

doi: 10.7690/bgzdh.2026.05.012

不同升温速率下引信响应特性及隔热涂层位置研究

梁宇航¹, 吴立林¹, 王 昊¹, 翟 蓉², 范晨阳²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 机电动态控制重点实验室, 西安 710065)

摘要: 针对弹药的贮存、运输和使用过程中受热刺激, 存在爆燃的可能性, 对不同升温速率下引信的响应特性规律进行研究。以 JHX-1 装药的隔爆型某引信为研究对象, 研究不同升温速率下引信烤燃热传导和隔热涂层位置对引信响应特性的影响, 得到引信的点火位置、点火时间和点火温度等。结果表明: 随着升温速率的增加, 点火位置会由传爆药中心移动到传爆药下侧边缘, 最终转移到导爆药中心; 引信壳体厚度会对点火位置产生影响, 点火位置会偏向壳体厚度较薄侧; 升温速率对点火温度影响较小; 在引信内部使用隔热涂层可以降低点火温度, 在外部使用可以延长点火时间; 在导、传爆药周围使用局部隔热涂层与整体隔热涂层差异不大。

关键词: 引信; 烤燃; 升温速率; 点火时间; 隔热涂层

中图分类号: TJ410.3⁺2 **文献标志码:** A

Study on Fuze Response Characteristics and Position of Thermal Barrier Coating at Different Heating Rates

Liang Yuhang¹, Wu Lilin¹, Wang Jiong¹, Zhai Rong², Fan Chenyang²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Electromechanical Dynamic Control Key Laboratory, Xi'an 710065, China)

Abstract: According to the possibility of detonating when ammunition is stimulated by heat in the process of storage, transportation and use, the response characteristics of fuze at different heating rates are studied. Taking the JHX-1 explosion-proof aerial bomb fuze as the research object, the influence of the heat conduction of the fuze cook-off and the position of the thermal insulation coating on the response characteristics of the fuze under different heating rates was studied, and the ignition position, ignition time and ignition temperature of the fuze were obtained. The results show that with the increase of heating rate, the ignition position will move from the center of the booster to the lower edge of the booster, and finally to the center of the detonator. The thickness of the fuze shell will affect the ignition position, and the ignition position will tend to the thinner side of the shell. The heating rate has little effect on the ignition temperature; The use of thermal barrier coating inside the fuze can reduce the ignition temperature, and the use of thermal barrier coating outside the fuze can prolong the ignition time.

Keywords: fuze; cook-off; heating rate; ignition time; thermal barrier coating

0 引言

随着高新技术的飞速发展, 复杂的战场环境对武器系统提出了更高要求。弹药的储存、运输和使用过程中受到热刺激、机械刺激等意外情况的影响, 存在爆燃的可能性, 危及己方作战人员的生命安全且减弱战斗力; 因此, 在烤燃环境下不敏感弹药引信响应特性规律对弹药引信的安全性设计研究^[1]具有重要的参考价值。数值分析方法是研究烤燃现象的重要方法之一, Catalano 等^[2-6]采用 COMSOL 软件模拟弹药在火烧快速烤燃下的热响应模型, 建立火焰对弹药的热辐射和热对流以及弹药内部的热传导。

刘文杰^[7-9]利用 Fluent 软件研究了药柱长度和

药柱直径对烤燃弹相应温度、点火位置和点火点数量的影响; 就目前来看了解引信结构在热应力作用下反应程度, 从而掌握对不同升温速率下引信响应特性的影响规律, 提出现有引信对不敏感弹药的薄弱环节仍是重要工作。

针对引信不同热刺激环境的响应特性问题, 笔者以 JHX-1 装药的隔爆型某引信为研究对象, 研究了在不同升温速率下引信的点火时间、点火温度等, 建立了 3 维引信烤燃模型, 分析了不同升温速率对引信烤燃响应特性的影响, 并研究了隔热涂层作用于引信的隔热效果, 为引信的热安全性设计提供参考。

