

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.01.005

不同加载压力下 HMX 基含铝炸药的冲击起爆特性^{*}

赵娟 冯博 薛乐星 冯晓军
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为了研究 HMX 基含铝炸药的冲击起爆特性,对其进行了两种加载压力下的冲击起爆试验。结果表明,加载压力为 14.68 GPa 时,其到爆轰距离为 12.04 ~ 15.38 mm;加载压力为 15.55 GPa 时,到爆轰距离为 10.23 ~ 12.01 mm;稳定爆轰后的爆轰压力约为 25 GPa。基于圆筒试验确定了 HMX 基含铝炸药的 JWL 状态方程参数,结合两种加载压力下的冲击起爆试验结果进行数值模拟,标定并验证了点火增长模型反应速率方程参数。计算结果与试验结果一致。得到 14.68 GPa 加载压力下 HMX 基含铝炸药到爆轰时间为 2.5 μ s,到爆轰距离为 13.70 mm;15.55 GPa 加载压力下的到爆轰时间为 1.9 μ s,到爆轰距离为 10.60 mm。计算结果表明,加载压力增大,前导冲击波速度增长变快,波阵面压力增长变快,炸药到爆轰时间与到爆轰距离减小,爆轰成长阶段同一时刻下的波阵面压力增长速率也随之增大。

[关键词] 冲击起爆;HMX 基含铝炸药;数值模拟;反应速率方程

[分类号] TQ560;O381

Shock Initiation Characteristics of HMX Based Aluminized Explosive under the Different Loading Pressure

ZHAO Juan, FENG Bo, XUE Lexing, FENG Xiaojun
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi X'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to investigate shock initiation characteristics of HMX based aluminized explosive, shock initiation tests under two different initiation pressures were conducted. When the initiation pressure is 14.68 GPa, run distance to detonation of HMX based aluminized explosive is 12.04 mm to 15.38 mm. When the initiation pressure is 15.55 GPa, run distance to detonation of HMX based aluminized explosive is 10.23 mm to 12.01 mm. Under steady detonation distance, the detonation pressure of HMX based aluminized explosive was 25 GPa. According to cylinder test, parameters of JWL equation of state were obtained. Ignition and growth reaction rate equation was used to numerically simulate shock initiation of the explosive. Based on the shock initiation tests of two different initiation pressures, the parameters were determined for the ignition and growth reaction rate equation of the explosive. The calculated results are consistent with the experimental results. When the initiation pressure is 14.68 GPa, detonation time is 2.5 μ s, and run distance to detonation is 13.70 mm. When the initiation pressure is 15.55 GPa, detonation time is 1.9 μ s, and run distance to detonation is 10.60 mm. The results show that with the increase of the initiation pressure, velocity of the front shock wave and pressure of the front increase faster, the time to detonation and the distance to detonation decrease, and the growth rate of the front pressure increases at the same time in the detonation growth stage.

[KEYWORDS] shock initiation; HMX based aluminized explosive; numerical simulation; equation of reaction state

引言

作为武器系统的能量来源,炸药的爆轰可靠性、反应完全性及能量释放特性始终是人们关注的重点问题。这就需要深入了解炸药的冲击起爆特性,掌握起爆机制和爆轰成长规律,从而正确指导爆轰序列的设计及能量输出结构调整,确保炸药的高效安全可靠应用^[1-6]。李志鹏等^[7]用组合式电磁粒子速度计确定了JOB-9003炸药在两种压力下的冲击转爆轰距离和时间;陈朗等^[8]测量了5种温度下飞片起爆PBXC10炸药内部的压力变化,标定了不同温

