

## Ti<sub>2</sub>AlNb 轧板激光弯曲工艺及微观组织研究

姜森宝, 王宇盛, 陈 瑶, 荣 建, 蒲容森, 毛 迪

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610092)

**摘要:** 为柔性制造 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金薄壁弯曲零件, 研究了激光弯曲工艺参数对弯曲角度和微观组织的影响规律。通过不同激光功率、扫描速度、扫描道次、扫描路径和试样宽度等工艺参数下的激光弯曲实验, 对比分析了弯曲样件的成形质量及微观组织。结果表明: 当试样宽度为 40 mm 时, 在激光束半径为 0.3 mm、激光功率为 0.4 kW 和扫描速度为 1.0 m·min<sup>-1</sup> 下, 单次弯曲角度达 3.3°; 随着扫描道次的增加, 弯曲角度近线性增加, 8 次扫描后的弯曲角度为 18°; 侧向偏移直线扫描路径与直线扫描路径趋势近似, 但弯曲圆角较大, S 曲线扫描路径会导致弯曲试样形状畸变; 小光斑直径激光弯曲的微观组织类似于激光焊接, 包括熔化区、热影响区和母材区, 材料的维氏硬度从母材区到熔化区呈下降趋势。因此, 激光弯曲成形是一种对 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金薄板局部弯曲的有效加工方法, 但需要精确控制。

**关键词:** Ti<sub>2</sub>AlNb 合金; 激光弯曲; 微观组织; 形状畸变; 弯曲角度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.05.008

**中图分类号:** TG302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 05-0061-06

### Research on laser bending process and microstructure for Ti<sub>2</sub>AlNb rolled sheet

Jiang Senbao, Wang Yusheng, Chen Yao, Rong Jian, Pu Rongsen, Mao Di

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

**Abstract:** In order to flexible manufacture the thin-wall Ti<sub>2</sub>AlNb alloy thin wall bent parts, the influences of laser bending process parameters on the bending angles and microstructure were studied, and the forming quality and microstructure of the bent samples were compared and analyzed by laser bending experiments with different laser powers, scanning rates, scanning passes, scanning paths and sample widths. The results show that when the sample width is 40 mm, the laser beam radius is 0.3 mm, the laser power is 0.4 kW and the scanning rate is 1.0 m·min<sup>-1</sup>, the bending angle under single scanning pass reaches 3.3°. With the increasing of scanning pass, the bending angle increases almost linearly, and the bending angle after eight times scanning is 18°. The lateral offset linear scanning path is similar to the trend of the liner scanning path, but the bending fillet is larger, and the S-curve scanning path causes distortion in the shape of the bent sample. The microstructure of laser bending with small spot diameter is similar to that of laser welding, which includes the melting zone, heat affected zone and base material zone, and the Vickers hardness of the material decreases from the base material zone to the melting zone. Thus, laser bending is an effective processing method for local bending of Ti<sub>2</sub>AlNb alloy thin sheet, but it needs precise control.

**Key words:** Ti<sub>2</sub>AlNb alloy; laser bending; microstructure; shape distortion; bending angle

激光弯曲成形是一种利用激光加热成形零件的成形技术<sup>[1]</sup>。通过激光束扫描零件表面, 引起局部加热, 并迅速冷却, 温度梯度产生热应力, 使零件发生弯曲成形<sup>[2]</sup>, 具有无接触力、精度高、工作环境简单、成形过程可控、成形路径灵活等优点<sup>[3]</sup>。激光弯曲的变形机制包括温度梯度机制、屈曲机制和镦粗机制<sup>[4]</sup>。温度梯度机制是由于激光扫描横截面上产生了明显温差, 导致巨大热应力差, 使板材

