

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0348

## 强约束球形装药反应裂纹传播 和反应烈度表征实验\*

李涛<sup>1</sup>, 胡海波<sup>1</sup>, 尚海林<sup>1</sup>, 傅华<sup>1</sup>, 文尚刚<sup>2</sup>, 喻虹<sup>3</sup>

(1. 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;  
2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999;  
3. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100089)

**摘要:** 炸药燃烧的高温高压气体产物可以进入基体裂纹中引发炸药表面热传导燃烧, 形成所谓的对流燃烧。在一定约束条件下, 不断上升的气体压力反过来又使炸药基体产生更多的裂纹, 为对流燃烧提供更多的通道和燃烧表面积, 快速生成大量产物气体导致高烈度反应现象的产生。本文中设计了一种新型强约束球形装药中心点火实验, 针对一种 HMX 为基的 PBX 炸药, 对高烈度反应条件下燃烧裂纹传播和反应增长过程进行了观测, 实验中采用测得的反应压力和壳体速度历程对反应烈度进行了量化表征。在带窗口结构中, 早期炸药中的燃烧裂纹不可见; 中期燃烧裂纹扩展到药球表面时, 先形成 4 条沿经线方向近似对称的主裂纹, 随后环向贯通并扩展到整个药球表面; 最后的剧烈反应造成强烈发光。上述反应演化经历低压增长阶段约为 100  $\mu\text{s}$ , 之后伴随着壳体变形膨胀产生剧烈的反应, 此时产物压力在约 10  $\mu\text{s}$  时间内超过 1 GPa, 并形成约 20% 相对于裸炸药爆轰的超压输出。在全钢结构中, 20 mm 厚的壳体膨胀速度最大可达到 500 m/s, 此时壳体完全破裂。

**关键词:** 对流燃烧; 脆性 PBX 炸药; 反应裂纹; 剧烈爆炸

中图分类号: O381; TJ55

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Propagation of reactive cracks and characterization of reaction violence in spherical charge under strong confinement

LI Tao<sup>1</sup>, HU Haibo<sup>1</sup>, SHANG Hailin<sup>1</sup>, FU Hua<sup>1</sup>, WEN Shanggang<sup>2</sup>, YU Hong<sup>3</sup>

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, Sichuan, China;*  
2. *Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, Sichuan, China;*  
3. *Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100089, China*)

**Abstract:** High temperature gaseous products of conductive burning on explosive surface can penetrate into preformed crack inside explosive bulk under high pressure to form so-called convective burning. The high rising gaseous products pressure resulting from the convective burning in turn will create cracks inside the explosive bulk, leading to the formation of new channels for convective reaction and the more reaction surfaces for burning. In this paper, a new experimental method is designed for a pressed HMX-based PBX, in which a highly confined spherical charge is ignited on center point via non-shock initiation. The propagation of such kind of reactive cracks inside is recorded and evaluated with the total reaction violence growth behavior characterized by reaction pressure and confinement wall velocity profile. In the experiment with a transparent window, the early stage evolution of crack inside explosive sphere is invisible and the crack system after the crack break through to the spherical surface shows a 4 fold symmetric crack pattern which is deduced to be related with outer layer

\* 收稿日期: 2019-09-05; 修回日期: 2019-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(11702273, 11802288, 11802283);

冲击波物理与爆轰物理重点实验室基金(6142A0305010717, 6142A03050105, JCKYS2018212010)

第一作者: 李涛(1978—), 男, 副研究员, [tedleus@163.com](mailto:tedleus@163.com)

confinement conjunction manner. The violence evolution experiences a sustaining low pressure growing rate stage for 100  $\mu$ s. Then it is observed that a rapid burst pressure in about 10  $\mu$ s is up to over 1 GPa during the confinement wall movement stage, which gives to a typical explosion outcome with  $\sim$ 20% of bare explosive detonation calculated by air blast over pressure. In the experiment with a 20 mm steel wall, the velocity of the wall has reached 500 m/s at the moment of confinement wall rupture.

