



中国载人航天

# 中国空间站 科学研究与应用进展报告

2025

- 空间生命科学与人体研究
- 微重力物理科学
- 空间新技术与应用
- 科普文化



中国载人航天工程办公室



# 目录

1	概述	2
2	空间生命科学与人体研究领域	4
2.1	空间生命科学与生物技术	4
2.2	太空人体研究	22
3	微重力物理科学领域	36
3.1	空间材料科学	36
3.2	微重力流体与热物理	50
3.3	微重力燃烧科学	58
4	空间新技术与应用领域	66
5	科普文化	82
6	未来展望	88

## 概述

习近平总书记指出：“建造空间站、建成国家太空实验室，是实现我国载人航天工程‘三步走’战略的重要目标，是建设科技强国、航天强国的重要引领性工程”。当前，空间站应用任务各领域正凝聚优势科研力量，开展高水平前沿科学探索与应用研究，为我国打造空间科学与应用原始创新策源地、努力抢占科技制高点、推动我国载人航天事业迈入科学引领、自主创新的高质量发展新阶段奠定基础。

2025年空间站在轨实（试）验设施运行稳定，新增在轨实施科学与应用项目86个，上行实验模块、单元及样品等科学物资约1179kg，下行空间科学实验样品质量约105kg，获取科学数据超过150TB，各科学团队深度挖掘诸多领域方向，着力攻克系列重大科学问题，产出了系列原创性、前沿性、创新性的进展与成果，发表高水平论文超过230篇，授权专利超过70项，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，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、生命起源与交叉等方面开展研究，成功实现了中国空间站首次小鼠空间科学实验；国际首次开展空间站亚磁-微重力复合太空环境生物学研究；在轨实验发现噬菌体三磷酸腺苷水解酶全新的镁离子结合模式；通过舱外暴露实验获得了耐辐射能力增强的细菌突变株；开发中国空间站首个AI赋能的多物种姿态估计与跟踪基准数据集。围绕空间环境对人体生理影响、空间飞行人因、空间脑科学、传统医学及其它新技术等，国际首次提出了基于经眶B超测量视神经蛛网膜下腔面积的无创颅内压监测技术，自主研发了能有效刺激腓肠肌、胫前肌等关键下肢肌群的仿生黏附鞋，有望为航天员健康评估和防护提供新技术；创新研制出国际领先的耐长时间常温储存固定后样本的单细菌转录组高可靠检测技术，支撑面向国际前沿的在轨人体肠道菌群的单细菌转录组学研究；在国际上获得一系列航天员生理机能和作业能力变化的创新发现，微重力通过影响航天员前庭视觉功能连接重塑生物运动知觉，减弱生物运动知觉及其神经响应的重力敏感性，前馈控制比反馈控制更易受微重力的影响，揭示了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机制，为认知和减控航天医学风险提供了丰富的理论和技术基础。

在微重力物理领域，围绕微重力材料制备机理、重要应用新材料制备技术、空间应用材料使役行为等方面开展研究。在高温难熔合金凝固机理方面获得具有重要影响的系列科学发现；探明了多相铁基磁致伸缩合金中不同物相的形成机理和影响因素，揭示了过冷液体中存在的动力学“脆

强”转变规律，突破了微重力条件下3100℃的无容器激光加热技术；在空间制备出性能更优的磁致伸缩合金、新型铁基超导材料等；验证了固液复合润滑、形状记忆聚合物等材料的可靠性、稳定性和空间适应性。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，首次揭示长时微重力下柱状微结构耦合流动的复合沸腾特性，首次观察到微重力下冷凝液膜动态演化全过程，以及胶体的分布结晶现象和规律。聚焦微重力条件下碳烟形成、火焰稳定与传播等基础过程，阐明射流相互作用调控火焰辐射与污染物生成的规律，建立碳烟排放预测模型，为实现燃料高效清洁利用、提升能源动力系统运行效能提供直接理论依据。

在空间新技术与应用领域，突破了同心物镜及光纤面板像面拼接的大视场高分辨天文观测技术；国际首次开展空间站管道检测机器人在轨试验，验证了管道检测机器人的管道环境适应能力和变刚度运动安全性；首次开展了基于气雾栽培的再生生保系统植物高效培养技术试验，植物生产效率较传统基质培养显著提升；国际首次开展了常温二氧化碳转化制备乙烯与氧气、光电催化二氧化碳转化等在轨试验验证，获得了较高的产氧速率等指标；构建了基于二元微生态体系的空间物质能量转化再生系统，一体化实现空间废水的净化与蕴藏能量的原位转化利用；发现了携带潜在新药基因簇的太空变异菌株，为掌握自主可控的新药源头技术提供了新途径；在轨验证了多环境参数作用下光纤传感关键特性等。本领域相关技术成果已推广转化至航天技术领域和民用行业。

太空探索永无止境，逐梦征程永不停歇。中国空间站为科学家开展前沿空间科学实验提供了前所未有的宝贵平台，对推动我国乃至全球科学技术进步、深化人类对宇宙的认知具有不可估量的深远意义。本次报告的编写和发布，既是对2025年度空间科学与应用进展的阶段性总结，更旨在呼吁社会各界广泛关注并积极参与空间科学与应用事业，促进空间科学、空间技术和空间应用的深度融合与协同发展，让载人航天成果惠及科技、经济、社会及人民健康等更多领域。



## 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

① 中国空间站首次开展小鼠空间科学实验	6
② 空间亚磁 - 微重力环境果蝇三代培育及其生物学效应研究	8
③ 空间微重力诱导肝细胞脂质代谢失调的生物力学机制	10
④ 空间飞行中骨骼肌萎缩相关 miRNA 变化规律研究	12
⑤ 在轨实验发现噬菌体三磷酸腺苷水解酶全新的镁离子结合模式	14
⑥ 极端环境微生物对空间暴露环境的耐受性研究	16
⑦ 小样本高维数据挖掘方法构建及空间环境响应分子特征解析与应用	18
⑧ AI 赋能空间生命科学：基于视觉分析的动物行为表型量化分析	20

### 2.2 太空人体研究

① 微重力对人视觉运动信息加工的影响及脑机理研究	24
② 基于仿生黏附的下肢肌肉力刺激技术与装置	26
③ 空间站单细菌 RNA 测序技术的建立及在轨应用	28
④ 空间飞行对人认知与精细操作能力的影响及机制	30
⑤ 长期失重环境下眼颅压无创监测及脑灌注评估技术研究	32
⑥ 空间辐射脑炎性样变化生物预警技术研究	34



空间生命科学与生物技术方向主要围绕空间基础生物学、空间生物技术及转化应用等方面开展研究，在空间细胞生物学、动物学（小鼠和果蝇）、辐射生物学、蛋白质结晶等方面取得了一系列重要进展。自主研制了国内首台空间小型哺乳动物实验装置，成功开展了小鼠空间科学实验；实现了国际首次空间亚磁-微重力复合太空环境的生物学研究；揭示了空间微重力环境诱导肝细胞脂滴累积的生物力学机制；阐明了miRNA介导肌萎缩与代谢紊乱的分子机制；通过空间蛋白质结晶实验首次获得微重力条件下噬菌体Topo II的ATPase结构域的晶体；通过空间站极端环境微生物舱外暴露实验获得了耐辐射能力增强的细菌突变株；构建的多维度数据挖掘方法为空间站“小样本、高维度”组学数据分析提供了新的技术途径；研制首个面向中国空间站的多物种姿态估计与跟踪基准数据集，将空间生命科学研究从传统人工观测推向AI赋能、可量化的的新阶段。

# 中国空间站首次开展小鼠空间科学实验

## The Chinese Space Station Carried Out Its First In-Orbit Mouse Experiment

突破了空间密闭饲养的核心关键技术，自主研制了国内首台空间小型哺乳动物实验装置，成功开展了中国空间站首次小鼠空间科学实验，小鼠安全返回，将开展小鼠对空间环境的应激响应与适应性变化研究。

### 研究进展

突破了空间小密闭环境下哺乳动物高效生保控制技术，自主研发了空间小型哺乳动物饲养装置（图 2-1），首次将经过筛选和训练的 4 只 SPF 级 C57BL/6JNifdc 实验小鼠送入中国空间站（图 2-2），完成了在轨 14 天的小鼠空间密闭饲养实验，并实现安全返回（图 2-3）。

在轨期间小鼠行为节律正常，状态稳定。后续，科研团队将对小鼠行为、生理生化关键指标开展研究，预期初步解析小鼠对空间环境的应激响应与适应性变化，并探索相关机制。

本研究初步建立了科学实验和工程实施深度耦合的“地面筛选—活体上行—在轨饲养—活体下行”的空间小型哺乳动物实验全流程生命支持保障和实验技术体系，为创新空间哺乳动物小样本与大数据研究范式、建立我国哺乳

动物空间科学的标准化数据管理体系探索了技术途径。通过共享生物样本、影像及生物学数据，建立多机构协同研究机制，为未来系统开展空间环境对哺乳动物影响研究奠定了重要基础。

### 应用及前景

本研究研制了空间小型哺乳动物饲养装置，使我国空间站具备了开展小鼠实验的初步条件，探索了空间哺乳动物小样本共享、多维度大数据分析的研究范式。为后续建成规模化的空间哺乳动物实验平台、支持系统化开展哺乳动物空间科学实验与研究奠定了重要技术基础。



扫码查看联系方式



图 2-1 空间小型哺乳动物饲养装置

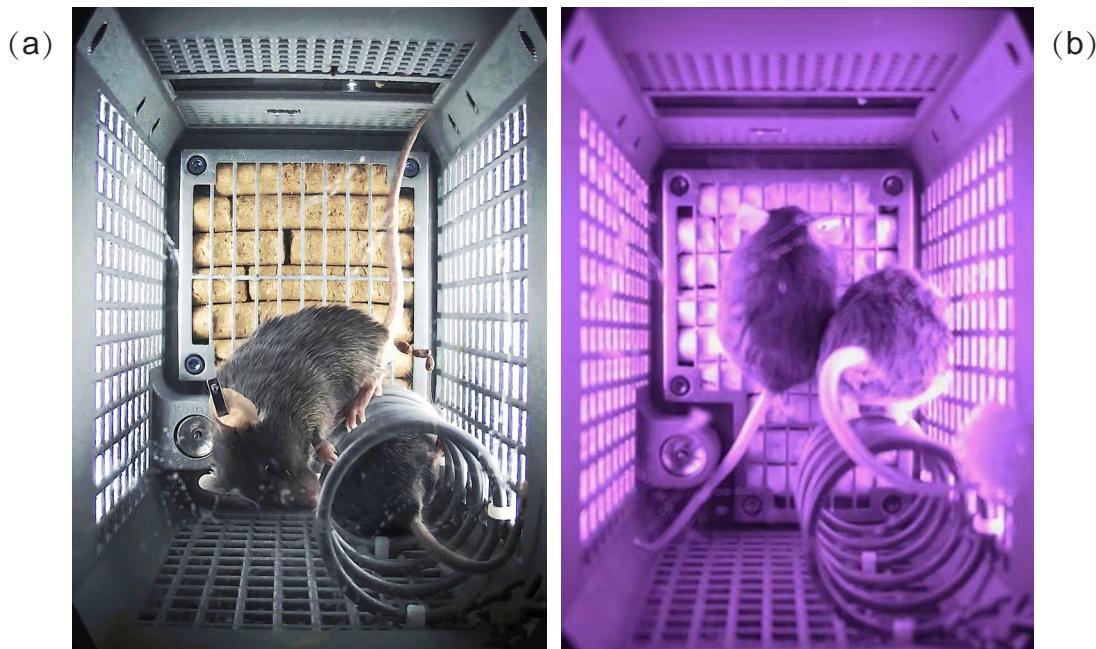


图 2-2 小鼠在轨实验照片

(a) 白天工作照明; (b) 夜间红外照明

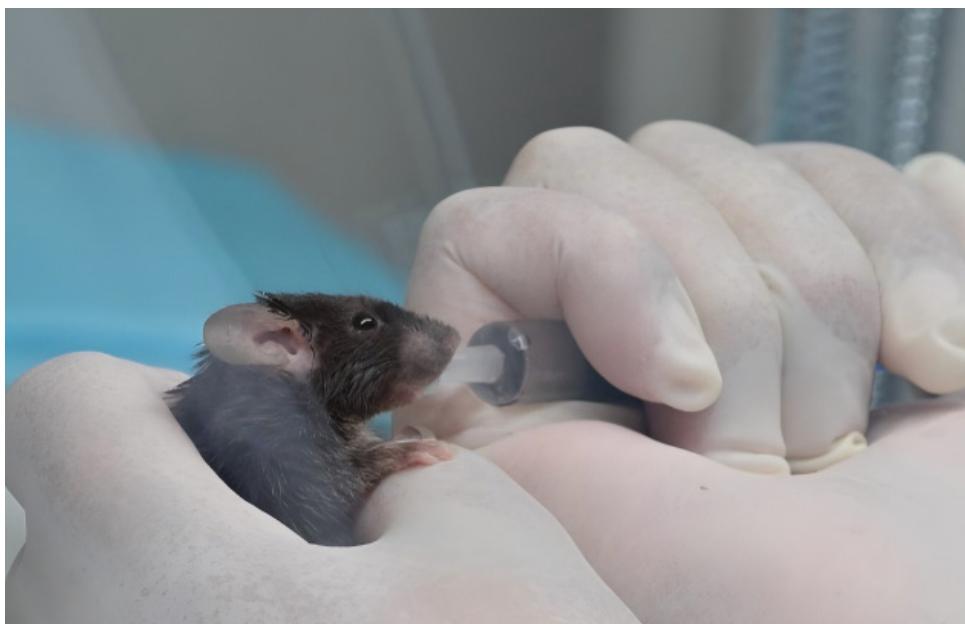


图 2-3 随神舟二十乘组返回地面的小鼠

**代表论文**

- [1] 李洁, 刘方武, 张涛. 空间小鼠实验有效载荷研究进展 [J]. 空间科学学报, 2021, 41(03): 445-456. DOI: 10.11728/cjss2021.03.445.
- [2] 张晶晶, 吕勇, 张涛, 等. 空间啮齿类动物培养装置及实验技术研究进展 [J]. 空间科学学报, 2024, 44(03): 544-555. DOI: 10.11728/cjss2024.03.2023-0096.
- [3] Ru Yuan, Haoyuan Sun, Qian Zhang, et al. Gas Purification Technology Suitable for Space Mice Cultured in Sealed Box[J]. Processes, 2025, 13(10): 3277. DOI: 10.3390/pr13103277.

**代表专利**

- [1] 刘方武, 张涛, 郑伟波, 等. 一种适用于太空微重力环境的动物排泄物收集系统. 发明专利. 专利号: ZL 2021 1 1658516. 1. 授权日期: 2023 年 07 月 21 日.

**主要完成团队**

中国科学院上海技术物理研究所 工程一室, 中国科学院动物研究所王红梅团队。

# 空间亚磁 - 微重力环境果蝇三代培育 及其生物学效应研究

## First Biological Investigation of a Combined Space Environment: Hypomagnetic Field and Microgravity across 3 Generations of Fruit Flies

建造了国际首个亚磁 - 微重力复合环境动物传代培养和生物学研究平台，成功完成了空间站果蝇三代培育，系统获取了发育与行为视频数据，以及在轨生物样品收集，开展了从基因、发育到行为的全面分析。这些从表型到分子的整合研究为揭示空间亚磁 - 微重力环境的生物学效应及其深层机制奠定了基础。

### 研究进展

自主设计研制了中国空间站果蝇培养研究模块，通过在轨和地面同时设立磁屏蔽和非磁屏蔽实验组，建立了国际首个空间亚磁 - 微重力复合环境的生物学效应研究体系和实验平台(图 2-4)。在为期 41 天的空间实验中，航天员深度参与实验流程，利用果蝇转移装置(图 2-5 a)，天地协同开展了 10 次在轨操作，完成了空间站首次连续三代、代际清晰的果蝇传代培养；实现了高质量、长时程、连续视频拍摄，验证了在轨果蝇样品收集、处理和长期冻存技术。通过对果蝇从卵、幼虫、蛹到成虫全发育周期的监测(图 2-5b)，证实在空间微重力环境和亚磁 - 微重力环境中，果蝇能够顺利完成各阶段发育，各器官形态正常，但发育时长显著延长，发育节律也出现明显变化。进一步对果蝇群体行为观测，发现空间环境对果蝇飞行、弹跳、漂浮及求偶等行为产生了不同的影响。基于转录组

测序，挖掘了生长发育和行为发生改变的关键分子机制。

此次实验利用模式动物果蝇，实现了国际首次空间站亚磁 - 微重力复合太空环境的生物学研究，发现了生物应对空间环境的核心变化特征及其潜在分子机制，为深空探索的生命健康保障奠定科学实验基础。

### 应用及前景

通过揭示亚磁场 - 微重力复合空间环境下动物的行为与基因变化规律，解析深层生物学机制，将为深空航行、月球基地建设和驻守时期，航天员长期面临亚磁场和微重力环境时，生命支持保障系统的设计和实现提供重要的科学依据。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Mingmin Zhou, Meijun Zheng, Xiaohang Zhang, et al. Central clock drives foraging rhythm through modulating food odor attraction in *Drosophila* [J]. *Current Biology*, 2025, 35(20): 4988-5001. DOI: 10.1016/j.cub.2025.09.011.
- [2] Yinuo Wang, Xiaotong Wang, Houqi Tan, et al. Protocol for evaluating protein intake-induced feeding inhibition in *Drosophila* using a pre-feeding approach[J]. *STAR Protocols*, 2025, 43(6): 104056. DOI: 10.1016/j.xpro.2025.104056.
- [3] Xiaoyu Li, Yang Yang, Xiaobing Bai, et al. A brain-derived insulin signal encodes protein satiety for nutrient-specific feeding inhibition [J]. *Cell Reports*, 2024, 43(6): 114282. DOI: 10.1016/j.celrep.2024.114282.

### 主要完成团队

中国科学院生物物理研究所认知科学与心理健康全国重点实验室李岩团队，中国科学院上海技术物理研究所工程一室。

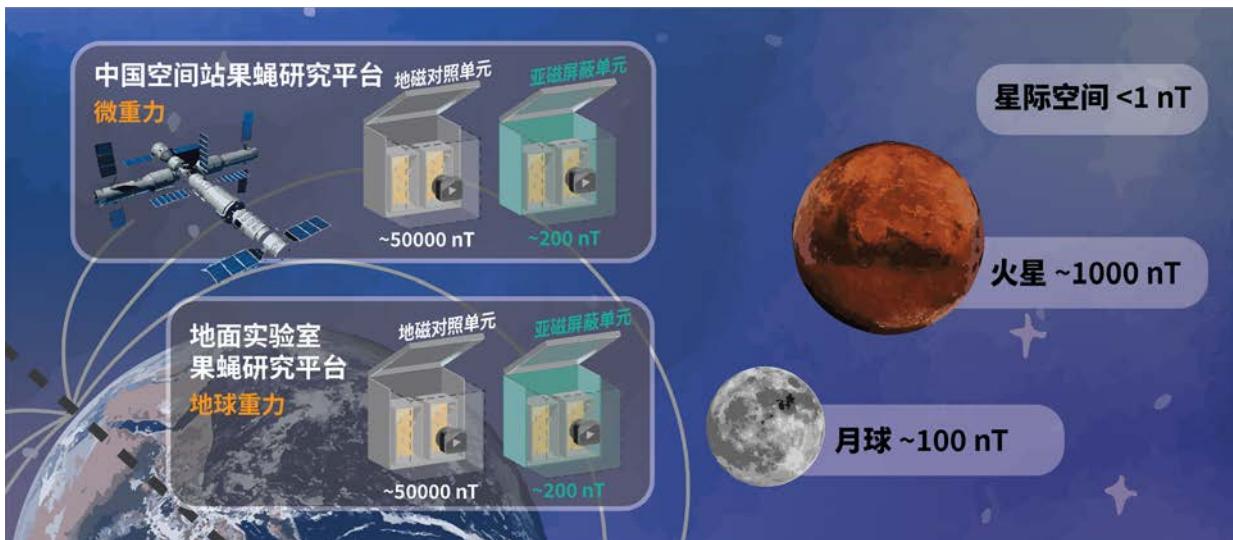


图 2-4 空间亚磁 - 微重力复合环境果蝇培养及生物学效应研究体系

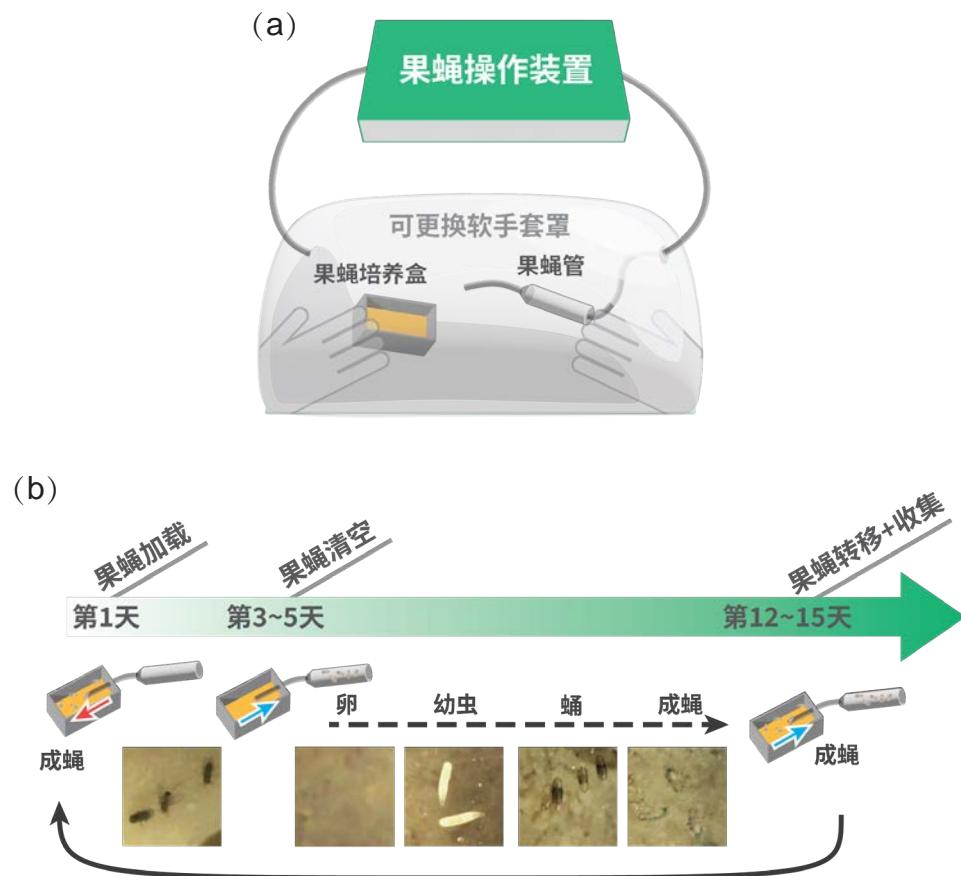


图 2-5 空间亚磁果蝇传代装置及流程设计

(a) 空间站果蝇转移装置示意图; (b) 果蝇全发育周期实验操作流程

# 空间微重力诱导肝细胞脂质代谢失调的生物力学机制

## Biomechanics of Space Microgravity-induced Hepatic Lipid Dysregulation

利用空间站生物力学专用实验模块在轨培养肝细胞，发现空间微重力环境显著促进肝细胞内的脂滴累积，施加模拟生理力学微环境的流体剪切可抑制上述现象。进一步分子生物学研究，揭示了肝细胞内调控脂质代谢的关键转录因子家族 SREBP 分子可以作为对重力敏感的肝细胞脂质调节因子，并受到流动剪切的调控，为理解空间代谢相关脂肪性肝病的机理提供新线索、新思路。

### 研究进展

空间微重力环境可诱导肝脏脂质代谢失调，增加代谢相关脂肪性肝病的发病风险。利用空间站生物力学专用实验模块（图 2-6）开展了肝细胞的在轨培养实验（图 2-7），发现空间微重力环境可显著促进肝细胞内的脂滴累积，而在细胞培养时施加模拟生理力学微环境的流体剪切则可抑制上述现象。通过组学分析及关键蛋白的功能验证，探索了空间微重力环境诱导肝细胞脂滴累积的力学信号转导机制（图 2-8），发现微重力环境可通过诱导细胞骨架丝状肌动蛋

白（F-actin）解聚、激活下游胆固醇调节元件结合蛋白（SREBP）信号介导的脂质合成；而流体剪切则可通过维持丝状肌动蛋白结构，部分缓解这种肝脏代谢失调，从而发挥保护作用。

### 应用及前景

本研究发现肝细胞内 SREBP 分子可以作为对重力敏感的肝细胞脂质调节因子，并受到流动剪切的调控，可为更进一步理解空间代谢相关脂肪性肝病提供新线索。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Yu Du, Bing Han, Katharina Biere, et al. Lunar and Martian gravity alter immune cell interactions with endothelia in parabolic flight[J]. *npj Microgravity*, 2025, 11(1): 4. DOI: 10.1038/s41526-024-00456-7.
- [2] Shaoyu Zhong, Lu Zheng, Yi Wu, et al. Rotating culture regulates the formation of HepaRG-derived liver organoids via YAP translocation[J]. *BMC Biology*, 2024, 22(1): 262. DOI: 10.1186/s12915-024-02062-1.
- [3] Wang Li, Yi Wu, Wenhui Hu, et al. Direct mechanical exposure initiates hepatocyte proliferation[J]. *JHEP Reports*, 2023, 5(12): 100905. DOI: 10.1016/j.jhepr.2023.100905.

### 主要完成团队

中国科学院力学研究所龙勉团队。

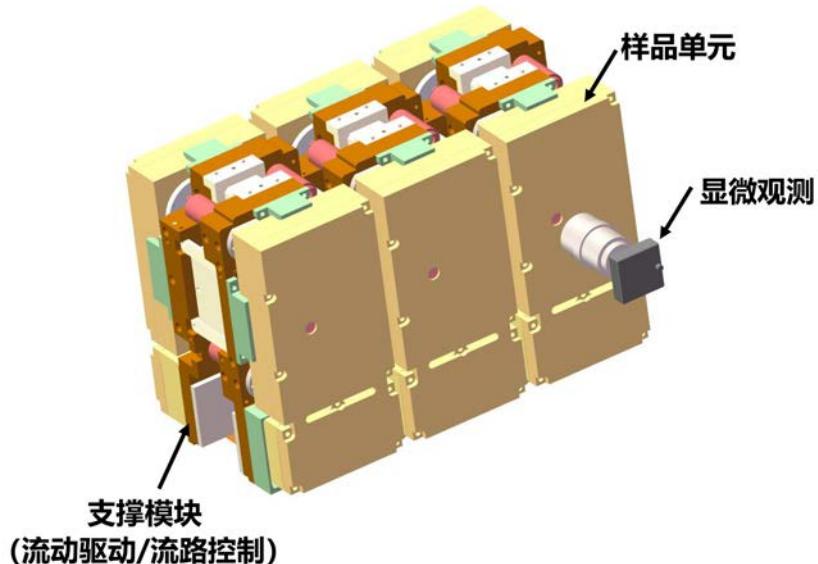


图 2-6 空间站生物力学专用实验模块结构示意图

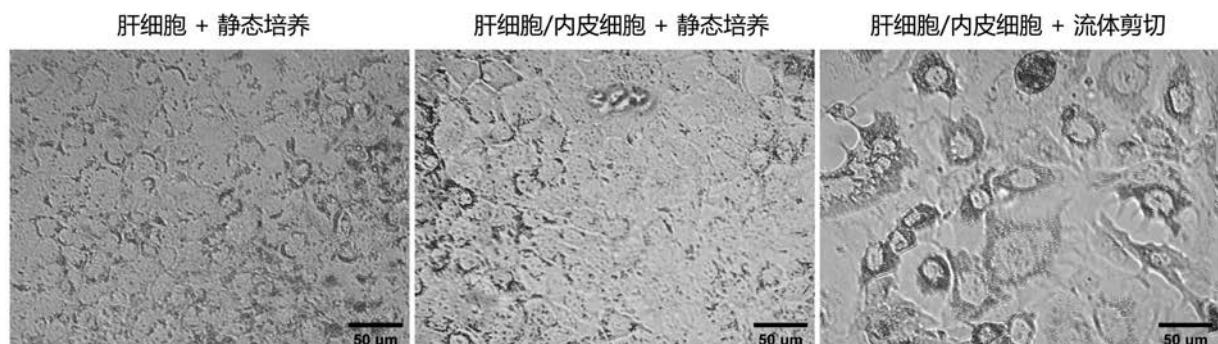


图 2-7 在轨细胞图片

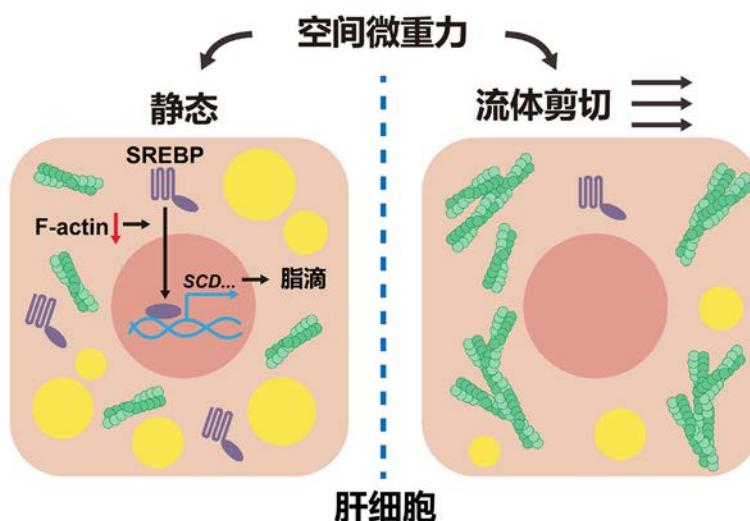


图 2-8 空间微重力环境诱导肝细胞脂滴累积的生物力学机制

# 空间飞行中骨骼肌萎缩相关 miRNA 变化规律研究

## Dynamics of Skeletal Muscle Atrophy-Associated miRNAs during Spaceflight

解析了空间飞行中骨骼肌细胞 miRNA 的表达和分泌规律, 进而阐明了 miRNA 介导肌萎缩与代谢紊乱的分子机制, 为相关疾病的诊断防治提供了关键的候选标志物。

### 研究进展

聚焦空间飞行导致的肌萎缩问题, 开展了骨骼肌细胞的在轨培养。利用回收的细胞和培液 (图 2-9), 发现了空间培养下骨骼肌细胞 miRNA 表达和分泌的变化规律。揭示了空间培养下表达与分泌失调的 miRNA 介导的骨骼肌功能紊乱和机体代谢异常的调控机制 (图 2-10a), 并在发现空间培养影响骨骼肌细胞自噬规律的基础上进一步明确了乳酸在运动过程中调控骨骼肌自噬的分子机制 (图 2-10b)。绘制了基于 miRNA 调控骨骼肌萎缩图谱, 筛选出可以作为

肌萎缩相关疾病的诊断与预后潜在标志物, 为防治空间及地面肌萎缩开辟了新途径。以上相关研究成果分别发表在 *Cell Chemical Biology* (细胞化学生物学) 和 *Life Metabolism* (生命代谢) 期刊。

### 应用及前景

利用 miRNA 作为关键标志物进行疾病诊断与监测, 并以其为干预靶点, 为防治长期卧床导致的肌肉萎缩提供新策略。



扫码查看联系方式

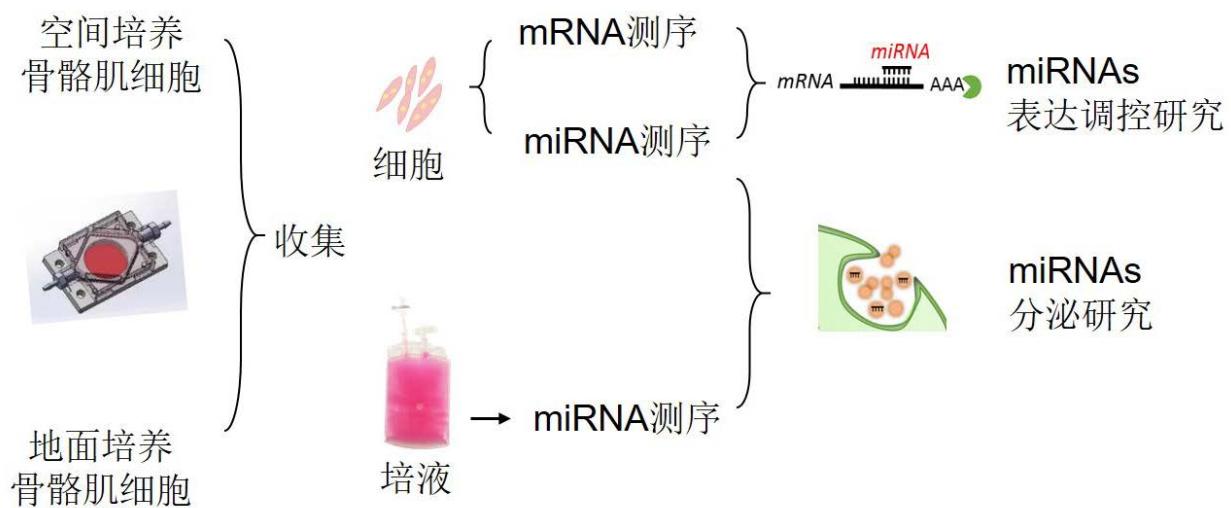


图 2-9 空间培养的骨骼肌细胞 miRNA 表达和分泌的研究策略

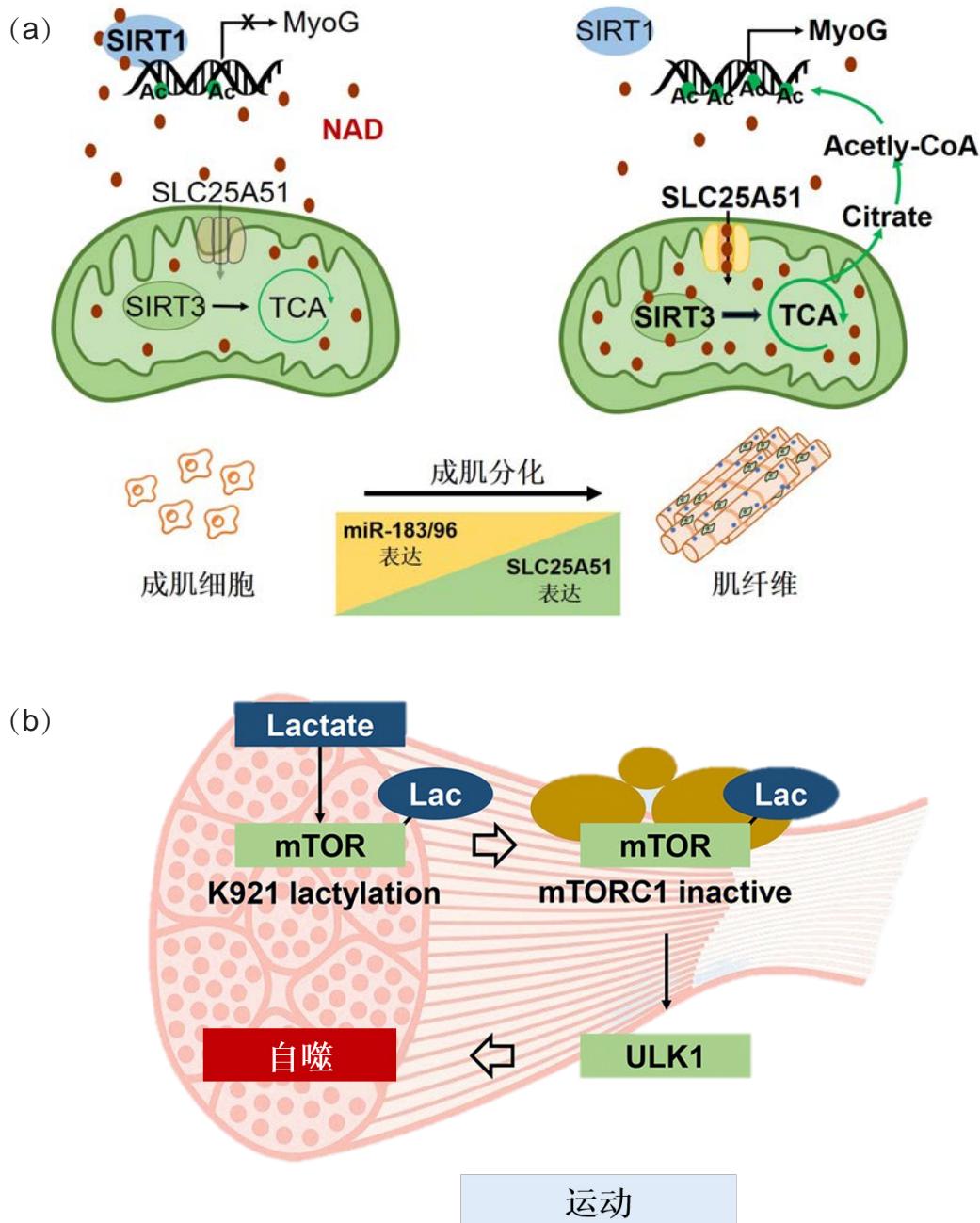


图 2-10 miRNA 和乳酸介导的骨骼肌功能调控机制

- (a) miR-183/96 介导的 NAD<sup>+</sup> 亚细胞分布控制肌肉干细胞分化机制示意图;  
 (b) 乳酸驱动 mTOR 蛋白乳酸化修饰以激活骨骼肌自噬的机制示意图

代表  
论文

- [1] Zhoumin Niu, Ying Yan, Wei Liu, et al. Aberrant miR-378 expression promotes hepatic lipid accumulation via hijacking the bile acid-regulated autophagy[J]. *Life Metabolism*, 2025, loaf038. DOI: 10.1093/lifemeta/loaf038.  
 [2] Yan Li, Lamei Xue, Feijie Wang, et al. Lactylation of mTOR enhances autophagy in skeletal muscle during exercise [J]. *Cell Chemical Biology*, 2025, 32(11): 1367-1380.e5. DOI: 10.1016/j.chembiol.2025.10.007.

