

文章编号: 1006-9941(2006)03-0191-04

## 低当量无铅液体炸药透镜的研制

李赛男, 周显明, 袁 帅, 宋 萍, 王 为, 叶素华

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 以聚四氟乙烯作为整形板, 设计了一种低当量的硝基甲烷液体炸药透镜。通过不同装药参数的动态实验和数值模拟计算分析发现, 除惰性材料整形板对爆轰冲击波的衰减外, 传爆药柱与硝基甲烷的爆速差以及由此形成的强爆轰也是影响透镜波形及波形不稳定的主要因素, 通过减小传爆药柱厚度可以削弱强爆轰及其影响的程度。

**关键词:** 爆炸力学; 爆轰波; 液体炸药透镜; 强爆轰

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标识码:** A

### 1 引 言

在冲击波物理和爆炸力学研究中经常要用到平面爆轰加载装置, 炸药透镜就是一种重要的平面波发生器。随着武器工程和精密物理研究的最新进展, 迫切需要一种高性能的炸药透镜。为此, 中国工程物理研究院化工材料研究所研制了直径为 200 mm 的新型炸药透镜, 其输出波形差为 60 ns<sup>[1]</sup>, 基本满足了上述急需。但该型号炸药透镜也存在一个明显的不足, 即自身的炸药量太大 (~6 kg), 使加载装置的爆炸威力增大, 加大了工程防护上的难度和费用。同时, 由于药量过大, 炸药透镜本身也对驱动飞片过程作功, 这对平面加载装置的设计并不方便。此外, 由于生产工艺复杂、费用较高, 很难满足使用的经济性。

在主发炸药后加入惰性材料整形板设计炸药透镜<sup>[2-7]</sup>可以有效降低药量, 本文报道利用硝基甲烷液体炸药/聚四氟乙烯整形器设计低当量平面波发生器, 并对影响输出波形的因素进行了探讨。

### 2 设计原理

采用惰性材料作整形器设计液体炸药透镜与采用高低爆速组合式固体炸药透镜的情况基本相同, 都是把点起爆的散心爆轰波改造成平面爆轰波, 依据 Fermat 原理确定界面方程, 使从起爆点传出的爆轰波经历不同路径后能同时到达透镜底部平面。在动态爆轰实验中, 一般都要在透镜顶部先安装传爆药柱, 再用雷管起爆。对于固体炸药透镜, 高爆速层与传爆药柱的爆速十分

接近或基本相同, 这时无需考虑传爆药柱的影响。但硝基甲烷液体炸药的爆速明显低于传爆药柱的爆速, 在设计和计算界面方程时则必须考虑到这种差别。

液体炸药透镜设计原理如图 1 所示, 自上而下依次为传爆药柱、硝基甲烷 (NM) 液体炸药和惰性材料整形板。

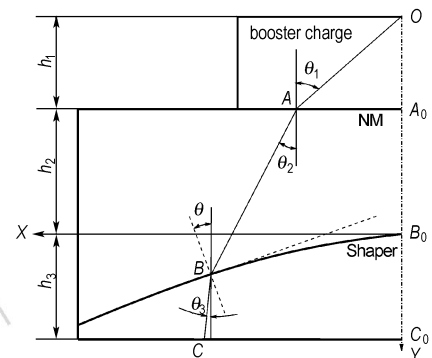


图 1 液体炸药透镜设计原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a liquid explosive lens

从 O 点处起爆, 设传爆药柱和硝基甲烷中的爆速分别为  $D_1$  和  $D_2$ , 惰性材料整形板中的冲击波速度为  $D_3$ , 传爆药柱、液体炸药和整形板三者为中心轴线上的高度分别为  $h_1$ 、 $h_2$  和  $h_3$ , B 点的界面坐标为  $(x, y)$ 。由于  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  三者数值上的差别, 向下传播的球面爆轰波将在传爆药柱与硝基甲烷液体炸药以及硝基甲烷与整形板的界面处发生折射, 根据 Fermat 原理可导出折射角  $\theta_2$  与入射角  $\theta_1$  间满足的斯涅耳公式<sup>[8]</sup>, 即

$$\frac{\sin \theta_1}{D_1} = \frac{\sin \theta_2}{D_2} \quad (1)$$

同理

$$\frac{\sin(\theta + \theta_2)}{D_2} = \frac{\sin(\theta + \theta_3)}{D_3} \quad (2)$$

