

文章编号: 1001-3806(2003)03-0175-03

## 板材激光加热弯曲成型的研究

王 扬 路 华 谭建国

(哈尔滨工业大学机械制造及自动化系, 哈尔滨, 150001)

摘要: 建立了板材激光加热弯曲成型的温度场模型, 利用有限元分析软件 ANSYS 编制了分析激光沿直线扫描板材的仿真软件, 分析计算了板材在不同参数下的变形规律。计算结果表明, 当其它参数不变的情况下, 弯曲角度随着板厚的增加逐渐减少; 随着板宽增加而增加; 随着激光功率增加先增加后减少; 随着光斑直径增大而减小; 随着扫描速度的增加先增大后减小; 板厚或激光扫描速度较大时板材将发生背向激光束方向的弯曲。并从理论上对板材的激光加热弯曲变形规律作了进一步的分析。

关键词: 板材弯曲; 激光加热; 温度场模型; ANSYS 软件

中图分类号: TG665 文献标识码: A

## A study on laser bending of sheet metal

Wang Yang, Lu Hua, Tan Jianguo

(Department of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

**Abstract:** An analytical model to describe the temperature field was established for laser bending of sheet metal. In order to analyze the forming rule of the change to different parameters, a simulation software is programmed on laser scanning sheet metal along the line through the finite element analysis' software ANSYS. The result shows that the bending angle decreases with the increasing thickness of sheet metal, increases with the increasing width of sheet metal, increases first and decreases afterwards with the increasing laser power, focus diameter or scanning speed if others factors remain unchanged. In addition sheet metal will bend deviating from the laser beam if there is a big thickness or a high scanning speed. Finally, the further academic analysis is carried out on the forming rule of laser bending of sheet metal.

**Key words:** sheet bending; laser heating; temperature field; software ANSYS

### 引 言

板材激光加热弯曲成型是近年来提出的一种先进的零件成型方法<sup>[1~3]</sup>。国内外的学者采用了各种各样的手段对该课题进行了研究<sup>[1~5]</sup>。作者采用有限元分析软件 ANSYS 对本课题进行了研究。因计算过程中采用热结耦合的原理, 为保证应力场的精度, 就要保证温度场的模型合理, 鉴于此, 作者建立了温度场数学模型及 ANSYS 的几何和物理模型, 并编制出激光沿直线对板材进行加热弯曲成型的通用程序。利用编制的应用程序对板材激光弯曲成型进行研究, 找到各种因素对板材弯曲的影响规律。经研究发现, 板材不但可产生朝向激光束方向的弯曲, 且通过加大激光的功率和光斑直径, 减小激光的扫描速度及增大板厚可产生背向激光束的弯

曲。

### 1 温度场模型

为了精确的计算加热弯曲角度, 对于某一确定的板材, 首先需要建立足够精确的温度场模型。建立如图 1 所示的激光成型坐标系统。

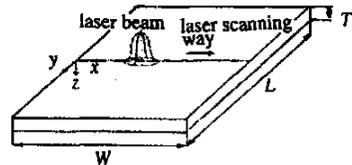


Fig. 1 Laser bending rectangular coordinates

激光的能量服从高斯分布, 并以恒速  $v$  沿  $x$  轴移动。3 维瞬态温度场的热传导公式如下:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中,  $k$ ,  $\rho$  和  $c$  分别指的是材料的热传导率、密度和

作者简介: 王 扬, 男, 1960 年 7 月出生。博士, 教授。现主要从事激光加工技术方面的研究。

收稿日期: 2002-06-04; 收到修改稿日期: 2002-08-26

比热容。

板材经激光扫描后在空气中自然冷却,与周围环境存在着对流和辐射换热,此两类边界条件在传热学中为第II类边界条件,可统一写成下式:

$$q = - \lambda \frac{\partial t}{\partial n} = a(t - t_{\infty}) \quad (2)$$

式中,  $a$  为换热系数,  $t$  为板材表面温度,  $t_{\infty}$  为环境温度。

在 ANSYS 计算中,激光设备施加的热载荷以热流密度的形式给出,激光束在板材表面光斑处的能量密度服从高斯分布,即:

$$I = \frac{2AP}{\pi R^2} \exp\left[-\frac{2r^2}{R^2}\right] \quad (3)$$

式中,  $I$  为激光的热流密度,  $A$  为板材对激光能量的吸收率,  $P$  为激光设备的输出功率,  $R$  为激光束在板材表面的光斑半径,  $r$  为光斑某一点离开光斑中心的距离。

于是,板材上整个光斑的平均热流密度为<sup>[4,6,7]</sup>:

$$I_m = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \frac{2rAP}{\pi R^2} \exp\left[-\frac{2r^2}{R^2}\right] dr = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \frac{2AP}{\pi R^2} r \exp\left[-\frac{2r^2}{R^2}\right] dr = \frac{0.865AP}{\pi R^2} \quad (4)$$

