

文章编号:1006-9941(2021)05-0414-08

DNAN 基含铝炸药烤燃实验与数值模拟

吴浩,段卓平,白孟璟,黄风雷

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要: 为研究 RB-2X(2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)/奥克托今(HMX)/铝(Al)/黏结剂)和 RM-2X(DNAN/HMX/3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮(NTO)/Al/黏结剂)两种新型 DNAN 基含铝炸药热响应特性,开展 RB-2X 炸药在 $1.0\text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 、RM-2X 炸药在 $1.0\text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.5\text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 加热速率下烤燃实验,测量炸药中心温度变化。建立烤燃弹数值模拟计算模型,采用多组元网格单元计算方法,考虑熔铸炸药冷却收缩形成空气间隙的影响,分析炸药热响应特性。数值模拟点火时间与实验结果对比显示,RB-2X 炸药点火时间偏差为 1.13%,RM-2X 炸药点火时间最大偏差为 5.63%。在此基础上,分析熔铸炸药壳体壁面与炸药之间的空气间隙对炸药点火时间的影响,结果显示延迟时间随间隙宽度增大而缓慢增大,当空气间隙扩大到 0.75 mm 后,延迟时间稳定在 90 s,表明空气间隙对炸药点火时间的影响明显。预测装填 RM-2X 大尺寸弹药热响应过程,结果表明弹药尺寸和加热速率的增大会明显降低点火时中心温度, DNAN 熔化状态从全部熔化变为固液共存。

关键词: DNAN 基含铝炸药;热响应特性;烤燃实验;数值模拟

中图分类号: TJ55; O64

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2020298

1 引言

发展钝感炸药是世界各国弹药发展的重点,是世界弹药发展过程的必然结果^[1]。熔铸炸药广泛应用于各类弹药,其中 2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)凭借其低感度、低成本、高能量、高安全性的优势,使得 DNAN 基熔铸炸药成为当代熔铸钝感炸药的代代表^[2-3]。RB-2X(DNAN/奥克托今(HMX)/铝(Al)/黏结剂)和 RM-2X(DNAN/HMX/3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮(NTO)/Al/黏结剂)炸药是我国新研制的两种 DNAN 基熔铸炸药,研究其热响应特性对于该炸药的推广应用和继续研发新型钝感炸药具有重要意义。

国外针对 DNAN 炸药研究较早,但主要面向研制钝感炸药配方^[4-6],美国研发了一系列以 DNAN、HMX 或黑索今(RDX)、高氯酸铵(AP)为基的低成本降感

PAX 熔铸炸药(picatinny arsenal explosive),澳大利亚研制了以 DNAN/N-甲基-4-硝基苯胺(MNA)为基的 ARX-4027(39.75%DNAN/60%RDX/0.25%MNA)熔铸炸药。近年来国内针对 DNAN 也展开了相关研究,王红星^[2]对 DNAN 进行烤燃实验,分析得出 DNAN 在热感度和热安全性上优于梯恩梯(TNT)。陈朗^[7]、马欣^[8]等对 DNAN 单质炸药进行烤燃实验和模拟计算,确定了 DNAN 炸药的物性参数和反应动力学参数。马欣^[8]通过对两种 DNAN/HMX 配方炸药进行烤燃实验,建立了考虑 DNAN 固液相变、HMX 晶型转变和多步热分解等机制的多组元熔铸炸药热反应计算方法,计算显示 DNAN 在 366 K 时发生固液相变, HMX 在 449 K 时发生晶型转变。此外其他学者^[3,9-10]也开展了关于 DNAN 基 RDX 熔铸炸药烤燃实验和数值模拟研究,结果表明随升温速率增加,炸药相变温度缓慢增大,最后趋于定值,同时炸药点火温度也缓慢升高;装药尺寸对响应温度也有明显影响;对于反应烈度,升温速率、装药量、弹体放置状态都是影响因素。

目前国内对新型 DNAN 基熔铸炸药研究依旧很少,本研究通过对新型 DNAN 基含铝炸药 RB-2X 和 RM-2X 进行慢速烤燃实验和数值模拟,分析炸药在不

收稿日期:2020-11-16;修回日期:2021-01-19

网络出版日期:2021-03-12

作者简介:吴浩(1996-),男,硕士研究生,主要从事爆炸与冲击动力学研究。e-mail:2993982075@qq.com

通信联系人:段卓平(1965-),男,研究员,博士生导师,主要从事爆炸与冲击动力学研究。e-mail:duanzp@bit.edu.cn

引用本文:吴浩,段卓平,白孟璟,等. DNAN 基含铝炸药烤燃实验与数值模拟[J]. 含能材料,2021,29(5):414-421.

WU Hao, DUAN Zhuo-ping, BAI Meng-jing, et al. Small-scale Cook-off Experiments and Simulations of DNAN-based Aluminized Explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(5):414-421.

