

文章编号: 0258-7025(2009)05-1292-04

激光驱动飞片加载金属箔板成形实验研究

刘会霞 杨 昆 王 匀 王 霄 周 明

(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 提出了一种新的微成形方法——激光驱动飞片加载金属箔板微成形技术,结合飞片速度模型和加载压力模型阐述了成形机理,利用 10 μm 厚的铝箔进行了初步成形实验。在体式显微镜下观察成形后的铝箔表面光滑,并且与模具的贴合程度较高,表现出很好的成形精度。考察了激光能量对铝箔成形深度的影响。通过表面轮廓形貌测量仪检测发现,成形深度受激光能量的影响比较大。在光斑直径为 1 mm,单脉冲激光能量为 25~40 mJ 时,铝箔成形深度随激光能量基本呈线性关系增加,单脉冲激光能量在 45~50 mJ 时,铝箔由于破裂成形深度大幅增加。

关键词 激光技术;微成形;激光驱动飞片;金属箔板

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093605.1292

Research on Micro-Forming Experiment of Metal Foil under Laser Driven Flyer Loading Method

Liu Huixia Yang Kun Wang Yun Wang Xiao Zhou Ming

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

Abstract A new method for micro-forming——micro-forming technology of metal foil under laser driven flyer loading method is developed. The forming mechanism combined with flyer speed model and pressure loading model is discussed and preliminary forming experiments are completed. The surface of formed aluminum foils is smooth, and has high copying ability with good formed precision. The influence of laser energy on forming depth is examined by topography instrument when the laser spot diameter is 1 mm, and single pulse laser energy of 25-40 mJ, the forming depth of aluminum foils shows linear relationship with laser energy. With single pulse laser energy of 45-50 mJ, the forming depth increases largely due to the rupture.

Key words laser technique; micro-forming; laser driven flyer; metal foil

1 引 言

随着电子产品、生物、医疗器械以及微机电系统(MEMS)的迅速发展,具有轻、薄、短、小、多功能特点的微型产品需求量不断增加。与之相关的微型金属零部件的加工也显得越来越重要^[1]。微型化使得微机电系统在精度、热变形、振动和速度等方面具备更优异的性能和功能,微型化成了当代科技发展的一个重要方向。

现有的面向 MEMS 微构件的微加工技术和成形工艺主要有三种^[2],第一种是以德国为代表的 LIGA 技术。利用 X 射线光刻技术,通过电铸成型

于注塑形成深层微结构的方法;第二种是以美国为代表的利用化学腐蚀的方法对硅材料进行加工,形成硅基 MEMS 器件;第三种是以日本为代表的利用传统机械加工手段,即利用大机器制造小机器,小机器制造微机器。但是微型化产业所要求的大批量、高效率、高精度、高模机、短周期、低成本、无污染、净成形等固有特点制约了微细加工技术的广泛应用。

因此,微细加工技术迫切需要探索新的微成形工艺。本文提出一种新的微成形工艺即激光驱动飞片加载金属箔板微成形技术,利用激光驱动飞片高

收稿日期: 2008-03-26; 收到修改稿日期: 2008-09-23

作者简介: 刘会霞(1964—),女,教授,主要从事激光加工技术,数字化设计和制造技术(CAD/CAE/CAM)等方面的研究。E-mail: lhx@ujs.edu.cn

速运动,将激光能量转化为飞片的动能。高速运动的飞片作为激光能量的载体,飞行一段距离后与工件材料发生碰撞。在碰撞界面上产生高压冲击波,高压冲击波向材料内部传播。若其峰值压力超过材料动态屈服强度,将使材料产生高速塑性变形。结合微型凹模,可以让工件精确复制模具的形状,实现工件的仿形制造。

