

文章编号: 1006-9941(2011)05-0536-04

5 GPa 内 JO-9159 炸药的磁驱动准等熵压缩响应特性

蔡进涛, 赵 锋, 王桂吉, 赵剑衡, 翁继东, 吴 刚

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 较宽压力范围内未反应炸药的动力学响应特性对于深入认识压缩波作用下炸药起爆热点形成机制具有重要意义。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的有效手段。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,获得了 5 GPa 内 JO-9159 炸药在磁驱动准等熵压缩加载下的速度响应历史。利用一维流体动力学编码对加载过程进行了模拟,计算得到的粒子速度曲线与实验测得的粒子速度曲线符合较好。随着厚度的增加,样品与窗口界面处速度的陡度越来越大,加载期间样品应变率峰值在 $10^5 \sim 10^6$ /s 量级,随着样品厚度的增加,应变率尖峰变窄、峰值增加。

关键词: 固体力学; 含能材料; 准等熵压缩; 动力学响应

中图分类号: TJ55; O34

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.05.012

1 引 言

传统的冲击压缩加载使得炸药在很短时间、很低压力范围就会发生强烈的化学反应,这使得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,可为爆轰理论研究提供更为精确的实验数据。

1999 年,美国 Sandia 实验室的研究人员在 Z 装置(储能 1.6 MJ,电流峰值 20 MA,电流脉冲上升时间 100 ~ 300 ns,能在样品中产生压力幅值数百吉帕的平滑上升的压缩波)上首次实现了磁驱动准等熵压缩一维平面加载技术^[2]。2000 年开始,他们在 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,通过不断改进实验技术,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^[3-5],在未反应含能材料的动力学特性研究

方面显示出准等熵压缩实验技术的独特优势。而 Baer^[6]等人则利用该实验技术开展了 PBX9501 炸药及其组分相互作用机理的实验研究,对 HMX 晶体与粘结剂的相互作用以及 PBX9501 炸药的变形模式有了进一步的认识。

基于电磁加载技术,本课题组在国内率先实现了炸药的磁驱动准等熵压缩实验。获得了 5 GPa 内 JO-9159 炸药在准等熵压缩加载下的速度响应历史。利用一维流体动力学编码 SSS^[7]对斜波加载下 JO-9159 炸药的响应特性进行了模拟计算,计算结果反映了斜波加载下材料响应的基本特征,与实验数据符合较好。

2 磁驱动准等熵压缩加载原理

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 $p(t)$ 的关系由式(1)表征:

$$\vec{p} = \vec{J} \times \vec{B}, p(t) = \frac{\mu_0}{2} \cdot J(t)^2 = \frac{\mu_0}{2} \cdot \left(\frac{I(t)}{D} \right)^2 \quad (1)$$

式中, $p(t)$ 为磁压力, GPa; $I(t)$ 为流经电极板的电流, MA; $J(t)$ 为驱动电极板宽度方向的电流线密度, MA/cm; D 为电极板宽度, cm; μ_0 是真空磁导率,为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m。

收稿日期: 2010-10-28; 修回日期: 2011-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(11002130; 10927201); 中物院重点基金(2010A0201006); 双百人才基金(2008R0105)

作者简介: 蔡进涛(1984-),男,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

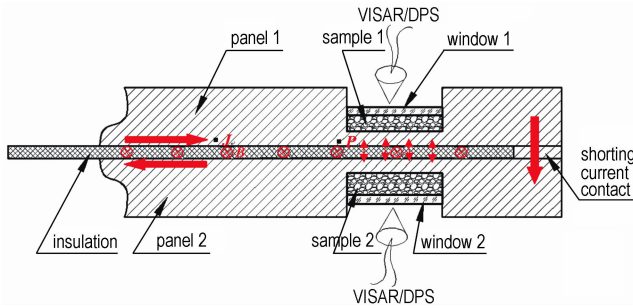


图1 磁驱动准等熵压缩原理

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

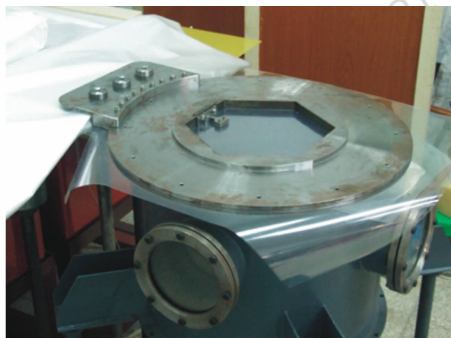
由于电流流经两电极板的条件相同,形成的磁压历程也相同,因此可沿上下两板放置多个不同厚度样品,实现多样品同条件加载。利用激光速度干涉测速技术,获取不同厚度样品与窗口界面处粒子速度历程。利用 Lagrange 数据分析处理^[3]或反积分处理方法^[8],得到材料准等熵压缩下的压力-比容关系。

