

不锈钢-碳钢层合板激光弯折区增厚现象研究

马绪鹏 王续跃 徐文骥 郭东明

(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 不锈钢-碳钢层合板经激光快速加热弯曲后,弯折区出现增厚现象。借助 IPP 图像处理软件测量各层厚度及碳钢层晶粒尺寸,基于温度梯度机理分析弯折区增厚机理及规律。研究表明:不锈钢层合板在加热过程中晶粒生长,尺寸增大,产生热膨胀增厚;正向弯曲过程中,晶粒在弯曲应力作用下挤压伸长,产生挤压增厚,在二者的共同作用下,板材厚度增加,且热膨胀增厚占主导地位。增厚现象主要出现在上层不锈钢及碳钢层,碳钢层增厚值所占比重大于 69%。最后,研究功率、扫描速度、扫描次数、离焦量等能量参数对增厚值的影响规律,为提高激光弯曲精度与质量提供理论和实验依据。

关键词 激光技术;层合板;温度梯度机理;热膨胀增厚;挤压增厚

中图分类号 TG161; TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0803001

Study on Thickening of Laser Bending Zone for Stainless Steel-Carbon Steel Laminated Sheet

Ma Xupeng Wang Xuyue Xu Wenji Guo Dongming

(Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of the Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract The bending zone thickening of the metal sheet becomes bigger after laser bending. IPP image processing software is the measure tool of the thickness and the grain size. Then rely on temperature gradient mechanism (TGM) to research the thickening mechanism. The results show that the grain size becomes bigger in the heating process which means thermal expansion thickening (TET). In the positive bending process grains are squeezed and extended by the bending stress and forming extrusion thickening (ET). TET and ET are the principal factors of thickening appearance, and TET occupies the main position. The stainless steel layer and the carbon layer become thicker, and the thickened value of the carbon layer at least account for 69%. At last, the relation between the energy parameters (ie. power, scanning speed, scanning frequency and defocusing amount) and the thickened value is studied, which are the basis of theory and experiment for better bending mould and quality.

Key words laser technique; laminated sheet; temperature gradient mechanism; thermal expansion thickening; extrusion thickening

OCIS codes 140.3535; 140.6810; 160.3900

1 引言

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,在保持母材金属特性的同时具有互补效应,改善金属材料的热膨胀性、强

度、断裂韧性、冲击韧性、磨损、电性能、磁性能等诸多性能;同时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的完美结合^[1-4]。激光弯曲成形技术具有高柔性、洁净无污染、材料消耗少、参数精密控制和高

收稿日期: 2014-01-20; 收到修改稿日期: 2014-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(51375073, 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: shuzizhicheng@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(通讯联系人)

度自动化等特性,同时也顺应了敏捷制造、柔性制造以及绿色制造的发展趋势。基于激光弯曲成形工艺所制备的不锈钢-碳钢成型件被广泛用于航空、航天、建筑、船舶制造、汽车工业等多个领域。

激光弯曲成形是一种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,以得到预期形状的热柔性成形技术。在轧制层合板热柔性成形方面,宋文庆等^[5-6]对不锈钢层合板等离子体弧柔性成形机理、成形方向控制、成形失效机制、能量控制等关键问题进行研究,并形成出典型板壳类工件。墨卫娟等^[7-8]分别利用Abaqus、Ansys分析软件研究了st14-GH4169层合板、金属-陶瓷层合板激光弯曲过程中的温度场与应力场分布情况。激光弯曲增厚方面,刘顺洪等^[9]利用CO₂激光器弯曲钛合金板后发现弯折区出现相变区与晶粒长大区,晶粒形状不规则,晶粒尺寸增大,出现增厚现象;Edwardson等^[10-12]对铝-纤维、Al-SiC_p等金属-非金属层合板激光弯曲规律及机理进行研究发现:金属-非金属层合板在温度梯度机理的作用下,表层金属被压缩,弯折区出现塑性堆积增厚,且层合板的增厚值远大于单一金属板。由此可知,国内外学者对增厚现象的研究内容大多着重于其金相组织的研究及增厚现象的陈述,而对其增厚

机理及规律的研究相对较少。

本文基于温度梯度机理分析不锈钢-碳钢层合板弯曲过程中热塑性挤压作用对厚度值的影响,借助Imagine-Pro Plus (IPP)图像技术测量各金属层厚度及晶粒尺寸,分析增厚机理及规律,加深对金属层合板激光弯曲机理的理解。最后,研究能量参数对增厚值的影响,为加工参数优化及板材精密成形提供参考。

