

文章编号: 1006-9941(2016)04-0385-06

升温速率对限定条件下烤燃弹热起爆临界温度的影响

王洪伟¹, 智小琦¹, 郝春杰², 李娟娟²

(1. 中北大学地下目标毁伤技术国防重点实验室, 山西 太原 030051; 2. 晋西集团公司, 山西 太原 030027)

摘要: 为研究升温速率与限定条件下烤燃弹热起爆临界温度之间的关系, 利用自行设计的烤燃试验装置, 以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率对装有 RDX 基高能炸药的烤燃弹进行加热, 并使壳体外界温度分别恒定在 160, 170, 180, 185, 195 $^{\circ}\text{C}$, 50 min 后观察烤燃弹的响应情况。用 FLUENT 软件对不同升温速率下烤燃弹的热起爆临界温度进行了数值模拟。结果表明, 炸药置于恒定高温环境中比慢速加热更加危险, 其发生反应的环境温度更低, 响应更剧烈; 升温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 烤燃弹的热起爆临界温度为 194.8 $^{\circ}\text{C}$ 。且随升温速率的提高, 烤燃弹的热起爆临界温度缓慢升高, 当升温速率大于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 其热起爆临界温度均为 197 $^{\circ}\text{C}$ 。在给定的条件下, 升温速率对烤燃弹点火点的位置无影响, 均为中心点火。

关键词: RDX 基高能炸药; 烤燃试验; 升温速率; 热起爆临界温度

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.04.012

1 引言

烤燃试验常用于检验和评估炸药的热易损性, 对弹药的设计、制造、运输、存储和使用具有重要的指导意义。烤燃试验方法、响应机理及影响因素是目前烤燃研究的三个主要方向, 其中关于影响因素的研究最为广泛, 且得到了许多有价值的结论。如 Monica Hall^[1] 等人利用 UINTAH 软件研究了热通量及装置尺寸对内装 PBX9501 炸药的方形薄盒的烤燃响应剧烈程度的影响。结果表明, 药柱尺寸一定时, 热通量及装置尺寸对烤燃响应剧烈程度有重要影响。冯晓军^[2-3] 等研究了装药尺寸和装药孔隙率对烤燃响应特性的影响。结果表明, 增大装药尺寸或装药空隙率, 炸药慢速烤燃反应的环境温度和发生反应的剧烈程度均增加。陈朗^[4]、王沛^[5] 等分别以 PBXC10 炸药、固黑铝炸药为试验材料, 研究了升温速率对炸药烤燃响应特性的影响。结果表明, 升温速率对炸药的点火时间和点火位置有很大的影响, 而对炸药的点火温度影响不大。此外, 还有关于约束条件、装药密度、物理界面等因素对烤燃响应特性影响的报道^[6-8]。

当大型作战平台发生火灾时, 热量以热辐射和热对流的方式传递到弹药存储室内, 使其温度逐渐升高并维持在高温下一段时间, 而此时对弹药安全性的研究却极少。为此, 本工作对装有 RDX 基高能炸药的烤燃弹进行了不同温度下的 50 min 恒温试验, 并用 FLUENT 软件对不同升温速率下烤燃弹的热起爆临界温度进行了数值模拟, 采用试验与仿真相结合的方法研究了升温速率对限定条件下烤燃弹热起爆临界温度的影响, 它对置于不同热环境中弹药的安全使用及处理具有重要意义, 其中“限定条件”指的是将烤燃弹外壁匀速加热至一定温度后恒温一段时间。

2 试验

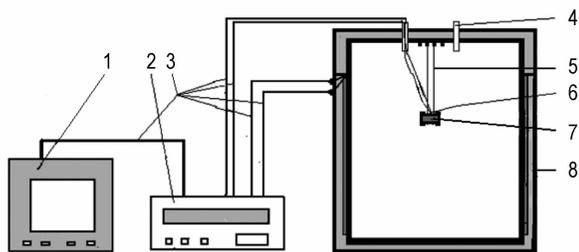
2.1 试验装置及材料

图 1 是自行设计的烤燃试验系统示意图。如图 1a 所示, 试验装置由计算机、MR13 温控仪、导线、烤燃炉、烤燃弹、K 型热电偶组成。MR13 温控仪的调节精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 可使烤燃弹以设定的升温速率升温或恒定在设定温度上一段时间。图 1b 是烤燃弹的实物图, 如图所示烤燃弹由上、下端盖、壳体、药柱组成, 端盖与壳体之间用螺纹连接。壳体材料为 45# 钢, 内部尺寸为 $\Phi 19\text{ mm}\times 38\text{ mm}$, 壁厚 3 mm、端盖厚 1 mm。药柱为 RDX 基高能炸药, 配方质量比为 RDX/添加剂 = 95/5。药柱尺寸为 $\Phi 19\text{ mm}\times 38\text{ mm}$, 装药密度 $1.64\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