收稿日期: 2024-12-02; 修回日期: 2025-01-15

第一作者: 梁宇航(1999—), 男, 山东人, 硕士。

通信作者: 王 昊(1964—), 男, 江苏人, 博士。

1 引信慢速烤燃特性试验研究

1.1 引信烤燃试验装置

烤燃试验装置^[10-14]主要由烤燃炉、温度采集控制系统和热电偶等装置组成，如图 1 所示。

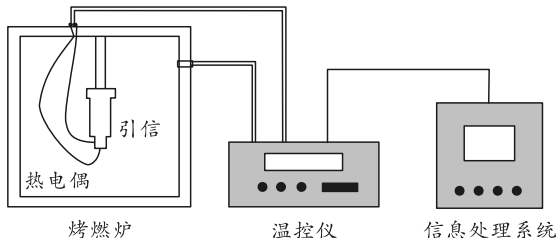


图 1 烤燃试验系统

烤燃试验炉有良好的保温性能和防爆性能。温度采集控制系统中有温控仪和数据采集系统。温控仪为可编程温控仪，具有升温速率可调功能；数据采集系统通过计算机数据采集软件实时对温度进行监测和储存；热电偶选用 K 型热电偶。

1.2 引信烤燃试样

试验以某引信为烤燃试样，导爆药柱和传爆药柱为 JHX-1 装药(主要成分为 FOX-7 炸药、RDX 和粘结剂)。

1.3 试验方案

试验采用悬挂方式对引信样机进行固定，试验件放在烤燃炉中心的位置，固定装置尽可能减少与试验样机的接触，避免影响施加在引信样机上的热刺激^[15]。为测得引信发生反应时的壳体温度，在引信样品的底部放置热电偶，如图 2 所示。

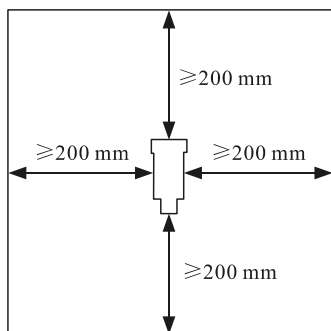


图 2 试验场地

图 2 中进行 2 种升温速率试验，每种升温速率有 2 发试验。第 1 种采用标准试验方法以 3.3 °C/h 的升温速率直至试验件发生反应；第 2 种试验将升温速率设置为 2 个阶段，第 1 阶段升温速率以 12 °C/h 升温至 120 °C，第 2 阶段将升温速率为 3.3 °C/h 直至试验件发生反应为止。试验全过程实时检测和记录温度数据。

1.4 试验结果

图 3 为某引信温升曲线。

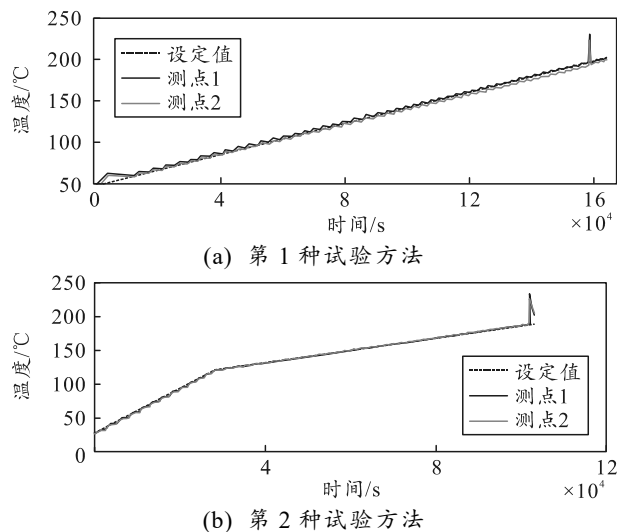


图 3 引信试验样机反应程度及壳体温度-时间曲线

某引信在升温速率为第 1 种时，响应时的壳体温度为 185.3 °C，点火时间为 160 375 s，反应程度为爆燃。在升温速率为第 2 种时，反应程度与标准实验相同，引信壳体无塑性变形，响应时壳体温度为 189.6 °C，点火时间为 101 136 s，反应程度为爆燃。表 1 为 2 种升温速率 2 发试验引信的试验结果。

表 1 烤燃试验结果

| 试验方法 | 测点 | 反应温度/°C | 反应时间/s |
|-------|----|---------|---------|
| 第 1 种 | 1 | 189.6 | 160 357 |
| | 2 | 188.4 | 159 035 |
| 第 2 种 | 1 | 185.3 | 101 136 |
| | 2 | 186.8 | 102 034 |

