

微重力流体力学

胡文瑞 徐硕昌 著

科学出版社

微重力流体力学

胡文瑞 徐硕昌 著

科学出版社

1999

本书出版受到华夏英才基金的支持，谨以致谢

前 言

随着航天高技术的发展,微重力科学及应用这门新兴的空间科学和应用的分支应运而生,它涉及当代科学与技术诸多重大前沿课题,对于生物技术、新材料制备、能源和环境等方面具有广阔的应用前景。随着下世纪初耗资 400 多亿美元的国际空间站组建成功,微重力科学的研究会更加蓬勃发展。在国家高技术发展计划的推动下,我国从 80 年代末开展了微重力科学及其应用的研究。目前我国已建立了一批研究基地,其中微重力流体科学研究以中国科学院力学研究所为主。

微重力流体力学是微重力科学的重要组成部分。流体在重力作用下出现包括浮力对流、静压不均匀分布和沉淀等独特的物理现象,这些现象在微重力下几乎消失,这些变化所产生的新现象和新过程激发了科学家的强烈研究兴趣,促使了微重力科学及其应用这个新兴领域的兴起。微重力科学开拓了空间材料科学、空间生物技术和空间生命科学的新天地。微重力流体力学不仅是微重力科学的基础,也是许多技术问题(如飞行器的流体管理、传热和传质,月球开发等)的科学基础。在微重力环境中,地面上被重力掩盖掉的一些次级现象会起主导作用。研究这些新现象和新过程为发展流体力学提供了新机遇;另一方面,为了利用微重力环境也必须首先认识微重力环境下流体的平衡、运动和稳定性的规律。

本书结合我们 10 年来研究微重力流体力学的体会,力图将微重力流体力学的主要内容归纳成册。作者的这些体会得益于中国科学院力学研究所微重力流体力学研究集体的讨论、商榷和合作研究。微重力流体力学是一门新兴的学科,本书内容大多散见于近 30 年内的学术刊物和会议文集之中;同时它又是一门发展迅速的学科,本书的主要内容只能涉及若干主要的方面,一些重要领域(诸如微重力两相流、复杂流体、电流体力学、磁流体力学等)和一些复杂的空间材料科学和空间生物技术问题都没有在书中作深入分析。对于这样一门新兴和迅速发展的学科,作者对其内容的安排和取舍,只能看做是一种尝试。本书第一、四、六章及第五章前三节由胡文瑞完成,第二、三章及第五章第四节由徐硕昌完成。

微重力流体力学的研究得到中国科学院、国家高技术发展计划航天领域专家委员会、国家科学技术部、国家自然科学基金委员会等各方面的支持。近期的国家攀登项目 95-预-34 和国家自然科学基金 19789201 号重点项目为我们撰写本书提供了支持。作者要特别感谢华夏英才基金为出版本书给予的资助以及科学出版社的领导、彭斌副主任等及时安排本书的出版。我们希望本书的出版能促进微重力科学研究的发展,能对读者有所帮助。如能激发年轻人投身微重力研究的兴趣,我们将倍感欣慰。由于作者知识结构和水平的限制,失误之处在所难免,敬请各位专家和读者不吝赐教。

胡文瑞 徐硕昌

1998 年 6 月 1 日于北京中关村

目 录

前 言

第一章 微重力流体科学概论	(1)
一、微重力科学与微重力流体科学	(1)
1. 微重力环境	(1)
2. 重力的影响	(2)
3. 微重力流体科学的发展	(4)
二、微重力流体力学概述	(5)
1. 对流	(5)
2. 扩散及输运现象	(9)
3. 液滴和气泡动力学	(10)
4. 多相流过程	(12)
5. 残余重力效应	(13)
6. 其他流体力学问题	(14)
三、微重力物理化学概述	(15)
1. 临界现象	(15)
2. 燃烧	(16)
3. 分散体悬浮系统	(16)
4. 晶体生长的物理化学问题	(17)
四、微重力流体科学的研究途径	(18)
1. 微重力研究的一般途径	(18)
2. 微重力实验手段	(20)
参考文献	(23)
第二章 基本方程组和流体运动特性	(24)
一、引言	(24)
二、连续性方程和迁移方程	(25)
三、动量方程	(27)
1. 流体的粘性——Reynolds 应力	(27)
2. 动量守恒定律	(29)
3. Navier-Stokes 方程	(30)
四、能量方程	(31)
1. 总能量方程	(31)
2. 动能方程	(31)
3. 内能方程	(32)
4. 粘性耗散函数	(32)

