

文章编号 1004-924X(2024)06-0806-16

圆振荡激光束提高激光弯曲成形效率

沈宗宝*, 韩曜阳, 孟康楠, 李 品
(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 激光弯曲成形技术常用的激光类型是点激光, 在温度梯度机理的作用下单次成形角度有上限, 在 3° 左右。为了增大点激光单次成形角度, 提高成形效率, 本文以不锈钢 304 板为对象, 通过试验对比探索了将圆振荡模式应用于激光弯曲成形中以提高弯曲角方法的可行性; 并且借助于三维视觉传感器测量板件在圆振荡激光束弯曲成形过程中的动态响应, 从余热效应、吸收率等角度分析其弯曲成形机理。对比试验结果显示, 在激光能量密度较高的情况下, 圆振荡模式确实可以明显提高工件的弯曲角, 增长率在 60% 左右。同时, 三维视觉传感器的测量结果显示出了板件在成形过程中的复杂形变与角度变化过程: 板件在长度与宽度方向上均产生了塑性变形, 长宽形变比约为 10:1; 单次扫描成形板件弯曲角增长过程呈现不同的增长曲线; 多次扫描成形弯曲角分布不均衡。此外, 板件厚度也逐渐增加, 热影响区微观晶粒得到细化。为进一步理解圆振荡激光束弯曲成形过程与机理提供了试验支撑。

关键词: 激光弯曲成形; 圆振荡激光束; 不锈钢 304; 变形机理

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243206.0806

Improving the efficiency of laser bending forming using circularly oscillating laser beam

SHEN Zongbao*, HAN Yaoyang, MENG Kangnan, LI Pin

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

* Corresponding author, E-mail: szb@ujs.edu.cn

Abstract: Laser bending forming techniques commonly utilize point lasers, which have a limited maximum bending angle of approximately 3° due to the temperature gradient mechanism. To increase the bending angle and improve the forming efficiency of point laser bending, this study explored the feasibility of applying the circular oscillation mode to enhance the bending angle in the bending process of stainless steel 304 sheets. Additionally, the dynamic response of the workpiece during circular oscillation laser bending forming was measured using a three-dimensional vision sensor to investigate the bending deformation mechanism from the perspective of thermal effect, variation in absorption, etc. The comparative experimental results show that the circular oscillation mode significantly improves the bending angle of the workpiece, with a growth rate of approximately 60% when the laser has a higher energy density. At the same time, the measurement results from the three-dimensional vision sensor reveal the complex deformation and angle changes of the workpiece during the forming process: plastic deformation occurs in both the length and width directions of the workpiece, with the length-width deformation ratio is about 10:1; the

收稿日期: 2023-09-21; 修订日期: 2023-10-10.

基金项目: 中国博士后科学基金 (No. 2019M651724)

growth of the bending angle during a single scan exhibits different growth curves; and the distribution of bending angles in multiple scans is uneven. In addition, the thickness of the plate also gradually increases, and the micro-grains in the heat-affected zone are refined. These experimental findings provide support for a better understanding of the process and mechanism of circular oscillation laser bending forming.

Key words: laser bending; circular oscillation mode; SS304; bending mechanism

1 引言

激光弯曲成形属于局部热成形的一种,利用高能激光束照射工件表面,在工件局部形成不均匀热应变来实现工件弯曲成形。激光弯曲成形具有无模具、周期短、柔性大、无接触等优点,能满足小批量、多品种和结构复杂的加工需求,在航空航天、船舶、汽车等领域具有广泛的应用前景。然而激光弯曲成形是一个热力耦合瞬态弹塑性变形的过程,同时存在加热与冷却两个过程,热影响区的温度、应力应变在时空上变化剧烈,且涉及到传热学、材料力学等多学科理论,变形过程十分复杂。因此,深入研究激光弯曲成形机理对于指导实际生产操作具有重要意义。

目前主流的用于解释激光弯曲成形过程的变形机理主要有三种,分别是温度梯度机理(Temperature Gradient Mechanism, TGM)、屈曲机理(Buckling Mechanism, BM)与增厚机理(Up-setting Mechanism, UM)^[1-10],对应三种不同的工艺条件:(1)光斑直径小、扫描速度快而板件较厚时,此时厚度方向温度梯度很大,温度梯度机理占主导地位;(2)光斑直径大、扫描速度慢而板件较薄时,此时厚度方向温度梯度小,屈曲机理占主导地位;(3)光斑直径大、扫描速度慢而板件厚度较薄却不足以发生屈曲时,此时厚度方向温度梯度可以忽略,增厚机理占主导地位。除此之外,石永军^[11]还补充了耦合机理(CM),用以解释当工艺条件处于温度梯度机理与增厚机理之间时,板件同时出现两种弯曲机理对应形变特征的现象。Mohammad Shahid Raza^[12]也提出了“熔融基 TGM”机理,用以解释当厚度方向温度梯度很大且加热区表面发生部分融化时板件的形变过程。

围绕激光弯曲成形机理的探索,国内外学者已经做了大量试验与模拟研究。M. Hoseinpour Gollo^[13]采用 DOE 试验方法研究了激光功率、光束直径、扫描速度和脉冲时间等激光工艺参数对

不锈钢 AISI1010 板单次扫描弯曲角的影响关系,试验结果表明弯曲角受光束直径的影响最大,其次是脉冲时间、扫描速度和激光功率;Gisario A^[14]采用数值模拟与实验验证相结合的方法研究了操作参数、激光功率、扫描速度、扫描次数与钛合金板弯曲角和弯曲圆角半径之间的关系,模拟结果显示激光弯曲成形工艺可以在难成形的钛合金上达到高弯曲角与小圆角半径,与实验结果一致;大连理工大学的孙涛^[15]通过试验方式探索了激光工艺参数、板材参数对玻璃纤维增强铝合金层板(GLARE)弯曲角的影响,确定了最佳工艺窗口;山东大学的管延锦^[16]通过三维热机耦合有限元仿真验证了材料性能参数与板料弯曲角之间的相关性;A. N. Thomsen^[17]采用二维激光测距仪实时测量激光弯曲成形中的动态响应过程,为验证数值模拟结果提供了一种新的思路。

根据已有研究成果可知,使用点激光在满足温度梯度机制工艺条件下对不锈钢板件做激光弯曲成形时,可以通过适当的增大激光能量密度来提高板件弯曲角,如增大激光功率、降低扫描速度等。但是当激光能量密度过高时,板件表面会出现烧蚀,弯曲角反而会减小甚至出现反向弯曲,所以点激光单次扫描板件弯曲角存在上限,最大弯曲角在 3° 左右。想要实现板件大角度的弯曲需要激光多次扫描累积成形^[13]。另外,利用数值模拟探索激光弯曲动态响应机理时,为了验证模拟结果通常采取的方式是比较最终形状,但是对动态响应过程的模拟准确度难以保证^[17]。

因此,为了提高点激光单次扫描板件弯曲角的上限,进而提高板件弯曲成形效率,本文以不锈钢 304 板为试验对象,探索了将圆振荡模式应用到点激光弯曲成形中以提高弯曲角方法的可行性。同时,为了准确反映不锈钢 304 板的弯曲成形机理,采用视觉传感器在线在位测量板件成形过程中的复杂动态响应。本文主要分为四个部分:首先比较有/无振荡模式下点激光弯曲成

形的差异;其次揭示在已知工艺条件下不锈钢 304 板做圆振荡激光束弯曲成形的变形机理;然后从板件轮廓、弯曲角变化、弯曲角分布三个方面表征不锈钢板在激光弯曲成形过程中的复杂动态响应,进一步探索成形机理;最后从余热效应、吸收率、部分增厚、几何效应和微观组织五个角度深入剖析不锈钢板多次扫描成形时弯曲角分布规律的原因。

2 试验方法与材料

2.1 试验方案

试验装置如图 1 所示,激光器采用 G·

WEIKE 的 LW-1500H 型激光器,最大功率为 1 500 W,激光波长为 1 064 nm,该激光器具有两种激光模式,分别为连续模式和 PWM 波脉冲模式,本文采用脉冲模式, PWM 波最大频率为 20 000 Hz。焊接头由焦距 50 mm 的准直模块、反射模块、振镜扫描模块和焦距 125 mm 的 $F-\theta$ 聚焦模块组成,装配在龙门架机器人上由机器人驱动。板件一端被夹紧固定在工作台上。试验开始后,机器人带动焊接头在工件上方作直线运动,激光从激光器发射,经准直、反射、振荡、聚焦,最终在工件表面形成高能量密度的圆振荡光束以完成激光弯曲成形。在激光弯曲成形过程中,采用视觉传感器实时记录板件的动态响应过程。

