

文章编号:1006-9941(2021)01-0035-06

斜波压缩下 PBX-59 未反应固体炸药的状态方程

种涛,蔡进涛,王桂吉

(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川绵阳 621999)

摘要: 利用磁驱动加载实验技术,开展了斜波压缩下未反应固体炸药 PBX-59 的动力学特性研究,获得了峰值压力 18.5 GPa 下 PBX-59 的动力学响应。利用阻抗匹配修正的迭代 Lagrange 数据处理方法,获取了 PBX-59 炸药斜波压缩加载下的 p - V 关系和声速-粒子速度关系等动力学特性参数。结合实验获得的动力学参数和等熵状态方程,对实验过程开展了流体动力学数值模拟,计算和实验结果基本吻合,验证了本研究实验技术、数据处理方法和物理模型的正确性。

关键词: 固体炸药;磁驱动斜波加载;等熵压缩线;状态方程;PBX-59

中图分类号: TJ55; O34

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2020045

1 引言

爆轰过程的计算模型中,未反应固体炸药的完全物态方程对于描述高压和高温下未反应固体炸药的应力、温度等热力学状态参量的精度,直接关系到炸药化学反应率模型和炸药产物状态方程的计算精度。作为典型的多组分非均质颗粒材料,未反应固体炸药的完全物态方程构建依赖于宽压力区间内炸药的动力学实验数据。因此利用磁驱动斜波压缩加载实验技术开展固体炸药的动力学行为研究,其中一个重要的目的是获得 0~20 GPa 压力范围内未反应炸药的状态方程参数,这是开展爆轰物理建模和安全性研究最基本的前提。

相比于冲击加载,斜波加载的重要特点是加载过程中样品的温升低,熵增小,因而有利于拓宽未反应固体炸药的加载压力范围,进行压力与温度分解的较高应变率动力学实验,得到关于材料高压相变动力学和炸药化学反应特性的新认识,进而可在宽压力范围内校核各种计算物理模型,使计算结果更加准确、可靠。

自 2000 年美国桑迪亚国家实验室(SNL)在 Z 机器上建立磁驱动准等熵压缩加载实验技术以来,劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)就有组织地对其武器用炸药型号进行了斜波压缩实验研究,后续的 6 年时间里,对超过 15 种炸药型号或样品进行了磁驱动准等熵压缩加载^[1],这其中还不包括 SNL 开展的炸药准等熵压缩加载实验研究^[2-5]。新的加载实验技术将未反应固体炸药宏观速度响应的压力范围拓展到 20 GPa 以上,未反应固体炸药高压段实验数据缺乏的情况得到改善,补充了炸药响应数据库,对未反应炸药的状态方程有了更直观的认识,更有利于校核炸药的完全物态方程模型^[6],为爆轰模拟计算提供基础的物性参数。

中国工程物理研究院流体物理研究所自 2006 年以来,积极发展磁驱动装置及斜波压缩加载实验技术^[7-9],实现了固体炸药的磁驱动斜波压缩加载实验技术及其数据处理方法^[10-12],拓宽了未反应固体炸药及组分动力学响应研究的压力范围(~20 GPa),改善了未反应固体炸药特别是国内配方炸药高压段实验数据缺乏的情况,为精密爆轰物理和炸药安全性研究提供了新的研究手段。

本课题组开展了 18 GPa 压力下未反应固体炸药 PBX-59 的动力学行为研究,从磁驱动斜波加载实验、数据处理与分析、数值模拟和基于实验结果的物态方程构建等四个方面,描述了利用磁驱动装置开展固体炸药动力学行为研究的过程。

收稿日期:2020-02-25;修回日期:2020-04-30

网络出版日期:2020-11-11

基金项目:国家自然科学基金资助(11702276,11972031),国防科技重点实验室基金(6142A03192007)

作者简介:种涛(1986-),男,助理研究员,主要从事动高压实验加载技术和材料动力学行为研究。e-mail:maoda318@163.com

通信联系人:王桂吉(1979-),男,研究员,主要从事电磁加载实验技术和材料动力学行为研究。e-mail:wangguiji@126.com

引用本文:种涛,蔡进涛,王桂吉.斜波压缩下 PBX-59 未反应固体炸药的状态方程[J].含能材料,2021,29(1):35-40.