发生弯曲。根据变形机制的不同, 可开发出不同材料和形状的激光成形工艺<sup>[5]</sup>。Labeas G N<sup>[6]</sup>采用有限元仿真方法研究了铝板激光成形的温度分布和弯曲角度规律。Kant R 等<sup>[7]</sup>研究了多种扫描激光路径下 M1A 镁合金的弯曲机理, 总结了工艺参数与弯曲角度的非线性关系。Shidid D P 等<sup>[8]</sup>研究了气氛保护条件对钛合金板激光弯曲过程中表面氧化、弯曲质量和弯曲角度的影响, 总结了气氛保护条件对热影响区宽度、截面厚度和硬度的影响规律。Gisario A 等<sup>[9]</sup>研究了钛合金和 7075 铝板材在外力辅助条件下的激光弯曲成形工艺, 获得了大弯曲角、小圆角和小回弹的弯曲效果。研究结果验证了激光弯曲工艺

收稿日期: 2024-02-22; 修订日期: 2024-04-26

基金项目: 国家博士后基金 (2020M670792)

作者简介: 姜森宝 (1986-), 男, 博士, 工程师

E-mail: jiangsenbao@126.com

在大尺寸、复杂形状零件弯曲成形中的可行性,在难变形材料的复杂零件局部弯曲成形中展现了良好的应用前景。

$Ti_2AlNb$  合金是一种具有高强度和良好抗蠕变性能的 Ti-Al 金属间化合物<sup>[10]</sup>,已应用于航空发动机等零部件<sup>[11]</sup>。但  $Ti_2AlNb$  合金在室温下的变形拉力大、塑性能力差,一般需要在较高温度下成形,如高温锻造、热轧制<sup>[12]</sup>、热压成形、超塑成形<sup>[13]</sup>和热等静压成形<sup>[14]</sup>等,长时间热变形也显著影响了  $Ti_2AlNb$  合金的显微组织和力学性能<sup>[15]</sup>。针对  $Ti_2AlNb$  合金的复杂结构,常采用钣金成形出零件后,再采用激光焊接拼接。 $Ti_2AlNb$  合金激光焊接后,焊缝区材料熔化后又快速冷却,形成粗大的 B2 相组织<sup>[16]</sup>,激光接头在拉伸过程中,易在热影响区断裂,发生准解理和晶间断裂<sup>[17]</sup>。 $Ti_2AlNb$  合金热加工的微观组织复杂<sup>[18]</sup>,不同激光参数下组织特征不同<sup>[19]</sup>,为实现  $Ti_2AlNb$  合金激光弯曲成形的尺寸精度和微观组织协同控制,需详细研究不同激光工艺参数下的弯曲变形和组织演变规律,为  $Ti_2AlNb$  合金薄板激光弯曲成形的工业应用提供理论支撑。

## 1 材料与实验方法

激光弯曲实验用  $Ti_2AlNb$  合金板材的名义成分为 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo (% , 质量分数),为宝钛集团有限公司热轧制板材,厚度为 1.1 mm。

采用 YLS-6000 高功率  $CO_2$  激光器进行激光弯曲实验,实验装置如图 1 所示,扫描路径由松下机

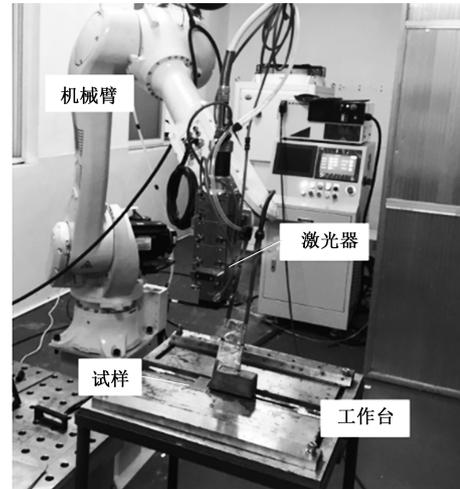


图 1 激光弯曲实验装置

Fig. 1 Test equipment of laser bending

械臂控制。扫描面采用氩气保护冷却,激光束半径为 0.3 mm,激光聚焦于弯曲试样上表面。实验板料长度为 60 mm,一侧固定,另一侧可自由弯曲,每次扫描后待实验板材充分冷却后,再进行下一次的激光扫描。

