

文章编号:1006-9941(2019)10-0819-05

炸药燃烧产物驱动裂纹动态扩展耦合特性

尚海林,马 骁,程 赋,李 涛,傅 华

(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: 为了研究炸药燃烧产物驱动基体中裂纹动态扩展的耦合特性,加深对武器装药意外点火后反应进入裂纹形成对流燃烧引发高烈度反应的机理性认识,采用热点火方式对某奥克托今(HMX)基(质量分数为95%)高聚物粘结炸药PBX预置缺口点火,采用数字高速摄影技术对炸药燃烧产物驱动裂纹动态扩展过程开展了实验研究。结果表明,由于高聚物粘结炸药(PBX)存在较强的细观非均匀性,同一种炸药的不同样品细观结构也不完全相同,导致其裂纹扩展路径存在差异(可能沿直线传播,也可能发生偏转),但是在相同的约束条件和预应力下其扩展速度基本一致,本研究实验条件下,该PBX炸药裂纹扩展平均速度为 $146.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

关键词: 反应演化;对流燃烧;裂纹扩展;耦合**中图分类号:** TJ55;O346.1+1**文献标志码:** A**DOI:**10.11943/CJEM2019136

1 引言

武器装药在意外事故条件下发生局部非冲击点火后,燃烧产生的高温高压气体可能在炸药内部缺陷部位生成裂纹。在燃烧产物的驱动下,裂纹不断向前扩展,宽度也随之增加,因此燃烧表面积增加,燃烧持续加速。若约束够强,裂纹扩展与燃烧加速的正反馈作用会导致反应烈度进一步提高,引起热爆炸,或者进而转变为爆轰,造成灾难性后果^[1-3]。因此,研究燃烧产物驱动裂纹动态扩展的耦合特性对武器装药在意外事故条件下的安全性评估具有重要意义。

Dickson等^[4-5]在烤燃实验中发现了炸药的裂纹损伤与反应的关系,他们的研究结果证明,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,发生剧烈的化学反应,甚至出现燃烧转爆轰(DDT)。Smilowitz等^[6-8]采用质子照相技术对

PBX9501炸药的热爆炸过程进行了研究,发现高温燃烧产物气体以对流方式进入炸药基体裂纹,点燃裂纹表面,裂纹中产生的气体压力驱使裂纹尖端向前分叉传播。Jackson等^[9]和Berghout等^[10-11]对PBX9501炸药预置裂缝中的燃烧演化开展了实验研究,发现裂缝长宽比能够极大的影响燃烧反应的剧烈程度。郭应文等^[12]在压装DDT管实验中发现炸药燃烧的火焰沿着炸药基体裂纹和炸药与管壁之间的缝隙中传播。尚海林等^[13]在某HMX基PBX炸药预置裂缝燃烧实验中发现炸药预置裂缝中的燃烧压力和燃烧传播速度与裂缝宽度密切相关。Holmes等^[14]采用三明治结构对薄片炸药施加预应力,使用激光表面点火研究了PBX9501炸药裂纹对点火响应的影响,结果表明在较低预应力下燃烧产物气体从炸药与蓝宝石窗口界面流出导致反应熄灭;而较高预应力条件下产物气体在炸药内部形成裂纹,气流进入裂纹并随之扩展,到达样品边缘后气体溢出导致反应熄灭。

裂纹的生成与扩展极大地影响着意外事故条件下武器装药点火后的反应演化进程,然而目前缺少对裂纹生成及燃烧产物驱动裂纹动态扩展的定量观测,因此本研究采用对某HMX基PBX薄片炸药预置缺口点火的方式开展炸药裂纹动态扩展实验,研究燃烧演化与裂纹动态扩展的耦合特性,加深对炸药意外点火后反应进入裂纹形成对流燃烧引发高烈度反应的机理性认识,为武器装药安全性研究提供支撑。

收稿日期: 2019-05-15; **修回日期:** 2019-07-27**网络出版日期:** 2019-09-05**基金项目:** 国家自然科学基金资助(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资助(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:tedleeus@163.com**引用本文:**尚海林,马骁,程赋,等. 炸药燃烧产物驱动裂纹动态扩展耦合特性[J]. 含能材料,2019,27(10):819-823.SHANG Hai-lin, MA Xiao, CHENG Fu, et al. Coupling Properties of Crack Penetration Driven by Explosive Burning Products[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(10):819-823.

