

文章编号: 1006-9941(2015)03-0248-05

固冲发动机补燃室流场条件下硼燃烧试验研究

刘道平¹, 夏智勋¹, 黄利亚², 胡建新²

(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: 建立了一套固冲发动机地面模拟试验系统, 用于研究补燃室流场条件下硼的燃烧, 该试验系统用乙醇与氧气反应加热硼颗粒, 并与空气二次燃烧的方式, 模拟含硼固冲发动机的工作过程, 其一次燃烧产物主要为 H_2 、 CO 和硼颗粒, 补燃室总温、静温值为 1300 ~ 1400 K, 总压、静压值为 0.4 ~ 0.5 MPa, 马赫数值为 0.35 左右, 与真实固冲发动机相关参数值相符合。基于此试验系统, 采集了燃气发生器、补燃室进气口、掺混区、燃烧区和喷管等位置的凝相燃烧产物。扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射 (XRD) 和 X 射线能谱 (EDS) 分析结果表明, 硼在反应过程中呈颗粒状, 整体形貌变化不太明显, 大部分的硼在补燃室中完成反应, 燃烧区硼的反应量最大, 靠近喷管区域次之, 掺混区域最少。

关键词: 固冲发动机; 补燃室; 硼; 试验研究

中图分类号: TJ55; V512

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.03.009

1 引言

硼具有很高的质量热值和容积热值, 是推进剂的最佳燃料。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, 许多学者开展了大量研究。Schadow 等^[1] 认为燃气发生器出口温度不足以使硼颗粒自维持燃烧, 只有当燃气中的气体燃料与掺混空气中的氧反应使温度升高后, 硼颗粒才能补燃。Mellor 等^[2] 的研究表明一次燃烧产物中颗粒的尺寸与其在推进剂中的初始尺寸相差不大。Pein 等^[3] 的研究表明, 补燃室内有旋流时, 有利于硼颗粒的着火燃烧、延长驻留时间和提高燃烧效率。Anderson 等^[4] 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 等^[5] 发现硼以颗粒团的形式从装药表面离开而进入气相参与反应。Ciezki 等^[6] 获得了硼颗粒在燃烧室内燃烧的一些重要特性。

国内针对含硼富燃料推进剂固冲发动机的研究始于 20 世纪 90 年代。夏智勋等^[7] 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] 也基于数值模拟分析了燃气发生器喷嘴出口布局、形状、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。但以上研究大多侧重于硼颗粒点火燃烧机理研究或者含硼推进剂燃烧过程研究, 对固冲发动机流场条件下的燃烧试验研究开展较少。

为此, 本课题组建立了一套地面模拟硼燃烧试验系统, 模拟燃气发生器一次燃烧产物和补燃室总温、静温、总压、静压等, 为硼颗粒的燃烧研究提供接近真实固冲发动机的条件。基于这一试验系统, 开展硼燃烧试验研究, 对燃气发生器、补燃室进气口、掺混区、燃烧区和喷管等位置的凝相燃烧产物进行采集和分析, 获得了凝相燃烧产物成分随轴向位置的变化规律。

2 实验部分

2.1 试剂及分析仪器

试剂: 硼粉为河北省保定市普瑞拓科技有限公司生产的无定形硼粉, 初始粒径为 2 ~ 5 μm (分析时为样品 1); 无水乙醇、氧气均为市售分析纯试剂。

分析仪器: 日立 S-4700 扫描电镜; 岛津 XRD-6100 X 射线衍射仪; 日立 TM3000 能谱仪。

收稿日期: 2013-11-26; 修回日期: 2014-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助 (51276194)

作者简介: 刘道平 (1981-), 男, 博士生, 主要从事燃烧诊断研究。
e-mail: liu_dp@ hotmail.com通信联系人: 夏智勋 (1961-), 男, 教授, 主要从事冲压发动机研究。
e-mail: zxia@ nudt.edu.cn

2.2 试验装置

建立的地面模拟试验系统结构如图 1 所示,主体部分为燃气发生器和补燃室,辅助系统包括空气、氧气和乙醇供应系统、高速摄影系统、凝相燃烧产物取样装置、冷却系统和测控系统等。系统实物如图 2 所示。燃气发生器采用乙醇与纯氧燃烧获得高温燃气,对加入的硼颗粒进行加热,代替含硼固体推进剂。乙醇在氧气中燃烧会产生高温,可以实现对硼颗粒的充分预热。为了方便观测补燃室掺混燃烧过程的和测量流场参数,补燃室采用方形截面设计,在补燃室左右两侧安装方形石英玻璃观察窗口,上下两侧设置通用的空气入口和流场参数测量传感器接口。