主要  
完成  
团队

中国科学院上海营养与健康研究所应浩团队。

# 在轨实验发现噬菌体三磷酸腺苷水解酶全新的镁离子结合模式

## High-Resolution ATPase Domain Structure Crystalized under Space Microgravity Conditions Revealed a New Magnesium Binding Mode in Type II Topoisomerase of T-even Bacteriophage

通过空间在轨结晶实验，获得了噬菌体拓扑异构酶中的三磷酸腺苷水解酶结构域晶体，解决了在地面条件下，局部区域电子密度模糊、ATP结合位点难以确定的难题，首次发现其在发挥功能时两个活性中心全新的镁离子结合模式，从而揭示Ⅱ型拓扑异构酶对DNA双链非同步切割的直接证据。

### 研究进展

DNA拓扑异构酶Ⅱ(TopoⅡ)广泛存在于真核、原核和病毒中，在DNA的复制和转录过程发挥重要作用。本研究从结构和分子层面，深入解析噬菌体TopoⅡ催化过程的分子机制。

通过在轨蛋白质结晶实验，首次获得微重力条件下噬菌体TopoⅡ的ATPase结构域的晶体，与地面条件下的电镜结构比较(图2-11a)，晶体衍射数据显示其两个活性中心表现出不同的镁离子结合模式，同时清晰揭示ATP的结合位点(图2-11e)，解决地面结构中难以确认结合位点的难题(图2-11d)。该研究首次发现TopoⅡ在发挥功能时，全新的镁离子结合模

式，对于理解其催化机制至关重要，相关研究结果发表于国际期刊Nature Communications(自然通讯)上。

### 应用及前景

通过空间在轨实验获得的高分辨率ATPase结构域晶体结构，发现相关催化的非同步切割过程，有助于全面理解TopoⅡ的动态催化过程，显示其作为药物靶点开发新一代抑制剂的潜在应用价值。为未来抗肿瘤药物及抗菌药的设计提供重要的结构参数和新思路。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Yuhui Xin, Runqi Xian, Yunge Yang, et al. Structural and functional insights into the T-even type bacteriophage topoisomerase II [J]. Nature Communications, 2024, 15: 8719-8733. DOI: 10.1038/s41467-024-53037-3.  
 [2] Jingyuan Cong, Yuhui Xin, Huiling Kang, et al. Structural insights into the DNA topoisomerase II of the African swine fever virus[J]. Nature Communications, 2024, 15:4607-4618. DOI: 10.1038/s41467-024-49047-w.

### 主要完成团队

中国科学院生物物理研究所生物大分子全国重点实验室饶子和团队。

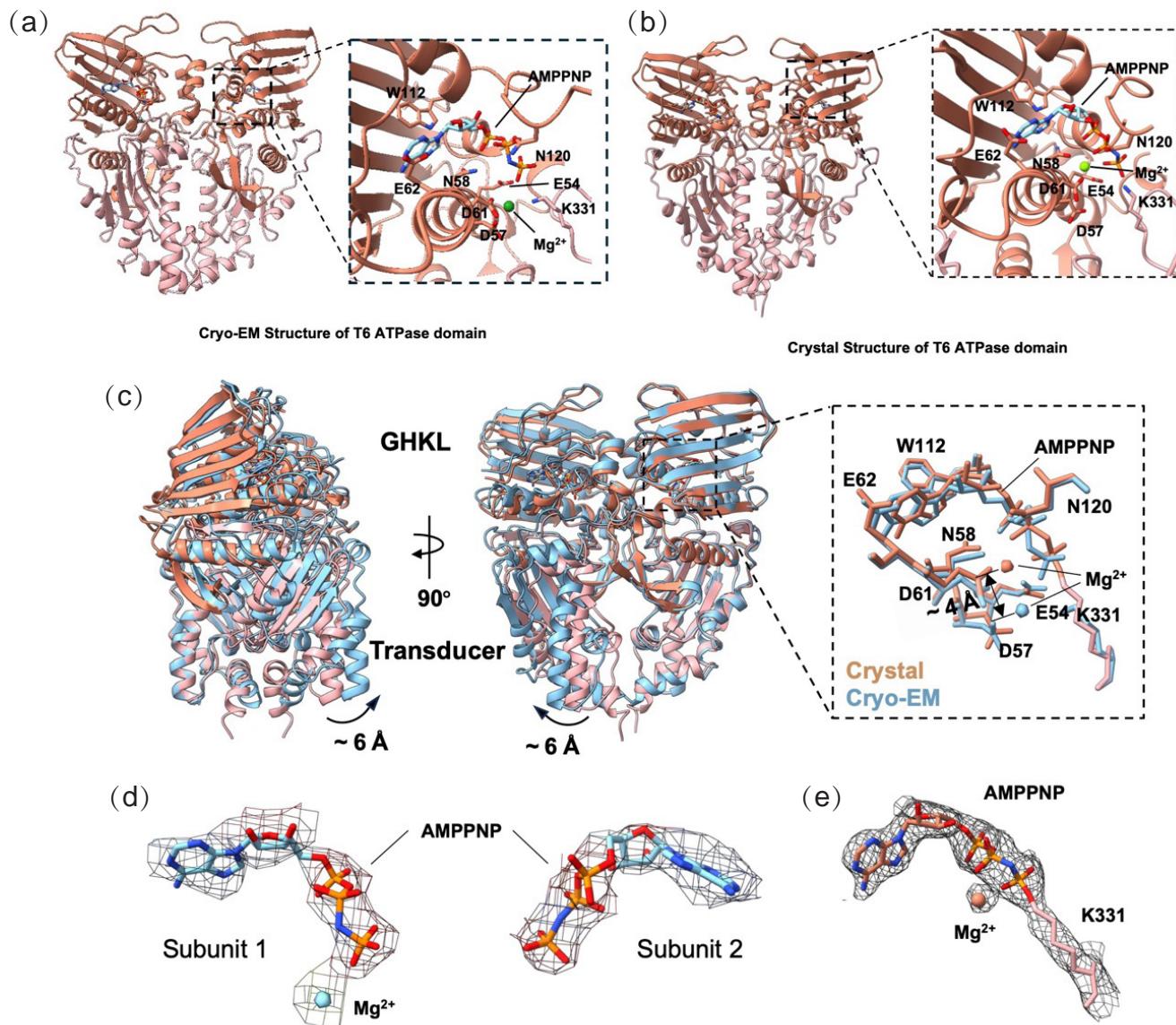


图 2-11 在轨试验返回的蛋白样品

(a) T6 Topo II ATPase 结构域冷冻电镜整体结构和活性中心局部视图；(b) T6 Topo II ATPase 结构域晶体整体结构和活性中心局部视图；(c) 电镜结构和晶体结构的整体对比和活性中心的对比；(d) 冷冻电镜结构两个活性中心的镁离子和 AMPPNP 局部密度；(e) 晶体结构活性中心镁离子和 AMPPNP 局部密度

(图片来源: Yuhui Xin , et al. Nature Communications. 2024, 15, 8719)

# 极端环境微生物对空间暴露环境的耐受性研究

## Space Exposure Tolerance Study of Microorganisms from Earth Extreme Environments

地球极端环境微生物在空间站的舱外暴露实验表明，太空辐射对生命存活影响显著，从返回样品中分离到数十株耐辐射突变株，并鉴定出一个潜在新种。地衣共生体在太空暴露 6 个月后仍然存活，且其共生藻活性似在隔离了紫外辐射的离子辐射下有增强。

### 研究进展

本研究关注极端环境微生物在空间环境中发生传播的可能性，利用辐射生物学舱外暴露实验装置安装紫外暴露样品盒（顶面是高透紫外的石英玻璃，紫外线总剂量的约 0.1% 可透过镀膜石英玻璃进入样品管）和非紫外暴露样品盒（不透光），开展了为期 6 个月的暴露实验。对比实验结果显示，空间环境中紫外线是杀死微生物最主要因素，仅需透过千分之一的紫外辐照可使微生物存活机会下降百万倍。然而，岩石、航天器材料甚至是微生物残骸可以遮挡紫外线，从而提升微生物的存活能力，增大了地球生命在不同宜居行星之间的传播潜力。

从返回的石生微生物样品中，通过寡营养培养基分离出生长缓慢但耐辐射能力突出的细菌菌株，初步鉴定发现存在细菌新种。从返回的耐辐射微生物样品的存活菌落中，通过使用紫外线、伽马射线和重离子束等不同类型射线辐照实验，筛选到 87 株耐辐射能力增强突变株

（图 2-12a），突变方向呈现多样性，一些突变株仅提升耐紫外能力，一些仅增强耐重离子辐照能力，还有一些兼具双重耐受优势，为微生物耐辐射的分子机制研究提供优质材料；在耐辐射能力增强的突变株中，有 8 株同时提高了

蓝色素（indochrome C）的生产能力，为开展微生物源性抗氧化剂和辐射损伤防护剂研究提供了新的菌株资源。地衣共生菌藻成功复苏（图 2-12b），并从返回地衣样品重新获得活体培养物，为地外环境先锋生物研究提供了材料。结合地衣样品生物学特性及空间站返回实际情况，建立了地衣空间适应能力评价新手段，丰富了地衣的抗逆场景内涵，佐证了其向地外拓展生存边界的生命先锋潜力。

### 应用及前景

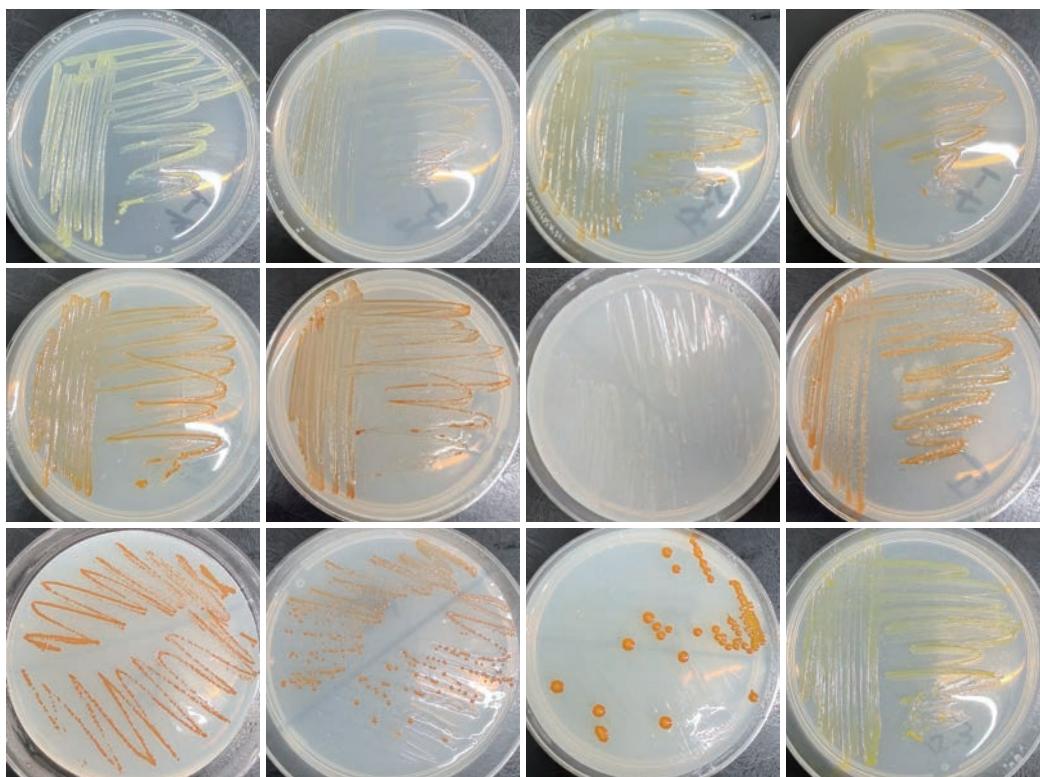
耐辐射微生物突变株为耐辐射分子机制研究提供优质材料，也为微生物源性抗氧化剂、辐射损伤防护剂研究提供了新菌株资源；佐证了地衣向地外拓展生存边界的生命先锋潜力，为地外生命信号探索及宜居星的环境改良提供重要参考；验证了行星保护重点关注微生物的空间环境耐受能力，为深空探测行星保护技术实施奠定基础。



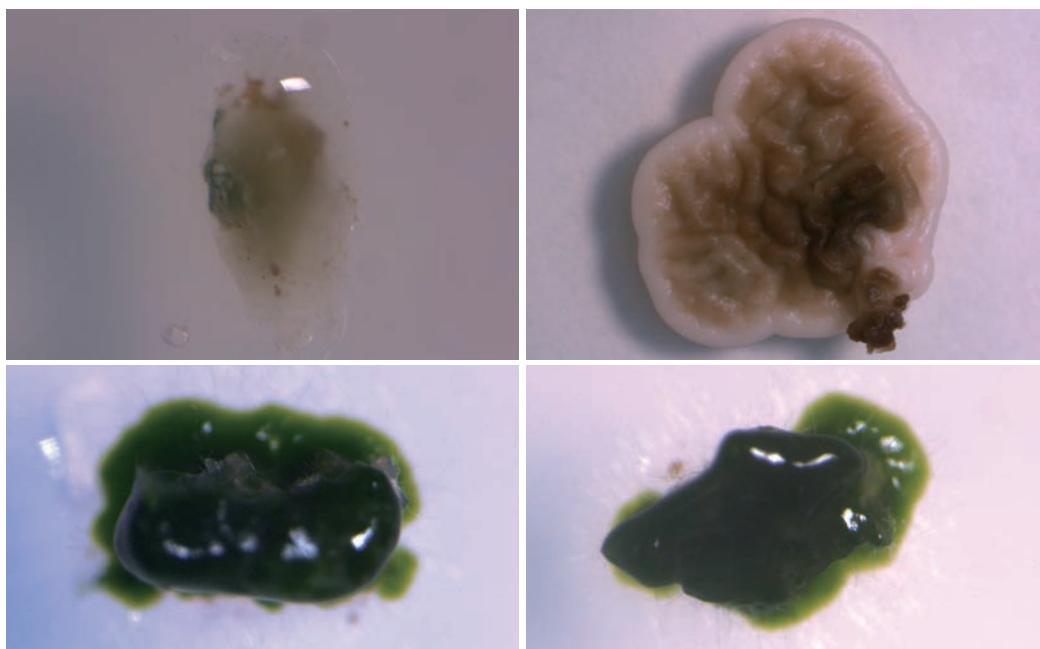
扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] 张璐, 阮迪, 张威, 等. 微生物介导的岩石有生源假说的研究进展 [J]. 微生物学通报, 2025, 52 (08): 3669-3683. DOI: 10.13344/j.microbiol.china.241064.
- [2] 袁俊霞, 张秦, 马玲玲, 等. 行星保护重点关注微生物资源库的构建 [J]. 深空探测学报 (中英文), 2024, 11(5): 513-520. DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230049.
- [3] Yanyan Wang, Yaran Zhang, Rong Li, et al. Exploration on cold adaptation of Antarctic lichen via detection of positive selection genes [J]. IMA Fungus, 2024, 15: 29. DOI: 10.1186/s43008-024-00160-x.



(a) 耐辐射鞘氨醇单胞菌突变株的菌落



(b) 地衣共生菌藻的恢复培养情况

图 2-12 随神舟十八号飞船返回地面的极端环境微生物实验样品

**代表  
专利**

- [1] 于雪, 张威, 章高森, 等. 一种空间诱变抗氧化节杆菌及其蓝色素的提取方法和应用. 发明专利. 专利号: ZL202410304150.5. 授权日期: 2024 年 3 月 18 日.
- [2] 齐莎, 魏鑫丽, 陈沛霖, 等. 一种微生物修复剂的播撒装置及其使用方法. 发明专利. 专利号: ZL 202410343880.6. 授权日期: 2025 年 9 月 2 日.

**主要  
完成  
团队**

中国科学院西北生态环境资源研究院甘肃省极端环境微生物重点实验室, 北京空间飞行器总体设计部, 航天神舟生物科技集团有限公司空间微生物研究团队, 中国科学院微生物研究所魏鑫丽团队。

# 小样本高维数据挖掘方法构建及空间环境响应分子特征解析与应用

## Data-Mining Methods Developed for Analyzing Small-Sample with High-Dimensional Omics Data and Their Applications in Identification of Molecular Features Responding to Space Environment

提出了耦合特征选择、跨物种大规模同源比对、单样本网络等多维度的数据挖掘方法，系统解析了不同物种在空间环境下的保守分子应答机制，发现并验证了空间环境关键分子响应特征，并构建了空间辐射剂量评估模型，为“小样本、高维度”数据提供分析范式，为“空间环境损伤评估和健康风险预警”提供技术支持。

### 研究进展

空间辐射是载人航天任务中最主要的健康风险因素之一，空间辐射分子标志物和空间辐射剂量评估技术被认为是影响辐射监测、损伤评估与健康风险预警准确性的关键瓶颈。针对空间生物学数据具有的“小样本、高维度”特征，构建了融合特征选择、跨物种比对及单样本网络分析等系列空间辐射损伤机制及敏感性分子标志物挖掘与分析方法。通过将遗传算法与多类机器学习模型深度耦合，系统识别了空间辐射响应关键基因，并建立了适用于空间辐射剂量评估的方法。对来自不同批次空间站返回的模式动物（如线虫和小鼠等）的多组学数据进行系统分析，并结合地面模拟实验开展实验验证。

研究结果揭示了无脊椎动物与人类对空间环境的保守分子应答机制（图 2-13）；发现空间辐射的累积作用诱导更强的分子应激响应与适应性调节特征（图 2-14）；识别了空间辐射敏感性关

键分子及其功能特征，获得了不同组织器官敏感性及疾病风险的类型，构建了基于空间辐射敏感性基因的剂量预测模型，并对空间环境诱导的健康风险进行了系统分析与预测（图 2-15）。

### 应用及前景

本研究构建的数据挖掘方法为“小样本、高维度”数据提供新的技术途径。研究所鉴定的跨物种空间环境分子响应特征，为深入解析空间环境作用下的保守分子应答机制提供了关键线索，并为“空间环境损伤评估和健康风险预警”提供了重要的技术支撑。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Zejun Li, Lei Zhao, Ge Zhang, et al. Optimized combination methods for exploring novel space environment-responsive genes and their roles: Insights from space-flown *C. elegans* and their implications for astronauts [J]. International Journal of Radiation Biology, 2025, 101: 891-911. DOI: 10.1080/09553002.2025.2519561.
- [2] Ge Zhang, Lei Zhao, Zejun Li, et al. Integrated spaceflight transcriptomic analyses and simulated space experiments reveal key molecular features and functional changes driven by space stressors in space-flown *C. elegans* [J]. Life Sciences in Space Research, 2025, 44: 10-22. DOI: 10.1016/j.lssr.2024.11.004.
- [3] Yan Zhang, Lei Zhao, Yeqing Sun. Using single-sample networks to identify the contrasting patterns of gene interactions and reveal the radiation dose-dependent effects in multiple tissues of spaceflight mice [J]. npj Microgravity, 2024, 10: 45. DOI: 10.1038/s41526-024-00383-7.

### 主要完成团队

大连海事大学环境系统生物学研究所孙野青团队。

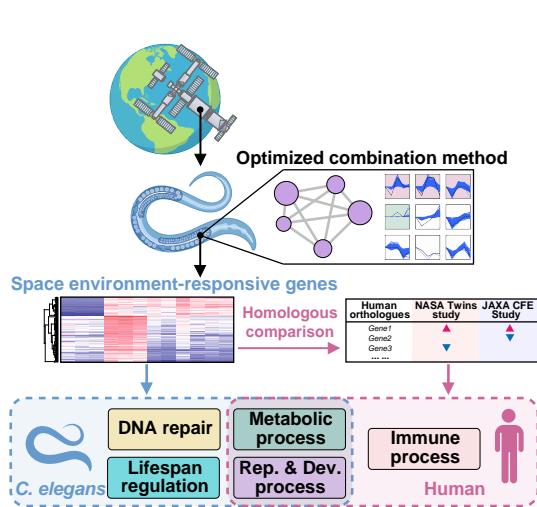


图 2-13 耦合特征选择和同源比对算法揭示线虫空间环境响应基因及保守应答机制示意图

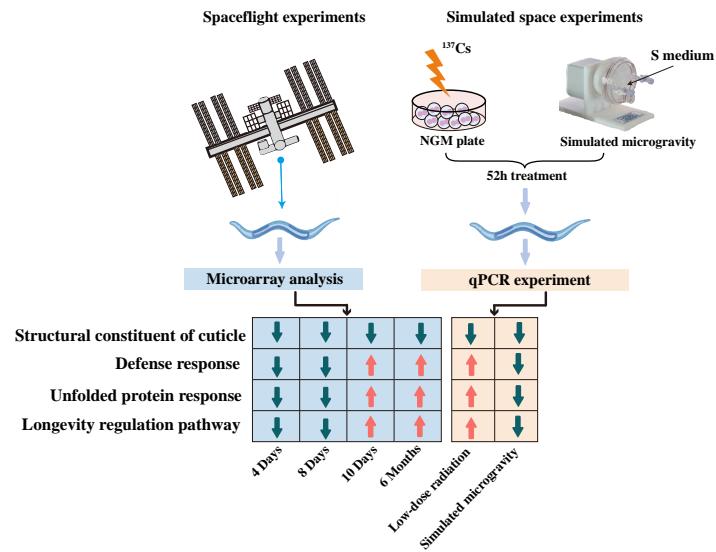


图 2-14 解析空间环境下线虫的关键转录特征、生物学功能及其主要驱动因素示意图

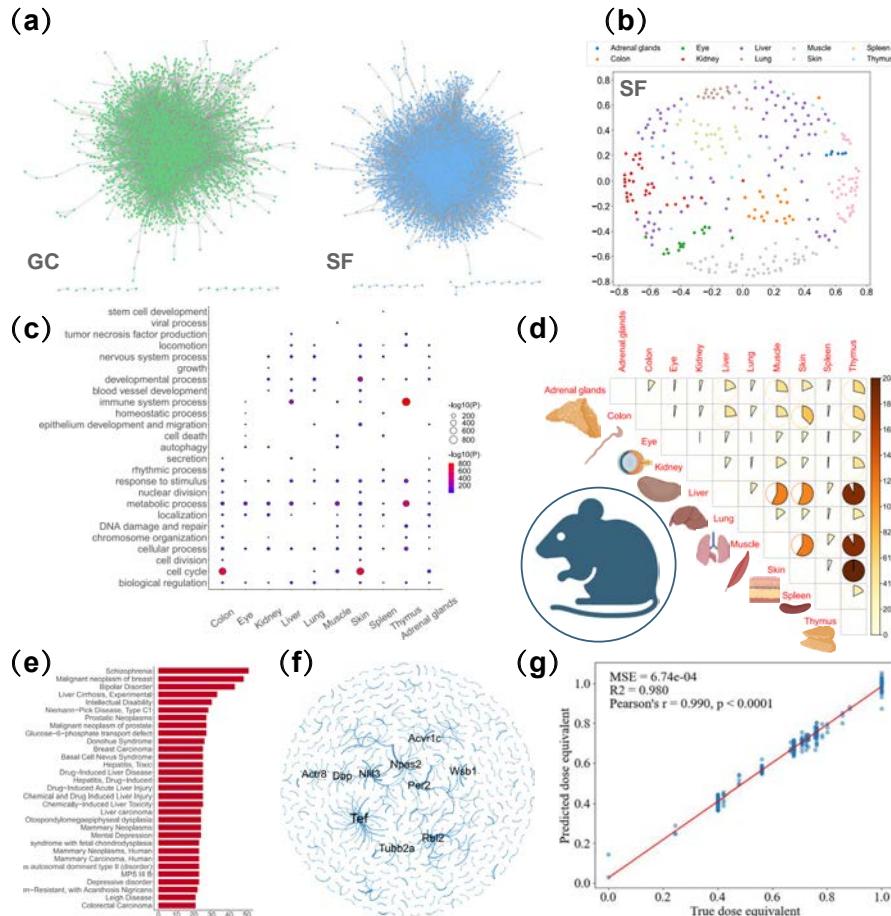


图 2-15 单样本网络算法解析空间环境下小鼠不同组织分子互作模式及空间辐射剂量评估与风险预测分析

- (a) 为地面对照和空间飞行小鼠单样本网络示意图； (b) 空间环境下小鼠不同组织转录组主成分分析结果；  
 (c) 空间环境下小鼠不同组织差异表达基因富集结果； (d) 空间环境下小鼠不同组织差异表达基因重叠情况；  
 (e) 空间环境下疾病风险预测分析； (f) 空间环境下小鼠关键响应基因挖掘；  
 (g) 基于空间环境下小鼠关键响应基因的空间辐射剂量评估预测结果

(图片来源于 Zejun Li, et al. International Journal of Radiation Biology, 2025, 101: 891-911; Ge Zhang, et al. Life Sciences in

Space Research, 2025, 44: 10-22.; Yan Zhang, et al. npj Microgravity, 2024, 10: 45)

# AI 赋能空间生命科学： 基于视觉分析的动物行为表型量化分析

## AI-Enabled Space Life Science: Vision-based Quantitative Phenotyping of Animal Behavior

面向空间站动物行为实验场景，构建覆盖果蝇、线虫、斑马鱼等多物种姿态估计、多目标追踪等任务的标注数据集，研究 AI 赋能空间动物行为分析方法，实现空间模式动物行为的高通量、精细化分析。

### 研究进展

本研究是空间生命科学实验与 AI 技术深度耦合的方法性探索，针对空间模式动物标准数据稀缺、智能化分析手段不足等问题，研制首个面向中国空间站的多物种（线虫、果蝇、斑马鱼等）姿态估计与跟踪基准数据集（SpaceAnimal Dataset）（图 2-16），提供检测框、关键点位与目标身份（ID）等多维标注信息，并配套开放可复现的评估工具与模型代码，创新性提出适配空间环境（生物姿态变化剧烈、运动轨迹非线性、遮挡重叠频发等）的结构感知的多目标姿态估计算法与双流融合的多目标追踪算法

（图 2-17，图 2-18），实现高精度姿态估计与追踪。该研究将空间生命科学研究从传统人工观测推向智能化、可量化的新阶段，为解析生物空间适应机制提供关键技术支撑与数据保障。

### 应用及前景

本研究构建的 AI 动物行为分析方法与基准数据集已在中国空间站多项空间生命科学在轨实验中成功应用。未来，该研究将持续扩展数据集规模，丰富物种类型，打造 AI 赋能的空间生命科学数据生态，助力建立新一代智能化空间生命科学实验范式。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Shengyang Li, Kang Liu, Han Wang, et al. Pose estimation and tracking dataset for multi-animal behavior analysis on the China Space Station[J]. *Scientific Data*, 2025, 12(1): 766. DOI:10.1038/s41597-025-05111-8.
- [2] Zhuang Zhou, Shengyang Li, Yixuan Lv, et al. A Deep Learning Framework for Multi-Object Tracking in Space Animal Behavior Studies[J]. *Animals*, 2025, 15(16): 2448. DOI: 10.3390/ani15162448.
- [3] Kang Liu, Shengyang Li, Yixuan Lv, et al. Structure-Aware Multi-Animal Pose Estimation for Space Model Organism Behavior Analysis[J]. *Animals*, 2025, 15(21): 3139. DOI: 10.3390/ani15213139.

### 代表专利

- [1] 李盛阳, 刘康, 赵曼淇. 一种面向空间站空间线虫运动的关键点提取与跟踪方法. 发明专利. 专利号: ZL202410505805.5. 授权日期: 2024 年 10 月 29 日.
- [2] 李盛阳, 刘康. 一种生物姿态的检测方法及系统. 发明专利. 专利号: ZL202410261160.5. 授权日期: 2024 年 11 月 05 日.
- [3] 周壮, 李盛阳, 杨荣, 等. 一种基于空间科学实验视频的果蝇多目标跟踪方法和系统. 发明专利. 专利号: ZL202510541648.8. 授权日期: 2025 年 7 月 11 日.

### 主要完成团队

中国科学院空间应用工程与技术中心科学与应用数据中心。

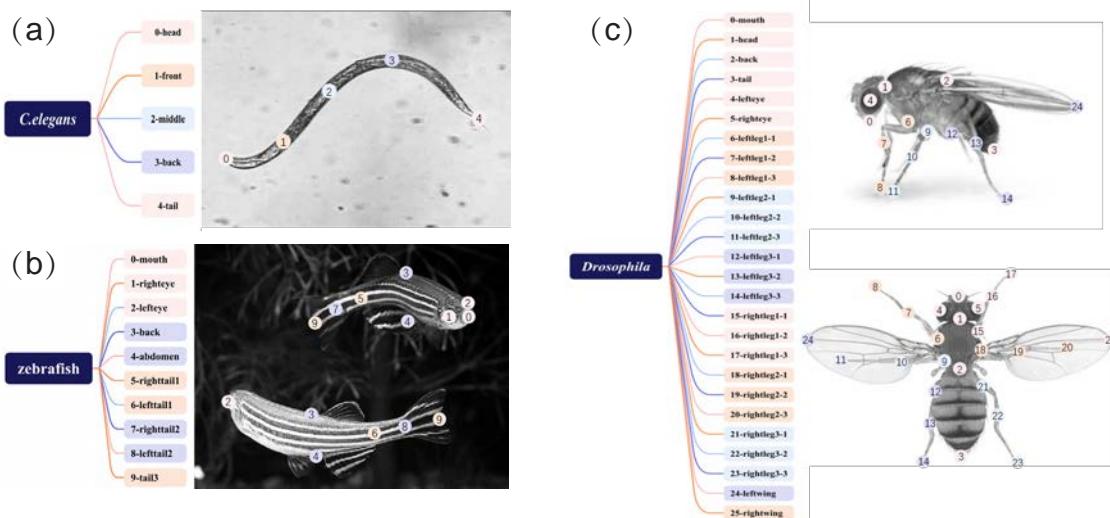


图 2-16 Space Animal 数据集示意图

(a) 线虫; (b) 斑马鱼; (c) 果蝇

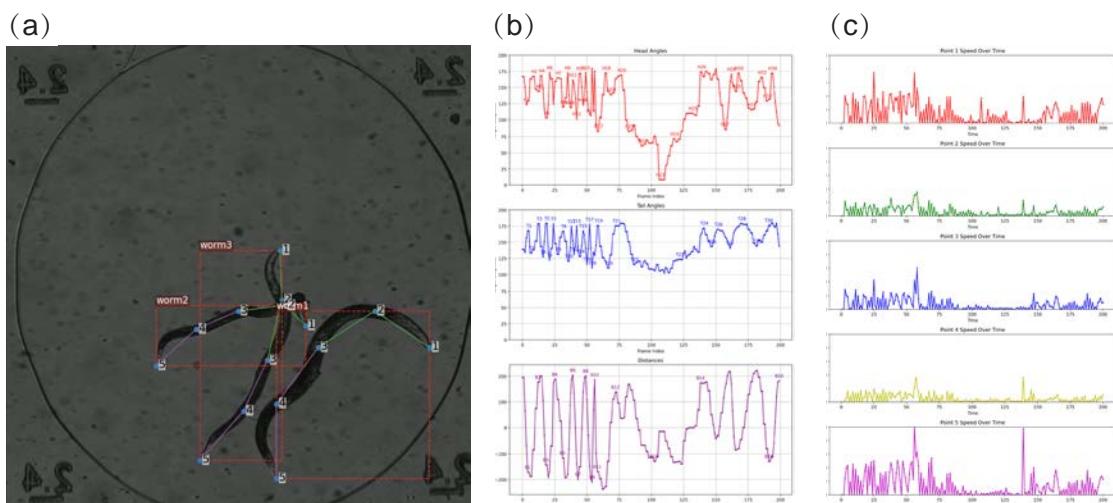


图 2-17 基于姿态估计与追踪的线虫行为参数提取与统计

(a) 线虫姿态估计结果; (b) 线虫运动信息随时间变化统计图; (c) 线虫关键点运动速率图

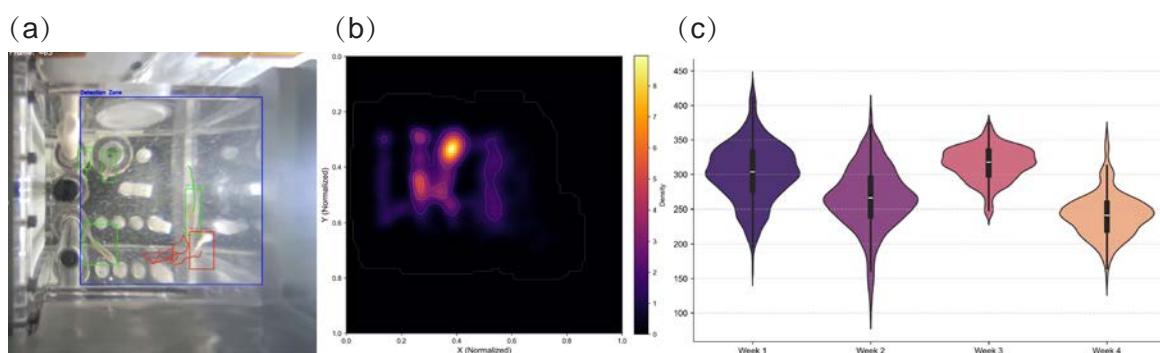


图 2-18 基于斑马鱼运动轨迹的行为参数提取与统计

(a) 斑马鱼空间失定向行为检测; (b) 斑马鱼活动空间热力图; (c) 斑马鱼群体紧密度统计分布特征



## 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

① 中国空间站首次开展小鼠空间科学实验	6
② 空间亚磁 - 微重力环境果蝇三代培育及其生物学效应研究	8
③ 空间微重力诱导肝细胞脂质代谢失调的生物力学机制	10
④ 空间飞行中骨骼肌萎缩相关 miRNA 变化规律研究	12
⑤ 在轨实验发现噬菌体三磷酸腺苷水解酶全新的镁离子结合模式	14
⑥ 极端环境微生物对空间暴露环境的耐受性研究	16
⑦ 小样本高维数据挖掘方法构建及空间环境响应分子特征解析与应用	18
⑧ AI 赋能空间生命科学：基于视觉分析的动物行为表型量化分析	20

### 2.2 太空人体研究

① 微重力对人视觉运动信息加工的影响及脑机理研究	24
② 基于仿生黏附的下肢肌肉力刺激技术与装置	26
③ 空间站单细菌 RNA 测序技术的建立及在轨应用	28
④ 空间飞行对人认知与精细操作能力的影响及机制	30
⑤ 长期失重环境下眼颅压无创监测及脑灌注评估技术研究	32
⑥ 空间辐射脑炎性样变化生物预警技术研究	34



太空人体研究方向主要开展了空间环境对人体生理影响、空间飞行人因研究、空间脑科学、传统医学及其他新技术等研究，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机制，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获得系列成果，一是为载人航天长期发展研发 2 项评估与防护相关新技术，在国际上首次提出的无创颅压监测技术，利用经眶 B 超测量视神经蛛网膜下腔面积实现无创颅内压监测，有望转化应用于飞行任务及临床检测；自主研发仿生黏附鞋，将有望结合航天员日常工作生活开展下肢肌萎缩的有效防护锻炼。二是为空间飞行组学前沿研究研发 1 项检测新技术。自主研发国际领先的耐长时间常温储存固定后样本的单细菌转录组高可靠检测技术，支撑面向国际前沿的在轨人体肠道微生物样本单细菌转录组学研究。三是丰富“人在太空适应机制”的理论认识。在国际上获得一系列航天员生理机能和作业能力变化创新发现：发现微重力通过影响航天员前庭视觉功能连接重塑生物运动知觉，前馈控制比反馈控制更易受微重力的影响等。

# 微重力对人视觉运动信息加工的影响及脑机理研究

## Investigating the Effects of Microgravity on Human Visual Motion Perception and Its Neural Mechanisms

围绕微重力对人视觉运动信息加工的影响及机理，提出并验证了评估运动感知中重力敏感性的测试范式；通过天地基实验，首次发现微重力会减弱航天员生物运动知觉及其神经响应的重力敏感性，而非生物运动感知则保持稳定；脑影像结果显示微重力通过影响前庭视觉功能连接重塑生物运动知觉。研究结果丰富了不同重力条件下人脑感知觉的可塑性理论。