^{*} 收稿日期:2020-06-14

第一作者:赵娟(1988~),女,硕士,工程师,研究方向为炸药爆轰性能及爆轰化学反应研究。E-mail: canghaiyisu6636@163.com

度下的模型参数及 POP 关系(加载压力对到爆轰距离的影响)。温丽晶等^[9]进行了 3 种加载压力下两种颗粒度 PBXC03 炸药的冲击起爆试验,通过数值模拟得到两种不同粒度的 POP 关系。李硕等^[10]根据 JH-14C 炸药的小隔板试验得到了点火增长模型参数,模拟其冲击起爆试验得到了临界钢隔板厚度。张涛等^[11]研究了 JBO-9X 炸药在较高冲击压力下的冲击起爆过程及化学反应比例,提出以化学反应比例作为炸药冲击起爆研究中炸药安定性的指标。白志玲等^[12]对比分析了 PBXC03 炸药和 PBXC10 炸药爆轰建立过程的压力变化。李金河等^[13]用组合式电磁粒子速度计测量了 TATB 基钝感炸药在不同加载状态下的到爆轰距离。目前,国内已有较多关于炸药到爆轰距离测量或反应速率方程参数标定的研究,但是参数的确定大都依赖于—组试验数据,对拟合所得反应速率方程参数在不同加载压力下的适用性及规律性研究较少。

锰铜压阻传感测压技术及电磁粒子速度计测速技术是研究炸药冲击起爆和爆轰成长过程的有效手段。锰铜压阻传感器所测量的压力历程更便于进行数值模拟,确定反应速率方程参数。对于目前广泛采用的含铝炸药, Lee-Tarver 点火增长模型考虑了铝粉与爆轰产物的二次反应,可以更为准确地描述其冲击起爆过程^[14]。反应速率方程的确定需要结合 JWL 状态方程,而 JWL 状态方程则需要拟合圆筒试验数据得到。

针对一种 HMX 基含铝炸药(HMX、Al 与黏结剂的质量比为 57 : 35 : 8)开展了冲击起爆试验,对比了其在两种加载压力下的压力历程,分析其冲击起爆特性;根据两组压力变化数据,确定并验证了点火增长模型反应速率方程参数,计算结果与试验测量结果一致;建立计算模型并分析了加载压力对 HMX 基含铝炸药冲击起爆特性的影响,以期为其应用研究提供基础数据及技术参考。

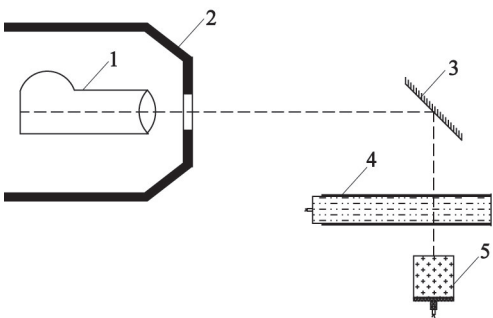
1 试验部分

1.1 圆筒试验

对 HMX 基含铝炸药进行 50 mm 标准圆筒试验(GJB 8381—2015),试样的平均密度为 1.865 g/cm³。试验装置如图 1 所示。

1.2 冲击起爆试验

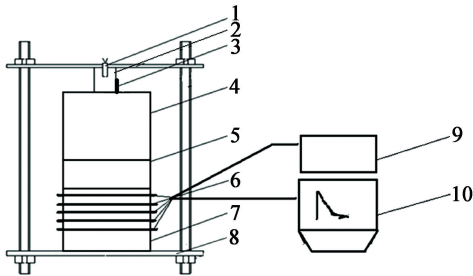
冲击起爆试验装置如图 2 所示。试验系统由雷管、传爆药、触发探针、主发装药、隔板、锰铜压阻传感器、受试装药、试验支架、脉冲恒流源及示波器等



1 - 高速扫描相机;2 - 防护掩体;3 - 反射镜;
4 - 圆筒试件;5 - 氩气爆炸光源。

图 1 圆筒试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of cylinder test



1 - 雷管;2 - 传爆药;3 - 触发探针;4 - 主发装药;
5 - 隔板;6 - 锰铜压阻传感器;7 - 受试装药;8 - 试验支架;9 - 脉冲恒流源;10 - 示波器。

