



《力学与实践》网络首发论文

题目： 上中国空间站“烧开水”，揭示沸腾现象中的重力作用机理
作者： 杜王芳，刘鹏，赵建福，李响，乔志宏，叶芳，郭航，蒋文静，李志刚
网络首发日期： 2022-06-22
引用格式： 杜王芳，刘鹏，赵建福，李响，乔志宏，叶芳，郭航，蒋文静，李志刚. 上中国空间站“烧开水”，揭示沸腾现象中的重力作用机理[J/OL]. 力学与实践. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2064.O3.20220622.0914.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

上中国空间站“烧开水”，揭示沸腾现象中的重力作用机理¹⁾

杜王芳^{*,+} 刘鹏^{*,+} 赵建福^{*,+,2)} 李响^{**} 乔志宏^{**} 叶芳⁺⁺ 郭航⁺⁺ 蒋文静^{*} 李志刚^{*}

^{*}(中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100190)

⁺(中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

^{**}(中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094)

⁺⁺(北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室及传热与能源利用北京市重点实验室, 北京 100124)

^{*}(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要：烧开水是一种常见的沸腾现象，平凡之中包含着深刻而复杂的科学奥秘，对沸腾传热规律的认识支撑了以蒸汽机为标志的第一次工业革命及后续诸多工业和工程应用。沸腾过程由于相变潜热的释放具有极大的热传递能力，特别有利于热控系统的轻量化设计，对航天相关技术的发展具有重要的应用价值。沸腾现象中气、液两相介质密度的巨大差异，导致在地面常重力环境中沸腾特征往往由重力主导。航天任务所遇到的不同重力环境，对沸腾过程中的重力效应及其变化规律的研究提出了迫切需求。变重力沸腾项目是中国空间站实验舱 I 首批科学实验任务之一，拟针对池沸腾传热与气泡热动力学行为的重力标度规律开展研究，即利用实验舱 I 变重力科学实验柜提供的长时间稳定的不同重力条件下，研究沸腾过程中的气泡热动力学行为及传热特性，揭示重力对沸腾现象的影响机理，构建重力标度规律，深化对沸腾传热规律的认识，支撑人类对太空奥秘的不断探索。

关键词：沸腾，重力效应，传热，气泡动力学，中国空间站

中图分类号： O359 **文献标志码：** A

Boiling Water Aboard the China Space Station to Reveal the Influence of Gravity in Boiling Phenomenon¹⁾

DU Wangfang^{*,+} LIU Peng^{*,+} ZHAO Jianfu^{*,+,2)} LI Xiang^{**} QIAO Zhihong^{**} YE Fang⁺⁺
GUO Hang⁺⁺ JIANG Wenjing^{*} LI Zhigang^{*}

^{*}(CAS Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

⁺(School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

^{**}(Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100094, China)

⁺⁺(MOE Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, and Beijing Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

^{*}(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

1) 中国载人空间站工程实验舱 I 科学实验项目 (项目编号: YYWT0601EXP18)。

2) 通讯作者: 赵建福, 博士, 研究员, 研究方向为微重力多相热流体动力学基础研究与空间应用技术研发。

E-mail: jfzhao@imech.ac.cn

引用格式: 杜王芳, 刘鹏, 赵建福等. 中国空间站上“煮开水”, 揭示沸腾现象中的重力作用机理. 力学与实践, 2022.

Du Wangfang, Liu Peng, ZHAO Jianfu, et al. Boiling water aboard the China Space Station to reveal the gravity influence in boiling phenomenon. *Mechanics in Engineering*, 2022.

