

文章编号: 1006-9941(2010)03-0335-04

## 微细圆管中 B/KNO<sub>3</sub> 燃烧特性分析

刘建, 沈瑞琪, 叶迎华, 胡艳

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了解微细圆管中点火药的燃烧特性, 采用高速摄影技术对微细圆管中 B/KNO<sub>3</sub> 的燃烧进行实验研究, 结果表明: 管壁热损失和管道阻力是影响微细圆管中 B/KNO<sub>3</sub> 燃烧稳定性的主要因素。圆管内径越小, 管壁热损失和管道阻力越大, 燃烧越不稳定。B/KNO<sub>3</sub> 在内径 1.0~2.0 mm 石英管中稳定燃烧、燃速变化微弱。燃烧室压强为 0.1~4.0 MPa 时, B/KNO<sub>3</sub> 燃速随压强增加, 但并不符合燃速指数规律。当石英管内径减至 0.5 mm 时, 燃烧不稳定, 燃速随时间延长而变大; 圆管内径进一步减小, 产生击穿现象导致火焰熄灭。研究还表明在一定壁厚范围内, 燃速反比于壁厚。

**关键词:** 军事化学; 微细圆管; B/KNO<sub>3</sub>; 燃烧特性; 热损失; 管道阻力

**中图分类号:** TJ55; O69

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.03.021

### 1 引言

B/KNO<sub>3</sub> 是一种应用广泛的点火药, 具有热值高、点火能力强以及安全钝感等特点, 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<sup>[1]</sup>, 国内外对其常规尺度下的点火特性和燃烧性能均进行了研究<sup>[1-3]</sup>, 但对于微细圆管中 B/KNO<sub>3</sub> 燃烧特性的研究较少。在微细圆管中, 随着表面积体积比增大, 热损失增加; 同时必须考虑很多在常规尺度下被忽略的微通道效应<sup>[4-8]</sup> 如表面力、粘性力等, 这些因素将引起燃烧特性和稳定性的变化。本研究拟采用高速摄影技术对 B/KNO<sub>3</sub> 点火药在微细圆管中的燃烧特性进行探讨, 获得微细圆管中 B/KNO<sub>3</sub> 点火药燃烧的特性、规律, 以期对微细圆管中点火药的燃烧特性有更进一步的认识。

### 2 B/KNO<sub>3</sub> 点火药的燃烧特性实验

实验采用 200 目筛下, 质量配比为 40:60 的 B/KNO<sub>3</sub> 点火药(添加 10% 的酚醛树脂粘合剂), 微细圆管材质为耐高温透明石英玻璃管。通过实验分析燃

速随管径、压强、厚度的变化情况。测试原理如图 1 所示。将装填 B/KNO<sub>3</sub> 的微细圆管置于充有一定压强氮气的透明密闭腔, 采用波长为 1.06 μm 的 Nd:YAG 脉冲激光器点火, 高速摄影仪记录燃烧过程, 拍摄频率为 500 fps。图 2 是高速摄影记录下的内径为 1.2 mm 和 0.5 mm 石英管中 B/KNO<sub>3</sub> 燃烧实时状态照片, 由图可见通过高速摄影可以获取燃烧过程的实时状态, 连续记录 B/KNO<sub>3</sub> 燃烧端面位置的数字图像, 通过测定每两幅图像燃烧端面之间的间距, 可以确定该时间段的平均燃速; 分析连续的数字图像可以获得燃烧过程中的连续燃速数据。同时通过图像有利于分析火焰形貌及整个过程的变化和影响, 避免异常燃烧现象等随机过程对燃速测量系统不确定度的影响。

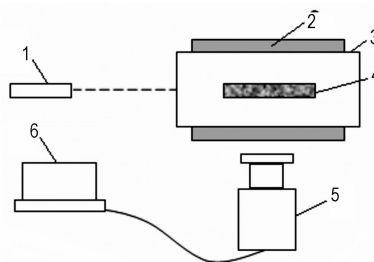


图 1 高速摄影法测试原理图

1—激光器, 2—透明玻璃窗, 3—透明密闭腔, 4—装填 B/KNO<sub>3</sub> 的微细圆管, 5—高速摄影仪, 6—计算机

Fig. 1 Schematic of high-speed photography tests

1—laser, 2—transparent window, 3—transparent closed chamber, 4—microscale tube filled with B/KNO<sub>3</sub>, 5—high-speed camera, 6—computer