CHONG Tao, CAI Jin-tao, WANG Gui-ji. Equation of State of Unreacted Solid Explosive PBX-59 Under Ramp Wave Compression[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(1):35-40.

2 固体炸药的磁驱动斜波压缩加载实验

PBX-59炸药是以95% HMX晶体颗粒、5%的黏结剂和钝感剂为组分的典型PBX炸药,理论密度^[12-13] $1.889 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。本次实验样品PBX-59炸药样品由中国工程物理研究院化工材料研究所提供,平均密度为 $1.848 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,密实度为97.8%(密实度是炸药固体物质体积占总体积的比)。

在磁驱动装置CQ-4^[14]上开展固体炸药的动力学行为实验研究。CQ-4装置由6个单元组成,分别为充电单元、储能单元、开关单元、传输单元、负载单元、能量泄放单元。装置最大峰值电流约4MA,电流上升沿500~800 ns。其中负载单元为条片式结构,用于上下对称地对样品材料进行动力学加载。磁驱动加载装置的负载区结构示意图如图1所示,平行电极板之间用厚度约0.3 mm厚的绝缘材料隔开。装置放电时由于趋肤效应,脉冲大电流流经样品对称安装的条形电极板内表面,产生压力平滑上升的洛伦兹力,洛伦兹力作用于电极板内表面,对“电极板-样品-窗口”三明治结构进行斜波压缩,利用激光干涉测速技术,如DLHV^[15](Dual Laser Heterodyne Velocimetry)测量不同厚度样品/窗口界面处的速度响应,处理数据获得样品材料的动力学参数。

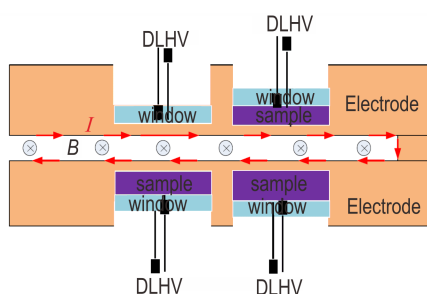


图1 负载区结构示意图

Fig.1 Schematic of the loading area

实验用的驱动电极材料为纯铝,驱动电极板厚度1 mm。窗口材料为单晶LiF,厚度4 mm,单面镀铝反射膜,该面安装在样品后表面,用于激光干涉测速的反射面,由连续性条件知,铝膜处速度与样品后表面粒子速度一致。实验条件见表1,考虑了4种不同加载电压下炸药样品的速度响应。每发实验安装3种厚度的炸药样品,样品直径都是10 mm,在第四个位置安装LiF窗口,以求解实验加载压力历史波形。

实验获得了4发实验的速度响应曲线,见图2。由图得,同一发实验中,随着样品厚度的增加,实验获得的样品与窗口界面处的速度曲线陡度增加,部分厚样

表1 斜波压缩实验条件

Table 1 Experimental conditions of ramp wave loading

No.	thickness/mm	loading voltage/kV
shot155	0.869	75.5
	0.973	
	1.133	
shot156	0.925	75
	1.243	
	1.472	
shot172	0.760	80
	0.939	
	1.075	
shot175	0.700	77
	0.880	
	1.050	

品材料中形成了冲击波。由公式(1)知,斜波加载下,后续压缩波相对于前驱压缩波是超声速,当样品厚度足够,后续压缩波将追上前驱压缩波,并在样品中一定厚度处出现冲击波,在样品后表面(样品与窗口界面)处可观测到冲击剖面。加载峰值压力越高,样品中形成冲击的临界厚度越薄。当形成的冲击波幅值足够大时,极可能引起炸药发生化学反应,并在速度幅值上出现增量。

$$c_l = c_0 + 2su_p \quad (1)$$

式中, c_l 是材料的纵波声速, c_0 和 s 为材料属性相关的动力学参数, u_p 是材料的粒子速度。其中 c_l 、 c_0 和 u_p 单位是 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, s 是无单位参数

