

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0360

长管强约束条件下压装 PBX 炸药点火实验研究*

邱 天^{1,2}, 文尚刚², 李 涛³, 胡海波³, 傅 华³, 尚海林³

(1. 中国科学技术大学近代力学系中国科学院材料力学行为和 Design 重点实验室, 安徽 合肥 230026;

2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999;

3. 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: 为探究压装炸药 PBX-A 在较强约束条件下、在药柱一端使用点火药引燃后能否发生燃烧转爆轰, 在传统 DDT 管的基础上重新设计了特定位置约束增强的厚壁钢柱壳管实验装置, 利用多路 PDV 诊断技术, 配套高速摄影记录对点火药引燃炸药实验过程中的柱壳膨胀、断裂特性等实验现象进行了全过程连续监测。对比由爆轰驱动的同装药条件下实验现象及对应过程物理状态的区别, 发现: 爆轰实验和点火实验的总反应时间历程存在数量级的差别; 柱壳上各个测点速度历程反映出装置内部炸药反应引起的压力增长历程特征, 以及炸药反应的传播过程均存在明显差异。分析表明, 在较强约束条件下, 典型压装炸药 PBX-A 在一端使用点火药引燃后的反应行为实际是以高温、高压反应产物沿装药缝隙对流, 炸药表面的层流燃烧及其伴随的结构响应行为为主要表现形态; 从反应压力水平及其增长的时间历程来看, 炸药基体中没有形成冲击波, 因而无法实现从冲击到爆轰的转变。

关键词: 压装 PBX; 燃烧转爆轰; 层流燃烧; 对流传播

中图分类号: O381

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Experimental study on initiated reaction evolution of pressed explosives in long thick wall cylinder confinement

QIU Tian^{1,2}, WEN Shanggang², LI Tao³, HU Haibo³, FU Hua³, SHANG Hailin³

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials (LMBD) Department of Modern Mechanics

University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, Sichuan, China;

3. Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP,

Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: In order to investigate whether the reaction evolution of pressed HMX-based PBXs inside long thick wall steel tube initiated by ignition composition leads to detonation finally or not, a new experiment apparatus was designed based on traditional DDT tube, in which the strength of tube at specific locations is enhanced, and multichannel PDV probes and high speed photography were used to diagnose the expansion process and rupture characteristics of tube wall. Compared with the results initiated by detonator in the same explosives and confinement, the reaction durations of detonation and ignition differed by orders of magnitude; the pressure evolution measured by tube wall velocities, and the propagation process of tube wall movement were significantly different in two reactions. Analysis shows that the convective flow of reaction products along the seam between tube wall and explosives, high temperature and pressure, dominated the reaction evolution of PBX-A initiated by ignition composition under strong confinement, and appeared as laminar burning on explosive surface and structural response of confinement. There is no reaction activated in explosive bulk by the ramp wave caused by upper stream non shock initiation reaction, least of all DDT.

Keywords: pressed PBX; DDT; laminar burning; convective flow

* 收稿日期: 2019-09-18; 修回日期: 2019-10-29

第一作者: 邱 天(1991—), 男, 博士研究生, qiutiancn@foxmail.com

通信作者: 胡海波(1964—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, hahaibo@caep.cn

炸药的冲击起爆是炸药基体在冲击波作用下受到绝热压缩后大幅升温,形成的热点带动炸药基体内的反应,反应的热、力学效应综合作用形成爆轰波^[1]。区别于冲击起爆的非冲击点火反应^[2],则是炸药在加热、碎片撞击、火花和摩擦或其他非冲击波刺激引起基体表面或局部位置初始点火,点火后续反应与炸药性质、约束条件及点火条件相关,涉及过程多、反应现象复杂,烈度演化走向不确定。对于在较强约束条件的压装 PBX 炸药在经历非冲击点火后反应是否会从燃烧转为爆轰 (deflagration to detonation transition, DDT), 仍然是一个非常具有争议的话题。

