文章编号:1000-5773(2010)06-0455-06

固体炸药的磁驱动准等熵压缩实验研究*

蔡进涛,王桂吉,赵剑衡,莫建军,翁继东,吴 刚,赵 锋

(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川绵阳 621900)

摘要:较宽压力范围内未反应炸药的本构关系和状态方程对于深入和精确认识压缩波作用下炸药组分间相互作用的力学过程和起爆热点的形成机制具有重要意义。较之冲击压缩,磁驱动准等熵压缩加载(无冲击压缩)是获取较宽压力范围内未反应炸药的动态压缩力学特性更有效的手段。基于大电流产生的电磁力作用原理,在国内率先实现了炸药的磁驱动无冲击压缩实验技术。通过对负载电极、炸药样品参数的优化设计和安装工艺的控制,实现了 5 GPa 载荷内 JO-9159 炸药的磁驱动准等熵压缩加载。基于激光位移干涉测量技术和 Lagrange 数据处理方法,获得了 JO-9159 炸药的速度响应历史和准等熵压缩线。所得结果与文献数据进行了比较,结果表明,在实验压力范围内,JO-9159 炸药的等熵压缩线与 PBX9501 炸药的等熵压缩线一致。

关键词:固体炸药;准等熵压缩;电磁力驱动;等熵压缩线

中图分类号:O521.3 **文献标识码**:A

1 引 言

传统的冲击压缩加载使炸药在很短时间、很低压力范围就会发生强烈的化学反应,使得在验证和校核爆轰理论模型和本构关系时缺乏较宽压力范围内未反应炸药的动态压缩力学特性的实验数据的支持。而准等熵压缩加载可改善这种状况,其加载压力平滑上升,加载过程时间达数百纳秒甚至微秒,样品熵增和温升较低,对热点形成有抑制作用[1],拓宽了炸药未发生明显反应的压力上限,可为爆轰理论的研究提供更为精确的实验数据。

未反应高能炸药(含能材料)的准等熵压缩特性实验研究几乎与磁驱动准等熵压缩技术研究同步发展。1999 年,美国 Sandia 实验室的研究人员在 Z 装置上首次实现了磁驱动准等熵压缩一维平面加载技术[2],该装置储能可达 11.6 MJ,电流峰值 20 MA、上升时间 100～300 ns 的电流脉冲,能在样品中产生压力幅值达数百吉帕的平滑上升的压力波。2000 年开始,他们与 Livermore 实验室、Los Alamos 实验室的研究人员联合在 Z 机器上开展了大量的 PBX 炸药及其组分的准等熵压缩实验(ICE)研究,不断改进实验技术,目前,已能将加载压力幅值延伸至接近 20 GPa 而 PBX 炸药没有发生明显反应,单晶 HMX 的加载压力幅值达到 50 GPa 而没有发生明显的化学反应[3-5],这是未反应炸药的动态力学性能研究以往所不能达到的压力范围。

本研究基于大电流产生的电磁力作用原理,在国内率先实现了炸药的磁驱动准等熵压缩实验技术,通过对负载电极、炸药样品参数的优化设计和安装工艺的控制,实现了 5 GPa 载荷内 JO-9159 炸药的准

* **收稿日期**:2009-12-23;**修回日期**:2010-01-25

基金项目:国家自然科学基金(10772167,10927201,11002130);中国工程物理研究院双百人才基金(2008R0105)

作者简介:蔡进涛(1984—),男,硕士研究生,主要从事电磁加载技术以及含能材料的动力学特性方面的研究. E-mail:goldennoon@163.com

通讯作者:赵 锋(1961—),男,研究员,主要从事含能材料、爆炸力学方面的研究. E-mail:ifpzf@163.com

等熵压缩加载，基于 DPS(Doppler Probe System)激光位移干涉测量技术[6]，依据 Lagrange 数据处理方法，获得了 5 GPa 载荷内 JO-9159 炸药的准等熵压缩线。

