

文章编号 : 0258-7025(2002)08-0755-04

# 预约束应力作用下的激光弯曲成形 仿真工艺研究

管延锦, 孙 胜, 赵国群, 李辉平

( 山东大学模具工程技术研究中心, 山东济南 250061 )

**提要** 提出了一种预约束应力作用下的激光弯曲成形新工艺, 研究了不同的加载模型, 通过施加预载荷, 使板料加热区材料产生期望的预应力分布。针对激光弯曲成形的特点, 建立了三维热力耦合模型, 采用有限元方法实现了预约束应力作用下的激光弯曲成形工艺过程仿真。分析了在预载荷作用下, 板料的激光弯曲成形机理。研究表明, 该工艺不仅可大大提高板料的弯曲成形效果, 而且只要合理控制预载荷的方向和大小, 即可控制激光弯曲成形的变形方向。板料弯曲角度随预载荷的增加而显著增大, 两者呈指数关系。

**关键词** 板料, 激光弯曲, 新工艺, 有限元仿真

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

## Simulation of the Laser Bending Process of Sheet Metals with Pre-stresses

GUAN Yan-jin, SUN Sheng, ZHAO Guo-qun, LI Hui-ping

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

**Abstract** A new laser bending process of sheet metals with pre-stresses is put forward. The different loading models are analyzed, and desired pre-stress distribution in heated zone of the sheet is acquired. The three-dimensional thermo-mechanical model is established. Using the thermal elastic-plastic finite element method ( FEM ), the process is simulated numerically. Its forming mechanism is analyzed. The bending angles of the sheet metals can be improved significantly, and the deformation direction can also be controlled easily by changing the direction and value of the pre-load reasonably. The bending angles of the sheet metals augment remarkably with the improvement of the pre-load, and both are in exponential relationship.

**Key words** sheet metal, laser bending, new process, FEM simulation

## 1 引 言

激光弯曲成形是国外近年来提出的一种新的金属材料柔性成形方法。由于金属材料的热胀冷缩特性, 当其受到不均匀加热时, 将会在材料内部产生热应力。板料激光成形技术就是一种利用高能激光束扫描金属薄板表面, 在热作用区产生强烈的温度梯度, 导致非均匀分布的热应力, 使金属板料发生塑性变形的工艺方法<sup>[1~4]</sup>。在无需模具、不需外力的情况下, 仅仅通过优化激光加工工艺参数、精确控制热作用区内的温度分布, 即可获得合理的热应力大小与分布, 使板料最终实现无模成形。

在不同的工艺参数下, 板料的激光弯曲成形存在三种基本的变形形式<sup>[3]</sup>: 1) 正向弯曲变形( 朝向激光束的弯曲 ); 2) 反向弯曲变形( 背向激光束的弯曲 ); 3) 长度方向的收缩变形。但是, 激光弯曲成形存在以下问题: 一是单次变形量小, 每次只能获得很小的弯曲角度; 二是在薄板的激光弯曲成形中板料的弯曲方向很难控制, 成形工艺参数稍有不同, 板料可能产生正向弯曲变形, 也可能产生反向弯曲变形。针对上述问题, 本文提出了预约束应力作用下的激光弯曲成形新工艺, 不仅可大大提高成形效果, 而且可控制板料的变形方向。

收稿日期 2001-06-13; 收到修改稿日期 2001-07-24

作者简介: 管延锦 (1969—) 男, 山东大学模具工程技术研究中心, 讲师, 博士, 主要从事成形新技术及其 CAD/CAE/CAM 方面的研究。E-mail: guan-yanjin@sdu.edu.cn

## 2 预约束应力作用下的激光弯曲成形工艺

为了增加弯曲的效果和控制弯曲的方向,可对工件施加一定的外载荷,使加热区尤其是加热面受到一定的预压缩应力,这种板料成形工艺称为预约束应力作用下的激光弯曲成形。为使板料加热区产生预压缩应力,可采用以下两种方法:

第一种方法是使板料的整个厚度方向受到均匀的预压缩应力。譬如板料的一端固定,另一端施加垂直于端面的压力。但使板料在整个厚度方向受到均匀的预压缩应力比较困难,而且预压缩应力太小,成形效果不明显,而太大则会使板料失稳,因此该方法不适合板料的激光弯曲成形。

