

文章编号:1006-9941(2025)10-1218-10

典型引信烤燃输出压力表征及数值模拟

曹 赫¹,余万千²,肖有才¹,范晨阳³,王志军¹,孙 毅⁴

(1. 中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051; 2. 西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065; 3. 西安机电信息技术研究所, 陕西 西安 710065; 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: 在弹-引信结合状态下,意外刺激引发的引信输出压力对弹药安全性具有至关重要的影响。针对引信烤燃环境下输出压力难以表征的问题,利用应变式压杆传感器获取引信烤燃输出压力,用于引信烤燃试验,建立了引信传爆药烤燃热传导模型、Arrhenius模型和点火反应模型,分析引信烤燃响应特征及输出压力大小。基于BP神经网络反演获取引信传爆药的活化能和指前因子,利用多岛遗传算法确定引信传爆药点火反应方程状态参数。通过Workbench平台使用Fluent与LS-DYNA软件进行联合仿真,对不同升温速率下的引信烤燃响应特性进行分析,实现对引信烤燃从热反应到点火反应的全过程数值模拟预测计算。研究结果表明,加热速率越慢,点火区域越接近装药中心区域,烤燃响应反应越剧烈。

关键词: 引信;烤燃实验;压杆传感器;输出压力;数值模拟

中图分类号: TJ55;O64

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2025035

0 引言

引信是弹药系统的重要组成部分,在勤务场景中,可能受到各种意外热刺激。烤燃实验^[1-2]是研究热刺激作用下引信响应特性的重要方法,旨在评估热刺激环境下引信的反应情况。由于烤燃实验中引信点火响应过程复杂。目前,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,缺乏定量分析,严重影响引信安全性评估准确性^[3-4]。

Hopkison^[5]最早提出利用应力波在压杆中的传播原理来测量扰动压力的概念,王定贤等^[6]基于一维弹性波理论,改进了应变式压杆传感器测量系统,为评估爆炸威力场提供了一种有效的测试平台。肖有才等^[7]将动态应变仪测试系统与高温应变片相结合加入到烤燃实验中,获取烤燃反应过程中壳体的变形程度,利用

薄壁筒原理计算装药烤燃反应过程中的冲击波强度,对烤燃反应程度进行了定量表征。引信作为弹药的重要组成部分,弹-引合装状态下引信安全性更加关注是否起爆战斗部,准确获取引信烤燃输出压力至关重要。

炸药烤燃数值模拟方面,Jorenby等^[8]采用McGuire-Tarver模型^[9]和Dickson模型^[10],对炸药的热反应进行模拟分析,并对比了模型的计算点火位置,但这两个模型计算的点火位置不一致。烤燃实验中不易测量点火位置,因此如何验证炸药烤燃模型精度是一个重要的问题。Graswald等^[11]利用热传导和化学反应方程对带壳装药的慢速烤燃进行数值模拟,通过微尺度量热表征技术获取模型参数。尽管这些模型在使用上较为便捷,但其本构关系中的参数包含经验性成分导致误差较大。寇永锋等^[12-13]利用网格分离计算技术,对烤燃壳体的变形进行了精确描述,实现了对燃烧反应严重程度的量化分析。但当前鲜有引信烤燃数值模拟研究能够统筹分析点火前的热反应与点火后的燃烧反应。考虑到点火后的燃烧反应与点火前的热反应密切相关,有必要对整个引信传爆药点火后的燃烧反应过程进行数值模拟分析,定量表征引信烤燃响应后的输出压力大小,从而对引信的热安全性进行综合评价。

本研究采用改进的应变式压杆传感器采集在烤燃

收稿日期: 2025-02-21; 修回日期: 2025-07-15

网络出版日期: 2025-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(12372368)

作者简介: 曹赫(2001-),硕士研究生,主要从事弹药安全研究。
e-mail: 490954329@qq.com

通信联系人: 肖有才(1988-),教授,博导,主要从事弹药安全、冲击动力学、爆炸与冲击等研究。e-mail: xiaoyoucai@nuc.edu.cn

引用本文: 曹赫,余万千,肖有才,等. 典型引信烤燃输出压力表征及数值模拟[J]. 含能材料, 2025, 33(10):1218-1227.

CAO He, YU Wan-qian, XIAO You-cai, et al. Characterization of Output Pressure and Numerical Simulation Method for Typical Fuze Cook-off[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(10):1218-1227.

环境下引信响应输出压力。通过优化算法确定传爆药 Arrhenius 模型与点火反应模型参数。利用 Fluent 与 LS-DYNA 联合仿真,将引信烤燃热点形成的位置与响应输出压力之间的关系进行耦合分析。

