

文章编号: 0258-7025(2002)03-0281-05

激光微弯曲成形机理的数值研究

黄晨光, 段祝平

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 利用自行研制的含热传导、冲击动力学大、变形有限元程序, 模拟了小尺寸梁在脉冲激光加热条件下的变形过程。在此基础上, 利用商用程序模拟了冷却及残余应力的产生, 研究了激光参数(强度及分布)等对于微弯曲的影响。数值模拟结果与文献中的实验观察相吻合。

关键词 微弯曲, 激光, 残余应力

中图分类号 TN 249; TG 665 **文献标识码** A

Numerical Simulation on the Micro-scale Bending Induced by Pulsed Laser Beam

HUANG Chen-guang, DUAN Zhu-ping

(Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract In this paper, the micro-scale bending process and mechanism were studied numerically with ANSYS and a FEM code, which could be used to investigate thermal mechanical coupling and finite deformation impacting problem. The distributions and evolution of temperature, stresses and plastic strain were shown in the paper. At the same time, the effects of laser beam parameters and materials constants on the bending angle were discussed, and compared well with the experimental observations.

Key words micro-scale bending, laser, residual stresses

1 引 言

激光微弯曲(Micro-scale Bending)成形作为一种新近发展的柔性加工技术,以其高精度、无需夹持和加工灵活等优势,引起了众多研究者的兴趣。它利用激光辐照在试件中产生的塑性形变来完成对试件的加工,而不是通过传统的外加机械载荷的方式。

激光用于成形加工始于上世纪 80 年代,起初主要利用 kW 级或更大功率的连续波 CO₂, YAG 激光器。主要用在复杂环境、形状的成形加工以及汽车、船舶用板壳的形状修复^[1~3]。随着这门工艺的发展,人们认识到了它在微电子工业中应用的潜力。

一般而言,较强的短脉冲激光引起的微弯曲就是源于试件表面极大的温度梯度。在辐照过程中,光斑辐照区域内会产生一定的压缩塑性形变,这是

不可恢复的,当试件冷却后,将产生一个朝向激光源的弯曲^[4,5]。

激光微弯曲成形的影响参数较多,包括激光参数、靶材的性能参数和靶板(试件)的几何参数等。一些科学工作者^[6~9]已从不同角度,利用不同的方法初步研究了这些参数对弯曲角度的影响规律。但是,在所见到的相关文献中,都存在一个共同的问题,即忽略了强脉冲激光加热中引起的波动和惯性效应以及材料的率相关性。这是难以接受的,原因是脉冲激光加热时间短(10 ns 级),试件变形速率高($\sim 10^5 \text{ s}^{-1}$)。

2 激光微弯曲机理

脉冲激光对微小尺寸试件的弯曲加工如图 1 所

收稿日期:2000-11-20; 收到修改稿日期:2001-02-23

基金项目:国家高技术计划激光技术领域和中国科学院重大项目资助课题。

作者简介:黄晨光(1969—),男,湖北汉川人,副研究员,博士,主要从事激光与物质相互作用研究。E-mail:huangcg@

imech.ac.cn

示^[9],图中,Nd:YLF激光器被用作加工源,它经过扩束、反射,在试样上聚焦成线状的光斑,另外 He-Ne 激光器用来测量试样在加热和冷却过程中的弯曲角度变化。本文中,为了便于与实验对照,按文献[9]来选取激光参数和几何参数,如表 1 所示。

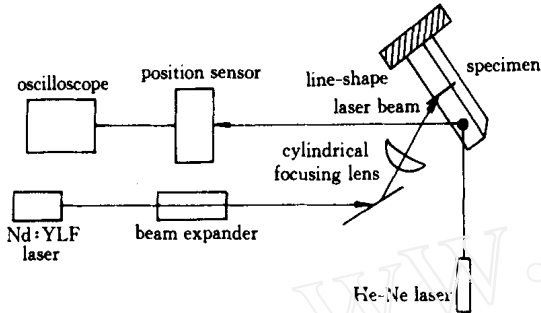


图 1 激光微弯曲加工示意图

Fig. 1 Sketch map of micro scale bending owing to laser irradiation

表 1 激光和试件几何参数表

Table 1 Parameters of laser and structure dimensions

Laser pulse energy $Q_p / \mu\text{J}$	40 ~ 118.5
Laser pulse width/ ns	10
Laser beam width/ μm	29.2 ~ 87.3
Laser beam length/ mm	1.55
Specimen length/ mm	10.0
Specimen width/ mm	0.8
Specimen thickness/ μm	100

