

文章编号: 0258-702X(2002)03-0197-04

# 激光产生的激波在靶材中的传播 及层裂效应

张建泉, 陈荣华, 强希文, 刘 锋

(西北核技术研究所, 西安 710024)

**提要** 应用一维理想弹塑性流体力学模型, 通过有限差分方法, 研究了 XeCl 准分子脉冲强激光辐照固体靶材时, 表面烧蚀压力在靶材中产生的激波的形成、持续和衰减过程, 并应用累积损伤判据和动态断裂准则, 分别计算了金属铝和碳酚醛靶材的层裂损伤。对有关实验数据给出合理的理论解释。

**关键词** 准分子激光, 激波传播过程, 靶材层裂损伤

中图分类号 TB 301 文献标识码 A

## Propagation and Spall Effect of Shock Wave Induced by Laser in Targets

ZHANG Jian-quan, CHEN Rong-hua, QIANG Xi-wen, LIU Feng

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024)

**Abstract** By means of 1-D elastic-plastic hydrodynamic model and finite differential method, it is studied that formation, sustain, and decay of shock wave were induced by powerful pulsed excimer laser in target materials. By using the criterion of accumulate damage and dynamic fracture, the spall thicknesses are given in aluminum and C/Ph, respectively. These calculation results are in agreement with the experimental measurements reported, and reasonably explained experimental phenomena.

**Key words** excimer laser, propagation of shock wave, spall fracture of target

## 1 引言

脉冲强激光辐照靶材时产生的等离子体向外喷射, 施于靶面一冲击压力, 从而向靶内传播一个压缩加载波。随着激光功率的下降, 又会向靶内传播一个稀疏卸载波。两者叠加的结果, 很快成三角形剖面的激波。该激波遇到靶材自由面时发生反射, 转换为拉伸波。一旦拉伸应力达到一定值时, 便会引起拉伸损伤, 即层裂破坏。

脉冲强激光出现以前, 常常采用高速碰撞或高能炸药加载方式研究靶材的冲击力学效应。但产生的激波压力一般低于 60 GPa。随着短脉冲强激光技术的发展, 冲击压力可达 TPa 量级, 并出现了许多实验和理论研究的综合报道<sup>[1]</sup>。研究激光产生的冲击力学效应时, 面临如下三个问题 (1) 激光与靶材相

互作用过程及其产生的烧蚀压力 (2) 靶材中激波的形成、持续和衰减过程 (3) 波的反射及其靶材的损伤机理。

激光产生的激波在靶内形成、持续和衰减过程, 受靶材力学性质和激光烧蚀压力大小、波形的控制。对靶材的层裂损伤发表了许多特定实验条件下的测量结果。对于这类问题的综合研究国外通常采用 LASNEX, MEDUSA 或 SHYLLAC 程序进行模拟<sup>[1,2]</sup>, 然而其模型却难以得到。我们采用一维理想弹塑性流体力学模型, 利用有限差分方法, 计算了紫外短脉冲激光辐照靶材时产生的激波的形成、持续和衰减规律, 并应用累积损伤判据或动态断裂准则, 模拟了铝和碳酚醛的层裂损伤。计算结果与国外有关实验测量和数值模拟结果比较一致, 从而对实验数据给出较合理的理论解释。

收稿日期 2001-01-02; 收到修改稿日期 2001-02-19

**作者简介** 张建泉(1942.10—), 男, 陕西省泾阳县人。现任西北核技术研究所研究员。主要从事辐射物理和激光物理的理论研究。E-mail: zhou@nint.ac.cn

## 2 理论模型

### 2.1 激光产生的烧蚀压力

脉冲强激光与靶材相互作用时,会在靶材表面附近形成一烧蚀等离子体层。该等离子体层迅速向外喷射,结果施于靶面一个冲击压力,该压力即为烧蚀压力。靶面的这一冲击加载导致一激波向靶内传播。

