

文章编号: 1006-9941(2013)06-0800-06

## 粒径和晶形对硼颗粒点火燃烧特性的影响

敖文, 周俊虎, 刘建忠, 杨卫娟, 汪洋

(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 针对粒径和晶形对硼颗粒燃烧的影响机理, 利用激光点火系统研究了硼颗粒的点火燃烧特性。结果表明, 在 25 ~ 65  $\mu\text{m}$  范围内, 晶体硼点火延迟时间随粒径变化无明显规律, 点火延迟时间在 13 ~ 19 ms 之间。晶体硼和无定形硼燃烧效率均随粒径增加而增加。当粒径小于 65  $\mu\text{m}$ , 硼表面氧化层是影响硼燃烧效率的决定性因素。55  $\mu\text{m}$  的晶体硼不仅点火延迟时间最短, 而且燃烧最剧烈, 表明 55  $\mu\text{m}$  可能是晶体硼颗粒点火燃烧性能最佳的尺寸。无定形硼的点火延迟时间要远低于晶体硼, 燃烧效率、火焰强度及发射光谱强度也比晶体硼高。相对粒径, 点火延迟时间对晶形更加敏感, 晶形对硼点火燃烧具有更强的影响作用。

**关键词:** 航空宇航推进理论与工程; 硼; 点火; 燃烧; 粒径; 晶形

**中图分类号:** TJ55; V513

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.06.022

### 1 引言

硼具有较高的体积热值 ( $136.38 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) 和质量热值 ( $58.28 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 是固体贫氧推进剂研究领域最具有前途的高能金属燃料组分之一。硼颗粒是含硼贫氧推进剂的主要能量来源, 了解硼颗粒点火燃烧过程的物理、化学本质是提高推进剂燃烧效率、改善其燃烧性能等研究必须的理论基础。固体含硼贫氧推进剂的研究工作可以追溯到 20 世纪 60 年代, 但由于硼颗粒难以点火和燃烧, 且对其燃烧机理研究不够深入, 缺乏有效途径来提高燃烧效率, 导致发动机的实测比冲不高, 美国在 20 世纪 70 年代甚至停止了含硼贫氧推进剂的研究工作, 由此可见硼颗粒点火、燃烧研究在固冲发动机研制中的重要作用。

国外在硼颗粒点火燃烧的实验和理论方面基础研究较多<sup>[1-3]</sup>, 而国内较侧重于实际含硼贫氧推进剂的研究<sup>[4]</sup>。硼粒子的点火和燃烧一般和自身理化特性有关, 如颗粒化学性质和颗粒尺寸大小等<sup>[5-6]</sup>。外部环境条件如环境温度、压力以及反应气氛等, 也会影响

硼粒子的点火和燃烧<sup>[1,7,8]</sup>。赵孝彬等<sup>[9]</sup>指出, 硼的熔点及沸点高, 表面容易氧化生成氧化层是其点火延迟期长的主要原因。硼粒子的直径越小, 越容易点火。霍东兴等<sup>[10]</sup>对非壅塞固冲发动机补燃室内硼粒子的点火燃烧进行了数值模拟, 发现较小粒子在补燃室头部点火, 较大的粒子一部分在气流的下游点火, 有的粒子在喷出补燃室时还没有点火。范红杰等<sup>[11]</sup>采用  $\text{CO}_2$  激光点火装置对含硼富燃料推进剂点火, 结果表明提高压强有利于点火。王天放等<sup>[12]</sup>比较分析了硼粒子在空气、水汽、氯、氟、氮等几种典型环境气氛中的点火特性。杨宇川等<sup>[13]</sup>借助 DTA 和 TG 研究了不同粒径硼粉的热化学性质, 得到硼粒子粒径越小, 硼与 AP 混合物的表观分解热越大, 热失重越高。最新的研究中, Ashish Jain 等<sup>[14-15]</sup>利用 TG 和 DSC 对硼粉的点火特性和动力学过程进行了分析, 结果表明硼粉点火温度随粒径增大而提高, 晶体硼比无定形硼更难点火。Gregory Young 等<sup>[5]</sup>利用平焰燃烧器对纳米级硼颗粒的燃烧特性进行了实验研究, 发现点火时间与氧气浓度几乎没有关联, 而燃烧时间则同时受温度和氧气摩尔分数的影响。

