

文章编号: 1001-1455(2013)02-0221-04

炸药装药密度对慢速烤燃响应特性的影响*

智小琦¹, 胡双启²

(1. 中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为研究炸药装药密度对烤燃响应剧烈程度的影响, 采用以 RDX 为主的高能炸药压制 7 种密度水平的试样, 采用长径比为 1.26 的烤燃弹, 以 $(1 \pm 0.2) \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率作了慢速燃实验。实验结果表明, 当装药密度为理论最大密度的 94% 时出现压力胀裂, 装药密度为理论最大密度的 70% 时产生爆燃, 而在理论最大密度的 80% 左右时出现燃烧转爆轰现象, 响应最剧烈。

关键词: 爆炸力学; 慢速烤燃; 易损性; 装药密度

中图分类号: O381; X944

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

研究影响炸药装药易损性的因素对弹药的安全使用起着重要作用。慢速烤燃实验是弹药危险性评估实验标准的重要组成部分^[1], 这方面的研究也比较多。大多数的研究主要集中在改变炸药的组分和配方对烤燃响应剧烈程度的影响方面^[2-3], 并通过测量烤燃过程中炸药装药内不同点的温度及壳体在烤燃过程中的应力、应变情况了解烤燃反应机理, 这些研究成果为研制低易损炸药和了解烤燃机制奠定了基础; 而烤燃实验是高危险性和高代价的实验, 烤燃过程包括热传导、化学分解、力学响应等多个物理和化学过程, 这些过程的相互作用和耦合影响了最终的响应温度和响应的剧烈程度。为简化烤燃工作、降低实验的危险性并深入分析烤燃响应的机制, 在采用微断层摄影等先进技术观测烤燃过程的基础上, 三维数值模拟炸药烤燃实验的技术也在迅速发展^[4-6], 增加了人们对烤燃机制的认识; 近几年, 研究壳体结构^[7-8]、炸药装药与壳体的自由空间^[9]、烤燃弹的密封性^[10]等物理因素对慢速烤燃响应剧烈程度的影响, 成为研究含能材料烤燃的又一发展方向。

本文中, 拟采用以 RDX 为基的高能炸药, 系统研究炸药装药密度对烤燃响应剧烈程度的影响, 以期发现装药密度与热烤响应剧烈程度的关系, 为炸药装药在弹药中的安全使用和研究孔隙率在烤燃过程中的作用提供技术支持。

1 实验

烤燃弹试样如图 1 所示, 圆柱体长 29 mm、内径 23 mm、壁厚 3 mm, 两端用螺纹与端盖链接, 端盖壁厚 1 mm, 长径比 1.26, 尺寸规格类似于子母战斗部中的子弹结构或一些传爆药结构。壳体材料为普通 45 钢, 未进行热处理。炸药是以 RDX 为主的高能混合炸药, 其中 RDX 质量占 95.0%, 其余 5.0% 为添加剂。试样平均密度分别为最大理论密度(TMD 为 $1.7714 \text{ g}/\text{cm}^3$) 的 94.5%、93.2%、92.1%、85.6%、80.1%、75.2% 和 70.0%, 对应的装药质量的变化范围在 15.4~20.6 g 之间, 每一试样至少做 3 发平行实验。

慢烤实验系统程序如图 2 所示。在烤燃过程中, 电热丝为烤燃弹提供热源, 以传导传热和辐射传热为主; MR13 温度

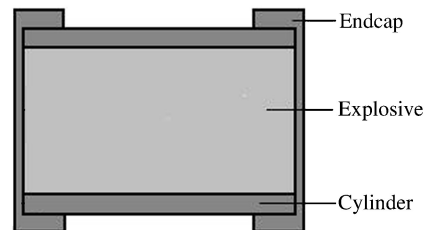


图 1 烤燃弹试样结构简图

Fig. 1 A schematic of the cook-off bombs

* 收稿日期: 2011-12-13; 修回日期: 2012-04-01

作者简介: 智小琦(1963—), 女, 博士, 副教授。

控制仪控制电热丝的升温速率,升温速率为 $(1 \pm 0.2) \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$;烤燃弹外壁的圆柱部中点分隔 90° 固定2只镍铬/镍硅热电偶,精度 $0.004T$ (T 为测量温度),以测定烤燃弹发生反应时的环境温度。计算机与热电偶和MR13温度控制/显示仪连接,通过自行设计的DC软件实时采集烤燃过程中的温度-时间曲线。实验前首先对升温速率做标定,确保升温速率在设定范围,当试样温度为 $(25 \pm 1) \text{ } ^\circ\text{C}$ 时开始升温。

