

doi: 10.7690/bgzdh.2024.09.019

TATB 对熔铸炸药烤燃过程传热及响应特性的影响研究

王 锋^{1,2}, 肖 伟², 李峰梅², 汪 衡², 朱英中², 刘宗伟²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 重庆红宇精密工业集团有限公司研究一所, 重庆 402760)

摘要: 为提高弹药安全性, 研究 TATB 组分含量对熔铸炸药烤燃过程传热及响应特性的影响规律。采用 3D-Fluent 软件对熔铸炸药烤燃过程开展仿真计算, 预测不同 TATB 含量熔铸炸药烤燃过程的响应时间及温度, 结合烤燃试验验证仿真预测炸药反应的准确性。结果表明, 烤燃过程中炸药内部梯度化温度及应特性与介质的传热系数密切相关。TATB 含量的增大能够通过改变烤燃条件下的响应温度和时间来提高炸药的热安全性, 且通过仿真计算方法预测炸药响应温度和时间可靠性较好。

关键词: TATB; DNAN; 熔铸炸药; 烤燃试验; 仿真计算

中图分类号: TJ55; O38 **文献标志码:** A

Effect of TATB on Heat Transfer and Response Properties of Cast Explosives During Roasting

Wang Feng^{1,2}, Xiao Wei², Li Fengmei², Wang Heng², Zhu Yingzhong², Liu Zongwei²

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

2. No. 1 Research Institute, Chongqing Hongyu Precision Industrial Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

Abstract: In order to improve the safety of ammunition, the effect of TATB content on the heat transfer and response properties of cast explosive during the roasting was studied. The 3D-Fluent software was used to simulate the roasting process of cast explosive. The response time and temperature of explosive with different TATB content were predicted, and the accuracy of the simulation was verified by the cook-off test. The results showed that the gradient temperature and response properties of the explosive were closely related to the heat transfer coefficient of the medium. The increase of TATB content could improve the thermal safety of explosive by changing the response temperature and time under the roasting condition. Moreover, the reliability of predicting explosive's response temperature and time by the method of simulation calculation was good.

Keywords: TATB; DNAN; cast explosive; cook-off test; simulation calculation

0 引言

针对航母、潜艇和舰载机等高价值武器平台对高安全性武器弹药的要求, 迫切需要大幅度降低贮存及战时因意外刺激而殉爆所导致灾难性事故发生的概率。提高弹药安全性的主要途径之一就是发展不敏感炸药技术, 在高价值平台上装备具有不敏感炸药的弹药系统。

自 20 世纪 80 年代发展不敏感弹药以来, 美国启动了多项不敏感炸药的研究工作, 如采用低感度 2, 4-二硝基茴香醚 (DNAN) 熔铸载体替代 TNT 用于熔铸炸药, 并推出了一系列新型 DNAN 基熔铸炸药配方^[1]。由美国霍尔斯顿陆军弹药厂研制的不敏感炸药 IMX-104 (31.7%DNAN、53%NTO 和 15.3%RDX), 能够替代 B 炸药装填在 M889A1 式 81 mm 迫击炮弹, 且换装后的炮弹通过快速烤燃、慢速烤燃、子弹撞击、破片撞击和殉爆试验考核,

仅发生了燃烧反应。

为兼顾 DNAN 基熔铸炸药的能量水平, 目前主要是向熔铸炸药配方中添加高能含能材料 1, 3, 5, 7-四硝基-1, 3, 5-四氮杂环辛烷 (HMX)^[2-5]; 因此, 深入分析 HMX 对 DNAN 基熔铸炸药热安全性的影响规律也至关重要。Terrones 等^[6]对含 HMX 复合炸药开展了烤燃试验, 发现温度的变化会产生压力梯度, 且炸药的相变和分解过程影响了点火时间和位置。刘瑞峰等^[7]从宏观和细观尺度研究了 DNAN 基熔铸炸药的烤燃响应特性, 结果发现点火位置位于 HMX 炸药品粒, 且在不同时刻液相 DNAN 统计分布呈 U 形分布、HMX 近似正态分布。胡惟佳等^[8]通过有限元计算软件模拟了 HMX 相变在烤燃下的演变过程, 结果表明温度均匀化有利于 HMX 发生相变, 且相变是可逆但路径不同; 由于 HMX 单晶的各向异性热膨胀, 相变后晶体在第三主方向上更容易生成裂纹和形成热点, 且相变 ($\beta \rightarrow \delta$ 型) 会导致