1 实验部分

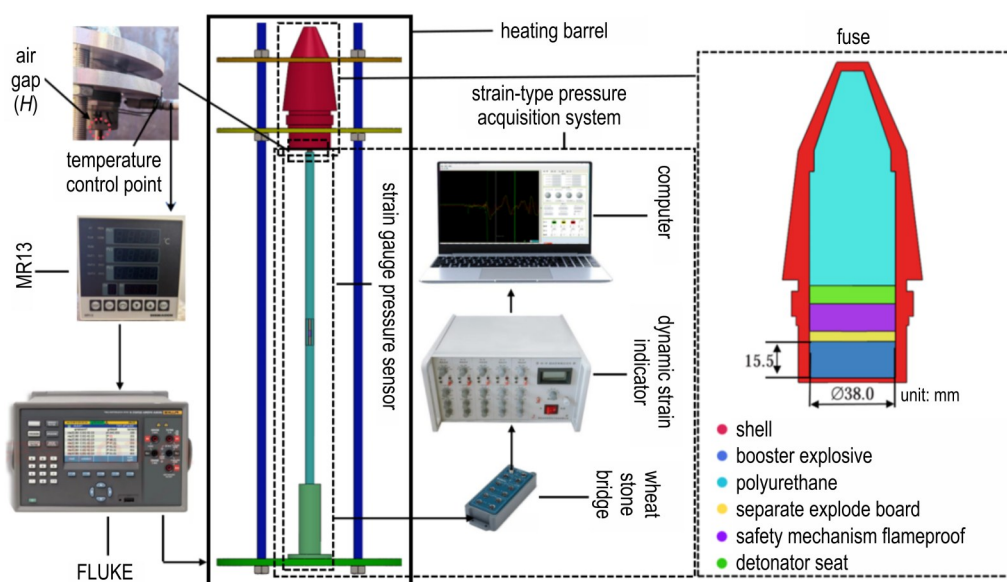
1.1 实验系统及方法

本研究设计了引信烤燃实验测试系统(如图 1 所示),包括引信、温控系统和压力测试系统。该系统由壳体、填充物(聚氨酯)、传爆药、雷管座、保险机构和隔爆板组成。温控系统由烤燃炉、镍铬/镍硅热电偶、MR-13 温度控制仪和 FLUKE 温度控制仪组成。实验过程中将引信布置在加热炉中,MR-13 温控仪连接引信

外壁固定的热电偶,该热电偶位于传爆药中心位置对应的壳体外壁,将温度反馈给 FLUKE 温控仪,FLUKE 温控仪通过调节炉壁加热功率来控制加热炉的升温速率。应变式压杆压力传感器由行波杆、应变片、超动态应变仪、采集卡和电脑组成。应变式压杆压力传感器基于霍普金森杆压杆原理。利用弹性元件(压杆)受力变形时,粘贴在其表面的应变片发生形变,导致电阻值变化(应变效应),通过测量电阻变化间接得到压力值。

1.2 实验步骤

在本课题组前期研究基础上^[14-15],选取 $\varnothing 6\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的行波杆。针对高温工作场景与较短输出脉宽,选用 BAB120-3AA250(11)-G500 型高温应变片,将其单侧粘贴在距行波杆顶端 100 mm 处。该应变片



a. the schematic diagram of the Cook-off test system and device



b. cook-off furnace



c. strain gauge pressure bar sensor and Fuse

图 1 烤燃实验系统与装置

Fig.1 Cook-off test system and device

灵敏度系数 K 为 1.8,最高可测量 167 kHz 的频率,同时拥有温度补偿功能。应变片通过 1/4 惠斯通桥连接超动态应变仪,超动态应变仪连接采集设备。烤燃试验从 27 °C 开始,升温速率分别为 1, 5, 10 °C·min⁻¹ 直至引信响应。

1.3 实验结果

实验测得引信外壳温度-时间曲线如图 2 所示,可以看出引信外壳温度先随着环境温度的升高而升高,当加热一段时间后温度突然指数上升,同时引信产生“爆炸”

声,由此判断引信在温度指数突变点响应,该点时间与温度即为该升温速率下引信烤燃响应的时间与温度。结果显示,当升温速率为 1 °C·min⁻¹ 时引信于 236.85 °C 在 12600.00 s 响应;当升温速率为 5 °C·min⁻¹ 时引信于 249.27 °C 在 2669.04 s 响应;当升温速率为 10 °C·min⁻¹ 时引信于 264.05 °C 在 1423.20 s 响应。利用应变式压杆传感器测试该升温速率下引信烤燃输出压力。3 次实验应变式压杆传感器均正常响应,结果如图 3 所示,可以观测到波形峰值随着升温速率加快而减小。

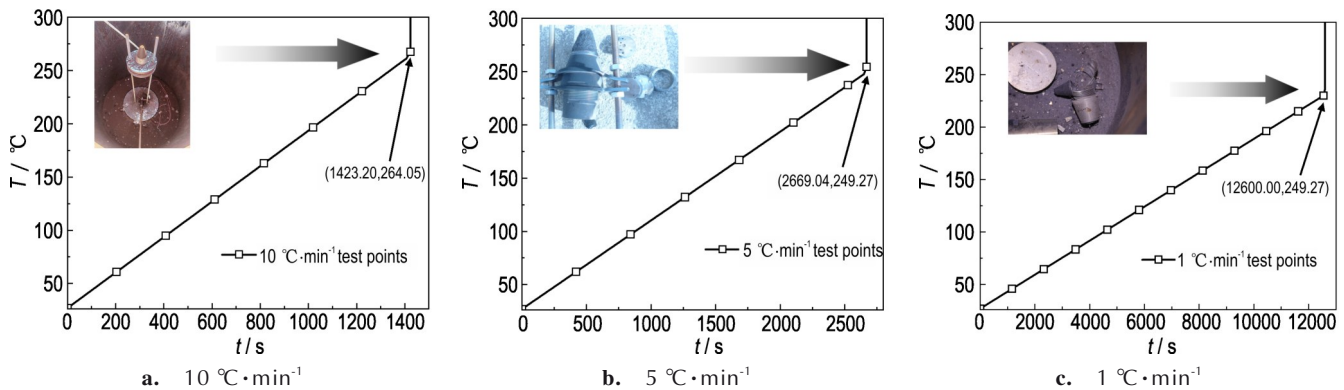


图 2 不同升温速率下引信壳体实验温度-时间曲线
Fig.2 Experimental temperature-time curve of the fuse shell at different heating rates

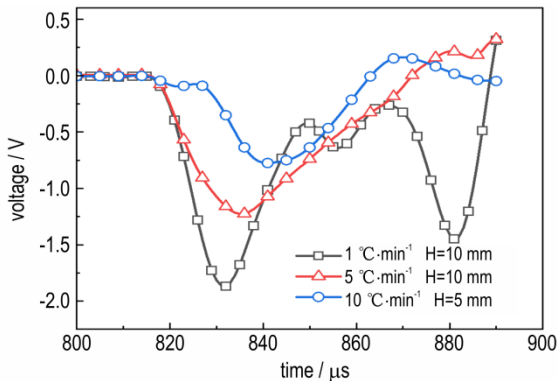


图 3 行波杆上应力波原始电压信号
Fig. 3 Original voltage signal of stress wave on travelling wave bar