第二种方法是使板料在激光弯曲过程中受到和所要求变形方向一致的弯矩,使加热区正面产生压应力,背面受到拉应力。

第二种方法比较简单,如果将板料的一端固定,而在另一端施加一定大小的力,即可建立相应的加载模型(如图1所示)。加热区材料在弯矩  $F \cdot L/2$  的作用下,产生一定的预应力,预应力的大小取决于  $F$  的大小及力的作用点到加热线的距离。本文采用此加载模型,采用有限元数值仿真研究了板料受到预约束应力时的激光弯曲成形过程。

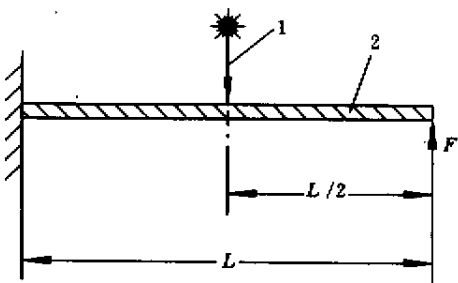


图1 加载模型

1: 激光束; 2: 板料;  $F$ : 预载荷;  $L$ : 板料长度

Fig.1 Loading model

1: laser beam; 2: sheet metal;  $F$ : pre-load;

$L$ : length of sheet metal

为便于分析,规定:当力  $F$  的方向与光束的照射方向相反时, $F$  为正值;当力  $F$  的方向与光束的照射方向相同时, $F$  为负值。

## 3 预约束应力作用下的激光弯曲成形

## 工艺仿真

### 3.1 模型处理

在激光弯曲成形过程中,温度场与位移场相互影响,因此成形过程属于复杂的热力耦合问题,为与实际情况相吻合,仿真采用了三维的热力耦合模型。

由于材料的热物理性能(热传导系数、热膨胀系数、比热、密度)、力学性能参数(弹性模量、屈服极限)都与温度相关,分析中必须考虑材料性能与温度的这种函数关系。本文所取材料为08F钢板,其相应的热物理性能及力学性能参数与温度的关系取自文献[5,6]。

热载荷以热流密度的形式,通过一用户子程序施加到相应单元表面,来描述动态的热源,光束为高斯光束,其能量密度分布  $I$  为

$$I = \frac{2AP}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right) \quad (1)$$

于是,在光束直径范围内的平均热流密度  $I_m$  为

$$I_m = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r I dr = \frac{0.865AP}{\pi R^2} \quad (2)$$

式中, $A$  为板料对激光的吸收系数, $P$  为激光的输出功率, $R$  为照射到板料表面的光束直径, $r$  为考察点至光束中心的距离。

板料表面需进行黑化处理,实验时在其受照射面涂一层炭黑,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。

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。板料的初始温度及环境温度均为  $20^\circ\text{C}$ ,板料无初始变形和应力。

基本的成形工艺参数如下:

光束功率:1000 W,扫描速度:25 mm/s,光斑直径:4 mm,板料尺寸:40 mm × 20 mm × 2 mm,预载荷: $F = 80$  N。

为与成形过程中板料的固定情况相吻合,将板料一端( $x = -20$  mm平面)的所有节点的平动自由度予以约束。

本文主要针对力  $F$  的方向与光束的照射方向相反时(即  $F$  为正值时)的激光弯曲成形工艺过程进行了工艺仿真。仿真运用大型有限元分析软件MSC/MARC在SGI Octane工作站上进行,有限元模型如图2所示。

