

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0226

孔隙度对 PBX 炸药冲击起爆影响的实验研究*

刘海庆¹, 段卓平¹, 白志玲¹, 温丽晶^{1,2}, 欧卓成¹, 黄风雷¹

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082)

摘要: 为了研究孔隙度(装药密度)对 PBX 炸药冲击起爆爆轰成长的影响, 采用炸药冲击起爆锰铜压阻一维拉格朗日实验测试系统, 测量了不同孔隙度的 PBXC03 炸药(HMX 的质量分数为 87%, TATB 的质量分数为 7%, 黏结剂的质量分数为 6%) 冲击起爆过程不同拉格朗日位置的应力-时间历史。结果显示: 在本文装药范围和加载条件下, 孔隙度对 PBX 炸药冲击起爆爆轰过程的影响不单调, 中等密度的炸药冲击起爆和爆轰成长最快, 这是热点点火过程与燃烧反应过程共同作用的结果。

关键词: 冲击起爆; PBX 炸药; 拉格朗日实验分析测试系统; 孔隙度

中图分类号: O381 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

PBX 炸药 (polymer bonded explosives) 是由主体炸药 (如 RDX、HMX、PETN 和 TATB 等) 或其混合物与聚合物黏结剂混合制成的非均质固体炸药, 由于其配方的灵活性、成型工艺的便捷性、成型后力学性能的优异性, 以及能量和感度的可协调性, 该炸药得到了广泛关注^[1-3]。非均质固体炸药的冲击起爆过程明显不同于均质炸药的, 归因于其细观非均质性^[4-5], 而目前对炸药在细观尺度的冲击响应认识还不足, 探索炸药细观结构特征对其冲击起爆性能的影响规律、发展细观反应速率模型是当前爆轰领域的重要研究方向。

前人开展的炸药冲击起爆试验研究, 主要通过隔板试验和楔形试验获得临界起爆条件或到爆轰距离等宏观数据^[6-7], 而通过一维拉格朗日量测试技术研究主要关注的是炸药本身爆轰成长特性和温度对炸药起爆过程的影响^[8-9]。近年来大家关注炸药细观结构对冲击起爆影响的试验研究, 如炸药组分^[10-12]、颗粒度^[13]对冲击起爆的影响, 但是孔隙度(密度)对炸药冲击起爆爆轰成长过程影响的拉格朗日实验数据未见报道。平面加载下一维拉格朗日量测试技术, 如嵌入式电磁粒子速度计测速技术^[6, 14]和锰铜压阻传感器测压技术^[8-9], 是目前记录炸药冲击起爆过程流场信息最直观有效的手段。目前由于反应速率模型大都是压力的函数, 因此采用流场压力数据来确定反应速率模型更直观合理。

本文中, 采用炸药冲击起爆锰铜压阻一维拉格朗日实验系统^[11-12], 测量不同孔隙度(装药密度)的 PBXC03 炸药冲击起爆过程中不同拉格朗日位置的应力变化历史, 获得孔隙度对 PBX 炸药冲击起爆过程的影响, 以期对炸药检验反应速率模型的合理性、确定反应速率模型参数提供实验数据。

1 实验设计

温丽晶等^[11-13]采用炸药冲击起爆锰铜压阻一维拉格朗日实验测试系统(如图 1 所示)研究了加载压力和细观结构如颗粒度变化对 PBXC03 炸药冲击起爆过程的影响。为了补充测量炸药装药密度(孔隙度)对其冲击起爆过程的影响, 并尽量减小其他因素带来的误差, 本文中采用相同的实验测试系统和相同尺寸的加载装置, 其中测试原理及加载装置尺寸细节见文献^[11-13]。

* 收稿日期: 2018-06-25; 修回日期: 2018-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(U1630113); 材料与结构冲击动力学创新小组(11521062)

第一作者: 刘海庆(1987—), 男, 博士研究生, liuhaiqing0705@163.com;

通信作者: 段卓平(1965—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, duanzp@bit.edu.cn。