根据激光光束尺寸和试件的特点,对图 1 所示的问题可以作如下简化:把三维问题简化成二维平面应变问题来处理。其基本的控制方程为:

1) 平衡方程

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0 \tag{1}$$

其中, σ_{ij}, f_i 分别为 Cauchy 应力张量和体积力矢量。

2) 几何方程

$$\epsilon = \ln(U), U = R^{-1}F \tag{2}$$

其中, ϵ, U, R, F 分别为对数应变、右形变张量、旋转张量和变形梯度张量。

3) 本构方程

$$\sigma_{ij} = \sigma_{kk}^e \delta_{ij} + 2\mu^e \epsilon_{ij}, \quad \sigma_{ij} = \sigma_{ij}^e + \sigma_{ij}^p + \sigma_{ij}^t \tag{3}$$

$$\dot{\sigma}_{ij} = \dot{\sigma}_{ij}^e, \quad d \sigma_{ij}^p = \frac{\partial \phi}{\partial \epsilon_{ij}} \tag{4}$$

$$= (\sigma_0 + K_1 \dot{\epsilon}^m + K_1^{-1/2}) (1 - T^*) + C \sinh^{-1} [(\dot{\epsilon})^{1/n_1}] \tag{5}$$

$$z = \frac{v}{A} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \tag{6}$$

其中, $\sigma_{ij}^e, \sigma_{ij}^p, \sigma_{ij}^t$ 分别为弹性、塑性和热膨胀应变张量。 σ_0, Q, R 分别为热膨胀系数、温升、障碍体强弱表征和 Boltzmann 常数。 z 为 Zener 参数, T, T^*, T_m, T_r 分别为温度、相对温度、熔点温度和参考温度。 σ_0, K_1, m, C, n_1 是本构参数。方程(5), (6)用于加热阶段,它考虑了材料的应变率效应和温度软化效应,方程(3), (4)用于冷却阶段。为了简便,把材料假设为理想弹塑性材料,材料性质对于温度的依赖关系见表 2。

能量方程为(Fourier 热传导)

$$\rho \dot{c} = \nabla \cdot (k \nabla T) - T \text{tr} \dot{D} + F \dot{D}^p + Q \tag{7}$$

其中, ρ, c, k, Q 分别为密度、热容、热传导系数和热源强度。 \dot{D}, \dot{D}^p 分别为变形率和塑性变形率张量, F 为转换系数。

表 2 材料参数表

Table 2 Table of material constant

Temperature/ K	273	400	600	800	1200	1800
Density	7900	7860	7780	7680	7460	7250
Thermal conductivity	14	15.3	19	22	26	32
Specific heat	450	500	552	580	630	785
TEC $\times 10^{-6} / \text{K}$	13.6	14.1	15.1	15.5	16.0	17.2
Young modulus/ GPa	210	170	152	120	30	3
Yield strength/ MPa	1200	1060	950	610	180	10
C / MPa	A / s^{-1}	$Q / \text{J / mole}$	σ_0 / MPa	K_1 / MPa	m	n_1
18	0.33×10^{13}	0.42×10^6	1120	510	0.25	4.80

* TEC: Thermal Expanding Coefficient.

