

文章编号: 1001-3806(2008)01-0095-03

# 激光半模冲击成形中板料反向变形现象研究

顾永玉<sup>1</sup>, 张兴权<sup>1</sup>, 史建国<sup>1</sup>, 李国杰<sup>1</sup>, 鲁金忠<sup>1</sup>, 张永康<sup>1,2\*</sup>

(1. 江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013; 2 华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237)

**摘要:** 为了研究激光半模冲击成形在工业领域的实际应用, 利用钛合金薄板作为试样进行波形零件的冲击试验, 冲击过程中发现试样局部区域产生了反向变形, 尤其在薄板中心区域反向变形现象更为严重。板料的反向变形使板料不能与凹模密切贴合, 严重影响了冲击成形的质量。通过分析发现, 由于激光能量较高, 使板料与凹模凹陷处接触时的残余速度过高, 从而导致板料与凹模发生剧烈碰撞。当板料因碰撞产生的反向运动速度大于板料反向屈服的速度阈值时将会产生影响成形质量的反向变形。通过调整激光能量避免了反向变形的发生, 得到了理想的波形零件。实验与分析的结果表明, 在满足半模冲击成形塑性变形量的基础上, 采用较低的激光能量, 既可避免反向变形的产生, 又可保证半模冲击成形的质量。

**关键词:** 激光技术; 冲击成形; 反向变形; 成因

**中图分类号:** TG156.99 **文献标识码:** A

## Investigation of inverse deformation in laser shock forming with half die

GU Yong-yu<sup>1</sup>, ZHANG Xing-quan<sup>1</sup>, SHI Jian-guo<sup>1</sup>, LI Guo-jie<sup>1</sup>, LU Jin-zhong<sup>1</sup>, ZHANG Yong-kang<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2 School of Mechanical and Power Engineering East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract** In order to investigate the application of laser shock forming with half die in industry, experiments were executed with titanium alloy sheet. Inverse deformation of sample in its partial area was found in laser shock forming process, especially it was more obvious in the center of concave die. The inverse deformation heavily affected the shock forming quality because it made the sheet couldn't touch concave die closely. According to results of experiment and analyses, the sheet with great speed hits the concave die strongly when it touches concave die if laser energy is higher than the needs of deformation, so the sheet obtains an inverse velocity through hitting and the inverse deformation take place if the inverse velocity beyond the speed threshold value of plastic deformation, which has great effect on the quality of shock forming. A good quality work piece was obtained after adjusting laser energy, which shows that inverse deformation can be avoided under lower laser energy.

**Key words** laser technique; shock forming; inverse deformation; mechanism

## 引 言

强激光辐照固体材料时, 激光与固体物质相互作用产生冲击波, 利用激光诱导的冲击波进行金属板料的无模或半模成形, 具有模具结构简单、适应性强以及冲击参数便于精密控制的特点, 在快速加工领域具有广阔的应用前景<sup>[1-5]</sup>。激光冲击成形作为一种快速成形方法, 与常规冲压成形的最大区别在于板料的超高应变率<sup>[6]</sup> (可达  $10^7 \text{ s}^{-1}$ ) 和极高的成形速度, 因而会出现一些在常规加工中不会发生的现象。在钛合金波形

零件的半模冲击成形实验过程中, 观察到板料局部区域发生反向变形现象, 亦即板料局部反弹, 使板料不能与凹模很好的贴合, 严重影响了工件的成形质量。因此研究反向变形现象的成因, 对于优化激光冲击参数, 保证薄板半模冲击成形的质量具有至关重要的意义。

## 1 实 验

钛合金波形零件的半模激光冲击成形的装置见图

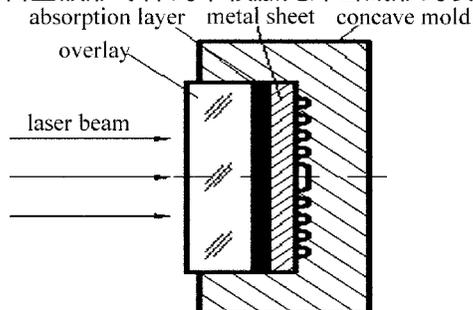


Fig 1 Schematic of laser shock forming with half die

基金项目: 国家八六三计划资助项目 (2002AA421120, 2002AA336030)

