

doi: 10.3788/gzxb20144306.0614001

# 数值模拟激光加载 $L_2$ 铝板材高速成形瞬态响应

姚红兵<sup>1</sup>, 于文龙<sup>1</sup>, 高原<sup>1</sup>, 李亚茹<sup>1</sup>, 孟春梅<sup>1</sup>, 蒋光平<sup>1</sup>, 张永康<sup>2</sup>

(1 江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

(2 东南大学 机械工程学院, 南京 211189)

**摘 要:** 采用 ABAQUS 有限元仿真软件对激光加载  $L_2$  铝板材高速成形进行数值模拟, 研究了单脉冲激光冲击下成形的瞬态响应过程, 获得了激光加载冲击成形过程中位移、速度、应变及应变率等特征量的变化特点. 模拟表明, 冲击后靶材中心区域发生明显塑性变形, 变形截面呈锥形. 高速成形过程中, 金属板材首先发生振荡幅度非常大的快速弹性变形, 其后进入减幅振荡直至静态, 激光冲击成形时间在毫秒量级. 板材不同节点的位移变化趋势相同, 靠近中心区域位移大, 边界区域位移小. 成形中板材的中心区域速度最大达 3 700 m/s, 变形过程前 2  $\mu$ s 内应变率急剧变化, 最大达  $10^4 \sim 10^5$  s<sup>-1</sup> 量级.

**关键词:** 激光技术; 激光加载; 高速成形; 瞬态响应; 特征量; 数值模拟

中图分类号: TN24

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)06-0614001-6

## Numerical Simulation of Transient Response Process of $L_2$ Aluminum Sheet by Laser Loading High-speed Forming

YAO Hong-bing<sup>1</sup>, YU Wen-long<sup>1</sup>, GAO Yuan<sup>1</sup>, LI Ya-ru<sup>1</sup>, MENG Chun-mei<sup>1</sup>,  
JIANG Guang-ping<sup>1</sup>, ZHANG Yong-kang<sup>2</sup>

(1 School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 12013, China)

(2 School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** The high-speed forming process of  $L_2$  aluminum sheet by laser loading was numerically simulated with the finite element software ABAQUS. In the simulation, the transient response process of the forming by single laser loading was investigated, and the change rules of the characteristics, such as displacement, velocity, strain and strain rate, were discussed. The results indicated that an obvious plastic deformation occurred in the central part of the target after the laser loading, and the cross sections thereof were conical. During the process of high-speed forming, the metal sheet underwent a rapid elastic deformation with large oscillation amplitude, and then attenuated into a static state. In the laser forming, the deformation duration was usually at a level of a few microseconds. The displacements at the different nodes varied in a similar trend, among which those in the central region endured larger variations than those in the boundary region. The maximum speed in the central region of the aluminum sheet reach 3 700 m/s during the laser forming. The strain rate increased considerably in the period of 2  $\mu$ s during the forming, whose maximum value is at a level of  $10^4 \sim 10^5$  s<sup>-1</sup>.

**Key words:** Laser technique; Laser loading; High-speed forming; Transient response; Characteristics; Numerical simulation

**OCIS Codes:** 140.3538; 140.7090; 240.6648; 320.4240; 320.7120; 350.3850

## 0 引言

金属板料的激光加载冲击成形是利用激光产生的

冲击波使金属材料产生塑性变形的一种冷成形技术<sup>[1-4]</sup>, 在一些特殊领域和中小批量零件的试制加工方面具有强大的潜力, 可为实现板料的柔性化冲压成形

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 50735001)、国家自然科学基金 (No. 10804037)、中国博士后科学基金特别资助项目 (No. 200902506) 和连云港市科技攻关计划 (工业) 项目 (No. CG1315) 资助

第一作者: 姚红兵 (1976-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光电检测和激光技术及应用. Email: yaoye@ujs.edu.cn

收稿日期: 2013-09-02; 录用日期: 2013-11-28

<http://www.photon.ac.cn>

提供条件,由于激光冲击成形过程耦合因素多,处理时间极短,对影响冲击处理的因素只能作大量的假设和一些定性的分析,因此,需进一步研究激光冲击成形的成形机理、变形场的理论计算和模拟、冲击处理的规律<sup>[7-9]</sup>.就现有的激光冲击成形瞬态塑性变形工艺而言,由于加工系统的条件不同,物理和力学过程的相互作用较复杂,至今未建立系统的理论体系.所以,对金属板料激光冲击成形技术进行研究,将进一步丰富和发展瞬态塑性理论,尤其是高应变率下超快塑性变形理论<sup>[10-11]</sup>.

