

# 激光驱动飞片复杂轮廓多孔微冲裁实验及模拟

陆萌萌 刘会霞 沈宗宝 王霄 顾春兴

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 激光驱动飞片微冲裁技术是在约束层模式下利用脉冲激光辐照飞片箔材诱导冲击波驱动高能飞片加载金属薄壁工件实现冲裁的微孔制造技术。实验中,使用 INNOLAS SpitLight 2000 Nd-YAG 短脉冲激光器,20  $\mu\text{m}$  厚的铝制飞片;采用厚度为 0.5 mm AISI 1095 钢薄片制作微模具,模具硬度为 58 HRC,利用皮秒激光铣削技术在模具中心加工微模孔阵列,在厚度为 20  $\mu\text{m}$  的铝箔板上一次性冲裁出三个外接圆直径为 500  $\mu\text{m}$  的梅花状通孔。通过 KEYENCE VHX-1000C 超景深三维显微系统进行观测,微冲孔具有良好的冲裁轮廓质量,工件上表面与冲裁断面有圆角带过渡,下表面轮廓处毛刺现象不明显。并以 ANSYS/LS-DYNA 为平台,使用有限网格单元法和流体动力学光滑粒子法对微冲裁过程进行了数值模拟,分别从断面形成、等效应力分布、等效塑性应变分布以及粒子位移变化等不同方面分析了激光驱动飞片多孔微冲裁工艺的基本特性。

**关键词** 激光技术; 激光间接加工; 多孔微冲裁; 飞片; 有限元模拟; 流体动力学光滑粒子(SPH)

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0403004

## Experiment and Simulation of Multihole Micro-Punching with Complex Layouts by Laser-Driven Flyer

Lu Mengmeng Liu Huixia Shen Zongbao Wang Xiao Gu Chunxing

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

**Abstract** Laser-driven flyer micro-punching technology is a micro-holes manufacturing process. When an intense laser pulse irradiates onto the ablative layer, a flyer with high speed will impact the thin metal workpiece thus punching is completed. In this experiment, a short pulse Nd-YAG laser (INNOLAS Spitlight 2000) is employed, and Al foils with thickness of 20  $\mu\text{m}$  are employed as flyers. AISI 1095 high-carbon steel is used as material of die, whose hardness is 58 HRC. The sheet used to make punching die is 0.5 mm in thickness and the through die-openings array in the center position are fabricated by picosecond laser. Three plum-like micro holes with 500  $\mu\text{m}$  in diameter are punched simultaneously on the 20  $\mu\text{m}$  thick Al foils. Under the KEYENCE VHX-1000C digital microscope, it can be found that the quality of sheared edges is good, there is an appropriate rollover zone between upper surface and punched fracture, burrs are also reduced a lot. In addition, simulations are conducted by ANSYS/LS-DYNA. The methods of finite element mesh (FEM) and smoothed particle hydrodynamics (SPH) are used. In the simulation, formation process of fracture, equivalent stress distribution, equivalent plastic strain distribution and evolution of displacement of specified particles are studied to analyze basic characteristics of laser-driven flyer micro-punching technology.

**Key words** laser technology; indirect laser processing; multihole micro-punching; flyer; finite elements simulation; smoothed particle hydrodynamics (SPH)

**OCIS codes** 140.3538; 000.2170; 160.3900

收稿日期: 2013-09-10; 收到修改稿日期: 2013-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(51175235)、江苏省自然科学基金(BK2012712)、江苏省高校自然科学研究面上项目(13KJB460003)

作者简介: 陆萌萌(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光加工和数字化设计与制造等方面的研究。

E-mail: 01dongfangyuxiao@gmail.com

导师简介: 刘会霞(1964—),女,博士,教授,主要从事激光加工和数字化设计与制造等方面的研究。

E-mail: lhx@ujs.edu.cn

# 1 引言

随着科学技术发展的日新月异,先进制造工艺和理念推陈出新,产品的微型化成为了工业制造的一个重要趋势。尤其在通讯、电子、航空航天、生物医学等领域,微器件的应用愈趋广泛<sup>[1-3]</sup>。其中,具有微孔特征的微细零部件常见于微电子和微机电系统(MEMS)的诸多产品之中,如喷墨头、微流泵、IC引线、微马达转子等,其应用的普遍性不言而喻。因此,微钻削、微细电火花加工、激光打孔、电解穿孔等面向微孔特征制造的加工技术相继出现,在工业生产中已经发挥了重要的作用。但由于各自工艺特性的限制,这些加工方法往往存在低效率、高成本、工件材料受限制、加工表面质变等亟需解决的工艺难题,例如:微细电火花加工工艺中,往往需要先加工出与孔轮廓一致或者尺寸小于孔径,并具有相当刚度的电极,在加工微孔过程中,电极又会因为磨损和消耗而需要周期性更换<sup>[4-5]</sup>;又如,广泛应用的激光打孔技术会面临气化物排泄、等离子体轰击、再铸层、微裂纹等影响加工表面质量的问题<sup>[6]</sup>。所以,对新的微孔制造方法的探索显得十分重要。基于传统冲裁技术发展起来的微冲裁技术<sup>[7]</sup>因其工艺可靠、方便、高效率以及断面质量良好等优点而具有巨大的发展潜力,引起国内外学者广泛的关注和研究<sup>[8]</sup>。Fujino等<sup>[9]</sup>利用线电极电火花磨削技术加工出微冲裁系统中关键的零件微冲头和微模具,并着手解决二者之间在冲裁过程中的偏心问题;Joo等<sup>[10]</sup>研制了一种具有高精度导向和检测装置的微冲裁系统,使用WC硬质合金制造出微冲头,在黄铜箔材上加工出较高质量的微孔特征;徐杰等<sup>[8]</sup>使用微细电火花磨削技术加工出直径为几百微米的WC-Co合金微冲头,并以冲头为放电媒介加工出对应的凹模,在SUS304不锈钢薄板上加工出100、150和300  $\mu\text{m}$ 的微孔。这些基于提高刚性冲头性能、改良冲裁装置的微冲裁工艺大大推动了微孔制造技术的发展,但是此类研究中同样面临冲裁工具自身制造难度大、成本高的难题;并且微冲头与微凹模之间复杂的对中问题更使得一次性多孔加工和复杂轮廓加工显得捉襟见肘。由此,Rhim等<sup>[11]</sup>提出使用硅橡胶代替刚性冲头作为压力媒介的微冲裁方法,配合单晶硅模具,在纯铜箔材和工业纯(CP)钛箔材成功加工出2~10  $\mu\text{m}$ 的阵列微孔;刘会霞等<sup>[12]</sup>也结合激光冲击加工技术<sup>[13]</sup>提出了微尺寸下激光高速冲裁的方法,开始了动载荷作用下微冲裁工艺的研究;随后,刘会霞等<sup>[14]</sup>又在此基础上提出了激光驱动飞片

