

# 低成本高效慢速烤燃试验方法研究

李娜, 吕春玲, 王杰, 马超

(中北大学, 太原 030051)

**摘要:** **目的** 研究低成本高效慢速烤燃试验方法。**方法** 利用自主研发的一套慢速烤燃试验装置, 以 1 °C/min 和 3.3 °C/h 升温程序作为对比试验, 设置几种三阶段升温程序, 对 JBO-9013 和 JH-14 炸药进行慢速烤燃试验, 以此获得不同升温程序下试样的响应温度和响应等级。**结果** 1 °C/min、3.3 °C/h、三阶段(100/150/193 °C) 升温程序下, JBO-9013 响应温度分别为 243.1、199.5、199.8、201.4、193.0 °C, 响应等级均为燃烧反应; JH-14 响应温度分别为 211.0、186.0、191.7 °C, 响应等级均为爆轰反应。**结论** 升温程序对 JBO-9013 和 JH-14 响应温度和响应剧烈程度均有影响。与 GJB 8018—2013 中 1 °C/min 升温程序相比, 三阶段升温程序与 MIL-STD-2105D 和 STANAG 4439 中 3.3 °C/h 烤燃试验结果吻合度较高。因此, 三阶段升温程序具有缩短试验周期、提高试验效率和降低试验成本的作用。

**关键词:** 慢速烤燃; 三阶段升温程序; 热刺激; 响应温度

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.09.003

**中图分类号:** TJ450

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)09-0018-06

## Low Cost and High Efficiency Slow Cook-off Test Method

LI Na, LYU Chun-ling, WANG Jie, MA Chao  
(North University of China, Taiyuan 030051, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the low cost and high efficiency slow cook-off test method. **Methods** The 1 °C/min and 3.3 °C/h heating program was taken as comparative tests to set several three-stage heating programs and carry out slow cook-off test on JBO-9013 and JH-14 explosives with a self-developed slow cook-off test device to obtain the response temperature and response grade of the samples under different heating programs. **Results** The response temperature of JBO-9013 was 243.1, 199.5, 199.8, 201.4, 193 °C respectively, and the response grades were all combustion reaction at the 1 °C/min, 3.3 °C/h, three-stage (100/150/193 °C) heating programs. The response temperature of JH-14 was 211.0, 186.0, 191.7 °C respectively, and the response grades were all detonation reaction at the 1 °C/min, 3.3 °C/h, three-stage (100 °C) heating programs. **Conclusion** The temperature program has an effect on the response temperature and violent degree of JBO-9013 and JH-14. The results of three-grades heating program is obviously closer to the 3.3 °C/h heating program of MIL-STD-2105D and STANAG 4439 in terms of slow cook-off test results compared to the 1 °C/min heating program of GJB8018-2013. Therefore the three-stage heating program test method can shorten the test time, improve the test efficiency and reduce the test cost.

**KEY WORDS:** slow cook-off; three-stage heating program; thermally stimulated; response temperature

不敏感弹药是现今武器装备技术的发展方向<sup>[1]</sup>。美国和北约等形成了针对不敏感弹药, 以 MIL-STD-

2105D<sup>[2]</sup>和 NATO STANAG 4439<sup>[3]</sup>为总纲, AOP-39<sup>[4]</sup>为执行文件, STANAG 单项试验程序为具体操作说

收稿日期: 2019-03-04; 修订日期: 2019-04-08

作者简介: 李娜(1991—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为含能材料测试。

通讯作者: 吕春玲(1970—), 女, 副教授, 主要研究方向为含能材料测试和火炸药安全评价技术。

明的安全性试验方法和评估体系<sup>[5]</sup>。其中，慢速烤燃试验是弹药通过低易损试验的必测项目之一，其实际上是模拟战场中的一种热刺激条件，如室外高温、库房的缓慢升温以及战场上的暗火加热等<sup>[6]</sup>。

