

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0050

TATB 基钝感炸药 JB-9014 的冲击起爆 反应增长规律*

张琪敏¹, 张旭², 赵康¹, 舒俊翔², 张蓉², 钟斌²

(1. 中国工程物理研究院研究生院, 四川 绵阳 621999;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 采用铝基组合式电磁粒子速度计技术, 通过一维平面冲击实验研究了 JB-9014 炸药的冲击起爆反应增长规律, 获得了 11.33~14.18 GPa 不同初始入射冲击压力下 JB-9014 炸药撞击界面及其内部不同深度处冲击前沿的波后粒子速度, 进而得到粒子速度-时间波剖面图, 并拟合得到未反应 JB-9014 炸药的 Hugoniot 关系。此外, 根据冲击波跟踪器所测波形获得了不同冲击压力下的到爆轰时间及距离。

关键词: JB-9014 炸药; 铝基组合式电磁粒子速度计; 粒子速度-时间波剖面图; 雨贡纽关系; Pop 图

中图分类号: O382 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

随着现代武器对弹药安全性能要求的提高, 钝感炸药已成为近年来武器弹药研究的热点。TATB 炸药最早于 1887 年由 Jackson 和 Wing 合成, 到目前为止, TATB 依然是最钝感的炸药^[1], 因此 TATB 及以 TATB 为基的炸药的冲击起爆性能受到各国学者的重视。Gustavsen 等^[2-3] 利用组合式电磁粒子速度计技术, 研究了常温下和 -55℃ 下 TATB 基钝感炸药 PBX-9502 在不同入射冲击压力下的波后粒子速度和冲击波/爆轰波传播轨迹, 得到了 2 种温度下表征炸药冲击起爆性能的“压力-冲击到爆轰距离”关系; 张旭等^[4] 利用压力对比法, 采用锰铜计测量了 TATB 基钝感炸药 JB-9014 的界面压力场, 拟合了该炸药的冲击绝热线关系。

在钝感炸药冲击起爆性能研究的实验技术中, 组合式电磁粒子速度计技术是使用最广泛的技术之一, 它具有工作原理简单、响应灵敏、单次实验所得信息丰富、对反应流场干扰小、无需标定等优点^[5]。1960 年, 电磁粒子速度计技术最先由俄罗斯的 Zaitzev 等提出; 中国的电磁粒子速度计测试技术起步于 20 世纪 80 年代初期, 经过几十年的研究与改造, 现已成功地利用火炮平台作为初始冲击力发射撞击起爆炸药, 再利用铝基组合式探针在爆炸或冲击波驱动下切割磁力线获得粒子速度-时间关系、冲击起爆雨贡纽关系, 这些数据于爆轰反应动力学过程建模的标定和验证具有重要支撑作用。

1 实验原理和方法

组合式电磁粒子速度计的设计原理为法拉第电磁感应定律: 即导线切割磁感线会产生感应电动势^[6]。电磁粒子速度计切割磁感线产生的感应电动势为:

$$E_{\text{gauge}} = Blu \quad (1)$$

式中: E_{gauge} 为动生电动势(V), B 为已知磁场强度(T), l 为有效切割长度(m), u 为粒子速度(m/s)。示波器记录的电压信号为:

* 收稿日期: 2018-02-06; 修回日期: 2018-05-09

基金项目: 科学挑战专题(TZ2018001)

第一作者: 张琪敏(1993—), 女, 硕士研究生, 15802856071@163.com;

通信作者: 张旭(1972—), 男, 博士, 研究员, 博导, caepzx@sohu.com。

$$E_{\text{scope}} = E_{\text{gauge}} \frac{R_{\text{scope}}}{R_{\text{scope}} + (R_{\text{gauge}} - \Delta R_{\text{gauge}})} \quad (2)$$

式中: R_{scope} 为示波器的电阻, 50Ω ; R_{gauge} 为粒子速度计的电阻, 实验时需用万用表测量, ΔR_{gauge} 为万用表本身的电阻。粒子速度为:

$$u = E_{\text{scope}} \frac{R_{\text{scope}} + (R_{\text{gauge}} - \Delta R_{\text{gauge}})}{BIR_{\text{scope}}} \quad (3)$$