从现有研究看来, 理化特性对硼颗粒点火燃烧的影响机理尚须进一步研究, 尤其是粒径对硼颗粒点火延迟时间、燃烧效率和燃烧强度的影响文献报道较少, 无定形硼及晶体硼的点火延迟时间也有待进行对比分析。此外, 物理性质和化学性质对硼点火燃烧影响作用的相互关系和权重不甚明确, 这点值得深入探索。

收稿日期: 2013-03-22; 修回日期: 2013-05-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106135); 中国博士后科学基金资助项目(20110491769); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2012FZA4014)

作者简介: 敖文(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事金属燃料研究。  
e-mail: 3050823067@zju.edu.cn

通讯联系人: 杨卫娟(1976-), 女, 副教授, 主要从事金属燃料研究。  
e-mail: yangwj@zju.edu.cn

基于此,本课题组利用激光点火系统研究硼颗粒的点火燃烧特性,分析粒径和晶形因素对硼颗粒的点火延迟时间、燃烧效率、燃烧火焰形态以及燃烧过程发射光谱的影响,以此对比物理性质和化学性质对硼点火燃烧的影响,明确二者相互关系,希望此研究成果可为含硼贫氧推进剂的燃烧研究提供基础理论指导。

## 2 实验

### 2.1 实验装置

使用 150W 大功率激光发生器,利用激光束高温辐射进行硼颗粒的点火。图 1 为激光点火实验系统示意图。主要包括 4 大模块,即点火模块,气氛调节模块,燃烧诊断模块和数据记录模块。点火模块主要是激光点火器,包括激光电源、激光发生器和激光点火嘴,可实现高温点火的启动和控制功能,并与电脑联结,可通过电脑程序控制功率大小,实现连续调节功能。气氛调节模块包括高压气瓶,气路,三通阀,质量流量计等,可根据实验工况满足不同的反应气氛要求,实现样品在单一气氛或混合气氛下的反应。燃烧诊断模块包括高速摄影仪和光谱仪等。高速摄影仪(HG-100K)用于观测记录硼颗粒点火燃烧过程,可观察火焰形态和燃烧强度变化。光谱仪(Avaspec-2048)用于测量分析硼点火燃烧过程中产生的中间产物的发射光谱,通过分析特征发射光谱可定量分析点火延迟时间和燃烧时间等特性。实验中燃烧诊断模块中的光谱仪通过点火模块触发启动,可实现光谱信号测量和点火同步,确保点火延迟时间测量的精确。数据记录模块则主要是高性能计算机和相关软件等。点火前后坩埚内样品质量采用高精度电子天平进行称量,由此确定样品燃烧前后质量变化。

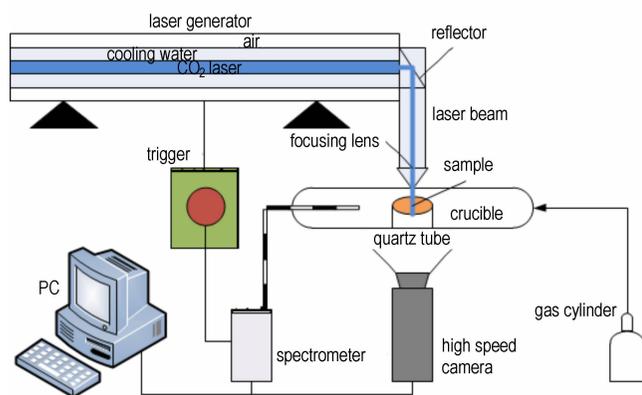


图 1 激光点火实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser ignition experimental system

### 2.2 参数定义

采用点火延迟时间  $t_d$  表征硼颗粒的点火特性,采用燃烧效率  $\eta$  表征硼颗粒的燃烧特性。另外,光谱仪捕捉到的发射光谱强度可以用来定性表征燃烧强度。

