DOI: 10.11858/gywlxb.20230757

不同尺寸 HMX 基压装装药的烤燃特性

董泽霖,屈可朋,胡雪垚,肖 玮,王奕鑫

(西安近代化学研究所,陕西 西安 710065)

摘要: 为了研究装药尺寸对压装装药烤燃特性的影响,针对 HMX 基压装装药,建立了压装装药烤燃过程的计算模型,利用 Fluent 软件对不同装药尺寸的烤燃样弹进行了数值模拟,计算了不同升温速率下装药尺寸对压装装药点火位置、响应温度和响应时间的影响规律。结果表明:在同一升温速率下,HMX 基压装炸药装药长径比为 1.0 时,装药中心响应温度均为最高;装药长径比大于 1.0 时,装药中心点火温度均随长径比的增加而降低;当长径比增大到一定程度时,装药中心的响应温度趋于恒值。装药的点火位置由升温速率和装药尺寸共同决定,且装药端面与曲面的传热量之比与长径比的平方成反比。当升温缓慢或长径比较小时,装药的点火位置位于装药中心;当升温速率较高且长径比较大时,装药的点火位置逐渐远离装药中心。

关键词: HMX 基炸药;压装装药;烤燃试验;装药尺寸

中图分类号: O389; TJ55 **文献标志码:** A

随着军事技术的发展,战场环境的复杂性不断提高,为降低外界环境出现意外热刺激时弹药爆炸造成的重大损失,针对不敏感战斗部的需求日渐凸显[1−2]。

烤燃试验[3−4]是不敏感弹药安全性评估试验之一,涉及热传导、化学分解、力学响应等多个过程,用于研究炸药及装药在热刺激条件下的敏感程度及响应特性。而装药尺寸[5−6]影响着热传导效率、化学反应程度以及力学响应参量的大小,因此,研究不同尺寸炸药装药的烤燃特性,对评价战斗部的不敏感性具有重要意义。

目前,国内外研究人员主要针对不同尺寸的熔铸及浇注炸药装药进行了烤燃响应特性研究。Wardell 等[7]研究了装药尺寸对 HMX 基、RDX 基混合炸药烤燃响应程度的影响。牛余雷等[8]针对 3 种尺寸的 GHL01 炸药装药进行了不同升温速率的烤燃实验,并建立了不同的计算模型,研究了装药尺寸对炸药烤燃响应温度和响应程度的影响。赵亮等[9]研究了 DNAN 基熔铸混合炸药,将炸药视为均一固体,基于 Arrhenius 定律建立了数值计算模型,得到了限定条件下装药尺寸和升温速率对 DNAN 基熔铸混合炸药烤燃特性的影响。吴浩等[10]对两种 DNAN 基配方炸药进行了烤燃试验,建立了考虑 DNAN 固液相变及 HMX 多步分解的炸药自热反应模型,并考虑了空气域部分,获取了不同装药尺寸 DNAN 基含铝炸药的烤燃特性。上述研究主要侧重于浇注和熔铸炸药装药,但针对复杂结构形状的战斗部,往往需要均匀性好、爆速稳定且能够精密加工的压装装药[11−12],而目前关于尺寸效应对压装炸药烤燃特性的研究却鲜有报道。

本工作以 HMX 基压装装药为研究对象,分析不同升温速率下装药尺寸对压装炸药烤燃响应特性的影响,以期为战斗部装药不敏感设计提供依据。

* **收稿日期:** 2023-10-17; **修回日期:** 2023-11-06

基金项目: 国防重大基础研究专项

作者简介: 董泽霖(1999—),男,硕士研究生,主要从事不敏感弹药研究. E-mail: 1040774622@qq.com

通信作者: 屈可朋(1983—),男,硕士,研究员,主要从事弹药材料动态力学响应及安全性评估研究. E-mail: qukepeng@gmail.com

1　试验方法及模型建立

1.1　试验方法

烤燃试验选用的 HMX 基压装炸药组分(质量)配比为：58%HMX、35% 铝粉和 7% 黏结剂，试样采用模具压制成型，单节药柱尺寸为⌀25 mm×25 mm，密度为 1.86 g/cm^3。烤燃样弹壳体材料为 30CrMnSi，壳体厚度为 4 mm，并根据装药长径比确定装药长度，端盖尾部设有垫片以保证装药药柱间无间隙。烤燃样弹一端采用带螺纹的端盖密封，另一端为盲孔。试验过程中，采用 WRNK 型热电偶测量壳体外壁及装药内部不同位置的温度。为了获取慢烤过程装药内部的温度，于药柱端面进行刻槽，槽宽及槽深均为 1.5 mm，放置热电偶后加入造型粉填实处理。样弹烤燃试验装置示意图如图 1 所示，其中测点 A、B 分别位于第一二、三四节药柱之间；测点 D、E 为数值计算所需测点，分别位于装药径向 1/4、1/2 处，测点 A、B、D、E 均位于装药内部轴向中心，测点 C 位于金属壳体外壁。

