

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0431

## 升温速率与流变特性对 B 炸药慢烤响应的影响\*

周 捷<sup>1</sup>, 智小琦<sup>1</sup>, 王 帅<sup>1</sup>, 范兴华<sup>2</sup>

(1. 中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051;

2. 中国兵器工业集团晋西工业集团有限责任公司, 山西 太原 030051)

**摘要:** 为探究慢速烤燃过程中不同升温速率下 B 炸药流变特性的尺寸效应对相变后内部温度场的分布特征与点火位置的影响, 设计了  $\varnothing 76$  mm 与  $\varnothing 130$  mm 两种尺寸的烤燃弹。通过慢烤试验分别获得了  $1$   $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  与  $3.3$   $^{\circ}\text{C}/\text{h}$  两种升温速率下, 各烤燃弹内部监测点的温度变化曲线, 结合数值模拟进一步分析了各工况下烤燃弹内部温度场的变化特点。研究表明: 在升温速率为  $1$   $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  时, 两种尺寸的烤燃弹在炸药还未完全相变前就已发生响应, 对流的存在导致炸药顶部的熔化速率明显高于底部, B 炸药流变特性的尺寸效应不明显; 当升温速率为  $3.3$   $^{\circ}\text{C}/\text{h}$  时, 相变完成后, 尺寸偏小的烤燃弹内部流场强度低, 温度场变化十分缓慢, 而尺寸偏大的烤燃弹内部流场强度较大, 温度场很快体现出典型的液相温度场分布特征, B 炸药的流变特性具有明显的尺寸效应; 无论升温速率的快慢与尺寸的大小, 炸药发生相变后温度最高点、自热反应区域与最终响应区域都出现在药柱顶部附近。

**关键词:** B 炸药; 慢速烤燃; 流变特性; 升温速率

中图分类号: O381; TJ55

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Influences of the heating rate and rheological properties on slow cook-off response of composition B

ZHOU Jie<sup>1</sup>, ZHI Xiaoqi<sup>1</sup>, WANG Shuai<sup>1</sup>, FAN Xinghua<sup>2</sup>

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

2. Jinxi Industries Group Corporation Limited, China North Industries Group Corporation Limited, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

**Abstract:** In order to investigate the difference of internal temperature distribution and the location of response in slow cook off of Comp B with consideration about the rheology and its size-effect when under different heating rates, 2 types of cooking off bombs with diameters of 76 mm and 130 mm were designed. The temperature curves of the internal monitoring points in the bombs at the heating rates of  $1$   $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  and  $3.3$   $^{\circ}\text{C}/\text{h}$  were obtained by the slow cook off test, and the characteristics of temperature field under various conditions were further analyzed in simulation. The results show that: at the heating rate of  $1$   $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , the internal explosives of the 2 sizes of bombs have already responded before they have completely melted, affected by the convection, the explosive of the top melted significantly quicker than that of the bottom, size effect on the rheology was not obvious; When the heating rate is  $3.3$   $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ , after the phase changing is completely done, the intensity of internal flow field is low, and the temperature field of the smaller bomb changed very slowly. However, the internal temperature field in the larger bomb changed quickly to a typical liquid temperature field because of an intenser flow, size effect on the rheology was more palpable. Moreover, in any conditions, the highest temperature location, self-heating and response areas are all near the top of the explosive.

**Keywords:** Comp B; slow cook-off; rheological behavior; heating rate

\* 收稿日期: 2019-11-11; 修回日期: 2020-01-02

第一作者: 周 捷(1995—), 男, 硕士研究生, [zhoujiepla@foxmail.com](mailto:zhoujiepla@foxmail.com)

通信作者: 智小琦(1965—), 女, 博士, 教授, [zxq4060@sina.com](mailto:zxq4060@sina.com)

大尺寸武器如大口径榴弹、航空炸弹、鱼雷与导弹战斗部等,通常采用铸装法装填熔铸炸药<sup>[1]</sup>。目前广泛使用的熔铸炸药的载体仍然是 TNT 炸药。B 炸药(40%TNT+60%RDX)是一类典型的 TNT 基熔铸炸药,其最大安全铸药体积可达 1 135 L<sup>[2]</sup>。

慢速烤燃试验是分析与评估含能材料热易损性的重要途径。复合熔铸炸药在慢速烤燃过程中会出现熔化、沉降、流动、分解、气体产物逸出等诸多现象,相比于固相炸药,其烤燃过程显得尤为复杂。其中,液态炸药的流动会影响炸药内部的传热方式,进而影响到温度场的分布特性。在前期的研究工作中<sup>[3]</sup>,通过使用 Zerkle 等<sup>[4]</sup>和 Davis 等<sup>[5-7]</sup>研究得出的 B 炸药 Bingham 流体特性,建立了 B 炸药 Bingham 流体黏度模型,研究了尺寸为 $\varnothing 35 \text{ mm} \times 112 \text{ mm}$ 的烤燃弹在不同升温速率下,炸药内部温度场与流场的变化规律、自热反应区域与点火位置分布等特性。但是温度场及流场的变化特性与熔铸炸药的体积密切相关,随着体积的增大,温度场和流场的特性可能会发生变化进而影响到自热反应区域与点火位置。为此,本文展开 $\varnothing 76 \text{ mm}$ 和 $\varnothing 130 \text{ mm}$ 两种尺寸的 B 炸药烤燃试验及数值模拟研究,分析不同升温速率下 B 炸药的 Bingham 流变特性的尺寸效应及其对炸药流动情况、温度场的分布、自热反应与点火区域分布的影响,以期从机理上进一步认识慢烤过程中 B 炸药的黏度和自然对流对烤燃响应特性的影响,为熔铸弹药的热安全使用提供参考。