收稿日期: 2005-09-21; 修回日期: 2006-01-16

基金项目: 武器装备预先研究(421040203)

作者简介: 李赛男(1973-), 女, 助工, 主要从事冲击波物理研究。

e-mail: 5xlaojianghu@sohu.com

按照平面波发生器的设计要求,从  $O \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C$  与从  $O \rightarrow A_0 \rightarrow B_0 \rightarrow C_0$  历时应相等,因此,从图中几何关系不难导出

$$\frac{h_1}{D_1 \cos \theta_1} + \frac{h_2 + y}{D_2 \cos \theta_2} + \frac{h_3 - y}{D_3 \cos \theta_3} = \frac{h_1}{D_1} + \frac{h_2}{D_2} + \frac{h_3}{D_3} \quad (3)$$

$$x = h_1 \tan \theta_1 + (h_2 + y) \tan \theta_2 \quad (4)$$

式中,  $\theta$  为 B 点切线方向与 X 轴线的夹角,因此,

$$\tan \theta = \frac{dy}{dx} \quad (5)$$

上述 5 个方程中有 6 个变量,原则上可以确定 B 的界面坐标方程。因公式(5)为微分方程,我们只能通过计算机进行数值求解。

以上是考虑到爆轰波/冲击波实际传播路径确定界面方程的方法,用上述公式还不能得到界面方程的解析式。为得到初级近似的界面方程解析式,作如下的简化:忽略  $D_1$  和  $D_2$  的差别,并认为 BC 线与底面垂直。由此导出整形板界面坐标近似方程

$$x^2 = \left[ \left( \frac{D_2}{D_3} \right)^2 - 1 \right] y^2 + 2h \left( \frac{D_2}{D_3} - 1 \right) y \quad (6)$$

此时,透镜底部的波形差  $\Delta t$ :

$$\Delta t = \frac{h_1}{D_1 \cos \theta_1} + \frac{h_2 + y}{D_2 \cos \theta_2} + \frac{h_3 - y}{D_3 \cos \theta_3} - \left( \frac{h_1}{D_1} + \frac{h_2}{D_2} + \frac{h_3}{D_3} \right) \quad (7)$$

当选定好具体的传爆药柱、液体炸药和整形板材料并确定了其爆轰 Hugoniot 参数后,通过数值计算可确定出各个实际爆轰装置中的最佳起爆点高度。

但是,实际的液体炸药透镜波形远比上述计算复杂,有些影响输出波形的重要因素目前还不能进行定量计算。例如,实际爆轰装置中向整形板中传入的冲击波为三角形泰勒波,由于整形板厚度随半径方向变化,因而在不同半径上的衰减程度也就不同。中心轴线附近炸药层厚度较薄,整形板厚度较厚,而边缘处炸药层厚整形板薄,中心区的衰减甚于边缘处,这是造成液体炸药透镜输出波形一般都为中滞后,形成凹面波的主要原因。另外,当传爆药柱装药较厚时,在传爆药柱和硝基甲烷两种高低爆速炸药的界面附近还可能形成强爆轰状态,引起中心波形超前,形成凸面波。这些因素在后面实测波形中,我们还将给出具体的分析。由于这些因素的存在,除了上述理论计算外,还需要结合动态实验来对实际的炸药透镜进行调试。

### 3 整形板中冲击波速度计算与液体炸药透镜设计

在设计液体炸药透镜之前,首先需要对各种材料的接触爆炸压力和冲击波速度进行计算,以便优选出

合适的材料作整形板。具体计算方法可参见文献[9],这里仅给出炸药透镜整形板选择的基本原则,即为了实现最小的装药量(控制炸药透镜高度),需要  $D_3$  值尽可能小。因此,就需要选择初始密度尽可能高而声速值则尽可能小的材料,还必需考虑到材料的机加性能和经济性。表 1 列出了几种材料的计算结果,由此看出 Pb 和 In 都是硝基甲烷液体炸药透镜较为理想的整形板材料,遗憾的是二者都有毒,装置爆炸后易造成对实验场地的污染,不宜采用。聚四氟乙烯(Teflon)的波速虽比上述两种材料高,但在非金属材料中是较低的,且机加性能较好。

