

固冲补燃室团聚硼颗粒燃烧试验*

刘道平¹, 夏智勋¹, 胡建新², 黄利亚², 方传波¹

(1. 国防科技大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:研究团聚硼颗粒在补燃室中的点火燃烧对提高固冲发动机性能具有重要意义。通过试验模拟固冲发动机工作过程的方法,开展了补燃室流场条件下的团聚硼颗粒点火燃烧试验。结合高速火焰图像处理技术和流场参数测量结果,对试验中团聚硼颗粒的点火燃烧状态、火焰结构以及颗粒尺寸变化等进行了分析,获得了补燃室燃气温度和氧气含量等因素对团聚硼颗粒点火燃烧过程的影响机制。对燃烧残渣进行了分析,发现燃烧前后颗粒尺寸变化不大,燃烧过程中高温气流可能进入了颗粒内部并与硼颗粒发生反应。

关键词:固冲补燃室;团聚硼颗粒;燃烧;试验研究

中图分类号:TN95 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2015)05-116-05

Experimental investigation of combustion of boron particle agglomeration in secondary chamber

LIU Daoping¹, XIA Zhixun¹, HU Jianxin², HUANG Liya², FANG Chuanbo¹

(1. Science and Technology on Scramjet Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Investigation of boron particle agglomeration ignition and combustion in secondary chambers is very important for increasing the capabilities of ducted rockets. By experimentally mimicking ducted rockets, boron particle agglomeration ignition and combustion in secondary chamber flow field was investigated. The ignition and combustion processes, flame constructions and size changes of boron particle agglomeration were analyzed with the image processing techniques of high speed flame and the measurement results of flow field parameters. The effects of gas temperature and oxygen content on ignition and combustion of boron particle agglomeration were acquired. The analysis result of residue indicates that the particle size changes little and the gas may get into the boron particle agglomeration and react with boron particles.

Key words: secondary chamber; boron particle agglomeration; combustion; experimental investigation

含硼富燃料推进剂在固体火箭冲压发动机(固冲发动机)中具有良好的应用前景。从20世纪60年代开始,国外许多学者开展了大量相关研究。Schadow^[1]认为固冲发动机燃气发生器出口的燃气温度不足以使硼颗粒在补燃室中自维持燃烧,当燃气中的气体燃料与掺混空气中的氧反应使燃气温度升高后,硼颗粒才能点火燃烧。Ciezki^[2]也获得了硼颗粒在燃烧室内燃烧的一些重要特性。Mellor^[3]的研究表明燃气发生器一次燃烧产物中硼颗粒的尺寸与其在推进剂中的初始尺寸相差不大。Pein等^[4]的研究表明补燃室内的旋流有利于硼颗粒的点火燃烧、延长硼颗粒驻留时间和提高推进剂燃烧效率等。Anderson等^[5]从理论上研究了含硼固体火箭冲压发动机

中硼颗粒的掺混、着火和燃烧过程。Gany^[6]发现推进剂中的硼以颗粒团的形式从装药表面离开并进入气相参与反应。国内的相关研究始于20世纪90年代。夏智勋等^[7]较早从理论上研究了气流条件下和考虑 Stefan 影响的单颗粒硼着火过程。陈林泉等^[8]也基于数值模拟研究了燃气发生器喷嘴出口布局、形状以及硼颗粒粒径等对发动机掺混效果和燃烧效率的影响。李疏芬^[9]、王英红^[10]、敖文^[11]、肖金武^[12]、高东磊^[13]和范红杰等^[14]通过硼颗粒包覆、团聚和添加易燃金属等方式,在改善硼的着火燃烧性能、促进硼颗粒在发动机中快速高效燃烧等方面做了大量研究。

硼在补燃室掺混燃烧过程会产生结团现象,团聚硼颗粒是硼颗粒在补燃室中着火燃烧的一种

* 收稿日期:2014-11-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51276194)

作者简介:刘道平(1981—),男,湖南桃江人,博士研究生,E-mail:liu_dp@hotmail.com;

