

文章编号: 1006-9941(XXXX)XX-0001-13

## 升温速率对 JEO 炸药烤燃响应特性的影响

张 焯, 王新宇, 徐文雨, 王在成, 姜春兰

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为研究 JEO 炸药(3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮(NTO)/奥克托今(HMX)/添加剂)的烤燃响应特性,设计了炸药烤燃多点测温-测压实验系统,开展了  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  和  $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  2种升温速率下的 JEO 炸药烤燃实验,获得了点火时间、点火温度、不同位置处炸药的温度历程和装置内部的压力历程,分析了升温速率对 JEO 炸药烤燃温度、压力变化和反应剧烈程度的影响。在实验研究的基础上,采用考虑压力对炸药热分解反应影响的炸药烤燃多相流物质输送模型,使用 Fluent 软件对不同升温速率下 JEO 炸药的烤燃热分解过程进行了数值模拟研究。研究表明, JEO 炸药热分解反应在相变前较为缓慢,相变后反应速率加快,炸药温度升高加快、压力呈指数增长,直至点火, JEO 炸药的点火温度约为  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在本实验的约束条件下响应等级为爆燃,具有良好的热安全性;随着升温速率的降低, JEO 炸药的点火时间变长,点火位置由装药边缘移向中心,反应剧烈程度增加;点火前的热分解过程中只有少部分炸药发生了反应,大部分炸药在点火后的燃烧阶段发生反应。

**关键词:** JEO 炸药; 烤燃实验; 热响应特性; 数值模拟

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2024010

## 0 引言

武器弹药在遭遇意外热刺激时,可能会发生燃烧或爆炸,造成人员伤亡、武器和高价值作战平台损毁,因此研究弹药的热安全性具有重要意义<sup>[1]</sup>。炸药装药是影响弹药战斗部热安全性的关键因素,开展新型高能不敏感炸药热响应特性研究,对于不敏感战斗部设计具有重要价值。

烤燃实验及数值模拟是研究炸药装药热响应特性的常用方法。对于特定组分的炸药装药,其对热刺激的响应特性受热刺激条件<sup>[2-5]</sup>、装药尺寸<sup>[6-8]</sup>、约束结构<sup>[9-11]</sup>、隔热防护<sup>[12-13]</sup>、泄压减敏结构<sup>[14-17]</sup>等多种因素的影响。升温速率作为常见的热刺激条件,对炸药烤燃的温度分布、点火时间和点火位置等都有很大影响。

因此,开展不同升温速率下的烤燃实验及数值模拟对于研究炸药在热刺激下的响应特性具有重要意义。烤燃弹内部压力是表征高聚物黏结炸药(PBX)烤燃反应的重要参数。对于炸药点火前的热分解阶段,炸药热分解反应速率对压力有很强的依赖性<sup>[18]</sup>,压力和温度一样是衡量炸药热分解反应速率和反应进程的重要指标;对于点火后的燃烧阶段,压力是反应传播、烈度演化和事故响应的驱动力<sup>[19]</sup>。Hobbs 等<sup>[20]</sup>建立了描述 B 炸药烤燃的通用烤燃模型(UCM),该模型采用修正后的阿伦尼乌斯速率,考虑了黑索今(RDX)的溶解、液化以及系统内压力对反应速率的影响,模拟得到的温度、压力和点火时间与试验结果较吻合。Kou 等<sup>[21]</sup>通过多点测温实验和燃烧测压实验测定了 2 种推进剂点火前的热反应温度和点火后的燃烧压力,标定了热分解反应模型和燃烧反应模型的参数,实现了对烤燃全过程的数学描述。目前的烤燃实验中,大多仅局限于炸药温度的测量,对内部压力的测试和分析相对较少。为了更加全面地评价炸药的烤燃响应特性,应开展炸药烤燃的温度-压力联合测量,以获取炸药的温度分布和压力增长过程。

在数值模拟计算中,传统烤燃模型通过求解带有

收稿日期: 2024-01-04; 修回日期: 2024-02-16

网络出版日期: 2024-03-28

作者简介: 张焯(1998-),男,硕士研究生,主要从事弹药战斗部热安全性研究。e-mail: bitzy@qq.com

通信联系人: 王在成(1972-),男,副教授,主要从事弹药系统与高效毁伤技术、不敏感炸药战斗部应用研究。

e-mail: wangskyshark@bit.edu.cn

引用本文: 张焯,王新宇,徐文雨,等. 升温速率对 JEO 炸药烤燃响应特性的影响[J]. 含能材料, DOI:10.11943/CJEM2024010.

ZHANG Ye, WANG Xin-yu, XU Wen-yu, et al. Effect of Heating Rates on the Cook-off Response Characteristics of JEO Explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Caifiao)*, DOI:10.11943/CJEM2024010.

化学反应热源项的炸药能量守恒方程计算炸药的点火时间和点火温度<sup>[18]</sup>。然而炸药热分解气体产物组分不同会导致体系内压力的增长历程不同,气体产物在炸药中的对流传热会导致体系中的温度分布不同<sup>[22]</sup>。传统烤燃模型未考虑固相炸药和气相产物之间的相态差异、气相产物组成对体系压力增长的影响以及体系中压力对炸药热分解反应速率的影响。因此,建立考虑气体产物组分和压力影响的炸药热反应模型,并使用烤燃实验得到的温度、压力数据标定模型参数,可以更加准确、合理地模拟炸药的烤燃过程。

JEO炸药是一种新型高能不敏感炸药,主要成分为奥克托今(HMX)和3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮(NTO),具有高爆热、低感度的特点,展现出了广阔的应用前景<sup>[23]</sup>。HMX在加热至165~185℃时会发生晶型转变<sup>[24-25]</sup>,由感度较低的 $\beta$ 相转变为感度较高的 $\delta$ 相,相变后HMX晶体体积膨胀,出现裂纹和孔洞等损伤,使其更容易发生点火<sup>[26-28]</sup>;NTO作为一种不敏感单质炸药,国内外研究人员对不同组分的NTO/HMX混合炸药的密闭空间热分解特性和慢烤特性进行了一定的研究<sup>[29-31]</sup>。然而,目前对于烤燃过程中JEO炸药相变和热分解反应导致的温度、压力变化以及升温速率对其烤燃特性影响的相关研究尚不充分。

基于上述背景,本研究开展了JEO炸药烤燃多点测温-测压实验,以体系温度和压力为表征参量,对不同升温速率下JEO炸药的烤燃响应特性进行了研究。在实验研究的基础上,数值模拟采用考虑压力对炸药热分解反应影响的炸药烤燃多相流物质输送模型,使用实验数据进行了参数标定和模型验证,进一步研究了升温速率对JEO炸药的点火位置、点火时间以及固相和气相体积分数变化等烤燃特性的影响规律。研究结果可为JEO装药战斗部热安全性设计提供参考。

## 1 JEO炸药烤燃实验

### 1.1 原料与仪器

NTO,纯度>99%,甘肃银光化学工业集团有限公司;HMX,纯度>99%,甘肃银光化学工业集团有限公司;碳氢聚合物,纯度>99%,甘肃银光化学工业集团有限公司;偕二硝基类化合物,纯度>99%,甘肃银光化学工业集团有限公司;石蜡,工业级,天津市光复科技发展有限公司。

烤燃控制箱,XJY-MKB-01型,西安嘉盈机电设备有限公司。

### 1.2 实验样品

所用JEO炸药是主要成分为NTO和HMX的PBX炸药,具体配方(质量分数)为45.5%NTO、45.5%HMX、8%黏结剂+增塑剂、1%钝感剂(黏结剂和增塑剂分别为碳氢聚合物和偕二硝基类化合物,钝感剂为石蜡)。JEO炸药的性能如表1所示。

使用溶液水悬浮法<sup>[32]</sup>制造成型粉,压装成JEO药柱,单个药柱尺寸为 $\Phi 32\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ,质量为14.2 g。

表1 JEO炸药性能<sup>[32]</sup>

Table 1 Properties of JEO explosive<sup>[32]</sup>

parameter	value	parameter	value
chemical formula	$\text{C}_{3.045}\text{H}_{4.600}\text{N}_{5.000}\text{O}_{4.660}$	$P_{\text{CJ}}/\text{GPa}$	29.25
$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.78	$Q_p/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	4739
$\Delta H/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	-259.81	$P_1/\%$	18
$D_{\text{CJ}}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	8262	$P_f/\%$	15

Note:  $\rho$  is density,  $\Delta H$  is enthalpy of formation,  $D_{\text{CJ}}$  is detonation velocity,  $P_{\text{CJ}}$  is detonation pressure,  $Q_p$  is detonation heat,  $P_1$  is impact sensitivity,  $P_f$  is friction sensitivity.

