

文章编号: 1006-9941 (2010)05-0551-07

TATB 基 PBX 的快速烤燃实验与数值模拟

张旭, 谷岩, 张远平, 李强, 龚晏青, 孙永强

(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国防科技重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 根据 TATB 基高聚物黏结炸药 (TATB 基 PBX) 异常环境安全性特点 (例如导弹发射失败), 采用固体推进剂作为燃料开展了带 2 mm 厚约束钢壳的 TATB 基 PBX 快速烤燃小尺寸实验, 模拟推进剂燃烧时具有一定约束炸药的响应情况, 并且利用实验得到的炸药表面热流量作为边界条件, 采用高阶有限元法对炸药样品升温过程进行了数值模拟。实验中测量了炸药表面温度随时间变化情况, 利用温度数据和 Duhamel 叠加原理计算得到炸药表面平均热流量在其点火前为 $19.17 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, 在此平均热流量条件下, 带 2 mm 厚约束钢壳的 TATB 基 PBX 点火反应时间为 95 s。研究表明, 固体推进剂燃烧会在短时间内引起 TATB 基 PBX 点火燃烧反应, 但不会发生猛烈的爆燃或爆轰现象。

关键词: 爆炸力学; 快速烤燃; 固体推进剂; TATB 基高聚物黏结炸药 (TATB 基 PBX)

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.05.017

1 引言

安全性研究是武器系统研究的重要内容之一, 其中早期以 HMX 类炸药为主的安全性主要集中在低速冲击下的炸药反应烈度研究, 被广泛接受用于计算机建模的标准实验方法包括跌落实验、Taylor 实验、SUSAN 实验和 STEVEN 实验^[1-3]。这些实验没有将与武器相关的尺度效应、几何构形、约束条件等作为考虑重点, 而是通过准一维或者二维实验设计, 评估炸药在低速冲击下的反应烈度。其中低速冲击 STEVEN 实验研究较多, 近几年国际爆轰会议和 SCCM (Shock Compression of Condensed Matter) 会议均有大量研究报道^[4], 主要由于 STEVEN 实验的重复性好、可以适应计算机模型验证的需要。早期的 STEVEN 实验主要用于评估炸药在低速冲击下的反应阈值速度, 近几年 STEVEN 实验更注重尝试炸药在低速冲击下的反应烈度量化评定和反应机理研究^[5-12], 包括采用镶入式压力计、外部应变计、弹道摆、超压计等确定热点位置、压力-时间历程测量、快响应温度等用于反应炸药反应

烈度的参数。结果表明, 随着钢质弹体撞击速度提高 HMX 基炸药反应烈度增强, 但是仍然远远低于 HMX 基炸药正常爆轰; 其中最值得注意的是在所有 TATB 基钝感炸药 STEVEN 实验中, 均没有反应发生, 换句话说, 钝感炸药在低速机械撞击条件下安全性问题不明显^[13-17]。因此, 随着导弹武器系统采用钝感炸药 (IHE) 的安全性提高, 多数研究人员将钝感炸药的战斗部安全性研究转移到异常环境火烧事故为主, 尤其是固体推进剂火烧产生的高温环境成为影响战斗部安全性的主要因素, 即推进剂火烧情况下的快烤燃研究成为钝感炸药 (IHE) 战斗部安全性研究的重要内容。

本实验开展的固体推进剂火烧情况下 TATB 基高聚物黏结炸药 (TATB 基 PBX) 快速烤燃研究就是针对钝感炸药安全性需求, 采用固体推进剂作为燃料开展了带 2 mm 厚约束钢壳的 TATB 基 PBX 快速烤燃小尺寸实验, 模拟推进剂燃烧时具有一定约束炸药的响应情况, 并且利用实验得到的炸药表面热流量作为边界条件对炸药样品升温过程进行了数值模拟。

2 研究现状

通常情况下, 烤燃实验分为慢烤燃 (slow cook-off) 和快烤燃 (fast cook-off) 两类, 其中慢烤燃实验主要是用于炸药在受到外部缓慢加热时的反应类型研究, 依此建立物理模型^[16]。慢烤燃的研究主要是通过控制影响炸药热起爆反应的因素 (温升速率和约束条