### 3.2 仿真结果与分析

与无预载荷作用相比,板料在整个成形过程中不再出现反向弯曲变形,并且最终获得了非常大的弯曲变形。表1列出了在不同条件下板料的弯曲角

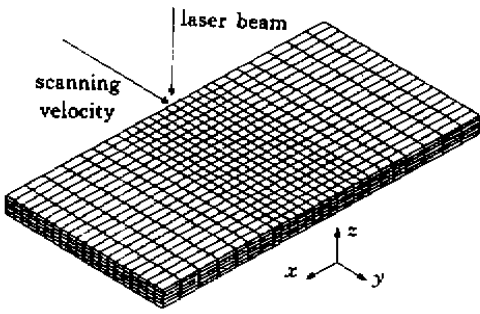


图2 有限元计算模型

Fig.2 Model of FEM simulation

度值,显然外界约束应力可使板料获得良好的成形效果。

表1 不同条件下板料的弯曲角度值

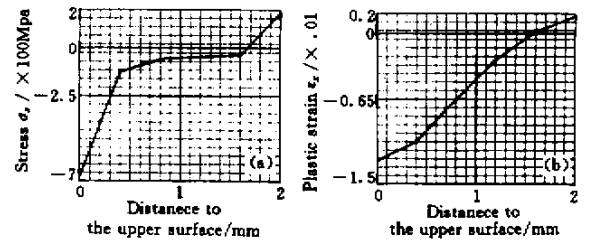
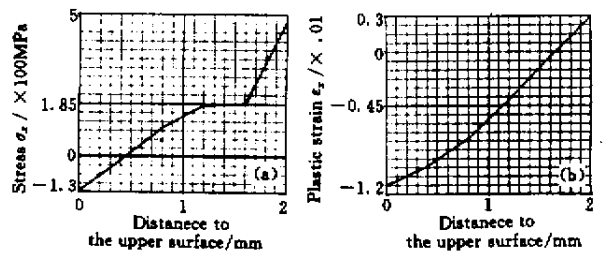
Table 1 Bending angles of the sheets in different conditions

Loading case	Under the pre-load ( $F = 80 \text{ N}$ )	Laser scanning	Under the pre-load ( $F = 80 \text{ N}$ ) and laser scanning
Bending angle/ $^\circ$	0.825	0.3231	3.89

在  $F = 80 \text{ N}$  的作用下,就扫描线左右区域内的材料而言,板料的上表面产生预压应力,下表面产生预拉应力。在加热阶段,当光束扫描板料时,上表面由于预压缩应力的存在,进一步限制了材料的热膨胀,使加热区更快地进入塑性状态,而且塑性压缩变形区明显扩大。同时加热区下表面材料也因热膨胀受到限制产生一定的压应力,但由于受到预拉应力的作用,总体呈现出很小的压应力或仍保持拉应力。与不受预应力时相比,加热区下表面材料只产生较小的塑性压缩,甚至因受拉应力产生伸长。图3(a)(b)分别给出了加热阶段加热区材料的应力  $\sigma_x$  和塑性应变  $\epsilon_x$  沿板厚方向的分布。显然,由于预应力的存在,在加热阶段板料上表面材料受到更大的压缩应力,而下表面材料仍受到拉伸应力的作用,在此应力作用下,板料上表面由于压应力而产生塑性压缩,而下表面则由于拉伸应力而产生拉伸应变(如图3(b)所示),结果在加热阶段板料即发生朝向光束的正向弯曲。

在冷却阶段,加热区材料的温度因热量迅速向周围传导而开始降低,变形区材料发生收缩,使板料内部产生相应的拉应力,但在预应力的作用下,使板料上表面的材料仍保持压应力或很小的拉应力,显

然此应力状态将有利于板料上表面材料在冷却过程的收缩。同时,对于板料下表面的材料来说,预拉应力与冷却过程中产生的热应力叠加,使其受到更大的拉应力作用。图4(a)(b)分别给出了冷却阶段加热区材料的应力  $\sigma_x$  和塑性应变  $\epsilon_x$  沿板厚方向的分布,在冷却阶段板料上表面材料仍受到压应力的作用( $-125.8 \text{ MPa}$ ),下表面材料的拉应力则为  $471.6 \text{ MPa}$ ,比加热阶段显著增大。这样,冷却阶段板料下表面材料因拉应力而产生伸长,而上表面材料则因压应力而产生了更大的横向收缩,结果使板料的正向弯曲效应大大提高,获得了很大的正向弯曲变形。图5即为板料自由端( $x = 20 \text{ mm}$ 平面)的  $z$  向变形随时间的变化规律,可见整个变形过程中,均为朝向光束的正向变形。

图3 加热阶段加热区应力  $\sigma_x$  (a)和塑性应变  $\epsilon_x$  (b)沿板厚方向的分布Fig.3 Stress  $\sigma_x$  (a) and plastic strain  $\epsilon_x$  (b) distribution along the thickness of sheet in heated zone during heating stage图4 冷却阶段加热区应力  $\sigma_x$  (a)和塑性应变  $\epsilon_x$  (b)在板厚方向的分布Fig.4 Stress  $\sigma_x$  (a) and plastic strain  $\epsilon_x$  (b) distribution along the thickness of sheet in heated zone during cooling stage