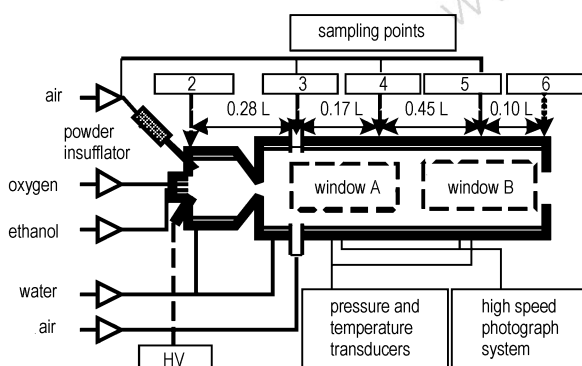


图 1 试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

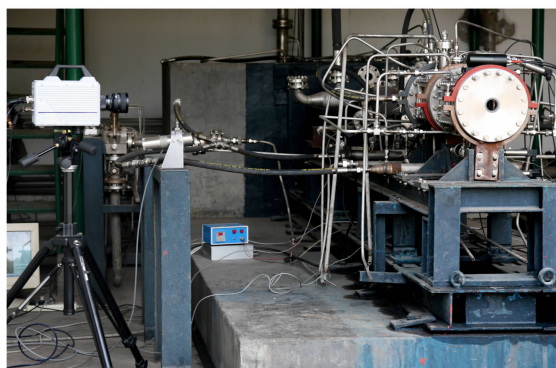


图 2 试验系统实物图

Fig. 2 Physical map of the experimental system

采用热力学计算对含硼推进剂一次燃烧产物和试验系统燃气发生器燃气的主要成分进行对比分析。选用的含硼固体推进剂配方为 AP 25%、HTPB 45%、单质硼 30%, 燃气成分为 H_2 19.54 mol · kg⁻¹、CO 5.99 mol · kg⁻¹、单质硼 25.57 mol · kg⁻¹; 试验系统的燃料配方为 $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ 40%、 O_2 40%、单质硼 20%, 燃气成分为 H_2 25.81 mol · kg⁻¹、CO 17.35 mol · kg⁻¹、单质硼 16.21 mol · kg⁻¹。可知, 两种燃气中的主要气体成分均为 H_2 、CO, 主要凝相成分均为单质硼, 但是含量存

在一定差别, 这是由于配方中硼的含量差异造成的。

2.3 试验设计

试验分 3 组进行, 每组重复 5 次, 试验工况见表 1。第一组试验中, 硼颗粒供应装置中加入 2 g 硼粉, 不加流化空气, 乙醇与纯氧点火反应后, 燃气与硼颗粒在燃气发生器内反应, 收集凝相反应产物作为样品 2。第二组试验中, 硼颗粒供应装置中加入 8 g 硼粉, 乙醇与纯氧点火反应后 (2 s), 加入流化空气, 硼颗粒被输送到燃气发生器内加热, 并随燃气喷射入补燃室, 补燃室不加空气, 在空气入口处收集凝相燃烧产物作为样品 3。第三组试验中, 补燃室中加入 160 g · s⁻¹ 的空气, 在取样点 4、5、6 (见图 1) 收集凝相产物分别作为样品 4、样品 5 和样品 6。在第二、第三组试验中, 每次试验前后对硼颗粒供应装置进行称重, 用质量差与硼颗粒输送时间 (2 s) 的比值作为硼的质量流量。

表 1 试验工况表

Table 1 Test conditions

test group	O_2 /g · s ⁻¹	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ /g · s ⁻¹	air for feeding boron /g · s ⁻¹	air for secondary chamber /g · s ⁻¹	boron /g	sampling point
1	220	120	0	0	2	2
2	220	120	50	0	8	3
3	236	122	50	160	8	4, 5, 6

