

微重力科学实验卫星 ——“实践十号”*



康琦 胡文瑞**

中国科学院力学研究所 北京 100190

摘要 北京时间2016年4月6日1时38分04秒，酒泉卫星发射中心，“长征”二号丁运载火箭成功发射，在559秒后将中国科学卫星系列第二颗星——“实践十号”返回式科学实验卫星送入高度约250 km的圆轨道，卫星发射取得圆满成功。“实践十号”卫星在太空运行15天，装载着19项科学设施，共28项实验。实验内容涉及微重力流体物理、微重力燃烧、空间材料科学、空间辐射生物效应、重力生物学效应和空间生物技术6大方向。卫星的返回舱装载着全部9项生物学设备以及空间材料科学多功能炉和流体物理中的输运系数测量装置；而留轨舱中装载着其他8项微重力科学设施。

关键词 科学卫星，“实践十号”，微重力科学，空间生命科学，返回式卫星

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2016.05.011

“实践十号”（SJ-10）是专门用于“微重力科学和空间生命科学”空间实验的返回式科学实验卫星。微重力科学主要研究微重力（低重力）环境下物质运动的规律及重力变化对运动规律的影响。空间生命科学研究地球生物在空间环境中的生物学规律，以及生命在宇宙中的起源、进化和分布。从人类将第一个航天器以及第一位宇航员送入太空开始，微重力科学和空间生命科学就应运而生。当今，国际空间站（ISS）依然是国际空间活动的主要热点之一，它是一个由多个国家和组织联合实施的有人长期驻留、操作的大型空间实验室，微重力科学、空间生命科学及航天医学等是其主要研究内容。2013年末，美国航空航天局（NASA）评选出国际空间站十大科学成就，其中2项属于微重力科学研究、3项属于生命科学研究。俄罗斯也与欧空局（ESA）合作，用其专门的Foton-、Bio-系列返回式卫星共同开展微重力科学和生命科学研究。此外，探空火箭、抛物线失重飞机以及地面短时微重力落塔（落井）设施也是各航天大国进行微重力科学研究的常规手段。前期，我国微重力科学和空

*资助项目：中科院空间科学战略性先导科技专项（XDA04020400、XDA04020202）

**通讯作者

修改稿收到日期：2016年4月23日

间生命科学的空间实验研究主要通过各种搭载途径开展，在返回式卫星、“神舟”系列飞船等航天器上都曾开展过相关研究，但搭载机会及其可利用的航天器资源依然十分有限。

我国 SJ-10 卫星工程于 2012 年 12 月 31 日正式启动。工程利用 SJ-10 返回式卫星提供的长时间微重力环境及空间辐射条件，通过空间实验遥科学技术手段和样品回收分析方法，围绕微重力科学与空间生命科学研究的热点科学问题，特别是针对自我模型的提出和检验、航天器技术及空间环境的利用、未来空间重大应用及理论突破，开展多项物质运动规律和生命活动规律的科学与技术实验研究。揭示在地面上因重力存在而被掩盖的物质运动规律和生命活动规律，认识在地面上无法模拟的空间复杂辐射环境对生物体的作用机理。

SJ-10 卫星共有 28 项微重力科学和空间生命科学实验，整合为 19 项载荷任务。涉及领域包括：微重力流体物理、微重力燃烧、空间材料科学、空间辐射生物学、重力生物效应和空间技术 6 个学科方向。2016 年 4 月 6 日 1 时 38 分 04 秒，酒泉卫星发射中心，长征二号丁运载火箭成功发射，在 559 秒后将中国科学卫星系列第二颗星——SJ-10 返回式科学实验卫星送入高度约 250 km 的近圆轨道，卫星发射取得圆满成功。卫星入轨后，各项载荷有序运转，共在太空开展 21 天科学实验。回收舱在轨工作 12 天后返回内蒙古四子王旗落区，载荷及生物样品进行现场拆解后携带返回实验室进行后期处理。留轨舱原定继续留轨工作 3—5 日，完成后续及拓展实验，实际继续留轨工作 8 日。