2 基本原理与方法

2.1 基本原理及试验方法

当采用直径小、扫描速度快、能量密度高的移动激光束辐照层合板表面时,在温度梯度机理^[13]的作用下,层合板经激光辐照后形成一定的弯曲角度,弯折区出现增厚现象,如图1所示。基于温度梯度机理分析层合板弯折区的增厚现象,观察分析增厚区域金相图片,利用IPP专业图像处理软件对显微图像进行晶界识别、尺寸测量,并以晶粒的横截面积 S 表征晶粒的大小,分析加热阶段晶粒生长作用与冷却阶段塑性挤压作用对各金属层厚度的影响;基于单因素变量法,分析功率 P 、扫描速度 V 、扫描次数 N 、离焦量 Z 等参数对增厚值的影响规律。

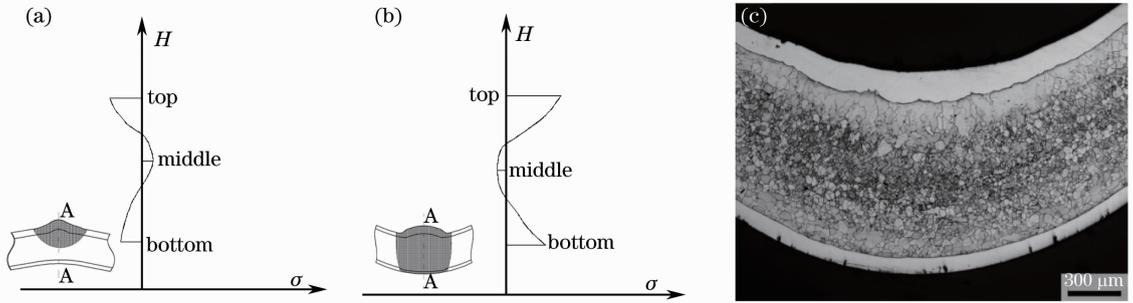


图1 层合板激光弯曲温度梯度机理及增厚现象。(a) 加热过程; (b) 冷却过程; (c) 增厚现象

Fig. 1 Temperature gradient mechanism and thickening phenomenon of laser bending laminated sheet.

(a) Heating process; (b) cooling process; (c) thickening phenomenon

试验中激光器选用JK701H型脉冲Nd:YAG固体脉冲激光器,频率是40 Hz,脉宽是2 ms。试验材料为不锈钢-碳钢层合板,简称不锈钢层合板。尺寸规格为100 mm×30 mm×0.82 mm,图2为不锈钢层合板的示意图,其表层为0Cr18Ni9Ti不锈钢,中间层为Q235A低碳钢,主要化学成分以热物理力学参数如表1、表2所示^[14]。为防止不锈钢层合板表面氧化,采用同轴吹氩气保护,气压为0.1 MPa。激光弯曲后,选取成型件进行切割、镶嵌、磨样、抛

光,利用4%(体积分数)的硝酸酒精腐蚀碳钢层,于放大倍数为20~1000的共聚焦MEF4型显微镜下观察试样的组织形貌,采集照片。

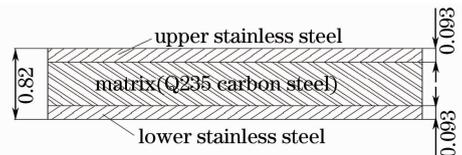


图2 不锈钢层合板示意图

Fig. 2 Schematic of stainless steel laminated sheet

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, %)

Composition	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
Melt point / $^{\circ}\text{C}$	1400	1398~1454
Specific heat /($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)	465	500
Heat conductivity /($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	80.3	16.3
Coefficient of linear expansion /($10^{-6}/\text{K}$)	10.6	17.2
Yield strength /MPa	235	205
Young's modulus /GPa	200~210	200

2.2 晶粒尺寸的图像处理方法

利用 IPP 对显微组织图像进行处理,测量各金属层厚度及晶粒尺寸,观察界面处晶粒形态。由于晶界颜色与晶粒内部颜色差别不大,不利于晶界识别,需要对其进行图像反差增强操作,图 3(a)为母材碳钢层图像反差增强之后的图像。对图像添加标尺,测量、标示各层厚度;利用人工干预和 IPP 中的魔棒相结合的方法标识晶粒,使得每个晶粒成为单独的一个感兴趣区域(AOI)。晶界不清晰,软件将