3 结果及讨论

3.1 补燃室流场参数测试

试验中对第三组试验中补燃室的总温 (T_t)、静温 (T_s) 和总压 (p_t)、静压 (p_s) 进行了实时测量, 按以公式 (1) 对流动马赫数 (Ma) 进行了计算^[15]:

$$Ma = \sqrt{\left[\left(\frac{p_t}{p_s} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \frac{2}{\gamma-1}} \quad (1)$$

式中, 比热比 γ 取值为 1.33。结果如图 3 所示。

从图 3 可看出, 试验过程平稳段 (6 ~ 9 s) 的补燃室的总温、静温均在 1300 ~ 1400 K, 总压、静压值均为 0.4 ~ 0.5 MPa, 马赫数值为 0.35 左右; 而真实固冲发动机补燃室中心轴线的温度在 1400 K 左右, 压力值为 0.3 ~ 0.5 MPa, 马赫数小于 0.5^[16]。这说明使用该试验系统可获得与真实固冲发动机补燃室基本一致的补燃室流场条件。

3.2 补燃室燃烧过程观测

补燃室掺混燃烧过程高速摄影照片如图 4 所示。图 4a 中, 窗口 A 位于空气入口附近, 照片左边为补燃室头部, 颜色比较明亮, 说明燃气发生器出口喷出的燃

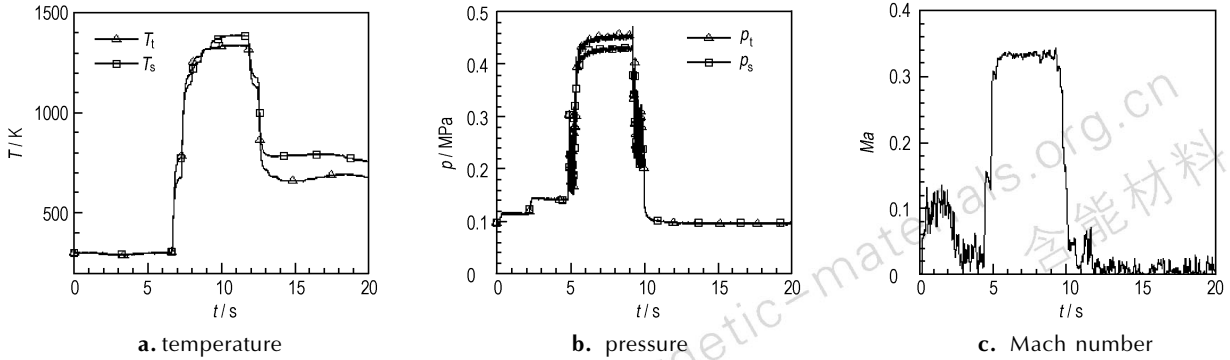


图3 试验系统补燃室的压力、温度和马赫数随时间变化曲线

Fig.3 Curves of temperature, pressure and Mach number changing with time in the secondary chamber

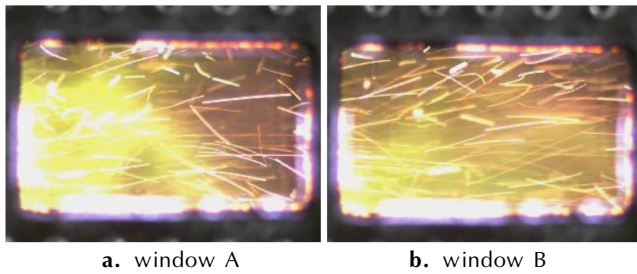


图4 补燃室高速摄影照片

Fig.4 High speed photographs of the secondary chamber

气温度较高,右半部分有一片暗色区域,说明燃气与空气掺混以后,温度降低。图4b中,窗口B位于补燃室后部,火焰的颜色比较明亮而均匀,说明在补燃室后段,气相燃料复燃,温度上升,硼颗粒点火燃烧。

3.3 补燃室凝相燃烧产物分析

3.3.1 扫描电镜(SEM)测试

样品的SEM照片如图5所示。样品1中,无定形硼为颗粒状,粒径为 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 。样品2中,颗粒之间的界限很模糊,这是因为在第一组的试验中,整个试验过程硼颗粒被放置在燃气发生器的富燃燃烧产物中,被高温燃气加热,硼颗粒上覆盖着液态氧化硼,样品冷却后氧化硼凝结在颗粒表面上。样品3中颗粒粒径与样品差别不大,颗粒之间的界限比较明显,是因为在第二组的试验中,颗粒进入燃气发生器后,随即被喷射进入补燃室,并被取样装置收集,颗粒在燃气中加热和与氧气反应的时间很短。样品4~6的形貌差别不是很大,只是样品表面的鳞状物逐渐增多,这是因为硼和氧

