



# 中国微重力流体科学的空间实验研究

胡文瑞, 龙勉, 康琦, 解京昌, 厚美瑛, 赵建福, 段俐, 王双峰

① 中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080;

② 中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100080

E-mail: wrhu@imech.ac.cn

2009-06-27 收稿, 2009-08-17 接受

中国科学院重点项目(编号: KJCX2-YW-L08)和国家自然科学基金(批准号: 10872202, 10672171, 30730032)资助项目

**摘要** 微重力流体物理是微重力科学的重要组成部分, 包括简单流体的许多新体系、气/液两相流动和传热以及复杂流体力学。微重力流体物理除其本身学术和应用的重要意义外, 还与微重力燃烧学、空间生物技术和空间材料科学密切结合, 促进了交叉学科的发展。利用我国返回式卫星和神舟飞船, 进行了一批微重力科学的空间实验, 使我国微重力科学迅速进展。本文主要介绍近 10 年来我国微重力流体科学的空间实验研究和主要学术成果。

**关键词**

微重力流体物理  
微重力气/液两相流  
微重力复杂流体  
微重力燃烧  
空间生物技术

火箭和卫星技术需要研究储液灌等流体管理问题, 我国在发展空间技术的同时就进行了微重力环境中的流体管理等微重力工程问题研究<sup>[1]</sup>。我国微重力科学的研究始于 20 世纪 80 年代后期, 在国家高技术研究发展计划的促进下, 我国科学家利用中国返回式卫星搭载进行了一批空间实验, 主要是中国科学院半导体研究所和兰州物理研究所负责的材料科学实验<sup>[2~4]</sup>, 以及中国科学院生命科学专家参加的空间生物学实验<sup>[5~7]</sup>。早期的返回式卫星搭载的空间试验资源比较有限, 但这些空间试验获得了一些好的学术结果。

微重力流体物理是微重力科学的重要组成部分, 其实验设施一般比较复杂, 大多需要光学诊断仪器。在中国, 微重力流体物理的理论和地面实验研究起步比较早<sup>[8]</sup>。在北京落塔建成以前, 中国科学家与日本科学家合作利用北海道 JAMIC 落井和土岐 MGLAB 落井完成了半浮区热毛细对流的微重力实验<sup>[9]</sup>和液滴 Marangoni 迁移的微重力实验<sup>[10]</sup>, 获得了很好的结果。我国空间流体物理实验的起步比材料科学实验晚 10 年。1999 年在 SJ-5 号科学实验卫星上, 进行了两层不混溶液体的 Marangoni 对流和热毛细

对流实验。1999 年利用俄罗斯和平号空间站首次完成了较长微重力时间的液/气两相的流型实验。2004 年在神舟 4 号飞船上完成了液滴 Marangoni 迁移实验。2005 年利用中国返回式卫星的搭载机会完成了气泡迁移和相互作用实验, 以及新型生物反应器的原理性实验。2006 年, 利用返回式 SJ-8 号科学实验卫星的留轨舱, 进行了 9 项微重力实验<sup>[11]</sup>, 其中 6 项与微重力流体科学有关。这些空间实验在学术上取得了一批很好的成果。

## 1 双层不混溶液体的 Marangoni 对流和热毛细对流实验

在微重力环境中, 浮力对流被抑制, 自由面上表面张力涨落所驱动的 Marangoni 对流(外加温差垂直于自由面)和表面张力不均匀所驱动的毛细对流(外加温差或其他外源引起的表向张力梯度平行于自由面)成为主要的自然对流形式, 参看文献[12]。研究热毛细对流有三种典型的位形, 即半浮区模型、同心圆柱模型和矩形液池中的液层模型。在微重力条件下约束一个液体层很困难。空间的液层热毛细对流实验至今尚未成功完成<sup>[13]</sup>, 而人们也没有安排单一液

**引用格式:** 胡文瑞, 龙勉, 康琦, 等. 中国微重力流体科学的空间实验研究. 科学通报, 2009, 54: 2615~2626

Hu W R, Long M, Kang Q, et al. Space experimental studies of microgravity fluid science in China. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0680-7

层的空间Marangoni对流实验. 利用三层不混溶液体进行热毛细对流来模拟晶体生长过程的包层覆盖现象, 这类空间实验取得了一些成果<sup>[14,15]</sup>.

我们在空间实验之前进行了地面的前期研究<sup>[16]</sup>. 空间实验是在我国 1999 年发射的SJ-5 号不返回卫星上完成的, 进行Marangoni对流(加上下温差)和热毛细对流(加左右温差)实验的两个容器的尺度分别为 48 mm×20 mm×32 mm和 35 mm×20 mm×32 mm<sup>[17]</sup>. 双层液体选用石蜡油和氟液(FC-70), 调整石蜡的熔点, 使其在地面和发射过程为固体, 空间实验时溶化为液体. 石蜡溶化后形成了清晰的两层液体, 建立了稳定的两层液体系统<sup>[18]</sup>. 但在石蜡溶化过程中出现了气泡, Marangoni对流时气泡在氟液层的右边界面处, 热毛细对流时气泡在石蜡油的低温端. 用数值模拟方法计算了具有气泡的两层对流流场(图 1(b)和图 2(b)), 并与PIV测量的流场的实验结果(图 1(a)和图 2(a))进行了对比, 两者基本相符, 其中Marangoni对流的上下壁温差为 23 °C, 气泡位于右下角; 热毛细对流左右壁温差为 41 °C, 气泡位于左上角. 数值模拟结果解释了微重力条件下具有气泡结构两层流体对流的基本特征<sup>[19]</sup>.

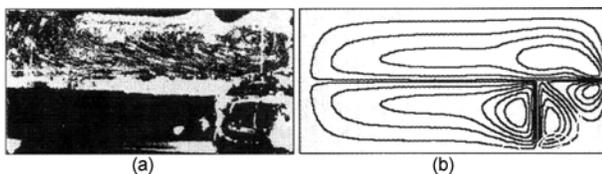


图1 两层液体 Marangoni 对流的空间实验流场(a)与数值模拟结果(b)的对比

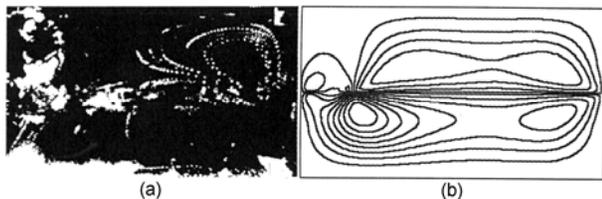


图2 两层液体热毛细对流的空间实验流场(a)与数值模拟结果(b)的对比

## 2 气液两相流流型实验

气液两相流动现象中, 气液两相介质往往存在巨大的密度差异, 从而引起强烈的重力效应, 即重力对流动特征具有强烈甚至主导的影响, 如浮力分层和相间速度滑移现象等. 在微重力环境中, 这些效应

被抑制, 流动结构或流道内气液两相介质的分布特征(即流型)呈现出明显的简化趋势, 主要分泡状流、弹状流和环状流<sup>[20]</sup>. 不过, 由于流型分类主要依赖目测, 流型间的转换往往存在一定的过渡区. 因此, 文献中也定义了如泡-弹状流、弹-环状流等过渡流型, 有时在流型图上甚至会占据相当大的区间.

1999 年 8 月完成的“和平号”空间站微重力气液两相流型实验, 迄今仍是国际上唯一在长期微重力环境并有人参与的实验研究. 实验段直径 10 mm, 长度 356 mm<sup>[21]</sup>. 气相介质选用空气, 液相介质carbogal为C<sub>6</sub>F<sub>10</sub>(CF<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. 它是一种无色、无味、无毒液体, 20°C时的密度为 1858 kg/m<sup>3</sup>, 黏度为 1.95×10<sup>-3</sup> kg/m·s, 表面张力为 0.019 N/m. 图 3 为和平号空间站微重力和低重力环境中的流型图, 并与Zhao和Hu<sup>[22]</sup>的微重力气液两相流型转换模型的预测进行了比较(图 4). 实验装置安装在一个大转台的外沿, 通过转动速度可控制外加低重力场. 利用旋转平台的转动, 空间实验还得到 0.014 和 0.1 g 时的气液两相流型特征, 揭示了重力对气液两相流特征的影响<sup>[23]</sup>.