同条件下的热响应特性;在慢速烤燃实验中,熔铸炸药会因冷却收缩从而与壁面形成空气间隙,以往在数值模拟中却没有考虑空气间隙的影响,因此本研究通过模拟分析空气间隙效应;预测装填 RM-2X 大尺寸弹药在不同热刺激条件下的热响应特性,为研发新型 DNAN 基炸药提供依据。

2 小型烤燃实验

炸药的热刺激响应实验一般采用小型烤燃实验装置,图 1 为小型烤燃弹实验装置简图,图 2 为实物图,该装置主要由炸药、壳体、端盖、热电偶、控温仪、加热套等几部分组成^[11];药柱高为 88 mm,直径为 50 mm;壳体内部高为 100 mm,外部高为 106 mm,内径为 50 mm,外径为 58 mm;考虑烤燃过程中炸药受热膨胀和防止炸药熔化后液体炸药流出,炸药与端盖之间预留 12 mm 空气域;端盖中心和炸药上端面至中心均开有直径 1 mm 小孔,用于放置直径 1 mm 的 K 型热电偶,并使用高温胶对小孔进行密封;端盖与壳体材质为 45°钢,两者采用螺纹连接;装置外部用岩棉保温,装置实物图如图 2 所示。炸药为新型 DNAN 基熔铸炸药 RB-2X 和 RM-2X,RB-2X 炸药加热速率为 $1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$,RM-2X 炸药加热速率为 $1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

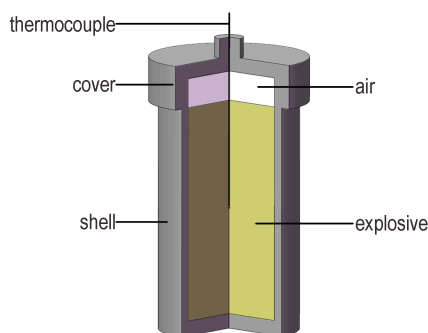


图 1 小型烤燃弹实验装置简图

Fig.1 Structural diagram of small-scale cook-off bomb setup



图 2 小型烤燃实验装置实物图

Fig.2 Photo of small-scale cook-off setup

3 理论与计算模型

烤燃实验虽能得到预设监测点温度-时间关系和炸药点火时间等数据,但是不能获取不同时刻炸药熔化液相分布、炸药温度场等数据。由于 RB-2X 和 RM-2X 均为混合炸药,因此采用多组元网格单元方法^[11],通过数值计算来模拟炸药热反应特性。

3.1 小型烤燃实验计算模型

根据小型烤燃实验装置,建立炸药烤燃三维计算模型图 3 所示。烤燃弹为对称结构,因此建立四分之一模型,网格类型为六面体,网格尺寸为 1 mm。考虑炸药与壳体侧壁之间的空气间隙,在炸药与壳体侧壁之间设置 0.05 mm 空气间隙。模型中主要考虑炸药、壳体和空气域,监测点设在炸药中心点和壳体外壁面,壳体外壁设为加热边界来替代加热套加热作用。

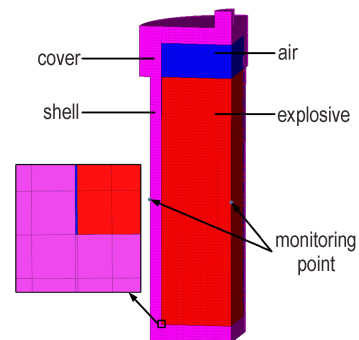


图 3 小型烤燃弹计算模型

Fig.3 Computational model of small-scale cook-off bomb

3.2 大尺寸弹药计算模型

为预测热刺激下装填 RM-2X 大尺寸弹药响应规律,基于弹药的实际尺寸和装药结构,建立四分之一简化计算模型如图 4 所示,网格类型为六面体。其中壳体外径为 152 mm,高为 337 mm,药柱直径为 122 mm,高为

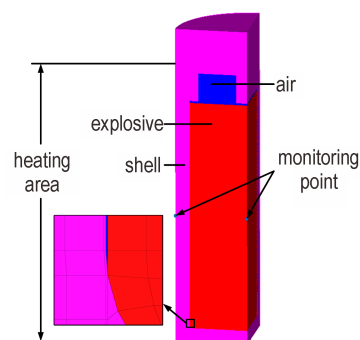


图 4 大尺寸弹药简化计算模型

Fig.4 Simplified computational mode of large-scale bomb

243 mm, 药柱上部预留 2 mm 空气域, 顶部有 2 个直径为 40 mm, 高为 30 mm 对称空气域, 网格尺寸为 1 mm。加热速率设为 $1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $1.5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$, 弹体侧壁加热范围从底部向上 300 mm。同时考虑 0.05 mm 壁面空气间隙。

3.3 炸药自热反应模型

炸药烤燃过程中, 炸药的能量、质量、动量运输方程采用如下通用形式表示^[12]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) + S \quad (1)$$

式中, t 为时间, s ; ρ 为密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; φ 为能量、质量、动量等通用参量; x_i 为炸药坐标系轴方向位移, m ; u_i 为速度矢量在坐标系轴方向分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; Γ 为通用扩散系数, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$; S 为炸药的自热反应源项。

