0254-6124/2023/43(3)-0531-18 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Shuangfeng, WU Chuanjia. Recent Progress and Development Trend of Solid Combustion Research for Manned Space Exploration (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(3): 531–548. DOI:10.11728/cjss2023.03.2022–0049

载人空间探索环境中固体材料可燃特性研究进展与态势*

王双峰[1,2,3] 吴传嘉[1,2]

1(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)

2(中国科学院大学工程科学学院 北京 100049)

3(中国科学院力学研究所 高温气体动力学国家重点实验室 北京 100190)

摘 要 掌握固体材料在空间特定使用环境中的可燃特性，是保障载人航天器防火安全的重要前提，相关需求构成了微重力燃烧研究的主要推动力之一。近年来，固体材料燃烧及相应的载人航天器防火问题得到各航天大国的持续关注，新一轮研究热潮正在形成，研究工作表现出新的特点和发展态势。本文综述了约 10 年来微重力固体材料燃烧的研究进展和最新成果，对该研究方向的发展趋势进行分析，对未来研究提出建议，为后续进一步发展提供参考。

关键词 材料可燃性，载人航天器，防火安全，微重力

中图分类号 TK16

Recent Progress and Development Trend of Solid Combustion Research for Manned Space Exploration

WANG Shuangfeng[1,2,3] WU Chuanjia[1,2]

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

2(*School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

3(*State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract The understanding of solid material flammability in the specific use environment is of practical importance for manned spacecraft fire safety, and the relevant fire safety concerns in spacecraft

* 国家重点研发计划项目资助（2021YFA0716203）

2022-09-05 收到原稿，2022-12-15 收到修定稿

E-mail：sfwang@imech.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

have served as one of the primary motivations for microgravity combustion research. In recent years, the various space powers have paid continuous attention to the burning characteristics of solid materials and the corresponding application to spacecraft safety. It seems that a renewed interest in such a research field is arising, while distinct features and development trends could be identified. This paper reviews the research progress and latest results on microgravity solid combustion in recent ten years. Overall development trends of the field and future directions of research work are also discussed, hoping to provide useful reference for further research.

Key words Material flammability, Manned spacecraft, Fire safety, Microgravity

0 引言

固体材料可燃性是对材料燃烧行为和火灾危险性的定量描述[1, 2]。可燃性参数一方面直接用于材料防火安全评价，另一方面作为火灾动力学模型的基本输入参数对于准确模拟火灾至关重要[1,3]。固体材料着火和燃烧涉及固相热解、热解产物与氧化剂混合、气相化学反应、气相和固相传热传质等一系列复杂过程，其可燃性强烈依赖于气流流动、压力、氧气浓度、受热情况等使用环境中的外部条件，在一定环境条件下获得的某种材料可燃性结果以及据此得到的材料热力学参数不适用于其他不同环境[4–8]。

与地面相比，在轨飞行的载人航天器舱内出现了明显不同但可支持材料燃烧的环境：微重力条件使得燃烧引起的自然对流大幅减弱甚至基本消失，自然对流在燃烧过程热量和物质传输中的支配地位不复存在，取而代之的是由于航天器舱内通风需要而存在的低速强迫对流（速度一般小于 20 $cm \cdot s^{-1}$）[9]；舱内大气总压和氧气浓度有多种可能的选择，目前普遍以标准空气（101 kPa, 21% O_2）为基准，但波动范围较大，下一代航天器将优先采用低总压（58 kPa 左右）、高氧浓度（30%～34%）的非标准大气[10–12]。这些环境要素相互耦合，深刻影响着固体材料的燃烧行为和可燃特性，理解其科学规律是载人航天器防火安全的基础，也是燃烧理论发展的需要。同时，未来空间探索经历的重力加速度环境是多样化的，除了轨道飞行时的微重力外，还主要面临地外天体表面的当地重力条件，使载人航天器和地外栖息基地的运营环境发生新的变化，对固体材料可燃性和防火安全研究提出挑战。

固体材料燃烧及相应的航天器防火安全问题一直是微重力燃烧领域的重要研究内容。自 20 世纪 60 年代以来，针对微重力条件下非金属固体材料燃烧特性已开展了大量研究工作，在理论分析、数值模拟、模型探索的同时，利用地基和空间微重力实验平台进行了一定数量的实验研究。总的来看，较前期的研究主要集中于材料着火之后的火焰传播，实验材料多为热薄材料，着重考察低速气流、氧气浓度、材料厚度和几何形状等的影响；由于实验数据有限，对微重力环境中固体材料燃烧过程的认识远不充分，无法为航天器材料可燃性评价和火灾模型发展等实际应用提供支撑。已有综述文献[13–15] 对这一时期的研究情况和主要研究结果进行了较为全面的总结。

近年来，为最大限度地保障载人航天活动的防火安全，空间环境中固体材料的可燃性研究持续受到高度重视。美国、欧洲和日本等国家及地区围绕相关问题规划并陆续开展了多个研究项目，研究周期长，内容广泛，并且有系统的组织和安排。NASA（美国国家航空航天局）以深入认识固体材料燃烧机理、增强航天器防火的实际能力为目标，在国际空间站上安排了系列专项实验，部分实验已完成并取得研究结果，另有实验在推进中[16,17]。NASA/ESA（欧洲空间局）和 JAXA（日本宇宙航空研究开发机构）分别组织了较大规模的国际合作项目[16]，针对固体材料燃烧开展空间实验和地基研究，主要关注尺寸效应对材料可燃性的影响、微重力与常重力可燃极限的联系等，并评估和改进现有的航天器材料筛选测试方法及航天器火灾模型。目前两个项目正按计划实施。同一时期，中国利用实践十号卫星和微重力落塔开展了内容丰富的固体材料燃烧实验，获得大量研究结果，也为中国载人空间站上的防火安全研究进行了技术研发和科学规划。这些已经完成和计划开展的研究项目标志着微重力环境中固体材料燃烧特性研究进入一个新的

发展阶段。

本文综述了最近 10 年来国外微重力固体材料燃烧研究的项目规划、进展情况和已取得的主要成果，介绍中国在该方向的最新研究进展和前景，对现阶段的发展趋势进行分析，并对载人空间探索环境固体材料可燃性的进一步研究提出建议。

1 国外研究计划与进展

1.1 国外空间站专项实验

NASA 将国际空间站作为航天器防火安全研究的主要空间实验平台，在固体材料燃烧方面规划了多个实验项目。较早的实验利用微重力科学手套箱（Microgravity Science Glovebox, MSG）完成，更多的实验则在稍后安装到位的多功能燃烧实验柜（Combustion Integrated Rack, CIR）中进行，CIR 为此配备相应的实验插件装置。这些实验之间相互衔接，各有侧重，其与实验设备/装置的对应及实施情况列于表 1。

1.1.1 烟雾测量实验 SAME

实验分两期进行，分别为 SAME 和 SAME-R，目的是提供定量的实测数据，评估离子感烟探测器（航天飞机使用）和光电感烟探测器（国际空间站使用）的性能，提升未来载人航天器火灾探测技术的可靠性[18]。SAME 实验装置如图 1 所示[18,19]。实验测量了 5 种典型材料在不同气流速度、加热温度和烟雾颗粒停留时间等条件下热解产生的烟雾颗粒粒径及分布，得到具有实际意义的分析结果[19–24]。这些实验材料产生的大量烟雾颗粒都是亚微米级尺度的（见图 2[23]），离子感烟探测器的探测效果较好，光散射探测器在多数情况下也有很好的探测效能。然而，两种探测器均不能探测到所有实验材料的烟雾颗粒，表明下一代感烟探测器必须进行改进设计和严格测试。实验发现，微重力下材料在着火前产生的烟颗粒的粒径分布范围较广，因此有效的感烟火灾探测方法应针对此特点进行相应设计。通过数值模型研究进一步发现，由于混合过程在烟雾颗粒输运中起主导作用，微重力条件下的探测器响应时间比常重力下要长，而且探测效果十分依赖于探测器和障碍物的位置。

值得一提的是，SAME 的成功建立在 NASA 长期的有组织的研究计划基础上：实验中使用的超细颗粒计数器已在此前（2005－2006 年）的国际空间站技术试验，即粉尘和气溶胶测量可行性测试（Dust and Aerosol Measurement Feasibility Test, DAFT）中经过专门检验，而 1996 年在航天飞机上完成的碳烟诊断实验（Comparative Soot Diagnostics, CSD）则是

表 1 NASA 在国际空间站的固体材料燃烧实验项目

Table 1 NASA's solid combustion projects on the International Space Station

实验名称	使用的实验设备/装置	空间实验实施时间	主要研究人员和机构	说明
烟雾测量实验 SAME(Smoke and Aerosol Measurement Experiment)	MSG/SAME	2007－2010	David Urban NASA 格林研究中心	包括SAME和SAME-R
固体材料燃烧和抑制 BASS(Burning and Suppression of Solids)	MSG/改造后的 SPICE装置	2012－2014	Paul Ferkul NASA 格林研究中心	包括BASS, BASS-II和 BASS-M; SPICE装置先期用于MSG中气体同流火焰烟点实验(Smoke Point in Coflow Experiment)
燃烧速率模拟器 BRE(Burning Rate Emulator)	CIR/ACME/BRE燃烧模拟器	2019－2021	James Quintiere 马里兰大学	微重力前沿燃烧实验 ACME(Advanced Combustion via Microgravity Experiments) 项目5个课题之一
固体燃料着火和熄灭 SoFIE(Solid Fuel Ignition and Extinction)	CIR/SoFIE	预计2022－2025	James T'ien凯斯西储大学; Carlos Fernandez-Pello加州大学伯克利; Fletcher Miller圣迭戈州立大学; S. Bhattacharjee圣迭戈州立大学; Sandra OlsonNASA格林研究中心	包括5个研究课题

