

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.01.008

飞片雷管激发药的燃烧性能^{*}

王俊杰 黄寅生 葛梦珠 张冬冬
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] PETN、RDX 和造粒 RDX 可作为飞片雷管激发药。为了研究这 3 种激发药的燃烧性能,制备了不同配比的造粒 RDX,并采用 50 mL 密闭爆发器测试了 3 种激发药定容条件下的燃烧速度和峰值压力。结果表明:相同点火条件下,PETN 的燃烧速度大于 RDX;相同质量的 RDX 燃烧产生的峰值压力大于 PETN;随着 KClO₄ 质量分数的增加,造粒 RDX 的燃烧速度和峰值压力均呈现先增大后减小的趋势;当 KClO₄ 质量分数为 30%~40% 时,造粒 RDX 燃烧性能最佳。

[关键词] 飞片雷管;激发药;密闭爆发器

[分类号] TQ560.7;TJ45

Combustion Properties of Excitation Powder in Flying Plate Detonator

WANG Junjie, HUANG Yinsheng, GE Mengzhu, ZHANG Dongdong

School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] To study the combustion performance of excitation powders, including PETN, RDX and granulated RDX prepared with different formulations, closed bomb was used to measure burning rates and peak pressures of powders under constant volume condition. Results indicate that under the identical ignition, the combustion velocity of PETN is larger than that of RDX while RDX generates a larger peak pressure than the same amount of PETN can do. The velocity and pressure of granulated RDX initially increase and then decrease with the increased amount of KClO₄. The granulated RDX works best at a KClO₄ mass fraction range from 30% to 40%.

[KEYWORDS] flying plate detonator; excitation powder; closed bomb

引言

飞片雷管作为无起爆药雷管的典型代表,采用激发装置代替起爆药,具有安全性高、无污染的优点^[1-2]。飞片雷管主要由点火元件、激发装置(延期元件、激发药、内帽)和底部装药 3 部分构成。激发药在点火元件或延期元件的作用下发生燃烧反应,产生的高温高压气体剪切驱动内帽底部形成飞片,高速冲击起爆底部装药,实现雷管能量输出。

激发药的燃烧性能对飞片的速度有着重要影响,它决定了飞片的起爆能力,是雷管可靠作用的关键因素。关于激发药的研究报道较少,目前使用的激发药要主要有点火药、低密度的单质炸药或单质炸药和氧化剂的造粒产物等。Jacobson 使用低密度

的 HNAB 配以 TiH_{0.18}/KClO₄ 点火药共同作为激发药^[3];国外 SE-1 型和 ER-322 型飞片雷管使用的激发药为 PETN 和 HMX^[4];程立国使用 Zr/KClO₄ (质量比 40:60)剪切驱动飞片^[5];王慧娥等使用 RDX 来加速飞片起爆底部装药^[6];刘明全等采用在膨胀珍珠岩、PETN、KClO₄ 混合物中添加黏合剂的方法发明了一种飞片式无起爆药电雷管激发药^[7];马宏昊等对 PETN 和造粒 RDX 作为激发药的性能进行了研究,试验表明,PETN 适用于无起爆药瞬发雷管,造粒 RDX 在延期雷管中性能优异^[2,8]。

本文中,采用密闭爆发器研究激发药在雷管内部的定容燃烧过程,测试 PETN、RDX 和造粒 RDX 3 种激发药燃烧的 $p-t$ (压力-时间) 曲线,对比不同激发药的燃烧速度和峰值压力,为激发药的选择作出一定的参考。

^{*} 收稿日期:2016-07-10

作者简介:王俊杰(1991-),男,硕士研究生,主要从事无起爆药雷管的研究。E-mail:1552264387@qq.com

通信作者:黄寅生(1962-),男,教授,博导,主要从事军事化学与烟火技术研究。E-mail:huangyinsheng@sina.com

1 试验部分

1.1 样品制备

采用 PETN、RDX 和造粒 RDX 作为激发药。造粒 RDX 的制备过程如下:将 RDX 和 KClO_4 加入质量分数为 4% 的虫胶乙醇溶液,混合搅拌均匀,待溶液呈黏稠状后,用 60 目筛子进行湿混造粒并烘干。具体配比如表 1 所示。

表 1 造粒 RDX 配方(质量分数)
Tab. 1 Formulation of the granulated RDX
(mass fraction)

序号	RDX	KClO_4	虫胶
1 [#]	96	0	4
2 [#]	86	10	4
3 [#]	76	20	4
4 [#]	66	30	4
5 [#]	56	40	4
6 [#]	0	96	4

