

文章编号: 0258-7025(2001)10-0953-04

板料激光弯曲成形数值模拟*

季 忠

吴诗惇

(山东大学(南区)材料科学与工程学院 济南 250061) (西北工业大学材料科学与工程学院 西安 710072)

摘要 采用准静态非耦合模型,对激光束扫描板料表面时形成的三维瞬态温度场进行了有限元模拟,并将温度载荷转化为节点力,进一步完成了三维热弹塑性形变场的模拟。通过对温度、位移、应力分布的动态演示,定量地分析了板料激光弯曲的变形机理。

关键词 板料,激光弯曲,数值模拟

中图分类号 TG 665 文献标识码 A

FEM Simulation on Laser Bending of Sheet Metal

Ji Zhong¹ WU Shi-chun²

(¹Shandong University, Jinan 250061
²Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract Based on the quasi-static and non-coupling models, the FEM simulation on three dimensional transient temperature field of laser-heating sheet metal is conducted, the temperature load is then converted to the nodal force, and the 3D thermal-elasto-plastic stress/strain fields are obtained. The main results show the forming mechanisms clearly.

Key words sheet metal, laser bending, FEM simulation

1 引 言

板料激光弯曲成形是近年来出现的一种高效、柔性、洁净的无模无外力成形方法^[1],它通过高能激光束对板料的扫描,使变形区产生超过材料屈服极限的内应力,从而导致所需的变形。在板料激光弯曲成形过程中,热源呈移动态,板料上的温度场随时空域变化剧烈,应力增长区与应力衰减区并存且不断变化,并可能发生卸载再屈服现象,其成形机理非常复杂。但经分析发现,变形时产生的热量可以忽略不计,相关的材料粘性和耦合影响不会显著,常用材料动力项的影响比耦合项小得多^[2]。因此,为了数学上的简化和工程应用,采用准静态非耦合模型,将动态的热弹粘塑性问题简化为热弹塑性问题,并进一步分为两个阶段来求解:第一阶段,将物体视为刚体,在给定的边界条件和初始

条件下求解热传导方程,得到板料激光加热时的三维瞬态温度场,第二阶段是在给定物体温度场的基础上,将温度载荷化为节点力,并按给定的初始条件和力学边界条件求解三维热弹塑性运动方程,得到位移场,然后再由温度场和热位移场,根据应力应变和温度关系的本构方程,求出热应力场,由此完成整个激光弯曲成形过程的数值模拟。

2 温度场的数值模拟

2.1 基本方程及关键问题的处理

在直角坐标系中,由沿 x 方向移动的点热源引起的固体中的能量平衡方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + v \rho c \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \text{Source} \quad (1)$$

式中,温度场 T ($^{\circ}\text{C}$) 为空间坐标及时间 t (s) 的函数, x, y, z 分别表示板料的长、宽及厚度方向, ρ (g/mm^3), c ($\text{J}/\text{g}^{\circ}\text{C}$) 分别为材料的密度和比热, k_x ($\text{W}/\text{mm}^{\circ}\text{C}$) 分

* 国家自然科学基金(19872055)及中国博士后科学基金资助课题。

别为三个轴向的热传导系数, v (mm/s) 为热源移动速度, Source (J/mm^3) 为单位体积的内部热生成量。忽略热源引起的对流项, 不计内部热源, 并假定材料呈各向同性 (1) 式可简化为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

设 T_0 为环境温度, 则温度场的初始条件可表示为

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (3)$$

在光斑区域, 光束能量作为一外加热流矢量输入

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = -\beta \frac{P}{A} = q \quad (4)$$

式中, β 为材料的热吸收率, P (W) 为激光束功率, A (mm^2) 为光斑面积。

由于方程 (2) 中忽略了速度敏感的对流项, 为方便起见, 在计算中认为光斑沿扫描方向每次跳跃一个单元的距离 dx 并滞留 dt 时间, 并保证 dx/dt 与光束扫描速度等值, 而光束能量则通过一系列热流时间函数将其作为边界条件引入。热流时间函数的数目取决于 dx 和扫描轨迹的长度, 不同的热流函数对应着不同的作用时间, 同时对应着不同的作用位置。当单元划分得足够细小以保证 dx 足够小时, 这种小步距间歇跳跃式移动是可以代替激光束连续扫描的。