升温速率对慢速烤燃特性影响很大<sup>[7-11]</sup>，选择不同的升温程序，对烤燃试验结果影响较大。在进行慢速烤燃试验时，一般参照国外标准 MIL-STD-2105D<sup>[2]</sup>和 STANAG 4439<sup>[3]</sup>，或者 GJB 8018—2013《地地常规导弹整体爆破弹头试验规程》，升温速率国外通常采用 3.3 °C/h，国内通常采用 1 °C/min。研究证明，3.3 °C/h 升温速率是合理的<sup>[12]</sup>，但存在试验周期长、试验效率低的问题。

为缩短试验周期，提高试验效率和节省成本，增加与国际慢速烤燃试验结果的可比性，提出三阶段升温程序对 JBO-9013 和 JH-14 进行慢速烤燃试验，以期获得更接近 3.3 °C/h 升温程序的烤燃试验结果，并且为炸药热安全性评价提出技术基础。

## 1 慢速烤燃试验

### 1.1 试样

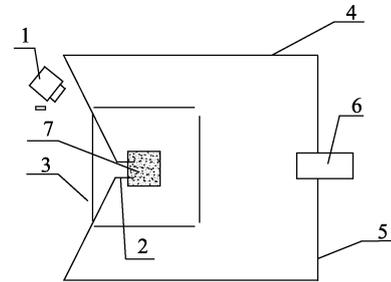
将 JBO-9013 和 JH-14 压制成为直径为 40 mm、高为 30 mm，密度为 90%TMD 的药柱。JBO-9013 试样药量约 64 g，JH-14 试样药量约 62 g。

### 1.2 试验装置

自主研发了一套慢速烤燃试验装置，主要由温控系统、烤燃弹系统、鉴证板和监控仪等组成，系统组成如图 1 所示。其中温控系统主要由控温传感器 A 级 Pt100 铂电阻、NG3C 调功器、导电 FP33 温控仪和计算机等组成，能够实现控温和数据采集一体化。

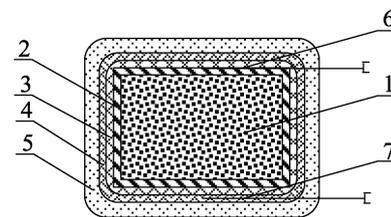
烤燃弹子系统主要由烤燃弹、均质加热层、电加热层和隔热保温层等部件组成，其结构组成如图 2 所示。烤燃弹采用 45#钢，内径为 40 mm，高为 60 mm，壁厚为 3 mm，两端用带螺纹端盖密封，上端盖和下

端盖均为 3 mm 厚。均质加热层采用石棉布，电加热层采用柔性电加热带，隔热保温层采用材质为硅酸铝纤维的保温棉。鉴证板采用 Q235A 级钢板，长为 0.6 m，宽为 0.6 m，厚为 5 mm。



1-监控仪；2-控温传感器；3-鉴证板；4-加热导线；5-控温补偿导线；6-温控子系统；7-烤燃弹子系统

图 1 慢速烤燃试验系统



1-被测样品；2-烤燃弹壳体；3-均质加热层；4-电加热层；5-隔热保温层；6-控温传感器；7-加热导线

图 2 烤燃弹结构

### 1.3 试验方法及试验程序

#### 1.3.1 试验方法

参照 MIL-STD-2105D<sup>[2]</sup>、STANAG 4439<sup>[3]</sup>和 GJB 8018-2013《地地常规导弹整体爆破弹头试验规程》制定试验程序。

#### 1.3.2 升温程序

采用一阶段升温程序和三阶段升温程序两种对比烤燃试验方案，JBO-9013 和 JH-14 具体升温程序细则见表 1。

表 1 JBO-9013 和 JH-14 烤燃试验升温程序

样品名称	升温程序	升温程序代码
JBO-9013	1 °C/min	JBO-9013-①
	3.3 °C/h	JBO-9013-②
	1 °C/min 升温至 100 °C，在 100 °C 保温 2 h，之后以 3.3 °C/h 升温直至响应	JBO-9013-③
	1 °C/min 升温至 150 °C，在 150 °C 保温 2 h，之后以 3.3 °C/h 升温直至响应	JBO-9013-④
	1 °C/min 升温至 193 °C，在 193 °C 保温 2 h，之后以 3.3 °C/h 升温直至响应	JBO-9013-⑤
JH-14	1 °C/min	JH-14-①
	3.3 °C/h	JH-14-②
	1 °C/min 升温至 100 °C，在 100 °C 保温 2 h，之后以 3.3 °C/h 升温直至响应	JH-14-③

