

# 激光层裂微成形技术影响因素研究

高传玉 刘国芳 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, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 由于目前的微塑性成形技术存在尺寸效应、成形不均匀、加工效率低、成本高、污染环境等问题, 讨论并研究了一种新的微成形方法——激光层裂微成形技术。建立了理论模型分析研究在激光驱动飞片加载下薄膜与基体层裂及薄膜微成形的影响因素, 设计并完成了实验, 考察了激光能量、薄膜厚度及薄膜种类对激光层裂微成形的影响。研究发现, 该技术可以实现薄膜微成形, 激光能量大小及薄膜的种类是影响薄膜与基体层裂的关键因素, 一定范围内薄膜厚度对薄膜成形影响较小, 但是超出其范围对薄膜成形将有重要影响作用。因此, 激光层裂微成形是具有应用前景的可控制与可操作的薄膜微成形技术。

**关键词** 激光技术; 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**: 10.3788/LOP50.041403

## Research on Influential Factors of Laser Spallation Micro-Forming Technique

Gao Chuanyu Liu Guofang Yang Xiaohong Ma Ming Li Qijun

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

**Abstract** Laser spallation technique, as a new micro-forming processing technique, is discussed, because several disadvantages exist in current micro-forming processing including size effect, unevenness in forming, low efficiency, high cost and high pollution. A theoretical analysis model is established to investigate the influential factors of thin films and substrate spallation under laser driven flyer. Laser energy, film thickness and type of film are investigated in experiment as they may affect the outcome of laser spallation micro-forming. The experiments show that the technique can achieve microstructure forming of thin films, and laser energy and film type are deciding factors in interfacial spallation. Film thickness within a certain range is less important, but it has significant influence on thin films micro-forming when it is out of the certain range. Therefore, laser spallation has the potential to become a controllable thin films micro-forming technique for commercial applications.

**Key words** laser technique; thin films; micro-forming; laser driven flyer; spallation

**OCIS codes** 140.3390; 310.3840

## 1 引言

20世纪90年代出现了应用传统塑性加工工艺制备微型零件的微塑性成形新技术<sup>[1]</sup>, 可用于生产微米级尺寸的零件。随着微电子技术和微机电系统技术的迅猛发展, 微塑性成形已成为微型器件制造领域的关键技术。然而目前微器件的制造方法受到尺寸效应、成形不均匀、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, 有必要开发一种高应变率、高效、无污染的微零件加工技术。

激光层裂微成形是一种新型的微成形技术, 该技术将薄膜技术与激光冲击技术融为一体, 利用激光驱动飞片高速运动撞击工件, 致使工件发生层裂微成形, 实现纳米级的材料微成形。这种高速动态成形技术避免了激光与箔材的直接作用, 层裂微成形的工件具有很好的表面质量, 并且有效避免了传统微成形技术中尺寸

**收稿日期**: 2012-11-19; **收到修改稿日期**: 2013-01-07; **网络出版日期**: 2013-03-14

**基金项目**: 国家自然科学基金(50975128)资助课题。

**作者简介**: 高传玉(1955—), 男, 教授, 主要从事先进制造技术与激光加工等方面的研究。E-mail: chygao@ujs.edu.cn

效应带来的影响。Cheng 等<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。单一的微纳尺度箔材制作目前还具有一定难度,而采用激光薄膜层裂微成形可以方便地实现一些微纳成形零件的制作。本文通过研究激光薄膜层裂微成形技术的影响因素,以进一步掌握并控制该技术,为今后的研究应用提供依据。

## 2 层裂微成形原理

激光驱动飞片技术是 20 世纪 80 年代末迅速发展起来的一种新型动高压加载技术,在冲击动力学、高压物理、武器物理以及航空航天等领域具有广阔的应用前景<sup>[4~7]</sup>。激光驱动飞片加载基体/金属薄膜层裂微成形是将激光能量转化为飞片的动能撞击工件,产生高压冲击波,压力冲击波在模具圆孔上方的薄膜后自由表面反射为拉伸波,此拉伸波与入射压力冲击波的卸载波部分相遇形成拉伸应力,当拉伸应力达到或超过一定强度时,工件将在基体与金属薄膜的界面结合处发生层裂,金属薄膜在微模具的约束与冲击波的作用下发生断裂,形成与模板特征形状相同的微结构,达到成形的目的。