**Keywords:** convective burning; brittle PBX; reactive crack; violent reaction

在操作、装配、运输、贮存等过程中,结构装药在遭受意外事故刺激下,可能引发非受控的化学反应,造成点火、燃烧、爆炸甚至爆轰反应等不同等级的能量输出。为了评估结构装药事故条件下发生危险反应的可能性,国内外学者对相关过程机制开展了大量研究。对于典型的事故,除了极端的高速破片和射流外,大多数意外刺激,如低速撞击、摩擦、火烧等,诱发初始点火的途径尽管有所差别,但都可归结为炸药局部区域温升超限的热点火。这类不属于经典冲击波起爆而引发炸药反应的过程,现在被定义为非冲击点火过程。

在经典的冲击波起爆过程中,能量传递是通过炸药块体中冲击波传播来实现的,冲击波阵面上诱发的热点反应则是化学能释放的主要形式,快速传播的冲击波和热点反应在空间和时间上高度一致,使得高能量密度的炸药转换为反应产物后可产生极高的压力。相比之下,结构装药非冲击点火反应的演化机制完全不一样,存在早期缓慢的层流燃烧和中后期炸药块体间隙或内部裂纹的对流燃烧过程<sup>[1-3]</sup>。所谓的对流燃烧,即气体产物先在裂纹中快速流动传输,再经过一定热诱导延迟时间后引发裂纹表面的热传导燃烧。由于炸药裂纹中反应产物的拥塞,在逐渐增加的反应压力作用下炸药块体会产生更多的裂纹,为燃烧提供更多的表面积,大面积燃烧反应产物造成的压力急剧增加是高烈度反应产生的根本原因。

历史上,在各类非冲击点火实验<sup>[4-5]</sup>中观察到大量炸药剧烈反应的现象。由于大部分实验仅依赖于表象观测或远区超压测量,使得研究者们对此类剧烈反应机制过程认识不清,还经常错误引用经典的爆轰术语对其进行描述。随着研究的深入,人们不断观测到炸药非冲击点火反应过程中对流燃烧的证据<sup>[6]</sup>。最近,美国的研究者们通过烤燃实验高速摄影<sup>[7]</sup>和质子辐射照相<sup>[8]</sup>直接观测,进一步确认了对流燃烧裂纹传播对于反应演化的重要性。为了能进一步认识结构装药非冲击点火反应向高烈度转变的过程,本文中专门设计了一种新型球形装药中心点火实验装置,采用了多种诊断方式对非冲击点火反应的三维扩展演化过程进行了研究分析。实验中,采用确保反应可持续的人为点火方式进行加载,同时尽可能控制约束状态,避免因装药反应卸压漏气导致火焰提前熄灭,影响对关心过程的研究。

## 1 实验装置

本文中设计的强约束球形装药实验装置如图1~2所示,分为带窗口和全钢结构两种。带透明窗口装置用于对炸药响应的直接观测,由固定基座、透明窗口、套筒、约束环、阻挡块和球形装药组成,总体尺寸为 $\phi 300$  mm $\times$ 170 mm,全钢结构中将透明窗口改为更强约束的钢半球壳,总体尺寸为 $\phi 230$  mm $\times$ 150 mm。其中,球形装药材料是以HMX为基的脆性压装PBX炸药(HMX含量为95%),密度为1.86 g/cm<sup>3</sup>,由两个直径为110 mm半球粘结而成,一个半球预留了直径6 mm的通孔;窗口为有机玻璃,径向特征厚度为40 mm,钢半球的径向特征厚度为20 mm;套筒为两半式卡槽钢结构,保证装置的轴向约束,钢约束环用于保证装置的径向约束,阻挡块的目的是减少引线孔的气体排出量。装置中除了透明窗口外,其他所有结构材料都为45钢。实验中,在球形装药预留中心孔中进行中心点火,装填的黑火药质量约为1 g。

实验的测试项目包括:高速摄影采用数字化高速相机,在未加照明的条件下对带窗口装置球壳装药裂纹燃烧扩展及其反应发光图像进行拍摄,在全钢结构中则对壳体破裂反应发光图像进行拍摄;采用了3个测速探头和1套自行研制的激光干涉仪,测量距离为50 mm,对球形炸药表面和约束结构壳体运动进行测量;采用2个PCB公司的高量程压力传感器,在固定基座或钢半球底端(见图1~2),对球壳装药反应压力进行了测量;采用2个PCB公司超压传感器,距离装置中心1.5 m,对装药反应造成的空气冲击波超压进行了测量。

