

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.05.002

高速撞击下温压炸药的响应敏感性^{*}

李宏伟 郭婉肖 王 茂 韩志伟 陈 坤 王伯良
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 采用自行设计的动态加载装置对 HMX 基、HMX/NTO 基和 HMX/FOX-7 基 3 种温压炸药撞击响应规律进行了研究,获得炸药的临界点火速度,并通过密闭燃烧罐分析撞击后回收试样的燃烧特性。结果表明:3 种温压炸药药柱在高速撞击下均经历了冲击、塑性变形、破碎飞散和点火反应阶段;HMX 基、HMX/NTO 基和 HMX/FOX-7 基温压炸药的临界点火速度分别为 302.9、312.3 m/s 和 315.3 m/s,NTO 和 FOX-7 能够提高温压炸药的临界点火速度;分析撞击后回收试样的燃烧特性发现,与 HMX 基温压炸药相比,HMX/NTO 基和 HMX/FOX-7 基温压炸药升压时间分别增加了 103.6% 和 103.3%,升压速率分别降低了 17.3% 和 21.1%,且撞击后的燃烧速率显著降低。

[关键词] 温压炸药;高速撞击;临界点火速度;燃烧特性

[分类号] TQ560.7

Response Sensitivity of Thermobaric Explosive under High-speed Impact

LI Hongwei, GUO Wanxiao, WANG Mao, HAN Zhiwei, CHEN Kun, WANG Boliang
School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] The impact response laws of three thermobaric explosives, including HMX based, HMX/NTO based and HMX/FOX-7 based, were studied by using a self-designed high-speed impact device. Critical ignition velocity was obtained, and combustion characteristics of the recovered samples after impact were tested by the closed burner tank. The results show that all the three kinds of thermobaric explosives have experienced shock, plastic deformation, fragmentation and ignition reaction stages under high-speed impact conditions. Critical ignition velocity of HMX based thermobaric explosives is 302.9 m/s, and that of HMX/NTO based or HMX/FOX-7 based thermobaric explosives is 312.3 m/s or 315.3 m/s. The addition of insensitive explosives NTO and FOX-7 to the formulation can improve the critical ignition velocity, in which FOX-7 is more effective. Through analyzing combustion characteristics of recovered samples, it is found that compared to HMX-based thermobaric explosives, the pressure rising time of HMX/NTO based and HMX/FOX-7 based thermobaric explosives increase by 103.6% and 103.3% respectively. The pressure rising rate reduce by 17.3% and 21.1% respectively, which can significantly reduce the burning rate of thermobaric explosives after impact.

[KEYWORDS] thermobaric explosive; high-speed impact; critical ignition velocity; combustion characteristics

引言

炸药在运输、储存和使用等过程中,可能处于机械刺激、破片撞击和冲击波等各种恶劣环境^[1],可能发生燃烧、爆炸等重大事故,从而造成不可挽回的重大损失。因此,针对炸药的撞击安全性问题,国内外已经开展了广泛的研究,主要方法有落锤加载试验^[2-3]、霍普金森杆试验^[4]和 Steven 试验^[5-6]等。

Hamdan 等^[7]利用改造的落锤仪研究炸药在撞击过程中的应力变化。吴艳青等^[8]利用改进后的落锤仪研究了 RDX/HMX 炸药的点火-燃烧机理,结果表明,HMX 颗粒在固相中点火,燃烧反应前常常发生剧烈的溅射现象。陈春燕等^[9]将落锤撞击试验与数值模拟相结合发现,高应力和高应变率使浇注 PBX 内部颗粒间发生摩擦剪切作用,其产生的热量大于 PBX 燃烧反应所需热量,从而发生点火反应。尚海林等^[10]采用改进后的落锤试验装置研究了

^{*} 收稿日期:2019-10-28
基金项目:江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20150780);江苏高校优势学科建设工程资助项目
第一作者:李宏伟(1993-),男,硕士研究生,主要从事含能材料安全性研究。E-mail:llhwperhps@163.com
通信作者:王伯良(1964-),男,教授,主要从事爆炸力学研究。E-mail:boliangwang@163.com

HMX 颗粒炸药在低速撞击下的点火燃烧反应并发现,撞击速度越低,颗粒炸药越容易发生喷射;撞击速度越高,颗粒炸药越容易发生点火燃烧。李宇翔等^[11]利用自行设计的落锤加载装置与扫描电镜 (SEM) 的方法研究发现,撞击作用下粒径较大的 HMX 主要发生孔穴压缩与颗粒破碎,粒径较小的 HMX 主要发生颗粒层的剪切滑移。李亮亮等^[12]基于分离式霍普金森杆并结合 SEM 研究了含铝炸药装药在双脉冲加载时的微观损伤模式。代晓淦等^[13]通过 Steven 试验采用锰铜压力计和 PVDF 压力传感器测定炸药在撞击下的压力变化,研究其响应规律。