收稿日期: 2010-01-01; 修回日期: 2010-04-13

基金项目: 中国工程物理研究院发展基金重点项目 (项目批准号: 2009A0401024) 和中国工程物理研究院发展基金项目资助 (项目批准号: 2008B0201012)

作者简介: 张旭 (1972-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为流体力学。
e-mail: caepzx@sohu.com

件), 利用压力计、应变计、X 光照相、质子照相、高速摄影、微波干涉仪、VISAR 等测试方法, 得到炸药热爆炸的过程参数。此外, 化学研究人员采用各种热化学技术研究材料的热分解现象, 获得有关的动力学参数, 如活化能、指前因子、生成热, 并用这些参数有效预测炸药对热刺激的响应。与慢烤燃实验不同的是, 快速烤燃试验主要评估的是炸药在受到外部火烧时的反应程度。美国 C-SAFE (Center for the Simulation of Accidental Fires and Explosions) 研究中心利用丙烷燃烧加热模拟快速烤燃过程^[17-19], 实验方法主要以测量炸药温升速率、炸药分解或者点燃在约束壳体内炸药的的压力变化为主, 并且通过观察反应过后壳体破裂情况判断炸药反应烈度。C-SAFE 研究中心研究人员就快烤燃实验得出几点结论: (1) 热对流、热传导、约束强度及其完整性是炸药反应程度的重要影响因素; (2) 快速烤燃过程中温度梯度较大; (3) 反应发生在约束壳体与炸药界面之间; (4) 最终是否发生爆炸或者爆轰由上面三个条件决定。此外, C-SAFE 研究中心在开展快速烤燃实验研究工作的同时, 开展了理论分析和数值模拟研究工作, 目的是为了深入理解快速烤燃实验炸药可能发生的化学反应机理, 从而能够建立恰当的计算模型, 如图 1 所示。关于快速烤燃实验, 研究人员认为其主要物理过程包括: (1) 外部热源加热炸药与壳体; (2) 炸药局部点火或燃烧; (3) 炸药局部点火或燃烧生成的产物对壳体产生压力; (4) 在燃烧生成的产物作用下壳体膨胀; (5) 持续燃烧和膨胀可能导致爆炸或者爆轰。C-SAFE 研究中心根据对快速烤燃实验结果的分析理解建立了理论模型, 并且在理论模型基础上建立了相应的计算模型(计算模型还适用于激光引爆炸药机理), 采用物质点法计算快速烤燃实验, 与实验结果符合较好。为了确定事故条件下推进剂火烧可能对炸药安全性构成的威胁, LLNL 曾就 MINUTEMAN III STAGE 3 的推进剂开展过火烧实验, 主要目的是研究推进剂火烧细节, 确定在可能发生的事中炸药响应所经历的火烧温度和热流密度, 实验测到的推进剂火烧温度达 2300 °C。此外, 国内也有一些炸药烤燃的实验和数值模拟研究工作, 北京理工大学的陈朗^[18]利用 FLUENT 开展了 TNT 炸药考虑相变的烤燃数值模拟研究, 中物院化工材料研究所的代晓淦等^[19]曾就 PBX-2 开展过烤燃实验, 但是应归类为慢烤燃研究。

实际上, 即使在不考虑炸药颗粒度、空隙度等炸药本身特性因素情况下, 快烤燃实验炸药反应烈度定量

评定依然非常困难。Blame Asay (SCCM 2001) 曾经在烤燃实验中采用微波干涉仪测量壳体膨胀速度或者位移, 并且尝试利用壳体膨胀速度作为炸药反应烈度的评定方法, 发现不同烤燃条件下壳体膨胀速度差别不明显。因此, 如果以壳体膨胀速度作为评定标准, 不同烤燃条件炸药反应烈度相同, 与随后实验测得的反应率结果矛盾(不同烤燃条件下反应率不同)。该方法的缺陷是以壳体膨胀速度作为炸药反应烈度的评定标准是一种积分效果。因此, C-SAFE 研究中心研究人员采用更科学的方法, 即通过物理建模的方法评估, 由于快速烤燃是一个包含点火、火焰传播、壳体动力学响应和炸药反应等多个复杂物理现象的过程, 整个过程以数学模型方式精细描述并且有机结合非常困难, 并不是一两个人在短时间内能够完成的。C-SAFE 研究中心的科研人员正在尝试完成这一复杂过程的建模和实验验证工作。

