

激光驱动飞片冲击下的箔板微小孔制造

刘会霞 王鹤军 王 霄 沈宗宝 黄志辉 李 威 郑远远

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 针对传统微小孔制造工艺在加工过程中遇到的微冲头的制造、冲头与模具的对准性等难题,提出一种基于激光驱动飞片技术实现对工件微冲裁的新工艺。由于飞片在强激光的辐照下会产生较高的动能,当其碰撞到工件上时会产生强大的动态加载压力,结合模具的限制作用,便可实现对工件的冲裁。利用微铣刀在印刷电路板上加工出直径为 1 mm 的微小孔作为模具,调节作用于飞片上的激光能量大小,实现了对铜箔工件的冲裁,利用 XTZ-FG 型体式显微镜和蔡司公司 AxioCSM700 真彩色共焦扫描显微镜对实验结果进行了观察,发现冲裁后的工件不但具有规则的圆孔特征,而且具有较好的光洁度。用数值模拟的方法对该冲裁过程进行分析,证明了该工艺的可行性,为减少实验次数、优化工艺参数奠定了基础。

关键词 激光加工;微孔制造;冲裁;激光驱动飞片;数值模拟

中图分类号 TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100121

Micro-hole Manufacturing on Metal Sheet by Laser-Driven Flyer Punching

Liu Huixia Wang Hejun Wang Xiao Shen Zongbao Huang Zhihui

Li Wei Zheng Yuanyuan

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

Abstract In conventional mechanical punching, the size of the punched holes is limited due to the difficulties of tool fabrication, the difficulties of punch-to-die alignment and the increasing costs of tool fabrication. In order to overcome these problems, a novel micro-hole manufacturing technique based on laser-driven flyer punching is presented. A flyer is irradiated by a short and intense laser pulse, resulting in a high speed and high punch pressure. When the flyer is loaded on the workpiece, the bending and axial stretching of workpiece would take place, and the workpiece could be sheared off around the corner of die. The single micro-hole mould with 1 mm diameter is machined by the micro-milling cutter on printed circuit board. The micro-punching experiment is conducted on copper successfully by controlling the laser energy and good edge quality is obtained. The experimental results are observed by an XTZ-FG stereo-microscope and an AxioCSM700 scanning microscope. The novel process of punching is also numerically studied, which confirms the feasibility of this method and lays the foundation for optimizing the process parameters and reducing the number of experiments.

Key words laser processing; micro-hole manufacturing; punching; laser-driven flyer; numerical simulation

OCIS codes 140.3390; 140.3440; 140.3538; 350.3390

1 引 言

近年来,随着电子产品、生物、医疗以及微机电系统(MEMS)的迅速发展,具有轻、薄、短、小、多功能等特点的微型产品需求量不断增加,与之相关的微金属零部件的加工也显得越来越重要。为了满足

不同种类的微金属零件的加工需求,一方面需要在传统加工工艺的基础上不断地改进^[1,2],另一方面需要不断地创造出新的加工工艺。目前,一些新颖的微金属零件锻造^[3]、压印^[4]、焊接^[5]、冲裁^[6]以及金属箔板类的塑性成形^[7]等微金属成形技术正受到

收稿日期: 2011-03-01; **收到修改稿日期**: 2011-03-30

基金项目: 江苏省高校优势学科建设项目资助课题。

作者简介: 刘会霞(1964—),女,教授,主要从事数字化设计与制造、激光微成形激光焊接及熔焊等方面的研究。

E-mail: lhx@ujs.edu.cn

越来越多的关注。这些改进和创新的微金属成形技术大多具有加工过程简单、方便和可重复性高等特点。

金属零件的微小孔制造也是微金属成形技术中的一种。对于传统的微小孔制造工艺来讲,往往在微冲头的制造及冲头和模具之间的对准性方面存在着较大的困难^[8]。随着加工制造的孔径尺寸的减小,用到的冲头的尺寸更小,相应的冲头的刚度也就越小,往往在加工数次后冲头就需要更换。此外,当加工的金属零件的厚度较薄时,冲头与模具之间需要非常小的配合间隙^[9],随之而来的问题就是冲头和模具的使用寿命都将大大降低。