铝与LiF窗口的波阻抗较为接近,忽略铝和LiF窗口的阻抗差异,利用铝/LiF界面速度曲线,可以得到界面压力,忽略Al电极中的烧蚀和磁扩散效应,认为Al电极中波的传播为简单波,对上述界面压力作时间上的反演修正,可得到铝电极内表面的压力历史曲线。当对Al和LiF之间的速度曲线进行波阻抗修正,可获得更为精确的加载压力历史。

基于已知材料动力学参数的铝电极板与LiF窗口界面处的速度历史,通过式(2)波阻抗修正,应用简单波原理,计算精确的加载压力历史,计算流程见图3。

$$\Delta u_p = \frac{Z_s + Z_w}{2Z_s} \Delta u_w \quad (2)$$

式中, $Z_s = \rho_{0s} c_s(u_w)$ 表示在界面速度 u_w 下的样品的初始密度与声速的乘积,即样品在界面速度 u_w 时的波阻抗。 $Z_w = \rho_{0w} c_w(u_w)$ 表示窗口在界面速度 u_w 时的波阻抗。下标 s 和 w 分别表示样品和窗口,下标 p 表示粒子速度, u_p 为原位粒子速度。

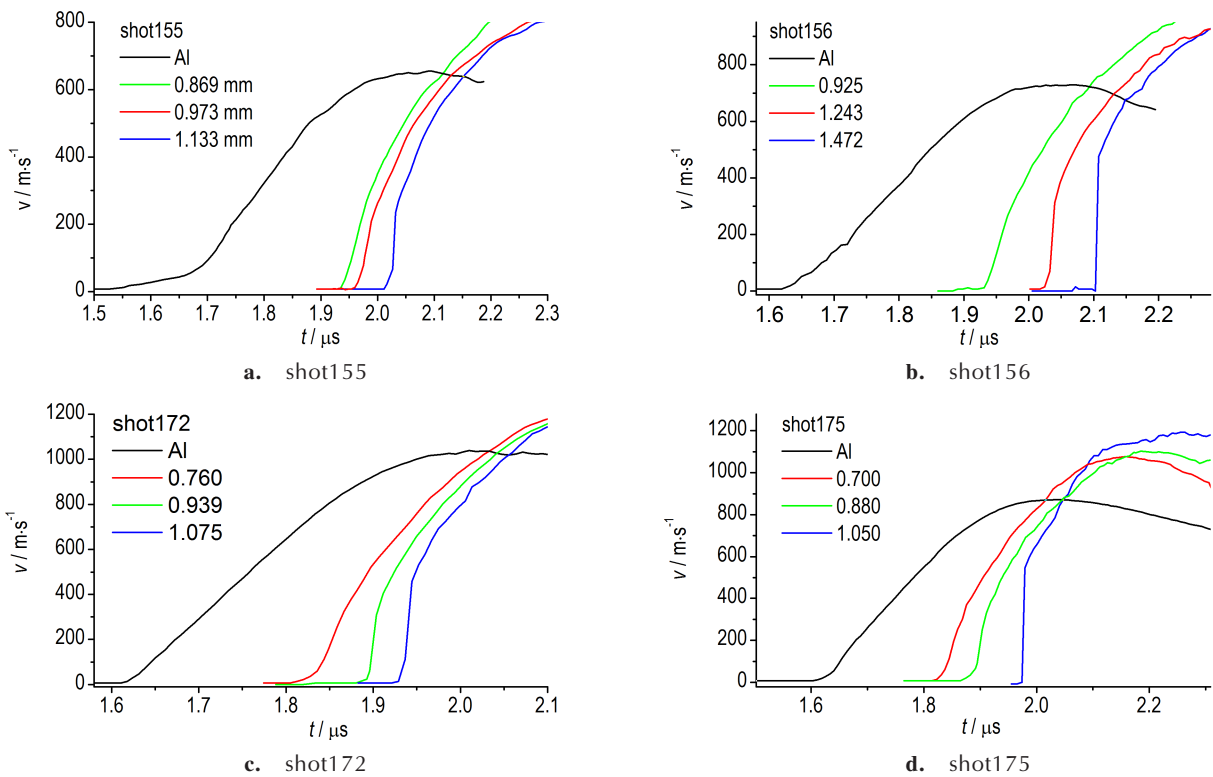


图2 4发实验的速度历史曲线

Fig.2 Interface velocities of four experimental shots

应用上述方法,由4发实验中铝后表面速度曲线计算的压力时程曲线见图4所示,4发实验的压力峰值分别为10.8,12.2,18.5 GPa和15.1 GPa。

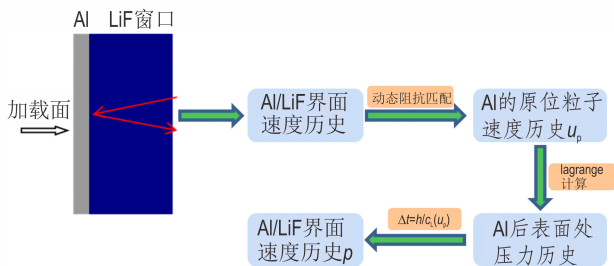


图3 波阻抗修正获取压力历史流程

Fig.3 The flow chart of calculating pressure history with wave impedance correction method

