

Plateau 模拟在微重力科学中的应用

徐硕昌¹ 简来成² 胡文瑞¹

¹(中国科学院力学研究所 北京 100080)

²(中央研究院物理研究所 台北市)

摘 要

Plateau 模拟使用中性悬浮技术来模拟太空的微重力条件, 在微重力科学中的应用包括: 研究液桥的平衡和振荡、研究液体封套悬浮区熔晶体生长技术和研究声悬浮技术等三个方面. 本文综述这三方面研究的进展, 评述这个方法的意义和局限, 讨论了进一步有待研究的问题.

关键词 Plateau 模拟—中性悬浮技术—微重力科学

1 引 言

19世纪60年代, Plateau 提出中性悬浮技术, 将油滴悬浮在酒精的水溶液中使两种液体密度相等且互不溶混, 这样可以消除重力影响来研究表面张力现象. 他对于表面张力作用下的旋转油滴的分裂过程进行了长期实验研究. 研究初衷是想类比旋转导致太阳系起源的演化过程.

20世纪70年代, 在太空材料加工研究的激励下, Plateau 模拟被重新重视. 这项实验技术被美、欧、日各国的许多科学家所使用^[1-10].

Plateau 模拟在微重力科学中的应用主要包括两个研究领域: 其一是关于无容器加工的声悬浮技术的地面模拟研究, 这主要是由美籍华裔科学家王赣骏在美国 JPL 所领导的研究集体所进行的研究; 另一个领域是进行悬浮区单晶体生长技术的模拟研究. 最先由美国的科学家 Carruthers 等进行了大量研究, 他们主要研究旋转对液桥的影响^[2]; 欧空局马德里研究集体在这方面也做了大量的研究工作^[11-18], 他们主要是研究液桥的平衡和振荡, 他们不仅把 Plateau 模拟作为一种地基研究手段, 而且在探空火箭和德国的太空实验室 D1 和 D2 上进行了 Plateau 模拟实验^[16,22].

最近, 日本科学家利用液体封套悬浮区熔晶体生长技术概念来消除和控制 Marangoni 对流, 他们依此概念设计了国际空间站上的实验方案, 预先用 Plateau 模拟进行地基实验研究^[20].

最新的一项研究表明: 将中性悬浮技术和声悬浮技术同时应用于液桥, 实验发现液桥的稳定最大长度可以达到 4.3 倍直径^[7].

2000-01-20 收到原稿, 2000-09-25 收到修定稿

2 应用 Plateau 模拟研究液滴的平衡和振荡

2.1 Rayleigh 准则的实验证明与理论分析

1878 年 Rayleigh 首先研究无穷长液体射流的稳定性问题, 解释了液体射流在表面张力作用下分裂形成液滴的物理机理^[21].

Plateau 是最早对表面张力现象进行深入研究的科学家. 柱形泡在表面张力作用下稳定平衡的长度与直径之比的最大值是最先被关注的问题^[19]. Plateau 的实验表明这个值在 3.13 与 3.18 之间. 按照 Rayleigh 的稳定性分析, 这个值是 π , 通常称这个稳定判据为 Rayleigh 准则. Mason 利用柱形液体泡实验更精确验证这个数值在 3.14 与 3.1417 之间. Rayleigh 的无穷长液柱模型有待改造, 需要考虑有限液柱模型^[10].

至今, 许多科学家研究了这个问题^[9]. 绝大多数作者没有考虑液桥外部液体影响^[6,29], 但 Xu 在假设液桥外部为真空条件下证实液桥稳定的 Rayleigh 准则^[29]. Xu 等对于柱形肥皂泡严格证明了 Rayleigh 准则^[30]. Bauer 考虑了液桥受外部流体的影响, 但作了理想流体假设, 理论和实验不符^[1]. 在我们最近工作中, 对于 Plateau 模拟中的液桥稳定性问题, 考虑有限长液桥以及其内外部液体的粘性的作用, 应用 Liapunov 方法严格证明了 Rayleigh 准则^[31].

将中性悬浮技术和声悬浮技术同时应用于液桥, 实验发现液桥的稳定最大长度可以达到 4.3 倍直径^[7]. 实验的理论分析尚有待进一步研究.

2.2 旋转对液桥稳定性的影响

Carruthers 在太空实验室上进行了旋转液桥的空间实验, 发现 C 模不稳定的新现象. 他们在地面预先应用 Plateau 模拟进行液桥的零重力模拟实验^[2]. C 模现象的解释依据共振理论^[29].