本文提出一种基于激光驱动飞片技术的冲裁工艺,可以克服传统微孔加工中出现的一些难题。设计了激光驱动飞片冲裁实验,成功地在 $10\ \mu\text{m}$ 厚度的铜箔上制造出直径为 $1\ \text{mm}$ 的微孔。结合实验和数值模拟对该冲裁工艺的机理和过程进行了讨论。该冲裁数值仿真过程在 LS-DYNA 软件中完成,为了更好地表述出工件在飞片加载下的变形和失效情况,在数值模拟过程中对工件材料应用了 Johnson-Cook 本构模型与损伤破坏模型。

2 冲裁机理

所谓激光驱动,就是利用激光烧蚀物质产生的高温高压物质推动物体高速飞行。激光驱动飞片^[10]过程大致可以分为以下几个阶段:1)激光透过透明基底材料入射到金属膜表面;2)金属膜表层被加热、汽化并在基底与金属界面处形成等离子体;3)等离子体继续吸收后续的激光能量从而升温和膨胀;4)剩余金属膜层被高速驱动形成飞片。图1为

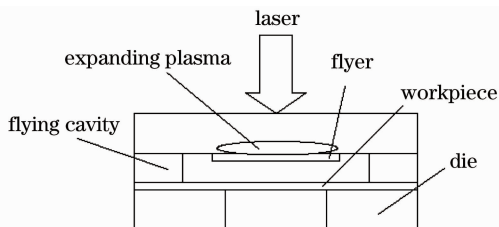


图1 激光驱动飞片原理图

Fig.1 Model of laser-driven flyer

激光驱动飞片原理图。高速飞行的飞片具有很高的动态加载压力^[11]以及较好的平整性^[12]。根据飞片的这些特性,将飞片作用在需要加工的工件上,配合模具的限制作用,便可实现工件的冲裁。

激光驱动飞片冲裁的原理如图2所示。当强激光辐照在箔膜物质上时,沉积的激光能量将使箔膜的表面部分被汽化和电离,产生的等离子体快速向外膨胀喷溅,其反冲作用力可形成强冲击波。在强冲击波的作用下,飞片向前运动。在激光脉冲持续时间内,飞片将不断吸收激光能量,将其转化成自身的动能,加速向前飞行;当入射激光脉冲结束时,飞片已经飞越了一段距离,并被加速到很大的速度。当飞片撞击到工件上后,飞片的动能将迅速释放并向工件内部转移,在工件内产生一个向前传播的冲击波,这个冲击波的压力将大大高于同等功率密度的激光直接辐照在靶上所产生的冲击压力,实现预想的增压效果。接着,工件在冲击波的作用下开始向下弯曲,同时又会受到模具的限制作用,其在凹模孔边缘便会发生强烈的剪切作用,结果工件沿凹模孔口被剪断,实现了微冲裁的目的。激光驱动飞片冲裁技术的可重复性较高,也不需要制造微小尺寸的冲头,是一种较为经济和高效的冲裁工艺。

