

激光间接冲击直接制造微零件的实验及模拟

张迪 刘立华 郭华 陈志澜

上海建桥学院机电学院, 上海 201306

摘要 提出一种基于激光间接冲击技术高效、高精度地制造微零件的新方法,采用激光冲击聚合物间接加载机制,结合不同形状的微模具,使用 Nd:YAG-GAIA R 激光器在厚度为 $35\ \mu\text{m}$ 的钛板上实现了在单脉冲激光冲击作用下制造精密金属微零件。使用 KEYENCE VHX-1000C 超景深三维显微系统对成形的微零件进行观测,发现在合适的激光能量范围内,成形的微零件表面轮廓质量较好,且微零件的成形深度与微模具的凹坑深度基本一致。使用有限元分析方法对微零件的成形过程以及成形零件厚度的减薄率进行了数值模拟分析。从实验和模拟的结果可以看出,该成形方法可以在激光单次冲击作用下成形质量良好的微零件。

关键词 激光技术; 激光冲击; 微零件; 减薄率; 有限元模拟

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.081404

Experiment and Simulation of Manufacturing Microparts by Laser Indirect Shocking

Zhang Di Liu Lihua Guo Hua Chen Zhilan

College of Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Jian Qiao University, Shanghai 201306, China

Abstract One new method based on laser indirect shocking is proposed to manufacture microparts with high efficiency and high precision. Based on the indirect loading mechanism of laser shocking polymers, with different shapes of micromolds and Nd:YAG-GAIA R laser, it is realized to manufacture microparts on a $35\ \mu\text{m}$ thick Ti sheet under only single laser impact. The experimentally obtained microparts are investigated by the digital measurement system (KEYENCE VHX-1000C), and it is found that within the suitable range of laser power, the microparts have good surface profile, and their forming depth are basically consistent with the pit depth of micromolds. Besides, the forming process of microparts and the thinning rate of the formed parts are investigated by the finite element numerical simulation. The experimental and simulation results show that the good quality microparts can be formed under the single laser impact.

Key words laser technique; laser shocking; micropart; thinning rate; finite element simulation

OCIS codes 140.3538; 160.3900; 000.2170; 000.4430

1 引言

随着工业技术的快速发展,越来越多的微器件产品广泛应用于精密仪器、生物和医疗器械、电信电子、航空航天以及国防等多个领域,与之相关的金属微器件产品的加工工艺也显得越来越重要,这些需求带动了金属微成形技术的发展^[1-3]。

微成形装置的体积通常比较小,与传统成形装置相比,其内部结构比较复杂,这使得微成形装置的制造、安装、操作都比较困难而且磨损问题突出。与此同时,对于成形效率低、成形能力不好的材料以及一些如钛、硅等难成形材料,传统加工技术难以满足其成形要求,所以传统的金属微成形方法也会受到限制。为了解决目前微成形工艺存在的诸多问题,满足规模化的市场需求,不但要改进传统微加工工艺,更要积极探索创

收稿日期: 2016-01-19; 收到修改稿日期: 2016-03-08; 网络出版日期: 2016-07-25

基金项目: 上海高校青年教师培养资助计划(AAYQ1634)

作者简介: 张迪(1987—),女,硕士,助教,主要从事激光冲击微成形方面的研究。E-mail: dizhang@outlook.com

新,寻求成形效率高、成形效果好的新微成形工艺方法^[4-5]。

激光冲击成形(LSF)是一种利用激光力效应使金属箔板发生塑性变形的加工工艺。在成形过程中,该工艺具有能量可控、加工精度高、加工效率高等优点,可以显著提高成形件的耐磨性、耐腐蚀性、疲劳强度以及力学性能。与传统加工方式相比,加工质量得到显著提高,而且大大延长了工件的使用寿命,因此,激光冲击成形已成为国内外学者的研究热点之一。Zhang等^[6-9]将激光冲击技术引入到微机电系统(MEMS),观察了将激光冲击技术用于微米尺度时的变形情况,发现金属靶材冲击区的残余应力和显微硬度都获得了较大的提高。Niehoff等^[10-12]率先提出利用激光诱导冲击波的法力效应使金属箔板发生微拉伸成形的技术,借助微凹模分别对纯铝、铜和不锈钢板材进行了激光冲击微拉伸成形实验研究,讨论工艺参数(离焦量、激光能量密度、脉冲能量、脉冲数)对金属变形行为的影响,发现激光冲击微拉伸成形技术能够增强工件的成形能力,成形件具有较好的成形质量。Nagarajan等^[13]研究了激光冲击微成形技术中激光冲击能量对成形件减薄率的影响。Zheng等^[14]提出了一种激光冲击微胀成形技术,并研究了在不同激光能量作用下铜箔成形的情况。Liu等^[15-19]结合激光冲击成形的方法提出了微压印成形方法,研究了离焦量和激光能量对吸收层和压印件成形效果的影响;随后又提出了激光冲击微冲裁的成形方法和激光间接冲击微冲裁方法。然而,此前激光冲击微成形技术的研究主要涉及简单形状微特征的复制或微孔的成形,利用激光冲击直接制造复杂微零件的研究鲜有报道。