1 微重力科学研究

SJ-10 搭载的微重力科学实验研究抓住国际微重力科学领域发展的前沿——微重力流体物理、微重力燃烧科学、空间材料科学，立足于必须在空间这一长微重力环境下才有可能认识清楚的重要物理学过程，拓展人类对微重力极端环境下物质运动规律的认识：对流、自组织

和相变等各种过程，传热、传质规律；微重力下材料着火、燃烧规律、煤燃烧机理；我国特色的新材料样品在微重力下的生长和凝固过程。结果数据将有利于改善、优化地面和空间工程流体和热能机械、材料加工过程和工艺，获得在地面重力场中难以生长的高品质材料，为我国载人航天器安全及能源、减排等国家重大需求提供科学依据和基础数据。

1.1 微重力流体物理

1.1.1 蒸发与流体界面效应空间实验研究项目

蒸发相变和流体界面流动是流体物理的基本现象之一，涉及天基和地基热机械和生保控制系统等相关的工程应用与技术开发。本项目利用空间长时间微重力环境研究蒸发相变界面的热质传输特性，在轨观测液滴蒸发过程，揭示蒸发效应与表面张力驱动对流的相互作用机制，建立界面流体动力学与传热理论模型。以期获得宝贵的空间环境科学实验数据，发展流体复杂界面动力学与相变传热理论，为载人航天等航天工程中的空间热流体设备的设计开发提供理论支撑，获得微重力环境中相变传热基本现象和特殊规律的研究结果。

1.1.2 颗粒流体气液相分离空间实验研究项目

颗粒物质团簇形成机制是包括星际尘埃行为及深空探测等在内的微重力科学研究的重要问题，微重力环境是实验观察颗粒气体形成及研究其本征行为的必要条件。本项目利用卫星较长时间的稳定微重力环境，系统地研究颗粒物质团簇形成条件、弛豫冷却过程，建立完善的理论模型，并建立可能的空间颗粒输运、存储新方法。此次实验为国际首次对颗粒团簇行为（包括麦克斯韦妖现象）进行系统空间实验，期望获得对颗粒聚集行为的系统观察，得以利用颗粒物质内禀特性，建立空间储存、运输和操作的新方法。

1.1.3 微重力沸腾过程中的气泡动力学特征研究项目

利用空间微重力环境增大沸腾现象中气泡生长过程的时间和空间尺度，认识生长气泡周围细观运动与加热器三维瞬态温度场演化特征，揭示气泡热动力学与局

部热量传输间的耦合作用及其对传热性能的影响机制，理解沸腾传热内在机理，服务航天事业与地面应用。微重力条件下，重力作用被极大削弱，气泡脱离加热表面的驱动力减弱，会增加气泡热动力过程的时间和空间尺度，凸显液-气-固三相界面附近细观流动与传热结构特征，从而方便对过程细观机理的深入研究，有利于认识生长气泡周围细观流动、气泡底部干斑与微液层演化以及加热器内部三维瞬态温度场演化等过程特征。利用SJ-10提供的长期、稳定的空间微重力环境开展单气泡池沸腾实验研究，其结果将加深对沸腾传热机理的认识，促进学科发展。

1.1.4 热毛细对流表面波空间实验研究项目

热毛细对流是空间微重力环境中自然对流的主要形式，其对流模式及不稳定性表现的极为复杂。借鉴提拉法晶体生长方法，本项目采用环形液池实验模型研究微重力环境中热毛细对流的表面波问题，对拓展流体力学机理、促进空间（热）流体管理以及空间、地面晶体优质生长都有重要意义和实用价值。地面环境由于浮力的作用，使流体界面问题研究受到极大的局限，特别是重力使流体体积效应研究完全不可能。本项目首次提出环形液池体系对流失稳可能极大地受到液面形貌及液体体积比的影响，采用空间注液控制方法，进行系列体积比科学实验。