1959年, Macek^[3]采用应变计和电离式探针研究了铸装 HMX 炸药的 DDT 过程,并提出了“一维假定”下的波聚物理模型。Macek 认为被点燃的炸药在端面上不断产生的应力波在炸药柱中传播,经过一段成长距离之后在炸药基体内汇聚形成了冲击波,对波阵面前未反应炸药进行冲击起爆,从而发生燃烧转爆轰,因而在从炸药点火至发生爆轰的位置存在一定长度的“到爆轰距离”。这一理论被认为是高密度固体炸药的燃烧转爆轰的主要机理, Tarver 等^[4]对其进行了改进,采用精密和复杂的模型描述了材料的燃烧过程。但与此同时遭到了 Jacobs^[5] 强烈反对,而 Asay^[2] 对于密实炸药 DDT 的介绍中对 Macek 的观点评述仍然十分谨慎。

20世纪80年代, Bernecker 等^[6]和 Sandusky 等^[7]等对颗粒状炸药 DDT 过程进行了一系列研究,由 Campbell^[8]利用设计活塞实验第一次清楚地阐述了炸药密度稍高于 50%~70% 最大理论密度(以下简称 TMD)的高孔隙率炸药的 DDT 机制,表明在炸药一端点火后压缩波形成的“活塞”是引发 DDT 的关键,反应波阵面的传播过程基本满足准一维条件,可以通过在 DDT 管壁上不同位置探针导通时间来监测炸药反应传播的具体情况,国内外已有一系列实验对不同的孔隙率炸药乃至固体推进剂的反应传播进行了研究^[6-10]。然而,当燃烧波阵面传播到完全密实区域(100% TMD),因反应产物气体无法透过密实的炸药基体传播,线性的燃烧速率在炸药密度为 90%~100% TMD 时下降至高孔隙率炸药时的 1/20,即从对流燃烧模式变成了层流燃烧模式,在与不断增强的对流燃烧速度相比之下,这样的燃烧速度接近于停止^[2]。因此对于本身就是接近 100% TMD 的压装炸药,如果根据 Macek 的波聚物理模型^[3],在炸药被点燃的一端以较慢速的层流燃烧进行反应,如果要使得燃烧产物压力不断快速增长达到足以使基体中的压缩波汇聚形成冲击波,则要求炸药本身的燃速对压力足够敏感,对某些配方的始发药剂也许可以满足条件,但对于 HMX 基的主装药来说是却是难以实现的^[11]。此外,如果要求冲击波压力足够强以至于可以在炸药中形成冲击起爆,那么装药约束需要足够高的强度来保证炸药反应的持续。在黄毅民等^[12]、王建等^[13-14]和代晓淦等^[15]对 HMX 基高密度压装炸药的 DDT 实验研究中,都使用了钢管作为 DDT 管,但由于设置的探针孔在管内处于高压时会引起应力集中,导致实际屈服强度比未打孔的钢管显著下降。从反应后的装置碎片来看,管壁的破坏基本都是沿着探针孔开始撕裂。而黄毅民^[12]和王建等^[13-14]在结论中认为如果使用更强的约束,密实的压装炸药仍然会发生 DDT。

此外,压装炸药点燃后的反应产物气体无法透过炸药基体,则会在装药约束的结构缝隙中以对流形式传播,并经一定热传导感应时间,诱发下游位置炸药表面燃烧。认识到这一点,则不能简单认为探针记录到的导通信号代表炸药反应传播的位置,更不能认定为是炸药基体内部发生了反应。从 Jackson 等^[16]对密闭容器中炸药拼接形成的 80 μm 宽的狭缝中进行点火的反应演化过程可知,火焰在裂缝中传播点燃炸药表面引起缝隙中压力增长驱使火焰沿缝隙加速向前传播,火焰传播速度最高甚至达到 10 km/s,最高峰值压力达到 680 MPa,传播特征与 Leuret 等^[17]观察到在炸药点火直到发生剧烈反应之前存在的“低速爆轰”十分相似,甚至有可能因为产物对流及表面燃烧行为传播速度达到炸药爆速的水平从而被误认为“发生了 DDT”。在 Jackson 等^[16]的实验装置解体后,仍回收得到几乎完整、仅表面反应的炸药样品,这也证实了在炸药基体内部并没有发生点火。Jackson 等^[16]狭缝中进行点火的实验的尺度恰好是 DDT 管中炸药与炸药、炸药与装药约束之间的缝隙特征宽度,反应结果很好地表现了炸药反应产物气体无法透过密实的炸药基体传播时在缝隙中对流传播的图像特征。

