

装药密度与壳体约束对钝化 RDX 慢速 烤燃特性的影响

胡双启, 解朝变, 智小琦

(中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051)

摘 要:利用自行设计的慢速烤燃装置测定了钝化 RDX 在不同装药密度和约束条件下的慢速烤燃特性。结果表明,装药密度为最大理论密度的 80%~94% 时,随着装药密度的增大,钝化 RDX 发生反应的剧烈程度减小;当壳体材料相同时,随着壳体厚度的增加耐烤燃时间增长,但反应的剧烈程度逐渐减弱;当厚度相同时,采用导热性低的材料可以降低慢烤响应的剧烈程度。

关键词:物理化学;慢速烤燃;装药密度;RDX;易损性;传爆药;炸药

中图分类号:TJ55; TQ564

文献标志码:A

文章编号:1007-7812(2011)02-0026-03

Effect of Charge Density and Restriction of Shell on Slow Cook-off Characteristics of Passive RDX

HU Shuang-qi, XIE Zhao-bian, ZHI Xiao-qi

(Institute of North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The slow cook-off characteristics of passive RDX under different charge densities and restriction conditions were tested by a self-designed slow cook-off setup. The results show that from 80% to 94% of theoretical maximum density, the passive hexogen explosion reaction is gradually weakened with the charge density increased. The response time increase with the increase of shell thickness when material is same and drastic degree of passive RDX explosive response is weakened with the increase of the restriction. And the degree of passive RDX explosive response can be reduced by using the low thermal-conduct material when the thickness of shell is same.

Key words: physical chemistry; slow cook-off; charge density; RDX; vulnerability; booster; explosive

引 言

炸药的烤燃试验是检验和评估炸药易损性的重要方法之一^[1]。慢速烤燃试验是研究炸药在缓慢升温条件下的反应特性,模拟暗火情况下炸药或弹药的易损性能。关于炸药慢速烤燃特性的研究,国内外早有相关报道, J. H. G. Scholtes^[2]对 HTPB/AP、PPG/AP/AN 推进剂进行了烤燃试验。Kin-drikov B N^[3]在国际爆炸研讨会上介绍了几种烤燃试验方法。王晓峰等^[4]研究了传爆药的烤燃试验方法,并用自制烤燃试验装置对钝感传爆药 PBXN-7、PBXN-5、CE 和 JH-14C 的烤燃特性进行了研究,结果表明, PBXN-7 的烤燃特性明显优于 PBXN-5、CE

和 JH-14C。冯长根等^[5]对 RDX 炸药进行了热烤试验和数值模拟,得出了与热爆炸理论相吻合的结论。冯晓军等^[6]对 JB-B、TNT、R852 三种炸药进行了烤燃特性研究,探讨了炸药装药尺寸对慢速烤燃响应特性的影响。杨丽侠等^[7]建立了快烤和慢烤试验装置,以典型发射药为对象研究了易损性响应特性及影响因素。但有关装药密度和约束条件对炸药烤燃特性的影响的报道较少。

本研究利用自行设计的慢速烤燃试验装置,对带壳体的钝化 RDX 进行了烤燃试验,研究装药密度及约束条件对炸药慢速烤燃特性的影响。试验结果为降低炸药在武器系统中的易损性提供参考。

收稿日期:2011-03-07; **修回日期:**2011-03-28

作者简介:胡双启(1962-),男,教授,博导,从事武器系统与应用工程研究。

1 试 验

1.1 试验装置

试验装置示意图如图 1 所示。烤燃炉通过辐射传热为烤燃弹提供热源; MR13 温度调节器控制烤燃炉的升温速率, 升温速率为 $(2 \pm 0.2)^\circ\text{C}/\text{min}$; 用热电偶(精度为 1 级)测量烤燃弹发生响应时的环境温度; 用计算机记录并采集烤燃过程中的温度-时间曲线。

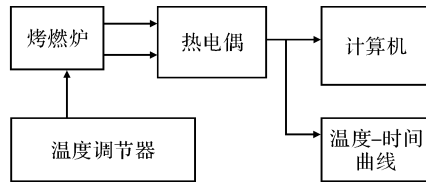


图 1 慢速烤燃装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of slow cook-off test setup

1.2 烤燃弹结构

烤燃弹壳体尺寸为 $\Phi 23\text{ mm} \times 28\text{ mm}$, 壳体两端用带螺纹的端盖与圆筒密封连接。烤燃弹圆筒材料为 45 号钢, 壁厚分别为 $(2 \pm 0.04)\text{ mm}$ 、 $(3 \pm 0.04)\text{ mm}$ 和 $(4 \pm 0.04)\text{ mm}$; 端盖厚度 $(1 \pm 0.03)\text{ mm}$ 。

为了研究不同材料壳体约束对慢速烤燃特性的影响, 选择 LY12 壳体的烤燃弹做对比, 圆筒壁厚 $(3 \pm 0.04)\text{ mm}$, 端盖厚度 $(1 \pm 0.03)\text{ mm}$ 。

