

文章编号: 1001-3806(2006)04-0355-05

## 钢管激光弯曲成形的数值模拟

刘顺洪, 吉巧杰, 扬 晶

(华中科技大学 材料科学与工程学院 国家模具重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 为了研究钢管激光弯曲过程, 采用数值模拟的方法研究了激光弯曲钢管的温度场以及应力应变场的变化特点, 分析了激光弯曲钢管的动态过程, 解释了激光弯曲钢管过程中沿钢管壁厚各点的弹性变形规律。结果表明, 在给定技术参数下, 激光扫描处横截面沿壁厚方向均产生压缩塑性变形, 且下表面的压缩塑性应变比上表面要大, 并解释了其机理。同时研究了激光工艺参数对弯曲成形角的影响, 随着激光功率或激光扫描角度的增加, 弯曲角度增加。

**关键词:** 激光技术; 激光弯曲; 数值模拟; 应力应变

**中图分类号:** TG665 **文献标识码:** A

## Numerical simulation on laser bending of steel tubes

LIU Shun-hong, JI Qiao-jie, YANG Jing

(State Key Laboratory of Plastic Forming Simulation and Die & Mould Technology, School of Material Science & Engineering HUST, Wuhan 430074, China)

**Abstract** In order to explore process of laser bending steel tubes the temperature field and stress strain field are analysed with method of numerical simulation. Dynamic process of laser bending the steel tube is researched. The rule of elastic and plastic distortion at top middle and bottom in tube thickness direction is analyzed. The results show that the compress plastic distortion is produced along tube thickness direction at section of laser scanning and compress plastic distortion of the bottom is greater than that of the top under giving technical parameter. The effect of the laser parameter on the bending angle is researched. The bending angle can be increased along with increasing the laser power or scanning angle.

**Key words** laser technique; laser bending; numerical simulation; stress and strain

### 引 言

近年来, 激光弯曲成形技术得到了很大发展和应用, 它是一种无模成形方法, 是由激光加热导致热应力进行成形的, 因此, 精确控制激光注入能量就可以精确控制成形过程。作者曾报道 VOLLERTSEN 等人提出的激光弯曲板材的 3 种弯曲机理<sup>[1]</sup>, 定义为温度梯度机理、翘曲机理和镦粗机理, 这些机理的划分与激光加热引起的温度分布有关, 可以利用不同的成形机理来进行正弯角、反弯角和镦粗缩短的基本成形。其中镦粗机理适用于型材的成形。最近, 激光弯曲成形的研究从板材延伸到钢管, 国内外不少研究者从事这方面的研究和应用<sup>[2~6]</sup>, 显示出激光弯曲钢管的优点。激光弯曲钢管不需要模具, 因此成本低, 适用于小批量和原型生产, 这对于锅炉、热交换器、发动机和空调器等

需要管件的行业是十分有意义的。

本文中基于镦粗机理使用数值模拟的方法进行了激光弯曲钢管的热分析、应力应变分析以及激光工艺参数对弯曲成形角影响规律的分析。并解释了激光弯曲钢管的动态过程以及弯曲机理。

### 1 计算模型

#### 1.1 物理模型

激光弯曲钢管的机理见文献 [3]。建立如图 1 所

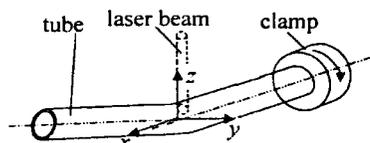


Fig 1 Sketch map of laser bending steel tubes

示坐标系。钢管激光弯曲物理过程描述如下: 金属管的一端置于工作台的三脚卡盘中, 高功率激光束以恒定功率  $P$  照射到待金属管表面, 三脚卡盘以恒定的线速度  $v$  绕  $x$  轴转动, 在此过程中, 被照射的各区域依次经历加热和冷却过程, 在其内部产生相应的应力及变形。数学模型见文献 [1]。

**作者简介:** 刘顺洪 (1954-), 男, 硕士, 教授, 主要从事焊接力学行为、材料激光加工以及计算机在材料加工中的应用的教学和科研工作。

E-mail: liushunhong@public.wh.hb.cn

收稿日期: 2005-06-08 收到修改稿日期: 2005-09-16

## 1.2 数学模型

激光加热温度场数学模型为非线性瞬态热传导问题的场变量  $T(x, y, z, t)$  在直角坐标系中应满足的微分方程是:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \kappa_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{Q} = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{在 } \Omega \text{ 域内}) \quad (1)$$

