

文章编号: 1006-9941(2008)02-0204-03

## B/KNO<sub>3</sub> 药柱燃烧速度的初步研究

祝明水, 何 碧, 蒋 明, 朱和平

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 利用密闭爆发器测试系统对 B/KNO<sub>3</sub> 药柱的燃烧速度进行了研究, 结果表明: B/KNO<sub>3</sub> 药柱的线燃烧速度主要受药柱密度的影响, 密度较小, 线燃烧速度较快; 药柱尺寸主要影响产物生成速率, 并最终影响 B/KNO<sub>3</sub> 药柱燃烧的压力-时间曲线。另外, 研究还发现本文中 B/KNO<sub>3</sub> 的线燃烧速度并不服从简单的指数燃烧定律, 宜采用分段函数的形式进行描述。压力低于 7 MPa 时, 线燃烧速度随压力线性增加; 而压力为 7~50 MPa 时, 线燃烧速度基本上不随压力变化。

**关键词:** 应用物理学; 密闭爆发器; B/KNO<sub>3</sub>; 线燃烧速度; 产物生成速率

**中图分类号:** TJ55; O59

**文献标识码:** A

### 1 引 言

B/KNO<sub>3</sub> 是美军标 MIL-STD-1901A 规定的火箭发动机直列式点火系统用典型点火药, 具有热值高、点火能力强以及安全钝感等特点<sup>[1]</sup>, 其优异的性能, 得到了国内研究机构的重视, 并应用于某些火工品中<sup>[2]</sup>。B/KNO<sub>3</sub> 燃烧速度特性对这些火工品的作用快慢有显著的影响, 但目前为止国内外关于这方面的研究还较少。蒋小华等<sup>[3]</sup>曾采用光纤测速法对装在燃烧管中的 B/KNO<sub>3</sub> 药粒进行了速度测试, 但这样测试的速度仅是一种表观平均速度, 不能建立瞬时燃烧速度随燃烧过程(燃烧压力)变化的关系。密闭爆发器测试燃速基于微分压力法进行, 能够比较准确地捕获药粒燃烧速度随压力的变化。因此, 本文采用密闭爆发器测试系统对影响 B/KNO<sub>3</sub> 燃烧快慢的因素以及 B/KNO<sub>3</sub> 的燃烧速度的变化规律进行研究。

### 2 试验研究

#### 2.1 试验原理

常温常压下的观测表明, B/KNO<sub>3</sub> 的燃烧产物中固体含量非常大(本文实测高达 85% 以上)。但在燃烧过程的高温高压状态下, B/KNO<sub>3</sub> 的燃烧产物可能仍然大部分为气体。无论如何, 只要有气体产物存在, 在压力低于 600 MPa 的情况, 都可以用余容形式的范德华状态方程<sup>[4]</sup>描述这些气体产物。假设燃烧过程中气、固产物的压强和温度平衡, 气体产物占燃烧产物

的质量比为  $k$ , 则燃烧系统的瞬时压力可以表示为:

$$p = \frac{\frac{kW\phi RT}{M}}{V - \frac{(1-\phi)W}{\gamma} - \frac{(1-k)W\phi}{\rho_s} - kW\phi a_g} = \frac{\left(\frac{k}{M}RT\right)\phi\Delta}{1 - \frac{\Delta}{\gamma} - \phi\Delta\left(\frac{(1-k)}{\rho_s} + ka_g\right) - \frac{1}{\gamma}} \quad (1)$$

式中,  $p$  为燃烧系统的瞬时压力,  $W$  为装药量,  $V$  为燃烧系统的体积,  $M$  为气体产物的平均分子量,  $\rho_s$  为固体产物的平均理论密度,  $a_g$  为气体产物的平均余容,  $R$  为常用气体常数,  $T$  为气体产物的温度,  $\Delta = \frac{W}{V}$  为装填密度,  $\gamma$  为装药颗粒的密度,  $\phi$  为装药燃去的相对体积。

令  $f_{\text{mix}} = k \frac{R}{M} T$ ,  $a_{\text{mix}} = \frac{(1-k)}{\rho_s} + ka_g$ , 则由(1)式可以得到余容形式完全一样的状态方程, 即

$$p = \frac{f_{\text{mix}}\phi\Delta}{\left(1 - \frac{\Delta}{\gamma} - (a_{\text{mix}} - \frac{1}{\gamma})\phi\Delta\right)} \quad (2)$$

