

高压物理学报

装药缺陷对浇注装药快烤响应特性的影响

梁明阳 智小琦 于永利 肖游

Effect of Charge Defects on the Fast Cook-off Response Characteristics of Cast PBX Explosive Charge

LIANG Mingyang, ZHI Xiaoqi, YU Yongli, XIAO You

引用本文:

梁明阳, 智小琦, 于永利, 等. 装药缺陷对浇注装药快烤响应特性的影响[J]. 高压物理学报, 2025, 39(4):045101. DOI: 10.11858/gywlb.20240893

LIANG Mingyang, ZHI Xiaoqi, YU Yongli, et al. Effect of Charge Defects on the Fast Cook-off Response Characteristics of Cast PBX Explosive Charge[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2025, 39(4):045101. DOI: 10.11858/gywlb.20240893

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240893>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

火焰特征量对快速烤燃的影响

Influence of Flame Characteristics on Fast Cook-off

高压物理学报. 2022, 36(5): 055201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220557>

不同尺寸HMX基压装装药的烤燃特性

Cook-Off Characteristics of HMX-Based Pressed Charges with Different Sizes

高压物理学报. 2024, 38(2): 025102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230757>

多种复合炸药装药的慢烤特性及其机理

Characteristics and Mechanism of Slow Cook-off of Composite Explosive Charges

高压物理学报. 2022, 36(2): 025201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210871>

HMX基含AP浇注炸药烤燃实验与数值模拟

Cook-off Test and Numerical Simulation of HMX-Based Cast Explosive Containing AP

高压物理学报. 2022, 36(5): 055202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220538>

缓释结构对B炸药烤燃响应烈度的影响

Influence of Venting Structure on the Cook-off Response Intensity of Composition B

高压物理学报. 2021, 35(3): 035201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200657>

热刺激下不同结构引信的响应机理

Response Mechanism of Fuse with Different Structures under Thermal Stimulation

高压物理学报. 2021, 35(5): 055101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210720>

DOI: 10.11858/gywlxb.20240893

装药缺陷对浇注装药快烤响应特性的影响

梁明阳¹, 智小琦¹, 于永利², 肖游³

(1. 中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051;

2. 吉林江机特种工业有限公司, 吉林 吉林 132021;

3. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能制造事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要:为研究炸药装药缺陷对快速烤燃响应特性的影响,对 I 型烤燃弹(无缺陷装药)和 II 型烤燃弹(含缺陷装药)进行了快速烤燃试验。II 型烤燃弹的响应时间(128 s)短于 I 型烤燃弹(132 s),且在 5 m 处的最大冲击波超压峰值(62.7 kPa)高于 I 型烤燃弹(12.5 kPa)。试验结果表明,点火后 II 型烤燃弹的响应较无缺陷的 I 型烤燃弹更为剧烈,但二者的响应等级仍为燃烧反应。在此基础上,通过 Fluent 软件建立了池火与烤燃试件相互耦合的计算模型,模拟了试件在火焰中的受热情况。研究发现,缺陷越靠近装药表面,缺陷处的局部温度越高,但对装药的响应时间无明显影响。

关键词:快速烤燃;池火模拟;装药缺陷;缺陷位置

中图分类号:O521.9; TJ55

文献标志码:A

不敏感弹药在快烤(快速烤燃)等热刺激条件下的安全性是弹药安全性研究的重要课题。聚合物黏结炸药(polymer boned explosive, PBX)具有能量高、力学性能优良、安定性好等优点,广泛应用于各类武器弹药中^[1]。对于复杂结构的弹体,常用浇注工艺装药。因炸药中高能固相含量高,药液的黏稠度大,若工艺参数控制稍有不当,将导致浇注时装药中出现气孔或空隙等缺陷^[2]。这些缺陷可能改变弹药装药局部的力学性能和安定性。当弹药遭受意外热刺激时,存在严重的事故隐患。因此,研究含损伤装药的弹药在快烤条件下的安全性具有重要意义。

关于快速烤燃,国内外学者进行了大量细致的研究^[3-5]。肖游等^[6]利用 FDS(fire dynamics simulator)软件模拟航空煤油池火燃烧,研究了池火中火焰特征量对快速烤燃的影响,发现烤燃弹放置高度和油池尺寸对池火火焰特征量的影响较大,进而影响烤燃弹的快速烤燃特性。关于炸药装药中的缺陷问题,国内外学者主要针对炸药的细观或晶体缺陷进行研究^[7-8],但对于宏观孔隙等缺陷对热刺激安全性影响的研究相对较少。2016年, Gross 等^[9]通过建立一维、完全瞬态的数值模型对快速烤燃进行研究,发现热路径中的微小变化,如炸药与壳体之间的气隙会显著改变快烤的预测点火时间,但对慢烤预测的影响很小。2020年,王志富^[10]建立了二维 Fourier 热传导模型,模拟了带有球形气泡缺陷的凝聚相炸药 PETN(pentaerythritol tetranitrate)在固定热流密度下的热响应,研究发现,随着热流密度的增加,炸药的点火位置从气泡缺陷处逐渐向受热边界转移。

为探究缺陷对装填某炸药的烤燃弹快速烤燃响应特性的影响,分别对带缺陷和不带缺陷的 2 发弹药进行快速烤燃试验;在此基础上,采用 Fluent 软件建立航空煤油池火与烤燃弹相互耦合的烤燃模型,模拟分析缺陷位置不同的弹药的快烤响应特性,为提高弹药的安全性和可靠性提供技术指导。

* 收稿日期: 2024-09-24; 修回日期: 2024-10-22

作者简介: 梁明阳(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事不敏感弹药研究. E-mail: 1522775234@qq.com

通信作者: 智小琦(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事战斗部毁伤技术及不敏感弹药研究.

