

文章编号: 1006-9941(2004)04-0193-06

RDX 炸药热烤 (Cook-off) 实验及数值模拟

冯长根¹, 张蕊^{1,2}, 陈朗¹

(1. 北京理工大学机电工程学院, 北京 100081;

2. 陕西应用物理化学研究所 应用物理化学国家重点实验室, 陕西 西安 710061)

摘要: 对一种改性的 RDX 炸药进行了热烤实验。应用热传导理论对实验中炸药的热作用过程进行了分析, 并通过软件 PHOENICS 3.3 对 RDX 在热烤过程中的热响应情况进行了模拟。结果表明, 在环境温度较低时, RDX 受热发生分解, 所放出的热量可以及时地散失到环境中, 从而不发生爆炸。环境温度较高时, 药柱的边沿受热形成局部高温, 导致热点火, 使药剂发生爆炸。

关键词: 爆炸力学; 热点火; 数值模拟; Cook-off 实验; RDX 炸药

中图分类号: TQ564.9

文献标识码: A

1 引言

热烤实验 (Cook-off test) 是研究含能材料热安全性的重要方法, 可以测定炸药、推进剂及烟火药剂等含能材料在较高温度下的反应情况。由于 Cook-off 实验能够对含能材料部件进行实验, 实验条件更接近于武器弹药的使用条件, 因此, 用它来研究武器弹药中炸药的热安全性, 得到的结论与实际情况更接近, 对炸药使用过程中的热安全性分析和评价更具实际意义。Cook-off 实验系统多针对炸药和推进剂^[1-4], 少量针对传爆药^[5]。这些实验都是基于小型烤燃弹 (SCB) 实验和一维热爆炸实验 (ODTX), 样品量较大, 一般为几十到几百克。Erneux 等^[6] 1983 进行小药量推进剂的 Cook-off 实验, 实验药量为 0.1 ~ 2 g, 但在实验中只测量了推进剂发生爆炸的热响应时间和温度, 并未对推进剂内温度的变化情况进行研究。由于 Cook-off 实验成本高, 危险性大, 因此, 使用数值模拟方法成为新的研究途径, 其中 Jones 和 Parker 用 Fortran 语言开发了基于有限差分算法的 HEAT 计算软件, 进行了 SCB 实验的一维计算^[7-8]。目前, 对于含能材料 Cook-off 实验的数值模拟多是一维和二维的, 且不涉及复杂的高温环境条件。

本文设计了一种小装药的 Cook-off 实验系统, 对一种改性 RDX 炸药部件的热安全性进行了实验研究。

应用传热学理论对炸药的热作用过程进行了分析, 建立了炸药在 Cook-off 实验中的热作用模型, 同时, 使用 PHOENICS 3.3 软件对 RDX 炸药部件在热烤过程中的受热情况进行了三维数值模拟, 分析了 RDX 炸药部件在不同环境温度下热安全性。

2 Cook-off 实验

图1 实验所用爆炸盒的结构简图^[9]。爆炸盒为自加工的钢制盒, 实验样品是将常用于新型延期雷管的硬性 RDX 以一定密度压入铝制雷管壳中, 通过爆炸盒盖上的样品架固定在爆炸盒内。用两只镍铬-康铜热电偶测量温度, 其中一只埋在药柱轴向 1/2 处, 测量样品内的温度, 另一只固定在雷管的外壁测量样品外的温度。再通过计算机记录、处理实验时温度的数据。