1.3 装药参数

将钝化 RDX 压制成直径 23 mm、高 28 mm, 密度分别为理论密度 (TMD) 的 80%、85%、92%、93%、94% 的药柱。

1.4 数据采集

系统温度、烤燃弹初始温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 时开始升温。烤燃过程中计算机采集温度-时间曲线。根据烤燃弹反应后的破片分布状态判定反应的剧烈程度。

2 结果与讨论

炸药在慢速升温条件下, 壳体受热后以传导传热的方式将热量传给药柱, 药柱表层温度升高, 同时药柱也以传导传热的方式将表层的热量传到药柱内部, 根据反应速率的过渡态理论, 随着系统温度的升高, 炸药分子的内能增加, 具有足够平均能量的炸药分子数量增加, 这些分子以适当趋向发生碰撞的次数增加, 活化配合物的浓度增加, 分解几率加快, 同时产生许多热量。由于炸药的热传导系

数小, 炸药分解放出的热量不能及时释放到环境中, 产生热积累和自加热现象, 温度越来越高, 反应越来越快, 如此循环, 最终导致爆轰。

2.1 装药密度对钝化 RDX 慢烤特性的影响

装药密度对钝化 RDX 慢烤特性的影响试验结果见表 1。从表 1 可以看出, 在慢速升温条件下, 炸药无论是高密度, 还是低密度, 烤燃温度都在 215°C 左右, 这是主体炸药 RDX 的分解温度。装药密度越小, 孔隙率越大, 反应越剧烈。

表 1 不同装药密度条件下烤燃弹试验状态及响应

Tab 1 The test conditions and response results of cook-off bombs in different charge density

壳体材料	厚度/mm	装药密度/%TMD	烤燃温度/ $^\circ\text{C}$	耐烤燃时间/s	反应终态判定
45 号钢	3	80.00	215.4	5768	爆轰
45 号钢	3	85.00	214.8	5773	部分爆轰
45 号钢	3	92.00	215.4	5773	爆炸
45 号钢	3	94.00	217.0	5840	爆燃

注: 反应终态根据文献[1]判定标准判定, 下同。

关于非均质炸药的起爆机理, 目前普遍接受的是热点点火和热点引起的化学反应成长为爆轰的二阶段理论, 其中热点点火阶段的主要影响因素是炸药颗粒之间空穴的尺寸和孔隙率。在通常情况下, 炸药的慢速烤燃反应首先出现在炸药药柱的中心位置。炸药装药密度越小, 孔隙率越大, 炸药颗粒之间的空穴尺寸越大, 药柱中心反应产生的气体越容易渗透到周围, 从而热点增多, 起爆面积增大, 反应剧烈程度增加(见图 2)。



图 2 不同装药密度壳体的破片状态

Fig. 2 Fragment of bomb under different charge densities

反之, 装药密度越大, 孔隙率越小, 炸药颗粒之

间的空穴尺寸越小,药柱中心反应产生的气体越难渗透到周围炸药中,形成的热点减少,起爆面积减小,反应剧烈程度降低。

2.2 壳体约束对钝化 RDX 慢烤特性的影响

壳体约束对钝化 RDX 慢烤特性影响的试验结果见表 2。表 2 结果显示,壳体材料为 45 号钢时,随着烤燃弹壳体厚度的增加,炸药延滞期和耐烤燃时间均随着增长。这是由于单位时间内传热量与厚度成反比^[8],随着厚度的增加,单位时间内传递给药柱的热量减少,导致体系升温速率减慢,因慢速烤燃是均匀升温过程,故随着厚度的增加,药柱从加热到发生急剧反应的时间增长。

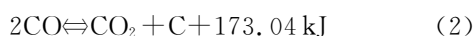
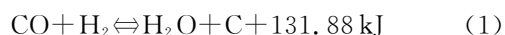
表 2 不同约束条件下烤燃弹试验状态及响应

Table 2 The test conditions and response results of cook-off bombs under different restriction conditions

壳体材料	厚度/mm	装药密度/TMD%	延滞期/s	烤燃温度/°C	耐烤燃时间/s	反应终态判定
45 号钢	2	93.00	5715	217.8	5828	爆轰
45 号钢	3	93.00	5915	219.8	5974	爆轰
45 号钢	4	93.00	6026	219.2	6038	部分爆轰
AL12	3	93.00	5588	217.4	214	爆轰

当装药反应发生急剧变化时,壳体内表面承受巨大的冲击载荷作用,此时可将其简化为均匀受压的厚壁圆筒模型。由理想弹塑性理论可知,圆筒受内载荷向外膨胀,壳体内任意一点产生三向应力状态,当三向应力中的任意一个超过材料的动态强度极限时壳体破裂。根据材料力学可知,壳体内任意一点的三向应力中,可以承受的轴向应力、切向应力均与壳体厚度成正比,即厚度越大壳体可承受的应力越大,反之越小,且最大应力发生在内壁,即壳体首先从内表面发生破裂。可见,随着壳体壁厚的增加,炸药的耐烤燃时间随之增加。

