

文章编号: 1001-3806(2012)03-0298-03

## 激光驱动飞片加载下基体/薄膜层裂微成形研究

刘国芳, 高传玉\*, 杨晓红, 马明, 李奇军

(江苏大学机械工程学院 江苏省光子制造科学与技术重点实验室 镇江 212013)

**摘要:** 为了满足微成形技术产业化的需求, 讨论了一种新的微成形方法——激光驱动飞片加载基体/金属薄膜层裂微成形技术。结合激光辐照效应及波的反射规律阐述了层裂微成形原理; 优化了基体/金属薄膜层裂工艺, 并且根据能量守恒原理, 估算了层裂片的应变率和激光诱导冲击波的峰值压力。结果表明, 随着脉冲能量的逐渐增大, 工件层裂现象不断明显, 直到金属薄膜上最后出现与模板微结构相同的特征结构, 但基体始终保持完好, 未出现裂纹或变形。通过激光驱动飞片加载基体/金属薄膜实现层裂微成形是可行的。

**关键词:** 薄膜; 微成形; 激光驱动飞片; 层裂

中图分类号: TG306

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.003

## Research of spallation and micro-forming of substrate/thin film under laser driven flyer loading

LIU Guo-fang, GAO Chuan-yu, YANG Xiao-hong, MA Ming, LI Qi-jun

(Jiangsu Provincial Key Laboratory for Science and Technology of Photon Manufacturing, School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to meet the need of micro forming technology industrialization, a new method, micro-forming spallation delamination micro-forming of substrate/metal thin films under laser driven flyer, was discussed. Combining with laser radiation effect and wave reflection, spallation delamination micro-forming mechanism was expounded. The spallation process of substrate/metal thin film was optimized and strain rate of layers lobes and peak pressure of laser-induced shock wave were estimated according to the principle of conservation of energy. It was found that the spallation of phenomenon of workpieces became apparent with increase of pulse energy, until metal thin films appeared the same structure characteristics as micro-structure of the template, but the substrate remained intact without cracks or deformation. It shows that it's available to achieve spallation and micro-forming of substrate/thin film under laser driven flyer loading.

**Key words:** thin film; micro-forming; laser driven flyer; spallation

### 引言

微机电系统技术和微电子技术的迅猛发展, 使得具有轻、薄、小等特点的微器件的需求量不断增加。微型金属零部件的加工变得越来越重要<sup>[1]</sup>。然而, 目前微器件的制造方法受到加工效率低、成本高、污染环境等问题的限制, 难以满足产业化生产要求, 使得基于传统塑性成形工艺的微成形技术很难得到迅速发展<sup>[2]</sup>。因此, 有必要开发一种无污染、高效率、低成本的微型零件加工技术。

激光驱动飞片加载金属薄膜层裂微成形是一种新型的微成形技术, 该技术利用飞片作为激光能量载体,

将激光能量转化为飞片动能, 高速运动的飞片撞击工件, 致使工件在膜基界面结合处发生层裂, 在模具的约束下, 实现金属薄膜的微成形。这种高速动态成形技术效率高、成本低、环境污染少, 并且具有很高的成形能力, 大大削弱了传统微成形技术中微尺寸效应的影响。CHENG 等人<sup>[3]</sup>发现, 激光诱导高压冲击波成形实验中, 材料的应变率极高, 成形能力高于准静态成形。

### 1 金属薄膜/基体界面层裂及成形机理

图1所示为激光驱动飞片加载冲击波诱导金属薄膜层裂微成形模型图, 整个装置由激光器、凸透镜、约束层、飞片、飞行腔、工件及模具组成。

脉冲激光经透镜聚焦后, 穿过透明的约束层到达飞片, 烧蚀表面部分膜层, 产生高温高压等离子体, 等离子体膨胀爆破驱动剩余的膜层高速飞行<sup>[4]</sup>, 撞击基

作者简介: 刘国芳(1986-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光驱动飞片成形的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: chygao@ujs.edu.cn

收稿日期: 2011-09-13; 收到修改稿日期: 2011-10-17

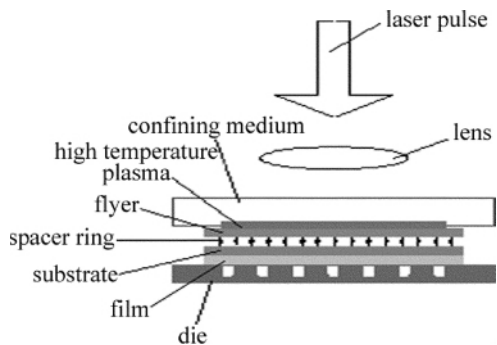


Fig. 1 The model picture of spallation delamination micro-forming

体/薄膜工件,产生高压冲击波。压力脉冲到达模板凹腔处时,薄膜后表面相当于自由表面,根据波与界面反射规律<sup>[5]</sup>,此处压缩波反射为拉伸波(稀疏波),并且与入射压力冲击波的卸载波相遇形成拉伸应力区。当拉伸应力达到或者超过薄膜/基体的结合强度时,薄膜/基体界面结合处将发生层裂。当压缩冲击波到达模板实体区时,压缩波反射后仍为压缩波,因此与实体区对应的工件不会发生层裂。图 2 为层裂微成形中冲击波的传播与相互作用的原理图,是实验层裂成形部分的局部放大。从图中可以看出,以凹腔棱边为界,薄膜左右两侧粒子运动速度方向相反,形成剪切力,当此剪切强度超过薄膜的剪切极限强度时,薄膜层裂部分与未层裂部分分离,形成与模板凹腔特征形状相同的微结构,达到成形的目的。