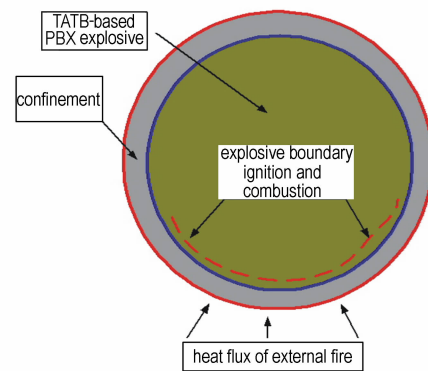


图 1 快速烤燃实验理论模型

Fig. 1 Fast cook-off model

3 实验方法

在炸药快速烤燃过程中, 主要的热转换形式包括热辐射和热对流, 其中热辐射由火焰温度和火焰尺度决定, 是快速烤燃实验中的主要传热机制, 热对流只在快速烤燃实验早期有作用。根据具有一定约束的炸药快速烤燃的特点, 本研究过程中设计了如图 2a 所示的实验装置, 实验装置中 TATB 基 PBX 样品由两块直径 50 mm、长 50 mm 的药柱组成, 放置在壁厚 2 mm 的钢约束壳体内; 两个测温范围 0 ~ 1320 °C 的 K 型热电偶分别放置在 TATB 基 PBX 样品中心和样品表面, 测量炸药样品在受到推进剂燃烧时炸药表面温度和中心温度变化情况; 装置顶盖安装一个测温范围在 0 ~ 2 GPa 的压力传感器, 低压压力计记录壳体内部炸药点火燃烧过程中压力增长-时间变化过程。

实验装置固定在丁羟固体推进剂上方,丁羟固体推进剂燃烧性能稳定。固体推进剂的直径 110 mm,长度 465 mm,固体推进剂点火药面至被加热实验装置底面的距离为 50 mm,如图 2b 所示。固体推进剂燃烧过程中火焰高度接近 2 m,燃烧过程能够将整个实验装置包围。在距离炸药样品一定距离处布置超压传感器,观测是否有空气冲击波超压变化,鉴别是否出现爆轰现象。需要指出的是,由于不知道快速烤燃实验炸药反应确切开始时间,同时由于炸药点火燃烧反应时间尺度大,因此低压压力计的触发时间也很难确定,在此次实验中主要采用信号间隔触发低压压力计。