## 1 慢速烤燃试验

### 1.1 试验流程

参照现有常用中、大口径火炮,分别设计了尺寸为 $\varnothing 76 \text{ mm} \times 255 \text{ mm}$ 和 $\varnothing 130 \text{ mm} \times 430 \text{ mm}$ 的两种烤燃弹,壳体材料为普通 45 钢,具体尺寸见表 1。使用一次性加热套筒对烤燃弹加热,烤燃弹与加热套筒实物照片如图 1 所示。在铸药时分别嵌入 7 支 K 类铠装微型热电偶,以监测烤燃过程中的内部温度变化情况,7 个等距(距离为  $a$ )温度测点由上至下编号 1~7,具体位置如图 2 所示。

表 1 烤燃弹具体尺寸

Table 1 Size of the cook off bombs

方案编号	弹体直径/mm	弹体长度/mm	弹体壁厚/mm	药柱直径/mm	药柱长度/mm	测点间距/mm
1	130	430	15	100	400	50
2	76	255	7.5	61	240	30

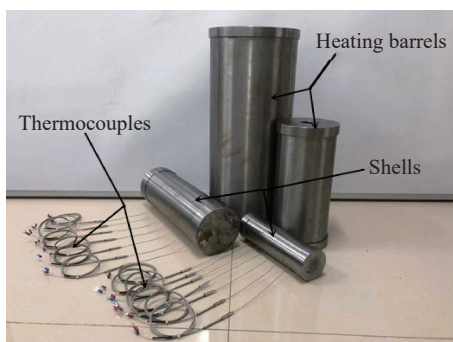


图 1 烤燃弹与加热套筒

Fig. 1 Slow cook off bombs and heating barrels

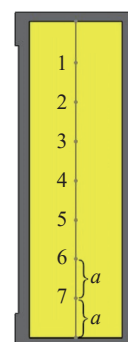


图 2 测点位置分布示意图

Fig. 2 Measuring points locations

加热系统整套装置由加热套筒、电加热带与保温层三部分组成,如图 3 所示。使用温控仪控制升温速率,数据记录选择多通道测温仪,参照北约标准化协议不敏感弹药慢烤标准 STANAG4382<sup>[8]</sup>,设计升温速率分别为  $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  与  $3.3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$ ,其中升温速率为  $3.3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$  时,先以  $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$  迅速升至  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  后保温 1 h,再以  $3.3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$  升温直至响应。

### 1.2 试验结果

试验前后烤燃弹及所在位置的照片见图 4。烤燃弹响应后, 试验点处出现弹坑, 加热套筒与烤燃弹完全碎裂。由于野外试验条件的限制, 响应后未回收到弹体碎片, 综合判断所有烤燃弹的响应等级均为爆炸以上。

响应时刻各测点温度见表 2。其中 $\varnothing 76$  mm 烤燃弹在  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  与  $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$  的烤燃试验中, 测点 7 与测点 5 的传感器分别失效, 未测得有效数据, 但对整个试验结果的分析没有影响。

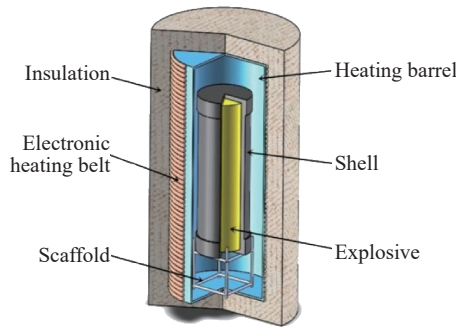


图 3 烤燃试验装置示意图

Fig. 3 Schematic setup of slow cook off test



(a) Arrangement

(b) Result

图 4 试验布置与试验结果

Fig. 4 Test arrangement and result

表 2 响应时刻各测点温度

Table 2 Temperature of each measuring points when ignition

弹径/mm	升温速率	温度/ $^{\circ}\text{C}$							
		外壁	测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	测点6	测点7
76	$1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$	194.2	127.4	82.9	78.7	78.3	78.2	78.3	(失效)
	$3.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$	171.8	227.6	205.2	201.4	193.4	(失效)	190.2	184.1
130	$1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$	193.8	79.3	66.2	65.3	64.9	64.5	64.3	64.5
	$3.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$	175.1	191.1	187.3	185.4	182.8	179.5	176.7	175.3

