

文章编号: 1006-9941 (2016)03-0300-06

HMX 基 PBX 粒子速度测量的铝基组合电磁粒子速度计技术

刘杰¹, 王延飞¹, 王广军², 张蓉², 钟斌², 赵锋², 张旭²

(1. 中国工程物理研究院研究生部, 四川 绵阳 621999; 2. 中国工程物理研究院流体研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为了精确测量奥克托今(HMX)基高聚物粘结炸药(PBX)冲击起爆过程的 Lagrange 粒子速度随时间的变化, 采用与炸药阻抗匹配的铝基组合电磁粒子速度计实验技术, 测量了 3.07, 4.14, 7.81, 8.12 GPa 入射压力下某 HMX 基 PBX 炸药样品中的 Lagrange 粒子速度随时间的变化。结果表明: 铝基组合电磁粒子速度计时间响应快, 感应单元冲击响应上升时间为 20 ns。不同起爆压力下获得 HMX 基 PBX 炸药样品中 1~8 mm 深度处的 Lagrange 粒子速度随时间变化响应快、干扰小。

关键词: 铝基组合电磁粒子速度计; 奥克托今(HMX)基高聚物粘结炸药(PBX); 粒子速度

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.03.016

1 引言

组合电磁粒子速度计技术(电磁法)是炸药冲击起爆、老化效应研究中非常重要的实验技术之一, 作为嵌入式传感器, 其主要特点是灵敏度高、无需标定。Fowles^[1]最早将组合电磁粒子速度计技术结合气炮使用, 美国洛斯阿拉莫斯(LANL)实验室的 Campbell^[2]、Dick^[3]、Gustavsen^[4-5]和 Sheffield^[6]利用组合电磁粒子速度计技术开展了多种炸药的冲击起爆研究, 测量以奥克托今(HMX)为基的 LX-04、PBX-9404、PBX-9501 炸药在不同入射压力下的粒子速度, 同时考虑了温度效应、颗粒度效应和老化效应的影响。实验结果还给出了未反应炸药 Hugoniot 参数、Popolato (POP 关系)数据, 提供丰富的冲击起爆过程信息。目前 LANL 实验室^[7]主要利用组合电磁粒子速度计技术测量钝感炸药 PBX-9502 冲击起爆过程的波后粒子速度, 包括 PBX-9502 钝感炸药受炸药颗粒度、温度参数影响的冲击起爆过程实验研究。北京理工大学和国防科技大学^[8]、化工材料研究所^[9-10]和流体物理研究所^[11-12]也先后开展了电磁粒子速度计实验技术研究,

组合电磁粒子速度计的感应单元以铜基材料为主, 加载方式以化爆加载为主, 但实验结果受电磁干扰较大, 不理想。以铜基材料作为感应单元的主要缺点是时间响应慢, 不能满足炸药反应过程测量的快响应需求, 因此本研究设计与炸药阻抗匹配的铝基组合电磁粒子速度计, 提高了组合电磁粒子速度计的时间响应特性, 结合火炮加载实验方式, 测量了某 HMX 基高聚物粘结炸药(PBX)在不同入射冲击压力下的粒子速度, 实验数据精度高, 电磁干扰小。

2 组合电磁粒子速度计设计和实验方法

2.1 铝基组合电磁粒子速度计设计

组合电磁粒子速度计设计中切割磁场的感应单元选取主要以铜和铝为主, 如果采用铜箔作为计材料, 铜密度大, 阻抗高($40890 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), 与炸药阻抗不匹配, 测量过程中时间响应慢, 故本研究选取与炸药阻抗($11400 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)接近的铝箔(铝的阻抗为 $17010 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)^[4]作为计材料, 以提高计单元的时间响应特性。设计的铝基组合电磁粒子速度计如图 1 所示, 设计计长 5~8 mm, 各个感应单元之间间距 2 mm, 铝箔厚度 10 μm , 夹在聚酰亚胺绝缘膜之间。铝基组合电磁粒子速度计通过转接板与测试电缆连接, 消除附加电阻, 设计的冲击示踪器记录惰性冲击波转化为爆轰的时间-距离关系。实验中铝基组合电磁粒子速度计嵌入具有 30°倾角的炸药样品中, 如图 2 所示, 保证相邻感应单元在冲击波传播方向的间距为 1 mm 间隔。