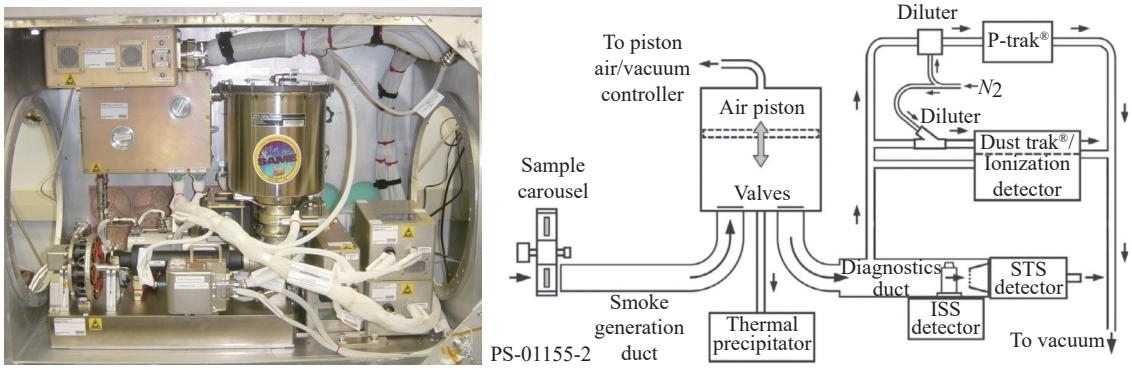

图 1 SAME 实验装置外观与结构

Fig. 1 Photograph and schematic of the SAME hardware

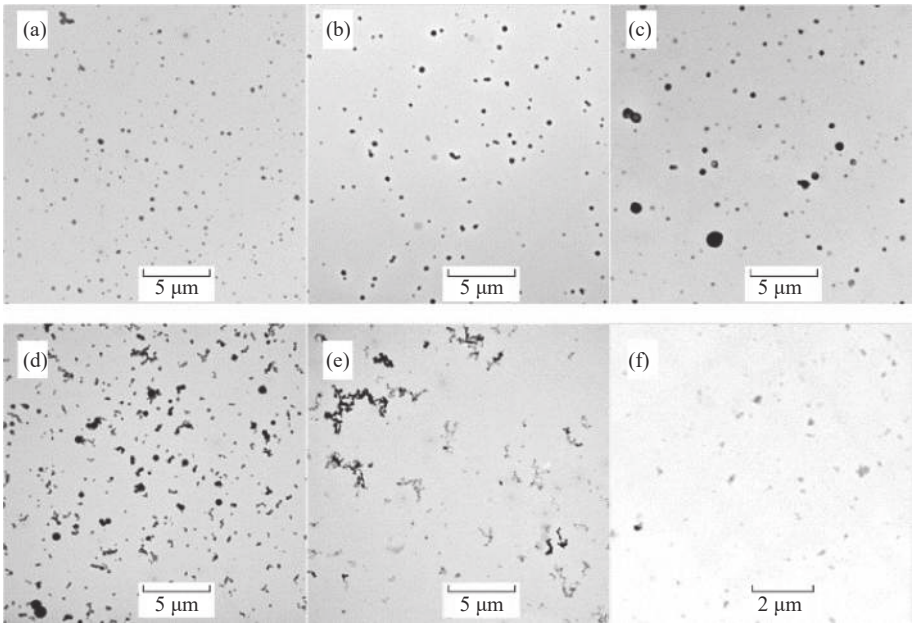

图 2 烟颗粒透射电镜照片。(a) 未老化的 Kapton，574℃，(b) 老化的 Kapton，574℃，(c) 未老化的灯芯，265℃，(d) 未老化的 Pyrell，242℃，(e) 未老化的 Teflon，514℃，(f) 未老化的硅树脂，380℃

Fig. 2 TEM images showing morphology of smoke particles. (a) Unaged Kapton, 574℃, (b) aged Kapton, 574℃, (c) unaged lamp wick, 265℃, (d) unaged Pyrell, 242℃, (e) unaged Teflon, 514℃, and (f) unaged silicone, 380℃

SAME 的前期研究工作。

1.1.2 固体材料燃烧和抑制 BASS

BASS 系列实验主要有三个目标：(1)为固体材料燃烧模型提供无重力影响的实验数据，在假设没有浮力的情况下发展简化的燃烧模型，经过微重力实验验证后加入浮力的影响以考虑更复杂的模型组合；(2)改进 NASA 现有的航天器材料可燃性地面测试方法，使之能够反映微重力条件下的材料燃烧特性；(3)进行氮气熄灭火焰测试。实验使用了大量固体材料样品，种类包含平板、柱状和球形材料以及圆管中的蜡烛。实验装置如图 3 所示[25]。应该注意到，BASS 实验过程中氧化气体和燃烧产生的气体封闭在 MSG 内进行循环，而且极限氧气浓度(维持燃烧的最低氧浓度)的测定是通过燃烧对氧气的消耗使火焰逐渐达到熄灭条件，因而环境气体成分的变化可能对实验结果有较大影响。

有关平板材料燃烧的研究取得了多项结果：对热辐射、传热和化学反应控制区的逆向火焰传播特征进行实验观察(火焰传播速度变化如图 4 所示)和理论分析，验证了热辐射和传热控制区理论模型的准确

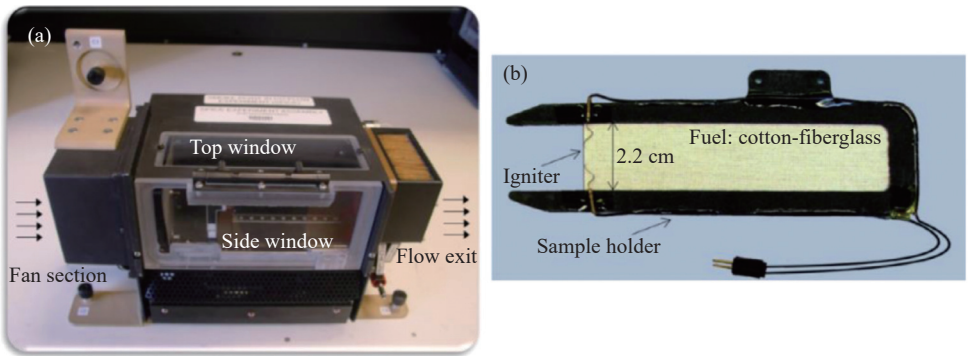

图 3　BASS 实验装置。（a）小型流动通道，（b）试样、试样架和点火器

Fig. 3　Experimental setup of BASS. (a) Small flow duct, and (b) fuel sample, sample holder, and igniter

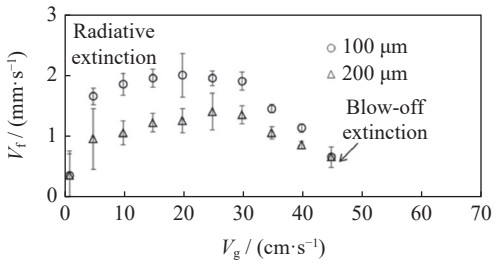

图 4　常压 21% 氧浓度环境中两种厚度平板火焰传播速度随气流速度的变化

Fig. 4　Experimental spread rate *vs.* flow velocity for two different fuel thicknesses at about 21% oxygen level and 1 atm

性[26]；比较微重力和常重力下的火焰传播实验数据，并基于传热控制理论，得到了热薄材料向热厚材料转变的临界厚度判据[27]；实验测定了逆向火焰传播的极限气流速度，小于此速度火焰将不能稳定传播，并通过二维模型的简化分析认识了影响极限气流速度的主要因素[28]；通过数值模拟发现，当逆向火焰从厚边界层传播到薄边界层中时，火焰的尺寸、温度和传播速度均有所增大[29]；实验发现，低速流动条件下较窄材料样品表面的同向火焰能够获得一个稳定的长度，薄材料火焰的熄灭具有三维特性，辐射热损失是火焰熄灭的主导机制[25]。

柱状和球形材料的燃烧实验主要关注火焰熄灭极限以及近极限火焰基本特性，并与平板材料相比较，从更基础的角度认识材料燃烧机理。图 5 显示了气流速度和材料内部加热对球形聚甲基丙烯酸甲酯（Polymethylmethacrylate, PMMA）火焰发展的影响[30]。在流场驻点附近，柱状和球形材料火焰的熄灭极限受流场拉伸率和材料加热程度共同影响，加热时间越长火焰越难熄灭，当拉伸率达到临界值时，滞止区内的火焰首先熄灭，滞止区下游的火焰则沿材料表面周期性振荡[30,31]。常重力与微重力下的火焰吹熄边界随强迫流动拉伸率的变化曲线是相互平行的，将常重力吹熄边界外推到零拉伸率，可以提供微重力下材料可燃极限的保守估计[32]。柱状材料逆向火焰传播实验发现，在低氧浓度条件下，微重力火焰的传播速度可超过常重力火焰，而且火焰能够在更低的氧浓度下维持传播，意味着微重力环境中的火灾风险可能更高[33, 34]。图 6 是不同气流速度下的柱状材料表面逆向火焰传播图像[33]。

在灭火实验中，氮气射流未能熄灭固体材料火焰，反而引起火焰亮度增强。这可能是由于射流卷吸环境中的空气，增加了氧化剂向火焰的传输。因此航天器气体灭火装置的设计和使用必须考虑微重力火灾燃烧的特点。

1.1.3　燃烧速率模拟器 BRE

燃烧速率模拟是微重力前沿燃烧实验 ACME 项目中 5 个独立的气体火焰研究课题之一[35]，也是 ACME 中唯一的主要针对固体材料燃烧问题的课题，其主要目标是提高对材料可燃性的理解，并评估现有的可燃性测试方法与微重力和低重力环境的关联性。如图 7 所示[36]，BRE 是一个多孔平面气体燃烧器，燃烧器表面取代燃烧过程中不断退化的凝聚态燃料表面，通过测量火焰向燃烧器的热反馈，并对燃烧和气化热、表面温度以及烟点等特性进行匹配，实现对固体和液体燃烧过程的模拟，可对燃烧和熄灭现象进行更为深入的观测。

BRE 前期系统开展了地面实验[37–39]、落塔实验[40–42]、理论分析和数值模拟[39, 43–46] 等工作，研究利

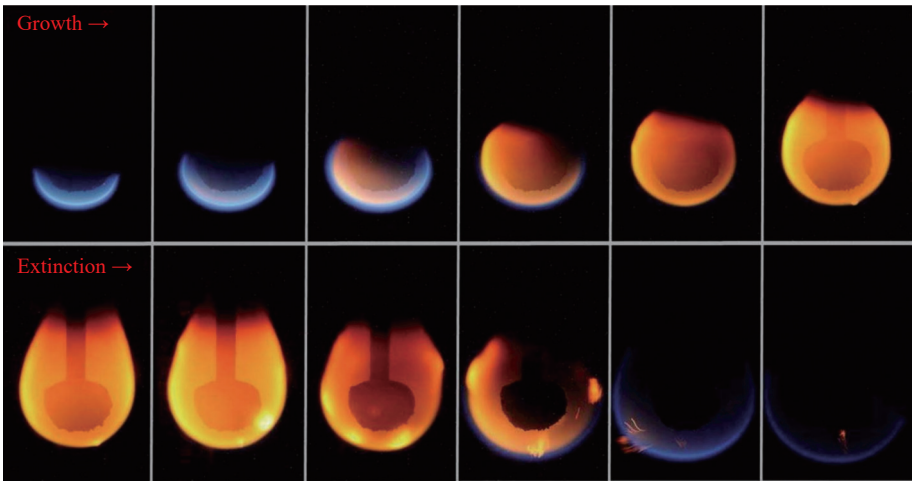

图 5 低速流动中球形 PMMA 火焰的增长与熄灭（流动方向向上）

Fig. 5 Flame growth and decay around a small PMMA sphere in low speed forced flow. The flow direction is from bottom to top

