

# 基于 ABAQUS 的金属板料激光冲击成形数值模拟<sup>\*</sup>

周建忠 杜建钧 杨超君 刘会霞 倪敏雄 黄舒

**【摘要】** 在激光冲击波加载转换模型的基础上,以有限元分析软件 ABAQUS/CAE 为平台,对圆形板料进行了直线形轨迹和圆形轨迹多点冲击成形的数值模拟,探索了冲击轨迹、应力分布和板料变形之间的相互关系。数值模拟分析表明,对圆形板料进行多点冲击成形时,选择圆形轨迹是最佳的。根据模拟结果对铝合金板料试样进行了无间隔冲击成形的实验,获得了和数值模拟相同的成形结果,模拟和实验结果一致性较好。

**关键词:** 激光冲击成形 金属材料 数值模拟 有限元分析

**中图分类号:** TN249; TG39 **文献标识码:** A

## Simulation of Laser Shock Forming of Sheet Metal Based on ABAQUS

Zhou Jianzhong Du Jianjun Yang Chaojun Liu Huixia Ni Minxiong Huang Shu  
(Jiangsu University)

### Abstract

Laser shock forming (LSF) is a novel technique that uses laser-induced shock wave to shape sheet metal. The principle of sheet metal forming caused by multi-shock laser shocking was investigated. On the basis of mathematical modeling of laser shock loading, numerical simulation of deforming process of sheet metal was done with the ABAQUS code along the tracks of linear and circular pattern. The relationship between the main parameters of laser shocking and the deformation of sheet metal was studied, and the optimized track was obtained for the deformed sheet of round shape from the numerical simulation. According to the simulation results, the experiment of overlapped laser shock forming of aluminum alloy specimen was carried out and the obtained deformation of sheet metal was in agreement with the simulations analysis. By means of FEM technique, the laser process parameters can be optimized and the deformation contour of LSF of sheet metal can be predicted.

**Key words** Laser shock forming, Sheet metal, Numerical simulation, Finite element method

### 引言

金属板料传统的成形方法是采用模具加工,存在加工柔性差、模具制造及装配调试时间长、成本高等不足。在以激光为手段的板料成形方法中,激光诱

导的高幅冲击波技术已被国内外学者广泛用于惯性约束聚变和材料表面改性,提高材料表面硬度、抗疲劳寿命和耐磨损性能方面的研究<sup>[1~3]</sup>,但激光冲击板料成形方面的研究,目前还不成熟。

鉴于有限元数值模拟能提前预测产品成形时的

收稿日期:2005-09-05

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50475127)、江苏省自然科学基金资助项目(项目编号:BK2004063)、教育部科学技术研究重点项目(项目编号:204052)和江苏省汽车工程重点实验室开放基金资助项目(项目编号:200406)

周建忠 江苏大学机械工程学院 教授 博士生导师,212013 镇江市

杜建钧 江苏大学机械工程学院 硕士生

杨超君 江苏大学机械工程学院 副教授

刘会霞 江苏大学机械工程学院 教授

倪敏雄 江苏大学机械工程学院 硕士生

黄舒 江苏大学机械工程学院 硕士生

可能缺陷,为设计者提供合理的设计依据和工艺安排,以缩短设计制造周期、降低成本、提高产品质量等,采用有限元软件 ABAQUS 对激光冲击成形进行一系列的模拟实验,为激光冲击成形工艺参数的优化、板料变形的理论分析提供依据。

## 1 成形机理

金属板料激光冲击成形的基本原理如图 1<sup>[4]</sup>,将高功率密度( $10^9\text{W}/\text{cm}^2$  级)、短脉冲( $10^{-9}\text{s}$  级)的强激光作用于覆盖在金属板材表面上的能量转换体,能量转换体兼有能量吸收层和约束层双重功能,其主要作用是把激光束产生的热能转成机械能(冲击波压力),并提高激光能量的利用率,保护工件表面不受到激光的热损伤。转换体和金属板料相接触的一侧薄层因吸收能量而汽化,汽化后的蒸汽急剧吸收激光能量形成等离子体而爆炸,爆炸时形成一 momentum 脉冲,产生向金属成形方向的应力波,板料在这种应力波的作用下产生塑性变形。通过选择激光脉冲能量、冲击轨迹和作用区域的脉冲次数,在数控系统控制下,可实现板料的局部或大面积成形。另外采用预先制作好的凹模,可实现激光冲击仿形。可见,激光冲击成形是一种集板料成形和强化于一体的复合工艺。