### 1.3 实验系统

设计如图1所示的炸药烤燃多点测温-测压实验系统,旨在获得JEO炸药在图示约束结构下烤燃的温度分布、压力增长情况以及反应的宏观现象,更全面地反映炸药烤燃热响应特性。实验系统主要由小型烤燃弹、温度控制-测试系统、压力测试系统和视频采集系统组成。

小型烤燃弹由圆柱JEO装药和约束结构构成。约束结构包括壳体、盖板、膜片和端盖。壳体最大外径为52 mm,内部空腔尺寸为 $\Phi 33\text{ mm}\times 21\text{ mm}$ ,装填上下2个药柱,侧壁开有3个直径1 mm的小孔,用于放置热电偶;盖板直径为40 mm,厚度为6 mm,盖板和端盖中心开有通孔,膜片用于密封通孔,保持装置密闭。

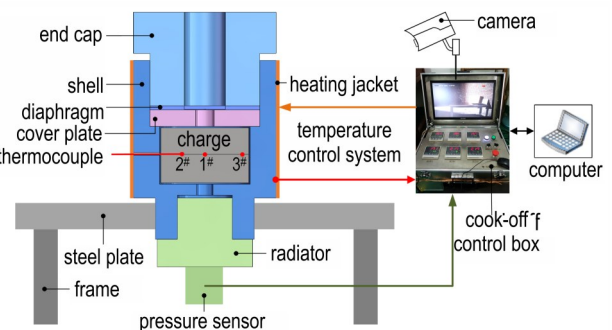


图1 烤燃多点测温-测压实验系统示意图

Fig. 1 Diagram of experimental system for multi-point temperature and pressure measurements

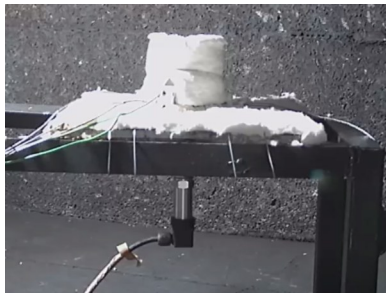
壳体、盖板和端盖的材料均为 45# 钢,膜片的材料为 304 不锈钢。烤燃弹约束结构实物图如图 2a 所示,烤燃弹壳体下端通过螺纹连接固定在钢板上,外侧包裹保温棉后共同放置在支架上,如图 2b 所示。

压力测试系统由压力传感器、散热管和烤燃控制箱组成。应变压力传感器量程为 1 MPa,用于测量 JEO 炸药点火前热分解阶段装置内部的压力。压力传感器通过散热管与壳体内腔相连,以保证其在烤燃过程中处于有效工作温度区间,如图 2c 所示。烤燃控制箱用于采集实验中的压力、温度和图像数据,外接笔记本电脑记录上述数据。温度和压力数据的采集频率均为 5 Hz。

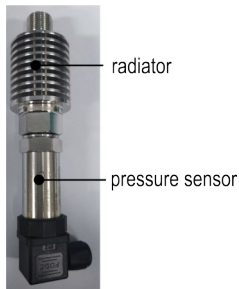
温度控制-测试系统由加热套、控温热电偶、测温热电偶和烤燃控制箱组成。使用陶瓷加热套对烤燃弹壳体侧壁进行加热。热电偶为铠装 K 型热电偶,直径为 1 mm,温度测量范围为 0~800 °C。1 根控温热电偶位于壳体和加热套之间,用于控制加热套的升温速率;3 根测温热电偶水平放置在上下 2 个药柱之间,用于测



a. constrained structure of the cook-off bomb



b. cook-off bomb



c. radiator and pressure sensor

图 2 烤燃实验装置实物图

Fig.2 Photograph of the cook-off experimental device

量烤燃过程中不同位置处炸药的温度,其中 1# 热电偶位于装药中心,2# 和 3# 热电偶分别位于距中心 8 mm 和 14 mm 处,位置如图 3 所示。

视频采集系统通过摄像机记录烤燃全过程小型烤燃弹的状态,视频帧率为 23 fps。

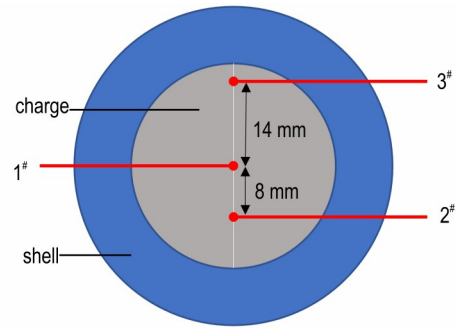


图 3 装药内部热电偶位置示意图(俯视)

Fig.3 Diagram of the thermocouple positions inside the charge (top view)

### 1.4 实验方案

综合考虑实验条件,选取  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  和  $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  2 种升温速率,以表征 JEO 炸药在不同升温速率下的烤燃响应特性。从室温开始按照预定的升温速率加热小型烤燃弹,直至发生响应,分析壳体和其他约束结构的破坏情况和视频录像,综合判断反应等级。

## 2 结果与分析

### 2.1 JEO 炸药烤燃反应宏观现象

研究进行了  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  和  $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  2 种升温速率下的烤燃实验,反应宏观现象相似,以升温速率为  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  为例,反应前一帧  $t_0$  时刻和反应后典型时刻画面如图 4 所示。从图 4 可以看出,反应后壳体下端首先出现火光,随后可见持续数十毫秒、覆盖整个画面的明亮白光,之后白光逐渐消失,分析认为这是炸药点火后发生燃烧导致的。2 种升温速率下,发生响应时均产生巨大响声。

2 种升温速率下,反应后回收到的端盖、壳体主体和下端如图 5 所示。由图 5 可以看出,壳体主体膨胀并沿侧壁热电偶孔位的竖直方向发生破裂,升温速率为  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  时,壳体破裂为一大一小两部分碎块飞出,壳体下端面保持完整;升温速率为  $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  时,壳体破裂为三部分并向四周飞散(其中较小的一块壳体碎片 a 丢失),并且壳体下端面与钢板连接处发生剪切破坏。盖板、膜片和端盖均被向上冲出并发生变形,壳体内无残留炸药,现场无明显冲击波破坏痕迹。综

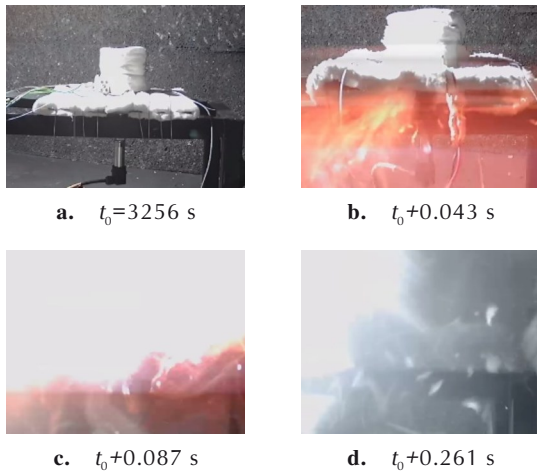


图4 JEO炸药反应后典型现象(5 °C·min<sup>-1</sup>)  
Fig.4 Typical reaction phenomena of JEO explosive at 5 °C·min<sup>-1</sup>