收稿日期: 2024-04-27; 修回日期: 2024-06-10

第一作者: 王 锋 (1982—), 男, 河北人, 博士。

HMX 晶体在烤燃下更加敏感。

1, 3, 5-三氨基-2, 4, 6-三硝基苯 (TATB) 作为一种应用较广的高能钝感炸药, 对热等作用极不敏感, TATB 密度为 $1.94 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、爆速为 $7\ 651 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、热分解初始温度为 $336 \text{ }^\circ\text{C}$, 能够兼顾安全与能量的要求^[9]。当前, 在 TATB 对熔铸炸药烤燃过程传热及响应特性方面的研究却鲜见报道。对此, 笔者针对 DNAN 基熔铸炸药的快速和慢速烤燃过程开展仿真计算, 掌握 TATB 含量对炸药烤燃过程传热及响应特性的影响规律, 预测 DNAN 基熔铸炸药的响应参数, 并结合快速和慢速烤燃试验验证预测值的准确性。该研究结果可为 DNAN 体系熔铸炸药的安全性设计提供技术支撑和理论指导, 提高我国武器装备的安全保障能力。

1 炸药配方及烤燃工况条件

在考虑 DNAN 基熔铸炸药能量水平的基础上, 向炸药中引入一定含量的 TATB, 以进一步提高炸药的热安全性。笔者设计 3 种 DNAN 基熔铸炸药配方, 其主要组分及配比、密度如表 1 所示。DNAN 基熔铸炸药的组分包括载体 DNAN、主体炸药 TATB 及 HMX、其他功能材料, TATB 组分的含量控制在 6%~18% 范围内。

表 1 DNAN 基熔铸炸药的组分配比及性能参数

炸药名称	DNAN/ %	TATB/ %	HMX/ %	其他/ %	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
ZY-1	27	6	34	33	1.76
ZY-2	27	12	28	33	1.79
ZY-3	27	18	22	33	1.82

熔铸炸药中的载体 DNAN 为黄色结晶粉末, 熔点大于 $90 \text{ }^\circ\text{C}$; 主体炸药 HMX 为 β 型无色针状结晶颗粒; TATB 为浅黄色固体粉末; 其他功能材料包括高能可燃金属粉、功能助剂等。按表中的熔铸炸药组分及配比, 采用熔铸装药工艺制备快速及慢速烤燃试验样品。试样的尺寸均为 $\Phi 60 \text{ mm}\times 60 \text{ mm}$, 质量约为 303 g , 如图 1 所示。在试样制备过程中, 严格控制其表面的光滑度和平整度, 确保装入烤燃弹内的 4 个药柱能够紧密接触。

用于 DNAN 基熔铸炸药快速及慢速烤燃试验的烤燃弹, 如图 2 所示。烤燃弹的材料为 45#钢, 内径为 $\Phi 60 \text{ mm}\times 240 \text{ mm}$, 壁厚为 3 mm , 壳体端盖厚为 3 mm 。

2 烤燃过程仿真计算

为获得 DNAN 基熔铸炸药在烤燃过程中的温

度场及其变化规律, 笔者分别对快速及慢速烤燃试验过程开展了仿真计算。考虑到熔铸炸药的传热和相变, 采用 3D-Fluent 软件进行仿真计算。



图 1 DNAN 基熔铸炸药试样药柱



图 2 烤燃弹实物

2.1 计算模型

快速及慢速烤燃试验过程中的烤燃弹主要由壳体、炸药装药等部分组成, 其 3 维计算模型及网格划分如图 3 所示。温度监测点共 4 个, 分别布置在烤燃弹壳体外壁处 (与实际烤燃试验相对应)、装药中心处、装药轴向 $1/4$ 处和装药径向 $1/4$ 处。

