0254-6124/2009/29(1)-140–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Li Jianqiang, Yuan Zhangfu. Introduction and interpretation of fluid mechanical experiments by Don Pettit on International Space Station. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(1): 140∼144

Don Pettit 国际空间站微重力流体实验与若干现象的解析*

李建强 袁章福

(中国科学院过程工程研究所 多相复杂系统国家重点实验室 北京 100190)

摘 要 Don Pettit 是美国 NASA 的资深宇航员, 2002 年 11 月至 2003 年 5 月, 在国际空间站工作期间, 进行了一系列名为 Saturday Morning Science 的微重力实验. Don Pettit 实验揭示了微重力下一些令人惊奇的现象, 涉及流体力学、气泡动力学、晶体生长以及运动学的诸多基础问题, 是能够获得的国际空间站为数不多的微重力实验资料, 具有重要研究意义. 实验包括 14 组流体实验和 7 组力学实验, 而流体实验又大致分为水膜实验和水球实验, 包括大尺寸水膜制备、扩散和对流、Marangoni 对流、薄膜结晶、水球/气泡旋转等. 本文对 Don Pettit 实验的流体部分进行了介绍, 并对其中的 Marangoni 对流和薄膜结晶实验现象进行了解析.

关键词 微重力; 流体力学; Marangoni 对流; 结晶学; 国际空间站

中图法分类号 V 524

Introduction and Interpretation of Fluid Mechanical Experiments by Don Pettit on International Space Station

LI Jianqiang YUAN Zhangfu

(*State Key laboratory of Multi-phase Complex System, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract The microgravity experiments "Saturday Morning Science" carried by Don Pettit, senior science astronaut' in 2003 on International Space Station was introduced in the present paper. The experiments video which has become available on NASA website demonstrates a variety of surprising phenomena which are highly related to the basic sciences in fluid convection, mechanics, crystallography, kinematics and so on. The experiments include 14 fluid experiments and 7 mechanical experiments. Only fluid experiments were narrated in this paper, particularly "Marangoni convection" and "thin film crystallizer" were compared with their counterparts on ground and the

* 国家自然科学基金项目 (50704031, 50474043), 国家自然科学委员会与韩国科学与工程基金会协议项目 (50711140385) 和北京市科技新星计划(2007A086) 共同资助

2008-01-22 收到原稿, 2008-05-10 收到修定稿

E-mail: jqli@home.ipe.ac.cn

effects of microgravity on relevant phenomena were analyzed.

Key words Microgravity, Fluid mechanics, Marangoni convection, Crystallography, International space station

1 引言

Don Pettit, 中文译名唐纳德·佩蒂特, 是美国 NASA 的资深宇航员, 曾先后 6 次到访国际空间站 (ISS). 2002 年 11 月 23 日, Don Pettit 作为 Expedition 6 的科学家, 搭乘奋进号航天飞机到达 ISS, 2003 年 5 月 3 日返回. 在此期间, 利用国际空间站的日常物品进行了一系列名为 Saturday Morning Science 的微重力实验*. 实验涉及流体力学、材料学等诸多领域的深层次基础科学问题. 资料公布后, 引起美国、日本等国众多微重力科学研究者的浓厚兴趣[1], 被誉为"令人惊异的太空实验".

实验共 21 组, 内容如表 1 所示, 包括 14 组流体实验和 7 组力学实验, 而流体实验又大致分为水膜实验和水球实验, 包括大尺寸水膜制备、扩散和对流、Marangoni 对流、薄膜结晶、水球/气泡旋转等. 本文对 Don Pettit 实验的流体部分进行了介绍, 并对其中的 Marangoni 对流和薄膜结晶实验现象进行解释.

2 流体实验介绍

2.1 大尺寸液膜制备

making thin water films 的实验目的是在微重力条件下制备水薄膜并进行相关实验. 用直径 53 mm 的金属丝围成圆圈, 从盛有太空饮用水的透明试样袋内, 拉制出水膜, 如图 1(a) 所示. 从侧面能明显看出"薄膜"其实是具有一定厚度的, 约 0.3 mm, 而且呈凸透镜状. 左右晃摆金属线圈, 水膜随之变形但很难破裂, 说明其具有较高的稳定性. 晃动时会有小液滴脱离水膜, 高速摄像机记录了分离过程. 水膜最大直径高达 115 mm, 而在地面重力条件下, 没有界面活性剂很难做出这种尺寸的液态薄膜, 尤其是保持高度稳定.

2.2 与水膜相关的实验介绍

diffusion and convection 实验将颜料加入水膜中, 用注射器吹送, 可以直接观察到水膜内的对流与扩散. 同样也可以用云母粉的白浊液作为示踪剂加入水膜, 达到稳定后, 可以清楚地观察到液膜内部呈漩涡状. 如图 1(b) 所示.