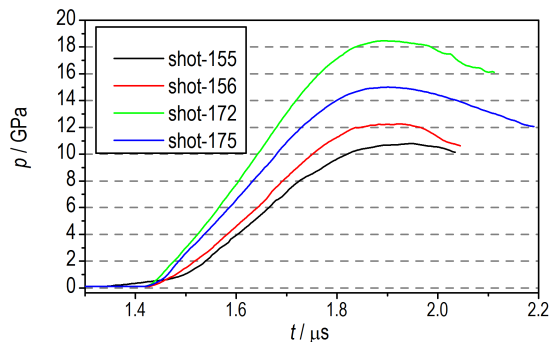


图4 4发实验的加载压力历史曲线

Fig.4 The loading pressure histories of 4 experimental shots

3 PBX-95炸药的等熵状态方程、压力-比容关系和高压声速

材料的压力-比容关系、高压声速和状态方程是开展动力学数值模拟的基础,本节给出适用于斜波加载实验的数据处理方法,并计算PBX-95炸药的动力学参数,给出适合斜波压缩过程的等熵状态方程。

同一发实验中,由于加载压力历史相同,两不同厚度样品的后表面位置可看作是同一无限厚样品中的不同空间位置 x_1, x_2 ,在获知样品的原位粒子速度与时间的关系 $u-t$ 的情况下,由平面一维等熵运动的质量、动量和能量守恒方程组,可得到如下的增量表达式^[16]:

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

$$d\sigma = \rho_0 c_L(u) du \quad (4)$$

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

式中, c_L 为Lagrange声速, Δh 为样品厚度差, Δt 为不同厚度处粒子速度达到相同速度的时间差, x_1, x_2 分别表示样品1和样品2的厚度; $t_1(u), t_2(u)$ 分别表示样品1和样品2与窗口界面处样品的原位粒子速度达到 u 时所需时间, σ 和 ρ 分别为样品中的应力和密度。

由于实验获得的速度历程是连续的,由式(3)可得到一定速度范围内的 $c_L(u)$ 的连续值。依据(4)式和(5)式,即得到等熵线上的斜率关系,积分可得材料的等熵线。忽略炸药材料强度,认为应力 σ 与静水压 p 相等,等熵线具体形式为:

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 (1 - v/v_0)}{[1 - s(1 - v/v_0)]^2} \quad (6)$$

式中, c_0 、 s 为 Hugoniot 关系参数; v 、 v_0 分别为材料比容和初始比容; ρ_0 为材料初始密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

公式(3)~(5)中的粒子速度均为样品的原位粒子速度,因此,需对带测试窗口的速度曲线进行处理,利用增量阻抗匹配(式2),修正样品与窗口阻抗失配的影响,获得原位粒子速度。

应用式(2)~式(5),对压力峰值最高的 shot-172 实验结果进行数据处理,经过多次迭代收敛,获得的 PBX-59 炸药的 Lagrange 声速与粒子速度关系曲线见图 5,由图 5 可见, PBX-59 声速与粒子速度关系近似表现为线性,对声速与粒子速度曲线进行线性拟合,得到的线性关系为 $C_L = 2.78 + 4.18u_p$ 。对比式(1)所示的 Lagrange 声速与粒子速度的关系,得到样品材料在 0~18.5 GPa 的 Hugoniot 关系参数为 $c_0 = 2.78 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $s = 2.09$ 。

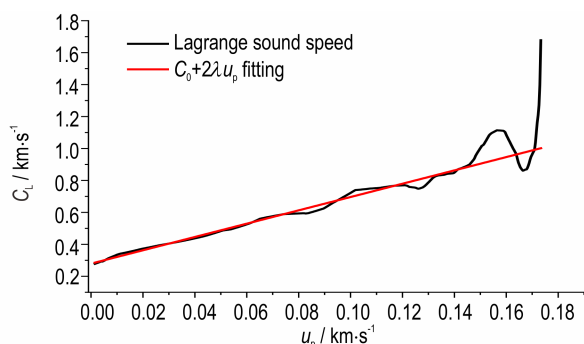


图 5 PBX-59 的声速-粒子速度曲线

Fig.5 The Lagrange acoustic velocity-particle velocity curve of PBX-59

联合式(1)和(4)可得到样品的斜波压缩压力-相对比容关系曲线,如图 6 所示。为了比较,同时将董海山^[13]、LASL 实验室^[17]的结果绘于图中。由图 6 可见,炸药表面粒子速度的抖动造成 Lagrange 声速起伏,但由于积分效应,这种声速上偏离真实值的抖动会得到抑制,实验获得的压力-相对比容曲线与用 Hugoniot 关系式(6)计算结果基本重合,即使是声速尾段相对剧烈的抖动,在压力-相对比容曲线上仅表现为小幅变化。图 6 结果与董海山院士早期利用楔形块和转镜相

机结合测得该炸药在 1.3~8.2 GPa 压力区间的冲击 Hugoniot^[13]线在 p - v/v_0 曲线上基本重合(绿色星形点),该结果外推到高压段时(绿色虚线)与本实验结果存在明显差异,与 PBX-9501 炸药^[17](95% HMX, 2.5% Estane, 2.5% BDNPFA, 理论密度 $1.860 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)的压力-相对比容线差异大很多, PBX-59 与 PBX-9501 两种炸药中的 HMX 均占 95%,但由于黏结剂种类不同,所以导致炸药理论密度和密实度的差异,动力学参数上的差异明显,故不能随意借鉴和使用。

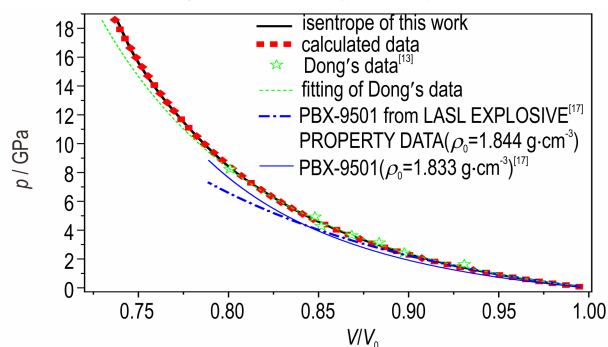


图 6 PBX-59 和 PBX-9051 的压力-相对比容曲线

Fig.6 The pressure-relative specific volume curves of PBX-59 and PBX-9051

4 数值模拟

为了校核以上物理模型和实验获取的 PBX-95 动力学参数,结合守恒方程和(6)式状态方程对本文 4 发实验进行了流体动力学数值模拟,结果如图 7 所示。铝电极和 LiF 采用 Grüneisen 状态方程^[18],具体计算参数见表 2。

