0254-6124/2021/41(1)-034–12 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHAO Jianfu, WANG Shuangfeng, LIU Qiang, HE Zhenhui, ZHANG Wei, LI Kai, ZHOU Zebing, LUO Xinghong, MIAO Jianyin, ZHENG Huiqiong, KANG Qi, CAI Weiming. Retrospect and perspective on microgravity science in China (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(1): 34-45. DOI:10.11728/cjss2021.01.034

中国微重力科学研究回顾与展望

赵建福[1,8,9] 王双峰[1,8,9] 刘 强[2] 何振辉[3]
张 伟[2] 李 凯[1,8,9] 周泽兵[4] 罗兴宏[5]
苗建印[6] 郑慧琼[7] 康 琦[1,8,9] 蔡伟明[7]

1(中国科学院力学研究所 微重力重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院空间应用工程与技术中心 北京 100094)

3(中山大学物理与天文学院 珠海 519082)

4(华中科技大学物理学院 武汉 430074)

5(中国科学院金属研究所师 昌绪先进材料创新中心 沈阳 110016)

6(中国空间技术研究院北京空间飞行器总体设计部 空间热控技术北京市重点实验室 北京 100094)

7(中国科学院分子植物科学卓越创新中心 上海 200032)

8(中国科学院大学工程科学学院 北京 100049)

9(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 微重力科学主要研究微重力环境中物质运动的规律, 以及不同重力环境中重力对物质运动的影响. 中国微重力科学研究起步于 20 世纪 60 年代, 兴起于 80 年代中后期, 经过多年发展, 目前已初具规模, 在一些重要方向具有明显特色和一定优势. 本文回顾了中国微重力科学研究的早期历程, 评述了近年来中国微重力科学研究进展, 特别是利用实践十号科学实验卫星、天宫二号空间实验室等空间平台开展的微重力科学与技术应用研究取得的最新成果, 并对中国载人空间站时代微重力科学发展的前景予以瞻望, 推动微重力科学与应用研究在中国的快速、可持续发展.

关键词 微重力科学, 基础研究, 应用技术, 中国研究活动

中图分类号 V 524, V 19

Retrospect and Perspective on Microgravity Science in China

ZHAO Jianfu[1,8,9] WANG Shuangfeng[1,8,9] LIU Qiang[2] HE Zhenhui[3]
ZHANG Wei[2] LI Kai[1,8,9] ZHOU Zebing[4] LUO Xinghong[5]
MIAO Jianyin[6] ZHENG Huiqiong[7] KANG Qi[1,8,9] CAI Weiming[7]

2020-10-19 收到原稿

E-mail: jfzhao@imech.ac.cn

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

2(*Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100094)

3(*School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai* 519082)

4(*School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan* 430074)

5(*Shi-changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang* 110016)

6(*Beijing Key Laboratory of Space Thermal Control Technology, Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing* 100094)

7(*Center for Excellence in Molecular Plant Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 200032)

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

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

Abstract The major objective of microgravity science is to study the movement laws of substances in microgravity, as well as to reveal the influence of gravity on the movement of materials in different gravity environments. China's microgravity research started in the 1960s and really rose in the middle and late 1980s. After years of efforts, it has begun to take shape, and has obvious characteristics and advantages in some important directions. In this paper, the early history of China's microgravity science is briefly reviewed. The emphases are put on the recent progress and the latest achievements of microgravity science and application researches in China carried out mainly by using the national space platforms, such as SJ-10 scientific experiment satellite, TG-2 space lab, and so on. Finally, the vision of China's microgravity science in the coming era of China Space Station (CSS) is prospected, so as to promote the rapid and sustainable development of microgravity science and application researches in China, for better serving the country and benefiting mankind.

Key words Microgravity sciences, Fundamental research, Applied technology, Chinese research activities

0 引言

微重力科学主要研究微重力环境中物质运动的规律, 以及不同重力环境中重力对物质运动的影响. 微重力科学一般包括微重力流体物理、微重力燃烧科学、空间材料科学、空间生物技术与空间基础物理等 [1,2]. 国际微重力科学的兴起, 源于人类航天活动的需求, 并随着航天技术的进步不断发展壮大, 目前已成为一门新兴的前沿交叉学科. 中国微重力科学研究同样如此. 中国早在 20 世纪 60 年代即在北京强度环境研究所建立了高度 38 m 的落塔, 研究空间流体管理 (如微重力环境中的充液腔等) 问题, 为航天工程设计提供可靠依据 [3], 但是作为一门交叉学科, 中国微重力科学研究真正兴起于 20 世纪 80 年代中后期, 在以林兰英、胡文瑞、顾逸东为代表的前辈学者倡议、引领和直接领导下, 经过 30 余年的努力, 从无到有, 从点到面, 目前已发展为初具规模, 并在一些重要方向具有明显特色和一定优势. 特别是中国载人空间站工程建设将为微重力科学研究提供优越的空间科学实验平台, 并通过广泛的国际合作为推动国际微重力科学的发展做出中国贡献.

中国微重力科学兴起之初即得到国家高度重视. 原国防科工委于 1994 年原则上批准了国家高技术研究发展计划航天领域首届专家委员会关于组建国家微重力实验室 (National Microgravity Laboratory) 的建议, 1995 年 9 月 4 日正式批准了实验室建设计划任务书, 由国家高技术研究发展计划 (航天领域) 和

中国科学院共同投资建设, 挂靠中国科学院空间科学与应用总体部 (后变更为中国科学院力学研究所). 胡文瑞院士为国家微重力实验室首任主任, 首届学术委员会主任为林兰英院士, 副主任为梁栋材院士和章综院士, “两弹一星” 功勋奖章获得者陈能宽院士、2012 年度国家最高科学技术奖获得者郑哲敏院士、载人航天工程空间科学首席专家顾逸东院士等为委员. 2003 年国家微重力实验室通过原总装备部组织的全面验收, 由前期 “边建设边研究” 转入正常运行. 2008 年纳入中国科学院重点实验室, 命名为中国科学院微重力重点实验室. 作为中国目前唯一的微重力科学研究中心, 实验室 20 余年来取得了一系列重要研究成果, 已成为国际上重要的微重力科学研究中心之一. 此外, 分布在中国科学院各相关研究所、高校及航天产业部门的微重力科学与应用研究机构, 在理论研究、数值模拟和地面常重力实验/地基短时微重力实验研究的基础上, 积极寻求空间微重力实验的机会, 为中国微重力科学发展做出显著贡献.

为了加强国内外微重力科学领域的学术交流与合作, 促进中国微重力科学快速发展, 林兰英、胡文瑞等于 1991 年 12 月 5−8 日在江苏省苏州市组织召开首届全国微重力科学和应用学术会议, 并倡议组建微重力科学与应用研究专业委员会 (简称微重力专委会). 1993 年 2 月 25 日中国科协准予备案, 微重力专委会正式成立, 成为中国空间科学学会分支机构之一, 首届主任委员为胡文瑞院士. 微重力专委会成立以来, 密切联系中国微重力科学与应用研究领域广大科学技术人员及相关科研单位和生产部门, 积极开展国内外学术交流, 迄今已举办 11 届全国微重力科学学术会议, 发起或共同发起了中日、中德、泛太平洋等区域性微重力科学研讨会. 其中, 中德微重力科学研讨会已举办 6 届, 交替在中国和德国举行; 中日微重力科学研讨会交替在中国和日本举办了 7 届后, 扩展成为中日韩微重力科学研讨会并继续举办 2 届, 目前已发展为亚洲微重力会议 (Asian Microgravity Symposium, AMS). 第 12 届亚洲微重力会议 (AMS-2018) 于 2018 年 11 月 12−16 日在广东省珠海市召开, 来自中国和中国香港、日本、韩国、印度、以色列、比利时、美国等国家与地区的 240 余名代表参加了本届会议, 通过大会特邀报告、分会场主旨报告、口头报告和高级科普报告等形式, 对微重力科学、空间生命科学以及载人航天其他相关领域最新成果和交叉前沿发展趋势进行了广泛深入的交流和研讨, 提升了中国在亚洲和国际微重力科学领域的影响.