收稿日期: 2015-01-08; 修回日期: 2015-04-04

基金项目: 中国工程物理研究院科学基金资助(2013B0101001), 国防科工局技术基础项目(JSZL2015212c001)

作者简介: 刘杰(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事炸药起爆研究。
e-mail: liuj3558@gmail.com

通信联系人: 张旭(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体动力学研究。e-mail: caepzx@sohu.com

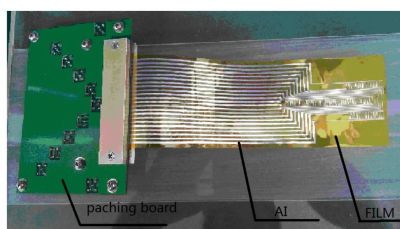


图1 设计的铝基组合电磁粒子速度计

Fig.1 Designed Al-based electromagnetic particle velocity gauge

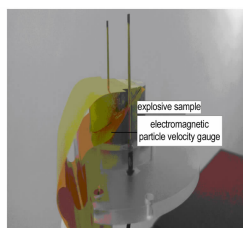


图2 嵌入炸药样品中的组合电磁粒子速度计

Fig.2 Electromagnetic particle velocity gauge inserted in explosive sample

2.2 实验原理及测试方法

组合电磁粒子速度计实验的装置构型如图3所示。由图3可见,加载和测试主要包括火炮加载装置、真空靶室、 $\Phi 57$ mm 的弹托 (polycarbonate projectile)、 $\Phi 55$ mm 蓝宝石飞片、磁场装置防护筒、 $\Phi 40$ mm $\times$ 30 mm 待测炸药样品,铝基组合电磁粒子速度计、磁通量为 0.14T 的永久磁场装置。磁场装置的磁场强度均匀区域为边长 30 mm 的立方均匀区域,非均匀性小于 1%。嵌入组合电磁粒子速度计的待测 HMX 基炸药样品放置在磁场均匀区域内,单计放置在炸药样品前表面和撞击飞片之间,用于测量待测样品表面的界面粒子速度,结合炸药样品中的冲击波速度计算入射到样品中的撞击压力。

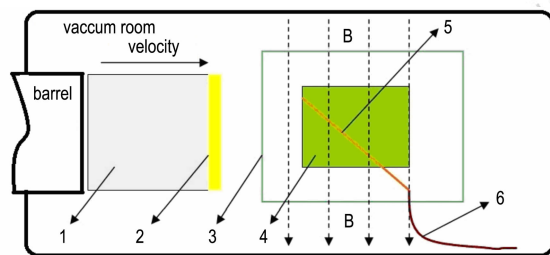


图3 实验装置构型图

1—聚碳酸酯弹托, 2—飞片, 3—防护筒, 4—HMX 基炸药样品, 5—组合电磁粒子速度计, 6—导线

Fig.3 Scheme of experimental device

1—Lexon (polycarbonate projectile), 2—flyer, 3—protection cylinder, 4—HMX-based explosive sample, 5—electromagnetic particle velocity gauge, 6—conducting wire

组合电磁粒子速度计实验原理是利用法拉第电磁感应定律,闭合回路导线切割磁力线产生感生电动势。在已知磁场强度 B 、切割磁力线的感应单元长度 l 前提下,通过测量感生电动势 ε 计算粒子速度 v

$$v = \varepsilon / Bl \times 10^3 \quad (1)$$

式中, v 为粒子速度, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$; ε 为感生电动势, V; l 为感应单元长度, mm; B 磁场强度, T。

入射冲击波压力由实验获得的进入样品中的冲击波速度 D 、样品和和飞片间的界面粒子速度 u_p 、样品初始密度 ρ_0 计算:

$$p = \rho_0 D u_p \quad (2)$$

式中, p 为入射冲击波压力, GPa; ρ_0 为样品初始密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; D 为冲击波速度, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$; u_p 为界面粒子速度, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。