在第 1 种升温速率下的壳体反应温度略高于第 2 种升温速率下的壳体温度。

2 烤燃试验可信性验证

2.1 物理模型

笔者以某引信为研究对象，根据文献^[16-17]中烤燃试验，建立引信模型如图 4 所示。

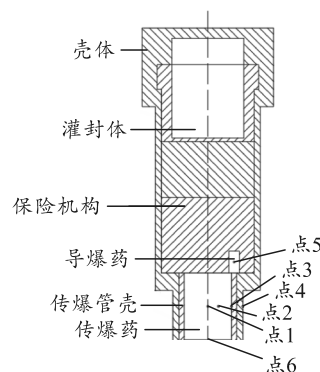


图 4 引信模型

模型主要由壳体、灌封体、保险机构、导爆药、传爆药和下端盖等部分组成。导爆药柱和传爆药柱为不敏感炸药 JHX-1。为方便检测引信点火时间、点火温度等信息，在计算过程中设置 6 个观测点来监测该点的温度。

2.2 基本假设

对引信烤燃过程进行假设：

- 1) 引信的各部件接触良好，没有空隙；
- 2) 装药热分解反应符合 Arrhenius 方程；
- 3) 各部件的物理参数和化学参数均为常数，且不随温度变化。

2.3 数学模型

引信烤燃数值计算流程分为前处理、计算求解

和后处理。前处理建立模型划分网格；计算求解过程使用 Fluent 完成；计算结果后处理使用 Tecplot，导出温度分布图等结果。

引信在烤燃环境下的数值模拟过程可以按照炸药在高温环境下的热点火问题进行描述，根据能量守恒定律和傅里叶传热定律^[18-20]，引信在烤燃环境下的瞬态传热方程为：

$$C_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + S \quad (1)$$

式中： ρ 为反应物的密度； C_v 为反应物比热容； T 为温度； t 为时间； λ 为反应物导热系数； ∇^2 为拉普拉斯运算符； S 为化学反应放热项。

引信中各部件的材料物性参数如表 2 所示。

表 2 引信材料物性参数

| 材料 | ρ /(kg/m ³) | C /((J/kg)/K) | λ /((W/m)/K) | Z /(S ⁻¹) | E /(J/mol) | Q /(J/kg) |
|-------|------------------------------|-----------------|----------------------|-------------------------|-------------------|-------------|
| 铝 | 2 719 | 871.00 | 202.400 | — | — | — |
| 聚氨酯 | 45 | 1 200.00 | 0.025 | — | — | — |
| TC4 | 4 510 | 612.00 | 7.955 | — | — | — |
| 45 钢 | 8 030 | 502.48 | 16.270 | — | — | — |
| JHX-1 | 1 885 | 1 424.00 | 0.250 | 4.5×10^{26} | 9.3×10^6 | 275 970 |

2.4 计算方法

引信为轴对称模型，为减少计算时间，建立 1/2 的引信模型。为了使计算结果更加准确，在导爆药和传爆药位置对网格进行加密处理，如图 5 所示。

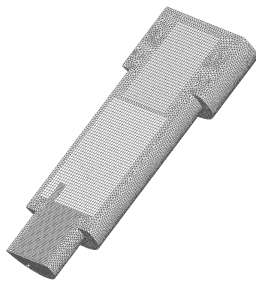


图 5 引信网格划分

笔者采用 ANSYS Workbench 中的 Fluent 模块进行烤燃过程的模拟，炸药反应的源项和加热速率以 UDF 的形式导入到 Fluent 中，选择引信壳体外壁面为加热边界，计算初始温度为 293 K。

2.5 计算结果和试验值比较

根据试验方案的升温速率，进行 2 组数值计算：第 1 组以 3.3 °C/h 的升温速率加热至引信发生响应；第 2 组先以 12 °C/h 的升温速率升温至 120 °C，再以 3.3 °C/h 的升温速率加热至引信发生响应。图 6 为烤燃过程温度-时间曲线，与计算温度时间与试验结果基本一致。