作者简介: 顾永玉 (1966), 男, 博士研究生, 从事激光应用技术研究。

\* 通讯联系人。E-mail: ykzhang@uj.edu.cn

收稿日期: 2006-11-24 收到修改稿日期: 2007-01-04

1. 采用 5mm 厚的 K9 玻璃作为约束层, 用于增强冲击效果。在钛合金板料的表面喷涂一层 0.1mm 厚的黑漆作为吸收层, 以提高对激光的吸收率, 进一步增强冲击效果, 并隔离激光对板料的热影响。

试样为 0.1mm 厚的钛合金薄板, 激光能量为 18J, 波长 1054nm, 脉冲宽度 23ns。

冲击成形后的试样如图 2 所示, 图 2a 为试样正面

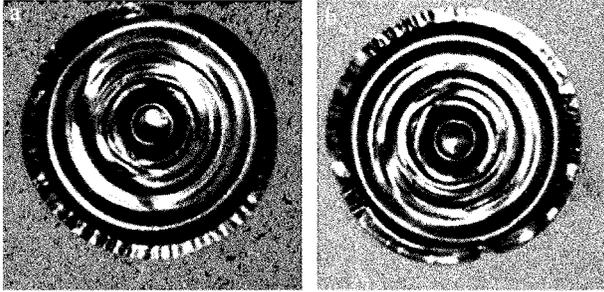


Fig 2 Appearance of sample with rebound  
a—front side b—back side

形貌, 图 2b 为试样背面形貌。从图中可以看出在第 2 环、第 3 环凹陷处试样发生不同程度的反向变形, 使试样轮廓形貌发生改变, 不能与凹模形貌完全吻合。反向变形最严重的区域处于光斑中心, 图中清楚地显示出试样中心区域向正面突出, 而不是一个平面。初期分析以为是激光能量较小导致板料变形量不足, 造成板料不能完全贴合凹模, 遂加大激光能量再一次进行冲击试验, 冲击后发现反向变形现象更为严重。通过进一步分析认为反向变形的发生是由于冲击强度过高, 同时板料所需变形量较小, 在薄板的高速运动阶段即受到凹模的约束, 从而与凹模之间发生强烈碰撞造成的。因此将激光能量降低到 15J 进行冲击试验, 冲击后试样形貌如图 3 所示。从图中可以看出试样轮廓清晰, 与凹模轮廓吻合较好, 基本没有反向变形现象发生。

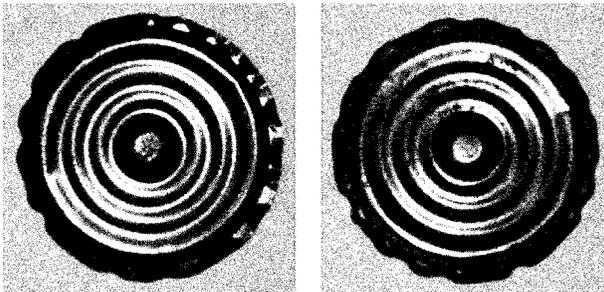


Fig 3 Appearance of sample without rebound  
a—front side b—back side

## 2 成因分析

激光脉冲辐照在试样表面的吸收层材料上, 吸收层材料被气化电离产生冲击波。冲击波将其冲量传递给板料使其获得一个初速度, 冲击波作用结束后板料

在惯性作用下以该初速度发生运动变形。激光诱导的冲击波峰值压力为<sup>[7]</sup>:

$$P_0 = 0.01 \left[ \frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot I_0^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中,  $P_0$  (GPa) 为冲击波的峰值压力;  $Z_1, Z_2$  分别为约束层和工件的声阻抗;  $I_0$  ( $\text{GW}/\text{cm}^2$ ) 为激光的峰值功率密度,  $\alpha$  为常数, 取 0.1~0.2。

不考虑由于约束层作用产生的二次冲击波和冲击波在工件和约束层之间的互相反射的影响, 激光诱导的冲击波压力衰减近似服从指数规律, 则根据动量定理可得板料的初速度为:

$$v_0 = 0.01 \frac{\theta}{h\rho} \left( 1 - e^{-\frac{r_0}{\tau_p}} \right) \left[ \frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot I_0^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中,  $h$  为板料厚度,  $\rho$  为材料密度,  $\theta$  为冲击波压力衰减常数, 具体数值可通过实验测定,  $\tau_p$  为冲击波的脉冲宽度。

