

文章编号 1004-924X(2014)07-1743-08

## 激光冲击驱动飞片成形性能

周建忠,戴磊\*,黄舒,孟宪凯,王霄,刘会霞  
(江苏大学机械工程学院,江苏镇江 212013)

**摘要:**研究了激光冲击驱动飞片成形中相关工艺参数对成形性能的影响。采用适合高压高应变率的 Johnson-Cook 模型,基于 ANSYS/LS-DYNA 软件平台,数值模拟了激光冲击驱动飞片成形胀形过程中激光能量、成形模具孔径以及模具圆角率与成形件成形高度的关系。分析表明,随着激光功率密度、成形模具孔径和模具圆角率的增加,胀形件成形高度均随之增加,胀形件的最大成形高度为 310.6  $\mu\text{m}$ 。对厚度为 50  $\mu\text{m}$  的铜箔材进行了激光冲击驱动飞片成形实验,利用体视显微镜和形貌测量仪对获得的胀形件试样进行了二维和三维形貌测试,验证了数值模型的合理性。本文建立的数值模拟分析方法为激光冲击驱动飞片成形胀形过程的预测和控制提供了手段。

**关键词:**激光成形;激光冲击;飞片成形;数值模拟

**中图分类号:** TN249; TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142207.1743

## Formability of laser shock-induced high speed flyers

ZHOU Jian-zhong, DAI Lei\*, HUANG Shu, MENG Xian-kai, WANG Xiao, LIU Hui-xia

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

\* Corresponding author, E-mail: dailei1010@126.com

**Abstract:** The effect of relevant process parameters on forming properties of laser shock flyers was investigated. By using the Johnson-Cook model suitable for a high pressure and a high strain rate and ANSYS/LS-DYNA software, the laser shock induced bulge forming of flyers was simulated to obtain the relation between the laser energies, forming die diameters and forming die fillet rates and the heights of forming parts. The analysis results show that as the laser power density, forming die diameter and the die fillet rate increase, the heights of bulging parts are increased, and the maximum height of bulging parts is 310.6  $\mu\text{m}$ . Finally, an experiment of laser shock induced forming of flyers was carried out on a copper foil with a thickness of 50  $\mu\text{m}$ . The two-dimensional appearance and three-dimensional microtopography of bulging parts were obtained with a stereomicroscope and a morphology measuring instrument. The results verify the reasonability of the numerical model. It concludes that the numerical simulation analysis method established in this paper can provide a means for the prediction and control of laser shock induced bulge forming processes of flyers.

**Key words:** laser forming; laser shock; flyer forming; numerical simulation

收稿日期:2013-08-22;修订日期:2013-10-06.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175235);江苏省自然科学基金资助项目(No. BK2012712);江苏大学大学生科研立项资助项目(No. 12A387)

## 1 引言

激光驱动飞片技术的研究始于 20 世纪 70 年代末<sup>[1-3]</sup>,其目的是为了实现在热核反应。近年来,随着激光技术的迅速发展,激光驱动飞片技术逐渐成为一种重要的动高压加载手段。通过实验测量或者理论模型计算都可以得到激光脉冲能量和飞片初始速度的定量关系<sup>[4-6]</sup>,同时获得平整性、完整性和重复性良好的飞片<sup>[7-8]</sup>。这些已有的研究成果为利用激光驱动飞片作为加载方式实现金属箔板冲压成形奠定了基础<sup>[9]</sup>。

江苏大学刘会霞等学者将激光驱动飞片技术引入微成形领域,首先利用脉冲激光冲击效应驱动飞片,然后高速运动的飞片与工件靶材发生碰撞实施动高压加载。当所加载的压力峰值高于材料动态屈服强度时,材料在微型凹模内会产生超快塑性变形,最终实现工件在微模具中的精确成形<sup>[10]</sup>。目前,关于激光驱动飞片技术的研究大多聚焦在如何得到具有优异平整性及完整性的高速运动飞片,或者将该技术作为一种动态超高压的加载机制引入到成形领域,对于飞片自身成形性能的相关探究在国内外文献中还很少涉及。

