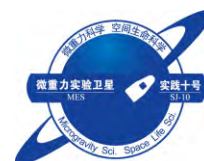


热毛细对流表面波空间实验研究¹⁾

康琦* 段俐*,2) 尹永利† 杨京松† 吴笛* 赵肆方† 姜欢*
章楚* 胡文瑞*

* (中国科学院力学研究所, 中国科学院微重力重点实验室, 北京 100190)

† (中国航天员科研训练中心, 北京 100094)



摘要 介绍了实践十号返回式科学实验卫星 19 项科学项目载荷之一: 热毛细对流箱表面波空间实验研究, 包括项目研究目标、意义、研究内容、空间实验模型及地面匹配实验结果等. 阐述了本项目开展空间实验研究的必要性, 用科学的地面实验研究数据预测和对比微重力条件下可能获得的研究结果, 展望本项目可能取得的成果.

关键词 热毛细对流, 微重力, 体积效应, 转捩途径, 有效载荷

中图分类号: O363.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.6052/1000-0879-16-068

引 言

SJ-10 有效载荷热毛细对流箱的科学目标是: 建立环形 (圆柱形) 液池热毛细对流空间实验系统, 研究环形体系热毛细流动的失稳规律和转捩途径, 首次开展体积效应问题研究, 深刻理解热毛细对流的不稳定性和机理.

由于表面温度的不均匀性引起表面张力的不均匀驱动了热毛细对流的产生. 热毛细对流是许多领域内重要的流体对流现象, 例如晶体生长和薄膜科学等. 由于质量守恒的作用, 热毛细对流引起的液体表面流动, 在液体下层形成回流. 理论上认为, 在流体自由面处存在剪切流, 它很容易引起流体不稳定性而导致流体振荡的产生^[1-2]. 热毛细对流问题是微重力科学中重要的基础理论问题, 大量的微重力科学实验首先在地面进行预研, 但浮力的效应是不能忽略的. 同一流体系统内的流动机理在地面和空间有很大差异.

近年来, 在航天技术发展基础上, 为满足现代微电子工业等对高质量半导体和合金材料的需要,

晶体生长成为空间微重力环境的一个重要应用前景. 国内外已开展了多次空间晶体生长实验, 虽然微重力环境基本克服了密度分层、浮力对流等对晶体生长的不利影响, 但是最终生成的晶体质量不总是那么尽如人意. 其原因是由于热毛细对流的不稳定性, 在某些情况下晶体熔融体内的对流会发展为非稳态的振荡对流, 使生成的晶体内部出现和地面情况类似的条纹缺陷. 如何抑制振荡热毛细对流的产生, 从而避免条纹缺陷, 有必要对热毛细对流开展深入研究. 另一方面, 热毛细对流还与它自身所具有的复杂非线性动力学性质有关, 热毛细对流是一种流场和温度场相耦合的非线性流动现象. 通过以往热毛细对流的研究, 已然在很大程度上推动了小扰动理论、能量法、弱非线性理论等流动稳定性理论的建立与发展, 促进了混沌理论、耗散结构理论等新兴科学与流体力学的融合, 极大地丰富了流体力学的研究内容.

前期, 人们对热毛细对流表面波问题已经开展了大量的相关科学问题的地基和空间实验研究^[3-7]. 为了尽量减小浮力的影响, 地基实验中尽量选取小

本文于 2016-03-11 收到.

1) 中国科学院空间科学先导专项实践十号返回式科学实验卫星项目 (XDA04020405, XDA04020202-05) 资助.

2) 段俐, 研究员, 主要研究方向为微重力流体物理, 实验流体力学. E-mail: duanli@imech.ac.cn

引用格式: 康琦, 段俐, 尹永利等. 热毛细对流表面波空间实验研究. 力学与实践, 2016, 38(2): 207-210

Kang Qi, Duan Li, Yin Yongli, et al. The project introduction about experiment study on surface wave of thermocapillary convection in space. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(2): 207-210

尺度模型,但是地面小尺度(小邦德数)并不能完全模拟微重力实验,存在尺度效应、边界层效应、界面形貌差异以及参数选择范围的限制.同时,热毛细对流体积效应问题也无法在重力环境建立实验模型,微重力条件下热毛细对流的理论分析与数值计算亦有待在空间验证.为此,需要微重力空间环境进一步开展热毛细对流机理问题的研究.