加载金属箔板的微冲裁方法,并在10~30  $\mu\text{m}$ 厚度的铜箔上冲裁出几百微米的圆孔和方孔。此前,激光驱动飞片微冲裁的研究主要涉及的是单孔和简单轮廓的冲裁加工,一次性多孔冲裁涉及不多。

本文采用皮秒激光铣加工技术在冲裁模具中心加工绕轴分布的梅花状微模孔阵列,使用厚度为20  $\mu\text{m}$ 的铝箔作为工件原材,利用激光驱动飞片微冲裁的方法,在单次脉冲激光冲击下一次性获得三个外圆直径为500  $\mu\text{m}$ 的梅花状通孔;并以ANSYS/LS-DYNA软件为平台,利用有限网格单元法(FEM)和流体动力学光滑粒子法(SPH)对冲裁断面的形成过程和微冲裁过程中材料的响应过程进行了数值仿真分析,在实验的基础上进一步探究了激光驱动飞片多孔批量微冲裁的工艺性能。

## 2 实验原理与装置

### 2.1 实验原理

随着功率密度的升高,激光辐照材料表面局域会相继发生温升、熔融、气化、甚至喷溅等物理现象;当激光功率密度高达 $10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,物质会迅速气化并继续吸收能量产生等离子体;若激光功率足够大,则会点燃等离子体形成激光诱导的爆轰波(LSD波)<sup>[15-16]</sup>。激光驱动飞片微冲裁技术利用强脉冲激光辐照飞片箔板,在约束层模式下诱发激光冲击波,并使用黑漆吸收层增加激光能量的吸收率,使激光能量最大程度地转化为飞片的动能;继而,高速运动的飞片快速撞击工件箔材,飞片的动能迅速释放并向工件内部转移,在工件内部产生强冲击波。飞片撞击工件产生的冲击压力高于同等功率密度的激光直接辐射靶面所产生的冲击压力,可以实现增压效果。最终,金属箔板在强冲击载荷作用下产生弹、塑性变形致断裂,实现期望的冲裁效果。图1所示为激光驱动飞片微冲裁技术实验原理示意图。

### 2.2 实验装置

如图1所示,实验装置由下往上依次由三坐标移动平台、冲裁模具、工件、飞行腔、飞片、烧蚀层、约束层以及压块组成。考虑到工况为局域强冲击载荷作用,冲裁模具需具备较好的刚度、硬度以及韧性,模具材料选用AISI 1095钢,模具厚度为0.5 mm,经过退火和淬火处理后模具硬度为58HRC;在冲裁模具中间位置利用皮秒激光铣削技术加工出三个绕轴均匀分布的外接圆直径为500  $\mu\text{m}$ 的梅花状通孔;模具表面经过抛光处理,并浸入酒精溶液进行超声波振动清洗,其形貌如图2所示。