2 实验部分

2.1 实验样品

实验所用炸药为某奥克托今(HMX)基高聚物粘结炸药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 $1.860 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。样品为 $100 \text{ mm}\times 100 \text{ mm}\times 5 \text{ mm}$ 带缺口的薄片炸药,缺口位于炸药的中心线上,宽度 15 mm ,深度约 13.3 mm ,缺口两边夹角为 45° 。

2.2 实验方法

实验装置如图 1 所示,炸药样品安装在约束外罩中,通过点火基座对炸药缺口点火。点火基座与炸药缺口紧密配合,如图 2 所示。采用电点火头加 3 g 黑火药的点火方式,点火头引燃黑火药后高温高压气体从点火基座预留的出口流出,对缺口处炸药加热加压,随后炸药缺口处产生裂纹并在燃烧产物的驱动下快速扩展。

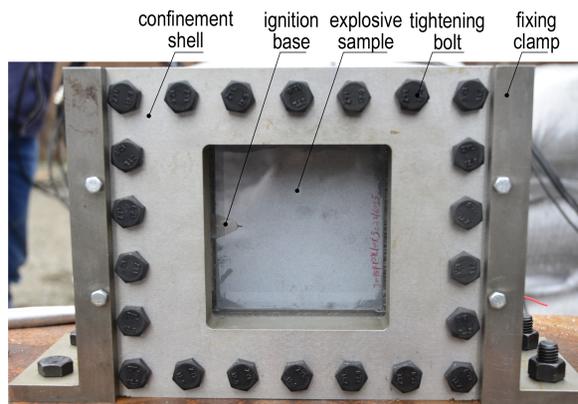


图 1 炸药裂纹动态扩展实验装置图

Fig. 1 Experimental device for explosive crack penetration

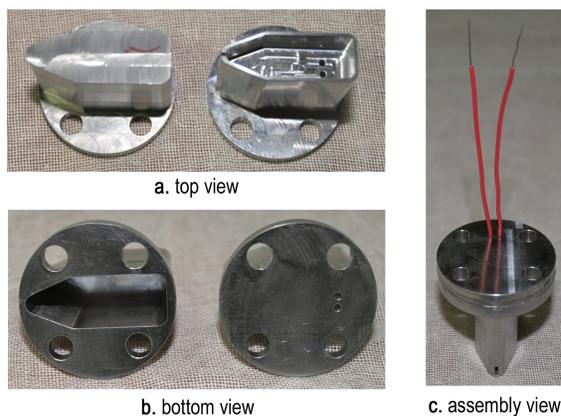


图 2 炸药裂纹动态扩展实验点火基座

Fig. 2 Ignition base for explosive crack penetration experiment

约束外罩材料为合金钢 30CrMnSi,尺寸为 $220 \text{ mm}\times 180 \text{ mm}\times 83 \text{ mm}$,其中前约束罩和后约束罩的厚度分别为 40 mm 和 43 mm ;前、后约束罩通过 22 个 12.9 级强度的 M10 螺栓紧固。样品的正面安装了 JGS1 石英玻璃窗口,尺寸为 $150 \text{ mm}\times 120 \text{ mm}\times 30 \text{ mm}$,透过该窗口采用高速相机拍摄炸药从缺口点火到燃烧产物驱动裂纹扩展的全过程。

2.3 实验测试及数据处理方法

实验中高速相机采用的图像分辨率为 384×352 ,拍摄频率为 $112,000 \text{ 帧/s}$,每幅图像之间的时间间隔为 $8.93 \mu\text{s}$,曝光时间为 $1/126158 \text{ s}$ 。

实验开始前,用高速相机对实验装置拍摄静止图像,选定装置中某个尺寸作为基准尺寸(可在拍摄过程中放入直尺作为基准),通过图像处理获取基准尺寸对应的像素值,进一步得到实际尺寸与像素值的对应关系。正式实验中保持相机的位置和所有设置不变,保证像素值与实际尺寸的对应关系不变。

实验后读取不同时刻裂纹尖端所在位置的像素值,依据实际尺寸与像素值的对应关系换算得到不同时刻裂纹尖端的位置,将裂纹尖端位置-时间曲线进行线性拟合可得到裂纹扩展速度。

