

# 激光热应力成形弯折区形貌演变规律研究

范伟鑫<sup>1,2</sup>, 姚喆赫<sup>1,2</sup>, 潘成颢<sup>1,2</sup>, 洪锦源<sup>1,2</sup>, 刘云峰<sup>1,2</sup>, 姚建华<sup>1,2\*</sup>

(1. 浙江工业大学 a. 激光先进制造研究院 b. 机械工程学院, 杭州 310023;

2. 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 杭州 310023)

**摘要:** **目的** 针对激光热应力成形弯折区增厚现象, 揭示激光热输入、弯曲角度和成形机制对弯曲过程的影响, 以及弯折区域形貌的演变规律, 为提高激光热应力成形弯折区域的形貌可控性提供参考。**方法** 采用高速相机拍摄成形过程中热输入和弯曲角度对弯折区的宏/微观形貌的作用效果, 并采用共聚焦显微镜观察试样的宏观形貌, 采用光学显微镜分析微观组织, 通过维氏显微硬度计测量弯折区附近材料的硬度分布情况, 同时结合温度场数值模拟和表面张力理论分析, 揭示弯折区形貌的影响因素及形成机制。**结果** 在低比能作用下, 弯折区的熔融材料在激光扫描结束后快速凝固, 并在扫描次数逐渐增加的过程中其表面逐渐隆起, 并形成凸起状形貌, 表面粗糙度随着扫描次数的增加呈现上升趋势, 由 5.5  $\mu\text{m}$  增至 37.6  $\mu\text{m}$ 。在高比能作用下, 熔融材料的流动性得到提升, 并在表面张力的作用下充分铺展, 宏观形貌由凸变平, 最后呈现凹形形貌, 表面粗糙度随着扫描次数的增加呈现相反的变化趋势, 由 31.7  $\mu\text{m}$  减至 5.8  $\mu\text{m}$ 。此外, 在塑性成形过程中, 熔池流动仍受到成形角两侧壁面的限制。硬度测试结果表明, 激光热应力成形弯折熔凝区域的硬度略高于基体的硬度, 热影响区的硬度比基体的硬度降低了 40%。**结论** 激光热输入、弯曲角度和成形机制会影响弯折区材料表面的挤压、熔化、流动、凝固过程, 以及材料内部的温度梯度和界面表面张力, 在这些因素的影响下弯折区域的轮廓形貌、成形粗糙度、显微组织和硬度分布发生了变化。

**关键词:** 激光热应力成形; 弯折区; 比能; 表面张力; 形貌; 硬度分布

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)13-0175-12

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.13.017

## Morphology Evolution of Bending Zone in Laser Thermal Stress Forming

FAN Weixin<sup>1,2</sup>, YAO Zhehe<sup>1,2</sup>, PAN Chenghao<sup>1,2</sup>, HONG Jinyuan<sup>1,2</sup>,  
LIU Yunfeng<sup>1,2</sup>, YAO Jianhua<sup>1,2\*</sup>

(1. a. Institute of Laser Advanced Manufacturing, b. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 2. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education and Zhejiang Province, Hangzhou 310023, China)

**ABSTRACT:** Laser thermal stress forming, as a contactless and highly flexible manufacturing method, is a promising technology in the micro forming field. Due to its high laser power density, thickening phenomenon occurs in the bending zone

收稿日期: 2023-07-10; 修订日期: 2023-10-07

**Received:** 2023-07-10; **Revised:** 2023-10-07

**基金项目:** 国家自然科学基金 (52175443, U1809220); 浙江省自然科学基金 (LD22E050013)

**Fund:** National Natural Science Foundation of China (52175443, U1809220); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LD22E050013)

**引文格式:** 范伟鑫, 姚喆赫, 潘成颢, 等. 激光热应力成形弯折区形貌演变规律研究[J]. 表面技术, 2024, 53(13): 175-186.

FAN Weixin, YAO Zhehe, PAN Chenghao, et al. Morphology Evolution of Bending Zone in Laser Thermal Stress Forming[J]. Surface Technology, 2024, 53(13): 175-186.

\*通信作者 (Corresponding author)

during the process. During the laser thermal stress forming, the involvement of multiple processes such as melting-solidification and plastic forming, as well as various effects of specific energy and forming mechanisms, constantly changes the temperature and stress state of the material in the bending zone. The flow of the material in the bending zone is affected by various factors including heating methods, bending angles, and forming mechanisms, etc. The evolution law of its morphology is even more complex. In this study, the effects and performance impacts of laser thermal input, bending angles, and forming mechanisms on the macroscopic and microscopic morphology of the bending zone were analyzed, revealing the morphological changes in the bending zone during laser thermal stress forming. The findings provide reference for improving the controllability of the morphology in the bending zone during laser thermal stress forming.

The temperature gradient in the direction of sheet thickness and temperature field distribution during the laser scanning were studied by numerical simulation. An experimental setup for laser thermal stress forming was developed. The material of the specimen used in the experiments was 304 stainless steel, with size of 30 mm×30 mm×0.5 mm. A 500 W oscillator continuous fiber laser with 150-250 W laser power and a velocity range of 8-100 mm/s was used. 10-50 times of scanning was conducted with an interval of 5 s. During the process, a high-speed camera was used to capture the morphology of the forming region. After experiments, the bending angle, morphology and roughness of the bending zone of the sample were measured with a confocal microscope (Keyens VK-X1000) and a metallographic microscope (Zeiss Axio Imager2). Furthermore, A Vickers microhardness tester (Nanguang XHV-1000T-CCD) was used to test the microhardness of the shaped sample.

With low specific energy, the molten material in the bending zone rapidly solidified after the laser scanning, forming a continuous raised morphology with the increasing of scanning numbers. The macroscopic morphology exhibited convex growth, and the surface roughness increased from 5.5  $\mu\text{m}$  to 37.6  $\mu\text{m}$  with the increase of scanning numbers. With high specific energy, the fluidity of the molten material increased and fully spread under the action of surface tension, resulting in a change in macroscopic morphology from convex to concave. The surface roughness showed an opposite trend, decreasing from 31.7  $\mu\text{m}$  to 5.8  $\mu\text{m}$  with scanning number increasing. In addition, the flow of the molten pool during plastic deformation was still restricted by the sheets on both sides of the forming angle. The effects of laser thermal input, bending angles, and forming mechanisms on the morphology of the bending zone were discussed based on the experimental results. At the same time, as the specific energy of the melting zone increased, the melting morphology changed from round shape into "waist shape", and a massive fine crystal structure was formed at the top region. The heat affected zone was symmetrically distributed around the melting zone, and its width was positively correlated with the specific energy. The microhardness test showed that the hardness of laser thermal stress forming melting zone was slightly higher than that of the matrix, and the hardness of heat affected zone was 40% lower than that of the matrix.

In the laser thermal stress forming, the joint action of laser thermal input, bending angles, and forming mechanisms can change the macro/microscopic morphology of the bending zone. As the specific energy and the scanning number increase, the flowability of the material in the bending zone gradually enhances. However, the material flow is restricted by the sheets of the forming angle during plastic deformation. With these effects, the macroscopic morphology of the bending zone grows convexly, and flattens with high specific energy, resulting in a concave morphology, accompanied by corresponding changes in surface roughness.

**KEY WORDS:** laser thermal stress forming; bending zone; specific energy; surface tension; morphology; hardness distribution

激光热应力成形采用高功率激光束对工件表面局部加热,在材料表面产生瞬时高温和热应力,进而对材料进行局部热塑性变形,从而实现折弯或复杂曲面结构的制造<sup>[1]</sup>,具有无模具、高柔性、强可控性等优势。激光热应力成形作为一种典型的激光等材制造技术<sup>[2]</sup>,其激光光斑可达到微米级尺度,该技术在微细加工领域具有广泛的应用前景。

经激光热应力成形后,板材弯折区的微观组织<sup>[3-5]</sup>和力学性能<sup>[6]</sup>等一直是国内外学者研究的重点。Nath等<sup>[4]</sup>对铝合金激光热应力成形显微组织进行了研究,

发现热影响区(HAZ)周围存在明显边界,受热组织由柱状树枝晶组成,中心存在细小等轴晶粒。刘顺洪等<sup>[5]</sup>研究了激光热应力成形的累积线能量密度对钛合金显微组织和硬度的影响。宫唤春等<sup>[6]</sup>研究发现,激光加热区中心的硬度最大。张攀等<sup>[7]</sup>研究发现,经激光弯曲后,层合板的厚度增加,过渡区域元素沿板厚方向扩散,提升了层合板冶金结合能力和过渡层性能。