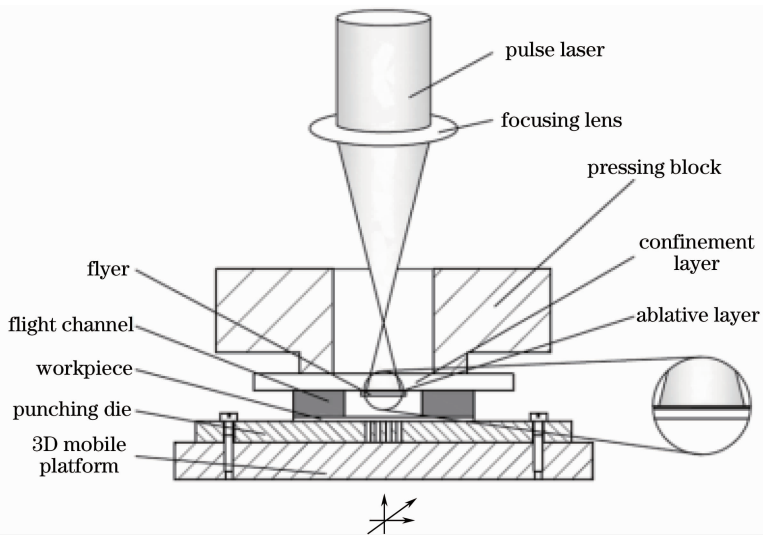


图 1 实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment

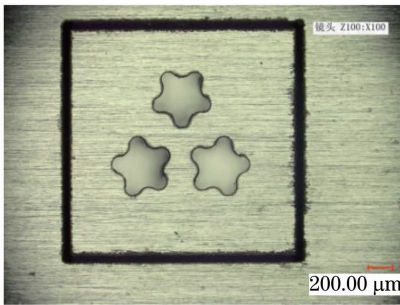


图 2 微冲裁模具

Fig. 2 Micro-punching die

工件试样采用 10 mm×10 mm 规格的铝箔片，厚度为 20 μm；飞片同样采用厚度为 20 μm 的工业

铝箔制成，直径为 4 mm；在飞片的上表面涂有一层黑漆，提高激光能量吸收率的同时保护飞片；飞行腔使用厚度为 200 μm 的聚氨酯塑料薄片制成，通道横截面直径为 5 mm。约束层采用直径为 40 mm 的光学 K9 玻璃，以保证良好的透射率；法兰状钢制压块提供压紧力使约束层、飞行腔、工件和冲裁模具的接触界面保持密封和平整性。

实验中使用的激光器是德国 INNOLAS 公司的 SpitLight 2000 Nd-YAG，脉冲激光的主要参数如表 1 所示。调节工作台高度使模具上表面的离焦量为 +40 mm（焦点位于模具上方为正），使光斑刚好能够覆盖模具中心 2 mm×2 mm 方框区域。

表 1 激光器主要相关参数

Table 1 Main parameters associated with experiments of laser

Wavelength /nm	Pulse energy /mJ	Pulse width /ns	Energy stability /%	Lens' focal length /mm
1064	80~2000	8	≤1	100

### 3 实验结果与讨论

采用 KEYENCE VHX-1000C 超景深三维显微

系统检测实验结果。图 3 所示为在单次强脉冲激光冲击下工件试样冲裁区域的微观特征，在厚度为

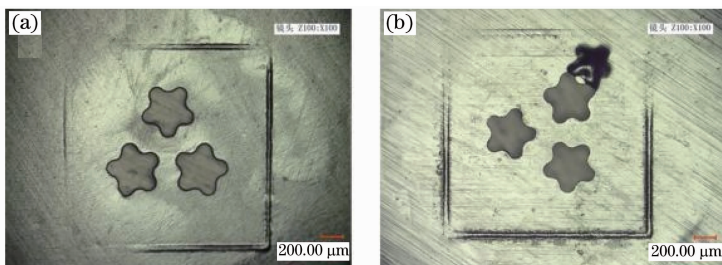


图 3 单次脉冲激光冲击下的铝箔工件

Fig. 3 Workpieces punched under a single pulse laser

20  $\mu\text{m}$ 铝箔上冲裁出三个梅花状微孔。图 4 为进一步放大观察的单孔形貌,其中 4(a)为正面观测视图,图 4(b)为反面观测视图。实验结果显示,微冲孔很好地复制了模孔所具有的轮廓特征,且剪切边质量良好。工件下表面冲孔轮廓线较上表面的更为

清晰,这是由于工件上表面与冲裁断面之间有一段过渡圆角带的缘故。另外,从工件的反面视图观察,也可以发现下表面微孔轮廓齐整,毛刺现象不明显。图 5 所示为模孔中残留落料的情况,实验中,将模具浸入酒精当中,利用超声波振动清洗器将落料振出。

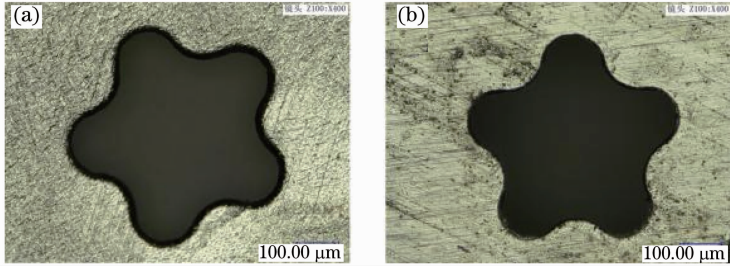


图 4 微冲孔正反面对比图。(a) 正面视图;(b) 反面视图

Fig. 4 Comparison of top view and bottom view of punched micro-hole (a) Top view; (b) bottom view

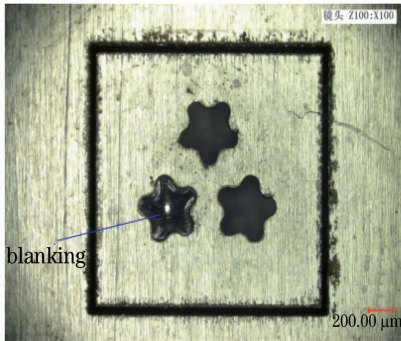


图 5 模孔中的残余落料

Fig. 5 Blanking lodged in the die hole

在微冲裁过程中飞片反复受到冲击作用,其材料的动态响应复杂,最终形貌如图 6 所示。强脉冲激光辐照飞片箔材表面的烧蚀涂层,在局域内发生等离子体爆轰等物理现象,从而诱导强冲击波作用于约束层与飞片,约束层受到压块约束而保持在原有位置不变,而飞片则会承受更大的反冲作用。根据应力波理论,冲击波传播至飞片下表面(自由表面)时会发生透射和反射现象。对于纵波而言,自由表面处反射脉冲与入射脉冲方向相反,其脉冲重合

