

文章编号: 1006-9941(2007)05-0471-03

## 平面波透镜实验与数值模拟

韩勇, 魏智勇, 黄毅民, 鲁斌, 蒋小华

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 利用高速转镜相机扫描照相技术测试了平面波透镜的输出波形, 应用三维非线性有限元流体动力学程序 ANSYS/LS-DYNA 对实验进行了数值模拟, 计算获得平面波透镜中爆轰波传播的物理图像及输出波形, 计算结果与实验结果基本相符。

**关键词:** 爆炸力学; 炸药; 平面波透镜; 数值模拟

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标识码:** A

### 1 引言

在爆轰物理研究和材料冲击动力学研究中, 平面波透镜是获得一维动态加载的一个重要装置, 其输出波形的平面度是实验研究中尤为关注的问题。为获得较好的输出波形, 各国研究人员对其设计进行了大量实验研究工作<sup>[1-5]</sup>。由于它的设计是基于光学的费马原理, 因此需要进行多轮次设计调整, 造成研究周期过长及资源浪费的情况。随着计算机数值模拟技术迅速发展, 采用基本物理方程通过数值求解方法来研究平面波透镜中爆轰波传播过程可大大缩短研究周期, 节约研究经费。

结合平面波透镜输出的波形测试结果, 本文利用三维非线性有限元流体动力学程序 ANSYS/LS-DYNA<sup>[6]</sup>对实验进行了数值模拟, 并对实验和计算结果进行了比较分析。

### 2 实验方法

实验装置如图1所示, 用高速转镜扫描相机和单狭缝技术来测定爆轰波透射出端面的波形。平面波透镜炸药选用 JO-9159, 内部采用惰性材料有机玻璃调整波形, 底端覆盖一层高能炸药 JO-9159, 起爆方式为单点起爆。

相机的扫描转速为 15 万转/分钟, 狭缝像在底片上的扫描速度为  $7.5 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ , 图7中小方框表示底片处理后得到的  $R-t$  实验数据。

### 3 数值模拟

#### 3.1 状态方程

在计算模型中, 对 JO-9159 炸药采用三项式的点

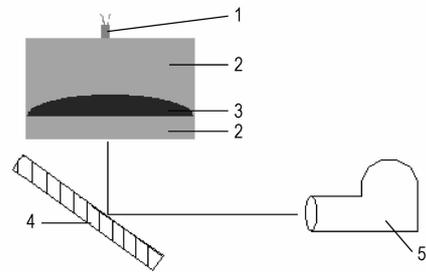


图1 平面波透镜示意图

1—微秒级高压电雷管, 2—JO-9159 炸药, 3—有机玻璃, 4—反光镜, 5—高速转镜扫描相机

Fig. 1 Planar detonation wave generator test setting

1—microsecond high pressure detonator, 2—JO-9159 explosive, 3—PMMA, 4—mirror, 5—high speed rotate mirror scan camera

火增长模型, 对有机玻璃采用 Gruneisen 方程。

三项式点火增长模型<sup>[7,8]</sup>:

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1 - \lambda)^b \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1 - \lambda)^c \lambda^d p^y + G_2(1 - \lambda)^e \lambda^g p^z \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  是炸药反应度,  $t$  是时间,  $\rho$  是密度,  $\rho_0$  是初始密度, 单位为  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $p$  是压力, 单位为 GPa,  $I, G_1, G_2, a, b, x, c, d, y, e, g$  和  $z$  是常数。

反应产物的状态方程采用 JWL 形式的状态方程:

$$p_p = A \left( 1 - \frac{w}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{w}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{w E_0}{V} \quad (2)$$

式中的系数均为待定参数。

Gruneisen 方程<sup>[9,10]</sup>:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\nu_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu + S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu) E \quad (3)$$

收稿日期: 2006-10-09; 修回日期: 2006-11-22

基金项目: 中国工程物理研究院化工材料研究所所长基金(62601040215)

作者简介: 韩勇(1976-), 男, 助理研究员, 硕士研究生, 从事爆轰物理研究。e-mail: y\_han76@126.com

式中,  $C$  为  $u_s-u_p$  曲线的截距,  $S_1, S_2, S_3$  是  $u_s-u_p$  曲线斜率的系数,  $\gamma_0$  是 Gruneisen 系数,  $a$  是对  $\gamma_0$  的一阶体积修正。

JO-9159 炸药化学反应速率方程的参数及爆轰产物状态方程的参数如表 1、2 所示, 有机玻璃状态方程参数如表 3 所示, 表 1、2、3 中参数的下标 0 表示材料初始值。