E-mail: zxq4060@sina.com

1 快速烤燃试验

1.1 试验装置及原理

快速烤燃试验装置由油池(长 2.0 m、宽 2.0 m、高 0.2 m)、RP-3 航空煤油、弹体支架、电子点火头、远程电子起爆器、A3 见证板、4 支 WRN-132 陶瓷热电偶(分度号 K, 量程 0~1300 °C, 精度 0.1 K)、温度补偿线、SHIMADEN MR-13 测温仪和烤燃弹组成。为提高对响应结果判断的准确度,在弹心投影点距离(d)分别为 5、8 和 10 m 的轴向和径向地面布置压力传感器,以测量响应后的压力。压力传感器选用美国 PCB 公司 ICP 型 113B 系列通用高频压力传感器,谐振频率大于 500 kHz,上升时间小于 1 μ s,现场布置如图 1 所示。烤燃弹固定在支架上,距离油面 0.4 m,4 支 WRN-132 陶瓷热电偶分别监测烤燃弹上方和下方的火焰温度,快速烤燃试验现场和热电偶布置如图 2 所示。

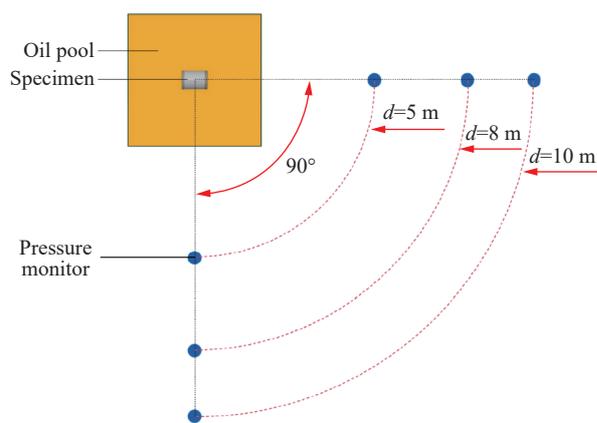


图 1 烤燃系统压力测点俯视图

Fig. 1 Top view of pressure points in the cook-off system

试验所用烤燃弹为某型战斗部的缩比样弹,由壳体、6 根周向均布的加强筋、端盖和炸药装药 3 部分组成,外部尺寸为 $\varnothing 267 \text{ mm} \times 377.5 \text{ mm}$,壁厚 3.25 mm。壳体与底部端盖焊接,与顶部端盖之间用螺纹连接,壳体与端盖材料均为 45 钢。烤燃弹装药为某浇注型炸药,成分及其质量配比为 18% RDX、27% Al 粉、43% AP 和 12% 黏结剂,装药密度为 1.809 g/cm^3 ,装药量为 35 kg。

同尺寸烤燃弹共有 2 发,分别称为 I 型烤燃弹和 II 型烤燃弹,其中:I 型烤燃弹炸药装药正常,不带任何缺陷;II 型烤燃弹在炸药装药内部预制 71 mm \times 62 mm \times 55 mm 的近似椭球形空隙缺陷。图 3 为 II 型烤燃弹的工业 CT 扫描结果,椭球形缺陷以红圈标出。

1.2 试验结果及分析

快速烤燃试验过程中监测点测得的温度-时间变化曲线如图 4 所示。I 型烤燃弹周围火焰温度在点火后 28 s 均达到 550 °C。其中,测点 1 在烤燃过程中发生断路,未测出数据;测点 2、测点 3 和测点 4 的平均温度分别为 852、786 和 861 °C。II 型烤燃弹周围火焰温度在点火后 29 s 均达到 550 °C,测点 1~测点 4 的平均温度分别为 755、811、741 和 816 °C。

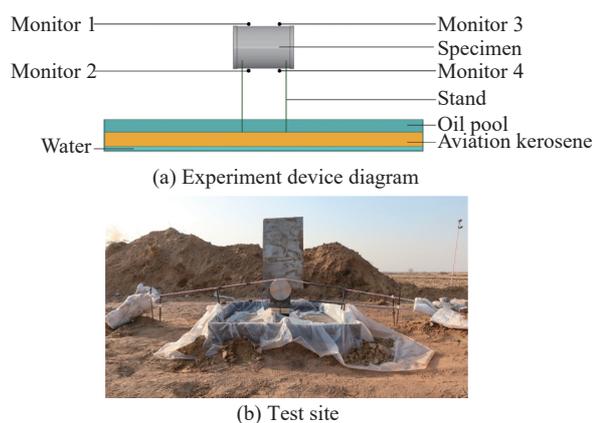


图 2 快速烤燃示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fast cook-off

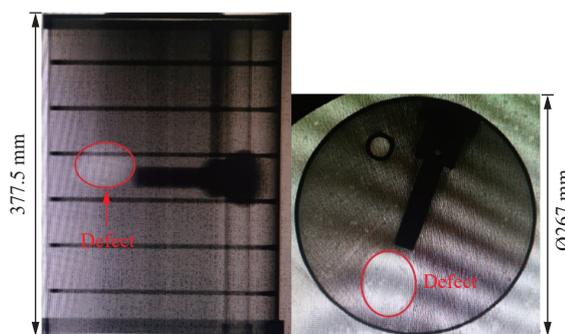


图 3 II 型烤燃弹预制缺陷 CT 图

Fig. 3 CT images of the pre-fabricated defect of Type II cook-off bomb

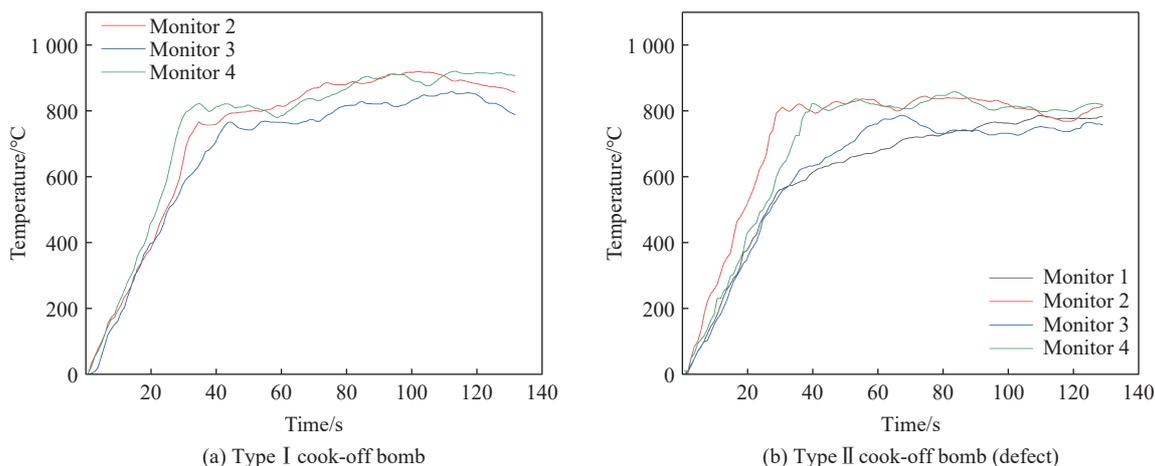


图 4 温度-时间历史曲线

Fig. 4 Temperature-time history curves

根据火焰的温度-时间曲线及现场视频监控,将油池点火到烤燃弹发生响应的时间定义为耐烤燃时间。根据响应后的现场状态、壳体残骸、残药剩余情况和所测压力综合判断响应等级。I型烤燃弹在油池点燃后 132 s 发生响应,并伴有响声。根据现场视频监控观察试验状态,响应时,烤燃弹端盖冲开,试件主体被冲到一边,炸药在壳体内开始燃烧,燃烧较为平稳。响应后,现场有部分剩余残药,壳体外形完整,但有轻微变形,壳体内部的穿线管断裂并被冲飞,现场未收集到穿线管残片。现场测试的最高轴向超压为 5.9 kPa,最高径向超压为 12.5 kPa。