2 数值模拟

2.1 热传导模型及炸药化学反应方程

引信传爆药内热源受 Arrhenius 定律支配^[16],随着外部加热源输入,缓慢引发药柱热分解。当放热反应速率超越散热速率时,系统内因反应放热导致温度自行升高,热流矢量极性反转。

基于热传导模型及炸药化学反应方程,建立引信烤燃计算模型^[9]:

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \lambda \nabla^2 T + S \tag{1}$$

式中, S 为炸药内热源相; ρ 为物质密度, kg·m⁻³; T 为温度, K; c 为比热容, J·kg⁻¹·K⁻¹; t 为时间, s; λ 为导热系数, W·m⁻¹·K⁻¹。

内热源相 S 通过 Arrhenius 方程表述:

$$S = \rho QZ \exp [-E_a / (RT)] \tag{2}$$

式中, Q 为反应热, J·kg⁻¹; R 为普适气体常数, J·mol⁻¹·K⁻¹; Z 为指前因子, s⁻¹; E_a 为活化能, kJ·kmol⁻¹。

表 1 为引信主要材料的热性能参数^[17-19]。

2.2 引信烤燃响应点火反应计算模型

Kou 等^[15]采用包括燃烧反应速率方程,未反应装药和反应产物状态方程的爆燃模型计算烤燃响应点火

表 1 主要材料热性能参数^[17-19]

Table 1 Thermal property of the major fuze materials ^[17-19]			
component	ρ / kg·m ⁻³	C_v / J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	λ / W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
JHX-1	1700	2570	0.2
Steel	7850	480	43
Polyurethane	350	2380	0.021
Al	2710	904	236
Cu	8960	24.44	401

Note: ρ is density; C_v is specific heat; λ is thermal conductivity.

反应阶段。相较于传统的 Lee-Tarver 三项式点火增长模型^[20],该模型常被用于模拟装药密闭点火反应时受限燃烧产生的压力。

引信传爆药未反应状态方程为:

$$p_u = A_1 \exp(-R_1 V_u) + B_2 \exp(-R_2 V_u) + R_3 T_u / (V_u - D_u) \quad (3)$$

式中, V_u 和 T_u 分别为未反应传爆药的相对体积和相对温度, D_u 为未反应物的剩余体积, A_1 、 B_1 、 R_1 和 R_2 是常数。 $R_3 = \omega_u C_{vu}$, ω_u 为未反应传爆药 Gruneisen 系数, C_{vu} 为未反应传爆药热容, $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

传爆药反应产物的状态方程为:

$$p_p = A_2 \exp(-R_4 \cdot V_p) + B_2 \exp(-R_5 \cdot V_p) + R_6 T_p / (V_p - D_p) \quad (4)$$

式中, V_p 和 T_p 分别为传爆药反应产物的相对体积和相对温度, D_p 为反应产物的剩余体积, A_2 、 B_2 、 R_4 和 R_5 是常数。 $R_6 = \omega_p C_{vp}$, ω_p 为反应产物 Gruneisen 系数, C_{vp} 为反应产物热容, $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

随着反应的进行,当未反应物和生成物的压力和温度平衡时(即 $T_u = T_p = T$, $p_u = p_p = p$),相对体积的相加关系为:

$$V = (1 - F) \cdot V_u + F \cdot V_p \quad (5)$$

式中, F 是反应的系数。

点火反应速率方程为:

$$\frac{dF}{dt} = a(1 - F)^c (F + F_i)^d (p + p_i)^y + b(1 - F)^e F^g p^z \quad (6)$$

$0 < F < F_{a \max} \quad F_{b \min} < F < 1$

式中, t 为时间, s , p_i 为初始压力, MPa , F_i 为初始反应系数, a 和 b 为第一项和第二项点火反应速率系数, c 、 d 、 y 分别为第一项未反应参数指数、反应参数指数和压力指数, e 、 g 、 z 分别为第二项未反应参数指数、反应参数指数和压力指数。 $F_{a \max}$ 和 $F_{b \min}$ 分别为方程中两项的最大反应分系数和最小反应系数。

2.3 模型参数获取与校正

2.3.1 基于 Back Propagation (BP) 神经网络热化学反应参数

在对热反应阶段的点火位置分布情况仿真计算中, Arrhenius 方程的活化能 (E_a) 和指前因子 (Z) 通常采用差示扫描量热测定法^[21]来测试炸药在不同温度下的热流量,进而利用 Kissinger 方法^[22]来计算活化能和指前因子。但此方法拟合参数的误差相对较大,且需要有大量实验数据作为支撑。

神经网络存在独特的认知计算优势,包括分布式拓扑信息编码、并行化异构计算架构、自主式参数进化机制以及非线性微分同胚映射能力。依据 Kolmogorov 全局泛函逼近定理^[23],多层前馈网络可构造三阶张量架

构,它能够以任意精度逼近任意连续函数,被广泛应用在函数逼近领域。

本研究采用改进 BP 神经网络对不同工况下的模型进行训练。该神经网络如图 4 所示,主要由输入层、输出层和隐含层构成。输入层由速率、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 Z 和 E_a ,其传递函数采用仿射变换算子;隐含层传递函数采用双曲正切特征空间映射。