1 空间实验的研究内容

该项目对空间流体系统采用加热或制冷方式建立环形液池热毛细流动体系(见图1),并通过高灵敏度热电偶测量流体温度、位移传感器测量流体界面形变、以及红外摄像等方式获得热毛细对流振荡特征、转捩条件、转捩过程、流动模式转换等,同时开展地面无法进行的体积比问题研究.

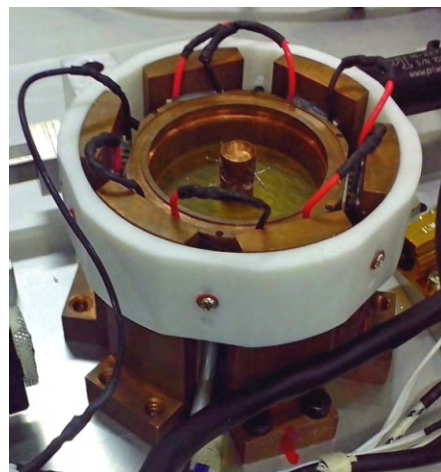
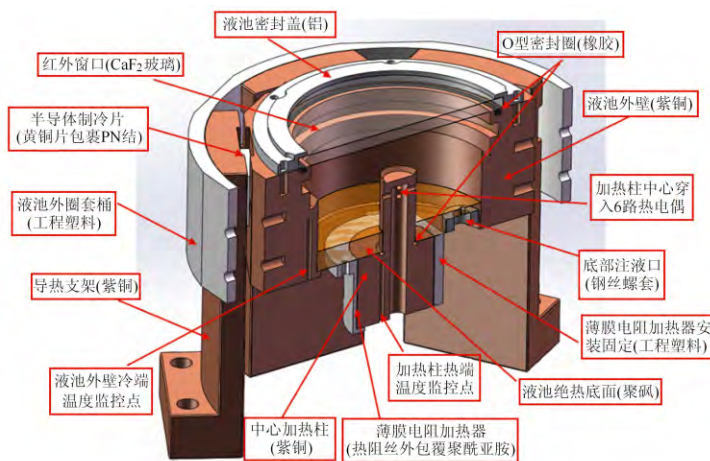


图1 环形液池结构设计图和实物图

本项目将多种测量方法于一体,完成对热毛细对流温度振荡、对流模式转换和界面形变的同时测量(见图2),在实验技术上需有新的突破.我们将应用亚微米表面形变光学测量系统完成热毛细对流的体积效应、振荡及转捩过程的研究,该技术是国际上首次在空间应用;同时用红外摄像法观测热毛细对流流动模式转换,上述两种方法的结合在过去的空间实验中没有应用,体现了空间实验原理的创新性.建立可变液池体积比的热毛细对流系统,将热电偶测温方法应用于温度采集系统,实现对热毛细对流的体积效应、振荡机理、及转捩过程的研究,体现了空间实验方法的创新性.

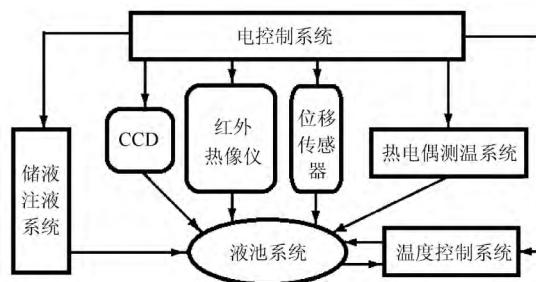


图2 测量方法

本项目将在空间微重力环境开展纯热毛细对流的体积效应及转捩问题的研究,对于环形液池热毛细对流的体系,体积效应只能在空间微重力环境中开展研究;而振荡的转捩问题,我们的地面实验发现了新的现象,即起振后随温差的增加振荡消失,这在任何其他人的实验研究中没有发现,这是否是环形液池热毛细对流振荡固有的特征,还是重力的影响,需要空间实验验证;此外,地面实验发现多个振荡频率共存,并随温差增加,主频向高频方向发展现象也需要空间实验进一步深化研究.因此,开展纯热毛细流动

体系体积效应和转捩问题的研究体现了空间实验思想的创新性.

2 地面对比实验

热毛细对流表面波空间实验研究项目已经即将进入空间实验阶段,实验箱体的内部结构和外形图见图3和图4.

