

文章编号: 1006-9941(2019)12-1056-06

## 约束 HMX 基 PBX 炸药裂缝中燃烧演化实验

尚海林, 杨洁, 李涛, 傅华, 胡海波

(中国工程物理研究院流体物理研究所 冲击波物理与爆轰物理重点实验室, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 为了研究约束装药裂缝中的燃烧演化规律, 获取典型尺寸裂缝中的对流燃烧特性, 加深对意外事故条件下武器装药发生点火后转变为高烈度反应过程的机理性认识, 采用热点火方式结合高速摄影、压力测量等测试技术, 对约束条件下某奥克托今 (HMX) 基高聚物粘结炸药 (PBX) (HMX 质量分数为 95%) 不同宽度预置裂缝 (50, 100, 200  $\mu\text{m}$ ) 中燃烧演化过程开展了实验研究。结果表明, 约束装药内部 50  $\mu\text{m}$  宽裂缝中的对流燃烧能够产生超过 250 MPa 的压力, 燃烧波阵面传播速度超过 400  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 裂缝越宽, 对流燃烧产生的峰值压力越低, 燃烧波阵面传播速度越快; 炸药裂缝中的对流燃烧演化主要包含 4 个阶段: 较低压力梯度下点火药燃烧产物的早期对流传播 (炸药表面未反应); 产物气体的稳定对流传播伴随炸药表面燃烧导致的裂缝增压过程; 炸药大量燃烧导致急速增压伴随约束壳体变形和炸药破裂; 极端高压下约束壳体的解体泄压过程。

**关键词:** 裂缝; 约束; 对流燃烧; 增压

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2018339

### 1 引言

炸药发生点火后的燃烧模式根据其传播特性可分为传导燃烧和对流燃烧。在传导燃烧过程中, 反应物和未反应物之间主要通过热传导传递能量, 燃烧从炸药表面向基体内部层层推进, 气相化学反应区释放的热量传递到未反应材料当中, 热传导主导整个过程, 辐射和对流只起很小的作用<sup>[1]</sup>。在特定环境 (压力、约束) 下, 燃烧会渗入炸药内部孔隙或者裂缝, 通过快速流动的高温气体引发炸药孔隙或者缝隙表面发生燃烧反应, 与主要靠热传导传播化学反应的传导燃烧相比, 这种燃烧模式的传播速度通过高温气体产物的对流得到了增加, 因此被称为对流燃烧<sup>[2]</sup>。

对流燃烧的主要特征是火焰渗入孔隙和利用火焰阵面驱动的高温气体预热孔隙。压装高能炸药系统中的对流燃烧是一个多阶段、多物理的复杂过程, 它强烈依赖于点火源的类型、高能炸药的自身性质、几何特性以及约束条件等因素<sup>[3]</sup>。由于炸药中实际裂缝的形状和尺寸各异, 通常采用预制裂缝的方式研究炸药典型尺寸裂缝中的燃烧演化特性。

Dickson 等<sup>[4-5]</sup>在烤燃实验中发现了炸药的裂纹损伤与反应的关系, 研究结果证明, 热损伤炸药在有约束的情况下点火后能够形成多条裂纹, 从而增加反应表面积, 导致发生剧烈的化学反应, 甚至爆燃转爆轰 (DDT)。Taylor 等<sup>[6]</sup>研究了边界条件对火焰穿过多孔床的影响, 采用三种不同形貌的丙烯酸树脂管开展火焰传播实验, 结果表明火焰在前端收缩的管道中传播最快, 在底端封闭的管道中传播最慢, 表明孔隙中气体产物的生成和约束能提高对流燃烧速率。Jackson 等<sup>[7]</sup>和 Berghout 等<sup>[8-9]</sup>将两块长条炸药拼在一起研究了炸药预置裂缝中燃烧演化过程, 对宽度 ( $w$ ) 为 80  $\mu\text{m}$ , 长度 ( $L$ ) 分别为 4.06 cm 和 19.1 cm 的预置裂缝开展了实验研究, 结果表明裂缝长宽比能够极大的影响燃烧反应的烈度: 长宽比由短裂缝的  $L/w=508$  增加到长裂缝的  $L/w=2388$  时, 约束解体前裂缝中最高压力由