图 1 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。

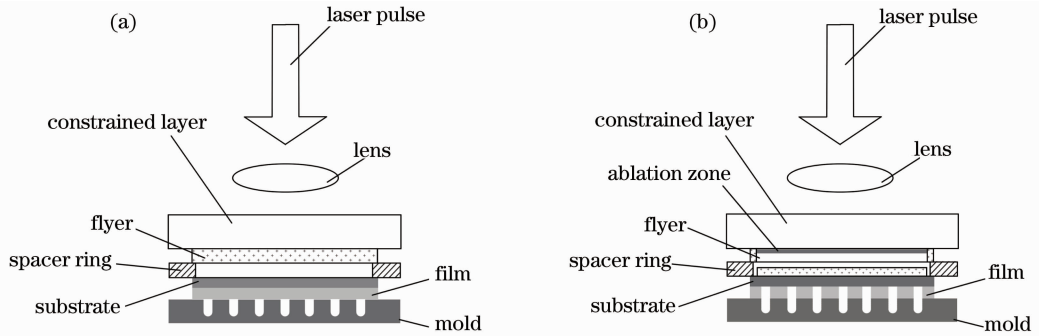


图 1 基体-金属薄膜层裂微成形模型图。(a)层裂微成形前;(b)层裂微成形后

Fig. 1 Model of spallation micro-forming of substrate-metal thin film. (a) Before spallation micro-forming; (b) after spallation micro-forming

Fabbro 等<sup>[8]</sup>根据约束层对激光诱导冲击波压力的影响,进行了系统的研究,根据能量守恒原理,推导出冲击波的峰值压力计算公式:

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

其中

$$I_0 = 4E/(\pi d^2 \Delta t), \quad (2)$$

式中  $P_{\max}$  为峰值压力,  $\alpha$  为常数,通常取 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,  $E$  为单脉冲激光能量,  $d$  为光斑直径,  $\Delta t$  为脉冲宽度。

基于冲击波在各种自由表面和膜基界面上的多重反射和透射分析的数学模型,并结合层裂特点,得到膜基结合界面的应力  $\sigma_{ts}$  为<sup>[9]</sup>

$$\sigma_{ts} = \frac{1 + R_f \exp(2\delta k_f i)}{1 - R_f R_{f/s} \exp(2\delta k_f i)} \sigma_1, \quad (3)$$

式中  $\exp(2\delta k_f i)$  表示应力波在薄膜后自由表面反射后相位滞后  $2\delta/c_f$ ,  $\sigma_1$  为初始入射应力波穿过膜基界面透射进入薄膜的应力波,与上述  $P_{\max}$  相对应;  $R_f$  表示冲击波在薄膜自由表面的反射系数,取值为  $-1$ ;  $R_{f/s}$  表示冲击波由薄膜向基体方向传播时在膜基界面处的反射系数,  $\delta$  为薄膜厚度,  $k_f$  为波数。  $R_{f/s} = (z_s - z_f)/(z_s + z_f)$ ,  $z_s$  表示基体的声阻抗,  $z_f$  表示薄膜的声阻抗,声阻抗可以用介质密度  $\rho$  与应力波在此介质密度中传播的速度  $c$  表示,即可表示为  $z = \rho c$ 。

由膜基界面的结合应力可以看出,膜基界面结合强度的大小主要和入射激光参数以及基体、薄膜和约束层的声阻抗有关,基体与薄膜的厚度对膜基界面结合强度影响不大。但薄膜的断裂成形却与薄膜的厚度有

直接关系。以圆孔边缘为界,当薄膜与基体层裂后,薄膜在冲击波拉伸应力的作用下,薄膜左右两侧粒子的运动速度方向相反,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,达到冲裁的目的,实现薄膜的微成形效果。此剪切力的大小可由如下公式求得<sup>[10]</sup>:

$$F_{\max} = \pi d_1 t_f S_f S_u, \quad (4)$$

式中  $d_1$  为冲裁孔径,  $t_f$  为材料厚度,  $S_f$  为材料抗拉伸强度,  $S_u$  为剪切因子。根据实验条件可以得到  $d_1$  和  $t_f$ ; 一般情况下,  $S_u$  的取值范围为 0.7 ~ 0.8。