图 2 冲击起爆试验装置图

Fig.2 Diagrams of shock initiation experiment device

组成。主发装药为 $\varnothing 40\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的 JH-14 药柱;传爆药为 $\varnothing 20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的 JH-14 药柱;隔板为 $\varnothing 40\text{ mm}$ 铝板,厚度可调;受试装药为多个 $\varnothing 40\text{ mm}$ 的圆柱形药片叠加而成,每两个药片之间放置一个锰铜压阻传感器。

2 结果与讨论

2.1 圆筒试验结果

对 HMX 基含铝炸药的圆筒试验结果进行处理,拟合时间-膨胀距离变化曲线,结果如图 3 所示;得到 HMX 基含铝炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数如表 1 所示。

2.2 冲击起爆过程

对 HMX 基含铝炸药进行了两种加载压力下的冲击起爆试验,所用铝隔板厚度分别为 27.85、26.00 mm。由文献资料^[15]得到相同加载条件下冲击波在铝隔板中的衰减规律如图 4 所示。冲击波压力随铝隔板厚度的变化方程为 $\ln p = 3.550 - 0.031x$ 。由此可知,27.85、26.00 mm 厚铝隔板对应

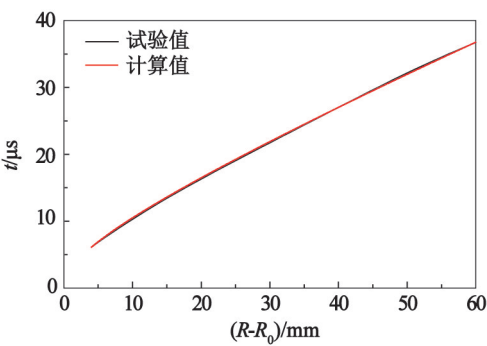


图 3 时间-膨胀距离曲线

Fig. 3 t -($R-R_0$) curves

表 1 HMX 基含铝炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数

Tab. 1 Parameters of JWL equation of state of HMX based aluminized explosive

A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
392.0	7.1	4.2	2.1	0.25

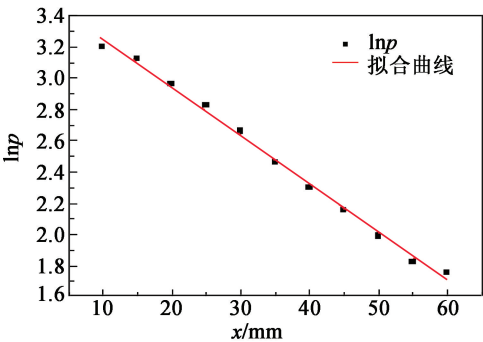


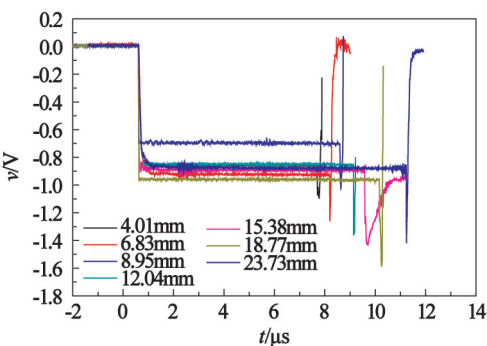
图 4 冲击波压力与铝隔板厚度关系的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of relationship between shock wave pressure and aluminum gap thickness

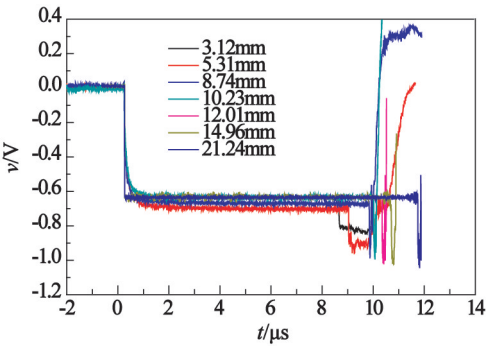
的压力分别为 14.68、15.55 GPa。

图 5 给出了 14.68 GPa 和 15.55 GPa 加载压力下测得 HMX 基含铝炸药内部不同位置处的波形曲线,经计算得到不同位置处的压力峰值如表 2 所示。