5. Fourier 定律及另外二种形式的能量方程	(33)
6. 不可压流体的导热方程	(33)
五、Newton 流体的运动方程组及定解条件	(35)
1. 基本方程组和适定性	(35)
2. 定解条件	(36)
六、Boussinesq 近似及适用范围	(43)
七、相似律和无量纲参数	(48)
1. 利用 Buckingham π 定理导出相似参数	(49)
2. 微重力流体力学的有关物理量和无量纲参数	(50)
参考文献	(52)
第三章 毛细现象以及界面的平衡和稳定	(54)
一、引言	(54)
二、表面张力的物理描述	(55)
三、液体射流的表面不穩定	(60)
1. 基本方程组和基态	(62)
2. 小扰动的线性化方程	(63)
3. 本征值方程及其解	(63)
四、等温条件下液桥的平衡位型和稳定	(66)
1. 表面张力作用下的平衡条件	(66)
2. 毛细稳定性	(68)
3. 旋转稳定性	(71)
五、液桥的流体动力学稳定理论	(72)
1. 基本假设和液桥的平衡条件	(73)
2. 稳定问题的数学提法	(73)
3. 液桥的 Liapunov 稳定理论	(75)
4. 特殊情形 ($\Omega_0 = \mu = 0$) 以及纯半波不穩定 ($n=1, m=1$)	(77)
5. 小扰动方程的变分方程	(78)
6. 小 Weber 数和大 Reynolds 数情形的不穩定发展率	(79)
7. 液桥微重力实验的结果的分析	(80)
8. 讨论和结论	(81)
参考文献	(82)
第四章 对流和扩散	(84)
一、Pearson 对流	(84)
1. 自由面不变形时的小扰动分析	(84)
2. 自由面可变形情形	(88)
3. 非线性理论	(91)
4. 多层不混溶液体系统	(93)
二、热毛细对流	(95)

1. 矩形容器中的热毛细对流	(96)
2. 柱形液桥的热毛细对流	(99)
3. 半浮区液桥热毛细对流的数值模拟	(100)
4. 薄层液体的热毛细对流	(102)
三、热毛细振荡对流的实验研究	(105)
1. 液桥内部的温度振荡	(105)
2. 热毛细对流的表面振荡	(109)
3. 综合测量	(111)
四、热毛细对流的振荡机理	(113)
1. 热流体波不稳定性	(114)
2. 表面波不稳定性	(118)
3. 有限高度液桥的线性不稳定性	(120)
4. 三维不定常数值模拟	(122)
5. 重力的影响	(124)
6. 一种非稳定性理论	(124)
7. 关于振荡的激发机制	(125)
参考文献	(126)
第五章 液滴动力学	(128)
一、等温液滴动力学	(128)
1. 球形液滴的振荡	(128)
2. 不混溶液体中球形液滴的振荡	(131)
3. 弱非线性理论	(134)
4. 实验模拟	(137)
二、非等温液滴的 Marangoni 迁移	(139)
1. 定常线性化理论 (小 Reynolds 数, 小 Marangoni 数)	(139)
2. 非线性理论	(140)
3. 实验结果	(142)
三、液滴和气泡的相互作用	(147)
1. 双气泡的轴对称理论	(147)
2. 多液滴的轴对称理论	(149)
四、旋转液滴的演化序列和分叉理论	(153)
1. 旋转液滴的演化	(153)
2. 旋转液滴的 Thomson-Tait 稳定准则	(154)
3. 长期稳定性和动力稳定性	(155)
4. 长期稳定性真实性的实验证明	(156)
5. 结论	(159)
参考文献	(159)
第六章 微重力材料流体力学	(161)
一、晶体生长过程	(161)

二、纯扩散过程.....	(163)
1. 一维扩散过程	(163)
2. 二维扩散过程	(164)
3. 固-液界面弯曲对径向分凝的影响	(166)
三、浮区晶体生长.....	(169)
1. 浮区的热毛细对流	(171)
2. 浮区的熔质毛细对流	(174)
3. 浮区对流的振荡特征 (小 Prandtl 数对流)	(177)
4. 耦合过程	(180)
四、溶液晶体生长.....	(182)
1. 溶液晶体生长的相变界面过程	(182)
2. 一维纯扩散过程	(184)
3. 准定常溶液晶体生长过程	(185)
4. 不定常溶液生长过程	(188)
五、气相晶体生长.....	(192)
1. 气相晶体生长过程	(193)
2. 一维模型	(195)
3. 物理气相输运中的对流效应	(196)
4. 化学气相沉积 (CVD) 过程	(198)
参考文献.....	(201)

第一章 微重力流体科学概论

在地球大气层以外的空间中,有许多地球上难以获得或无法获得的环境,例如很大的典型尺度、极高的真空、丰富的粒子和波辐射、多种多样的电场和磁场位形、极低的有效重力等。在这些极端条件下,包含着大量有待探索的物理、化学和生物科学的规律,并由此形成了一批前沿学科。这些新兴学科的发展除具有理论的重要性外,又往往孕育着新型的空间高技术产业。微重力科学正是空间科学中蓬勃发展的这类新领域,它研究在微弱重力环境中的物质运动规律,特别是传质、传热、物理化学,以及临界点和广义相对论等物理学的规律^[1,2]。引力普遍地作用于所有状态的物质,但它对流体作用则更为复杂多变。因此,微重力流体科学在微重力科学中占有核心的重要作用,越来越受到重视。