在分析中,我们将激光处理成热源

$$Q_{ab}(y, z, t) = (1 - R_f) I_s(y, t) \exp(-z) \tag{8}$$

$$I_s(y, t) = I_0(t) \exp\left(-\frac{8y^2}{w^2}\right)$$

$$I_0 = \begin{cases} \sqrt{\frac{8}{lw}} \frac{Q_p t}{t_p} & 0 < t < t_p \\ \sqrt{\frac{8}{lw}} \frac{Q_p (2t_p - t)}{t_p} & t_p < t < 2t_p \end{cases} \quad (9)$$

其中, l, w 是试样的长度和宽度。 R_f 为反射系数, 为吸收系数。分别按文献[9], 取为 0.6 和 $\frac{4 \times 4.5}{1.047 \mu\text{m}}$ 。

模型中, 梁的长度方向为 y 轴方向, 其厚度方向与 z 轴重合, x 轴方向即梁的宽度方向。我们并不考虑各量沿 x 轴的分布。

3 数值计算

整个微弯曲加工过程可以分为二个阶段: 加热和冷却。由于必须考虑材料的非线性及温度相关性, 想获得解析解十分困难, 本文采用有限元方法来求解。

在加热阶段, 时间极短, 波动效应和惯性效应十分重要, 故此应该采用含热传导的冲击动力学的有限元程序 (Modified PRONTO)。该程序中, 通过中间无旋构形上的本构计算, 保证应力增量的客观性。在格式上, 它属于 Update-Lagrange, 即逐步更新拉格朗日方法。采用的应力和应变度量分别为 Cauchy 应力和 Euler 应变。该程序可以适用于有限变形的条件。

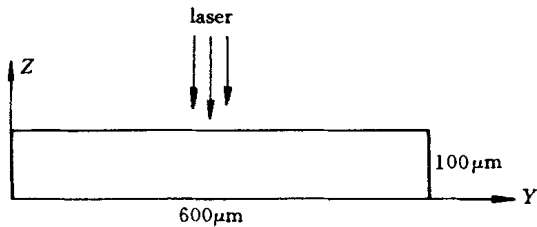


图 2 计算模型图

Fig. 2 Model of numerical simulation

在每一时间增量步长内, 动量守恒方程和能量方程的求解是分开的, 即在 $t + \Delta t$ 时刻求解动量方程时, 如果用到温度, 则以 t 时刻的温度值来代替, 反之在求解温度场时, 塑性功的贡献等项也是以 t 时刻相应的值来代替。但是从整体上看, 热-力是相互耦合的。程序中, 动量方程的时间积分格式为修正中心差分法, 能量守恒方程的积分格式是 Euler 法。由于动量方程的特征时间短, 以动量方程的稳定时间步长为依据, 确定整体的时间步长大小。

对于冷却阶段 (时间相对较长, 达到秒量级), 本

文采用准静态的有限元程序 (ANSYS 5.6) 来分析。

应该说明的是, 在计算过程中, 采用冲击动力学程序的时间并不仅限于加热阶段, 而是利用它模拟了整个过程的前 $10 \mu\text{s}$ 。其原因在于, $10 \mu\text{s}$ 后应力在结构内达到平衡, 并且质点速度较小, 惯性项的因素可以忽略, 此时再利用准静态程序 ANSYS 来分析才是可行的。另外, 我们在 Modified PRONTO 程序和 ANSYS 程序间, 用 Visual Basic 4.0 研制了一个数据转换程序, 它将动态计算的结果 (主要包括坐标、位移等几何量以及应力、温度等物理量), 变成 ANSYS 可以接受的输入命令文件。

计算步骤简述如下:

1) 利用 Modified PRONTO 的前处理程序, 建立几何模型, 给定材料及其他物理参数, 并对结构进行了有限元离散, 离散采用的是四节点等参元, 单元数目为 50×30 , 其中在靠近光斑的地方, 单元较为密集。

2) 调用 Modified PRONTO 程序中的热冲击问题求解器, 对短脉冲激光引起的热冲击和冷却过程的前期 ($10 \mu\text{s}$) 进行计算, 其中, 特别要注意人工黏性参数和砂漏算法的选择, 以避免过小时步长或零能量变形模态的出现。在预先设定的时刻, 将计算结果和模型等参数输出到指定的文件。