近年来,相关研究者在当前激光驱动飞片和激光冲击动态冲压成形技术<sup>[11-14]</sup>的基础上,利用高功率短脉冲激光诱导的高压冲击波作为微冲头剪切铜箔靶材得到飞片,同时运用成形模具将高速运动的飞片实施动态碰撞贴模成形,从而实现了脉冲激光剪切铜箔与飞片直接贴模成形的复合工艺<sup>[15]</sup>。但是,这些研究仅探讨了激光冲击驱动飞片成形的机理,并未深入探究实验过程中遇到的问题。为了研究激光冲击驱动飞片成形中相关工艺参数对最终成形结果的影响,考察飞片在高应变率下的成形特征,本文利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对激光冲击驱动飞片成形胀形件的过程进行了数值模拟研究,并对厚度为 50  $\mu\text{m}$  的铜箔材进行了激光冲击驱动飞片成形实验。通过实验结果与模拟结果的对比,验证了数值模型的正确性。

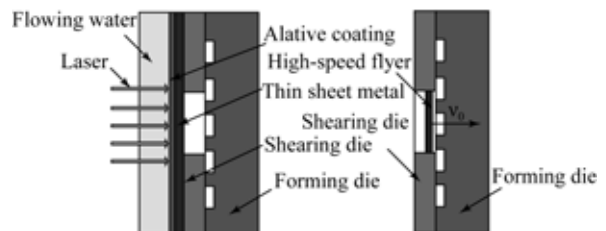
## 2 成形机理及特点

脉冲激光冲击飞片及利用高速运动的飞片进

行成形的原理如图 1 所示。整个成形装置依次由透明约束层、能量吸收层、金属靶材、剪切模具和成形模具组成,采用流动的水帘作为约束层,使得聚焦后的高功率密度脉冲激光可以穿过约束层作用于金属箔板表面,箔板的厚度大约为几十微米到几百微米之间<sup>[9]</sup>。激光冲击驱动飞片成形工艺过程如下:

(1)脉宽为数 ns 级的脉冲激光辐射到吸收层表面,致使吸收层材料迅速汽化,汽化部分材料形成高温高压等离子体,在激光脉宽时间内等离子体继续吸收激光能量并膨胀爆炸,产生 GPa 量级的冲击压力波剪切金属箔板获得飞片;

(2)飞片在冲击波压力作用下向前加速运动,高速运动的飞片经过飞行腔后与成形模具发生碰撞,在碰撞界面上对飞片产生反向的动态冲击力。若峰值压力超过飞片材料的动态屈服强度,飞片在成形模具中将产生超快塑性变形,成形飞片胀形件。该工艺具有超高压高应变率快速成形特性,在一定程度上可以克服微结构件的尺寸效应,有利于金属微小结构件的微塑性成形。



(a) 脉冲激光剪切金属箔板并驱动飞片 (b) 飞片贴模成形

(a) Pulse laser shearing metal foil and driving flyer (b) High speed flyer forming parts

图 1 激光冲击驱动飞片成形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser shock flyer forming

## 3 数值模拟

### 3.1 数值模拟条件

#### 3.1.1 材料本构模型

本文采用的材料本构方程 Johnson-Cook 塑性模型是一种特殊的 Mises 塑性模型,该模型考虑了加工硬化、应变率和温度影响的弹塑性本构关系。由于飞片获得过程中能量吸收层会保护靶材,不存在热效应的影响,从而表明剪切飞片是受冲击波力学效应作用,而不受热力学作用。因此

可以忽略 Johnson-Cook 塑性模型中温度效应的影响,于是材料本构关系可以简化成<sup>[16]</sup>:

$$\sigma = (A + B \cdot \epsilon^n) \left[ 1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right], \quad (1)$$

式中:  $\epsilon$  为等效塑性应变;  $\dot{\epsilon}$  为等效塑性应变率;  $A, B, C, n, \dot{\epsilon}_0$  为测得的材料常数。表 1 给出了材料铜的本构模型参数。