在火炮加载平台上, 采用铝基组合式电磁粒子速度计技术开展 TATB 基钝感炸药 JB-9014 的一维平面冲击实验, 实验装置如图 1 所示。用环氧树脂把铝基组合式电磁粒子速度计以 30° 倾角镶入两块楔形 JB-9014 炸药样品之间, 粘合成 $\varnothing 42 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的组合药柱, 并置于 0.14 T 的均匀磁场中。实验所用铝基组合式电磁粒子速度计如图 2 所示, 它由 8 个电磁粒子速度单计和 3 个冲击波跟踪器组成。在冲击波传播方向, 相邻两个粒子速度单计间隔 1 mm , 相邻两个冲击波跟踪器间隔 0.5 mm 。另外, 在炸药样品前表面还贴有 3 个单点速度计, 用于记录蓝宝石飞片撞击炸药时刻的界面粒子速度。

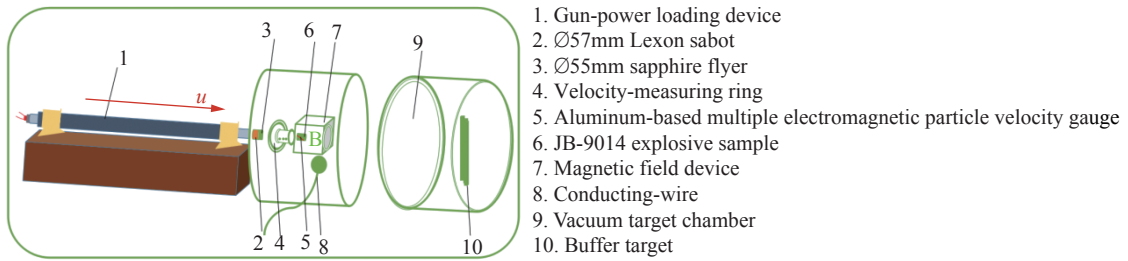


图 1 实验装置图

Fig. 1 Illustration of the experimental set-up

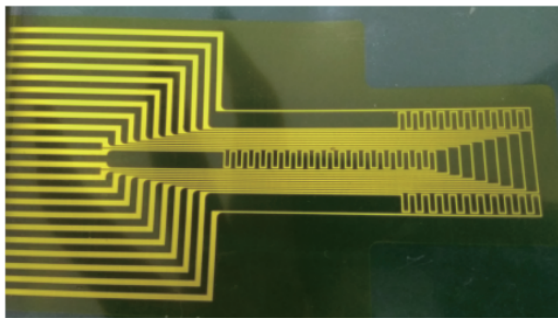


图 2 铝基组合式电磁粒子速度计

Fig. 2 Aluminum-based multiple electromagnetic particle velocity gauge

3 实验结果与分析

3.1 入射冲击压力的标定

为了获得不同冲击起爆压力下 JB-9014 炸药的冲击反应增长规律, 在火炮平台上开展了 6 发 JB-9014 炸药的一维平面冲击实验。分析蓝宝石飞片撞击炸药的过程, 用下标 f 表示蓝宝石飞片的各个物理量, 用下标 e 表示炸药样品的物理量, 由动量守恒可知^[7]:

$$p_{0,f} = \rho_{0,f} u_{s,f} (u_1 - u_p) \quad (4)$$

$$p_{0,e} = \rho_{0,e} u_{s,e} u_p \quad (5)$$

式中: p_0 为初始入射冲击压力, ρ_0 为初始密度, u_s 为入射冲击波速度, u_p 为波后粒子速度, u_1 为蓝宝石飞片的撞击速度。

利用蓝宝石和 JB-9014 炸药的 Hugoniot 关系, 式 (4) 和 (5) 可以改写为:

$$p_{0,f} = \rho_{0,f} [c_{0,f} + \lambda_e (u_1 - u_p)] (u_1 - u_p) \quad (6)$$

$$p_{0,e} = \rho_{0,e} (c_{0,e} + \lambda_e u_p) u_p \quad (7)$$

式中: c_0 和 λ 为常数, 对于飞片, $c_{0,f} = 11.19 \text{ km/s}$, $\lambda_f = 1.0$; $\rho_{0,f} = 3.985 \text{ g/cm}^3$ 。由界面连续性可知: $p_{0,f} = p_{0,e}$, 联立式 (6) 和 (7) 计算出未反应炸药的波后粒子速度 u_p , 进一步得到每发实验的初始入射冲击压力 p_0 , 结果如表 1 所示。