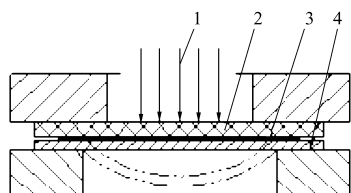


图 1 板料激光冲击成形机理示意图

Fig. 1 Deformation mechanism of sheet metal by laser shock

1. 激光 2. 约束层 3. 吸收层 4. 板料

## 2 试验设计

### 2.1 假设

为了研究问题方便,对模拟的板料作如下假设:①板料是连续介质。②板料是均匀的,各部分都具有相同特性。③板料是各向同性的,机械性能不随方向的改变而改变。

### 2.2 试验条件

实验所用的材料为铝合金 6061-T6 圆形板,直径 100 mm,厚 0.8 mm;屈服强度 255 MPa,抗拉强度 290 MPa,泊松比 0.33,弹性模量 68.9 GPa。实验所用激光的波长为  $1.06\ \mu\text{m}$ ,脉宽约 23 ns,能量 25 J 左右,有效光斑直径为 7 mm,图 2 为利用 PVDF 实验所测量得到的激光脉冲波形图,图 3 为

模拟采用的激光冲击波加载曲线。

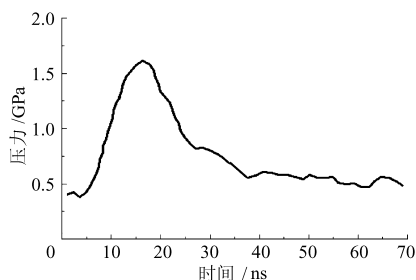


图 2 激光脉冲波形图

Fig. 2 Wave shape of laser pulse

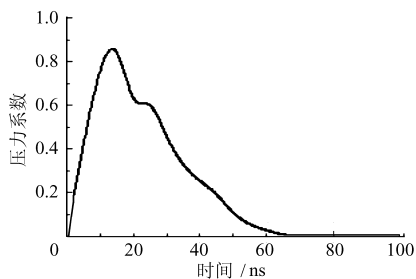


图 3 激光冲击波加载曲线

Fig. 3 Loading curve of laser shock wave

### 2.3 试验方案

对圆形板进行了有间隔冲击和无间隔冲击模拟。沿直径方向冲击时,前后斑点间距为 1 mm,当沿圆周冲击时,间隔为  $36^\circ$  和  $18^\circ$ 。无间隔冲击时,采用前后斑点重叠冲击,即后一个斑点覆盖前半个斑点。模拟多点冲击成形方案如图 4 所示。

## 3 模拟方法

### 3.1 建模和划分网格

在文本编辑器中编写建模程序,选择合适的网格密度,单元类型为三角形壳单元。在所有建模信息如元素类型、材料定义、边界条件、加载设置、输出设置、重启设置等编写完后,就可以将输入文件导入 ABAQUS 模块中求解。

### 3.2 激光冲击波加载的转换模型

对于激光冲击波的加载,根据激光冲击波系统所激发的激光脉冲的波形,在软件中预先设置一个压力时间变化曲线(图 3),然后使载荷按照振幅曲线变化。根据文献[5]研究,激光诱导的冲击波的持续时间大约为激光脉冲的 2~3 倍或更高,模拟中冲击波作用持续时间设定为 75 ns,峰值压力为<sup>[6]</sup>

$$p_{\max} = \sqrt{\frac{A(\gamma-1)I_0 Z_{t_0} Z_{c_0} \rho}{(2\gamma-1)(K_0 Z_{c_0} + K_c Z_{t_0})}}$$