因此, B/KNO<sub>3</sub> 的燃烧产物也就具有了密闭爆发器微分压力法测试燃烧速度的基础, 采用密闭爆发器对 B/KNO<sub>3</sub> 进行燃烧速度测试合理可行。

#### 2.2 试验装置及试验样品

B/KNO<sub>3</sub> 燃速测试的试验装置如图 1 所示。试验时, 绑在点火头两接线电极上的点火药包被一定时长的恒流点燃, 其燃烧产生的高温气体和固体产物进而点燃密闭空间(本体)内的 B/KNO<sub>3</sub> 药柱。B/KNO<sub>3</sub> 在密闭空间内燃烧, 气体产物会逐渐增加, 因而压力也会不断上升。根据其压力变化的规律(即示波器记录的

收稿日期: 2007-08-31; 修回日期: 2007-11-30

作者简介: 祝明水(1977-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事火工品、燃烧、爆炸等研究。e-mail: zhumsil2@163.com

压力时间曲线)和 B/KNO<sub>3</sub> 药柱的几何尺寸,通过气体产物的范德华状态方程以及几何燃烧定律,得到 B/KNO<sub>3</sub> 药柱燃速随压力的变化规律。

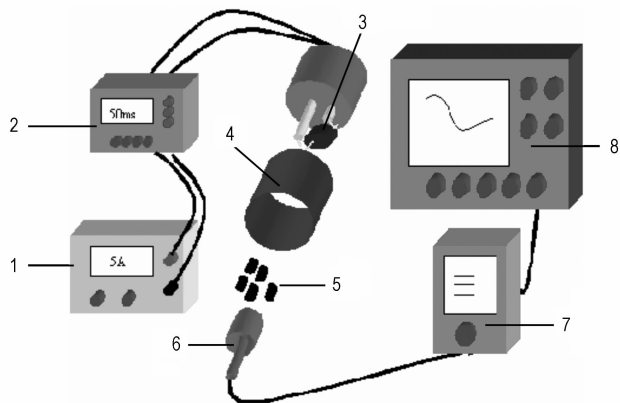


图 1 B/KNO<sub>3</sub> 密闭爆发器测压实验装置示意图

1—电源, 2—定时器, 3—点火药包, 4—本体, 5—药柱, 6—传感器, 7—放大器, 8—示波器

Fig. 1 Schematic set-up for B/KNO<sub>3</sub> closed bomb test

1—current source, 2—timer, 3—ignition charge, 4—volume, 5—pellet, 6—sensor, 7—enlarger, 8—oscilloscope

为了便于计算燃速系数, B/KNO<sub>3</sub> 被压制成规则的圆柱形。每发密闭爆发器(容积为 50 mL)试验使用的药柱数量多,药柱的密度、尺寸等参数有一定的分布,为简化计算,实际取这些药柱密度和几何尺寸的平均值。本研究一共准备了 4 发试验,装填密度均约为 0.2 g · cm<sup>-3</sup>,每发试验的相关参数见表 1。

表 1 试验样品相关参数

Table 1 Characteristic parameters of tested samples

No.	average density /g · cm <sup>-3</sup>	average diameter /mm	average height /mm	total charge weight /g	ignition charge weight /g	$\lambda$	$\chi$
1	1.750	10.062	9.99	9.7347	0.4186	-0.5988	2.4927
2	1.751	10.061	9.99	9.7349	0.4185	-0.5989	2.4929
3	1.770	6.300	6.006	9.9411	0.4188	-0.5922	2.4522
4	1.768	6.300	6.015	9.9349	0.4188	-0.5925	2.4537

Note:  $\lambda$  and  $\chi$  are charge's shape coefficients used in function  $\phi = \chi Z(1 + \lambda Z)$ .