上述研究探讨了激光热应力成形微观组织和性能的变化,弯折处的表面形貌受到多因素的影响,其变化将对工件的成形性能和质量产生显著影响。在不

同的激光热应力成形机制中<sup>[8]</sup>, 经研究发现, 在温度梯度机制 (TGM)<sup>[9]</sup>作用下, 由于热输入较小, 因此弯折区材料表面光滑; 在屈曲机制 (BM)<sup>[10]</sup>作用下, 由于径厚比较大, 因此金属材料在局部区域易发生屈曲, 并产生弹性变形, 且金属材料的表面形态呈波浪状; 在镦粗机制 (UM)<sup>[11-12]</sup>作用下, 板材上下表面会产生凸起, 镦粗现象明显。上述研究定性阐述了激光热应力成形过程中不同成形机制下弯折区形貌的显著变化情况。Shi 等<sup>[13]</sup>进一步提出了 TGM 与 UM 的耦合成形机制 (CM), 且弯曲形貌兼具两者特征。光斑直径越小, 则功率密度越高<sup>[14]</sup>。Raza 等<sup>[15]</sup>提出了考虑表面熔化的成形机制 (Melt-based TGM), 在该机制作用下, 弯折处顶部出现了凸形形貌。吴东江等<sup>[16]</sup>观测了脉冲激光弯曲硅片后的表面形貌发现, 在激光能量作用的弯折区表面形成了波纹状凸起, 以及具有一定深度的熔融层。燕翔等<sup>[3]</sup>对钛合金激光热应力成形微观组织进行研究后发现, 弯折区出现了材料堆积现象, 其大小和形状与累积线能量有关。Shidid 等<sup>[17]</sup>研究发现, 采用惰性气体辅助激光热应力成形, 可以降低扫描区域的重熔深度。Wang 等<sup>[18-19]</sup>对层合板激光热应力成形增厚机理进行研究后发现, 成形过程中的热膨胀增厚与弯曲过程中的挤压增厚协同作用是材料增厚的原因, 且弯曲角度决定了两者的影响程度。上述研究表明, 激光热应力成形涉及熔化凝固、塑性成形、晶粒再结晶和晶界运动等多个过程, 它们在成形中的作用和机制各不相同, 在其相互作用下, 变形区域内材料的温度和应力状态持续变化, 弯折区域内材料的流动受到多方面因素的影响, 包括加热方式、弯曲角度及成形机制等, 其形貌的演变规律更为复杂, 仍需深入研究。

为此, 本文通过分析激光热应力成形弯折区的形貌演变过程, 研究激光热输入、弯曲角度及成形机制对弯曲过程的影响, 采用高速相机监测成形过程, 分析弯折区宏观形貌的变化规律。对比不同比能作用下扫描线上粗糙度的变化情况, 并对弯折区周围的显微组织和硬度分布进行检测。为了深入理解激光热应力成形弯折区域形貌的形成过程, 通过温度场数值模拟和表面张力理论分析, 揭示弯折区形貌的影响因素及形成原因。

## 1 试验方案与数值模型

### 1.1 设备与方法

采用的激光热应力成形试验装置主要包括振镜式激光加工系统、高速相机、保护气 ( $N_2$ )、可翻转薄板夹具、倾斜式回转台等。其中, 振镜式激光加工系统主要包括光路控制系统、激光器水冷系统、激光器等。激光器为振镜式连续光纤激光器 (IPG, 型号 PS-YLR-500), 激光功率可调 (范围为 0~500 W),

焦点处光斑的直径为 125  $\mu m$ , 激光器的纵向工作距离大于 200 mm。激光器光路控制系统可经外部控制计算机绘制不同路径, 并通过 2 块控制振镜的偏转调整光路, 实现扫描路径的调整。试验过程由高速相机系统拍摄并记录, 拍摄视角沿扫描线 View I 和垂直扫描线 View II 方向。待弯曲薄板通过带有分度头的可翻转薄板夹具装夹, 可翻转薄板夹具保证实验前后扫描线水平, 并始终处于焦点位置。此外, 当弯曲角度超过 90°时, 通过倾斜式回转台调节工作台面与水平面的夹角, 实现大角度弯曲, 整体装置示意图如图 1 所示。

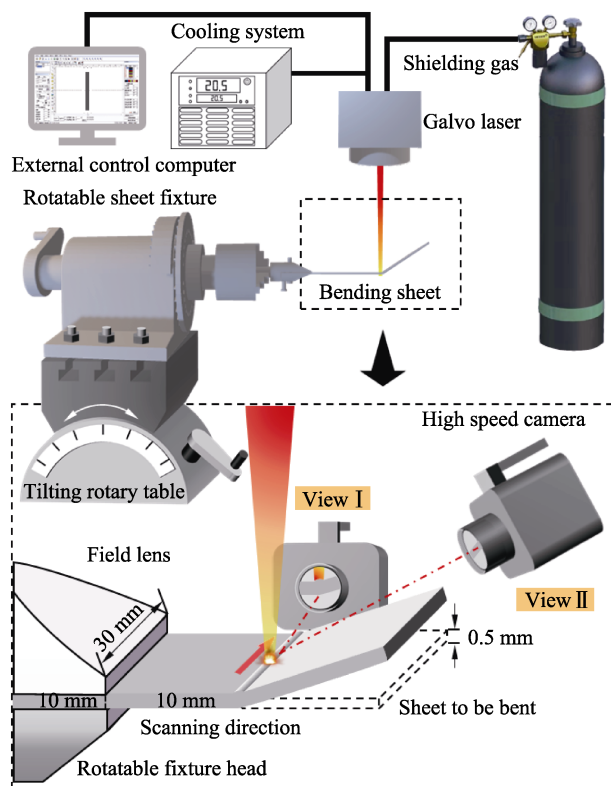


图 1 激光热应力成形示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser thermal stress forming

试验所用材料为 304 不锈钢薄板, 尺寸为 30 mm×30 mm×0.5 mm, 在试验前用砂纸将薄板表面打磨。在试验中, 薄板的装夹区域尺寸为 30 mm×10 mm×0.5 mm, 夹具头的宽度为 30 mm, 与薄板的宽度一致。扫描路径为直线, 距离薄板自由端 10 mm。为了提升板材表面对激光的吸收率, 沿激光扫描路径涂覆石墨, 涂覆层的厚度为 3~5  $\mu m$ 。在多次扫描时, 相邻道次间的扫描时间间隔相同, 均为 5 s。采用单因素试验法, 为了保证试验的准确性, 取 3 组对照组, 每块试样选取头尾两侧进行角度测量, 在试验后每个数据点选取头尾进行角度测量, 取 6 次角度的平均值为该数据点的值。粗糙度选取扫描线中点测量, 取样长度为 3 mm, 宽度为扫描线宽度。试验参数如表 1 所示。采用高速相机拍摄弯折区的形貌, 在试验结束

表 1 试验与模拟工艺参数  
Tab.1 Experiment laser parameters and simulation laser parameters

Method	Laser power $P/W$	Scanning velocity $v/(mm \cdot s^{-1})$	Scanning number $N$	Cooling time single scanning $t/s$
Experimental	150/200/250	8/10/30/50/100	10/20/30/40/50	5
Simulation	200	10/50	5	5

后,采用共聚焦显微镜(基恩士 VK-X1000)和金相显微镜(蔡司 Axio Imager2)检测试样的弯曲角度、弯折区形貌及粗糙度。同时,采用维氏显微硬度计(南光 XHV-1000T-CCD)对成形后的试样进行显微硬度测试。

## 1.2 数值模型

鉴于热输入在激光热应力成形过程中的重要性,对薄板进行不同参数下温度场及薄板厚度方向上的温度梯度数值模拟。由于试验中薄板存在宽度为 10 mm 的装夹区域,故在模拟中将薄板的尺寸设定为 30 mm×20 mm×0.5 mm,激光参数设置如表 1 所示,与试验基本一致。为了保证计算的准确性,在扫描区域内采用加密网格,如图 2a 所示。为了保证数值模型的收敛性,在不影响模型准确性的前提下,对该数值模型提出以下假设。

1) 材料保持各向同性,同时考虑温度变化对材料性能(包括导热系数  $k$ 、比热  $c$ 、热膨胀系数  $\alpha_{th}$ 、对流系数  $h$ )的影响。

2) 薄板的初始温度和环境温度均为 25 ℃,且外部空气热交换足够快,环境温度恒定为 25 ℃。

3) 薄板的冷却方式为自然冷却,考虑了空气的对流换热和材料表面对环境的热辐射。

综合考虑热传导、热对流、激光比能后,得到了激光热应力成形的能量控制方程<sup>[20-21]</sup>,见式(1)。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q_{laser} + Q_{convection} + Q_{diffuse} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为材料的密度;  $C_p$  为材料的恒压热容;  $T$  为温度;  $t$  为时间;  $Q_{laser}$  为激光功率密度;  $Q_{convection}$ 、 $Q_{diffuse}$  分别为对流换热及辐射等功率密度。

激光热源为高斯热源模型,如式(2)所示,其激光功率密度分布如图 2b 所示。对流换热的基本计算公式为牛顿冷却公式,其形式如式(3)所示。热辐射遵从 Stenfan-Boltzmann 定律,能量的计算如式(4)所示。数值模拟使用的材料热物性参数随着温度而变化,其值选自有限元软件的自有数据库。

$$Q_{laser} = \frac{2AP}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{2r_1^2}{r_0^2}\right) \quad (2)$$

$$Q_{convection} = h(T_0 - T) \quad (3)$$

$$Q_{diffuse} = -\varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (4)$$

式中:  $A$  为薄板对激光的吸收率;  $P$  为激光功率;  $r_0$  为激光光斑半径;  $r_1$  为激光光束内某点与焦点的间距;  $h$  为表面传热系数;  $T_0$  为外部温度;  $\varepsilon$  为表面辐射率;  $\sigma$  为 Stenfan-Boltzmann 常数,取值为  $5.67 \times 10^{-4} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