式中  $p_{\max}$ ——激光脉冲产生的峰值压力

$A$ ——吸收系数,取 0.80~0.95

$\gamma$ ——等离子体的绝热指数,取 1.67

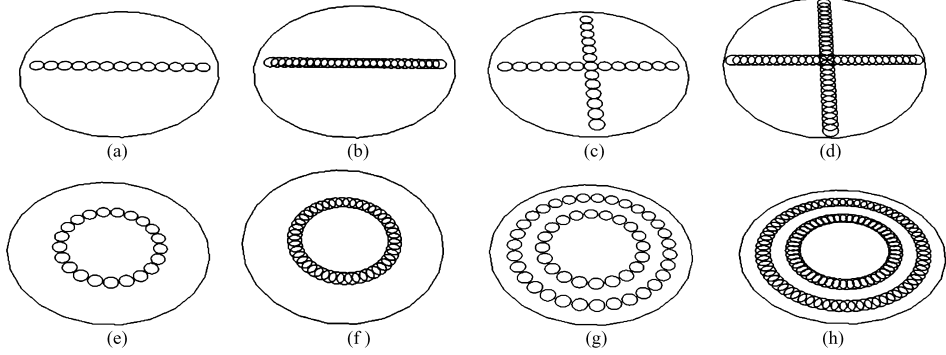


图 4 多点冲击成形方案

Fig. 4 Plans for simulation of multi-shock forming

(a) 间隔“—”形冲击 (b) 无间隔“—”形冲击 (c) 间隔“+”形冲击 (d) 无间隔“+”形冲击 (e) 间隔“⊙”性冲击 (f) 无间隔“⊙”形冲击 (g) 间隔“⊙”形冲击 (h) 无间隔“⊙”形冲击

$Z_{i_0}, Z_{c_0}$  —— 靶材和约束层材料的声阻抗  
 $K_0, K_c$  —— 与能量吸收和约束层密度有关的参量  
 $\rho$  —— 等离子体的密度, 可以看作是约束层材料、能量吸收层和工件材料汽化蒸汽的综合体  
 $I_{t_0}$  —— 激光功率密度

### 3.3 求解及后处理

板料激光冲击是一个高度非线性的瞬时动态事件, 因此对其模拟主要是在 ABAQUS/Explicit 模块中进行。由于是多点冲击, 第 1 点冲击模拟完成后, 需将数据代入 ABAQUS/Standard 模块中进行应力和回弹分析, 并在 ABAQUS/Viewer 模块中观察平衡状态下板料的变形量, 然后再将所得数据代入 ABAQUS/Explicit 模块进行第 2 点冲击模拟, 如此反复, 直至模拟完所有的点。分析过程如图 5 所示<sup>[7~8]</sup>。

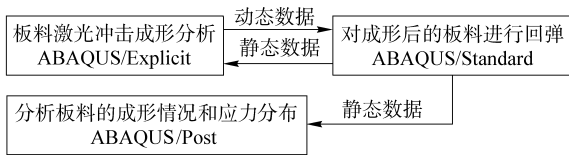


图 5 激光冲击成形的分析过程图

Fig. 5 LSF analysis procedure

### 3.4 激光多点沿直径方向的冲击

对圆形板沿直径方向进行激光多点冲击, 间隔冲击时前后 2 个激光斑点间隔为 1 mm, 无间隔冲击时激光斑点相互重叠, 得到图 6a 间隔“—”形冲击变形和图 6b 沿半径方向的应力分布曲线, 图 7a 无间隔“—”形冲击变形和图 7b 沿半径方向的应力分布曲线。比较图 6a 和图 7a 可以看出, 无间隔冲击比间隔冲击成形量要大, 但是间隔冲击比无间隔冲击应力分布要光滑, 这是由于无间隔冲击时光斑间影