对于空气域部分, 则采用 P1 辐射模型, 对于辐射流 q_r , 采用下述方程计算^[13]:

$$q_r = -\frac{1}{3(\alpha + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (2)$$

式中, α 为吸收系数, m^{-1} ; σ_s 为散射系数, m^{-1} ; C 为线性各向异性相位函数系数; G 为入射辐射。

两种炸药均为混合炸药, 主要组分有 DNAN、HMX、NTO 和 Al 粉。对于 HMX, 其烤燃过程中首先吸收热量发生 β -HMX \rightarrow δ -HMX 晶型转变, 之后随加热进程 δ -HMX 发生分解反应并生成最终产物, 因此 HMX 热分解过程采用四步反应动力学模型描述^[14-15]:

反应 1 β -HMX \leftrightarrow δ -HMX (一阶吸热反应)

反应 2 β -HMX + δ -HMX \rightarrow δ -HMX (双分子吸热反应)

反应 3 δ -HMX \rightarrow 产物 (一阶吸热反应)

反应 4 δ -HMX + 产物 \rightarrow 产物 (双分子放热反应)

各反应过程所使用的反应速率方程为:

$$r_1 = M_a \frac{kT}{h} \exp\left(\frac{T\Delta S_{1f} - E_{1f}}{RT}\right) - M_b \frac{kT}{h} \exp\left(\frac{T\Delta S_{1r} - E_{1r}}{RT}\right) \quad (3)$$

$$r_2 = M_a M_b \frac{kT}{h} \left[\exp\left(\frac{T\Delta S_{2f} - E_{2f}}{RT}\right) - \exp\left(\frac{T\Delta S_{2r} - E_{2r}}{RT}\right) \right] \quad (4)$$

$$r_3 = M_b Z_3 \exp\left(\frac{-E_{\beta_3}}{RT}\right) \quad (5)$$

$$r_4 = M_b M_c Z_4 \exp\left(\frac{-E_{\beta_4}}{RT}\right) \quad (6)$$

HMX 单位时间内热分解反应生成的热量为:

$$S_{\text{HMX}} = \rho_{\text{HMX}} Q_1 r_1 + \rho_{\text{HMX}} Q_2 r_2 + \rho_{\text{HMX}} Q_3 r_3 + \rho_{\text{HMX}} Q_4 r_4 \quad (7)$$

式中, k 为玻尔兹曼常数, $1.380649 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$; h 为普朗克常数, $6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; R 为普适气体常数, $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; T 为温度, K ; r_x 为反应速率, s^{-1} ; S_x 为活化熵, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; E_x 为反应的活化能, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$; Z_x 为指前因子, s^{-1} ; Q_x 为反应热, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$; x 为反应式序号, $x=1, 2, 3, 4$; M_a 、 M_b 和 M_c 分别为 β -HMX、 δ -HMX 和产物质量分数; S_{HMX} 为 HMX 炸药热反应源项。

DNAN 熔点约 366 K, 低于 3 次实验爆炸时刻的最低中心温度 464.35 K, 因此在加热过程中会吸热熔化的, 由固相转变为液相, 随温度升高发生分解反应生成产物, 用液相分数来表示液态物质在单元中的容积比, 当单元中材料仍为固体时, 液相分数为 0; 完全熔化成液体时, 液相分数为 1, 采用单步反应动力学模型描述 DNAN 分解反应^[7], 其反应速率方程为:

$$\text{DNAN} \rightarrow \text{产物}, r_5 = Z_5 \exp\left(\frac{-E_5}{RT}\right) \quad (8)$$

DNAN 单位时间内热分解反应生成的热量为:

$$S_{\text{DNAN}} = \rho_{\text{DNAN}} Q_5 Z_5 \exp\left(\frac{-E_5}{RT}\right) \quad (9)$$

对于 NTO 炸药, 采用单步反应动力学模型描述其热反应过程^[16-17], 其反应速率方程为:

$$\text{NTO} \rightarrow \text{产物}, r_6 = Z_6 \exp\left(\frac{-E_6}{RT}\right) \quad (10)$$

NTO 单位时间内热分解反应生成的热量为:

$$S_{\text{NTO}} = \rho_{\text{NTO}} Q_6 Z_6 \exp\left(\frac{-E_6}{RT}\right) \quad (11)$$

式中, r_x 为反应速率, s^{-1} ; Z_x 为指前因子, s^{-1} ; E_x 为活化能, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$; ρ 为物质密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; Q_x 为反应热, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$; x 为反应式序号, $x=5, 6$; S_{DNAN} 和 S_{NTO} 分别为 DNAN 和 NTO 炸药热反应源项。