一、微重力科学与微重力流体科学

微重力代表一种受力环境,即在该环境中的有效重力水平极低。按照英文 Micro-gravity 的原意,微重力应指该环境中的重力水平为地球表面重力 980cm/s^2 的 10^{-6} 倍。目前许多广义的理解,也把微重力理解为微小重力,有时也有低重力之称。微重力科学就是研究微重力环境中的科学规律,它实际上是物理学、化学、生物科学等各学科在微重力环境这种特定条件下的延伸。微重力流体科学就是研究流体介质(液体、气体、等离子体)在微重力环境中运动规律的科学。

1. 微重力环境

地球重力场作用于地球表面及地球空间的物体上,使物体与其他的力保持平衡。人们习惯于生活在地球重力环境中,很理解地球重力的各种作用。在一个自由落体的系统中,可以造成一种“失重”状态。同样,把一个物体抛向天空,地球引力场与初始动量形成抛物线运动的离心力相抵消,也可以在运动物体的质心附近形成“失重”状态。当人们把空间飞行器发射到地球空间,并绕地球作周期转动时,地球引力与空间飞行器运动产生的离心力相平衡,在飞行器中造成“失重”环境。事实上,由于各种次级力的作用,绝对的“失重”环境是难于获得的,只能获得大体的失重环境,即微小重力环境。所以,微重力环境是近地轨道飞行器中存在的环境。随着人类的空间活动越来越频繁,必然要求进行微重力科学的研究。在载人空间活动日益活跃的今天,微重力研究就成为载人空间利用计划的主要内容。

地球重力场可以表示为

$$\mathbf{g} = g\mathbf{e}_r = \frac{r_0^2 g_0}{(r_0 + h)^2} \mathbf{e}_r, \quad (1-1)$$

其中 $\mathbf{e}_r$ 为单位矢量并由地心指向外, g_0 为地面的重力加速度 980cm/s^2 , r_0 为地球的半径

6 378km, h 为参考点距地面的高度, g 为参考点处的重力加速度值。在一个局部运动坐标系中,重力可以被某种力所抵消,局部坐标系中的物体将受到一个有效重力 g_e 的作用。一般而言,有效重力的原点、大小及方向都会发生变化。人们时常用 g_e/g_0 来度量参考系中的重力水平,而将 $g_e/g_0=O(10^{-6})$ 的环境称为微重力环境。

利用加速度计可以对运动物体中的微重力状态进行测量,三个互相垂直的加速度计可以测量出有效重力矢量的分布。大量的测量结果表明,在空间飞行器的环境中都存在着残余重力,重力值往往有周期性的变化时称为重力跳动 (g -jitter),其频率范围在 $10^2 \sim 10^{-1}\text{Hz}$ 的区域中^[3]。图 1-1 给出了中国回地卫星在绕地球运转时的典型重力测量结果。

大量实验表明,残余重力和重力跳动对于体系中的物理过程会产生重大的影响。研究这些残余重力及重力跳动的效应是微重力科学中的一个重要课题。

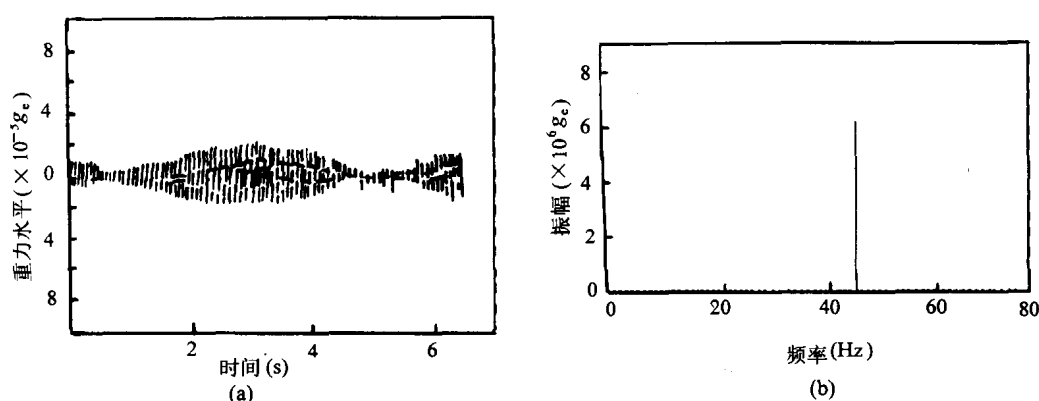


图 1-1 中国回地卫星上的典型重力测量结果
(a) 微重力平均水平为 $10^{-5}g_e$; (b) 主频为 46 Hz 左右

2. 重力的影响

重力是体积力,它作用于所有重力场中的物质,不论它是固体还是流体。重力作用主要表现在宏观过程中,分子间或原子间的相互作用力比重力要强得多,控制着微尺度过程。在天体物理、地球物理、流体物理、理论力学等学科领域中,重力都是必须考虑的主要作用力。重力对固体的影响表现在多方面,它影响飞行体的运动和平衡,改变空间大型结构的应力分布等。但是重力对流体的影响则更加多种多样。