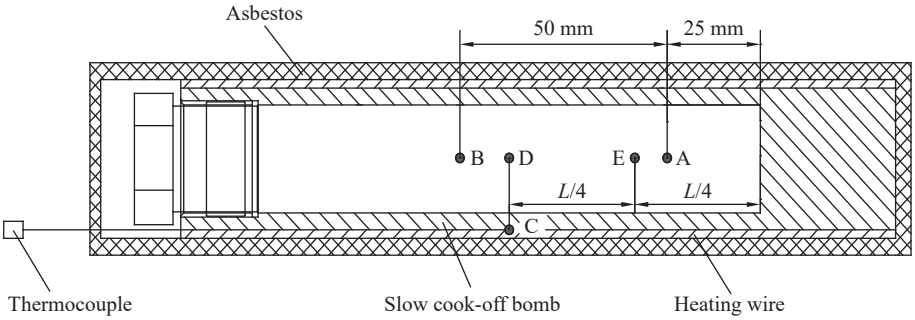


图 1　试验布局及测温点示意图

Fig. 1　Schematic diagram of test layout and temperature measurement points

烤燃试验过程中，从室温以 3.0 ℃/min 的速率升温至 120.0 ℃，在此温度下保温 1 h 后，以 0.5 ℃/min 加热到样弹发生响应。

1.2　计算模型建立

在烤燃试验的过程中，烤燃样弹在受热后，热量自样弹外壁依次传入空气层及装药内部。为描述外界热量传入后装药区域温度随时间的变化，采用热传导方程对烤燃样弹的传热过程进行模拟，可表示为

$$\rho C\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+S \tag{1}$$

式中：ρ 为炸药装药密度，C 为比热容，T 为温度，t 为时间，λ 为炸药导热系数，S 为自热反应源项。

由于外界环境热量不断传至炸药装药内部，此时炸药装药内部受热将发生分解反应，以自热反应源项 S 表示。目前主要的计算方法有两种：一种采用 Frank-Kamenetskii 反应模型[13]，该反应模型将炸药视为均一固体，忽略相变过程的不均匀性，炸药的自热反应遵循 Arrhenius 定律；另一种采用 McGuire-Tarver 反应模型[14]，通过使用多步化学反应动力学模型[15] 描述炸药的热分解过程。本研究分别使用两种方法进行计算，并与试验结果进行对比。

当装药热分解程度较低时，将压装装药整体视为研究对象，只考虑压装装药整体的放热量，采用 Frank-Kamenetskii 反应模型

$$S=\rho QZ\mathrm{e}^{-E/RT} \tag{2}$$

式中：Q 为反应热；Z 为指前因子；E 为活化能；R 为普适气体常数，取 8.314 J/(mol·K)。

考虑装药的热分解程度时，为精确描述炸药的分解过程，将压装装药的主要成分作为研究对象，并对其不同成分在受热过程中的放热量或吸热量进行计算[16]，此时采用 McGuire-Tarver 反应模型。由文

献 [17] 可知, HMX 炸药在受热过程中主要包括 3 个阶段: 第 1 阶段为 HMX 分子开环, 生成中间产物 $H_2C=N-NO_2$; 第 1 阶段生成的中间产物进一步反应生成小分子产物 CH_2O 和 N_2O 或 HCN 和 HNO_2, 为反应的第 2 阶段; 第 3 阶段为小分子产物间发生反应。其中第 1、2 阶段均为一级反应, 第 3 阶段为二级反应。HMX 热分解反应为连续反应过程, 可表示为

$$\mathrm{A} \xrightarrow{k_1} \mathrm{B} \xrightarrow{k_2} 2\mathrm{C} \xrightarrow{k_3} \mathrm{D} \tag{3}$$

$$S_i = \rho_i^m Q_i Z_i \mathrm{e}^{-E_i/RT} \tag{4}$$

式中: k_1、k_2、k_3 为各个反应阶段的反应速率常数; A 代表 HMX; B 代表 $H_2C=N-NO_2$; C 代表 CH_2O 和 N_2O 或 HCN 和 HNO_2; D 代表最终产物 H_2O、N_2、CO_2、CO 等; i 为反应阶段序号, i=1, 2, 3; m 为反应级数, m=1, 2。

考虑到铝粉在慢速烤燃过程中不参与热分解反应, 采用量纲分析法[8], 其中与温度相关的热物理性能参数包括热导率 λ、比热容 C 等基本量用于度量铝粉源项, 其吸热源项可表示为

$$S_{\mathrm{Al}} = a\lambda^3 C_{\mathrm{Al}}^{-3} \rho_{\mathrm{Al}}^{-2} l^{-4} \tag{5}$$

式中: S_{Al}为铝粉的吸热源项, C_{Al}为铝粉的比热容, ρ_{Al}为铝粉的密度, a 为标定参量, l 为铝粉的特征长度。

根据体积分数叠加原理, 压装装药总自热反应源项 S_{total} 可表示为

$$S_{\mathrm{total}} = 0.53 S_{\mathrm{HMX}} + 0.41 S_{\mathrm{Al}} + 0.06 S_{\mathrm{binder}} \tag{6}$$