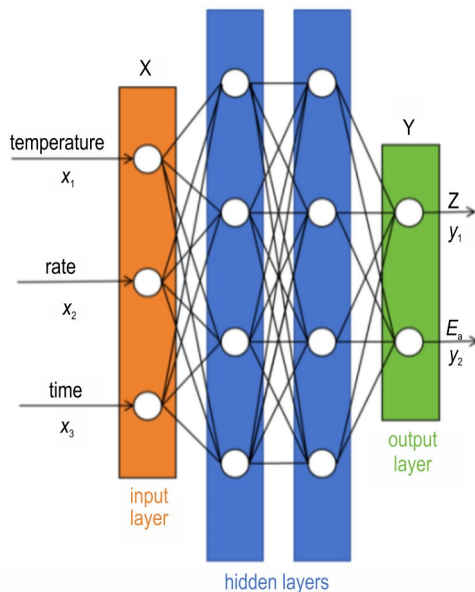


图4 双隐含层BP神经网络

Fig.4 Double-hidden-layer BP neural network

首先,依据文献[21-22],确定 E_a 、 Z 的初值。通过 Fluent,设置不同工况,对引信烤燃化学反应过程数值模拟,获取结果数据。然后,将这些结果作为神经网络输入数据,将 E_a 和 Z 设定为神经网络的输出目标,训练模型。最终,在训练好的 BP 神经网络模型中,输入升温速率、响应温度和时间等参数,反演得出了 JHX-1 传爆药 Arrhenius 方程中的 E_a 和 Z 。通过计算得出传爆药反应动力学参数:指前因子 (Z) 为 $2.6 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$,活化能 (E_a) 为 $2.35 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

2.3.2 基于多岛遗传算法点火反应方程参数的计算

本研究在对引信烤燃响应点火反应模拟分析中,如图 5 所示,对 JHX-1 炸药的点火反应方程参数进行优^[24-25],采用多岛遗传算法 (MIGA)^[26]确定点火反应方程参数。首先,定义 R_1 和 R_2 的值;根据公式(2)~(6)确定状态方程各参数的关系,求解出 A 和 B 。其次,将数据导入 LS-DYNA 进行仿真分析,提取模型中与实验对应位置处的时间-压力数据提交至 Isight。最后,如图 6 所示,在 Isight 的 Data Matching 模块中将仿真和

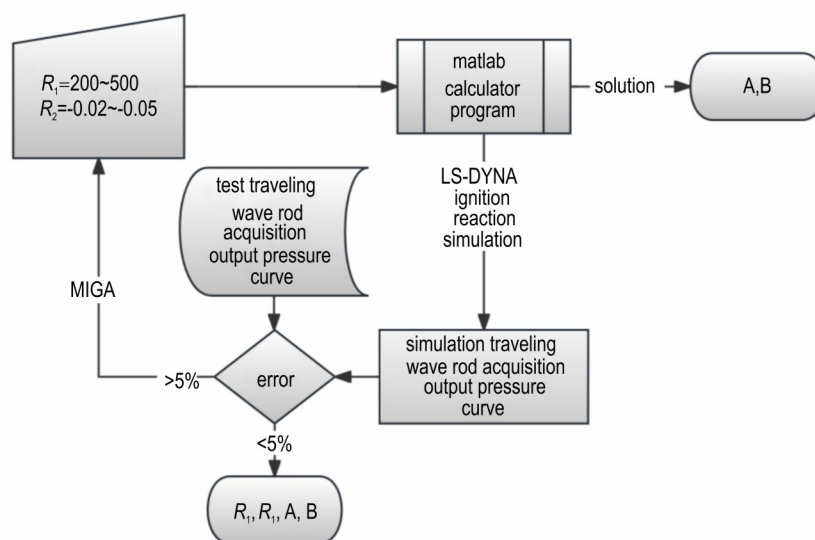


图5 JHX-1炸药点火反应方程参数优化流程图

Fig.5 Flowchart for Parameter Optimization of the Ignition Reaction Equation in JHX-1

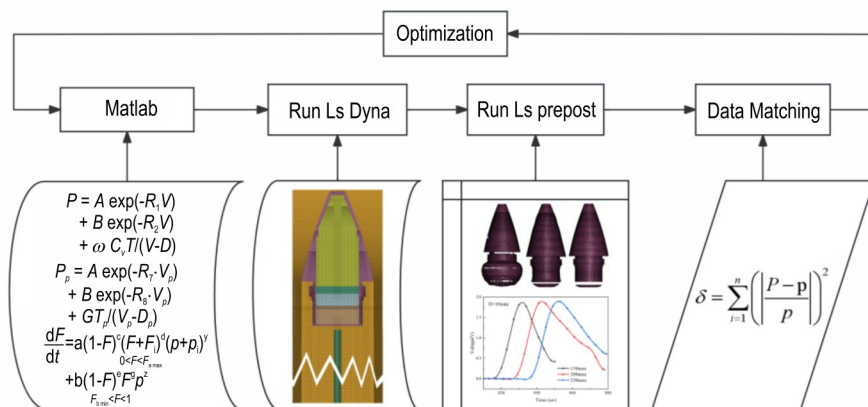


图6 Isight-MIGA 迭代优化流程

Fig.6 Isight-MIGA Iterative optimization process

实验中获得的数据进行对比,设置优化目标 δ ;如果误差在5%以内,则认为该组数据满足需求;如果不满足,则在Isight主软件模块通过多种岛传算法进行参数迭代优化,直至满足要求。优化后的点火反应方程参数如表2、3和4所示。

表2 传爆药未反应状态方程参数

Table 2 Non-reactive state equation parameters of the booster explosive

A_1	B_1	R_1	R_2	R_3
310	-3.2785×10^{-2}	2.223×10^{-5}	11.30	1.13

表3 传爆药反应产物状态方程参数

Table 3 State equation parameters of reaction products of the booster explosive

A_2	B_2	R_4	R_5	R_6	T
6.125	0.1395	2.5×10^{-6}	298	4.60	1.30

表4 传爆药点火反应速率方程参数

Table 4 Equation parameters of ignition reaction rate of the booster explosive

$a / (100 \text{ GPa})^{-1} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	F_i	$P_i / 100 \text{ GPa}$	c	d	γ
0.60	100×10^{-4}	1.00×10^{-6}	1.00	0.00	0.00
$b / (100 \text{ GPa})^{-1} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	e	g	Z	F_{amax}	F_{bmin}
1.00	2.00	0.50	0.10	0.022	0.80