#### 1.3.3 试验判据

MIL-STD-2105D<sup>[2]</sup>和 STANAG4382<sup>[13]</sup>中规定响

应等级中有部分爆轰和完全爆轰，但从大量先期试验经验可知，严格区分判定这两种响应等级很困难，故

确定爆轰、爆炸、爆燃、燃烧和无反应等5个响应等级。由于慢烤的试样量较少,测试其冲击波超压比较困难,且测试超压影响因素多,重复性较差,因此本次试验未进行超压测试。最终,确定慢速烤燃试验响应等级及分类标准见表2。

### 1.3.4 试验过程

根据图2对烤燃弹进行装配好后,依照图1对慢烤试验进行布置,现场布置如图3所示。从室温开始,以设定的升温程序对烤燃弹进行加热,直至试样发生响应。

表2 慢速烤燃试验响应等级及分类标准

响应等级	残药数量	壳体破碎状态	鉴证板状态	其他
爆轰	全部药柱发生一次性爆轰反应,现场无残留药粉	试验弹壳体发生严重破碎,形成大量小碎片	鉴证板被冲倒,鉴证板上有大量破片穿孔	有瞬间爆轰火光或烟雾,同时伴有巨大爆炸响声
爆炸	部分或全部药柱发生了一次性快速燃烧反应,现场无残留药粉	试验弹壳体发生严重破裂,形成多个较大块破片	鉴证板发生塑性变形,并有明显爆炸痕迹,可能有破片撞击凹痕或穿孔	有瞬间爆炸火光或烟雾,同时伴有较大爆炸响声
爆燃	现场无残留药柱或药块,可能有少量药柱破碎散射粉末	试验弹一端或两端端盖被冲开,且壳体发生轻微膨胀变形或局部破裂,但不形成碎片	鉴证板上可能有残药燃烧痕迹或端盖撞击形成的轻微凹痕	有瞬间爆燃火光或烟雾,同时伴有爆炸响声
燃烧	部分或全部药柱低压持续燃烧,试样有燃烧发黑或碳化迹象	试验弹一端或两端盖被冲开,壳体内有残药燃烧痕迹或有高温熔化变形,壳体无显著膨胀变形或破裂	鉴证板上可能有残药喷射燃烧痕迹,或端盖撞击形成的轻微凹痕	有低压燃烧火光或烟雾
无反应	药柱完整,无燃烧发黑或碳化迹象	试验弹壳体和端盖配合完好,端盖无冲开现象,壳体无宏观膨胀变形或破裂	鉴证板上无药剂反应和壳体破损撞击痕迹	无反应火光和烟雾



图3 现场布置



a 现场



b 烤燃弹

图5 JBO-9013-②试验后照片

## 2 结果及分析

试样发生剧烈反应时的拐点温度即为慢速烤燃试验的响应温度。试样的响应等级要依据试验后残药数量、壳体破碎状态、鉴证板状态和录像等进行综合判定。在不同升温程序下, JBO-9013、JH-14 试验后的现场、烤燃弹和鉴证板照片如图4—11所示。试验结果的综合分析见表3。

