



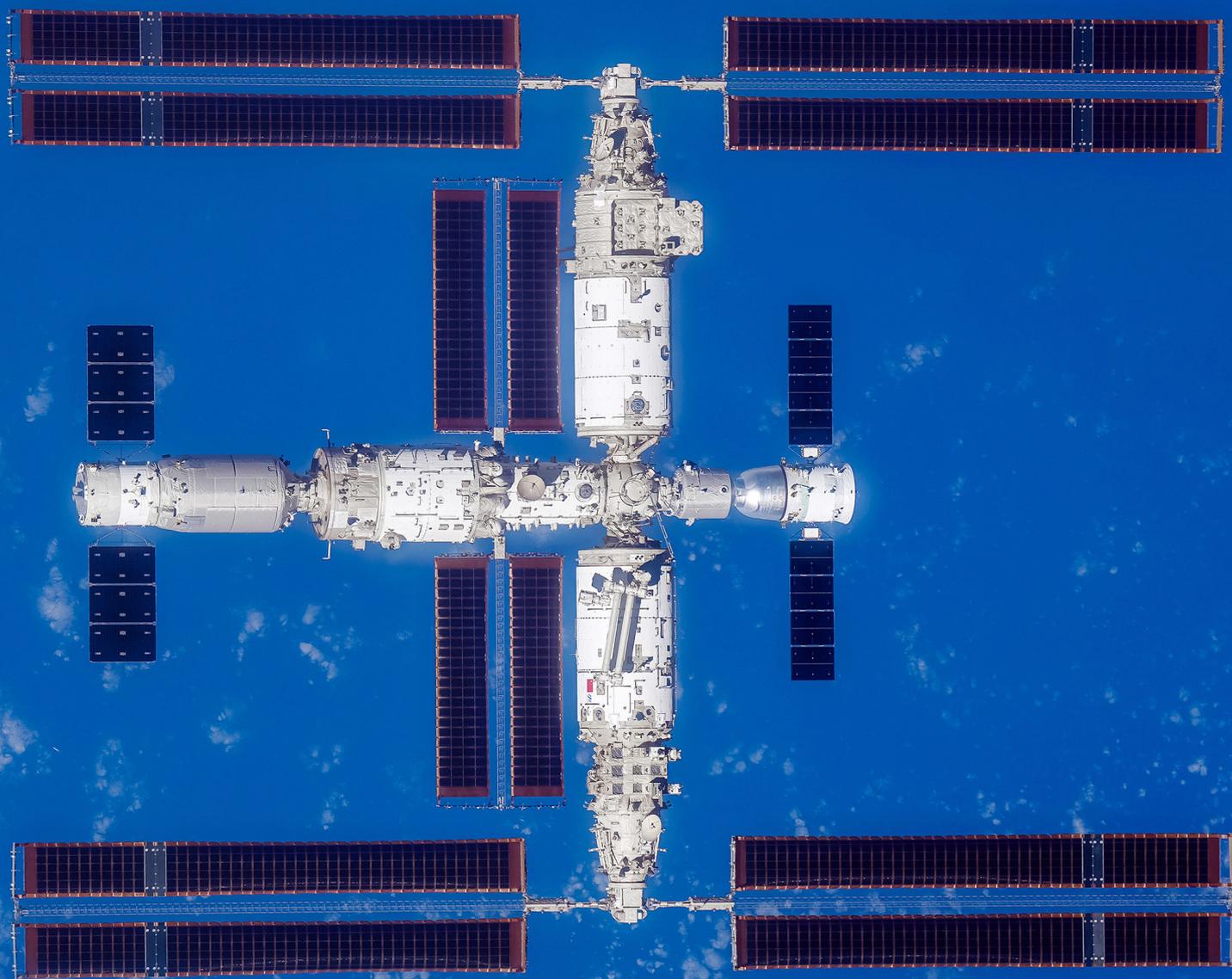
# 中国空间站 科学研究与应用进展报告 2024

中国载人航天工程办公室

# 中国空间站

科学研究与应用进展报告

# 2024



# 序言

随着 2021 年 4 月天和核心舱发射、2022 年 7 月和 10 月问天实验舱、梦天实验舱的发射和在轨组装，以及多次载人飞船和货运飞船的访问，我国建成了具有鲜明时代特点和中国特色载人空间站大系统，实现了载人航天三步走的宏伟目标。这是 30 年来几代人努力奋斗的结晶，是我国航天事业的巨大成就，也是我国开展大规模空间科学、应用和技术研究的历史性机遇。

空间科学是充满新发现机遇、探索重要科学规律、获得显著应用效益的突破口。空间站提供的长期微重力、宇宙辐射等特殊环境，以及航天员参与、天地往返运输等特殊优势，成为诸多学科解决重要科学与应用问题的独特有效途径，也是开展突破性空间新技术试验的重要平台。

经国内近百位院士、千余位专家的多年论证，我们制定了包括空间生命科学与人体研究、微重力物理科学（含空间材料科学、微重力流体与热物理、微重力燃烧科学、微重力基础物理）、空间天文与地球科学、空间新技术与应用四个领域，32 个研究主题的空间站应用研究体系，并配置了具有国际先进水平的人体系统、生命生态、生物技术、流体物理、两相流体、燃烧科学、无容器静电悬浮、高温材料、超冷原子物理、高精度时频、科学手套箱、变重力实验、在线维修装调、航天基础试验等 20 余个舱内科学实验柜和 3 个舱外暴露实验平台；正在研制具有国际竞争力的 2m 口径空间站巡天空间望远镜（CSST）等一批重大研究设施。作为国家太空实验室，将在今后 10~15 年的运营中开展千余项研究，并大力开展科学普及和国际合作。空间站应用的目标是：在基础前沿重要领域取得重大突破，进入国际科学前列；在应用基础和新技术方面，取得系统性认知和重大成果，解决国家重大需求，加强对经济、产业发展和人民健康方面科技供给，支撑科技强国建设。

本报告汇集了空间站建成以来首批数十项完成或初步完成空间研究的阶段进展，涉及空间生命科学与生物技术、太空人体研究、空间材料科学、微重力流体与热物理、微重力燃烧科学、微重力基础物理、空间应用新技术等方向。这些项目均是我国科学家深入研究、自主提出的重要科学课题，或面向国家需求的重要内容，科学思想、实验方法、样品体系等均体现了较高水平的创新。实验中发现了大量新现象，取得了机理研究的重要进展，并正在不断深入中取得系统性科学认识和应用效益。总体上，该阶段应用研究进展令人鼓舞。

在此基础上，我们将进一步完善应用规划，持续征集实施项目，组织重要科学计划，开展高水平研究。希望更多从事空间科学、应用和技术研究的优秀科学家和团队加入载人航天科学与应用任务，为我国进入创新型国家前列和建设科技强国做出突出贡献。

中国载人航天工程空间科学首席专家





# 目 录

1 概述	1
2 空间生命科学与人体研究领域	3
3 微重力物理科学领域	33
4 空间新技术与应用领域	65
5 科普文化	85
6 未来展望	94

2022年12月31日，国家主席习近平宣布“中国空间站全面建成”，标志着我国已成功构建起极具时代特征与中国特色的载人空间站大系统，圆满达成载人航天三步走战略的宏伟目标。这一伟大壮举不仅彰显我国在航天领域卓越的探索能力与雄厚的科技实力，更是我国迈向科技强国征程中浓墨重彩的一笔，有力推动我国载人航天事业昂首迈入全新的发展纪元，具有极为重大的里程碑意义。

空间站自在轨建造以来，共发射8艘载人飞船和7艘货运飞船，共有21名航天员进驻，目前整体运行情况安全稳定，已实现常态化太空生活。凭借长期微重力、宇宙辐射等独特环境条件，再结合航天员亲身参与、天地往返运输等突出优势，我国空间站已然成为一座珍贵的“国家太空实验室”。

“飞天之路”记录中国航天的辉煌与荣耀，也是不断孕育科学梦想、让梦想成为现实的漫漫征途。自1992年立项实施起，中国载人航天工程即提出“造船为建站，建站为应用”的发展理念，邀集组织国内近百位院士、千余一线专家开展长期、深入论证，形成了重点突出、层次清晰的科学与应用任务规划，包括空间生命与人体研究、微重力物理科学、空间天文与地球科学、空间新技术与应用四大研究领域及32个研究主题，持续布局开展系列化科学与应用研究、技术试验。截至2024年12月1日，中国空间站已在轨实施181项科学与应用项目，上行科学与应用任务近两吨实验模块、单元及样品等科学物资，下行空间科学实验样品近百种，获取科学数据超过300TB。各领域科学团队深度挖掘诸多领域方向，着力攻克系列重大科学命题，产出了系列原创性、前沿性、创新性的进展与成果，累计发表500多篇高水平SCI论文，获得150多项专利，部分成果已实现转移转化与推广应用，显著推动我国空间科学与应用快速发展。

在空间生命科学与人体研究领域共实施项目68项，主要围绕空间基础生物学、空间生物技术及转化应用、空间生命生态、空间生命起源与交叉、空间环境对人体生理影响、传统医学与健康检测新技术、空间飞行人因、空间脑科学等方面开展研究。成果包括国际上首次获得空间发育的水稻和再生稻新的种质资源；首次实现空间人胚胎干细胞分化为造血干/前体细胞；实现国际上空间水生生态系统在轨运行的最长纪录；为干预骨流失、对抗肌萎缩及防治代谢性疾病等提供了重要理论基础与治疗方案；自主研发的便携式骨丢失对抗仪、穿戴式穴位刺激装置已在飞行任务中开展应用，肌肉结构功能、营养代谢等客观无创评估方法已为航天员健康保驾护航；在国际上获得一系列航天员生理机能和作业能力变化的原创性发现；首次将人工血管芯片送入太空，完成了对抗血管损伤的黄酮类小分子化合物筛选，入选2023年度中国生命科学领域十大进展；构建航天飞行航天员行为能力研究与维护调节的新范式；突破在轨脑功能实时评估和快速有效在轨调节技术；实现了双光子首次在轨应用研究。

在微重力物理领域共实施项目69项，围绕微重力材料制备机理、重要应用新材料制备技术、

# 概述

空间应用材料使役行为等方面开展研究，在金属及难熔合金凝固机理方面取得具有重要影响的系列科学发现；在空间制备出性能更优的新型红外探测器材料铟砷锑、层状柔性半导体晶体硒化铟、大尺寸拓扑超导单晶、新型铁基超导材料等；抗空间辐射高性能镁合金、凝胶复合润滑材料等已初步尝试空间应用。围绕微重力流体动力学、多相流和相变传热、复杂流体与软物质等方面开展研究；国际上首次获得宽域重力条件下池沸腾稳态传热数据并发现传热性能的反常重力标度行为；成功建立微重力环境下贮箱气泡理论模型。围绕近可燃极限和基础燃烧方面开展研究，国际上首次揭示低流量部分预混火焰的升举及吹熄特性，发现微重力部分预混火焰熄灭过程中的双钩状结构，为未来极端燃烧应用提供理论依据。聚焦空间冷原子物理及应用研究，实现了全光阱的玻色-爱因斯坦凝聚，原子温度冷却到了数十 pK；国际上首次实现空间微重力条件下的冷原子干涉陀螺，为发展我国空间量子惯性传感技术奠定了基础。

在空间新技术与应用领域共实施项目 44 项，主要围绕共性基础新技术、在轨制造和建造技术、空间信息与精密测量新技术、新型能源与推进技术及环控和生保系统技术等方面开展研究，在元器件与部组件空间应用可靠性等方面验证一批新工艺和新组件，突破掌握长寿命抗辐照光纤及气密封穿舱技术、基于微纳结构的薄膜衍射光学成像技术等，在新型元器件材料与工艺、空间热管理、通信导航与控制、新型空间能量转换、食物再生、长期空间环境微生物腐蚀防护等研究方向取得了一系列重要进展和成果。首次揭示了液态金属管内对流的层流-湍流转捩特性，填补了过渡区对流换热数据的空白；实现了斯特林热电转换技术首次在轨验证应用；建立国际首个高通量在轨微生物腐蚀试验装置，获得了我国首批在轨环境下航天器材料微生物腐蚀试验数据；首次利用靶向加热技术实现了空间液态微藻由“生”变“熟”。相关技术成果已推广转化至航天技术领域和民用行业。

在中国空间站全面建成两周年之际，中国载人航天工程办公室组织编制《中国空间站科学研究与应用进展报告（2024）》并向全社会发布。本报告系统梳理和总结空间站应用任务实施进展，针对目前已下行样品、取得研究数据、完成在轨实验、获得突出进展的科学与应用项目，最终遴选出 34 项代表性研究成果与阶段性进展，包括 13 项空间生命与人体研究进展、12 项微重力物理科学研究进展、9 项空间新技术与应用研究进展。此外，空间站建成以来组织的多维度、多形式的深度科普，不仅实现了知识传播，还极大助力了航天事业的传承，也一并列入报告。

太空探索永无止境，逐梦之路永不停歇。中国空间站对促进我国乃至世界科学技术进步、提升人类对宇宙的整体认知水平有着不可估量的深远意义。本次报告的编写以及对全国、全世界公开发布，既是对以往工作的系统性总结，更希望获得社会各界对于空间科学与应用的关注和参与，广泛凝聚国内外高水平科学团队，促进我国空间科学、空间技术、空间应用全面发展，推动中国航天事业再攀高峰，更好的服务于国家总体发展战略。

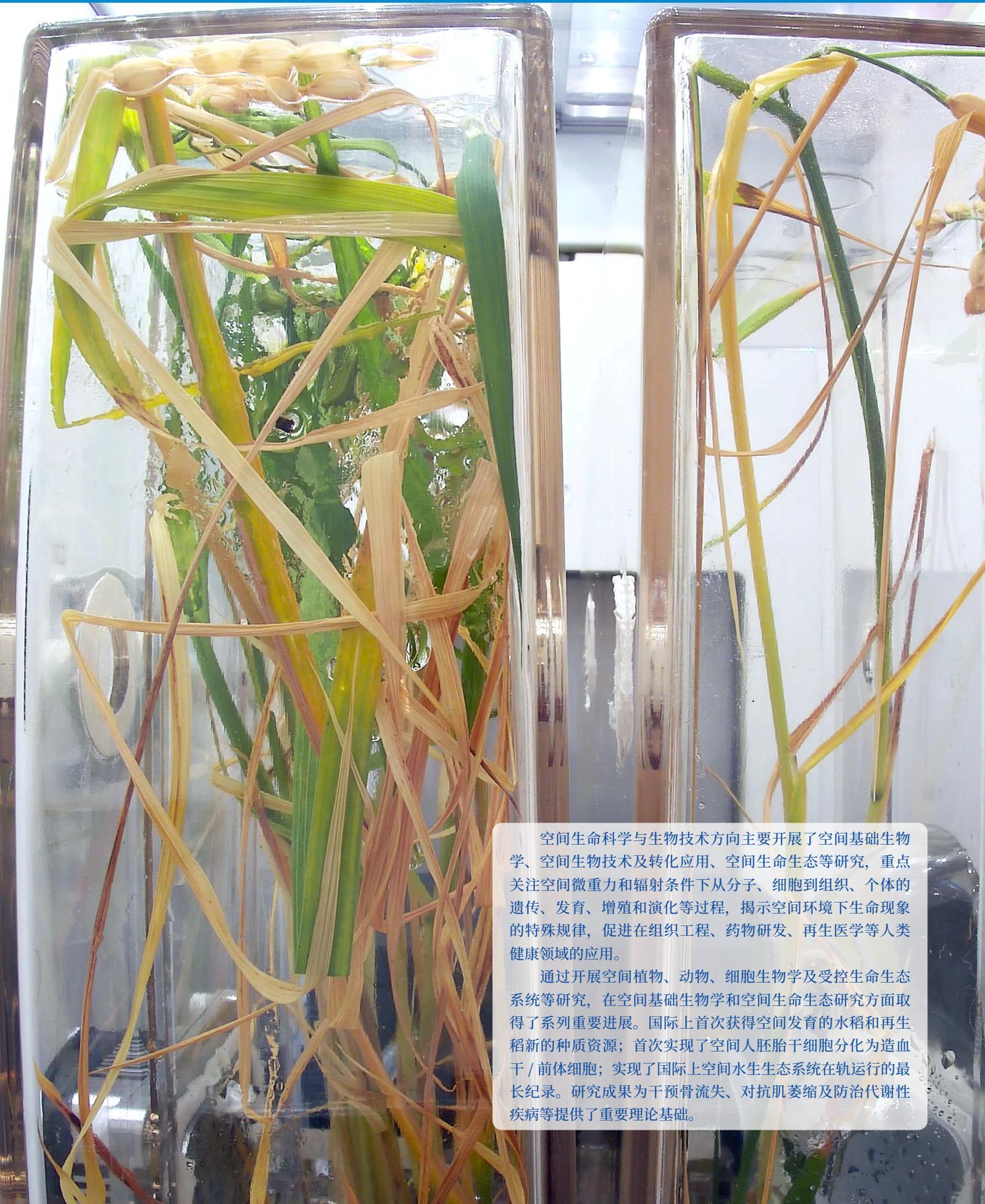
## 2. 空间生命科学与人体研究领域

### 2.1 空间生命科学与生物技术

- (一) 微重力下利用开花基因调控植物开花时间的分子途径 ..... 5
- (二) 空间站水生生态系统在轨稳定运行及斑马鱼培养 ..... 7
- (三) 空间微重力下人胚胎干细胞早期造血分化 ..... 9
- (四) 空间微重力影响干细胞成骨分化的作用机理 ..... 11
- (五) 微重力通过影响细胞自噬导致肌萎缩的作用机制 ..... 13
- (六) 空间单线虫水平自动化跟踪监测微流控系统 ..... 15

### 2.2 太空人体研究

- (一) 骨骼相关生理系统协同调控与空间骨丢失防护技术研究 ..... 19
- (二) 代谢重塑调控心肌细胞微重力效应的分子机制研究 ..... 21
- (三) 基于器官芯片的失重心血管功能变化机制与防护研究 ..... 23
- (四) 航天员在轨脑功能评估与调节技术研究 ..... 25
- (五) 中医特色的航天员健康评价与防护新技术研究 ..... 27
- (六) 长期飞行肌肉功能适应性变化规律与机制研究 ..... 29
- (七) 空间站双光子显微镜的研制及在轨应用 ..... 31



空间生命科学与生物技术方向主要开展了空间基础生物学、空间生物技术及转化应用、空间生命生态等研究，重点关注空间微重力和辐射条件下从分子、细胞到组织、个体的遗传、发育、增殖和演化等过程，揭示空间环境下生命现象的特殊规律，促进在组织工程、药物研发、再生医学等人类健康领域的应用。

通过开展空间植物、动物、细胞生物学及受控生命生态系统等研究，在空间基础生物学和空间生命生态研究方面取得了系列重要进展。国际上首次获得空间发育的水稻和再生稻新的种质资源；首次实现了空间人胚胎干细胞分化为造血干/前体细胞；实现了国际上空间水生生态系统在轨运行的最长纪录。研究成果为干预骨流失、对抗肌萎缩及防治代谢性疾病等提供了重要理论基础。

# 微重力下利用开花基因调控植物开花时间的分子途径

## Molecular Pathway on Controlling Plant Flowering Time under Microgravity in Space by Using Flowering Genes

通过比较微重力条件下开花基因（FT）表达水平的差异，发现了微重力调控开花的关键转录调控元件 GCC- 和 CAGTG-box, 为植物从种子到种子关键环节的调控、创制适应空间环境的植物新品种提供了理论基础和技术途径。

### 研究进展

利用生命生态实验柜开展了三种不同开花时间（正常开花、晚花和早花）的拟南芥在空间微重力条件下的开花调控机理研究（图 2-1）。利用返回的拟南芥实验材料，获得了不同开花时间的拟南芥响应微重力的天地比对转录组和生长发育表型数据，首次发现了微重力条件下拟南芥开花时间调控的关键分子模块 GI-CO-FT 的特异性转录因子（包括四类 bZIP、bHLH、BES 和 SBP 家族转录因子），通过 GCC- 和 CAGTG- 两类转录调控元件来调控拟南芥开花途径中的关键基因（图 2-2）。该项研究不仅深入解析了植物通过调整开花时间适应空间微重力的分子机理，也为利用相关转录调控元件作为分子开关控制空间植物的开花时间，构建具有较强空间环境适应能力的植物，提高其产量和品质提供了新的途径。

### 应用及前景

国际上首次在空间完成水稻“从种子到种子”的全生命周期培育，成功获得空间发育的水稻和再生稻新的种质资源，并在返回地面后实现了大田种植，证明在空间站发育的水稻种子具有活力和繁殖能力，相关研究获得了 2023 年度上海市科技进步奖二等奖。

本研究解析的微重力调控开花分子开关（转录调控元件）及其调控开花机理的研究结果，可为创制适应于长期空间微重力的植物新品种提供候选基因，对于指导空间和地面植物育种实践，推动水稻新品种改良和培育具有重要意义。在地面植物工厂化生产方面具有潜在应用前景，也为未来载人深空探测中粮食的原位生产提供了直接实验证据和理论基础。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Chaoxian Jia, Weibo Zheng, Fangwu Liu, et al. Biological culture module for plant research from seed-to-seed on the Chinese Space Station [J]. Life Science in Space Research. 2024, 42:47-52. DOI:10.1016/j.lssr.2024.04.005.
- [2] Junyan Xie, Lihua Wang, Huiqiong Zheng. Molecular basis to integrate microgravity signals into the photoperiodic flowering pathway in *Arabidopsis thaliana* under spaceflight condition [J]. International Journal of Molecular Sciences. 2022, 23: 63. DOI:10.3390/ijms23010063.
- [3] Lihua Wang, Junyan Xie, Chenghong Mou, et al. Transcriptomic analysis of the interaction between *FLOWERING LOCUS T* induction and photoperiodic signaling in response to spaceflight [J]. Frontiers in Cell and Developmental Biology. 2022, 9: 813246. DOI:10.3389/fcell.2021.813246.

### 主要完成团队

中国科学院分子植物科学卓越创新中心郑慧琼团队，中国科学院上海技术物理研究所张涛团队。

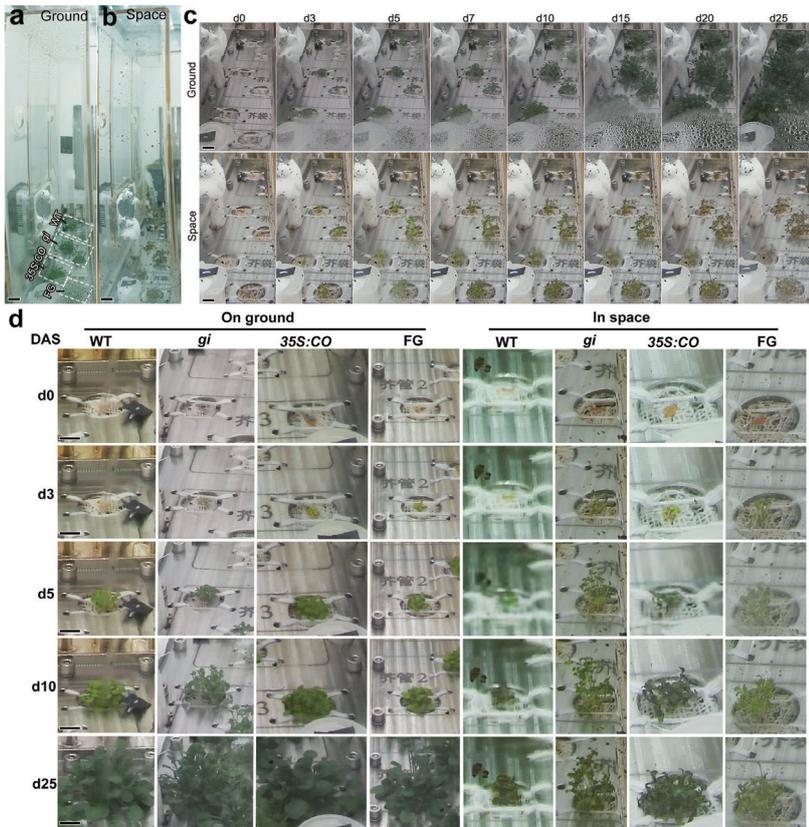


图 2-1 微重力条件下拟南芥生长发育与开花情况

(a,b) 拟南芥幼苗在地面 (a) 和空间 (b) 培养盒中分布情况; (c) 地面与空间拟南芥在培养单元中 25 天的生长过程图像; (d) 比较不同基因型拟南芥在空间与地面条件下生长差异。WT, 野生型 (正常开花); *gi*, *gigantea* 基因缺失突变体 (晚花), FG, *pHSP:FT;pHSP:GFP* 转基因植株, 即热激启动子控制的 FT 基因和绿色荧光蛋白转基因植株 (早花); 35S:CO, 35S 启动子控制的 *COSTANS(CO)* 基因过表达植株 (早花)。

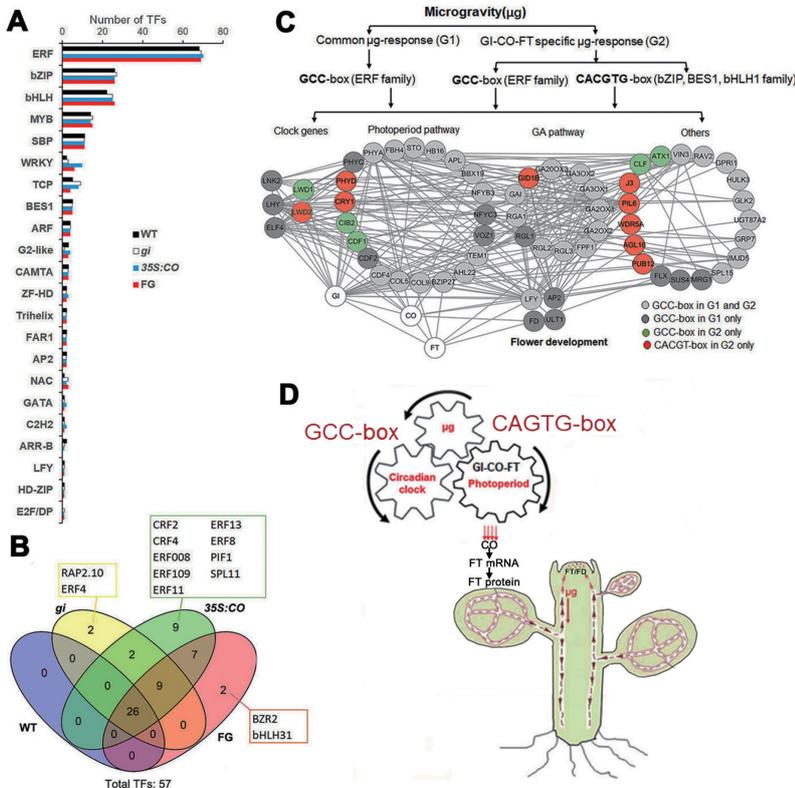


图 2-2 拟南芥返回样品天地比对转录组分析及微重力对开花调控可能的分子机理解析

(a) 响应微重力的转录因子以及 GI-CO-FT 模块改变的影响; (b) 不同开花时间拟南芥中响应微重力的转录因子比较分析; (c) 响应微重力的转录因子通过两类顺式元件调控关键的开花基因的途径和相互作用网络; (d) 微重力通过整合生物钟和光周期 (GI-CO-FT 模块) 调控植物开花的可能机理假说示意图。

图片来源: Xie et al., Research Square, 2024, doi.org / 10.21203/rs.3.rs-3803812/v1

获奖情况

2023 年度上海市科技进步奖二等奖, 项目名称: 空间微重力对植物从种子到种子生长发育作用机理研究, 获奖者: 郑慧琼、张涛、王丽华、谢俊燕、郑伟波等。

# 空间站水生生态系统在轨稳定运行及斑马鱼培养

## On-Orbit Stable Operation of Closed Aquatic Ecosystem(CAES) and Zebrafish Culture in China Space Station

本研究研制的空间水生生态系统在空间站稳定运行 43 天，实现了我国在空间站培养斑马鱼的突破，获得了国际上空间水生生态系统在轨运行的最长纪录。

### 研究进展

本研究利用斑马鱼和金鱼藻组成密闭水生生态系统（图 2-3），安装在生命生态柜进行空间实验，实现了水生生态系统气体平衡和长期稳定运行（图 2-4）。通过天地比对发现，空间水生生态系统溶解氧等参数在运行初期振荡较大，而在后期逐渐变小，反映了空间水生生态系统的高鲁棒性；斑马鱼在轨出现背腹面颠倒游泳、旋转运动、转圈等空间运动行为异常现象；金鱼藻在轨则一直保持较高光合作用活性。空间站水生生态系统正常运行 43 天，获得了空间水

生生态系统在轨运行的最长国际纪录，实现了我国在空间站培养斑马鱼及在轨产卵的突破，同时在利用光照调节金鱼藻光合作用和系统内溶解氧方面也取得很好的调控效果。相关研究结果发表在《The Innovation》等期刊，并被新华社和中央电视台多次报道。

### 应用及前景

本研究为后续利用斑马鱼作为动物模型进行航天员空间健康研究建立了实验平台，为未来构建空间生态系统提供了良好的生物元件。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Maobin Xie, Qing Tian, Gaohong Wang, et al. Breakthrough in enclosed aquatic ecosystems in space: Supporting zebrafish survival for 43 days [J]. *The Innovation*. 2024, 5(6): 100711. DOI:10.1016/j.xinn.2024.100711.
- [2] Peifan Gu, Xianyuan Zhang, Anji Chen, et al. Microbes and nutrient shift in a Closed Aquatic Ecosystem (CAES) during four weeks of operation [J]. *Life Sciences in Space Research*. 2024, 42(1):91-98. DOI:10.1016/j.lssr.2024.06.001.
- [3] Caiyan Li, Xianyuan Zhang, Tong Ye, et al. Protection and damage repair mechanisms contributed to the survival of *Chroococcidiopsis* sp. exposed to a Mars-like near space environment [J]. *Microbiology Spectrum*. 2022, 10(6): 03440-22. DOI:10.1128/spectrum.03440-22.

### 代表专利

- [1] 李小燕, 王高鸿, 刘永定. 一种超声分离获取鱼类微小耳石的方法. 发明专利. 专利号: ZL.202010699616.8. 授权日期: 2021 年 6 月 29 日.

### 主要完成团队

中国科学院水生生物研究所王高鸿团队, 中国科学院上海技术物理研究所张涛团队。

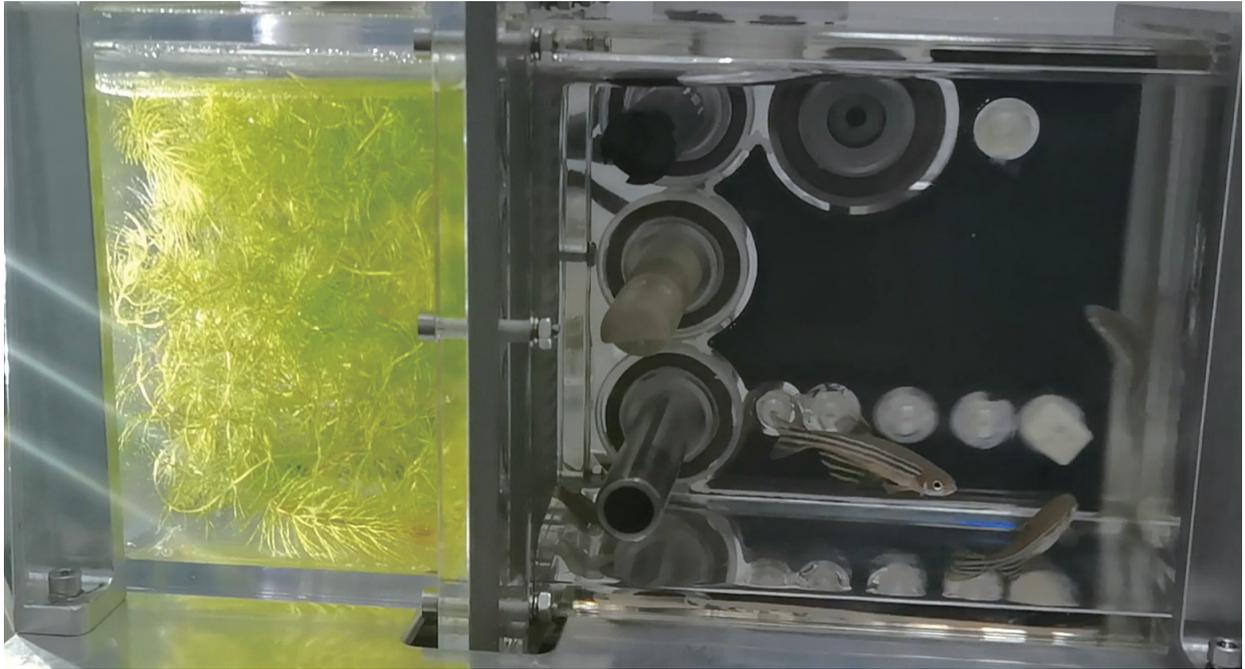


图 2-3 空间水生生态系统发射前状态图

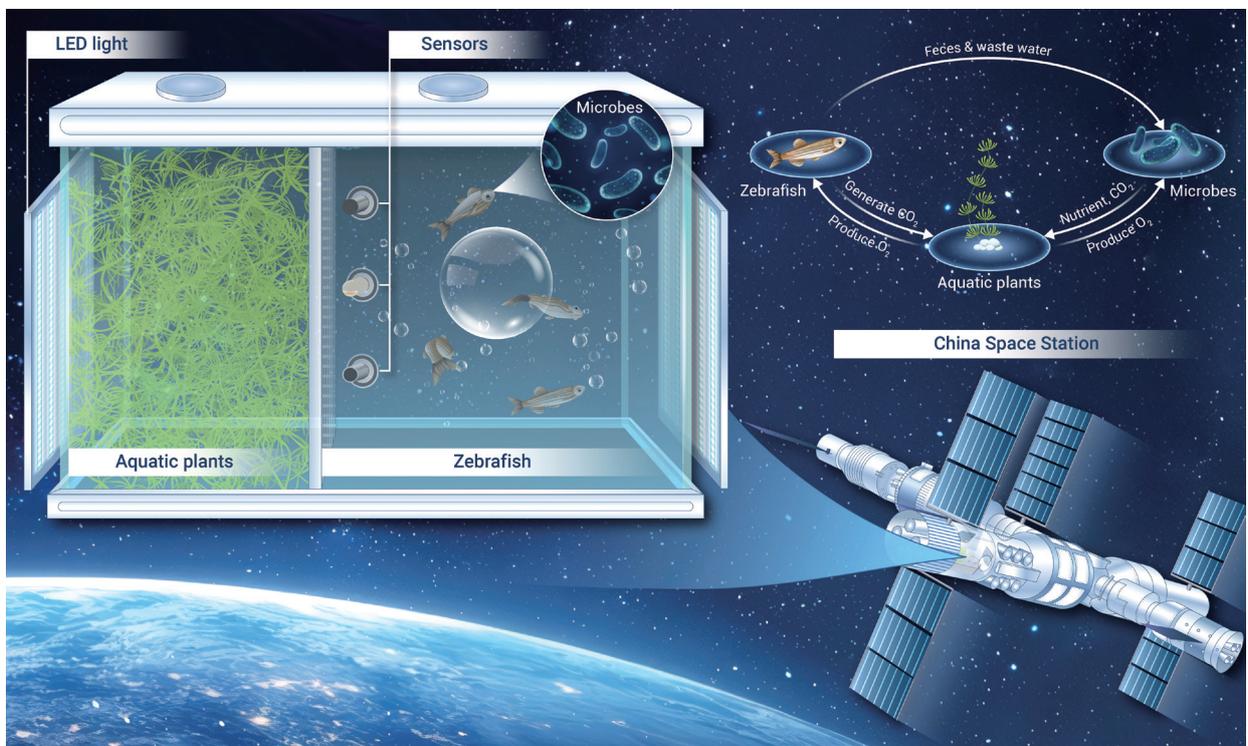


图 2-4 空间水生生态系统在轨运行示意图

图片来源: Xie et al., The Innovation. 2024, 5(6): 10071

# 空间微重力下人胚胎干细胞早期造血分化

## Early Hematopoietic Differentiation of Human Embryonic Stem Cells under Space Microgravity Conditions

首次实现了空间人胚胎干细胞分化为造血干 / 前体细胞，揭示微重力通过影响整合素信号来促进早期造血分化的分子机制，为解决地面人多能干细胞造血分化效率低的问题提供新思路。

### 研究进展

利用生物技术实验柜开展了空间微重力下的人胚胎干细胞的早期造血分化实验（图 2-5A），首次在轨实现人多能干细胞分化出造血干细胞 / 前体细胞。获取了在轨干细胞连续生长和分化的高清细胞影像，各单元细胞均完成造血分化，分化出鹅卵石样的造血细胞（图 2-5B 和图 2-5C，右部分放大图像所示）。通过天地比对实验，验证了在轨分化出的细胞为造血干 / 前体细胞（图 2-6），发现空间微重力环境效应有望促进人胚胎干细胞向造血干 / 前体细胞的分化效率。

研究成果不仅为进一步开展太空早期造血研究提供理论和技术依据。

### 应用及前景

本研究有望利用微重力环境效应改进干细胞培养体系，提高多能干细胞到造血干 / 前体细胞的分化效率，为解决地面干细胞早期造血分化效率低的问题提供了新思路，为血液疾病患者提供更有效的治疗方法，从而有望推动生物制造业的发展。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Chiyuan Ma, Yue Xiong, Xiaohua Lei, et al. simulated microgravity potentiates hematopoietic differentiation of human pluripotent stem cells and supports formation of 3D hematopoietic cluster [J]. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*. 2022, 9: 797060. DOI:10.3389/fcell.2021.797060.
- [2] Chiyuan Ma, Xianglong Duan, Xiaohua Lei. 3D cell culture model: from ground experiment to microgravity study [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023, 11:1136583. DOI:10.3389/fbioe.2023.1136583.
- [3] Xiaohua Lei, Chiyuan Ma, Yujing Cao, et al. High-efficiency differentiation of human pluripotent stem cells to hematopoietic stem/progenitor cells in random positioning machine bioreactors [J]. *Methods in Molecular Biology*. 2022, 2436:55-66. DOI:10.1007/7651\_2021\_412.

### 代表专利

[1] 雷晓华, 张键, 马驰原, 等. 一种诱导多能干细胞向造血前体细胞分化的培养基以及方法. 发明专利. 专利号: ZL202110396567.5. 授权日期: 2023 年 4 月 18 日.