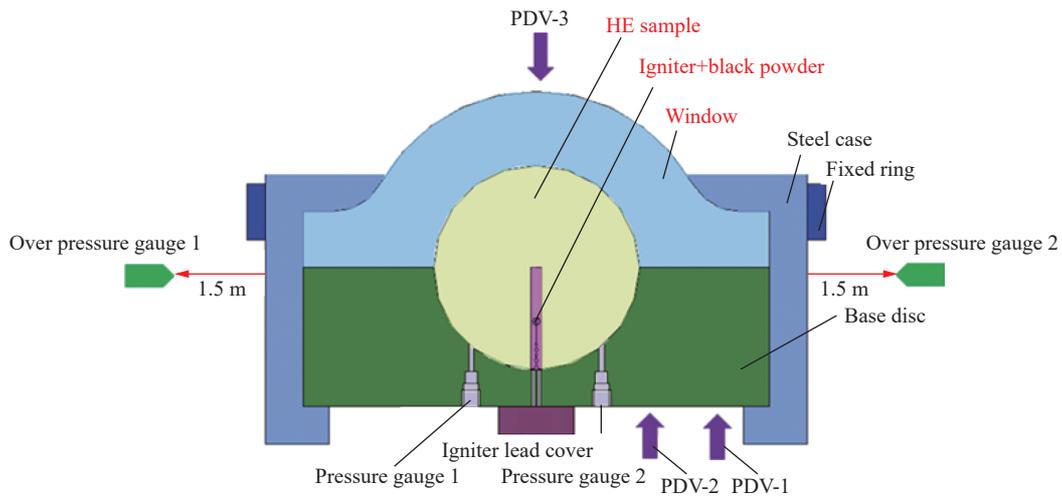


图 1 带窗口强约束球形装药实验装置及其测试布局示意图

Fig. 1 Schematic representation of experimental setup and diagnostic arrangement of spherical charge under strong confinement with optical window

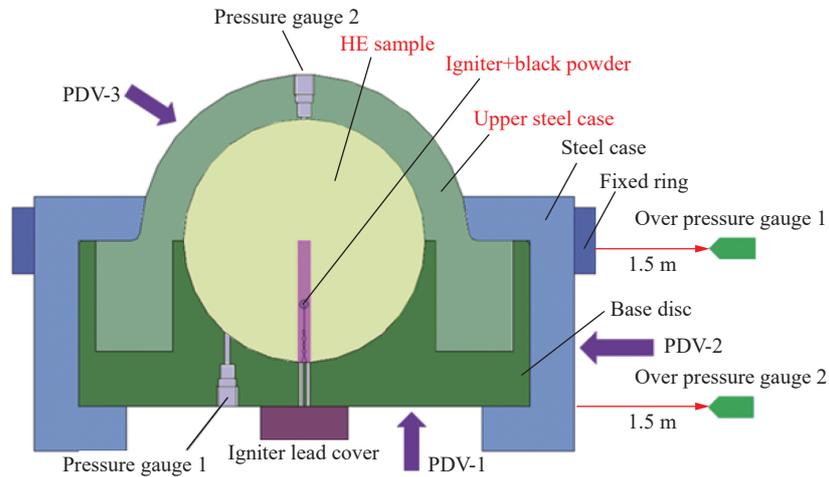


图 2 全钢结构强约束球形装药实验装置及其测试布局示意图

Fig. 2 Schematic representation of experimental setup and diagnostic arrangement of spherical charge under full steel confinement without optical window

## 2 实验结果及分析

带窗口实验装置中心点火后, 高速摄影拍摄的带窗口实验装置整个反应裂纹扩展演化过程如图 3 所示。高速摄影图像的时序定义为点火头激发为零时, 此时黑火药开始点火燃烧。

根据高速摄影图像分析, 中心点火后球形装药的反应演化过程大致可以分为 4 个阶段:

阶段 I 为初始反应发展过程, 此时点火已经发生, 但由于炸药块体不透明, 视场中仍然是一片黑暗, 持续时间为 0.678 ms。

阶段 II 为裂纹传播到达壳壁界面以及后续扩展过程, 持续时间约 0.13 ms, 观察到裂纹反应发光现象: 开始, 4 条裂纹基本呈近似对称方式从药球赤道附近向极点方向传播, 该过程约 32  $\mu\text{s}$ ; 随后, 在距极点一定位置处的纬线方向出现裂纹环向发展并贯通的现象, 该过程约 40  $\mu\text{s}$ ; 最后, 径向裂纹和环向裂纹逐渐变宽, 直到发光火焰包覆球形炸药表面, 该过程持续约 60  $\mu\text{s}$ 。4 条对称裂纹细节演化过程如图 4 所示, 这种沿初始预制孔扩展的裂纹应与球形结构和外部约束条件密切相关。