硼颗粒在点火和燃烧过程中均会产生  $BO_2$  [5,16], 可以通过检测  $BO_2$  光谱信号来表明硼颗粒的着火和燃烧过程的持续,即当光谱仪接收到  $BO_2$  光谱信号时,认为着火开始,从激光点火启动到光谱仪接收到  $BO_2$  光谱信号的时间段定义为  $t_d$ 。

硼颗粒的燃烧效率( $\eta$ )用来表征硼颗粒的燃尽程度,其数值通过实际增重和理论增重的比值来确定。假设点火前硼重量为  $\omega_i$ ,燃烧后硼重量为  $\omega_f$ ,则实际增重为  $(\omega_f - \omega_i) / \omega_i$ 。硼在氧气/氮气/空气气氛中燃烧时,硼与氧为主导反应。考虑金属杂质镁和铝对燃烧的影响。假设硼、镁、铝质量含量分别为  $x_B, x_{Al}, x_{Mg}$ ,与氧的最终产物分别为  $B_2O_3, MgO, Al_2O_3$ ,可以计算得到硼样品完全燃烧的理论增重为  $\frac{24}{10.8}x_B + \frac{24}{27}x_{Al} + \frac{16}{24}x_{Mg}$ 。因此,可以通过(1)式计算:

$$\eta = \frac{(\omega_f - \omega_i) / \omega_i}{\frac{24}{10.8}x_B + \frac{24}{27}x_{Al} + \frac{16}{24}x_{Mg}} \times 100\% \quad (1)$$

文中对相关参数的误差进行了分析,误差主要通过仪器给定的误差和大量实验数据的标准差来获得。其中, $t_d$ 的误差为 5.66%,而  $\eta$  误差为 5.89%。根据 Avaspec-2048 光纤光谱仪的仪器误差,可以得到发射光谱强度的测量误差为 40 光子/计数@600 nm,预计文中实测误差与此近似,即 40 光子/计数@547.1 nm。

### 2.3 实验样品和工况

实验硼粉为平均粒径分别为 0.75, 1.25, 2, 2.5  $\mu m$  的无定形硼(B\_1,纯度 95%,杂质镁 3.72%,铝 1.24%)和平均粒径为 49  $\mu m$  的晶体硼(B\_2,纯度 99.9%)。利用不锈钢筛网对晶体硼粉进行筛分,分别得到平均粒径为 25,35,45,55,65  $\mu m$  的晶体硼颗粒,通过工况 1#~5#和 8#~10#研究粒径影响规律。另外,通过对比工况 6#~7#研究晶形影响规律。为保证实验条件平等,每次实验的样品质量保持在 50 mg。实验工况见表 1。

## 3 结果与讨论

### 3.1 粒径影响

图 2 为晶体硼颗粒点火延迟时间随粒径变化规

律。在 25 ~ 65  $\mu\text{m}$  范围内, 硼点火延迟时间随粒径变化无明显规律, 点火延迟时间为 13 ~ 19 ms。当粒径从 25  $\mu\text{m}$  增加到 35  $\mu\text{m}$  时, 点火延迟时间略微增加。而在 35 ~ 55  $\mu\text{m}$  时, 点火延迟时间随粒径增大而降低。当粒径进一步从 55  $\mu\text{m}$  增加到 65  $\mu\text{m}$  时, 点火延迟时间又增加了。分析产生这一变化的原因: 硼颗粒粒径越大, 反应比表面积就越小, 不利于硼与氧的反应, 将延迟点火, 使点火延迟时间增加。而在 35 ~ 55  $\mu\text{m}$  范围内出现点火延迟时间随粒径增大而下降的趋势, 则很可能与表面氧化层有关。根据硼颗粒点火机理<sup>[17]</sup>, 粒径越大, 表面氧化层蒸发速率越大, 表面氧化层对氧扩散的阻碍就越小, 加剧了硼与氧的反应速率, 最终导致点火延迟时间缩短。