夏智勋(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:zxia@nudt.edu.cn

重要形态,对固冲发动机的性能具有重要影响,本文以试验的方式开展补燃室环境下团聚硼颗粒的着火燃烧过程研究。

1 试验过程

1.1 团聚硼颗粒制作与固定

使用的团聚硼颗粒(见图1)由河北保定中普瑞托有限公司将纯度大于95%、粒径为10~40 μm 的晶体硼颗粒(见图2)在真空中压制而成,粒径大小为10mm左右。



图1 晶体硼团聚颗粒

Fig.1 boron particle agglomeration

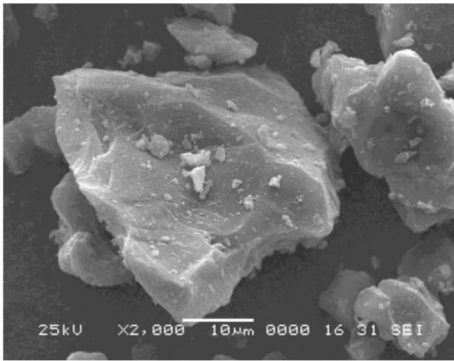


图2 晶体硼的扫描电子显微镜

Fig.2 Scanning electronic micrograph of crystal boron particles

如图3所示,为了观测补燃室流场中单个团聚硼颗粒的点火燃烧过程,将团聚硼颗粒固定在补燃室中,防止硼颗粒被高速气流吹走。

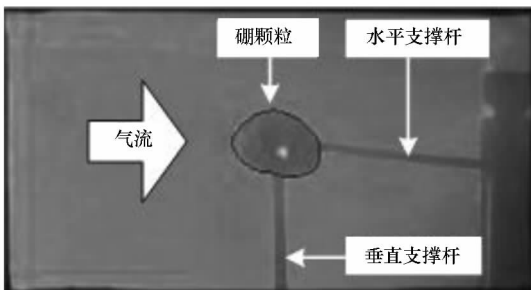


图3 团聚硼颗粒固定图

Fig.3 Fixation micrograph of boron particle agglomeration

固定的方式是在团聚硼颗粒中心打小孔(约1mm),在垂直方向和水平方向各安装一根耐高温的钨棒对团聚硼颗粒进行固定和支撑。

1.2 试验系统

试验系统结构如图4所示。试验系统主体部分为一个带燃气发生器和补燃室的仿真固冲发动机组成,还有空气、氧气和乙醇供应系统,高速摄影系统,固体燃烧产物取样装置,冷却系统和测控系统等。

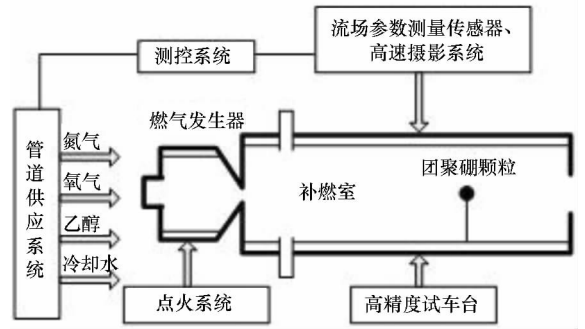


图4 试验系统结构图

Fig.4 Schematic diagram of the experimental system

1.3 试验时序

试验中测量的氧气、乙醇和氮气质量流量-时间曲线如图5所示。

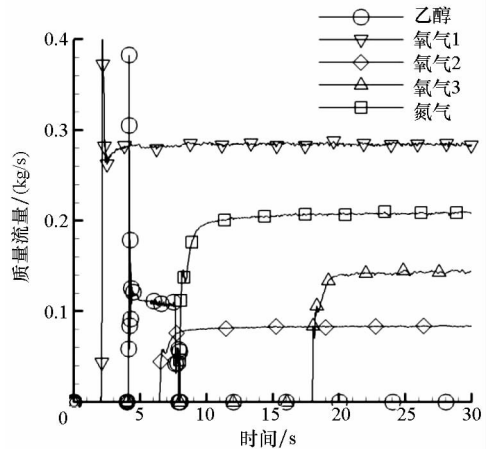


图5 质量流量-时间曲线

Fig.5 Mass flow rate versus time

试验时序分为四个阶段:第一阶段(0~6.5s),在燃气发生器中加入氧气(280g/s)和乙醇(120g/s),点火燃烧产生的富氧燃气对硼颗粒进行加热和点火,乙醇完全燃烧所需的氧气质量流量约为250g/s,因此燃气发生器是富氧条件,氧气的摩尔分数是8.1%;第二阶段(6.5~8s),在燃气发生器中补充加入氧气(80g/s),使燃气中的氧气含量增大,摩尔分数上升到21.9%;第三阶段(8~17s),燃气发生器停止点火,同时停止加入乙醇,加入质量流量为200g/s的氮气,氧气