式中: S_{HMX}、S_{binder}分别为 HMX 基压装炸药和黏结剂的自热反应源项。

为了获取 HMX 基压装装药的热分解反应动力学参数, 采用 Kissinger 方法对升温速率为 2.5、5.0、10.0、20.0 ℃/min 的差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)数据进行分析, 获取了 HMX 基压装装药的热分解动力学参数。HMX 基压装装药及壳体材料参数如表 1 所示, 铝粉修正物性参数如表 2 所示, HMX 基压装装药热分解反应动力学参数如表 3 所示。

表 1　HMX 基压装装药及壳体材料参数

Table 1　Material parameters of HMX-based pressed charge and shell

Material	ρ/(kg·m^{-3})	λ/(J·m^{-1}·K^{-1})	C/(J·kg^{-1}·K^{-1})
30CrMnSi	7 850	10.1	550
HMX-based pressed charge	1 860	0.437	1 050
HMX	1 960	0.535 8	1 004.26
Binder (Kel-F)	2 020	1 000.4	0.052 7
Air	1.25	381	0.023

表 2　铝粉的修正物性参数

Table 2　Modified physical parameters of aluminum powder

a	λ/(J·m^{-1}·K^{-1})	C/(J·kg^{-1}·K^{-1})	ρ/(kg·m^{-3})	l/m
2.3×10^{-16}	1.39	871	2719	5×10^{-6}

表 3　HMX 压装装药热分解反应动力学参数

Table 3　Kinetic parameters of the thermal decomposition reaction of HMX explosive

Material	i	E/(MJ·mol^{-1})	Z/s^{-1}	Q/(MJ·kg^{-1})
HMX-based pressed charge		1.60	2.0×10^{18}	0.20
HMX	1	0.22	1.4×10^{21}	0.42
	2	0.18	1.9×10^{16}	1.30
	3	0.14	1.6×10^{12}	5.00

2　结果与讨论

2.1　计算与试验结果对比

由于烤燃样弹具有轴对称性，因此，建立 1/2 模型进行分析，基于试验所用烤燃样弹建立有限元模型。将炸药反应模型用户自定义程序 UDF 编写并加载至 Fluent 软件中，图 2 给出了烤燃样弹的计算网格模型。模型采用六面体网格，最大网格尺寸为 1.0 mm。在仿真过程中，模型初始温度为 30.0 ℃；壳体外壁设为壁面边界条件，通过用户自定义函数加载至壳体外壁，使壳体外壁按照升温策略加热；炸药装药与壳体内壁及端盖接触区域为耦合传热。考虑到压装装药药柱与壳体内壁、药柱与药柱间存在微小空隙，基于实际装配情况，在烤燃样弹模型内药柱与壳体间设置空气层，厚度为 0.2 mm，药柱间空气层厚度预设为 0.05 mm。

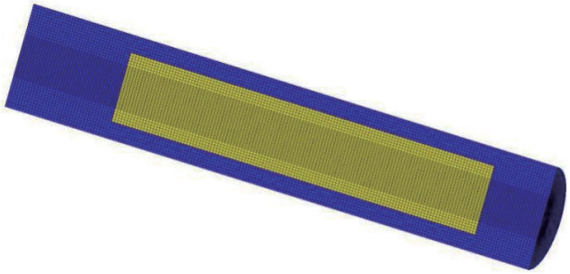


图 2　烤燃样弹的计算网格模型

Fig. 2　Computational grid model of cook-off bomb

采用两种反应模型计算 HMX 基压装炸药响应时刻不同测点的点火温度及响应时间，并与烤燃试验结果进行对比。表 4 给出了 120.0 ℃ 保温 1 h 后，0.5 ℃/min 升温速率下不同测点的点火温度及点火时间对比结果，其中 δ 为误差。对比发现：采用 Frank-Kamenetskii 反应模型时，点火时间的误差为 4.2%，测点点火温度的最大误差为 3.3%；采用 McGuire-Tarver 反应模型时，点火时间的误差为 1.5%，测点点火温度的最大误差为 2.1%。两种反应模型与试验结果的误差均不超过 5%，因此，可以认为，两种反应模型均能较准确地预测 HMX 基压装炸药的烤燃试验结果。考虑到 McGuire-Tarver 反应模型与试验结果吻合得更好，因此，本研究选用 McGuire-Tarver 反应模型对 HMX 基压装炸药进行仿真分析。烤燃试验及 McGuire-Tarver 反应模型在测点 A 处的温度曲线如图 3 所示，对比发现两者的吻合性较好，说明该模型能够较真实地预测烤燃试验结果。

表 4　不同测点位置的响应温度及点火时间

Table 4　Response temperature and ignition time of different gauges

Method	t/s	δ/%	Measuring point A		Measuring point B		Measuring point C	
			T/℃	δ/%	T/℃	δ/%	T/℃	δ/%
Test	13 090		221.7		224.5		184.5	
Frank-Kamenetskii model	13 640	4.2	214.4	3.3	230.1	2.5	188.7	2.3
McGuire-Tarver model	12 895	1.5	217.0	2.1	226.8	1.4	182.3	1.2