1.2 试验条件

试验采用容积为 50 mL 的密闭爆发器。点火方式采用点火头直接点燃松装激发药,激发药燃烧后产生的气体迅速膨胀,造成密闭空间内压力升高,产生的压力信号通过压电传感器和电荷放大器处理后被数据采集仪接收,得到 p - t 曲线。试验采用的样品质量均为 200 mg。

2 结果与讨论

2.1 PETN 和 RDX 燃烧性能研究

PETN 和 RDX 的燃烧 p - t 曲线如图 1 所示。

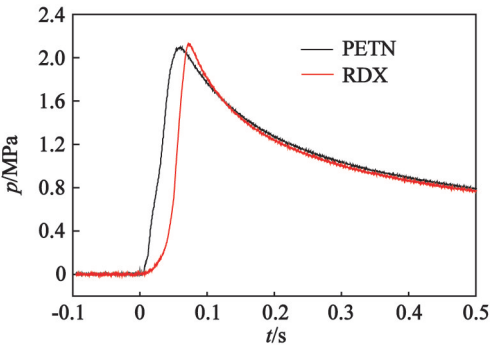


图 1 密闭爆发器中 PETN 和 RDX 燃烧的 p - t 曲线
Fig. 1 p - t curves of PETN and RDX combusting
in closed bomb

由图 1 可以看出,在燃烧初始阶段,PETN 的曲线的斜率大于 RDX,说明 PETN 初始燃烧速度快,压力上升速度较快;进入稳定燃烧阶段(曲线中间部分)以后,两者燃烧速度比较接近。PETN 和 RDX 燃烧时间分别为 52.8 ms 和 68.4 ms,最大峰值压力分别是 2.186 MPa 和 2.223 MPa。

造成 PETN 和 RDX 燃烧时间差异的主要原因在于两者的化学反应速率不同。由文献[9]可知,炸药化学反应速率如式(1)所示。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = A e^{-\frac{E}{RT}} (1 - \varepsilon)^m. \tag{1}$$

式中: ε 表示炸药的反应百分数; $\partial \varepsilon / \partial t$ 表示炸药化学反应速率; A 表示指前因子; R 为气体常数; E 表示炸药的活化能; T 表示温度; m 为反应级数。

PETN 和 RDX 的反应动力学参数如表 2 所示^[10-11]。

表 2 PETN 和 RDX 的反应动力学参数
Tab. 2 Reaction kinetics parameters
of PETN and RDX

炸药	A/s^{-1}	$E/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	m
PETN	$10^{15.298\ 8}$	160.5×10^3	0.951
RDX	$10^{22.000\ 0}$	235.0×10^3	0.600

将表 2 中数据代入式(1)中,得到 PETN 和 RDX 的燃烧速度:

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right)_{\text{PETN}} = 10^{15.298\ 8} e^{-\frac{160.5 \times 10^3}{8.314 \times T}} (1 - \varepsilon)^{0.951}; \tag{2}$$

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right)_{\text{RDX}} = 10^{22.000\ 0} e^{-\frac{235.0 \times 10^3}{8.314 \times T}} (1 - \varepsilon)^{0.600}. \tag{3}$$

式(2)除以式(3),得

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right)_{\text{PETN}} / \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right)_{\text{RDX}} = 10^{6.7012} e^{\frac{8.96 \times 10^3}{T}} (1 - \varepsilon)^{0.351}. \tag{4}$$

因为 $T > 273.15\ \text{K}$,所以

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right)_{\text{PETN}} / \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right)_{\text{RDX}} > 3.52 \times 10^7 \times (1 - \varepsilon)^{0.407}. \tag{5}$$

令式(5)右项 ≥ 1 ,则

$$1 - \varepsilon \geq 2.87 \times 10^{-19}. \tag{6}$$

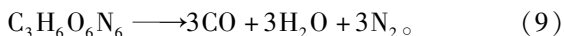
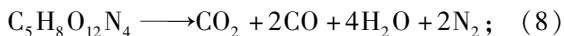
不等式(6)右项接近无穷小,而 $0 \leq \varepsilon \leq 1$,所以

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right)_{\text{PETN}} / \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right)_{\text{RDX}} > 1. \tag{7}$$

由式(7)可以看出,PETN 的化学反应速率大于 RDX。因此,在相同的条件下,PETN 的燃烧时间小于 RDX。

由吕-查德里方法(B-W 法)可知,PETN 和 RDX

爆炸反应方程式如下所示^[12]：



由式(8)和式(9)可知,单位质量的 PETN 和 RDX 的气体产物的物质的量分别是 0.035 mol/g 和 0.041 mol/g。由于密闭爆发器空间体积固定,根据理想气体的状态方程可知,燃烧产物的峰值压力主要取决于气体产物的物质的量。由于试验使用的药剂用量相同,所以密闭爆发器中 RDX 的气体燃烧产物物质的量较多,产生的峰值压力较大。

