



现代力学丛书

微重力 科学概论

胡文瑞 等 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

现代力学丛书

微重力科学概论

胡文瑞 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

微重力科学是力学、物理学和生物学的新兴交叉学科,它主要研究在微重力环境中物质的平衡和运动的规律。微重力科学主要包括微重力流体物理(自然对流、多相流、复杂流体)、微重力燃烧、空间材料科学、空间生物技术和空间基础物理等领域。在微重力环境中,由地球重力产生的浮力、沉淀、压力梯度等过程基本消失,这就为微重力科学各学科领域的发展创造了极好的机遇,孕育了学术的重大突破。载人空间站和载人空间探索工程需要微重力科学的支撑,而微重力科学的发展推动了许多空间和地面的重大高新技术的发展。

本书涉及微重力科学的主要内容,对流体力学、工程热物理、材料科学、生物技术、基础物理以及航天工程专业的大学高年级学生、研究生、教师和科技人员有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

微重力科学概论/胡文瑞等著. —北京:科学出版社,2010
(现代力学丛书)

ISBN 978-7-03-029522-4

I. ①微… II. ①胡… III. ①微重力-概论 IV. ①P312.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 222370 号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达胶艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年11月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010年11月第一次印刷 印张: 25 1/2

印数: 1—2 000 字数: 494 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛 书 序

《现代力学丛书》是由中国科学院力学研究所组织编撰的一套丛书，由科学出版社出版发行。丛书的作者为本所的科研人员、客座研究人员及其他相关人员。出版本套丛书的目的是总结和提高我们近年来的科学研究成果，并促进相关学科领域的开拓。中国科学院力学研究所自成立以来，既从事基础研究，也以基础研究为手段，参与和承担了国家和部门委托的许多任务，取得了一系列重要的成果。我们认为，将这些成果分类整理，系统化并加以提高，在此基础上出版专著，是一件很有价值的事，既有益于中国科学院力学研究所科研工作的进一步提高，也有利于广大读者获取新的知识，共同促进力学学科的繁荣发展。

本丛书可供相关专业的科研人员和研究生参考。

郑哲敏

二〇〇九年二月于北京

前 言

由美国、俄罗斯、西欧、日本、加拿大等联合建造的“国际空间站”将运营到2020年。国际空间站是至今耗资最多、技术最先进、运营时间最长、提供能量最多和体积最庞大的空间设施。目前,各参加国都在抓紧进行各种微重力实验,预计在今后10年会取得一批重大成果。中国载人航天工程已经完成了第一阶段的“神舟飞船起步”,实现了单人和双人遨游太空。目前正在执行第二阶段的“空间实验”,已实现了宇航员的出舱活动,正在准备进行太空实验室和飞船的交会、对接和相关的技术攻关。预计2020年将实现第三阶段的“中国空间站”升空。各国空间站的主要目的都是进行微重力科学和空间生命科学及其应用的微重力实验。因此,不少人希望学习和了解微重力科学。

微重力流体力学的一些过程在地面一些小尺度问题中突显出来,这时表面张力的影响超过地球重力的作用。140多年前,C. Marangoni在研究薄膜运动时就提出热毛细对流的概念。20世纪50年代末,国际著名的流体力学刊物*Journal of Fluid Mechanics*发表了表面张力驱动对流的稳定性、热毛细作用的液滴迁移等微重力流体物理学术论文。在此期间,日本东京大学S. Kumagai教授在自由落体装置中进行了滴状燃料的微重力燃烧实验。这些先驱研究都显现了微重力环境中的许多新体系和新问题。微重力科学作为一门近代科学,是随着载人航天活动的发展而迅速发展的。航天工程中的流体管理和热管理都需要微重力流体科学的理论和实验支撑。航天飞机和空间站的微重力环境为微重力科学提供了进行微重力实验的机遇,目前已经完成了许多空间材料制备和蛋白质晶体生长等方面的实验研究。近30年来,西方各主要大国都建立了配套的微重力科学研究体系,包括地基的国家研究中心、大型自由落体设施、抛物线飞机系统、微重力火箭系统、航天飞机系统和空间站系统,俄罗斯和中国还有返回式卫星系统。可以有人操作和长期运作的空间站是进行微重力实验的良好平台。一般认为,空间站就是可进行有人操作和长期运作的微重力实验室。