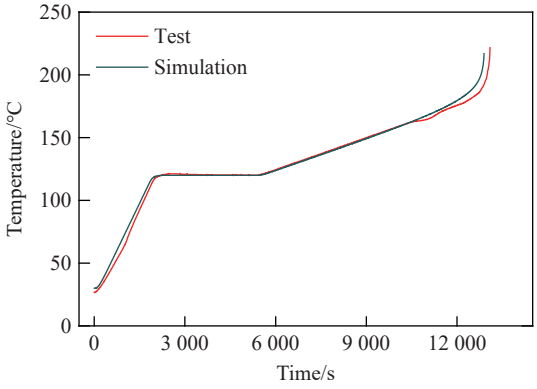


图 3　测点 A 的试验及数值模拟温度曲线

Fig. 3　Test and numerical simulation of temperature curves at measuring point A

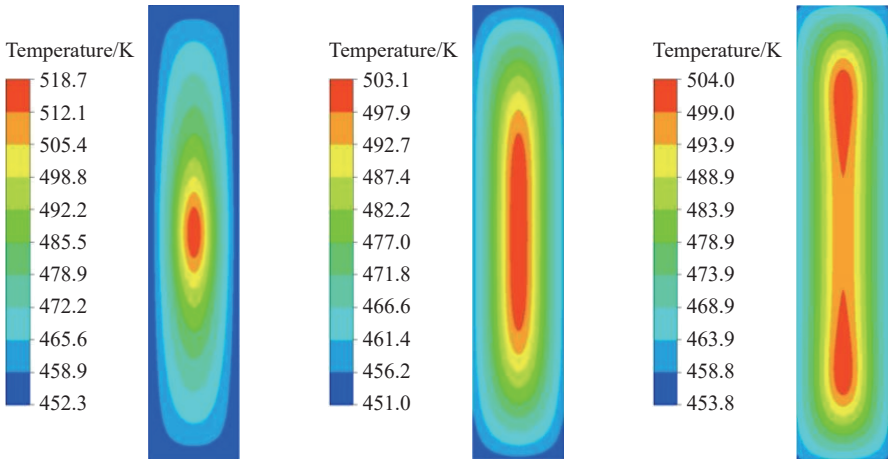
典型尺寸装药(L/D = 5.0, 其中 L 为装药轴向长度, D 为装药端面直径)在不同升温速率下的试验结果如图 4 所示, 其计算温度分布云图如图 5 所示。结合图 4 和图 5 可以看出: 当升温速率分别为 0.1、0.5 ℃/min 时, 点火位置位于装药中心区域, 此时烤燃样弹的破坏形式为壳体膨胀破坏; 当升温速率为 1.0 ℃/min 时, 点火位置向端面移动, 此时烤燃弹的破坏形式为螺纹剪切破坏。



(a) 0.1 ℃·min^{-1}　　(b) 0.5 ℃·min^{-1}　　(c) 1.0 ℃·min^{-1}

图 4　不同升温速率下典型尺寸装药的试验结果

Fig. 4　Test results of typical-size charges at different heating rates



(a) 0.1 ℃·min^{-1}　　(b) 0.5 ℃·min^{-1}　　(c) 1.0 ℃·min^{-1}

图 5　不同升温速率下典型尺寸装药的计算结果

Fig. 5　Calculated results of typical-size charges at different heating rates

2.2　不同升温速率下装药尺寸对烤燃点火位置的影响

在壳体壁厚为 4 mm 的条件下, 分别对∅25 mm×12.5 mm、∅25 mm×25 mm、∅25 mm×50 mm、∅25 mm×75 mm、∅25 mm×100 mm、∅25 mm×125 mm、∅25 mm×150 mm 7 种装药尺寸样弹的烤燃过程进行计算。可以发现, 装药的点火位置随升温速率的提高而发生改变。当升温速率小于或等于 0.7 ℃/min 时, 装药的点火位置始终位于中心区域, 且点火区域与装药尺寸呈相似几何分布, 如图 6(a)～图 6(g) 所示。当升温速率提升至 1.0 ℃/min: 长径比为 3.0 时, 点火位置出现向两端移动的趋势, 如图 7(a) 所示; 当长径比增至 4.0 时, 点火区域由椭圆逐渐分裂为两个较小的卵形区域, 对称分布于装药轴向两端, 如图 7(b) 所示。

在烤燃条件下, 外界环境所传入的热量通过壳体和表层装药传至装药中心, 当温度升高到炸药的分解温度时, 表层装药分解产生的热量可通过壳体散失至环境中, 而装药的导热能力远低于金属壳体, 装药内部区域的热量无法及时散出, 进而导致其产生热积累和自加热现象。