在烤燃实验中 Al 粉不能受热分解, 不参与烤燃过程中的化学反应, 采用量纲分析方法, 选取与温度有关的物性参数热传导系数和比热容、密度、铝粉的细观特征长度为基本量来度量 Al 粉源项, 假设 Al 粉各物性参数不随温度变化, 则 Al 粉作为定常吸热源项^[18]表示为:

$$S_{\text{Al}} = a \cdot \lambda^3 C_v^{-3} \rho_{\text{Al}}^{-2} l^{-4} \quad (12)$$

式中, a 为标定参数; λ 为热传导系数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; C_v 为比热容, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; ρ_{Al} 为密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; l 为铝粉的特征长度, m 。

表 1 为所使用炸药组分、钢和空气参数。通过计算比较, 表 2 为 Al 粉修正物性参数。表 3 为 HMX 炸药

热分解反应动力学参数。表 4 为 DNAN 和 NTO 炸药热分解反应动力学参数。

表 1 材料物性参数

Table 1 Physical parameters of materials

material	$\rho / \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$C_v / \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\lambda / \text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
HMX ^[15]	1850	1004.26	0.5358
DNAN(s) ^[7]	1450	1170	0.25
DNAN(l) ^[7]	1330	1170	0.17
NTO ^[16]	1850	1088	0.27
Steel ^[13]	8030	502.48	16.27
Air ^[13]	1.225	1006.43	0.0242

Note: ρ is density, C_v is heat capacity, λ is thermal conductivity.

表 2 Al 粉修正物性参数^[11, 18]

Table 2 Modified physical parameters of Al powder

a	$\lambda / \text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$C_v / \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\rho / \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	l / m	
Al	2.3×10^{-16}	1.39	871	2719	5×10^{-6}

Note: a is calibration parameter, λ is thermal conductivity, C_v is heat capacity, ρ is density, l is characteristic length.

表 3 HMX 热分解反应动力学参数^[14-15]

Table 3 Thermal decomposition reaction kinetic parameters of HMX

No.	Z / s^{-1}	$\Delta S_f / \text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$E_f / \text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$	$\Delta S_r / \text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$E_r / \text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$	$Q / \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
1	...	123.0	2.040×10^5	89.0	1.890×10^5	-2.5×10^4
2	...	-41.7	1.020×10^5	-75.2	8.650×10^5	-2.5×10^4
3	3.16×10^{16}	...	2.000×10^5	-1.20×10^5
4	1.50×10^{14}	...	1.730×10^5	3.20×10^6

Note: Z is pre-exponential factor, S_f is forward activation entropy, E_f is forward activation energy, S_r is reverse activation entropy, E_r is reverse activation energy, Q is heat of reaction.

表 4 DNAN 和 NTO 热分解反应动力学参数

Table 4 Thermal decomposition reaction kinetic parameters of DNAN and NTO

No.	material	Z / s^{-1}	$E / \text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$	$Q / \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
5	DNAN ^[7]	1.20×10^{11}	1.720×10^5	4.923×10^6
6	NTO ^[16-17]	1.10×10^{12}	1.675×10^5	6.005×10^6

Note: Z is pre-exponential factor, E is activation energy, Q is heat of reaction.

对于混合炸药,各个单元在热分解反应过程中产生的总热量为各组分与其质量分数乘积之和^[11]。模拟软件采用 FLUENT^[12],考虑炸药熔化过程,计算模型添加熔化模块,炸药自热反应源以编写子程序方式导入。

4 结果与讨论

4.1 烤燃实验

4.1.1 热-点火响应

3 发实验后烤燃弹照片如图 5 所示。图 5a 所示,当加热速率 $1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, RB-2X 炸药点火后装置壳体完全冲开,仅剩部分端盖,由此判断发生爆炸反应;图 5b 所示,当加热速率 $1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, RM-2X 炸药点火后装置保持完整,壳体表面有烧灼痕迹,由此判断发生燃烧反应;图 5c 所示,当加热速率 $0.5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, RM-2X 炸药点火后装置侧壁保持完整,壳体底部与端盖上表面被冲开,由此判断发生爆燃反应。



a. RB-2X (1.0 K·min⁻¹) b. RM-2X (1.0 K·min⁻¹) c. RM-2X (0.5 K·min⁻¹)

图 5 点火后烤燃弹照片

Fig.5 Photo of cook-off bomb after ignition

图 6 对比了升温速率 $1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 时 RB-2X 炸药中心监测点实验和计算温度-时间曲线。从图 6 可看出计算得到的 DNAN 熔化温度和 HMX 晶型转变温度与实验结果基本一致,点火时监测点温度和时间也与实验基本吻合,第一个温度平台在 362 K,该阶段是由 DNAN 熔化吸热造成,实验曲线显示温度回升后出现快速下降又快速上升,并且最低温度 362.65 K,这是由于 DNAN 含量少,部分为熔化的 DNAN 沉降为中心部位并发生吸热熔化;第二个温度平台在 440 K,这是由于 HMX 发生晶型转变吸热导致;实验测量 15021 s 时,炸药发生点火反应,点火时该监测点温度 464.35 K,计算点火时间为 15191 s,误差为 1.13%。