重力效应最直接地表现在动量平衡关系中,即作用于单位流体体积上的重力与流体的压力梯度、惯性力、粘性力及其他外力相平衡。对于流体静力学问题,如果除重力外不存在其他外力,就得到压力梯度与重力相平衡

$$\nabla p = \rho \mathbf{g}, \quad (1-2)$$

其中 ρ 和 p 分别为流体的密度和压强。式 (1-2) 是流体静力学的基本关系,它表明重力场的作用必然导致沿重力场方向流体静压强的不均匀分布。应用于可压缩流体可导出熟知的大气压公式,应用于不可压缩流体可导出 Archimedes 定律。当重力趋于零时,静压强梯度也趋于零,从而在有限区域中可获得非常均匀的热力学状态。这个特征不仅对微

重力环境中的实验和工程问题提出了要求；同时对某些地面上难于实现的高度均匀热力学状态中的实验（诸如临界点和近临界点研究）提供了机遇。当然，重力场的作用不仅限于静力学问题，也大量地涉及动力学过程。

在重力场作用下的浮力对流是一个典型的流体力学问题，也被广泛应用于许多工程问题之中。由于温度或浓度的不均匀而造成流体的密度不均匀，密度低的流体趋于向重力场相反的方向移动，即受到浮力的作用。当浮力和传热效应足以克服粘性阻力的作用时，流体中就会产生对流，称之为自然对流。典型的自然对流现象是 Bénard 对流，即垂直于重力场方向的两块平行平板具有下热上冷的外加温差，两平板之间充满液体，当温差超过一个临界值时，液体中形成一系列对流胞元。对于热对流问题，通常引用 Rayleigh 数作为临界参数，Rayleigh 数的定义为

$$Ra = \frac{\rho g \beta \Delta T d^3}{\nu \kappa}, \quad (1-3)$$

其中 β , ν , κ 分别为液体的热膨胀系数、运动粘性系数和热扩散系数， d 为上下板间距， ΔT 为两板间的温差。一般地，当 $Ra \simeq 1700$ 时可出现对流胞元，相应的 Rayleigh 数就是临界 Rayleigh 数，记为 $(Ra)_c$ 。 Ra 数超过 $(Ra)_c$ 以后并继续增加，则流场逐渐变得更加无序，并发展为湍流。研究表明，转换过程不仅与 Rayleigh 数有关，还与 Prandtl 数及平板间的长宽比有关，其中 Prandtl 数的定义为

$$Pr = \frac{\nu}{\kappa}. \quad (1-4)$$

由于 Rayleigh 数与重力水平 g 成正比，当重力趋于零时浮力对流将消失，当重力量值极大地减小时浮力对流至少会极大地减弱。这样，在微重力环境中，地面许多过程中起主导作用的浮力对流可能消失或极大地减弱，给利用微重力环境提出了新的问题，也为研究许多力学体系提供了新的机遇。在地面材料制备过程中，不可避免的浮力对流会造成热场及浓度场的不均匀，从而影响材料制备的质量。人们正努力地试图利用微重力环境去制备比地面更好的高质量晶体。

在重力场的作用下，流体具有沿重力方向沉积或分层的趋势，密度大的在下面，轻的在上边。不相溶的几种液体混合时，密度大的在下层，密度轻的在上层。在两相流中，大密度的物质将沿重力方向沉淀。当重力场趋于零时，不同密度的介质将不再相对地沉淀，而彼此悬浮在空间中。微重力环境中的悬浮状态给人们工作带来许多新问题，但另一方面又为材料加工和生长晶体带来新的机遇。例如合金熔化时常形成两种不混溶液相，在地面重力作用下趋于分层，则凝固时组分将不均匀；这个缺点在微重力状态下就得到极大的改进，可能制备出相当均匀的高质量合金。

从连续介质的观点分析，重力的主要作用表现为形成静压强梯度，产生浮力对流，造成流体的密度分层或不同密度流体的相对沉淀。在微重力流体科学中，还要处理不少与生物学和材料科学交叉的学术问题，需要突破连续介质力学的限制。细胞及组织的受力状态模型，材料凝固界面动力学过程与外场连续介质流体的耦合，晶体的成核等，都需要包含非连续介质模型，而重力对这些细观过程的影响还是一个有待深入研究的重大课题。值得指出的是，在空间生物技术和空间材料制备过程中，往往是许多因素在起作用，而重力只是诸多因素中的一个因素。为了利用微重力环境的有利条件发展生物技术和制备空间材料，就必须深入研究具体系统中重力的影响，以及重力与其他制约因素的相互