烧蚀压力的大小与入射激光的强度、波长、脉冲持续时间和靶物质性质有关。在单流体、双温度和气化等离子体作等温膨胀的假定下,我们在文献[3]中曾推导出烧蚀压力的定标关系

$$P_m = 0.43 M^{7/16} I^{3/4} \lambda^{-1/4} Z^{-3/8} \tau^{-1/8} (Z + f)^{3/16} [\text{Pa}] \quad (1)$$

式中各物理量的意义和单位文献[3]中已经给出。

假定烧蚀压力随时间的变化关系与激光脉冲随时间的变化相同,即

$$F(t) = I(t) / I_{\max} \quad (2)$$

从而,靶材表面的冲击加载可以表示为

$$P_a = P_m F(t) \quad (3)$$

### 2.2 激波的形成、持续和衰减过程

假定入射到靶材表面的激光光斑尺寸远大于靶材厚度,以烧蚀压力为边界条件,可用一维理想弹塑性流体动力学的质量、动量和能量守恒方程描述激波的形成、持续和衰减过程

$$V = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial R}{\partial r} \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial r} (\sigma + Q) \quad (5)$$

$$\frac{\partial R}{\partial t} = u \quad (6)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \begin{cases} -(P + Q) \frac{\partial V}{\partial t}, & |\sigma| < \sigma_H \\ -(\sigma + Q) \frac{\partial V}{\partial t}, & |\sigma| \geq \sigma_H \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{其中}^{[1]} \sigma = P + S_d \quad (8)$$

应力偏量  $S_d$  由下面二式决定

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial R} = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (9)$$

$$\frac{\partial S_d}{\partial t} = 2G \left( -\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{1}{3V} \frac{\partial V}{\partial t} \right) \quad (10)$$

从而

$$S_d = \text{sign}(S_d) \times \max(|S_d|, Y) \quad (11)$$

上述各式中,  $V$  为比容;  $\rho_0$  为物质初始密度;  $R, r$  分别为欧拉和拉格朗日坐标;  $t$  为时间;  $u$  为粒子速度;

$\sigma$  为总应力;  $P$  为流体静压力,由状态方程给出;  $Q$  为人工粘性;  $E$  为比内能;  $\sigma_H = (1 - \nu) Y_0 / (1 - 2\nu)$  为雨贡纽弹性限;  $Y_0$  为屈服强度;  $\nu$  为泊松比(7)式的第一式是基于在弹性限内,畸变能并不转化为内能而得到的。 $Y = 2Y_0/3$  为冯·米赛屈服限。

在压缩区,为阻止激波震荡,又不使波阵面拉得过宽,取如下人工粘性

$$Q = \frac{C_1(\rho_0 \Delta r)}{V} \frac{\partial V}{\partial t} \left( \frac{\partial V}{\partial t} - \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right| \right) + \frac{C_2 \rho_0 \Delta r}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial t} - \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right| \right) |u| \quad (12)$$

材料在压缩时状态方程取格吕乃森-雨贡纽形式,在膨胀时取 PUFF 状态方程形式<sup>[4]</sup>,即

$$P = \left[ 1 - \frac{\Gamma_0 \rho_0 (V_0 - V)}{2} \right] \frac{C_0^2 (V_0 - V)}{[V_0 - S_0 (V_0 - V)]^2} + \Gamma_0 \rho_0 E, \quad (V \leq V_0) \quad (13)$$

$$P = \rho \left[ \gamma - 1 + (\Gamma_0 - \gamma + 1) \left( \frac{V_0}{V} \right)^{1/2} \right] \times$$

$$\{E - E_s (1 - e^{N(V_0 - V)/V_0^2})\}, \quad (V > V_0) \quad (14)$$

其中,  $\gamma$  为气化物质比热比;  $\Gamma_0$  为格吕乃森系数,假定与压力和密度无关;  $E_s$  为材料升华能;  $N$  为材料常数;  $C_0$  为流体静力学声速;  $S_0$  为波阵面激波速度  $D$  与粒子速度  $u$  之间线性关系  $D = C_0 + S_0 u$  中的拟合常数。

