

文章编号: 1001-3806(2007)05-0555-03

铝合金板激光冲击变形实验及有限元模拟

王广龙¹, 周建忠²

(1 江苏科技大学 先进焊接技术省级重点实验室, 镇江 212003 2 江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了研究金属板料在脉冲激光辐照下的响应、激光冲击下板料的变形特性、激光脉冲能量对金属板料变形量的影响以及脉冲激光光斑内冲击波压力的分布情况, 采用高功率钕玻璃激光系统对 LD31板进行了单次冲击变形实验, 同时利用有限元软件 ABAQUS对板料变形过程进行了模拟。结果表明, 激光冲击条件下板料变形时呈现粘塑性性质; 激光脉冲能量是影响板料变形量的主要因素, 且板料变形大小随脉冲能量的增加呈非线性增大; 激光冲击时激光光斑作用区域内冲击波压力并不是均匀分布, 而是沿径向减小。

关键词: 激光技术; 激光冲击变形; 有限元模拟; 粘塑性变形; 金属板料

中图分类号: TG665 文献标识码: A

Experiments and simulation of Al-alloy plate deforming by laser shock forming

WANG Guang-long¹, ZHOU Jian-zhong²

(1. Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China 2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract In order to study the dynamic response of sheet metal to the laser shockwave loading, the characteristics of laser shock forming, the effect of pulse energy on sheet metal deformation and the distribution of shockwave pressure in irradiated zone, single laser shock forming of LD31 aluminum alloy was carried out with high-power Q-switched pulsed neodymium-glass laser. Then the process of laser shock forming was simulated with ABAQUS. The results reveal that viscoplastic deformation happens in sheet metal under laser shocking, the deformation of sheet metal increases with the increase of pulse energy in non linear way, and pressure in irradiated zone decreases along radius.

Key words laser technique; laser shock forming; finite element simulation; viscoplastic deformation; sheet metal

引言

随着高功率短脉冲激光器技术的日益成熟, 高能激光和材料相互作用产生高幅冲击波的技术已被广泛用于惯性约束聚变^[1, 2]、金属表面改性^[3, 4]和模拟高速撞击^[5, 6]等方面的研究。激光应用于金属板料的变形是基于激光两种不同的冲击效应: 一种是热冲击, 即靶材表面快速地吸收激光脉冲能量造成热膨胀和巨大的应力梯度实现板料变形, 如激光热应力变形。一种是力冲击, 是利用迅速蒸发与膨胀的高温等离子体对靶材的反冲压力使金属板料产生变形, 如激光冲击变形。激光冲击变形具有加工柔性高、精确可控、成形后材料性能好等特点, 另外, 由于激光冲击波压力达到吉帕量级, 尤其适用于钛合金等难成形金属, 因此在国防、航空航天等领域具有良好的应用前景。

作者简介: 王广龙(1976-), 男, 讲师, 主要从事激光冲击成形方面的研究工作。

E-mail: wanggl@163.com

收稿日期: 2006-07-10 收到修改稿日期: 2007-01-04

1 变形机理

金属板料激光冲击变形是由于脉冲强激光辐照靶材时在靶体表面形成一个烧蚀等离子体层, 由于等离子体的迎光性使其迅速离开靶面向激光器方向喷射, 结果在靶面施加一个反冲压力, 从而产生塑性变形。其变形示意图如图1所示, 高能短脉冲激光束穿过透

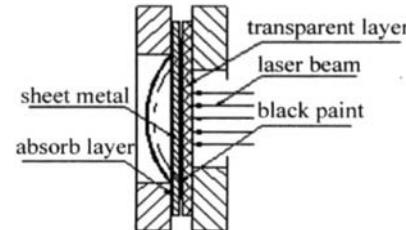


Fig 1 Schematic set up for laser shock forming of sheet metal
明约束层照射到涂覆在金属板料表面的能量吸收层(黑漆)上, 能量吸收层吸收能量温度升高汽化, 汽化后的蒸气继续吸收能量形成等离子体, 等离子体继续吸收能量发生爆炸, 形成动量脉冲, 在约束层的作用下产生向板料内部传播的强冲击波, 利用激光冲击产生的作用力作