收稿日期: 2018-12-07; 修回日期: 2019-02-01

网络出版日期: 2019-04-30

基金项目: 国家自然科学基金 (11702273, 11802288, 11802283, 11572297); 冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室基金 (6142A0305010717, 6142A03050105)

作者简介: 尚海林 (1983-), 男, 助理研究员, 主要从事炸药燃烧演化特性研究。e-mail: hailinshang@caep.cn

通信联系人: 李涛 (1978-), 男, 副研究员, 主要从事炸药化爆安全性研究。e-mail: tedleus@163.com

引用本文: 尚海林, 杨洁, 李涛, 等. 约束 HMX 基 PBX 炸药裂缝中燃烧演化实验 [J]. 含能材料, 2019, 27(12): 1056-1061.

SHANG Hai-lin, YANG Jie, LI Tao, et al. Experimental Study on Burning Evolution in Confined HMX-based PBX Cracks [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(12): 1056-1061.

15 MPa 增加到 700 MPa, 火焰传播速度由  $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  增加到超过  $1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Jackson 等<sup>[10]</sup>发展了一个简化的模型可以预测高能炸药狭缝(用来模拟炸药中的裂纹)中失控反应发生的临界条件, 以狭缝开口处发生气动壅塞为基础来预测狭缝增压, 预测结果与 Berghout 等<sup>[6-7]</sup>强约束、高纵横比裂纹燃烧实验结果一致。Andreevskikh 等<sup>[11]</sup>对几种炸药狭缝中的燃烧演化及模式转换进行了研究, 两块炸药拼成一个长 150 mm、宽 0.5 mm 的狭缝, 采用电加热头点火, 高速相机记录燃烧过程, 压力传感器测量腔体内的压力历程, 通过分析获得了几种常用炸药两种燃烧模式的速率和临界转换压力。Holmes 等<sup>[12]</sup>最近采用激光点火的方式研究了不同压力条件下薄药柱中心点火后的燃烧演化过程, 结果表明点火区域周围炸药材料的压力对于点火能否发展为剧烈的燃烧具有极大的影响, 由于预应力形成裂纹损伤的炸药发生点火后燃烧火焰更容易进入这些裂纹并发展为高烈度反应。

武器装药在意外撞击、跌落等事故条件下形成的典型裂纹尺寸以及实际装配间隙的宽度可以小到微米量级, 也可以大到毫米量级, 它可能是影响燃烧在裂缝中传播演化的关键因素之一。然而目前的研究尚未单独考虑宽度对裂缝燃烧演化的影响, 因此本研究拟开展炸药内部不同宽度预置裂缝燃烧演化实验研究, 通过对实验结果开展深入分析, 获取裂缝宽度对燃烧演化的影响规律, 揭示炸药裂缝中对流燃烧演化的特性, 为武器装药在意外点火后的安全性研究提供支撑。

## 2 实验部分

### 2.1 实验样品

实验所用炸药样品为某 HMX 基 PBX, 由中国工程物理研究院化工材料研究所提供, 其各组分的质量分数分别为 HMX 95%、粘结剂 4.3%、钝感剂 0.7%; 其理论最大密度为  $1.889 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 实际密度为  $1.860 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 样品尺寸为  $200 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ; 质量为  $(27.9 \pm 0.03) \text{ g}$ 。

### 2.2 实验装置及测试方法

实验装置如图 1 所示, 将两块实验样品拼在一起形成一个长度 200 mm 和特定宽度的裂缝; 裂缝一端封闭, 另一端与点火腔相通, 点火腔的体积约为  $8.5 \text{ cm}^3$ , 点火方式为电点火头加 1 g 黑火药; 约束外罩材料为合金钢 30CrMnSi, 尺寸为  $340 \text{ mm} \times 131 \text{ mm} \times 93 \text{ mm}$ , 其

中前约束罩和后约束罩的厚度分别为 45 mm 和 48 mm; 有机玻璃窗口的尺寸为  $260 \text{ mm} \times 51 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ ; 前、后约束罩通过 26 个 12.9 级强度的 M10 螺栓紧固。

