

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0555

## 带壳 JH-14C 传爆药烤燃实验及响应特性数值模拟\*

肖有才<sup>1</sup>, 王瑞胜<sup>1</sup>, 范晨阳<sup>2</sup>, 张 宏<sup>3</sup>, 王志军<sup>1</sup>, 孙 毅<sup>4</sup>

- (1. 中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051;
2. 西安机电信息技术研究所, 陕西 西安 710065;
3. 中国船舶重工集团公司第七一三研究所, 河南 郑州 450015;
4. 哈尔滨工业大学航天学院航天科学与力学系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为了探究受外部不同温度影响下带壳 JH-14C 传爆药的响应特性, 设计了一套慢速烤燃下可测量 JH-14C 传爆药温度变化和壳体应变的实验装置, 获取了不同升温速率下弹体内部温度随时间变化曲线、慢烤响应过程中装药壳体径向应变历程曲线, 揭示了带壳 JH-14C 传爆药的慢速烤燃响应特性, 将烤燃实验中弹体径向应变测试结果和炸药反应烈度相关联, 提出了一种弹药烤燃实验反应等级的判定方法; 基于热力学和装药化学反应, 建立了带壳装药烤燃热传导模型和 Arrhenius 模型, 采用 BP 神经网络反演了 JH-14C 传爆药的热反应参数, 对不同升温速率下弹体内部的温度场进行了研究。结果表明: 升温速率越低, 装药的响应温度越高, 响应越剧烈; 随着升温速率的降低, 炸药的点火区域从炸药两端外缘逐渐向炸药内部转移。

**关键词:** JH-14C 传爆药; 烤燃实验; 烤燃响应; 升温速率; 热反应参数; BP 神经网络

**中图分类号:** O381 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

## Cook-off experiment on the JH-14C booster explosive with a shell and the relevant numerical simulation

XIAO Youcai<sup>1</sup>, WANG Ruisheng<sup>1</sup>, FAN Chenyang<sup>2</sup>, ZHANG Hong<sup>3</sup>, WANG Zhijun<sup>1</sup>, SUN Yi<sup>4</sup>

- (1. College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;
2. Xi'an Institute of Electromechanical Information Technology, Xi'an 710065, Shaanxi, China;
3. The 713th Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Zhengzhou 450015, Henan, China;
4. Department of Astronautic Science and Mechanics, School of Astronautics Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

**Abstract:** In order to explore the cook-off response characteristics of the JH-14C booster explosive with a shell under different external temperatures, a set of experimental devices was designed for measuring the cook-off response temperatures at multiple points of the JH-14C booster explosive and for monitoring the deformation of the shell. The explosive temperatures were measured from its edge to its center. The strain-time curves of the shell were recorded by a dynamic strain indicator and a high-temperature strain gauge. The cook-off experiments with the heating rates of 1.0 °C/min and 3.3 °C/h were conducted. The temperature was raised at different points of the explosive and the strains at different points of the shell were obtained. The intensity of the shock wave in the process of the slow cook-off experiment is calculated by using the thin-walled cylinder principle, and the violence of the reaction of the JH-14C booster explosive with a shell is quantitatively characterized by using the intensity of blast loading. The response characteristics of the JH-14C booster explosive with a shell in the slow cook-off experiment is revealed. Though the relationship between the shell strain results and the reaction intensities, a method is

\* 收稿日期: 2022-12-12; 修回日期: 2023-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(11802273); 山西省青年科学基金(201901D211279)

第一作者: 肖有才(1988—), 男, 博士, 副教授, xiaoyoucai@nuc.edu.cn

proposed to describe the reaction level of the JH-14C booster explosive with a shell. Based on the thermodynamics and the chemical reaction of the explosive, the heat conduction model is established. The decomposition reaction of the explosive is described by the Arrhenius equation. A back propagation (BP) neural network is used to invert the heat reaction parameters of the JH-14C booster explosive. Comparison between the experimental and simulated results shows that the presented model can be used to obtain the cook-off response characteristics of the explosive obtained by simulation with high precision. The internal temperature field response of the projectile body is also studied under different heating rates. The results exhibit that the lower the heating rate, the higher the response temperature of the charge and the more intense the reaction. With the decrease of the heating rate, the ignition area of the explosive gradually shifts from the outer edges of both ends to the inside of the explosive.

**Keywords:** JH-14C booster explosive; cook-off experiment; cook-off response; heating rate; heat reaction parameter; BP neural network

装药在存储、运输和使用过程中可能遇到各种意外刺激,包括燃油火灾、高温炙烤、电火花及强光照射等。这些热刺激能量通过外部结构传递给内部炸药,引起炸药发生升温、相变、熔化及热分解等物理化学变化,甚至引发点火和爆炸<sup>[1-2]</sup>。炸药的化学反应具有放热性,在分解反应过程中不断释放热量,同时还与周围环境发生热量传递。由于热产生速率与温度关系是非线性的,热损失率与温度关系是近似线性的,两者随温度的变化关系不一致,一旦系统的热产生速率高于热损失速率,系统就会因热积累而升高温度,使反应加速,产生更多的热量;系统温度因此不断升高,如此循环,最终会导致燃烧和爆炸。由于热刺激下装药点火过程的复杂性,目前对其点火机制的认识仍不足<sup>[3-4]</sup>。

学者们设计了多种慢烤实验装置,如:一维热爆炸<sup>[5]</sup>、径向烤燃<sup>[6]</sup>、环形烤燃<sup>[7]</sup>及强约束慢烤<sup>[8]</sup>等。Pakulak 等<sup>[9]</sup>开展了弹药小型烤燃实验,基于见证板的变形情况来评估烤燃实验反应的剧烈程度。Hobbs 等<sup>[10]</sup>设计了一套烤燃实验装置,测量了壳体内部装药温度的变化、装药内部燃烧压力的变化和不同升温速率下的点火时间。Kou 等<sup>[11]</sup>也设计了类似的烤燃实验装置,测量了烤燃实验中装药燃烧的压力。Li 等<sup>[12]</sup>研究了带壳装药烤燃实验中壳体端面开孔直径对烤燃响应的影响。智小琦等<sup>[13]</sup>研究了约束条件对 RDX 烤燃响应特性的影响,发现增大壳体厚度可以提高钝化 RDX 炸药的热安定性。White 等<sup>[14]</sup>在烤燃炉和烤燃弹试样壳体上安装了观测窗,观察烤燃过程中装药的反应过程,发现烤燃过程中装药经历了相变、熔化、产生气体等中间物和燃烧;并采用该实验装置,研究了约束条件、升温速率、装药质量对烤燃响应的影响。Cheese 等<sup>[15]</sup>设计烤燃试样,通过高速相机观测到含能材料慢烤实验过程中的反应变化过程。乔炳旭等<sup>[16]</sup>研究了黏结剂种类对 HMX 基 PBX 烤燃响应特性的影响,通过壳体撕裂情况进行了烤燃反应等级的分析和判定。传统烤燃实验装置大多针对具体弹药,主要研究升温速度、装药壳体约束强度对烤燃响应特性影响。