2.4 烤燃实验全过程数值模拟

如图7所示流程图将Fluent与LS-DYNA进行联合仿真^[27-28]进行模拟烤燃试验。首先,在Fluent中对引信升温传热以及热点形成过程进行数值模拟得出热反应形成的热点位置;最后,通过结果设置,将这些在Fluent中模拟出的热点位置(温度最高点)设置为LS-DYNA中的起爆点,借助点火反应模型,对点火后的快速燃烧响应进行数值模拟,实现对引信烤燃从热反应到点火反应的全过程数值模拟预测计算。

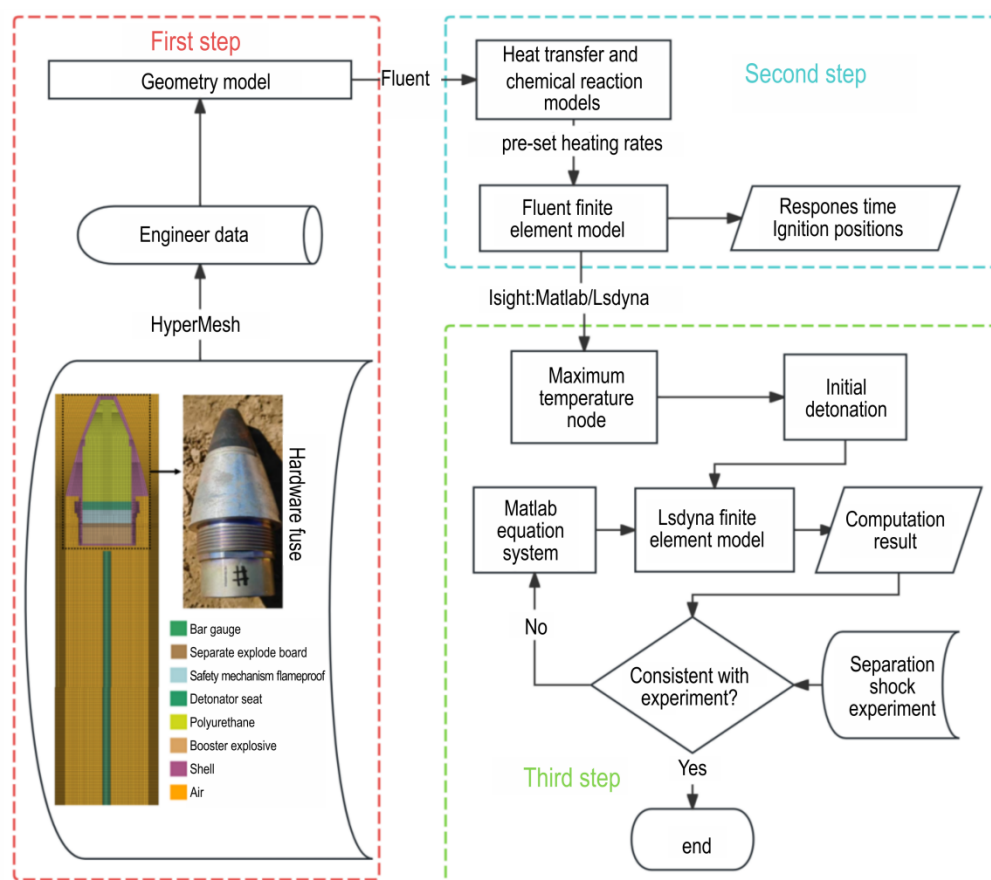


图7 引信烤燃全过程数值模拟流程图

Fig.7 Flow chart of numerical simulation of the whole process of fuze cook-off

3 结果与讨论

3.1 热化学反应的热点位置分布

引信烤燃数值模拟均按照预设升温速率执行,其仿真温度-时间曲线如图8所示。在升温速率为 $1, 5, 10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,仿真响应时刻温度分别为 $230.85, 242.99, 256.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与实验值误差均未超过 3.37% ,

可以验证仿真模型与参数的正确性。

计算结果如表5所示,该结果表明,对于引信装药,加热速率越慢,壳体温度越低,点火点温度越高,点火区域的热焓越大。

图9中可以看到,升温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时热点形成于药柱的几何中心,热点区域为直径 2 mm 的球形(图9c),这是因为装药体系的热生成通量密度与边

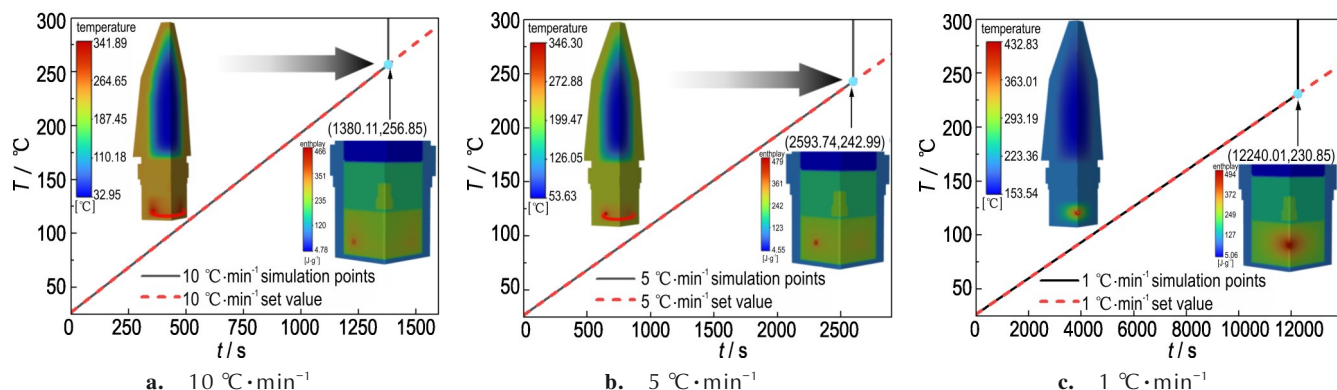


图8 不同工况下烤燃引信壳体仿真温度-时间曲线

Fig.8 Simulated temperature-time curve of the fuze shell under different operating conditions