烤燃过程中各测点在不同升温速率下的完整温度变化曲线分别见图 5~6。

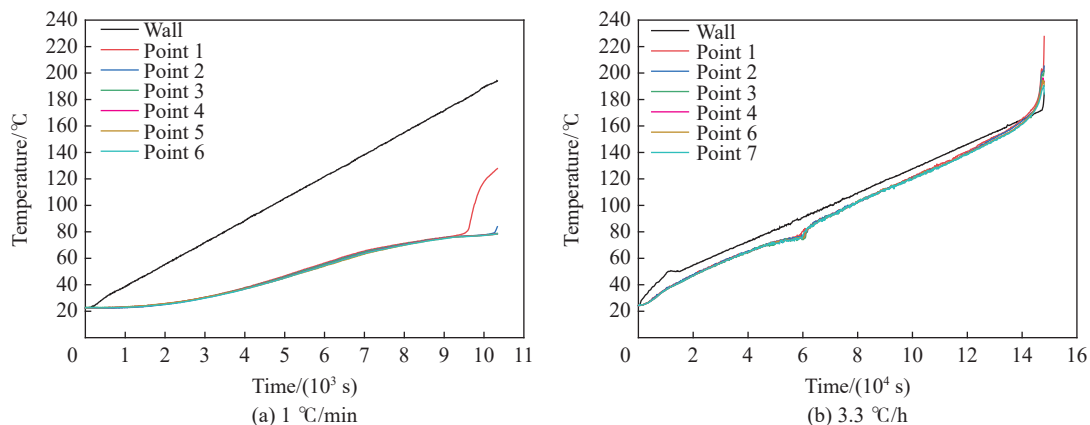


图 5  $\varnothing 76$  mm 烤燃弹在不同升温速率下实测各点温度变化曲线

Fig. 5 Measured temperature curves of  $\varnothing 76$  mm shell sat different heating rates

由图 5(a) 可知, 在  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升温速率下,  $\varnothing 76$  mm 烤燃弹内部各测点处的温度随着外壁温度的升高而缓慢升高, 当外壁温度升高至  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右时, 靠近壁面处的炸药开始相变, 吸收了部分热量, 内部各

测点处升温速率开始减缓,与外壁之间的温差进一步增大。当外壁温度升至 180 °C 左右时,测点 1 附近的炸药才开始熔化,熔化完成后测点 1 的温度迅速上升。由表 2 可知,响应时刻外壁温度为 194.2 °C,此时测点 1 的温度 127.4 °C,测点 2 的温度为 82.9 °C,测点 3~6 均处在固相状态,且温度基本一致,测点 7 失效。

由图 6(a) 可知,试验中  $\phi 130$  mm 烤燃弹在 1 °C/min 升温速率下,内部各测点温度也出现了上述类似情况,响应时外壁温度为 193.8 °C,与  $\phi 76$  mm 情形很接近,只是发生响应时,测点 1~7 均未熔化,测点 1 温度较高且即将熔化,但测点 2~7 温度基本一致。由此可见,随着烤燃弹尺寸的增大,整个烤燃过程中炸药内部温升更加缓慢,但最高温度点都在烤燃弹顶部附近。

而当升温速率为 3.3 °C/h 时,由图 5(b) 可知,  $\phi 76$  mm 烤燃弹内部炸药完全熔化后,各测点处的温度十分接近,直到外壁温度升至 135 °C 左右时,测点 1 与测点 2 处的温度逐渐略高于其他测点的温度,随后炸药开始出现自热反应。当外壁温度升至 171.8 °C 时,烤燃弹发生响应,由表 2 可知,此时测点温度最高点出现在测点 1 处,炸药温度分布从上至下逐渐递减。

由图 6(b) 可知,当烤燃弹直径增大至 130 mm 时,在 3.3 °C/h 升温速率下,炸药完全相变后内部各测点处的温度在短时间内差距不大,但当外壁温度高于 112 °C 后,各测点之间的温差逐渐增大,增大趋势比  $\phi 76$  mm 明显加快,也呈现出温度从上至下依次递减的情况,当外壁温度升至 175.1 °C 时,烤燃弹发生响应。

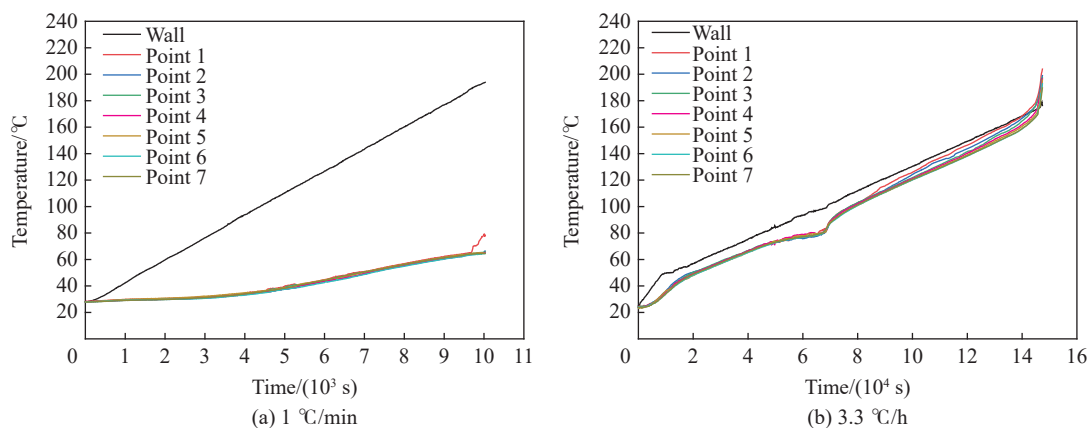


图 6  $\phi 130$  mm 烤燃弹在两种升温速率下实测各点温度变化曲线

Fig. 6 Measured temperature curves of  $\phi 130$  mm shells at different heating rates

通过烤燃试验发现,烤燃弹尺寸一定时,升温速率越快,烤燃弹的响应温度越高。在较慢升温速率下,烤燃弹尺寸越大,响应温度越低;对于中、大口径的烤燃弹,当升温速率较快时,烤燃弹尺寸对响应温度的影响十分微弱。

在烤燃试验中,两种尺寸烤燃弹在不同升温速率下内部各测点温度均表现出顶部附近高、向下逐渐降低的特点,为进一步探究 B 炸药的流变特性在不同升温速率下对中/大口径烤燃弹内部温度场变化的影响机理以及黏性流动的特点,使用 CFD 软件 Fluent 对整个烤燃过程进行数值分析。