20年来,微重力科学在中国逐步发展,至今已拥有一批研究设施,完成了一批空间微重力实验,在国际上有相应的地位。本书作者是中国从事微重力科学相关领域研究的主要专家:胡文瑞(第1、3章),唐泽眉(第2章),赵建福(第4章),孙祉伟、徐升华(第5章),张孝谦(第6章),王育人(第7章),龙勉、孙树津、霍波(第8章),张元仲、刘亮、王育竹、聂玉昕(第9章)。在各章撰写中,兼顾对各领域的综述和对中国主要研究成果的介绍。本书完整地介绍了微重力科学的5个主

要领域,第2~5章涉及微重力流体物理,第6~9章分别是微重力燃烧、空间材料科学、空间生物技术和空间基础物理。空间基础物理探索物理学的许多重大前沿课题,学术意义重大,一般需要大型设备或专门卫星,该领域的研究在我国起步较晚。

中国的微重力科学研究是在国家航天高技术发展计划和载人航天工程计划的推动下发展起来的,同时得到中国科学院、国家自然科学基金委员会、国家航天局和中国航天科技集团公司等部门的支持。本书的出版获得国家科学技术学术著作出版基金(2010010019)的资助,获得中国科学院知识创新计划项目(KJCX2-YW-L08)、中国科学院空间科学预先研究项目和国家自然科学基金项目(11032011, 10332060, 10872202, 10972217, 10972225, 2010CB32805, 20473108, 30870601)的资助。我们希望,本书的出版能增进微重力科学的交流,对读者增长知识和进行研究有所裨益。由于作者学术修养的限制,不当之处在所难免,敬请读者不吝赐教。

胡文瑞

2010年5月20日于北京中关村

目 录

丛书序

前言

第 1 章 微重力科学概论	胡文瑞 1
1.1 微重力环境及其效应	1
1.1.1 微重力环境	1
1.1.2 微重力效应	2
1.2 微重力科学的内涵	5
1.2.1 微重力流体物理	6
1.2.2 微重力燃烧科学	7
1.2.3 空间材料科学	8
1.2.4 空间生物技术	9
1.2.5 空间基础物理	9
1.3 微重力科学的研究方法	11
1.3.1 理论和数值模拟研究	11
1.3.2 小 Bond 数模拟实验	11
1.3.3 自由落体设施实验	12
1.3.4 抛物线飞机实验	13
1.3.5 微重力火箭实验	13
1.3.6 卫星实验	14
1.3.7 有人操作的微重力实验	15
参考文献	16
第 2 章 基本方程组和边界条件	唐泽眉 19
2.1 引言	19
2.1.1 流体的位形	19
2.1.2 重力的分层、静压和浮力效应	19
2.1.3 残余重力和重力跳动	20
2.2 毛细及界面现象	20
2.2.1 自然界的毛细现象	20
2.2.2 表面张力	21
2.2.3 润湿、接触角	27

2.2.4	毛细现象	31
2.3	基本方程	31
2.3.1	连续方程	32
2.3.2	运动方程	33
2.3.3	能量方程	36
2.4	微重力流体的基本方程组和定解条件	38
2.4.1	自由流的 Boussinesq 近似	38
2.4.2	微重力流体的基本方程组	44
2.4.3	无量纲基本方程组	45
2.4.4	定解条件	47
2.4.5	微重力流体力学有关的物理量和无量纲参数	55
2.5	主要求解方法	56
2.5.1	线性稳定性分析方法	57
2.5.2	能量稳定性分析方法	61
2.5.3	直接数值模拟	62
	参考文献	63
第 3 章	微重力条件下的自然对流	胡文瑞 66
3.1	引言	66
3.1.1	两类微重力环境中的自然对流	66
3.1.2	液滴迁移和其他	69
3.1.3	理论和实验研究方法	69
3.2	Pearson 不稳定性	70
3.2.1	Pearson 不稳定性的摄动理论	70
3.2.2	Pearson 不稳定性的理论	70
3.2.3	多层液体系统的 Pearson 不稳定性	73
3.2.4	空间实验	76
3.3	热毛细对流中的热流体波不稳定性	78
3.3.1	无限延伸液层的热流体波不稳定性	78
3.3.2	液池中热毛细对流的起振过程	82
3.3.3	液池的热毛细对流实验	85
3.4	半浮区中的热毛细对流	86
3.4.1	初期研究	86
3.4.2	液桥几何参数的影响	87
3.4.3	Prandtl 数的影响	90
3.4.4	三维流场	92