我们用初样鉴定件和正样飞行件开展了大量的地面匹配实验,环形液池中盛放1号、1.5号和2号硅油,液层厚度分别是1.5mm、2.0mm、2.5mm和3mm,间隔0.5mm递增,对各种工况进行实验研究,用T型热电偶测量液层内部单点温度振荡信号、用位移传感器测量流体自由面振荡、用红外热

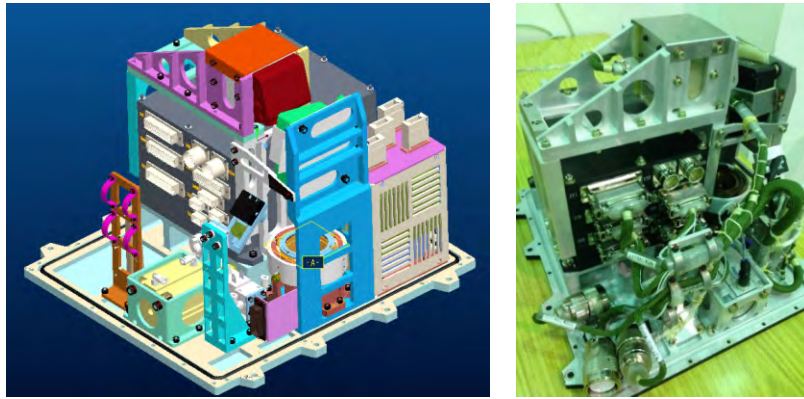


图 3 热毛细对流箱内部结构设计图和实物图



图 4 热毛细对流箱外观实物图

像仪测量流体表面温度分布探讨流动模式转换问题.

图 5 给出 1 号硅油液层厚度为 2mm 时的浮力 - 热毛细对流温度振荡原始数据和频谱分析结果, 图 6 对应给出流体自由面振荡原始数据和频谱分析结果. 经过 Fourier 变换发现温度振荡和自由面振荡的主频均为 0.214 Hz.