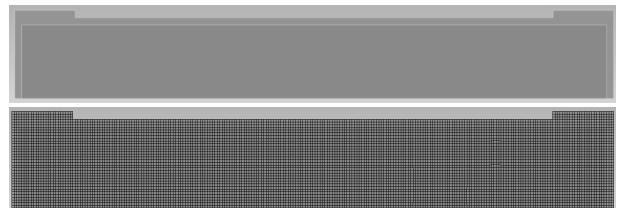


图 3 熔铸炸药烤燃弹网格划分

针对熔铸炸药烤燃仿真计算过程进行了假设: 1) 药柱与壳体之间无间隙; 2) 炸药的化学反应为零级反应, 反应物没有消耗; 3) 忽略材料相变的体积变化, 且炸药熔化后的流体为牛顿流体; 4) 忽略气体产物对传热的影响, 并且固液物质的比热容、活化能、指前因子、反应热在反应过程中保持不变。对此, 仿真计算过程中质量、动量、能量的输运方程可采用如式(1)所示的通用形式进行表示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho u_i \Phi) = \frac{\partial}{\partial X_i}(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial X_i}) + S \quad (1)$$

式中: Φ 为通用变量, 代表质量、动量、能量等; ρ

为流体密度； Γ 为通用的扩散系数； t 为时间； X_i 为坐标系中 x 、 y 和 z 的方向； u_i 为速度矢量在 x 、 y 和 z 方向分量； S 为炸药自热反应源项。

由于炸药自热反应遵循 Arrhenius 反应定律，可得到炸药的自然热反应源项为：

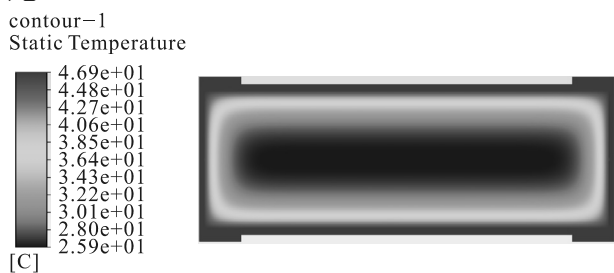
$$S = \rho Q A \exp(-E / RT) f(a). \quad (2)$$

式中： ρ 为炸药密度， kg/m^3 ； Q 为炸药单位质量分解反应热， J/kg ； A 为指前因子； E 为活化能； T 为温度； R 为普适气体常数； $f(a)$ 为反应机理函数。

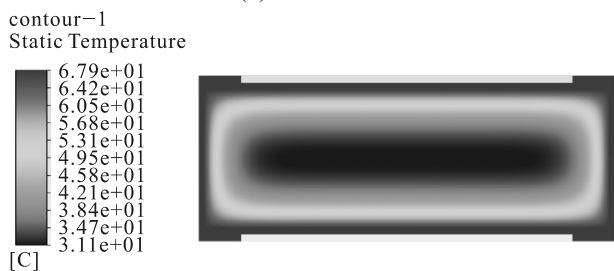
2.2 烤燃过程仿真计算结果与分析

2.2.1 慢速烤燃过程仿真计算

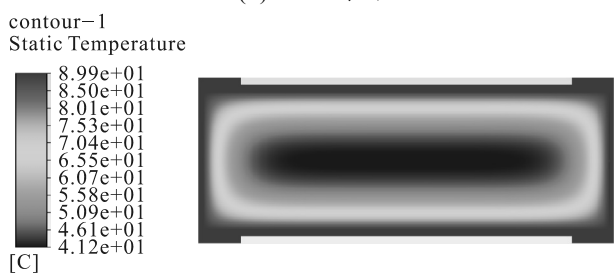
针对 DNAN 基熔铸炸药开展慢速烤燃过程仿真计算后，获得了典型 ZY-3 炸药装药在不同时刻的烤燃弹温度分布云图，如图 4 所示。可知，随着烤燃弹外部温度的增大，壳体由于传热快而迅速升温，整个烤燃弹的最大温度即在壳体外壁处。之后，外界的热量缓慢由炸药装药表面传至内部，烤燃弹温度总体呈类层状分布，且温度梯度变化现象显著。在 4 h 后，炸药装药内部仍然有很大一部分尚处于较低的温度。然而，此时炸药装药已几近发生反应状态。