2 成形机理

整个成形装置主要由约束层、飞片层、飞行腔、工件和模具组成,其相互位置及加工原理如图 1 所示。

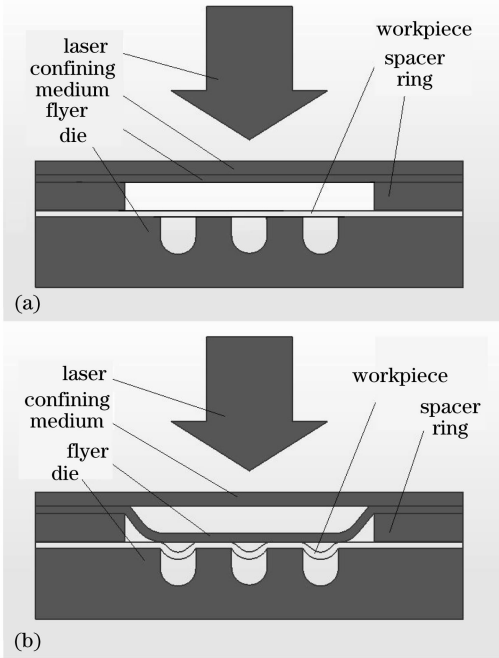


图 1 激光驱动飞片加载金属箔板微成形示意图。(a)成形前;(b)成形后

Fig. 1 Schematic diagram of micro-forming technology of metal foil under laser driven flyer loading method. (a) before forming; (b) after forming

激光驱动飞片技术是一种新型的动高压加载技术^[3,4],利用小型固体脉冲激光器产生激光脉冲(脉宽约 10 ns,功率密度约 $10^8 \sim 10^{10} \text{ W/cm}^2$) 辐照附着在透明窗口上的金属膜,烧蚀一部分膜层,产生高温高压等离子体,利用等离子体的高压驱动剩余的膜层以高速飞行。

提出的成形方法基于激光驱动飞片技术。利用高速运动的飞片与相隔一定距离的金属箔板发生碰撞,在撞击界面产生高压冲击波。此高压冲击波向材料内部传播,若其峰值压力超过金属箔板的于戈

尼奥(Hugoniot)弹性极限强度,将在金属箔板表面及其内部产生塑性形变^[5]。

激光驱动飞片加载时需要采用透明约束层,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飞片。一般飞片的厚度在几个微米到几十微米之间,激光在纳秒级的时间辐射到飞片表面,飞片表面温度立即升高到材料的气化温度,会使飞片表面材料迅速气化。气化部分的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使得等离子体膨胀爆炸。由于约束层的阻挡,爆炸等离子体向飞片方向膨胀,在飞片上产生吉帕级的冲击压力。等离子体作用的时间达到激光脉宽的 3 倍左右^[6],同时约束层也可以使激光作用的冲击压力得到很大提高^[7]。

由于在成形过程中,飞片与金属箔板的接触代替了激光与金属箔板的直接作用,使得金属箔板表面避免了激光的烧蚀,成形后的金属箔板不但兼有激光冲击强化的性能而且表面质量没有损伤,如图 2 所示。同时由于激光驱动飞片加载金属箔板微成形的时间非常短,材料具有极高的成形速率,成形能力高于准静态成形^[8],能在一定程度上克服传统微塑性成形中的尺度效应。

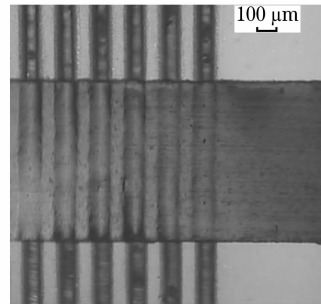


图 2 成形后的金属箔板

Fig. 2 Metal foil after forming

3 实验

考虑到模具需要承受的瞬态压力比较大,为了防止模具在成形过程中发生变形,模具材料选用具有高硬度高强度的石英玻璃。实验采用的石英玻璃的尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,利用飞秒激光在石英玻璃上加工出阵列的 U 型槽。槽宽度为 $100 \mu\text{m}$,深度为 $80 \mu\text{m}$,相邻两槽间距为 $200 \mu\text{m}$,如图 3 所示。

飞行腔选用厚度为 $170 \mu\text{m}$ 的医学盖玻片,利用纳秒激光雕刻机在盖玻片中心位置加工出直径为 $\phi 1.5 \text{ mm}$ 的圆孔,得到 $\phi 1.5 \text{ mm} \times 170 \mu\text{m}$ 的飞行腔。