3.4.5 液桥自由面的振荡	94
3.4.6 空间微重力实验	96
3.4.7 转换到湍流的过程	98
3.5 微重力液滴动力学	100
3.5.1 等温液滴动力学	100
3.5.2 单个液滴的热毛细迁移	108
3.5.3 多个液滴或气泡的热毛细迁移	114
参考文献	121
第 4 章 气-液两相流动与相变传热 赵建福	127
4.1 引言	127
4.2 池内沸腾	128
4.2.1 沸腾类型	128
4.2.2 池内沸腾模式与传热曲线	129
4.2.3 池内核态沸腾	131
4.2.4 临界热流	136
4.3 气-液两相绝热流动	140
4.3.1 流动结构/流型	140
4.3.2 无量纲参数与相似准则	143
4.3.3 流型转换模型与流型图	144
4.3.4 摩擦压降	149
4.4 强迫流动沸腾	153
4.4.1 流动状态	153
4.4.2 重力效应	155
4.5 凝结	157
4.5.1 凝结模式	157
4.5.2 Nusselt 蒸气层流膜状凝结分析解	157
4.5.3 微重力膜状凝结	160
参考文献	161
第 5 章 微重力复杂流体 孙社伟 徐升华	165
5.1 引言与背景	165
5.1.1 基本背景	165
5.1.2 胶体粒子受的力	168
5.1.3 粒子间的流体动力学相互作用	171
5.2 胶体粒子的聚集过程和胶体的稳定性	173
5.2.1 布朗运动	173

5.2.2	分散与聚集	174
5.2.3	聚集的微重力研究	176
5.3	胶体的无序-有序相变	182
5.3.1	基本背景	182
5.3.2	硬球胶体晶体	184
5.3.3	带电粒子胶体晶体	187
5.3.4	液晶相变	191
5.4	关于复杂流体的其他一些研究内容	192
5.4.1	等离子体尘粒晶体 (胶体等离子体晶体)	192
5.4.2	磁流变流体	194
5.4.3	泡沫动力学	195
5.4.4	颗粒物质	197
5.4.5	乳状液体体系的分层、稳定性研究	199
5.4.6	石油组分热扩散特性的研究和 Soret 系数的测量	200
5.4.7	长链分子聚合物特性	201
	参考文献	201
第 6 章	微重力燃烧	张孝谦 211
6.1	引言	211
6.2	气体扩散火焰	212
6.2.1	重力对层流气体射流扩散火焰的影响	212
6.2.2	层流气体射流扩散火焰	213
6.2.3	蜡烛火焰	218
6.3	预混气体火焰	225
6.3.1	相关时间尺度的比较	225
6.3.2	可燃极限	226
6.3.3	火焰球	229
6.4	火焰沿固体可燃物表面的传播	231
6.4.1	火焰传播过程及火焰结构概述	232
6.4.2	微重力环境中的火焰传播	233
6.4.3	几个相关的尺度	233
6.4.4	微重力状态下逆向流动中的火焰传播	235
6.4.5	环境压力对火焰传播的影响	236
6.4.6	环境中气体成分的辐射特性对火焰传播的影响	237
6.5	载人航天器舱内安全防火技术	238
6.5.1	载人航天器舱内安全防火的原则	239

