

金属板材激光弯曲成形规律的研究*

李纬民

(燕山大学机械工程学院锻压所 秦皇岛 066004)

Manfred Geiger Frank Vollertsen

(德国 Erlangen-Nuerberg 大学)

提要 用大变形弹塑性有限元法对金属板材柔性成形新工艺——激光弯曲进行了动态数值模拟。论证了板料的几何参数和工艺参数与变形的相互关系。模拟结果与试验吻合较好。

关键词 激光弯曲, 柔性成形, 数值模拟

1 引 言

金属板材的弯曲成形是实际生产中最常见的工艺方法之一,通常需借助于模具来完成。但模具的设计加工周期长、制造费用高,对于某些形状复杂、精度要求高且生产批量不很大的产品,既不经济,又难以保证成形质量和工期。激光弯曲是国外近年来提出的一种新的金属板材柔性成形方法^[1,2],其特点是:无需专用模具、无需任何形式的成形外力,仅靠激光设备对工件的不均匀加热,在变形区引起超过屈服极限的内应力,使之产生所需的弯曲变形。对于这种成形方法的研究,国内尚属空白,国外也还是停留在定性的模拟试验上^[2]。关于其成形过程中的各种影响因素,还缺少理论分析和定量描述。本文采用大变形弹塑性有限元法,对该工艺成形过程中的变形规律及各种影响因素进行了数值模拟,可为实际应用时的工艺参数选择提供理论依据。

2 激光弯曲的基本原理

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。如果加热的不均匀性足以使其引起的热应力超过材料相应温度下的屈服极限,则会在材料内部产生塑性变形。板料的激光弯曲实质上是基于材料的热胀冷缩特性、以高能激光为热源的一种热应力塑性成形方法。其具体工艺原理是:用高度聚焦的激光束照射待成形板材的表面,并以确定的速度沿预定的弯曲线移动。在此过程中,被照射的各部位依次经历加热和冷却两个换热过程,在其内部产生相应的应力及变形。

2.1 加热过程

能量密度很高的激光束照射在待弯曲的板料上,如图 1(a),使得被照射部位上表面的温度在极短时间内(通常小于 0.1 s)急剧上升;而远离上表面处的材料,由于没有直接受到照射,

* 国家教委留学人员资助项目。

其温度在这一短暂的时间内无明显变化,从而使被照射部位沿板厚方向形成较大的温度梯度。板材上表面材料的膨胀量远远大于下表面,使板料朝光源相反的方向弯曲,称为反向弯曲,如图 1(b) 所示。根据数值模拟计算的结果,在此过程中沿板厚方向产生的热应力模型如图 1(c)。板材的上、下表面附近产生压缩应力,中间部位产生拉伸应力。由于上表面处材料的温度很高,故其热膨胀量大而屈服极限低,因而在此不均匀温度场产生的压应力的作用下,该处产生较大的塑性变形,形成材料堆积。下层材料的温度低,屈服极限高,基本不产生或只产生很小的压缩塑性变形,这要视具体的工艺参数而定。