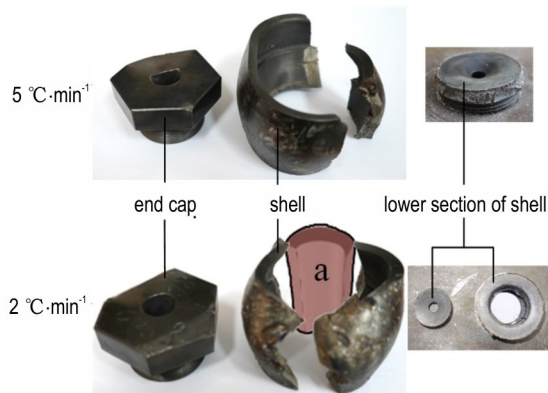


图5 不同升温速率下反应后回收的约束结构  
Fig.5 Constrained structures recovered after the reaction at different heating rates

合判断2种升温速率下的反应等级均为爆燃<sup>[33]</sup>。  
由此可见,5 °C·min<sup>-1</sup>和2 °C·min<sup>-1</sup>2种升温速率下,JEO炸药均发生了爆燃反应。但从壳体结构破坏程度综合判断,升温速率为2 °C·min<sup>-1</sup>时炸药的反应剧烈程度强于5 °C·min<sup>-1</sup>。

### 2.2 JEO炸药烤燃温度和压力变化特性

升温速率为5 °C·min<sup>-1</sup>和2 °C·min<sup>-1</sup>时,烤燃过程中壳体和不同位置处炸药的温度/压力-时间曲线分别如图6a和图6b所示。为了更好地反映烤燃过程中外界热传导、炸药相变和炸药热分解带来的温度、压力变化,以及温度和压力变化之间的对应关系,根据图6绘制了2种升温速率下不同位置处炸药温度对时间的变化率/压力-时间曲线,综合炸药温度和压力的变化,可将JEO炸药的烤燃热分解过程分为整体升温阶段、相变阶段和快速热分解阶段3个阶段,分别如图7a和图7b所示。

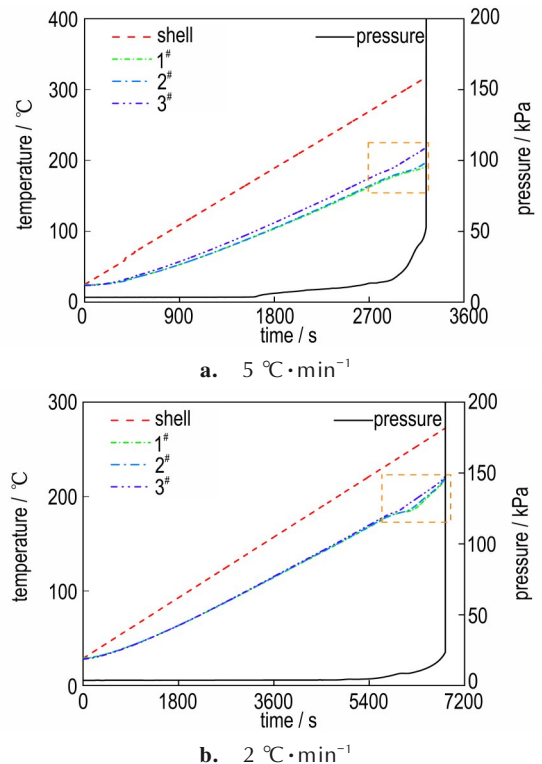


图6 不同升温速率下烤燃过程中壳体和不同位置处炸药温度/压力-时间曲线  
Fig.6 Temperature/pressure-time curves of shell and different positions with different heating rates

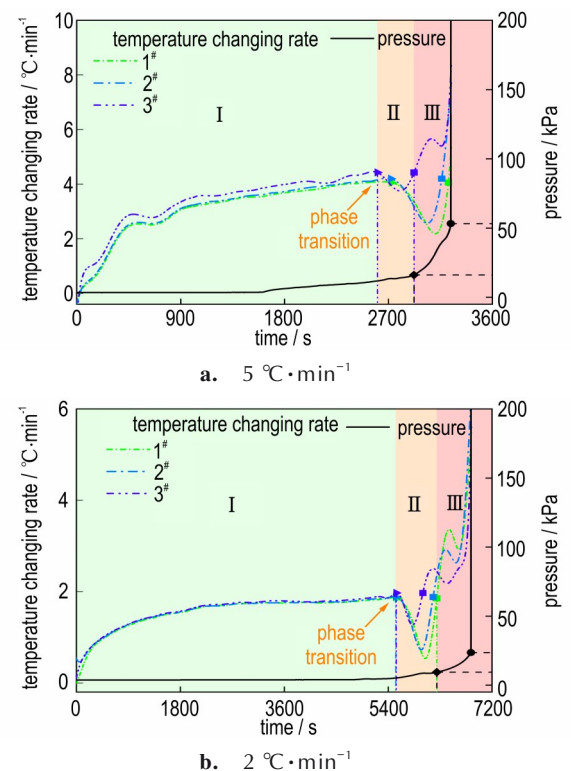


图7 不同升温速率下炸药温度变化率/压力-时间曲线  
Fig.7 Temperature changing rate/pressure-time curves with different heating rates

### (1) 整体升温阶段

由图6可知,  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  和  $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  的升温速率下, 壳体全程均保持预设的升温速率, 炸药温度从室温开始缓慢升高, 壳体和炸药温差逐渐增大, 一段时间后, 炸药温度近似呈线性升高。升温速率为  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  时, 位于装药边缘的3#升温速率高于中心区域的1#和2#, 边缘和中心炸药产生温差并逐渐增大, 见图6a和图7a; 升温速率为  $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  时, 各处炸药温度基本一致, 并保持约  $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  的速率线性增长, 见图6b和图7b。这是由于整体升温阶段, 外部热传导是影响炸药温度变化的主要因素, JEO炸药的导热系数远低于壳体, 而比热容高于壳体, 这导致炸药升温较慢。并且在  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  这一较快的升温速率下, 外部热量不能及时、完全传导至装药中心, 装药内部因此形成了一定的温度梯度。2种升温速率下, 压力在此阶段仅出现小幅缓慢增长。

$5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  和  $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  的升温速率下, 整体升温阶段的时长分别为2604 s和5552.8 s, 分别占烤燃全过程的80.0%和81.2%, 时长占比较大, 但JEO炸药热分解反应较为缓慢, 炸药温度近似呈线性增长, 压力出现小幅缓慢增长。

### (2) 相变阶段

由图6和图7可知, 当炸药升温至  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右时, 不同位置处炸药的温度变化率开始降低, 炸药升温变缓, 这是由于JEO炸药主要成分之一的HMX发生 $\beta\rightarrow\delta$ 相变吸热。根据图7a和图7b中的炸药温度变化率-时间曲线, 可以确定炸药相变阶段的开始和结束时间以及对应温度, 对图6a和图6b局部放大可得2种升温速率下炸药相变阶段和快速热分解阶段的温度-时间曲线, 如图8所示。

如图8a所示,  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  的升温速率下, 由于装药内部存在温度梯度, 位于最外侧的3#处炸药温度最高, 首先达到HMX的相变温度并发生相变, 随后依次是2#和1#, 但观测到相变的起始温度略低于3#。分析认为, 在  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  这一较快的升温速率下, 单位时间内外界热源传导至炸药(尤其是边缘处炸药)的热量较多, 能够部分弥补HMX晶体相变吸收的热量, 从而减弱了相变过程对炸药温度变化的影响。图8b显示,  $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  的升温速率下, 各处炸药温度接近, 基本同时发生相变, 且炸药温度受外界热源影响相对较小, 因此温度-时间曲线可见更为明显的相变平台<sup>[34]</sup>。在同一升温速率下, 不同位置处炸药相变的结束温度相同。