实验中未见明显的弹塑性转变,故计算未考虑材料的强度效应,参数列表于表 2,其中, PBX-59 参数由上述实验获得,认为 Grüneisen 系数 $\Gamma(v)/v = \Gamma_0/v_0$, Γ_0 取值^[2, 21] 1.15。对应实验的加载压力历史见图 4,此处以真实时序开展模拟计算。

模拟计算与实验结果如图 7 所示。由图 7 可得,磁驱动准等熵压缩实验获得的 PBX-59 炸药的状态方程参数能较好地再现 18.5 GPa 内未反应炸药的动力学响应过程。在时序和波形两方面,计算的速度曲线均能与实验结果较好吻合。shot-175 实验中 1.050 mm 厚样品中出现了明显的前驱冲击波,幅值达到 $550 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,速度曲线表现出比其他厚度样品更快的速度增长,不考虑化学反应的模拟计算无法再现实验结果,该样品中可能发生了明显的化学反应。

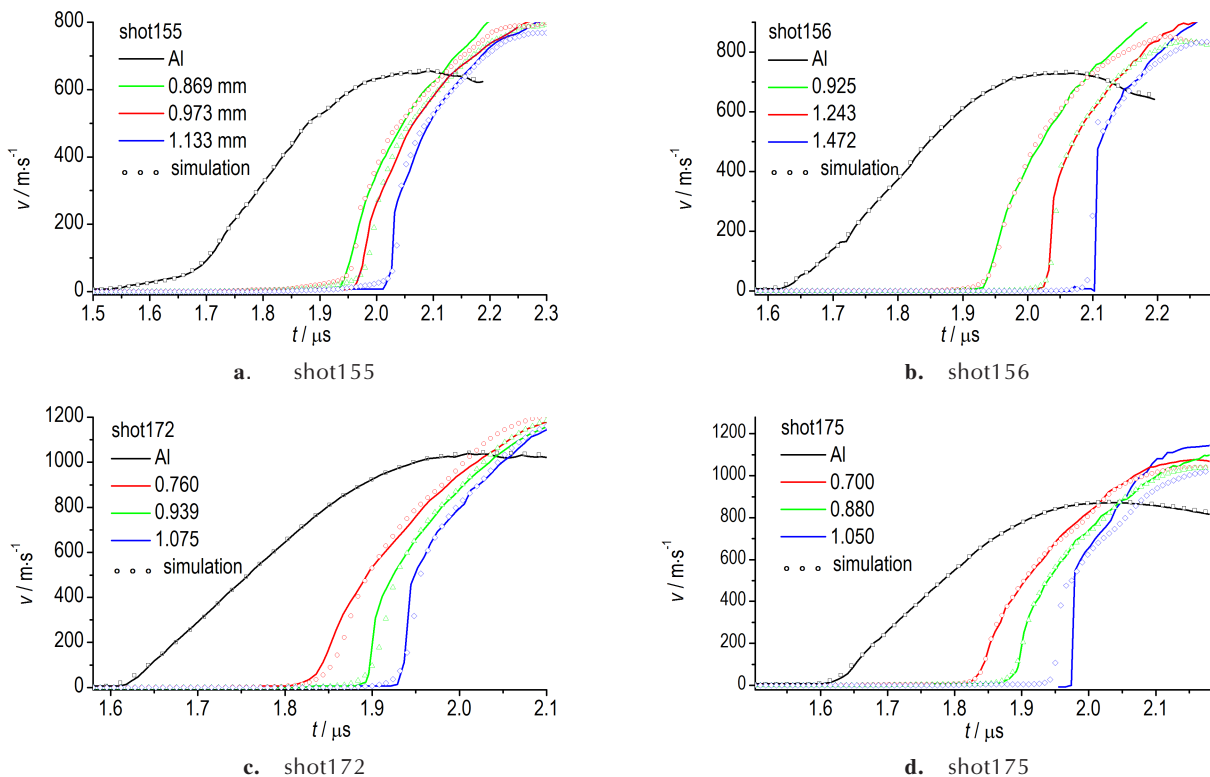


图7 模拟计算与实验结果对比

Fig.7 Comparisons between calculated and experimental data

表2 一维流体动力学模拟计算参数

Table 2 Calculation parameters for one-dimensional hydrodynamic simulation

material	$\rho_0/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$c_0/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	s	γ_0
PBX-59	1.848	2.78	2.09	1.15
Al ^[19]	2.698	5.328	1.338	1.97
LiF ^[20]	2.638	5.15	1.35	1.69

5 结论

利用磁驱动斜波压缩加载实验技术,针对 PBX-59 炸药,分别从未反应固体炸药在磁驱动准等熵加载下的动力学实验、数据分析处理和数值模拟三个方面开展了动力学及状态方程研究工作。基于 CQ-4 装置获得了 0~18.5 GPa 峰值压力下 PBX-59 炸药的动力学响应,利用迭代的 Lagrange 数据处理方法获得了该炸药斜波压缩下的压力-比容关系及其参数和 Lagrange 声速-粒子速度关系,给出了适合斜波压缩过程的等熵状态方程。结合等熵状态方程和实验获得的动力学参数,完成了实验过程的数值模拟,计算较好地再现了实验结果,验证了本文实验技术及其数据处理方法、物理模型及其参数的正确性。

参考文献:

- [1] Vandersall K S, Reisman D B, Forbes J W, et al. Isentropic Compression Experiments Performed By LLNL On Energetic Material Samples Using The Z Accelerator [R]. UCRL-TR-236063, 2007.
