

异形波纹板激光弯曲成形面畸变抑制策略研究

姚喆赫^{1,2,3}, 洪锦源^{1,2,3}, 范伟鑫^{1,2,3}, 刘云峰^{2,3}, 梅德庆⁴, 姚建华^{1,2,3*}¹浙江工业大学激光先进制造研究院, 浙江 杭州 310023;²浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310023;³高端激光制造装备省部共建协同创新中心, 浙江 杭州 310023;⁴浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 面向甲醇重整制氢微反应器异形微细波纹板制造难题,采用激光弯曲成形技术制造了“双圆弧”异形微细波纹板。针对“双圆弧”异形波纹板激光弯曲成形过程中的面畸变缺陷,提出了一种变速扫描策略,在不同扫描策略下开展了温度场数值模拟与成形试验研究,并对有无抑制策略下的异形波纹板成形质量进行了评价。结果表明,多段变速策略实现了能量分布的离散化调控,末端热积累显著降低,8段变速时出口处峰值温度相较于恒速扫描下降了13.4%;在变速扫描策略下,法平面弯曲成形面畸变呈减小趋势,弯曲角度差小于1.0°,成形后波纹板流道上下底面的平行度提高了87.5%,波纹度最大降低了51.2%。研究结果表明,变速扫描策略可显著降低激光弯曲成形面畸变,提升波纹板成形质量。

关键词 激光技术; 激光弯曲成形; 异形波纹板; 面畸变; 抑制策略

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230533

1 引言

氢能是低碳高效能源体系的重要组成部分,甲醇重整制氢微反应器^[1]作为移动氢源,具有传热传质效率高、结构紧凑、体积小、集成化程度高等突出优势^[2]。波纹板是反应器的重要载体之一,起着传热传质、催化负载、定向导流、结构支撑等关键作用^[3]。研究发现,优化设计的异形流道可均匀分配反应物,增加反应物停留时间,提高传质效率^[4],并可改善介质在流动过程中的温度不均匀性和压力损失问题,强化流道传热性能^[5],满足了燃料电池高效、高能量密度的服役需求。

流道结构的异形化设计可显著提升波纹板的服役性能,但由于受力不均、尺度效应等,采用冲压、辊压等成形技术时常出现回弹起皱、均匀性差、尺寸偏差等^[6]问题,严重影响成形质量和合格率。激光弯曲成形^[7-11]作为一种兼具高柔性、可控性好的板材成形技术,避免了实体刀具或模具所带来的问题,且易实现数字化和柔性化处理,有望成为异形波纹板制造的解决方案之一,但采用激光弯曲成形技术制备异形波纹板仍需克服成形过程中的面畸变问题。

薄板成形时的面畸变(平直性缺陷)从力学角度可分为瓢曲和翘曲^[12]两大类:瓢曲缺陷是薄板沿宽度方向的残余应力分布不均匀的结果,翘曲缺陷则是薄板

沿厚度方向的应力不均匀分布产生的弯曲变形。在激光弯曲成形中,由于加热线温度与板内约束的非均匀化分布会产生“边界效应”^[13],因此成形不均匀,容易出现翘曲变形。Shi等^[14]、Shen等^[15]和Zhang等^[16]分别研究了不同激光功率、扫描速度和扫描次数下的边界效应及其抑制策略。李紫慧^[17]针对成形后的板材,提出了能量调控方法以减少首尾的翘曲现象。顾杰岩等^[18]采用一种扫描路径误差补偿方法,提高了激光弯曲成形精度。王高峰等^[19]对激光圆弧扫描弯曲曲面变形进行了试验研究,发现薄板曲面变形量受输入激光能量、热应力分布及金属层合板曲面变形抗力的影响。由于异形波纹板激光曲线扫描的特点,除“边界效应”产生的翘曲变形外,加热线残余应力分布不均以及自由端不均匀约束等因素引起的成形面瓢曲变形将不可忽略。异形波纹板激光弯曲成形中的“面畸变”现象及其机制将比直线弯曲成形显著复杂。因此,异形波纹板激光弯曲成形面畸变的抑制方法仍有待进一步深入研究。

本文将激光弯曲成形技术用于异形微细波纹板制造,实现了双圆弧异形波纹板的制造。通过数值模拟与试验研究,分析了激光双圆弧曲线扫描过程中的热积累与自由端约束情况,揭示了变速扫描策略下温度场分布与成形角间的关系,研究了分段变速和扫描速

收稿日期: 2023-02-16; 修回日期: 2023-03-31; 录用日期: 2023-04-06; 网络首发日期: 2023-04-16

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

通信作者: *lam@zjut.edu.cn

率分布对弯曲成形面畸变的抑制机制。在此基础上,进一步对波纹板成形质量进行了评估,研究结果为异形件激光弯曲成形面畸变分析及其抑制策略提供了参考。

2 数值模拟

2.1 数值模型构建

激光弯曲过程中主要存在三种成形机制,分别为温度梯度机制(TGM)、屈曲机制(BM)和墩粗机制(UM)^[20]。本研究中光斑直径与厚度之比较小,同时扫描速度较快,因此弯曲成形过程以温度梯度机制为主。由于在激光弯曲成形过程中温度场分布将直接影响成形效果,为了模拟激光双圆弧曲线扫描过程中的温度场变化情况,利用有限元分析软件构建了激光双圆弧曲线弯曲成形数值模型。在考虑成形过程中的热对流和辐射的基础上^[21],对模型作出以下假设^[13,22]: 1) 板材为各向同性; 2) 忽略加热过程中的相变与潜热; 3) 环境温度设定为 25 °C。试验过程中使用的激光光源服从高斯分布:

$$I' = \frac{8AP}{\pi D^2} \exp(-8r^2/D^2), \quad (1)$$

式中: I' 为输入热通量; A 为材料的吸收系数; P 为激光功率; D 为激光光斑直径; r 为与激光光源中心的距离。

当激光照射金属薄板时,会出现热量传导、对流和辐射现象,部分热量传导到薄板内部,还有部分热量通过对流和辐射进入到空气中。控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(k \cdot \partial T / \partial x) + \frac{\partial}{\partial y}(k \cdot \partial T / \partial y) + \frac{\partial}{\partial z}(k \cdot \partial T / \partial z) + q_0 = \rho c \cdot \partial T / \partial t, \quad (2)$$

式中: T 为温度; ρ 为密度; c 为比热; k 为热导率; q_0 为每单位体积的介质产生热量的速率; $k \cdot \partial T / \partial x$ 、 $k \cdot \partial T / \partial y$ 和 $k \cdot \partial T / \partial z$ 分别为 x 、 y 、 z 坐标处单位面积的传热速率。

本文采用双圆弧扫描路径制造波纹板流道,如图 1 所示,其中, r' 为圆弧半径, o' 为圆弧圆心, A' 、 a' 分别为流道进、出口的下底边边长, B 、 b 分别为流道进、出口的上底边边长, h 为流道高度, α' 为流道壁面倾角。扫描路径呈中心对称,流道面积大处为进口,小处为出口,以改善流速分布和降压,加强流道的传热传质性能。