会把多个晶粒识别为一个晶粒,利用分割功能将多个晶粒一一分割,使其成为单独 AOI 区域,如图 3(b)所示。最后,选取“面积”作为特征参数,测量晶粒横截面面积 S ,得出平均横截面面积 S_m ,以二者差值表示不同能量参数下晶粒生长程度,如图 3(c)。测量过程中,IPP 软件可以自动分析图像,并对每个测量对象进行数字标记,并将每个对应晶粒的特征参数以数据表格的形式存储到软件中。

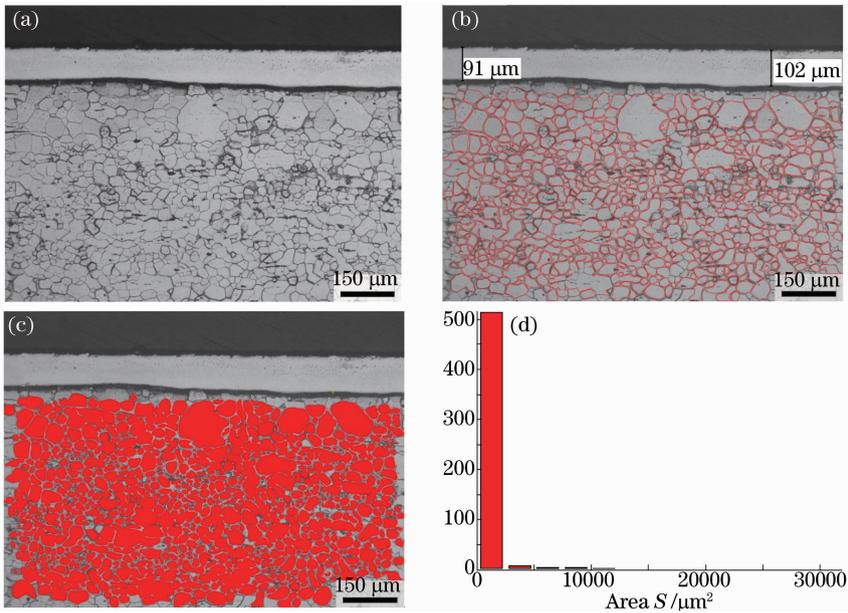


图 3 显微图像处理(100×)。 (a) 图像反差增强; (b) 区域标识; (c) 区域填充; (d) 晶粒横截面面积 S 分布图

Fig. 3 Microscopic image processing (100×). (a) Contrast enhancement of image; (b) region marking; (c) region filling; (d) cross sectional area of the grains S

测量结果显示,母材不锈钢层厚度为 91~102 μm,平均厚度为 93 μm,碳钢层平均厚度为 630 μm。参与测量铁素体晶粒数为 535,最大晶粒

横截面面积为 31970.5 μm²,最小为 14.7 μm²,平均横截面面积 $S_m = 565 \mu\text{m}^2$,晶粒横截面面积 S 分布如图 3(d) 所示,横坐标为 S ,纵坐标为晶粒个数,

$S < 2000 \mu\text{m}^2$ 的晶粒数为 510, 占总体的 95.3%。

3 层合板弯折区增厚机理研究

3.1 热膨胀增厚

不锈钢层合板在加热过程中, 上表面瞬间被加热至高温状态, 而下表面温度较低, 厚度方向产生强烈的温度梯度。同时由于多次扫描的缘故, 加热区域在一定的时间内维持在高温状态, 使得不锈钢层奥氏体晶粒及碳钢层铁素体晶粒生长, 晶粒尺寸变大, 即加热区域出现热膨胀, 且上表面的热膨胀量远大于下表面的膨胀量, 板材产生背向激光束的小角度弯曲(层合板反向弯曲角度一般小于 0.01°), 沿板材厚度 H 方向, 上、下表面产生压缩应力, 中间产生拉伸应力, 如图 1(a) 所示; 加热区域金属由于温度升高, 屈服强度大幅度降低, 而加热区域及周围材料虽然有少量温升, 但仍保持较高的屈服极限及弹性模量, 限制了加热区域的膨胀, 一旦热应力超过了材料的屈服应力, 加热区域产生塑性压应变, 上表面产生塑性堆积, 弯折区厚度增加。由此可以看出, 弯折区在加热阶段出现塑性堆积, 厚度增加的根本原因在于晶粒受热生长, 尺寸增大所产生的热膨胀, 称之为热膨胀增厚。