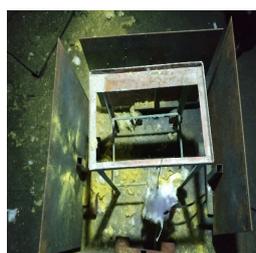


a 现场



b 烤燃弹

图6 JBO-9013-③试验后照片



a 现场



b 烤燃弹

图4 JBO-9013-①试验后照片



a 现场



b 烤燃弹

图7 JBO-9013-④试验后照片



图 8 JBO-9013-⑤试验后照片



图 10 JH-14-②试验后照片

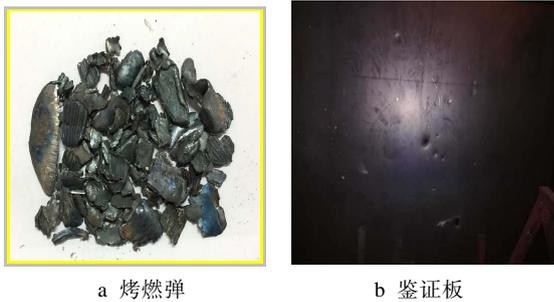


图 9 JH-14-①试验后照片

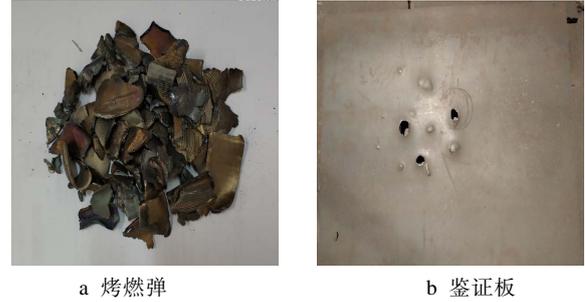


图 11 JH-14-③试验后照片

表 3 JBO-9013 和 JH-14 慢速烤燃试验结果综合分析

升温程序代码	响应温度/℃	试验现象	响应等级
JBO-9013-①	243.1	反应声响较大；保温棉破裂，无燃烧痕迹；现场有大量抛撒的黄色药粉；鉴证板上有残药无碰撞痕迹，未被冲倒；壳体内留有残药，一端端面冲开，未冲开一端有轻微膨胀	燃烧
JBO-9013-②	199.5	反应声响较大；保温棉碎裂；现场有抛撒的残药，残药颜色变深；鉴证板上有残药无碰撞痕迹，未被冲倒；壳体内留有残药，一端端盖冲开，冲开一端端盖明显变形，未冲开一端有轻微膨胀，两端盖有轻微撞击痕迹	燃烧
JBO-9013-③	199.8	反应声响较大；保温棉较为完整；现场有抛撒的残药，残药颜色变深；鉴证板上有少量残药无碰撞痕迹，未被冲倒；壳体和保温棉内留有残药，一端端盖冲开，冲开一端端盖轻微膨胀，未冲开一端无肉眼可见膨胀	燃烧
JBO-9013-④	201.4	反应声响较大；保温棉完全碎裂；现场有抛撒的残药，残药颜色变深；鉴证板未被冲倒，无碰撞痕迹；壳体内留有残药，一端端盖冲开，两端端盖有轻微膨胀，冲开一端有轻微撞击痕迹	燃烧
JBO-9013-⑤*	193.0	反应声响较大；保温棉较为完整；现场有抛撒的残药，残药颜色变深；鉴证板上有少量残药无碰撞痕迹，未被冲倒；壳体和保温棉内留有残药，一端端面被冲开，冲开一端端面有较较明显变形，未冲开一端有轻微膨胀	燃烧
JH-14-①	211.0	有瞬间爆轰火光和巨大爆炸声响；鉴证板留有大小不等的穿孔及凹痕，鉴证板均被冲倒；无残药；壳体炸裂成大量破片	爆轰
JH-14-②	186.0	有瞬间爆轰火光和巨大爆炸声响；鉴证板留有大小不等的穿孔及凹痕，鉴证板均被冲倒；无残药；壳体炸裂成大量小破片	爆轰
JH-14-③	191.7	有瞬间爆轰火光和巨大爆炸声响；鉴证板留有大小不等的穿孔及凹痕，鉴证板均被冲倒；无残药；壳体炸裂成大量破片	爆轰

注：JBO-9013-⑤\*在 193.0 ℃ 恒温 1.55 h 后发生响应

以试验升温程序代码为  $x$  轴，响应温度为  $y$  轴，绘制升温程序与响应温度关系曲线，如图 12 所示。

从图 4—12 和表 3 可知，在三种升温程序下，JBO-9013 响应等级均是燃烧，JH-14 均是爆轰，响应等级相同，但响应温度和响应剧烈程度存在差异。由于 JBO-9013 在三阶段升温程序（193 ℃）保温阶