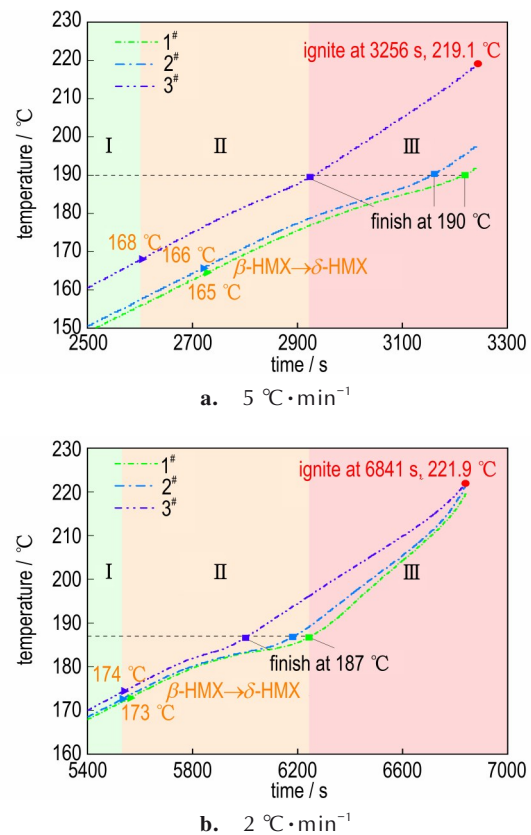


图8 不同升温速率下炸药相变阶段和快速热分解阶段温度-时间曲线

Fig. 8 Temperature-time curves during phase transition and rapid thermal decomposition stages with different heating rates

### (3) 快速热分解阶段

由图7a和图8a可知, 升温速率为  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  时, 3#处炸药在约  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$  时首先完成相变热分解反应加快, 炸药进入快速热分解阶段, 3#温度升高加快, 装置内压力由  $16\text{ kPa}$  开始快速增长, 温度和压力的升高形成正反馈进一步促进了炸药的热分解反应; 直至  $3256\text{ s}$  时刻, 炸药发生点火, 点火时3#温度为  $219.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 远高于刚刚结束相变的1#和2#, 压力此时增长至  $53\text{ kPa}$  并发生突跃, 突跃后的压力峰值为  $214\text{ kPa}$ 。这说明  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  的升温速率下, 边缘处炸药热分解反应加快并发生点火。

由图7b和图8b可知, 升温速率为  $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  时, 各处炸药温度相近, 先后在约  $187\text{ }^{\circ}\text{C}$  完成相变进入快速热分解阶段, 各处炸药热分解反应均加快; 直至  $6841\text{ s}$  时刻, 各处炸药共同达到点火温度发生点火, 点火温度为  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。多处炸药共同点火导致压力增长相较升温速率为  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  时更为迅速, 压力

由 9 kPa 快速增长至 24 kPa 便发生突跃,突跃至 928 kPa。2 种升温速率下 JEO 炸药的点火时间和点火时各处温度如表 2 所示。

由差示扫描量热法(DSC)和绝热加速量热法(ARC)试验结果可知,JEO 炸药主要成分之一 NTO 的热分解温度在 220~260 °C 之间<sup>[32,35]</sup>,而点火前 JEO 炸

表 2 不同升温速率下 JEO 炸药的点火时间和温度

Table 2 Ignition time and temperature of JEO explosive with different heating rates

heating rate / °C·min <sup>-1</sup>	ignition time / s	T <sub>s</sub> / °C	T <sub>1</sub> / °C	T <sub>2</sub> / °C	T <sub>3</sub> / °C	ignition position	reaction level
5	3256	313.9	192.1	197.9	219.1	edge	deflagration
2	6841	277.5	219.5	221.6	221.9	-	deflagration

Note: T<sub>s</sub> is temperature of shell, T<sub>1</sub> is temperature of 1<sup>#</sup>, T<sub>2</sub> is temperature of 2<sup>#</sup>, T<sub>3</sub> is temperature of 3<sup>#</sup>.

从上述实验结果可以得出,升温速率对 JEO 炸药的烤燃响应特性有明显影响。升温速率为 5 °C·min<sup>-1</sup> 时,点火时间短,JEO 装药内部温度分布不均匀,边缘处炸药发生点火;升温速率为 2 °C·min<sup>-1</sup> 时,点火时间长,装药内部温度分布比较均匀,各处炸药发生共同点火,压力增长更为迅速,反应更为剧烈。

### 3 JEO 炸药烤燃数值模拟研究

为系统深入研究不同升温速率对 JEO 炸药烤燃特性的影响规律,基于 5 °C·min<sup>-1</sup> 和 2 °C·min<sup>-1</sup> 2 种升温速率下的烤燃实验研究,拓展升温速率选取范围,采用考虑压力对炸药热分解反应影响的炸药烤燃多相流物质输送模型<sup>[36]</sup>,通过数值模拟的方法对不同升温速率下 JEO 炸药的烤燃热分解过程开展进一步研究。

#### 3.1 炸药烤燃多相流物质输送模型

为建立准确有效的炸药热反应计算模型,对炸药烤燃过程做出以下假设<sup>[34]</sup>:

- 1) 炸药自热反应遵循 Arrhenius 定律;
- 2) 热传导是体系中唯一的传热形式,忽略热对流和热辐射的影响;
- 3) 烤燃弹各部分为均质固体;
- 4) 烤燃过程中,炸药的热物性参数和反应动力学参数为定值,不随温度和炸药反应而改变。

则炸药烤燃过程中的能量守恒方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S \quad (1)$$

式中, $\rho$  为密度,kg·m<sup>-3</sup>;C<sub>p</sub> 为比热容,J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>;T 为温度,K; $\lambda$  为导热系数,W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>;t 为时间,s;S 为炸药热源项。

药的温度均低于此。因此,可以认为快速热分解阶段主要是由于  $\delta$ -HMX 热分解加速,生成气体产物和放热增多,最终导致炸药发生点火。点火后燃烧阶段瞬间产生的大量气体产物使装置内部压力急剧增长,当超过约束结构的强度极限(兆帕级别)时,在其薄弱环节(如热电偶孔位)发生破坏响应。

传统烤燃模型的热源项采用阿伦尼乌斯定律形式,仅考虑炸药化学性质和温度对反应的影响:

$$S = \rho Q k \quad (2)$$

$$k = A e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} \quad (3)$$

式中,Q 为反应热,J·kg<sup>-1</sup>;k 为反应速率常数,s<sup>-1</sup>;A 为指前因子,s<sup>-1</sup>;E 为活化能,J·mol<sup>-1</sup>;R 为理想气体常数,值为 8.314 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>。

在传统烤燃模型的基础上<sup>[34]</sup>,考虑固态炸药和气态产物的相态差异、气态产物组成对体系压力增长的影响以及体系压力对炸药热分解反应速率影响,对热源项作出如下改进:

- 1) 将烤燃过程中炸药和气态产物视为两相;
- 2) 根据两相之间的物质输送获得体系中的压力增长;
- 3) 引入压力指数表征体系中压力对烤燃过程的影响。

具体方法如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{q=1}^2 \alpha_q = 1 \quad (5)$$

1) 使用计算流体力学软件 Fluent 内嵌的 VOF (Volume of Fluid) 多相流模型<sup>[37]</sup>处理烤燃过程中的相态变化,该模型采用体积分数控制单元中某一相的存在。对于模型中的固相炸药和气相产物:

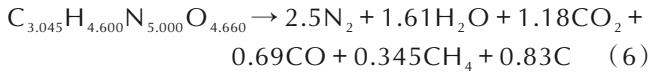
$\alpha_q = 0$ : 单元中不存在第 q 相;

$\alpha_q = 1$ : 单元中充满第 q 相;

$0 < \alpha_q < 1$ : 单元中第 q 相和其他相共存

式中, $\rho_q$  为 q 相密度,kg·m<sup>-3</sup>; $\alpha_q$  为 q 相的体积分数; $\vec{v}_q$  为 q 相流动速度,m·s<sup>-1</sup>。

2) JEO炸药的化学反应方程式为:



则体系中的压力增长为:

$$p = \frac{nRT}{V_g} \quad (7)$$

$$S_m = R \sum_{j=1}^5 \gamma_j MW_j \quad (8)$$

$$n = S_m / \sum_{j=1}^5 \frac{\gamma_j MW_j}{\sum_{j=1}^5 \gamma_j} \quad (9)$$

$$V_g = \alpha_g V \quad (10)$$

式中,  $p$  为体系中的压强, Pa;  $V_g$  为气体产物体积,  $m^3$ ;  $n$  为气体产物的物质的量;  $S_m$  为由反应引起的气体质量源项;  $R$  为反应速率;  $\gamma$  为化学反应计量数;  $MW$  为摩尔质量,  $kg \cdot mol^{-1}$ 。