3.2 挤压增厚

冷却阶段, 上表面材料温度降低, 塑性变形区开始收缩, 屈服极限升高, 加热时产生的材料堆积不能全部复原, 因此冷却过程中的收缩量更大些, 板材由反向弯曲逐渐转为正向弯曲, 上、下表面产生拉伸应力, 中间部位产生压应力, 如图 1(b)。随着弯曲角度的增大, 应变中性层内移, 应变中性层以上区域称为内区, 以下区域称为外区。如图 4 所示, 越远离中性层, 内区的压应力越大, 塑性变形区受到周围冷态材料强烈的挤压作用, 同时, 增厚区域在挤压作用下不断变小, 内区金属在压应力的挤压作用下厚度进一步加大, 称之为挤压增厚。

热量在厚度方向的传递需要一定时间, 上表面

温度降低而下表面温度仍要继续升高一段时间, 外区晶粒受热生长, 晶粒尺寸增大, 使得此区域在热膨胀作用下厚度增加; 同时弯曲过程中此区域受存在强烈的拉应力, 外区受拉变薄使得此区域厚度降低, 因此外区厚度变化主要取决于热膨胀增厚作用与拉伸变薄作用的共同作用。由于内区的拉应力大于外区应力值, 使得内区厚度增加值大于拉伸减薄值, 同时加上热膨胀增厚作用, 弯折区整体厚度增加。

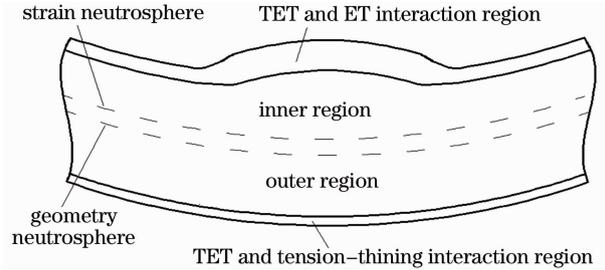


图 4 中性层及厚度变化区域

Fig. 4 Neutral layer and thickness change region

由此可知, 不锈钢层合板弯折区的增厚分为两个方面: 晶粒生长所产生的热膨胀增厚与弯曲压应力所导致的挤压增厚。如图 4 所示, 上层不锈钢与碳钢层在热膨胀增厚与挤压增厚的共同作用下厚度增加, 碳钢层挤压增厚主要作用于应变中性层以上区域; 下层不锈钢在热膨胀增厚的同时存在拉伸变薄的过程, 厚度由二者决定, 但板材整体厚度的增加值远大于拉伸作用所造成的减薄值, 弯折区厚度增加, 形成增厚现象。

4 结果与分析

4.1 结果分析

将不同角度下弯折区显微图像借助 IPP 软件处理, 测量各层厚度及碳钢层晶粒尺寸, 可得到如表 4 所示的数据报告结果。表中 α 代表弯曲角度, h 代表不锈钢层合板弯折区总的增厚值, h_{304} 代表上层不锈钢的增厚值, h_{Q235} 代表中间碳钢层的增厚值, h'_{304} 代表下层不锈钢的增厚值。

表 3 弯曲角度与增厚值

Table 3 Bending angle and thickening value

$\alpha / (^\circ)$	$h / \mu\text{m}$	$h_{304} / \mu\text{m}$	$h_{Q235} / \mu\text{m}$	$h'_{304} / \mu\text{m}$	$h_{304} / h / \%$	$S_m / \mu\text{m}^2$
19.2	31	4	30	-3	13	604
34.2	61	16	55	-10	26	824
43.5	96	25	84	-13	31	966
85.6	311	77	230	4	24	-

如表 3 所示, 随 α 的增大, S_m 逐渐增大, h 增加, 上层不锈钢与碳钢层均出现增厚。弯曲角度小

于 43.5° 时, h_{304} / h 值随 α 的增大而逐渐增加, 下层不锈钢厚度随弯曲角度的增大而减小。当弯曲角度

达到 85.6° 时, h_{304}/h 值下降到 24%; 下层不锈钢出现增厚, 但增幅较小。

当弯曲角度较小时, 冷却过程中的应力水平较低, 塑性区域受到的挤压作用较小, 晶粒形状基本不发生变化, 挤压增厚作用微弱, 厚度的增加主要得益于上层不锈钢及碳钢层的热膨胀增厚。 α 为 19.2° ($P=120\text{ W}, V=600\text{ mm/min}, Z=10\text{ mm}, N=10$) 时, 上层不锈钢与碳钢层出现热膨胀增厚, 碳钢层晶粒生长区主要集中于上界面附近, 如图 5(a), 碳钢层 $S_m=604\ \mu\text{m}^2$, 相比激光作用前晶粒增大 7%, 上层不锈钢厚度增加 $4\ \mu\text{m}$ 。下层不锈钢由于温度较低, 晶粒尺寸基本不变, 在弯曲拉应力的作用下, 金属层受拉变薄, 厚度减小 $3\ \mu\text{m}$ 。