2 结果与讨论

表1中为烤燃弹的实验状态及响应结果,表中 ρ/ρ_{TMD} 为相对密度, t 为响应时间, T 为反应温度。图3为响应后所收集的破片状态。从表1和图3可以看出,烤燃响应特性随装药密度的不同而变化。当 $\rho/\rho_{\text{TMD}}=94.5\%$ 时,发生了压力胀裂^[11];当 ρ/ρ_{TMD} 为 $93.2\% \sim 85.6\%$ 时,随着密度的降低,烤燃反应的剧烈程度增加;当 $\rho/\rho_{\text{TMD}} \approx 80\%$ 时产生了燃烧转爆轰现象;当 $\rho/\rho_{\text{TMD}} < 75.20\%$ 时,随着密度的降低,反应的剧烈程度也随之降低,当 $\rho/\rho_{\text{TMD}} \approx 70\%$ 时出现了爆燃现象。实验中没有发现残药。

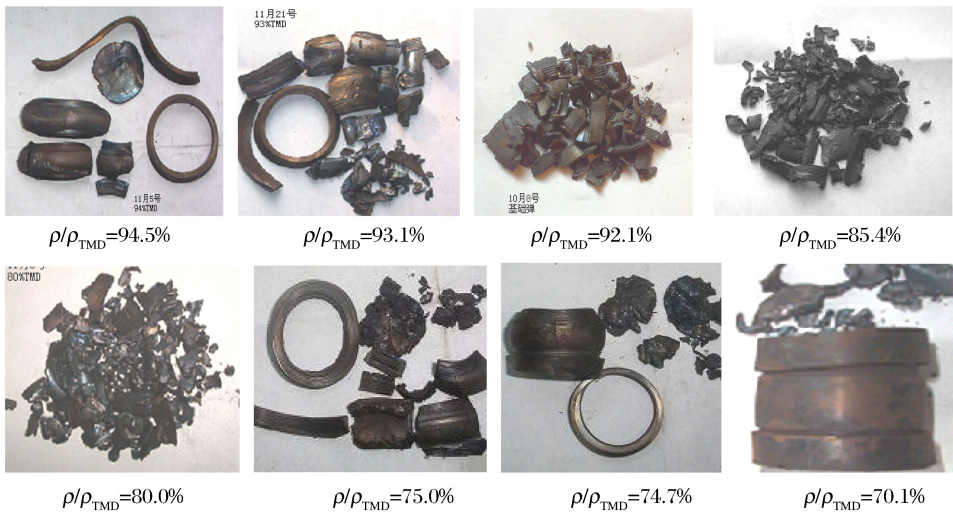


图3 不同密度的烤燃弹响应后的破片状态

Fig. 3 Fragments recovered from cook-off at different percent TMD

非均质炸药爆轰的响应机制目前普遍被接受的是二阶段理论,即热点火阶段和由热点引起的化学反应转变为爆轰阶段的理论。影响热点火阶段的主要因素是炸药颗粒间的尺寸和孔隙率。因此,在一定条件下,孔隙率(或装药密度)决定着炸药装药的响应特性。在压药过程中,构成孔隙的凹穴的形成或气孔的产生必须要有另外的附加能量,这些能量储存在凹穴或气孔的表面,称为表面能^[12]。当烤燃弹受热后,炸药装药经受壳体传导传热、辐射传热的共同作用后发生热分解反应,使凹穴或气孔破坏,表面能释放。释放的表面能又加热空穴或气体周围的介质,使温度升高,形成热点。由爆轰物理可知,单位表面的表面能与温度升高值之间的关系为

$$\Delta T = E_s S / (\rho c_v V) = 3E_s / (\rho c_v r_b) \quad (1)$$

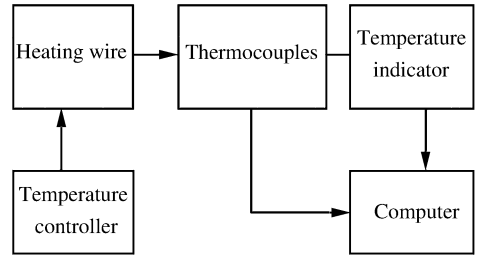


图2 慢烤实验系统示意图

Fig. 2 System sketch of slow cook-off experiment

表1 不同密度的烤燃结果

Table 1 The results for different densities in cook-off

$(\rho/\rho_{\text{TMD}})/\%$	t/min	$T/^\circ\text{C}$	响应结果
94.5	193.73	219.6	压力胀裂
93.2	192.08	218.9	部分爆轰
92.1	191.30	219.3	部分爆轰
85.6	190.20	217.8	爆轰
80.1	190.53	219.2	燃烧转爆轰
75.2	191.83	218.9	爆炸
70.0	192.67	219.5	爆燃