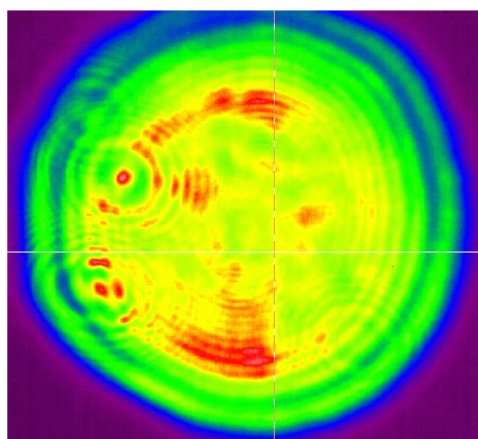
本文应用等效恒载荷简化计算,采用ABAQUS有限元仿真软件对单脉冲激光加载金属板材高速成形进行数值模拟,建立了激光加载下板材的变形模型,研究了激光冲击成形瞬态响应过程和成形规律,获得了金属板料的激光加载冲击成形过程中位移、速度、应变及应变率等特征量的变化特点,为板料成形的理论分析提供数值理论依据.

## 1 单脉冲激光加载金属板材高速成形有限元模拟

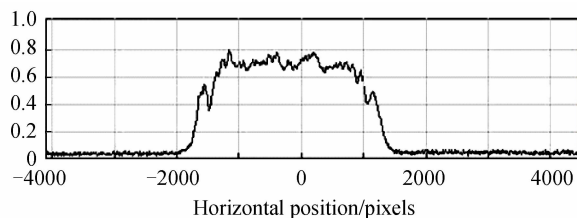
在激光加载金属板料高速成形过程中,金属板料发生塑性变形,而且应变率极高,同时材料还会出现硬化效应.因此在模拟时,材料参量的设定既要能够反映板料的变形特点,又要考虑到高应变率下材料的动态屈服应力和硬化效应对变形的影响.以厚度为0.15 mm的L<sub>2</sub>铝板材为激光加载靶材,其化学成分及材料性能参量见表1、表2<sup>[12]</sup>.

表1 L<sub>2</sub>铝的化学成分及含量(质量分数,%)

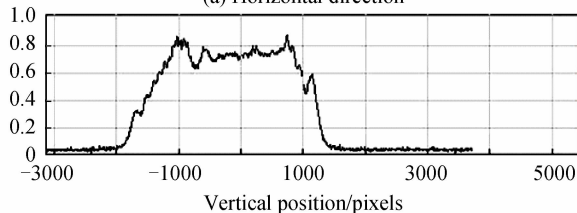
Chemical constituents	Cu	Si	Mn	Mg	l
Content	0.4	0.85	0.25	0.68	est



(a) The output spot



(a) Horizontal direction



(b) Vertical direction

图1 激光器输出的光斑能量分布

Fig. 1 Energy distribution of output laser beam

表2 L<sub>2</sub>铝材料性能参量

Table 2 Properties of Al L<sub>2</sub>

Yield strength/MPa	120
Tensile strength/MPa	80~100
Hardness/ HB	2~2.9
Elastic modulus/GPa	28.9
Density/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 700
Thermal conductivity/(W·m <sup>-1</sup> ·°C)	237

### 1.1 数值模型的建立

由于激光参量和冲击波峰值压力值直接相关,而冲击波压力决定板料的最终成形量,因此建模时,考虑将激光诱导的冲击波简化为作用在板料表面随时间变化的压力载荷,在模拟过程中不考虑冲击波的产生和传播,反估算相应激光参量下的冲击波压力值.激光诱导冲击波的峰值压力计算公式为<sup>[13]</sup>

$$P_{\max} = 0.01 \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2\alpha+3}\right) Z I_0} \quad (1)$$