为研究扫描路径对激光弯曲结果的影响,设计了图 2 中的 3 种路径,即直线扫描、S 曲线扫描和侧向偏移直线扫描路径。直线扫描是按照固定直线扫描弯曲,可多道次重复弯曲;S 曲线扫描为两个半圆组合,可多道次弯曲;侧向偏移直线扫描为第 1 道沿着中心线直线扫描,后续每道次将激光器向右偏移 1 mm 后,再沿直线扫描,以对比分析相同激光弯曲道次下,激光作用区面积增大对薄板弯曲的影响。

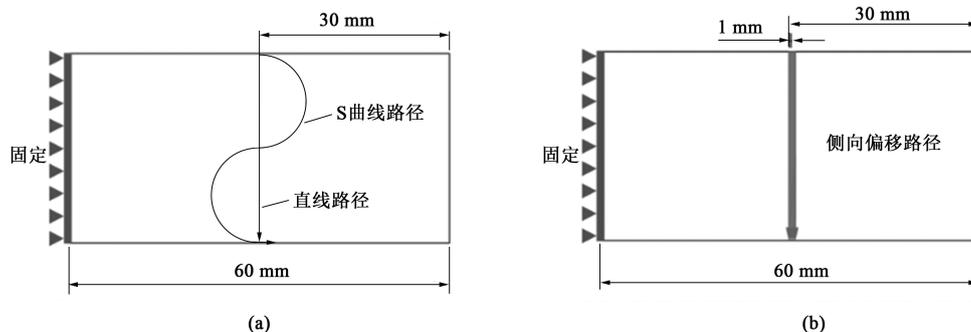


图 2 3 种扫描路径示意图

(a) 直线扫描和 S 曲线扫描 (b) 侧向偏移直线扫描

Fig. 2 Schematic diagrams of three kinds of scanning paths

(a) Linear and S-curve scanning (b) Lateral offset linear scanning

激光弯曲后,在弯曲试样上取样,采用 ZEISS Supra 55 SAPPHERE 电子显微镜,观察背散射衍射电子照

片微观组织。对弯曲后的熔化区、热影响区和母材区进行维氏硬度测试,以评价弯曲后试件的力学性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 弯曲角度变化规律

选择扫描速度为  $1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , 对宽度为  $40 \text{ mm}$  板材开展单道次激光弯曲实验, 图 3a 显示了 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金薄板弯曲角度与不同激光功率的关系。随着激光功率从  $0.4 \text{ kW}$  增加至  $1.0 \text{ kW}$ , 弯曲角度从  $3.3^\circ$  减小至  $1.1^\circ$ 。当激光功率增加至  $1.5 \text{ kW}$  时, 弯曲角与  $1.0 \text{ kW}$  功率时近似, 为  $0.9^\circ$ 。图 3b 为不

同激光功率下的弯曲试样。激光功率为  $0.4 \text{ kW}$  时的弯曲试样扫描线表面已局部融合, 表面光滑。当激光功率增加至  $0.6$  和  $0.8 \text{ kW}$  时, 扫描线因激光脉冲能量较大呈鱼鳞状。且激光功率为  $0.8 \text{ kW}$  时的弯曲试样背面已出现明显的冲蚀痕迹, 激光已熔透  $1.1 \text{ mm}$  厚的 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金薄板。因此, 弯曲角度随着激光输入功率增加而降低的主要原因可解释为: 激光扫描时板材表面金属熔化降低了热应力, 温度梯度机制作用减弱。激光器最小输入功率为  $0.4 \text{ kW}$ , 后续实验均选择此功率。