表 1 实验工况

Table 1 Test conditions

condition	sample	particle size / $\mu\text{m}$	ignition power / W	flow rate of $\text{N}_2$ / $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	flow rate of $\text{O}_2$ / $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$
1 <sup>#</sup>	B_2	25	150	0.3	0.7
2 <sup>#</sup>	B_2	35	150	0.3	0.7
3 <sup>#</sup>	B_2	45	150	0.3	0.7
4 <sup>#</sup>	B_2	55	150	0.3	0.7
5 <sup>#</sup>	B_2	65	150	0.3	0.7
6 <sup>#</sup>	B_1	2	150	0.2	0.8
7 <sup>#</sup>	B_2	49	150	0.2	0.8
8 <sup>#</sup>	B_1	0.75	150	0	1
9 <sup>#</sup>	B_1	1.25	150	0	1
10 <sup>#</sup>	B_1	2.5	150	0	1

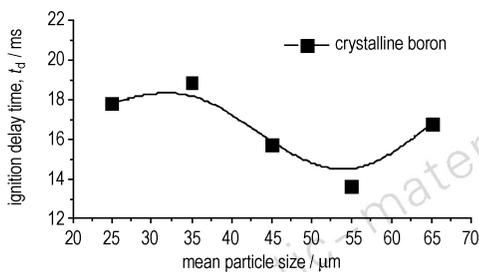


图 2 粒径对晶体硼点火延迟时间的影响

Fig. 2 Effect of particle size on the ignition delay time of crystalline boron

图 3 为燃烧效率随粒径变化规律。由图 3 可见, 随着粒径的增大, 晶体硼和无定形硼燃烧效率均逐渐增加。Ashish Jain 等<sup>[14]</sup>通过热重实验得到了类似的结果, 他们发现当晶体硼粒径小于 90  $\mu\text{m}$  (此处是 65  $\mu\text{m}$ ) 时, 反应效率随粒径增大是增加的。这一特性

表明比表面积并不是反应效率的决定性因素, 反应效率同样与硼表面氧化层的蒸发速率有关。氧化层的覆盖将严重阻碍硼与外界氧气的接触和反应。硼颗粒粒径越大, 氧化层蒸发速率越快, 硼与氧反应速率提高, 最终导致燃烧效率增加。

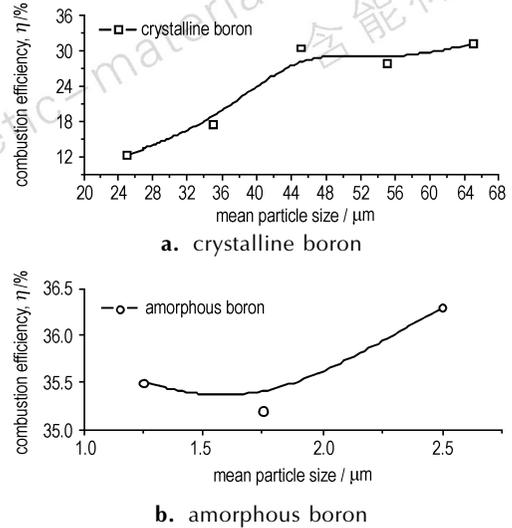


图 3 粒径对硼燃烧效率的影响

Fig. 3 Effect of particle size on the combustion efficiency of boron

利用高速摄影仪对硼燃烧过程进行拍摄, 截取部分重要时间节点的图片进行分析。图 4 为不同粒径晶体硼燃烧形态, 各粒径下载取火焰最为强烈的时间节点的图片进行比较。随着硼粒径的增加, 火焰形态变化呈现不规律趋势。当粒径从 25  $\mu\text{m}$  增加到 35  $\mu\text{m}$  时, 火焰直径和高度均有所减小。而当粒径从 35  $\mu\text{m}$  增加到 45  $\mu\text{m}$  时, 火焰直径和高度均出现较大幅度的增加, 燃烧突然加剧。当粒径进一步增加到 55  $\mu\text{m}$  时, 火焰直径继续加大, 但高度略有下降。而当粒径从 55  $\mu\text{m}$  增加到 65  $\mu\text{m}$  时, 火焰直径和高度基本不变。综上, 虽然火焰形态随粒径变化规律性不显著, 但可以得出的结论是 35  $\mu\text{m}$  以下的硼颗粒火焰强度相对较低, 而 45  $\mu\text{m}$  以上的硼颗粒火焰强度相对较高, 燃烧更为剧烈, 可见粒径的增加在一定程度上有助于改善硼的燃烧。

