

文章编号: 1001-3806(2009)02-0147-04

## 激光辅助加热下的微塑性成形的研究

王 匀, 张 凯, 董培龙, 袁国定, 蔡 兰  
(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 为了解决难成形材料微构件成形困难, 采用脉冲固体激光器对铝合金微型件进行了辅助加热实验研究, 同时利用有限元软件 ABAQUS 建立了基于激光加热的微锻粗圆柱形工件的热力耦合有限元模型, 对激光加热后的温度场分布和微塑性成形过程进行了模拟研究。结果表明, 工件在激光功率 800mW, 加热时间 0.08s, 光斑半径 0.1mm 下的温度场分布呈卵圆形, 在短时间内温度场基本趋于均匀化, 激光加热下的微塑性成形应力比常温下降低了 30% 左右。这一结果对提高微塑性材料的成形性能和完善微热及微温成形工艺是有帮助的。

**关键词:** 激光技术; 微塑性成形; 数值模拟; 温度场; ABAQUS

**中图分类号:** TG376.2 **文献标识码:** A

### Investigation into microforming based on laser-assisted heating

WANG Yun, ZHANG Kai, DONG Pei-long, Yuan Guo-ding, Cai Lan

(School of Mechanical Engineering College, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to solve the forming difficulty occurring in the microforming microparts made of hard-to-deform materials, the experimental study on laser-assisted heating of the micropart of aluminum alloy was performed by means of pulsed laser. With the help of ABAQUS finite element software, the coupled thermomechanical finite element model of micropart was built up based on laser-assisted heating method. Then the temperature distribution of the workpiece and microforming process were simulated and analyzed. The results show that the temperature field distributions are oval and flattening with the certain laser parameters (laser power is 800mW, heating time is 0.08s and spot radius is 0.1mm), and that the temperature distribution is uniform after a very short time. The microforming stress using laser-heating method decreased about 30% compared with that of room temperature. The obtained results are helpful to improve the microforming properties of plastic materials and perfect micro-hot and microwarm forming process.

**Key words:** laser technique; microforming; numerical simulation; temperature field; ABAQUS

### 引 言

随着现代科学技术的发展, 微器件在医疗生物工程、微型机器人、传感器等工业中有着广泛应用前景<sup>[1-2]</sup>, 特别是微机电系统及航空航天等技术的进一步发展, 对各种材料的微型零件需求量越来越大。但同时也对微器件的加工工艺、加工成本和批量生产等也提出了新的要求, 其最终目的是能够低成本大批量生产制造可实际应用的微型器件。现有的面向微机电系统的微

机械加工技术主要依赖于光刻、蚀刻、准分子激光、电火花、薄膜制备等微细加工技术, 无法满足 3 维复杂形状微器件的加工, 也限制了加工材料的多样性。近年来, 微塑性成形这个新兴的研究领域发展较快, 微锻、微挤压、微锻粗等微体积成形技术成为微成形的重要分支<sup>[3-4]</sup>, 特别适用于低成本批量制造, 所成形微器件强度高、表面质量好、尺寸精度高。但是在微成形难成形材料时, 变形抗力大, 易受材料种类、晶粒尺寸和取向的影响, 造成微成形的变形、充模不均匀, 工艺参量不稳定。

因此, 针对难成形材料, 作者提出基于激光加热的微塑性成形方法, 即以激光束通过外光路系统对微小工件表面进行加热, 利用激光的热作用降低材料的变形抗力。通过控制激光参量和激光良好的聚焦性就可以实现对微小材料的可选择性加热和控制。加热后降低了工件的变形抗力, 提高了成形性能, 而且可以降低成形力, 有利于提高微模具的寿命。激光加热和微成形的相互结合为解决微塑性成形技术提供了一条新的途径。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50605029); 中国博士后科学基金资助项目(20060390961); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2006551); 高级人才启动基金资助项目(128300090, 128300087)

作者简介: 王 匀(1975-), 男, 副教授, 主要从事 CAD/CAE/CAM、微成形等方面的研究。

E-mail: wangyun@ujs.edu.cn

收稿日期: 2008-01-03; 收到修改稿日期: 2008-01-21

## 1 铝合金激光加热实验研究

### 1.1 实验过程

实验用铝合金, 2.0mm × 1.0mm, 采用 Nd:YAG 脉冲激光器, 调整聚光镜使光斑直径为 1.0mm, 实验参量分别是: 功率为 15W, 电流为 21.5A, 频率为 40kHz, 波长为 1064nm。具体实验过程如下: 首先利用激光设备自带的电荷耦合器件(charge coupled device, CCD) 图像传感器进行光斑和工件对中, 按照上述的激光控制参量对工件上表面进行加热, 利用 NEC 红外测温仪对加热后的工件进行温度测量, 最后借助测温仪自带软件进行数据和图像处理。