### 3 实验

激光层裂微成形实验采用 Spitzlight 2000 型 Nd:YAG 激光器,主要参数为:脉冲宽度 8 ns,激光波长 1064  $\mu\text{m}$ ,单脉冲能量可调,光斑直径 4 mm,激光束呈准高斯分布。实验装置和所用的模具如图 2 和图 3 所示,整个模板直径大小为 3 mm,内部含数百个圆形凹腔,凹腔深度为 27  $\mu\text{m}$ ,单个凹腔直径为 150  $\mu\text{m}$ ,飞片选用 10  $\mu\text{m}$  厚的铝箔,飞行腔选用厚度为 200  $\mu\text{m}$  的盖玻片,在圆形盖玻片中心位置加工出直径为 5 mm 的圆孔,得到  $\phi 5 \text{ mm} \times 200 \mu\text{m}$  的飞行腔。

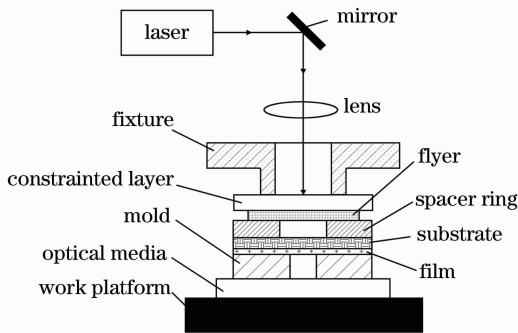


图 2 激光层裂微成形实验装置

Fig. 2 Experimental setup for the laser spallation micro-forming

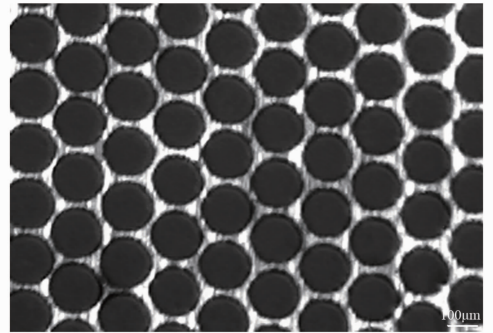


图 3 模具外观图

Fig. 3 Die appearance

实验所用的基体材料为 100  $\mu\text{m}$  的无色透明聚对苯二甲酸乙二酯(PET),裁成尺寸为 15 mm  $\times$  15 mm 的小块,经丙酮清洗并烘干后,用磁控溅射的方法在不同的 PET 薄膜块上镀厚度分别为 100、200、300、400 nm 的铂金(纯度为 99.95%)薄膜和厚度分别为 100、200、400、800 nm 的银(纯度为 99.95%)薄膜。

实验约束层选用厚度为 2 mm 的 K9 玻璃。约束层可以大幅度提高激光作用的冲击压力<sup>[8]</sup>并且可以延长等离子体作用于飞片上的时间<sup>[11]</sup>。

#### 3.1 激光能量对层裂微成形的影响

激光能量是金属薄膜层裂微成形的重要工艺参数,选择合适的激光能量有利于得到较好的层裂微成形效果。选择的实验材料为 PET/200 nm 铂膜,激光能量分别设为 515、675、1020、1200 mJ,得到了一系列在不同激光能量作用下铂膜与基体 PET 在结合界面处层裂及铂膜微成形的图像,如图 4 所示。

可以看出,在激光能量不断变化的过程中,基体一直保持完好,未出现变形或断裂,而铂膜却表现出一系列的动态变化。随着激光能量的不断增大,铂膜与基体的层裂现象越来越明显,铂膜微成形的能力也随之增强。当激光能量为 515 mJ 时,激光束中心区域膜基结合界面上开始发生层裂,但由于激光能量过小,造成层裂的范围很小,铂膜的微成形效果并不明显,也没有出现明显的模具圆孔棱边;在激光能量为 675 mJ 时,层裂范围扩大,膜基层裂现象明显,但圆孔棱边依旧模糊不清;随着激光能量的继续增加,膜基层裂现象越来越显著,铂膜微成形性能增强,圆孔棱边开始变得平整光滑、界限分明;当激光能量升至 1200 mJ 时,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。这说明当基体与薄膜厚度一定时,膜基界面结合强度与薄膜断裂的抗力一定,此时激光能量越大,越有利于薄膜与基体的层裂及薄膜的微成形。

