

文章编号: 0258-7025(2008)08-1265-06

预应力作用下微尺度激光弯曲成形的数值模拟

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 应用一种新的激光弯曲成形工艺,通过施加位移约束,使厚度为 0.1 mm 的 304 不锈钢箔加热区产生预期的预应力分布。针对激光弯曲成形的特点,建立三维热力耦合模型,基于塑性皱曲机制(BM),对三种不同预约束应力状态下微尺度激光弯曲成形过程进行数值模拟。通过对比三种不同模型的模拟结果,分析了预约束应力作用下,微尺度激光弯曲成形的成形机制。研究发现,预应力作用下激光弯曲成形是热应力与预应力综合作用的结果,在预应力作用下激光弯曲成形效果显著增加。在塑性皱曲机制下,通过控制预约束作用的方向和大小以及选择合适的激光工艺参数可以得到任意方向的弯曲成形角。弯曲角度随预应力的增大而增大,两者之间呈近似线性关系。

关键词 激光技术;微尺度激光弯曲成形;预约束应力;塑性皱曲机制

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20083508.1265

Numerical Study on the Laser Bending of Stainless Steel Foil with Pre-Stresses

Liu Jie Sun Sheng Guan Yanjin

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

Abstract Through using a new laser bending process, the distribution of expected pre-stress was obtained on the heated zone of AISI 304 steel foil with thickness of 0.1 mm by applying initial displacement to the sample's free end. Considering the characteristics of laser bending, three-dimensional (3D) thermomechanical finite element method (FEM) models of laser bending process with various pre-stresses were developed based on the buckling mechanism (BM). Through comparing the simulation results of different models, the mechanism of laser bending with pre-stresses was explained. The simulation results show that the deformation of the stainless steel foil under buckling mechanism depends on the integration of the thermal stress and the pre-stress when the laser beam irradiates the foil. The forming performance can be improved significantly under pre-stress, and the deformation direction can also be controlled easily by changing the direction and value of the pre-loading. The bending angles of the steel foils increase remarkably with the increase of the pre-loading, and both are almost in linear relationship.

Key words laser technique; laser micro-bending; pre-stress; buckling mechanism

1 引 言

激光弯曲成形是一种无模具、无外力的非接触式热态累积成形技术,应用此技术可实现板料的弯曲、三维成形以及金属非金属组件的精确校正或调整^[1~3]。它是通过激光束扫描板料表面时形成的不均匀温度场所导致的热应力来实现工件弯曲变形的。

通常激光弯曲成形的机制主要解释为温度梯度机制、塑性皱曲机制(BM)和镦粗机制。

近年来激光弯曲成形技术在微尺度成形方面的应用引起许多研究者的兴趣。Zhang 等^[4,5]应用脉冲激光与连续波激光进行微尺度激光弯曲成形的数值模拟与实验研究,并在该技术应用方面做了大量

收稿日期: 2007-10-15; **收到修改稿日期:** 2007-12-17

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方面的研究。

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

导师简介: 孙 胜(1949—),男,广西人,教授,博士生导师,目前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)和模具设计与制造方面的研究。E-mail: shsun@sdu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: guan_yanjin@sdu.edu.cn

的工作。英国利物浦大学激光研究小组研究了微尺度激光成形的扫描策略,进行了金属箔片的二维与三维成形实验,获得了大量有价值的结果^[6]。目前大多数研究者在微尺度激光弯曲成形方面的研究主要集中在基于温度梯度机制的朝向激光束的正向弯曲成形的研究,而对基于塑性皱曲机制,背离激光束的反向弯曲成形方面的研究很少。

基于塑性皱曲机制的激光弯曲成形与温度梯度机制相比有以下几个主要的不同点:1) 在激光加热过程中,与温度梯度机制相比,材料厚度方向不存在大的温度梯度;2) 加热区域变大,在塑性皱曲机制中光斑直径一般在板料厚度 10 倍以上;3) 基于塑性皱曲机制的激光弯曲成形,可以获得朝向激光束的正向弯曲和背离激光束的反向弯曲,其成形方向取决于材料初始形状与应力状态。而在基于温度梯度机制的激光弯曲成形中,只能得到朝向激光束的正向弯曲。