响比较大而造成的。

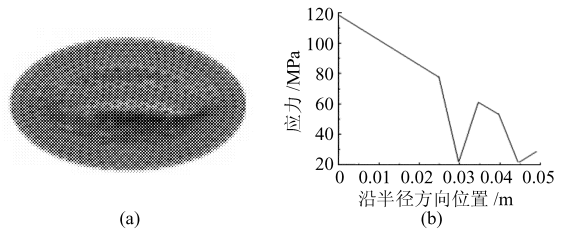


图 6 间隔“—”形冲击板料变形图和应力曲线

Fig. 6 Deformation diagram and stress curve by interval shock with line tracks

(a) 冲击变形图 (b) 沿半径方向的应力曲线

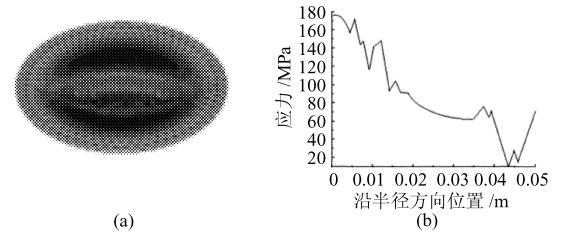


图 7 无间隔“—”形冲击板料变形图和应力曲线

Fig. 7 Deformation diagram and stress curve by overlapped shock with line tracks

(a) 冲击变形图 (b) 沿半径方向的应力曲线

在此基础上, 对板料进行了“+”形多点冲击成形模拟, 得到图 8a 间隔“+”形冲击变形和图 8b 沿直径方向的应力分布曲线, 图 9a 无间隔“+”形冲击变形和图 9b 沿直径方向的应力分布曲线。比较图 8b 和图 9b 可看出, 应力在直径方向的分布基本相同, 只是无间隔冲击比间隔冲击的应力分布曲线要光滑, 但是间隔冲击比无间隔连续冲击的效果要好。

### 3.5 激光多点沿圆周方向的冲击

对圆形板进行沿圆周方向上的间隔和无间隔激光多点冲击, 间隔冲击时第 1 圈前后斑点间隔为 36°, 第 2 圈前后斑点间隔为 18°; 无间隔冲击时, 前后激光斑点间相互重叠, 前半个斑点覆盖后半个斑

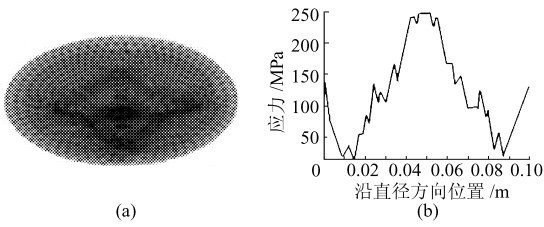


图 8 间隔“+”形冲击板料变形图和应力曲线

Fig. 8 Deformation diagram and stress curve by interval shock with “+” tracks

(a) 冲击变形图 (b) 沿直径方向的应力曲线

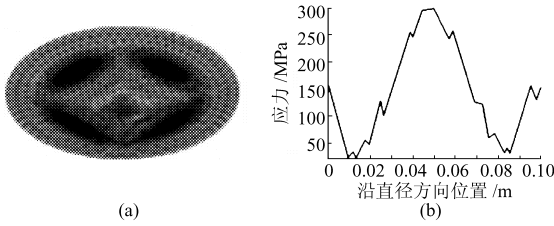


图 9 无间隔“+”形冲击板料变形图和应力曲线

Fig. 9 Deformation diagram and stress curve by overlapped shock with “+” tracks

(a) 冲击变形图 (b) 沿直径方向的应力曲线

点。模拟后得到图 10a 间隔“⊙”形冲击变形图，相应的图 10b 沿直径方向的应力分布曲线和图 10c 截面轮廓线；图 11a 无间隔“⊙”形冲击变形图，相应的图 11b 沿直径方向的应力分布曲线和图 11c 截面轮廓线。

对圆形板料进行“⊙”形冲击。模拟后得到图 12a 间隔“⊙”形冲击变形图，相应的图 12b 沿直径方向的应力分布曲线和图 12c 截面轮廓线；图 13a 为无间隔“⊙”形冲击变形图，相应的图 13b 沿直径方向的应力分布曲线和图 13c 截面轮廓线。分析与比较可以看出，间隔冲击比无间隔冲击的应力分布和截面轮廓线都平缓且光滑。