在裂缝的一侧设置了透明窗口, 可通过该窗口实时观测裂缝中的燃烧反应发展全过程, 对燃烧演化图像进行分析可得到不同时刻火焰尖端的位置。在装置背面裂缝的另一侧正对裂缝处安装了 6 个压力传感器, 如图 2 所示, 其中编号为 1 的压力传感器用来测量点火腔内的压力, 编号 2~6 的压力传感器距离裂缝开口端分别为 4, 52, 100, 148, 196 mm, 用来测量裂缝不同位置的燃烧压力。将压力传感器记录到的压力开始上升时刻视为燃烧波阵面到达时间, 将不同位

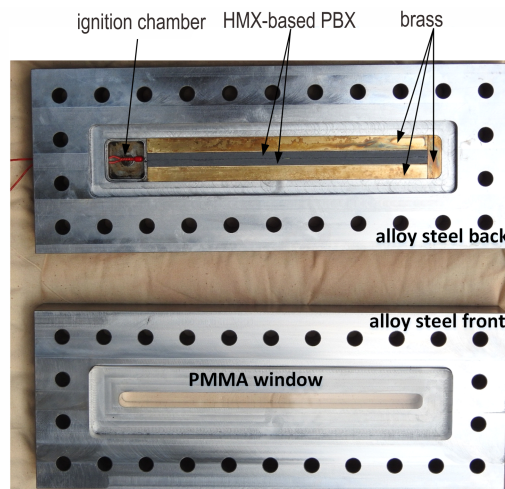


图 1 炸药裂缝燃烧实验装置图

Fig.1 Crack burning experiment device

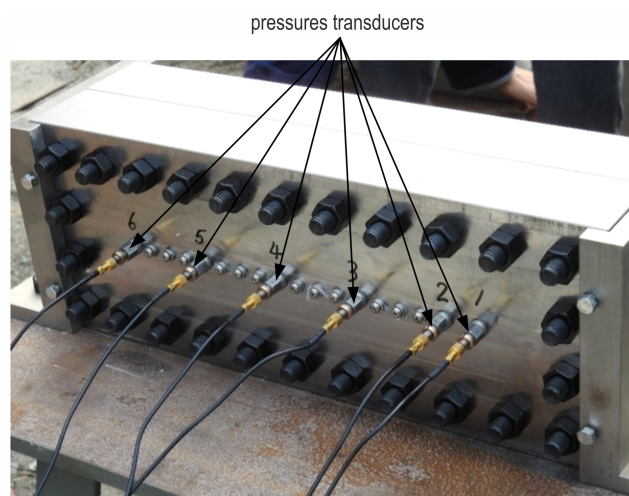


图 2 炸药裂缝燃烧实验压力传感器布局图

Fig.2 Diagram of pressure transducers distribution for crack burning experiment

置波阵面的到达时间在位置—时间曲线上进行分段线性拟合,可以得到燃烧波阵面在不同阶段的传播速度。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 典型裂缝燃烧实验结果

为研究裂缝宽度对燃烧演化的影响规律,本研究分别开展了50、100  $\mu\text{m}$ 和200  $\mu\text{m}$ 三种宽度的预置裂缝燃烧实验,由于不同实验得到的裂缝燃烧演化过程、压力和速度曲线的变化趋势相同,只是压力大小和速度快慢有所差别,因此以50  $\mu\text{m}$ 裂缝宽度为例,对实验结果进行详细分析和讨论。

在裂缝宽为50  $\mu\text{m}$ 的燃烧实验中,高速相机拍摄到不同时刻裂缝燃烧过程图像如图3所示。压力传感器记录到的裂缝中不同位置压力曲线如图4所示,根据图4中压力曲线的演化特征结合燃烧过程图像可将裂缝燃烧过程划分为4个不同的阶段,其压力变化范围分别为0~5 MPa(阶段 I)、5~30 MPa(阶段 II)、30~250 MPa(阶段 III)和250~0 MPa(阶段 IV)。详细燃烧演化历程分析见3.3。

