

文章编号: 0258-7025(2005)01-0135-04

## 单次激光冲击下板料变形的理论分析

周建忠<sup>1</sup>, 张永康<sup>1</sup>, 周 明<sup>1</sup>, 殷苏民<sup>1</sup>, 杨继昌<sup>1</sup>, 吴鸿兴<sup>2</sup>, 郭大浩<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 江苏大学机械学院激光研究所, 江苏 镇江 212013; <sup>2</sup> 中国科学技术大学强激光研究所, 安徽 合肥 230026)

**摘要** 金属板料的激光冲击成形(LSF)技术是利用高能激光诱导的高幅冲击波的力效应,而非热效应。它是在激光冲击强化基础上拓展出的又一崭新的研究领域。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和理论估算式。通过对激光冲击波载荷作用下板料变形过程的理论分析,建立激光冲击板料变形的数学模型,得到板料变形量与加工系统中各种参数之间的相互关系,为加工过程中各种参数的合理优化,板料变形过程的有效控制,实现大面积金属板料的激光冲击成形提供了理论依据。

**关键词** 激光技术;激光冲击;塑性变形;数学模型;金属板料

**中图分类号** TN 249;TG 156 **文献标识码** A

### Theoretical Analysis on Deformation of Sheet Metal under One Laser Shot Loading

ZHOU Jian-zhong<sup>1</sup>, ZHANG Yong-kang<sup>1</sup>, ZHOU Ming<sup>1</sup>, YIN Su-min<sup>1</sup>,  
YANG Ji-chang<sup>1</sup>, WU Hong-xing<sup>2</sup>, GUO Da-hao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

<sup>2</sup> Laboratory of High Power Laser, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** Laser shock forming (LSF) is a novel technique realized by applying a compressive shock wave generated by laser shock on the surface of the metal. It is a mechanical, not a thermal process, and has a significant characterization of ultra-pressure and super plastic forming etc. In this paper, a physical model and the estimated formula of shockwave pressure of laser shock forming were found according to the detonation wave and explosive gas dynamical theory. On the base of experimental results and theory analysis, a mathematical model of the sheet deformation under one laser shot loading was established, the relationship between shockwave pressure and deformation of sheet metal was discussed, and the effects of factors such as laser parameters, boundary condition on the deformation of sheet metal were analyzed. These model and formula are very useful and can be used to predict the deformation of sheet metal loaded by laser shock, and provide a theory foundation to choose laser processing parameters reasonably and program the controlled software of laser shock forming.

**Key words** laser technique; laser shock; plastic forming; mathematical model; sheet metal

## 1 引 言

随着激光技术的发展,激光冲击强化技术(LSP),即高功率密度(GW/cm<sup>2</sup>量级)、短脉冲(ns

量级)的强激光束和材料相互作用产生的高压冲击波技术已被广泛用于材料表面改性的研究,如提高材料表面的硬度、抗疲劳寿命和耐磨损性能等<sup>[1~4]</sup>。如果被加工零件在激光冲击方向上,背面的刚性约

收稿日期:2003-08-18;收到修改稿日期:2003-12-16

基金项目:国家自然科学基金(50475127,50275068),国家 863 计划(2002AA336030),教育部科学技术研究重点项目(No. 204052),国防航空基金(02H52053)和江苏省自然科学基金(BK2004063)资助项目。

作者简介:周建忠(1964—),男,江苏无锡人,江苏大学机械学院教授,工学博士,研究方向为激光新技术应用和模具设计制造新方法。E-mail:zhoujz@ujjs.edu.cn

束被解除,则为板料的成形提供了空间,这将为板料的塑性成形开辟一种全新的成形方法——激光冲击成形(LSF)。初步的实验研究表明<sup>[5,6]</sup>,激光冲击成形是利用高能激光诱导的高幅冲击波压力的力效应,而非热效应实现金属板料的塑性成形,在国防工业、航空航天等中小批量零件生产领域具有广阔的应用前景。文献[6,7]就金属板料激光冲击成形的机理和工艺过程进行了分析。本文对单次激光冲击下板料的变形进行理论分析,探讨激光能量—冲击波压力—变形量之间的相互关系,为控制激光冲击板料成形过程提供理论依据。

