



力学所空间热毛细对流研究取得重要进展

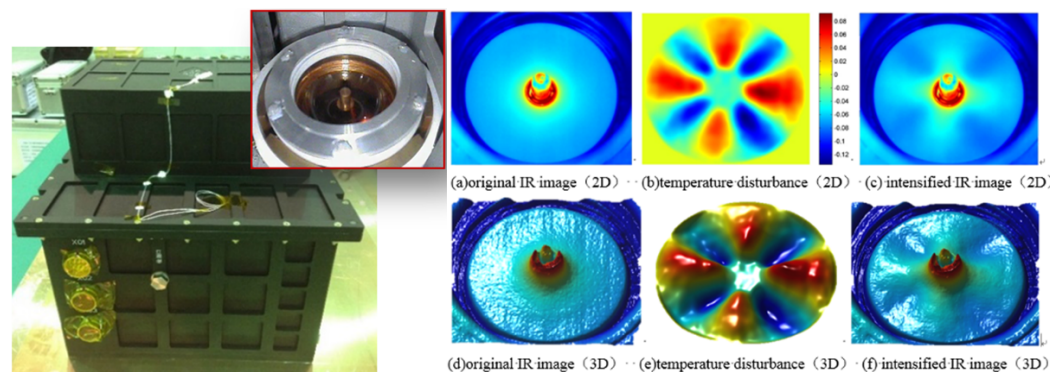
作者: 王佳 2020-03-19 10:50

【放大 缩小】

热对流是自然界中最常见的自然对流。地面热对流通常由流体温度梯度导致密度梯度而引起的浮力对流主导，空间热对流则主要由流体温度梯度诱导的表面张力梯度而产生，其驱动形式由体积力转为表面力。微重力环境是一个特殊的平台，浮力驱动的流动被极大地抑制，流体界面通常也不再保持水平形貌，可以应用空间热对流这种新模型开展流动转换问题的研究，观测新现象、发现新问题、探索新规律，拓展通向湍流的过程深入研究，实现从机制到机理的认识。

在胡文瑞院士指导下，中国科学院力学研究所微重力重点实验室康琦团队在“实践十号”返回式科学实验卫星和“天宫二号”空间实验室任务中成功完成两项空间流体科学实验，深入研究了热毛细对流不稳定性机制，取得了丰硕成果。

(1) “热毛细对流表面波空间实验研究”是“实践十号”微重力科学实验卫星开展的19项空间实验之一（2016年4月）。它以Czochralski晶体生长方法提炼出的环状流热毛细对流体体系作为研究对象，采用红外热像、精密位移传感、高精度温度采集与控制以及在线图像记录等综合流场诊断技术，对热毛细对流的表面波动结构与模态转变过程进行全面观测。

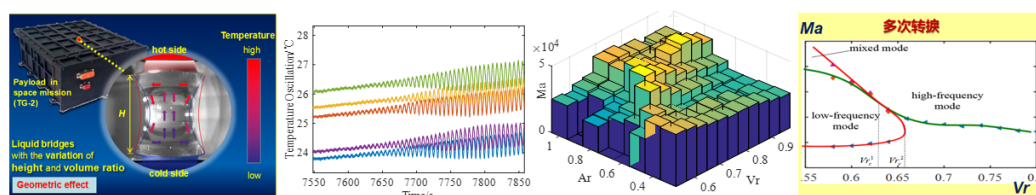


(./W020200319401665947069.png)

图1 实践十号环形液池载荷与流动模式转变

实验首次以体积比作为关键参量，系统地研究自由面不同曲率形貌对热毛细对流不稳定性的影响，成为体积比效应理论的首次成功拓展；分析了热流体波的模式演化与转变过程，发现了驻波/行波耦合、 $m=3/m=4$ 耦合和Benjamin-Feir不稳定等新流态，探明不同模式表面波之间的非线性竞争机制。(J. Fluid Mech., 2019; Phys. Fluids, 2019, Featured Article; Int. J Heat Mass Trans., 2019)

(2) “大Prandtl数液桥热毛细对流研究”是在载人航天工程“天宫二号”开展的空间科学实验(2016年12月~2019年7月)。液桥模型来源于浮区晶体生长方法,该项目利用微重力环境建立不同几何形貌的大尺寸液桥(最大高度22mm),研究液桥热毛细对流失稳与振荡的转换分岔机理。历时32个月完成了740余组空间实验,是国际上最长时间、最多工况、最系统的空间流体实验。



(./W020200319401666169919.png)