### 1.2 实验结果与分析

从图 1a 激光加热过程观察到, 激光光强较大, 反射强度较大。此外, 波长为 1064nm 的激光为非可见

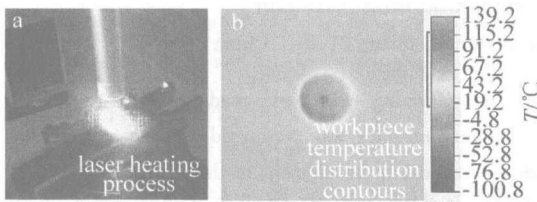


Fig. 1 The experiment setup and results

光, 使用普通测温仪无法直接测量, 因此实验中用 NEC 红外测温仪进行非接触红外测量。从图 1b 工件加热表面温度分布云图中观察到, 周围环境温度为 18℃, 工件表面加热后最高温度为 116℃ 左右, 工件表面, 温差大约 20℃, 温度分布比较均匀。工件周围有环状温度带大约 50℃, 这是由于工件与环境进行热交换使周围环境温度升高, 但是工件尺寸小, 使周围升温区域较小。

由于激光加热时间极短, 测温仪手动操作, 故不能准确记录加热完成瞬间的温度图像, 影响了加热后温度测量的精度。但是激光加热后升温效果明显, 并且温度分布比较均匀, 可以满足塑性成形要求。因此激光加热辅助微塑性成形具有实际的研究和应用价值。

## 2 基于激光加热的微锻粗有限元模型的建立

鉴于实验研究中, 仪器和设备等存在的缺陷, 为了说明问题, 提高激光加热后温度场测量的准确度, 以微锻粗工艺为研究对象, 利用有限元分析软件 ABAQUS 对基于激光加热的微圆柱微锻粗成形过程进行分析模拟。根据提出的基于激光加热的微塑性成形方法, 首先利用激光束对工件进行加热, 然后进行微锻粗。因为 ABAQUS/explicit 模块适用于模拟短暂、瞬态的动态事件, 可以较高精度地模拟成形问题, 而且通过 ALE 技术可以得到良好的网格<sup>[5]</sup>, 所以微锻粗模拟采用

ABAQUS 的显式模块, 而激光加热过程可以采用 ABAQUS/standard 模块, 实现快速的求解, 激光辅助加热微塑性成形的流程如图 2 所示。

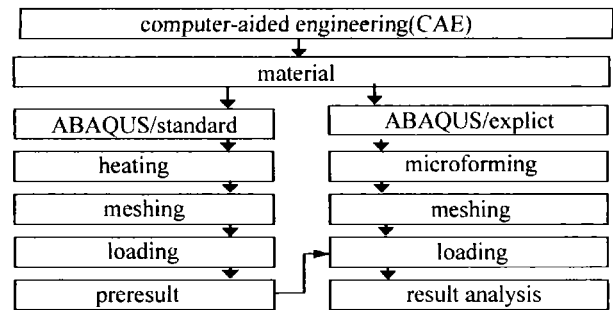


Fig. 2 Workflow of micropset simulation with laser-assisted heating method

工件形状为微圆柱体, 其尺寸为 1.2mm × 0.8mm, 最终成形高度是 0.6mm, 工件材料为铝合金, 其热物理参量见参考文献[6], 弹性模量  $E = 69000\text{MPa}$ , 泊松比  $\mu = 0.33$ , 熔点是 660℃。因为温度变化对密度的影响较小, 所以分析过程中密度为恒量,  $\rho = 2700\text{kg/m}^3$ 。同时需要考虑工件与周边环境的传热, 以及工件表面与模具的热传导。由于金属具有“蓝脆”现象, 金属加热到一定温度时变形抗力明显加大, 强度增加, 塑性下降。为了避免这种现象, 结合国内外的生产实践, 将工件加热到 250℃ 左右进行压缩。