图 7 和图 8 分别对比升温速率 $1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 时 RM-2X 炸药中心监测点实验和计算温度-时间曲线。从图 7 和图 8 中可看出计算曲线与实验曲线基本一致,炸药点火温度和时间也基本吻合,图 7 显示 DNAN 熔化吸热导致的温度平台维持在 366 K;在 11232 s 时,实验曲线中心温度出现下降过程,随后

又快速回升,最低温度在 452 K,此阶段是由 HMX 晶型转变吸热造成;实验测量 12278 s 时,炸药发生点火反应,点火时该监测点温度 495.56 K,计算点火时间为 11599 s,误差为 5.53%。图 8 显示 DNAN 熔化吸热导致的温度平台维持在 362~366 K,实验曲线显示在温度正常回升后出现快速下降又快速上升,最低温度 373.45 K,这是由于未熔化 DNAN 沉降到中心附近吸热熔化造成;HMX 晶型转变导致的温度平台在 447 K;实验测量 25694 s 时,炸药发生点火反应,点火时该监测点温度 466.05 K,计算点火时间为 27141 s,误差为 5.63%。

图 6~图 8 显示当组分中 DNAN 熔化时,温升曲线开始上升缓慢并出现温度平台,熔化结束后温度会有

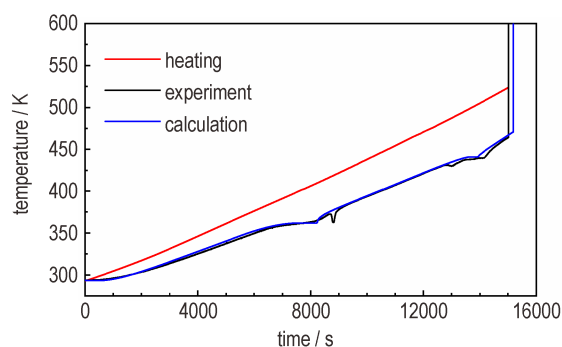


图 6 实验和计算 RB-2X 炸药中心温度-时间曲线 ($1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$)
Fig.6 Temperature-time curves of RB-2X explosive at the center point from experiment and calculation ($1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$)

一段快速回升的过程。表 5 是点火时中心温度与点火时间实验和计算结果对比。

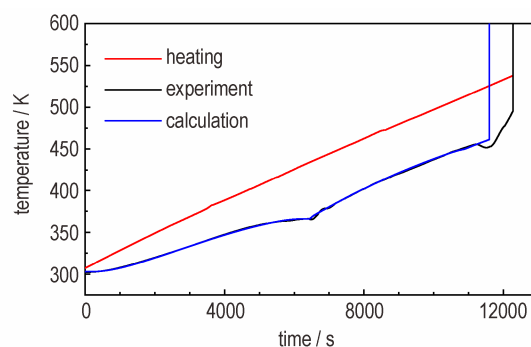


图 7 实验和计算 RM-2X 炸药中心温度-时间曲线 ($1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$)
Fig.7 Temperature-time curves of RM-2X explosive at the center point from experiment and calculation ($1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$)

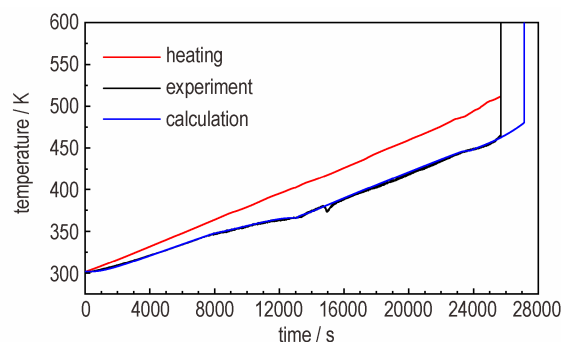


图 8 实验和计算 RM-2X 炸药中心温度-时间曲线 ($0.5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$)
Fig.8 Temperature-time curves of RM-2X explosive at the center point from experiment and calculation ($0.5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$)

表 5 点火时中心温度与点火时间实验和计算结果对比

Table 5 Comparison of experimental and calculated results of ignition temperature at the center point and ignition time

material	heating rate / $\text{K}\cdot\text{min}^{-1}$	experiment		calculation		ignition time deviation / %
		t_c / K	ignition time / s	t_c / K	ignition time / s	
RB-2X	1.0	464.35	15021	470.99	15191	1.13
RM-2X	1.0	495.56	12278	461.48	11599	5.53
	0.5	466.05	25694	480.42	27141	5.63

Note: t_c is temperature at the center point.