阶段 III 为剧烈爆炸过程, 在球形装药范围的视场中呈现出一片强烈的白光, 持续时间约 60  $\mu\text{s}$ 。

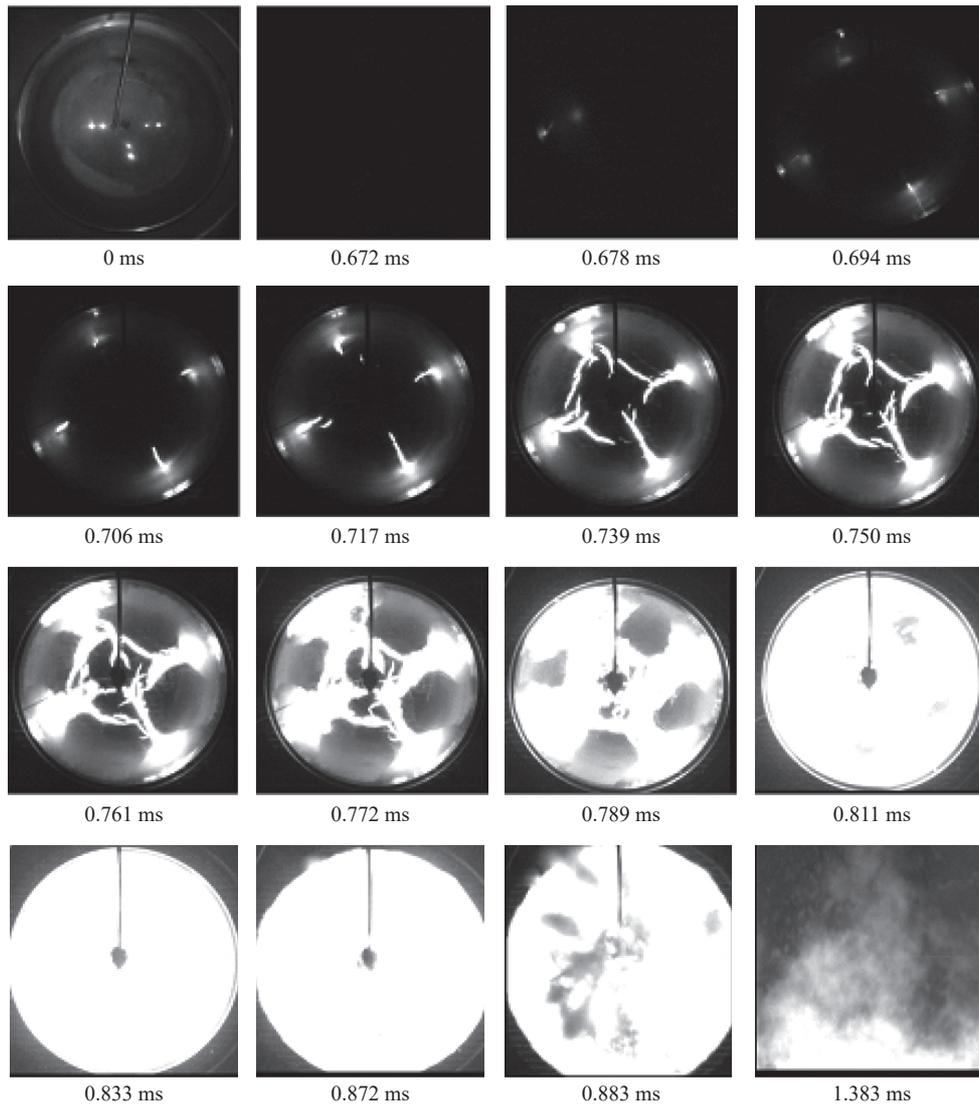


图 3 带窗口实验装置反应裂纹完整演化过程高速摄影图像(幅频  $18\ 000\ \text{s}^{-1}$ )

Fig. 3 High-speed photos of full evolution process of reactive crack system in the experiment with PMMA window (frame rate of  $18\ 000\ \text{s}^{-1}$ )

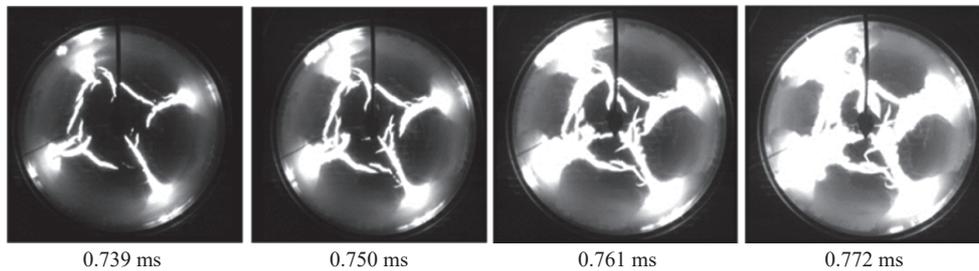


图 4 反应裂纹扩展演化早期阶段 II 高速摄影图像(幅频  $18\ 000\ \text{s}^{-1}$ )

Fig. 4 High-speed photos of the crack propagation at the early half of stage II (frame rate of  $18\ 000\ \text{s}^{-1}$ )