3 实验及结果分析

在磁驱动实验装置 CQ-1.5^[9](图 2)上,通过改进实验技术^[10],实现了以 HMX 为基的高能炸药 JO-9159 的磁驱动准等熵压缩加载。表 1 为相关实验参数。



a. general view



b. loading area

图2 CQ-1.5 装置外观和负载区

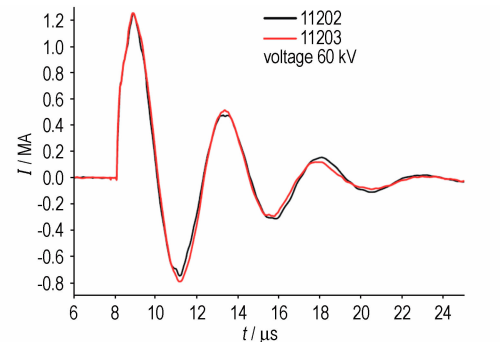
Fig. 2 General view of CQ-1.5 (a) and loading area (b)

表1 实验参数

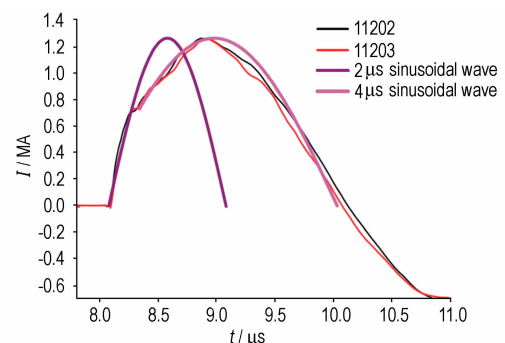
Table 1 Experimental parameters				mm
shot No.	panel thickness	LiF windows	samples thickness	
11202	0.353	$\Phi 10 \times 3$	0.789	
	0.353		0.599	
11203	0.369	$\Phi 10 \times 3$	0.609	
	0.374		0.904	

两发实验中 CQ-1.5 装置的充电电压均为 60 kV,实验电流波形见图 3。由图 3 可见,电流波形前 1/4 周期重合较好,忽略驱动电极板的厚度差异造成的影响,可近似认为加载过程中载荷历史相同。实验放电周期约 4.2 μs ,值得指出的是,放电过程中随着负载区参数的改变,周期逐渐增加,图 3b 显示,放电前 1/4 周期可近似看做 2 μs 和 4 μs 两段正弦波的组合。

利用 DPS (Doppler Probe System) 激光位移干涉测量技术^[11],实验获得了不同厚度的 JO-9159 炸药窗口界面处粒子速度历史曲线。图 4 为实验结果与模拟计算结果的比较,可以看出,图 4a 和图 4b 中速度均平滑上升,样品中未产生冲击波,实现了该炸药样品的无冲击平滑加载。



a. discharging current waveform



b. current waveform compared with sinusoids

图3 放电电流波形及波形前 1/4 周期与正弦波的比较

Fig. 3 Experimentally discharging current waveform (a), the general view (b), the first 1/4 cycle time of the current waveform compared with sinusoids

