0254-6124/2016/36(4)-492–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

YIN Yongli, WANG Shuangfeng, LIU Renhao, YANG Jingsong, ZHU Feng, TIAN Liu. Experimental facility for ignition and burning of solid materials aboard SJ-10 satellite (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(4): 492-496. DOI:10.11728/cjss2016.04.492

SJ-10 卫星固体材料燃烧实验装置 *

尹永利[1] 王双峰[2] 刘仁豪[1]
杨京松[1] 朱 凤[2] 田 柳[1]

1(中国航天员科研训练中心 北京 100094)

2(中国科学院力学研究所 微重力重点实验室 北京 100190)

摘 要 为对微重力条件下固体材料着火和火焰传播特性进行研究, 研制了实践十号 (SJ-10) 卫星固体材料燃烧实验装置. 利用空间高真空条件, 采用实验段内气体环境更新和控制技术, 实现了在有限实验空间内对多个实验样品进行研究, 并提供准确可控的实验环境条件 (氧气浓度和气流速度). 通过地面试验验证, 该装置可通过实验样品、氧气浓度、气流速度、点火方式等实验参数的灵活组合, 实现空间实验机会的充分利用和预定科学目标.

关键词 微重力实验, 燃烧, 固体材料, SJ-10 卫星

中图分类号 V 524

Experimental Facility for Ignition and Burning of Solid Materials aboard SJ-10 Satellite

YIN Yongli[1] WANG Shuangfeng[2] LIU Renhao[1]

YANG Jingsong[1] ZHU Feng[2] TIAN Liu[1]

1(*China Astronaut Research and Training Center, Beijing* 100094)

2(*Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract Ignition of solid fuels and subsequent transition to flame spread is of fundamental interest and practical importance for fire safety. Motivated primarily by fire safety of spacecraft, a renewed interest in microgravity flame spread over solid materials has arisen. With few exceptions, however, research on microgravity flame spread has been focused on thermally thin fuels due to the constraint on available test time. Till now still little is known about flame spread over thick fuels in microgravity. A facility is described, which has been designed to examine the ignition and burning behaviors of thick solids onboard SJ-10 satellite of China. The combustion experiments will be conducted with varying low velocity flow and varying ambient oxygen concentration. Other variables to be tested are the effects of fuel type and geometry. The important observations from space experiments include

* 中国科学院空间科学战略性先导科技专项项目资助 (XDA04020202-10, XDA04020410)
2015-11-10 收到原稿, 2016-04-01 收到修定稿
E-mail: yinbid@139.com

flame behavior and appearance as a function of oxygen concentration and flow velocity, temperature variation in gas and solid phases, and flame spread rate. The research will focus on: (i) finding a limiting oxygen concentration or flow velocity where a flame will propagate in microgravity, and comparing the limits with those on Earth, (ii) evaluating effects of flow velocity, oxygen percentage and material shape on flame spread modes, and (iii) improving the prediction model of solid material combustion.

Key words Microgravity experiment, Combustion, Solid material, SJ-10 satellite

0 引言

燃烧是人类利用矿物能源的主要手段, 燃烧技术在航空航天推进等领域中具有重要应用. 加深对燃烧现象的科学理解, 是开发高效低污染燃烧技术以及合理利用能源的有效途径. 微重力提供了一种减轻浮力、抑制颗粒或液滴沉降的环境 [1], 为检验经典燃烧理论及分析燃烧机理提供了依据.

微重力燃烧研究在载人航天飞行器的防火工程实际需要中也具有重要意义, 载人航天飞行器的防火安全直接关系着航天员和飞行器的安全. 有关微重力燃烧的科学研究及理论和实验不断深入, 积累了丰富的实验数据 [2−4]. 尽管对固体材料燃烧问题开展了很多地面实验和理论研究 [5−7], 但是由于地面设施微重力时间长度的限制, 已有对微重力下材料燃烧过程的实验主要集中在热薄材料 [8−10], 而关于热厚材料的实验结果十分有限, 对微重力环境中热厚材料燃烧特性的分析尚显不足. 因此, 针对载人航天飞行器防火安全问题, 需要深入广泛地开展微重力燃烧科学研究.