段发生响应，导致响应温度变低<sup>[9]</sup>。对于响应温度，1 ℃/min 与 3.3 ℃/h 升温程序的响应温度差值最大，JBO-9013 相差 43.6 ℃，JH-14 相差 26 ℃，三阶段升温程序与 3.3 ℃/h 差值较小，JBO-9013（100/150 ℃）差值分别为 0.3、0.9 ℃，JH-14（100 ℃）差值为 5.7 ℃。对于响应剧烈程度，从保温棉破裂情况、残药数量和

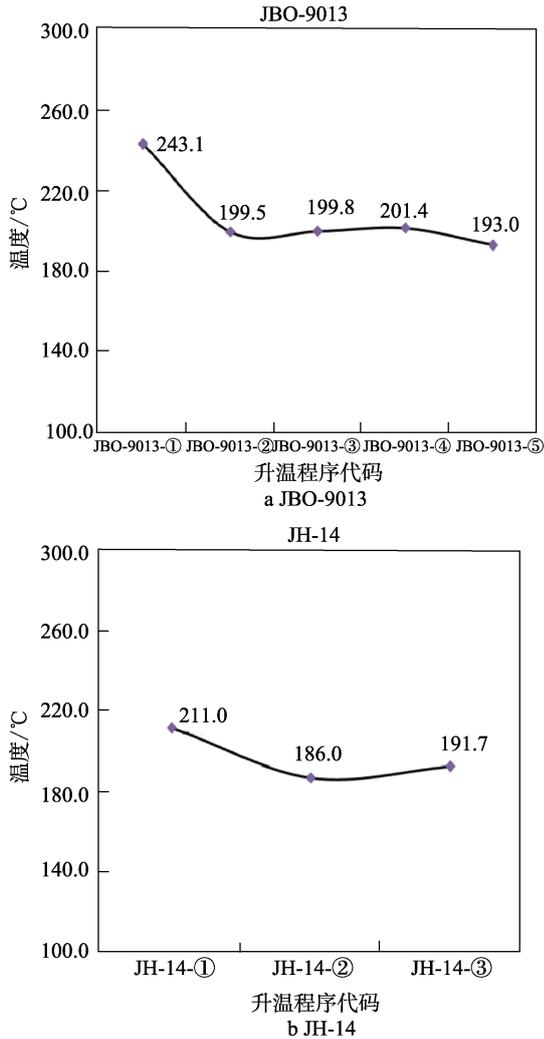


图 12 升温程序与响应温度关系

状态及烤燃弹壳体变形程度上可知, 3.3 °C/h 升温程序响应剧烈程度最高, 1 °C/min 升温程序响应剧烈程度最低, 三阶段升温程序介于两者之间, 且趋近于 3.3 °C/h 升温程序。其中, JBO-9013 三阶段升温程序 (150 °C) 与 3.3 °C/h 的响应剧烈程度非常接近。

依据热爆炸理论<sup>[14]</sup>, 对 1 °C/min、3.3 °C/h、三阶段升温程序的烤燃热反应机理进行分析。

JBO-9013 和 JH-14 慢速烤燃试验中, 热量不断由外界向药柱内传递, 由于热传递方式存在差异, 药柱边缘区域与药柱中心区域热量积聚状态不同。对于药柱边缘区域, 热量积聚主要是因为外界热传导和自身热分解产热的热量大于向外界热辐射和向药柱中心区域热传导的热量; 药柱中心区域, 热量积聚主要是因为药柱边缘区域的热传导和自身热分解产热, 对比药柱边缘区域, 中心区域更易积累热量。

由于炸药是热的不良导体, 药柱边缘区域向中心区域传热较慢, 因此向药柱中心区域传热较少。当升温速率较快时, 单位时间内, 外界对药柱边缘区域传热更多, 热量不断积累, 导致温度升高, 加速反应速率, 继而积累更多热量, 药柱边缘区域更