### 主要完成团队

中国科学院深圳先进技术研究院雷晓华团队。

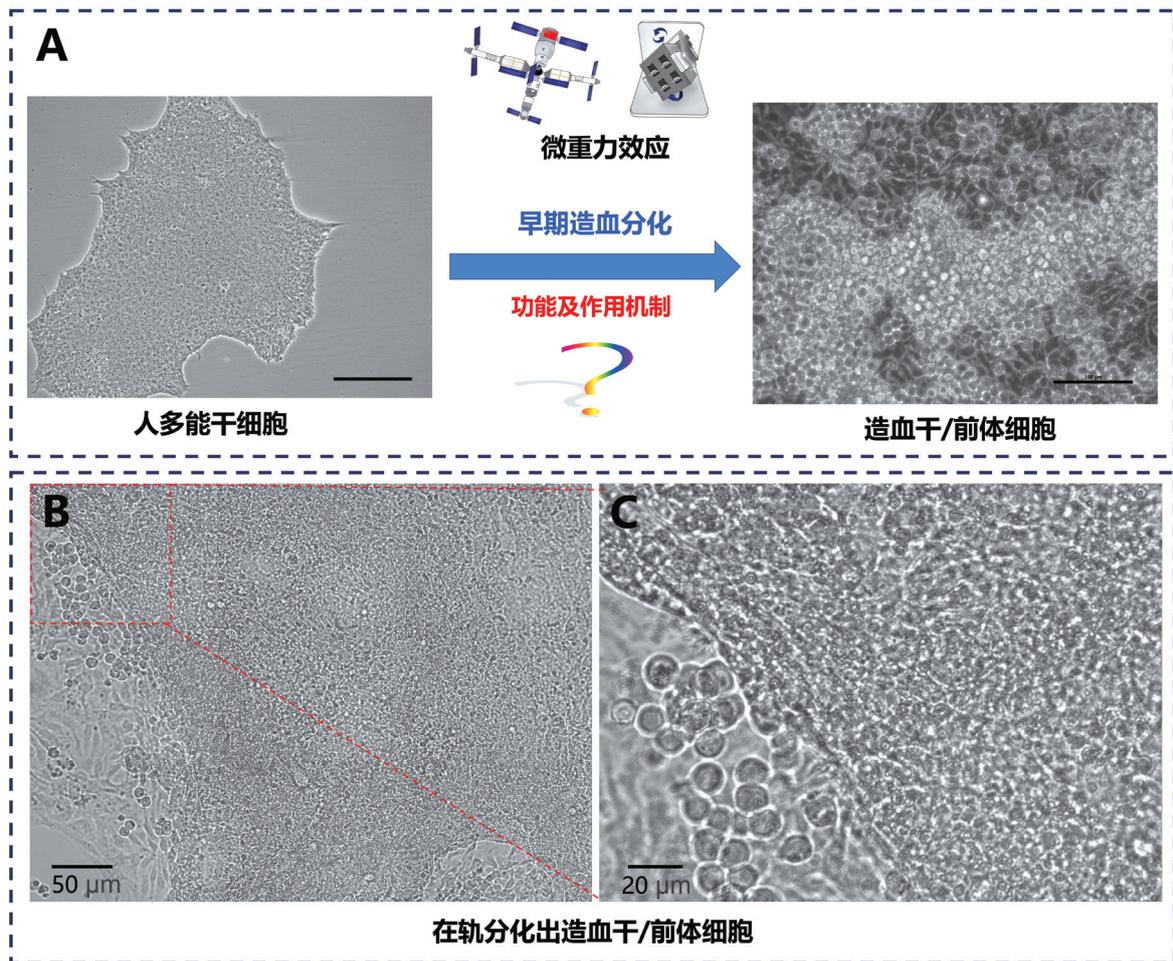


图 2-5 空间微重力下人胚胎干细胞早期造血分化结果

(A) 本研究实验科学问题和假说图，(B) 在轨拍摄分化第 7 天图片，图片为 9 个拍摄位置合并的大视野图，(C) 在轨拍摄分化第 7 天单张放大图片，箭头所示细胞克隆边缘分化鹅卵石样的造血干 / 前体细胞。

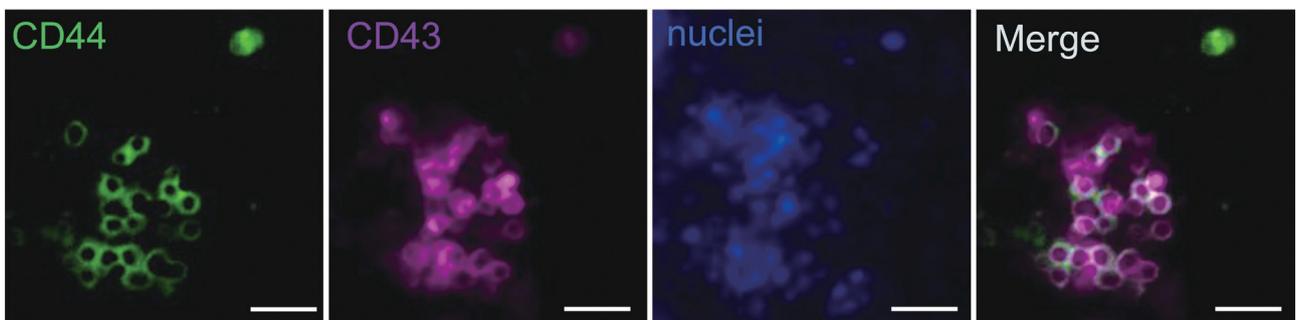


图 2-6 空间站在轨分化的造血细胞返回地面后免疫荧光鉴定

### 空间微重力影响干细胞成骨分化的作用机理

#### The Mechanism Underlying Spatial Microgravity-Induced Dysfunction of the Osteogenic Differentiation of Stem Cells

首次揭示了微重力通过 DNA 甲基化修饰导致细胞代谢重编程、阻碍骨生成并促使脂肪样分化的作用机制，为失重性骨流失防护提供新靶点；开发了基于长链非编码 RNA 的基因与干细胞治疗技术，拓展其在骨损伤修复等领域的临床应用。

#### 研究进展

利用生物技术实验柜开展了人骨髓间充质干细胞成骨诱导分化实验，在国际上首次解析了微重力抑制骨髓间充质干细胞成骨分化的表观调控机制（图 2-7）。通过天地比对实验，发现了微重力环境通过调控 DNA 甲基化修饰，诱导细胞代谢重编程，导致干细胞成骨分化能力显著下降，并促使其转变为脂肪样细胞的作用机制（图 2-8），诠释了航天员在长期失重状态下出现骨量流失的重要成因，筛选并验证了 10 余个潜在分子靶点。开发了基于长链非编码

RNA AC 的基因治疗方法，为骨折修复和骨流失防护提供了新的技术手段。研究成果发表于《Cellular and Molecular of Life Sciences》等国际主流期刊。

#### 应用及前景

针对微重力导致骨流失的分子靶点，可靶向性地开发干预空间骨流失和地面骨质疏松的小分子和干细胞药物，为航天员健康提供新的保障策略。



扫码查看联系方式

#### 代表论文

- [1] Fangwu Liu, Shali Wu, Weibo Zheng, et al. Research and development of cell culture devices aboard the Chinese Space Station [J]. Microgravity Science and Technology. 2024, 36(1). DOI:10.1007/s12217-023-10081-w.
- [2] Cui Zhang, Shali Wu, luyang Yu, et al. ALX1-transcribed LncRNA AC132217.4 promotes osteogenesis and bone healing via IGF-AKT signaling in mesenchymal stem cells [J]. Cell and Molecular Life Sciences. 2022, 79(6):328. DOI:10.1007/s00018-022-04338-7.
- [3] Chen Qiu, Yuan Sun, Jinying Li, et al. A 3d-printed dual driving forces scaffold with self-promoted cell absorption for spinal cord injury repair [J]. Advanced Science (Weinh). 2023, 10(33): e2301639. DOI:10.1002/advs.202301639.

#### 主要完成团队

浙江大学生命科学学院余路阳团队，中国科学院上海技术物理研究所张涛团队。

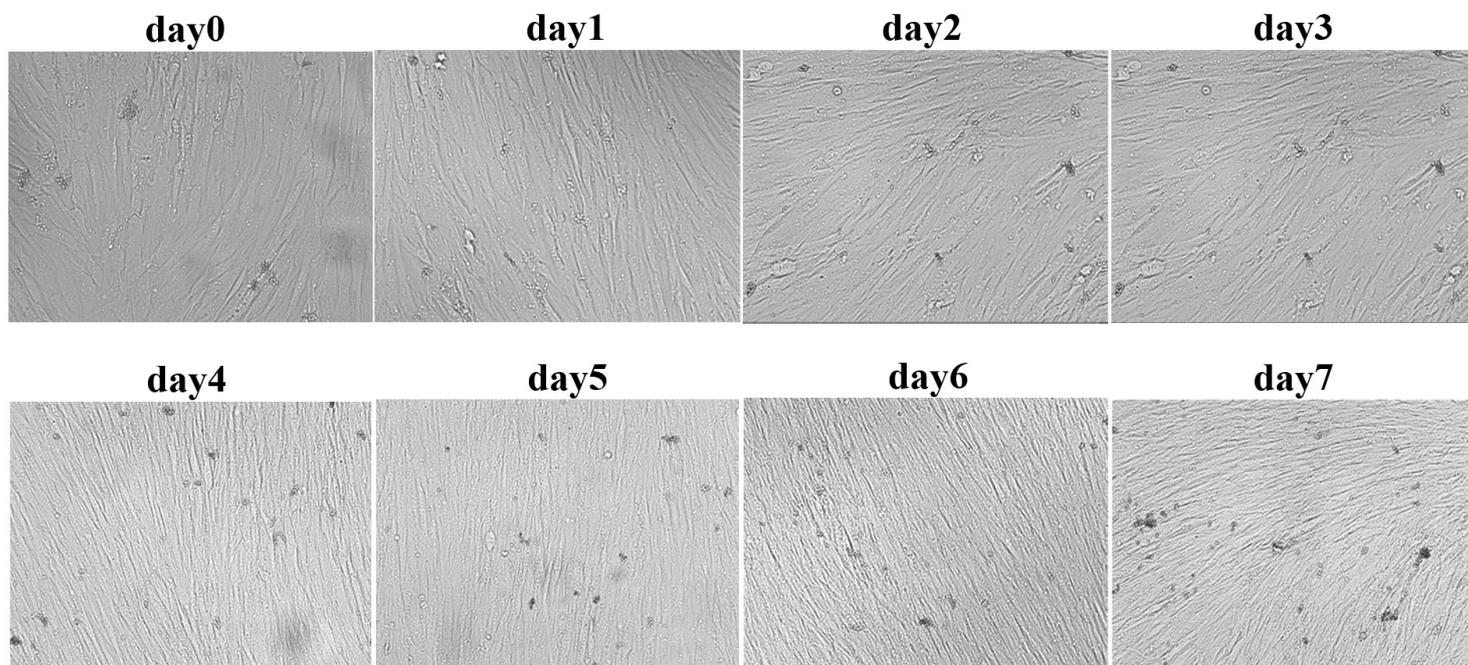


图 2-7 人骨髓间充质干细胞在轨成骨分化实验样本

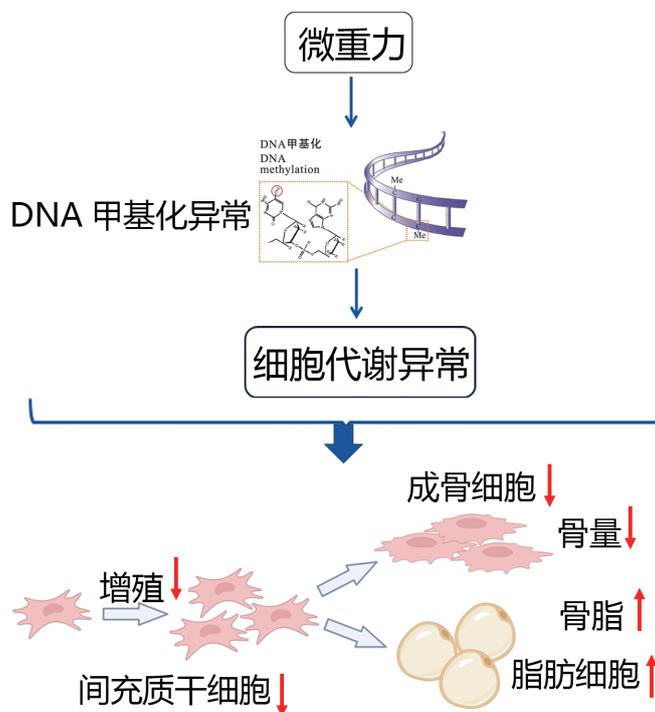


图 2-8 微重力环境下干细胞成骨分化受阻分子机制示意图

本研究发现微重力通过 DNA 甲基化异常引发细胞代谢重编程，抑制间充质干细胞向成骨细胞分化，促使脂肪细胞生成，导致骨量减少、骨脂增加

# 微重力通过影响细胞自噬导致肌萎缩的作用机制

## Mechanism by Which Microgravity Affects Cell Autophagy Leading to Muscle Atrophy

国际上首次实现了骨骼肌细胞自噬的实时检测，发现了空间微重力环境影响细胞自噬的规律和作用机制，从改善自噬流的角度为对抗肌萎缩提供了新的解决方案。

### 研究进展

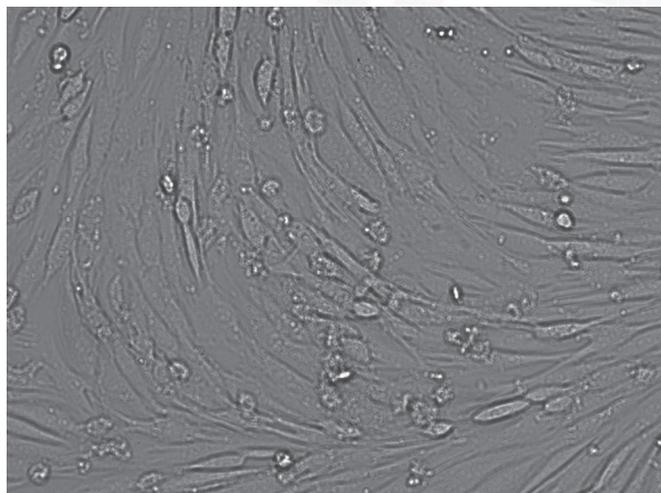
利用生物技术实验柜成功实现了小鼠骨骼肌细胞的在轨培养和分化(图 2-9)，观察到了细胞融合和肌管形成等现象。在国际上首次利用骨骼肌细胞自噬荧光报告系统(图 2-10)，通过天地比对分析发现了空间微重力环境影响骨骼肌细胞自噬的规律。利用高通量测序获得了空间骨骼肌细胞基因表达图谱，发现了空间微重力环境通过影响自噬导致肌萎缩的可能机制及潜在分子靶标。

### 应用及前景

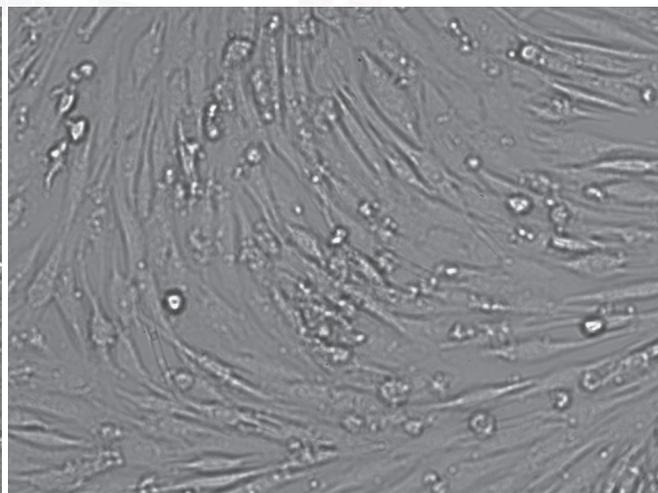
本研究未来有望通过特定药物、调整饮食结构或运动方式等手段来调控自噬流，从而改善航天员的健康状况。研究成果可推广应用于地面的肌少症患者及长期卧床病人，为对抗肌肉萎缩问题提供新的解决方案。



扫码查看联系方式



(a) 在轨培养 48 小时



(b) 在轨培养 84 小时

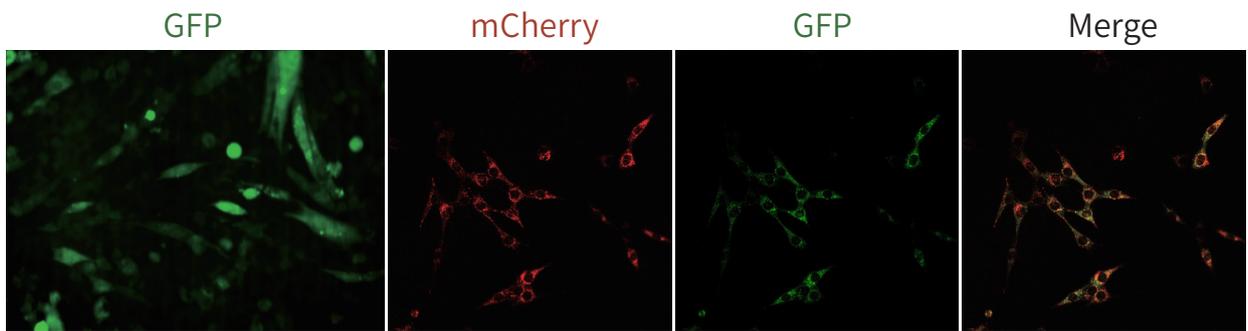
图 2-9 骨骼肌细胞在轨分化实验样本

### 代表论文

[1] Hui Wang, Mei Ma, Yuying Li, et al. miR-183 and miR-96 orchestrate both glucose and fat utilization in skeletal muscle [J]. EMBO Report. 2021, 22(9): e52247. DOI:10.15252/embr.202052247.

### 主要完成团队

中国科学院上海营养与健康研究所营养代谢与食品安全重点实验室应浩团队，中国科学院上海技术物理研究所张涛团队。

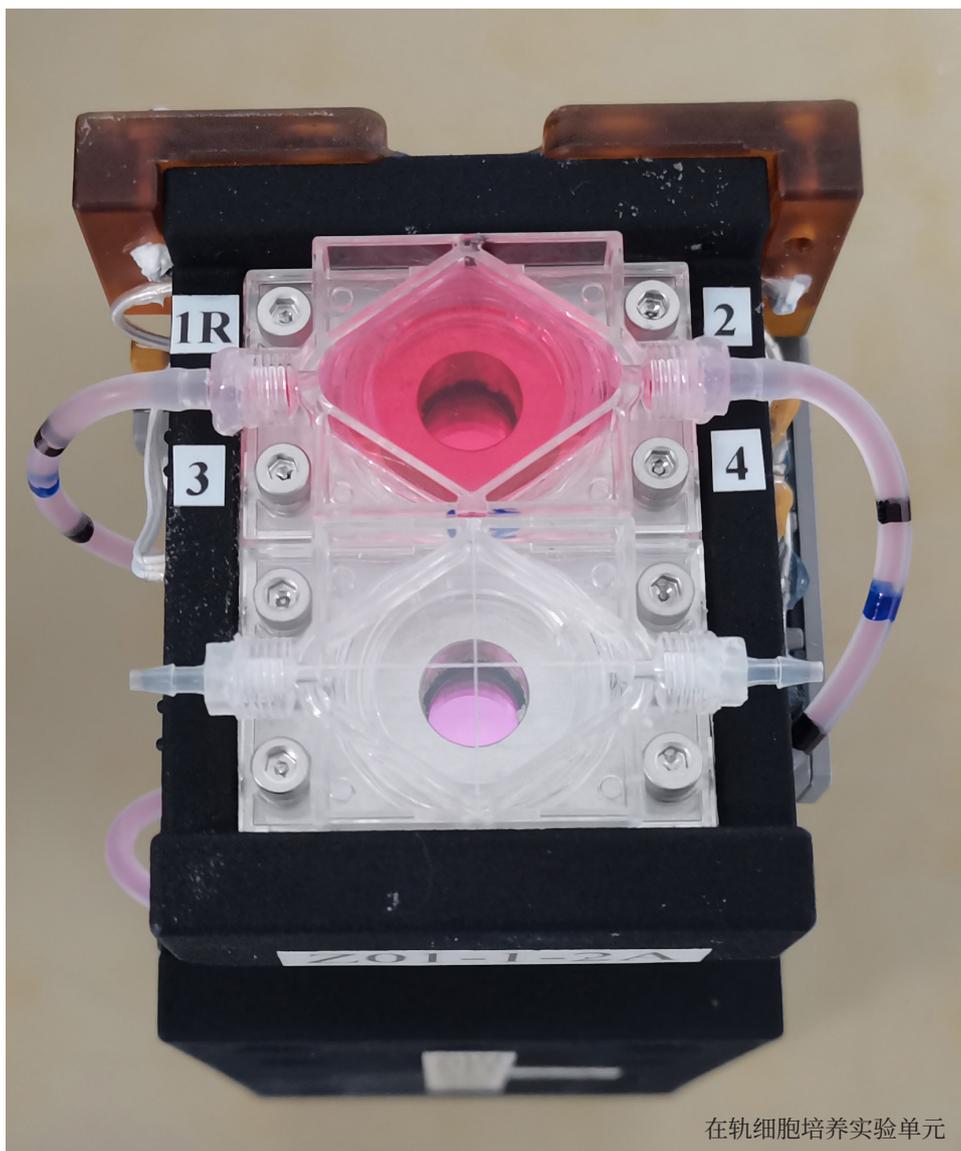


(a) GFP-LC3 在轨荧光拍摄

(b) 地面细胞自噬流检测

图 2-10 骨骼肌细胞实验样品

上图中 (a) 表达 GFP-LC3 融合蛋白的成肌细胞, (b) 表达 mCherry-GFP-LC3 融合蛋白的成肌细胞。



在轨细胞培养实验单元

# 空间单线虫水平自动化跟踪监测微流控系统

## Microfluidic System for Automatic Tracking and Monitoring of *Caenorhabditis elegans* at the Single-Worm Level in Space Environment

构建了线虫空间实验模型体系，研发了空间线虫分析微流控系统并成功在轨验证，首次实现了在轨线虫多品系、单线虫水平自动化长期培养与生长发育及靶分子动态变化监测，为深空原位实施辐射损伤评估和医学防护研究提供了模式动物实验手段。

### 研究进展

开展线虫及其不同突变体多次的空间环境暴露实验，构建了空间辐射与微重力协同效应实验模型，发现了微重力是短期飞行中机体 DNA 损伤修复调控的主要协同因素，揭示了关键的靶基因及参与 DNA 损伤修复调控的 miRNAs，被评述为在该领域建立了关键的实验体系 (Scott et al., 2023. iScience)。为进一步研究长期飞行中空间辐射环境对个体水平全寿命周期的影响，开发了全自动、体积小、重量轻的空间线虫分析微流控系统。

完成了不同品系线虫在同一空间胁迫环境下，不同个体的生长发育、运动和靶分子标志物的动力学变化分析 (图 2-11)。在国际上首

次实现了在同一块微流控芯片上，进行 4 种不同品系线虫多个个体的自动换液和操控，定期对线虫生长发育、运动及荧光蛋白标志物进行监测，本研究成果以封面文章发表在《Lab on a chip》上 (图 2-12)。

### 应用及前景

线虫分析微流控系统为未来深空环境下个体水平的空间辐射与微重力损伤协同生物学效应研究、空间环境模式动物生长生殖、个体辐射损伤敏感性预警和医学防护药物筛选等，提供了在轨实时分析平台。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Lei Zhao, Ge Zhang, Aiping Tang, et al. Microgravity alters the expressions of DNA repair genes and their regulatory miRNAs in space-flown *Caenorhabditis elegans* [J]. Life Sciences in Space Research. 2023, 37: 25-38. DOI:10.1016/j.lssr.2023.02.002.
- [2] Xinye He, Lei Zhao, Aiping Tang, et al. Integrated analysis of miRNAome and transcriptome reveals that microgravity induces the alterations of critical functional gene modules via the regulation of miRNAs in short-term space-flown *C. elegans* [J]. Life Sciences in Space Research. 2024, 42: 117-132. DOI:10.1016/j.lssr.2024.07.001.
- [3] Qianqian Yang, Runtao Zhong, Wenbo Chang, et al. WormSpace  $\mu$ -TAS enabling automated on-chip multi-strain culturing and multi-function imaging of *Caenorhabditis elegans* at the single-worm level on the China Space Station [J]. Lab on a Chip. 2024, 24: 3388-3402. DOI:10.1039/d4lc00210e.

### 代表专利

- [1] 钟润涛, 杨倩倩, 刘清清, 等. 一种便携式单线虫并行分析微流控芯片系统及其使用方法. 发明专利. 专利号: ZL201911286519.X. 授权日期: 2024 年 1 月 26 日.
- [2] 钟润涛, 杨倩倩, 刘清清, 等. 一种基于离心微流控技术的高通量单线虫分析装置及其使用方法. 发明专利. 专利号: ZL201911285621.8. 授权日期: 2023 年 11 月 24 日.

### 主要完成团队

大连海事大学孙野青团队, 中国科学院上海技术物理研究所张涛团队, 中国科学院国家空间科学中心王超团队。

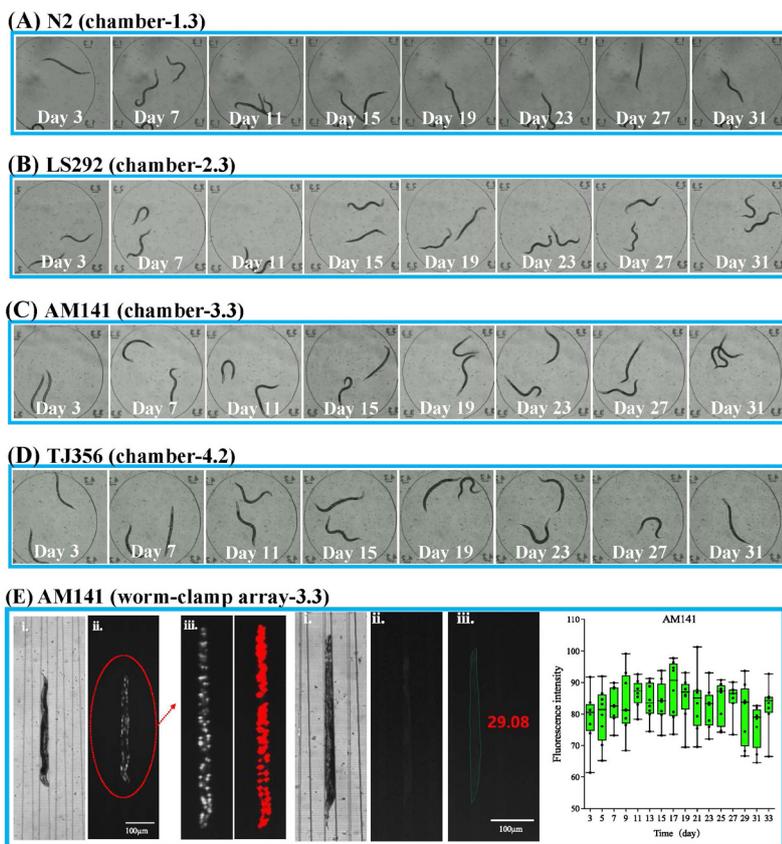


图 2-11 在轨线虫监测结果

4 种品系线虫在轨一个月录像截图 (A-D) 及  
荧光线虫 AM141 捕获成像结果分析与统计 (E)



图 2-12 发表在 Lab on a Chip 杂志封面上的  
空间线虫分析微流控系统示意图

图意为重量仅为 2.8 Kg 的线虫芯片实验盒由  
航天员插入实验柜, 即可开展在轨自动化线  
虫监测, 获得的线虫视频及图片定期上传至  
地面进行分析

Showcasing research from Prof. Runtao Zhong and Prof. Yeqing Sun's research group, Institute of Environmental Systems Biology, University of Dalian Maritime University, Dalian, China.

WormSpace  $\mu$ -TAS enabling automated on-chip multi-strain culturing and multi-function imaging of *Caenorhabditis elegans* at the single-worm level on the China Space Station

This work introduces the WormSpace  $\mu$ -TAS, a fully integrated microfluidic system designed for automated on-chip multi-strain culturing and multi-function imaging of *C. elegans* at the single-worm level aboard the China Space Station (CSS). The system has been successfully applied to the CSS, from launch of the WormChip cartridge through in-orbit operation and automated 30-day experiment, to return of the fixed samples to Earth. It will provide a novel experimental platform for studying the biological effects of space radiation and microgravity, and for developing protective drugs.

As featured in:



See Yeqing Sun et al., Lab Chip, 2024, 24, 3388.

## 2. 空间生命科学与人体研究领域

### 2.1 空间生命科学与生物技术

(一) 微重力下利用开花基因调控植物开花时间的分子途径 .....	5
(二) 空间站水生生态系统在轨稳定运行及斑马鱼培养 .....	7
(三) 空间微重力下人胚胎干细胞早期造血分化 .....	9
(四) 空间微重力影响干细胞成骨分化的作用机理 .....	11
(五) 微重力通过影响细胞自噬导致肌萎缩的作用机制 .....	13
(六) 空间单线虫水平自动化跟踪监测微流控系统 .....	15

### 2.2 太空人体研究

(一) 骨骼相关生理系统协同调控与空间骨丢失防护技术研究 .....	19
(二) 代谢重塑调控心肌细胞微重力效应的分子机制研究 .....	21
(三) 基于器官芯片的失重心血管功能变化机制与防护研究 .....	23
(四) 航天员在轨脑功能评估与调节技术研究 .....	25
(五) 中医特色的航天员健康评价与防护新技术研究 .....	27
(六) 长期飞行肌肉功能适应性变化规律与机制研究 .....	29
(七) 空间站双光子显微镜的研制及在轨应用 .....	31



太空人体研究方向主要开展了长期失重 / 空间辐射对航天员健康影响与防护技术、航天员行为与能力、先进在轨监测与医学处置技术、传统医学航天应用技术等研究，揭示机体从整体到细胞分子等不同水平适应空间微重力和辐射环境的生理过程与调控、中医证机变化特性等，阐释空间飞行对航天员工作能力与认知、人机交互特性等影响规律，探寻健康与能力维护新技术，在认知和减控航天医学风险，丰富发展航天医学理论，搭建新的技术平台等方面取得丰硕成果。

各项目团队在领域总体单位中国航天员科研训练中心的指导下，通过天地结合系统研究，自主研发的便携式骨丢失对抗仪、穿戴式穴位刺激装置已成功作为失重防护新措施应用于飞行任务，建立的肌肉结构功能、营养代谢客观无创评估方法为在轨健康评估提供了详实客观数据。在国际上获得了一系列航天员生理机能和作业能力变化的原创性发现，揭示成骨细胞力感受及与破骨细胞“串话”调控、失重心肌结构功能变化的代谢重塑、空间肌萎缩和肌少症的肌卫星细胞分化障碍等新机制；首次将人工血管芯片送入太空，完成了对抗血管损伤的黄酮类小分子化合物筛选，入选 2023 年度中国生命科学领域十大进展；研制了空间站双光子显微镜，首次实现了在轨皮肤细胞分子水平变化的在体呈现；视功能变化研究结果反映了我国航天医学保障的独特优势；构建了航天飞行航天员行为能力研究与维护调节的新范式；突破了在轨脑功能实时评估和快速有效在轨调节技术，探索了面向复杂任务操作的自适应人机协作新方法等。

# 骨骼相关生理系统协同调控与空间骨丢失防护技术研究

## Research on the Coordinated Regulation of Skeletal-Related Physiology Systems and Countermeasures for Space Bone Loss

针对长期失重导致骨丢失难题，自主研发骨丢失对抗技术，首次揭示失重条件下成骨细胞微丝解聚的力-生化偶联机制，解析 PIEZO1 介导力学刺激调控成骨细胞与破骨细胞串话机制，成果已应用于航天员失重防护等任务保障。

### 研究进展

国际上首次分析了长期飞行航天员骨代谢影响糖脂代谢的规律及机制（图 2-13a），发现长期飞行降低钙磷调节能力、减弱骨形成能力，促进部分骨吸收活性，完善力学刺激-骨重建-其他组织交互调控-适应新环境的观点。通过空间细胞学实验，发现微丝解聚引起的 BMP2-smad 信号和 PI3K-FoxK1-糖酵解-AMPK-骨形成和羧化相关基因表达等调控通路之间的关联性，为力-生化偶联学说提供新证据（图 2-13b）。发现骨骼系统新型骨膜干细胞，发现 Piezo1 在成骨细胞中通过 YAP 途径影响胞外基质多种胶原蛋白的丰度，影响破骨细胞的分化和功能（图 2-13c），为骨骼退变和再生修复提供力学调控靶点，为进一步开发成具有我国自主知识产权的 Piezo1 激动剂用于防治废用型骨质疏松等疾病的特效药奠定基础。

基于骨液流剪切力作用原理，自主研发骨

丢失对抗仪，通过短时、高频、低幅的直接力刺激作用于下肢胫骨，有效促进成骨细胞活性，抑制骨丢失。经 5 次长期飞行任务的 180 余人次在轨使用验证（图 2-14），可有效减缓航天员骨密度下降率。该技术具有无创、高效、使用便捷等特点，已作为失重防护新措施在神舟十八号飞行任务中应用。

### 应用及前景

骨丢失对抗仪具有无创、高效、使用便捷等特点，已应用于神舟十八号飞行任务，并成为后续飞行任务的防护措施构成；对于地面老年骨质疏松症患者等人群的辅助治疗具有良好应用前景。基于 PIEZO1 及其下游通路如基质蛋白等是废用性骨丢失的治疗靶点的发现，研发 PIEZO1 蛋白的激动剂可作为空间骨丢失防护、废用型骨质疏松等疾病治疗的潜在方法。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Wenhui Xing, Bo O Zhou, Weiguo Zou, et al. Identification of a periosteal Itm2a-expressing skeletal stem cell contributing to bone fracture healing [J]. Journal of Clinical Investigation. 2024, 134(17): e176528. DOI:10.1172/JCI1176528.
- [2] Zihan Xu, Chao Yang, Feng Wu, et al. Triple-gene deletion for osteocalcin significantly impairs the alignment of hydroxyapatite crystals and collagen in mice [J]. Frontiers in Physiology. 2023, 14:1136561. DOI:10.3389/fphys.2023.1136561.
- [3] Lijun W, Xiuling Y, Weiguo Z, et al. Mechanical sensing protein PIEZO1 regulates bone homeostasis via osteoblast-osteoclast crosstalk [J]. Nature Communications. 2020, 11:282. DOI:10.1038/s41467-019-14146-6.

### 主要完成团队

中国航天员科研训练中心航天医学全国重点实验室张洪玉团队，中国科学院分子细胞科学卓越创新中心邹卫国团队。



# 代谢重塑调控心肌细胞微重力效应的分子机制研究

## Research on the Molecular Mechanism of Metabolic Remodeling in Regulating Microgravity Effects on Cardiomyocytes

聚焦微重力诱导心血管功能障碍的突出问题，开展人尿液细胞重编程多能干细胞分化心肌细胞的在轨研究，获得心肌细胞适应性改变表型，解析代谢重塑调控心肌细胞微重力效应分子机制，相关内容已发表在高影响力学术期刊。

### 研究进展

在国际上首次实现人心肌细胞钙荧光信号在轨实时监控和分析，发现空间微重力可造成心肌细胞搏动频率降低，细胞骨架紊乱和钙循环失衡。通过开展多组学解析发现代谢重塑是其发生适应性改变的重要诱因，而硫胺素摄取是调控微重力环境下心肌细胞能量代谢和适应性改变的潜在靶点。通过天基和地基实验结合，首次表明补充硫胺素可改善人心肌细胞和小鼠心脏的功能表现，未来有望通过调控硫胺酸摄取和代谢改善航天员微重力适应性，加速太空飞行后心血管功能恢复（图 2-15）。本研究已发表数篇论文，空间细胞实验主要成果发表于《Signal Transduction and Targeted Therapy》高影响力学术期刊，获得“论道心血管”、“我们的太空”等多个公众号报道转载（图 2-16）。研究成果被大量引用，其

中发表于《Biosensors and Bioelectronics》的“A simulated microgravity-oriented AIE probe-ECM hydrogel-integrated chip for cell culture and superoxide anion radical detection”评论：空间环境易造成长期累积损伤效应，本研究使用钙离子探针可实现活细胞的长期监测，并有效降低航天员的操作负担。

### 应用及前景

本研究证实硫胺素在模拟微重力环境下，可提高心肌细胞的能量代谢水平，并改善心肌细胞以及心脏功能表现。未来经过充分评估和论证后，有望通过调控硫胺酸摄取和代谢改善航天员的微重力适应性，加速太空飞行后心血管功能恢复，并有望在人体其他生理系统的微重力效应中拓展应用。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Xinglong Han, Lina Qu, Miao Yu, et al. Thiamine-modified metabolic reprogramming of human pluripotent stem cell-derived cardiomyocyte under space microgravity [J]. Signal Transduction Target Therapy. 2024, 9(1):86. DOI:10.1038/s41392-024-01791-7.
- [2] Zhuangzhuang Yang, Miao Yu, Xuechun Li, et al. Retinoic acid inhibits the angiogenesis of human embryonic stem cell-derived endothelial cells by activating FBP1-mediated gluconeogenesis [J]. Stem Cell Research Therapy. 2022, 13(1):239. DOI:10.1186/s13287-022-02908-x.
- [3] Yong Wang, Wei Lei, Jingsi Yang et al. The updated view on induced pluripotent stem cells for cardiovascular precision medicine [J]. Pflügers Archiv - European Journal of Physiology. 2021, 473(7):1137-1149. DOI:10.1007/s00424-021-02530-5.