## 2 数值模拟

### 2.1 黏度表征

当炸药开始相变后,在浮升力的驱动下,部分液相区出现自然对流,而对流传热的传热效率远大于热传导<sup>[9]</sup>,影响温度场的分布,流体的黏度是影响对流流场强度的重要因素。

液态的 B 炸药是由液相的 TNT 与大量的固相 RDX 颗粒组成,大量研究均表明,纯 TNT 在液态下是一种典型的牛顿流体<sup>[10-14]</sup>,其黏度只与温度有关。而当牛顿流体中加入大量固相粒子后,其不再表现出

牛顿性, 在低剪切应变率下表现出类固性, 只有流体的剪切应变率超过某一临界值后才开始屈服并流动, 这种特性的流体称为 Bingham 流体<sup>[15]</sup>。

此现象可用粒子碰撞概率解释。两层极薄流体之间的相对流动阻力在宏观上即表现为流体的黏度<sup>[15]</sup>, 在 Bingham 流体中, 当流层之间出现相对运动趋势后, 流体边界两侧粒子碰撞概率很大, 很难发生相对流动; 随着粒子碰撞的进行, 边界两侧固相粒子运动方向逐渐趋于同向, 碰撞概率逐渐减小, 流动阻力也随之减小, 最后表现出屈服并开始稳定流动, 见图 7。

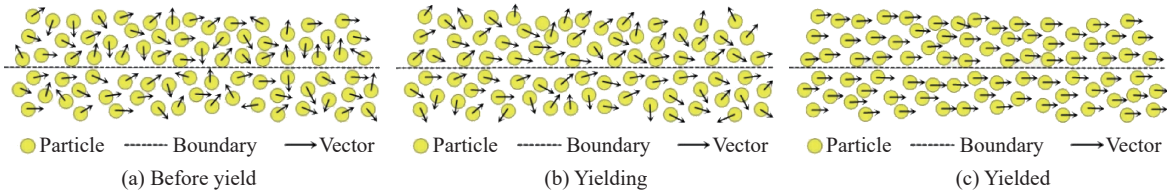


图 7 Bingham 流体屈服过程

Fig. 7 Yield process of Bingham fluid

在烤燃过程中, 随着温度的升高, RDX 发生分解, 释放热量, 随后出现自热反应, 且 RDX 在 TNT 中的溶解度也会随着温度升高而增大<sup>[16]</sup>。因此, 整个熔融 B 炸药体系中固相 RDX 颗粒的浓度是一个变化的值, B 炸药的黏度  $\mu$  应是一个与温度  $T$ 、应变率  $\gamma$  与粒子浓度  $\varphi$  有关的函数:

$$\mu = f(T, \gamma, \varphi) \quad (1)$$

Zerkle 等<sup>[4]</sup>提出了第一个基于上述三项的 B 炸药黏度模型:

$$\mu_{\text{app}} = \mu_c \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{\text{max}}}\right)^{-2} \quad (2)$$

$$\mu_c = 0.0127(T - T_{m,\text{TNT}})^{0.304} \quad (3)$$

$$\varphi_{\text{max}} = \left[0.55^{-1} - (0.55^{-1} - 0.713^{-1})(1 + 8.73\gamma^{-m})^{-1}\right]^{-1} \quad (4)$$

$$\varphi = 0.6 - (0.0426 + 0.0753T^* + 0.134T^{*2} + 0.7474T^{*3}) \quad (5)$$

$$T^* = \frac{T - T_{m,\text{TNT}}}{T_{m,\text{RDX}} - T_{m,\text{TNT}}} \quad (6)$$

式中;  $\mu_{\text{app}}$  是 B 炸药的表现黏度;  $\mu_c$  是 TNT 的黏度;  $\varphi$  是固相 RDX 浓度;  $\varphi_{\text{max}}$  是在不同应变率下 B 炸药悬浮液体体系中固相 RDX 粒子的极限浓度;  $T$  是当前温度;  $T_{m,\text{TNT}}$  是 TNT 的熔化温度, 取值 80 °C;  $\gamma$  是应变率 ( $\text{s}^{-1}$ );  $m$  是流变特性项, 当  $m > 0$  时, 材料表现出剪切稀化, 当  $m < 0$  时, 材料表现出剪切增稠, 此处取  $m=0.398$ ;  $T_{m,\text{RDX}}$  是 RDX 的理论熔点, 取值 204 °C。

基于 Bingham 流体的特性, 考虑到屈服条件, 屈服后的 B 炸药黏度<sup>[6]</sup>可表征为:

$$\mu = \mu_{\text{app}} + \frac{\tau_y}{|\gamma|} (1 - e^{-b|\gamma|}) \quad (7)$$

$$b = 1.75 \times 10^6 (\varphi - 0.336)^4 + 100 \quad (8)$$

$\tau_y$  是屈服应力阈值:

$$\tau_y = 6874(\varphi - 0.336)^{2.37} \quad (9)$$

## 2.2 仿真计算

炸药在热刺激过程中发生分解反应而产生的放热量  $Q_d$  可采用经典阿伦尼乌斯方程来计算:

$$Q_d = \rho Q A e^{\frac{E_a}{RT}} \quad (10)$$

式中:  $Q$  是炸药的反应热,  $A$  是指前因子,  $E_a$  是活化能,  $R$  是普适气体常数。

建立与试验等尺寸的烤燃弹物理模型,在相同测点位置设置温度监测点,将前文的黏度模型与放热方程编写为 UDF 程序嵌入 Fluent 中。

B 炸药与壳体的物性参数与 B 炸药的化学反应动力学参数分别见表 3~4<sup>[17-19]</sup>。

表 3 B 炸药与壳体的物性参数

Table 3 Physical parameters for Comp B and shell

材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	$k/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$Q_m/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	$T_s/^\circ\text{C}$	$T_l/^\circ\text{C}$
B 炸药	$\begin{cases} 1690 & (T \leq T_s) \\ 1690 - 0.675(T - T_s) & (T > T_s) \end{cases}$	1 126	$\begin{cases} 0.17 & (T < T_s) \\ 0.17 - 0.025(T - T_m) & (T_s \leq T \leq T_l) \\ 0.15 & (T > T_l) \end{cases}$	128 000	80	82
45 钢	7850	475	14	-	-	-