收稿日期: 2015-07-07; 修回日期: 2015-09-10

作者简介: 王洪伟 (1989-), 男, 硕士, 主要从事弹药易损性方面的研究。e-mail: 1290303565@qq.com

通信联系人: 智小琦 (1963-), 女, 教授, 主要从事弹药设计、毁伤及低易损弹药技术及相关研究。e-mail: zqx4060@sina.com



a. schematic diagram of cook-off test system



b. cook-off bomb

图1 烤燃装置示意图

1—计算机, 2—MR13 温控仪, 3—导线, 4—排气孔, 5—稳固架, 6—热电偶, 7—烤燃弹, 8—烤燃炉;

Fig.1 Schematic diagram of cook-off device

1—computer, 2—MR13controlling temperature instruments, 3—conducting wire, 4—sealing plug, 5—support instruments, 6—thermocouple, 7—cook-off bomb, 8—cook-off stove

2.2 试验方法

试验前,校准试验仪器,确保试验时烤燃弹以设定的升温速率升温。由范特荷甫规则^[9]可知,温度每升高 10 °C,其化学反应速率增大 2~4 倍,为使试验结果更为显著,需将恒温温度取在较高温度下(热分解反应明显阶段)。首先以 1 °C·min⁻¹的升温速率将烤燃弹加热至某一温度,然后将 MR13 温控仪的加热模式由 PROGM 模式(线性升温模式)切换至 FIX 模式(恒温模式),并将仪表中的恒温参数值分别设为 160, 170, 180, 185 °C 和 195 °C(最后两个试验温度取为 185 °C、195 °C 而不是 190 °C、200 °C,是为了捕捉到经过一定热延滞期后发生反应的温度)进行恒温, 50 min 后观察烤燃弹的响应情况。为了研究烤燃弹在不同烤燃模式下的响应剧烈程度,还进行了升温速率为 1 °C·min⁻¹的匀速加热至响应(208 °C)的烤燃试验,结果一并列入表 1。

为保证试验结果的可靠性,每种温度下做两发平行试验。其中,50 min 恒温时间是随机试验值,以通过该试验数据获得合理的仿真参数。

表 1 升温速率为 1 °C·min⁻¹时烤燃弹的试验结果

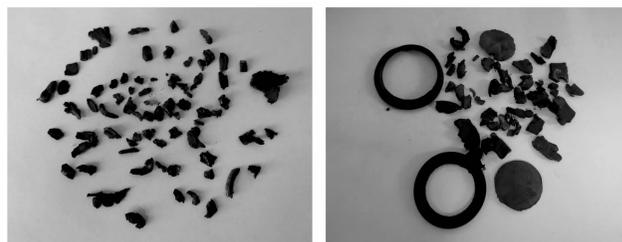
Table 1 Experiment results of cook-off bombs at a heating rate of 1 °C·min⁻¹

constant temperature of case/°C	constant time of case/min	amount of mass loss/g	percentage of mass loss/%	results
160	50	0.18	1.02	thermal balance
170	50	0.23	1.26	thermal balance
180	50	0.36	1.99	thermal balance
185	50	0.47	2.63	thermal balance
195	48	-	-	initiation
208	0	-	-	initiation

Note: Percentage of mass loss = $(m_0 - m_1) / m_0$, m_0 is explosives mass before heating, m_1 is the explosives mass after heating.