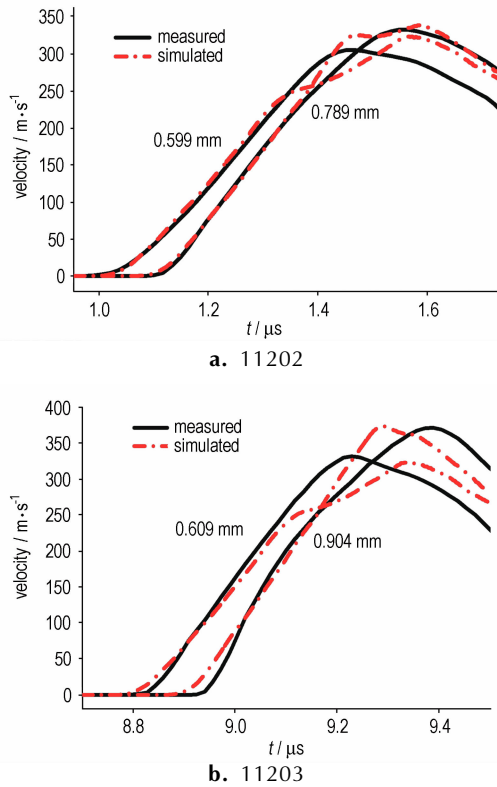


图4 不同厚度 JO-9159 样品与窗口界面处粒子速度曲线的实验与模拟计算结果比较

Fig. 4 Comparison of experimental particle velocities at the sample/windows interface with simulated results for JO-9159

4 斜波加载响应特性模拟计算

根据图3放电电流波形,依据公式(1)可计算得到洛仑兹力历史曲线,由于该压力经过铝板后作用于样品表面,依据简单波原理,修正后得到了近似的样品加载压力历史,见图5。利用样品加载压力历史,采用以 Hugoniot 线为参考线的 Grüneisen 状态方程,使用一维流体动力学编码 SSS 对实验过程进行了模拟计算,获得了上述实验条件下,样品窗口界面处的粒子速度历史。由于低压下等熵压缩线与冲击 Hugoniot 线基本重合,计算参数选择实验获得的 JO-9159 的准等熵压缩线参数^[10],见表2。由图4中实验结果与计算结果的对比可知,低速段计算结果与实验数据符合较好,在高速段出现偏差。可能原因是计算获得的压力历史与真实加载历史存在误差,对样品响应的连续过程的模拟计算中,误差积累导致在峰值段的计算结果出现偏差。另外,出现偏差与所用状态方程过于简单也有一定关系。

进一步计算得到了相同压力历史条件下,不同厚度样品与窗口界面处粒子速度历史曲线与应变率曲线,计算结果见图6。

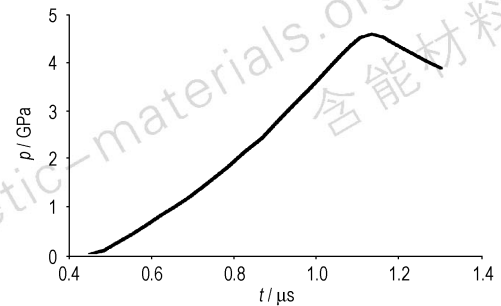


图5 加载压力历史

Fig. 5 Loading pressure

表2 计算状态方程参数

Table 2 Parameters of equation of state

sample	$c_0 / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	λ	Γ_0	$\rho_0 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
JO-9159	2.4	2.39	1.15	1.847

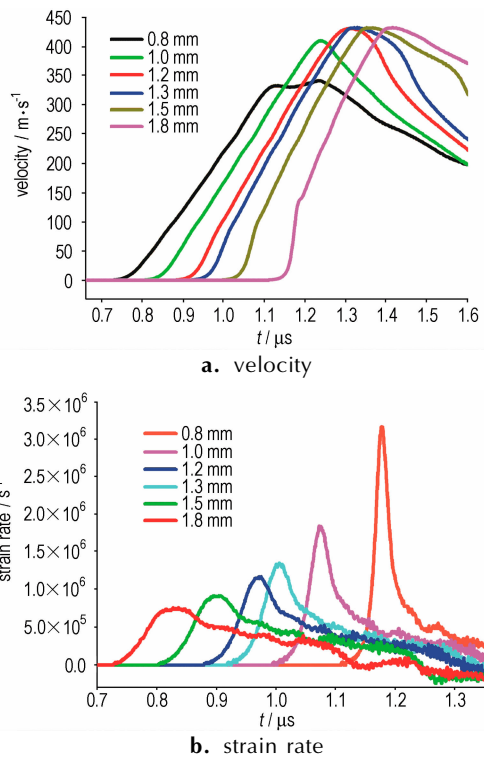


图6 不同厚度 JO-9159 炸药/窗口界面处粒子速度与应变率曲线

Fig. 6 Particle velocities and strain rates at the sample/windows interface with different sample thickness for JO-9159