F. Vollertsen 等^[7]曾提出采用塑性皱曲机制进行微成形的构想,并给出预应力模型和部分实验结果,但未对预应力与弯曲成形之间的关系进行详细的分析。本文应用预约束应力法^[8],通过对板材人为施加确定的预应力,控制激光弯曲角的大小与弯曲方向,对成形过程中温度场与应力应变场进行详细的描述,揭示预应力在激光弯曲成形中的作用。

2 预约束施加方法

根据激光弯曲成形有限元分析结果可知^[9,10],激光弯曲成形过程中,厚度方向上的应力梯度是板材弯曲的主要原因。通过人为地给加热区施加预期的应力分布,便可以控制激光弯曲成形的方向。

采用给定板材自由端初始位移的方法获得加热区预期的预应力分布。如图 1 所示,把板材一端固定,在另一端即板材自由端用一刚体施加压力,使自由端产生 z 向初始位移 d 。

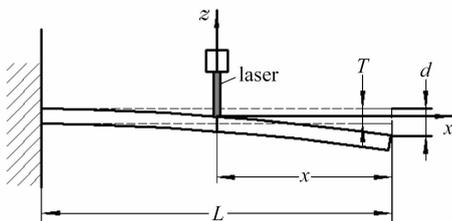


图 1 机械约束施加示意图

Fig.1 Pre-stresses loading model

通过受力分析可知,在初始位移产生的弯矩作用下,加热区的预应力沿板材厚度方向为线性分布,

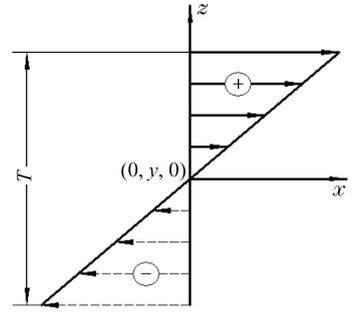


图 2 板料厚度方向应力分布

Fig.2 Corresponding pre-stress distribution in thickness direction

如图 2 所示。

沿板厚方向不同位置 x 向应力可表示为

$$\sigma_x = -3dExz/L^3, \quad (1)$$

式中 d 为初始位移, x 为扫描线到板材自由端的距离, E 为板材在室温下的弹性模量, L 为板材长度, z 为图 2 中板厚方向各点纵坐标值 ($-T/2 \leq z \leq T/2$, T 为板材厚度)。为便于分析,规定:当预约束位移 d 方向与光束照射方向相反时, d 为正值;当预约束位移 d 与光束的照射方向相同时, d 为负值。

3 有限元模型建立

为了研究预应力对激光弯曲成形的影响,分别建立不同预应力下的有限元法(FEM)模型,即负向约束模型 ($d = -1 \text{ mm}$),无约束模型 ($d = 0$) 和正向约束模型 ($d = 1 \text{ mm}$)。

预应力作用下激光弯曲成形有限元分析计算包括三个不同的分析过程,第一阶段为预约束施加过程应力分析,该过程采用刚性体在板料自由端施加垂直厚度方向 (z 向) 的约束位移;第二阶段为激光弯曲成形的三维热力耦合分析;第三阶段为预约束释放过程的应力应变场分析。采用大型非线性有限元程序 MSC. Marc 对预应力作用下激光弯曲成形过程进行数值模拟。为了计算方便和便于分析比较,三个过程采用同一计算网格,如图 3 所示,在激光扫描路径周围采用细密网格。

第一与第三阶段为简单的机械加载与卸载过程,激光弯曲成形阶段为复杂的热力耦合过程。

3.1 激光光源的处理

激光光束以热流密度的形式,通过用户子程序施加到相应单元表面,来描述动态的热源。在 MSC. Marc 中光束为高斯光束,其能量密度分布 I 为

$$I = \frac{2AP}{\pi r_b^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_b^2}\right), \quad (2)$$