表 1 是升温速率为 1 °C·min⁻¹时烤燃弹的试验结果。由表 1 可见,随着恒定温度的逐渐升高,药柱的质量损失率呈非线性增加,且恒定温度为 195 °C 时,烤燃弹经 48 min 热延滞期后发生爆轰反应。由此可见,存在一个使烤燃弹发生热点火的最低恒定温度 T_{min} ,即热起爆临界温度。当恒定温度低于 T_{min} 时,即使无限延长加热时间,也不会发生点火反应,当恒定温度大于等于 T_{min} 时,经过不同的延滞期后发生点火反应。 T_{min} 即为本研究所指的热起爆临界温度。由表 1 最后一组数据可知,以 1 °C·min⁻¹ 的升温速率对烤燃弹进行加热时,壳体外壁温度为 208 °C 时烤燃弹发生点火。

为了研究烤燃弹在不同烤燃模式下的响应剧烈程度,收集了 1 °C·min⁻¹ 的升温速率加热至 195 °C,恒温 48 min 后点火及 1 °C·min⁻¹ 的升温速率加热(208 °C, 加热 182 min, 初温 26 °C)至响应两种模式下的破片,其结果如图 2 所示。由图 2 可见,以 1 °C·min⁻¹ 的升温速率加热至 195 °C,恒温 48 min 后点火的烤燃弹其破片数量更多,破片的平均质量也更小。因此烤燃弹置于恒定高温环境中比慢速加热更危险,其发生反应的环境温度更低,响应更剧烈。



a. 195 °C, 48 min b. 208 °C, heating 182 min, first 26 °C

图 2 不同烤燃模式下烤燃弹的破片状态

Fig.2 Fragments status of cook-off bombs in different heating models

目前人们普遍认为,非均质炸药起爆机理是热点火和热点引起的化学反应成长为爆轰的二阶理论^[10]。烤燃弹 195 °C 下恒温 48 min 后药柱内部温差减小,温度分布更趋于均匀场,活化分子数更多,这样,由热点引起的化学反应成长为爆轰的时间更短,反应更充分,剧烈性也更强。这与文献[1]“药柱的温度场分布对响应剧烈程度有重要影响”的结论一致。

3 模拟仿真

3.1 升温速率为 1 °C · min⁻¹ 时热起爆临界温度的数值模拟

3.1.1 仿真模型的建立

为了建立数学模型,对烤燃试验假设如下:(1)假设烤燃弹壳体与药柱之间没有间隙。(2)假设整个烤燃过程中壳体和内壁的材料参数保持不变。(3)药柱的热反应和热传导遵循 Frank-Kamenetskill 方程^[11]:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_p A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(a)$$

式中, $f(a)$ 为反应机理函数, $f(a)=(1-a)^n$,其中 a 为反应深度, n 为反应级数。由于 Frank-Kamenetskill 模型为零级反应模型,且反应深度很小,因此, $f(a)=1$ 。 T 为温度,K; Z 为圆柱坐标系下药柱某点的高度,m; r 为圆柱坐标系下某点径向距离,m; φ 为圆柱坐标系下某点的方位角,rad; ρ 为反应物的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c_v 为比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; λ 为热导率, $\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; Q 为反应物的反应热, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; A 为指前因子, s^{-1} ; E 为活化能,

表 2 材料参数

Table 2 Parameters of materials

material	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_v/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\lambda/\text{J} \cdot (\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{s})^{-1}$	$Q/\text{J} \cdot (\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{s})^{-1}$	A/s^{-1}	$E/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$R/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
RDX	1640	1130	0.213	21010	5.80×10^{18}	202730	8.314
45# steel	7850	480	43				

表 3 是升温速率为 1 °C · min⁻¹ 时烤燃弹的仿真结果。图 4 是不同热烤温度下烤燃弹热起爆延滞期与温度的关系。曲线上的数值为烤燃弹外壁温度。由表 3 可见,烤燃弹以 1 °C · min⁻¹ 的升温速率加热至点火时,壳体外壁温度为 207 °C,而试验时壳体壁面温度为 208 °C;烤燃弹以 1 °C · min⁻¹ 的升温速率加热至 195 °C 后恒温 45 min 后发生点火,与试验结果(恒温 48 min 后发生点火)相近,说明材料参数的选取是合理的,仿真结果是可信的。结合图 4 可见,恒定的温

$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$, R 为普适气体常数, $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