处的质点速度会增加一倍<sup>[17-18]</sup>。飞片则会以很高的速度(约 200 m/s)通过飞行腔通道,其过程分为两个阶段:加速飞行阶段和匀速飞行阶段。在约束层模式下,飞片受冲击波作用加速飞行的时间是激光脉宽的 3~5 倍<sup>[13]</sup>,也即 24~40 ns。在匀速飞行阶段,飞片内部因波系作用引起的沿运动方向密度的不均匀性将会得到缓解(飞片撞击靶材时的期望状态是保持密度均匀)。

飞片冲击工件,产生的压力大大高于同等功率密度的激光直接辐照在靶材上所产生的冲击压力,也即与纯粹的激光冲击成形相比具有了增压效果。一般,静态或准静态载荷作用下,材料的应变率约为  $10^{-5} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$  量级,而激光冲击作用下应变率可以高达  $10^6 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$ <sup>[19]</sup>。根据材料科学的知识,应变率的提高会使屈服应力和强度极限升高而塑性却会降低,材料将会出现屈服滞后和断裂滞后的现象<sup>[18]</sup>。在微冲裁过程中,断面的形成过程依旧分为弹性形变阶段、塑性形变阶段和断裂阶段,由于屈服滞后的原因,弹性形变阶段在整个冲裁周期中所占

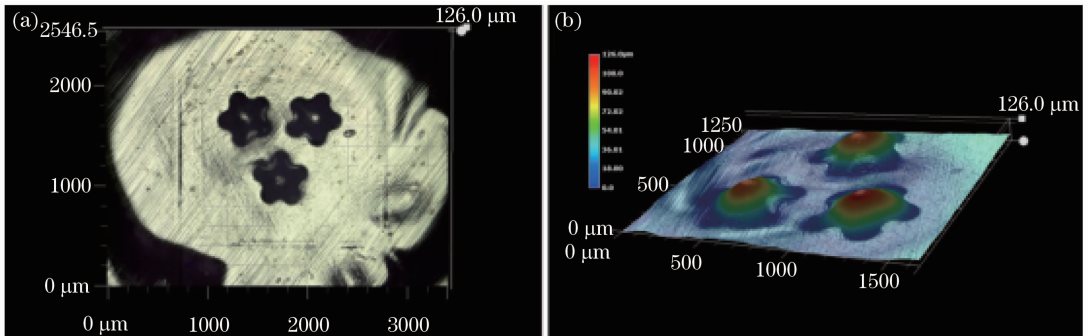


图 6 飞片微观形貌图

Fig. 6 Morphology of flyer

比例增大,对应此阶段的材料响应是工件上下表面剪切边缘处都会发生周边材料向冲裁区域流动的行为。不同的是,工件下表面直接承受刃口的挤压作用,发生应力集中,将率先形成剪切断裂,材料流动很快终止;而工件上表面承受的飞片冲击作用并不同于常规(准)静态冲裁中冲头直接作用于落料区域的剪切作用,而是在飞片覆盖平面内发生无差别的高速碰撞冲击,由此,上表面剪切边缘处材料流动的时间长于下表面剪切边缘处,材料流动范围也大于下表面剪切边缘处。所以,最终上表面与冲裁断面之间形成了圆角区过渡;下表面剪切边却更加齐整,轮廓清晰,由于塑性降低的原因,毛刺现象也得到了抑制。

## 4 数值模拟

激光驱动飞片微冲裁的过程发生在极短暂的时间区间内,工件成形的尺寸又属于微观范围。实验

中难以找到合适的检测方法和设备用来捕捉过程细节和材料响应,因此,使用 FEM 和 SPH 以 ANSYS/LS-DYNA 为软件平台对高速飞片撞击工件实现微冲裁的机械成形过程进行了数值模拟分析。

### 4.1 有限元模型及参数设置

图 7 所示为模拟中所用的简化几何模型,由于本模拟不涉及光能向机械能转化的过程,所以模型中减去了压块、约束层、烧蚀层等实验中存在但与模拟的机械成形过程无关的元件。为了节省计算时间和提高计算精度,合理有效地利用内存资源是必要的,故针对完全的周期对称结构,模拟中只对整体的 1/3 进行了建模,并对此部分细化了网格的划分。飞片和飞型腔采用 8 节点显示动力应用的体单元 Solid 164 (在冲裁断面分析中也作为工件的单元类型),模具采用壳单元 Shell 163,使用 LS-PrePost 生成 SPH 粒子作为工件的有限元模型。