表 1 JB-9014 炸药平面冲击实验参数

Table 1 Parameters of plane impact experiments on JB-9014 explosive

实验	$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$		$u_1/(km \cdot s^{-1})$	p_0/GPa	实验	$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$		$u_1/(km \cdot s^{-1})$	p_0/GPa
	上端	下端				上端	下端		
A	1.897	1.896	1.517	11.472	D	1.9	1.902	1.553	12.830
B	1.897	1.894	1.686	14.175	E	1.895		1.489	13.645
C	1.898	1.893	1.651	13.667	F	1.9	1.893	1.529	11.334

注: Shot E 炸药样品的密度数据缺失, 故炸药样品初始密度用平均密度 $1.895 g/cm^3$ 替代。

3.2 粒子速度-时间波剖面图

根据实验数据, 按式 (3) 计算出表 1 中 6 发实验的波后粒子速度, 得到其粒子速度-时间波剖面图, 如图 3 所示; 并计算出炸药内部不同深度处的冲击波压力, 如图 4 所示。

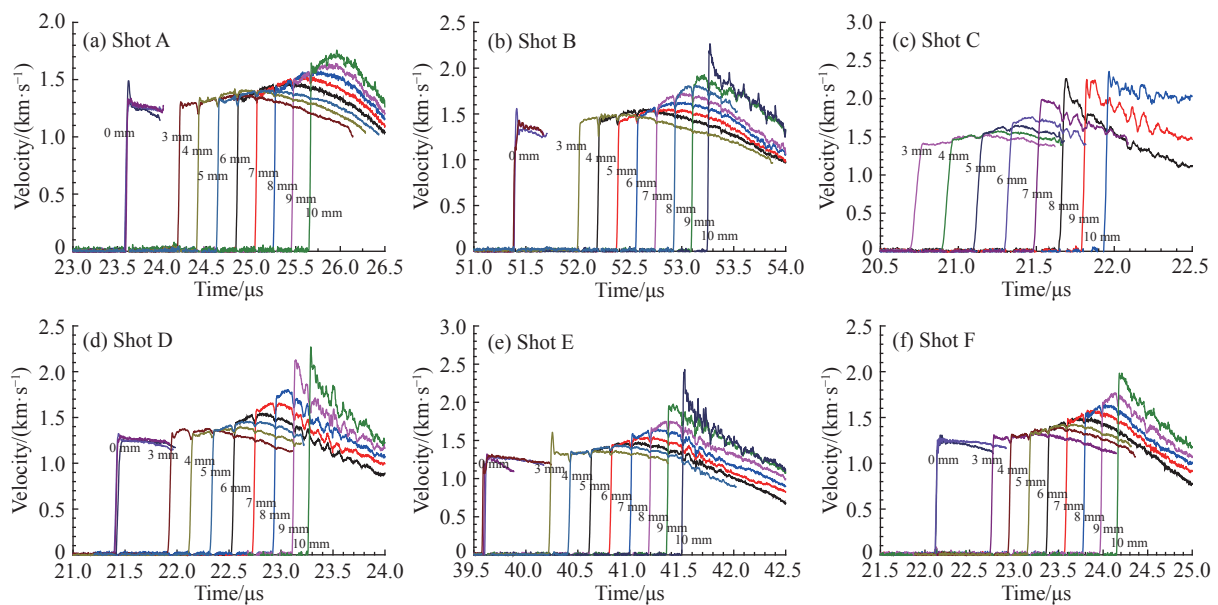


图 3 6 发实验粒子速度曲线

Fig. 3 Particle velocities of six shots on PBX-9014

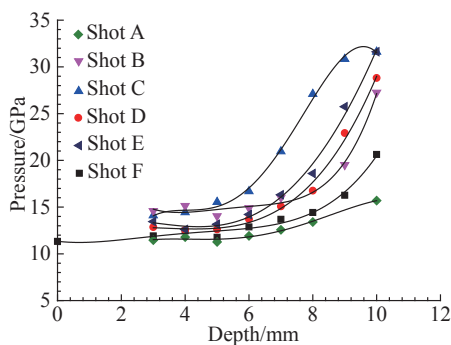


图 4 JB-9014 炸药内部不同深度的压力

Fig. 4 Impact pressure at different depths of JB-9014

图 3~4 显示: 随着冲击波的传播, 炸药内部不同深度处波面上的粒子速度及冲击压力均逐渐增大。波后粒子速度呈三阶段发展: “炸药反应诱发阶段——反应冲击波追赶惰性先驱波阶段^[8]——冲击转爆轰”。前沿冲击波波后粒子速度和冲击波压力不断增强的原因: 炸药在冲击波作用下不断发生化学反应释放能量, 使得冲击波强度逐渐增加; 增强后的冲击波会使当地粒子速度、压强、温度等物理量增大; 温度越高、压强越大将进一步加速化学反应, 从而在相同的反应时间里将释放更多的能量来支持冲击波的传播, 随着冲击波到达炸药内部越深,