式中 $\alpha$ 为内能转化为热能部分的系数, $P_{\max}$ 为冲击波峰值压力, $I_0$ 为激光功率密度, $Z$ 为靶材与约束层的合成冲击波声阻抗,定义为

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \quad (2)$$

式中 $Z_1, Z_2$ 分别为约束层和金属靶材的声阻抗.同时,在激光冲击成形中,除考虑等离子体横向膨胀,还必须考虑激光与能量吸收层和约束层相互作用产生冲击波及在其中的传播.周建忠等<sup>[14]</sup>对这一模型进行了修正,得到关系式

$$P_{\max} = \sqrt{\frac{A(\gamma-1)I_0 Z_a Z_c \rho}{(2\gamma-1)(K_a Z_c + K_c Z_a)}} \quad (3)$$

式中: $P_{\max}$ 为激光脉冲产生的峰值压力, $A$ 为吸收系数, $\gamma$ 为等离子体的绝热指数, $Z_a, Z_c$ 分别为靶材和约束层材料的声阻抗, $K_a, K_c$ 分别为与能量吸收层和约束

层密度有关的参量,  $\rho$  为等离子体密度, 可以看作约束层材料、能量吸收层和工件材料气化蒸气的综合体,  $I_0$  为激光功率密度. 激光冲击成形实验中使用法国 Thales laser 公司生产的 GAIA-R 激光器, 输出的光斑能量分布为超高斯分布, 如图 1. 为了能更好地揭示激光冲击成形的动态响应规律, 假设激光脉冲在整个加载过程中为恒载荷, 并将其直接作用在板料表面. 这样, 激光冲击成形的有限元模型将变得简单, 图 2 为激光冲击模型.

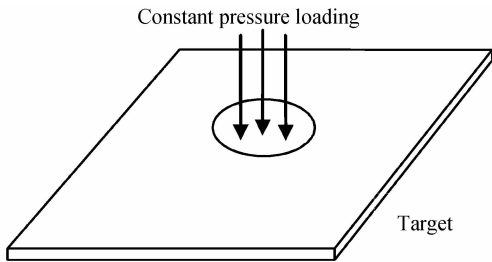


图 2 激光冲击模型  
Fig. 2 Model of laser loading forming

板材激光冲击成形中激光脉冲很短, 其脉宽在数纳秒到数十纳秒之间, 在整个等离子膨胀爆炸引起的冲击压力下板材变形, 板材受到压力的上升时间和下降时间不同. R. Fabbro 等人<sup>[2]</sup>的研究认为, 激光诱导冲击波的作用时间是脉冲激光作用时间的 2~3 倍. 因此, 进行有限元模拟时, 对靶材表面冲击压力的作用时间设定为 3 倍激光脉冲时间. 实验采用的激光脉冲宽度是 15 ns, 仿真中设定激光冲击压力的脉冲宽度是 45 ns, 即冲击波载荷的作用时间为 45 ns.

### 1.2 网格划分

由于在激光冲击成形过程中所用的金属板料为薄板, 其厚度远小于另外两维尺寸, 因此模拟过程中采用壳体单元<sup>[5]</sup>. 模拟表面被分成 3 个部分, 中心冲击区域采用较细网格, 未作约束的非冲击区域采用中等粗细的网格, 外层的约束区域采用较粗网格, 见图 3. 这样, 既可以较准确地模拟模型, 又可控制网格数量. 模型采

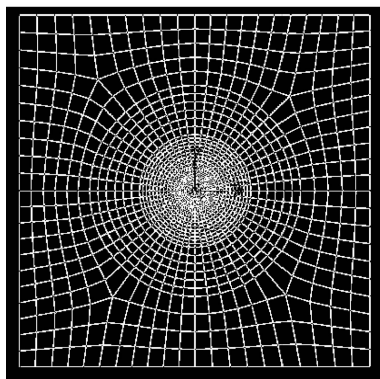


图 3 网格划分示意图  
Fig. 3 Finite element mesh of the metal sheet

用  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  方形壳体单元, 中心冲击未约束区域直径为 15 mm, 冲击激光光束直径为 8 mm.