- [2] Baer M R, Hall C A, Gustavsen R L, et al. Isentropic loading experiments of a plastic bonded explosive and constituents [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101: 034906.
- [3] Baer M R, Hobbs M L, Hall C A, et al. Isentropic Compression Studies of Energetic Composite Constituents[C]//AIP Conference Proceedings. AIP, 2006, 955(1): 1165-1168.
- [4] Baer M R, Root S, Dattelbaum D, et al. Shockless compression studies of HMX-based explosives[C]//AIP Conference Proceedings. AIP, 2009, 1195(1): 699-702.
- [5] Baer M R, Root S, Gustavsen R L, et al. Temperature dependent equation of state for hmx-based composites[C]//AIP Conference Proceedings. AIP, 2011, 1426: 163-166.
- [6] Aslam T D. The reactants equation of state for the tri-amino-tri-nitro-benzene (TATB) based explosive PBX 9502 [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122: 035902.
- [7] Wang G J, Tan F L, Sun C W, 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: 053904.
- [8] 罗斌强, 张红平, 种涛, 等. 磁驱动斜波压缩实验结果的不确定度分析[J]. *高压物理学报*, 2017, 31(3): 90-95.
- LUO Bin-qiang, ZHANG Hong-ping, CHONG Tao, et al. Experimental uncertainty analysis of magnetically driven ramp wave compression[J]. *Chinese Journal of High Pressure Phys-*