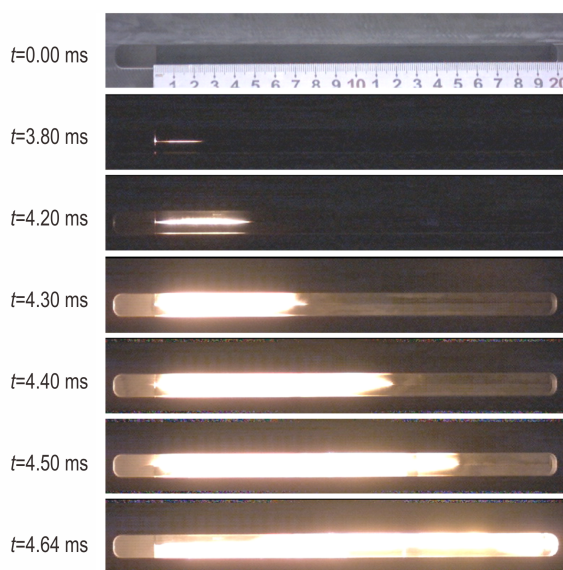


图3 50  $\mu\text{m}$ 宽裂缝燃烧过程照片

Fig.3 Images of burning process in 50  $\mu\text{m}$  width crack

通过图3获取不同时刻火焰尖端的位置,作位置—时间曲线,并对曲线开展分段线性拟合,得到火焰在靠近点火端的传播速度约为3.27  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,而在后段的速度约为384.3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,如图5所示。通过图4中阶段 II的压力上升时刻获取燃烧波阵面达到时刻,在位置

—时间曲线中进行线性拟合(图5),得到其传播速度约为423  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

由图5可以看出,在裂缝中的同一位置,火焰总是先于波阵面到达,这是因为火焰到达裂缝某个位置后,要先对炸药壁面加热,炸药壁面在持续的热流加热作用下需要一定的时间才能发生点火燃烧,因此高速相机记录到的火焰尖端与压力传感器记录的波阵面位置并不同步,而是有一定的时间差,这个时间差在裂缝宽50  $\mu\text{m}$ 的实验中约为110  $\mu\text{s}$ 。

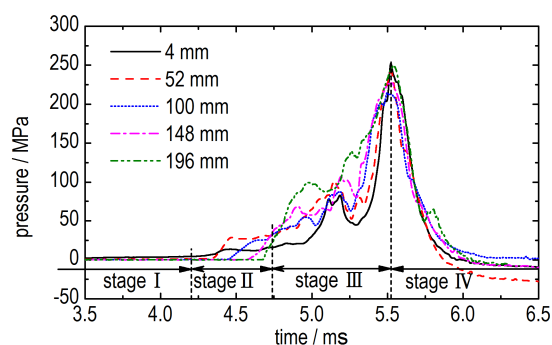


图4 50  $\mu\text{m}$ 宽裂缝燃烧压力曲线

Fig.4 Pressure traces from the 50  $\mu\text{m}$  width crack burning experiment

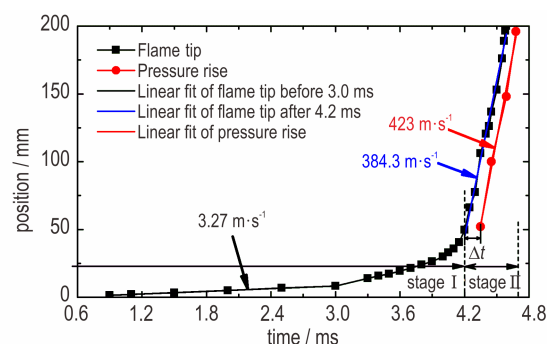


图5 50  $\mu\text{m}$ 宽裂缝燃烧火焰尖端及波阵面位置和传播速度

Fig.5 Position and propagation speed of flame tip and wave front from the 50  $\mu\text{m}$  width crack burning experiment