6.5.2	载人航天器的安全防火工作	239
6.5.3	与安全防火直接有关的微重力环境中燃烧基本规律的研究	248
6.6	液滴燃烧	257
6.6.1	液滴燃烧的理论分析和数值模拟	257
6.6.2	微重力状态下的实验研究	259
	参考文献	260
第 7 章	空间材料科学	王育人 275
7.1	前言	275
7.1.1	研究概述	275
7.1.2	发展简史	278
7.1.3	空间材料科学设备	285
7.1.4	空间材料科学展望	290
7.2	固-液相变与材料制备	290
7.2.1	凝固过程	290
7.2.2	熔体晶体生长	299
7.3	溶液晶体生长	301
7.3.1	空间溶液晶体生长概述	301
7.3.2	蛋白质晶体生长	302
7.3.3	沸石晶体生长	305
7.3.4	α -LiIO ₃ 晶体生长	307
7.3.5	空间溶液晶体生长前景展望	307
7.4	材料加工与热物性参数测量	308
7.4.1	微重力下热物性参数测量概述	308
7.4.2	有容器法: 扩散系数及热导率	310
7.4.3	无容器法: 电导率、密度和热膨胀系数、比热、表面张力和黏度	311
7.4.4	微重力下热物性参数测量面临的发展前景	313
7.5	胶体晶体与光子晶体	313
7.5.1	胶体晶体与光子晶体概述	313
7.5.2	主要科学问题	314
7.5.3	典型研究例子	315
	参考文献	315
第 8 章	空间生物技术	龙 勉 孙树津 霍 波 323
8.1	引言	323
8.1.1	空间细胞/组织培养技术	323
8.1.2	空间蛋白质晶体生长和生物分离技术	325

8.1.3 空间细胞融合技术	325
8.2 空间细胞/组织培养	326
8.2.1 空间细胞/组织培养的基本概念和技术要求	326
8.2.2 地面微重力效应模拟实验技术	333
8.2.3 空间细胞/组织培养的模型模拟研究	335
8.3 空间蛋白质晶体生长	341
8.3.1 基本概念	341
8.3.2 空间实验装置	344
8.3.3 空间蛋白质晶体生长	346
8.4 空间细胞力学-生物学耦合及其调控	350
8.4.1 细胞对(微)重力的生物学响应	350
8.4.2 (微)重力影响细胞的生物学功能	357
8.4.3 (微)重力下细胞力学-生物学耦合及其调控	359
8.4.4 未来展望	361
参考文献	363
第9章 空间基础物理	372
9.1 相对论与引力理论的空间实验检验	张元仲 372
9.1.1 弱等效原理实验检验	373
9.1.2 物体的自转与引力场的耦合	374
9.1.3 牛顿引力反平方定律的实验检验	376
9.1.4 相对论效应的实验验证	377
9.2 微重力环境下冷原子物理及其应用	刘 亮 王育竹 378
9.2.1 微重力环境下冷原子物理	379
9.2.2 原子干涉仪	381
9.2.3 空间冷原子钟	382
9.3 微重力条件下的临界现象实验	聂玉昕 386
9.3.1 引言	386
9.3.2 微重力实验	386
9.3.3 进一步的研究计划	389
参考文献	391

第 1 章 微重力科学概论

1.1 微重力环境及其效应

1.1.1 微重力环境

根据牛顿引力理论,质量分别为 m_1 和 m_2 的两物体质心相距为 r ,其间相互作用力为

$$f_g = G \frac{m_1 m_2}{r^3} r \quad (1.1)$$

式中,引力常数 $G = 6.685 \times 10^{-8} \text{cm}^3/(\text{g} \cdot \text{s}^2)$ 。考虑到地球平均半径 $r_e = 6\,371 \text{km}$ 和地球质量 $m_e = 5.976 \times 10^{27} \text{g}$,距地面 h 的物体 m 受到地球的引力为

$$f_g = -mg_e \frac{r_e^2}{(r_e + h)^2} r_o \quad (1.2)$$

式中, r_o 为地心至物体质心的单位矢量;地球表面的重力加速度 $g_e = 980 \text{cm/s}^2$ 。这时,物体受到地球的引力加速度为

$$g = g_e \frac{r_e^2}{(r_e + h)^2}$$

这表明,地球近地轨道 ($h \approx 500 \text{km}$) 运行的飞行器所受到的地球引力加速度比地球表面的地球引力加速度只小 10% 左右。

按照牛顿力学的观点,如果不考虑大气阻力、光辐射压力、质心偏离引起的各种扰动力,则空间飞行器中物体受到的地球引力与运动离心力相抵消。可以引进有效引力加速度 g_{eff} 的概念

$$g_{\text{eff}} = g - \frac{V^2}{r_e + h} = g_e \frac{r_e^2}{(r_e + h)^2} - \frac{V^2}{r_e + h} \quad (1.3)$$