表 1 JO-9159 炸药点火-增长模型反应速率方程参数

Table 1 Ignition and growth reactive flow parameters of JO-9159 explosives

| $I$       | $b$   | $a$   | $x$ | $G_1$ | $c$   | $d$ | $y$ | $G_2$ | $e$ | $g$ | $z$ |
|-----------|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|
| 7.430E+11 | 0.667 | 0.111 | 10  | 100   | 0.667 | 1   | 1   | 80    | 1.0 | 1.0 | 1.0 |

表 2 JO-9159 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数

Table 2 The JWL coefficients of JO-9159 detonation products

| $A$     | $B$     | $R_1$ | $R_2$ | $W$  | $E_0$   | $V_0$ |
|---------|---------|-------|-------|------|---------|-------|
| 8.54000 | 0.20493 | 4.6   | 1.35  | 0.25 | 0.08499 | 1.0   |

表 3 有机玻璃状态方程参数

Table 3 The Gruneisen EOS parameters of PMMA

| $C/cm \cdot \mu s^{-1}$ | $S_1$ | $S_2$    | $S_3$    | $\gamma_0$ | $A$      | $E_0$    | $V_0$    |
|-------------------------|-------|----------|----------|------------|----------|----------|----------|
| 0.332                   | 1.424 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.85E+00   | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.10E+01 |

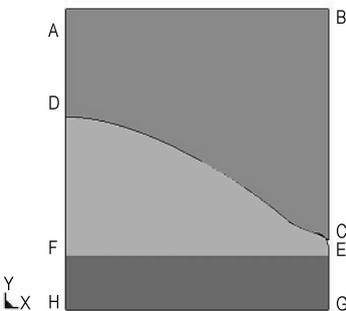


图 2 计算模型的主视图  
Fig. 2 Main view of model

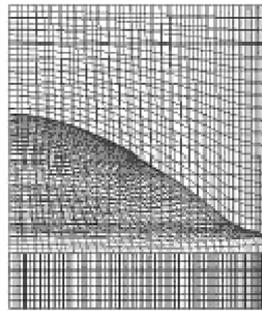


图 3 计算模型初分网格的主视图  
Fig. 3 Main view of gridding

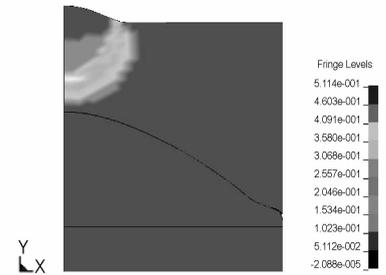


图 4 1.42  $\mu s$  时 JO-9159 炸药及有机玻璃中的等压分布图  
Fig. 4 Contour pressure of JO-9159 and PMMA at 1.42  $\mu s$

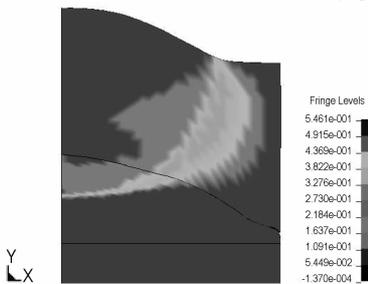


图 5 4  $\mu s$  时 JO-9159 炸药及有机玻璃中的等压分布图  
Fig. 5 Contour pressure of JO-9159 and PMMA at 4  $\mu s$

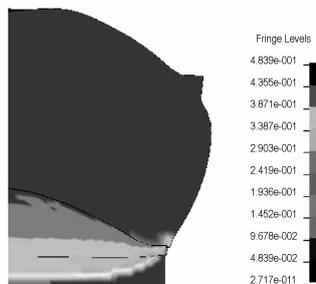


图 6 7.32  $\mu s$  时有机玻璃及底层 JO-9159 炸药中的等压分布图  
Fig. 6 Contour pressure of JO-9159 and PMMA at 7.32  $\mu s$

### 3.2 计算模型与结果分析

在笛卡儿坐标系中建立三维计算模型如图 2 所示。由于测试实验装置为轴对称, 故将其剖为原来四分之一的形状, 在其两个剖面分别加上关于  $x, y$  轴的对称约束。ABCD 区为 JO-9159 炸药部分, CDEF 区为有机玻璃, EFGH 区为 JO-9159 炸药。采用单点起爆方式, 起爆点为 A 点。

图 3 为模型的初分网格图, 网格划分为六面体形, 边长取为 1 mm。图 4 为 1.42  $\mu s$  时模型的等压分布图, 由于轴向稀疏波的作用, 爆轰产物向后飞散, 起爆位置成小山坡状, 这时平面波透镜内传播的爆轰波形近似为球面波形。图 5 为 4  $\mu s$  时模型的等压分布图, 这时有机玻璃已被压缩, 由于有机玻璃中的冲击波速度小于高速层炸药的爆速值, 造成在同一轴向距离的位置, 爆轰波到达有机玻璃与高速层炸药界面的时间与冲击波沿有机玻璃轴线传播的时间几乎相同, 因而使有机玻璃中传播的冲击波波形近似为一平面。图 6 为 7.32  $\mu s$  时模型的等压分布图, 这时底层 JO-9159 已被起爆, 由于侧向稀疏波的作用, 平面波透镜成为凸出的腰鼓状, 轴向稀疏波的作用使起爆部分的山坡形状进一步扩大。等压分布图中靠近轴线位置的爆轰波近似为平面, 而边侧的等压分布则由于径向稀疏波的作用向后