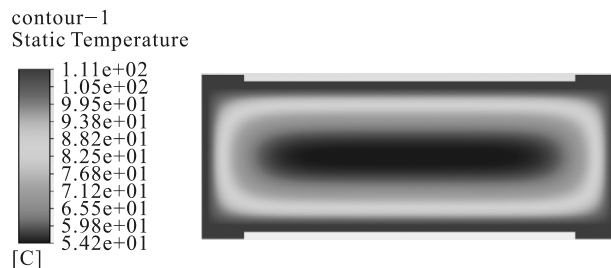
(a) 0.5 h 时刻



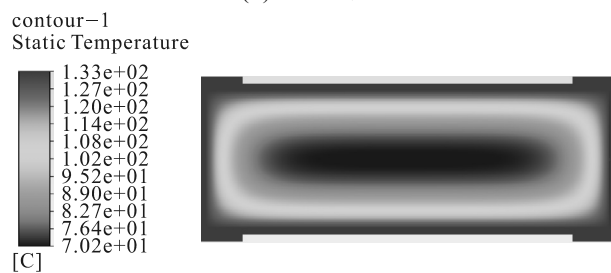
(b) 1.0 h 时刻



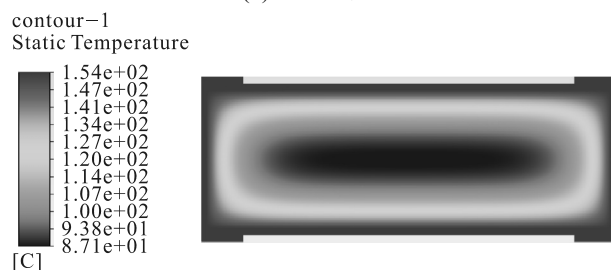
(c) 1.5 h 时刻



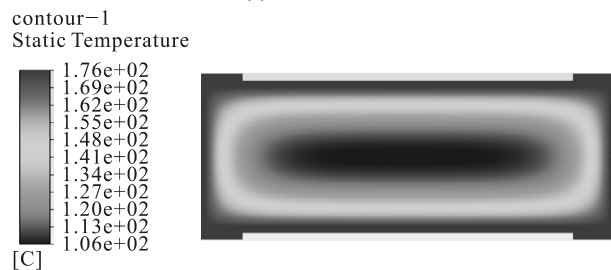
(d) 2.0 h 时刻



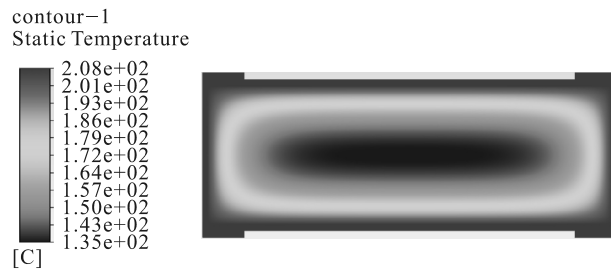
(e) 2.5 h 时刻



(f) 3.0 h 时刻



(g) 3.5 h 时刻



(h) 4.0 h 时刻

图 4 典型 ZY-3 配方慢速烤燃过程中不同时刻温度分布云

典型 ZY-3 配方慢速烤燃过程中温度随时间变化的温升曲线，如图 5 所示。图 4 和 5 的结果再次表明，烤燃弹内炸药装药的温度梯度现象显著。由于装药中心点也处在轴线上，因而中心点与 1/4 处温度接近。在 4 小时 15 分钟时，ZY-3 炸药装药已发生反应，响应温度为 207.98 °C。

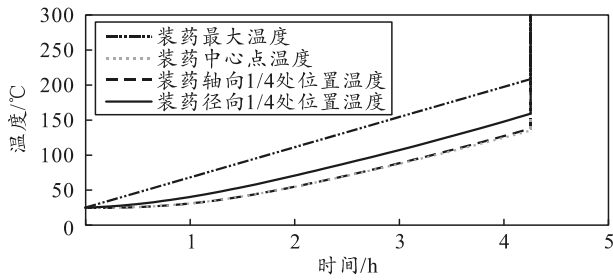


图 5 ZY-3 配方慢速烤燃过程中温度随时间变化的温升

3 种炸药配方慢速烤燃过程中温度随时间变化的温升曲线, 如图 6 所示。可知, 炸药的响应温度随着配方体系中 TATB 含量的增加而增大, 说明 TATB 能够在一定程度上提高炸药整体的耐热安全性。体系中含更多 TATB 具有降低整体热量积累速率的趋势, 延迟体系发生热分解时间, 提高了混合体系的响应温度。