本文提出的激光冲击制造微零件的成形方法,结合了激光冲击微成形工艺及激光冲击微冲裁成形工艺的优点,采用聚合物作为软模,在激光冲击作用下实现微零件的成形。采用微电火花技术,在美国 AISI 1090 钢上加工制作出所需的模具;使用厚度为 $35\ \mu\text{m}$ 的钛箔作为工件原材,利用激光冲击聚合物间接加载金属薄板;工件在聚合物动态加载下,冲裁边的精度和质量都得到了提高;同时,结合成形/冲裁微模具,在单脉冲激光作用下实现了微成形和微冲裁工艺,从而直接制造微零件。以 ANSYS/LS-DYNA 软件为平台,利用有限元分析方法对零件的成形过程及减薄率进行了数值仿真分析,在实验的基础上进一步探究了激光冲击金属薄板制造的微零件的工艺性能。

2 实验机理

激光间接冲击直接制造微零件的成形方法是一种新型的微成形工艺,整个装置由约束介质、吸收介质、软模、工件和微模具组成,如图 1 所示。当高功率密度(大于 $10^9\ \text{W}/\text{cm}^2$)、短脉冲(纳秒量级)的强激光束经过透镜聚焦透过约束层辐照至吸收层表面时,吸收层表面被加热并瞬间发生气化。发生气化的吸收层继续吸收激光能量,继而发生电离,从而产生高温(大于 $10^7\ \text{K}$)、高压(大于 $1\ \text{GPa}$)等离子体。等离子体在约束层的约束作用下产生向工件层传播的冲击波,该冲击波对软模施加的巨大冲击压力可高达吉帕数量级。冲击波经过软模的传递迅速加载于金属箔板工件上,工件最终会在软模的冲击载荷和刚性模具的约束反力的双重作用下发生弹性、塑性变形以及一系列物理变化,最终实现所期望的零件成形。

