

文章编号: 0258-7025(2008)02-0276-05

# 微尺度激光弯曲成形数值模拟与实验研究

刘 杰 孙 胜 管延锦\*

(山东大学模具工程技术研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要** 建立了厚度为 0.1 mm 的不锈钢箔激光弯曲成形的三维热力耦合有限元模型, 并采用有限元软件 MSC. Marc 模拟计算得到了箔材弯曲变形过程中的温度场、变形场与应力应变场。分析了应力、温度、变形三者之间的内在关系, 阐述了激光弯曲成形的温度梯度机制(TGM)。建立了微尺度激光弯曲成形的实验装置, 验证了有限元模型(FEM)的可靠性, 模拟计算结果与实验结果吻合较好。通过实验分析了激光功率、扫描速度以及激光扫描次数等工艺参数对激光弯曲角度的影响规律, 并对影响原因进行了初步分析, 为进一步对微尺度激光弯曲成形机制及工艺的研究打下了基础。

**关键词** 激光技术; 微尺度激光弯曲成形; 有限元方法; 温度梯度机制; 数值模拟

**中图分类号** TN 249; TG 665 **文献标识码** A

## Numerical and Experimental Study on the Laser Micro-Bending Process

Liu Jie Sun Sheng Guan Yanjin

(Mold & Die Engineering Technology Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

**Abstract** A three-dimensional (3D) thermal-mechanical finite element analysis model for laser micro-bending of 0.1 mm thick stainless steel foil is developed. The software MSC. Marc is used in the numerical analysis of this process. The detailed simulation results such as temperature distribution, deformation field, stress and strain field are obtained. The inner relationship among them is investigated and the temperature gradient mechanism (TGM) is expressed. Laser micro-bending experiments have been carried out on the steel foil samples, and the simulation results are in good agreement with the experimental results. Through analyzing the experimental results, the influence of laser power, scanning velocity and scanning times on bending angles is described. The works of the finite element method (FEM) simulation and experiments of the laser micro-bending are helpful for further studying on this process.

**Key words** laser technique; laser micro-bending; finite element method; temperature gradient mechanism; numerical simulation

## 1 引 言

微尺度激光弯曲成形作为一种新型的无模成形技术在电子器件、光学器件以及某些微力学器件的生产中有着良好的应用前景。不仅可直接成形微小器件, 而且可实现器件的微小调校, 具有其他成形方法无法比拟的优点, 不但能突破工具尺寸的限制, 而且还具有精度高、易实现自动化等优点。目前国外

已有研究者开始对微尺度激光弯曲成形技术进行研究<sup>[1~3]</sup>, 但还没有形成对实际生产具有指导意义的理论系统, 尤其是三维微尺度激光弯曲成形的研究还不够深入。尽快开展微尺度激光弯曲成形技术的研究, 对进一步研究微尺度激光弯曲变形成形机制及其工艺实施方案具有重要意义。

收稿日期: 2007-03-26; 收到修改稿日期: 2007-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(50575125)资助项目。

作者简介: 刘 杰(1978—), 男, 河北人, 博士研究生, 主要从事成形新技术及成形过程数值模拟研究。

E-mail: liujie216@mail. sdu. edu. cn

导师简介: 孙 胜(1950—), 男, 广西人, 教授, 博士生导师, 主要从事材料加工学科中金属塑性成形理论、工艺与计算机应用(CAD/CAM/CAE)、模具设计与制造方面的研究。E-mail:

\* 通信联系人。E-mail: guan\_yanjin@sdu. edu. cn

## 2 激光弯曲的有限元模拟

### 2.1 单元及材料性能参数的选取

在激光弯曲成形过程中,材料局部的温度及变形发生剧变,存在强烈的温度与应力梯度,六面体单元在解决这类问题时可达到较高的精度,因此在模拟时采用八节点六面体单元。

在热力耦合有限元模拟中,材料的性能参数(包括力学性能与热物理性能)对激光弯曲成形的影响很大<sup>[4,5]</sup>。选用的 304 不锈钢材料的物理与力学性能参数同温度的关系曲线如图 1 所示。