质量流量不变,这时补燃室流场的温度下降,氧气含量继续上升,摩尔分数为 61.2%;第四阶段(17~30s),在燃气发生器中补充加入质量流量为 140g/s 的氧气,虽然补燃室流场的温度较低,但是氧气含量继续上升,摩尔分数为 68.6%。

1.4 诊断方法

团聚硼颗粒的点火燃烧过程通过石英玻璃观察窗用高速摄影仪进行记录。为判断燃烧过程火焰面的变化以及燃烧前后的颗粒尺寸变化,采用图像边缘检测技术在高速摄影仪的视场中提取团聚硼颗粒的初始轮廓,将加热和燃烧过程中的图像与初始图像进行对比,从而获得试验过程中团聚硼颗粒的形状尺寸变化和火焰位置、形状变化。团聚硼颗粒的初始轮廓如图 3 所示。燃烧后的残渣用日立 S-4800 型扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)、岛津 XRD-6100 型 X 射线衍射仪(X-Ray Diffraction, XRD)、日立 TM3000 型能谱仪(Energy Disperse Spectroscopy, EDS)进行分析。

2 结果及分析

2.1 补燃室压力、温度测量结果

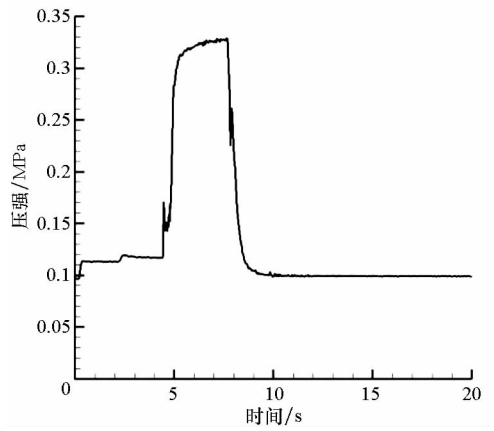
试验中,对补燃室壁面附近的流场温度和压力进行了测量,测量结果如图 6 所示。

由图 6(a)可知,从 5s 开始,压强迅速上升,到达 0.33MPa 左右,与固冲发动机补燃室接近,当燃气发生器停止点火,加入氧气和氮气后,补燃室压强迅速下降到接近环境压强。由图 6(b)可知,在第一阶段,补燃室壁面附近温度达到 1200K 左右,在第二阶段增加氧气量后,燃烧温度进一步上升,达到 1400K 以上,由于壁面采用了冷却,所以温度要低于流场中心温度,燃气发生器停止点火后,气流温度迅速下降。

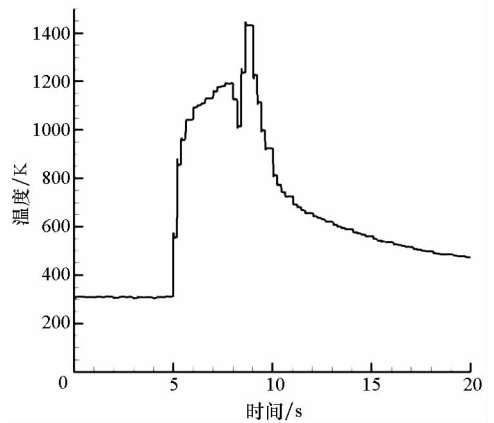
2.2 火焰图像分析

第一阶段的补燃室以及颗粒图像如图 7 所示。图 7(a)和图 7(b)分别为加热开始、加热过程中的团聚硼颗粒照片。由图可以看出,在试验过程的第一阶段,硼颗粒的边缘位置基本无变化,硼颗粒周围未能观测到火焰出现,硼颗粒没有点火燃烧,形状也没有变化,说明补燃室流场的温度和氧气浓度的综合作用不足以使硼颗粒点火。

第二阶段的补燃室以及颗粒图像如图 8 所示。图 8(a)显示硼颗粒未点火燃烧,图 8(b)显示硼颗粒剧烈燃烧,团聚硼颗粒周围出现了亮白色火焰。这是由于在燃气发生器中增加氧气流量