#### 3.2 裂缝宽度对燃烧演化的影响

裂缝宽度分别为50、100  $\mu\text{m}$ 和200  $\mu\text{m}$ 的燃烧实验结果对比如表1所示。从表1可以看出,随着裂缝宽度增加,对流燃烧的速度逐渐升高,火焰尖端和压力波阵面到达时间差逐渐降低,而装置解体前裂缝中燃烧产生的峰值压力逐渐降低。

Jackson等<sup>[10]</sup>指出,在狭窄裂缝中传播的可压缩气体必然要受到壁面黏性阻力的影响,在考虑黏性的情况下,裂缝壁面需要满足无滑动边界条件,因此就会对靠近壁面的气体流动产生黏性阻力。由于裂缝越

窄,边界的影响越明显,因此黏性约束效应会随着裂缝宽度的减小而增加,气流速度就会随着裂缝宽度的减小而降低,高温气流速度降低自然会导致燃烧波阵面传播速度的降低,这就是燃烧传播速度随着裂缝宽度增加而增加的原因。

表 1 不同裂缝宽度实验结果对比

Table 1 Comparison among experiment results with different crack widths

crack width / $\mu\text{m}$	flame speed in stage II / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	pressure wave speed in stage II / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	time delay between arriving of flame and pressure wave in stage II / $\mu\text{s}$	Peak pressure in stage III / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
50	384.3	423	110	253
100	467	469.3	95	210
200	479.1	477.8	80	183

火焰尖端和压力波阵面到达时间差的变化规律可作如下解释:裂缝越宽,单位时间内裂缝单位长度方向内流入的高温气体越多,对单位长度裂缝壁面炸药加热的热流密度越大,点火反应所需的时间越短,因此火焰尖端和压力波阵面到达时间差随着裂缝宽度的增加而降低。

压力的变化规律可通过体积与压力的关系解释:在燃烧产生同样气体质量的条件下,裂缝越宽,其空腔体积越大,因而压力就会越低。

### 3.3 裂缝燃烧演化历程分析

由于不同宽度裂缝实验得到的燃烧压力演化趋势相同,只是压力大小有所差别,因此以 50  $\mu\text{m}$  宽裂缝为例,对燃烧压力历程进行分阶段分析和讨论。截取图 4 中某时刻各位置的压力值,作该时刻裂缝中压力-位置分布曲线,由同一阶段中不同时刻的压力分布曲线即可得到该阶段中压力空间分布随时间的变化趋势。

#### 3.3.1 阶段 I :较低压力梯度下靠近点火端裂缝中高温气体的早期对流传播

阶段 I 中不同时刻裂缝中的压力分布曲线如图 6 所示。该阶段点火腔中黑火药燃烧产生的高温气体进入裂缝,炸药表面由于热流输入时间不够尚未发生燃烧反应。由图 6 可以看出,由于狭窄裂缝中壁面的黏性阻力作用,裂缝中的增压速率以及气体的对流传播速度都相对缓慢,压力小于 5 MPa。

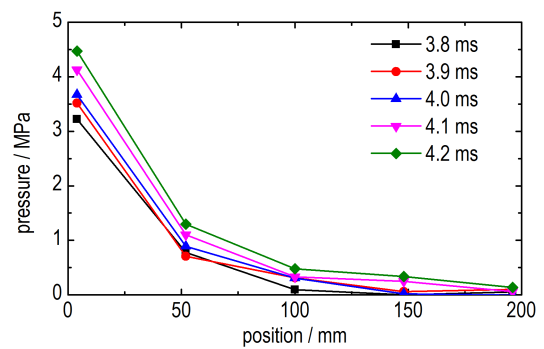


图 6 阶段 I 中不同时刻压力沿裂缝长度的分布曲线

Fig. 6 Pressure distributions along crack length at different time in stage I

#### 3.3.2 阶段 II :产物气体的稳定对流传播伴随裂缝表面沿长度方向传导燃烧

阶段 II 中不同时刻裂缝中的压力分布曲线如图 7 所示。该阶段中燃烧产物沿着裂缝以相对稳定的超声速度传播。由图 7 可知,经过一定的延迟时间之后裂缝表面沿着长度方向开始燃烧,并逐渐将裂缝中的压力升高到 30 MPa 左右,且在裂缝中部(52~148 mm)形成了一个压力平衡区域。