3) 对于体系中压力对反应速率的影响, 引入压力指数  $\delta$  表征炸药热分解对压力的依赖性, 模拟压力对热分解过程的催化作用。化学反应速率常数采用改进阿伦尼乌斯定律形式, 基于化学反应式(6), 则改进后的反应热源项  $S$  为:

$$S = R(\gamma_{JEO} MW_{JEO} h_{JEO}) - R \sum_{j=1}^6 \gamma_j MW_j h_j \quad (11)$$

$$R = k \left( \frac{\rho_{JEO} \alpha_{JEO}}{MW_{JEO}} \right) \left( \frac{p}{p_0} \right)^\delta \quad (12)$$

$$k = A \left( \frac{T}{T_0} \right)^m e^{-\frac{E}{RT}} \quad (13)$$

式中,  $p_0$  为初始压强, Pa;  $h$  为生成热,  $J \cdot kg^{-1}$ ;  $m$  为温度指数。

### 3.2 仿真模型

考虑到烤燃装置结构的对称性, 建立简化的二维 1/2 计算模型, 其中壳体侧壁为加热边界, 装药中心为对称边界, 仿真模型如图 9 所示。在实验中装药的相同位置设置观测点。综合考虑计算精度和计算时间, 网格尺寸为 0.25 mm、时间步长为 0.5 s。装置中端盖、盖板、壳体和散热管的材料均为 45# 钢, 其材料参数如表 3 所示。

### 3.3 参数标定与模型验证

将上述炸药烤燃多相流物质输送模型以用户自定义函数的形式嵌入 CFD 软件 Fluent 中。根据实验得到的  $5 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升温速率下的温度和压力数据, 结合上述模型, 通过调整温度指数  $m$  和压力指数  $\delta$  (表征热分解过程对温度和压力的依赖性) 标定模型, 使得数值

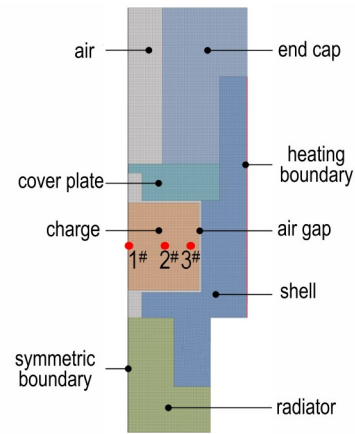


图 9 小型烤燃弹仿真计算模型

Fig.9 Numerical simulation model of the cook-off bomb

表 3 材料热物性参数<sup>[32]</sup>

Table 3 Thermophysical parameters of materials<sup>[32]</sup>

material	density / $g \cdot cm^{-3}$	thermal conductivity / $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	specific heat / $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
45# steel	7.85	49.8	486
air	$1.225 \times 10^{-3}$	0.0242	1006.43
JEO explosive	1.77	0.7562	1050

模拟获得的压力曲线  $f_i(m, \delta)$  与实验曲线  $X_i$  之间的均方误差最小, 即:

$$\text{Min} \left( \frac{1}{\varepsilon} \sum_{i=1}^{\varepsilon} (f_i(m, \delta) - X_i)^2 \right) \quad (14)$$

式中,  $\varepsilon$  为数据点数;  $0 \leq m \leq 2, 0 \leq \delta \leq 1.5$ 。

标定后的参数如表 4 所示, 标定结果如图 10a 所示, 使用该参数对  $2 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升温速率下的烤燃过程进行数值模拟, 得到的验证结果如图 10b 和表 5 所示。从图 10b 和表 5 可以看出, 仿真结果与实验结果的误差较小, 表明该模型和参数能够有效表征 JEO 炸药的烤燃热分解过程。

表 4 JEO 炸药化学反应动力学参数<sup>[32]</sup>

Table 4 Chemical reaction kinetic parameters of JEO explosive<sup>[32]</sup>

parameter	value	parameter	value
$A / s^{-1}$	$1.97 \times 10^{14}$	$\delta$	0.72
$E / J \cdot mol^{-1}$	117360	$T_0 / K$	298
$MW / g \cdot mol^{-1}$	185.7	$p_0 / kPa$	101.325
$m$	0.7		

Note:  $A$  is pre-exponential factor,  $E$  is activation energy,  $MW$  is molar mass,  $m$  is temperature index,  $\delta$  is pressure index,  $T_0$  is reference temperature,  $p_0$  is reference pressure.

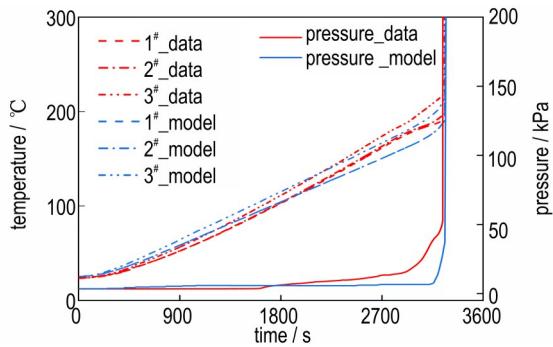
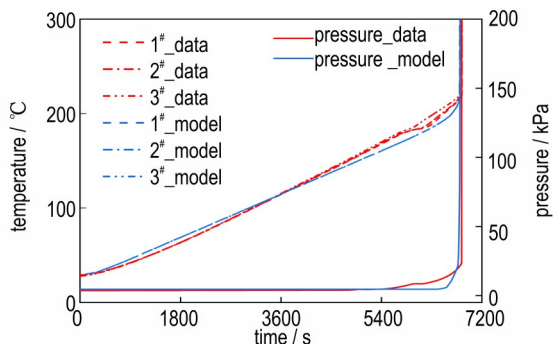
a.  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  (calibration)b.  $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  (verification)

图 10 不同升温速率下温度/压力-时间曲线

Fig.10 Temperature/pressure-time curves with different heating rates

表 5  $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升温速率下仿真和实验结果对比Table 5 Comparison of simulation and experimental results with heating rate of  $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 

$2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	simulation	experiment	error
	value	value	
ignition time / s	6821	6841	0.3%
$T_1 / ^{\circ}\text{C}$	217.6	219.5	0.9%
$T_2 / ^{\circ}\text{C}$	217.6	221.6	1.8%
$T_3 / ^{\circ}\text{C}$	217.6	221.9	1.9%
ignition pressure / kPa	937	928	1.0%

Note:  $T_1$  is ignition temperature of 1#,  $T_2$  is ignition temperature of 2#,  $T_3$  is ignition temperature of 3#.

### 3.4 仿真结果与分析

使用上述标定参数后的炸药烤燃多相流物质输送模型对不同升温速率下的JEO炸药烤燃热分解过程进行数值模拟,升温速率分别选取为 $0.2, 1, 2, 3, 4, 5, 25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  7种情况。

选取 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  2种典型升温速率进行分析。2种升温速率下JEO装药内不同位置的温度-时间曲线如图11所示。从图11可以看出,在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的快升温速率下,烤燃过程中装药内部形

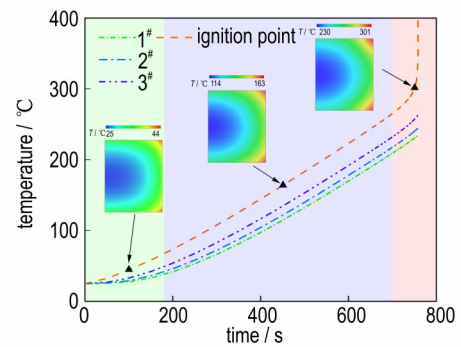
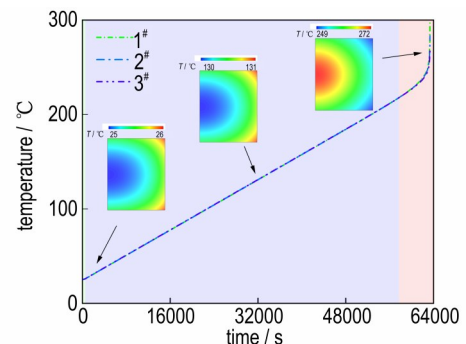
a.  $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ b.  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 