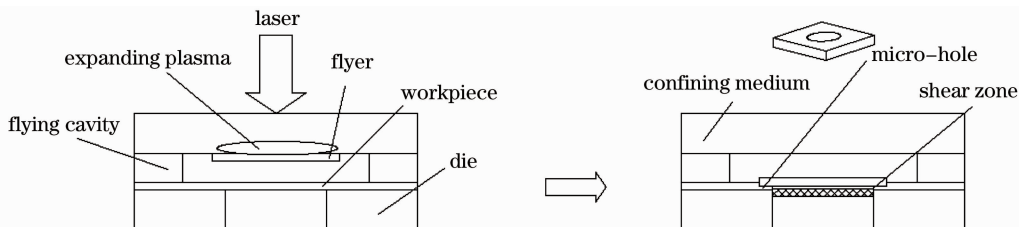


图2 激光间接冲裁原理图

Fig.2 Schematic diagram of laser indirect shock punching

3 实验研究

3.1 实验仪器

该实验的激光发生器为 Spilight 2000 型 Nd:YAG 激光器。此外,实验中还涉及导光系统、数控工作台和计算机控制系统等设备。表1为该激光器

的主要参数(实验中所用到的激光波长为 $1064\ \text{nm}$)。

3.2 实验准备

约束层为 K9 玻璃,飞行腔为硅片材料,飞片为铝箔,工件材料为铜箔(因为铜材料广泛应用于 MEMS 零部件)。首先选择实验所需要的铝箔

表 1 激光器技术参数

Table 1 Laser equipment technical parameters

Parameter	Value
Laser wavelength /nm	1064/532/355
Single pulse energy /mJ	80~2000
Pulse width /ns	8
Repetition rate /Hz	1~10
Energy instability /%	<±1
Direction instability /mrad	±0.25
Divergence angle /mrad	<0.5
Spot size /mm	9 (Exit)

(17 μm)和铜箔(10 μm),硅片厚度为 170 μm。利用剪刀从铝箔与铜箔上。剪取飞片和工件所需的宽度和长度,并放置于柔软的擦镜纸上,再用镊子夹住裁剪好的铝箔,用无水酒精清洗铝箔表面的污渍和杂质,放置在擦镜纸上晾干;晾干后将铝箔放置与两块 K9 玻璃中间,目的是保证其平面度。

利用微铣刀在印刷电路板上加工出圆孔特征,模具外形如图 3 所示,圆孔直径为 1 mm。

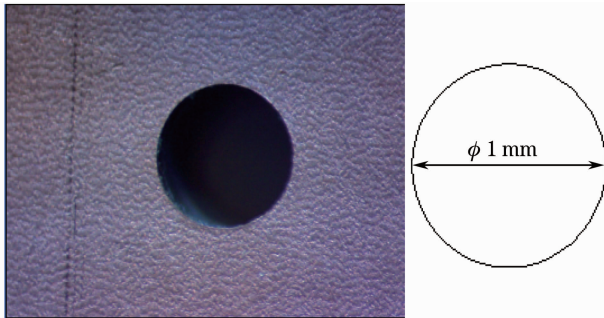


图 3 模具整体外形图与二维图

Fig. 3 Shape and two-dimensional figure of the micro-hole mould

实验中采用的光路如图 4 所示。激光首先由激光发射器水平发射出来,经由一个反射镜反射后,变

为竖直光路,然后经过透镜($f=100\text{ mm}$),聚焦到飞片(铝箔)上。因为模具的圆孔直径为 1 mm,为了得到较好的冲裁效果,飞片的面积需能覆盖模具上的成形特征,所以实验中光斑直径选择为 1.5 mm。调节数控工作台使得激光光斑满足实验要求,此时离焦量为-5 mm。

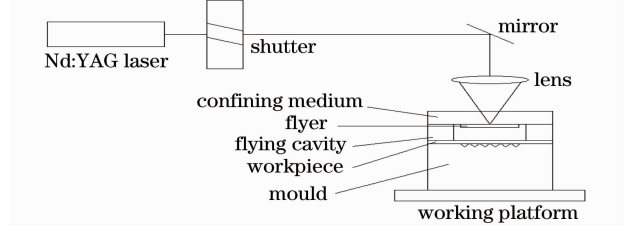


图 4 实验光路图

Fig. 4 Optical layout of the experiment

3.3 实验结果

图 5 为铜箔在不同激光能量作用后,利用 XTZ-FG 型体式显微镜观察的冲裁效果图。由图 5 可见,当激光能量为 585 mJ 时,铜箔没有沿模具凹腔边缘冲裁掉,只是形成了一个凹坑,这是由于激光辐照在飞片上的能量过小,没有形成足够的等离子体,从而无法驱动飞片达到很高的速度以满足剪切工件的要求。工件也只是在飞片的撞击下流入了模具腔槽内,并没有在模具的边缘发生破坏。激光能量为 675 mJ 时,流入凹腔槽内的工件增多,在图片上显示为凹坑加深。激光能量为 835 mJ 时,工件开始在周边地区出现剪切开裂。激光能量为 1020 mJ 时,工件实现完全冲裁。图 6 为用蔡司公司 AxioCSM700 真彩色共焦扫描显微镜观察到的边缘细微扫描结果,工件不但具有规则的圆孔特征,而且具有较好的光洁度,证明在激光驱动飞片的加载下,可以实现很好的工件冲裁效果。