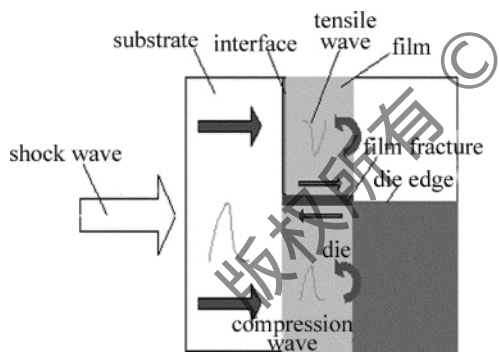


Fig. 2 Propagation and interaction principal diagram of shock wave in spallation and micro-forming experiments

## 2 层裂及成形实验

实验中采用 Spilight 2000 型 Nd:YAG 激光器,主要参量为激光波长  $1064\mu\text{m}$ ,脉冲宽度为 8ns,光斑大小和单脉冲能量可调,激光束呈准高斯分布。实验中所用的模具如图 3 所示,利用电路板雕刻机上的微铣功能,在印刷电路板上加工出一系列的圆孔特征,孔直径为 1mm,深度为 2mm。飞行腔选用厚度为  $200\mu\text{m}$  的盖玻片,利用纳秒激光雕刻机在圆形盖玻片中心位置加工出直径为  $\varnothing 3\text{mm}$  的圆孔,得到  $\varnothing 3\text{mm} \times 200\mu\text{m}$  的飞行腔。

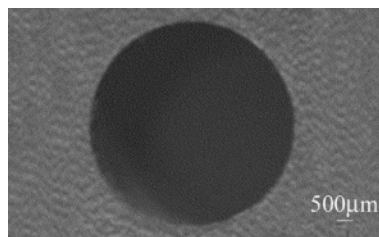


Fig. 3 Die appearance

实验中所用基体材料为  $100\mu\text{m}$  的无色透明聚对苯二甲酸乙二酯 (polyethylene terephthalate, PET),剪裁成尺寸为  $20\text{mm} \times 20\text{mm}$  的小块,经丙酮清洗烘干后,用磁控溅射的方法在 PET 上镀 200nm 的铂金(纯度为 99.95%)薄膜。

约束层选用厚度为 2mm 的 K9 玻璃。约束层可以延长等离子体作用于飞片上的时间,达到激光脉宽的 3 倍左右<sup>[6]</sup>,并且大幅度提高激光作用的冲击压力<sup>[7]</sup>。

## 3 层裂微成形特征

### 3.1 层裂最优参量

初始加载应力一定的情况下,调节激光器参量使得基体/薄膜处拉伸应力达到最大有利于薄膜/基层层裂。薄膜自由表面处与薄膜/基体结合界面处应力幅值比值为<sup>[8]</sup>:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2 - 2\cos(2dk)}} \quad (1)$$

式中  $d$  为薄膜厚度,  $k$  为薄膜内波数,且  $k = \omega/c$ ,其中  $\omega$  为应力波在薄膜中传播的角频率,  $c$  为应力波在薄膜中传播的角速度。将 (1) 式进一步转化为:

$$\frac{1}{\beta} = \sqrt{2 - 2\cos\left(\frac{4t_0}{\tau}\pi\right)} \quad (2)$$

式中  $t_0 = d/c$  称为薄膜当量时间宽度,  $\tau$  表示应力冲击波脉冲宽度。可以看出,当  $t_0 \geq \frac{1}{4}\tau$  时可得到最大

拉伸应力值。综上可以得出:在冲击应力波一定的情况下,薄膜/基体最优层裂的条件是应力波的脉冲宽度小于薄膜当量时间宽度的 4 倍。

### 3.2 加载压力

根据能量守恒定律,激光诱导冲击波的峰值压力<sup>[7]</sup>为:

$$p_{\max} = 0.01 \times \left(\frac{\alpha}{2\alpha + 3}\right)^{1/2} Z^{1/2} I_0^{1/2} \quad (3)$$

式中  $p_{\max}$  为激光诱导峰值压力;  $\alpha$  为常数,通常取为 0.1;  $Z$  为约束层与工件之间的声阻抗;  $I_0$  为激光功率密度。

### 3.3 层裂微成形薄膜应变率

在韧性断裂情况下,根据拉伸应力加载过程中动

能、势能和局部塑性变形所耗能量相平衡的原则,层裂片厚度与应变率关系为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{aligned}\sigma &= (8\sigma_y V_0)^{1/2} \rho^{-1/2} \varepsilon^{-1} \Rightarrow \\ \varepsilon &= (8\sigma_y V_0)^{1/2} \rho^{-1/2} \delta^{-1}\end{aligned}\quad (4)$$