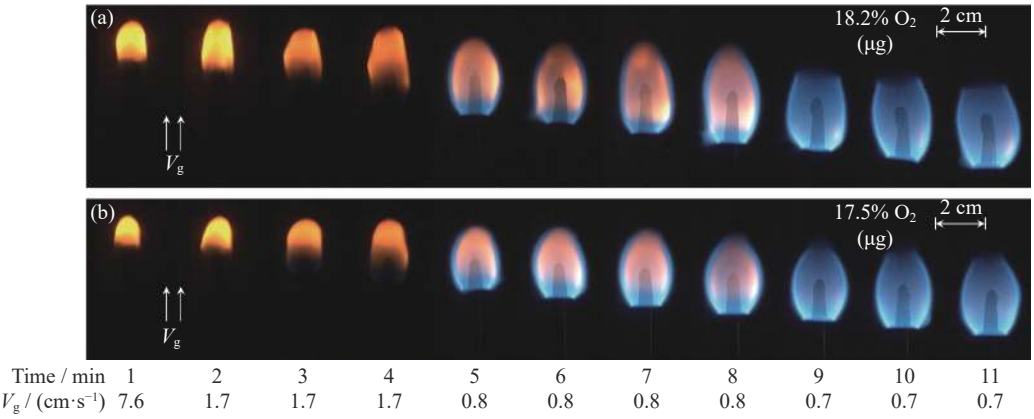

图 6 柱状材料表面逆向火焰传播过程

Fig. 6 Photo sequence of opposed fame spread over cylindrical solids

用甲烷、丙烷、乙烯等气态燃料模拟 PMMA、聚甲醛（Polyoxymethylene, POM）等固体和甲醇、庚烷等液体燃料的燃烧特性。地面实验验证了气体火焰模拟凝聚态燃料燃烧的合理性，同时利用 BRE 研究了浮力对流下气态燃料的点火和火焰熄灭机理[37,38]。落塔实验中观察到接近稳态的球状火焰，用一维稳态理论将火焰热流密度与火焰长度关联，得到了燃烧速率与火焰直径和传质数的关系[41]。落塔实验还对燃烧器尺寸、环境压力、氧浓度等因素的影响进行研究，发现对于尺寸较大的燃烧器，气相辐射的作用更为显著[40]，而理论分析表明低压环境有利于火焰的稳定[45]。

BRE 空间实验成功实现 59 次点火，得到长时间稳定的气体（乙烯/氮气混合物）扩散火焰，对测量得到的燃烧器表面热流变化进行理论分析，估算了固体材料稳定燃烧时的汽化热，认为当材料燃烧热为 23.6～47.2 kJ·g^{-1}、汽化热为 1～10 kJ·g^{-1} 时，直径 25 mm 的平面固体材料能够在微重力下稳定燃烧，空间实验数据也验证了数值模型的准确性[36]。实验测量了稳定火焰和火焰振荡熄灭过程中的辐射热流，发现所有稳定状态的火焰辐射分数保持在 0.6 以下，并且可与火焰高度建立联系（见图 8 [36]），这为认识微重力下的火灾增长规律提供了依据。

1.1.4 固体燃料着火和熄灭 SoFIE

作为 BASS 实验的后续研究项目，SoFIE 于 2009 年立项，2022 年 2 月其实验装置运抵国际空间站[47,48]。SoFIE 包含 5 个研究课题，分别为：（1）停留

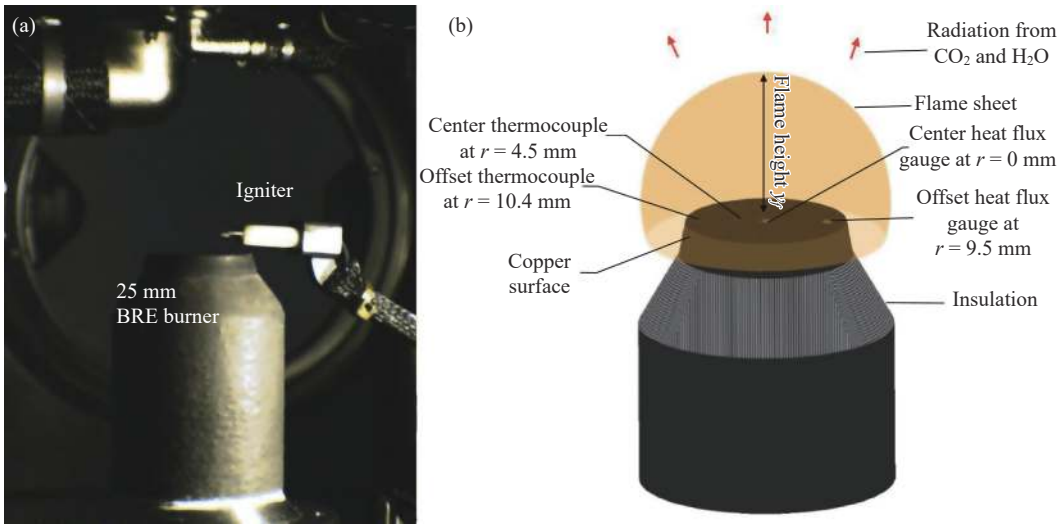

图 7　BRE 燃烧器照片和示意

Fig. 7　BRE burner image and drawing

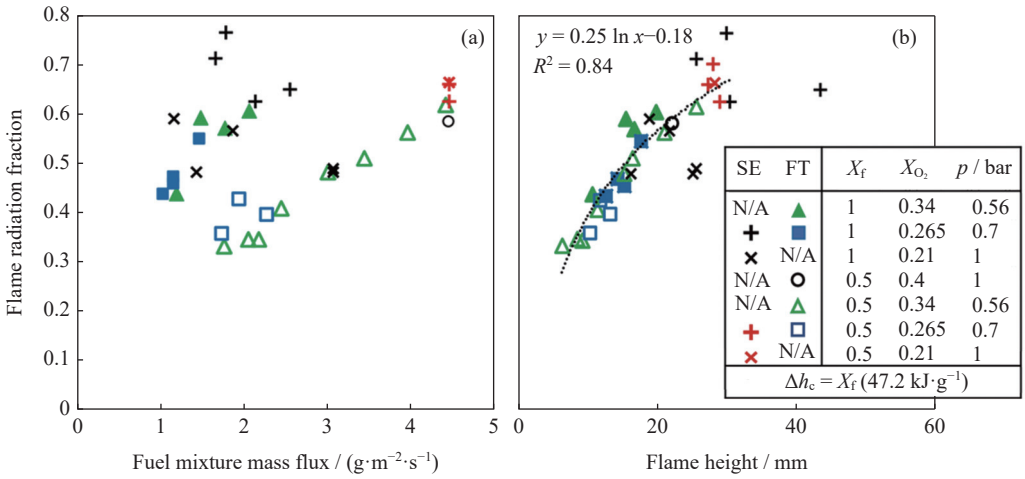

图 8　火焰辐射分数随燃料质量流率（a）和火焰高度（b）的变化

Fig. 8　Flame radiant fraction with mass flux (a) and flame height (b)

时间控制的火焰传播(Residence Time Driven Flame Spread, RTDFS), 研究材料厚度对火焰传播和火焰熄灭的影响; (2)窄通道装置 (Narrow Channel Apparatus, NCA), 验证利用地面窄通道实验模拟厚材料微重力燃烧特性的能力; (3)火焰增长和熄灭极限(Growth and Extinction Limit, GEL), 利用球形试样研究材料内部传热和环境流动影响火焰演化的机理; (4)材料着火和抑制测试(Material Ignition and Suppression Test, MIST), 研究柱状材料着火过程并进行灭火试验; (5)航天器材料微重力可燃性(Spacecraft Materials Microgravity Research on Flammability, SMμRF), 通过比较常重力和微重力下的实验数据, 检验航天器材料可燃性测试方法。

相比 BASS 实验, SoFIE 装置的实验条件和燃烧诊断能力更为完善, 将对 PMMA、棉基织物和其他常用航天材料开展广泛的燃烧过程研究。在前期固体材料可燃性研究的基础上, SoFIE 研究内容进一步扩展到固体材料在实际构型和现实气体环境中的着火和可燃特性, 希望将科学研究成果应用于航天器防火的工程实践中, 从而实现以下目标: 完善航天员舱外活动装备的防火设计; 提高航天器材料的防火安全性; 检验材料可燃性地面测试标准在微重力条件下的适用性; 深入了解材料着火初期的火焰传播行为; 验证材料可燃性模型; 从灭火剂、环境流动、航天器通

风状态等角度寻找优化的灭火技术。由于有明确的研究计划指引，并且 CIR/SoFIE 实验平台可提供较好技术支撑条件，SoFIE 项目未来研究结果值得关注。

NASA 早期的空间站利用规划中有与 SoFIE 相近的项目，即面向空间探索的材料可燃性评估（Flammability Assessment of Materials for Exploration, FLAME）。该项目原计划于 2012 至 2020 年进行，研究目标是提高对材料燃烧早期行为的认识、验证材料可燃性评估方法和数值模型，进而为空间探索中的防火安全服务；研究内容包括火焰传播、窄通道方法模拟微重力燃烧特性的验证、航天器材料在微重力下的可燃性、火焰熄灭极限、材料着火和火焰抑制等。FLAME 与 SoFIE 的研究目标和研究内容高度重叠，目前 NASA 网站已取消 FLAME 相关信息，该项目可能由 SoFIE 取代。

1.2 国外合作研究项目

航天器防火相关问题研究的国际合作十分活跃，目前有两个主要的国际项目正在实施中，分别是航天器防火安全验证（Spacecraft Fire Safety Demonstration, Saffire）和微重力可燃极限研究（Flammability Limits at Reduced Gravity, FLARE）。

1.2.1 航天器防火安全验证 Saffire

Saffire 是一个综合性的航天器防火安全研究项目，研究方向大致可分为两类：一是固体材料燃烧；二是火灾探测、环境监测以及灾后清理等技术的演示验证[49]。项目由 NASA 格林研究中心和 ESA 专题小组领导，研究团队包括来自日本和俄罗斯等国的 14 个国际成员，计划利用从国际空间站分离后的无人飞船进行 6 次空间实验（Saffire I～VI），已于 2016 至 2021 年间完成 5 次（Saffire I～V），最后一次空间实验计划于 2023 年进行[50]。在材料火灾燃烧行为方面，Saffire 重点开展以往无法进行的大尺寸材料样品火焰传播实验，实验数据用于研究尺寸效应对材料可燃性的影响，并评估现有航天器火灾模型和航天器材料筛选测试方法[51,52]。