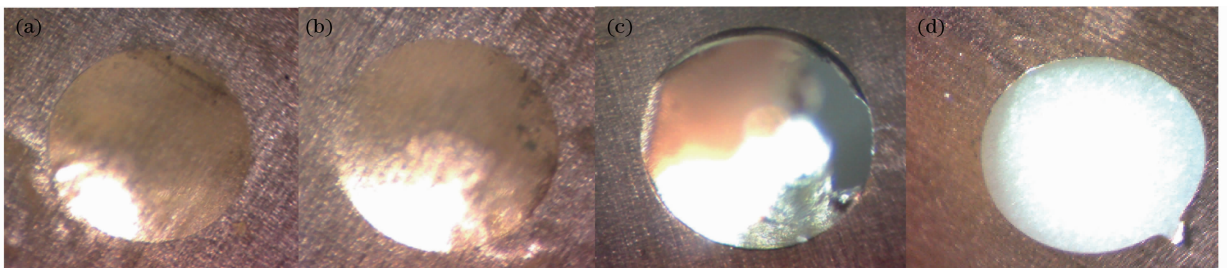


图 5 不同激光能量下的冲裁结果图。(a)585 mJ;(b)675 mJ;(c)835 mJ;(d)1020 mJ

Fig. 5 Punching results under different laser energy pulsers. (a) 585 mJ; (b) 675 mJ; (c) 835 mJ; (d) 1020 mJ

4 冲裁过程数值模拟

4.1 加载压力

高功率密度激光诱导产生高压冲击波,从而使

得材料产生塑性变形,因此有必要建立激光加载的压力模型。首先需要计算激光功率密度 I_0 ,可由下式得到:

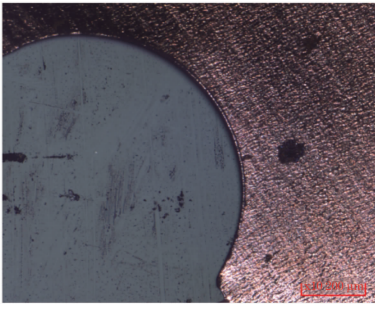


图 6 激光能量为 1020mJ 时的冲裁结果边缘图
Fig.6 Peripheral figure of the punching result under 1020 mJ laser pulse

$$I_0 = \frac{4aE}{\pi d^2 \tau}, \quad (1)$$

式中 E 为激光能量; a 为激光吸收系数; d 为光斑直径; τ 为激光脉宽。

根据 Fabbro 等^[13]建立的约束模式下激光冲击波传播的一维模型, 可以对冲击波的峰值压力进行计算:

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

式中 P_{\max} 为峰值压力(GPa); α 为常数, 通常取 0.1; Z 为约束层与工件之间的声阻抗 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); I_0 为激光功率密度 ($\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$)。

通过(2)式可以对一定功率密度的激光诱导产生冲击波的压力进行计算, 从而获得数值模拟时载荷的大小。

4.2 材料本构模型

材料的本构模型指在一定的微观组织下, 材料的流变应力对由温度、应变、应变率等热力学参数所构成的热力学状态所做出的响应。在高速形变条件下, 形变局域化区域既包括形变强化过程, 也包括因绝热温升而导致的材料软化过程。Johnson-Cook 塑性模型是一种特殊的 Mises 塑性模型, 其中考虑了硬化准则和应变率的相关影响。同时, Johnson-Cook 模型对于许多材料(包括金属)的高应变率变形都在相当范围内适用。根据 Johnson-Cook 模型^[14], 一个考虑加工硬化、应变率和温度影响的弹塑性本构关系可用如下形式表示:

$$\sigma = (A + B \cdot \epsilon^n) \times \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right], \quad (3)$$