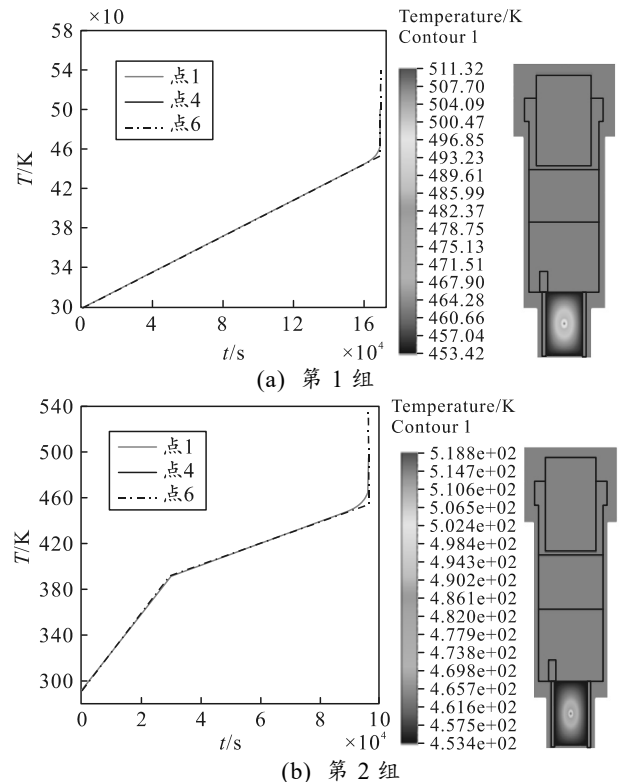


图 6 不同升温速率下，引信壳体的温度-时间曲线

当设置监测点处温度急剧上升，装药处于热失控状态，由热爆炸理论认为引信发生响应，将此刻定义为烤燃响应时间。表 3 中给出了引信点火时间和点火时壳体温度的试验平均值和计算值对比。

表 3 试验值与计算值对比

| 试验方式 | 内容 | 试验平均值 | 计算值 | 误差/% |
|-------|--------|------------|-----------|------|
| 第 1 种 | 点火时间/s | 159 696.0 | 167 776.0 | 4.87 |
| | 壳体温度/℃ | 189.00 | 184.63 | 2.36 |
| 第 2 种 | 点火时间/s | 101 585.00 | 98 460.00 | 3.17 |
| | 壳体温度/℃ | 186.10 | 183.86 | 1.21 |

计算结果和试验结果相吻合，误差低于 5%，证明所建立引信烤燃计算模型可信。

3 计算结果分析

3.1 不同升温速率计算结果

采用上文中所述的烤燃计算模型以 0.5、1、2、3、4 和 5 K/min 6 种不同升温速率对引信进行烤燃过程计算分析，研究不同升温速率下的引信响应特性，如图 7-8 所示。

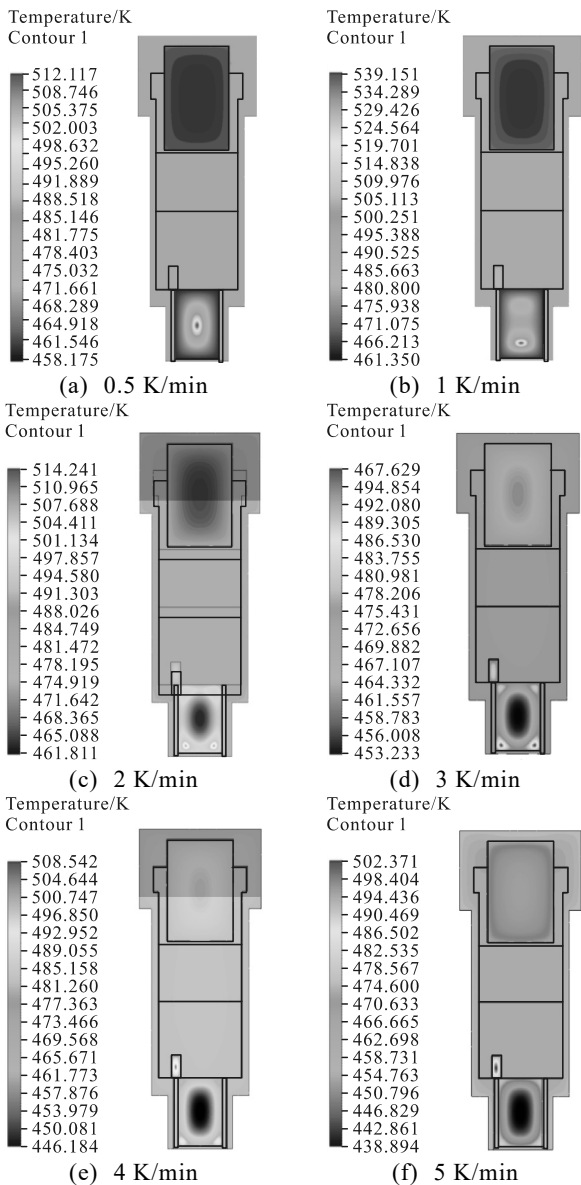
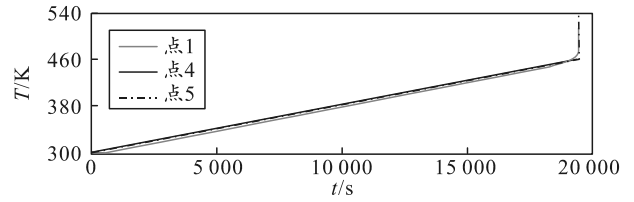
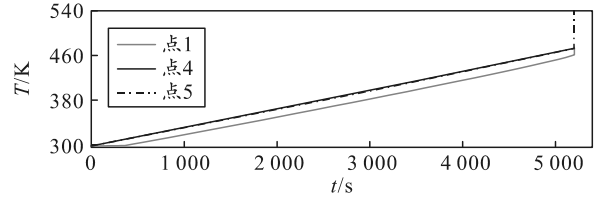