## 2 激光冲击板料变形的压力分析

图1为单次激光冲击下板料变形区形貌(脉冲能量18.15 J,光斑直径 $\phi 8$  mm,边界 $\phi 15$  mm)。激光冲击产生冲击波的压力大小及其分布对板料变形

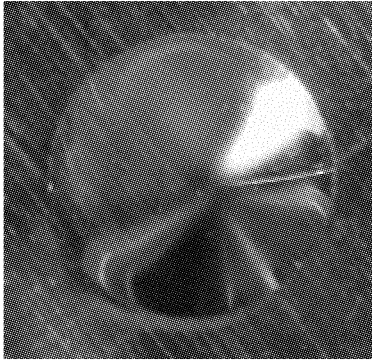


图1 单次激光冲击下板料变形区形貌

Fig. 1 Deformation of 304 sheet by laser shock

及其轮廓形状产生很大影响。为了提高激光冲击波的峰值压力,延长压力的作用时间,在激光冲击成形中也采用能量吸收层加约束层的能量转换体技术,把激光能量转变成冲击波机械能,使板料在激光冲击波的力效应作用下变形。激光冲击板料成形中,激光-能量转换体-靶材系统的相互作用如图2所示。根据爆轰波稳定传播的理论,由等离子体爆炸形成的冲击波向板料和约束层传播过程中,在冲击波波阵面上,质量、动量和能量保持守恒,冲击波波速之间的关系为<sup>[7]</sup>:

对于约束层有

$$\rho_{c0}(D_c - u_{c0}) = \rho_c(D_c - u_c), \quad (1)$$

$$P_c - P_{c0} = \rho_{c0}(D_c - u_{c0})(u_c - u_{c0}), \quad (2)$$

$$E_c + \frac{u_c^2}{2} = \frac{1}{2}(P_c + P_{c0})\left(\frac{1}{\rho_{c0}} - \frac{1}{\rho_c}\right), \quad (3)$$

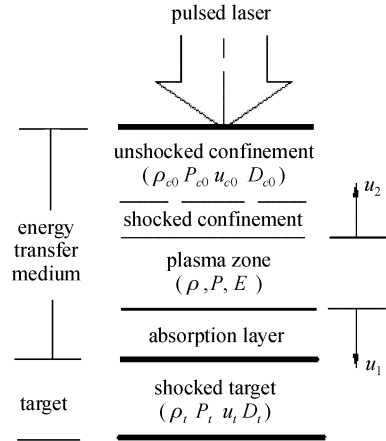


图2 激光-靶系统的相互作用关系

Fig. 2 Interaction relationship of laser-target system

$$D_c = D_{c0} + S_c \cdot u_{c0}. \quad (4)$$

对于等离子体与约束层界面有

$$\rho_c(u_2 - u_c) = \rho u_2, \quad (5)$$

$$P + \rho \cdot u_2 \cdot u_c = P_{c0}. \quad (6)$$

对于等离子体与能量吸收层界面有

$$\rho_a(u_1 - u_a) = \rho \cdot u_1, \quad (7)$$

$$P + \rho \cdot u_1 \cdot u_a = P_{a0}. \quad (8)$$

对于能量吸收层与靶材有

$$\rho_{t0}(D_t - u_{t0}) = \rho_t(D_t - u_t), \quad (9)$$

$$P_t - P_{t0} = \rho_{t0}(D_t - u_{t0})(u_t - u_{t0}), \quad (10)$$

$$E_t + \frac{u_t^2}{2} = \frac{1}{2}(P_t + P_{t0})\left(\frac{1}{\rho_{t0}} - \frac{1}{\rho_t}\right), \quad (11)$$

$$D_t = D_{t0} + S_t \cdot u_{t0}. \quad (12)$$

其中能量吸收层很薄,假设能量吸收层仅作为提高金属表面对激光能量吸收能力的方法,只考虑吸收涂层的物理特性,则有

$$u_a = u_t, \quad P_a = P_t,$$

上述公式中 $\rho_c, P_c, u_c, D_c, E_c$ 分别为约束层的密度、压力、粒子速度、冲击波速度、内能; $\rho_t, P_t, u_t, D_t, E_t$ 分别为板料靶材的密度、压力、粒子速度、冲击波速度、内能; $\rho_a, P_a, u_a$ 分别为能量吸收层的密度、压力、粒子速度; $\rho, P, u_1, u_2$ 分别为等离子体的密度、压力、向约束层和靶面传播的速度;下标带0的为未受冲击波影响的相应材料的物理量,不带0的为冲击波影响后相应材料的物理量。 $S$ 为与材料有关的常数。