收稿日期: 2009-07-10; 修回日期: 2009-09-22

基金项目: 国家 973 项目资助

作者简介: 刘建(1983-), 男, 博士研究生, 主要从事含能材料微尺度燃烧研究。e-mail: njust303@163.com

通讯联系人: 沈瑞琪(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光物理化学、含能材料燃烧和爆炸研究。e-mail: rqshen@mail.njust.edu.cn

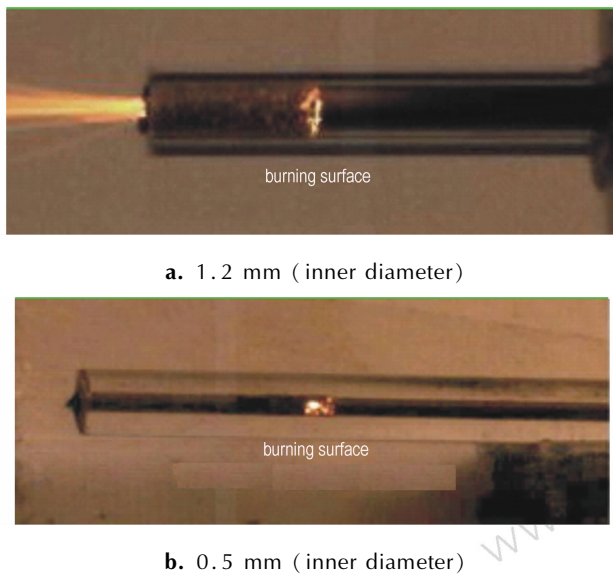


图2 石英管中 B/KNO<sub>3</sub> 燃烧图片  
Fig.2 Combustion photographs of B/KNO<sub>3</sub> in quartz tube

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 圆管管径对燃速的影响

采用壁厚 1 mm, 内径分别为 0.5, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0 mm 的透明石英管, 药剂装填密度为 2000 kg · m<sup>-3</sup>, 在燃烧室压强 0.1 MPa, 环境温度 300 K 下实验, 取 5 次实验平均值分析, 得到不同内径石英管中 B/KNO<sub>3</sub> 燃面距点火端距离随时间变化曲线, 如图 3 所示。

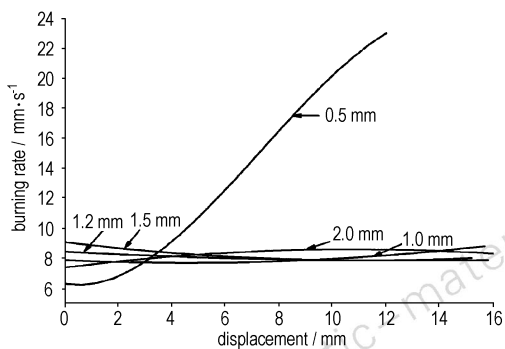


图3 不同内径石英管中 B/KNO<sub>3</sub> 燃速与距离关系曲线  
Fig.3 Curves of B/KNO<sub>3</sub> burning rate versus displacement in quartz tubes with different inner diameters

由图 3 可见, B/KNO<sub>3</sub> 在内径 1.0 ~ 2.0 mm 石英管中燃速基本无变化, 燃烧比较稳定, 对其进行线性拟合得到曲线的斜率即为燃速, 燃速在 7.9 ~ 8.3 mm · s<sup>-1</sup> 之间, 波动不大, 可以认为燃速在这个尺寸区间基本上不受管径的影响。这主要是因为影响燃速的因素除了管径外, 还有药剂的反应热。对于内径为  $r$  的圆管, 热损失率

$\eta$  为:

$$\eta = \frac{q_l F}{q_c \rho V} = \frac{q_l 2\pi r l}{q_c \rho \pi r^2 l} = \frac{q_l}{q_c \rho r} \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为药剂密度, kg · m<sup>-3</sup>;  $V$  为药剂体积, m<sup>3</sup>;  $l$  为反应区长度, m;  $F$  为圆管内表面积, m<sup>2</sup>;  $q_c$  为单位质量反应热, J · kg<sup>-1</sup>;  $q_l$  为单位面积热损失, J · m<sup>-2</sup>。

