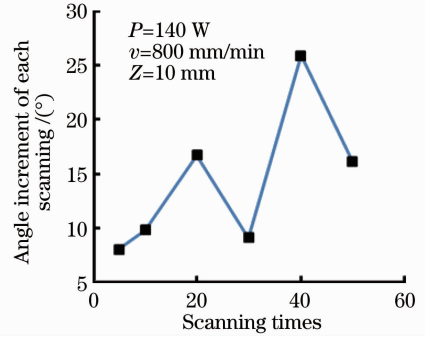


图 9 角度增量与扫描次数的关系

Fig. 9 Relation between angle increment and scanning times

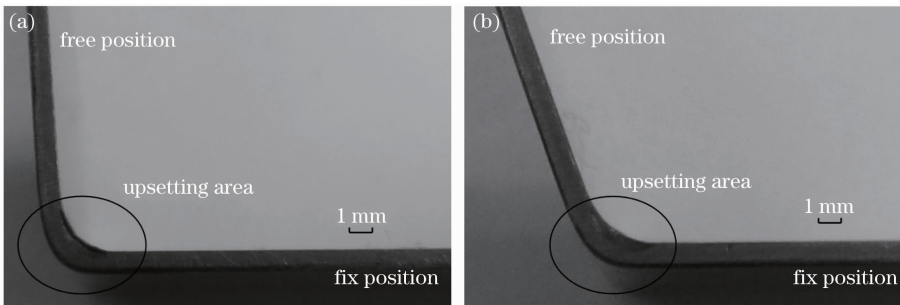


图 10 加热区域的增厚图。(a) $N=50$; (b) $N=40$

Fig. 10 Picture of upsetting on heating area while. (a) $N=50$ and (b) $N=40$

3.2 板材几何参数对弯曲角度的影响

图 11 是 $100 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ 和 $100 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 试件在激光功率 $P=140 \text{ W}$, 离焦量 $Z=10 \text{ mm}$, 扫描次数 $N=10$ 的工艺参数下,弯曲角度 α 随扫描速度 v 的变化曲线。从图中可以看出,当板材厚度 T 从 1.0 mm 增加到 1.5 mm 时, α 从 $18^\circ \sim 23^\circ$ 下降到 $3^\circ \sim 5^\circ$ 。这是因为在其他工艺参数一定的情况下,激光弯曲厚板所需要的热内应力矩比薄板大,以致弯曲角度明显比薄板小。还可以看出,当 $T=1.0 \text{ mm}$ 时, α 随 v 的变化较陡峭;而当 $T=1.5 \text{ mm}$ 时, α 随 v 的变化较平缓。这说明在其他工艺参数不变的情况下,扫描速度对薄板弯曲角度的影响更明显。

图 12 是板厚 1.0 mm 和 1.5 mm 试件在激光功率 $P=140 \text{ W}$, 扫描速度 $v=800 \text{ mm/min}$, 离焦量 $Z=10 \text{ mm}$, 扫描次数 $N=10$ 的工艺参数下,弯曲角度 α 随板材宽度 W 的变化曲线。从图中可以看出,在不同板厚下,随着 W 增加, α 都是先减小再增大。这个结论不同于其他板料激光弯曲中^[4,7~11]随着板宽的增加,弯

