

文章编号: 1006-9941(2011)06-0669-04

固体推进剂慢速烤燃特性的影响因素研究

赵孝彬¹, 李 军¹, 程立国¹, 王 宁¹, 王 拯², 陈中娥², 王晨雪¹, 秦 超¹, 程新丽¹

(1. 航天工业固体推进剂安全技术研究中心, 湖北 襄阳 441003; 2. 湖北航天化学技术研究所, 湖北 襄阳 441003)

摘 要: 以 HTPE 推进剂、GAP 推进剂为对象, 采用慢速烤燃试验装置结合热电偶测温及传感器测压技术, 研究了固体推进剂慢速烤燃特性的影响因素, 包括配方组成、燃速、升温速率、约束条件、自由体积等。HTPE 推进剂具有优异的慢速烤燃特性, 10% HMX 的加入使其慢速烤燃的响应程度增加, 自由体积对其慢速烤燃的响应程度没有明显影响; 燃速从 $10.1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $32.2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 升温速率从 $3.3 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 增加到 $1 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$, 对 GAP 推进剂慢速烤燃的响应程度影响较小; 增加夹板约束后, HTPE 推进剂和 GAP 推进剂慢速烤燃的响应程度增加。

关键词: 物理化学; 固体推进剂; 慢速烤燃; 影响因素

中图分类号: TJ55; V512; O64

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.06.016

1 引 言

随着高新武器在现代战争中的大量应用以及使用环境的日趋苛刻, 对导弹武器在战场的生存能力提出了越来越高的要求。军舰是现代战争中的重要作战平台, 舰载导弹武器在受到敌方打击或由于自身弹药着火而引起意外的燃烧或爆炸, 历史上已经发生多起灾难性的事故, 如英阿马岛战争、美国“福莱斯特”、“企业”、“尼米兹”号航空母舰等。引起上述事故的重要原因之一是由于弹药的烤燃导致的, 即弹药在烤燃时发生了剧烈的爆炸, 引起其它弹药发生殉爆。

烤燃试验可以模拟火焰烧烤、库房缓慢升温、战场暗火加热等刺激条件, 通过测试装药在不同升温速率下的温度及压力变化、反应等级、爆炸时间等数据, 确定弹药在受到外部缓慢及快速加热时的反应类型, 是评估火炸药、固体推进剂、弹药低易损性的重要指标之一。烤燃试验包括快速烤燃和慢速烤燃, 目前关于快速烤燃和慢速烤燃的区分尚未形成统一的认识。国际烤燃危险工作小组^[1] (International Cook-off Hazards Working Group, CHWG) 基于升温速率的大小将烤燃过程分为快速烤燃 ($10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)、中速烤燃 ($10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)、慢速烤燃 ($10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$)。陈朗等人^[2] 按照炸药内部温度变化和热量传递方向, 把烤燃过程分为慢速烤燃、中速

烤燃和快速烤燃, 并给出了区分三种烤燃形式的方法。

烤燃试验一直受到西方发达国家的高度重视, 美、英、法等国都建立了相应的烤燃试验方法及标准^[3-5]。国内烤燃试验的相关研究起步较晚, 在炸药领域开展的研究工作相对较多, 针对固体推进剂的研究工作较少。相比而言, 快速烤燃试验较为简单, 国内外试验方法也基本相同; 而慢速烤燃试验则较为复杂, 不仅影响因素 (如升温速率、约束条件、壳体密封性、自由体积等) 较多, 而且不同国家甚至同一国家不同研究机构的试验方法都存在较大的差异。

HTPE 推进剂是目前研究较多的一类低易损性固体推进剂, 其具有优异的综合性能。为了进一步提高固体推进剂的能量性能, 采用 GAP 作为粘合剂的低易损性固体推进剂得到了国内外的广泛重视。鉴于此, 本文主要以 HTPE 推进剂、GAP 推进剂为对象, 研究其慢速烤燃特性及其影响因素。

2 试验部分

2.1 试验配方

HTPE 推进剂基础配方为 HTPE/NE/AP/Al (NE 为硝酸酯), GAP 推进剂基础配方为 GAP/NE/AP/HMX/Al。

2.2 慢速烤燃试验

慢速烤燃试验升温速率在 $3.3 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1} \sim 3 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 之间变化, 约束条件分为有夹板约束和无夹板约束两种。为了提高试验效率, 首先通过快速升温将试样加