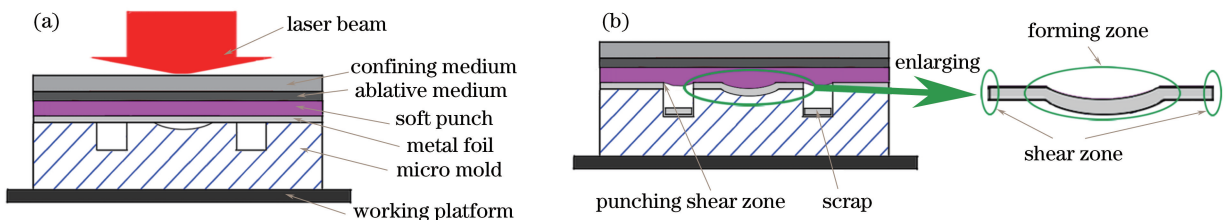


图 1 激光冲击成形原理图。(a)成形之前;(b)成形之后

Fig. 1 Schematic diagrams of LSF. (a) Before LSF; (b) after LSF

3 成形实验

3.1 实验仪器及准备

实验采用德国 InnoLas 公司的 Nd:YAG-GAIA R 激光器,主要参数:激光波长为 $1064\ \text{nm}$,重复频率为

0.5 Hz,最大单脉冲能量为 12.2 J,光斑大小可调(2~13 mm),激光束为平顶分布,能量范围为 2~3 J,光斑为 3 mm。激光器进行微落料零件及微孔成形实验的光路布置如图 2 所示。

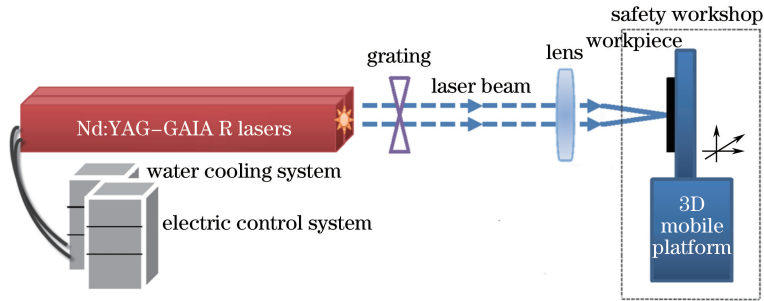


图 2 采用 GAIA 激光器的实验光路布置

Fig. 2 Experimental layout with GAIA lasers

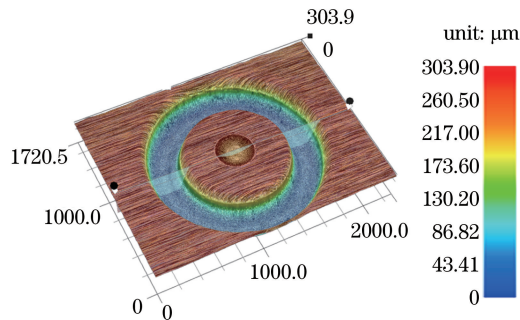


图 3 模具三维轮廓图

Fig. 3 3D profile of mold

考虑到工况为局域强冲击载荷作用,模具需具备较好的刚度、硬度以及韧性,模具材料选用 AISI 1090 钢,经过退火和淬火处理后模具硬度为 65 HRC(HRC 为洛氏硬度);在模具中间位置利用微电火花技术加工出所设计的模具形状;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,采用超景深三维显微系统(KEYENCE VHX-1000C,基恩士公司,日本)测量模具,其形貌如图 3 所示,其中环形槽的深度为 844.6 μm ,中间凹坑深度为 75.02 μm 。

工件试样采用厚度为 17 μm 的铝箔作为吸收层;厚度为 3 mm 的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)作为约束层,PMMA 是目前最优良的高分子透明材料,可见光透射率达到 92%,比玻璃的透光度高;采用厚度为 200 μm 、邵氏硬度为 70 的聚氨酯橡胶薄膜作为软模;工件选用厚度为 35 μm 的钛箔,钛箔的主要组成成分见表 1。

表 1 钛箔的主要化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of titanium foil (mass fraction, %)

Element	Al	Si	Ni	Cr	Sn	C	N	O	Fe	Ti
Content	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.012	0.008	0.084	0.053	Bal.

3.2 实验结果与讨论

为了研究激光冲击落料零件与冲裁孔的成形过程,选用不同的能量进行多次实验。实验之后,采用 KEYENCE VHX-1000C 检测结果。图 4 所示为在不同的激光能量单次冲击作用下微孔的微观特征形貌。图 4(a)为激光能量小于 2.2 J 时,激光冲击金属钛箔成形后的图片。从图 4(a)可以看出,工件上没有实现微孔的成形,在环形区域出现了剪切裂痕,而且工件发生了显著的塑性微成形,在金属钛箔工件中心部位复制了模具的凹坑形状。这是因为激光能量太小,工件边缘所受的最大剪切应力小于工件材料本身的剪切断裂极限,所以只发生了塑性变形。图 4(b)、(d)为激光能量为 2.6J 时激光冲击金属箔板成形后的图片。从图 4(b)可以看出,微冲孔很好地复制了模具孔所具有的轮廓特征,且剪切边缘质量良好。从图 4(d)可以看出落料零件很好地复制了模具的形貌,而且零件的剪切边缘光滑,成形零件的表面质量较好。图 4(c)、(e)为激光能量为 3.0 J 时,

激光冲击后的冲裁孔和落料零件图。从图 4(c)可以看出,微冲孔复制了模具孔的轮廓特征,但剪切边缘被烧蚀。从图 4(e)也可以看出,虽然落料零件复制了模具形貌,但零件的表面存在烧蚀现象,尤其是剪切边缘烧蚀很严重。从图 4 可以得知,激光冲击成形的过程中,能量既不能太大也不能太小,当小于工件的最低冲裁能量 2.0 J 时,工件不能实现微孔,但当能量太大时(大于 3.0 J),会烧蚀微孔剪切边缘。

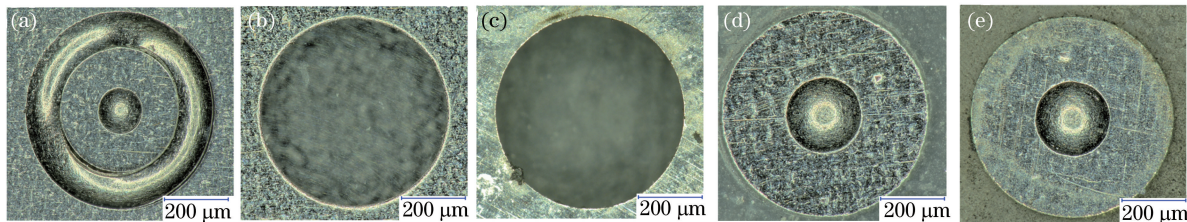


图 4 不同能量单次冲击后钛箔工件 2D 图。(a)成形零件(2.0 J);(b)微孔(2.6 J);
(c)微孔(3.0 J);(d)成形零件(2.6 J);(e)成形零件(3.0 J)

