

doi: 10.7690/bgzdh.2013.11.016

# 一种含 FOX-7 的发射药燃烧性能研究

张阔, 罗亚军, 陈晓明, 袁忍让, 杨建兴, 张江波, 祝捷  
(西安近代化学研究所科研试制部, 西安 710065)

**摘要:** 为研究高能化合物 FOX-7 在发射药中的应用, 采用溶剂法制备 3 种 FOX-7 含量不同的发射药样品, 利用 DSC 对发射药进行分析, 以及密闭爆发器试验, 并针对 FOX7-3 发射药还进行高低常温试验比较。试验结果表明: 发射药的热分解与配方中 FOX7 含量成正比关系, 热分解温度随 FOX-7 含量增加而增高; 配方中含 FOX-7 较高的发射药 (FOX7-3), 能量较高 (火药力为 1 030.42 J/g), 燃速较快 (燃速系数为 0.051 6, 压力指数为 1.066), 且燃烧渐增性较好; FOX7-3 发射药在高、低、常温下燃烧性能稳定, 低温没有出现碎裂的现象。FOX-7 在发射药中能够显著提高发射药的火药力, 温度系数较稳定, 在一定的范围内, 通过调整 FOX-7 的含量能够获得火药力较高和燃烧渐增性较好的发射药。

**关键词:** FOX-7; 发射药; 热分解; 燃烧性能; 燃速

**中图分类号:** TJ410.6 **文献标志码:** A

## Study on Combustion Performance of Gun Propellant Containing FOX-7

Zhang Kuo, Luo Yajun, Chen Xiaoming, Yuan Renrang, Yang Jianxing, Zhang Jiangbo, Zhu Jie  
(Research & Development Department, Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Three gun propellant samples with different content of FOX-7 were prepared by solvent method to investigate the application of FOX-7 in gun propellant. The thermal behavior and combustion property of the propellants containing FOX-7 were studied by DSC and closed bomb test. The closed bomb test of propellant sample FOX7-3 was carried out at high, low, normal temperature respectively. The results show that thermal decomposition temperature of gun propellants containing FOX-7 is proportional to the content of FOX-7. The energy of sample FOX7-3 (with higher content of FOX-7) is higher than others. The burning rate of sample FOX7-3 is faster and burning progressivity is better than others. The burning behavior of sample FOX7-3 under high, low and normal temperature is stable. There is no disintegration phenomenon at low temperature. The specific energy of gun propellant can be increased by adding FOX-7. The temperature coefficient is also stable. By changing the content of FOX-7 in gun propellant, the specific energy of gun propellant can be increased and the burning progressivity can be improved.

**Key words:** FOX-7; propellant; thermal decomposition; burning behavior; burning rate

## 0 引言

随着现代战争的发展, 对武器系统的要求也越来越高。在追求高效毁伤的同时, 对弹药的安全性也更加重视。目前, 世界各国在含能材料制备方面的一个主要方向是寻找能量接近奥克托今 (HMX) 而安全性能接近 TATB 的新型钝感炸药。FOX-7 (1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯) 能量密度与 RDX (黑索今) 相当而同时兼具良好的耐热性和安全性, 并且它与多材料在工艺上能够相容, 是制备钝感火药的重要含能材料之一<sup>[1-3]</sup>。在最近 40 年中, 美国及其他国家曾发生一系列与弹药保养和运输、舰船操作、武器使用有关的弹药爆炸事故。同时, 在阿以战争和英阿马岛战争中, 多次发生因弹药殉爆而造成自身重大损失的事件; 因此, 很多国家纷纷开展了弹药易损性的研究, 低易损性 (LOVA) 弹药概念的出现正是这些研究工作的产物。发射药是

弹药主要组成部分之一, 所以, 发展低易损发射药是发展不敏感弹药的主要工作之一, 不敏感性发射药是未来发射药的主要发展方向。美国发展的第一代 LOVA 发射药应用于 40 mm 和 57 mm 火炮中, 代表产品为 XM39 和 M43, 它们的组成为 NC、CAB、RDX 和惰性或含能增塑剂<sup>[4]</sup>。采用高能添加剂研制出既满足低易损性, 又具有较高能量的发射药是现在研究的重点。