阶段 IV 为有机玻璃窗口变形破裂过程,可观察到有机玻璃破碎和后续反应发光现象,直到反应熄灭。

在全钢结构下壳体破裂与反应发光图像如图 5 所示,虽然无法观察到前期对流燃烧裂纹扩展过程,但可以观察到后期压力测试孔破坏、反应产物喷出、壳体大面积破裂以及反应发光现象,大致对应于带窗口实验的阶段 IV。

图 1 中带窗口实验装置约束壳体的变形速度和内部压力由图 6 给出, 图中标出了高速摄影图像对应的阶段划分。有机玻璃窗口界面速度起跳时间(PDV3)要比钢壳体变形速度(PDV1 和 PDV2)起跳早约 0.07 ms, 由于有机玻璃窗口具有较低的强度, 炸药表面裂纹出现在与界面速度起跳几乎相同的时间, 表明炸药裂纹内部反应造成的应力水平与约束结构强度达到平衡。固定在基座上的压力传感器记录到气体压力在 10  $\mu$ s 的短时间内快速增长到 1 GPa 量级, 这对应于 0.85 ms 阶段 III 的压力爆发时刻, 此时壳体膨胀速度最大约 115 m/s。

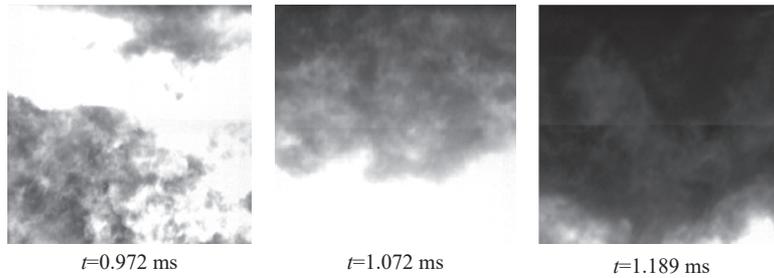


图 5 全钢结构实验装置壳体破裂反应发光过程高速摄影图像(幅频 18 000 s<sup>-1</sup>)

Fig. 5 High-speed photos of full evolution process of case rupture and reaction illumination in the experiment with steel shell (frame rate of 18 000 s<sup>-1</sup>)

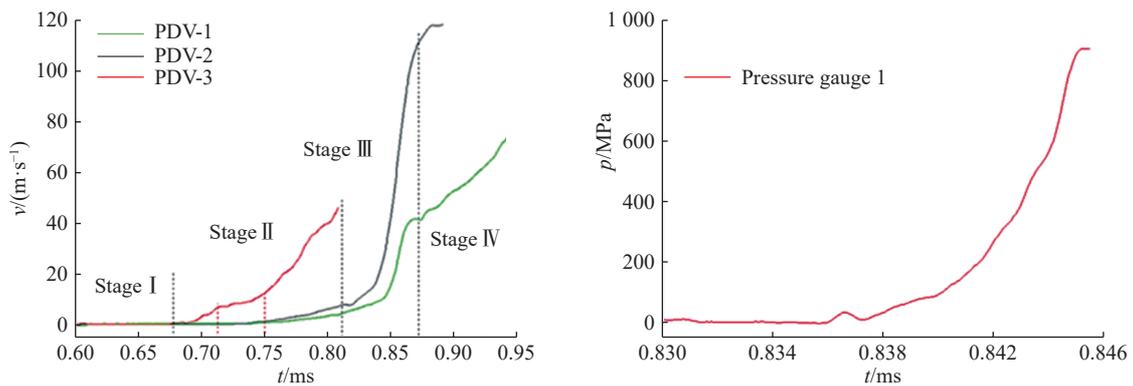


图 6 带窗口实验装置壳体速度和内部压力历程

Fig. 6 Pressure inside confinement and velocity profiles in experiment with window

在全钢结构实验中, 压力传感器和 PDV 测速记录到早期阶段反应演化的信息, 如图 7 所示。压力和速度维持在一个较低的幅值, 即在 100  $\mu$ s 时间内压力小于 200 MPa, 随后出现一个快速的反应爆发。阶段 III 中在 20~40  $\mu$ s 时间内压力超过 1 GPa, 壳体膨胀速度约 500 m/s。