Abstract: Boiling water in daily life is a common phenomenon of boiling, which contains profound and complex scientific mysteries in the ordinary. The understanding of boiling heat transfer has supported the first industrial revolution marked by steam engine and many subsequent industrial and engineering applications. Boiling process has great heat transfer capacity due to the release of latent heat of phase change, which is especially conducive to the lightweight design of thermal control system, and thus has important application potential for the development of related aerospace technology. The great difference between the density of gas and liquid phases in boiling phenomenon leads to the fact that the boiling characteristics are often dominated by gravity in the normal gravity environment on the ground. Due to the different gravity environments encountered in space missions, there is an increased demand for studying the gravity influence on boiling phenomenon. The project of vgBOILING, which is one of the first batch of scientific experimental tasks aboard the Experimental Module I of the Chinese Space Station (CSS), will study the scaling law of gravity on pool boiling heat transfer and bubble thermal dynamical behaviors. Using the long-term, stable variable gravity conditions provided by the Varying Gravity Rack (VGR) aboard the CSS Experimental Module I, the bubble thermal dynamical behaviors and related heat transfer performance of pool boiling in different gravity conditions will be studied experimentally, to reveal the influence and the underlying mechanism of gravity on boiling phenomenon, and then to construct the gravity scaling law of boiling process. The project will deepen the understanding of boiling heat transfer and support mankind's endless exploration of the mysteries of the universe.

Key words: boiling, gravity influence, heat transfer, bubble dynamics, the China Space Station (CSS)

2022年3月23日下午,在距离地面400 km的中国空间站天和核心舱上,神舟十三号飞船“感觉良好”乘组航天员翟志刚、王亚平和叶光富相互配合,成功讲授了“天宫课堂”第二课,吸引了海内外观众的广泛关注。在天地互动环节,来自西藏地面分课堂的同学想知道在空间站上能否把水烧开。想象一下,要是航天员能像在地面一样,工作之余烧一壶开水,冲几片翠芽,清茶一杯,巡天万里,岂不美哉?然而,航天员老师王亚平给出的却是否定的回答:空间站上饮用水可以直接喝,也可以通过特定的加热装置加热后再喝;但由于受失重的影响,目前在空间站上水是无法烧开的。

通常所说的开水是指煮沸后的水,烧开水是我们日常生活中最为常见的一种沸腾现象。在一个大气压下,水被加热到 100°C 后会发生气化,由液态的水转变为水蒸气,往往先在加热面上形成气泡。在地面常重力环境,气泡因为密度比水低得多,会受到浮力作用从加热面脱落并快速上浮;此外,热胀冷缩也会在加热的水中形成浮力驱动的自然对流。在对流和气泡运动共同作用下,水的整体温度快速升高,很快就能达到 100°C ,即“烧开了”。然而,在空间站内,物体处于失重环境,浮力作用被抑制,浮力驱动的自然对流以及气泡的脱落与运动都很难发生,气泡会黏附在加热面上,而远离加热面的水很难被加热到 100°C ,无法达到均匀烧开的状态(图1^[1])。

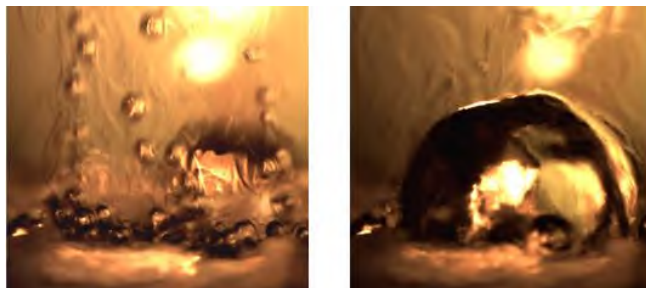


图1: 常重力(左)和微重力(右)环境中的沸腾现象
Figure 1: Boiling phenomenon in normal (left) and microgravity (right) environments

沸腾是一种常见的多相热流体动力学现象，伴随有大量气泡的生成和气液两相介质的流动，同时传递着大量的热。以蒸汽机为标志的第一次工业革命，即充分利用了沸腾现象，极大地解放了劳动力，促进了人类文明的快速发展。在现代工业过程中，随处可见的沸腾现象发挥着重要的作用，其高效传热性能对航天器（尤其是像空间站这样的大型航天器或者像嫦娥月球车和祝融火星车那样的深空探测器）热管理技术应用等也有巨大的潜在优势。