Saffire I 和 Saffire III 对大尺寸复合织物试样进行了同向与逆向火焰传播实验[53]，试样尺寸达到 0.95 m × 0.40 m，是现有空间实验中最大的试样；Saffire II、IV 和 V 三次实验采用 PMMA 等 4 种材料的小尺寸（0. 29 m × 0.05 m）试样开展实验，主要考察材料构型和气体环境等因素的影响。Saffire I～III 实验中的试样布置如图 9 所示[51]。Saffire IV 和 V 实验中，对航天器舱内的火灾探测、灾后清理和环境监测设备进行了测试[49,54]，航天器配备的远场诊断模块[55]、燃烧产物检测仪[56] 及气溶胶监测仪[57] 等设备用来测量燃烧产物和监测空气质量。

大尺寸材料试样燃烧实验发现，微重力强迫对流中的同向传播火焰可以达到准稳态，火焰长度存在极限值（见图 10 [51]），而地面自然对流中向上（同向）传播火焰的速度和长度则随时间不断增长，二者差异显著[51]。数值计算表明，大尺寸材料表面的同向火焰对上游边界层敏感，靠近边界层前缘，火焰根部热流量较大，导致质量燃烧速率增大，火焰长度主要受氧气进入气相反应区的速率和平均质量燃烧速率控制[58,59]。对具有凹槽结构的小尺寸材料进行燃烧实验，揭示出几何构型强化火焰传热的机制[60]。聚二甲基硅氧烷（Polydimethylsiloxane, PDMS）薄膜燃烧时会产生硅粉，硅粉输运影响同向火焰与材料表面之间的能量平衡，进而改变火焰传播速度和熄灭极限[61]。Saffire 系列实验获得了较多的微重力实验结果，通过比对分析空间实验和地面低压实验数据，发现当环境压力降低到 30 kPa 量级，地面实验可以近似地模拟微重力常压环境中的材料燃烧特性[62,63]。

1.2.2 微重力可燃极限研究 FLARE

FLARE 由日本 JAXA 主导，于 2012 年立项，合作方包括 NASA、ESA、法国国家太空研究中心（CNES）以及日本、美国和欧洲的多所大学。项目将研制固体材料燃烧实验模块（Solid Combustion Experiment Module, SCEM），在国际空间站中的日本舱段进行材料着火和火焰传播的基础研究，同时开展地基实验和理论分析，主要目标是建立微重力下材料燃

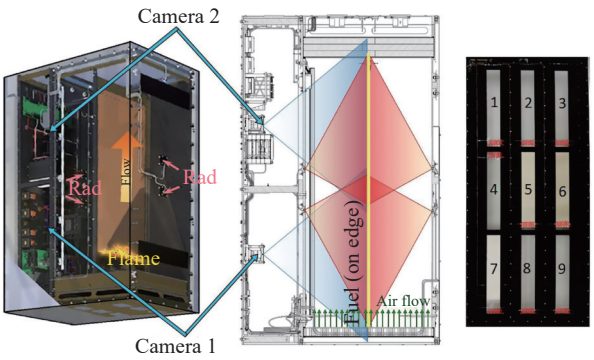

图 9 Saffire I～III 实验中的试样布置

Fig. 9 Sample configurations in the Saffire I～III

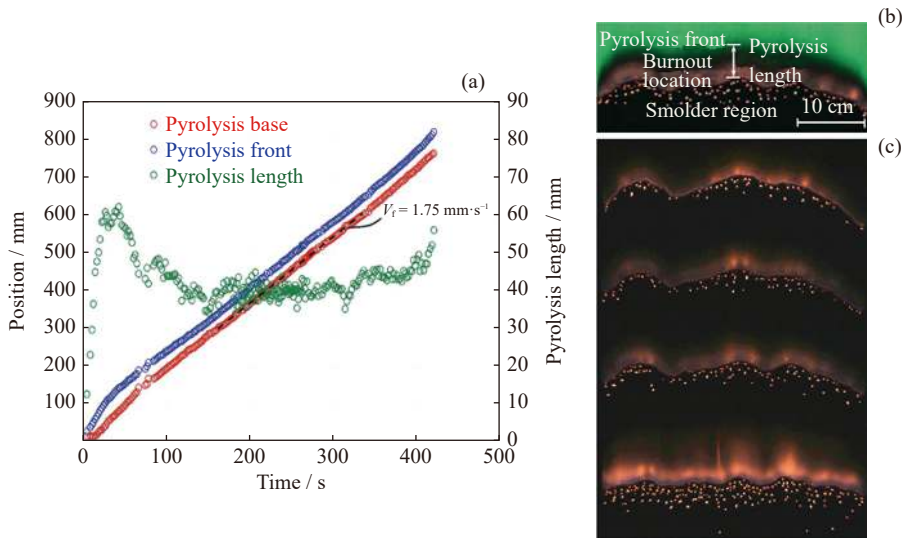

图 10 Saffire I 实验中的大尺寸试样火焰传播。(a) 材料热解区域的时间变化，(b) 合成的俯视火焰图像，(c) 点火后不同时刻的俯视火焰图像

Fig. 10 Flame spread over a large sample in the Saffire I experiment. (a) Pyrolysis tracking, (b) a composite top-view flame image, and (c) top-view flame images at selected times after ignition

烧最低极限氧气浓度(Minimum Limiting Oxygen Concentration, MLOC)与常重力下获得的极限氧气浓度(Limiting Oxygen Concentration, LOC)之间的联系，进而提出新的航天器材料可燃性测试方法[64]。目前，FLARE 的空间实验仍处于准备阶段，但已资助完成多项失重飞机实验[65–79] 和地面实验[80–84]，相关理论研究也取得一定进展。

近熄灭极限条件下，固体材料表面辐射热损失和气相化学反应动力学的影响较为显著。通过尺度分析，研究建立了预测热薄材料可燃极限的理论模型[72–75]，并对多种材料在不同气体环境下的可燃性开展微重力实验，进行模型验证[71–73]。微重力环境中一些阻燃材料的可燃极限如图 11 所示[71]。实验表明，微重力下的材料可燃极限并非总是低于常重力下的可燃极限，微重力环境能否扩大材料的可燃范围与材料自身热解温度密切相关，热解温度较高的材料在微重力下的 LOC 高于常重力下的结果，而热解温度较低的材料表现出相反的趋势[72]。导线在微重力下的可燃特性也是 FLARE 的研究重点之一，已有研究较为系统地分析了导线尺寸、加热时间和点火功率、重力水平、环境压力等多种因素对 LOC 和火焰传播速度的影响规律及控制机理[76–79]，为后续在国际空间站上开展燃烧实验打下了基础。

2 中国研究进展

中国 2016 年在中国科学院空间科学战略性先导专项实践十号卫星上成功完成两项固体材料燃烧实验[85]：非金属材料着火及燃烧特性、导线绝缘层着火烟的析出和烟气分布规律，并在空间实验前后开展了系统的地基研究和分析工作，取得了具有重要科学和应用价值的研究成果。两项研究工作分别由中国科学院力学研究所和工程热物理研究所的项目团队负责。这是继 2006 年实践八号卫星搭载多孔材料闷烧(阴燃)实验[86] 和导线着火前期特性实验[87] 之后，中国再次开展以航天器防火为背景的空间微重力燃烧实验。

实践十号卫星非金属材料着火及燃烧特性实验，发现了热厚固体材料表面连续火焰分裂成小火焰(flamelet)的现象(见图 12 中的示例)，建立了典型材料在低速流动中的火焰传播模式图谱和可燃极限边界(见图 13)，认识了火焰对气流的动态响应特性及火焰传播和熄灭的控制机理[88]。空间实验与地面实验结合，形成了对富氧低速流动中柱状材料火焰传播特征以及微重力和常重力材料燃烧特性差异的深入认识，在整个气流速度范围内划分了柱状材料表面火焰传播不同机理的控制区[89]。利用窄通道实验研究气流速度和氧气浓度对同向和逆向火焰传播特性的影

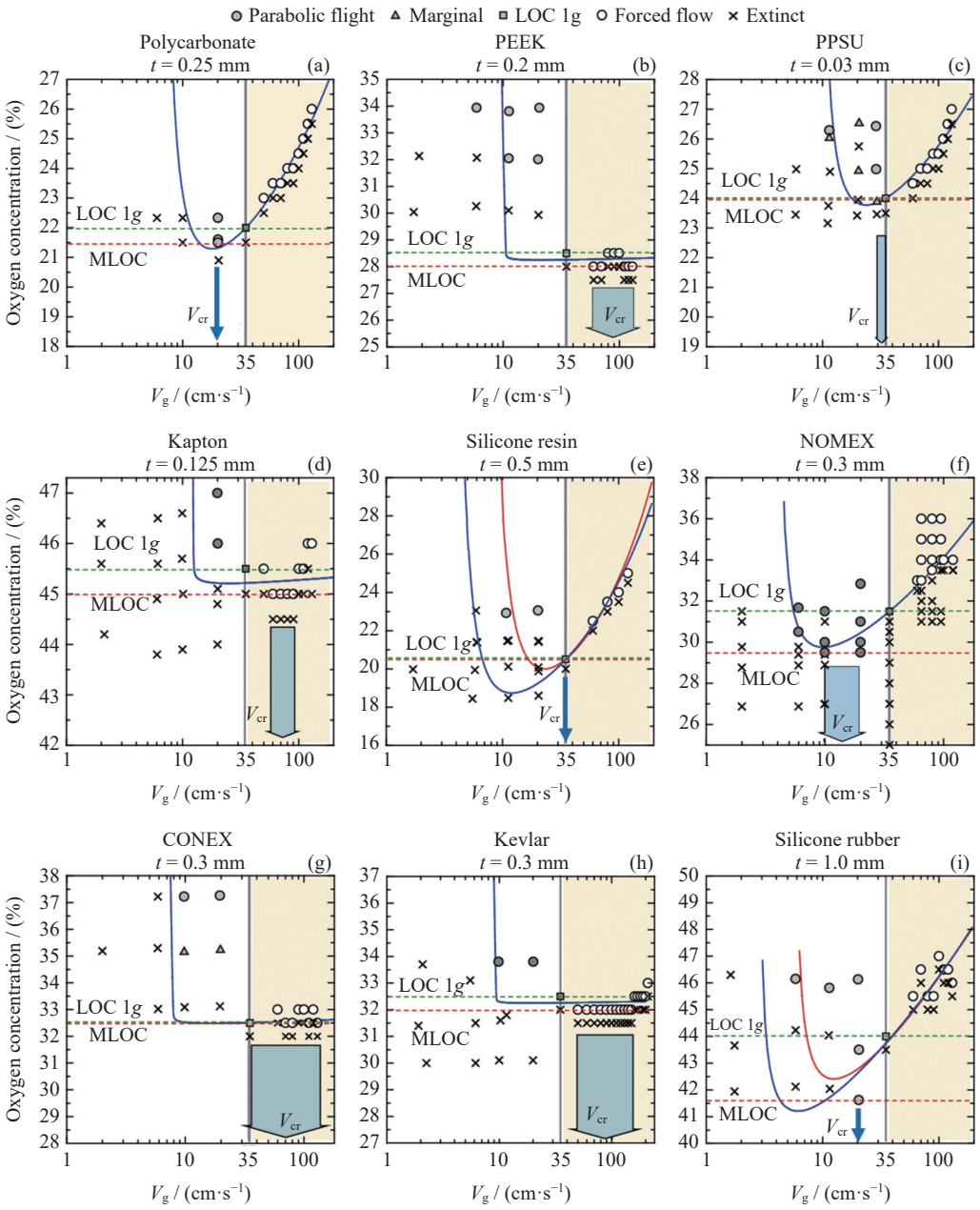

图 11 逆向流动中阻燃材料的可燃极限

Fig. 11 Flammability maps of flame retardant materials in opposed flow

响，并与空间实验和理论预测进行对比，通过分析窄通道内流动特点，定量分析窄通道内材料燃烧过程与微重力燃烧过程的相似程度，研究得到了窄通道功能模拟的机理和控制参数[90,91]。这些结果不仅促进了对热厚材料燃烧过程的理解，对载人航天器设计中材料防火性能的评价和材料筛选也具有现实意义。