关系。

诚然,人类进入载人航天时代以后,需要生活和工作在微重力环境之中,因而需要理解和掌握微重力环境中物质的运动规律,并进而利用微重力环境和开发空间资源。在微重力环境中,浮力对流消失或极大地减弱了,而在地面上被掩盖了的一些次级对流过程,诸如热毛细对流或浓度毛细对流突出起来;当分层或沉淀现象消失或极大地减弱了以后,浸润作用等次级过程变得重要了。在微重力环境中,并不是理所当然地可以获得纯扩散过程或者不同介质的均匀混合,地面上的次级过程引起了新的机制。因此,微重力环境为人们开展地面上难以实现的“次级过程”研究提供了机遇,为发展新的学科提供了条件。

3. 微重力流体科学的发展

微重力科学主要是研究流体介质或与流体介质密切相关的相变等过程在微重力环境中的运动规律。因此,在某种意义上讲,微重力科学的核心是微重力流体科学。从流体力学的角度看,微重力流体物理侧重于研究那些地面上难于实现的“次级过程”,以及与空间材料制备和空间生物技术相关联的流体物理问题。换言之,微重力流体物理既研究连续介质流体力学体系中的新过程,诸如表面张力梯度驱动对流、两相流及液滴、气泡动力学、燃烧、输运过程等;在研究由于交叉学科而引进新系统的过程中,人们越来越认识到微重力流体科学的重要性,这是因为重力最显著地作用于流体系统之中。

人们对于微重力流体物理重要性的认识有一个过程。从60年代开始,随着载人航天技术的发展,使微重力环境的利用提到了议事日程。尽管学术界对利用微重力环境开展学术研究表现出强烈的兴趣;但不少人则看好微重力环境中制备出地面造不出的高品质材料,以尽早取得商业上的效益。30年来,微重力活动主要沿着以流体物理及物理学重大问题为重点的科学研究及以新材料制备和开发的应用研究这两条主线在发展。特别是1987年以前,微重力应用开发的热潮持续高涨。在航天飞机“挑战者”失事以后,人们利用空间实验间隙的机会反复思索,发现微重力环境中的流体运动规律远非想像的那么简单。重力作用消失后,在地面被掩盖的“次级效应”变为主导作用,形成微重力环境中产生运动和流体不稳定性的驱动因素,使材料制备遇到新问题。与此相关的课题涉及到诸如凝固界面动力学,电、磁流体力学,浸润、成核,母液中分散体系的聚积,以及晶体生长过程的流体物理等。

对于一些非重力驱动的流动问题,特别是与表面张力相关联的过程,在流体力学的一些经典理论中就已经涉及。例如,由于表面张力梯度驱动的热毛细对流明显地出现在薄膜制备过程,在19世纪就被Marangoni研究过,通常被称为Marangoni对流。液滴或气泡在温度不均匀的流体中迁移,也是经典流体力学教科书中讨论的问题。只不过在地面条件下,这些过程只能存在于特征尺度很小的体系中,而且往往与重力的作用相互耦合在一起。当重力极大地减小以后,非重力因素引起的作用就会成为比重力更加重要的因素,而对流体的平衡和运动起着主导的作用。所以,微重力流体科学的若干课题研究已有百余年的历史,但是作为一门学科,它还是随着载人航天的发展而逐渐成长起来的新学科。微重力流体科学作为微重力科学的一部分,其发展历史只有30年左右。

在微重力的环境中有时也生长出比地面更好的单晶,但如何保证制备材料的质量仍

然未能弄清。大量的实践使人认识到,为了更好地利用微重力环境,必须先加强微重力科学的研究。只有在科学研究取得突破性进展,只有深入地认识了微重力环境中流体运动规律以后,才能有效地进行微重力应用。

学术界对微重力流体科学的认识过程最清楚地反映在美国科学院对微重力科学进行评估的几次国家研究报告之中^[4,5]。美国航宇局空间生命和微重力科学和应用办公室下属的微重力科学和应用处负责执行微重力科学的研究计划。在1987年以前的分类为平行的六个方面,即:① 流体物理及输运现象,② 电子材料,③ 金属与合金,④ 玻璃和陶瓷,⑤ 生物技术,⑥ 燃烧。在1987年空间科学委员会的国家研究报告中指出,微重力活动必须更加重视基本规律的研究,不赞同急于实现微重力应用的倾向。在此背景下,美国航宇局把上述分类的次序重新排列,将流体物理和输运现象放在中心地位,而将其余5项列在周围。1992年,美国科学院成立了专门的微重力科学委员会,该委员会发表的国家研究报告对于微重力活动进行了全面的评述,更加强调基本规律研究的重要性。该报告建议将微重力研究进行新的分类,即:① 生物科学和技术,② 燃烧,③ 流体科学,④ 基本规律,⑤ 材料,⑥ 加工科学和技术。根据报告的建议,美国航宇局将微重力科学和应用的管理重新分为五类,即:① 生物技术,② 燃烧,③ 流体物理,④ 材料科学,⑤ 低温基础物理学研究。新的学科分类和部署反应出现阶段加强微重力基本规律研究的必要性,反应出流体物理在微重力科学中的核心作用。