随着弯曲角度增大, 上层不锈钢与中间碳钢层

增厚值逐渐增加, 同时, 弯曲应力水平升高, 冷却阶段的挤压增厚作用开始显现, 不锈钢层增厚值所占比重增加, 晶粒形貌发生改变。 α 为 43.5° ($P=140\text{ W}, V=800\text{ mm/min}, Z=10\text{ mm}, N=30$) 时, 上层不锈钢厚度增加至 $118\ \mu\text{m}$, 且整个加热区域厚度均匀, 增厚值所占比重为 31%; 碳钢层铁素体晶粒生长变大, $S_m=966\ \mu\text{m}^2$, 增大 71%, 产生热膨胀增厚; 碳钢层上界面处铁素体晶粒在压应力作用下被拉长, 界面部分晶粒呈现细长条状, 使得中心区域厚度高于两侧, 如图 5(b) 所示。下层不锈钢中心区域峰值温度最高, 晶粒生长程度相对两侧较大, 发生热膨胀增厚, 但晶粒同时受到较大的拉应力, 且拉伸变薄作用大于热膨胀增厚作用, 使得中心区域减薄 $13\ \mu\text{m}$, 两侧减薄 $27\ \mu\text{m}$ 。

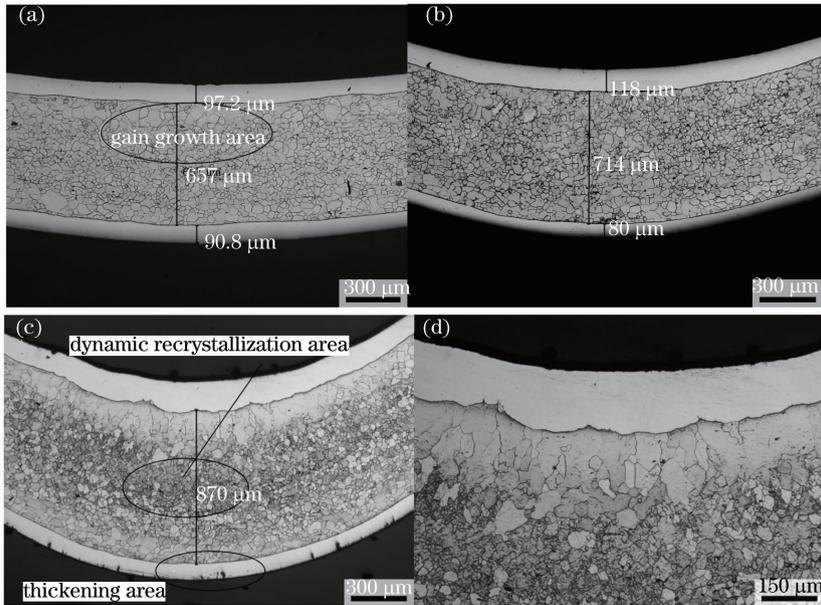


图 5 增厚区显微图像。(a) $\alpha=19.2^\circ(50\times)$; (b) $\alpha=43.5^\circ(50\times)$; (c) $\alpha=85.6^\circ(50\times)$; (d) $\alpha=85.6^\circ$ 挤压晶粒($100\times$)

Fig. 5 Microscopic images of the thickening area. (a) $\alpha=19.2^\circ(50\times)$; (b) $\alpha=43.5^\circ(50\times)$; (c) $\alpha=85.6^\circ(50\times)$; (d) crushed grain of $85.6^\circ(100\times)$

如图 5(c), 当 α 达到 85.6° ($P=140\text{ W}, V=800\text{ mm/min}, Z=10\text{ mm}, N=50$) 时, 能量参数较大, 晶粒生长剧烈, 上层不锈钢与中间碳钢层热膨胀增厚, 同时, 冷却阶段应力水平较高, 生长晶粒受到周围冷态金属的挤压, 产生挤压增厚。上层不锈钢扫描路径上的厚度为 $170\ \mu\text{m}$; 两侧厚度为 $130\ \mu\text{m}$, 同时, 界面出现褶皱现象。碳钢层厚度增加 $240\ \mu\text{m}$, 上界面处为发生脱碳现象的部分相变区, 重结晶的细小铁素体晶粒与未转变的粗大铁素体晶粒混杂在一起, 其在挤压增厚作用下呈现细长条状, 如图 5(d); 中心区域发生动态再结晶, 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; 下界面处晶粒 $S_m=768\ \mu\text{m}^2$, 增大 43%。下层不锈钢温度相对升高, 奥氏体晶粒生长剧烈, 尺寸增大, 导致弯折区中心部分热膨胀增厚作用大于拉伸变薄作用, 厚度增加 $4\ \mu\text{m}$; 但两侧区域拉伸变薄作用仍占主导地位, 厚度小于 $93\ \mu\text{m}$ 。