2 磁驱动准等熵压缩加载原理与实验设计

2.1 磁驱动准等熵压缩原理

磁驱动准等熵压缩加载原理如图 1 所示，当脉冲功率装置短路放电所产生的强电流流经两个平行导电平面所构成的回路时，两相向流动的电流与产生的磁场相互作用将产生洛仑兹力即磁压力，作用于两平行电极的内表面，由内向外传播。设流经电极的电流线密度为 $J(t)$，则产生的压力波 $p(t)$的关系由(1)式表征

$$\boldsymbol{p}=\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B},p(t)=(\mu_0/2)J(t)^2=(\mu_0/2)[I(t)/D]^2 \tag{1}$$

式中：$p(t)$为磁压力，单位 GPa；$I(t)$为流经电极板的电流，单位 MA；$J(t)$为驱动电极板宽度方向的电流线密度，单位 MA/cm；D 为电极板宽度，单位 cm；μ_0 是真空磁导率，为 $4\pi\times10^{-7}$ H/m。

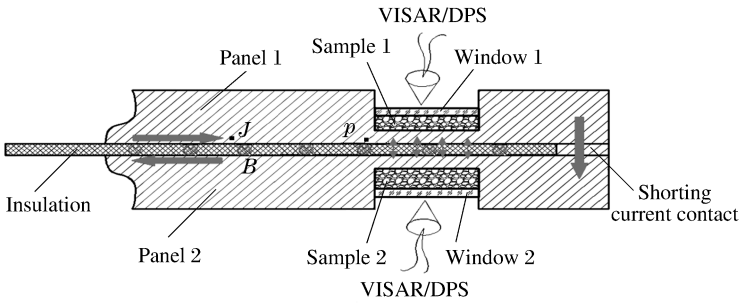


图 1 磁驱动准等熵压缩原理图

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

由于电流流经两电极板的条件相同，形成的磁压历程也相同，因此可沿上下两板放置多个不同厚度的样品，以实现多样品同条件加载。通过激光速度干涉测速技术，获取不同厚度样品与窗口界面处粒子速度历程；利用 Lagrange 数据分析处理[3]或反积分处理方法[7]，得到材料在准等熵压缩下的压力-比容关系。

2.2 样品参数设计

实验样品为 JO-9159 炸药，它是一种以 HMX 为基的高能炸药。为实现该样品的准等熵压缩，保证实验为一维应变无冲击加载，需针对样品对负载区进行相关参数设计。

在 p-t 压力载荷下，考虑简单波情形，样品压缩区的 Lagrange 声速随压力的增加而增加，压缩波特征线在 x_s 处汇聚，形成冲击波，如图 2 所示。为避免形成冲击波，样品厚度应小于冲击波产生位置 x_s。样品厚度可由公式(2)初估[8]

$$\delta\leqslant c(\rho_0)c(\rho_{\max})T_{1/4}/[c(\rho_{\max})-c(\rho_0)] \tag{2}$$

式中：$T_{1/4}$为加载时间。

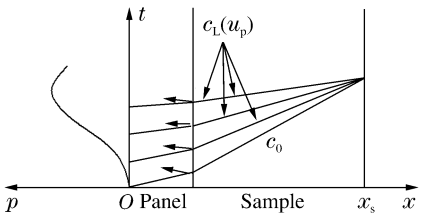


图 2 压缩波特征线传播示意图

Fig. 2 The propagation schematic diagram of the compression wave characteristics

然而在实际实验中，压缩波不会理想地汇聚于同一位置，这取决于加载压力波形的特征。下面以实验中获得的放电电流波形为条件，对冲击波产生位置进行进一步的分析。

驱动电极与样品界面的压力关系由(3)式表示，其中驱动电极中加载压力 p_{panel}由(1)式计算得到。在较低压力下，近似认为等熵压缩线与冲击 Hugoniot 线是重合的，以冲击波关系近似替代斜波加载下