#### 3.2 薄膜厚度对层裂微成形的影响

实验中选择的基体材料为 100  $\mu\text{m}$  的 PET 薄膜,并在 PET 上镀厚度分别为 100、200、300、400 nm 的铂



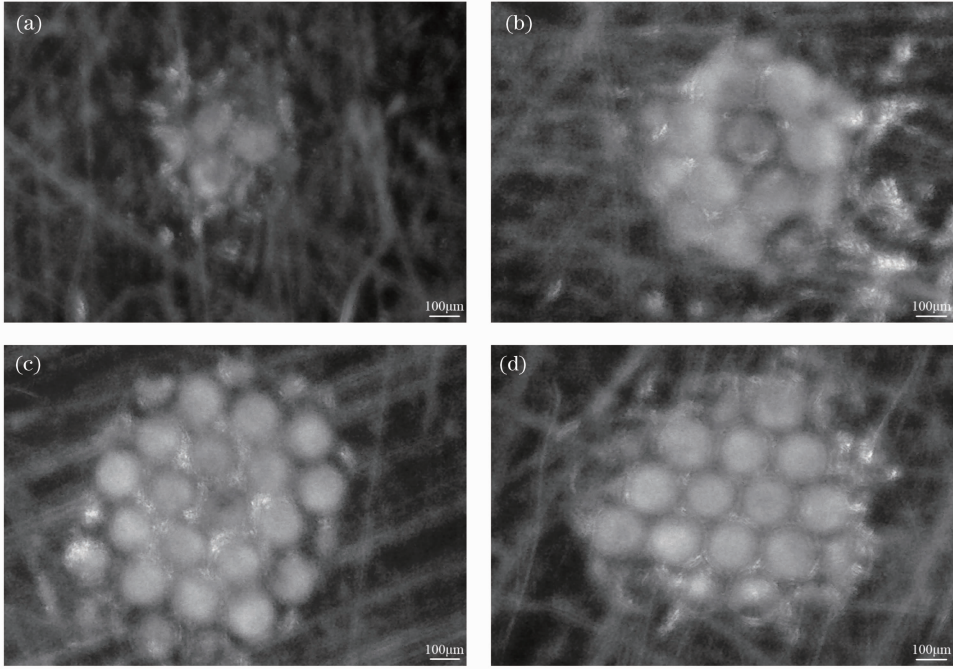


图 4 不同激光能量作用下层裂及微成形图。(a) 515 mJ; (b) 675 mJ; (c) 1020 mJ; (d) 1200 mJ  
 Fig. 4 Spallation and micro-forming figures under different laser energies. (a) 515 mJ; (b) 675 mJ;  
 (c) 1020 mJ; (d) 1200 mJ