3 结果与分析

3.1 铝基组合电磁粒子速度计的时间响应特性

组合电磁粒子速度计的时间响应是影响冲击波后速度波剖面参数测试精度的重要因素之一,一般认为由计箔被加速到与周围介质相同速度所需时间、作用在计箔单元上的冲击波与计箔的夹角、传输和记录系统的前沿响应时间等因素决定。计箔响应时间由冲击波在计箔内来回反射两次的时间确定,即 $t_1 = 4\delta/D$, 其中 D 为冲击波速度, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$; δ 为计箔厚度, mm; 感应单元从开始部分动作到全部动作需的时间由飞片的撞击倾斜角确定,即 $t_2 = l * \sin\theta/D$, 其中 l 为感应长度, θ 为撞击倾斜角。以实验中进入样品的冲击波速度 $D = 5.25 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 、飞片的倾角小于 0.5° 为例,计箔厚度 $\delta = 10 \mu\text{m}$, 则其响应时间约为 $t_1 \approx 7.62 \text{ ns}$, $t_2 \approx 18 \text{ ns}$, 则总作用时间为 $20 \sim 30 \text{ ns}$ 。本实验获得的 3.07, 4.14, 7.81, 8.12 GPa 四种入射压力 (见表1) 下炸药样品中入射冲击波无倾斜, 在入射冲击波压力为 4.14 GPa 的实验条件下, 获得的冲击波到达炸药样品 1 mm 深度处的左、右示踪器、中间感应单元的记录信号如图4所示, 从图4可见, 入射冲击波几乎同时到达左、右示踪器和中间感应单元, 表明飞片撞击样品的平面度好, 在感应单元投影方向冲击波无倾斜, 能够保证感应单元的时间响应特性。此外, 入射冲击波压力为 4.14 GPa 时, 炸药样品中铝基组合电磁粒子速度计中感应单元的上升时间约为 20 ns, 如图5所示, 达到了理想的冲击时间响应特性, 与 LANL 实验室 Gustavsen^[4] 获得的实验结果相当。

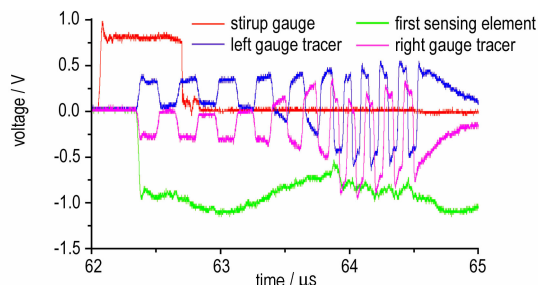


图4 冲击波撞击平面度 ($p=4.14$ GPa)

Fig.4 Planeness of shock wave

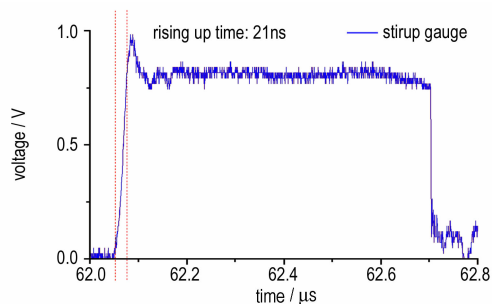


图5 铝基组合电磁粒子速度计时间响应特性 ($p=4.14$ GPa)

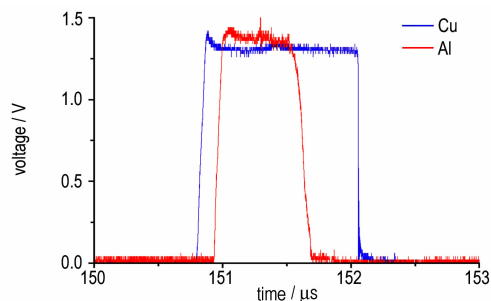
Fig.5 Time response characteristic of Al based electromagnetic particle velocity gauge