在板料运动的某一时刻, 在半径  $r$  处取宽度为  $\Delta r$  的环状微元, 微元受力分析如图 4 所示。在环状微元

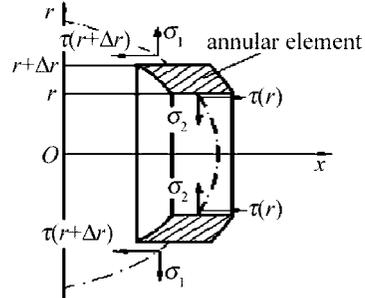


Fig 4 Stress analysis figure of annular element

的外圆柱面上受到与  $x$  轴方向相反的剪应力  $\tau(r + \Delta r)$  以及沿外圆柱面外法线方向的拉应力  $\sigma_1$ ; 在微元的内圆柱面上受到与  $x$  轴同向的剪应力  $\tau(r)$  和沿内圆柱面内法线方向的拉应力  $\sigma_2$ 。由于环状微元的轴对称性, 微元内外圆柱面上的拉应力  $\sigma_1, \sigma_2$  的合力为 0, 因此与微元运动相关的内力只有内外圆柱面上的剪应力。根据牛顿第二定律得环状微元的运动方程为:

$$\frac{\partial^2 x(r, t)}{\partial t^2} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial r} \quad (3)$$

在高压高应变率状态下, 材料对冲击载荷的塑性流动响应相当于粘性流体, 且流动应力与材料运动的速度梯度近似成线性关系<sup>[8]</sup>, 即:

$$\tau = - \eta \frac{\partial v}{\partial r} \quad (4)$$

式中,  $\eta$  为比例常数, 负号表示作用在微元侧面的总的切向应力分量与运动方向相反。将 (4) 式代入 (3) 式, 则环状微元的运动方程为:

$$\frac{\partial^2 x(r, t)}{\partial t^2} = \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^3 x(r, t)}{\partial r^2 \partial t} \quad (5)$$

这是一个三阶偏微分方程, 难以求得满足全部边初条件的精确解析解。利用实验拟合法, 得方程的近似解为:

$$x(r, t) = \frac{\rho a^2 v_0}{2\eta + \rho a^2} \left[ 1 - \exp(-2\eta t / \rho a^2) \right] \left[ 1 - \frac{r^2}{a^2} \right] \quad (6)$$

式中,  $a$  为变形区域半径。板料自由成形 (亦即无模成形) 时的最大变形量发生在光斑中心处, 其值为:  $x_{\max} = \rho a^2 v_0 / (2\eta + \rho a^2)$ 。

设板料与凹模之间距离为  $h_0$  ( $h_0 < x_{\max}$ ), 则板料各部分与凹模发生碰撞的时间为:

$$t_1 = -\frac{\rho a^2}{2\eta} \ln \left[ 1 - \frac{2\eta + \rho a^2}{\rho a^2} \cdot \frac{h_0}{1 - r^2/a^2} \right], \quad \left( a \sqrt{1 - \frac{2\eta + \rho a^2}{\rho a^2} \frac{h_0}{1 - r^2/a^2}} \geq r \geq 0 \right) \quad (7)$$

板料与凹模碰撞时的速度为:

$$v_1 = \frac{2\eta v_0}{2\eta + \rho a^2} \left[ 1 - \frac{2\eta + \rho a^2}{\rho a^2} \cdot \frac{h_0}{1 - r^2/a^2} \right] \cdot \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \quad (8)$$

根据应力波理论<sup>[9]</sup>可求得板料碰撞部位因碰撞而产生的反向运动速度为:

$$v_2 = -\frac{Z_3 v_1}{Z_2 + Z_3} \quad (9)$$

式中,  $Z_3$  为凹模的声阻抗。根据冲击动力学理论<sup>[10]</sup>可知, 当速度  $v_2$  的绝对值满足:  $|v_2| > \sqrt{Y/\rho}$  时, 板料将发生反向塑性变形。其中  $Y$  为板料的动态屈服强度。以凹模凹陷面为坐标原点, 负  $x$  轴方向为  $X$  轴正向建立反向变形坐标系, 将 (9) 式代入 (6) 式并对时间  $t$  取极限, 则得板料反向变形量表达式:

$$X_{\max}(r) = \frac{2\eta \rho a^2 v_0}{(2\eta + \rho a^2)^2} \left[ 1 - \frac{2\eta + \rho a^2}{\rho a^2} \cdot \frac{h_0}{1 - r^2/a^2} \right] \times \left[ 1 - \frac{r^2}{b^2} \right] \left[ 1 - \frac{r^2}{a^2} \right], \quad (b \geq r \geq 0) \quad (10)$$