3) 利用前述的中间转换程序, 将上一步的结果文件, 转化成 ANSYS 的输入文件, 遵从 APDL 的语法和格式。

4) 进入 ANSYS 程序, 调入输入文件, 进行冷却阶段的计算。计算中并没有采用热-力耦合单元和相应的算法, 只是在结构单元的基础上, 添加了温度自由度。并且利用 ANSYS 后处理图形显示计算结果。

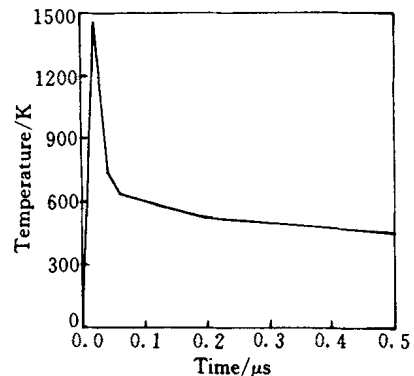


图 3 光斑中心温度的时间演化规律

Fig. 3 Temperature history of the center of the irradiation region

4 计算结果讨论

计算采用的激光束宽度为 $29.2 \mu\text{m}$, 脉冲能量为 $118.5 \mu\text{J}$ 。图 3 是光斑中心点在加热阶段的温度演化, 温度的最高值出现在 20 ns 左右。在 $20 \sim 50 \text{ ns}$ 之间, 温度急剧下降, 而在此后温度的变化较为

平稳。图 4(a), (b) 则描述了温度沿表面及厚度方向的分布规律 ($t = 13 \text{ ns}$)。由于时间较短, 热传导的效应表现不出来, 表面上温度的分布与激光强度的空间分布相似, 沿厚度方向温度急剧下降, 在 500 nm 左右, 温升就接近 0。

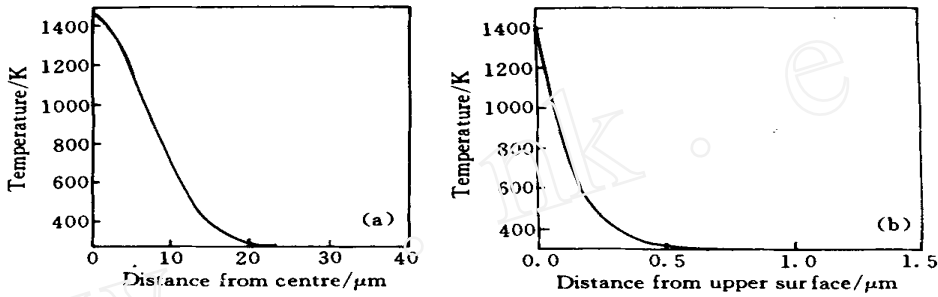


图 4 温度沿表面(a)和厚度方向(b)的分布规律

Fig. 4 Temperature distribution along the upper surface (a) and along the thickness (b) of the sample

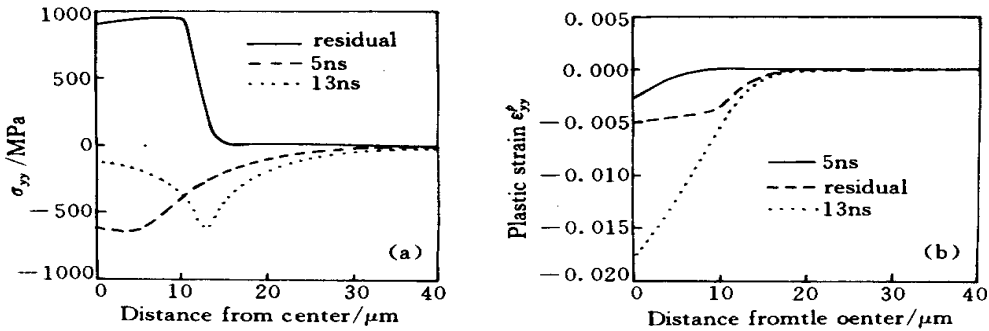


图 5 辐照表面的应力分布(a)和塑性形变(b)