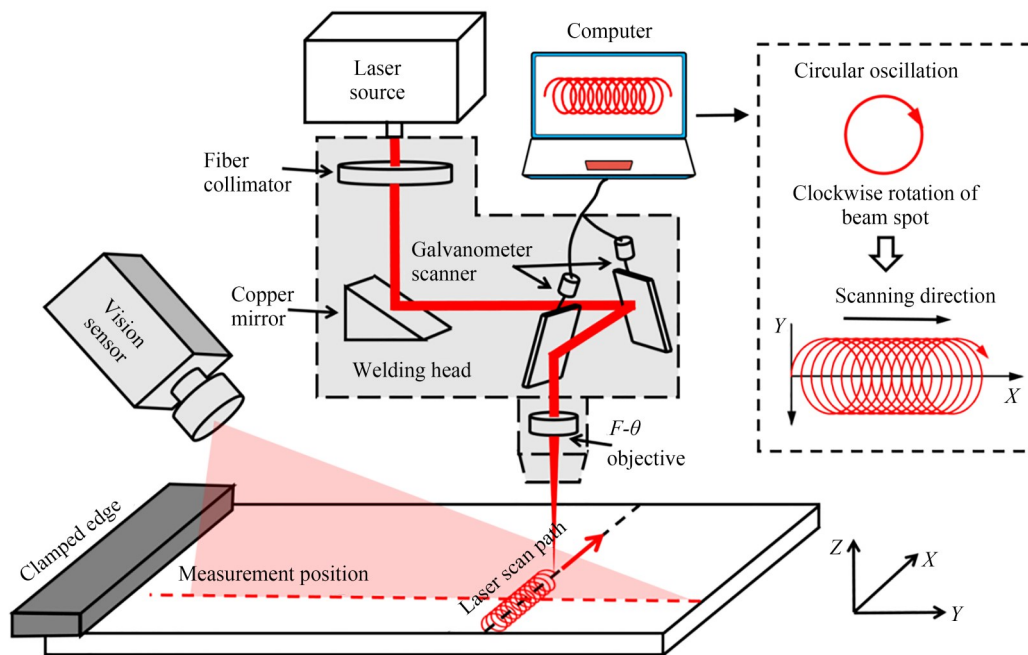


图 1 圆振荡激光束弯曲成形试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a circularly oscillating laser beam bending forming test device

视觉传感器采用的是单目线激光三维视觉测头,能够实时捕获线激光照射截面内的表面轮廓 abc 与弯曲角 α ,如图 2 所示。

试验前,用无水乙醇对板件表面进行清洗,去除表面的油污;成形后,按照金相试样制备步骤依次对板件进行切割、镶嵌、研磨、抛光和腐蚀,最后用 SEM 扫描电镜观察弯曲截面金相组织。由于 AISI 304 不锈钢耐腐蚀性好,腐蚀试剂选用王水溶液,浓盐酸与浓硝酸体积比为 3:1,腐蚀 25 s。

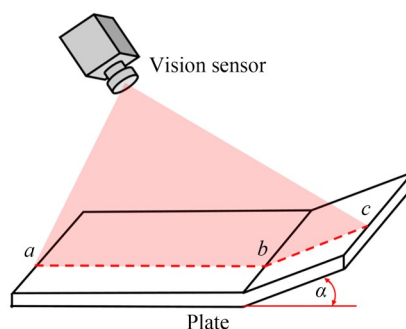


图 2 视觉测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of visual measurement

2.2 材料与激光工艺参数

试验材料选用 0.5 mm 厚的 AISI 304 不锈钢,所有样件尺寸均为 60 mm×40 mm,其中用于装夹部分的长度为 10 mm,扫描路径距自由端 20 mm,如图 3 所示。

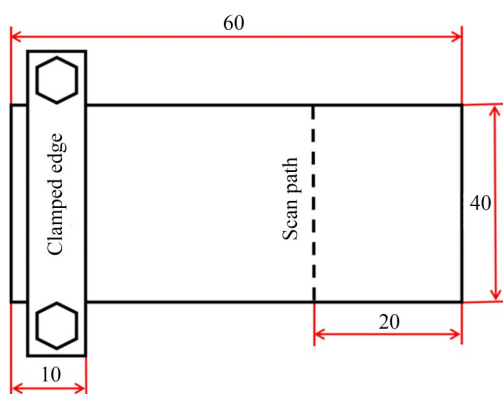


图3 板件几何尺寸
Fig. 3 Plate geometry size

激光弯曲成形试验采用的工艺参数如表 1 所示。

表1 激光器技术参数

Tab. 1 Technical parameters of the Laser

Parameter	Value
Pulse frequency f/Hz	1 000
Pulse duty ratio	0.5
Laser power P/W	120, 150, 180, 210
Scan speed $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	9, 15
Spot diameter d/mm	0.28
Circular oscillation diameter D/mm	1.51
Laser swing frequency r/min	700
Defocus distance Z/mm	5
Scan number	1, 10
Scanning interval t/s	5, 120
Distance from free end L/mm	20
Measurement position X/mm	10, 20, 30

3 两种振荡模式的对比试验

图 4 是在两种不同工艺参数下,使用无振荡模式(即点激光)与圆振荡模式的弯曲实物图与振荡示意图。如图 4(a)所示,当功率较高、扫描

速度较慢时,圆振荡激光弯曲板件的弯曲角明显大于无振荡的,此时利用圆振荡模式来提高点激光弯曲成形效率的方法是切实可行的;但是当功率较低、扫描速度较快时,即如图 4(b)所示,圆振荡激光弯曲板件的弯曲角却明显小于无振荡的,此时用圆振荡模式反而会导致弯曲角降低。圆振荡模式在两种工艺参数下对弯曲角的影响截然相反,可以从两方面进行解释:

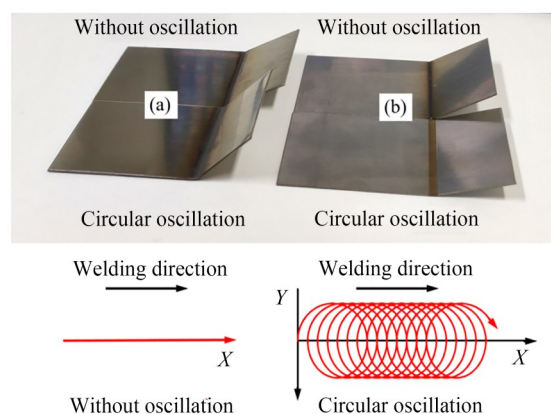


图4 两种振荡模式下的实物图与振荡示意图
Fig. 4 Physical drawing and Schematic diagrams of the two oscillation modes

首先,从温度场分布的角度来分析。当激光功率较高、扫描速度较慢时,激光扫描瞬间两种振荡模式下的温度分布分别如图 5(a)和 5(b)所示,无振荡激光束由于在垂直方向热量传递过快导致板件上下表面温升都很明显,此时在厚度方向上的温度梯度较小、不利于板件弯曲;而圆振荡模式下(如图 4 圆振荡示意图)点激光照射区域更大、相邻振荡圆之间重叠率很高导致点激光在板件上表面引起的温度梯度相互叠加、相互影响,此时光斑热量沿垂直方向传递速度减慢、沿水平方向传递速度加快,进而使得板件在厚度方向上的温度梯度增大且横向热影响区域更广、更有利于板件弯曲,所以此时使用圆振荡模式能够增大板件弯曲角。当激光功率较低、扫描速度较快时,如图 5(c)和 5(d)所示,在无振荡激光束的作用下上表面温度明显升高,在厚度方向形成明显的温度梯度;而圆振荡激光束由于横向照射区域较大、能量被分散,板件上表面温度升高不明显,即在厚度方向上温度梯度不明显,所以此时使用圆振荡激光束反而会降低板件弯曲角。

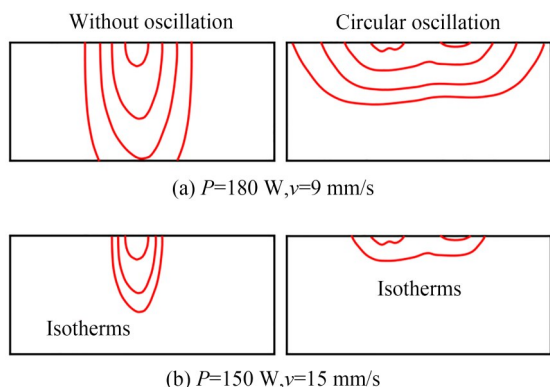


图5 两种振荡模式下板料表面温度场分布示意图
Fig. 5 Temperature field distribution diagram of sheet surface under two oscillation modes

其次,从能量损耗的角度来分析。当激光功率较高、扫描速度较慢时,如图6(a)所示,无振荡激光束作用的区域较小,输出的能量密度太高、表面温升太大,导致板件表面出现了烧蚀,损耗了一部分能量;而圆振荡模式下,如图6(b)所示,点激光照射的区域更广,输出的能量密度相对减小,进而减少了由于表面烧蚀而导致的能量损失,点激光的能量更多用于弯曲成形,所以此时使用圆振荡激光束能够增大板件弯曲角。当激光功率较低、扫描速度较快时,如图6(c)与6(d)所示,此时无振荡与圆振荡激光束弯曲成形都不存在明显烧蚀现象,能量损耗可以忽略;但是相比之下,无振荡激光束的能量密度更高,更有利

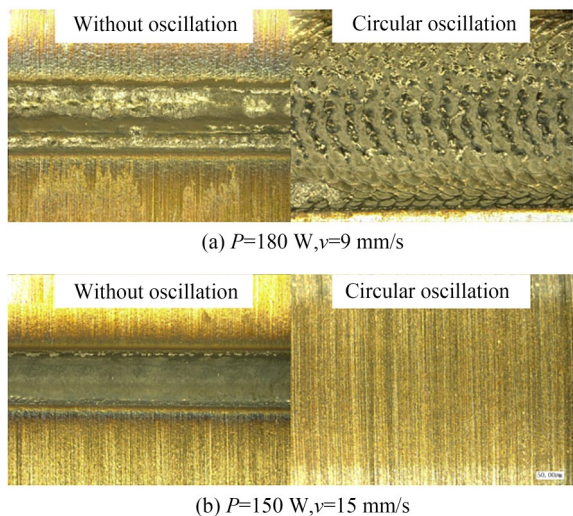


图6 两种振荡模式下扫描表面形貌
Fig. 6 Scanning surface morphology of the two oscillation modes

于弯曲成形,此时使用圆振荡激光束也会降低板件弯曲角。

由此可见,圆振荡模式能够使点激光在激光能量密度较高的工况下扩大热影响区域、增大温度梯度、减少表面烧蚀,此时使用圆振荡激光束可以有效提高板件的弯曲角,经测量角度增长率在60%左右;反之不行,甚至会抑制弯曲角增长。