表 1 几种材料的雨贡纽参数和波速计算结果

Table 1 Hugoniot parameters and shock wave speed calculations results of some materials

materials	$\rho_0$ /g · cm <sup>-3</sup>	$C_0$ /km · s <sup>-1</sup>	$\lambda$	$D_3$ /km · s <sup>-1</sup>	$p_H$ /GPa
Pb	11.346	2.03	1.47	3.088	25.23
Sn	7.287	2.59	1.49	3.856	23.89
Zn	7.139	3.03	1.55	4.050	18.79
In	7.278	2.419	1.54	3.520	18.32
32W	13.812	3.58	1.50	4.288	27.95
Teflon	2.152	1.845	1.71	3.709	8.79
PMMA	1.184	3.08	1.29	4.569	12.22
Ta	16.65	3.293	1.31	3.869	28.35

从经济实用的角度考虑,选用了泰安和硝基甲烷分别作为液体炸药透镜的传爆药柱和主装药。二者的爆速分别为  $D_1 = 7.98 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $D_2 = 6.29 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 结合上表中给出的 Teflon 波速  $D_3 = 3.709 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 代入式(6)后确定的整形板界面方程为:  $x = \sqrt{1.876y^2 + 53.1y}$ 。兼顾加工和装配因素,设计的 Teflon 整形板中心厚度为  $h_3 = 27 \text{ mm}$ 。为确保装配精度和现场安装的便利,整形板和液体药筒设计加工成一个整体(外径 110 mm),雷管套、传爆药柱盒与上盖板设计加工成另一整体,盖板上设计有开口,以便于注入硝基甲烷液体,传爆药柱与液体炸药间用透明胶片封隔,实际结构如图 2 所示。

确定了界面方程后,在不考虑强爆轰波和波在整形板中衰减的情况下,由式(7)可以计算不同装药参数下的波形(见图 3)。

从上述计算结果可看出,在不同传爆药柱厚度下,不同液体炸药装药厚度将对明显不同的透镜底部波形。由于传爆药柱的爆速( $D_1 = 7.98 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )明显高于硝基甲烷液体炸药的爆速( $D_2 = 6.29 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ),因此计算得到的最佳起爆点高度比原设计值低。为了

尽量减小形成强爆轰波的可能性,在保证能可靠起爆液体炸药的前提下,传爆药柱应尽量薄。当取  $h_1 = 11$  mm 时,计算得到的硝基甲烷液体炸药最佳装药厚度为 23 mm 左右。由于计算中没有考虑整形板对爆轰波的衰减效应,因此实际装药厚度需要调整到更小值,这样得到凸面波以抵消衰减效应产生的凹面波。具体的调整量需要用动态实验波形确定,上述计算给出了调整设计的基本思路。

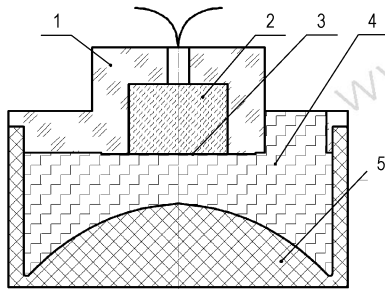
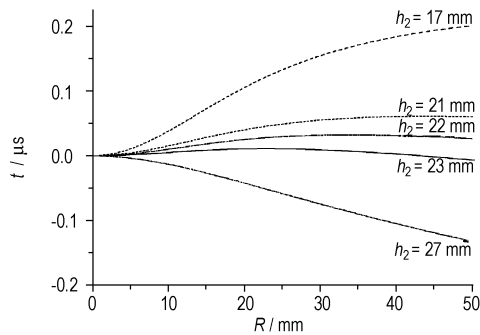


图 2 实验装置装配图

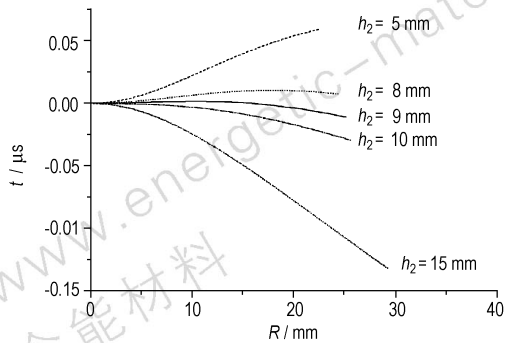
1—上盖板, 2—传爆药柱 ( $\Phi 32$  mm), 3—塑料薄膜, 4—硝基甲烷, 5—Teflon 整形板