II型带缺陷的烤燃弹在油池点燃后 128 s 发生响应,并伴有响声。响应时,烤燃弹端盖冲开,响应速度快并伴有剧烈燃烧,部分装药破裂成小块,被抛射出壳体后继续燃烧。相比于 I型烤燃弹,II型烤燃弹燃烧得更加剧烈,火光更加明显。响应后现场有部分残药碎块,壳体外形完整,有轻微变形,内部穿线管断裂,并收集到管的残骸。现场测试的最高轴向超压为 47.5 kPa,最高径向超压为 62.7 kPa。两型弹响应时的视频监控如图 5 所示,响应后的状态如图 6 所示。现场测试的超压值见表 1。



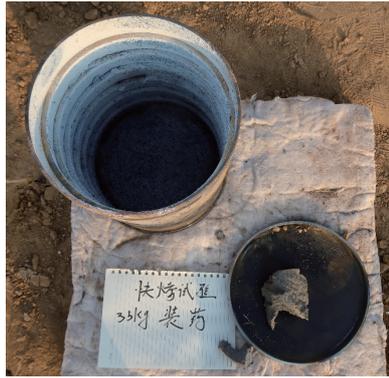
图 5 两型弹响应时的状态

Fig. 5 During-response condition of two types of cook-off bombs

综合分析响应后的现场状态、壳体残骸、残药剩余和所测压力,判断两型弹的响应等级均为燃烧反应。

从表 1 可以看出,II型烤燃弹的轴向和径向超压峰值明显高于 I型烤燃弹,在近距离处的超压增加更为显著。同时,视频观测显示,II型烤燃弹的燃烧火焰更浓烈。

受快速烤燃试验条件的限制,试验只能测得弹体周围火焰温度与烤燃弹的响应时间,无法获取内部炸药的温度分布、点火点温度及位置,特别是缺陷内部及其周围的温度分布情况。为获得这些关键信息,采用 Fluent 软件对快速烤燃试验过程进行模拟研究。



(a) Fragment debris of the Type I cook-off bomb



(b) Fragment debris of the Type II cook-off bomb (defect)

图 6 两型弹响应后的状态

Fig. 6 Post-response condition of two types of cook-off bombs

表 1 冲击波超压峰值

Table 1 Peak overpressure of shock wave

Cook-off bomb	Monitor point location	Distance/m	Overpressure peak/kPa	Cook-off bomb	Monitor point location	Distance/m	Overpressure peak/kPa
Type I	Axial	5	5.9	Type II	Axial	5	47.5
		8	5.4			8	15.9
		10	4.8			10	11.8
	Radial	5	12.5		Radial	5	62.7
		8	9.4			8	32.4
		10	8.9			10	3.2

2 理论模型

2.1 池火模型

池火燃烧属于典型的非预混燃烧,点燃之前燃料与氧化剂没有混合。非预混燃烧也称扩散燃烧,扩散是控制其燃烧速率的主要因素,相比于化学反应发生的时间,扩散、对流等过程发生得更慢。因此,对于扩散燃烧而言,假设化学反应无限快是可以接受的^[11]。

本研究使用 CFD 软件 Fluent 模拟池火燃烧,采用 Non-Premixed Combustion 非预混燃烧模型,通过混合分数定义燃料与氧化剂的混合程度,混合分数的表达式^[12]为

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (1)$$

式中: f 为燃料-氧化剂混合物中燃料所占的质量分数; Z_i 为元素 i 在混合物中的质量分数,下标 ox 表示元素 i 在氧化剂中的质量分数, fuel 表示元素 i 在燃料中的质量分数。为了模拟湍流火焰中的有限速率化学反应过程,使用 PDF 传输模型,该模型能有效地耦合湍流流动和化学反应动力学。利用 DPM 离散相与 Droplet 模型模拟煤油液滴的蒸发过程。

对于不稳定的池火湍流,采用大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 模型。该模型中,湍流结构被划分为大尺度涡旋和小尺度涡旋,其中大尺度涡旋直接通过滤波后的 Navier-Stokes 方程求解,而小尺度涡旋则通过建立 WALE 亚网格尺度模型近似。滤波后的 Navier-Stokes 方程的主要表达式可分为连续方程(式 (2))和动量方程(式 (3))^[12]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; u 为速度, m/s ; x 表示空间坐标, m ; σ_{ij} 为由分子黏度引起的应力张量, Pa ; τ_{ij} 为亚网格尺度应力, Pa ; 下标 i, j 为坐标索引, 采用爱因斯坦求和约定; p 为压力, Pa ; 上横线表示过滤。

烟气采用 Moss-Brookes-Hall 模型描述, 求解得到归一化自由基核浓度 b_{nuc}^* 和碳烟质量分数 Y_{soot} 的运输方程^[12], 分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\text{soot}}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{\text{soot}}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{\text{soot}}} \nabla Y_{\text{soot}} \right) + \frac{dM}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho b_{\text{nuc}}^*) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} b_{\text{nuc}}^*) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{\text{nuc}}} \nabla b_{\text{nuc}}^* \right) + \frac{1}{N_{\text{norm}}} \frac{dN}{dt} \quad (5)$$

式中: M 为碳烟的质量浓度, kg/m^3 ; b_{nuc}^* 为归一化自由基核浓度, 颗粒数 $\times 10^{-15}/\text{kg}$; $N = \rho N_{\text{norm}} b_{\text{nuc}}^*$, 为碳烟颗粒数密度, 颗粒数/ m^3 ; N_{norm} 为常数, $N_{\text{norm}} = 10^{15}$; $\mu_t/\sigma_{\text{soot}}$ 为碳烟质量分数的扩散系数; $\mu_t/\sigma_{\text{nuc}}$ 为碳烟原子成核的扩散系数。

使用离散坐标辐射模型 DO 计算辐射传热^[13]。DO 辐射模型是一种高效解决辐射传输方程的方法, 可适应复杂几何结构, 能够高精度处理参与介质、灵活调节方向分辨率, 并能与 CFD 软件耦合。

2.2 炸药反应动力学

炸药在烤燃过程中遵循质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程^[14]。其中, 质量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 (\rho u_x)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 (\rho u_y)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 (\rho u_z)}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

式中: u_x 、 u_y 和 u_z 分别为流体微元在 x 、 y 和 z 轴向的速度, m/s 。

动量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial (\rho \mu_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mu_i \mu_i) = -\nabla p + \rho g [1 - b(T - T_{\text{ref}})] + \nabla \cdot (m \nabla \mu_i) + S_m \quad (7)$$