Fig. 4 2D plots of Ti workpieces after single laser impact with different energies. (a) Formed parts (2.0 J);
(b) microholes (2.6 J); (c) microholes (3.0 J); (d) formed parts (2.6 J); (e) formed parts (3.0 J)

下面进一步研究激光能量对零件成形深度的影响。图 5 所示为激光能量分别为 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.0 J 时工件微凹坑的最大成形深度。从图 5 可以看出,零件微凹坑的成形深度与激光能量成正比。这是因为,当激光能量太低时,激光冲击压力太小,不能实现比较理想的塑性变形。从图 5 也可以看出,当激光能量为 3.0 J 时,最大成形深度基本达到饱和。但最大成形深度仍小于模具的深度(75.02 μm),可能的原因是:模具型腔内无法完全排除的空气影响了材料的流动性^[20]。

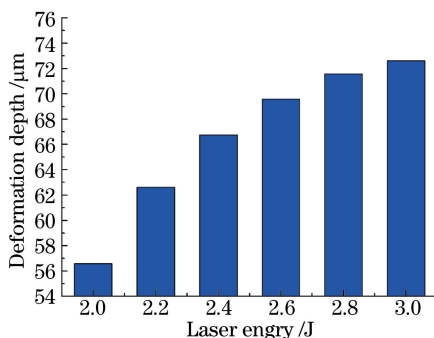


图 5 激光能量与零件微凹坑成形深度的关系

Fig. 5 Relationship between deformation depth of micro-pit and laser energy

在合适的能量下,采用方形模具同样可以成形方形落料零件与方形微孔,图 6 为激光能量为 2.6 J 时,在单脉冲激光作用下所获得的落料零件和微孔。从图 6(a)方形孔及图 6(b)落料方形零件可以看出其剪切边缘及工件质量都较好,激光冲击箔板成形落料与冲裁成形工艺可以成形多种形状的零件。

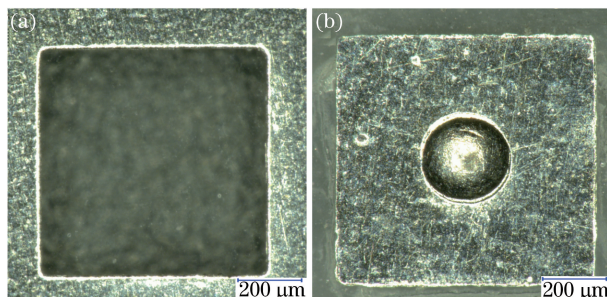


图 6 激光能量为 2.6 J 时激光冲击后工件的 2D 图。(a)冲裁孔;(b)落料零件

Fig. 6 2D plot of workpieces after single laser impact with energy of 2.6 J. (a) Punching holes; (b) blanking parts

上述实验选用聚氨酯橡胶作为软模。在没有使用软模的情况下进行实验,结果发现:当激光能量小于 2.4 J 时,不能形成落料零件和微孔,而且吸收层的铝箔与工件钛箔焊接在一起;当激光能量大于 2.4 J 时,工

件钛箔和吸收层铝箔同时被冲击成微孔,而且冲击下来的钛箔落料零件和吸收层的铝箔落料零件被烧蚀焊接在一起。人为地把所需的钛箔落料零件和吸收层的铝箔落料零件分开时,所得到的落料零件如图 7 所示,钛箔零件[图 7(a)]和铝箔零件[图 7(b)]表面均被严重烧蚀。然而在实验中有软模的情况下,如图 4 所示,当能量在合适的范围内,可以得到比较理想的冲裁孔和落料零件,这得益于聚氨酯橡胶材料的超弹性特征。当成形结束时,聚氨酯橡胶可自动和工件分离,且不需要额外的力^[21]。软模直接与工件接触可以将工件与吸收层分离,避免了吸收层直接与工件接触发生粘合或金属刻蚀现象,有利于提高工件的成形质量^[22-24]。

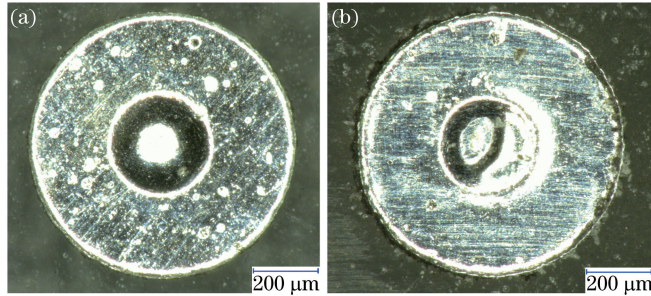


图 7 无软膜情况下,激光能量为 2.6 J 时激光直接冲击落料零件。(a)工件钛箔落料零件;(b)吸收层铝箔落料零件

Fig. 7 Blanking parts under laser direct shock with laser energy of 2.6 J and without soft mold.