图 3 中给出基于激光加热的微锻粗和激光加热模型, 其中凸模和凹模采用刚性体。

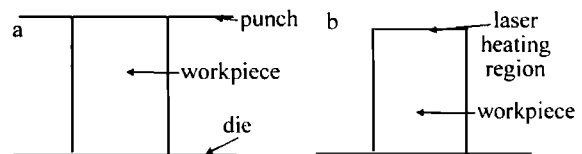


Fig. 3 Laser-assisted heating micropset model

## 3 基于激光加热的微小工件温度场分析

### 3.1 数学模型及边界条件

激光加热一个对称性同向性材料的物体的温度场遵循以下的公式:

$$\rho c \frac{\partial^2 T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \omega \quad (1)$$

式中,  $T$  是温度,  $\rho$  是材料的密度,  $\lambda$  是导热系数,  $\omega$  是材料的内热源强度,  $t$  为时间,  $r$  为半径,  $z$  为高度,  $c$  为比热容。在热源热输入的分析中, 高斯分布热源和均匀分布热源是常用的两种模型<sup>[7-8]</sup>。均匀热源输入的热流密度在光斑直径范围内均匀分布, 网格划分较粗, 计算时间较短, 但是计算精度不高。高斯分布热源模型输入的热流密度  $I$  呈高斯函数分布, 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, 虽然采用 ABAQUS/standard 在时间上要很多时间步进行迭代, 计算量比较大, 但是计算精度高。本文中采用

高斯分布的热源模型,其数学表达式为<sup>[9]</sup>:

$$I = \frac{2\alpha P}{\pi R^2} \exp\left[-\frac{2d^2}{R^2}\right] \quad (2)$$

式中, $I$ 为激光加热的热流密度, $\alpha$ 为激光吸收率, $P$ 为激光输出功率, $R$ 为激光的光斑半径, $d$ 为光斑某一点离开光斑中心的距离。高斯分布的热源模型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强度。

通过数学公式推导得到整个激光加热光斑的平均热流密度为<sup>[10]</sup>:

$$I = \frac{0.865\alpha P}{\pi R^2} \quad (3)$$

微工件放置在空气中进行加热,与空气存在着对流换热,传热学中第3类边界条件表示为:

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (4)$$

式中, $h$ 为对流换热系数, $q$ 为对流换热的热流密度, $T_s$ 为工件的表面温度, $T_\infty$ 为环境温度。取空气的自然对流换热系数  $h = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,表面的接触摩擦系数取0.1。

### 3.2 热过程分析

在激光加热过程,利用有限软件 ABAQUS 采用热力耦合单元进行分析。采用激光功率  $\alpha P = 800 \text{ mW}$ ,加热时间  $t = 0.08 \text{ s}$ ,加热区域  $R = 0.1 \text{ mm}$  对坯料进行激光加热。图 4a 为加热完成后的等温线分布图,图中

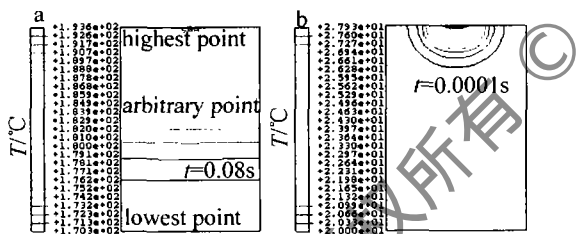


Fig. 4 Isothermal line of laser-heating

显示出最高温度点  $196^\circ\text{C}$  出现在上表面的中心区域,最低温度点  $170^\circ\text{C}$  出现在最左下端部。整个模型的温度场分布明显,温度梯度较大。随着与加热区域距离的增加,热量流动也逐渐趋于水平状。由于热量的减少和传热距离的增加,等温线之间的距离逐渐变大,这表明温度增加逐渐减小。图 4b 是加热刚开始  $0.0001 \text{ s}$  时等温线分布图,热量以卵圆状向周围扩散,通过热流量的形式流向邻近区域。加热初时阶段能量较小,整个工件的温度场分布不明显,温度梯度较小,热量主要集中在加热区域。在激光加热区域极小的范围之内,温度场分布十分明显,温度梯度大,这是由于激光可以在短时间内产生很大的能量,使工件表面及其周围的温度迅速升高。但是由于热流还没有到达工件的下半部分,温度还是初时环境温度  $20^\circ\text{C}$ 。整个工件在这个