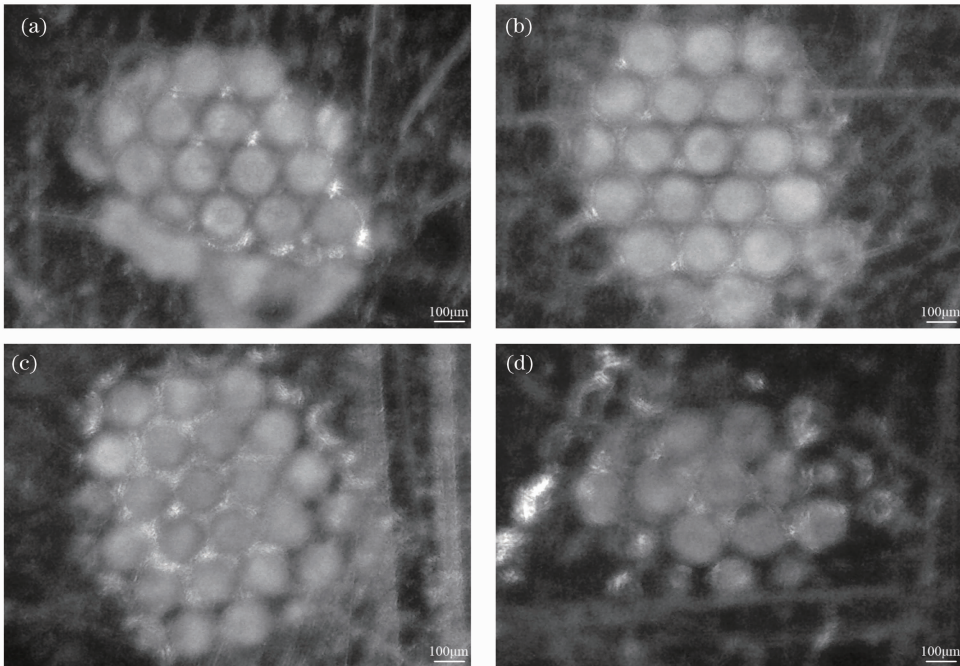


图 5 不同厚度薄膜层裂微成形图。(a) 100 nm; (b) 200 nm; (c) 300 nm; (d) 400 nm  
 Fig. 5 Spallation micro-forming figures of platinum films with different thicknesses. (a) 100 nm;  
 (c) 300 nm; (d) 400 nm

金薄膜,激光能量均为 1200 mJ。由图 5 可见,当薄膜厚度为 100、200 nm 时,得到了较好的层裂及微成形效果,成形区域基本上层裂完全,铂膜上出现的特征与模板特征基本一致,圆孔特征清晰规则,圆孔棱边平整光滑;但随着薄膜厚度的增加,当薄膜厚度为 300 nm 时,层裂及微成形效果较 100、200 nm 薄膜的实验效果稍差一些,体现最明显的是圆孔的成形开始变得模糊,与模板的圆孔特征的相似度下降且圆孔棱边的光滑度下降;当薄膜厚度为 400 nm 时,薄膜成形部分基本没有断裂分离,只在激光束中心区域出现不明显的层裂及

微成形效果。这说明随着薄膜厚度的增加,薄膜与基体的结合强度虽变化不大,但薄膜断裂抗力增加,在一定的激光能量下,膜的断裂成形难度上升。

### 3.3 不同类型薄膜对层裂微成形的影响

实验中选择的基体材料为 100  $\mu\text{m}$  的 PET 薄膜,并在 PET 上镀厚度分别为 100、200、400、800 nm 的银薄膜,激光能量都为 1200 mJ。

由图 6 所示,当银膜厚度为 100、200 nm 时,层裂及微成形效果较好;当银膜厚度为 400 nm 时,开始出现了断裂不完全的现象,但层裂效果较好;当薄膜厚度为 800 nm 时,薄膜的层裂微成形区域变小,薄膜的层裂部分在冲击波拉伸应力的作用下向下凹陷,基本没有实现断裂成形。

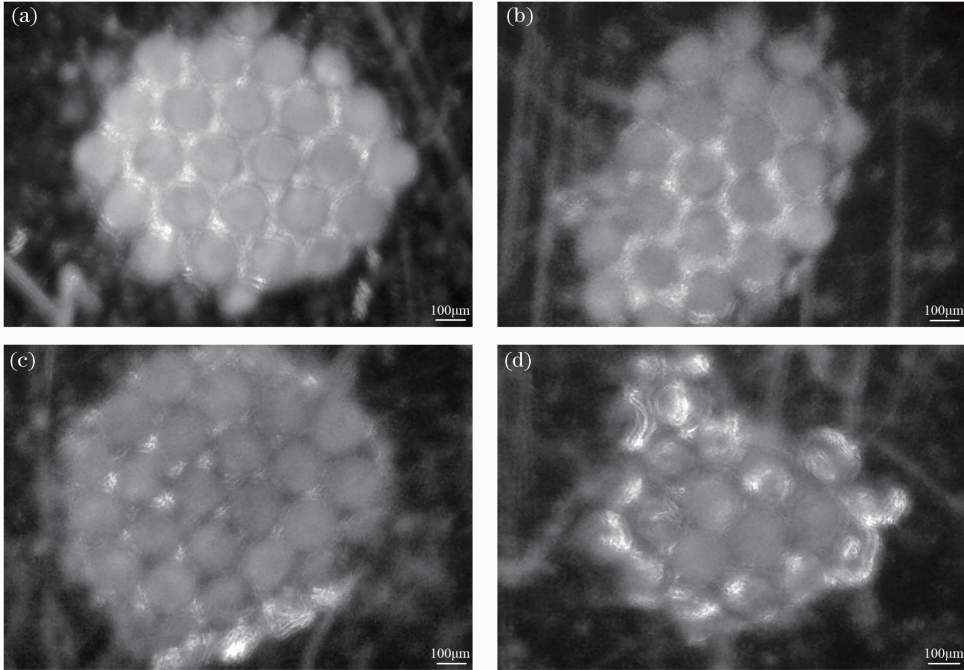


图 6 不同厚度银膜层裂微成形图。(a) 100 nm; (b) 200 nm; (c) 400 nm; (d) 800 nm

Fig. 6 Spallation micro-forming figures of silver films with different thicknesses. (a) 100 nm; (b) 200 nm; (c) 400 nm; (d) 800 nm