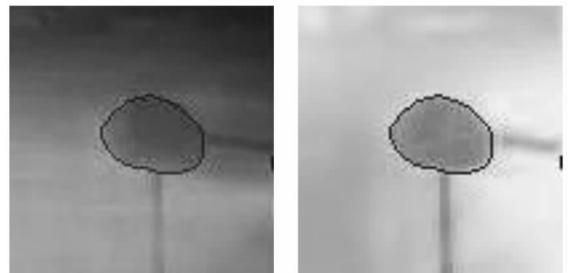
(a) 压力测量结果
(a) Pressure



(b) 温度测量结果
(a) Temperature

图 6 流场参数测量结果

Fig. 6 Measurement results of flow field parameters



(a) $t = 2s$ (b) $t = 5s$

图 7 第一阶段补燃室图像

Fig. 7 Photo of secondary chamber in the first phase

后,由于氧气浓度的增大,乙醇燃烧更加充分,燃气温度上升,硼颗粒点火燃烧。

第三阶段的补燃室以及颗粒图像如图 9 所示。由于停止了乙醇供应,并加入了氮气,使得温度突然下降,补燃室火焰变暗,同时团聚硼颗粒几乎熄灭。

第四阶段的颗粒图像如图 10 所示。图

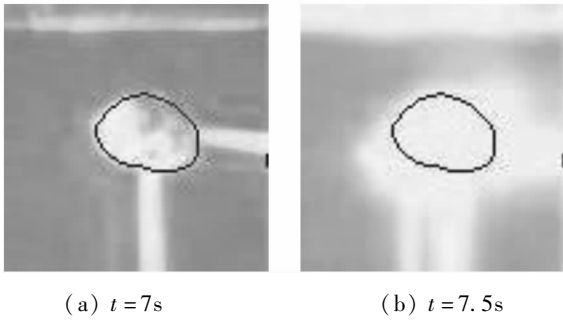


图8 第二阶段补燃室图像

Fig. 8 Photo of secondary chamber in the second phase

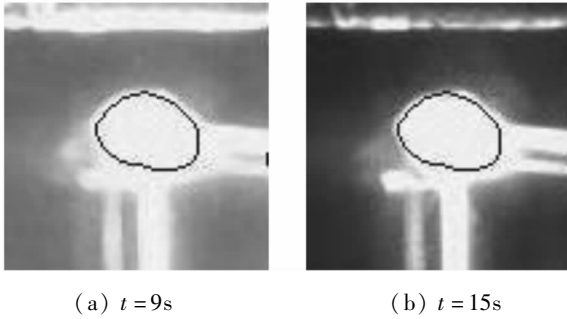


图9 第三阶段补燃室图像

Fig. 9 Photo of secondary chamber in the third phase

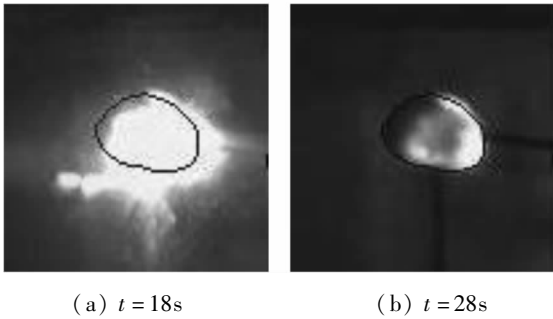


图10 第四阶段补燃室图像

Fig. 10 Photo of secondary chamber in the fourth phase

10(a)中团聚硼颗粒重新点火并剧烈燃烧,在高速气流作用下,迎风面火焰消失。硼颗粒燃烧一段时间后,如图10(b)所示,其火焰逐渐熄灭,可能是由于氧化物凝结在颗粒表面阻止了继续燃烧。观察熄灭后的硼颗粒,发现颗粒尺寸和位置几乎没有变化。

2.3 燃烧残渣分析

对颗粒燃烧的残渣进行直接观察,外表面形态如图11(a)所示,呈灰黑色,有白色物质,迎风面的颜色较深接近黑色,背风面的颜色较浅,呈灰色。颗粒剖面形态如图11(b)所示,颜色与外表面基本一致,迎风面比较紧实,空隙较少,颜色较深,呈黑色,有成片的白色物质,而背风面空隙较多而大,呈灰色,没有发现明显成片的白色物质。