式中  $\sigma_y$  为屈服强度,  $V_0$  为临界空洞体积分,  $\rho$  是材料密度,  $\delta$  为层裂片厚度,  $\varepsilon$  为应变率。由此得出的应变速率比普通机械撞击产生的应变速率要大得多。

#### 4 实验结果及分析

实验中单脉冲激光能量分别为 515mJ, 535mJ, 675mJ, 835mJ, 1020mJ 和 1200mJ, 光斑直径为 4mm, 离焦量为 30mm, 得到了一系列不同激光能量作用下工件的铂膜与 PET 基底在结合界面处层裂及铂膜成形图像。

图 4 为不同激光能量作用下工件层裂及微成形图。可以看出,在激光能量逐渐增大的过程中,基底 PET 始终保持完好,未出现裂纹或变形,铂膜却表现出一系列的动态变化;随着激光能量的增大,铂膜与 PET 的分离程度和复制模具特征的能力也随之增强;在激光能量为 515mJ 时,膜基结合界面上开始发生层裂,但在模具特征区铂膜基本上没有与 PET 脱离,只在铂膜表面出现模具特征的压痕;在激光能量为 535mJ 时,拉伸应力超过 PET/铂膜的结合强度,膜基层裂现象明显;随着激光能量的继续增加,膜基不仅在界面结

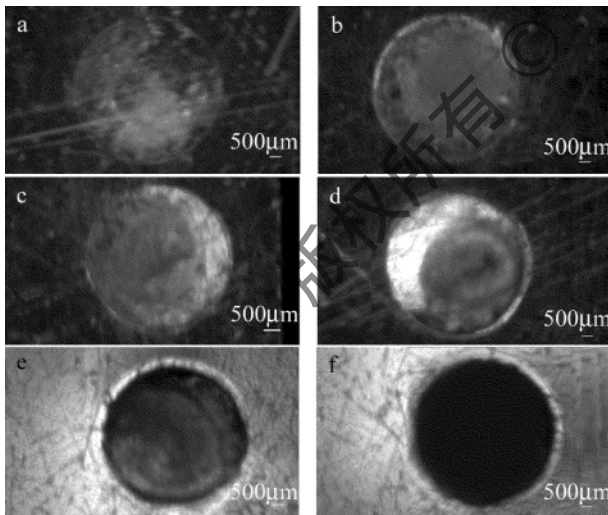


Fig. 4 Spallation and micro-forming figure under different laser energy a—515mJ b—535mJ c—675mJ d—835mJ e—1020mJ f—1200mJ

合处发生层裂,铂膜也在一定程度上开始复制模具圆孔特征;当激光能量升至 1200mJ 时,冲击波在铂膜内部形成的剪切力大于铂膜的剪切极限强度,铂膜层裂部分与未层裂部分的铂膜分离,铂膜表面形成与模板形状相同的特征结构。

#### 5 结论

激光驱动飞片加载金属薄膜层裂微成形是一种新的微成形手段,它以飞片为载体,利用激光直接作用于飞片使其以极高的冲击速度撞击工件,产生高压冲击波,使得工件在膜基界面结合处发生层裂,在模具的约束下,使薄膜基体上出现与模具特征形状相同的微结构。运用这种成形方法可以在微纳米级厚度薄膜上获得微结构特征,与激光刻蚀等方法相比,得到的微结构边缘质量更高,而且,这种高速动态成形技术可以产生极高的冲击压力和应变率,很大程度上削弱了微尺度效应的不利影响,提高了成形能力。

#### 参考文献

- [1] HSU T R. MEMS and microsystems: design and manufacture [M]. Boston: McGraw-Hill, 2002: 201-250.
- [2] WANG X, YANG K, LIU H X, *et al.* Research and numerical simulation on metal foil forming under laser driven flyer [J]. Journal of Plasticity en Gineering, 2009, 16(1): 25-30.
- [3] CHENG G J, PIRZADA D, ZHOU M. Microstructure and mechanical property characterizations of metal foil after microscale laser dynamic forming [J]. Journal of Applied Physic, 2007, 101(6): 063108-063116.
- [4] PAISLEY D L. Laser-driven miniature flyer plates for shock initiation of secondary explosives, DE89016587 [R]. Los Alamos, New Mexico, USA: Los Alamos National Laboratory, 1989: 14-17.
- [5] MEYERS M A. Dynamic of materials [M]. New York: Wiley, 1994: 128-143.
- [6] PEYRE P, FAHBRO R. Laser shock processing: a review of the physics and applications [J]. Optical & Quantum Electronics, 1995, 27(1): 1213-1229.
- [7] FABBRO R, FOURNIE J, BALLARD P, *et al.* Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(2): 775-784.
- [8] ZHOU M, ZHANG Y K, CAI L. Measurement of film interface tension strength by the laser spallation technique [J]. Science in China, 2002, 32(1): 28-36 (in Chinese).
- [9] GRADY D E. The spall strength of condensed matter [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1988, 36(3): 353-384.