以上学者从药粉和药柱层面研究了炸药低速撞击条件下的敏感性,但炸药在高速撞击条件下的响应敏感性研究较少,尤其是温压炸药在高速撞击下的响应情况;而且研究方法多采用药柱被动撞击方式,无法得到药柱发生点火时的撞击速度。因此,以 3 种温压炸药为研究对象,通过自行设计的动态加载装置研究药柱撞击响应规律,利用高速摄影机记录药柱的撞击及点火响应过程,获得药柱的临界点火速度和加载后试样的燃烧特性,为温压炸药的安全性设计提供基础试验依据。

1 试验部分

1.1 样品

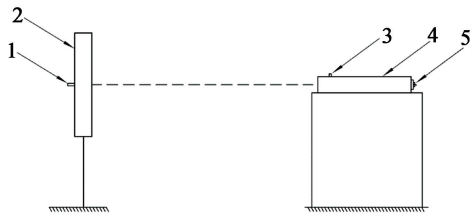
药柱为压装温压炸药,采用压装工艺制备炸药试样。试样尺寸为 $\varnothing 18\text{ mm}\times 30\text{ mm}$,药柱间密度极差不超过 0.02 g/cm^3 ,3 种温压炸药配方及平均密度见表 1。

1.2 仪器和装置

1.2.1 动态加载试验装置

图 1 为炸药药柱动态加载试验装置的示意图。该装置由加载装置、弹托分离装置、测速装置、高速摄影机和钢质靶板等部分构成。加载装置为 30 mm 口径的简易火炮,通过控制药室内火药质量实现对炸药试样撞击速度的控制。为避免炸药药柱被药室内高压气体推动时与发射管内壁摩擦产生碎裂甚至

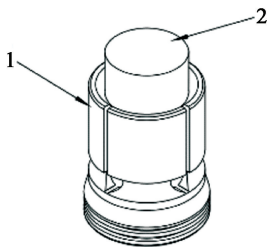
燃烧,在炸药药柱外嵌套一个弹托(见图 2),能够保证炸药药柱在发射装置内的安全性,同时能够保持炸药药柱飞行的气动稳定性。撞靶前,弹托会与药柱自动分离,不影响撞靶过程。测速装置由炮口与靶板处的传感器组成(两者距离一定),用于测试药柱飞行时间,通过计算得到炸药药柱的撞击速度。高速摄影机 (MotionPro Y4,美国 IDT 公司)用以拍摄炸药药柱的动态撞击过程及点火情况。试验中,摄影机距靶板 3 m,拍摄速度为 5 000 帧/s,每幅图间隔时间 0.2 s。钢质靶板中心距离地面 83 cm,尺寸为 300 mm \times 300 mm。



1,3 - 传感器;2 - 钢质靶板;4 - 发射管;5 - 药室。

图 1 动态加载试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dynamic impact loading device



1 - 壳;2 - 样品。

图 2 炸药药柱装配示意图

Fig. 2 Schematic diagram of explosive charge assembly

1.2.2 密闭燃烧罐

撞击后的炸药药粉通过尺寸为 $\varnothing 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的圆筒形密闭燃烧罐进行燃烧特性试验。密闭燃烧罐包含点火系统和压力采集系统,如图 3 所示。点火系统包括直流稳压电源(0~15 V)、自制电极、电阻丝(镍铬丝)和电线;压力采集系统包括压力传感器(102A06 型,灵敏度 689.65 kPa/V,量程 0~3.45 MPa,美国 PCB Piezotronics 公司)和数据采集

表 1 温压炸药配方与平均密度

Tab. 1 Formula and average density of thermobaric explosive

样品	炸药配方	平均密度/(g·cm ⁻³)
1 [#] (HMX 基)	$m(\text{HMX}):m(\text{Al}):m(\text{其他})=54:33:13$	1.92
2 [#] (HMX/NTO 基)	$m(\text{HMX}):m(\text{NTO}):m(\text{Al}):m(\text{其他})=20:34:33:13$	1.90
3 [#] (HMX/FOX-7 基)	$m(\text{HMX}):m(\text{FOX-7}):m(\text{Al}):m(\text{其他})=20:34:33:13$	1.92