由式(1)知, 热损失率与药剂反应热  $q_c$  和管径  $r$  成反比。当药剂反应热较大时, 管径的微小变化对燃速的影响较小。而实验用 B/KNO<sub>3</sub> 的反应热非常高, 为  $7.754 \times 10^6$  J · kg<sup>-1</sup>。所以在内径 1.0 ~ 2.0 mm 石英管中燃速变化较小。

但从图 3 可见, 当 B/KNO<sub>3</sub> 在内径为 0.5 mm 的石英管中燃烧时, 其燃速随距离的增加而变大, 表明 B/KNO<sub>3</sub> 处于非稳定燃烧。这主要是由于 B/KNO<sub>3</sub> 在常压下的燃烧产物含有大量的固体颗粒, 在微细圆管中, 由于管壁的表面力、粘性力、摩擦力等微通道效应的影响, 这些因素会使固体颗粒的流动受阻而滞留在管中, 对比图 2a 和图 2b 可直观看出, B/KNO<sub>3</sub> 在内径 0.5 mm 石英管燃烧过程中, 没有固体颗粒产物喷出。滞留的固体颗粒对产物中的气体形成阻塞, 导致圆管中压强升高, 而且随着燃烧的进行, 燃气不断积聚, 压强不断升高。由维耶里定律  $u = ap^n$  可知, 燃速随压强的增加而增大。当管径进一步减小, 管道阻力和管内压强均急剧增加, 当压强增大到一定值时将产生击穿现象, 将管中前端残渣或后端未燃药剂冲出, 燃烧熄灭。实验表明常压下石英管中 B/KNO<sub>3</sub> 稳定燃烧的临界内径在 0.5 ~ 1.0 mm 之间。

#### 3.2 燃烧室压强对燃速的影响

实验分析了不同压强下, B/KNO<sub>3</sub> 在不同内径石英管(壁厚 1 mm)中的燃烧特性, 结果表明, 压强大于 1 MPa 时, 各石英管中 B/KNO<sub>3</sub> 的燃面距离与时间均呈线性关系, 说明燃烧处于稳定状态。不同内径石英管中 B/KNO<sub>3</sub> 燃速随压强变化曲线如图 4 所示。

由图 4 知, 不同内径石英管中 B/KNO<sub>3</sub> 的燃速随压强增加而增大, 但压强在 0.1 ~ 4.0 MPa 之间, 虽然燃速随压强成正比, 但并不符合压强指数规律。祝明水<sup>[2]</sup>在 B/KNO<sub>3</sub> 药柱燃烧速度的初步研究中也得到了相似的结果。图 4 还表明, 在相同压强下, B/KNO<sub>3</sub> 在内径为 1.0 mm、1.5 mm 和 2.0 mm 石英管中的燃速变化微弱, 而在内径 0.5 mm 的石英管中 B/KNO<sub>3</sub> 燃速较大, 这同样是由于燃烧室尺度的减小, 增加了微通道效应的结果, 这与 3.1 中得到的结论相符。

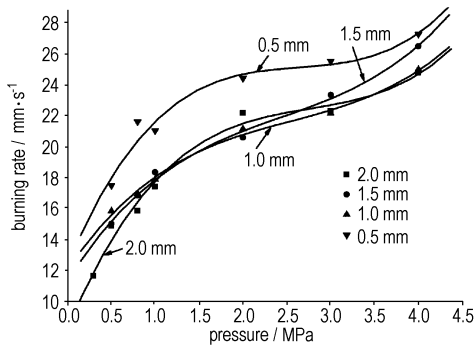


图 4 不同内径石英管中 B/KNO<sub>3</sub> 的燃速与压强关系曲线  
 Fig. 4 Curves of B/KNO<sub>3</sub> burning rate versus combustion chamber pressure in quartz tubes with different inner diameters

### 3.3 管壁热传导系数对燃速的影响

实验研究了微细圆管热传导系数对燃速的影响。通过实验得到 B/KNO<sub>3</sub> 在同壁厚(1.0 mm)、同内径(1.5 mm)的铝管和石英管中燃速随圆管内径变化曲线如图 5 所示。

