

文章编号: 1006-9941(2014)02-0210-05

# HMX 基 PBX 炸药的等熵压缩实验研究

蔡进涛, 赵锋, 王桂吉, 吴刚, 王为, 罗斌强, 赵剑衡

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 利用磁驱动准等熵压缩加载实验技术,研究了某奥克托今(HMX)基高聚物粘结炸药(PBX)未反应固体炸药峰值压力 8 GPa 内的动力学响应特点。实验在保持多样品加载压力历史一致的前提下,同时加载多个不同厚度实验样品,用激光干涉测速方法获得了样品的速度响应历史曲线,对实验数据进行了 Lagrange 分析处理,获得了该 PBX 炸药样品 8 GPa 内的准等熵压缩线,多发实验获得的准等熵压缩线在该压力范围内一致,基于该状态方程的拟合参数对实验结果进行了流体动力学计算,计算结果与实验结果吻合较好。

**关键词:** 爆炸力学; 高聚物粘结炸药(PBX); 动力学响应; 磁驱动; 准等熵压缩

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.02.017

## 1 引言

固体炸药作为一种亚稳态含能材料,受到外界刺激如高温、冲击达到一定阈值会发生化学反应。然而,未反应固体炸药的高压动力学行为对研究炸药的起爆、反应机制具有重要意义。冲击加载作为一门成熟的加载技术,在研究材料的高压物态方程和本构方面应用广泛。但是,在研究未反应炸药的动态力学行为方面,较低的冲击压力就会使炸药发生较明显的化学反应。准等熵压缩实验技术由于其加载压力平滑无冲击,加载过程中熵增小、温升低等优点,可大大提高实验研究中未反应固体炸药的加载压力,获得几个吉帕甚至更高压力范围内未反应炸药的动力学实验数据,为炸药的反应机理研究提供重要的实验参数。

目前,美国已经在用磁驱动准等熵压缩技术研究未反应炸药的高压动力学行为方面取得了一些进展。Reisman、Baer 等<sup>[1-5]</sup>先后使用 Z 机器<sup>[6]</sup>,对 LX-04、LX-17、PBX-9501 等高聚物粘结炸药(PBX)和奥克托今(HMX)单晶、TATB 单质炸药进行了准等熵压缩加载,获得了部分炸药的实验数据和高压物态方程参数,

他们对 LX-17 的实验结果模拟计算表明,炸药未发生明显化学反应。目前,准等熵压缩下,HMX 为基的高聚物粘结炸药最高加载压力已达到 32 GPa<sup>[7]</sup>、HMX 单晶的加载压力达到 50 GPa<sup>[8]</sup>,实验结果均显示未发生明显化学反应。

国内,准等熵压缩加载技术刚刚起步,孙承纬团队于 2005 年建立国内第一台磁驱动准等熵压缩实验装置 CQ-1.5<sup>[9]</sup>,并对金属材料 Al、Cu 在 40 GPa 下的准等熵压缩实验进行了报道<sup>[10]</sup>,于 2009 年实现了 5 GPa 内的未反应固体炸药 JO-9159 的准等熵压缩<sup>[11-12]</sup>,获得了该炸药的准等熵压缩线。

基于 CQ-1.5 实验装置,本课题组开展了 8 GPa 内某 HMX 基未反应 PBX 炸药的准等熵压缩加载实验研究,单次实验可实现同时加载四个不同厚度的实验样品,由于加载条件一致,单发实验即可获得丰富的实验结果。利用 Lagrange 方法对实验数据处理,获得了该 PBX 炸药的实验准等熵压缩线参数,并通过流体动力学模拟计算对实验结果进行了验证。

## 2 准等熵压缩实验

### 2.1 实验原理与实验条件

磁驱动准等熵压缩加载的原理如图 1 所示:脉冲功率装置短路放电,产生脉冲大电流流经两平行对称的电极板构成的回路。由于趋附效应,产生的洛伦兹力作用于对称的电极板上,由里向外传播,作用于置于电极上的样品。洛伦兹力满足如下关系:

收稿日期: 2013-03-20; 修回日期: 2013-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(11002130, 11176002, 11272295), 中物院重点基金(2011A0101001)