式中: p 为流体微元体上的压力, Pa ; μ 为动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; g 为重力加速度, m/s^2 ; T_{ref} 为参考温度, 计算中 T_{ref} 取 298.15 K ; S_m 为动量源项。

能量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = \lambda \nabla^2 T + S \quad (8)$$

式中: h 为单位质量炸药温度升高所需的能量, J/kg ; T 为温度, K ; λ 为热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; S 为炸药自热反应源项, 可用 Arrhenius 方程表示

$$S_m = \rho Q f(\alpha) A \exp(-E/RT) \quad (9)$$

式中: Q 为反应热, kJ/kg ; A 为指前因子; E 为活化能, kJ/mol ; R 为气体常数, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; T 为系统温度, K 。

反应机理函数为

$$f(\xi) = (1 - \xi)^n \quad (10)$$

式中: ξ 为反应进度, n 为反应级数。假设反应为零级, 即 $n=0$, 则 $f(\xi)=1$ 。

3 数值模拟

3.1 快速烤燃数值模拟

利用 Fluent 对快速烤燃过程进行数值模拟, 基于试验条件建立快速烤燃模型, 该模型包含油池、空气域、烤燃试样。由于试验所用试样内部结构复杂, 且为非对称结构, 无法简化, 因此, 建立烤燃试样的全尺寸模型。将端盖与壳体视为一体, 两发模拟烤燃弹的结构相同, 一发无缺陷, 一发有预制缺陷, 缺陷处材料为空气, 如图 7 所示。为模拟开放空间的池火燃烧, 设置空气域直径 12 m、高 12 m, 整体计算域模型如图 8 所示。

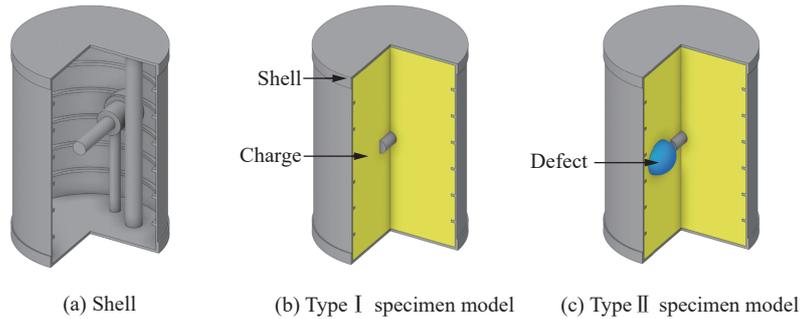


图 7 烤燃模拟试件模型
Fig. 7 Simulation models of Cook-off bombs

在模拟过程中, 由于航空煤油的成分复杂^[15], 为简化数值模型, 根据黄生洪等^[16]和 Kundu 等^[17]的研究, 采用 $C_{12}H_{23}$ 作为替代燃料的主要成分, 其物理特性与航空煤油相似, 能够有效地模拟燃烧过程中航空煤油的行为。为保证池火燃烧的相对稳定, 设置环境为无风环境。根据曾娇^[18]的研究, 尺寸为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的方形油池在无风条件下的单位面积航空煤油质量燃烧速率为 $0.052\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。本研究中, 油池面积为 4 m^2 , 可设置燃料的煤油液滴蒸发流量为 $0.208\text{ kg}/\text{s}$ 。点火后, 池火中的煤油自行燃烧, 池火模拟场景如图 9 所示, 30 s 时的池火温度场截面如图 10 所示。模拟结果表明, 油池火焰可以稳定包围试件。

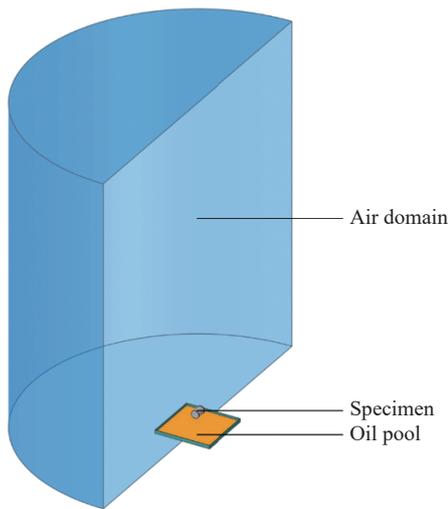


图 8 计算域模型
Fig. 8 Computational domain model

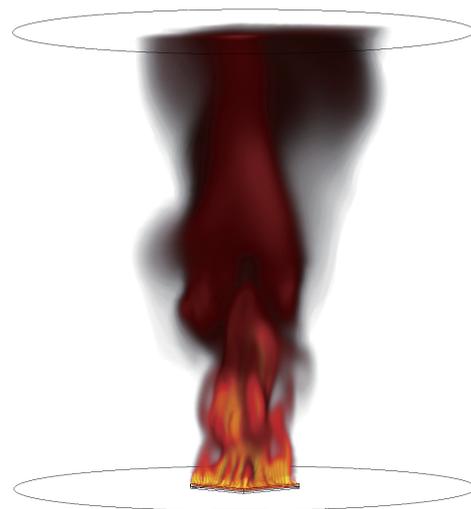


图 9 池火模拟场景
Fig. 9 Pool fire simulation scenario

模拟计算涉及的材料物性参数和反应动力学参数如表 2 和表 3 所示, 其中: C 为比热容, λ 为导热系数。

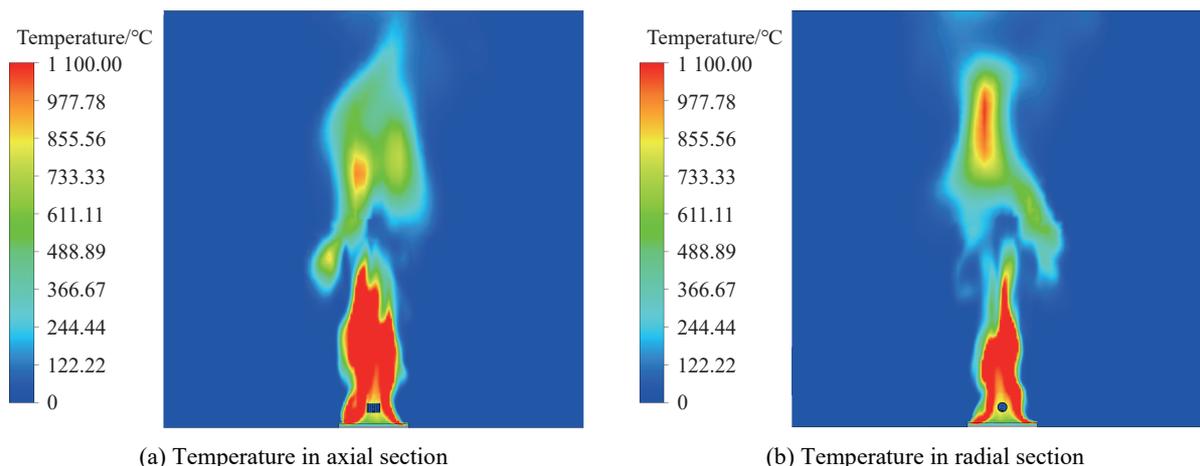


图 10 池火截面温度云图

Fig. 10 Temperature of the cross-section of pool fire

表 2 材料的物性参数

Table 2 Physical parameters of the material

Material	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
Steel	7 850	480	43
Charge	1 809	1 012	0.49
Air	1.225	1 004	0.024 2

