

基于激光冲击动态力学效应的薄板变形特性与控制

郭永升 孙霄川 羊茜 胡永祥

上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240

摘要 激光冲击成形技术用于微细薄板拉深成形,有望改善传统成形中的高昂模具费用及摩擦效应问题。采用纳秒高能短脉冲激光诱导冲击动态压力载荷,研究了激光能量密度在 15.1~27.0 J/cm² 范围内薄板工件的激光冲击动态拉深半模成形的变形量变化规律与成形极限,实验观察到了逆向形变的发生。分析结果表明表面逆向形变是工件在激光冲击载荷作用下撞击下模底面后反弹而产生的。进一步研究了激光能量密度对逆向形变的影响,提出了通过降低激光脉冲能量、由单脉冲到多脉冲作用的方法改善逆向回弹,有效实现了较高的模具贴合程度。

关键词 激光光学; 激光冲击成形; 实验法; 薄板变形; 逆向形变

中图分类号 V261.8

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.081402

Fabrication and Controlling of Metal Sheets Based on Dynamic and Mechanical Effect of Laser

Guo Yongsheng Sun Xiaochuan Yang Xi Hu Yongxiang

School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract Laser peen forming, while applied in the deep drawing of metal sheet, is hopeful to cut down the cost of molds and reduce the friction effect in traditional micro deep drawing. Using dynamic and mechanical load induced by high-energy nanosecond laser pulses, deformation of metal sheets under laser fluence of 15.1~27.0 J/cm² is investigated, during which bulging effect is observed. The results show that the bulging occurs when the metal sheet collides with the die under the load induced by laser pulse. Moreover, experiment on bulging effect under different laser fluences is performed. Possible controlling method is presented through lowering laser fluence and starting from single pulse to multiple pulses, which can improve the molding rate.

Key words laser optics; laser peen forming; experimentation; deformation of metal sheet; bulging

OCIS codes 140.3390; 350.3850; 310.3840

1 引言

随着机电系统的迅速发展与其在高新领域的广泛运用,研发适应高精密、高可靠性微型零件的集成化生产技术已成为现代制造的热点^[1-2]。近年来,微细零件加工技术得到了飞速发展。激光成形是微细零件制造的一个重要途径,受到研究人员的广泛关注^[3]。激光成形技术包括激光弯曲成形与激光冲击成形。激光冲击成形利用激光诱导的等离子体冲击压力使板材发生冷塑性变形,区别于传统激光热效应应用。美国 Hackel 等^[4]正式提出激光喷丸成形(LPF)的概念后,国内 Zhou 等^[5]开展了相关研究并取得了较大进展。YAO 等开展了微尺度板材激光冲击成形,确立了激光微冲击成形的概念(μ LPF)^[6-8]。

将激光冲击成形技术运用于薄板微拉深成形,有望解决传统技术高昂模具成本、摩擦效应等问题^[9],具有重要的应用前景。对此,不少学者做了相关研究,如 Vollertsen 等^[11]完成了 20 μ m 超薄铜、铝以及不锈钢薄板的杯状零件成形,Liu 等^[10]利用微型圆形沟槽状模具与 10 μ m 的铜箔完成了 260 μ m \times 59 μ m 的微型圆形沟道的成形等。在激光动态冲击载荷作用下,考虑到利用激光诱导的等离子体冲击压力代替传统凸模,会出

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-04-02; 网络出版日期: 2015-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(51375305)、上海交通大学着政项目

作者简介: 郭永升(1993—),男,本科生,主要从事激光制造方面的研究。E-mail: 365497623@sjtu.edu.cn

导师简介: 胡永祥(1981—),男,博士,副教授,主要从事激光喷丸强化、激光喷丸成形方面的研究。

E-mail: huyx@sjtu.edu.cn(通信联系人)

现工件触碰下模反弹的问题, Hanna Wielage 通过实验对比, 观察到了此现象。逆向形变将严重影响成形效果, 导致工件无法形成预定形状, 并降低成形精度, 是激光冲击成形应用的关键问题之一。

本文通过利用不同深度的模具并控制激光能量, 实验研究杯状薄板工件的冲击成形的可能性, 并以此为基础探讨逆向形变发生的条件与原因, 研究其发生的规律, 提出减弱此现象的方法。