这种裂纹扩展速度测试方法主要依赖于高速摄影,可能的影响因素包括裂纹尖端位置的判断、通过图像获取实际尺寸的精度等。燃烧产物驱动裂纹扩展过程中,只能通过发光来判断裂纹尖端的位置,必然会因为视觉差异带来一定的误差,可以针对同一图像采用多次读取求平均值的方法尽量减小误差。通过图像获取实际尺寸的精度问题主要是因为炸药样品、玻璃窗口、约束外罩等处于不同的焦距平面上,如果选择与炸药不在同一焦距平面的物体尺寸作为基准尺寸,由于景深不同就会导致通过像素值换算得到的实际尺寸与真实尺寸存在一定的误差,避免这一误差的最好办法是选择炸药样品的某个尺寸作为基准尺寸建立实际尺寸与像素值的对应关系。

3 结果与讨论

3.1 炸药裂纹动态扩展实验结果

采用带缺口的某 HMX 基 PBX 炸药开展了 2 发炸药裂纹动态扩展实验,实验样品的尺寸、点火方式、约束条件、测试设置都保持一样,实验结果如下。

实验 1 通过高速相机拍摄到缺口炸药点火后燃烧产物驱动裂纹的扩展过程,如图 3 所示。同步机给出点火信号之后大约 1.54 ms 黑火药的燃烧产物从点火

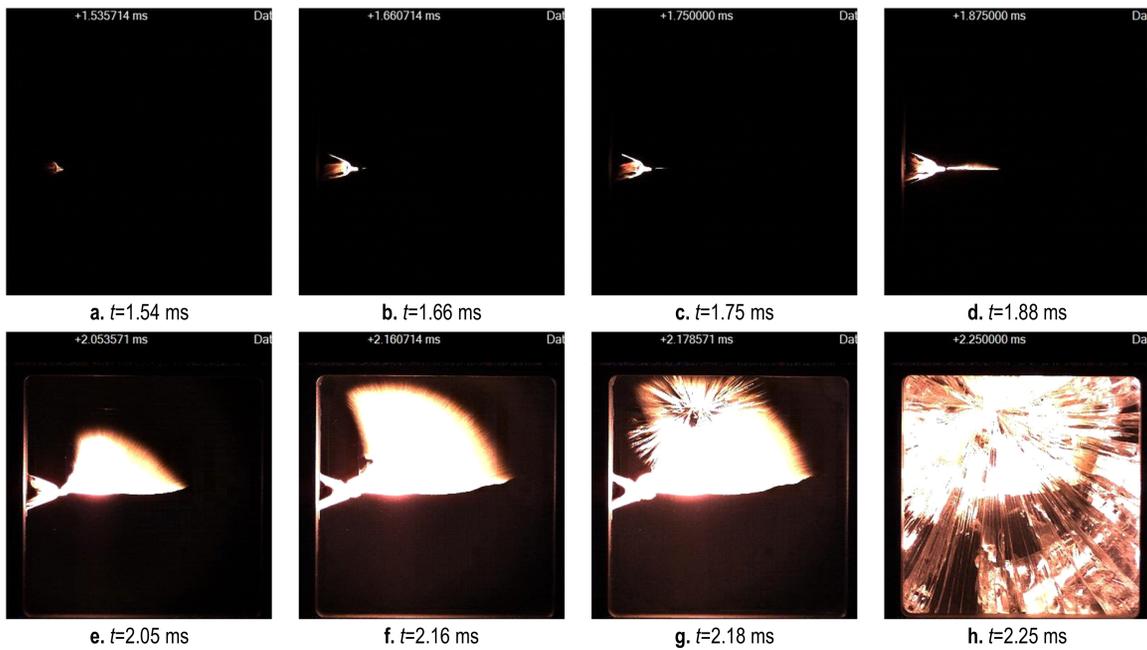


图3 实验1燃烧产物驱动裂纹扩展过程图像

Fig.3 High-speed video images for crack penetration driven by explosive burning products in experiment 1

基座缺口流出,对炸药缺口加热;1.66 ms缺口尖端出现裂纹,并向右扩展;1.75 ms裂纹开始快速扩展,直到2.16 ms;2.18 ms石英玻璃窗口出现破裂;2.25 ms石英玻璃窗口已完全破碎。