图 11 不同升温速率下炸药温度-时间曲线

Fig.11 Temperature-time curves of explosive with different heating rates

成了明显的温度梯度,位于装药边缘的点火点温度远高于所设3个观测点;在 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的慢升温速率下,烤燃全过程中各处炸药温差极小。

图12为不同升温速率下点火时刻JEO装药的温度分布云图。根据图12可知,升温速率为 $0.2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的范围内,点火位置均位于装药的中心区域;升温速率为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,点火位置离开圆柱装药的中心轴线,向外壁靠近;升温速率为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,点火位置移至装药外表面。数值模拟得到的升温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的点火情况与实验结果相符。不同升温速率下的点火点到装药中心点的距离如图13所示。从图13可以看出,升温速率在 $3\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,随着升温速率的增加,点火点到装药中心的径向和轴向距离均增大,点火位置由装药中心移至边缘。

不同升温速率下JEO炸药的点火时间如图14所示。数值模拟结果表明,升温速率对JEO炸药的点火时间有显著影响,升温速率越快,点火时间越短,与本研究的实验结果相一致。在 $0.2\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率范围内,升温速率的增加对点火时间缩短的影响



近似是线性的。例如,在 0.2, 1, 5, 25  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  的升温速率下,升温速率依次为前者的 5 倍,点火时间分别为前一升温速率的 20.8%, 24.6% 和 23.3%。

图 15 为在 25  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  和 0.2  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  的升温速

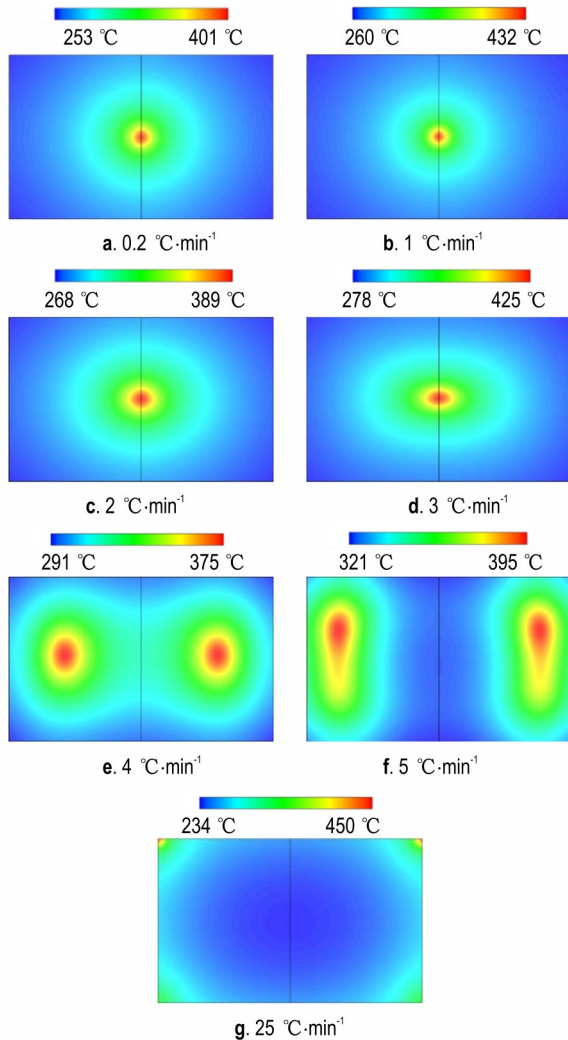


图 12 点火时刻装药温度云图

Fig.12 Temperature contour of charge at ignition time

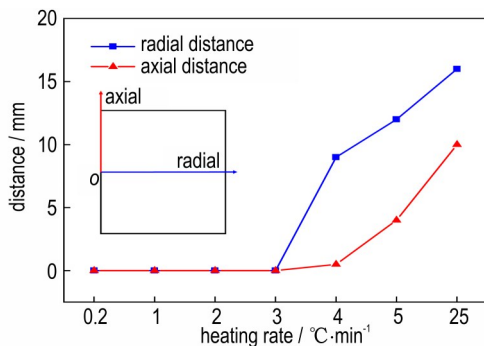


图 13 不同升温速率下点火点到装药中心点的距离

Fig.13 Distances from the ignition point to the center of the charge with different heating rates

率下,烤燃过程中不同位置固相/气相体积分数的变化曲线。由图 15 可知,在快速热分解阶段之前固相体积分数几乎不发生变化,表明 JEO 炸药在高温下具有良好的热稳定性。不同升温速率下, JEO 炸药的分解过程不同:在 25  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  的快升温速率下,装药边缘 3<sup>#</sup> 处的固相体积分数降低,气相体积分数升高,且固相和气相之间的交界面不断向装药中心扩展。这表明在该升温速率下, JEO 炸药的热分解过程首先由外表面开始,然后向中心扩展;在 0.2  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  的慢升温速率

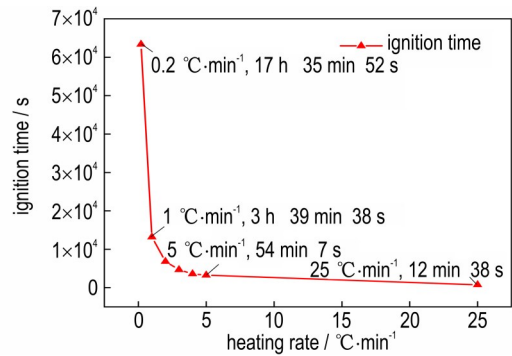


图 14 不同升温速率下 JEO 炸药点火时间

Fig.14 Ignition time of JEO explosive with different heating rates

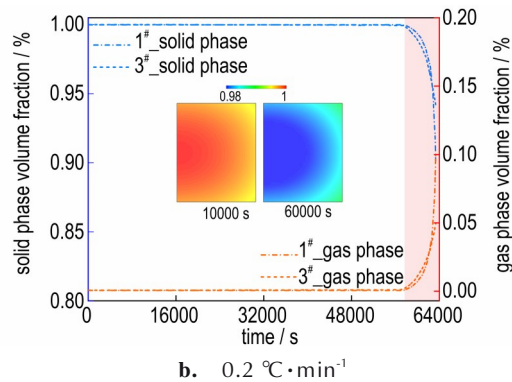
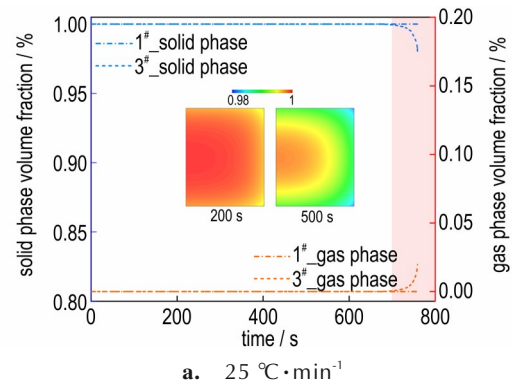


图 15 不同升温速率下固相/气相体积分数-时间曲线

Fig.15 Volume fractions of solid phase/gas phase-time curves with different heating rates

下,装药的外表面和中心同时发生热分解,且临近反应时刻装药中心的分解速率超过装药外壁。这2种升温速率下,相态体积分数的变化过程与装药中温度场的变化相一致。

在不同升温速率下,热分解阶段发生反应的炸药占比都较少,且 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率下发生反应的炸药占比多于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ,但最高只有10%左右。这表明炸药在不同升温速率下的点火前热分解过程中,只有少部分发生了反应,大部分炸药会在点火后的燃烧阶段发生反应。

## 4 结论

研究建立了炸药烤燃多点测温-测压联合实验测试系统,采用考虑压力对炸药热分解反应影响的炸药烤燃多相流物质输送模型,通过实验和数值仿真相结合的方法,研究了升温速率对新型不敏感炸药JEO烤燃响应特性的影响。主要结论如下:

(1)JEO炸药烤燃热分解过程可分为3个阶段:整体升温阶段、相变阶段和快速热分解阶段。其中,相变是JEO炸药热分解反应进程的关键分界点。在相变前,JEO炸药热分解反应较为缓慢,炸药温度近似呈线性增长,内部压力缓慢增长;相变时炸药升温变缓;相变完成后,炸药热分解反应加快,炸药升温加快、内部压力呈指数增长,直至发生点火。JEO炸药点火时的温度约为 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,具有良好的热安全性。

(2)升温速率是影响JEO炸药烤燃热分解过程和点火响应特性的重要因素。随着升温速率的降低,炸药内部温度场趋于均匀,炸药由表面热分解变为整体热分解,JEO炸药的点火时间明显延长,点火位置由炸药外壁移向炸药中心,点火前内部压力增长更为迅速,炸药的反应剧烈程度相应增强。

(3)不同升温速率下,JEO炸药的固相体积分数减少都很少,表明在点火前的热分解过程中只有少部分炸药发生了反应,大部分炸药在点火后的燃烧阶段发生反应。

### 参考文献:

[1] 黄辉,黄亨建,王杰,等.安全弹药的发展思路与技术途径[J].含能材料,2023,31(10):1079-1087.  
HUANG Hui, HUANG Heng-jian, WANG Jie, et al. Development ideas and technical approaches for safety ammunition[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(10): 1079-1087.

[2] 刘静,余永刚.不同升温速率下模块装药慢速烤燃特性的数值

模拟[J].兵工学报,2019,40(5):990-995.

LIU Jing, YU Yong-gang. Simulation of slow cook-off for modular charges at different heating rates[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(5): 990-995.

[3] 郭伟,贾路川,王浩旭,等.加速老化PBX-6炸药的烤燃实验研究[J].火炸药学报,2022,45(3):315-322.

GUO Wei, JIA Lu-chuan, WANG Hao-xu, et al. Experimental research on cook-off test of accelerated aging PBX-6 explosive[J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2022, 45(3): 315-322.

[4] 肖游,智小琦,王琦.基于FDS与CFD组合的快速烤燃数值模拟[J].火炸药学报,2022,45(4):536-543.

XIAO You, ZHI Xiao-qi, WANG Qi. Numerical simulation of fast cook-off based on the combination of FDS and CFD[J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2022, 45(4): 536-543.

[5] 肖有才,王瑞胜,范晨阳,等.带壳JH-14C传爆药烤燃实验及响应特性数值模拟[J].爆炸与冲击,2023,43(7):40-51.

XIAO You-cai, WANG Rui-sheng, FAN Chen-yang, et al. Cook-off experiment on the JH-14C booster explosive with a shell and the relevant numerical simulation[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(7): 40-51.

[6] 刘子德,智小琦,王帅,等.几何尺寸对DNAN基熔铸炸药慢烤响应特性的影响[J].火炸药学报,2019,42(1):63-68.

LIU Zi-de, ZHI Xiao-qi, WANG Shuai, et al. Effect of geometric dimensions on slow cook-off response characteristics of DNAN-based melt-casting explosive[J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2019, 42(1): 63-68.

[7] 戴湘晖,段建,沈子楷,等.侵彻弹体慢速烤燃响应特性实验研究[J].兵工学报,2020,41(2):291-297.

DAI Xiang-hui, DUAN Jian, SHEN Zi-kai, et al. Experiment of slow cook-off response characteristics of penetrator[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(2): 291-297.

[8] 张海军,聂建新,王领,等.端羟基聚醚推进剂慢速烤燃尺寸效应[J].兵工学报,2021,42(9):1858-1866.

ZHANG Hai-jun, NIE Jian-xin, WANG Ling, et al. Numerical simulation on size effect of hydroxyl terminated polyether propellant engine during slow cook-off[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(9): 1858-1866.

[9] 沈飞,王胜强,王辉.HMX基含铝炸药装药慢烤缓释结构设计及验证[J].含能材料,2019,27(10):861-866.

SHEN Fei, WANG Sheng-qiang, WANG Hui, et al. Slow release structure design and verification of HMX-based aluminumized explosive charge under slow cook-off condition[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(10): 861-866.

[10] 董泽霖,屈可朋,胡雪焱,等.约束方式和强度对HMX基压装含铝炸药慢烤响应特性的影响[J].火炸药学报,2023,46(10):897-904.

DONG Ze-lin, QU Ke-peng, HU Xue-yao, et al. Effects of restraint mode and strength on slow cook-off response characteristics of HMX-based pressed aluminumized explosive[J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2023, 46(10): 897-904.

[11] 胡平超,李涛,刘仓理,等.初始自由空腔体积对PBX-3炸药慢烤反应烈度的影响[J].含能材料,2023,31(10):1035-1040.

HU Ping-chao, LI Tao, LIU Cang-li, et al. Influence of initial free cavity volume on the reaction violence of PBX-3 in slow cook-off[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng*