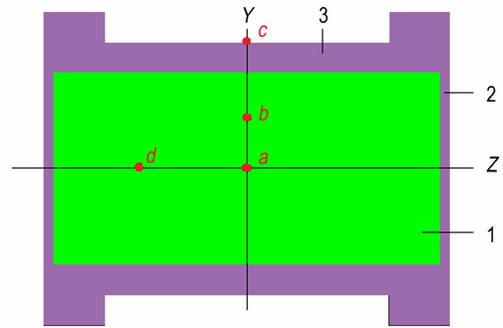


图 3 烤燃弹物理模型

1—端盖, 2—药柱, 3—壳体

Fig. 3 the physical model of cook-off bomb

1—end cover, 2—explosive cylinder, 3—case

图 3 是烤燃弹的物理模型,为观测烤燃过程中烤燃弹内部的温度变化,取 a 、 b 、 c 、 d 四个观测点,如图所示,测点 a 在药柱几何中心处,测点 b 在药柱中心横截面的 1/2 半径位置,测点 c 在壳体圆柱部外壁 1/2 处,测点 d 位于药柱纵轴线的 3/4 横截面处。

3.1.2 仿真结果

炸药装药密度由实际称量计算得到,其他仿真材料参数参照文献[12]。由于随温度的变化,指前因子的值也有一定变化。为提高仿真结果与试验的测点温度和响应时间的吻合度,指前因子作了适当修改,由文献[2]中的 4.01×10^{18} ,修改为 5.8×10^{18} ,调整后的材料参数见表 2。

度越高,延滞期越短。这是因为恒定温度越高,热分解反应越迅速,产热速率越快,热反馈也越剧烈所致。恒

表 3 升温速率为 1 °C · min⁻¹ 时烤燃弹的仿真结果

Table 3 Simulation results of cook-off bomb at a heating rate of 1 °C · min⁻¹

constant temperature of case/°C	207	195	194.9	194.8	194.7
constant time of case/min	0	45	72	135	thermal balance

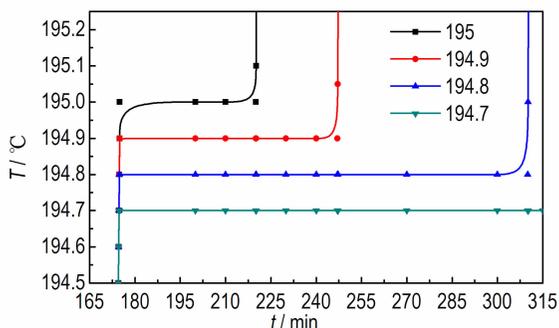


图4 不同恒定温度下的热点火温度与延滞期的关系
Fig. 4 Relationship between thermal initiation temperature and delay time

定温度为 194.7 °C 时,无论加热时间多长,烤燃弹都不会发生点火反应,系统热得失平衡,而恒定温度为 194.8 °C 时,烤燃弹恒温 135 min 后发生点火。可见升温速率为 1 °C · min⁻¹ 时,烤燃弹的热起爆临界温度为 194.8 °C。

3.2 不同升温速率下热起爆临界值的数值模拟

3.2.1 仿真结果

不同升温速率下烤燃弹热起爆临界温度的仿真结果见表 4。从表 4 可知,当升温速率小于等于 10 °C · min⁻¹ 时,随升温速率的提高,烤燃弹的热起爆临界温度逐渐升高。当升温速率大于 10 °C · min⁻¹ 时,无论升温速率多大,烤燃弹的热起爆临界温度均为 197 °C。由此可知,升温速率对烤燃弹的热起爆临界温度有影响,当升温速率低于一定值时,随升温速率的提高,烤燃弹的热起爆临界温度缓慢升高,当升温速率高于一定值时,继续提高升温速率,烤燃弹的热起爆临界温度保持不变。这是因为,随升温速率的提高,加热时间逐渐缩

表 4 不同升温速率下烤燃弹的仿真结果

Table 4 Simulation results of cook-off bomb in different heating rates

heating rate/°C · min ⁻¹	critical temperature/°C
0.1	194.4
0.5	194.6
1.5	195.1
2	195.4
4	195.8
6	196.4
8	196.8
10	197.0
15	197.0
30	197.0

短,烤燃弹的热起爆临界温度会逐步的逼近直接恒温时的热起爆临界温度(模拟仿真可知,将烤燃弹直接置于恒温环境中的热起爆临界温度为 197 °C)。且影响烤燃弹热起爆临界温度的最主要因素是炸药本身的物化性能,因此达到一定值时不再发生变化。

