

不同约束条件下钝化RDX的烤燃响应特性

智小琦, 胡双启, 李娟娟, 徐双培

(中北大学, 山西 太原 030051)

摘要:以2℃/min的升温速率对带壳的钝化RDX炸药进行慢烤试验,研究了不同约束条件下钝化RDX的烤燃响应特性。结果表明,材料相同时,随着厚度的增加炸药耐烤燃时间随之增长,但反应的剧烈程度逐渐减弱;厚度相同时,耐烤燃特性随材料物理性能的不同发生变化。根据材料力学理论和传热学理论,对所产生的现象进行了分析。结果表明,材料相同时,增加壳体的厚度,可以提高钝化RDX的热安定性;材料不同时,采用热导性低的材料可以提高炸药的热安定性。

关键词:材料科学;烤燃实验;钝化RDX;热安定性

中图分类号: TJ55;TQ564

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2009)03-0022-03

Cook-off Response Characteristics of Desensitizing RDX Explosive under Different Restriction Conditions

ZHI Xiao-qi, HU Shuang-qi, LI Juan-juan, XU Shuang-pei

(North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A slow cook-off test of desensitizing RDX cylinder with shells at a heating rate of 2℃/min is performed to investigate the response characteristics of desensitizing RDX explosive under different restriction conditions. The test results show that the response time increases with increasing the thickness of shell when material is same and drastic degree of explosive response weakens with the increase of the restriction. And the response time change with the change of physical characteristics of materials. The phenomena are explained according to the theory of mechanics of materials and heat transfer, showing that the vulnerability of booster can be reduced by increasing thickness of shell and with the low thermal-conduct material.

Key words: material science; cook-off test; desensitizing RDX; thermal stability

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]。因此,研究炸药的烤燃试验方法、机理及影响因素是促进低易损性弹药发展和应用的一项重要工作。慢速烤燃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。含能材料慢速烤燃特性的研究,国内外早有报道,J. H. G. Scholtes等^[2-3]研究了HTPB/AP、PPG/AP/AN推进剂的烤燃试验,介绍了烤燃过程中压力和温度的测量方法和烤燃试验结果;王晓峰^[4]研究了传爆药的烤燃试验方法和烤燃结果;冯长根^[5]等以RDX炸药为研究对象,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;杨丽侠^[6]等建立了快烤和慢烤系统,以典型发射药为对象研究了易损性响应特性及影响因素。但关于外在约束对炸药烤燃响应特性影响的研究报道却较少。

本实验设计了一种慢速烤燃试验系统,对带壳体的钝化RDX药柱进行烤燃试验,研究了不同约束条件下钝化RDX的烤燃响应特性。

1 实验

1.1 实验装置与原理

慢烤试验系统如图1所示。在慢烤试验系统中,烤燃炉为烤燃弹提供热源,以辐射传热为主;MR13温度控制仪控制烤燃炉的升温速率为(2±0.2)℃/min;

收稿日期:2008-11-13; 修回日期:2009-03-17

作者简介:智小琦(1963),女,副教授,从事弹药工程与爆炸技术研究。

烤燃弹外壁的圆柱部分固定一只镍铬/镍硅热电偶, 精度1级, 测定烤燃弹发生响应时的环境温度。计算机与热电偶和温度显示仪连接, 通过自行设计的软件实时采集烤燃过程中的温度—时间历程曲线。试验前首先对炉内温度场做标定, 确保升温速率在设定值, 然后将烤燃弹固定在锁定位置。

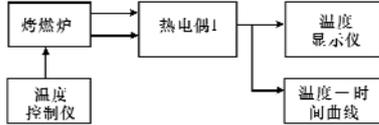


图1 慢烤试验系统图

Fig. 1 System sketch of slow cook-off test

在缓慢升温条件下, 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递药柱内部, 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, 分解的儿率加快, 同时产生热量。由于环境温度通常比炸药的分解温度低, 表层炸药热分解产生的热量可以容易地散失到环境中。而炸药本身的热传导系数小(当RDX密度为 1.816g/cm^3 时, 热导系数为 $0.25 \times 10^3\text{K}^{-1}\text{s}^{-1}$), 药柱中心分解反应所产生的热量不能及时散失到环境中, 于是在药柱内部产生热积累和自加热现象, 温度愈升高, 反应愈加快, 热量愈积累, 如此循环, 最终导致爆轰。

炸药慢速烤燃的点火温度通常在药柱中心。钝化RDX炸药受热后体系温度升高, 具有足够平均能量的分子以某一趋向发生碰撞, 越过势垒, 形成活化配合物(分子碎片)和 CH_2O 、 NO_2 、 N_2O , 然后活化配合物及其他产物继续反应, 直至生成最终产物。终态生成物为 CO 、 CO_2 、 N_2 、 H_2O 和部分游离 $\text{C}^{[7]}$ 。