注: $\rho$ 为密度; $C$ 为比热容; $k$ 为导热系数; $Q_m$ 为熔化热; $T_s$ 为相变起始温度; $T_l$ 为相变结束温度。

通过 UDF 程序对壳体外壁的温度做出限定,与试验中的升温状态一致,壳体内壁与炸药的接触面设置为耦合接触条件。

### 2.3 仿真结果与分析

各工况下烤燃弹的响应温度结果对比见表 5,数值模拟结果与试验测量值的误差均不超过 1%。

数值模拟中各测点处温度变化曲线分别见图 8~9。

对比图 5~6 可知,图 8~9 中数值模拟各测点温度变化规律与试验曲线较为吻合,说明仿真中烤燃弹内部温度场的变化过程很接近真实情况。

各烤燃弹在不同升温速率下内部温度场变化过程分别见图 10~13。

表 4 B 炸药化学反应动力学参数

Table 4 Chemical kinetic parameters for Comp B

$E_a/(\text{J}\cdot\text{mol}^{-1})$	$Q/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	$A$
22 000	$5.82 \times 10^6$	$2.01 \times 10^{18}$

表 5 试验与数值模拟响应温度的比较

Table 5 Comparison of response temperatures from experiment and simulation

弹体直径/mm	升温速率	响应温度/ $^\circ\text{C}$		误差/%
		试验	数值模拟	
76	1 $^\circ\text{C}/\text{min}$	194.2	195.0	0.4
	3.3 $^\circ\text{C}/\text{h}$	171.8	172.4	0.3
130	1 $^\circ\text{C}/\text{min}$	193.8	193.7	-0.05
	3.3 $^\circ\text{C}/\text{h}$	175.1	174.6	-0.3

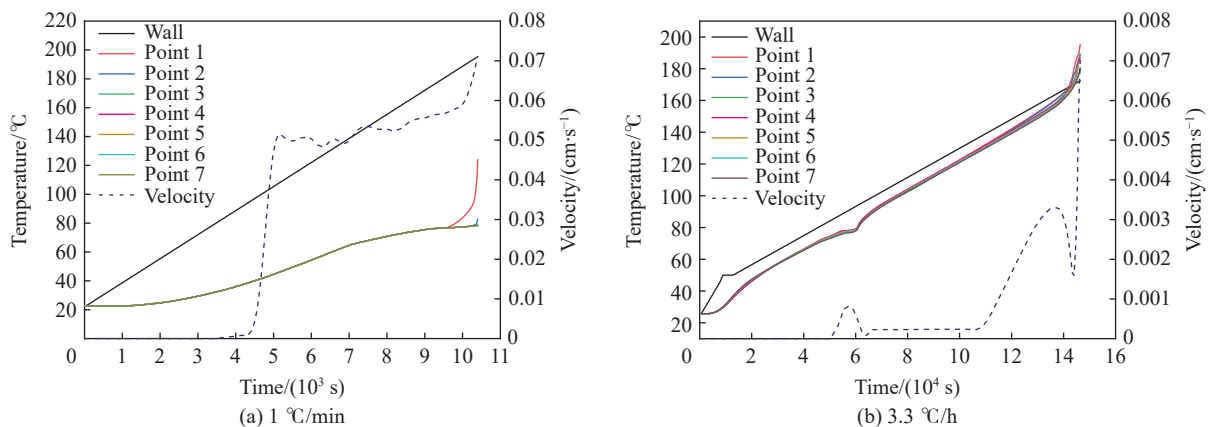


图 8  $\varnothing 76$  mm 烤燃弹在不同升温速率下模拟各点温度与平均流速变化曲线

Fig. 8 Simulated average velocity and temperature curves at different points of  $\varnothing 76$  mm shells under different heating rates

从 1  $^\circ\text{C}/\text{min}$  升温速率下两种弹体的内部平均流速曲线可知,在该升温速率下,由于发生相变时炸药与壳体温差很大,当表层炸药熔化后,在浮升力的驱动下,炸药很快开始屈服流动并形成自然对流,达到

稳定后流场的平均流速总体上呈缓慢上升趋势, 当炸药出现自热反应后, 平均流速的上升趋势加快, 这说明当炸药开始发生相变后, 内部流场一直处于较为活跃的状态。从温度场分布的变化过程中可知, 对流的出现导致炸药顶部温度高于底部,  $\varnothing 76\text{ mm}$  与  $\varnothing 130\text{ mm}$  的烤燃弹上半部炸药的熔化速率明显高于下半部, 且在炸药还未完全熔化的情况下就已发生响应, 点火区域都出现在药柱顶部附近, 与烤燃试验吻合。