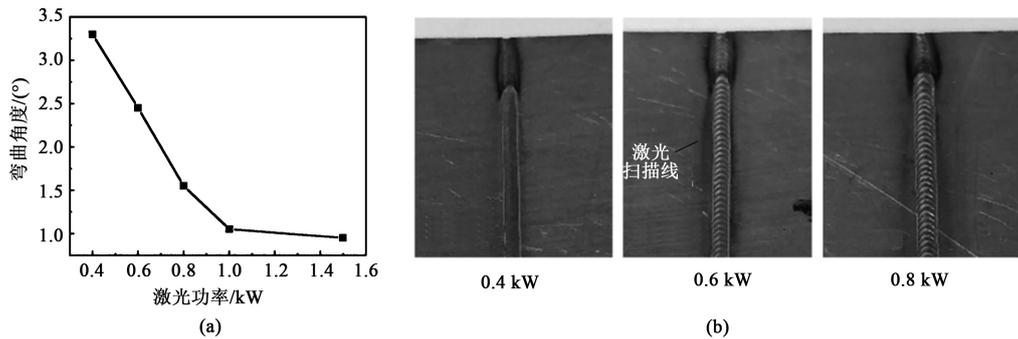


图3 激光功率对弯曲角度和表面质量的影响

(a) 弯曲角度 (b) 表面质量

Fig. 3 Effect of laser power on bending angle and surface quality

(a) Bending angle (b) Surface quality

选择扫描功率为  $0.4 \text{ kW}$ , 对宽度为  $40 \text{ mm}$  的板材开展单道次激光弯曲实验, 图 4 为不同激光扫描速度下的弯曲角度。当激光扫描速度从  $0.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  增加至  $1.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  时, 弯曲角度从  $1.1^\circ$  增加至  $3.3^\circ$ 。当激光扫描速度进一步增加时, 弯曲角度减小。激光扫描速度影响了弯曲区域温度和应力分布: 当扫描速度较低时导致局部温度过高, 弯曲角度较小; 当扫描速度较高时, 板料的激光辐照不足, 弯曲角度也较小。为提高激光弯曲效率, 选择扫描速度为  $1.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

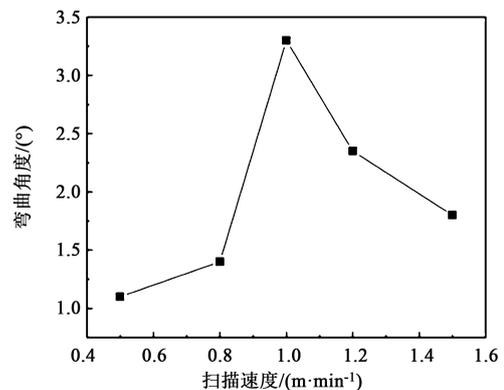


图4 扫描速度对弯曲角度的影响曲线

Fig. 4 Effect curve of scanning speed on bending angles

选择扫描速度为  $1.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 、扫描功率为  $0.4 \text{ kW}$ , 对宽度为  $40 \text{ mm}$  的板材开展多道次激光弯曲实验。图 5a 为弯曲角度与扫描道次的关系曲线。随着扫描道次的增加, 激光弯曲角度呈线性增加。当扫描 8 道次后, 弯曲角度达到  $18^\circ$ 。图 5b 为扫描 4 道次和 8 道次的弯曲试样。多次扫描后, 材料表面反复熔化, 激光扫描线表面质量良好, 未出现裂纹、杂质、空腔和激光穿透现象, 表明 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金薄板可在无缺陷情况下进行大角度弯曲, 且可通过扫描道次控制弯曲角度。

试样宽度从  $20 \text{ mm}$  增加至  $40 \text{ mm}$ , 弯曲角度从  $1.2^\circ$  增加至  $3.3^\circ$ 。这主要是因为温度场、应力场和试样重力的综合作用。宽度小的试样受到激光扫描热输入较小, 弯曲角度较小。当板料宽度增加至  $80 \text{ mm}$  时, 薄板尺寸过大, 重力削弱了弯曲程度, 弯曲角度下降至  $1.9^\circ$ 。因此, 激光弯曲不仅受激光参数影响, 也受试样尺寸、重力等因素影响。为精确获得激光弯曲零部件, 需采用有限元仿真软件精确仿真, 制定精准的工艺参数。