微重力研究一直有科学和应用两个方面。由于微重力应用的诱人商业前景,使得各国政府愿意大量地投入经费,促进微重力研究。由于微重力科学涉及许多当代自然科学的前沿课题,使得许多科学家愿意投入精力,从事微重力基本规律的探讨。再加上当前和今后相当一段时间内,载人航天计划需要大力发展微重力研究。因此,微重力科学的研究会持续地作为一个热门领域而发展下去。人们认识到,必须首先加强基本规律的研究,今后才能很好地应用开发。微重力基本规律研究大多与流体物理过程密切相关,微重力流体科学的研究不仅将促进有关学科的发展,而且也商业应用奠定扎实的基础。

二、微重力流体力学概述

微重力环境提供了一种机遇,去研究新的力学体系,以及研究包括地面上一些“次级效应”在内的新型流体物理机理。微重力流体科学涉及诸多问题,主要研究伴随着重力减弱以后而突出起来的各种过程,特别是与自由面和界面相关的现象(已发表一些专著如文献[6],[7])。

1. 对流

对流是自然界普遍存在的一种传热和传质的方式,它与力学体系的热物理状态密切相关。在地球重力作用下,下部较热而上部较冷的流体区域中,浮力趋于使热流体上升而形成对流,称之为自然对流。最著名的自然对流过程是平行平板之间的对流,如图1-2所示,称之为Bénard对流。它研究两个平行平板之间的流体状态,其中下平板温度 $T_0 + \Delta T$ 高于上平板温度 T_0 ,当温差 ΔT 超过某一临界值 $(\Delta T)_c$ 时,流体中产生对流胞元。一般引用无量纲的Rayleigh数来描述其对流和转换特征,Rayleigh数的定义已由式

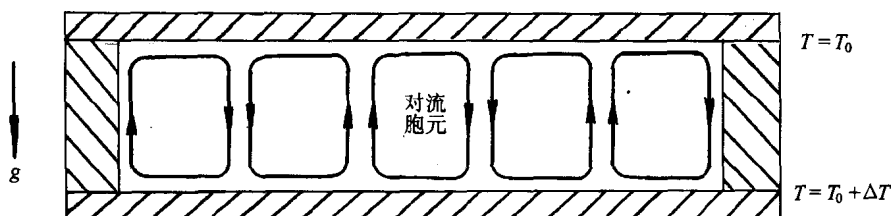


图 1-2 Bénard 对流的示意图

当 Rayleigh 数超过其临界值时, 流体中产生对流胞元

(1-3)给出。对于一般情况, 无穷平板之间充满水的 Bénard 对流临界状态为

$$(Ra)_c \approx 1700, \quad (1-5)$$

这里的临界状态指的是浮力作用造成对流的状态。Bénard 对流问题至今仍吸引着人们的研究兴趣, 它是一个典型的耗散体系, 是研究浮力对流, 不稳定性, 以及通过混沌结构发展为湍流等转换过程的极好对象。研究表明, Bénard 对流的转换过程主要依赖于三个无量纲参数, 即式 (1-3) 定义的 Rayleigh 数 Ra , 式 (1-4) 定义的 Prandtl 数 Pr , 以及几何长宽比 A , 其中 A 的定义为

$$A = \frac{l}{d}, \quad (1-6)$$

l 和 d 分别为平行平板的宽度和二块平行平板的间距。

在微重力环境中, Rayleigh 数极大地减小, 抑制了浮力对流的发生。这时, 其他的对流过程就突出起来, 其中经常讨论的就是表面张力梯度驱动对流。一类新的耗散体系的对流问题被称为 Pearson 对流, 它是研究一个无穷平板与气液界面之间液体的对流, 如图 1-3 所示。这时低部无穷平板维持温度 $T_0 + \Delta T$ 高于液气界面的温度 T_0 , 在零重力 $g=0$ 的情况下, 当温差 ΔT 超过某一临界值时, 流体中产生对流。这种对流的机制主要是表面张力的不均匀。众所周之, 对于均一流体, 表面张力依赖于温度; 对大多数介质, 温度越大, 表面张力越小。设想在液-气界面上表面温度有一点增加 δT , 则该处的表面张力相对于周围减小, 则流体在表面被拉着向周围流动。由于质量守恒, 在表面向四周流动