一般而言，当气、液两相介质存在较大的密度差异时，重力会导致显著的浮力作用。地面常重力环境中，往往是浮力主导着沸腾过程的特征。但是，航天器在其任务中会经历与地面常重力环境迥异且多样的重力环境，包括发射和变轨时的（过载）超重环境，火星和月球表面的部分重力环境，以及在轨自由飞行中的微重力环境。空间微重力环境作为一种极端环境，其中的浮力作用将被极大地抑制甚至完全消失，沸腾中的气泡动力学行为、气液两相流动与传热特性等将随之展现出与地面常重力环境中截然不同的特征和规律，制约了沸腾传热技术在航天领域的应用。因此，世界各航天大国和地区均高度重视对微重力沸腾现象的研究，探究沸腾传热对于重力环境变化的响应特征，以保障航天器相关热管理设备的安全高效运行。

微重力沸腾研究最早可追溯至二十世纪六十年代人类开始进行航天探索之时^[2]。国内相关研究起步较晚，实验研究更是在新世纪伊始才利用返回式卫星和北京落塔等得以开展^[3]。经过 70 余年艰难探索，一些基本的疑问得到解决，例如：微重力环境核态沸腾可以持续存在；微重力核态沸腾传热性能尽管有所恶化，但一般要高于现有模型预测结果；微重力沸腾临界热流将大大减小，但同样高于现有模型预测结果；等等。然而，受限于空间实验机会少、实验条件严苛、经费投入大、任务周期长等一系列困难，目前相关知识还远不能支撑航天应用的迫切需求。特别需要指出的是，不同的研究结果往往无法直接相互比较，哪怕像国际空间站（ISS）上开展的微加热器阵列池沸腾实验（MABE）^[4]和核态沸腾实验（NPBX）^[5]这两个项目，尽管使用的是同一个沸腾实验装置（BXF），实验工质与条件相同，只是加热器不同，结果却差异巨大，传热曲线不论是位置还是变化趋势都极不相同（图 2）。不同研究结果只能在自己的微重力与常重力数据间进行比较，呈现出明显的“0（无）和 1（有）”二元对比状态，不能将重力作为可独立调控的变量，难以揭示沸腾现象中重力的作用机制。Raj 等^[4]基于失重飞机进出失重状态时 3~5 s 短时瞬态变重力条件下的沸腾传热实验结果，构建了一个沸腾传热重力标度模型，并基于 ISS 长期稳定微重力实验数据进行了修订和验证。Feng 等^[6]和赵建福等^[7]分别采用基于格子-玻尔兹曼方法（LBM）的介观模型和基于 Level-set 方法的连续介质模型，数值模拟了不同重力下的池沸腾现象，比较和探讨了对 Raj 等^[4]重力标度模型的修订。杜王芳和赵建福^[8]详细讨论了沸腾传热标度规律的表达形式，辨析了不同重力标度指数的物理意义及其相互关系，明确指出了 Raj 等^[4]重力标度模型在基础假设方面存在的明显矛盾和在重力标度指数取值方面的混淆误用，特别强调了目前可直接比较的实验数据严重不足，是制约对沸腾传热中重力作用机制的认识的最大障碍。

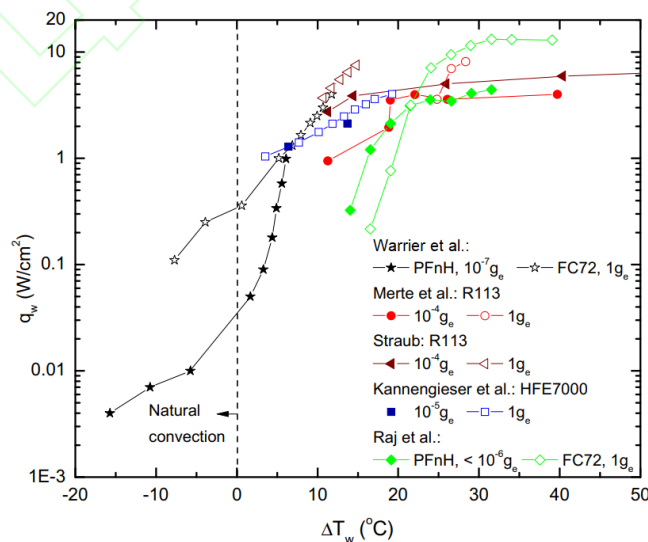


图 2：不同微重力沸腾实验结果间的显著差异

Figure 2: Obvious difference between the results obtained from different microgravity boiling experiments