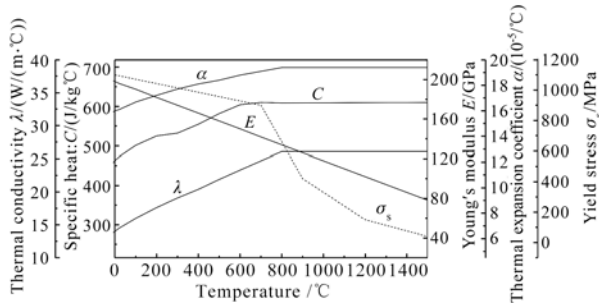


图 1 304 不锈钢热物理与力学性能参数温度曲线

Fig. 1 Thermal and mechanical properties of 304 stainless steel

### 2.2 材料吸收系数的处理

材料吸收系数的大小取决于材料对激光的吸收率和板料的表面状况等。材料表面应进行黑化处理,模拟中不考虑材料吸收系数的变化,根据经验数据取常数 0.5。

### 2.3 热传导边界与初始条件的处理

箔材经激光扫描后在空气中自然冷却,与周围环境存在对流和辐射换热,对流换热与辐射换热总的换热系数可采用经验公式

$$h = 2.2 \times (T_w - T_e)^{1/4} + 4.6 \times 10^{-8} (T_w^2 + T_e^2), \quad (1)$$

式中  $T_w$  为材料加工过程中表面的温度,  $T_e$  为周围环境的温度。环境温度按 20 °C 处理,同时认为工件初始温度与环境温度一致。

钢箔无初始应力和变形,并且与实际加工固定情况相吻合,将钢箔一端所有节点的平动自由度加以约束。

### 2.4 移动激光热源的处理

将沿箔片宽度方向(图 2 所示  $y$  向)移动的激光光束看作一面热源,其截面为圆形,光斑内能量为高斯分布,则移动的激光热流密度为

$$I(x, y, t) = \frac{2P}{\pi r^2} \exp\left\{-\frac{2[x^2 + (y - vt)^2]}{r^2}\right\}, \quad (2)$$

式中  $P$  为激光功率,  $r$  为光斑半径,  $v$  为扫描速度,  $t$  为扫描时间。

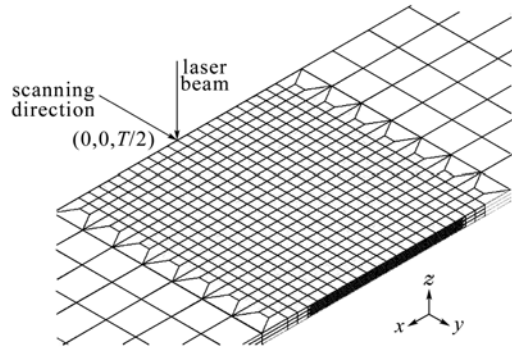


图 2 计算网格示意图 ( $T$  为钢箔厚度)

Fig. 2 Mesh for the 3D simulation of the laser bending ( $T$  means the thickness of the steel foil)

采用 MARC 提供的用户子程序 FLUX(F, TS, N, TIME)求解(2)式可以定义随时间、位置变化的面热流,满足描述激光热源的需要<sup>[6]</sup>。

### 2.5 物理模型的建立

功率为 25 W 的激光束以 50 mm/s 的速度沿  $y$  方向( $x = 0$ )扫描尺寸为 10 mm × 1 mm × 0.1 mm 的 AISI304 不锈钢钢箔,光斑直径为 0.2 mm,光斑内能量为高斯分布。计算时采用 9828 个八节点六面体单元,11742 个节点。激光加热区及邻近区域采用致密网格,如图 2 所示。

## 3 模拟结果及讨论

通过数值模拟计算得到了激光弯曲过程中的温度场、应力应变场、变形场以及各种场量随时间等的变化情况。以沿扫描路径上钢箔上下表面中心点(0, 0.5 mm, ±0.05 mm)为研究对象。

图 3 为加热区上下表面中心点温度随时间的变化曲线,加热初期由于热传导,两点温度共同缓慢上升。当光斑逐渐接近上表面中心点时,该处温度急剧上升,在 0.0128 s 时达到峰值温度 1294 °C,此时下表面中心点温度为 628 °C,上下表面存在着强烈的温度梯度。光斑离开后,上表面温度仍高于下表面,由于热传导的作用,下表面温度继续上升,在 0.0140 s 时达到峰值 669 °C,故下表面温度峰值时间略滞后于上表面。此后该处材料完全进入冷却阶段,上下表面很快达到相同的温度,并一起冷却到室温。可以看出在激光加热过程中材料上下表面存在强烈的温度梯度。