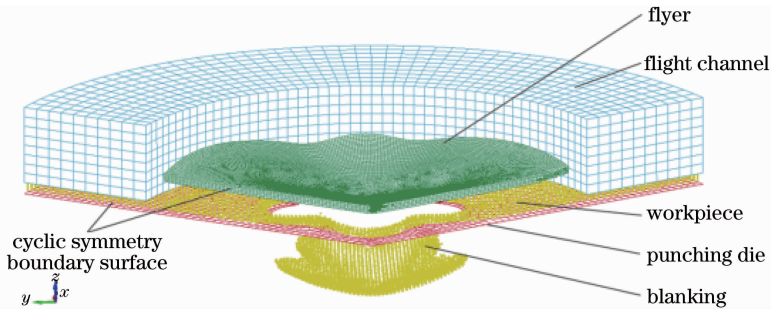


图 7 有限元模型

Fig. 7 Finite element analysis model

模拟中定义了两种材料的本构模型,分别是:工件和飞片采用的 Johnson Cook 模型<sup>[20]</sup>,模具和飞行腔采用的刚体模型。Johnson Cook 模型是一种 Mises 塑性模型,考虑硬化准则和应变、应变率以及温度相关的影响,广泛适用于描述材料在大变形、高应变率下的动态响应行为,其适用的简化本构关系为

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

表 2 2014-T3 铝的本构模型参数

Table 2 Constitutive model parameters of 2024-T3 aluminum

Material	A /MPa	B /MPa	C	n	m	$\dot{\epsilon}_0 / s^{-1}$
2024-T3 Aluminum	369	684	0.0083	0.73	1.7	1.0

另外,采用 Johnson Cook 损伤模型<sup>[21]</sup>来模拟冲裁过程中工件的失效行为,根据此模型,材料的瞬态断裂应变  $\epsilon_f$  可以表示为

$$\epsilon_f = \left[ d_1 + d_2 \exp \left( d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[ 1 + d_4 \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] (1 + d_5 \hat{\theta}), \quad (2)$$

式中  $d_1 \sim d_5$  为断裂失效参数, $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变率, $\hat{\theta}$  为参考温度, $p/q$  为压力与等效应力之比,表 3 给出了 2024-T3 铝的 Johnson Cook 损伤模型的相关参数。

表 3 2014-T3 铝的材料失效模型参数

Table 3 Failure damage mode parameters of 2024-T3 aluminum

Material	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$
2024-T3 aluminum	0.112	0.123	1.500	0.007	0.000

根据脉冲激光诱导冲击波作用的特征,模拟中初始时刻在飞片上表面施加一强度随时间呈高斯分布的冲击压力,加载的时间长度为所用激光的 3 倍脉宽 24 ns,压力-时间曲线的峰值压力根据 Fabbro 等<sup>[22]</sup>建立的约束模式下激光冲击波传播的压力模型计算获得:

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

式中  $p_{\max}$  为峰值压力,  $\alpha$  为常数,通常取值为 0.1,  $Z$  为约束层与飞片之间的声阻抗,  $I_0$  为激光功率密度。

## 4.2 模拟结果与讨论

### 4.2.1 FEM 模拟结果及分析

模拟中先是使用 FEM 对冲裁的断面形成过程

进行了研究,工件采用 Solid 164 体单元,以便直观地反映截面上的应变情况。结果如图 8 所示:初始断裂发生在工件下表面与模具刃口相接触的地方;最大剪切应变首先出现在目标冲裁截面的偏下位置[图 8(a)]。与传统冲裁过程中冲头加载方式不同,飞片冲击作用的区域大于落料区域,所以在初始时刻,工件只在模具刃口对应的下表面产生应力集中。根据高速冲击下剪切带断裂模式的理论,高应变率的动态响应会使材料在近乎绝热的条件下热软化超过硬化,材料中塑性变形高度集中形成剪切带<sup>[23]</sup>,剪切带往往是材料破碎的前奏。图 8(b)所示为模拟中最终获得的冲裁断口。

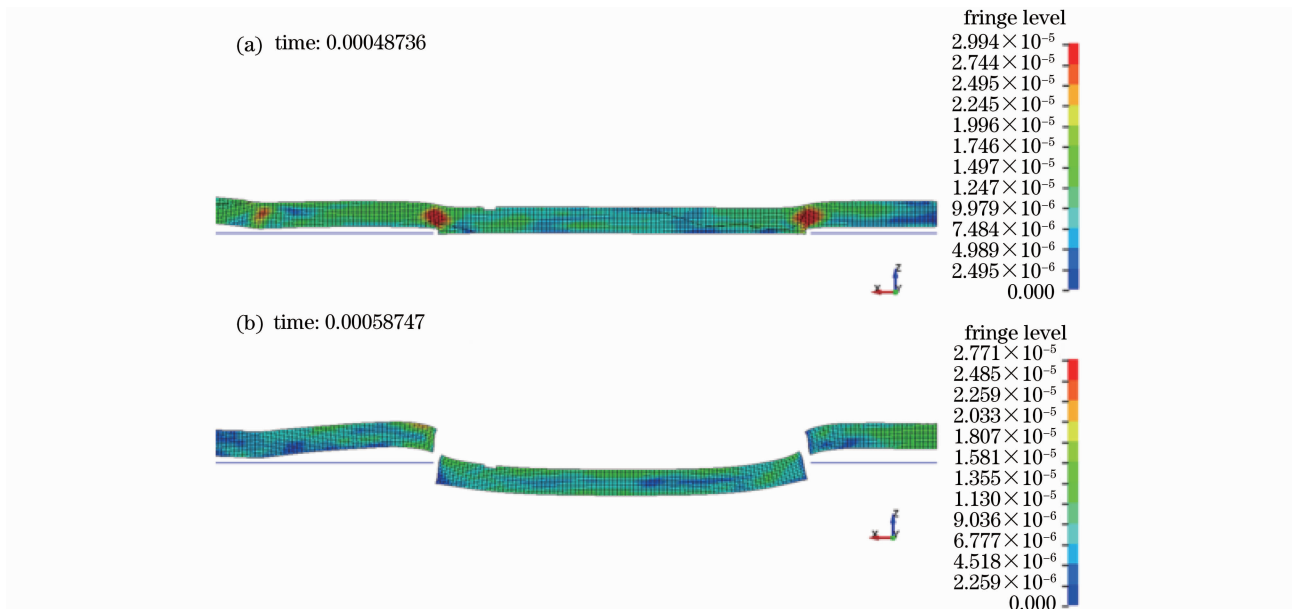


图 8 FEM 模拟冲裁断面形成(最大剪切应变云图)