文尚刚^[18]对装在透明有机玻璃管中的高密度压装 HMX 基炸药柱使用黑火药进行单端点燃, 从回收的实验装置碎片以及炸药样品特征来看, 与 Jackson 等^[16]的实验有相似之处, 如炸药样品基本被完全回收, 甚至大部分都保持完整没有反应痕迹, 发生反应的部分也仅有少量熏痕, 说明参与反应的炸药量极少且仅有炸药表面发生反应。从高速摄影图像可以看出, 在实验过程中火焰尖端是沿炸药表面进行传播的, 且具有明显的非对称性。这也可以解释王建等^[13-14]的实验中为什么电探针导通时序出现了混乱, 很可能源于火焰及反应产物在炸药柱和管壁之间的圆柱面缝隙中的不对称传播。通过尚海林等^[19]的炸药狭缝点火实验中的高速摄影图像及不同位置压力历程可以看出, 当狭缝中炸药表面都被点燃后, 不同局部位置的反应程度存在区别, 压力增长并非严格按照火焰传播方向依次增长。

种种迹象表明, 高密度的固体炸药在传统 DDT 管及其类似的长管强约束条件下、在一端点火后, Macek 在一维假定下的波聚物理模型不能很好地解释其反应行为。而炸药表面点火产生的高温高压产物气体在装药结构的宏观缝隙中对流传播引起的炸药表面燃烧以及压力增长可能才是反应向剧烈演化的主导机制。

1 实验装置和测试系统

为了研究固体压装炸药在长管厚壁柱壳约束条件下一端点火后的真实反应演化过程, 探究在更强的约束条件下, 密实压装炸药 PBX-A 是否会发生 DDT。本文中设计了在特定的装药及约束条件下用电点火头加黑火药的方式对以 HMX 为基的密实压装炸药 PBX-A 进行单端引燃点火实验(以下简称点火实验)。

实验装置如图 1 所示, 钢柱壳管材为 45 钢, 内径 20 mm、外径 60 mm, 装置总长度 600 mm。在管壁上不设置探针孔以保持结构完整对称, 避免高压下应力集中在结构弱环处造成装置提前解体, 保证腔体内炸药不被意外中断反应; 端头外加厚重压盖, 防止端头被冲出导致反应中断; 外端压盖和管壁连接处设置厚度渐进的圆台, 防止管壁膨胀后在接触位置造成剪切破裂, 同样是为了防止反应提前终止。实验使用的密实低孔隙率压装炸药 PBX-A 含有 95% HMX, 密度 1.860 g/cm^3 (理论密度为 1.889 g/cm^3)。装填的药柱总长度 440 mm, 由多个药柱拼接而成, 药柱与管壁之间存在的装配缝隙约 $70 \sim 120 \mu\text{m}$ 。点火药小粒黑火药质量大约 1.75 g, 点火系统响应时间约 4 ms。

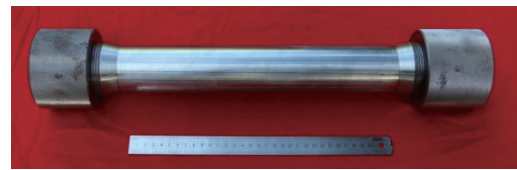


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental set-up

在点火实验中将使用 PDV 测速仪、数字式高速相机、应变测试仪以及空气冲击波超压传感器对实验过程进行监测。实验测试系统如图 2 所示: 数字式高速相机用于拍摄记录反应过程图像; PDV 测速仪用于监测实验装置不同位置的壳体膨胀速度历程; 应变测试系统用于监测实验装置不同位置的形变。延时同步机用于触发实验装置点火、时间间隔记录仪和数字示波器。