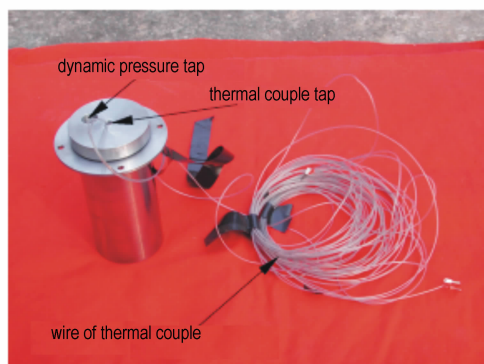
4 实验结果及数据分析

4.1 快烤燃过程中炸药温度变化情况

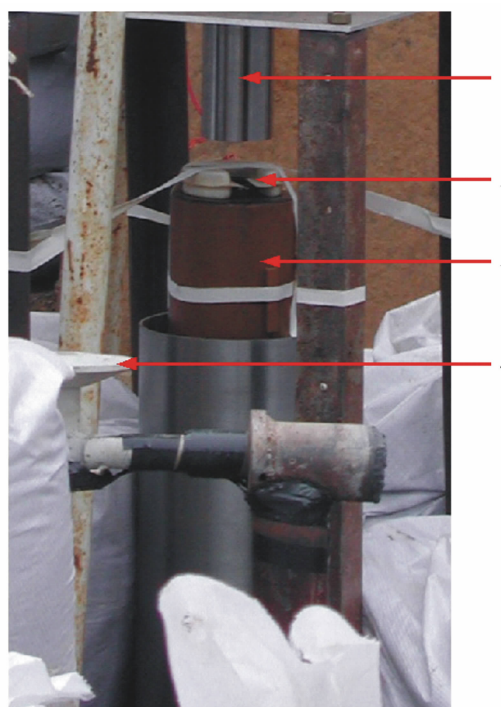
此次研究过程中共进行两发实验,其中第一发实验固体推进剂从点火头点火到火焰熄灭的总燃烧时间为 104 s,火焰熄灭后 8 s 钟发生爆响,实验装置的钢约束壳体底部发生塑性变形,同时整体剪切断裂,如图 3a 所示。实验中热电偶测量到壳体中心温度,推进剂点火 60 s 左右后温度快速上升,并且发生脉动过程;出现这一现象的合理解释是由于热电偶安装在两块炸药中间,炸药间存在气隙,气隙热对流引起热电偶周围空气升温并且发生脉动。此外,实验后回收到 TATB 基 PBX 碎块和黑色豆瓣状胶质颗粒,如图 3b 所示。第二发实验固体推进剂从点火到火焰熄灭的燃烧时间与第一发实验相同,火焰熄灭后发生爆响,钢约束壳体底部发生塑性大变形,没有发生断裂,如图 3c 所示,但是安装压力传感器的顶盖被冲开。实验后没有回收到 TATB 基 PBX 碎块和黑色豆瓣状胶质颗粒,只是在装置附近发现大量 TATB 基 PBX 粉末,如图 3d 所示。

第一发实验中,采用量程范围 0 ~ 2 GPa 的压力传感器对实验装置钢壳的内压增长过程进行了测量,实验过程中信号的触发压力为 50 MPa,图 4a 是实验测量得到的钢壳内压增长过程,1.5 s 时间内壳体内压力增长到 90 MPa,但是由于示波器记录时间过短,没有记录到壳体断裂前的峰值压力。实验中热电偶测量到炸药表面和中心温度如图 4b 所示,炸药中心温度变化与第一发实验类似,推进剂点火 60 s 左右后温度快速上升,并且发生脉动过程。炸药表面热电偶的实验数据表明:炸药表面温度上升分三个阶段,第一阶段,推进剂火焰温度通过壳体热传导至炸药表面升温;第二阶段,推进剂火焰渐弱及熄灭过程冷却;第三阶

段,炸药发生放热化学反应的快速升温过程。



a. thermal couple distribution during fast cook-off



b. test facilities

图 2 实验装置

1—带约束的 TATB 基 PBX 样品, 2—点火头, 3—固体推进剂, 4—超压计

Fig. 2 Experimental set-up

1—sample of TATB-based PBX explosive with steel casing, 2—ignition, 3—solid propellant, 4—overpressure sensor



a. steel container in Test 1



b. recovered fragments and black gelatinous granules of explosive in Test 1



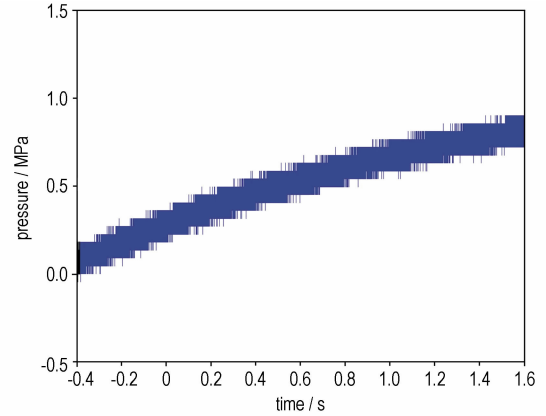
c. steel container in Test 2



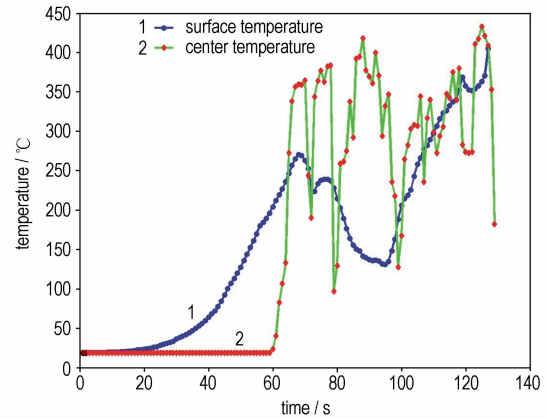
d. explosive powders (light yellow) sprinkles in Test 2