Fig. 8 Punched fracture in FEM simulations (the maximum shear strain contours)

### 4.2.2 SPH 模拟结果及分析

SPH 是一种使用拉格朗日算法的无网格数值模拟方法,可以避免在使用 FEM 方法模拟材料大变形和高应变率过程中出现的网格畸变或者重构等影响计算精度的不良因素,同时由于不需要添加网格使得计算效率也得到了有效的提高。SPH 方法在离散化上弃用网格单元,取而代之的是使用具有质量的可动质点,利用流体运动过程中动量守恒、质量守恒以及能量守恒三大定律即可表示其控制方程。使用 SPH 方法对工件的等效应力分布、等效塑

性应变以及粒子位移变化等相关项进行了基本研究。其中,工件有限元模型使用 SPH 方法建模,其他元件使用 FEM 网格法建模,工件与冲裁模具、压块、飞片之间采用“AUTOMATIC\_NODES\_TO\_SURFACE”接触类型设置实现耦合。

图 9 所示为在模拟时间  $8.3993 \times 10^{-4}$  ms 时,工件分别在正面、反面两个视图下的等效应力分布图情况。可以发现工件上下表面的飞片冲击覆盖区域呈现出较为一致的应力分布,最大 Von Mises 等效应力值为 610.382 MPa。值得注意的是,当上表

面剪切边还处于高应力状态时[图 9(a)],对应的下表面边缘处已经出现粒子的失效情况[深蓝色零应力轮廓圈,图 9(b)],即实际情况下此处已经衍生裂纹,这里与 FEM 模拟中初始断裂首先出现在工件

下表面轮廓处相一致。当冲裁时间为  $9.2968 \times 10^{-4}$  ms 时,裂纹扩展致上下表面贯通实现完全冲裁,模拟冲裁的效果如图 10 所示。

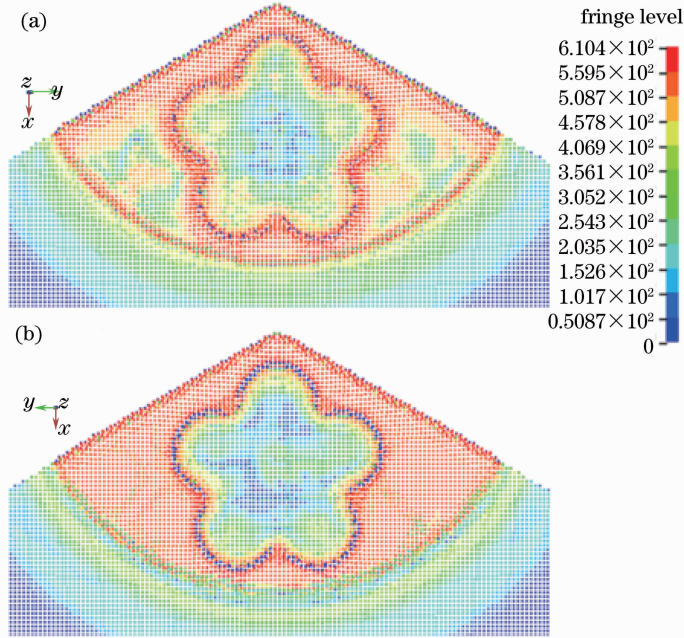


图 9 等效应力分布图(时间  $8.3993 \times 10^{-4}$  ms)。(a) 正面视图;(b) 反面视图  
Fig.9 Contours of effective stress at  $8.3993 \times 10^{-4}$  ms; (a) Top view; (b) bottom view

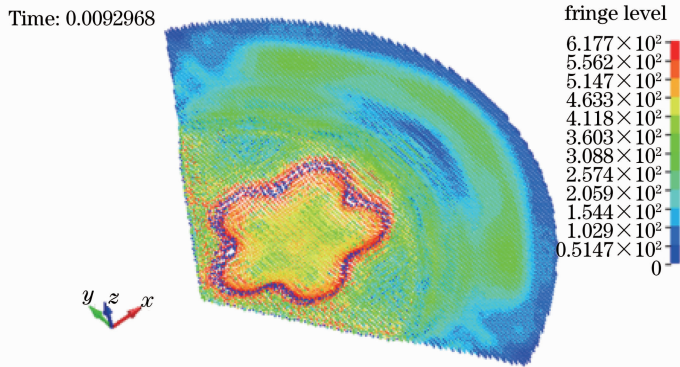


图 10 冲裁完成(时间  $9.2968 \times 10^{-4}$  ms)