2 实验方法

工艺原理如图 1 所示。高能短脉冲激光作为能量源, 作用在吸收层上令其迅速气化、电离为等离子体。等离子体急速膨胀, 对工件表面形成力学冲击, 其造成的冲击波压力达到吉帕量级, 远大于材料的动态屈服强度, 从而实现不可逆的冷塑性变形。其中, 约束层主要作用为提高冲击波峰值压力并延长作用时间, 吸收层为防止工件表面因高温发生烧蚀。在瞬态冲击压力作用下, 板材背面材料流动大于激光作用面, 发生凹面变形, 其应变率达到 10^6 s^{-1} 。

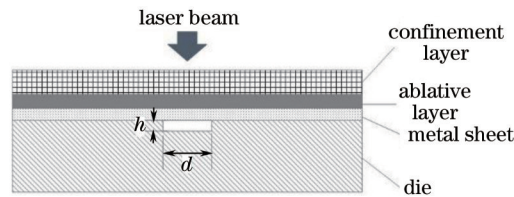


图 1 μLPP 工艺原理图

Fig.1 Schematic illustration of the process principle of μLPP

实验采用 Q-switched Nd-YAG 固体激光器为激光源, 光斑形状为 $\phi 2 \text{ mm}$ 的圆形, 脉冲宽度为 10 ns 。最大激光能量密度为 27.0 J/cm^2 , 通过 75% 以及 50% 分光镜获取不同能量密度。实验中, 以水作为约束层, 黑胶带为吸收层。成形材料为在微型零件中常用的紫铜^[8], 纯度为 99.9%, 延伸率为 8%, 厚度为 $100 \mu\text{m}$ 与 $200 \mu\text{m}$ 。模具设计以及安装方法如图 2 所示。材质为不锈钢, 横向尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 由两部分组成, 下模 1 加工 $\phi 1.8 \text{ mm}$ 通孔, 下模 2 厚度为 3 mm 。通过改变下模 1 厚度 (0.5 mm 和 0.3 mm) 从而获得不同深度的杯形模具。固定方式采用压块而非传统冲压成形的压边圈, 目的是确保在激光作用的过程中, 水能够覆盖工件表面。整个夹具固定在工业机器人末端上, 通过控制机械手在每个位置的停留时间, 改变激光在同一点的作用次数。

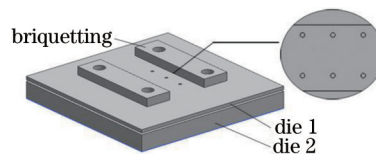


图 2 模具安装方法

Fig.2 Installation method of the die

采用 KS 1100 表面形状测量仪测量成形工件的几何形状。另外, 采用体视显微镜观察工件成形情况, 最大放大倍数为 250 倍。

3 实验结果

3.1 激光脉冲能量的影响

在激光冲击成形过程中, 激光单脉冲能量、持续时间与次数、激光光斑大小等工艺参数均会影响工件成形效果^[11-12]。单脉冲能量是影响成形的主要因素之一, 直接决定了变形量的大小。因此, 进行了不同脉冲能量下的杯形模具的拉深成形实验, 分析其对成形结果的影响。

图 3 是成形具体形状照片, 其中, 图 3(a)、(b)、(c)、(d) 为体视显微镜下成形工件上、下表面照片, 图 3(e)、(f) 为通过三维光学轮廓扫描仪测量成形工件背面得到的三维几何形状。当单脉冲能量密度为 $15.1 \sim 22.9 \text{ J/cm}^2$ 时, 工件自由形变深度未足以触碰到下模具, 试样截面形状呈抛物线形, 以 22.9 J/cm^2 样本点为例, 其图像见图 3(a)、(b)、(e)。当能量密度增大至 27.0 J/cm^2 时, 铜箔发生逆向形变, 最终呈深度为 $455.10 \mu\text{m}$ 的杯形, 无法与模具完全贴合, 见图 3(c)、(d)、(f)。逆向形变发生的原因是在激光冲击成形中, 采用高能激光脉冲诱导的等离子体冲击压力代替了传统拉深成形中的凸模, 导致工件在触底时无约束而发生逆向反弹。