图 6 为弯曲角度与板料宽度的关系曲线。随着

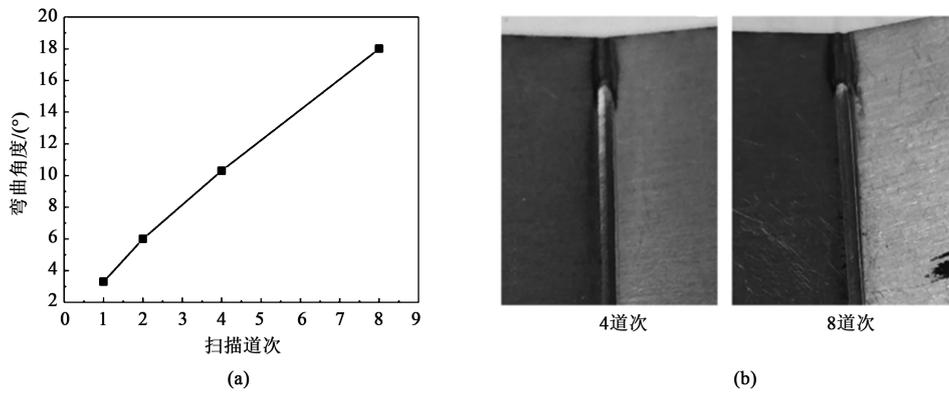


图 5 激光扫描道次对弯曲角度的影响

(a) 关系曲线 (b) 弯曲试样

Fig. 5 Effect of laser scanning passes on bending angle

(a) Relation curve (b) Bending samples

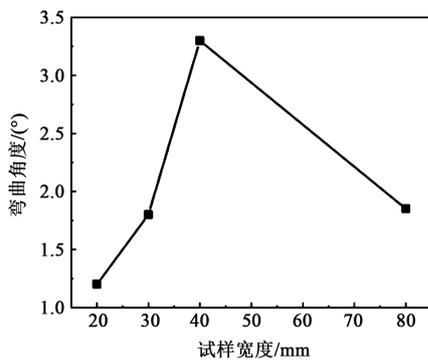


图 6 试样宽度对弯曲角度的影响曲线

Fig. 6 Effect curve of blank width on bending angle

### 2.2 扫描路径对激光弯曲角度的影响

激光扫描路径会影响弯曲角度和弯曲形状,图 7a 与图 7b 为 S 曲线扫描路径和侧向偏移直线扫描路径的试样。图 7c 为不同扫描路径下弯曲角度随扫描道次的变化规律。侧向偏移直线扫描 4 道次后,试样弯曲角度为 8.5°, 略小于直线 4 道次反复扫描试样弯曲角度。这是因为侧向偏移直线扫描时,薄板热影响区发生变化且相互影响,激光不聚集,弯曲圆角增大,弯曲应力减小。相同扫描次数下, S 曲线扫描试样的弯曲角度远小于直线扫描样品,扫描 4 道次的弯曲角度为 5.0°。

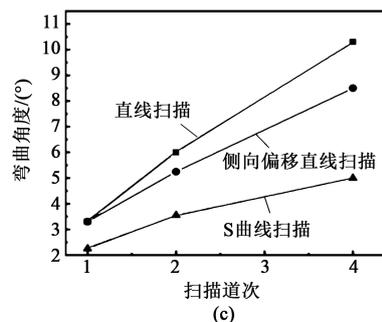
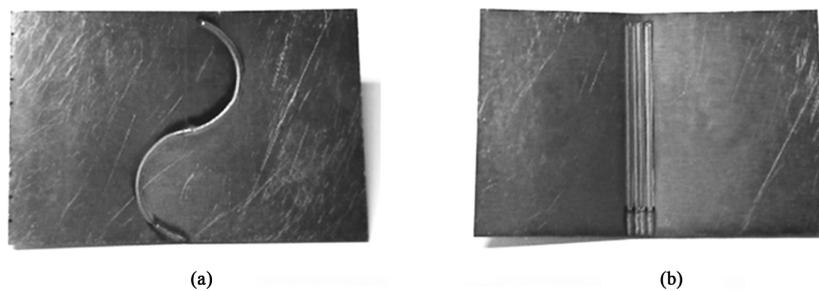