2.2 氧化剂对 RDX 燃烧性能的影响

对不同配比的造粒 RDX 进行密闭爆发器试验,结果如图 2 所示。

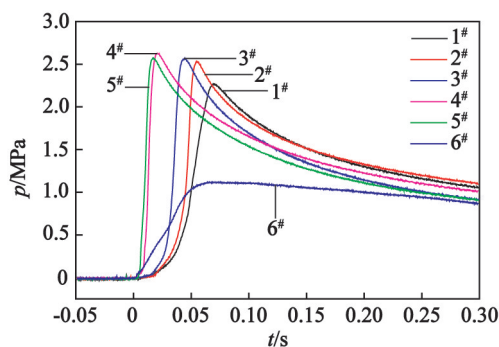


图 2 密闭爆发器中造粒 RDX 燃烧的 $p-t$ 曲线

Fig.2 $p-t$ curves of granulated RDX combusting in closed bomb

由图 2 可以看出,与 RDX 相比, KClO_4 燃烧的 $p-t$ 曲线斜率明显较大(曲线斜率 $6^\# > 1^\#$),表明 KClO_4 初始燃烧速度明显大于 RDX;随着氧化剂含量的增加,峰值压力均呈现先增加后减小的趋势,燃烧时间则呈现相反趋势。

随着氧化剂含量的增加,炸药颗粒逐渐接近零氧平衡。炸药中的碳和氢完全被氧化成 CO_2 和 H_2O ,燃烧放出更多的热量。气体产物受热膨胀,密闭爆发器内压力增加。氧化剂含量进一步增加,炸药颗粒达到正氧平衡,燃烧将会产生富余的氧气。燃烧放出的热量是 RDX 和 KClO_4 的共同作用,由于 RDX 的燃烧热较高,所以添加过多的氧化剂将会使炸药燃烧放出的热量降低,气体产物膨胀程度减小,压力降低。

密闭条件下,炸药的燃速与压力密切相关。 KClO_4 的燃烧速度明显快于 RDX,所以炸药颗粒中的 KClO_4 首先被点燃,造成密室内压力升高。由图 2 可以看出,燃烧初始阶段,造粒 RDX 的压力上升速率明显大于纯 RDX。因此,添加 KClO_4 能够有效

增加炸药颗粒的燃烧速度,燃烧时间降低(如燃烧时间 $2^\# < 1^\#$)。进入稳定燃烧阶段以后,炸药的燃烧速度取决于 KClO_4 和 RDX 气体产物压力的共同作用,由于单位质量的 KClO_4 气体产物的物质的量 (0.021 mol/g)^[13] 明显低于 RDX (0.041 mol/g),所以随着 KClO_4 含量的进一步增加,密室内的压力将会降低,进一步增加 KClO_4 的含量将会使炸药颗粒的燃烧速度降低,燃烧时间增加。

3 结论

通过密闭爆发器研究不同激发药的燃烧时间和峰值压力,得出以下结论:

1) 相同的点火条件下, PETN 和 RDX 的燃烧性能相差不大; PETN 的燃烧速度略高于 RDX,但是相同质量的 RDX 燃烧气体产物的压力略大于 PETN。

2) KClO_4 的燃烧速度大于 RDX,添加 KClO_4 能够明显增加 RDX 的燃烧速度和峰值压力。随着 KClO_4 含量的增加,造粒 RDX 的燃烧时间呈现先减小后增大的趋势,峰值压力呈现相反的趋势。当 KClO_4 质量分数为 30%~40% 时,造粒 RDX 燃烧性能较好。

参 考 文 献

- [1] 陈月畅,沈兆武,杜建国. 飞片式无起爆药雷管的结构和工作原理[J]. 爆破,2013,30(2):162-166.
CHEN Y C, SHEN Z W, DU J G. Structure and working principal of flying plate detonator [J]. Blasting, 2013, 30(2):162-166.
- [2] 马宏昊. 高安全雷管机理与应用的研究[D]. 合肥: 中国科技大学,2008.
MA H H. Research on the principle and application of the high-safe detonator [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008.
- [3] JACOBSON A K. A low-energy flying plate detonator: SAND 81-0487C[R]. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratory, 1981.
- [4] 陈尚令. 全炸药飞片雷管[J]. 现代兵器,1985(10):55-56.
- [5] 程立国. 预制飞片式电脉冲激发雷管的结构研究[D]. 南京: 南京理工大学,2006.
- [6] 王惠娥,胡企强,胡学先,等. 装药条件对飞片雷管爆轰性能的影响[J]. 火工品,2005(4):13-16.

WANG H E, HU Q Q, HU X X, et al. Influence of

(下转第 45 页)