压力 p 与粒子速度 u_p 间的关系((4)式、(5)式),可获得样品的粒子速度 u_p。由(6)式近似得到 Lagrange 声速 c_L[1]。在样品中,简单波以 c_L 的速度向前传播,直至形成冲击。

$$p = p_{panel}(2\rho_{0,sample}c_{0,sample})/(\rho_{0,sample}c_{0,sample} + \rho_{0,panel}c_{0,panel}) \tag{3}$$

$$u_s = c_0 + \lambda u_p \tag{4}$$

$$p = \rho_0 u_s u_p \tag{5}$$

$$c_L = c_0 + 2\lambda u_p \tag{6}$$

式中:p_{panel}为驱动电极中的磁压力;p 为样品与驱动电极界面处样品中的压力;u_s 为冲击波速;u_p 为粒子速度;c_L 为 Lagrange 声速;c_0、λ 为冲击波关系参数。

图 3 为实验装置放电电流波形,图 3(b)为图 3(a)中前 1/4 周期的放大图。利用该波形条件和(1)式、(3)式～(6)式,忽略驱动电极中应力波间的相互作用,得到了 Lagrange 坐标下简单波在半无限厚样品中传播的特征线簇关系,如图 4 所示,图 4(b)为图 4(a)中冲击波产生位置附近区域的放大图,从图中可见在 1.4 mm 位置附近开始有冲击波产生。

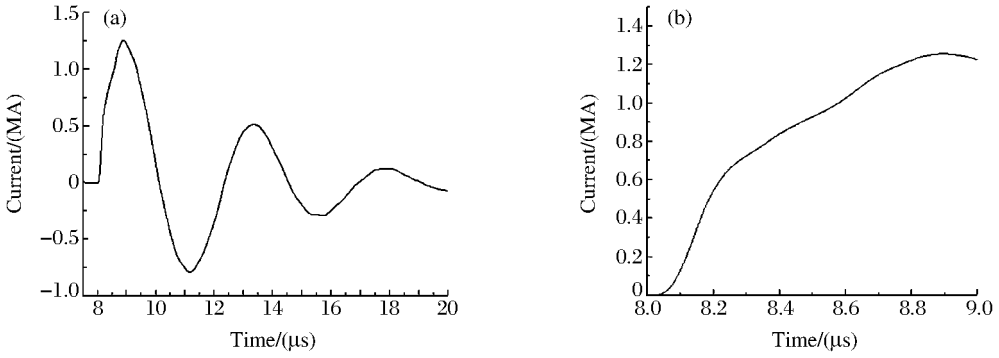


图 3　实验电流波形

Fig. 3　Experimental discharging current waveform

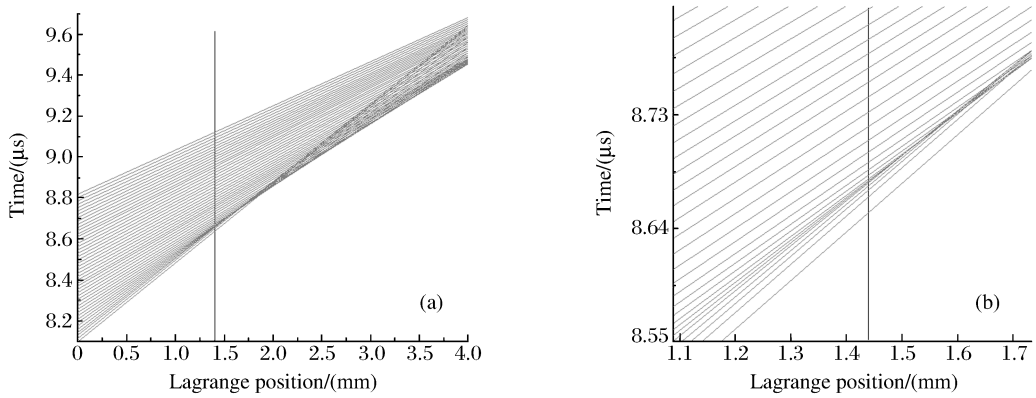


图 4　Lagrange 坐标下样品中简单波特征线簇关系

Fig. 4　Simple wave characteristics in Lagrange position

实验为一维应变加载,测量区应不受边侧稀疏波的影响。样品直径大小应满足[8]