收稿日期: 2011-09-27; 修回日期: 2011-11-07

作者简介: 赵孝彬 (1973-), 男, 研究员, 主要从事含能材料安全技术研究。e-mail: zxb73525@sina.com

热至一定温度并恒温,然后再以 $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的升温速率加热直至试样发生反应。

2.3 温度及压力(超压)测试

根据试样的大小,分别在试样中心、试样表面、二分之一半径处、四分之一半径处布置热电偶监测试样内部及表面的温度变化。采用压力传感器测试试样慢速烤燃响应以后的压力或冲击波超压,作为试样慢速烤燃响应程度的辅助判据。

2.4 响应程度判定

考虑试验现象(包括装药反应情况;碎片大小、形状、飞散距离等)、反应声响、反应压力(压力变化率)或冲击波超压(相对释放能),综合判定慢速烤燃试验的响应程度。

3 结果与讨论

3.1 配方组成对慢速烤燃特性的影响

以 HTPE 推进剂为对象,研究了配方组成对固体推进剂慢速烤燃特性的影响。试样尺寸为 $\Phi 60\text{ mm} \times 240\text{ mm}$,烤燃弹壳体及端盖壁厚均为 4 mm ,升温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 。HTPE-1 配方为基础配方,HTPE-2 配方中加入了 10% 的含能添加剂 TN 取代 AP,HTPE-3 配方中加入了 10% 的 HMX 取代 AP,慢速烤燃试验照片如图 1 所示。

三种 HTPE 推进剂慢速烤燃的试验现象基本相同,均表现为烤燃弹体一侧端盖冲开,另一侧端盖凸起,弹体无明显变形,试样发生燃烧,但有剩余残药。相比之下,含有 HMX 炸药的 HTPE-3 配方端盖凸起较为明显,而且烤燃弹体一端有明显膨胀。三种 HTPE 推进剂慢速烤燃的响应温度分别为 $171, 161, 161\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明 TN 及 HMX 的加入导致 HTPE 推进剂的响应温度降低。根据烤燃弹体的变形情况及剩余残药情况,认为三种 HTPE 推进剂配方的慢速烤燃响应程度较低,反应等级均为燃烧。

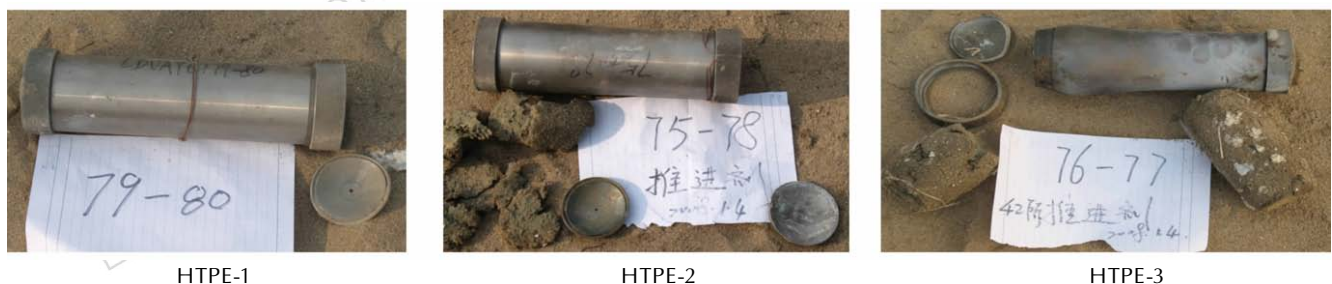


图 1 HTPE 推进剂的慢速烤燃试验照片

Fig. 1 Pictures of the slow cook-off test of HTPE propellant

3.2 燃速对慢速烤燃特性的影响

以 GAP 推进剂为对象,研究了燃速对固体推进剂慢速烤燃特性的影响,升温速率为 $3.3\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 。试样尺寸为 $\Phi 50\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,装药量约为 700 g 。GAP 推进剂的燃速分别为 $10.1\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $32.2\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (6.86 MPa),慢速烤燃试验照片如图 2 所示。两种不同燃速条件下,GAP 推进剂响应以后的试验现象基本相同,四个紧固螺栓均被拉断,烤燃弹体破裂形成较大的碎片。燃速为 $10.1\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,GAP 推进剂的响应温度为 $148\text{ }^{\circ}\text{C}$;燃速为 $32.2\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,GAP 推进剂的响应温度为 $141\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据试验现象及响应后的压力变化,认为 GAP 推进剂在慢速烤燃过程中发生了爆炸,说明提高燃速对改善 GAP 推进剂慢速烤燃特性的效果不显著。