为了比较不同计箔材料对粒子速度测量结果的影响,分别选取 $10\ \mu\text{m}$ 厚的铜箔和 $10\ \mu\text{m}$ 厚的铝箔作为感应单元,测量同一撞击界面处两种不同计箔材料的时间响应特性(即从信号出现直至达到峰值所需的时间)。实验中计箔感应单元放置在有机玻璃(PMMA)样品撞击表面,保证冲击波同时到达铜箔和铝箔感应单元。实验中飞片速度为 $1136\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (入射冲击波压力为 $8.71\ \text{GPa}$) 时,测到的铜箔和铝箔感应单元感生电动势原始记录信号如图 6a 所示,由图 6a 可见,铝箔上升前沿 $0.06\ \mu\text{s}$,铜箔上升前沿 $0.07\ \mu\text{s}$,铝箔上升时间比铜箔上升前沿快 7% 左右,实验结果表明铝基组合电磁粒子速度计具有更优异的时间响应特性。

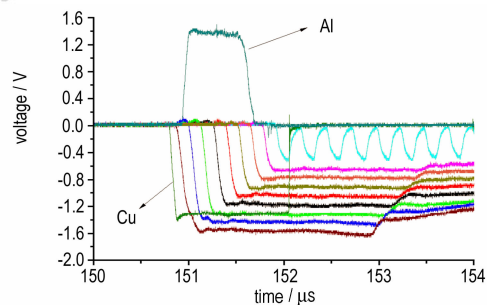
此外,对比实验中有有机玻璃样品中的组合电磁粒子速度计记录了冲击波后粒子速度和示踪器数据如图 6b 所示,由图 6b 可见,实验数据信号无干扰,完整记录了 PMMA 冲击响应的波后粒子速度历程,同时记录了铜箔和铝箔作为感应单元的时间响应特性。

3.2 不同冲击起爆压力下 HMX 基炸药反应增长的速度剖面

为了检验反应增长过程粒子速度测量的精度和干扰,采用所设计的铝基组合电磁粒子速度计,感应单元预埋入样品 $1\sim 8\ \text{mm}$ 深度处,在 $3.07, 4.14, 7.81,$



a. comparison of Cu and Al origin signal



b. origin signals of all gauges

图6 铜和铝感应单元记录信号和组合计信号

Fig.6 Comparison of the origin signals of Cu and Al induction unit and the ones of all gauge

$8.12\ \text{GPa}$ 四种入射压力下测量了 HMX 基 PBX 炸药不同冲击起爆压力下的粒子速度,结果见表 1。同时,表 1 还给出了 HMX 基 PBX 炸药反应增长粒子速度测量的样品密度和入射冲击波压力列表。

表1 样品密度和入射冲击波压力

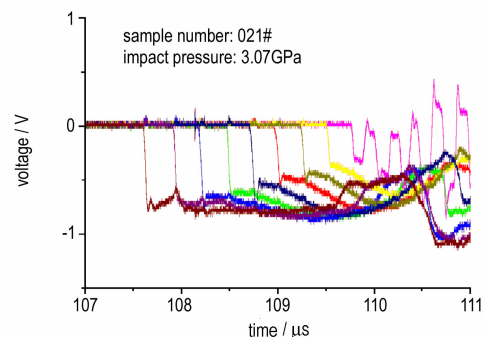
Table 1 Sample density and incident shock wave pressure

No.	sample density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	shock wave velocity in sample / $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	interface velocity / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	impact pressure /GPa
1	1.849	3.165	525	3.07
2	1.841	3.460	650	4.14
3	1.845	3.846	1101	7.81
4	1.845	3.876	1136	8.12

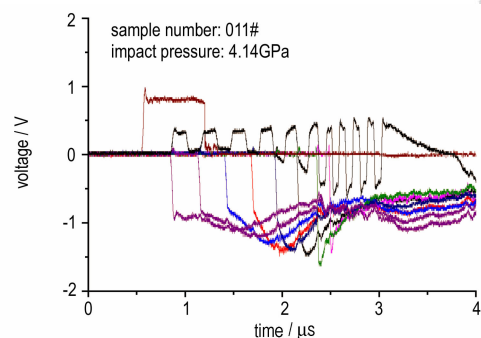
在入射冲击波压力 $3.07, 4.14, 7.81, 8.12\ \text{GPa}$ 下,铝基组合电磁粒子速度计测试 HMX 基 PBX 反应增长粒子速度原始信号如图 7a ~ 图 7d 所示,相应的粒子速度信号如图 8a ~ 图 8d 所示,图 8 中每组曲线的第一条曲线为飞片撞击表面的 stirup gauge 记录的界面粒子速度,以 stirup gauge 所在的撞击表面作为源点,由左至右感应单元埋入样品中深度间隔 $1\ \text{mm}$ 。由图 7 所见,速度计记录信号信噪比高、无干扰,而且