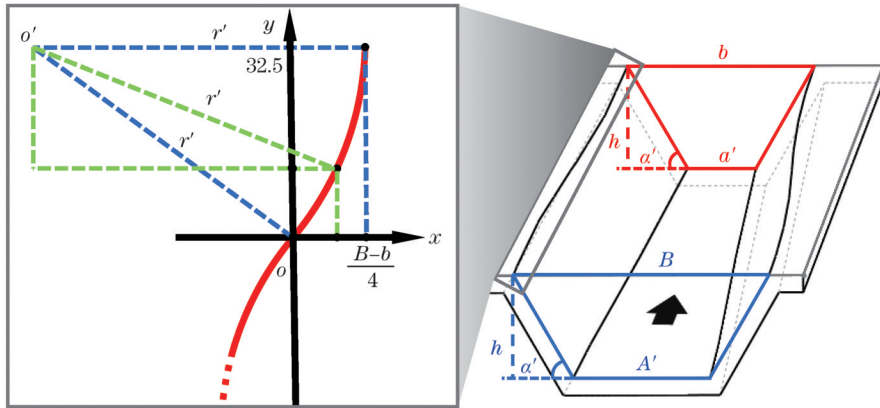


图 1 双圆弧异形流道示意图

Fig. 1 Schematic of double-arc specialty-shaped flow channel

为了提高计算精度和效率,采用网格非均匀划分方式。对激光扫描路径及部分辐散区域进行细化处

理,细化网格尺寸为 0.05~0.10 mm,如图 2 所示。数值模拟使用的材料热物性参数如表 1 所示。

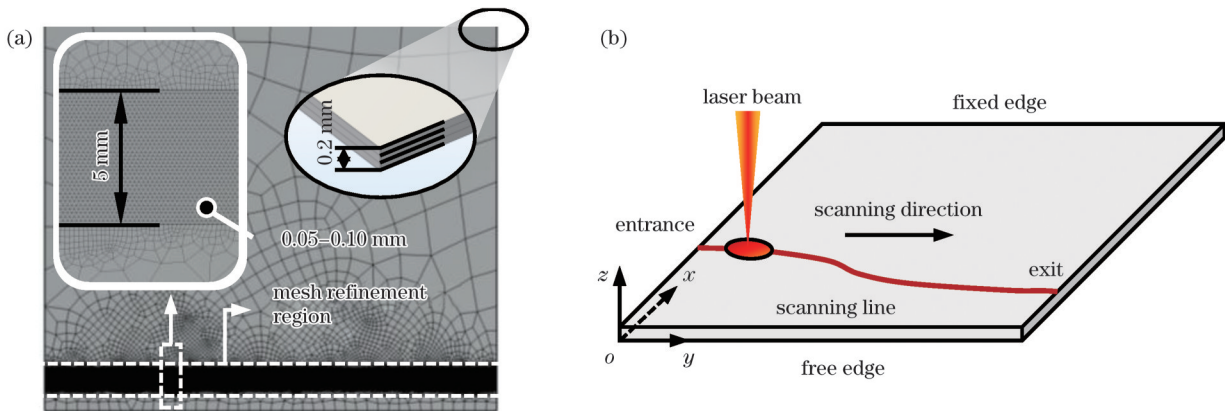


图 2 激光弯曲成形数值模型。(a) 网格划分;(b) 扫描路径示意图

Fig. 2 Numerical model for laser bending forming. (a) Meshing; (b) schematic of scanning path

表 1 304 不锈钢热物性参数^[23]Table 1 Thermal physical parameters of 304 stainless steel^[23]

Parameter	Value					
	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C	1200 °C
Heat expansion coefficient / (10^{-6} K^{-1})	14.1	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2
Young's modulus / GPa	205	188	171	153	135	117
Specific heat / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	412	495	505	537	580	625
Heat conductivity / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	12.6	17.9	24.0	29.8	35.4	42.5

2.2 曲线激光扫描中的热积累与自由端约束

由于热量在扫描过程中不断沿扫描线向四周传导且扫描过程中自由端对扫描处的约束力不同,当激光移动至出口处时,前端流动的热量在出口处不断积累,故在扫描线末端易形成热积累,通常表现为出口处温度陡增。由于热积累问题在激光弯曲试验中不可避免,为了改善扫描路径上的温度分布不均匀现象,采用了分段变速的扫描方式。考虑双圆弧扫描路径为中心

对称,将扫描路径等分为 4 段和 8 段。

以试验件上表面峰值温度为研究对象,分析波纹板成形过程中温度场与热积累的变化,测温点分布如图 3(a) 所示。图 3(b) 反映了不同变速段数的上表面峰值温度随扫描位置的变化情况,结果显示,变速段数增加后出口处的峰值温度下降 13.4%;同时,变速处理后,扫描线上的整体峰值温度呈下降趋势,表明分段变速抑制了出口端热积累并调控了输入能量分布。

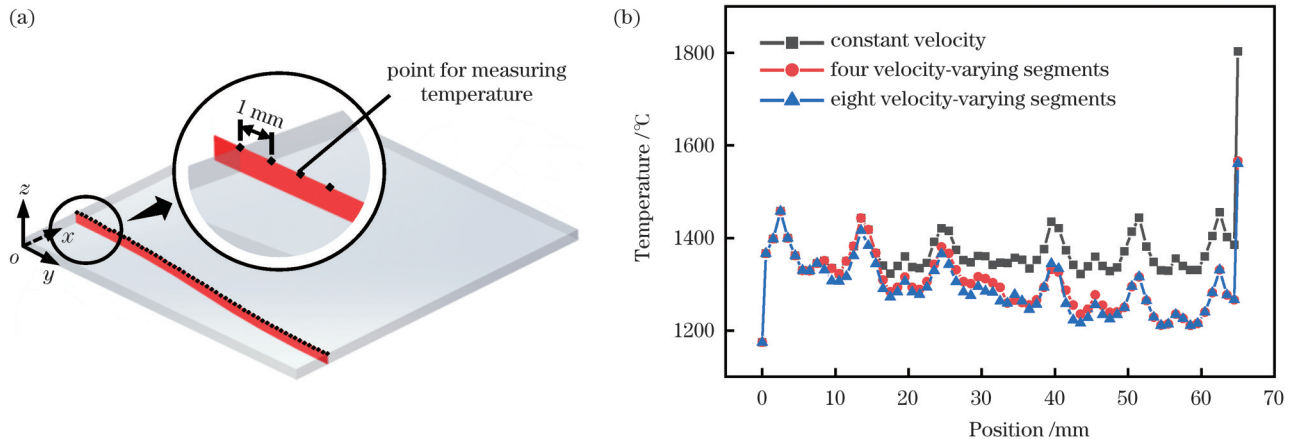


图 3 扫描路径上表面测温点处的峰值温度。(a) 测温点示意图; (b) 不同变速段数的上表面测温点峰值温度

Fig. 3 Peak temperatures at temperature measurement points along scanning path on upper surface. (a) Schematic of temperature measurement points; (b) peak temperatures at temperature measurement points on upper surface with different numbers of velocity-varying segments

由于激光弯曲成形中出口处热积累的迅速发生,故在不考虑热积累的情况下对扫描线上的不同位置进行了自由端约束分析。因为扫描路径呈中心对称,所以从扫描线后半段取 5 个等距点,如图 4(a) 所示,忽略固定端一侧对扫描线处的约束,对五个等距点的法平面进行分析:随着激光在扫描路径上的移动,加热区受到激光的热应力和周围材料的约束力的作用。由于曲线上各点的位置差异,薄板受到的横向约束不同,由图 4(σ 为应力, l 为薄板长度)可知,从位置 I 到位置 V,自由端冷态材料对受热膨胀区的约束力(σ_0)越来越小,因此平衡约束的热应力(σ_1)与实际成形所需的热应力(σ_r)亦逐渐减小。此外,通过前述分析,2 段变速时后半段速度依然固定,热应力呈均匀分布;而 4 段和 8 段变速时,速度增长较缓,热传导作用下温度增长的趋势与理想热应力变化趋

势相接近,后续将分析上述分段情况下薄板的成形特点。

2.3 变速扫描策略下的温度场分布

为进一步探明不同变速扫描策略下的温度分布情况,揭示温度分布对弯曲角度的影响规律,对比了不同变速扫描策略下扫描线不同位置处的温度分布图,如图 5(a)~(c) 所示。可以发现,薄板成形过程中不同扫描策略下的温度场分布存在显著差异,不同速度下的温度梯度大小不同,随着速度的增大,温度梯度有所减小,即利用速度分布可调控该区域的温度分布。上述现象产生的原因是速度增大的同时,激光作用时间减少,输入热量也相应减少,可见分段变速可改善温度分布不均匀现象。