对图3高速摄影图像进行分析,得到不同时刻裂纹尖端的位置,作出裂纹尖端位置-时间曲线,并对曲线进行分段线性拟合,得到不同阶段的裂纹扩展速度,如图4所示。可以看到,1.75 ms之前,裂纹刚开始萌生阶段传播的较慢,此阶段的拟合速度为 $17.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;此后裂纹以相对恒定的速度向右传播,拟合速度为 $145.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

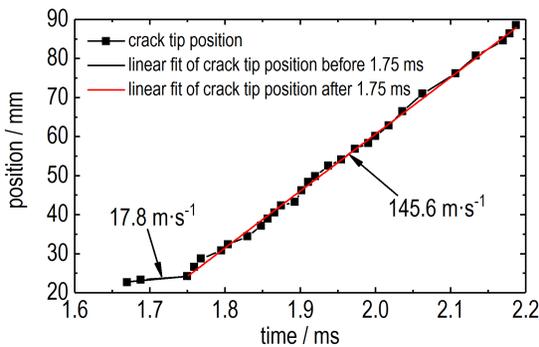


图4 实验1不同时刻裂纹尖端的位置和传播速度

Fig.4 Crack tip position and penetration velocity in experiment 1

实验2缺口炸药点火后燃烧产物驱动裂纹的扩展过程如图5所示。同步机给出点火信号之后大约1.43 ms黑火药的燃烧产物从点火基座缺口流出,对

炸药缺口加热;1.5 ms缺口尖端出现裂纹,并向右快速扩展;1.625 ms之后裂纹向下方偏转,偏转角度约为 25° ;1.91 ms石英玻璃窗口出现破裂;2.00 ms石英玻璃窗口已完全破碎。

对高速摄影图像进行分析,得到不同时刻裂纹尖端的位置(由于1.625 ms之后裂纹向下方偏转,因此之后的裂纹尖端位置根据偏转角度做了相应的修正,用裂纹的实际长度代替水平方向的投影长度),作出裂纹尖端位置-时间曲线,并对曲线进行线性拟合,得到裂纹扩展速度,如图6所示。可以看到,裂纹在炸药缺口处生成之后以相对恒定的速度向右传播,拟合速度为 $147.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,与实验1中后期裂纹稳定传播速度 $145.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 非常接近。

通过开展炸药裂纹动态扩展耦合特性实验研究,获取了燃烧产物驱动裂纹扩展的动态物理图像,结果表明裂纹的传播路径由于炸药存在细观非均匀性并不完全相同,但是其传播速度基本一致,本文实验条件下裂纹平均扩展速度为 $146.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

3.2 分析与讨论

Holmes等^[14]采用三明治结构对薄片炸药施加预应力,使用激光表面点火方式研究了PBX9501炸药裂纹对点火响应的影响,作者针对不同样品尺寸、不同预应力状态、不同点火条件共开展了16发实验,其中实验16样品在应变为 81 me 时预应力达到峰值 13.2 MPa ,随后加载持续,样品持续破碎直到应变达到 310 me ,应力减小到 8.2 MPa ,此时对炸药表面中