国际上已开展微重力科学研究的主要国家均为国际空间站参与国, 微重力科学与国际空间站的强相关性, 使其在航天大国和组织的研究工作中占有重要地位, 常被纳入载人航天的相关领域统一管理. 鉴于此, 本文按照中国载人航天工程三步走战略发展历程, 将中国微重力科学研究划分为三个阶段: 早期发展, 自 20 世纪 60 年代至 2005 年第一步战略完成; 近期发展, 与第二步战略实施过程一致, 即自 2006 年至 2019 年; 未来发展, 自 2020 年起, 中国载人空间站建设和运营将为微重力科学研究提供巨大助力, 因此也可称之为我国微重力科学的中国空间站时代. 本文在简要回顾中国微重力科学研究的早期发展历程后, 将重点评述近期中国微重力科学研究的进展, 特别是利用实践十号科学实验卫星及天宫二号空间实验室等空间平台开展的微重力科学与技术应用研究所取得的最新成果. 对即将到来的中国载人空间站时代微重力科学发展的前景予以瞻望, 以推动微重力科学与应用研究在中国的快速、可持续发展, 服务国家, 造福人类.

1 早期成就与发展概况

中国微重力科学研究起步于 20 世纪 60 年代, 真正兴起于 80 年代中后期. 胡文瑞 (时任中国科学院力学研究所基础力学研究室主任, 1986 年被聘为 863 计划航天领域首届专家委员会委员) 率先倡导并组织了关于微重力科学研究的调研, 积极推动中国微重力科学研究工作的逐步深入与发展. 林兰英在 863 计划支持下, 领导了 1987 年中国返回式卫星搭载的首次空间材料科学实验, 获得国际上第一根在空间微重力环境下从熔体生长出的高质量砷化镓单晶 [4], 开启了中国微重力科学空间实验的先河. 1988−1991 年中国科学院 “七五” 重点项目 “微重力科学基础研究” 进一步培育和凝聚了队伍, 推动了中国微重力科学的持续发展.

中国成熟的卫星 (特别是返回式卫星) 技术和经验, 为微重力科学 (和空间生命科学) 研究提供了空间实验平台, 成为开展微重力科学空间实验的首要途径. 除 1987 年中国返回式卫星搭载的首次空间材料科学实验外, 1988 年中国返回式卫星上搭载德

国 INTOSPACE 公司研制的管式空间蛋白质晶体生长装置, 进行了中国空间蛋白质晶体生长的首次尝试; 1992 年和 1994 年采用自行研制的空间蛋白质晶体生长装置在中国返回式卫星上开展了二次空间蛋白质结晶实验, 晶体生长成功率分别为 52% 和 81%, 且大单晶样品比例远高于地面对比实验结果 [5]; 中国自行研制的动态细胞培养系统于 1994 年成功进行卫星搭载实验; 中国首次微重力流体物理空间实验于 1999 年 5 月在实践五号科学实验卫星上完成, 实现了科学实验装置全自动无人操作和遥测遥控等先进空间实验技术 [6]. 2005 年利用第 22 颗返回式卫星搭载机会, 中国科学院力学研究所组织了三项微重力科学空间实验: 气泡热毛细迁移研究, 观测了大 Marangoni 数气泡在热毛细作用力驱动下的非线性运动特征及其规律 [7]; 恒温加热模式下丝状加热表面微重力池沸腾传热研究 [8]; 空间细胞生长实验, 通过自行设计的逆流片流式空间细胞生长实验装置, 以滋养层细胞为模型细胞, 对流体剪切和微重力环境影响空间细胞生长规律进行验证 [9]. 此外, 还通过植物种子样品 (水稻、小麦、蔬菜、水果、花卉和药用植物种子等) 搭载和地面培育的研究方式, 开展了植物的空间实验研究. 得益于中国卫星技术的有力支撑, 中国的微重力科学研究虽起步较晚, 但起点较高, 兴起之初即在国际上具有较大影响.

地基短时微重力实验是微重力科学研究主要手段之一. 除了前述北京强度环境研究所 38 m 落塔之外, 中国还发展了探空火箭 (T7 和 T7A) 以及由教练机改装的失重飞机, 用于空间生物学、航天医学和微重力科学等研究. 20 世纪 80 年代末至 90 年代中期, 利用高空气球落舱开展了微重力粉尘燃烧与爆炸 (1991 年)、预混火焰燃烧 (1996−1998) 和空间细胞电融合 (1996−1998) 等研究 [10]. 同时, 中国科学院工程热物理研究所将一座压气机进气消音塔加固改建为微重力时间 1.7 s (单程自由下落) 的简易落塔 [11], 后采用泛能上抛技术实现了 2.8 s 的微重力时间 [12], 开展微重力燃烧研究 [13]. 在此基础上建设的中国科学院国家微重力实验室北京落塔, 是目前中国最高、国际上正在运行的第三高度的地基短时微重力实验设施, 微重力时间 3.6 s, 微重力水平 $10^{-5}g$ (双舱) 或 10^{-2}∼$10^{-3}g$ (单舱), 有效支撑了中国微重力科学地基短时实验研究 [14].

1992 年启动的中国载人航天工程是中国微重力科学空间实验研究最为重要的途径之一. 神舟二号 (2001 年)、三号 (2002 年) 和四号 (2002−2003 年) 无人试验飞船安排了一批微重力科学 (和空间生命科学) 实验: 神舟二号和三号安排了一批材料制备实验、多种蛋白质结晶、空间细胞和组织培养实验等; 神舟四号安排了多种生物细胞的空间电融合 [15]、生物大分子分离–空间电泳技术实验和大 Marangoni 数液滴热毛细迁移实验 [16] 等. 相关实验大都取得良好结果, 推动了中国微重力科学研究的快速发展.

国际合作是中国微重力科学空间实验研究的另一个重要途径. 除前面提到的利用中国返回式卫星开展的中德合作空间蛋白质晶体生长实验外, 1995 年利用美国航天飞机开展了基于液–液扩散法的蛋白质晶体生长实验; 1998 年利用俄罗斯和平号空间站提供的长时间微重力环境以及空间站上旋转平台提供的模拟部分重力条件, 开展了国际首次有人参与的不同重力条件下的气液两相流型实验研究, 揭示了微重力气液两相流动中的相分布特征、流型转换条件以及重力对气液两相流型的影响 [17]; 1998 年还开展了 IL-76 抛物线飞机短时失重环境方管气液两相流型与摩擦压降、透明材料相分离与 Marangoni 迁移、材料自蔓燃、细胞电融合等实验研究以及加速度测量、静态水气分离等技术验证试验, 对被重力所掩盖的物质运动规律和生命活动规律进行了探索性研究 [18]. 此外, 利用日本落井短时微重力地基实验设施, 开展了液桥热毛细流动和表面波实验以及液滴热毛细迁移实验等, 获得了有价值的学术成果 [19]. 早期国际合作较多的是利用国外空间实验平台开展中国参与甚至主导的微重力科学空间实验, 支持了中国微重力科学研究的快速发展壮大; 随着国家航天事业的发展, 中国开始提供越来越多的空间实验机会, 既强化了国际合作力度, 也提升了自身的国际影响力.

