

文章编号: 1006-9941(2014)03-0386-06

## 碳对无定形硼颗粒的点火燃烧特性影响

梁导伦<sup>1</sup>, 王纵涛<sup>2</sup>, 刘建忠<sup>1</sup>, 张彦威<sup>1</sup>, 敖文<sup>1</sup>, 席剑飞<sup>1</sup>, 汪洋<sup>3</sup>, 周俊虎<sup>1</sup>

(1. 浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; 2. 中国航天科技集团公司第四研究院四十一所, 陕西 西安 710000; 3. 浙江大学先进技术研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 碳是硼一次燃烧产物的主要成分,对硼的二次点火燃烧有重要的影响。采用热重差示量热扫描(TG-DSC)、X射线衍射(XRD)和激光点火试验系统研究了不同配比的碳对无定形硼颗粒点火燃烧特性的影响。试验采用的硼、碳混合样品碳含量分别为0%、10%、20%、50%和100%,结果表明,碳的添加降低了样品加热过程中的增重量。碳含量对加热过程的影响是复杂的。当样品的碳含量不大于10%,样品的氧化反应推迟,放热量增加。当样品的碳含量进一步升高,又会使样品的氧化反应提前,放热量减少。在氧气气氛下,随碳含量的增加,样品的燃烧峰值强度减弱,燃烧时间从2436 ms增加到2909 ms,但碳对样品的点火时间的延迟较小,最多不超过3 ms。样品燃烧产物呈黑色块状固体,主要成分有氧化硼和单质碳等。对样品燃烧产物的分析表明,样品的点火燃烧反应并不充分。

**关键词:** 物理化学; 无定形硼颗粒; 碳; 热重差示扫描量热(TG-DSC); 激光点火; X射线衍射(XRD); 燃烧特性

**中图分类号:** TJ55; V512; O64

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.021

## 1 引言

半个世纪以来,硼以其较高的燃烧热值受到了各国学者广泛的关注<sup>[1]</sup>。研究发现,硼的质量热值分别是镁和铝的2.3倍和1.9倍,且燃烧产物洁净,可有效避免二相流损失,因此被认为是固体火箭冲压发动机贫氧推进剂最理想的燃料之一<sup>[2-3]</sup>。但实际应用中,由于硼熔点、沸点较高,点火延迟时间长,导致其点火困难,燃烧效率低,严重限制了其性能的充分发挥<sup>[4]</sup>。

国内外对硼的研究主要包括点火燃烧特性、机理模型、添加剂、包覆技术等几个方面。Foelsche<sup>[5-6]</sup>等人在3~15 MPa条件下,研究了不同压力、温度、氧气浓度对直径为24 μm左右的晶体硼的点火和燃烧特性。周华<sup>[7]</sup>等人研究了环境温度、压力、氧气浓度等因素对硼一次燃烧产物热氧化特性和点火燃烧特性的影响规律。Kuo<sup>[8]</sup>等人在总结前人研究的基础上,提出了一个较为完善的点火模型,该模型认为高温下硼

在氧化层界面上溶解并与三氧化二硼发生反应,生成聚合物(BO)<sub>n</sub>,该聚合物在氧化层中由内向外扩散,并在外界面上通过蒸发和化学反应消耗。Obuchi等<sup>[9]</sup>采用电子炉研究了镁铝金属添加剂对无定形硼点火延迟时间的影响,研究发现,硼与镁铝金属的混合物在较低温度时,点火延迟时间分为两个区域;添加镁铝金属,可有效降低单纯硼颗粒的点火温度,使硼颗粒在较低的环境温度下点燃。席剑飞等<sup>[10]</sup>针对重结晶法硼包覆工艺的不足,采用了双溶剂法对硼颗粒进行包覆,发现双溶剂法包覆对促进硼颗粒点火燃烧效果更明显。可见,国内外对含硼推进剂的一次燃烧产物(一次硼产物)的点火燃烧特性的研究极少。

由固体火箭发动机的基本工作原理<sup>[11]</sup>可知,受推进剂及粘合剂配方的影响,进入补燃室的一次硼产物并非单纯的硼颗粒,而是含有多种气相和固相成分的混合物。由于含硼推进剂的大部分燃烧过程和能量释放在补燃室中进行,相对于研究硼颗粒本身,对一次硼产物的点火燃烧特性进行研究对含硼推进剂的配方改进和补燃室的组织燃烧具有更为直接和有效的指导作用。研究发现,一次硼产物固相成分中存在大量的单质碳,利用热力学计算软件factsage理论计算得到一次硼产物中的单质碳占其固相成分总质量的16.3%<sup>[7]</sup>。因此,碳会对补燃室硼颗粒的燃烧产生显著的影响。