Fig. 2 Experimental assembly

1—upper cover, 2—booster charge ( $\Phi 32$  mm), 3—plastic film, 4—NM, 5—Teflon shaper



(a)  $h_1 = 11$  mm



(b)  $h_1 = 22.5$  mm

图 3 不同装药参数下 Teflon 整形板底部波形的预估计算

Fig. 3 Waveforms under the Teflon shaper estimated under the various loading parameters

#### 4 二维流体力学数值模拟计算

采用二维流体力学程序 ANSYS 对上述设计进行了数值模拟计算,其中有机玻璃和聚四氟乙烯采用流体弹性材料模型和格留乃森状态方程。炸药泰安和硝基甲烷液体采用 JWL 状态方程。具体计算参数见表 2<sup>[10-12]</sup>。

表 2 炸药 JWL 状态方程参数和装置材料力学性质

Table 2 Explosive JWL EOS parameters and materials mechanical properties of the apparatus

$R_1^{(1)}$	$R_2^{(1)}$	$\omega^{(1)}$	materials	G/MPa	$Y_H$ /MPa
4.4	1.2	0.25	PMMA	229.0	37.5
4.4	1.2	0.3	Teflon	165.6	27.6 <sup>[10]</sup>

Note: 1) represent parameters of JWL equation of state .

#### 5 动态实验及结果分析

为了考察不同装药厚度和起爆点高度对液体炸药透镜输出波形的影响,共做了 6 发动态波形检测实验。电探针置于透镜底部,测试系统布局如图 4 所示。

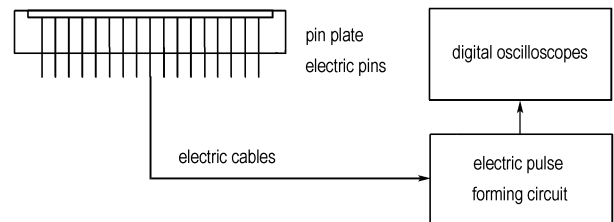


图 4 电探针测试系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram for electric-pin diagnostics

实测波形如图 5 所示,图中○和■符号分别为沿十字交叉两个直径方向的实测数据,实线为二维流体力学模拟计算曲线,虚线为式(7)计算结果。LEPG1 和 LEPG2 两发实验实测波形显示,中心部位均为凸面波而周边为凹面波,与二维流体力学数值模拟计算基本吻合。这两发实验传爆药柱厚度最大为 22.5 mm,说明在传爆药柱与硝基甲烷液体炸药中心界面附近可能形成了强爆轰波。LEPG3 及其余实验减小了传爆药柱厚度 ( $h_1 = 16.25$  mm),同时保持起爆点高度与 LEPG1 实验基本相同。此时,中心区附近强爆轰波不明显,波形整体呈现为纯凹面波,可归因于爆轰波在整形板中的衰减。由此可见,为了减小高低炸药层不匹配形成的强爆轰波对炸药透镜输出波形的影响,应尽量减小传爆药柱的厚度。图 5(e)和(f)中的实验结果不对称是由于有机玻璃盖上的注液孔恰好对准了检测方向所致。