时刻的温差只有  $7^\circ\text{C}$  左右。

图 5a 和图 5b 分别为激光加热沿径向  $AB$  和沿高度方向  $BC$  在不同加热时刻的温度分布。如图 5a

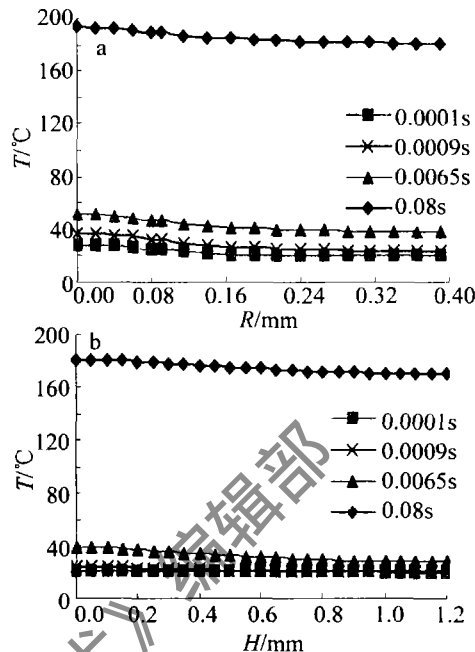


Fig. 5 Temperature change in different directions  
a—radial temperature change b—axial temperature change

所示,随着半径的增加,由于热量的减少和传热区域的加大,温度逐渐减少,基本与半径成线性关系,随着加热时间增加,斜率不断的减小。在不同时间段内径向  $AB$  上的最大温差为  $12^\circ\text{C}$ 。如图 5b 所示,随高度的增加,同样由于热量的减少和传热区域的加大,温度逐渐减少,基本与高度成线性关系。刚开始加热时,温度梯度较小, $0.0001 \text{ s}$  和  $0.0009 \text{ s}$  的曲线后半部分基本重合,主要是这段时间内,激光施加在工件上的能量较小,工件的下半部分并没有获得的很多热量,温度并没有明显升高。与高度方向  $BC$  相比虽然在加热开始阶段温度梯度也比较小,但是在径向  $AB$  方向上并没有出现明显的重合现象。这是由于相对于径向,高度方向上热量传播面积更大,能量消耗增加,不同时间段内高度方向  $BC$  上的最大温差为  $11^\circ\text{C}$ 。径向和高度方向温差满足压缩要求。

### 4 微锻粗成形分析

采用 ABAQUS/explicit 对微锻粗过程进行模拟分析,图 6 是冷压缩成形和基于激光加热的微成形后的应力分布图,可看到对于相同区域的应力,明显基于激光加热状态下的应力小于常温状态下微成形的应力。

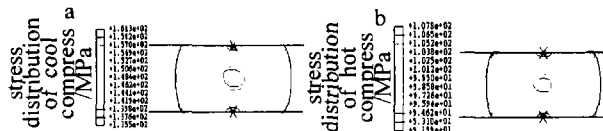


Fig. 6 The Stress distribution of cool compress and hot compress

## 5 结论

提出基于激光加热的微塑性成形方法,即以激光束通过外光路系统对微小工件表面进行加热,利用激光的热作用降低材料的变形抗力,提高其成形性能。首先通过激光加热铝合金实验对加热表面的温度场进行了分析研究,验证了激光加热方法的可行性。然后通过有限元软件 ABAQUS 建立了基于激光加热的微塑性成形模型,模拟得出温度场分布,研究了微型工件激光加热后温度场分布状况。结果显示加热初始状态下热量以卵圆状向周围扩散,通过热流量的形式流向邻近区域。整个工件的温度梯度较小,热量主要集中在加热区域,而加热区域附近的温度梯度很大。加热完成后的温度场梯度明显最大,随着与加热区域距离的增加,热量流动也逐渐趋于水平状。另外通过拟合给出了温度分布与加热时间以及加热距离的关系,验证了激光加热在微塑性成形中的可行性。

通过对常温下和激光加热后微锻粗成形的模拟比较,得到了冷热两种不同成形工艺中的应力分布,结果显示采用激光加热的微塑性成形明显减少成形力。激光技术和微塑性成形技术的结合是一种崭新的设计方法,为微塑性成形设备的研制和生产提供了新的途径。

(上接第 146 页)