对于液桥两端面向同旋转和反向旋转情形下, 研究了在 Plateau 模拟中液桥的平衡形状和稳定的长度, 旋转的影响用 Bond 数 (旋转与表面张力影响程度之量度) 来描述. 当液桥长度和液态石蜡的动量边界层厚度两倍相当时, 液桥的旋转稳定性实验结果和理论结果就相当一致. 当液桥中心区域旋转较慢时, 较长液桥会出现 $n=2$ (轴向波数) 的不稳定模. 在这些实验中, 液桥旋转而外部液体不旋转时, 要对流场进行理论分析是困难的, 系统作整体旋转才易于进行理论分析.

2.3 液桥的平衡形状、稳定区域和长液桥的分裂过程研究

马德里研究集体应用 Plateau 模拟对于液桥的微重力模拟实验作了长时期研究, 液桥的平衡形状和稳定区域是他们最主要关注的问题^[11-18]. 他们依据极小体积条件导出液桥的平衡形状和稳定区域, 对理论和实验的结果作了详细的比较. 影响液桥的物理因素包括: 两端部圆盘半径不相等^[13,14]; 轴向剩余重力^[15]; 液桥的长度^[12], 液桥外部液体等的影响^[24], 多数研究工作为简单起见只处理轴对称平衡位型, 新近的研究才考虑非轴对称平衡位型的情形^[17].

Sanz 对于液桥的振荡模式的研究进行了综述. 他强调了有限长度液桥和无穷长液柱的液体射流模型之间存在本质不同, 这种不同是由于边界条件所引起. Xu 等进一步指出这是由一系列驻波条件所引进的影响, 确定系统的本征振荡频率决离不开边界条件^[30].

在微重力科学研究中, Plateau 模拟被普遍和经常使用, 这是由于太空微重力实验费用昂贵且机会很少. 绝大多数情形 Plateau 模拟是地基研究的一种手段. 马德里研究集体进行了一系列探空火箭, D1 和 D2 太空实验室上的实验^[22]. 在 Plateau 模拟的地基实验中, 由于液桥外部流体密度和粘性的影响以及外部容器形状的影响, 液桥共振频率的精确决定只能企求理论计算, 空间进行 Plateau 模拟实验结果可以更有利于得到实验数值来和理论值进行比较.

最近, 马德里的科学家考虑剩余重力和支承圆盘沿轴向振动所激发液桥的动力效应, 沿轴向出现流动, 他们使用简化的一维 Cosseret 模型进行理论分析, 使用 Plateau 模拟方法进行实验研究^[18].

3 应用 Plateau 模拟研究液体封套悬浮区晶体生长技术

在微重力环境下, 流体在重力作用下出现的自然对流、静压不均匀分布和沉淀等物理现象几乎消失. 表面张力梯度驱动对流 (Marangoni 对流) 代替自然对流起了主导作用, 致使太空生长的晶体出现缺陷. 因此, 消除和控制 Marangoni 对流就成为一个重要的课题. 对悬浮区加上液体封套来抑制 Marangoni 对流就是新近提出的一个方案. 日本科学家将此方案作为国际空间站的日本实验模块 (JEM) 的项目^[20].

为了进行预先的地基实验, 加液体封套的液桥是放在 Plateau 池中形成, 池中液体和构成液桥液体相同, 封套液体是和其密度相近的另一种液体, 构成 Plateau 池中的双液体柱模型. 为了解释实验结果, Prahash 等研究了同轴双液体柱的静平衡的稳定性, 为了简化他们将液柱视为无穷长^[20]. 正如 Sanz^[24] 和 Xu 等^[30] 所指出那样: 有限长液柱的振荡和无穷长液柱的振荡之间存在本质的不同. 对于有限长双液柱的稳定性问题是一个有待解决的问题, 我们将在另文中进行研究^[31].

4 应用 Plateau 模拟研究声悬浮技术

太空的微重力环境为研究液滴动力学提供一个独一无二的机会, 只是仍会受到残余重力的影响, 因此进行液滴太空实验必须用声悬浮技术进行定位和控制. JPL 的王贛骏领导的研究集体进行长时间的研究^[26]. 在进行太空实验之先, 他们应用 Plateau 模拟进行液滴动力学的地基研究.