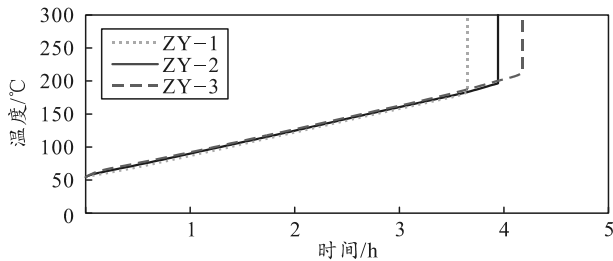
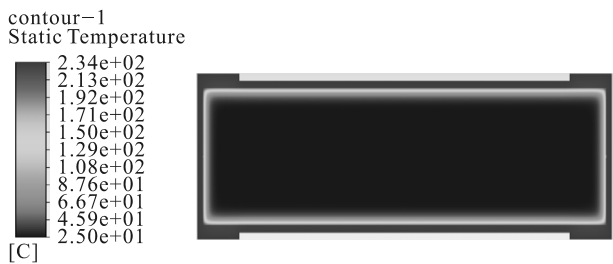


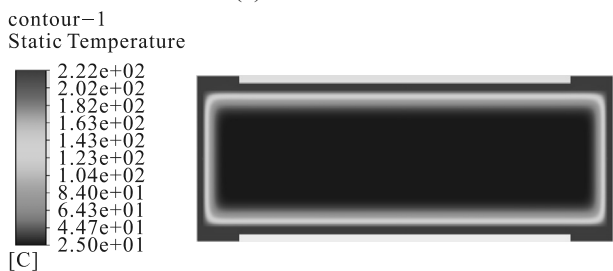
图 6 3 种炸药慢速烤燃过程中温度随时间变化的温升

2.2.2 快速烤燃过程仿真计算

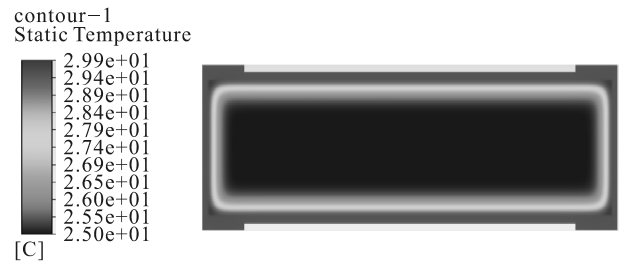
典型 ZY-3 炸药装药在快速烤燃条件下, 不同时刻的烤燃弹温度分布云图, 如图 7 所示。由图 7 可知, 由于环境温度的急剧升高, 烤燃弹内部传热速度加快。特别是在炸药装药外层发生反应后, 装药内部温度进一步快速增大, 燃烧反应位置也转移至内部。