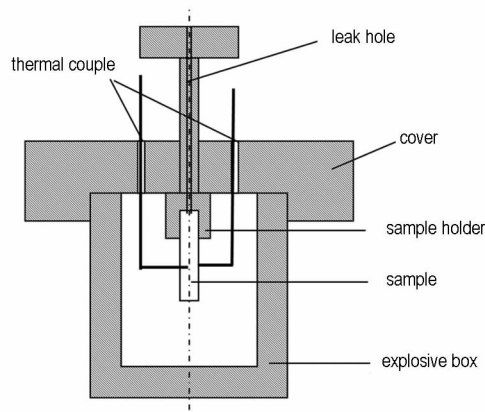


图1 爆炸盒结构示意图

Fig. 1 Diagram of explosive box

收稿日期: 2003-12-25; 修回日期: 2004-03-24

作者简介: 冯长根 (1953 -), 男, 教授, 博士生导师, 从事热爆炸理论研究。联系人: 张蕊 e-mail: zh-rui@263.net

实验时,先将加热炉的温度升至实验温度,并恒温40 min。按实验要求将试样装入爆炸盒,安装好爆炸盒,放入加热炉中,记录药柱内外温度随时间的变化情况。

3 RDX 炸药 Cook-off 实验的数值模拟

根据本文所设计的 Cook-off 实验,装有 RDX 炸药的爆炸盒由药柱、雷管壳、空气夹层及爆炸盒壳体4部分构成。对 RDX 的热作用过程实验假设。

(1) 炸药为均质固体,化学反应是零级放热反应,炸药不发生相变,反应物没有消耗;

(2) 炸药的热作用过程为有内热源的非稳态导热过程;

(3) 试验时,爆炸盒外的环境温度保持不变;

(4) 爆炸盒内表面向爆炸盒内空气进行辐射换热,且在研究的区域内没有对流传热;

由此,区域内的热过程可以认为是有内热源的非稳态导热与辐射换热的耦合传热过程。炸药装药由于是圆柱形,为减少计算量,计算模型只考虑以 z 轴为对称轴的 $1/2$ 圆柱,且采用整体求解法计算。几何模型如图2所示,该模型包括爆炸盒、样品架、雷管壳及药柱。

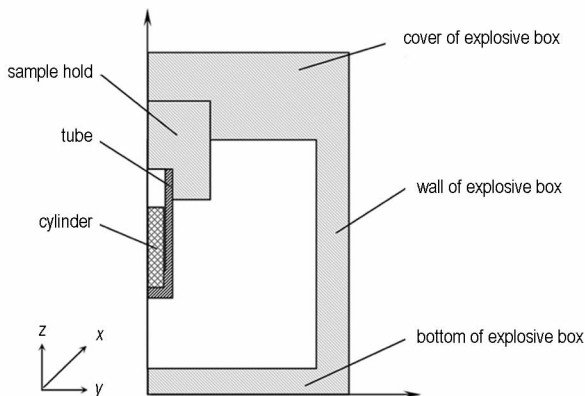


图2 几何模型

Fig. 2 Model of the Cook-off test

药柱的热反应及热传导遵循 Frank-Kaminetskii 方程^[10]

$$\rho C \left(\frac{dT}{dt} \right) = \lambda \nabla^2 T + \rho_0 Q Z w \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

在柱坐标系下,温度场的控制方程可以表示为^[11]

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S \quad (2)$$

$$\text{物理条件} \begin{cases} S \neq 0, 0 \leq r < r_0 \\ S = 0, r_0 \leq r \leq r_3 \end{cases}; \text{初始条件 } T(r, \varphi, z, 0) = T_0;$$

边界条件

$$\text{爆炸盒壁外侧面 } T(r, \varphi, z, t) = T_1, r = r_3; 0 < z < H;$$

$$\text{壁侧面 } -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \varepsilon_s \sigma_b (T_1^4 - T_2^4)$$

式中, r_0 为药柱半径, m; r_1 为雷管壳的外径, m; r_3 为爆炸盒的外径, m; H 为爆炸盒的高, m; ρ 为 RDX 的装填密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_0 为 RDX 的物理密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C 为炸药比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; λ 为炸药导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; t 为时间, s; T 为温度, K; T_0 为研究区域内物体的初始温度, K; T_1 为加热炉的温度, K; S 为炸药内部热源, J, 它是由炸药的化学反应放热引起的; Q 为炸药的反应热, J; Z 为指前因子, s^{-1} ; E 为活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$; R 为普适气体常数, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; w 为炸药反应分数, 当炸药完全反应, 有 $w = 1$ 。 ε_s 为壁面的发射率; σ_b 为壁面的辐射系数, $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8}$, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。