收稿日期: 2013-09-09; 修回日期: 2014-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(109203-N11119); 中国博士后科学基金(20110491769)

作者简介: 梁导伦(1991-),男,博士生,主要从事含能材料研究。

e-mail: tom6574@163.com

通信联系人: 张彦威(1980-),男,副教授,主要从事能源转化与利用研究。e-mail: zhangyw@zju.edu.cn

由于一次硼产物的成分复杂,且不同成分之间会互相作用、影响,给研究带来了极大的困难。对一次硼产物的成分进行简化,从而对其中各主要成分的影响进行逐一研究,是目前相对可行的方法。周华<sup>[7]</sup>等人利用这一方法,研究了固相成分中的碳化硼、气相成分中的二氧化碳等物质对无定形硼颗粒的点火燃烧特性的影响,结果表明,二氧化碳会降低一次硼产物的放热量和燃烧效率;碳化硼对硼在不同温度段的影响不同,在低温段(低于 1000 K)和高温段(1250 ~ 1700 K)碳化硼的添加有利于加快硼的反应,而在中温段(1000 ~ 1250 K)则会减慢硼的反应速率。

本研究采用热重-差示扫描量热(TG-DSC)、X射线衍射(XRD)等方法及自主设计的激光点火试验系统,多角度分析了碳与硼颗粒混合物的热氧化过程,研究了碳对硼颗粒点火燃烧反应的影响规律,对含硼推进剂的配方改进和一次硼产物点火燃烧模型的建立具有指导意义。

## 2 实验部分

### 2.1 实验材料和样品

实验使用的硼颗粒为市售无定形硼,纯度为 99%,平均粒径 15  $\mu\text{m}$  左右。

通过扫描电镜观察一次硼产物样品,发现其中碳颗粒微观形态与石墨最为相似,因此使用纯度为 99.99%,粒径为 1  $\mu\text{m}$  左右的石墨形态碳粉。

将硼颗粒和碳粉以不同质量比例进行混合,机械搅拌均匀,分别得到碳含量为 0%, 10%, 20%, 50%, 100% 的样品。

### 2.2 实验设备和方法

热氧化分析实验采用德国 NETZSCH 公司生产的 STA 449F3 型热天平试验台进行。本研究采用 TG-DSC,实验的环境条件为常压,升温范围 40 ~ 1000  $^{\circ}\text{C}$ ,升温速率 20  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 。实验样品质量为 5 mg。实验过程中空气流量为 40  $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ,并通有流量为 20  $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$  的氮气作为保护气。

自行设计的激光点火试验系统,主要是由点火模块,气氛调节模块,燃烧诊断模块和数据记录模块四部分组成,如图 1 所示。激光器发出高能量密度激光(加热面积仅约 2  $\text{mm}^2$ ,可迅速升温至 2000  $^{\circ}\text{C}$  以上)对放置于敞口的透明燃烧管道中的样品进行快速加热点火燃烧,通过控制调节气流气氛和流量,可对样品的点火动态过程进行详细研究。利用光纤光谱仪等诊断

仪器对样品的点火燃烧过程进行拍摄,可得到样品的点火延迟时间、燃烧时间、燃烧效率以及样品点火前后理化特性变化等特性。实验时设置激光工作功率为 150 W,持续加热样品 3 s。用光纤光谱仪测量样品点火燃烧过程中的特征光谱,拍摄时间间隔为 3 ms/帧,每次拍摄 1000 帧。光纤光谱仪与激光器开关联动触发,通过计算机软件进行控制,能够同时开启激光器和光纤光谱仪。同时控制每次实验样品质量为 5 mg,环境气氛氧气,流量为 1  $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