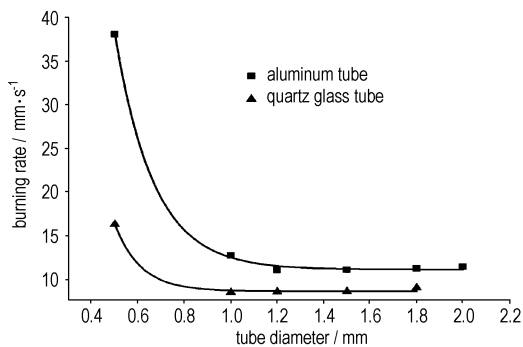


图 5 铝管和石英管中 B/KNO<sub>3</sub> 燃速与圆管内径关系曲线  
 Fig. 5 Curves of B/KNO<sub>3</sub> burning rate versus tube inner diameter in aluminium tube and quartz tube

按照热损失对燃速的影响规律<sup>[4]</sup>,随着管壁热传导系数增加,管壁热损失增大,燃速应该降低。但由图 5 可见,B/KNO<sub>3</sub> 在铝管中的燃速较石英管内的大,这主要受两个因素影响:一是管壁轴向热传导<sup>[5,7]</sup>,管壁导热系数越大,通过轴向热传导反馈给预热区的热量越多,加速了预热区升温,导致燃速增加;另外,由于实验所用铝管的内壁的粗糙度比石英管大,微细圆管对燃气的阻力增加<sup>[5-6]</sup>,由 3.1 节分析可知,燃速增加。这点从图 5 也可直观看出,B/KNO<sub>3</sub> 在内径为 1.2 mm 的铝管中燃速开始突然增加,而石英管在内径为 1.0 mm 时才出现燃速突变,且铝管中的燃速变化梯度较大。所以微细圆管中 B/KNO<sub>3</sub> 的燃烧稳定性取决于管壁热传导系数和微细圆管阻力的综合作用。

### 3.4 管壁壁厚对燃速的影响

由于石英管的热传导系数(1.38 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)较小,研究燃速与壁厚关系现象不明显,故采用热传导系数较大的铝管(160 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)来研究壁厚对燃速影响,实验得到内径 1.5 mm 铝管中 B/KNO<sub>3</sub> 燃速随壁厚变化曲线如图 6 所示。

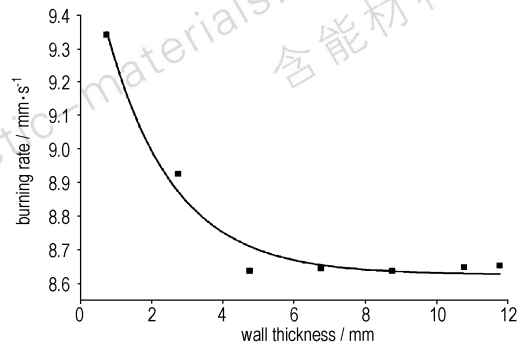


图 6 铝管中 B/KNO<sub>3</sub> 燃速与壁厚关系曲线  
 Fig. 6 Curve of B/KNO<sub>3</sub> burning rate versus wall thickness in aluminium tube

由图 6 可知,相同内径铝管中,壁厚在小于 5 mm 时,B/KNO<sub>3</sub> 燃速随壁厚增加而减小。这主要是因为铝管导热系数较大,由于壁厚增加而带走的热量比空气对流和辐射带走的热量多,导致药剂温度降低,燃速变小。当壁厚大于 5 mm 时燃速基本上不随壁厚变化,这是因为经典的傅里叶热传导模型是在假设热流传播速度无穷大<sup>[8]</sup>的基础上建立的。事实上,由于热阻和热容的存在,在非常短的燃烧时间内,热流对物体的作用总是在有限的范围内,超过了这个范围,管壁热传导带走的热量不再变化,燃速趋于稳定。

## 4 结论

B/KNO<sub>3</sub> 在内径 1.0 ~ 2.0 mm 石英管中、燃烧室压强为 0.1 ~ 4.0 MPa 时均处于稳定燃烧,燃速随燃烧室压强增加而变大,但并不符合燃速指数规律。相同的压强下,内径 1.0 ~ 2.0 mm 石英管中燃速变化较小,基本不受管径的影响。

随着圆管内径的减小,管壁热损失和管道阻力作用增大,这成为燃烧不稳定的主要因素。在内径 0.5 mm 石英管中,由于管道阻力增大,管内压强增大,导致燃烧不稳定,燃速随时间逐渐变大,且均大于内径 1.0 ~ 2.0 mm 石英管中的燃速。当管径进一步减小,管道阻力急剧增加,产生击穿现象导致火焰熄灭。