作者简介: 蔡进涛(1984-),男,在读博士,助理研究员,主要从事电磁加载技术以及含能材料动力学特性方面的研究。

e-mail: goldennoon@163.com

$$p(t) = k \frac{\mu_0}{2} \left( \frac{I(t)}{w} \right)^2 \quad (1)$$

式中,  $p(t)$  为磁压力, Pa;  $I(t)$  为放电电流, A;  $w$  为电极板宽度, m;  $\mu_0$  是真空磁导率, 为  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $k$  是与装置及负载区相关的修正系数。

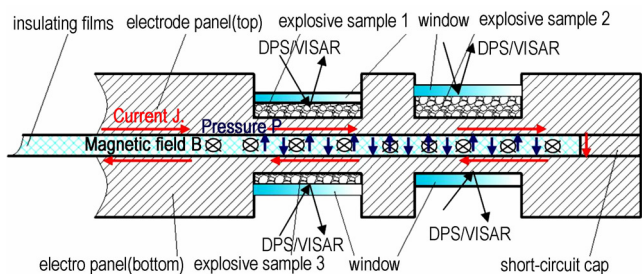


图1 实验原理示意图

Fig.1 Principle diagram of magnetically driven quasi-isentropic compression

实验在小型脉冲功率装置 CQ-1.5 上进行<sup>[9]</sup>。CQ-1.5 装置能提供最高峰值接近 1.5 MA 的脉冲电流, 放电电流上升沿 500 ~ 800 ns, 可提供峰值压力 50GPa 的平缓上升的加载压力脉冲, 满足实验需求。实验采用单晶 LiF 作为窗口材料, 利用多普勒探针 (DPS) 测量实验过程中样品/窗口界面处速度历程曲线。同时, 利用 B-dot 探针监测实验过程中的 CQ-1.5 装置放电电流曲线。

实验样品为以 HMX 为基的 PBX, 组分为 HMX 颗粒、粘结剂、细颗粒 TATB、钝感剂, 其中 HMX 占总体积的 85.58%。实验过程中, 样品材料中不应形成冲击波, 以保证加载过程的准等熵要求。

压力较低时, 扰动传播的 Lagrange 声速  $c_L$  可表示为<sup>[12]</sup>:

$$c_L = c_0 + 2\lambda u_p \quad (2)$$

式中,  $c_0$  和  $\lambda$  均为冲击波关系参数,  $u_p$  为粒子速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由于炸药材料的  $c_0$  较小,  $\lambda$  较大, 斜波加载下更易形成冲击波, 样品的尺寸参数需根据放电电流波形进行确定<sup>[13]</sup>。基于以上原则, 实验样品区参数设计见表 1。

### 2.2 实验结果

根据表 1 实验参数, 对 4 发该 HMX 基 PBX 炸药样品进行准等熵压缩加载, 其 CQ-1.5 装置的放电电流波形见图 2 所示, 由于 CQ-1.5 装置采用爆炸开关, 放电时间存在漂移, 每发实验信号的记录时间零点不一致, 为方便比较, 电流放电初始时刻移动到了相同的时间点。由图 2 可见, 实验 1 与 2 的放电电流峰值约 1.2 MA, 放电电流曲线基本重合, 实验 3 与 4 的放电

电流峰值约 1.0 MA 电流波形基本重合。可见, 当负载电极参数相同且充电电压相同时, 装置放电电流波形重合, 装置重复性好。

表 1 实验样品区参数

Table 1 Experimental parameters

shot No.	voltage /kV	panel width /mm	sample thickness /mm	density /g · cm <sup>-3</sup>
1	60	8	0.799	1.830
		8	0.991	1.828
2	60	8	0.980	1.829
		8	1.212	1.825
3	55	7	0.788	1.831
		7	1.000	1.830
		7	1.221	1.827
		7	0.663	1.831
4	55	7	1.115	1.831
		7	0.901	1.831
		7	1.227	1.831

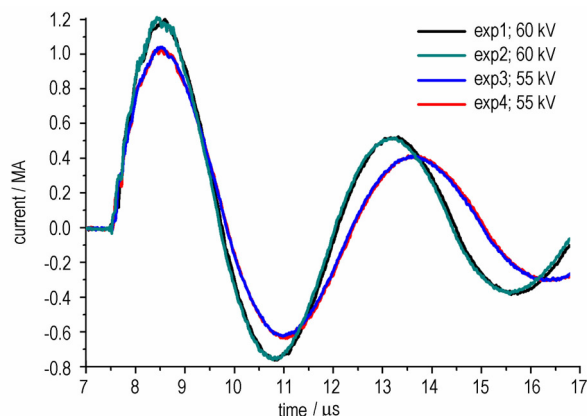


图2 装置放电电流波形

Fig.2 Discharging current waveform of CQ-1.5

实验 1 和实验 2 中, 上下电极上各安装了一个实验样品, 即一次实验同时加载两个样品。实验获得的样品/窗口界面处粒子速度曲线见图 3 中黑色点线曲线, 两发实验均未形成冲击波。