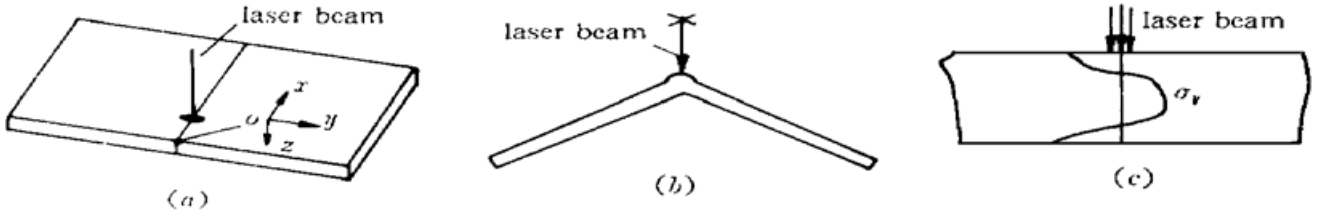


图 1 加热过程

(a) 激光弯曲工艺原理; (b) 反向弯曲; (c) 应力模型

Fig. 1 Heating process

(a) principle of laser bending; (b) counter bending; (c) model of stress

2.2 冷却过程

所谓冷却,是指光源离开后被照射部位通过热传导进行的自然散热过程。当激光束离开后,上表面处于高温区材料的热量迅速向其它各方向传导,以达到热平衡状态。此过程中,上表面附近材料的温度很快降低而下表面处的温度还要继续升高一段时间。反映在变形上,上表面的材料已开始冷缩的最初一段时间,下表面处的材料还要继续热胀。此时的应力模型如图 2(a) 所示,在上、下表面附近均产生拉伸应力,中间部位产生压缩应力,与加热过程相反。上表面处温度降低产生的热学效应(冷缩) 大于温度应力产生的力学效应(拉伸应变),使材料在板料长度方向缩短。下表面处材料温度的上升及在其内部产生的拉伸应力均使材料纤维伸长。随着冷却过程的继续,加热过程中产生的反向弯曲逐渐减小,当冷却到上下表面材料的温度趋于一致时,板料产生一个朝向激光源方向的弯曲角,如图 2(b) 所示。当激光束将板料沿弯曲线全部照射一次后,完成了一个加热冷却工作循环。图 2(c) 给出了料宽为 20 mm,料厚为 2 mm 的板料在一个工作循环过程中的变形规律,所用激光功率为 1000 W,光束与工件间的相对运动

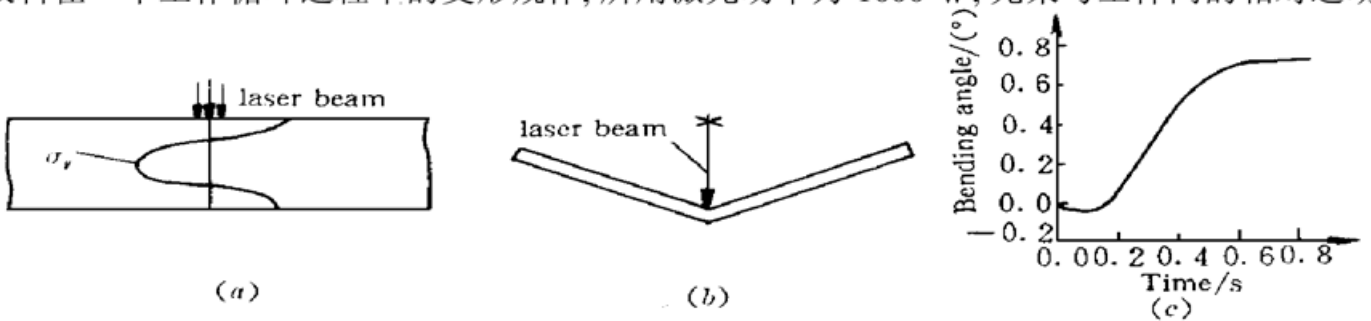


图 2 冷却过程

(a) 应力模型; (b) 正向弯曲变形; (c) 弯曲变形过程

Fig. 2 Cooling process

(a) model of stress; (b) bending deformation; (c) process of laser bending

速度为 2.4 m/min, 其结果与相应条件下的实测曲线^[2]一致。

3 材料性能及工艺参数

3.1 材料性能参数

板料的激光弯曲实质上是一个换能和塑性成形交互作用的复杂过程, 温度变化很大, 模拟计算中所需的许多热学、力学性能参数诸如热膨胀系数、密度、热传导系数、弹性模量、屈服极限等都和温度有关, 材料性能的这种温度依赖关系对模拟计算的结果影响很大。本文模拟计算和试验所用材料为 ST 1403(德国标准), 其相应的热学、力学性能参数与温度间的关系取自文献[3]。

3.2 工艺参数

激光弯曲过程中, 温度的高低、温度梯度的大小取决于板材表面吸收的热流密度和加热时间。

1) 热流密度 在模拟计算中, 激光设备施加的热载荷以热流密度的形式给出, 其在光束截面上的能量密度服从高斯分布, 即

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

式中 I 为激光的热流密度; A 为板料对激光能量的吸收率; P 为激光设备的输出功率; r_b 为激光束在与板料接触处的半径; r 为离开光束中心的距离。

于是, 板料上在光束直径范围内的平均热流密度为

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

2) 加热时间 各质点加热时间 t 和工件与激光束间的相对运动速度 v 及光束半径 r_b 有关:

$$t = 2r_b/v \quad (3)$$

本文模拟试验采用功率 $P = 1000 \text{ W}$ 的 CO_2 激光器, 模拟计算的功率参数与模拟试验一致。结合模拟试验时试件的表面处理情况, 模拟计算中, 取 $A = 0.4$ 。