采用软件 PHOENICS 3.3 对上述模型进行数值模拟计算^[12]。其中炸药的化学反应放热项以内部热源的形式由本文自编的子程序嵌入主程序中。表1给出了计算涉及的炸药参数^[13-15]。雷管壳的导热系数取 $204 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; 钢制爆炸盒的导热系数取 $43 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。其中 Q_0 是炸药在 $219 \text{ }^\circ\text{C}$ 分解温度下的反应放热。其他参数均采用文献[14]中的值。

4 结果与讨论

4.1 不同环境温度下系统温度-时间曲线及分析计算

本文对置于内径为3 mm 铝制雷管壳中的 RDX

表1 炸药参数

Table 1 Calculation parameters of explosive

$\rho_0 /$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$Q_0 /$ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$C /$ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$E /$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$R /$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\lambda /$ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$Z /$ s^{-1}
1 640	1.101×10^5	1130	146500	8.314	0.213	2.01×10^{18}

炸药部件在 205 °C、230 °C、240 °C 和 330 °C 这 4 种环境温度下进行了 Cook-off 实验。根据 3 节中建立的计算模型和方法对 Cook-off 实验进行了数值模拟计算。图 3 给出了 4 种环境温度下, 药柱中 z 轴 1/2 处的温度随时间的变化的计算值与实验值的对比, 可以看出计算得到温度-时间曲线与实验的温度-时间曲线的一致性较好, 说明所建立的计算模型和计算方法可以模拟 RDX 炸药在 Cook-off 实验过程中的热响应情况。

由图 3 看出, 实验过程中药柱内的温度从室温开始上升, 随着放入加热炉中时间的增加, 环境中的热量传入药柱, 使其温度逐渐上升。当环境为 205 °C 时, 药剂在受热过程中没有明显的放热峰。实验结束后, 观察到药剂已完全分解。这说明药剂的分解是一个缓慢的反应过程。当环境温度为 230 °C 时, 曲线上出现了一个温度上升台阶。这是由于反应比较缓慢, 分解反应所放出的热量可以比较及时地传递到周围的环境中, 因此, 没有形成尖锐的放热峰。当温度为 240 °C 时, 曲线上有一个明显的放热峰, 因为在此环境温度下, 反应比较剧烈, 周围环境温度较高, 反应释放的热量不能在短时间内传递到周围环境中。当温度为 330 °C 时, 放热峰较强。由此可以看出, 在较高的环境温度下, 药剂所发生的反应比较剧烈。从实验现象中也可以发现, 泄爆孔中有明显的气体放出, 并伴随轻微的爆响。实验结果表明, 环境温度对于 RDX 炸药柱发生反应的时间有明显的影 响, 而对 RDX 炸药柱的临界反应温度的影响不大。Rogers^[16] 采用式(3)对 HMX、RDX 等多种炸药的临界点火温度进行了估算, 结果表明, 计算的结果与实验结果有较好的一致性。杜志明^[17] 对炸药的临界点火温度的研究也表明, 采用 Rogers 的计算方法计算的药柱临界点火温度与采用指数近似和非指数近似条件下计算的误差约为 1 °C。此处, 采用式(3)计算 RDX 炸药柱发生点火的临界温度

$$\frac{E}{T_m} = R \ln \frac{a^2 E Q \rho Z E}{T_m^2 \lambda \delta R} \quad (3)$$

式中 E 为反应的活化能, $J \cdot mol^{-1}$; T_m 为临界点火温度; R 为普适气体常数; Q 为反应放热; Z 为指前因子; λ 为热导率; ρ 为 RDX 的密度; δ 为 Frank-Kamenetskii 参数, 当其达到临界值时取 $\delta = \delta_{cr}$ 。对于圆柱状炸药, $\delta_{cr} = 2$ 。 a_0 为特征尺寸, 这里取 $a_0 = 0.0015 m$ 。当其特征尺寸 a_0 确定时, 临界点火温度确定。计算出 RDX 药柱的点火温度为 213.3 °C。