注:响应结果判定参照 MIL-STD-2105C^[1]。

式中: r_b 为空穴的初始半径, ρ 为炸药的理论密度, c_v 为炸药的比定容热容, E_s 为炸药的表面能。

如将表面能视为炸药的常数, 可用凝聚炸药的 E_s 代替。而 E_s 可用以下经典公式近似计算

$$E_s = 0.1Ea \approx c^2 \rho^{2/3} M^{1/3} \quad (2)$$

式中: E 为炸药的弹性模量; a 为原子间距, 可近似用分子间的平均线性距离表示; M 为炸药分子质量; ρ 为炸药晶体的密度; c 为声速。

用 RDX 的参数近似代替混合炸药的参数, $M = 222 \text{ kg}$, $\rho = 1.816 \text{ g/cm}^3$, $c = 2.62 \text{ km/s}$, 代入式(2), 得到 $E_s = 728 \text{ J/m}^2$ 。将该值代入式(1), 取 $r_b = 1 \mu\text{m}$, $c_v = 1.12 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$, 计算的平均升温 $\Delta T = 810 \text{ }^\circ\text{C}$ 。可见, 此时表面层早已破坏、熔化、蒸发变为气体, 并冲入空穴或气孔内, 在空穴或气孔内形成热点进而产生热起爆。另一方面, 在一定的密度范围内, 随着孔隙率的增加, 在慢速烤燃过程中药柱中心分解产生的高温气体容易渗透到周围的区域, 使局部温度升高, 分解反应加速, 热量增加, 同样也会致反应剧烈程度增加。因此, 在 $\rho/\rho_{\text{TMD}} = 93.2\% \sim 80.1\%$ 的密度范围内, 空隙率增加时, 达到临界温度的热点数增多, 起爆面积增大, 导致反应剧烈程度增加。

特别地, 当 ρ/ρ_{TMD} 达到 80% 时, 烤燃响应结果出现了燃烧转爆轰现象, 这与文献[11]的研究结果类似。可见, 装药密度是凝聚炸药在一定条件下产生燃烧转爆轰的重要因素。文尚刚等[13]压制了 3 种密度水平的 B 炸药 ($m(\text{TNT}) : m(\text{RDX}) = 40 : 60$), 用电探针和压力传感器研究了爆燃向爆轰转变的 DDT 效应。研究结果显示, 在容积限定的条件下, 装药密度为 1.597 g/cm^3 时发生了爆燃转爆轰现象, 爆速达到 7452 m/s ; 装药密度为 1.654 g/cm^3 时产生了低速爆轰现象, 爆速为 4400 m/s ; 而装药密度为 1.681 g/cm^3 的药柱没有发生爆轰。关于炸药烤燃的燃烧转爆轰现象还有待作更深入细致的研究。

当 $\rho/\rho_{\text{TMD}} > 94\%$ 时, 由于装药的孔隙率很低, 在慢速烤燃过程中药柱中心分解产生的高温气体很难向周围渗透, 压力急剧增长; 同时由于炸药的热导系数较低, 导热性能差, 使药柱中心分解产生的热量急剧增高, 反应速度强线性增加, 因此导致了压力胀裂现象[11]产生。而且, 由于装药密度高即孔隙率低, 炸药的热导性差, 药柱中心达到分解温度的时间较长, 因此, 耐烤燃时间也较长。

但是, 当装药密度降低到一定值后, 随着装药密度的继续减低, 炸药质量减少, 单位体积内产生的能量及分解产生的高温气体量减少, 因此反应剧烈程度降低。除此之外, 当装药密度较低时, 限定空间内的压力增长率减小, 温度增长率减慢, 导致反应剧烈程度降低。同时, 由于壳体材料达到极限强度的时间增加, 因此, 耐烤燃时间有所增加。

虽然在 MIL-STD-2105C 中, 把响应的剧烈水平作为衡量钝感弹药的唯一标准。但是, 从一定意义上讲, 烤燃弹响应的剧烈水平、反应温度或耐烤燃时间均是衡量弹药易损性指标的重要参数, 因此, 提高耐烤燃时间, 在一定条件下也起到了降低弹药易损性的作用。