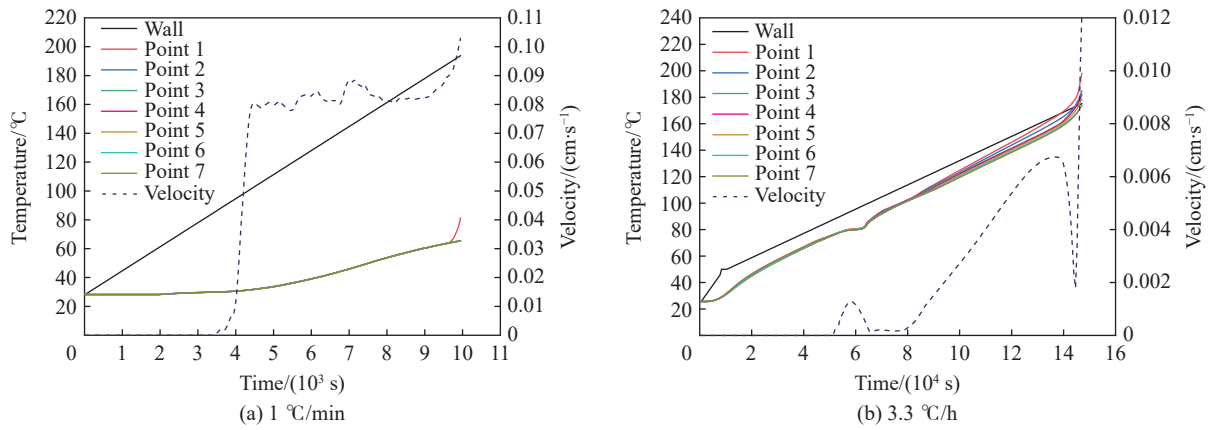


图 9  $\varnothing 130\text{ mm}$  烤燃弹在不同升温速率下模拟各点温度与平均流速变化曲线

Fig. 9 Simulated average velocity and temperature curves at different points of  $\varnothing 130\text{ mm}$  shells under different heating rates

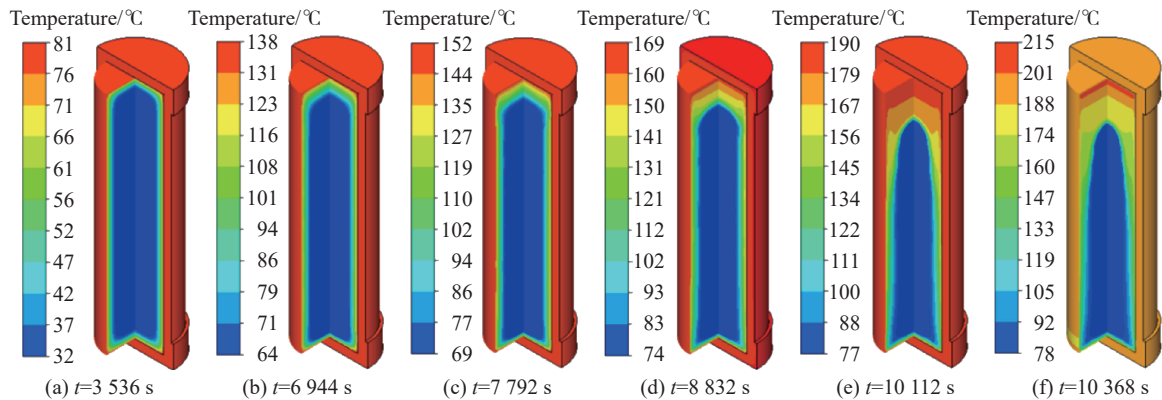


图 10  $1\text{ °C/min}$  升温速率下  $\varnothing 76\text{ mm}$  烤燃弹内部温度场变化过程

Fig. 10 Changes of temperature field inside the  $\varnothing 76\text{ mm}$  shell at the heating rate of  $1\text{ °C/min}$