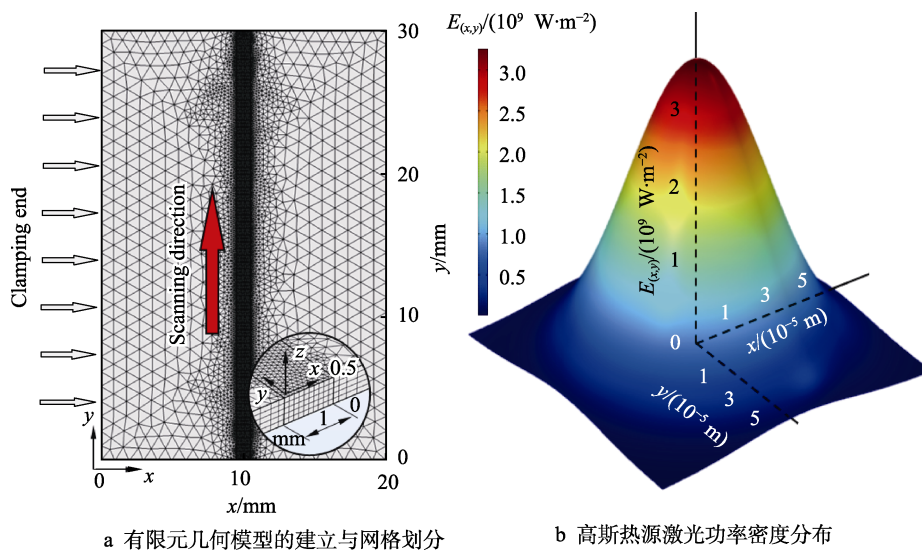


图 2 激光热应力成形有限元几何模型与高斯热源激光功率密度  
Fig.2 FEM geometric model and Gaussian heat source power density in laser thermal stress forming:  
a) FEM model and mesh; b) laser power density distribution of Gaussian heat source



## 2 结果与分析

### 2.1 比能对激光热应力成形弯曲角度的影响

为了探究激光参数对弯曲角度的影响规律,对薄板在不同工艺条件下的弯曲角度随扫描次数( $N$ )的变化情况展开试验研究,结果如图 3a 所示。研究发现,在相同条件下,弯曲角度随着扫描次数的增加而增大,且当扫描次数在较小范围内时,弯曲角度随着扫描次数的增加呈近似线性关系,这与文献所述一致<sup>[22-24]</sup>。同时,当扫描速度( $v$ )为 30、50 mm/s 时,弯曲角度随着激光功率( $P$ )的增加而增大。当  $v=10$  mm/s 时,弯曲角度随  $P$  增加的幅度略有减小。同时,在扫描速度小且扫描次数较多的情况下,形成了大于  $90^\circ$  的弯曲角。研究发现,激光功率、扫描速度、扫描次数对弯曲都有影响。研究人员还发现,激

光的光斑直径( $d$ )作为激光参数在弯曲过程中也起着重要作用<sup>[25]</sup>。

在上述基础上,引入比能  $E$  ( $E=P/(d \cdot v)$ <sup>[26]</sup>) 作为激光热应力成形试验参数,以此表征不同比能下薄板的成形规律。研究多组试验参数发现,在  $E \leq 65$  J/mm<sup>2</sup> 时,弯曲角度随着比能的增加呈现线性增长的趋势,定义该区域为低比能作用区间。在  $65 < E \leq 120$  J/mm<sup>2</sup> 时存在不稳定的角度变化。在  $E > 120$  J/mm<sup>2</sup> 时,弯曲角度趋于平缓,且有下降趋势,定义该区域为高比能作用区间。同时,随着扫描次数的增加,弯曲角度的增幅逐渐变缓,如图 3b 所示。上述结果表明,比能对激光热应力成形产生了显著影响,从弯曲角度的变化趋势并结合激光热应力成形过程中典型机制作用效果可知,比能变化过程中的成形机制存在由 TGM 向 BM、UM 转化的趋势。

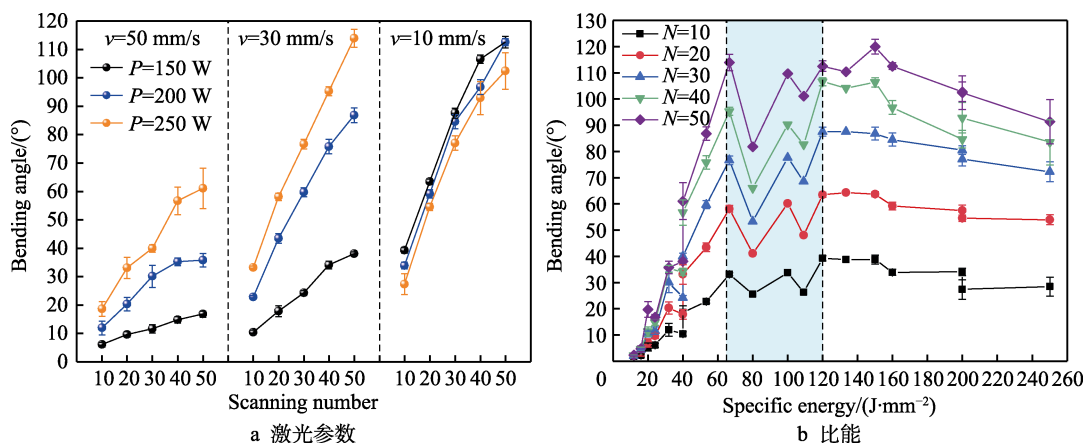


图 3 薄板激光弯曲成形角度

Fig.3 Bending angle in laser thermal stress forming: a) laser parameters; b) specific energies

### 2.2 激光热应力成形弯折区域宏观形貌演变

在不同比能作用下,观测窗口内弯折区熔融材料形貌的演化,用高速相机实时拍摄激光热应力成形弯折区形貌的变化过程,采用垂直扫描线 (View II) 方向的拍摄角度对弯折部位形貌进行拍摄。在功率为 200 W, 扫描速度为 50 mm/s ( $E=32$  J/mm<sup>2</sup>)、10 mm/s ( $E=160$  J/mm<sup>2</sup>) 2 种情况下,  $N$  分别为 20、40 次时,监测弯折区形貌的变化情况。在低比能作用下,由于激光扫描速度较快、作用时间较短,导致弯折区的熔融材料在激光扫描结束后快速凝固,并在扫描次数逐渐增加的过程中形成了连续的隆起形貌,如图 4a、b 所示。在高比能作用下,相对较低的扫描速度使得激光作用时间大幅增加,熔融材料的流动性得到提升,并在表面张力的作用下充分铺展。此外,随着扫描次数的增加,弯曲角度相应增大,但受到两侧壁面的限制,材料的流动得到有效控制,进而呈现出更加平整的形貌,如图 4c、d 所示。

为了定量分析弯折区截面处的形貌,采用沿扫描

线 (View I) 方向的拍摄角度对 2 种比能下弯折区的截面形貌进行拍摄,并对不同扫描次数下 ( $N$  为 10、30、50) 成形后的形貌、润湿角、熔宽等进行共聚焦测量。如图 5 所示,在低比能作用下,弯曲角度随着扫描次数的增加呈现缓慢增长趋势,弯折区域整体呈现凸形形貌;在高比能作用下,弯曲角度随着扫描次数的增加明显增大,同时弯折区的形貌由凸变平,最后形成凹形形貌。此外,测量了不同比能作用下弯折处的润湿角和熔宽,取凸起/凹陷轮廓与壁面交点的切线与弯曲壁面的夹角为润湿角,测量方式及结果如图 6a 所示。当形貌为凸形时,随着扫描次数的增加,经激光扫描后形成的润湿角不断增大;在成形形貌由平变凹的过程中,润湿角随着扫描次数的增加呈先增后减的趋势。同时,在低比能下,扫描次数对弯折区宽度的影响较小;在高比能作用下,由于激光单次输入的能量较高,弯折区的宽度逐渐增大,最终趋于稳定,如图 6b 所示。

进一步分析弯折区周围的增厚情况。在 2 种比能下,采用金相显微镜对不同扫描次数的成形试样的薄

板横截面进行测量,测量长度为 3 mm,测量方式和测量结果如图 7 所示。研究发现,在低比能作用下,薄板厚度沿中线呈对称分布,且随着扫描次数的增加,厚度的峰值逐渐增大,中线处的增厚率从 30%增至 84%;在高比能作用下,中线处的厚度随着扫描次数的增加呈先增加后减小然后趋平的趋势,且厚度峰

值位于中线一侧,最大增厚率从 100%增至 190%后又减至 100%。此外,在该情况下,材料在挤压过程中,由于薄板与工作台之间存在一定夹角,材料的流动方向因重力作用而流向薄板下侧。这种由重力引起的流动不均匀性,导致材料在弯折区域的增厚形貌呈现出不对称性,如图 7b 所示。

