

文章编号: 1001-1455(2009)01-0109-04

装药孔隙率对炸药烤燃响应的影响^{*}

冯晓军, 王晓峰

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了探讨炸药装药的孔隙率对其烤燃响应特性的影响, 利用自行研制的炸药烤燃试验系统, 选用 TNT 和 JB-B 两种炸药进行试验。得出结论: 随着装药孔隙率的增大, 炸药从开始发生自加速分解反应到发生烤燃反应的延滞时间会增长, 相应的烤燃反应温度也会提高; 同时孔隙率的增大也会导致炸药发生烤燃反应剧烈性的增大。

关键词: 爆炸力学; 烤燃特性; 烤燃试验; 炸药; 炸药装药; 装药孔隙率

中图分类号: O381

国标学科代码: 130 · 3510

文献标志码: A

1 引 言

烤燃试验用于评价炸药等含能材料在外部缓慢加热条件下对热作用的敏感程度和发生反应的剧烈程度, 它主要是针对炸药等含能材料在制造、储存、运输及实战环境中可能会遭受意外的热刺激而设计的。随着炸药爆炸能量的提高, 其相应的运输、储存和使用安全性能也开始受到重视。通常情况下, 炸药装药不可能达到其理论密度, 因此在装药中总会有一定的孔隙率, 这些装药孔隙的存在对于弹药系统的热安全性具有重要的影响。系统研究炸药装药的孔隙率对烤燃响应温度和响应剧烈性的影响, 对于提高炸药装药工艺和预测炸药装药系统的热响应安全性具有重要的指导意义。

2 试验装置及方法

2.1 试验装置

烤燃试验装置系统是自行研制的。主要由加热炉、控温仪、记录仪及测温用 Pt100 铂电阻等构成^[1]。加热炉具有良好的抗爆性和保温性能, 加热炉丝板的设计和安装可保证炉内温度场的均匀性; 自行编制了程序控温软件, 控温仪采用高性能可编程 PID 调节器, 控温精度可达 $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$; 记录仪可连续记录试验升温过程的时间-温度历程, 并绘制出曲线; Pt100 铂热电阻用来测量炸药发生烤燃响应时的环境温度, 精度等级为 A 级, 在 $0 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的允许偏差 $\Delta t = \pm (0.15 \text{ }^\circ\text{C} + 0.002 |t|)$ 。烤燃试验装置示意图见图 1。

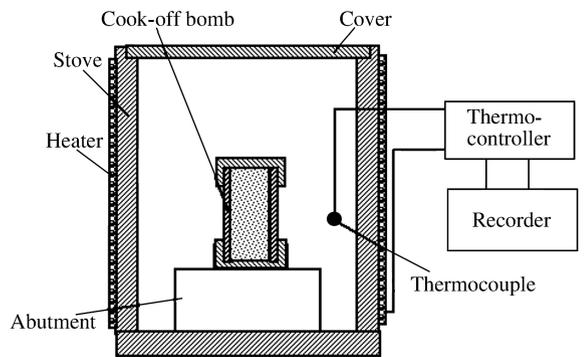


图 1 烤燃试验装置示意图

Fig. 1 Apparatus of cook-off test

所用的模拟烤燃弹是用 45 优质碳素结构钢加工而成, 弹体内径为 40 mm, 长度为 40 mm, 弹壁厚为 3 mm, 弹体两端用带螺纹的端盖密封。

2.2 试验方法和试验条件

选 TNT、JB-B ($w_{\text{TATB}} = 0.95, w_{\text{F26}} = 0.05$) 两种炸药进行试验, 用以确定装药孔隙率对炸药烤燃响

* 收稿日期: 2007-07-12; 修回日期: 2007-12-12

作者简介: 冯晓军(1976—), 男, 博士研究生。

应特性的影响。将这两种炸药压制成 $\varnothing 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的药柱, 压制密度分别为理论密度的 88%、90%、92%、94%、95% 和 96%。将压制合格的药柱分别装入到模拟烤燃弹中, 然后放置在防爆加热炉内, 从 $(25 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$ 的初始温度开始, 以 $3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的恒定升温速率进行加热, 直到被测炸药柱发生反应或温度达到 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 。记录试验过程中的时间-温度历程曲线和发生反应(分解、爆燃或爆轰)时的炉内环境温度。以壳体的变形和收集到的破片来判断反应的剧烈程度。每种炸药在不同孔隙率下的药柱至少各做两发平行试验。