式中,  $\rho$  是材料的密度,  $c$  是材料的比热容,  $\kappa_x, \kappa_y, \kappa_z$  是材料的热传导系数,  $\bar{Q}$  是材料的内热源强度。定解条件见文献 [1]。

激光加热应力应变场的数学模型取非耦合的温度场和应力场模型, 最后计算公式为:

$$\{d\sigma\} = [D] \{d\varepsilon\} - \{c\} dT \quad (2)$$

式中,  $\{d\sigma\}$  是应力增量矩阵,  $\{d\varepsilon\}$  是应变增量矩阵,  $\{c\}$  是与温度相关的比热容矩阵,  $[D]$  是与温度相关的弹塑性系数矩阵。弯曲角度与工艺参数之间的关系计算方法见参考文献 [3]。

## 1.3 网格划分及物性参数

金属管在实体建模时简化为一个圆筒体。为了便于光斑区域的选取以及网格密度的控制, 将该圆筒体划分成 12 个体 (见图 2)。

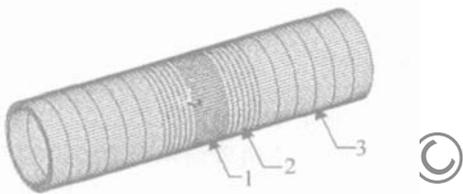


Fig 2 Sketch map of the grid

由于激光束扫描线及其附近的区域温度梯度很大, 由此引起的应力应变的变化也很大, 因此, 为了获得高的计算精度, 需要在该区域加密网格, 而在远离扫描轨迹的区域可以划分成较为粗大的网格。采用金属管的壁厚尺寸来控制网格密度。网格划分见图 2。为了实现这种网格划分方式, 实体建模时将模型分为 12 个体, 在整个金属管的壁厚方向上分成 2 层网格, 其单元数为 6336 个, 节点数为 9768 个。

选取低碳钢 Q235B 作为分析材料, 熔点为  $1468^{\circ}\text{C}$ 。其中密度受温度影响较小, 取常值  $7680 \text{ kg/m}^3$ , 热物理参数取自参考文献 [7]。

## 1.4 激光弯曲模型几何和工艺参数

几何尺寸:  $60\text{mm}$  (管长)  $\times 15\text{mm}$  (外径)  $\times (0.5 \sim 2.5)\text{mm}$  (壁厚  $X$ ); 激光功率  $P$ :  $600\text{W} \sim 1300\text{W}$ ; 扫描速度  $v$ :  $15\text{mm/s} \sim 50\text{mm/s}$ ; 光斑尺寸  $D$ :  $2.5\text{mm} \times 2.5\text{mm} \sim 6\text{mm} \times 6\text{mm}$ ; 扫描角度  $\theta$ :  $90^{\circ} \sim 360^{\circ}$ ; 扫描次数  $n$ : 1 次  $\sim 5$  次。

## 1.5 激光弯曲温度场的计算模型及相关技术处理

激光成形过程中, 热过程贯穿整个成形过程的始

终, 物理化学过程都是在热过程中发生和发展的, 准确地了解热过程是进行后续应力应变场分析、组织分析以及成形过程控制的前提。

(1) 热源的加载。激光弯曲成形过程中, 不均匀加热所形成的局部高温使得局部热应力超过屈服应力, 由此导致的压缩塑性变形是薄壁金属管弯曲变形的根本原因。因此, 研究光斑及其邻近区域的温度、应力应变场的变化是有意义的。热源模型的选取对该区域温度场以及应力应变场的模拟尤为重要。在热源热输入的分析中, 高斯分布热源、均匀分布热源和等效矩形热源是几种常用的模型<sup>[8-11]</sup>。高斯分布热源模型输入的热流密度  $I$  呈高斯函数分布, 其数学表达式为  $I = 2\beta P \exp(-2r^2/R^2) / (\pi R^2)$ , 其中,  $I$  为激光的热流密度;  $\beta$  为材料对激光能量的吸收率;  $P$  为激光器的输出功率;  $R$  为光束直径,  $r$  为考察点至光束中心的距离。高斯热源模型需要在空间上将光斑及附近区域的网格划分得很细, 在时间上也要很多时间步进行迭代计算, 因此计算量比较大。均匀热源输入的热流密度在光斑直径范围内均匀分布, 其数学表达式为  $I = \beta P / A$ , 其中  $A$  为激光光斑面积, 等效矩形热源是能量在相同光斑直径下等效矩形面积内均匀分布。热源模型均通过数学表达式来描述热源的分布, 改变模型中的各变量就可以相应地调整热源分布区域和密度。