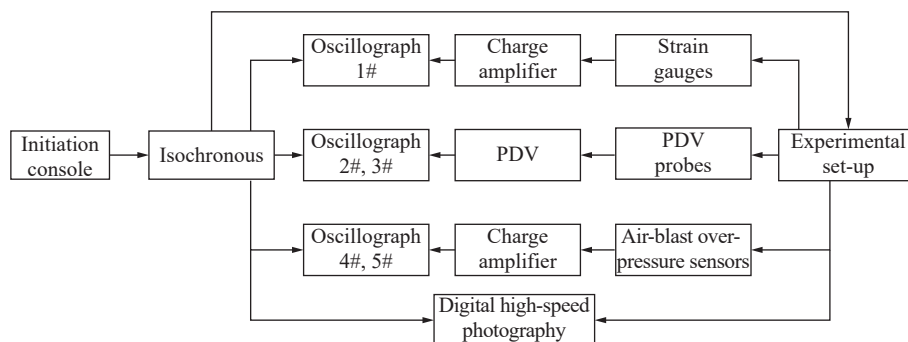


图 2 测试系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the testing system

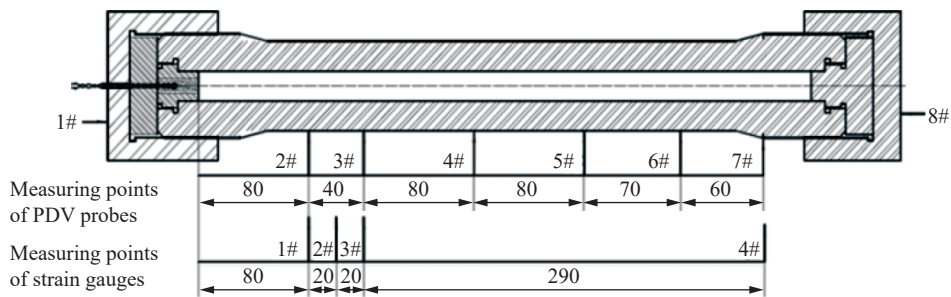


图 3 点火实验 PDV 探针及应变片测点位置 (单位: mm)

Fig. 3 Measuring points position of PDV probes and strain gauges in initiation reaction(unit: mm)

点火实验中 PDV 探针及应变片的测点位置如图 3 所示,均以点火座与炸药交界面为基准点(0 mm 处)。其中 PDV 探针 2~7 号测点分别垂直于管壁,测量管壁径向的运动情况;探针 1、8 号测点垂直于装置尾端盖平面,测量装置尾端盖处的轴向运动情况。整体测试系统布局如图 4 所示。

为比较炸药在点火引燃条件下与直接起爆条件下的实验现象及对应过程物理状态的区别,在爆轰标定实验中以雷管代替引燃点火装置,直接起爆实验装置中的炸药,使用转镜式分幅相机及 PDV 测速仪进行监测。PDV 探针的测点位置如图 5 所示。

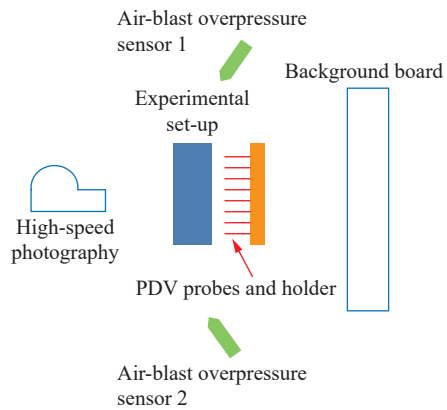


图 4 实验系统布局示意图

Fig. 4 Diagram of experimental system

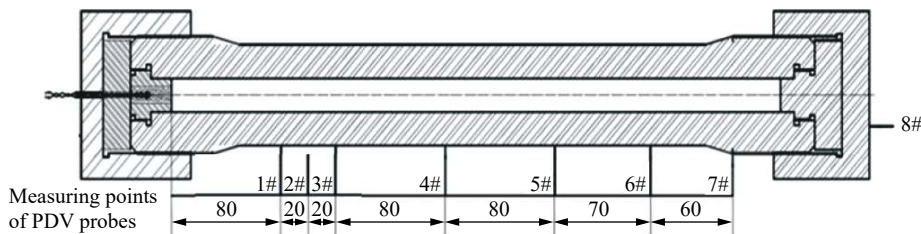


图 5 爆轰标定实验 PDV 探针测点位置 (单位: mm)

Fig. 5 Measuring points position of PDV probes in detonation reaction (unit: mm)