图2 天宫二号液桥载荷与几何参数效应

该实验探明了液桥热毛细对流振荡的临界Marangoni数范围,刻画了几何参数效应(涵盖体积比和高径比)的完整起振图谱,首次观测到垂直跳变型失稳新效应;发现了热毛细对流多次转换新机制;首次提出了独特的低频起振失稳区域新概念,对临界失稳条件有了全新的认知;得到不同几何参数下行波与驻波的多模式转换图谱;发现了微重力下更为丰富的、复杂的耦合分岔途径。(J. Fluid Mech., 2019; Phys. Fluids, 2020; Featured Article; Int. J Heat Mass Trans., 2017)

两项空间实验分析了两种模型热毛细对流由定常流动发生失稳、形成振荡、分岔演变最终进入混沌的整个转换过程,深入探讨了临界条件、流动模态、流场结构、转换途径与失稳机理等问题,为湍流这一难题的突破寻找破解的途径,对掌握微重力流体物理的基本规律、拓展流体物理理论研究具有重要学术意义。在空间/地面材料生长、焊料融化与凝固、流体管理及热质运输等方面有重要应用价值。两项空间实验载荷均由中国科学院力学研究所康琦团队分别联合中国航天员科研训练中心、中国科学院空间应用工程与技术中心等单位研制完成,突破了多项微重力流体实验的关键技术,并在空间得到成功验证。

相关结果发表于流体力学学科顶级期刊Journal of Fluid Mechanics、Physics of Fluid、International Journal of Heat and Mass Transfer, 微重力科学专业期刊以及全球唯一实验视频期刊等,其创新性结论引起界内广泛关注。多篇论文被期刊选为“Feature Article”,并作为杂志封面。项目得到中国科学院空间科学先导专项、中国载人航天工程以及国家自然科学基金的资助。

相关文章:

[1] Kang Q., Wang J., Duan L., Su Y.Y., He J.W., Wu D., Hu W.R., The volume ratio effect on flow patterns and transition processes of thermocapillary convection. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, **868**:560-583.

[2] Qi Kang, Di Wu, Li Duan, Liang Hu, Jia Wang, Pu Zhang, Wenrui Hu, The effects of geometry and heating rate on thermocapillary convection in the liquid bridge. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, **881**: 951-982.

[3] Qi Kang, Di Wu, Li Duan, Jianwu He, Liang Hu, Longsheng Duan, Wenrui Hu, Surface configurations and wave patterns of thermocapillary convection onboard the SJ10 satellite. *Physics of Fluids*, 2019, **31**(4): 20.

[4] Qi Kang, Di Wu, Li Duan, Zhangquan Zhang, Bin Zhou, Jia Wang, Zhiyi Han, Liang Hu, Wenrui HU, Space experimental study on wave modes under instability of thermocapillary convection in liquid bridges on Tiangong-2. *Physics of Fluids*, 2020, **32**(3).

[5] Kang Qi, Jiang Huan, Duan Li, Zhang Chu, Hu Wenrui, The critical condition and oscillation transition characteristics of thermocapillary convection in the space experiment on SJ-10 satellite. *International Journal of Heat and Mass*, 2019, **135**: 479-490.

[6] Jia Wang, Di Wu, Li Duan, Qi Kang, Ground experiment on the instability of buoyant-thermocapillary convection in large-scale liquid bridge with large Prandtl number. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, **108**: 2107-2119.

[7] Q. Kang, L. Duan, L. Zhang, Yongli Yin, Jingsong Yang, Wenrui Hu, Thermocapillary Convection Experiment Facility of an open Cylindrical Annuli for SJ-10 Satellite. *Microgravity Science and Technology*, 2016, **28**(2):123-132.

[8] Longsheng Duan, Li Duan, Huan Jiang, Qi Kang, Oscillation Transition Routes of Buoyant-Thermocapillary Convection in Annular Liquid Layers, *Microgravity Science and Technology*, 2018, **30**:865–876.

[9] Li Duan, Yongli Yin, Jia Wang, Qi Kang, Di Wu, Huan Jiang, Pu Zhang, Liang Hu, Thermocapillary Convection Space Experiment on the SJ-10 Recoverable Satellite. *Journal of Visualized Experiment*, 2020, **157**, e59998. (Video Sci)

[10] Li Duan, Qi Kang, Di Wu, Li Zhan, Di Zhang, Huan Jiang, Chu Zhang, Pu Zhang, Yongli Yin, Weirui HU, Chapter 5. Study on Thermocapillary Convection in an Annular Liquid Pool. *Physical Science Under Microgravity: Experiments on Board the SJ-10 Recoverable Satellite*, Springer Nature Singapore, 2019. ISSN 2198-7300



中国科学院力学研究所 版权所有 京ICP备05002803
号 京公网安备110402500049
地址: 北京市北四环西路15号 邮编: 100190



([http://bszs.conac.cn/siteName?
method=show&id=081D2D6355AD574EE0530228](http://bszs.conac.cn/siteName?method=show&id=081D2D6355AD574EE0530228))