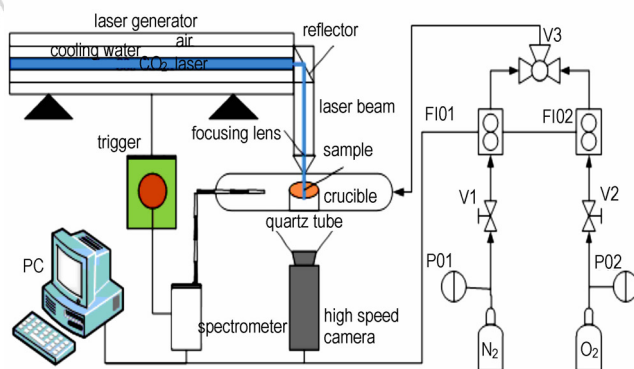


图 1 激光点火试验系统

Fig. 1 System of laser ignition test bench

X射线衍射实验在 X'Pert PRO X射线衍射仪上完成。根据现有一次硼产物成分理论计算,一次硼产物中碳单质含量为 10% ~ 20%<sup>[7]</sup>,故选取碳含量 10% 和 20% 的碳与硼混合物激光点火燃烧后的产物进行 X射线分析。

## 3 结果与讨论

### 3.1 碳对硼颗粒热氧化特性影响分析

不同碳含量的样品在空气气氛下的热分析曲线如图 2 至图 4 所示。

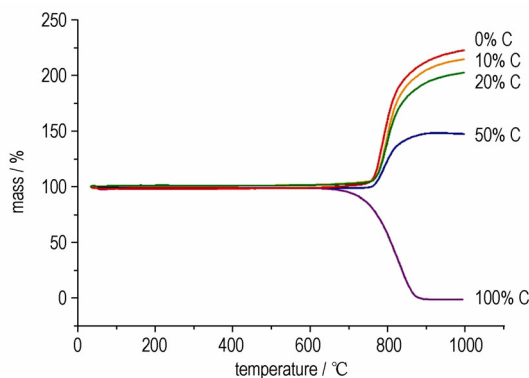


图 2 不同碳含量样品的 TG 曲线

Fig. 2 TG curves of sample with different ratio of C

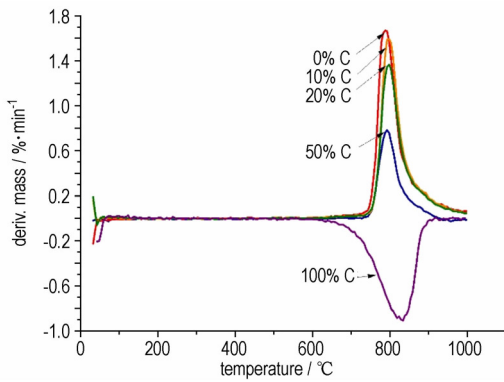


图3 不同碳含量样品的 DTG 曲线

Fig.3 DTG curves of sample with different ratio of C

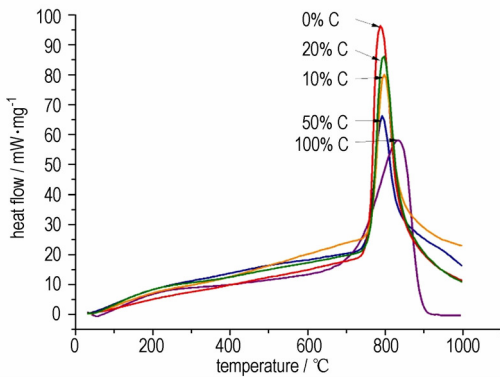


图4 不同碳含量样品的 DSC 曲线

Fig.4 DSC curves of sample with different ratio of C

由图2和图3可见,含硼样品的热氧化过程总体的质量变化趋势是增加的,而纯碳样品的热氧化过程呈现失重趋势。这是由于硼、碳两种物质在40~1000℃的升温范围内氧化产物相态不同造成的。单质碳氧化生成气态二氧化碳,散逸到空气中,导致样品失重;而单质硼氧化生成的氧化硼沸点在2000℃以上<sup>[12]</sup>,在热氧化过程中难以挥发,导致样品增重。此外,贫氧条件下氮气与硼也会发生反应,其产物氮化硼熔点高达3027℃<sup>[13]</sup>,也会保留在固相产物中。但由于氮气化学性质稳定,故在氮气气氛下,硼与氮气的反应十分缓慢<sup>[14]</sup>,因此本节分析中忽略氮化硼的产生。

样品的增重量随着样品含碳量的增加而减少,但总体仍呈增重趋势,说明在含硼样品的质量变化方面,硼氧化的增重作用始终是起主导作用的。

结合图4进行分析,发现随着碳含量的增加,样品的放热峰高度呈现先减小,再增加,后复又减小的复杂变化规律,反映出样品的放热速率随碳含量的增加反复变化。考虑到碳的质量热值远低于硼<sup>[15]</sup>,若两者分别发生氧化,样品的放热速率应随着含碳量的增加而