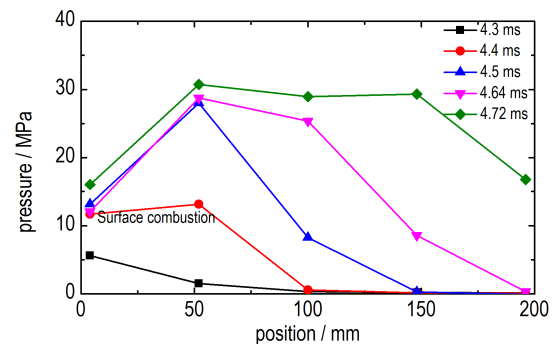


图 7 阶段 II 中不同时刻压力沿裂缝长度的分布曲线

Fig. 7 Pressure distributions along crack length at different time in stage II

#### 3.3.3 阶段 III :裂缝中炸药剧烈燃烧伴随着约束壳体变形

阶段 III 中不同时刻裂缝中的压力分布曲线如图 8 所示。该阶段中裂缝上下表面持续燃烧导致裂缝内部压力不断升高。由图 8 可知,压力达到某个特定值之后约束壳体开始变形,导致裂缝宽度增加,炸药块体受压变形和破裂,燃烧火焰进入炸药内部新生成的裂纹以及炸药与壳体的结构间隙中,导致燃烧进一步加剧,裂缝内部压力急剧升高,峰值压力甚至超过了 250 MPa。

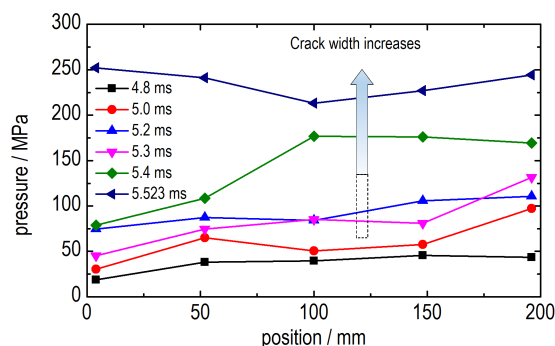


图8 阶段Ⅲ中不同时刻压力沿裂缝长度的分布曲线

Fig. 8 Pressure distributions along crack length at different time in stage III

### 3.3.4 阶段Ⅳ:约束壳体破裂伴随着压力卸载

阶段Ⅳ中不同时刻裂缝中的压力分布曲线如图9所示。由图9可知,在燃烧造成的极端高压作用下,约束壳体发生破裂,未反应炸药在高压产物气体的作用下四处分散,裂缝中的压力也随之迅速下降。

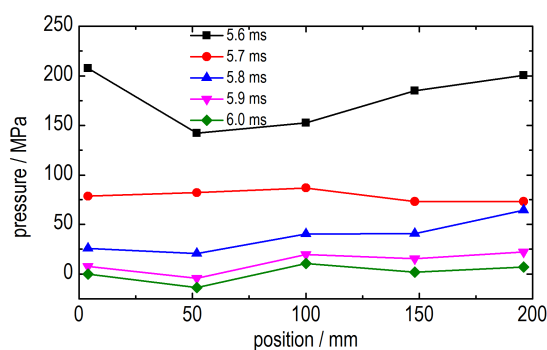


图9 阶段Ⅳ中不同时刻压力沿裂缝长度的分布曲线

Fig. 9 Pressure distributions along crack length at different time in stage IV

## 4 结论

采用高速摄影结合压力测量等技术对热点火下约束某HMX基PBX炸药预置裂缝中的对流燃烧过程开展了实验研究,得到结论如下:

(1)约束炸药内部50 μm宽度裂缝中的对流燃烧能够产生超过250 MPa的压力,对流燃烧波阵面传播速度超过400 m·s<sup>-1</sup>。

(2)随着裂缝宽度增加,炸药裂缝中对流燃烧的传播速度逐渐升高,火焰尖端和压力波阵面到达时间差逐渐降低,而装置解体前裂缝中燃烧产生的峰值压力逐渐降低。

(3)炸药裂缝中的对流燃烧演化可划分为4个阶段:较低压力梯度下靠近点火端裂缝中高温气体的早期对流传播(炸药表面未反应);产物气体的稳定对流传播伴随炸药表面燃烧导致的裂缝增压过程;裂缝中炸药剧烈燃烧伴随着约束壳体变形和炸药破裂;极端高压下约束壳体的解体泄压过程。