为了考察高能化合物 FOX-7 在发射药中的应用, 笔者制备了 3 种不同 FOX-7 含量的发射药, 对制备的样品进行 DSC 试验和密闭爆发器实验, 并进行了高、低、常温密闭爆发器试验对比研究<sup>[5-8]</sup>。

## 1 实验研究

### 1.1 样品制备

实验采用溶剂法制备了 3 种 FOX-7 含量不同的

收稿日期: 2013-06-12; 修回日期: 2013-07-22

基金项目: 火炸药支撑 (62201070203) 资助项目

作者简介: 张阔 (1982—), 男, 山东人, 工学学士, 高工, 从事发射药配方与工艺技术研究。

发射药样品。首先根据设计的配方按一定比例进行吸收,吸收药料经过压延驱水后进行造粒,制得吸收药片,将 FOX-7 和药片进行混合并充分胶化,形成胶化药料,胶化后的药料放入压伸缸中进行压伸,模具选用 18/1 模具,压伸出的药条表面光滑、质地均匀,样品外观如图 1 所示。



图 1 FOX-7 发射药样品外观

FOX-7 不同含量的发射药配方组成见表 1。

表 1 FOX-7 不同含量的发射药配方

发射药 配方编号	硝化棉 (13.0N%)/%	硝化三乙 二醇/%	其他/ %	FOX-7/ %
空白药	58.0	40	2.0	—
FOX7-1	49.5	34	1.5	15
FOX7-2	43.5	30	1.5	25
FOX7-3	37.5	26	1.5	35

## 1.2 实验条件

DSC 试验采用 DSC2910 型热分解试验仪器进行, N<sub>2</sub> 气氛, 流速 40 mL/min, 温度以 10 °C/min 速度从室温升至 600 °C。

密闭爆发器容积 107.47 mL, 实验环境温度 20 °C 左右, 传感器为 SyC-6213B, 量程为 2~300 MPa。点火药为 1g 2#硝化棉, 点火压力为 10 MPa, 装填密度为 0.2, 样品均为管状 18/1 发射药, 药长为 40 mm, 样品及点火药精确称量到 0.000 1 g, 进行了 50, -40, 20 °C 的高、低和常温试验<sup>[9]</sup>。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 FOX-7 发射药的 DSC 试验

单体 FOX-7 的 DSC 曲线没有吸热峰, 说明 FOX-7 材料本身没有熔点<sup>[10-12]</sup>, 这一点与 RDX 等含能材料不同, RDX 等含能材料分解前有吸热融解过程。FOX-7 起始分解温度约为 180 °C, 存在 2 个分解峰, 如图 2。分别为 194.23 °C 和 248 °C, 这与其分子结构有关, 不同的分子内基团, 其分解温度也不同。由面积积分分析, 194.23 °C 是主分解峰。

根据图 3 可以看到, 这 3 个配方的发射药 DSC 曲线基本相同, 3 号发射药热分解温度为 191.2 °C,

2 号发射药分解温度为 186.3 °C, 1 号发射药分解温度为 184.5 °C, 这与配方中加入的固体组分 FOX-7 单质炸药的含量成正比关系, 含量 35%、25%、15% 热分解温度依次降低, 说明了发射药热分解温度与 FOX-7 单体关系最大, 硝化棉及硝化三乙二醇对发射药热分解影响有限。