3.3 升温速率对慢速烤燃特性的影响

以 GAP 推进剂为对象,研究了升温速率对固体推进剂慢速烤燃特性的影响。升温速率分别为 $1\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $3.3\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 。试样尺寸为 $\Phi 50\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,装药量约为 700 g ,慢速烤燃试验照片如图 3 所示。

升温速率为 $3.3\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,GAP 推进剂的响应温度为 $148\text{ }^{\circ}\text{C}$,四个紧固螺栓均被拉断,烤燃弹壳体破裂形成较大的碎片;结合试验现象,认为 GAP 推进剂在慢速烤燃过程中发生了爆炸。升温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,GAP 推进剂的响应温度为 $188\text{ }^{\circ}\text{C}$,仅回收到了一个夹板和部分碎片;结合试验现象认为 GAP 推进剂在慢速烤燃过程中也发生了爆炸。上述试验结果表明,升温速率从 $3.3\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 增加至 $1\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$,对 GAP 推进剂慢速烤燃响应程度的影响不显著。

3.4 约束条件对慢速烤燃特性的影响

以 HTPE 推进剂、GAP 推进剂为对象,研究了约束条件对固体推进剂慢速烤燃特性的影响,一种为两端通过螺盖密封,另一种为在螺盖密封基础上增加夹板和紧固螺栓。试样尺寸为 $\Phi 50\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,装药量约为 700 g 。HTPE 推进剂升温速率为 $3.3\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$,GAP 推进剂升温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 。



10.1 mm · s⁻¹

32.2 mm · s⁻¹

图2 燃速对 GAP 推进剂慢速烤燃特性的影响

Fig.2 Influence of the burning rate on the slow cook-off characteristics of GAP propellant



3.3 °C · h⁻¹

1 °C · min⁻¹

图3 升温速率对 GAP 推进剂慢速烤燃特性的影响

Fig.3 Influence of the heating rate on the slow cook-off characteristics of GAP propellant

3.4.1 HTPE 推进剂

HTPE 推进剂慢速烤燃试验照片如图 4 所示。无夹板约束条件下,烤燃弹体一侧端盖冲开,弹体无明显变形,试样发生燃烧,响应温度为 151 °C。有夹板约束条件下,烤燃弹体两侧端盖冲开,弹体撕裂为两部分,响应温度为 157 °C。根据烤燃弹体的破坏情况,认为 HTPE 推进剂在无夹板约束条件下的响应程度为燃烧,有夹板约束条件下的响应程度为爆燃,约束条件对 HTPE 推进剂的响应程度有一定的影响。

3.4.2 GAP 推进剂

GAP 推进剂慢速烤燃试验照片如图 5 所示。无夹板约束条件下,GAP 推进剂的响应温度为 198 °C,响应程度为爆燃;有夹板约束条件下,GAP 推进剂的响应温度为 197 °C,响应程度为爆炸,说明约束条件对 GAP 推进剂的响应程度影响较为显著。

3.5 自由体积对慢速烤燃特性的影响

HTPE 推进剂试样尺寸为 $\Phi 50$ mm × 200 mm,烤燃弹壳体及端盖壁厚均为 3 mm,升温速率为 3 °C · min⁻¹,无夹板约束,1 发试件有 20% 的自由体

积,慢速烤燃试验照片如图 6 所示。存在自由体积时,HTPE 推进剂的响应温度为 198 °C;无自由体积时,HTPE 推进剂的响应温度为 196 °C。HTPE 推进剂慢速烤燃响应以后,有无自由体积时均表现为烤燃弹壳体一侧端盖冲开,一侧端盖变形,响应程度均为燃烧,说明自由体积对 HTPE 推进剂慢速烤燃的响应程度没有显著影响。



without restriction



with restriction

图4 约束条件对 HTPE 推进剂慢速烤燃特性的影响

Fig.4 Influence of the restriction condition on the slow cook-off characteristics of HTPE propellant



without restriction

with restriction

图5 约束条件对 GAP 推进剂慢速烤燃特性的影响

Fig.5 Influence of the restriction condition on the slow cook-off characteristics of GAP propellant