在板材进行激光加热之前,为了提高板材对激光能量的吸收率,需要对板材表面进行黑化处理。根据板材表面的处理情况,选择合适的吸收系数。在进行仿真分析时,取板材对激光能量的吸收系数为 0.5。

## 2 ANSYS 分析

### 2.1 建模

在进行 ANSYS 分析之前,首先要建立几何模型和物理模型。建立几何模型的方法有很多,根据几何模型的复杂程度,可以利用 Pro/e, Ungraphics 和 Ideas 等软件生成,然后通过与 ANSYS 接口导入到 ANSYS 中。如果形状不是很复杂,可以在 ANSYS 中直接生成几何图形。根据研究的需要,假定激光是从长度方向的中点开始沿宽度方向进行扫描的,所以,板材关于激光的扫描轨迹对称。根据对称性原理,板材的温度场和热应力场关于激光的扫描轨迹对称,故选择板材的一半作为研究对象。在建立物理模型时,为了使问题得到简化,特做出如下假设:(1)材料是各向同性的;(2)忽略板材变形过程中发生的蠕变;(3)忽略板材的重力;(4)激光的圆形

光斑按方形加载;(5)用激光光斑的平均热流密度  $I_m$  来代替激光光斑处的热流密度  $I$ ;(6)由于加热的时间比较短,假定加热阶段板材与外界环境处于绝热状态,而冷却阶段板材与外界环境存在着对流和辐射;(7)假定激光束是离散的一步一步的沿着扫描轨迹进行加载的,每一步的时间间隔是  $R/v$ ,其中,  $R$  是激光在板材表面的光斑的半径,  $v$  是激光扫描的速度。由此看出光斑在工步与工步之间的重合度为 50%。

根据上面的假设,建立 ANSYS 分析的物理模型。可以分为 3 种情况,即:加热阶段温度场的物理模型,冷却阶段温度场的物理模型和应力场的物理模型。冷却时与环境接触的面与外界存在对流和辐射。3 种情况的物理模型如图 2 所示。

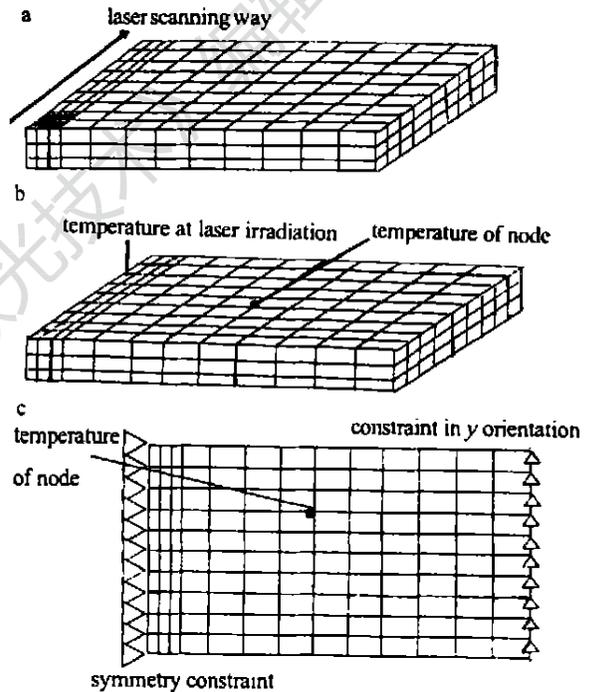


Fig. 2 Physics model of ANSYS

a—physics model of laser heating b—physics model of cooling c—model of stress field

### 2.2 应力场分析

选用材料为 35CrMnSiA,其密度是 8030kg/m<sup>3</sup>,

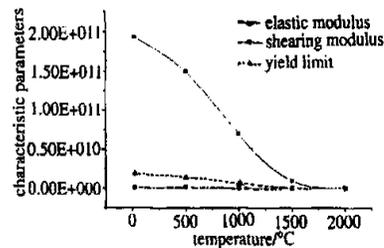


Fig. 3 Curves of material characteristic parameters

比热容是 502J/(kg·K),热传导率为 16.3W

$/(m \cdot K)$ , 热膨胀系数是  $1.78 \times 10^{-5} m/K$ , 泊松比是 0.29, 弹性模量  $E$ , 剪切模量  $G$  和屈服极限  $\sigma_s$  随温度变化曲线如图 3 所示<sup>[6, 8]</sup>。

采用非线性大变形弹塑性有限元方法, 将上面建立的模型输入 ANSYS 中, 首先进行热分析, 然后利用热结耦合, 将热分析的结果转换到结构分析中去, 再进行结构分析, 求出各个节点应力和应变, 最终求出板材的弯曲角度。分析过程采用的屈服准则为 Von Mises, 其表达式如下:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \leq \sigma_s \quad (5)$$