激光弯曲成形加工经历加热和冷却两个过程,温度场的变化引起应力应变场的相应变化。图 4 给

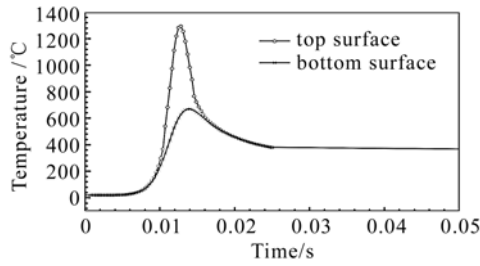
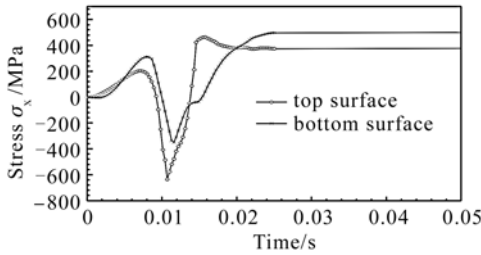


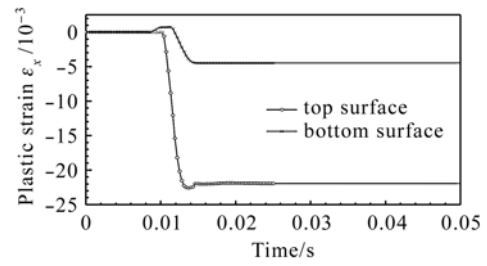
图3 上下表面中心点温度随时间的变化曲线

Fig. 3 Variations of the temperature of the top and bottom surface with the time

图4 上下表面中心点  $x$  向应力随时间的变化曲线Fig. 4 Variations of stresses  $\sigma_x$  of the top and bottom surface with the time

出了上下表面  $x$  向应力随时间的变化曲线,在加热开始阶段,应力由零开始出现拉应力并逐渐增加达到最大值。这是由于光斑从钢箔一端进入,距离中心点较远,只依靠热传导该点温度改变不大,膨胀变形较小,但此时中心处前方材料在光斑照射下温度急速升高,产生较大膨胀变形,推动周围材料向扫描线两侧运动。由于未直接加热的中心处材料温度低,热膨胀变形小,从而阻止其两侧材料向外运动,产生了拉应力。随着光斑向前移动,中心点处温度继续升高,膨胀变形增大,所受拉应力减小,当膨胀量足够大时,周围材料由对该点的拉应力变为阻碍该点膨胀的压应力。随着膨胀变形的继续增大,压应力的值不断增大,在 0.0107 s 时应力峰值为 -635 MPa,达到此时温度下的材料屈服点。该处材料开始出现压缩塑性变形。结合图 4 与图 5 可以看出,钢箔上表面压应力达到峰值时开始出现塑性压缩应变。当中心处温度继续升高,材料屈服强度下降,而热应力保持与材料屈服应力相同,图 4 所示应力变化趋势与文献[7]所描述一致。当激光光束离开后,该处材料随即进入冷却阶段,其温度由于热量向邻近区域以及周围环境的传导、对流和辐射迅速降低,材料开始收缩,压应力迅速减小。当收缩量足够大时,周围材料阻碍该处材料收缩,应力状态重新变为拉应力。

图 5 为上下表面塑性应变随时间的变化曲线,

图5 上下表面中心点  $x$  向塑性应变随时间的变化曲线Fig. 5 Variations of plastic strain  $\epsilon_x$  of the top and bottom surface with the time

在加热阶段初期,由于下表面产生了较大的拉应力,出现了拉伸塑性应变。随着温度的继续升高,加热区材料膨胀受约束所产生的压应力不断增大。另一方面,由于温度的升高引起材料屈服极限降低,使加热区的材料在压缩应力的作用下产生塑性压缩变形。由于沿材料厚度方向存在强烈的温度梯度,不同厚度处的热膨胀量并不相同,相应的应力变化非常剧烈,材料上下表面的塑性变形也差别很大,加热阶段结束时上下表面的塑性应变分别为 -0.0226 与 -0.00386,钢箔产生朝向光源的正向弯曲变形。当进入冷却阶段,激光加热区材料迅速冷却收缩,应力由压应力转变为拉应力,且随着材料温度降低,材料屈服强度升高,故在冷却阶段产生的塑性变形很小。在本文研究参数下,冷却阶段结束后材料加热区上表面塑性应变值为 -0.02201,下表面塑性应变值为 -0.00448,上下表面的塑性应变差为 0.01753。由于钢箔的上表面产生较大的塑性压缩应变,下表面产生较小的塑性压缩应变,上下表面间由于不同的横向收缩产生了应变差值,这样在宏观上产生了面向光源的弯曲变形,最终弯曲角度为 1.4943°。