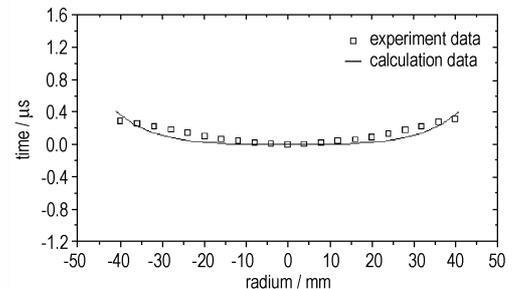


图 7 爆轰波透出端面波形的计算值与实验值的比较图  
Fig. 7 Output shape of detonation wave by calculation and measurement

弯曲。图7为爆轰波透出端面波形的计算值与实验值的比较图,计算结果与实验值基本相符合,只是在靠近边侧位置的计算结果与实验结果相差较大,这是由于在建模过程中为了计算稳定,对靠近平面波透镜侧面的有机玻璃进行光滑处理后而造成的波形计算失真。

#### 4 结 论

应用三维非线性有限元流体动力学程序(ANSYS/LS-DYNA)对平面波透镜实验进行了数值模拟,数值模拟中对JO-9159炸药采用点火增长模型,炸药爆轰产物采用JWL状态方程,有机玻璃采用Gruneisen方程,计算结果与实验基本相符。所得炸药及有机玻璃参数可用于平面波透镜的设计。

#### 参考文献:

- [1] Marsh S P. Explosive plane-wave lens[P]. USP 4729318, March 1988.
- [2] Fritz J N. A simple plane-wave explosive lens[R]. Los Alamos National Laboratory Report,1990,DE91-004297.
- [3] Vigil M G. Plane shock generator explosive lens[R]. Sandia Report 1996,SAND94-3206,UC-742.
- [4] 金柯,周显明,刘晓海,等. 硝基甲烷-铝合金组合式平面波透镜研制[J]. 含能材料,2005,13(2): 121-123.  
JIN Ke,ZHOU Xian-ming,LIU Xiao-hai, et al. Design of plane-wave lens utilizing nitromethane and lead[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*,2005,13(2): 121-123.
- [5] 李赛男,周显明,袁帅,等. 低当量无铅液体炸药透镜的研制[J]. 含能材料,2006,14(3): 191-194.  
LI Sai-nan,ZHOU Xian-ming,YUAN Shuai, et al. Manufacture of low equivalent liquid explosive lens without lead[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*,2006,14(3): 191-194.
- [6] ANSYS/LS-DYNA 用户使用手册. 1998.
- [7] 孙承纬,卫玉章,周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社,2000.
- [8] 龙新平. VLW爆轰产物状态方程及纳米基铝粉含铝炸药爆轰特性研究[D]. 北京: 北京理工大学,1999.
- [9] Daniel J S. An equation of state for polymethylmethacrylate[R]. UCID-16982,1975.
- [10] Lee E, Breithaupt D, Memillan C, et al. The motion of thin metal walls and the equation of state of detonation products[R]. UCID-91490,1985.

## Experiment and Numerical Simulation of Plane Wave Lens

HAN Yong, WEI Zhi-yong, HUANG Yi-min, LU Bin, JIANG Xiao-hua

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Miangyang 621900, China)

**Abstract:** The output wave of a plane wave lens was tested by a scanning photography technique with a high speed rotating camera, and was modeled by ANSYS/LS-DYNA code. Physical picture of detonation and shock wave propagation in the device was obtained by the calculation, and the simulated output waveform was in accordance with the experimental result.

**Key words:** explosion mechanics; explosive; plane wave lens; numerical simulation

(上接 470 页)

## Application of Emulsion Explosive in Detonation Synthesis of Nano-oxide Particles

LI Xiao-jie, WANG Xiao-hong, XIE Xing-hua, ZHANG Yue-ju, QU Yan-dong, SUN Gui-lei

(Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** A new type emulsion explosive containing plenty of Fe and Mn elements was prepared for synthesis of nano-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> powders by detonation method. The collected detonation products were characterized by X-ray diffraction (XRD) and transmission electron microscope (TEM). The results indicate that spherical nano-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> powders with spinel structure were successfully synthesized by detonation of this kind of emulsion explosive, and that the impurities could be removed after the products are treated at 280 °C for 1 h.

**Key words:** applied chemistry; emulsion explosive; detonation synthesis; MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>