4 结果与讨论

4.1 整体形貌与动态响应

图7为板件在激光功率为180 W、扫描速度为9 mm/s、扫描次数为10、时间间隔为5 s时不锈钢板件的成形效果。从图中可以看出,圆振荡激光弯曲效果较好,上表面虽然存在少量熔化,但表面光滑且没有明显缺陷。图8为该板件弯曲角在激光弯曲成形过程中的变化过程。从图中可以看出,板件实际的弯曲角增长时间相

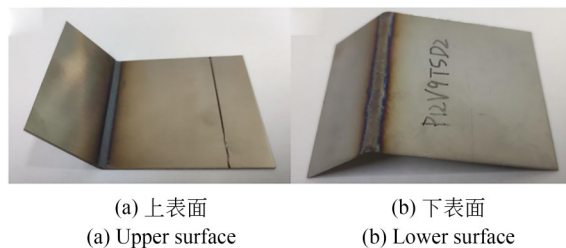


图7 成形件实物图
Fig. 7 Physical drawing of the formed part

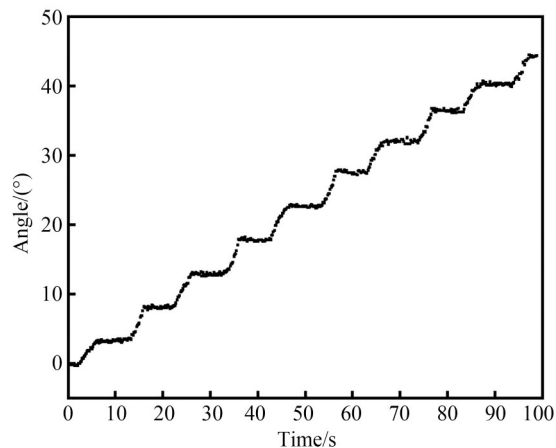


图8 板件弯曲角随时间的变化过程
Fig. 8 Change process of plate bending angle with time

对较短,其余时间处于稳定状态,且每次弯曲角增长幅度较为稳定。综合以上两点,圆振荡激光束适合不锈钢板件多次弯曲渐进成形的场合。

为了深入探索板件的弯曲成形机理,还需要对板件的动态响应过程做进一步的分析。

4.2 反弯曲

图9表示的是当激光功率为120 W、扫描速度为9 mm/s、扫描次数为1时不锈钢304板件弯曲角度随扫描时间的变化过程。其中,X1表示圆振荡激光开始驶入工件上表面的时刻,即激光弯曲成形开始的时刻;X2表示激光刚好移动到视觉传感器测量位置处的时刻;X3表示板件最终驶出板件上表面的时刻,即激光弯曲成形结束的时刻。从图中不难看出,在圆振荡激光束开始扫描上表面的大约前0.5 s时间里,板件弯曲角出现了负角度增长,即板件背向激光出现了反弯曲现象;而0.5 s后负角度逐渐减小、角度开始正向增大,即板件开始正向弯曲。

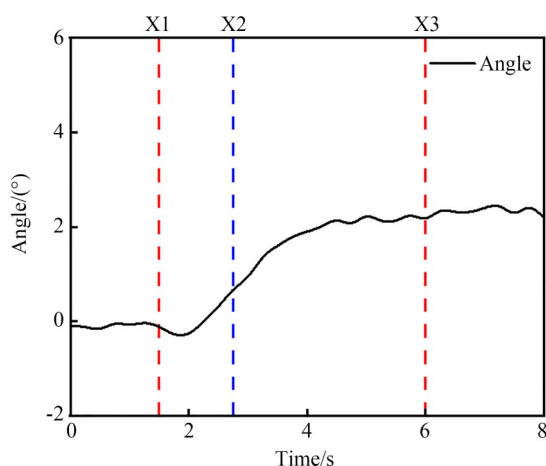


图9 单次扫描板件弯曲角随时间的变化过程

Fig. 9 Change process of single scanning plate bending angle with time

反弯曲现象通常与温度梯度机理(TGM)相关。如图10所示,加热阶段板件在激光照射的瞬间,上表面吸收激光能量瞬间升至高温;而下表面由于没有受到激光直射,温度短时间内没有明显提升,此时上下表面之间形成温度梯度。上表面由于温度高、屈服强度降低,受热发生膨胀且膨胀量远大于下表面,使得板件产生朝着背向激

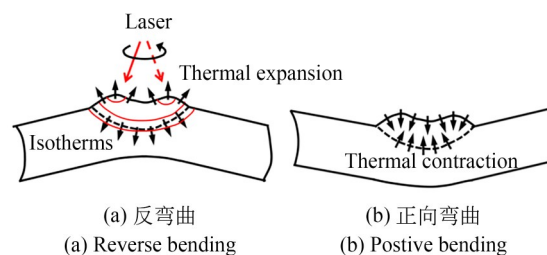


图10 温度梯度机理原理图

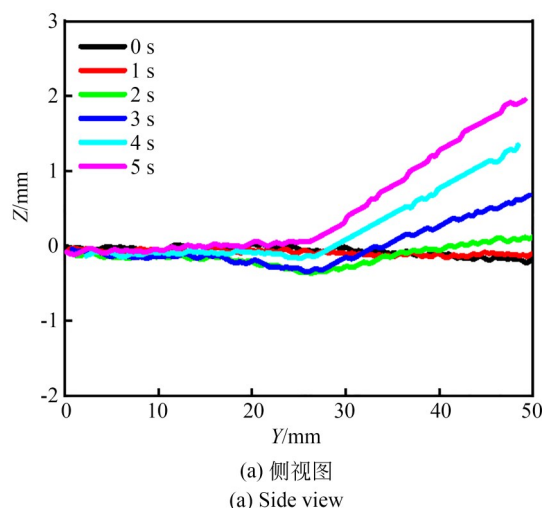
Fig. 10 Schematic diagram of temperature gradient mechanism

光方向的弯曲,即反弯曲。此外,由于下表面屈服强度依旧很高,反向弯曲受阻,导致上表面加热区材料堆积。冷却阶段,上表面温度下降,而下表面开始升温膨胀,板件产生正向弯曲,此时由于上表面屈服强度恢复使得材料堆积无法复原。

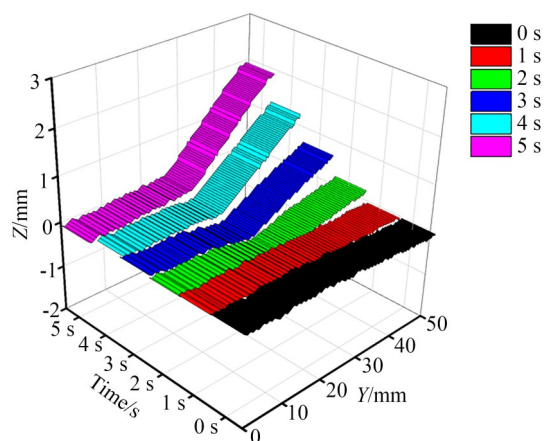
由于三种主流的机理中只有温度梯度机理存在反弯曲现象,所以该圆振荡激光弯曲成形机理应属于温度梯度机理范畴。

4.3 轮廓变化

为了更直观地理解不锈钢304板件在圆振荡激光束弯曲成形过程中的动态响应过程,本节主要研究板件在测量截面内上表面轮廓的弯曲过程。图11表示的是在激光功率为180 W、扫描速度为9 mm/s、扫描次数为1的情况下,不锈钢304板沿长度(y轴)方向轮廓的弯曲过程。已知圆振荡激光束在大约0.3 s时刻进入板件的后缘开始成形,在4.7 s时刻后从板件前缘驶出停止成形,视觉测量位置在X=10 mm处。



(a) 侧视图
(a) Side view



(b) 三维效果图

(b) Three-dimensional view

图 11 板件沿 y 轴线轮廓弯曲过程

Fig. 11 Bending process of plate profile along y-axis

由图 11(a)可知,当激光作用板件上表面时,在温度梯度机理的作用下板件自由端围绕激光扫描路径持续产生塑性变形。不仅如此,夹持端

(扫描路径左侧)一侧的板件随扫描时间变化同样产生了弹性变形,且在 2 s 与 3 s 之间形变量达到最大,在 5 s 时刻恢复原状。推测夹持端一侧板件弹性形变与激光扫描的长度有关,于是设计了如下实验。

如图 12 所示,在相同的工艺参数下,用圆振荡激光束沿扫描路径分别扫过板件宽度方向 10 mm、20 mm、30 mm 和 40 mm 的长度,并用视觉传感器测量装置测量板件表面的形变情况,测量结果如图 13 和图 14 所示。