通过上述关系式,可得到等离子体的膨胀速度为

$$u_1 \approx \frac{K_a P}{\rho Z_{t0}}, \quad u_2 \approx \frac{K_c P}{\rho Z_{c0}}, \quad (13)$$

$$\text{其中 } K_a = \frac{\rho_{a0}(S_a + 1)}{S_a}, \quad K_c = \frac{\rho_{c0}(S_c + 1)}{S_c}。 \quad (14)$$

把等离子体看作理想气体, 则等离子体的内能为

$$E_p = \frac{\gamma \cdot P}{(\gamma - 1)} \cdot \int_0^t (u_1 + u_2) \cdot dt。 \quad (15)$$

等离子体打开界面做功为

$$W_i = \int_0^t P \cdot (u_1 + u_2) \cdot dt。 \quad (16)$$

激光冲击板料成形中, 等离子体内能的增加和对外做功的能量来自于对激光脉冲能量的吸收, 假设吸收系数为  $A$ , 则

$$\int_0^t A \cdot I(r, t) \cdot dt = E_p + W_i = \frac{(2\gamma - 1)P}{\gamma - 1} \int_0^t (u_1 + u_2) \cdot dt, \quad (17)$$

$$\text{得 } P = \sqrt{\frac{A(\gamma - 1)I_0 Z_{t0} Z_{c0} \rho}{(2\gamma - 1)(K_a Z_{c0} + K_c Z_{t0})}}, \quad (18)$$

上述式中  $A$  为  $0.80 \sim 0.95$ ;  $\gamma$  为等离子体的绝热指数,  $1.67$ ;  $Z_{t0}, Z_{c0}$  分别为靶材和约束层材料的声阻抗 [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];  $K_a, K_c$  分别为与能量吸收层和约束层密度有关的参量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), 用式 (14) 计算;  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 可看作约束层材料、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 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )。

式 (18) 即为板料激光冲击成形中激光诱导冲击波压力的估算式, 它直观地反映了冲击波压力与激光脉冲能量、约束层、能量吸收层及靶材物理量之间的关系。

设  $V_0 = \frac{Z_{t0} Z_{c0}}{K_a Z_{c0} + K_c Z_{t0}}$  ( $\text{m}/\text{s}$ ) 为与靶材 - 能量吸收层 - 约束层有关参量, 代入式 (18), 得到激光冲击波峰值压力的估算式为

$$P = [A(\gamma - 1)/(2\gamma - 1)]^{1/2} V_0^{1/2} \rho^{1/2} I_0^{1/2}, \quad (19)$$

式 (19) 与 R. Fabbro 等<sup>[8]</sup> 建立的激光冲击强化中的压力估算式相比, 更能真实反应激光冲击成形中冲击波峰值压力的大小, 可用来定量分析激光冲击波压力与靶体材料、能量转换体 (吸收层与约束层) 及激光参数之间的关系<sup>[7]</sup>。

### 3 激光冲击加载下板料的变形模型

当作用在板料上的冲击波载荷较小时, 板料对应弹性状态。而当载荷大于其动态屈服强度时, 板料将进入塑性变形状态, 此时板料内将形成塑性铰圆, 在冲击波动态载荷作用下, 板料内的塑性铰圆不

断向外运动, 使更多的板料屈服而呈现出宏观的塑性变形。考虑板料在单次激光脉冲作用下的变形情况。由于激光脉冲模式是准高斯分布的轴对称形状, 可以认为冲击波的时空分布也是轴对称的。实验中采用的边界约束是圆孔形, 这样所讨论的情况可归结为, 在轴对称冲击波压力作用下的板料轴对称变形问题。模型简化为: 一厚度为  $h$  的板料被夹紧在直径为  $2R_0$  的圆孔凹模上, 轴对称地作用有一直径为  $a$  的横向载荷, 单位压力为  $P$ , 为便于分析, 假设  $a = 2R_L$  (光束直径), 如图 3 所示。