单调递减。这一现象说明样品发生的反应不仅仅是硼和碳各自的氧化反应,而应当包含了其他的附加反应。

为进一步探究附加反应过程对样品的热氧化过程作用规律,用TG切线法<sup>[16]</sup>对图4中5个样品的起始氧化温度进行求解,并对各曲线进行峰值求取和积分计算,获得不同样品的放热峰值和放热量,结果见表1。

表1 不同碳含量样品的热反应特性

Table 1 Thermal reaction characteristics of the sample with different mixing ratio of carbon

thermal reaction characteristics	ratio of C				
	0%	10%	20%	50%	100%
initial oxidation temperature/°C	764.2	772.6	772.1	768.5	756.6
peak heat release rate/mW·mg <sup>-1</sup>	96.49	80.16	86.37	66.31	58.13
peak temperature/°C	788.4	798.2	796.1	792.5	834.4
exotherm/J·g <sup>-1</sup>	45666	54613	49204	49200	39110

表2表明,随碳含量的增加,样品的起始氧化温度先升高后降低,放热量先增加后减少;同时含硼样品的峰温也是先升高后降低。这表明附加反应对样品热氧化过程的影响是双面的,一方面使得样品的热氧化过程推迟,另一方面增大了样品的放热量,并且这种影响在碳含量10%~20%之间的某点最为明显。而当样品中的碳含量继续增加时,碳本身燃烧特性的影响对样品热氧化过程的作用起到主导作用,使得硼样品的起始氧化温度、放热峰值、峰温与放热量降低。

根据文献[7]中硼一次燃烧产物XRD分析结果(观察到明显的碳化硼波峰)和factsage软件对碳含量为20%的硼、碳混合物的模拟结果(反应产物中含碳化硼),推测样品热氧化过程的附加反应可能包含碳和硼化合生成碳化硼的反应。碳化硼能够与氧气反应放热并产生CO<sub>x</sub>,破除热氧化过程中硼颗粒表面的氧化硼液膜,使硼颗粒的氧化更充分,提高硼的氧化效率<sup>[7]</sup>。这一特性与试验结果中样品放热量的增加是相符的。此外,3.3节对碳含量10%和20%的硼、碳混合样品激光点火燃烧产物进行了XRD分析,检测到了少量碳化硼,也证明了这一推测的合理性。

### 3.2 碳对硼颗粒激光点火燃烧特性影响分析

对不同碳含量的样品在氧气气氛下进行激光点火燃烧实验,结果如图5所示。

观察图5可知,纯硼颗粒样品的特征光谱波峰形貌较为复杂,其中在波长550~600nm处峰值达到最

高,导致硼颗粒燃烧呈现耀眼的绿光,如图6所示,结果与文献[17]所述相同。随着碳含量的增加,样品在波长550~600 nm处的波峰迅速下降,且最大光谱强度不断减弱。说明碳会使样品的发光和燃烧的峰值强度减弱。一方面这是由于碳的质量热值要远低于硼,燃烧过程发光发热现象相对不明显;另一方面由于碳燃烧生成 $\text{CO}_x$ 气体在氧气流通的环境下迅速散逸,会带走部分热量。纯碳样品仅在波长700 nm左右形成一个单峰,导致碳颗粒燃烧发出红光。碳对样品燃烧过程的发光和放热特性具有十分显著的影响。

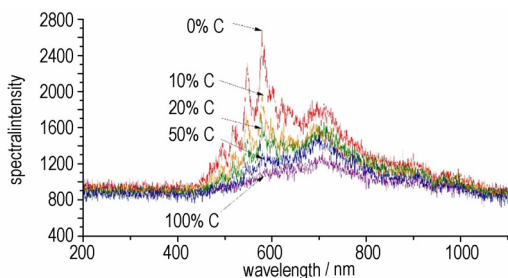


图5 不同碳含量的最大光谱强度瞬时图

Fig. 5 Maximum spectral intensity curves of the sample with different ratio of C



图6 硼颗粒激光点火燃烧高速摄影照片

Fig. 6 The high speed photography of boron particle during laser ignition combustion

光纤光谱仪能够记录样品被激光点火后整个燃烧过程的特征光谱,根据特征光谱出现的时间和消失时间,可以计算得到燃料的点火延迟时间和燃烧时间(具体计算方法见文献[18]),结果如图7和图8所示。