当壳体材料为 45 号钢时,随着壳体厚度的增强,炸药发生反应的剧烈程度减弱,见图 3。因为壳体厚度的增加阻碍了气体产物的膨胀,延长了炸药爆炸瞬间的二次反应时间,化学反应方程式(1)、(2)向右进行,游离态碳增多,气体产物减少^[9],冲击载荷强度降低。



更主要的原因是,在爆炸瞬间爆轰波的作用下,材料发生塑性变形,随着壳体厚度的增强,材料

从蠕动到裂纹产生、裂纹扩展所需的能量增加,扩展有效裂纹的能量减少,即贯通性裂纹减少。上述综合作用效应,使得随着壳体厚度的增加,反应剧烈程度减弱。



图 3 不同约束条件下壳体的破片状态

Fig. 3 Fragment of bomb under different restriction conditions

当壳体材料不同时,由于材料的热导性能及强度极限的差异,烤燃弹从加热到发生剧烈反应所需的时间以及反应剧烈程度有所不同。热导性能良好的材料相同时间内传递给药柱的热量比热导性能差的材料多,致使体系温度升高快,延滞期短。在爆压一定的条件下,强度极限小的材料单位面积能承受的应力较小,致使响应程度剧烈。

3 结 论

(1)在缓慢升温条件下,钝化 RDX 炸药烤燃温度由主体炸药的临界分解温度决定。

(2)当药柱尺寸一致时,装药密度为 80% TMD~94% TMD,随着装药密度的减小,孔隙率增大,钝化 RDX 发生慢速烤燃的反应剧烈程度增强,对热易损性增强。

(3)相同材料的壳体,随着烤燃弹壁厚的增加,钝化 RDX 的热爆炸延滞期增大。在一定程度上增加壁厚,可以降低钝化 RDX 慢速烤燃反应的剧烈程度。随着壳体厚度或材料极限强度的增加,钝化 RDX 慢速烤燃反应剧烈程度减弱。采用热导系数低的金属材料可以降低钝化 RDX 慢速烤燃反应的剧烈程度。

(下转第 60 页)

空气环境相比,射流速度梯度减小,射流拉伸长度变化较小。对 K 装药射流成型影响较大;与空气环境相比,射流拉伸长度减小;对亚半球装药射流成型影响明显;与空气环境相比,到达固定炸高时,射流头部速度明显提高,射流拉伸长度有少量减少,工程应用中混凝土环境的影响可近似等效为 2 mm 厚的铝壳。

(2)混凝土环境中,K 装药更适合多级串联战斗部攻坚战斗部次级装药的要求;但对亚半球进行设计改进,也可满足多级串联战斗部装药要求。下一步工作可对亚半球装药进行优化设计,以期满足混凝土环境下的使用要求。

参考文献:

- [1] Blache A, Weimann K. Shaped charge with jetting projectile for extended targets[C]// 17th International Symposium on Ballistics. Midrand: Office of Naval Research, 1998: 207-215.
- [2] Murphy M J. Performance Analysis of two-stage motions[C]// 8th International Symposium on Ballistics. Orlando: Office of Naval Research, 1984.
- [3] Mattson K, Sorensen J, Ouye N, et al. Development of the K charge, A short L/D shape charge[C]// 18th International Symposium on Ballistics. San Antonio: Office of Naval Research, 1999.
- [4] Teland J A. Cavity expansion in penetration of targets with pre-drilled cavities[C]// 19th International Symposium on Ballistics. Interlaken: Office of Naval Research, 2001.
- [5] PAN Xu-chao, HE Yong, HE Yuan, et al. Study of the act of the shaped charge in the pre-damage blind hole of the concrete[C]// 25th International Symposium on Ballistics. Beijing: Office of Naval Research, 2010.
- [6] Murphy M J, Kuklo R M. Fundamentals of shaped charge penetration in concrete[C]// 18th International Symposium on Ballistics. San Antonio: Office of Naval Research, 1999.
- (上接第 28 页)
- #### 参考文献:
- [1] MIL-STD-2105B. Non-nuclear ammunitions tests of risk assessment[S]. USA: The Department of National Defense of USA, 1994.
- [2] Schoites J H G. Strain rate results of the TNO-PML. Cook-off test with HTPB/AP and PPG/AP/AN propellants, PML1996-A87. 1-17[R]. Netherlands: TON Prins Maurits Laboratory, 1997.
- [3] Kondrikov B N. Investigation of cook-off-type test methods[C]// The 11th International of Detonation Symposium. Snowmass Village: Snowmass Conference Center, 1998: 135-142.
- [4] 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.
- [5] 冯长根, 张蕊, 陈朗. RDX 炸药热烤实验及数值模拟[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]. Energetic Materials, 2004, 12(4): 193-198.
- [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 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.
- [7] 杨丽侠, 张邹邹, 刘来东. 发射装药热刺激下的易损性响应试验研究[J]. 火炸药学报, 2008, 31(3): 71-74.
YANG Li-xia, ZHANG Zou-zou, LIU Lai-dong. Experimental study on vulnerability response of propelling charge to thermal stimuli[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2008, 31(3): 71-74.
- [8] 张奕, 郭恩震. 传热学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2004.
- [9] 炸药理论编写组. 炸药理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.