式中, V 为圆轨道飞行器的运行速度。这时,物体可以看成受到有效重力的作用。按照广义相对论的观点,所有坐标系都是等价的,重力与加速度等效。假设物体的惯性质量与引力质量相同,在运动空间飞行器的局部惯性参考系中,物体只受到有效重力加速度 g_{eff} 的作用。在空间飞行器中, g_{eff} 与频率有关,可以比地球表面的重力加速度 g_e 小几个数量级,物体处于“失重”状态,或者说物体处于微重力水平中。

学术上的“微”指的是 10^{-6} ,所谓“微重力”是指该处的有效重力水平 g_{eff} 为 $10^{-6}g_e$ 。用于微重力实验的空间飞行器有返回式卫星和不返回式卫星、载人飞船、

航天飞机和空间站。各种载人空间飞行器不可避免地受到人和机械的干扰,飞行器中的有效重力很难达到微重力水平;而验证引力理论的高分辨率空间实验需要非常低的飞(毫微微)重力至阿(微微微)重力环境,一般需要具有无拖曳技术的专门卫星来实现。

事实上,绕地球运行的空间飞行器会受到许多“干扰”力的影响。低轨空间站运行时,大气阻力引起加速度减少的量级为 $10^{-7}g_e$ 。太阳辐射压产生的加速度变化量级更小,约为 $10^{-8}g_e$ 。在轨航天器内部非质心位置上的有效重力偏移,航天器绕地球以外的运动会产生诱导力的作用,航天器内部的人和机器运动产生的各种残余外力等都会引起残余加速度(residual acceleration)。在实际的绕地球飞行器中,有效重力水平与频率相关,低频时达到 10^{-3} ,高频时优于 10^{-6} 。例如,国际空间站要求:当频率小于 0.1Hz 时,残余加速度略大于 $10^{-6}g_e$;当频率在 0.1~100Hz 时,残余加速度从 $10^{-6}g_e$ 线性地增加到 $10^{-3}g_e$ ^[1]。有些残余加速度将随时间变化,它们的频率与扰动源的频率相关,被称为重力跳动(G-jitter)。研究残余重力和重力跳动的影响,是空间微重力实验的重要课题^[2~5]。

1.1.2 微重力效应

人们生活在地球表面的重力环境中,积累了丰富的有关重力场的知识。人们通过坐过山车、高台跳水、蹦极以及飞机颠簸等可以感受到短暂的“失重”状态,而微重力环境中的各种效应则是微重力科学所要研究的问题。

1. 地球重力引起的浮力对流被极大地减小

人们一直生活在地面的重力环境中,处处受到地球引力场的制约。浮力对流是广泛影响人们生活和生产过程的现象。与地球重力方向相反的温度梯度所引起密度差产生的浮力可以驱动流体中的 Benard 对流, Benard-Rayleigh 不稳定性是流体力学的经典课题,其理论和实验研究已有百余年的历史,而且还在研究。Benard 对流的重要性不仅在于它是一个经典的力学体系,而且在于它在材料制备、燃烧以及广泛的技术过程中与凝固过程、化学反应过程和其他相关过程相耦合,增加了总体过程的复杂程度。

由于有效重力加速度降低了几个数量级,微重力环境中的浮力极大地减小,很难达到 Benard-Rayleigh 不稳定性条件,一般难以激发浮力对流。对于有自由面的流体体系,自由面上的温度差造成表面张力差,也可以激发流动的不稳定性和产生自然对流。这种流动在地面过程中也存在,但是相对比较微弱,大多被浮力对流所掩盖;在微重力环境中,它成为主要的对流过程。微重力环境为研究表面张力梯度驱动的流动提供了极好的机遇,这是在地面难以实现的。微重力环境中几种主要的对流和流动过程将在第 3 章中讨论。

输运系数是研究流体输运过程不可缺少的参数。在地面测量输运系数时,由于重力引起的自然对流会造成较大的偏离,特别是对一些高温的熔体和介质,会产生很大的误差。微重力环境可以避免浮力对流的影响,获得高精度的输运系数测量值。没有浮力对流的环境更有利于材料制备过程,人们期待在微重力环境中研究材料制备的机理,进而改进地面的材料加工过程。