### 主要完成团队

苏州大学胡士军队。

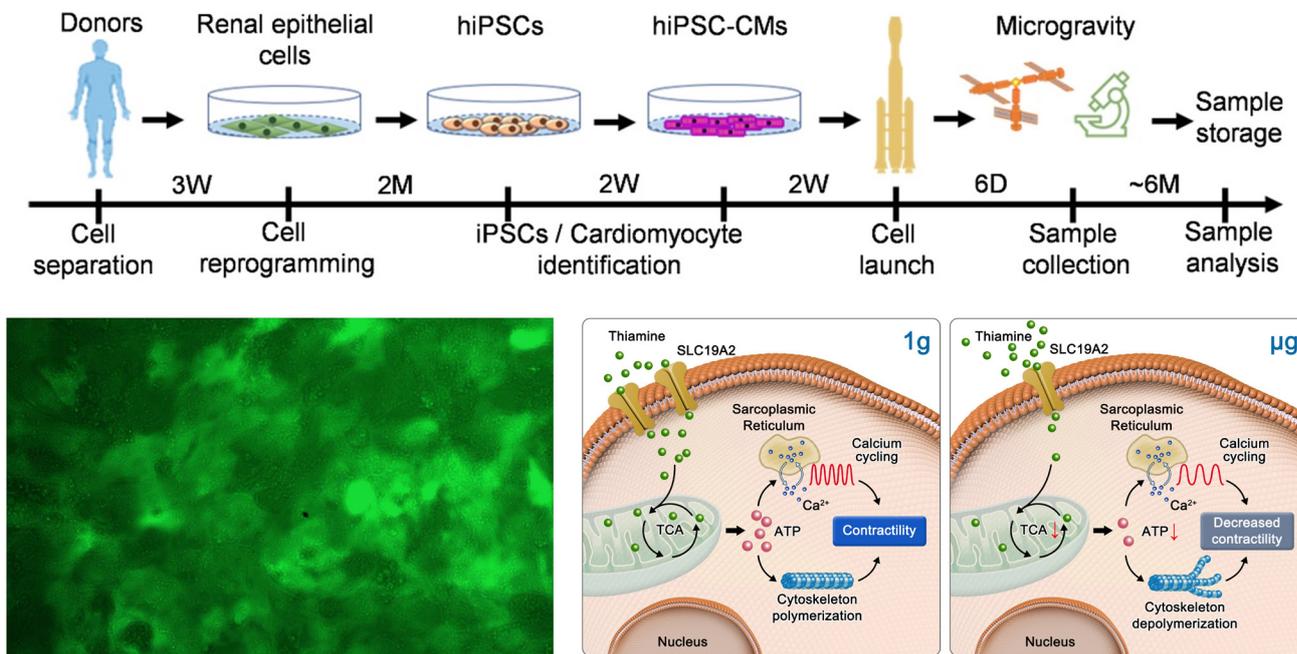


图 2-15 硫胺素在空间微重力下维持心肌细胞稳态的重要作用

This block contains academic and media content. On the left is the cover of BMC Stem Cell Research Therapy. In the center is the article 'Thiamine-modified metabolic reprogramming of human pluripotent stem cell-derived cardiomyocyte under space microgravity' in Signal Transduction and Targeted Therapy. On the right is a media report titled '从“心”出发，揭示太空人类生命现象变化本质——中国空间站首次活细胞研究获得突破性进展'.

图 2-16 相关论文发表和媒体报道

代表专利

- [1] 肖森, 刘青华, 唐明亮, 等. 一种基于鱼鳞基底构建工程化智能心肌组织的方法. 发明专利. 专利号: ZL202210337408.2. 授权日期: 2023 年 11 月 28 日.
- [2] 胡士军, 雷伟, 杨静思, 等. 间歇性饥饿促进心肌细胞成熟的方法. 发明专利. 专利号: ZL2021110559884.4. 授权日期: 2023 年 3 月 24 日.
- [3] 雷伟, 胡士军, 沈振亚, 等. 一种诱导人源动脉内皮细胞的分化方法. 发明专利. 专利号: ZL202111154289.9. 授权日期: 2023 年 1 月 17 日.

### 基于器官芯片的失重心血管功能变化机制与防护研究

#### Research on the Prevention of the Mechanism of Weightlessness and Cardiovascular Function Change Based on Organ-on-a-Chip

聚焦航天员长期航天飞行后重力环境再暴露导致的机体立位耐力不良等心血管系统失调，构建适用于空间实验的高仿真人工血管芯片，从器官和分子水平解析其发生机制，筛选出有防护效果的小分子化合物。

#### 研究进展

该项目是我国首个“太空器官芯片”研究项目，亦是国际上首次开展太空人体血管研究的器官芯片项目，实验从血管组织的水平上研究和发现了空间微重力因素对动脉血管组织重构、功能性以及细胞活性和氧化应激、机械信号等多条信号通路的影响，揭示了血管平滑肌和内皮在失重环境下激活、凋亡过程和血管 ECM 降解等的细胞学机制；通过空间药物筛选，获得了对血管损伤具有一定保护作用的黄酮醇类小分子化合物。本研究的实施是我国发展系列的太空人体器官芯片工作的最初成果和成功示范，亦为科学有效的对抗航天员器官损伤和防护方法提供了理论和实验依据。该项目的成功开展表明我国已具备在轨开展器官芯片相关项目实

验研究的能力，是将空间生物医学实验从 2D 细胞到 3D 组织器官实验的提升。相关研究内容已发表 SCI 6 篇，获批专利 5 项，同时该项目相关成果荣获 2023 年度中国生命科学领域十大进展（图 2-17）

#### 应用及前景

本研究相关成果已推广至其他组织类型器官芯片的在轨应用研究，同时本团队在此基础上成功构建了国内第一、国际第二个器官芯片的数据库（Organ on a Chip DataBase, OCDB）。在未来的应用中，有望将器官芯片的相关研究推广至空间微重力、空间辐射等多领域实验研究，助力我国航天医学及医学工程实验领域高效、快速发展。



扫码查看联系方式

#### 代表论文

- [1] Qiwei Li, Chunyan Wang, Xiaoran Li, et al. Epidermis-on-a-chip system to develop skin barrier and melanin mimicking model. [J] Journal of Tissue Engineering. 2023, 14:1-13. DOI:10.1177/20417314231168529.
- [2] Xuan Du, Zaozao Chen, Qiwei Li, et al. Organoids revealed: morphological analysis of the profound next generation in-vitro model with artificial intelligence [J]. Bio-Design and Manufacturing. 2023, 6(3):319-339. DOI:10.1007/s42242-022-00226-y.
- [3] Liang Wang, Zaozao Chen, Zuoyue Xu, et al. A new approach of using organ-on-a-chip and fluid-structure interaction modeling to investigate biomechanical characteristics in tissue-engineered blood vessels. [J] Frontiers Physiology. 2023, 14:1210826. DOI:10.3389/fphys.2023. 1210826.

#### 主要完成团队

东南大学顾忠泽团队，中国航天员科研训练中心航天医学全国重点实验室王春艳团队。

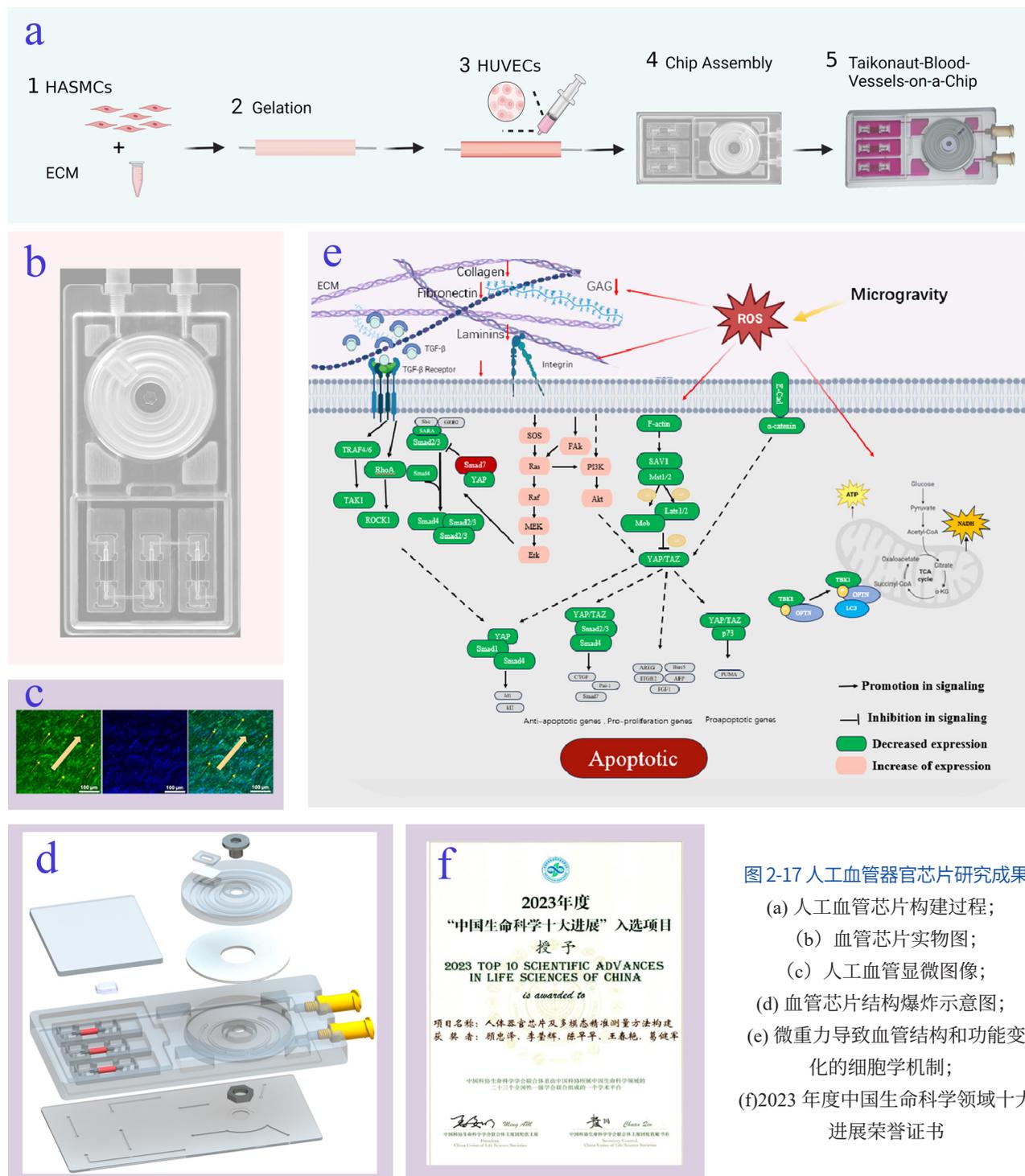


图 2-17 人工血管器官芯片研究成果

(a) 人工血管芯片构建过程;

(b) 血管芯片实物图;

(c) 人工血管显微图像;

(d) 血管芯片结构爆炸示意图;

(e) 微重力导致血管结构和功能变化的细胞学机制;

(f) 2023 年度中国生命科学领域十大进展荣誉证书

代表专利

- [1] 顾忠泽, 陈早早, 朱建峰, 等. 一种人造血管生成模具及培育系统. 实用新型专利. 专利号: ZL2019200761937. 授权日期: 2020 年 5 月 1 日.
- [2] 陈早早, 顾忠泽, 葛健军, 等. 一种分叉血管模型及其制备方法. 发明专利. 专利号: ZL201910048903X. 授权日期: 2020 年 7 月 7 日.
- [3] 陈早早, 顾忠泽, 欧阳珺, 等. 血管培养芯片. 外观专利. 专利号: ZL2023302986104. 授权日期: 2023 年 10 月 20 日.

### 航天员在轨脑功能评估与调节技术研究

#### Research on Brain Function Assessment and Regulation Technology for Astronauts in Spaceflight

围绕脑力负荷、脑力疲劳、警觉度等脑功能状态指标，突破了具有完全自主知识产权的空间站脑功能评估与调节技术，揭示了空间飞行对航天员脑功能的影响规律，为航天员脑功能状态的维持与增强提供了技术支撑。

#### 研究进展

围绕长期空间飞行任务航天员脑功能快速实时评估、动态调节的重大需求，突破了跨时间和跨重力环境的快速脑功能状态解码和多模态警觉度调节技术，开发了航天员在轨脑力负荷实时监测与自适应人机协作系统、航天员脑力疲劳与警觉度快速评估与增强装置。空间站任务在轨实验显示，所构建的脑功能状态评估技术具有高识别度、高稳定性、高空间环境适用性，实现了四个等级的脑力负荷识别和三种人机分配方式的实时调节（图 2-18），构建了包含声、光、温三种模态的警觉度物理调控系统和基于正念冥想的警觉度调节平台，能够优化长期空间飞行航天员的脑力负荷、提升人机协作效率

#### 应用及前景

和警觉度（图 2-19）。长期在轨实验揭示了空间复合因素对航天员脑力负荷敏感脑电特征的影响规律，阐明了航天员警觉度变化规律与机理。

本成果提出和验证了航天员脑功能状态快速评估与调节技术，并提出了自适应自动化人机功能分配策略，为载人航天任务中航天员脑功能状态的检测、维持和保障，以及实现更安全、更有效的人机协作提供了技术支撑。同时，脑力负荷和疲劳客观评估技术也可推广应用至各类神经人因学研究和人员状态监测中。



扫码查看联系方式

#### 代表论文

- [1] Peng Zhang, Zhongqi Liu, Hongqiang Yu, et al. Extreme conditions affect neuronal oscillations of cerebral cortices in humans in the China Space Station and on earth [J]. Communications Biology. 2022, 5: 1041. DOI:0.1038/s42003-022-04018-z.
- [2] Yufeng Ke, Tao Jiang, Shuang Liu, et al. Cross-task consistency of electroencephalography-based mental workload indicators: comparisons between power spectral density and task-irrelevant auditory event-related potentials [J]. Frontiers in Neuroscience. 2021, 15: 703139. DOI:10.3389/fnins.2021.703139.
- [3] Ying Yin, Shufang Chen, Tao Song, et al. Cognitive load moderates the effects of total sleep deprivation on working memory: evidence from event-related potentials [J]. Brain Sciences. 2023, 13(6): 898. DOI:10.3390/brainsci13060898.

#### 主要完成团队

中国航天员科研训练中心人因工程全国重点实验室焦学军团队，天津大学明东团队，北京航空航天大学周前祥团队，南京大学周仁来团队。

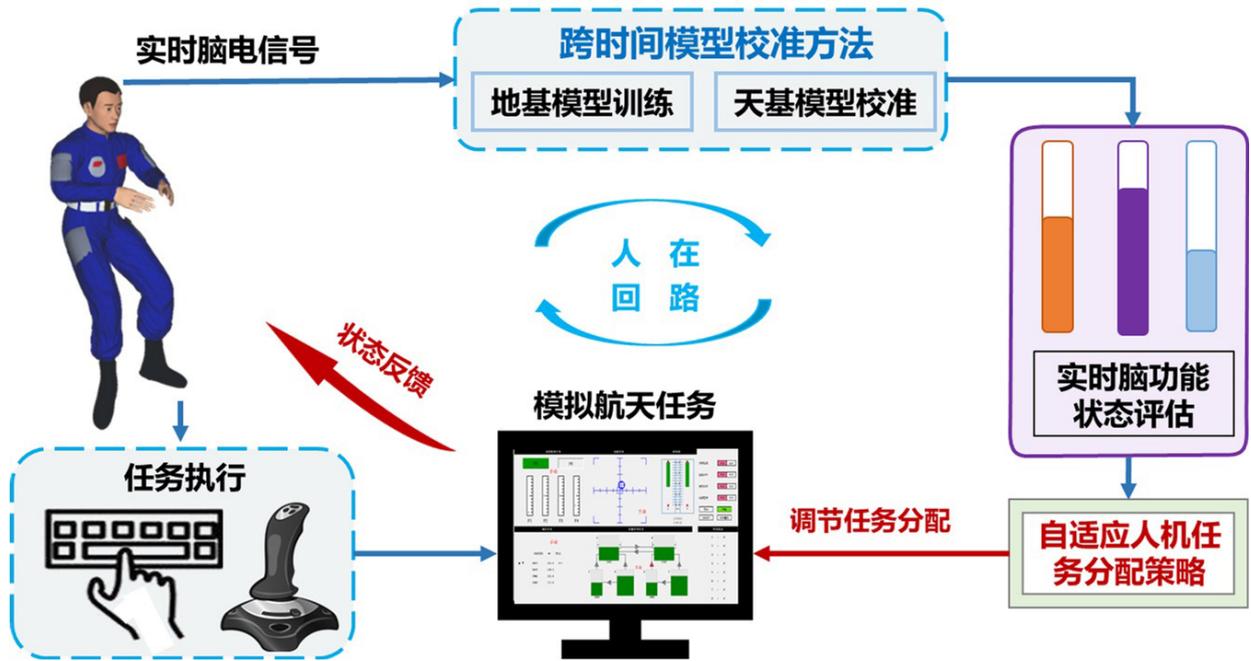


图 2-18 基于操作者功能状态的人机功能分配策略与动态调节技术

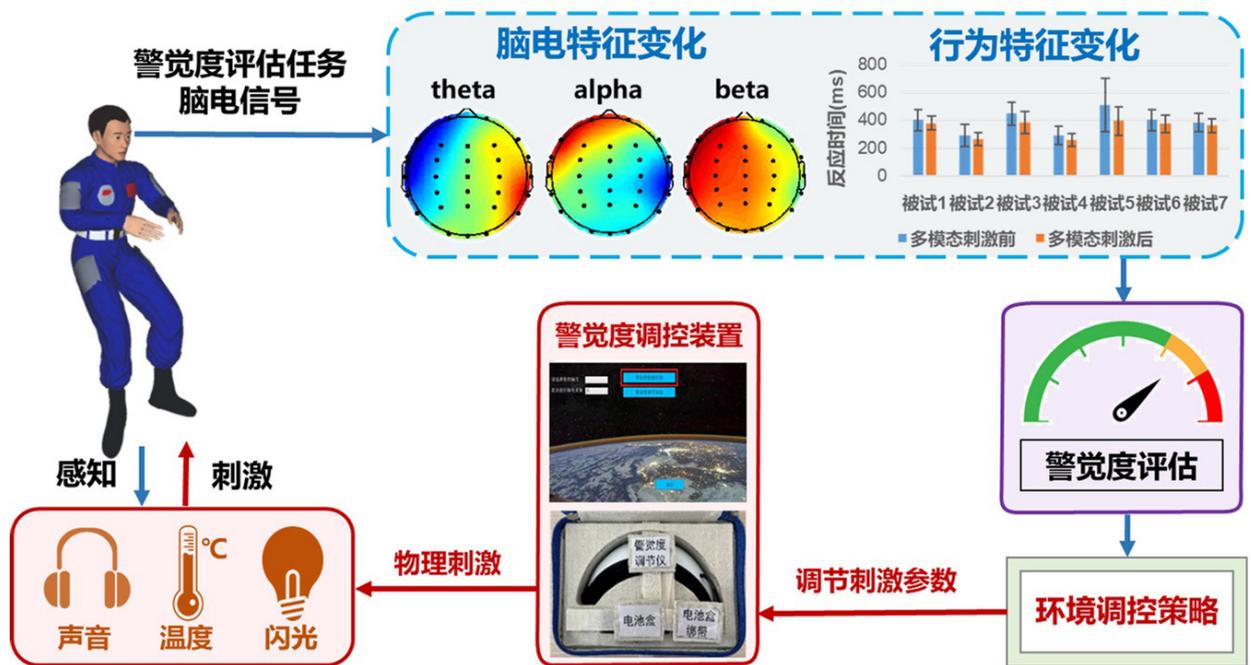


图 2-19 不同物理刺激对警觉度调控效果及在轨警觉度调节仪研发

代表专利

- [1] 刘金鑫, 王慧泉, 钟楚伟, 等. 一种多物理场疲劳干预方法和装置. 发明专利. 专利号: ZL202210875479.8. 授权日期: 2023 年 4 月 18 日.
- [2] 王慧泉, 胡猛, 于蒙蒙, 等. 一种脑力疲劳干预设备. 实用新型专利. 专利号: ZL202021066890.3. 授权日期: 2021 年 1 月 12 日.
- [3] 周鹏, 杨成, 朱智文. 一种基于光电脉搏反馈的大脑警觉度调控装置及方法. 发明专利. 专利号: ZL201911037218.3. 授权日期: 2020 年 2 月 21 日.

### 中医特色的航天员健康评价与防护新技术研究

#### Research on New Technologies for Astronaut Health Evaluation and Protection with Traditional Chinese Medicine Characteristics

聚焦长期航天飞行主要医学问题，探索航天飞行中医证机，揭示长期飞行人体整体功能状态特点和规律，研发基于穴位刺激的失重生理效应防护措施，并已应用于航天员失重生理效应防护任务保障。

#### 研究进展

利用在轨中医四诊仪数字化中医诊断信息，研究建立在轨飞行人体面色、舌象、脉象分析技术，发现了长期飞行阴阳平基础上的8种中医证型表现等体内平衡态微妙变化，揭示了其与植物神经功能间的关联（图 2-20），为长期飞行航天员在轨健康监测、评估、预警提供了新的方法。将中医针灸和现代科技有机结合，突破了针灸技术在轨应用的难题，研制了穿戴式穴位刺激服及便携式穴位刺激装置（图 2-21），基于中医证型可能变化形成腧穴配伍和穴位刺激防护处方，完成六次飞行两百余人次的在轨应用，穴位定位准、集成度高、功耗低、可循环使用，

实现了多系统、多组穴的综合灵活处方调理，在人体健康稳定调节和维护上具有鲜明优势。穿戴式穴位刺激装置已作为失重防护新措施在神舟十八号飞行任务中应用，对地面衰老退行性疾病的辅助治疗也具有良好应用前景。

#### 应用及前景

成果已应用于神舟十八号飞行任务，并成为后续飞行任务防护措施的组成部分；还可应用于极地科考、航海、潜艇、密闭环境、卧床实验等人员整体健康状态评价与医学防护，对地面心血管疾病、衰老退行性疾病的辅助治疗也具有良好应用前景。



扫码查看联系方式

#### 代表论文

- [1] Xiao-jing Guo, Shi-xuan Dai, Jin-di Lou, et al. Distribution characteristics of oral microbiota and its relationship with intestinal microbiota in patients with type 2 diabetes mellitus [J].Frontiers in endocrinology. 2023, 14:1119201. DOI:10.3389/fendo.2023.1119201.
- [2] Yulin Shi, Dandan Guo, Yi Chun, et al. A lung cancer risk warning model based on tongue images [J].Frontiers in Physiology. 2023, 14: 1154294. DOI:10.3389/fphys.2023.1154294.
- [3] Shiqi Guo, Guozhen Zhao, Xueming Chen, et al. Effect of transcutaneous electrical acupoint stimulation on bone metabolism in patients with immobilisation after foot and ankle fracture surgery: a randomised controlled trial study protocol [J]. British Medical Journal Open. 2022, 12(9):e056691. DOI:10.1136/bmjopen-2021-056691.

#### 主要完成团队

中国航天员科研训练中心航天医学全国重点实验室戴小倩团队、石宏志团队，北京中医药大学赵百孝团队，天津中医药大学郭义团队，上海中医药大学许家侗团队。

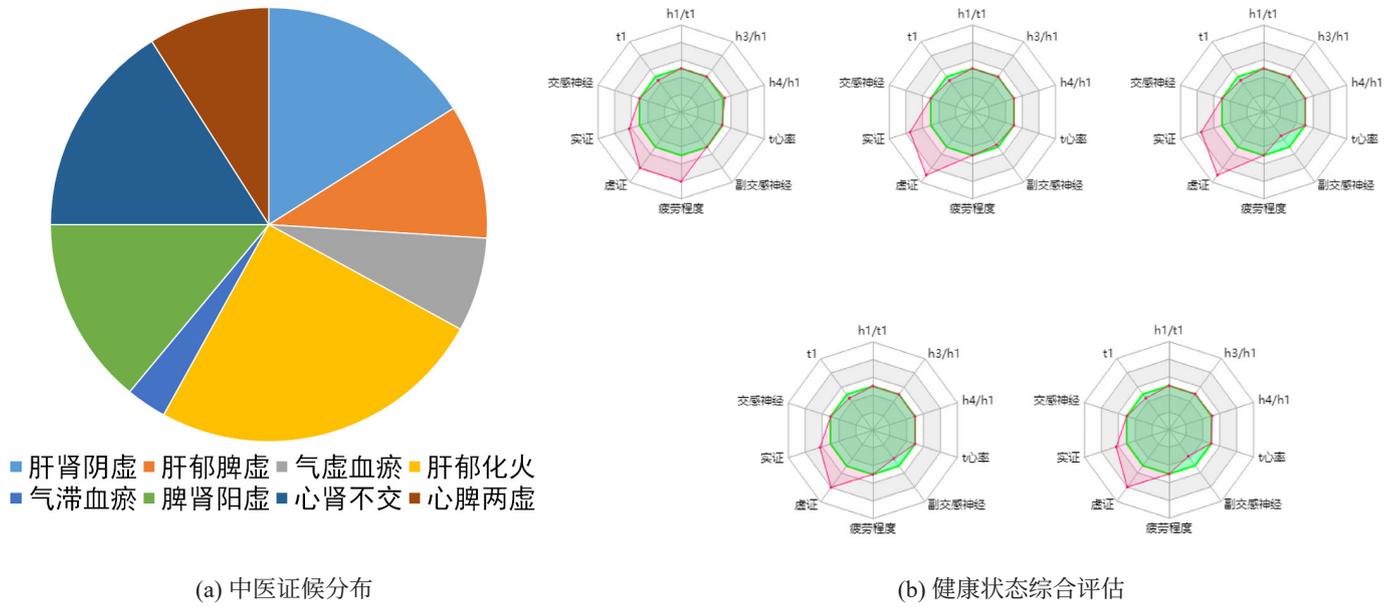


图 2-20 航天飞行期间中医证候分布及健康状态综合评估

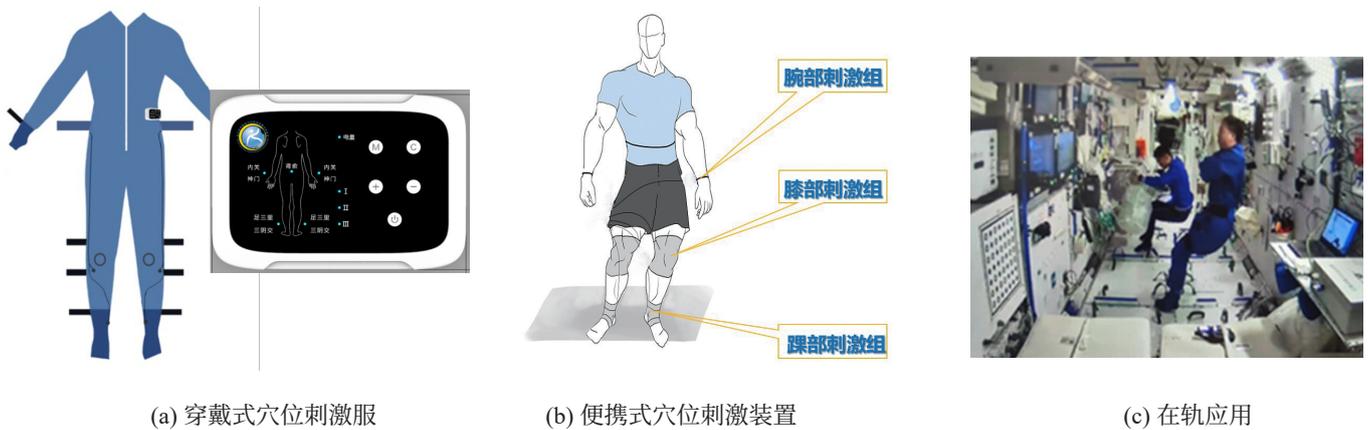


图 2-21 穴位刺激服及便携式穴位刺激装置在轨使用

代表  
专利

- [1] 郭义, 席强, 周鹏, 等. 经皮穴位电刺激装置. 实用新型专利. 专利号: ZL202320568694.3. 授权日期: 2024 年 2 月 20 日.
- [2] 许家佗, 罗志宇, 李军, 等. 基于深度学习的脉图质量检测方法. 发明专利. 专利号: ZL202110735237.4. 授权日期: 2023 年 12 月 8 日.
- [3] 许家佗, 江涛, 屠立平, 等. 基于高速数字显微镜器件的面舌望诊 3D 成像装置. 实用新型专利. 专利号: ZL2022 2 3402017.9. 授权日期: 2023 年 9 月 26 日.

# 长期飞行肌肉功能适应性变化规律与机制研究

## Mechanisms of Muscle Function Adaptation to Long Term Space Flight

开展失重性肌萎缩研究，首次发现肌萎缩的骨骼肌卫星细胞分化障碍机制，成果发表在《Cell》等顶级期刊，获取长期飞行肌萎缩特征及规律，有效支撑航天员在轨失重防护，评估技术已应用于航天员失重生理效应防护任务保障。

### 研究进展

聚焦长期航天飞行影响航天员健康的肌肉萎缩防护关键问题，空间站任务中组织开展了肌萎缩调控机制、在轨运动生物力学特征、肌肉结构和功能变化规律等研究。建立了人骨骼肌卫星细胞空间培养与分化研究系统，发现了长期微重力肌萎缩的骨骼肌卫星细胞分化障碍机制，首次揭示了有相似表征的杜氏肌营养不良症（DMD）的肌肉组织微环境异常、单核细胞组成变化和干细胞功能失调的致病机制（图 2-22）为失重性肌萎缩调控机制研究和防护措施研制提供了新的思路和靶点。上述成果发表在《Cell》、《Cell Discovery》等国际顶级期刊。建立了基于肌肉收缩力学特性的肌纤维类型检测等 3 项无创检测方法（图 2-23），获取了空间飞行肌腱结构和力学性能变化特性，首次发现失重状态下肌腱刚度及弹性模量显著下降，

航天员运动足底压力明显降低、肌肉受力明显减弱（图 2-24），肌肉萎缩程度及快慢肌纤维类型转换呈现明显部位差异性特征。该结果已为航天员在轨锻炼防护方案评估及防护措施改进方向确定提供了详实客观数据，为我国空间站开展更长期驻留航天员健康保障研制提供了重要技术支撑。

### 应用及前景

无创测试方法可应用于飞行前后航天员肌肉形态、纤维类型和收缩功能的检测评价；在轨锻炼生物力学结果直接应用于空间站在轨锻炼防护措施持续改进，指导在轨锻炼方案和预案设计；空间实验获取的骨骼肌卫星细胞性质及多组学数据为空间肌萎缩、老年肌少症和杜氏肌营养不良等防治提供新的治疗思路。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Shuaiwei Ren, Xin Fu, Wenting Guo, et al. Profound cellular defects attribute to muscular pathogenesis in rhesus monkey model of Duchenne muscular dystrophy [J]. Cell. 2024, 187(23):6669-6686.e16. DOI:10.1016/j.cell.2024.08.041.
- [2] Jiayin Peng, Lili Han, Biao Liu et al. Gli1 marks a sentinel muscle stem cell population for muscle regeneration [J]. Nature Communications. 2023, 14(1):6993. DOI:10.1038/s41467-023-42837-8.
- [3] Xiexiang Shao, Xin Fu, Jingfan Yang et al. Asymmetrical inactivation of ESR1 signaling in muscle progenitor cells causes and its reactivation alleviates progression of adolescent idiopathic scoliosis [J]. Cell Discovery. 2023, 9(1):44. DOI:10.1038/s41421-023-00531-5.

### 主要完成团队

中国航天员科研训练中心航天医学全国重点实验室李志利团队，广州国家实验室胡莘团队。

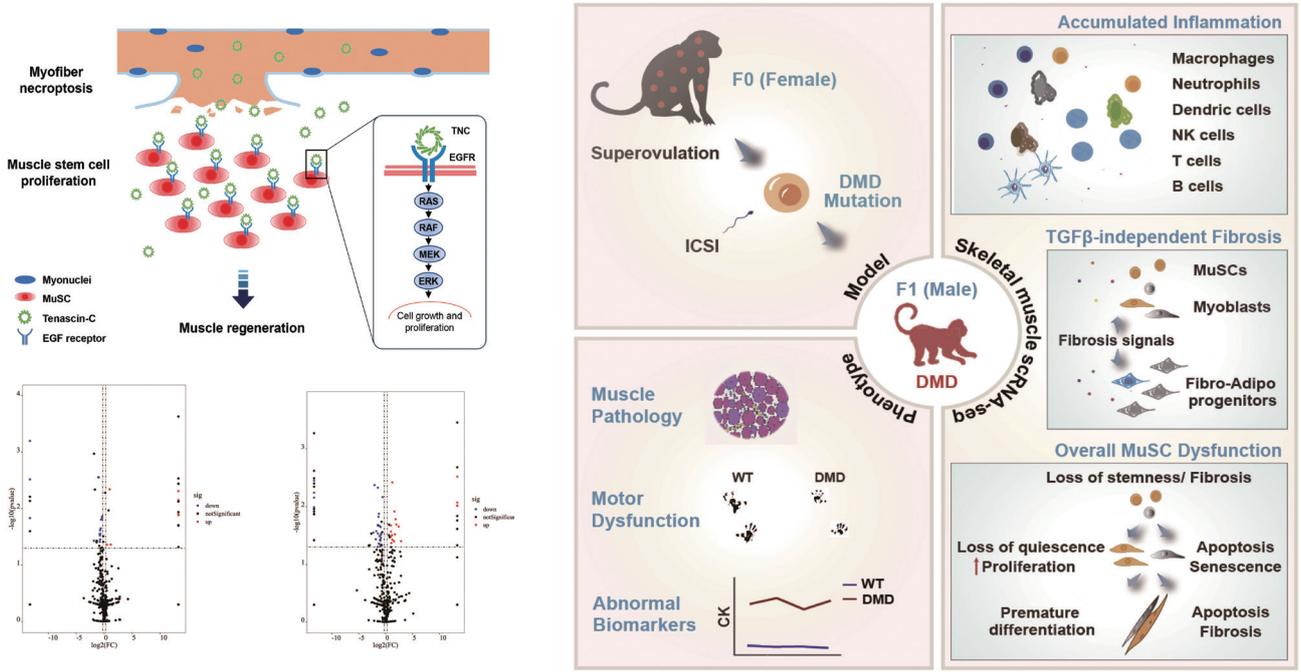


图 2-22 在中国空间站进行首次骨骼肌卫星细胞培养与分化

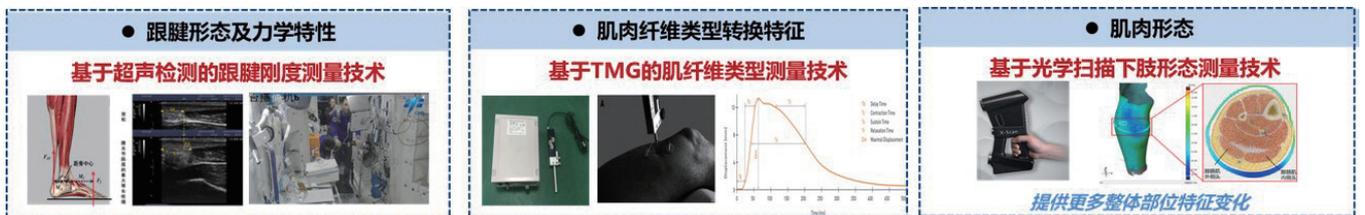


图 2-23 肌肉结构和功能无创检测技术建立

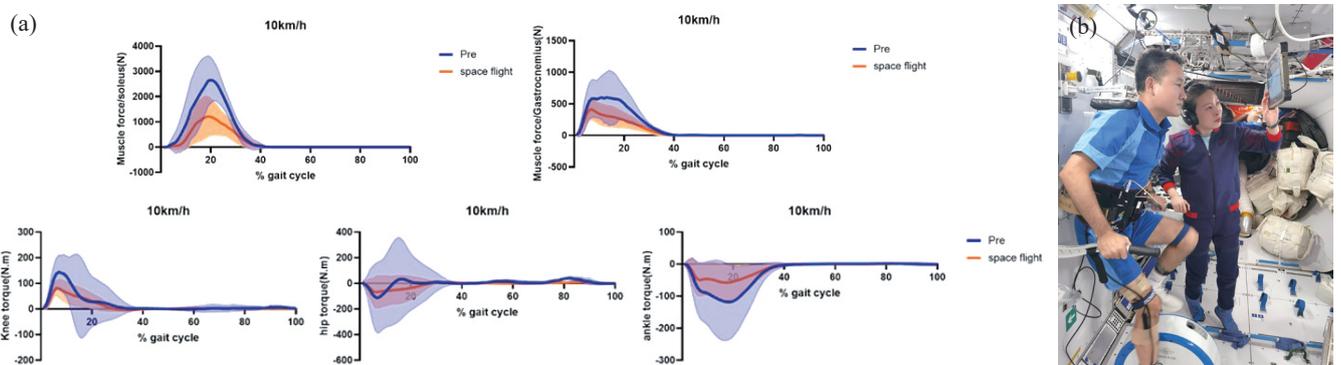


图 2-24 在轨跑步锻炼生物力学变化

(a) 航天员在轨跑步锻炼肌肉受力特征明显不同于地面状态； (b) 航天员在轨进行脚踏自行车的生物力学测试。

## 空间站双光子显微镜的研制及在轨应用

### The China Space Station Two-Photon Microscope: Development and In-orbit Application

首次实现双光子显微镜在轨运行，突破了小型化、微重力适用性、抗振动冲击等多项技术，发现了航天飞行引起的皮肤结构重塑、机体应激反应以及机体有氧代谢能力的变化等，为航天医学和脑科学研究提供重要手段。

#### 研究 进展

空间站双光子显微镜（基于双光子效应的原理而成像的显微镜）在国际上首次实现在轨正常运行，获取了航天员不同部位皮肤的高精度三维影像数据，在细胞和分子水平上在轨实时无创检测了机体应激反应信息，为航天员在轨健康监测提供了新的基于双光子显微成像技术的方案（图 2-25）。

项目组攻克了双光子显微镜及其超快光纤激光光源的小型化、微重力适用性、抗振动冲击等多项技术难题，研发了微型双光子高速扫描成像探头、微型高数值孔径物镜和微型 780nm 倍频器等重要组件，开发了自动控制软件系统，完成双光子显微镜整机及在轨应用等整体设计。与欧美仅供航天员在地面使用的双光子显微镜相比，重量减小到 1/20，体积减小到 1/46，成像性能完全可比。

应用实验中首次在地面、在轨及恢复阶段

获取了航天员飞行全周期皮肤高精度三维影像数据，发现航天飞行引起机体出现以下变化：1) 观察到皮肤表皮及真皮浅层的细胞及胞外基质的高精度三维分布（图 2-26）；2) 观察到真表皮交界局部变化（图 2-27）；3) 观察到动脉阻断再灌注过程中细胞的荧光变化（图 2-28）。空间站双光子显微镜作为国家科技自立自强的标志，已被中国国家博物馆永久收藏（图 2-29），成为中国科技及航天事业发展的见证。

#### 应用 及 前景

空间站双光子显微成像技术已经完成产业化落地，产品之一“在体双光子显微成像系统”于 2023 年 12 月获批第二类医疗器械注册证。目前已完成海内外销售十余台套，产值余万元。其主要应用场景为皮肤疾病的辅助诊断与辅助鉴别诊断、医美评价、化妆品功效测评、模式动物的在体无创无标记成像等领域。



扫码查看联系方式

#### 代表 论文

[1] Junjie Wang, Zhen Zhen, Yanqing Wang, et al. Non-invasive skin imaging assessment of human stress during head-down bed rest using a portable handheld two-photon microscope [J]. *Frontiers in Physiology*. 2022, 13:899830. DOI:10.3389/fphys.2022.899830.

#### 代表 专利

[1] 蒋颖, 胡斌强, 王俊杰, 等. 空间站双光子显微镜. 外观设计专利. 专利号: ZL202130759504.2, 授权日期: 2022 年 6 月 24 日.  
[2] 蒋颖, 胡斌强, 王俊杰, 等. 空间站双光子显微镜手柄. 外观设计专利. 专利号: ZL202130759505.7, 授权日期: 2022 年 6 月 24 日.