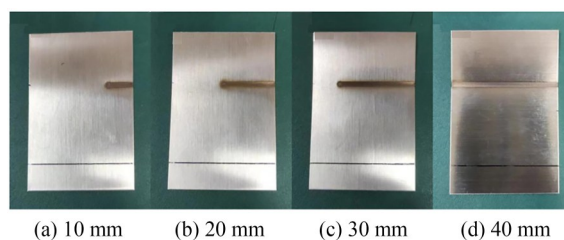


图 12 不锈钢板件试样

Fig. 12 Stainless steel plate specimen

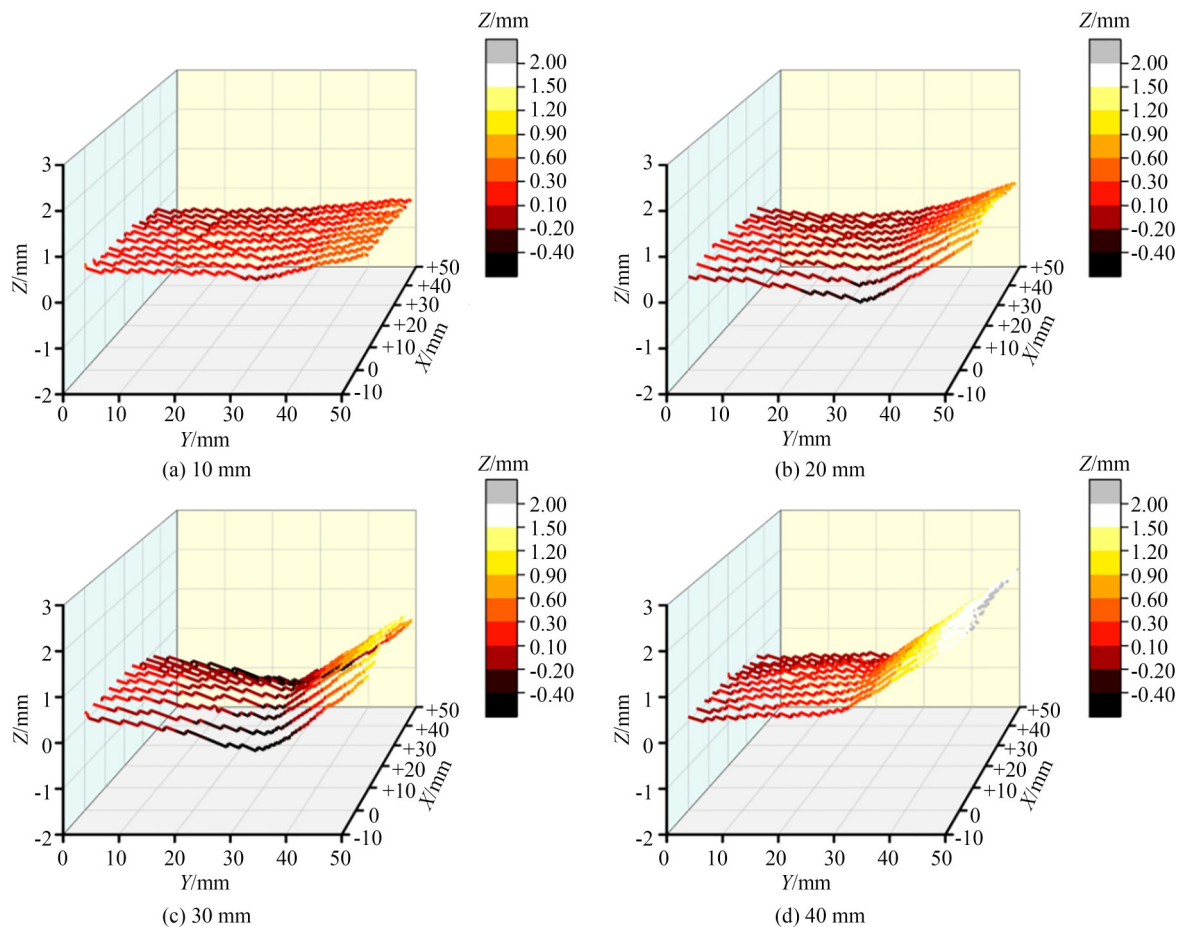


图 13 板件表面轮廓三维点云

Fig. 13 Three-dimensional point cloud of plate surface profile

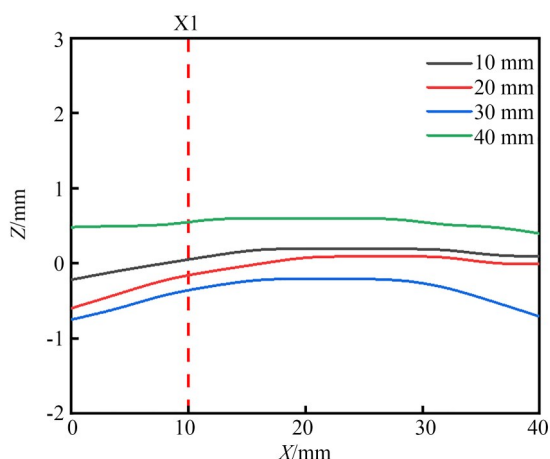
图14 板件沿扫描路径($y=30$ mm)处的截面轮廓

Fig. 14 Cross-section profile of the plate along the scanning path($y=30$ mm)

结合图13板件表面轮廓与图14在板件扫描路径处的截面可以看出,扫描长度不同时,夹持端一侧板件变形程度是不同的。当圆振荡激光束沿扫描路径扫过前20 mm的长度时,在激光热源的作用下板件在宽度方向翘曲明显,且扫描距离越长,翘曲越明显;但是当环形激光沿扫描路径扫过20 mm长度后,板件在宽度方向上的翘曲程度逐渐减小。观察图14中X1($x=10$ mm)位置可以看到,随着扫描长度的增大截面先向下弯曲后回弹,与图11(a)现象相符。由此可见,夹持端一侧的板件发生弹性形变与激光扫描长度是相关的。此外,文献[17]中还指出激光扫描线上的弹性形变与热影响也有关系。

激光弯曲成形过程中,板件宽度方向不仅发生弹性形变,同时也存在塑性形变。图15表示的是在激光功率为180 W、扫描速度为9 mm/s、扫描次数为10、扫描时间间隔为5 s的情况下,板件沿扫描路径($y=30$ mm)截面轮廓随扫描次数的变化情况。由图可知,不同扫描次数下板件沿扫描路径方向的轮廓线是弯曲的,且呈现出两端低中间高的“倒碗型”。石永军^[18]在文章中指出,这种弯曲边轮廓弯曲的现象为边缘效应,与激光照射板件时的热扩散差异、板件几何约束差异和板件上下表面之间塑性应变差异有关。

由此可见,圆振荡激光束沿直线扫描不锈钢304板件的弯曲形变过程不是简单的二维弯曲,而是复杂的、立体的:长度方向上,板件不仅自由端围绕 x 轴方向发生塑性弯曲,而且固定端附近

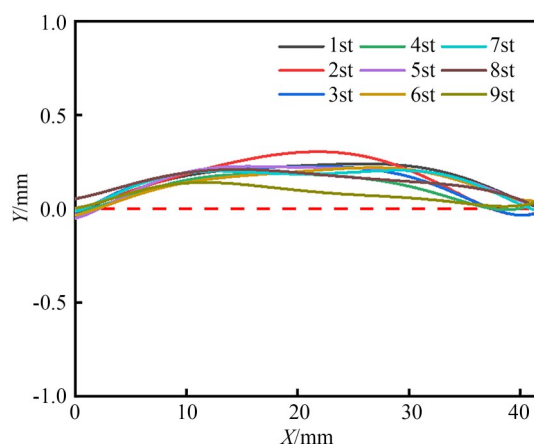
图15 板件扫描路径处($y=30$ mm)截面轮廓随扫描次数的变化

Fig. 15 Change of the cross-section profile of the plate along the scanning path ($y=30$ mm) with the number of scans

板件同样发生着弹性变形,成形结束后弹性变形恢复成初始状态;宽度方向上,板件存在边缘效应,呈现出两端低中间高的塑性变形,长宽形变比约为10:1。

4.4 弯曲角变化

板件弯曲是激光弯曲成形的最终目的,因此板件弯曲角的变化规律是研究板件动态响应过程中的关键特征。板件在整个激光弯曲过程中的弯曲角变化情况在4.1节中已经提到了,如图8所示。为了更好地分析板件弯曲角随时间的变化特征,本节对每一次扫描角度变化过程进行分析。

图16是从图8中截取出第一、三、五和七次扫描时板件在测量位置处弯曲角的变化过程。X1和X3分别表示环形激光驶入和驶出板件上表面的时刻,X2表示环形激光刚好移动到视觉测量线上的时刻。从图16可以看出,在圆振荡激光束驶入视觉测量位置前,测量位置处板件弯曲角呈现指数曲线增长,即曲线导数逐渐增大;当圆振荡激光束驶出测量位置后,测量位置处板件弯曲角呈功率曲线增长,即曲线导数逐渐减小。

为了更直观地体现上述规律,对以上曲线进行求导,导数曲线如图17所示。由于视觉测量传感器测量精度问题导致板件弯曲角导数波动较大,但整体趋势与上述基本一致:在圆振荡激光