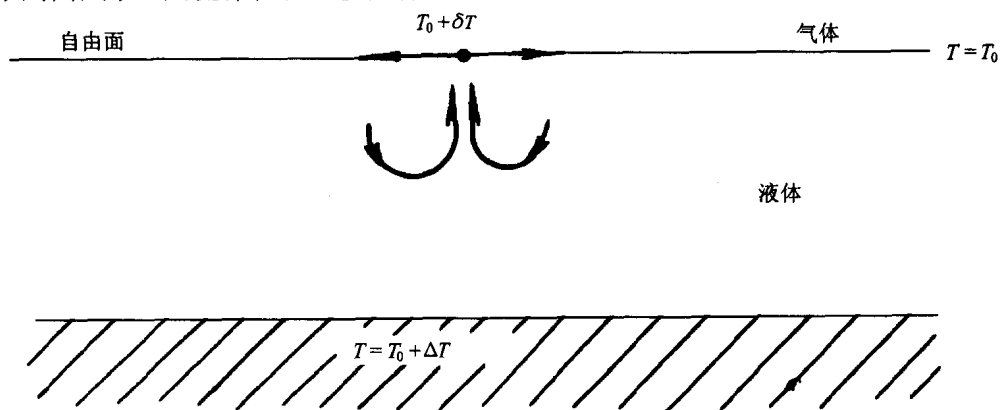


图 1-3 Pearson 对流的示意图, 低部温度比自由面温度高

的流体向下形成回流，并沿扰动点的底部向上流动。由于底部温度较高，所以回流到扰动点的流体温度亦较高，结果可能维持初始的扰动温度或增大初始的扰动温度，从而维持所产生的对流。显然，这是一种不同于浮力对流的机制，而主要是由表面张力不均匀所产生的对流。遵循这个思路，人们可以研究平板与液-气界面间的 Pearson 对流 [图 1-4 (a)]，两个液-气界面之间的液层对流 [图 1-4(b)]，双层液体之间的不混溶液层的对流 [图 1-4(c)]，三层液体之间的多层不混溶液体的对流 [图 1-4(d)]，等等。这些多彩

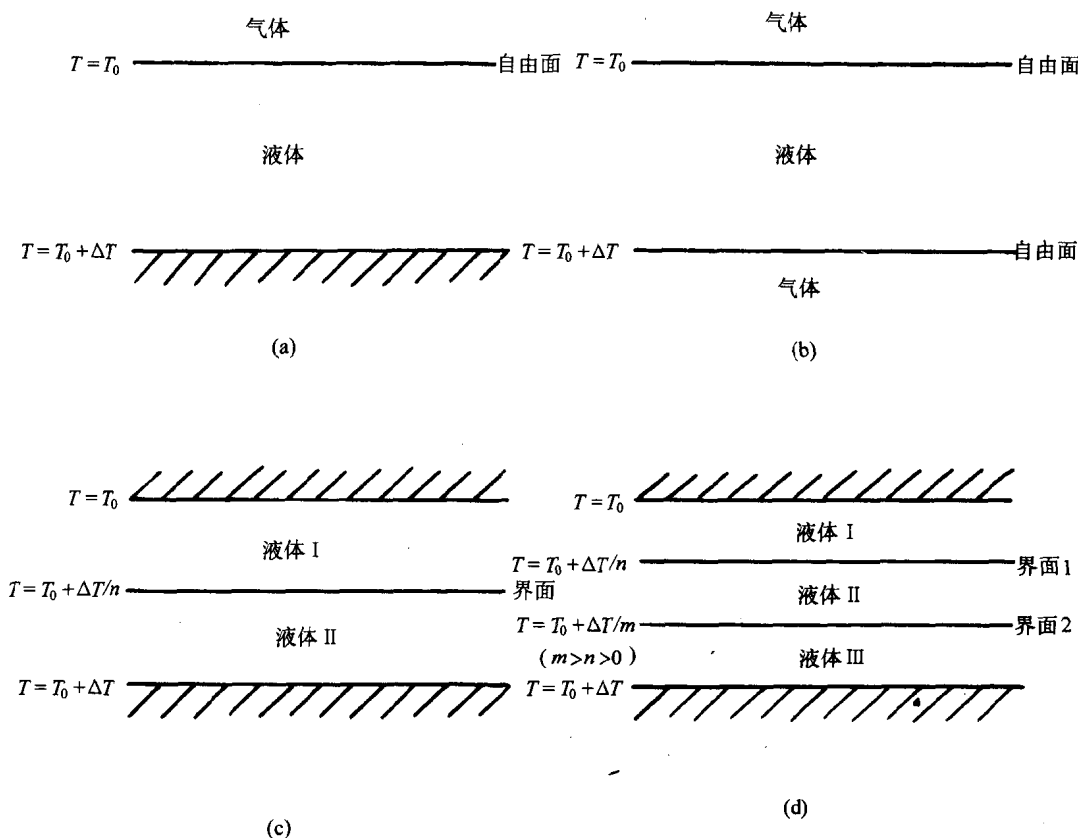


图 1-4 Pearson 对流的各种体系

(a) Pearson 对流体系；(b) 双气-液界面液层；(c) 双层液层体系；(d) 三层液层体系

的耗散体系可以极大地丰富了流体物理的研究。从不稳定性的概念分析，Bénard 对流和 Pearson 对流都是研究一种静止的基态在外加温差 ΔT 增加并超过一个临界值时所激发的对流。

另一类微重力流体力学问题是浮区对流，它着重研究定常对流向振荡对流的过渡^[8]。浮区晶体生长是制备半导体晶体的基本方法，在地面重力作用下，将产生热对流；当温差增大时，可出现振荡对流。地面浮区中浮力对流的机理与 Bénard 对流的机理类似，如图 1-5 (a) 所示，即加热器使液桥中部加热，则浮力驱动流体由热的部分向冷的部分流