图 3 实验后回收情况

Fig. 3 Recovery after explosion



a. bore pressure build-up



b. temperature change of explosive sample

图 4 钢壳内部压力和温度

Fig. 4 Pressure and temperature in the steel container

4.2 炸药表面热流密度

炸药表面热流密度由 Duhamel 叠加原理和热电偶测量得到的炸药表面温度随时间变化曲线计算。对于柱坐标系, Duhamel 叠加原理^[17]是从非稳态导热方程出发, 计算非稳态温度分布 $T(r, t)$,

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \alpha_{\text{TATB-based PBX explosive}} \left(\frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

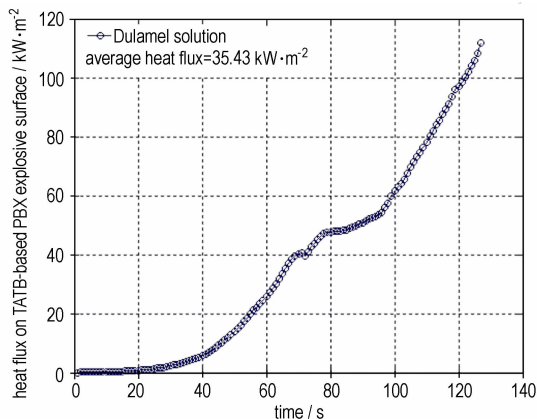
式中, α 为导热系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; r 为空间径向坐标, m 。从式(1)可以得到炸药表面热流密度的近似解为

$$q = \frac{K_{\text{TATB-based PBX explosive}}}{\sqrt{\pi \cdot \alpha_{\text{TATB-based PBX explosive}}}} \left[\frac{T(t) - T_0}{\sqrt{t}} \right] + \frac{1}{2} \int_0^t \frac{T(t) - T(s)}{\sqrt{(t-s)^3}} ds - \frac{K_{\text{TATB-based PBX explosive}}}{2R} [T(t) - T_0] \quad (2)$$

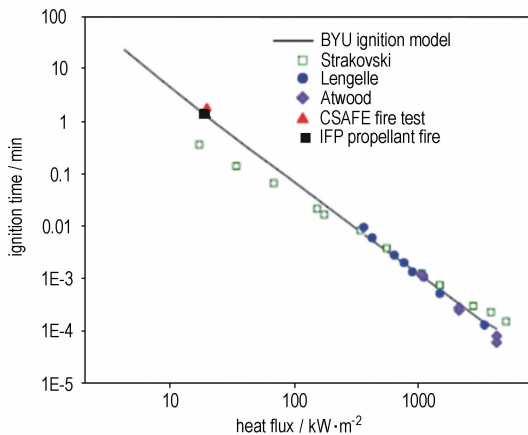
式中, q 为热流密度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; K 为导热系数, $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; T_0 为初始温度, K ; R 为样品半径, m ; t 为时间, s 。对于典型的非稳态导热, 方程(1)解的精度接近 1%。最后运用分段线性插值方法计算方程(2)得到炸药表面热流密度。

$$q(t_n) = \frac{2K_{\text{TATB-based PBX explosive}}}{\sqrt{\pi\alpha_{\text{TATB-based PBX explosive}}}} \sum_{j=1}^n \left(\frac{T_j - T_{j-1}}{\sqrt{t_n - t_j} + \sqrt{t_n + t_{j-1}}} \right) + \frac{K_{\text{TATB-based PBX explosive}}}{2R} [T_j - T_0] \quad (3)$$

根据热电偶测量得到的炸药表面温度随时间变化曲线如图 4b 所示,炸药表面热流密度由 Duhamel 叠加原理计算得到如图 5a 所示的结果。计算结果表明在固体推进剂火烧整个过程中,炸药表面热流密度经历快速上升过程,壳体断裂前整个过程平均热流密度近似 $35.43 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。



a. heat fluxes



b. ignition time

图 5 炸药表面热流密度和点火反应时间

Fig. 5 Heat fluxes and ignition time of explosive surface

另一方面,根据实验结果图 4b 所示,炸药表面温度在 A 点出现快速上升,因此 A 点可以定义为 TATB 基 PBX 点火反应的开始点。在 A 点以前时间段内应该为真实的推进剂火烧过程热流密度,A 点以后时间段温度出现快速上升应该是炸药开始点火放热分解反应形成的。如果以 A 点划分,则由推进剂火烧过程产生的平均热流密度为 $19.17 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在同等条件下,C-SAFE