实验 3 中, 两个驱动电极上共安装了三个样品, 第四个装样品区域直接装 LiF 窗口, 实验 4 中, 两个驱动电极上各安装了两个样品。

利用 DPS 对实验过程中样品/窗口界面处粒子速度历史测量, 获得了两组实验的样品/窗口处的速度响应曲线, 图 4 为 DPS 获得的速度干涉条纹。实验获得的干涉条纹清晰, 由于样品厚度不同, 压缩波传播到达样品/窗口界面所需的时间也不相同, 导致不同示波器

通道获得的干涉条纹起跳时间上的差异,起跳时间的先后次序也可用来验证样品初始声速的大小。由于有一个样品区中未安装样品,直接安装了 LiF 窗口,使图 4a 中黄色条纹起跳时间比其他三条干涉条纹早很多。

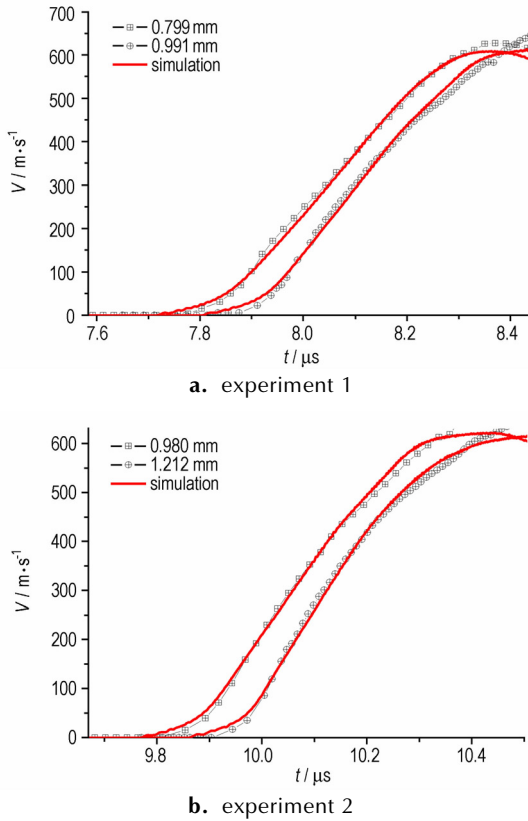


图 3 双样品实验数据与模拟计算结果  
Fig.3 Experimental and calculated particle velocities for two samples