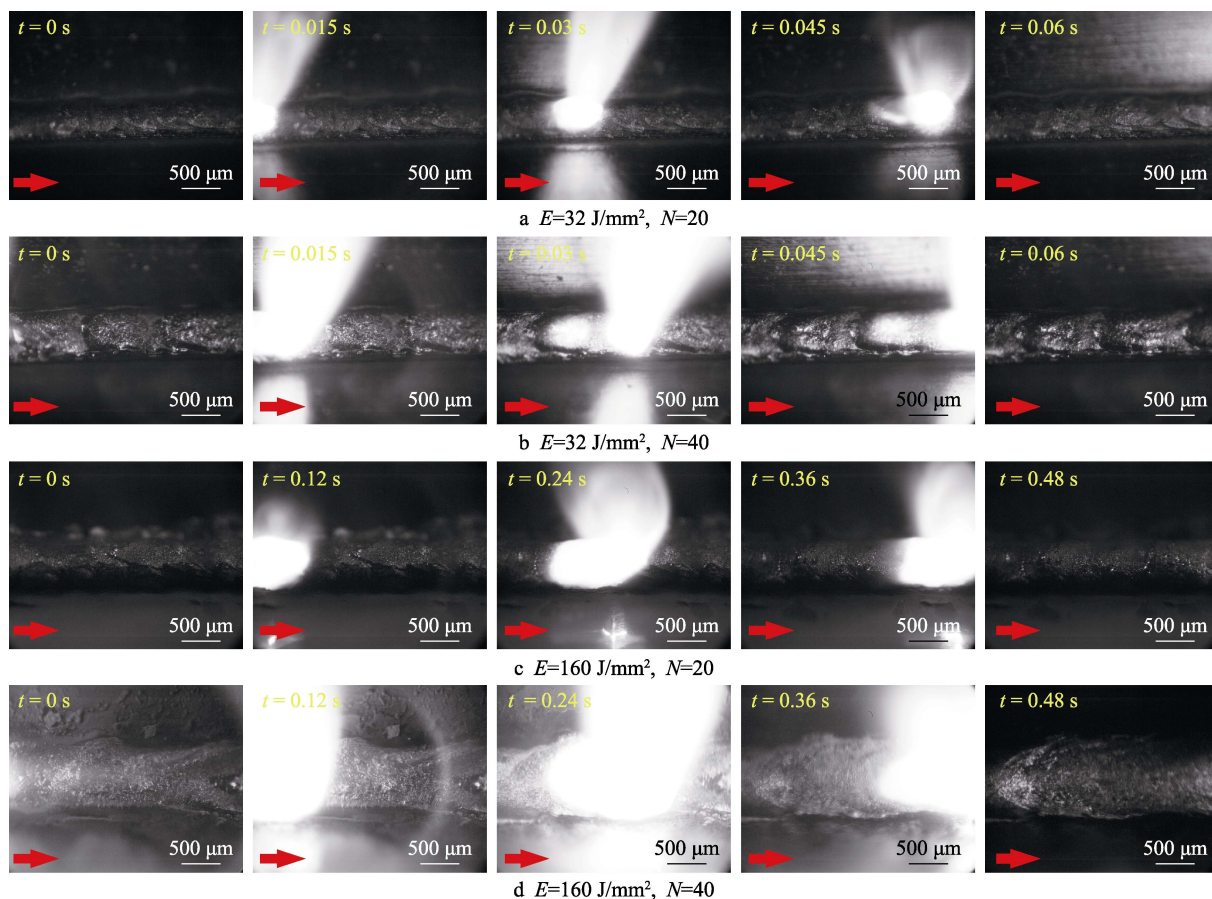


图 4 激光热应力成形过程弯折区 View II 方向形貌

Fig.4 Bending zone morphology by View II in laser thermal stress forming

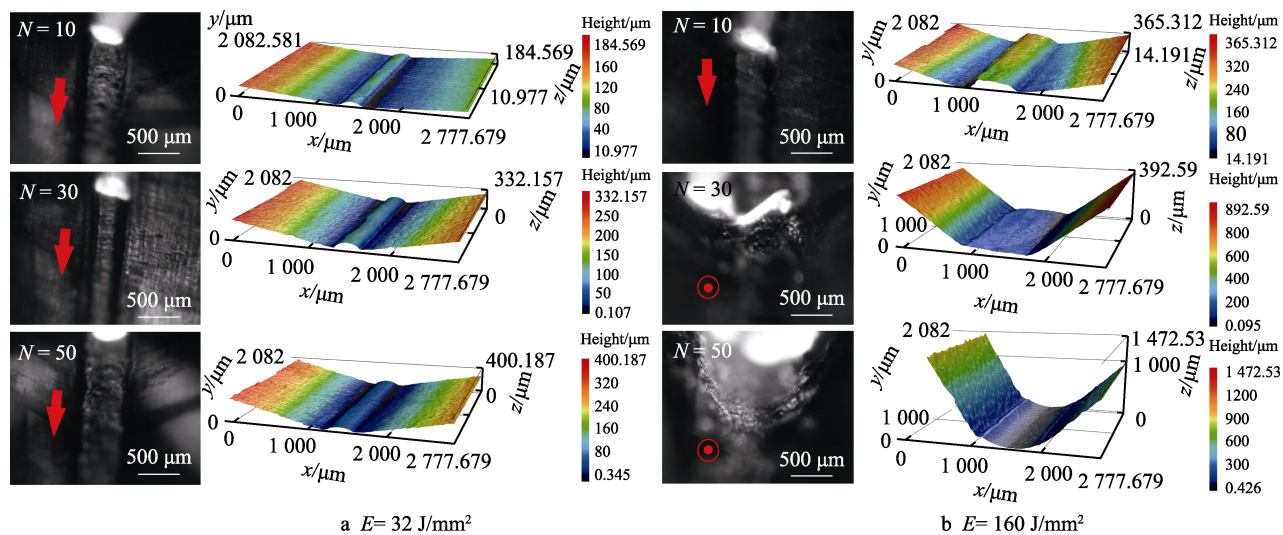


图 5 激光热应力成形后扫描线中点处形貌

Fig.5 Morphology at the midpoint of scanning line after melt-assisted laser thermal stress forming

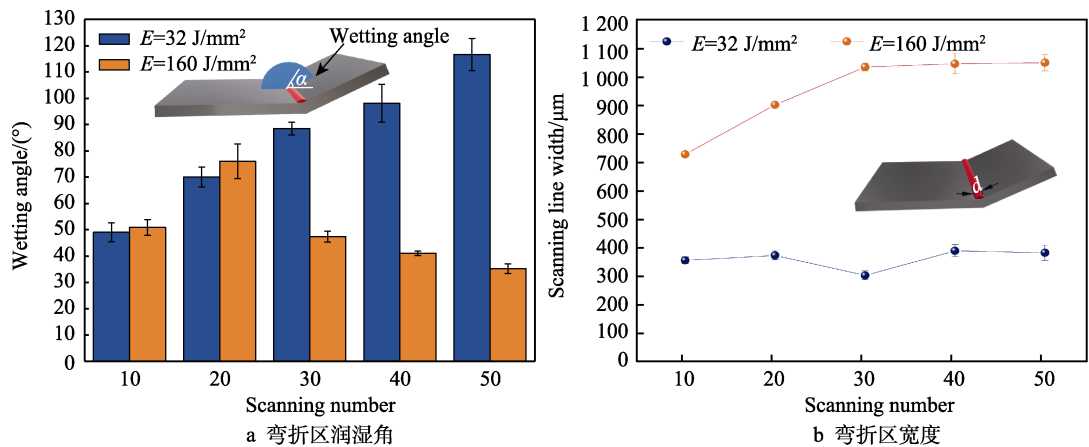


图 6 激光热应力成形后弯折区形貌  
Fig.6 Morphology of bending zone after laser thermal stress forming: a) wetting angles in bending zone; b) width of bending zone

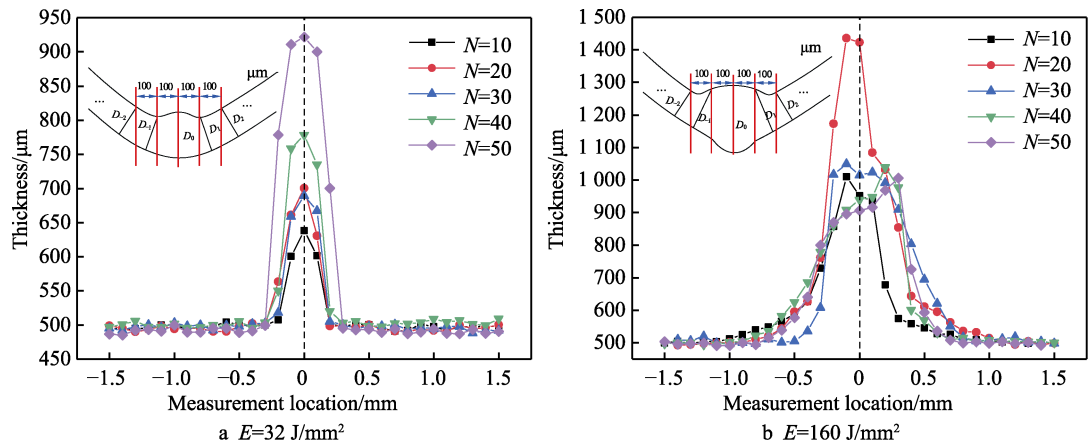


图 7 激光热应力成形后弯折区的增厚情况  
Fig.7 Thickening of bending zone after laser thermal stress forming