层合板在热膨胀增厚及挤压增厚的作用下出现增厚现象, 且热膨胀增厚占主导地位。弯曲角度较小时, 挤压增厚作用有限, 厚度的增加主要得益于热膨胀增厚; 当弯曲角度为 43.5° 时, 热膨胀增厚及挤压增厚共同作用, 使得板材厚度大幅增加。上层不锈钢及中间碳钢层厚度增加, 且碳钢层增厚值所占比重大于 69%。下层不锈钢受到热膨胀增厚及拉

伸变薄作用的共同影响,厚度减小,只有 α 达到 85.6° 时,弯折区中心区域出现增厚。

4.2 增厚规律分析

以弯曲角度 α 为横坐标,增厚值 h 为纵坐标,对选取的数据点进行高斯曲线拟合,如图 6,增厚值 h 随着 α 的增大而增加。当 α 小于 30° 时,挤压增厚(ET)作用微弱,厚度值的增加主要得益于热膨胀增厚(TET)作用,此段曲线较为平缓;当 α 为 $30^\circ \sim 70^\circ$ 时,挤压增厚作用开始逐渐显现,程度逐渐加大,同

时,热膨胀增厚作用随能量参数的增大得到加强,在热膨胀增厚及挤压增厚的共同作用下, h 随 α 的增大呈线性增加,且曲线斜率较大;当 α 大于 70° ,板材出现热透现象,晶粒尺寸达到最大值,生长停滞,即热膨胀增厚作用达到最高水平。能量参数升高,弯曲角度增大,但热膨胀增厚作用仍维持在原来的水平,厚度值的升高完全得益于“挤压增厚”作用,使得增厚值增量逐渐减小,曲线趋于平缓。

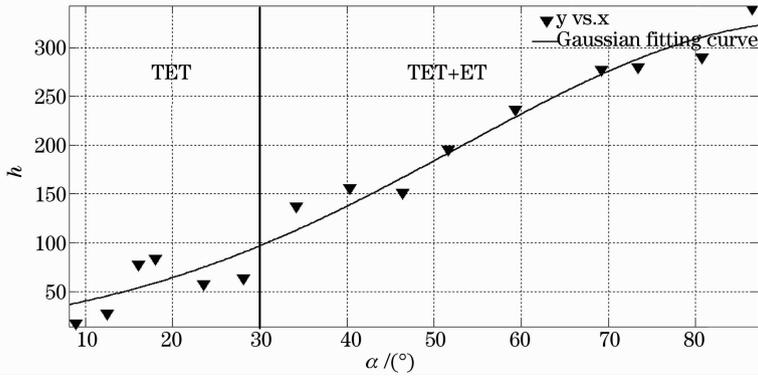


图 6 弯曲角度与增厚值拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve between bending angle and thickening value

通过研究进一步发现, α 小于 30° 时,改变功率、扫描速度、离焦量、扫描次数等能量参数,在角度差别极小的情况下,增厚值 h 间却存在较大的梯度。如表 4 所示,三种能量参数下 α 均为 15° 左右,但其增厚值最大差值达到 $40 \mu\text{m}$ 。其原因在于:在此角度范围内,厚度的增加主要得益于热膨胀增厚作用,而热膨胀增厚作用的大小则受到功率、扫描速度、扫

描次数、离焦量等能量参数的影响,改变任一参数,增厚值将发生变化。功率、扫描速度、扫描次数、离焦量等能量参数决定了最终的弯曲角度及增厚值,为更加深入地了了解不锈钢层合板增厚规律,需研究各能量参数对增厚值的影响,有助于加深激光弯曲增厚机理的理解,提高弯曲精度及质量。

表 4 不同能量参数下的弯曲角度与增厚值

Table 4 Bending angle and thickening value with different energy parameters

P/W	$V/(mm/min)$	N	Z/mm	$\alpha/^\circ$	$h/\mu\text{m}$
140	800	10	10	15.1	40
100	600	10	7	15.3	67
100	600	10	10	15.4	27