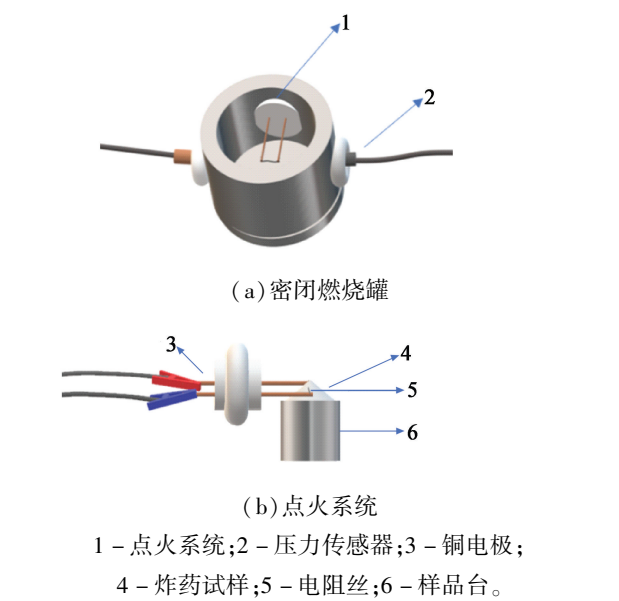


图 3 密闭燃烧罐及其点火系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of closed burner and its ignition system

分析仪 (TraNET FE 208 型, 瑞士 Elsys AG 公司), 试验采样频率取 500 kHz。

1.3 试验方法

药柱撞击刚性靶板试验采用下限值法。试验时, 炸药药柱一旦发生点火反应就降低试样的撞击速度, 直至某一撞击速度下不发生点火反应; 反之则提高撞击速度, 至发生点火反应为止; 最终获得炸药的临界点火速度。回收撞击后的试样, 利用密闭燃烧罐分析撞击后炸药试样的燃烧特性。

2 结果与讨论

2.1 动态加载过程

表 2 为炸药药柱的高速撞击试验结果。根据 1.3 中临界点火速度的判别方法, 从表 2 中可以看出, HMX 基温压炸药的临界点火速度为 302.9 m/s; HMX/NTO 基温压炸药的临界点火速度为 312.3 m/s; HMX/FOX-7 基温压炸药的临界点火速度为 315.3 m/s。这表明, 在高速撞击条件下, 配方中加入钝感炸药 NTO 或 FOX-7 能够提高温压炸药的临界点火速度。

3 种配方温压炸药发生点火反应的动态响应见图 4 ~ 图 6。由图 4 可以看出, HMX 基温压炸药以 302.9 m/s 速度正面撞击靶板后, 在撞击瞬间因惯性作用导致其整体急剧压缩, 发生塑性变形, 并发生破碎向四周迅速扩散; 药柱从接触靶板到压缩的过程在 0.4 ms 内完成, 在 0.2 ms 发生点火反应, 热点

表 2 3 种炸药药柱的高速撞击试验结果

Tab. 2 High-speed impact test results of three explosive charges

样品	撞击速度/ (m · s ⁻¹)	结果
1 [#]	253.8	药柱撞碎, 炸药未点火
	281.2	药柱撞碎, 炸药未点火
	286.6	药柱撞碎, 炸药未点火
	295.3	药柱撞碎, 炸药未点火
	298.6	药柱撞碎, 炸药未点火
	302.9	炸药点火, 产生火光, 有残药
	310.4	炸药点火, 产生火光, 有残药
	328.6	炸药点火, 产生火光, 有残药
	299.9	药柱撞碎, 炸药未点火
	305.2	药柱撞碎, 炸药未点火
2 [#]	310.7	药柱撞碎, 炸药未点火
	311.3	药柱撞碎, 炸药未点火
	312.0	药柱撞碎, 炸药未点火
	312.3	炸药点火, 产生火光, 有残药
	314.3	炸药点火, 产生火光, 有残药
	320.0	炸药点火, 产生火光, 有残药
	323.2	炸药点火, 产生火光, 有残药
	283.4	药柱撞碎, 炸药未点火
	297.1	药柱撞碎, 炸药未点火
	304.6	药柱撞碎, 炸药未点火
3 [#]	315.1	药柱撞碎, 炸药未点火
	315.3	炸药点火, 产生火光, 有残药
	322.4	炸药点火, 产生火光, 有残药
	324.0	炸药点火, 产生火光, 有残药