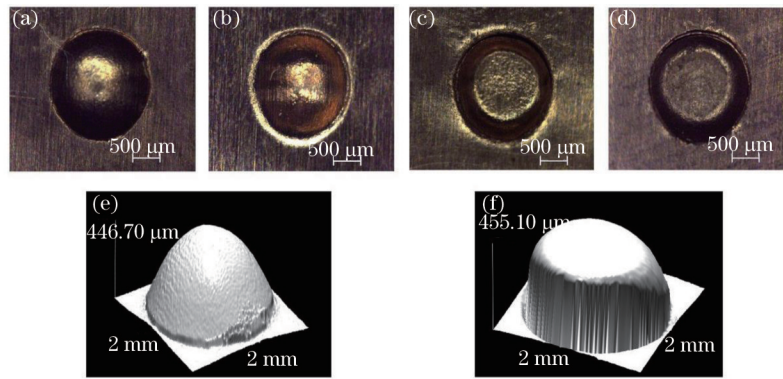


图3 模具深度为0.5 mm时,0.1 mm厚度铜箔成形图像。(a)、(b)、(e)单脉冲能量为22.9 J/cm²;
(c)、(d)、(f)单脉冲能量为27.0 J/cm²

Fig.3 Images of 0.1 mm metal sheet with 0.5 mm deep mold. (a), (b), (e) Laser fluence of 22.9 J/cm²;
(c), (d), (f) laser fluence of 27.0 J/cm²

图4是工件最大变形深度 h 与单脉冲能量的曲线关系图,旁边附有该点处工件截面拟合图。由图中结果可以发现,随着能量增加,变形深度也增加,且两者呈良好的线性关系。但当脉冲能量从22.9 J/cm²提高到27.0 J/cm²时,试样发生逆向形变,回弹作用力导致工件变形深度有一定下降。未发生逆向形变时,同一能量下工件成形深度能够控制在平均数值上下30 μm之内,成形精度较为理想。在实际工业生产中,能通过控制脉冲能量来较为准确地得到给定深度的抛物线形工件。

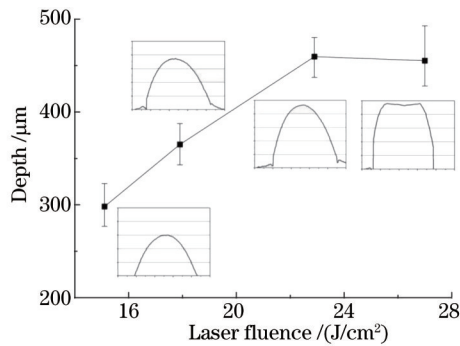


图4 模具深度为0.5 mm,单脉冲能量为15.1~27.0 J/cm²时,0.1 mm厚度铜箔成形深度与能量关系曲线

Fig.4 Depth versus laser fluence of 0.1 mm metal sheet under laser fluence of 15.1~27.0 J/cm² with 0.5 mm deep mold

为进一步理解逆向形变发生机制,利用三维光学轮廓扫描仪测量27.0 J/cm²处一个典型样本工件,结果如图5所示。在杯件顶端a处,因逆向回弹过程中材料挤压而向上凸起。在壁面b处与底端c处均存在不平滑突起。可以推测,在等离子冲击压力作用下,工件顶端触碰下模具底面后,作用力以顶端应力集中点为中心向四周扩散,使壁面受到向上的作用力,整体向上回弹。同时,在此能量点处,观察到部分样本工件沿凹模入口处发生破裂,如图6所示。传统准静态拉深成形中,常见的失效形式是工件沿凸模圆角处断裂;而激光冲击成形过程中,由于以激光诱导的等离子体冲击压力代替凸模,凸模圆角处应力集中不明显,因此工件失效部位不同。

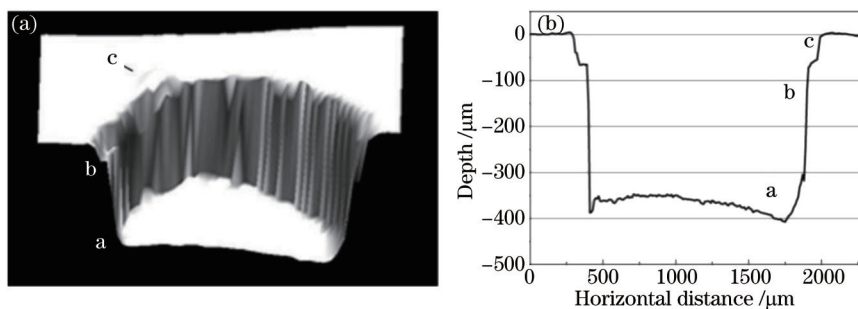


图5 模具深度为0.5 mm,单脉冲能量为27.0 J/cm²时,0.1 mm厚度铜箔成形图像。(a) 反面三维扫描图;(b) 截面曲线形状

Fig.5 Deformation of 0.1 mm metal sheet under the laser fluence of 27.0 J/cm² with 0.5 mm deep mold.