$$d > (1 \sim 3) + 2c\rho_0 T_{1/4} \tag{7}$$

式中:$c(\rho)$为样品的 Lagrange 声速,δ 为样品厚度,$T_{1/4}$为加载时间。

同时,为获得足够的加载压力,驱动电极宽度由(1)式约束,即

$$J_{max} = \sqrt{2p_{max}/\mu_0}, \quad D < I_0/J_{max} \tag{8}$$

式中:p_{max}为峰值压力;J_{max}为对应的峰值电流密度;I_0 为装置的额定电流。样品直径 d 应小于驱动电极宽度 。

为保证无冲击波前沿，安装过程中在负载区使用了环氧胶粘结剂，使样品与驱动电极、样品与测试窗口之间无间隙。为控制环氧胶的厚度，选择的环氧胶粘度低，流动性好，并设计了一套工装用于安装样品，可使凝固后胶水厚度控制在 2 μm 左右。

3 实验结果及分析

3.1 实验结果

在磁驱动实验装置 CQ-1.5 上[9]，针对 JO-9159 炸药进行了磁驱动准等熵压缩实验，表 1 为相关实验参数。图 5 为通过实验获取的不同厚度 JO-9159 炸药与窗口界面处的粒子速度历史曲线。由图 5 可以看出，在 1.5 mm 样品中出现了冲击波平台，而图 5(b)、图 5(c)中均为平缓上升的压缩波，与图 4 中的理论预估结果是吻合的。

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

Shot No.	Panel thickness /(mm)	LiF window /(mm×mm)	Thickness /(mm)	Sample diameter /(mm)	Density /(g/cm³)
08151	0.374	∅10×3	1.504	10	1.822
	0.366		0.798	10	1.833
11202	0.353	∅10×3	0.789	10	1.841
	0.353		0.599	10	1.850
11203	0.369	∅10×3	0.609	10	1.849
	0.374		0.904	10	1.845

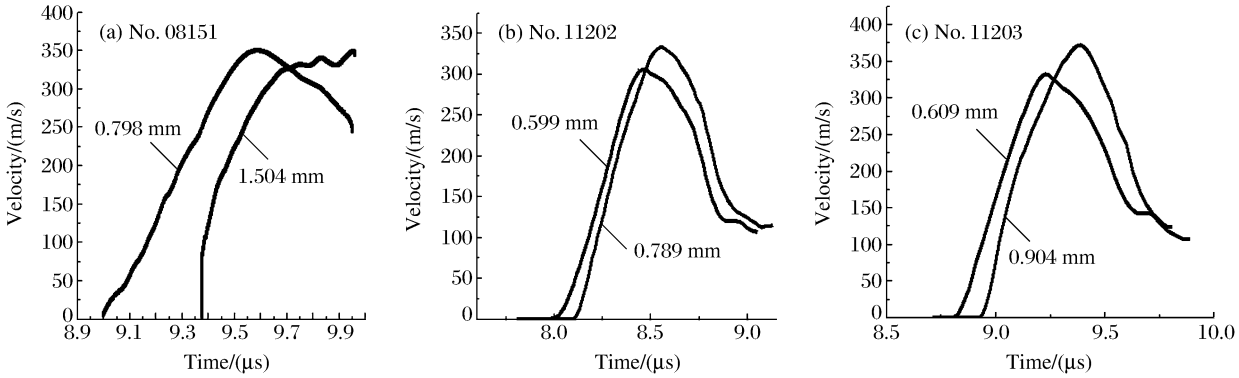


图 5 不同厚度 JO-9159 炸药与窗口界面处的粒子速度曲线

Fig. 5 Particle velocities of the interface between JO-9159 explosives and LiF windows with different thicknesses