数值计算中稳定条件取为

$$\Delta t \leq \min \left( \frac{\Delta R}{C_i} \right) \quad (15)$$

其中  $\Delta R$  为第  $i$  个网格长度;  $C_i$  为相应区域的声速

$$C_i = C_0^{-1/2} \left[ C_0 + (S_0 - 1)u \right] \times \left[ C_0 + 2S_0 u - \frac{\Gamma_0 S_0 u^2}{C_0 + S_0 u} \right]^{1/2} \quad (16)$$

### 2.3 靶材的层裂损伤

计算表明,脉冲激光的烧蚀压力向靶内先后传播一个压缩波和一个稀疏波,由于稀疏波很快追赶上前面的压缩波,结果向前传播的激波不久便变成三角形。这种波到达靶材后自由面时,由于反射而转化为一拉伸波。在一定条件下,自由面附近会出现垂直于波传播方向的拉伸断裂,即层裂损伤。

许多层裂数据是由飞板碰撞或爆轰加载实验取得的。在较低压力(数十 GPa 以下)和较长脉冲持续时间(数十 ns)条件下,被冲击的材料应变率不超过  $10^5/\text{s}$ ,简单的动态断裂判据常常可以给出较为满意的结果。但在高压(超过 100 GPa)和短脉冲持续时间条件下,被冲击材料的应变率可以高达  $10^7/\text{s}$  以

上,简单的动态断裂判据往往不能给出满意的结果,常常需要对断裂强度按应变速率或应力幅值加以调整<sup>[2]</sup>。

飞板实验表明,动力学损伤与应力持续时间有关。长脉冲比短脉冲造成损伤的应力要低,因而材料损伤不是瞬时的,它有一个时间累积过程。通常,假定材料的损伤经历三个不同的阶段,即微孔洞的成核、增长和汇合。累积损伤判据<sup>[5]</sup>假定:当拉应力大于某一临界值 $\sigma_R$ 时,微小孔洞开始成核;在微小孔洞增长期间,定义一个与位置和时间有关的损伤函数 $f(r, t)$ ,当某个位置的损伤函数关于时间的累积达到一阈值 $K_s$ 时,微小孔洞的汇合得以完成。累积损伤判据可表示如下,并且满足下面二式的最小

时间 $t$ 即为层裂时刻 $t_f$

$$f(r, t) = \int \sigma(r, t) dt = [\max(-\sigma - \sigma_R, 0)]^n \quad (17)$$

$$\sum f(r, t) \Delta t \geq K_s \quad (18)$$

其中, $K_s$ 、 $\sigma_R$ 和 $A$ 是材料常数; $\sigma_R$ 可视为材料动态或静态屈服强度。与某些损伤判据相比,累积损伤判据需要的参数最少。

### 3 计算结果和讨论

按照上述理论模型,我们计算了脉冲紫外强激光辐照铝和碳酚醛靶材时的激波的形成、持续和衰减的传播过程及其产生的层裂损伤。材料参数由表 1 给出。

表 1 铝和碳酚醛的材料参数

Table 1 Parameters of target materials

Materials	$\rho_0$ /kg/m <sup>3</sup>	$C_0$ /m/s	$T_0$	$Y_0$ /GPa	$\nu$	$S_0$	$G$ /GPa	$\sigma_R$ /GPa	$A$	$K_s$ /pa <sup>2</sup> s	$E_s$ /MJ/kg	$\gamma$
Al	2785	5328	2.09	0.3	0.34	1.338	26.2	1.0	2.02	380	12	1.667
C/Ph	1410	3020	1.49	0.05	0.22	1.22	6	1.5	-	-	5.2	1.667