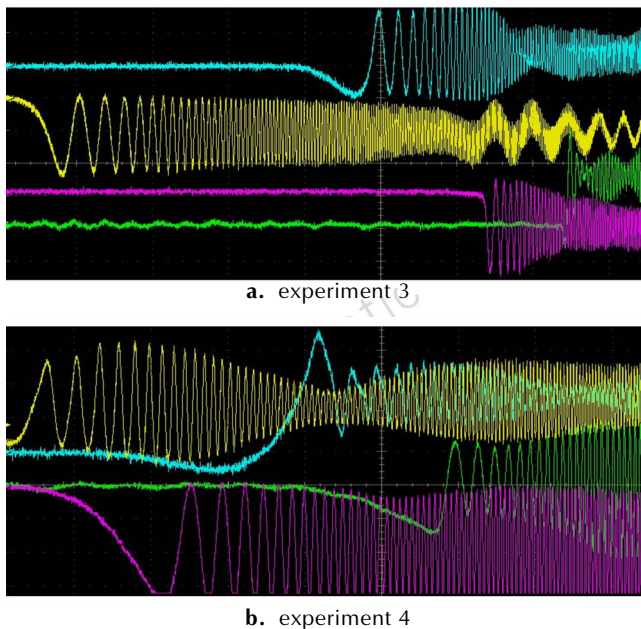


图 4 实验获得的 DPS 干涉条纹  
Fig.4 Interferometric fringes in the experiments

对干涉条纹处理后获得的速度响应数据见图 5 中黑色点线曲线,两发实验中不同厚度样品中也未形成冲击波,且速度曲线随厚度的增加,陡度也相对增加。

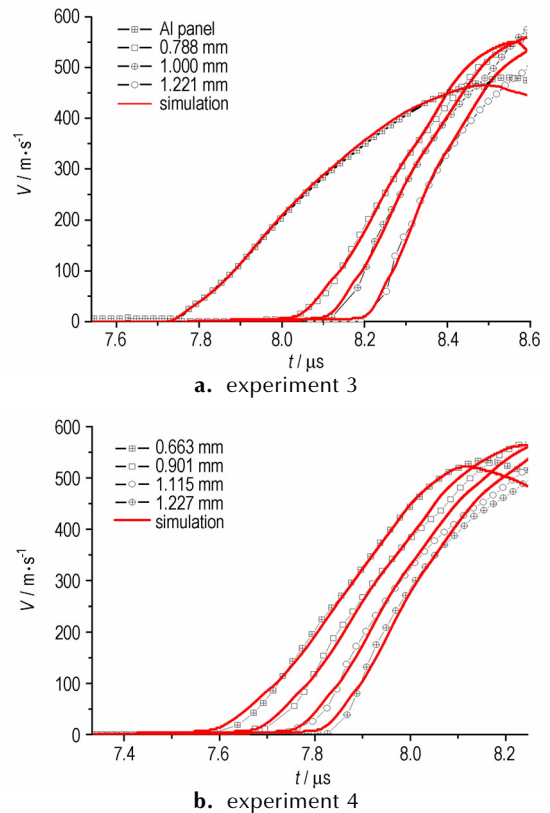


图 5 四样品实验数据与模拟计算结果  
Fig.5 Experimental and calculated particle velocities for four samples

### 2.3 实验加载压力历史确定

负载区加载压力历史是模拟计算分析实验结果的重要数据,但由于测试水平限制,不能由实验直接获得。本研究通过标定试验,对条形电极板的洛伦兹力进行修正,获得加载压力历史,为流体动力学模拟计算提供压力边界条件。

由洛伦兹力公式(1)知,当修正系数  $k$  确定,可利用公式(1)计算放电过程中负载区的洛伦兹力。对于同一种负载区构型,通过测量已知材料的速度响应曲线和实验的电流曲线,反积分<sup>[14]</sup>计算实验加载压力历史,与公式(1)的计算结果进行校核,即可定出修正系数  $k$ 。

对于实验 1 和实验 2,由于负载设计相同,且装置放电电流波形基本重合,进行了该负载区构型下的电流压力标定试验。根据 Al 和 LiF 的已知材料参数,通过反积分计算精确获得了定标实验的加载压力历史,

如图 6 所示。根据公式(1)和图 6 所示装置放电电流曲线,校核计算获得的压力历史,给出了这种情况下的洛伦兹力修正系数  $k=0.65$ 。

将实验 1 和实验 2 电流曲线(图 2)代入公式(1),修正系数取 0.65,获得了双样品实验的加载压力历史曲线,如图 7 所示。

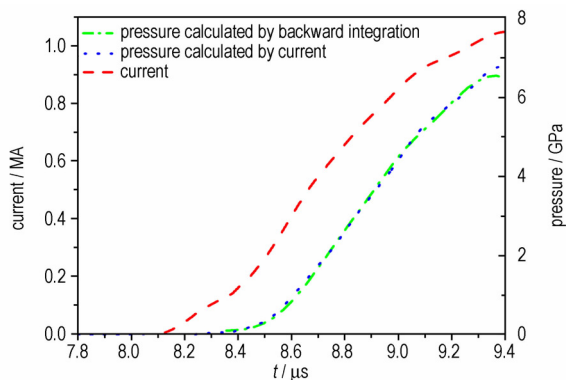


图 6 双样品实验负载的电流/压力标定曲线图  
Fig. 6 Current-loading pressure demarcating curves for two samples

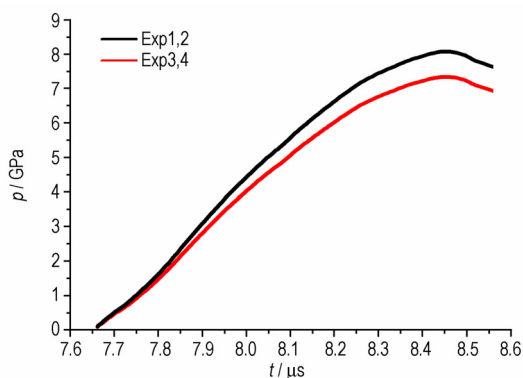


图 7 双样品实验加载压力历史曲线  
Fig. 7 Loading pressure curves for two samples

同样,由于实验 3 和实验 4 的负载设计相同,利用上述方法给出了实验 3 和实验 4 的洛伦兹力修正系数  $k=0.55$ 。将两发实验基本相同的电流曲线(图 2 中曲线 3、4)代入公式(1),获得了实验 3 和 4 的的加载压力历史,见图 7 中黑色曲线。