从表 2 可以看出,对于 HMX 基含铝炸药,在不同的加载压力下,其压力峰值都呈现出递增趋势,最后稳定在 25 GPa 左右,均达到稳定爆轰。加载压力为 14.68 GPa 时,炸药在 15.38 mm 处压力峰值趋于稳定,到爆轰距离为 12.04 mm 至 15.38 mm 之间。加载压力为 15.55 GPa 时,炸药在 12.01 mm 处已经达到稳定爆轰,到爆轰距离为 10.23 mm 至 12.01 mm 之间。可见,加载压力增大后,爆轰波成长速度增大,炸药的到爆轰距离明显减小。



(a) 14.68 GPa



(b) 15.55 GPa

图 5 不同加载压力下测得的波形曲线
Fig. 5 Waveform curves measured under different initiation pressures

表 2 不同位置处的测试压力峰值

Tab. 2 Tested pressure peak at different locations

加载压力/GPa	到爆轰距离/mm	压力峰值/GPa
14.68	4.01	11.39
	6.83	13.58
	8.95	16.11
	12.04	23.02
	15.38	24.46
	18.77	25.11
	23.73	24.86
15.55	3.12	12.08
	5.31	14.23
	8.74	19.65
	10.23	22.84
	12.01	24.42
	14.96	24.75
	21.24	25.54

3 数值计算

采用非线性有限元计算软件 AUTODYN 对 HMX 基含铝炸药的冲击起爆过程进行模拟,根据简化的冲击起爆试验装置建立二维轴对称计算模型。HMX 基含铝炸药采用点火增长模型反应速率方程和 JWL 状态方程进行描述,主发装药 JH-14 采用

JWL 状态方程进行描述,参数由文献[10]得到。铝隔板材料参数取自 AUTODYN 程序自带的材料库。

点火增长模型反应速率方程为

$$\frac{d\lambda}{dt}=I(1-\lambda)^b(\frac{\rho}{\rho_0}-1-a)^x+G_1(1-\lambda)^c\lambda^d p^y+G_2(1-\lambda)^e\lambda^g p^z。$$

(1)

式中: λ 为反应度; t 为时间; ρ 为密度; ρ_0 为初始密度; p 为压力; I 、 b 、 a 、 x 、 G_1 、 c 、 d 、 y 、 G_2 、 e 、 g 、 z 均为模型参数。

根据 14.68 GPa 加载压力下的测量结果,调整模型参数,使得计算结果与试验结果基本一致,拟合得到 HMX 基含铝炸药的点火增长模型反应速率方程参数见表 3 所示,计算结果见图 6(a)。为了进一

表 3 HMX 基含铝炸药点火增长模型
反应速率方程参数

Tab.3 Parameters of reaction rate equation for
ignition and growth model of HMX based
aluminized explosive