式中,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  分别是板材中受热点在 3 个方向的

主应力, 其中  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ,  $\sigma_{eq}$  是当量应力,  $\sigma_s$  是屈服极限。

### 2.3 分析结果

各参数对弯曲角度的影响趋势如图 4 所示。由计算结果可以看出, 当其它参数不变的情况下, 弯曲角度随着激光功率的增加先增加后减少, 存在使板材弯曲角度最大的最佳激光功率(如图 4a 所示); 随着板厚的增加逐渐减少, 当板厚达到某一值时出现背离激光束的弯曲(如图 4b 所示); 随着光斑直径的增大而越小(如图 4c 所示); 随着扫描速度的增加先增大后减小, 存在使板材弯曲角度最大的最佳扫描速度, 也会出现背向弯曲(如图 4d 所示); 随着板材宽度增加而增加(如图 4e 所示)。

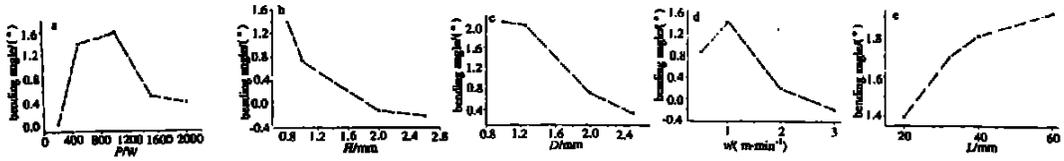


Fig. 4 Influence of parameters on bending angle,  $P$ —laser power,  $W$ —plant width,  $L$ —plant length,  $H$ —plant thickness,  $v$ —laser scanning speeding,  $D$ —laser facula diameter

a— $D = 4mm, L = 40mm, W = 20mm, H = 0.8, v = 1m/min$     b— $P = 500W, D = 4mm, L = 40mm, W = 20mm, v = 1m/min$     c— $P = 200W, L = 40mm, W = 20mm, H = 0.4mm, v = 2m/min$     d— $P = 500W, L = 40mm, W = 20mm, H = 0.8mm, D = 4mm$     e— $P = 500W, D = 4mm, v = 1m/min, L = 40mm, H = 0.8mm$

对于上面的 5 种情况, 可以解释如下。

图 4a 中, 当激光功率低的时候, 板材吸收的能量较少, 激光照射区板材的温度不高, 上下表面的温度梯度较小, 所以板材的弯曲角度不大。随着激光功率的增加, 上表面的温度增加, 上下表面的温度梯度增大, 弯曲角度变大。随着激光功率继续增加, 照射部位的热影响区变大, 从而使沿厚度方向的温度梯度减少, 所以弯曲角度逐渐变小。

图 4b 中, 当板材的厚度增加时, 虽然上下表面的温度梯度加大, 但由于材料内部对变形的约束力变大, 使板材发生朝向激光束的变形减少。随着板材的厚度进一步增加, 因板材内部的约束力更大, 使得加热阶段产生的背向激光束弯曲的塑性变形在板材冷却阶段不能恢复, 从而产生背向激光束的弯曲。

图 4c 中, 当光斑直径增大时, 由于能量的分散, 被照射处温度下降, 上下表面的温度梯度下降, 所以弯曲角度变小。

图 4d 中, 扫描速度过慢, 板材薄, 被照射板材处激光能量过大, 部分能量穿透了板材, 上下表面的温度梯度变小, 所以弯曲角度较小。随着扫描速度增大, 照射板材处的激光能量变小, 不能再穿透板材, 板材上下表面产生的温度梯度增加, 板材弯曲角

度变大。光斑继续增大, 被照射板材处的激光能量继续变小, 上表面的温度下降, 上下表面温度梯度又开始减小, 弯曲角度开始变小。扫描速度继续增大, 被照射处板材塑性变形更小, 相对而言, 板材的约束较大, 加热阶段产生的塑性变形在冷却阶段的不到恢复, 从而产生了背向激光束的弯曲。

图 4e 中, 当激光点对薄板材沿直线进行加热时, 激光照射处将发生塑性变形, 在加热阶段有产生背向激光束弯曲的趋势, 但是由于沿激光扫描方向材料的约束, 将无法背向弯曲, 而是产生了材料的堆积, 在冷却阶段, 堆积的材料进一步收缩, 从而使朝激光束方向弯曲的角度增大。随着板材宽度的增加, 对板材背向激光束弯曲的约束将变得更大, 因此, 弯曲角度将变得更大。



Fig. 5 Simulation of plant bending upwards  
 $P = 200W, D = 1mm, v = 2m/min, L = 40mm, W = 20mm, H = 0.4mm, \text{bending angle } 2.09^\circ$  (下转第 239 页)