表 1 铜的本构模型参数

Tab.1 Parameters of constitutive model of copper

Material	A/MPa	B/MPa	C	n	$\dot{\epsilon}_0/s^{-1}$
Copper	150	170	0.015	0.34	1.0

飞片及成形模具部件特征均采用空间薄壳单元 SHELL163, 需考虑箔板翘曲所以采用 Belytschko-Wong 单元算法, 成形模具部件特征设置为刚体 MAT\_RIGID, 飞片材料采用 MAT\_JOHNSON\_COOK 模型, 飞片与成形模具之间用面-面接触 CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE。

### 3.1.2 模型建立

高速运动的飞片是采用平顶型单脉冲激光器冲击剪切靶材获得的。由于剪切模具呈中心对称结构, 且光斑直径大于剪切模具孔径, 为缩短计算时间, 选用 1/4 模型进行有限元模拟, 如图 2 所示。为了能够更好地呈现模拟过程, 对原来的飞片成形模型进行适当简化, 采用飞片-成形模具结构, 其尺寸与相应的实验参数保持一致。在网格划分时, 为了获得较为精确的飞片成形过程, 对飞片和成形模具刃口圆角处进行了网格细化处理, 飞片网格的单元长度为 0.025 mm、模具刃口圆角网格的单元长度为 0.005 mm, 而模具其他区域的粗网格单元长度为 0.15 mm。

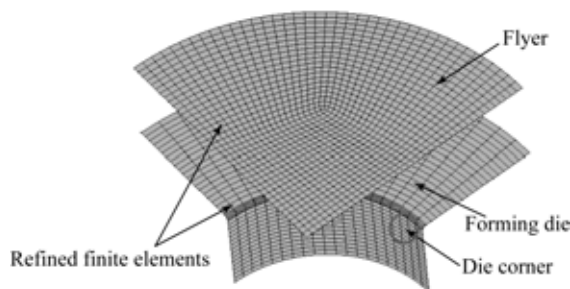


图 2 有限元模型及网格划分

Fig.2 Finite element model and mesh

### 3.1.3 冲击波压力加载

数值分析中激光冲击波压力加载需要得到激光功率密度  $I_0$ , 其计算公式为<sup>[13]</sup>:

$$I_0 = \frac{4aE}{\pi d^2 \tau}, \quad (2)$$

其中:  $a$  为激光吸收系数,  $E$  为激光能量,  $d$  为激光的光斑直径,  $\tau$  为激光脉宽。冲击波的峰值压力采用如下模型进行计算<sup>[15]</sup>:

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

其中:  $P_{max}$  为冲击波峰值压力;  $\alpha$  为常数, 一般取值为 0.1;  $Z = 2 / (1/Z_1 + 1/Z_2)$  为折合声阻抗,  $Z_1, Z_2$  分别为水和铜箔靶材的声阻抗, 分别为  $0.165 \times 10^7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}), 4.18 \times 10^7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $I_0$  为激光功率密度。激光诱导冲击波压力随时间的变化曲线如图 3 所示。为了便于模拟分析, 将冲击波压力加载方式简化为随时间变化的阶梯形斜坡加载, 由于光斑直径大于剪切模具孔径, 且采用平顶型激光脉冲, 冲击波压力载荷作用在整个飞片上表面。根据已有的文献研究, 约束模式下冲击波压力的脉宽为激光脉宽的 3 倍左右<sup>[17]</sup>, 由于实验激光器的脉宽为 10 ns, 所以设冲击波载荷的作用时间为 30 ns, 在相同加载方式条件下探究相关工艺参数对飞片成形结果的影响。