导线绝缘层着火烟的析出和烟气分布规律空间实验，采用自身的过载电流作为导线点火源，观测微重力条件下聚乙烯(Polyethylene, PE)等导线绝缘层材料的产烟特征和烟气输运过程，研究结果可为航天器火灾探测的方案设计提供参考。空间实验系统组成如图 14 所示[92]。实验观察到微重力下烟气析出的不同模式(见图 15 中的示例)，认识其形成机理和影响因素，揭示烟析出对导线附近温度特性的影响机制[92,93]。通过低压下的窄通道实验，研究导线绝缘层在弱浮力对流环境中的着火先期特征，并与微重力实验数据比较，发现地面模拟实验能够较好地复现微重力下的烟气输运特性[94]。

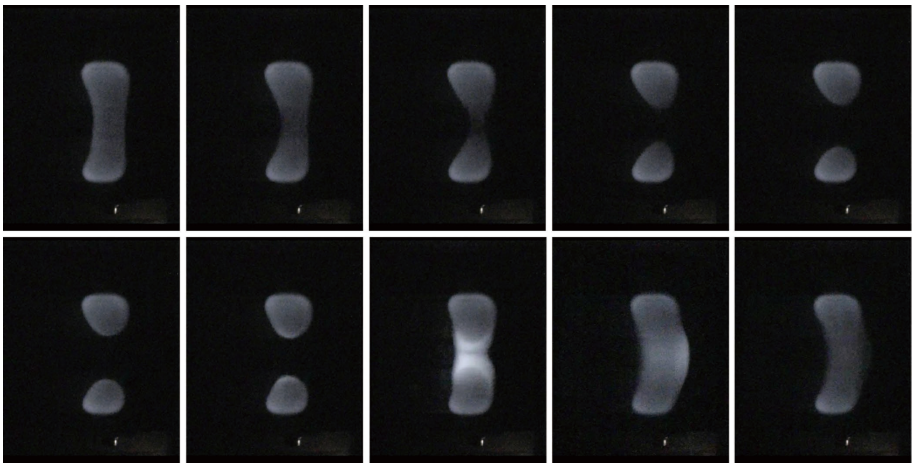

图 12 连续火焰向小火焰转变过程的俯视图像

Fig. 12 Top-view flame image sequence illustrating the transition from continuous flame to flamelet

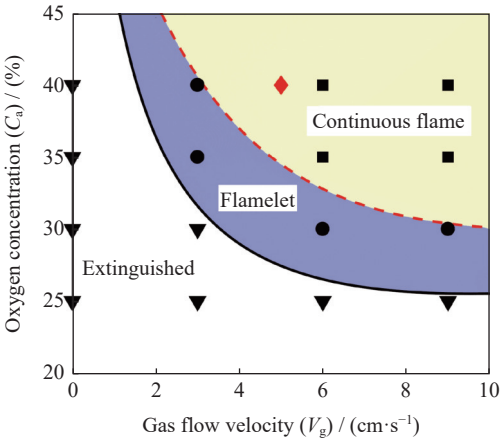

图 13 连续火焰区、小火焰区、熄灭区组成的可燃极限与火焰稳定图谱

Fig. 13 A flammability map and stability diagram showing the distribution of the continuous flame zone, the flamelet zone, and the extinguished zone

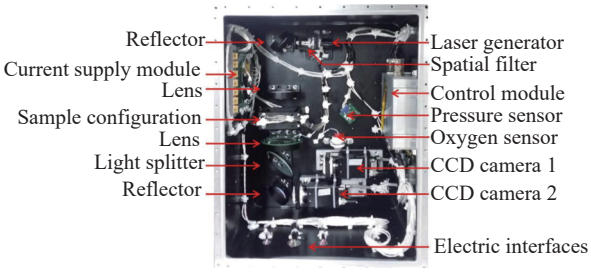

图 14 实践十号导线绝缘层过载燃烧实验系统

Fig. 14 Setup of the SJ-10 experimental system for overloaded wire insulation combustion

近期, 中国科学院力学研究所、中国科学技术大学以及香港理工大学等利用落塔短时微重力实验设施开展了多项固体材料燃烧实验, 涉及的研究内容比较广泛, 主要包括导线绝缘层产烟特性[95]、火焰对重力水平的响应[96]、受限空间火焰传播[97,98]、构型影响[99]、熔化液滴燃烧[100] 和热塑材料火焰传播[101] 等, 取得了丰富的研究结果。导线绝缘层产烟特性实验研究了氟化乙烯丙烯(Fluorinated Ethylene Propylene, FEP)绝缘层材料在电流过载时产生的烟颗粒及重力水平和强迫流动的影响, 在静止的微重力环境中, 较长的停留时间使得烟颗粒主粒子粒径和回转半径显著增大, 随着强迫气流流动速度的增加, 烟颗粒的粒径和分形维数均有所降低[95]。对不同直径球形固体材料火焰熄灭过程开展实验[99], 获得了熄灭极限附近热损失特性的定量结果, 并得到临界质量燃烧速率和临界传质数, 可作为微重力下固体材料火焰熄灭的极限条件, 对深入理解熄灭极限和熄灭机理具有重要意义。落塔实验成功观察到固体材料熔化液滴在微重力条件下的燃烧过程, 测定了低速运动液滴和静止液滴的燃烧速率常数等基础数据, 发现材料熔化液滴的燃烧符合经典的粒径平方(D^2)规律(见图 16), 由于燃烧过程中发生强烈的起泡和微小液滴喷射现象, 燃烧速率常数较大, 但传质数较小, 因而质量燃烧速率小于一般的碳氢液体燃料[100]。微重力环境中, 热塑性薄膜材料不能维持表面的连续火焰, 以局部火焰的形式进行燃烧, 而常重力下虽然火焰出现局部熄灭, 热解锋面整体向前传播, 相比常重力环境中的向下传播火焰, 微重力静止环境中的火焰传播速度更大, 这

与热固材料燃烧特性存在显著差异，其原因有外界环境的作用，更多是受到材料热特性的影响[101]。

总体而言，中国的微重力固体材料燃烧研究已具备较好的基础，但研究规模有限，研究工作的系统性存在明显不足。中国载人航天事业快速发展，一方面对航天器防火安全提出了更加迫切的需求，另一方面也为固体材料可燃性等相关防火问题研究提供了很好的发展机遇，特别是中国载人空间站投入运营后，可为大规模、系统化的微重力科学和应用提供优良的实验条件，有望推动研究工作实现跨越式发展。中国空间站 2022 年完成建造，将在轨运营 10 年以上；为开展微重力环境中的燃烧科学及应用研究，空间站内的燃烧科学实验柜设计配备先进的实验条件保障和燃烧诊断技术[102,103]，灵活支持包括固体材料在内的多种燃烧实验。同时，随着中国空间站运营期研究规划论证工作的不断深入，微重力下材料燃烧行为及火灾防护基础研究的任务和目标将更加明确，为未来发展提供方向指引。