近年来,学者们建立了大量热、力学、化学耦合的多物理场慢烤模型。Traver 等<sup>[17]</sup>模拟了以 HMX 或 TATB 为基的 PBX 炸药一维热爆炸实验(one-dimensional time to explosion, ODTX),发现壳体约束对炸药的点火行为具有明显影响。Chaves 等<sup>[18]</sup>考虑黏结剂组分建立了 PBX 炸药烤燃反应模型,评估了连续添加黏结剂(HTPB、DOS 和 IPDI)对 PBX 慢速烤燃结果的影响,发现添加黏结剂导致计算的点火时间缩短、点火温度降低。Jorenby<sup>[19]</sup>利用 Jaeger 模型<sup>[20]</sup>、McGuire-Tarver 模型<sup>[17]</sup>及 Dickson 模型<sup>[21]</sup>对 PBX9501 炸药的热分解反应进行模拟,比较了不同模型预测的点火位置,发现 Dickson 模型预测的点火位置在模型中心,Jaeger 模型和 McGuire-Tarver 模型预测的点火位置都偏上。刘瑞峰等<sup>[22]</sup>基于化学反应动力学模型建立了 DNAN 宏-细观熔化-化学反应动力学模型,对点火区域进行了宏、细观计算分析。陈朗等<sup>[23]</sup>考虑烤燃中的热对流和炸药熔化建立了热反应计算模型,利用实验结果标定了模型参数,对 HMX 基混合炸药烤燃进行了数值模拟。Graswald 等<sup>[24]</sup>利用热传导和化学反应方程对密闭容器内装有各种高爆炸药的慢速烤燃进行数值模拟,通过不同加热速率下差示扫描量热法获取模型参数。这些模型尽管使用方便,但模型参数误差较大,通常带有经验成分。因此,炸药热反应参数还需要进一步改进和完善。

烤燃实验的目的是为了评估不敏感弹药在邻近弹药库或其他弹药储存载体起火环境下的反应程度和反应时间。北约国际标准 AOP-39 中将各种外部刺激下弹药的反应等级定义为无反应、燃烧、爆燃、爆炸、部分爆轰、爆轰<sup>[25]</sup>, 根据该标准, 弹药在验证安全性实验中未发生比爆炸更剧烈的反应, 则弹药需通过烤燃实验进行考核。目前, 弹药烤燃实验的反应等级通过见证板的凹痕、样机破片、含能材料消耗等定性描述来综合判断, 忽略了烤燃过程中反应等级的定量判定, 导致弹药烤燃实验考核结果的准确度大大降低。由于弹药烤燃过程中不同反应程度所对应的冲击波强度不同, 将动态应变仪测试系统结合高温应变片加入烤燃实验中, 可获取烤燃反应过程中壳体的变形程度, 从而可利用薄壁筒原理计算装药烤燃反应过程中的冲击波强度, 以此对烤燃反应程度进行定量表征。

本文中, 采用弹药烤燃实验装置, 通过高温应变片测试弹药烤燃响应时装药壳体的变形程度, 将弹体径向应变测试结果和反应烈度相关联, 构建一种弹药烤燃响应等级定量判定方法; 采用 BP (back propagation) 神经网络反演 JH-14C 传爆药的活化能和指前因子, 通过实验与仿真结果的对比, 验证 Arrhenius 模型参数的正确性, 分析升温速率对 JH-14C 传爆药烤燃响应的影响。

## 1 实验

### 1.1 装置与试件

图 1 为弹药烤燃实验测试系统示意图, 该测试系统由温度测试系统和超高速动态应变测试系统两部分组成。将带壳装药放置在烤燃炉中, 炉壁通电加热, MR-13 温度控制仪连接烤燃弹外壁固定的镍铬/镍硅热电偶, 将外壁温度反馈给温控仪, 温控仪再通过控制输出的电功率来调节烤燃炉的升温速率。采用使用温度范围为  $-269 \sim 250$  °C 的高温应变片 (BAB120-3AA250(11)-G500), 测试弹药烤燃响应过程中壳体的变形程度, 该应变片自带温度补偿。将高温应变片连接 1/4 桥盒, 桥盒连接动态应变仪。图 2(a) 为带壳 JH-14C 传爆药的实物图, 在弹体内部设置 6 个测点, 嵌入 6 支 K 类铠装微型热电偶, 开孔处采用耐高温双组份 AB 灌封软胶完全密封, 防止漏气, 并与 FLUKE-1586A 多通道测温仪相接, 得到烤燃过程中各个测点的温度-时间数据。

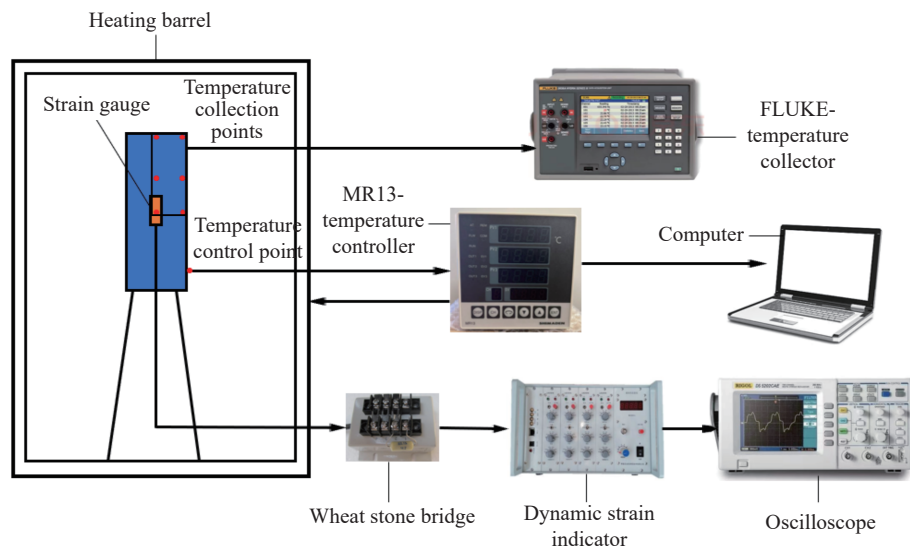


图 1 烤燃实验系统

Fig. 1 Cook-off experimental system

图 2(b) 为烤燃弹体尺寸及温度传感器测点位置示意图, 壳体材料为 35CrMnSi 高强度钢, 其屈服强度大于 1 500 MPa, 烤燃弹体壳体直径 60 mm、长 210 mm、壁厚 5 mm, 端盖与壳体采用螺纹连接, JH-14C 传爆药试样直径 50 mm、长 200 mm。如图 2(b) 所示, 点 1、2、3 为药柱与壳体侧壁接触面的测

点,点 4、5、6 为药柱中轴线上的测点,药柱中心开孔直径为 1 mm,采用钻头慢速旋转开孔,自上而下测点间距为 50 mm。

JH-14C 传爆药试样密度约为 1.70 g/cm<sup>3</sup>,该传爆药中 RDX 的质量分数为 96.5%,黏结剂的质量分数为 3%,石墨的质量分数为 0.5%。图 3 为 JH-14C 传爆药的微观形貌,可见,传爆药内部含能颗粒端面清晰,不规则散布于聚合物黏结剂中,直径主要在 50~200 μm。