比较圆形板料的 2 种多点冲击成形，发现沿圆周冲击后板料的成形效果明显比沿直径方向冲击要好，说明对于不同形状的板料选择合适的冲击轨迹是非常重要的。比较间隔冲击和无间隔冲击，发现经无间隔冲击后，板料总体成形比较光滑。经激光多点冲击后，板料变形非常明显，冲击后圆形板料基本呈碗形。从轮廓曲线图中可以看出，冲击后板料的最大

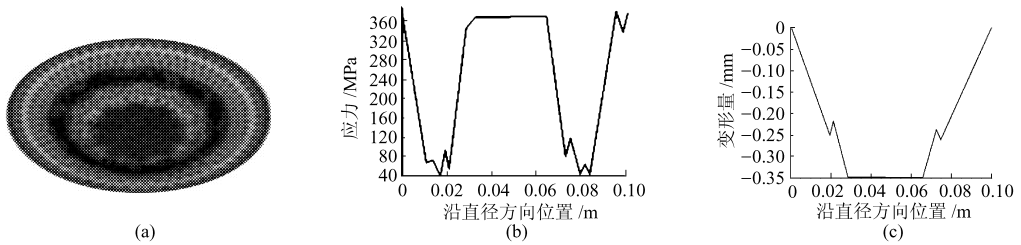


图 10 间隔“⊙”形冲击变形、应力曲线和截面轮廓线

Fig. 10 Deformation, stress curve and section curve by interval laser shock with “⊙” tracks

(a) 冲击变形图 (b) 沿直径方向的应力曲线 (c) 截面轮廓线

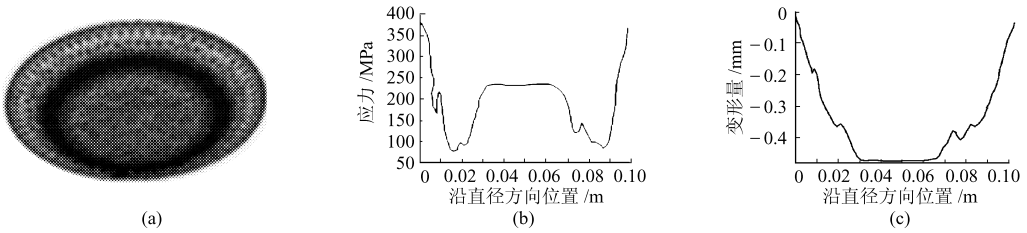


图 11 无间隔“⊙”形冲击变形、应力曲线和截面轮廓线

Fig. 11 Deformation, stress curve and section curve by overlapped laser shock with “⊙” tracks

(a) 冲击变形图 (b) 沿直径方向的应力曲线 (c) 截面轮廓线

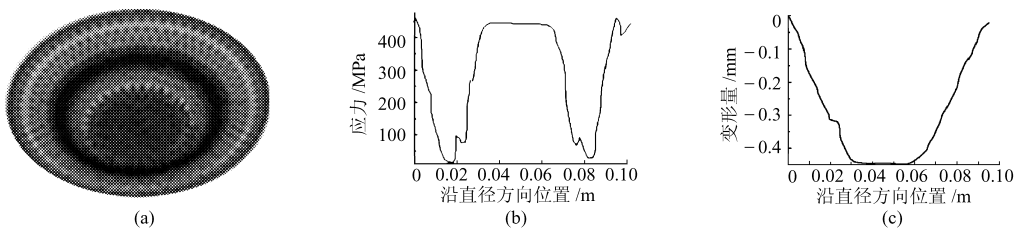


图 12 间隔“⊙”形冲击变形、应力曲线和截面轮廓线

Fig. 12 Deformation, stress curve and section curve by interval laser shock with “⊙” tracks