1.1.5 胶体有序排列及新型材料研究项目

流体在重力作用下会出现包括浮力对流、静压力不均匀分布和沉淀等物理现象，这些现象在微重力条件下几乎消失。作为一种公认的理想模型系统，微重力条件下，胶体系统中的胶体球没有重力沉降作用，可提供准确的局域结构信息。浮力对流受到较大抑制，没有流体静压力，不产生沉降作用，这为进行界面上的自组织原位观察提供了有利条件。实验结果将是首次观察到空间胶体粒子自组装动力学过程，并获得粒子排列过程，研究微重力条件下的自组装机制；并将首次验证纯熵驱动的相变机制。

1.1.6 微重力条件下石油组分热扩散特性的研究项目

原油索雷特系数（Soret Coefficients in Crude Oil, SCCO）项目是一个已持续多年的国际合作项目，已有加拿大、欧洲、俄罗斯等多个国家或地区参与，曾在俄罗斯的Foton M2和Foton M3返回式卫星上进行了多次空间微重力实验。本次中欧合作项目“微重力条件下石油组分热扩散特性的研究和Soret系数的测量”是国际上一系列的SCCO研究项目之一，是以欧空局为主，利用中国的返回式卫星，搭载欧方和中方共同研制的仪器设备，完成石油组分热扩散系数的测量。通过本项目的研究，将有望建立多组分与两组分热扩散过程联系的理论和物理模型，还将获得不同组分的Soret系数的精确数据，从而可能帮助准确预测油田中石油组分分布和油气界面位置，指导石油的开采并降低开采成本。

1.2 微重力燃烧

1.2.1 导线绝缘层着火早期烟的析出和烟气分布研究项目

安全防火是发展载人航天必须妥善解决的最重要问题之一，典型电子电气部件，是火灾隐患的主要源头，本项目为发展微重力下的着火监测和早期报警技术提供基础数据和技术支撑。本项目首次在长时间的微重力环境下获得导线在自身电流过载下的着火突变规律；首次在长时间的微重力环境下获得导线在自身电流过载下引起的绝缘层烟气析出及其在受限空间中的分布规律；首次获得长时间微重力环境下过载电流大小、绝缘层厚度等因素对导线着火先期征兆的影响规律。

1.2.2 微重力下煤燃烧及其污染物生成特性研究项目

本项目的意义在于揭示煤在微重力条件下燃烧的基本现象，提高人们对煤燃烧基本特性和机理的认识，为修正现有模型和发展新模型提供更为准确的实验数据，促进我国煤炭的清洁、高效和安全利用。地面微重力实验装置时间过短，不足以观察煤粒的全燃烧过程和煤粉在燃烧室内达到均匀分布，本项目将获得在传热传质各向同性条件下煤粒及煤粉颗粒群着火燃烧全过程的基本现象和规律及低温火焰特性，丰富燃烧学理论；获得在

微重力下我国典型煤种煤粉和煤粒燃烧等重要基础参数；结合地面数据揭示浮力对煤燃烧作用的大小，为地面煤的高效低污染燃烧发展更为准确的数学模型。

1.2.3 典型非金属材料在微重力环境中的着火及燃烧特性

研究项目

空间实验将获得微重力环境中热厚非金属材料着火和火焰传播特性的可靠数据，促进对热厚材料在微重力条件下燃烧过程和火焰特性的深入理解，进而为载人航天器材料防火性能评价的实际应用提供科学依据。热厚材料燃烧实验需要的微重力时间较长，卫星等航天器为其提供了理想的实验平台。本项目突出载人航天器防火安全的应用方向和固体材料燃烧机理的科学需求，通过包括空间实验在内的系统研究，将丰富和完善固体材料燃烧理论，并取得航天器火灾预防的关键环节——材料防火性能评价的技术原理突破，直接服务于我国载人航天的工程实践。