### 3 数据处理及模拟计算

#### 3.1 实验准等熵压缩线

Lagrange 坐标下,实验样品的  $p-v$  曲线可由如下公式<sup>[2]</sup>获得:

$$c_L(u) = \frac{x_1 - x_2}{t_1(u) - t_2(u)} \quad (3)$$

$$dp = \rho_0 c_L(u) du \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s = c_E^2 = \frac{\rho_0^2}{\rho^2} (c_L(\rho))^2 \quad (5)$$

式中,  $c_L$  为 Lagrange 声速;  $x_1, x_2$  分别为样品 1 和 2 的厚度;  $u$  为样品粒子速度;  $t(u)$  为在样品后表面速度为  $u$  时所需的时间;  $p$  为加载压力;  $\rho_0$  和  $\rho$  分别为样品初始密度和压缩过程中的密度。

利用上述方法对图 3 和图 5 中获得的样品/窗口界面速度曲线进行计算处理,分别获得了该 PBX 炸药的实验准等熵压缩线(图 8),每发实验的  $p-v$  曲线基本重合,相同比容下的压力差异小于 2%,对上述  $p-v$  曲线以公式(7)所示的 Hugoniot 形式进行拟合,得到曲线参数,  $c_0 = 2.546 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\lambda = 2.062$ 。

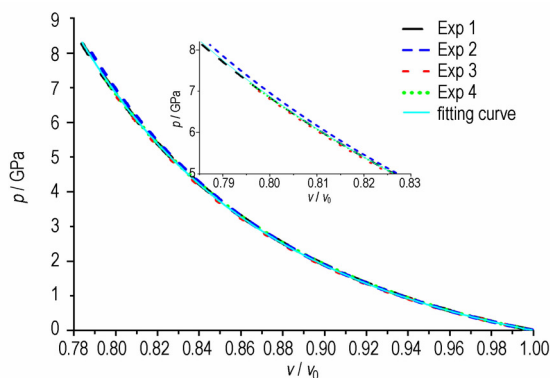


图 8 实验准等熵压缩线及拟合曲线  
Fig. 8 Experimental compression isentropes and the fitting curves

#### 3.2 模拟计算分析

利用上述计算获得的加载压力历史,对样品/界面处的速度历史进行了模拟计算,见图 3 和图 5。模拟计算采用 Gruneisen 状态方程:

$$p - p_H = \frac{\gamma}{V} (E - E_H) \quad (6)$$

其中 Hugoniot 状态为参考状态:

$$p_H = p_0 + \frac{c_0^2 (V_0 - V)}{[V_0 - \lambda (V_0 - V)]^2} \quad (7)$$

$$E_H = E_0 + \frac{1}{2} (p_H + p_0) (V_0 - V) \quad (8)$$

$\gamma$  是 Gruneisen 系数,  $c_0, \lambda$  为 Hugoniot 系数,其中,参数  $c_0 = 2.546 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\lambda = 2.062$ ,为上述实验获得的准等熵压缩线的拟合结果。模拟计算过程未考虑炸药的材料强度和化学反应。

由图 5a 知,对标准材料铝电极/窗口界面处速度曲线模拟计算,其结果与实验结果吻合较好,可见用上

述方法获得的加载压力历史是准确可信的,可用于模拟计算的边界条件。对炸药样品的模拟计算结果与实验结果总体重合较好,表明上述实验获得的该 HMX 为基的 PBX 炸药的准等熵压缩线参数在 8 GPa 压力内适用。

## 4 结 论

基于 CQ-1.5 实验装置,对某 HMX 为基的未反应的 PBX 炸药进行了 8 GPa 内的准等熵压缩加载,获得了双样品和四样品同时加载的样品/窗口界面速度响应曲线,为未反应炸药的本构研究提供了实验数据。

利用 Lagrange 方法对实验数据处理,获得了该 PBX 炸药的实验准等熵压缩线参数,并通过流体动力学模拟计算对实验结果进行了验证,模拟结果和实验结果较好重合,表明该准等熵压缩线在 8 GPa 压力内是适用的。