2.3 激光热应力成形弯折区域微观形貌与组织

对弯折区域成形的微观形貌进行研究,采用多线粗糙度表征扫描线上的轮廓算术平均偏差 ( $Ra$ ),在扫描线中点设定沿扫描线 3 mm 的取样长度。为了全面评估弯折区域的形貌,在取样长度上沿弯折区宽度等间隔设置了 11 条测量线进行测量,测量方式如

图 8a 所示。激光参数和弯曲角度对表面粗糙度的影响如图 8b~c 所示。研究发现,在激光热应力成形过程中,比能和扫描次数的变化会影响弯折区的表面粗糙度。从结果可知,在比能较小时,薄板扫描线处的表面粗糙度随着扫描次数的增加呈现上升趋势,由  $5.5 \mu\text{m}$  增至  $37.6 \mu\text{m}$ ;在高比能作用下,薄板扫描线处的表面粗糙度随着扫描次数的增加呈现相反的变化趋势,

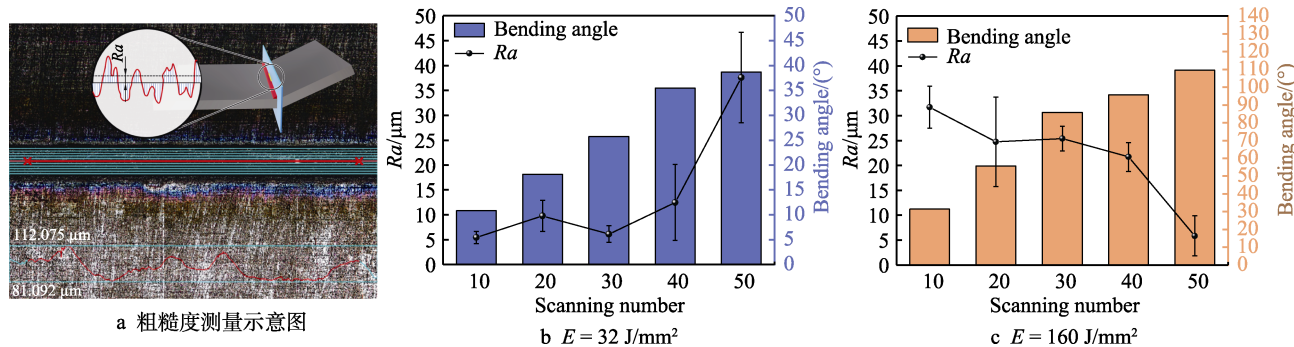


图 8 激光热应力成形弯折区的线粗糙度  
Fig.8 Characterization of line roughness at bending zone in laser thermal stress forming: a) schematic diagram of roughness measurement; b) measurement results with  $E=32 \text{ J/mm}^2$ ; c) measurement results with  $E=160 \text{ J/mm}^2$



由 31.7  $\mu\text{m}$  减至 5.8  $\mu\text{m}$ 。同时，当弯曲角度接近 90° 时，弯折区上表面趋平。

在激光热应力成形过程中，基于比能的差异，会出现不同的形貌特征。对弯折区显微组织进行观测，其横截面金相组织如图 9a~b 所示。受到激光持续热辐射的影响，薄板弯折处材料发生熔化，基于比能的不同，熔化区分别表现出圆形的顶部熔凝形貌和束腰形熔透特征。受到熔凝区域的影响，贴近熔合线的热影响区分布存在显著差异，在比能较低时 (32 J/mm<sup>2</sup>，图 9a)，热影响区围绕熔凝区呈条带状，带宽约为 50  $\mu\text{m}$ ；在高比能作用下 (160 J/mm<sup>2</sup>，图 9b)，热影响区均匀分布于熔凝区两侧，其单侧宽度约为 500  $\mu\text{m}$ ，此时熔合线热影响区内的奥氏体晶粒由粗变细。在激光热应力成形过程中反复的激光骤热急冷作用下，由于无足够时间完成扩散过程，因此熔凝区域产生了非平衡凝固组织。同时，在顶部向冷端材料的传热过程中，与空气间的对流换热使得局部过冷，从而增大了晶粒的生长速度和形核数量，晶粒间的生长相互制约，形成了不同取向的细小等轴晶。由于激光热应力成形是多道热源的累加效应，因此在高比能、多道扫

描下弯折处顶部产生了块状细晶区，如图 9e 所示。

2.4 激光热应力成形弯折区域硬度分析

在观察组织的基础上，对弯折区周围进行了显微硬度测试，测试位置如图 10 所示，测试间距为 100  $\mu\text{m}$ ，加载为 2 N，测试时间为 10 s，保荷时间为 10 s。经测试发现，基体的硬度为 350HV0.2~400HV0.2，扫描热影响区 (HAZ) 的硬度为 200HV0.2~250HV0.2，降低了约 40%，明显低于基体和熔凝区。在激光热输入的影响下，热影响区存在再结晶软化区。研究发现，在比能较小的情况下，交界处仍存在软化区，且随着热输入的增加，软化区宽度呈逐渐增加的趋势。由图 9c~f 可知，热影响区的软化和强度的降低主要是因再结晶发生在该区域的基体中，变形组织消失，出现了新的再结晶组织。上述情况主要与金属中的位错机制有关，在发生再结晶后，位错密度显著降低，导致硬度明显下降。

如图 10 所示，在激光热应力成形后，弯折区顶部的硬度与基体相当，或有一定提升，在该情况下细晶强化起着关键作用。在不锈钢内部，晶粒在变形的

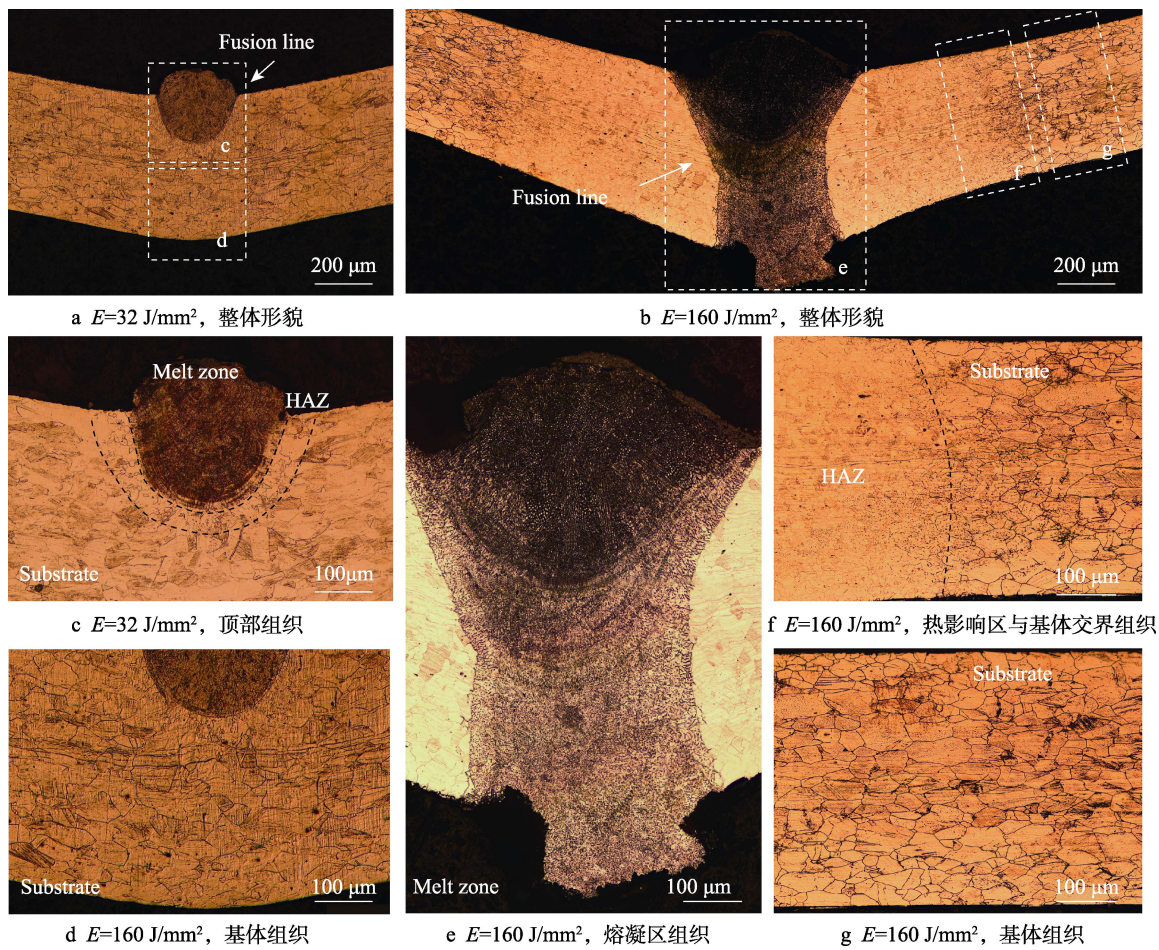


图 9 激光热应力成形弯折区的微观组织

Fig.9 Microstructure of bending zone in laser thermal stress forming: a)  $E=32 \text{ J/mm}^2$ , overall morphology; b)  $E=160 \text{ J/mm}^2$ , overall morphology; c)  $E=32 \text{ J/mm}^2$ , top morphology; d)  $E=32 \text{ J/mm}^2$ , substrate morphology; e)  $E=160 \text{ J/mm}^2$ , melt zone morphology; f)  $E=160 \text{ J/mm}^2$ , HAZ and substrate morphology; g)  $E=160 \text{ J/mm}^2$ , substrate morphology