(a) Blanking parts of Ti foil workpieces; (b) blanking parts of Al foil absorption layer

4 数值模拟

激光冲击成形的过程发生在极短暂的时间内,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来捕捉过程细节和材料响应^[1]。使用有限网格单元法(FEM)以 ANSYS/LS-DYNA 为软件平台对微落料及微冲裁的机械成形过程进行数值模拟分析^[1]。

图 8 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,所以模型中减去了烧蚀层实验中存在的但与模拟的机械成形过程无关的元件。为了节省计算的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 1/4 进行建模,并对此部分细化了网格的划分。聚氨酯橡胶模型采用显示实体 Solid 164 单元进行网格划分,工件采用薄壳 Shell 163 单元进行网格划分,约束层和压块采用 Solid 164 单元、模具采用壳单元 Shell 163 进行网格划分,并且设置成刚体。

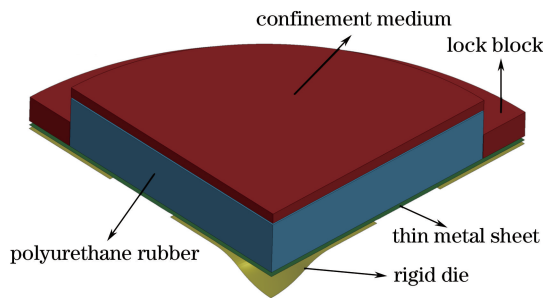


图 8 几何模型

Fig. 8 Geometric model

在激光冲击软模微弯曲成形过程中,金属箔板在强冲击波作用下发生完全变形的时间仅在纳秒范围内,应变率高达 $10^6 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$,并且动态屈服强度获得增加,而这种动态屈服强度的增加不仅与应变增强有关,还与应变率增强有关。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以及与应变率有关的影响。Johnson-Cook 模型对于材料的高应变率变形都适用,尤其适用于不传热的瞬态动态成形模拟。根据相关文献中的 Johnson-Cook 模型^[25],可以使用如下的公式来表示考虑应变率、加工硬化和温度等因素的弹塑性本构关系

$$\sigma = (A + B \cdot \epsilon^n) \left(1 + C \cdot \ln \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_R - T_r} \right)^m \right], \quad (1)$$

式中 σ 为等效屈服强度, ϵ 为等效塑性应变, ϵ_1 为等效塑性应变率, A, B, n, ϵ_2 和 m 是通过实验测得的材料在转变温度或低于转变温度下的常数, T_r 为室温, T_R 为熔点温度, T 为设置温度, C 为本构常数。装置中介质层的作用是避免软模和工件受到热效应的影响, 保证软模和工件完全是在机械力的作用下产生变形。所以可以忽略温度效应在 Johnson-Cook 塑性模型中的作用, 弹塑性本构关系可以简化成如下形式

$$\sigma = (A + B \cdot \epsilon^n) \left(1 + C \cdot \ln \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right). \quad (2)$$

采用 Johnson Cook 损伤模型^[26]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 ϵ_f 可以表示为

$$\epsilon_f = \left[d_1 + d_2 \exp \left(d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left(1 + d_4 \ln \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right) (1 + d_5 T^*), \quad (3)$$

式中 $d_1 \sim d_5$ 为断裂失效参数, T^* 为参考温度, p/q 是压力与等效应力之比。

在激光冲击软模微弯成形过程中, 采用的软模材料为柔性橡胶材料, 该材料具有非线性的应力应变特性。采用超弹性本构 Mooney-Rivlin 模型来描述柔性橡胶材料^[27], 对应变能函数关于应变分量进行求导, 获得应力分量。Mooney-Rivlin 模型的应变能形式为

$$W = \sum_{k+m=1}^n C_{km} (I_1 - 3)^k + (I_2 - 3)^m + \frac{1}{2} k (I_3 - 3)^2, \quad (4)$$

式中 W 为材料每单位标准体积的应变能, I_1, I_2, I_3 为材料形变的张量常数, k 为体积弹性模量, C_{km} 是表示材料超弹性应变的常数, 用来控制软模材料的响应行为。其中 I_3 因为忽略了弹性材料的可压缩性而设置为 1。在这里的模拟分析中采用了邵氏硬度为 70 的聚氨酯橡胶作为软模, 聚氨酯橡胶材料的机械性能参数见表 2。