图 7 激光扫描路径对激光弯曲的影响规律

(a) S 曲线扫描试样 (b) 侧向偏移直线扫描试样 (c) 弯曲角度-扫描道次曲线

Fig. 7 Effect law of laser scanning paths on laser bending

(a) S-curve scanning sample (b) Lateral offset linear scanning sample (c) Curves of bending angle-scanning pass

因 S 曲线扫描路径易引起试样翘曲、畸变, 固定一侧, 另一侧的弯曲高度不同, 如图 8a 所示。图 8b 为 2 道次扫描和 4 道次扫描后试样的不均匀高度分布, 两侧高度差从 0.99 mm 增加至 1.95 mm。

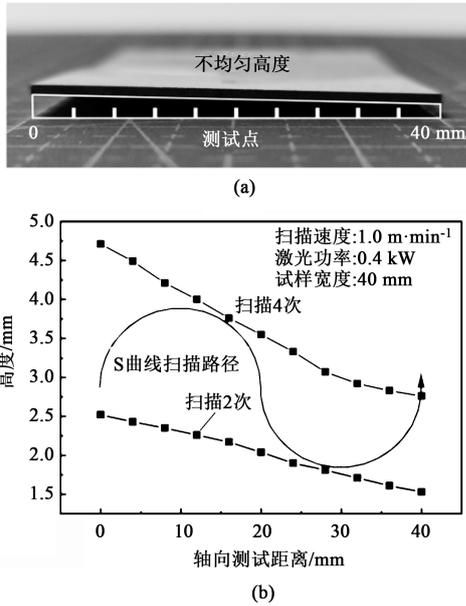


图 8 S 曲线扫描路径激光弯曲结果  
(a) 试样 (b) 相对扭曲高度分布

Fig. 8 Laser bending results under S-curve scanning paths  
(a) Sample (b) Relative distortion height distribution

### 2.3 微观组织及硬度

由于激光束能量集中, Ti<sub>2</sub>AlNb 合金导热性能差, 沿厚度方向温度差异较大, 其激光弯曲成形的主要机制为温度梯度机制。激光弯曲导致的局部温度升高, 其温度梯度影响了试样微观组织和力学性能。

图 9 为不同激光功率下弯曲试样扫描区域的背散射电子照片。图 9a 为激光功率为 0.4 kW 时弯曲试样的微观组织。激光扫描区域的横截面分为熔化区、热影响区和母材区。母材组织呈现明显的轧制组织, 白色基体为 B2 相, 长条状灰色相为 O 相, 深色球形相为 α<sub>2</sub> 相。熔池中明显有 B2 相枝晶, 由熔化区边缘向激光光斑中心生长, 为典型半圆形熔池特征。热影响区域的典型 O 相组织含量减少, 晶粒粗大, 与母材组织差异明显。图 9b 为激光功率为 0.8 kW 时弯曲试样的微观组织, 熔化区和热影响区明显增大, 为典型粗大 B2 相激光焊接组织, 呈漏斗形, 且热影响区已穿透整个薄板厚度。

图 10 为 8 道次扫描后的背散射电子照片, 扫描速度为 1.0 m·min<sup>-1</sup>, 激光功率为 0.4 kW, 板材宽度为 40 mm。由于每次扫描后充分冷却, 不同扫描道次下激光扫描区域的组织特征相似。显微组织中无微观裂纹缺陷、熔化区域多次膨胀迫使材料流线向熔化区偏移。熔化区多次熔化深度略有差异, 会在