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, 材料为45#钢的烤燃弹圆柱部壁厚分别为2、3和4mm; 材料为LY12铝的壳体圆柱壁厚为3mm。圆柱壁厚公差均为 $\pm 0.04\text{mm}$, 端盖厚度为 $(1 \pm 0.03)\text{mm}$ 。钝化RDX 20g, 密度为93%TMD。

1.3 实验结果

当系统温度、烤燃弹初温为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 时开始升温。烤燃过程中计算机采集的温度—时间历程曲线见图2。根据烤燃弹反应后的破片质量分布状态判定

反应的剧烈程度。试验状态及结果见表1。

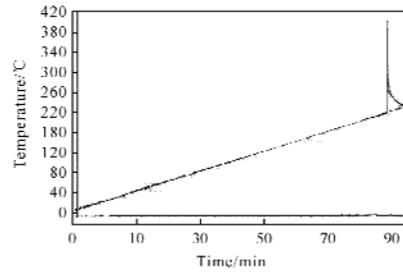


图2 测点的时间—温度历程曲线

Fig. 2 Temperature-time curve of cook-off course

表1 烤燃弹试验条件及响应结果

Table 1 Conditions and response results of cook-off test

材料	强度极限/MPa	厚度/mm	延滞期/min	耐烤燃时间/min	延滞点圆柱温度/°C	反应终态判定
45#钢	580	2	95.25	97.13	217.8	爆轰
45#钢	580	3	98.58	99.57	219.8	爆轰
45#钢	580	4	100.43	100.63	219.2	部分爆轰
铝	493	3	93.13	3.57	217.4	爆轰

注: 根据文献[2]标准判定。

2 结果与讨论

药柱吸收壳体传导的热量后温度升高, 根据化学动力学原理, 放热速度随温度的增加呈指数关系, 根据传热学理论, 散热速度随温度的变化呈线性关系, 即服从牛顿冷却定律。在本试验条件下, 热得失出现不平衡, 吸热大于失热, 使系统温度升高。由分子碰撞理论可知, 体系温度升高, 分子运动速率增大, 分子间碰撞频率增加, 且活化分子的百分数增大, 有效碰撞的百分数增加, 因此, 分解反应速率加快并放出较大的热量, 直至最终发生爆轰。

图3为壳体厚度随响应时间变化的拟合曲线。由表1或图3可以看出, 壳体材料为45#钢时, 随着烤燃弹壳体厚度的增加, 钝化RDX从加热到反应急剧变化(图2中对应的急剧上升点)所需的时间随之增长, 耐烤燃时间(从加热到爆轰的时间)也随之增长。根据传热学理论, 单位时间内的传热量与厚度成反比^[8], 随着壳体厚度的增加, 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, 因慢速烤燃是均匀的升温过程, 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。

当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(压强 $p'(t)$ 随时间变化)。由理想弹塑性理论可知,一个圆筒受内载荷向外膨胀,壳体内任一点产生三向应力状态,当三向应力中的任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,壳体内任一点的三向应力中,可承受的轴向应力、切向应力均与壳体壁厚呈正比,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。可见增加厚度可延缓壳体破裂的时间。因此,随着壳体壁厚的增加,炸药的耐烤燃时间随之增加,热安定性也随之提高。

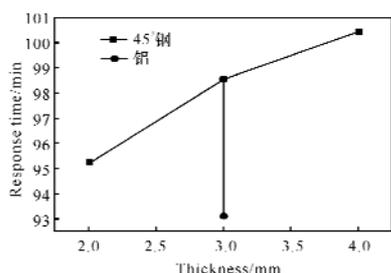
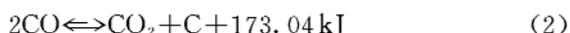
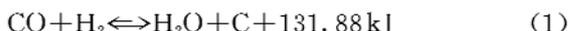


图3 壳体厚度随响应时间的拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of thickness-response time

当壳体材料均为45#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4。这一方面是随着壳体厚度的增加,阻碍气体产物的膨胀,延长了炸药爆炸瞬间的二次反应时间,化学反应式如下:



根据反应式(2),随着反应向右移动,游离的碳增多,气体产物减少^[9],冲击载荷强度降低。更主要的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,材料从蠕变到裂纹产生、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。上述综合作用效应是随着厚度的增加,破片数量减少,反应剧烈程度减弱。由此可以推断,当药量、密度、壳体厚度及壳体综合机械性能(如强度、延升率)满足某一条件时,可能只产生燃烧现象。

当壳体材料不同时,铝壳体的烤燃弹从加热到发生急剧反应所需的时间比钢壳体的短(见表1),但反应剧烈程度增加(见图4)。这是由材料的热导性能及强度极限决定的。铝材的热导系数大于钢材,因此相同时间内传递给药柱的热量多,体系温度升高快,反应时间短,故图2中对应于急剧变化点所需的时