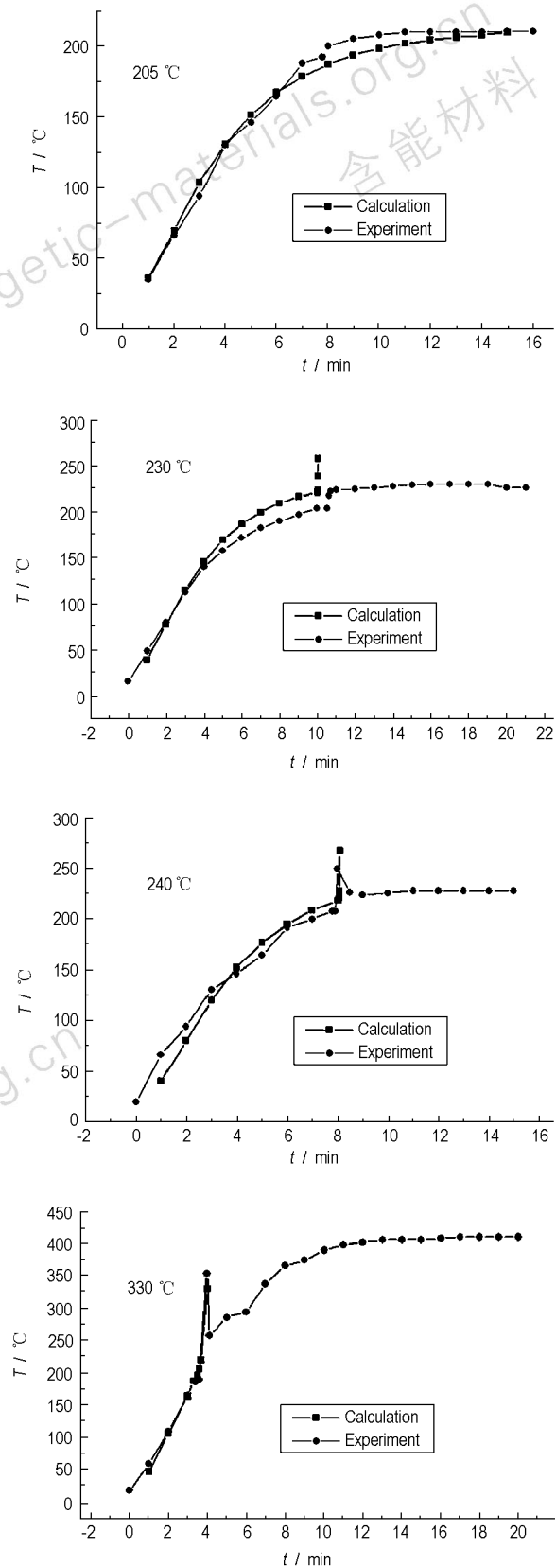


图 3 计算与实验的温度-时间曲线比较
Fig. 3 Comparison of $T-t$ curves of calculated and experimental results

4.2 爆炸盒内温度场分布的模拟计算分析

通过三维数值模拟可以得到反应系统内部的温度分布,从系统内的温度分布情况可以对炸药在不同环境温度下的热作用过程进行深入研究。图4为205℃时不同时间内爆炸盒内的温度分布图。由图可以看出,实验开始时,药柱内的温度较低,随着环境中热量的传入,药柱内温度逐渐上升,并发生缓慢的反应,放出一定的热量,使药柱内的温度上升。从图4中可以看出720s时,药柱中心的温度已高于其周围的温度。由于产生的反应热不能及时散失到周围环境中,药柱中心在散热不利的地方产生热积累,使温度上升。但是由于环境温度较低,产生的热积累不足以使药柱内温度大幅度上升形成自热。药柱内的热量不断散失到周围环境中,最终与环境达到热平衡。从图中可以看出,药柱在205℃的环境温度下不发生点火。

图5是230℃时不同时间爆炸盒内的温度分布。可以看出,在反应进行了480s时,药柱中心处的温度

已明显高于药柱其他地方的温度。在602s时,药柱中心的温度达237℃,远高于DSC实验测得的RDX的分解温度,即219℃,说明药柱中心处已形成了自加热,使温度在短时间内迅速上升,发生点火。从图中可以看出,药柱在230℃环境温度下发生点火的位置在药柱中心处。