表 2 聚氨酯橡胶的材料性能参数

Table 2 Material performance parameters of polyurethane rubber

Material	Shore hardness	M-R constant /MPa	M-R constant /MPa	Poisson ratio
Polyurethane	70	0.736	0.184	0.49997

模拟中使用 FEM 对落料零件及冲裁孔的形成过程进行了研究, 结果如图 9 所示。图 9(a) 所示为模具图, 图 9(b) 所示为激光冲击前的工件图, 图 9(c)~(i) 所示为激光冲击后的成形过程。从图 9(c) 可以看出, 工件的中心部位已经复制了模具的微凹坑形貌, 但工件在剪切边缘还没有发生任何裂纹或断裂现象。从图 9(d)~(f) 可以看出, 工件在落料剪切边缘的中间先出现裂纹, 随着时间的推移, 裂纹向两边延伸越来越大, 最后完成零件的落料成形, 而在这个时间段内, 冲裁剪切边缘没有出现裂痕, 只是随着时间的推移, 剪切应变不断发生变化。从图 9(g)~(i) 可以看出, 工件在冲裁剪切区域的最中间处开始出现裂痕, 随着时间和最大剪切应变的变化, 裂纹不断扩展, 最后获得冲裁断面, 完成落料零件与微孔的成形。

减薄率是评估工件成形性能的一个重要标准, 一般的局部减薄率不应超过板厚的 30%^[16], 局部的过度减薄会影响成形件的性能, 所以有必要对成形件的厚度分布进行研究^[16]。本模拟中落料零件各个时刻不同部位的减薄率-时间曲线如图 10 所示, 其中图左上方的绿色插图为零件的模型图。从图 10 可以看出, 随着时间的推移, D、E 区域内的工件厚度基本没发生变化; 而在 A、B、C 三个区域厚度都有明显的减薄。在激光的冲击作用下, C 区域发生微塑性拉伸变形, C 区域在时间为 0.00015~0.0002 s 时, 减薄率不断增加, 之后, 工件的减薄率不再变化, 基本维持在 4% 左右; 而在 B 区域, 工件受到冲击波作用与模具圆角位置接触, B 区域的减薄率随着时间的推移增加幅度很大, 首先达到最大值, 之后稳定在 8% 左右; 之后, 随着工件塑性变形, 减薄危险区域逐渐向成形中心位置靠近, 成形过程最大减薄率发生在成形中心区域, 最大减薄率为 10%。这说明成形区域工件减薄最严重, 厚度最薄, 这是因为落料零件中间部位的微凹坑是通过内拉伸变形得到的, 这样会使成形件的厚度分布不均匀, 加之激光冲击的时间极短, 因此微拉伸成形时材料的应变率很高, 凸缘材料很快流入凹模腔, 使得材料拉伸变薄^[16]。