表 1 国际空间站 Don Pettit 微重力实验内容

Table 1 Don Pettit experiments in ISS

fluid experiments	1. making thin water films	2. diffusion and convection
	3. Marangoni convection	4. thin film crystallizer
	5. nucleate boiling	6. interlude: tea break
	7. making water spheres	8. vortex rings in water spheres
	9. large water spheres	10. symphony of spheres
	11. rotating spheres	12. rotating flask
	13. Alka seltzer	14. visco elastic
mechanical experiments	1. rotating bolt	2. gyro platform
	3. bubble movement in μg	4. particle agglomeration
	5. rotating bodies	6. watch repair
	7. snack time	

注: 流体实验中 1~5 为水膜实验, 7~13 为水球实验.

* Pettit D. Saturday Morning Science Videos 2003. http://science.nasa.gov/headlines/y2003/25feb-nosoap.htm

Marangoni convection 实验将加热棒 (电烙铁) 放在漩涡状液膜外侧, 清楚地观察到水膜中 Marangoni 对流, 如图 1(c) 所示. 用手电筒照射水膜, 发现水膜也发生流动, 这个现象让人费解, 显然光波的作用不会导致水的流动, 最可能的解释是手电筒光源的热能传递到水膜上, 导致局部存在温度梯度, 引发了 Marangoni 对流.

thin film crystallizer 实验用某种水溶液制成液膜, 随着水分的蒸发, 溶质达到过饱和状态然后开始形核与生长. 如图 1(d) 所示, 结晶发生在液膜边缘位置, 然后晶体向中心移动. 晶体具有规则外形. 在蒸发过程中液膜能长时间保持完整不破裂, 呈现显著的稳定性.

nucleate boiling 实验将加热棒插入液膜, 在固液界面处连续生成大量气泡, 可以观察到气泡的形核与长大过程, 形核的驱动力值得分析. 液膜内部产生明显的对流, 方向与插入角度有一定关系. 如图 1(e) 所示.

2.3 大尺寸水球的制备

水球的制备也要使用金属线圈, Don Pettit 采用三种方法制备水球. (1) 先用金属线圈制出水膜, 然后用塑料管从下部添加纯水, 在表面张力作用下, 最后形成规则的水球; (2) 用塑料管把水直接挤到圆圈上, 慢慢扩展最后形成水球; (3) 先在塑料管尖端挤成水球, 然后转移到金属线圈上. 如图 1(f) 所示.

2.4 与水球有关的实验介绍

vortex rings in water spheres 实验把少量白浊液用注射器注入水球内, 可以看到白浊液快速扩散成形为圆环, 并长时间保持这种形状, 类似烟雾在空气中形成的烟圈, 如图 1(g) 所示. 在液体中发生这种“烟圈”现象, 其机理值得深思.