基于 Vollertsen 课题组提出的双层模型^[24-25],在温度梯度机制作用下,上下表面的温度差和法平面弯曲

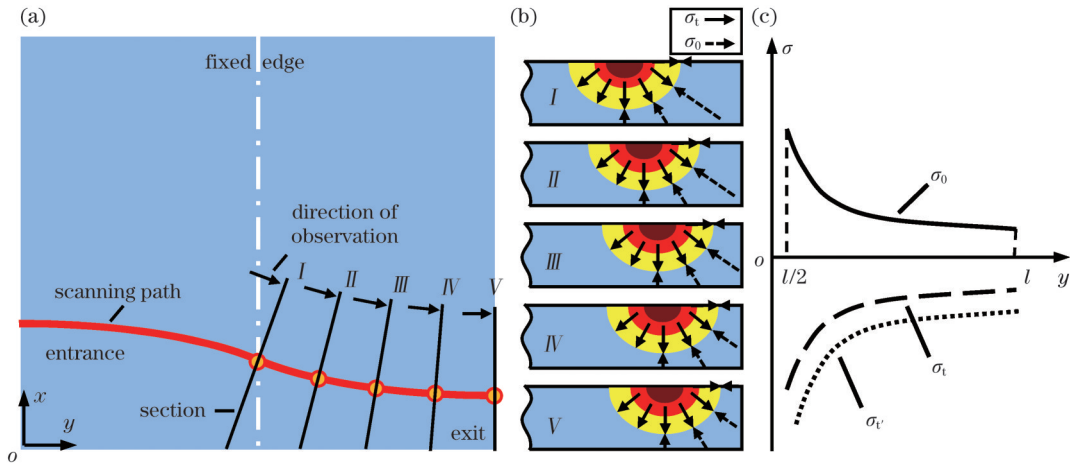


图 4 激光弯曲成形中自由端对扫描处的约束分析。(a)等距点与观测面示意图;(b)等距点约束情况;(c)约束力与热应力变化趋势
Fig. 4 Analysis of free end restraint to scanning location in laser bending forming. (a) Schematic of isometric points and observation surfaces; (b) isometric point constraint; (c) variation trends of constraint force and thermal stress

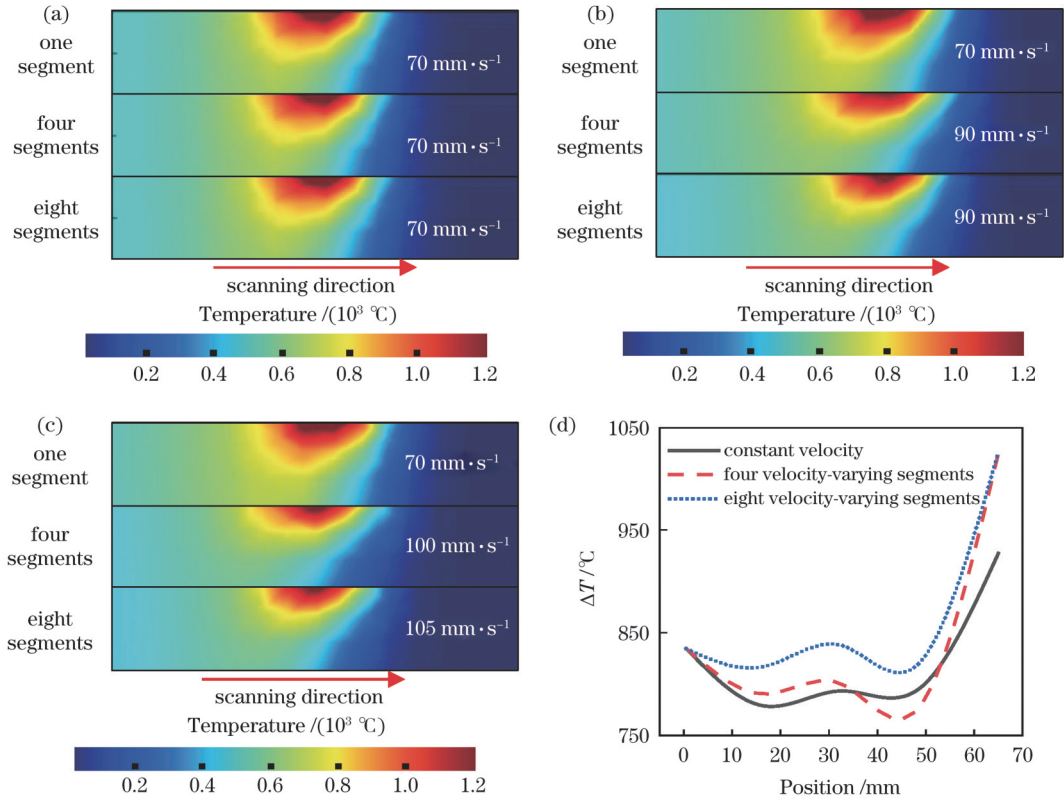


图 5 不同变速段数下的薄板截面温度场分布情况。(a)入口;(b)中间;(c)出口;(d)同一时刻上下表面温度差
Fig. 5 Cross-sectional temperature field distributions of sheet with different numbers of velocity-varying segments. (a) Entrance; (b) middle; (c) exit; (d) temperature difference between upper and lower surfaces at same moment

角度(β)之间存在以下关系:

$$\beta = (2 \cdot \alpha_{th} \cdot D \cdot \Delta T) / s, \quad (3)$$

式中: α_{th} 为热膨胀系数; s 为薄板厚度; ΔT 为薄板上下表面的温度差,即 $\Delta T = T_t - T_b$,其中 T_t 为某位置的上表面峰值温度, T_b 为同位置同时刻的下表面峰值温度。

在异形件弯曲试验中,双圆弧扫描线的法平面弯曲角度与 x 向弯曲角度(α)存在如下换算关系:

$$\beta = \arcsin(\sin \alpha / \cos \theta), \quad (4)$$

式中: θ 为法平面与 xz 平面的夹角。

由于扫描线为曲线,法平面与 xz 平面的夹角 θ 随激光光斑移动发生变化,法平面弯曲角度与 x 向弯曲角度不同。基于双圆弧线形可知, θ 随着扫描的进行呈先增后减的变化。

由式(3)、(4)分析可知,弯曲角度与温度差呈正相关关系。图5(d)所示为不同位置同一时刻上下表面温度差,可见温度差皆呈先下降后上升的趋势。中间处的温度差最小,出口处的温度差最大,但当变

速段数为 4 段和 8 段时,温度差随段数的增加而整体增大。分析认为不变速时出口处的热积累多,因此温度梯度较小,温度差小;结合图 4 所示的约束分析,对于异形线,中间非均匀分布的温度差会引起较严重的受力不平衡现象。而 4 段和 8 段变速时上升曲线较陡,说明在上表面峰值温度缓慢下降的过程中,温度差增大,对应下表面的温度呈现下降趋势,且比上表面温度下降得快,在出口处热积累仍有影响的情况下,这在一定程度上平衡了热量分布。因此,改变变速段数可以调控能量分布,有利于法平面弯曲角度的均匀分布。

3 试验装置与材料

异形波纹板激光弯曲成形试验平台如图 6(a) 所示,试验系统由 1.5 kW 振镜激光器、控制系统、冷却系统、薄板夹具等装置构成,所选用的激光器为连续型光

纤激光器,其功率在 150~1500 W 范围内可调,波长范围为 1060~1080 nm,试验中激光光斑直径为 0.175 mm,加工距离超 500 mm。试验所用薄板材料为 304 不锈钢,尺寸为 65.0 mm×65.0 mm×0.2 mm。试验开始前,为提高不锈钢板材表面对激光能量的吸收率,沿激光扫描路径涂覆石墨层。在弯曲试验过程中将金属薄板一端居中固定,装夹区域宽度为 10 mm,通过三爪卡盘可实现 180° 翻转加工。