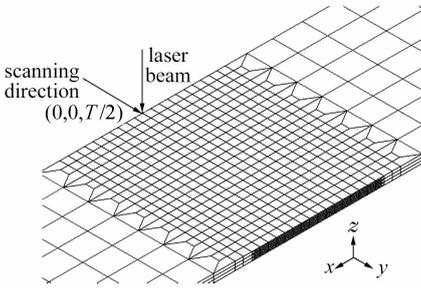


图 3 有限元计算模型

Fig. 3 Mesh for the 3D simulation of the laser bending

于是, 光束直径范围内的平均热流密度 I_m 为

$$I_m = \frac{1}{\pi r_b^2} \int_0^{r_b} I(2\pi r_1) dr_1 = \frac{0.865AP}{\pi r_b^2}, \quad (3)$$

式中 P 为激光功率, r_b 为光斑直径, r_1 为考察点至光束中心的距离, A 为材料对激光的吸收系数。对板料表面进行黑化处理, 以增强对激光的吸收能力, 根据板料表面的处理情况, 仿真时板料对激光能量的吸收系数取 0.5。

3.2 热传导边界条件的处理

板料经激光束扫描后在空气中自然冷却, 板料与周围环境存在对流和辐射换热。其中给定外表面 Γ 上的对流边界条件称为第三类边界条件, 可表示为

$$q = h(T_r - T_\infty), \quad (4)$$

式中 h 为表面对流放热系数, T_r 为表面温度, T_∞ 为外界环境温度。对流放热系数通常是环境介质的温度及其他材料特性和结构尺寸的复杂函数, 取经验数值 $30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

热辐射称为第四类边界条件, 可表示为

$$q = \alpha(T_r^4 - T_\infty^4), \quad (5)$$

式中 σ 为斯特藩-玻尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 常数, α 为表面辐射效率。

3.3 其他边界条件与初始条件

板料初始温度及环境温度均为 20°C , 板料无初始变形和应力。为与实际成形过程钢箔固定情况相吻合, 将钢箔一端的所有节点的平动自由度加以约束。研究对象为厚度 0.1 mm 的 304 不锈钢箔, 其材料性能参数同温度的关系曲线取自文献[11]。成形工艺参数如表 1 所示。

4 数值模拟结果与分析

以扫描路径上钢箔上下表面中心点 ($0, 1 \text{ mm}$, $\pm 0.05 \text{ mm}$) 为研究对象。

4.1 预约束施加阶段

确定的初始位移被施加到钢箔的自由端, 图 4

为预应力在位移加载过程中的变化曲线。随着初始位移的增加, 上下表面的应力值不断增大。

表 1 工艺参数

Table 1 Details of the other parameters

Parameters	Value
Laser power /W	30
Scanning velocity /(mm/s)	20
Laser beam diameter /mm	1
Size $L \times W \times T$ /mm	$10 \times 2 \times 0.1$
Distance between scanning line and free end /mm	5
Displacement constraint d /mm	$-1, 0, 1$

$L \times W \times T$ means length \times width \times thickness.

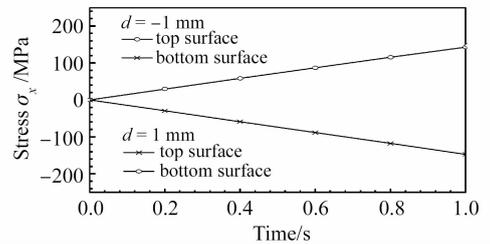


图 4 初始位移加载过程预应力随时间的变化曲线
Fig. 4 Variation of pre-stresses with the time during the process of the initial displacement loading

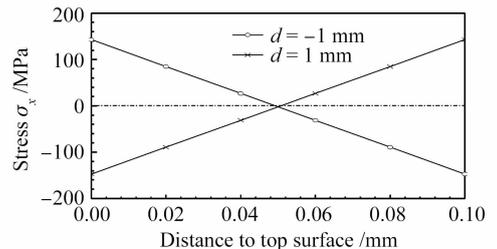


图 5 预应力沿板厚方向的分布曲线
Fig. 5 Distribution of pre-stresses along stainless foil thickness