图 2-25 利用空间站双光子显微镜进行三维扫描（左）和动脉阻断再灌注实验（右）

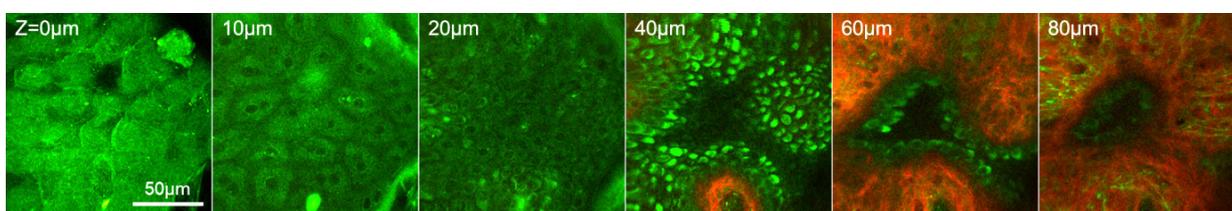


图 2-26 皮肤各层的双光子显微成像结果

从左至右依次是角质层、颗粒层、棘层、基底层、真表皮交界、真皮浅层

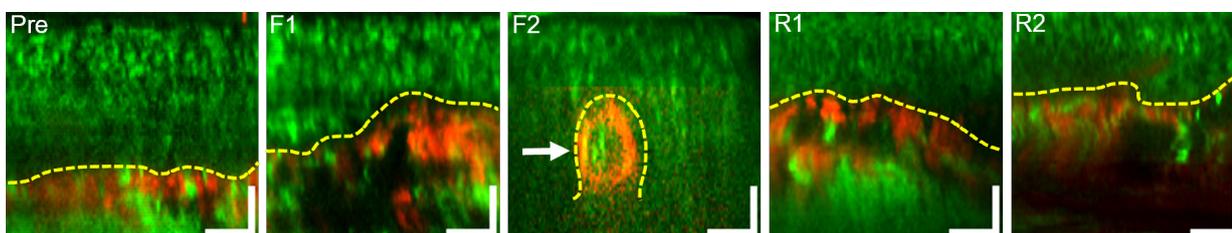


图 2-27 根据三维扫描数据获得的皮肤剖面影像，黄色虚线表示真表皮交界

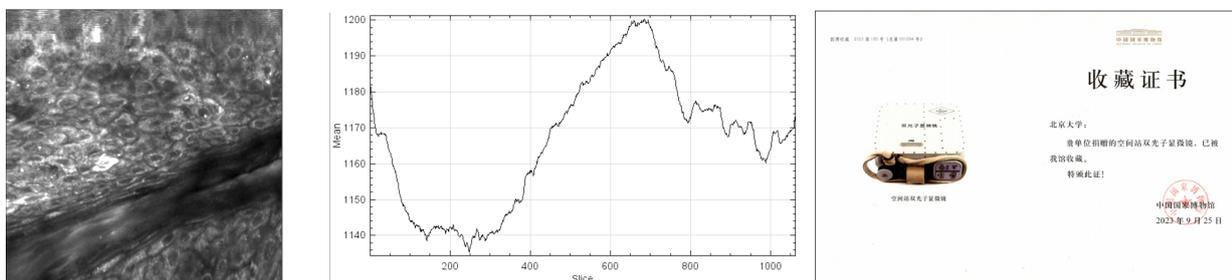


图 2-28 臂部缺血再灌注实验

左：基底层附近的细胞自发荧光图像；  
右：缺血再灌注过程中左图所示细胞的荧光强度变化曲线

图 2-29 中国国家博物馆颁发的“空间站双光子显微镜”收藏证书

主要  
完成  
团队

北京大学程和平院士团队，中国航天员科研训练中心李英贤团队。

## 3. 微重力物理学领域

### 3.1 空间材料科学

- (一) 微重力条件下难熔合金快速凝固组织调控 ..... 35
- (二) 微重力条件下壳核型结构、弥散型组织形成机理和调控途径 ..... 37
- (三) 微重力生长碲硒半导体晶体及高性能晶体管制备研究 ..... 39
- (四) 抗空间辐射高性能镁合金的组织设计与服役性能研究 ..... 41
- (五) 凝胶复合润滑材料的舱外服役性能研究 ..... 43
- (六) 微重力对铝硅合金凝固组织、成分偏析和气孔的影响规律 ..... 45

### 3.2 微重力流体与热物理

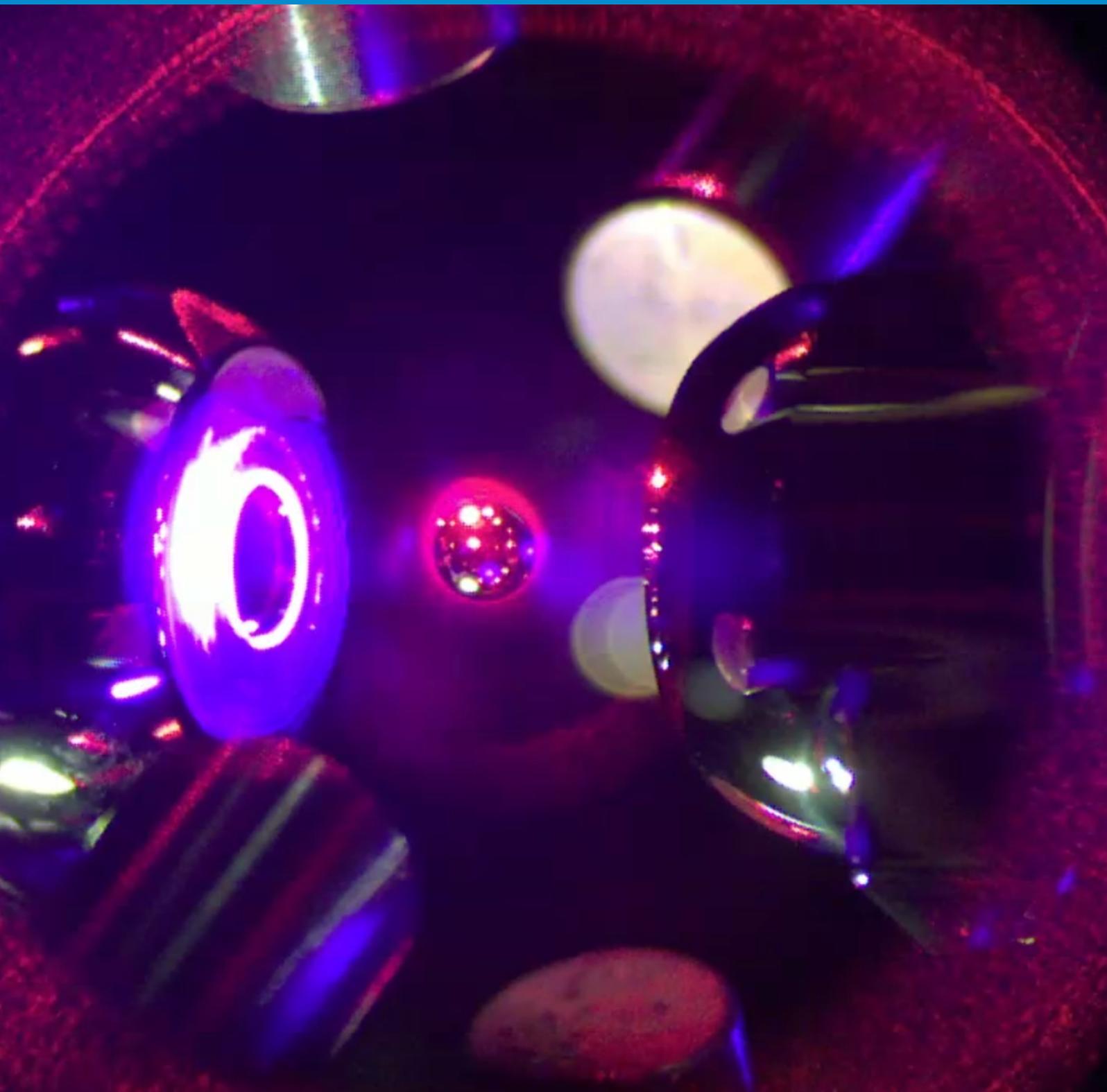
- (一) 空间板式贮箱流体形貌演化与环状流多模式转换 ..... 49
- (二) 低热流密度核态池沸腾传热现象中的反常重力标度行为 ..... 51
- (三) 低重力下在振动颗粒介质中的侵入颗粒动力学 ..... 53
- (四) 空间纯扩散和热毛细对流的液滴蒸发传热 ..... 55

### 3.3 微重力燃烧科学

- (一) 微重力部分预混火焰的升举及吹熄特性研究 ..... 59

### 3.4 微重力基础物理

- (一) 空间冷原子干涉陀螺技术研究 ..... 63



空间材料科学方向聚焦研究空间环境下与各类材料组织、结构和性能相关联的特殊物理、化学过程，材料制备过程及性能调控机理，以及空间环境下材料使役行为和使役性能的特殊规律。在探索金属及半导体等材料微观结构、缺陷与性能等关键科学问题，制备性能更加优异的功能结构材料，研究空间环境下润滑材料等的使役行为三个方面取得了重要进展。

目前在金属及难熔合金凝固机理方面取得具有重要影响的系列科学发现，丰富和发展了材料科学基础理论，得到国际同行的广泛认可和高度评价。在空间制备出了性能更优的新型红外探测器材料铟砷铋、层状柔性半导体晶体铟硒等，有望研制出更高性能的原型器件。制备出了大尺寸拓扑超导单晶、新型铁基超导材料，超导转变温度相较地面同类材料更高。验证了抗空间辐射高性能镁合金、凝胶复合润滑材料、形状记忆聚合物材料等材料的可靠性和稳定性，已初步尝试在不锈镁合金卫星电控箱、卫星热管、太阳能阵列和柔性太阳翼等方面应用。

# 微重力条件下难熔合金快速凝固组织调控

## Rapid Solidification Coupled With Structure Regulation of Refractory Alloys under Microgravity

精确测定了难熔合金液态性质，实现了合金表面形核控制和表面结构调控，共晶合金的“解耦”生长，有助于开发出更加精密的材料设计和制造技术。

### 研究进展

利用无容器材料实验柜开展了难熔钕合金、锆合金、钛合金的液态性质测定与快速凝固等重要实验，精确测定了从超高温到极端深过冷温度范围内液态钕合金、锆合金、钛合金的密度、热辐比等材料制备必不可少的关键物理性质；通过调控形核点数量与位置，实现了合金材料的宏观形态控制；通过调控凝固收缩动力学过程，可以获得不同的缩孔形态和分布，从而减小缩孔对合金组织性能的影响（图 3-1）；利用静电场激励合金熔体，在表面形成周期性波纹结构和特殊的涡旋组织，为调控表面微观组织结构提供了新的思路（图 3-2）；发现钕

和钕硅化合物原本协同生长的共晶两相，可以“解耦”单独生长，揭示了材料调控的新路径。本研究丰富了合金凝固理论，成果在国际重要期刊《Advanced Materials》、《Angewandte Chemie International Edition》、《Physics of Fluids》等发表，获得了国际同行的高度评价。

### 应用及前景

有望指导在空间环境中制备结构新颖的合金材料，支撑航空、航天领域对超高温材料的迫切需求。能够拓展对于太空环境中难熔合金特殊的深过冷行为、凝固规律与晶体生长方式的认知，为未来太空制造提供重要理论基础。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Haipeng Wang, Hui Liao, Liang Hu, et al. Freezing shrinkage dynamics and surface dendritic growth of floating refractory alloy droplets in outer space [J]. *Advanced Materials*. 2024, 36(24): 2313162. DOI:10.1002/adma.202313162.
- [2] Haipeng Wang, Liang Hu, Wenjun Xie, et al. Metastable liquid properties and surface flow patterns of ultrahigh temperature alloys explored in outer space [J]. *Angewandte Chemie International Edition*. 2024, 63(15): e202400312. DOI:10.1002/anie.202400312.
- [3] Haipeng Wang, Hui Liao, Jian Chang, et al. Decoupling effect stimulated independent dendrite growth of eutectic phases under microgravity and containerless states [J]. *Materials Today*. 2024, 75: 386-392. DOI:10.1016/j.mattod.2024.04.009.

### 主要完成团队

西北工业大学魏炳波院士团队。

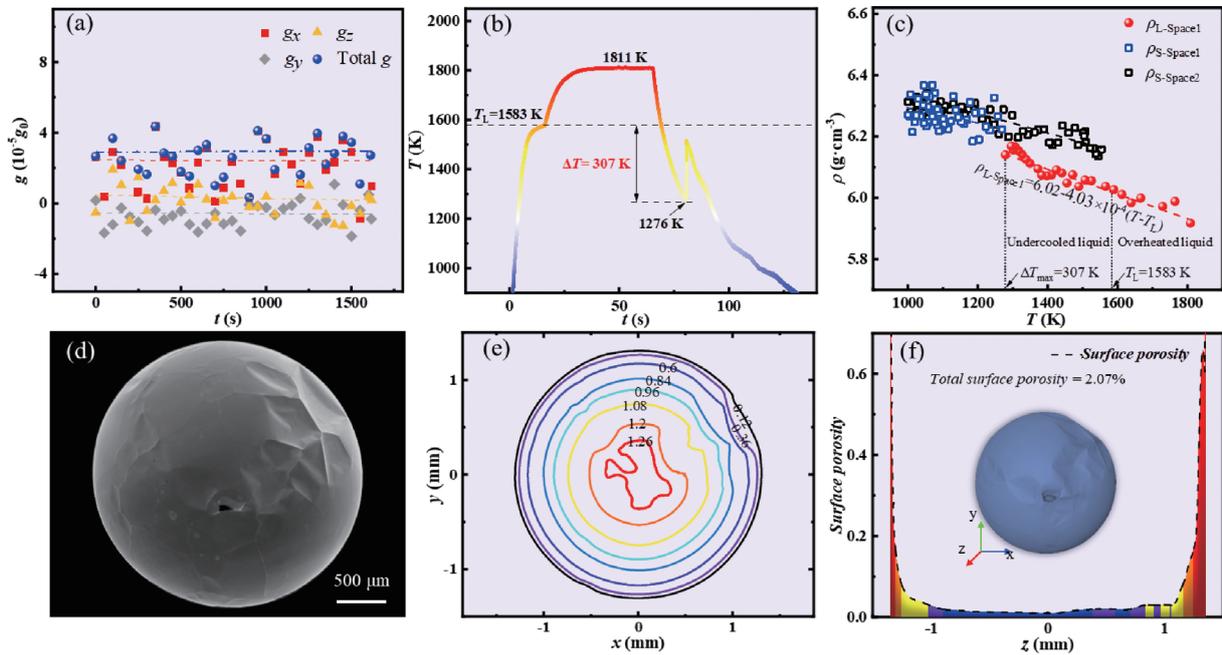


图 3-1 空间站 Ti-Ni-V 合金快速凝固的过冷能力和表面变形行为  
(图片来源: Dingnan Liu, et al. Advanced Functional Materials, 2024, 2415364)

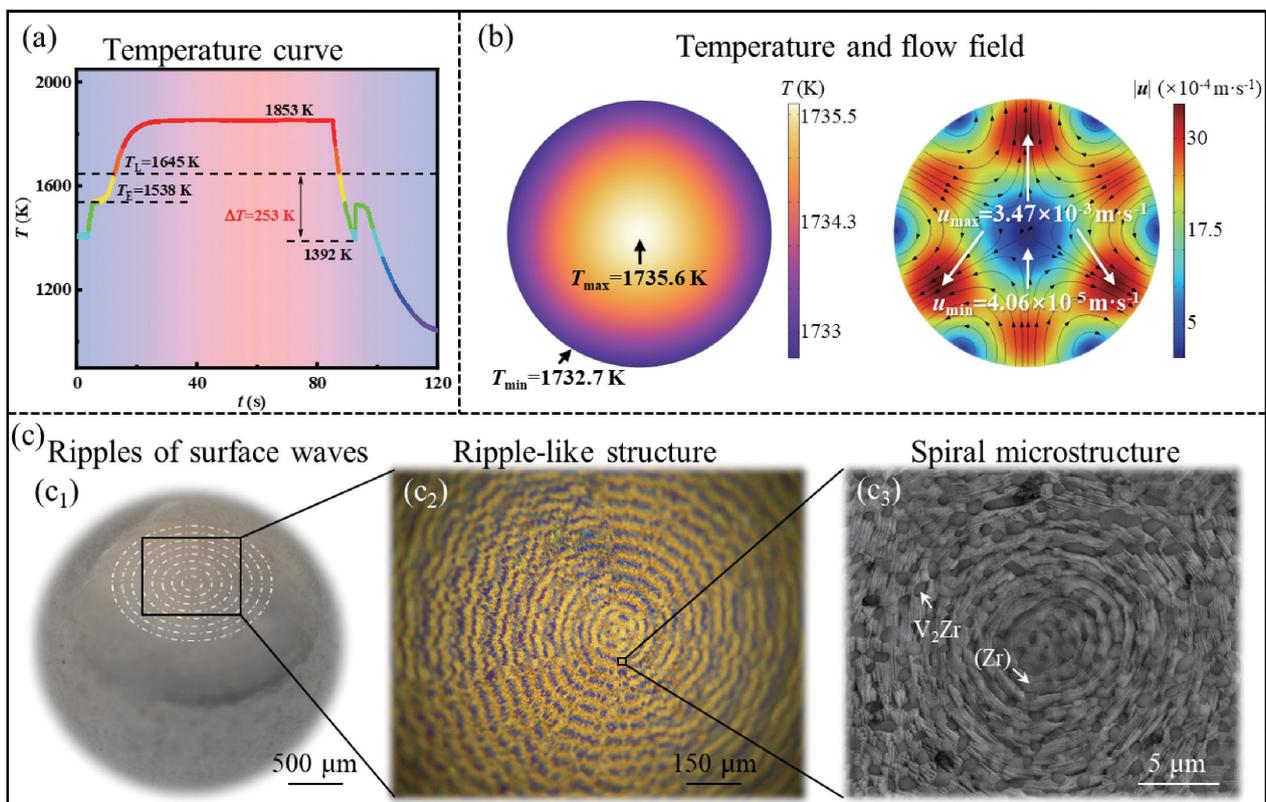


图 3-2 空间站实验调控得到的 Zr-V 亚共晶合金表面的表面波及涡旋组织  
(图片来源: Haipeng Wang, et al. Physics of Fluids, 2024, 36(4): 047137)

# 微重力条件下壳核型结构、弥散型组织 形成机理和调控途径

## Formation Mechanisms of Core/Shell Structure, Dispersed Microstructure under Microgravity and Control Methods

基于空间合金凝固研究，建立了相分离合金凝固过程模型，提出了偏晶合金成分及制备工艺联合优化设计方法，指导了多种关键合金材料的研制，并在核电、电子通讯等领域获得应用。

### 研究 进展

利用无容器材料实验柜开展了液-液相分离合金凝固实验，通过调控合金成分及制备工艺，分别获得了在地面难以制备的完美壳核结构样品（微米级厚度的壳层均匀包覆在核的表面）（图 3-3）和第二相均匀弥散分布的合金样品（图 3-4）。揭示了重力对多元相分离合金凝固组织的影响，建立了相分离合金凝固过程模型，探明了该类合金凝固组织的形成过程、关键控制因素及调控途径，提出了快速/亚快速凝固相

分离合金成分及制备工艺联合优化设计方法。研究成果在《National Science Review》、《Acta Materialia》等国际重要期刊发表，出版了《金属基复合材料原位形成理论基础》专著。

### 应用 及 前景

本研究探明了相分离合金凝固组织的形成过程、关键控制因素及调控途径，以相关理论为指导，研发了多种关键材料的制备技术，在核电、电子通讯等领域获得应用。



扫码查看联系方式

### 代表 论文

- [1] Jiuzhou Zhao, Hao Sun, Lili Zhang, et al. In-situ composite microstructure formation of immiscible alloy solidified in space [J]. National Science Review. 2023, 10, nwac261. DOI:10.1093/nsr/nwac261
- [2] Lili Zhang, Linjie. Yang, Jiuzhou Zhao, et al. Selection of a micro-alloying interface active component to stabilize the interface between droplets and liquid matrix in monotectic alloys [J]. Acta Materialia. 2023, 250: 118823. DOI:10.1016/j.actamat.2023.118823
- [3] Yanqiang.Li, Hongxiang. Jiang, Hao Sun, et al. Microstructure evolution of immiscible alloy solidified under the effect of composite electric and magnetic fields [J]. Journal of Materials Science & Technology. 2023,162: 247-259. DOI:10.1016/j.jmst.2023.04.018

### 代表 专利

[1] 江鸿翔, 赵九洲, 何杰, 等. 一种高强高导电铝合金材料及其制备方法. 发明专利. 专利号: ZL202011284865.7. 授权日期: 2023年04月07日.

### 主要 完成 团队

中国科学院金属研究所赵九洲团队。

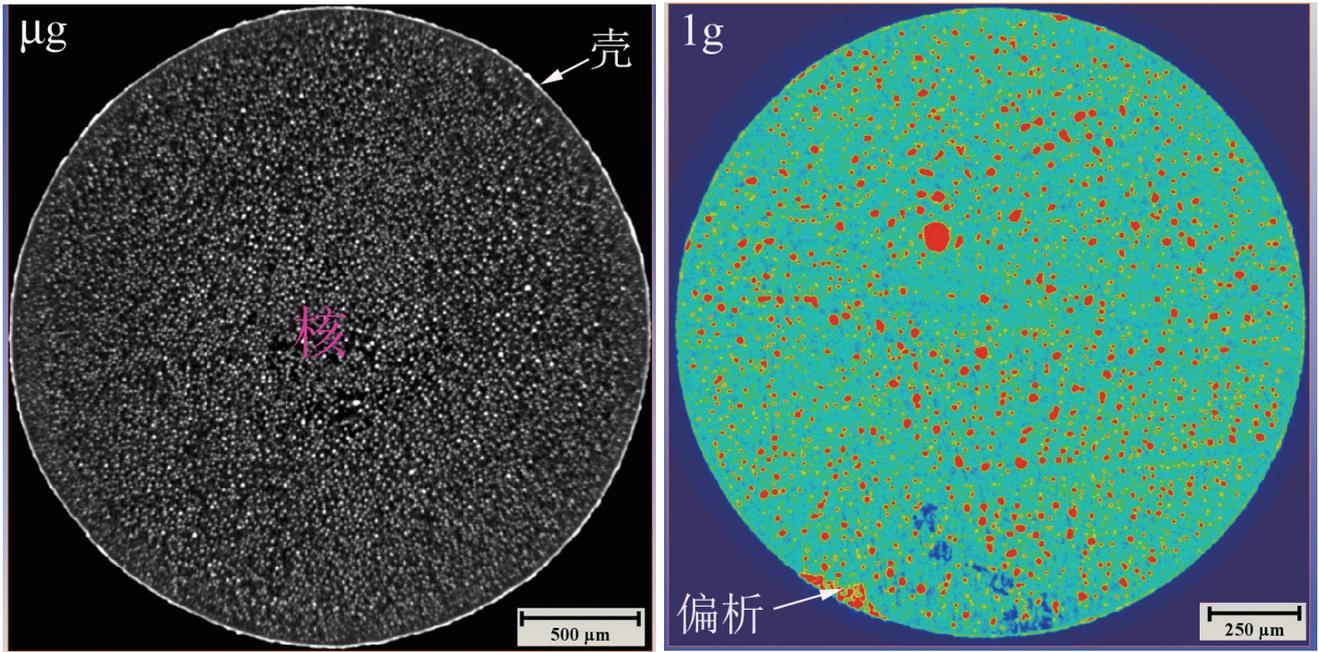


图 3-3 空间及地面 Gd-Co-Ti 偏晶合金样品凝固组织

- (a) 空间样品壳核型组织 (Jiuzhou Zhao, et al. National Science Review. 2023, 10, nwac261) ;  
 (b) 地面样品偏析型组织

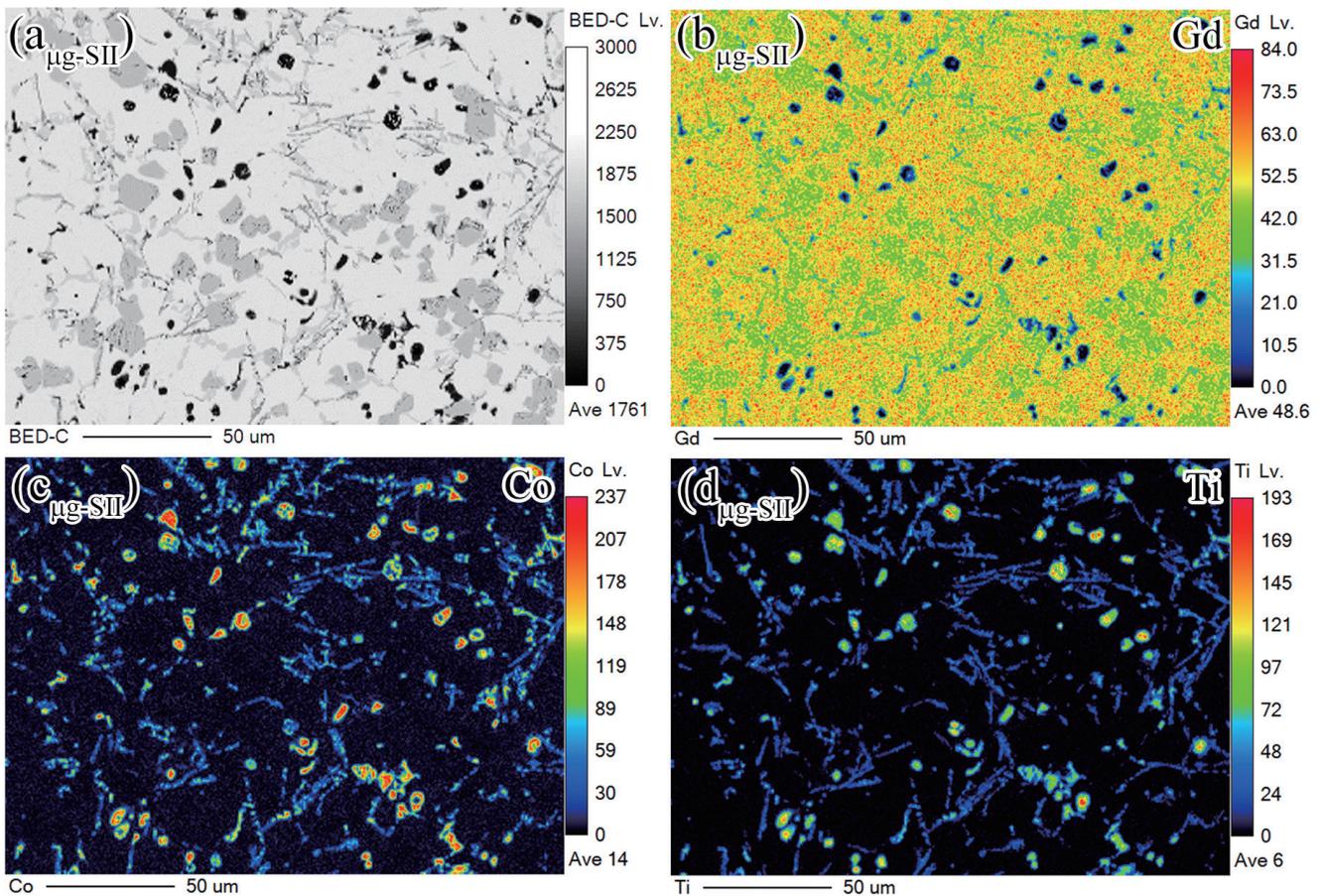


图 3-4 空间控温冷却条件下 Gd-Co-Ti 偏晶合金样品的显微组织

- (a) 背散射电子图像; (b) Gd 元素面分布图; (c) Co 元素面分布图; (d) Ti 元素面分布图

# 微重力生长硒化铟半导体晶体及高性能晶体管制备研究

## Research on InSe Semiconductor Crystal Growth under Microgravity and Fabrication of High-performance Transistors

国际上首次在微重力条件下开展了硒化铟半导体晶体生长研究，成功获得了高质量硒化铟单晶，研发的场效应晶体管原型器件电子迁移率与地面器件相比提高了 3-4 倍，开启电流、开关比及稳定性等关键指标显著提升。

### 研究进展

利用高温材料科学实验柜首次在微重力条件下开展了 InSe 半导体晶体生长研究，通过自发成核成功获得了面积大于 1 平方厘米的 InSe 单晶样品（图 3-5）。InSe 单晶具有标准的 P63/mmc 结构，In、Se 元素在基体中均匀分布，样品沿 (001) 面可机械剥离出镜面光滑的片状晶体。利用化学腐蚀法发现晶体边缘区域位错近乎为 0，X 射线双摇摆测试及高分辨率球差电镜分析显示晶体完整性、结晶质量得到了明显提升，样品具有近乎完美的 In-Se 蜂窝晶格，没有明显的晶格损伤或原子空位。基于该样品开发了以 InSe 为沟道材料、P 型重掺杂 Si 为底

栅、SiO<sub>2</sub> 层充当栅介质层、源漏电极为 Bi/Au 的场效应晶体管原型器件（图 3-6）。结果显示 InSe 场效应晶体管原型器件（图 3-6），电子迁移率提高了 3-4 倍，材料内部载流子输运能力大幅提升；器件的开启电流、开关比及稳定性等关键指标也得到了显著增强。

### 应用及前景

本研究对未来地面优化 InSe 半导体晶体生长技术具有重要指导意义，有助于推动该材料在高速电子器件、光电子器件、光探测器及柔性电子学等领域实现广泛应用。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Fengrui Sui, Haoyang Li, Ruijuan Qi, et al. Atomic-level polarization reversal in sliding ferroelectric semiconductors [J]. Nature Communications. 2024. 15:3799. DOI:10.1038/s41467-024-48218-z.
- [2] Fengrui Sui, Min Jin, Yuanyuan Zhang, et al. Sliding ferroelectricity in van der Waals layered  $\gamma$ -InSe semiconductor [J]. Nature Communications. 2023,14:36. DOI:10.1038/s41467-022-35490-0.
- [3] Min Jin, Siqi Lin, Liang Xue, et al. Growth and thermal properties of InSe crystal by using the ground simulation apparatus of China space station [J]. Materials Letters. 2023, 337:133970. DOI:10.1016/j.matlet.2023.133970.

### 主要完成团队

上海电机学院金敏团队，中国科学院上海硅酸盐研究所刘学超团队，山东大学韩琳团队，华东师范大学越方禹团队。

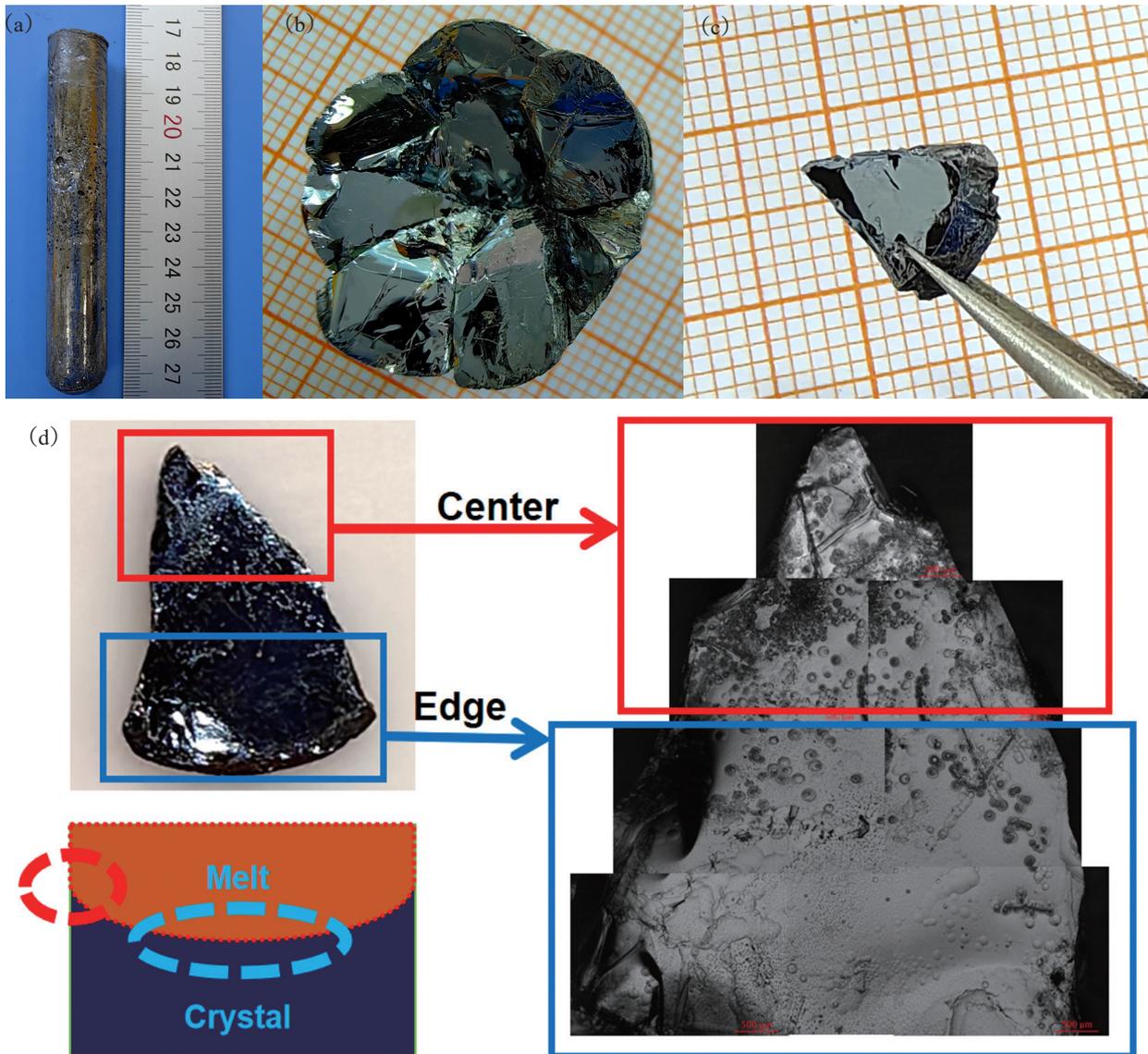


图 3-5 空间站生长的 InSe 半导体晶体

(a) 空间站生长的原生态 InSe 晶体形貌； (b) 自发成核获得的众多 InSe 单晶； (c) 沿 (001) 面剥离的片状晶体；  
(d) 低位错密度 InSe 晶体

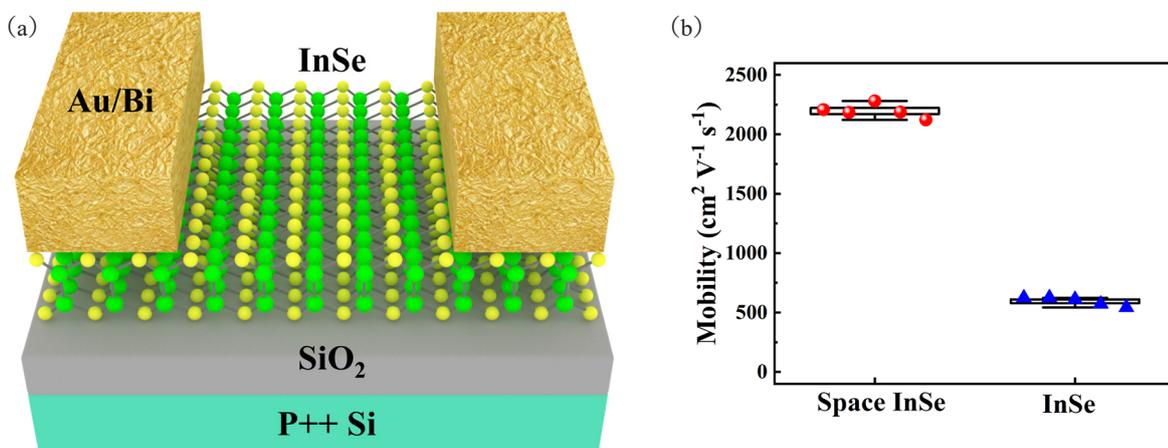


图 3-6 空间 InSe 晶体制成的高性能场效应晶体管原型器件

(a) InSe 场效应晶体管结构图； (b) 天/地 InSe 场效应晶体管电子迁移率对比

# 抗空间辐射高性能镁合金的组织设计与服役性能研究

## Research on the Microstructure Design and Service Behavior of High-Performance Magnesium Alloys Resistant to Space Radiation

国际上首次在空间开展高性能不锈钢镁合金的暴露实验，验证了不锈钢镁合金的空间服役可靠性和稳定性，为研发新型耐空间极端环境轻质高性能不锈钢镁合金奠定基础。

### 研究进展

利用舱外材料暴露平台开展了不同高性能不锈钢镁合金样品在空间材料箱迎风面和背风面的长期暴露实验，发现经空间长期暴露实验后的不锈钢镁合金样品表面质量完好，显微组织基本保持不变，屏蔽性能无衰退，验证了不锈钢镁合金材料在空间环境长期服役性能的可靠性和稳定性。采用不锈钢镁合金材料研制的电控箱壳体相比传统铝合金减重约 30%，能够有效屏蔽空间

粒子，同时具备优良的低温力学性能和抗原子氧侵蚀能力，可以有效保障卫星电控系统的长期安全服役（图 3-7）。

### 应用及前景

本研究为地面研发新型耐空间极端环境轻质高性能不锈钢镁合金奠定技术基础，可推动不锈钢镁合金材料在我国轻量化卫星电控系统和散热部件上的应用。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Xixi Qi, Yangxin Li, Xinyu Xu, et al. Enhancing strength-ductility synergy in a Mg-Gd-Y-Zr alloy at sub-zero temperatures via high dislocation density and shearable precipitates [J]. Journal of Materials Science & Technology. 2023, 166: 123-132. DOI:10.1016/j.jmst.2023.05.029.
- [2] Xixi Qi, Yangxin Li, Xiaoqin Zeng, Role of prismatic  $\langle a \rangle$  dislocations in sub-zero temperature deformation of Mg-Gd-Y-Zr alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds. 2023, 960: 170803. DOI:10.1016/j.jallcom.2023.170803.
- [3] Zhipeng Wang, Zhao Shen, Yangxin Li, et al. The effect of LPSO phase on the high-temperature oxidation of a stainless Mg-Y-Al alloy [J], Journal of Magnesium and Alloys. 2024, 12(10): 4045-4052. DOI:10.1016/j.jma.2024.07.009.