烤燃试验要求的恒定升温速率 $3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 是指加热模拟烤燃弹的烤燃炉内环境升温速率, 而衡量炸药对热刺激敏感度的温度指标是烤燃弹内药柱发生反应的温度。因此在烤燃试验中通过测量烤燃炉内的环境温度进行升温速率的控制, 同时测量模拟弹内炸药柱不同点处的温度来衡量其对热刺激的敏感度。但由于该试验对热电偶是消耗性的, 而且在烤燃弹内安装热电偶工艺复杂。因此在实际试验中, 先通过试验标定出烤燃炉内某一确定的测温点与烤燃弹内药柱表面之间的温度关系^[2], 然后利用这种温度关系通过测温点的温度 θ_c 计算烤燃弹内药柱表面的温度 θ_i 。烤燃炉内的测温点也是其控温点, 这样不仅可以降低试验成本, 又能使试验操作简单。

研究所用的烤燃试验系统中, 标定的测点温度 θ_c 与烤燃弹内药柱表面的温度 θ_i 之间的关系曲线, 如图 2 所示。利用该曲线的温度对应关系, 就可以通过测点温度求得被试炸药的烤燃反应温度。

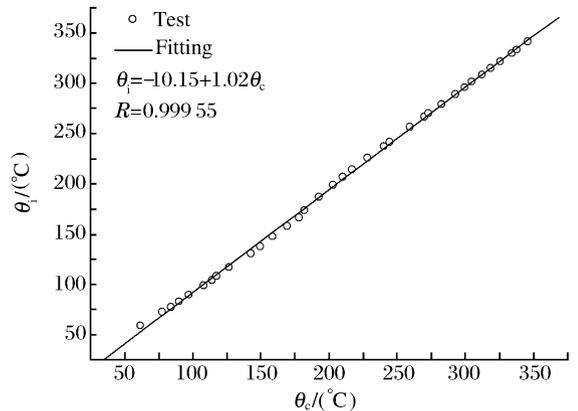


图 2 测点与模拟弹内药柱表面温度的关系曲线
Fig. 2 Relationship of the temperatures between the measured spot and the inner surface of the cook-off bomb

3 结果与讨论

将 TNT、JB-B 两种被试炸药按照上述试验方法和条件进行不同孔隙率 φ 条件下的烤燃试验, 得到发生烤燃反应时的炉内测点温度和壳体变形情况, 见表 1。测点温度 θ_c 指被试炸药发生反应时烤燃炉内温度。从表 1 可以直观地看出, 随着装药孔隙率的增加, 这两种炸药发生烤燃反应时的测点温度都在增加; 同时从壳体的变形情况来看, 随着孔隙率的增加, 壳体的变形和破裂程度也越来越严重, 即就是随着孔隙率的增大, 炸药烤燃反应的剧烈性增大。

图 3 为 TNT 炸药在不同孔隙率下烤燃反应的壳体变形和破裂情况^[3], 可以看到, 当 TNT 的孔隙率从 0.04 增加到 0.12 时, 壳体由轻微变形发展为破裂成很多碎片。

由图 2 的关系曲线, 可以由这两种炸药在不同孔隙率下发生烤燃反应时的测点温度计算得到对应的烤燃反应温度; 同时根据试验后收集到的药粉残渣及相应的壳体变形情况, 也可以定性地判断出被试炸药柱的烤燃反应结果, 结果见表 2。由表 2 可以得出, 随着装药孔隙率的增加, 炸药烤燃反应的温度

表 1 不同孔隙率下炸药烤燃反应时的测点温度和壳体变形情况

Table 1 Measured-spot temperatures and case distortion at different charge porosities