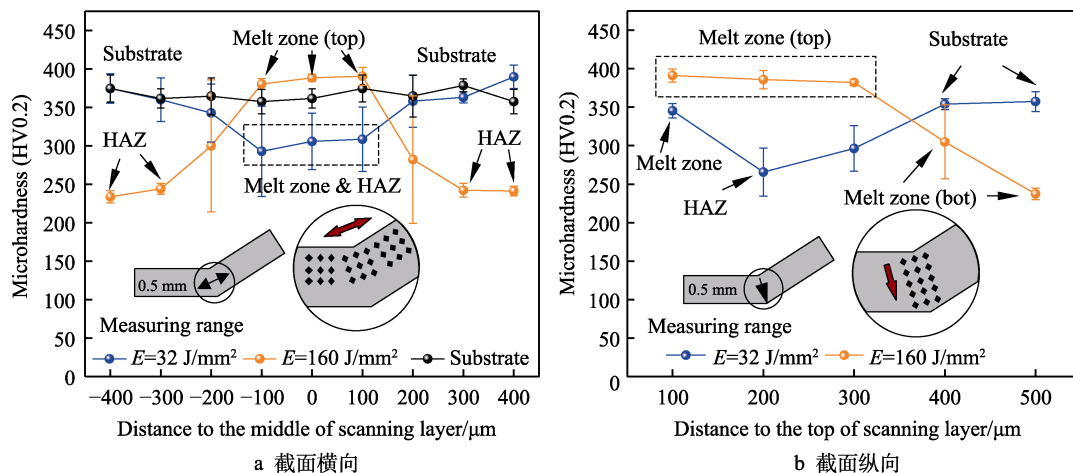


图 10 激光热应力成形弯折区域硬度测试

Fig.10 Hardness of bending zone in laser thermal stress forming: a) transverse hardness distribution; b) longitudinal hardness distribution

同时会受到周围晶粒的牵制。当晶粒受到力的作用而发生塑性变形时,部分晶粒开始沿晶面进行滑移和增殖,直至晶界。此时变形因无法向相邻晶粒传递,导致塑性变形晶粒内的位错发生塞积<sup>[27]</sup>。在激光热应力成形过程中,弯折区材料在激光骤热急冷的作用下,熔凝区中部晶粒被细化,单位面积上边界增多,位错运动受阻,因此该区域材料的硬度增大。

### 3 分析与讨论

通过观察激光热应力成形过程中弯折处的形貌发现,激光热输入、弯曲角度和成形机制会影响弯折区材料表面的挤压、熔化、流动和凝固过程,以及材料内部的温度梯度和界面表面张力,这些影响导致弯折区域的轮廓形貌、粗糙度、显微组织、硬度分布发生变化。在激光热应力成形过程中,熔池的受力情况如图 11a 所示。一方面,当比能较小且熔凝区仅存在金属板上表面时,薄板弯折处的增厚主要受到左右两侧和下侧冷端材料的约束作用,通过作用于上侧材料,且上表面局部熔化的材料在顶端表面张力的作用下,形成了顶部凸起的形貌。同时,由于激光瞬态作用时间较短,熔融材料在激光扫描结束后快速凝固,并在扫描次数逐渐增加的过程中形成连续隆起的形貌,在弯折处形貌演变过程中粗糙度逐渐增大。在高比能下,薄板弯折处材料的熔化凝固和塑性变形受到左右两侧材料的横向约束,该区域在左右两侧材料的挤压下增厚。同时,弯折区随着扫描次数的增加存在持续不断的热积累,且激光作用区域整体软化,较大的弯曲角度限制了顶部熔池的铺展,材料的流动性增强,从而在扫描结束后形成更加光滑的表面形态。此外,随着热输入的变化,激光作用于薄板后,热传导方向由底部传导转变为向两侧传导,相应作用机制从 TGM 转变为 BM,薄板因屈曲产生失稳。随着输入能量的增加,UM 作用效应越显著,如图 11b 所示。

另一方面,材料内部的温度梯度和界面表面张力亦会导致弯折区的形貌发生改变。通过观测不同比能和扫描次数下薄板弯折区的成形状态发现,在高比能、多次扫描下,弯折区界面的形貌由凸向凹演变,润湿角显著降低,如图 11c 所示。可见,比能和扫描次数是造成形貌发生变化的重要因素,最终通过影响熔池的表面张力和温度梯度,进而影响弯折区的宏观形貌。通过对成形过程弯折区域材料的温度梯度和界面表面张力进行分析可知,激光热应力成形界面处的表面张力与润湿角  $\theta$  的关系可用杨氏方程<sup>[28]</sup>表示,见式(5)。在成形结束后,界面表面张力的矢量和为零,同时熔凝层表面张力与温度梯度存在如式(6)所示的关系<sup>[29]</sup>。

$$\sigma_{sg} - \sigma_{sl} = \sigma_{gl} \cdot \cos \theta = F \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial T} \quad (6)$$

式中:  $\partial \sigma / \partial z$  为表面张力梯度;  $\partial T / \partial z$  为沿  $z$  方向的温度梯度;  $\partial \sigma / \partial T$  为表面张力温度系数;  $\sigma_{sg}$  为固/气表面张力;  $\sigma_{sl}$  为固/液表面张力;  $\sigma_{gl}$  为气/液表面张力;  $\theta$  为接触角;  $F$  为润湿张力。

对不同比能和扫描次数下的 304 薄板进行了温度场数值模拟(以 5 次扫描为例)。根据模拟结果,在不同比能作用下,扫描线中点区域的温度场分布存在显著差异。在比能较低时,激光能量集中在薄板表面,在热传导和冷却作用下,多次扫描过程中的热积累较少,在 5 次扫描过程中,薄板中点的峰值温度变化量为 17.9 °C。相较之下,在高比能、多次扫描作用下,薄板存在严重的热积累,薄板中点的峰值温度变化量为 87.3 °C,如图 12 所示。另外,对激光作用中点沿厚度方向的温度梯度变化情况进行了分析,如图 13 所示。与高比能相比,在低比能作用下薄板的温度梯度更大,且随着扫描次数的增加和比能的减小,温度梯度不断减小。由于表面张力温度系数通常

取为定值,故由式(5)可知,当薄板表面温度梯度减小时,气/液界面的表面张力也减小,润湿角 $\theta$ 减小,这与图5、图11c的结果相符。

文中考虑了基体熔化情况下的激光热应力成形,对比分析了不同比能作用下成形后材料的组织差异。国内外学者(如大连理工大学吴东江等<sup>[16]</sup>和印度理工学院 Raza 等<sup>[15]</sup>)也对激光热应力成形中表面熔化时的薄板组织进行了研究,结果表明,其板材上部区域存在等轴胞状晶粒,而结合区存在定向生长的枝晶,

这与本文的研究结果相符。在硬度分布方面,燕京理工学院宫唤春等<sup>[6]</sup>对镁合金成形后的硬度分布进行了分析研究,其结果与本研究在高比能情况下的结果相符。在低比能作用下,由于热影响区分布存在不同,其硬度分布与高比能作用相比存在明显差异。随着激光热应力成形比能的变化,在热传导、熔化、凝固等因素的影响下,材料的形貌和组织也会发生变化,进而影响其力学性能,因而在分析激光热应力成形过程中需充分考虑比能的影响。