与上述不同厚度铂膜实验对比可以发现,在相同的激光参数及薄膜厚度下,银膜的层裂及微成形效果较好;这是因为,银膜与基体的界面结合强度小于铂膜与基体的界面结合强度,更易发生层裂,并且在相同薄膜厚度的前提下,银膜剪切极限强度小于铂膜剪切极限强度,更易断裂成形。

## 4 结 论

利用实验研究了激光驱动飞片加载金属薄膜层裂微成形的影响因素,考察了激光能量大小、薄膜厚度及薄膜种类对薄膜层裂微成形的影响。研究发现,激光能量大小与膜基结合强度大小是影响膜基层裂的关键因素,当冲击波拉伸应力超过膜基结合强度时,层裂即可发生,而薄膜与基体的声阻抗与厚度决定膜基结合强度大小,其中薄膜与基体的声阻抗更为重要;一定范围内薄膜的厚度对层裂微成形影响较小,但是当薄膜的厚度增加到一定程度时对层裂成形影响所起作用非常显著;薄膜的种类决定薄膜的声阻抗及薄膜的抗剪切强度,对膜基层裂及薄膜断裂成形起直接影响作用。因此,激光层裂微成形是具有应用前景的可控制与可操作的薄膜微成形技术。

## 参 考 文 献

- 1 M. Geiger, M. Kleiner, R. Eckstein *et al.*. Microforming[J]. *Annals of the CIRP*, 2001, **50**(2): 445~462
- 2 Wang Xiao, Yang Kun, Liu Huixia *et al.*. Research and numerical simulation on metal foil forming under laser driven flyer

- [J]. *J. Plasticity Engineering*, 2009, **16**(1): 25~30  
王 霄, 杨 昆, 刘会霞 等. 激光驱动飞片加载金属箔板成形及数值模拟[J]. 塑性工程学报, 2009, **16**(1): 25~30
- 3 Gary J. Cheng, Daniel Pirzada, Zhou Ming. Microstructure and mechanical property characterizations of metal foil after microscale laser dynamic forming [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(6): 063108
- 4 S. Watson, M. J. Gifford, J. E. Field. The initiation of fine grain pentaerythritol tetranitrate by laser-driven flyer plates [J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **88**(1): 65~69
- 5 D. C. Swift, J. G. Niemczura, D. L. Paisley *et al.*. Laser launched flyer plates for shock physics experiments[J]. *Rev. Scient. Instrum.*, 2005, **76**(9): 093907
- 6 Sun Chengwei, Zhuang Shiming, Wang Chunyan. Calculation of shock initiation of explosives impacted by the laser driven flyer [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, **9**(3): 471~476  
孙承纬, 庄仕明, 王春彦. 激光驱动飞片冲击引爆炸药的计算[J]. 强激光与粒子束, 1997, **9**(3): 471~476
- 7 R. Roybal, C. Stein, C. Miglionico *et al.*. Laboratory simulation of hypervelocity debris [J]. *Internat. J. Impact Engineering*, 1995, **17**(4): 707~718
- 8 R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2): 775~784
- 9 Zhou Ming, Zhang Yongkang, Cai Lan. Measurement of film interface tension strength by the laser spallation technique [J]. *Science in China Series E*, 2002, **32**(1): 28~36  
周 明, 张永康, 蔡 兰. 激光层裂法定量测定薄膜界面结合强度[J]. 中国科学 E 辑, 2002, **32**(1): 28~36
- 10 M. Geiger, F. Vollertsen, R. Kals. Fundamentals on the manufacturing of sheet metal microparts [J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 1996, **45**(1): 277~282
- 11 P. Peyre, R. Fabbro. Laser shock processing: a review of the physics and applications [J]. *Opt. & Quantum Electron.*, 1995, **27**(12): 1213~1229