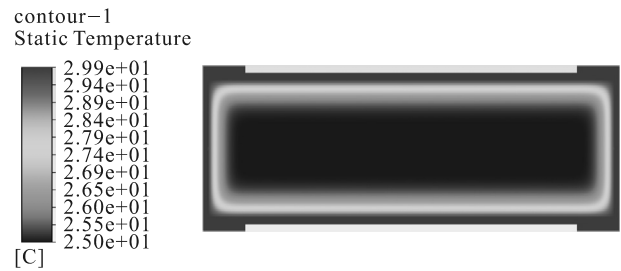
(a) 2 min 时刻



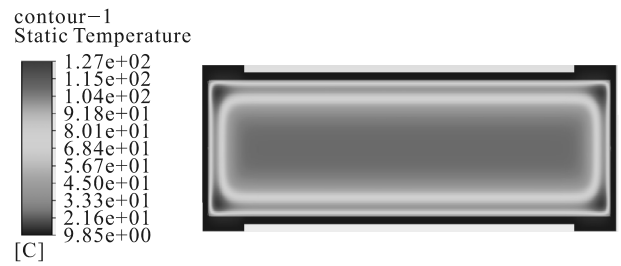
(b) 4 min 时刻



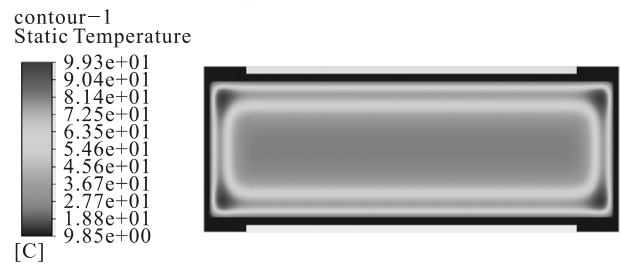
(c) 6 min 时刻



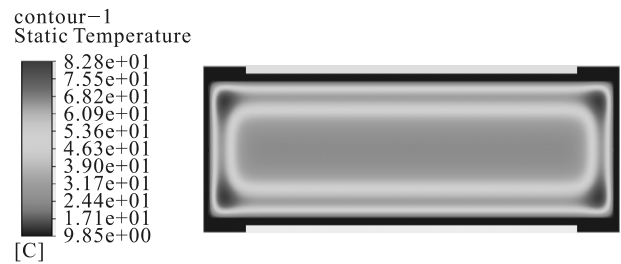
(d) 8 min 时刻



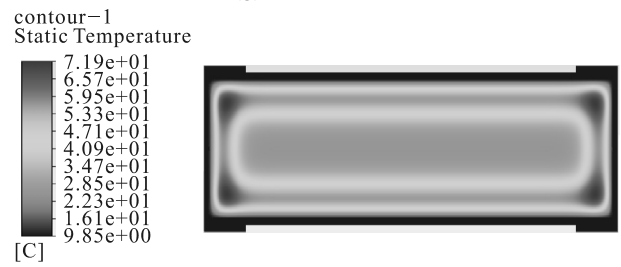
(e) 10 min 时刻



(f) 11 min 时刻



(g) 12 min 时刻



(h) 13 min 时刻

图 7 ZY-3 炸药装药快速烤燃条件下不同时刻温度分布云

3种炸药配方快速烤燃过程中温度随时间变化的温升曲线,如图8所示。由图6和8可知:3种炸药配方在快速与慢速烤燃条件下装药反应温度的变化趋势相似,表明随TATB含量增加炸药的点火时间逐渐延长和点火温度逐渐增大。在炸药装药快速烤燃过程中,凝固态的DNAN首先吸热开始熔化,之后HMX从周围环境中吸热完成晶型转变(β 型 \rightarrow δ 型)。同时,耐热炸药TATB从体系中吸热,一方面降低了体系的热量累积速度,另一方面在一定程度上提高了混合炸药的热安全性。

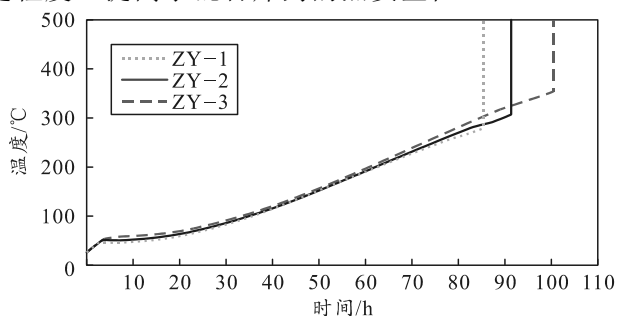


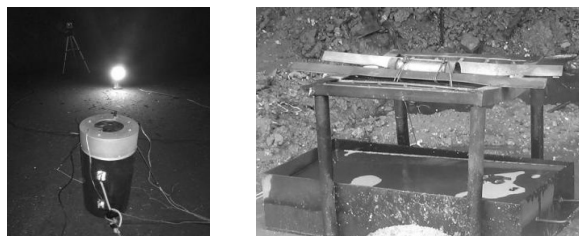
图8 3种炸药快速烤燃过程中温度随时间变化的温升

3 烤燃试验验证

为验证烤燃过程仿真计算预测炸药装药发生反应的准确性,针对ZY-3炸药开展了烤燃试验验证。

3.1 烤燃试验条件

烤燃试验过程中,慢速烤燃试验系统的控温精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$;温度信号由2支K型热电偶(精度1级)进行采集,一支热电偶用于采集炸药壳体外壁的温度且控制升温速率,另一支热电偶用于采集金属套筒内空气的温度,如图9(a)所示。快速烤燃试验采用航空煤油作为试验的燃料,试验时置于燃料槽内;系统的控温精度同样为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,2支K型热电偶(最高温度为 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$)分别用于采集煤油燃烧时的火焰温度与烤燃弹弹体的表面温度,如图9(b)所示。