界层热耗散通量密度达成动态平衡,热量可以均匀向
内传递,装药反应产生的热量能够及时释放,最终在中
心处汇聚形成球形点火点;升温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时
引信装药形成了围绕装药中心半径为 10.36 mm 的圆
环热点(图 9b),这是因为加热速率提高,装药反应产

表 5 引信烤燃热化学反应仿真结果

Table 5 Thermochemical reaction simulation results in fuse cook-off scenarios

heating rates / $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	casing temperature at ignition/ $^{\circ}\text{C}$	ignition temperature/ $^{\circ}\text{C}$	peak thermal enthalpy/ $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$
1	237.29	432.83	494
5	251.06	346.30	479
10	262.20	341.89	466

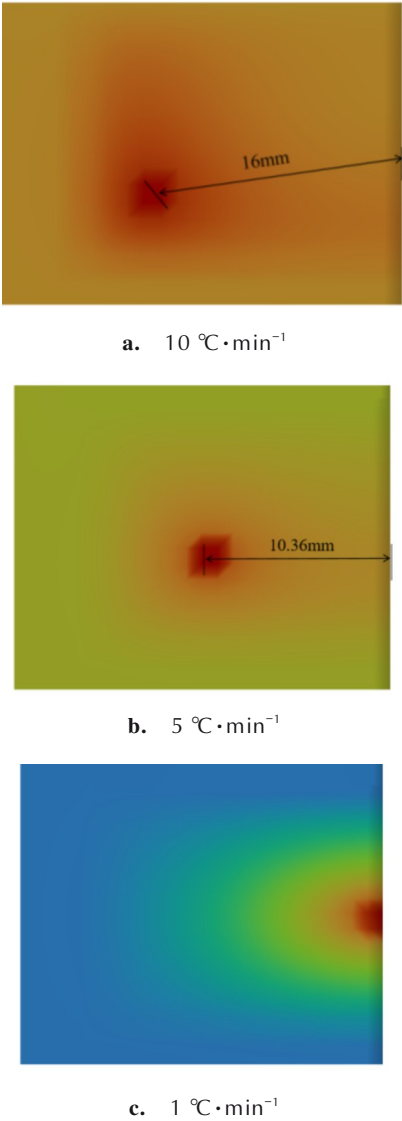


图 9 不同升温速率下热点在传爆药中的位置
Fig.9 The location of the hot spot in the booster explosive

生的热量不能充分向外释放,热量逐渐在装药内部累
积,形成环形点火区域;升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时引信
装药环形热点形成于药柱下端距传爆药中心 16 mm 与
引信中轴夹角为 81.52° 处(图 9a),这是因为这一区域
同时受到壳体底端和侧壁加热使其温度偏高,而炸药
热导率较低升温速率过快使得热量无法及时传导所造
成的。对于引信装药,加热速率越慢,热量累积越多,
其点火区域越接近装药中心区域^[29]。

3.2 引信响应的点火反应

实验与仿真中壳体破碎情况如图 10 所示。在实

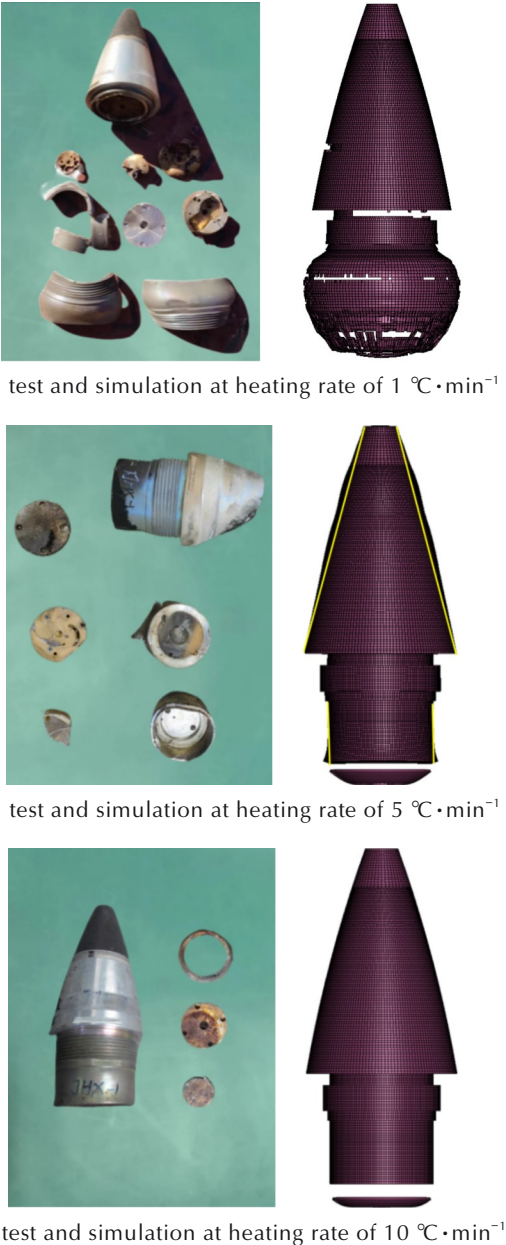


图 10 烤燃引信弹体实验与仿真破碎情况
Fig.10 Cook-off Fuse Casing Fracture Situation

验中当升温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时引信传爆管底壳被炸碎,装药部分与风帽切断,风帽保存完整,底部壳体膨胀塑性变形,下部破裂成两块。相对应的仿真结果,下部壳体网格严重膨胀变形,底部碎裂成小块,大量网格失效,风帽与装药部分的网格失效。其中,膨胀形变最严重的部分为传爆药中心处对应的径向外壳,之后,整个冲击波均匀向周围扩散外壳膨胀半径向两边减小。上部膨胀半径小于下部膨胀半径,部壳体更多导致约束更强。通过壳体形变情况反应的冲击波作用情况,符合在传爆药在密闭空间中心点火时受限燃烧爆轰波生成规律。