(a) Image through 3D surface optical profiler from the bottom surface; (b) curve of the section

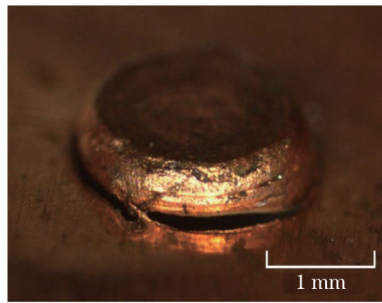


图6 逆向形变工件的断裂

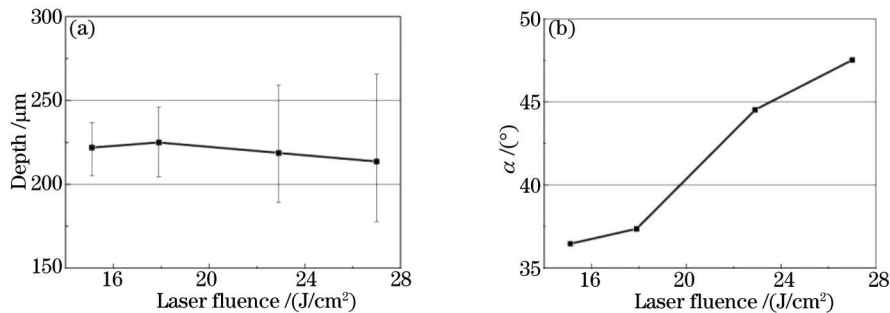
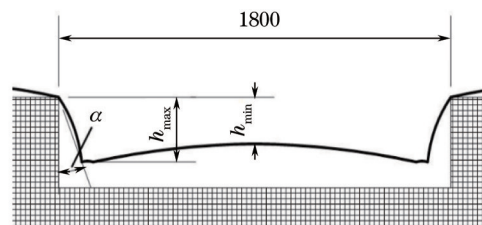
Fig.6 Fracture of metal sheet after bulging

3.2 逆向形变影响因素分析

3.2.1 逆向形变与激光脉冲能量的关系

3.1节所观察到的逆向形变问题将导致成形工件拉深深度低于预定深度,并使模具的贴合程度下降。该问题会影响到激光冲击成形的实际运用,故需要对影响逆向形变产生的因素进行进一步研究。

以单脉冲激光能量密度为变量,采用0.1 mm铜板与0.3 mm深的模具进行了拉深实验。实验结果如图7所示。为表征成形工件与模具的贴合程度,定义模具与工件侧壁离散角 α ,其示意图如图8所示。 α 是伴随工件逆向回弹时带来的侧壁挤压变形而产生的。

图7 激光脉冲能量对逆向形变的影响。(a) 深度 h ; (b) 离散角 α Fig.7 Influence of laser fluence on bulging. (a) On depth h ; (b) on walk-off angel α 图8 离散角 α 定义图Fig.8 Illustration of walk-off angel α

由图7(a)可以看出,不同激光能量密度下,工件形变平均深度 h 亦不同。同时由图7(b)看出,离散角 α 随能量密度上升而变大,表征了逆向形变的程度增加。由上述两点推测,随激光能量的上升,逆向回弹发生时工件回弹的动量亦上升,但对回弹高度的影响较小,而主要消耗在杯状工件壁面的逆向挤压变形中,导致壁面与模具夹角 α 增大。

图7(a)中,随激光能量密度上升, h 的数值分布范围变大,从上下浮动约10 μm(15.1 J/cm²)到50 μm(27.0 J/cm²)。这表明能量的上升将加剧成形过程的不稳定性,这种不稳定性对成形深度的影响已覆盖了能量变化带来的影响。

3.2.2 逆向形变的改善

在杯状薄板工件的成形中,发生逆向形变后无法通过调节激光能量控制底面的回弹量。借鉴Li等^[11]的研究,考虑通过降低激光脉冲能量,增加脉冲次数的工艺方法,控制逆向形变的回弹量,提高工件的模具贴合程度。