间短。同时铝的强度极限比45#钢的低(见表1),在爆轰压力一定的条件下,单位面积上能够承受的应力比45#钢的小,因此破片数量增多,反应剧烈。

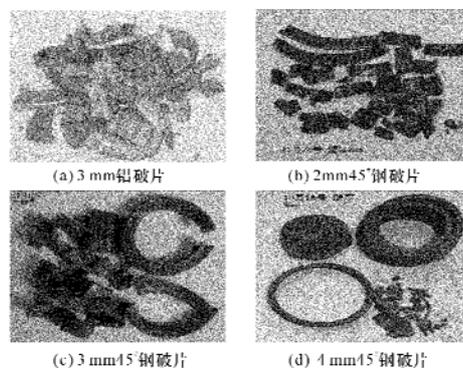


图4 不同材料壳体的破片状态

Fig. 4 Fragment of bomb

3 结 论

(1) 在缓慢升温条件下,当药柱物理结构基本一致时,对于相同材料的壳体,随着烤燃弹壁厚的增加,钝化RDX的热爆炸延滞期随之增长。因此在一定程度上增加壳体的壁厚,可以提高传爆药的热安定性能,降低易损性。

(2) 随着外约束的增强,即壳体厚度或材料极限强度的增加,钝化RDX的慢速烤燃响应特性发生变化,即反应的剧烈程度减弱。

(3) 采用导热系数低的金属材料可以提高传爆药的热安定性能。这些结论对实际工作中降低传爆药的易损性具有普遍的指导意义。

参考文献:

- [1] MIL-STD-2105B. Non-nuclear ammunitions tests of risk assessment[S]. Washington: 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]. Netherland: TON Prins Maurits Laboratory, 1997.
- [3] Kondrikov B N. Investigation of cook-off-type test methods [C] // The 11th International of Detonation Symposium. Snowmass: Snowmass Conference Center, 1998: 135-142.

(下转第34页)

向上,偏心起爆战斗部的破片速度明显增加,最大增益可达 10.7%。

(2) 偏心引爆时,引爆点同侧的破片速度明显小于引爆点对侧的破片速度,方位角在 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 方向上,破片的速度呈递增趋势。

(3) 偏心起爆了母式定向战斗部的整体性能优于中心起爆战斗部。

参考文献:

- [1] 梁争峰,袁宝慧,孙兴昀,等.定向战斗部破片能量增益的数值模拟[J].火炸药学报,2005,28(2):52-55.
LIANG Zheng-feng, YUAN Bao-hui, SUN Xing-yun, et al. Numerical simulation on the kinetic energy increase of aimed warhead [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2005, 28(2): 52-55.
- [2] 袁晋,苗立功.偏心起爆战斗部起爆状态研究[J].现代防御技术,2008,36(2):36-41.
YUAN Jin, MIAO Li-gong. A detonation model study for aimable warhead [J]. Modern Defence Technology, 2008, 36(2): 36-41.
- [3] 李翔宇,卢芳云,林玉亮,等.可变形战斗部破片增益研究[J].弹箭与制导学报,2007,27(1):104-106.
LI Xiang-yu, LU Fang-yun, LIN Yu-liang, et al. An investigation on fragmental gains of a deformable warhead [J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2007, 27(1): 104-106.
- [4] 诸德放,冯长根,李友,等.基于Gurney假设的一种非对称型战斗部破片初速计算[J].弹箭与制导学报,2006,26(1):74-76.
ZHU De-fang, FENG Chang-gen, LI You, et al. Calculation of first velocity of the unsymmetrical warhead' fragment based on gurney hypothesis [J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2006, 26(1): 74-76.
- [5] 王树山,马晓飞,隋树元,等.偏心多点起爆战斗部破片飞散实验研究[J].北京理工大学学报,2001,21(2):177-179.
WANG Shu-shan, MA Xiao-fui, SUI Shu-yuan, et al. Experimental research on fragments dispersion of the warhead under asymmetrical multi-spots initiation [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2001, 21(2): 177-179.
- [6] 王晓英,张庆明,李金柱.偏心多起点爆战斗部破片飞散三维数值模拟研究[C]//第六届全国爆轰学术会议.北京:北京理工大学,2003:201-206.
- [7] LSTC. LSDYNA Keyword User's Manual. Ver. 970 [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2003: 612-613, 799-804, 816-818.
- [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(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]. Energetic Materials, 2004, 12(4): 193-198.
- [6] 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.
- [7] 周霖.爆炸化学基础[M].北京:北京理工大学出版社,2005.
ZHOU LIN. Base of Explosion Chemistry [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005.
- [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.

(上接第 24 页)