式中 ϵ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}$ 为等效塑性应变率; T_m 和 T_r 分别为熔点和室温; $A, B, C, n, \dot{\epsilon}_0$ 和 m 为在转变温度或者低于转变温度时测得的材料常数。在实验中, 由于飞片承受了激光的热效应作用, 工件得以避免受到热效应影响, 保证工件产生的形变完全是由于机械作用。因此 Johnson-Cook 塑性模型中的温度效应可以被忽略, 本构关系可以简化成

$$\sigma = (A + B \cdot \epsilon^n) \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right). \quad (4)$$

表 2 给出实验中使用的材料的本构模型参数^[15]。

表 2 铝和铜的本构模型参数

Table 2 Constitutive model parameters of aluminum and copper

Material	A /MPa	B /MPa	C	n	m	T_r /K	T_m /K	$\dot{\epsilon}_0$ / s^{-1}
Aluminum	256	426	0.015	0.34	1.0	27	660	1.0
Copper	89.63	291.64	0.025	0.31	1.09	27	1200	1.0

4.3 材料失效模型

为了描述材料的非线性力学响应, 采用 Johnson-Cook 损伤模型^[16]来模拟激光微冲裁下工件的失效行为, 其模型可表示为

$$\dot{D}_s = \dot{\epsilon} / \epsilon_f, \quad (5)$$

式中的瞬态断裂应变 ϵ_f 可表示为

$$\epsilon_f = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \sigma^*)] \times [1 + d_4 \ln(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)] [1 + d_5 T^*], \quad (6)$$

式中 $\sigma^* = -p / \sigma_{\text{eq}}, \sigma_{\text{eq}}$ 为 Mises 等效应力, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 为材料常数(表 3)。

拉伸损伤的演变方程为

$$\dot{D}_t = \left[\frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\text{th}})}{\sigma_{\text{th}}^0} \right]^2 \Big/ [t_d (1 - D_t^2)], \quad (7)$$

当 $\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{th}}$ 时, $\dot{D}_t = 0$; σ_{\max} 为最大主应力, σ_{th} 为当前

拉伸强度, σ_{th}^0 为材料的初始拉伸强度, t_d 为累积损伤时间常数。拉伸损伤方程中的损伤参数 D 的范围为 $0 \leq D \leq 1$, 0 代表初始无损伤, 1 表示完全损伤。

拉伸损伤可以软化与当前拉伸状态量直接相关的所有模量和强度参数, 包括拉伸强度 σ_{th} 、体积模量 K 、剪切模量 μ 以及屈服强度 Y 。而剪切损伤主要描述材料的剪切变形或剪切弯曲, 因此它只能降低拉伸强度。累积损伤对材料的软化和弱化可表征如下

$$\sigma_{\text{th}} = (1 - D_s^2)(1 - D_t^2)\sigma_{\text{th}}^0, \quad K = (1 - D_t^2)K_0, \quad Y = (1 - D_t^2)Y_{\text{JC}}, \quad \mu = (1 - D_t^2)\mu_0, \quad (8)$$

式中 K_0, μ_0 分别为材料的初始体积模量和初始剪切模量。

表 3 给出铜材的失效模型参数。

表 3 铜材的失效模型参数

Table 3 Failure damage model parameters of copper

Material	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
Copper	0.3	0.28	-3.03	0.014	1.12

4.4 数值模拟结果与讨论

图 7 为基于激光间接冲击的冲裁过程。为了方便观察和对比,图中给出了有飞片和隐藏飞片情形下,工件典型阶段时的变形和失效情况以及应力分布图。具体的应力值可从图右侧的参考值得知。

在 900 ns 时,飞片开始接触工件,由碰撞产生

的冲击波开始向工件内部传播。从图 7(a)可以看出,工件上并没有发生变形。只有当工件内部冲击波的峰值压力大于工件材料的 Hugoniot 弹性强度时,工件才会在其表面和内部产生弹塑性形变。而冲击波在工件内部的作用时间取决于工件的厚度。在 900~1000 ns,工件开始发生变形。工件的中部带动其周边地区向模具内部流动,而在模具圆角边缘处的工件由于受到了飞片的挤压和模具圆角的限制,逐渐拉伸变长,在图 7(b)中表现为在模具圆角处的飞片与工件都具有较高的应力值。在 1000~1100 ns,工件中央地区继续流向模具内部,模具圆