Fig. 5 σ_{yy} (a) and ϵ_{yy} (b) in the irradiated surface

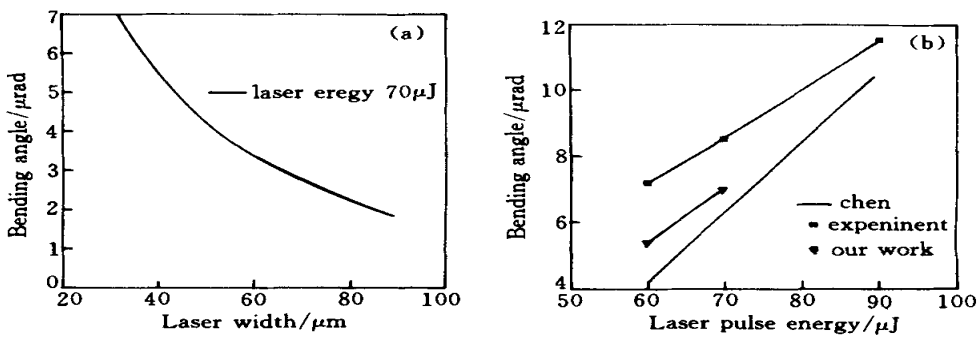


图 6 弯曲角度与光束尺寸(a)及输入激光能量(b)的关系

Fig. 6 Bending angle vs diameter of laser beam (a) and input laser energy (b)

温度梯度导致的塑性形变是激光微弯曲加工的基础, y 方向应力和塑性形变的大小, 决定着弯曲的角度和方向, 图 5(a), (b) 中展示了激光辐照表面上的应力和塑性变形在不同时刻的分布。在激光辐照阶段(加热), 光斑辐照的区域因温升膨胀被限制, 产生压应力, 随着温度的升高, 压应力的幅值变大。

但是由于材料存在热软化, 当温度较高时, 应力大幅回落。这一过程中, 塑性形变却一直升高。当进入冷却阶段以后, 结构内的温度降至室温, 特别是激光辐照表面附近温度降低较大, 工件开始朝向光源作弯曲运动。加热阶段产生的 y 方向塑性形变逐渐减小, 但是仍有残余塑性形变存在, 并导致上表面相应

区域内较大的 y 方向残余拉应力。

图 6(a) 显示了在输入激光能量一定的条件下 (70 μJ), 微尺度梁弯曲的角度与激光束宽度之间的关系, 可以理解的是, 当光束较宽时, 辐照的功率密度下降, 塑性变形的区域较大, 但幅值较小, 这样便导致冷却后弯曲角度较小。反之, 光束能量集中, 将在较小区域形成较大的塑性形变, 形成类似“激光刀”的现象, 无疑会提高弯曲加工的能力。

图 6(b) 则显示了在光束宽度固定的情况下, 工件弯曲的角度对激光能量大小的依赖关系。从中可以看到, 模拟结果较之于实验观察值偏低, 但比 Chen 等的预测结果^[9]要好。在他们的数值模拟中, 忽略了惯性、材料的率相关等重要因素和特征。另外从图 6(b) 中可以发现, 随着输入激光能量的增大, 弯曲的角度近乎线性地增加。

从热的角度来看, 激光辐照引起的微尺度弯曲过程可以分为加热和冷却两部分, 但从变形来分析, 则有三个不同的部分, 参见图 7。

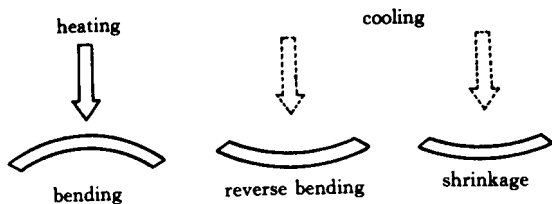


图 7 微尺度弯曲的基本过程

Fig. 7 Different stages of micro scale bending

当激光辐照到试样上表面时, 辐照区域内的材料被快速加热并膨胀, 试样就开始背向光源弯曲。此时, 辐照区域内承受较大的压应力。随着弯曲角度的增大和被加热材料的热软化效应, 表面上光斑附近区域会出现明显的塑性变形。计算发现, 当输入能量一定时, 激光的功率密度越高, 产生的塑性变形越大。这是因为塑性变形的产生是由温度梯度引起的。功率密度较高时, 试样内的温度分布更陡峭。