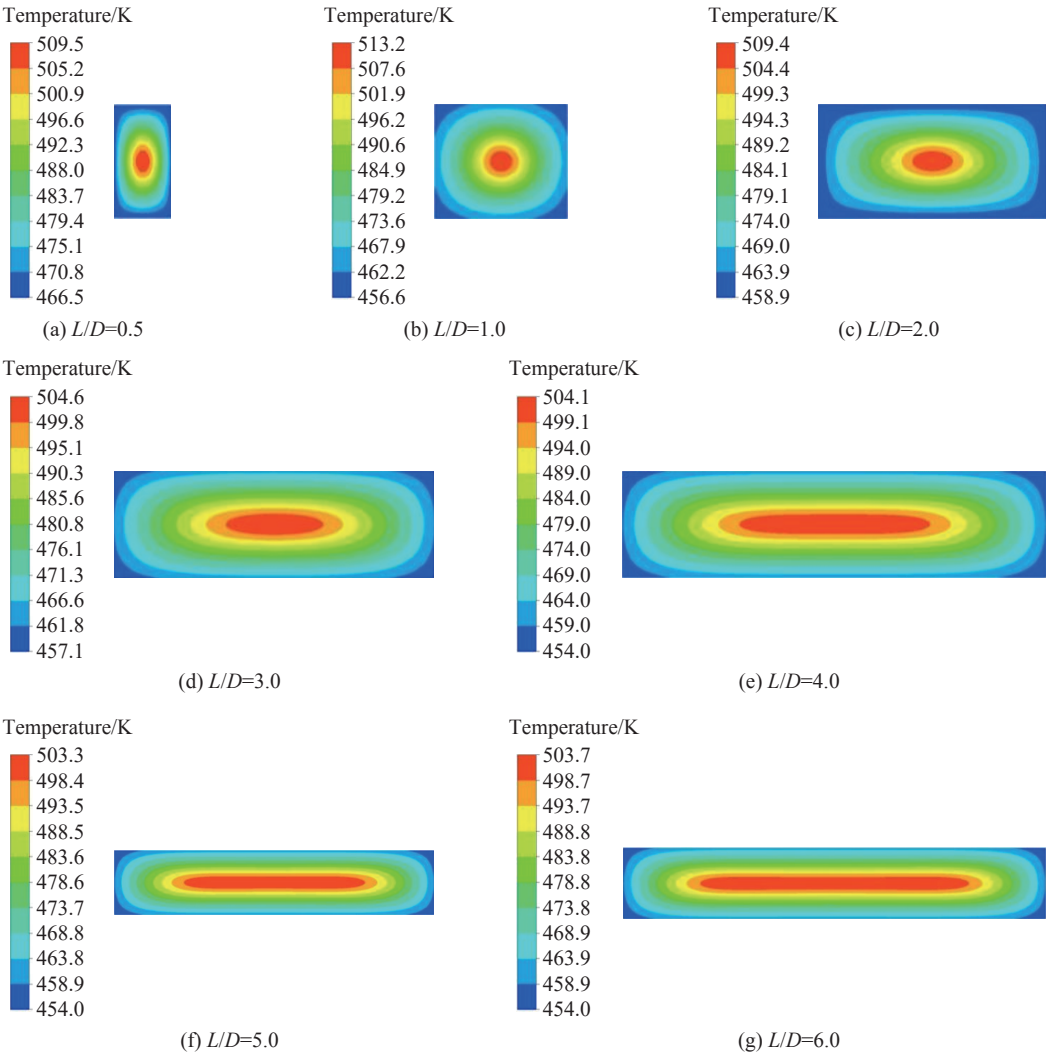


图 6　0.7 ℃/min 升温速率下不同装药尺寸样弹烤燃温度分布云图

Fig. 6　Temperature contours of test bombs with different charge sizes at the heating rate of 0.7 ℃/min

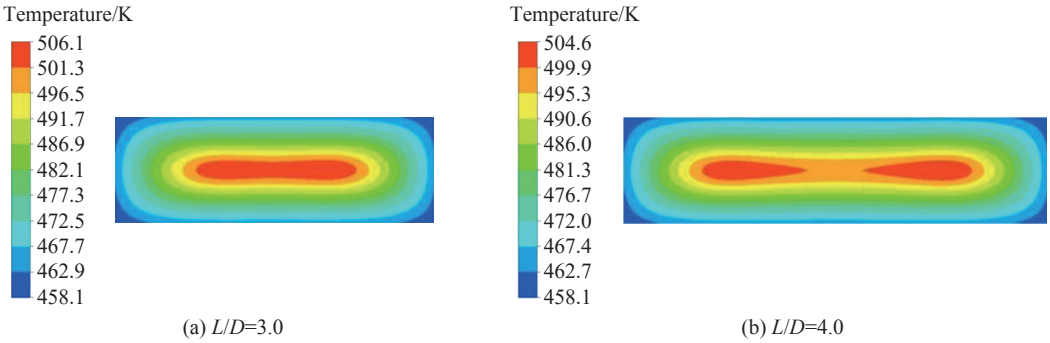


图 7　1.0 ℃/min 升温速率下不同装药尺寸样弹烤燃温度分布云图

Fig. 7　Temperature contours of test bombs with different charge sizes at the heating rate of 1.0 ℃/min

针对不同的装药尺寸，考虑到装药形状为圆柱体，平面及曲面的传热量可表示为

$$Q_{\text{plane}} = \frac{\lambda A \Delta T}{a_0 d} = \frac{\lambda \pi D^2 \Delta T}{4 a_0 d} \tag{7}$$

$$Q_{\text{shell}}=\frac{L\Delta T}{\frac{1}{2\pi\lambda}\ln\frac{D}{D-d}}=\frac{2\pi\lambda a_0 D\Delta T}{\ln\frac{D}{D-d}} \tag{8}$$

式中：d 为传热距离；a_0 为装药长径比，$a_0=L/D$；ΔT 为冷热面温度差值。

平面及曲面的传热量之比可表示为

$$\frac{Q_{\text{plane}}}{Q_{\text{shell}}}=\frac{D^2}{8a_0^2 d(D-d)}\ln\frac{D}{D-d}=\frac{1}{a_0^2}C_0 \tag{9}$$