- Cailiao), 2023, 31(10): 1035-1040.
- [12] 潘玥, 李定华, 杨荣杰, 等. 烤燃环境下引信及其包装材料的热防护涂层性能[J]. 兵工学报, 2021, 42(6): 1169-1177.  
PAN Yue, LI Ding-hua, YANG Rong-jie, et al. Performance of thermal protection coating of fuze and its packaging materials in cook-off test[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(6): 1169-1177.
- [13] 白孟璟, 段卓平, 白志玲, 等. 内/外隔热复合结构炸药装药快速烤燃热防护效应[J]. 兵工学报, 2023: 1-8. [2023-11-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20230529.1939.002.html>.  
BAI Meng-jing, DUAN Zhuo-ping, BAI Zhi-ling, et al. Fast cook-off thermal protection effect of inner and outer heat-insulating composite structure of explosive charge[J]. *Acta Armamentarii*, 2023: 1-8. [2023-11-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20230529.1939.002.html>.
- [14] 邓海, 赵小锋, 任新联, 等. 不同约束条件下硝酸酯类PBX炸药慢烤响应特性[J]. 火炸药学报, 2021, 44(5): 652-657.  
DENG Hai, ZHAO Xiao-feng, REN Xin-lian, et al. Slow cook-off response characteristics of nitrate explosive PBX charge under different constraint conditions[J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2021, 44(5): 652-657.
- [15] LI X, WANG J, LIU W, et al. Effect of vent hole size on combustion and explosion characteristics during cook-off tests[J/OL]. *Combustion and Flame*, 2022, 240: 111989. [2023-11-22]. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.111989>.
- [16] 张克斌, 李文彬, 郑宇, 等. 快速烤燃条件下B炸药战斗部的临界泄压面积[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(5): 36-45.  
ZHANG Ke-bin, LI Wen-bin, ZHENG Yu, et al. Critical vent area of a comp-B warhead under fast cook-off[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(5): 36-45.
- [17] LIANG J, NIE J, LIU R, et al. Study and design of the mitigation structure of a shell PBX charge under thermal simulation[J]. *Crystals*, 2023, 13(6): 914.
- [18] HENSON B F, SMILOWITZ L B. The chemical kinetics of solid thermal explosions[M/OL]//ASAY B W. Shock Wave Science and Technology Reference Library, Vol. 5: Non-Shock Initiation of Explosives. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 45-128[2023-11-22].
- [19] 胡海波, 傅华, 李涛, 等. 压装密实炸药装药非冲击点火反应传播与烈度演化实验研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(1): 4-17.  
HU Hai-bo, FU Hua, LI Tao, et al. Progress in experimental studies on the evolution behaviors of no-shock initiation reaction in low porosity pressed explosive with confinement[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(1): 4-17.
- [20] HOBBS M L, KANESHIGE M J, ERIKSON W W, et al. Cook-off modeling of a melt cast explosive (Comp-B)[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 215: 36-50.
- [21] KOU Y, CHEN L, LU J, et al. Assessing the thermal safety of solid propellant charges based on slow cook-off tests and numerical simulations[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 228: 154-162.
- [22] TERRONES G, SOUTO F J, BURKETT M W, et al. The effect of cook-off on the bulk permeability of a plastic bonded explosive[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2006, 31(5): 333-342.
- [23] TAPPAN B C, BOWDEN P R, LICHTHARDT J P, et al. Evaluation of the detonation performance of insensitive explosive formulations based on 3,3'-diamino-4,4'-azoxyfurazan (DAAF) and 3-nitro-1,2,4-triazol-5-one (NTO)[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2018, 36(2): 169-178.
- [24] LI H, LI Y, BAI L, et al. Acceleration of  $\delta$ - to  $\beta$ -HMX-D8 phase retransformation with  $D_2O$  and intergranular strain evolution in a HMX-based polymer-bonded explosive[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123(12): 6958-6964.
- [25] 部婵, 孙晓宇, 梁文韬, 等. RDX、HMX及CL-20晶体的高温高压相变研究进展[J]. 含能材料, 2020, 28(9): 902-914.  
GAO Chan, SUN Xiao-yu, LIANG Wen-tao, et al. Review on phase transition of RDX, HMX and CL-20 crystals under high temperature and high pressure[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(9): 902-914.
- [26] 胡惟佳, 吴艳青, 黄风雷. 烤燃作用下的HMX单晶各向异性力学响应及相变[J]. 含能材料, 2018, 26(1): 86-93.  
WU Wei-jia, WU Yan-qing, HUANG Feng-lei. Anisotropic mechanical response and phase transition of cooked HMX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(1): 86-93.
- [27] 随志磊, 胡秋实, 尚海林, 等. HMX晶体高温相变及裂纹对点火的影响[J]. 高压物理学报, 2022, 36(3): 32-39.  
SUI Zhi-lei, HU Qiu-shi, SHANG Hai-lin, et al. Influence of high temperature phase transformation and cracks on ignition of HMX crystals[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(3): 32-39.
- [28] 胡平超, 李涛, 刘仓理, 等. 初始空腔体积率对约束HMX基PBX-3炸药慢烤相变的影响[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(6): 54-61.  
HU Pin-chao, LI Tao, LIU Cang-li, et al. Effect of initial void ratio on phase transition of confined HMX-based PBX-3 in slow cook-off test[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(6): 54-61.
- [29] KOU X, JIN S, CHEN Y. Thermal decomposition and kinetics of cast plastic bonded explosives based on NTO and HMX[C/OL]//Journal of Physics: Conference Series: Vol. 2095. 2021: 012096. [2023-11-22]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2095/1/012096>.
- [30] DU L X S, JIN S H, SHU Q H, et al. The investigation of NTO/HMX-based plastic-bonded explosives and its safety performance[J]. *Defence Technology*, 2022, 18(1): 72-80.
- [31] 吴浩, 段卓平, 白孟璟, 等. DNAN基含铝炸药烤燃实验与数值模拟[J]. 含能材料, 2021, 29(5): 414-421.  
WU Hao, DUAN Zhuo-ping, BAI Meng-jing, et al. Small-scale cook-off experiments and simulations of DNAN-based aluminized explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(5): 414-421.
- [32] 王俊峰. 密闭空间内TKX-50、NTO及其混合炸药的热分解和慢烤燃性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2019.  
WANG Jun-feng. The thermal decomposition and slow cook-off of TKX-50, NTO and their composite explosive in confined space[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2019.
- [33] 李广武, 赵继伟, 杜春兰, 等. 常规导弹弹药安全性考核与技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2015.  
LI Guang-wu, ZHAO Ji-wei, DU Chun-lan, et al. Safety assessment and technology of conventional missile ammunition [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2015.

- [34] 陈朗, 马欣. 炸药热安全性理论与分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.  
CHEN Lang, MA Xin. Theory and analysis method of explosive about thermal safety[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [35] 王凯, 王俊林, 徐东, 等. 3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮自催化分解反应特性与热安全性研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(9): 1727-1732.  
WANG Kai, WANG Jun-lin, XU Dong, et al. Research on autocatalytic thermal decomposition properties and thermal safety of NTO[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(9): 1727-1732.
- [36] 王新宇, 姜春兰, 王在成, 等. 烤燃条件下JEO聚能装药战斗部泄压结构研究[J]. 兵工学报, 2024, 45(1): 1-14.  
WANG Xin-yu, JIANG Chun-lan, WANG Zai-cheng, et al. Research on the pressure relief structure of JEO shaped charge warhead under cook off [J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(1): 1-14.
- [37] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
WANG Fu-jun. Computational fluid dynamics analysis—principle and application of CFD software [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

## Effect of Heating Rates on the Cook-off Response Characteristics of JEO Explosive

ZHANG Ye, WANG Xin-yu, XU Wen-yu, WANG Zai-cheng, JIANG Chun-lan

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To investigate the cook-off response characteristics of JEO explosive (NTO/HMX/additives), an experimental system for multi-point temperature and pressure measurements during the cook-off process of explosive was devised. The cook-off experiments of JEO explosive were conducted at two different heating rates of  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  and  $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  to obtain the ignition time, ignition temperature, temperature history at different positions within the explosive, and pressure evolution inside the device. The effect of heating rates on temperature and pressure variations and reaction intensity during the cook-off process of JEO explosive was analyzed. Furthermore, based on the experimental research, a multiphase flow species transport model for explosive cook-off was adopted considering the influence of pressures on the thermal decomposition reaction of explosive, and numerical simulations were conducted to investigate the thermal decomposition process of JEO explosive under different heating rates using Fluent software. The results indicate that the thermal decomposition reaction of JEO explosive proceeds slowly before phase transition, while it accelerates significantly afterwards, leading to a rapid increase in temperature and an exponential growth in pressure until ignition. The ignition temperature of JEO explosive is approximately  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and its response level is deflagration under the constraint conditions of this experiment, demonstrating excellent thermal safety. As the heating rate decreases, the ignition time of JEO explosive prolongs, and the ignition location shifts from the edge of the charge towards the center, resulting in an increased intensity of the reaction. During the thermal decomposition process before ignition, only a small portion of the explosive undergoes reaction, with the majority of the reaction occurring during the combustion stage after ignition.

**Key words:** JEO explosive; cook-off experiment; thermal response characteristic; numerical simulation

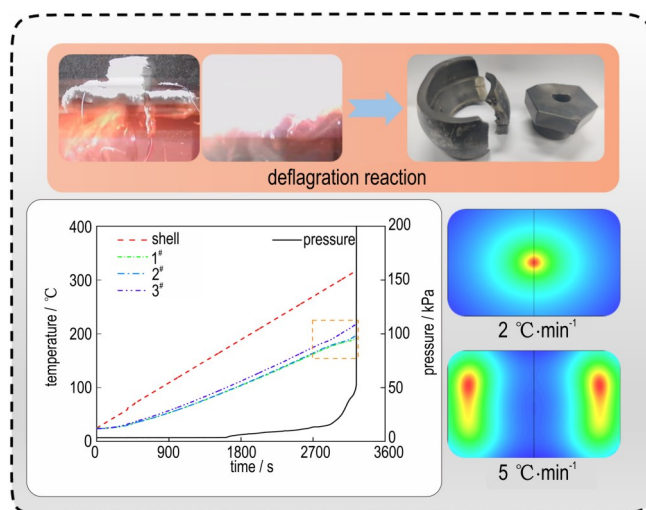
**CLC number:** TJ55;O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024010

(责编:姜梅)

图文摘要:



This paper designed an experimental system for multi-point temperature and pressure measurements during the cook-off process of explosive. The ignition time, ignition temperature, temperature history at different positions within JEO explosive (NTO/HMX/additives), and pressure evolution inside the device were obtained. The effect of heating rates on temperature and pressure variations and reaction intensity during the cook-off process of JEO explosive was analyzed. Based on the experimental study, a multiphase flow species transport model for explosive cook-off was adopted considering the influence of pressures on the thermal decomposition reaction of explosive. Numerical simulations were conducted to investigate the thermal decomposition process of JEO explosive under different heating rates.