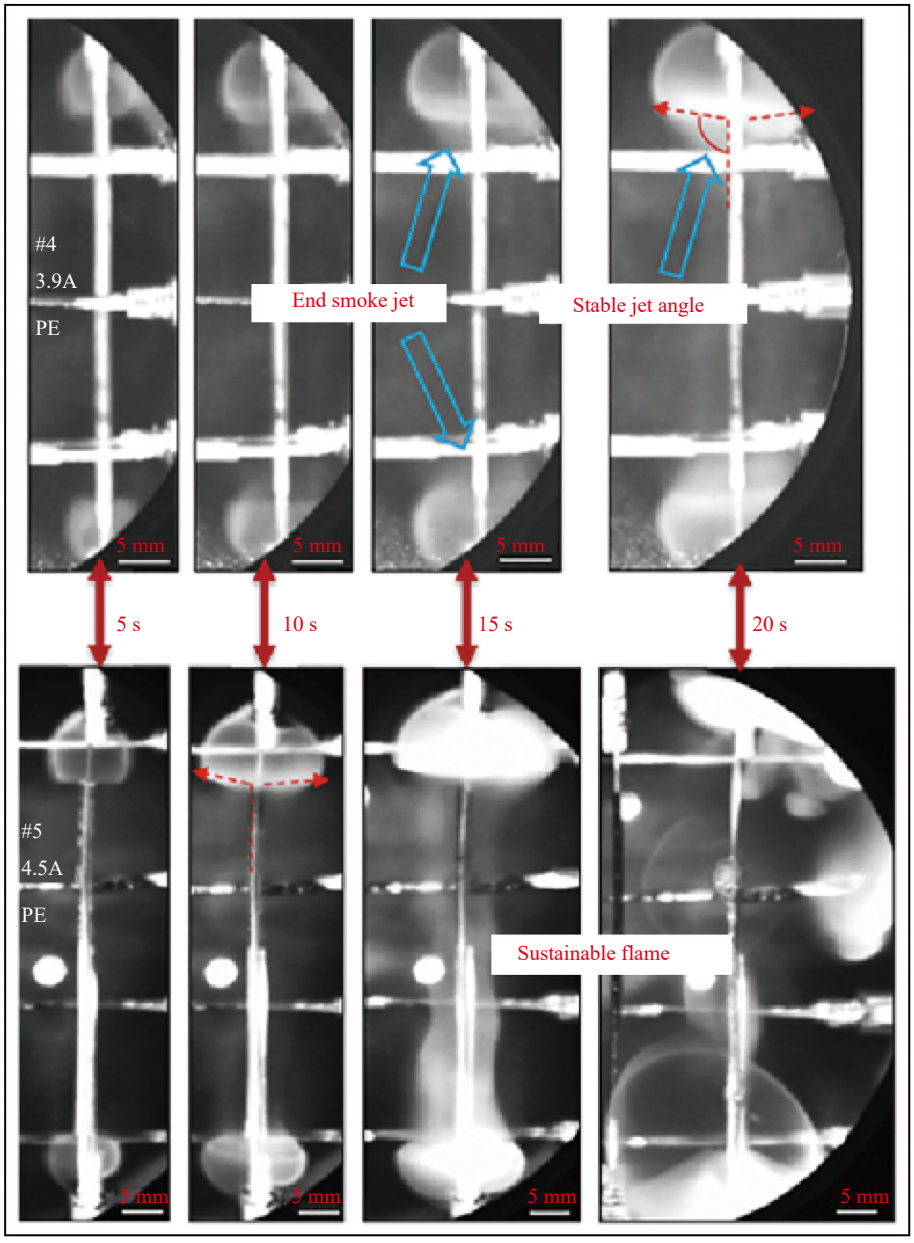

图 15 不同电流下导线绝缘层烟的析出

Fig. 15 Smoke emissions of wire insulations with different currents

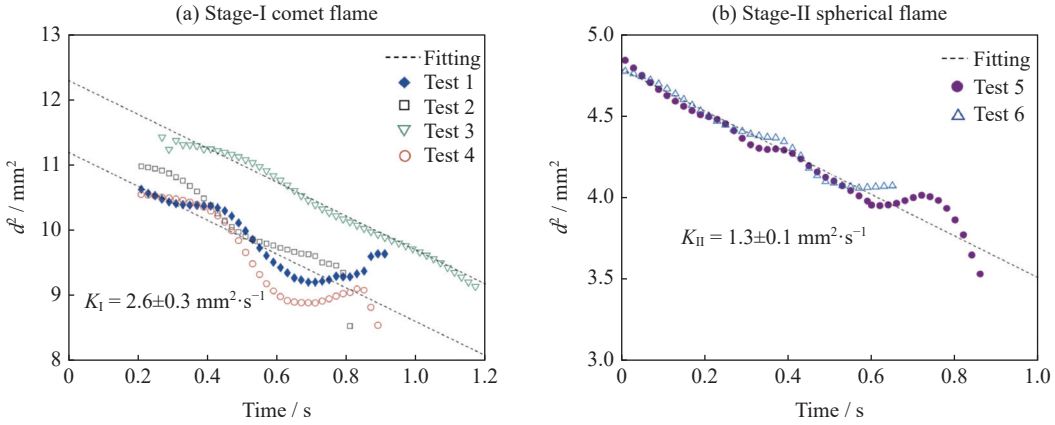

图 16 微重力燃烧实验中 PE 液滴直径平方随时间的变化

Fig. 16 Time evolution of measured d-square for the microgravity combustion of PE droplets

3 发展趋势分析与研究建议

3.1 发展趋势

由于载人航天防火安全的实际需求牵引,以及国际空间站等实验资源的有力支撑,近年来,微重力环境中固体材料可燃性成为国际上的热点研究方向,研究的规模和连续性前所未有,与较早期研究工作相比,现阶段新的发展态势具有以下特点。

(1)持续关注可燃性机理。重力水平、环境压力、氧浓度、低速强迫流动等环境条件影响着决定材料可燃性的物质和能量输运过程以及气相、固相化学反应机理,涉及材料着火和燃烧的全部环节。更为重要的是,这些参数的影响方式和作用机制相互耦合,特定环境中的材料可燃性是其共同影响的结果,其中一个参数的变化将改变环境特征以及其他参数的作用程度,给可燃性结果带来难以预估的误差,因此参数化的燃烧实验观测难以满足环境多样化的航天器防火需求。通过微重力实验获得较为充分的可燃性数据,进而分析和掌握环境的作用规律与影响机理,是微重力环境中固体材料可燃性研究的基本出发点,也是航天器材料可燃性评价取得突破性进展的重要前提;在当前阶段,持续的项目实施和大量的空间实验为深入认识材料可燃性机理提供了可能,揭示微重力下材料的燃烧规律成为首要的研究目标,在促进燃烧科学进步的同时也将建立航天器防火的理论基础。

(2)完整考虑材料燃烧过程和燃烧特性。完整的材料可燃性参数应提供材料燃烧的全过程信息,并为综合评价材料火灾安全性提供定量数据,这是地面上防火研究和应用的成熟思路。但早期对微重力材料燃烧的研究主要集中在着火之后的火焰传播特性,实验所用小尺度材料试样不能完全反映实际应用情况,由于适用的可燃性数据有限,载人航天器材料可燃性测试和评价基本沿用了地面上的技术。此外,对微重力下材料燃烧产物特征的研究很匮乏,不仅限制了对燃烧过程和特性的理解,也制约了火灾探测技术的发展。近年来,这一缺陷有了明显改观,空间长时间微重力实验以及在轨航天器舱内实际环境中开展的较大规模燃烧实验为材料燃烧特性的全面观测提供了条件,特征燃烧时间尺度较大的热厚材料、实际航天器材料和材料尺度效应的影响得到了更多关注,对材料着火前期产物特性的研究取得了良好进展,即将进行严格意义上的材料着火过程实验。研究内容的扩展将丰富和完善对微重力材料燃烧过程的理解,为航天器材料防火性能评价以及火灾安全措施提供依据,该思路下的研究工作将进一步得到加强。

(3)重视航天器防火应用。微重力下固体材料燃烧研究的主要背景为载人航天器火灾预防,但是前期为数不多的研究工作更偏重环境因素影响火焰传播的科学认识,科学研究结果与航天器防火安全工程实践之间的联系不紧密,未能对发展和完善航天材料可燃性评价方法提供实质性支持,也没有为建立航天器火灾模型发挥应有的作用。与之相比,现阶段的研究项目在关注材料燃烧规律的同时,普遍把航天器和地外栖息地的防火安全应用作为重要目标,研究方向主要包括以材料可燃性为根据改进材料防火性能测试方法、建立新的实验和理论方法以便利用地面测试结

果预测微重力下材料的防火性能、发展准确的航天器火灾模型等,部分研究还涉及火灾探测和灭火等相关问题。防火安全应用与材料可燃性基础研究是相互支撑的整体,有机兼顾二者可使航天器防火安全保障水平提升到新的高度。

3.2 研究建议

从航天器防火和燃烧科学认知的需求出发,需要深化对微重力环境中固体材料燃烧特性的理解,进一步提高航天器防火能力。同时,人类月面活动及火星等其他深空探测将成为中长期空间活动的热点,前所未及的环境特征对航天器防火研究提出了新的科学和技术问题,拓展对载人月球和深空探测环境中材料可燃性的认识是必要且适时的。其中,以下研究应受到特别重视。

(1)微重力下材料可燃性理论模型研究。概括地说,可燃性由材料自身物理、化学性质与外部环境条件共同决定,普适性理论模型应同时反映这些影响因素的作用原理,但目前对可燃性机理的认识远未达到相应水平,理论模型建立在诸多未经验证的假设和简化基础上,对材料类型和环境条件的适用范围有严格限制。开展微重力环境下材料可燃性模型研究,将针对这种特殊环境的影响建立适用的材料着火、火焰传播及熄灭理论与模型,更准确地预测多因素耦合的材料燃烧,是微重力环境下固体材料燃烧研究的关键科学问题之一。同时,微重力实验可精确控制环境流动条件,有效扩展实验参数范围并简化影响因素,开展微重力环境下的材料可燃性研究对于检验和发展固体材料燃烧理论具有重要意义。

(2)月球和深空探测环境中材料的可燃性。与地面和轨道飞行航天器相比,载人登月、火星探测等航天器和地外栖息基地的运营环境有显著变化:除了轨道飞行和深空转移时的微重力,月球和火星表面的活动将处于低重力(或称部分重力,分别为 0.16 g_0 和 0.38 g_0,这里 g_0 表示地球表面重力加速度)环境;航天器内将优先采用低总压、高氧浓度的非标准大气。从火灾安全的观点看,有必要掌握这些环境特征对材料可燃性的影响,特别是已有研究明确了低重力、低压和高氧浓度对可燃性的增强作用,更突显相关问题研究的重要性。但是目前关于该环境中材料可燃性的理解仍停留在初级阶段,实验数据极为匮乏,实验能力严重不足。建议优先发展地基低重力实验平台以及复现低重力效应的实验手段,在此基础上建立同时模拟其他环境要素的材料可燃性实验装备,形成材料可燃性研究和测试的基础能力,进而对多环境因素耦合作用下的材料可燃性以及环境参数的影响进行深入研究,并发展材料可燃性评价方法。

(3)航天器火灾动力学模型与火灾数值模拟。材料可燃性是火灾动力学模型的基本输入参数和重要子模型,其可靠性严重影响模型对火灾发展演化和火灾环境的预测结果,而火灾模型在系统约束下预测的火灾环境是评估材料在实际使用中的危险性和燃烧行为的基本依据。因此火灾模型与材料可燃性之间的关系是双向的,利用火灾模型分析火灾过程是材料可燃性研究最重要的应用之一。在过去 20 多年里,基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的火灾动力学模型逐渐成为火灾安全策略的核心组成部分;随着微重力环境中材料可燃性研究的逐步深入,发展载人航天器 CFD 火灾模型的条件已较为成熟,航天器火灾数值模拟可望具有良好的可靠性。积极开展火灾模型和火灾数值模拟研究,不仅将提供材料火灾安全评价中系统风险评估的分析工具,也可显著提升航天器舱内实际火灾的模拟能力。

4 结语

空间探索特殊环境条件深刻改变着固体材料火灾燃烧的特点,该研究方向的进展不仅受到燃烧科学领域的关注,更作为解决载人航天器防火安全这一重大实际需求的基础而得到高度重视。固体材料的燃烧过程和燃烧特性形成机理十分复杂,影响因素较多,目前还不能仅根据材料和环境参数确定材料可燃性,也无法依靠分析模型对已知数据进行外推。另外,载人航天器的运营环境不断演进,未来还将面临全新的变化,使已有科学认识和工程经验的应用存在不确定性,给防火安全带来新挑战。因此,载人空间探索环境中材料燃烧特性的研究工作将是长期的,完善航天器防火技术措施需要不懈努力。中国自主发展载人航天是综合国力和科技水平的重要体现,围绕固体材料可燃性深入开展科学研究,并紧密结合载人航天器舱内防火安全的现实需求,形成航天器防火的科学基础、数据和实用方法,将为当前及未来载人航天任务的顺利实施提供可靠的安全保障。

参考文献

[1] LAUTENBERGER C, TORERO J, FERNANDEZ-PELLO C. Understanding material flammability[M]// APTE V. Flammability Testing of Materials Used in Construction, Transport and Mining. Boca Raton: CRC Press, 2006: 1-21

[2] QUINTIERE J. A simplified theory for generalizing results from a radiant panel rate of flame spread apparatus [J]. *Fire and Materials*, 1981, **5**(2): 52-60