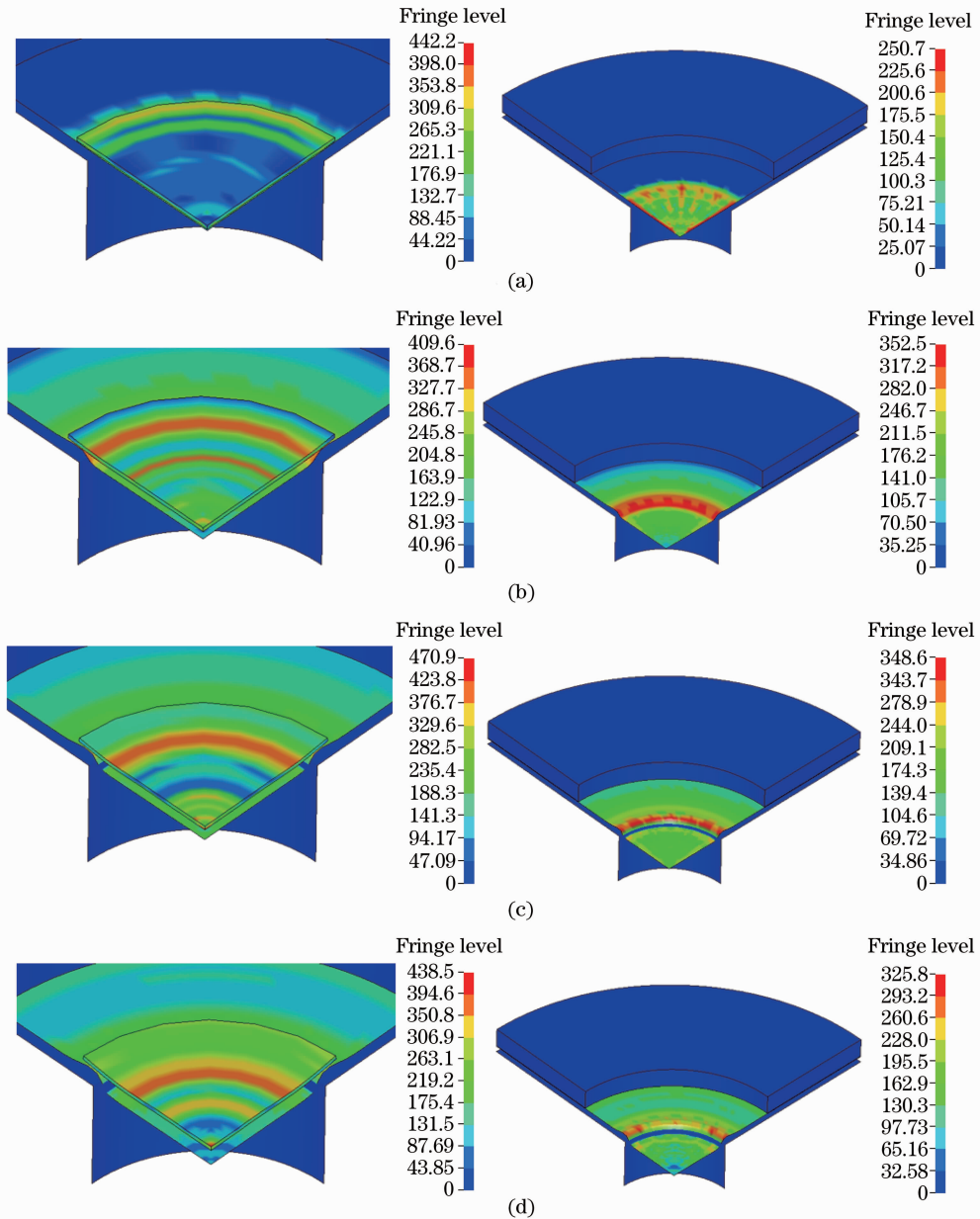


图 7 典型时刻工件的变形和应力分布图。(a)900 ns; (b)1000 ns; (c)1100 ns; (d)1200 ns

Fig. 7 Typical stages of deformations with contours of the Von Mises stress distribution. (a)900 ns; (b)1000 ns; (c)1100 ns; (d)1200 ns