激光弯曲成形试验中的扫描路径如图 6(b) 所示,入口处距薄板自由端 5 mm,多次扫描时,扫描间隔即冷却时间为 10 s。试验结束后,采用共聚焦显微镜测量弯曲角度,在扫描方向上等分 9 个测量点;测量的弯曲角度为 xz 平面上的锐角(x 向弯曲角度),测量方法如图 7 所示。其中,法平面为与扫描路径垂直、与 xz 平面成 θ 夹角的平面,法平面弯曲角度 β 为该平面上的弯曲夹角。

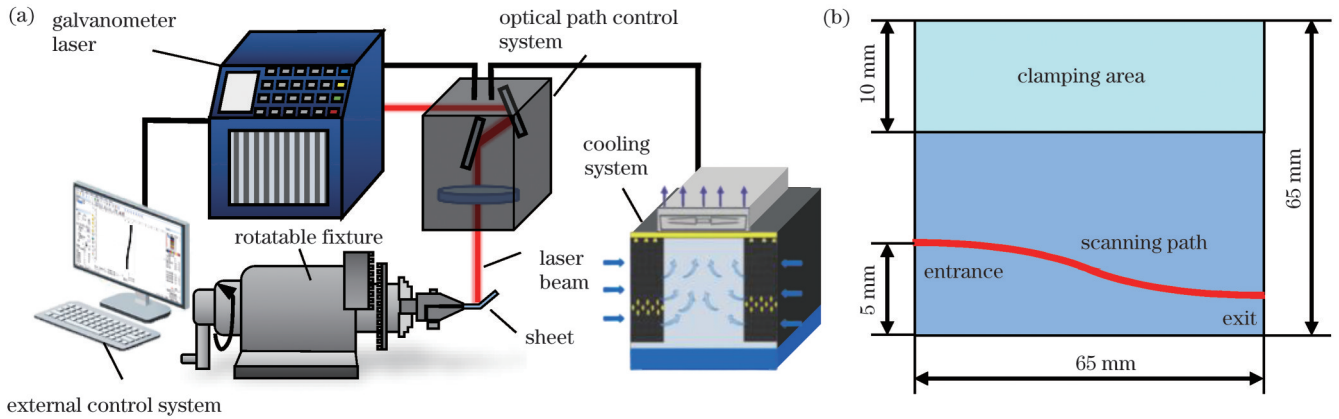


图 6 激光弯曲成形试验方法。(a) 试验装置;(b) 扫描路径示意图

Fig. 6 Experimental method for laser bending forming. (a) Experimental setup; (b) diagram of scanning path

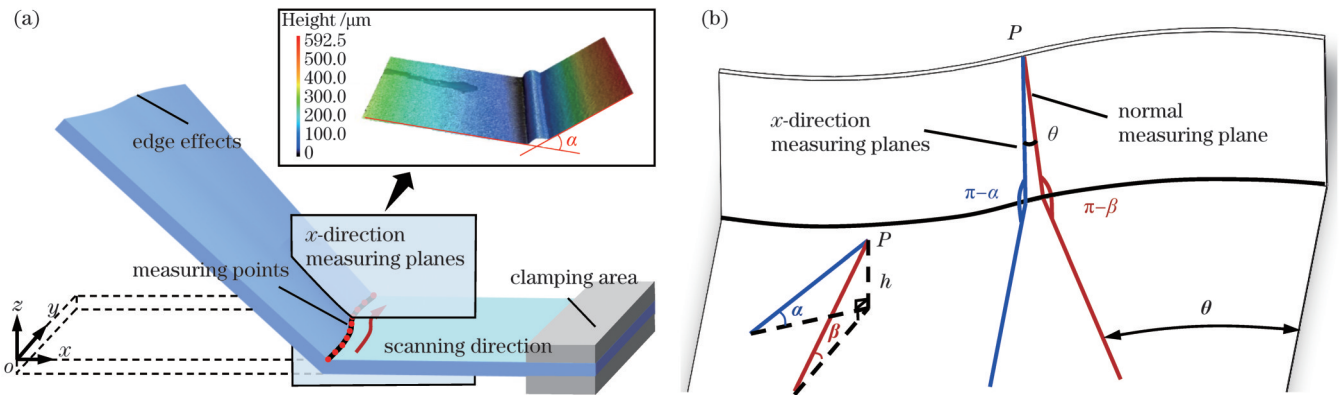


图 7 弯曲角测量示意图。(a) 测量面及测量角度 α ; (b) 测量面与法平面的夹角

Fig. 7 Schematics of bending angle measurement. (a) Measuring surface and measuring angle α ; (b) angle between measuring surface and normal plane

4 试验结果与讨论

4.1 激光弯曲成形过程中薄板表面温度的测试

为验证温度场数值模拟的有效性,在金属薄板上表面布置了测温点 A_1 、 A_2 、 A_3 , 分别距离扫描路径中心

点 5、10、15 mm,位置如图 8(a) 所示,采用 K 型热电偶搭配多路数据记录仪测试激光扫描过程中的温度变化。选用与数值模拟相同的工艺参数(激光功率为 250 W,激光扫描速度为 10 mm/s)开展激光扫描试验。将试验获得的测温点峰值温度与数值模拟结果进

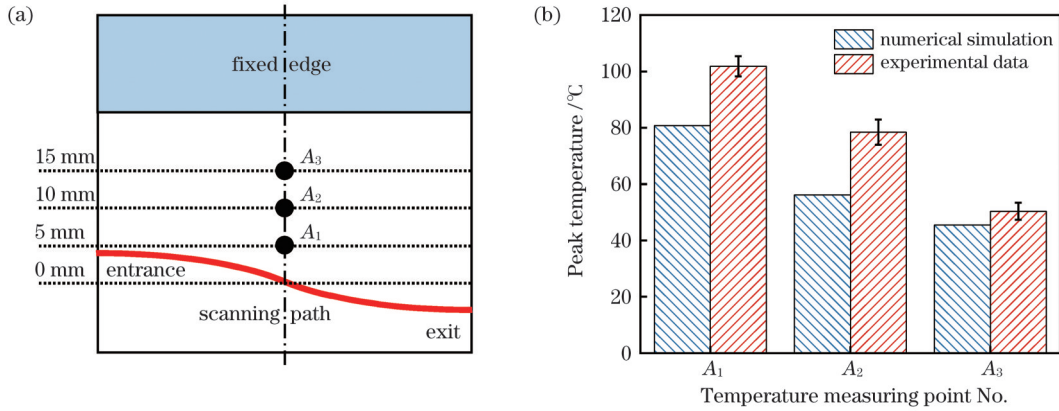


图 8 激光弯曲成形过程中薄板表面温度。(a)测温点示意图;(b)数值模拟与试验结果对比

Fig. 8 Sheet surface temperature during laser bending forming. (a) Schematic of temperature measuring points; (b) comparison of results between numerical simulation and experiment

行对比,结果如图 8(b)所示。发现数值模拟和试验得到的温度分布趋势基本一致,本文数值模拟结果具有一定的有效性。

4.2 分段变速对异形波纹板激光弯曲成形的影响

在激光弯曲成形试验中,可以通过调控激光工艺参数来抑制弯曲成形面畸变,然而激光功率的改变会

使激光的光束直径及激光功率的响应时间^[15]发生变化。因此在保持激光功率为 250 W、扫描次数为 12 的情况下,将扫描路径分别等分为 4 段和 8 段,通过赋予每段路径不同的扫描速度来调控能量输入,另设置一组恒速扫描作为对照组,试验参数设置如表 2 所示。