[3] TORERO J L. Scaling-up fire[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, **34**(1): 99-124

[4] CORDOVA J L, WALTHER D C, TORERO J L, *et al.* Oxidizer flow effects on the flammability of solid combustibles[J]. *Combustion Science and Technology*, 2001, **164**(1): 253-278

[5] RICH D, LAUTENBERGER C, TORERO J L, *et al.* Mass flux of combustible solids at piloted ignition[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, **31**(2): 2653-2660

[6] FERERES S, LAUTENBERGER C, FERNANDEZ-PELLO C, *et al.* Mass flux at ignition in reduced pressure environments[J]. *Combustion and Flame*, 2011, **158**(7): 1301-1306

[7] MCALLISTER S, FERNANDEZ-PELLO C, URBAN D, *et al.* The combined effect of pressure and oxygen concentration on piloted ignition of a solid combustible[J]. *Combustion and Flame*, 2010, **157**(9): 1753-1759

[8] MCALLISTER S, FERNANDEZ-PELLO C, URBAN D, *et al.* Piloted ignition delay of PMMA in space exploration atmospheres[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, **32**(2): 2453-2459

[9] FRIEDMAN R, ROSS H D. Combustion technology and fire safety for humancrew space missions[M]//ROSS H D. Microgravity Combustion: Fire in Free Fall. New York: Academic Press, 2001: 525-562

[10] LANGE K E, PERKA A T, DUFFIELD B E, *et al.* Bounding the spacecraft atmosphere design space for future exploration missions[R]. Houston: NASA, 2005

[11] CAMPBELL P D. Recommendations for exploration spacecraft internal atmospheres: the final report of the NASA exploration atmospheres working group[R]. Houston: NASA, 2010

[12] LIU Weibo, LIU Zhaoxia, CHEN Jindun, *et al.* Selection of spacecraft atmospheric pressure regime for manned lunar exploration mission[J]. *Manned Spaceflight*, 2016, **22**(6): 687-693 (刘伟波, 刘朝霞, 陈金盾, 等. 载人探月航天器大气压力制度选择[J]. 载人航天, 2016, **22**(6): 687-693)

[13] T'IEN J S, SHIH H Y, JIANG C B, *et al.* Mechanisms of flame spread and smolder wave propagation[M]//ROSS H D. Microgravity Combustion: Fire in Free Fall. San Diego: Academic Press, 2001: 299-418

[14] ZHANG Xia. Progress in fire safety research for manned spacecraft[J]. *Advances in Mechanics*, 2005, **35**(1): 100-115 (张夏. 载人航天器火灾安全研究进展[J]. 力学进展, 2005, **35**(1): 100-115)

[15] FUJITA O. Solid combustion research in microgravity as a basis of fire safety in space[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, **35**(3): 2487-2502

[16] XUE Yuan, XU Guoxin, HU Songlin, *et al.* Planning and progress of microgravity combustion science on the International Space Station[J]. *Manned Spaceflight*, 2020, **26**(2): 252-260 (薛源, 徐国鑫, 胡松林, 等. 国际空间站微重力燃烧项目规划及进展[J]. 载人航天, 2020, **26**(2): 252-260)

[17] ZHANG Lu, LIU Yingchun. Research status and outlook of microgravity combustion in space station[J]. *Manned Spaceflight*, 2015, **21**(6): 603-610 (张璐, 刘迎春. 空间站微重力燃烧研究现状与展望[J]. 载人航天, 2015, **21**(6): 603-610)

[18] NASA. Smoke aerosol measurement experiment (SAME) [EB/OL]. [2022-12-23]. https://www1.grc.nasa.gov/space/iss-research/msg/same/#space-applications

[19] MEYER M E, URBAN D L, MULHOLLAND G W, *et al.* Evaluation of spacecraft smoke detector performance in the low-gravity environment[J]. *Fire Safety Journal*, 2018, **98**: 74-81

[20] MULHOLLAND G W, MEYER M, URBAN D L, *et al.* Pyrolysis smoke generated under low-gravity conditions [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2015, **49**(5): 310-321

[21] URBAN D L, RUFF G A, MULHOLLAND G W, *et al.* Measurement of smoke particle size under low-gravity conditions[J]. *SAE International Journal of Aerospace*, 2008, **1**(1): 317-324

[22] URBAN D, RUFF G, SHEREDY W, *et al.* Properties of smoke from overheated materials in low-gravity[C]//Proceedings of the 47 th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando: AIAA, 2009: 1-7

[23] MEYER M E, MULHOLLAND G W, BRYG V, *et al.* Smoke characterization and feasibility of the moment method for spacecraft fire detection[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2015, **49**(5): 299-309

[24] URBAN D, RUFF G, BROOKER J, *et al.* Spacecraft fire detection: smoke properties and transport in low-gravity[C]//Proceedings of the 46 th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 2008: 1-9

[25] ZHAO X Y, LIAO Y T T, JOHNSTON M C, *et al.* Concurrent flame growth, spread, and quenching over composite fabric samples in low speed purely forced flow in microgravity[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, **36**(2): 2971-2978

[26] BHATTACHARJEE S, SIMSEK A, MILLER F, *et al.* Radiative, thermal, and kinetic regimes of opposed-flow flame spread: a comparison between experiment and theory[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, **36**(2): 2963-2969

[27] BHATTACHARJEE S, LAUE M, CARMIGNANI L, *et*

al. Opposed-flow flame spread: a comparison of microgravity and normal gravity experiments to establish the thermal regime[J]. *Fire Safety Journal*, 2016, **79**: 111-118

[28] BHATTACHARJEE S, SIMSEK A, OLSON S, *et al*. The critical flow velocity for radiative extinction in opposed-flow flame spread in a microgravity environment: a comparison of experimental, computational, and theoretical results[J]. *Combustion and Flame*, 2016, **163**: 472-477

[29] CARMIGNANI L, BHATTACHARJEE S, OLSON S L, *et al*. Boundary layer effect on opposed-flow flame spread and flame length over thin polymethyl-methacrylate in microgravity[J]. *Combustion Science and Technology*, 2018, **190**(3): 535-549

[30] ENDO M, T'IEN J S, FERKUL P V, *et al*. Flame growth around a spherical solid fuel in low speed forced flow in microgravity[J]. *Fire Technology*, 2020, **56**(1): 5-32

[31] OLSON S L, FERKUL P V, MARCUM J W. High-speed video analysis of flame oscillations along a PMMA rod after stagnation region blowoff[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, **37**(2): 1555-1562

[32] MARCUM J W, FERKUL P V, OLSON S L. PMMA rod stagnation region flame blowoff limits at various radii, oxygen concentrations, and mixed stretch rates[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, **37**(3): 4001-4008

[33] LINK S, HUANG X Y, FERNANDEZ-PELLO C, *et al*. The effect of gravity on flame spread over PMMA cylinders[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1): 120

[34] HUANG X Y, LINK S, RODRIGUEZ A, *et al*. Transition from opposed flame spread to fuel regression and blow off: effect of flow, atmosphere, and microgravity[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, **37**(3): 4117-4126

[35] NASA. Advanced combustion via microgravity experiments (ACME)[EB/OL]. [2022-12-23]. https://www1.grc.nasa.gov/space/iss-research/iss-fcf/cir/acme

[36] DEHGHANI P, SUNDERLAND P B, QUINTIERE J G, *et al*. Burning in microgravity: experimental results and analysis[J]. *Combustion and Flame*, 2021, **228**: 315-330

[37] LUNDSTRÖM F V, SUNDERLAND P B, QUINTIERE J G, *et al*. Study of ignition and extinction of small-scale fires in experiments with an emulating gas burner[J]. *Fire Safety Journal*, 2017, **87**: 18-24

[38] AUTH E, QUINTIERE J G, SUNDERLAND P B. Emulation of condensed fuel flames with gaseous fuels supplied through a porous copper calorimeter[J]. *Fire and Materials*, 2020, **44**(7): 935-942

[39] ZHANG Y, KIM M, SUNDERLAND P B, *et al*. A burner to emulate condensed phase fuels[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, **73**: 87-93

[40] MARKAN A, SUNDERLAND P B, QUINTIERE J G, *et al*. A burning rate emulator (BRE) for study of condensed fuel burning in microgravity[J]. *Combustion and Flame*, 2018, **192**: 272-282

[41] ZHANG Y, KIM M, GUO H Q, *et al*. Emulation of condensed fuel flames with gases in microgravity[J]. *Combustion and Flame*, 2015, **162**(10): 3449-3455

[42] MARKAN A, SUNDERLAND P B, QUINTIERE J G, *et al*. Measuring heat flux to a porous burner in microgravity[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, **37**(3): 4137-4144

[43] SNEGIREV A, KUZNETSOV E, MARKUS E, *et al*. Transient dynamics of radiative extinction in low-momentum microgravity diffusion flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, **38**(3): 4815-4823

[44] KUZNETSOV E, SNEGIREV A, MARKUS E. Radiative extinction of diffusion flame in microgravity[C]//Proceedings of the 9 th International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Saint Petersburg: St. Petersburg Polytechnic University, 2019: 214-224

[45] DEHGHANI P, QUINTIERE J G. Theoretical analysis and predictions of burning in microgravity using a burning emulator[J]. *Combustion and Flame*, 2021, **233**: 111572

[46] MARKAN A, BAUM H R, SUNDERLAND P B, *et al*. Transient ellipsoidal combustion model for a porous burner in microgravity[J]. *Combustion and Flame*, 2020, **212**: 93-106

[47] NASA. Solid fuel ignition and extinction[EB/OL]. [2022-12-23]. https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/explorer/Facility.html?#id=2060

[48] NASA. Fighting fire with fire: new space station experiments study flames in space[EB/OL]. [2022-12-23]. https://www.nasa.gov/feature/glenn/2022/fighting-fire-with-fire-new-space-station-experiments-study-flames-in-space

[49] NASA. Spacecraft fire safety (Saffire)[EB/OL]. [2022-12-23]. https://www.nasa.gov/saffire

[50] NASA. Spacecraft fire safety demonstration (Saffire) [EB/OL]. [2022-12-23]. https://techport.nasa.gov/view/13543

[51] URBAN D L, FERKUL P, OLSON S, *et al*. Flame spread: effects of microgravity and scale[J]. *Combustion and Flame*, 2019, **199**: 168-182

[52] JOMAAS G, TORERO J L, EIGENBROD C, *et al*. Fire safety in space –beyond flammability testing of small samples[J]. *Acta Astronautica*, 2015, **109**: 208-216

[53] FERKUL P, OLSON S, URBAN D, *et al*. Results of large-scale spacecraft flammability tests[C]//Proceedings of the 47 th International Conference on Environmental Systems. Charleston: ICES, 2017: 1-10