3.2 p-v 等熵线计算

在 Lagrange 坐标下，实验材料的 p-v 线可由如下公式[3]获得

$$c_{\mathrm{L}}(u)=(x_1-x_2)/[t_1(u)-t_2(u)] \tag{9}$$

$$\mathrm{d}p=\rho_0 c_{\mathrm{L}}(u)\mathrm{d}u \tag{10}$$

$$(\partial p/\partial\rho)_S=c_{\mathrm{L}}^2(p)\rho_0^2/\rho^2 \tag{11}$$

式中：c_{L} 为 Lagrange 声速；x_1、x_2 分别为样品 1 和样品 2 的厚度；u 为样品的粒子速度；$t(u)$为在样品后表面速度为 u 时所需的时间；p 为加载压力；ρ_0 和 ρ($\rho=1/v$，v 为比容)分别为样品的初始密度和压缩过程中的密度。

利用图 5(b)、图 5(c)所示的样品与窗口界面处的粒子速度曲线和上述计算方法,得到了 JO-9159 炸药在 5 GPa 载荷内的实验准等熵压缩线,见图 6,图 6 中也给出了本研究实验结果与文献[10-11]中实验数据的比较情况,其中实线为文献中未反应炸药 PBX-9501 炸药的准等熵压缩数据,黑方格点为通过持续脉冲起爆楔实验获得的 JO-9159 炸药的冲击 Hugoniot 数据。表 2 给出了本实验中 JO-9159 炸药与文献中 PBX9501 炸药的组分以及密度。从表 2 中可以看出,JO-9159 与 PBX9501 炸药的主要成分均为 HMX,其质量分数(w_{HMX})均为 95%,密度接近。

表 2　2 种炸药成分特性

Table 2　Constituents of two explosives

Explosives	w_{HMX}/(%)	$w_{polymer\ binder}$/(%)	$w_{desensitizer}$/(%)	$w_{nitroplasticizer}$/(%)	Density/(g/cm^3)
JO-9159	95	4.3	0.7		1.847
PBX9501	95	2.5		2.5	1.837

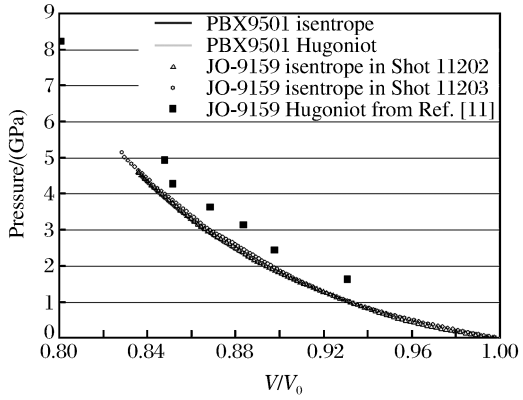


图 6　JO-9159 等熵压缩线与文献[10-11]结果的比较

Fig. 6　The comparison of the experimental compression isentropes of JO-9159 explosive with Ref. [10-11]

图 6 表明,JO-9159 炸药的实验等熵压缩线与 PBX9501 炸药的等熵压缩线一致;在实验压力范围内,PBX9501 炸药的等熵压缩线与 Hugoniot 线基本重合,而 JO-9159 炸药的准等熵压缩线与文献[11]中由持续脉冲起爆楔实验获得的 JO-9159 炸药(密度 1.862 g/cm^3)的 Hugoniot 数据有较大差别,可能是由于在高压下持续脉冲起爆楔实验中炸药样品已发生明显的化学反应,另外,密度的较大差异也可能导致不同炸药实验数据的差别。

4　结　论

通过负载电极、炸药样品参数的优化设计和安装工艺的控制,实现了未反应炸药 JO-9159 载荷范围 5 GPa 内的准等熵压缩加载;利用 DPS 激光干涉测试系统,获取了炸药 JO-9159 在 5 GPa 载荷内准等熵压缩加载下的速度响应历史;使用 Lagrange 数据分析处理技术获取了 JO-9159 的准等熵压缩线,并与文献中 PBX9501 炸药的准等熵压缩实验数据进行了比较。结果表明,实验压力范围内,JO-9159 的实验等熵压缩线与 PBX9501 的等熵压缩线一致。

References:

[1]　Hare D E. How to Plan and Analyze an Isentropic Compression Experiment (ICE) [R]. UCRL-TR-206486,2004.