2 近期进展与代表性创新成果

近年来, 中国微重力科学家与航天技术专家充分利用实践八号育种卫星、实践十号微重力科学实验卫星、墨子号量子科学实验卫星、实践二十号科学实验卫星、太极一号卫星、天琴一号卫星、天宫一号目标飞行器、天宫二号空间实验室、天舟一号货运飞船等空间科学实验平台, 开展了多系列的空间实验任务, 取得令人瞩目的创新成果, 极大提升了中国在国

际微重力科学领域的地位和影响 [20−23].

2.1 微重力流体物理

微重力流体物理研究在微重力环境 (及低重力环境) 中具有自由界面的多相混合体系与复杂流体的形态、结构、流动、相变、传热等规律和机理, 具有基础科学与技术应用基础双重特征, 也为空间材料科学、空间生命科学及生物技术等研究提供相关流体理论指导.

中国微重力流体物理研究关注微重力环境 (热) 毛细流动结构与稳定性、多相热流体动力学及复杂流体行为等. 近年来, 利用实践八号育种卫星、实践十号科学实验卫星、天宫二号空间实验室等空间平台, 开展了一系列微重力流体物理科学实验, 取得了一批有影响力的科学成果.

在热毛细流动及稳定性方面, 实践十号卫星安排了热毛细对流表面波实验, 研究微重力环境下环形液池热毛细对流的表面波问题, 分析其体系失稳临界条件以及随体积比的变化规律、多模式对流及转换、转捩途径等 [24]. 天宫二号空间实验室安排了大 Prandtl 数液桥热毛细对流实验, 研究液桥热毛细对流现象中高径比对临界过程的影响、体积效应及二次转捩等, 发现多次及多种形式的振荡转捩、多模式耦合特征、亚临界现象等. 此外, 研究了起振模式及其波动和转换新特征, 为湍流研究提供新视角和突破点 [25].

在多相热流体动力学方面, 实践八号育种卫星安排了准稳态加热模式下平直加热面微重力池沸腾传热研究 [26], 对比第 22 颗返回式卫星搭载池沸腾实验, 揭示不同加热表面构型对微重力池沸腾传热的影响, 提出对加热面有效供应新鲜液体可以维持微重力沸腾传热性能, 并通过微型方柱结构表面沸腾传热强化的落塔短时微重力实验予以验证 [27]. 实践十号卫星安排了微重力池沸腾过程中的气泡动力学特征研究, 利用空间微重力环境增大沸腾现象中气泡生长过程的时间和空间尺度, 观测和认识生长气泡周围细观运动与加热器三维瞬态温度场演化特征, 揭示气泡热动力学与局部热量传输间的耦合作用及其对传热性能的影响机制与沸腾传热的内在机理 [28,29]. 实践十号卫星还安排了蒸发与流体界面效应研究, 通过实验观测微重力下液滴蒸发过程, 研究蒸发相变界面的热质传输特性. 此外, 在天舟一号货运飞船两相系统实验平台关键技术实验中也安排了微重力条件下的流体蒸发和冷凝实验, 研究有质量交换的流体界面动力学特征与相变传热规律.

在复杂流体研究方面, 实践十号卫星安排了三项实验: 颗粒流体气液相分离研究, 开展了较长时间稳定微重力环境下的单舱、双舱振动实验, 系统地研究了颗粒物质团簇形成条件及弛豫冷却过程; 胶体有序排列及新型材料研究, 首次原位观察到微重力条件下胶体粒子自组装动力学过程, 研究了微重力条件下的自组装机制, 验证了纯熵驱动的相变机制 [30]; 微重力条件下石油组分热扩散特性的研究 (中欧合作项目), 通过空间实验获得多种组分 Soret 系数的精确数据, 发展了多组分与两组分热扩散过程联系的理论和物理模型 [31].

此外, 利用北京落塔对短时微重力条件下贮箱内液体界面重定位行为、毛细结构/管内液体爬升现象、液滴/气泡热毛细迁移、池沸腾/流动沸腾传热与加热面微结构传热强化、液滴蒸发与冷凝、燃料电池/电解池内两相流动及电性能、胶体颗粒变形与迁移、颗粒物质流变行为、颗粒物质冲击与溅射行为等开展了实验研究, 并利用数值模拟对相关过程细观特征与规律开展仿真分析, 取得了一系列有价值的成果.

2.2 微重力燃烧科学

微重力燃烧科学利用微重力环境抑制了自然对流和重力沉降的优势, 深入探索燃烧过程的基本特征和规律, 促进燃烧理论和应用技术的发展; 对微重力条件下火灾预防、探测和灭火问题的研究, 直接支撑载人航天器防火安全.

中国已经完成的空间微重力燃烧实验主要集中在固体材料着火、火焰传播和烟气生成特性、多孔材料闷烧 (阴燃) 以及煤燃烧过程等方面, 尽管已开展的实验次数有限, 但是这些研究注重原始创新, 瞄准前沿科学问题开展实验和理论分析, 具有较高的研究水平, 部分研究处于国际领先地位.

微重力环境固体材料的燃烧特性直接关系到载人航天器材料选用与防火安全设计. 实践八号卫星多孔材料闷烧实验使用与载人航天器舱内气氛接近的实验条件, 揭示了材料闷烧点燃和双向传播过程的主要特性, 首次发现微重力环境下闷烧向有焰燃烧的转变 [32]. 实践十号卫星固体材料着火及燃烧特性研究, 对不同氧浓度和低速气流环境中的热厚材料燃烧过程进行系统观测, 测定典型热厚材料的可燃极限边界, 揭示微重力火焰传播模式的分布特征, 阐明了近

极限火焰的传播和熄灭机理 [33]. 相关结果为固体材料燃烧机理研究提供了基础数据, 对航天器舱内火灾的安全防护具有实际意义.

在空间环境中电器过载可能引发严重火灾. 实践八号卫星导线着火前期特性实验采用导线自身过载电流作为点火源, 模拟实际火灾发生的情形, 获得了导线在着火前期的温度和辐射特征 [34]. 实践十号卫星电流过载条件下导线绝缘层着火烟的析出和烟气分布研究, 发现了微重力下烟气析出的不同模式, 认识了其形成机理、影响因素以及对导线附近温度分布的作用机制 [35]. 两项实验的结果可为航天器火灾监测提供实际参考.

煤在中国能源结构中占有主导地位, 微重力实验有助于揭示煤燃烧的基本规律. 实践十号卫星煤燃烧及其污染物生成特性研究, 获得了多种煤粒及煤粉颗粒群的完整燃烧过程, 为发展更为准确的燃烧模型提供了着火温度、延迟时间和燃尽时间等重要数据, 发现在高温条件下挥发分射流燃烧的特有现象 [36]. 相关研究有助于揭示煤燃烧的机理并完善地面燃烧预测模型, 具有明确的应用价值和指导意义.

在地基研究方面, 近期中国的微重力燃烧研究涉及气体预混和扩散火焰、固体材料表面火焰传播、导线绝缘层着火燃烧、湍流燃烧、煤燃烧等领域, 取得了相当可观的研究结果, 并在一些领域形成特色. 例如, 研究建立了在微重力非常压条件下使用对冲火焰测定预混火焰熄灭极限的方法, 通过落塔实验测量了不同压力下火焰的熄灭极限, 验证了压力对燃料可燃极限非单调变化的影响规律 [37]; 通过落塔实验, 对非预混湍流射流火焰的吹熄和推举行为进行研究, 得到微重力下湍流火焰的稳定特性, 并通过模型分析得出重力和伴流条件的影响规律 [38]. 另外, 以相关研究为基础, 有关单位制定了中国航天器材料可燃性评价和材料选用的首部国家标准, 标准的两部分分别于 2012 年和 2014 年发布, 为提高中国航天器防火安全水平做出了贡献.