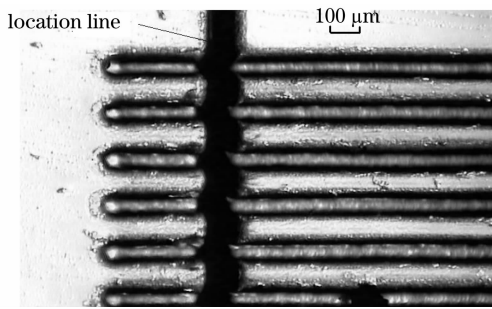


图3 飞秒激光加工出的阵列模具

Fig. 3 Array model fabricated by femtosecond laser

实验材料为 1235 型铝箔,化学成分(质量分数)为 Cu0.05, Si + Fe0.65, Mn0.05, Mg0.05, Zn0.10, Ti0.03,其余为 Al;调质度为 H19 的 1235 型铝箔的力学性能如下:屈服强度 $\sigma_{0.2} = 145$ MPa,弹性模量 $E = 69$ GPa,剪切强度 $\tau = 100$ MPa。

将厚度为 $10 \mu\text{m}$ 的铝箔裁剪为 $30 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 的条状金属箔板,裁剪尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的铝箔作为飞片,用无水乙醇清洗金属箔板和飞片表面,保证金属箔板和飞片的平面度。

实验采用的激光器为美国 Big Sky 公司的 Nd:YAG 激光器,主要参数:激光波长为 1064 nm ,脉冲宽度为 10 ns ,最大单脉冲能量为 50 mJ ,输出能量可控,光斑大小可调,激光束为准高斯分布。用于实验结果观察的设备有:1) 体视显微镜,能够将观察物体放大 200 倍,并且通过计算机输出图像,可以观察成形金属箔板的表面质量;2) Veeco 表面轮廓形貌测量仪,能够测量金属箔板成形的深度和表面粗糙度。

按照图 1(a)中的位置关系,将模具放置于激光器的工作台,然后把条状金属箔板垂直放置于 U 型槽上方,在金属箔板上放置盖玻片,保证飞行腔的中心在 U 型槽及金属箔板上,再将飞片放置于飞行腔上,在飞片上放置厚度为 1 mm 的 K9 玻璃作为约束层。

4 实验结果及分析

图 2 是铝箔在 U 型阵列模具上成形的图像,在体视显微镜下可以看到成形后的铝箔表面没有受到激光的烧蚀,并且与模具的贴合程度较高,表现出很好的复制能力。飞片由于与铝箔碰撞后发生了回弹,因此铝箔表面没有飞片的残留,铝箔的成形也较均匀,充分验证了激光驱动飞片加载金属箔板微成形技术的可行性和优越性。

在保证其他边界条件一致的前提下,考察激光

能量对铝箔成形深度的影响,成形后利用 Veeco 表面轮廓形貌测量仪测量铝箔成形情况,可以得到铝箔成形的三维图,如图 4(a)所示。选择三维图中成形量最大的截面,可以得到成形的截面图,如图 4(b)所示。铝箔成形过程中由于受激光高斯分布的影响,越接近光斑中心工件变形越大。另外,由于铝箔本身表面质量的影响,成形后的工件表面有一定的起伏。

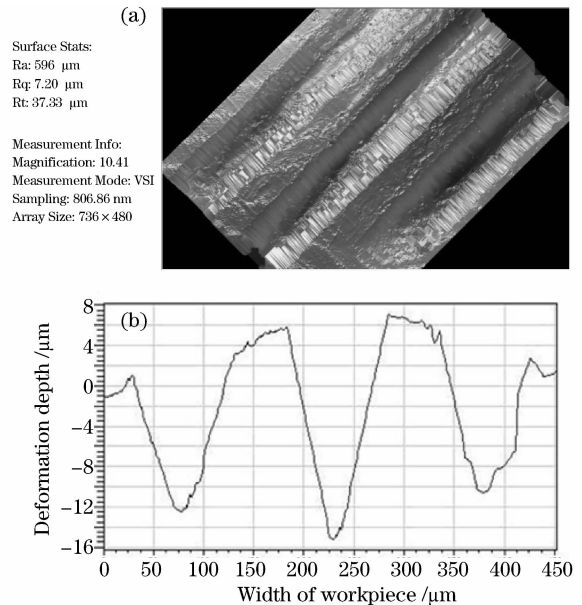


图4 形貌仪测量得到成形铝箔的三维图(a)和截面图(b)
Fig. 4 3D diagram (a) and cross section diagram (b) of formed aluminum foil detected by topography instrument