由于空间实验条件限制, 固体材料燃烧实验装置要求强度高、气密性好、功耗低, 而又必须体积小、质量轻、空间利用率高, 以往实验装置 [11] 难以实现长期微重力环境下的试样引燃及燃烧环境控制和观测.

在长期微重力环境中提供准确可控的实验环境条件 (氧气浓度和气流速度), 通过观察和记录火焰图像, 研究火焰形状和温度场的分布, 并将其与地面实验结果及数值模拟结果进行对比, 建立固体材料着火以及火焰传播与演化的理论和模型, 是实践十号 (SJ-10) 卫星固体材料燃烧实验的主要科学目标 [12]. 本文重点对实现该科学目标的有效载荷研制技术进行分析.

1 实验装置设计

SJ-10 卫星固体材料燃烧实验装置的主要功能包括点燃试样、创造低速流动环境、测量燃烧温度、采集燃烧图像、控制实验舱内气体环境、在轨改变工况、自主控制实验进程等. 试样材料为 PMMA (聚甲基丙烯酸甲酯) 和 HDPE (高密度聚乙烯), 试样包括 6 块平板试样和 2 根柱状试样, 实验段内初始氧气浓度为 21%∼50%, 气流速度为 0∼15 $\mathrm{cm\cdot s^{-1}}$.

实验装置主要由 4 大模块组成 (见图 1), 从左至右依次为供气调压模块与测控控制模块、实验箱体模块、燃烧实验段模块. 实验箱体模块用于承载实验装置的各部组件, 确保装置满足环境力学要求. 燃烧实验段模块用于构造 8 个相对独立的实验腔室, 形成预定的通风流速, 并观察燃烧图像. 供气调压模块用于控制实验舱内气体的充装和排放. 测控控制模块用于控制腔室内的燃烧环境和实验进程. 整个实验装置采用模块化设计, 实验箱模块、供气调压模块和测控控制模块作为固定的平台, 在地面测试中, 8 个试样燃烧完成后, 燃烧实验段模块可以作为一个整体进行更换. 图 2 所示为实验装置外观.

1.1 实验箱体模块

实验箱体模块主要由筒体组件、支架和底板组成. 筒体由直筒段和两侧法兰组成, 有效容积约为

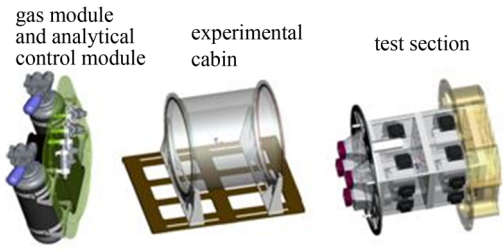


图 1 固体材料燃烧装置组成

Fig. 1 Components of the facility

39 L, 直筒段通过钨极氩弧焊与两侧法兰焊接, 两端固定法兰用丁晴橡胶 O 形圈与前后端盖密封, 漏率 $\leqslant 4.6\times10^{-6}$Pa·m^3·s^{-1}. 筒体组件表面经喷黑漆处理, 满足卫星内产品表面发射率的要求.

1.2 燃烧实验段模块

燃烧实验段模块主要由燃烧实验段组件、试样组件和传感器组件等组成, 如图 3 所示.

燃烧实验段组件主要由风扇、前燃烧段、后燃烧段、CCD 相机 (其中板状试样从两个方向进行观测, 柱状试样从一个方向观测) 和整流组件等组成. 风扇形成的气流通过整流组件整流, 形成均匀流动. 风扇选用小型紧凑型风机, 采用滚动轴承, 机械强度高、耐磨性好. 通过风扇的 PWM 调速功能, 实现实验过程中不同气流速度的控制.

试样组件包括板状试样和柱状试样, 每个试样上安装一根电热丝, 用于点燃试样. 在每个试样的表面和上方设置 5 路 R 型热电偶, 热电偶测温点直径为 30 μm, 其响应时间短, 可在 0~1600°C 区间内长期工作. 热电偶和电热丝安装位置如图 4 所示.