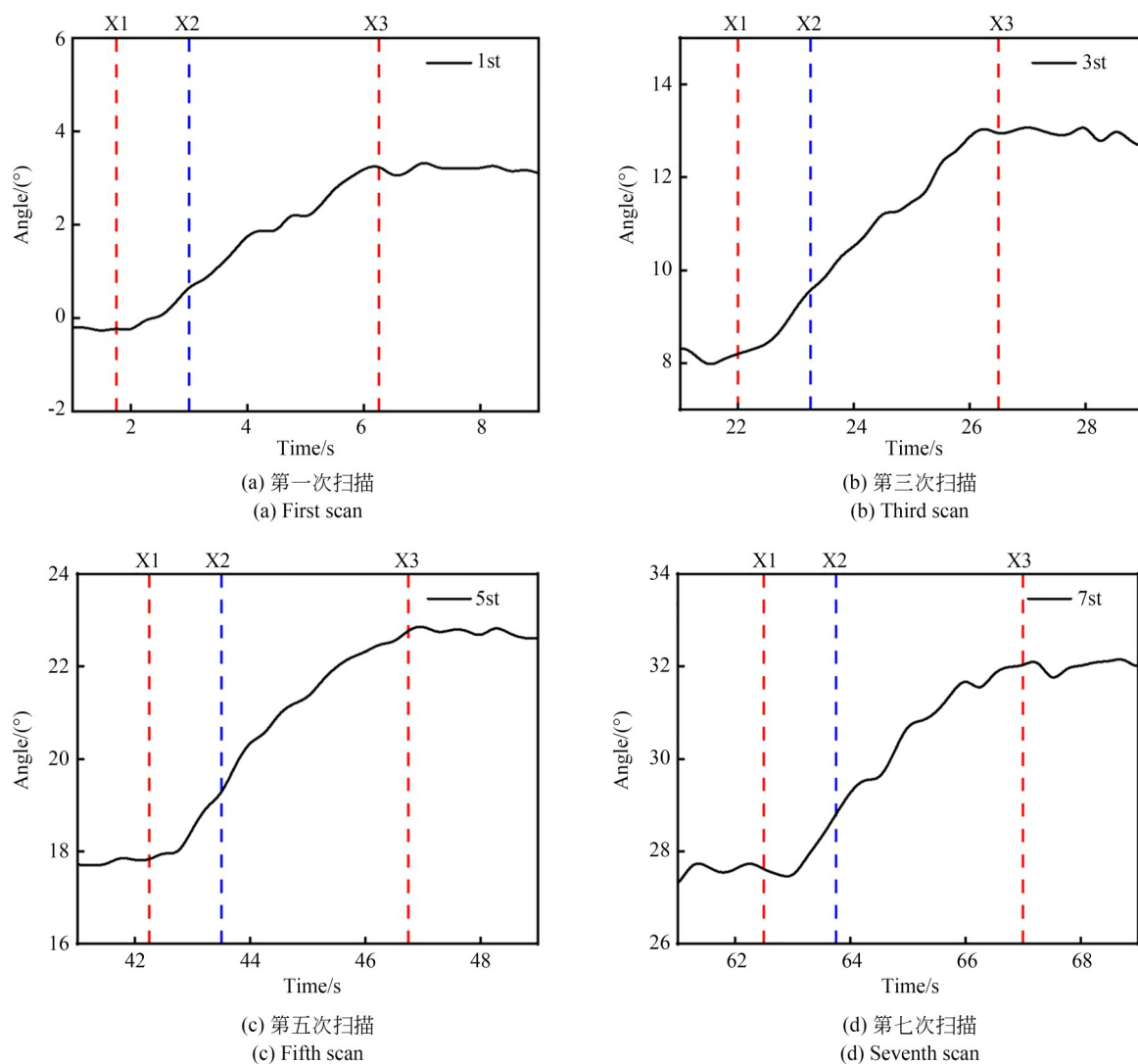
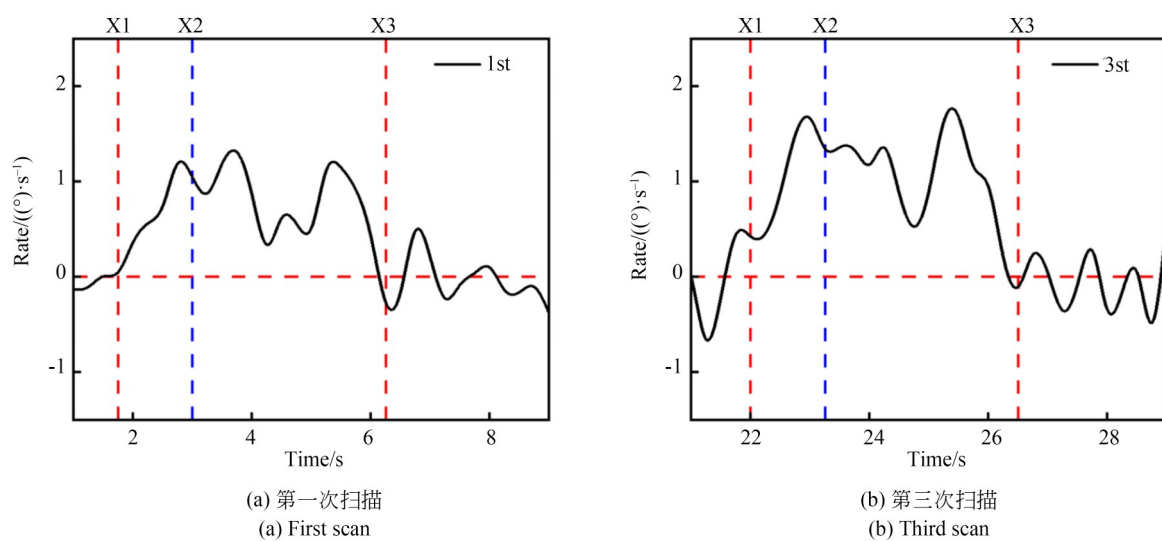


图 16 激光第一、三、五和七次扫描板件弯曲角变化过程

Fig. 16 Evolution of the bending angle of the plate during the first, third, fifth, and seventh laser scans



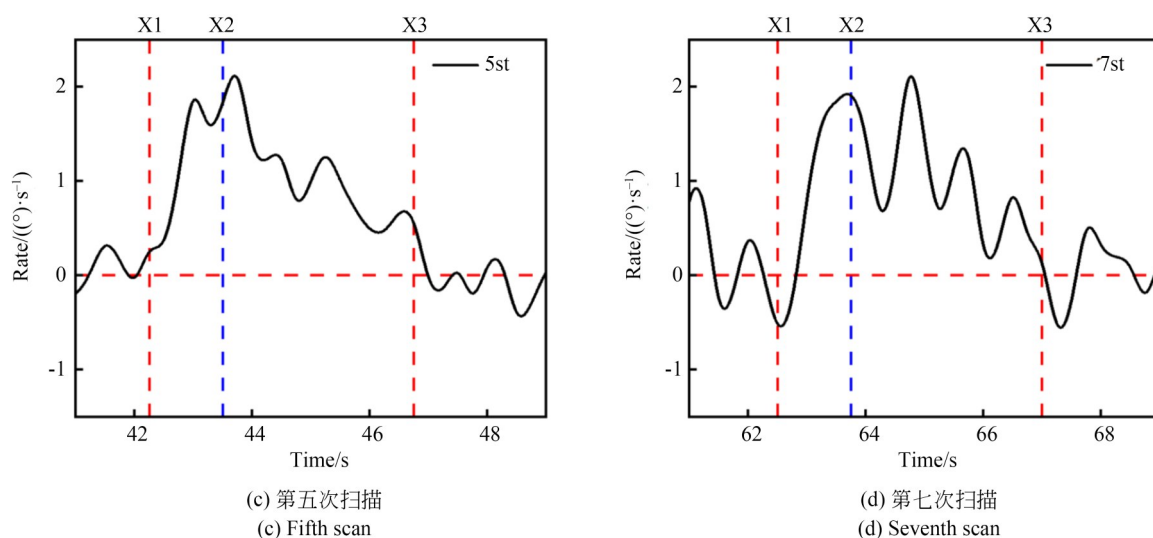


图17 激光第一、三、五和七次扫描板件弯曲角导数变化过程

Fig. 17 Derivative change of the bending angle of the plate during the first, third, fifth, and seventh laser scans

束扫过测量位置前,板件弯曲角随时间变化的导数逐渐增大且在测量位置达到峰值;在圆振荡激光束扫过测量位置后,导数逐渐减小。

为了验证上述规律的普遍性,改变视觉测量传感器的测量位置,观察板件弯曲角变化规律是否依旧存在。由图18可以看到,当视觉测量传感器分别处于 $y=20\text{ mm}$ 和 30 mm 位置时,所测得

的板件弯曲角先遵循指数曲线变化,然后在X2时刻切换到功率曲线,即弯曲角导数先增大后减小。A. N. Thomsen等^[17]在点激光弯曲试验中也发现了类似的规律,并在文中指出X1-X2之间的弯曲角变化是由其余部分变形引起的,而X2-X3之间的弯曲角变化主要是由激光直接加热引起的。

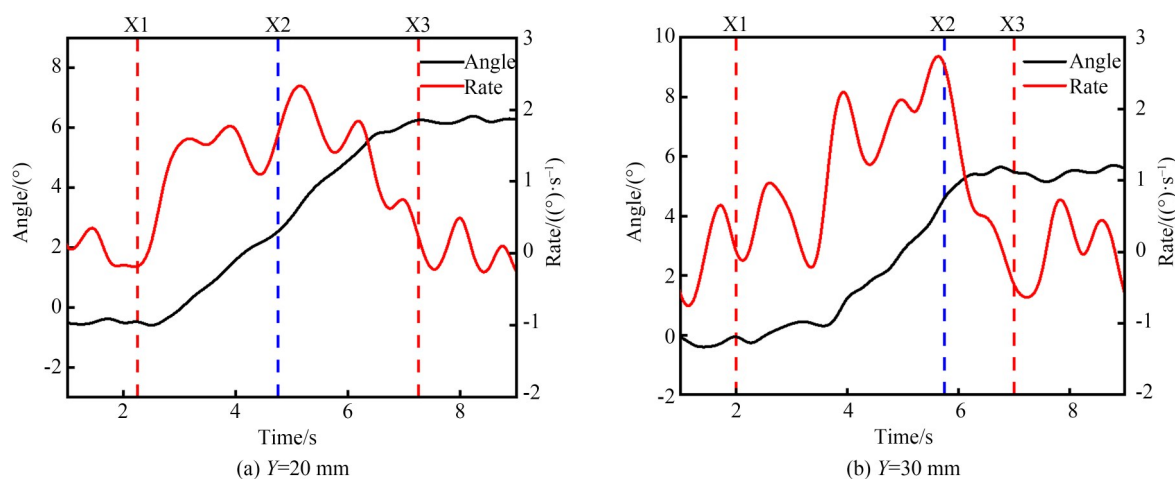


图18 不同测量位置处板件弯曲角及其导数变化

Fig. 18 Bending angle and its derivative changes of the plate at different measurement positions