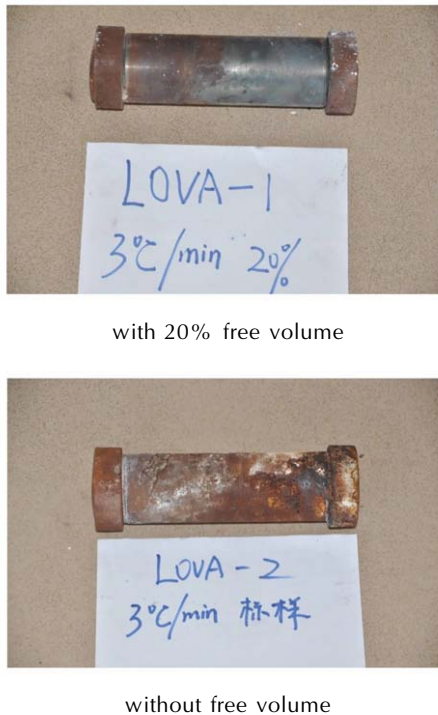


图6 自由体积对HTPE推进剂慢速烤燃特性的影响
Fig.6 Influence of the free volume on the slow cook-off characteristics of HTPE propellant

4 结论

- (1) HTPE推进剂具有优异的慢速烤燃特性, HMX的加入会加剧其慢速烤燃的响应程度;
- (2) 燃速从 $10.1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $32.2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Influence Factors of Slow Cook-off Characteristic for Solid Propellant

ZHAO Xiao-bin¹, LI Jun¹, CHENG Li-guo¹, WANG Ning¹, WANG Zheng², CHEN Zhong-e², WANG Chen-xue¹, QIN Chao¹, CHENG Xin-li¹

(1. Research Center of Solid Propellant Safety Technology of Aerospace Industry, Xiangyang 441003, China; 2. Hubei Institute of Aerospace Chemotechnology, Xiangyang 441003, China)

Abstract: The influence factors of slow cook-off characteristic of solid propellant were studied with the object of HTPE propellant and GAP propellant by means of slow cook-off experimental device and thermocouple and pressure transducer, including composition, burning rate, heating rate, restriction condition, and free volume. HTPE propellant has a very excellent slow cook-off characteristic, but the addition of HMX increases the response extent of slow cook-off, and free volume has not obvious effect on the response extent of slow cook-off. The burning rate from $10.1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ to $32.2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ and the heating rate from $3.3 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ to $1 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ have scarcely effect on the response extent of slow cook-off characteristic of GAP propellant. The response extent of slow cook-off becomes more violent after increasing restriction condition for HTPE propellant and GAP propellant.

Key words: physical chemistry; propellant; slow cook-off; influence factor

CLC number: TJ55; V512

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.06.016

(6.86 MPa),对GAP推进剂慢速烤燃响应程度的影响较小;

(3) 升温速率从 $3.3 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 增加至 $1 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$,对GAP推进剂慢速烤燃响应程度的影响不显著;

(4) 增加夹板约束后,HTPE推进剂慢速烤燃的响应程度由燃烧转为爆燃,GAP推进剂慢速烤燃的响应程度由爆燃转为爆炸,说明约束条件对固体推进剂慢速烤燃响应程度的影响较为显著;

(5) 对于HTPE推进剂,自由体积对慢速烤燃的响应程度没有明显影响。

参考文献:

- [1] Cook-off Reaction Mechanisms and Related Experimental and Modeling Capabilities. Cook-off Hazards Working Group (CHWG), NIMIC, NATO HQ, B-1110 Brussels, Belgium
- [2] 陈朗,马欣,伍俊英,等. 炸药多点测温烤燃实验和数值模拟[C]//2010年含能材料与钝感弹药技术学术研讨会论文集,成都温江,483-491.
CHEN Lang, MA Xin, WU Junying, et al. Multi-point Temperature Measured Cook-off Test and Numerical Simulation for Explosive[C]//Proceedings of 2010 Insensitive Ammunition and Energetic Materials Technology Symposium, Chendu, 483-491.
- [3] Department of Defense Ammunition and Hazard Classification Procedures, Departments of the Army, the Navy, the Air Force and the Defense Logistics Agency, TB 700-2/NAVSEAINST 8020.8B TO II A-1-47 DLAR 8220.1, 5 January 1998
- [4] MIL-STD-2105C. Hazard Assessment Tests for Non-Nuclear Munitions. Department of Defense Test Method Standard, 14, July, 2003.
- [5] DGA/IPE INSTRUCTION N°260. French National Doctrine With Regards To Less Hazardous Munitions. Issue of July, 1993.