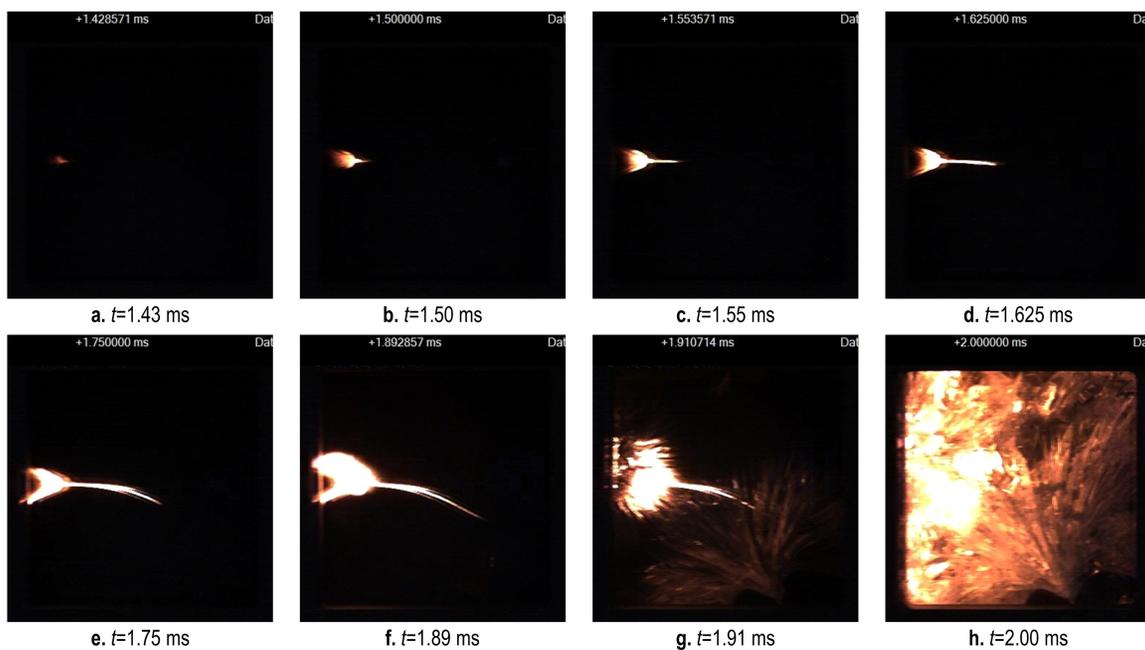


图5 实验2燃烧产物驱动裂纹扩展过程图像

Fig.5 High-speed video images for crack penetration driven by explosive burning products in experiment 2

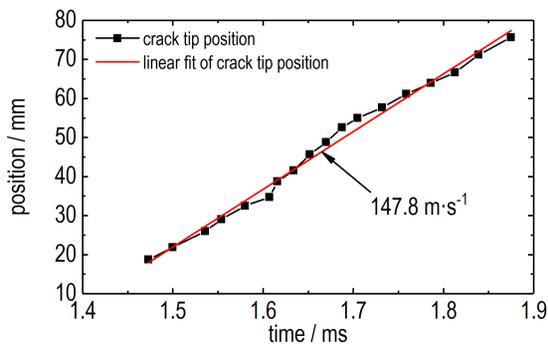


图6 实验2不同时刻裂纹尖端的位置和传播速度

Fig.6 Crack tip position and penetration velocity in experiment 2

心位置点火,观测到炸药中形成了3条主裂纹,拟合得到的扩展速度分别为 165.2, 148.7, 130.0 $m \cdot s^{-1}$ (图7),三条裂纹的平均扩展速度为 148 $m \cdot s^{-1}$,与本研究实得到的裂纹扩展速度基本相同。

文献[14]同时指出,预应力大小以及炸药的初始状态极大的影响着裂纹的扩展形态及扩展速度,在实验14中炸药样品在应变为 93 $m\epsilon$ 时预应力达到峰值 13.7 MPa,随后点火也出现了3条主裂纹,然而裂纹的平均扩展速度超过了 200 $m \cdot s^{-1}$ 。本研究不同实验中裂纹的扩展速度基本相同,说明炸药受到的约束条件及预应力状态基本相同。

本研究结果与文献[14]等相关研究对比分析表明,裂纹扩展速度可能受到炸药材料特性、约束条件(包括炸药和壳体之间间隙)、预应力状态的影响。高聚物粘接炸药存在细观结构非均匀性,同一种炸药的

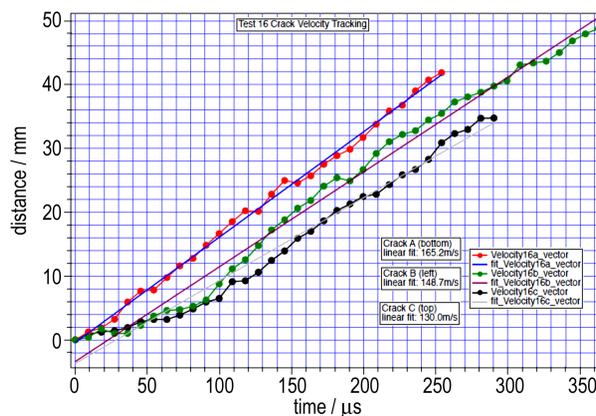


图7 实验16裂纹扩展速度^[14]

Fig.7 Crack penetration velocity of experiment 16^[14]

不同样品在相同实验条件下其裂纹传播路径也并不会完全相同。不同炸药具有不同的断裂特性,因此即使在相同的实验条件下裂纹扩展速度也不会相同。约束条件也在很大程度上影响裂纹的传播,本文实验中薄片炸药周围与约束壳体之间没有预留间隙,在裂纹扩展过程中裂纹两侧炸药的的运动受到限制,可能导致裂纹扩展速度变慢。随着预应力增加,炸药表面受到的正压力增加,炸药与窗口表面摩擦力增加,也可能限制裂纹的扩展速度。