如图 7 所示,功率升高,加热区域峰值温度升高,晶粒生长剧烈,热膨胀增厚程度加大,增厚值逐渐升高。当 P 由 100 W 增加到 120 W 时,热膨胀增厚主要由不锈钢层细小的奥氏体晶粒生长造成, h 仅增大 $3 \mu\text{m}$ 。当功率由 120 W 增加到 140 W 时,热膨胀区域加深至碳钢层,铁素体晶粒长大, h 增加 $17 \mu\text{m}$;当功率值为 160 W 时,层合板出现热透现象,厚度方向温度梯度减小,相对于 140 W ,晶粒生长速率变缓,致使 h 仅增加 $6 \mu\text{m}$ 。

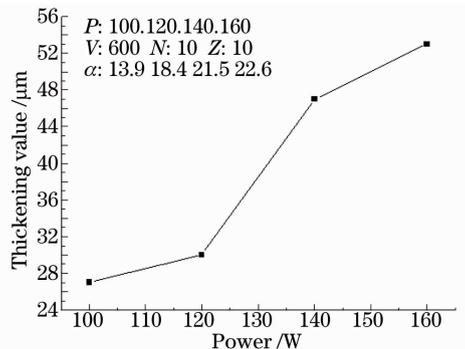


图 7 功率与增厚值关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between power and thickening value

随着扫描速度增大,板材表面受激光辐射的时间减少,吸收的激光能量逐渐减少,加热阶段的热膨胀增厚作用减弱;厚度方向温度梯度降低,弯曲角度减小,冷却阶段塑性挤压增厚作用同样减弱,从而使 h 随扫描速度的增大而降低,如图 8 所示。

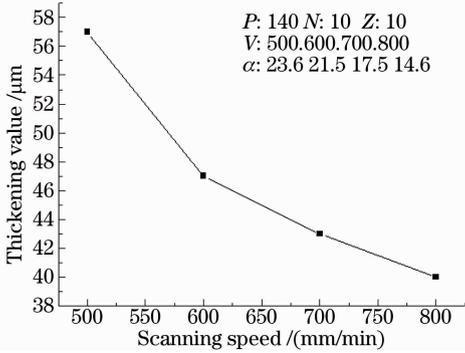


图 8 扫描速度与增厚值关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between scanning speed

and thickening value

由图 9 可知,随扫描次数增加,增厚值逐渐增加。扫描次数增加,热量于加热区域累积,热膨胀塑性变形区域深度增加,热膨胀晶粒数量增加,在热膨胀增厚的作用下,增厚值增加。如扫描次数由 5 次增加到 20 次时, h 由 17 μm 增加到 77 μm 。当扫描次数由 20 次增加到 40 次时,曲线斜率加大,其原因在于:板材在热膨胀增厚的同时,弯曲角度增大到一定水平,冷却阶段的应力值升高,挤压增厚作用逐渐增加,二者共同作用下 h 增加迅速。当扫描次数为 50 次时,加热表面出现轻微融化,固液相变过程吸收大量的能量而造成区域温升较小^[15],使得 h 增加减缓,曲线斜率相对减小。

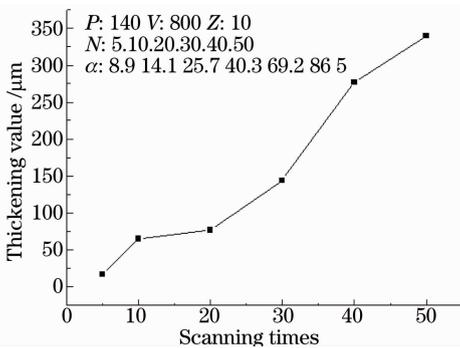


图 9 扫描次数与增厚值关系曲线

Fig. 9 Relationship curve between scanning times

and thickening value

离焦量的改变,一方面会使激光辐照区域内的能量密度发生变化,另一方面则使激光辐照区域面积发生变化^[16]。当离焦量由 7 mm 逐渐增加到 12 mm 时, h 先降低后升高,并在 10 mm 时达到最

小值,如图 10 所示。当 Z 由 7 mm 逐渐增加到 10 mm 时,虽然激光辐照区域增大,热膨胀区域增大,但能量密度降低,晶粒生长程度变缓,增厚值逐渐减小。当 Z 值增大到 12 mm 时,能量密度变化对塑性变形区的影响减弱,激光辐照区域成为主要影响因素,热膨胀区域增大,生长晶粒数量增加,增厚值逐渐增加,使得离焦量为 12 mm 时, h 达到 83 μm 。