3 结 论

(1) 装药密度对炸药的慢速烤燃响应特性有重要影响。对于以 RDX 为基的高能炸药所压制的小药柱而言, 装药密度不同时慢速烤燃响应会产生压力胀裂、部分爆轰、燃烧转爆轰和燃烧等现象。

(2) 上述研究结论能为炸药慢速烤燃机理研究及炸药热安全性研究提供一定的参考。

参考文献:

- [1] MIL-STD-2105C. Military standard-hazard assessment tests for non-nuclear munitions[S]. 2003.
- [2] Dagley L J, Parker R P. Simulation and moderation of the thermal response of confined pressed explosive compositions[J]. Combustion and Flame, 1996, 106(4): 428-441.
- [3] Maienschein J L, Wardell J F, Weese R K. Understanding and predicting the thermal explosion violence of HMX-based and RDX-based explosives-experimental measurements of material properties and reaction-violence[C]//12th International Conference Symposium. San Diego, California, 2002.
- [4] Atwood A I, Curran P D. Coupled thermal-chemical-mechanical modeling of validation cook-off experiments[C]//

- 19th Propulsion Systems Hazards Subcommittees Joint Meeting. Monterey CA, 2000.
- [5] Nichpls A L, Anderson A, Needly R. A model for high explosive cook-off[C]// 12th International Conference Symposium. San Diego, California, 2003.
- [6] 冯长根, 张蕊, 陈朗. RDX 炸药热烤(cook-off)实验及数值模拟[J]. 含能材料, 2004, 12(4): 193-198.
Feng Chang-gen, Zhang Rui, Chen Lang. The cook-off test and its numerical simulation of RDX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004, 12(4): 193-198.
- [7] Garcia F, Vandersall K S, Forbes J W, et al. Thermal cook-off experiments of the HMX based high explosive lx-04 to characterize violence with varying confinement[R]. American Physical Society Meeting on Shock Compression of Condensed Matter. MD. UCRL-CONF-214058, 2005.
- [8] 智小琦, 胡双启, 李娟娟, 等. 不同约束条件下钝化黑索金炸药的烤燃响应研究[J]. 火炸药学报, 2009, 32(3): 22-24.
Zhi Xiao-qi, Hu Shuang-qi, Li Juan-juan, et al. Study on slow cook-off characteristic of passive RDX explosive under different restriction conditions[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, 32(3): 22-24.
- [9] Atwood A I, Curran P O, Bui D T, et al. Energetic material response in a cook off model validation experiment[C]// Proceedings of Twelfth International Detonation Symposium. Office of Naval Research, 2002: 112-117.
- [10] Madsen T, DeFisher S, Baker E L, et al. Warhead venting design technology development[R]. NJ07856-5000, USA, 2008.
- [11] Atwood A I, Curran P O. The effect of initial porosity on cook off reaction violence[C]// 34th International Annual Conference of ICT 24-27. Karlsruhe, Federal Republic of Germany, 2003.
- [12] 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, 1991: 126-127.
- [13] 文尚刚, 王胜强, 黄文斌, 等. 密度对压装炸药燃烧转爆轰性能的影响[J]. 火炸药学报, 2006, 29(5): 5-8.
Wen Shang-gang, Wang Sheng-qiang, Huang Wen-bin, et al. The effect of density in composition B on deflagration-detonation-transition behavior[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(5): 5-8.

Influences of charge densities on responses of explosives to slow cook-off*

Zhi Xiao-qi¹, Hu Shuang-qi²

(1. *Machine and Electronic Engineering College, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;*

2. *Chemical Industry and Ecology College, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)*

Abstract: Seven kinds of RDX-based high explosive samples with different densities were prepared to study the influences of explosive charge densities on cook-off response. The slow cook-off experiments were conducted by using the cook-off bombs with the length-diameter ratio of about 1.2 at the rate of $(1 \pm 0.2) \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$. The results indicate that a pressure burst occurs in the tests at 94.5% theoretical maximum density and a deflagration occurs at 70% theoretical maximum density. The tests undergo a deflagration to detonation transition (DDT) at about 80% theoretical maximum density and the response is violent. The results will supply a help for reducing the hot cook-off vulnerability of ammunition as well as the study on the slow cook-off mechanism.

Key words: mechanics of explosion; slow cook-off; vulnerability; charge density

* Received 13 December 2011; Revised 1 April 2012

Corresponding author: Zhi Xiao-qi, zxq4060@sina.com