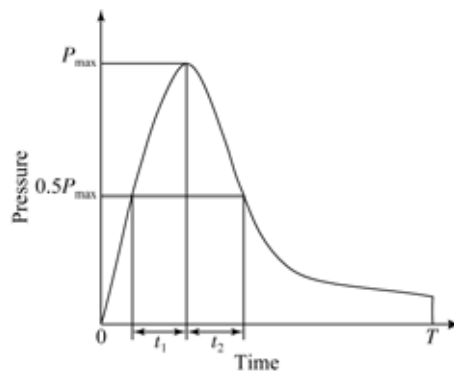


图 3 载荷随时间的变化曲线

Fig.3 Variation of load with time

## 3.2 模拟结果及分析

### 3.2.1 成形过程分析

图 4 给出了数值模拟中飞片的成形过程。在冲击波载荷施加前, 飞片保持静止状态, 距离成型模具上表面为飞行腔高度, 如图 4(a) 所示。在

$t=10 \mu\text{s}$ 施加冲击载荷。由于载荷作用,飞片获得高速并向下移动,高速运动的飞片完全穿过剪切模具的飞行腔,与成形模具上表面接触,如图 4(b)所示。当飞片与成形模具碰撞后,飞片边缘部分受到成型模具上沿表面的反向作用力而快速反弹,由于惯性作用飞片中间部分材料向模腔内塑性流动,形成中间部分被拉伸的胀形结构,如图 4(c)所示。随着时间的推移,飞片中间部分材料向模腔内的塑性流动变慢,速度降为零时产生反向回弹,直至整个胀形件各部分速度基本一致并飞离成形模腔,如图 4(d)所示。

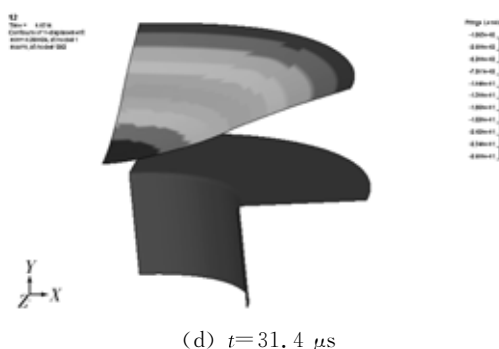
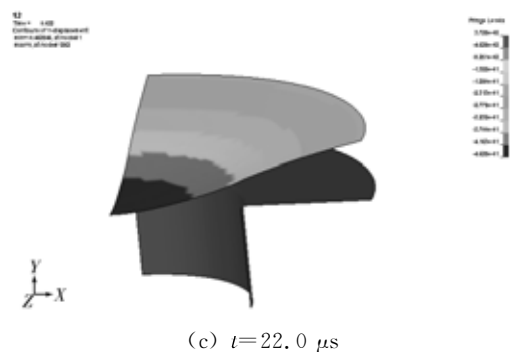
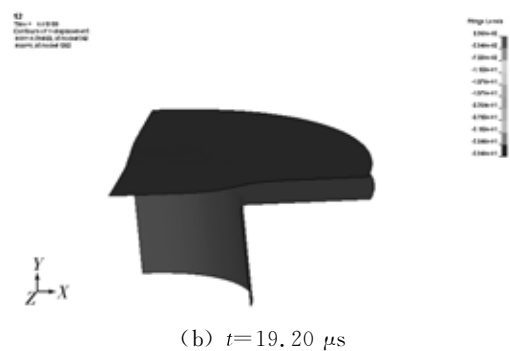
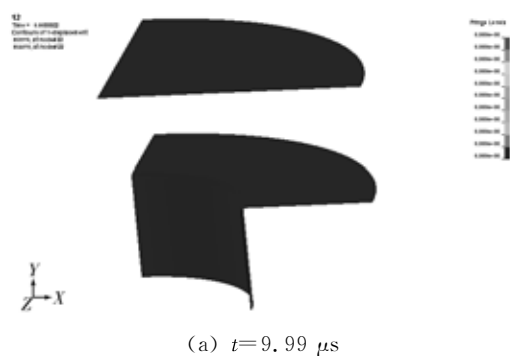


图 4 飞片成形胀形件过程

Fig. 4 Forming process of bulging parts with high-speed flyer

### 3.2.2 数值模拟中飞片节点位移分析

如图 5 所示,选取距离飞片中心不同的 5 个特殊节点,其中节点 82 处于飞片中心,节点 98 在成形模具的圆角处,节点 115 靠近飞片边缘,对这 5 个点进行成形过程中的位移分析,以考察支撑凹模对飞片成形过程中材料流动的影响。