炸药	φ	$\theta_c / (^\circ\text{C})$	壳体变形情况
TNT	0.04	323.9	上端盖冲开, 壳体有变形并有炭化黑色产物
	0.05	326.6	两端盖冲开, 壳体变成鼓形, 有裂缝
	0.06	331.0	两端盖冲开, 壳体变成鼓形, 有裂缝
	0.08	335.0	壳体炸成大的破片
	0.10	338.0	壳体炸成大的破片
	0.12	348.6	壳体炸成大的破片, 一端盖破裂
JB-B	0.04	370.1	上端盖冲开, 壳体有轻微变形
	0.05	372.0	上端盖冲开, 壳体有轻微变形, 有灼烧现象
	0.06	372.8	上端盖冲开, 壳体有变形, 有灼烧现象
	0.08	374.5	上端盖冲开, 壳体有变形, 有灼烧现象
	0.10	375.1	上端盖冲开, 壳体有变形, 有灼烧现象
	0.12	376.0	两端盖冲开并有大的变形, 有灼烧现象

升高。这说明随着孔隙率的增加,炸药发生烤燃反应的延滞时间增加。烤燃反应的延滞时间是指炸药从开始发生分解反应到爆燃或爆炸所经历的时间。对于一种确定的炸药,其开始发生自加速分解反应的温度是由炸药本身的热力学性质决定的^[4]。孔隙率只是对开始发生自加速分解反应到炸药分解的气体产物的压力足以冲开烤燃弹的端盖或使弹体发生破裂而引起炸药爆燃或爆炸的时间历程有影响^[5]

$$p = \frac{a}{c} \frac{dp}{dt} + p_s \quad (1)$$

式中: p 为爆炸瞬间弹体内气体产物的压力, dp/dt 为气体产物压力变化率, p_s 为弹体材料屈服强度, a 为装药临界尺寸(如装药半径), c 为装药的声速。

由式(1)可以看出,只有当烤燃弹内部的气体产物压力远大于弹体的强度而导致弹体破裂时,炸药才会发生爆燃或爆炸响应。TNT 开始分解的温度为 271 °C,JB-B 炸药开始分解的温度为 359.6 °C^[6]。当装药温度达到各自的分解温度后,就开始发生加速分解反应。但由于存在装药孔隙,热分解产生的气体会沿着这些孔隙流动,这种流动具有一定的泄压作用^[7]。而且随着孔隙率的增加,泄压作用越强,这样就使 dp/dt 的增加很小不足以冲裂烤燃弹体。因而必然引起炸药发生烤燃响应的延滞,以便产生更多的气体产物,由于烤燃弹处于恒定升温的环境中,因此表现出其烤燃反应温度增大。

烤燃弹发生爆燃或爆炸瞬间弹体内气体产物的压力 p 也可以用来衡量烤燃反应的剧烈性,这就是说孔隙率可引起炸药慢速烤燃反应的延滞,还可使烤燃反应过程的剧烈性增加。由式(1)可知,弹体内气体产物的压力增加率越大,其响应时弹体内的压力也越大。假设烤燃弹体内气体产物符合理想气体,则其压力增加率可表示为

$$\frac{dp}{dt} = \left[\left(\frac{dm}{dt} \right)_b - \left(\frac{dm}{dt} \right)_v \right] \frac{RT}{MV} \quad (2)$$

式中: M 为气体产物的平均分子量, V 为弹体内气体体积, $(dm/dt)_v$ 为气体沿孔隙率流动的质量流速, $(dm/dt)_b$ 为炸药分解反应速率。

由式(2)可知,要使炸药装药发生剧烈的爆炸反应,需要有极快的反应速率以保证气体产物压力率的快速增加。对于炸药的烤燃来说,如果存在装药孔隙,炸药分解反应所产生的气体将会沿着这些孔隙