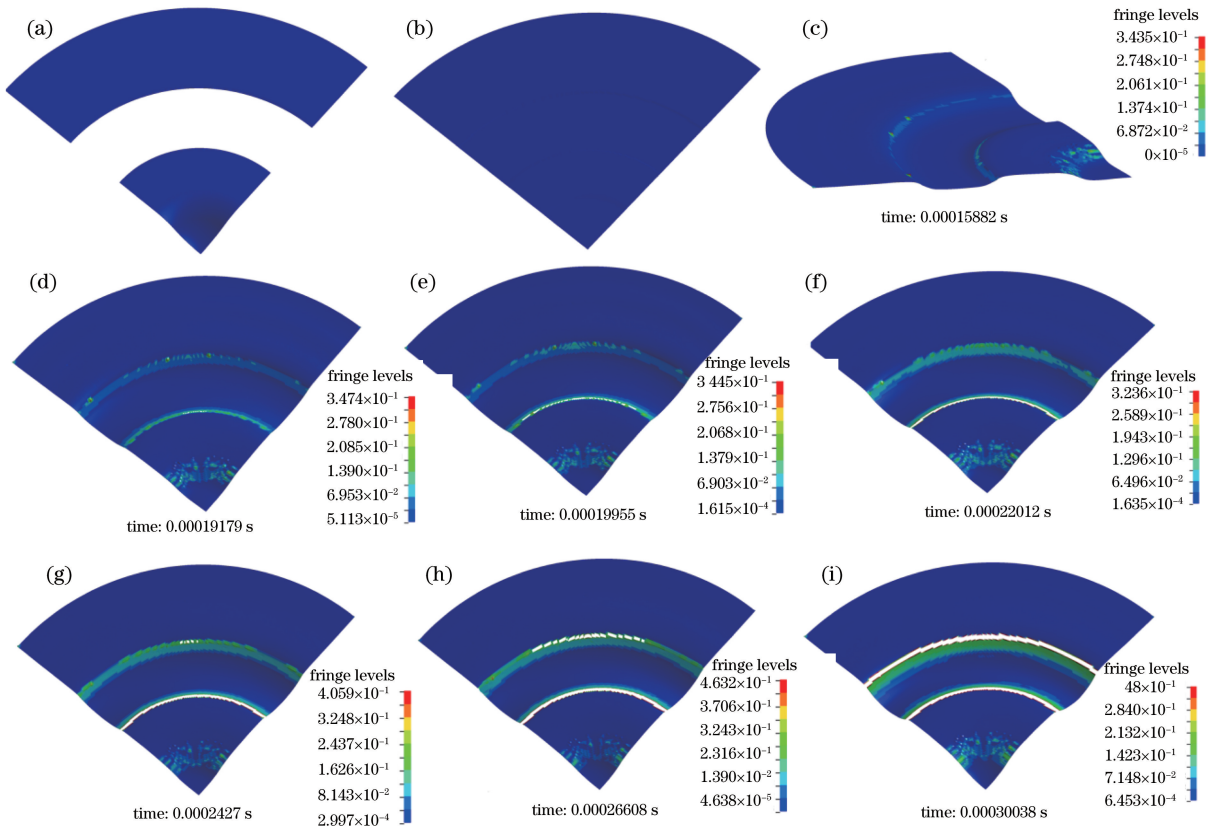


图 9 FEM 模拟落料零件与冲裁孔的形成。(a) 模具;(b) 工件;(c)~(i) 成型过程

Fig. 9 Formation of blanking parts and punching holes in FEM simulations.

(a) Mold; (b) workpiece; (c)-(i) formation process

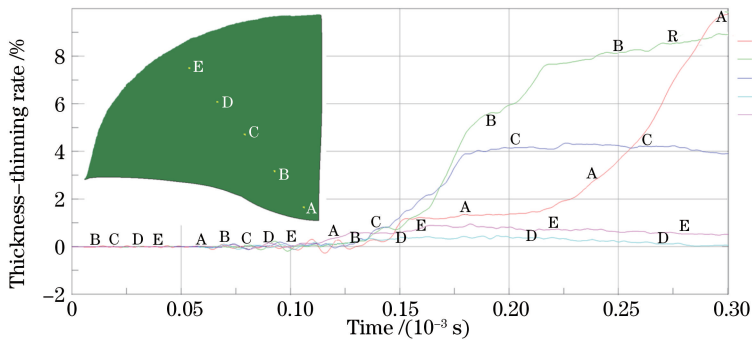


图 10 落料零件不同部位的减薄率-时间曲线

Fig. 10 Thinning rate-time curves in different regions of blanking parts

5 结 论

利用实验和数值模拟的方法,研究了基于激光间接冲击技术直接制造复杂微零件的成形方法。首先,开展了利用激光间接冲击技术直接制作微零件的实验研究与探索,研究了软模对成形件的影响,观测了落料零件的三维形貌、成形深度的变化并对结果展开讨论。实验结果表明,软模直接与工件接触,可以将工件与吸收层分离,避免了吸收层直接与工件接触发生粘合或金属刻蚀现象,提高了工件的成形质量。当激光能量在 $2.2\sim 2.8\text{ J}$ 之间时,可以成形质量良好的零件,冲裁孔的边缘比较光滑,而且落料零件很好地复制了模具的微凹坑;随着激光能量的增大,落料零件微凹坑的成形深度不断增加,最终基本达到模具的微凹坑深度。其次,使用有限元分析方法,以 ANSYS/LS-DYNA 为主要的软件平台,对成形过程进行了数值模拟分析。讨论了零件的成形过程以及工件在不同部位的厚度减薄情况。从模拟的结果可以看出,工件成形零件的动态

成形过程,是先发生塑性变形,然后发生剪切变形,最后形成所需的零件,且成形件在中心位置的应变率及减薄率最大。数值模拟与实验结果对比发现,模拟结果与实验结果吻合度较高,说明了数值模型的正确性以及可靠性。