4 计算模型

采用 4 节点四边形板壳单元, 在板厚方向取 7 个积分点。坐标系选择见图 1(a), o 点为坐标原点。图 3 给出了板料宽度为 12 mm, 长度为 40 mm 的有限元网格划分简图。由于变形在长度方向的对称性, 仅取其长度方向的二分之一进行分析。

5 计算结果的讨论

5.1 温度场

图 4 中 a 为加热冷却循环过程中 z 轴(厚度方向)上各点的温度分布及变化情况。图中的虚线 $a-a$ 是加热与冷却的分界线。可见, 随着加热的不断进行, 上下表面间的温度差值越来越大, 加热结束时, 温差高达 1200℃左右。在加热结束后的冷却过程中, 上表层附近材料的温度

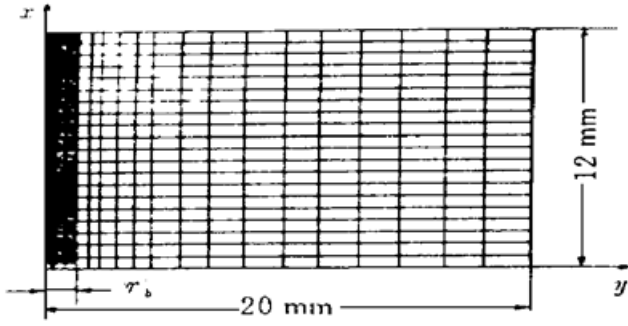


图3 模型的离散化
Fig. 3 Discretization of model

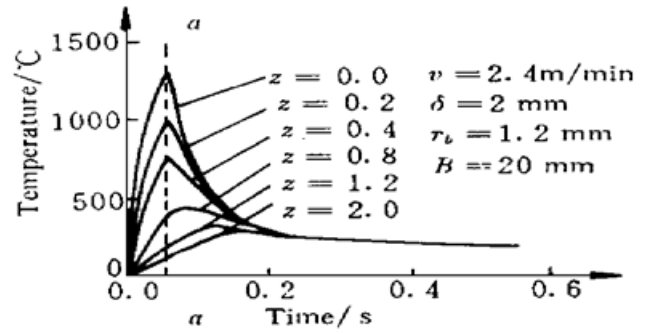


图4 温度分布及随时间的变化规律
Fig. 4 Temperature distribution and its change versus time

急剧降低,而板厚中下层的材料由于上表层高温区传递的热量,温度继续升高一段时间后,才开始降低。到 0.25 s 以后,上下表层温度趋于一致。随着激光束与工件间的相互运动,弯曲线各质点的温度依次经历这种变化。 δ, B 分别为板料的厚度与宽度。

5.2 工艺参数对弯曲变形的影响

影响弯曲变形程度的计算参数是激光束对板材弯曲线各质点的加热时间 t 和热流密度 I 。在实现具体工艺时,上述两个计算参数由激光设备的功率 P ,光束在板材上的半径 r_b 和激光光束沿板材弯曲线的运动速度 v 决定。实际生产时,设备功率只能局限在有限几种,故不同的热流密度主要靠调整焦点位置——透镜焦点与板料上表面间的距离 l 来实现。

5.2.1 焦点位置的影响

图 5 (a) 给出了不同的透镜焦点位置对弯曲变形的影响。可以看出,随着 l 的增加,板料一个工作循环后所得到的弯曲角减小。其原因可从以下两个方面来分析:焦点距板材的距离越远,光束在板材表面上的半径 r_b 也就越大,在激光设备的输出功率一定的条件下,热流密度也就越小;另一方面,在光束运动速度 v 一定的条件下, l 的增加又使得每个质点加热的时间变长。这两个因素对板材被加热部位的温度有很大的影响,如图 5(b) 所示。增加 l ,使板材上表面的温度降低幅度较大,但对下表面的温度几乎没有什么影响,故而上下表面的温度梯度大大降