升温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时引信内部零件飞出,变形严重,外壳底部有扩张形变,上有黑色碳化的药渣残留,风帽出现一定程度变形。仿真结果图中可以看出,壳体底部出现伞型外扩形变,顶部风帽也出现一定膨胀变形,底部壳体切除。点火位置围绕装药中心的圆环热点,点火后壳体下部外缘与底部被先行炸开,部分能量被释放。点火位置位于传爆药下部导致向上点火增长距离较长从而导致风帽受力形变。

当升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时引信壳体保持完好,未见明显变形或裂纹,外壳底部则被冲开切断。仿真结果可知引信外壳完整,底部壳体未切除。

升温速率越慢加热时间越长,炸药内能越大,导致炸药反应度提高。同时点火位置更靠近装药中心,爆轰波在炸药内的增长时间加长,更晚破碎壳体,导致炸药受到更长时间约束,进一步增加反应度。反之当热点位置靠近炸药边缘时,冲击波过早破碎壳体,导致装药约束不足,未能完全反应。在响应过程中可以看到壳体均是在靠近点火区处的外壳形成环状断裂带,总体壳体破碎结果与实验基本一致,可以初步证明点火反应方程参数与数值模拟引信烤燃全过程方法的准确性。

将应变式压力采集系统采集的电压-时间数据通过公式(7)^[14]换算为压力-时间数据,

$$P = \frac{-4U_0 E}{GKU_1} \quad (7)$$

U_0 代表仪器输出电压, K 代表应变片灵敏度系数, G 代表仪器放大倍数, U_1 代表桥路输入电压, E 代表行波杆弹性模量。式中 $K=1.8$, $G=1000$, $U_1=2$, $E=210000\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 。得到引信烤燃输出压力(图 11)。从图 11 可知数值模拟中提取与实验对应位置处的压力-时间曲线与实验结果进行比较,升温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时误差不超过 6%;升温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$

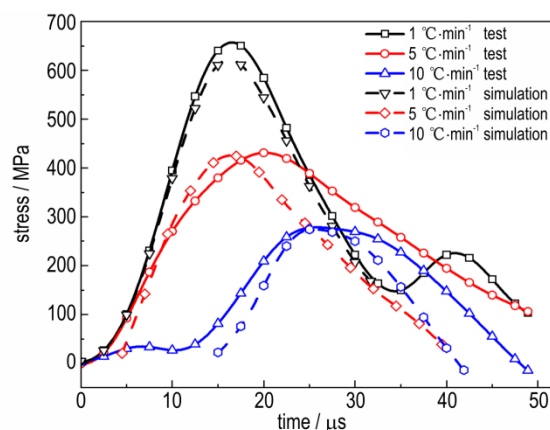


图 11 实验与仿真中行波杆对应位置采集引信不同升温速率烤燃输出时间-压力曲线

Fig. 11 The time dependent output pressure curve at different heating rate for both experimental and simulative results

时误差不超过 2%;升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时误差不超过 8%,表明了引信烤燃全过程数值模拟方法的准确性。

4 结论

本研究对典型引信进行烤燃实验,准确采集了温度-时间曲线与输出压力;采用 BP 神经网络确定传爆药热反应模型参数,通过多岛遗传算法确定传爆药点火反应模型参数;对引信烤燃响应进行数值模拟,实得到了温度分布云图、输出压力与壳体破碎情况。具体结论如下:

(1) 改进型应变式压杆传感器可对引信烤燃输出压力进行准确测量。

(2) 利用 Fluent 和 LS-DYNA 联合仿真对引信烤燃响应进行数值模拟,是进行烤燃全过程模拟研究的可靠方案。

(3) 结合实验采集数据与仿真结果得出:升温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时点火区域到装药中心距离为 0 mm,最大输出压力为 654.354 MPa;升温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时点火区域到装药中心距离为 10.36 mm,最大输出压力为 425.577 MPa;升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时点火区域到装药中心距离为 16 mm,最大输出压力为 258.786 MPa。由此推断对于引信装药,加热速率越慢,点火区域越接近装药中心区域,输出压力越大,响应越剧烈。

参考文献:

- [1] 张辉,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, 2024, 32(11):1182-1193.