3.2.2 不同升温速率下各测点的温度变化

表 5 是烤燃弹在不同烤燃模式下内部各测点的温度分布情况,测点 a、b、c、d 的位置见图 3。由表 5 可见,壳体壁面温度为 200 °C 时,升温至 195 °C 后恒温的烤燃弹,其 a、b 点和 a、d 的温差 ΔT_{ab} 、 ΔT_{ad} 分别为 0.47 °C、0.17 °C。而匀速加热至点火的烤燃弹其 a、b 点和 a、d 的温差 ΔT_{ab} 、 ΔT_{ad} 分别为 1.01 °C、0.4 °C,分别是经恒温处理的烤燃弹的 2.15 倍和 2.35 倍。观察壁面温度为 220 °C 的仿真结果,可得到相似的结论。由此可见,在加热至一定温度后恒温的条件下,烤燃弹内部的温度分布更为均匀,这进一步解释了图 2a 烤燃弹响应更剧烈的原因。

表 5 不同烤燃模式下各测点的温度变化

Table 5 The change in temperature at each measuring point in different heating models

heating methods	point a	point b	point d	ΔT_{ab}	ΔT_{ad}
heating to ignition	200	198.99	199.60	1.01	0.4
	220	211.31	207.90	8.69	12.1
keeping temperature for 50 min	200	199.53	199.83	0.47	0.17
	220	215.30	216.37	4.70	3.63

图 5 是升温速率为 0.1, 1, 10 °C · min⁻¹ 时烤燃弹各测点温度随时间的变化曲线,为了使观测效果更加清晰明了,截取了升温阶段末期(I)和恒温阶段(II)的温度-时间曲线。

由图 5 可知,当升温速率较小时(0.1 °C · min⁻¹, 图 5a),在线性升温阶段,烤燃弹温度场的分布是开始中心温度最低,外壁温度最高,1560 min 后,中心温度开始高于外壁温度,加热至恒温值时(1758 min 对应的温度),中心温度已比外壁温度高 12.9 °C;对于升温速率为 1 °C · min⁻¹ 的烤燃弹(图 5b),加热至恒温值时,中心温度为 195.7 °C,此时已经比外壁 c 点温度高 0.7 °C;当升温速率大于 1 °C · min⁻¹ 后(图 5c),随升温速率的加快,无论在线性升温阶段还是恒温阶段前期,烤燃弹温度场的分布均为中心温度低,外壁温度高。且升温速率越快,中心温度赶上并超过外壁温度所需的恒温时间越长。达到恒温值时,不同升温速率下烤燃弹中心温度与外壁温度如图 6 所示。

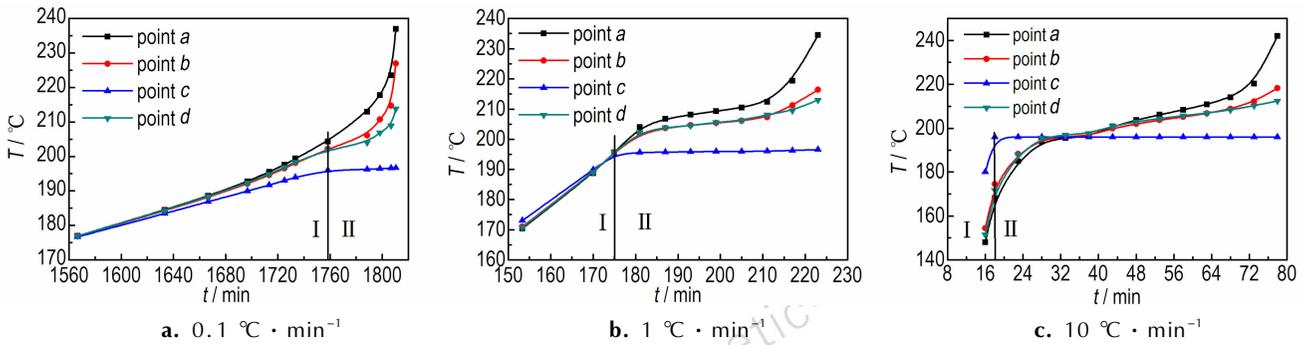


图5 不同升温速率下烤燃弹各测点的温度变化

Fig.5 The change in temperature at each measuring point with different heating rates (I-heating stage, II-thermostatic stage)