有鉴于此，我们提出了“池沸腾传热与气泡热动力学行为的重力标度规律研究（Gravity Scaling Law of Pool Boiling Heat Transfer and Bubble Thermal Dynamic Behaviors）”项目，简称为“变重力沸腾”（vgBOILING，即 variable gravity boiling），拟利用中国空间站实验舱 I 变重力科学实验柜提供的长时间稳定的可变重力场环境，开展同一个加热器上不同重力条件下的池沸腾传热实验，以期深入理解和揭示重力对沸腾传热的作用机制（图 3）。



图 3: 变重力沸腾项目任务标识
Figure 3: Logo of the project vgBOILING

1 科学目标及预期成果

基于对微重力沸腾研究现状和发展趋势的认识，针对中国空间站实验舱 I 变重力科学实验柜相应技术条件和资源约束，变重力沸腾项目将研制变重力沸腾实验装置一套两件，由天舟货运飞船运送至空间站，借助航天员适量参与，在中国空间站实验舱 I 变重力科学实验柜上，开展从中国空间站背景微重力（离心机平台静止）到 $2g_e$ 超重力（这里， g_e 代表地面重力加速度）范围的不同重力条件下沸腾传热与气泡热动力学实验研究，结合数值模拟和地面对比实验等，揭示沸腾现象中的重力作用机制与重力标度规律，服务于我国航天事业发展，特别是载人月球探测和火星探测等，并推动学科进步，同时也为地面常重力环境相关应用提供理论指导。

项目拟定的主要研究内容包括：1) 不同重力条件下的常规池沸腾现象中的传热特征，重点研究不同重力条件下的池沸腾传热特性及其中的重力标度规律；2) 不同重力条件下的单气泡沸腾现象中气泡动力学与传热特征，重点研究重力以及固壁内瞬态导热与周期性蓄热特征及其对气泡生长过程与传热特性的影响，探讨气泡底部干斑与微液膜的演化特征；3) 不同重力条件下的双气泡沸腾现象中气泡动力学与传热特征，重点研究重力对气泡聚合现象的影响机制及气泡相互作用对沸腾传热的影响机理；4) 不同重力条件下多气泡沸腾现象中的气泡动力学与传热特征，重点研究临近核化点间相互作用机制以及加热表面核化点密度对沸腾传热的影响。预期科学成果及与近期国内外同类项目（包括美国 NASA 资助的 MABE^[4]和 NPBX^[5]、欧洲 ESA 资助的 RUBI^[9]和我国实践十号返回式卫星上开展的 SOBER-SJ10^[10]）的比较见表 1。表中括号内列出了相应空间实验平台（ISS：国际空间站；CSS：中国空间站；SJ-10：实践十号卫星）。失重飞机往往也被用来获得短时失重（ $\sim 10^{-2}g_e$ ）、月面或火星表面低重力甚至超重（ $\sim 1.8g_e$ ）等条件；不过，失重飞机因受大气环境和机械噪声等影响，往往具有与目标重力水平相当的残余重力波动，会对沸腾特征有一定影响^[4]。

表 1: vgBOILING 项目预期科学成果与近期国际同类项目的比较

项目名称 (预期) 成果	vgBOILING (CSS)	NPBX (ISS)	MABE (ISS)	RUBI (ISS)	SOBER-SJ10 (SJ-10)
微重力常规沸腾传热特性	√	√	√	√	√