式中：C_0为常值。从式 (9) 可以看出，装药端面与曲面的传热量之比与长径比的平方成反比。当装药的长径比较小时，装药端面与曲面的热量均可传至装药中心区域，此时点火位置位于装药中心；当装药长径比逐渐增大时，热量由端面沿轴向传至装药中心的速度逐渐低于由径向传至装药中心的速度，此时若升温速率较低，则外部环境热量能够较均匀地传至装药内部，装药中心处将发生点火反应，若升温速率较高，外界环境热量在样弹的轴向上尚未传至装药中心时，在径向上已经形成热积累，此时点火位置将发生在装药轴向的两端。

2.3　升温速率和装药尺寸对装药烤燃特性的影响

表 5、表 6 分别给出了不同长径比烤燃样弹监测点 D、E 两点的响应温度计算结果，不同装药尺寸样弹的烤燃响应时间计算结果如表 7 所示。当升温速率（r）大于或等于 0.5 ℃/min，装药长径比为 1.0 时，装药中心响应温度均最高；当升温速率为 0.1 ℃/min 时，装药中心响应温度无明显变化，最大温差为 4.2 ℃，小于数值模拟的最大误差（4.5 ℃），由此可以认为，该升温速率下装药尺寸对装药中心响应温度的影响较小。当升温速率大于或等于 0.5 ℃/min，装药长径比大于 1.0 时，装药中心点火温度随长径比的增加而降低，点火时间均随装药长径比的增加呈指数减小；当长径比大于 4.0 时，装药中心的响应温度及响应时间均趋于恒值。这是由于随着装药长径比的增加，单位时间内由轴向传至装药中心的热量逐渐减少，当装药长径比大于 4.0 时，由径向传至装药中心区域的热量占主导因素，此时装药点火区域热量主要由轴向传递及炸药自热分解提供，因此，当装药长径比大于 4.0 时，装药中心的响应温度及响应时间均趋于恒值。

表 5　HMX 基压装装药测点 D 的响应温度计算结果

Table 5　Calculated response temperature of measuring point D of HMX-based pressed charges

r/(℃·min^{-1})	Calculated response temperature of measuring point D/℃						
	L/D=0.5	L/D=1.0	L/D=2.0	L/D=3.0	L/D=4.0	L/D=5.0	L/D=6.0
0.1	245.4	248.2	246.2	248.6	243.4	245.6	246.3
0.5	245.0	245.6	240.2	237.4	234.9	230.0	230.2
0.7	236.4	240.5	236.8	231.6	231.0	229.9	229.9
1.0	232.6	239.7	236.3	231.2	226.5	225.2	225.1
2.0	227.2	229.6	212.2	207.4	206.0	205.8	205.7

表 6　HMX 基压装装药测点 E 的响应温度计算结果

Table 6　Calculated response temperature of measuring point E of HMX-based pressed charges

r/(℃·min^{-1})	Calculated response temperature of measuring point E/℃						
	L/D=0.5	L/D=1.0	L/D=2.0	L/D=3.0	L/D=4.0	L/D=5.0	L/D=6.0
0.1	220.6	211.7	206.5	205.4	204.0	207.6	212.7
0.5	221.4	213.3	208.2	212.1	216.0	224.4	226.1
0.7	220.3	220.1	210.9	217.0	223.3	226.0	226.6
1.0	217.0	219.6	220.4	228.1	231.5	228.9	228.2
2.0	215.2	219.0	226.8	225.6	212.4	210.8	207.0

表 7　不同装药尺寸样弹的烤燃响应时间计算结果

Table 7　Calculated cook-off response time of test bombs with different charge sizes

r/(℃·min^{-1})	Calculated cook-off response time/s						
	L/D=0.5	L/D=1.0	L/D=2.0	L/D=3.0	L/D=4.0	L/D=5.0	L/D=6.0
0.1	48 140	44 150	41 335	41 020	40 930	40 905	40 895
0.5	14 140	13 425	12 950	12 905	12 895	12 895	12 895
0.7	11 695	11 210	10 895	10 865	10 860	10 860	10 860
1.0	9 485	9 370	9 325	9 315	9 315	9 315	9 315
2.0	7 545	7 520	7 505	7 500	7 500	7 500	7 500

装药中心响应温度，即测点 D 的响应温度（T_D）与升温速率的关系曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出，在同一装药尺寸下，装药中心的响应温度均随升温速率的增加而降低，这是由于炸药的导热率较低，当升温速率增加时，装药边缘的实际升温速率加快，单位时间传至中心区域的热量减少。

为了分析升温速率对不同装药尺寸点火时间的影响，绘制了升温速率与不同尺寸装药点火时间差值的关系曲线，如图 9 所示。从图 9 可以看出，不同尺寸装药点火时间的差值随升温速率的增加而降低，当升温速率大于 2.0 ℃/min 时，装药尺寸的改变几乎不对装药的点火时间造成影响。分析认为，这是由于当升温速率大于 2.0 ℃/min 时，单位时间内由壳体传至装药边缘区域的热量增加，传至中心区域的热量小于壳体的传入量，导致边缘区域热量积累达到炸药热分解所需能量，此时装药的点火时间主要由升温速率决定。