研究中心丙烷加热的平均热流密度约为 $19 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$,因此固体推进剂燃烧过程中平均热流密度与丙烷加热的平均热流密度相近。此外,从图 4b 还可以推断出炸药点火燃烧反应时间约为 95 s,如果将此实验数据与 C-SAFE 研究中心的数据放在同一数据图上,则如图 5b 所示,但是由于炸药配方的差别,与 C-SAFE 研究中心的数据比较只能作为参考。炸药中心或者壳体外壁热流密度可以通过反向热导方法推算,即通过求解下列一组柱坐标系方程得到分析解,但是由于分析解表达式比较复杂,本文为了计算方便采用下一节数值计算方法估计炸药样品中心温度场分布。

5 烤燃建模及数值模拟

应该说,快烤燃过程中包括四个阶段:火焰燃烧、炸药升温、壳体响应(炸药分解产生气体内压力升高)、炸药猛烈反应,本文只就炸药升温过程建模和模拟。由于炸药与壳体线膨胀系数不同,因此在炸药分解过程和快烤燃过程中炸药与壳体之间可能会形成气隙,气隙厚度将随时间变化,气隙厚度与炸药、壳体线膨胀系数、导热系数有关,出现除壳体热阻外的随时间变化附加气隙热阻。炸药升温过程可以用图 6 的简化物理模型表示,而更复杂的过程是建立多材料模型(由于气隙厚度的变化,因此计算网格也需要随时间变化)。由于附加气隙热阻的出现,需要建立适当的热阻模型,从而确定适当的边界条件,有效模拟炸药在反应前的升温过程。

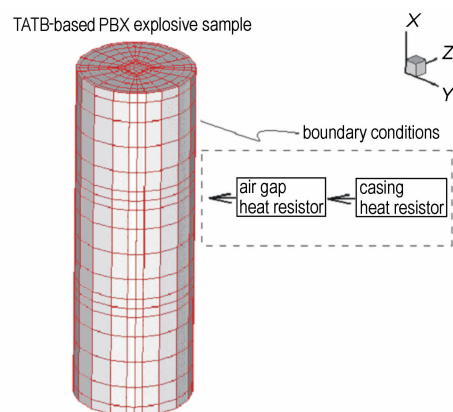


图 6 高阶算法模拟炸药内部温度变化建模示意图

Fig. 6 Boundary conditions of fast cook-off model

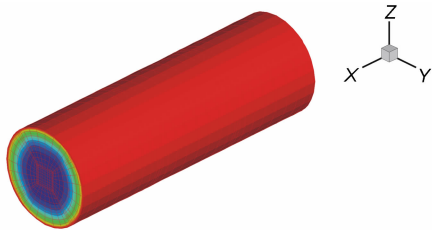
根据快烤燃的特点和现有计算技术基础,本文采用高阶算法求解三维热传导方程模拟炸药内部温度变化^[20-22],验证实验结果,其中考虑炸药反应的三维热

烤燃方程^[14]是

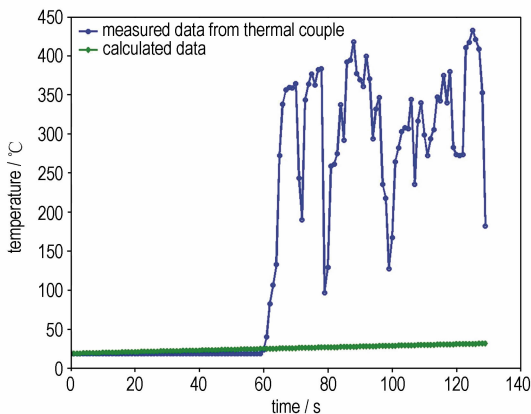
$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{dQ}{dt} \quad (4)$$