过合频所产生的非线性耦合作用导致了光能在各个纵模间不断转换使绿光输出功率波动,即所谓的“绿光问题”;三是由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 的导热性较差,当泵浦功率超过一定值时,可能出现热透镜效应,使绿光输出功率下降;KTP 虽然采用的是位相匹配,但是也受温度影响。故 LD, Nd:YVO<sub>4</sub>, KTP 均应采取严格的温控措施。

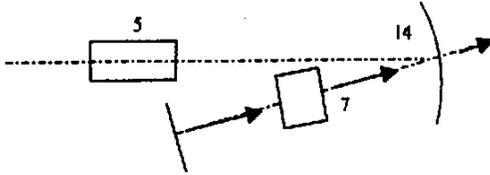


Fig. 9 532nm output of folded cavity

(3) 实验中所用的光纤束输出模块,其缺点是 7 个 LD 的波长不可能完全一致,对效率有影响。实验中也曾用 LD 经过整形后用 900 $\mu$ m 光纤耦合输出模块作为泵浦源。泵浦功率相同时,光纤束作为泵浦源时绿光输出功率较高,说明有一部分用来克服阈值的泵浦光也转换成了激光输出,但由于泵浦光场不均匀,7 个激光器分别在谐振腔内激发出 7 个激光振荡模场,它们通过衍射场耦合实现了相位相互锁定使激光器输出的光强分布呈现对基模的

正弦或余弦函数形式的调制<sup>[2]</sup>;后者虽然泵浦光功率密度有所下降,其效率下降了,但绿光光束质量明显变好。另外,光纤对于泵浦光有退偏作用,选择光纤的长度,可得到某一个偏振方向较强或退偏的泵浦光;可用布儒斯特角放置的波片对三镜折叠腔像散补偿<sup>[3]</sup>。

### 3 结 论

研究了两种腔结构不同的 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 全固化倍频绿光激光器,对腔结构参数进行了优化计算,在相同实验条件下,对这两种腔的输出和稳定性等进行了对比实验,并进行了深入的分析。实验结果说明,折叠腔有利于提高绿光的转换效率和输出稳定性,温控对于绿光输出稳定性有很明显的作用,并在此基础上提出了一些改进措施。折叠腔方案得到了 580mW 的绿光,且输出稳定性(4%)很好,产品的体积大小为 376mm × 218mm × 118mm。

#### 参 考 文 献

- [1] 王占山,檀慧明,余锦. 光学技术, 2001, 27(2): 153~155.
- [2] 刘宁,胡巍,廖常俊 *et al.* 中国激光, 1999, 26(2): 105~108.
- [3] 郑权,赵岭,檀慧明 *et al.* 激光杂志, 2001, 22(2): 6~7.

(上接第 177 页)

但是在计算和做实验时为了得到大的弯曲角度,要综合考虑上面得出的各种规律,同时也要考虑功率过大、板材太薄、扫描速度太小可能造成激光穿透板材。图 5 和图 6 中展示了板材朝两个方向的弯曲情况。



Fig. 6 Simulation of plant bending downwards

$P = 2000\text{W}$ ,  $D = 4\text{mm}$ ,  $v = 3\text{m/min}$ ,  $L = 40\text{mm}$ ,  $W = 20\text{mm}$ ,  $H = 2\text{mm}$ , bending angle  $0.305^\circ$

### 3 结 论

(1) 对于分析所选的材料,影响板材弯曲成型角度的主要几何参数是板厚和板宽。当其它参数不变的情况下,随着板厚的增加逐渐减少。随着板宽增加而增加,但增长的幅度逐渐减小。(2) 对于分析所

选的材料,影响板材弯曲成型角度的主要激光参数是激光功率,光斑直径和扫描速度。当其它参数不变的情况下,弯曲角度随着激光功率增加先增加后减少;随着光斑直径增大而减小;随着扫描速度的增加先增大后减小。(3) 对于分析所选的材料,当其它参数不变的情况下,板厚或激光扫描速度较大时板材将发生背向激光束方向的弯曲。

#### 参 考 文 献

- [1] 季忠,刘韧. 锻压机械, 1996(5): 23~24.
- [2] 王秀凤,王秀彦. 锻压机械, 1999(3): 8~10.
- [3] 李纬民,卢秀春,刘助柏. 中国有色金属学报, 1999, 1(9): 39~44.
- [4] 李纬民. 中国激光, 1998, 9(25): 859~864.
- [5] 季忠,刘庆斌. 航空精密制造技术, 1996, 3(32): 13~15.
- [6] Cheng P J, Lin S C. J Mater Process Technol, 2000, 101: 260~267.
- [7] Cheng P J, Lin S C. J Mater Process Technol, 2001, 108: 314~319.
- [8] Arnet H, Vollertsen F. Proc Instn Mech Engng, 1995, 209: 433~442.