应力在厚度方向的分布如图 5 所示。以中性层为分界线, 负向约束模型中上半部分材料处于拉应力状态, 下半部分材料处于压应力状态。正向约束模型中, 则是上半部分材料处于压应力状态, 下半部分材料处于拉应力状态。两模型均在上下表面处达到最大应力值 147 MPa 。

4.2 激光弯曲成形阶段

激光光束对钢箔上表面进行扫描, 依次经历了加热与冷却过程, 最终产生了塑性弯曲变形。对不同模型模拟得到的温度场和应力应变场进行对比分析。

4.2.1 温度场分析

考虑到初始应力场对温度场不存在影响, 当激

光工艺参数确定之后,三种模型将得到相同的温度场分布。图6给出了激光弯曲阶段温度随时间的变化曲线。钢箔上表面与下表面之间温度差很小,加热阶段上下表面的温度峰值分别为1294℃和1228℃。由于激光光斑直径较大,扫描速度慢,且钢箔厚度非常小,所以与温度梯度机制相比,基于塑性皱曲机制时产生的温度梯度非常小。

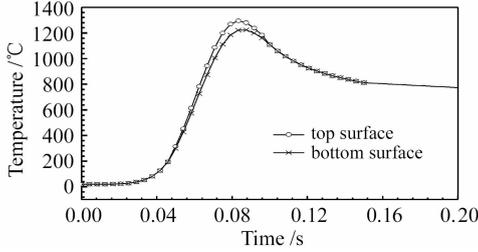


图6 激光弯曲过程中温度的分布曲线

Fig. 6 Variation of the temperature with time during laser bending stage

4.2.2 应力应变分析

伴随激光弯曲中的加热与冷却两个过程,材料的应力应变与变形场随温度场的改变发生了剧烈的变化。为便于分析,根据塑性应变状态,把加热过程分为I和II两个阶段,如图7~9所示。

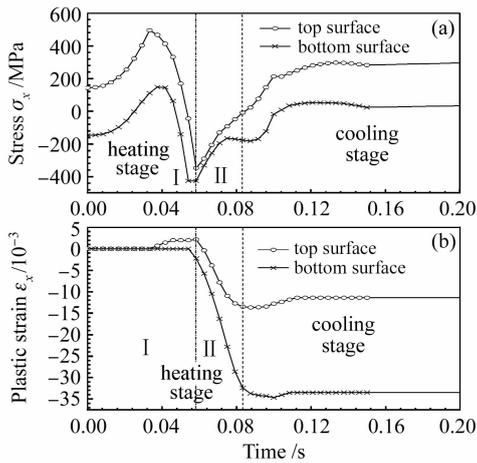


图7 $d = -1$ mm时负向约束模型 x 向应力与塑性应变随时间的变化曲线。(a) 应力;(b) 塑性应变

Fig. 7 Variations of stresses σ_x and plastic strain ϵ_x with time during laser bending stage under initial displacement of $d = -1$ mm. (a) stress σ_x ; (b) plastic strain ϵ_x

在加热过程第I阶段产生拉伸塑性应变,应力状态由拉应力向压应力状态转变。在此阶段出现了较大的拉应力,在光源未达到中心点之前,中心点前方材料因急剧温度升高而膨胀变形,推动扫描线两侧材料向外运动,而中心处材料温度较低,膨胀变形

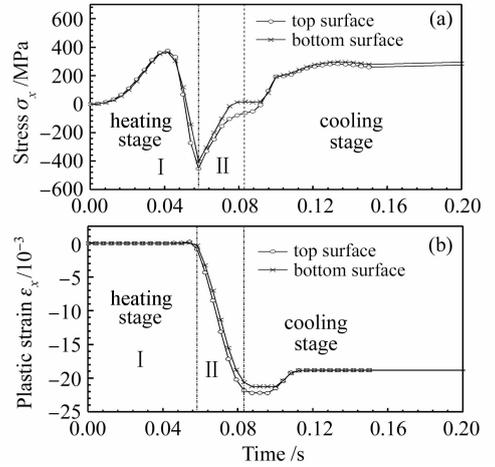


图8 无约束模型 x 向应力与塑性应变随时间的变化曲线。(a) 应力;(b) 塑性应变

Fig. 8 Variations of stresses σ_x and plastic strain ϵ_x with time during laser bending stage without prestresses. (a) stress σ_x ; (b) plastic strain ϵ_x