2 实验结果

两次实验的典型高速摄影图像如图 6 所示。点火实验中的 3 张图片的拍摄时刻自上而下分别为 8.23、8.30、8.32 ms。爆轰标定实验中因转镜式高速相机启动时间存在漂移,无法确定拍摄的具体时刻。在爆轰标定实验中炸药反应产物驱动柱壳破片向外飞散,炸药反应沿着起爆方向以爆速稳定传播,总反应时间约 60 μ s;而在点火实验中,在点火信号发出后 8.22 ms(即点火药点火后约 4 ms)时首次在近点火端出现明显火光,同时在下游位置出现管壁膨胀凸起,且凸起形状在周向上并不均匀。在 8.26、8.27 ms 时分别可见两处裂纹生成,8.29 ms 时管壁出现另一处火光,8.40 ms 后火光覆盖整个装置,表明炸药总反应时间约 4 ms,远远大于爆轰标定实验中炸药反应时间。

两次实验中通过 PDV 测得实验装置各处的运动速度历程曲线如图 7 所示。在爆轰标定实验中,径向测点位置膨胀最高速度大于 400 m/s,波形有明显爆轰波阵面传播形成的 von Neuman 尖峰特征。而在点火实验中,从反应的时间历程上来看,管壁上开始出现膨胀变形的时刻是点火信号发出后 8.14 ms,随

后数百微秒的时间里整个装置管壁数个位置发生膨胀变形乃至破裂, 装置解体。壳体管壁上沿轴向各测点运动启动顺序为 2-3-5-4-6-7, 反映出实验装置中各个位置的炸药发生剧烈反应起始的时间和位置呈现随机性, 而非爆轰或燃烧转爆轰过程中反应阵面一维传播的特征。从速度脉冲波形来看, 在管壁破裂前各测点位置的脉冲前沿长达几十至百微秒, 且各处测点的速度曲线斜率接近, 可以视为管内各测点位置压力水平相近, 根据加速度估算管壁破裂前内部最大压力约为 1 108 MPa。