表 2 试验参数设置

Table 2 Experimental parameter setting

Number of segments	Laser power /W	Scanning velocity / (mm·s ⁻¹)	Number of scans
1	250	70	12
4	250	70, 80, 90, 100	12
8	250	70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105	12

利用共聚焦显微镜测量弯曲角度,使用式(4)实现 x 向弯曲角度与法平面弯曲角度的转换,结果如图 9 所示。对法平面弯曲角度进行角度差求解:

$$\Delta\beta = \beta_{\max} - \beta_{\min}, \quad (5)$$

式中: $\Delta\beta$ 为法平面角度差; β_{\max} 为最大弯曲角度; β_{\min} 为最小弯曲角度。计算结果如图 9(b)所示。

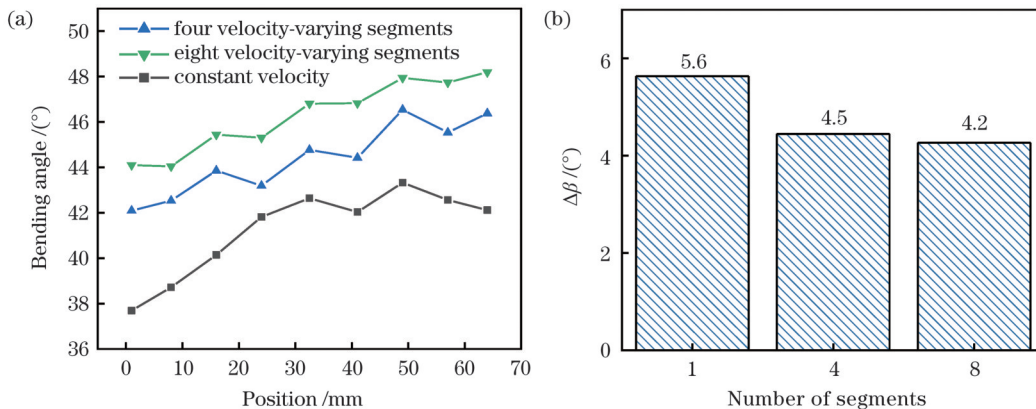


图 9 不同变速段数的激光弯曲成形面畸变表征。(a)弯曲角度的分布情况;(b)试验件弯曲角度差

Fig. 9 Characterization of plane distortion for laser bending forming with different numbers of velocity-varying segments. (a) Bending angle distribution; (b) bending angle difference of specimen

可见,随着变速段数的增加,法平面弯曲成形面畸变程度呈减弱趋势。恒速试验件的弯曲角度呈两边小中间大,同时在激光弯曲试验过程中,出口处热量积累

不可避免。在 2 段变速(扫描速度:前 70 mm/s,后 100 mm/s)试验中,其角度差高达 10.4°,原因为后段速度的增幅过大,因此能量输入不平衡,增加了法平面弯

曲成形面畸变程度,相关结论与图 4 分析结果对应。相较于上述结果,在 4 段和 8 段变速试验中,弯曲角度随着扫描的进行均呈缓慢增大的趋势,角度差低于恒速情况。入口处至中间的热量输入优于恒速情况,同时出口处热积累的影响依然较大。原因一方面为速度增长相对较缓,不同位置之间的温差逐渐减小,这在一定程度上弥补了入口处的热量输入;另一方面,从热应力与约束力平衡的角度分析,4 段和 8 段变速试验中的速度增长相对较缓,受力较平衡。该结果也证明设置合适的变速段数可以平衡能量分布并减弱法平面弯曲成形面畸变的程度,但速度增长幅度需保持在合理范围内。

4.3 扫描速率分布对弯曲成形面畸变的抑制

以 8 段变速为例,设置不同变速扫描策略并研究其对弯曲成形面畸变的影响。鉴于先增后减的变速扫描策略在抑制边界效应中有显著效果^[15-16],因此设计 S_1 策略,速率分布如图 10(a) 所示。 S_1 策略下的试验件弯曲角度测量结果如图 10(d) 所示,可以看出,在扫描线出口处弯曲角度明显增大,但整体变化趋势较为平缓。其原因主要是:出口处的热量积累以及扫描线中点处前后的速率过大导致热量补偿不足。此外,试验件角度差由恒速时的 5.6° 减小至 2.1° ,证明先

增后减的变速扫描策略对法平面弯曲成形面畸变能起到抑制的作用。然而,相较于直线扫描^[15-16],激光在双圆弧扫描路径上的作用时间更长,成形过程中温度的时空分布更为复杂,因此该变速扫描策略仍有待进一步优化。

基于上述试验研究与分析,设计了图 10(b)、(c) 所示的变速扫描策略 S_2 、 S_3 。为补偿入口前半段的能量,第 2、3 段的速率调整较小;在第 4~8 段,为减小出口处角度,需平衡中间段热量输入高的问题,继续增大速度,而变速扫描策略 S_2 、 S_3 仅在后两步有所差别。结果表明, S_3 策略下中前段的弯曲角度变化明显减小,双圆弧线形的试验件法平面弯曲成形面畸变得进一步抑制。而出口处的弯曲角度随着速度的变化而改变,因速度较快而弯曲角度相对较小,出口处热积累情况得到一定改善。 S_2 、 S_3 策略下的试验件角度差分别减小至 1.8° 和 1.0° ,相较于恒速的试验件面畸变最大降低了 82.1%。因此,结合数值模拟研究结果可知,通过控制速率分布可调控能量分布,从而减小弯曲角度的变化幅度,降低激光弯曲试验中的法平面弯曲成形面畸变。此外,变速试验件的平均弯曲角度明显高于恒速试验件,说明采用变速扫描策略在降低法平面弯曲成形面畸变的同时,也提高了波纹板的成形效率。