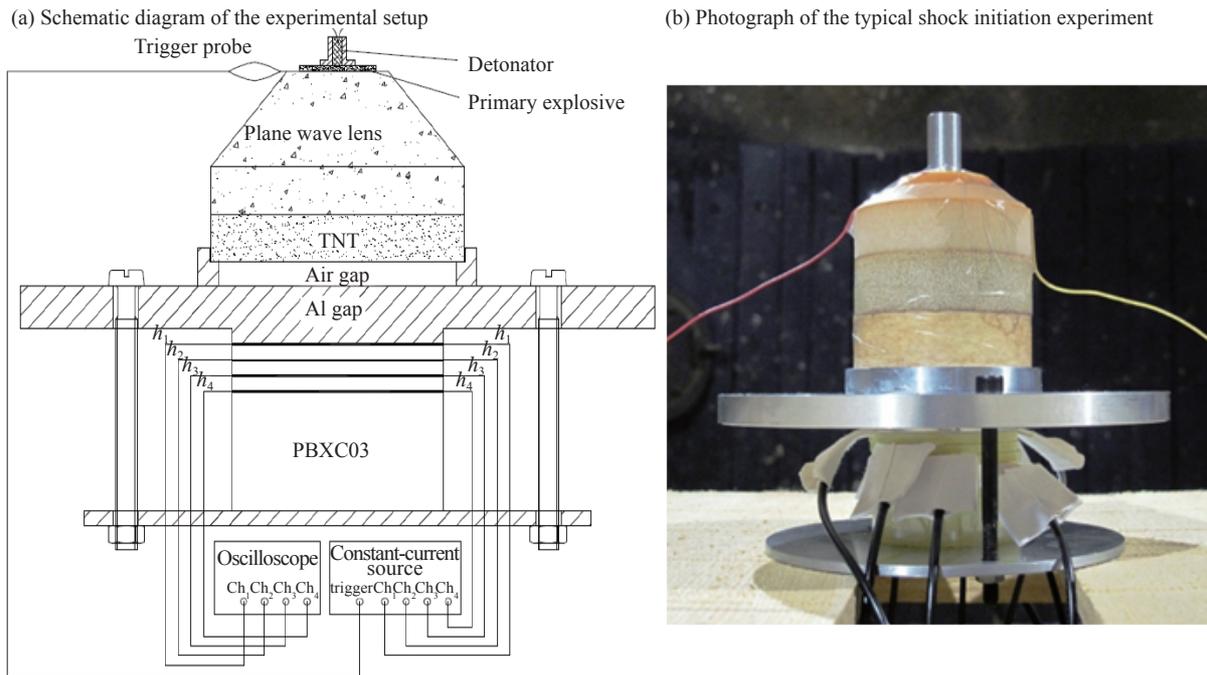


图 1 炸药冲击起爆锰铜压阻—维拉格朗日实验测试系统^[11-13]

Fig. 1 One-dimensional Lagrangian system with manganin piezoresistive pressure gauges for testing explosive shock initiation^[11-13]

本实验用的 PBXC03 炸药试件的尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 、 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的药片, 该药片是通过严格工艺控制加工得到, 并通过密度测量和筛选, 同种状态密度相对误差小于 1.5%, 厚度相对误差小于 2.0%, 每发实验待测试件采用 3 块 3 mm 厚的药片和一块 25 mm 厚的药片相叠组成, 如图 2 所示。