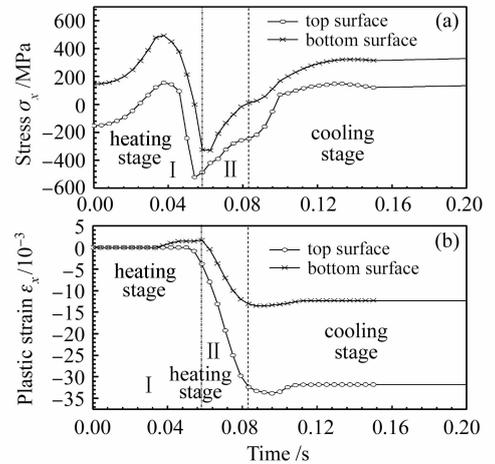


图9 $d = 1$ mm时负向约束模型 x 向应力与塑性应变随时间的变化曲线。(a) 应力;(b) 塑性应变

Fig. 9 Variations of stresses σ_x and plastic strain ϵ_x with time during laser bending stage under initial displacement of $d = 1$ mm. (a) stress σ_x ; (b) plastic strain ϵ_x

小,要阻止其周围材料向扫描线两侧运动,故在中心处产生了很大的拉应力。在无约束模型中,由于温度梯度小,产生的应力梯度也小,上表面拉应力峰值为396.6 MPa,下表面拉应力峰值为379.2 MPa,应力梯度为17.4 MPa。当有预约束应力作用时,有预拉应力一面,热应力与预应力叠加,拉应力显著增大。存在预压应力的表面,热应力与预压应力叠加,则拉应力减小。负向约束模型中,存在于拉应力的上表面拉应力峰值为492.5 MPa,而下表面拉应力峰值为163.7 MPa,应力梯度为328.8 MPa。在正向

约束模型中, 存在于拉应力的下表面拉应力为 499.4 MPa, 而上表面则为 171.5 MPa, 应力梯度为 328.9 MPa。可以看出, 两个约束模型中应力梯度约为两倍的预应力与无约束模型中应力梯度之和。具有初始位移的模型中应力梯度的增大是热应力与预应力共同作用的结果。当拉应力达到此温度下材料的屈服点时, 出现塑性变形。如图 7 和图 9 所示, 在拉应力较大的表面均出现了塑性拉伸应变, 而在无预约束模型中, 单纯热应力不足以使工件产生塑性变形。当出现塑性拉伸应变后, 中心点处拉应力开始减小, 随着光斑向中心处移动, 中心处温度急剧上升, 该处材料热膨胀受周围材料限制而产生了压应力, 应力状态由拉应力转变为压应力。而在压应力增大过程中, 拉伸塑性应变一直在增大, 虽然处于压应力状态, 但未达到该温度材料屈服点, 仍为热膨胀变形, 该过程主要为热应变。在压应力达到峰值, 即该温度材料屈服点时, 拉伸塑性应变也达到最大值。负向约束模型中, 上表面拉伸应变为 1.994×10^{-3} , 在正向约束模型中下表面拉伸应变为 2.03×10^{-3} 。受预压应力的表面, 压应力显著增大, 表面提前出现压缩塑性变形。在第 I 阶段结束时, 钢箔产生与初始位移方向相同的塑性弯曲变形。