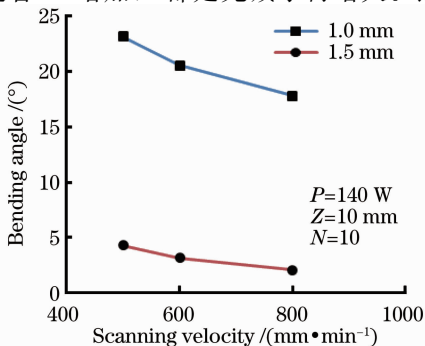


图 11 板厚对弯曲角度的影响

Fig. 11 Effect of sheet thickness on bending angle

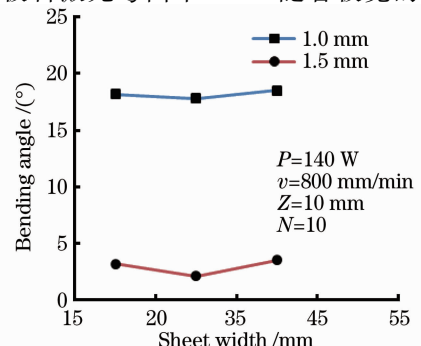


图 12 板宽对弯曲角度的影响

Fig. 12 Effect of sheet width on bending angle

曲角度增大的规律。这是激光作用时间和激光未辐射区域刚性约束相互作用的结果。在其他工艺参数一定的情况下,宽度小的板材在扫描线上的某一固定点上相邻两次扫描的时间间隔要短,散热时间短,且不锈钢层热导率小($16.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$),热传导慢,多次扫描后,该点处的热累积更多,温度更高。以此类推,整个扫描线上可以获得比宽板更高的温度。加之在相同的扫描次数下,激光作用于窄板的时间比宽板短,导致热传导时间短,因此在试件上下表面形成更大的温度梯度,而此时板材宽度小,激光未辐射区域刚性约束作用不明显,激光作用时间占主导,故板材越窄,弯曲角度越大。随着板宽增加,未辐射区域刚性约束作用增强,当宽度到达某一固定值时,二者的作用达到平衡。若板宽继续增加,则未辐射区域刚性约束作用占主导,故随着板宽增加,弯曲角度增大。所以,当 $W < 30 \text{ mm}$ 时,激光作用时间占主导, α 随 W 的增加而减小;当 $W \geq 30 \text{ mm}$ 时,激光未辐射区域刚性约束作用占主导, α 随 W 的增加而增大。

3.3 材料性能对弯曲角度的影响

在相同工艺条件下,进行了 304/Q235A 不锈钢-碳钢层合板和 304 不锈钢板的对比试验,用以研究屈服强度、热导率、热膨胀系数和比热容对弯曲变形的影响。图 13 是 $100 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ 的 304 不锈钢板和 304/Q235A 不锈钢-碳钢层合板在激光功率 $P=140 \text{ W}$,离焦量 $Z=10 \text{ mm}$,扫描次数 $N=10$ 的工艺参数下,弯曲角度 α 随扫描速度 v 的变化曲线。从图中可以看出,尽管屈服强度、热导率、热膨胀系数和比热容不同,但是随着 v 增加, α 都在减小,说明二者在激光弯曲变形上存在共性。同时还可以看出,在相同的工艺条件下,不锈钢层合板的弯曲角度大于不锈钢板的弯曲角度。为验证这一结论,还进行了其他不同工艺参数下的对比试验,其结果如图 14 所示,均呈现上述规律。这是不锈钢层合板激光弯曲的层间内应力分布有助于弯曲角度的增加以及材料性能之间交互作用的结果。

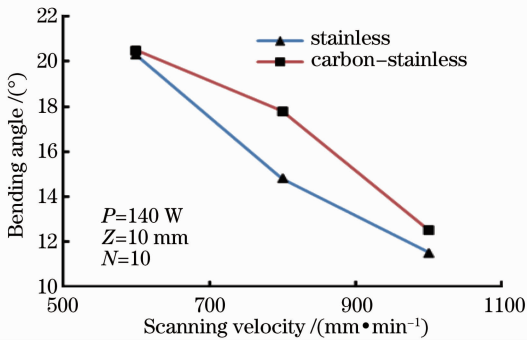


图 13 扫描速度对不锈钢板和不锈钢-碳钢层合板弯曲角度的影响

Fig. 13 Effect of scanning velocity on bending angle of stainless steel sheet and stainless steel-carbon steel laminated sheet

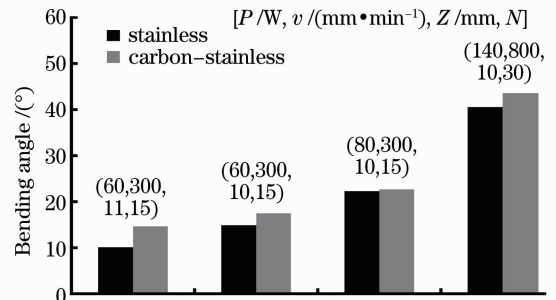


图 14 不同激光参数下不锈钢板和不锈钢-碳钢层合板弯曲角度对比图

Fig. 14 Comparison of bending angle of stainless steel sheet and stainless steel-carbon steel sheet with different laser parameters