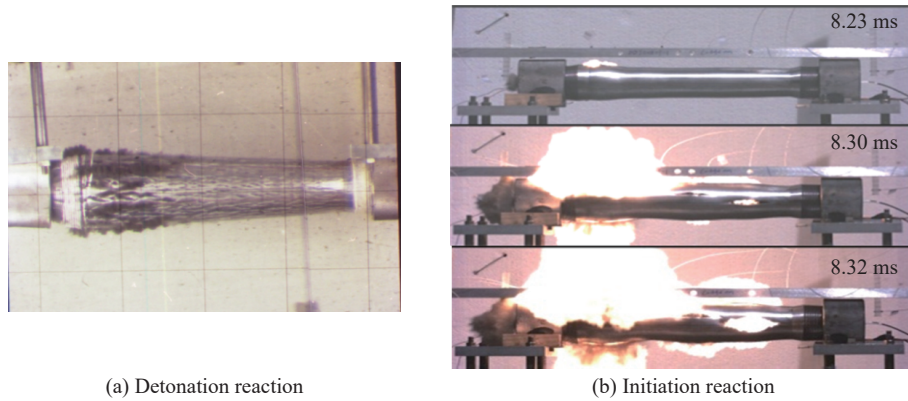


图 6 实验过程典型图像

Fig. 6 Typical experimental photographs

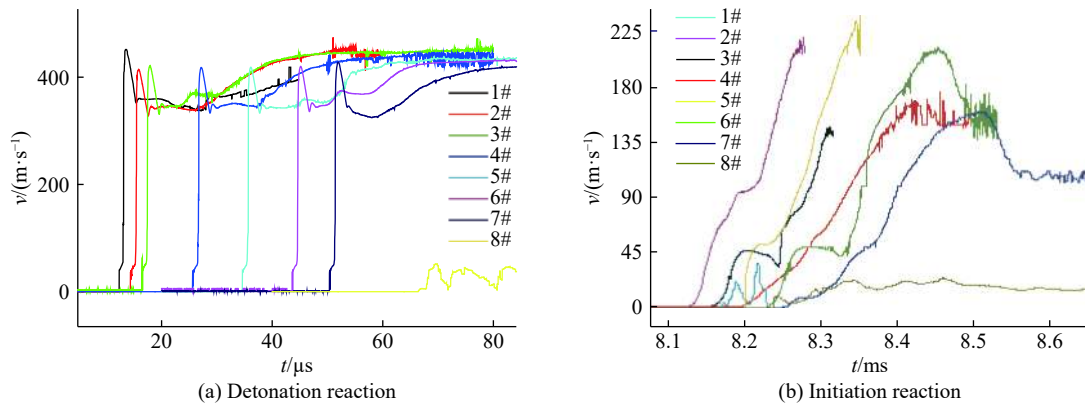


图 7 PDV 测得实验装置各处的运动速度历程

Fig. 7 Velocity profiles measured by PDV

点火实验中管壁不同位置处应变曲线如图 8 所示, 可知管壁不同位置应变片测得的变形发生时间与 PDV 测得的管壁膨胀变形发生时间基本一致。

点火实验测得的空气冲击波超压结果如图 9 所示, 在距离装置中心 1.5 m 处的两个空气冲击波超压传感器, 分别在点火后 9.87、10.1 ms 测得空气冲击波峰值压力分别为 0.135、0.163 MPa, 换算得等效 TNT 当量 390 g, 表明大部分炸药发生了反应。需要注意的是, 等效 TNT 当量是以裸药球爆炸计算所得, 而本文实验结果中空气冲击波超压产生的条件是在特定的约束条件下,

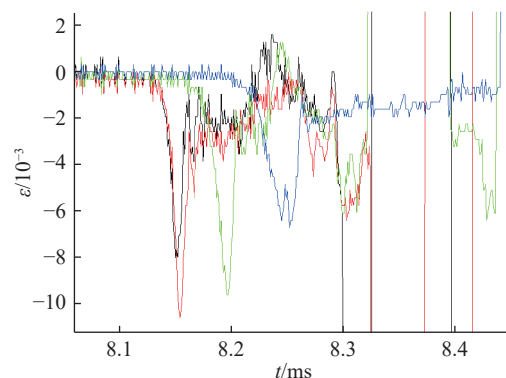


图 8 点火实验应变片测试结果

Fig. 8 Hoop strain measurements of initiation reaction

因此不能简单与 TNT 当量做比较, 仅作为参考数据。

两次实验回收的实验装置碎片如图 10 所示。爆轰加载形成的碎片较小、呈细长条状。尺寸、形状分布较均匀。点火实验回收碎片与爆轰加载形成的碎片相比, 尺寸明显更大, 形状、尺寸分布不均匀; 部分碎片内表面有更明显的燃烧痕迹, 没有爆轰加载形成的层裂痕迹; 并没有出现典型 DDT 过程形成的从点火端到远端的碎片从大到小的演化特征。

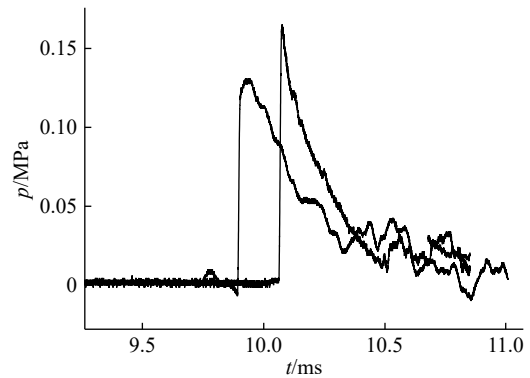
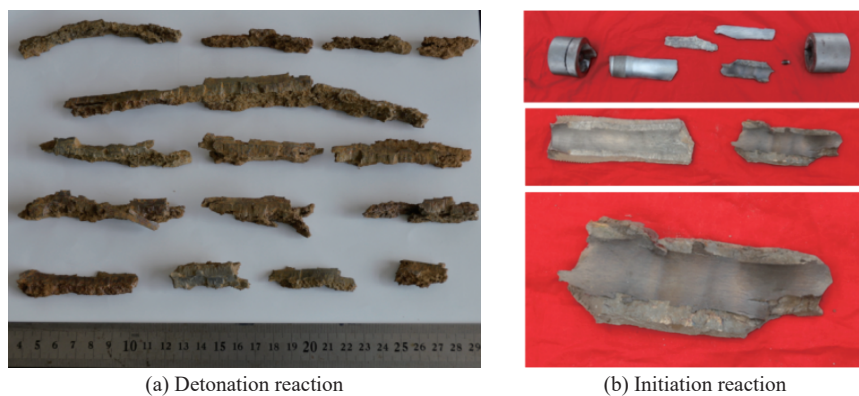