每个速度计的上升沿时间都小于 20 ns,说明铝基组合电磁粒子速度计达到了设计和应用要求。当入射压力

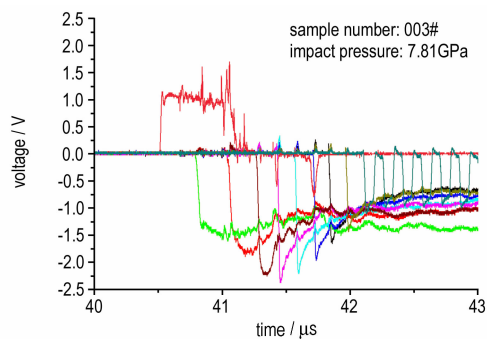
(3.07 GPa 和 4.14 GPa) 较低时,由图 8a 和图 8b 可见,1 mm 深度处的粒子速度没有出现增长现象,而且



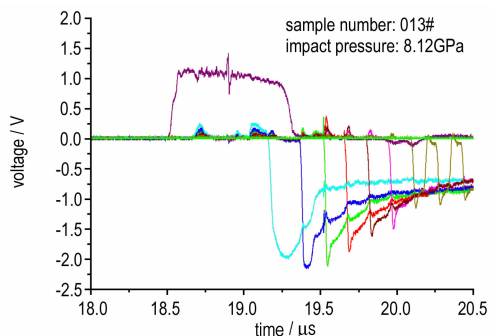
a. 3.07 GPa



b. 4.14 GPa



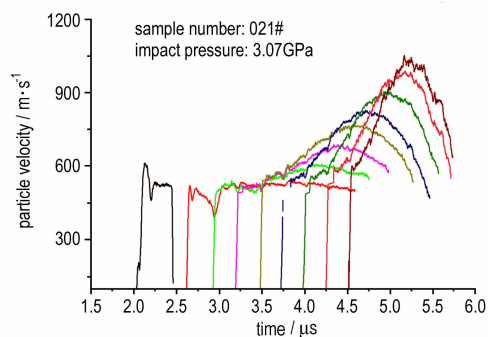
c. 7.81 GPa



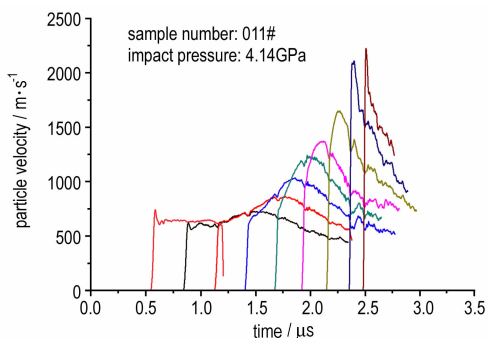
d. 8.12 GPa

图 7 铝基组合电磁粒子速度计记录的 HMX 基炸药反应增长原始信号

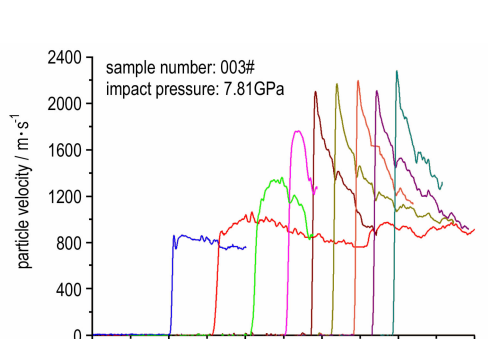
Fig. 7 Origin signals of reaction-build-up in HMX-based PBX recorded by Al based electromagnetic particle velocity gauge