式 (1) ~ (4) 构成了板料激光加热温度场的传热基本方程与定解条件, 与之对应的有限元控制方程为

$$[K] \{T\} + [C] \{\dot{T}\} = \{Q\} \quad (5)$$

其中 $[K]$ $[C]$ 分别为材料的热传导系数阵与热容阵, $\{T\}$ $\{\dot{T}\}$ 为节点温度列阵及其对时间的导数阵, $\{Q\}$ 为温度载荷列阵。按泰勒级数展开, 有

$$\{T\}^{t+\theta\Delta t} = \theta \{T\}^{t+\Delta t} + (1-\theta) \{T\}^t + \alpha (\Delta t)^2 \quad (6)$$

式 (5) 不难转化为如下代数方程组

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{\Delta t} [C^\theta] + [K^\theta] \right) \{T\}^{t+\Delta t} = \\ & \left(\frac{1}{\Delta t} [C^\theta] - (1-\theta) [K^\theta] \right) \{T\}^t + \\ & \theta \{Q\}^{t+\Delta t} + (1-\theta) \{Q\}^t \end{aligned} \quad (7)$$

参照文献 [3, 4], 可以推出

$$T^{t+\theta\Delta t} = T^t + \theta\alpha (T^t - T^{t-\Delta t}) + \alpha (\Delta t)^2 \quad (8)$$

显然, 如果已知 $t - \Delta t_1$ 及 t 时刻的温度值, $t + \theta\Delta t$ 时刻的温度值便可由 (8) 式求得, 并由此计算 $[K^\theta]$, $[C^\theta]$ 再由式 (7) 解出 $T^{t+\Delta t}$, 这种变通的数值方法, 省去了在一个时间步内的反复迭代, 减少了式 (7) 的计

算量。

2.2 计算结果及其分析

已经论证, 式 (1) 中对流项的存在使方程具有双曲与抛物的双重性质, 为有限元求解带来了许多不便, 但是, 该项并不会显著增加有限差分法离散和近似的复杂性。为考查简化模型式 (2) 以及 2.1 中算法的合理性, 作者首先将 FEM 模拟结果与 Gu Bingwu 基于式 (1) 并考虑对流与辐射边界条件的 FDM 解进行了比较 [5], 二者非常一致 [4]。由于 Gu 所采用的热吸收率按倒推法取得, 即采用该热吸收率时温度峰值的 FDM 计算值恰好等于温度峰值的实测值, 因而可以近似认为 FDM 数值解便是此时温度场的真实解。这也说明, 方程 (1) 中的对流项并不会对计算结果产生显著的影响。

图 1 是用光斑面积为 $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 的 1 kW 激光束以 50 mm/s 的速度沿 x 方向扫描厚度为 $z = 1.5 \text{ mm}$ 的 08 钢板时的某时刻的温度场分布, 其中光斑中心处 $y = 0$ 。泊松比恒取 0.3, 其他与温度相关的材料性能参数

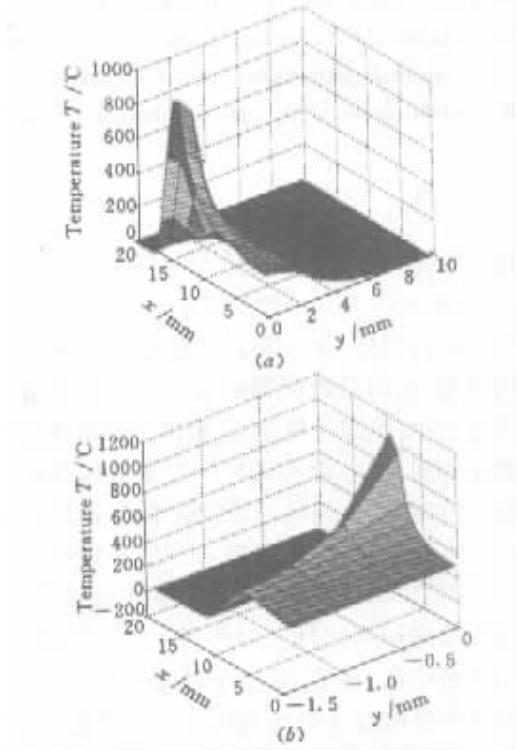


图 1 板料激光加热时的温度场

(a) 板料上表面 ($z = 0$) 温度场;

(b) 板料厚度方向 ($y = 0$) 温度场

Fig.1 Temperature field during laser forming of sheet metal

(a) temperature distribution on upper surface ($z = 0$);