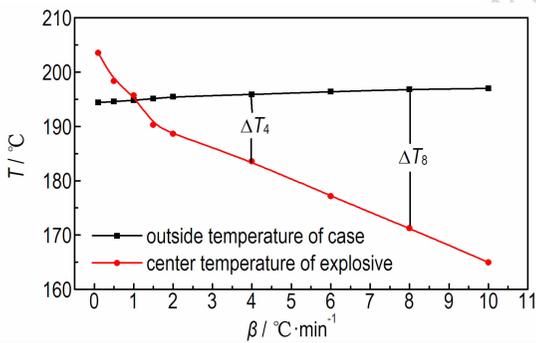


图6 烤燃弹达到恒定温度时的药柱中心温度与壳体壁面温度 (ΔT_4 、 ΔT_8 分别为升温速率为 4, 8 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时壳体外壁与药柱中心的温差)

Fig.6 The center temperature of explosive cylinder and wall temperature of case when the constant temperature of cook-off bomb is reached (ΔT_4 、 ΔT_8 are the difference between outside wall temperature of case and center temperature of explosive cylinder at heating rates of 4 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ and 8 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, respectively)

由图6可见,升温速率大于1 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,升温速率越快,加热至恒温值时烤燃弹中心与外壁的温差越大。图7为烤燃弹点火前的温度分布云图,从图7

中也可看出,烤燃弹点火前的药柱中心温度最高。这说明,在加热至一定温度后恒温的条件下,升温速率对烤燃弹的点火位置无影响,均为中心点火,烤燃弹达到恒温值时的温度场分布是导致其热起爆临界温度不同的原因。

4 结论

(1) 与匀速升温至响应的试验结果相比,烤燃弹在匀速升温至 195 $^{\circ}\text{C}$ 后恒温至点火时,破片数量更多,平均质量更小。由此可见,炸药置于恒定高温环境中比慢速加热更危险,其发生反应的环境温度更低,响应更剧烈。

(2) 仿真结果表明,升温速率为 1 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,限定条件下烤燃弹的热起爆临界温度为 194.8 $^{\circ}\text{C}$,且随升温速率增大,烤燃弹热起爆临界温度缓慢升高,当升温速率大于 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,热起爆临界温度恒定在 197 $^{\circ}\text{C}$ 不变。由此可见,升温速率对限定条件下烤燃弹热起爆临界温度有影响,随升温速率的提高,烤燃弹热起爆临界温度缓慢升高,当升温速率增大至一定值时,热起爆临界温度保持不变。

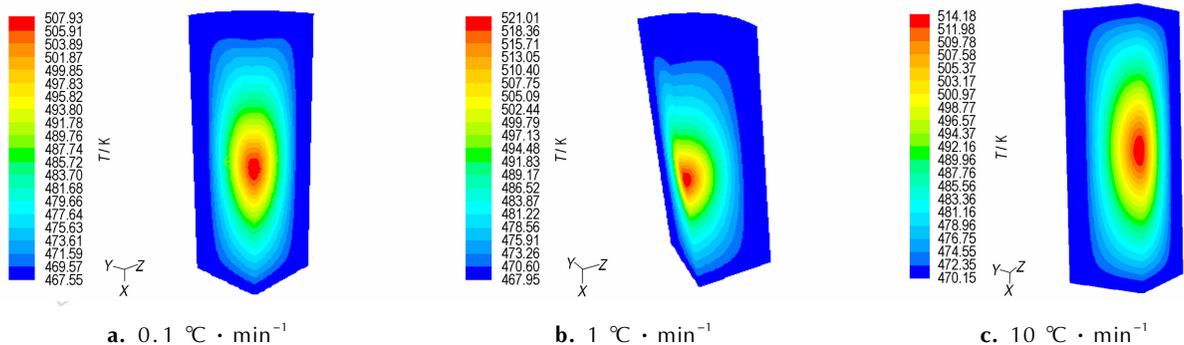


图7 不同升温速率下烤燃弹点火前的温度分布云图

Fig.7 Temperature distribution of cook-off bomb at different heating rates before initiation

(3) 当烤燃弹以不同的升温速率升温至热起爆临界温度,然后保持恒温直至发生响应时,升温速率对点火点的位置无影响,均为中心点火。

参考文献:

- [1] Monica H, Jacqueline C B, Charles A W, et al. The influence of an applied heat flux on the violence of reaction of an explosive device[C]//Proceeding; New York, NY, USA, 2013.
- [2] 冯晓军, 王晓峰. 装药孔隙率对炸药烤燃响应的影响[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(1): 109-112.
FENG Xiao-jun, WANG Xiao-feng. Influences of charge porosity on cook-off response of explosive [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(1): 109-112.
- [3] 冯晓军, 王晓峰, 韩助龙. 炸药装药尺寸对炸药烤燃响应的影响[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(3): 285-288.
FENG Xiao-jun, WANG Xiao-feng, HAN Zhu-long. The study of charge size influence on the response of explosives in slow cook-off test[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(3): 285-288.
- [4] 陈朗, 马欣, 黄毅民, 等. 炸药多点测温烤燃实验和数值模拟[J]. 兵工学报, 2011, 32(10): 1230-1236.
CHEN Lang, MA Xin, HUANG Yi-min, et al. Multi-point temperature measuring cook-off test and numerical simulation of explosion[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(10): 1230-1236.
- [5] 王沛, 陈朗, 冯长根. 不同升温速率下炸药烤燃模拟计算分析[J]. 含能材料, 2009, 17(1): 46-49.
WANG Pei, CHEN Lang, FENG Chang-gen. Reaction rule for explosive under different shape warhead impact in steven test [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(1): 46-49.
- [6] 智小琦, 胡双启, 李娟娟. 不同约束条件下钝化 RDX 的烤燃响应特性[J]. 火炸药学报, 2009, 32(3): 22-24.
ZHI Xiao-qi, HU Shuang-qi, LI Juan-juan. Cook-off response characteristics of desensitizing RDX explosive under different restriction conditions[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(3): 22-24.
- [7] 智小琦, 胡双启. 炸药装药密度对慢速烤燃响应特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(2): 221-224.
ZHI Xiao-qi, HU Shuang-qi. Influence of charge densities on responses of explosives to slow cook-off[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(2): 221-224.
- [8] 高峰, 智小琦. 物理界面对慢速烤燃特性的影响[J]. 火炸药学报, 2014, 37(6): 53-57.
GAO Feng, ZHI Xiao-qi. Effect of physical interface on slow cook-off characteristics of explosives[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2014, 37(6): 53-57.
- [9] 周霖. 爆炸化学基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 161-162
ZHOU Lin. Base of explosion chemistry. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005: 161-162.
- [10] Price D. Effect of particle size on the shock sensitivity of pure porous HE. NSWC TR 86-336, 1986. Silver Spring, MD: Naval Surface Warfare Center.
- [11] 冯长根. 热爆炸理论[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 97-118
FENG Chang-gen. thermal explosion theory[M]. Beijing: Science Press, 1988: 97-118
- [12] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 310-312
DONG Hai-shan, ZHOU Fen-fen. High explosive and related chemical and physical properties [M]. Beijing: Science Press, 1989: 310-312

Effect of Heating Rate on the Critical Temperature of Thermal Initiation of Cook-off Bomb in Defined Conditions

WANG Hong-wei¹, ZHI Xiao-qi¹, HAO Chu-jie², LI Juan-juan²

(1. National Defense key Laboratory of Underground Damage Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Shanxi West Group, Taiyuan 030027, China)

Abstract: In order to study the relationship between the heating rate and the critical temperature of thermal initiation of cook-off bomb in defined conditions, experiments were carried out with a self-designed test setup. Cook-off bomb with RDX based high energy explosives was heated at a heating rate of $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ and then makes the outer wall temperature of case keep at 160, 170, 180, 185 $^{\circ}\text{C}$ and 195 $^{\circ}\text{C}$ respectively for 50 min and then the response of cook-off bomb was observed. The critical temperature of thermal initiation of cook-off bomb at different heating rates was simulated by FLUENT software. Results show that explosive in constant high temperature environment is more dangerous than slow heating. The environment temperature of the reaction is lower and the response is more intense. When heating rate is $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, the critical temperature of thermal initiation of cook-off bomb is 194.8 $^{\circ}\text{C}$. In addition, the critical temperature of thermal initiation increases slowly with the increasing of heating rate. When heating rate is larger than $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, the critical temperature of thermal initiation is 197 $^{\circ}\text{C}$. When cook-off bomb is heated to its critical temperature of thermal initiation at different heating rates and then the temperature is kept constant until the response, the heating rate has no influence on the ignition position of cook-off bomb under the given conditions. Ignition point is always in the center of explosives.

Key words: RDX based high energy explosives; cook-off experiment; heating rate; critical temperature of thermal initiation

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.04.012