实验中单脉冲激光能量分别为 25 mJ , 30 mJ , 35 mJ , 40 mJ , 45 mJ , 50 mJ ,光斑直径均为 1 mm ,选取各铝箔最大成形深度进行对比,得到了激光能量与弯曲成形深度($E-D$)的关系,如图 5 所示。

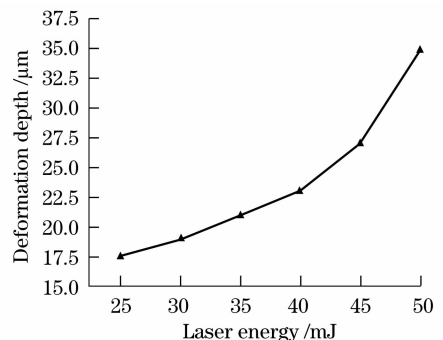


图5 激光能量与成形深度的关系

Fig. 5 Relation between laser energy and forming depth

随着激光能量的增强,铝箔成形深度也随之增加;在激光能量为 $25 \sim 40 \text{ mJ}$ 时,铝箔成形深度随激

光能量基本呈线性关系增加;当激光能量增加到 45~50 mJ 时,变形深度的增加脱离了线性关系,近似为指数关系。通过体视显微镜观察,发现当激光能量到达 45 mJ 时,铝箔的中心部位出现了细微的裂纹,在激光能量为 50 mJ 时,铝箔出现明显破裂。这种现象能够对激光能量增加到 45~50 mJ 时,弯曲变形深度近似表现为指数关系做出很好解释,即破裂处的变形脱离了铝箔的约束力明显增大。实验结果说明选择适当的激光能量对于成形来说非常关键,由于在装配过程中存在细微的误差,得到的结果有一定偏差。但是总体来看,图 4(b)能够很好反映激光能量对成形的影响。

5 结 论

提出了一种新的微成形方法——激光驱动飞片加载金属箔板微成形技术,即利用激光直接作用飞片,使得飞片具有较高的运动速度。飞片与金属箔板高速碰撞,利用碰撞界面产生的高压冲击波实现金属箔板的高压高应变率成形。结合模具可实现仿形制造,具有较高的精度。采用飞片作为激光能量的载体,避免了激光直接作用于金属箔板,保证了金属箔板的表面质量。结合激光驱动飞片的速度模型以及碰撞压力的计算模型,对激光驱动飞片加载金属箔板的成形机理进行了阐述。利用厚度为 10 μm 的铝箔进行了初步的激光驱动飞片加载成形实验,考察了激光能量对铝箔成形深度的影响,为进一步

研究激光驱动飞片加载金属箔板微成形提供了依据。激光驱动飞片加载金属箔板微成形作为一种新的微成形工艺,在成形理论、成形参数、失效形式、成形极限等方面,还需要进行深入的研究。

参 考 文 献

- 1 Tau Ran Hsu. MEMS and Microsystems: Design and Manufacture [M]. McGraw-Hill, Boston, 2002
- 2 Zhou Ming, Huang Tao, Li Baojia. A method and device for three-dimensional micro-nano scale forming by laser loading[P]. China, invention patent, CN1986387, 2007. 06. 27
周 明,黄 涛,李保家. 激光加载实现微纳尺度三维成形的方法及其装置[P]. 中国,发明专利, CN1986387, 2007. 06. 27
- 3 D. L. Paisley. Laser-driven Miniature Flyer Plates for Shock Initiation of Secondary Explosives [R]. APS-Shock Waves in Condensed Matter-1989 Albuquerque, NM, August, 1989, 14~17
- 4 Huang Xiuguang, Gu Yuan, Luo Pingqing. Numerical simulation of double foils with laser directly driving [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(1): 47~51
黄秀光,顾 援,罗平庆. 激光直接驱动飞片空腔靶的数值模拟 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(1): 47~51
- 5 Yang Guitong. Dynamic Theory of Plasticity [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998
杨桂通. 塑性动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998
- 6 P. Peyre, R. Fabbro. Laser shock processing: a review of the physics and applications [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 1995, **27**(1): 1213~1229
- 7 R. Fabbro, J. Fournier, D. Devaux *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2): 775~782
- 8 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**(06): 063108