对于旋转液滴的平衡形状以及随角速度缓慢增加液滴的演化过程的研究, 由于 Plateau 模拟实验中液滴内外粘性及其外部液体产生的阻力的影响, 理论和实验相比较只限于缓慢旋转情形, 液滴失去对称性, 出现单叶非对称形状 ($n=1$), 在实验中可以在能控制方式下出现 $n \geq 2$ 形状的液滴, 实验中没有发现对称椭球和三轴椭球系列分叉点.

应用声悬浮技术在太空进行的旋转液滴实验克服了上述困难, 得到和理论一致的、令人振奋的实验结果. 当无量纲角速度 $\Omega = \omega / (8\sigma / \rho a^3)^{1/2}$ (ω 角速度, ρ, a 分别为液滴密度和半径, σ 为表面张力) 接近 0.47 时, 双叶形状的液滴处于临界稳定态 (理论值为 0.56). 随角速度继续增加, 双叶液滴发生分裂.

自吸引旋转液体星的演化过程研究的历史要追索到牛顿研究地球形状的年代. 至今对于旋转液体星演化过程到底依据长期稳定性判据, 还是动力稳定性判据确定其真实性还是一个长期有争论的问题. Xu 研究了旋转液滴的演化过程, 对于自吸引液体系统, 表面张力作用下的液滴和流体转子陀螺仪三种情形的稳定性进行比较得出结论: 三种系统稳定与否都应按照 Thomson-Tait 稳定判据判断, 而没有计及粘性影响的动力稳定判据是虚假的, 即液滴不会沿轴对称形状的一系列演化直至分裂^[28]. Wang 的实验结果也证明了这一结论^[27].

5 结 论

综上所述, 对于 Plateau 模拟在微重力科学中的应用可以作出如下结论:

(1) 由于太空微重力实验研究所需费用昂贵、且机会极少, Plateau 模拟虽有局限, 但作为一种地基研究手段还是具有重要实用意义的. 同时将理论加以进行太空实验校验, 为理论模型完善以利外推, 开辟新的研究途径.

(2) 对于 Plateau 池中液桥进行理论分析时, 直接应用 Rayleigh 的无穷长液体射流理论带有很大的局限性, 必须处理有限长液桥的端部边界条件, 把所有驻波条件都考虑进去才能达到理论的完整^[30].

(3) 无论处理 Plateau 池中的液桥还是液滴, 两种液体的粘性, 池的形状的影响都是现有理论中有待解决的问题. 一般说来, 对于地基 Plateau 模拟实验的理论分析, 等温的静平衡问题可以做到一致, 其他情形只能企求定性一致.

(4) 应用 Plateau 模拟研究液体封套悬浮区晶体生长技术, 在地基实验中, 常温下两种液体可以建立中性悬浮; 一旦加温, 由于两种液体的热物理性质的差别极难再建立中性悬浮, Plateau 模拟具有更大局限性.

参 考 文 献

- [1] Bauer H F. Coupled oscillations of a solidly rotating liquid bridge. *Acta Astronaut.* 1982, **9**:547—653
- [2] Carruthers J R, Grasso M. The stabilities of floating liquid zones in simulated zero gravity. *J. Cryst. Growth*, 1972, **13/14**:611—614
- [3] Coriell S R, Hardy S C, Cordes M R. Stability of liquid zones. *J. Coll. Interface Sci.*, 1977, **60**:126—136
- [4] Carruthers J R *et al.* Studies of rotating liquid floating zones on Skylab IV, In: Steg L ed. Materials Sciences in Space with Application to Space Processing. *AIAA*, 1977, 208—211
- [5] Erle M A, Gillette R O, Dyson D C. Stability of interfaces of revolution with constant surface tension. The case of catenoid. *Chem. Engng. J.*, 1970, **1**: 97—109
- [6] Haynes J M. Stability of a fluid cylinder. *J. Coll. Interface Sci.*, 1970, **32**:652—654
- [7] Marr-Lyon M J, Thiessen D B, Marston P L. Stabilization of a cylindrical capillary bridge for beyond the Rayleigh-Plateau limit using acoustic radiation pressure and active feedback. *J. Fluid Mech.* 1997, **351**:345—357
- [8] Martinez I, Riva D. Plateau tank facility for simulation of Spacelab experiments. *Acta Astron.*, 1982, **9**:339—342
- [9] Martinez I, Haynes J M, Langbein D. In: Fluid Sciences and Materials Sciences in Space. Springer-Verlag, 1987