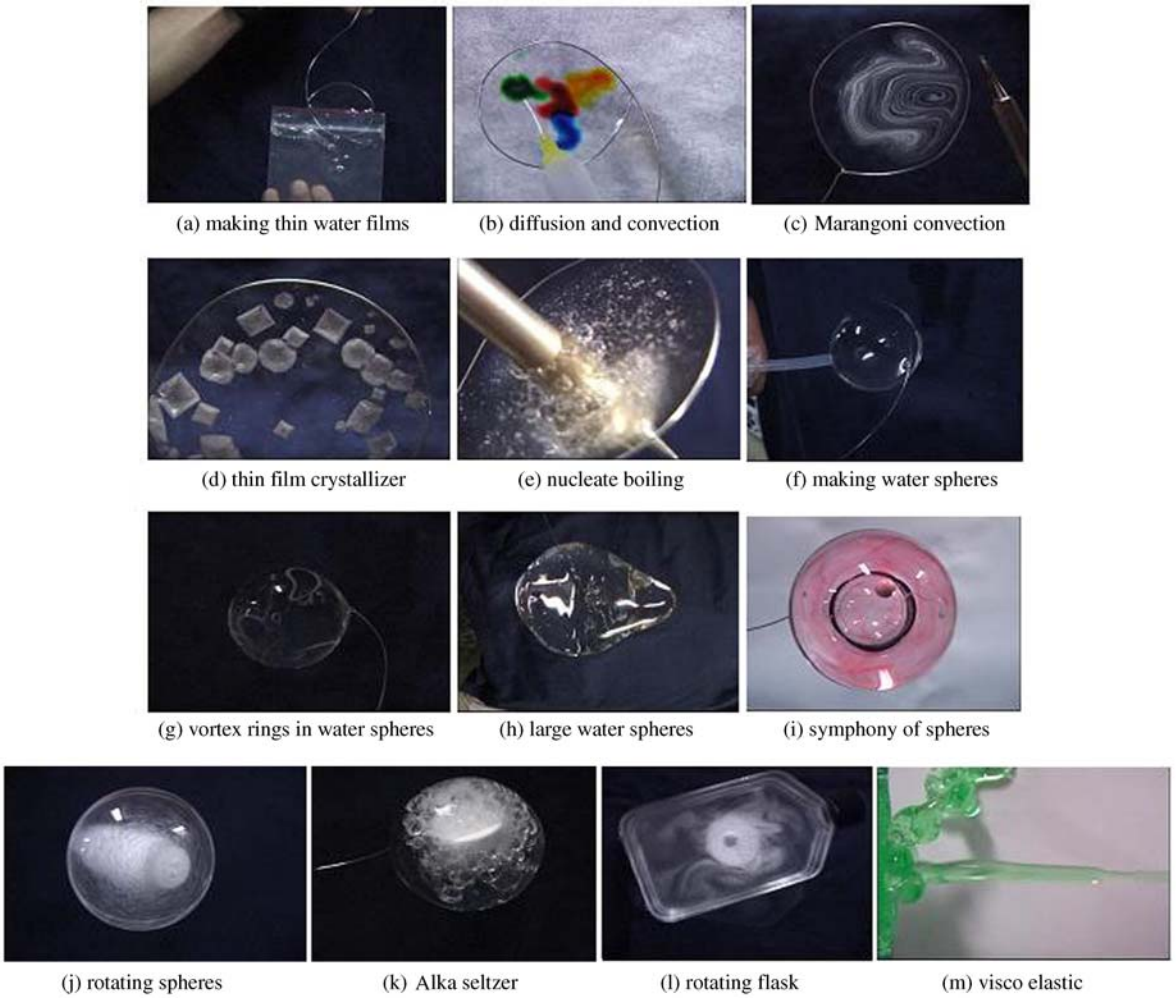


图1 Don Pettit 微重力流体实验

Fig.1 Captured photos from experiments video by Don Pettit in ISS

large water spheres 实验制出一个超大水球, 从录像上可以看出水球尺寸与人面部相当, 从侧面吹气冲击水球, 水球发生剧烈变形和振荡, 振荡在两侧相互之间往复传递并逐渐衰减. 当振荡传递到边缘时, 会形成液滴状突起, 液滴甚至会脱离水球. 从中清楚地观察到水球动力学形变的过程. 如图 1(h) 所示.

symphony of spheres 实验用注射器向水球中注入空气, 球心处先形成一个大气泡. 然后从外侧注入一个小气泡, 两个气泡快速合并并导致气泡周围产生扰动; 用注射器把水注入中心气泡里面, 形成较多液滴, 液滴和气泡壁接触时发生融合, 直径越小的液滴越容易融合; 先后用带有红色和白色颜料的液滴注入中心气泡, 可以更清楚地看到液滴融合的详细过程. 通过比较发现, 带有颜料的液滴寿命更短, 融合更快. 如图 1(i) 所示.

rotating spheres 实验在水球中形成无数微小气泡, 然后旋转, 可以看到气泡向旋转轴汇集; 把红茶茶叶混入水球, 旋转时茶叶会漂浮在水球表面; 把白糖加入水球也观察到同样现象. 旋转的水球自身也变成椭球体, 这些都是离心力作用的结果. 如图 1(j) 所示.

Alka seltzer 实验将 Alka seltzer (发泡剂) 放入水球, 产生大量气泡. 直径较大的气泡容易在水球表面破裂, 并有液滴溅出, 与沸腾现象类似. 最后形成微小气泡和水的均匀混合物. 用金属线圈固定水球, 并让水球旋转, 气泡逐渐向中心汇集, 用注射器从旋转轴处吸走气泡, 水球逐渐恢复透明. 用毛巾接触水球, 水在毛细作用下被汲取到毛巾上, 最后恢复成水膜. 如图 1(k) 所示.

2.5 其他

rotating flask 实验将水和气泡的均匀混合物装入容器 (flask) 中进行旋转, 气泡逐渐向旋转轴也就是容器中心处汇集, 最后气泡的分布呈类似银河系的形状. 如图 1(l) 所示. 这是非旋转对称的容器与内部流体对称旋转发生复杂相互作用的结果. 旋转一旦停止, 富集的气泡迅速向四周扩散.

visco elastic 试验与 Rayleigh Instability 现象有关. 首先观察果冻状粘性物质液柱断裂的过程. 然后把粘性物质用细管挤压喷出, 观察喷射液柱形状的变化. 在出口处液柱直径与管径相当, 然后逐渐增加, 在某处突然变大几毫米后又恢复到逐渐增加. 如图 1(m) 所示.