### 3 结果及分析

试验测得的原始曲线为压力-时间曲线,如图 2 所示。通过计算得到不同压力对应的线燃速曲线,如图 3 所示。由图 2 和图 3 可见,1#与 2#药柱、3#与 4#药柱的压力-时间曲线和压力-线燃烧速度曲线非常相近,表明试验结果具有较好的重复性,能够比较准确地表征 B/KNO<sub>3</sub> 药柱的燃烧规律。

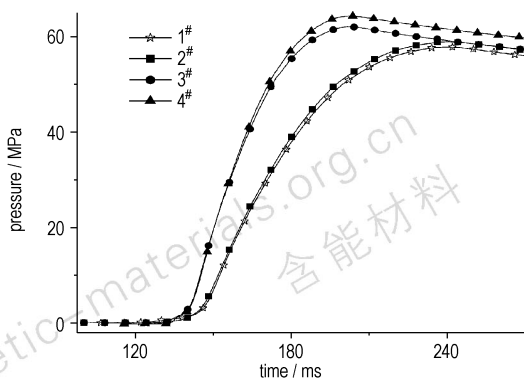


图 2 B/KNO<sub>3</sub> 药柱燃烧输出压力的时程曲线

Fig. 2 Curves of pressure vs time of B/KNO<sub>3</sub> during burning

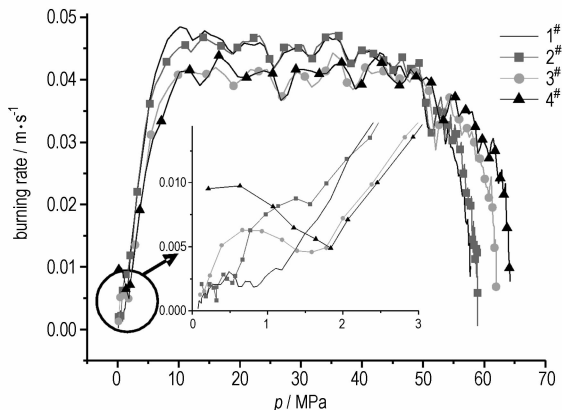


图 3 B/KNO<sub>3</sub> 药柱线燃烧速度随压力变化的计算结果

Fig. 3 Curves of pressure vs linear burning rate of B/KNO<sub>3</sub>

#### 3.1 药柱参数对燃烧速度的影响

从图 3 可见,1#、2#药柱的线燃烧速度比 3#、4#药柱快一些。由于线燃烧速度是火焰沿燃面法线的传播速度,不受尺寸影响。因此,可以认为这种现象是由两种 B/KNO<sub>3</sub> 药柱的密度差异引起的:密度较小,线燃烧速度较快。根据传热定律——密度较小、温升较快,也能证明该结论。该结果与文献[3]结果一致。但由图 2 可见,3#、4#药柱装药比 1#、2#药柱装药燃烧要快。这是由于产物生成速率不完全由线燃烧速度决定,除线燃烧速度外,它还与药柱的密度和总燃烧面积成正比。在相同装填密度的情况下,3#、4#药柱不但密度较大,而且装药的总燃烧面积比 1#、2#药柱装药要大得多,因此其产物生成速率快得多,表现燃烧也快一些。

#### 3.2 B/KNO<sub>3</sub> 的燃烧速度函数

由图 3 可见, B/KNO<sub>3</sub> 药柱在燃烧初期压力低于 2.8 MPa 时,药柱的线燃速随压强的变化呈现较强的随机性,这可能是由于点火阶段药柱的燃烧与几何燃烧存在差距,因而由几何燃烧定律计算出来的线燃速,不能

反映真实的燃烧情况;随着燃烧的进行,药柱比较符合几何燃烧定律,计算的线燃速基本能够反映真实的燃烧情况,药柱线燃速随压力变化的规律性显现出来;但当压力增加至 50 MPa 左右时,由于药柱已大部分燃烧,可能产生破碎等情况,药柱的形状不再为规整的圆柱形,由圆柱参数计算得到的线燃速也不能反映真实的燃烧情况。因此,能够反映实际燃烧情况的仅为压力 2.8 ~ 50 MPa 之间的线燃速。但即使在这个阶段,也很难用单一的指数燃烧规律来描述。在压力为 2.8 ~ 7 MPa 之间,线燃速随压力的变化基本上呈线性规律;在压力为 7 ~ 50 MPa 之间,可能由于燃烧生成的固体产物较多而完全包覆了未燃颗粒的表面,药粒的燃烧主要由固体产物提供的能量进行,受气体产物的影响比较小,因而线燃烧速度基本上不随压力变化,呈现平台燃烧现象。黄寅生等<sup>[5]</sup>在研究  $\text{NaN}_3$  的燃烧速度特性时,也得到了相似的结果。因此,有理由认为上述现象是  $\text{B/KNO}_3$  这类固态燃烧产物较多的物质所共有的特性。基于这种情况,采用分段线性函数来描述这种现象。

$$r = \begin{cases} r_0 p (2.8 \text{ MPa} \leq p \leq 7 \text{ MPa}) \\ 7r_0 (50 \text{ MPa} \geq p > 7 \text{ MPa}) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $r_0$  为与药柱性质相关的燃速系数。