1.3 空间材料科学

空间材料科学项目主要开展熔体材料空间生长实验。在地面重力条件下，与流体相关的材料制备过程中，重力引起的对流、沉降和器壁效应等将不可避免地影响材料质量。通过微重力环境抑制溶质对流，可获得地面重力场中难以生长出的高质量材料，同时可探明地面重力效应掩盖的影响材料质量和性能的一些次级效应。希望通过在多功能炉中的空间材料实验，攻克在地面条件下材料制备中无法解决的难题，获得在地面无法得到的高性能优质材料，开发新的材料制备工艺。另一方面，通过天地对比研究，揭示材料制备过程中的微观机理和组分、结构与性能之间的内在关联，发现新的科学现象，丰富和发展材料科学理论，指导地面的材料制备和生产工艺。

2 空间生命科学研究

紧紧抓住国际空间生命科学领域发展的前沿——空间辐射生物效应、重力生物效应、空间生物技术，立足

于必须在空间这一特定环境下才有可能认识清楚的重要生物学过程，认识上述3个空间生命科学领域有限目标下的基本规律：（1）建立微重力环境影响植物、动物、微生物等生命体生命活动的理论基础；（2）揭示微重力及空间辐射环境影响重要生物学过程的分子机制；（3）将理论应用于动物早期胚胎发育、干细胞生长/分化、组织的三维构建，发展空间生命科学领域相关的关键技术和硬件装置，为我国载人航天工程和空间站应用等重大需求提供科学依据和基础数据、技术。

2.1 空间辐射生物效应

2.1.1 空间辐射诱变的分子生物学机制研究项目

为了深入分析空间辐射引起的生物学效应，需要对空间粒子进行更加精细的测量，得出精细的粒子谱分布、不同位置粒子的通量分布，以及不同粒子种类对辐射损伤和流量的贡献，而空间环境提供极低剂量、可利用的高能粒子辐射环境。因此，本项目将根据预先测算，监测模式生物接受空间辐射粒子的品质和其诱发的系统生物学变化特征，挖掘空间辐射诱发生物体遗传变异的诱因和生物损伤的分子机制，挖掘对空间辐射环境敏感的生物分子和空间环境引起生物学效应的诱因，探索新的空间辐射生物计量评估技术，为载人航天中的深空探测任务和舱外暴露试验打下技术基础。

2.1.2 空间辐射对基因组的作用和遗传效应研究项目

太空辐射的风险和防护研究迫在眉睫，但我国在此方面基础还很薄弱。空间辐射与地面常规辐射有很大区别，地面模拟空间辐射也仅能模拟其某一方面的特点，无法模拟空间辐射的综合效应，且目前地面也无法真正有效模拟出太空中微重力的环境。因此，利用SJ-10返回式科学实验卫星，在真正的空间环境中进行该项目研究是十分必要的。利用项目组提出的野生型和辐射敏感的小鼠细胞和果蝇进行上述研究国内外尚无相关报道，研究将获得原创性成果，为我国进行太空辐射的风险和防护研究提供极有价值的基础数据和检测手段。

2.1.3 空间环境对家蚕胚胎发育的影响和变异机理研究项目

家蚕产业是我国农业领域的支柱性产业之一，新品种的推广应用和新型功能蛋白的开发都将极大地推动该产业的发展。空间技术应用于家蚕不仅能够认识动物对空间环境的适应性，还有望获得新型的家蚕突变品系而有利于家蚕新品种的开发，有重要的应用与经济价值。本项目利用宇宙空间这个特殊的环境，以家蚕作为模式生物，系统研究空间条件下家蚕基因表达的特征，并将这些研究结果和方法推广到其他的生物研究之中，成为空间基础生物学研究的基础，并为新品种的开发和相关机理的验证提供理论指导。