易形成热点。当升温速率较慢时, 单位时间内, 外界对药柱边缘区域传热变少, 由于存在向外界散热以及向药柱中心区域的传热, 热量积累少。药柱中心区域, 受到药柱边缘区域的传热以及自身热分解产热作用, 热量更易积累, 热点更易在中心区域产生。热点靠近中心区域时, 由于能量瞬间释放, 反应更为剧烈<sup>[12]</sup>。因此, 1 °C/min 升温程序响应温度最高, 响应剧烈程度最低; 3.3 °C/h 响应温度最低, 响应剧烈程度最高。

三阶段升温程序保温阶段, 药柱边缘区域受到外界传递能量大幅度降低, 热量积聚降低, 热反应速率降低。相反, 药柱内部热量积聚增多, 热点也逐渐向药柱内部移动。在进行第三阶段 3.3 °C/h 升温速率时, 内部热量积聚变多状态一直持续, 药柱内温度分布状态与 3.3 °C/h 情况接近, 更易在中心区域形成热点。因此, 三阶段升温程序在响应温度和响应剧烈程度上趋近与 3.3 °C/h。

### 3 结论

1) 1 °C/min、3.3 °C/h 和三阶段升温程序对 JBO-9013 和 JH-14 的响应温度和响应剧烈程度均有影响, 三阶段升温程序热刺激强度介于两者之间。在一定热刺激强度范围内, 热刺激强度与响应温度和响应剧烈程度之间存在一个关系趋势, 热刺激强度与响应温度呈正比关系, 与响应剧烈程度呈反比关系。

2) 与 1 °C/min 升温程序相比, 无论在响应温度和响应剧烈程度上, 三阶段升温程序都趋近 3.3 °C/h 升温程序, 结果吻合度较高, 对进行慢速烤燃试验具有缩短试验周期, 提高试验效率和降低试验成本的作用, 并且增加试验数据与国际慢烤试验的可比性。值得注意的是, 保温阶段温度参数值选择对响应温度及响应程度的影响较大, 在选择时不宜过大, 导致响应温度偏低, 选择合适的温度值可以达到既满足缩短试验周期, 又实现与国际接轨的目的。

### 参考文献:

- [1] 钱立新. 不敏感弹药安全要求及设计技术[C]// 第六届含能材料与钝感弹药技术学术研讨会论文集. 绵阳: 《含能材料》编辑部, 2014.
- [2] MIL-STD-2105D, Hazard Assessment Tests for Non-nuclearmunitions[S].
- [3] STANAG 4439, Policy for Introduction, Assessment and Testing for Insensitive Munitions[S].
- [4] AOP-39, Guidance on the Development, Assessment and Testing Ofinsensitive Munitions[S].
- [5] 梁晓璐, 梁争峰, 程淑杰, 等. 不敏感弹药试验方法及评估标准研究进展[J]. 飞航导弹, 2016(6): 84-87.

- [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(3): 71-74.
- [7] 王沛, 陈朗, 冯长根. 不同升温速率下炸药烤燃模拟计算分析[J]. 含能材料, 2009, 17(1): 46-49.
- [8] 牛余雷, 南海, 冯晓军, 等. RDX 基 PBX 炸药烤燃试验与数值计算[J]. 火炸药学报, 2011, 34(1): 32-36.
- [9] 王洪伟, 智小琦, 郝春杰, 等. 升温速率对限定条件下烤燃弹热起爆临界温度的影响[J]. 含能材料, 2016, 24(4): 380-385.
- [10] 王洪伟. 热刺激强度对炸药烤燃响应特性影响的研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [11] 刘文杰. 传爆药烤燃响应特性的数值仿真及试验研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [12] 李翊, 赵继伟, 霍菲. 国外固体发动机慢烤安全性评估技术[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(6): 897-902.
- [13] STANAG 4382, Slow Heating, Munition Test Procedures[S].
- [14] 冯长根. 热爆炸理论[M]. 北京: 科学出版社, 1988.