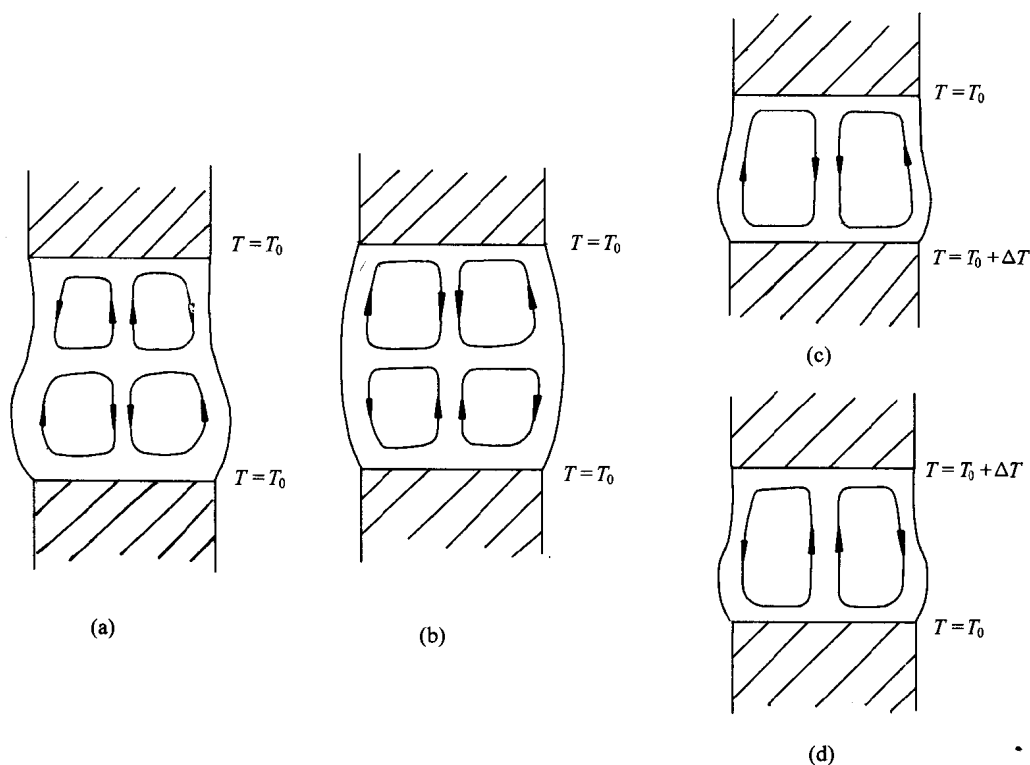


图 1-5 浮区对流的示意图

(a) 为全浮区 (1g); (b) 为全浮区 (μg); (c) 为半浮区 (下加热); (d) 为半浮区 (上加热)

动。在微重力情况下, 浮力对流被抑制了, 但表面张力在熔体表面不均匀, 驱动流体在表面从高温部分向低温部分运动, 并形成对流 [如图 1-5 (b) 所示]。只要在表面有温度或浓度的不均匀性, 就会驱动流体运动; 但是当表面的温差或浓度差超过一个临界值时, 这种表面张力梯度驱动的热毛细对流或浓度毛细对流可以由定常流转变为振荡流。这种临界状态附近的流动情况正是人们研究的重点, 因为当浮区液桥中振荡时, 必然会影响晶体生长的质量。热毛细对流和浓度毛细对流是微重力科学和应用中的一类典型问题, 至今仍吸引着众多学者的兴趣。由于浮区对流问题的复杂性, 人们首先集中地研究半浮区对流模型, 即把浮区由中间加热器部位截开, 简化成图 1-5 (c) 和图 1-5 (d) 的状态。当重力为零时, 无所谓上下的方向, 这两种半浮区对流模型完全是等价的。当有重力存在时, 图 1-6 (d) 的模型不受浮力的作用, 在某些条件下可以较好地模拟微重力的情况, 因而被广泛地用做地面模拟研究的对象。在地面浮区对流中, 尽管也存在表面张力梯度驱动对流的作用, 但是对于不是非常小尺度的液桥, 浮力对流的作用总是起着主导的作用。在微重力情况下, 浮力作用极大地减弱, 表面张力梯度的作用成为主导因素。

由表面张力梯度驱动的热毛细对流或浓度毛细对流还不仅存在于浮区对流的形式中, 可以构造各种体系来研究其特征。诸如圆柱形液池中的液体表面具有温差时, 就可以产生热毛细对流, 如图 1-6 (a) 和图 1-6 (b) 所示; 同样地, 在矩形容器充液体后, 横向加温差也可以造成热毛细对流, 如图 1-6 (c) 和图 1-6 (d) 所示。利用这些不同力学