- ics, 2017, 31(3): 90–95.
- [9] Wang G J, Chen X M, and Cai J T, et al. A high current pulsed power generator CQ-3-MMAF with co-axial cable transmitting energy for material dynamics experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(6): 065110.
- [10] 蔡进涛, 赵锋, 王桂吉, 等. 5 GPa内JO-9159炸药的磁驱动准等熵压缩响应特性[J]. 含能材料, 2011, 19(5): 536–539.
CAI Jin-tao, ZHAO Feng, WANG Gui-ji, et al. Response of JO-9159 under magnetically driven quasi-isentropic compression to 5 GPa[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(5): 536–539.
- [11] Wang G J, Cai J T, Zhang X P, et al. Dynamic compression of solid HMX-based explosives under ramp wave loading [J]. *Eur Phys J Appl Phys*, 2012, 60(2): 21001.
- [12] 蔡进涛, 赵锋, 王桂吉, 等. HMX基PBX炸药的等熵压缩实验研究[J]. 含能材料, 2014, 22(2): 210–214.
CAI Jin-tao, ZHAO Feng, WANG Gui-ji, et al. Quasi-isentropic compression of HMX based PBX explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(2): 210–214.
- [13] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及其相关物性[M]. 北京: 科学出版社, 1989:334–340.
DONG Hai-shan, ZHOU Fen-fen. Characteristics of high performance explosives [M]. Beijing: Science Press, 1989: 334–340.
- [14] Wang G J, Luo B Q, Zhang X P, et al. A 4 MA, 500 ns pulsed power generator CQ-4 for characterization of material behaviors under ramp wave loading [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84: 015117.
- [15] 陶天炯, 翁继东, 王翔. 一种双源光外差测速技术[J]. 光电工程, 2011, 38(10): 39–45.
TAO Tian-jiong, WENG Ji-dong. A dual laser heterodyne velocimetry [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(10): 39–45.
- [16] 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研究生院, 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.
- [17] LASL Explosive property data. University of California Press, 1980: 109–119.
- [18] 谭华. 实验冲击波物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 78–89.
TAN Hua. Experimental shock wave physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018: 78–89.
- [19] 汤文辉, 张若棋. 物态方程理论及计算概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008:86–123.
TANG Wen-hui, ZHANG Ruo-qi. Introduction to theory and computation of equation of state [M]. Beijing: High Education Press, 2008: 86–123.
- [20] Hare D E. How to plan and analyze an isentropic compression experiment (ICE)[R]. UCRL-TR-206486, 2004.
- [21] Olinger B, Roof B, Cady H H. Proceedings of the International Symposium on High Dynamic Pressures [C]//Paris, CEA, 1978:3–8.
- [22] Grebyonkin K F, Zhrebtsov A L, Popova V V, et al. P, V, E, T Equation of state for TATB-based explosives [C]//AIP Conference Proceedings. AIP, 2003, 706: 141.
- [23] Menikoff R, Kober E. Equation of state and hughoniot locus for porous materials: P-a MODEL [R]. LA-UR-99-2364, 1999.
- [24] Sewell T D, Menikoff R. Complete Equation of State for beta-HMX and Implications for Initiation [R]. LA-UR-03-3114, 2003.
- [25] Menikoff R. Comparison of constitutive models for plastic-bonded explosives [J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2007, 12(1): 73–79.

Equation of State of Unreacted Solid Explosive PBX-59 Under Ramp Wave Compression

CHONG Tao, CAI Jin-tao, WANG Gui-ji

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: The dynamic characteristics of unreacted solid explosive PBX-59 under ramp wave compression were studied with a magnetic driven loading experimental technique, and the dynamic response of PBX-59 under a peak pressure up to 18.5 GPa was obtained. The p - V relationship, the acoustic velocity-particle velocity relationship and other dynamic parameters of PBX-59 were obtained by the iterative Lagrange data processing method modified by impedance matching under the ramp wave compression. Combined with the dynamic parameters and isentropic equation of state derived from experimental data, the experimental results were hydrodynamically simulated. The numerical calculation agree well with the experimental results, which verifies the validity of the experimental technology, data processing method, and physical model.

Key words: solid explosive; magnetic driven ramp wave loading; isentropic compression curve; equation of state; PBX-59

CLC number: TJ55; O34

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020045

(责编: 王艳秀)