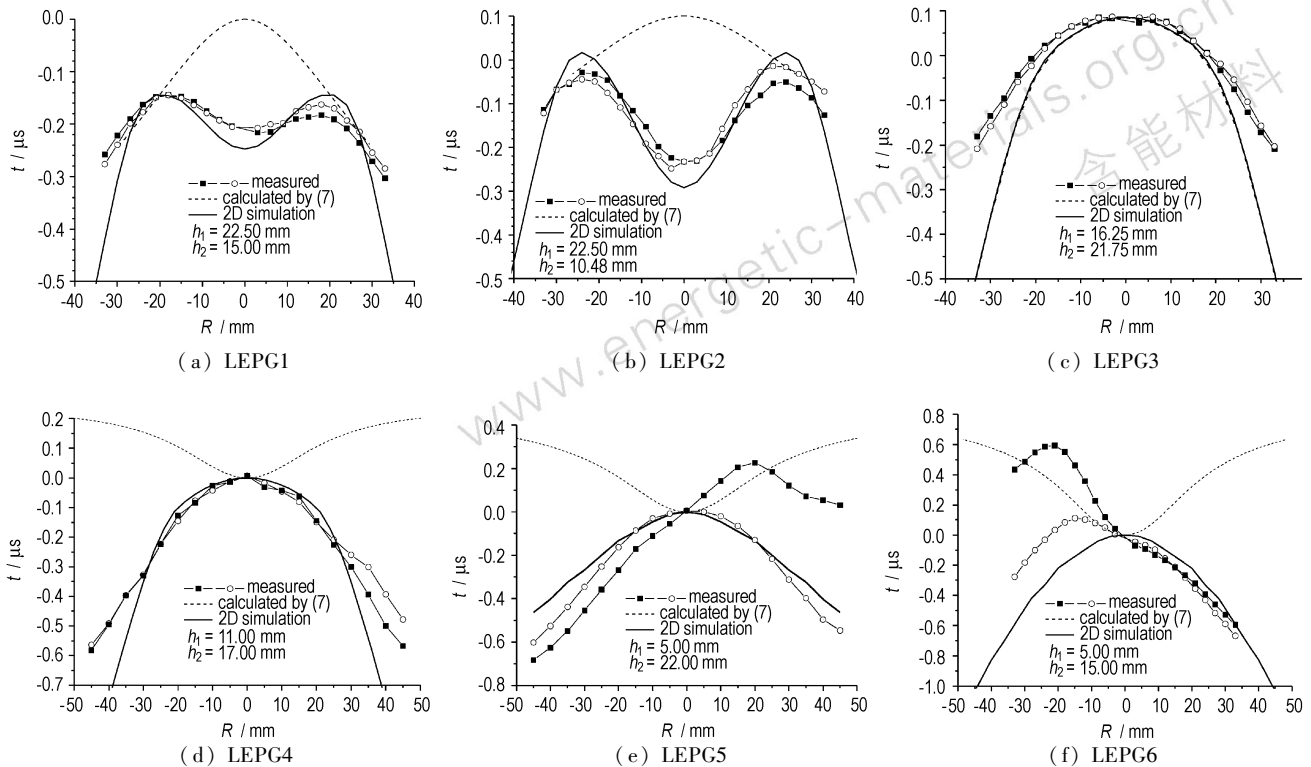


图5 实验波形及与计算结果的比较

Fig. 5 The comparison of the experiment and calculation results

由图5可知,各发实验的二维流体力学模拟计算与实测波形基本符合,但在偏离轴向远处,符合效果稍差。分析其原因可能与计算中采用的材料模型、材料参数以及炸药的起爆方式有关。由公式(7)计算的波形曲线与实测波形则相差较大,并且除LEPG3实验外其余实验实测波形和数值模拟结果均与公式(7)预测方向完全相反。由此可见,Teflon整形板对硝基甲烷液体炸药爆轰波的衰减十分明显。

## 6 结论

根据硝基甲烷液体炸药的爆轰参数,计算了几种惰性材料在与之接触爆炸后传入的冲击波波速,并根据计算结果优选出Teflon设计加工出了无铅液体炸药透镜。6发动态爆轰实验结合数值模拟计算分析表明,传爆药柱与硝基甲烷液体炸药爆速的差异是影响实验波形的重要因素之一。传爆药柱的厚度不同,对最终波形的影响也不一样。较厚的高爆速传爆药柱易形成强爆轰波,使输出波形很难调控。另一方面,为了可靠起爆硝基甲烷液体炸药,传爆药柱还不能太薄。

虽然目前液体炸药透镜的动态波形还不太理想( $\Phi 40$  mm范围波形差 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{s}$ ),但我们已经对影