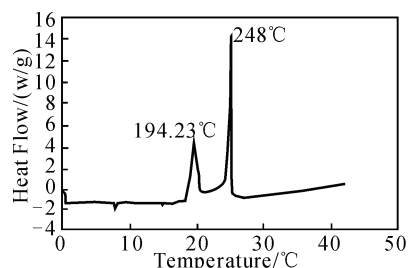


图 2 FOX-7 的 DSC 曲线

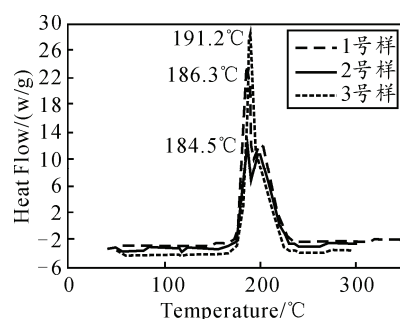


图 3 不同 FOX-7 含量的发射药常压 DSC 曲线

### 2.2 FOX-7 发射药密闭爆发器试验

对 3 种含 FOX-7 样品的密闭爆发器试验曲线进行数据处理, 利用最小二乘法对  $u-p$  曲线进行指数式拟合, 得到了不同发射药的燃速系数  $u_1$  和燃速压力指数  $n$ , 试验结果如表 2 所示。图 4 为 FOX-7 不同含量发射药的  $p-t$  曲线, 图 5 为 FOX-7 不同含量发射药的  $u-p$  曲线, 图 6 为 FOX-7 不同含量发射药的  $L-B$  曲线, 图 7 为不同温度 FOX7-3 发射药的  $u-p$  曲线。

表 2 FOX-7 不同含量发射药密闭爆发器试验结果

发射药配方	燃速系数 $u_1$ cm/(s·MPa)	压力指数 $n$	火药力 (实测) J/g	爆温 K
空白药	0.065 4	0.998 6	956.10	2 458
FOX7-1	0.060 2	1.017 6	997.25	2 648
FOX7-2	0.057 1	1.028 9	1 010.37	2 737
FOX7-3	0.051 6	1.066 0	1 030.42	2 827

由表 2 知, FOX7-1 的火药力为 997.25 J/g, 爆温为 2 648 K; FOX7-2 的火药力为 1 010.37 J/g, 爆温为 2 737 K; FOX7-3 的火药力为 1 030.42 J/g, 爆温为 2 827 K, 随着 FOX-7 含量的增加火药力和爆温均增加。由图 5 知, FOX7-3 的  $u-p$  曲线在 100 MPa 后明显高于 FOX7-2 和 FOX7-1 的  $u-p$  曲线, 说明

FOX-7 含量越多, 发射药的燃速越快。由图 4 知, FOX7-3 的  $p-t$  曲线低于 FOX7-2 和 FOX7-1 的  $p-t$  曲线, 说明 FOX7-3 的起始燃速较低, 图 6 的  $L-B$  曲线中, FOX7-3 的前半部分较 FOX7-2 和 FOX7-1 的曲线较低, 而后半部分基本相当, 说明 FOX7-3 发射药的燃烧渐增性较好。通过以上分析知, 配方中含 FOX-7 较高的发射药, 能量较高(火药力为 1030.42 J/g), 燃速较高(燃速系数为 0.0 516 cm/(s·MPa), 压力指数为 1.066), 且燃烧渐增性较高, 发射药配方中在适当范围内提高 FOX-7 的含量, 能够同时提高火药力和燃烧渐增性。