### 1.3 边界条件设置

激光加载金属板材高速成形实验中, 试样在卡槽中, 用螺丝拧紧, 上下用磁铁固定, 以保证板料在其平面内转动、移动不受限制. 模拟过程中对边界条件进行处理时限制除板料平面内的其他自由度: 约束区域是夹持板材的部分, 约束定位  $Z$  向的位移为  $0^\circ$ ; 同时约束铝板绕  $X, Y$  轴的转动. 板材载荷定义在激光冲击区域, 加载图如图 4.

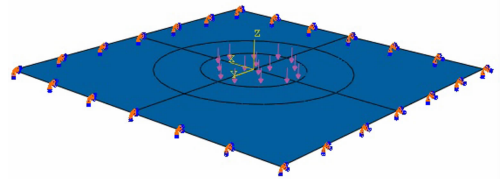


图 4 压力加载示意图  
Fig. 4 Schematic of the pressure loading

## 2 有限元数值模拟结果

### 2.1 板料变形情况

单次冲击模拟时, 选择 8 J 来研究激光能量和板料变形量之间的关系. 图 5 为模拟冲击后的变形图, 图 6 为模拟板料冲击后的轮廓曲线图和实验中试样受冲击后的塑性变形图. 从形变的轮廓来看, 冲击后靶材中心区域发生明显塑性变形, 变形量较大, 并且变形突出部分的截面形状呈现锥形, 与实验结果相一致. 同时, 实验测得板料的最终形变量为 1.495 mm, 模拟结果为 1.432 mm, 误差率为 4.2%, 在可接受范围内.

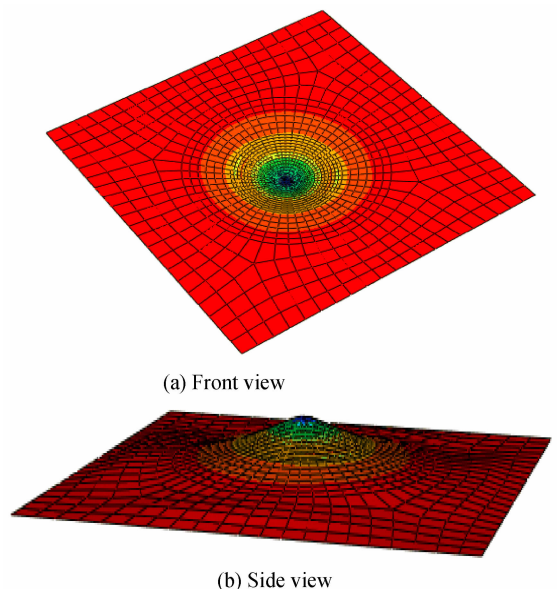


图 5 模拟加载后各方向变形图  
Fig. 5 Deformation of different views after the laser loading

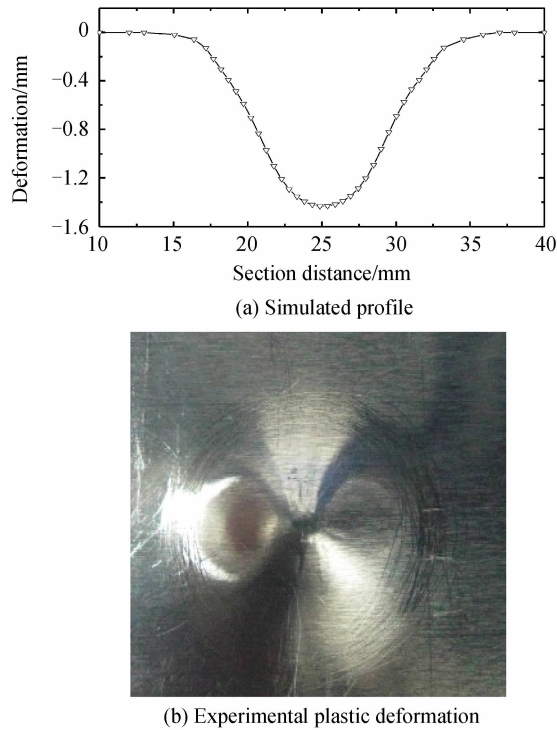


图6 冲击后试样模拟轮廓图和实验塑性形变图

Fig. 6 Simulated profile and experimental plastic deformation of the target after laser loading