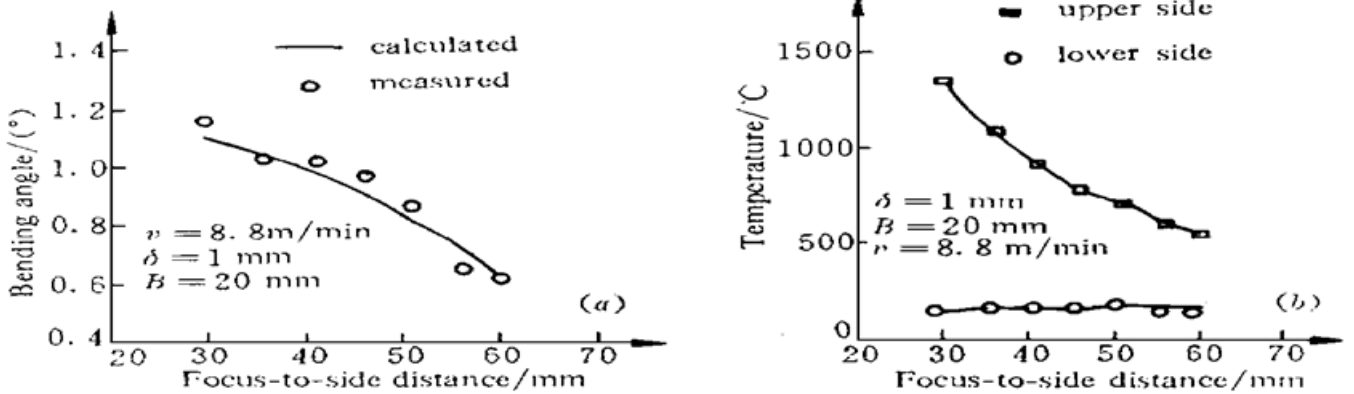


图5 焦点位置的影响
(a) 对弯曲变形的影响; (b) 对温度梯度的影响

Fig. 5 Influence of the focus-to-side distance
(a) distance influence on the bending angle; (b) influence on the temperature gradient

低, 温度应力以及由此引起的弯曲变形减小。

5.2.2 激光束移动速度 v 的影响

工件与激光束间的相对运动速度 v 是一个很重要的工艺参数, 它直接影响板材质点的加热时间。图 6 给出了其它各参数一定的条件下, 相对运动速度对弯曲变形的影响。随着 v 的增加, 由式(2) 可知, 每个质点加热的时间线性减小, 使得板材上下表面的温度和温度梯度均减小, 这一点可从图 4 中看出。在加热结束前(以虚线 $a-a$ 为分界) 的任一时间, 均代表一定的运动速度, 时间越短, 加热速度越快, 温度及温度梯度就越低, 弯曲变形也就越小。

5.3 几何参数的影响

影响最终变形结果的几何参数主要是板料的宽度和厚度。

图 6 给出了板料宽度对弯曲变形的影响。随着板料宽度的增加, 一个工作循环后, 弯曲变形也增大。图 7 是弯曲角随板料厚度的变化规律, 板料增厚, 一个工作循环所得到的弯曲变形减小。

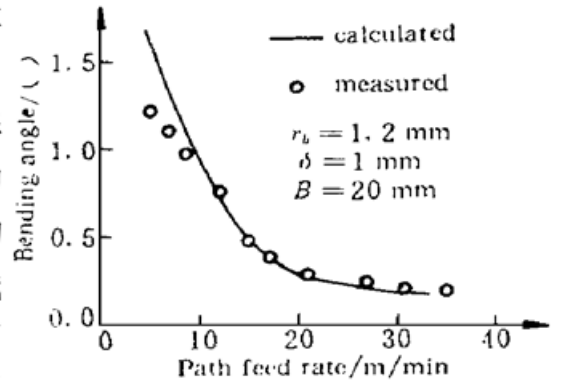


图 6 光束移动速度对弯曲变形的影响
Fig. 6 Influence of moving speed of the light beam on the bending deformation