图 5 为不同粒径的晶体硼颗粒燃烧的发射光谱图。通过对比  $\text{BO}_2$  在可见光谱范围内发射光谱的波长可知<sup>[18]</sup>, 波长 471, 492.9, 518.1, 547.1, 579.1, 620.2 nm 处对应的波峰即对应  $\text{BO}_2$  的特征光谱。在  $\text{BO}_2$  最强特征峰, 波长为 547.1 nm 处, 25, 35, 45, 55, 65  $\mu\text{m}$  晶体硼发射光谱强度分别为 2775, 2402, 3470, 3840, 3546。当粒径从 25  $\mu\text{m}$  增加到 35  $\mu\text{m}$

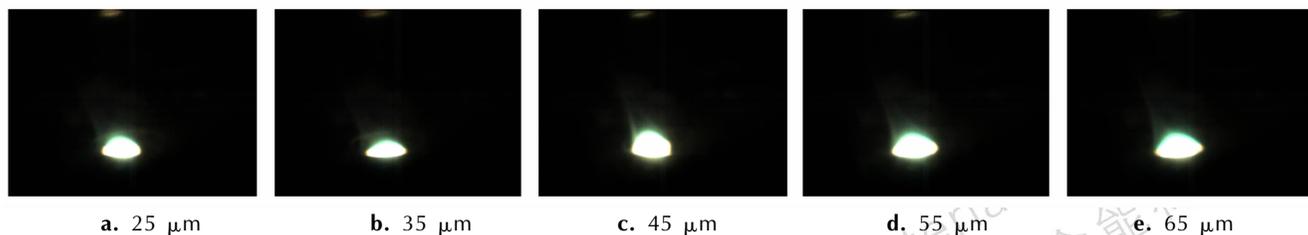


图4 不同粒径晶体硼燃烧的火焰形态

Fig.4 The morphological of burning flame of crystalline boron with different particle size

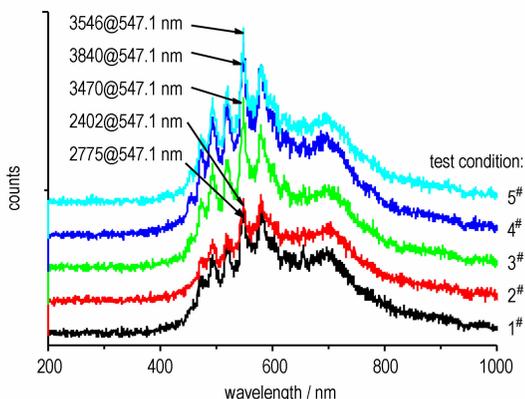


图5 粒径对晶体硼燃烧过程中发射光谱影响

Fig.5 Effect of particle size on the emission spectra during combustion process of crystalline boron

时,发射光谱强度有所减小。而当粒径从 35 μm 增加到 45 μm 时,发射光谱强度出现较大幅度的增加。当粒径进一步增加到 55 μm 时,发射光谱强度继续加大。而当粒径从 55 μm 增加到 65 μm 时,发射光谱强度稍有减小。这一变化规律与火焰形态随粒径变化趋势基本一致,反映了燃烧剧烈程度随粒径的变化。同样地,可以得到粒径的增加在一定程度上有助于改善硼的燃烧,且当晶体硼粒径为 55 μm 时,燃烧最为剧烈。结合前面粒径对点火延迟时间影响的分析可以发现,55 μm 的晶体硼不仅点火延迟时间最短,而且燃烧也是最剧烈的,这表明 55 μm 可能是晶体硼颗粒点火燃烧性能最佳的一个尺寸。

### 3.2 晶形影响

图6 为无定形硼与晶体硼点火燃烧特性比较。由图6可知,无定形硼的点火延迟时间要远远低于晶体硼,仅为晶体硼的 1/5 左右,燃烧效率也比晶体硼高出近 50%。无定形硼和晶体硼在理化特性上均存在差异:在物理性质上,无定形硼粒径更小,比表面积更大;而在化学性质上,无定形硼为非晶体,原子间作用力主要是范德华力,化学性质相对晶体硼更加活泼,而