加热过程第 II 阶段为大量压缩塑性应变产生阶段。在开始时, 上下表面压应力均达到峰值, 即该温度下材料屈服点, 材料开始发生塑性压缩变形。存在预压应力的表面, 热应力与预应力叠加, 生成了更大的压应力; 存在预拉应力一面, 压应力减小。在第 I 阶段发生了塑性变形, 使得预应力减小, 所以此时上下表面的应力差也减小。在第 II 阶段, 负向约束模型中, 存在预压应力的下表面应力峰值为 -484.7 MPa, 而上表面为 -369.8 MPa, 应力梯度为 114.9 MPa。在正向例子中应力的上表面压应力为 -519.8 MPa, 下表面为 -319.2 MPa, 差值为 200.6 MPa, 与第 I 阶段相比应力差值减小, 这表明预应力由于第 I 阶段发生了塑性变形而减小。随着中心处材料温度继续升高, 材料屈服应力减小, 则压应力减小维持在材料的屈服点, 如图 7~9 所示。

加热过程第 II 阶段为压缩塑性应变主要生成过程, 此阶段结束时, 负向约束模型中, 上表面应变为 -11.58×10^{-3} , 下表面为 -34.05×10^{-3} ; 正向约束模型中上表面为 -34.4×10^{-3} , 下表面为 -11.36×10^{-3} 。从数值可以看出, 正向与负向约束模型中发生的塑性变形方向均与初始位移的方向一致。在无预约束模型中, 由于在加热过程温度梯度

小, 上下表面应变差值很小, 为 0.08×10^{-3} , 发生了很小的朝向激光束的弯曲变形。

冷却阶段, 加热区材料冷却收缩, 应力状态迅速由压应力状态转变为拉应力状态。从应力图 7(a) 与图 9(a) 可以看出, 冷却过程中, 存在预拉应力表面转变为拉应力状态时, 存在预压应力的表面仍然保持较大的压应力。压应力的存在有利于材料的收缩变形, 如塑性应变图 7(b) 与图 9(b) 所示, 在冷却过程中, 存在预压应力的表面压缩塑性变形有所增大, 而存在预拉应力的表面出现拉伸塑性变形, 表现为塑性压缩应变的减小。冷却阶段结束后, 负向约束模型中存在预拉应力的表面应变为 -11.58×10^{-3} , 下表面为 -34.05×10^{-3} , 正向约束模型中存在预拉应力的下表面的应变为 -11.36×10^{-3} , 上表面为 -34.4×10^{-3} , 与加热过程第 II 阶段相比, 存在预拉应力的表面的塑性变形均减小, 而存在预压应力的塑性变形均增大, 上下表面的塑性应变差值在此阶段有所增加。而在无约束模型中, 冷却阶段结束后上下表面的压缩塑性应变与应变差都减小。虽然在冷却阶段, 材料内产生了很大的拉应力, 但随着温度的降低材料屈服强度增大, 塑性变形相对于加热阶段很小。

4.3 预应力卸载阶段

图 10 所示为整个加工过程中钢箔自由端 z 向位移随时间的变化曲线。在应力释放阶段, 自由端位移有所减小, 在卸载阶段只有弹性变形产生, 自由端位移减小说明加热区域之外的弹性变形部分恢复到原始状态。

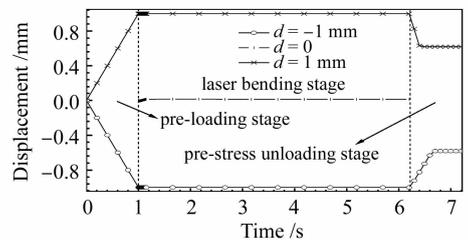


图 10 钢箔自由端 z 向位移随时间的变化曲线
Fig. 10 Displacement variations of the free end in z direction with time of different models

卸载结束后, 负向约束模型最终弯曲角度为 -6.54° , 正向约束模型弯曲角度为 7.08° 。而在无预应力作用情况下, 无约束模型中产生的弯曲角度很小, 只有 0.61° 。