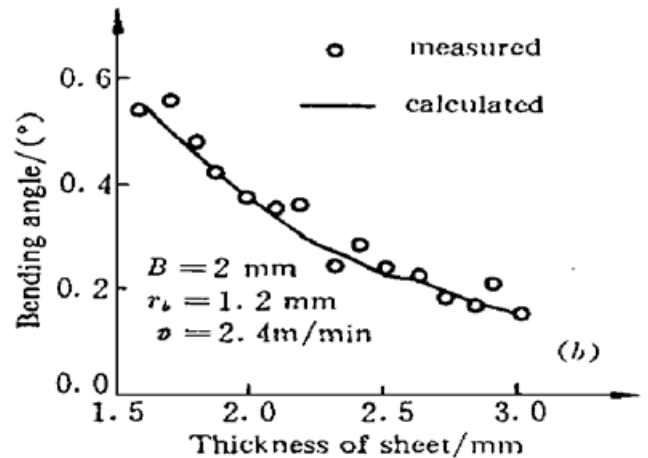
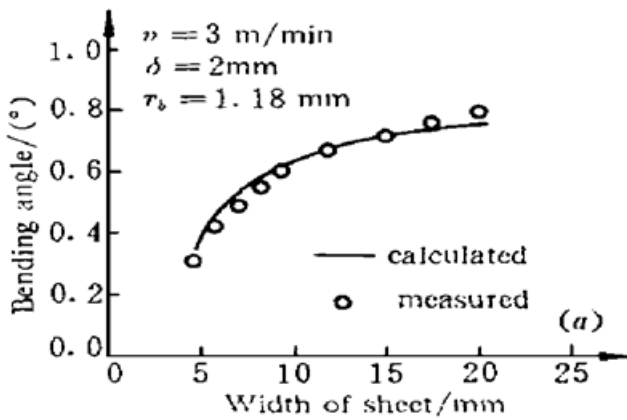


图 7 几何参数对弯曲变形的影响
(a) 板料宽度的影响; (b) 板料厚度的影响

Fig. 7 Influence of geometric parameters on the bending angle
(a) influence of width; (b) influence of thickness

除了上述工艺参数和工件几何参数的影响以外, 材料的热学、力学性能对弯曲变形也有很大的影响。屈服极限低、弹性模量小、硬化指数低的材料, 容易产生大的弯曲变形; 热膨胀系数大的材料, 在同样的温度梯度条件下, 产生的温度应力也大, 也可获得大的弯曲角; 另外, 如果材料的热传导系数大, 同样工艺条件下, 板料上下表面间的温度梯度小, 得到的弯曲变形也小。

6 结 论

激光弯曲工艺是一种不需模具、不需施加外载荷的柔性成形方法, 特别适用于形状复杂、

批量小的弯曲件。该工艺对于降低加工成本、加速产品的更新换代周期,具有一定的意义。通过本文的模拟计算,可以得出如下结论:

1) 影响激光弯曲变形大小的主要工艺参数是热流密度和加热时间。对于输出功率一定的激光设备,可通过调节透镜焦点与板料表面的距离改变热流密度;加热时间则取决于相对运动速度和光束在板材表面上的直径;

2) 在板料上表面不熔化的前提条件下,透镜焦点与板料表面的距离越小,相对运动速度越低,一个加热冷却工作循环所得到的弯曲角度越大;

3) 板料宽度越大,厚度越小,一个工作循环所得到的弯曲角度越大;

4) 相同工艺参数、几何参数下的弯曲角的大小,与具体的材料性能有关。

参 考 文 献

- 1 Frackiewicz, H., Kalita, W., Mucha, Z. *et al.*. Laserformgebung der Bleche. *VDI-Berichte*, 1990, **867**: 317~ 328
- 2 Manfred Geiger, F. Vollertsen, S. Amon. Flexible Blechumformung mit Laserstrahlung-Laserstrahlbiegen. *Blech Rohre Profile*, 1991, **38**(11): 856~ 861
- 3 F. Vollertsen, M. Geiger, Li Weimin. FDM- and FEM-simulation of Laser forming: a comparative study. *Advanced Technology of plasticity(4th ICTP)*, Vol. 7, Beijing, China, 1993. 1793~ 1798

Study on Laser Bending of Metal Sheets

Li Weimin

(*Yanshan University, Qinhuangdao 066004*)

Manfred Geiger Frank Vollertsen

(*Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nuerberg*)

Abstract A new metal sheets flexible forming technique——laser bending process has been numerically simulated by using the finite element method of large elastic-plastic deformation. Relationship between the bending angle and geometry of sheets and technological parameters is discussed. It is shown that the calculated values are in good accordance with the experiments.

Key words laser bending, flexible forming, numerical simulation