1999年7月完成的IL-76失重飞机气/液两相流实验, 采用截面 12 mm×12 mm方管实验段, 管长 960 mm, 管壁为有机玻璃<sup>[24]</sup>. 将地面常重力时观测到的流型转换边界示出以比较, 重力对泡状流和弹状流

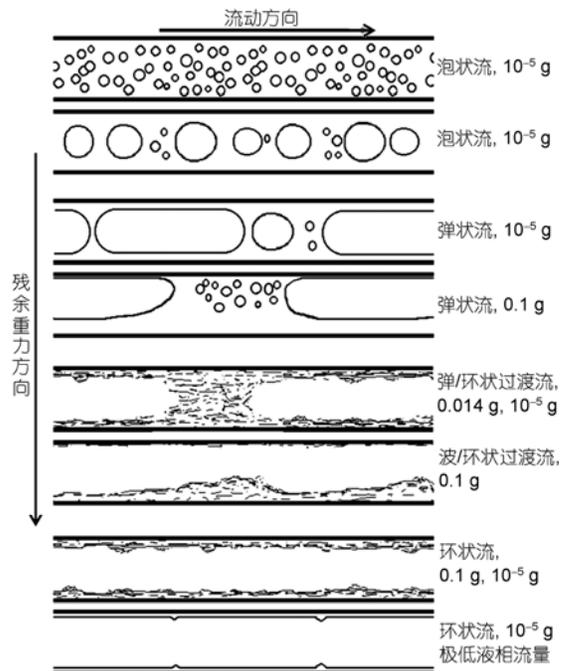


图3 和平号空间站不同重力条件下流型特征

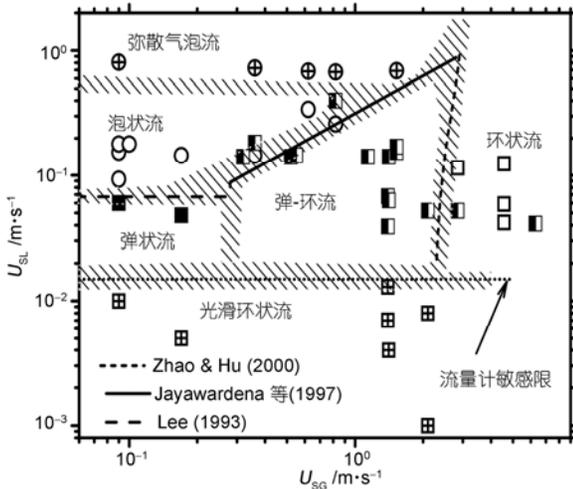


图4 和平号空间站微重力气液两相流型图

的特征及其相互转换条件有着明显影响, 但对弹状流-环状流转换边界没有明显影响. 基于微重力泡状流特征, 提出其摩擦因子和两相Reynolds数定义应基于液相物性和混合流速, 据此整理出的数据显示出明确的规律性<sup>[25]</sup>. 不过, 微重力两相压降实验数据与常用模型预测间存在显著差异, 其中Friedel模型与实验数据符合相对较好, 可以用于空间两相系统中摩擦压降的预估<sup>[26]</sup>.

### 3 液滴 Marangoni 迁移实验

微重力环境下液滴、气泡Marangoni迁移的动力学研究, 其重要性不仅在于理论方面, 还在于其具有极强的应用背景. 最早研究液滴或气泡Marangoni迁移现象的YGB模型前瞻性地给出了非线性对流项可忽略时的线性理论<sup>[27]</sup>, 然后人们讨论各种非线性效应. 强非线性的液滴理论有两种不同的结果. 我们的理论显示, 无量纲液滴的迁移速度随Marangoni数的增大而减小<sup>[28]</sup>. Subramanian研究组的理论结果得到, 液滴的迁移速度 $V/V_{YGB}$ 随Marangoni数的增大先减小, 然后增大<sup>[29]</sup>. 因此, 研究微重力条件下大Marangoni数时的液滴迁移成为一个关注的问题.

在充分地地基模拟微重力和短时微重力实验研究的基础上<sup>[30,31]</sup>, 在我国神舟4号(SZ-4)飞船上用自行研制的通用流体实验装置完成了大Marangoni数( $Ma$ )空间液滴热毛细迁移实验<sup>[32]</sup>. 通用流体实验装置由液滴迁移实验单元、记录仪、电控装置和二次电源组成, 如图5所示. 空间实验实现了液滴热毛细迁移实验的过程控制、多种物理量的实时测量、实验数

据的记录存储以及在轨飞行实验的遥操作等功能. 此次空间实验中使用KF-96L系列5cst硅油及FC-75氟液分别作为连续相母液介质和液滴相介质, 研究了系列较大尺寸的液滴在较大温度梯度下的热毛细迁移规律, 观测到了在微重力环境下液滴热毛细迁移的非线性动力学特征. 实验装置中的双套管注液系统有效地控制了注入液滴的体积, 保证了预定直径的液滴被成功地注入母液之中. 图6给出了大Marangoni数情况下液滴迁移速度的实验结果, 图7是液滴迁移尾迹的光学干涉图. 实验结果表明, 所施加的温度梯度、液滴与母液液体体系界面张力温度系数及液滴尺寸是影响液滴热毛细迁移速度的三个主要因素. 液滴热毛细迁移速度的大小与上述因素呈正比关系, 迁移速度方向极其敏感地跟随连续相介质中所加的温度梯度方向. 本实验首次将 $Ma$ 数扩展到5500, 无量纲迁移速度 $V/V_{YGB}$ 随Marangoni数的增加而单调减少, 当 $Ma = 5500$ 时, 无量纲迁移速度趋近于40%左右. 空间实验结果与我们的理论分析结果一致. 进一步的空间微重力环境下液滴热毛细迁移实验正在安排之中.

### 4 气泡迁移和相互作用实验

与上节相同, 气泡的Marangoni迁移研究亦始于

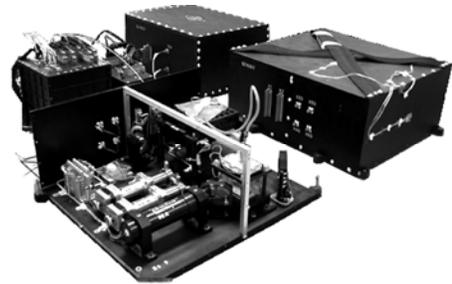


图5 空间实验装置

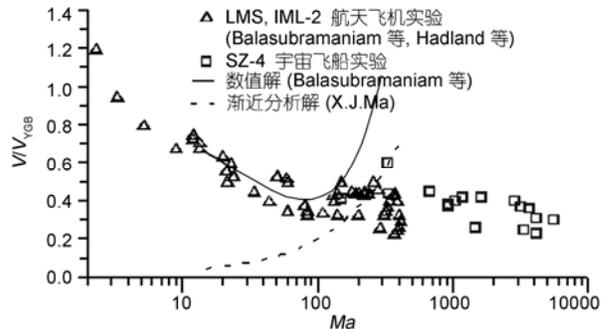


图6 SZ-4空间液滴热毛细迁移实验数据与美国航天飞机实验数据及理论预测的比较



图7 空间微重力环境下液滴尾迹的热毛细迁移激光干涉图

YGB模型<sup>[27]</sup>, 研究的兴趣除了研究单个气泡的迁移规律外, 还非常关注多个气泡的相互作用. 单气泡迁移的空间实验主要研究空气泡在硅油中的迁移, 硅油分别选用 50cSt<sup>[33]</sup>和 10cSt<sup>[34]</sup>, 以增大Reynolds数和Marangoni数的范围. 利用我国 2005 年发射的第 22 颗返回式卫星, 完成了气泡迁移的空间实验, 主要研究双气泡的相互作用, 同时也进行了单气泡迁移实验.