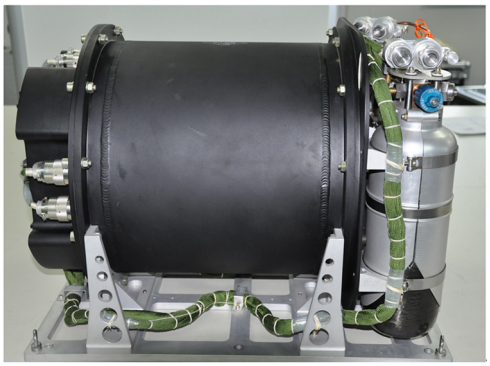


图 2 实验装置

Fig. 2 Photograph of the facility

传感器组件由 3 路舱压传感器、1 路氧浓度传感器和 1 路舱温热电偶组成. 舱压传感器采用 3 取 2 原则, 增加了系统的可靠性, 测量精度为 ±1% FS; 氧浓度传感器用于测量配气后实验舱内的实际氧气浓度; 舱温热电偶为 K 型, 测温范围为 0~100°C, 精度 ±0.5% FS.

1.3 供气调压模块

供气调压模块由 2 路供气系统和 1 路排气系统组成 (见图 5), 功能包括向实验舱内供应气体和向外排出气体. 供气系统由高压气瓶、截止阀、减压阀、安全阀、供气自锁电磁阀和管路组成, 排气系统由 2 个泄压自锁电磁阀和管路组成. 气瓶设计额定工作压力 42 MPa, 本次实验降额为 13 MPa, 设计裕度大, 安全性高.

1.4 测控控制模块

测控控制模块 (控制器) 用于接收注入指令, 依据实验流程建立预定的实验环境 (包括气压、氧气浓度和气体流动速度), 依次对 8 个试样进行点火燃烧实验; 具备实验装置的供配电管理、数据通信、指令接收、工程参数采集、外设控制、图像采集和压缩等功能.

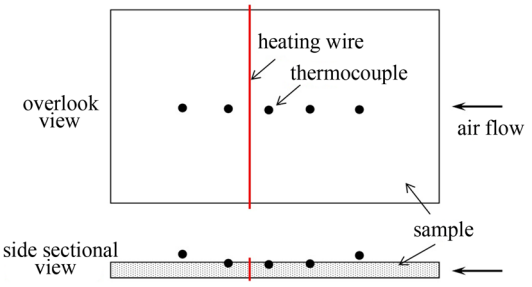


图 4 热电偶和点火丝安装位置

Fig. 4 Positions of the thermocouples and ignition wire

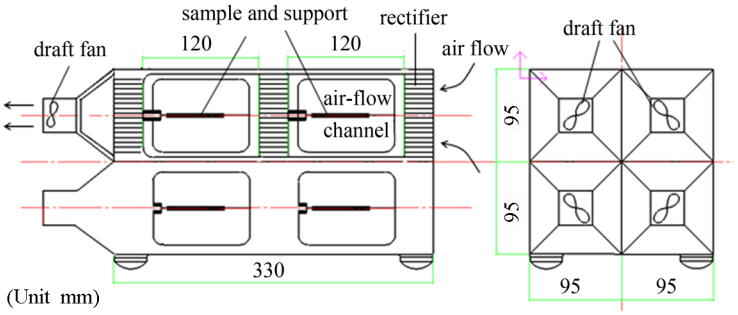


图 3 燃烧实验段模块原理

Fig. 3 Schematic of the test section

控制器硬件由电源变换板、CPU 处理器板、信号采集板、设备控制板及产品机壳组成. 控制器 CPU 软件主要功能包括 RS485 总线通信、试验流程控制、压缩图像、控制指令、模拟量采集、看门狗和定时等; 控制器 FPGA 软件主要功能包括时钟输入、复位功能、遥测采集、数据接收、外设开关控制、科学数据组帧传输等.

1.5 设计分析

根据可靠性和安全性工作项目及要求, 从设备安全性可靠性设计出发, 建立了固体材料燃烧实验装置的可靠性模型, 并应用加权分配法可靠性分配公式, 得到各单元和组件的可靠性指标分配. 经复核复算, 实验装置满足可靠性分配指标.