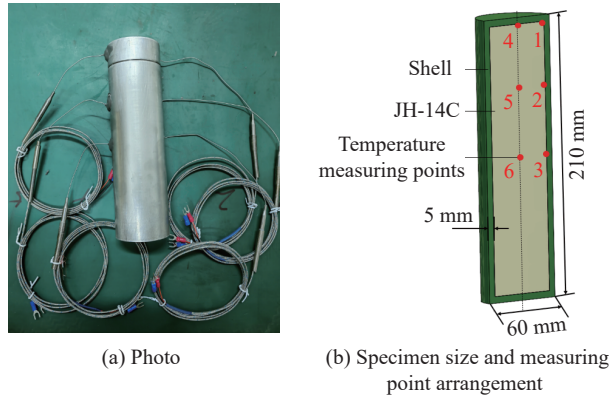


图 2 烤燃弹实物图、烤燃弹尺寸及温度测点布置

Fig. 2 A photo of the cook-off bomb specimen as well as its sizes and the measuring point arrangement

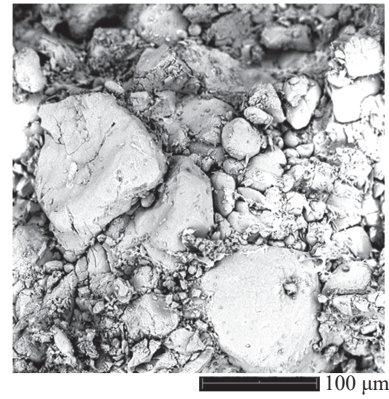


图 3 JH-14C 传爆药微观形貌图

Fig. 3 Meso-morphology of the JH-14C booster explosive

## 1.2 实验结果

表 1 为 3.3 °C/h 和 1.0 °C/min 等 2 种升温速率下发生烤燃响应时采集到的温度。图 4 为不同升温速率下烤燃过程中各测点的完整温度历程曲线。

表 1 响应时刻不同测点的温度

Table 1 Temperatures of different measuring points at response times

升温速率	响应温度/°C						
	外壁	测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	测点6
1.0 °C/min	230	241	234	234	243	227	226
3.3 °C/h	212	215	217	218	221	240	264

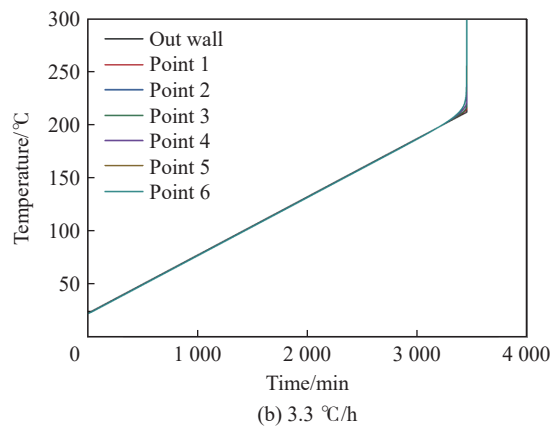
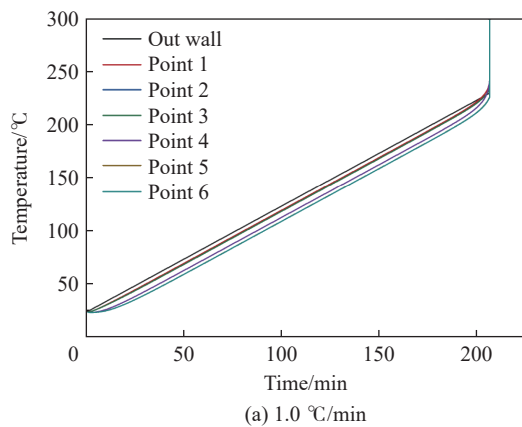


图 4 带壳 JH-14C 传爆药在 1.0 °C/min 和 3.3 °C/h 升温速率下各测点的温度历程曲线

Fig. 4 The temperature history curves at different measuring points in the JH-14C booster explosive with a shell under the heating rates of 1.0 °C/min and 3.3 °C/h

由图 4 可知,在恒定升温速率下,带壳 JH-14C 传爆药各测点处的温度随着外壁温度的升高而缓慢升高。结合表 1 可知,1.0 °C/min 升温速率下的响应位置为测点 1,响应温度为 241 °C,响应时间为 207.0 min;3.3 °C/h 的升温速率下,各测点位置处的温度十分接近,当外壁温度升至 212 °C 时,带壳装药发生响应,响应位置为测点 6,响应温度为 264 °C,响应时间为 3442.3 min。图 5 为 3.3 °C/h 升温速率下烤燃结束后回收的实验弹体,主要失效形式为烤燃实验弹 2 个端面冲开。图 6 为 1.0 °C/min 和 3.3 °C/h 升温速率下壳体外壁径向应变历程曲线,该曲线主要反映烤燃过程中带壳 JH14C 传爆药发生剧烈反应时刻壳体的变形量。



图 5 3.3 °C/h 升温速率下烤燃结束后回收的实验弹体

Fig. 5 The recovered bomb that has undergone cook-off under the heating rate of 3.3 °C/h

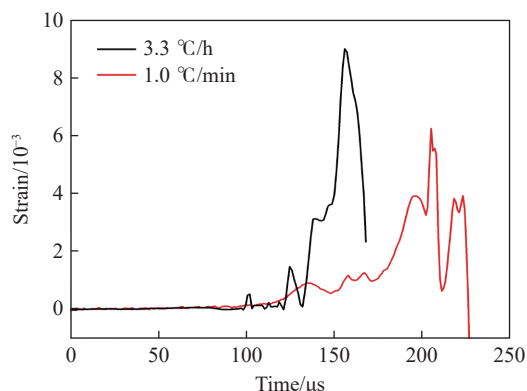


图 6 1.0 °C/min 和 3.3 °C/h 升温速率下烤燃弹体径向应变历程曲线

Fig. 6 Radial strain history curves of cook-off bombs under the heating rates of 1.0 °C/min and 3.3 °C/h

### 1.3 实验结果分析

通过慢烤燃实验中 3.3 °C/h 升温速率下温度传感器和应变片记录数据,对 3.3 °C/h 升温速率下 JH-14C 传爆药反应机理进行分析:弹体在烤燃过程中,当弹体内部测点 6 温度达到约 190 °C 之前,高温应变片电压信号未发生波动,即弹药壳体未发生变形;当测点 6 温度达到约 190 °C 时,高温应变片产生电压信号,多次实验结果一致,证明 190 °C 左右 JH-14C 传爆药炸药发生分解反应,炸药中可能产生微裂纹或相变,壳体产生了膨胀,即弹药壳体发生微小变形,应变在  $10^{-4}$  量级;随着温度升高,烤燃弹体内部将形成烤燃点火区域,烤燃点火区域的炸药品粒将发生化学反应,随着 JH-14C 传爆药化学反应越来越剧烈,当达到某一温度临界值时,壳体内部气压超过承受极限时,平衡被打破,壳体产生剧烈变形,听到爆炸声。在 1.0 °C/min 和 3.3 °C/h 升温速率下,壳体变形持续时间分别约 50 和 100  $\mu\text{s}$ 。因此,可将点火过程大致分为 3 个阶段:(1) 初始热分解阶段,主要是 RDX 初始吸热的分解过程,时间尺度在小时量级;(2) 分解放热反应阶段,包括自持加热和热失稳;(3) 点火阶段,形成点火区域并发生剧烈反应。