这次空间实验液池设备如图 8 所示, 液池内腔尺寸为 40 mm×40 mm×70 mm, 选取 KF-96L 5 号硅油作为母液. 液池四壁采用光学玻璃制作. 液池上部金属板采用电热膜加热, 下部金属板采用半导体制冷片制冷, 利用 PID 温度控制器, 分别测量并控制上下端温度使其保持恒定温度值. 在液池的内部均布了 4 个热电偶, 用以了解液池内的温度变化情况. 通过控制高精度步进电机位移器推动气缸调整推出气泡的体积大小和时序. 所有的气泡迁移实验过程由 CCD 拍

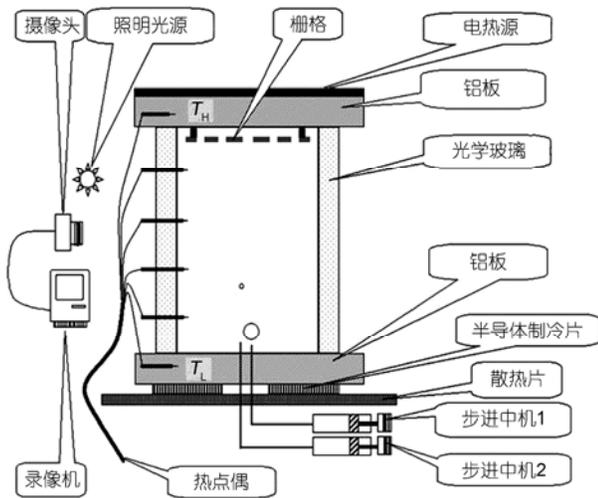


图8 气泡迁移空间实验设备示意图

摄、记录在录像带中, 随卫星返回舱一起回收. 本次空间实验将单个气泡迁移的最大Marangoni数从 5780 扩展到了 9288,  $Ma$ 数和 $Re$ 数的范围分别为 98.04~9288 和 2.3~217.9<sup>[35]</sup>, 图 9 为本次空间实验气泡热毛细迁移速度 $V$ 和 $V_{YGB}$ 之比随 $Ma$ 数的变化曲线.

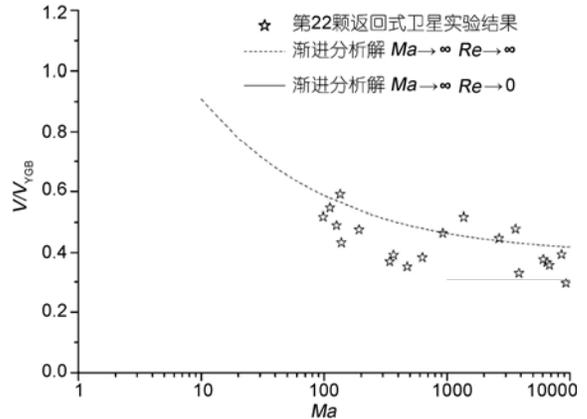


图9  $V/V_{YGB}$  随  $Ma$  数的变化曲线

本次空间实验得到了数组双气泡热毛细迁移相互作用的实验结果<sup>[36]</sup>, 图 10 为相应气泡轴向迁移速度、位移随时间的变化曲线. 实验结果显示, 小泡被超越总会带来小泡迁移速度的迅速减小, 两个气泡半径比越大, 小泡受到的影响也越大. 这与理论结果的预测一致<sup>[37,38]</sup>. 大小气泡半径比在 2 以上时, 很难观察到小气泡对大气泡的影响.

大尺寸球形气泡的合并在地面实验中难以实现. 图 11 显示了球形气泡合并的实验结果, 气泡半径分别为 6.7 mm 和 5.0 mm, 气泡驻留时间(从液滴接触、滑移到合并全过程)为 27 s. 基于液滴(气泡)化学势差与合并趋势的关系, 根据本次空间实验 19 组气泡的合并过程分析, 获得了驻留时间 $t_{\text{coal}}$ 与两个气泡半径 $r_1$ 和 $r_2$ 的关系<sup>[39,40]</sup>:

$$\ln\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = (-0.77 \pm 0.03) + (-0.077 \pm 0.002) \times t_{\text{coal}}$$

### 5 沸腾传热实验

沸腾现象具有很高的传热系数, 获得了广泛的应用. 地面常重力环境中, 加热面上气泡的形成、生长、运动(包括脱落、滑移、合并与振荡等)会受到浮力的主导, 并进而主导传热特性, 在相当大的程度上掩盖了加热面附近气-液-固相互作用及相变过程对传热的贡献, 导致对沸腾传热机制的认识迄今仍具

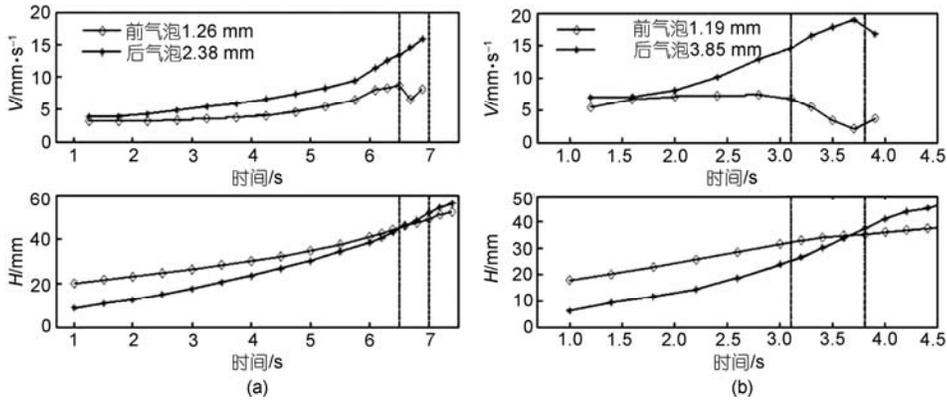


图 10 双气泡热毛细迁移过程轴向速度  $V$  及位移  $H$  随时间的变化曲线  
(a) 大小气泡半径比  $r = 1.89$ ; (b) 大小气泡半径比  $r = 3.24$

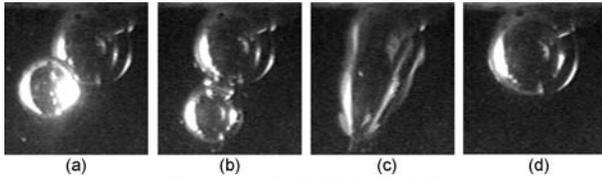


图 11 两气泡的合并过程

(a) 初始位置  $t=0$  s; (b) 合并位置  $t=22$  s; (c) 合并瞬间  $t=27$  s;  
(d) 合并后形状

有明显的经验特色。

2005 年, 搭载我国第 22 颗返回式卫星进行了池沸腾实验<sup>[41]</sup>。图 12 显示了微重力条件下 R113 在铂丝表面的核态池沸腾传热强化因子的变化特征, 在落塔中进行了相应的地基短时微重力实验<sup>[42]</sup>。可以明显看到, 对于丝(柱)状加热表面, 微重力池沸腾具有不低于地面时的传热系数, 甚至还略有增强。临界热流的绝对值比常重力时有所降低, 但近似地仍可以采用 Lienhard 和 Dhir 模型描述, 尽管无量纲半径比该模型最初的适用范围扩大了 3~4 个数量级。这和地面常重力环境中关于临界现象尺度效应的研究结果