单质晶体硼微观下由 B-12 正二十面体的基本结构单元组成,属于原子晶体,相邻原子之间以共价键结合而成,原子间键能较大<sup>[19]</sup>。粒径影响的分析结果表明,硼点火延迟时间随粒径变化规律不明显,燃烧效率是随粒径增大而增加的,因此可以得到,相对粒径这一物理性质,晶形对硼点火燃烧具有更强的影响作用。点火过程本质上为剧烈的氧化反应过程,反应物键能的大小决定了反应的难易程度,因此无定形硼相对更容易点火,其点火燃烧性能均要高于晶体硼。因此,目前含硼固体贫氧推进剂使用的燃料一般选择无定形硼而非晶体硼。

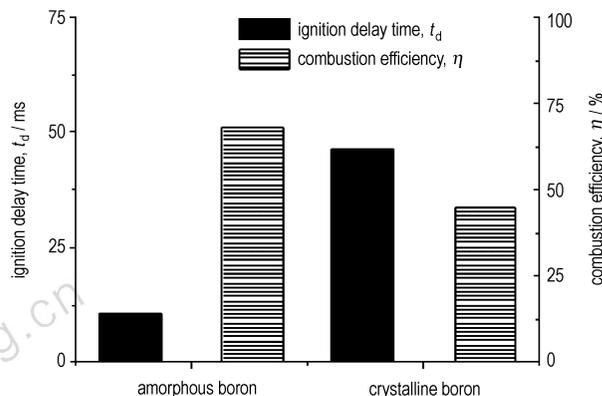


图6 无定形硼与晶体硼点火燃烧特性比较

Fig.6 Comparison of the ignition and combustion performance of amorphous and crystalline boron

图7 给出了无定形硼和晶体硼燃烧火焰的对比。可以看出,无定形硼整个燃烧过程基本都有明显的绿色火焰,且火焰高度和直径远大于晶体硼,由此说明无定形硼燃烧比晶体硼要剧烈的多。

比较无定形硼和晶体硼燃烧过程中的发射光谱图8可知,几个主要特征峰的强度均是无定形硼大于晶体硼。在  $BO_2$  最强特征峰,波长为 547.1 nm 处,无定形硼光谱强度为 5008,而晶体硼光谱强度为 4116,前者约比后者大 22%。这同样印证了无定形硼的燃

烧更为剧烈。此时晶体硼燃烧的发射光谱强度要大于图 5 中的晶体硼, 这可能与氧浓度有关。综上可知, 无论从点火延迟时间, 火焰强度, 发射光谱强度来看, 无定形硼的点火燃烧性能都优于晶体硼, 最终燃烧效率也高于晶体硼。体现了无定形硼点火更迅速, 燃烧更剧烈, 反应更充分的特点。

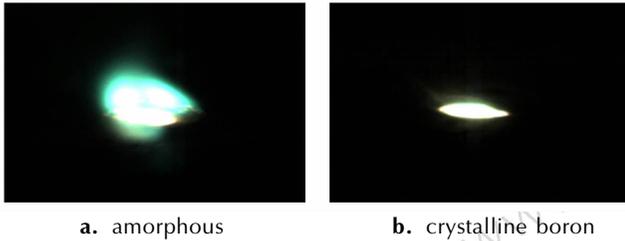


图 7 硼颗粒燃烧火焰对比

Fig. 7 Comparison of the burning flame of amorphous and crystalline boron

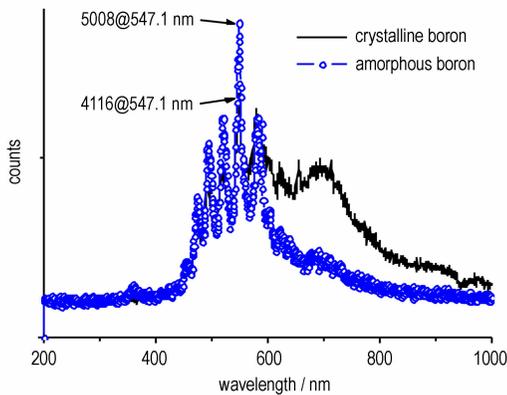


图 8 无定形硼与晶体硼燃烧过程中发射光谱对比

Fig. 8 Comparison of the emission spectra during combustion process of amorphous and crystalline boron