图 9 和图 10 分别是升温速率为 $1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 下 RM-2X 炸药不同时刻液相分数分布和温度分布。图 9 显示,在达到 DNAN 熔化温度附近时,接近壳体附近的固态 DNAN 最先熔化,熔化由外向内进行,直至药柱中心部位。由于 DNAN 熔化温度远低于 RM-2X 和 RB-2X 点火温度,因此在炸药点火前 DNAN 成分已全部熔化。图 10 显示,烤燃过程中温度由外向内递减,对比图 9 和图 10 相同时刻 3200 s 和 6200 s 可发现,在 DNAN 熔化固液边界处,温度分布也相对集中;由于药柱底部靠近侧壁部分受到壳体侧壁与底部传热叠

加,温度上升最快,点火区域也集中于此,如图 10 中 11598 s 时刻所示。

4.1.2 空气间隙效应

为研究熔铸炸药冷缩产生的空气间隙对烤燃模拟过程的影响规律,在计算模型中将空气间隙设为 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75 mm 和 1 mm,炸药为 RM-2X 炸药,加热速率为 $1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

定义延迟时间为有空气间隙与无空气间隙计算点火时间的差值。图 11 中的延迟时间与空气间隙宽度关系可看出有空气间隙的点火时间均落后于无空气间

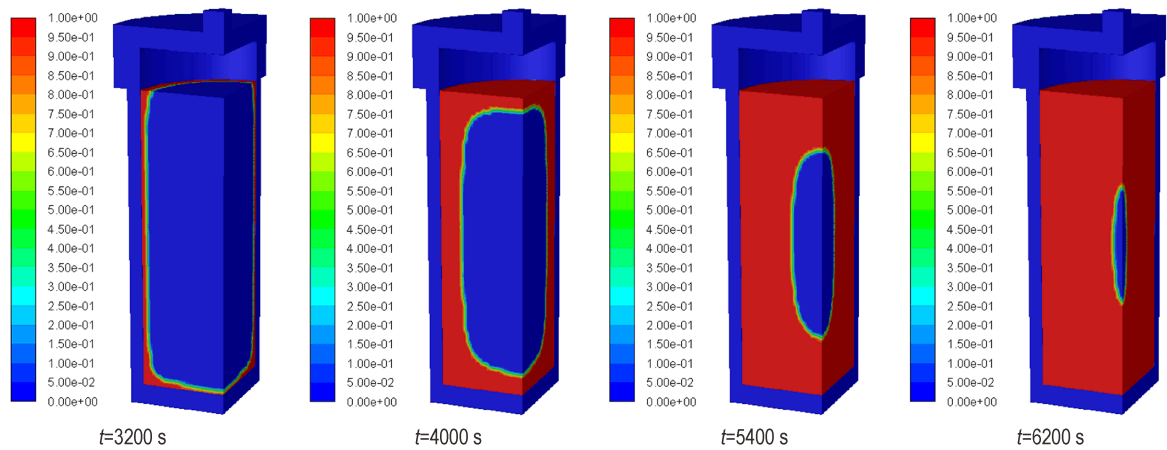


图9 RM-2X炸药不同时刻液相分数分布 ($1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$)

Fig.9 Liquid phase fraction distribution of RM-2X explosive at different times ($1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$)

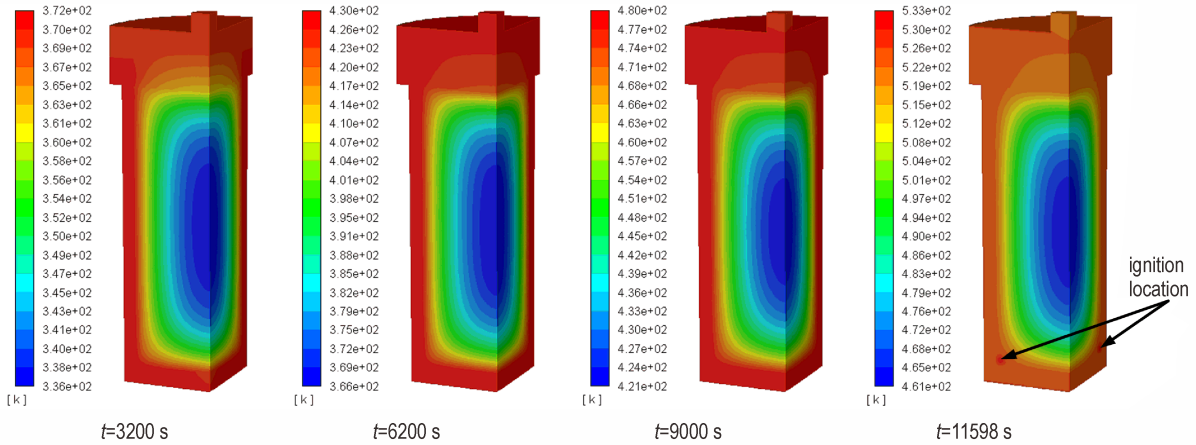


图10 RM-2X炸药不同时刻温度分布 ($1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$)

Fig.10 Temperature distribution of RM-2X explosive at different times ($1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$)

隙,且延迟时间随空气间隙宽度增大缓慢增大,说明空气间隙的存在阻碍了热量的有效传递。当空气间隙扩大至 0.75 mm 后,延迟时间趋于稳定,延迟时间 90 s ,虽然壁面的热量因空气间隙热辐射传递效率低于热传导作用,不能及时传入炸药中,但是热量依然可以通过壳体底部热传导作用直接传入炸药底部引起爆炸反应。