Fig.10 Completed punching at  $9.2968 \times 10^{-4}$  ms

图 11 所示为不同时刻工件上表面材料的等效塑性应变分布情况。在工件受到飞片冲击的初始时刻( $8.3993 \times 10^{-4}$  ms),其上表面受冲击区域呈现比较一致的塑性变形,冲击区域边缘与剪切边的塑性应变略高于其他受冲击区域[图 11(a)],这样冲击载荷的作用会增强受冲击区域材料的韧性,增强工件的机械性能<sup>[24]</sup>。在随后冲裁时间为  $9.2968 \times 10^{-4}$  ms 冲裁基本完成的时候,塑性应变大部分集中于工件的剪切边处,如图 11(b)所示。

边缘处材料响应的区别,模拟中选择了具有代表意义的节点(SPH 粒子),对其 Z 坐标位置随时间变化的规律进行了探究,结果如图 12~13 所示。图 12 显示的是工件上表面选定节点的 Z 坐标随时间变化的曲线,其中 A、B、C 节点是位于剪切边附近的节点,D、E 是向外延伸的两个节点。图 13 显示的是工件下表面对于上表面选定位置的节点的响应行为。可以发现,工件上下表面的 D 点和 E 点这些非剪切边的粒子表现出反复震荡的行为,离剪切边缘较远的 E 点较 D 点具有较低的振幅。

为了研究微冲裁过程中工件上下表面在近剪切

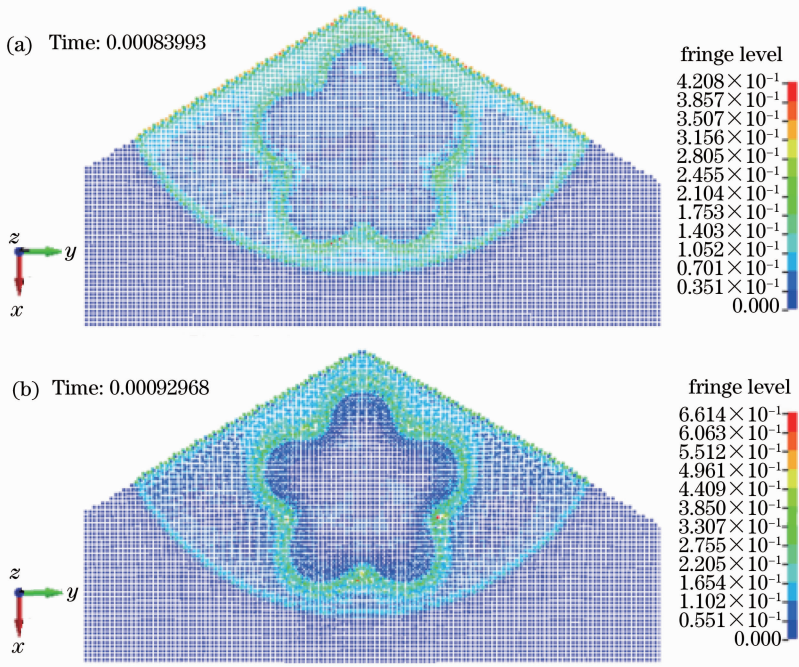


图 11 等效塑性应变分布变化对比图

Fig. 11 Evolution of contours of effective plastic strain

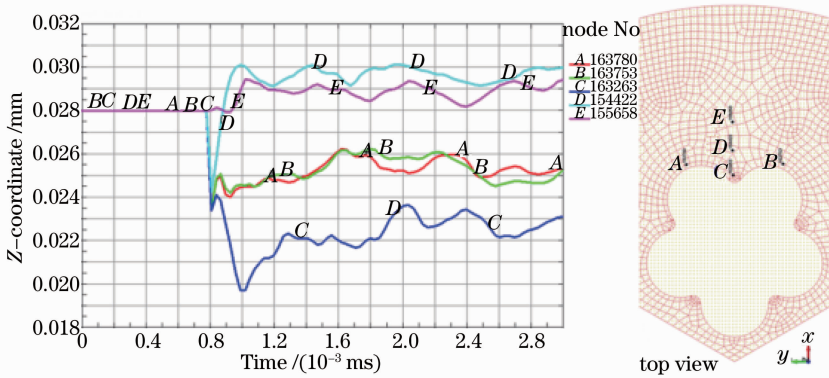


图 12 指定 SPH 节点的 Z 坐标变化曲线(正面视图)

Fig. 12 Time curve of Z coordinate of specified SPH nodes (top view)

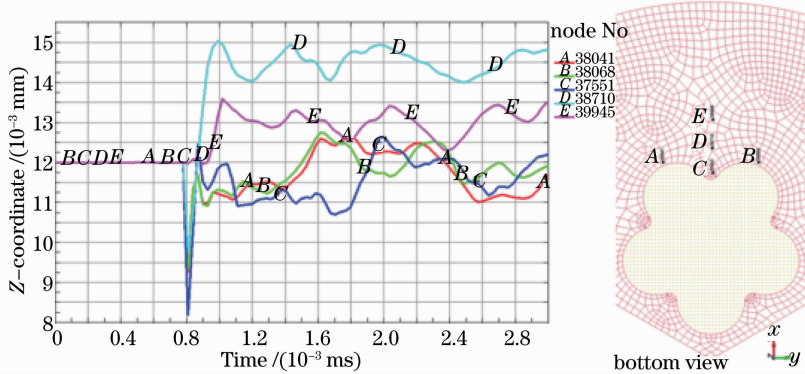


图 13 指定 SPH 节点的 Z 坐标时间变化曲线(反面视图)