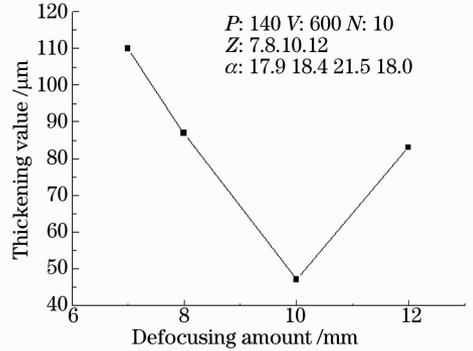


图 10 离焦量与增厚值关系曲线

Fig. 10 Relationship curve between defocusing amount

and thickening value

5 结 论

不锈钢-碳钢层合板经激光弯曲后弯折区出现增厚现象,基于材料组织图像分析研究增厚机理,并分析各能量参数对增厚值的影响规律,得到以下结论:

1) 不锈钢层合板在加热过程中晶粒生长,尺寸增大,产生热膨胀增厚;冷却阶段,塑性变形区在弯曲应力的作用下产生挤压增厚,在二者的作用下弯折区出现增厚现象,且热膨胀增厚占主导地位。当 α 小于 30° 时,挤压增厚作用微弱,厚度的增加主要得益于热膨胀增厚。

2) 激光弯曲后,上层不锈钢及中间碳钢层厚度增加,且碳钢层增厚值所占比重较大。下层不锈钢厚度在热膨胀增厚及拉伸变薄二者的共同作用厚度减小,仅当弯曲角度达到 85.6° 时,弯折区中心区域厚度增加 4 μm 。

3) 增厚值随弯曲角度的增大而增大。功率升高、扫描速度降低,弯折区热膨胀增厚作用加强,增厚值逐渐增大;随着扫描次数的升高,增厚值成因由单一热膨胀增厚作用转变为热膨胀增厚与挤压增厚共同作用,最大增厚值为 340 μm ;当离焦量为 10 mm 时,弯折区增厚值最小。

参 考 文 献

1 K Y Rhee, W Y Han, H J Park, *et al.*. Fabrication of aluminum/copper clad composite using hot hydrostatic extrusion

- process and its material characteristics[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 384(1): 70–76.
- 2 J E Lee, D H Bae, W S Chung, *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: 546–549.
- 3 Zhang Di, Zhang Guoding, Li Zhiqiang. The current state and trend of metal matrix composites[J]. *Materials China*, 2010, 29(4): 1–7.
张 荻, 张国定, 李志强. 金属基复合材料的现状及发展趋势[J]. *中国材料进展*, 2010, 29(4): 1–7.
- 4 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, 张廷安, 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.
- 5 Song Wenqing. Basic Research on the Flexible Forming of Laminated Clad Metal Sheet Using Plasma Arc [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. 19–84.
宋文庆. 层状金属复合板件等离子体弧柔性成形技术基础研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. 19–84.
- 6 Jiang Jishang. Research on Plasma Arc Forming of Laminated Clad Metal Sheets Containing Defects [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. 17–40.
姜继尚. 含缺陷层状金属复合板等离子体弧柔性成形研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009. 17–40.
- 7 Mo Weijuan. On Research Forming of a Composite Plate with Laser Bending[D]. Yanshan: Yanshan University, 2012. 31–46.
墨卫娟. 复合板材激光弯曲成形规律的研究[D]. 燕山: 燕山大学, 2012. 31–46.
- 8 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.
- 9 Liu Shunhong, Hu Qianwu, Zhou Longzao, *et al.*. Investigation on microstructure 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. 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.
- 10 S P Edwardson, P French, G Dearden, *et al.*. Laser forming of fiber metal laminates[J]. *Laser in Eng*, 2005, 15: 233–255.
- 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 A*, 2005, 396(1): 172–180.
- 12 K C Chan, J Liang. Thermal expansion and deformation behaviour of aluminium-matrix composite in laser forming [J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(9): 1265–1270.
- 13 M Geiger, F Vollertson. The mechanisms of laser forming[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1993, 42(1): 301–304.
- 14 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.
- 15 Chen Yanbei. Temperature Rise, Stress, Fluctuation of Stress and Evolution of Plastic Zone During Laser Heating of Metal Plat [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2009. 32–95.
陈彦北. 金属板激光加热时的温升、应力、应力波动和塑性区演化[D]. 南京: 南京理工大学, 2009. 32–95.
- 16 Ding Lei, Liu Huixia, Wang Hejun, *et al.*. Experimental study of thin aluminum-lithium alloy sheet mental 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实验研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 2143–2148.

栏目编辑: 韩 峰