由直接观察结果可知,燃烧过程中高温气流可能进入了颗粒内部,燃气中的CO₂可能与硼反应生成了硼的氧化物和单质的碳,在颗粒内部聚集。

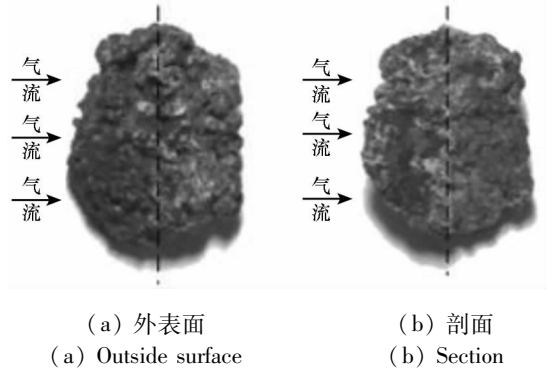


图11 燃烧后颗粒形貌

Fig. 11 Photo of the particle after the test

对残渣进行SEM测试,结果如图12所示。燃烧后颗粒表面物质的形貌分为两种,一种是呈块状结构的物质,另一种是疏松状的物质。

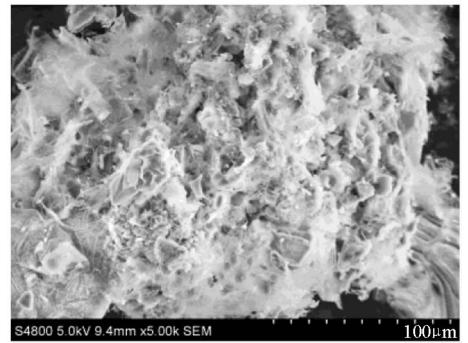


图12 颗粒表面扫描电镜照片

Fig12 SEM photo of the particle surface

对残渣进行XRD测试,结果如图13所示。残渣的主要物相为B(OH)₃,这是由于单质硼燃烧后产生的氧化硼与空气中的水蒸气反应生产了晶体的B(OH)₃。物相中含有微弱的单质碳的X射线衍射峰,说明残渣中含有单质碳的晶体结构。

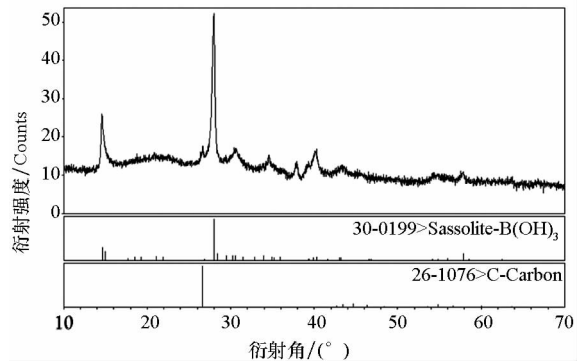


图13 残渣的X射线衍射谱图

Fig. 13 X-ray diffraction patterns of the particle

物相中没有检测到单质硼,可能单质硼表面被硼的氧化物包裹,无法检测出来。

分别对残渣中疏松状物质和块状物质进行 EDS 测试,结果如表 1 所示。

表 1 能谱测试结果

Tab. 1 EDS examination results %

元素	疏松状物质		块状物质	
	元素质量百分数	原子数量百分数	元素质量百分数	原子数量百分数
B	28.11	36.08	21.12	25.12
O	66.43	57.62	35.75	28.72
C	5.46	6.31	43.13	46.16

样品的主要元素成分为 B, O, C, 其中疏松状物质中的氧含量比较高,而碳含量较低,块状物质中的氧含量较低,碳含量较高。

3 结论

(1) 提出了一种补燃室条件下的团聚硼颗粒点火燃烧试验方法,试验中补燃室压强可以达到 0.33MPa 左右,壁面温度可达 1400K 以上,可为团聚硼颗粒点火燃烧提供接近真实补燃室的流场条件,而且可以通过改变反应物流量,方便调整补燃室流场条件。

(2) 通过对高速图像中团聚硼颗粒轮廓的提取,提出了一种团聚硼颗粒点火燃烧过程辨识方法,可以对团聚硼颗粒的点火燃烧过程、火焰结构以及颗粒尺寸变化等进行分析。

(3) 当补燃室流场温度较高而氧气含量低时,团聚硼颗粒不点火燃烧。增大氧气含量后,团聚硼颗粒可以点火燃烧。温度降低后,虽然氧气浓度较高,但硼颗粒不燃烧,需要进一步增大氧气含量,才能使团聚硼颗粒重新点火燃烧。