4.5 弯曲角分布

Georgi Nikolaev Nikolov等^[19]在文章指出,点激光的TGM成形机理中单次弯曲角度可达 3° 左右,想要使用TGM实现大于 3° 的弯曲,则需要

点激光多次扫描渐进成形。圆振荡激光束弯曲成形也是如此,想要实现大角度弯曲同样需要多次扫描来实现,而板件弯曲角在每次扫描时的分布情况对保证渐进成形稳定性与精度具有十分

重要的意义。因此,本节主要研究板件弯曲角的分布情况。

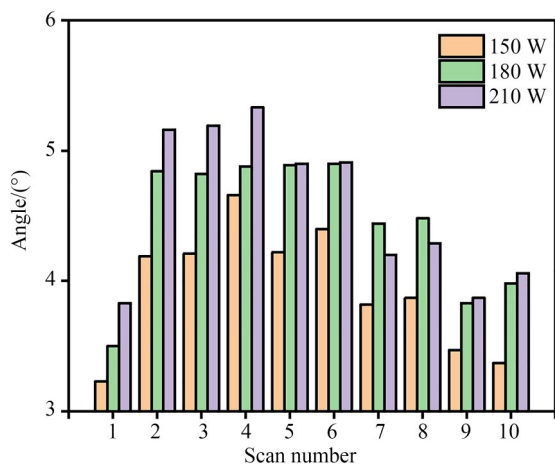


图 19 不同激光功率下板件弯曲角分布

Fig. 19 Plate bending angle distribution under different laser power

图 19 表示的是在不同激光功率下板件弯曲角的分布情况。由图可知,当激光功率增大时,单次激光弯曲成形的角度会增大。这是因为激光功率的增大提高了圆振荡激光束单位面积的能量密度,进而提高了激光照射板件上表面时上下表面之间的温度梯度,所以板件的弯曲角会增大。但是在同一激光功率下,弯曲角分布规律基本一致:板件在第二道扫描时,单次扫描弯曲角会大幅增大,然后在后续扫描时会缓慢增大甚至达到平衡,最后单次扫描弯曲角逐渐衰减。前人的文献中也报道了类似的现象:在多次扫描激光成形中,随着扫描次数的增加,单次弯曲角度减小^[20]。

由此可见,不锈钢 304 板件在圆振荡激光束渐进成形过程中弯曲角分布并不是始终稳定的,而是:先急速增大;再趋于平稳;最后缓慢衰减。弯曲角的不均匀分布极大地影响着激光渐进成形的稳定性与精度,因此理解弯曲角分布规律的成因至关重要。本文主要从以下几个方面解释不锈钢 304 板件在圆振荡激光束多次弯曲成形时弯曲角分布的变化规律:(a)余热效应;(b)吸收率;(c)部分增厚;(d)几何效应;(e)应变硬化;(f)微观组织。

4.5.1 余热效应

余热效应是指前道工序在工件内部产生的热量对后续工序的影响。前道工序产生的热量可能有两种效果:一是降低材料与温度相关的特性,使材料更容易弯曲变形;二是提高工件自身的基础温度,降低激光产生的热梯度(满足 TGM 条件时),从而使弯曲角减小。本文设计了一组对照试验,来说明余热效应是否影响了板件弯曲角的分布。

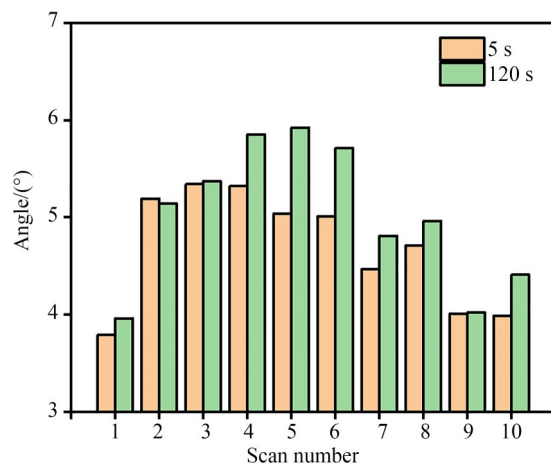


图 20 不同间隔时间下板件弯曲角分布

Fig. 20 Distribution of bending angle of plate under different interval time

图 20 表示的是不同时间间隔下圆振荡激光束扫描十次板件弯曲角的分布情况。当时间间隔为 5 s 时,相邻两次扫描之间时间间隔较短,在下一扫描开始前板件温度没有冷却到初始温度,所以当前激光弯曲成形过程对下一次扫描存在余热效应影响。而当间隔时间为 120 s 时,在下一扫描开始前有充足的时间让板件温度恢复到初始状态,激光弯曲成形过程不存在余热效应。通过比较有/无余热效应两种情况下板件弯曲角的分布情况我们不难看出,在第 4 到第 6 次扫描时余热效应对板件弯曲产生了明显的抑制效果,与余热效应效果的第二点是一致的;而在其他扫描过程时,余热效应对板件的弯曲成形没有明显改变,即两种效果达到了动态平衡。

4.5.2 吸收率

激光弯曲成形的关键就是金属表面吸收激光束能量转换成板材内部的热应力从而使板材

发生弯曲,所以板件表面对激光束能量的吸收率对板材弯曲角的变化有很大影响。因此吸收率的变化也可能是导致每次扫描弯曲角变化的因素。本文使用的板件表面没有覆盖涂层,所以板件表面对激光束能量的吸收率很大程度上却取决于板件表面的粗糙度,表面越粗糙吸收率越高,反之越差。因此本节主要分析板件表面粗糙度对弯曲角分布的影响。

利用真彩色超景深三维显微镜捕捉圆振荡激光束扫描路径表面,如图21所示。由图可以看出,初始状态下板件表面十分光滑,当环形激光扫描后板件表面因为浅层被融化而变得十分粗糙,但是经过多次扫描后板件表面粗糙程度又逐渐变小。为了定性的描述板件表面粗糙度变化,采用 R_z 值来表征表面粗糙度情况,如图22所示。

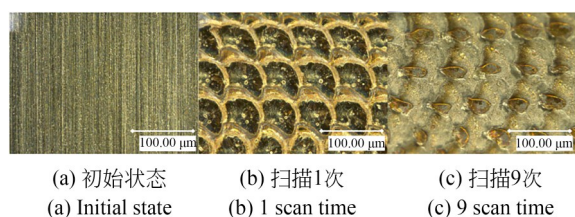


图21 不同扫描次数下上表面形貌

Fig. 21 Upper surface morphology under different scanning times

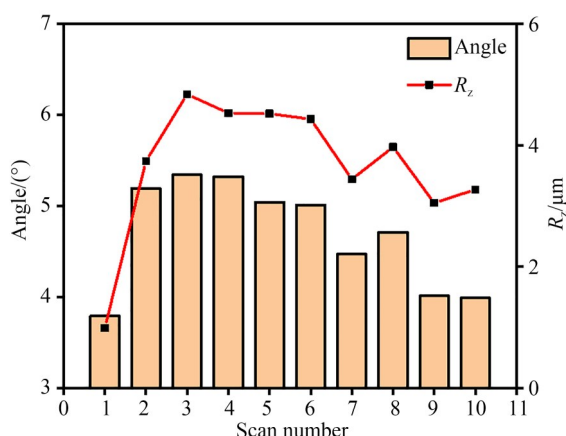


图22 每次扫描前表面 R_z 值与弯曲角的变化关系

Fig. 22 Relationship between the R_z value before scanning and the distribution of bending angle

由图22可以看出,单次扫描弯曲角的变化趋势与每次扫描前表面粗糙度 R_z 的变化基本一致:

激光弯曲成形前不锈钢板件初始表面十分光滑,对激光能量的吸收率低,此时单次扫描时弯曲角比较小;激光扫描一次后板件表面由于浅层被融化表面 R_z 值激增,对激光能量吸收率也大幅增大,此时单次扫描时弯曲角增长较大;随着扫描次数的增多表面 R_z 值逐渐减小,对激光能量的吸收率减弱,此时单次扫描时弯曲角又逐渐减小,因此单次扫描弯曲角变化规律与表面吸收率的变化有密切关系。S P Edwardson等^[20]在文章中也提到过类似的结论。

4.5.3 部分增厚

许多文献都报道了激光弯曲成形后扫描区域截面厚度增加的现象^[21-24]。从图23可以看出,右侧弯曲部位为扫描区域,其厚度相对于左侧明显增大。这种增厚效应归因于体积守恒,在激光弯曲成形过程中上表面在TGM的作用下受到压应力而发生塑性压缩变形,由于材料体积始终保持不变,此时部分受挤压的材料被迫沿厚度方向移动导致厚度增大。当板件截面厚度增加时,板件将更难弯曲。所以,板件的部分增厚也可能是影响激光弯曲成形过程弯曲角分布的原因之一。为了验证这一猜想,对激光弯曲成形过程中的板厚变化进行了测量,如图24所示。

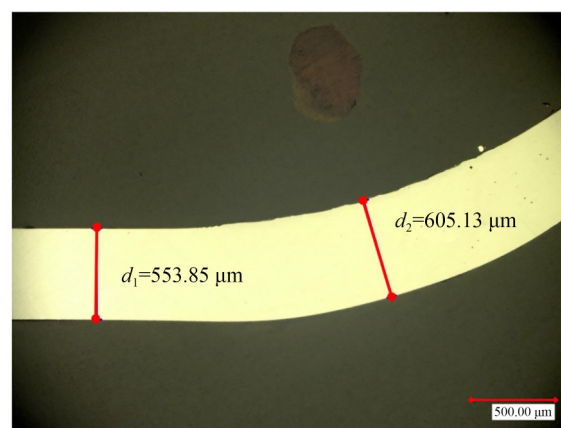


图23 激光弯曲成形后板件截面

Fig. 23 Section of plate after laser bending forming

图24表示的是前一次扫描后的板件厚度与当前扫描的弯曲角变化关系。从图中可以看出,扫描次数与板件厚度成正比,随着扫描次数的增加板件厚度也随之增大。而且前三次扫描板厚增大并未对板件弯曲产生明显的抑制效果;但是