[2] Hall C A, Asay J R, Knudson M D, et al. Experimental Configuration for Isentropic Compression of Solids Using Pulsed Magnetic Loading [J]. Rev Sci Instrum, 2001, 72: 3587.

[3] Reisman D B, Forbes J W, Tarver C M, et al. Isentropic Compression of LX-04 on the Z Accelerator [A]//Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. New York: AIP Press, 2002: 849-852.

[4] Hare D E, Reisman D B, Garcia F, et al, The Isentrope of Unreacted LX-04 to 170 kbar [A]//Furnish M D, Gupta Y M, Forbes J W. Shock Compression of Condensed Matter-2003 [C]. New York: AIP Press, 2004: 145-148.

[5] Hooks D E, Hayes D B, Hare D E, et al. Isentropic Compression of Cyclotetramethylene Tetranitramine (HMX) Single Crystals to 50 GPa [J]. J Appl Phys, 2006, 99: 124901.

[6] Weng J D, Tan H, Hu S L, et al, New All-Fiber Velocimeter [J]. Rev Sci Instrum, 2005, 76: 093301.

[7] Hayes D B. Backward Integration of the Equations of Motion to Correct for Free Surface Perturbations [R]. SAND 2001-1440, 2001.

[8] Sun C W. The Experimental Technique of Magnetically Driven Isentropic Compression and High Speed Flyer Plates [J]. Detonation and Shock Waves, 2005, (3): 126-138. (in Chinese)
孙承纬. 磁驱动等熵压缩和高速飞片的实验技术 [J]. 爆轰波与冲击波, 2005, (3): 126-138.

[9] Wang G J, Sun C W, Tan F L, et al. The Compact Capacitor Bank CQ-1.5 Employed in Magnetically Driven Isentropic Compression and High Velocity Flyer Plate Experiments [J]. Rev Sci Instrum, 2008, 79: 53904.

[10] Baer M R, Hall C A, Gustavsen R L, et al. Isentropic Loading Experiments of a Plastic Bonded Explosive and Constituents [J]. J Appl Phys, 2007, 101: 034906.

[11] Dong H S. Performance of High Explosive and Correlates [M]. Beijing: Science Press, 1989. (in Chinese)
董海山. 高能炸药及其相关物性能 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.

Magnetically Driven Quasi-Isentropic Compression Experiments of Solid Explosives

CAI Jin-Tao, WANG Gui-Ji, ZHAO Jian-Heng, MO Jian-Jun,
WENG Ji-Dong, WU Gang, ZHAO Feng

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

Abstract: It is very important and instructive for us to further and accurately investigate the interaction between constitutes of explosive and formation mechanism of hot spots in explosive initiation, with the constitutive relation and equation of states in wide pressure zone. Compared with shock compression, magnetically driven quasi-isentropic compression (shockless compression) is a more effective method to research the dynamic behavior of un-reacted explosives in wide pressure zone. Based on the working principle of electro-magnetic force produced by large current, the shockless compression technique driven by magnetic force was first realized in domestic. By optimizing the loading electrodes and the parameters of explosive samples, and controlling the installation technology, a pressure of 5 GPa was realized in magnetically driven quasi-isentropic compression experiments. By means of the technique of laser displacement interferometer and the Lagrange data processing method, the particle velocities of the interface between JO-9159 explosive and LiF windows were measured, and from which the experimental isentropes of JO-9159 explosive were obtained. Compared with the results from references, the experimental isentrope of JO-9159 explosive is consistent with that of PBX9501 explosive.

Key words: solid explosives; quasi-isentropic compression; electro-magnetic force driving; isentrope