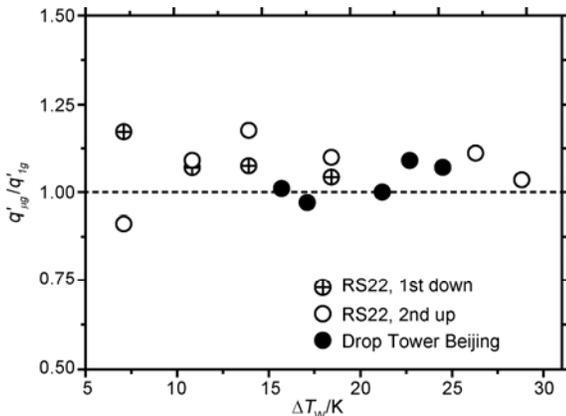


图 12 微重力细丝表面池沸腾强化因子

存在极大差异, 表明无量纲半径在小 Bond 数情形中, 已不再是描述临界热流尺度效应的唯一参数。

在长期微重力环境中, 气泡行为有着与常重力时迥然不同的特征(图 13): 小气泡不断在铂丝表面生成、脱落并缓慢远离加热表面; 中等尺寸气泡黏附在铂丝上做横向振动, 并不断合并所碰到的小气泡; 铂丝表面还黏附有一个大气泡, 但它并未包裹细丝, 随着热流增大, 该气泡不断长大(其间也吸收底部其他小气泡), 最终从丝上脱落。实验过程中也观察到了气泡向加热表面的运动<sup>[42]</sup>。现有模型均无法完全描述相关发现, 其根源在于没有考虑 Marangoni 效应对气泡脱落过程影响。同时考虑气泡所受浮力、表面张力、黏性阻力、惯性力、压差力和 Marangoni 力的影响, 建立了核态池沸腾孤立气泡区生长气泡受力及脱落模型, 与实验观测符合甚好(图 14)<sup>[43]</sup>。

平板加热面时传热性能则有明显不同(图 15)。该微重力实验是在 2006 年 9 月搭载我国 SJ-8 号卫星进行的, 采用平板加热, 液体工质为 FC-72。实验采用了控制加热电压按指数形式增长的准稳态加热方式, 并通过压力、温度控制系统对系统压力、液体过冷度等进行控制<sup>[44]</sup>。这里, 采用准稳态实验的好处在于可



图 13 长期微重力环境细丝表面池沸腾中的气泡行为特征

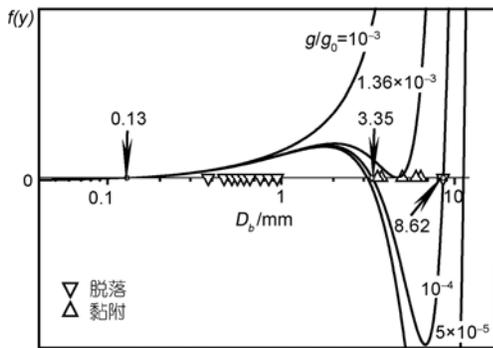


图 14 不同重力条件下气泡受力与脱落

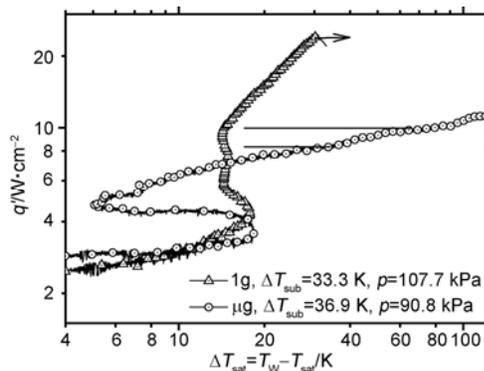


图 15 不同重力条件下平板加热面上 FC-72 沸腾传热曲线

以获得连续的沸腾曲线，从而避免空间微重力沸腾稳态实验数据的稀缺与分散引起沸腾曲线变化趋势模糊不清的弊端。可以看到，在低热流密度时，沸腾传热在微重力时显著增强，但随热流密度增加很快转为恶化，沸腾曲线变得极为平缓，这与前人采用稳态加热实验所得到的趋势相同。此外，对记录图像的分析表明，传热曲线特征与气泡行为有着直接的关联<sup>[45]</sup>。

## 6 液体/液体扩散传质实验

只有在微重力条件下，才可能单因素地研究由于溶液中不同组分浓度梯度引起的物质传输过程，精确测量扩散系数。国内外已经开展了许多对二元溶液相互扩散系数的测量研究<sup>[46~49]</sup>，相关的空间实验只有两项。一项是美国空间局(NASA)资助的空间二元混溶液体的扩散系数研究；另一项是欧洲空间局(ESA)的扩散和Soret系数测量。这两项工作均不是实时测量传质过程，而是后处理研究传质问题。Rashidnia等人<sup>[50]</sup>设计了一套共光路剪切干涉仪，给出了地面重力环境的测量。德国微重力研究中心设计了双波长Mach-Zehnder干涉仪，将在国际空间站

上使用。我们开展了Mach-Zehnder干涉仪实时观测晶体生长传质过程的地基研究<sup>[51~53]</sup>，并在SJ-8号卫星中首次采用Mach-Zehnder干涉测量技术在空间实时地测量了杜仲蛋白质溶液与水之间的扩散过程。

空间Mach-Zehnder干涉仪实验设备中包含4套独立的分系统，Mach-Zehnder光学干涉系统、图像采集系统、液池对接系统以及电路控制系统，我们研制出抗震性能强的空间Mach-Zehnder干涉系统。实验观察了水滴进入6 mm×6 mm×1.5 mm的液池内盛有的浓度为10 mg/mL杜仲蛋白质溶液中发生的传质过程，取得3.5 h的空间实验结果，干涉条纹图像非常清晰。图16给出了不同时刻的干涉条纹，图17给出了 $t = 1449.7$  s时刻反演计算的浓度分布。结果看出，传质过程是纯扩散过程，浓度梯度集中于水滴所在位置，远处浓度变化缓慢。数据分析给出 $x$ 方向、 $y$ 方向以及 $R$ 方向( $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$ )固定时刻浓度的空间分布，如图18所示，可见三方向的扩散速率基本相同，均扩散到4.0 mm处。计算得出杜仲蛋白质溶液的平均扩散系数为 $2.02 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{s}$ 。

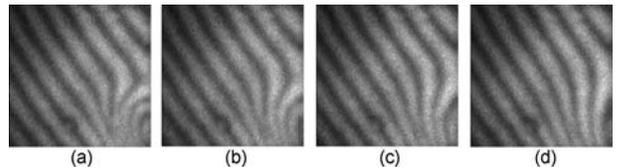


图 16 空间实验干涉条纹图(扩散过程)

(a)  $t = 304.5$  s; (b)  $t = 548.7$  s; (c)  $t = 906.0$  s; (d)  $t = 1449.7$  s

## 7 颗粒物质动力学

在SJ-8卫星上开展了对微重力条件下颗粒物质在小幅振动驱动下的运动行为的首次空间实验研究<sup>[54]</sup>，所取得的进展主要在颗粒气体低密度(Knudsen区域)和较高密度(平均自由程远小于系统尺寸)两种条件下颗粒的运动规律，另外还理论研究了如何利用颗粒气体的“麦克斯韦妖”效应实现对颗粒的运输和操纵等问题<sup>[55]</sup>。

分布律问题是统计物理的基础，要建立合适的颗粒统计学理论，必须研究清楚颗粒体系的分布律问题。在SJ-8卫星上的实验建立了准二维系统(图19)，通过粒子跟踪方法得到颗粒在任一时刻的位置和运动速度。分析由图19右图所得的包含4个运动颗粒，10种振动参数的2 h长时间跟踪数据，得到如图20所示的速度分布曲线，表明颗粒在两个维度上的速