由壳体外壁应变片记录的径向脉冲波形,可算得壳体外壁环向应变  $\varepsilon_r$ 。利用厚壁筒理论<sup>[26]</sup>,可求得壳体内壁的压力:

$$p_r = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2r_1^2} E \varepsilon_r \quad (1)$$

式中: $p_r$  为壳体内壁的压力; $r_1$  和  $r_2$  分别为套筒的内外半径; $E$  为壳体的弹性模量, $E=206$  GPa。

由图 6 可知,在 1 °C/min 和 3.3 °C/h 升温速率下,壳体的最大应变分别为  $6 \times 10^{-3}$  和  $9 \times 10^{-3}$ 。由式 (1) 可得,在 1.0 °C/min 和 3.3 °C/h 升温速率下,壳体的最高压力分别为 277.2 和 415.8 MPa。这表明,在烤燃过程中升温速率越低,带壳装药烤燃反应越剧烈,且壳体受到的冲击波压力越高。带壳 JH-14C 传爆药发生爆轰时,作用于壳体的径向冲击波压力约 26 GPa<sup>[27]</sup>,但本实验测得的壳体径向冲击波压力远低于 26 GPa,显然本烤燃实验中 JH-14C 传爆药未发生爆轰响应,仅发生了燃烧响应。

## 2 模拟结果与讨论

### 2.1 计算模型

基于热传导模型及炸药化学反应方程,建立弹药烤燃计算模型<sup>[17]</sup>:

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \lambda \nabla^2 T + S \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为物质密度,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $c$ 为比热容,  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $T$ 为温度,  $\text{K}$ ;  $t$ 为时间,  $\text{s}$ ;  $\lambda$ 为导热系数,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $S$ 为炸药自热反应放热源项。 $S$ 用 Arrhenius 方程表述<sup>[18-19]</sup>:

$$S = \rho Q Z \exp[-E_a/(RT)] \quad (3)$$

式中: $Q$ 为反应热,  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $Z$ 为指前因子,  $\text{s}^{-1}$ ;  $E_a$ 为活化能,  $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;  $R$ 为普适气体常数,  $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

采用 Fluent 软件对带壳 JH-14C 传爆药烤燃过程进行数值模拟,网格尺寸为  $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ ,对壳体采用热传导模型,壳外壁为加热面;认为壳和炸药之间的温度及热流是连续的。其中,对密度、能量和组分方程的离散采用二阶迎风格式。将炸药的升温速率方程以及自热反应放热源项编写成 UDF 程序,并加载到 Fluent 软件主程序中。表 2 为壳体和炸药的热物理参数<sup>[28-29]</sup>。

表 2 壳体和炸药的热物理参数<sup>[28-29]</sup>

Table 2 Thermophysical parameters of the shell and explosive<sup>[28-29]</sup>

材料	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	比热容/ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	导热系数/ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
35CrMnSi	7850	480	43
JH-14C	1700	1176	0.4644

### 2.2 BP 神经网络

带壳 JH-14C 传爆药烤燃模拟分析中,需要确定 JH-14C 传爆药 Arrhenius 公式中的活化能和指前因子。一般是采用差示扫描量热法对所研究炸药不同温度下的热流量进行测试,并利用 Kissinger 方法计算活化能和指前因子,但是该方法实验量较大,且拟合参数误差较大。人工神经网络具有信息的分布存储、并行处理、自学习以及特有的非线性适应性信息处理能力的优点,尤其是多层前馈神经网络,可以以任意的精度逼近任意的连续函数,被广泛地用于非线性建模、函数逼近、模式分类等领域。

基于改进的 BP 神经网络对不同升温速率下的烤燃响应样本进行训练,主要由输入层、隐含层和输出层构成,如图 7 所示。输入层由升温速率、响应时间和温度 3 个节点组成;输出层包含 2 个节点,即需要反演的指前因子( $Z$ )和活化能( $E_a$ )。隐含层的传递函数采用 Sigmoid,输出层的传递函数采用 Purelin。

首先,根据文献确定指前因子和活化能参数的取值范围,采用 Fluent 软件对不同升温速率下带壳 JH-14C 传爆药的烤燃响应进行数值仿真获取样本。然后,将数值仿真结果作为神经网络的输入层,指前因子和活化能作为输出层进行网络训练。最后,通过训练成型的网络中输入升温速率、响应温度和温度,反演获取 Arrhenius 公式中的指前因子和活化能。

### 2.3 反应动力学参数的计算

根据 BP 神经网络样本对 Arrhenius 方程参数指前因子和活化能的均匀方法设计,指前因子分别取  $2.7\times 10^{13}$ 、 $2.7\times 10^{15}$ 、 $2.7\times 10^{17}$ 、 $2.7\times 10^{19}$ 、 $2.7\times 10^{21}$  和  $2.7\times 10^{23}\text{ s}^{-1}$ ,活化能分别取  $9.0\times 10^4$ 、 $24.0\times 10^4$ 、 $39.0\times 10^4$ 、 $54.0\times 10^4$ 、 $69.0\times 10^4\text{ J/mol}$ 。将烤燃仿真分析中 70%、15%、15% 的样本分别对神经网络进行训练、验证和测试,通过网络训练发现总的相关系数为 0.93。将实验中升温速率、响应时间和温度输入到已训练好的网络模型,对神经网络反演获得的参数取平均值,最终可以确定指前因子和活化能。