升温速率为 0.7 和 1.0 ℃/min 时，测点 D 的响应温度 T_D 和测点 E 的响应温度 T_E 随装药尺寸的变化曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出，当装药长径比为 2.0 时，其测点响应温度存在最小值。

由于装药点火区域均位于装药中心，使用 MATLAB 软件对温度云图进行处理，计算得到点火区域的径向长度 L_i，其与装药长度的比值即点火区域的相对长度 L_δ

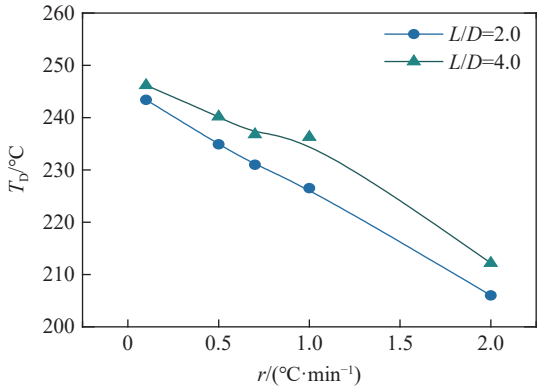


图 8　装药中心响应温度与升温速率的关系曲线

Fig. 8　Curves of the relationship between response temperature at charge center and heating rate

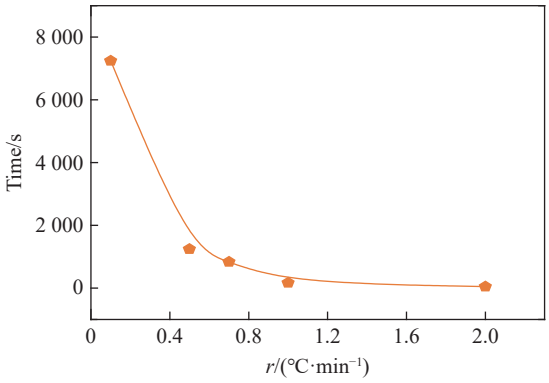
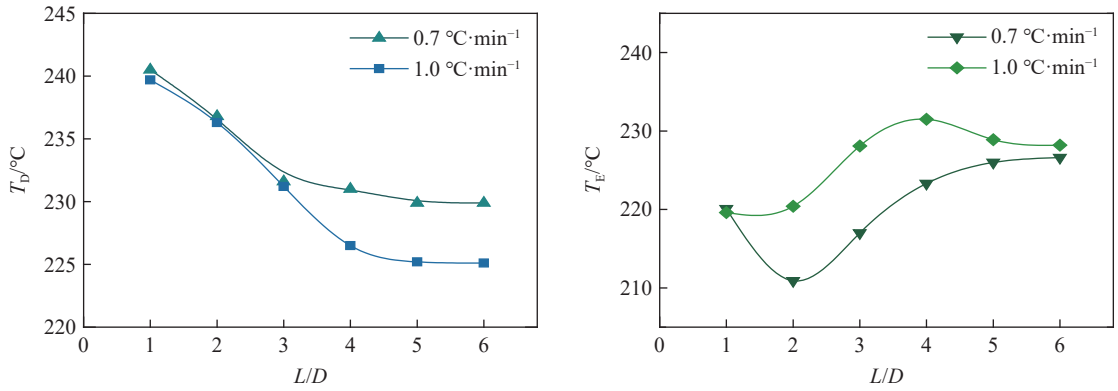


图 9　升温速率与不同尺寸装药点火时间差值的关系曲线

Fig. 9　Curve of the relationship between heating rate and ignition time difference for different charge sizes

$$L_\delta = L_i / L \tag{10}$$

通过计算 L_δ 可知，当升温速率不变，装药长径比为 2.0 时，L_δ 取最小值，此时炸药热分解区域与测点 E 的相对距离最长。可以认为，由炸药自热分解产生的热量在单位时间内传至测点 E 最少，而测点 E 的温度主要受外界环境及炸药自热分解影响，当外界升温速率不变时，装药自热分解区域距测点 E 的距离决定了测点 E 的温度。



(a) Measuring point D　　(b) Measuring point E

图 10　不同测点响应温度与装药尺寸关系曲线

Fig. 10　Relationships between response temperature at different measuring points and charge sizes

3　结　论

以 HMX 基压装装药为研究对象，分析了不同升温速率下装药尺寸对压装炸药烤燃响应特性的影响，得到以下主要结论。

(1) HMX 基压装炸药装药的点火位置由升温速率和装药尺寸共同决定：当升温速率较低或长径比较小时，装药的点火位置位于装药中心；当升温速率较高且长径比较大时，装药的点火位置位于装药轴向的两端，径向的中心。

(2) 在同一升温速率下：装药长径比为 1.0 时，装药中心响应温度最高；装药长径比大于 1.0 时，装药中心点火温度随长径比的增加而降低；当长径比大于 4.0 时，装药的响应温度趋于恒值。在同一装药尺寸下，装药中心响应温度均随升温速率的提升而降低。

(3) 随着升温速率的增加，HMX 基压装炸药装药装药点火时间降低，装药尺寸对点火时间的影响逐渐减小，当升温速率大于 2.0 ℃/min 时，装药尺寸的改变几乎不对装药的点火时间造成影响。

参考文献：

[1] 王晓峰. 关于不敏感弹药的几点认识 [J]. 火炸药学报, 2022, 45(3): 285–289.
WANG X F. Some opinions about insensitive munitions [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2022, 45(3): 285–289.