图6和图7分别为240℃和330℃时不同时间药柱内的温度分布。可以看出,当外界的热量将药柱加热到一定的温度时,药剂反应所释放的热量在药柱中心形成一个温度较高的区域。该区域的高温又加速了药剂的分解,使药柱内的温度进一步升高。从图6可以看出,120s时,药柱中心的温度还低于药柱边沿的温度。360s时,药柱中心的温度已升至208℃,较其边沿203℃高出5℃。而486s时,药柱内最高温度可达265℃,远高于其分解温度。因此,由于环境温度较高,药剂反应所放出的热量不能有效地散失到周围环境中,形成局部高温,致使药剂的热分解反应加剧。

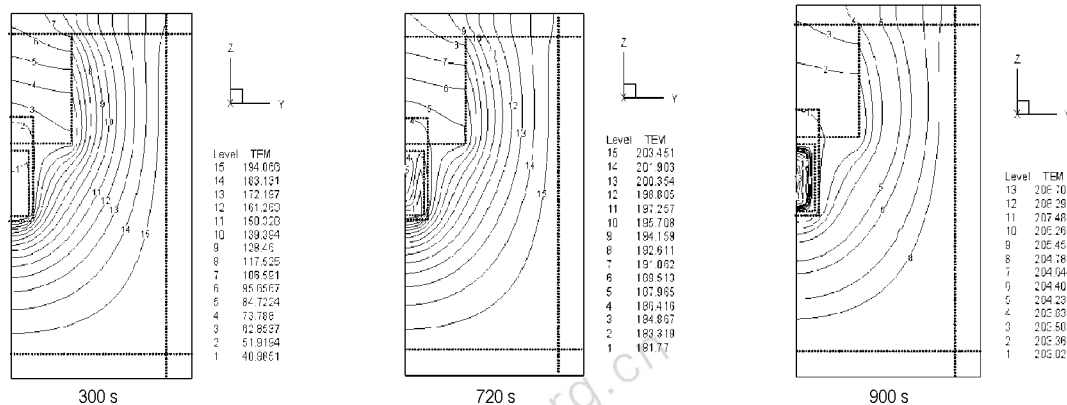


图4 模拟计算得到的205℃时爆炸盒内温度分布

Fig. 4 The temperature distribution of explosive box at 205℃ by calculation

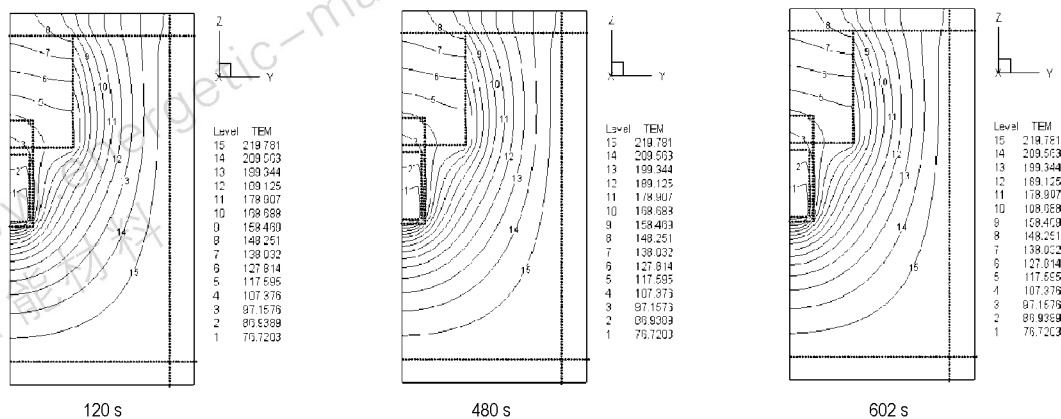


图5 模拟计算得到的230℃时爆炸盒内温度分布

Fig. 5 The temperature distribution of explosive box at 230℃ by calculation

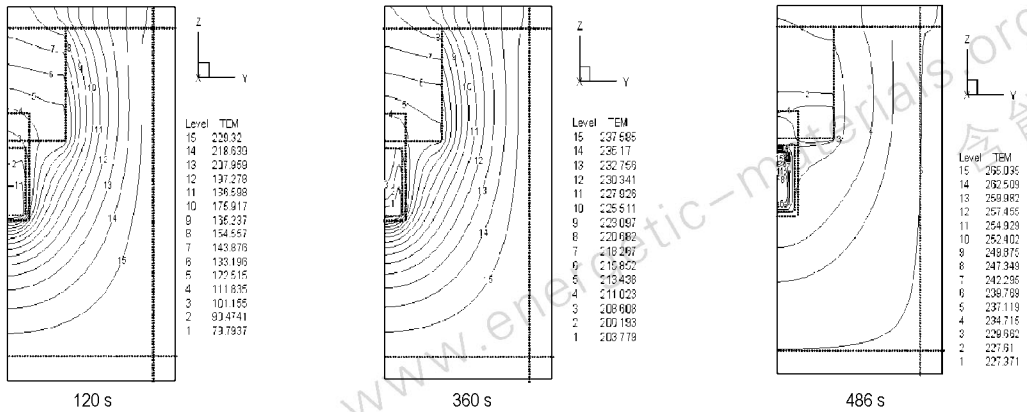


图 6 模拟计算得到的 240 °C 时爆炸盒内温度分布

Fig. 6 The temperature distribution of explosive box at 240 °C by calculation

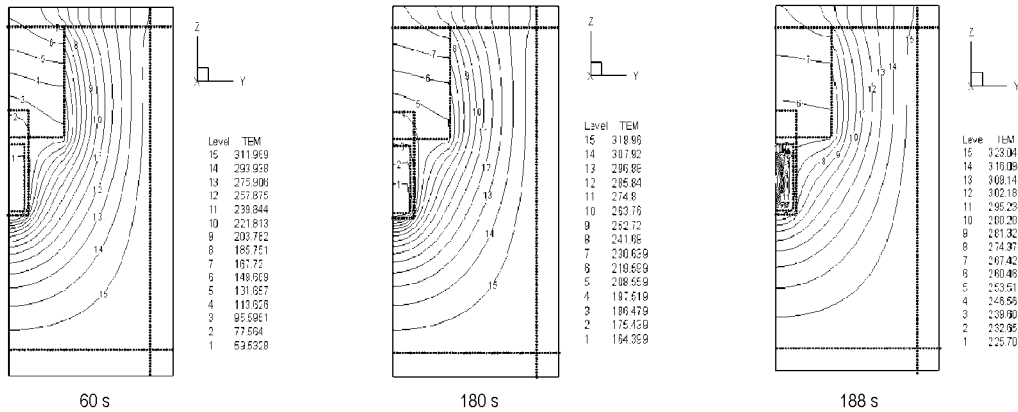


图 7 模拟计算得到的 330 °C 时爆炸盒内温度分布