式中,  $b$  为反向变形区域半径,  $b = a \sqrt{1 - \frac{2\eta + \rho a^2}{\rho a^2} \frac{h_0}{1 - r^2/a^2}}$ 。

结合 (2) 式和 (10) 式可以发现, 随着凹模与板料之间的距离  $h_0$  减小和激光的峰值功率密度  $I_0$  的增大, 反向变形区域半径以及反向变形量相应增大。反向变形区域实际测量的轮廓形状和根据 (10) 式拟合的轮廓曲线如图 5 所示, 可以看出二者有较好的近似度。

对于变形量一定的半模冲击成形, 板料与凹模接触时的速度取决于冲击波的强度与脉冲宽度, 亦即取决于激光脉冲的波形与能量。因此, 在满足激光冲击成形变形量要求的前提下, 应尽量降低激光脉冲的能

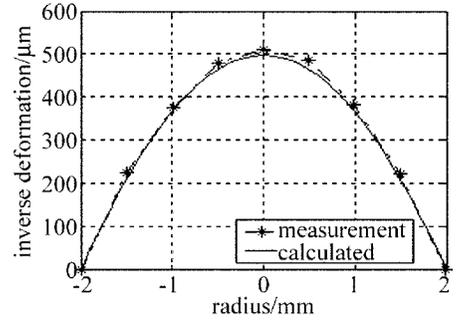


Fig 5 Profile curve of inverse deformation area

量值, 使碰撞后板料反向运动速度小于反向变形的速度阈值  $\sqrt{Y/\rho}$  即可抑制反向变形的产生, 从而保证半模冲击成形的质量。

### 3 结论

在钛合金波形零件激光半模冲击成形过程中, 试样发生了局部反向变形, 使零件形貌不能与凹模吻合, 严重影响了冲击成形的质量。通过分析发现在激光冲击过程中由于激光能量较大, 且板料所需变形量较小, 因而板料在与凹模接触时的运动速度较高, 板料与凹模高速碰撞产生的反向运动速度大于板料发生反向塑性变形的速度阈值, 从而产生了影响成形质量的反向变形。通过降低激光能量密度, 避免了反向变形的出现, 获得了较好的成形质量。

### 参考文献

- [1] GEIGER M, MERKLEN M, PITZ M. Laser and forming technology—an idea and the way of implementation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(3): 3-11
- [2] ZHOU J Zh, YANG J Ch, ZHANG Y K, et al. A study on super speed forming of metal sheet by laser shock waves [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1): 241-244.
- [3] ZHOU J Zh, ZHANG Y K, ZHOU M, et al. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading [J]. Chinese Journal of Laser, 2005, 32(1): 135-138 (in Chinese).
- [4] ZHOU J Zh, ZHANG Y K, ZHOU M, et al. Study on technique of laser shock forming of metal sheet [J]. Laser Technology, 2002, 26(6): 478-480 (in Chinese).
- [5] JIN Ch, YIN SM, CAIW Q, et al. Research on the method of creation of shocked trace during laser shock [J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 142-144 (in Chinese).
- [6] MEYERS M A, GREGORIEF, KAD B K, et al. Laser induced shock compression of monocrystalline copper: characterization and analysis [J]. Acta Materialia, 2003, 51(5): 1211-1228
- [7] FABBRIO R, FOURNIER J, BALLARD P, et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. J A P, 1990, 68(2): 775-784.
- [8] ZHOU N, QIAO D J. Materials dynamics under pulse beam radiation [M]. Beijing National Defence Industry Press, 2002, 81 (in Chinese).
- [9] WANG L L. The foundation of stress waves [M]. 2nd ed. Beijing National Defence Industry Press, 2005: 39 (in Chinese).
- [10] MA X Q. Shock dynamics [M]. Beijing Beijing Institute of Technology Press, 1992, 310 (in Chinese).