近年来, 微重力燃烧预先研究得到持续支持, 其中重点对空间燃烧实验的设备研制和燃烧诊断等关键技术进行攻关, 对湍流燃烧和冷焰燃烧等项目概念进行完善, 为未来空间微重力燃烧实验计划的实施打下了重要基础.

2.3 空间材料科学

空间材料科学主要研究在微重力、强辐照、高真空、交变温度等空间环境因素影响下材料形成过程中的流体流态和相变规律, 以及材料结构、物理化学性能和使役性能变化规律等.

近年来, 基于返回式卫星和载人航天平台等开展的空间材料科学实验研究主要包括: 2007 年中俄合作在 Foton M3 上进行了 GaMnSb 和 Bi_2Te_3 单晶生长实验; 2008 年神舟七号飞船上开展了固体润滑材料舱外暴露实验 [39]; 2011 年天宫一号目标飞行器上开展了复合胶体晶体生长实验; 2016 年实践十号卫星上开展了 InGaSb 晶体生长等多项材料科学实验 [40,41]; 2016−2019 年天宫二号空间实验室上开展了 ZnTe:Cu 晶体、Au/m-SiO_2 有序介孔复合材料、AgCuGe 和 AgCuSb 等多组元复相合金、Al-Cu-Mg 单晶合金、Al-Sn-Bi 偏晶合金、CsI 闪烁晶体、SiC/Zr-基合金新型复合材料、PZT 铁电薄膜材料、Bi_2Te_3-Sb_2Te_3-Te 热电半导体晶体、红外探测器 InTeSb 和磁性半导体 InMnSb 材料的空间制备, 以及材料实验装置热分析和模型研究等 10 余项综合空间材料科学实验 [42], 极大地推动了中国空间材料科学研究的进步. 天宫二号空间实验室上的空间材料科学实验也是首次有中国航天员参与操作的微重力科学空间实验.

迄今为止, 中国的空间材料科学研究涉及的材料种类包括: 二元、三元半导体光电子材料及功能晶体材料, 例如早期卫星搭载实验中成功生长出高质量的 GaAs、GaSb 单晶、TeCdHg 晶体; 具有重要科学研究意义和应用价值的金属合金及非晶材料, 例如 Al-Al_3Ni 共晶合金、Al-Bi 偏晶合金、Al-Li 合金、Al-Mg_2Si 共晶合金及 Al-Y_2O_3 复合材料等; 具有特殊用途和研究前景的新型单晶材料, 例如 Ce:$Bi_{12}SiO_{20}$ 和 α-$LiIO_3$ 晶体. 通过对回收的空间制备材料进行测试分析, 研究获得了多项有价值的结果, 发现空间生长的晶体质量和性能获得明显的改进提升, 初步掌握了空间微重力环境下熔体中物质的扩散、浸润、结晶和分凝等过程特性, 建立和验证了部分材料形成过程的理论模型及实验技术预测模型, 使得中国在空间材料研究的一些方向上居于国际前列. 例如, 两次在空间微重力环境中生长出优质的砷化镓单晶, 空间生长的砷化镓单晶回收后制作成的模拟开关集成电路和低噪声场效应晶体管, 其性能明显优于利用地面制备材料制作的相同器件和电路 [43].

通过这些研究, 也使得中国空间材料科学实验硬

件研制能力显著提升. 空间实验用的晶体生长炉已从简单的单样品控制重熔炉, 发展到多样品的移动样品晶体生长炉, 再到多批次及航天员参与更换样品的晶体生长与凝固炉; 晶体生长炉的炉膛温场从无控制到反馈式控制, 发展到计算机程序控制、地面对空间实验过程的监控; 空间材料制备工艺从单温区重熔再结晶, 发展到移动样品生长和多模式控制; 从无空间数据纪录到多种工程与实验参数及实验过程图像数据的传输和存储. 目前中国正在研制用于空间站的新一代空间材料实验装置, 例如高温材料科学实验柜和无容器材料实验柜, 这些装置在功能与性能上较以往设备有了大幅提高, 将助力中国未来的空间材料科学研究跨上新的台阶.

2.4 空间基础物理

空间基础物理研究工作主要是利用空间微重力环境开展现有物理理论的高精度检验, 发现新的物理现象和物理规律. 主要内容包括冷原子物理与空间冷原子钟、相对论与引力物理、空间量子科学等.

自 2000 年起, 中国科学院上海光学精密机械研究所开始进行小型化冷原子铷钟和空间冷原子钟实现方案等方面的研究, 研制的空间激光冷却原子钟地面原理样机——超高精度铷原子喷泉钟, 是中国目前地面冷原子喷泉钟中体积小、重量轻、功耗低的典型代表, 其使用的铷原子比目前国际上仅存的 ESA 支持的 PHARAO 冷原子空间钟地面样机里的铯原子具有更高物理性能, 例如超低温下更小的碰撞频移, 选态原子数损失更少, 准确度和稳定度更高等. 天宫二号空间实验室上的空间冷原子钟是国际上首次在空间轨道上运行的冷原子钟, 在轨运行状况良好, 性能稳定, 成功开展了包括激光连续稳频输出、激光冷却原子、原子慢速抛射、超冷原子与微波相互作用、冷原子钟信号产生与传递、高精度光电自动时序控制等首次在空间进行的前沿科学实验, 在空间轨道获得了温度 $4.5\,\mu$K 左右的冷原子团, 并利用冷原子团与微波相互作用获得了线宽小于 0.8 Hz 的冷原子钟鉴频曲线, 验证了天稳 10^{-16} 量级的冷原子钟在空间运行的能力, 表明中国已经具备了在空间建立超高精度时间频率基准的能力 [44].

空间引力波探测是中国空间基础物理领域一个新的重要方向, 自 2008 年开始前瞻论证中国空间引力波探测的可行性, 经过多年科学前沿研究, 目前形成了太极、天琴二个空间引力波探测计划. 2019 年 8 月和 12 月太极一号和天琴一号试验卫星先后发射, 对空间引力波探测所涉及的重要技术 (如高精度空间惯性传感器、μN 级微推进技术、空间激光干涉仪、无拖曳控制技术等) 进行了空间在轨飞行试验验证 [45,46], 为中国空间引力波探测任务的实施奠定了基础.

中国空间量子通信研究一直走在国际前列, 2016 年 6 月成功发射了国际首颗用于空间尺度量子通信科学实验的卫星——墨子号量子科学实验卫星, 首次在国际上实现了星地量子密钥分发, 并通过卫星中转实现了两个地面站之间的量子保密通信, 为中国未来覆盖全球的天地一体化广域量子保密通信网络奠定了基础; 首次在星地 10^3 km 的距离上检验了量子纠缠的存在, 实现了地星 10^3 km 的量子隐形传态. 墨子号量子科学实验卫星成为国际上首个空间尺度量子力学基本问题检验平台, 将在空间尺度的量子物理学研究以及空间量子精密测量等方向上起到重要作用, 成为中国在物理学领域的一项重要贡献 [47]. 此外, 天宫二号空间实验室上也安排了量子密钥分配试验空间终端, 实现了国际上首个基于载人航天空间平台的空地量子密钥分配试验, 突破了量子密钥分配关键技术, 并得到在轨验证; 成功实现了天地双向高精度跟瞄、量子密钥分配和激光通信; 首次实现超 $\mathrm{Gbit\cdot s^{-1}}$ 码速率的天地业务数据激光通信传输, 为后续空间任务更高容量数据传输打下坚实基础.