## 4 结 论

(1) 在 25 ~ 65  $\mu\text{m}$  范围内, 晶体硼点火延迟时间随粒径变化无明显规律, 点火延迟时间为 13 ~ 19 ms。点火延迟时间除了与比表面积有关外, 也与硼表面氧化层有关。随着粒径的增大, 晶体硼和无定形硼燃烧效率均逐渐增加。当粒径较小时 (小于 65  $\mu\text{m}$ ), 比表面积并不是燃烧效率的决定性因素, 取而代之的是硼表面氧化层的影响。表面氧化层的覆盖将严重阻碍硼与外界氧气的反应。硼粒径越大, 表面氧化层蒸发速率越快, 硼与氧反应速率提高, 将使燃烧效率增加。

(2) 火焰形态和光谱分析表明, 35  $\mu\text{m}$  以下的硼颗粒火焰强度相对较低, 而 45  $\mu\text{m}$  以上的硼颗粒火焰强度相对较高, 燃烧更为剧烈, 当晶体硼粒径为 55  $\mu\text{m}$

时, 燃烧最为剧烈。55  $\mu\text{m}$  的晶体硼不仅点火延迟时间最短, 而且燃烧也是最剧烈的, 表明 55  $\mu\text{m}$  可能是晶体硼颗粒点火燃烧性能最佳的一个尺寸。

(3) 无定形硼的点火延迟时间要远低于晶体硼, 燃烧效率也比晶体硼高。火焰形态和光谱分析均表明无定形硼燃烧比晶体硼要剧烈。体现了无定形硼具有点火更迅速, 燃烧更剧烈, 反应更充分的特点。相对粒径这一物理性质, 硼点火延迟时间对晶形更加敏感, 而且小颗粒的无定形硼的燃烧效率, 火焰强度, 发射光谱强度均高于大颗粒的晶体硼, 说明晶形对硼点火燃烧具有更强的影响作用。

## 参考文献:

- [1] Ulas A, Kuo K K, Gotzmer C. Ignition and combustion of boron particles in fluorine-containing environments [J]. *Combustion and Flame*, 2001, 127(1-2): 1935-1957.
- [2] Yeh C L, Kuo K K. Ignition and combustion of boron particles [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996, 22(6): 511-541.
- [3] Hussmann B, Pfitzner M. Extended combustion model for single boron particles - Part II: Validation [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(4): 822-833.
- [4] 吴婉娥, 毛根旺, 鲁军, 等. 镁铝金属粉对含硼富燃推进剂燃烧性能及硼氧化效率的影响 [J]. *含能材料*, 2008, 16(4): 458-460.  
WU Wan-e, MAO Gen-wang, LU Jun, et al. Effect of Mg and Al powders on combustion performance of Boron-based fuel-rich propellant and oxidation efficiency of boron [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(4): 458-460.
- [5] Young G, Sullivan K, Zachariah M R, et al. Combustion characteristics of boron nanoparticles [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(2): 322-333.
- [6] King M K. Boron particle ignition in hot gas streams [J]. *Combustion Science and Technology*, 1974, 8(5-6): 255-273.
- [7] Ulas A, Kuo K K, Gotzmer C. Effects of fluorine-containing species on the ignition and combustion of boron particles; Experiment and theory [J]. *Combustion of Energetic Materials*, 2002: 453-463.
- [8] Yoshida T Yuasa S. Effect of water vapor on ignition and combustion of boron lumps in an oxygen stream [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28: 2735-2741.
- [9] 赵孝彬, 张小平, 侯林法. 硼粒子的点火及燃烧特性 [J]. *固体火箭技术*, 1999, 22(3): 37-40.  
ZHAO Xiao-bin, ZHANG Xiao-ping, HOU Lin-fa. Ignition and combustion characteristics of boron particles [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1999, 22(3): 37-40.
- [10] 霍东兴, 陈林泉, 刘霓生, 等. 硼粒子直径对点火位置及燃烧效率的影响研究 [J]. *固体火箭技术*, 2004, 27(4): 272-275.  
HUO Dong-xing, CHEN Lin-quan, LIU Ni-sheng, et al. Effects of boron particles diameter on ignition position and combustion efficiency [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2004, 27(4): 272-275.
- [11] 范红杰, 王宁飞, 关大林. GAP 包覆硼对硼固体推进剂燃烧特性