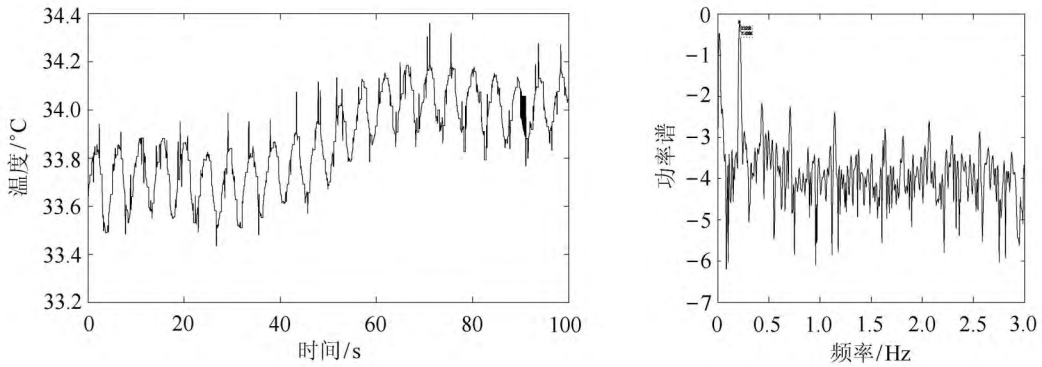


图 5 流体温度振荡原始数据和频谱分析

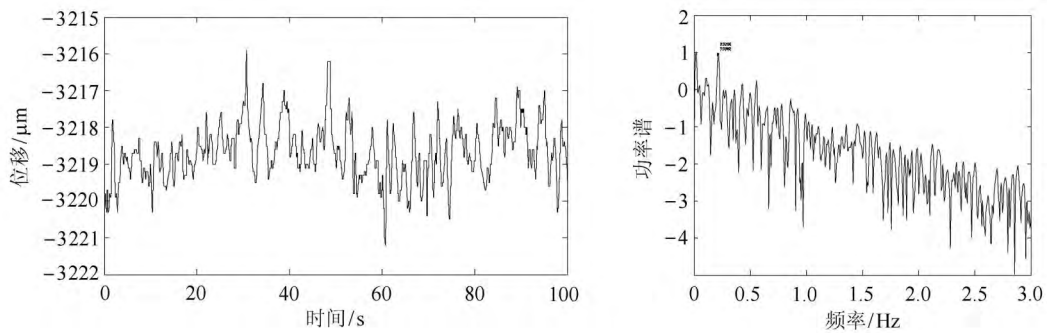


图 6 流体自由面振荡原始数据和频谱分析

由于热电偶温度测量仅限于单点,借助红外热像仪,就能捕捉到流体层自由面的温度场信息,进而研究流动模式转换问题.我们在地面上用初样鉴定件和正样飞行件配备的红外热像仪拍摄了液层厚度为 1.5 mm、1.6 mm、1.9 mm、2.0 mm 等不同液层厚度下内外壁面温差逐步增大过程中表面温度场的演变过程,定量观察了周向温度的脉动规律,发现

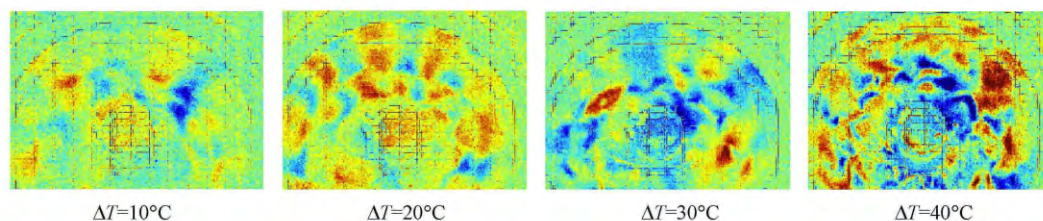


图7 红外热像仪测量结果

上述实验结果是在地面实验室用热毛细对流载荷初样件和正样件完成的,浮力的影响不能忽略,所有的实验结果均是浮力-热毛细对流的特征表现.我们希望通过本次空间实验获得纯热毛细对流的实验结果,获得振荡特征、转捩条件、转捩过程、模式转换,同时获得地面无法进行的体积效应实验研究结果,深刻研究热毛细对流机理.

3 展望

本项目利用 SJ-10 返回式卫星空间实验机会,开展对纯热毛细对流机理问题的研究,研究热毛细流动体系的失稳和转捩过程,研究有自由面热毛细流体的体积效应、振荡现象及对流模式转换问题.它们是热毛细对流从层流到混沌转捩过程中的一个重要的基本特征,该问题属于基础研究,对于强非线性流动过程的研究具有重要的科学意义.是对重力效应以及微重力流体科学又一次有意义的认知.

热毛细对流是一种广泛存在的自然对流现象,无论是出于实际应用的考虑,还是为了推动科学理论的发展,都有必要对热毛细对流开展进一步的研究.

环形液池对流体存在表面周向驻波模态转捩.发现在升温过程中,当流体层内外温差 ΔT 超过一定的临界值时,液面温度场会出现驻波现象或沿着周向的行波.图7给出红外热像仪测量结果,以驻波为主,存在径向振荡,能量由波腹的运动传递到边壁,此时驻波流场状态为二维振荡流.随着温差的增加,波数增加,流动结构更为复杂.

虽然人们较早地认识到了热毛细对流的普遍性和重要性,并且已经进行了长达数十年的努力研究,但是由于其自身的复杂性以及对流体系的多样性,目前还有许多问题有待研究.

参考文献

- 1 胡文瑞等. 微重力科学概论. 北京: 科学出版社, 2010
- 2 胡文瑞, 徐硕昌. 微重力流体力学. 北京: 科学出版社, 1999
- 3 Schwabe D, Abdelfattah Z, Bok-Cheol S. Oscillatory thermocapillary convection in open cylindrical annuli. Part 1. Experiments under microgravity. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, 491: 239-258
- 4 张丽, 段俐, 康琦. 环形液池浮力-热毛细对流表面振荡现象的临界温差. *实验流体力学*, 2012, 26(4): 48-53
- 5 Zhu P, Zhou B, Duan L, et al. Characteristics of surface oscillation in thermocapillary convection. *Experimental Thermal And Fluid Science*, 2011, 35(7): 1444-1450
- 6 Zhu P, Duan L, Kang Q. Transition to chaos in thermocapillary convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 57: 457-464
- 7 张迪, 段俐, 康琦. 实践十号卫星项目——热毛细对流振荡特征的地面研究. *力学与实践*, 2016, 38(1): 43-48

(责任编辑: 胡漫)