综上所述,由于外界约束应力的作用,使加热面的横向收缩量增加,而板料下表面的横向收缩量大大降低,甚至出现伸长,从而使板料的弯曲角度显著增大。而且仿真结果表明,只要预弯曲力矩和弯曲效应同向(加热表面受到预压应力),不管扫描速度、光束功率、光斑直径等成形工艺参数如何变化,都不

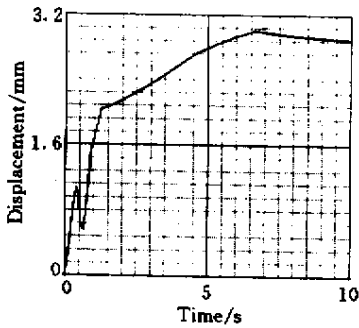


图 5 自由端  $z$  向变形随时间的变化规律

Fig.5 Variation of deformation in  $z$  direction with time

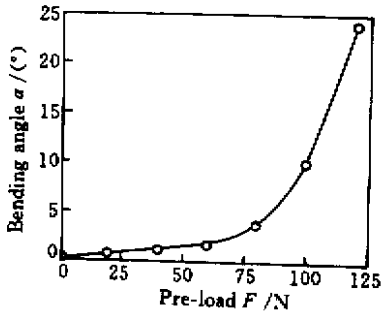


图 6 预载荷与弯曲角度的关系

Fig.6 Influence of the pre-load on bending angles

会产生反向弯曲,即不会出现负的弯曲变形。图 6 表示出弯曲角度随预载荷的变化规律,显然弯曲角度随载荷的增加而显著增大,两者呈指数关系。

通过改变力的方向进一步研究发现,不管其他的工艺参数如何选取,只要合理控制预载荷的方向和大小,即可控制激光弯曲成形的变形方向,同时板料产生的弯曲变形量也大大增加。但是应注意的是,虽然对板料施加预约束应力可以大大提高成形效果,但载荷并不是越大越好,如果载荷过大,可能使加热区产生失稳,在板料表面出现皱折,影响成形的质量。因此,必须合理控制外载荷的大小,或者适当变化成形工艺参数,如减小光斑直径等,在增大弯曲效果、控制变形方向的基础上,获得良好的工件质量。

## 4 结 论

激光弯曲成形工艺是一种新的板料柔性成形方法,本文提出了一种预约束应力作用下的激光弯曲成形新工艺。通过有限元工艺仿真研究发现:

1) 在预约束应力作用下,板料激光弯曲的成形效果显著增加。在预载荷的作用下,使加热区上下表面材料产生了一定的预约束应力,当激光束扫描金属板料时,板料的变形是热应力和预应力的综合作用。当力  $F$  的方向与光束的照射方向相反时,由于预应力的存在,结果在加热阶段板料即发生朝向光束的正向弯曲。在冷却阶段,预应力使板料上表面的材料仍保持压应力或很小的拉应力,显然此应力状态将有利于板料上表面材料在冷却过程的收缩,结果使板料的正向弯曲效应大大提高,最终板料获得了很大的正向弯曲变形。

2) 不管其他工艺参数如何选取,只要合理控制预载荷的方向和大小,即可灵活控制激光弯曲成形的变形方向,同时板料产生的弯曲变形量也大大增加。

3) 板料的激光弯曲角度随载荷的增加而显著增大,两者呈指数关系。

## 参 考 文 献

- 1 C. L. Yan, K. C. Chan, W. B. Lee. Laser bending of leadframe materials [ J ]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, **82**( 1 ~ 3 ): 117 ~ 121
- 2 An. K. Kyrsanidi, Th. B. Keranidis, Sp. G. Pantelakis. Numerical and experimental investigation of the laser forming process [ J ]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, **87**( 1 ~ 3 ): 281 ~ 290
- 3 H. Arnet, F. Vollertsen. Extending laser bending for the generation of convex shapes [ J ]. *Journal of Engineering Manufacture*, 1995, **209**( 6 ): 433 ~ 442
- 4 Li Weimin, M. Geiger, F. Vollertsen. Study on laser bending of metal sheets [ J ]. *Chinese J. Lasers* ( 中国激光 ), 1998, **A25**( 9 ): 859 ~ 864 ( in Chinese )
- 5 Ma Qingfang, Fang Rongsheng. Handbook of Thermal-physical Properties [ M ]. Beijing: Chinese Agricultural Machine Press, 1986 ( in Chinese )
- 6 Tan Zhen, Guo Guangwen. Thermal-physical Properties of Alloys [ M ]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994 ( in Chinese )