图 7 不同升温速率下，引信点火时刻温度分布



(a) 0.5 K/min



(b) 2 K/min

图 8 0.5、2 K/min 升温速率下，观测点温度-时间曲线

随着升温速率的提高，引信的点火位置从导爆药的中心位置逐渐移向传爆药柱的下边缘位置，最终会转移到导爆药的中心位置。如图 7(a)和图 8(a)因为升温速率较小时，引信体内尤其是传爆药柱的温度梯度较小，随着温度升高，传爆药的热分解速率加快，而传爆药柱中心的热量散出困难，在达到一定温度时会发生点火；图 7(c)和图 8(b)传爆药柱的温度梯度较大，下侧壳体处的传爆药温度较高，在外部热量还没有完全传递到传爆药中心位置时，传爆药柱边缘处的温度就已经到达点火温度，由于引信结构原因，边缘处的局部高温区仅仅出现在传爆药柱下侧，药柱下侧更容易受到外部热刺激的影响，说明对其不敏感化改造也应该主要针对传爆药的下侧位置；随着升温速率的继续增大如图 7(f)，因为导爆药柱的尺寸较小，升温速率较大时比起尺寸较大的传爆药柱热量更容易积累从而发生热点火，而且如果导爆药柱先发生点火，更容易引爆传爆药柱，从而使引信的反应程度更加剧烈。在上述不同升温速率下引信点火时间变化如图 9 所示。

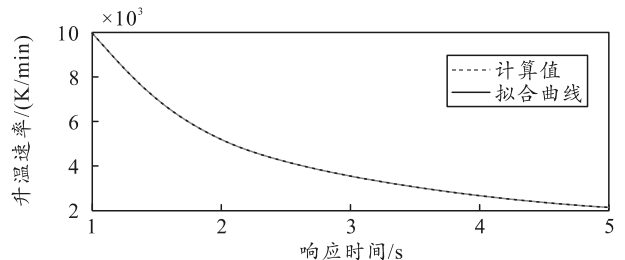


图 9 不同升温速率下，引信点火时间变化

不同升温速率下，引信烤燃特征参数如表 4 所示。升温速率对于引信的烤燃特征均有显著影响，在升温速率由 0.5 提升到 5 K/min 过程中，点火时间从 19 448 缩短至 2 157 s，壳体温度从 460.08 升高至 477.68 K。

表 4 不同升温速率下，慢速烤燃特征参数

| 升温速率/ (K/min) | 点火 时间/s | 点火 温度/K | 壳体 温度/K | 点火位置 |
|------------------|------------|------------|------------|----------|
| 0.5 | 19 448 | 514.36 | 460.08 | 传爆药中心 |
| 1.0 | 10 028 | 511.49 | 465.14 | 传爆药中心下侧 |
| 2.0 | 5 195 | 516.43 | 471.19 | 传爆药下侧边缘处 |
| 3.0 | 3 529 | 512.97 | 474.47 | 传爆药下侧边缘处 |
| 4.0 | 2 679 | 510.81 | 476.62 | 导爆药中心 |
| 5.0 | 2 157 | 505.02 | 477.68 | 导爆药中心 |