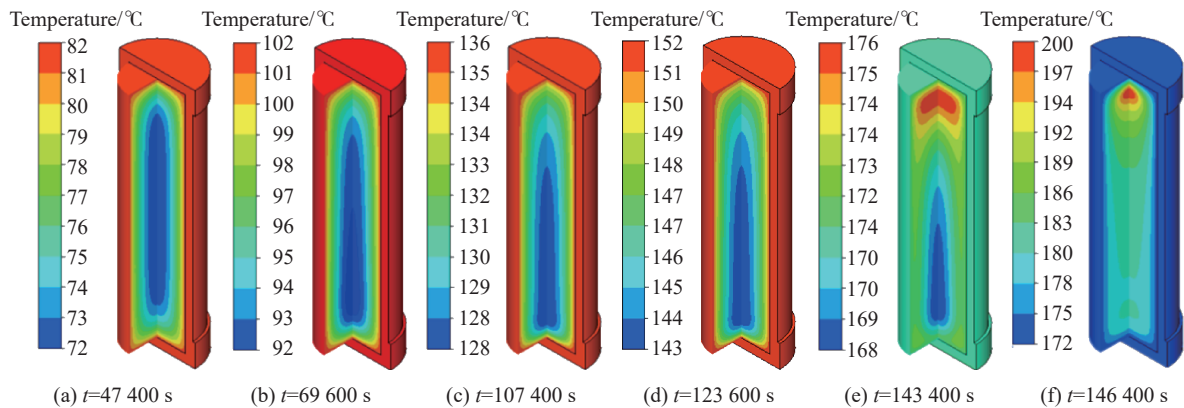
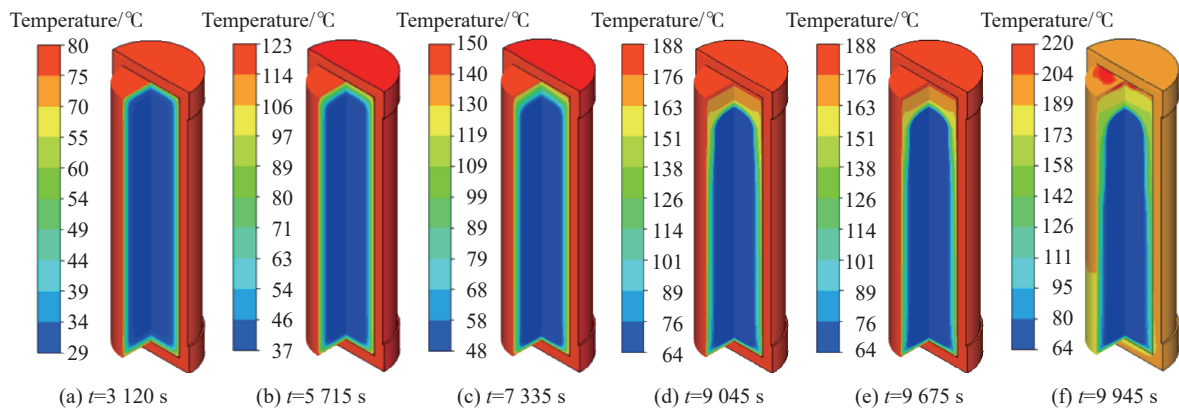
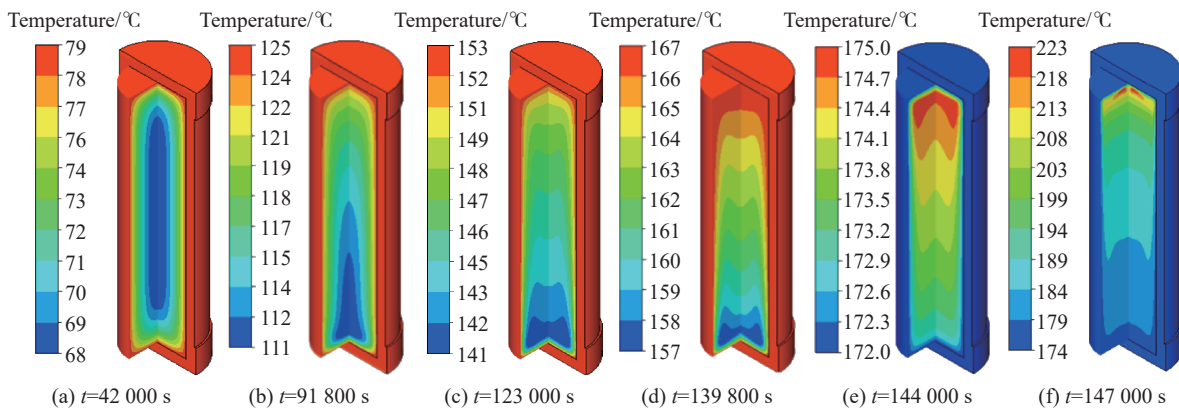


图 11  $3.3\text{ °C/h}$  升温速率下  $\varnothing 76\text{ mm}$  烤燃弹内部温度场变化过程

Fig. 11 Changes of temperature field inside the  $\varnothing 76\text{ mm}$  shell at the heating rate of  $3.3\text{ °C/h}$

图 12 1 °C/min 升温速率下  $\phi$ 130 mm 烤燃弹内部温度场变化过程Fig. 12 Changes of temperature field inside the  $\phi$ 130 mm shell at the heating rate of 1 °C/min图 13 3.3 °C/h 升温速率下  $\phi$ 130 mm 烤燃弹内部温度场变化过程Fig. 13 Changes of temperature field inside the  $\phi$ 130 mm shell at the heating rate of 3.3 °C/h

结合图 8(b) 与图 11 可知,  $\phi$ 76 mm 烤燃弹在 3.3 °C/h 升温速率下, 炸药开始熔化后, 由于吸热, 内部温差开始增大, 在此影响下, 部分炸药发生屈服并流动。但相变完成后, 内部温差减小, 流场强度下降, 此时对流强度低, 对温度场的影响有限, 内部温度场变化过程十分缓慢, 在很长时间内均处于固相温度场向液相温度场的转变之中。随着整体温度的进一步升高, 当外壁温度超过 137 °C 后, 出现屈服的部分逐渐增多, 流场强度开始增大, 温度场的分布也出现变化, 导致炸药最终发生自热反应与点火的区域都出现在药柱上部。

结合图 9(b) 与图 13 可知, 当升温速率为 3.3 °C/h 时,  $\phi$ 130 mm 烤燃弹在相变过程中, 内部流场平均流速也出现了短暂的上升, 完全相变后, 内部温差减小, 流场强度降低。在短暂的平稳期过后, 炸药开始屈服并出现黏性流动, 流场强度逐渐升高。在此影响下, 主要传热方式由热传导转变为对流换热, 其内部温度场出现了明显变化, 体现出典型液相温度场的层状分布特点, 温度由上到下逐层降低。最终炸药在靠近顶部位置出现自热反应并最终响应。

由此可见, 在缓慢升温速率下, 相比于小尺寸烤燃弹, 大尺寸烤燃弹 B 炸药完全相变后, 由于内部温差较大, B 炸药的流变特性对慢速烤燃的影响体现得更明显, 对流强度更强, 对温度场分布的影响更强烈, B 炸药的流变特性具有明显的尺寸效应。