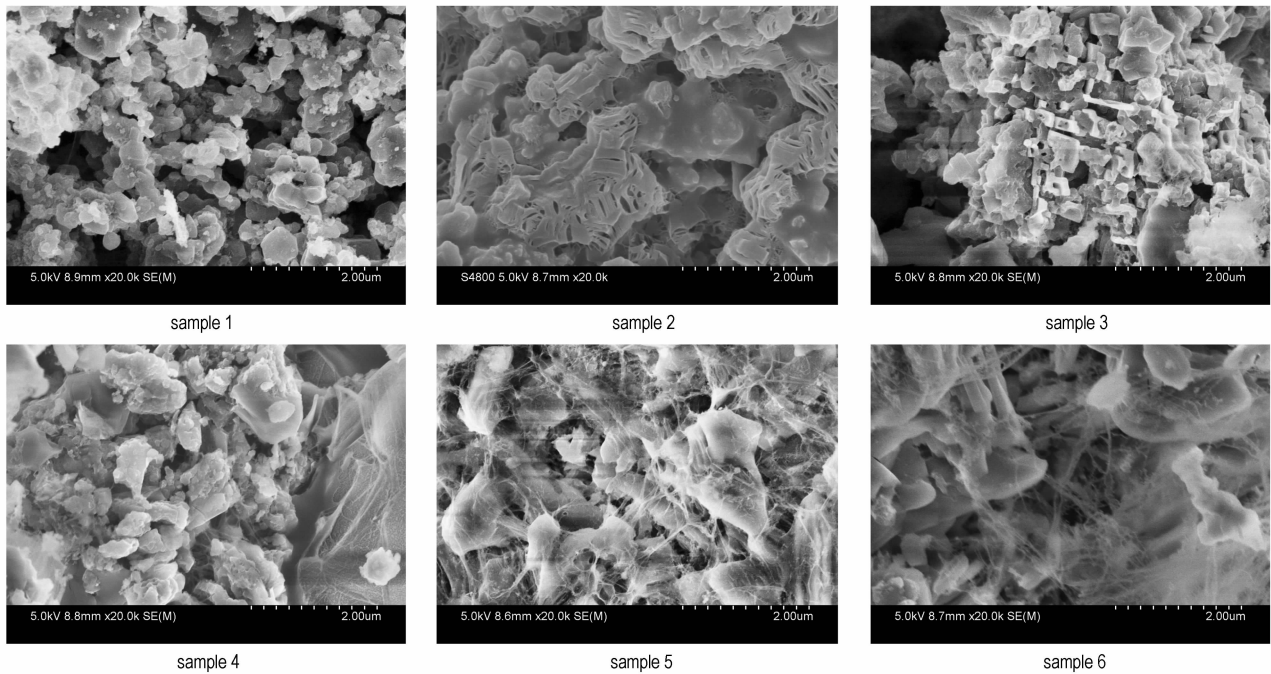


图5 6个样品的场发射扫描电镜照片

Fig.5 SEM photographs of six samples

的反应的最终产物是 B_2O_3 , B_2O_3 吸收空气中的水蒸气形成鳞状的晶体硼酸($B_2O_3 + H_2O \rightarrow 2B(OH)_3$), 样品中的 $B(OH)_3$ 的含量可以表征 B_2O_3 的含量, 因此可以看出样品4~6的硼氧化物含量逐渐增多。

3.3.2 X射线衍射(XRD)测试

样品的X射线衍射图谱如图6所示。XRD测试可以定性得到样品中结晶物质成分, 6个样品的X射线衍射谱线基本一致, 只是强度存在差异。样品中的主要晶体物质为 $B(OH)_3$, 与样品的SEM测试分析结果一致。因为试验使用的是无定形硼而非晶体硼, 所以没有检测到单质硼。