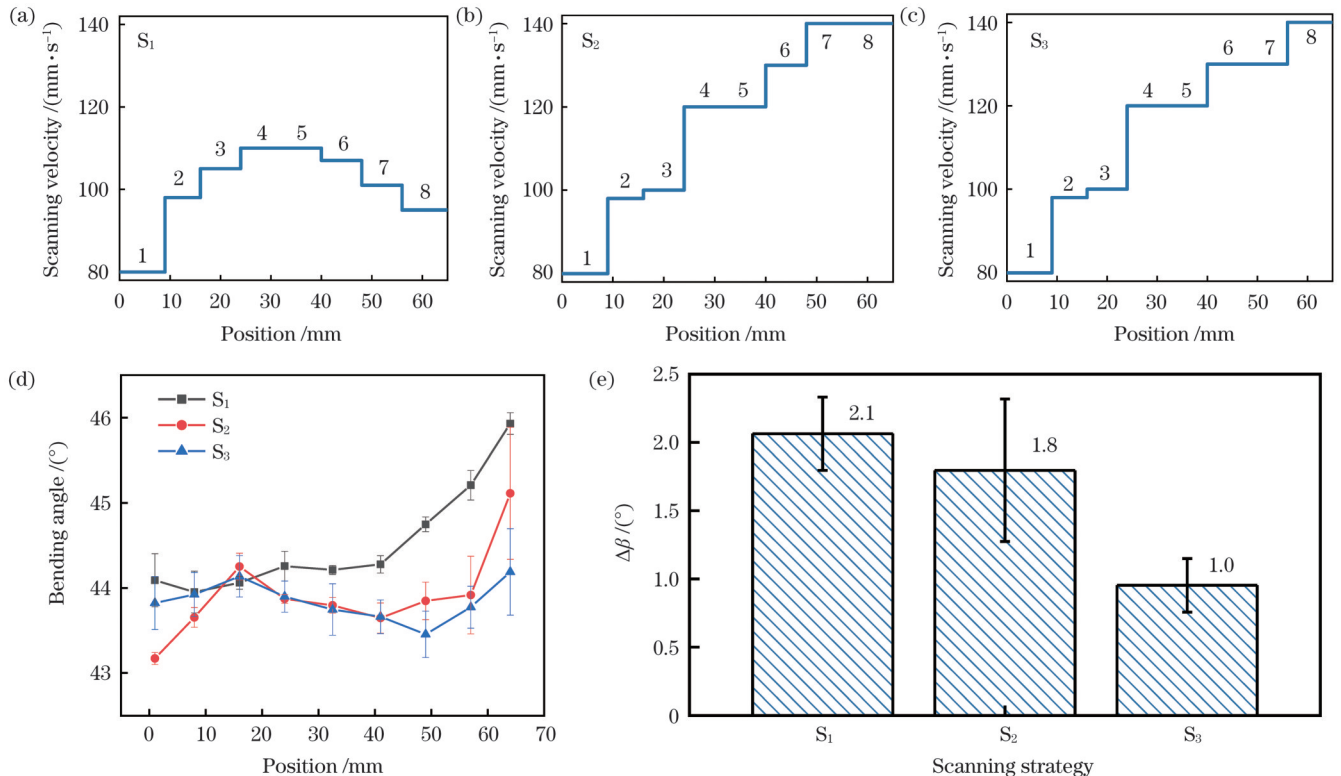


图 10 激光弯曲成形面畸变表征。(a) S_1 扫描策略;(b) S_2 扫描策略;(c) S_3 扫描策略;(d) 弯曲角度分布情况;(e) 试验件弯曲角度差
Fig. 10 Characterization of plane distortion for laser bending forming. (a) S_1 scanning strategy; (b) S_2 scanning strategy; (c) S_3 scanning strategy; (d) bending angle distribution; (e) bending angle difference of specimen

4.4 双圆弧异形波纹板面畸变抑制

基于上述研究,对双圆弧异形波纹板成形效果进行分析,如图 11 所示。恒速策略下成形的波纹板法平

面弯曲成形面畸变明显,流道之间的翘曲与瓢曲现象并存,上下底面平行度不佳,波纹板成形质量较差;而采用变速扫描策略后,波纹板流道平整,弯曲成形面畸

变程度被大大削弱,上下底面平行度得到明显改善。此外,以流道上下底面之间的角度作为其平行度的评价指标,采用共聚焦显微镜对波纹板流道轮廓进行表征,开展不同变速扫描策略下的波纹板流道成形质量的对比分析。可以发现,变速扫描策略能够有效提高波纹板流道上下底面的平行度,流道上下底面之间的

角度由恒速扫描策略下成形的 $14.4^\circ(\omega_1)$ 降低至变速扫描策略下的 $1.8^\circ(\omega_2)$,面畸变抑制后波纹板流道上下底面的平行度提高了 87.5%。以上结果表明,变速扫描策略显著抑制了双圆弧异形波纹板制造过程中的弯曲成形面畸变,降低了波纹板激光弯曲成形过程中的形状误差,提高了成形质量。

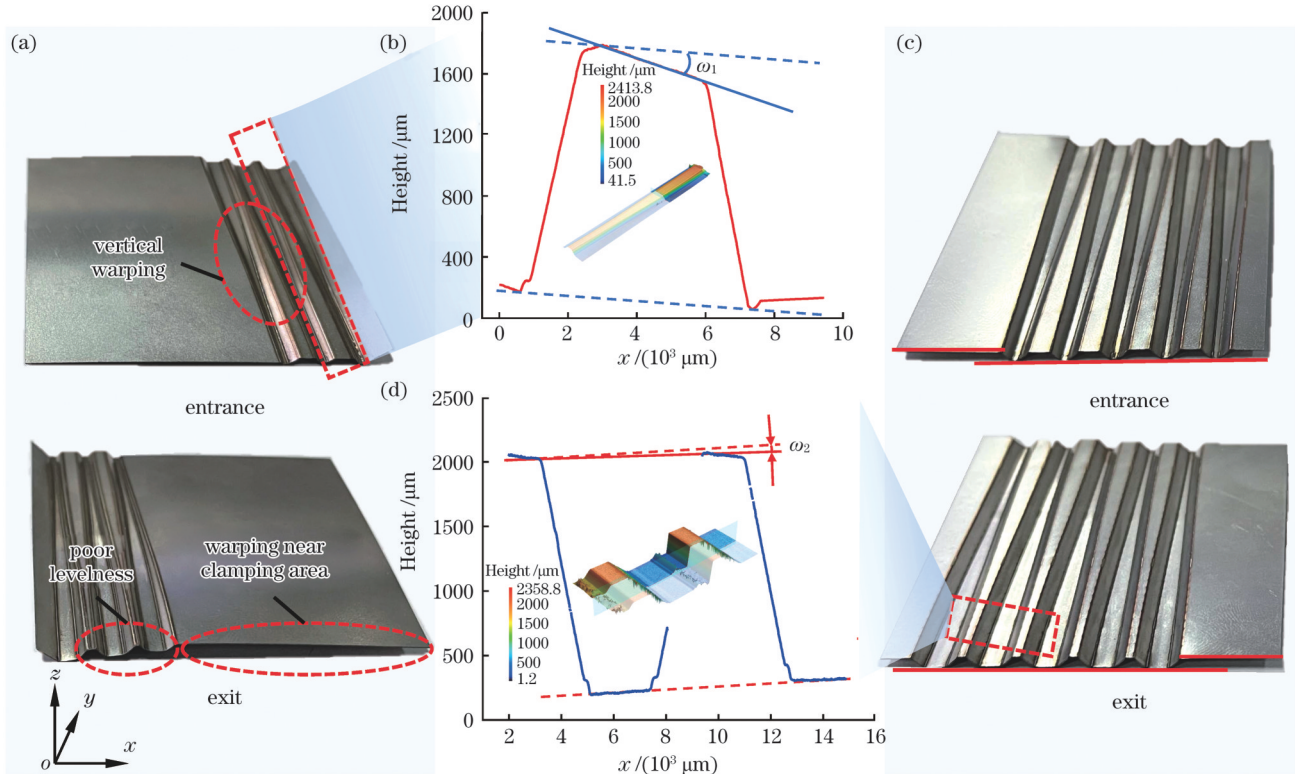


图 11 异形波纹板激光弯曲成形的整体评价。(a)恒速扫描下的成形件;(b)恒速扫描下的截面轮廓;(c) S_3 扫描策略成形件;(d) S_3 扫描策略下的截面轮廓

Fig. 11 Overall evaluation of laser bending forming of specialty-shaped corrugated sheet. (a) Formed parts under constant-velocity scanning; (b) cross-sectional profile under constant-velocity scanning; (c) formed parts under S_3 scanning strategy; (d) cross-sectional profile under S_3 scanning strategy

为进一步研究抑制策略对异形波纹板波纹度的影响,采用共聚焦显微镜获得了不同扫描策略下的波纹板成形形貌,并分别在其底面和壁面的入口处至出口处取等间隔的 5 个位置(I~X)的波纹度轮廓算数平均偏差 (W_a) 进行评价。在评价中,设定短波滤波器的截止波长 (λ_s) 为 $8 \mu\text{m}$,滤波器的取样截止波长 (λ_c) 为 0.8 mm ,长波滤波器的截止波长 (λ_l) 为 8 mm ,采样线间距为 $0.5 \mu\text{m}$,在扫描路径两侧即在底面和壁面上分别设置三条采样线,测量结果如图 12 所示。可以看出: S_3 扫描策略下的底面波纹度始终小于恒速扫描策略,并且随着激光扫描的进行,下底面 W_a 值逐渐增大;在出口处, S_3 扫描策略下的下底面 W_a 值相比于恒速扫描减小了 31.1%。如图 12(b) 所示,壁面 W_a 值与下底面的 W_a 值的变化趋势基本一致;在出口处即 X' 位置, S_3 扫描策略下的壁面 W_a 值相比于恒速扫描降低了 51.2%,波纹轮廓线对比如图 12(c) 所示。分析其原因:由于出口处的热积累较大,恒速策略下的底面和壁