从图7中可以看出,样品的点火延迟时间随碳含量的变化较小,变化范围不超过3 ms。当碳含量从10%变化到20%时,点火延迟时间稍有减少,但在碳含量继续升高时呈现逐渐延长的趋势。硼在高温下点火延迟时间约为16 ms,与点火性能良好的碳相近,甚至更优于碳。但在实验过程中发现,当激光器的功率

减小,使加热的最高温度低于2000 °C时,硼将不能被点燃。

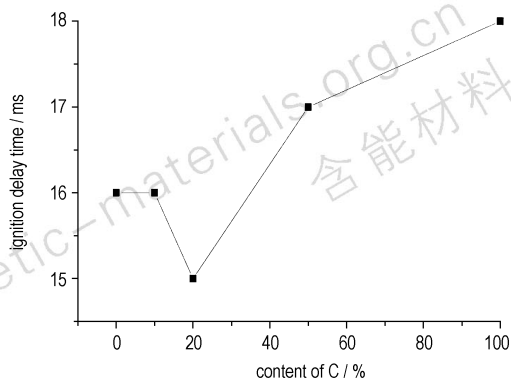


图7 不同碳含量的点火延迟时间曲线

Fig. 7 Ignition delay time of the sample with different ratio of C

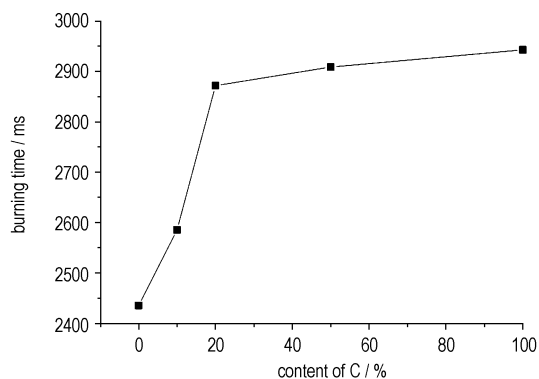


图8 不同碳含量的燃烧时间曲线

Fig. 8 Combustion time of the sample with different ratio of C

从图8可以看出,碳对样品的燃烧时间有明显的影响。随着样品含碳量的增加,其燃烧时间有较大幅度的增加,从2436 ms增加到2909 ms。说明碳的添加增加了样品的持续燃烧时间。由于硼燃烧会生成的液态 $\text{B}_2\text{O}_3$ ,包覆在颗粒表面阻碍传热<sup>[19]</sup>,在补燃室中硼难以燃烧完全,因此增加硼的持续燃烧时间,对提高硼的燃烧效率是有利的。推测这是由于碳燃烧生成的 $\text{CO}_x$ 有助于破除样品表面的氧化硼液膜,从而增加了样品表面的空隙,提高了传热与传质效率。

此外,可以观察到样品燃烧时间的变化是先快后慢,即当样品中碳含量大于20%之后,样品的燃烧时间增长速率逐渐放缓。含碳量为10%~20%时,碳对样品燃烧时间的延长作用最明显。

### 3.3 激光点火燃烧固相产物 XRD 分析

样品激光点火燃烧固相产物呈黑色块状固体,其形态比燃烧前有明显改变,如图9和图10所示。通过机械研磨将其破碎,进行XRD分析。





图9 激光点火燃烧前样品(20% C)

Fig. 9 Sample before laser ignition combustion(20% C)



图10 激光点火燃烧后产物(20% C)

Fig. 10 Laser ignition combustion products (20% C)

根据一次硼产物成分理论计算结果<sup>[8]</sup>,选取碳含量10%和20%的硼、碳混合样品的激光点火燃烧产物进行XRD分析,从产物成分的角度分析其燃烧过程的特性,结果如图11所示。