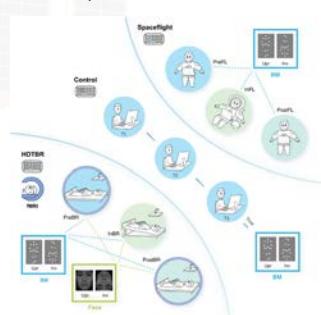
### 研究进展

围绕“重力在视觉运动信息加工过程中的作用及其认知神经机制”的重大科学需求，本成果提出和验证了一套评估生物运动感知与非生物运动感知中重力敏感性的测试范式，并从行为学、电生理等多层面证实了人类视觉系统对运动模式所包含重力信息的高敏感性。通过空间实验室任务中开展的生物运动知觉测试（图 2-19a），在国际上首次发现空间飞行中航天员生物运动知觉的倒置效应显著减弱（图 2-19b），表明人类所处重力环境的改变会引发生物运动知觉重力敏感性的改变。长时模拟微重力（头低位卧床）实验中同样发现了生物运动知觉倒置效应的减弱，且头低位卧床前、起床后的功能磁共振成像（fMRI）数据显示，志愿者大脑中特异于生物运动加工的“pSTS”脑区的激活及其与后脑岛（前庭系统的核心脑区）的功能连接发生了改变（图 2-20），由此揭示出前庭系统功能对生物运动知觉敏感性的重要作用。在空间站长期飞行任务中，通过行为和脑电实

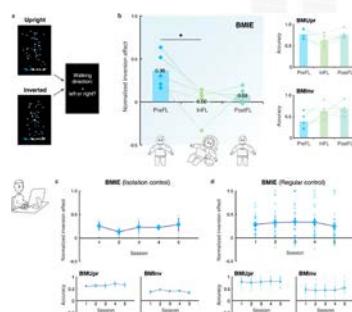
验，在国际上首次观测到长期失重条件下航天员对生物运动节律性特征的脑电追踪倒置效应显著下降（图 2-21）；同时，非生物运动感知重力敏感性指标在长期空间飞行中保持稳定。通过系列研究，在国际上首次发现，微重力环境对生物运动和非生物运动感知存在差异性影响；对前者的影响可能源于大脑前庭的重力计算深度参与了视觉生物运动中的重力信息加工；身体所接受重力刺激的改变可通过影响前庭重力估计重塑生物运动视知觉。上述研究发现丰富了不同重力条件下人脑感知觉的可塑性理论。

### 应用及前景

本成果建立了视觉运动信息加工特性的测试方法、范式和平台，构建了具有高敏感性和高信效度的行为和脑功能指标，为系统研究重力如何塑造人类视觉运动加工提供了重要技术支撑。研究中揭示了微重力对人视觉运动信息加工的影响规律及脑机理，为航天人机界面设计提供了理论支撑。



(a) 天地基实验研究技术路线图



扫码查看联系方式

(b) 微重力减弱生物运动知觉的倒置效应

图 2-19 研究技术路线及生物运动知觉倒置效应的变化趋势

(图片来源: Ying Wang, et al. Nature Communications, 2022, 13(1): 2765)

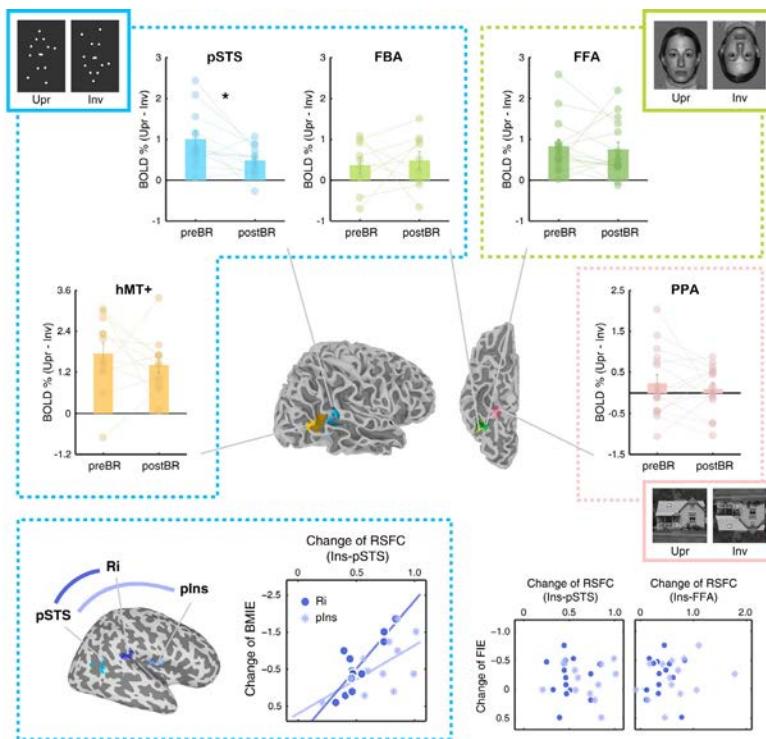


图 2-20 模拟微重力环境改变生物运动加工中“pSTS 脑区”的激活及其与后脑岛的功能连接

(图片来源: Ying Wang, et al. Nature Communications, 2022, 13(1): 2765)

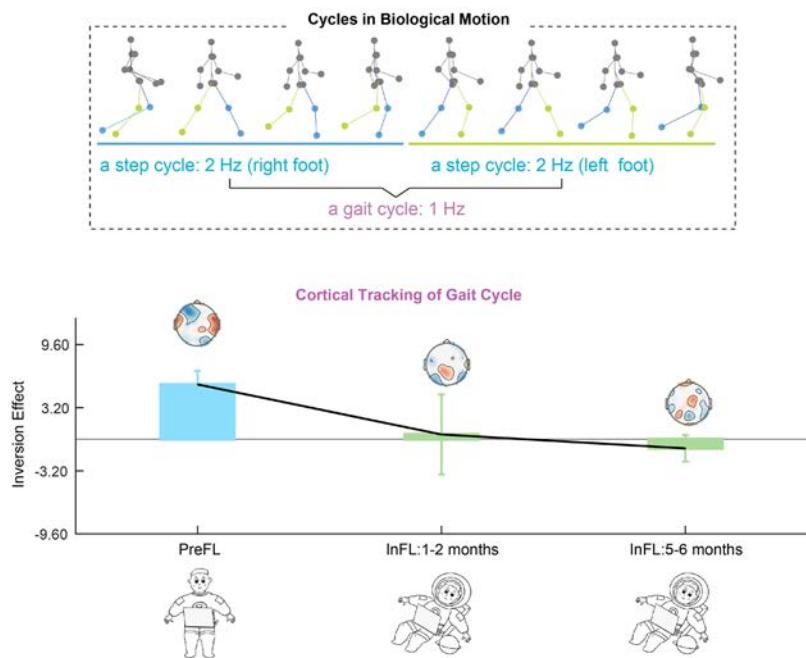


图 2-21 长期空间飞行减弱人脑对生物运动的神经追踪强度

代表  
论文

[1] Xiqian Lu, Bogeng Song, Shaoshuai Zhang, et al. Implied gravity promotes coherent motion perception[J]. *npj Microgravity*, 2025, 11(1): 36. DOI: 10.1038/s41526-025-00498-5.

[2] Li Shen, Xiqian Lu, Xiangyong Yuan, et al. Cortical encoding of rhythmic kinematic structures in biological motion[J]. *NeuroImage*, 2023, 268: 119893. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2023.119893.

[3] Ying Wang, Xue Zhang, Chunhui Wang, et al. Modulation of biological motion perception in humans by gravity[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 2765. DOI: 10.1038/s41467-022-30347-y.

主要  
完成  
团队

中国科学院心理研究所蒋毅团队。

## 基于仿生黏附的下肢肌肉力刺激技术与装置

### Bionic Adhesion-Based Lower Limb Muscle Force Stimulation Technology and Device

长期微重力环境导致航天员出现下肢肌肉萎缩，直接关系航天员在轨健康和体能状态及返回过程中的超重耐受力和后恢复进程。针对失重环境中下肢屈肌力刺激难题，研发基于仿生黏附技术的失重性肌萎缩防护锻炼新措施。

#### 研究进展

本研究将仿生黏附技术引入在轨下肢肌肉力量训练场景，基于壁虎多层级多级分支刚毛结构端-面黏附作用原理，通过高性能材料的引入及表面修饰技术，建立微纳米纤维柱状阵列结构聚合物材料模具，制备合理弹性模量和微结构分布的黏附材料，研制形成仿生黏附鞋，显著提升了足底与舱内锻炼平台间的摩擦系数和接触稳定性，黏附性能高达  $5\text{N}/\text{cm}^2$ ，并实现了较好的力刺激线性传递特性。基于项目团队构建的“刺激强度 - 肌电信号响应 - 生物力学输出”的量效关系模型，形成下肢肌群力刺激方案，结合空间飞行任务中多部位表面肌电信号实验数据，系统评估了股直肌、股二头肌、腓肠肌、胫骨前肌等关键下肢肌群在力刺激负荷刺激下的激活时序、放电强度与疲劳特征，证实该技术可有效增强肌肉募集效率，具有防护

效能，形成了基于仿生黏附下肢肌肉力刺激技术。地基模拟实验也表明，采用仿生黏附鞋开展 4 周下肢力刺激锻炼可使下肢肌群厚度增加 8~20%，羽状角增加 5~16%，踝膝关节最大力提升 20~30%。

#### 应用及前景

本研究建立的基于仿生黏附的下肢力刺激技术为航天员失重防护提供了一项重要的创新技术，相关研究成果被 CCTV、载人航天网等媒体报道，具有向失重生理效应防护技术转化的良好应用前景，其轻量化、高效能的优势使其在地面康复医学、运动科学及老龄化健康管理方面亦具广阔前景。本技术以被动式仿生结构实现高效能力学传递，具备重量轻、能耗低、可靠性高等显著优势，特别适用于资源受限环境。



扫码查看联系方式

#### 代表论文

- [1] Jian Chen, Wenjie Chen, Mengmeng Zhao, et al. Ultrafast Adhesion/Friction Bidirectionally Switchable Control by Vibration[J]. Advanced Functional Materials. 2025, e16421. DOI: 10.1002/adfm.202516421.
- [2] Shixun Fu, Jun Sun, Zhiyong Hu, et al. Multi-mechanism collaborative bionic fixation technique between a wide range of solid interfaces[J]. Advanced Science, 2024, 12(3): e2409507. DOI: 10.1002/advs.202409507.
- [3] 姬科举, 李志利, 李英泽, 等. 用于失重条件下下肢骨肌锻炼的仿生黏附鞋及在轨验证 [J]. 中国科学: 技术科学, 2024, 54(12): 2337-2346. DOI: 10.1360/SST-2024-0024.

#### 主要完成团队

南京航空航天大学戴振东团队，中国航天员科研训练中心航天医学全国重点实验室团队。

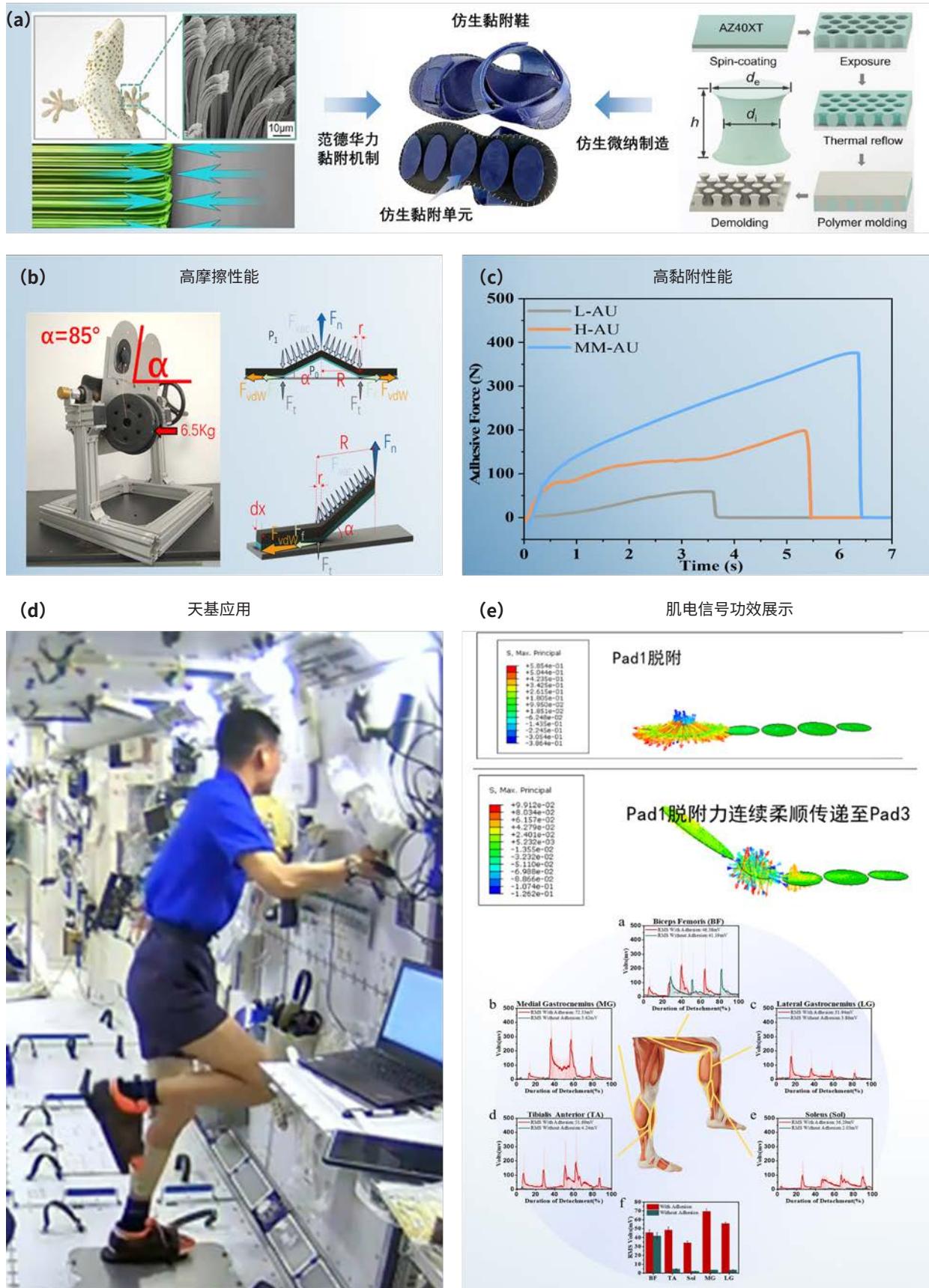


图 2-22 基于仿生黏附的下肢力刺激技术

(a) 仿生原理及仿生黏附鞋研制； (b) 仿生黏附材料高摩擦特性； (c) 仿生黏附鞋黏附性能； (d) 仿生黏附锻炼装备天基验证； (e) 下肢肌肉力刺激量效关系模型

## 空间站单细菌 RNA 测序技术的建立及在轨应用

### Establishment and in-orbit Application of Single-bacterium RNA Sequencing Technology on the Space Station

首次实现空间环境样本单细菌 RNA 测序，建立的全封闭固定方案及随机引物 RNA 捕获策略，突破了空间样本长期稳定保存与单细菌测序的技术难题。成功构建首个空间环境下人类肠道菌群的单细菌 RNA 表达图谱，揭示了航天飞行期间肠道菌群的功能状态与动态变化。

#### 研究进展

肠道微生物在航天员免疫、代谢与健康中至关重要，但传统群体测序难以揭示空间环境下的单细菌功能变化。单细菌 RNA 测序可直接解析单个细菌的基因表达与功能异质性，是理解航天环境对微生物生态与人体健康影响的关键技术。

本研究建立了一种全封闭固定方案及配套耗材体系，实现了人体粪便样本在空间站内长达半年及返回舱常温条件下的稳定保存。开发了基于随机引物的单细菌转录本捕获策略，实现对长期固定与反复冻融样本中转录本的有效捕获，以及对肠道菌群全物种的广谱覆盖。结合微流控单细菌编码，实现对肠道菌群的高通量单细菌测序。该技术体系首次从方法学层面验证了长期保存样本开展单细菌 RNA 测序的可行性，显著拓展了该技术在极端环境和操作受限场景中的应用边界。

在神舟十九号载人航天任务中，利用该技术对航天员飞行前、在轨及返回后多个时间点采集的粪便样本进行了单细菌 RNA 测序验证，所有样本均获得稳定的细胞与基因捕获效率（单样本检测细菌数超过 5000 个，单细菌平均基因检出数超过 30 个）。基于该数据，解析了航天员肠道菌群随时间序列的丰度变化，构建了单细菌水平的功能图谱，并在核心菌种中鉴定出 164 个呈时间序列变化的差异表达基因，刻画了其对空间环境的动态转录响应。

通过建立在轨全封闭固定方案及配套耗材体系以及地面基于随机引物的单细菌转录本捕获策略和微流控平台，首次构建了空间环境下人类肠道菌群的单细菌基因表达图谱，为航天医学和生命保障系统的微生物相关研究提供了重要技术基础。

#### 应用及前景

空间单细菌 RNA 测序技术的建立，为在轨采样和长期保存肠道微生物样本提供了一种安全可行的方法，可在载人飞行任务中更稳定、低风险地获取微生物信息。结合单细胞分辨率的功能亚群解析和时间动态分析框架，本研究展示了微生物在航天飞行任务不同时段的结构与功能变化可被系统捕捉，为后续更大规模或更长周期的航天微生态研究提供了参考。首次开发的粪便固定样本处理策略与随机引物驱动的全 RNA 捕获方案在单微生物测序领域的强大潜力，拓宽了环境受限下采集样本的可研究范围，还解决了微生物群落难以单体化测序的技术瓶颈，为构建高分辨率的多组织、多物种单细胞转录组图谱奠定了技术基础，并将在疾病研究、微生物生态学与宿主 - 微生物互作等方向发挥重要作用。



扫码查看联系方式

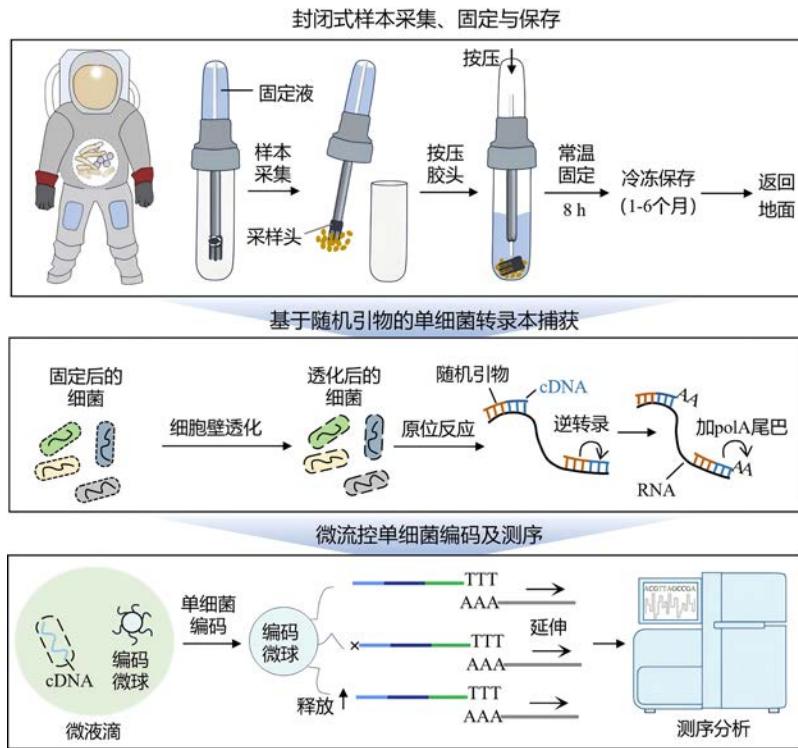


图 2-23 空间站单细菌 RNA 测序方案流程图

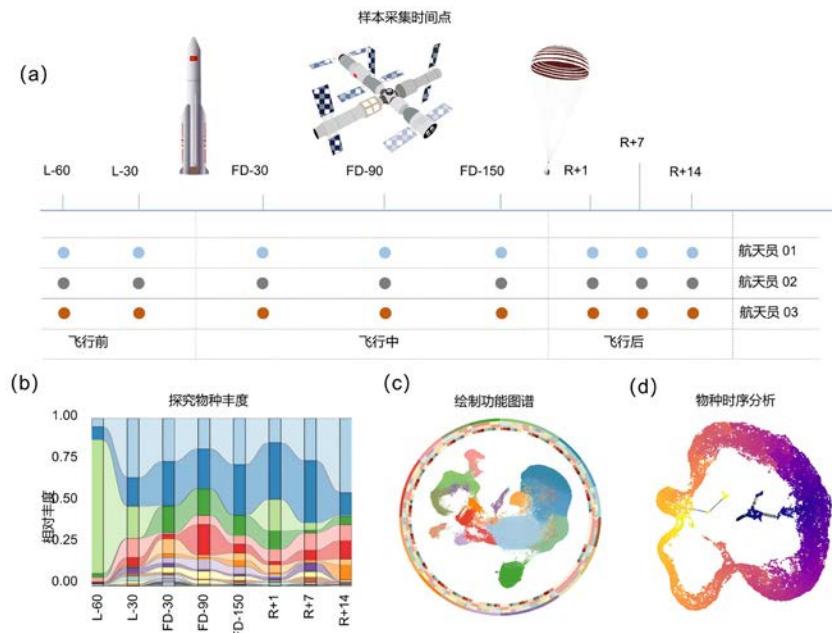


图 2-24 神舟十九号飞行任务在轨方案验证

- (a) 样本采集时间点； (b) 飞行前、在轨及返回后肠道菌群主要物种丰度的动态变化；  
 (c) 不同飞行阶段肠道菌群功能基因表达图谱； (d) 基于单细胞转录组数据的物种拟时序分析

代表论文

- [1] Ziye Xu, Yuexiao Lyu, Haide Chen, et al. Single-nucleus total RNA sequencing of formalin-fixed paraffin-embedded samples using snRandom-seq[J]. *Nature Protocols*, 2025, 20(10): 2771-2802. DOI: 10.1038/s41596-025-01170-8.  
 [2] Ziye Xu, Yuting Wang, Wenjie Cai, et al. Single microorganism RNA sequencing of microbiomes using smRandom-Seq[J]. *Nature Protocols*, 2025. DOI: 10.1038/s41596-025-01181-5.

主要完成团队

浙江大学良渚实验室王永成团队。

# 空间飞行对人认知与精细操作能力的影响及机制

## The Impact of Spaceflight on Human Cognition and Fine Motor Skills and Its Mechanisms

针对航天特因环境对人认知与精细操作能力的挑战，聚焦于眼手协调、空间认知、执行功能等关键能力特性，突破认知操作能力高信效度测评与数据建模分析技术，通过天地基实验，获取了长期空间飞行对航天员认知和精细操作能力影响的新发现。

### 研究进展

针对航天特因环境对人认知与精细操作能力的挑战，聚焦于眼手协调、空间认知、执行功能等关键能力特性，本成果突破了航天员认知操作能力高信效度测评技术，开发的测试平台覆盖了10余项认知与精细动作测试范式，集成度高、小型便携，空间环境适应性好，有效采集航天员数据超200人次。通过行为学指标和计算建模分析，获取了长期空间飞行对航天员认知和精细操作能力影响的新发现。国际上首次发现前馈控制比反馈控制更易受微重力的影响，肢体质量低估是在轨动作变缓的重要诱因（图2-25）；首次证实，空间飞行应激因素对高注意需求的认知操作任务有持续、泛化的影响（图2-26）；

发现计算机化的空间认知、执行功能测试绩效在轨保持稳定。研究发现为航天操控任务界面与人机交互设计优化提供了指导。

### 应用及前景

本成果所开发的眼手协调、空间认知、执行功能等测试平台集成度高、小型便携，已应用到船舶、高原等环境下的人员能力特性测评；研究发现的能力特性变化规律和机理可为航天人机界面设计与交互设计提供指导。



扫码查看联系方式

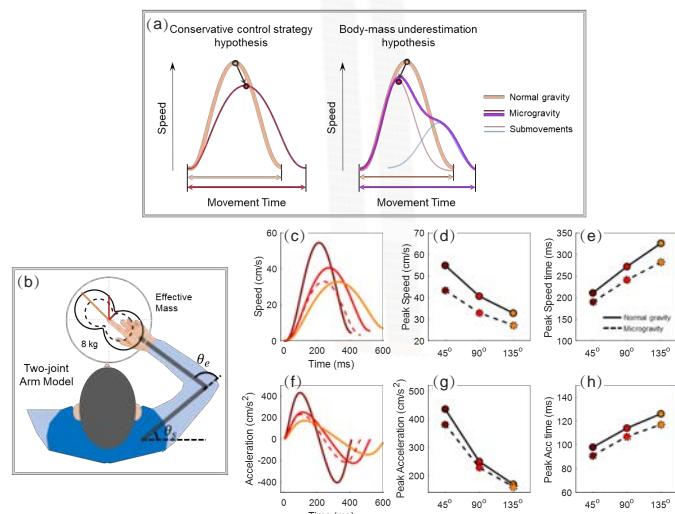
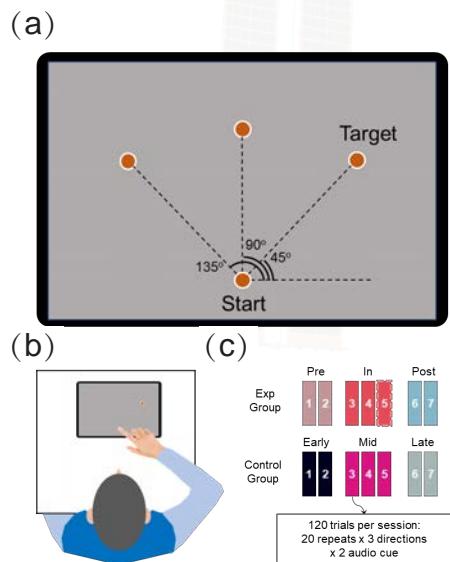


图 2-25 上肢动作实验揭示微重力下的肢体质量低估是在轨运动变缓的重要诱因

（图片来源：Zhaoran Zhang, et al. eLife, 2025）

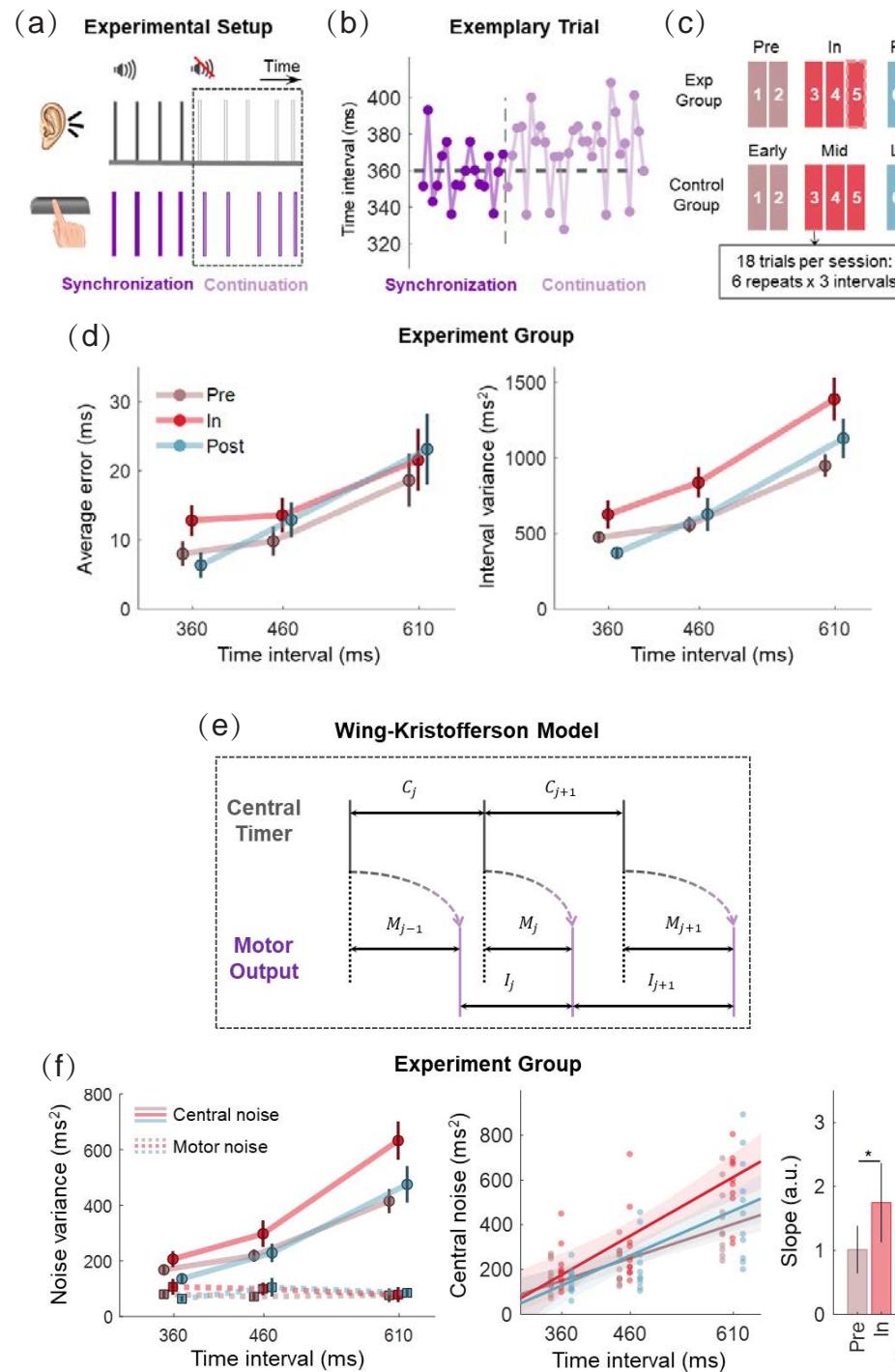


图 2-26 感知动作同步实验证实空间飞行应激因素对操作性任务的认知影响

(图片来源: Yu Tian, et al. npj Microgravity, 2024, 10: 108)

**代表论文**

- [1] Zhaoran Zhang, Yu Tian, Chunhui Wang, et al. Humans underestimate their body mass in microgravity: evidence from reaching movements during spaceflight [J]. *eLife*, 2025. 14: RP107472. DOI: 10.7554/eLife.107472.1.sa4.
- [2] Yu Tian, Zhaoran Zhang, Changhua Jiang, et al. Stressors affect human motor timing during spaceflight[J]. *npj Microgravity*, 2024, 10: 108. DOI: 10.1038/41526-024-00439-8.
- [3] Xiaoyue Zhang, Tianyang Zhang, Kunlin Wei. Cognitive load suppresses explicit learning while sparing implicit learning in visuomotor adaptation[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2025, 134: 1133-1145. DOI: 10.1152/jn.00262.2025.

**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团队, 北京大学魏坤琳团队, 浙江大学葛列众团队, 南京大学周仁来团队。

# 长期失重环境下眼颅压无创监测及 脑灌注评估技术研究

## Research on Noninvasive Techniques for Measuring Ocular-Intracranial Pressure and Evaluating Cerebral Perfusion in Long-Term Microgravity

眼颅压力稳态直接关系视神经健康及视功能，在空间站对航天员进行无创眼颅压力监测对眼健康风险评估具有重要意义。项目在国际上首次提出利用经眶 B 超测量视神经鞘蛛网膜下腔面积建立无创颅内压监测技术，发现眼颅压力不平衡是引起航天飞行相关眼生理及视功能变化的主要原因。针对空间飞行对航天员脑结构与功能潜在影响，构建了基于颈动脉血流动力学参数的脑灌注评估模型，为在轨人体生理健康状态评估提供理论支撑和技术储备。

### 研究 进展

长期在轨飞行将对航天员视觉健康带来挑战，了解眼生理改变及其发病机制可能为建立航天员视功能相关评估体系以及提出相应防护措施奠定基础。本研究创建长期失重视觉改变监测体系，首次提出经眶 B 超测量视神经蛛网膜下腔面积为监测体液头向转移脑脊液压力变化的敏感指标，敏感度和特异性均达到 95% 以上。长期失重可引起视神经鞘脑脊液压力持续增高，阐释眼 - 颅压力失衡是航天飞行相关神经 - 眼综合征（Spaceflight associated neuro-ocular syndrome, SANS）主要发病机制。揭示我国航天员眼生理改变特征，发现我国无病理性视盘水肿发生，较低的体重指数，精准阻抗措施制定是避免病理性 SANS 发生的关键保护因素。这一发现为未来长期深空探测任务的风险防控提供了新思路与依据。

围绕长期空间飞行任务对脑结构与功能影响，探索了脑灌注在全脑 - 脑区 - 体素水平的动态变化规律，初步发现了白质高信号进展与脑灌注下降之间的对应关系。首次从动脉 - 静脉 - 毛

细血管网的多层级视角，系统阐释了空间微重力环境下多血管与关键器官的血流动力学演变特征，提出了微重力环境下各血管、关键器官动力学异质性的量化变化模式。针对微重力场景，采用融合大脑解剖先验与结构边界知识的生成模型，结合颈 - 脑生理关联机制，构建了脑灌注评估模型，有望为在轨健康监测提供便捷工具。

### 应用 及 前景

无创颅压监测技术不仅可以应用在航天医学领域，也可以应用在临床中，辅助青光眼、高原眼病等眼颅压力梯度疾病的诊治。本研究建立的脑灌注评估模型，有望应用于更长期航天飞行致脑灌注异常的预警，在极端环境及急救医学方面亦具有一定应用前景。



扫码查看联系方式

### 代表 论文

- [1] Linkun Cai, Yawen Liu, Kai Li, et al. Multimodal Imaging-Based Cerebral Blood Flow Prediction Model Development in Simulated Microgravity [J]. Cyborg and Bionic Systems, 2025, 6: 0448. DOI: 10.34133/cbsystems.0448.
- [2] Linkun Cai, Yawen Liu, Haijun Niu, et al. AgGAN: Anatomy-guided generative adversarial network to synthesize arterial spin labeling images for cerebral blood flow measurement under simulated microgravity[J]. Medical Image Analysis, 2026, 107(Pt A): 103817. DOI: 10.1016/j.media.2025.103817.
- [3] Yuan Xie, Yingdi Fu, Yaqi Shao, et al. Quantitative ultrasound image assessment of the optic nerve subarachnoid space during 90-day head-down tilt bed rest [J]. npj Microgravity, 2024, 10(1): 9. DOI: 10.1038/s41526-024-00347-x.

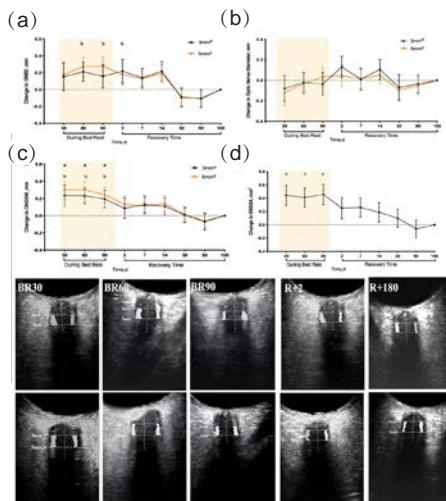
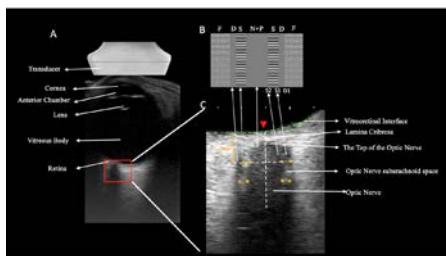


图 2-27 经眶 B 超视神经鞘测量模式图, 长期失重导致视神经鞘持续增宽

(图片来源: Yuan Xie, et al. npj Microgravity, 2024, 10(1))

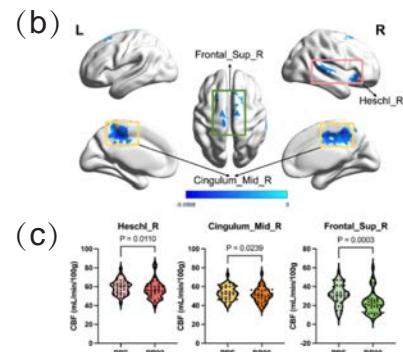
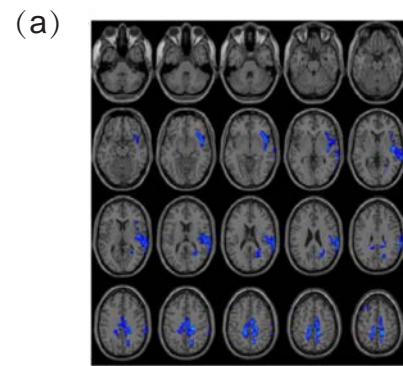


图 2-28 模拟失重条件下颅脑 MRI 脑灌注图像

(图片来源: Linkun Cai, et al. Cyborg and Bionic Systems, 2025, 6: 0448)

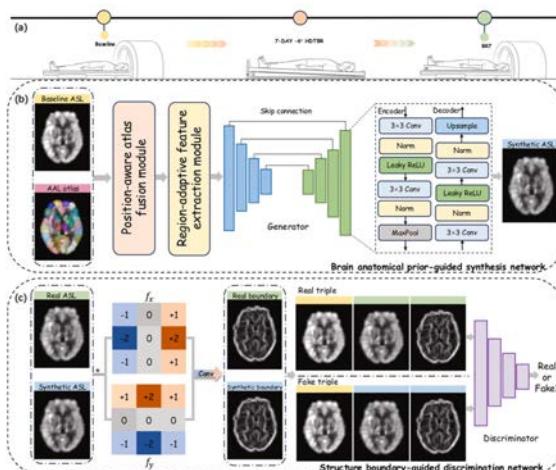


图 2-29 基于生成模型的脑灌注评估模型构建

(图片来源: Linkun Cai, et al. Medical Image Analysis, 2026, 107(PtA): 103817)

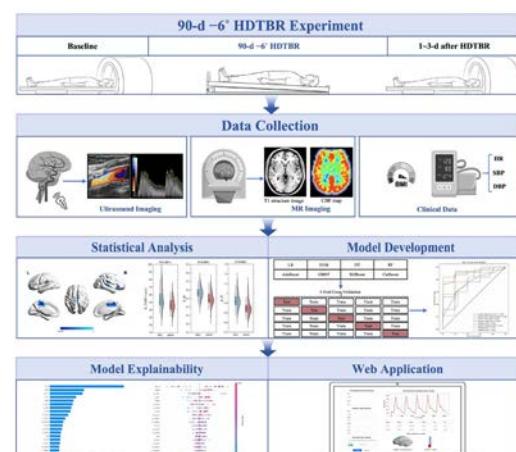


图 2-30 基于机器学习模型的脑灌注评估模型构建

(图片来源: Linkun Cai, et al. Cyborg and Bionic Systems, 2025, 6: 0448)

## 代表专利

- [1] Zhenchang Wang, Wei Zheng, Han Lv, et al. Cerebral perfusion state classification apparatus, method and device, and model training apparatus. United States Patent. US 11621079 B2. Apr. 4, 2023.
- [2] 王振常, 郑伟, 任鹏玲, 等. 脑灌注状态预测装置、方法、设备及模型训练装置. 发明专利. 专利号: ZL202210153193.9. 授权日期: 2022 年 9 月 16 日.
- [3] 王振常, 郑伟, 任鹏玲, 等. 脑灌注状态分类方法、装置、设备和存储介质. 发明专利. 专利号: ZL202211243065.X. 授权日期: 2023 年 6 月 23 日.