5 预约束对变形的影响

图 11 给出了初始位移对弯曲角度影响的数值

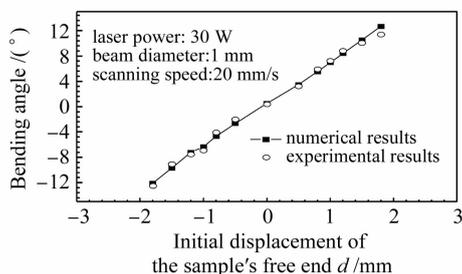


图 11 预约束位移与弯曲角度之间的关系

Fig. 11 Influence of the initial displacement on the bending angle

模拟与实验结果。实验结果为多次实验的平均值，与模拟结果吻合较好。当其他工艺参数保持不变时，弯曲角度随初始位移的加大而增大。较大的初始位移使加热区产生更大的预应力，所以较大的预应力有助于生成更大的弯曲角度，弯曲角与预应力呈近似线性关系。

但应该指出的是，在钢箔固定端附近产生的预应力不能超过材料的屈服强度。根据(1)式可知，预应力在钢箔固定端上下表面处最大，当该处预应力超过屈服点时，钢箔将产生不必要的塑性变形，必须合理控制初始位移的大小。

6 结 论

数值模拟结果表明，预约束作用下，在钢箔加热区获得预期的预应力分布。激光弯曲成形阶段，预应力使材料厚度方向应力梯度增大。选择合适的工艺参数可以得到背向激光束的反向弯曲角。

与常规无预应力激光弯曲成形相比，在加热阶段初期，存在预拉应力的钢箔表面产生了拉伸塑性变形。

当初始位移保持与激光束方向一致时，材料上表面产生预拉应力，下表面产生预压应力。由于预约束作用，激光弯曲阶段产生了反向弯曲变形。当初始位移朝向激光源时，材料上表面产生预压应力，下表面产生预拉应力，激光弯曲成形阶段产生正向弯曲成形。与无预应力成形相比，预应力作用下的

微尺度激光弯曲成形不仅可以控制弯曲的方向，而且可以显著增大弯曲变形量。数值模拟和实验结果表明，弯曲角与初始位移间呈近似线性关系。

参 考 文 献

- 1 Wu Dongjiang, Ma Guangyi, Cao Xiansuo *et al.*. Analysis of silicon surface profile of pulsed laser bending processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11):1589~1593
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
- 2 M. Geiger, M. Merklein, M. Pitz. Laser and forming technology — an idea and the way of implementation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, **151**:3~11
- 3 Li Weimin, Manfred Geiger, Frank Vollertsen. Study on laser bending of metal sheets [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(9):859~864
李伟民,Manfred Geiger, Frank Vollertsen. 金属板材激光弯曲成形规律的研究[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(9):859~864
- 4 X. Richard Zhang, Xianfan Xu. Laser bending for high-precision curvature adjustment of microcantilevers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(2):021114
- 5 X. Richard Zhang, Xianfan Xu. High precision microscale bending by pulsed and CW lasers [J]. *ASME*, 2003, **125**:512~518
- 6 G. Dearden, C. Taylor, K. Bartkowiak. An experimental study of laser micro-forming using a pulsed Nd:YAG laser and scanning optics [C]. *Processing of the 21st International Congress on application of Laser and Electro-Optics*, 2003, **M409**:1~10
- 7 F. Vollertsen, I. Komel, R. Kals. The laser bending of steel foils for microparts by the buckling mechanism — a model [J]. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, 1995, **3**:107~119
- 8 Guan Yanjin, Sun Sheng, Zhao Guoqun *et al.*. Simulation of the laser bending process of sheet metals with pre-stresses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):755~758
管延锦,孙 胜,赵国群等. 预约束应力作用下的激光弯曲成形仿真工艺研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):755~758
- 9 Ji Zhong, Wu Shichun. FEM simulation on laser bending of sheet metal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(10):953~956
季 忠,吴诗惇. 板料激光弯曲成形数值模拟[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(10):953~956
- 10 Pei Jibin, Zhang Liwen, Zhang Quanzhong *et al.*. Simulation on influence of scanning passes during laser bending of steel plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1721~1725
裴继斌,张立文,张全忠等. 扫描次数对钢板激光弯曲成形影响的模拟[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12):1721~1725
- 11 P. J. Cheng, S. C. Lin. An analytical model to estimate angle formed by laser [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, **108**:314~319