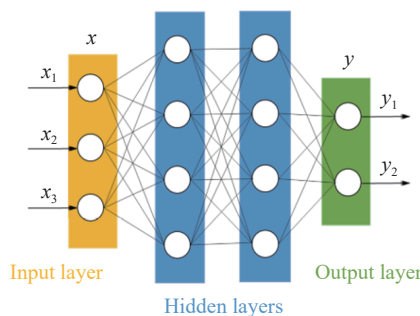


图 7 含 2 层隐含层的 BP 神经网络

Fig. 7 A back-propagation (BP) neural network with two hidden layers

## 2.4 模型参数验证

BP 神经网络反演得到的 JH-14C 传爆药反应动力学参数: 密度,  $1\ 700\ \text{kg/m}^3$ ; 反应热,  $4.78 \times 10^6\ \text{J/kg}$ ; 指前因子,  $2.7 \times 10^{21}\ \text{s}^{-1}$ ; 活化能,  $2.4 \times 10^5\ \text{J/mol}$ ; 气体常数,  $8.314\ 5\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)}$ 。图 8 为  $1.0\ \text{°C/min}$  升温速率下装药内部测点 1 和测点 6 的温度历程曲线。测点 1 实验和计算的响应时刻测点的温度分别为  $241$  和  $235\ \text{°C}$ , 测点 6 实验和计算的响应时刻测点的温度分别为  $226$  和  $225\ \text{°C}$ , 测点 1 实验和计算响应时间分别为  $207.0$  和  $200.8\ \text{min}$ , 测点 6 实验和计算响应时间分别为  $208.0$  和  $201.0\ \text{min}$ , 最大误差均小于  $3.37\%$ 。图 9 为  $3.3\ \text{°C/h}$  升温速率下装药内部测点 1 和测点 6 温度历程曲线。测点 1 实验和计算的响应时刻测点的温度分别为  $215$  和  $210\ \text{°C}$ , 测点 6 实验和计算的响应时刻测点的温度分别为  $264$  和  $251\ \text{°C}$ , 测点 6 实验和计算响应时间分别为  $3\ 442.3$  和  $3\ 348.3\ \text{min}$ , 两者误差均小于  $4.92\%$ 。验证了仿真模型及模型参数的正确性。

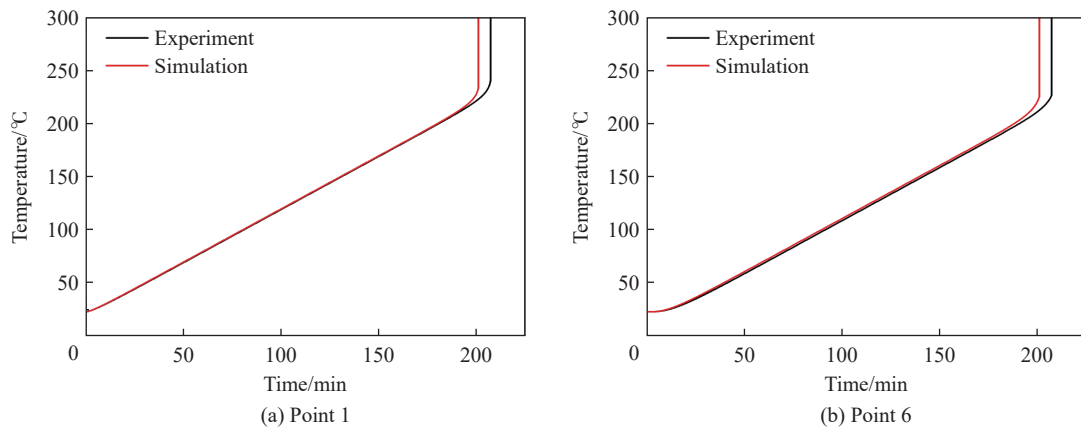


图 8 在  $1.0\ \text{°C/min}$  的升温速率下两测点温度的实验值与计算值的比较

Fig. 8 Comparison between experimental and calculated temperatures at the two measuring points under the heating rate of  $1.0\ \text{°C/min}$

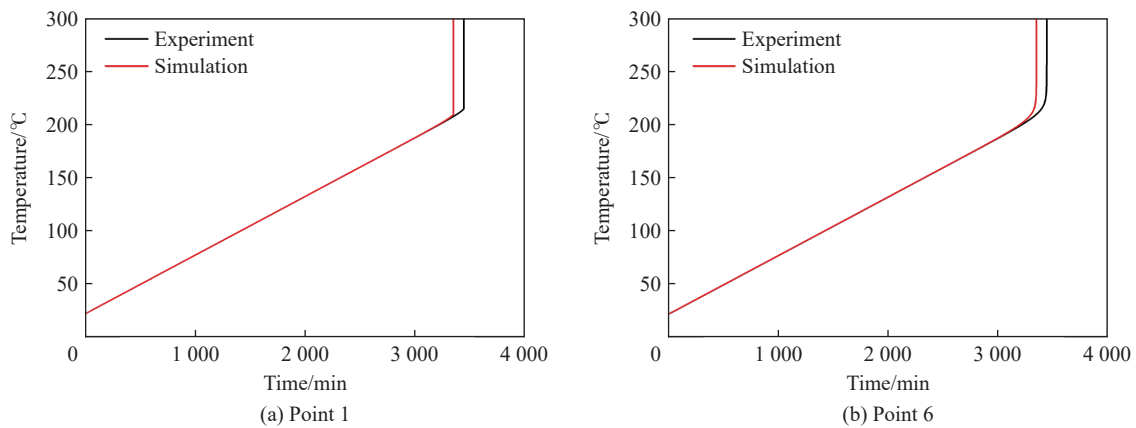


图 9 在  $3.3\ \text{°C/h}$  的升温速率下两测点温度的实验值与计算值的比较

Fig. 9 Comparison between experimental and calculated temperatures at the two measuring points under the heating rate of  $3.3\ \text{°C/h}$

## 2.5 带壳 JH-14C 传爆药烤燃响应特性数值分析

采用标定的 JH-14C 传爆药的反应动力学参数进行烤燃实验模拟计算, 图 10 为  $1.0\ \text{°C/min}$  升温速率下烤燃弹体内部 6 个测点温度历程曲线。从图 10 中可以看到, 当外壁以稳定的升温速率开始升温时, 离外壁近的测点 1、2、3 的升温速率比药柱中心的测点 4、5、6 的升温速率要高, 且在内部温度超过外壁温

度之前,始终保持测点 1~6 的温度依次降低。这是因为,壳体外壁温度高于 JH-14C 传爆药内部温度,热量由弹体外部向内部传递,导致内部温度始终低于外部温度。从放大图中可以看出,测点 1 的温度率先高于外壁的温度,在 199.3 min 时测点 4 的温度高于测点 1 的温度,并于 200.8 min 时发生响应。图 11 为 1.0 °C/min 升温速率下不同时刻温度分布云图,随着热量不断积累,当 JH-14C 传爆药发生自热反应,升温开始加快,在 196.7 min 时传爆药内部温度高于壳体外壁温度,传爆药中形成温度梯度,传爆药上下顶端区域的温度较高,传爆药中心区域的温度较低,在 200.8 min 时传爆药中心区域的温度达到烤燃响应温度,传爆药发生点火响应。

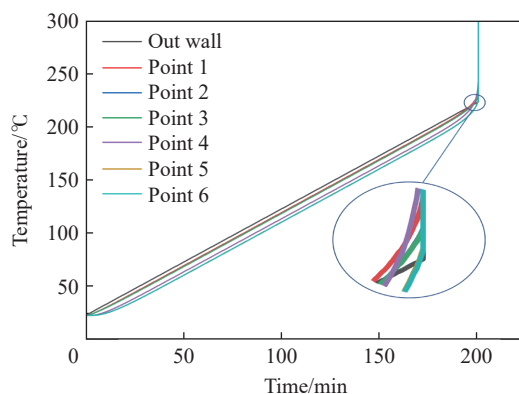


图 10 在 1.0 °C/min 的升温速率下烤燃弹体不同测点的温度-时间曲线

Fig. 10 Temperature-time curves at different measuring points of the cook-off bomb under the heating rate of 1.0 °C/min