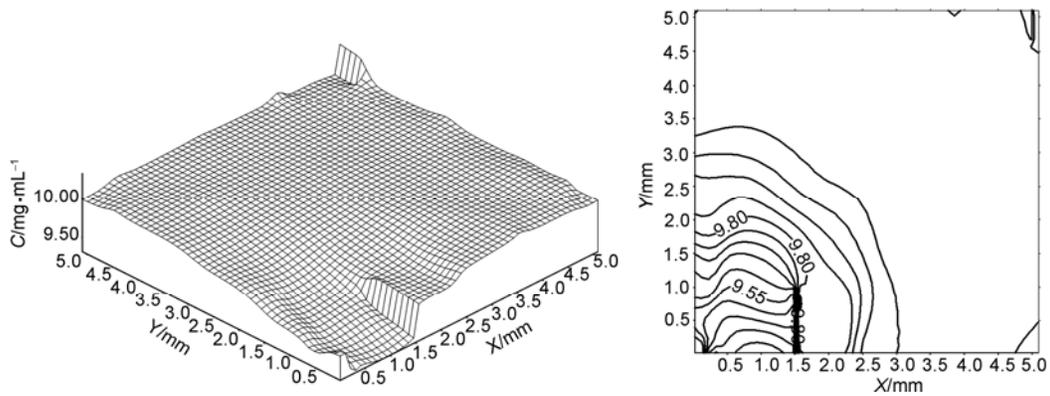


图 17  $t = 1449.7$  s 不同时刻的浓度场分布

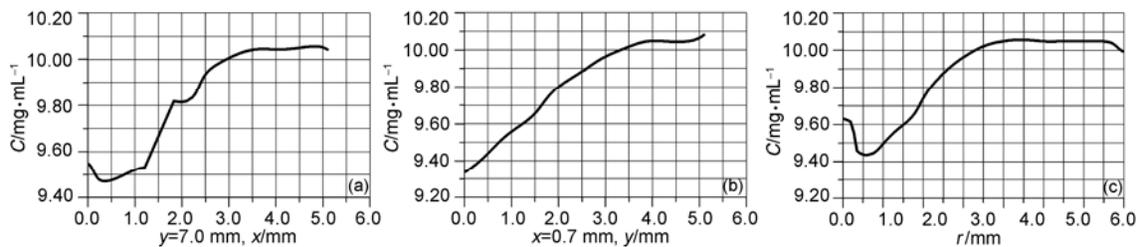


图 18 三方向的浓度分布

(a)  $x$  方向; (b)  $y$  方向; (c)  $R$  方向

度分布均满足很好的指数分布律  $\text{PDF}(v) \propto \exp\{-[v/v_0]\}$ 。对传统分子体系的麦克斯韦分布律的偏离在颗粒体系中是非常普遍的，其影响机制包括体系的边界条件、颗粒的数目、能量的输入与耗散的频率等因素，是否存在一种普适的分布规律仍然是值得思考的问题。

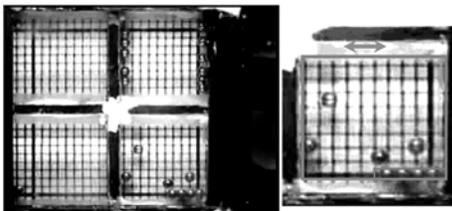


图 19 摄像记录的 SJ-8 卫星实验样品池中颗粒的运动轨迹

微重力条件提供了直接观察颗粒运动物理规律的必要环境，使得对颗粒体系的一些基本物理机制的研究成为可能。从现象上的颗粒气体的团聚行为，到统计基础的速度分布律问题，这些研究工作无疑都有助于促进我们对颗粒体系的深入理解。目前在 Knudsen 域颗粒气体所展现的基本特征的研究，揭示了密度变化导致的颗粒气体气-凝相变的物理机制，给出了颗粒气体可能的速度指数分布规律等重要物

理内容。颗粒数目的改变能够导致颗粒气体分布的本质性变化，这一实验结果告诉我们颗粒这样的耗散体系的物理本质是多尺度的，体系因密度或体积的变化存在相转变过程。在进一步的卫星实验中，将开展颗粒气体相分离和颗粒物质空间输运实验研究<sup>[54-59]</sup>。

## 8 微重力燃烧实验

微重力燃烧是微重力科学的重要领域<sup>[60,61]</sup>，我国已经开展的工作主要是地基实验和数值模拟。2006 年中国科学家利用 SJ-8 号科学实验卫星完成了我国首批两项微重力燃烧空间实验<sup>[62,63]</sup>，分别对多孔材料闷烧过程和导线着火前期特性进行研究，取得了具有实际意义和科学价值的成果。

闷烧是一种主要多孔可燃材料内部发生的无焰燃烧现象<sup>[64,65]</sup>，一般认为，它是载人航天器舱内和地面设施发生火灾的重要形式和原因。由于闷烧的特征速度很小，浮力效应对其点燃、传播和演化过程的影响十分显著。在美国航天飞机上完成的空间闷烧实验<sup>[66-68]</sup>，对微重力条件下典型的逆向(闷烧锋面传播方向与气流方向相反)和同向(闷烧传播方向与气流相同)闷烧过程进行了研究，而对更具实际意义的双向闷烧过程没有考虑。这些实验中，密闭燃烧室

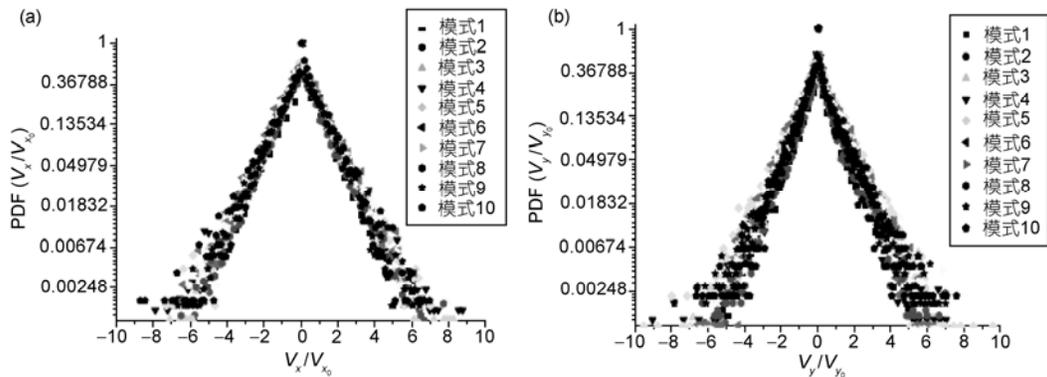


图 20 准二维实验统计测量得到的颗粒气体  $x$  方向与  $y$  方向速度的几率分布函数

内的压力不断上升，而实际的闷烧环境接近于等压条件。SJ-8号卫星搭载闷烧实验<sup>[62]</sup>通过控制实验段内的环境压力，对等压(绝对压力约 97 kPa)条件下聚氨酯泡沫试样中的闷烧点燃和双向传播过程进行了研究。空间实验装置(图 21)总质量约为 50.5 kg，包含两个独立的实验单元，分别用于气流氧气浓度为 21%和 35%的实验，气流速度均为 3.1 mm/s。实验结果表明，在微重力环境中，只需要较微弱的热源即可引发闷烧，很小的气流速度即可支持闷烧的传播；氧气浓度

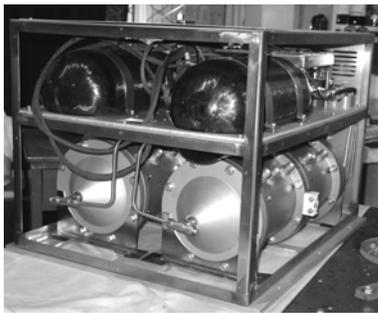


图 21 SJ-8 卫星搭载闷烧实验装置(安装面板前)

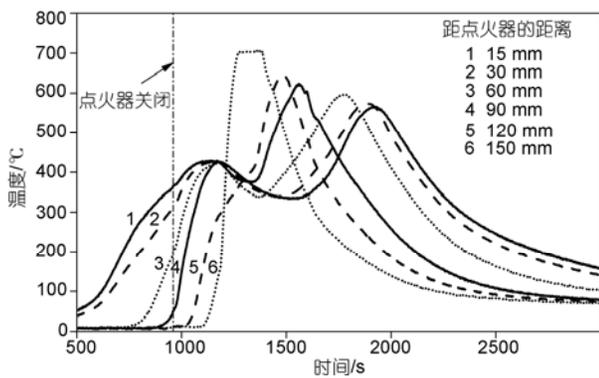


图 22 逆向闷烧试样中不同位置处闷烧温度-时间曲线(气流氧气浓度 35%)