固体燃烧实验装置在设计完成后分别进行了模态分析及随机振动分析和热分析, 验证了其环境适应性设计的合理性.

2 地面试验验证

针对固体材料燃烧实验装置已完成大量地面测试和试验, 包括单机、SJ-10 卫星有效载荷分系统以及卫星系统等各级测试、联试和试验、全面检验装置的功能、性能和实验流程. 结果表明, 装置状态满足设计要求. 根据卫星工程研制进程, 固体材料燃烧实验装置将完成在轨空间实验任务.

图 6 所示为一个完整实验流程中实验舱内气体

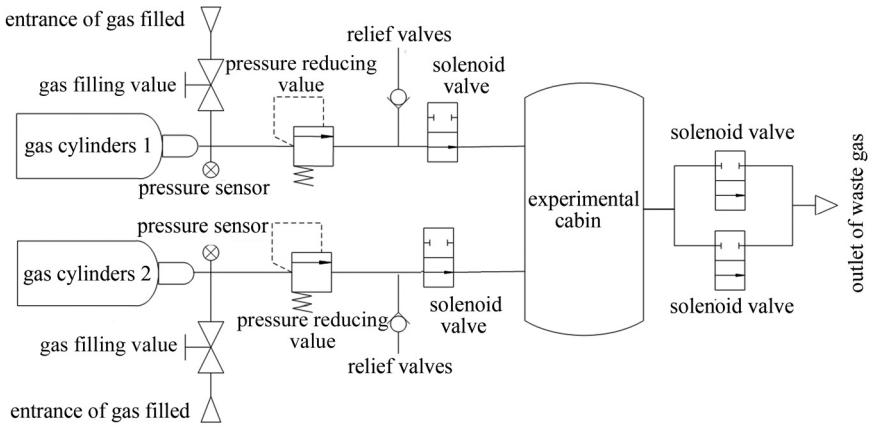


图 5 供气调压模块

Fig. 5 Schematic of the gas module

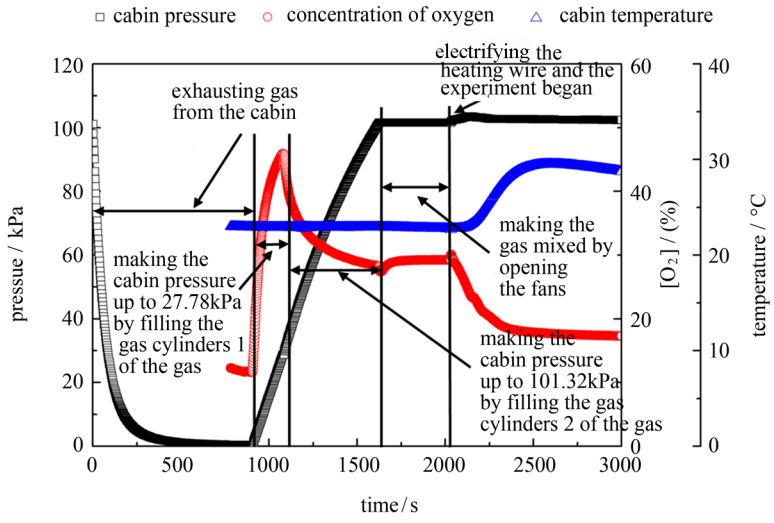


图 6 实验舱内压力、温度和氧浓度随时间变化曲线

Fig. 6 Variation of pressure, temperature and oxygen concentration in the experimental cabin with time