2.2 瞬态位移场分布

板材的初始状态为平板形状,受到瞬时高压发生Z方向变形.图7为板材在100 ns、500 ns和1 μs的位移分布图.在t=100 ns时,受冲击压力的瞬时加载,板材中心区域开始发生变形,从图7(a)看出变形量是

非常小的,从图7(b)可以看到,冲击区域变形逐渐扩大的同时,板材变形也开始向外边缘扩展.到达t=1 μs时刻时,中心变形随着时间的增加不断变大,边缘也有比较明显的变形,从图7(c)可以明显看到,中心点的最大位移达到3.202 mm.

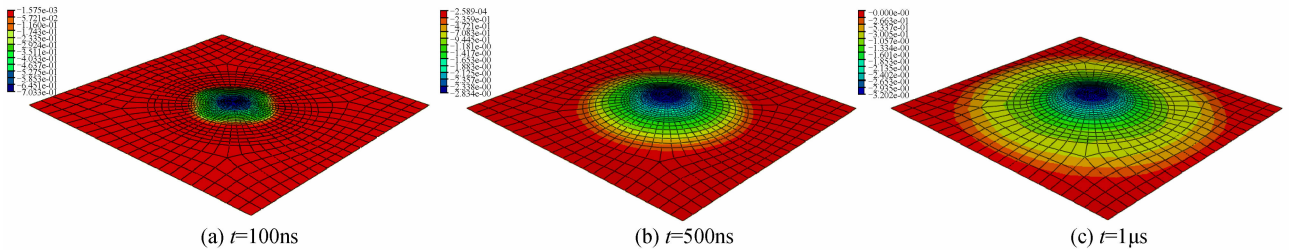


图7 各时刻位移分布图

Fig. 7 Displacement distribution at different times

图8给出了8 μs内板材中心点处的位移变化趋势.当t=920 ns时,板材第一次到达最大位移处.因为受到瞬时高压,板材发生快速弹性变形,振荡幅度非常大.振荡后,由于阻尼存在,节点位移进入减幅振荡,最后振动停止,接近静态.

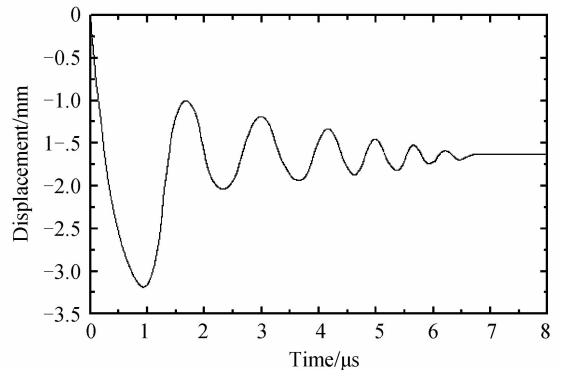


图8 中心节点位移趋势图

Fig. 8 Displacement variation of the central node

选择板材上比较典型的几个节点作为模型的分析节点,序号如图 9 所示,节点 1 靠近板材的中心点,节点 2 位于冲击激光光束直径边缘,节点 3 位于非激光直接冲击区域.图 10 显示了代表性节点的位移历史,明显看出,每个节点的位移变化趋势相同,板材靠中心区域位移大,边界区域位移小.