图 9 点火实验反应后远区测得的空气冲击波超压曲线

Fig. 9 Air blast overpressure profiles of initiation reaction



(a) Detonation reaction

(b) Initiation reaction

图 10 回收的实验装置碎片

Fig. 10 Fragments in recovery experiments

3 分析与讨论

3.1 点火实验系统的反应动作时序梳理

控制台输出点火信号为时间零点。结合应变片信号、高速摄影、PDV 信号, 扣除点火系统的作用时间约 4 ms, 至 8.14 ms 管壁开始变形膨胀。等容腔压力增长的时间约 4 ms, 此时管内等效压力小于管壁箍缩屈服限。

应变片信号显示 8.15 ms 时测点近点火端测点位置已达最大变形, 但由于破口在管壁靠近背景板一侧, 无法确定宏观裂口出现的具体时间。至 8.22 ms 火光出现, 管壁塑性形变至首次破裂时间最长不超过 70 μ s, 炸药发生强反应(爆燃或爆炸)的时间与位置具有不确定性。

3.2 长管强约束条件下炸药点火的反应机制探究

从实验结果来看, 即便是在增强厚壁长管约束条件下, 对于单端引燃的密实压装炸药仍然没有发生 DDT。从实验装置管壁膨胀变形直至解体之前的剧烈反应情况下, 装置内的反应压力水平仅仅达到 1 GPa 左右的量级, 且压力脉冲增长前沿长达数十至百微秒, 无法在炸药基体中形成冲击波, 因此无法实现从冲击到爆轰的转变, 与 Macek 在一维假定下的波聚物理模型不符。

此外, 从以往一些压装炸药 DDT 实验结果中出现的电离电探针导通时序混乱的情况反映出在单端引燃的 DDT 管实验中, 炸药表面点火产生的高温高压产物气体在装药结构的宏观缝隙中对流传播引起的炸药表面燃烧以及压力增长在反应演化方面扮演了重要的角色。结合文尚刚^[18]和 Shang 等^[19]的实验图像, 本文中单端引燃实验中管壁膨胀启动时序的随机性, 实验装置膨胀破裂前的反应压力水平和压力增长历程, 以及回收的实验装置内表面上的烧蚀痕迹, 体现了约束中的炸药实际反应过程是炸药表

面点火后先期反应高温高压产物气体会以对流形式在炸药与柱壳壁面间缝隙中传播,诱发下游位置炸药表面燃烧;持续燃烧的反应产物使缝隙中的压力持续增长,而表面燃烧加速产生高温高压气体并进一步向周围传播,不断形成正反馈;当压力水平引起炸药比表面积快速增长,炸药的反应速度急剧加快引起压力水平的剧烈增长直至超过约束屈服极限,最终导致约束解体。因此对于约束条件下的密实炸药,表面点火后高温、高压反应产物气体以对流形式在炸药与柱壳壁面间缝隙中传播过程才是影响反应演化的主导机制。

4 结论

通过本文实验结果及结合文献分析,得到以下主要结论:

(1)压装炸药 PBX-A 在长管强约束条件下单端引燃后未发生典型的燃烧转爆轰现象,反应烈度为爆燃或爆炸级。从反应压力增长历程反映出炸药基体内没有形成冲击波,因而无法实现从冲击到爆轰的转变;

(2)炸药表面点火后先期反应高温高压产物气体会以对流形式在炸药与柱壳壁面间缝隙中传播,诱发相邻位置炸药表面燃烧与反应的进一步传播,这一过程是约束条件下的密实炸药点火反应演化的主导机制。

参考文献:

- [1] 张震宇,田占东,陈军,等. 爆轰物理 [M]. 2 版. 长沙:国防科技大学出版社, 2016: 122-113.
- [2] ASAY B. Shock wave science and technology reference library, Vol.5: non-shock initiation of explosives [M]. Springer Science & Business Media, 2010: 11-488.
- [3] MACEK A. Transition from deflagration to detonation in cast explosive [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1959, 31(1): 162-167. DOI: 10.1063/1.1730287.
- [4] TARVER C M, GOODALE T C, SHAW R, et al. Deflagration-to-detonation transition studies for two potential isomeric cast primary explosives [C] // Sigmund Jacobs. 6th Symposium(International) on Detonation. Coronado, California, United States, 1976: 231-249.
- [5] JACOBS S. Personal communication with C. M. Tarver. [C] // Sigmund Jacobs. 6th Symposium (International) on Detonation. Coronado, California, United States, 1976: 249.
- [6] BERNECKER R R, SANDUSKY H W, CLAIRMONT Jr A R. Deflagration-to-detonation transition studies of porous explosive charges in plastic tubes [C] // James M. Short. Proceeding of the 7th Symposium (International) on Detonation. Annapolis, Maryland, United States, 1981: 119-138.
- [7] SANDUSKY H W, BERNECKER R R. Compressive reaction in porous beds of energetic materials [C] // James M Short. 8th Symposium (International) on Detonation. Albuquerque, New Mexico, United States, 1985: 881-891.
- [8] CAMPBELL A W. Deflagration-to-detonation in granular HMX: LA-UR 80-2016 [R]. Los Alamos Scientific Laboratory, 1980.
- [9] 张泰华,白以龙,王世英,等. 多孔和铸装高能推进剂的燃烧转爆轰 [J]. *爆炸与冲击*, 2000, 20(4): 296-302.
ZHANG T H, BAI Y L, WANG S Y, et al. Deflagration-to-detonation transition in porous propellants and cast propellants [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(4): 296-302.
- [10] 赵同虎,张新彦,李斌,等. 颗粒状 HMX、RDX 的燃烧转爆轰实验研究 [J]. *含能材料*, 2003, 11(4): 187-190. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2003.04.003.
ZHAO T H, ZHANG X Y, LI B, et al. Experimental study on the deflagration-to-detonation transition for granular HMX, RDX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2003, 11(4): 187-190. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2003.04.003.
- [11] MAIENSCHNEIN J L, CHANDLER J B. Burn rates of pristine and degraded explosives at elevated temperatures and pressures: UCRL-JC-127993 [R]. 1998.
- [12] 黄毅民,冯长根,龙新平. JOB-9003 炸药燃烧转爆轰现象研究 [J]. *火炸药学报*, 2002, 1: 54-58. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2002.01.017.

- HUANG Y M, FENG C G, LONG X P. Deflagration to detonation transition behavior of explosive JOB-9003 [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002, 1: 54–58. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2002.01.017.
- [13] 王建, 文尚刚. 以 HMX 为基的两种压装高密度炸药的燃烧转爆轰实验研究 [J]. *高压物理学报*, 2009, 23(6): 441–446. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5773.2009.06.007.
- WANG J, WEN S G. Experimental study on deflagration-to-detonation transition in two pressed high-density explosives [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(6): 441–446. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5773.2009.06.007.
- [14] 王建, 文尚刚, 何智, 等. 压装高能炸药的燃烧转爆轰实验研究 [J]. *火炸药学报*, 2009, 32(5): 25–28. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2009.05.008.
- WANG J, WEN S G, HE Z, et al. Experimental study on deflagration-to-detonation transition in pressed high-density explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(5): 25–28. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2009.05.008.
- [15] 代晓淦, 王娟, 文玉史, 等. PBX-2 炸药加热条件下燃烧转爆轰特性 [J]. *含能材料*, 2013(5): 649–652. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.05.017.
- DAI X G, WANG J, WEN Y S, et al. Deflagration to detonation transition on characteristics for heated PBX-2 [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2013(5): 649–652. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.05.017.
- [16] JACKSON S I, HILL L G, BERGHOUT H L, et al. Runaway reaction in a solid explosive containing a single crack [C] // Ruth Doherty. 13th International Detonation Symposium. 2006: 646–655.
- [17] LEURET F, CHAISSÉ F, PRESLES H N, et al. Experimental study of the low velocity detonation regime during the deflagration to detonation transition in a high density explosive [C] // James M Short. Proceedings of 11th International Symposium on Detonation. Snowmass, Colorado, 1998: 693–701.
- [18] 文尚刚. 炸药缝隙中燃烧模式转化及反应烈度增长行为研究 [R]. 四川绵阳: 中国工程物理研究院, 2017.
- [19] SHANG H L, YANG J, LI T, et al. Convective burning in confined explosive cracks of HMX-based PBX under non-shock initiation [C] // Shelley Cohen. 16th International Detonation Symposium. Cambridge, Maryland, United states, 2018.

(责任编辑 曾月蓉)