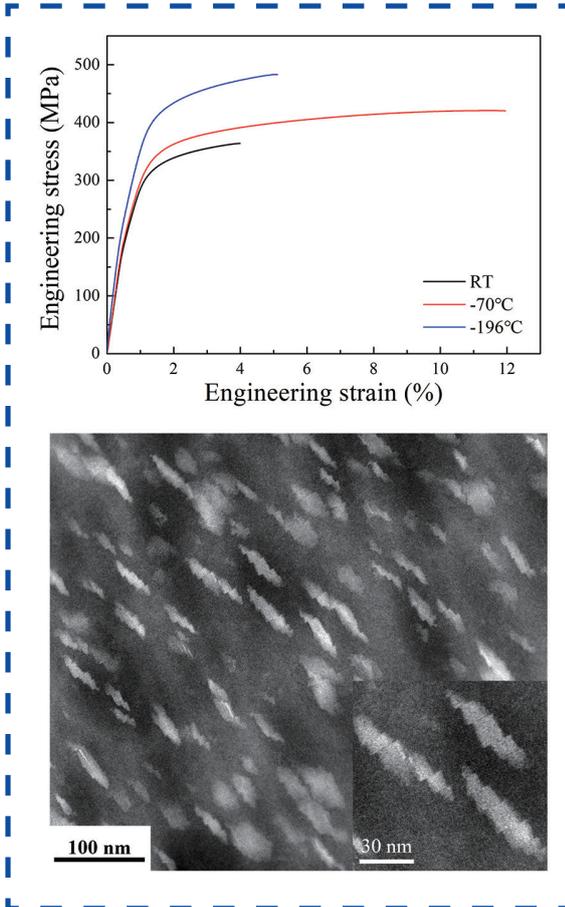
### 代表专利

- [1] 李扬欣, 曾小勤, 朱庆春, 等. 一种高强高耐腐蚀三元镁合金及其制备方法. 发明专利. 专利号: ZL202010198047.9. 授权日期: 2021 年 05 月 25 日.

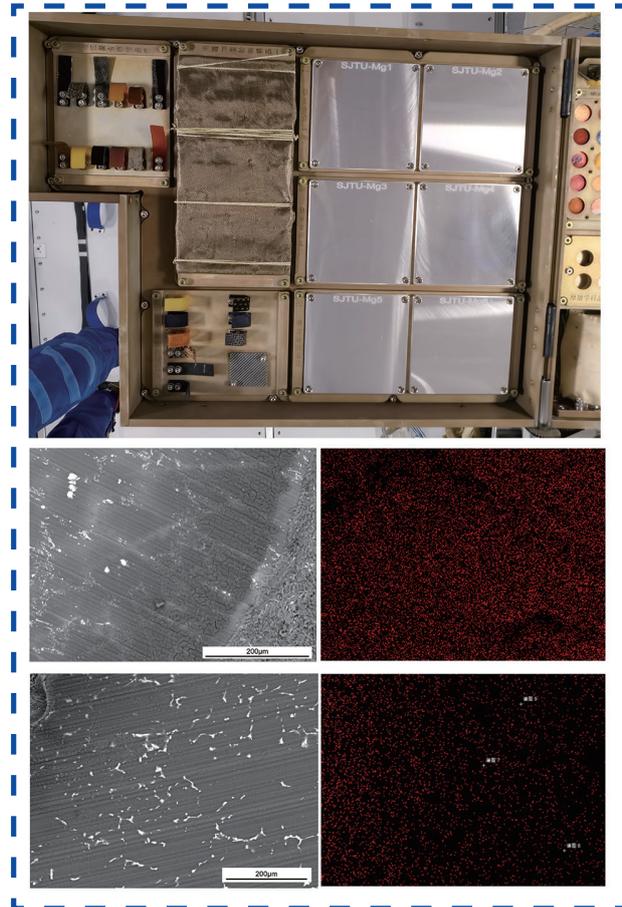
### 主要完成团队

上海交通大学曾小勤团队。

### 不锈镁合金低温力学性能



### 不锈镁合金空间长期暴露试验



### 潜在航天部件应用

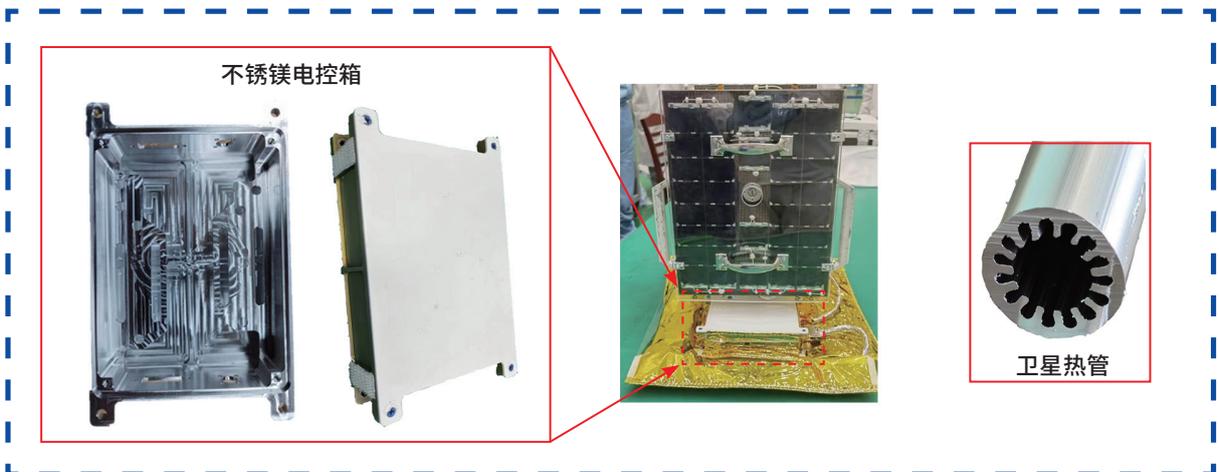


图 3-7 空间站舱外暴露实验助力不锈镁合金的航天应用

(部分图片来源: X. Qi, et al. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 166, 123-132.)

# 凝胶复合润滑材料的舱外服役性能研究

## Research on the In-Orbit Performance of Gel Composite Lubricating Materials

国际上首次开展含液凝胶润滑材料的舱外暴露实验和轴承摩擦学实验，验证了凝胶 / 薄膜复合润滑材料在真实空间环境中的服役寿命高于现役固体润滑薄膜，为新型长寿命空间润滑材料的设计和研制奠定基础。

### 研究进展

利用舱外材料暴露平台开展了多种凝胶润滑材料的静态暴露实验和凝胶 / 薄膜复合润滑材料的动态摩擦学实验，研究其在真实空间环境中的服役行为及性能演变规律（图 3-8）。该实验是国内首次在空间站开展在轨摩擦学实验，也是国际上首次开展轴承摩擦学实验。获取了凝胶复合润滑材料的在轨综合性能数据，揭示了空间环境对材料结构、性能的影响规律和摩擦磨损机制。在轨摩擦学数据表明，凝胶润滑材

料的抗粒子辐照性能和防爬移性能显著优于传统航天润滑油，凝胶 / 薄膜复合润滑材料服役寿命远高于现役空间固体润滑薄膜。

### 应用及前景

本研究为新型长寿命空间润滑材料的设计和研制奠定了技术基础，可有力支撑航天技术发展对高性能润滑材料的需求，后续可推广至月球车运动机构使用。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1]Yanyan Bai, Qiang Chen, Xujin Lang, et al. Dispersion stability and tribological behavior of nanocomposite, supramolecular gel lubricants and molecular dynamic simulation [J]. Tribology International. 2024,191:109150. DOI:10.1016/j.triboint.2023.109150.
- [2]Yongqiang Wang, Xiao Liu, Rui Wang, et al. Elastohydrodynamic lubrication performance of PUMA-PSMA supramolecular polymer gel lubricant [J]. Tribology International. 2024,191:109148. DOI:10.1016/j.triboint.2023.109148.
- [3]Ao Xie , Jiaying Zhang, Hao-Zhe Xu, et al. Enabling ultra-low wear and long-lived lubrication by DLC-supramolecular gel composite lubrication system under extreme contact stress [J]. Tribology International. 2024,193:109364. DOI:10.1016/j.triboint.2024.109364.

### 代表专利

- [1]周峰, 蔡美荣, 张嘉莹, 等. 一种复合润滑材料及其制备方法和在空间润滑中的应用. 发明专利. 专利号: ZL202111334376.2. 授权日期: 2022年09月13日.
- [2]周峰, 蔡美荣, 张嘉莹, 等. 中国发明专利. 一种具有机械自适应性的润滑剂及其制备方法和应用. 发明专利. 专利号: ZL202310587528.2. 授权日期: 2024年06月11日.

### 主要完成团队

中国科学院兰州化学物理研究所周峰团队。

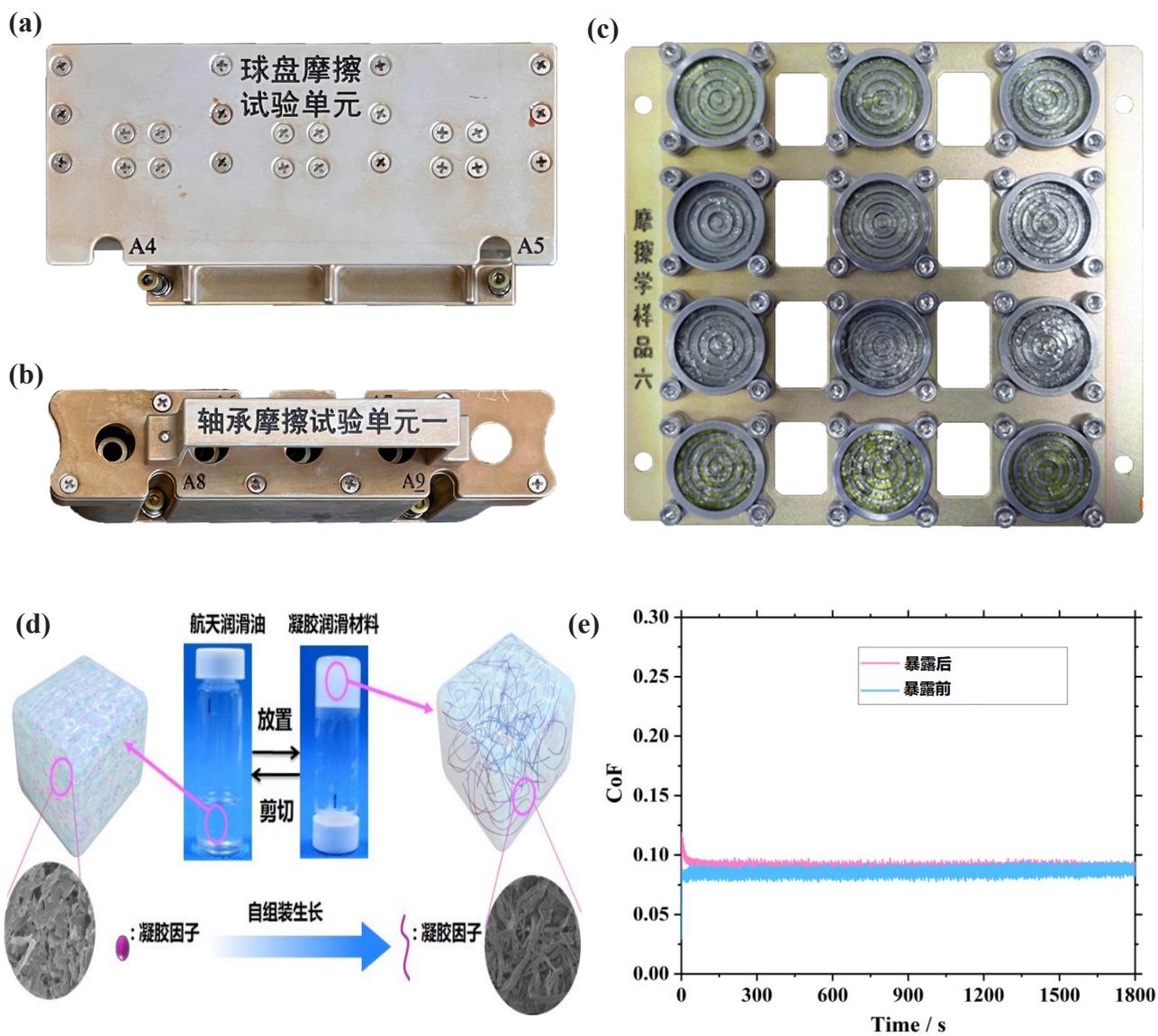


图 3-8 部分暴露实验装置和样品及其暴露前后的摩擦学性能

- (a) 球盘摩擦实验单元, (b) 轴承摩擦实验单元, (c) 静态暴露实验凝胶润滑材料样品, (d) 凝胶复合润滑材料, (e) 舱外暴露前后凝胶复合润滑材料的摩擦学性能。

# 微重力对铝硅合金凝固组织、成分偏析和气孔的影响规律

## The Roles of Microgravity in the Solidification Microstructure, Composition Segregation, and Porosity Distribution of Al-3.5 Wt.% Si Alloy

获得了微重力条件下合金凝固组织形态、成分分布以及气孔形成与演变的基准数据，对优化凝固理论模型以及深入理解重力在凝固过程中的作用机制具有重要的意义。

### 研究进展

利用高温材料科学实验柜开展了铝基合金的空间生长研究，成功制备出与地面具有明显结构差异的铝硅合金实验样品。空间与地面样品的对比分析结果显示，空间样品一次、二次枝晶间距较小（图 3-9），枝晶形态整体更加均匀细小，元素分布更加均匀；空间样品中气孔形态、尺寸和分布均不同于地面，具有独特的分布花样（图 3-10）。获得了微重力条件下合金凝固组织形态、成分分布以及气孔的形成与演变的基准数据。揭示了重力在合金凝固组织形成、成分分布以及缺陷形成过程中的扰动

机制，对优化凝固理论，深入理解重力在凝固过程中的作用机制及对材料性能优化调控具有重要意义。

### 应用及前景

本研究为消除凝固偏析和生产高性能合金提供了理论指导。研究发现的微重力凝固过程气孔的演变以及最终分布规律，对于多孔材料的生产具有重要的参考价值。



扫码查看联系方式

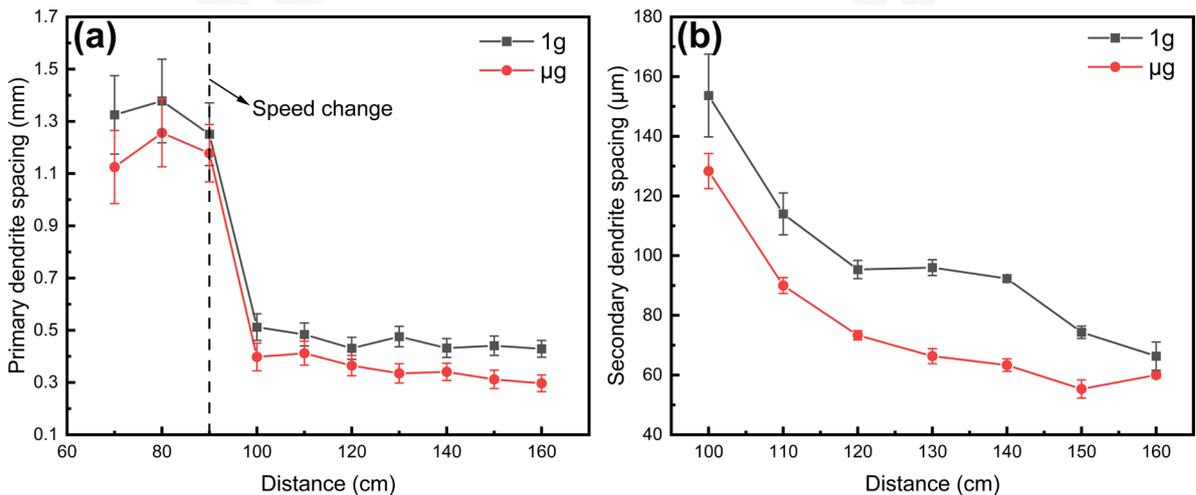


图 3-9 样品一次、二次枝晶间距

### 代表论文

[1] Guiyuan Zhang, Xinghong Luo, Yang Li, et al. Comparative study of gravity effects in directional solidification of Al-3.5 wt.% Si and Al-10 wt.% Cu alloys [J], npj Microgravity. 2024,10:114. DOI:10.1038/s41526-024-00454-9.

### 主要完成团队

中国科学院金属研究所罗兴宏团队。

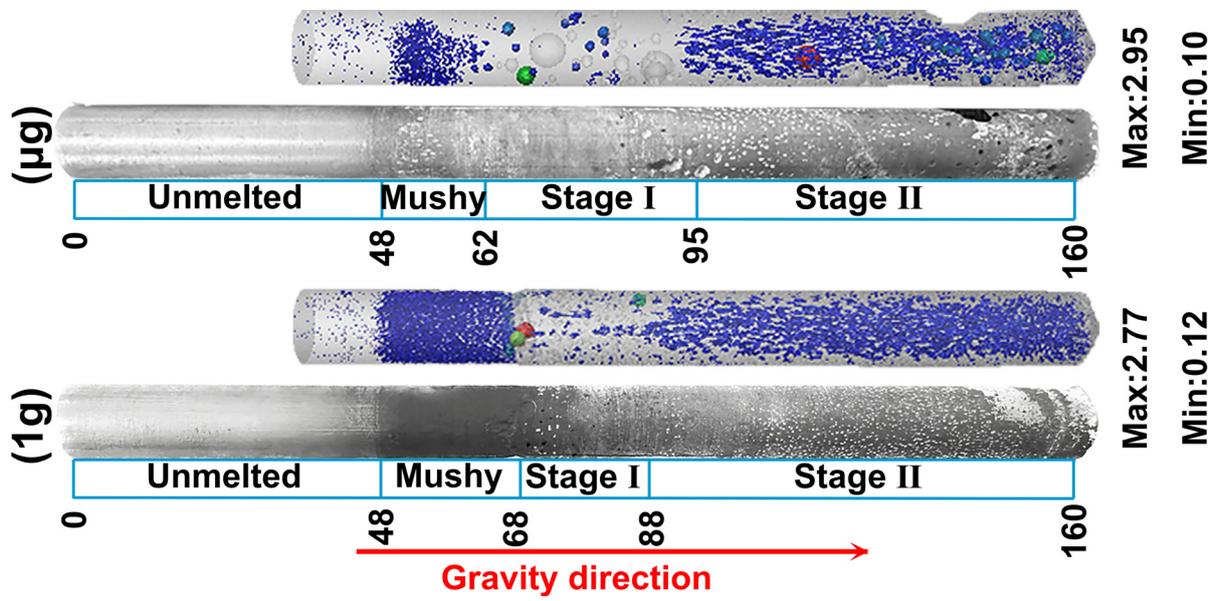


图 3-10 样品气孔分布



空间站返回的高温材料科学实验样品盒

## 3. 微重力物理学领域

### 3.1 空间材料科学

- (一) 微重力条件下难熔合金快速凝固组织调控 ..... 35
- (二) 微重力条件下壳核型结构、弥散型组织形成机理和调控途径 ..... 37
- (三) 微重力生长锗硒半导体晶体及高性能晶体管制备研究 ..... 39
- (四) 抗空间辐射高性能镁合金的组织设计与服役性能研究 ..... 41
- (五) 凝胶复合润滑材料的舱外服役性能研究 ..... 43
- (六) 微重力对铝硅合金凝固组织、成分偏析和气孔的影响规律 ..... 45

### 3.2 微重力流体与热物理

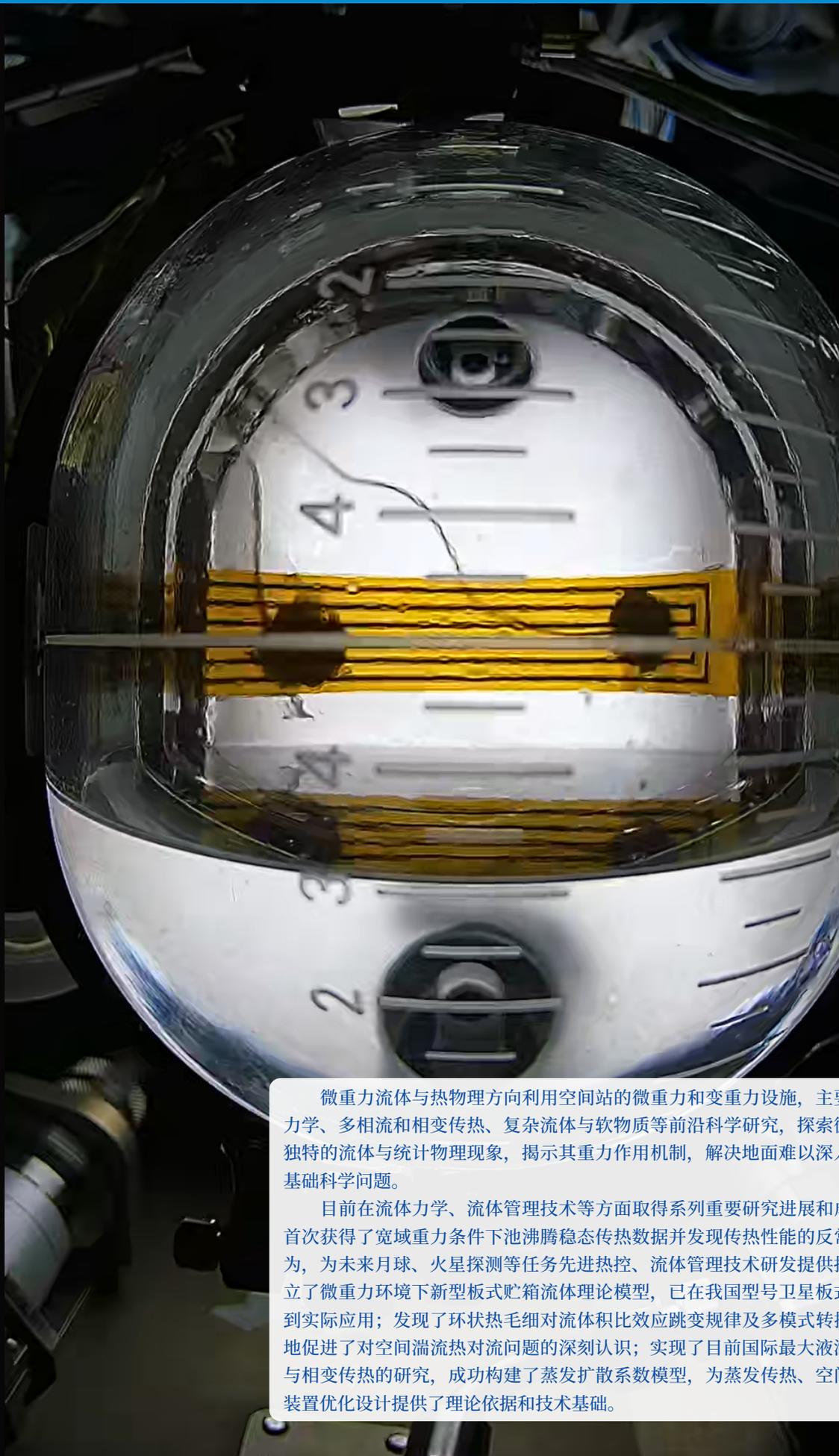
- (一) 空间板式贮箱流体形貌演化与环状流多模式转换 ..... 49
- (二) 低热流密度核态池沸腾传热现象中的反常重力标度行为 ..... 51
- (三) 低重力下在振动颗粒介质中的侵入颗粒动力学 ..... 53
- (四) 空间纯扩散和热毛细对流的液滴蒸发传热 ..... 55

### 3.3 微重力燃烧科学

- (一) 微重力部分预混火焰的升举及吹熄特性研究 ..... 59

### 3.4 微重力基础物理

- (一) 空间冷原子干涉陀螺技术研究 ..... 63



微重力流体与热物理方向利用空间站的微重力和变重力设施，主要开展流体力学、多相流和相变传热、复杂流体与软物质等前沿科学研究，探索微重力条件下独特的流体与统计物理现象，揭示其重力作用机制，解决地面难以深入的流体物理基础科学问题。

目前在流体力学、流体管理技术等方面取得系列重要研究进展和成果。国际上首次获得了宽域重力条件下池沸腾稳态传热数据并发现传热性能的反常重力标度行为，为未来月球、火星探测等任务先进热控、流体管理技术研发提供指导；成功建立了微重力环境下新型板式贮箱流体理论模型，已在我国型号卫星板式贮箱设计得到实际应用；发现了环状热毛细对流体积比效应跳变规律及多模式转换规律，极大地促进了对空间湍流热对流问题的深刻认识；实现了目前国际最大液滴全过程蒸发与相变传热的研究，成功构建了蒸发扩散系数模型，为蒸发传热、空间生保系统等装置优化设计提供了理论依据和技术基础。

### 空间板式贮箱流体形貌演化与环状流多模式转换

#### The Evolution of Fluid Morphology in Propellant Tanks and Multi-mode Conversion of Microgravity Annular Flow under Microgravity

发现了微重力环境中流体界面形貌的稳定形态与动态演化规律，建立了微重力环境下板式贮箱内流体的理论模型，实现了新型板式贮箱模型在轨推进剂双向输运；发现了环状流体系空间热对流体积比效应跳变规律，揭示了超临界域热流体波多模式转换机制。为空间微重力环境流体动力学的理论发展与工程应用做了创新性探索。

#### 研究进展

瞄准推进剂板式贮箱工程应用需求，在流体物理实验柜上开展了具有特殊内部构型的球形贮箱与胶囊形贮箱模型双向输运实验研究（图 3-11）。建立了微重力环境下加注、排空过程中贮箱内气液界面的理论模型（图 3-12），掌握了不同性能推进剂与贮箱结构耦合形成的气液界面演化规律，揭示了气泡合并及与贮箱结构耦合的作用机制，成功验证了新型结构板式贮箱在微重力环境中的排液效能、有效加注、可靠输运和流体管理等工程技术及性能。

国际上首次在微重力环境下建立了中心柱固定、旋转和提拉三种全控制参量的环状流系统（图 3-13）。发现了空间热对流小体积比高

频失稳、大体积比低频失稳规律以及体积比转换中的跳变型机制，验证、拓展了体积比效应理论的普适性；揭示了超临界域热流体波的驻波、行波、线性波和混沌波等多模式演化及竞争传播机制（图 3-14），极大地促进了对空间湍流热对流问题的深刻认识。

#### 应用及前景

本研究对于提高动力推进系统、航天器及载荷热控系统、环控及生命保障系统的流体管理与输运、热管理等方面具有重要意义和应用价值。对于太空增材制造、高质量材料制备方法改进以及工艺提升具有指导意义。



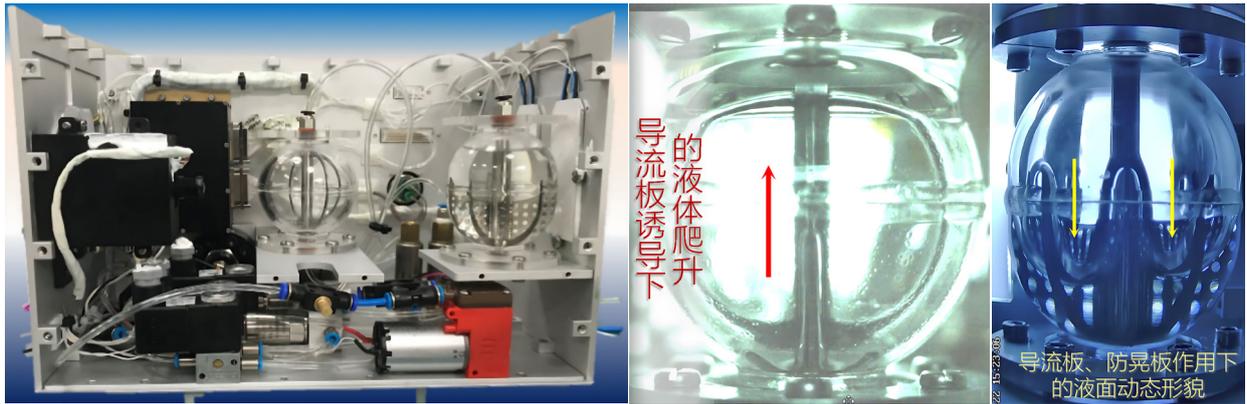
扫码查看联系方式

#### 代表论文

- [1] Shangtong Chen, Liang Hu, Qi Kang, et al. Study on the shape and motion of bubbles in the tank model with a central column aboard the Chinese Space Station [J]. Physics of Fluids. 2024, 36(012124): 1-14. DOI:10.1063/5.0180681.
- [2] Zhewen Chen, Yi Chen, Qi Kang, et al. Static analysis and contact angle hysteresis study of bubbles in Chinese Space Station tank models under different gravity effect [J]. Physics of Fluids. 2024, 36(72101): 1-14. DOI:10.1063/5.0211985.
- [3] Jia Wang, Li Duan, Qi Kang, et. al. Development and space experiment verification of annular liquid flow payload for China Space Station [J]. Symmetry. 2024, 16(11):1530. DOI:10.3390/sym16111530.

#### 主要完成团队

中国科学院力学研究所康琦和段俐团队。



(a) 空间实验装置

(b) 球形贮箱加注

(c) 胶囊贮箱排空

图 3-11 空间实验装置和加注排空过程

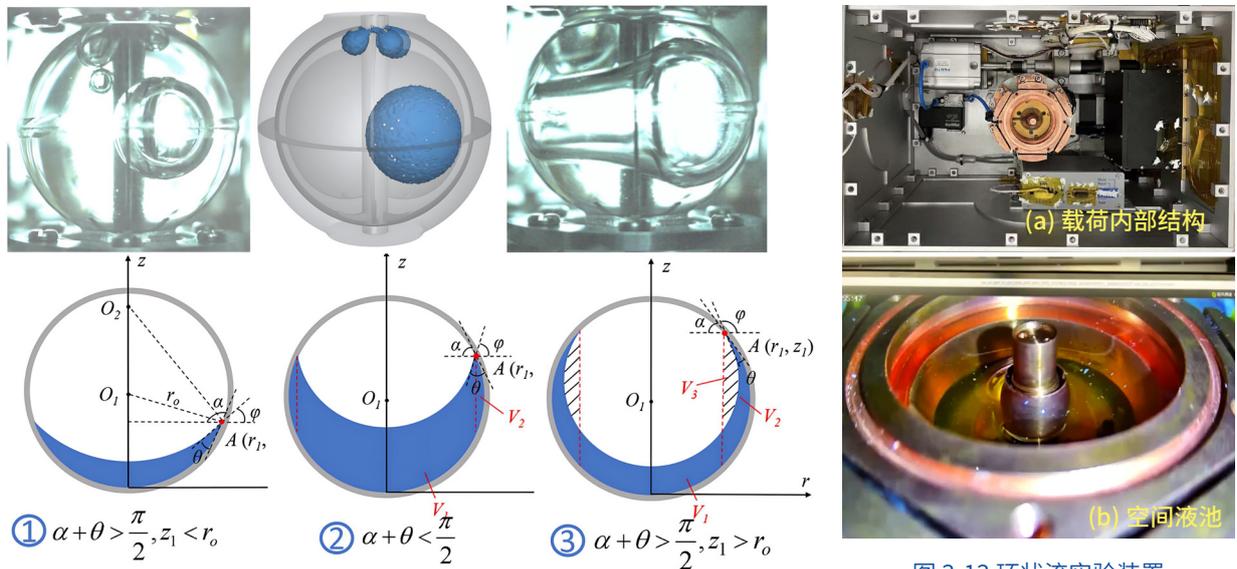


图 3-12 气泡构型与合并及贮箱液面轮廓理论模型

图 3-13 环状流实验装置  
与在轨实验图像

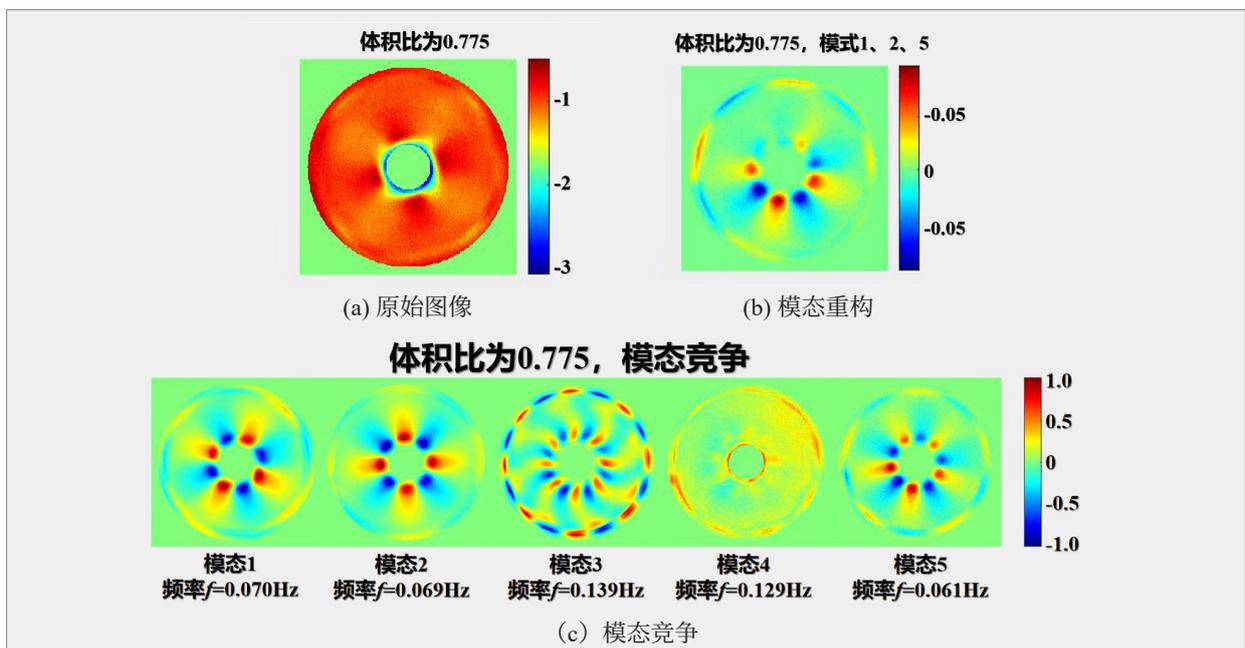


图 3-14 微重力环状流热流体波模态竞争

# 低热流密度核态池沸腾传热现象中的反常重力标度行为

## Anomalous Gravity Scaling Behavior Related to Heat Transfer Performance in Nucleate Pool Boiling with Low Heat Flux Density

国际上首次发现了低热流密度下重力主导池沸腾传热性能的临界值，且在重力主导下的传热性能随重力提高不升反降，丰富了对池沸腾传热重力标度行为的认知，并为未来多重力场景航天任务的热管理与流体管理等技术研发提供指导。

### 研究进展

利用变重力科学实验柜开展了微重力到火星重力范围内稳态池沸腾实验，以及微重力至 2g 重力变化过程中瞬态池沸腾实验（图 3-15）。首次将重力作为可控环境变量，获得了宽域重力条件下低热流密度池沸腾稳态和准稳态传热实验结果，发现沸腾传热性能在重力小于 0.06g 时与重力无关，而在重力大于 0.06g 时明显与重力相关，并且随着重力上升不升反降，呈现出明显的反常重力标度行为特征（图 3-16）。本研究克服了以往池沸腾空间实验因加热器的

不同，数据不能直接相互比较的难题，弥补了国际上关于重力连续变化时低热流密度池沸腾传热过程中准稳态实验数据的缺失，丰富了对池沸腾传热重力标度行为的认知。

### 应用及前景

研究成果丰富了对池沸腾传热重力标度行为的认知，对于多重力场景下复杂航天任务的先进热控、低温流体管理、环控生保系统研发具有理论指导意义。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Wenjing Jiang, Zhigang Li, Jianfu Zhao, et al. The study of an integrated sensor for partial nucleate pool boiling at low heat flux [J]. IEEE Sensors Journal. 2022, 22(24): 23692-23698. DOI:10.1109/JSEN.2022.3215680.
- [2] 杜王芳, 刘鹏, 赵建福, 等. 上中国空间站“烧开水”, 揭示沸腾现象中的重力作用机理 [J]. 力学与实践. 2022, 44(6): 1456-1463. DOI:10.6052/1000-0879-22-308.
- [3] 杜王芳, 赵建福. 核态池沸腾传热现象中的重力标度规律 [J]. 科学通报. 2020, 65(17): 1629-1637. DOI:10.1360/TB-2019-0337.

### 代表专利

- [1] 赵建福, 杜王芳, 刘鹏, 等. 可精准实现气泡激发及监测的集成式加热装置的制备方法. 发明专利. ZL 2023 1 0387794.0. 授权日期: 2024 年 01 月 23 日.