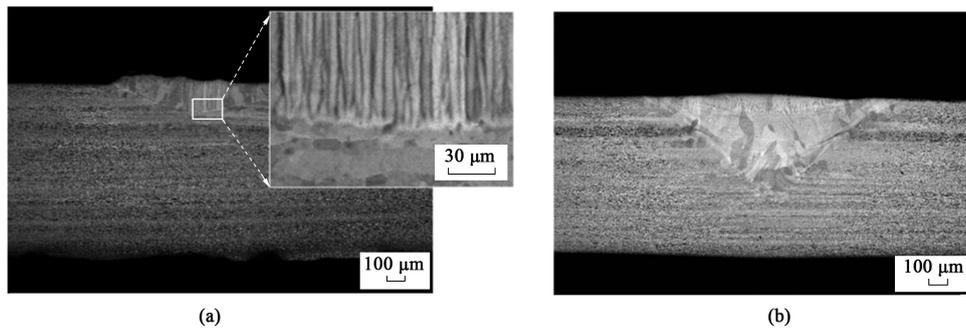


图 9 不同激光功率下弯曲试样的显微组织  
(a) 0.4 kW (b) 0.8 kW

Fig. 9 Microstructures of bent samples under different laser powers

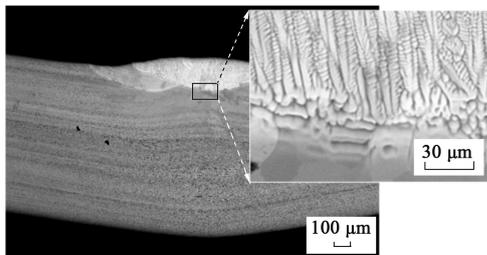


图 10 8 道次激光扫描后弯曲试样的显微组织

Fig. 10 Microstructure of bent sample after eight times scanning

熔化区与热影响区边界处形成复杂纤维组织。激光弯曲后, 弯曲内侧的材料明显高于两侧, 堆积了熔化的多余材料。随着激光功率的增加, 熔化区深度由 0.4 kW 下的 168 μm 增加至 0.8 kW 下的 303 μm, 经过 8 次扫描后的熔化区深度仅增加至 203 μm。

图 11 为不同扫描道次下弯曲试样的维氏硬度分布, 采样间隔为 100 μm, 竖线为母材与热影响区的分界线。母材硬度在 390~420 HV, 热影响区的硬度逐渐下降, 熔化区的硬度降低约 22%, 约为 320 HV。

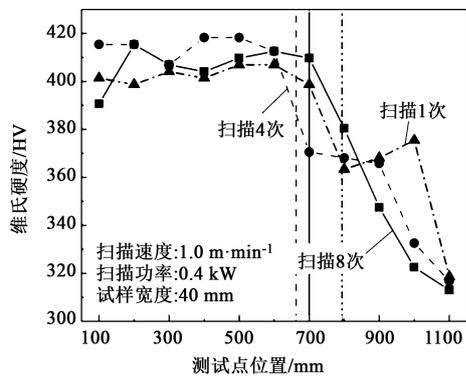


图 11 不同扫描道次下弯曲试样的维氏硬度分布

Fig. 11 Vickers hardness distributions of bent samples under different scanning times

### 3 结论

(1) 激光功率、扫描速度、扫描道次、扫描路径、试样尺寸等显著影响了  $Ti_2AlNb$  合金薄板的激光弯曲角度。当试样宽度为 40 mm 时，在激光束半径为 0.3 mm、激光功率为 0.4 kW 和扫描速度为  $1 m \cdot min^{-1}$  条件下，单道次弯曲角度达  $3.3^\circ$ 。随着扫描道次的增加，弯曲角度近线性增加，8 次扫描后的弯曲角度为  $18^\circ$ 。侧向偏移的扫描路径与直线扫描路径趋势近似，但弯曲圆角较大，S 曲线扫描方式导致弯曲试样形状畸变。