Fig. 7 The temperature distribution of explosive box at 330 °C by calculation

与图 6 不同,从图 7 中可以看出,由于环境温度较高,在热量还没有传递到药柱中心产生足够的热积累时,药柱边沿已出现了局部的高温区使其发生热反应。从 188 s 的计算结果可以明显地看出,药柱边沿的温度已达 295 °C,远高于其中心的温度。因此,可以认为,当环境温度较高时,由于外界加热作用使药柱的边沿温度迅速上升,使局部发生点火,导致整个药柱发生爆炸。

5 结 论

对于尺寸较小的 RDX 炸药部件,所处环境温度对其起始反应温度影响不大,但是对于起始反应时间影响较大,且随环境温度的提高,起始反应时间缩短。同时,环境温度对于药柱反应的剧烈程度也有影响。环境温度越高,反应越剧烈。

环境温度不同,药柱发生点火的位置不同。环境温度较低时,如 205 °C 和 230 °C 时,由于所放出的热量

可以较好地散到环境中,因此,不会发生热爆炸。且药柱发生点火的位置在药柱中心处。但当环境温度为 240 °C 时,反应产生的热量不能有效地散失到环境中,药剂的分解反应较为剧烈,但并未发生热爆炸,且发生点火的位置在药柱中心处。而环境温度较高为 330 °C 时,药柱发生点火的位置在药柱的边沿,表明在较高的环境温度下,药柱的点火并不是由于药柱内部的热积累引起自热反应造成的,而是由于局部温度较高,而发生了分解反应,或是直接引起局部点火,导致整个药柱发生爆炸。

参考文献:

[1] Parker R P. USA small-scale cook-off bomb (SCB) test [A]. Minutes of 21st Department of Defense Explosives Safety Board Explosives Safety Seminar [C], Houston, 1984.