### 主要完成团队

中国科学院力学研究所赵建福团队。

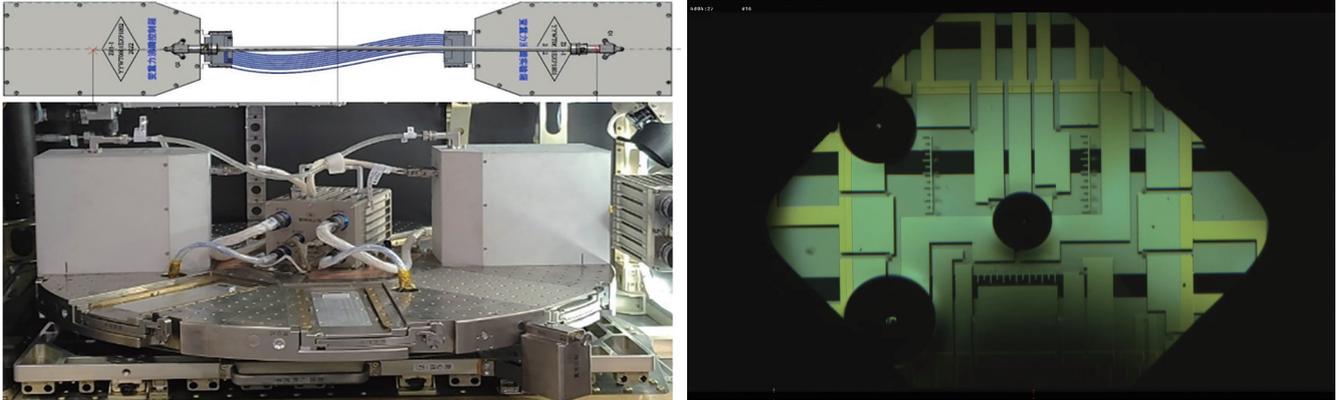


图 3-15 变重力池沸腾实验装置与空间环境中典型池沸腾现象

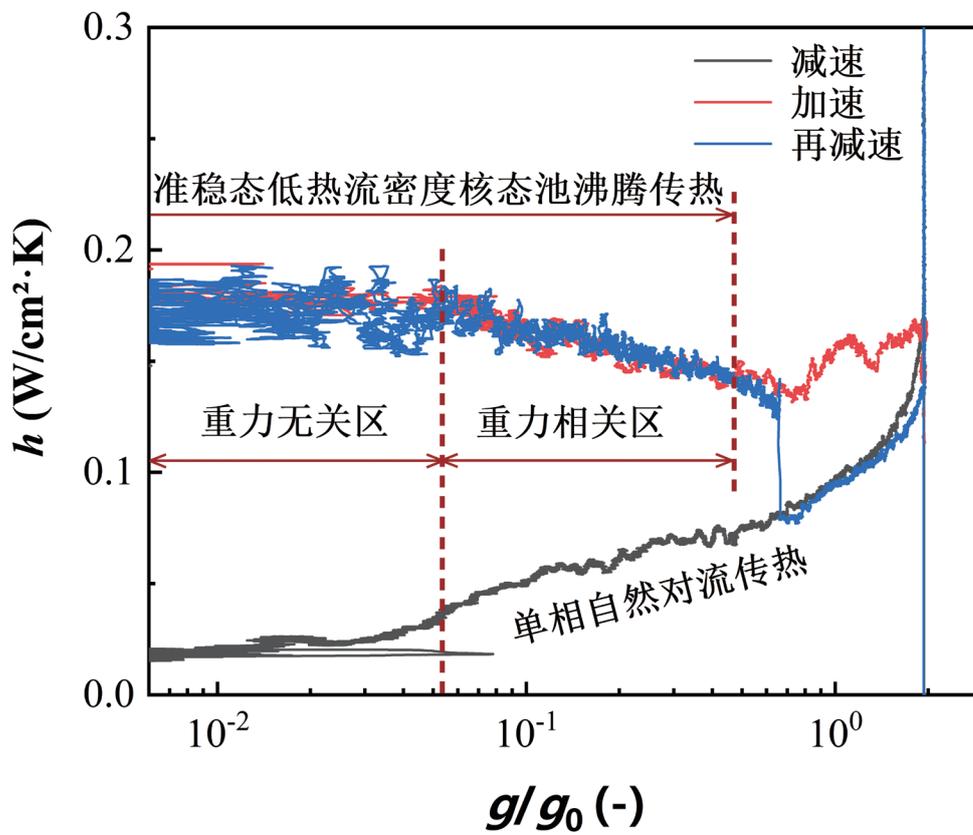


图 3-16 准稳态变重力池沸腾传热系数随重力的变化

# 低重力下在振动颗粒介质中的侵入颗粒动力学

## Intruder Dynamics within Vibrated Granular Media in Low Gravity

国际上首次发现了侵入颗粒在弱振动颗粒介质中的下降现象，运动行为转变与重力水平显著相关，转变的振动强度阈值随重力下降而升高，此发现丰富了小行星形貌与结构形成机理的认知，有助于解决地外星球表面探测中颗粒控制的关键技术问题。

### 研究进展

利用变重力科学实验柜开展了不同重力条件下颗粒混合物的振动分聚实验（图 3-17），首次发现了侵入颗粒在弱振动颗粒介质中的下降现象，此下降行为的转变与重力水平显著相关，转变发生时的振动强度阈值随重力下降而升高（图 3-18）。建立了侵入颗粒的动力学模型，获得侵入颗粒的穿透深度，揭示了穿透阻力系数的重力依赖性。本研究为确定月球或其他小行星（如 Itokawa）表面对侵入物的动力学影响及最优控制提供了重要的科学依据，丰富了对

小行星形貌与结构形成机理的认知，有助于解决地外星球表面探测中的颗粒运动与操控关键技术问题。

### 应用及前景

本研究发现的重力对颗粒分聚影响对于颗粒操控技术开发、月球月壤分拣平台建设具有重要参考价值。侵入物动力学相关结果可用于解决行星沙漠探测过程中低振动对设备影响的技术问题。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Ke Cheng, Meiyang Hou, Wei Sun, et al. Unraveling the role of gravity in shaping intruder dynamics within vibrated granular media[J], Communications Physics. accepted.
- [2] Tuo Li, Ke Cheng, Meiyang Hou, et al. The intruder motion in a cubic granular container [J]. Physics of fluids. 2024, 36, 073304. DOI:10.1063/5.0210406.
- [3] Ke Cheng, Meiyang Hou, Tuo Li et al. Tracking the motion of an intruder particle in a three-dimensional granular bed on-board the Chinese Space Station [J]. Microgravity Science and Technology. 2024, 36:15. DOI:10.1007/s12217-024-10102-2.

### 代表专利

- [1] 刘鹏, 王珂, 乔志宏, 等. 一种直线运动系统锁紧机构. 发明专利. 专利号: ZL 2021 1 146237.3. 授权日期: 2022 年 05 月 31 日.
- [2] 丁建智, 李响, 王小丽, 等. 基于空间微重力条件的磁性颗粒运动轨迹测量系统及方法. 发明专利. 专利号: ZL 2022 1 1608565.9. 授权日期: 2023 年 07 月 28 日.
- [3] 刘鹏, 王珂, 乔志宏, 等. 一种颗粒运动驱动实验装置. 发明专利. 专利号: ZL 2023 1 1836181.7. 授权日期: 2024 年 11 月 08 日.

### 主要完成团队

中国科学院物理研究所厚美瑛团队。

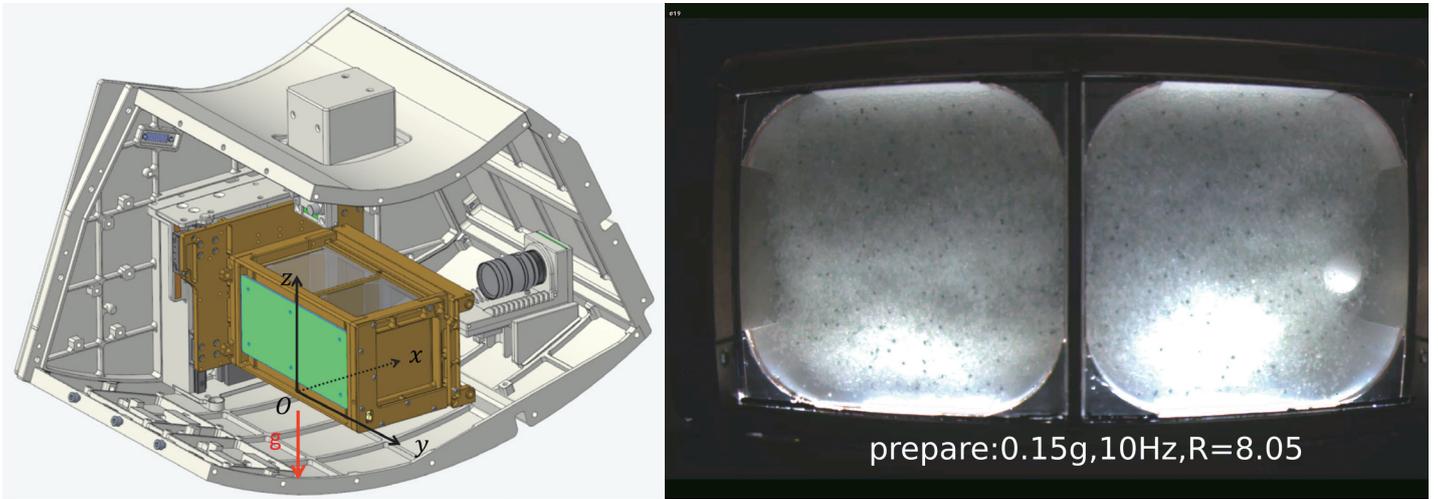


图 3-17 振动驱动颗粒系统中磁颗粒动力学研究实验装置与颗粒床快照

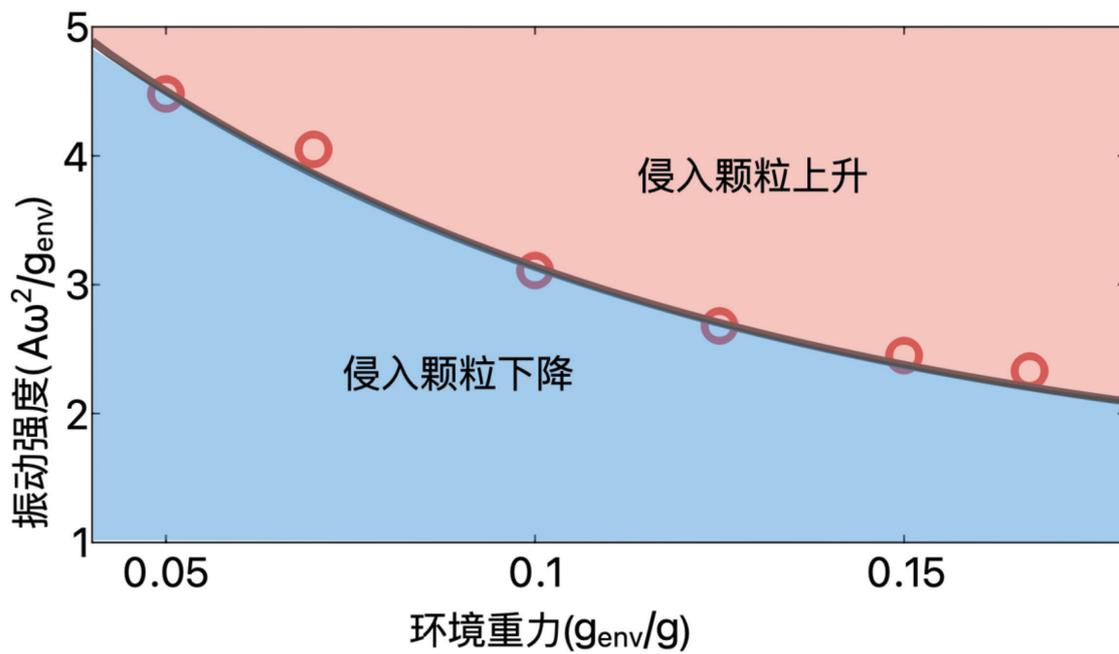


图 3-18 振动和重力水平变化对侵入颗粒动力学的影响  
侵入颗粒下降（上升）转变阈值随重力的增加而减小

# 空间纯扩散和热毛细对流的液滴蒸发传热

## Droplet Evaporation Heat Transfer via Pure Diffusion and Thermalcapillary Convection in Space

首次开展空间长时液滴蒸发全过程观测实验，获得微重力大尺度球冠状液滴，蒸发速率仅为地面的 20%~40%，从底板吸热的热流密度为地面的 30%~70%，建立了空间热毛细效应影响的大尺度液滴蒸发理论模型，为空间两相换热回路、空间热管设计提供理论依据。

### 研究进展

利用两相系统实验柜开展空间蒸发相变与热质传输耦合与换热强化实验研究，完成了微重力环境液滴与薄液层蒸发全过程复杂相变界面流动与传热的多场量、多工况实验研究，构建了液滴体积 3 倍于地面的空间大尺度液滴（最大体积 260 $\mu$ L）全过程蒸发与相变传热的多参量空间实验数据库。发现大尺度液滴形貌有别于地面的扁平状，在空间蒸发全过程保持完美球冠形(图 3-19)；蒸发速率仅为地面的 20%~40%，吸热热流密度为地面的 30%~70%；空间液滴蒸发过程中内部热毛细对流流型从热液波向 Marangoni 对流多涡胞结构转换，但没有形成地面液滴蒸发

中的大尺度对流涡胞结构(图 3-20)。地基普遍采用的 Hu, H., & Larson, R. G. (2002, JPC) 附壁液滴蒸发相变理论模型低估了微重力环境蒸发速率，建立了空间纯扩散下考虑热毛细对流影响的液滴蒸发速率新理论模型，为空间生保系统、空间两相回路和热管等热控装置的工程设计提供了理论依据。

### 应用及前景

本研究可用于指导空间流体管理系统、空间热控系统、航天员生保系统以及地基热流体设备设计等。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Jun Qin, Christophe Minetti, Yuequn Tao, et al. Evaporation of high-volatile binary sessile drop: Influence of concentration [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2024,106:109313. DOI:10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109313.
- [2] Yuequn Tao, Qiusheng Liu. Conditions of enhanced evaporation for nanofluids droplet and inhibition of coffee-ring effect under buoyancy and Marangoni convection [J]. Surfaces and Interfaces. 2023,42:103320. DOI:10.1016/j.surfin.2023.103320.
- [3] Yuequn Tao, Qiusheng Liu, Jun Qin, et al. Thermocapillary convection of evaporating thin nanofluid layer in a rectangular cavity [J]. Microgravity Sciences and Technology. 2023, 35:51. DOI:10.1007/s12217-023-10076-7.

### 代表专利

- [1] 刘秋生, 陶跃群, 朱志强, 等. 一种精确判定冷凝液膜形成起始点的综合测量方法. 发明专利. 专利号: ZL202011443936.3. 授权日期: 2024 年 10 月 1 日

### 主要完成团队

中国科学院力学研究所刘秋生团队。

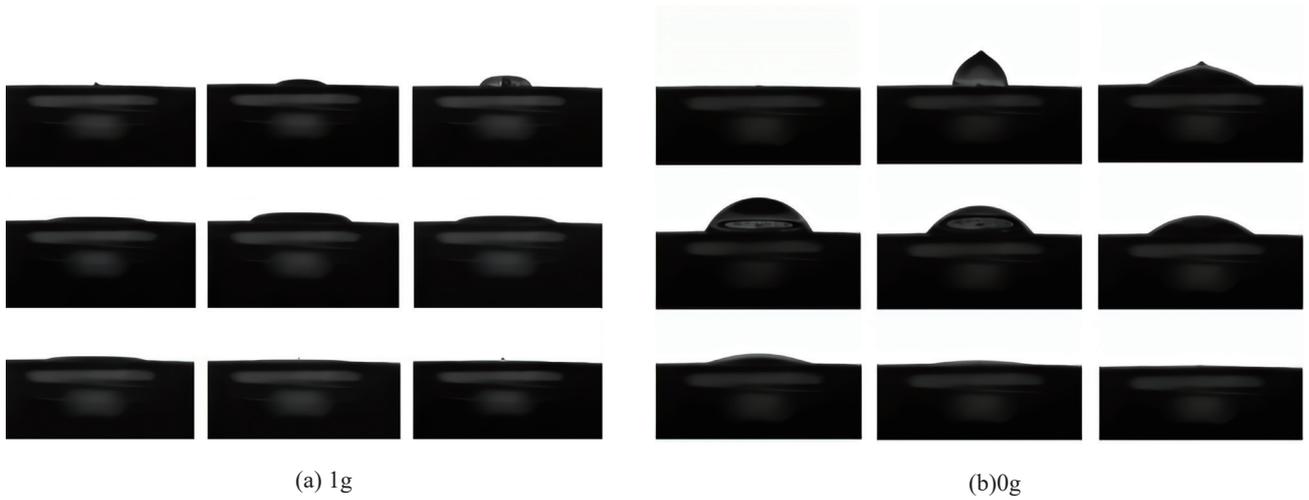


图 3-19 大尺度液滴注液和蒸发过程 (底板温度 30°C, 液滴接触线直径 10mm)

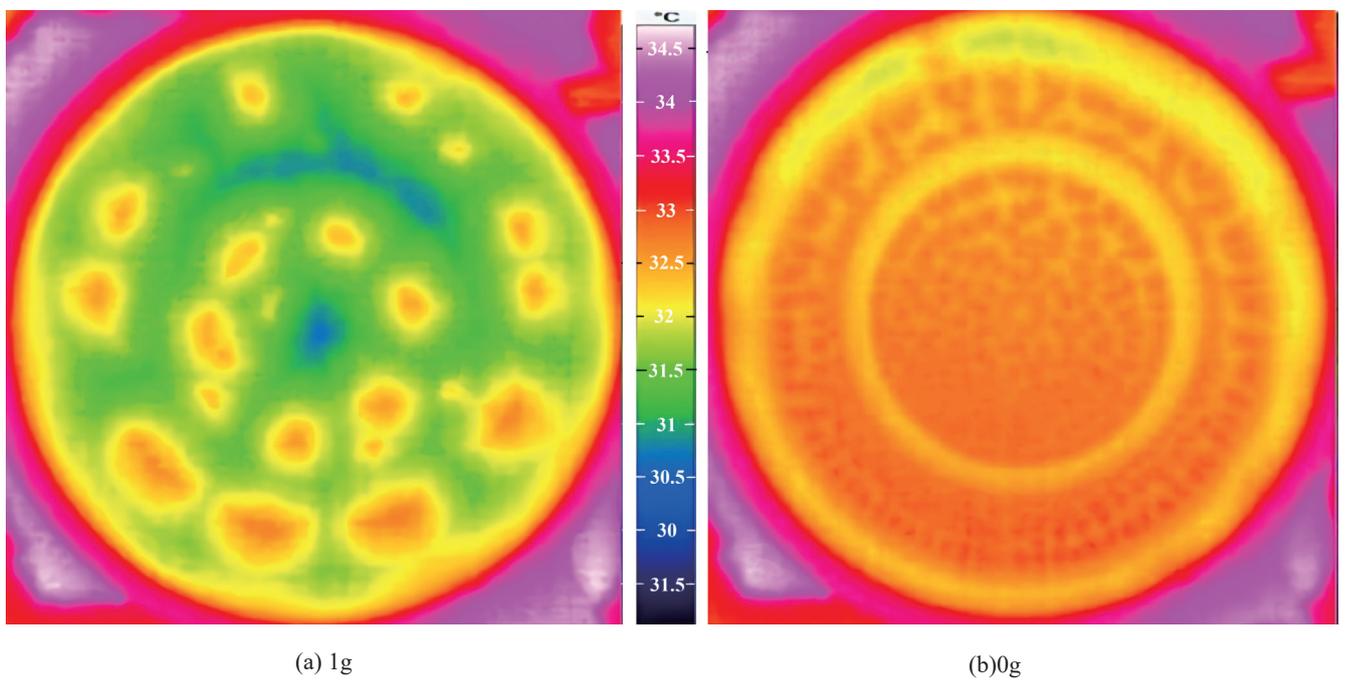


图 3-20 地面浮力对流涡胞和空间 Marangoni 对流涡胞

## 3. 微重力物理学领域

### 3.1 空间材料科学

- (一) 微重力条件下难熔合金快速凝固组织调控 ..... 35
- (二) 微重力条件下壳核型结构、弥散型组织形成机理和调控途径 ..... 37
- (三) 微重力生长锗硒半导体晶体及高性能晶体管制备研究 ..... 39
- (四) 抗空间辐射高性能镁合金的组织设计与服役性能研究 ..... 41
- (五) 凝胶复合润滑材料的舱外服役性能研究 ..... 43
- (六) 微重力对铝硅合金凝固组织、成分偏析和气孔的影响规律 ..... 45

### 3.2 微重力流体与热物理

- (一) 空间板式贮箱流体形貌演化与环状流多模式转换 ..... 49
- (二) 低热流密度核态池沸腾传热现象中的反常重力标度行为 ..... 51
- (三) 低重力下在振动颗粒介质中的侵入颗粒动力学 ..... 53
- (四) 空间纯扩散和热毛细对流的液滴蒸发传热 ..... 55

### 3.3 微重力燃烧科学

- (一) 微重力部分预混火焰的升举及吹熄特性研究 ..... 59

### 3.4 微重力基础物理

- (一) 空间冷原子干涉陀螺技术研究 ..... 63

微重力燃烧科学重点研究近可燃极限燃烧过程和点火、火焰传播、火焰稳定、熄火等基础燃烧过程，揭示其中的物理化学机制，发展燃烧基础理论，深入理解能源、动力系统和相关领域燃烧的重要机理，推动我国在清洁燃烧、节能减排、空天推进动力燃烧技术、火焰合成材料等方面的技术进步。目前已经在国际上首次揭示低流量部分预混火焰的升举及吹熄特性，发现微重力部分预混火焰熄灭过程中的双钩状结构。



中国空间站首次点火实验

### 微重力部分预混火焰的升举及吹熄特性研究

#### Liftoff and Blowoff Characteristics of Partially Premixed Flame under Microgravity

揭示低流量部分预混火焰的升举及吹熄特性，发现微重力部分预混火焰熄灭过程中的双钩状火焰结构，建立基于极限 Damköhler 数的熄灭极限理论模型，有望为未来极端燃烧应用提供理论依据。

#### 研究进展

利用燃烧科学实验柜开展了微重力部分预混火焰的驻定、升举及吹熄实验，在国际上首次揭示低流量部分预混火焰的升举及吹熄特性，发现了微重力部分预混火焰熄灭过程中的双钩状火焰结构（图 3-21A 上排图像），并通过数值仿真（图 3-21A 下排图像）揭示其在辐射熄灭及拉伸熄灭间的竞争关系（图 3-21B）。本研究建立了基于极限达姆科勒数（Damköhler 数， $Dac$ ）的熄灭极限理论模型（图 3-21B 中公式），

#### 应用及前景

可用于分析熄灭过程中的拉伸熄灭和辐射熄灭的模式极限及其交互作用，有望提高近极限湍流燃烧数值仿真精度及速度，为未来极端燃烧应用提供理论依据。

本研究获得的实验结果及理论模型有望为近极限燃烧相关应用提供数据支撑及理论指导，拓宽能源与动力系统中燃烧装置稳定运行的工况边界。



扫码查看联系方式

#### 代表论文

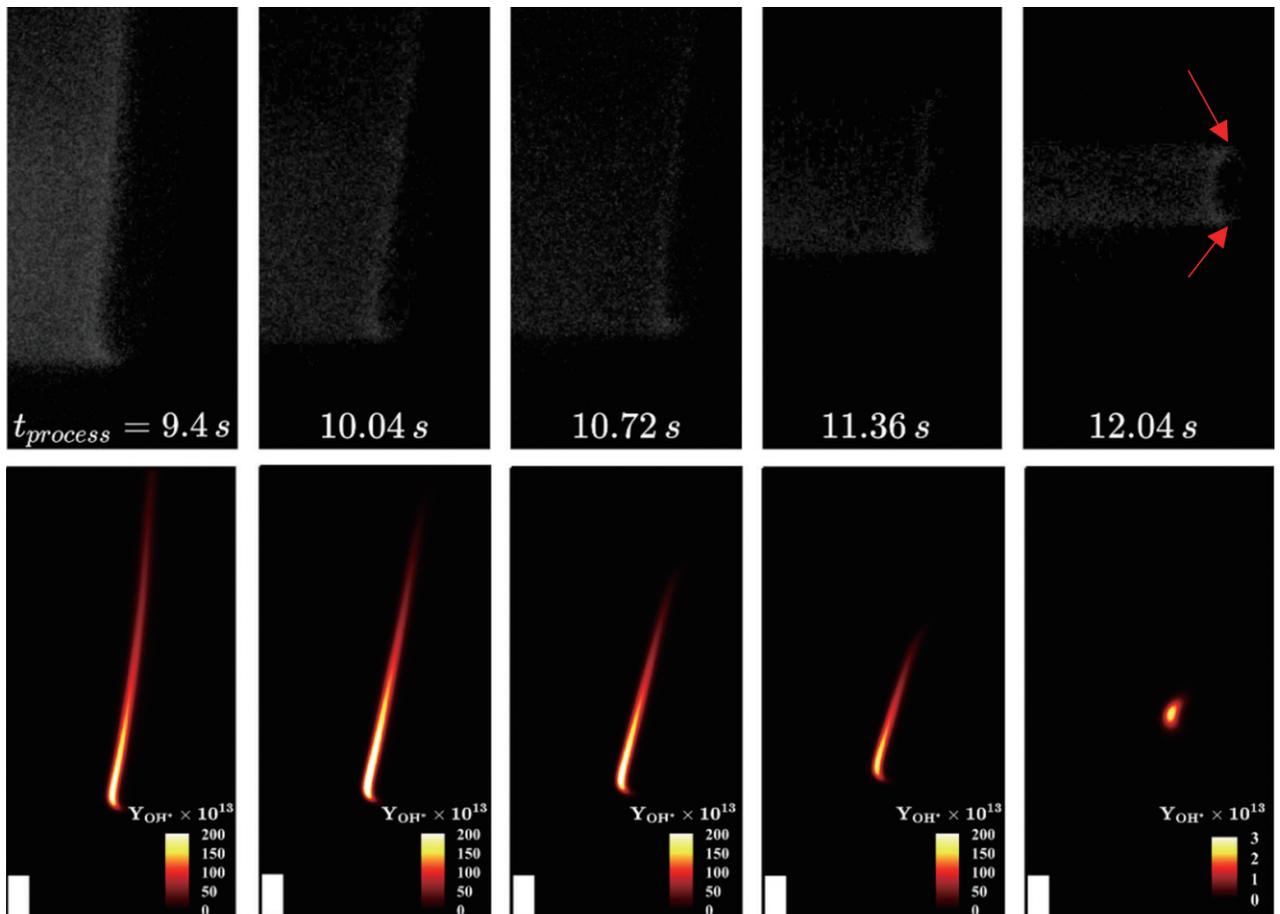
- [1] Yuzhe Wen, Longfei Li, Xingxian Li, et al., Extinction of microgravity partially premixed flame aboard the Chinese Space Station [J]. Proceedings of Combustion Institute. 2024, 40: 105574. DOI:10.1016/j.proci.2024.105574
- [2] 刘有晟, 李星贤, 温禹哲, 等. 中国空间站气体射流火焰科学实验 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 已接收 (2024 年 10 月 30 日).
- [3] Yuzhe Wen, Longfei Li, Xingxian Li, et al, Extinction of microgravity partially premixed flame aboard the Chinese Space Station [C]. 40th International Symposium on Combustion, Milan Italy, Jul 21– 26, 2024.

#### 主要完成团队

清华大学刘有晟团队, 中国科学院工程热物理研究所郑会龙团队。

A

双钩状结构



B

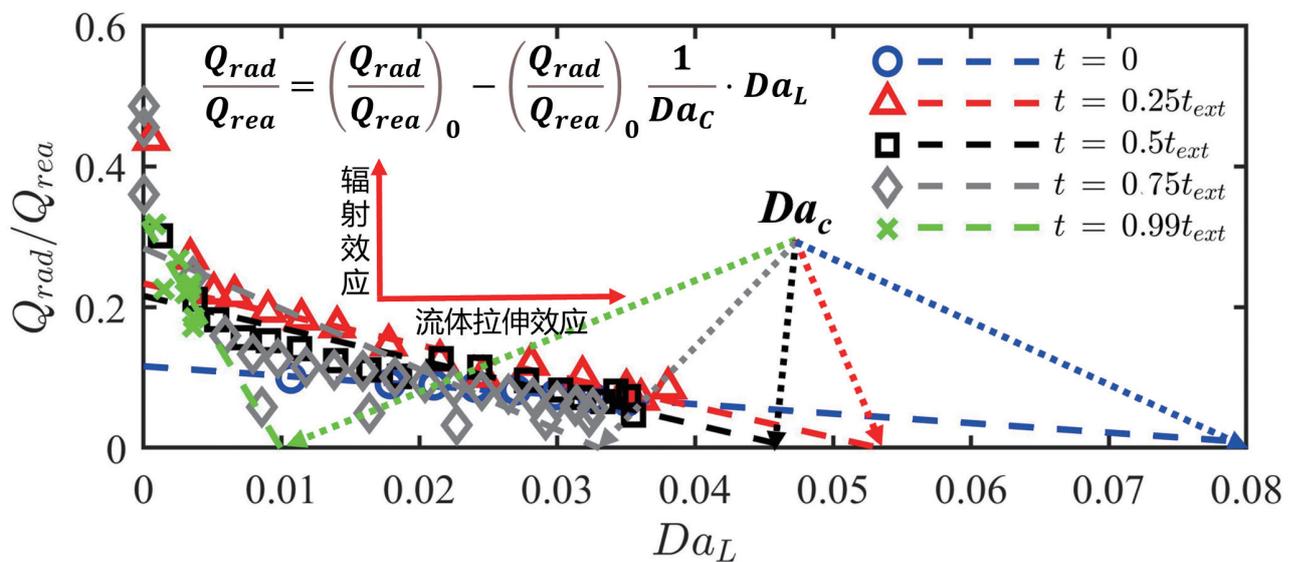


图 3-21 空间微重力部分预混火焰熄灭实验与数值仿真结果

(A) 熄灭过程中的 OH\* 自由基空间分布与双钩状结构 (上排: 空间实验; 下排: 数值仿真);

(B) 数值仿真结果揭示的辐射与流体拉伸效应竞争关系与理论模型

## 3. 微重力物理科学领域

### 3.1 空间材料科学

- (一) 微重力条件下难熔合金快速凝固组织调控 ..... 35
- (二) 微重力条件下壳核型结构、弥散型组织形成机理和调控途径 ..... 37
- (三) 微重力生长锗硒半导体晶体及高性能晶体管制备研究 ..... 39
- (四) 抗空间辐射高性能镁合金的组织设计与服役性能研究 ..... 41
- (五) 凝胶复合润滑材料的舱外服役性能研究 ..... 43
- (六) 微重力对铝硅合金凝固组织、成分偏析和气孔的影响规律 ..... 45

### 3.2 微重力流体与热物理

- (一) 空间板式贮箱流体形貌演化与环状流多模式转换 ..... 49
- (二) 低热流密度核态池沸腾传热现象中的反常重力标度行为 ..... 51
- (三) 低重力下在振动颗粒介质中的侵入颗粒动力学 ..... 53
- (四) 空间纯扩散和热毛细对流的液滴蒸发传热 ..... 55

### 3.3 微重力燃烧科学

- (一) 微重力部分预混火焰的升举及吹熄特性研究 ..... 59

### 3.4 微重力基础物理

- (一) 空间冷原子干涉陀螺技术研究 ..... 63



微重力基础物理方向重点研究空间冷原子物理及应用研究、高精度时频与相关基础物理、复杂等离子体物理研究等，聚焦空间冷原子物理和精密测量等方向。目前超冷原子实验柜运行正常，实现了全光阱的玻色-爱因斯坦凝聚，原子温度冷却到了数十 pK；国际上首次在轨验证主动氢钟技术，并完成自评估，新一代冷原子微波钟在轨闭环，是目前在轨原子钟的最优指标；空间冷原子干涉仪取得重要进展。

# 空间冷原子干涉陀螺技术研究

## Research on Space-Based Cold Atom Gyroscope Technology

在国际上首次突破空间冷原子干涉陀螺技术，攻克了最优角度补偿、在轨转角自标定等关键技术，转动测量不确定度优于  $3.0 \times 10^{-5}$  rad/s，加速度测量分辨率优于  $1.1 \times 10^{-6}$  m/s<sup>2</sup>。实现了首次空间微重力条件下基于原子干涉的量子惯性传感测量。

### 研究进展

针对高精度空间量子惯性传感的技术发展和科学应用，研发了空间双组分铷同位素冷原子干涉仪实验装置（图 3-22(a)），并安装在中国空间站高微重力科学实验柜内开展科学实验。开展了铷同位素的原子冷却实验，冷原子温度低于 6  $\mu$ K，原子数目大于  $2 \times 10^8$ ，开展了在轨的冷原子剪切干涉实验，最长干涉时间达到 200 ms。依据原子剪切干涉条纹，开展了在轨的惯性量测量研究，提出了最优转角比例，从而消除了冷原子团分布导致的干涉条纹退相，提出并实现了基于原子剪切干涉的摆镜角度自标定，分析了影响剪切干涉条纹周期的各项系统误差，在

国际上首次实现了空间微重力条件下的冷原子干涉陀螺，转动测量不确定度优于  $3.0 \times 10^{-5}$  rad/s，同时也实现了在轨的冷原子干涉加速度计，加速度测量分辨率优于  $1.1 \times 10^{-6}$  m/s<sup>2</sup>（图 3-22(b)），相关研究成果发表在《NPJ Microgravity》等国际期刊。相关指标处于国际领先水平，为发展我国空间量子惯性传感技术奠定了基础。

### 应用及前景

空间量子惯性传感技术有望应用于引力波探测、暗物质探测、等效原理检验、参考系拖曳效应验证、重力卫星、重力梯度卫星等各项空间科学和应用任务。



扫码查看联系方式

### 代表论文

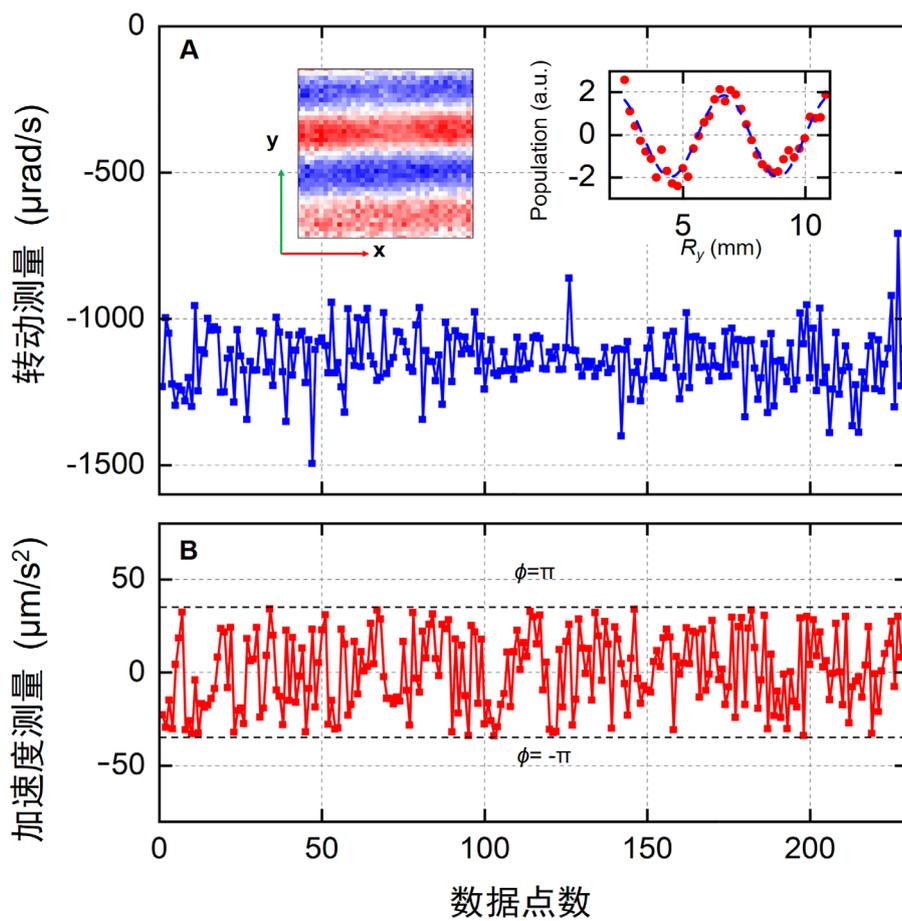
- [1] Meng He, Xi Chen, Jie Fang, et al. The space cold atom interferometer for testing the equivalence principle in the China Space Station [J]. NPJ Microgravity. 2023, 9(58): 1-10. DOI:10.1038/s41526-023-00306-y.
- [2] Jinting Li, Xi Chen, Danfang Zhang, et al. Realization of cold atom gyroscope in space. arXiv:2405.20659. 2024.

### 主要完成团队

中国科学院精密测量科学与技术创新研究院詹明生团队。



(a) 空间冷原子干涉仪



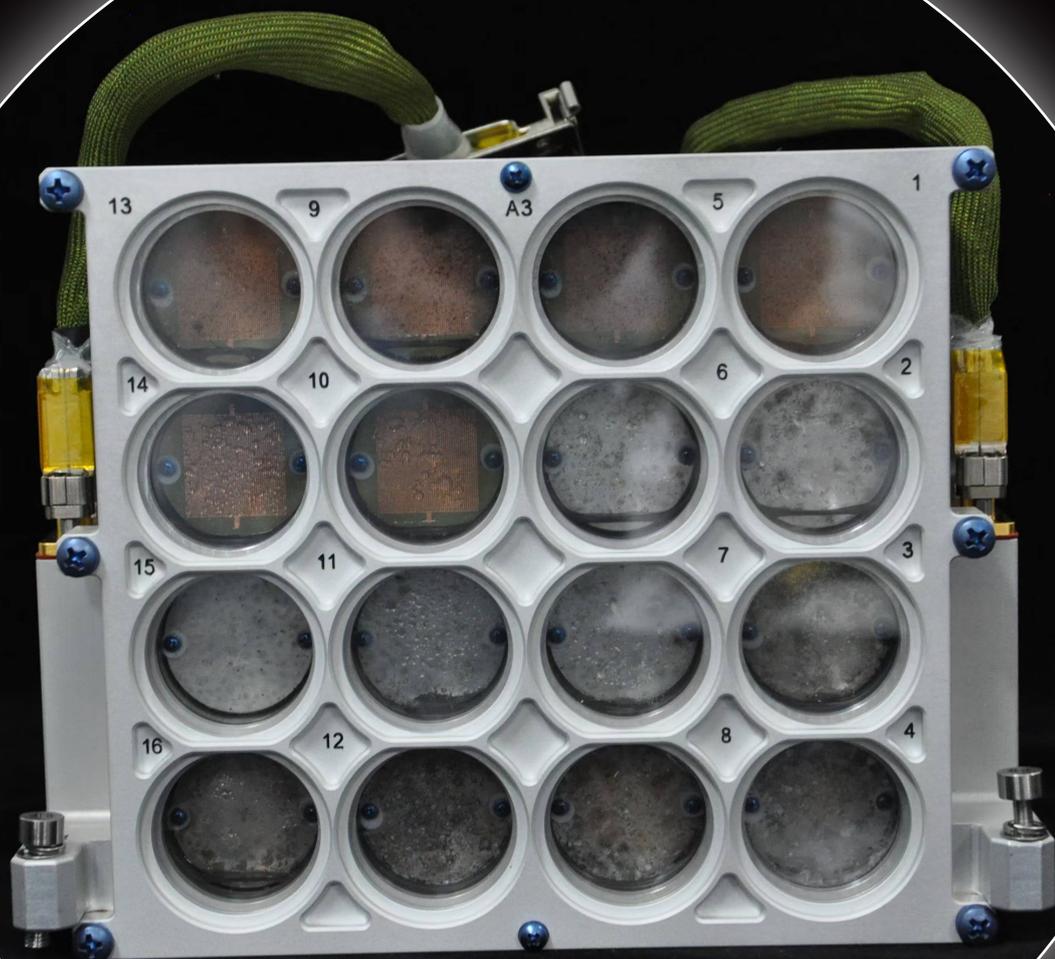
(b) 在轨转动及加速度测量结果

图 3-22 空间冷原子干涉仪在轨实物图及相关实验结果

## 4. 空间新技术与应用领域

(一) 长寿命抗辐照光纤及气密封穿舱技术研究 .....	67
(二) 基于微纳结构的薄膜衍射光学成像技术研究 .....	69
(三) 液态金属空间热管理关键技术 在轨试验验证 .....	71
(四) 空间高效自由活塞斯特林热电转换技术试验验证 .....	73
(五) 空间站微生物防控技术体系验证与应用 .....	75
(六) 空间微藻培养与熟化关键技术研究 .....	77
(七) 柔性芯片与微系统的在轨适应性和稳定性研究 .....	79
(八) 空间高效无线配电技术 .....	81
(九) 空间氢氧燃料电池技术 .....	83

空间新技术与应用领域重点开展了空间应用新技术、航天技术试验、搭载试验等方向的技术试验和在轨验证等。空间应用新技术方向开展了国产高性能、复杂、新型电子元器件和传感器等空间效应机理研究及在轨验证，突破了长寿命抗辐照光纤及气密封穿舱和基于微纳结构的薄膜衍射光学成像等关键技术。航天技术试验方向在新型元器件材料与工艺技术、空间热管理技术、通信导航与控制技术、新型空间能量转换技术、食物再生技术、长期空间环境生物腐蚀防护技术等研究方向取得了系列重要进展：首次揭示了液态金属管内对流的层流 - 湍流转捩特性，填补了过渡区对流换热数据的空白；实现了斯特林热电转换技术首次在轨验证应用；建立国际首个高通量在轨微生物腐蚀试验装置，获得了我国首批在轨环境下航天器材料微生物腐蚀试验数据；首次利用靶向加热技术实现了空间液态微藻由“生”变“熟”。充分利用天舟货运飞船的搭载机会，在轨验证了空间高效无线配电试验，实现了燃料电池国内首次空间环境发电等。空间新技术与应用领域的系列研究进展已推广转化至航天技术领域和民用行业，有望在空间科学、空间应用、空间技术领域获得应用突破。



## 长寿命抗辐照光纤及气密封穿舱技术研究

### Research on Long-Life Radiation-resistant Optical Fiber and Hermetic Seal Technology

攻克了宇航环境中强辐照对光纤的损伤、宽温变对转接座的应力破坏等难题，在同等性能指标的前提下，穿舱气密光纤及转接座的宽温和抗辐照两项关键指标超越国际知名品牌产品，达到世界先进水平。

#### 研究进展

空间站众多舱外载荷与舱内处理设备存在着海量数据的传输与交换需求。类比于人类的五官与大脑之间的神经网络，布设在三个舱段内部和外部的光纤网络与气密封转接座构建了联通舱内外的信息高速通道，使分布在空间站各处的信息系统成为了一个有机整体。

针对微重力、高温深冷、快速交变、空间辐照等恶劣环境带来的诸多问题以及空间站高气密性要求开展技术攻关，先后突破了宽温变条件下光纤微裂纹抑制、相近热膨胀系数光纤涂覆层优选、光纤端面高精度研磨与形貌测量等一系列关键技术和关键工艺，研制的长寿命抗辐照光纤组件（图 4-1）和气密封光纤转接座（图 4-2）各项技术性能指标达到世界先进水平。

自 2021 年 4 月随舱发射入轨以来（图 4-3），经历 3 年 8 个月的在轨使用，性能稳定可靠，其成功在轨应用为中国空间站顺利建造提供了技术与产品支撑。

#### 应用及前景

长寿命抗辐照光纤及气密封穿舱技术可广泛应用于航天、深海、核能等领域，实现航天器内外部不同系统之间的高可靠通信、深海观测站或潜水器等设备之间的数据交换，以及核电站关键部位的监测、核废料储存和处理设施的实时监控等。



扫码查看联系方式

#### 代表论文

- [1] 周海峰, 田国峰, 武德珍. 高强 PI 纤维增强耐温光缆应力特性仿真分析 [J]. 光纤与光缆及其应用技术. 2021(5):6-9,25.DOI:10.19467/j.cnki.1006-1908.2021.05.002.
- [2] 周海峰. 航天器用耐辐射多模光纤的研制 [J]. 光纤与电缆及其应用技术. 2022(1): 20-23.DOI:10.19467/j.cnki.1006-1908.2022.01.006.
- [3] 张志升, 陆兆辉, 阚杰. 一种宇航用光缆及光缆组件的加固设计方案 [J]. 光通信技术. 2022,46(6):82-85.DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.06.016.