### 参考文献:

- [1] Reisman D B, Forbes J W, Tarver C M, et al. Isentropic compression of LX-04 on the Z accelerator [C] // Atlanta, Georgia: AIP Conference Proceedings. 2002, 620: 849.
- [2] Reisman D B, Forbes J W, Tarver C M, et al. Isentropic Compression of high Explosives with the Z Accelerator [C] // Proceedings of the 12th International Detonation Symposium, San Diego, CA. 2002: 343-348.
- [3] Hare D E, Forbes J W, Reisman D B, et al. Isentropic compression loading of octahydro-1, 3, 5, 7-tetranitro-1, 3, 5, 7-tetrazocine (HMX) and the pressure-induced phase transition at 27 GPa [J], *Applied Physics Letters*, 2004, 85: 949-951.
- [4] Hare D E, Reisman D B, Garcia F, et al. The isentrope of unreacted LX-04 to 170 kbar [C] // Portland, Oregon: AIP Conference Proceedings. 2004, 706: 145.
- [5] Hare D E, Reisman D B, Dick J J, et al. Isentropic compression loading of HMX and the pressure-induced phase transition at 27 GPa [R], UCRL-JRNL-202601, 2004.
- [6] Hall C A, Asay J R, Knudson M D, et al. Experimental configuration for isentropic compression of solids using pulsed magnetic loading [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72: 3587-3595.
- [7] Baer M R, Root S, Dattelbaum D, et al. Shockless compression studies of HMX-based explosives [C] // AIP Conference Proceedings. 2009, 1195: 699.
- [8] Hooks D E, Hayes D B, Hare D E, et al. Isentropic compression of cyclotetramethylene tetranitramine (HMX) single crystals to 50 GPa [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(12): 124901-124901-6.
- [9] Wang G, Sun C, Tan F, et al. The compact capacitor bank CQ-1.5 employed in magnetically driven isentropic compression and high velocity flyer plate experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(5): 053904-053904-6.
- [10] 王桂吉, 谭福利, 孙承伟, 等. 40GPa 压力范围内铜和铝的准等熵压缩线 [J]. *高压物理学报*, 2009(4): 266-270.  
WANG Gui-ji, TAN Fu-li, SUN Cheng-wei, et al. Compression isentropes of copper and aluminum under 40 GPa [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009(4): 266-270.
- [11] 蔡进涛, 王桂吉, 赵剑衡. 固体炸药的磁驱动准等熵压缩实验研究 [J]. *高压物理学报*, 2010(6): 455-460.  
CAI Jin-tao, WANG Gui-ji, ZHAO Jian-heng, et al. Magnetically driven quasi-isentropic compression experiments of solid explosives [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2010(6): 455-460.
- [12] Hare D E. How to plan and analyze an isentropic compression experiment (ICE) [R]. UCRL-TR-206486, 2004.
- [13] 蔡进涛. 高能炸药的磁驱动准等熵压缩特性研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2010.  
CAI Jin-tao. Researches on dynamic behaviours of high explosives under magnetically driven quasi-isentropic compression [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2010.
- [14] 王刚华, 孙承伟, 王桂吉, 等. 带窗口准等熵压缩实验的流场反演技术 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(1): 101-104.  
WANG Gang-hua, SUN Cheng-wei, WANG Gui-ji, et al. Backward analysis for isentropic compression experiment with window backed on the sample [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(1): 101-104.

## Quasi-isentropic Compression of HMX Based PBX Explosive

CAI Jin-tao, ZHAO Feng, WANG Gui-ji, WU Gang, WANG Wei, ZHAO Jian-heng

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

**Abstract:** A quasi-isentropic compression loading technique (ICE) driven by electro-magnetical was applied to investigate the dynamic behaviors of an un-reacted HMX based polymer-bonded explosive (PBX). Multiple samples with different thicknesses were loaded up to 8 GPa. Particle velocities of the interface between sample and LiF windows were measured by laser interference method, and by Lagrange data processing, the experimental isentropes within 8 GPa of this explosive were obtained. Based on the fitting parameters of the isentropes, the isentropic compression procedure was numerically simulated by one dimensional hydrodynamics code, and the calculated particle velocities are consistent with the experimental results.

**Key words:** mechanics of explosion; polymer bonded explosive (PBX); dynamic response; magnetic force driving; quasi-isentropic compression

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.02.017