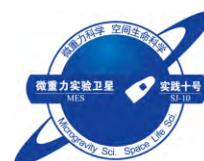


非金属材料在微重力环境中的着火及燃烧特性研究¹⁾

王双峰^{*,2)} 尹永利[†] 朱 凤^{*} 刘仁豪[†] 杨京松[†] 田 柳[†]

^{*}(中国科学院力学研究所, 中国科学院微重力重点实验室, 北京 100190)

[†](中国航天员科研训练中心, 北京 100094)



摘要 微重力条件下固体材料的着火和火焰传播特性研究对于发展燃烧理论、保障航天器防火安全具有重要意义。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研究主要集中在热薄材料,而关于热厚材料的实验结果十分有限。作为实践十号(SJ-10)卫星科学实验项目之一,非金属材料燃烧实验将利用长时间微重力条件开展低速流动中典型热厚材料着火和火焰传播过程研究。简要介绍非金属材料燃烧项目的研究目标、空间实验内容、有效载荷技术特点和地面实验验证情况。

关键词 非金属材料,着火,火焰传播,微重力,实践十号卫星

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **doi:** 10.6052/1000-0879-16-070

引 言

在载人航天飞行过程中,潜在着多种威胁航天器和航天员安全的风险,航天器舱内的火灾事故是最令人恐惧、危害最严重的一种。实际上,在人类载人航天的历史上已经发生过多次火灾事故,并造成严重损失。因此,防火安全是载人航天器设计和运行中必须妥善解决的最重要问题之一,从 20 世纪 60 年代开始,这方面的研究一直受到各航天大国的高度重视^[1-3]。

载人航天器舱内的可燃物主要是各种非金属材料。为了最大程度地预防航天器舱内火灾的发生,首先需要掌握所使用的非金属材料的防火特性,建立材料选用和使用规范,对不得不使用的可燃材料,根据其燃烧特性制定相应的火灾预防办法^[2,4-5]。因此,理解非金属材料的着火、燃烧及火灾演变规律是防火安全的基础,也是检测和控制火灾的前提,在全面开展火灾安全研究工作时,应该受到优先重视。另一方面,地面上的燃烧总是受到浮力对流的影响,

而航天器在轨飞行时处于微重力状态,这时浮力对流基本消失,燃烧过程明显不同于地面常重力下的情况,不可能不加验证地把地面上材料的燃烧特性照搬到航天器中,必须系统地开展微重力环境中材料燃烧特性的研究。

实践十号卫星科学研究项目“典型非金属材料在微重力环境中的着火及燃烧特性研究”以载人航天器舱内的防火安全为应用目标,对微重力条件下热厚(thermally thick)非金属材料的燃烧特性进行研究。通过卫星空间实验,研究固体材料在微重力条件下的着火和燃烧特性,分析燃料种类、形状和环境气流等因素对材料着火和火焰传播机理的影响规律,并将其与地面实验结果、数值模拟结果相对照,认识微重力环境中火灾发生和演变的规律,建立非金属材料火焰传播和可燃极限模型。研究将取得载人航天器火灾预防的关键环节——材料防火性能评价的实质性技术原理的突破,为航天器设计中材料防火性能的评价、材料筛选以及火灾安全措施

本文于 2016-03-11 收到。

1) 中国科学院空间科学战略性先导科技专项资助项目(XDA04020410, XDA04020202-10)。

2) 王双峰,博士,副研究员,从事燃烧基础、微重力燃烧及航天器防火安全研究。E-mail: sfwang@imech.ac.cn

引用格式: 王双峰,尹永利,朱凤等.非金属材料在微重力环境中的着火及燃烧特性研究.力学与实践,2016,38(2):217-220

Wang Shuangfeng, Yin Yongli, Zhu Feng, et al. A study on the ignition and burning of non-metallic solid materials in microgravity. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(2): 217-220

建立和完善提供科学依据。

目前,国内外关于微重力下固体材料燃烧特性的实验研究主要集中于热薄(thermally thin)材料,对于热厚材料燃烧特性仅有少量实验数据[6],而实际使用的非金属材料大部分都属于热厚材料。本项目对微重力环境中热厚材料的着火和燃烧特性开展研究,研究目标在国际上处于领先,研究内容更能反映现实情况。另外,项目研究成果将促进对固体材料燃烧过程的理解,丰富和完善现有的固体材料燃烧理论,具有重要科学价值。

1 空间实验的内容和技术

空间实验的研究内容包括:(1)热厚材料的着火及火焰传播特性观测;(2)材料种类和几何形状不同时,其着火和火焰传播特性的观测;(3)环境气流方

向、速度和氧气浓度不同时,材料着火和火焰传播特性的观测。实验用非金属材料样品包括6块平板材料和2根柱状材料,火焰传播类型包括逆风、顺风、部分顺风部分逆风。图1和图2分别为空间实验样品安装设计图和实物照片。