2.5 空间生物技术

空间生物技术以应用技术为主导, 研究空间微重力等环境因素对生物体内相关基因组、蛋白质组个体和群体的结构、相互关系、表达与合成、识别与组装、作用与代谢、操纵与调控的影响规律等, 发展创新的生物材料、药物和医疗技术, 服务于提高人类生活质量和健康水平, 支持人类拓殖空间的载人航天事业可持续发展.

中国空间生物技术研究的主要内容包括空间蛋白质结晶、空间细胞培养和组织构建、空间干细胞培养和定向诱导分化、生物分子纯化与功能结构分析等. 此外, 由于学科交叉、渗透与融合, 重力生物学、植物空间生物效应和空间辐射生物学等研究也同样活跃在中国的微重力科学研究中.

2011 年利用神舟八号飞船搭载的德国研制通用生物培养箱, 中德双方合作开展了 4 大领域 (基础空间生物学、空间生物技术、先进生命支持系统基础

生物学及空间辐射生物学) 17 项 (中方 10 项, 德方 6 项, 双方合作 1 项) 科学实验, 在基因组和蛋白质组水平上开展了重力生物学研究. 其中, 中国负责的生物大分子组装与转化研究项目, 针对通用生物培养箱生物容器约束, 自主研制了浸入式毛细管结晶室, 开展了 14 种生物蛋白质空间晶体生长实验, 获得 12 种空间生长的优质蛋白质晶体 (地面对照实验仅有 11 种长出晶体); 通过对晶体结构分析获得了 4 种蛋白质样品空间生长晶体 8 套完整的同步辐射衍射数据, 高于地面 3 种蛋白质样品的 4 套数据 [48].

高等植物空间生长实验在实践八号和十号卫星及天宫二号空间实验室均有安排 [49]. 其中, 实践八号卫星通过实时图像观察技术, 记录了 21 天空间飞行中青菜抽苔、开花、授粉的过程; 实践十号卫星应用植物光周期诱导开花及热激诱导启动子在轨诱导开花基因表达等技术, 研究了空间微重力条件下光周期诱导开花的作用机理, 为阐明重力在光周期诱导植物开花中的作用提供了新的证据; 天宫二号空间实验室首次完成了高等植物 “从种子到种子” 全过程的空间长周期培养实验, 验证了利用植物光周期反应原理调控空间植物营养生长与生殖生长的设计思想, 首次获得拟南芥和水稻在 “ 长日” 与 “短日” 条件下生长发育全过程的实时图像数据, 并首次对水稻吐水、拟南芥寿命和根的 “向触性运动” 进行观察与分析, 取得一系列有价值的新成果.

空间 (干) 细胞培养和组织发育在实践十号卫星和天舟一号货运飞船上有集中而较为广泛的研究. 在实践十号卫星项目中, 关于哺乳动物早期胚胎发育的研究, 在国际上首次得到空间条件下小鼠早期胚胎发育结果, 阐述微重力影响哺乳动物早期胚胎发育的机制, 为保障人类空间活动中的生殖发育健康提供科学依据 [50]; 造血与神经干细胞空间三维培养及组织构建项目, 研究了造血与神经干细胞在空间微重力条件下的增殖能力和定向诱导分化, 为研究造血与神经干细胞增殖及分化的机理提供更准确、科学的依据, 推动了再生医学的发展 [51,52]; 骨髓间充质干细胞的骨细胞定向分化项目, 建立了微重力环境下干细胞培养、定向分化的技术平台, 得到空间骨细胞定向诱导分化效应及其关键细胞信号分子相关结果, 揭示微重力影响人骨髓间充质干细胞定向分化骨细胞的生物学效应及其分子机制, 为预防和治疗人在空间长期生存过程中的骨质变化以及相关药物开发提供了理论依据 [53]; 细胞间相互作用的物质输运规律项目研制了新型空间动物细胞生物力学实验装置, 并得到空间飞行试验验证, 所取得的动物细胞物质输运规律的空间实验数据可用以分析重力变化对细胞的直接与间接作用, 揭示微重力条件下动物细胞生物学行为的物质输运规律 [54]. 天舟一号货运飞船利用中国自主研发的哺乳动物细胞空间生物反应器, 成功开展 8 个生物实验研究, 涉及骨组织细胞、iPS 细胞、胚胎干细胞、生殖细胞、肝 (干) 细胞、骨髓间充质干细胞等 12 种细胞样品. 空间生物反应器载荷兼具细胞自动控温、换液培养、在轨处理等功能, 实现哺乳动物细胞最长 30 天的在轨培养, 并利用明场及荧光显微镜对细胞生长状态进行了实时图像采集.

空间生物技术研究取得的成果得益于空间实验硬件装置研制及技术研究方面的发展. 目前, 空间通用生物培养箱、空间细胞生物反应器、空间蛋白质结晶装置、空间细胞电融合仪、空间动物胚胎细胞培养箱、空间细胞培养箱等一批空间科学实验装置已成功研制, 并利用国内外高空落舱、返回式卫星、飞船等空间飞行平台, 成功开展数十次空间飞行实验, 获得了进行空间研究的直接经验, 为未来相关研究的深化奠定了基础.

2.6 空间应用研究

在强调基础研究的同时, 中国微重力科学研究十分重视应用领域的开发, 服务航天技术的发展及其空间应用.

为解决嫦娥三号月球探测器月夜生存面临的巨大困难和挑战, 创造性地提出了基于 $(1/6)\,g$ 重力辅助两相流体回路 (又称封闭式两相热虹吸管) 的解决方案, 利用月球 $(1/6)\,g$ 重力场驱动两相流体回路运行, 将同位素热源的热量供给探测器, 解决了在长达 14 天月夜无电源供给情况下探测器的生存难题 [55]. 嫦娥三号 $(1/6)\,g$ 重力辅助两相流体回路技术的成功应用, 是国际航天器热控系统上的首次尝试, 以十余千克质量代价实现了美苏上百千克质量才得以实现的月球探测器月夜生存目标. 该技术同样应用于国际上首个在月球背面着陆、巡视和探测的嫦娥四号月球探测器, 支撑了探测器月夜生存和科学探测活动.

2008 年成功研制了国际上首套 CO_2 两相系统储液器, 实现 CO_2 气液两相的分离、液相分布的可预知性及其向系统的快速补偿和回收, 并掌握了地

面常重力条件下非 CO_2 工质实验模拟准则, 所研制的 CO_2 两相系统储液器作为国际首套在轨运行的机械泵驱动两相流体回路——国际空间站阿尔法磁谱仪 2 (AMS-02) 硅微条轨迹探测器温控系统 (TTCS) 的关键部件, 实现了对 AMS-02 探测器 192 个分散器件的在轨精密温度控制和系统工质智能补偿. 相关技术也应用于空间 −60~60°C (氨) 温区毛细泵驱动两相流体回路, 在实践九号 A 卫星上得到在轨验证, 取得 ±1.5°C 的系统控温精度 [56], 成为中国毛细泵驱动两相流体回路控温的标准方法.

在 AMS-02 TTCS 机械泵驱动两相流体回路系统性能与维持等方面, 已研制的 CO_2 在轨充装系统可以识别回路何时需要补充工质, 并精确控制工质补充量, 确保回路系统获得最佳的工质含量, 支持机械泵驱动两相流体回路长期工作 [57]. 目前, 国际空间站 AMS-02 TTCS 在轨数据表明, 系统温度稳定性优于 1°C, 192 个控温点温度一致性优于 2°C, 完全满足科学探测载荷的要求.