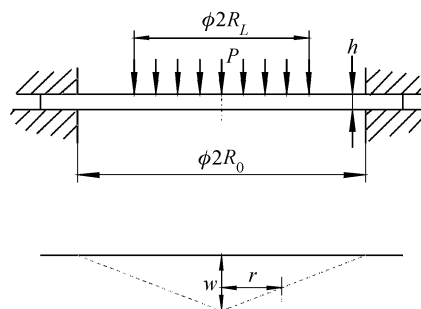


图 3 板料受载及其变形模型

Fig. 3 Deformation model of sheet loading

为便于理论分析, 我们假设冲击波压力在板料上的有效作用区域内为一均匀分布的等效平均载荷  $P_m$ 。由于板料厚度远小于板中面的最小尺寸, 可把研究对象作为薄板处理。为了分析板料在激光冲击波压力作用下的变形过程, 切取变形过程中薄板的一个微元体。根据微元体上应力满足的平衡方程、屈服条件、流动准则和边界条件, 可得到单次激光冲击下板料变形量的表达式为<sup>[7]</sup>

$$w = \frac{t(3\ln a - 1)R_0}{m(3R_0 - a)} [P_m - P_0] \cdot \left(1 - \frac{r}{R_0}\right) \cdot t^2, \quad (20)$$

$$\text{其中 } P_0 = \frac{3(\ln a - 1)h^2}{2(3\ln a - 1)a^2} \sigma_s。$$

从式 (20) 可以看出, 板料产生变形的前提是作用在板料上的冲击波载荷  $P_m$  必须大于某一临界阈值  $P_0$ 。板料变形量 ( $w$ ) 随激波载荷的增加而增大。而板料变形所需的临界应力  $P_0$  与材料的屈服强度  $\sigma_s$ , 板料厚度  $h$  及冲击波压力的作用面积  $a$  有关, 随板料厚度的增加而增加, 随冲击波作用面积的增加而减小, 屈服强度提高所需的冲击波压力增大。板料变形量及轮廓形状除与材料本身的性能有关外, 还与板料的厚度  $h$ , 参与变形的板料质量  $m$  有关, 另外还与约束边界的凹模孔径  $2R_0$ , 冲击波载荷的作用

面积  $a$  和作用时间  $t$  等多种参量有关。

## 4 结 论

1) 建立了激光冲击板料变形的物理模型,从中得到了高能脉冲激光冲击板料变形中峰值压力的估算式,直观地反映了冲击波压力的大小与靶材特性、能量转换体(吸收层和约束层)性能以及激光功率密度之间的相互关系。

2) 通过对单次激光冲击下板料变形的模型分析,建立了板料变形量与激光冲击波压力、约束边界条件、材料性能和作用时间等参数之间的关系,为分析各种参数对成形过程的影响提供了依据。

3) 单次激光冲击成形中激光冲击波压力及其板料变形量关系式的建立,为加工过程中各种参数的合理优化,板料变形过程的有效控制,分析和实现大面积金属板料的激光冲击成形提供了理论依据。

## 参 考 文 献

- 1 John A. Vaccari. Laser shocking extends fatigue life [J]. *American Machinist*, July, 1992. 62~64
- 2 Y. K. Zhang, C. L. Hu, L. Cai *et al.*. Mechanism of improvement on fatigue life of metal by laser-excited shock waves [J]. *Appl. Phys. A*, 2001, **72**(2):113~116
- 3 Liu Shiwei, Guo Dahao, Wang Shengbo *et al.*. Effects of experimental parameters on LSP [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(10):937~940  
刘世伟,郭大浩,王声波等. 实验参数对激光冲击强化效果的影响[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(10):937~940
- 4 Zhou Jianzhong, Yang Jichang, Zhou Ming *et al.*. Experimental study on the effects of overlay properties on laser-induced shock waves [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11):1041~1044  
周建忠,杨继昌,周 明等. 约束层刚性对激光诱导冲击波影响的研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(11):1041~1044
- 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):241~244
- 6 Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Yang Jichan *et al.*. New technique on plastic forming of metal sheet by laser shock wave [J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, **13**(22):1938~1941  
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):1938~1941
- 7 Zhou Jianzhong. Study on the mechanism of shock wave loading and properties of deformation of sheet metal of laser shock forming [D]: [Ph. D. Dissertation]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2002. 35~55  
周建忠. 金属板料激光冲击成形加载机制及变形特性研究[D]. 镇江:江苏大学博士学位论文,2002. 35~55
- 8 R. Fabbro, J. Fournier P. Ballard *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2):775~784