## 主要完成团队

首都医科大学附属北京同仁医院王宁利团队, 首都医科大学附属北京友谊医院王振常团队, 首都医科大学附属北京天坛医院刘杰昕团队。

## 空间辐射脑炎性样变化生物预警技术研究

### Research on Biological Warning Technology for Space Radiation Inflammatory Change on the Brain

针对长期飞行空间辐射可能导致的脑部炎性样变化，探索脑 mRNA- 外泌体 miRNA 的损伤调控机制，解析染色体畸变、转录变化 - 辐射剂量响应规律，筛选出候选预警标志物及防护制剂，为空间辐射脑损伤防护提供技术储备。

#### 研究进展

针对长期飞行空间辐射可能引起脑部发生炎性样变化的问题，聚焦脑 - 外周体液轴线，结合地面模拟空间辐射脑炎性损伤效应及转录数据，探索脑 mRNA- 外泌体 miRNA 的损伤调控机制，刻画神经炎症、髓鞘神经发育等关键信号通路、mRNA 分子响应及 miRNA 调控。整合长期飞行航天员外周血染色体畸变对空间辐射剂量的响应规律，建立体液辐射生物剂量模型；天地对比，探寻与地面模拟辐射共同响应的 mRNA 和 miRNA，提出外周血 PDGFR、TLR 等家族相关的 mRNA、尿外泌体 miRNA-21、miR-100-5p 等 miRNA，作为空间辐射脑炎性样变化“体液 RNA”无创预警候选生物标志物；基于遴选的候选生物标志物和中药龙血竭的小分子化合物库，利用网络药理学和计算机辅助多靶

点分子对接互作技术，筛选出空间辐射神经损伤防护生物制剂，并在地面获得有效性验证。本成果获得空间辐射生物剂量模型、系列的脑炎性损伤转录层级的预警候选标志物、潜在防护制剂（图 2-31），为空间辐射脑损伤风险早期防护提供了理论技术储备。

#### 应用及前景

建立的外周血淋巴细胞染色体畸变的天基辐射损伤检测方法，已应用于空间辐射生物剂量评估；获得的外周体液的脑炎性样变化候选生物指标有望应用于空间飞行空间辐射致航天员认知下降的早期预警、康复策略；获得的候选辐射防护制剂在发展减缓空间辐射致认知损伤措施方面具有一定应用前景。未来也有望拓展应用于地面职业辐射暴露人群的预警和防护。



扫码查看联系方式

#### 代表论文

- [1] Liben Yan, ChunLi Sun, Yaxi Zhang, et al. The biological implication of semicarbazide- sensitive amine oxidase (SSAO) upregulation in rat systemic inflammatory response under simulated aerospace environment[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(4): 3666-3679. DOI: 10.3390/ijms24043666.
- [2] Jundong Feng, Xu Wang, Liuxin Tian, et al. Protective effect of memantine hydrochloride on radiation-induced cognitive impairment and its mechanism[J]. Health Physics Journal, 2025, Accepted.

#### 代表专利

- [1] 马宏, 陈钰, 邓玉林, 等. 一种适用微重力回转仪装配的生物培养微流控芯片及其细胞培养方法. 发明专利. 专利号: ZL202110649283.2. 授权日期: 2022 年 10 月 25 日.

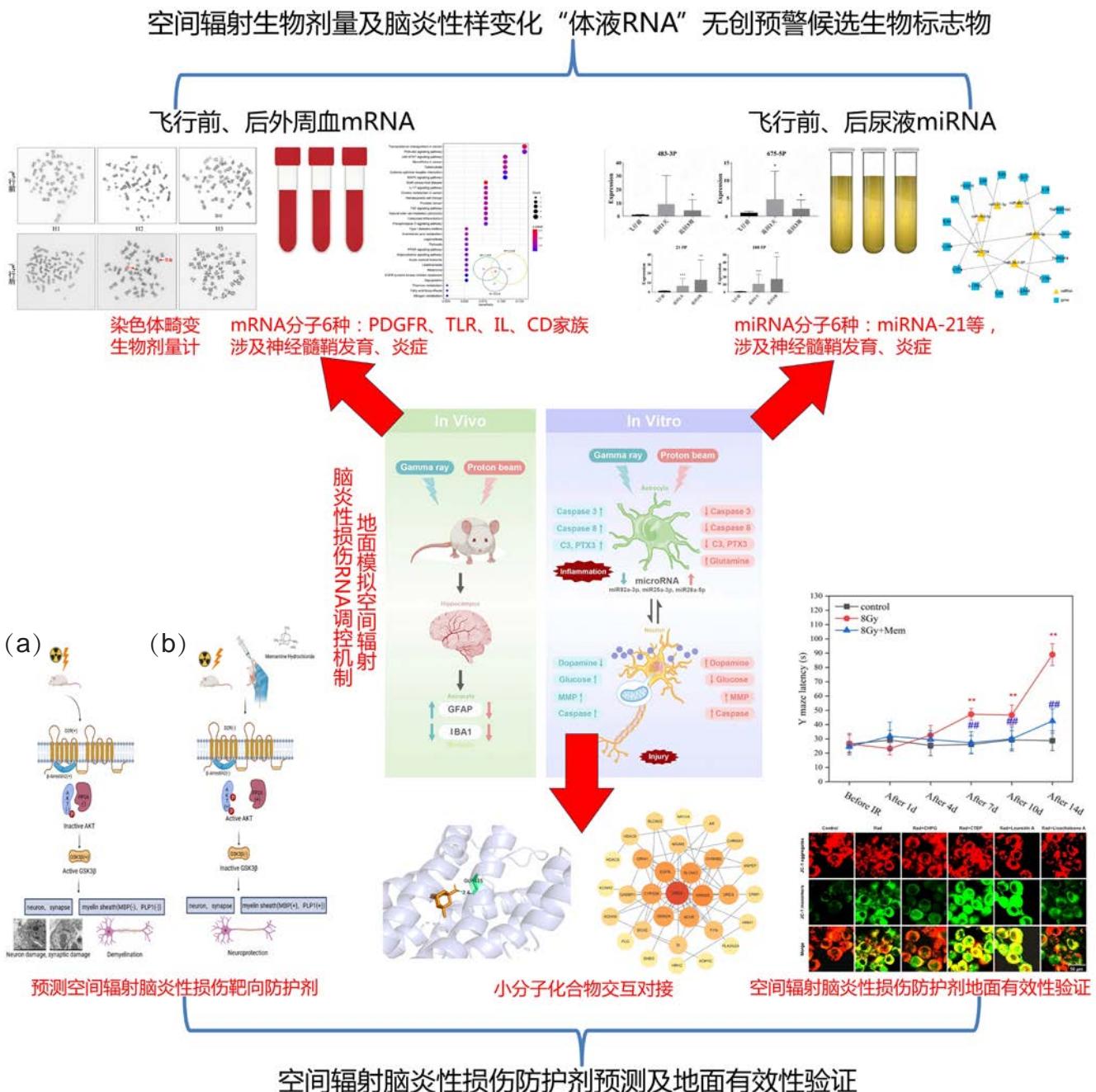


图 2-31 空间辐射脑炎性样变化生物预警技术研究成果

获奖情况

2025 年度国防科学技术进步奖二等奖, 项目名称: 带电粒子空间辐射生物效应地基模拟平台创建及应用 (2024GFJBJ2021),  
获奖者: 郭刚, 隋丽, 马宏, 等。

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团队, 北京理工大学马宏团队, 南京航空航天大学丰俊东团队。



## 微重力物理科学领域

### 3.1 空间材料科学

- ① 微重力条件下超高温金属材料枝晶和共晶生长的动力学局域效应 ..... 38
- ② 高性能铁基磁致伸缩合金的物相及性能调控研究 ..... 40
- ③ 金属玻璃熔体热物性与凝固组织研究 ..... 42
- ④ 微重力条件下铁基超导材料生长特性研究 ..... 44
- ⑤ 固 - 液复合润滑材料的舱外服役性能研究 ..... 46
- ⑥ 形状记忆聚合物及其复合材料空间服役性能研究 ..... 48

### 3.2 微重力流体与热物理

- ① 微重力条件下柱状微结构耦合小流速剪切流 / 射流强化沸腾换热规律 ..... 52
- ② 单针翅结构表面空间冷凝液膜演化行为及传热规律 ..... 54
- ③ 微重力条件下带电胶体结晶中的长寿命亚稳态体心立方结构 ..... 56

### 3.3 微重力燃烧科学

- ① 微重力条件下甲烷多射流火焰燃烧及碳烟形成特性研究 ..... 60
- ② 微重力条件下层流射流扩散火焰的形态和碳烟特征 ..... 62
- ③ 微重力条件下部分预混火焰的混合达姆科勒数和曲率稳焰机理 ..... 64



中国载人航天



空间材料科学方向聚焦空间环境下各类材料组织、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。在金属及半导体材料性能调控、高性能功能结构材料制备、空间润滑材料使役行为等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磁致伸缩合金、新型铁基超导材料等。验证了固液复合润滑材料、形状记忆聚合物材料等材料的可靠性和稳定性，已初步尝试在太阳能阵列和柔性太阳翼等方面应用。

# 微重力条件下超高温金属材料枝晶和共晶生长的动力学局域效应

## Dynamic Localization Effect of Dendritic and Eutectic Growth in Ultrahigh Temperature Metallic Materials under Microgravity

首次报道了微重力条件下流体驱动的枝晶与共晶生长动力学局域效应，发现获得的共晶组织具有更优异的力学性能，并阐明了其影响机理，为高性能铌合金和锆合金制备工艺优化提供了实验和理论依据。

### 研究进展

成功实现了铌合金、锆合金等超高温金属材料的空间无容器凝固实验。研究揭示了空间流体对枝晶和共晶生长模式的动力学局域效应（图3-1）：在微重力下，马兰格尼对流主导的局域流动（图3-2）诱导出球冠状、指状和针状等三种超常的枝晶尖端形态，发现了与传统枝晶生长理论不同的非抛物线旋转体的枝晶形态新现象；同时，发现在超过400K过冷条件下，共晶区域出现“规则共晶与非规则共晶共存、小平面生长与非小平面生长共存”的新规律。构建出微重力三维球状液滴凝固模型，揭示了铌合金中枝晶和共晶生长微重力局域效应。此外，对锆合金共晶生长及力学行为的研究表明：在微重力条件下，锆合金液滴的流动受到显著抑制，合金在凝固时共晶的两种相结构交替排列，最终形成了具有独特波纹状组织的共晶胞（图3-3），在胞内波纹状组织和胞外层片共晶的共同作用下，合金获得了优异的强度塑性匹配，

其硬度和弹性模量均显著提升。这些在地面重力环境中被自然对流所掩盖的新现象与新机制，拓展了人们对传统凝固中共晶与枝晶生长的新认知，为发展在轨材料制备技术奠定了关键的科学基础。相关成果发表于 *Advanced materials*（先进材料）、*Acta materialia*（材料学报）、*Journal of applied physics*（应用物理期刊）等国际期刊。

### 应用及前景

研究成果可用于指导在空间和地面环境中制备结构新颖的超高温铌合金、锆合金材料，建立新型微观结构与材料服役性能间的构效关系。拓展微重力下的快速凝固生长动力学理论，为高性能铌合金和锆合金制备工艺优化提供实验和理论依据。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Hui Liao, Haipeng Wang, Dingnan Liu, et al. Dynamic localization effect of dendritic and eutectic growth patterns stimulated by space fluid flow[J]. *Advanced Materials*. 2025, e08092. DOI: 10.1002/adma.202508092.
- [2] Haipeng Wang, Haozhe Li, Chenhui Zheng, et al. Eutectic growth kinetics and microscopic mechanical property of refractory  $Zr_{57}V_{43}$  alloy under space and ground conditions[J]. *Acta Materialia*. 2025, 295: 11. DOI: 10.1016/j.actamat.2025.121213.
- [3] Haipeng Wang, Chenhui Zheng, Liang Hu, et al. Outer space cultivated regular eutectic cells with anomalous internal microstructures for rapidly solidifying  $Zr_{50}V_{50}$  hypereutectic alloy[J]. *Journal of Applied Physics*. 2025, 137: 045104. DOI: 10.1063/5.0245520.

### 代表专利

- [1] 王海鹏, 左冬冬, 刘丁楠, 等. 测定静电悬浮液态金属振荡频率和表面张力的装置及方法. 发明专利. 专利号: ZL202410492146.6. 授权日期: 2024年7月19日.
- [2] 王海鹏, 左冬冬, 廖晖, 等. 液态金属振荡转变中频率及表面张力的探测装置及方法. 发明专利. 专利号: ZL202410489577.7. 授权日期: 2024年7月30日.

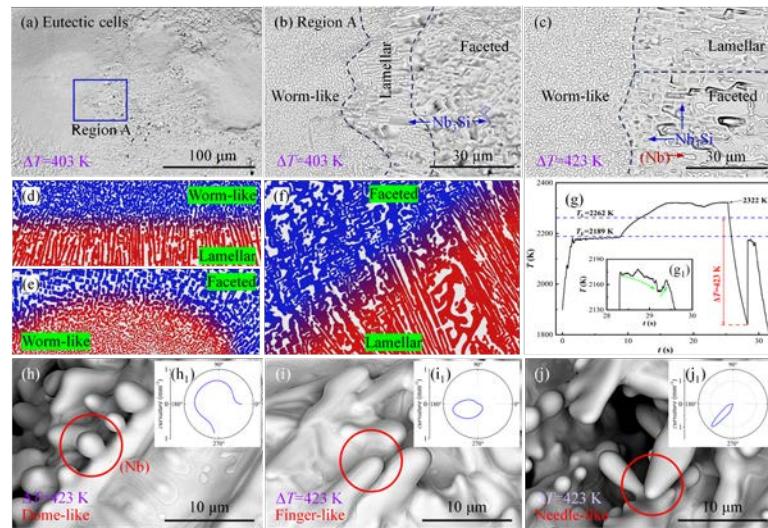


图 3-1 微重力下形成的铌合金多种共晶组织形态与枝晶尖端形貌

(图片来源: Hui Liao, et al. Advanced Materials, 2025, e08092)

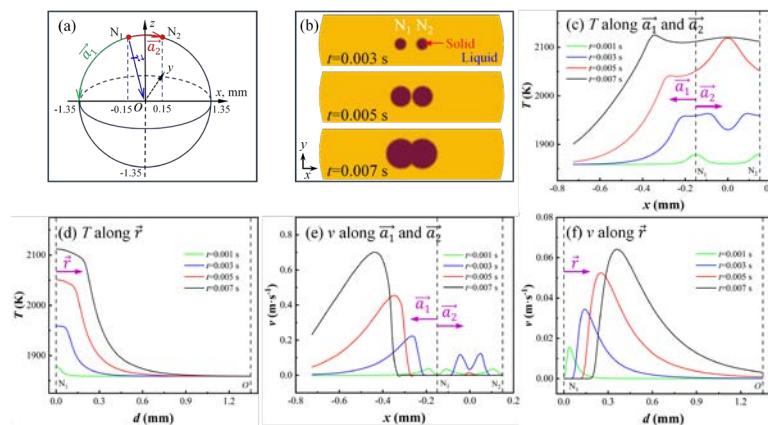


图 3-2 微重力下铌合金凝固过程的传热和流动

(图片来源: Hui Liao, et al. Advanced Materials, 2025, e08092)

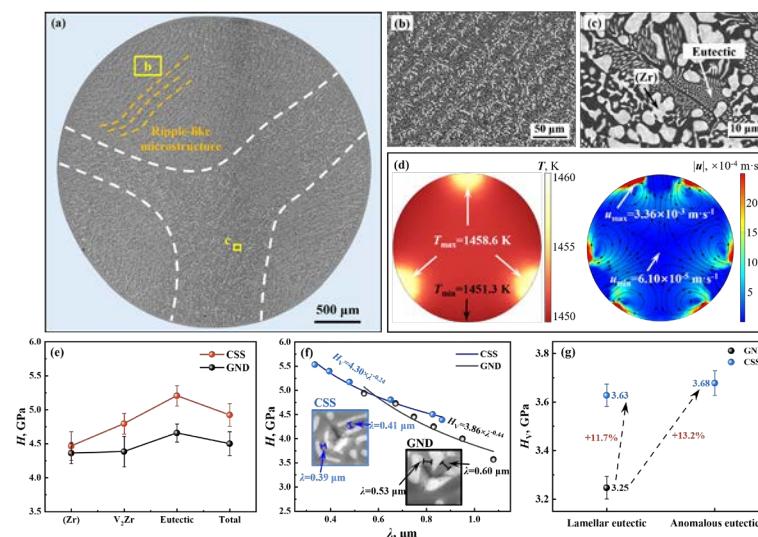


图 3-3 空间站实验得到的锆合金波纹状共晶组织及其力学性能

(图片来源: Haipeng Wang, et al. Acta Materialia, 2025, 295: 11)

# 高性能铁基磁致伸缩合金的物相及性能调控研究

## Phase-structure and Property Control of High-Performance Fe-Based Magnetostrictive Alloys

基于空间 / 地面实验对比, 探明了多相铁基磁致伸缩合金中不同物相的形成机理和影响因素, 提出了性能优化的设计方法及调控手段, 在传感器领域有重要潜在应用。

### 研究进展

开展了铁基磁致伸缩合金的空间凝固实验, 获得了比地面样品质量更好、更致密的铁钴硼(FeCoB)合金样品。通过微观组织表征和相场模拟发现, 微重力条件下获得的样品共格应变能较大, 有利于形成平直的共格界面; 而地面条件下共格应变能较小, 易形成具有高曲率的非共格界面。这表明, 微重力条件下获得的样品与地面制备的样品相比, 表面可以呈现出不同的相界形貌(图3-4)。微重力样品的矫顽力与剩磁均有所降低, 饱和磁化强度则有所增加。同时, 空间样品的析出相(纯FeCo相)体积分数相较于地面样品更大, 这导致了更大的磁致伸缩应变和更高的磁响应灵敏度, 样品整体磁性能有较为明显的提升(图3-5)。基于多相微结构调控与磁性能优化的相关研究,

构建了多相铁基磁致伸缩合金的凝固模型, 探明了不同物相的形成机理和影响因素, 提出了高灵敏磁致伸缩材料的设计方法及调控手段。研究成果在 *Acta Materialia* (材料学报)、*Applied Physics Letters* (应用物理快报) 等国际期刊发表。

### 应用及前景

本研究探明了铁基磁致伸缩合金性能优化的物理机制, 获得了高灵敏铁基磁致伸缩材料。凭借其低驱动磁场、大响应输出的性能优势, 有望在声纳、传感器与致动器等精密控制领域获得应用, 可推动未来信息技术、生物医疗和智能器件等领域的发展。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Chunxi Hao, Yu Wang, Teng Lu, et al. High performance magnetostriction of Fe-Cu-Pd ferromagnetic strain glass: Local chemical ordering induced martensitic nanodomains morphology with low modulus [J]. *Acta Materialia*, 2023, 245: 118650. DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118650.
- [2] Zhiyong Dai, Chao Zhou, Qizhong Zhao, et al. Effects of Ag doping on texture and magnetic properties of directionally solidified Fe-17%Ga alloys [J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 124: 212406. DOI: 10.1063/5.0200456.
- [3] Changxing Wang, Yayun Ning, Yifan Yue, et al. Scalable synthesis of phosphorescent SiO<sub>2</sub> nanospheres and their use for angle-dependent and thermoresponsive photonic gels with multimode luminescence [J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 6640. DOI: 10.1038/s41467-025-61967-9.

### 代表专利

- [1] 王宇, 郭远军, 原晨洁, 等. 一种磁致伸缩合金及其制备方法. 发明专利. 专利号: ZL 202410723089.8. 授权日期: 2025年3月21日.
- [2] 王宇, 窦祥祥, 原晨洁, 等. 一种膨胀系数可调合金及其制备方法. 发明专利. 专利号: ZL 202410723128.4. 授权日期: 2025年8月12日.

### 主要完成团队

西安交通大学杨森团队。

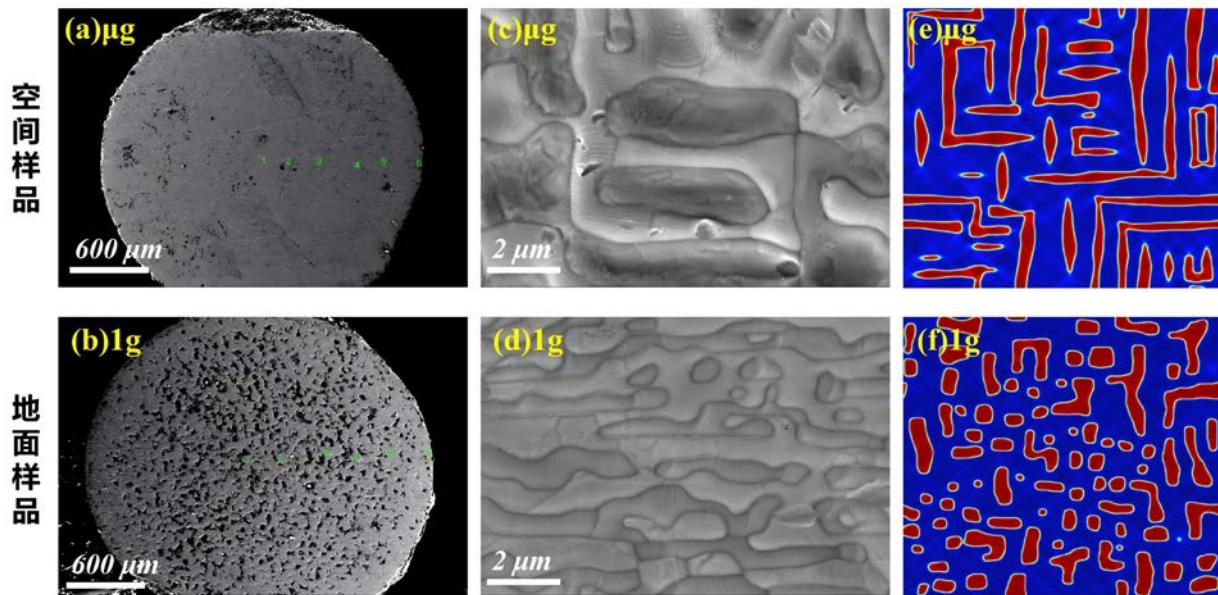


图 3-4 空间及地面 Fe-Co-B 合金样品显微图像与凝固组织

图 (a) ,图 (b) 样品剖面显微图像; 图 (c) ,图 (d) 样品表面凝固组织; 图 (e) ,图 (f) 相场模拟表面形貌

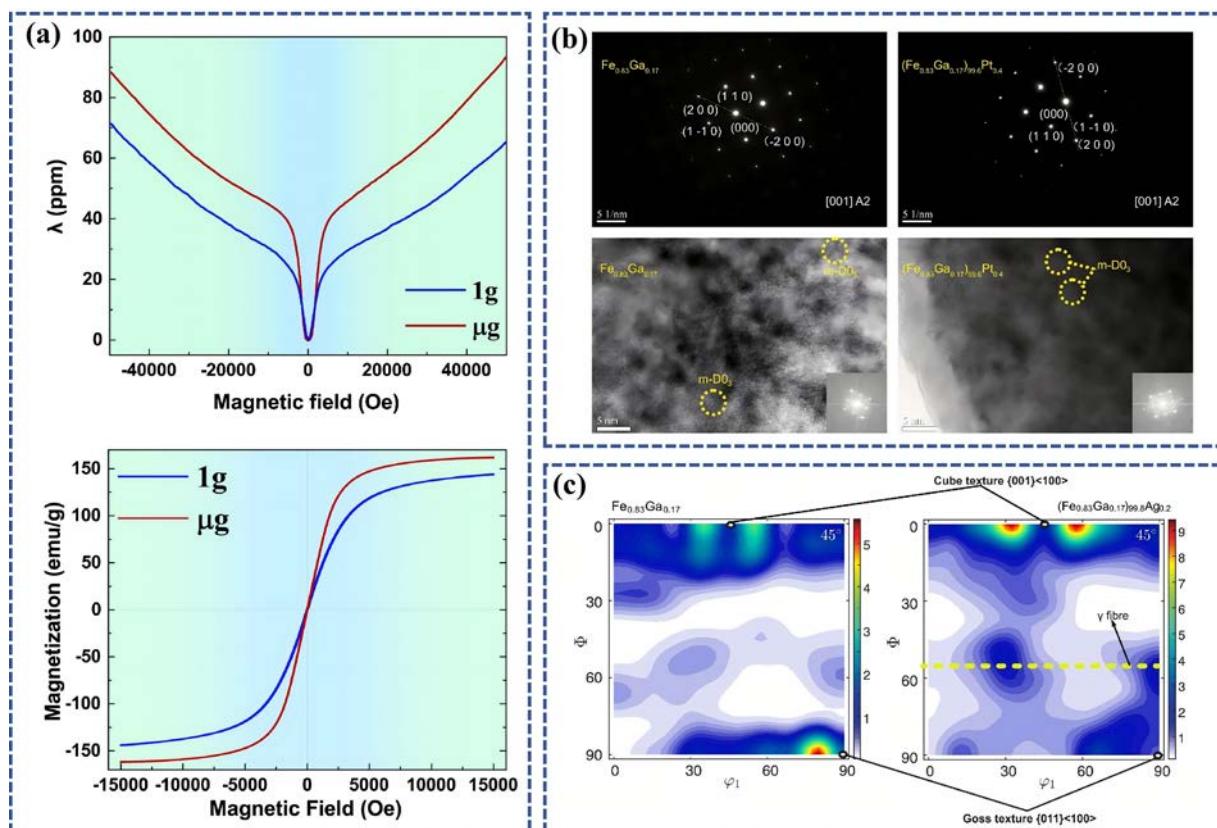


图 3-5 空间及地面铁基磁致伸缩合金样品多相微结构调控与性能优化

- (a) 空间 Fe-Co-B 样品的磁致伸缩应变和磁响应灵敏度相较于地面样品得到显著优化;
- (b) Fe-Ga 合金的微观结构调控 (图片来源: Zhiyong Dai, et al. Applied Physics Letters, 2023, 123: 082402);
- (c) Fe-Ga 合金的晶体生长取向调控 (图片来源: Zhiyong Dai, et al. Applied Physics Letters, 2024, 124: 212406)

# 金属玻璃熔体热物性与凝固组织研究

## Thermophysical Properties and Solidification Microstructure of Metallic Glass-Forming Liquids

测定了多组元合金的高温热物理性质，揭示了过冷液体中存在的动力学“脆强”转变，建立了熔体热历史与凝固行为之间的关系，为金属玻璃在空间制造中的参数选择及微结构调控奠定了理论基础。

### 研究进展

系统开展了多组元锆铜基金属玻璃熔体的热物性测试与凝固实验，成功获取了传统地面方法难以测定的液态锆铜基金属玻璃高温密度、粘度等关键热物性数据（图 3-6）；通过对比高温熔体与深过冷液体中粘度随温度的演化规律，揭示了金属玻璃过冷液体中存在动力学“脆强”转变现象，阐明了异常动力学行为在玻璃形成过程中的关键作用及其独特的液固遗传特性。发现锆铜基金属玻璃熔体中存在明确的过热阈值，在阈值温度以上和以下的快速凝固过程中，熔体表现出显著不同的过冷度、凝固路径及显

微组织特征（图 3-7），建立了熔体热历史与金属玻璃熔体凝固行为的潜在关系，为调控合金微观组织结构提供了新的理论依据。相关研究成果完善了玻璃形成和晶化理论，有助于推动金属玻璃及其复合材料的产业化应用。

### 应用及前景

相关研究成果为金属玻璃及其复合材料的结构及性能调控提供了理论指导，有助于推动该类材料在航空航天、精密仪器、新能源汽车以及消费电子等领域的应用。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Haoran Jiang, Maximilian Frey, Nico Neuber, et al. Liquid-liquid phase transition and chemical phase separation in Cu-Zr-Al-Y bulk glass-forming supercooled liquid [J]. *Acta Materialia*, 2025, 293: 121090. DOI: 10.1016/j.actamat.2025.121090.
- [2] Lu Cao, Haoran Jiang, Jochi Tseng, et al. Effect of quenching temperature on the structure and properties of Cu-Zr-Al glassy ribbons [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 36: 272-283. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.03.114.

### 主要完成团队

上海大学王刚团队。

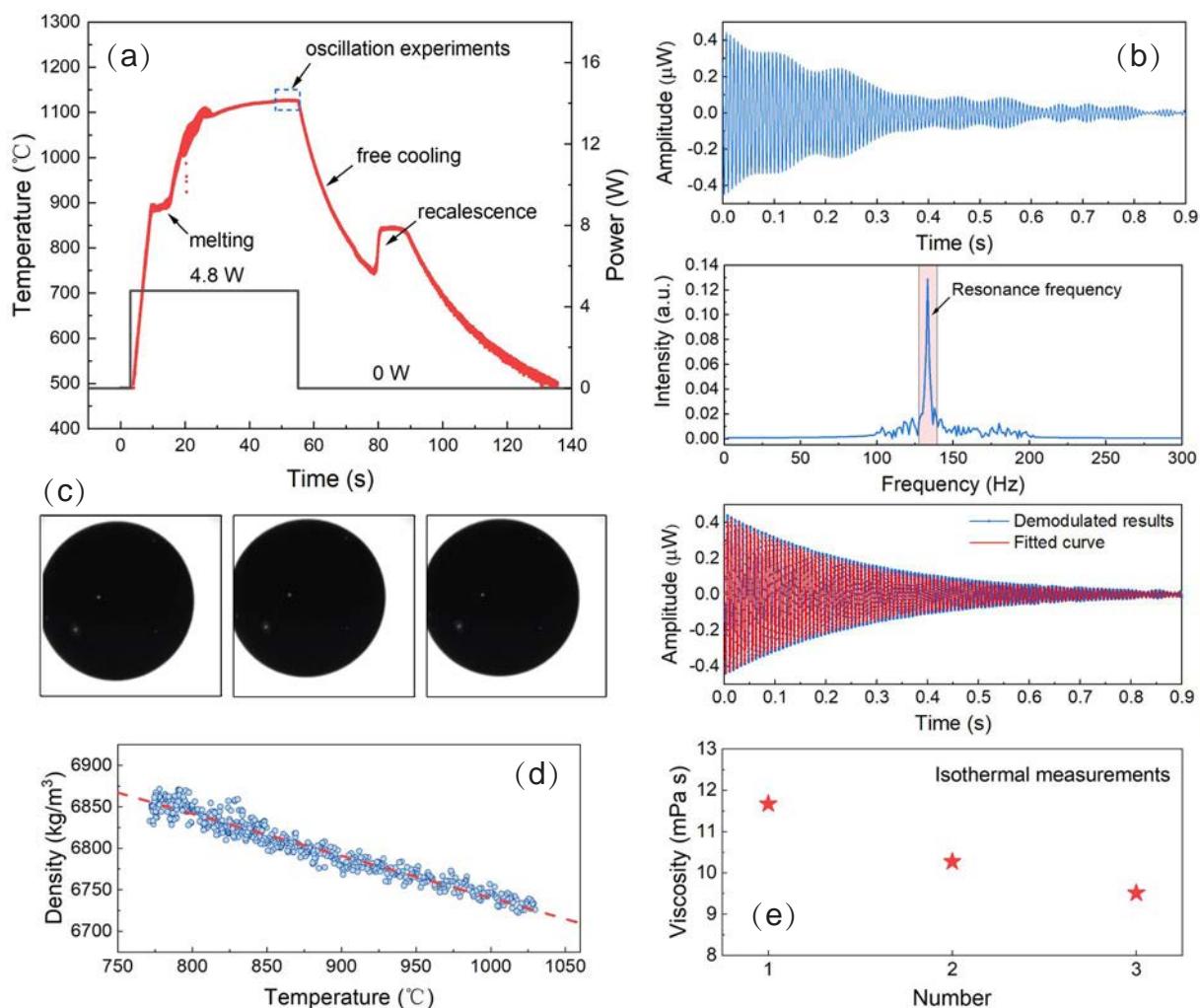


图 3-6 空间站实验测定的 Zr-Cu-Al 合金高温熔体密度、粘度结果

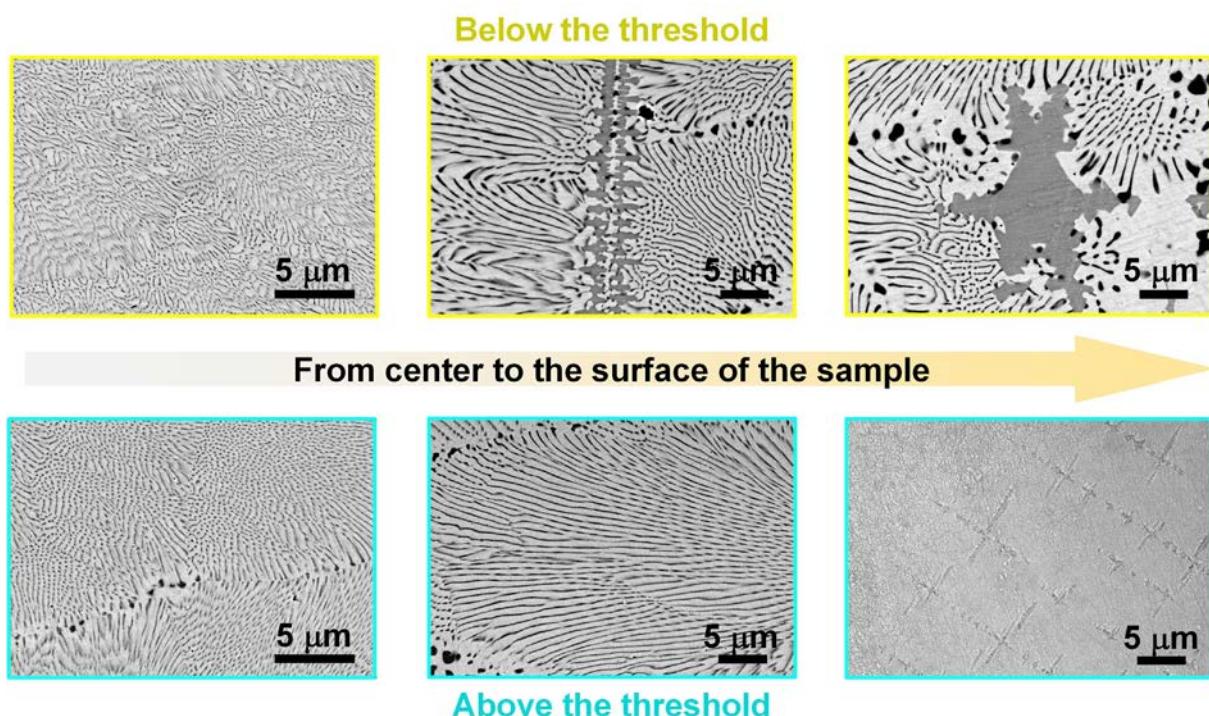


图 3-7 空间站实验获得的不同热历史条件下 Zr-Cu-Al 合金的凝固组织

# 微重力条件下铁基超导材料生长特性研究

# Growth Mechanisms of Iron-Based Superconductors under Microgravity

开展了铁基超导材料微重力条件下定向凝固实验，在国际上首次得到强熔融织构、高均匀性铁基超导样品，超导电性显著提升，为研发高性能铁基超导材料提供新思路。

## 研究进展

针对具有典型液相分离特征的铁碲硒超导材料，开展了空间在轨定向凝固研究，发现微重力条件下由重力驱动的浮力对流与溶质沉降效应得到有效抑制，宏观偏析及器壁效应诱导的杂晶生长被基本消除，从而成功制备出国际上首例具有熔融织构、高成分均匀性的铁基超导柱状样品（图 3-8）。在轨实验获得了地面难以实现的大尺度准双轴织构定向凝固棒材。棒材的显微结构分析表明，微重力环境显著抑制了快速定向凝固过程中的晶体缺陷形成，在纯扩散主导的生长机制下间隙铁原子密度明显降低，材

料的超导体积分数达到地基样品的两倍以上，超导性能获得显著提升（图 3-9）。相关成果对空间环境中超导材料定向凝固理论进行了重要拓展和深化，为突破铁基超导材料织构化制备瓶颈开辟了新的技术路径。

## 应用及前景

该织构化制备方法能够为地面获得高性能铁基超导块材提供技术支撑,适用于制造高稳定性超导磁轴承、磁悬浮输送系统等。同时,该空间制备工艺为开发太空制造超导材料奠定了技术基础。



扫码查看联系方式

## 代表论文

- [1] 汤明辉, 董持衡, 任为, 等. 无容器条件下 Fe-Se-Te 超导材料凝固行为研究 [J]. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 2078. DOI: <https://doi.org/10.1360/SST-2025-0253>.