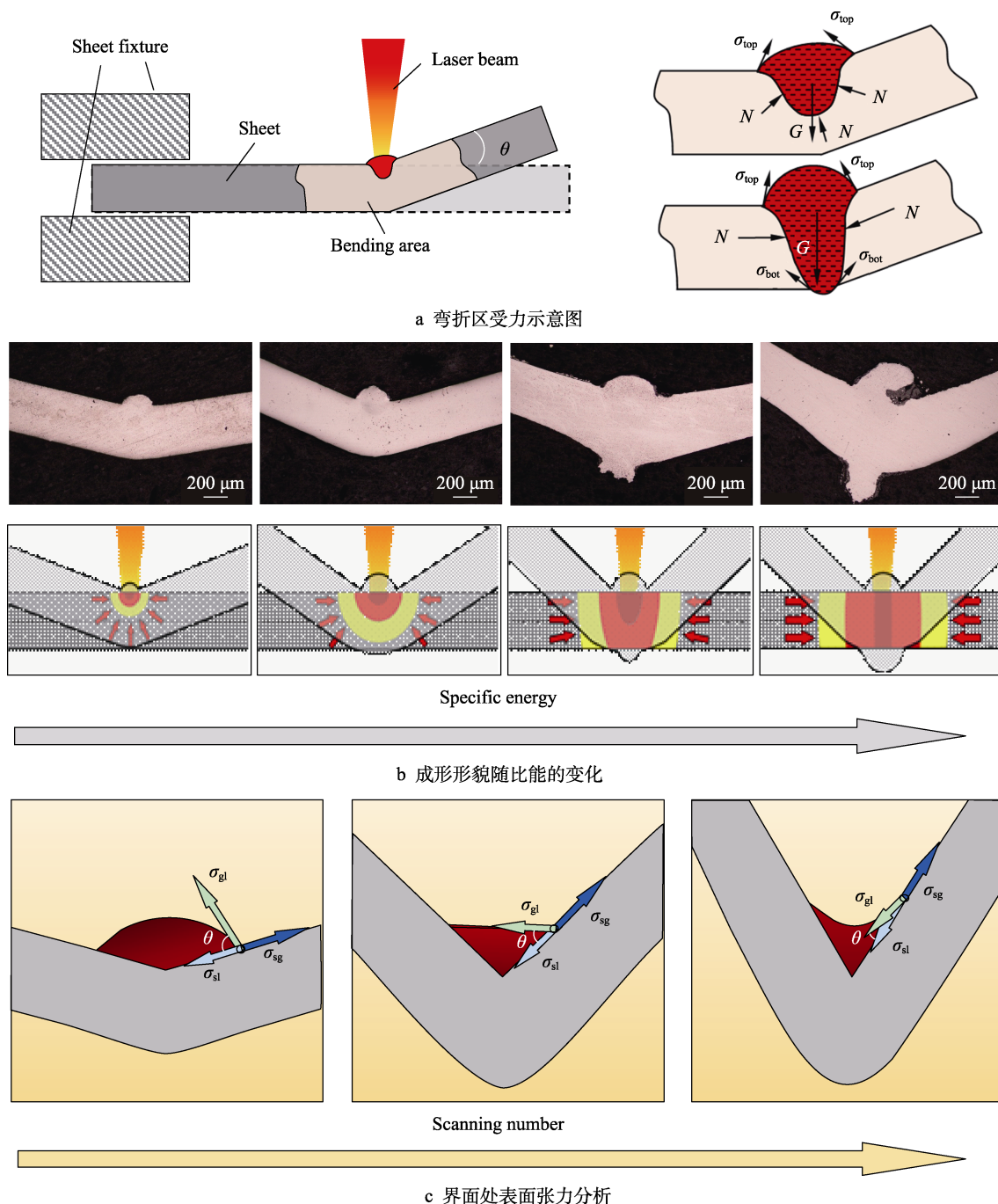


图 11 激光热应力成形弯折区形貌演变过程

Fig.11 Morphology evolution of bending zone in laser thermal stress forming: a) schematic diagram of force in bending zone; b) variation of forming morphology with specific energy; c) analysis of surface tension at interface

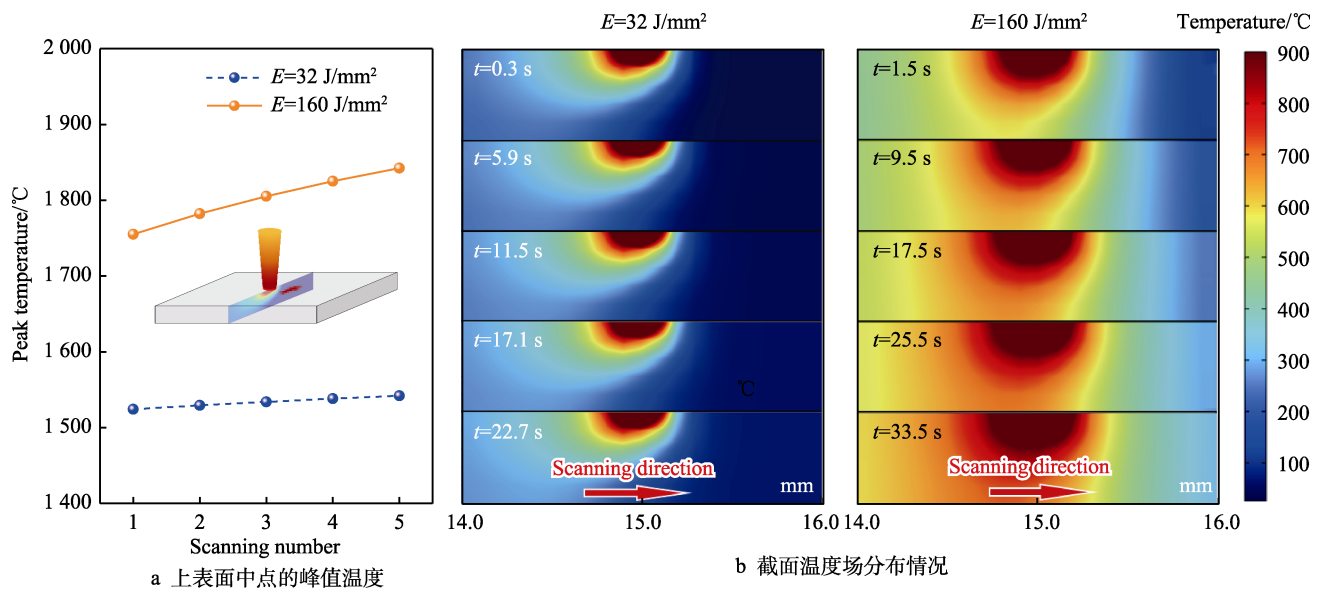


图 12 多次扫描过程中薄板温度场的分布情况

Fig.12 Temperature field distribution of sheets during multi-pass scanning: a) peak temperature at midpoint of upper surface; b) temperature field distribution at cross section

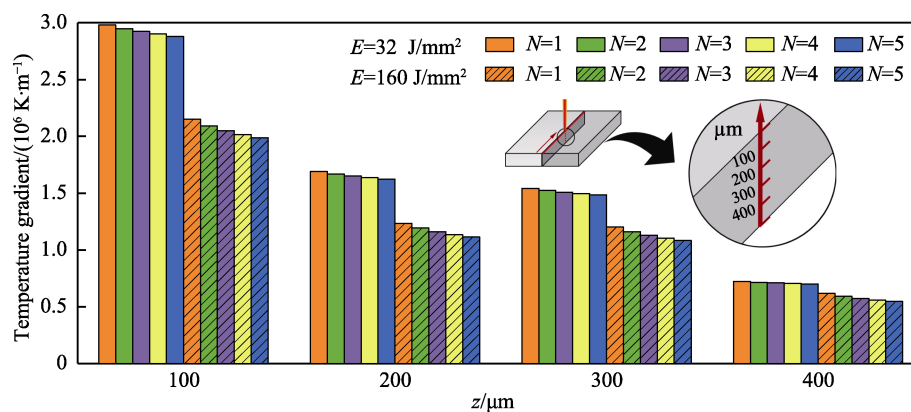


图 13 扫描线中点沿厚度方向的温度梯度变化情况

Fig.13 Temperature gradient at midpoint of scanning line along thickness direction

## 4 结论

采用振镜激光器对 304 不锈钢薄板开展了激光热应力成形试验研究,通过调节比能和扫描次数来调控激光的热输入,揭示了弯折区形貌的影响因素及其形成机制,并结合数值模拟和显微组织观测结果,分析了弯折区的宏/微观形貌演变行为。主要结论如下。

1) 激光热应力成形过程存在机制的转变。弯曲角度随着比能的增加,存在角度增长区、不稳定的角度变化区和角度不变区。比能变化过程中的成形机制存在由 TGM 向 BM、UM 转化的趋势。

2) 激光热输入、弯曲角度和成形机制是造成弯折区粗糙度和形貌发生变化的重要因素。随着比能的增长和扫描次数的增加,弯折区材料的流动性得到增强。在塑性变形过程中,较大的成形角壁面限制了熔融材料的铺展,降低了弯折区域的粗糙度。此外,弯折区域顶部的表面张力减小,导致润湿角减小,促进

了材料的平滑铺展,使得弯折区的宏观形貌从凸形逐渐过渡到平坦,最终转变为凹形。

3) 热输入的变化使得激光热应力成形弯折区产生了不同的微观形貌和组织。在增大比能的过程中,熔凝区由顶部圆形熔凝形貌变化为束腰形熔透特征,顶部产生了块状细晶组织,热影响区环绕熔凝区呈对称分布,其宽度亦随着比能的变化呈正相关变化。

4) 显微硬度测试结果表明,激光热应力成形熔凝区域的硬度略高于基体的硬度,热影响区的硬度比基体的硬度降低了 40%。由此可见,在该技术成形过程中应控制热影响区范围,以适应加工需求。

## 参考文献:

- [1] 王燕齐, 程永奇, 张鹏, 等. 板料先进成形工艺研究现状与发展趋势[J]. 热加工工艺, 2018, 47(7): 5-10.  
WANG Y Q, CHENG Y Q, ZHANG P, et al. Research