图 1 给出铝靶中激波峰值压力随传播时间的变化关系(实线)及与文献[6]的 LASNEX 计算结果(○或×)的比较。图中曲线 1 和 2 对应于波长为 0.308  $\mu\text{m}$  脉冲持续时间为 0.3 ns,而强度分别为  $10^{14}$  和  $4 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> 的激光在铝靶表面产生 2.85 TPa 和 1.4 TPa 的烧蚀压力的情况。从图看出,激波压力约在 150 ps 时达到最大,约 500 ps 时开始下降,稳定时间约 300 ps。我们的计算结果与文献[6]比较吻合。

关系。图 2(b)给出在与文献[1]相同的烧蚀压力  $P_m = 50$  GPa 条件下(激光波长 0.308  $\mu\text{m}$ ,脉冲形状为半高宽  $\tau = 2.5$  ns 的高斯分布,激光强度为  $6 \times 10^{11}$  W/cm<sup>2</sup>),激波在铝靶内传播时,层裂厚度与靶材厚度的关系。从图 2(a)(b)可以看出,在给定的激光和烧蚀压力条件下,层裂厚度随靶材厚度的增加而增加。其原因是:靶材越厚,传播到后表面的激波就越弱,达到层裂的应力累积时间就越长,因而层裂薄片就越厚。当靶材厚到一定程度时,传播到靶材背表面的激波变得太弱,便不会发生层裂。不致产生层裂的靶材厚度称为层裂阈值。图中曲线终端的短线表示相应的层裂阈值。对图 2(a)(b)的情况,我们计算的层裂阈值分别为 1235  $\mu\text{m}$  和 1153  $\mu\text{m}$ ,而引证的文献分别为 1250  $\mu\text{m}$  和 1175  $\mu\text{m}$ ,二者基本吻合。

图 3 给出碳酚醛(C/Ph)层裂厚度与靶材厚度的关系。计算中取激光波长为 0.308  $\mu\text{m}$ ,激光强度

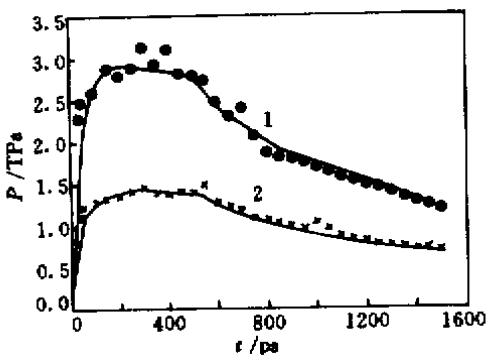


图 1 铝靶中激波峰值压力随时间的变化

Fig.1 Shock pressure as a function of time in Al

图 2(a)给出在与文献[7]相同的烧蚀压力  $P_m = 65$  GPa 条件下(激光波长 0.308  $\mu\text{m}$ ,脉冲形状为半高宽  $\tau = 2$  ns 的高斯分布,激光强度为  $8 \times 10^{11}$  W/cm<sup>2</sup>),激波在铝靶内传播时,层裂厚度与靶材厚度的