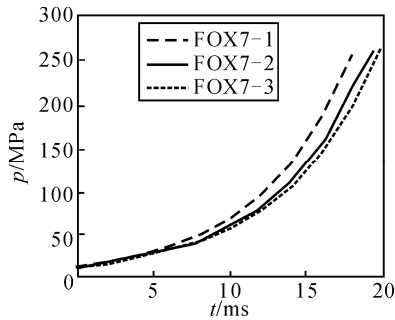


图 4 FOX-7 不同含量发射药的  $p-t$  曲线

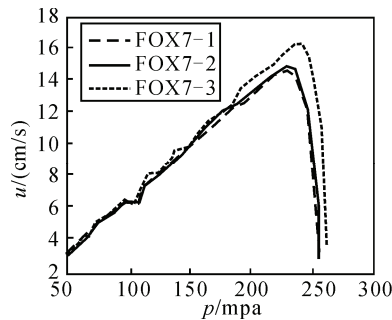


图 5 FOX-7 不同含量发射药的  $u-p$  曲线

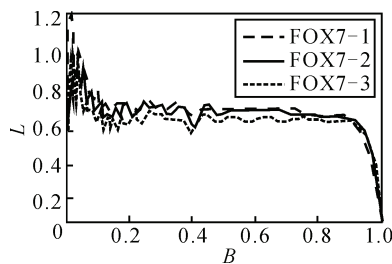


图 6 FOX-7 不同含量发射药的  $L-B$  曲线

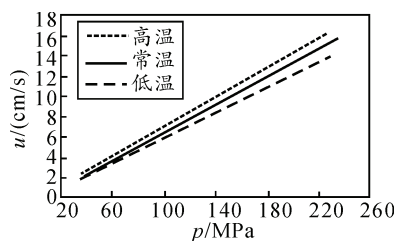


图 7 不同温度 FOX7-3 发射药的  $u-p$  曲线

由图 7 知, FOX7-3 发射药的高温(50 °C)、低温(-40 °C)、常温(20 °C)的  $u-p$  曲线, 呈现高温较高低温较低的趋势, 且曲线平直, 表明燃烧稳定, 低温没有出现碎裂的现象。通过计算知, 该发射药温度系数约为 4%, 处于正常范围之内。

### 3 结论

1) FOX-7 系列发射药在高压密闭爆发器中的燃烧性能稳定, 其燃速与压力( $u-p$ )曲线光滑, 没有出现异常的转折。

2) FOX-7 发射药热分解温度与发射药中 FOX-7 单质炸药含量成正比关系, 随 FOX-7 含量增加而增加。

3) 配方中 FOX-7 含量较高的发射药, 能量较高, 燃速较快, 且燃烧渐增性较好, 在适当范围内调整 FOX-7 的含量, 能够使得发射药的火药力和燃烧渐增性同时得以提高。

4) FOX-7 发射药低温燃烧较稳定, 燃速温度系数约为 4%, 与双基发射药基本相同。

### 参考文献:

- [1] Dan C Sorescu, Jerry A Boatz, Donald L. Thompson. Classical and quantum-mechanical studies of crystalline FOX-7(1, 1-D iamino-2, 2-d initroethylen e)[J]. JPhys Chem, A 2001, 105: 5010-5021.
- [2] 蔡华强, 舒远杰, 郁为飞, 等. FOX-7 的合成和反应机理研究[J]. 化学学报, 2004, 62(3): 295-301.
- [3] 祝明水, 龙新平, 蒋小华. 不同粒径 RDX 的燃烧特性研究[J]. 含能材料, 2004, 12(1): 40-42.
- [4] 王振宇. 国外近年研制的新型不敏感单质炸药[J]. 含能材料, 2003, 11(4): 227-230.
- [5] 徐皖育, 何卫东, 张颖. 含 RDX 高能太根发射药的热分解性能[J]. 火炸药学报, 2006, 29(2): 63-65.
- [6] 黄振亚, 王泽山, 何卫东, 等. 新型高能高强度 JMZ 发射药的燃烧特性[J]. 火炸药学报, 2005, 28(4): 61-63.
- [7] 赵晓梅, 张玉成, 严文荣, 等. ETPE 发射药的热分解特性与燃烧机理[J]. 火炸药学报, 2010, 33(3): 68-71.
- [8] 张邹邹, 蒋树君. 低压下硝酸发射药燃烧性能研究[J]. 含能材料, 2007, 15(2): 125-127.
- [9] 芮筱亭, 王燕, 王国平. 弹药发射安全性试验方法进展[J]. 兵工自动化, 2012, 31(12): 81-84.
- [10] 周诚, 黄新萍, 周彦水, 等. FOX-7 的晶体结构和热分解特性[J]. 火炸药学报, 2007, 30(1): 60-63.
- [11] 付秋菠, 舒远杰, 黄奕刚, 等. FOX-7 的热分解机理[J]. 固体火箭技术, 2010, 11(3): 77-79.
- [12] 金朋刚, 常海, 陈智群, 等. FOX-7 热分解动力学和机理研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 6(6): 528-531.