一般情况下, 激光光斑呈圆形, 其能量密度服从高斯分布。在模拟计算中, 选用等效矩形热源模型, 激光器施加的热载荷以热流密度的形式给出。由于光斑呈运动状态, 该边界热流的作用位置随时间不同而不断变化, 在求解的时候需要确定每时刻的载荷的位置和大小, 载荷移动到下一个载荷步的时候, 上一个载荷步的载荷要去掉, 本文中是用对流边界条件把上一个载荷步中施加的热流密度覆盖。如果网格划分足够密, 载荷步之间的跳跃步距很小, “移动载荷”就会连续。取光束每次向前跳动  $1/6$  光斑边长 (等于壁厚的大小)。故一个载荷步对金属管上质点的作用时间  $t$  是激光束沿扫描路径移动  $1/6$  光斑边长所需要的时间:  $t = D/6v$ , 其中  $D$  为光斑边长尺寸,  $v$  为扫描速度。

(2) 边界条件的处理。热传导方程只有加上合适的边界条件和初始条件才是一个定解方程, 设整个工件的初始温度为室温  $20^{\circ}\text{C}$ 。热载荷以热流密度的形式施加于光斑区域, 薄壁金属管对激光能量的吸收率取 0.6 在激光扫描工件时对流系数取  $10 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ , 忽略辐射换热损失。当扫描以后, 为迅速降温, 采用水冷方式, 取对流系数为  $150 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

(3) 时间步长的选取。激光加热是一个能量高速注入的过程, 在激光扫描中, 光斑扫描区域的材料温度急剧升高, 而在已扫描过的区域, 材料温度却急剧降

低。因此,在激光扫描阶段计算时间步长必须划分得足够细小,才能求得精确的结果。扫描结束后,材料主要通过热传导方式进行散热,与激光加热时相比,温度变化显著减慢,可以采用变步长的方法,逐步增大时间步长,以节省运算时间。

应力应变场分析是基于温度场的分析结果,从本质上来说,两者之间存在一定的耦合作用,但是研究表明,二者之间的耦合作用很微弱,因此,采用非耦合算法,即只考虑温度场对应力应变场的作用,而不考虑应力应变场对温度场的作用。计算流程是:首先进行热分析,求得温度场分布,然后将热单元转换为结构单元,同时设置结构分析中的材料属性,再读入相应时刻热分析的节点温度,将求得的节点温度作为体载荷施加在结构应力分析中,同时设置时间步选项并求解。

## 2 热过程分析

### 2.1 金属管壁厚方向上的温度分布

图 3 所示为  $t = 0.8\text{s}$  时激光光斑中心壁厚方向上

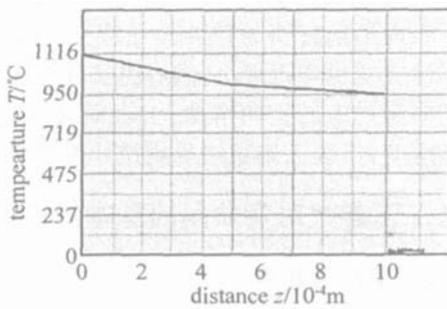


Fig 3 The temperature grades of the tube wall direction  
 $P = 800\text{W}$ ,  $v = 15\text{mm/s}$ ,  $\theta = 180^\circ$ ,  $n = 1$

的温度分布。可见,在给定的光斑尺寸为  $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ ,壁厚为  $1\text{mm}$  的工艺参数下,壁厚方向温度下降梯度比较小,上下温差为  $233^\circ\text{C}$ 。满足激光弯曲的墩粗机理的条件。沿的温度梯度高达  $182^\circ\text{C}/\text{mm}$ ,并且在  $8\text{mm}$  范围内温度从最高值下降到室温,光斑后部温度下降梯度最大达到  $95^\circ\text{C}/\text{mm}$ ,其值随着离光斑距离的增大而逐渐减小。

### 2.2 热循环曲线

多次扫描主要有两种方式,一种是多次连续扫描;

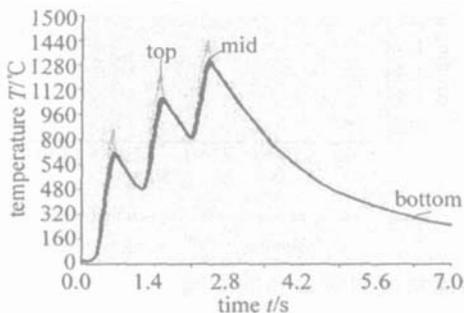


Fig 4 Heat circle curve in laser bending the tubes  
 $P = 700\text{W}$ ,  $v = 20\text{mm/s}$ ,  $\theta = 180^\circ$ ,  $n = 3$