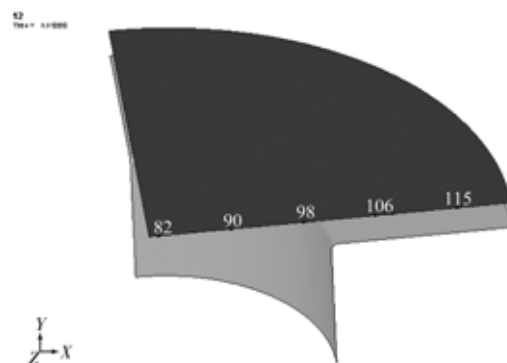


图 5 节点选取位置

Fig. 5 Positions of selected nodes

图 6 为 5 个节点的位移-时间曲线。当  $t < 0.01 \text{ ms}$  时,由于未施加冲击载荷,所以飞片中的 5 个节点位移曲线重合,是一条与时间轴平行的线段。在  $t=0.018 \text{ ms}$  附近,首先是曲线 D, E 分离,然后分离的曲线依次为 C, B, 最终曲线 A 也产生反向位移。当  $t > 0.025 \text{ ms}$  后,5 条曲线均近似于直线,且彼此之间相互平行,此时飞片成形反弹后整体反向位移。从图中还可以得出曲线 D, E 分离出来的时刻较曲线 A 进入反向直线段的时刻要提前  $0.0025 \text{ ms}$  左右,即反映出成形凹模对飞片成形过程中材料流动的影响特性,也说明飞片在该时间段内的塑性变形最大,进而形成胀形件。

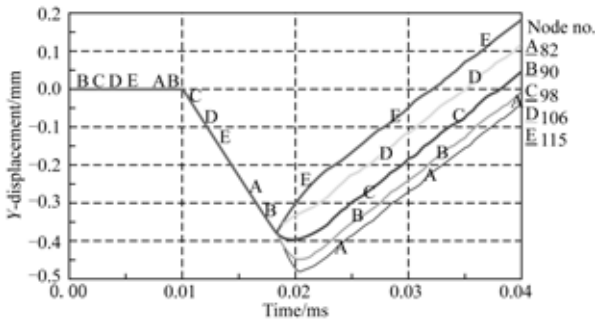


图 6 不同节点的位移-时间曲线

Fig. 6 Displacement-time curves of different nodes

3.2.3 激光能量对成形高度的影响

由初步探究可知<sup>[15]</sup>,成形胀形件的激光能量在 1.5 J 左右,所以选取 1.4, 1.45, 1.5, 1.55, 1.6 J 并将其换算成对应的激光功率密度进行研究。其余的模拟参数分别为:光斑直径 5 mm,铜箔靶材厚度 50 μm,剪切模具孔径 2 mm,成形模具孔径 1 mm。图 7 为不同激光功率密度对成形高度的影响,从图中可以看出,随着激光功率密度的增加,胀形件的成形高度递增。这是因为激光能量越大,激光冲击飞片可以获得的撞击速度越大,撞击惯性力也越大,因此能获得较大的胀形高度。

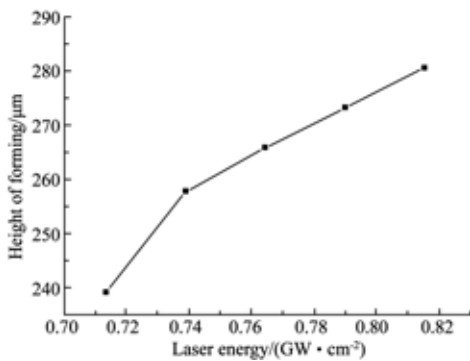


图 7 激光能量对成形高度的影响

Fig. 7 Effect of laser energies on heights of forming parts

3.2.4 成形模具孔径对成形高度的影响

图 8 给出了成形模具孔径不同时,胀形高度的变化趋势。选取的成形模具孔径分别为 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 mm。其余的模拟参数分别为:单次脉冲激光能量 1.5 J、光斑直径 5 mm,铜箔靶材厚度 50 μm,剪切模具孔径 2 mm。从图中可以看出,随着成形模具孔径的增加,胀形件成

形高度递增,且递增趋势逐渐放缓。这是因为采用较大的成形模具孔径,飞片成形部分的流动材料增多,成形凸起效果增强,可以获得较大的胀形高度,胀形件的最大成形高度为 310.6 μm。