[54] BROYAN JR J L, SHAW L, MCKINLEY M, *et al*. NASA environmental control and life support technology development for exploration: 2020 to 2021 overview [C]//Proceedings of the 50 th International Conference on Environmental Systems. Lisbon: ICES, 2021: 1-10

[55] CASTEEL M, GRAF J. Development of a carbon dioxide removal bed and a combustion products removal bed for Saffire[C]//Proceedings of the 49 th International Conference on Environmental Systems. Massachusetts: ICES, 2019: 1-10

[56] FRADET M, BRIGGS R, BENDIG R. The combustion product monitor instrument for the spacecraft fire safety demonstration project[C]//Proceedings of the 49 th International Conference on Environmental Systems. Massachusetts: ICES, 2019: 1-10

[57] WANG X L, ZHOU H, ARNOTT W P, *et al*. Evaluation of gas and particle sensors for detecting spacecraft-relevant fire emissions[J]. *Fire Safety Journal*, 2020, **113**: 102977

[58] LI C Y, LIAO Y T T, T'IEN J S, *et al*. Transient flame growth and spread processes over a large solid fabric in concurrent low-speed flows in microgravity–model versus experiment[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, **37**(3): 4163-4171

[59] LI C Y, LIAO Y T T. Effects of ambient conditions on concurrent-flow flame spread over a wide thin solid in microgravity[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, **38**(3): 4775-4784

[60] OLSON S L, URBAN D L, RUFF G A, *et al*. Concurrent flame spread over two-sided thick PMMA slabs in microgravity[J]. *Fire Technology*, 2020, **56**(1): 49-69

[61] ROJAS-ALVA U, MØLLER-POULSEN F, MAN S L, *et al*. Flame spread behaviour of polydimethylsiloxane (PDMS) membranes in 1 g and μg environments[J]. *Combustion and Flame*, 2022, **240**: 112009

[62] THOMSEN M, FERNANDEZ-PELLO C, URBAN D L, *et al*. On simulating concurrent flame spread in reduced gravity by reducing ambient pressure[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, **37**(3): 3793-3800

[63] THOMSEN M, FERNANDEZ-PELLO C, RUFF G A, *et al*. Buoyancy effects on concurrent flame spread over thick PMMA[J]. *Combustion and Flame*, 2019, **199**: 279-291

[64] NASA. Flammability limits at reduced-g experiment (FLARE)[EB/OL]. [2022-12-23]. https://www1.grc.nasa.gov/space/iss-research/iss-fcf/cir/flammability-limits-at-reduced-g-experiment-flare

[65] TAKAHASHI S, MARUTA K. Prediction of limiting oxygen concentration of thin materials in microgravity[J]. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, 2018, **16**(1): 28-34

[66] GUIBAUD A, CITERNE J M, CONSALVI J L, *et al*. Experimental evaluation of flame radiative feedback: methodology and application to opposed flame spread over coated wires in microgravity[J]. *Fire Technology*, 2020, **56**: 185-207

[67] KOBAYASHI Y, TERASHIMA K, BIN BORHAN M A F, *et al*. Opposed flame spread over polyethylene under variable flow velocity and oxygen concentration in microgravity[J]. *Fire Technology*, 2020, **56**(1): 113-130

[68] MIZUTANI K, MIYAMOTO K, HASHIMOTO N, *et al*. Limiting oxygen concentration trend of ETFE-insulated wires under microgravity[J]. *International Journal of Microgravity Science and Application*, 2018, **35**(1): 350104

[69] CITERNE J M, DUTILLEUL H, KIZAWA K, *et al*. Fire safety in space–investigating flame spread interaction over wires[J]. *Acta Astronautica*, 2016, **126**: 500-509

[70] NAGACHI M, MITSUI F, CITERNE J M, *et al*. Can a spreading flame over electric wire insulation in concurrent flow achieve steady propagation in microgravity?[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, **37**(3): 4155-4162

[71] TAKAHASHI S, TERASHIMA K, BIN BORHAN M A F, *et al*. Relationship between blow-off behavior and limiting oxygen concentration in microgravity environments of flame retardant materials[J]. *Fire Technology*, 2020, **56**(1): 169-183

[72] TAKAHASHI S, BIN BORHAN M A F, TERASHIMA K, *et al*. Flammability limit of thin flame retardant materials in microgravity environments[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, **37**(3): 4257-4265

[73] TAKAHASHI S, EBISAWA T, BHATTACHARJEE S, *et al*. Simplified model for predicting difference between flammability limits of a thin material in normal gravity and microgravity environments[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, **35**(3): 2535-2543

[74] TAKAHASHI S, OIWA R, TOKORO M, *et al*. Flammability limits of flat materials with moderate thickness in microgravity[J]. *Fire Technology*, 2021, **57**(5): 2387-2406

[75] MARUTA K, TSUBOI K, TAKAHASHI S. Limiting oxygen concentration of flame resistant material in microgravity environment[J]. *International Journal of Microgravity Science and Application*, 2017, **34**(3): 340304

[76] NAGACHI M, MITSUI F, CITERNE J M, *et al*. Effect of ignition condition on the extinction limit for opposed flame spread over electrical wires in microgravity[J]. *Fire Technology*, 2020, **56**(1): 149-168

[77] KONNO Y, KOBAYASHI Y, FERNANDEZ-PELLO C, *et al*. Opposed-flow flame spread and extinction in electric wires: the effects of gravity, external radiant heat flux, and wire characteristics on wire flammability[J]. *Fire Technology*, 2020, **56**(1): 131-148

[78] KONNO Y, LI Y T, CITERNE J M, *et al*. Experimental study on downward/opposed flame spread and extinction over electric wires in partial gravity environments[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, doi: 10.1016/j.proci.2022.07.002.

[79] NAGACHI M, CITERNE J M, DUTILLEUL H, *et al*. Effect of ambient pressure on the extinction limit for op-

posed flame spread over an electrical wire in microgravity[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, **38**(3): 4767-4774

[80] KOBAYASHI Y, HUANG X Y, NAKAYA S, *et al*. Flame spread over horizontal and vertical wires: the role of dripping and core[J]. *Fire Safety Journal*, 2017, **91**: 112-122

[81] MIYAMOTO K, HUANG X Y, HASHIMOTO N, *et al*. Limiting oxygen concentration (LOC) of burning polyethylene insulated wires under external radiation[J]. *Fire Safety Journal*, 2016, **86**: 32-40

[82] NAKAMURA Y, KIZAWA K, MIZUGUCHI S, *et al*. Experimental study on near-limiting burning behavior of thermoplastic materials with various thicknesses under candle-like burning configuration[J]. *Fire Technology*, 2016, **52**(4): 1107-1131

[83] KONNO Y, HASHIMOTO N, FUJITA O. Downward flame spreading over electric wire under various oxygen concentrations[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, **37**(3): 3817-3824

[84] KOBAYASHI Y, NAKAYA S, TSUE M, *et al*. Flame spread over polyethylene-insulated copper and stainless-steel wires at high pressure[J]. *Fire Safety Journal*, 2021, **120**: 103062

[85] ZHAO Jianfu, WANG Shuangfeng, LIU Qiang, *et al*. Retrospect and perspective on microgravity science in China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(1): 34-45 (赵建福, 王双峰, 刘强, 等. 中国微重力科学研究回顾与展望[J]. 空间科学学报, 2021, **41**(1): 34-45)

[86] WANG S F, ZHANG X. Microgravity smoldering combustion of flexible polyurethane foam with central ignition[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2008, **20**(2): 99-105

[87] KONG W J, WANG B R, ZHANG W K, *et al*. Study on prefire phenomena of wire insulation at microgravity[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2008, **20**(2): 107-113

[88] ZHU F, LU Z B, WANG S F, *et al*. Microgravity diffusion flame spread over a thick solid in step-changed low-velocity opposed flows[J]. *Combustion and Flame*, 2019, **205**: 55-67

[89] WU C J, HUANG X Y, WANG S F, *et al*. Opposed flame spread over cylindrical PMMA under oxygen-enriched microgravity environment[J]. *Fire Technology*, 2020, **56**(1): 71-89

[90] ZHU F, LU Z B, WANG S F. Flame spread and extinction over a thick solid fuel in low-velocity opposed and concurrent flows[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2016, **28**(2): 87-94

[91] ZHU F, WANG S F, LU Z B. A comparative study of near-limit flame spread over a thick solid in space- and ground-based experiments[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2018, **30**(6): 943-949

[92] XUE S, KONG W J. Smoke emission and temperature characteristics of the long-term overloaded wire in space[J]. *Journal of Fire Sciences*, 2019, **37**(2): 99-116

[93] ZHUANG H H, KONG W J. Smoke emission and distribution characteristics of overloaded wire insulations under microgravity[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2022, **34**(5): 81

[94] WANG K, XIA W, WANG B R, *et al*. Study on fire initiation of wire insulation by a narrow channel at low pressure[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2016, **28**(2): 155-163

[95] GUAN J F, FANG J, XUE Y, *et al*. Morphology and concentration of smoke from fluorinated ethylene propylene wire insulation in microgravity under forced airflow[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **320**: 602-611

[96] HU L H, DELICHATSIOS M A, LI J, *et al*. Experimental study on diffusive solid combustion behavior during transition from normal- to reduced-gravity[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, **55**(7/8): 2035-2043

[97] WANG S F, HU J, XIAO Y, *et al*. Opposed-flow flame spread over solid fuels in microgravity: the effect of confined spaces[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2015, **27**(5): 329-336

[98] WANG S F, ZHU F. Flame spread in low-speed forced flows: ground- and space-based experiments[M]//HU W R, KANG Q. Physical Science Under Microgravity: Experiments on Board the SJ-10 Recoverable Satellite. Singapore: Springer, 2019: 237-262

[99] WU C J, SUN P Y, WANG X Z, *et al*. Flame extinction of spherical PMMA in microgravity: effect of fuel diameter and conduction[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2020, **32**(6): 1065-1075

[100] SUN P Y, WU C J, ZHU F, *et al*. Microgravity combustion of polyethylene droplet in drop tower[J]. *Combustion and Flame*, 2020, **222**: 18-26

[101] ZHU F, HUANG X Y, WANG S F. Flame spread over polyethylene film: effects of gravity and fuel inclination[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2022, **34**(3): 26

[102] ZHANG Zhenzhong, KONG Wenjun, ZHANG Hualiang. Design of combustion science experimental system for China Space Station[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(1): 72-78 (张振忠, 孔文俊, 张华良. 空间站燃烧科学实验系统设计[J]. 空间科学学报, 2020, **40**(1): 72-78)

[103] ZHANG Xiaowu, ZHENG Huilong, WANG Kun, *et al*. Combustion chamber design and analysis of the space station combustion science experimental system[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(2): 301-309 (张晓武, 郑会龙, 王琨, 等. 中国空间站燃烧科学实验系统燃烧室设计与分析[J]. 空间科学学报, 2021, **41**(2): 301-309)