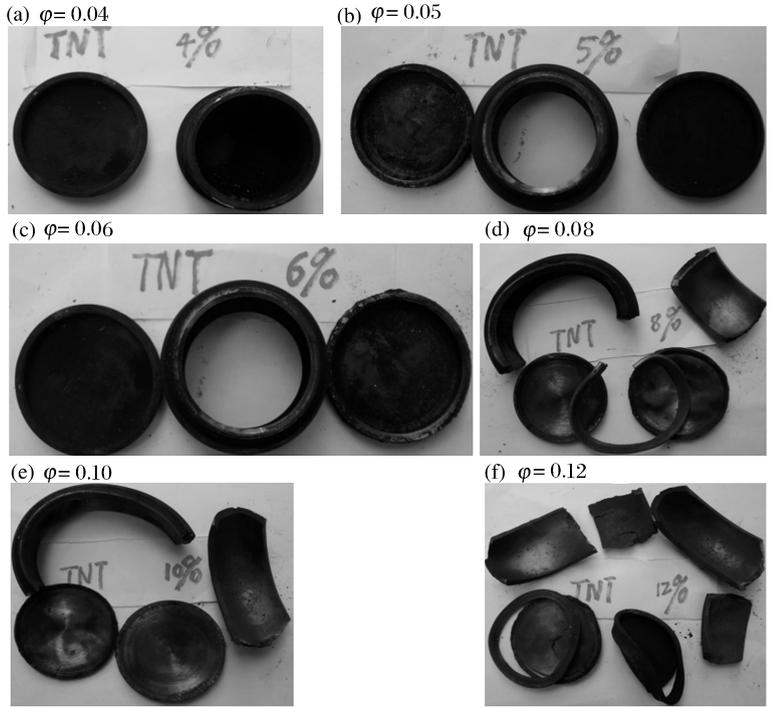


图 3 不同孔隙率的壳体破片图

Fig. 3 Fragmentation for different charge porosities

表 2 不同孔隙率下炸药烤燃反应温度和反应结果
Table 2 Cook-off temperatures and reaction results at different charge porosities

炸药	φ	$\theta_i / (^\circ\text{C})$	反应结果
TNT	0.04	320.2	分解
	0.05	323.0	爆燃
	0.06	327.5	爆燃
	0.08	331.6	爆轰
	0.10	334.6	爆轰
	0.12	345.4	爆轰
JB-B	0.04	367.4	分解
	0.05	369.3	分解
	0.06	370.1	分解
	0.08	371.8	分解
	0.10	372.5	分解
	0.12	373.4	爆燃

流动,这样初期反应的压力增加率很小。只有当分解反应延滞一定时间段后,反应速率加快到产生的气体足以引起更大的压力增加率,使药柱内部产生裂纹,裂纹向外扩展会引起药柱结构的剧烈破坏,最终导致炸药发生爆炸或燃烧转爆轰。

4 结 论

通过对 TNT、JB-B 两种炸药在不同孔隙率情况下的烤燃反应温度和反应剧烈性的讨论和分析,可以得出以下结论:(1)装药孔隙率的存在,影响炸药发生烤燃反应的延滞时间,孔隙率越大,烤燃反应发生的延滞时间越长,相应的烤燃反应温度也越高;(2)随着炸药装药孔隙率的增大,发生烤燃反应时的压力增加率增大,从而引起更加剧烈的响应。

参 考 文 献:

- [1] 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 tests of booster explosives[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2001(2):5-7.
- [2] 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.
- [3] 冯晓军. 炸药慢速烤燃特性研究[D]. 西安:西安近代化学研究所,2005.
- [4] Guengant Y, Houdusse D, Briquet B. Pyrolysis and self-heating characterizations to predict the munitions responses to slow cook-off[C]//30th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Federal Republic of Germany, 1999.
- [5] Victor A C. Equations for predicting cook-off ignition temperatures, heating times, and violence[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1997,22:59-64.
- [6] 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.
- [7] Scholtes G, van der Steen A, Bouma R, et al. The influence of the free-volume on the cook-off response[C]// 30th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Federal Republic of Germany, 1999.

Influences of charge porosity on cook-off response of explosive

FENG Xiao-jun*, WANG Xiao-feng

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: A cook-off equipment was developed to explore influences of charge porosity on the cook-off response of explosives. The cook-off test was carried out by taking the TNT and JB-B explosives for examples. Experimental results indicate that with the increase of charge porosity, the lasting time from the beginning of self-acceleration decomposition reaction to the start of cook-off reaction is prolonged, the corresponding cook-off temperature is elevated, and the violence of the cook-off response is intensified.

Key words: mechanics of explosion; cook-off characteristic; cook-off test; explosive; explosive charge; charge porosity

* Corresponding author; FENG Xiao-jun
Telephone: 86-29-88291756

E-mail address: fengxj_78@163.com