表 3 反应动力学参数

Table 3 Reaction kinetic parameters of explosives

$E/(\text{J}\cdot\text{mol}^{-1})$	A/s^{-1}	$Q/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	$R/(\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
115 820	2.030×10^{14}	2.293×10^6	8.314

3.2 数值模拟结果及分析

3.2.1 I 型烤燃弹数值模拟结果分析

设置火焰温度监测点, 监测点位置与试验时温度监测点 2、监测点 3 和监测点 4 的位置相同。通过数值模拟, 得到烤燃弹周围火焰温度随时间变化曲线, 如图 11 所示。I 型烤燃弹周围火焰温度在点火后 27 s 均达到 550 °C, 测点 2、测点 3 和测点 4 的平均温度分别为 854、771 和 838 °C, 相对偏差分别为 0.2%、1.9% 和 2.7%。I 型烤燃弹在油池点火后 134.1 s 后发生点火响应, 与试验结果(132 s)相比, 相对偏差约 1.6%, 模拟结果与试验结果非常吻合。值得注意的是, 火焰温度在保持相对稳定的同时存在一定的波动, 试件上下部分测点的温度有明显区别。这是因为燃烧产生的热流经过试件表面时受到试件的影响, 运动不稳定, 从而产生湍流, 导致试件上下表面温度分布不均匀, 另外, 火焰在不同高度处的温度也不相同。

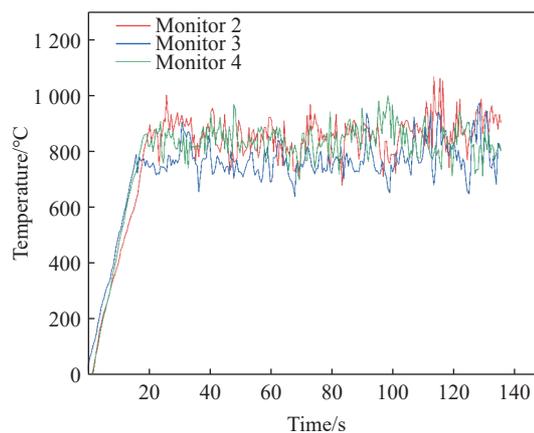


图 11 I 型烤燃弹火焰中测点温度随时间变化曲线

Fig. 11 Temperature-time curves of gauging points in flame of type I cook-off bomb

不同时刻 I 型烤燃弹药柱表面的温度云图如图 12 所示。受池火影响,药柱表面高温区域始终位于药柱两端下部边缘处,即点火位置附近。点火时刻 I 型烤燃弹药柱表面温度云图如图 13 所示。可以看出,点火点位于药柱两端下部边缘的高温区域,134.1 s 时,炸药开始发生点火响应。

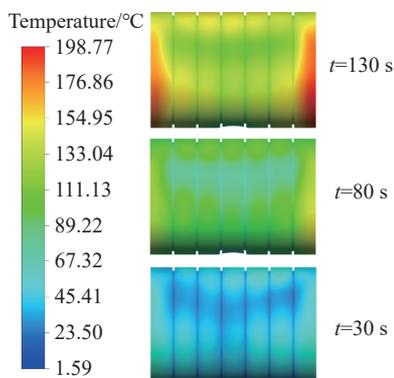


图 12 不同时刻药柱表面温度云图 (I 型烤燃弹)
Fig. 12 Temperature contour map of the charge surface at different times (Type I cook-off bomb)

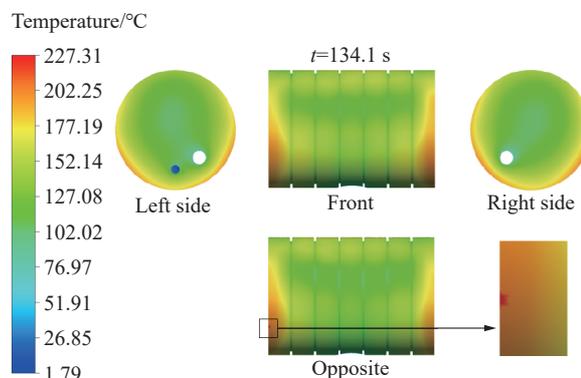


图 13 点火时刻药柱表面温度云图 (I 型烤燃弹)
Fig. 13 Temperature contour map of the propellant surface at the moment of ignition (Type I cook-off bomb)

3.2.2 II 型烤燃弹数值模拟结果分析

II 型烤燃弹与 I 型烤燃弹所用池火模型的结构参数完全相同,仅增加了预制缺陷。设置火焰温度监测点与试验时的测点位置相同,通过数值模拟计算,得到 II 型烤燃弹周围火焰温度随时间变化曲线,如图 14 所示。II 型烤燃弹周围火焰温度在点火后 30 s 均达到 550 °C 以上,测点 1、测点 2、测点 3 和测点 4 的平均温度分别为 768、843、759 和 837 °C,相对偏差分别为 1.7%、3.9%、2.4% 和 2.6%。II 型烤燃弹在油池点火后 129.1 后发生点火响应,与试验结果(128 s)相比,相对偏差为 0.86% 左右,数值模拟结果与试验结果非常吻合。

点火时刻药柱表面的温度云图如图 15 所示,高温区域仍旧位于药柱两端下部边缘,点火位置也位于其附近。129.1 s 时,高温区炸药开始发生点火响应。

图 16(a) 为响应时刻缺陷截面处的温度云图,此时缺陷处的最高温度为 20.41 °C。图 16(b) 为缺陷和药柱截面处温度云图,可以看出,缺陷处的温度高于周围药的温度,但与响应时刻药柱表面的最高温度 211.38 °C 相比,仍存在较大差距。