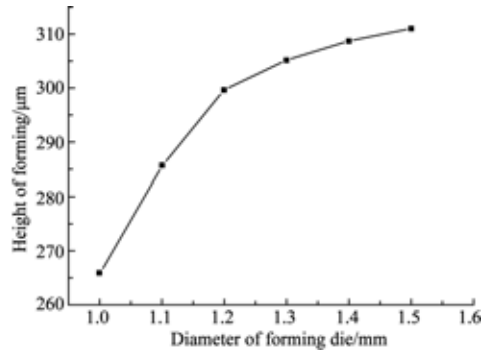


图 8 成形模具孔径对成形高度的影响

Fig. 8 Effect of die diameters on heights of forming parts

3.2.5 成形模具圆角率对成形高度的影响

图 9 给出了不同成形模具圆角率对成形高度的影响。选取的成形模具圆角率分别为 20, 40, 60, 80 μm。其余的模拟参数分别为:单次激光脉冲能量 1.5 J、光斑直径 5 mm,铜箔靶材厚度 50 μm,剪切模具孔径 2 mm,成形模具孔径 1 mm。从图中可以看出,随着成形模具圆角率的增加,胀形件的成形高度增大。这是因为采用较大的成形模具圆角率,增强了飞片材料向成形模具凹腔内的流动性,有利于凸起效果,可以得到较大的胀形高度。

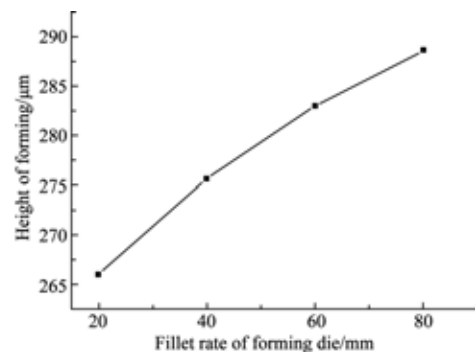


图 9 成形模具圆角率对成形高度的影响

Fig. 9 Effect of die fillet rates on heights of forming parts

4 成形实验

4.1 实验仪器及准备

激光冲击驱动飞片成形实验所采用的设备为

江苏大学激光技术研究所持有的法国 GAIA 短脉冲大功率 Nd:YAG 激光器,其基本参数为脉宽 10 ns,波长 1 064 nm,最大脉冲能量 12.5 J。值得注意的是,在成形实验过程中确保剪切模具刃口处的冲击波压力加载必须均匀一致,以得到平整性良好的高速运动的飞片,采用能量分布为平顶型的脉冲激光并将光斑直径设置为大于剪切模具通孔直径。实验中圆形光斑直径为 5 mm;试样靶材为厚度 50  $\mu\text{m}$  的纯铜箔材;选择流动的水帘作为透明约束层、黑漆作为能量吸收层;采用厚度为 0.4 mm 的特制合金钢薄板,并在薄板上加工通孔作为剪切模具和成形模具。最后采用德国蔡司 AxioCamERc5s 体视显微镜进行胀形件表面形貌的观察,AxioCSM700 真彩色共聚焦扫描显微镜进行成形件的三维形貌测量。

#### 4.2 实验结果分析

图 10 为脉冲激光能量为 1.5 J,剪切模具孔径为 2 mm,成形模具孔径为 1 mm 时获得的激光冲击驱动飞片成形胀形件在 AxioCamERc5s 体视显微镜下的外观图。由图可知,在该工艺参数下成形件具有良好的成形效果,胀形特征为中间凸起的胀形件;进一步观察可知,成形件表面质量优异,底部凸起成形光滑过渡,并且没有出现表面拉裂现象。这表明激光冲击驱动飞片的成形性能良好。

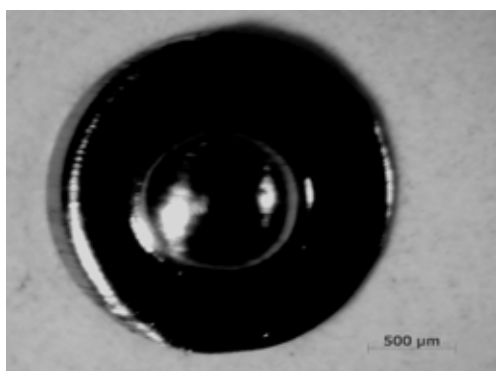
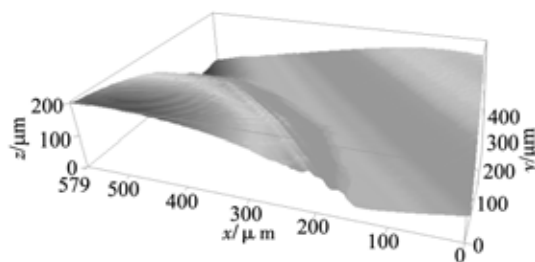