位进行切割时,切割速度的脉冲信号变化(脉冲数/秒)如图 4b 所示,其中曲线 1 表示  $x$  轴的脉冲频率采集,曲线 2 表示  $y$  轴的脉冲频率采集。切割速度与脉冲频率具有如下关系表达式:

$$v = \left(\frac{f}{n}\right)L \quad (3)$$

式中, $v$  为切割速度, $f$  为脉冲频率, $n$  为电机旋转 1 周所需的脉冲数, $L$  为丝杠螺距。图 4c 为切割两个尖角时激光功率变化图,由于激光功率和切割速度具有线性关系,因此在区域 1 和区域 2 中激光功率有最小值,随着切割速度增大激光功率逐渐变大。激光器功率变化的响应时间为 0.1s,因此,切割速度的曲线与激光功率的曲线存在时间差。

## 4 小结

提出了一种激光功率随切割速度变化的方法,并且采用 PMAC 的开放性编写应用程序进行串口通信调整功率的方式实现激光功率的实时控制。通过激光切割试验,证明了这种方法是可行的,有效地提高了激光切割质量,并且保证了激光切割的效率。

## 参考文献

- [1] LI J T, DONG X H, HUANG J H. Progress in microforming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2004, 11(4): 1-8 (in Chinese).
- [2] WANG Y, ZHOU J Zh, DAI Y Ch, et al. Application of micro forming technology in plastic processing [J]. Forging & Stamping Technology, 2004, 30(6): 81-86 (in Chinese).
- [3] MAGEE J, WATKINS K G, STEEN W M. Advances in laser forming [J]. Journal of Laser Applications, 1988, 10(6): 235-246.
- [4] KRATKY A, LIEDL G, BIELAK R. Laser assisted deep drawing [J]. Laser Assisted Machining, 2004(4): 1125-1134.
- [5] LIU W K, CAO J, LU H Sh, et al. A multi-scale simulation of micro-forming process with RKEM [J]. Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Application, 2004, 712(34): 103-108.
- [6] XU G L, WANG X M. Engineering heat transfer [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 236-237 (in Chinese).
- [7] LKEUCHIK M F, LIAO J. Weld HAZ toughness and its improvement of low alloy steel SQV-2A for pressure vessels [J]. Transactions of Joining and Welding Research Institute, 1993, 22(2): 215-221.
- [8] TIAN D, KARJALAINEN L P, NETAL Q B. Cleavage fracture model for granular bainite in simulated coarse-grained heat-affected zones of high-strength low-alloyed steels [J]. JSME International Journal Series, 1997, 40(2): 179-188.
- [9] LIU Sh H, JI Q J, YANG J. Numerical simulation on laser bending of steel tubes [J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 355-359 (in Chinese).
- [10] WANG Y, TAN J G, YANG L J. The experimental study on laser bending of sheet metals [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2003, 14(4): 415-418 (in Chinese).

## 参考文献

- [1] ZHANG Y Q, WU Y H, CHEN W Zh, et al. Study on relationship between radiation and quality for laser cutting [J]. Laser Technology, 2007, 31(4): 397-399 (in Chinese).
- [2] INGO D, HOLGER H, DIR K M. Process monitoring in laser beam cutting on its way to industrial application [J]. SPIE, 1997, 3097: 29-37.
- [3] JORGENSEN H, OISEN F O. Process monitoring during CO<sub>2</sub> laser cutting [J]. Proc SPIE, 1991, 1412: 198-208.
- [4] Delta Tau Data System Inc. PMAC user manual [DB/CD]. Chatsworth, CA: Delta Tau Company, 2004: 280.
- [5] Delta Tau Data System Inc. PMAC software reference manual [DB/CD]. Chatsworth, CA: Delta Tau Company, 2004: 479.
- [6] HUA X H, WANG X Ch, ZHANG Q. The research of the CNC system of the plane milling machine [J]. Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006, 2: 7978-7982 (in Chinese).
- [7] LI Y J. Cutting technology and applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 277 (in Chinese).
- [8] CAPRINO G. Maximum cutting speed in laser cutting of fibre reinforced plastics [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1988, 28(4): 389-398.
- [9] HONG L, MI Ch L, LIU D J. Special steel sheet controlled by rotating gas flow [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(4): 543-547 (in Chinese).
- [10] CHEN J M, XIAO R Sh, ZUO T Ch. The self-adapt research on laser cutting [J]. Applied Laser, 2002, 22(3): 317-319 (in Chinese).