式中, ρ 为炸药的密度; C 为定压比热; λ 为热传导系数; T 为温度; t 为时间; x, y, z 为空间坐标; dQ/dt 为炸药分解放热速率, 采用唯象反应速率 Arrhenius 方程。

本文计算过程中只考虑炸药点火燃烧前的过程, 炸药分解放热过程没有考虑, 因此三维热烤燃方程中炸药分解放热速率项在计算过程中省略掉。需要指出的是炸药点火前的分解反应对炸药温度的影响没有在计算过程中给予考虑, 计算所用参数包括以 TATB 基 PBX 的密度 $\rho = 1.888 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 导热系数 $\lambda = 0.269 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$, 质量热容 $C_p = 1.08 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。计算过程中几何模型尺寸与实验样品尺寸相同 (直径 50 mm、长 100 mm 的圆柱), 网格内插值多项式阶数为 $p = 9$, 计算边界条件采用图 4b 的炸药表面温度数据作为输入, 计算得到的炸药样品内温度场分布如图 7a 所示。图 7b 是计算得到的炸药中心温度变化与实验测量结果对比, 计算结果表明在爆响前炸药样品中心温度上升不明显, 这一计算结果从另一角度说明实验过程中炸药中心温度快速上升并且发生脉动是热电偶周围气隙空气对流引起的, 而不是真实的热传导过程引起的。



a. Temperature distribution inside the explosive sample



b. Temperature of explosive center

图7 数值模拟炸药温度上升

Fig.7 Numerical simulation of temperature rising of explosive

6 结论

本文根据导弹发射失败等异常环境 TATB 基 PBX 安全性特点, 采用固体推进剂作为燃料开展了带 2 mm 厚约束钢壳的 TATB 基 PBX 快速烤燃小尺寸实验, 利用实验得到的炸药表面热流密度作为边界条件对炸药样品升温过程进行了数值模拟。实验中测量到了炸药表面温度随时间变化情况, 利用温度数据和 Duhamel 叠加原理计算得到炸药表面平均热流密度在其点火前为 $19.17 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, 在此平均热流密度条件下, 带 2 mm 厚约束钢壳的 TATB 基 PBX 点火反应时间为 95 s。研究表明固体推进剂燃烧会引起 TATB 基 PBX 快速点火燃烧反应, 并且使整个装置在内压作用下发生大变形和断裂, 但不会有猛烈的爆燃或爆轰现象。

参考文献:

- [1] Forbes G W, Tarver C M, et al. Measurement of low-level explosives reaction in the two-dimensional Steven impact test [R]. UCRL-JC-132716, 2000.
- [2] Chidester S K, Green L G, Lee C G. A frictional work predictive method for the initiation of solid high explosives from low-pressure impacts [C] // Tenth International Detonation Symposium, ONR 33395-12, Boston, MA 1993: 785-792.
- [3] Chidester S K, Tarver C M, Lee C. Impact ignition of new and aged solid explosives [C] // Shock Compression of Condensed Matter-1997, AIP Conference Proceedings 429, AIP Press, New York, 1998: 707-710.
- [4] Chidester S K, Tarver C M, Garza R. Low amplitude impact testing and analysis of pristine and aged solid high explosives [C] // Eleventh (International) Symposium on Detonation, ONR 33300-5, Arlington, VA, 1998: 93-100.
- [5] Chidester S K, Tarver C M, DePiero A H, et al. Single and multiple impacts of new and aged high explosives in the Steven impact test [C] // Shock Compression of Condensed Matter-1999, AIP Conference Proceedings 505, New York, 2000: 663-666.
- [6] Niles A M, Garcia F, Greenwood D W, et al. Measurement of low level explosives reaction in gauged multi-dimensional Steven impact tests [C] // Shock Compression of Condensed Matter-2001, AIP Press, New York, 2002: 886-889.
- [7] Vandersall K S, Chidester S K, Forbes J W, et al. Experimental and modeling studies of crush, puncture, and perforation scenarios in the Steven impact test [C] // Twelfth International Detonation Symposium, San Diego, CA, August 2002.
- [8] Switzer L L, Vandersall K S, Chidester S K, et al. Threshold studies of heated HMX-based energetic material targets using the Steven impact test [C] // Shock Compression of Condensed Matter-2003, Furnish, M. D., ed., AIP Press, New York.
- [9] Vandersall K S, Murty S S, Chidester S K, et al. Investigation of Steven impact test using a transportation hook projectile with gauged experiments and 3D modeling [C] // Shock Compression of Condensed Matter-2003, AIP Press, New York.
- [10] 代晓淦, 申春迎, 文史玉, 等. Steven 试验中不同开关弹头撞击下响应应规律研究 [J]. 含能材料, 2009, 17(1): 50-54.