#### 代表专利

- [1] 韦正世, 周海峰, 王学海, 等. 一种舱外耐辐照光缆及其制作方法. 发明专利. 专利号: ZL 2016 1 0417966.4. 授权日期: 2023 年 06 月 23 日.
- [2] 高泽仁, 周丰, 王鹏飞, 等. 直光纤式穿舱光纤气密封转接座及连接方法. 发明专利. 专利号: ZL 2020 1 0948899.5. 授权日期: 2024 年 04 月 05 日.
- [3] 张志升, 陆兆辉, 阚杰. 宇航用光缆组件抗弯曲加固方法、光缆组件及验证方法. 发明专利. 专利号: ZL 2022 1 0104222.2. 授权日期: 2024 年 05 月 28 日.

#### 主要完成团队

中国电子科技集团有限公司电子科学研究院, 中国电子科技集团有限公司第八研究所, 中国电子科技集团有限公司第二十七研究所。



图 4-1 舱外长寿命抗辐照光纤组件



图 4-2 气密封光纤转接座



图 4-3 连接舱段的舱外光缆组件

## 基于微纳结构的薄膜衍射光学成像技术研究

### Research on Membrane Diffractive Optical Imaging Technology Based on Micro-Nano Structures

开展了基于微纳结构的薄膜衍射光学成像技术研究，完成了衍射体制空间相机研制，在空间站验证了微纳结构加工、可重复展收等关键技术，达到应用水平。

#### 研究进展

开展轻量化平面光学成像原理和方法研究，建立了微纳结构辅助的成像理论模型，改变了依赖曲面透镜/反射镜的传统成像模式，研制了轻量化微纳结构薄膜光学相机。相机采用  $\Phi 300$  mm 口径微纳结构薄膜光学主镜（图 4-4(a)），其厚度小于  $20\ \mu\text{m}$ ，约为头发直径的四分之一（图 4-4(b)），重量约为  $3.2\ \text{g}$ ，远轻于传统光学主镜。相机采用了可重复展收式光

机结构，实现了主镜的在轨伸展和相机的快速重构，重构后相机成像质量良好。

#### 应用及前景

薄膜衍射成像相机具有光学主镜重量轻、发射尺寸包络小、折叠展开重复伸展控制精度高、空间环境适应性好等特点，相关技术可为空间大口径光学系统研制与应用提供支撑。



扫码查看联系方式

#### 代表论文

- [1]Jiajia Yin, Danbo Mao and Bin Fan, Polyimide membrane with low CTE and CME for potential space optical applications [J]. Polymers. 2021, 13: 1001. DOI:10.3390/polym13071001.
- [2]Qian Luo, Guohan Gao, Dun Liu, et al., Wavefront measurement of a large aperture high image quality off-axis fresnel lens [J]. OPTICS EXPRESS.2023, 31,2:1249-1257. DOI:10.1364/OE.479611.
- [3]Heng Shi, Junfeng Du, Lihua Wang, et al., A high-precision real-time pose measurement method for the primary lens of large aperture space telescope based on laser ranging [J]. Sensors. 2023, 23:4833. DOI:10.3390/s23104833.

#### 代表专利

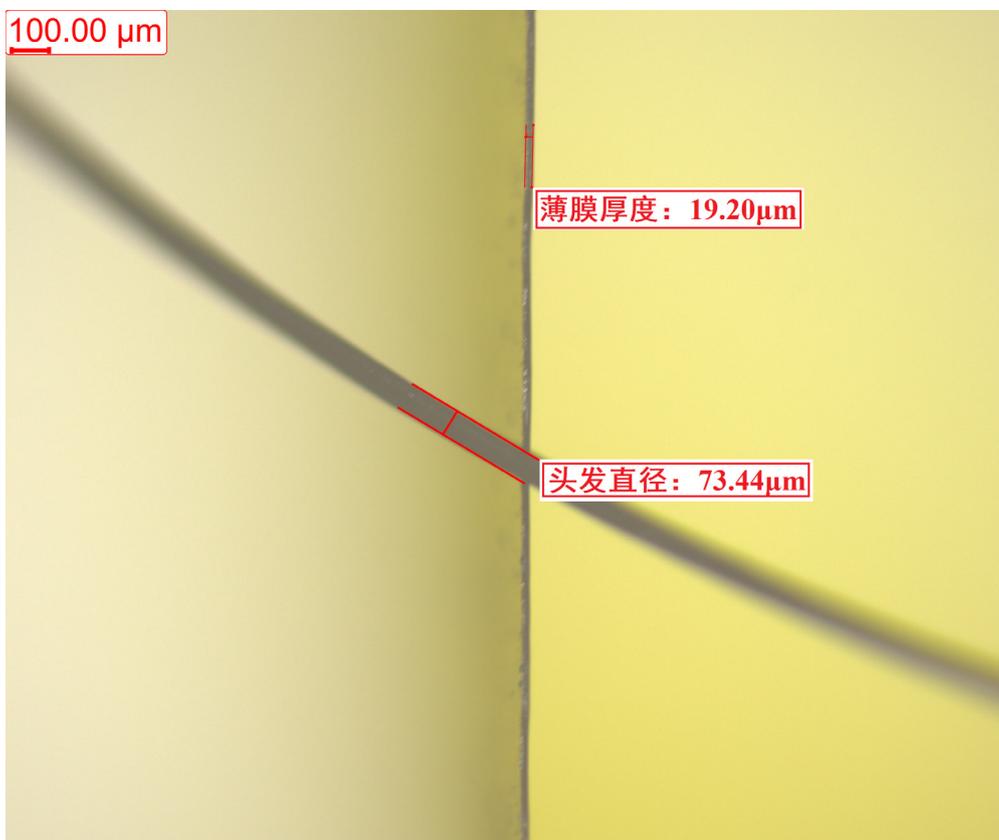
- [1] 刘盾, 汪利华, 高国涵, 等. 一种宽波段折衍混合镜头设计方法. 发明专利. ZL202211633112.1. 授权日期: 2024 年 08 月 30 日.
- [2] 殷家家, 毛丹波, 范斌. 超低热膨胀系数高强度聚酰亚胺光学薄膜材料及制备方法. 发明专利. 专利号: ZL202010586956.X. 授权日期: 2023 年 5 月 26 日.
- [3] 罗倩, 李志炜, 邵俊铭, 等. 一种空间位置变化前后两次检测波像差残差的计算方法. 发明专利. 专利号: ZL202011434660.2. 授权日期: 2023 年 09 月 19 日.

#### 主要完成团队

中国科学院光电技术研究所轻量化微纳结构薄膜光学相机研制团队。



(a) 薄膜主镜



(b) 薄膜厚度与头发直径对比

图 4-4 轻量化薄膜相机

## 液态金属空间热管理关键技术 在轨试验验证

### Experimental Achievements of Liquid Metal Thermal Management Techniques in Space and Related Industrial Utilization

在轨开展了液态金属低流速换热特性实验和增强型相变控温技术试验，验证了多项关键技术，揭示了液态金属管内对流的层流 - 湍流转捩特性，填补了过渡区实验数据空白，相关成果已在民用高效散热技术领域开展产业化应用。

#### 研究进展

液态金属热管理试验装置由一套液态金属流动散热回路试验模块、一套低熔点金属相变控温试验模块和一台控制器组成(图 4-5(a))，利用航天基础试验机柜提供的支撑资源，在轨开展了液态金属过渡区流态对流换热特性和低熔点金属微重力环境增强型相变控温技术验证试验。

获得了液态金属过渡区流态对流换热特性科学实验数据和低熔点金属相变控温曲线，验证了低熔点金属分段受控熔化、膨胀缓冲、接口密封和复合型相变控温等关键技术，揭示了液态金属管内对流的层流 - 湍流转捩特性(图 4-5(b))，填补了过渡区纯强迫对流实验数据空白。

#### 应用及前景

液态金属热管理技术主要包括：界面导热、对流换热和相变控温三种典型方案，可有效解决受限空间内高功率密度器件或设备的严苛散热需求。本次在轨试验获得的成果已应用于民用工业领域功率器件小型液态金属散热回路装置的研发，目前正在开发一款便携式计算平台用刀片式液态金属回路，可为高性能便携式计算机提供高效、紧凑的芯片散热方案，有望实现液态金属高效散热技术在民用领域的应用突破，并逐步拓展到工业领域其他功率器件的热管理需求场景。



扫码查看联系方式

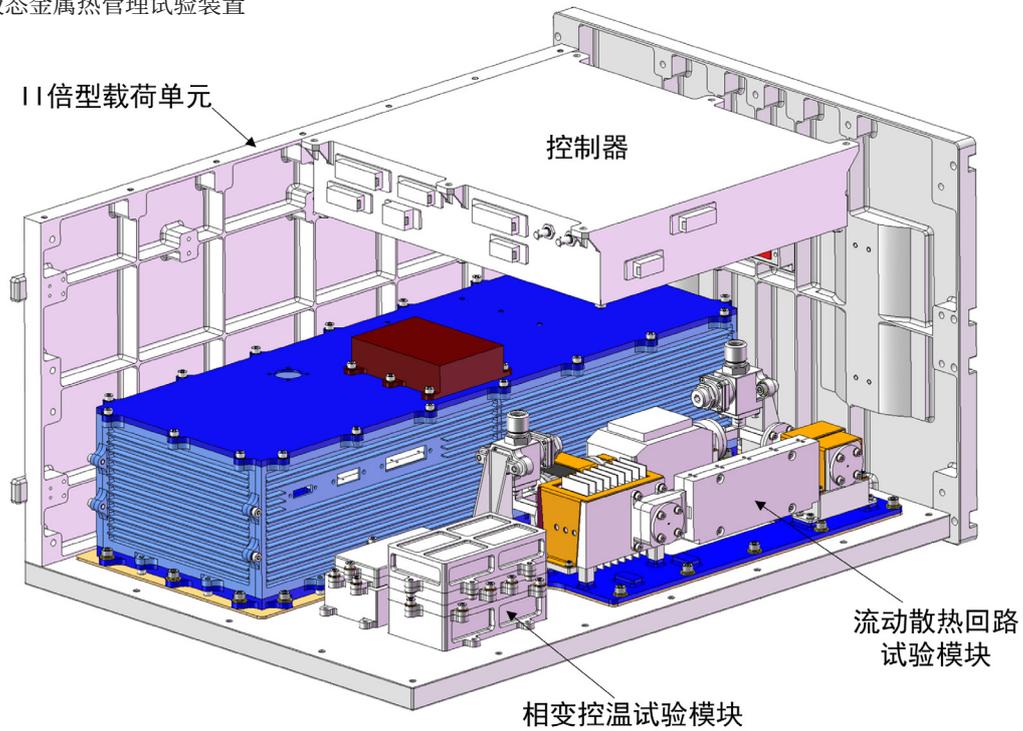
#### 代表论文

- [1] 刘贵林, 尹钊, 杨金禄, 等. 低贝克莱数液态金属对流换热特性在轨微重力实验 [J]. 宇航学报, 已录用.
- [2] Guilin Liu. Thermal Properties of Liquid Metal(Book Chapter). In:Liu,J.,Rao,W.(eds) Handbook of Liquid Metals. Springer, Singapore. 2024. DOI:10.1007/978-981-19-2797-3\_11-1.
- [3] Mengwen Qiao, Yixin Zhou, Guilin Liu, et al. Optimization and testing of DC electromagnetic pump for liquid metal space use [J]. Journal of Propulsion and Power. 2024. DOI:10.2514/1.B39203.

#### 主要完成团队

中国科学院理化技术研究所液态金属与低温生物医学研究中心, 中绿空间液态金属科技(江苏)有限公司。

(a) 液态金属热管理试验装置



(b) 液态金属对流换热特性在轨实验数据

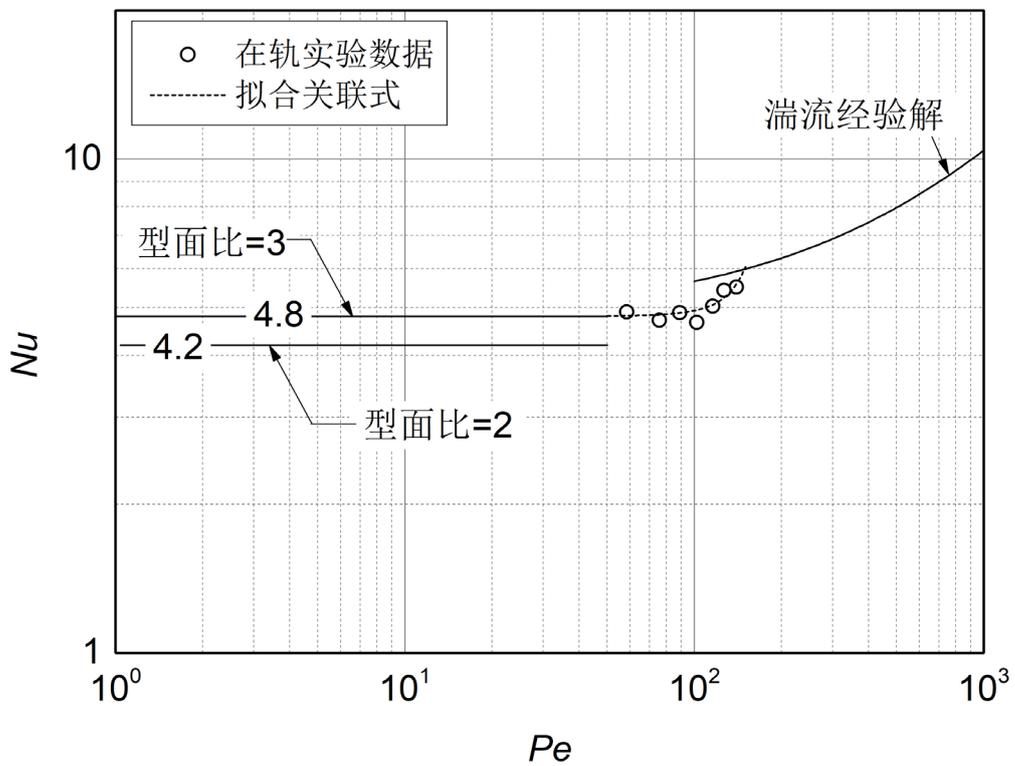


图 4-5 液态金属热管理技术在轨试验

## 空间高效自由活塞斯特林热电转换技术试验验证

### In-orbit Experimental Study of Free Piston Stirling Thermoelectric Conversion Technology on the Tiangong Space Station

开展了高效自由活塞斯特林热电转换技术攻关，研制了空间用自由活塞斯特林热电转换器系统，国内首次开展了空间用百瓦级斯特林热电转换技术在轨验证应用，效率（同等温比条件下）等综合技术指标达到了国际先进水平。

#### 研究进展

斯特林热电转换技术采用闭式循环往复活塞式斯特林发动机将热能转换为动能，并通过耦合线性交流发电机将动能转换为电能。作为航天器电源系统新技术，斯特林热电转换系统具有结构简单、效率高、质量轻、启动快、振动小及噪声低等优点，是未来深空探测等不依赖太阳能的空间任务的技术路线，具有广阔的应用前景。中国空间技术研究院兰州空间技术物理研究所于2022年12月在国内首次开展了空间用百瓦级斯特林热电转换技术在轨验证（试验装置见图4-6），获取了热/冷端温度为695.5K/314.3K，输出功率66.82W和热电转换效率24.72%，相对卡诺循环效率为45.1%，其中效率（同等温比条件下）等综合技术指标达到了国际先进水平。

空间高效自由活塞斯特林热电转换技术试验验证利用航天基础试验机柜开展试验(图4-7)，

通过在轨试验，验证了双活塞自由运动间隙密封技术；热力学和动力学参数匹配及保持技术；热系统高效耦合技术；整机系统空间适应性等关键技术。掌握了多变量，多物理场强耦合、高温高频双活塞自由运动的间隙密封、双自由活塞调相及保持等核心技术。解决了空间高效自由活塞斯特林热电转换技术在轨应用难题，提高自由活塞斯特林热电转换技术的成熟度和空间适应性，该验证成果为未来空间高效同位素电源等不完全依赖太阳能任务的能源技术应用奠定基础。

#### 应用及前景

该成果可应用于月球科考站、木星系及太阳系边际探测等任务，满足我国未来空间任务对于先进空间电源系统的迫切需求，同时在地面点聚焦太阳能发电领域有潜在应用价值，能为我国先进电源技术的发展提供技术储备。



扫码查看联系方式

#### 代表论文

- [1] Xinkui Luo, Xiaojun Wang, Chunjie Yan, et al. Performance prediction and parametric optimization of  $\gamma$ -type free piston Stirling engine [J]. Thermal Science. 2024, 28(1A):269-281. DOI:10.2298/TSCI230709232L.
- [2] 尹钊, 张安, 郭佩, 等. 空间斯特林热电转换技术在轨试验 [J]. 宇航学报. 2024, 45 (1) : 123-132. DOI:10.3873/j.issn.1000-1328.2024.01.013.
- [3] 张安, 闫春杰, 孙述泽, 等.  $\gamma$ 型自由活塞式斯特林发电机稳定性模型分析及验证 [J]. 宇航学报, (已录用).

#### 代表专利

- [1] 孙述泽, 许发铎, 等. 一种共用活塞的并联气体弹簧活塞组件. 发明专利. 专利号: ZL202211373318.5. 授权日期: 2023年7月21日.
- [2] 罗新奎, 王小军, 等. 一种应用于斯特林发电机的加热器组件. 发明专利. 专利号: ZL202111515268.5. 授权日期: 2024年8月28日.

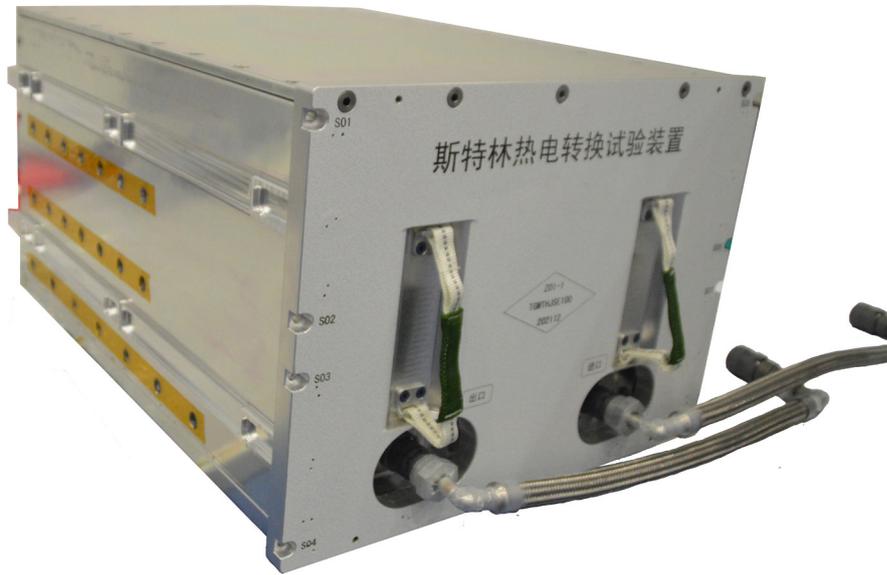


图 4-6 斯特林热电转换装置



图 4-7 双机对置自由活塞斯特林热电转换器

## 空间站微生物防控技术体系验证与应用

### Verification and Engineering Application of Microbial Control Technology System in China space Station

首次系统性开展空间微生物防控技术体系全链条在轨试验验证。研制的国际首个高通量在轨微生物腐蚀试验装置，实现了航天材料微生物腐蚀在轨评价，支撑了型号任务的航天器材料选型应用。

#### 研究进展

聚焦空间站内微生物安全，围绕微生物风险识别、检测、评价和控制四个关键环节开展技术验证。(1) 通过居留舱微生物监测计划 (CSS Habitation Area Microbiome Program, CHAMP) 在空间站内开展持续 2 年的环境微生物追踪，建成的空间站微生物菌种资源库，形成了我国空间站运营早期舱内微生物分布的“基准线”，实现了对国家重要战略性微生物资源的规范化收集、保藏、整理与应用 (图 4-8(a) 和图 4-9(a))。

(2) 基于微流控芯片、实时荧光等温扩增技术在国内首次实现了微生物的在轨快速检测，验证了“样品进，结果出”的一体化自动化检测技术。开发的表面微生物显色检测片具有可靠、安全、稳定、便捷的特点，完成了在轨验证和工程化应用 (图 4-8(b))。(3) 打破航天器材料性能评价的技术与场景限制，首次将航天器材料的微生物腐蚀评价从地面迁移到了空间站原位环境，获得了我国首批微生物腐蚀航天器材料的试验数据，阐明了微重力环境介导的

生物腐蚀行为的天地差异，推动了航天器材料服役安全评价标准和体系的升级 (图 4-8(c) 和图 4-9(b))。(4) 实现了基于功能化接枝的安全高效抗菌纺织品系列技术和无残留消毒巾产品在轨应用，有效解决了传统擦拭巾化学药剂残留和微重力环境中漂浮问题 (图 4-8(d))。上述研究成果已经牵引了后续空间站微生物防控技术的工程化应用。

#### 应用及前景

国内首次提出的空间站微生物防控技术体系，研究成果已应用于航天器型号任务的材料选型，评估航天器材料在轨抗菌防霉性能，验证航天器材料服役性能。研究成果能够引领空间微生物安全与控制的技术发展方向，包括空间站微生物动态变化和溯源分析、微生物清洁与控制策略制定、空间微生物腐蚀损伤动力学模型搭建、在轨腐蚀防护技术开发等。同时，还服务于航天器微生物控制标准、国家空间微生物安全标准的修订等。



扫码查看联系方式

#### 代表论文

- [1] Wende Zhang, Nana Chen, Hong Yin, et al. Initial attempt: Design and application of microorganism-material interaction test on on-orbit space microgravity conditions [J]. Acta Astronautica. 2024. DOI:10.1016/j.actaastro.2024.12.006.
- [2] Qianqian Liu, Wende Zhang, Hong Yin, et al. Study on biodegradation of polyurethane coating on PCB by *Aspergillus brasiliensis* in space [J]. Chemical Engineering Journal. 2024, 490:151514. DOI:490. 151514. 10.1016/j.cej.2024.151514.
- [3] Qianqian Liu, Qin Zhang, Junxia Yuan, et al. The interaction between *Aspergillus brasiliensis* and exposed copper circuits in the space microgravity environment [J]. Corrosion Science. 2024, 234:112132. DOI:10.1016/J.CORSCI.2024.112132.

#### 主要完成团队

航天神舟生物科技集团有限公司，北京理工大学，西南交通大学，中国科学院国家空间科学中心，北京科技大学。

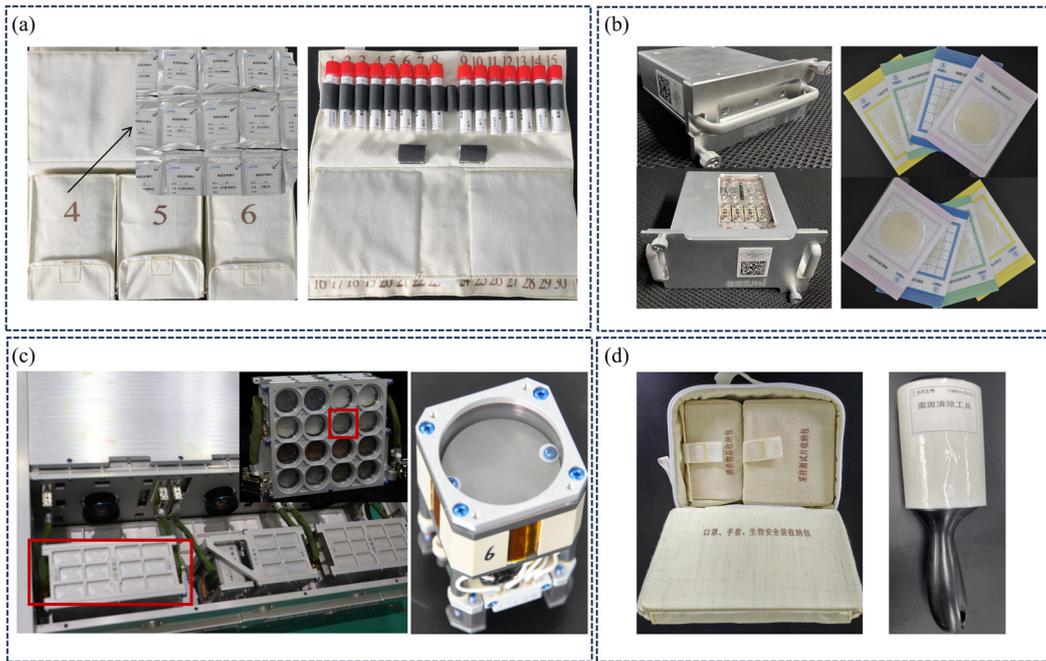


图 4-8 微生物防控技术体系在轨试验载荷

上图中 (a) 采样模块, (b) 检测模块, (c) 高通量在轨微生物腐蚀试验装置, (d) 消杀模块。

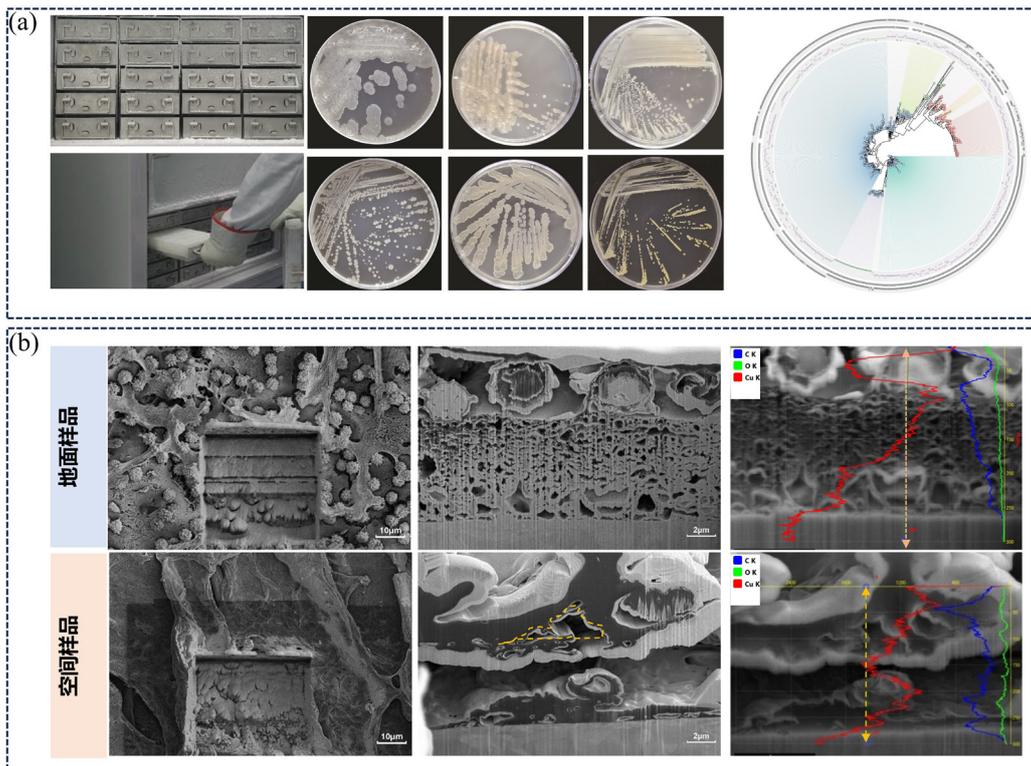


图 4-9 微生物防控技术体系验证代表性结果

上图中 (a) 空间站微生物菌种资源和多样性, (b) 航天器材料微生物腐蚀行为的天地差异。

代表  
专利

- [1] 张文德, 印红, 徐侃彦, 等. 适用于微重力环境的材料微生物腐蚀试验装置. 发明专利. 专利号: ZL201811407109.1. 授权日期 2024 年 01 月 23 日.
- [2] 印红, 张文德, 徐侃彦, 等. 多因素一体化筛选平板及其制作工具和制作方法. 发明专利. 专利号: ZL201910022008.0. 授权日期 2021 年 10 月 26 日.
- [3] 袁俊霞, 马玲玲, 印红, 等. 一株地衣芽孢杆菌及其在行星保护领域中的应用. 发明专利. 专利号: ZL202311757764.0. 授权日期 2024 年 04 月 30 日.

## 空间微藻培养与熟化关键技术研究

### Research of Controlled Cultivation and Microwave Processing of Microalgae in Space

研制了在微重力环境下使用的微藻培养与熟化试验装置，在轨完成微藻培养与熟化技术验证。微藻在轨培养验证了微藻在克服微重力、辐照、受控环境等不利因素下的持续生长和光合放氧能力，探索了微藻在空间微重力环境的生长发育规律与物质交互特性。研制了空间受控环境下微波靶向加热新型专用装置，首次利用靶向加热技术实现在轨微藻的由生变熟，验证了微藻在轨熟化的营养保留特性及食品化应用潜力。

#### 研究进展

研制了微重力环境下微藻培养与熟化试验装置（图 4-10），平行采用液态基和固态基两种培养方式开展在轨试验。液态基培养方式下，采用密闭模块培养方式，获得了在轨微藻分裂、生长和再分裂的传代生长图谱，揭示了微藻在空间受控环境下的生长发育规律与物质交互特性（图 4-11）。固态基培养方式下，采用生物膜贴壁培养技术，利用多种微孔锁水材料复合成型。通过毛细作用将营养盐输送至基质表层供藻细胞生长，验证了微藻在克服微重力、辐照、受控环境等不利因素下的持续生长和光合放氧能力。

开发了适用于空间微重力的专用微波熟化模块，在确保微藻杀菌和熟化的要求下，攻克了微失重状态下不确定体积液态物料漂移引发的微波能量定向供给难题，开展了液态基微藻

在轨原位熟化试验，发现微重力条件下反应器内液态食品内部的对流传热大幅降低，反应器压力变化、气泡生成状态和热量分布规律均与地面对照组呈现出显著差异（图 4-12）。

项目组对返回微藻样品进行了生理特征、分子机制、遗传育种等方面的研究与分析（图 4-13），评估了空间生长的微藻与地面培养微藻之间的差异，以及微藻在熟化前后的功能和营养变化，验证了作为食物资源的安全性。

#### 应用及前景

在轨原位熟化微藻技术作为极端环境（深空、深海、深地）任务中应急食品加工的方案，其小体积、低功耗等特点匹配特殊任务过程中的轻量化、便捷性等需求，可以实现可持续的食物供给；基于靶向熟化技术的小型化食品原位加工技术可以应用于精细化食品加工环节。



扫码查看联系方式

#### 代表论文

- [1] Jian Zhang, Huayu Yang, Yuying Sun, et al. The potential use of microalgae for nutrient supply and health enhancement in isolated and confined environments [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2024, 23(4):e13418. DOI:10.1111/1541-4337.13418.
- [2] Jian Zhang, Yingying Zou, Bowen Yan, et al. Microwave treatment on structure and digestibility characteristics *Spirulina platensis* protein [J]. *Current Research in Food Science*. 2023, 7:100581. DOI:10.1016/j.crf.2023.100581.
- [3] 张峰, 李海兵, 罗骋, 等. 基于 W5300 的 TFTP 客户端文件传输系统设计 [J]. *仪表技术与传感器*. 2022, (11): 50-54. DOI:10.3969/j.issn.1002-1841.2022.11.010.

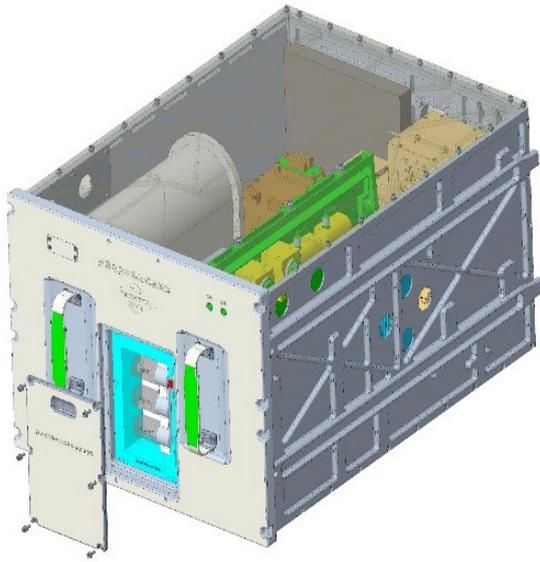


图 4-10 微藻培养与熟化试验装置

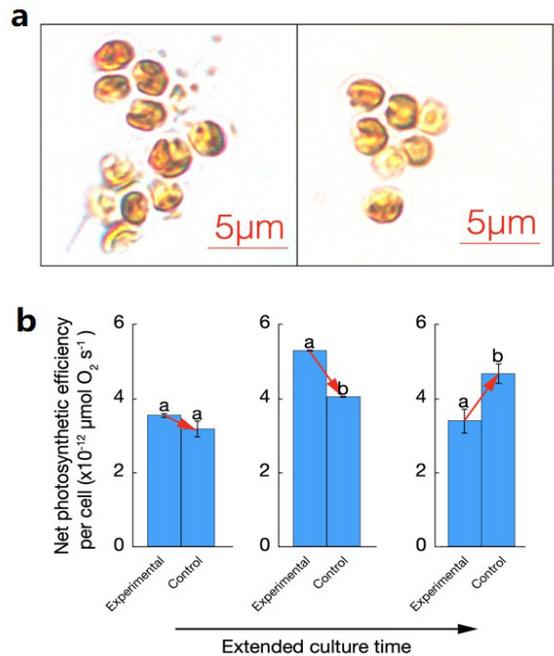


图 4-11 微藻培养生理参数监测

a: 在轨及地面培养微藻尺寸示意图;

b: 微藻细胞净光合效率变化

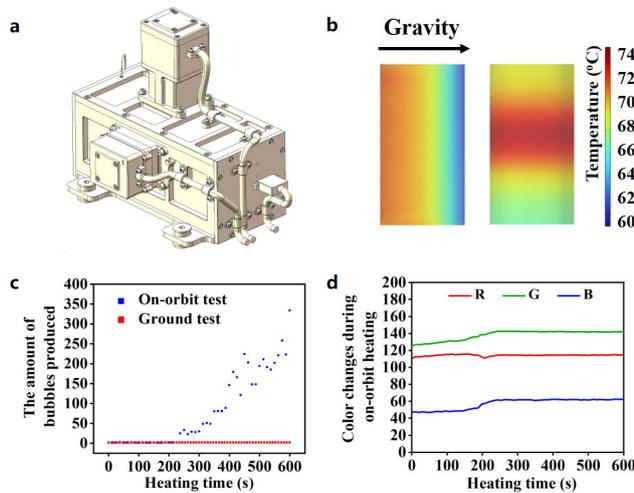


图 4-12 微波靶向加热方法设计及在轨观测结果

a: 在轨微波熟化装置图; b: 在轨及地面微波熟化效果预测;

c: 熟化过程气泡生成数量变化; d: 物料在轨熟化过程 RGB 变化

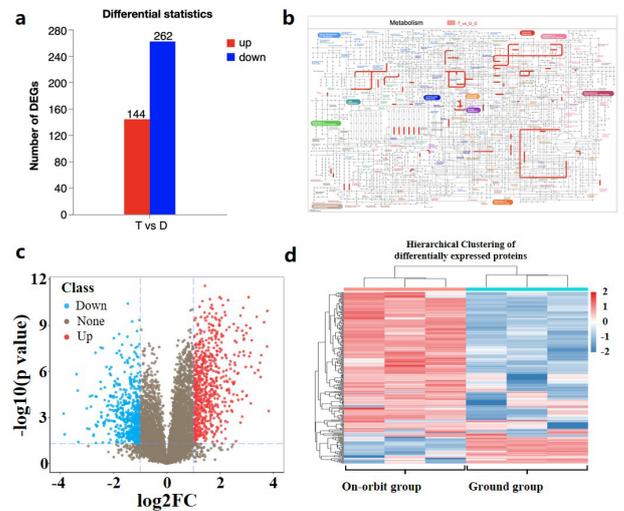


图 4-13 返回培养及熟化微藻样品蛋白质组学测试

a: 在轨及地面培养微藻的差异蛋白数量;

b: 在轨及地面培养微藻样品差异蛋白的代谢通路分析;

c: 在轨及地面熟化微藻样品的典型差异蛋白火山图;

d: 在轨及地面熟化微藻样品的差异蛋白表达热图

代表  
专利

[1] 李海兵, 罗骋, 许思宇, 等. 一种自动化太空鱼类培养试验装置. 发明专利. 专利号: ZL202111015127.7. 授权日期: 2023 年 02 月 28 日.