- [10] Mason G C. An experimental determination of stable length of cylindrical liquid bubble. *J. Coll. Interface Sci.*, 1970, **32**:172—176
- [11] Meseguer J. The breaking of axisymmetric slender liquid bridges. *J. Fluid Mech.*, 1983, **130**:123—151
- [12] Meseguer J. Stability of slender axisymmetric liquid bridges between unequal disks. *J. Cryst. Growth*, 1984, **67**:141—143
- [13] Meseguer J. The dynamics of axisymmetric slender liquid bridges. *J. Cryst. Growth*, 1985, **73**:599—608
- [14] Meseguer J *et al.* Experiments with liquid bridges in simulated microgravity. *J. Cryst. Growth*, 1985, **153**:83—101
- [15] Meseguer J, Sanz A. Numerical and experimental study of the dynamics of axisymmetric liquid bridges. *J. Fluid Mech.* 1985, **153**:83—101
- [16] Meseguer J, Sanz A, Lopez J. Liquid bridge breakages aboard Spacelab-D1. *J. Cryst. Growth*, 1986, **78**:325—334
- [17] Meseguer J, Siobozhanin J A, Perales J M. A review on the stability of liquid bridges, *Adv. Space Rev.*, 1995, **16**:(7) 5—(7)14
- [18] Perales J M, Meseguer J. Theoretical and experimental study of the vibration of axisymmetric viscous liquid bridges. *Phys. Fluid*, 1992, **A4**:1110—1130
- [19] Plateau J A F. Experimental and theoretical researches on the figures of equilibrium of a liquid mass with drawn from the action of gravity. In: *The Annual Report of the Board of Regents of the Smithsonian Institution*, Washington: Government Printing Office 1863. 270—285
- [20] Prakash A *et al.* Hydrostatic stability of concentric two-liquid columns. *Microg. Sci. Tech.*, 1996, **9**:70—79
- [21] Rayleigh L. On the Instability of Jets. *Collected Papers*, 1878, 1:361
- [22] Sahm P R, Keller M H, Schiewe B. Scientific Results of the German Space Mission D-2, DARA, 1995
- [23] Sanz A, Martinez L. Minimum volume for a liquid bridge between equal disks. *J. Coll. Interface Sci.*, 1983, **93**:235—240
- [24] Sanz A. The influence of the outer bath in the dynamics of axisymmetric liquid bridges. *J. Fluid Mech.* 1985, **156**:101—140
- [25] Sanz A, Diez J L. Non-axisymmetric oscillations of liquid bridges. *J. Fluid Mech.*, 1989, **205**:503—521
- [26] Trinh E H, Zwem A, Wang T G. The experimental study of small amplitude drop oscillations in immiscible systems. *J. Fluid Mech.*, 1982, **115**:453
- [27] Wang T G. Equilibrium shapes of rotating spheroids and drop shape oscillations, *Advan. Appl. Mech.*, 1988, **26**:1—62
- [28] Xu S C. Application of bifurcation theory to the problem of rotating liquid drop in space, In: Rath H J. ed *Microgravity Fluid Mechanics*. Springer-Verlag, 1992. 315
- [29] Xu S C. Liquid bridge stability and microgravity experiments analyses. *Microg. Sci. Tech.* 1993, **6**:176—183
- [30] Xu S C *et al.* Analysis of instability of a cylindrical soap film of finite dimensions. *Langmuir*, 1998, **14**:533—535
- [31] Xu S C, Chien L C, Hu W R. Research on the stability of liquid bridge by Plateau Simulation. *J. Coll. Interface Sci.*, 2000, (in press)

APPLICATIONS OF THE PLATEAU SIMULATION TO THE MICROGRAVITY SCIENCES

XU Shuochang¹ Chien L C² HU Wenrui¹

¹(*Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

²(*Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei*)

Abstract

The microgravity condition is simulated using the neutral buoyancy technique by the Plateau simulation, applications of which for microgravity science include three aspects: investigations of equilibrium and oscillations of liquid bridges; research on the liquid encapsulated floating zone crystal growth technique and the acoustic levitation technique and so on. Advances of three aspects are reviewed in this paper. The meaning and limitations of the simulation method are given; Finally the left problems to be solved are discussed.

Key words Plateau simulation, Neutral buoyancy technique, Microgravity science