I	b	a	x	G_1	c
200	0.667	0	60	360	0.667
d	y	G_2	e	g	z
0.667	2	13	0.333	1	2

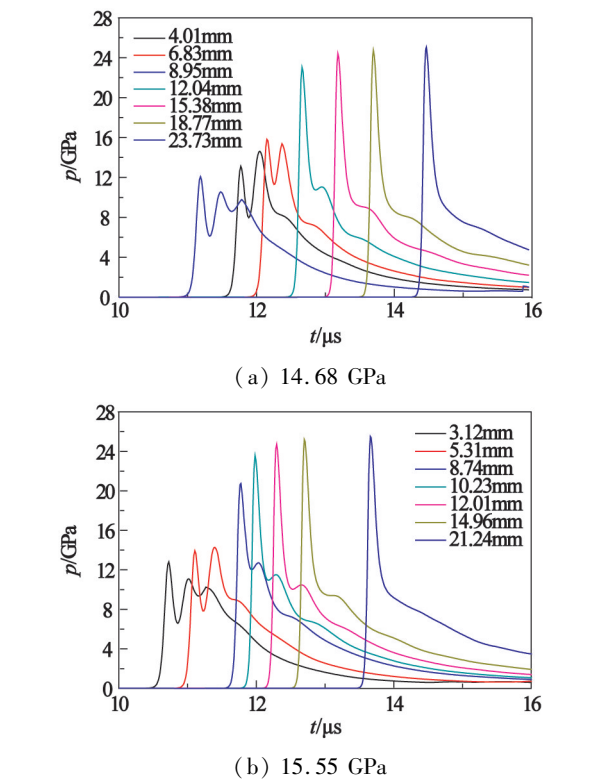


图 6 不同加载压力下炸药内部
压力-时间曲线计算结果

Fig.6 Calculated pressure-time curves
under two different initiation pressures

步验证确定的反应速率方程参数的适用性,对加载压力为 15.55 GPa 的冲击起爆过程进行了数值模拟,计算结果见图 6(b)。计算压力与试验压力对比如图 7 所示。

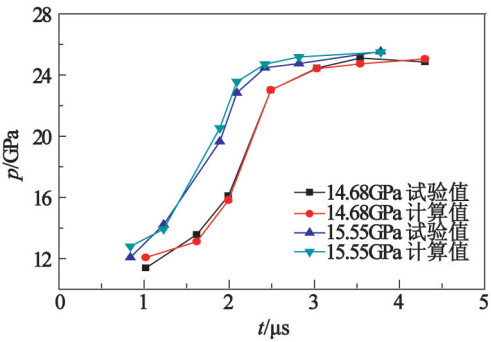


图 7 压力峰值试验值与计算值对比

Fig.7 Comparison between experimental
and calculated pressure peak value

通过图 7 可以看出,在 14.68 GPa 和 15.55 GPa 的加载压力下,计算压力与试验测量压力均吻合得较好,表明这组参数可以比较准确地描述该 HMX 基含铝炸药在不同加载压力下的冲击起爆过程。为了进一步研究 HMX 基含铝炸药在不同加载压力下的冲击起爆特性,采用这组参数计算炸药在不同加载压力下前导冲击波阵面压力历程及前导冲击波时程曲线,如图 8 和图 9 所示。

图 8 可以看出,加载压力为 14.68 GPa 时,1.5 μ s 前压力增长较为缓慢,1.5 ~ 2.0 μ s 压力迅速增大,在 2.5 μ s 时炸药达到稳定爆轰,对应的到爆轰距离为 13.7 mm;加载压力为 15.55 GPa 时,1.2 ~ 1.8 μ s 压力增长迅速,到爆轰时间为 1.9 μ s,对应的到爆轰距离为 10.6 mm。可见,加载压力增大后,前导冲击波阵面压力增速明显变快,炸药的到爆轰时间变短。

图 9 可以看出,起爆后前导冲击波的速度不断

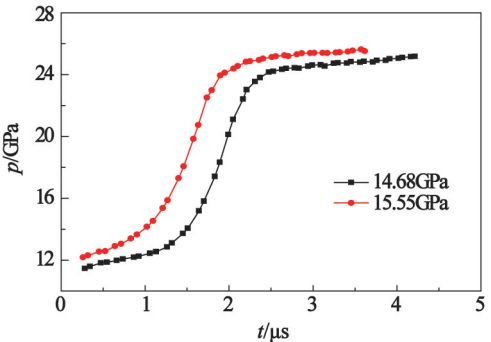


图 8 不同加载压力下前导冲击波阵面压力历程
Fig.8 Pressure history of front shock wave
under different initiation pressures

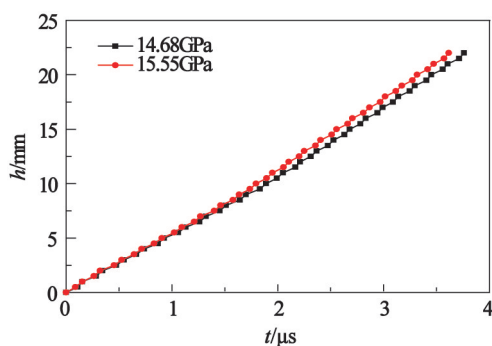


图 9 不同加载压力下前导冲击波时程曲线

Fig. 9 Time history curve of front shock wave under different initiation pressures