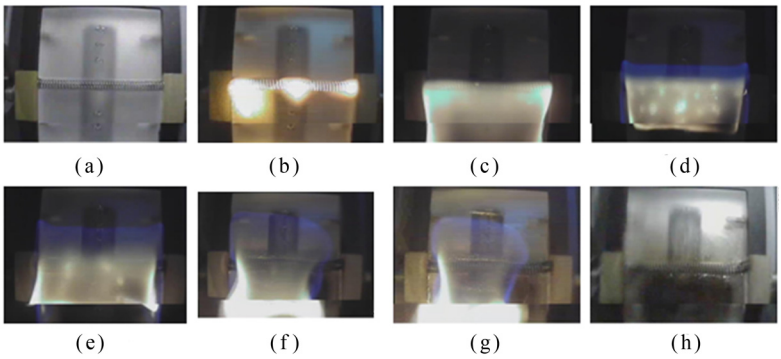


图 7 试样点燃和火焰传播过程

Fig. 7 Images of the ignition and flame propagation

压力、温度和氧气浓度的变化过程, 说明了实验环境 (压力和氧气浓度) 的控制过程及试样燃烧对环境温度、压力和氧气浓度的影响. 图 7 给出一个平板试样点燃和火焰传播的过程, 火焰行为变化反映了气流速度的改变.

3 结论

根据科学研究目标和卫星平台要求, SJ-10 卫星固体材料燃烧实验装置能够自动控制实验过程, 在实验段内形成低速流动, 对多个试样进行燃烧实验, 测量试样和火焰温度, 获得试样点燃和火焰传播燃烧过程中的图像, 控制实验舱内的气体环境 (压力和氧气浓度), 向外排出废气, 测量实验段内环境参数等. 地面测试和试验表明, 该装置各项技术指标符合设计要求, 性能稳定可靠, 可以满足空间实验任务和科学目标的需求.

参考文献

[1] ZHANG Xia. Progress in fire safety research for manned spacecraft [J]. *Adv. Mech.*, 2006, **35**(1): 100-115 (张夏. 载人航天器火灾安全研究进展 [J]. 力学进展, 2006, **35**(1): 100-115)

[2] KUMAR A, SHIH H Y, T'IEN J S. A comparison of extinction limits and spreading rates in opposed and concurrent spreading flames over thin solids [J]. *Combust. Flame*, 2003, **132**: 667-677

[3] FRIEDMAN R. Fire safety in spacecraft [J]. *Fire Mater.*, 1996, **20**: 235-243

[4] FRIEDMAN R, ROSS H D. Combustion technology and fire safety for human-crew space missions [C]//Microgravity Combustion: Fire in Free Fall. San Diego: Academic Press, 2001: 525-562

[5] FRIENDS R, URBAN D L. Progress in Fire Detection and Suppressions Technology for Future Space Missions: AIAA-2000-5251 [R]. Long Beach: AIAA, 2000

[6] OLSON S L, MILLER F J, WICHMAN I S. Characterizing fingering flamelets using the logistic model [J]. *Combust. Theory Model*, 2006, **10**: 323-347

[7] LONG Y, WICHMAN I S. Theoretical and numerical analysis of a spreading opposed-flow diffusion flame [J]. *Proc. Roy. Soc.*, 2009, **465**: 3209-3238

[8] WANG Shuangfeng, XIAO Yuan. A ground-based experimental method for solid material flammability simulation in microgravity environment [J]. *Manned Spacef.*, 2012, **18**(4): 70-74 (王双峰, 肖原. 微重力下固体材料燃烧特性的地面实验模拟方法研究 [J]. 载人航天, 2012, **18**(4): 70-74

[9] DU Wenfeng, HU Wenrui. Effect of pressure and radiation on the propagation of flame along a thin fuel surface under microgravity environment [J]. *Sci. China: E*, 2003, **33**(5): 405-412 (杜文锋, 胡文瑞. 微重力下环境压力和辐射再吸收对火焰沿薄燃料表面传播的影响 [J]. 中国科学 (E 辑), 2003, **33**(5): 405-412)

[10] OLSON S L, MILLER F J, JAHANGIRIAN S, WHICHMAN I S. Flame spread over thin fuels in actual and simulated microgravity conditions [J]. *Combust. Flame*, 2009, **156**(6): 1214-1226

[11] WANG Shuangfeng, YIN Yongli. Microgravity smoldering combustion experiments abroard the China recoverable satellite SJ-8 [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, **28**(1) 6-27 (王双峰, 尹永利. 卫星搭载聚氨酯泡沫闷烧实验 [J]. 空间科学学报, 2008, **28**: 6-27)

[12] HU W R, Zhao J F, Long M, *et al.* Space program SJ-10 of microgravity research [J]. *Microgravity Sci. Technol.*, 2014, **26**: 159-169