为板料塑性成形的变形力, 从而实现金属板料的宏观塑性变形。在板料成形过程中, 当冲击波到达金属板料背面时, 压缩波会反射形成拉伸波, 故在金属板料背面会发生层裂现象, 为解决这个问题, 通常在板料背面加一层涂层。这种涂层通过自身的层裂以吸收大量的冲击波, 从而使反射波衰减, 有效地保护板材背面。

2 实验及结果分析

实验采用的是高功率钕玻璃激光冲击波系统, 产生的激光波长为 $1.06\mu\text{m}$, 脉宽为 22ns , 有效光斑直径为 12.5mm , 激光脉冲波形、输出光场如图 2 所示。

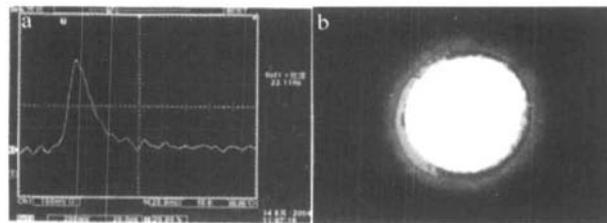


Fig. 2 a—laser pulse waveform b—field of output laser pulse

LD31 试样性能参数及其主要成分见表 1 和表 2。

Table 1 Material parameters of LD31 sheet

yield strength	145M Pa
tensile strength	185M Pa
elastic modulus	71GPa
density	2700 kg/m ³

Table 2 Main components of LD31

component	Mg	Si	Fe	Cu	Mn
content	0.45~0.9	0.2~0.6	0.35	0.10	0.10
component	Zn	Cr	Ti	Al	
content	0.10	0.10	0.1	the rest	

在光斑尺寸一定的情况下, 激光脉冲能量的大小直接影响作用在金属板料表面的冲击波压力大小, 从而影响板料变形的大小。图 3 为不同的激光脉冲能量

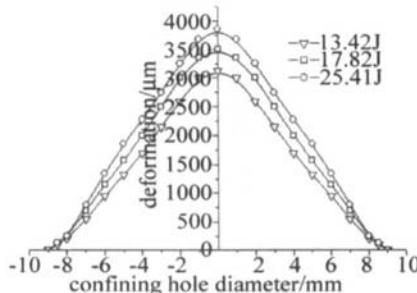


Fig. 3 Pulse energy vs deformation

下, 厚度为 0.7mm 的 LD31 试样在约束边界为 $\varnothing 12\text{mm}/\varnothing 15\text{mm}$ 条件下板料变形的轮廓形状。可以看出, 板料变形的截面形状像锥形。图 4 是板料变形量与激光脉冲能量的拟合关系曲线。可以看出, 在成

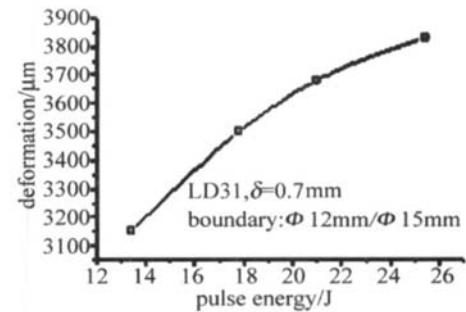


Fig. 4 Curve of deformation vs pulse energy

形极限范围内, 板料变形量随激光脉冲能量的增大而增大, 但由于试样变形能力的限制, 板料变形量增大速度却逐步变缓直至最终破裂(见图 5)。

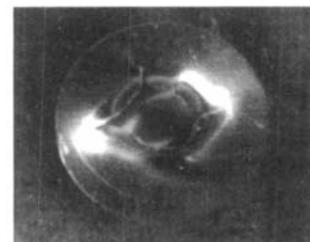


Fig. 5 Ruptured appearance of LD31 under laser shocking

3 模拟及结果分析

在对金属板料激光冲击变形进行模拟时, 根据有关冲击波理论和已有的研究, 将激光诱导的冲击波转化为随时间变化压力, 然后将其作为载荷直接作用在金属板料表面。如图 6 所示。