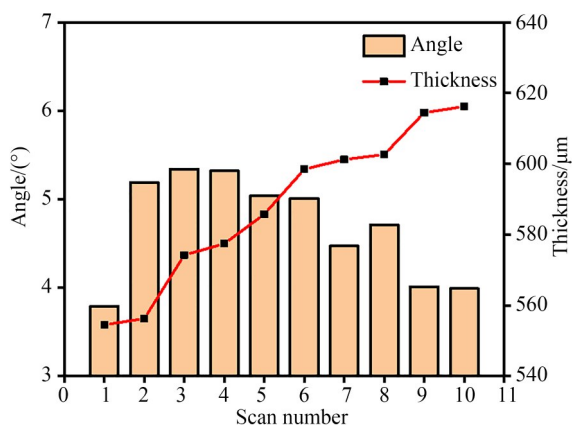


图 24 每次扫描前板件厚度与弯曲角的变化关系

Fig. 24 Relationship between the thickness of the plate and the bending angle before scanning

从第四次扫描开始板件厚度与单次扫描弯曲角成反比关系,板件厚度越大,单次扫描弯曲角越小,板厚增大对板件弯曲角起到了明显的抑制作用。Vollertsen^[25]在其导出的双层模型中阐述了板件厚度 s_0 的平方与每道弯曲角 α_b 的反比关系:

$$\alpha_b = 3 \frac{\alpha_{th} p_1 A}{\rho C_p \nu_1 s_0^2}, \quad (1)$$

其中: p_1 为激光功率, A 为吸收系数, ν_1 为加工速度, C_p 为比热, ρ 为密度。

由此可见,当扫描次数超过一定次数时,截面厚度增大确实会增大板件弯曲的难度,导致单次扫描弯曲角衰减。

4.5.4 几何效应

激光束在板件上投影的几何形状也会影响板件弯曲角的分布。如图 25 所示,随着板件弯曲角 α 的增大,光束投影的几何形状发生了变化。圆振荡激光束辐射到倾斜表面后变为椭圆形,与垂直入射相比面积增大,那么单位面积内的能量密度也相应减小,弯曲角也会受到影响。

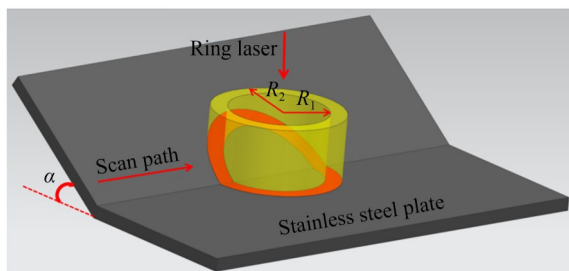


图 25 几何效应示意图

Fig. 25 Schematic diagram of geometric effects

已知光束小径 R_1 、大径 R_2 ,激光辐射面积 A 随弯曲角 α 的变化关系为:

$$A = \frac{\pi(R_2^2 - R_1^2)}{2} \left(1 + \frac{1}{\cos \alpha} \right). \quad (2)$$

根据等式关系可以绘制图 26。如图所示,激光辐射面积与板件总弯曲角成正相关,总弯曲角越大,激光辐射面积也越大,而激光功率是不变的,所以激光辐射面积越大,能量密度反而越小,每次扫描弯曲角也就越小。尤其是在 20° 以上时,总弯曲角增大对激光辐射面积有着显著提升,而此时单次扫描弯曲角也出现明显衰减。由此可见,板件总弯曲角过大对每次扫描弯曲角有显著的抑制作用。

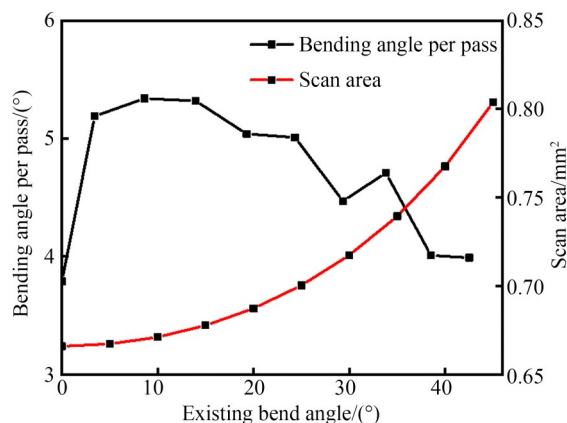


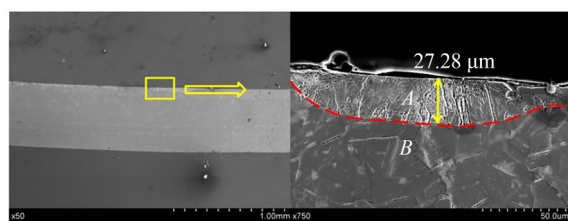
图 26 激光辐射面积、单次扫描弯曲角随当前总弯曲角的变化关系

Fig. 26 Relationship between scan area and bending angle per pass with existing bend angle

4.5.5 微观组织

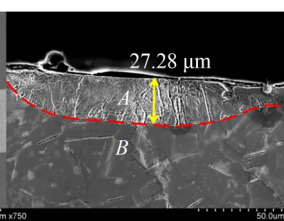
本节从微观角度研究板件在激光弯曲成形过程中的组织变化以及组织变化对板件弯曲的影响。

图 27 为不锈钢板件在圆振荡激光束下扫描一次后,扫描区域截面局部的微观晶粒图。从图 27(b)可以看出,板件局部在厚度方向上出现了明显的边界,可将金相组织分为两个部分,其中 A 区域为热影响区, B 区域为母材区。这种分层现象是由板件在激光扫描过程中厚度方向温度变化不均匀导致的。不锈钢 304 材料属于奥氏体不锈钢,在高温和室温下具有稳定的奥氏体组织,所以激光热成形过程中板件不存在组织转



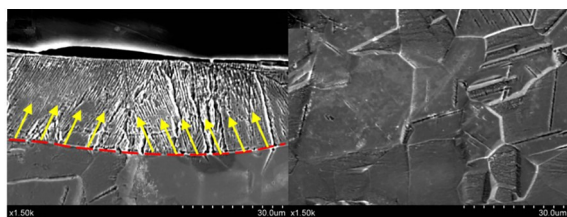
(a) 截面宏观图

(a) Macroscopic cross-section diagram



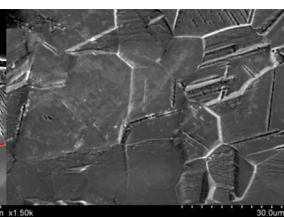
(b) 局部放大图

(b) Partial enlarged detail diagram



(c) A区微观晶粒图

(c) Region A

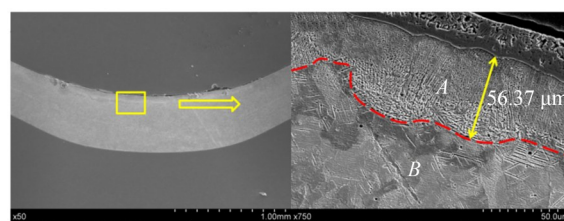


(d) B区微观晶粒图

(d) Region B

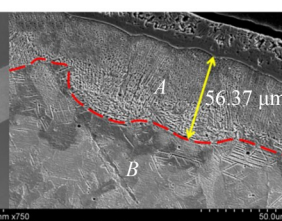
图 27 扫描一次后的微观晶粒图

Fig. 27 Microscopic grain diagram after 1 scan



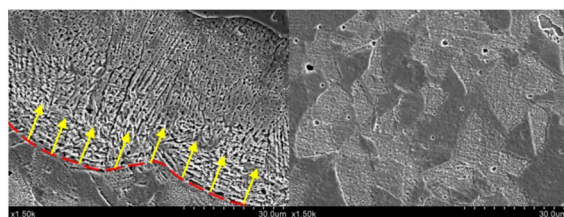
(a) 截面宏观图

(a) Macroscopic cross-section diagram



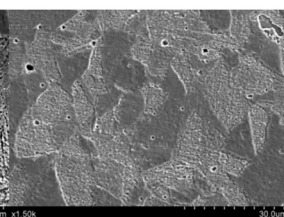
(b) 局部放大图

(b) Partial enlarged detail diagram



(c) A区微观晶粒图

(c) Region A



(d) B区微观晶粒图

(d) Region B

图 29 扫描十次后的微观晶粒图

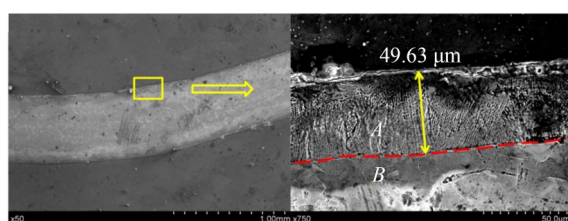
Fig. 29 Microscopic grain diagram after 10 scans

变,仅存在晶粒形态上的变化。结合图 27(c)与 27(d)不难看出,在温度梯度的影响下,A区晶粒相较于B区细化明显,且呈现出柱状晶结构。这是因为A区更靠近激光热源和板件上表面,温度较高、与空气的接触面较大,所以A区冷却速度较快,形核率较高,与母材区晶粒相比晶粒细化明显。晶粒细化会增大板件的抗弯强度。