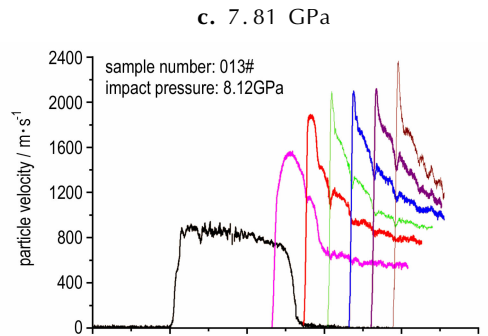
a. 3.07 GPa



b. 4.14 GPa



c. 7.81 GPa



d. 8.12 GPa

图 8 4 种入射冲击波压力下的粒子速度

Fig. 8 Particle velocity at different incident shock wave pressure

整个记录时间内粒子速度都处于增长阶段,说明反应过程没有转为正常爆轰;当入射冲击波压力提高到 7.81 GPa 和 8.12 GPa 时,由图 8c 和图 8d 可见,出现了反应冲击波赶上惰性前驱冲击波的过程。HMX 基 PBX 炸药的反应增长粒子速度数据表明:铝基组合电磁粒子速度计时间响应特性高,无干扰,能够很好地反映炸药冲击起爆过程的粒子速度增长规律。

铝基组合电磁粒子速度计中的示踪器也正确记录了冲击波在样品中的运动轨迹,其原理是当冲击波经过示踪器的敏感单元时,会产生跳变信号,每一个跳变信号对应冲击波在样品中传播的一个位置和时间,由此可以得到冲击波在样品中的运动轨迹。以入射冲击波压力为 4.14 GPa 的实验结果为例,示踪器记录信号如图 9a 所示,相应的冲击波在样品中的运动轨迹如图 9b 所示,完整记录了冲击波在样品中的传播特性,示踪器间隔 0.5 mm,冲击波扫过示踪器时,示踪器感生电动势信号符号发生变化,此外,当冲击波转化为爆轰波时,信号幅度会明显增强,即为冲击转爆轰的拐点。

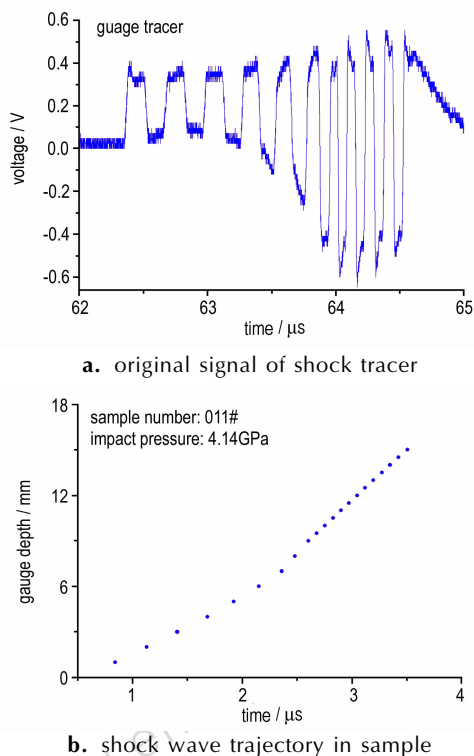


图9 用示踪器记录的信号和冲击波在样品中的传播特性

Fig.9 Signals recorded by tracer and propagation characteristic of shock wave in sample

4 结论

设计了与炸药阻抗匹配的铝基组合电磁粒子速度

计,与铜基组合电磁粒子速度计相比,铝基组合电磁粒子速度计具有更好的冲击时间响应特性,铝箔上升时间比铜箔上升前沿快 7% 左右;HMX 基 PBX 炸药反应增长粒子速度测量实验结果中,铝基组合电磁粒子速度计记录信号信噪比高、无干扰,而且每个感应单元的上升沿时间都小于 20 ns,达到了设计和应用要求。研究结果表明:铝基组合电磁粒子速度计及其测试系统得到的感生电动势干扰小,精度高,可以成功获得高精度的 HMX 基炸药反应增长过程粒子速度数据,实验结果将有助于对冲击起爆反应增长过程规律的认识,也是反应速率建模和反应流体动力学程序校验的重要实验依据。