- [2] Cheese P J, Briggs R I, Fellows J, et al. Cook-off test on secondary explosives [A]. The 11th International Detonation Symposium [C], Colorado: 1998, 272 - 278.
- [3] Kondrikov B N. Investigation of cook-off-type test methods [A]. The 11th International Detonation Symposium [C], Colorado: 1998, 135 - 142.
- [4] 张蕊, 冯长根, 陈朗. 弹药的热烤实验 [J]. 火工品, 2002, (4): 37 - 39.
ZHANG Rui, FENG Chang-gen, CHEN Lang. The cook-off test of ammunition [J]. *Pyrotechnics*, 2002, (4): 37 - 39.
- [5] 王晓峰, 戴蓉兰, 涂健. 传爆药的烤燃实验 [J]. 火工品, 2001, (2): 5 - 7.
WANG Xiao-feng, DAI Rong-lan, TU Jian. Cook-off test of booster [J]. *Pyrotechnics*, 2001, (2): 5 - 7.
- [6] Erneux T, Arijs J, Meysmans R. Cook-off studies of propellants and explosives. [J]. *Propellant, Explosion, Pyrotechnical*, 1983, 8: 199 - 202.
- [7] Jones D A, Parker R P. Heat flow calculations for the small-scale cook-off bomb test [R]. AD-A236829, 1991.
- [8] Timothy P C. Fire modeling for cook-off in ordnance magazines [D]. Naval Postgraduate School Thesis, 1996.
- [9] ZHANG Rui, CHEN Lang, FENG Chang-gen. Experimental safety on the RDX explosives thermal safety [A]. In: HUANG Ping, WANG Ya-jun, LI Sheng-cai, et al. Progress in Safety Science and Technology, Vol. 3, Part B. Beijing: Science Press, 1132 - 1136.
- [10] 冯长根. 热爆炸理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
FENG Chang-gen. Theory of Thermal Explosion [M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [11] 戴钢生. 传热学 (第 2 版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
DAI Guo-sheng. Heat Transfer (the second edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [12] Ludwig J C. Phoenics-VR Reference Guide [M]. London: Concentration, Heat & Momentum Limited, 2000.
- [13] 楚士晋. 炸药热分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
CHU Shi-jin. Thermal Analysis of Explosive [M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [14] 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.
DONG Hai-shan, ZHOU Fen-fen. Performance of High Explosives and Correlates [M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [15] Victor A C. Simple calculation methods for munitions cook-off times and temperatures [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1995, 20: 252 - 259.
- [16] Rogers R N. LASL methods of deriving model for predicting the thermal hazards and useful lifetime of explosives [R]. AD-A044783, 1978.
- [17] 杜志明. 有限空间内的热点火研究 [D]. 北京理工大学, 1983.
DU Zhi-ming. Studies of thermal ignition of finite space [D]. Beijing Institute of Technology, 1983.

The Cook-off Test and its Numerical Simulation of RDX

FENG Chang-gen¹, ZHANG Rui^{1,2}, CHEN Lang¹

(1. Department of Mech-electronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. State Key Laboratory of Applied Physics-Chemistry Research, Shaanxi Applied Physics-Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)

Abstract: The Cook-off test of RDX explosive was carried out. The test results of explosives were discussed by the theoretics of thermal transfer. The thermal response of the explosive was calculated by numerical simulation methods and PHOENICS software was used in the simulation. The results show that RDX explosive decomposes slowly in the lower temperature (e. g. 205 °C, 230 °C) and the heat of the reaction can be absorbed in time by the environment. Thus the thermal explosion is not occurred. And the calculation result has a good agreement with the experiment. When the test temperature is lower (e. g. 240 °C), the temperature of the center of the column increases quickly. It will be ignited firstly. But in the higher temperature (e. g. 330 °C), the higher temperature area is formed at the edge of the column. The temperatures of the area increase rapidly and lead to the thermal ignition and explosion.

Key words: explosion mechanics; thermal ignition; numerical simulation; Cook-off test; RDX explosive