- DAI Xiao-gan, SHEN Chun-ying, WEN Shi-yu, et al. Reaction rule for explosive under different shape warhead impact in Steven test [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(1): 50–54.
- [11] 代晓淦, 向永, 申春迎. 用抛射弹法 (Steven 试验) 研究 PBX-2 炸药加速老化前后及响应能力[J]. 含能材料, 2006, 14(6): 453–456.
- DAI Xiao-gan, XIANG Yong, SHEN Chun-ying. Reaction ability of PBX-2 before and after accelerated aging by projectile impact (Steven test) [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(6): 453–456.
- [12] 代晓淦, 向永. 两种塑料粘炸药的 Steven 试验及撞击感度研究[J]. 含能材料, 2006, 14(1): 38–41.
- DAI Xiao-gan, XIANG Yong. Steven test and impact sensitivity for two explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(1): 38–41.
- [13] Theodore S S. Large scale fast cook-off sensitivity results of a melt castable general purpose insensitive high explosive[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1999, 24: 61–64.
- [14] Murry R L. CSAFE cook-off test [R]. Report TR11566: 1998, Thiokol Corporation, Brigham City.
- [15] Murry R L. CSAFE cook-off tests phase III [R]. Report TR12646: 1998, Thiokol Corporation, Brigham City.
- [16] Murry R L. CSAFE cook-off tests [R]. Report TR11996: 1999, Thiokol Corporation, Brigham City.
- [17] 张宝铎, 张庆明, 黄风雷. 爆轰物理学 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2001.
- [18] 陈朗, 王沛, 冯长根. 考虑相变的炸药烤燃数值模拟计算[J]. 含能材料, 2009, 17(5): 568–573.
- CHEN Lang, WANG Pei, FENG Chang-gen. Numerical study of explosive cook-off with phase change [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(5): 568–573.
- [19] 代晓淦, 吕子剑, 申春迎, 等. 火烧实验中不同尺寸 PBX-2 的响应规律[J]. 火炸药学报, 2008, 31(3): 41–49.
- DAI Xiao-gan, Lü Zi-jian, SHEN Chun-ying, et al. Response of different size PBX-2 under fire [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(3): 41–49.
- [20] Zhang X, Stanescu D. Large Eddy simulations of round jet with spectral element method [J]. *Computers and Fluids*, 2010, 39: 251–259.
- [21] Zhang X, Naughton J W. 2-D and 3-D numerical modelling of a dynamic resonant shear stress sensor [J]. *Computers and Fluids*, 2009, 38: 340–346.
- [22] Zhang X. Numerical study of Rayleigh-Taylor instability between miscible fluids with spectral element method [J]. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 2010, 10: 80–87.

Numerical Simulation and Experimental Study of Fast Cook-off of TATB-based PBX Explosive

ZHANG Xu, GU Yan, ZHANG Yuan-ping, LI Qiang, GONG Yan-qing, SUN Yong-qiang

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The fast cook-off of TATB-based PBX explosive with 2 mm thickness steel casing under solid propellant firing in a well-defined scenario such as failed launch of a missile was investigated. In addition, temperature distribution of the TATB-based PBX explosive under solid propellant firing was numerically investigated. Temperature rising was recorded and the heat flux of the explosive surface was calculated with the experimental data and Duhamel superposition principal, the average heat flux on the explosive surface under the solid propellant firing is $19.1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. Ignition time of TATB-based PBX explosive under the solid propellant firing is 95 s. The experimental results show that fast cook-off of TATB-based PBX explosive under solid propellant firing will not develop into deflagration or detonation.

Key words: explosion mechanics; fast cook-off; solid propellant; TATB-based PBX explosive

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.05.017