较小时，逆向闷烧在传播到试样末端之前将自行熄灭，同向闷烧可以自维持传播至试样末端；气流氧气浓度为 35%时，逆向闷烧和同向闷烧都可自维持传播，如图 22 中的闷烧温度变化曲线所示，当逆向闷烧传播至试样末端区域时反应急剧加速，导致局部发生闷烧向有焰燃烧的转变，反应温度大大增加，有焰燃烧进一步点燃闷烧反应留下的剩余碳，使其发生剧烈的二次氧化反应，并向下游传播直到剩余碳耗尽。实验结果为研究闷烧机理提供了理想的基础数据，对载人航天器的防火安全具有实际意义。

电子电气元件过热及由此引发的着火和燃烧是载人航天器火灾的主要点火源，微重力条件下的相关研究可为研制火灾探测技术提供依据。美国和日本科学家通过空间实验和落井实验研究了微重力条件下导线绝缘层表面的火焰传播过程<sup>[69-72]</sup>。他们在实验中首先对导线进行预热，然后用外加点火器来点燃导线，研究结果不能说明电子电气元件由于本身的过载疲劳引起的失火，尤其是无法获得发生失火的先期征兆。SJ-8号卫星搭载实验<sup>[63]</sup>以潜在的“点火源”为研究对象，测量了静止环境中航天导线自身适度过载时绝缘层着火前期的温度和辐射特性。实验环境绝对压力约 59 kPa，被测导线截面积为 0.2 mm<sup>2</sup>，绝缘层为 0.1 mm厚的聚四氟乙烯，内包镀银铜线芯。实验发现，由于在微重力环境中浮力对流基本消失，导线的散热情况恶化，过载导线绝缘层的温度不断增加，极易发生着火。实验还研究了过载电流大小和导线捆绑方式对导线着火前期特性的影响。图 23 是 10.2 A过载电流下单根导线绝缘层的温度变化曲线，图中将空间实验结果与地面功能模拟实验结果进行了对比。图 24 是空间实验中对单根导线和排线得到的温度测量结果的比较。

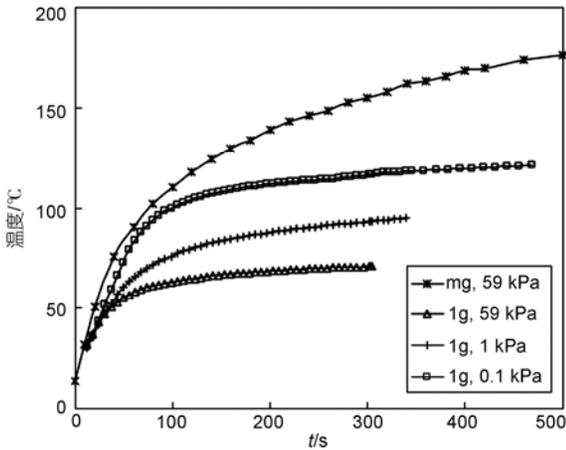


图 23 10.2 A 过载电流下单根导线绝缘层的温度变化

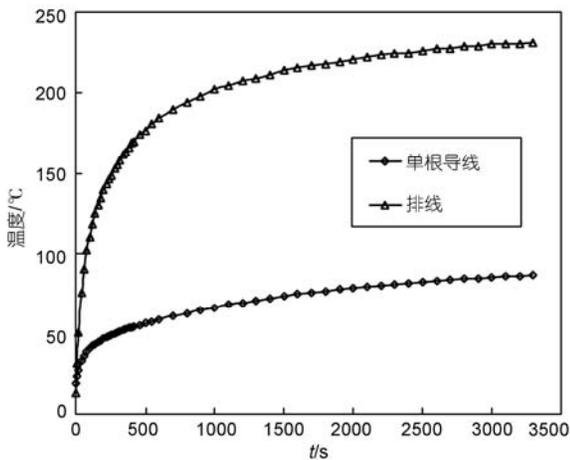


图 24 单根导线和排线绝缘层温度曲线的比较

### 9 空间生物流体力学实验

空间微重力环境下对流、沉降、静水压趋于消失，球面气-液界面随机出现，导致物质传输过程发生显著改变，从而严重影响细胞(尤其是哺乳动物细胞)营

养物质运输和新陈代谢过程。若细胞对营养物质摄取速率大于其扩散速率，细胞将因营养物质匮乏而逐步死亡；反之，代谢废物则逐渐积聚于细胞周围、产生毒理效应。若容器内未充满培养液，部分细胞可能得不到正常的营养物质供给；反之，则将面临如何实现在密封条件下有人操作的气体交换和培养液更新的问题。因此，采取强迫对流方式是当前空间细胞生长过程中物质交换的主要途径<sup>[73-75]</sup>。然而，流动剪切将影响细胞的生物学行为<sup>[76-78]</sup>，从而使(微)重力作用与流体剪切作用耦合在一起，难以实现细胞可控生长和细胞生物学行为定量研究。

本实验针对区分重力直接与间接作用这一关键科学问题，基于鱼鳃呼吸的生物力学原理<sup>[79,80]</sup>，提出了双向流动、半透膜渗流运输的空间细胞培养新概念(图 25)，理论研究表明，培养室内流动剪切对细胞生物学行为影响可以忽略<sup>[73,74]</sup>(图 26)。利用自行研制的逆流-片流式空间细胞生长实验装置，以滋养层细胞为细胞模型，采用空间与地面实验对照、流体剪切和(微)重力单独或协同作用的实验方案，于 2005 年在返回式卫星上开展了装置原理性验证和细胞生长与分泌的空间飞行实验。实验在轨运行 4 天，样品回收后进行生物学检测和地面实验比对。实验结果表明，空间实验装置达到了预期设计目标，有利于降低和控制流动剪切等因素对微重力效应的干扰；空间搭载样品的糖耗较地基样品有所增加，而激素分泌水平则有不同方向的改变。本实验提出了逆流-片流方式保持均匀的营养物质运输、并定量控制流体剪切影响的新思想，从而克服了已有旋转式空间细胞生长实验装置的不足。未来研究在科学问题上将从细胞生长向细胞分化、凋亡、黏附、聚集等生物学功能改变及其分子调控机制方面深化，在技术上将进一步

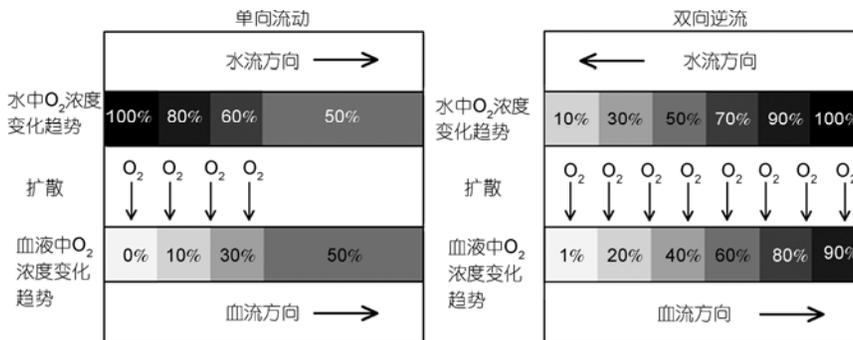


图 25 新型片流-逆流式细胞生物反应器的生物力学概念

在单向流动(左)和双向逆流模式中血液对从水流中的氧气摄取率分别为 50%和 80%<sup>[67,68]</sup>

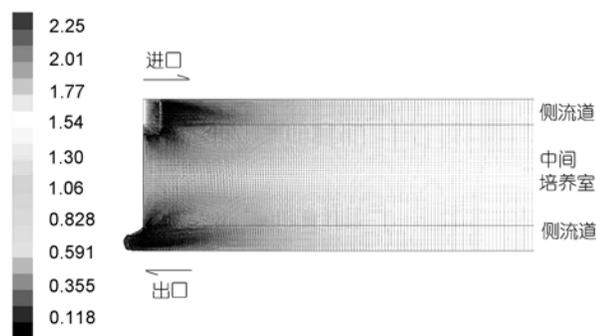


图 26 片流-逆流式细胞生物反应器中位剖面剪切率分布以剪切率值图示速度矢量(1/s), 基于几何对称性的剪切率场<sup>[67]</sup>

发展基于模式化表面的单细胞生长实验装置、在线观测细胞生物学行为改变的检测装置、可更好模拟空间微重力效应的地面模拟装置, 以期拓展空间细胞/组织工程以及空间制药技术, 深化重力直接与间接作用影响空间细胞生物学行为的认识, 进而为量化航天员生理改变、提供对抗措施提供定量依据。