根据科学研究目标和卫星平台资源条件的要求,空间实验设备(有效载荷)实现自动控制实验过程、在实验段内形成预定的低速流动条件、依次对8个试样进行着火和火焰传播实验、对试样进行加热和点燃、测量试样点燃和火焰传播过程中的温度变化数据、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一系列先进功能。

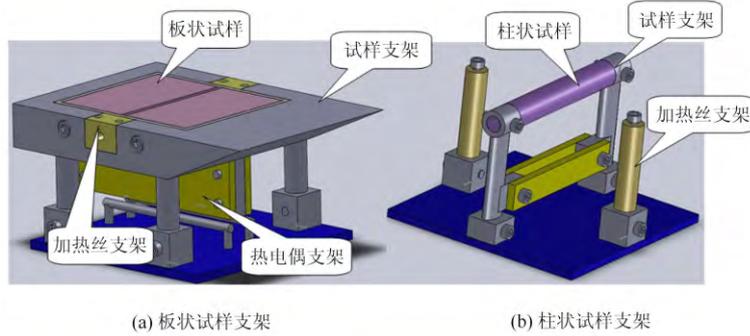


图1 实验样品安装三维结构图

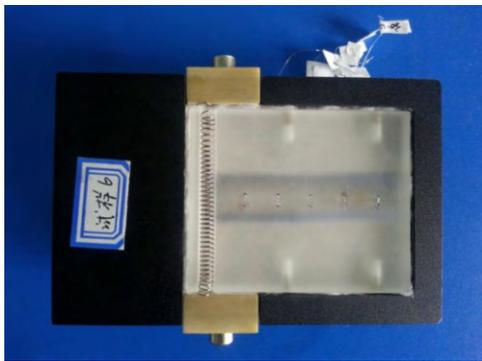


图2 实验样品(板状)实物照片

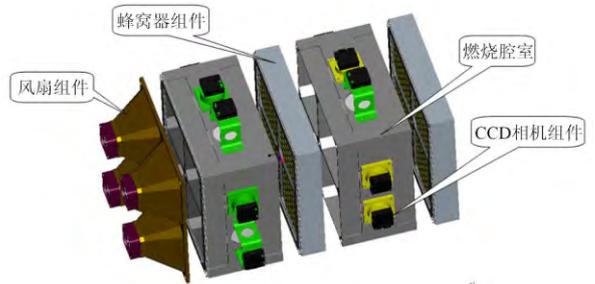


图3 多通道实验段及流动控制三维原理图

载荷研制技术创新点突出表现在:充分利用太空高真空条件,采用创新性的实验舱内气体环境更新和控制技术,实现在有限实验空间中对多个实验样品进行研究,并提供精确、可控的实验环境条件;采用多通道实验段设计(图3所示),有效避免实验样品之间的干扰,实现实验样品、氧气浓度、气流速

度、点火方式等实验参数的灵活组合,以保证空间实验机会的充分利用和科学目标的实现。

2 地面实验

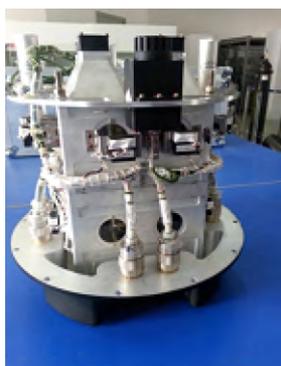
已完成的地面实验研究一方面为空间实验参数的选取和优化提供了重要依据,同时揭示了低速流动中热厚固体材料表面火焰传播、火焰熄灭等基本过程和特性[7]。但是,地面实验中不可避免地存在

浮力流动的影响，实验结果的可靠性有待进一步验证，需要微重力实验提供更为准确的、定量的科学数据。

图 4 为实践十号卫星非金属材料燃烧实验设备外观照片，图 5 给出了设备内部的部分细节。针对空间实验设备已经完成了所有测试和试验，即将利用空间微重力环境开展预定的实验研究工作。



图 4 空间实验设备整体照片



(a) 实验段组件



(b) 风扇和传感器

图 5 空间实验设备内部

图 6 为地面全流程测试过程中空间实验设备内气体压力、温度和氧气浓度的变化过程，清楚地展示了实验过程的控制情况，主要包括：实验舱内气体排出、新鲜气体供应和混合、以及实验样品点燃。图 7 为实验样品着火、火焰传播过程的图像记录，图 8 为试样表面和上方 5 个热电偶测温点温度随时间的变化过程。地面测试全面检验了空间实验设备的功能、性能和实验流程，覆盖科学研究任务需求，结果表明，设备状态满足设计要求。