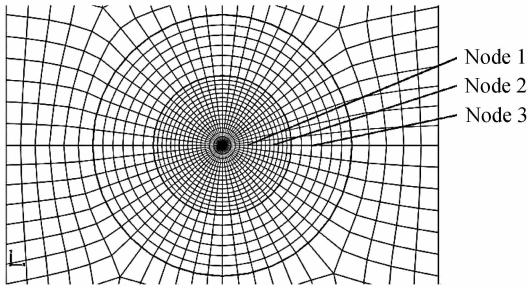


图 9 板材表面节点选择

Fig. 9 Chosen nodes on the target surface

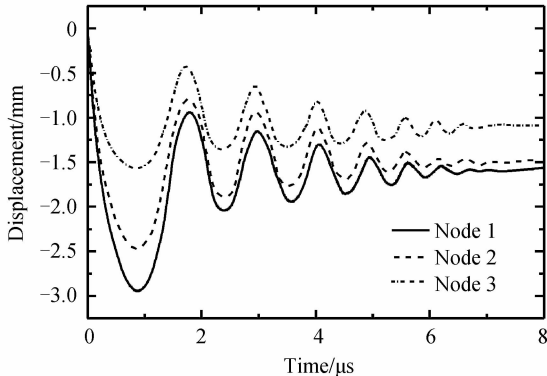


图 10 各节点历史位移

Fig. 10 Displacement variations of different nodes

### 2.3 瞬态速度场分布

激光冲击加载时间非常短,一般在 100 ns 以内,加载时间约为普遍爆炸加载时间的十万分之一,远低于普通爆炸加载时间,而激光加载的压力又高达数千 MPa,甚至达到 GPa 量级,所以研究加载瞬时板材初始状态对于激光冲击的成形具有特别重要的意义.图 11 显示板材中心点处在 0~12 μs 的历史速度分布曲线,从图中可以看出,随着时间增加,受冲击压力不断加载,板材中心区域速度不断增大,因为阻尼的影响板材有一定的回弹,逐渐振荡幅度慢慢变小.在不到 1 μs 时刻,瞬时速度达到最大 3 700 m/s,理论上可以认为板材中心的速度达到最大.

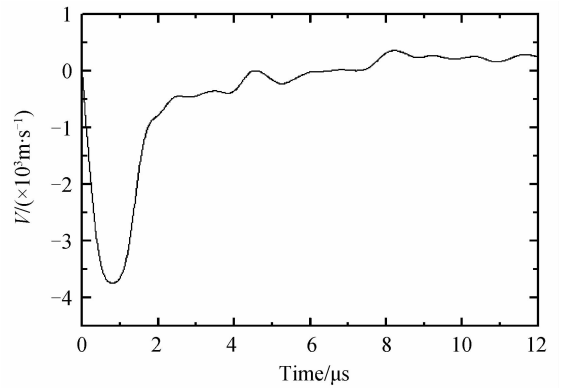


图 11 中心点历史速度

Fig. 11 Velocity variation of the central node

### 2.4 应变率分析

激光冲击过程中,压力脉冲在靶材表面上产生的整个外部功转化为材料内部的动能和内能,板材的最大应变出现在中心区域和约束边界区域附近<sup>[15]</sup>.中心点的应变历史如图 12.图中应变随时间变化的历史曲线的斜率可以看作作为激光冲击成形的应变率.在 2 μs 内,板材受冲击而发生运动时,应变率急剧变化;随后时间内,应变率逐渐下降逐渐趋于零值.因为板材的振荡应变率可能仍有小幅度变化.在 1 μs 时刻,等效塑性应变 PEEQ 值是 0.93.从零时刻到 1 μs 这段时间范围内,应变几乎成直线上升,所以根据该曲线,板材的应变率为 9 300 s<sup>-1</sup>,冲击过程中的应变率最大只有 10<sup>4</sup> s<sup>-1</sup>~10<sup>5</sup> s<sup>-1</sup>量级.