#### 4 微尺度激光弯曲成形实验研究

在数值分析的同时,对微尺度激光弯曲成形进行了实验研究,建立了微尺度激光弯曲成形的实验装置。采用美国 Synrad 48-5 型 CO<sub>2</sub> 激光器,额定功率 50 W,最小光斑直径可达 0.1 mm。加工材料为厚度 0.1 mm 的 304 不锈钢箔,材料表面涂有炭黑作为吸收层,以提高金属对激光能量的吸收。实验装置如图 6 所示。

加工过程由 CCD 相机实时监测,采集不同时刻的工件弯曲成形图形,并记录到计算机中,由图像处理软件计算获得最终的弯曲角度值。

影响微尺度激光弯曲成形的因素很多,重点考虑激光功率、扫描速度以及扫描次数对成形的影响

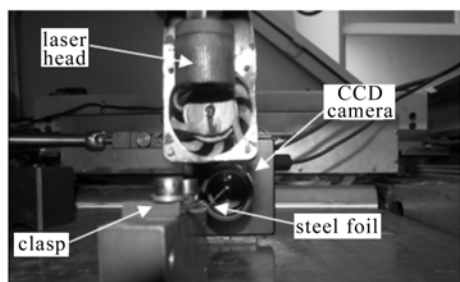


图 6 微尺度激光弯曲实验装置图

Fig. 6 Experimental device of laser micro-bending

规律。

#### 4.1 有限元仿真结果的实验验证

实验材料尺寸为  $10\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$ , 激光功率  $20 \sim 30\text{ W}$ , 光斑直径  $0.2\text{ mm}$ , 扫描速度  $50\text{ mm/s}$ 。

图 7 给出了采用不同激光功率对箔片进行单次激光扫描时, 所得到的有限元计算结果与实验结果的对比曲线, 其中实验结果为 5 次实验的平均值。可以看出, 两者所得到的弯曲角度随激光功率变化的规律一致。同时, 模拟与实验结果的平均误差为  $2.8\%$ , 显然两者吻合较好, 说明本有限元模型 (FEM) 可以保证计算精度。

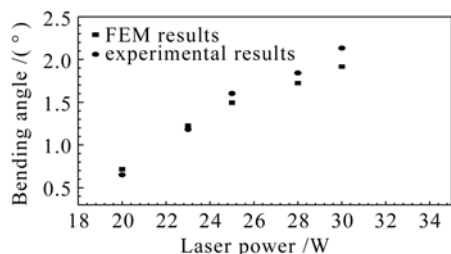


图 7 计算结果与实验结果对比

Fig. 7 Comparison between the FEM results and experimental results

模拟结果与实验结果存在差异的原因有以下两点: 箔片在成形前的制备过程中产生了初始内应力; 材料性能参数以及边界条件与现实加工参数之间存在差异。

#### 4.2 工艺参数对弯曲角度影响规律分析

实验材料尺寸为  $20\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$ 。根据实验结果对激光功率、扫描速度和扫描次数对弯曲角度的影响规律进行了分析。激光工艺参数如表 1 所示。

由图 8 所示弯曲角度与激光功率关系曲线可以看出, 随着激光功率的增大弯曲角度逐渐增大, 增大激光功率即增加了材料所吸收的能量密度, 使钢箔上表面加热区温度大幅度升高, 而对下表面温度影

响较小, 这样不但增大了温度梯度, 而且温度升高使材料屈服强度下降更多, 更容易发生塑性变形。当激光功率增大到一定值时, 弯曲角度开始减小, 此时可以发现材料表面遭到明显的破坏。

表 1 激光工艺参数

Table 1 Process parameters

Parameters	Value
Laser power /W	3~40
Scanning velocity /(mm/s)	20~100
Laser beam diameter /mm	0.2