因此,为了获取不同状态下炸药裂纹动态扩展的特性参数和规律,在未来的研究中将开展不同炸药类型、不同约束条件(包括炸药和壳体之间预留不同间隙)、不同预加载荷状态下的裂纹扩展实验,以模拟不同装药类

型、不同装药结构、不同场景下装药意外点火后的事故反应演化进程,为武器装药安全性研究提供支撑。

4 结论

对某HMX基PBX带缺口薄片炸药燃烧产物驱动裂纹动态扩展的耦合过程开展了实验研究,得到如下结论:

(1)获取了燃烧产物驱动裂纹扩展的动态物理图像和裂纹扩展速度,本研究实验条件下,该PBX炸药裂纹扩展平均速度为 $146.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(2)由于高聚物粘结炸药存在较强的细观非均匀性,同一种炸药的不同样品裂纹扩展路径并不一样,但是在相同实验条件(包括炸药类型、炸药尺寸、约束条件、预加载荷、点火方式)下裂纹的扩展速度基本一致。

(3)炸药类型、约束条件和预应力状态可能是影响裂纹扩展特性的主要因素,未来将开展不同炸药类型、不同约束条件、不同预加载荷状态下的炸药裂纹扩展实验,获取不同条件下的炸药裂纹动态扩展特性。

参考文献:

- [1] 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: 923-952.
- [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] 胡海波, 郭应文, 傅华, 等. 炸药事故反应烈度转化的主控机制[J]. 含能材料, 2016, 24(7): 622-624.
HU Hai-bo, GUO Ying-wen, FU Hua, et al. The dominant mechanism of reaction violence transition for explosive accident [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(7): 622-624.
- [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, Colorado, 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] Smilowitz L, Henson B F, Romero J J, et al. Proton radiography of a thermal explosion in PBX9501 [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 955: 1139-1142.
- [7] Smilowitz L, Henson B F, Romero J J, et al. The evolution of solid density within a thermal explosion II. Dynamic proton radiography of cracking and solid consumption by burning [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111: 103516.
- [8] Smilowitz L, Henson B F, Oswald D, et al. Internal subsonic burning during an explosion viewed via dynamic X-ray radiography [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111: 184103.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 郭应文, 胡海波, 李涛, 等. 压装PBX炸药DDT管实验初始反应演化过程分析[J]. 火炸药学报, 2017, 40(6): 77-80.
GUO Ying-wen, HU Hai-bo, LI Tao, et al. Analysis of initial reaction evolution process of experiment of DDT tube filled with pressed PBX explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2017, 40(6): 77-80.
- [13] 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, DOI: 10.11943/CJEM2018339.
SHANG Hailin, YANG Jie, LI Tao, et al. Experimental Study on Burning Evolution in Confined Explosive Cracks [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, DOI: 10.11943/CJEM2018339.
- [14] Holmes M D, Parker G R J, Broilo R M, et al. Fracture Effects on Explosive Response (FEER), LA-UR-18-29694 [R]. Los Alamos, USA: Los Alamos National Laboratory, 2018.

Coupling Properties of Crack Penetration Driven by Explosive Burning Products

SHANG Hai-lin, MA Xiao, CHENG Fu, LI Tao, FU Hua

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

Abstract: In order to investigate the characteristics of crack penetration in explosive bulk driven by burning products, and deepen the mechanism understanding on the process of high intensity reaction induced by burning products entering into cracks and forming convective burning under accidental ignition. The penetration of cracks in a HMX-based PBX (with a content of 95% for HMX) under thermal initiation at the preformed gap was photographed by the high-speed camera. Experimental results reveal that, due to the strong meso-heterogeneity of polymer bonded explosive (PBX), different samples of the same kind of explosive have different meso-structures, which results in the difference of crack propagation paths (which may propagate in a straight line or deflect). Velocities of the crack penetration are nearly the same under same confinement and same pre-load stress. The average crack penetration velocity is about $146.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in the experimental condition of this research.

Key words: burning evolution; convective burning; crack penetration; coupling

CLC number: TJ55; O346.1+1

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019136

(责编:高毅)