在试样的冷却过程中, 应该包含两种不同的变形: 反向弯曲和收缩。与第一阶段变形相反的是, 反向弯曲过程是由温度分布的均匀化引起的。对于辐照区域而言, 当吸收的激光能量小于热传导项时, 试样内的温度梯度开始下降, 背向光源的弯曲角会逐渐减小。如果在第一阶段中没有出现塑性变形, 那么当试样内的温度重新均匀分布时, 试样会恢复到辐照前平直的结构。如果第一阶段有塑性变形产生, 那么在温度均匀后, 上表面由于受到过不可恢复

的压缩, 而比下表面短, 从而产生朝向光源的弯曲。试样在完成弯曲后, 其上表面承受着拉应力。一般在冷却开始阶段, 由于温度梯度的降低较快, 试样朝向光源的变形速度也较快。

收缩变形是指试样温度整体降低时的变形, 它使得试样相应变小, 但不会引起弯曲角度的变化。在冷却的不同时期都会出现。这一变形模式一般并不单独存在。

5 结 语

本文利用自行发展的程序与商用程序相结合, 对短脉冲激光引起的微小试件弯曲过程进行了数值模拟, 预测结果与实验基本吻合。但是下列几个方面仍需要深入的研究:

1) 冷却阶段的计算应该耦合求解平衡方程和能量方程。本文中, 由于程序的限制没有实现, 便忽略了试样的降温历程, 在非线性分析中这是一种粗略的算法。

2) 必须进行有关材料的更系统的力学性能实验, 以确定更合适的本构关系和参数。

3) 需要开展大量的计算, 定量给出主要的无量纲参数(激光、材料和几何)对弯曲角度的影响。为微弯曲工艺的发展提供参考性的意见。

参 考 文 献

- 1 Y. Namba. Laser forming in space [C]. Int. Conf. On Lasers '85, Edited by C. P. Wang, 1986. 403 ~ 407
- 2 K. Scully. Laser line heating [J]. *Journal of Ship Production*, 1987, 3(1): 237 ~ 246
- 3 M. Geiger. Synergy of laser material processing and metal forming [J]. *Annals of CIRP*, 1994, 43(2): 563 ~ 570
- 4 F. Vollertsen. Mechanisms and models for laser forming, Laser Assisted Net Shape Engineering [C]. *Proc. of the LANE '94*, 1994, 1: 345 ~ 360
- 5 H. Arnet, F. Vollertsen. Extending laser bending for the generation of convex shapes [J]. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 1995, 209(2): 433 ~ 442
- 6 F. Vollertsen. Model for temperature gradient mechanism of laser bending, Laser Assisted Net Shape Engineering [C]. *Proc. of the LANE '94*, 1994, 1: 371 ~ 378
- 7 F. Vollertsen, M. Geiger, W. M. Li. FDM and FEM simulation of laser forming: A comparative study, Advanced Technology of Plasticity [M]. Ed. Z. R. Wang, Y. He. Beijing: International Academic Publishers, 1993. 1793 ~ 1798
- 8 I. Alberti, L. Franiti, F. Micari. Numerical simulation of laser bending processing by a coupled thermal mechanical analysis, Laser Assisted Net Shape Engineering [C]. *Proc. of the LANE '94*, 1994, 1: 327 ~ 336
- 9 G. Chen, X. Xu, C. C. Poon *et al.*. Experimental and numerical studies on microscale bending of stainless steel with pulsed laser [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1999, 66(3): 772 ~ 779