(b) temperature distribution on a cross section ($y = 0$)

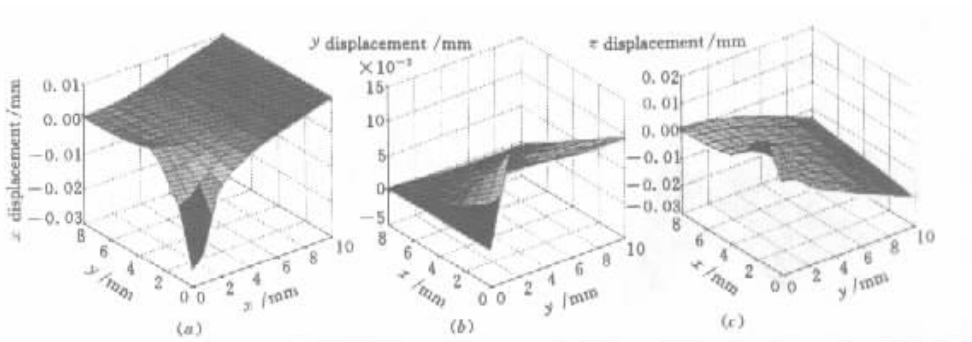
如表 1。分析发现,温度峰的位置沿扫描方向略滞后于该时刻的光斑中心处,光斑扫过后,已扫区域的温度迅速回落,但高于尚未扫描的区域,因而在温度峰之后总拖有一“长尾”,而在光斑周围,无论是板平面方向还

是板厚度方向,都存在强烈的温度梯度,这种极不均匀的温度场正是诱发热应力从而导致板料弯曲变形的内在因素。

表 1 温度相关的材料性能参数

Table 1 Material properties

Material properties	Temperature(°C)	0	400	800	1200
Density * Heat capacity ρc (J/mm ³ °C)		0.0036	0.0042	0.0053	0.0052
Heat conductivity k (W/mm°C)		0.065	0.045	0.026	0.027
Young's modulus E (GPa)		200	168	130	80
Thermal expansion coefficient α (10 ⁻⁶ /°C)		11	12	18	18

图 2 激光束刚进入板料时板上表面的 x, y, z 向位移(a) x 向位移 (b) y 向位移 (c) z 向位移Fig.2 Displacement field of upper surface($z = 0$)(a) x directional displacement ;(b) y directional displacement ;(c) z directional displacement

3 形变场的数值模拟

3.1 基本理论及关键问题的处理

板料激光弯曲成形属大位移几何非线性问题,一般认为,在数值模拟时宜采用 T. L. (Total Lagrange Formulation) 描述的有限元列式^[6],并将前述 2 中求得温度载荷化为节点力进行求解。由于温度只产生正应变 αT ,该初应变对应的温度载荷对各向同性材料的不平衡力向量为

$$\{\Delta F\} = \sum_V [B]^T \frac{E\alpha\Delta T}{1-2\gamma} \{\delta\} dV$$

$$\{\delta\} = [111000]$$
(9)

其中 E 为弹性模量, γ 为泊松比, ΔT 为当前温度与初始参考温度之差, α 为材料的线胀系数, V 表示体积。

值得一提的是,在激光弯曲成形中,材料的温度梯度很大,升温与降温过程急剧转换,并且材料的屈服应力随温度变化剧烈,并可能发生反向屈服现象。因此,

对于这种加载与卸载、软化与硬化在一次变形中同时存在的复杂过程,其弹塑性过渡区的处理必须采用特殊的方法。为此取卸载再屈服时的加权系数 W ^[34]

$$W = 2\sigma_1(2\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_{y2}) \quad (10)$$

此时的应力应变关系为

$$\Delta\sigma = D^e(W\Delta\varepsilon) + [D^{ep}(1 - W\Delta\varepsilon)] \quad (11)$$

式中 D^e , D^{ep} 分别表示弹性矩阵及弹塑性塑阵。

3.2 模拟结果及其分析

按上述理论,对激光弯曲成形的形变场进行了数值模拟。图 2 是激光束刚进入板料时板上表面的 x, y, z 向位移。可以看出,在光斑区域,由于材料的受热膨胀,在 x, y, z 方向均产生明显的“鼓包”。根据冷却到室温时板料上表面的 z 向位移,求得板料的最终弯曲角度为 1.93°,其值与实测角度的相对误差为 -3.6%。图 3 表明不同工况下弯曲角度的有限元模拟值与实测值间的误差分布。当板厚较大时,其弯曲角度