(2)  $Ti_2AlNb$  合金薄板小光斑直径激光弯曲的微观组织类似于激光焊接，微观组织包括熔化区、热影响区和母材区，材料的维氏硬度从母材区域到熔化区呈下降趋势，母材维氏硬度约为 400 HV，熔化区硬度约为 320 HV。

#### 参考文献:

- [1] Liu J, Sun S, Guan Y J. Numerical investigation on the laser bending of stainless steel foil with pre-stresses [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209 (3): 1580-1587.
- [2] Shen H, Vollertsen F. Modelling of laser forming-An review [J]. *Computational Materials Science*, 2009, 46 (4): 834-840.
- [3] Guo Y K, Shi Y J, Wang X G, et al. A method to realize high-precision and large laser thermal bending angle [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 62: 168-178.
- [4] Uday S D, Shrikrishna N J, Ravi K. Laser forming systems: A review [J]. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 2015, 8 (3-4): 160-205.
- [5] Dearden G, Edwardson S P. Some recent developments in two- and three-dimensional laser forming for 'macro' and 'micro' applications [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2003, 5: S8.
- [6] Labeas G N. Development of a local three-dimensional numerical simulation model for the laser forming process of aluminium components [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 207 (1-3): 248-257.
- [7] Kant R, Joshi S N. Thermo-mechanical studies on bending mechanism, bend angle and edge effect during multi-scan laser bending of magnesium M1A alloy sheets [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, 23: 135-148.
- [8] Shidid D P, Hoseinpour G M, Brandt M, et al. Study of effect of process parameters on titanium sheet metal bending using Nd: YAG laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 47: 242-247.
- [9] Gisario A, Barletta M, Venettacci S. Improvements in springback control by external force laser-assisted sheet bending of titanium and aluminum alloys [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 86: 46-53.
- [10] Germann L, Banerjee D, Guédou J Y, et al. Effect of composition on the mechanical properties of newly developed  $Ti_2AlNb$ -based titanium aluminide [J]. *Intermetallics*, 2005, 13 (9): 920-924.
- [11] Partridge A, Shelton E F J. Processing and mechanical property studies of orthorhombic titanium-aluminide-based alloys [J]. *Air & Space Europe*, 2001, 3 (3): 170-173.
- [12] Emura S, Araoka A, Hagiwara M. B2 grain size refinement and its effect on room temperature tensile properties of a Ti-22Al-27Nb orthorhombic intermetallic alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2003, 48 (5): 629-634.
- [13] Li X, Wang G F, Zhang J X, et al. Electrically assisted superplastic forming/diffusion bonding of the  $Ti_2AlNb$  alloy sheet [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106 (1): 77-89.
- [14] Wu J, Xu L, Lu Z G, et al. Microstructure design and heat response of powder metallurgy  $Ti_2AlNb$  alloys [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, 31 (12): 1251-1257.
- [15] Zhang Q C, Chen M H, Wang H, et al. Thermal deformation behavior and mechanism of intermetallic alloy  $Ti_2AlNb$  [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26 (3): 722-728.
- [16] Chen Y B, Zhang K Z, Xue H, et al. Study on laser welding of a Ti-22Al-25Nb alloy: Microstructural evolution and high temperature brittle behavior [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 681: 175-185.
- [17] Lei Z L, Zhou H, Chen Y B, et al. A comparative study of deformation behaviors between laser-welded joints and base metal of Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo alloy [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28 (8): 5009-5020.
- [18] Wang W, Zeng W D, Li D, et al. Microstructural evolution and tensile behavior of  $Ti_2AlNb$  alloys based  $\alpha_2$ -phase decomposition [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 662: 120-128.
- [19] Maji K, Shukla R, Nath A K, et al. Finite element analysis and experimental investigations on laser bending of AISI304 stainless steel sheet [J]. *Procedia Engineering*, 2013, 64: 528-535.