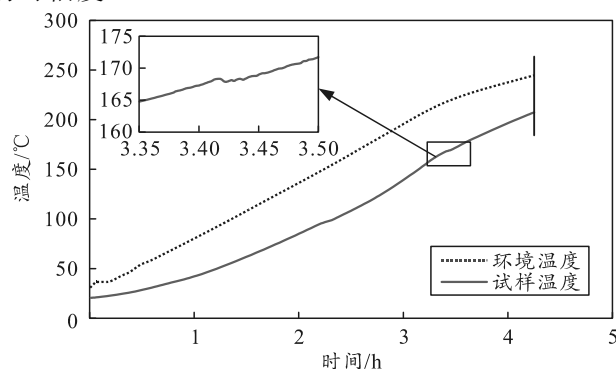
(a) 慢速烤燃试验系统 (b) 快速烤燃试验系统

图9 慢速及快速烤燃试验系统

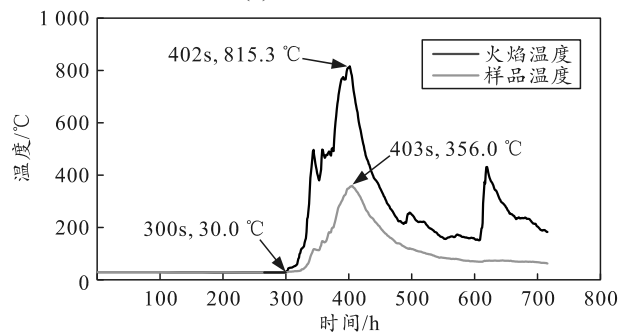
3.2 烤燃试验结果与分析

在慢速烤燃试验后,回收烤燃弹和试验系统。

结果发现试验系统已完全碎裂,且烤燃弹体的一侧端盖脱落,整体完好,试验样品发生了燃烧反应。慢速烤燃试验过程中温度随时间变化的温升曲线如图10(a)所示。由图10(a)可知,环境与试样的温度升高过程始终具有一定的差异,特别是在烤燃的前2h,试样的温升斜率较小;在3.4h后体系中的HMX完成了晶型转变过程;之后试样以更高的速率升温,当环境温度达到 $224.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,炸药装药发生响应。此时,炸药试样的响应最高温度为 $207.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,与仿真计算预测值相比降低了 $9.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。两者的相对误差小于 4.42% ,表明仿真计算预测结果具有较好的可信度。



(a) 慢速烤燃



(b) 快速烤燃

图10 烤燃试验结果

在快速烤燃试验结束后,发现烤燃弹的弹体一侧端盖脱落,且炸药试样发生了完全燃烧反应。快速烤燃试验过程中温度随时间变化的温升曲线如图10(b)所示。由图10(b)可知,在煤油燃烧火焰温度达到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,烤燃弹内的炸药开始快速升温;并且,在 103 s 后达到最高温度 $356\text{ }^{\circ}\text{C}$ (此时火焰温度达到 $815.3\text{ }^{\circ}\text{C}$)。之后,炸药试样即开始降温,表明炸药试样的燃烧反应过程已结束。炸药试样的最高温度与仿真计算预测值相比提高了 $11.29\text{ }^{\circ}\text{C}$,反应时间较预测值增大 3.92 s ,两者的相对误差分别小于 3.18% 和 3.96% ,表明仿真计算预测结果具有较好的可信度。

4 结束语

针对 TATB 开展了组分含量对熔铸炸药烤燃过程传热及响应特性的影响研究, 主要结论包括:

1) 烤燃过程中炸药内部梯度化温度呈现类层状分布, 且其响应特性与介质的传热系数密切相关。

2) TATB 能够通过改变烤燃条件下的反应温度和时间来提高炸药的热安全性, 且其热安全性与 TATB 含量的增大呈正相关关系。

3) 仿真计算预测值与试验测试值吻合度较高, 表明通过仿真计算的方法预测炸药响应温度和时间可靠性较好。

参考文献:

[1] VIJAYA S M, SUBBARAIDU R V. Studies on NTO-, FOX-7- and DNAN-based Melt Cast Formulations[J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2017, 14(2): 1-15.