针对未来高热流密度器件或者飞行器对极高热流密度和/或超大功率热传输技术的需求, 中国首套闭式喷雾冷却原理样机研制成功, 并提出了空间微重力条件下的气液收集方案, 系统临界热流密度超过 200 $W{\cdot}cm^2$ [58]; 提出大深宽比微槽道高热流散热与流动减阻的结构设计准则, 实现了金刚石微通道激光精密加工、金刚石与铝合金封装焊接等关键技术, 并于 2016 年 6 月搭载多用途飞船缩比返回舱在轨实现微槽道高热流流动沸腾换热系统的稳定运行, 受限于空间功率, 在轨实验散热能力达到 270 $W{\cdot}cm^2$ (地面实验超过 10^3 $W{\cdot}cm^2$ [59]); 开展了面向长寿命需求的空间两相热传输系统失效机理研究, 揭示了不凝结气体对系统性能的影响及不凝结气体产生及迁移规律, 提出并实现了基于脱附原理的不凝结气体预处理方法, 建立中国第一套长寿命环路热管研制系列装备及工艺方法, 国产环路热管首次在轨飞行验证于 2012 年在实践九号卫星上完成, 并于 2014 年成功应用于嫦娥五号探测器飞行试验器 [60].

在深低温热传输两相系统研究方面, 目前已实现 80 K (液氮) 温区深低温热传输系统的小型化、小功率超临界启动和稳定运行 [61]; 开发了中国首套 150 K (乙烷) 温区低温热管 [62], 其于 2017 年 6 月随硬 X 射线调制望远镜卫星 (慧眼) 发射, 在轨工作状况良好; 35 K (液氖) 温区深冷环路热管 [63] 与脉冲管制冷机集成系统于 2019 年底搭载实践二十号卫星发射, 在轨测试结果表明, 其可实现 0.5 W@35 K 的传热能力, 温度稳定性优于 0.05 $K{\cdot}s^{-1}$. 相关工作为中国的空间红外探测器低温热控技术储备了新的技术手段.

此外, 2017 年天舟一号货运飞船安排了多项重大技术验证试验: 两相系统实验平台关键技术试验, 验证了空间实验工质供给、气液分离与热控等两相系统关键技术, 为中国空间站两相系统实验柜和流体科学实验载荷研发奠定技术基础; 电磁悬浮主动隔振试验, 在国内首次实现了 0.03~10 Hz 范围、最大 40 dB 的电磁悬浮主动隔振能力和 μg 量级的微重力环境, 达到国际先进水平, 同时直接应用于天舟一号静电悬浮加速度计验证试验, 后续将应用于中国空间站多个实验平台 [64]; 燃料在轨补加试验, 三次试验均获得圆满成功, 掌握了推进剂在轨补加技术, 填补中国航天领域这一空白, 实现了空间推进领域的一次重大技术跨越, 为中国空间站组装建造和长期运营解决了能源供给的难题, 使中国成为第三个独立掌握这一关键技术的国家.

2.7 小结

目前, 中国微重力科学研究已初具规模, 并在一些重要方向具有明显特色和一定优势, 多个方向已步入国际先进行列. 近年来, 中国在微重力科学领域取得的一大批创新成果受到国际同行的重视. 国际微重力科学领域旗舰期刊 *Microgravity Science and Technology* 多次以特刊、专刊或专辑形式刊发中国微重力科学研究成果: Microgravity Experiments on board the Chinese Recoverable Satellites (特刊, 客座主编: 胡文瑞, 2008 年第 20 卷第 2 期, 共 12 篇); Ground-based Researches Related to Microgravity Science Experiments aboard SJ-10 (专刊, 客座主编: 赵建福、康琦, 2016 年第 28 卷第 2 期, 共 12 篇); Approaching the Chinese Space Station-Microgravity Research in China (专辑, 客座主编: 赵建福、王双峰, 分别刊发在 2018 年第 30 卷第 6 期和 2019 年第 31 卷第 1 期, 共 17 篇). 此外, 最新出版的 Multiphase Fluid Dynamics in Microgravity 专辑 (客座主编: T. P. Lyubimova[俄] 和赵建福) 中, 刊发了 8 篇中国微重力多相流研究方面的论文. 这些论文集中展示了中国微重科学研究取得的成果, 为提升中国在国际微重力科学领域的影响起到了积极作用.

3 未来发展愿景

微重力科学研究固有的发展动力来自基础和应用双需求, 因此未来发展需要坚持既重视基础又强调应用的方针, 充分认识到微重力科学基础研究内容更多来自应用需求, 与应用关联密切.

中国载人空间站建设正在按照计划进行, 预计 2022 年完成并投入运营. 此外, 国际空间站将延寿运行至 2024 年或更晚. 因此, 空间站将是微重力科学空间实验研究的主要平台. 中国空间站建造完成后, 将在轨运营 10 年以上, 实验资源充足, 能支持开展大规模、多学科、系列化和长期的空间科学研究、技术验证和空间应用研究, 具有航天员参与实验操作、实验设备可维护升级、实验样品可返回、天地信息传输等独特优势, 将为中国以及国际微重力科学研究提供优良的实验条件和发展机遇.

中国载人空间站核心舱、实验舱 Ⅰ 和实验舱 Ⅱ 内部已安排 16 个科学实验柜, 其中一半以上可用于开展微重力科学实验研究, 主要包括微重力流体物理实验柜、两相系统实验柜、燃烧科学实验柜、高温材料科学实验柜、无容器材料实验柜、超冷原子物理实验柜、高精度时频实验柜、生物技术实验柜、科学手套箱与低温存储柜、变重力科学实验柜、医学样本分析与高微重力科学实验柜等. 在专用科学实验柜之外, 空间站上还留有多个具有空置空间的实验机柜, 可采用标准模块组合的形式设计舱内的独立载荷, 安装在空置实验机柜中开展实验. 同时, 在密封舱外安排了多种暴露试验装置, 可以通过更换试验样品, 支持空间材料科学等方向的试验研究.

目前, 首批空间站空间科学实验项目已经启动, 正在开展实验单元或样品研制和地面实验研究; 新的空间科学实验项目也在持续征集与遴选中. 同时, 中国空间站运营阶段的论证工作已启动, 新的微重力研究设施/装置的研制、现有实验柜的升级更新以及基于已有资源开展的数百项科学研究, 为中国未来微重力科学研究展现出良好的前景.

与此同时, 对地基短时微重力验证试验和对比实验能力的需求将进一步提高, 未来载人月球探测和深空行星探测等大型航天活动也对月球和火星等部分重力环境模拟提出了迫切需求, 激励了中国在抛物线飞机、探空火箭、临近空间浮空器、电磁弹射落塔/落井以及地外天体着陆综合试验场等大型地基空间重力模拟实验设施等研究方面的投入. 中国空间站的地基研究设施 (空间实验室地面实验基地、空间站镜像实验平台等) 已开工建设, 将为空间站微重力科学实验项目提供地基预先研究、匹配实验和天地比对的实验条件. 加强对地基短时微重力设施的统一部署和综合利用, 能够为中国微重力科学研究提供多种高效便捷的地基实验平台. 利用这些平台资源, 将可获得更多研究成果, 服务国家, 造福人类.