地面的燃烧是一个复杂的过程。剧烈化学反应伴随着大的温度不均匀,这时会有很强的浮力对流。化学反应过程和浮力对流过程耦合在一起,使火焰的形态复杂,增大了模型化研究的难度。在微重力环境中,浮力对流的消失,使人们可以集中地研究化学反应过程和其他传热传质过程的关系,更有利于燃烧机理的模型化研究。

2. 地球重力引起的沉淀和分层作用被极大地减弱

在地球表面,不同密度的物体受到不同的重力,而产生沉淀作用;在大气和海洋中,流体趋于按密度分层。沉淀和分层作用是地面普遍存在的现象。地面上合金熔体的不同组分的分布并不均匀,受到重力沉淀和分层的影响,使晶体生长的组分不均匀。地面生物反应器中存在被培养体和培养液的密度差,造成被培养体的附壁现象,往往需要加入搅拌,从而影响培养质量。地面上生物的演化过程都是在重力作用下进行的,人类的生理现象也是与地球重力环境密切相关的。一个典型的静力学问题是微重力环境中部分充液容器内的流体分布。在重力条件下,由于液体的密度比气体的大,液体集中于容器的底部,液-固边界因接触角有一点弯曲外,液面为平面。在微重力环境中,液体的分布由容器中气-液体积分数、液体与容器固壁的接触角 θ 决定,如图 1.1 所示。显然,液体分布并非唯一。

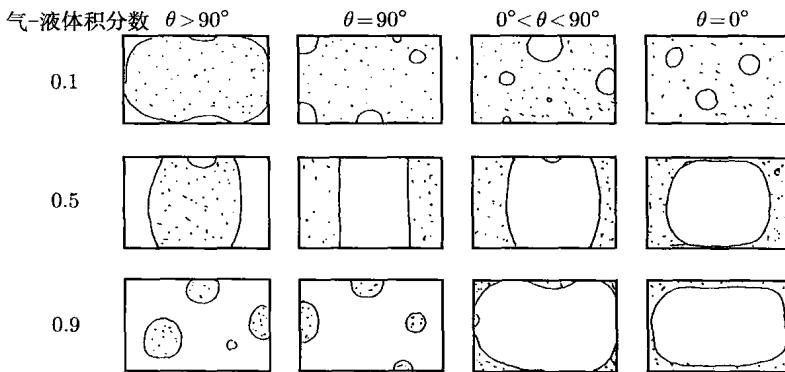


图 1.1 部分充液容器内液体(带点区域)的分布图

上、中、下图的气-液体积分数分别为 0.1、0.5、0.9, 从左至右分别对应于接触角

$\theta > 90^\circ$ 、 $\theta = 90^\circ$ 、 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 、 $\theta = 0^\circ$

在微重力环境中,不同质量的物体都处于“失重”状态,没有轻重之分。合金熔体中由重力引起的组分不均匀消失了,生物反应器可进行三维的细胞/组织培养,可以实现高效率的生物大分子分离技术。如此优越的环境为发展高新技术提供了极好的机遇,在地面上可望而不可即。同时,微重力环境中生理现象的变化也提出许多空间生理学和医学的问题,给载人航天任务增加了困难,特别是对长期载人航天任务提出许多挑战。

3. 微重力环境可以实现无容器过程

在微重力环境中,一个钢球和一滴液体都可以自由地悬浮在空间,因为它们都没有重量,也无处可掉落。在空间中,所有物体都“悬浮”着,要牢固地与局部惯性系相连接还要想些办法。这时,我们可以不用容器来装液体,可以实现无容器过程。

在地面上,浮区技术是生长高质量单晶的方法。由于重力的作用,生长单晶硅时浮区液桥的直径不能超过 8mm。在地面上,增大直径是改进浮区技术的关键。在微重力环境中,原则上增大浮区的直径并没有限制,人们在空间用浮区法生长出比 8mm 粗得多的硅单晶。在微重力科学中,浮区液桥中的流动是一个典型的课题。微重力环境中的无容器过程可以有许多应用。