面在出口处的波纹度明显升高;而在 S_3 扫描策略下,面畸变被有效抑制,底面和壁面的波纹度相较于恒速策略均显著降低。

5 结 论

激光弯曲过程中的温度场数值模拟结果表明:随着变速段数的增加和速度的增大,出口处的热积累和温度梯度减小;相较于恒速扫描,分段变速下末端热积累明显减小,8段变速时出口处的峰值温度下降了 13.4%。

试验对比研究了不同激光扫描策略下“双圆弧”异形板的弯曲角度,发现随着变速段数的增加及速率分布的优化,弯曲成形面畸变显著减小。在 S_3 策略下,弯曲成形角度差由恒速时的 5.6° 降至 1.0° ,表明变速扫描策略可有效抑制异形波纹板激光弯曲成形面畸变。

采用优化后的变速扫描策略实现了双圆弧异形波纹板的成形制造,相较于恒速策略,波纹板流道上下底

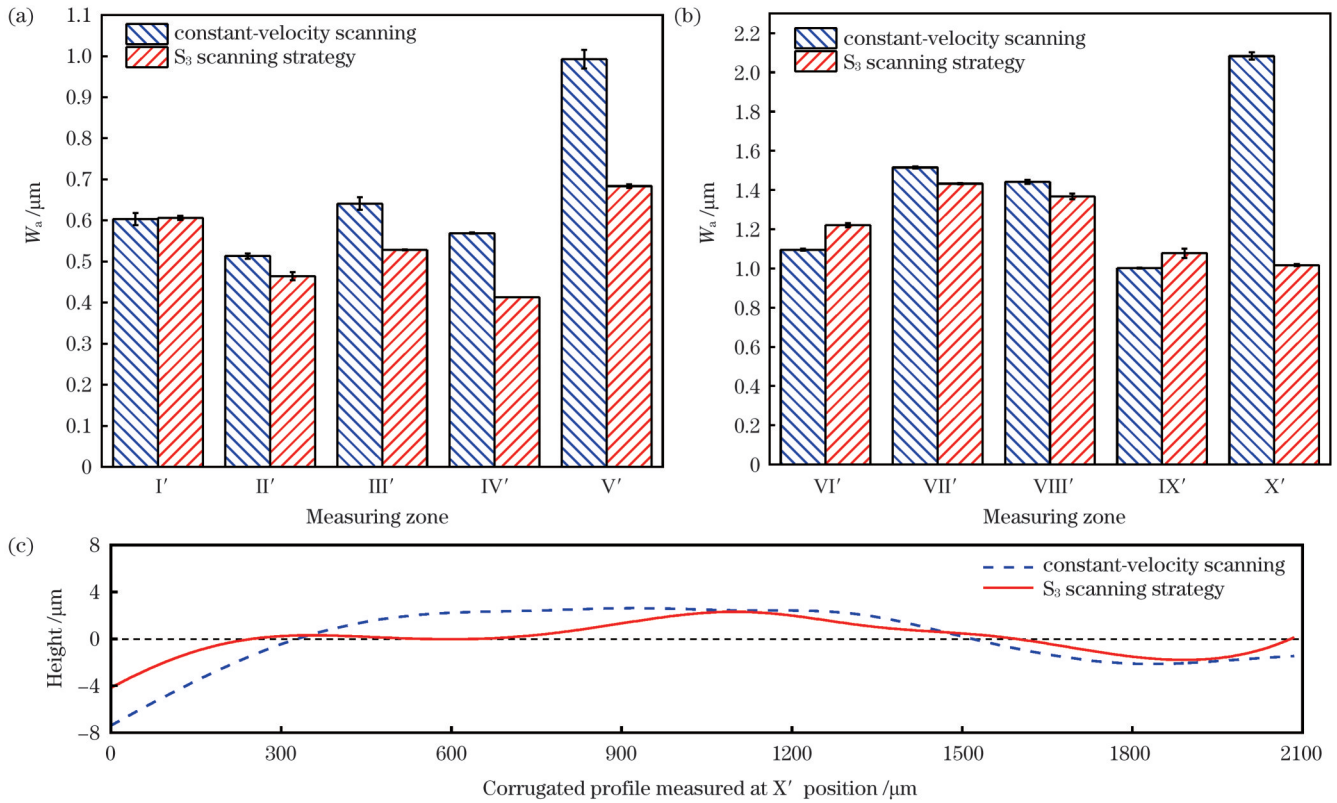


图 12 激光弯曲成形异形波纹板波纹度。(a)波纹板下底面 W_a 值;(b)波纹板壁面 W_a 值;(c)X'处波纹轮廓

Fig. 12 Waviness of specialty-shaped corrugated sheet after laser bending forming. (a) W_a of bottom surface of corrugated sheet; (b) W_a of wall surface of corrugated sheet; (c) corrugated profile measured at X' position

面的平行度提高了 87.5%，波纹板壁面波纹度轮廓的算数平均偏差最大降低了 51.2%，异形波纹板激光弯曲成形质量得到显著提高。

参 考 文 献

[1] 周伟, 李新颖, 钟雨晨, 等. 甲醇重整制氢微反应器的研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(3): 598-613.
Zhou W, Li X Y, Zhong Y C, et al. Research progress of methanol steam reforming microreactors for hydrogen production[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2021, 60(3): 598-613.

[2] 李佳霖. 质子交换膜内质子传输通道纳微结构调控及传递特性强化[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
Li J L. Nanostructure control and transfer characteristics enhancement of proton transport channels in proton exchange membranes[D]. Changchun: Jilin University, 2022.

[3] 华日升, 张文泉, 程利冬, 等. 燃料电池金属双极板设计与成形技术综述[J]. 精密成形工程, 2022, 14(3): 25-33.
Hua R S, Zhang W Q, Cheng L D, et al. Review on design and forming technology of metallic bipolar plates for fuel cells[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(3): 25-33.

[4] 周伟, 俞炜, 裴普成, 等. 渐变孔隙率纤维载体微反应器的甲醇重整制氢性能[J]. 汽车安全与节能学报, 2018, 9(1): 85-92.
Zhou W, Yu W, Pei P C, et al. Performances of a methanol reforming microreactor with gradient porosity fiber support for hydrogen production[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2018, 9(1): 85-92.

[5] 张西龙. 异形流道换热面强化传热传质特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
Zhang X L. Study on heat and mass transfer characteristics of heat exchanger surface with special-shaped channel[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.

[6] Khatir F A, Elyasi M, Ghadikolaee H T, et al. Evaluation of effective parameters on stamping of metallic bipolar plates[C]// 17th International Conference on Sheet Metal (SHEMET), April 10-12, 2017, Palermo, Italy. Amsterdam: Elsevier Science BV, 183: 322-329.

[7] Guo Y K, Shi Y J, Wang X G, et al. An analytical model of laser bending angle under preload[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(7): 2569-2577.

[8] 丁磊, 刘会霞, 王鹤军, 等. 铝-锂合金薄板半导体激光弯曲成形试验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2143-2148.
Ding L, Liu H X, Wang H J, et al. Experimental study of thin aluminum-lithium alloy sheet metal laser forming with semiconductor laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2143-2148.

[9] 池闪闪, 王续跃, 徐文骥. 考虑结合面的不锈钢-碳钢板脉冲激光弯曲数值模拟[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103002.
Chi S S, Wang X Y, Xu W J. Numerical simulation on stainless steel-carbon steel laminated sheet considering interface during pulsed laser bending[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 1103002.

[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] Woizeschke P. Approach for bidirectional laser bending of sheet metal with one-sided accessibility[J]. CIRP Annals, 2019, 68(1): 277-280.