### 参考文献:

- [1] Asay B W, McAfee J M. Temperature effects on failure thickness and the deflagration-to-detonation transition in PBX9502 and TATB[C]//Proceedings of the 10th International Detonation Symposium. Boston, MA, US: Naval Surface Warfare Center, 1993: 485-489.
- [2] Asay B W. Shock wave science and technology reference library, Vol. 5: non-shock initiation of explosives[M]. Heidelberg, Baden-Württemberg, Germany: Springer, 2010: 245-292.
- [3] Asay B W, Son S F, Bdzil J B. The role of gas permeation in convective burning [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1996, 22(5): 923-952.
- [4] Dickson P M, Asay B W, Henson B F, et al. Observation of the behaviour of confined PBX 9501 following a simulated cookoff ignition[C]//Proceedings of the 11th International Detonation Symposium. Snowmass, CO, US: Office of Naval Research, 1998: 606-611.
- [5] Dickson P M, Asay B W, Henson B F, et al. Thermal cook-off response of confined PBX 9501 [J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 2004, 460(2052): 3447-3455.
- [6] Taylor J W. The burning of secondary explosive powders by a convective mechanism [J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1962, 58: 561-568.
- [7] Jackson S I, Hill L G, Berghout H L, et al. Runaway reaction in a solid explosive containing a single crack[C]//Proceedings of the 13th International Detonation Symposium. Norfolk, VA, US: Office of Naval Research, 2006: 646-655.
- [8] Berghout H L, Son S F, Hill L G, et al. Flame spread through cracks of PBX9501 (a composite octahydro-1, 3, 5, 7-tetranitro-1, 3, 5, 7-tetrazocine-based explosive) [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(11): 114901.
- [9] Berghout H L, Son S F, Asay B W. Convective burning in gaps of PBX9501 [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28(1): 911-917.
- [10] Jackson S I, Hill L G. Runaway reaction due to gas-dynamic choking in solid explosive containing a single crack [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2307-2313.
- [11] Andreevskikh L A, Vakhmistrov S A, Pronin D A, et al. Convective combustion in the slot of an explosive charge [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2015, 51(6): 659-663.
- [12] Holmes M D, Parker G R J, Broilo R M, et al. Fracture effects on explosive response (FEER)[R]. LA-UR-18-29694: 2018.

## Experimental Study on Burning Evolution in Confined HMX-based PBX Cracks

SHANG Hai-lin, YANG Jie, LI Tao, FU Hua, HU Hai-bo

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** The aim of the paper is to investigate the evolution law of burning in high explosive (HE) cracks under confinement, obtain the characteristics of convective burning in typical explosive cracks, and deepen our mechanism understanding on the process for high intensity reaction of projectile fillings under accidental ignition. The propagation of burning in preformed cracks inside octogen(HMX)-based polymer bonded explosive (PBX)(with a content of 95% for HMX) under thermal initiation was recorded by high-speed camera and pressure transducers. It is found that convective burning in 50  $\mu\text{m}$  wide crack of HE under confinement can produce high pressure exceeding 250 MPa with the burning wave speed exceeding  $400 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Comparison between crack widths reveals that with the increase of crack width, the peak pressure attributed to convective burning decreases but the burning wave speed increases. Detailed analysis of experimental data reveals that there are four stages in the evolution of convective burning in explosive cracks. The first stage is the early stage transportation of initial reaction products through crack under relatively low pressure gradient without burning on HE surface. The second stage is the steady convection of product gases with pressure growing due to combustion inside crack. The third stage is the rapid pressurization due to violent burning of HE with fracture of HE and deformation of the confinement shell. The fourth stage is the confinement failure process under extremely high pressure.

**Key words:** crack; confinement; convective burning; pressurization

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018339