图 10 激光冲击飞片成形胀形件

Fig. 10 Bulging parts by laser shock flyer

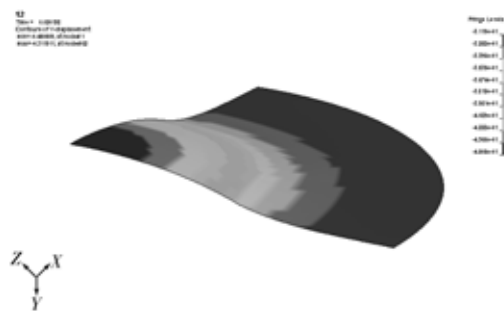
图 11 为在相同成形参数下,实验试样形貌测试云图与模拟结果云图的对比,从中可以看出模拟结果能够较好地反映实验现象。图 12 为在上述加工参数下,改变成形模具孔径所得的胀形件

胀形高度的实验值与模拟值对比。通过实验与模拟的对比可以看出,二者的吻合度较好,数值模拟可以较好地预测飞片的成形情况,同时也验证了所用数值模型的合理性。



(a) 实验试样 3D 形貌云图

(a) 3D microtopography of experimental sample



(b) 模拟结果云图

(b) Contour of numerical simulation results

图 11 胀形件三维形貌云图与模拟结果云图

Fig. 11 3D microtopography and numerical simulation contour of bulging parts

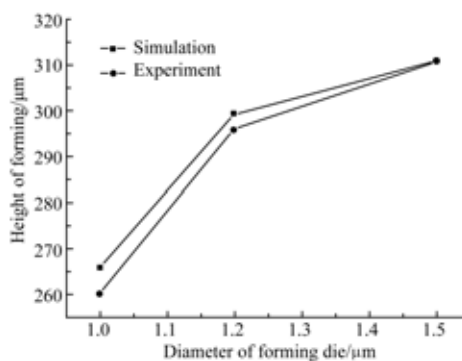


图 12 实验结果与模拟结果对比

Fig. 12 Comparison of experimental and numerical simulation results

## 5 结 论

本文采用 ANSYS/LS-DYNA 软件模拟了激

光冲击驱动飞片成形胀形件的实验,获得了胀形件在不同时刻成形过程的位移云图。模拟结果表明,随着激光功率密度、成形模具孔径、成形模具圆角率的增加,胀形件的成形高度均随之增加,胀形件的最大成形高度为 310.6  $\mu\text{m}$ 。

依据数值模拟中设定的工艺参数,对 50  $\mu\text{m}$  厚铜箔试样进行了激光冲击驱动飞片成形实验,

对获得的胀形件进行了三维形貌测量。结果表明,胀形件的成形效果良好、表面质量优异。实验结果验证了数值分析模型的合理性。所建立的数值模拟方法为激光冲击驱动飞片成形胀形件过程的预测和控制提供了手段,为研究激光冲击驱动飞片成形提供了依据,但在失效形式、成形极限等方面还有待做进一步深入研究。