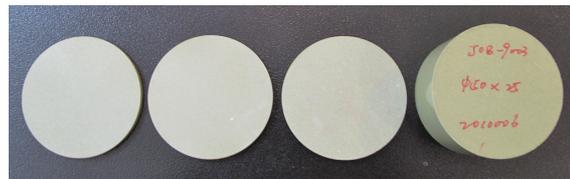


图 2 PBXC03 炸药样品
Fig. 2 PBXC03 samples

PBXC03 炸药中 HMX 的质量分数为 87%, 体积分数为 85.58%; TATB 的质量分数为 7%, 体积分数为 6.76%; 黏结剂的质量分数为 6%, 体积分数为 7.66%; HMX 平均颗粒尺寸为 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ (细颗粒), TATB 平均颗粒尺寸为 $15 \mu\text{m}$ 。PBXC03 炸药低装药密度为 1.836 g/cm^3 , 中等装药密度为 1.849 g/cm^3 , 高装药密度为 1.855 g/cm^3 。每发实验均在炸药 0 mm 位置处 (与铝隔板接触的炸药表面) 放置一个锰铜压阻传感器, 为了便于对比压力成长变化, 每发实验中锰铜传感器放置位置相同 (0、3、6、9 mm)。此外, 为维持爆轰压力测量时间, 锰铜压阻传感器用聚四氟乙烯薄膜包覆, 0 mm 位置传感器使用的薄膜厚度为 0.2 mm, 其余 3 个位置传感器使用的薄膜厚度均为 0.1 mm, 并使用真空硅脂封装, 装配细节如图 3 所示。



图 3 封装的锰铜压阻传感器
Fig. 3 Packaged manganin piezoresistive pressure gauges

实验用 H 型锰铜压阻传感器, 传感器电阻 $R_0 = 0.1 \sim 0.2 \Omega$, 压阻关系^[15] 为:

$$p = (0.763\ 56 \pm 0.181\ 1) + (34.627\ 96 \pm 0.960\ 71) \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right) + (6.007\ 62 \pm 0.978\ 41) \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^2 \quad (1)$$

实验现场示波器记录的典型实验信号, 如图 4 所示, 每条曲线代表一个拉格朗日位置处流场压力变化历程, 由式 (1) 即可将图中电压信号转化为压力-时间曲线。

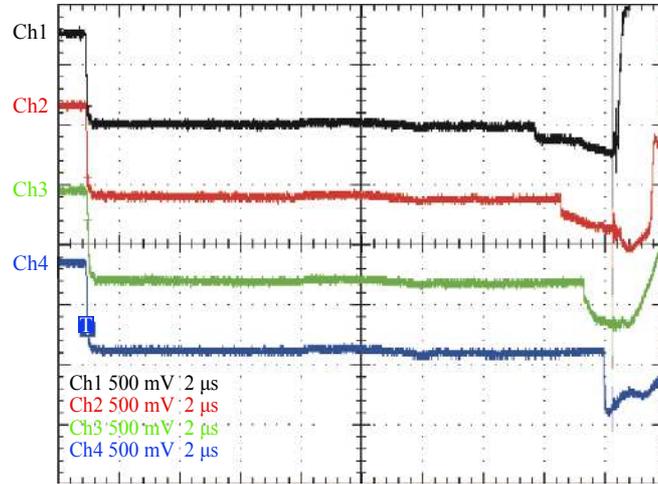


图 4 示波器记录的典型实验信号

Fig. 4 Typical voltage signals recorded by an oscilloscope

2 实验结果和分析

图 5 为 3 种孔隙度 (装药密度) 的 PBXC03 炸药在同一加载压力 ($p_0=5.9$ GPa) 下冲击起爆过程不同拉格朗日位置的实验测试结果。对比不同实验中 0 mm 位置的压力-时间历史, 如图 6 所示, 作为输入条件, 3 条曲线在平台值阶段几乎重叠 (后期压力成长不同是因为不同的孔隙度引起炸药反应速率不同), 表明本文实验加载条件一致。