不锈钢层合板处于加热阶段时,表层不锈钢温度迅速升高、受热膨胀发生塑性变形,而不锈钢热导率低,传热慢,此时碳钢层的温度较低,且屈服强度较高,故而提供主要的弯曲阻力矩,因此,在加热阶段板材表层不锈钢虽有增厚,但整体不会发生反向弯曲。在冷却阶段,表层不锈钢温度急剧下降,扫描区材料收缩,则不锈钢层未辐射区受到拉应力作用,因热传导时间较长,此时碳钢层温度较高,受热膨胀,则碳钢层未辐射区受到压应力作用,这样在层间形成正向弯曲力矩,有利于弯曲角度的增加。图 15 是 $P=60 \text{ W}$, $v=300 \text{ mm/min}$, $Z=10 \text{ mm}$, $N=15$ 时不锈钢层合板碳钢层的金相照片。激光作用前,表层晶粒粗大,而心部晶粒细小,且晶粒沿轧制方向拉长,这种晶粒的拉长和不均匀现象是由于冷轧时轧制工艺不当引起的,如图 15(a)所示;激光作用后产生晶粒细化现象,等轴晶明显增多,不均匀现象减缓,但没有发生相变,如图 15(b)所示;还可以看出,激光作用后,表层不锈钢没有损伤,如图 15(c)所示。金相组织分析表明,不锈钢层合板在激光弯曲过程中,中间碳钢层受到了较强的热作用,这印证了上文中关于碳钢层受热膨胀的分析;且对比参考文献[12]可知,不锈钢层合板激光弯曲并非完全的 TGM 机理作用。

另外,弯曲角度随着材料屈服强度、比热容以及热导率的增加而减小,随着热膨胀系数的增加而增大,且屈服强度、热导率对弯曲变形的影响较为显著^[15]。比热容的差异使得不锈钢层合板弯曲角度较大,但是二者比热

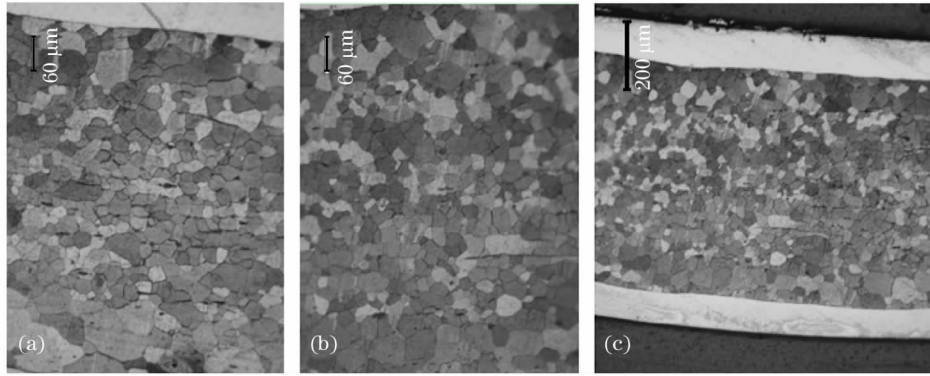


图 15 碳钢层金相照片。(a)弯曲前;(b)弯曲后;(c)弯曲后低放大倍率

Fig. 15 Metallographic photos of carbon-steel layer (a) before laser bending; (b) after laser bending and (c) after laser bending with lower magnification

容差距不大(碳钢 $465 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 不锈钢 $500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 见表 2)且比热容对弯曲的影响不显著;屈服强度、热导率和热膨胀系数的差异使得不锈钢板弯曲角度较大,且二者热导率差距明显(碳钢 $80.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 不锈钢 $16.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$),同时热导率对弯曲变形的影响较显著。若是这 4 个材料参数机械组合并独立地影响激光弯曲,那么,不锈钢板的弯曲角度要大于不锈钢层合板的弯曲角度。这一分析结果与对比试验的结果(不锈钢层合板的弯曲角度大于不锈钢板的弯曲角度)不一致。这表明材料参数之间不是机械组合,也不是独立地影响激光弯曲,而是存在交互作用。

4 结 论

在试验条件范围内,研究了脉冲 Nd:YAG 固体激光弯曲 304/Q235A 不锈钢-碳钢层合板过程中激光能量因素、板材几何参数以及材料性能对弯曲角度的影响规律,结论如下:

1) 在其他工艺参数一定的情况下,弯曲角度随着激光功率的增加而增大,随着扫描速度的增加而减小,随着扫描次数的增加而增大;随着离焦量的增大,辐射区面积增大,若辐射区能量密度较低,弯曲角度减小,若辐射区能量密度较高,增大的辐射区面积有利于弯曲变形,弯曲角度先增大后减小。多次扫描后加热区域出现明显的增厚现象,增大了弯曲阻力矩,角度增量减小。当 $P=140 \text{ W}$, $v=800 \text{ mm/min}$, $Z=10 \text{ mm}$, $N=50$ 时,经一次安装固定可获得 85.6° 这一近似直角的极限弯曲角度。

2) 随着板厚的增加,弯曲角度减小,并且在其他工艺参数一定的情况下,随着扫描速度的增加,薄板弯曲角度减小的幅度更大。随着板宽的增加,弯曲角度先减小后增大,存在一个板宽值,当板宽小于该值时,激光作用时间占主导,弯曲角度随着板宽的增加而减小,当板宽大于该值时,未辐射区域刚性约束作用占主导,弯曲角度随着板宽的增加而增大。

3) 不锈钢-碳钢层合板层间内应力分布有利于弯曲变形以及材料性能之间交互作用的影响,使得在相同工艺条件下不锈钢-碳钢层合板弯曲角度大于不锈钢板的弯曲角度。

参 考 文 献

- Liu Xiaotao, Zhang Ting'an, Cui Jianzhong. Technology of clad metal production and its latest progress[J]. *Materials Review*, 2002, **16**(7): 41~43
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
- Hou Yingwu. The FEM Simulation of Stainless Clad Strip in Cool-Rolled Process[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2003. 1~4
侯英武. 不锈钢复合板冷轧过程有限元模拟[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2003. 1~4
- Li Weimin, Manfred Geiger, Frank Vollertsen. Study on laser bending of metal sheets[J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **25**(9): 859~864
李伟民, Manfred Geiger, Frank Vollertsen. 金属板材激光弯曲成形规律的研究[J]. 中国激光, 1998, **25**(9): 859~864
- 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 M. Geiger, F. Vollertson. The mechanisms of laser forming[J]. *Annals of the CIRP*, 1993, **42**(1): 301~304
- 6 F. Vollertson. An analytical model for laser bending[J]. *Lasers in Engineering*, 1994, **2**(3): 261~276
- 7 Liu Jie, Sun Sheng, Guan Yanjin. Numerical study on the laser bending of stainless steel foil with pre-stresses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1265~1270
- 刘杰, 孙胜, 管延锦. 预应力作用下微尺度激光弯曲成形的数值模拟[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1265~1270
- 8 Shi Yongjun. Research on Laser Bending Mechanism and Forming Process Plan for 3D Curved Plates[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. 114~132
- 石永军. 激光热变形机理及复杂曲面板材热成形工艺规划研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. 114~132
- 9 V. Paunoiu, E. A. Squeo, F. Quadrini *et al.*. Laser bending of stainless steel sheet metals[J]. *Int. J. Mater. Form.*, 2008, **1**(S1): 1371~1374
- 10 Cheng Lifang. Experimental Research on Laser Bending and Forming of Aluminum[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005. 3~26
- 程丽芳. 铝合金板激光弯曲成形的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005. 3~26
- 11 Wu Dongjiang, Zhang Qiang, Ma Guangyi *et al.*. Laser bending of brittle materials[J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2010, **48**(4): 405~410
- 12 S. P. Edwardson, G. Dearden, P. French *et al.*. Laser forming of metal laminate composite materials[C]. Proceeding of ICALEO'2003, 2003. 107
- 13 Shen Hong, Yao Zhenqiang, Hu Jun. Numerical analysis of metal/ceramic bilayer materials systems in laser forming[J]. *Computational Materials Science*, 2009, **45**(2): 439~442
- 14 Yang Jiabin, Zhang Likun. Handbook of Steel and Iron Material[M]. Beijing: Chinese Standards 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
- 15 Guan Yanjin, Ji Zhong, Hao Binhai *et al.*. Influence of material properties on laser bending process of sheet metal[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2001, **12**(1): 87~90
- 管延锦, 季忠, 郝滨海等. 材料性能参数对板料激光弯曲成形的影响[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(1): 87~90