炸药反应速率越快, 最终达到稳定爆轰(图中三角波形出现就表示已达到稳定爆轰)。

3.3 未反应 JB-9014 炸药的 Hugoniot 关系

炸药的冲击 Hugoniot 关系是指炸药从同一初始状态出发, 经过不同的冲击压缩达到的最终状态的集合, 它反映了冲击波后炸药热力学量之间的关系。实际应用中使用的最多的炸药 Hugoniot 关系是入射

冲击波速度 u_s 与波后粒子速度 u_p 之间的近似线性关系^[9], 即:

$$u_s = c_0 + \lambda u_p \tag{8}$$

式中: c_0 和 λ 需要实验标定。根据粒子速度曲线, 由未反应炸药前表面的 3 个粒子速度单计可测得撞击界面处的波后粒子速度; 由冲击波到达炸药样品 0、3、4 mm 处的时刻, 可推算出入射冲击波平均速度。

表 2 汇总了近年来标定 JB-9014 炸药冲击 Hugoniot 关系的实验参数和结果: 实验 1~12 是张旭等^[5]采用锰铜计测量 JB-9014 炸药的 u_s - u_p 实验数据; 实验 13~16 是裴红波等采用反向碰撞法测量 4.4~8.2 GPa 压力范围内的数据; 实验 17~20 是刘俊明等用 PDV 测量 3.1~9.7 GPa 压力范围内的数据; 实验 21~24 是刘俊明等利用 PVDF 获得的数据; 实验 A~F 是本次实验的数据。根据表 2 中所列实验数据绘制出 u_s - u_p 关系图, 如图 5 所示, 由于锰铜法、电磁法、PDV 方法的测量误差不同, 而且锰铜法并不是直接测量粒子速度, 属于间接测量, 因此, 不同方法测量的实验结果存在一定差异, 但是实验结果总体上趋于一致, 呈线性关系。

对比各组实验数据, JB-9014 炸药的 u_s - u_p 关系利用正交回归直线拟合的结果为:

$$u_s = (2.42 \pm 0.006) + (2.14 \pm 0.007) u_p \quad (0.5 \leq u_p \leq 1.43) \tag{9}$$

式中: u_s 和 u_p 的单位为 km/s。

表 2 JB-9014 炸药的实验数据

Table 2 Particle velocity vs shock velocity data for JB-9014

实验	ρ_0 (g·cm ⁻³)	u_p /(km·s ⁻¹)	u_s /(km·s ⁻¹)	实验	ρ_0 (g·cm ⁻³)	u_p /(km·s ⁻¹)	u_s /(km·s ⁻¹)
1	1.887	0.508	3.32	16	1.891	0.963	4.501
2	1.889	0.510	3.34	17	1.894	0.574	3.347
3	1.887	0.523	3.37	18	1.893	0.735	3.990
4	1.885	0.546	3.47	19	1.893	0.913	4.369
5	1.891	0.582	3.43	20	1.898	1.084	4.727
6	1.885	0.592	3.37	21	1.898	0.481	3.408
7	1.891	0.772	3.60	22	1.898	0.604	3.776
8	1.887	1.017	4.11	23	1.893	0.639	4.000
9	1.885	1.074	4.12	24	1.889	0.813	4.136
10	1.889	1.445	4.32	A	见表1	1.282	4.718
11	1.884	1.425	4.63	B	见表1	1.428	5.236
12	1.885	1.447	4.65	C	见表1	1.431	5.040
13	1.893	0.480	3.433	D	见表1	1.373	4.918
14	1.889	0.618	3.788	E	见表1	1.330	4.997
15	1.893	0.779	4.028	F	见表1	1.286	4.647

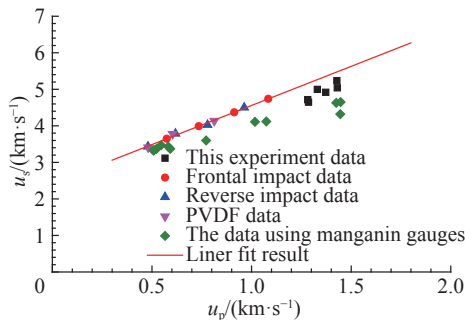


图 5 Hugoniot 关系 (u_s - u_p 曲线)