主要  
完成  
团队

北京航天控制仪器研究所, 崂山国家实验室, 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 江南大学, 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 中国海洋大学.

## 柔性芯片与微系统的在轨适应性和稳定性研究

### Research on the Adaptability and Stability of Flexible Chips and Microsystems in Space Orbit

突破了超薄晶圆减薄技术以及柔性封装制造技术，使微系统中的芯片和基板均满足可弯、可柔的需求，并验证了柔性微系统的在轨适应性和长期稳定性，该研究为在轨电子系统的共形和减重提供一种全新技术途径。

#### 研究进展

本次研究以柔性应变采集系统为对象，包含了运放芯片、flash 芯片和 wifi 芯片等多种超薄芯片，它们都是基于超薄柔性化晶圆减薄研磨技术开发，在无损、高平整度的前提下使这些通用芯片厚度降至 25 $\mu\text{m}$  以下；同时针对柔性芯片厚度薄、易弯曲以及易破损的特点，还使用了封装柔性化设计与集成制造技术，使柔性电子产品中的基板、器件及系统均满足可弯、可柔的需求，并进一步提高了系统的集成度和性能（图 4-14）。上述技术的应用为柔性应变采集系统在复杂的太空环境中准确和稳定地采集应变数据奠定了坚实的基础。

经历 1 年多的在轨运行与测试，柔性芯片与微系统运行良好，采集的信号经过地空数据链完整传输至地面，应变数据完整和准确，精准地反映了试验装置的受力情况（图 4-15）。试验结果表明了柔性芯片与微系统具有超轻柔、实时在线、易与装备集成和高稳定性等优势，

可实现航天器长时间的实时健康检测。微系统整体性能达到了国际先进水平，该技术填补了我国柔性芯片和微系统在航天领域应用的空白，对促进航天器轻量化和高集成度升级具有里程碑式的意义。

#### 应用及前景

柔性芯片和微系统可解决航天器的实时健康检测难题，及时发现航天器在轨工作时的异常形变，提前警示、防范航天器关键部位的破损和失效问题的发生。同时柔性芯片与微系统可安装于任意狭窄区域，不会改变气动外形，适配性极好，并且其低重量特性使得发射和装载成本低，可推动航天医学、航天探测、航天监测等领域的发展。



扫码查看联系方式

#### 代表论文

- [1] Wei Jian, ZhaoXian Wang, Peng Jin, et al. Subsurface damage and bending strength analysis for ultra-thin and flexible silicon chips [J]. Science China Technological Sciences. 2023, 66(1): 215-222. DOI:10.1007/s11431-021-2021-4.
- [2] Siyu Chen, Wenhan Lyu, Gang Wang, et al. Mechanics analysis of ultra-thin chip peeling from substrate under multi-needle-ejecting and vacuum-absorbing [J]. International Journal of Solids and Structures, 2021, 224: 111009. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2021.02.020.

#### 代表专利

- [1] 冯雪, 简巍, 焦阳, 等. 柔性半导体结构及其系统和形成方法. 发明专利. 专利号: ZL202210750557.1. 授权日期: 2023 年 06 月 16 日.
- [2] 冯雪, 李海成, 陈颖. 柔性半导体薄膜的转印方法, 装置及液滴印章. 发明专利. 专利号: ZL202110168584.3. 授权日期: 2023 年 01 月 20 日.
- [3] 冯雪, 焦阳, 王鹏. 柔性电子器件的制备方法. 发明专利. 专利号: ZL202210127766.0. 授权日期: 2022 年 10 月 04 日.

#### 主要完成团队

清华大学柔性电子技术实验室团队。

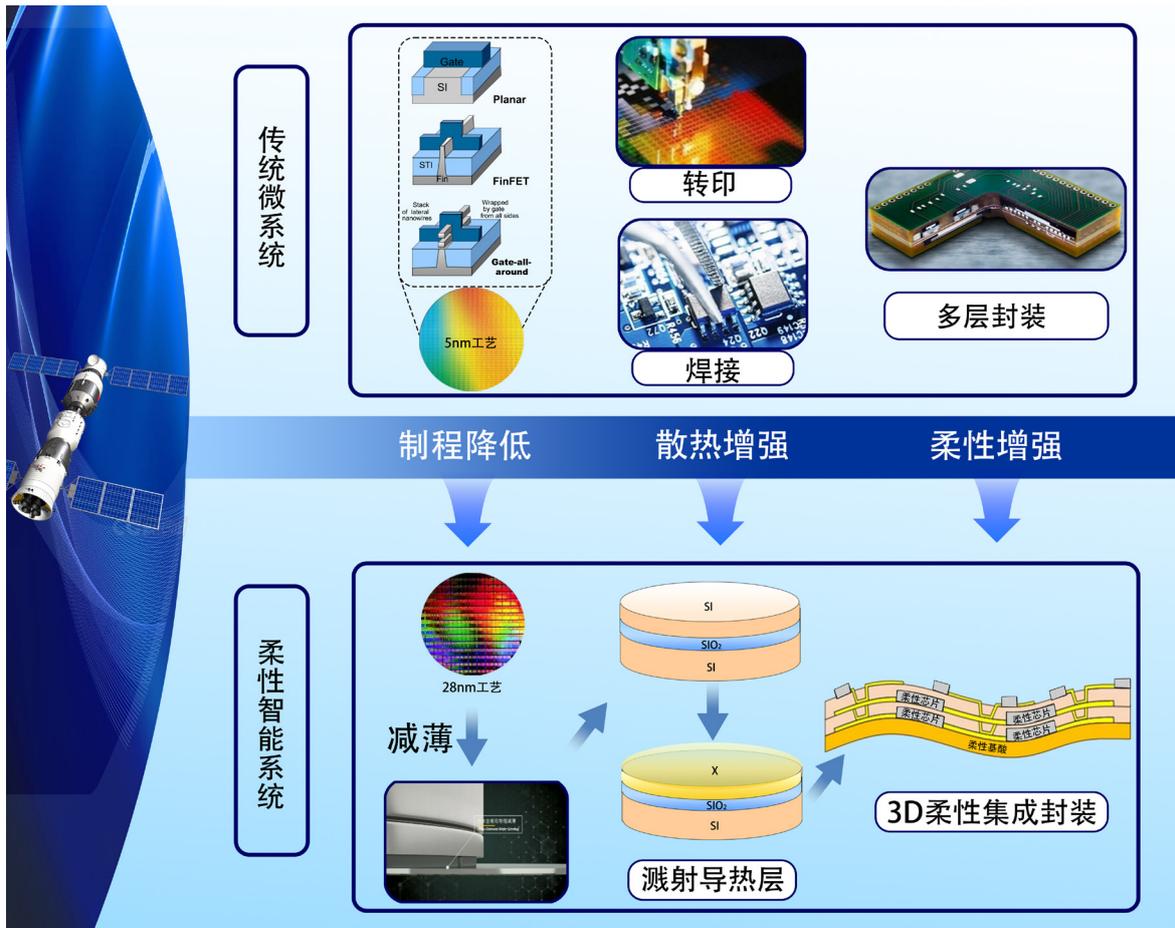


图 4-14 柔性微系统的超薄芯片技术和柔性封装技术

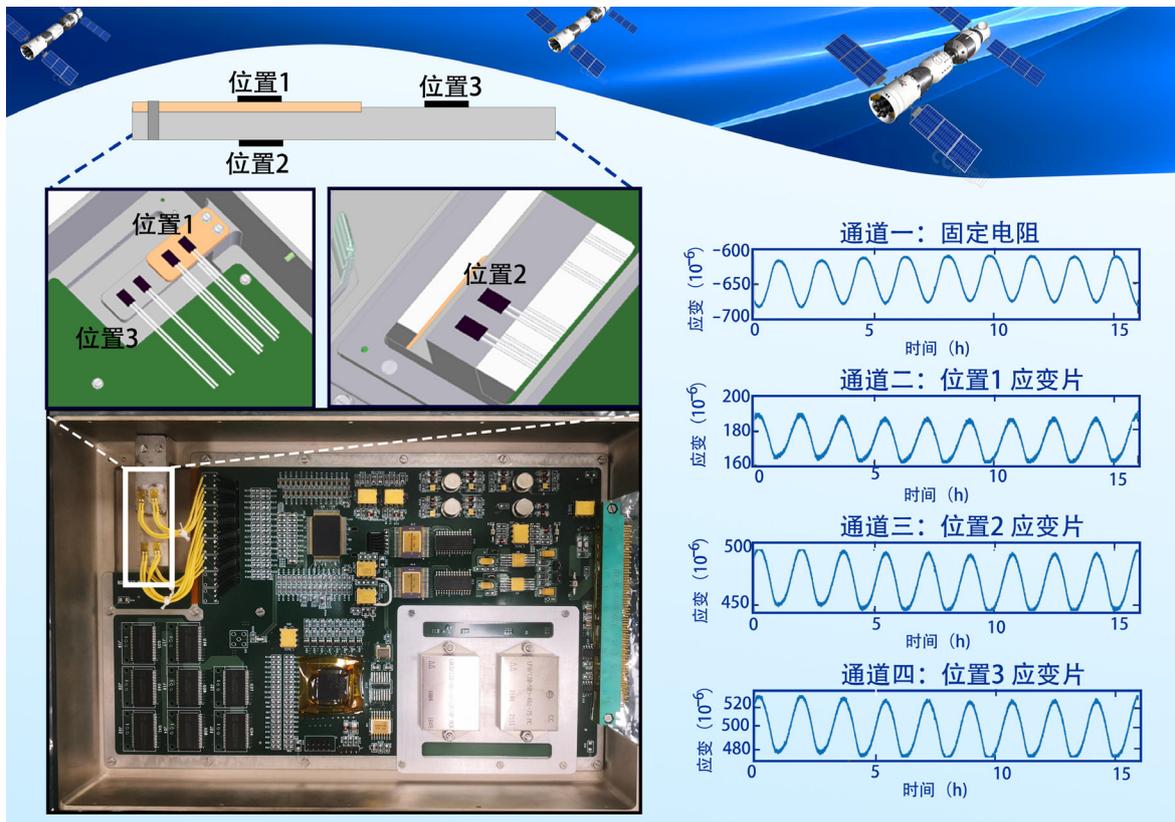


图 4-15 柔性应变采集系统的在轨实验方案与代表性数据

## 空间高效无线配电技术

### Space-Efficient Wireless Power Distribution Technology

空间高效无线配电试验验证系统在天舟七号货运飞船进行了在轨试验，首次实现了无线配电技术在航天器舱外环境下应用，系统各项遥测数据正常，工作性能稳定，为探月工程等重大任务提供了技术支持。

#### 研究进展

空间高效无线配电试验验证系统通过开展空间高效、高可靠无线配电系统架构设计、磁屏蔽耦合机构优化、机电热一体化设计等关键技术研究，验证空间环境下非接触式供电传输技术。为后续载人月球探测、月面科研站等任务做好关键技术攻关和技术储备。同时，系统配置了照明负载，可在地影期为舱外摄像头提供照明，可辅助货运飞船系统开展舱外太阳翼等设备状态监视和数据回溯等工作（图 4-16）。

试验验证系统开展了空间高效高可靠无线配电系统架构设计，对高效高频 DC/AC 电能逆变变换技术、高效磁屏蔽耦合机构设计等关键技术开展验证（图 4-17）。同时，通过搭载试验，对近场无线配电技术所必需的关键国产原材料、元器件（高频利兹线、高频谐振电容、高频磁芯等）开展在轨验证和应用，评估在轨热应力、

空间辐照环境下的电性能数据，并推动核心国产元器件“自主可控”工作。

本次搭载飞行的磁耦合机构验证采用了基于磁力线约束的磁场定向技术，对磁场方向进行控制。通过采用新型利兹线圈、铁氧体导磁材料以及基于聚丙烯电容器的谐振腔有效的减小高频磁场的涡流损耗，提高系统的效率，在轨试验结果表明无线传输效率达到 91.7%，实现了高效非接触能量传输（图 4-18）。

#### 应用及前景

空间高效无线配电可以减少提升航天器系统能源互联灵活性和可靠性，简化空间对接过程，降低故障风险，同时支持在轨服务和维护，减少维护难度。目前已明确在后续月球探测任务中可得到应用。



扫码查看联系方式

#### 代表论文

[1] Xianrui Zeng, Tianran Cheng, Chaoyang Shen, et al. An inductive power transfer system for lunar rovers [C]. 2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference. Harbin. 2024. 5148-5152.

#### 主要完成团队

中国空间技术研究院总体设计部，中国空间技术研究院 513 所。



图 4-16 空间高效无线配电试验验证系统在轨工作照片

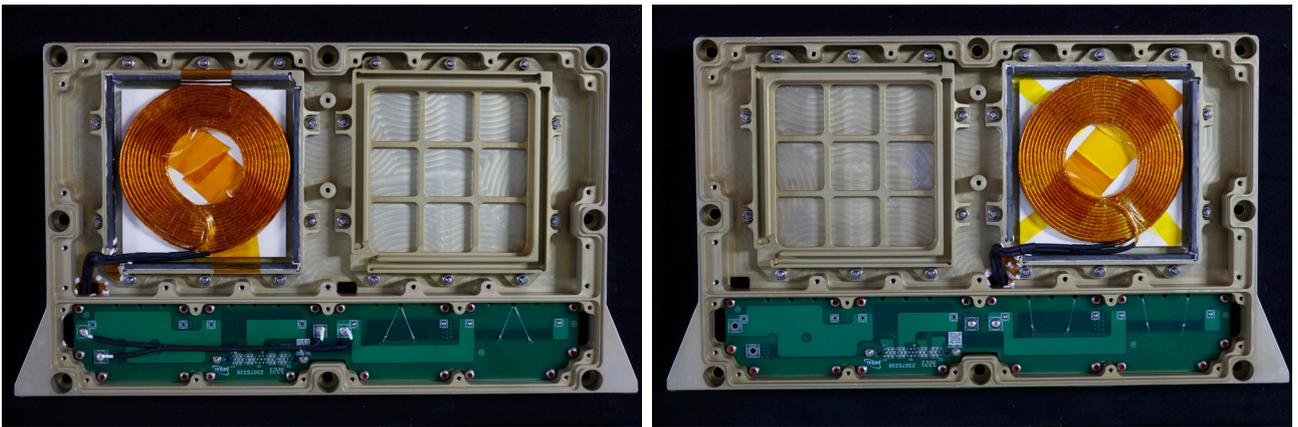


图 4-17 发射端、接收端磁屏蔽耦合机构

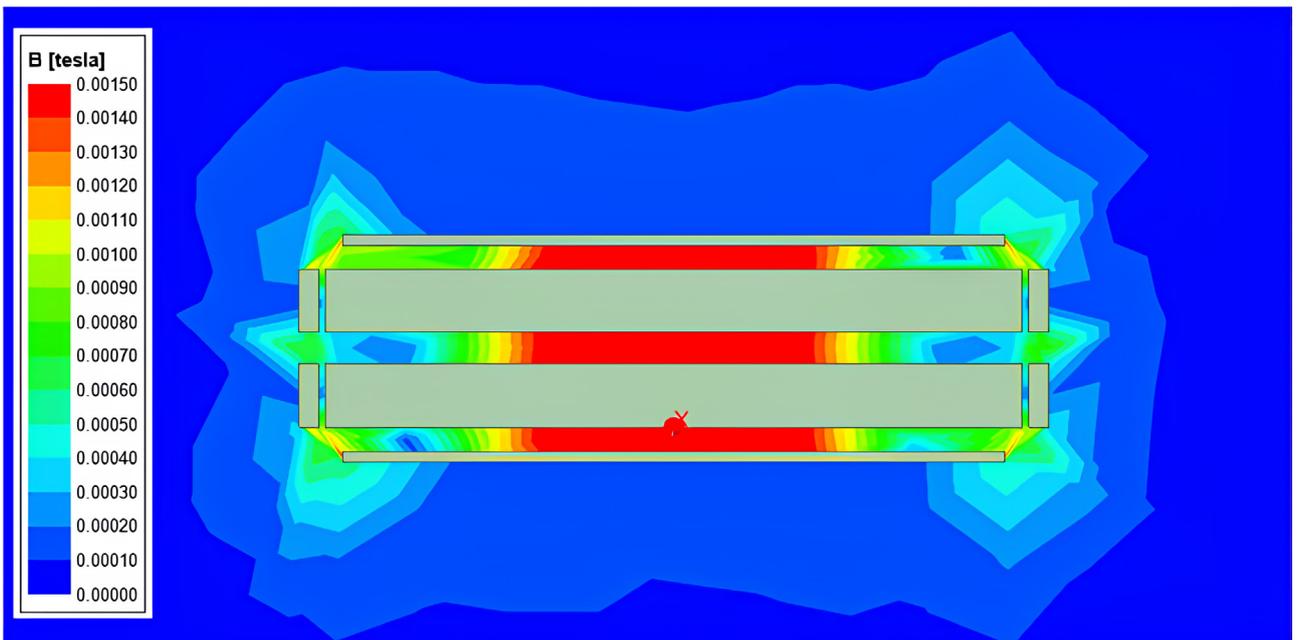


图 4-18 磁屏蔽耦合机构磁场分布情况

## 空间氢氧燃料电池技术

### Space Hydrogen-oxygen Fuel Cell Technology

空间氢氧燃料电池技术实现了燃料电池国内首次空间环境发电，初步获得了在轨梯度发电和空间启停特性规律，通过原位监测获得了流道内水气分布状态，对空间燃料电池优化设计和推动空间应用具有重要意义。

#### 研究进展

在天舟五号货运飞船舱外完成了国内首次空间氢氧燃料电池在轨实验。本次实验采用 100W 氢氧静态排水燃料电池系统（图 4-19）。系统按照计划任务在货运飞船舱外稳定运行 6h，舱外存储时间达到 11 个月，完成了三次重复启停试验，对不同运行工况和梯度发电规律进行了测试，获得了在轨运行相关数据，验证了氢氧燃料电池在轨运行的安全性和可靠性，初步获得了氢氧燃料电池的在轨工作特性数据，验证了舱外高低温、真空及微重力条件下电化发电能力，为后续空间氢氧燃料电池的研制提供有力数据支撑，同时也为氢氧燃料电池发电系统天地对比下的地面模拟试验方法及标准的建立奠定了基础。同时，设计了模块化可视化单

池对电化产水后水气传输演变过程进行了原位监测，通过发电过程流道内水气分布可视化原位监测和分析，获得了燃料电池化学、电化学、流体学综合作用下的水气演变规律，为空间电化学反应下的两相流体学研究提供了指导。

#### 应用及前景

本研究研制成果能够有效指导空间燃料电池设计和研制，后续可应用于后续月面驻留、月面移动以及月面活动等月面任务，也可应用于深空探测及其他宇航高比能供电任务；同时，研制成果可推广应用于水下等特殊应用场景。获得的在轨电化发电和静态水气分离条件下的水气产生、演变规律，可应用于空间相关领域的研究，促进相关学科发展。



扫码查看联系方式

#### 代表论文

- [1] Lei Feng, Chen Wen, Jingrun Wang, et al. Research on space regenerative fuel cell system and comprehensive energy utilization technology [J]. Singapore: Springer Nature Singapore. 2023. 334-343. DOI:10.1007/978-981-99-8631-6\_32.
- [2] 王景润, 冯磊, 文陈, 等. 可视化燃料电池运行时间差异性研究 [J]. 电源技术. 2024, 48(3): 439-444. DOI:10.3969/j.issn.1002-087X.2024.03.014.

#### 主要完成团队

中国空间技术研究院北京卫星制造厂有限公司。



图 4-19 燃料电池载荷装置

## 5. 科普文化

5.1 天宫课堂 .....	87
(一) “天宫课堂” 第一课 .....	87
(二) “天宫课堂” 第二课 .....	88
(三) “天宫课堂” 第三课 .....	89
(四) “天宫课堂” 第四课 .....	90
5.2 天地连线活动 .....	91
(一) “时代精神耀香江” 之仰望星空话天宫 .....	91
(二) 元旦京港澳天宫对话 .....	92
5.3 释放澳门学生科普卫星一号 .....	93





空间站作为国家太空实验室，也是重要的太空科普教育基地，蕴含着得天独厚的丰富教育资源，对激发社会大众特别是青少年弘扬科学精神、热爱航天事业具有特殊优势。

在科普文化活动方面，空间站开展了一系列形式新颖、内容丰富的科普文化活动，包括中国首个太空教育品牌“天宫课堂”、天地连线、科普卫星释放等，社会反响热烈，在传播航天知识、提高公众科学素养、推动航天科普教育、文化事业发展方面做出重要贡献。

## “天宫课堂”第一课

“天宫课堂”是为发挥中国空间站的综合效益，推出的首个太空科普教育品牌，由中国载人航天工程办公室联合教育部、科技部、中国科协、中央广播电视总台共同主办。“天宫课堂”结合载人飞行任务，贯穿中国空间站建造阶段、应用与发展阶段系列化推出，由中国航天员担任“太空教师”，以青少年为主要对象，采取天地协同互动方式开展。

2021年12月9日，“天宫课堂”第一课开课，神舟十三号飞行乘组航天员翟志刚、王亚平、叶光富在中国空间站进行授课，这是自中国空间站在轨建造以来开展的首次太空授课活动。太空授课采用视频直播课的方式进行，在中国科技馆设地面主课堂，在广西南宁、四川汶川、香港、澳门分设4个地面分课堂，航天员与地面课堂师生通过视频通话的方式进行实时互动交流，1420名中小学生代表参加现场活动，全国近6000万名中小學生观看了直播。

在约60分钟的授课中，航天员不仅介绍了其在中国空间站工作生活的场景，还演示了微重力环境下细胞学实验、人体运动、液体表面张力等神奇现象，并对这些神奇现象背后的科学原理进行了详细讲解。

此次太空授课活动在激发青少年科学探索精神的同时，获得社会公众对太空科学事业的认可，成功将“天宫课堂”打造成为中国载人航天工程标志性科普品牌。授课内容相关话题及解读内容获得全网关注，点击量突破四千万次，微博相关话题阅读量近9亿次。



## “天宫课堂” 第二课

2022年3月23日，神舟十三号乘组航天员翟志刚、王亚平、叶光富在中国空间站跨越400公里的距离进行“天地对话”，三位“太空教师”再上讲台，“天宫课堂”第二课开讲。在首次太空授课之后，时隔三个多月，第二次“天宫课堂”再次给广大青少年的心中播撒下了“太空梦”的种子。

本次授课在中国科技馆设地面主课堂，在西藏拉萨、新疆乌鲁木齐设2个地面分课堂，航天员与地面课堂的师生们展开了即时生动的互动交流。在约45分钟的授课中，航天员生动演示微重力环境下太空“冰雪”实验、液桥演示实验、水油分离实验、太空抛物实验，深入浅出讲解实验现象背后的科学原理，同时展示了部分空间科学设施，介绍了在空间站的工作生活情况。授课过程中，航天员们与地面师生通过视频通话互动，极大地提升了青少年的参与感和学习兴趣。

“飞天梦永不失重，科学梦张力无限”，此次授课再次激发了全国青少年对科学探索的热情，也进一步加深了社会公众对中国太空科学事业的关注与支持。活动全网点击量超过五千万次，微博相关话题的阅读量接近10亿次，被网友誉为“科普太空版，直播天花板”。



## “天宫课堂” 第三课

2022年10月12日，“天宫课堂”第三课在中国空间站开讲。神舟十四号飞行乘组航天员陈冬、刘洋、蔡旭哲为广大青少年带来一堂精彩的太空科普课，这是“神十四”乘组航天员首次担任“太空教师”。和前两次“天宫课堂”不同，这次太空授课是在全新的“太空教室”——“问天”实验舱举行。

“天宫课堂”第三课在中国科学院空间应用工程与技术中心设地面主课堂，这里是我国空间站科学实验的核心枢纽，被称为中国空间站的太空实验“大管家”，科学家们在这里远程管理400公里外空间站上的各类科学实验项目。在山东菏泽、河南郑州、云南大理分设3个地面分课堂，约400名中小学生代表参加现场活动，全国近6000万名中小學生观看了直播。

在约50分钟的授课中，航天员生动介绍展示了空间站问天实验舱工作生活场景，演示了微重力环境下毛细效应实验、水球变“懒”实验、太空趣味饮水、会调头的扳手等神奇现象，并生动讲解了实验背后的科学原理。此外，航天员还重点介绍了在中国空间站开展的水稻和拟南芥种植研究情况，展示了手套箱剪株操作。授课期间，航天员们与地面师生通过视频通话互动，分享自己的太空生活体验，地面课堂专家也就有关科学问题进行认真解析，让广大青少年感知宇宙的奥秘、体验探索的乐趣，激发他们对太空和科学研究的热情和向往。

此次太空授课的全网点击量近五千万次，微博相关话题的阅读量突破5亿，又一次播撒了科学的种子，在亿万青少年的心里生根发芽。



## “天宫课堂” 第四课

2023年9月21日，“天宫课堂”第四课在中国空间站开讲，新晋“太空教师”——神舟十六号航天员景海鹏、朱杨柱、桂海潮为广大青少年带来一节精彩的太空科普课。这是中国航天员首次在梦天实验舱内进行授课，也是首次由大学教授、博士生导师作为主讲人带来的太空科普课。

本次授课活动分别在北京航空航天大学设地面主课堂，在内蒙古阿拉善盟、陕西延安、安徽桐城及浙江宁波分设4个地面课堂。与此前“天宫课堂”相比，首次覆盖到了大学生群体，约2800名学生代表参加了现场活动，全国近8000万大中小学生观看了直播。

在约50分钟的授课中，航天员展示介绍了空间站梦天实验舱工作生活场景，演示了球形火焰实验、奇妙“乒乓球”实验、动量守恒实验以及又见陀螺实验，并生动讲解了实验背后的科学原理，充分展现了太空科学的魅力与奥秘。授课期间，航天员们通过视频通话形式，与地面课堂师生进行了实时互动交流。

“天宫课堂”是一扇连接地球与太空的奇妙之门，“天宫课堂”相关话题引爆微博热搜，当天话题阅读量突破7亿次。在空间站应用与发展阶段，“天宫课堂”将持续开展太空授课活动，中国载人航天工程办公室将继续通过媒体广泛征集关于“天宫课堂”的创意和建议，邀请社会各界共赴太空神奇之旅。



## “时代精神耀香江”之仰望星空话天宫



2021年9月3日，由中央人民政府驻香港特别行政区联络办公室、香港特区政府、中国载人航天工程办公室主办的“时代精神耀香江”之仰望星空话天宫活动在北京和香港两地举办，这是我国空间站首次以天地实时连线的方式与香港地区共同开展的天地互动活动。

活动中，神舟十二号飞行乘组航天员聂海胜、刘伯明、汤洪波在中国空间站与近300名来自香港的科技工作者、教育工作者及大中学生展开了一场别开生面的互动交流，地面航天专家们就中国载人航天事业的发展感悟和我国空间站的建设展望等大众普遍关心的问题逐一作答。

这场别开生面的活动，是国家航天科学家团队访港和月壤入港等活动的延续，也是北京和香港联袂开展的一次航天科普交流活动，又一次在香港掀起了航天热潮，加深了香港市民对国家航天成就的了解。香港特区行政长官林郑月娥表示：“我国从事航天事业的科学家都是热爱祖国、无私奉献、艰苦奋斗、力求国家科技自主的爱国者。香港青少年应当怀着开拓未来的梦想，学习航天员求知求真的精神，追求至善至美的毅力，在国家和香港的未来发展路上发光发亮。”



## 元旦京港澳天宫对话

2022年1月1日，由香港特区政府、澳门特区政府、香港中联办、澳门中联办、中国载人航天工程办公室、中央广播电视总台共同主办的“元旦京港澳天宫对话”活动在北京、香港、澳门三地举办。

三地联动，天地连线，神舟十三号飞行乘组航天员翟志刚、王亚平和叶光富在中国空间站与500余名来自北京、香港、澳门的青年学生们进行了一场以“青春”“梦想”“奋斗”为关键词的特殊对话，共话“太空梦”，一起向未来。新年第一天，航天员还向全国青少年送出了来自“天宫”的新年寄语：只要敢于有梦，勇于追梦，用智慧和汗水打造

自己的梦想飞船，就一定能够迎来自己梦想的发射时刻，飞向属于你的浩瀚星空！活动期间，神舟十三号航天员乘组还带领青年学生参观了一场以“青春与星空对话”为主题的特殊画展。这是在中国空间站首次举行的“太空画展”，共有20余幅中西部地区青少年创作的太空主题绘画作品亮相中国“天宫”。

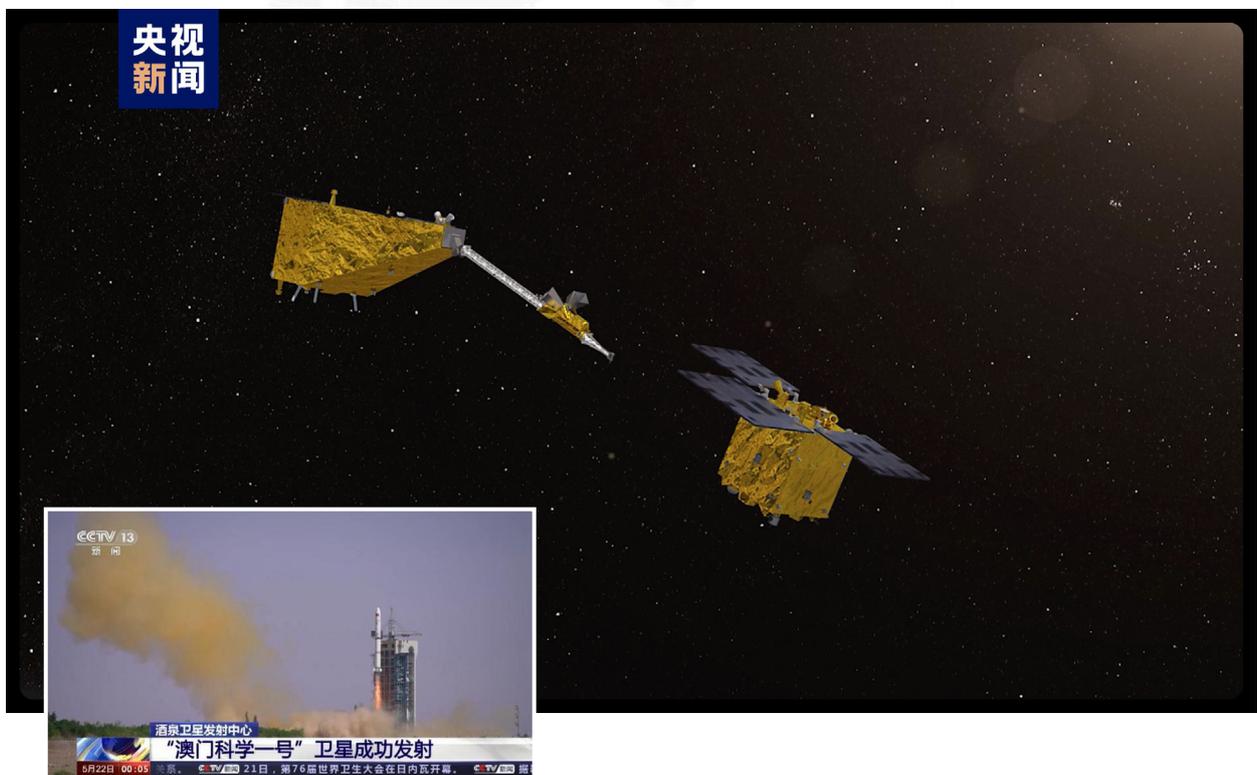
活动相关话题在全网范围内引发了广泛讨论与关注，点击量突破五千万次。活动充分体现了中央对香港、澳门的关心关怀，在港澳社会产生了正面示范效应，引导港澳青少年进一步走进航天、了解航天，激发他们探索未知、敢于创新的科学热情。



### 释放澳门学生科普卫星一号

2022年11月12日，天舟五号货运飞船在文昌成功发射，“澳门学生科普卫星一号”作为搭载载荷上行，并于2022年12月18日释放入轨。澳门学生科普卫星一号依托于澳门青少年航天科普实践卫星平台，装载了一台用于光学遥感观测实验的光学照相机和一台用于业余无线电通联实验的无线电通讯装置，该载荷方案是从全澳门近30所中学征集的100多个方案中遴选而来。

“澳门学生科普卫星一号”在轨运行期间，澳门科技大学先后组织了5批次澳门中小學生航天科普教育活动，深入开展卫星测控设计、无线电通联、航天基础知识等方面的实践、学习，并组织开展“我用卫星拍澳门”的科普卫星控制方案设计竞赛。通过系列航天科普实践活动，激发了澳门青少年对航天科学的兴趣和热爱，培养了创新精神和实践能力，提升了科学思维和探索未知的能力，加强了两地的航天技术交流。





中国空间站作为我国覆盖空间科学相关学科领域最全、在轨支撑能力最强，且兼备有人参与和上下行运输等独特优势的“国家太空实验室”，是我国最大的综合性近地空间研究设施，计划在轨稳定运行十年以上，为我国开展高水平空间科学与应用研究提供了千载难逢的发展机遇，也是我国锚定 2035 年建成科技强国的重要创新驱动动力。与此同时，空间站的建成不仅是我国航天科技实力的彰显，更为全球科学研究搭建了共享合作的广阔平台。

围绕“四个面向”，中国空间站未来十年将充分发挥平台优势，围绕重大科技问题和国家重大需求，凝练科学目标，汇聚不同学科领域的智慧与力量，分批组织实施体系化的科学与应用研究、技术试验，以及打破传统学科界限藩篱、组织跨领域与多学科的深度交叉合作研究，持续产出重大科技成果并加速转化应用，促进科技全面进步。

在空间生命科学与人体研究领域，将持续深化基础生物学、生物技术及转化、生命生态、生命起源研究，重点部署哺乳动物太空孕育、密闭生命生态等方向，进一步揭示和认识空间环境对生命各层次的影响机制和响应变化规律，在干细胞和再生医学、药物干预和研发、合成生物制造等先进生物技术方面取得突破。围绕人类太空长期生存面临的医学和人因问题，深入研究空间环境对人体生理影响、空间飞行人因问题、空间脑科学前沿问题。持续探索航天医学实验研究和在轨健康监测评估与维护、传统医学航天应用等新技术。系统布局建设类器官、太空医学细胞图谱特色研究，发展先进航天医学应用技术，深化人类对自身的认识，促进对疾病问题的认识和诊疗技术发展，带动健康产业发展，服务国家健康工程。

在微重力物理科学领域，将持续开展金属和合金微观组织及宏观性能调控机理研究，掌握空间晶体成核机制及生长规律，指导地面材料制备，解决“卡脖子”问题。深化多尺度连续介质流体动力学机制，加强多相流体流动与传热应用研究，探索非平衡系统的科学本质与规律，促进智能制造、特殊功能流体等前沿技术发展。揭示微重力点火、火焰传播和熄灭的本质规律，促进高效低碳燃烧、动力系统性能提升等关键问题解决，为先进动力和高效清洁能源开发提供支撑。挑战空间低温极限，探索新的原子冷却方法，在超低温量子物态和精密物理测量中取得突破。建设国际领先的复杂等离子体物理实验平台，揭示三维尘埃等离子体非平衡多重输运过程的微观机制，获得新统计规律。

# 未来展望

在空间天文与地球科学领域，巡天空间望远镜 (CSST) 有望在暗能量本质和暗物质性质等宇宙学基本问题、星系与活动星系核、银河系与近邻星系等方向取得国际重大成果。高能宇宙辐射探测 (HERD)、伽马射线偏振仪 II (POLAR-2) 围绕暗物质搜寻、宇宙线起源、极端天体演化等重要科学前沿问题有望取得突破。高分辨率温室气体点源探测、先进遥感技术体制验证等为香港地区多个研究领域和部门提供数据支持。行星际尘粒采集与太空风化研究有望深入理解太阳系形成与早期演化过程。

在空间新技术与应用领域，将重点面向近地、地月空间、未来载人深空探测与在轨服务等国家战略需求，以创新航天应用为驱动，持续开展前瞻性空间应用项目、关键技术验证试验项目和新型航天系统演示验证项目，推进空间应用、新型航天系统及应用的能力提升。在空间信息及精密测量新技术、在轨制造与建造技术、机器人与自主系统技术、空间能源与推进技术、环境控制与生命保障技术以及航天器共性新技术等方面突破一系列关键技术瓶颈，解决制约航天装备发展的“卡脖子问题”，进一步提升空间站的拓展应用能力，推动创新成果转化为现实生产力。

在合作交流方面，中国空间站将积极扩大空间科学及应用国际合作，参与和实施国际大科学计划，坚持“和平利用、平等互利、共同发展”的原则，践行共商共建共享，开放科学数据，扩大成果产出，共享科学成果，建立多元化的空间科学及应用国际合作格局。

在科学普及方面，中国空间站将丰富科普教育活动，拓展“天地连线”主题活动，深化“天宫课堂”授课方式，举办多层次载人航天科普展览等，提升公众科学素养，增强文化自信，激发青少年好奇心、想象力和探索欲，激励年轻一代献身科学。

“星空浩瀚无比，探索永无止境”，中国空间站已进入应用与发展工程新阶段，科学和应用工作将成为主旋律之一。面向全面建设航天强国的战略部署，中国载人航天工程将聚焦前沿科学探索、服务国家战略及经济社会高质量发展，“管好、用好、发展好”中国空间站，推动空间科学、空间技术、空间应用全面发展，为构建人类外太空命运共同体，促进人类文明进步贡献中国智慧。







中国科学院  
空间应用工程与技术中心



中国航天员  
科研训练中心



中国航天科技集团  
有限公司



北京跟踪与通信技术  
研究所