3.2 点火位置影响因素

为探究引信点火位置变化原因，使用 B 引信仿真结果与上文引信进行对比(上文引信称为 A 引信)，根据文献[9, 21]建立引信模型如图 10 所示。

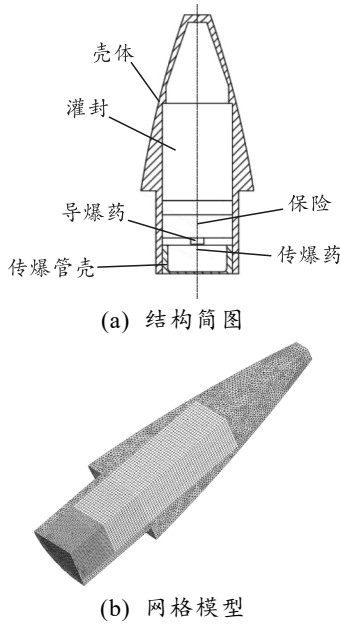
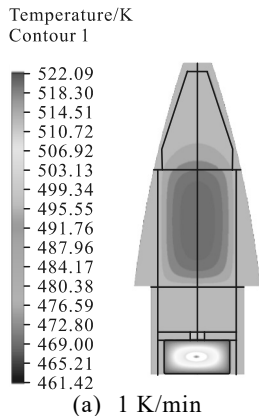


图 10 引信模型

模型由壳体、灌封、保险机构、导爆药柱、传爆药柱和隔爆等部分组成，壳体结构为钢，灌封体为聚氨酯，保险机构为铝，装药为 JHX-1。仿真基本假设和基本流程与前文一致，不再赘述。对 B 引信进行升温速率为 1、2 和 3 K/min 的仿真计算，结果如图 11 所示。



(a) 1 K/min

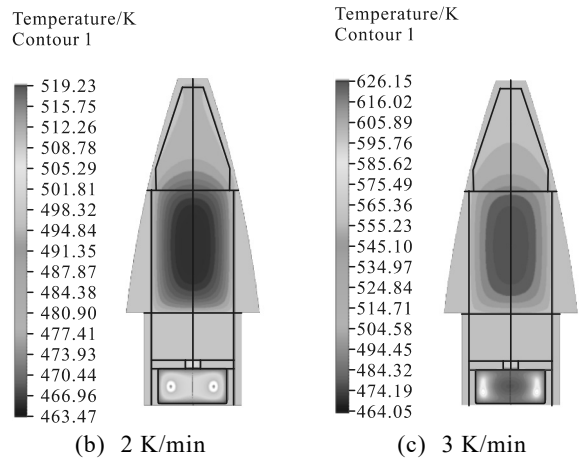


图 11 不同升温速率下，引信点火位置分布

由图可知：在升温速率为 2 和 3 K/min 时，点火位置分别在传爆药中心位置周围呈圆环分布和传爆药两侧底部成圆环分布。2 种引信在相同升温速率下，点火位置有所差异，在升温速率为 1 K/min 时，如图 8(b)和图 11(a)，A 引信点火位置在传爆药中心下侧，B 引信点火位置在传爆药中心。A 引信结构中传爆药上侧部分区域壳体较厚，壳体下侧的厚度较薄，热量能够更快到达传爆药下侧，因此在相同时间内传爆管下侧的传爆药温度上升较快，传爆药整体受热不均匀从而导致传爆药下侧先发生点火。在引信升温速率为 3 K/min 时，如图 7(d)和图 11(c)所示，2 种引信点火位置均在传爆药两侧底部，传爆药下侧能够同时接收到引信壳体外壁面传递的热量和引信底部传递的热量，所处环境升温速率过快，热量还没有传递到传爆药柱中心时，下侧边缘处已出现局部高温区从而发生点火。引信点火位置随着升温速率的增加，由传爆药中心位置移动到传爆药下侧边缘处，最终转移到导爆药中心；同时传爆药周围壳体厚度存在差异，会导致药柱受到不均匀加热，响应时点火位置会偏向壳体厚度较薄一侧，因此可对传爆药周围壳体薄弱处进行特殊防护。

4 隔热涂层位置改造

针对引信材料防护技术方面进行改造，探究隔热涂层位置对引信烤燃特性的影响。

4.1 计算模型

文献[20]选取材料 T-09 为引信的隔热涂层材料，T-09 是一种新型热防护涂料，由交联密度的有机硅树脂绝热材料和吸热材料组成，具有耐高温、抗高温氧化和绝热的特点，其材料参数如表 5 所示。

表 5 T-09 材料物性

| | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|--|
| $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$ | $C/(\text{J}/\text{kg}/\text{K})$ | $\lambda/(\text{W}/\text{m}/\text{K})$ |
| 1 800 | 1 940 | 0.18 |