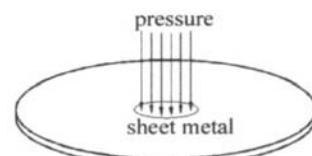


Fig. 6 Finite element model for laser shock forming

对于冲击波载荷的加载, 采用预先估算、模拟反求和实验验证相结合的方式进行处理。在 ABAQUS 中按照加载方式预先设置一个振幅曲线, 然后使得载荷按照振幅曲线的变化规律进行变化。根据 PEYRE 等人的研究结果^[7], 将冲击波压力的作用时间设为激光脉宽的 3 倍。ZHOU 等人根据爆轰波和爆炸气体动力学理论, 建立了板料激光冲击成形中激光能量转换体靶材系统的冲击波压力的物理模型, 并结合激光单次冲击的实验结果, 推导出峰值压力的理论估算式^[8]:

$$p_{\max} = \frac{A(\gamma - 1)I_0 Z_0 Z_{\infty} \rho}{\sqrt{(2\gamma - 1)(K_a Z_{\infty} + K_s Z_0)}} \quad (1)$$

式中, p_{\max} 为激光脉冲产生的峰值压力; A 为吸收系数, 在 $0.80 \sim 0.95$ 之间; γ 为等离子体的绝热指数取 1.67 ; Z_0, Z_{∞} 分别为靶材和约束层材料的声阻抗; K_a ,

ρ_c 分别为与能量吸收层和约束层密度有关的参数; ρ 为等离子体的密度, 可以看作为是约束层材料、能量吸收层和工件材料汽化蒸气的综合体, 实验中应用的为 LD31 靶材、86-1 黑漆吸收层及有机玻璃约束层; I_0 为激光功率密度, 为激光脉冲能量与光斑直径的比值。

在模拟时, 还通过以下公式将实验所得的材料名义应力、名义应变转化成真实应力、真实应变:

$$\sigma = \sigma_{\text{nom}} (1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad (2)$$

$$\varepsilon = \ln (1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\text{pl}} = \varepsilon_{\text{tot}} - \sigma / E \quad (4)$$

式中, σ_{nom} 为名义应力; ε_{nom} 为名义应变; σ 为真实应力; ε 为真实应变; ε_{pl} 为真实塑性应变; ε_{tot} 为总体真实应变; E 为杨氏模量。

另外, 在模拟中还考虑了应变率相关参数^[9]:

$$\varepsilon = D \left(\frac{\sigma_s^D}{\sigma_0} - 1 \right)^{p'} \quad (5)$$

式中, σ_0 为静态屈服强度, σ_s^D 为动态屈服强度, D 和 p' 是由实验确定的材料常数。

图 7 和图 8 是对上述实验进行模拟后所得到的板

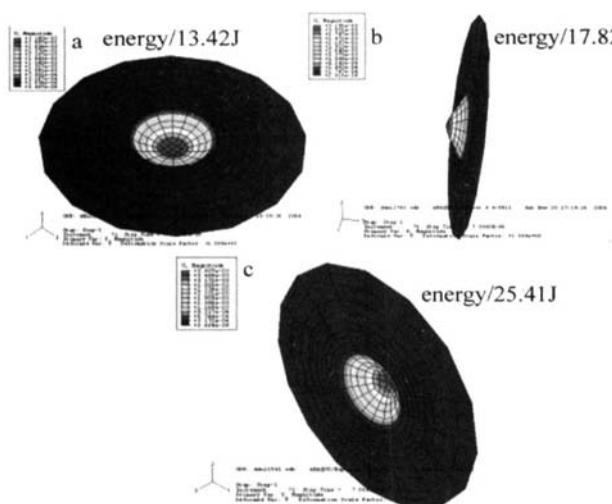


Fig. 7 Deformation of sheet metal corresponding to different pulse energy

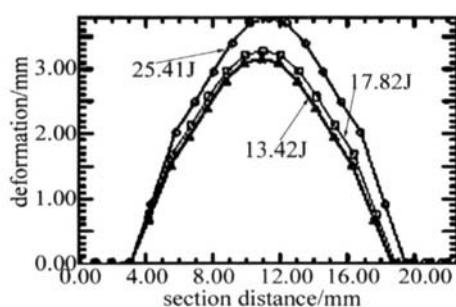


Fig. 8 Cross-section curve of deformed sheet metal

料变形图和截面曲线图, 可以看出模拟结果与试验结果相似。从图 6 所示的板料变形图中发现, 与普通的模具冲压成型不同, 激光冲击时金属板料只是在光斑作用内发生局部胀形, 而光斑作用区域外并没有发生

塑性流动, 分析认为, 这是由于在高能激光辐照下产生的瞬间高压作用于板料, 板料在变形时表现出流体的特征, 改变了最初认为板料对激光辐照的响应为有限塑性的想法, 另外, 材料的动态响应时间为纳秒量级, 光斑以外的材料也有可能来不及流动。过去曾认为, 在激光冲击过程中的某一瞬间光斑区域内的冲击波压力应该是均匀分布的, 但在模拟中发现冲击波压力是自光斑中心随半径的增大冲击波压力逐渐减小, 这也从 ZHANG^[10] 在冲击强化模拟中所得到的冲击波压力公式得到证实。不过激光冲击变形过程中约束层与板料中间的空间是一个变化的, 故其随时间、径向的变化较冲击强化更为复杂, 目前还未能拟合出相关公式, 但本次模拟为今后工作打下初步基础。

4 结 论

通过对金属板料的激光冲击变形实验和模拟, 可以得到如下结论: (1) 随着激光脉冲能量增大, 板料的变形量呈增大趋势; (2) 由于等离子体爆炸产生的瞬时高压, 金属板料在变形时表现出流体性质, LD31 板料只在激光束辐照区域产生拉胀式塑性变形, 而在辐照区以外不发生变形; (3) 光斑作用区域内冲击波压力大小自光斑中心随半径的增大冲击波压力逐渐减小。

参 考 文 献

- [1] ZHANG J T. Present status and development trends in interaction study on laser hohlraum target and plasmas [J]. *Laser & Optoelectronics Progress* 2001, 38(2): 1~11 (in Chinese).
- [2] TANG C H, HUANG Y X, HU X *et al*. The application of laser micro machining technology in inertial confinement fusion [J]. *Science Technology and Engineer* 2005, 5(10): 668~672 (in Chinese).
- [3] XIAO H J, PENG Y, MA C H *et al*. Surface modification of laser [J]. *Surface Technology* 2005, 34(5): 10~12 (in Chinese).
- [4] FAN Y, WANG Sh B, WU H X *et al*. Experimental research of laser shock processing on aerial aluminum alloy [J]. *Laser Technology* 2003, 27(4): 273~275 (in Chinese).
- [5] ZHOU J Z, ZHANG X Q, WANG G L *et al*. A new technology of plastic forming plate by laser peening [J]. *Engineering Science* 2005, 7(11): 94~97 (in Chinese).
- [6] ZHANG W J, WANG W, ZEN Y J *et al*. Simulation study on laser-induced spallation in aluminum [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics* 1994, 8(3): 205~212 (in Chinese).
- [7] PEYRE P, FABBRO R. Laser shock processing: a review of the physics and applications [J]. *Opt & Quant Electron* 1995, 27(12): 1213~1229.
- [8] ZHOU J Z, ZHANG Y K, ZHOU M *et al*. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2005, 32(1): 135~138 (in Chinese).
- [9] SYMONDS P S. Approximation techniques for impulsively loaded structures of rate sensitive plastic behavior [J]. *SIAM Journal on Applied Mathematics* 1973, 25(3): 462~473.
- [10] ZHANG W W, YAO Y L. Micro scale laser shock processing of metallic components [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [J], 2002, 124(371): 369~378