[2] Minghui Tang, Chiheng Dong, Zhongtang Xu, et al. Formation and modulation mechanisms of Fe-As phases in melting-processed  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  superconductor [J]. Acta Materialia. 2024, 266: 119679. DOI: 10.1016/j.actamat.2024.119679.

代表  
专利

- [1] 马衍伟, 孙乔, 王栋樑, 等. 一种铁基超导多晶块材及其制备方法. 发明专利. 专利号: ZL202210274495.1. 授权日期: 2023 年 04 月 21 日.

## 主要完成团队

中国科学院电工所马衍伟团队

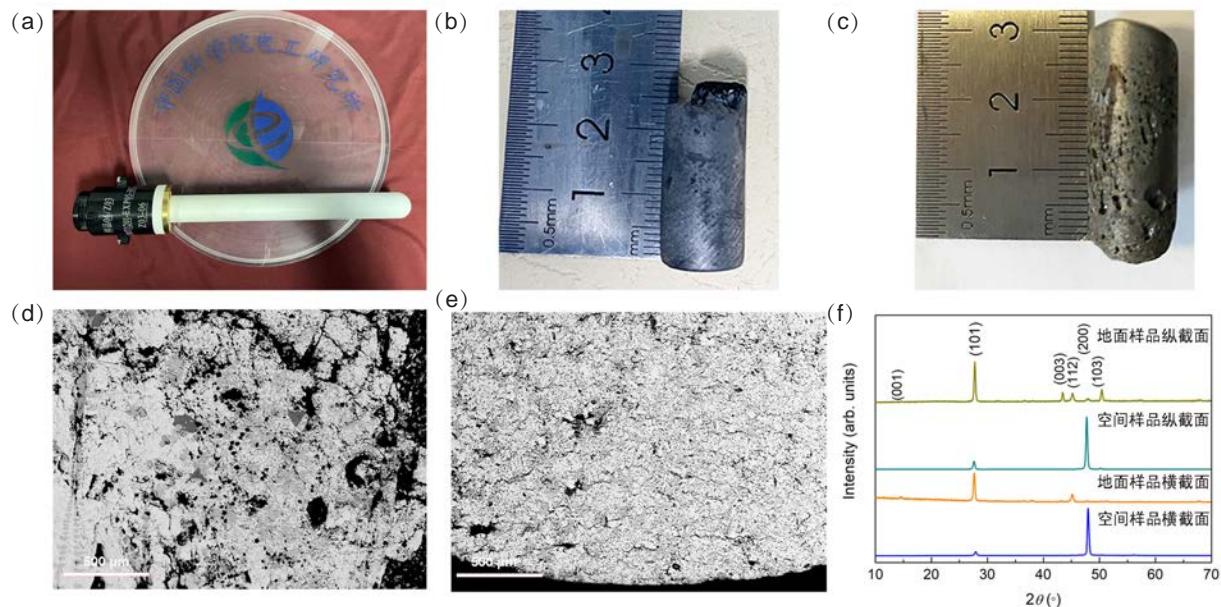


图 3-8 定向凝固实验样品外观、显微组织和晶体取向结果

(a) 下行样品安瓿; (b) 地面匹配和 (c) 空间实验样品外观;

(d) 地面和 (e) 在轨实验样品临近器壁区域显微组织图片; (f) 织构测试结果

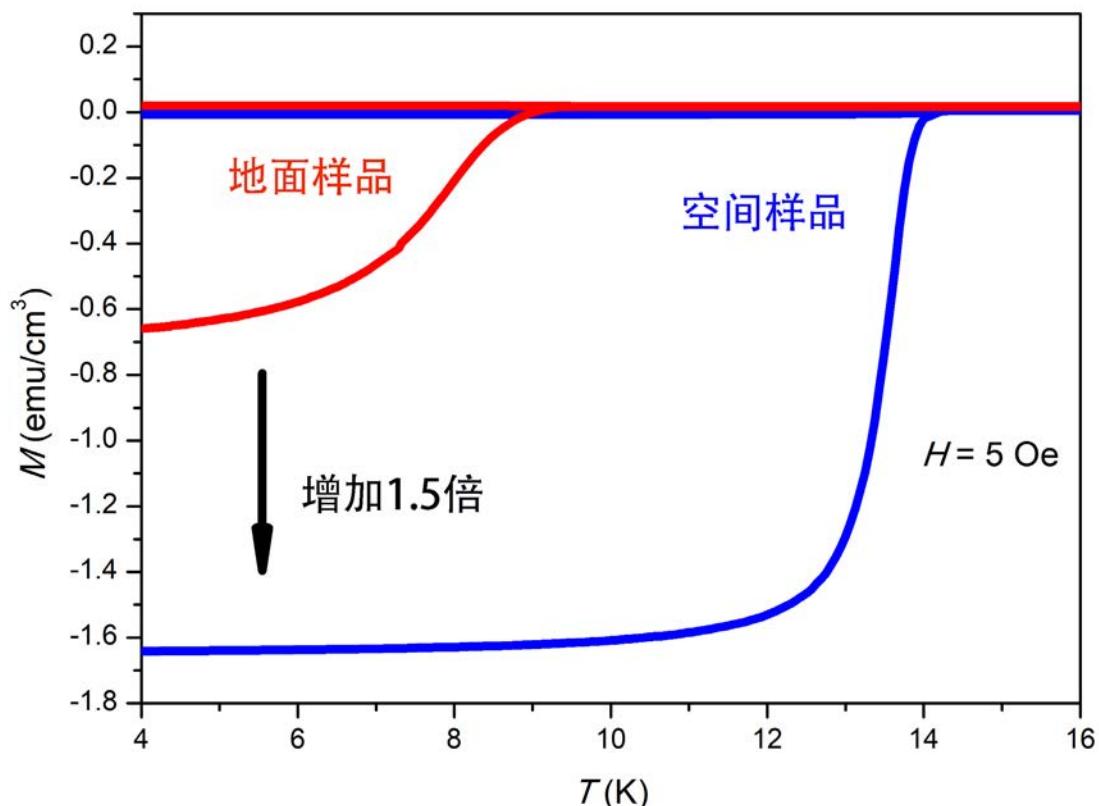


图 3-9 地面匹配和空间样品的磁化率随温度变化曲线

# 固 - 液复合润滑材料的舱外服役性能研究

## Research on the Service Performance of Solid-Liquid Composite Lubricating Materials in Space Environment

国际上首次开展了油脂基超润滑 / 近零磨损润滑材料在真实空间环境中的摩擦学实验，基于固液复合润滑策略实现了滑动摩擦副的近零磨损并揭示了固 - 液复合润滑机制，为未来近零摩擦磨损的润滑材料应用奠定了基础。

### 研究进展

设计筛选了 10 余种超润滑材料体系（摩擦系数  $<0.01$ ）（图 3-10），并基于空间站舱外暴露平台搭建了固 - 液复合润滑摩擦学实验箱，开展了固 - 液复合润滑材料的动态摩擦学实验和静态暴露实验，完成了  $3 \times 10^5$  转的舱外验证。通过空地样品的系统表征和分析（图 3-11），研究了超低摩擦磨损润滑材料在真实空间环境中的材料使役行为及摩擦学机制，创新性地提出了剪切变稀效应、固液复合润滑、界面分子催化超润滑等新机制。研究结果表明，基于固液复合的润滑策略可以有效地减小摩擦磨损，

有潜力实现空间“近零”摩擦、磨损以及空间润滑水平跨量级提升。部分超润滑和近零磨损润滑剂已在相关装备的高载高速轴承部件试用，并有望为解决空间运动装备更低能耗、更高可靠、更长寿命运行提供新思路和新策略。

### 应用及前景

本研究有望指导未来空间超润滑油脂基润滑材料的研制合成，有助于支撑航空航天润滑材料与技术的发展，推动近零摩擦磨损材料在航空航天、高端装备、先进制造领域的广泛应用。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Di Yang, Liqiang Zhang, Tongtong Yu, et al. Hierarchical MoS<sub>2</sub>-Oleogel in Porous Polyimides: A Self-Adaptive Confined Lubrication Strategy for Ultralow Friction and Wear [J]. Advanced Functional Materials, 2025, e17029. DOI: 10.1002/adfm.202517029.
- [2] Liucheng Wang, Liqiang Zhang, Runhao Zheng, et al. Macroscale superlubrication achieved with shear-thinning semisolid lubricants [J]. Advanced Materials, 2024, 36: 2412257. DOI: 10.1002/adma.202412257.
- [3] 王刘程, 郑润灏, 张立强, 等. 空间液体润滑材料研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 2025, 55(S1): 1-8. DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2025.S1.001.

### 代表专利

- [1] 王道爱, 王刘程, 张立强, 等. 一种钙基三维限域结构和耐低温类凝胶润滑剂及制备方法. 发明专利. 专利号: ZL202310998209.0. 授权日期: 2025 年 10 月 10 日.
- [2] 王道爱, 王刘程, 张立强, 等. 一种润滑油固化剂和凝胶润滑剂及其制备方法和在轴承中的应用. 发明专利. 专利号: ZL202310998598.7. 授权日期: 2025 年 10 月 10 日.
- [3] 王道爱, 王刘程, 张立强, 等. 一种润滑油稠化因子和可在真空环境下使用的半固体润滑剂及制备方法. 发明专利. 专利号: ZL202310998619.5. 授权日期: 2025 年 05 月 02 日.

### 主要完成团队

中国科学院兰州化学物理研究所王道爱团队。

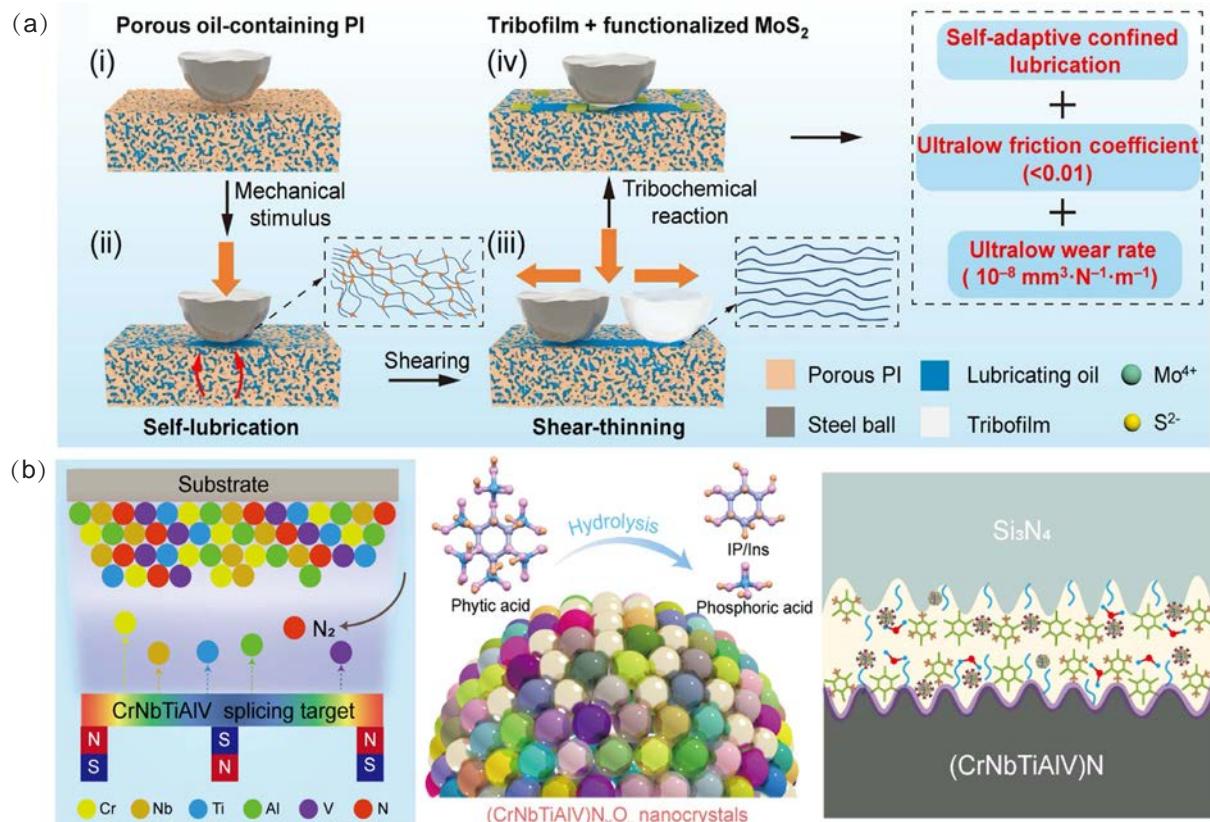


图 3-10 超润滑与近零磨损润滑材料的设计策略与原理

- (a) 自适应润滑 - 限域润滑 - 剪切变稀协同作用 (Di Yang, et al. Advanced Functional Materials, 2025, e17029) ;  
 (b) 原位摩擦催化机理 (Changhe Du, et al. Advanced Materials, 2025, 37, 2413781)

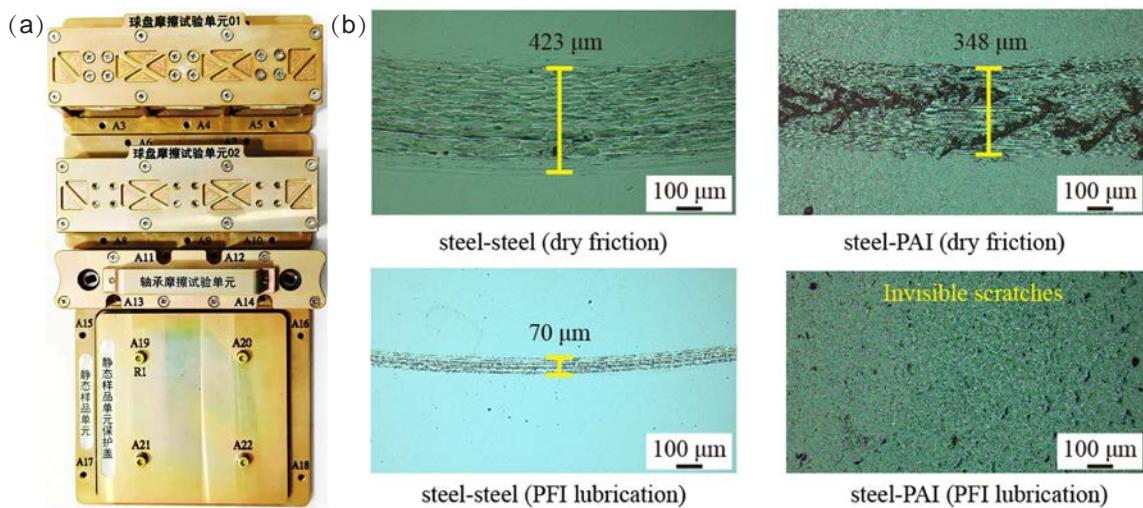


图 3-11 摩擦学实验装置及样品磨损性能

- (a) 摩擦学单元照片; (b) 干摩擦、固体润滑、液体润滑、固 - 液复合润滑摩擦后的表面形貌对比图

# 形状记忆聚合物及其复合材料空间服役性能研究

# The Service Performance of Shape Memory Polymers and Their Composites in Space Environment

开展了形状记忆聚合物及其复合材料空间站暴露试验，揭示了多种形状记忆聚合物及其复合材料的性能演变规律及空间适应性，筛选出了可展开结构和锁紧释放结构的优选基材，为形状记忆聚合物材料及其空间可展开结构研发提供依据。

研究  
进展

开展了环氧、氰酸酯、聚酰亚胺、酚醛等多种形状记忆聚合物及其复合材料的暴露实验。结合空间辐照结果（图 3-12），筛选了可应用于空间可展开结构和在轨锁紧释放结构的优质基材。对比分析地面样品和在轨暴露不同时间样品的微观形貌、材料性能等变化（图 3-13），空间辐照后树脂表面由于原子氧侵蚀导致的氧化分解，普遍出现侵蚀厚度低于  $50\mu\text{m}$  的细密沟槽与浅坑。宏观性能测试表明，形状记忆聚合物材料经过 1 年空间辐照后表面侵蚀并未明显影响到材料的形状记忆性能、力学及热学性能。上述研究系统揭示了空间辐照环境下形状记忆聚合物及其复合材料梯度损伤机制和在轨

演化规律, 以及宏观形状记忆 / 力学性能与微观结构损伤的关联规律。

## 应用及前景

基于形状记忆聚合物复合材料的可展开结构和锁紧释放结构具有结构简单、轻质、展开可控、可靠性高等优势，可实现材料-结构-功能一体化，为新型空间可展开结构设计和研制提供了材料基础。基于形状记忆聚合物复合材料的铰链、锁紧释放机构、柔性太阳能电池系统等结构未来有望应用于我国空间站、探月工程、载人登月、行星探测等重大航天工程。



扫码查看联系方式

## 代表论文

- [1] Rongxiang Hu, Fenghua Zhang, Lan Luo, et al. An end-capping strategy for shape memory phthalonitrile resins via annealing enables conductivity and wave-absorption[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 489: 150956. DOI: 10.1016/j.cej.2024.150956.

[2] Lan Luo, Fenghua Zhang, Linlin Wang, et al. Multidimensional cross-linked network strategies for Rapidly, Reconfigurable, refoldable shape memory polymer[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 478: 147428. DOI: 10.1016/j.cej.2023.147428.

代表  
专利

- [1] 冷劲松, 罗兰, 张风华, 等. 一种导热形状记忆环氧树脂及其制备方法. 发明专利. 专利号: ZL 202310181720.1. 授权日期: 2024 年 6 月 18 日.  
[2] 冷劲松, 王林林, 张风华, 等. 三重形状记忆氰酸酯及其制备方法. 发明专利. 专利号: ZL 202210622661.2. 授权日期: 2023 年 8 月 15 日.

## 主要完成团队

哈尔滨工业大学冷劲松团队

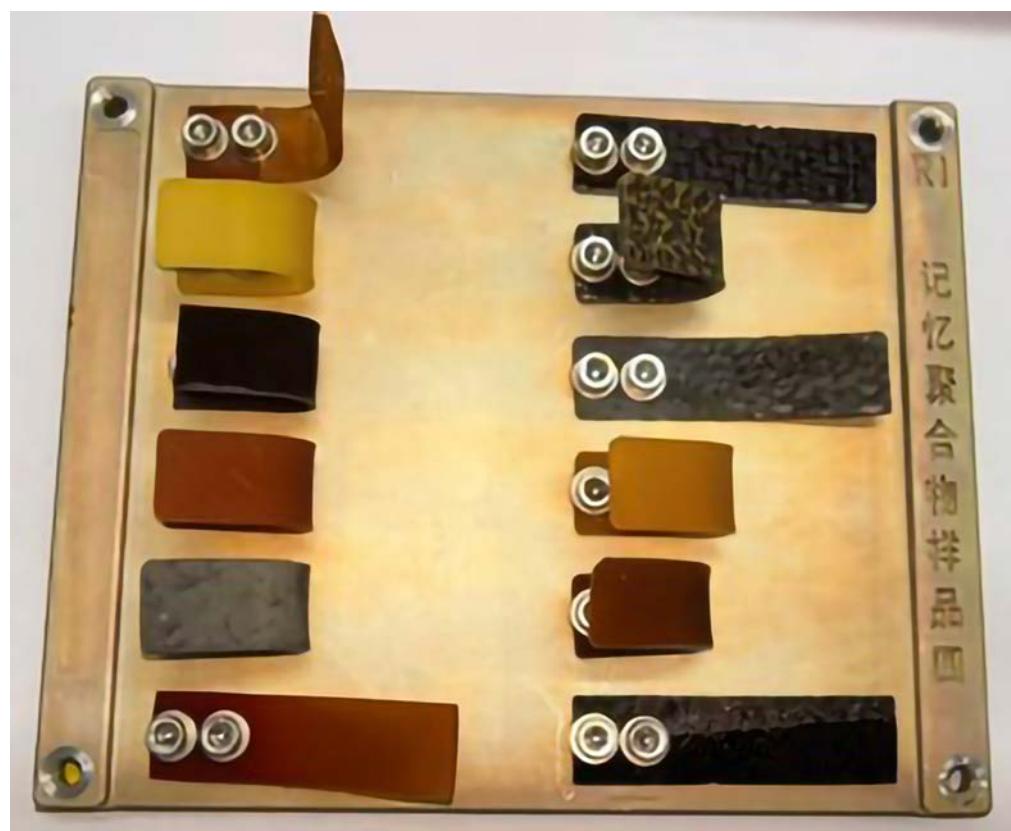


图 3-12 形状记忆聚合物及其复合材料在轨暴露后展开状态（变形前为 U 型）

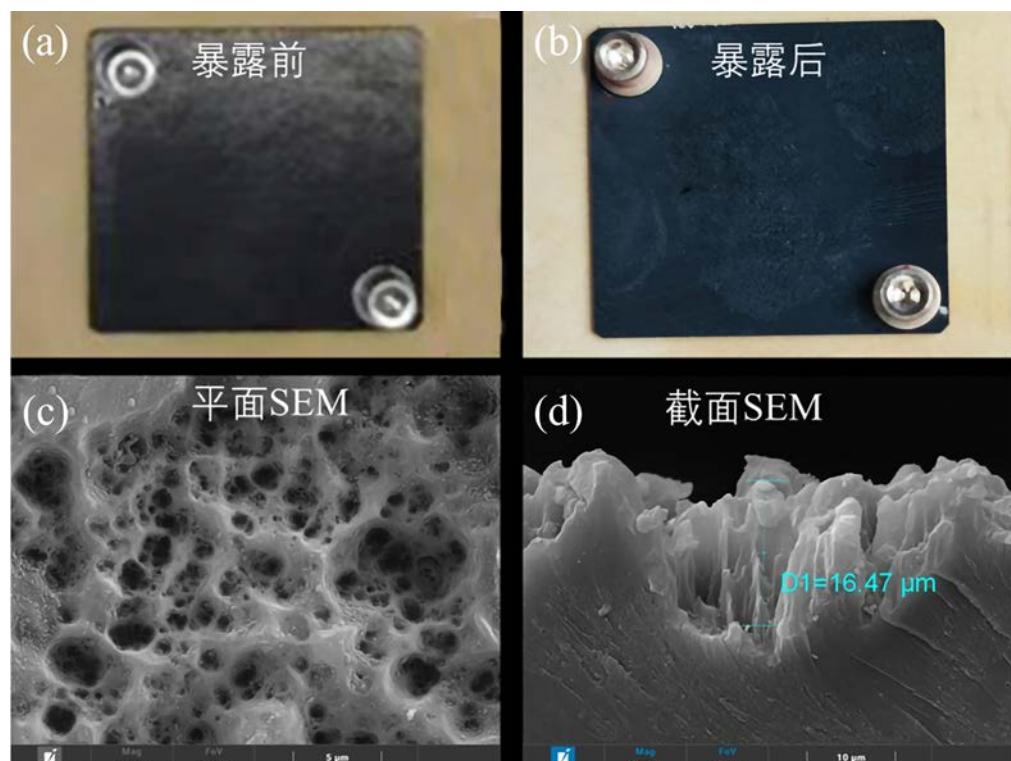


图 3-13 形状记忆邻苯二甲腈暴露前后对比图

(a) 和 (b) 为暴露前后的静态样品, (c) 和 (d) 暴露后形状记忆邻苯二甲腈的平面和截面 SEM



## 微重力物理科学领域

### 3.1 空间材料科学

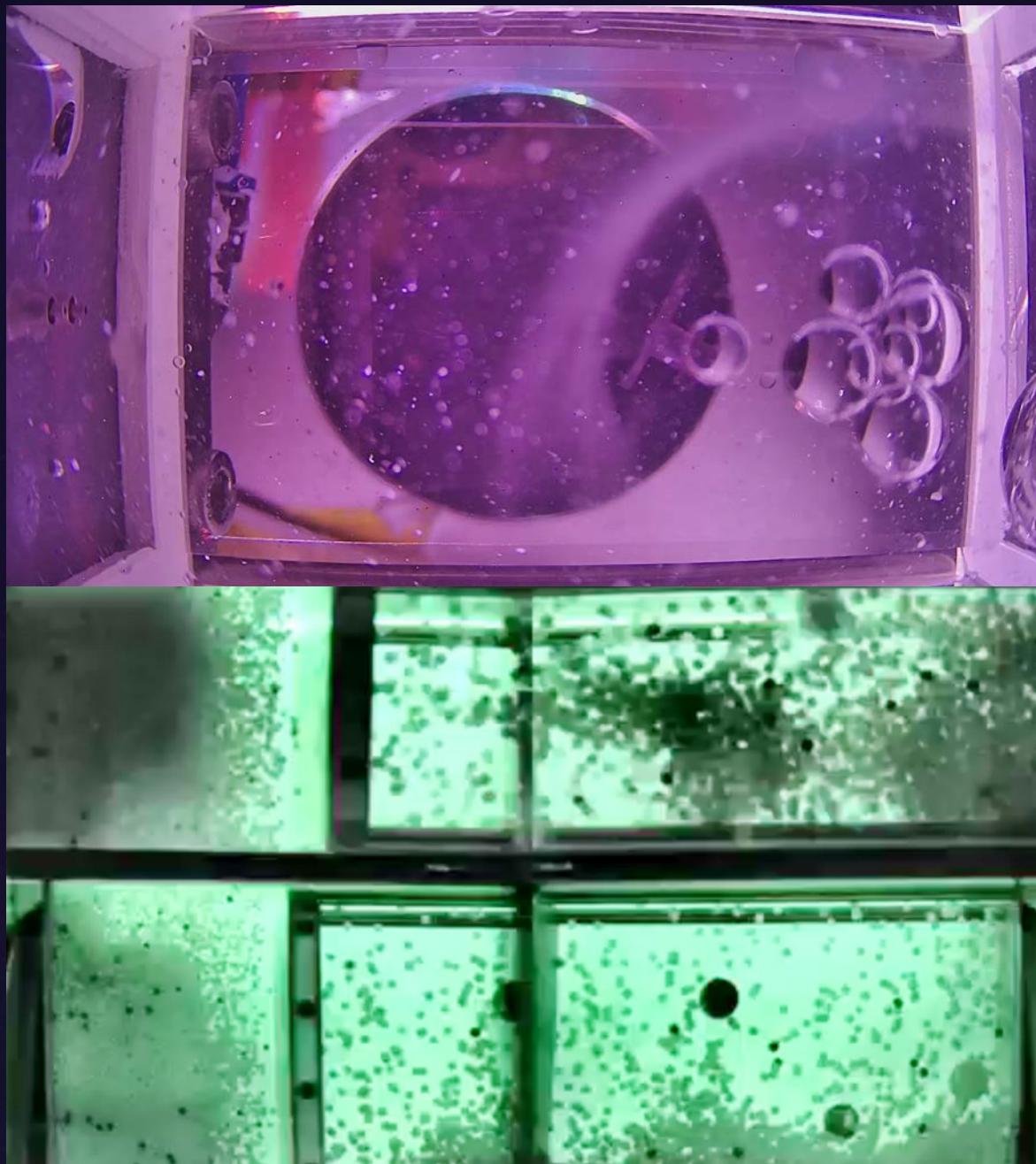
- ① 微重力条件下超高温金属材料枝晶和共晶生长的动力学局域效应 ..... 38
- ② 高性能铁基磁致伸缩合金的物相及性能调控研究 ..... 40
- ③ 金属玻璃熔体热物性与凝固组织研究 ..... 42
- ④ 微重力条件下铁基超导材料生长特性研究 ..... 44
- ⑤ 固 - 液复合润滑材料的舱外服役性能研究 ..... 46
- ⑥ 形状记忆聚合物及其复合材料空间服役性能研究 ..... 48

### 3.2 微重力流体与热物理

- ① 微重力条件下柱状微结构耦合小流速剪切流 / 射流强化沸腾换热规律 ..... 52
- ② 单针翅结构表面空间冷凝液膜演化行为及传热规律 ..... 54
- ③ 微重力条件下带电胶体结晶中的长寿命亚稳态体心立方结构 ..... 56

### 3.3 微重力燃烧科学

- ① 微重力条件下甲烷多射流火焰燃烧及碳烟形成特性研究 ..... 60
- ② 微重力条件下层流射流扩散火焰的形态和碳烟特征 ..... 62
- ③ 微重力条件下部分预混火焰的混合达姆科勒数和曲率稳焰机理 ..... 64



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，开展流体动力学、多相流与相变传热、软物质与复杂流体等前沿科学的研究。

首次揭示了在长时微重力条件下柱状微结构表面耦合射流的沸腾传热特性，显著提升了沸腾换热最大热通量，为完善极端条件下的沸腾换热理论体系提供了关键实验依据。微重力条件下首次观察到液膜演化全过程特征和冷凝微液滴向液膜转换的现象，揭示了单针翅结构表面液膜非稳定性等冷凝相变传热规律，为空间热管理提供有力支撑。首次发现微重力条件下带电胶体体系长时间保持在亚稳态体心立方结构，揭示了分步结晶规律及重力对亚稳态-稳态转变的显著促进作用，解决了国际上有关结晶微观过程理论的长期争论。

# 微重力条件下柱状微结构耦合小流速剪切流 / 射流 强化沸腾换热规律

## Research of Enhanced Boiling Heat Transfer by Coupling of Micro-Pin-Fins and Low-Velocity Shear Flow/Impinging Jets in Microgravity

本研究针对微重力条件下缺乏浮力导致的汽泡脱离难、加热面供液不足进而引起的沸腾换热性能恶化难题，通过柱状微结构表面和小流速剪切流 / 射流相结合，大幅提升空间沸腾换热性能。首次研究揭示了缺乏浮力作用的微重力条件下剪切流 / 射流与微结构耦合促进汽泡脱离和毛细作用供液的沸腾强化换热机理及流速和微结构尺寸的影响规律。

### 研究进展

针对空间微重力条件下缺乏浮力导致的沸腾换热性能严重恶化难题，以解决汽泡脱离难导致的加热面无法供液换热的关键问题为突破口，开发具有毛细供液功能的柱状微结构表面，并结合小流速剪切流 / 射流进行沸腾强化换热研究。首次研究揭示了缺乏浮力作用的微重力条件下剪切流 / 射流与微结构耦合促进汽泡脱离和毛细作用供液的沸腾强化换热机理与规律（图 3-14）。研究发现具有  $30 \mu\text{m}$  边长和  $120 \mu\text{m}$  高度的柱状微结构表面在空间微重力下显著强化沸腾换热性能，其最大热流密度达  $103.3 \text{ W/cm}^2$ ，较光滑表面提升 66.1%（图 3-15 和图 3-16）。柱状微结构表面与地面常重力相比，壁面温度明显升高，但最大热流密度变化不大；而光滑表面壁面温度变化不大，最大热流密度明显提升（图 3-17）。该性能差异源于主被动协同强化机制：

微柱结构不仅提供了高密度且稳定的汽化核心，同时具备优异的液体抽吸能力；而剪切流与射流则共同促进了汽泡的快速脱离。二者协同作用，有效克服了微重力条件下汽泡脱离困难和无法向加热面供液的核心难题。

本研究不仅为完善微重力沸腾换热理论提供了关键实验数据，也为构建国际领先的高热流空间两相热控技术体系提供了理论与技术支撑。

### 应用及前景

提出强化沸腾换热表面微结构的设计技术，开发新型表面微结构，从而为设计高效、轻便的空间两相热管理系统提供理论与技术支撑。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Xiang Ma, Gege Song, Hongqiang Chen, et al. Experimental investigation and correlation analysis of pool boiling heat transfer on the array surfaces with micro-fins using FC-72 for the electronic thermal management[J]. Applied thermal engineering, 2024, 236: 121755. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121755.
- [2] Gege Song, Xiang Ma, Pengzhuo Xu, et al. Experimental study of pool boiling heat transfer on hybrid surface coupled micro-pin-finned[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2024, 108:109467. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109467.

### 代表专利

- [1] 魏进家, 刘斌, 张永海, 等. 一种微重力流动沸腾临界热流密度的地面模拟实验装置及方法. 发明专利. 专利号: ZL201910584315.8. 授权日期: 2020 年 7 月 28 日.
- [2] 杨小平, 魏进家, 张芫通, 等. 一种射流 - 横流组合浸没式散热装置与方法. 发明专利. 专利号: ZL202110707777.1. 授权日期: 2022 年 5 月 6 日.

### 主要完成团队

西安交通大学魏进家和张永海团队。



图 3-14 沸腾换热实验模块

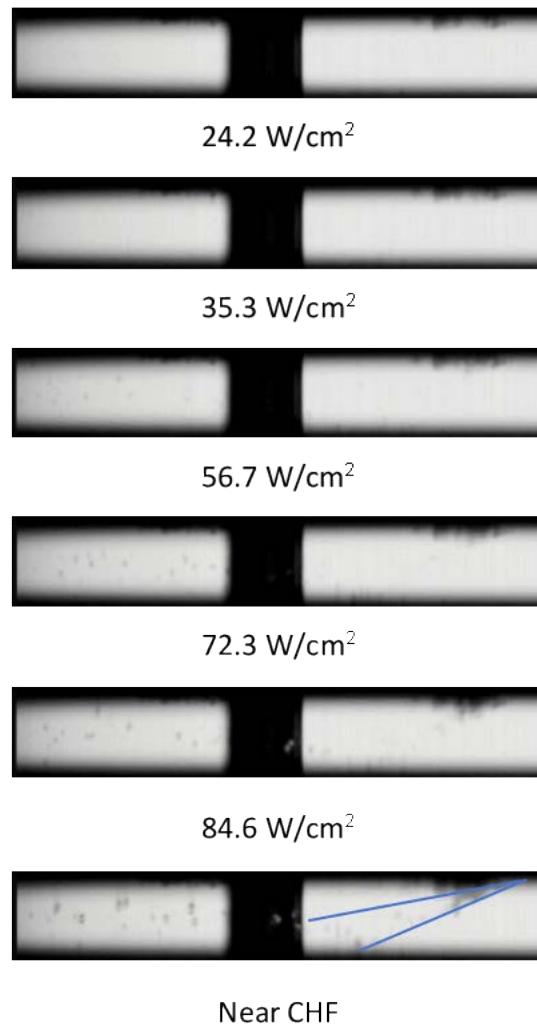


图 3-16 微重力条件下剪切流 / 射流复合沸腾的气泡动力学行为  
(PF30-120, 剪切流速  $V_1=0.2$  m/s; 射流流速  $V_2=0.9$  m/s)

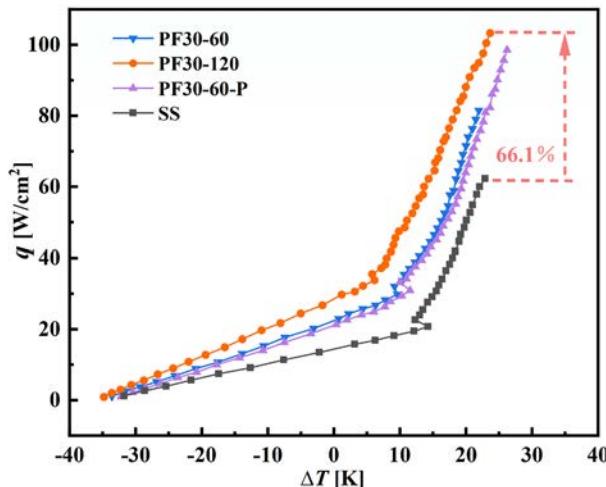


图 3-15 微重力条件下不同微结构表面剪切流 / 射流复合沸腾曲线  
(剪切流速  $V_1=0.3$  m/s; 射流流速  $V_2=1.0$  m/s)

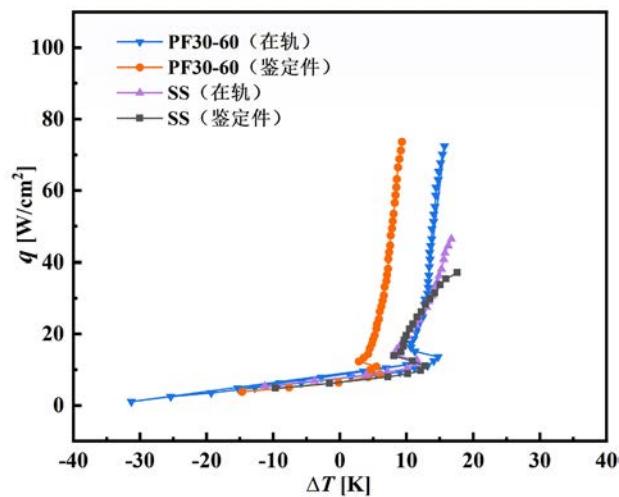


图 3-17 天地对照剪切流 / 射流复合沸腾曲线  
(剪切流速  $V_1=0.2$  m/s; 射流流速  $V_2=0.35$  m/s)

# 单针翅结构表面空间冷凝液膜演化行为及传热规律

## Evolution Behavior and Heat Transfer Law on Single Pin-Fin Surface in Space Condensation

获得了长时微重力条件下单针翅结构表面液膜形成至铺展的全过程演化行为及传热规律，发现相对于地面，液膜沿翅顶向底部积聚并逐渐向外延伸，传热性能显著降低；液膜表面温度不均匀程度增加，强化热毛细对流，有助于改善微重力冷凝传热性能。该成果为空间热管理提供有力支撑。

### 研究进展

利用空间站长时微重力环境开展了单针翅结构表面上 HFE-7100 工质的膜状冷凝实验（图 3-18），获得了长时微重力条件下单针翅结构表面液膜形成至铺展的全过程演化行为（图 3-19）。微重力条件下，液膜在针翅底部积聚并逐渐向外铺展延伸，传热性能显著降低；液膜表面温度不均匀程度增加，强化了热毛细对流，加剧了液膜波动，有助于改善微重力冷凝传热性能（图 3-20）。该研究提供了长时微重

力条件下单针翅结构表面冷凝液膜演变及传热性能的基准数据，丰富了微重力冷凝液膜稳定性理论，为未来太空探索的两相热管理系统设计提供支撑。

### 应用及前景

可应用于空间热管理领域，支撑空间两相热控设计和高效紧凑换热装备的研发。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Shuai Guo, Meiqi Liu, Bo Xu, et al. Vapor condensation and droplet directional migration on the surface of asymmetric triangular micropillar array structures using a hybrid thermal lattice Boltzmann method [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2025, 169: 109557. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109557.
- [2] Xin Wang, Bo Xu, Qiusheng Liu, et al. Enhancement of vapor condensation heat transfer on the micro-and nano-structured superhydrophobic surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 177: 121526. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121526.
- [3] Xin Wang, Bo Xu, Shuai Guo, et al. Droplet impacting dynamics: Recent progress and future aspects [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2023, 317: 102919. DOI: 10.1016/j.cis.2023.102919.