尝试了不同工艺参数组合下的激光拉深成形,其中一组结果如表1所示。在本组实验中,取0.2 mm Cu

为成形薄板,单脉冲能量密度为 27.0 J/cm^2 ,控制每个样本点激光脉冲次数在 4~5 次,同时获得了未发生回弹的抛物线形工件与发生回弹后的杯状工件。杯状工件与模具的贴合效果较好,其深度误差仅为 2.13%。

实验结果说明在逆向回弹发生时,多脉冲成形时单脉冲能量的峰值压力远小于单脉冲成形,有效地控制了逆向形变量,实现较好的贴合效果。显然,采用减小激光脉冲能量,增加激光作用次数的做法,可以有效地降低逆向形变的影响,达到较好的成形效果。

表 1 单脉冲能量为 27.0 J/cm^2 时,0.2 mm 铜板变形情况

Table 1 Deformation of 0.2 mm copper sheet under laser fluence of 27.0 J/cm^2

Shape	Number of laser pulses	Depth $h / \mu\text{m}$	Forming error /%
Parabolic	4	463.40	/
Cup-shaped	5	489.35	2.13

4 结 论

通过改变激光脉冲能量与模具深度等工艺参数,以杯状薄板工件为例研究了激光微冲击成形工艺。研究了激光脉冲能量对逆向形变的影响,提出了降低单脉冲能量,增加激光脉冲次数的控制方法。主要结论如下:

1) 控制单脉冲能量在 $15.1 \sim 22.9 \text{ J/cm}^2$,单脉冲,无下模约束时,能够使厚度为 0.1 mm 的紫铜成形直径为 1.8 mm、深度为 $277.75 \sim 459.64 \mu\text{m}$ 的抛物线深坑,成形量随激光能量增加而增加;

2) 在冲击波作用下的工件,当无背面约束的形变量大于模具深度时(激光能量密度 27.0 J/cm^2),工件底面会与模具底部发生碰撞,产生逆向形变,成形深度下降;

3) 当激光能量达到一定阈值、足以使材料发生逆向形变时,激光能量不是影响回弹高度的主要因素,但激光能量的增加将加剧成形过程的不稳定性,并最终消耗在工件壁面的逆向挤压过程中,导致成形工件与模具贴合程度下降;

4) 通过降低激光能量、增加脉冲次数的方法,能够改善逆向形变情况,提高模具贴合程度。

参 考 文 献

- 1 Vollertsen Frank, Niehoff Hendrik Schulze, Wielage Hanna. On the acting pressure in laser deep drawing[J]. *Production Engineering*, 2009, 3(1): 1-8.
- 2 Fan Jinrong, Huang Shu, Zhou Jianzhong, *et al.*. Analysis and expectation of microscale laser shock forming[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 010003.
范金荣,黄舒,周建忠,等.激光微冲击成形技术分析展望[J].*激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 010003.
- 3 F Vollertsen, Z Hu, H S Niehoff, *et al.*. State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 151: 70-79.
- 4 Lloyd Hackel, Fritz Harris. Contour Forming of Metals by Laser Peening: U.S., 6410884[P]. 2012-06-25.
- 5 J Z Zhou, J C Yang, Y K Zhang, *et al.*. A study on super-speed forming of metal sheet by laser shock waves[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 129(1-3): 241-244.
- 6 Youneng Wang, Yajan Fan, Sinisa Vukelic, *et al.*. Energy level effects on deformation mechanism in micro-scale laser peen forming[J]. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME*, 2006, 34: 119-126.
- 7 Y Fan, Y Wang, S Vukelic, *et al.*. Wave-solid interactions in laser-shock-induced deformation processes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(10): 104904.
- 8 Hongqiang Chen, Jeffrey W Kysar, Lawrence Y Yao. Characterization of plastic deformation induced by microscale laser shock peening[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2004, 71(5): 713-723.
- 9 Zhong Minlin, Fan Peixun. Applications of laser nano manufacturing technologies[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(6): 0601001.
钟敏霖,范培迅.激光纳米制造技术的应用[J].*中国激光*, 2011, 38(6): 0601001.
- 10 H Liu, Z Shen, X Wang, *et al.*. Micromould based laser shock embossing of thin metal sheets for MEMS applications[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(14): 4687-4691.
- 11 J Li, G J Cheng. Multiple-pulse laser dynamic forming of metallic thin films for microscale three dimensional shapes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(1): 013107.
- 12 R Fabbro, P Peyre, L Berthe, *et al.*. Physics and applications of laser-shock processing[J]. *Journal of Laser Applications Journal of Laser Applications*, 1998, 10(6): 265-279.