角处的工件发生了开裂现象,如图 7(c)所示,此处的工件经历了由压缩、拉伸到剪切断裂失效的过程。在 1100~1200 ns,如图 7(d)所示,工件中央地带被完全冲裁掉。由于惯性作用,被冲裁掉的这部分工件继续流向模具内部,此时圆角处的应力值也逐渐减小。至此,便完成了对工件的冲裁。

5 结 论

提出了一种基于激光驱动飞片的微冲裁工艺方法,设计了冲裁实验。从实验结果中可以看出,工件具有规则的圆孔特征和较好的光洁度,可以证明在激光驱动飞片的加载下,可以很好地实现冲裁效果。通过 LS-DYNA 软件的数值模拟,分析了激光驱动飞片下的冲孔过程,进一步验证了该微孔制造技术的可行性。此外,如果结合非圆孔模具特征,该方法还可以实现非圆孔的制造。基于激光驱动飞片的微冲裁技术尚处于探索研究阶段,还需在未来的研究工作中进一步细化。激光驱动飞片冲裁工艺将会成为一种新颖的、具有很好应用前景的微塑性成形工艺。

参 考 文 献

- 1 Yuan Weizheng, Li Xiaoying. Micro machine and micro fabrication technology[J]. *Mechanical Science and Technology*, 1997, **16**(3): 503~508
苑伟政, 李晓莹. 微机械及微细加工技术[J]. *机械科学与技术*, 1997, **16**(3): 503~508
- 2 Shan Debin, Yuan Lin, Guo Bin. Research situation and development trends in micro forming[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2008, **15**(2): 46~53
单德彬, 袁林, 郭斌. 精密微塑性成形技术的现状和发展趋势[J]. *塑性工程学报*, 2008, **15**(2): 46~53
- 3 Y. Saotome, S. Miwa, T. Zhang *et al.*. The micro-formability of Zr-based amorphous alloys in the supercooled liquid state and their application to micro-dies[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2001, **113**(1-3): 64~69

- 4 Huixia Liu, Zongbao Shen, Xiao Wang *et al.*. Micromould based laser shock embossing of thin metal sheets for MEMS applications [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2010, **256**(14): 4687~4691
- 5 Li Pin, Liu Huixia, Xu Zhenkai *et al.*. Laser transmission joining process of PET films and titanium[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1914~1920
李品, 刘会霞, 许贞凯等. 医用 PET 薄膜与薄钛板激光透射连接工艺研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1914~1920
- 6 Huixia Liu, Zongbao Shen, Xiao Wang *et al.*. Numerical simulation and experimentation of a novel micro scale laser high speed punching[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2010, **50**(5): 491~494
- 7 U. Engel, R. Eckstein. Microforming-from basic research to its realization [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2002, **125-126**: 35~44
- 8 Byung-Yun Joo, Sung-Han Rhim, Soo-Ik Oh. Micro-hole fabrication by mechanical punching process [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2005, **170**(3): 593~601
- 9 B. Y. Joo, S. I. Oh, B. H. Jeon. Development of micro punching system[J]. *Ann. CIRP*, 2001, **50**(1): 191~194
- 10 Cogan S., Shirman E., Haas Y.. Production efficiency of thin metal flyers formed by laser ablation[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(11): 113508~113513
- 11 Jing Fuqian, Chen Junxiang. Dynamic High-Pressure Generation Principle and Related Technologies [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006. 33
经福谦, 陈俊祥. 动高压原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. 33
- 12 T. de Ressaquier, H. He, P. Berterretche. Use of laser-accelerated foils for impact study of dynamic material behavior [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, **31**(8): 945~956
- 13 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
- 14 Johnson G. R., Cook W. H.. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]. Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics, 1983. 541~547
- 15 Poizat C., Campagne L., Daridon L.. Modeling and simulation of thin sheet blanking using damage and rupture criteria[J]. *Int. J. Form. Processes*, 2005, **8**(1): 29~47
- 16 Johnson G. R., Cook W. H.. Fracture characteristics of three metals subjected to various strain rates, temperatures and pressures[J]. *Eng. Fract. Mech.*, 1985, **21**(1): 31~48