(a) 冲击变形图 (b) 沿直径方向的应力曲线 (c) 截面轮廓线

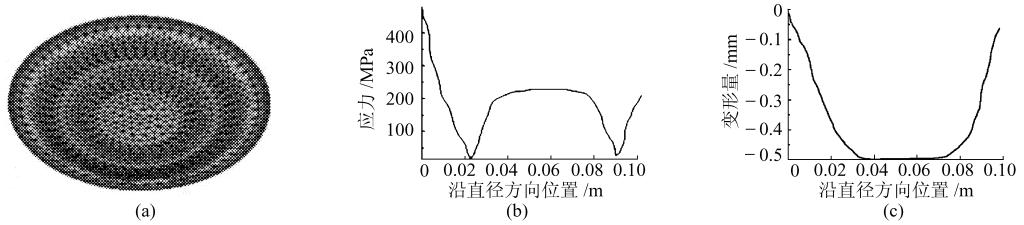


图 13 无间隔“◎”形冲击变形、应力曲线和截面轮廓线

Fig. 13 Deformation, stress curve and section curve by overlapped laser shock with “◎” tracks

(a) 冲击变形图 (b) 沿直径方向的应力曲线 (c) 截面轮廓线

变形量大约为 0.5 mm。

#### 4 实验结果

对各种模拟分析的方案进行比较可以发现,对圆形板料进行多点冲击成形时,选择圆形轨迹是最佳的。此方案的激光冲击成形实验在 Nd:Glass 高功率激光冲击波成形系统上进行。该系统激光器产生的激光波长为  $1.06 \mu\text{m}$ , 激光脉冲宽度 23 ns, 单脉冲能量 10~40 J。经连续冲击后得到的板料变形如图 14 所示,从图中可以看出,试件形状基本呈碗状,这与模拟的结果吻合较好,但激光冲击成形获得的表面还不够光滑,如何有效控制和提高成形表面精度有待于进一步深入的研究。

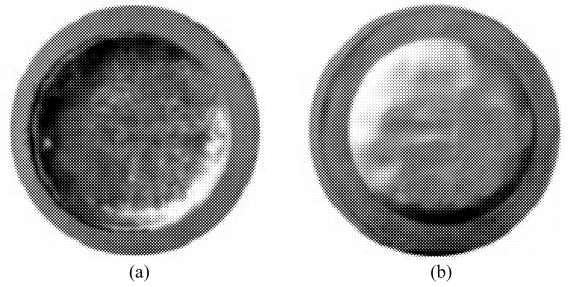


图 14 无间隔“◎”形冲击变形图

Fig. 14 Deformation by overlapped laser shock

(a) 正视图 (b) 背视图

(2) 激光加工参数-应力-板料变形量之间存在着——对应关系,应力大,板料变形量也大,选择合适的激光加工参数,可以得到不同的应力分布以及不同形状的板料。

(3) 有限元数值模拟的结果和实验结果符合较好,可通过数值模拟的方法来优化激光冲击的相关参数,预测板料变形,实现改变激光参数和边界条件获得所需的变形量。

#### 5 结论

(1) 板料的几何参数和边界条件不变时,板料的变形量随着激光冲击次数的增加呈现出增大的趋势,可以采用激光多点冲击或激光多点多次冲击的方法来获得更大的变形量。

#### 参 考 文 献

- Charles S. Montross, et al. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24: 1 021~1 036.
- Peyre P, Fabbro R. Laser shock processing: a review of the physics and applications[J]. Opt. Quant. Electr, 1995, 27: 1 213~1 229.
- 王广龙, 周建忠, 张兴权, 等. 激光冲击波技术在金属表面改性和成形中的应用[J]. 农业机械学报, 2005, 36(12): 148~152.
- 周建忠, 张永康, 杨继昌, 等. 基于激光冲击波的板料塑性成形新技术[J]. 中国机械工程, 2002, 13(22): 1 938~1 940.
- Li Zhiyong, Zhu Wenhui, Chen Jinyi. Experimental study of high-power pulsed laser induced shock waves in aluminum targets[J]. Chinese Journal of Laser, 1997, 24(3): 259~262.
- 周建忠, 张永康, 周明, 等. 单次激光冲击下板料变形的理论分析[J]. 中国激光, 2005, 32(1): 135~138.
- William Braisted, Robert Brockman. Finite element simulation of laser shock peening[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(7): 719~724.
- 杜建钧, 周建忠, 杨超君, 等. 基于 ABAQUS 的激光喷丸成形数值模拟[J]. 中国激光, 2006, 33(S1): 419~422.