随着药柱破碎扩散而扩散, 但未引起剩余药粉发生反应; 而以 328.6 m/s 速度撞击靶板时, 瞬间产生热点并发生剧烈点火反应, 在 0.8 ~ 1.4 ms 之间, 点火反应有减弱的趋势, 但持续至 3.4 ms 之后, 点火反应更加剧烈, 表明 1.4 ms 之后持续的点火反应蔓延至周围破碎药粉引起其反应。对于 HMX/NTO 基温压炸药, 由图 5 可以看出, 试样以 312.3 m/s 速度撞击, 0.2 ms 时在药柱前端产生热点, 仅有极少量炸药参与点火反应, 0.2 ms 后仅有药柱破碎向四周飞散现象; 撞击速度达到 320.0 m/s 时, 0.2 ms 时产生热点并引起小范围点火反应持续至 1.0 ms。图 6 中, HMX/FOX-7 基温压炸药以 315.3 m/s 速度撞击靶板时, 在 0.2 ms 时药柱前端产生热点, 极少量炸药参与点火反应; 在撞击速度增至 322.4 m/s 时, 点火反应从 0.2 ms 持续至 0.8 ms。

在高速撞击加载作用下, HMX 基、HMX/NTO 基和 HMX/FOX-7 基温压炸药均经历冲击、塑性变形、破碎飞散和点火反应阶段。在临界点火速度下,

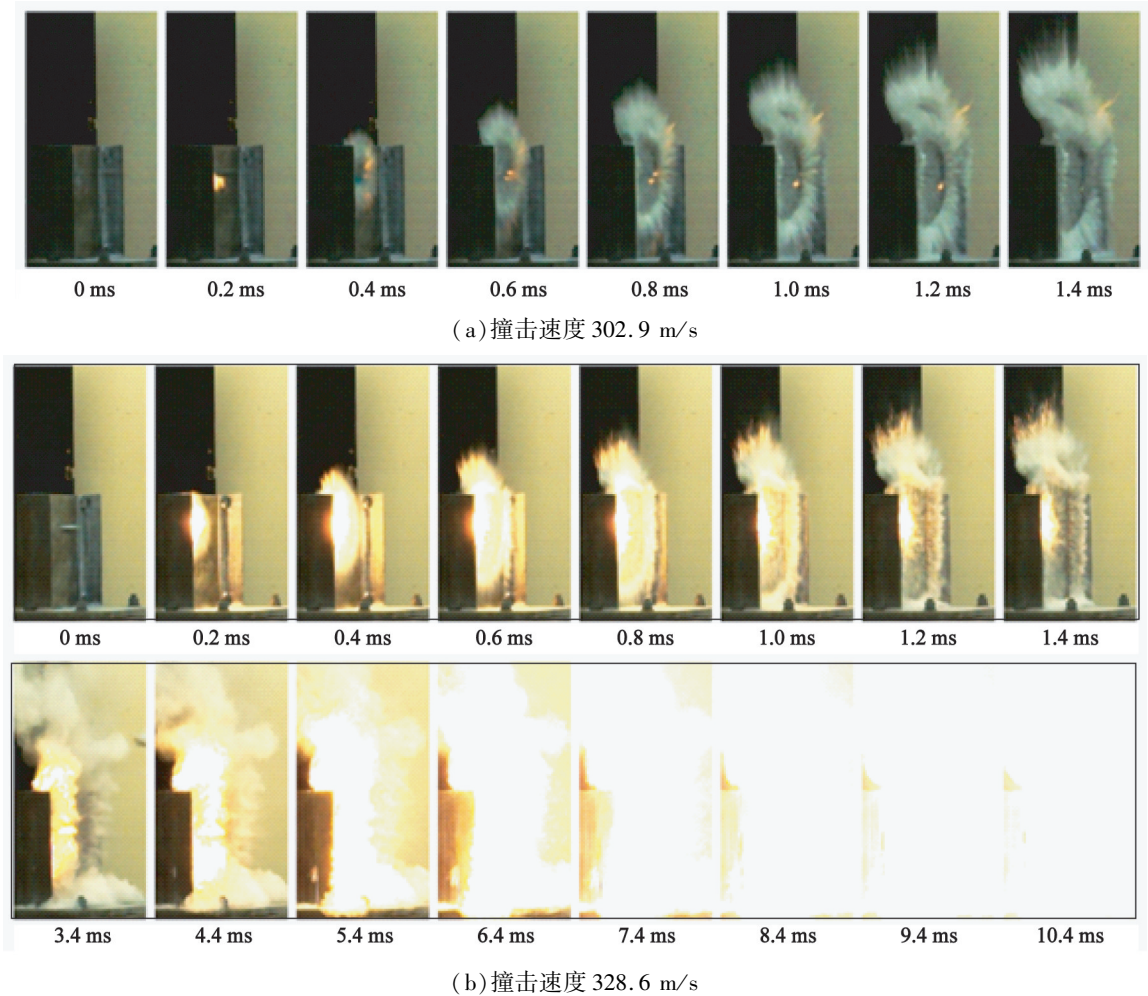


图 4 HMX 基温压炸药试样的动态响应过程

Fig 4 Dynamic responses process of HMX based thermobaric explosive

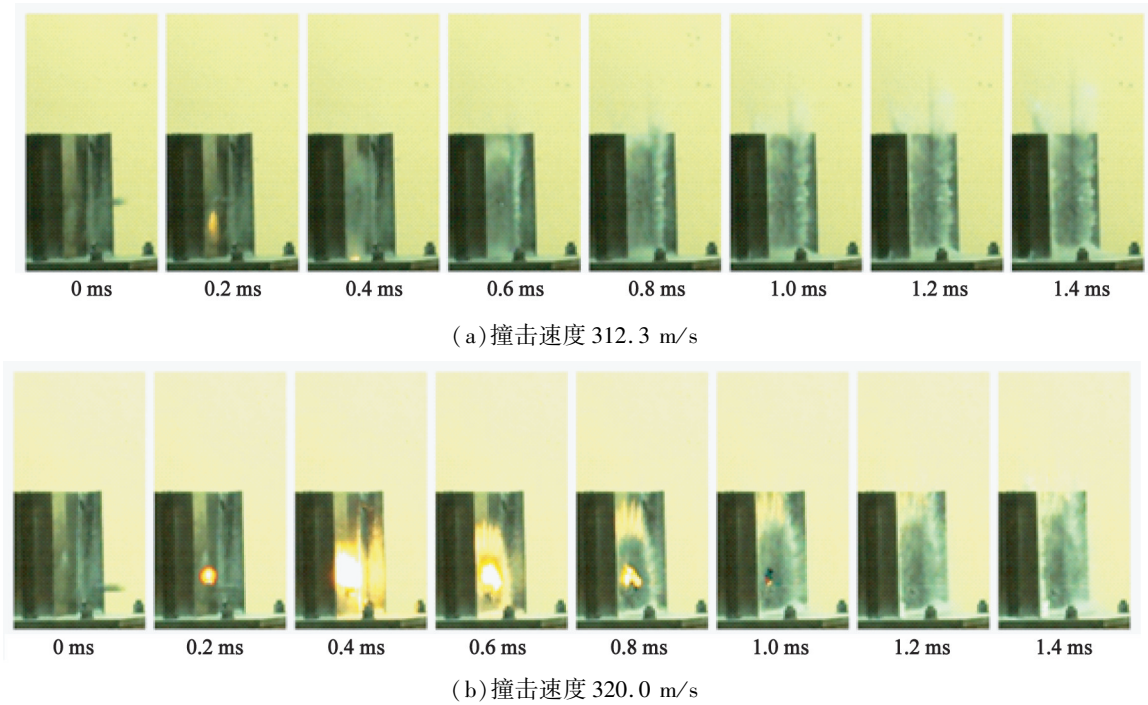