厚度设置为 2 mm，初始温度为 298 K，升温速率为 0.5 K/min，隔热层选择无涂层、内涂层 2 mm、外涂层 2 mm 和内外双涂层均为 2 mm 4 种规格，无涂层为对照组，即不加任何防护状态下引信体在烤燃环境下的响应状态。涂层位置设计如图 12 所示。

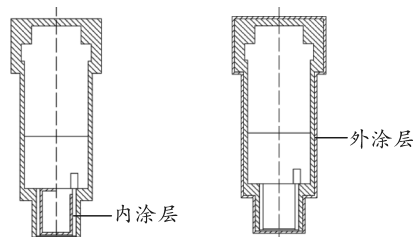


图 12 隔热涂层位置

4.2 仿真结果

升温速率为 0.5 K/min 时，引信点火时刻的温度分布如图 13 所示。响应数据见表 6 所示。

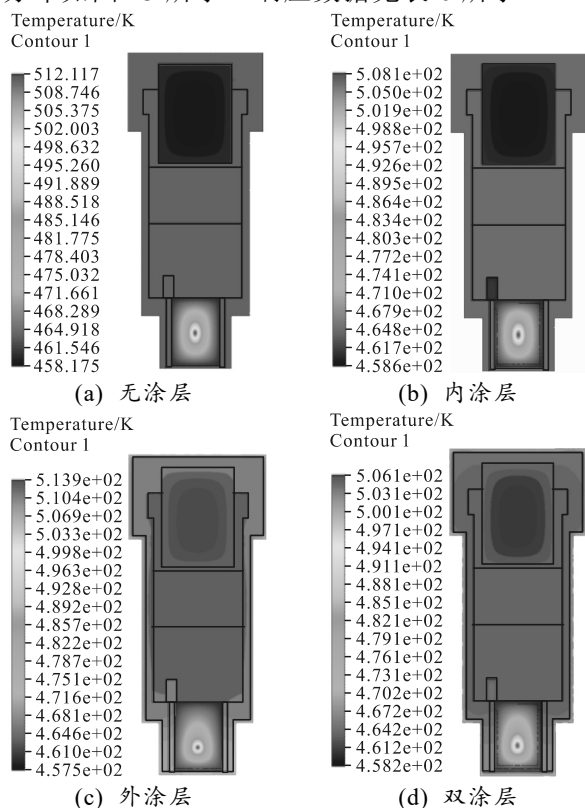


图 13 0.5 K/min 升温速率下，引信点火时温度分布

表 6 相同升温速率下，慢速烤燃特征参数

| 涂层位置 | 点火时间/s | 点火温度/K | 点火位置 |
|------|--------|--------|---------|
| 无涂层 | 19 448 | 514.4 | 传爆药中心 |
| 内涂层 | 19 500 | 509.6 | 传爆药中心 |
| 外涂层 | 19 716 | 514.3 | 传爆药中心下侧 |
| 双涂层 | 19 801 | 508.1 | 传爆药中心下侧 |

仿真结果表明：1) 引信添加隔热涂层能够延长点火时间，无涂层时点火时间为 19 448 s，内涂层比外涂层点火时间的延长效果较弱，分别为 19 500 和 19 716 s，采用内外双涂层对点火时间的延长较明显为 19 801 s；2) 从点火温度来看，使用内部涂层点火温度为 509.6 K，而外部涂层点火温度为 514.3 K，内部涂层的响应温度降低，引信的响应程度也随之降低；3) 采用内外双涂层引信结构既可以延长点火时间，又可以降低引信的点火温度，从而使引信具备更好的不敏感特性。

4.3 局部隔热涂层研究

为探究隔热涂层在导、传爆药处的局部隔热和整体隔热的区别，仅在导、传爆药附近设置隔热涂层，所建立模型如图 14 所示。

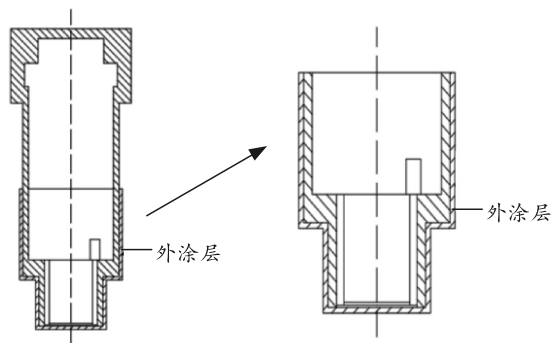


图 14 引信局部隔热

在升温速率为 0.5 K/min 时，引信点火时刻烤燃相应特征参数如表 7 所示。

表 7 局部隔热涂层覆盖下，引信响应特性对比

| 涂层位置 | 点火时间/s | 点火温度/K |
|---------|--------|--------|
| 全引信外涂层 | 19 716 | 514.3 |
| 局部引信外涂层 | 19 708 | 515.8 |