低重力常规沸腾传热特性	✓	✓ (失重飞机)	✓ (失重飞机)	✓ (失重飞机)	
常重力常规沸腾传热特性	(地面、空间站)	✓ (地面)	✓ (地面)	✓ (地面)	✓ (地面)
超重力常规沸腾传热特性	✓		✓ (失重飞机)		
沸腾传热重力标度规律	✓		✓ (失重飞机)		
微重力单气泡热动力学行为	✓	✓		✓	✓
低重力单气泡热动力学行为	✓	✓ (失重飞机)		✓ (失重飞机)	
微重力有限气泡热动力学行为	✓	✓			
低重力有限气泡热动力学行为	✓	✓ (失重飞机)			

2 变重力沸腾实验装置与空间实验计划

变重力科学柜（Varying Gravity Rack, VGR）是中国空间站通用科学实验柜之一，安装在实验舱I内，具有两个相对安装、独立的离心机，通过离心机转盘旋转产生模拟重力加速度（图4）^[1]，可以为用户提供包括空间站背景微重力环境（离心机静止不转）及（0.01–2） g_e 范围内稳定可调的不同重力水平及其他实验支持条件与资源。

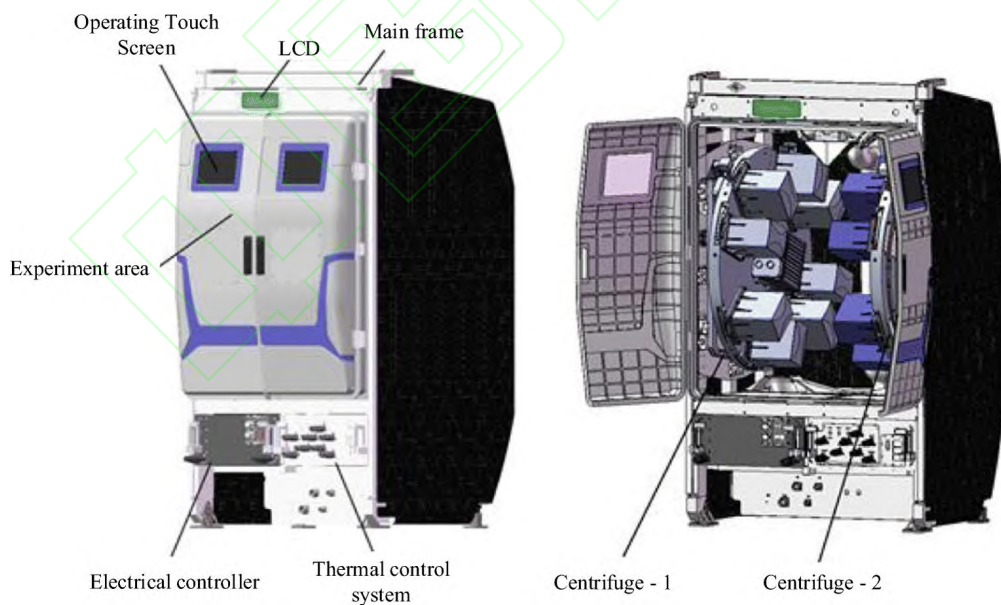


图 4：变重力科学实验柜
Figure 4: Varying Gravity Rack (VGR)

变重力沸腾实验装置包括一套两件设备（图 5），即变重力沸腾实验箱（E-Box）和变重力沸腾控制箱（C-Box），将由天舟货运飞船运送到空间站，并由航天员将其安装到实验舱 I 变重力科学实验柜的一个离心机转盘上（图 5）。两件设备间有电缆和气体管路相连，并通过离心机转子控制器和空间站数传系统实现天地互联。在空间站内航天员的辅助下，科学家可以在地面实验室完成空间实验任务。