较小,测量误差的影响比较显著,因此相对误差值偏大,而当板厚较小时,激光加热导致的温度峰值明显增高,计算时所采用的材料高温性能可能与实际值偏差较大,另外,板料所产生的变形量也明显增大,光斑区域的有限元网格会产生一定程度的畸度,这些因素都会对计算精度产生影响。

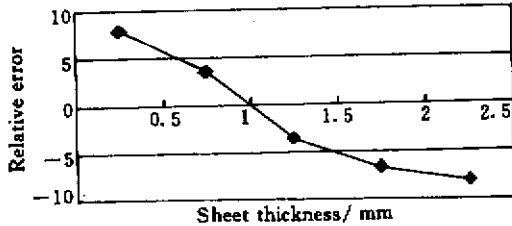


图3 弯曲角度的模拟值与实测值间的误差分布

Fig.3 Relative error of computation and experimental results

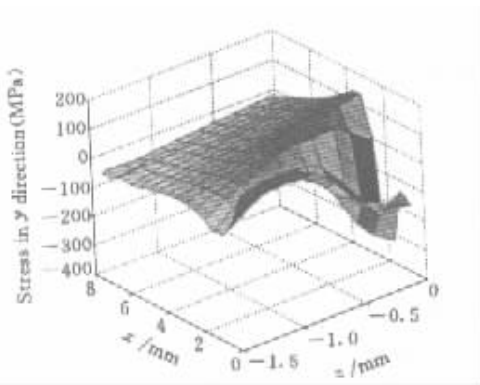


图4 $y = 0$ 的对称面上的 y 向应力分布

Fig.4 y directional stress on a cross section ($y = 0$)

图4是激光弯曲成形过程中的某时刻 $y = 0$ 的对称面上的 y 向应力分布情况。可见,在激光扫描过程中,板料的上表面($z = 0$ 处)特别是光斑区域($x = 2$ mm附近)具有较大的 y 向应力,其值已经超出该温度下材料的屈服极限,并导致不可恢复的塑性应变的产生。由于剧烈的热膨胀, $x = 2$ mm的光斑区域承受 y 向压应力,光斑过后的区域,材料已经回缩, y 向压应力开始缩小,逐渐变为拉应力,从而引

起板料的弯曲变形。

4 结 论

1) 基于准静态非耦合模型,用了小步距间歇跳跃式移动光源模拟激光束的连续扫描,用有限元方法分析了板料激光加热时的三维瞬态温度场。与 FDM 解的一致性说明忽略动热源引起的对流项不会对计算结果产生显著的影响,并且发现,在光斑周围,无论是板平面方向还是板厚度方向,都存在强烈的温度梯度;

2) 将温度场的分析结果作为形变场的求解条件,并将温度载荷化为节点力,考虑到成形过程中的屈服及卸载再屈服现象,对弹塑性过渡区的权因子进行了特殊处理,并由此完成整个成形过程的数值模拟。结果发现,不均匀加热所形成的局部高温使局部应力超过屈服极限,由此导致的塑性应变是板料弯曲变形的根源。

参 考 文 献

- 1 F. Vollertsen, S. Holzer. Laser beam forming-fundamental and possible applications. *VDI-Z*, 1994, **136**(1/2):35 ~ 38 (in German)
- 2 Ji Zhong. Laser forming of sheet metal and its FEM simulation. [Ph. D. dissertation]. Northwestern Polytechnical University, 1997 (in Chinese)
- 3 Y. Ueda, J. Wang. Three dimensional numerical simulation of various thermo-mechanical processing by FEM. *Trans. JWRI*, 1993, **22**(2) 289 ~ 294
- 4 Z. Ji, S. C. Wu. FEM simulation of temperature field during laser forming of sheet metal. *J. Mater. Processing Technol.*, 1998, **74** 89 ~ 95
- 5 B. W. Gu, T. C. Ma. Three dimensional numerical model for laser transformation hardening of metals. *Material Science and Technology*, 1994, **10**(5) 425 ~ 430
- 6 Wang Xucheng, Shao Min. Basic Principle and Numerical Method of FEM. Beijing: Tsinghua University Press, 1988 (in Chinese)