[2] 周捷, 智小琦, 刘子德, 等. 2, 4-二硝基苯甲醚基熔铸

(上接第 61 页)

4 结束语

笔者利用不同热处理工艺制备了 3 种不同晶体结构材料样品, 并对 3 种样品的力学性能以及晶体结构进行了拉伸实验和金相观测。实验结果表明: 纵波声弹性灵敏度以及线性度均优于横波, 塑性变形会引起声弹性测试曲线的非线性, 并导致无应力状态的 TOF 变大。同时, 随着应力循环次数的增加, 声弹性的线性度以及重复性均在改善。通过 3 种材料的声弹性测试误差以及 TOF 回零情况分析。结果表明, 以马氏体为主的中碳钢材料声弹性应力测试效果最好。

参考文献:

[1] ZHU Q, BURTIN C, BINETRUY C. Acoustoelastic effect in polyamide 6: Linear and nonlinear behavior[J]. Polymer Testing, 2014, 40: 178-186.

[2] RIZZO P, SCALEA F. Effect of frequency on the acoustoelastic response of steel bars[J]. Experimental Techniques, 2010, 27(6): 40-43.

[3] ABBASI Z, OZEVIN D. Acoustoelastic Coefficients in Thick Steel Plates under Normal and Shear Stresses[J]. Experimental Mechanics, 2016, 56(9): 1-17.

[4] WANG H, TIAN J. Acoustoelastic theory for

炸药慢速烤燃过程[J]. 兵工学报, 2019, 40(6): 1154-1160.

[3] 赵亮, 智小琦, 高峰, 等. DNAN 基熔铸混合炸药慢烤燃的尺寸效应[J]. 火炸药学报, 2018, 41(2): 159-164.

[4] 王帅, 智小琦, 王雪, 等. DNAN 基熔铸炸药的慢烤相变及传热特性[J]. 火炸药学报, 2019, 42(4): 396-402.

[5] 陈朗, 李贝贝, 马欣. DNAN 炸药烤燃特征[J]. 含能材料, 2016, 24(1): 27-32.

[6] TERRONES G, FRANCISCO J S, MICHAEL W B, et al. The Effect of Cookoff on the Bulk Permeability of a Plastic Bonded Explosive[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2006, 31(5): 333-342.

[7] 刘瑞峰, 王昕捷, 黄风雷, 等. DANA 基熔铸炸药宏观烤燃响应特性数值分析[J]. 兵工学报, 2022, 43(2): 287-296.

[8] 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.

[9] 张浩斌, 孙杰, 舒远杰, 等. TATB 结晶技术研究进展[J]. 含能材料, 2010, 18(6): 711-716.

fluid-saturated porous media[J]. 固体力学学报(英文版), 2014, 27(1): 41-53.

[5] SONG W, XU C, PAN Q, et al. Nondestructive testing and characterization of residual stress field using an ultrasonic method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(2): 365-371.

[6] 张俊, 顾临怡, 钱筱林, 等. 钢结构工程中高强度螺栓轴向应力的超声测量技术[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 216-220.

[7] ALBAKRI M I, MALLADI V, TARAZAGA P A. Low-frequency acoustoelastic-based stress state characterization: Theory and experimental validation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 112(1): 417-429.

[8] LIU B, MIAO W, DONG S, et al. Grain size correction of welding residual stress measurement in a carbon steel plate using the critical refraction of longitudinal waves[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2019, 30(2): 112-126.

[9] LIU B, MIAO W, DONG S, et al. Grain size effect on LCR elastic wave for surface stress measurement of carbon steel[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2018, 33(2): 139-153.

[10] ZHU Q, CHEN J, GOU G, et al. Residual stress measurement and calibration for A7N01 aluminum alloy welded joints by using longitudinal critically refracted (LCR) wave transmission method[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(10): 4181-4189.