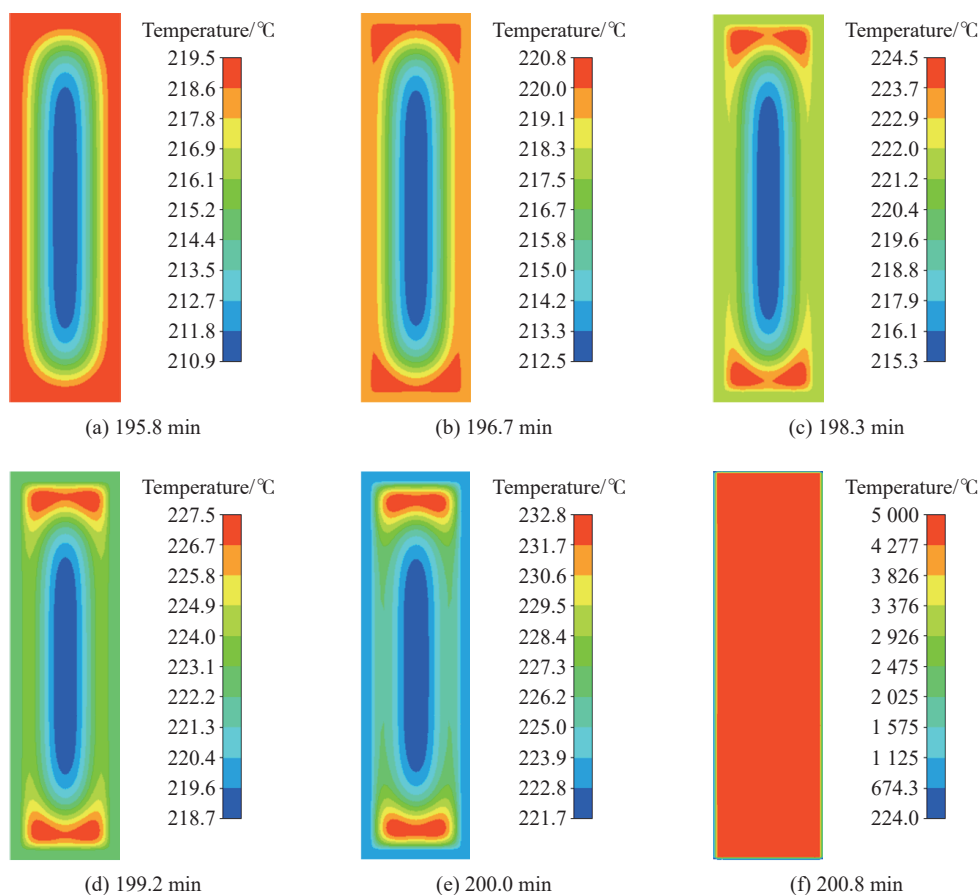


图 11 在 1.0 °C/min 的升温速率下 JH-14C 传爆药不同时刻温度分布

Fig. 11 Temperature distribution in the JH-14C booster explosive under the heating rate of 1.0 °C/min at different times

### 2.6 讨论升温速率对弹药烤燃响应的影响

对 3.0、5.0、9.0 和 20.0 °C/min 等 4 种升温速率进行了模拟。图 12 为这 4 种升温速率下的温度-时间曲线,图 13 为 JH-14C 传爆药响应时刻的装药剖面温度分布云图,随着升温速率的提高,各测点之间的温差越大。表 3 为不同升温速率下响应时刻各测点以及外壁温度和响应时间,响应位置均为测点 1,即距



离弹体中心最远处,并且 JH-14C 传爆药内部各测点的温度均低于外壁温度。但随着升温速率的升高响应温度会逐渐降低,响应时刻的外壁温度反而逐渐升高,这是因为升温速率逐渐增大,会使传爆药内部的温度提升不均匀,传爆药内部各测点的温差更大,由于外壁的温度升高较快,传爆药没有产生足够多的自热反应,已由外壁热传导在传爆药的边缘产生点火区域并发生了反应。升温速率为 5.0 和 3.0 °C/min 时, JH-14C 传爆药的上下两端形成了一个圆弧形形状的点火区域,这是因为壳体外壁均加热,导致传爆药的上下两端的边缘圆弧区域更容易形成点火区域。在 9.0 和 20.0 °C/min 升温速率下,点火区域在 JH-14C 传爆药的外缘,从图 13(c) 和 (d) 温度云图局部放大图中看到,9.0 °C/min 升温速率下的点火区域相较 20.0 °C/min 的点火区域稍微向内部移动了一些。因为在这 2 种升温速率下壳体升温较快, JH-14C 传爆药发生点火前,壳体的温度一直高于传爆药内部的温度,热量由传爆药外部向内部传递。

表 3 不同升温速率下 JH-14C 传爆药各测点在响应时刻的温度

Table 3 Temperature of each measuring point in the JH-14C booster explosive at response time under different heating rates

升温速率/(°C·min <sup>-1</sup> )	响应时间/min	响应温度/°C						
		外壁	测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	测点6
3.0	70.8	235	238	229	229	212	200	199
5.0	43.5	240	230	223	223	195	179	178
9.0	24.8	246	219	211	211	166	141	141
20.0	11.6	254	195	187	187	107	77	77