### 3 结 论

(1) 炸药是否屈服并发生黏性流动对熔铸炸药在慢速烤燃过程中的熔化、温度分布、自热反应区域与点火位置都有本质上的影响。在慢速烤燃条件下, 无论升温速率的快慢, 装填 B 炸药的中, 大口径烤燃弹, 炸药熔化后均会出现自然对流, 在此影响下, 最早出现自热反应与最终响应的区域都出现在靠近



药柱顶端的位置。

(2)对于中、大口径的烤燃弹,在慢速烤燃过程中,当升温速率较快时,烤燃弹尺寸的变化对响应温度的影响几乎可以忽略,内部炸药在完全熔化前就已发生响应,且受内部对流的影响,炸药顶部的熔化速率明显高于底部。升温速率较慢时,尺寸较大的烤燃弹内部发生相变后很快出现对流,且对流强度逐渐升高,在此影响下其温度场也明显体现出典型液相温度场分布特点;尺寸偏小的烤燃弹内部炸药熔化后,由于温差较小,在很长时间内其内部流场强度都很低,对温度场的影响相对较弱小。

## 参考文献:

- [1] CUDZIHO S, TRZCIŃSKI W A. Melt cast high explosives [J]. *Bulletin of the Military University of Technology*, 2014, 63(4): 43–55. DOI: 10.5604/12345865.1131330.
- [2] KRAWIETZ T R, MCKENNEY R L, ORTIZ R J. Characterization of the unconfined slow cook-off response of nitramines and nitraminecomposites with TNT [C] // 12<sup>th</sup> International Detonation Symposium. San Diego, 2002: 79–86.
- [3] 周捷,智小琦,王帅,等. B炸药慢速烤燃过程的流变特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(5): 052301. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0321.  
ZHOU J, ZHI X Q, WANG S, et al. Rheological properties of Composition B in slow cook-off process [J]. *Explosion and Shock Wave*, 2020, 40(5): 052301. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0321.
- [4] ZERKLE D K, NUNEZ M P, ZUCKER J M. Molten composition B viscosity at elevated temperature [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2016, 34(4): 368–383. DOI: 10.1080/07370652.2015.1102179.
- [5] DAVIS S M, ZERKLE D K. Short communication: estimation of yield stress/viscosity of molten octol [J]. *AIP Advances*, 2018, 8(5): 055202. DOI: 10.1063/1.5027397.
- [6] DAVIS S M, ZERKLE D K, SMILOWITZ L B, et al. Molten composition B-3 yield stress model [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 1979(1): 150011. DOI: 10.1063/1.5044967.
- [7] DAVIS S M, ZERKLE D K, SMILOWITZ L B, et al. Integrated rheology model: explosive composition B-3 [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2018, 36(4): 398–411. DOI: 10.1080/07370652.2018.1451573.
- [8] JAN H E. Slow heating, munitions test procedures: STANAG 4382 [S]. Brussels: NATO Standardization Agency, 2003.
- [9] MCCALLEN R, DUNN T, NICHOLS A, et al. Modeling of thermal convection of liquid TNT for cook-off [C] // Nuclear Explosives Code Development Conference, Monterey, 2003.
- [10] PARRY M A, BILLON H H. A note on the coefficient of viscosity of pure molten 2, 4, 6-trinitrotoluene (TNT) [J]. *Rheologica Acta*, 1988, 27(6): 661–663. DOI: 10.1007/BF01337463.
- [11] PARRY M A, BILLON H H. Flow behavior of molten 2, 4, 6-trinitrotoluene (TNT) between concentric cylinders [J]. *Rheologica Acta*, 1990, 29(5): 462–468. DOI: 10.1007/BF01376797.
- [12] NICHOLS A L. Improved cook-off modeling of multi-component cast explosives [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018: 150029. DOI: 10.1063/1.5044985.
- [13] GUILLEMIN J P, BRUNET L, BONNEFOY O, et al. A flow time model for melt-cast insensitive explosive process [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2007, 32(3): 261–266. DOI: 10.1002/prop.200700028.
- [14] ZHU D L, ZHOU L, ZHANG X R. Rheological behavior of DNAN/HMX melt-cast explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019, 44(12): 1583–8. DOI: 10.1002/prop.201900117.
- [15] PAPANASTASIOU T C. Flows of materials with yield [J]. *Journal of Rheology*, 1987, 31(5): 385–404. DOI: 10.1122/1.549926.
- [16] HOBBS M L, KANESHIGE M J, TODD S N, et al. RDX solubility in TNT at high temperatures [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 142(2): 861–869. DOI: 10.1007/s10973-019-08924-z.
- [17] HOBBS M L, KANESHIGE M J, ANDERSON M U. Cook-off of a melt-cast explosive (Comp-B) [C] // Proceedings of the 27<sup>th</sup> Propulsion Systems Hazards Joint Subcommittee Meeting. Monterey: SNL-NM, 2012.
- [18] SANHYE W, DUBOIS C, LAROCHE I, et al. Numerical modeling of the cooling cycle and associated thermal stresses in a melt explosive charge [J]. *AIChE Journal*, 2016, 62(10): 3797–3811. DOI: 10.1002/aic.15288.
- [19] McCLELLAND M A, GLASCOE E A, NICHOLS A L, et al. ALE3D simulation of incompressible flow, heat transfer, and chemical decomposition of Comp B in slow cookoff experiments [C] // 15<sup>th</sup> International Detonation Symposium. 2014: 1196–1206.

(责任编辑 王小飞)