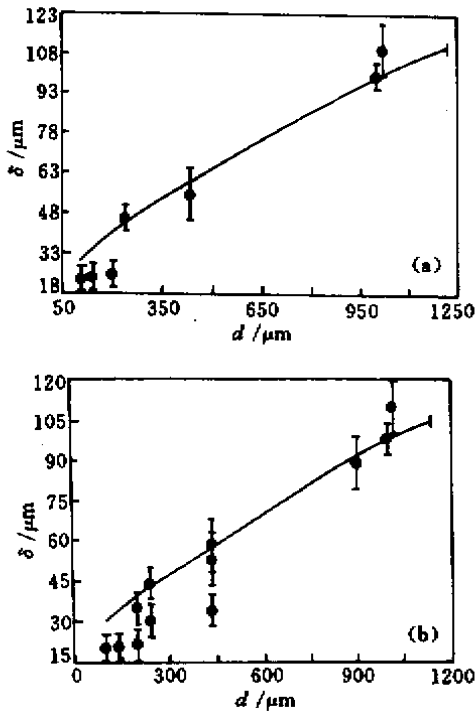


图2 铝靶层裂厚度随靶厚的变化

Fig.2 Spall thickness as target thickness in Al

- (a)  $P_m = 65 \text{ GPa}$  ( $\lambda = 0.308 \mu\text{m}$ ,  $\tau = 2 \text{ ns}$ ,  $I = 8 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ );  
 (b)  $P_m = 50 \text{ GPa}$  ( $\lambda = 0.308 \mu\text{m}$ ,  $\tau = 2.5 \text{ ns}$ ,  $I = 6 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ )

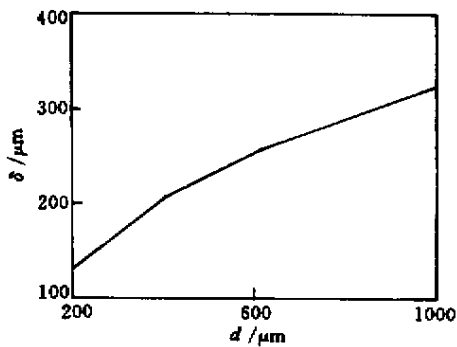


图3 碳酚醛层裂厚度随靶厚的变化

Fig.3 Spall thickness as target thickness in C/Ph

为  $7 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ , 脉冲持续时间为  $2 \text{ ns}$ , 激光产生的烧蚀压力为  $65 \text{ GPa}$ 。其层裂判据取自脆性材料动态断裂准则。由图可以看出, 随着靶材厚度的增加, 层裂厚度亦缓慢增大。

激光与靶材相互作用过程及其冲击动力学效应的研究涉及许多学科。许多问题, 如烧蚀压力的准确计算, 高应变条件下材料参数和状态方程的选取以及动态断裂准则的真实性等, 都仍然是国内外有待深入讨论的课题。近年国外先后发表了几篇应用改进的 LASNEX, MEDUSA 和 SHYLAC 等程序完成的激光冲击动力学效应的理论计算文章, 其结果与实验符合较好, 但我们无法得知其模型的关键之处。我们给出的理论模型和计算结果基本上反映了激光激波的形成、持续和衰减的传播规律, 对层裂问题的计算取得与实验较为一致的结果, 从而给出实验结果较为合理的理论解释。

#### 参 考 文 献

- 1 M. Boustie, F. Cottet. Experimental and numerical study of laser induced spallation into aluminum and copper targets [ J ]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**( 11 ):7533 ~ 7538
- 2 S. Eliezer, I. Gilath. Laser-induced spall in metals: experiment and simulation [ J ]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **67**( 2 ):715 ~ 724
- 3 Zhang Jianquan. Analytic research of laser-generated plasma parameters [ J ]. *Chinese J. Lasers* ( 中国激光 ), 1995, **B4**( 4 ):323, 336 ~ 342 ( in English )
- 4 N. J. Rudie. Principles and Techniques of Radiation Hardening [ M ]. North Hollywood, California: West. Period. Comp., 1976. 8 ~ 32
- 5 Chen Danian, Wang Desheng. Spallation criteria and computer modeling of spallation processes [ J ]. *Explosion and Shock Waves* ( 爆炸与冲击 ), 1982, **4**:50 ~ 54 ( in Chinese )
- 6 J. R. Trainor, Y. T. Lee. Analytic models for design of laser-generated shock-wave experiments [ J ]. *Phys. Fluids*, 1982, **25**( 10 ):1898 ~ 1907
- 7 F. Cottet, M. Boustie. Spallation studies in aluminum targets using shock waves induced by laser irradiation at various pulse durations [ J ]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**( 9 ):4067 ~ 4073