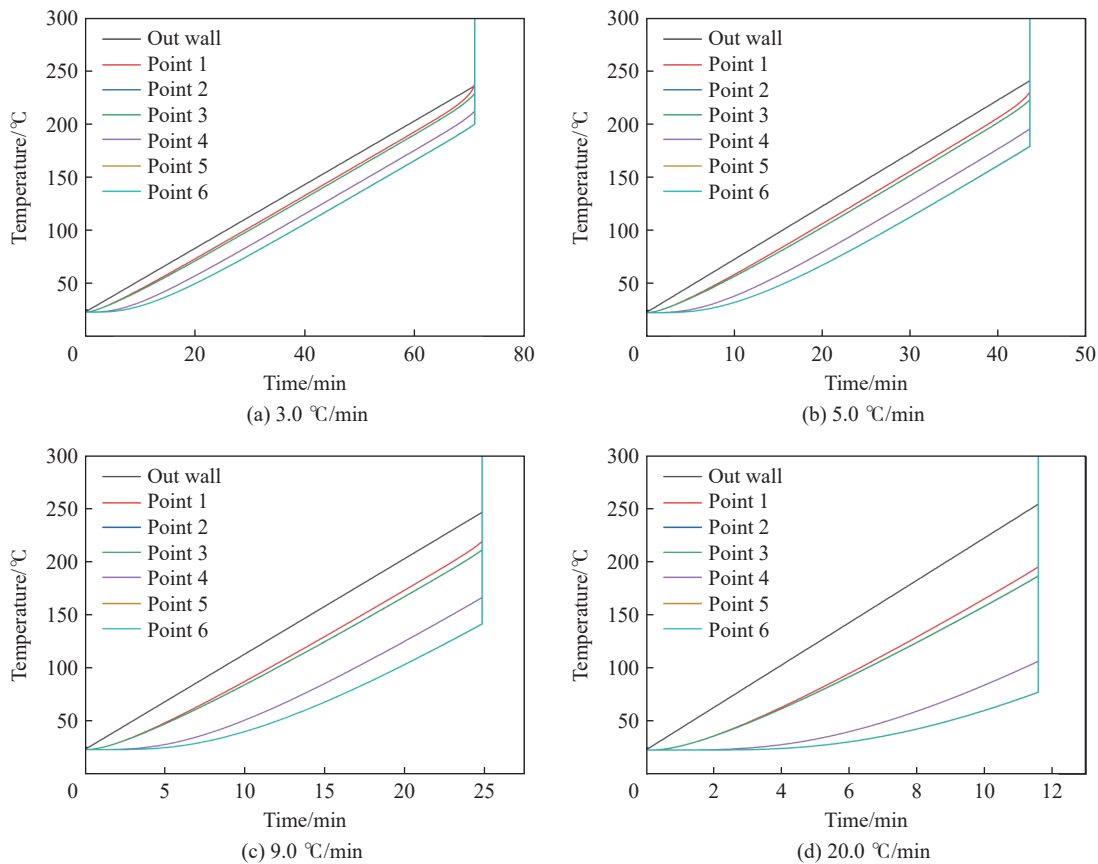


图 12 不同升温速率下 JH14C 传爆药各测点的温度-时间曲线

Fig. 12 Temperature-time curves of each measuring point in the JH-14C booster explosive under different heating rates

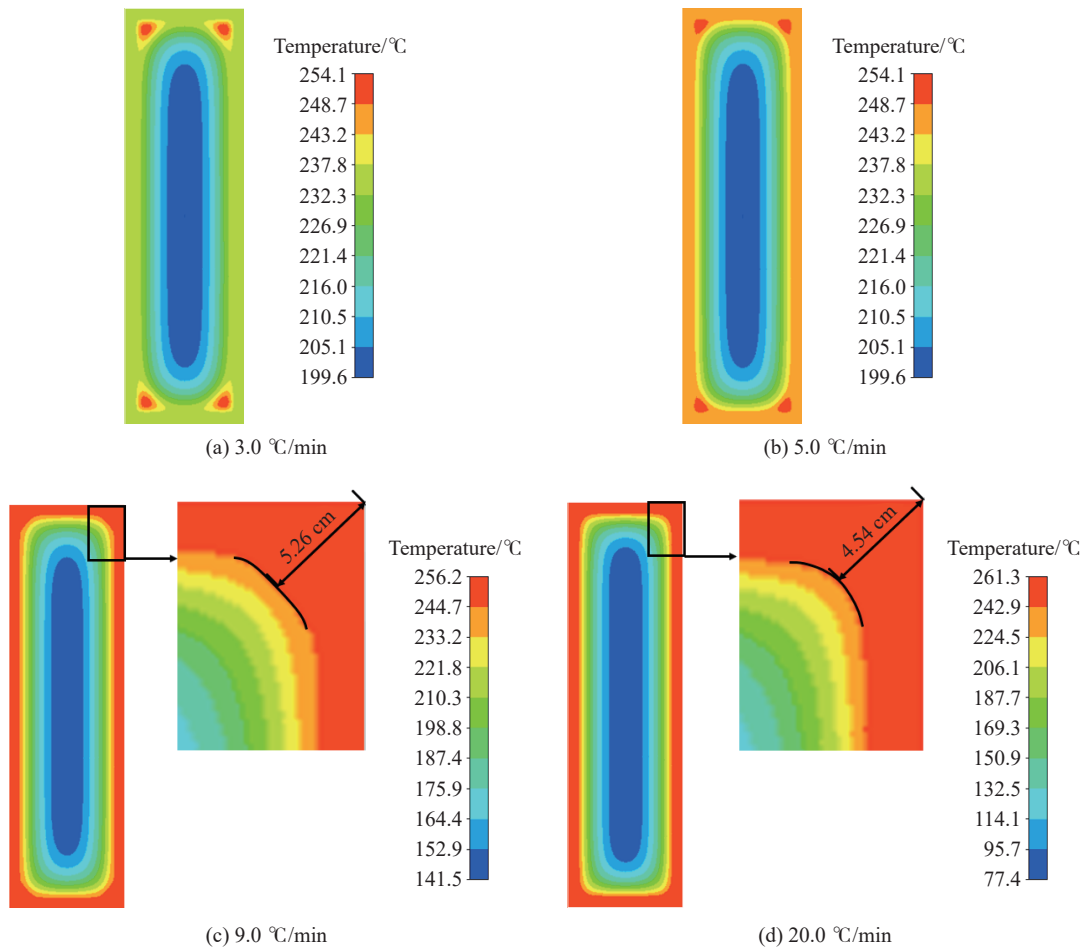


图 13 不同升温速率下 JH-14C 传爆药的温度分布

Fig. 13 Temperature distribution in the JH-14C booster explosive under different heating rates

### 3 结 论

对带壳 JH-14C 传爆药开展了烤燃实验,精确测得了设置的 6 个测点的温度-时间曲线、烤燃响应时壳体径向的变形量;通过 BP 神经网络反演,获取了 JH-14C 传爆药的反应动力学参数,对多个位置温度随时间的变化情况进行了数值模拟,得到了不同时刻烤燃弹的温度分布云图;得到以下结论:

(1) 通过慢烤实验中壳体上高温应变片得到的壳体径向变形,可以计算出带壳 JH-14C 传爆药烤燃响应形成冲击波的强度,依此来表征带壳装药烤燃反应的剧烈程度。

(2) JH-14C 传爆药的活化能为  $2.4 \times 10^5$  J/mol, 指前因子为  $2.7 \times 10^{21}$  s<sup>-1</sup>。

(3) 在带壳 JH-14C 传爆药的慢烤反应过程,随着升温速率的降低,外壁温度会降低,带壳 JH-14C 传爆药的响应温度会升高,且烤燃响应更剧烈;随着升温速率的升高,点火位置会从 JH-14C 传爆药中心位置移向上下端面环状区域,再移向 JH-14C 传爆药边缘。

### 参考文献:

- [1] 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. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202203040.  
GUO W, JIA L C, WANG H X, et al. Experimental research on cook-off test of accelerated aging PBX-6 explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2022, 45(3): 315-322. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202203040.