由表 7 可知：整体涂层引信与局部涂层引信点火温度和点火时间方面的差异不大，它们的烤燃响应程度相似；因此，在考虑对引信使用隔热结构时，可以选择仅在导、传爆药周围进行局部的隔热涂层覆盖。

5 结论

通过 2 次烤燃试验，建立引信烤燃数值计算模型，对 3.3 °C/h 和 12 °C/h-120-3.3 °C/h 2 种试验方式下引信烤燃过程进行数值模拟，模拟结果与引信烤燃试验值相吻合，证明所建立烤燃模型是可信的。分析不同升温速率对隔爆型某引信的响应特性影响，计算结果表明：

1) 升温速率对引信点火位置有显著影响。随着

升温速率增加, 点火位置从传爆药中心逐渐移动到侧边缘位置, 最终移动到导爆药的中心位置。

2) 传爆药柱外引信壳体厚度会对点火位置产生影响。当传爆药外壳体厚度不均匀时, 会导致传爆药整体受热不均匀, 进而导致点火位置偏向于壳体厚度较薄的一侧。针对传爆药外的壳体薄弱处, 可以采取特殊防护措施。

3) 隔热涂层的位置对引信的点火温度和点火时间产生影响。外部涂层延长点火时间, 内部涂层降低点火温度, 提高炸药热稳定性。内外双隔热涂层能够延长点火时间和降低点火温度。在导、传爆药周围使用局部隔热涂层与整体隔热涂层差异不大。

参考文献:

- [1] 张春海. 不敏感弹药让士兵和武器更安全[J]. 现代军事, 2006(2): 54-59.
- [2] CATALANO E, MCGUIRE R, LEE E, et al. Thermal Decomposition and Reaction of Confined Explosives[R]. California Univ, 1976.
- [3] JONES D A, PARKER R P. Heat Flow Calculations for The Small-Scale Cookoff Bomb Test[R]. Materials Research Labs Ascot Vale(Australia), 1991.
- [4] TARVER C M, KOERNER J G. Effects of Endothermic Binders on Times to Explosion of HMX-and TATB-based Plastic Bonded Explosives[J]. Energetic Materials, 2007, 26(1): 1-28.
- [5] GROSSM L, HEDMAN T D, MEREDITH K V. Considerations for Fast cook-off Simulations[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2016, 41: 1036-1043.
- [6] GRASWALD M, GUTSER R. Thermal modeling of fast cook-offs[C]//Insensitive Munitions&Energetic Materials Technology Symposium. USA: Portland (OR), 2018.
- [7] 刘文杰. 传爆药烤燃响应特性的数值仿真及试验研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [8] 谢磊. 探测与控制装置烤燃热敏感特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [9] 吴琴钟. 不敏感装药引信烤燃响应特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [10] 赵亮. 尺寸效应对炸药烤燃响应特性影响的研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [11] 刘子德. 影响熔铸混合炸药慢烤特性的因素研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [12] 常天笑, 闻泉, 王雨时, 等. 引信内部装药对烤燃试验响应的影响[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(5): 17-24.
- [13] 蒋超, 闻泉, 王雨时, 等. 不敏感弹药烤燃试验技术综述[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(2): 1-9.
- [14] 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.
- [15] 马楠, 牛兰杰, 赵旭, 等. 泄压孔径对引信慢速烤燃响应程度的影响[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(1): 21-25.
- [16] 吴琴钟, 王昊, 陆静, 等. 升温速率对引信烤燃响应特性的影响[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(4): 1-6.
- [17] 周捷, 智小琦, 王帅, 等. 升温速率与流变特性对 B 炸药慢烤响应的影响[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(12): 70-78.
- [18] 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.
- [19] 薛超阳. 引信及其等效构件的慢烤特性研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [20] 韩炎晖, 娄文忠, 冯跃, 等. 慢速烤燃环境下引信热响应特性测试与仿真[J]. 兵工学报, 2019, 40(5): 946-953.
- [21] 李文凤, 余永刚, 叶锐. 装药尺寸对高氯酸铵/端羟基聚丁二烯底排药烤燃特性的影响[J]. 兵工学报, 2017, 38(8): 1532-1540.