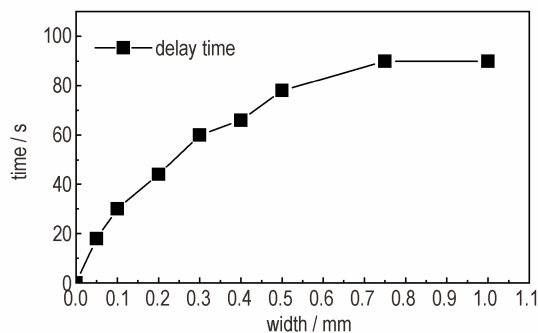


图11 延迟时间与空气间隙宽度关系图

Fig.11 Relation between delay time and air gap width

4.2 大尺寸弹药热-点火响应预测

图12为升温速率 $1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $1.5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 时弹药中心点计算温度-时间曲线,从图12可看出随着升温速率增大,点火时刻中心点温度会降低。当升温速率为 $1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,在 13811 s 发生点火反应,点火时

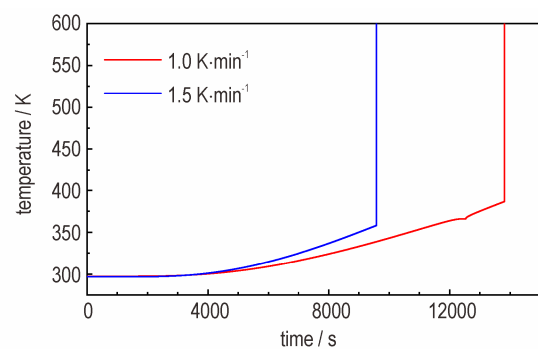


图12 大尺寸弹药中心温度-时间曲线 ($1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $1.5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$)

Fig.12 Temperature-time curves at center point of large-scale bomb ($1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ and $1.5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$)

中心点温度为 386.68 K,已超过 DNAN 熔化温度平台,说明当炸药点火时,炸药中 DNAN 组分已经全部熔化。而升温速率为 $1.5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,在 9577 s 发生点火反应,点火时中心点温度为 358.10 K,还未到达 DNAN 熔化温度,说明当炸药发生点火反应时,炸药内部 DNAN 组分是固液共存状态,这是由于药柱直径偏大和升温速率增大共同造成的。表 6 为计算点火时间和点火时中心温度。

表 6 点火时间与点火时中心温度

Table 6 Ignition time and ignition temperature at the center point

heating rate / $\text{K}\cdot\text{min}^{-1}$	ignition time of calculation / s	t_c / K
1.0	13811	386.68
1.5	9577	358.10

Note: t_c is temperature at the center point.

5 结论

(1)对 RB-2X 和 RM-2X 炸药进行烤燃实验的结果显示 RB-2X 炸药在加热速率 $1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的反应烈度为爆炸, RM-2X 炸药在加热速率 $1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的反应烈度分别为燃烧和爆燃。从热刺激响应角度, RM-2X 炸药的热安全性要优于 RB-2X 炸药。

(2)对 RB-2X 和 RM-2X 炸药烤燃实验进行了数值模拟,结果表明,计算获得的温升曲线与实验结果吻合较好, RB-2X 炸药点火时间与实验值偏差为 1.13%, RM-2X 炸药点火时间最大偏差为 5.63%,证实所建烤燃模型合理。

(3)模拟了熔铸炸药壳体壁面与炸药之间的空气间隙对炸药响应时间的影响,计算结果表明爆炸延迟时间随空气间隙宽度增大而缓慢增大;当空气间隙扩大到 0.75 mm 后,延迟时间稳定在 90 s。因此在烤燃实验装药过程中应尽量减小空气间隙的宽度,降低空气间隙效应的影响。

(4)对装填 RM-2X 大尺寸弹药的烤燃特性进行了模拟预测,结果表明随弹药尺寸增大和加热速率增大,炸药点火时中心温度会有明显降低;当加热速率从 $1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 $1.5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, DNAN 熔化状态从全部熔化变为固液共存。

致谢:感谢北京理工大学陈朗教授团队为本文小型烤燃实验提供帮助,在此深表感谢!