增大,直至达到稳定,且 15.55 GPa 加载压力下前导冲击波速度增长明显比 14.68 GPa 时的速度增长快,可知,前导冲击波速度增长随着加载压力的增大而变快。

前导冲击波的压力增长在早期较为缓慢,此时热点数量较少;随后,炸药反应所产生的压缩波推动压力持续增长,直至稳定爆轰。增大加载压力后,前导冲击波压力增大的同时,冲击波速度增长也变快。这是由于不同加载压力下产生的热点数量和尺寸不同,前导冲击波过后反应程度不同,热点密度影响了压力变化过程。

对图 8 中前导冲击波阵面压力增长阶段进行求导处理,得到不同加载压力下前导冲击波阵面压力随时间的变化率,如图 10 所示。

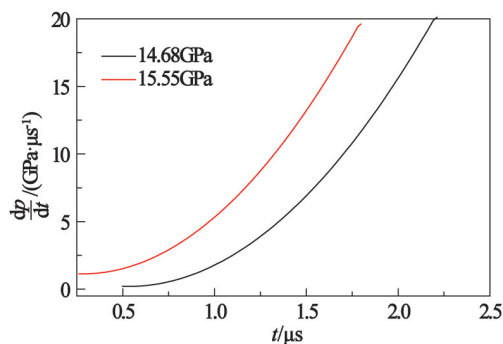


图 10 不同加载压力下前导冲击波阵面压力变化率与时间的关系

Fig. 10 Relationship between pressure change rate of front shock wave and time under different initiation pressures

通过图 10 可以看出,在冲击起爆前期的爆轰成长阶段,不同加载压力下的前导冲击波阵面压力增长速率均在不断增大,同一时刻下 15.55 GPa 加载压力下的波阵面压力增长速率始终大于 14.68 GPa 时的增长速率。加载压力为 14.68 GPa 时,爆轰成

长初期波阵面压力仅略有增大,从 0.9 μs 后开始迅速增大;而 15.55 GPa 加载压力下波阵面压力从 0.5 μs 便开始迅速增长。

在冲击载荷作用下,会发生 HMX 晶粒的破碎以及晶粒与黏结剂基体材料的脱粘等形式的损伤,冲击波能量沉积在缺陷处形成热点;随着加载压力的增大,冲击波能量增强,炸药内部损伤更为明显;热点数量增加,能量释放加快,波阵面的反应更加迅速,爆轰的建立也相应加快。

4 结论

1) 对 HMX 基含铝炸药进行了不同加载压力下的冲击起爆试验,测量其不同位置处的压力历程。结果表明,加载压力为 14.68 GPa 时,到爆轰距离为 12.04 ~ 15.38 mm;加载压力为 15.55 GPa,到爆轰距离为 10.23 ~ 12.01 mm;稳定爆轰后的爆轰压力约为 25 GPa。

2) 根据圆筒试验确定 HMX 基含铝炸药的 JWLB 状态方程参数;结合冲击起爆试验结果,标定并验证了其点火增长模型反应速率方程参数;对两种加载压力下的冲击起爆试验进行了数值模拟,计算结果与试验结果能较好地吻合。得到 14.68 GPa 加载压力下 HMX 基含铝炸药的到爆轰时间为 2.5 μs ,到爆轰距离为 13.70 mm;15.55 GPa 加载压力下的到爆轰时间为 1.9 μs ,到爆轰距离为 10.60 mm。

3) 通过数值模拟得到不同加载压力下 HMX 基含铝炸药冲击起爆特性规律:加载压力增大,前导冲击波速度增长变快,波阵面压力增长变快,炸药的到爆轰时间与到爆轰距离减小,爆轰成长阶段同一时刻下的波阵面压力增长速率也随之增大。