[2] LI Y B, PAN L P, YANG Z J, et al. The effect of wax coating, aluminum and ammonium perchlorate on impact sensitivity of HMX [J]. Defence Technology, 2017, 13(6): 422–427.

[3] MIL-STD-2105D. Hazard assessment tests for non-unclear munitions [S]. 2011.

[4] HOBBS M L, KANESHIGE M J. Small-scale cook-off experiments and models of ammonium nitrate [J]. Journal of Energetic Materials, 2019, 37(1): 29–43.

[5] 吴世永, 王伟力, 苗润, 等. 不同尺寸装药烤燃特性的数值模拟研究 [J]. 中国测试, 2016, 42(10): 85–89.
WU S Y, WANG W L, MIAO R, et al. Numerical simulation of cook-off behavior of charge with different size [J]. China Measurement & Test, 2016, 42(10): 85–89.

[6] 冯晓军, 王晓峰, 韩助龙. 炸药装药尺寸对慢速烤燃响应的研究 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(3): 285–288.
FENG X J, WANG X F, HAN Z L. The study of charging size influence on the response of explosives in slow cook-off test [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(3): 285–288.

[7] WARDELL J F, MAIENSCHEIN J L. The scaled thermal explosion experiment [C]//Proceedings of 12th International Detonation Symposium. San Diego, CA: Office of Naval Research, 2002.

[8] 牛余雷, 冯晓军, 郭昕, 等. GHL01 炸药烤燃实验的尺寸效应与数值计算 [J]. 火炸药学报, 2014, 37(5): 37–41.
NIU Y L, FENG X J, GUO X, et al. Size effect and numerical simulation of cook-off test for GHL01 explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2014, 37(5): 37–41.

［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 L, ZHI X Q, GAO F, 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］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 H, DUAN Z P, BAI M J, et al. Small-scale cook-off experiments and simulations of DNAN-based aluminized explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(5): 414–421.
［11］胡海波, 傅华, 李涛, 等. 压装密实炸药装药非冲击点火反应传播与烈度演化实验研究进展 [J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(1): 011401.
HU H B, FU H, LI T, et al. Progress in experimental studies on the evolution behaviors of non-shock initiation reaction in low porosity pressed explosive with confinement [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(1): 011401.
［12］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 C, WEN Q, WANG Y S, et al. An overview on cook-off test technology for insensitive munitions [J]. Journal of Detection & Control, 2019, 41(2): 1–9.
［13］章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
［14］MCGUIRE R R, TARVER C M. Chemical-decomposition models for the thermal explosion of confined HMX, TATB, RDX, and TNT explosives [C]//Proceedings of the 7th Symposium (International) on Detonation. Annapolis: Naval Surface Weapons Center, 1981: 56–64.
［15］刘润泽, 王昕捷, 刘瑞峰, 等. HMX 基含 AP 浇注炸药烤燃实验与数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2022, 36(5): 055202.
LIU R Z, WANG X J, LIU R F, et al. Cook-off test and numerical simulation of HMX-based cast explosive containing AP [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(5): 055202.
［16］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.
［17］刘瑞鹏, 贾宪振, 郭洪卫, 等. FOX-7/HMX 混合炸药烤燃试验的数值计算 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3606–3611.
LIU R P, JIA X Z, GUO H W, et al. Simulation calculation of cook-off test on composite explosives of FOX-7/HMX [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9): 3606–3611.

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

DONG Zelin, QU Kepeng, HU Xueyao, XIAO Wei, WANG Yixin

（*Xi'an Modern Chemistry Research Institute*, *Xi'an* 710065, *Shaanxi*, *China*）

Abstract: In order to study the effect of charge size on the cook-off characteristics of pressed charges, the calculation model of cook-off process was established for HMX-based pressed charges. The cook-off bombs with different charge sizes were simulated by Fluent software, the effect of charge size on the ignition position, response temperature and response time of pressed charges at different heating rates was calculated. It was found that, at the same heating rate, the response temperature of the charge center is the highest when the length-diameter ratio of HMX-based pressed explosive is 1.0, and the ignition temperature of the charge center decreases with the increase of the length-diameter ratio when the length-diameter ratio is greater than 1.0. When the length-diameter ratio increases to a certain extent, the response temperature of the charge center tends to be a constant. The ignition position of the charge is determined by both the heating rate and the size of the charge, and the ratio of heat transfer between the end face and the periphery face of the charge is inversely proportional to the square of the length-diameter ratio. When the heating rate is slow or the length-diameter ratio is small, the ignition position of the charge is located at the charge center; when the heating rate is fast and the length-diameter ratio is large, the ignition position of the charge is gradually away from the charge center.

Keywords: HMX-based explosive; pressed charge; cook-off test; charge size