图 5 HMX/NTO 基温压炸药试样的动态响应过程

Fig 5 Dynamic responses process of HMX/NTO based thermobaric explosive

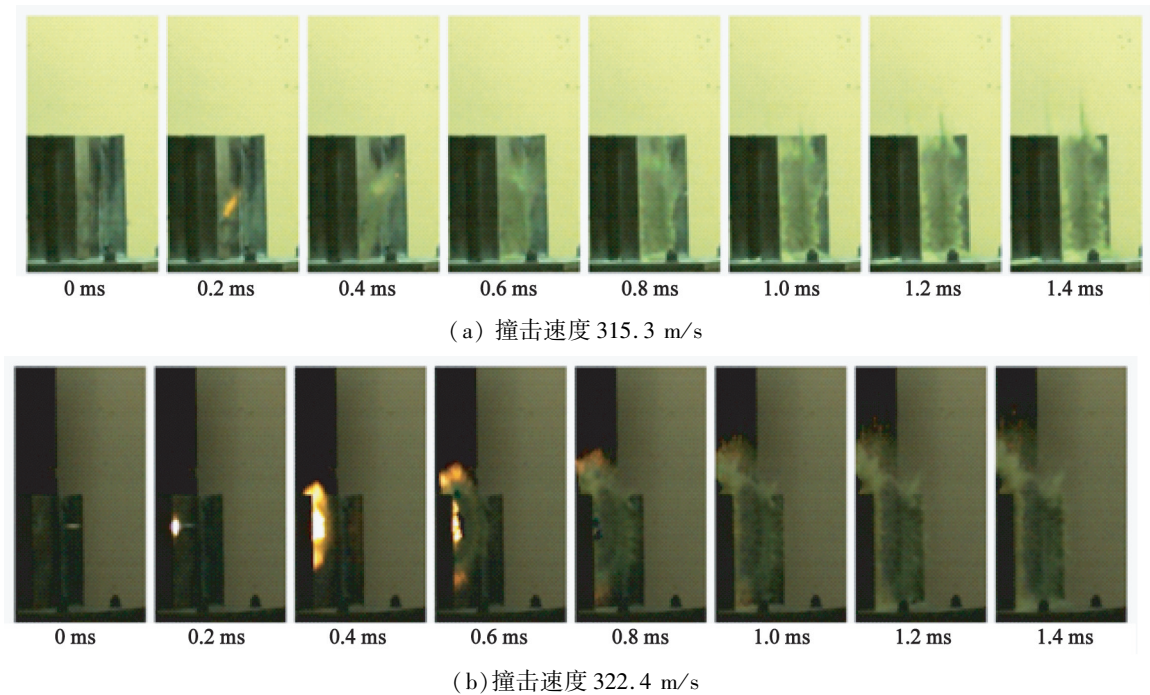


图 6 HMX/FOX-7 基温压炸药试样的动态响应过程

Fig 6 Dynamic responses process of HMX/FOX-7 based thermobaric explosive

3 种试样在 0.2 ms 时均有明显的点火反应,反应并没有引起周围破碎药粉发生大范围点火反应。在该试验条件下,配方中加入钝感炸药 NTO 或 FOX-7 的试样的火光持续时间都较短。当撞击速度为 320 ~ 329 m/s 时,HMX 基温压炸药产生强烈火光,发生剧烈的点火反应,持续时间为 2.0 s;HMX/NTO 基温压炸药产生火光,持续 0.8 ms;HMX/FOX-7 基温压炸药产生火光,持续 0.6 ms。结果表明,温压炸药中加入钝感炸药 NTO 或 FOX-7 能够明显提高其抗撞击能力,具有更好的安全性。

2.2 燃烧特性表征

HMX 基、HMX/NTO 基、HMX/FOX-7 基温压炸药撞击靶板后的燃烧特性可以通过密闭燃烧罐内试样的燃烧压力峰值 p_{\max} 、升压时间 t_1 、压力持续时间 t_2 和升压速率 $\Delta p/\Delta t$ 判断(罐内气氛为空气)。为了对比 3 种温压炸药燃烧特性的差异,选取撞击速度相近(303 m/s左右)试样的回收药粉开展试验。