另一种是扫描一次后冷却至室温,再进行下一次激光扫描。图 4 为第 1 种扫描方式下,沿着壁厚方向上、中、下 3 点的热循环曲线。由图可见,出现了 3 个峰值温度,并且随着扫描次数的增加,峰值温度向上递增,3 次扫描上下表面最大温差分别为  $193.5^\circ\text{C}$ ,  $203.1^\circ\text{C}$ ,  $180.6^\circ\text{C}$ ,差异不大。

而在第 2 种扫描方式下,两次扫描所引起的热循环曲线是相同的。

## 3 钢管激光弯曲过程应力应变分析

### 3.1 钢管激光弯曲的动态变化过程

选取扫描角等于  $180^\circ$  为例来研究金属管激光弯曲成形的动态变化过程。图 5 为各个时刻纵剖面的弯

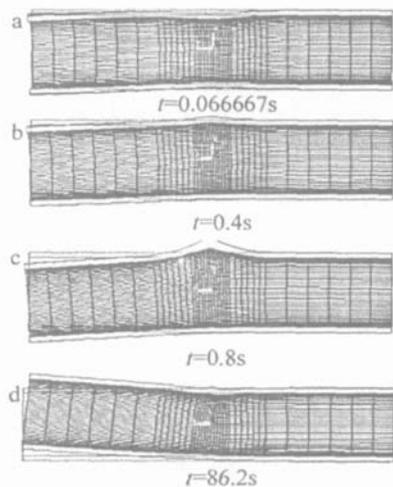


Fig 5 Dynamic process of laser bending tube

曲变形图,纵剖面位置距离开始扫描点  $90^\circ$  即位于整个扫描路径的中央。扫描开始时,光斑区域被瞬间加热至高温状态,使激光作用区的金属产生强烈的体积膨胀,其膨胀量的大小取决于加热温度。金属体积的增加受到加热区周围低温区的阻碍,产生塑性压缩,造成材料堆积使管壁增厚。因为管材弯曲成形时,在加热区域形成周向压应力,周向压应力的水平分量导致材料墩粗,垂直分量导致加热区域向上凸起。因此,宏观上表现为光斑区迅速向外凸出,金属管产生背离激光束的反向弯曲。而在光斑区域周围的材料承受拉应力,宏观上表现为往里凹(见图 5a)。随着扫描过程的进行,金属管的反向弯曲角越来越大(见图 5b),当光斑移动到该剖面的正上方,光斑区域的材料向外凸出,同时壁厚出现了墩粗的现象,反向弯曲角最大(见图 5c)。在冷却过程中,激光照射区域恢复弹性,金属管产生回弹,扫描线上的材料明显向外凸出。扫描线上堆积的材料难以复原,因而扫描区域材料在轴向上产生缩短,导致了钢管面向激光束的正向弯曲(见图 5d),由于这种变化实现了钢管的弯曲。图 6 是扫描

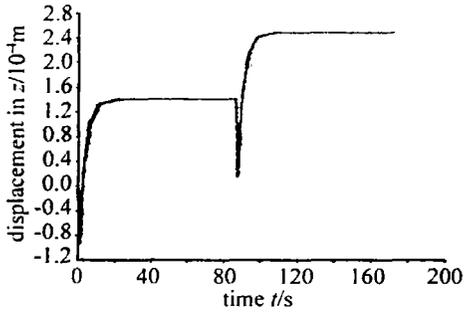


Fig 6 The displacement of z direction in freeness end  
 $P = 800W, v = 15mm/s, \theta = 180^\circ, n = 2$

两次的情况下,金属管自由端 z 方向位移随时间的变化曲线。清楚地显示了金属管在两次扫描的情况下,第 1 次加热阶段的反向弯曲到冷却阶段的正向弯曲,第 2 次加热阶段的反向弯曲到冷却阶段的正向弯曲直至最终成形的演变过程。很好地解释了多次扫描方式下累积成形的过程。

### 3 2 成形过程中弹塑性应变变化规律

激光弯曲过程中产生的应变是由弹性应变、塑性应变以及热应变组成的,下面分别给出弹性应变和塑性应变的变化过程。

#### 3 2 1 成形过程中塑性应变 $\xi_p$ 的演变过程 图 7 所

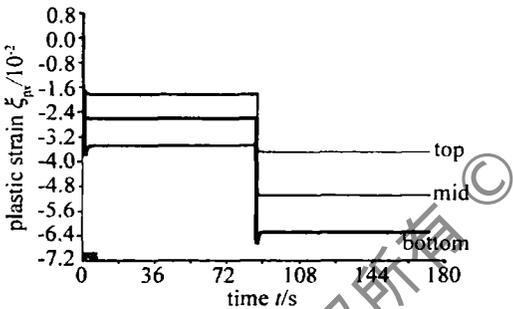


Fig 7 Change of residual plastic strain with time in the tube section  
 $P = 800W, v = 15mm/s, \theta = 180^\circ, n = 2$