### 代表专利

- [1] 许波, 沈天汇, 陈振乾. 基于多材料模型的双流体换热器结构拓扑优化设计方法. 发明专利. 专利号: ZL202411965927.9. 授权日期: 2025 年 9 月 26 日.
- [2] 许波, 赵俣, 陈振乾. 一种基于多目标函数的微通道散热器结构设计方法及散热器. 发明专利. 专利号: ZL202410481337.2. 授权日期: 2025 年 9 月 5 日.

### 主要完成团队

东南大学陈振乾和许波团队，中国科学院力学研究所刘秋生团队。

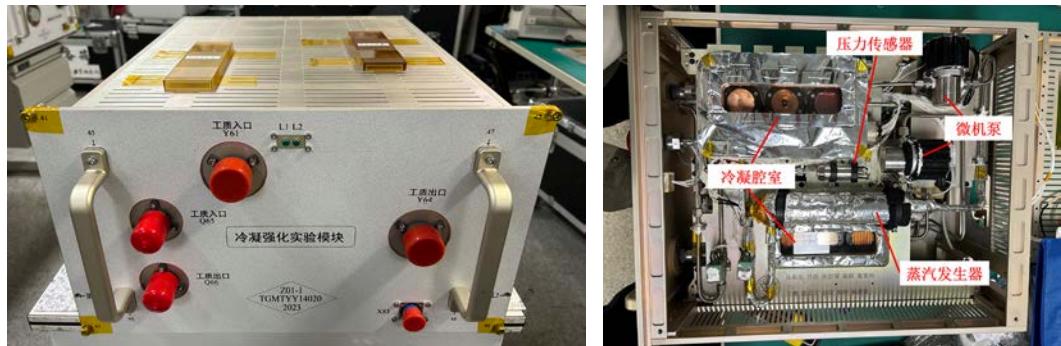


图 3-18 微重力膜状冷凝实验装置

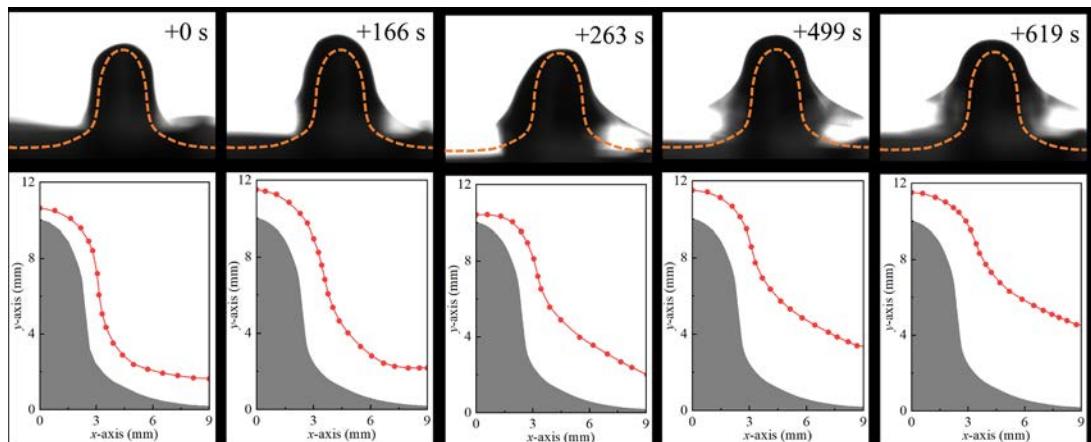


图 3-19 微重力条件下单针翅表面冷凝界面演化

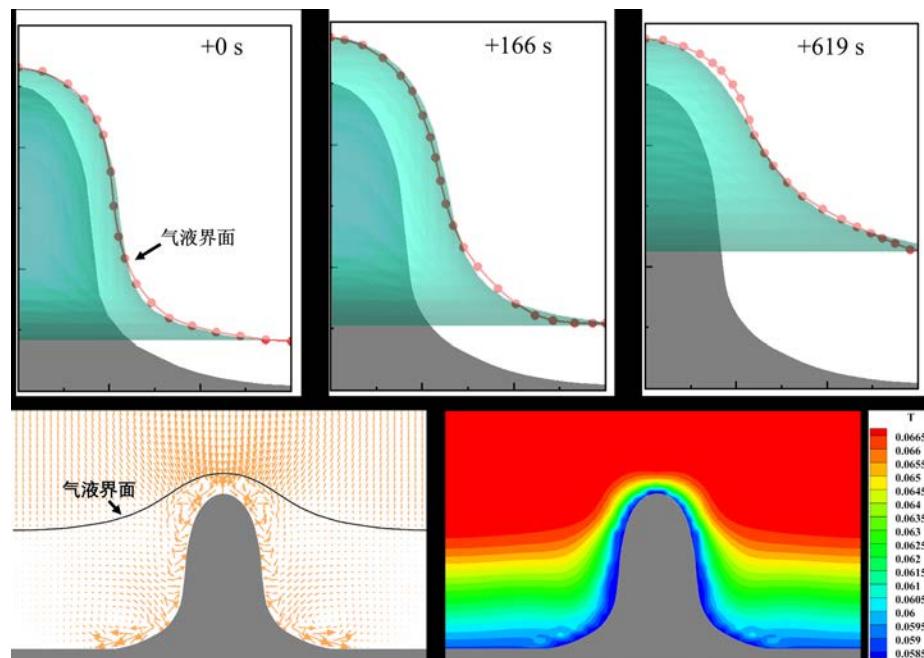


图 3-20 微重力条件下单针翅表面冷凝界面温度分布

# 微重力条件下带电胶体结晶中的长寿命亚稳态 体心立方结构

## Long-lived Metastable bcc Phase in the Crystallization of Charged Colloids under Microgravity

空间站胶体结晶实验中发现，地面上能很快形成稳态面心立方结构的带电胶体体系，微重力环境下却长时间保持在亚稳态体心立方结构，揭示了分步结晶规律及重力对亚稳态-稳态转变的显著促进作用。

### 研究 进展

利用中国空间站长时微重力环境，研究了带电胶体悬浮液的结晶动力学过程（实验装置与样品见图 3-21）。在地面常重力下，该胶体样品能很快形成稳态的面心立方（fcc）晶体；然而，在空间微重力条件下，胶体结晶却难以达到稳态的 fcc 结构，而是形成长寿命的亚稳态体心立方（bcc）结构（图 3-22）。基于空间微重力实验结果的分子动力学模拟，阐明了结晶须经历亚稳态的普适性规律，即由母液开始的结晶，

最先形成的不是热力学上最稳定的晶体，而是自由能更接近液态的亚稳态晶体。该研究解决了国际上关于奥斯特瓦尔德 (Ostwald) 分步结晶规律的争议，并进一步揭示了重力效应是促进 bcc-fcc 转变的重要因素。

### 应用 及 前景

该研究为晶体材料的制备和晶型控制等提供了理论和数据支持，在光学器件、传感器、储能材料和生物医学等方面具有广泛的应用价值。



扫码查看联系方式

### 代表 论文

Hongwei Zhou, Shuangyang Zou, Wenze Ouyang, et al. Long-lived metastable bcc phase in the crystallization of charged colloids under microgravity[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 695: 137841. DOI: 10.1016/j.jcis.2025.137841.

### 主要 完成 团队

中国科学院力学研究所徐升华团队。

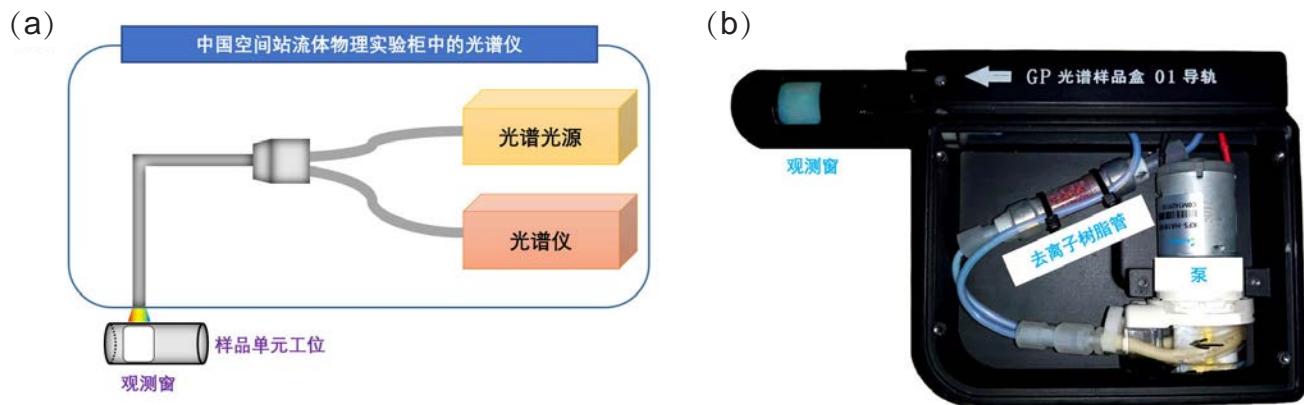


图 3-21 微重力下带电胶体结晶实验装置与样品

(a) 空间站流体物理柜的反射光谱示意图; (b) 结晶样品单元照片

(图片来源: Hongwei Zhou, et al. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 695: 137841)

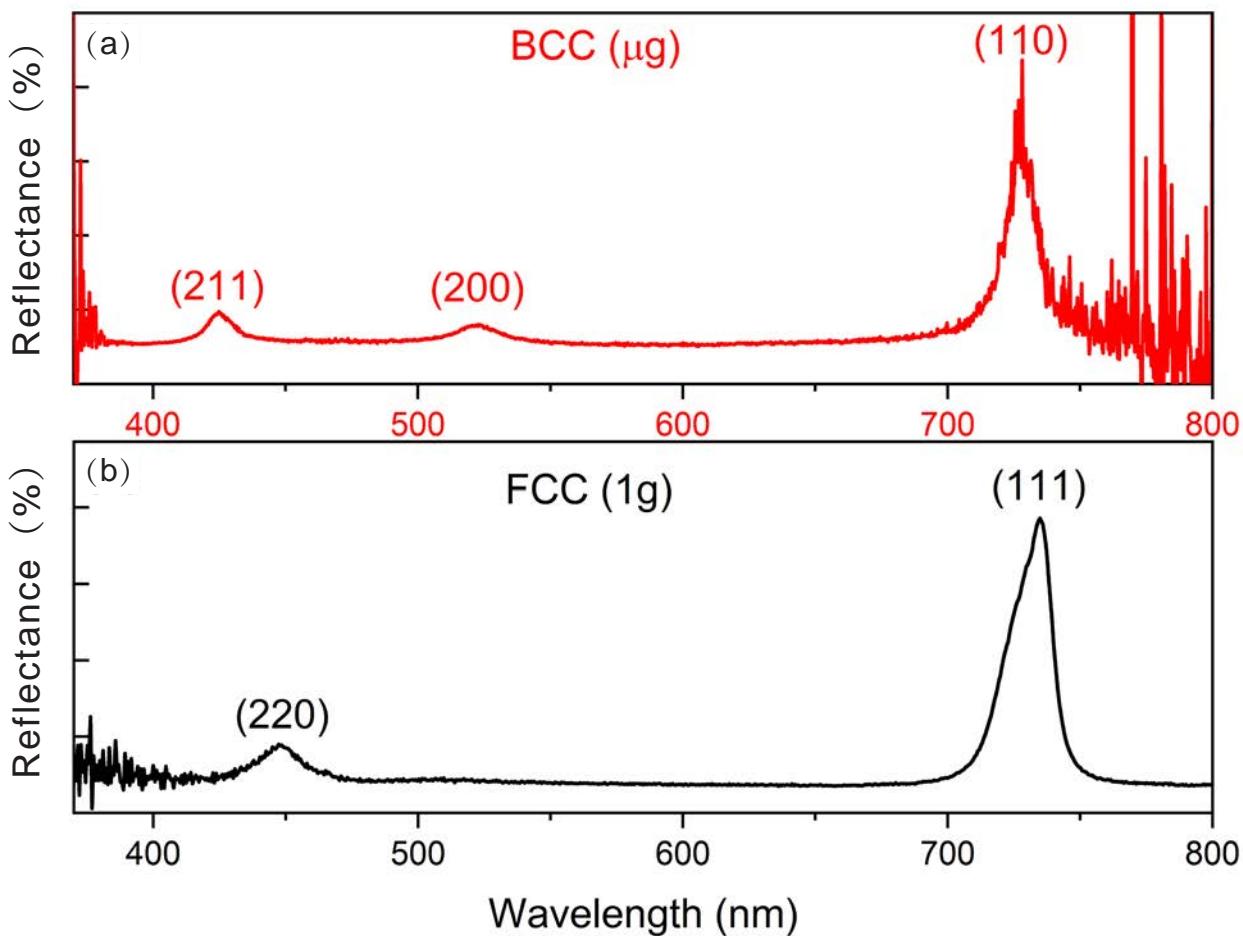


图 3-22 空地带电胶体结晶反射光谱图

(a) 空间: 亚稳态 bcc; (b) 地面: 稳态 fcc

(图片来源: Hongwei Zhou, et al. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 695: 137841)



## 微重力物理科学领域

### 3.1 空间材料科学

- ① 微重力条件下超高温金属材料枝晶和共晶生长的动力学局域效应 ..... 38
- ② 高性能铁基磁致伸缩合金的物相及性能调控研究 ..... 40
- ③ 金属玻璃熔体热物性与凝固组织研究 ..... 42
- ④ 微重力条件下铁基超导材料生长特性研究 ..... 44
- ⑤ 固 - 液复合润滑材料的舱外服役性能研究 ..... 46
- ⑥ 形状记忆聚合物及其复合材料空间服役性能研究 ..... 48

### 3.2 微重力流体与热物理

- ① 微重力条件下柱状微结构耦合小流速剪切流 / 射流强化沸腾换热规律 ..... 52
- ② 单针翅结构表面空间冷凝液膜演化行为及传热规律 ..... 54
- ③ 微重力条件下带电胶体结晶中的长寿命亚稳态体心立方结构 ..... 56

### 3.3 微重力燃烧科学

- ① 微重力条件下甲烷多射流火焰燃烧及碳烟形成特性研究 ..... 60
- ② 微重力条件下层流射流扩散火焰的形态和碳烟特征 ..... 62
- ③ 微重力条件下部分预混火焰的混合达姆科勒数和曲率稳焰机理 ..... 64



微重力燃烧科学方向紧密围绕国家“双碳”战略与空天动力重大需求，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，开展碳烟形成机理研究，发现扩散火焰碳烟趋势和碳烟生成过程依赖流体动力学效应的内在规律，为燃料的高效利用和污染排放的减少提供理论依据。

# 微重力条件下甲烷多射流火焰燃烧及碳烟形成特性研究

## Combustion and Soot Formation Characteristics of Methane Multi-Jet Flames under Microgravity

揭示微重力下甲烷多射流火焰耦合机制及其对碳烟生成的影响，阐明射流相互作用调控火焰辐射与污染物生成的规律，建立碳烟排放预测模型，为空间与地面清洁燃烧提供理论支撑。

**研究进展** 依托中国空间站燃烧实验柜，研究团队研制了适用空间环境的多射流 / 单射流燃烧装置，结合高分辨率成像与光学诊断技术，首次实现微重力下甲烷多射流火焰形态、温度及辐射强度的精准观测（图 3-23）。实验揭示浮力削弱后火焰呈现对称稳定结构，射流间相互作用由动量与扩散主导，形成独特燃烧区分布。研究发现微重力下火焰辐射显著增强，碳烟生成与射流耦合密切相关：高流速区高温增强导致碳烟生成增加，而扩散区充分混合促进氧化反应、有效抑制碳烟。基于简化化学动力学、辐射传

输及碳烟模型开展的数值模拟表明，多射流耦合显著影响碳烟前驱体分布与反应路径，决定污染物空间特征。此外，研究同步获取了甲烷单射流火焰在轨成像（图 3-24），并正在探索微重力下火焰辐射与碳烟排放的关联机制，为清洁燃烧理论提供支撑。

### 应用及前景

本研究获得的实验结果及理论模型可为航天器推进与地面多喷口燃烧器、航空发动机燃烧室低污染设计提供数据支撑与理论指导，拓宽清洁燃烧技术边界。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] 王文娇, 金楷茹, 郑智浩, 等. 微重力条件下 C1-C4 烃类燃料燃烧生成碳烟研究进展 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2025, 65(09): 1763-1773. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2024.27.031.
- [2] Wenjiao Wang, Kairu Jin, Hongqing Shi, et al. Variable gravity combustion: new frontiers in flame studies [J]. npj Space Exploration, 2025, 1: 14. DOI: 10.1038/s44453-025-00016-7.
- [3] Xiaohong Gui, Jiaoqiao Wu, Wenjun Zhou, et al. Soot characterization of n-dodecane combustion in multi-jet premixed flames: A multi-scale analysis [J]. Fuel, 2025, 401: 135905. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.135905.

### 代表专利

- [1] 田振玉, 金楷茹, 郑智浩, 等. 一种用于空间站燃烧碳烟取样的实验装置. 发明专利. 专利号: ZL 202411138648.5. 授权日期: 2025 年 09 月 12 日.

### 主要完成团队

中国科学院工程热物理研究所燃烧动力学研究中心团队。

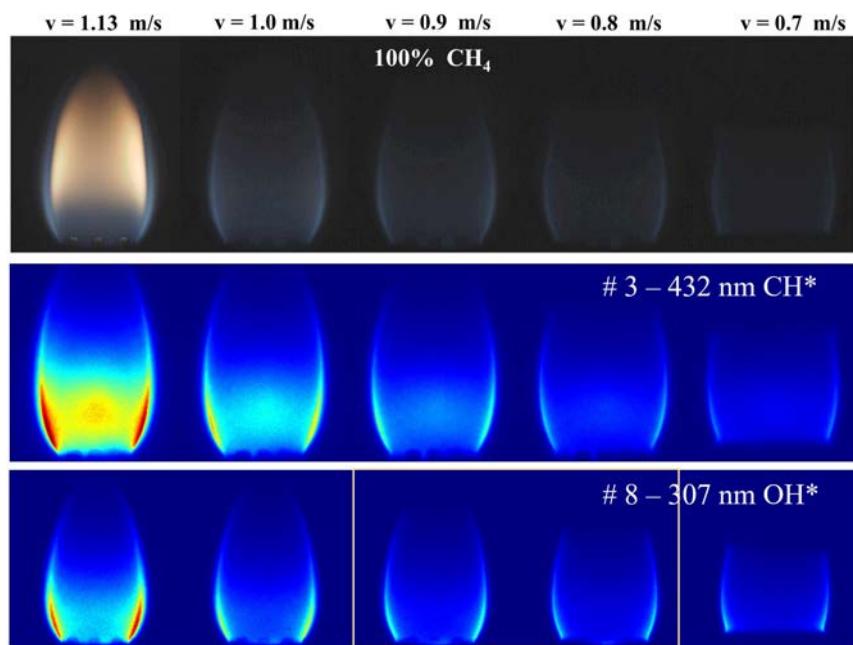


图 3-23 甲烷多射流火焰在轨成像

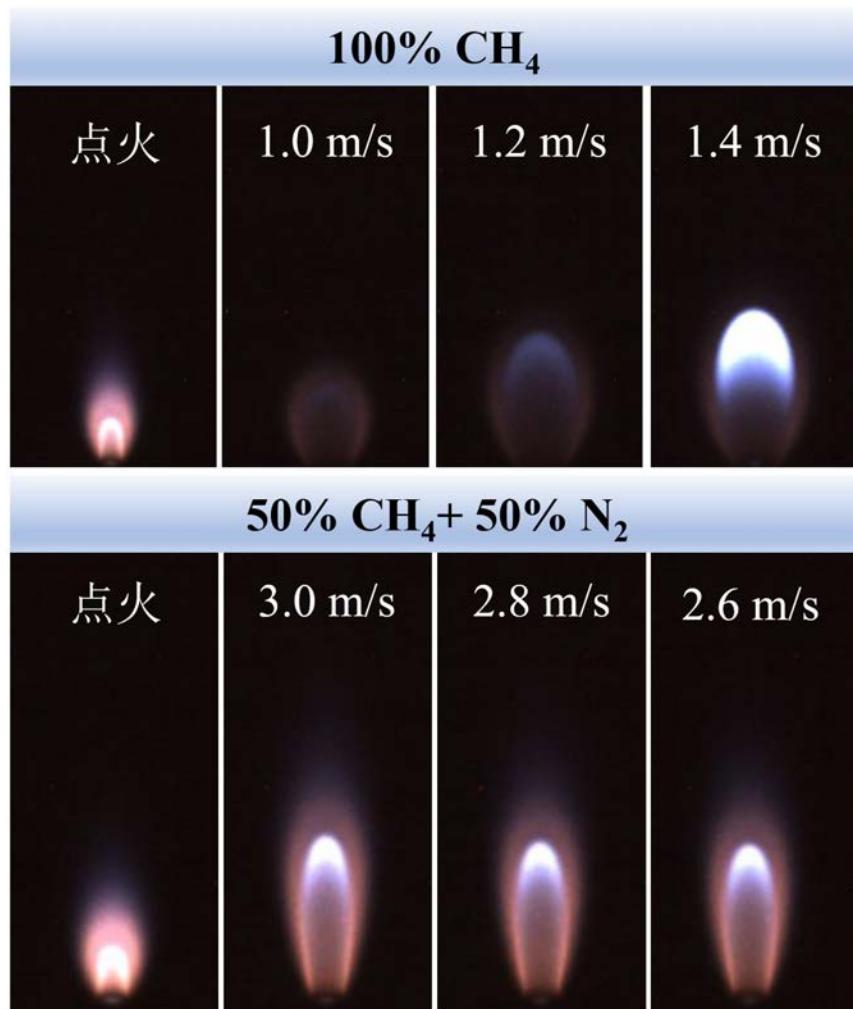


图 3-24 甲烷单射流火焰在轨成像

# 微重力条件下层流射流扩散火焰的形态和碳烟特征

## Shape and Sooting Properties of Laminar-jet Diffusion Flames in Microgravity

揭示近场和远场射流火焰形态与环境气体条件的定量关系，发现扩散火焰碳烟趋势和碳烟生成过程依赖流体动力学效应的内在规律，提出环境气体组分通过稀释效应和热效应影响碳烟生成的表征参数。

### 研究进展

几何形状和碳烟是碳氢燃料扩散火焰的基本特性，直接关系到燃料清洁高效利用，微重力条件下实验研究为揭示扩散燃烧的物理和化学机理以及建立湍流扩散燃烧模型提供了重要途径。利用燃烧科学实验柜在轨完成了同轴伴流甲烷层流射流扩散火焰的微重力实验，重点关注高氧浓度、空气、氮气和氩气稀释空气等多种伴流气体及其速度对微重力火焰形态特征与碳烟特性的影响规律。对近场和远场火焰的分析表明，基于射流流场相似理论的简化模型能够对射流远场中微重力火焰的形状进行有效预测，伴流组分的影响主要体现为燃烧化学计量关系的变化；近场火焰长度与伴流速度无关，与化学当量混合物分数之间成反比关系，而火焰直径受到射流速度 / 伴流速度比值和化学当量混合物分数共同影响。用惰性气体稀释空气伴流

时，火焰中碳烟生成为主的区域减小、碳烟氧化为主的区域增大，火焰中碳烟含量随着惰性气体体积分数的增加而减少（图 3-25），稀释效应和热效应对碳烟生成的影响分别由惰性气体体积分数和火焰温度表征。结合地面实验研究，发展了火焰烟点（开始析出碳烟时的火焰长度）与射流喷口尺寸和伴流速度的关联模型（图 3-26），并揭示了碳烟趋势和碳烟生成过程中的流体动力学与浮力效应。

### 应用及前景

研究结果将为湍流燃烧碳烟模型的验证提供数据支撑，指导燃料的碳烟倾向准确测定和发烟趋势机理分析，为燃料的高效利用和污染排放的减少提供理论依据，支持有关燃烧设备的优化设计。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Kun Liu, Feng Zhu, Shuangfeng Wang, et al. Influence of hydrodynamics on soot process in laminar jet diffusion flame[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2025, 37: 42. DOI: 10.1007/s12217-025-10196-2.
- [2] 朱凤, 李丹, 王双峰, 等. 微重力甲烷层流射流扩散火焰的形态和碳烟特征 [J]. 空间科学学报, 2025, DOI: 10.11728/cjss2025-0166.
- [3] Shuangfeng Wang, Feng Zhu. Microgravity experiments of soot formation in laminar gaseous diffusion flames onboard China Space Station[C]. The 76<sup>th</sup> International Astronautical Congress. Sydney, Australia. 29 September - 3 October 2025.

### 主要完成团队

中国科学院力学研究所王双峰团队，清华大学张扬团队。

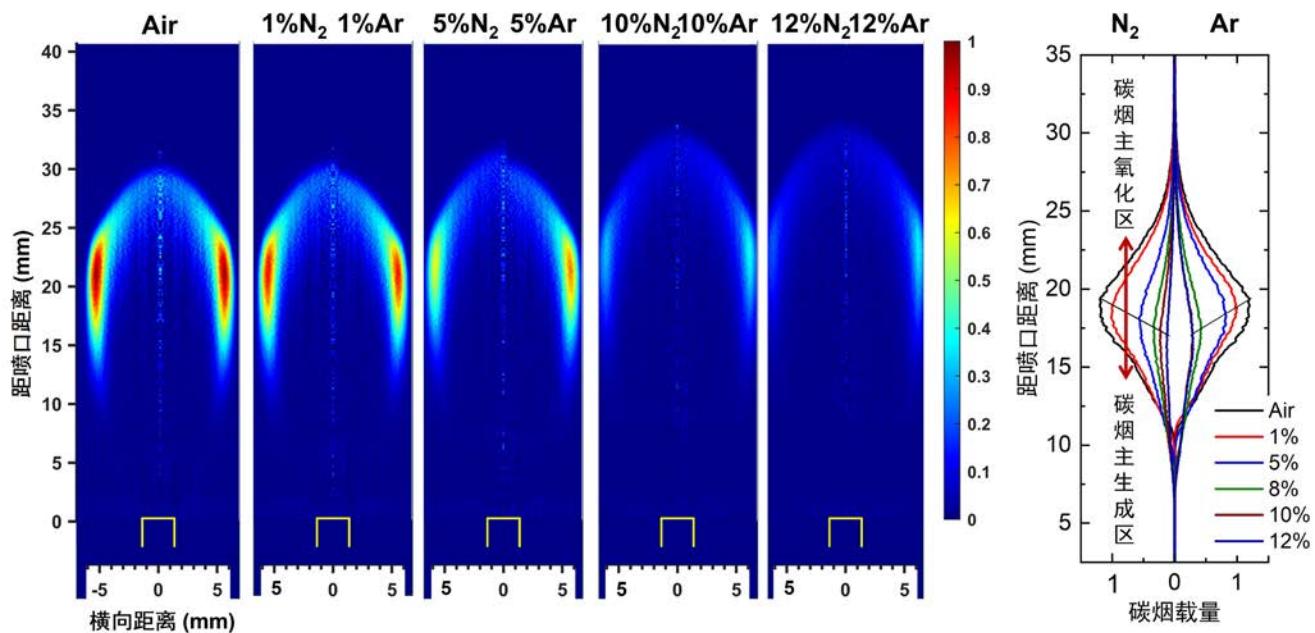


图 3-25 不同样伴流气体中微重力火焰碳烟分布 (左边云图) 及碳烟载量分布 (右边线图)

(图片来源: 朱凤, 等. 空间科学学报, 2025, DOI: 10.11728/cjss2025-0166)

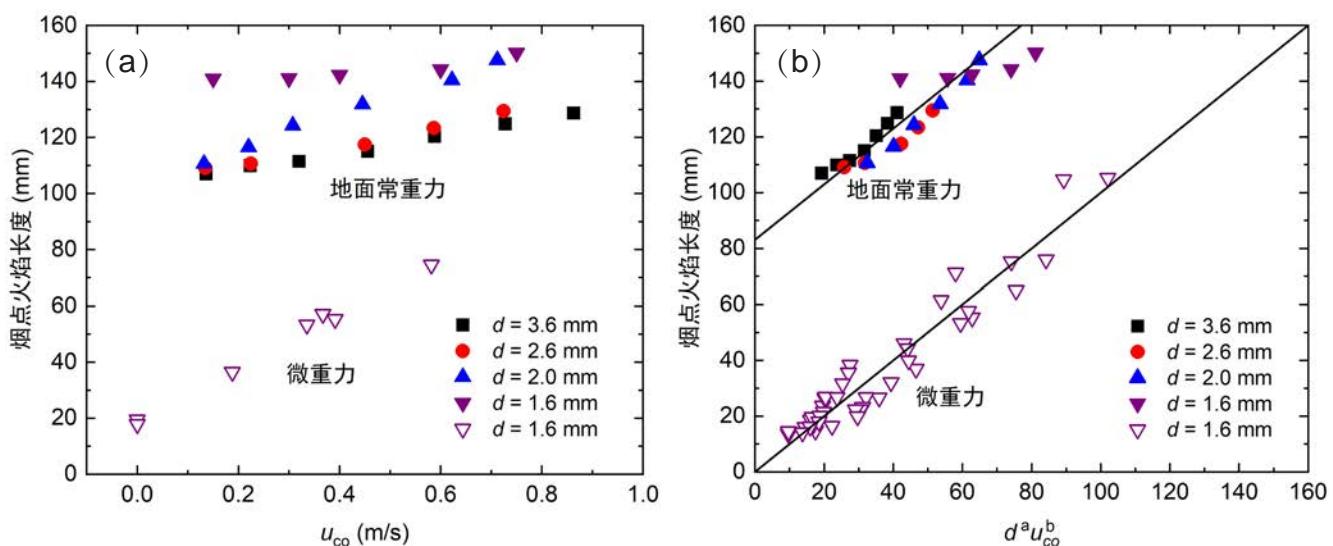


图 3-26 烟点火焰长度变化 ( $d$ : 射流喷口直径,  $u_{co}$ : 伴流速度)

(a) 伴流速度对烟点的影响; (b) 烟点与射流喷口直径和伴流速度关联

(图片来源: Kun Liu, et al. Microgravity Science and Technology, 2025, 37: 42)

# 微重力条件下部分预混火焰的混合达姆科勒数和曲率稳焰机理

## Stabilization Mechanisms Based on Mixing Damköhler Number and Curvature for Microgravity Partially Premixed Flames

层流部分预混火焰驻定、升举和吹熄机理研究项目通过天地实验对比、数值模拟和理论分析，揭示了常—微重力条件下的部分预混火焰稳焰和传播机理，发展了基于流体混合与化学反应竞争的部分预混火焰升举稳定理论。

### 研究进展

研究部分预混火焰的推举特性对能源动力装置的燃烧稳定性和防止喷嘴结焦具有重要意义。本研究通过构建“天地实验对比—理论分析”研究框架，聚焦层流部分预混火焰的稳定推举特性，以及微重力与常重力部分预混火焰的差异（图 3-27）。研究团队以流体掺混时间和燃烧化学特征时间构建的达姆科勒数为关键参数设计实验。在固定射流速度下，通过调节当量比与惰性稀释，系统性揭示了空间站微重力火焰的“掺混—化学”竞争关系。

研究结果表明，火焰推举高度与当地混合达姆科勒数倒数呈普适线性关系，团队基于达姆科勒数发展的理论模型实现了不同速度、当量比、稀释度与重力条件的火焰推举位置预测（图 3-28a）。马克斯斯坦数可用于描述火焰传播

速度偏离层流火焰速度的敏感性。研究团队进一步将火焰总拉伸率分解为曲率与应变两部分，揭示了微重力部分预混火焰的曲率马克斯斯坦数显著大于应变马克斯斯坦数（图 3-28b），当地火焰传播由几何曲率主导；团队通过天地对比实验发现，浮力效应降低火焰传播的曲率敏感性，而氩气稀释因导热性质和反应速率降低导致火焰对曲率敏感性增加。

### 应用及前景

本研究揭示的甲烷部分预混火焰推举和当地火焰传播规律，相应的理论模型可应用于载人航天相关任务的火灾安全判定依据，以及为地面的能源与动力系统拓宽稳定运行工况提供理论支撑。



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(1-4): 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进展 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2025, 65(9): 1609-1620. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2024.27.039.
- [3] 史京璇, 温禹哲, 李龙飞, 等. 微重力扩散火焰燃烧实验总结与展望 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2025, 65(9): 1659-1683. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2025.27.027.