在微细圆管中 B/KNO<sub>3</sub> 的燃速随管壁热传导系

数增加而减小; 管材相同, 燃速随壁厚增加而减小, 当壁厚增加到一定值时, 燃速趋于稳定。

#### 参考文献:

- [1] 祝明水, 龙新平, 蒋小华, 等. B/KNO<sub>3</sub> 燃烧性能参数计算[J]. 兵工学报, 2005, 26(3): 320-322.  
ZHU Ming-shui, LONG Xin-ping, JIANG Xiao-hua, et al. The calculation of combustion characteristics of B/NO<sub>3</sub> [J]. *Acta Armamentarii*, 2005, 26(3): 320-322.
- [2] 祝明水, 何碧, 蒋明, 等. B/KNO<sub>3</sub> 药柱燃烧速度的初步研究[J]. 含能材料, 2008, 16(2): 204-206.  
ZHU Ming-shui, HE Bi, JIAN Ming, et al. Investigation on burning rate of B/KNO<sub>3</sub> pellet in closed bomb test[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(2): 204-206.
- [3] 严楠, 张慧卿, 华光, 等. 压药压强及密封性对 B/KNO<sub>3</sub> 激光点火特性的影响[J]. 应用激光, 2001, 21(6): 389-391.  
YAN Nan, ZHANG Hui-qing, HUA Guang, et al. The effect of pressing pressure and hermetic intensity on the Laser diode ignition characteristic of B/KNO<sub>3</sub> [J]. *Applied Laser*, 2001, 21(6): 389-391.
- [4] 张永生, 周俊虎, 杨卫娟, 等. 微燃烧稳定性分析和微细管道燃烧实验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(7): 1178-1181.  
ZHANG Yong-sheng, ZHOU Jun-hu, YAN Wei-juan, et al. Burning stability analysis of micro-combustion and experimental research of combustion in microscale tube [J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2006, 40(7): 1178-1181.
- [5] 刘志刚, 赵耀华. 微型管内流动特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(5): 835-837.  
LIU Zhi-gang, ZHAO Xiao-hua. Experimental study on flow characteristic in microtubes [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005, 26(5): 835-837.
- [6] 张颖, 王蔚, 田丽, 等. 微流动的尺度效应[J]. 微纳电子技术, 2008, 45(1): 33-37.  
ZHANG Ying, WANG Wei, TIAN Li, et al. Scaling effect of micro fluidic systems [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2008, 45(1): 33-37.
- [7] Veeraragavan A, Cadou C. Experimental investigation of influence of heat recirculation on temperature distribution and burning velocity in a simulated micro-burner [C] // 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, America, 2007.
- [8] 王秋军, 徐红玉, 宋亚勤, 等. 微尺度热传导理论及金属薄膜的短脉冲激光加热[J]. 微纳电子技术, 2003, 11: 18-23.  
WANG Qiu-jun, XU Hong-yu, SONG Ya-qin, et al. Theory of microscale heat transfer and short-pulse laser heating of thin metal films [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2003, 11: 18-23.

## Combustion Characteristics of B/KNO<sub>3</sub> in Microscale Tube

LIU Jian, SHEN Rui-qi, YE Ying-hua, HU Yan

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

**Abstract:** To understand combustion characteristics of igniter in microscale tube, B/KNO<sub>3</sub> combustion in microscale tube were obtained from high-speed photography. Results show that wall heat loss and tube resistance are the main affecting factors for combustion stability. Combustion is stable in 1.0-2.0 mm quartz tube, and B/KNO<sub>3</sub> burning rate varies weakly. B/KNO<sub>3</sub> burning rate is proportional to combustion chamber pressure among 0.1-4 MPa, however, it is not consistent with exponent law. Combustion is unstable when the inner diameter of quartz tube is decreased to 0.5 mm, and the burning rate is increased with increasing of time. When the inner diameter of quartz tube is reduced further, breakdown phenomenon is produced and combustion quenching is caused. In addition, B/KNO<sub>3</sub> burning rate is in inverse proportion to wall thickness in the certain extent.

**Key words:** military chemistry; microscale tube; B/KNO<sub>3</sub>; combustion characteristics; heat loss; tube resistance

**CLC number:** TJ55; O69

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.03.021