参 考 文 献

- [1] 宋浦,肖川,沈飞,等. 炸药非理想爆轰能量释放与能量利用的关系[J]. 火炸药学报,2011,34(2):44-46.
SONG P, XIAO C, SHEN F, et al. Relationship of energy release and utilization of non-ideal detonation of explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011, 34(2):44-46.
- [2] WATT S D, SHARPE G J, FALLE S A E G. A streamline approach to steady non-ideal detonation theory[C]// Proceedings of the 14th International Symposium on Detonation. Coeur d'Alene, Idaho, 2010.
- [3] 薛仲卿,胡双启,曹雄. 约束条件对异形传爆药柱起

- 爆能力影响的数值模拟[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2015, 36(6):677-681,695.
- XUE Z Q, HU S Q, CAO X. Numerical simulation of the influence of constraints on initiating capacity of the special-shaped booster pellet[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2015, 36(6):677-681,695.
- [4] 陈卫东, 张忠, 刘家良. 破片对屏蔽炸药冲击起爆的数值模拟和分析[J]. 兵工学报, 2009, 30(9):1187-1191.
- CHEN W D, ZHANG Z, LIU J L. Numerical simulation and analysis of shock initiation of shielded explosive impacted by fragments[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(9):1187-1191.
- [5] 吴艳红. 非均质凝聚态炸药冲击波临界起爆现象研究[D]. 长沙:湖南大学, 2006.
- [6] 张忠, 陈卫东, 杨文森. 非均质固体炸药冲击起爆的物质点法[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(1):25-30.
- ZHANG Z, CHEN W D, YANG W M. The material point method for shock-to-detonation transition of heterogeneous solid explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(1):25-30.
- [7] 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 Z P, LONG X P, HUANG Y M, et al. Electromagnetic gauge measurements of shock initiating JOB-9003 explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(3):269-272.
- [8] 陈朗, 刘群, 伍俊英. 受热炸药的冲击起爆特征[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(1):21-28.
- CHEN L, LIU Q, WU J Y. On shock initiation of heated explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(1):21-28.
- [9] 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.
- WEN L J, DUAN Z P, ZHANG Z Y, 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.
- [10] 李硕, 袁俊明, 刘玉存, 等. 聚黑-14C 的传爆装置冲击起爆实验及数值模拟[J]. 火炸药学报, 2016, 39(6):63-68,79.
- LI S, YUAN J M, LIU Y C, et al. Experiment and numerical simulation of shock initiation of JH-14C detonation device[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(6):63-68,79.
- [11] 张涛, 谷岩, 赵继波, 等. 新型高能钝感炸药 JBO-9X 在较高冲击压力下冲击起爆过程的实验研究[J]. 火炸药学报, 2016, 39(1):28-33.
- ZHANG T, GU Y, ZHAO J B, et al. Experimental study on shock initiation process of a new insensitive high explosive JBO-9X under high impact pressure[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(1):28-33.
- [12] 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.
- BAI Z L, DUAN Z P, JING L, et al. Experimental research on initiation of insensitive high energy plastic bonded explosives by flyer impact[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(8):1464-1468.
- [13] 李金河, 傅华, 赵继波, 等. 用电磁粒子速度计实验研究一种 TATB 基钝感炸药的冲击响应[J]. 火炸药学报, 2016, 39(6):58-62.
- LI J H, FU H, ZHAO J B, et al. Experimental study on the shock response of a TATB-based insensitive explosive with electromagnetic particle velocity gauge[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(6):58-62.
- [14] 沈飞, 王辉, 袁建飞, 等. RDX 基含铝炸药不同尺寸的圆筒试验及数值模拟[J]. 含能材料, 2013, 21(6):777-780.
- SHEN F, WANG H, YUAN J F, et al. Different diameter cylinder tests and numerical simulation of RDX based aluminized explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(6):777-780.
- [15] 赵娟, 冯晓军, 徐洪涛, 等. FOX-7 和 RDX 基含铝炸药的冲击起爆特性[J]. 火炸药学报, 2016, 39(4):42-45,50.
- ZHAO J, FENG X J, XU H T, et al. Shock initiation characteristics of FOX-7 and RDX based aluminized explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(4):42-45,50.