## 10 展望

微重力科学是空间科学的新兴和前沿领域, 它

研究自然科学中许多具有突破性的挑线课题, 同时也为空间和地面的高技术发展开辟应用前景, 为载人外太空探索奠定基础。随着国际空间站的正常运营, 微重力研究将取得一批重大成果。中国的载人航天工程计划和即将实施的空间站计划, 对微重力科学的发展提出了新的需求。从 20 世纪 80 年代后期开始, 我国逐渐开展了微重力科学研究。近 10 年来, 主要通过神舟飞船计划和返回式卫星计划, 完成了一批空间微重力实验, 取得了一批可喜的学术成果。

本文总结了近 10 年来我国科学家在流体科学方面的空间实验结果。事实上, 每个空间实验开始前都需要进行大量的地面理论和实验研究, 我国微重力研究的基础设施正在逐步加强。我国科学家还进行了一批空间生命科学和空间生物技术、以及空间材料科学方面的实验, 空间基础物理的研究也正在逐步开展。可以预计, 微重力科学在我国将会有较好的发展前景, 空间微重力实验的机会将会增加, 实验的资源将会更加完善。中国科学家将在微重力科学领域作出更大的贡献。

## 参考文献

- Huang H D, Chu G M, Zhan X Q. Liquid management under microgravity environment. In: Hu W R, ed. Space Science in China. New York: Gordon & Breach Science Publishers, 1997. 355—374
- 林兰英. 中国微重力科学与空间实验. 北京: 中国科学技术出版社, 1988
- Zhong X R, Lin L Y. GaAs single crystal growth in space. In: Hu W R, ed. Space Science in China. New York: Gordon & Breach Science Publisher, 1997. 333—354
- Chen W C. Space material science. In: Hu W R, ed. Space Science in China. New York: Gordon & Breach Science Publisher, 1997. 315—332
- Liu C X. Simulations and experiments of space biology. In: Hu W R, ed. Space Science in China. New York: Gordon & Breach Science Publisher, 1997. 387—396
- Bi R C. Protein crystal growth in space. In: Hu W R, ed. Space Science in China. New York: Gordon & Breach Science Publisher, 1997. 397—414
- Feng M F. Cell cultivation in space. In: Hu W R, ed. Space Science in China. New York: Gordon & Breach Science Publisher, 1997. 415—436
- 胡文瑞, 徐硕昌. 微重力流体力学. 北京: 科学出版社, 1999
- Yao Y L, Xie J C, Shu J Z, et al. Microgravity experiment in oscillatory convection in liquid bridge of floating half zone. Acta Mech Sin, 1995, 27: 663
- Xie J C, Lin H, Han J H, et al. Experimental investigation of thermocapillary migration of isolated drop. Adv Space Res, 1999, 24: 1409 [DOI](#)
- Hu W R. Preface of special issue: Microgravity experiments on board the Chinese recoverable satellite. Microgravity Sci Tech, 2008, 20: 59 [DOI](#)
- Birikh R V, Briskman V A, Velarde M G, et al. Liquid Interfacial Systems. New York & Basel: Marcel Dekker, Inc, 2003
- Schwabe D, Lamprecht R, Scharmann A. Marangoni experiment in an open boat. In: Proceedings of the Norderney Symposium on Scientific Results of the Germany Space-lab Mission D1, Norderney, Germany, 1986. 121
- Georis Ph, Hennenberg M, Lebon G, et al. Investigation of thermocapillary convection in a three-liquid-layer system. J Fluid Mech, 1999, 389: 209—228 [DOI](#)

- 15 Simanovskii I B, Georis Ph, Nepomniaschy A, et al. Oscillatory instability in multilayer system. *Phys Fluids*, 2003, 15: 3867 [\[DOI\]](#)
- 16 Liu Q S, Roux B, Velarde M G. Thermocapillary convection in two-layer system. *Int J Heat Mass Transfer*, 1998, 41: 1499 [\[DOI\]](#)
- 17 Yao Y L, Liu Q S, Zhang P, et al. Space experiments on thermocapillary convection and Marangoni convection of two-immixible liquid layers. *J Japan Soc Microgravity Appl*, 1998, Suppl II: 150
- 18 Geng R H, Zhang P. The melting process in space experiment of fluid physics on board satellite SJ-5. *Microgravity Space Station Utilization*, 2000, 3: 5
- 19 周炳红, 刘秋生, 胡良, 等. 两层流体热毛细对流空间实验研究. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2002, 32: 316—322
- 20 Zhao J F, Xie J C, Lin H, et al. Microgravity experiments of two-phase flow patterns aboard Mir space station. *Acta Mech Sin*, 2001, 17: 151 [\[DOI\]](#)
- 21 Zhao J F, Xie J C, Lin H, et al. Experimental studies on two-phase flow patterns aboard the Mir space station. *Int J Multiphase Flow*, 2001, 27: 1931 [\[DOI\]](#)
- 22 Zhao J F, Hu W R. Slug to annular flow transition of microgravity two-phase flow. *Int J Multiphase Flow*, 2000, 1295—1304
- 23 赵建福, 解京昌, 林海, 等. 部分重力条件下气液两相流型研究. *工程热物理学报*, 2004, 25: 85—87
- 24 赵建福, 解京昌, 林海, 等. 常重力和低重力条件下气液两相流实验研究. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2002, 32: 491—495
- 25 Zhao J F, Xie J C, Lin H, et al. Pressure drop of bubbly two-phase flow through a square channel at reduced gravity. *Adv Space Res*, 2002, 29: 681—686 [\[DOI\]](#)
- 26 赵建福, 林海, 解京昌, 等. 低重力条件下气/液两相流摩擦压降实验研究. *应用基础与工程科学学报*, 2001, 9: 373—380
- 27 Young N O, Goldstein J S, Block M J. The motion of bubbles in a vertical temperature gradient. *J Fluid Mech*, 1959, 6: 350 [\[DOI\]](#)
- 28 Yin Z H, Gao P, Hu W R, et al. Thermocapillary migration of nondeformable drops. *Phys Fluids*, 2008, 20: 082101 [\[DOI\]](#)
- 29 Ma X J, Balasubramaniam R, Subramanian R S. Numerical simulation of thermocapillary drop motion with internal circulation. *Numer Heat Transfer A*, 1999, 35: 291
- 30 Xie J C, Lin H, Han J H, et al. Drop migration of middle Reynolds number in a vertical temperature gradient. *Microgravity Sci Tech*, 1996, 9: 95
- 31 Xie J C, Lin H, Han J H, et al. Experimental investigation on Marangoni drop migration using drop shaft facility. *Int J Heat Mass Transfer*, 1998, 41: 2077 [\[DOI\]](#)
- 32 Xie J C, Lin H, Zhang P, et al. Experimental investigation on thermocapillary drop migration at large Marangoni number in reduced microgravity. *J Coll Interf*, 2005, 285: 737 [\[DOI\]](#)
- 33 Balasubramaniam R, Lacy C E, Wozniak G, et al. Thermocapillary migration of bubbles and drops at moderate values of the Marangoni number in reduced gravity. *Phys Fluids*, 1996, 8: 872—880 [\[DOI\]](#)
- 34 Hadland P H, Balasubramaniam R, Wozniak G, et al. Thermocapillary migration of bubbles and drops at moderate to large Marangoni number and moderate Reynolds number in reduced gravity. *Exp Fluids*, 1999, 26: 240—248 [\[DOI\]](#)
- 35 崔海亮, 胡良, 段俐, 等. 气泡热毛细迁移的空间实验研究. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2007, 37: 674—683
- 36 Kang Q, Cui H L, Hu L, et al. On-board experimental study of bubble thermocapillary migration in a recoverable satellite. *Microgravity Sci Tech*, 2008, 20: 67—71 [\[DOI\]](#)
- 37 Sun R, Hu W R. The thermocapillary migration of two bubbles in microgravity environment. *J Coll Interf Sci*, 2002, 255: 375—381 [\[DOI\]](#)
- 38 Sun R, Hu W R. Planar thermocapillary migration of two bubbles in microgravity environment. *Phys Fluids A*, 2003, 15: 3015—3027 [\[DOI\]](#)
- 39 Kang Q, Cui H L, Hu L, et al. Experimental Investigation on bubble coalescence under non-uniform temperature distribution in reduced gravity. *J coll Interf Sci*, 2005, 310: 546—549
- 40 Kang Q, Hu L, Huang C, et al. Experimental investigation on interaction of two drops by thermocapillary-buoyancy migration. *Int J Heat Mass Transfer*, 2006, 49: 2636—2641 [\[DOI\]](#)
- 41 Zhao J F, Wan S X, Liu G, et al. Subcooling pool boiling on thin wire in microgravity. *Acta Astronautica*, 2009, 64: 188—194 [\[DOI\]](#)
- 42 Zhao J F, Wan S X, Liu G, et al. Pool boiling heat transfer in microgravity. *Microgravity Sci Tech*, 2007, 19: 135—136 [\[DOI\]](#)
- 43 Zhao J F, Liu G, Wan S X, et al. Bubble dynamics in nucleate pool boiling on thin wires in microgravity. *Microgravity Sci Tech*, 2008, 20: 81—89 [\[DOI\]](#)
- 44 Zhao J F, Li J, Yan N, et al. Bubble behavior and heat transfer in quasi-steady pool boiling in microgravity. *Microgravity Sci Tech*, 2009, in press
- 45 李晶, 赵建福, 闫娜, 等. 微重力池沸腾现象中的气泡行为特性研究. *工程热物理学报*, 2008, 29: 439—442
- 46 Bowen W R, Liang Y, Williams P M. Gradient diffusion coefficients-theory and experiment. *Chem Eng Soc*, 2000, 55: 2359—2377 [\[DOI\]](#)
- 47 Laurence R, Jacques B. Influence of conformational changes on diffusion properties of bovine serum albumin: a holographic interferometry study. *Coll Surf B: Biointerfaces*, 2002, 25: 99—108 [\[DOI\]](#)
- 48 He C H. Prediction of the concentration dependency of mutual diffusion coefficients in binary liquid mixtures. *Ind Eng Chem Res*, 1998, 34: 2148—2153
- 49 Yeng E, Lee Sam, Li F Y. Binary diffusion coefficients of the methanol/water system in the temperature range 30—40°C. *J Chem*