- 的影响[J]. 推进技术, 2002, 23(3): 262-264
- FAN Hong-jie, WANG Ning-fei, GUAN Da-lin. Effect of GAP coating boron on the ignition performance and combustion residues for boron-based propellants[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 23(3): 262-264
- [12] 王天放, 李疏芬. 不同环境气氛中硼粒子点火特性研究[J]. 飞航导弹, 2004(1): 49-52.
- WANG Tian-fang, LI Shu-fen. Ignition characteristics of boron particle at different atmosphere [J]. *Winged Missiles Journal*, 2004(1): 49-52.
- [13] 杨宇川, 王进 何小波. 硼粒径对硼与 AP 复合物的热化学性能的影响[J]. 含能材料, 2005, 13(5): 288-315.
- YANG Yu-chuan, WANG Jin, HE Xiao-bo. Effect of boron particle size on the thermal behavior of B/AP composition [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(5): 288-315.
- [14] Jain A, Anthonysamy S, Ananthasivan K, et al. Studies on the ignition behaviour of boron powder [J]. *Thermochimica Acta*, 2010, 500(1-2): 63-68.
- [15] Jain A, Joseph K, Anthonysamy S, et al. Kinetics of oxidation of boron powder [J]. *Thermochimica Acta*, 2011, 514(1-2): 67-73.
- [16] Li S C, Williams F A and Takahashi F. An investigation of combustion of boron suspensions [C] // Symposium (International) on Combustion, 22 nd. University of Washington, Seattle, 1988: 1951-1960.
- [17] King M K. Boron ignition and combustion in air-augmented rocket afterburners [J]. *Combustion Science and Technology*, 1972, 5(4): 155-164.
- [18] Spalding M J, Krier H Burton R L. Boron suboxides measured during ignition and combustion of boron in shocked Ar/F/O-2 and Ar/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 2000, 120(1-2): 200-210.
- [19] 顾学民. 无机化学丛书 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- GU Xue-ming. *Inorganic Chemistry Series Book* [M]. Beijing: Science Press, 1998.

## Effects of Particle Size and Crystalline Form on the Ignition and Combustion Characteristics of Boron Particles

AO Wen, ZHOU Jun-hu, LIU Jian-zhong, YANG Wei-juan, WANG Yang

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China, )

**Abstract:** To reveal the influence mechanism of the particle size and crystalline form on the combustion of boron particles, the ignition and combustion characteristics of boron particles were studied by using a laser ignition system. Results show that in the particle size range of 25-65  $\mu\text{m}$ , the ignition delay time of crystalline boron is between 13 and 19 ms, and shows no evident regularity as a change of particle size. The combustion efficiency of both amorphous and crystalline boron increases with increasing the particle size. The oxide layer covered on the surface of boron particles is a crucial factor of the reaction efficiency when particle size is less than 65  $\mu\text{m}$ . The ignition delay time is the shortest and the combustion becomes most intense for crystalline boron with a particle size of 55  $\mu\text{m}$ , which indicates that 55  $\mu\text{m}$  may be the optimum size for ignition and combustion. Amorphous boron has a shorter ignition delay time and higher combustion efficiency, compared to crystalline boron. The burning flame and emission spectrum of amorphous boron are also stronger. This implies crystalline form has a more important influence on boron ignition and combustion than particle size.

**Key words:** aerospace propulsion theory and engineering; boron; ignition; combustion; particle size; crystalline form

**CLC number:** TJ55; V513

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.06.022