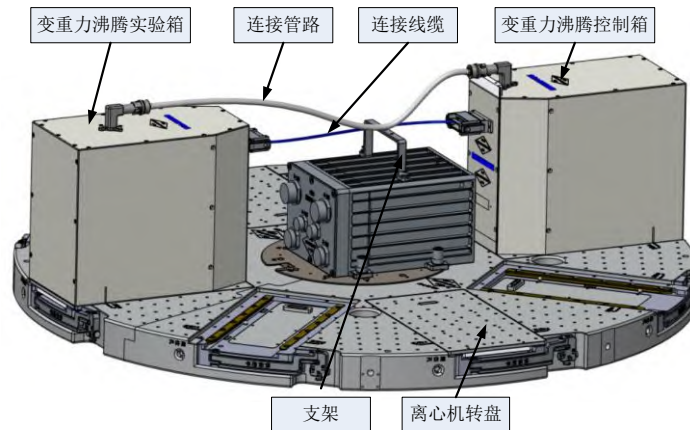


图 5: 安装在变重力科学实验柜离心机转盘上的变重力沸腾实验装置
Figure 5: vgBOILING facility on VGR centrifuge turntable

沸腾实验是在变重力沸腾实验箱内部沸腾实验液池（图 6）内进行的，实验工质为 FC-72，并预先精心去除了其中溶解的不凝气体。FC-72 是一种主要由碳氟化合物 C_6F_{14} 异构体组成的混合物，其中主体为直链结构 $CF_3-CF_2-CF_2-CF_2-CF_2-CF_3$ ，常压沸点 $56.5^{\circ}C$ ，与水相比可以在更低温度下发生沸腾，从而降低了对加热功率的需求，同时也能满足载人航天工程严格的安全性等要求，是一种常用的空间实验工质。

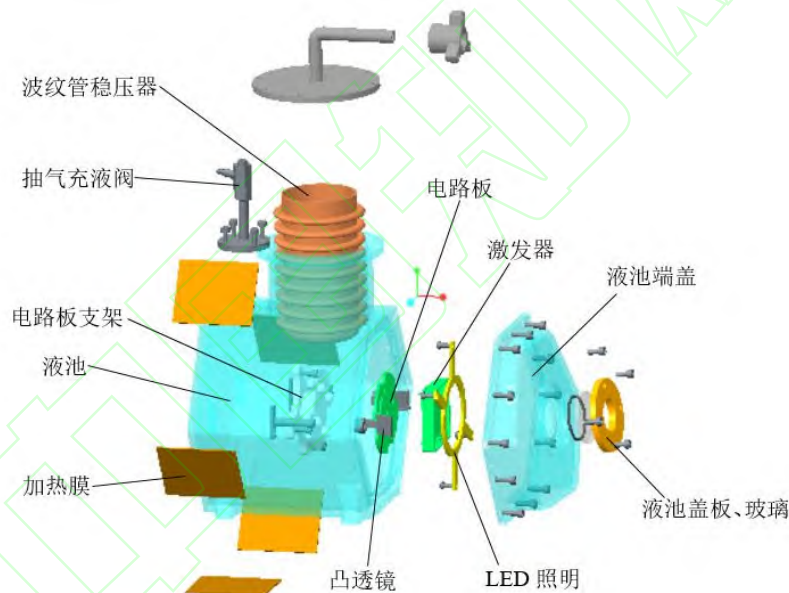


图 6: 沸腾实验液池与附属部组件
Figure 6: Boiling pool and its auxiliary subassembly

多功能集成微加热器是沸腾实验液池内的核心部件之一，采用 MEMS 技术将气泡激发、加热表面与内部局部温度测量、加热功率输入与调控等功能集合在一起。多功能集成微加热器继承了 SOBER-SJ10 集成微加热器研制经验，同时进一步采用双层石英玻璃基板结构，并具有独立可控的多气泡激发功能。加热器首层 $0.5mm$ 厚石英玻璃基板正面（即与实验工质直接接触的加热表面）布置有 5 个独立可控的气泡激发器和 16 个局部测温点；第二层 $1.0mm$ 厚石英玻璃基板正面则在与气泡激发器对应位置处布置 5 个局部测温点，同时在背面布置主加热器，通过稳定的电加热方式提供沸腾实验所需加热功率，并同步测量基板背面平均温度变化。气泡激发器、局部测温点和主加热器均为蛇形薄膜铂电阻，具体尺寸依据不同需求设计和加工，并依据测试结果筛选一致性良好的器件进入后续工序。筛选厚的两层基板将精细黏合形成统一的基板，再用 COB (chip-on-board) 封装技术制成一个独立的器件（图 7）。3 层共 22 路温度测量数据可以微后续反演加热基板瞬态温度和热流的分布与变化提供可靠依据。