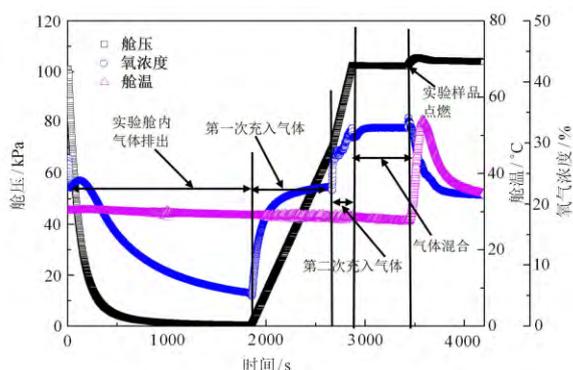


图 6 实验舱内气体压力、温度和氧气浓度的变化过程

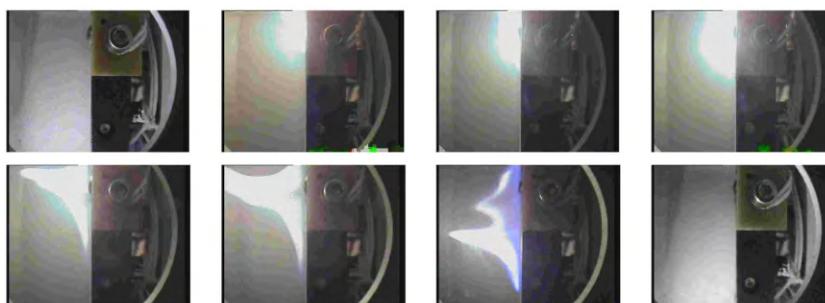


图 7 实验样品着火、火焰传播过程的图像记录

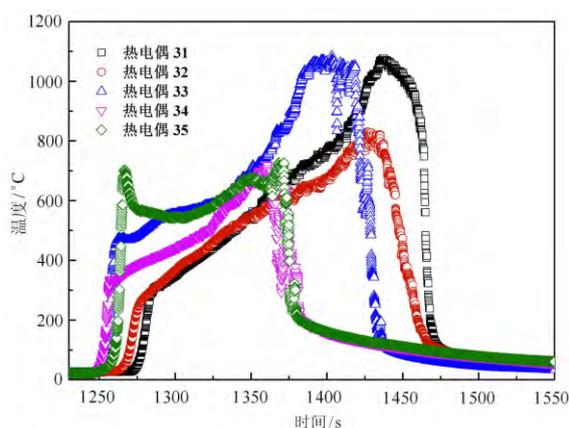


图8 试样测温点温度随时间的变化

3 展望

实践十号卫星非金属材料燃烧项目研究紧紧围绕微重力(低速流动)条件下热厚固体材料燃烧特性,研究目标突出载人航天器防火安全的应用方向和固体材料燃烧机理的科学需求,空间实验与地面研究有机配合,将揭示外界低速气流速度、气流方向和氧气浓度等主要因素对材料着火及燃烧特性的影响规律,完善固体材料燃烧理论,促进对热厚材料在微重力条件下燃烧过程的理解。以空间实验和地基研究结果为基础,结合我国载人航天器(载人飞船和空间站)舱内防火安全工程,将进一步考虑评估国内

外航天器材料防火性能的主要测试技术,评价防火规范总体方案的有效性和可靠性,直接服务于载人航天的实践。

参考文献

- 1 Committee for the Decadal Survey on Biological and Physical Sciences in Space, National Research Council. Recapturing a Future for Space Exploration: Life and Physical Sciences Research for a New Era. Washington: The National Academies Press, 2011
- 2 Friedman R, Sacksteder KR. Science and technology issues in spacecraft fire safety. NASA/TM 88933, AIAA-87-0467, 1987
- 3 张夏. 载人航天器火灾安全研究进展. 力学进展. 2005, 35(1): 100-115
- 4 Jomaas G, Torero JL, Eigenbrod C, et al. Fire safety in space-beyond flammability testing of small samples. *Acta Astronautica*, 2015, 109: 208-216
- 5 Friedman R, Ross HD. Combustion technology and fire safety for human-crew space missions. In: Ross HD. ed. *Microgravity Combustion: Fire in Free Fall*. San Diego: Academic Press, 2001: 525-562
- 6 T'ien JS, Shih HY, Jiang CB, et al. Mechanisms of flame spread and smolder wave propagation. In: Ross, HD. ed. *Microgravity Combustion: Fire in Free Fall*. San Diego: Academic Press, 2001: 299-418
- 7 Zhu F, Lu ZB, Wang SF. Flame spread and extinction over a thick solid fuel in low-velocity opposed and concurrent flows. *Microgravity Science and Technology*, DOI: 10.1007/s12217-015-9475-4

(责任编辑:刘希国)

为了加强编者与读者间的互动与沟通,本刊已开通官方微信平台,微信号:lxysj_cstam.我们将及时发布期刊最新文章和相关信息,热忱欢迎广大读者关注本刊微信,了解更多期刊信息.