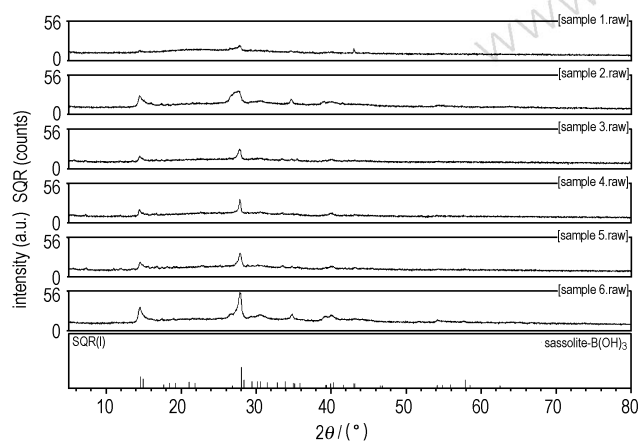


图6 6个样品的X射线衍射图谱

Fig.6 X-ray diffraction patterns of six samples

3.3.3 X射线能谱(EDS)测试

用X射线能谱仪(EDS)分析得到各样品中的元素质量分数, 结果如图7所示。样品中的主要元素是硼、氧和镁, 根据XRD测试, 样品中应含有少量氢元素, 但是氢是轻量元素, EDS无法测试出来。硼元素和氧元素的含量变化很明显, 并且成对称性变化, 而镁元素的含量很低, 几乎不变。

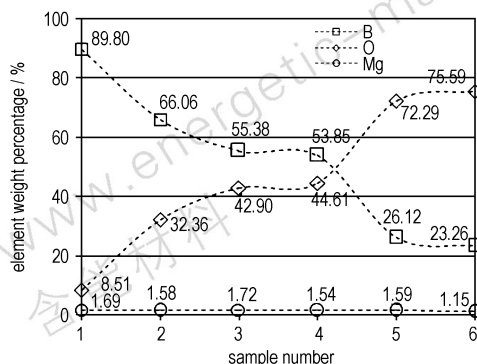


图7 6个样品的元素质量分数

Fig.7 Element mass fraction of six samples

从样品1到样品2再到样品3, 硼元素和氧元素的质量分数呈近似线性变化, 说明一部分硼在燃气发生器内与氧气反应, 但是样品3中硼的反应量大于样品2, 这是因为在第一组试验中, 硼是静置在燃气发生器中, 硼颗粒“堆放”在一起, 与燃气中的氧气接触不充分, 所以反应量较少。在第二组试验中, 使用流化气将硼颗粒播撒到了燃气发生器中, 硼颗粒呈悬浮状态, 与燃气中的氧接触比较充分, 所以反应量比样品2多。从样品3到样品4, 硼元素和氧元素的质量分数变化比较小, 说明在取样点3与4之间的区域内, 硼颗粒与氧气的反应量很少, 其原因可能是这一区域位于空气入口下游附近, 是燃气与空气的掺混区, 高温燃气与空气掺混后, 气相燃料还没有补燃, 流场温度比较低, 不满足硼着火燃烧条件, 硼的反应量少。从样品4到样品5, 硼元素的质量分数急剧减少, 而氧元素的质量分数急剧增加, 说明在取样点4到5之间的区域内, 硼颗粒与氧气大量反应, 这可能是因为在这一区域内, 燃气与空气完成了掺混, 气相燃料补燃, 温度升高, 大量硼着火燃烧, 使得硼的氧化产物大量增加。从样品5到样品6, 硼元素和氧元素的质量分数变化又很平缓, 这可能是经过取样点4到5之间的剧烈燃烧反应后, 氧气浓度下降, 氧化硼含量增加, 硼的反应速率下降。在样品1~6中, 镁元素的含量基本保持不变, 这是因为镁被用于还原氧化硼获得无定形硼($B_2O_3 + 3Mg \rightarrow 2B + 3MgO$), 因此, 在整个试验过程中, 镁元素以氧化物的形式存在, 镁元素不再反应, 其含量也基本不变。

4 结论

(1) 采用乙醇和纯氧燃烧加热硼颗粒的方式获得的一次燃烧产物成分为 H_2 、 CO 和单质硼, 补燃室的总温、静温为1300~1400 K, 总压、静压值为0.4~0.5 MPa, 马赫数值为0.35左右, 与真实固冲发动机相关参数相符合, 说明本研究的试验系统可以为硼燃烧试验提供接近真实固冲发动机的流场条件。