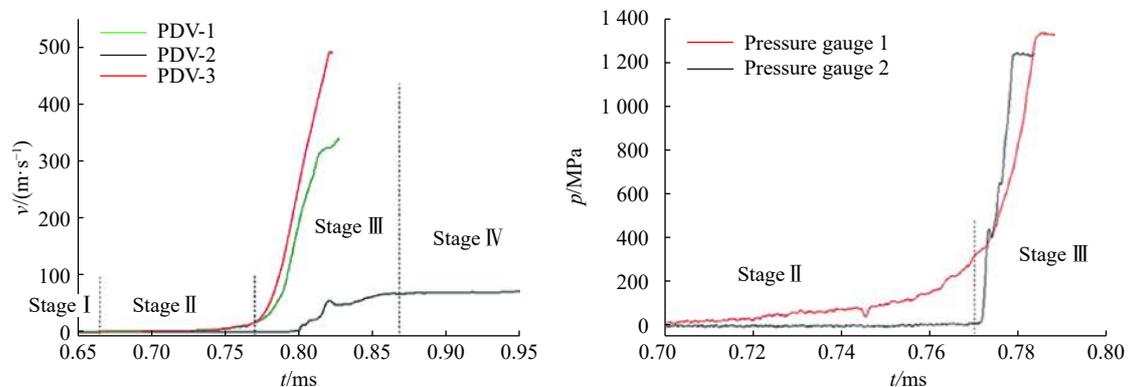


图 7 全钢结构实验装置壳体速度和内部压力历程

Fig. 7 Velocity profiles and pressure inside confinement without window

图 8 给出了全钢结构实验中回收的固定基座碎片。可以看出,固定基座容腔边缘断裂成大块,基座中间带压力传感器测试孔和点火头引线孔处碎裂成小块,特征尺寸约 20~40 mm。

图 9 给出了带窗口的超压传感器测得的空气冲击波超压信号,峰值为 135 kPa。根据标准自由场爆轰超压计算公式<sup>[9]</sup>(1)和(2),估算得到的 TNT 当量为 354 g,约为裸药球爆轰总当量的 21%。

$$\Delta P = 0.084R + 0.27R^2 + 0.7R^3 \tag{1}$$

$$R = \sqrt[3]{W}/r \tag{2}$$

式中:  $\Delta P$  为空气冲击波超压, MPa;  $W$  为 TNT 当量, kg;  $r$  为距爆心的距离, m。

在全钢结构中, 2 个超压传感器测得的峰值为 122 kPa 和 117 kPa, 对应估算得到的 TNT 当量为 307 g 和 289 g, 平均值约为 300 g, 约为裸药球爆轰总当量的 18%。