2.2 重力生物技术

2.2.1 微重力植物生物学效应及其微重力信号转导研究项目

空间飞行实验显示，失重会影响植物的生长发育。从植物开始进入失重状态到产生生理和结构方面的微重力效应，需要经历失重刺激信号的转导、传输、代谢调控等中间过程，这些过程组成了一个复杂的分子调控网络。这项空间实验将进一步揭示介导微重力引发植物生物学效应的机理，获得微重力对植物细胞壁代谢影响方面的新认识，深入理解植物对微重力这一特殊环境的适应机制。这些发现将有助于构建受控生命支持系统，为利用植物开拓空间提供理论基础。

2.2.2 空间微重力条件下光周期诱导高等植物开花的分子机理研究项目

在SJ-10实验平台提供的微重力实验条件下，应用典型的长日与短日植物光周期诱导开花特点、利用热激诱导启动子在轨诱导开花基因表达，来研究空间微重力条件下光周期诱导开花的作用机理，为阐明重力在光周期诱导植物开花中的作用提供新证据，为建立载人航天受控生命生态支持系统的品种培育、空间栽培提供理论与技术基础。研究成果应用主要有3个方面：（1）为从全新角度认识重力在高等植物开花调控中的作用机制提供重要依据；（2）在国际上首次使用在轨微重力条件下热激启动基因表达及实时荧光图像观察的方法与技术，所构建的热激启

动系统与实时荧光图像系统，将为今后研究植物发育相关基因的在轨实时表达提供重要的实验系统与分子生物学工具；（3）植物从营养生长向生殖生长转变过程的调控直接关系到作物的产量和品质、甚至物种的延续。本次实验获得的空间实时数据将应用于载人航天受控生命生态支持系统的设计，并为空间植物培养提供理论依据。

2.2.3 微重力条件下细胞间相互作用的物质运输规律研究项目

微重力条件下，物质交换环境的改变所引起的间接效应与细胞响应重力变化的直接效应共同存在，这将使空间细胞生物学实验结果难以区分“空间环境（综合）效应”和单纯的“微重力效应”。本项目基于生物力学视角，力图在技术上量化微重力条件下细胞培养的物质运输条件，在科学上分析重力变化对动物细胞的直接作用与间接作用机制。项目将获得新科学数据——微重力条件下动物细胞生物学行为的物质运输规律；新实验技术——新型空间动物细胞生物力学实验装置。验证新型空间生物力学实验装置，获得动物细胞物质运输规律的空间实验数据，分析重力变化对细胞的直接作用与间接作用。

2.3 空间生物技术

2.3.1 微重力条件下造血与神经干细胞三维培养与组织构建研究项目

干细胞研究是继药物治疗、手术治疗之后的又一场医疗革命，再生医学已是近年来世界各国重点发展的高科技领域之一。造血干细胞和神经干细胞是组织损伤修复和体细胞发育分化的重要种子细胞，是再生医学治疗疾病的重要手段。如何扩增和定向诱导造血与神经干细胞一直是再生医学应用干细胞的关键技术问题。项目前期已经利用自制的空间三维生物培养反应器模拟地微重力效应开展了多次匹配实验，证明微重力条件影响干细胞的增殖能力与分化方向。搭载于SJ-10返回式科学卫星上的进一步研究，将在空间微重力条件下，为人类探究造血与神经干细胞增殖与分化的机理提供更准确、更科学的线索。

2.3.2 微重力条件下骨髓间充质干细胞的骨细胞定向分化

效应及其分子机制研究项目

本项目希望建立微重力环境下干细胞培养、定向分化的技术平台，阐明微重力影响人骨髓间充质干细胞定向分化骨细胞的生物学效应及其分子机制。分析 SJ-10 卫星返回舱携带的实验结果，将获取空间骨细胞定向诱导分化效应及其关键细胞信号分子相关结果；为人类将来在微重力环境下进行骨质变化的预防、治疗和相关药物开发提供理论依据。