3 若干现象解析

3.1 Marangoni 对流实验

实验中, 加热棒放在带有示踪剂的液膜右侧, 可以看到液膜内部产生对流, 流动的方向是从中心到边缘, 如图 1(c)所示. 比较直观的理解, 对流是由于液膜在径向产生了正温度梯度, 在表面张力梯度驱动下产生了 Marangoni 对流. 但是大量实验结果和理论分析表明, Marangoni 对流方向应该是从边缘到中心, 而非从内向外. 文献 [2] 对液膜的 Marangoni 对流进行了模拟, 基于 Navier-Stokes 方程和能量方程的计算结果表明, 如果是纯 Marangoni 对流, 流动方向应该是从边缘到中心.

考虑到实验在微重力条件下进行, 需要验证微重力的影响. 我们在地面进行了类似的液膜对比实验. 用不锈钢细丝围成直径为 9 mm 的线圈 (在地面无法做出大尺寸水膜), 制备云母粉悬浮液的液膜, 把加热棒放在液膜右侧, 发现液膜内部也产生对流, 对流方向与加热端温度有关. 热端温度高时, 对流方向也是由内到外, 与微重力实验的结果相似; 热端温度低时, 对流方向为由外到内.

由此可以推断, Don Pettit 实验与地面对比实验中, 液膜在温度梯度下产生的对流不仅仅是 Marangoni 效应的结果, 很可能是 Marangoni 对流与液膜蒸发综合作用的结果. 液膜表面积较大, 则容易蒸发. 加热端温度较高, 则液膜蒸发速率相对较高, 中心液体会向热端运动进行补充. 在 Don Pettit 实验录像中, 可以清楚地观察到液膜的蒸发. 当蒸发作用占据优势时, 液膜对流为由内向外; 而当 Marangoni 效应占据优势时, 对流方向由外到内.

3.2 薄膜结晶实验

某种水溶液制成的液膜, 随着水分的蒸发, 溶质达到过饱和状态然后开始形核与生长. 如图 1(d) 所示, 结晶发生在液膜边缘位置, 长大的同时向中心移动.

与微重力实验结果不同, 地面的液膜实验中结晶通常发生在液膜中心, 然后晶体在 Marangoni 对流向边缘运动. 这种差异的原因可用图 2 说明. 微重力下的液膜为凸透镜状, 这在 Making thin water films 部分已经述及. 蒸发时, 边缘的液体先到达过饱和状态, 开始结晶; 而地面重力条件下的液膜为凹透镜状, 中心处最薄, 所以在蒸发过程中液

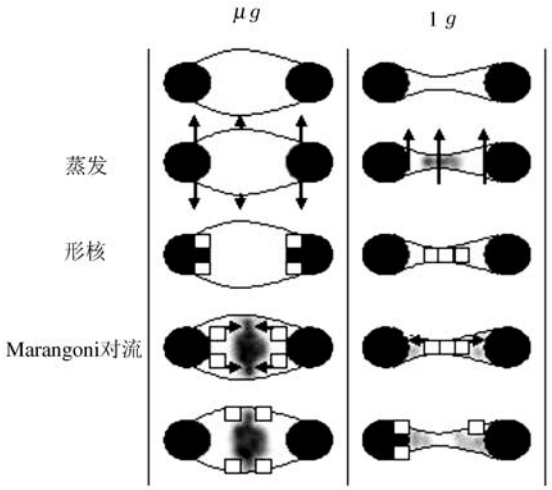


图 2 微重力 (μg) 和地面重力 ($1 g$) 条件下液膜结晶过程比较

Fig.2 Comparison of crystallization process under microgravity and ground gravity

膜中心先开始结晶, 并造成液膜内部成分偏析, 产生 Marangoni 对流, 晶体向液膜边缘移动.

4 结论

Don Pettit 实验揭示了微重力下一些与地面不同的异常现象, 涉及流体力学、气泡动力学、晶体生长以及运动学的诸多基础问题, 是能够获得的国际空间站为数不多的微重力实验资料, 具有重要研究意义, 值得关注和分析.

参考文献

[1] Ohnishi M. Tour in Don Pettit's microgravity world. *J. Soc. Micro. Appl.*, 2006, **23**:151 ∼156

[2] Kawamura H, Iwamoto K, Harashima M. Convection experiment in liquid thin film with thin metallic wire ring. *J. Soc. Micro. Appl.*, 2006, **23**:157 ∼160