### 主要完成团队

清华大学微重力多相燃烧实验室团队。

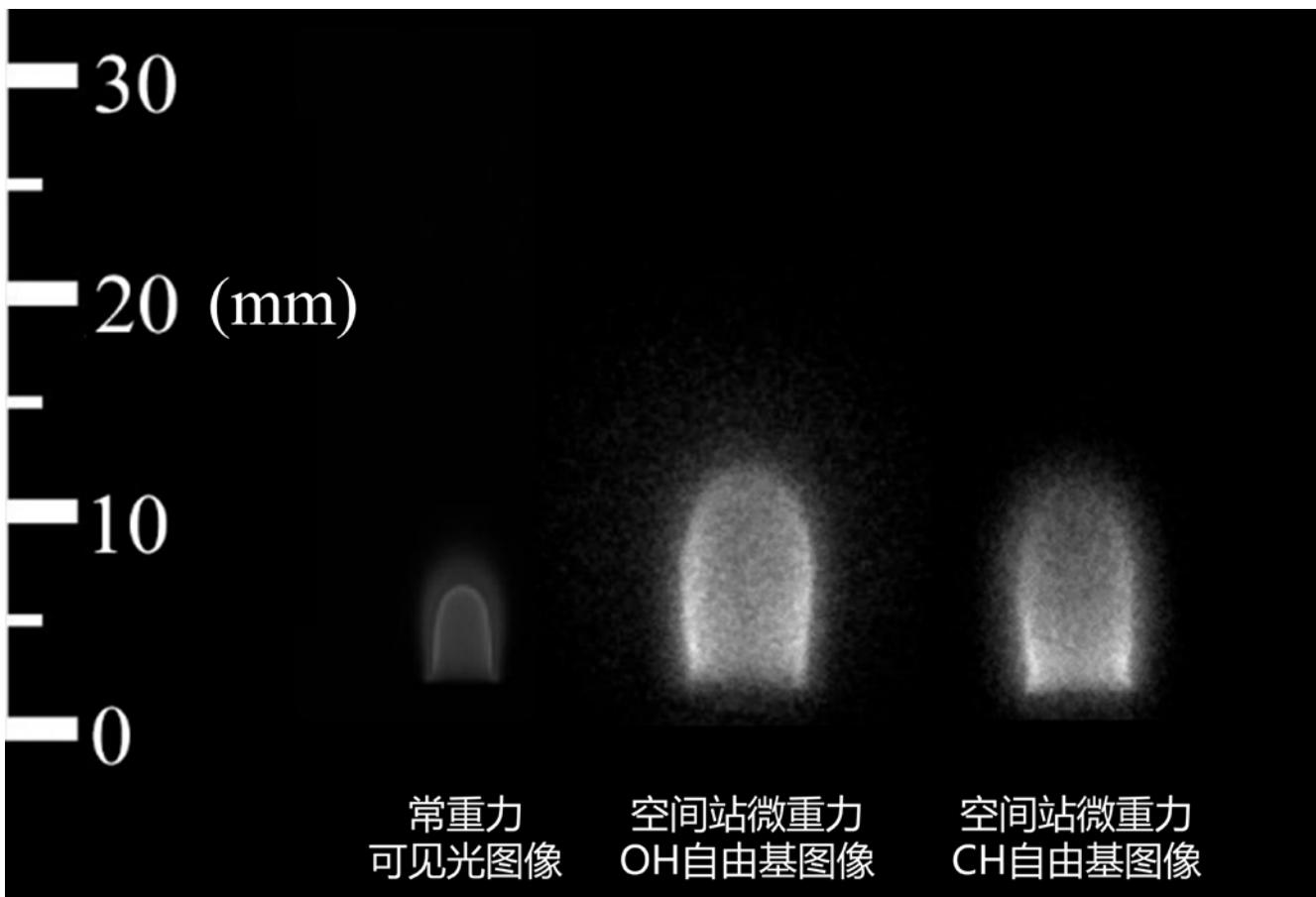


图 3-27 部分预混火焰在常 - 微重力条件下的结构差异

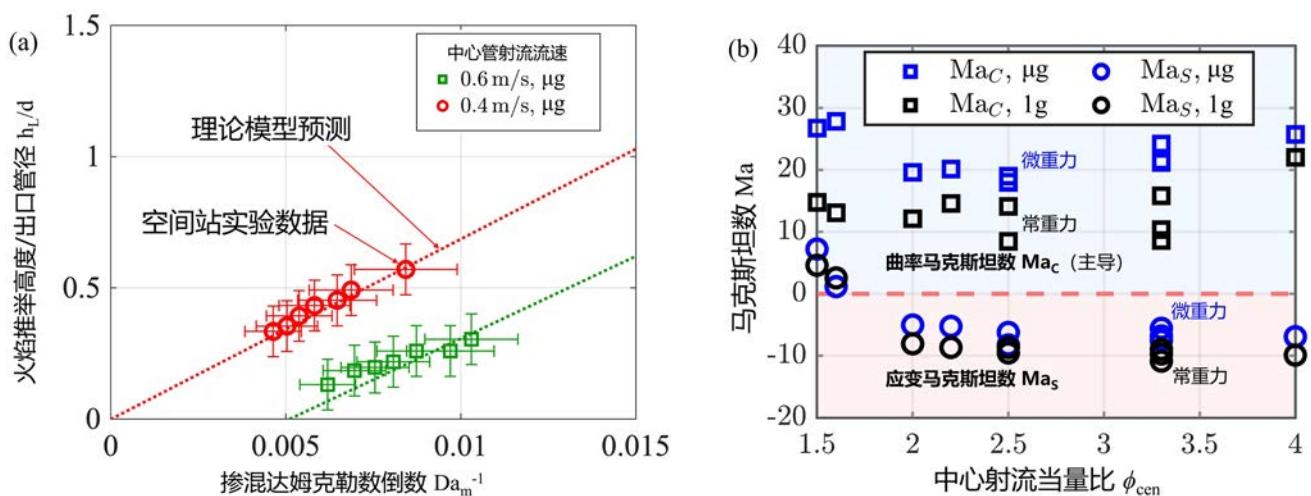


图 3-28 部分预混火焰的无量纲数关系分析

- (a) 部分预混火焰在微重力条件下火焰升举高度  $h_L$  与混合达姆科勒数  $Da_m$  的关系；  
 (b) 部分预混火焰在微重力和常重力下曲率和应变马克斯斯坦数  $Ma_c$  和  $Ma_s$  在不同中心射流当量比条件下的变化趋势



## 空间新技术与应用领域

- |                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| ① 基于同心物镜及光纤面板像面拼接的大视场高分辨率天文观测技术研究 | 68 |
| ② 基于空间微生物群体应激变异的新药创制研究            | 70 |
| ③ 空间站管道检测机器人及试验验证                 | 72 |
| ④ 地外人工光合作用技术试验验证                  | 74 |
| ⑤ 再生生保系统植物高效培养技术研究                | 76 |
| ⑥ 基于二元微生态体系的空间物质能量转化再生系统在轨试验      | 78 |
| ⑦ 多环境参数作用下光纤传感关键特性在轨验证            | 80 |

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，突破了同心物镜及光纤面板像面拼接的大视场高分辨率天文观测技术，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，在轨验证了多环境参数作用下光纤传感关键特性等。航天技术试验方向重点在空间机器人技术、氧气再生与二氧化碳转化、植物高效培养、空间生物制造等研究方向取得了系列重要进展：国际首次开展空间站管道检测机器人在轨试验，验证了管道检测机器人的管道环境适应能力和变刚度运动安全性；国际首次开展了常温二氧化碳转化制备乙烯与氧气、光电催化二氧化碳转化等在轨试验验证，获得了较高的产氧速率等指标；首次开展了基于气雾栽培的再生生保系统植物高效培养技术试验，相比传统基质培养，在轨培养效率显著提升；构建了基于二元微生态体系的空间物质能量转化再生系统，一体化实现空间废水的净化与蕴藏能量的原位转化利用；发现了携带潜在新药基因簇的太空变异菌株，为掌握自主可控的新药源头技术提供了新途径。空间新技术与应用领域的部分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。



# 基于同心物镜及光纤面板像面拼接的大视场高分辨率天文观测技术研究

## Research on Large Field of View and High Resolution Astronomical Observation Technology Based on Image Plane Mosaic of Concentric Objective Lens and Fiber Optic Panels

攻克了空间用同心物镜高精度加工装配、大面阵探测器低漏像拼接、大视场高精度几何畸变校正关键技术，完成了单镜头大视场高分辨率空间天文观测载荷研制及在轨验证，光学视场及分辨率综合指标国内领先。

### 研究进展

开展光纤面板对球形像面光学平场的原理研究，完成六边形蜂窝状光纤排布、周期采样对光学像质影响的理论分析（图 4-1）。开展利用光纤面板传像的同心光学系统的焦面装调方法研究。用 8 片  $6k \times 6k$  面阵探测器拼接实现  $12k \times 24k$  大视场高分辨率天文观测载荷研制（图 4-2），实现相邻拼接漏像小于 10 个像素，全视场各局部分辨率一致性优异。经历在轨 2 年后，天文观测系统性能稳定。

### 应用及前景

本成果验证的光纤面板光学平场方案为解决各类光学像面弯曲问题提供了可靠的光学工程技术途径。基于同心物镜及光纤面板像面拼接的天文观测载荷具有光学视场大、分辨率高、全视场像质优异的特点，且可适应空间环境，有望应用于需高效天文观测场合。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] Ge Chi, Yawei Huang, Changxiang Yan. Pixel-scale multipoint concentric optical camera non-uniformity correction based on the fiber-optic panel mask[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2025,42(9): 1285-1294. DOI: 10.1364/JOSAA.560837.
- [2] Ge Chi, Yawei Huang, Chaoran Ma, et al., Defect Detection and Localization in Fiber-Optic Panels Based on Discrete Wavelet and Multiobjective Morphological Optimization[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(19): 30726-30735. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3447122.
- [3] Dandan Xie, Yawei Huang, Changxiang Yan. Defect detection and response non-uniformity correction of a monocentric camera based on fiber optic relay imaging[J]. Optics Express, 2023, 31(14): 22635-22648. DOI: 10.1364/OE.493543.

### 主要完成团队

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所颜昌翔团队。

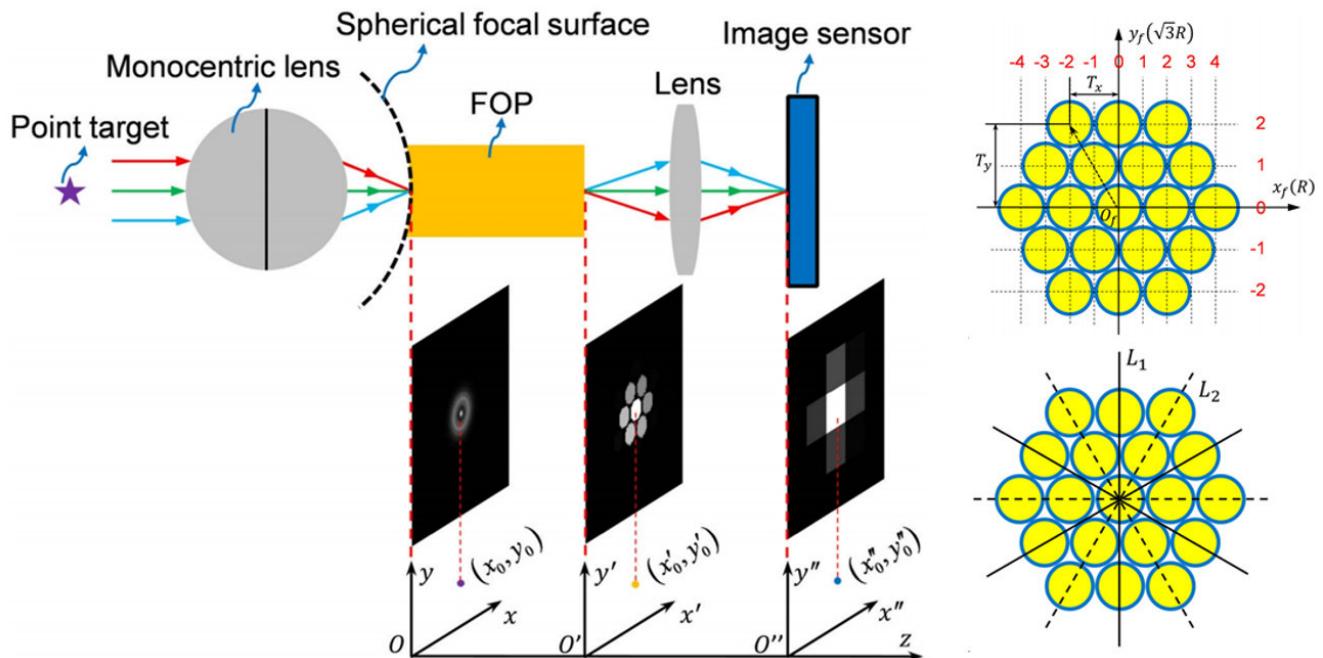


图 4-1 同心物镜的半球形焦面 - 光纤面板 - 图像传感器的两级离散耦合模型图

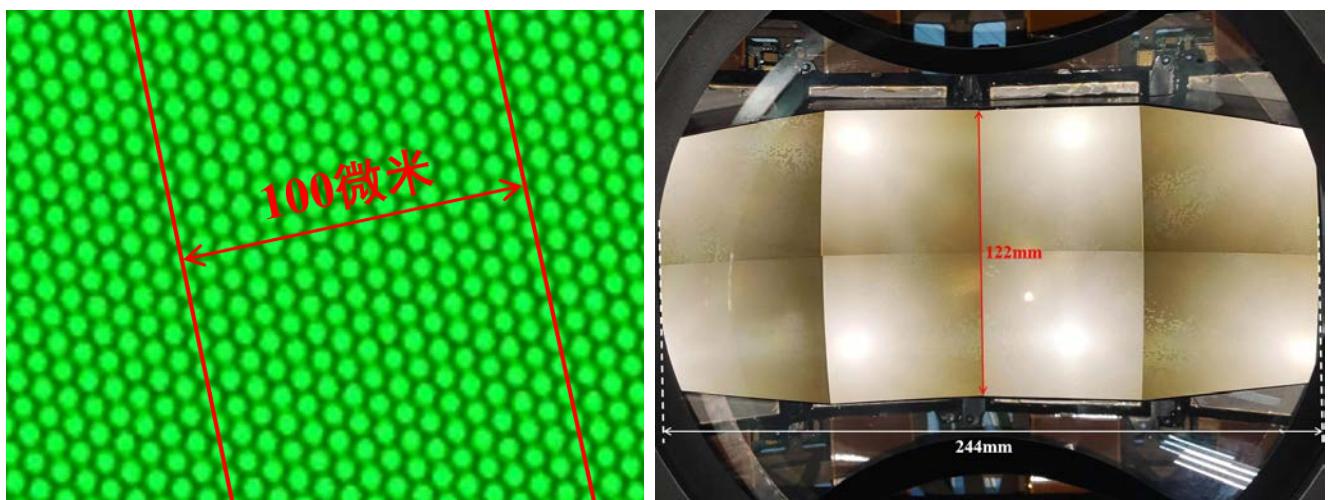


图 4-2 光纤面板微观图像及基于光纤面板拼接实现大视场高分辨率光学焦面组件

## 基于空间微生物群体应激变异的新药创制研究

### Spaceflight New Drug Discovery Based on Stress Induced Microbial Cooperative Metabolic Gene Variations

基于空间极端环境微生物群体应激反应引发的变异现象，聚焦变异产药基因簇挖掘微生物新药潜力，发现具有药用价值的新颖代谢产物，发展太空新药创制技术，揭示空间极端环境微生物群体应激现象及规律。

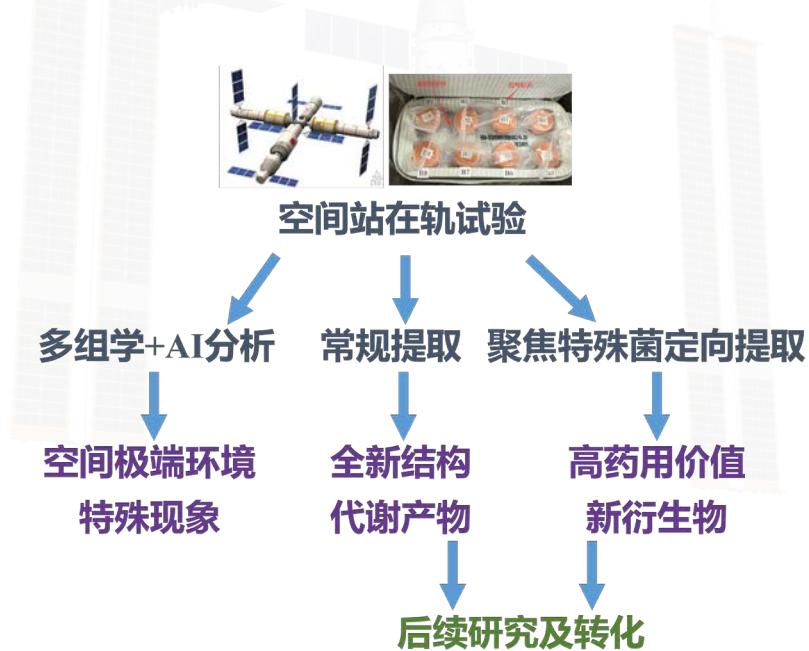
#### 研究进展

目前已研究发现极端环境可诱导基因簇变化和启动沉默基因簇。基于此，项目的整体实施思路如图 4-3 所示，通过空间在轨试验获得菌群样本，应用多组学 +AI 分析聚焦特殊菌株，以期获得高药用价值的新代谢产物。目前已初步搭建 BGC 鉴定和分类模型（图 4-4），并从空间站样本 5 株产药菌株中发现 1 株含外源变异上市药基因簇的潜力产新药菌株，其合成基数量及合成新结构能力明显提升（图 4-5）。这是国际上首次发现长期在轨微生物应激反应导致活跃单菌获取外源变异基因簇并拓展其合成新结构能力的现象。这一发现，一方面揭示

了空间在轨菌群中活跃单菌基因簇转移与变异并存的普遍规律，另一方面为广泛挖掘微生物新药资源另辟蹊径，为掌握自主可控的新药源头技术提供了新范式。

#### 应用及前景

本研究揭示的新现象，为利用空间极端环境挖掘微生物新药潜能提供一条有效途径。后续太空菌株的广泛研究将会揭示出更多有产新药潜力的菌株，可为新药产业提供具有药用价值的结构新颖的先导化合物资源。



扫码查看联系方式

图 4-3 本研究整体实施思路

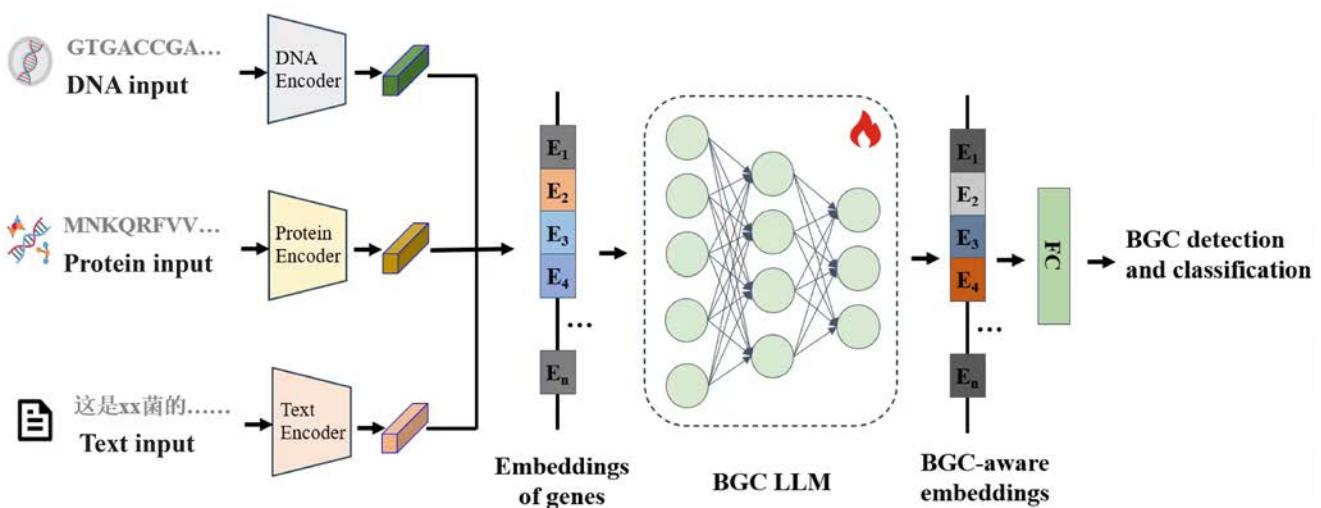


图 4-4 BGC 检测和分类模型

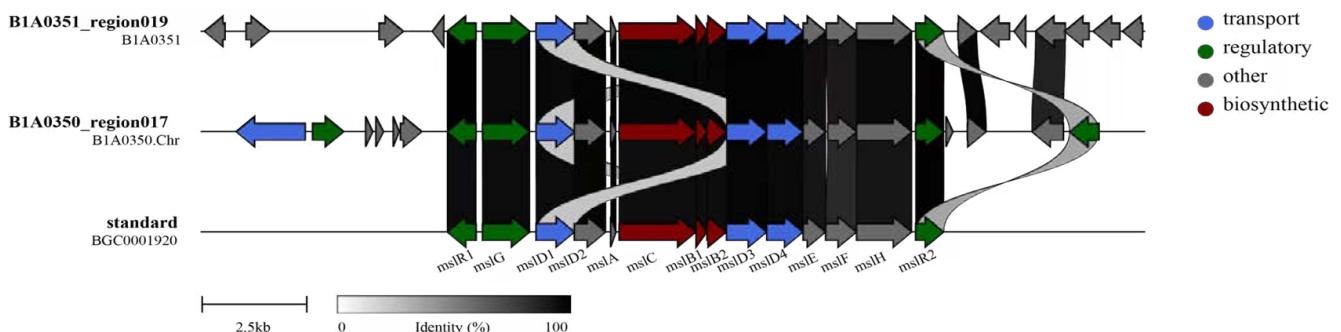


图 4-5 潜力基因簇与已知基因簇分析比对结果

### 代表论文

- [1] Junyong Wang, Tao Wang, Yu Zong Chen, et al. Database of space life investigations and bioinformatics of microbiology in extreme environments. *Frontiers In Microbiology*, 2022, 3(13): 1017773. DOI: 10.3389/fmicb.2022.1017773.
- [2] Hui Zhao, Yuan Yang, Yu Zong Chen, et al. NPASS database update 2023: quantitative natural product activity and species source database for biomedical research. *Nucleic Acids Research*, 2023, 51(D1): D621-D628. DOI: 10.1093/nar/gkac1069.
- [3] Wan Xiang Shen, Shu Ran Liang, Yu Zong Chen, et al. Enhanced metagenomic deep learning for disease prediction and consistent signature recognition by restructured microbiome 2D representations. *Patterns*, 2023, 4(1):100658. DOI: 10.1016/j.patter.2022.100658.

### 主要完成团队

宁波大学新药技术研究院 / 钱学森空间科学协同研究中心，中国航天科技集团空间技术研究院，深圳湾实验室医药健康技术与工程研究所，清华大学深圳研究生院，自然资源部第三海洋研究所，中国科学院上海技术物理研究所，西藏大学。

# 空间站管道检测机器人及试验验证

## In-orbit Experimental Study of Space Station Pipeline Inspection Robot

开展了大变径比复杂管道适应性机构设计与狭小空间高冗余自由度全身协调运动控制技术攻关, 研制了空间站管道检测机器人, 完成了国际上首次空间站管道检测机器人在轨试验, 验证了机器人的运动能力和安全性, 为未来在空间站管道的实际应用积累了经验。

### 研究进展

空间站管道检测机器人(机器人配置如图 4-6 所示)面向微重力环境复杂管道定期巡检作业场景(在轨模拟管道内运动如图 4-7 所示), 针对机器人在微重力环境的复杂管道自主适应、运动安全性两个关键环节开展技术验证。

借鉴棘皮动物的管足器官静止时收缩于体内, 运动时向外延伸的运动机理, 提出了“自主伸张、受力收缩、无电变柔”的仿生变刚度设计思路, 设计了主被动结合的腿部剪叉伸缩机构(腿部机构如图 4-8), 既能适应复杂的空间站管道, 又可以保证空间站管道的安全。

提出了适应空间站复杂管道场景的多任务全身协调运动控制算法, 利用全身传感器信息计算管道机器人的姿态、位置, 并给出运动策略, 在保障管道安全的前提下, 调整全身各关节位置、速度、力的输出, 使机器人安全平稳地在

管道内运动, 在轨开展了运动能力和机构适应性测试, 验证了机器人自主运动技术和被动柔顺机构的安全性(管道检测机器人在轨验证试验如图 4-9 所示)。

### 应用及前景

本次管道检测机器人在轨试验是我国空间站开展的首次舱内特种作业机器人在轨试验, 验证了适应多种复杂管道的大变径比管道机器人设计和多级协调全身运动控制等关键技术, 验证了机器人在空间站管道复杂环境下的自主适应运动能力和安全性, 为在空间站管道的实际应用积累了经验。未来将进一步增加管道机器人的作业功能, 更好地服务于我国空间站运营, 将来可在地面的水、石油、天然气管道和地外科考站管道扩展应用。



扫码查看联系方式

图 4-6 空间站管道检测机器人结构、传感器以及自由度配置

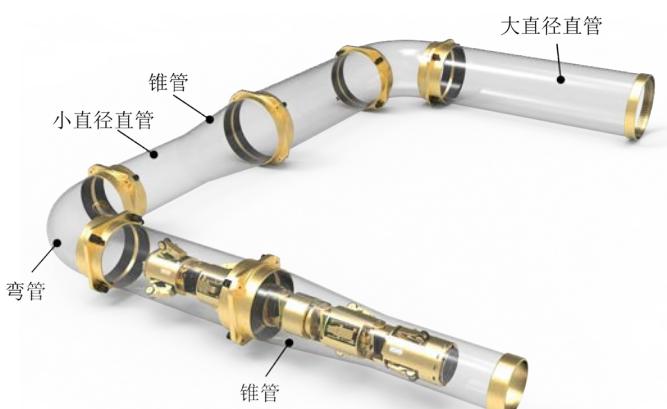


图 4-7 机器人在模拟管道中运动

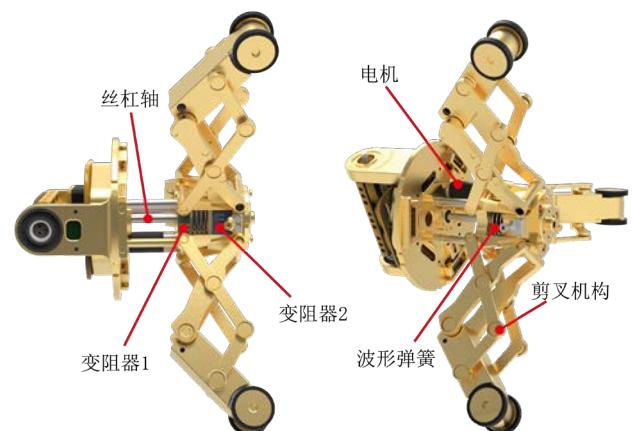


图 4-8 驱动 / 感知一体化腿部机构



图 4-9 管道检测机器人在轨验证试验

**代表论文**

- [1] 冯甚尧, 黄强, 王翔, 等. 空间管道检测机器人系统设计与试验 [J]. 空间科学与试验学报, 2025, 2(1): 46-53. DOI: 10.19963/j.cnki.2097-4302.2025.01.006.
- [2] Tao Zheng, Hui Li, Xiang Wang, et al. Smooth motion control policy of wall-pressing pipeline robots [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(6): 6005-6012. DOI: 10.1109/TIE.2023.3294599.
- [3] Tao Zheng, Xiang Wang, Hui Li, et al. Design of a robot for inspecting the multishape pipeline systems [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(6): 4608-4618. DOI: 10.1109/TMECH.2022.3160728.

**主要完成团队**

北京理工大学机电学院智能机器人研究所, 北京空间飞行器总体设计部。

## 地外人工光合作用技术试验验证

### In-orbit Experimental Study on Extraterrestrial Artificial Photosynthetic Technology

开展高效二氧化碳转换与氧气再生技术攻关，提出地外人工光合作用技术路线并研制技术试验装置，国际首次开展了常温二氧化碳转化制备乙烯与氧气、光电催化二氧化碳转换等在轨试验验证，获得产氧速率等关键指标。

#### 研究进展

地外人工光合作用技术通过物理化学方法将二氧化碳转化成氧气和含碳燃料，是一种二氧化碳高效转换和氧气再生的新技术。它不仅可将人类呼吸产生的二氧化碳转换为氧气，实现密闭空间的废弃资源原位再生循环，大大降低载人空间站、载人深空飞船的物资供应需求，而且可利用火星等地外大气环境丰富二氧化碳和水原位资源生产氧气和燃料，实现人类在其它行星的地外生存。中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室在国际上首次开展了常温二氧化碳转化制备乙烯与氧气在轨试验验证，实现产氧速率  $52.8 \text{ mL/h cm}^2$ 。通过在轨更换模块（图 4-10），开展了一系列拓展性试验，在国际上首次验证光电催化二氧化碳还原、二氧化碳转换制备甲酸等技术路线（图 4-11）。

地外人工光合作用技术试验利用航天基础试验机柜开展试验，通过在轨试验验证了空间常温高效二氧化碳转换和氧气再生（图 4-12）；微重力下多相催化反应界面气相产物高效脱离、气液反应物流动与扩散（图 4-13）；空间气体

和液体工质高精度压力与流量控制和空间高灵敏度在线检测等关键技术，并获得了大量微重力环境下二氧化碳催化转化、多相催化反应界面气相产物高效脱离、气液反应物流动与扩散传递等在轨试验数据；有望在材料开发、微重力条件下的物理化学过程、多场耦合条件下的能量和物质转化、新型仪器的开发与应用等研究领域上取得重大突破，为地外长期生存碳氧循环和火星大气二氧化碳资源化利用技术发展和应用奠定基础。

#### 应用及前景

本技术成果可应用于载人登月与月球科研站、火星探测和太空资源利用等任务，满足我国未来空间任务对于地外原位资源转换利用的需求，同时在地面具有二氧化碳回收与高效利用应用价值，为我国新能源和碳中和产业发展提供技术储备。



扫码查看联系方式

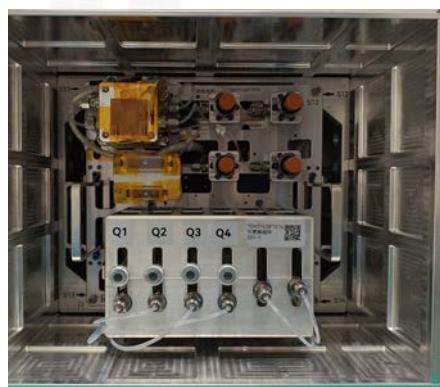
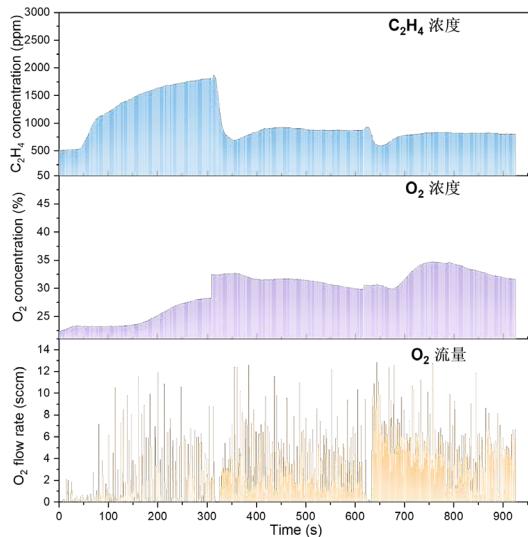


图 4-10 可更换模块



图 4-11 在轨采样照片

(a)



(b)

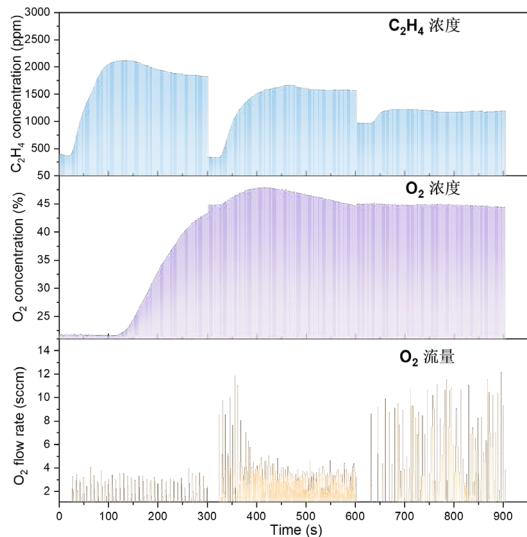


图 4-12 试验数据总结

(a) 在轨试验数据; (b) 地面试验数据

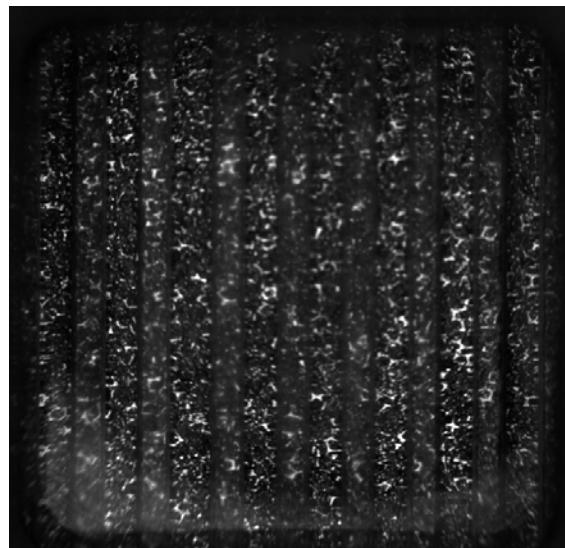


图 4-13 在轨试验氧气产生 (高速相机照片)

**代表论文**

- [1] 张策, 胡博韬, 张思勃, 等. 地外人工光合作用技术试验研究 [J]. 空间科学与试验学报, 2025, 2(1): 1-7. DOI: 10.19963/j.cnki.2097-4302.2025.01.001.
- [2] Jun Wang, Jiajia Wang, Jianyong Feng, et al. Photochemical  $\text{CO}_2$  hydrogenation of carbon nanotubes and  $\text{H}_2\text{O}$  for oxygen recovery in space exploration [J]. Joule, 2024, 8(11): 3126-3141. DOI: 10.1016/j.joule.2024.08.007.
- [3] Jinhao Li, Zixian Li, QiuHong Sun, et al. Recent Advances in the Large-Scale Production of Photo/Electrocatalysts for Energy Conversion and beyond [J]. Advanced Energy Materials, 2024, 14(45): 2402441. DOI: 10.1002/aenm.202402441.

**代表专利**

- [1] 刘释元, 张策, 姚伟, 等. 电化学反应器及电化学反应系统. 发明专利. 专利号: ZL202110640118.0. 授权日期: 2022 年 11 月 15 日.

**主要完成团队**

中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室, 南京大学。

# 再生生保系统植物高效培养技术研究

## Study of High-Efficiency Plant Cultivation Technology for RLSS

为满足后续受控生态生保系统中规模化和批量化的植物生产需求, 研制了适应空间微重力环境的植物高效培养技术试验装置, 在轨开展了植物气雾培养试验, 验证了营养液气雾式供应等多项植物高效栽培关键技术, 获得了较高的植物生产能力和植物呼吸代谢数据。

### 研究进展

研制了适应空间微重力环境的植物高效培养技术试验装置(图4-14a), 在轨验证了营养液气雾式供应、水气定向收集、高效分离和回收再生等植物高效栽培关键技术, 实现水、肥和氧同步高效供给, 提升了装置自动化率、植物培养效率和营养液循环利用率。

国内首次采用气雾培养方式在轨开展了第一批次植物(生菜)气雾培养实验验证(图4-14b)。通过优化配制大量、中量和微量等植物必需矿质营养元素及相应的供应/回收频率, 科学配比红/蓝/白三色LED光源的光质、光强和光周期, 实现了满足植物全生育期生长发育所需的矿质养分和光照条件。植株(生菜)在轨生长

旺盛(图4-15), 每平米每天的蔬菜生产能力(地上部)达到 $140.9 \text{ g FW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。植株二氧化碳固定能力最高达到 $51.3 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (图4-16)。植物生产效率较传统基质培养显著提升。后续将进一步开展樱桃番茄、小麦和胡萝卜等多类植物的在轨气雾栽培实验验证。

### 应用及前景

本研究成果的推广应用方向: (1) 应用于空间站后续批量化的植物生产; (2) 为未来月球基地受控生态生保系统中植物栽培提供技术储备; (3) 应用于地面特殊密闭环境, 以及极地、荒漠、孤岛等极端环境下的生命保障。



扫码查看联系方式

### 代表论文

- [1] 唐永康, 卞强, 吴浩, 等. 空间植物气雾培养技术研究进展. 航天医学与医学工程, 2026(已录用).
- [2] 唐永康, 卞强, 刘向阳, 等. 我国空间站受控生态生保系统技术方案的测试验证. 空间科学与试验学报, 2025, 2(1): 40-45. DOI: 10.19963/j.cnki.2097-4302.2025.01.005.
- [3] 唐永康, 卞强, 王俊峰, 等. 空间站几种果蔬类作物生长栽培验证初探. 航天医学与医学工程, 2024, 35(6): 379-385. DOI: 10.16289/j.cnki.1002-0837.2024.06010.