取 3 种温压炸药撞击后的试样各 50 mg,并过 30 目筛,进行燃烧特性表征。试验过程中,通过电热丝点燃试验样品,并记录燃烧压力时程曲线。3 种温压炸药回收样品燃烧的压力时程曲线见图 7,表征结果见表 3。

由图 7 可知,3 种温压炸药的 t_1 (燃烧压力从 0 kPa 升至 p_{\max} 所用时间)和压力持续时间 t_2 (燃烧压力从上升再降至基线所用时间)都较长,压力波形为燃烧波,处于燃烧状态。

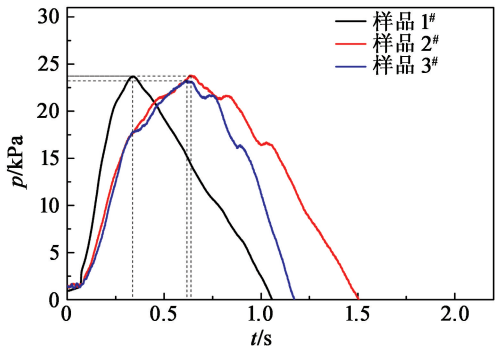


图 7 3 种温压炸药撞击后燃烧压力时程曲线

Fig. 7 History curve of combustion pressure of three thermobaric explosive after impact

从表 3 可知,对于 3 种温压炸药试样以相近速度撞击后, p_{\max} 无明显差别,但 t_1 、 t_2 和 $\Delta p/\Delta t$ 有较显著差异。温压炸药中加入 NTO 和 FOX-7 后, t_1 和 t_2 明显增大,其中 t_1 分别增加 103.6% 和 103.3%, t_2 分别增加 44.6% 和 12.2%;但 $\Delta p/\Delta t$ 降低,与样品 1# 相比,分别下降 17.3% (样品 2#) 和 21.1% (样品 3#)。这说明,温压炸药中加入钝感炸药降低了其撞击后所回收药粉的燃烧性能。另外,从升压速率数据可以看出,HMX/FOX-7 基温压炸药燃烧反应速率更慢,具有更好的安全性。