- Eng Data, 1991, 36: 240—243[DOI]
- 50 Rashidnia N, Balasubramaniam R. Measurement of the mass diffusivity of miscible liquids as a function of concentration using a common path shearing interferometer. *Exp Fluids*, 2004, 36: 619—626[DOI]
- 51 Duan L, Shu J Z. The convection during NaClO<sub>3</sub> crystal growth observed by the phase shift interferometer. *J Crystal Growth*, 2001, 223: 181—188[DOI]
- 52 Kang Q, Duan L, Hu W R. Mass transfer process during the NaClO<sub>3</sub> crystal growth process. *Int J Heat Mass Transfer*, 2001, 44: 3213—3222 [DOI]
- 53 Duan L, Kang Q, Hu W R, et al. Mass transfer process and growth rate of protein crystal growth. *Biophys Chem*, 2002, 97: 189—201[DOI]
- 54 Hou M, Liu R, Zhai G, et al. Velocity distribution of vibration-driven granular gas in Knudsen regime in microgravity. *Microgravity Sci Tech*, 2008, 20: 73[DOI]
- 55 Hou M, Tu H, Liu R, et al. Temperature oscillations in a compartmentalized Bi-disperse granular gas. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 068001[DOI]
- 56 Hou M, Evesque P. Granular medium in microgravity. In: Hu W R, ed. *Advances in Microgravity Sciences*. Kerala, India: Research Signpost Publisher, 2008
- 57 厚美瑛, 刘锐, Meerson B. 颗粒气体的类气-液相变. *空间科学学报*, 2008, 28: 1
- 58 厚美瑛, 李寅阁. 稀薄颗粒气体的运动速度几率分布函数. *科学通报*, 2009, 54: 1483—1487
- 59 Liu R, Li Y, Hou M, et al. van der Waals-like phase separation instability of a driven granular gas in three dimensions. *Phys Rev E*, 2007, 75: 079705
- 60 张孝谦. 微重力燃烧基础研究概述. *力学进展*, 1990, 20: 83—92
- 61 张夏. 微重力燃烧研究进展. *力学进展*, 2004, 34: 507—528
- 62 Wang S F, Zhang X. Microgravity smoldering combustion of flexible polyurethane foam with central ignition. *Microgravity Sci Tech*, 2008, 20: 99—105[DOI]
- 63 Kong W, Wang B, Zhang W, et al. Study on prefire phenomena of wire insulation at microgravity. *Microgravity Sci Tech*, 2008, 20: 107—113[DOI]
- 64 Ohlemiller T J. Modeling of smoldering combustion propagation. *Prog Energy Combust Sci*, 1986, 11: 277—310
- 65 Drysdale D. *An Introduction to Fire Dynamics*. Chichester, England: John Wiley, 1999
- 66 Walther D C, Fernandez-Pello A C, Urban D L. Space shuttle based microgravity smoldering combustion experiments. *Combust Flame*, 1999, 116: 398—414[DOI]
- 67 Bar-Ilan A, Anthenien R A, Walther D C, et al. Microgravity smoldering combustion experiments in the space shuttle. *AIAA Paper*, 2002, 2002-1077
- 68 Bar-Ilan A, Rein G, Fernandez-Pello A C, et al. Forced forward smoldering experiments in microgravity. *Exp Thermal Fluid Sci*, 2004, 28: 743—751[DOI]
- 69 Greenberg P S, Sacksteder K R, Kashiwagi T. Wire insulation flammability experiment: USML-1 1 Year Post Mission Summary. *NASA CP 3272*, 1994
- 70 Greenberg P S, Sacksteder K R, Kashiwagi T. Wire insulation flammability. *NASA CP 10174*, 1995
- 71 Kikuchi M, Fujita O, Ito K, et al. Experimental study on flame spread over wire insulation in microgravity. *Proc Combust Inst*, 1998, 27: 2507—2514
- 72 Kikuchi M, Fujita O, Ito K, et al. Flame spread over polymeric wire insulation in microgravity. *Space Forum*, 2000, 6: 245—251
- 73 Sun S J, Gao Y X, Shu N J, et al. A novel counter sheet-flow sandwich cell culture system to unravel cellular responses in space. *Microgravity Sci Tech*, 2008, 20: 115—120[DOI]
- 74 Long M, Sun S J, Huo B, et al. Biomechanics on cell responses to microgravity. In: Hu W R, ed. *Advances in Microgravity Sciences*. Trivandrum, India: Transworld Research Network Press, 2009, in press
- 75 Freed L E, Vunjak-Novakovic G. Spaceflight bioreactor studies of cells and tissues. *Adv Space Biol Med*, 2002, 8: 177—195[DOI]
- 76 Mardikar S H, Niranjana K. Observations on the shear damage to different animal cells in a concentric cylinder viscometer. *Biotech Bioeng*, 2000, 68: 697—704[DOI]
- 77 Wang J H, Thampatty B P. An introductory review of cell mechanobiology. *Biomech Model Mechan*, 2006, 5: 1—16[DOI]
- 78 Begley C M, Kleis S J. The fluid dynamic and shear environment in the NASA/JSC rotating-wall perfused-vessel bioreactor. *Biotech Bioeng*, 2000, 70: 32—40[DOI]
- 79 Piiper J, Baumgarten-Schumann D. Transport of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> by water and blood in gas exchange of the dogfish (*Scyliorhinus stellaris*). *Resp Physiol*, 1968, 5: 326—337[DOI]
- 80 Hughes G M. Distribution of oxygen tension in the blood and water along the secondary lamella of the icefish gill. *J Exp Biol*, 1972, 56: 481—492