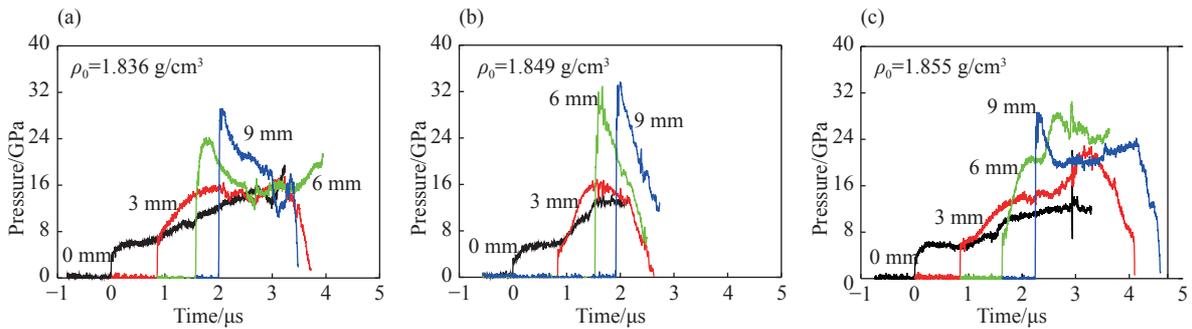


图 5 不同孔隙度的 PBXC03 炸药冲击起爆过程的实验测试结果

Fig. 5 Experimental pressure-time curves of the shock initiation processes of the PBXC03 with different porosities.

冲击起爆前期, PBXC03 炸药前导冲击波阵面压力增长不明显, 因为在较低的起爆压力下, 炸药压缩度小, 波阵面附近热点数量少, 释能缓慢, 热点点火反应在波阵面附近贡献不大, 但波后压力成长较快, 压力高峰不断追赶前导冲击波, 最终转为爆轰。

不同孔隙度的 PBXC03 炸药前导冲击波阵面压力成长历史和前导冲击波迹线, 如图 7 所示, 中等密度炸药前导冲击波阵面压力成长最快, 波后压力成长也最快, 到爆轰时间最早, 低密度炸药的次之, 高密度炸药的最低。可见, 在本文装药范围和加载条件下, 装药密度对炸药冲击起爆爆轰性能的影响不单调。

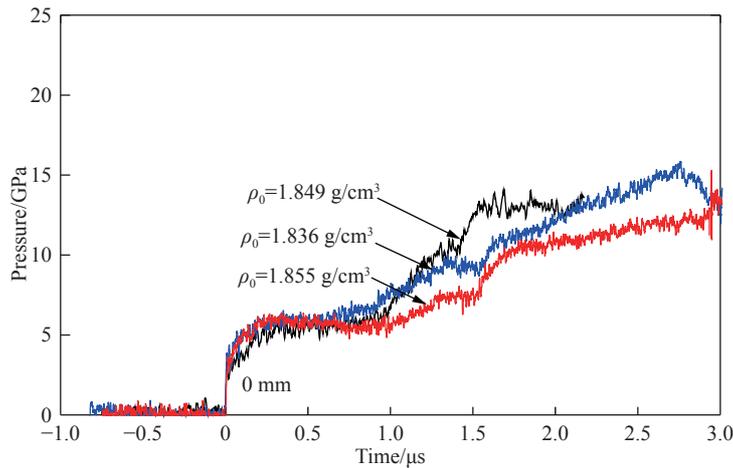


图 6 同一加载压力下不同实验中 PBXC03 炸药 0 mm 位置的压力-时间曲线对比

Fig. 6 Pressure-time curves at 0 mm of the PBXC03 with different porosities in different experiments under the same loading pressure