2.3.3 微重力条件下哺乳动物早期胚胎发育研究项目

空间环境下哺乳动物与人类能否繁衍后代？空间微重力环境是否影响胚胎的正常生长和发育？相关问题一直是待解之谜。迄今为止，国内外尚无在空间微重力实验条件下进行哺乳动物早期胚胎体外发育研究成功的报道。本项目在世界上首次获得太空条件下小鼠早期胚胎发育结果；阐述空间微重力条件影响哺乳动物早期胚胎发育的机制，为保障人类太空活动中生殖发育健康提供科学依据。

3 结语

SJ-10 卫星工程利用我国成熟的返回式卫星技术，紧密围绕有关能源、农业和健康等领域国家科技战略目标，结合航天器防火等关键技术需求，进行重大科学问题研究，并为有关卫星型号任务进行前期试验。SJ-10 卫星的科学应用系统联合了中科院 11 个研究所及国内 6 所高校共同参与。除国内合作外，通过与 ESA 等国际机构开展合作研究，搭建了中国和国际空间强国紧密合作的互通平台，共同孕育空间微重力科学和空间生命科学领域的新发展、新突破。SJ-10 卫星每一项科学实验都经过严格遴选、反复论证，具有创新性、针对性和很好的科学前景，预期将获取具有国际先进水平的、具有自主知识产权的创新性重大科技成果，促进地面生物工程、新材料等高技术发展和生命科学等基础研究取得突破，对于推动我国空间微重力科学和空间生命科学发展具有重要意义。

（相关图片请见封二）

Microgravity Experimental Satellite — SJ-10

Kang Qi Hu Wenrui

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The Long March-2D carrier rocket carrying the “SJ-10”, the 24th recoverable satellite of China, blasts off from the launch pad at the Jiuquan Satellite Launch Center at 1:38:04” am of April 6, 2016. It took 559 seconds to send this satellite, the second of the series, into the circular orbit of approximately 250 km high. The SJ-10 program provides a mission of space microgravity experiments including both fields of microgravity science and space life science. It is designated to promote the scientific research in the space microgravity environment by operating the satellite at lower earth orbit for 2 weeks. There are 19 scientific facilities on board the satellite, of which 9 biological facilities, multiple work position furnace of space material science, and transport coefficient measuring device of fluid physics in re-entry module, and 8 microgravity facilities in orbit capsule. Totally 28 experiments include 18 ones in the field of microgravity science (6 in microgravity fluid physics, 4 in microgravity combustion, and 8 in space materials science) and 10 in the field of space life science (3 in radiation biology, 3 in gravitational biology, and 4 in space biotechnology). These experiments were selected from more than 200 applications. Scientific purposes of these experiments are summarized as follows: to promote the basic research of fluid physics and biology experiments; to support the manned space flight for fire safety research; to improve the human health by biotechnology studies; and to develop the high-technology by experiments

of coal combustion, materials processing and biotechnology.

Keywords scientific satellite, SJ-10, microgravity science, space life science, recoverable satellite

康琦 中科院力学所研究员、博士生导师，“实践十号”返回式科学卫星工程科学应用系统总设计师。主要研究领域包括：微重力流体物理、实验力学。E-mail: kq@imech.ac.cn

Kang Qi Researcher of Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences (CAS), doctoral supervisor, Chief Designer of application system, SJ-10 satellite engineering. His major is experiment mechanics, including microgravity sciences and fluid physics.

E-mail: kq@imech.ac.cn

胡文瑞 男，流体物理学家。中科院院士，国际宇航科学院院士，中科院力学所研究员，“实践十号”返回式科学卫星工程首席科学家。主要研究领域包括：空间科学、微重力流体物理。E-mail: wrhu@imech.ac.cn

Hu Wenrui Male, Researcher of Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Academician of Chinese Academy of Sciences, Academician of International Academy of Astronautics, and Chief Scientist of SJ-10 satellite engineering. His major is fluid physics, including space science and microgravity fluid physics. E-mail: wrhu@imech.ac.cn