2.3 机理分析

炸药以一定速度 v 轴向撞击刚性靶板,如果 v 足够小,那么在撞击时药柱内部会产生弹性应力波,幅值 σ 为

表 3 3 种温压炸药撞击后的燃烧性能

Tab.3 Combustion characteristics of three thermobaric explosives after impact

样品	撞击速度/ (m·s ⁻¹)	燃烧压力/ kPa	升压时间/ ms	压力持续时间/ ms	升压速率/ (kPa·ms ⁻¹)
1 [#]	302.9	23.8	273	987	0.052
2 [#]	305.2	23.8	556	1 427	0.043
3 [#]	304.6	23.0	555	1 108	0.041

$$\sigma = \rho_0 c_0 v_0. \tag{1}$$

式中: ρ_0 为药柱密度; c_0 为声速。

当 v 足够高,药柱内部产生的应力会超过炸药材料本身的屈服应力 Y ,在临界状态产生的应力所对应屈服应力水平的撞击速度,即屈服速度 v_Y 为

$$v_Y = \frac{Y}{\rho_0 c_0}. \tag{2}$$

材料声速 c_0 可根据材料的弹性模量 E 和密度 ρ_0 计算

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho_0}}. \tag{3}$$

根据式(2)、式(3),得:

$$v_Y = \frac{Y}{\sqrt{E\rho_0}}. \tag{4}$$

试样药柱的弹性模量在 250 MPa 左右,屈服应力在 4 MPa 左右,密度为 1.90 ~ 1.92 g/cm³。因此,由式(4)可得,药柱的屈服速度在 6 m/s 左右。在撞击试验中,试样的撞击速度均在 200 m/s 以上,远远大于炸药试样屈服速度;因此,炸药试样在这一速度量级下撞击刚性靶板,必然发生大的变形和破碎。

点火反应是应力和应力作用时间共同作用的结果,而压装成型的温压炸药是一种损伤材料,在压制成型的过程中,造型粉颗粒间相互挤压,已经开始出现缺陷^[14]。由于初始缺陷的存在,在高速撞击作用下,炸药颗粒之间相互挤压、剪切和摩擦等作用加剧,导致炸药感度提高。在高速撞击下,炸药药柱在撞击靶板阶段会产生塑性应力波,引起塑性大变形,药柱所具有的动能通过塑性功转热过程转化为炸药内能,使得炸药内部温度迅速上升^[15]。随着撞击速度的增大,塑性应力波的幅值也随之增大,炸药药柱的塑性变形和塑性功转热也逐渐加剧,从而发生点火反应。

由上述试验知,在高速撞击下,FOX-7 的降感效果优于 NTO。NTO 标准摩尔比热容^[16]为 141.53 J/(mol·K),FOX-7 的标准摩尔比热容^[17]为 176.59 J/(mol·K);与 HMX 相比,NTO 和 FOX-7 的比热容较大,在受到撞击作用时,会从热点处吸收较多的

热量。钝感炸药的加入较为显著地降低了 HMX 基温压炸药的燃烧速率,HMX/FOX-7 基温压炸药更不易产生热点,具有更高的临界点火速度,安全性更好。燃烧特性表征结果表明,钝感炸药的加入较为显著地降低了撞击后的 HMX 基温压炸药的燃烧速率。

3 结 论

为研究温压炸药在高速撞击条件下的响应敏感性,通过药柱撞击刚性靶板试验和密闭燃烧罐试验对 HMX 基、HMX/NTO 基和 HMX/FOX-7 基 3 种温压炸药的临界点火速度及高速撞击后药粉的燃烧特性进行分析,结论如下:

- 1) 高速撞击下,3 种温压炸药均经历冲击、塑性变形、破碎飞散和点火反应阶段。HMX 基、HMX/NTO 基和 HMX/FOX-7 基温压炸药的临界点火速度分别为 302.9、312.3、315.3 m/s。这表明,配方中加入钝感炸药 NTO 和 FOX-7 能够提高温压炸药的临界点火速度。
- 2) 303 m/s 左右速度撞击后,HMX/NTO 基和 HMX/FOX-7 基的温压炸药升压时间比 HMX 基温压炸药分别增加 103.6% 和 103.3%,升压速率比 HMX 基温压炸药分别降低 17.3% 和 21.1%。这说明,HMX 基温压炸药中加入钝感炸药 NTO 和 FOX-7,降低了撞击后药粉的燃烧速率,提高了温压炸药的安全性。

参 考 文 献

[1] WALLEY S M, FIELD J E, PALMER S J P. Impact sensitivity of propellants[J]. Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, 1992, 438(1904): 571-583.

[2] 陈鹏, 屈可朋, 陈荣, 等. 落锤加载下反应材料的反应性能[J]. 火炸药学报, 2019, 42(2): 197-201, 206.