参考文献

[1] National Natural Science Foundation of China. China's Discipline Development Strategy in the Next 10 Years —— Space Science [M]. Beijing: Science Press, 2011 (国家自然科学基金委员会. 未来 10 年中国学科发展战略——空间科学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011)

[2] National Natural Science Foundation of China. China's Disciplinary Development Strategy —— Space Science [M]. Beijing: Science Press, 2019 (国家自然科学基金委员会. 中国学科发展战略——空间科学 [M]. 北京: 科学出版社, 2019)

[3] HU Wenrui. Microgravity science and its application [J]. *Bull. Chin. Acad. Sci.*, 1990, **2**: 95-100 (胡文瑞. 微重力科学及其应用研究 [J]. 中国科学院院刊, 1990, **2**: 95-100)

[4] ZHOU Bojun, ZHONG Xingru, CAO Funian, *et al.* GaAs single crystal growth from melt in space [J]. *J. Semiconduct.*, 1988, **9**(5): 548-552, 564 (周伯骏, 钟兴儒, 曹福年, 等. 太空熔体生长砷化镓单晶 [J]. 半导体学报, 1988, **9**(5): 548-552, 564)

[5] WANG Yaoping, PAN Jishen, NIU Xiutian, *et al.* The second space protein crystal growth experiment in China [J]. *Sci. China*: *Ser. C*, 1996, **26**(2): 121-126 (王耀萍, 潘冀, 牛秀田, 等. 我国第 2 次空间蛋白质晶体生长实验 [J]. 中国科学: C 辑, 1996, **26**(2): 121-126)

[6] ZHOU Binghong, LIU Qiusheng, HU Liang, *et al.* Experimental study on thermocapillary convection space of two-layer fluid [J]. *Sci. China*: *Ser. E*, 2002, **32**(3): 316-322 (周炳红, 刘秋生, 胡良, 等. 两层流体热毛细对流空间实验研究 [J]. 中国科学: E 辑, 2002, **32**(3): 316-322

[7] CUI H L, HU L, DUAN L, *et al.* Space experimental investigation on thermocapillary migration of bubbles [J]. *Sci. China G*: *Phy. Mech. Astron.*, 2008, **51**(7): 894-904

[8] ZHAO J F, WAN S X, LIU G, *et al.* Subcooling pool boiling on thin wire in microgravity [J]. *Acta Astronaut.*, 2009, **64**(2/3): 188-194

[9] SUN S J, GAO Y X, SHU N J, *et al.* A novel counter sheet-flow sandwich cell culture device for mammalian cell growth in space [J]. *Microgravity Sci. Technol.*, 2008, **20**(2): 115-120

[10] WANG Yue, CHENG Xiaobin, ZHANG Peiyuan, *et al.* Experimental study on the influence of buoyancy on premixed V type flame with high altitude balloon [J]. *J. Eng.*

Therm., 2001, **22**(1): 130-132 (王岳, 程晓斌, 张培元, 等. 用高空气球搭载微重力实验研究浮力对预混 V 型火焰的影响 [J]. 工程热物理学报, 2001, **22**(1): 130-132

[11] ZHANG Xiaoqian, WEI Minggang. Falling tower for microgravity combustion [J]. *J. Eng. Therm.*, 1995, **16**(4): 503-506 (张孝谦, 韦明罡. 微重力燃烧用落塔 [J]. 工程热物理学报, 1995, **16**(4): 503-506)

[12] ZHANG Xiaoqian. Microgravity tower dropping successfully realizes the up throw working mode [J]. *Bull. Chin. Acad. Sci.*, 2000, **3**: 278-279 (张孝谦. 微重力落塔成功地实现上抛工作模式 [J]. 中国科学院院刊, 2000, **3**: 278-279)

[13] ZHANG Xiaoqian, YANG Ping, FENG Lingzhi, *et al.* Effect of buoyancy on laminar V-shaped premixed flame angle [J]. *J. Eng. Therm.*, 1996, **17**(4): 505-508 (张孝谦, 杨平, 封灵芝, 等. 浮力对 V 型火焰张角的影响 [J]. 工程热物理学报, 1996, **17**(4): 505-508)

[14] WEI Minggang, WAN Shixin, YAO Kangzhuang, *et al.* Tower drop and microgravity experiment of National Microgravity Laboratory [J]. *Manned Spaceflight*, 2007, **4**: 1-3, 22 (韦明罡, 万士昕, 姚康庄, 等. 国家微重力实验室落塔及微重力实验研究 [J]. 载人航天, 2007, **4**: 1-3, 22)

[15] ZHENG Huiqiong, WANG Liufa, CHEN Aidi, *et al.* Electrofusion of tobacco protoplasts in space [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2003, **48**(18): 1438-1441 (郑慧琼, 王六发, 陈爱地, 等. 烟草细胞的空间电融合 [J]. 科学通报, 2003, **48**(18): 1438-1441)

[16] XIE J C, LIN H, ZHANG P, *et al.* Experimental investigation on thermocapillary drop migration at large Marangoni number in reduced gravity [J]. *J. Colloid Int. Sci.*, 2005, **285**(2): 737-743

[17] ZHAO J F, XIE J C, LIN H, *et al.* Experimental studies on two-phase flow patterns aboard the MIR space station [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 2001, **27**(11): 1931-1944

[18] LÜ Congmin, XI Long, ZHAO Guangheng, *et al.* Microgravity experiment system based on weightless aircraft [J]. *J. Tsinghua Univ.*: *Sci. Technol.*, 2003, **43**(8): 1064-1068 (吕从民, 席隆, 赵光恒, 等. 基于失重飞机的微重力科学实验系统 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, **43**(8): 1064-1068)

[19] XIE J C, LIN H, HAN J H, *et al.* Experimental investigation on Marangoni drop rations using drop shaft facility [J]. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 1998, **41**(14): 2077-2081

[20] HU W R, LONG M, KANG Q, *et al.* Space experimental studies of microgravity fluid science in China [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2009, **54**(22): 4035-4048

[21] HU W R, ZHAO J F, LONG M, *et al.* Space program SJ-10 of microgravity research [J]. *Microgravity Sci. Tech.*, 2014, **26**: 159-169

[22] HU W R, KANG Q. Physical Science under Microgravity: Experiments on Board the SJ-10 Recoverable Satellite [M]. Beijing: Science Press, 2019

[23] DUAN E, LONG M. Life Science in Space: experiments on Board the SJ-10 Recoverable Satellite [M]. Beijing: Science Press, 2019

[24] KANG Q, WANG J, DUAN L, *et al.* The volume ratio effect on flow patterns and transition processes of thermocapillary convection [J]. *J. Fluid Mech.*, 2019, **868**: 560-583

[25] KANG Q, WU D, DUAN L, *et al.* The effects of geometry and heating rate on thermocapillary convection in the liquid bridge [J]. *J. Fluid Mech.*, 2019, **881**: 951-982

[26] ZHAO J F, LI J, YAN N, *et al.* Bubble behavior and heat transfer in quasi-steady pool boiling in microgravity [J]. *Microgravity Sci. Tech.*, 2009, **21**(S1): S175-S183

[27] WEI J J, XUE Y F, ZHAO J F, *et al.* Bubble behavior and heat transfer of nucleate pool boiling on micro-pin-finned surface in microgravity [J]. *Chin. Phy. Lett.*, 2011, **28**(1): 016401

[28] LIU Peng, WU Ke, DU Wangfang, *et al.* Experimental study on bubble behavior in microgravity pool boiling [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2018, **38**(2): 221-226 (刘鹏, 吴克, 杜王芳, 等. 微重力池沸腾中的气泡行为实验研究 [J]. 空间科学学报, 2018, **38**(2): 221-226)

[29] WU Ke, ZHAO Jianfu, LI Huixiong, *et al.* Space and ground experiments on pool boiling phenomenon utilizing SOBER – SJ-10 facility [J]. *J. Eng. Therm.*, 2017, **38**(11): 2378-2381 (吴克, 赵建福, 李会雄, 等. SOBER-SJ10 池沸腾现象天地实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2017, **38**(11): 2378-2381)

[30] LI W B, LAN D, SUN Z B, *et al.* Colloidal material box: in-situ observations of colloidal self-assembly and liquid crystal phase transitions in microgravity [J]. *Microgravity Sci. Technol.*, 2016, **28**(2): 179-188

[31] GALLIERO G, BATALLER H, BAZILE J P, *et al.* Thermodiffusion in multicomponent n-alkane mixtures [J]. *NPJ Microgravity*, 2017, **3**: 20