参考文献:

- [1] Fowles R, Williams R F. Plane wave stress propagation in solids [J]. *Journal of Applied Physics*, 1970, 41(1): 360-365.
- [2] Campbell A W, Davis W C, Ramsay B, et al. Shock initiation of solid explosives[J]. *The Physics of Fluids*, 1961, 21(4): 511-577.
- [3] Dick, J J, Forest C A, Ramsay J B, et al. The Hugoniot and shock sensitivity of a plastic-bonded TATB explosive PBX 9502 [J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, 63: 4881-4887.
- [4] Gustavsen, R L, Sheffield S A, Alcon R R. Measurements of shock initiation in the tri-amino-tri-nitro-benzene based explosive PBX 9502: wave forms from embedded gauges and comparison of four different material lots [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99: 114907.
- [5] Gustavsen, R L, Sheffield S A, Alcon R R. Low pressure shock initiation of porous HMX for two grain size distributions and two densities[C] // American Institute of Physics (AIP) Conference Proceedings, 1995.
- [6] Sheffield S A, Gustavsen R L, Alcon R R, et al. Particle velocity and stress measurements in low density HMX[C] // Edited by Schmidt S C, Shaner J W, Samara G A, et al, American Institute of Physics (AIP) Conference Proceedings, 1993.
- [7] Gustavsen R L, Sheffield S A. Double shock initiation of the HMX based explosive EDC-37 [C] // AIP Conference Proceeding, 2002.
- [8] 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(1): 26-32
WEN Li-jing, DUAN Zhuo-ping, ZHANG Zhen-yu, et al. Experimental study build-up difference of HMX and TATB based PBX explosive[J]. *Explosive and Shock Wave*, 2013(1): 26-32.
- [9] 李志鹏, 龙新平, 黄毅民, 等. 组合式电磁粒子速度计实验方法的研究及应用[J]. *含能材料*, 2005, 13(6): 359-361.
LI Zhi-peng, LONG Xin-ping, HUANG Yi-min, et al. Experimental method and application of electromagnetic particle velocity technique [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(6): 359-361.
- [10] 李志鹏, 龙新平, 黄毅民, 等. 用组合式电磁粒子速度计研究 JOB-9003 炸药的冲击起爆过程[J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(3): 269-272.
LI Zhi-peng, LONG Xin-ping, HUANG Yi-min, et al. Initiation of JOB-9003 explosive study with electromagnetic particle velocity

- ty technique[J]. *Explosive and Shock Wave*, 2006, 26(3): 269–272.
- [11] 王圣平. 电磁速度计技术[J]. 爆轰波与冲击波, 1985, 4(1): 33–35.
- WANG Sheng-ping. Study of electromagnetic particle velocity technique[J]. *Detonation and Shock Wave*, 1985, 4(1): 33–35.
- [12] 于川. JB-9001 炸药冲击 Hugoniot 关系测试[J]. 高压物理学报, 1998, 12(1): 72–77.
- YU Chuan. Shock Hugoniot relation of JB-9001 high explosive[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1998, 12(1): 72–77.

Al-based Electromagnetic Particle Velocity Gauge Technique of Measuring the Particle Velocity of HMX-based PBX Explosives

LIU Jie¹, WANG Yan-fei¹, WANG Guang-jun², ZHANG Rong², ZHONG Bin², ZHAO Feng², ZHANG Xu²

(1. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China; 2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: In order to accurately measure the change in Lagrange particle velocity with time in the shock initiation process of HMX-based PBX, Al-based electromagnetic particle velocity gauge technique was used to measure the change in Lagrange particle velocity with time history in HMX-based PBX samples under the incident shock wave pressure of 3.07, 4.14, 7.81 GPa and 8.12 GPa. Results show that the time response of Al-based electromagnetic particle velocity gauge is very fast and the rising-up time of impact response for induction unit is less than 20 ns. The time response for the change in Lagrange particle velocity with time at 1–8 mm depth position of HMX-based PBX obtained under different incident shock wave pressures obtained is fast and the interference is small.

Key words: Al-based electromagnetic particle velocity gauge; HMX-based PBX; particle velocity

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.03.016