参 考 文 献

- 1 Wang Xiao, Zhang Di, Gu Chunxing, *et al.* Large area micro bending method by soft punch under laser shock wave based on multi-groove mold[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9): 2292-2298.
王 霄, 张 迪, 顾春兴, 等. 激光冲击软模大面积微弯曲成形方法[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(9): 2292-2298.
- 2 Ma Youjuan, Liu Huixia, Zhou Jianzhong, *et al.* Experimental research on size effects in laser dynamic flexible micro-bending forming[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0503007.
马友娟, 刘会霞, 周建忠, 等. 激光动态柔性微弯曲中尺寸效应的实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0503007.
- 3 Liu Huixia, Zhang Qiang, Gu Chunxing, *et al.* Experimental investigation on warm micro-forming by laser-driven flyer [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0703011.
刘会霞, 张 强, 顾春兴, 等. 激光驱动飞片微塑性温成形实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0703011.
- 4 Saotome Y, Iwazaki H. Superplastic backward microextrusion of microparts for micro-electro-mechanical systems [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 119(1-3): 307-311.
- 5 Wang X, Zhang D, Gu C, *et al.* Micro scale laser shock forming of pure copper and titanium sheet with forming/blanking compound die[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 67: 83-93.
- 6 Zhang W, Yao Y L. Microscale laser shock processing-modeling, testing, and microstructure characterization[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2001, 3(2): 128-143.
- 7 Zhang W W, Yao Y L. Micro scale laser shock processing of metallic components[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002, 124(2): 369-378.
- 8 Chen H Q, Yao Y L, Kysar J W, *et al.* Fourier analysis of X-ray micro-diffraction profiles to characterize laser shock peened metals[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(11-12): 3471-3485.
- 9 Wang Y, Kysar J W, Yao Y L. Analytical solution of anisotropic plastic deformation induced by micro-scale laser shock peening[J]. Mechanics of Materials, 2008, 40(3): 100-114.
- 10 Niehoff H S, Vollertsen F. Non-thermal laser stretch-forming [J]. Adv Mat Res, 2005(6-8): 433-440.
- 11 Niehoff H S, Hu Z Y, Vollertsen F. Mechanical and laser micro deep drawing[J]. Key Engineering Materials, 2007, 344: 799-806.
- 12 Vollertsen F, Niehoff H S, Wielage H. On the acting pressure in laser deep drawing[J]. Production Engineering, 2009, 3(1): 1-8.
- 13 Nagarajan B, Castagne S, Wang Z K. Investigation of copper foil thinning behavior by flexible-pad laser shock forming [J]. Key Engineering Materials, 2013, 535: 306-309.
- 14 Zheng C, Sun S, Ji Z, *et al.* Effect of laser energy on the deformation behavior in microscale laser bulge forming[J]. Applied Surface Science, 2010, 257(5): 1589-1595.
- 15 Liu H X, Shen Z B, Wang X, *et al.* Micromould based laser shock embossing of thin metal sheets for MEMS applications [J]. Applied Surface Science, 2010, 256(14): 4687-4691.
- 16 Liu Huixia. Reseachon metalfoil indirect shockmicro forming under laser driven flyer[D]. Zhenjiang: Jiangsu Unviersity, 2011.
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.
- 17 Liu H X, Lu M M, Wang X, *et al.* Micro-punching of aluminum foil by laser dynamic flexible punching process[J]. International Journal of Material Forming, 2015, 8(2): 183-196.
- 18 Liu H X, Wang H J, Shen Z B, *et al.* The research on micro-punching by laser-driven flyer[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 54: 18-24.
- 19 Lu Mengmeng, Liu Huixia, Shen Zongbao, *et al.* Experiment and simulation of multihole micro-punching with complex layouts by laser-driven flyer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403004.
陆萌萌, 刘会霞, 沈宗宝, 等. 激光驱动飞片复杂轮廓多孔微冲裁实验及模拟[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403004.
- 20 Wang X, Shen Z B, Gu C X, *et al.* Laser indirect shock micro-embossing of commercially pure copper and titanium sheet

- [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 56: 74-82.
- 21 Rhim S, Son Y, Oh S. Punching of ultra small size hole array[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2005, 54(1): 261-264.
- 22 Wang X, Du D Z, Zhang H, *et al.* Investigation of microscale laser dynamic flexible forming process-simulation and experiments[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, 67: 8-17.
- 23 Watari H, Ona H, Yoshida Y. Flexible punching method using an elastic tool instead of a metal punch[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 137(1-3): 151-155.
- 24 Ramezani M, Ripin Z M, Ahmad R. Sheet metal forming with the aid of flexible punch, numerical approach and experimental validation[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2010, 3(3): 196-203.
- 25 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 7th International Symposium on Ballistics, 1983, 21: 541-547.
- 26 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.
- 27 Dirikolu M H, Akdemir E. Computer aided modelling of flexible forming process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148(3): 376-381.