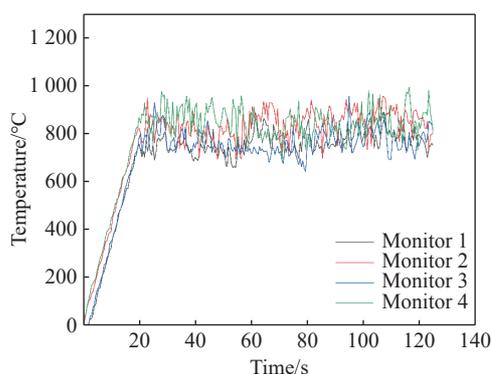


图 14 II 型烤燃弹火焰中测点温度随时间变化曲线
Fig. 14 Temperature-time curves of gauging points in flame of type II cook-off bomb

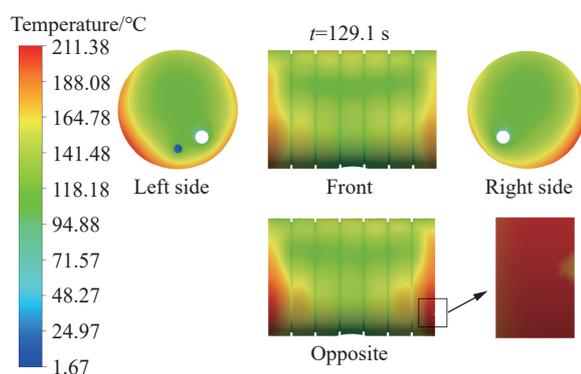


图 15 点火时刻药柱表面温度云图 (II 型烤燃弹)
Fig. 15 Temperature contour map of the propellant surface at the moment of ignition (Type II cook-off bomb)

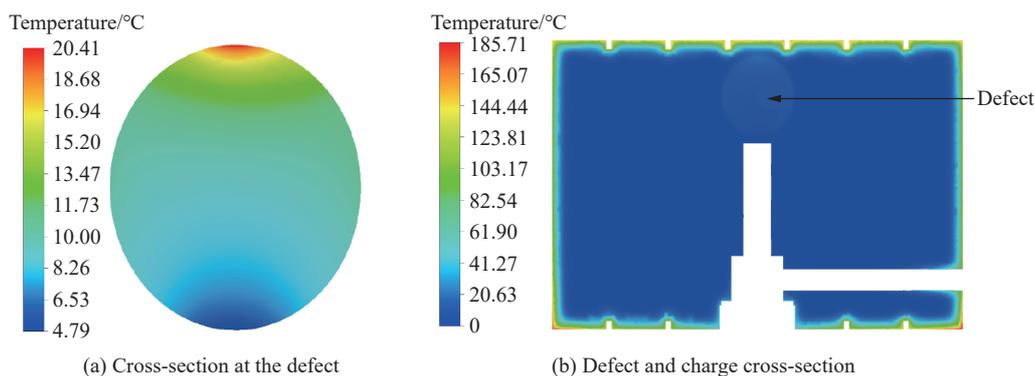


图 16 点火前缺陷和药柱截面温度云图

Fig. 16 Temperature contour map at the defect and propellant cross-section before ignition

3.3 两型烤燃弹的反应进度计算

反应进度 ξ 是描述特定条件下反应物转化为生成物的程度。常用于表征化学反应在任意时刻的进展情况,是分析反应机制和动力学的重要工具。 ξ 的定义^[19]为

$$n_B(\xi) \stackrel{\text{def}}{=} n_B(0) + \nu_B \xi \quad (11)$$

式中: $n_B(\xi)$ 为组分 B 在反应进度为 ξ 时的物质的量, ξ 的单位为 mol; $n_B(0)$ 代表 $\xi=0$ (反应尚未开始)时组分 B 的物质的量,是原始给定的量,在给定条件下是一个常数; ν_B 为组分 B 的化学计量数。

根据式(11)计算 2 种烤燃弹的反应进度,得到响应时刻 I 型烤燃弹的反应进度为 8.37×10^{-6} mol, II 型烤燃弹的反应进度为 6.65×10^{-6} mol, I 型烤燃弹的反应进度相较于 II 型烤燃弹的反应进度多了 1.72×10^{-6} mol。可以看出,在点火时刻, I 型烤燃弹和 II 型烤燃弹中的装药均发生了一定程度的分解,但分解量都极为有限。

3.4 不同位置缺陷的影响

由图 15(b)可知,在快速烤燃过程中,药柱的传热主要集中在表面相对较薄的区域,温度超过 50°C 的药柱层厚度均不超过 7 mm。高温区域主要分布在药柱两端下部的边缘部分。本试验中的缺陷距离药柱径向外表面约 14 mm,对于药柱的整体传热而言,这一距离的影响相对较小。此外,缺陷并不处于火焰传热作用下的高温区域。因此,该缺陷对烤燃弹响应特性的影响甚微。快速烤燃高温区主要分布在药柱表面。为此,在数值模拟过程中,尝试调整缺陷位置,观察缺陷是否对试件快速烤燃的响应特性产生影响。

根据药柱高温区的分布及其结构特征,将仿真中的缺陷位置分别调整至药柱右端下部的 2 个区域:区域 A 位于药柱右端正下方,设置 3 个不同位置缺陷模型,分别命名为 A1、A2、A3,其缺陷位置与轴向药柱表面的最近距离分别为 1、2、3 mm,与径向壁面的最近距离分别为 3、5、7 mm,缺陷位置如图 17 所示;区域 B 位于药柱右端的右下高温区,设置 3 个不同位置缺陷模型,分别命名为 B1、B2、B3,其缺陷位置与轴向表面的最近距离分别为 1、2、3 mm,与径向壁面的最近距离分别为 3、5、7 mm,缺陷位置如图 18 所示。

图 19 为响应前不同位置区域的药柱及其缺陷截面温度分布云图。通过对比分析,可以明显观察到缺陷区域的温度显著高于周边药柱的温度。这一现象是由缺陷区域充满静止空气引起的。空气的低热导率特性导致缺陷处的热量难以有效传导,进而造成热量在缺陷内部靠近药柱的边界区域积聚。因此,在缺陷与药柱边界之间的药柱部分,其温度相对更高,从而进一步扩大了药柱内部高温区域的影响范围。