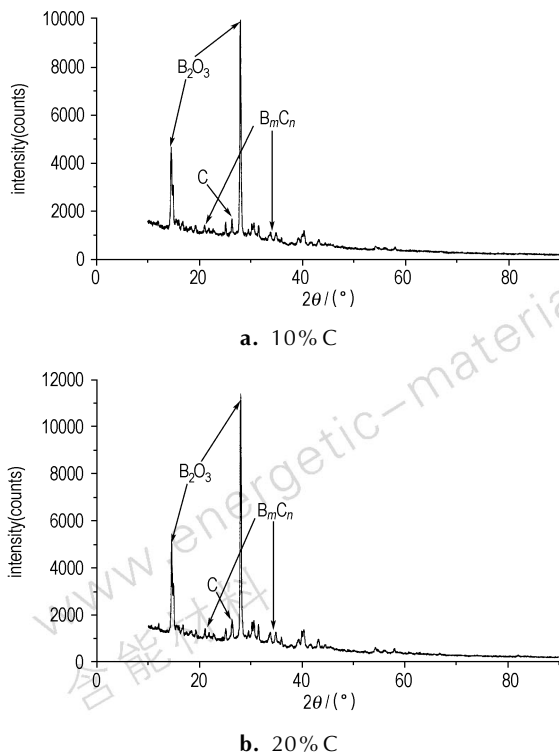


图11 样品的激光点火燃烧产物 XRD 图谱

Fig. 11 XRD curves of laser ignition combustion products

由于XRD对晶体物质较为敏感,而实验采用的硼是无定形硼,因此并未检测到产物中的硼物质。

从分析结果来看,两种样品的燃烧产物主要成分均为 $B_2O_3$ ,也含有少量的C和碳化硼(可能包括 $B_8C$ 、 $B_4C$ 、 $B_{13}C_2$ 等)。当样品的碳含量从10%增加到20%时,产物中三种物质对应的峰强度均有所增强,说明此时碳的增加对促进硼的转化是有利的。产物中含有C单质说明样品中C的燃烧并不完全,推测这仍是由于3.2节中提到的氧化硼液膜的影响,使得一部分碳没有被点燃,保留到了产物中。碳化硼含量较少,可能是由于激光点火过程中氧气比较充足,部分碳化硼已经被氧化。

#### 4 结论

(1) 碳对硼、碳混合样品热氧化过程的影响随着碳含量的范围变化呈现出两种的不同趋势。即碳含量较低时使样品热氧化延迟,放热量增加,而碳含量较高时则相反。这种变化的转折点在碳含量10%~20%之间。很明显,碳的含量较低时,对样品的热氧化过程产生了较为有利的影响。

(2) 硼颗粒在激光点火燃烧过程中发出耀眼的绿光,碳颗粒燃烧发出红光。碳会使硼、碳混合物燃烧时的发光和燃烧强度峰值变弱。碳的添加对样品的持续燃烧有利,从而能够提升硼的燃烧效率;对样品点火时间则仅在碳含量较高时有少量延迟。

(3) 样品激光点火燃烧固相产物呈黑色块状固体。样品产物主要成分为 $B_2O_3$ ,此外还包括少量C和碳化硼等物质。在XRD分析范围内,C的添加有利于样品中硼的转化。

#### 参考文献:

- [1] Talley C P. Combustion of elemental boron[R]. Texaco Experiment Inc. Richmond VA, 1960.
- [2] 戴耀松. 固体火箭—冲压发动机的研究进展[J]. 推进技术, 1987(5): 40-45.  
DAI Yao-song. Advances in solid rocket-ramjet engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1987(5): 40-45.
- [3] 毛成立, 李葆萱, 胡松启, 等. 热空气中硼粒子点火模型研究综述[J]. 推进技术, 2001, 22(1): 6-9.  
MAO Cheng-li, LI Baoxuan, HU Song-qi, et al. Overview of models of boron particle ignition in hot air[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2001, 22(1): 6-9.
- [4] 臧令千. 硼用作推进剂燃料组分的研究[J]. 推进技术, 1990(4): 56-62.  
ZANG Ling-qian. A investigation on boron used as a component of solid propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1990(4): 56-62.