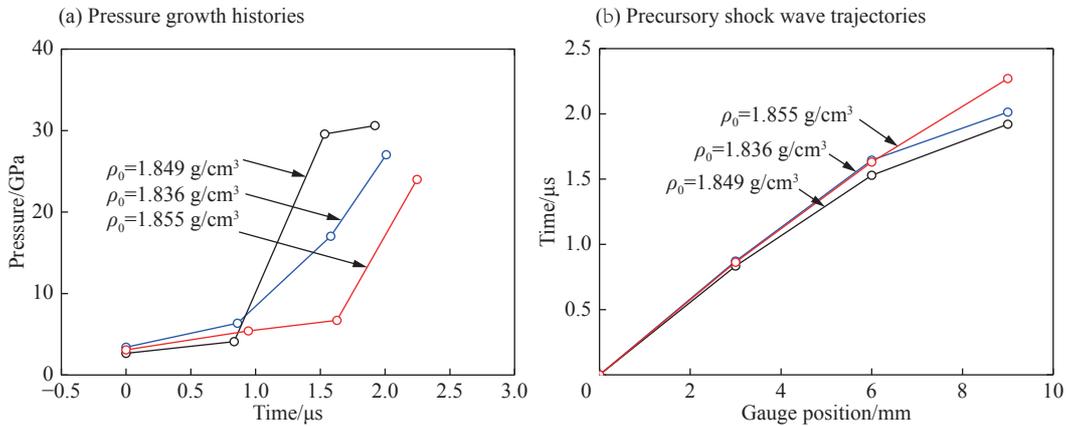


图 7 不同孔隙度的 PBXC03 炸药前导冲击波阵面压力成长历史和前导冲击波迹线。

Fig. 7 Pressure growth histories on the shock wave front and precursory shock wave trajectories in the PBXC03 with different porosities

在冲击载荷作用下, 炸药临界点火温度 T_{cr} 、反应热点的临界直径 d_{cr} 与前导冲击波阵面压力 p_f 满足关系式^[4]:

$$d_{cr} = \left(\frac{T_1}{T_0 + \theta p_f} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2)$$

$$T_{cr} = \frac{T_1}{d_{cr}^{\gamma}} \quad (3)$$

式中: T_0 为炸药初始温度, K; T_1 、 γ 、 θ 为常数系数。可见, 在相同外载条件下, 反应热点的临界直径 d_{cr} 越小, 临界点火温度 T_{cr} 越高。

目前普遍认为, 非均质固体炸药的冲击起爆由热点点火过程和后续燃烧反应过程共同作用控制。装药密度低时, 孔隙度大, 潜在热点数量多或尺寸大, 在相同外载条件下, 形成的反应热点温度较低, 热点反应区内激发的化学反应速率慢; 而装药密度大时, 孔隙度小, 潜在热点数量少或尺寸小, 临界点火温度较高, 但能够发生点火反应的热点数量少, 也将导致反应速率下降; 实验测得中等密度炸药反应速率最快的现象也可理解, 因为中等密度的炸药潜在热点数量和尺寸均适中, 燃烧拓扑结构可达到最优, 热点点火和后续燃烧速率可达到最快。

上述实验结果仅适用于本文装药密度范围和加载压力范围。装药密度范围不同, 炸药冲击起爆过程随孔隙度变化可能单调。载荷范围不同, 炸药冲击起爆随孔隙度变化规律也可能不同。比如, 在高压载荷作用下, 炸药冲击起爆主要受燃烧反应控制, 冲击起爆过程随着装药密度增大而单调变慢。在后续工作中将建立合理的细观反应速率模型进行数值模拟进一步证实。

3 结 论

采用炸药冲击起爆锰铜压阻一维拉格朗日实验分析测试系统, 获得了 PBXC03 炸药孔隙度 (装药密度) 变化对其冲击起爆过程的影响: 在本文装药和加载条件下, 孔隙度对 PBXC03 炸药冲击起爆爆轰成长过程的影响不单调, 这是热点点火过程与燃烧反应过程共同作用的结果。本文实验数据可为后续建立宏细观反应流模型提供实验依据。

参考文献:

- [1] AN C, LI H, YE B, et al. Preparation and characterization of ultrafine HMX/TATB explosive co-crystals [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2017, 14(4): 876–887. DOI: 10.22211/cejem/77125.
- [2] TALAWAR M B, AGARWAL A P, ANNIYAPPAN M, et al. Method for preparation of fine TATB (2-5 microm) and its evaluation in plastic bonded explosive (PBX) formulations [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137(3): 1848. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.05.031.
- [3] WANG Z, GUO X, WU F, et al. Preparation of HMX/TATB composite particles using a mechanochemical approach [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(2): 327–333. DOI: 10.1002/prop.201500136.
- [4] GREBENKIN K F. Comparative analysis of physical mechanisms of detonation initiation in HMX and in a low-sensitive explosive (TATB) [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2009, 45(1): 78–87. DOI: 10.1007/s10573-009-0011-y.
- [5] MASSONI J, SAUREL R, BAUDIN G, et al. A mechanistic model for shock initiation of solid explosives [J]. *Physics of Fluids*, 1999, 11(3): 710–736. DOI: 10.1063/1.869941.
- [6] BOURNE N K, MILNE A M. Shock to detonation transition in a plastic bonded explosive [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(5): 2379–2385. DOI: 10.1063/1.1644632.
- [7] COOPER M, TROTT W. On the development of a modified wedge test for shock-to-detonation transition in explosives using ORVIS [C] // 17th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. Chicago, Illinois, 2011.
- [8] URTIEW P A, TARVER C M. Shock initiation of energetic materials at different initial temperatures: review [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2005, 41(6): 766–776. DOI: 10.1007/s10573-005-0085-0.
- [9] VANDERSALL K S, TARVER C M, GARCIA F, et al. Shock initiation experiments on PBX9501 explosive at 150 °C for ignition and growth modeling [C] // American Physical Society Meeting on Shock Compression of Condensed Matter, Baltimore, MD, United States, 2005.
- [10] 白志玲, 段卓平, 景莉, 等. 飞片冲击起爆高能钝感高聚物粘结炸药的实验研究 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(8): 1464–1468. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.018.
BAI Zhiling, DUAN Zhuoping, JING Li, et al. Experimental research on initiation of insensitive high energy plastic bonded explosive by flyer impact [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(8): 1464–1468. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.018.
- [11] 温丽晶, 段卓平, 张震宇, 等. 不同加载压力下炸药冲击起爆过程实验和数值模拟研究 [J]. *兵工学报*, 2013, 34(3): 283–288. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.03.005.
WEN Lijing, DUAN Zhuoping, ZHANG Zhenyu, et al. Experimental and numerical study on the shock initiation of pbxc03 explosive under the different loading pressure [J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(3): 283–288. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.03.005.

- [12] 温丽晶, 段卓平, 张震宇, 等. HMX 基和 TATB 基 PBX 炸药爆轰成长差别的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(S): 135–139.
WEN Lijing, DUAN Zhuoping, ZHANG Zhenyu, et al. Experimental research on differences of detonation growth process between HMX-based and TATB-based plastic bonded explosives [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(S): 135–139.
- [13] WEN L J, DUAN Z P, ZHANG L S, et al. Effects of HMX particle size on the shock initiation of PBXC03 explosive [J]. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2012, 13(2): 189–194. DOI: 10.1515/ijnsns.2011.129.
- [14] GIBSON L L, DATTELBAUM D, BARTRAM B, et al. Shock initiation sensitivity and Hugoniot-based equation of state of composition-B Obtained using in-situ electromagnetic gauging [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2014, 500(19): 192004. DOI: 10.1088/1742-6596/500/19/192004.
- [15] DUAN Z P, LIU Y, PI A G, et al. Foil-like manganin gauges for dynamic high pressure measurements [J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(7): 075206. DOI: 10.1088/0957-0233/22/7/075206.

Experimental research on effects of porosity on shock initiation of PBX explosive

LIU Haiqing¹, DUAN Zhuoping¹, BAI Zhiling¹, WEN Lijing^{1,2},
OU Zhuocheng¹, HUANG Fenglei¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection,
Beijing 100082, China)

Abstract: To investigate the influence of the porosity (charge density) on the shock initiation and detonation of polymer bonded explosives (PBXes), a one-dimensional Lagrangian experimental testing system is adopted to measure the pressure-time histories at different Lagrangian locations of PBXC03 (87% HMX, 7% TATB, 6% binder by weight) with three different porosities (or charge densities), in which, an explosive plane-wave lens is used to generate a high-pressure planar detonation wave loading, and the Manganin piezoresistive pressure gauge measurement technique and the attenuation technique by both air-gap and Al-gap are used. The experimental results show that the detonation grows the fastest in the explosive with a moderate porosity. This work provides more detailed experimental data for the further development of mesoscopic reaction rate models for shock initiation of heterogeneous explosives.

Keywords: shock initiation; PBX explosives; Lagrangian experiment testing system; porosity

(责任编辑 张凌云)