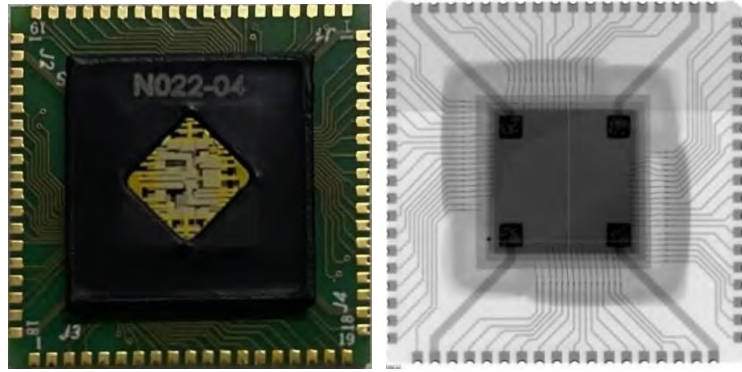


图 7：多功能集成微加热器芯片实物图（左）与内部电路 X 光扫描照片（右）

Figure 7: Photos of a multi-functional integrated heater (left) and its X-ray scanning diagram of internal circuits (right)

空间实验过程中，将根据地面输入参数，首先由变重力科学实验柜设定目标重力水平，其次通过预热和沸腾实验液池波纹管稳压器背压调节机构联合确定液体温度、压力及相应的液体过冷度（即液体压力对应的饱和温度与其实实际温度间的差值），随后根据设定实验模式执行相应实验流程，完成空间飞行实验任务，获得完整的科学实验数据和沸腾过程图像资料，用于后续科学分析，揭示沸腾机理。

变重力沸腾实验项目共设置了以下四种实验模式：

1) 常规沸腾模式。气泡激发器不启动，沸腾现象在加热器基板背面主加热器作用下自发启动，气泡起始位置往往随机分布。通过观测不同重力条件下常规池沸腾模式下的传热特性，研究不同重力条件下沸腾过程的具体特性，揭示重力对沸腾传热的影响机制，构建沸腾传热特性的重力标度规律。

2) 单气泡沸腾模式。单个气泡激发器启动，采用脉冲电加热方式，在特定的时间和空间位置上形成一个种子气泡，并通过主加热器恒定加热作用实现并详细观测微、低重力下单个气泡的生长与传热过程，重构加热器内部温度及热流的三维瞬态分布与变化，确认内壁内瞬态导热与周期性蓄热特征及其对沸腾传热的影响机制。

3) 双气泡沸腾模式。采用加热表面局部过热的方式，主动控制在两个相邻位置以相同或相异的相位生成两个种子气泡，并在稳定的背部热流作用下生长，观测其相互抑制或促进、合并以及合并诱导的气泡振荡、脱落、运动等基本现象，研究并揭示核态沸腾现象中普遍存在的气泡间的相互作用特征及其机理，以及重力对相关过程的影响。

4) 多气泡沸腾模式。采用加热表面局部过热的方式，主动控制多个（3~5 个）气泡的生成，实验观测其动力学行为和传热特征，研究并揭示加热表面多气泡相互作用与气化核心密度对沸腾传热的影响，以及重力对相关过程的影响。

目前，变重力沸腾实验装置已完成工程鉴定件产品研制和相关试验工作，性能稳定并满足设计指标要求。飞行实验件产品研制也已展开，预计夏秋之间即可交付，作为变重力科学实验柜首批科学实验任务之一，将按预期计划上行至中国空间站开展实验。