参考文献:

- [1] 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.
JIANG Chao, WEN Quan, WANG Yu-shi, et al. An overview on cook-off test technology for insensitive munitions[J]. *Journal of Detection & Control*, 2019, 41(2): 1-9.
- [2] 王红星, 王晓峰, 罗一鸣, 等. DNAN 炸药的烤燃实验[J]. 含能材料, 2009, 17(2): 183-186.
WANG Hong-xing, WANG Xiao-feng, LUO Yi-ming, et al. Cook-off test of DNAN explosive application basic research on 2, 4-dinitroanisole [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(2): 183-186.
- [3] 曾稼, 智小琦, 于永利, 等. 热刺激强度对 DNAN 基熔铸炸药烤燃响应特性的影响[J]. 火炸药学报, 2018, 41(2): 131-136.
ZENG Jia, ZHI Xiao-qi, YU Yong-li, et al. Effect of thermal stimulation intensity on cook-off response characteristics of DNAN based castable explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(2): 131-136.
- [4] Anniyappan M, Talawar M B, Sinha R K, et al. Review on advanced energetic materials for insensitive munition formulations [J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2020, 56(5): 495-519.
- [5] Lan G C, Jin S H, Chen M L, et al. Preparation and performances characterization of HNIW/NTO-based high-energetic low vulnerable polymer-bonded explosive [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry: An International Forum for Thermal Studies*, 2020, 139(6): 3589-3602.
- [6] 张光全, 董海山. 2,4-二硝基苯甲醚为基熔铸炸药的研究进展 [J]. 含能材料, 2010, 18(5): 604-609.
Zhang G Q, Dong H S. Review on melt-castable explosives based on 2,4-dinitroanisole [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(5): 604-609.
- [7] 陈朗, 李贝贝, 马欣. DNAN 炸药烤燃特性 [J]. 含能材料, 2016, 24(1): 27-32.
CHEN Lang, LI Bei-bei, MA Xin. Research on the cook-off characteristics of DNAN explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(1): 27-32.
- [8] 马欣. 高能混合炸药热反应特征和规律研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
MA Xin. Research on the thermal reaction characteristics and rules of high mixed explosives [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [9] 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.
ZHAO Liang, ZHI Xiao-qi, GAO Feng, et al. Study on the size effect of cook-off of DNAN based melting and casting mixed explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(2): 159-164.
- [10] 刘子德, 智小琦, 周捷, 等. 药量和升温速率对 DNAN 基熔铸炸药烤燃特性的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(1): 20-24.
LIU Zi-de, ZHI Xiao qi, ZHOU Jie, et al. Influence of explosive mass and heating rate on cook-off response characteristics of DNAN based casting explosive [J]. *Explosive and Shock Waves*, 2019, 39(1): 20-24.
- [11] 寇永锋, 陈朗, 马欣, 等. 黑索今基含铝炸药烤燃实验和数值模拟 [J]. 兵工学报, 2019, 40(5): 978-989.
KOU Yong-feng, CHEN Lang, MA Xin, et al. Cook-off experimental and numerical simulation of RDX-based aluminized ex-

- plosives [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(5): 978–989.
- [12] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. WANG Fu-jun. Analysis of computational fluid dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [13] ANSYS Inc. Fluent Inc. ANSYS FLUENT 14 User's Guide[CP]. US: ANSYS Inc, 2011.
- [14] Perry W L, Gunderson J A, Balkey M M, et al. Impact-induced friction ignition of an explosive: infrared observations and modeling[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(8): 084902.
- [15] CHEN L, MA X, LU F, et al. Investigation of the cook-off processes of HMX-based mixed explosives [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2014, 11(2), 199–218.
- [16] 寇永锋. 烤燃条件下炸药反应剧烈程度研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- KOU Yong-feng. Research on the reacted intensity of explosives cook-off [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [17] Williams G K, Brill T B. Thermal decomposition of energetic materials. 68. decomposition and sublimation kinetics of NTO and evaluation of prior kinetic data[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1995, 99(33): 12536–12539.
- [18] 方皓. RBOL-2 炸药烤燃计算模型及热特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- FANG Hao. Study on simulation of cook-off experiments and thermal characteristics of RBOL-2 explosive [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.

Small-scale Cook-off Experiments and Simulations of DNAN-based Aluminized Explosives

WU Hao, DUAN Zhuo-ping, BAI Meng-jing, HUANG Feng-lei

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To study the thermal response of two new DNAN-based aluminized explosives RB-2X (DNAN/HMX/Al/binder) and RM-2X (DNAN/HMX/NTO/Al/binder), small-scale cook-off experiments and simulations of RB-2X at a heating rate of $1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ and RM-2X at heating rates of $1.0 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ and $0.5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ were conducted. The numerical simulation used multi-component grid cell calculation method and considered the air gap formed by cooling and contraction of fused cast explosive. The thermal response of explosives were analyzed. The comparisons of ignition time between simulation and experiment show that the ignition time deviation of RB-2X explosive is 1.13%, and the maximum deviation of RM-2X explosive is 5.63%. The influence of the air gap between the explosive and the inner wall of the bomb on ignition time was also analyzed. The results show that the delay time increases gradually with the increase of gap width, and when the air gap expands to 0.75 mm, the delay time is stable at 90 s, indicating that the air gap has a significant influence on the explosive ignition time. The thermal response of large-scale cook-off bomb with RM-2X explosive was predicted. The results show that the temperature at center point can be significantly reduced at ignition by increasing of ammunition size and heating rate. The state of DNAN changes from total melting to solid-liquid coexistence.

Key words: DNAN-based aluminized explosives; thermal response characteristics; cook-off experiment; numerical simulation

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020298

(责编: 高毅)