### 参考文献:

- [1] GREHL P, SCHWIRZKE F, COOPER A W. Correlation of stress-wave profiles and the dynamics of the plasma produced by laser irradiation of plane solid targets[J]. *Journal of Applied Physics*, 1975, 46(10): 4400-4406.
- [2] DECOSTE R, BODNER S E, RIPIN B H, et al.. Ablative acceleration of laser-irradiated thin-foil targets[J]. *Physical Review Letters*, 1979, 42(25): 1673-1677.
- [3] COGAN S, SHIRMAN E, HAAS Y. Production efficiency of thin metal flyers formed by Laser ablation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(11): 113508-113513.
- [4] HE H L, KOBAYASHI T, SEKINE T. Time-resolved measurement of the launch of laser-driven foil plate[C]. *AIP Conf. Proc. Shock Compression in Condensed Matter*, 2002, 620: 1339-1342.
- [5] LUO S N, SWIFT D C, TIERNEY IV T E, et al.. Laser-induced shock waves in condensed matter; some techniques and applications [J]. *High Pressure Research*, 2004, 24(4): 409-422.
- [6] 唐孝容, 李剑峰, 张大勇, 等. 高速运动飞片的 F-P 干涉测量技术研究[J]. *激光技术*, 2007, 31(2): 172-174.
- TANG X R, LI J F, ZHANG D Y, et al.. Measurement of high-speed flyer using F-P cavity interferometer [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 172-174. (in Chinese)
- [7] OZAKI N, ESPOSITE M, NAZAROV W, et al.. Laser-driven flyer impact experiments at the LULI 2000 laser facility inertial[J]. *Journal de Physique IV*, 2006, 133: 1101-1105.
- [8] 代福, 龚自正, 曹燕, 等. 激光驱动飞片超高速发射技术实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(12): 3011-3014.
- DAI F, GONG Z ZH, CAO Y, et al.. Experiment study on technologies for laser-driven flyer hypervelocity launch [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(12): 3011-3014. (in Chinese)
- [9] 刘会霞. 激光驱动飞片加载金属箔板间接冲击微成形研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
- LIU H X. *Research on metal foil indirect shock micro forming under laser driven flyer*[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. (in Chinese)
- [10] 刘会霞, 杨昆, 王霄, 等. 激光驱动飞片加载金属箔板成形机理研究[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(7): 865-868.
- LIU H X, YANG K, WANG X, et al.. Research on mechanism of metal foil forming under laser driven flyer[J]. *The Chinese Mechanical Engineering*, 2009, 20(7): 865-868. (in Chinese)
- [11] 张兴权, 张永康, 周建忠, 等. 弹性预加载下板料激光喷丸成形特性[J]. *中国激光*, 2008, 35(7): 1095-1110.
- ZHANG X Q, ZHANG Y K, ZHOU J ZH, et al.. Characteristics of deformation of plate by laser peening under the elastic pre-loading condition[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(7): 1095-1110. (in Chinese)
- [12] ZHENG C, SUN S, JI Z, et al.. Numerical simulation and experimentation of micro scale laser bulge forming[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2010, 50(12): 1048-1056.
- [13] 杨超君, 周建忠, 张永康, 等. 激光冲击金属板料变形的最小激光能量估算及其实验研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 396-401.
- YANG CH J, ZHOU J ZH, ZHANG Y K, et al..

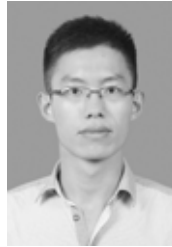
- Study on calculation of minimum laser energy of sheet metal deformation by laser shock forming [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 396-401. (in Chinese)
- [14] JIANG Y F, HUANG Y, JIN H, *et al.*. Research on precision control of sheet metal forming by laser shock waves with semi-die [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45 :598-604.
- [15] 周建忠, 高彬, 黄舒, 等. 激光冲击铜箔飞片及其复合成形研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 114-119.  
ZHOU J ZH, GAO B, HUANG SH, *et al.*. Research on laser shock induced composite forming of copper foil flyer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(7): 114-119. (in Chinese)
- [16] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]. *In Proc. 7th International Symposium on Ballistics*, 1983: 541-547.
- [17] PEYRE P, FABBRO R. Laser shock processing: a review of the physics and applications [J]. *Opt. Quant. Electr.*, 1995, 27: 1213-1229.

#### 导师简介:



周建忠(1964—),男,江苏无锡人,教授,博士生导师,1986年于江苏工学院获得学士学位,1993年,2003年于江苏大学分别获得硕士、博士学位,主要从事先进激光制造技术及微塑成形理论与微细加工技术等方面的研究。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

#### 通讯作者:



戴磊(1985—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,2010年于扬州大学获得学士学位,主要从事激光微尺度冲击成形特性的研究。E-mail: dailei1010@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)