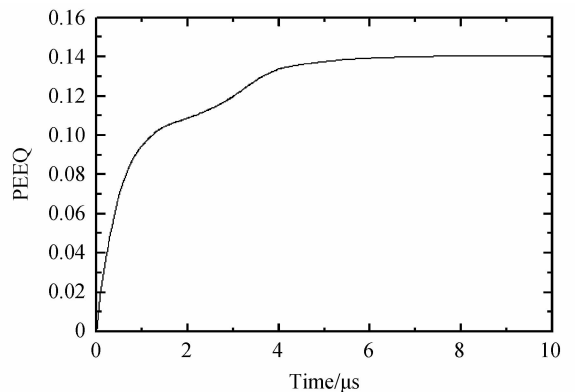


图 12 中心点历史应变

Fig. 12 Strain variation of the central node

## 3 结论

利用有限元分析软件 ABAQUS 对单脉冲激光加载金属 L<sub>2</sub> 铝板材高速成形进行了数值模拟.模拟结果表明,冲击后靶材中心区域发生明显塑性变形,变形突出部分的截面形状呈现锥形.高速成形过程中,由于金属板材受到瞬时的高压,发生振荡幅度非常大的快速弹性变形,其后进入等幅振荡,逐渐衰减,最后振动停止,接近静态.板材不同节点的位移变化趋势相同,靠

近中心区域位移大,边界区域位移小,成形过程中的最大速度达 3 700 m/s.就目前的激光冲击成形参量而言,激光冲击成形的最大应变率在  $10^4 \text{ s}^{-1} \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$  量级左右.

## 参考文献

- [1] MALEKSHAHI B Z, MALEK G F, SHEIKHI M, *et al.* Effect of severe plastic deformation on hot cracking of wrought aluminium alloy in pulsed laser welding [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, **18**(6): 473-477.
- [2] PEYRE P, FABBRO R. Laser shock processing: a review of the physics and applications [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1995, **27**(12): 1213-1229.
- [3] WANG De-fei, QI Wen-zong, GUO Chun-feng. Simulation study of thermal and mechanical effect on metal film irradiated by ultra-fast laser pulse[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2172-2176.  
王德飞, 齐文宗, 郭春风. 超快脉冲激光辐照金属薄膜热-力效应的模拟研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(11): 2172-2176.
- [4] JIANG Yin-fang, HUANG Yu, JIN Hua, *et al.* Research on precision control of sheet metal forming by laser shock waves with semi-die[J]. *Optics and Laser Technology*, 2013, **45**(1): 598-604.
- [5] WIELAGE H, VOLLERTSEN F. Investigations of forming behaviour in laser shock forming [J]. *Steel Research International*, 2009, **80**(5): 323-328.
- [6] ZHAO Jian-jun, SONG Chun-rong, LIU Jin. Thermal and mechanical effect in optical material induced by repetitive pulse laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1856-1860.  
赵建君, 宋春荣, 刘进. 重复脉冲激光辐照光学材料的热力效应[J]. 光子学报, 2006, **35**(12): 1856-1860.
- [7] CASALINO G, LUDOVICO A D. Optimization and modeling of laser forming of stainless steel circular sectors[J]. *Journal of Laser Applications*, 2003, **15**(2): 89-95.
- [8] SHI Yong-jun, YAO Zhen-qiang, SHEN Hong, *et al.* Research on the mechanisms of laser forming for the metal plate [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, **46**(12-13): 1689-1697.
- [9] GUAN Yan-jin, SUN Sheng, ZHAO Guo-qun, *et al.* Study on relationship between material properties and bending angles in laser forming process of sheet metals[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(4): 499-504.  
管延锦, 孙胜, 赵国群, 等. 材料性能参量与板料激光弯曲成形角度的相关性研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(4): 499-504.
- [10] KISHIDA K, NAKAMURA T, AOYAMA H, *et al.* Basic study on laser forming of curved surfaces with simulation[J]. *International Journal of Automation Technology*, 2013, **7**(1): 24-29.
- [11] DEARDEN G, EDWARDS S P. Some recent developments in two- and three-dimensional laser forming for 'macro' and 'micro' applications[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2003, **5**(4): S8-S15.
- [12] 田荣璋, 王祝堂. 铝合金及其加工手册[M]. 中南工业大学出版社, 2007.
- [13] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, *et al.* Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, **68**(2): 775-784.
- [14] ZHOU Jian-zhong, ZHANG Yong-kang, ZHOU Ming, *et al.* Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(1): 135-138.  
周建忠, 张永康, 周明, 等. 单次激光冲击下靶材变形的理论分析[J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 135-138.
- [15] DING K, YE L. Three-dimensional dynamic finite element analysis of multiple laser shock peening processes [J]. *Surface Engineering*, 2003, **19**(5): 351-358.