(2) 对试验系统中燃气发生器、补燃室进气口、掺混区域、燃烧区域和喷管位置的凝相燃烧产物进行取样和测试。SEM测试表明, 硼颗粒在反应过程中呈颗粒状, 整体形貌变化不太明显。XRD测试表明, 样品的结晶物质为硼酸。

(3) EDS测试到了样品的主要元素硼、氧和少量镁。硼元素和氧元素的质量分数变化明显, 二者趋势相反。在燃气发生器中, 硼有一部分被氧化, 大部分的硼在补燃室中完成反应。在补燃室空气入口下游掺混

区域,硼的反应量最少,在随后区域内硼大量反应,在靠近喷管的区域内硼的反应量又较少。

参考文献:

- [1] Schadow K C. Experimental investigation of boron combustion in air-augmented rockets[J]. *AIAA Journal*, 1969, 7(10): 1870–1876.
- [2] Mellor A M. Particulate matter in the exhaust of a boron-load solid propellant[J]. *AIAA Journal*, 1971, 9(10): 1944–1947.
- [3] 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]//AIAA, 1989: 89–2885.
- [4] Channapragada R S, Anderson R, et al. Mixing, ignition, and combustion analysis of air augmented solid rockets with boron particles[C]//AIAA, 1967: 67–481.
- [5] Alon Gany. Comprehensive consideration of boron combustion in air breathing propulsion[C]//AIAA, 2006: 4567.
- [6] 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]//AIAA, 2000: 3347.
- [7] 方传波, 夏智勋, 肖云雷. 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 Chuan-bo, XIA Zhi-xun, XIAO Yun-lei, et al. Study of ignition process of boron particle with considering Stefan flow effects[J]. *Acta Phys*, 2013, 62(16): 164702.
- [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 Lin-quan, WANG Yun-xia. 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.
- [9] 李疏芬. 含硼的固体燃料[J]. *含能材料*, 1995, 3(2): 1–8.
LI Shu-fen. Boracic solid fuel[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 1995, 3(2): 1–8.
- [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 Lin-lin, HE Guo-qiang, WANG Ying-hong. Effects of fules on primary combustion of boron based fuel-rich propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(4): 475–478.
- [11] 敖文, 周俊虎, 刘建忠. 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 Jun-hu, LIU Jian-zhong, et al. Effects of particle size and crystalline form on the ignition and combustion characteristics of boron particles[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(6): 800–805.
- [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 Xian-rui, WANG Yuan-yuan, et al. Effect of LiF coating on the thermal oxidation characteristics for boron powder[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(1): 57–60.
- [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 Dong-lei, ZHANG Wei, ZHU Hui, et al. Effect of coating and agglomerating on combustion of boron[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(4): 378–381.
- [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 Hong-jie, WANG Ning-fei, GUAN Da-lin. 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.
- [15] 钱翼稷. 空气动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 194–195.
QIAN Yi-ji. Aerodynamics[M]. Beijing: Beihang University Press, 2008: 194–195.
- [16] 胡建新. 含硼推进剂固体火箭冲压发动机补燃室工作过程研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
HU Jian-xin. Research on the secondary combustion chamber operation process of boron-based propellant ducted rocket[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.

Experimental Investigation of Boron Combustion in Flow Field Conditions in Secondary Chamber of Ducted Rocket

LIU Dao-ping¹, XIA Zhi-xun¹, HU Jian-xin², HUANG Li-ya²

(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: Boron based ducted rocket experimental system for ground simulation was established to study the boron combustion. Through heating the boron in a primary chamber by the combustion gas of the ethanol and oxygen, and using air react with boron in the secondary chamber, the working process under the condition of the flow field was simulated, and the similar condition for the real ducted rocket was obtained as following: the compositions of primary products are H₂, CO and boron particles, and in the secondary chamber, the total and static temperatures 1300–1400 K, total and static pressures 0.4–0.5 MPa and Mach number about 0.35. With the experimental system, the condensed products at different axial locations including the primary chamber, secondary chamber inlet, mixture region, combustion region, nozzle, were collected and analyzed by the Scanning Electron Microscope, X-ray diffraction and the energy dispersive X-ray spectroscopy. Results show that boron particles are grain during the reaction and its morphology changes a little. The boron is combusted mainly in the secondary chamber, and most in the combustion region, less in the region before the nozzle, and the lest in the mixture region.

Key words: ducted rocket; secondary chamber; boron; experimental investigation

CLC number: TQ565; O38

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.03.009