- [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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.05.011.  
LIU J, YU Y G. Simulation of slow cook-off for modular charges at different heating rates [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(5): 990–995. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.05.011.
- [3] 王沛,陈朗,冯长根. 不同升温速率下炸药烤燃模拟计算分析 [J]. *含能材料*, 2009, 17(1): 46–49, 54. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.01.012.  
WANG P, CHEN L, FENG C G. Numerical simulation of cook-off for explosive at different heating rates [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(1): 46–49, 54. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.01.012.
- [4] 邓玉成,李军,任慧,等. 不同结构尺寸丁羟发动机慢速烤燃特性 [J]. *含能材料*, 2022, 30(2): 155–162. DOI: 10.11943/CJEM2021097.  
DENG Y C, LI J, REN H, et al. Slow cook-off characteristics of HTPB SRM with different structural sizes [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2022, 30(2): 155–162. DOI: 10.11943/CJEM2021097.
- [5] MERZHANOV A G, AVERSON A E. The present state of the thermal ignition theory: an invited review [J]. *Combustion and Flame*, 1971, 16(1): 89–124. DOI: 10.1016/S0010-2180(71)80015-9.
- [6] TERRONES G, SOUTO F J, SHEA R F, et al. Data analysis, pre-ignition assessment, and post-ignition modeling of the large-scale annular cookoff tests: LA-14190 [R]. Los Alamos, USA: Los Alamos National Laboratory, 2005. DOI: 10.2172/861364.
- [7] ASAY B W. Shock wave science and technology reference library, vol. 5: non-shock initiation of explosives [M]. Berlin, Germany: Springer, 2010: 198–200. DOI: 10.1007/978-3-540-87953-4.
- [8] 刘仓理. 装药化爆安全性 [M]. 北京: 科学出版社, 2022: 123–127.  
LIU C L. Explosive safety of charge [M]. Beijing, China: Science Press, 2022: 123–127.
- [9] PARKER R P. USA small-scale cook-off bomb (SCB) test [C]//Minutes of 21st Department of Defense Explosives Safety Board Explosives Safety Seminar. Houston, USA, 1984: 539–548.
- [10] HOBBS M L, KANESHIGE M J, ERIKSON W W. Modeling the measured effect of a nitroplasticizer (BDNPA/F) on cookoff of a plastic bonded explosive (PBX 9501) [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 173: 132–150. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.08.014.
- [11] KOU Y F, CHEN L, LU J Y, 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. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.01.043.
- [12] LI X D, WANG J Y, LIU W J, et al. Effect of vent hole size on combustion and explosion characteristics during cook-off tests [J]. *Combustion and Flame*, 2022, 240: 111989. DOI: 10.1016/j.combustflame.2022.111989.
- [13] 智小琦,胡双启,李娟娟,等. 不同约束条件下钝化 RDX 的烤燃响应特性 [J]. *火炸药学报*, 2009, 32(3): 22–24,34. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2009.03.007.  
ZHI X Q, HU S Q, LI J J, et al. Cook-off response characteristics of desensitizing RDX explosive under different restriction conditions [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2009, 32(3): 22–24,34. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2009.03.007.
- [14] WHITE N, REEVES T, CHEESE P, et al. Live decomposition imaging of HMX/HTPB based formulations during cook-off in the dual window test vehicle [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 1979(1): 150041.
- [15] CHEESE P, REEVES T, WHITE N, et al. Development of a dual windowed test vehicle for live streaming of cook-off in energetic materials [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 1979(1): 150009.
- [16] 乔炳旭,李小东,燕翔,等. 粘结剂种类和含量对 HMX 基 PBX 烤燃响应特性的影响研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(12): 261–267. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2021.12.040.  
QIAO B X, LI X D, YAN X, et al. Study on influence of binder type and content of HMX-based PBX on response behavior under cook-off conditions [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(12): 261–267. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2021.12.040.
- [17] TARVER C M, KOERNER J G. Effects of endothermic binders on times to explosion of HMX- and TATB-based plastic bonded explosives [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2007, 26(1): 1–28. DOI: 10.1080/07370650701719170.
- [18] CHAVES F R, GÓIS J C. Slow cook-off simulation of PBX based on RDX [J]. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2017, 9(2): 225–230. DOI: 10.5028/jatm.v9i2.729.

- [19] JOENBY J W. Heat transfer analysis and assessment of kinetics systems for PBX 9501: LA-14259-T [R]. Los Alamos, USA: Los Alamos National Laboratory, 2006. DOI: 10.2172/902466.
- [20] JAEGER D L. Thermal response of spherical explosive charges subjected to external heating: W-7405-ENG-36 [R]. Los Alamos, USA: Los Alamos National Laboratory, 1980. DOI: 10.2172/5102476.
- [21] DICKSON P M, ASAY B W, HENSON B F, et al. Measurement of phase change and thermal decomposition kinetics during cookoff of PBX 9501 [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2000, 505(1): 837–840.
- [22] 刘瑞峰, 王昕捷, 黄风雷, 等. 2, 4-二硝基苯甲醚基熔铸炸药宏细观烤燃响应特性数值分析 [J]. *兵工学报*, 2022, 43(2): 287–296. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2022.02.006.
- LIU R F, WANG X J, HUANG F L, et al. Macro-meso-scale cook-off simulations of DNAN-based melt-cast explosives [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(2): 287–296. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2022.02.006.
- [23] 陈朗, 马欣, 黄毅民, 等. 炸药多点测温烤燃实验和数值模拟 [J]. *兵工学报*, 2011, 32(10): 1230–1236.
- CHEN L, MA X, HUANG Y M, et al. Multi-point temperature measuring cook-off test and numerical simulation of explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(10): 1230–1236.
- [24] GRASWALD M, GUTSER R, SCHWEIZER M. Extended multi-physics model for slow-cook off events of warheads [C]// *Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium*. Seville, Spain, 2019.
- [25] Defence Investment Division, NATO International Staff. Guidance on the assessment and development of insensitive munitions (IM): AOP-39 (3rd ed) [S]. USA: Allied Ordnance Publication, 2010. DOI: 10.5281/zenodo.3592238.
- [26] XIAO Y C, SUN Y, LI X, et al. Dynamic compressive properties of polymer bonded explosives under confining pressure [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42(8): 873–882. DOI: 10.1002/prop.201700016.
- [27] 李硕, 袁俊明, 刘玉存, 等. 聚黑-14C 的传爆装置冲击起爆实验及数值模拟 [J]. *火炸药学报*, 2016, 39(6): 63–68. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2016.06.011.
- LI S, YUAN J M, LIU Y C, et al. Experiment and numerical simulation of shock initiation of JH-14C detonation device [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2016, 39(6): 63–68. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2016.06.011.
- [28] 代晓淦, 黄毅民, 吕子剑, 等. 不同升温速率热作用下 PBX-2 炸药的响应规律 [J]. *含能材料*, 2010, 18(3): 282–285. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.03.010.
- DAI X G, HUANG Y M, LV Z J, et al. Reaction behavior for PBX-2 explosive at different heating rate [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2010, 18(3): 282–285. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.03.010.
- [29] 牛余雷, 南海, 冯晓军, 等. RDX 基 PBX 炸药烤燃试验与数值计算 [J]. *火炸药学报*, 2011, 34(1): 32–36, 41. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2011.01.007.
- NIU Y L, NAN H, FENG X J, et al. Cook-off test and its numerical calculation of RDX-based PBX explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2011, 34(1): 32–36, 41. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2011.01.007.

(责任编辑 张凌云)