(4) 试验前后团聚硼颗粒的尺寸变化不大,氧化物向颗粒的背风面集聚较多。燃烧过程中高温气流可能进入了颗粒内部并与硼颗粒发生反应,残渣形貌分为疏松状和块状两种,前者氧含量比较高,碳含量较低,后者氧含量较低,碳含量较高。

参考文献 (References)

[1] Schadow K C. Experimental investigation of boron combustion in air-augmented rockets[J]. AIAA Journal, 1969, 7(10): 1870 - 1876.

[2] Ciezki H K, Claub W, Feinauer A, et al. Investigation of the combustion process of boron particle containing solid fuel slabs in a rearward facing step combustor [C]//Proceedings of

AIAA, 2000 - 3347, 2000.

[3] Mellor A M. Particulate matter in the exhaust of a boron-load solid propellant[J]. AIAA Journal, 1971, 9(10):1944 - 1947.

[4] Pein R, Vinnemeier F. The influence of swirl and fuel composition of boron-containing fuels on combustion in a solid fuel ramjet combustion chamber [C]//Proceedings of AIAA, 1989 - 2885, 1989.

[5] Channapragada R S, Anderson R, Gopalakrishnan A, et al. Mixing, ignition, and combustion analysis of air augmented solid rockets with boron particles [J]. AIAA Journal, 1969, 7(8): 1581 - 1587.

[6] Gany A. Comprehensive consideration of boron combustion in air breathing propulsion [C]//Proceedings of AIAA, 2006 - 4567, 2006.

[7] 方传波,夏智勋,肖云雷,等. 考虑 Stefan 影响的单颗粒硼着火过程研究[J]. 物理学报, 2013, 62(16):164702. FANG Chuanbo, XIA Zhixun, XIAO Yunlei, et al. Study of ignition process of boron particle with considering Stefan flow effects [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(16): 164702. (in Chinese)

[8] 吴秋,陈林泉,王云霞,等. 含硼固冲发动机补燃室内凝相产物燃烧效率测试方法[J]. 固体火箭技术, 2014, 37(1): 134 - 138. WU Qiu, CHEN Linquan, WANG Yunxia. Test method of combustion efficiency for condensed products for boron-based propellant in secondary chamber of solid ducted rocket [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2014, 37(1): 134 - 138. (in Chinese)

[9] 李疏芬. 含硼的固体燃料[J]. 含能材料, 1995, 3(2): 1 - 8. LI Shufen. Boracic solid fuel [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 1995, 3(2): 1 - 8. (in Chinese)

[10] 刘林林,何国强,王英红. 燃料组分对含硼富燃料推进剂一次燃烧性能的影响[J]. 含能材料, 2012, 20(4):475 - 478. LIU Linlin, HE Guoqiang, WANG Yinghong. Effects of fuels on primary combustion of boron based fuel-rich propellant [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012, 20(4):475 - 478. (in Chinese)

[11] 敖文,周俊虎,刘建忠,等. 粒径和晶形对硼颗粒点火燃烧特性的影响[J]. 含能材料, 2013, 21(6): 800 - 805. AO Wen, ZHOU Junhu, LIU Jianzhong, et al. Effects of particle size and crystalline form on the ignition and combustion characteristics of boron particles [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(6): 800 - 805. (in Chinese)

[12] 陈涛,张先瑞,肖金武,等. LiF 包覆对硼粉热氧化特性的影响[J]. 含能材料, 2013, 21(1):57 - 60. CHEN Tao, ZHANG Xianrui, XIAO Jinwu, et al. Effect of LiF coating on the thermal oxidation characteristics for boron powder [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(1): 57 - 60. (in Chinese)

[13] 高东磊,张炜,朱慧,等. 包覆及团聚对硼燃烧的影响[J]. 含能材料, 2007, 15(4):378 - 381. GAO Donglei, ZHANG Wei, ZHU Hui, et al. Effect of coating and agglomerating on combustion of boron [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(4):378 - 381. (in Chinese)

[14] 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 Hongjie, WANG Ningfei, GUAN Dalin. Effect of GAP coating boron on ignition performance and combustion residues for boron based propellants [J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(3): 262 - 264. (in Chinese)