相同加载历史条件下,不同厚度样品的样品/窗口界面速度响应历史的比较结果显示:随着厚度的增加,

样品/窗口界面响应速度的陡度越来越大。低于 1 mm 的样品中加载压力尚未达到峰值,前期压缩波在样品与窗口界面的反射波已经到达加载面,造成压力历史的改变,且随着样品厚度的增加,这种影响越来越小,样品与窗口界面速度峰值越来越大;当反射波不对压力历史形成干扰时,若炸药样品没有发生反应,不同厚度样品与窗口界面响应速度峰值应该是基本相同的,图 6a 中可见 1.2 mm 以后峰值速度基本相同;1.3 mm 厚样品界面速度历史已经出现较明显拐折,表明样品中已开始出现冲击波。

实验过程中炸药的应变率峰值量级在 $10^5 \sim 10^6/s$,图 6b 表明,斜波加载下样品中不同 Lagrange 位置应变率变化在峰值和陡度上均有极大差异。与冲击加载不同之处在于,样品不同厚度处应变率存在差别。随着加载样品厚度的增加,应力波在样品中追赶汇聚,对较厚样品以及样品的较厚位置,加载时间更为集中,应变率尖峰变窄、峰值增加。

5 结 论

在磁驱动等熵压缩装置 CQ-1.5 上,实现了固体含能材料的磁驱动准等熵压缩加载,利用 DPS 激光干涉测试系统,获取了 5 GPa 载荷内炸药 JO-9159 在准等熵压缩加载下的速度响应历史;利用一维流体动力学编码对加载过程进行了模拟计算,与实验结果符合较好;计算结果显示,随着厚度的增加,样品与窗口界面处速度的陡度越来越大,加载期间样品应变率峰值在 $10^5 \sim 10^6/s$ 量级,随着样品厚度的增加,应变率尖峰变窄、峰值增加。

Response of JO-9159 under Magnetically Driven Quasi-Isentropic Compression to 5 GPa

CAI Jin-tao, ZHAO Feng, WANG Gui-ji, ZHAO Jian-heng, WENG Ji-dong, WU Gang

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: It is very important and instructive for us to further investigate the formation mechanism of hot spots in explosive initiation in wide pressure zone. Magnetically driven quasi-isentropic compression (shock less compression) is an effective method to research the dynamic behaviors of un-reacted explosives in high pressure. Based on the working principle of electro-magnetic force produced by large current, the shockless compression technique driven by magnetic force is first achieved in domestic. A pressure of 5 GPa is obtained in the experiments of magnetically driven quasi-isentropic compression. The particle velocities of the interface between JO-9159 explosive and LiF windows are gained. The isentropic compression procedure was numerically simulated by one dimensional hydrodynamics code. The simulated particle velocities are in good agreement with experimental results. The gradient of particle velocities between the windows and the samples becomes larger when samples become thicker. The strain ratios of the samples are in $10^5/s \sim 10^6/s$, and the peak of strain ratio becomes narrower but higher when samples become thicker.

Key words: solid mechanics; energetic materials; quasi-isentropic compression; dynamic response

CLC number: TJ55; O34

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.05.012

参考文献:

- [1] Hare D E. How to plan and analyze an isentropic compression experiment(ICE). Lawrence Livermore National Laboratory Report: UCRL-TR-206486[R]. 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[C]// Shock Compression of Condensed Matter, 2001, edited by Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y, 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[C]// Shock Compression of Condensed Matter, 2003, edited by Furnish M D, Gupta Y M, and Forbes J W, 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] 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.
- [7] 孙承伟. 一维冲击波和爆轰波计算程序 SSS[J]. 计算物理, 1986, 3(2): 142-154.
SUN Cheng-wei. SSS: A code for computing one dimensional shock and detonation wave propagation[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 1986, 3(2): 142-154.
- [8] Hayes D B. Backward integration of the equations of motion to correct for free surface perturbations sandia national laboratories Rpt: SAND2001-1440[R]. 2001.
- [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] 蔡进涛, 王桂吉, 赵剑衡, 等. 固体炸药的磁驱动准等熵压缩实验研究[J]. 高压物理学报, (待发表).
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*, (in press).
- [11] Weng J D, Tan H, Hu S L, et al. New all-fiber velocimeter[J]. *Rev Sci Instrum*, 2005, 76: 093301.