[12] 张勃洋, 卢兴福, 张立元, 等. 冷轧板薄带钢复杂板形翘曲变形行为研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(12): 184-192.
Zhang B Y, Lu X F, Zhang L Y, et al. Analysis of complex warping deformation for cold-rolled strip[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(12): 184-192.

[13] 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.
- [14] Shi Y J, Zhang C, Sun G D, et al. Study on reducing edge effects by using assistant force in laser forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 227: 169-177.
- [15] Shen H, Hu J, Yao Z Q. Analysis and control of edge effects in laser bending[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(3): 305-315.
- [16] Zhang Y J, Dong W B, Yang T Y, et al. Edge effect reduction in laser bending of DP980 high-strength steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(3): 1965-1973.
- [17] 李紫慧. 不锈钢-碳钢层合板激光弯曲数值模拟及工艺基础[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- Li Z H. Numerical simulation and technological basis of laser bending of stainless steel-carbon steel laminates[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [18] 顾杰岩, 闫崇京, 张翅超, 等. 板材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.
- [19] 王高峰, 王续跃, 王焕捷. 矩形金属层合板激光圆弧扫描弯曲曲面变形分析[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(2): 149-156.
- Wang G F, Wang X Y, Wang H J. Analysis of curved surface deformation in laser circular scanning of rectangular metal laminated plates[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(2): 149-156.
- [20] 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.
- [21] 胡玲玲, 周建忠, 杨小东, 等. 激光弯曲陶瓷片的数值模拟[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1631-1635.
- Hu L L, Zhou J Z, Yang X D, et al. Numerical simulation of laser bending of Al₂O₃ ceramic slice[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(6): 1631-1635.
- [22] 李紫慧, 王续跃. 层合板激光往复扫描弯曲中翘曲变形数值模拟[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 56-63.
- Li Z H, Wang X Y. Numerical simulation of warping deformation on laminated plate during reciprocating laser bending[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 56-63.
- [23] 杨琨. 304 不锈钢激光弯曲的实验研究及数值模拟[D]. 广州: 华南师范大学, 2014.
- Yang K. Experimental study and numerical simulation of laser bending for 304 stainless steel[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2014.
- [24] Arnet H, Vollertsen F. Extending laser bending for the generation of convex shapes[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1995, 209(6): 433-442.
- [25] Geiger M, Vollertsen F. The mechanisms of laser forming[J]. CIRP Annals, 1993, 42(1): 301-304.

Research on Suppression Strategy of Plane Distortion in Laser Bending Forming of Specialty-Shaped Corrugated Sheet

Yao Zhehe^{1,2,3}, Hong Jinyuan^{1,2,3}, Fan Weixin^{1,2,3}, Liu Yunfeng^{2,3}, Mei Deqing⁴, Yao Jianhua^{1,2,3*}

¹*Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;*

²*College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;*

³*Collaborative Innovation Center of High-end Laser Manufacturing Equipment, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;*

⁴*State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China*

Abstract

Objective The miniaturization and customization of corrugated sheets have become development trends to meet the demand of the high-efficiency heat and mass transfer in methanol reforming microreactors. To avoid problems such as springback, cracking, and wrinkling caused by conventional metal-forming processes, laser-forming technology becomes a potential solution to manufacture such structural components. However, when laser forming is adopted to fabricate specialty-shaped microcorrugated sheets, the sheets are prone to plane distortion defects owing to the uneven distribution of the energy input and free-end constraint in the curved scanning process. The plane distortion may lead to a gap between the corrugated sheets in the microreactor assembly, resulting in fluid leakage and a significant reduction in the heat and mass transfer performance of the microreactor. Because studies focusing on the laser forming of specialty-shaped microcorrugated sheets remain limited, the heat accumulation in laser scanning and the relationship between the temperature field and bending angle with various scanning strategies are analyzed in this study based on numerical simulations and experimental studies. A segmented variable-velocity strategy is explored to suppress the plane distortion. The forming quality of the corrugated sheets is further evaluated. This study provides a reference for the analysis and suppression of the plane distortion in the laser forming of specialty-shaped components.

Methods The heat accumulation and temperature field distribution during the laser scanning along a double-arc curve are studied via numerical simulation, and the temperature difference between the top and bottom surface on the scanning path is analyzed using a segmented variable-velocity strategy. An experimental setup for the laser forming of a specialty-shaped corrugated sheet is developed (Fig. 6). The material of the specimen used in the experiments is 304 stainless steel with the size of 65.0 mm × 65.0 mm × 0.2 mm. A 1.5 kW oscillator continuous fiber laser with a laser power of 250 W and velocity range of 70–140 mm/s is used. Twelve cycles of scans are performed with the interval time of 10 s. During the experiments, one end of the sheet is fixed with a clamping width of 10 mm and can therefore be turned 180° using a three-jaw chuck. The laser scanning path can be drawn during the experiments and

modeling process using the definition of a double-arc specialty-shaped line (Fig. 1). The x -directional and normal-plane bending angles are defined (Fig. 7), and the angles after laser forming are measured using a confocal microscope.

Results and Discussions The segmented variable-velocity strategy effectively reduces the heat accumulation in the scanning process along the double-arc curve by discretely controlling the energy distribution along the scanning line. Using the segmented variable-velocity strategy, the heat accumulation at the exit is reduced, and the overall peak temperature decreases (Fig. 3). In addition, the segmented variable-velocity strategy improves the uniformity of the temperature distribution owing to the varying laser irradiation time and heat input (Fig. 5). After the local thermal stress generated during the forming process is balanced by the constraint force of the free end to the laser heating location, a relatively uniform thermal deformation is generated along the scanning line, thereby suppressing the distortion of the forming plane during laser forming. Without considering the heat accumulation, the thermal stress must maintain a downward trend while balancing the binding force at each part of the scanning line (Fig. 4). Combined with the double-layer model, the variation trend of the bending angle of the normal plane depends on the change of the temperature difference (Fig. 5). The accuracy of the numerical model is verified by comparing the numerical simulation and experiment results of the sheet surface temperature during laser bending forming (Fig. 8). The results demonstrate that a suitable number of velocity-varying segments can balance the energy distribution and reduce the unevenness of the bending angle in the normal plane, whereas the velocity should be set within a reasonable range. The angular difference is reduced to less than 1.0° . The forming efficiency of the corrugated sheet is also improved by using the segmented variable-velocity strategy (Figs. 9 and 10). By using the segmented variable-velocity strategy, the parallelism between the top and bottom surfaces of the corrugated sheet increases by 87.5% and the waviness values of the bottom and wall surfaces decrease by a maximum of 51.2% (Figs. 11 and 12).

Conclusions A numerical model for the laser forming of a 304 stainless-steel sheet is developed, and the temperature distribution of the sheet at different numbers of velocity-varying segments is investigated. The results demonstrate that an increase in the segmental velocity can reduce the peak temperature of the top surface and heat accumulation at the exit. Meanwhile, the temperature gradient decreases as the velocity increases. Compared to constant-velocity scanning, the peak temperature at the terminal is significantly reduced by using the segmented variable-velocity strategy. For example, the peak temperature at the exit with eight velocity-varying segments is reduced by 13.4%. The experimental studies based on various scanning strategies and the detection of the normal-plane bending angle demonstrate that the distribution of the normal-plane bending angle is more uniform with an increase in the segmental number and velocity. Owing to the use of the segmented variable-velocity strategy, the forming plane distortion is significantly suppressed and the angle difference is reduced from 5.6° to 1.0° compared to constant-velocity scanning. Furthermore, the parallelism between the top and bottom surfaces of the corrugated sheet increases by 87.5% and the waviness decreases by a maximum of 51.2% by using the suppression strategy. The segmented variable-velocity strategy can be concluded to significantly improve the quality of specialty-shaped corrugated sheet forming.

Key words laser technique; laser bending forming; specialty-shaped corrugated sheet; plane distortion; suppression strategy