响输出波形的主要因素有了正确认识。总之,经过精心计算设计和动态实验调试,液体炸药透镜有望达到满足实际需求的、较高的精度。

**致谢:** 本文实验和测试工作得到了付秋卫、卢敏、贾路峰、谢庆海、靳开诚、刘晓海、杨慕松等同志的帮助和支持,在此一并致谢!

### 参考文献:

- [1] 黄交虎,刘文翰,黄辉,等. 高精度平面波透镜设计[R]. 中国工程物理研究院科技年报. 北京: 原子能出版社,2003.
- [2] Marsh S P. Explosive plane-wave lens[P]. US 4729318, March 1988.
- [3] Fritz J N. A simple plane-wave explosive lens[R]. Los Alamos National Laboratory report, 1990, DE91-004297.
- [4] Vigil M G. Plane shock generator explosive lens[R]. Sandia report, 1996, SAND94-3206. UC-742.
- [5] 张春生. F100 铅-炸药组合式平面波发生器[J]. 高能密度物理, 1981, (5): 12.
- [6] 魏智勇,韩敦信,杨永林,等. 有机玻璃平面波透镜设计[R]. 中国工程物理研究院科技年报-2002. 北京: 原子能出版社,2003.
- [7] 金柯,周显明,刘晓海,等. 硝基甲烷-铅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.

(下转 220 页)

从表4可以看出,药料的平均粒度减小,穿透性能明显增强,主要原因:一是平均粒度减小,药料的比表面积增大,在相同装药量的情况下,初始燃烧面积增大,在同样的时间内,产生的气体多,故而膛压升高,火药的燃烧速度随着压力的增加而增大,有利于火药装药的完全燃烧;二是药粒的平均直径减小,药料的燃烧弧厚减小,在相同的条件下火药燃完的时间减少。因此8#样比7#样燃烧得更完全,有利于火药能量的充分利用,所以相同的时间内,能够提供更多的火药燃气用于射钉的穿透。因而8#样的穿透性能远远好于7#样。

#### 4 结论

(1) 在其它条件相近的前提下,发射药堆积密度适当降低有利于射钉弹穿透性能的提高。

(2) 用高氮量的NC取代双基球形药中的低氮量NC,会提高射钉弹的穿透性能。

(3) 调整药型尺寸,调整弧厚或改变粒度等,可改善射钉弹的穿透性能。

#### 参考文献:

- [1] 徐复铭,王泽山. 重视创新,实现火炸药的跨越式发展[J]. 火炸药学报,2001,24(2): 3.
- XU Fu-ming, WANG Ze-shan. Stressing innovation for overleaping development of explosives and propellants [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2001, 24(2): 3.
- [2] 陆安舫,李顺生,薛幸福. 国外火药性能手册[M]. 北京:兵器工业出版社,1991.
- [3] 张柏生. 火炮与火箭装药内弹道原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1997.
- [4] 程守洙,江之永. 普通物理学(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社,1982.

### Influence of Gun Propellant on the Penetrability of Powder Loads

TIAN Xin

(Yibin North Industries Chuan An Chemical Corporation, Yibin 644219, China)

**Abstract:** Based on the penetrability of powder loads, the relative parameters affecting characteristics of gun propellant for powder loads were studied. The results show that the penetrability of powder loads can be improved when suitably reducing bulk density and grain size of gun propellant, increasing nitrogen content of NC and choosing oblate spheroid explosive respectively under the constant test conditions.

**Key words:** applied chemistry; powder load; penetrability; explosive shape; grain size; burning rate

(上接 194 页)

- [8] 孙承纬,卫玉章,周之奎. 应用爆炸物理[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [9] 经福谦. 实验物态方程导引(第二版)[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [10] <http://www.soarise.com/>, 外国公司PFA技术指标[OL].
- [11] Laurence E F, Souers P C. BKWC: An empirical BKW parametrization-based on cylinder test data[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1996, 21: 215-223.
- [12] Dobtatz B M, Crawford P C. Explosive handbook properties of chemical explosives and explosive stimulants[M]. UCRL-52997-chg.2.

### Manufacture of Low Equivalent Liquid Explosive Lens without Lead

LI Sai-nan, ZHOU Xian-ming, YUAN Suai, SONG Ping, WANG Wei, YEI Su-hua

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** By using Teflon as the rectifying plate, a kind of low equivalent liquid explosive lens with nitromethane was designed. The results of dynamic tests and numerical simulations show that except the inert rectifying plates have effect on the retardation of the explosive shock wave, the difference of velocity of detonation for booster pellet and nitromethane, and strong detonation are the main factors to influence the lens wave. The experimental results indicate that the strong detonation can be reduced by decreasing the thickness of booster pellet.

**Key words:** explosion mechanics; detonation wave; liquid explosive len; strong detonation