### 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卞强团队。

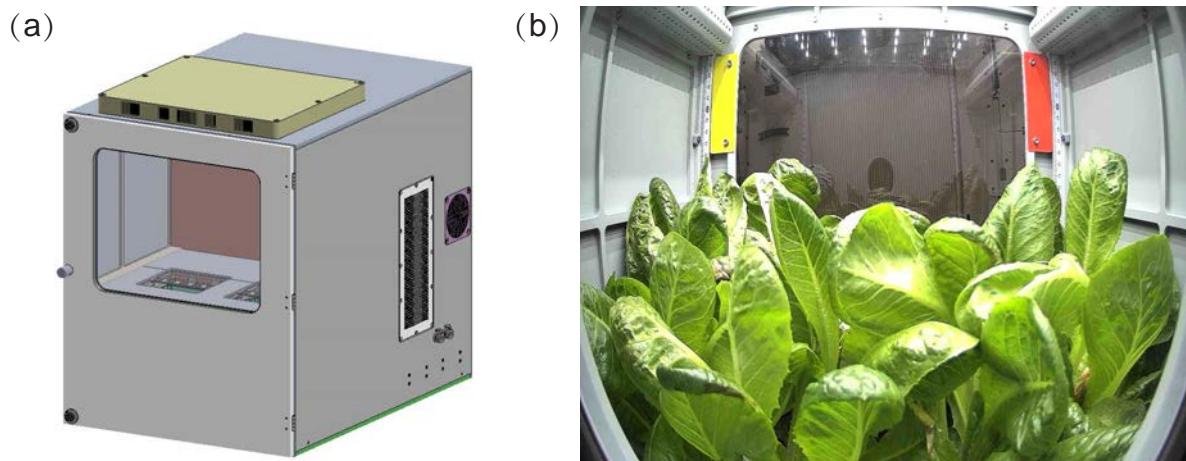


图 4-14 植物高效培养技术试验装置及培养的生菜

(图片来源 (a) : 唐永康, 等. 空间科学与试验学报, 2025, 2(1): 40-45 )

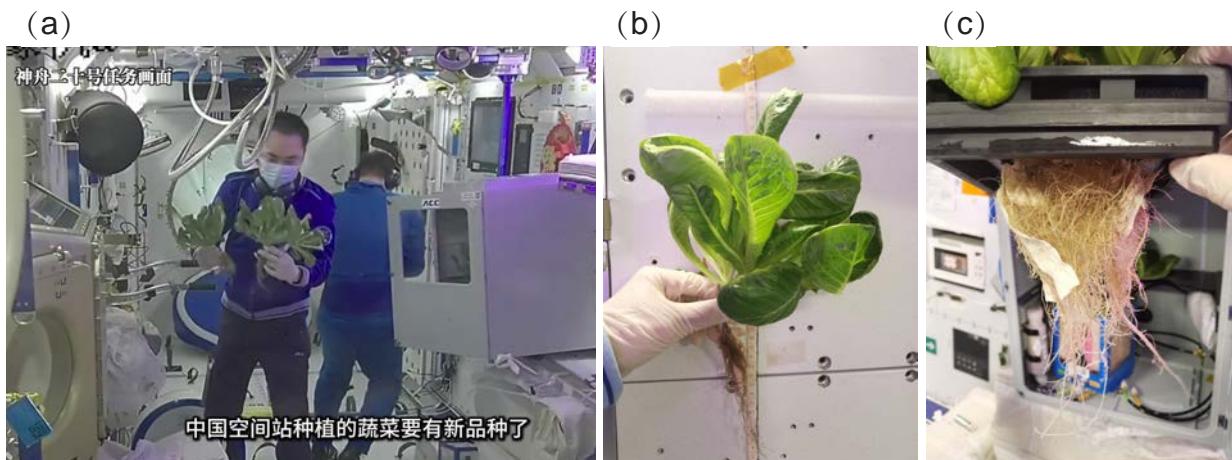


图 4-15 在轨生菜收获及样品采集

(图片来源 (a) : CCTV-13 新闻频道报道)

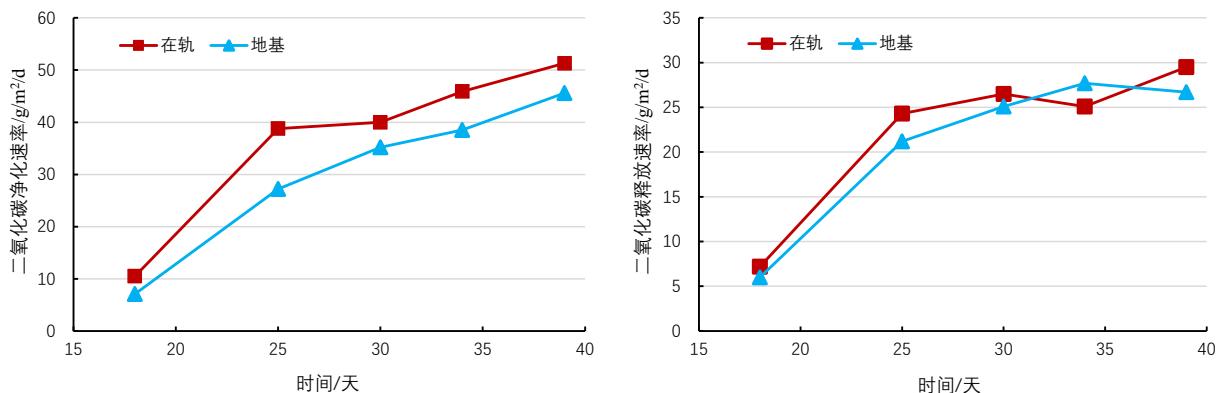


图 4-16 在轨 / 地基生菜二氧化碳吸收 / 释放速率比较

# 基于二元微生态体系的空间物质能量转化 再生系统在轨试验

## Orbital Experimental Verification of a Spatial Substance-Energy Conversion and Regeneration System Based on a Binary Microecological System

国际上首次开展了基于微生物燃料电池技术的空间物质能量转化再生系统在轨试验验证。为“废水深度净化 - 原位能源化利用”提供了可供选择的方法和途径。

### 研究 进展

依托新型集成式微生物燃料电池技术，整合电化学活性微生物 - 光合微生物二元人工微生态体系，构建空间物质能量转化再生系统（图 4-17），一体化实现空间废水的快速深度净化与蕴藏能量的原位转化利用。

系统安装于航天基础试验机柜，实现了生命要素自动精准调节及系统长期稳定运行。通过天地对照试验发现，空间微重力、辐射环境下系统产电性能与地面对照组存在显著差异

（图 4-18），水质净化性能良好；对下行生物样品开展显微表征发现，空间环境下电池阳极生物膜缺少导电丝状结构，显示空间环境下电化学活性微生物群落存在差异化电子传递机制

（图 4-19）。物质能量转化再生系统在轨正常运行 30 天，国际上首次实现了微生物燃料电池长期稳定在轨运行，并展现出良好产电性能，

验证了微生物燃料电池在轨运行的可行性与稳定性；二元微生态系统工作正常，人工合成微生物群落间交叉代谢调控效果良好。

团队研发了集成式微生物燃料电池，克服了传统微生物燃料电池结构限制，实现了其空间应用；开发了微型多参数水质传感器，国际上首次实现了在轨多参数水质指标在线监测。本研究验证成果为“废水深度净化 - 原位能源化利用”提供了可供选择的方法和途径。

### 应用 及 前景

本研究成果可应用于地外驻留等任务，同步实现基地水资源循环利用、污染物转化与原位资源化利用及多样化冗余能量供应。



扫码查看联系方式

### 代表 论文

- [1] Jingtong Dai, Xinyu Cao, Heng Xu, et al. Anodic microbiota reassembly via cell-cell interactions confers oxygen resilience in microbial fuel cells [J]. *Bioresource Technology*. 2026; 443: 133815. doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133815.
- [2] Yongyun Li, Yahui Chen, Yi Chen, et al. Fast deployable real-time bioelectric dissolved oxygen sensor based on a multi-source data fusion approach [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 475: 146064. doi.org/10.1016/j.cej.2023.146064.
- [3] Peng Chen P, Taotao Zhang, Yahui Chen, et al. Integrated chamber-free microbial fuel cell for wastewater purification and bioenergy generation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 442: 136091. doi.org/10.1016/j.cej.2022.136091.

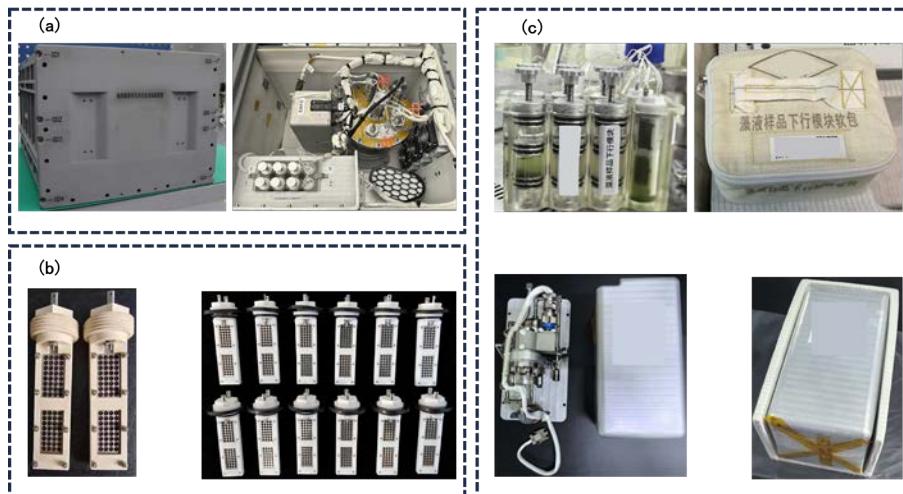


图 4-17 物质能量转化再生系统在轨试验装置

图中 (a) 为试验装置; (b) 为主反应器中微生物燃料电池 (iMFC-I, 左) 和下行模块中微生物燃料电池 (iMFC-II, 右); (c) 为生物样品上下行模块

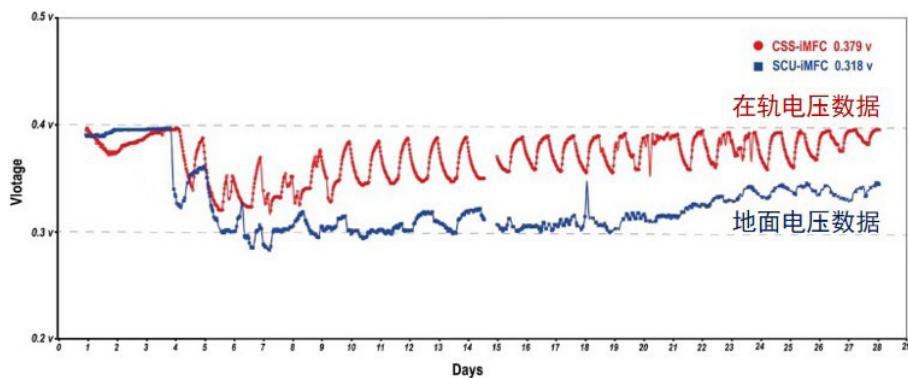


图 4-18 物质能量转化再生系统产电性能天地对照试验结果

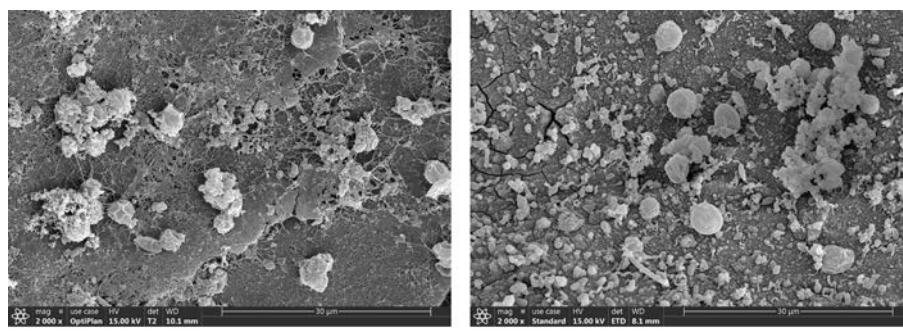


图 4-19 天地生物样品显微特征

### 代表专利

- [1] 徐绯, 王璨, 陈鹏, 等. 一种集成式微生物燃料电池、其制备方法及应用. 发明专利. 专利号: ZL 2021 1 1255142.9. 授权日期: 2023 年 05 月 26 日.
- [2] 周广武, 蒲伟, 周志成, 等. 微生物燃料电池和藻类光合生物耦合物质转化试验装置. 发明专利. 专利号: ZL 2020 1 1263715.8. 授权日期: 2022 年 05 月 10 日.
- [3] 蒲伟, 周广武, 周志成, 等. 一种微生物燃料电池和藻类光合生物系统串联试验装置. 发明专利. 专利号: ZL 2020 1 1260894.X. 授权日期: 2022 年 03 月 08 日.

### 主要完成团队

四川大学生命科学学院、空天科学与工程学院, 成都理工大学, 山东航天电子技术研究所, 北京控制工程研究所。

# 多环境参数作用下光纤传感关键特性在轨验证

## Verification of Key Characteristics of Fiber Optic Sensing under the Influence of Multiple Environmental Parameters on the Chinese Space Station

本研究验证了空间复杂因子作用下传感光纤及核心元件特性，光纤传感器与光纤试验单元长期服役的性能和可靠性，为未来光纤传感技术在空间应用提供了技术支持。

### 研究进展

本研究开展了新型耐辐照光纤光栅温度传感器和光纤辐照总剂量传感器关键技术的空间飞行试验，采用飞秒激光刻写方法制作耐辐照光纤光栅温度传感器（图 4-20），选用辐照敏感光纤研制光纤辐照总剂量传感器（图 4-21），配套光纤试验单元（图 4-22）为光纤传感器提供光源并采集相关数据。

耐辐照光纤光栅温度传感器安装于试验平台表面，用于测量试验平台表面温度梯度（图 4-23），同时发现平台温度变化呈现出 90 分钟的波动周期，与空间站轨道周期高度吻合；耐辐照光纤光栅温度传感器精度误差小于  $0.1^{\circ}\text{C}$ ，证明传感器的耐辐照特性可以满足空间环境下长期温度监测的需求。

光纤辐照总剂量传感器安装于试验单元顶部，用于测量试验单元空间环境辐照总剂量。通过对试验数据解析得出，试验期间外壳屏蔽后传感器辐照总剂量约为 200rad（图 4-24）。

本研究验证了传感光纤及核心元件受总剂量、单粒子和原子氧等空间复杂因子耦合环境作用下的功能性能与可靠性指标，为未来光纤传感技术的空间应用提供技术支持。

### 应用及前景

本研究成果可应用于生物医疗、结构健康监测等领域，已推广应用于生物组织无损吸附固定手术机器人触觉感知系统，以及大型斜拉桥结构的瞬态应力、振动、变形等关键参数的高速高动态实时监测。

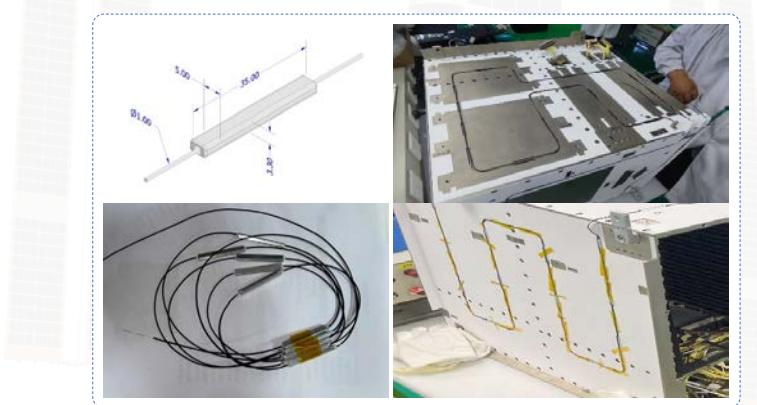


图 4-20 辐照光纤光栅温度传感器

### 代表论文

- [1] Chenbo Yu, Jingtao Xin, Jingjing Liao, et al. Three-Axis High-Sensitivity Vibration Sensor Based on Ultrafine and Ultrashort Fiber Bragg Gratings. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(12): 21557-21565. DOI: 10.1109/JSEN.2025.3553859.
- [2] Zheng Lv, Bofei Zhu, Lidan Lu, et al. Miniature and low-power high-precision FBG interrogator with self-temperature compensation. *Optics Express*, 2025, 33(5): 10289-10301. DOI: 10.1364/OE.557542.
- [3] Jingtao Xin, Jingjing Liao, Chenbo Yu, et al. Fiber Bragg gratings inscription with a single UV laser pulse by high-temperature arc pretreatment. *Optics Express*, 2025, 33(10): 21692-21706. DOI: 10.1364/OE.561822.



扫码查看联系方式

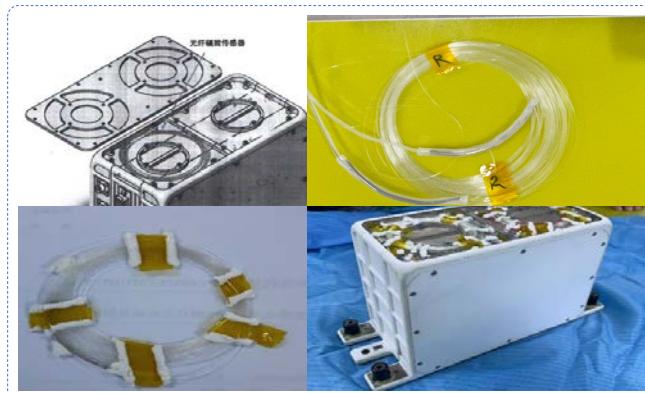


图 4-21 光纤辐照总剂量传感器



图 4-22 光纤试验单元

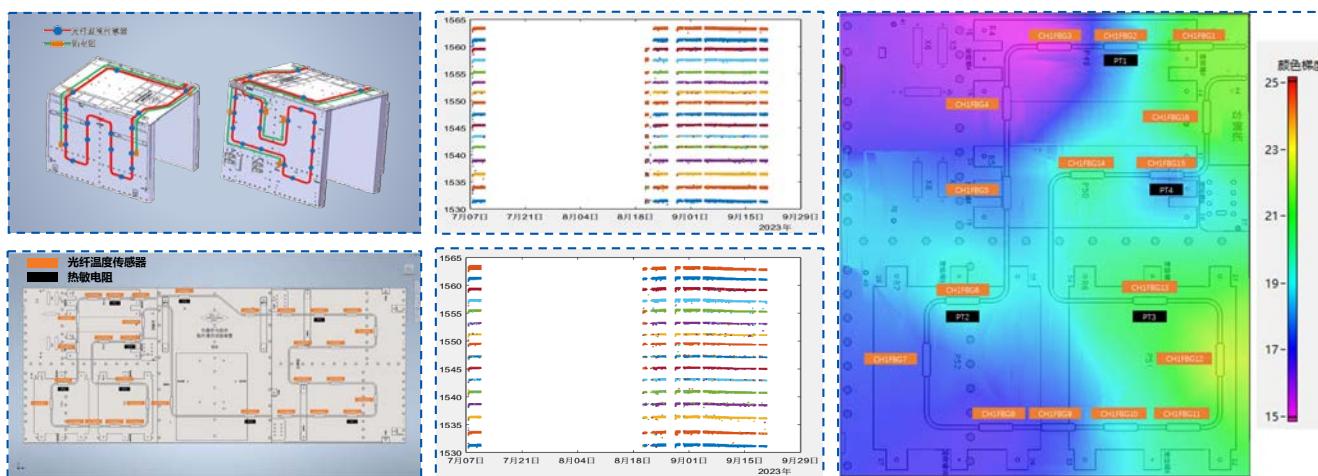


图 4-23 耐辐照光纤光栅温度传感器试验数据

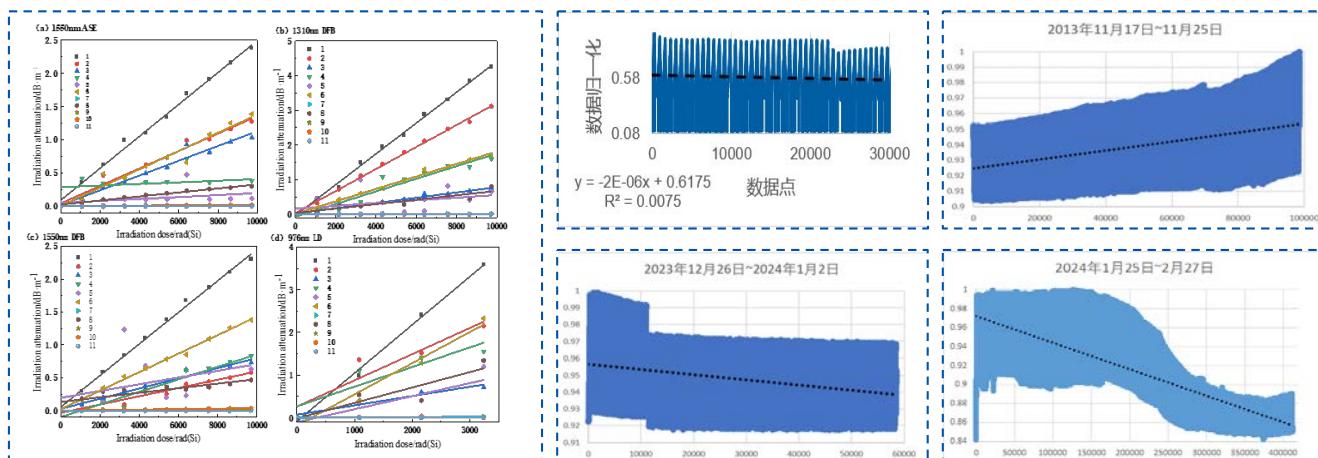


图 4-24 光纤辐照总剂量传感器试验数据

**代表专利**

- [1] 辛璟焘, 董明利, 徐春锋, 等. 基于 CCD 像素点光强差分的 FBG 振动解调方法及其测试系统. 发明专利. 专利号: CN118687675B. 授权日期: 2024 年 10 月 25 日.
- [2] 董明利, 辛璟焘, 庄炜, 等. 一种采用双四芯 FBG 的三轴振动传感器. 发明专利. 专利号: CN117191179B. 授权日期: 2024 年 3 月 15 日.
- [3] 祝连庆, 王帅, 庄炜, 等. 卫星在轨视轴指向变化高精度测量的组合夹角测量方法. 发明专利. 专利号: CN115060227B. 授权日期: 2023 年 5 月 12 日.

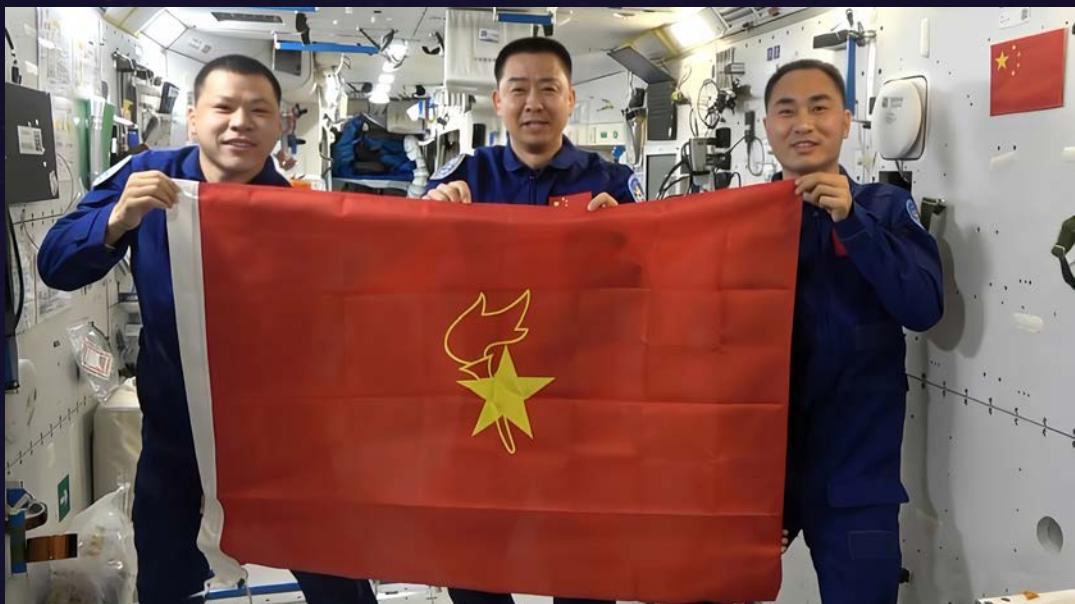
**主要完成团队**

北京信息科技大学祝连庆教授团队, 中国空间技术研究院供应链中心团队。



## 科普文化

- |                          |    |
|--------------------------|----|
| ① 神舟十九号乘组在轨录制中国航天日祝福视频   | 84 |
| ② 神舟二十号乘组太空送祝福并在轨展示少先队队旗 | 85 |
| ③ 航天科普搭建青少年交流桥梁          | 86 |
| ④ 红星照耀中国主题活动             | 87 |



空间站作为国家太空实验室和太空科普教育基地，依托独特在轨环境，为公众特别是青少年提供鲜活科普资源。

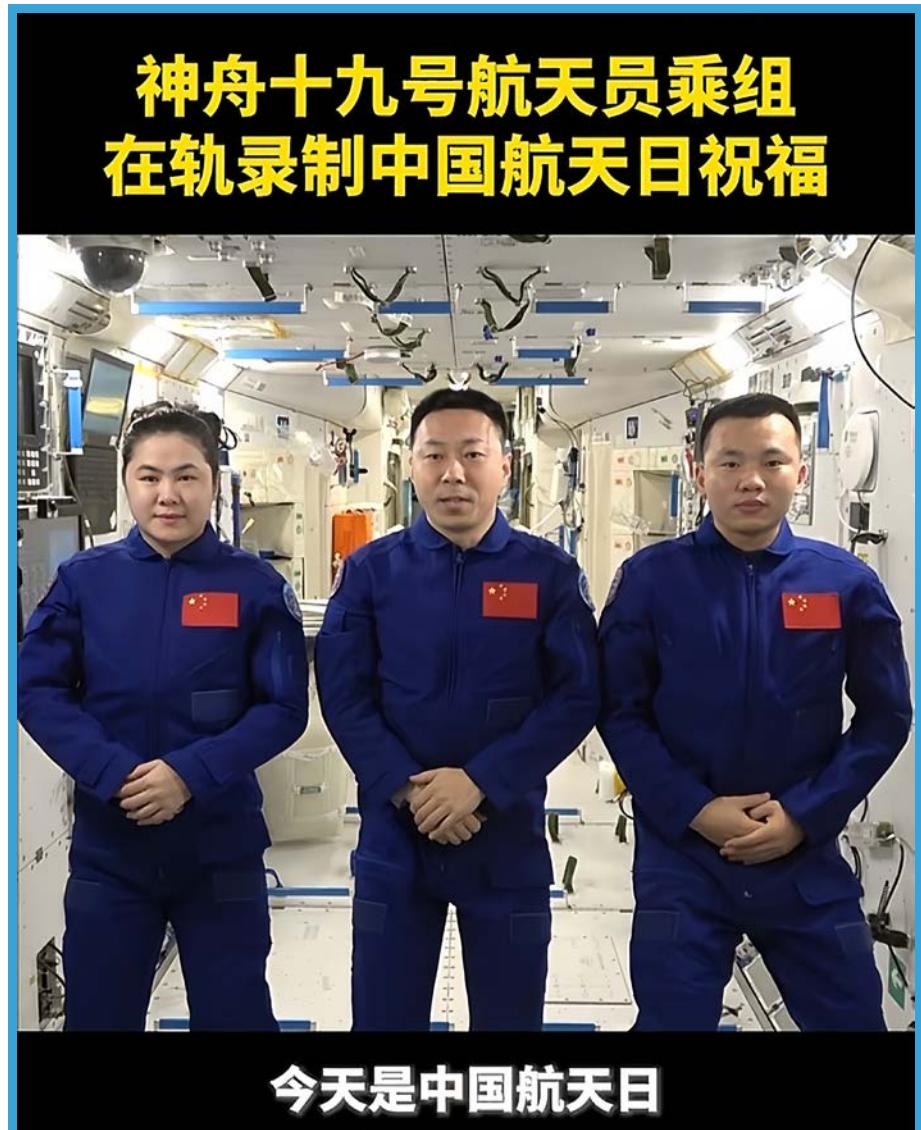
2025年，中国载人航天工程办公室围绕中国航天日、少年儿童主题教育及“红星照耀中国”等活动，推出系列空间站主题科普内容与天地联动融媒体传播，持续提升空间站科普文化影响力。

## 神舟十九号乘组在轨录制中国航天日祝福视频

2025年4月24日，第十个“中国航天日”到来之际，中国载人航天工程办公室发布神舟十九号航天员乘组在中国空间站录制的“中国航天日”主题祝福视频，通过中央广播电视台总台及多家主流新媒体平台向社会各界集中推送。

视频中，正在执行在轨驻留任务的“龙马乘组”航天员蔡旭哲、宋令东、王浩泽，以空间站为“太空课堂”，回顾了从1970年“东方红一号”发射到中国空间站全面建成的光辉历程，深情阐释“两弹一星”精神和载人航天精神所蕴含的自立自强、敢于斗争、勇于创新的时代价值，礼赞一代代航天人“干惊天动地事、做隐姓埋名人”的无私奉献。三位航天员从400公里高空向祖国和全国人民送上节日祝福，向所有奋战在航天战线的科研工作者致敬，并发出“飞天圆梦、登月有我”的铿锵宣言，展望中华民族早日实现载人登月梦，引导广大青少年把个人理想融入航天强国、科技强国的伟大事业中。

祝福视频与当日神舟二十号载人飞船发射等重大任务报道同频共振，被各地“中国航天日”主场活动和系列科普活动广泛引用，在网络平台收获大量播放和转发，形成“天地共庆航天日”的传播热潮。活动充分彰显了新时代中国载人航天事业的自信与担当，激发社会公众尤其是青少年崇尚科学、追逐航天梦想、矢志投身科技报国的热情。



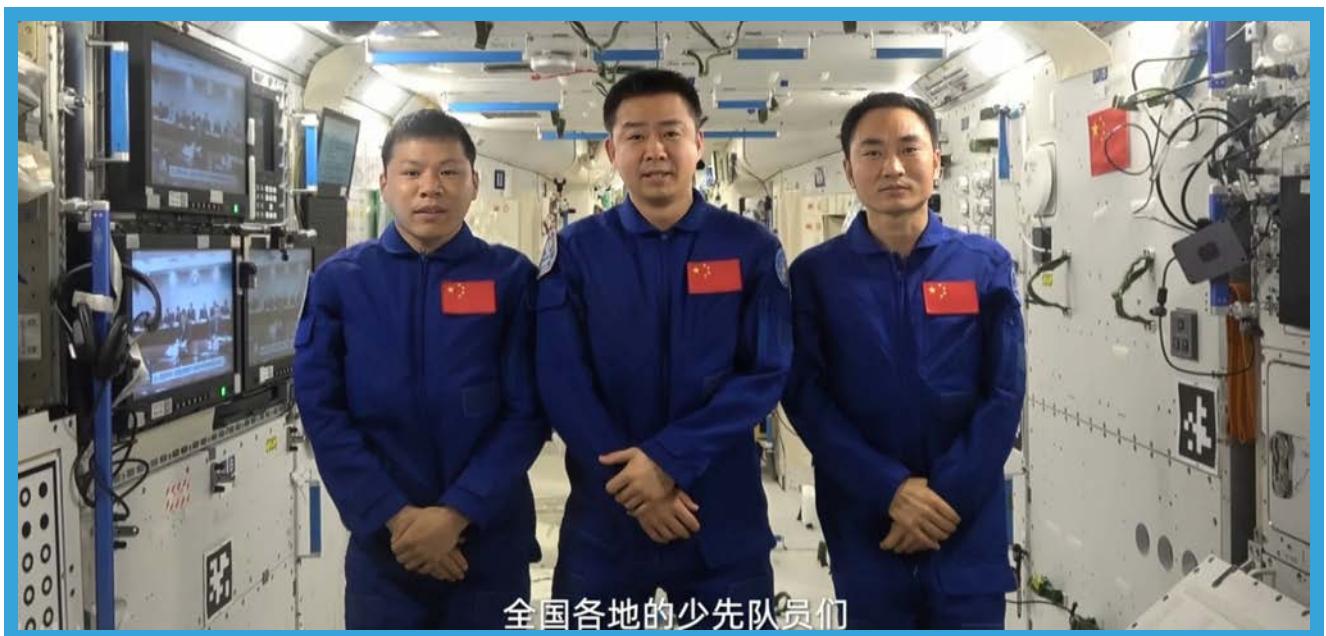
# 神舟二十号乘组太空送祝福 并在轨展示少先队队旗

2025年5月27日，在“六一”国际儿童节即将到来之际，中国少年先锋队第九次全国代表大会于北京开幕。中国载人航天工程办公室组织神舟二十号航天员乘组在中国空间站录制祝福视频，通过中央广播电视台总台及多家新媒体平台面向大会代表和全国少年儿童发布。正在“天宫”执行任务的航天员陈冬、陈中瑞、王杰向大会致贺，预祝大会圆满成功，并向全国少年儿童送上“六一”节日祝福。



视频以“从红领巾到航天员”为主线，三名航天员结合各自成长经历，讲述少年立志、刻苦学习、逐梦太空的故事，勉励少先队员听党话、跟党走，努力成长为对国家有用的人。作为特别设计的“太空礼物”，乘组在舱内庄重展示随神舟二十号一同升空的中国少年先锋队队旗，用“红领巾飞向太空、队旗飘扬天宫”的画面，将来自中国空间站的节日问候送达每一名少先队员，并与地面庆“六一”主题队日等活动实现天地联动。

活动把载人航天重大成果与少先队组织教育紧密结合，在新华社、人民日报、央视新闻等主流媒体平台和各地相关报道中广泛传播，在全国1.13亿名少先队员和广大青少年中引发热烈反响。太空送祝福、队旗上太空，形象生动地展示了新时代中国青少年的精神风貌和航天强国的壮阔前景，有力厚植了青少年爱党爱国爱社会主义的情感，激发他们崇尚科学、勇于创新、敢于逐梦星辰的热情，进一步引导广大少年儿童把个人成长进步同实现航天强国、科技强国的伟大事业紧密相连。



## 航天科普搭建青少年交流桥梁

2025年6月6日,由中国载人航天工程办公室、中国驻匈牙利大使馆与匈牙利科学院等联合主办的“童心筑梦九天 创新中匈未来——天宫课堂”活动在布达佩斯匈牙利科学院举行,通过视频内容将中国空间站的科学探索与匈牙利青少年的求知热情紧密联结,成为中匈科技、人文与教育交流的一次生动实践。

活动围绕“视频呈现+互动问答+科学演示”展开:现场播放空间站科普视频及航天员寄语视频,在轨航天员以预先录制方式回应匈牙利学生提出的科学问题,内容涵盖在轨工作生活、微重力现象与实验等;同时穿插微重力趣味实验展示,并设置专家解读与交流环节,提升科普的互动性与可理解度。

此次活动以航天科普为纽带,增进匈牙利青少年和社会公众对中国载人航天与空间站成就的了解,激发探索未知、勇于创新的科学热情,营造崇尚科学、追梦奋进的积极氛围,也为深化中匈科技、人文与教育交流注入新动力。



## 红星照耀中国主题活动

2025年10月18日，由中央网信办、中央党史和文献研究院、新华社、陕西省委网信委联合主办的“红星照耀中国从伟大胜利走向伟大复兴”网络主题宣传活动在革命圣地延安启动。活动以弘扬延安精神、赓续红色血脉为主线，从纪念中国人民抗日战争暨世界反法西斯战争胜利80周年的历史节点出发，面向全国网民开展线上线下联动的主题宣传教育。

活动围绕“胜利之声”“宝塔丰碑”“壮美延安”等篇章，通过故事化叙事、互动式表达、可视化呈现和沉浸式演绎等形式，邀请老一辈革命者代表、专家学者、文艺工作者和基层干部群众走上舞台，讲述从延安窑洞灯火到新时代发展巨变的生动故事，现场合唱《东方红》《保卫黄河》《团结就是力量》等经典曲目，让历史记忆与当代实践同频共振。其间，现场还发布“延安苹果‘飞’上太空”的喜讯，正在中国空间站执行任务的神舟二十号航天员乘组从400公里高空发来视频祝福，在“红星照耀中国”的主题之下，把黄土高原与浩瀚宇宙串联起来，形成天地呼应的独特亮点。

这一主题活动以网络为主要阵地，在央视新闻、新华社及多家重点新闻网站和商业平台同步推出系列融媒体产品，形成全网联动传播效应。活动把延安精神、伟大抗战精神与新时代中国载人航天成就及革命老区高质量发展实践有机结合，生动展示中国共产党带领人民从“伟大胜利”迈向“伟大复兴”的壮阔进程，进一步厚植社会各界特别是青少年心中的家国情怀和历史责任感，汇聚起在新征程上团结奋斗的强大精神力量。



## 未来展望

中国空间站是我国当前覆盖空间科学学科领域最全、在轨支持能力最强的国家太空实验室，它凭借有人参与和天地往返运输的强大优势，已成为我国规模最大、功能最全的综合性近地空间研究平台。中国载人航天工程空间应用任务各领域通过统筹组织国内一流科研力量，构建起协同创新、集智攻关的高效能组织体系，全面推动了空间站科学与应用任务的规划与实施，有力支撑了中国空间站成为探索浩瀚宇宙、服务国家战略需求、推动科技自立自强的重要载体。

中国空间站计划在轨稳定运行十年以上，这不仅为我国开展高水平空间科学研究与应用带来了前所未有的机遇，也是推动我国实现2035年建成科技强国目标的重要创新引擎。围绕“四个面向”，中国空间站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，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。

在空间生命科学与人体研究领域，将持续深化空间生物物理、空间生理病理及繁育、空间生物技术及转化、空间生态生物学应用基础及空间生命科学前沿探索方向研究，重点部署空间哺乳动物生命孕育、空间微生理系统等方向，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，系统布局建设国际领先的类器官（器官芯片）、太空医学细胞图谱特色研究，阐释人在太空的适应机制，发展先进的航天医学应用技术，深化人类对自身的认识，在再生与衰老、代谢异常调节、脑功能维护与提高、人的能力维持和增强、肿瘤及退行性变疾病的药物筛选和组穴干预等应用方面获得突破，促进对天地相通疾病问题的机制认识和相关诊疗技术发展，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，促进解决高效低碳燃烧、动力系统性能提升等关键问题，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。持续

发展空间高精度原子钟与时频传递技术，并应用于基础物理理论检验、大地测量及导航授时等领域。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。

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。高能宇宙辐射探测设施 (HERD)、伽马暴偏振探测仪 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。银河系热重子探测 (DIXE) 等致力于攻克银河系热重子起源与弥漫辐射探测等重要前沿问题，推动对银河系生态系统的深入认知。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。

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、关键技术验证试验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。在空间精密测量、机器人与自主系统、在轨制造与建造、空间能源与推进、受控生态生保系统以及航天器共性新技术等方面突破一系列关键技术瓶颈，为攻克关键“卡脖子”问题提供核心支撑，助力航天科技赋能重大战略任务和国民经济发展，彰显我国在空间科技创新领域战略引领作用。

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

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。面向建成科技强国“五个强大”基本要素，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



中国航天科技集团  
有限公司



北京跟踪与通信技术  
研究所