示为扫描线横截面壁厚方向上、中、下 3 点  $\xi_p$  在扫描两次的情况下随时间的变化过程,当激光光斑移动到考察点上方时,上、中、下 3 层面都迅速出现压缩塑性变形,而且是下表面的压缩塑性变形最大,中间层的压缩塑性变形居中,上表面的压缩塑性变形最小,最大压缩塑变的时间点与达到最高温度的时间点一致。在冷却阶段,压缩塑性变形有一点下降随后保持不变。而后在第 2 次扫描中,出现了与第 1 次相同的现象。

下面分析为什么上层的压缩塑性应变反而没有下层的压缩塑性应变大的现象。金属管在承受机械力弯曲的情况下,在壁厚方向上上表面的拉伸塑性变形比下表面的拉伸塑性变形大。在光斑尺寸远大于壁厚的情况下,金属管的上下表面的温差相差不大,其结果就是在激光照射区,上下层面的膨胀变形量大体相等或者上层比下层稍大。那么在激光弯曲成形的情况下,如前所述,上层比下层有更大的拉伸量,造成了上层的

压缩塑性应变没有下层的压缩塑性应变大。关于这一现象,和温度梯度机理下的激光弯曲成形是不一样的。在温度梯度机理下是上表面出现压缩塑性变形,下表面出现拉伸塑性变形<sup>[12]</sup>。

#### 3 2 2 成形过程中弹性应变 $\xi_e$ 的演变过程 图 8 是

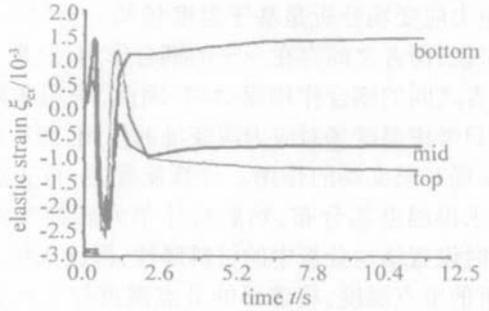


Fig 8 Change of residual elastic strain with time in the tube section  
 $P = 800W, v = 15mm/s, \theta = 180^\circ, n = 2$

弹性应变  $\xi_e$  的变化过程。当光束扫描接近到该点时,光点加热膨胀使该点受到拉伸弹性应变,当光束到达该点时,受热膨胀使上表面、中间、下表面迅速达到最大的压缩弹性应变;当光斑越过此点后,温度下降收缩,上、下表面迅速转变为拉伸弹性应变,中间层面上的压缩弹性应变也变得很小,然后由于散热冷却,金属管产生朝向激光束的正向弯曲,上表面又快速转变为压缩弹性应变,下表面则始终受到拉伸弹性应变。

## 4 激光工艺参数对弯曲角的基本规律

### 4 1 激光功率对弯曲角的影响

在激光功率不超过 1400W (当功率大于 1400W 时,最高温度将达到熔点)时,金属管的弯曲角度随着激光功率的增加近似呈线性的增加(见图 9)。由温度场结果可知,随着激光功率的增加,金属管上下表面的温度近似线性增加,在壁厚方向产生的温度梯度变化不大的情况下。导致激光光斑照射区域材料的膨胀量增加,扫描线区域的材料产生的压缩塑性应变增大。结果与文献 [3] 中的趋势一致。

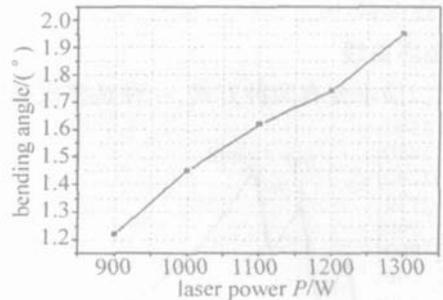


Fig 9 Effect of laser power on bending angle  
 $v = 20mm/s, \theta = 90^\circ, n = 1$

### 4 2 扫描角度对弯曲角的影响

在扫描角度小于 180° 的情况下,随着扫描角度的增加,金属管的弯曲角随之增加(见图 10)。扫描角度