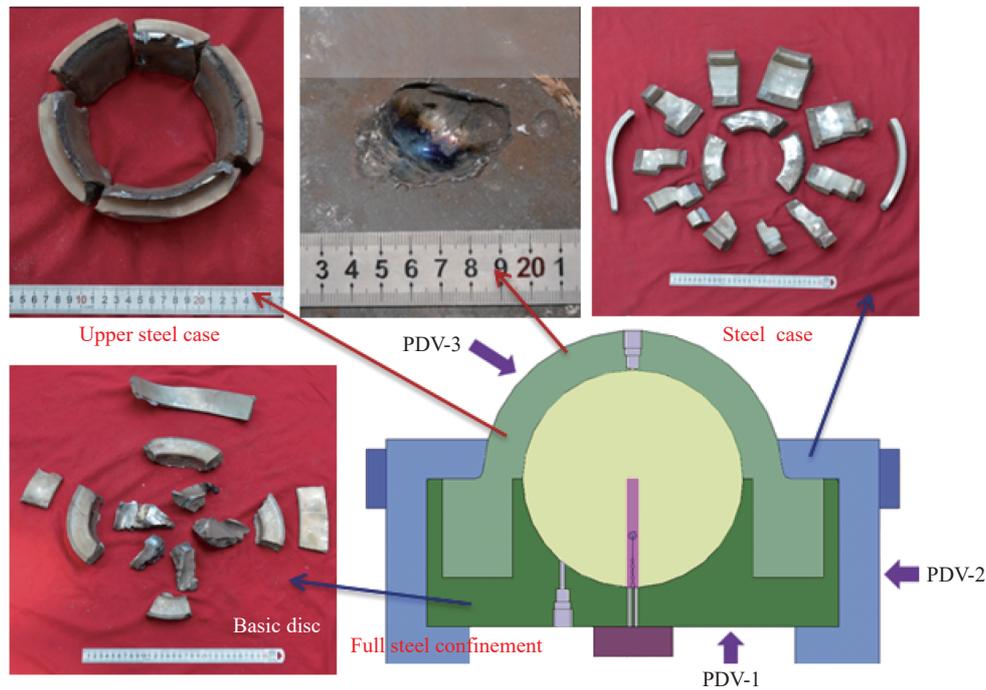


图 8 全钢结构实验回收壳体碎片残骸

Fig. 8 Recovery fragments of full steel confinement in second experiment

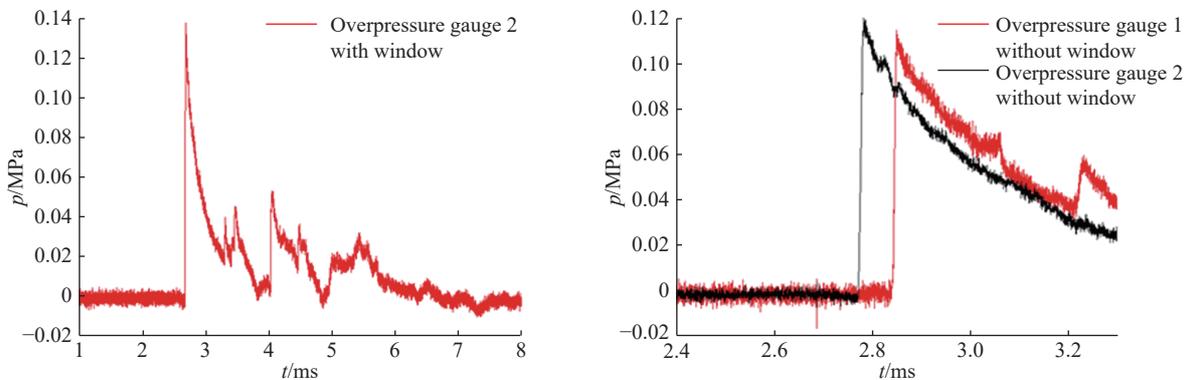


图 9 带窗口和全钢结构实验中测得的空气冲击波超压波形

Fig. 9 The air blast overpressure measured in the experiment with and without window

### 3 讨 论

本文中实验关注的焦点是脆性炸药中反应产物压力驱动下的裂纹扩展与烈度增长过程, 对此将进行以下分析讨论。

在给定约束下, 1 g 黑火药的燃烧会引发点火预留孔产生裂纹, 炸药损伤断裂特性将强烈依赖于结构约束的环向应力。点火系统的气体产物在早期裂纹形成和扩展传播阶段可能扮演重要角色, 这是因为气体对流后裂纹表面热传导燃烧具有一个诱导时间, 即点火系统和炸药反应产物高温加热到点燃的时间。对于新形成的裂纹表面, 点火反应是在对流物质到达后经过数十微秒或是更长的数百微秒时间延迟后才发生的<sup>[2, 10]</sup>。在高速摄影中看到的裂纹发光现象并不意味着裂纹表面已经点燃, 而可能是热的发光气体产物先进入裂纹<sup>[10]</sup>。最后的反应快速爆发是在发光完全覆盖整个外表面一定时间后才发生的。

在中心点火后的反应演化过程中, 烈度增长最敏感的因素是反应燃烧表面积的增加速度<sup>[11-12]</sup>。炸药块体在最终爆发的一段时间前, 可能存在一个灾变式的破碎过程, 由此引发足够多的裂纹表面积参与最后的反应(见图 10)。当不发生裂纹或破碎时, 类似于经典厚壁 DDT 管实验一样<sup>[13]</sup>, 最后阶段在壳体破裂前反应给出吉帕级的压力特征。

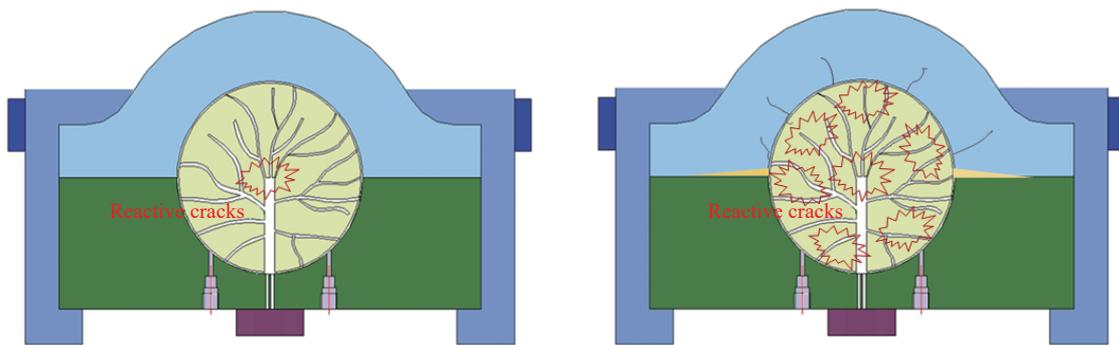


图 10 约束装药内部反应裂纹的早期和后期演化图像

Fig. 10 The early and late stage evolution of reactive cracks inside explosive bulk under confinement