- 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 Cailiao)*, 2024, 32(11):1182-1193.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- WANG Pei, CHEN Lang, FENG Chang-gen. Numerical simulation of cook-off for explosive at different heating rates[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(1):46-49+54.
- [5] HOPKINSON B. A method of measuring the pressure produced in the detonation of bullets[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1914, 213(497-508):437-456.
- [6] 王定贤,胡永乐,金飞华,等.行波杆在混凝土应力波参数测量中的应用[J].兵工学报,2010,31(S1):238-241.
- WANG Ding-xian, HU Yong-le, JIN Fei-hua, et al. Application of bar gauge in parameters measurement of stress wave in concrete[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(S1):238-241.
- [7] 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.
- [8] JORENBY J W. Heat Transfer Analysis and Assessment of Kinetics Systems for PBX 9501[J]. *Office of Scientific & Technical Information Technical Reports*, 2006.
- [9] 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.
- [10] DICKSON P, ASAY B, HENSON B, et al. Measurement of phase change and thermal decomposition kinetics during cook-off of PBX 9501[J]. *Engineering, Chemistry*, 2001, (505(1)):837-840.
- [11] GRASWALD M, GUTSER R, SCHWEIZER M. Extended multi-physics model for slow-cook off events of warheads[C]// Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. Seville, Spain. 2019:
- [12] 寇永峰,杨坤,张斌,等.基于烤燃实验和数值模拟的战斗部装药热安全性[J].兵工学报,2023,44(S1):41-49.
- KOU Yong-feng, YANG Kun, ZHANG Bin, et al. Research on thermal safety of warhead charge based on cook-off experimental and numerical simulation[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(S1):41-49.
- [13] 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(1-2):154-162.
- [14] 王瑞胜.子弹和破片撞击作用下模拟引信响应特性研究[D].太原:中北大学,2024.
- WANG Rui-sheng. Study on the response characteristics of simulated fuzes under the impact of bullets and fragments[D]. Taiyuan: North University of China, 2024.
- [15] 王波,黄亚峰,田轩,等.JHX-1不敏感传爆药的起爆与传爆特性研究[J].爆破器材,2024,53(5):8-12.
- WANG Bo, HUANG Ya-feng, TIAN Xuan, et al. Detonation and propagation characteristics of an insensitive booster explosive JHX-1[J]. *Explosive Materials*, 2024, 53(5):8-12.
- [16] HUIFENG B, CHENYANG F, ZHUOJUN Q, et al. A study of effect of temperature and shock coupled loading on the response characteristics of fuze cook-offs[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2891(12), 122007-122007.
- [17] GAO J M, JIN S H, WANG N, et al. Study on the Properties of CL-20/NTO Based Pressed Mixed Explosive Under Typical Binder System[J]. *Chemistryselect*, 2025, 10(1).
- [18] HAN Z, WU C, WANG J, et al. Study on the influence of air gap on the thermal response violence of pressed polymer bonded explosive charge in slow cook-off experiment[J]. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2024, 18(4), 1077-1089.
- [19] 翟蓉,施坤林,邹金龙,等.引信慢速烤燃特性的等效试验方法[J].探测与控制学报,2020,42(3):1-7.
- ZHAI Rong, SHI Kun-lin, ZOU Jin-long, et al. An equivalent method of Fuze's slow cook-off characteristic[J]. *Journal of Detection & Control*, 2020, 42(3):1-7.
- [20] LI Y H, YANG X Y, WEN Y Q, et al. Determination of lee-tarver model parameters of JO-11C explosive[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2018, 43(10):1032-1040.
- [21] CHÁVEZ G C, CAZAR J, GORDILLO G, et al. Using differential scanning calorimetry to measure the energetic properties of residual sludge and catalysts from the textile, tannery, and galvanic industries[J]. *ChemEngineering*, 2024, 8(6):123-123.
- [22] NOSEDA GRAU V, CUNIBERTI A. Estudio de la validez del método de Kissinger en una aleación AL-MG-SI[J]. *Anales (Asociación Física Argentina)*, 2017, 28(3):82-86.
- [23] BOGACHEV V I, SHAPOSHNIKOV S V. On Reconstruction of kolmogorov operators with discontinuous coefficients[J]. *Doklady Mathematics*, 2024, 109(2):103-106.
- [24] ZHOU R, YUE Y, YANG L, et al. Estimation of constitutive parameters for shape memory polymer thermo-mechanical cycle by an integrated simulation and inverse optimization method[J]. *Functional Materials Letters*, 2024, 17(03).
- [25] KIM C H, KIM J N, KIM S C, et al. Multidisciplinary integrated optimal design process for optomechanical structures[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(26):6871-6876.
- [26] ZHOU J P, ZHANG N, LI Q. An equivalent reformulation and multiproximity gradient algorithms for a class of nonsmooth fractional programming[J]. *Mathematics of Operations Research*, 2024.
- [27] ZHAO H D, LIU W, DING J F, et al. Numerical study on separation shock characteristics of pyrotechnic separation nuts[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 151:893-903.
- [28] LIU Z W, YU Y Z, ZHAI Q, et al. Impact characteristics simula-

tion analysis of high pressure valve based on workbench/ls-dyna[C]//International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS). Changsha, PEOPLES R CHINA. Jishou, China; 2019; 267–269.

[29] 张烨,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,2024,23(11):1182–1193.

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 Cailiao)*, 2024, 23(11):1182–1193.

Characterization of Output Pressure and Numerical Simulation Method for Typical Fuze Cook-off

CAO He¹, YU Wan-qian², XIAO You-cai¹, FAN Cheng-yan³, WANG Zhi-jun¹, SUN Yi⁴

(1. College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, China North Industries Group Corporation, Xi'an 710065, China; 3. Xi'an Institute of Electromechanical Information Technology, Xi'an 710065, China; 4. Department of Astronautic Science and Mechanics, School of Astronautics Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To enable comprehensive prediction of typical fuze cook-off processes and address the challenge of quantifying output pressure, an advanced strain-gage pressure bar sensor was utilized for dynamic pressure acquisition during experimental investigations. A comprehensive coupled numerical framework was developed, integrating heat transfer models, Arrhenius reaction kinetics, and ignition response mechanisms, to systematically analyze the cook-off behavior and generate detailed pressure profiles of booster explosives. The kinetic parameters, such as activation energy and pre-exponential factors, were inversely determined through the application of a Back Propagation (BP) neural network. Meanwhile, the state parameters that govern the ignition reaction equation were optimized using a multi-island genetic algorithm. Coupled simulations utilizing ANSYS Fluent and LS-DYNA within the Workbench platform were performed to numerically investigate the cook-off response under different heating rates. This approach enables comprehensive full-process characterization from thermal reaction to ignition. The results indicate that slower heating rates shift the ignition zone toward the central region of the charge, thereby intensifying the severity of the reaction.

Key words: fuze; cook-off experimental; pressure bar sensor; output pressure; numerical simulation

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025035

Grant support: National Natural Science Foundation of China (No. 12372368)

(责编:高毅)