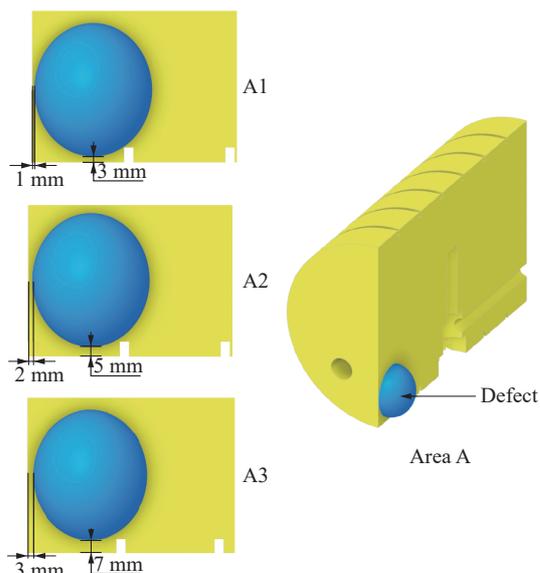


图 17 区域 A 缺陷位置示意图

Fig. 17 Defect location diagram in area A

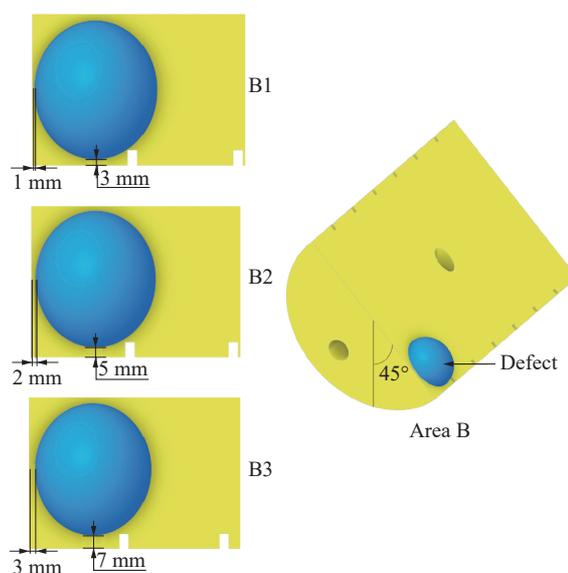


图 18 区域 B 缺陷位置示意图

Fig. 18 Defect location diagram in area B

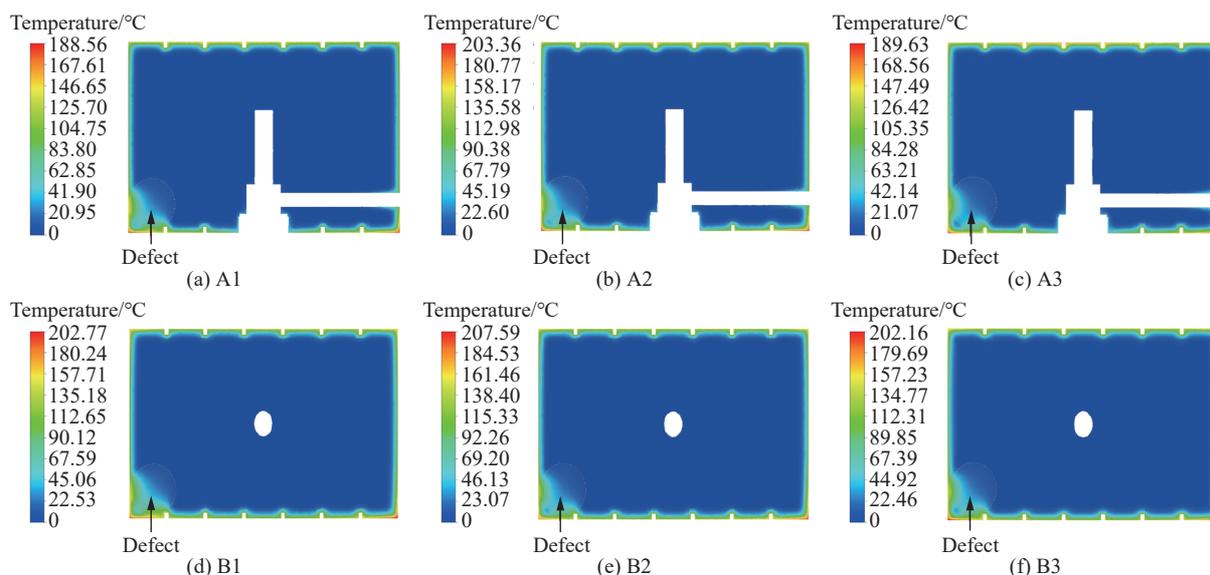


图 19 响应前不同位置缺陷及药柱截面温度云图

Fig. 19 Temperature contour maps of defects at different positions and charge cross-sections before ignition

图 20 显示了响应前各位置的缺陷与药柱的最高温度随时间变化曲线。可以看出，无论是在区域 A 还是区域 B，缺陷位置越靠近药柱表面，其表面最高温度越高，但相较于药柱表面区域的最高温度，仍低了 50 °C 以上。模型 A1、A2、A3、B1、B2 和 B3 的响应时间分别为 120.5、134.0、134.5、137.5、132.5 和 142.5 s，与无缺陷的 I 型烤燃弹的试验结果相比，误差分别为 8.7%、1.5%、1.9%、4.2%、0.4% 和 8.0%。烤燃弹的响应时间主要受药柱表面最高温度的影响，而缺陷处的热积聚及其形成的高温区域并没有对炸药的响应时间造成明显影响。

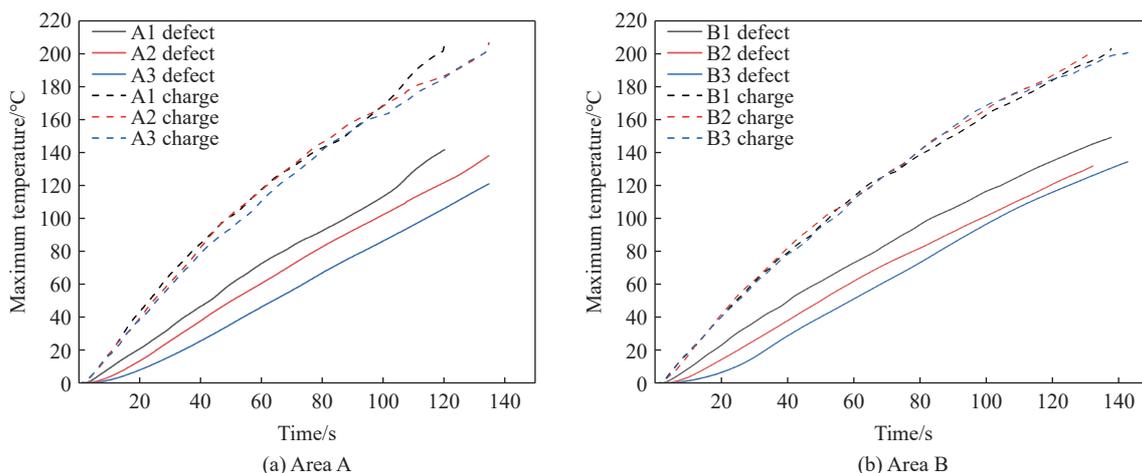


图 20 缺陷与药柱的最高温度随时间变化曲线

Fig. 20 Time-dependent curves of the maximum temperature of defects and explosive charges