- [5] Foelsche R O, Spalding M J, Burton R L, et al. High pressure ignition of boron in reduced oxygen atmospheres[J]. *Decomposition, Combustion, and Detonation Chemistry of Energetic Materials*, 1996, 418: 187-194.
- [6] Foelsche, R O, R L Burton, H Krier. Boron particle ignition and combustion at 30-150 ATM[J]. *Combustion and Flame*, 1999, 117(1-2): 32-58.
- [7] 周华. 含硼推进剂一次燃烧产物点火燃烧特性研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2013.  
ZHOU Hua. The study of ignition and combustion of the primary combustion products of the boron-based fuel-rich propellant [D]. Zhejiang University, 2013.
- [8] Yeh, C L, Kuo K K. Ignition and combustion of boron particles [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996, 22(6): 511-541.
- [9] Obuchi K, Tanabe M, Kuwahara T. Ignition characteristics of boron particles in the secondary combustor of ducted rockets-effects of magnalium particle addition [C] // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2008: 1-8.
- [10] 席剑飞, 刘建忠, 胡友瑞, 等. 双溶剂法硼包覆工艺及其工艺参数研究[J]. *推进技术*, 2013, 34(7): 984-990.  
XI Jian-fei, LIU Jian-zhong, HU You-rui, et al. A study for coating boron particles with two-solvent method and its process parameters[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(7): 984-990.
- [11] 高东磊. 含硼富燃料推进剂一次燃烧性能研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.  
GAO Dong-lei. Study on primary combustion characteristics of boron-based fuel-rich propellant [D]. National University of Defense Technology, 2009
- [12] Mohan G, Williams F A. Ignition and combustion of boron in O<sub>2</sub>-inert atmospheres[J]. *Aiaa Journal*, 1972, 10 (6) : 776-783.
- [13] Droval G, Glouannec P, Salagnac P, et al. Electrothermal behavior of conductive polymer composite heating elements filled with ceramic particles [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2008, 22(4): 545-554.
- [14] 敖文, 杨卫娟, 汪洋, 等. 不同气氛下硼粉燃烧特性及动力学研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(29): 59-65.  
AO Wen, YANG Wei-juan, WANG Yang, et al. Study on combustion characteristics and kinetics of boron in different atmosphere [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(29): 59-65.
- [15] 岑可法, 姚强, 洛仲决, 等. 燃烧理论与污染控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [16] 陈镜泓, 李传儒. 热分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [17] Li S C, Williams F A, Takahashi F. An investigation of combustion of boron suspensions [C] // Symposium (International) on Combustion, 1989: 1951-1960.
- [18] 范红杰, 王宁飞, 樊学忠, 等. 含硼富燃料推进剂点火特性[J]. *推进技术*, 2008, 29(1): 102-104.  
FAN Hong-jie, WANG Ning-fei, FAN Xue-zhong, et al. Ignition characteristics of boron-based fuel-rich propellants [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(1): 102-104.
- [19] 敖文, 杨卫娟, 韩志江, 等. 硼颗粒点火燃烧模型研究进展[J]. *固体火箭技术*, 2012, 35(3): 361-366, 371.  
AO Wen, YANG Wei-juan, HAN Zhi-jiang, et al. Research on boron particles ignition and combustion model [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2012, 35(3): 361-366, 371.

## Effect of Carbon on the Ignition and Combustion Characteristics of Amorphous Boron Particles

LIANG Dao-lun<sup>1</sup>, WANG Zong-tao<sup>2</sup>, LIU Jian-zhong<sup>1</sup>, ZHANG Yan-wei<sup>1</sup>, AO Wen<sup>1</sup>, XI Jian-fei<sup>1</sup>, WANG Yang<sup>3</sup>, ZHOU Jun-hu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. The 41st Institute of the Fourth Academy of CASC, Xi'an 710000, China; 3. Institute of Advance Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Carbon is the main component of a combustion products of boron. It has important influence to secondary ignition combustion. The influence of different contents of carbon on the ignition and combustion characteristics of boron particles was studied by thermogravimetry (TG) and differential scanning calorimetry (DSC), X-ray diffractometer (XRD) and laser ignition test system. The mass contents of carbon in the mixture of boron and carbon samples were set to be 0%, 10%, 20%, 50% and 100%. Results indicate that the addition of carbon make the sample weight gain lower during the process of heating. The influence of the mass content of carbon on the heating process is complex. When the content of carbon is low, the oxidation reaction delays and the heat release increases, while as it increases, the results turn to be opposite. Under oxygen atmosphere, with an increase in the mass content of carbon, the maximum combustion peak intensity of the sample decreases, the burning time of the sample is prolonged from 2436 ms to 2909 ms, but the ignition delay of carbon to the sample is less, not more than 3 ms. The combustion products are black massive solid, which mainly consist of boron oxide and carbon, etc. The analysis of the combustion products of the sample shows that the ignition combustion reaction of the sample is not sufficient.

**Key words:** physical chemistry; amorphous boron particles; carbon; thermogravimetry-differential scanning calorimetry (TG-DSC); laser ignition; X-ray diffractometer (XRD); combustion characteristics

**CLC number:** TJ55; V512; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.021