4. 地球重力引起的压力梯度被极大地减小

在流体力学中,地球重力会产生流体的压力梯度。例如,两个同心圆柱之间可形成液桥,地面上的液桥形状不可能是圆柱形,因为重力作用引起的压力梯度使液桥呈葫芦形,只有在微重力环境中才可能有圆柱形液桥,如图 1.2 所示。在一些基础物理实验中,常常要求极高的温度精度。在地面的室温条件下,重力造成的压力梯度会形成实验容器中的温度梯度。在一般流体物理实验中,这种温度不均匀性很小,但在一些高精度的理论物理实验中,这种温度不均匀性会产生严重的影响。

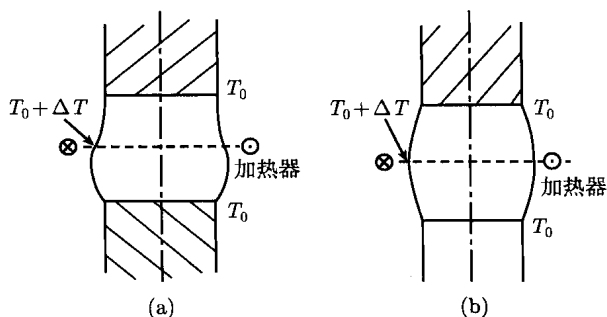


图 1.2 浮区液桥在重力条件下 (a) 和微重力条件下 (b) 的位形

二阶相变的重整化群理论是理论物理的重要结果,它要求液体比热在相变点处为无穷。比热奇异性实验要求相变点附近的实验温度控制在纳度的量级。地面实验中由于重力作用,温度达不到要求的精度,测量不出比热的奇异性。美国国家航空航天局在航天飞机的实验中测量出了比热奇异性的趋势,实验基本验证了理论的预言,如图 9.11 所示。微重力环境提供的高精度物理实验条件为发展基础物理提供了极好的机遇。

5. 微重力环境中的生物学新效应

地球上生物的演化都是在地球重力作用下进行的,地球生物的生理过程都适应了地球重力场的影响。把地球生物放到微重力环境中,就出现一些生理上的适应性问题。研究不同重力场中的生物学问题称为重力生物学,不同于地球重力场的生物学研究可以揭示生命过程的新规律。在国际空间站上将安置一个大型离心机,可以提供从微重力 μg_e 到超重力 $2g_e$ 的实验条件。在微重力环境中,宇航员前庭器官中耳石的平衡位置会发生变化,从而产生运动病;血液分布和血压分布发生变化,从而产生肌肉萎缩;体液分布和组分分布发生变化,造成骨质疏松和缺钙。空间生理学的问题与空间医学密切相关,将会影响宇航员的生活质量,微重力环境中长时间生活的问题还有待进一步研究。

空间生物学有不同的尺度,空间细胞生物学受到学者们的关注。最近,欧洲科学家完成的空间实验发现,微重力环境中细胞膜的微管分布图样与地面的相差很大。微管的作用与细胞信息传递功能相关,为什么这么小尺度的生物现象会受到重力场的巨大影响,这是一个令人费解的问题。许多微重力环境中的生物学问题还有待进一步研究。

1.2 微重力科学的内涵

自 20 世纪七八十年代以来,微重力科学主要研究微重力流体物理、微重力燃烧、空间材料科学和空间生物技术。在两年一届的国际空间委员会闭幕后,都会有相应一期微重力科学的论文集在 *Advances in Space Research* 上出版,这些年来,还不断出版了一批专集^[6~22]。近 10 年来,微重力条件提供的高精度物理实验环境吸引了一批理论物理学家,他们希望利用空间的微重力环境能更好地检验广义相对论和引力理论、低温原子物理和低温凝聚态物理的许多基础物理前沿问题。这样就形成了微重力科学的一个新领域——空间基础物理。近年来,人们常常把这些微重力科学的领域统称为空间的物理学,它是利用微重力环境来研究物理学规律,以区别于在地面重力环境中的物理学^[23]。要指出的是,中文的“空间的物理学”和“空间物理”是两个不同的概念,后者主要研究太阳系等离子体的运动规律和行星