- Status and Development Trend of Advanced Sheet Forming Technology[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(7): 5-10.
- [2] 姚喆赫, 张群莉, 王梁, 等. 激光复合制造技术研究进展[J]. 电加工与模具, 2022(1): 1-13.  
YAO Z H, ZHANG Q L, WANG L, et al. State-of-the-Art Review on Laser Hybrid Manufacturing Technology[J]. Electromachining & Mould, 2022(1): 1-13
- [3] 燕翔, 李虎, 段澎, 等. Ti-6Al-4V 钛合金激光弯曲成形微观组织研究[J]. 航天制造技术, 2010(5): 20-25.  
YAN X, LI H, DUAN P, et al. Laser Bending Microstructures of Ti-6Al-4V Titanium Alloy[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2010(5): 20-25.
- [4] NATH U, YADAV V. Analytical Modeling of Temperature Evolution and Bend Angle in Laser Forming of Al<sub>6061</sub>-T6 Sheets and Its Experimental Analysis[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 154: 108307.
- [5] 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.  
LIU S H, HU Q W, ZHOU L Z, et al. Investigation on Microstructure and Property of Laser Bent Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(11): 1049-1053.
- [6] 宫唤春, 宋丽辉. 镁合金板激光弯曲成形的试验研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(23): 44-47.  
GONG H C, SONG L H. Experimental Study on Laser Bending of Magnesium Alloy Sheet[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(23): 44-47.
- [7] 张攀, 王续跃. 层合板激光弯折区过渡层元素扩散及材料性能[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0702001.  
ZHANG P, WANG X Y. Element Diffusion and Material Properties in Transition Layer of Bending Zone in Laminated Plates[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0702001.
- [8] MEHDI S, DE SOUSA RICARDO A, JALAL J. Recent Advances in the Laser Forming Process: a Review[J]. Metals, 2020, 10(11): 1472.
- [9] AFFAF N, WONG H S, AIMAN M H, et al. The Effect of Laser Power and Laser Scan Passes on Bending Angle of Stainless Steel AISI 304 Laser Bending[C]// International Conference on Mechanical Engineering Research. Singapore: Springer, 2023: 899-907.
- [10] VOLLERTSEN F, KOMEL I, KALS R. The Laser Bending of Steel Foils for Microparts by the Buckling Mechanism - a Model[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 1995, 3(1): 107-119.
- [11] SHI Y J, LIU Y C, YI P, et al. Effect of Different Heating Methods on Deformation of Metal Plate under Upsetting Mechanism in Laser Forming[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(2): 486-491.
- [12] WOIZESCHKE P. Approach for Bidirectional Laser Bending of Sheet Metal with One-Sided Accessibility[J]. CIRP Annals, 2019, 68(1): 277-280.
- [13] SHI Y J, YAO Z Q, SHEN H, et al. Research on the Mechanisms of Laser Forming for the Metal Plate[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(12/13): 1689-1697.
- [14] 殷圆淋. 基于振镜扫描的激光焊接技术[J]. 中外企业家, 2015(21): 208.  
YIN Y L. Laser Welding Technology Based on Galvanometer Scanning[J]. Chinese & Foreign Entrepreneurs, 2015(21): 208.
- [15] RAZA M S, DATTA S, GOPINATH M, et al. Monitoring and Analysis of Melt-Assisted Deformation Behavior of 304L Stainless Steel during Multipass Laser Forming Process Using IR Pyrometer and Laser-Based Displacement Sensor [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 135: 106718.
- [16] 吴东江, 马广义, 曹先锁, 等. 脉冲激光弯曲成形技术中硅片表面的形貌分析[J]. 中国激光, 2007, 34(11): 1589-1593.  
WU D J, MA G Y, CAO X S, et al. Analysis of Silicon Surface Profile of Pulsed Laser Bending Processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(11): 1589-1593.
- [17] SHIDID D P, GOLLO M H, 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.
- [18] WANG X Y, MA X P, LI Z H, et al. A Study of Thickening Phenomenon in Laser Bending Zone of a Metal Laminated Plate[J]. Procedia CIRP, 2016, 42: 454-459.
- [19] 马绪鹏. 不锈钢—碳钢层合板激光弯折区材料特性与增厚现象研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014: 38-48.  
MA X P. Study on Laser Bending Region Material Feature and Thickening Phenomenon of Stainless Steel-Carbon Steel Laminated Sheet[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014: 38-48.
- [20] SUN R, SHI Y J, WANG X G, et al. Understanding the Thermal Process during Laser Assisted Ultra-High Frequency Induction Deposition with Wire Feeding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 153: 119536.
- [21] 刘珍峰. 送粉式激光熔覆温度场的三维有限元模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006: 19-22.  
LIU Z F. 3D FEM Numerical Simulation on the Temperature Field of Laser Cladding by Powder Injection[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006: 19-22.
- [22] 段园培, 张海涛, 余小鲁, 等. 304 不锈钢板料激光热应力成形试验研究[J]. 应用激光, 2012, 32(5): 403-407.  
DUAN Y P, ZHANG H T, YU X L, et al. Study on Laser Forming of AISI 304-Sheet Metal by Thermal Stress[J]. Applied Laser, 2012, 32(5): 403-407.

( 下转第 197 页 )



- Steel in Selective Laser Melting[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2023, 15(1): 128-136.
- [21] PRASHANTH K G, SCUDINO S, MAITY T, et al. Is the Energy Density a Reliable Parameter for Materials Synthesis by Selective Laser Melting?[J]. *Materials Research Letters*, 2017, 5(6): 386-390.
- [22] GUSAROV A V, KOVALEV E P. Model of Thermal Conductivity in Powder Beds[J]. *Physical Review B*, 2009, 80(2): 024202.
- [23] ROACH A M, WHITE B C, GARLAND A, et al. Size-Dependent Stochastic Tensile Properties in Additively Manufactured 316L Stainless Steel[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 32: 101090.
- [24] LIU S W, ZHU J J, ZHU H H, et al. Effect of the Track Length and Track Number on the Evolution of the Molten Pool Characteristics of SLMed Al Alloy: Numerical and Experimental Study[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 123: 105924.
- [25] 任忠, 王东东, 白培康, 等. 金属粉末选区激光熔化单道扫描热应力场的数值模拟[J]. *热加工工艺*, 2010, 39(15): 173-175.
- REN Z, WANG D D, BAI P K, et al. Numerical Simulation on Thermal-Stress Distribution of Metal Powders Selective Laser Melting Single-Track Scanning[J]. *Hot Working Technology*, 2010, 39(15): 173-175.
- [26] 袁美霞, 寇廷彧, 刘琪, 等. 脉冲激光 SLM 工艺参数对钛合金成形质量的影响[J]. *表面技术*, 2023, 52(11): 430-438.
- YUAN M X, KOU T Y, LIU Q, et al. Effect of Process Parameters on Forming Quality of Pulsed Laser SLM Titanium Alloy[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(11): 430-438.
- [27] ILIN A, LOGVINOV R, KULIKOV A, et al. Computer Aided Optimisation of the Thermal Management during Laser Beam Melting Process[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 390-399.
- [28] YAO J H, WANG Y, WU G L, et al. Growth Characteristics and Properties of Micro-Arc Oxidation Coating on SLM-Produced TC4 Alloy for Biomedical Applications[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 479: 727-737.
- [29] ZOU S, PANG L, XU C, et al. Effect of Process Parameters on Distortions Based on the Quantitative Model in the SLM Process[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(3): 1567.
- [30] LIAN Y P, GAN Z T, YU C, et al. A Cellular Automaton Finite Volume Method for Microstructure Evolution during Additive Manufacturing[J]. *Materials & Design*, 2019, 169: 107672.
- [31] CHEN J W, HUANG C Y, LIAN Y P, et al. Numerical Simulation on Metallic Additive Manufacturing[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2020, 50(9): 090007.
- [32] KHAIRALLAH S A, ANDERSON A T, RUBENCHIK A, et al. Laser Powder-Bed Fusion Additive Manufacturing: Physics of Complex Melt Flow and Formation Mechanisms of Pores, Spatter, and Denudation Zones[J]. *Acta Materialia*, 2016, 108: 36-45.

(上接第 186 页)

- [23] 梁伟文. 金属薄板激光弯曲成形的工艺参数研究[J]. *现代制造工程*, 2005(9): 64-66.
- LIANG W W. Experimental Study on Laser Forming Technology of Stainless Steel Sheet Metals[J]. *Machinery Manufacturing Engineer*, 2005(9): 64-66.
- [24] 梁伟文, 孙卫和, 王红英. 不锈钢薄板的激光弯曲成形试验研究[J]. *新技术新工艺*, 2005(8): 45-47.
- LIANG W W, SUN W H, WANG H Y. Experimental Study on Laser Forming Technology of Stainless Steel Sheet Metals[J]. *New Technology & New Process*, 2005(8): 45-47.
- [25] MAJI K, PRATIHAR D K, NATH A K. Experimental Investigations, Modeling, and Optimization of Multi-Scan Laser Forming of AISI 304 Stainless Steel Sheet[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(9): 1441-1455.
- [26] SUI X M, LU J, HU J, et al. Effect of Specific Energy on Microstructure and Properties of Laser Cladded TiN/Ti<sub>3</sub>AlN-Ti<sub>3</sub>Al Composite Coating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 131: 106428.
- [27] 王子璇, 胡艳娇, 庞铭. 激光熔凝不锈钢的组织 and 综合性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 1914006.
- WANG Z X, HU Y J, PANG M. Microstructure and Comprehensive Properties of Laser-Melted Stainless Steel[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1914006.
- [28] 陈宗洪, 王光信, 徐桂英. 胶体与界面化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 34-41.
- CHEN Z Q, WANG G X, XU G Y. *Colloid and Interface Chemistry*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 34-41.
- [29] 刘振侠. 激光熔凝和激光熔覆的数学模型及数值分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2003: 5.
- LIU Z X. Modeling and Numerical Simulation on Laser Remelting and Cladding[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003: 5.