表 2 是利用(3)式拟合得到的  $\text{B/KNO}_3$  药柱的线燃速系数。由表 2 可见,性质相同的药柱线燃速系数相近(1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>),表明结果的重复性较好,能够反映比较真实的情况。结合表 1 还可以得到药柱密度较小、燃速系数  $r_0$  较大的结论。

表 2  $\text{B/KNO}_3$  药柱的线燃速系数

Table 2 Linear burning rate constant of  $\text{B/KNO}_3$

No.	1	2	3	4
$r_0/\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$	0.006848	0.006787	0.005389	0.005271

## Investigation on Burning Rate of $\text{B/KNO}_3$ Pellet in Closed Bomb Test

ZHU Ming-shui, HE Bi, JIANG Ming, ZHU He-ping

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The closed bomb test system was used to investigate the burning rate of  $\text{B/KNO}_3$ . Results show that the linear burning rate increases as the pellet density decreases, and the product formation rate of  $\text{B/KNO}_3$ , which affects pressure-time curves, is significantly affected by the pellet size. Additionally, the linear burning rate  $\text{B/KNO}_3$  is not consistent with single exponent equation, and can be expressed with step-wise function. Below 7 MPa, the linear burning rate is proportional to pressure. But as pressure higher than 7 MPa and lower than 50 MPa, the linear burning rate does not change with pressure.

**Key words:** applied physics; closed bomb;  $\text{B/KNO}_3$ ; linear burning rate; product formation rate

## 4 结 论

$\text{B/KNO}_3$  密闭爆发器燃烧的结果表明,本试验所用  $\text{B/KNO}_3$  的线燃烧速度随压力的变化不服从简单指数燃烧定律,而可以近似为压力指数为 1 和压力指数为 0(平台燃烧)的两段式燃烧规律。另外,  $\text{B/KNO}_3$  的线燃烧速度主要受药柱密度等性质的影响,线燃速系数的拟合结果也说明了这一点;但药柱尺寸对  $\text{B/KNO}_3$  产物生成速率有显著影响,在宏观上表现为相同装填密度下尺寸较小的药柱,燃烧压力上升到最大值的时间较短。

### 参考文献:

- [1] MIL-STD-1901A. Munition rocket and missile motor ignition system design: safety criteria[S].
- [2] 祝明水,龙新平,蒋小华,等.  $\text{B/KNO}_3$  燃烧性能参数计算[J]. 兵工学报, 2005: 320-322.  
ZHU Ming-shui, LONG Xin-ping, JIANG Xiao-hua, et al. The calculation of combustion characteristics of  $\text{B/KNO}_3$ [J]. *Acta Armamentarii*, 2005: 320-322.
- [3] 蒋小华,何碧,陈朗. 硼酸钾点火药燃烧特性研究[C]//2002 年火炸药技术及钝感弹药学术研讨会文集. 珠海,2002.  
JIANG Xiao-hua, HE Bi, CHEN Lang. Study on burning characteristics of boron potassium [C] // Proceedings of Symposium on Propellants, Explosives and Insensitive Munitions. Zhuhai, 2002.
- [4] 鲍庭玉,邱文坚. 内弹道学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1995.
- [5] 黄寅生,沈瑞琪,戴实之,等. 汽车防撞气体发生剂燃烧示性参数的实验研究[J]. 兵工学报(火化工分册),1996(2): 36-38.  
HUANG Ying-sheng, SHEN Rui-qi, DAI Shi-zhi, et al. Experimental study on combustion characteristic parameters of gas-generating agent for automobile safety air-bag system [J]. *Acta Armamentarii (Pyrotechnics)*, 1996(2): 36-38.