Fig. 5 Particle velocity (u_p) vs. shock velocity (u_s)

3.4 JB-9014 炸药的 Pop 图

冲击波跟踪器呈“梯形”, 它记录冲击波到达 JB-9014 炸药样品内部指定位置的时刻。由于冲击波跟踪器中的电流流向改变引起电压符号的改变, 因此, 根据炸药内部不同深度处冲击波跟踪器信号正负的改变就可以判断冲击波所到位置与所到时刻, 即能较精确地记录冲击波的传播轨迹, 进一步获得 JB-9014 炸药冲击起爆的时间-位置曲线(如图 6 所示, 实验所用冲击波跟踪器在冲击波传播方向每步间距 0.5 mm, 每发实验均埋入 3 组), 拟合出其

Pop 关系(即转爆轰压力 p_D 和转爆轰距离 x_D 的关系, 如图 7 所示)。已知冲击转爆轰点为时间-位置曲线上曲率最大的点(即拐点)^[10], 因此结合粒子速度-时间波剖面图可以从时间-位置曲线获得 x_D (即到爆轰距离)和 t_D (即到爆轰时间), 6 发实验的 x_D 和 t_D 数据如表 3 所示。

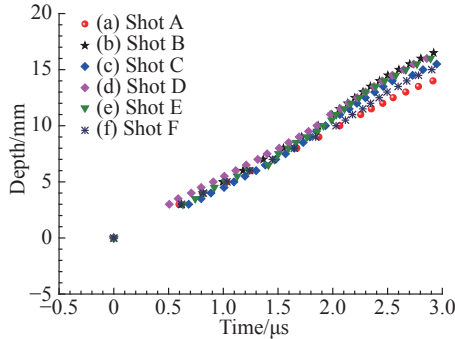


图 6 冲击波时间-位置曲线

Fig. 6 Time-distance curve of shock waves

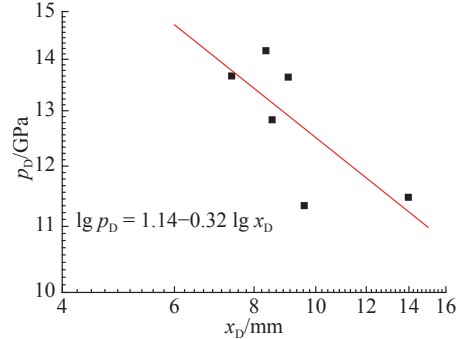


图 7 Pop 关系

Fig. 7 Pop-plot for JB-9014 explosives

表 3 JB-9014 炸药的数据

Table 3 data for JB-9014 explosives

实验	$\rho_0(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$		$\rho_0(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$t_D/\mu\text{s}$	x_D/mm	实验	$\rho_0(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$		p_D/GPa	$t_D/\mu\text{s}$	x_D/mm
	上端	下端					上端	下端			
A	1.897	1.896	11.472	26.48	13.97	D	1.900	1.902	12.830	23.04	8.54
B	1.897	1.894	14.175	53.01	8.35	E	1.895		13.645	41.38	9.05
C	1.898	1.893	13.667	21.57	7.38	F	1.900	1.893	11.334	24.09	9.59

4 结 语

在火炮加载平台上采用铝基组合式电磁粒子速度计技术开展了 JB-9014 炸药的冲击起爆研究。铝基组合式电磁粒子速度计所测得的粒子速度-时间波剖面图较好地记录了 JB-9014 炸药的冲击转爆轰过程, 冲击波跟踪器所测波形较精确地记录了冲击波/爆轰波的传播轨迹。表征 JB-9014 炸药冲击起爆性能的“压力-冲击到爆轰距离”关系说明: 随着入射冲击压力的增大, JB-9014 炸药到爆轰距离减小。本文获得的不同冲击起爆压力下的 JB-9014 炸药反应增长规律对于标定反应速率函数具有重要支撑作用。研究成果对冲击力的大小影响起爆深度的判定具有重要意义, 是实验爆轰物理的有益探索, 也是凝聚炸药起爆特性研究的难点、热点之一。

参考文献:

- [1] 潘昊, 胡晓棉. 钝感炸药的超压爆轰与冲击起爆过程数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(2): 174–178. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)02-0174-05.
PAN Hao, HU Xiaomian. Numerical simulation for overdriven and shocking-to-detonation transition of insensitive high explosives [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(2): 174–178. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)02-0174-05.
- [2] GUSTAVSEN R L, SHEFFIELD S A, ALCON R R, et al. Measurement of shock initiation in the tri-amino-tri-nitro- benzene based explosive PBX9502: wave forms embedded gauges and comparison of four different material lots [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(11): 1–17. DOI: 10.1063/1.2195191.
- [3] GUSTAVSEN R L, GEHR R J, ALCON R R, et al. Shock initiation of the tri-amino-tri-nitro-benzene based explosive PBX 9502 cooled to-55re [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(7): 074909. DOI: 10.1063/1.4757599.
- [4] 张旭, 池家春, 冯民贤, 等. JB-9014 钝感炸药冲击绝热线测量 [J]. *高压物理学报*, 2001, 15(4): 304–308. DOI: 10.11858/gywlx.2001.04.011.

- ZHANG Xu, CHI Jiachun, FENG Minxian, et al. Hugoniot relation of JB-9014 insensitive high explosive [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2001, 15(4): 304–308. DOI: 10.11858/gywlxb.2001.04.011.
- [5] 李志鹏, 黄毅民, 何碧, 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. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)03-0269-04.
- LI Zhipeng, HUANG Yiming, HE Bi, et al. Electromagnetic gauge measurements of shock initiating JOB-9003 explosive [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(3): 269–272. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)03-0269-04.
- [6] 李金河, 瞿攀登, 张旭, 等. 用组合式电磁粒子速度计研究一种活性材料的反应特性 [J]. *高压物理学报*, 2017, 31(3): 309–314. DOI: 10.11858/gywlxb.2017.03.013.
- LI Jinhe, ZI Pandeng, ZHANG Xu, et al. Reaction characteristics of reactive material investigated by embedded electromagnetic velocity gauges [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(3): 309–314. DOI: 10.11858/gywlxb.2017.03.013.
- [7] ZHANG Xu, WANG Yanfei, HUANG Wenbin, et al. Reaction buildup of PBX explosives JOB-9003 under different initiation pressures [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2017, 35(2): 197–212. DOI: 10.1080/07370652.2016.1250841.
- [8] 刘杰, 王广军, 张旭, 等. HMX 基 PBX 粒子速度测量的铝基组合电磁粒子速度计技术 [J]. *含能材料*, 2016, 24(3): 300–305. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.03.016.
- LIU Jie, WANG Guangjun, ZHANG Xu, et al. Al-based electromagnetic particle velocity gauge technique of measuring the particle velocity of HMX-based PBX explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2016, 24(3): 300–305. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.03.016.
- [9] 王延飞, 刘杰, 张旭, 等. 未反应炸药 JOB-9003 的 JWL 状态方程 [J]. *高压物理学报*, 2016, 30(5): 387–391. DOI: 10.11858/gywlxb.2016.05.007.
- WANG Yanfei, LI Jie, ZHANG Xu, et al. JWL equation of state of unreacted JBO-9003 explosive [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016, 30(5): 387–391. DOI: 10.11858/gywlxb.2016.05.007.
- [10] BURNS M J, GUSTAVSEN R L, BARTRAM B D. One-dimensional plate impact experiments on the cyclotetramethylene tetranitramine (HMX) based explosive EDC32 [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112: 064910. DOI: 10.1063/1.4752865.

Law of reaction growth of shock initiation on the TATB based insensitive explosive JB-9014

ZHANG Qimin¹, ZHANG Xu², ZHAO Kang¹, SHU Junxiang², ZHANG Rong², ZHONG Bin²

(1. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;;

2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: To find out about the patterns and regularities of the reaction growth of shock initiation on JB-9014 explosives, using aluminum-based multiple EMV, we conducted six one-dimensional planar impact experiments in the gun-power platform. Under different initial pressures (11.33–14.18 GPa), we measured the particle velocity versus time $u_p(t)$ and wave-profiles in the JB-9014 explosive at 9 different distances from the impact plane, and recorded the position of the shock front with time $x(t)$, successfully fitting the unreacted explosive JB-9014 Hugoniot relation. Furthermore, we obtained the time and distance to detonation are estimated according to both the wave-profiles and the $x(t)$ trajectories from the shock wave tracker gauges.

Keywords: JB-9014 explosive; aluminum-based embedded electromagnetic particle velocity gauge; particle velocity profile; shock Hugoniot; Pop-plot

(责任编辑 王小飞)