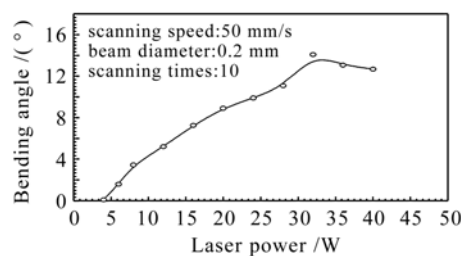


图 8 激光功率对弯曲角度的影响

Fig. 8 Influence of laser power on the bending angle

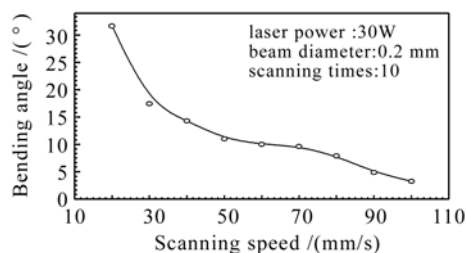


图 9 扫描速度对弯曲角度的影响

Fig. 9 Influence of scanning speed on the bending angle

从图 9 可见, 弯曲角度随扫描速度的增大而减小, 且随着速度的不断增大角度下降的趋势变缓。这是由于随着扫描速度的增大, 一方面, 激光扫描时的线能量密度减小, 使加热表面温度和上下表面的温度梯度降低, 弯曲角度存在减小的趋势; 另一方面, 随着速度的增大, 激光束使加热表面的温度在极短的时间内急剧升高, 热量来不及向材料内部传导就进入了冷却阶段, 上下表面的温度梯度有增大的趋势, 有助于弯曲角度的产生。两者的综合作用, 使弯曲角度的下降趋势减小。

图 10 为扫描次数与弯曲角度的关系曲线, 可以看出随着扫描次数的增加, 弯曲角度不断增大, 多次扫描后弯曲角度与扫描次数呈近似线性关系, 但随着扫描次数的增加每次成形的角度呈减小趋势。这是由于随着扫描次数的增加, 材料表面所涂激光吸收层被消耗, 造成激光效率下降; 同时多次扫描后, 加热区产生一定的硬化效果等<sup>[4]</sup>; 如图 10 所示, 前

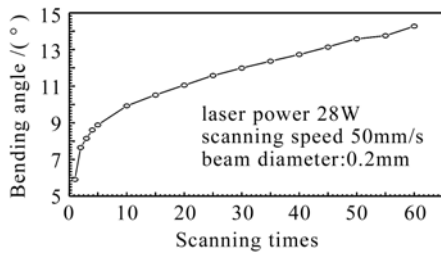


图 10 扫描次数对弯曲角度的影响

Fig. 10 Influence of scanning times on the bending angle  
五次扫描的单次弯曲角度依次减小,以第一次扫描弯曲角度最大。

## 5 结 论

1) 通过对微尺度激光弯曲成形过程进行有限元仿真,对温度梯度成形机制进行了分析。在激光加热过程中沿钢箔厚度方向产生了强烈的温度梯度,温度较高的上表面加热过程中热应力大,产生的塑性压缩变形量大,温度较低的下表面,热应力小,塑性压缩变形量小。从而在加工结束后,产生了朝向激光束的弯曲变形。从模拟结果可以发现主要成形阶段为激光加热阶段。

2) 通过建立微尺度激光弯曲成形实验装置,对有限元计算结果进行了验证。有限元计算结果与实验结果吻合较好,有限元模拟是研究激光弯曲成形机制以及改进工艺的有效途径。

3) 在其他工艺条件不变的情况下,弯曲角度随激光功率增大而增大,但当功率过大材料表面温度过高时因材料遭到破坏,弯曲角度反而减小,故应控

制激光功率以保证材料加热表面组织不受到破坏;随着扫描速度增大,弯曲角度逐渐减小,且减小幅度呈下降趋势;随着扫描次数的增加,总的弯曲角度不断增大,单次扫描弯曲角度随扫描次数的增加而减小,多次扫描弯曲角度与扫描次数之间呈近似线性关系。

## 参 考 文 献

- 1 X. Richard Zhang, Xianfan Xu. High precision microscale bending by pulsed and CW lasers [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2003, **125**(3): 512~518
- 2 X. Richard Zhang, Xianfan Xu. Laser bending for high-precision curvature adjustment of microcantilevers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(2): 021114-1~021114-3
- 3 G. Dearden, C. Taylor, K. Bartkowiak *et al.*. An experimental study of laser micro-forming using a pulsed Nd:YAG laser and scanning optics [C]. *Proceeding of the 21st International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics*, 2003, M409: 1~10
- 4 Guan Yanjin, Sun Sheng, Zhao Guoqun *et al.*. Study on relationship between material properties and bending angles in laser forming process of sheet metals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 499~504  
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
- 5 Li Weimin, M. Geiger, F. Vollertsen. Study on laser bending of metal sheets [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(9): 859~864  
李伟民, M. Geiger, F. Vollertsen. 金属板料激光弯曲成形规律的研究[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(9): 859~864
- 6 Chen Huohong, Yin Weiqi. User Guide of MSC. Marc Secondary Development [M]. Beijing: Science Press, 2004. 54~62  
陈火红,尹伟奇. MSC. Marc 二次开发指南[M]. 北京:科学出版社, 2004. 54~62
- 7 R. McBride, F. Bardin, M. Gross *et al.*. Modelling and calibration of bending strains for iterative laser forming [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005, **38**: 4027~4036