[32] WANG S, ZHANG X. Microgravity smoldering combustion of flexible polyurethane foam with central ignition [J]. *Microgravity Sci. Technol.*, 2008, **20**: 99-105

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

[34] KONG W, WANG B, ZHANG W, *et al.* Study on prefire phenomena of wire insulation at microgravity [J]. *Microgravity Sci. Technol.*, 2008, **20**: 107-113

[35] XUE S, KONG W. Smoke emission and temperature characteristics of the long-term overloaded wire in space [J]. *J. Fire Sci.*, 2019, **37**: 99-116

[36] ZHANG H, LIU B, ZHANG Y, *et al.* Experimental study on coal combustion at microgravity [M]//Physical Science Under Microgravity: Experiments on Board the SJ-10 Recoverable Satellite. Singapore: Science Press and Springer, 2019: 263-301

[37] ZHANG H, FAN R, WANG S, *et al.* Extinction of lean near-limit methane/air flames at elevated pressures under normal- and reduced-gravity [J]. *Proc. Combust. Inst.*,

2011, **33**: 1171-1178

[38] WANG Q, HU L, WANG S, *et al.* Blowout of non-premixed turbulent jet flames with coflow under microgravity condition [J]. *Combust. Flame*, 2019, **210**: 315-323

[39] WANG Guobiao. Natural Science Foundation of China supported the development of lubricating materials for "Shenqi" real space environment test [J]. *Prog. Nat. Sci.*, 2009, **19**(2): 165 (王国彪. 国家自然科学基金支持项目研制的润滑材料进行 "神七" 真实空间环境试验 [J]. 自然科学进展, 2009, **19**(2): 165)

[40] YIN Zhigang, ZHANG Xingwang, PAN Xiuhong. Space melt materials science: practice 10 recoverable scientific experiment satellite [J]. *Physics*, 2016, **45**(4): 213-218 (尹志岗, 张兴旺, 潘秀红. 空间熔体材料科学: 实践十号返回式科学实验卫星 [J]. 物理, 2016, **45**(4): 213-218)

[41] YU J D, INATOMI Y, KUMAR V N, *et al.* Homogeneous InGaSb crystal grown under microgravity using Chinese recovery satellite SJ-10 [J]. *NPJ Microgravity*, 2019, **5**: 8

[42] LI X Y, LU Y, MENG X J, *et al.* Materials experiment on Tiangong-2 space laboratory [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2018, **38**(5): 829-835

[43] YIN Zhigang, ZHANG Xingwang, WU Jinliang. Progress in microgravity growth of Ⅲ-Ⅴ semiconductors [J]. *Sci. China*: *Phys. Mech. Astron.*, 2020, **50**(4): 66-78 (尹志岗, 张兴旺, 吴金良. Ⅲ-Ⅴ 族半导体微重力生长研究进展 [J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2020, **50**(4): 66-78)

[44] LIU L, LÜ D S, CHEN W B, *et al.* In-orbit operation of an atomic clock based on laser-cooled 87Rb atoms [J]. *Nat. Commun.*, 2018, **9**: 2760

[45] WEI Xing. Taiji-1 [J]. *China Terminol.*, 2019, **21**(5): 80 (魏星. 太极一号 [J]. 中国科技术语, 2019, **21**(5): 80)

[46] LUO J, BAI Y Z, CAI L, *et al.* The first round result from the Tianqin-1 satellite [J]. *Class. Quantum Grav.*, 2020, **37**: 185013

[47] PENG Chengzhi, PAN Jianwei. Quantum science experimental satellite "Micius" [J]. *Bull. Chin. Acad. Sci.*, 2016, **31**(9): 1096-1104

[48] CANG Huaixing, ZHANG Heqiao, HAN Yi, *et al.* Protein crystallization experiments aboard Shenzhou-8 spacecraft [J]. *Sci. Technol. Rev.*, 2012, **30**(16): 20-25

[49] ZHENG H Q, WANG L H, XIE J Y. Flowering of Arabidopsis and rice in space [M]//Life Science in Space: Experiments on Board the SJ-10 Recoverable Satellite. Beijing: Science Press, 2019: 189-204

[50] LEI X, CAO Y, ZHANG Y, *et al.* Advances of mammalian reproduction and embryonic development under microgravity [M]//Life Science in Space: Experiments on Board the SJ-10 Recoverable Satellite. Beijing: Science Press, 2019: 281-315

[51] WANG P, QIAN J, TIAN H, *et al.* The maintaining and directed differentiation of hematopietic stem cells under microgravity [M]//Life Science in Space: Experiments on Board the SJ-10 Recoverable Satellite. Beijing: Science Press, 2019: 205-233

[52] HAN J, CUI Y, XU B, *et al.* Three-dimensional cell culture and tissue restoration of neural stem cells under microgravity [M]//Life Science in Space: Experiments on Board the SJ-10 Recoverable Satellite. Beijing: Science Press, 2019: 235-279

[53] ZHANG C, LI L, WANG J. Effects of microgravity on the trans-differentiation between osteogenesis and adipogenesis of human marrow-derived mesenchymal stem cells [M]//Life Science in Space: experiments on Board the SJ-10 Recoverable Satellite. Beijing: Science Press, 2019: 317-359

[54] SUN S, WANG C, LI N, *et al.* Cell growth and differentiation under microgravity [M]//Life Science in Space: experiments on Board the SJ-10 Recoverable Satellite. Beijing: Science Press, 2019: 281-315

[55] ZHANG H, MIAO J, MO Q, *et al.* Development and test results of closed two-phase thermosyphons for the Chinese moon exploration spacecraft "CE-3" [C]//Proceeding of 11th International Heat Pipe Symposium. Beijing: China Academy of Aerospace Aerodynamics, 2013

[56] MIAO Jianyin, CAO Jianfeng, HOU Zengqi. Experimental study on performance of LHP in simulated space environment [J]. *J. Eng. Therm.*, 2003, **24**(1): 97-99

[57] YU Y, HE Z, CHUNG C, *et al.* Testing of CO_2 on-orbit fill/refill for the upgraded tracker thermal pump system in the alpha magnetic spectrometer [J]. *Appl. Thermal Eng.*, 2020, **178**: 115558

[58] ZHANG Hongxing, MIAO Jianyin, YAO Wei, *et al.* Experimental study on steady state characteristics of spray cooling system [J]. *Chin. Space Sci. Technol.*, 2009, **4**: 61-68

[59] HUANG Y, YANG Q, ZHAO J, *et al.* Experimental study on flow boiling heat transfer characteristics of ammonia in microchannels [J]. *Microgravity Sci. Technol.*, 2020, **32**(3): 477-492

[60] ZHANG H, MI M, MIAO J, *et al.* Development and on-orbit operation of loop heat pipes on chinese circumlunar return and reentry spacecraft [J]. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2017, **31**(6): 2597-2605

[61] ZHOU Shuntao, MO Qing, ZHANG Hongxing, *et al.* Experimental study on supercritical start-up of cryogenic loop heat pipe [J]. *Cryogenics*, 2010, **3**: 18-21, 60

[62] GUO Y D, LIN G, ZHANG H, *et al.* Investigation on thermal behaviours of a methane charged cryogenic loop heat pipe [J]. *Energy*, 2018, **157**: 516-525

[63] HE J, GUO YD, ZHANG H, *et al.* Design and experimental investigation of a neon cryogenic loop heat pipe [J]. *Heat Mass Trans.*, 2017, **53**(11): 3229-3239

[64] LIU W, GAO Y, DONG W, *et al.* Flight test results of the microgravity active vibration isolation system in China's Tianzhou-1 mission [J]. *Microgravity Sci. Technol.*, 2018, **30**: 995-1009