CHEN P, QU K P, CHEN R, et al. Reactive properties of reactive material under the load of drop-weight[J].

- Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2019, 42 (2): 197-201, 206.
- [3] BALZER J E, FIELD J E, GIFFORD M J, et al. High-speed photographic study of the drop-weight impact response of ultrafine and conventional PETN and RDX[J]. Combustion & Flame, 2002, 130(4): 298-306.
- [4] 聂海亮, 石霄鹏, 陈春杨, 等. 单轴双向加载分离式霍普金森压杆的数据处理方法[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(3): 517-524.
- NIE H L, SHI X P, CHEN C Y, et al. Data processing method for bidirectional-load split Hopkinson compression bar[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(3): 517-524.
- [5] 代晓淦, 文玉史, 李敬明. Steven 试验中含 TNT 类炸药的响应特性[J]. 火炸药学报, 2011, 34(3): 48-51.
- DAI X G, WEN Y S, LI J M. Reaction characteristics for explosive containing TNT in steven test[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011, 34(3): 48-51.
- [6] CHEN X D, LAI J W, CHANG X L, et al. Compressive mechanical properties of HTPB propellant at low temperatures and high strain rates[J]. Results in Physics, 2017, 7: 4079-4084.
- [7] HAMDAN S, SWALLOWE G M. The strain-rate and temperature dependence of the mechanical properties of polyetherketone and polyetheretherketone[J]. Journal of Materials Science, 1996, 31: 1415-1423.
- [8] 吴艳青, 鲍小伟, 王明扬, 等. RDX/HMX 颗粒炸药落锤撞击点火-燃烧机理[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(2): 339-346.
- WU Y Q, BAO X W, WANG M Y, et al. Ignition and burning mechanisms of RDX/HMX particles subjected to drop-weight impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(2): 339-346.
- [9] 陈春燕, 栗保华, 李昆, 等. 冲击加载下 PBX 的点火特性与力学特性间的关系[J]. 火炸药学报, 2018, 41(4): 369-374.
- CHEN C Y, LI B H, LI K, et al. Relationship between ignition characteristics and mechanical properties of PBX under impact loading[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2018, 41(4): 369-374.
- [10] 尚海林, 杨洁, 赵锋, 等. 低速撞击下 HMX 颗粒炸药点火燃烧实验研究[J]. 现代应用物理, 2017, 8(2): 021001.
- SHANG H L, YANG J, ZHAO F, et al. Experimental research on ignition and burning of HMX granular explosives under low velocity impact[J]. Modern Applied Physics, 2017, 8(2): 021001.
- [11] 李宇翔, 吴鹏, 花成, 等. 微纳米 HMX 基 PBX 力学、导热性能及药片撞击敏感度[J]. 含能材料, 2018, 26(4): 334-338.
- LI Y X, WU P, HUA C, et al. Mechanical, thermal conductive properties and tablet impact sensitivity of micro-nano-HMX based PBX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(4): 334-338.
- [12] 李亮亮, 屈可朋, 沈飞, 等. 基于霍普金森压杆的 RDX 基含铝炸药装药双脉冲加载实验[J]. 火炸药学报, 2018, 41(1): 52-56.
- LI L L, QU K P, SHEN F, et al. Double-pulse loading experiment of RDX based aluminized explosive charge based on Hopkinson pressure bar[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2018, 41(1): 52-56.
- [13] 代晓淦, 申春迎, 文玉史, 等. Steven 试验中不同形状弹头撞击下炸药响应规律研究[J]. 含能材料, 2009, 17(1): 50-54.
- DAI X G, SHEN C Y, WEN Y S, et al. Reaction rule for explosive under different shape warhead impact in steven test[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(1): 50-54.
- [14] 梁增友. 炸药冲击损伤与起爆特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [15] 贾宪振, 王永顺, 刘瑞鹏. 炸药撞击刚性靶板的试验和数值模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(7): 212-216.
- JIA X Z, WANG Y S, LIU R P. Test and numerical simulation of explosive impact with rigid target plate[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(7): 212-216.
- [16] 李兆娜, 马海霞, 宋纪蓉, 等. NTO 的比热容、热力学性质及绝热至爆时间[J]. 火炸药学报, 2008, 31(3): 25-28.
- LI Z N, MA H X, SONG J R, et al. Specific heat capacity, thermodynamic properties and adiabatic time-to-explosion of NTO[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008, 31(3): 25-28.
- [17] 孙倩, 徐抗震, 宋纪蓉, 等. FOX-7 及其五种衍生物的燃烧热和比热容研究[C]//中国化学会第五届全国热分析动力学与热动力学学术会议论文摘要集. 延安: 中国化学学会, 2015: 57.