4 结 论

(1) 快速烤燃试验中 I 型烤燃弹(无缺陷装药)和 II 型烤燃弹(含缺陷装药)的响应时间分别为 132 和 128 s, 在 5 m 处产生的最大冲击波超压峰值分别为 12.5 和 62.7 kPa。结合试验时视频监控观测结果, 可以说明, II 型烤燃弹(含缺陷装药)点火后的响应剧烈程度明显高于 I 型烤燃弹, 但两者的响应等级均为燃烧反应。

(2) 通过 Fluent 软件建立了池火与烤燃试件的相互耦合的数值模型, 计算结果显示, 药柱内部的缺陷导致局部温度升高, 但缺陷处的热积聚温度并没有高于药柱表面的点火温度。因此, 对于快速烤燃而言, 装药内部缺陷对装药的响应时间基本没有影响。

参考文献:

- [1] 江鹏. 烤燃作用下 PBX 炸药的热分解及微观热损伤研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
JIANG P. Thermal decomposition and microstructure study of PBX explosive subjected to cook-off [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [2] 黄开书, 江涛, 吴欣欣, 等. 提高浇注 PBX 炸药装药品质技术途径 [J]. *兵工自动化*, 2023, 42(10): 60–62.
HUANG K S, JIANG T, WU X X, et al. Technical approach to improve charging quality of cast PBX explosive [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2023, 42(10): 60–62.
- [3] CUENOT B, SHUM-KIVAN F, BLANCHARD S. The thickened flame approach for non-premixed combustion: principles and implications for turbulent combustion modeling [J]. *Combustion and Flame*, 2022, 239: 111702.
- [4] WEI R C, WANG B W, HE Q Z, et al. An experimental study on aviation kerosene pool fire flame and thermal radiation [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2263(1): 012018.
- [5] 王帅, 智小琦, 贾秋琳, 等. 基于 mass_flux 法的炸药火烧试验与数值仿真 [J]. *兵器装备工程学报*, 2020, 41(8): 1–6.
WANG S, ZHI X Q, JIA Q L, et al. Experiment and numerical simulation of explosive firing based on mass_flux method [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(8): 1–6.
- [6] 肖游, 智小琦, 王琦, 等. 火焰特征量对快速烤燃的影响 [J]. *高压物理学报*, 2022, 36(5): 055201.
XIAO Y, ZHI X Q, WANG Q, et al. Influence of flame characteristics on fast cook-off [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(5): 055201.
- [7] 王洪波, 王旗华, 卢永刚, 等. PBX 炸药细观孔洞缺陷对其冲击点火特性的影响 [J]. *火炸药学报*, 2015, 38(5): 31–36.
WANG H B, WANG Q H, LU Y G, et al. Effect of Meso-defect holes on the shock-to-ignition characteristics of PBX explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2015, 38(5): 31–36.
- [8] 周婷婷, 楼建锋. 含孔洞炸药晶体 HMX 冲击响应的分子动力学模拟 [J]. *含能材料*, 2024, 32(1): 65–75.
ZHOU T T, LOU J F. Molecular dynamic studies on the shock responses of energetic crystal HMX with cylindrical voids [J].

- Chinese Journal of Energetic Materials*, 2024, 32(1): 65–75.
- [9] GROSS M L, HEDMAN T D, MEREDITH K V. Considerations for fast cook-off simulations [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(6): 1036–1043.
- [10] 王志富. 有装药缺陷的凝聚相炸药烤燃的数值模拟 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
WANG Z F. Numerical simulation of the burning of defective condensed phase explosives [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020.
- [11] PETERS N. Turbulent combustion [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [12] Ansys Inc.. Fluent A.: ANSYS fluent theory guide [Z]. USA, 2013, 15317: 724–746.
- [13] ATTAR A A, POURMAHDIAN M, ANVARIPOUR B. Experimental study and CFD simulation of pool fires [J]. *International Journal of Computer Applications*, 2013, 70(11): 9–15.
- [14] 任玉新, 陈海昕. 计算流体力学基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
REN Y X, CHEN H X. Fundamentals of computational fluid dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [15] 付淑青. 国产航空煤油多组分替代燃料的燃烧反应机理研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2020.
FU S Q. Study on combustion reaction mechanism of domestic aviation kerosene multi-component surrogate fuels [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2020.
- [16] 黄生洪, 徐胜利, 刘小勇. 煤油超燃冲压发动机两相流场数值研究 (III) 煤油在超燃流场中的多步化学反应特征 [J]. *推进技术*, 2005, 26(2): 101–105.
HUANG S H, XU S L, LIU X Y. Combustion flow of kerosene-fueled scramjet with 3D cavity (III) multi-step chemistry characteristics of kerosene [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2005, 26(2): 101–105.
- [17] KUNDU K, PENKO P, YANG S. Reduced reaction mechanisms for numerical calculations in combustion of hydrocarbon fuels [C]//36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 1998.
- [18] 曾娇. 开放空间航空煤油池火燃烧数值模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
ZENG J. Numerical simulation of aviation fuel pool fire in open air [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [19] 傅献彩. 普通高等教育十五国家级规划教材: 物理化学 (上) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 99–103.

Effect of Charge Defects on the Fast Cook-off Response Characteristics of Cast PBX Explosive Charge

LIANG Mingyang¹, ZHI Xiaoqi¹, YU Yongli², XIAO You³

(1. School of Electromechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

2. Jilin Jiangji Machine Special Industry, Ltd., Jilin 132021, Jilin, China;

3. Department of Intelligent Manufacturing, Automation Research Institute, Ltd., China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract: To study the effect of explosive charge defects on fast cook-off response characteristics, fast cook-off tests were conducted on type I cook-off bomb (with defect-free charges) and type II cook-off bomb (with defective charges). The results showed that the response time of type II cook-off bomb (128 s) is shorter than that of type I cook-off bomb (132 s), and the maximum shock wave overpressure at 5 m (62.7 kPa) is higher than that of type I cook-off bomb (12.5 kPa). This indicates that the combustion of the type II cook-off bomb was more intense than the defect-free type I cook-off bomb after ignition, although both of them exhibit the same response level of burning reaction. Furthermore, a coupled computational model of pool fire and cook-off specimen was established to simulate the heating of the specimen in the flame using Fluent software. It is found that the closer the defect is to the charge surface, the higher local temperature at the defect, but it does not significantly affect the response time of explosive charges.

Keywords: fast cook-off; pool fire simulation; charge defects; defect position