图 28~图 29 分别为扫描五次、十次后扫描区

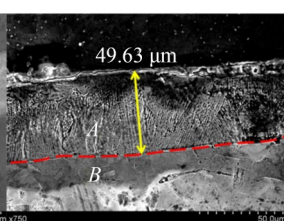
域截面的微观晶粒图。通过对比图 27-28 与 29 可以看出,随着扫描次数的增加,热影响区晶粒细化程度虽然没有明显变化,但是细化晶粒区域深度不断增加。细化晶粒区域深度增大会导致板件抗弯强度也增大,因此板件的弯曲难度会随扫描次数增大而增大。

为了进一步说明晶粒细化对板件弯曲的影响,对扫描十次后的板件截面显微硬度进行测量,结果如图 30。



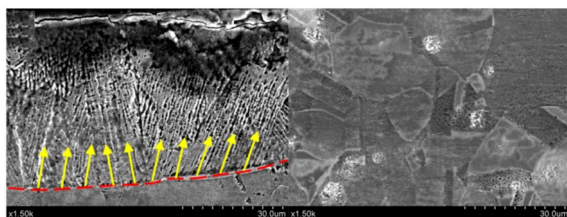
(a) 截面宏观图

(a) Macroscopic cross-section diagram



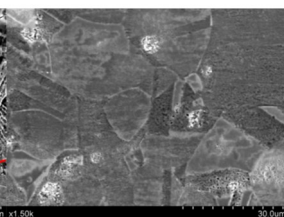
(b) 局部放大图

(b) Partial enlarged detail diagram



(c) A区微观晶粒图

(c) Region A

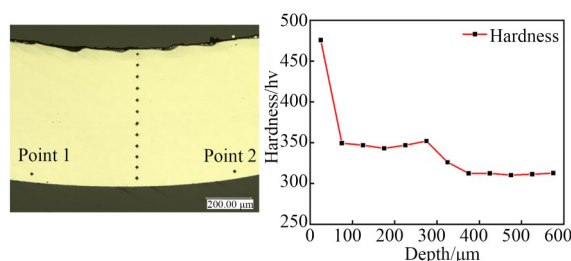


(d) B区微观晶粒图

(d) Region B

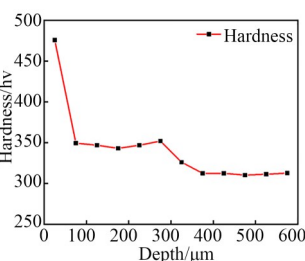
图 28 扫描五次后的微观晶粒图

Fig. 28 Microscopic grain diagram after 5 scans



(a) 测量点位置分布

(a) Distribution of measuring point position



(b) 显微硬度测量值

(b) Measured values of microhardness

图 30 显微硬度分布

Fig. 30 Distribution of microhardness

从图中不难看出,表层的显微硬度值明显高出其他深度下的显微硬度,这是由于激光处理区域的晶粒发生了细化现象。显微硬度的变化规

律也验证了晶粒细化增大板件弯曲强度的结论。另外,靠近弯曲板件背面部分材料(即深度值较大处)显微硬度与其他两处相同深度下的材料显微硬度值(Point1:310.25 hv/Point2:309.18 hv)基本一致,由此可见板材背面烧蚀痕迹对材料力学性能影响并不明显。

5 结 论

本文对不锈钢 304 板进行了大量的激光弯曲成形试验,为提高激光弯曲成形效率提供了一种新思路:当点激光能量密度较高时,使用圆振荡

模式可以大幅增大单次扫描板件的弯曲角,增长率在 60% 左右,进而可以提高板件弯曲成形效率。此外,本文还通过视觉传感器捕捉到了不锈钢 304 板在圆振荡激光束弯曲成形过程中复杂的动态响应并揭示其机理,试验表明:(1)板件在长度与宽度方向上均产生了塑性变形,长宽形变比约为 10:1;(2)单次扫描成形板件弯曲角增长过程呈现不同的增长曲线;(3)多次扫描成形弯曲角分布不均衡,与余热效应、吸收率、部分增厚、几何效应与微观组织密切相关。本文的研究成果为实际生产提供了丰富的理论指导^[26-27]。

参考文献:

- [1] 管延锦,孙胜. 板料激光弯曲的屈曲机理的研究[J]. 激光技术, 2001, 25(1): 11-14.
GUAN Y J, SUN S. Study on buckling mechanism of laser bending of the sheet metal[J]. *Laser Technology*, 2001, 25(1): 11-14. (in Chinese)
- [2] MAGEE J, WATKINS K G, STEEN W M. Advances in laser forming[J]. *Journal of Laser Applications*, 1998, 10(6): 235-246.
- [3] HU Z, KOVACEVIC R, LABUDOVIC M. Experimental and numerical modeling of buckling instability of laser sheet forming[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42(13): 1427-1439.
- [4] DEARDEN G, EDWARDSON SP, WATKINS KG, *et al.* Magee J. Laser Assisted Forming for Ship Building [C]. SAIL, Williamsburg, VA. 2003 Jun 2:2-4.
- [5] HU Z, LABUDOVIC M, WANG H, *et al.* Computer simulation and experimental investigation of sheet metal bending using laser beam scanning[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41(4): 589-607.
- [6] 顾杰岩,闫崇京,张翅超,等. 板料单曲面激光弯曲成形的误差补偿研究[J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002108.
GU J Y, YAN C J, ZHANG C C, *et al.* Study on error compensation for laser bending of single-curved surface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(10): 1002108. (in Chinese)
- [7] 王晓岗,石永军,郭延阔,等. 层状金属复合板的激光弯曲成形及边缘效应控制[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0302004.
WANG X G, SHI Y J, GUO Y K, *et al.* Laser bending and edge effect control of laminated metal composite plate [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0302004. (in Chinese)
- [8] CHEN G, XU X. Experimental and 3D Finite Element Studies of CW Laser Forming of Thin Stainless Steel Sheets[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2001, 123(1):66-73.
- [9] KYRSANIDI A K, KERMANIDIS T B, PANTELAKIS S G. An analytical model for the prediction of distortions caused by the laser forming process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 104(1/2): 94-102.
- [10] SHI Y J, LIU Y C, YAO Z Q, *et al.* A study on bending direction of sheet metal in laser forming [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(5).
- [11] SHI Y, YAO Z, SHEN H, *et al.* Research on the mechanisms of laser forming for the metal plate [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 46(12-13):1689-97.
- [12] 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.
- [13] HOSEINPOUR GOLLO M, MOSLEMI NAEINI H, LIAGHAT G H, *et al.* An experimental study of sheet metal bending by pulsed Nd: YAG laser with DOE method[J]. *International Journal of Material Forming*, 2008, 1(1): 137-140.

- [14] GISARIO A, MEHRPOUYA M, VENETTACCI S, *et al.* Laser-assisted bending of Titanium Grade-2 sheets: experimental analysis and numerical simulation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 92: 110-119.
- [15] 孙涛. 玻璃纤维增强铝合金层板激光弯曲成形试验及模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
SUN T. *Experimental Study and Simulation on Laser Bending of Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [16] 管延锦, 孙胜, 赵国群, 等. 材料性能参数与板料激光弯曲成形角度的相关性研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(4): 499-504.
GUAN Y J, SUN S, ZHAO G Q, *et al.* Study on relationship between material properties and bending angles in laser forming process of sheet metals [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(4): 499-504. (in Chinese)
- [17] THOMSEN A N, KRISTIANSEN M, KRISTIANSEN E, *et al.* Online measurement of the surface during laser forming[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107(3): 1569-1579.
- [18] SHI Y J, SHEN H, YAO Z Q, *et al.* Edge effects of metal plate in laser forming[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2005, 15(S3): 260-263.
- [19] NIKOLAEV NIKOLOV G, NOEL THOMSEN A, KRISTIANSEN M. Hardening in laser forming under the temperature gradient mechanism[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1135(1): 012006.
- [20] EDWARDSON S P, GRIFFITHS J, EDWARDS K R, *et al.* Laser forming: overview of the controlling factors in the temperature gradient mechanism [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2010, 224(5): 1031-1040.
- [21] THOMSON G, PRIDHAM M. Material property changes associated with laser forming of mild steel components [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 118(1/2/3): 40-44.
- [22] MERKLEIN M, HENNIGE T, GEIGER M. Laser forming of aluminium and aluminium alloys-microstructural investigation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 115(1): 159-165.
- [23] CHENG J, YAO Y L. Microstructure integrated modeling of multiscan laser forming[J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2002, 124(2): 379-388.
- [24] MARYA M, EDWARDS G R. A study on the laser forming of near-alpha and metastable beta titanium alloy sheets[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 108(3): 376-383.
- [25] VOLLERTSEN F. *Forming, Sintering and Rapid Prototyping* [M]. Handbook of the EuroLaser Academy. Boston, MA: Springer US, 1998: 357-453.
- [26] 刘友强, 曹银花, 李景, 等. 激光加工用5kW光纤耦合半导体激光器[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1279-1287.
LIU Y Q, CAO Y H, LI J, *et al.* 5 kW fiber coupling diode laser for laser processing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1279-1287. (in Chinese)
- [27] 李鹏举, 潘登, 刘顺利. 长焦深连续立方相位板的飞秒激光加工与性能测试[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(17): 2088-2093.
LI P J, PAN D, LIU S L. Continuous cubic phase plate with long depth of focus fabricated by femtosecond laser and its optical performance[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(17): 2088-2093. (in Chinese)

作者简介:



沈宗宝(1984—),男,江苏盐城人,高级实验师,分别于2007年、2010年、2017年在江苏大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事激光先进制造技术的研究。E-mail: szb@ujs.edu.cn



韩曜阳(1998—),男,江苏徐州人,硕士研究生,2021年于江苏大学获得学士学位,主要从事激光弯曲成形机理方面研究。E-mail: 1216924073@qq.com