3 小结

中国空间站实验舱 I 变重力科学实验柜的研制成功，为不同重力条件下的沸腾研究提供了优良的实验平台，从而真正将重力作为一个独立可控的变量，深入研究和揭示复杂的沸腾现象中重力的作用机制，构建沸腾传热特性的重力标度规律，促进学科认识进步，强化技术创新能力。

多重力沸腾实验项目作为变重力科学实验柜首批科学实验项目之一，目前装置研制进展顺利，空间飞行实验将在不远的将来顺利展开。相信在航天人的不懈努力下，充分认知了重力对沸腾现象的影响机理，我们将真正利用其背后蕴含的物理规律，从而有效控制相应的过程，即使在空间微重力环境也能安全、可靠的“烧水烹茶”，煮茶一壶邀日月，巡天万里看山河，惬意悠哉，赛神胜仙！

参考文献

- [1] Wei JJ, Xue YF, Zhao JF, et al. Bubble behavior and heat transfer of nucleate pool boiling on micro-pin-finned surface in microgravity. *Chin. Phy. Lett.*, 2011, 28(1): 016401.
- [2] Siegel R, Keshock EG. Effects of reduced gravity on nucleate boiling bubble dynamics in saturated water. *AIChE J.*, 1964, 10(4): 509-517
- [3] Du WF, Zhao JF, Li HX, et al. Thermal Dynamics of Growing Bubble and Heat Transfer in Microgravity Pool Boiling (Chapter 4). In: *Physical Science Under Microgravity: Experiments on Board the SJ-10 Recoverable Satellite* (Eds. Hu WR, Kang Q), Science Press & Springer, 2019, pp. 73-99
- [4] Raj R, Kim J, McQuillen J. Pool boiling heat transfer on the International Space Station: experimental results and model verification. *J. Heat Mass Transfer*, 2012, 134: 101504
- [5] Warriar GR, Dhir VK, Chao D F. Nucleate pool boiling experiment (NPBX) in microgravity: International Space Station. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2015, 83: 781-798
- [6] Feng Y, Li HX., Zhao JF, et al. Lattice Boltzmann study on influence of gravitational acceleration on pool nucleate boiling heat transfer. *Microgravity Sci. Tech.*, 2021, 33(2): 21
- [7] 赵建福, 张良, 杜王芳等. 单气泡池沸腾传热中的重力效应数值模拟. *空气动力学学报*, 2021, 39(3): 121-129
- ZHAO Jianfu, ZHANG Liang, DU Wangfang, et al. Numerical simulation on gravity influence on heat transfer in single bubble pool boiling. *Acta Aerodyn. Sin.*, 2021, 39(3): 121-129 (in Chinese)
- [8] 杜王芳, 赵建福. 核态池沸腾传热现象中的重力标度规律. *科学通报*, 2020, 65(17): 1629-1637
- DU Wangfang, ZHAO Jianfu. Gravity scaling law of heat transfer in nucleate pool boiling. *Chin. Sci. Bull.*, 2020, 65(17): 1629-1637 (in Chinese)
- [9] Sielaff A, Mangini D, Kabov O, et al. The multiscale boiling investigation on-board the International Space Station: an overview. *Appl. Therm. Eng.*, 2022, 54: 117932
- [10] 吴克, 赵建福, 李会雄. 微重力池沸腾过程中的气泡热动力学特征研究. *力学与实践*, 2016, 38(2): 203-206
- WU Ke, ZHAO Jianfu, LI Huixiong. Thermal dynamical behavior of vapor bubble during pool boiling in microgravity. *Mech. Eng.*, 2016, 38(2): 203-206 (in Chinese)
- [11] Wang SK, Wang K, Zhou YL, et al. Development of the Varying Gravity Rack (VGR) for the Chinese Space Station. *Microgravity Sci. Tech.*, 2019, 31: 95-107