Fig. 13 Time curve of Z coordinate of specified SPH nodes (bottom view)

对比图 12 和图 13 可以发现:在上表面近剪切边处节点的 Z 坐标具有下降的过程,在所选点中,

应力最为集中区域(曲率最大处)的 C 点向下的位移最大;而工件下表面对应节点的 Z 坐标虽然也有



一个下降的过程,却最终都回弹至原来的位置。这说明了上表面冲裁轮廓处产生了过渡的圆角带特征,而下表面冲裁轮廓处的材料表现出足够的弹性(屈服滞后),毛刺得到了抑制;这一点上,模拟的结果与实验结果保持一致,相互验证。

## 5 结 论

1) 利用激光驱动飞片微冲裁技术能够实现金属箔板零件上微小尺寸复杂多孔特征的一体化加工,并且获得良好的冲裁轮廓质量。

2) 在高速冲击载荷作用下,工件上表面与冲裁断面之间具有明显的圆角过渡,下表面毛刺现象得到有效抑制;

3) 在激光驱动飞片微冲裁的过程中,工件下表面冲裁轮廓处首先发生应力集中,诱发裂纹和剪切带向上面扩展;工件上表面受冲击的非冲裁区域呈现一致的微塑性变形,具有残余压应力,增强材料性能。

## 参 考 文 献

- Fu M W, Chan W L. A review on the state-of-the-art microforming technologies[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 67(9-12): 2411-2437.
- Vollertsen F, Hu Z, Niehoff H S, *et al.*. State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 151(1-3): 70-79.
- Zhang Kaifeng. *Microforming Technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.  
张凯锋. 微成形制造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- Du Liqun, Mo Shunpei, Zhang Yusheng, *et al.*. Fabrication of 3D metal microstructure based on UV-LIGA and Micro-EDM technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(2): 363-368.  
杜立群, 莫顺培, 张余升, 等. UV-LIGA 和微细电火花加工技术组合制作三维金属微结构[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(2): 363-368.
- Wang Yuangang, Wang Hu, Wu Menghua, *et al.*. An investigation of rod electrode wear in micro-EDM[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2013, (2): 9-13.  
王元刚, 王 虎, 吴蒙华, 等. 微细电火花加工圆柱电极的损耗研究[J]. *现代制造工程*, 2013, (2): 9-13.
- Li Binghui. Basic research on hybrid processing of electrochemical jet machining and laser beam machining[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.  
李炳晖. 电解射流-激光复合加工技术基础研究[Z]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- Joo B Y, Oh S I, Jeon B H. Development of micro punching system[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2001, 50(1): 191-194.
- Xu J, Guo B, Shan D, *et al.*. Micro-punching process of stainless steel foil with micro-die fabricated by micro-EDM [J]. *Microsystem Technologies*, 2013. 1-7.
- Fujino M, Yamamoto M, Masuzawa T. Micro-punching system as an application of WEDG[J]. *Institute of Industrial science, University Tokyo, Seisan-Kenkyu*, 1987, 39: 277-280.
- Joo B, Rhim S, Oh S. Micro-hole fabrication by mechanical punching process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 170(3): 593-601.
- Rhim S H, Son Y K, Oh S I. Punching of ultra small size hole array[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2005, 54(1): 261-264.
- Liu H, Shen Z, Wang X, *et al.*. Numerical simulation and experimentation of a novel micro scale laser high speed punching [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50(5): 491-494.
- Peyre P, Fabbro R. Laser shock processing: a review of the physics and applications[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1995, 27(12): 1213-1229.
- Liu H, Wang H, Shen Z, *et al.*. The research on micro-punching by laser-driven flyer[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, (54-55): 18-24.
- Liu Chenghai, Pei Wenbing, Yan Jun, *et al.*. The laser induced detonation wave of metal vapor[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1990, 4(2): 123.  
刘成海, 裴文兵, 颜 军, 等. 金属蒸汽中的激光维持爆震波[J]. *高压物理学报*, 1990, 4(2): 123.
- Yuan Gang, Zhou Guangquan. The ignition threshold criterion for plasma and LSD wave[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1988, 2(2): 182-189.  
袁 钢, 周光泉. 用于等离子体及 LSD 波点燃阈值的判据[J]. *高压物理学报*, 1988, 2(2): 182-189.
- Wang Lili. *Foundation of Stress Waves*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.  
王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- Guo Weiguo, Li Yulong, Suo Tao. *Stress Wave Concise Guide* [M]. Xi' an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005.  
郭伟国, 李玉龙, 索 涛. 应力波基础简明教程[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
- Gao H, Ye C, Cheng G J. Deformation behaviors and critical parameters in microscale laser dynamic forming[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2009, 131(5): 051011.
- Johnson G R, Cook W H. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, 1983[C]. The Hague, Netherlands, 1983.
- Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48.
- Fabbro R, Fournier J, Ballard P, *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(2): 775-784.
- Yang Zhenyu. The investigation of plasticizing effect, deformation morphology and performance of materials under high-speed impact[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 1990, 1: 7-13.  
杨振宇. 高速冲击下材料的增塑效应, 变形形态及性能[J]. *兵器材料科学与工程*, 1990, 1: 7-13.
- Hu Y, Liu H X, Wang X, *et al.*. Formation of nanostructure and nano-hardness characterization on the meso-scale workpiece by a novel laser indirect shock forming method[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(4): 045001.