强约束为反应烈度增长到剧烈反应创造了条件, 特别是炸药反应裂纹驱动的块体破碎, 但是约束壳体强度限制了最后阶段反应烈度的进一步增长。经典的 DDT 概念<sup>[14]</sup>不能考虑为强约束压装 PBX 炸药非冲击点火反应演化的主导机制, 即使是在后期约束壳体破裂前的剧烈反应演化过程。

传统的实验大多采用远区超压测量结果来评定反应的剧烈程度, 但由于大面积燃烧的剧烈反应和稳态超音速传播的爆轰反应, 最终都表现为高压气体做功产生空气冲击波的爆炸现象, 使得仅从超压数据无法区分两类过程的差别。同时, 由于壳体结构还会消耗能量, 由超压推算的相对反应释能数据很难作为不同反应比较的直接依据, 如本文实验中估算的相对释能仅为 20% 左右。而最能表征反应烈度的还是结构装药反应的压力和驱动壳体的膨胀速度, 根据本文的测试结果可知, 高烈度反应压力可达 1 GPa 量级, 壳体速度最高可达 500 m/s, 上升时间仅在 10  $\mu$ s 量级, 这明显区别于典型更高烈度的爆轰反应。

### 4 结 论

为了能进一步认识结构装药非冲击点火反应向高烈度转变的过程, 本文中专门设计了一种新型强约束球形装药中心点火实验。初始激发的是非冲击点火的方式, 采用电点火头和 1 g 左右黑火药。

实验结果表明: 点火系统的气体产物是早期裂纹形成的起因; 中期燃烧裂纹传播受结构约束影响,

对于烈度的增长起着重要作用,具体体现为4条裂纹由经线传播转为环向贯通,随后扩展到整个药球;最后的剧烈反应造成强烈发光,烈度增长的敏感因素应该是大面积破损造成的燃烧表面积快速激增。

本文实验的高烈度反应只形成约20%相对释能输出,但实验采用反应压力和壳体膨胀速度对反应烈度进行了更合理的量化表征。实验测得的压力在1 GPa量级,壳体膨胀速度最大可达到500 m/s,波形上升时间在10  $\mu$ s量级,这与稳态超音速传播的爆轰反应呈现明显的差别。

### 参考文献:

- [1] ASAY B. Shock wave science and technology reference library, Vol. 5: Non-shock initiation of explosives [M]. Springer Science & Business Media, 2010: 245–292.
- [2] JACKSON S I, HILL L G. Predicting runaway reaction in a solid explosive containing a single crack [C] // AIP Conference Proceedings, 2007, 955(1): 927–930.
- [3] 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. DOI: 10.1134/S0010508215060064.
- [4] DYER A S, TAYLOR J W. Initiation of detonation by friction on a high explosive charge [C] // 5th Symposium (International) on Detonation. ONR, 1970: 291–300.
- [5] IDAR D J, LUCHT R A, SCAMMON R, et al. PBX 9501 high explosive violent response/low amplitude insult project: Phase I [R]. Los Alamos National Laboratory. New Mexico, United States, 1997.
- [6] 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. DOI: 10.1016/0301-9322(96)00041-9.
- [7] DICKSON P M, ASAY B W, HENSON B F, et al. Observation of the behaviour of confined PBX 9501 following a simulated cook-off ignition [R]. Los Alamos National Laboratory. Los Alamos, New Mexico, United States, 1998.
- [8] SMILOWITZ L, HENSON B F, ROMERO J J, et al. Direct observation of the phenomenology of a solid thermal explosion using time-resolved proton radiography [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(22): 228301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.228301.
- [9] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用(下册) [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [10] SHANG H L, YANG J, LI T, et al. Convective burning in confined explosive cracks of HMX-based PBX under non-shock initiation [C] // 16th International Detonation Symposium, 2018.
- [11] HOLMES M D, PARKER Jr G R, HEATWOLE E M, et al. Center-ignited spherical-mass explosion (CISME); FY 2018 Report [R]. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, United States, 2018.
- [12] HOLMES M D, PARKER JR G R, HEATWOLE E M, et al. Fracture effects on explosive response (FEER); FY2018 Report [R]. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, United States, 2018.
- [13] HU H B, LI T, WEN S G, et al. Experimental study on the reaction evolution of pressed explosives in long thick wall cylinder confinement [C] // XXI Khariton's Scientific Readings. Sarov, Russia, 2019.
- [14] MAČEK A. Transition from deflagration to detonation in cast explosives [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1959, 31(1): 162–167. DOI: 10.1063/1.1730287.

(责任编辑 曾月蓉)