微重力科学和应用

胡 文 瑞

（中国科学院力学研究所）

摘　　要

微重力科学是研究微重力环境中流体介质运动规律的一门新兴学科，它包括微重力流体科学、空间材料科学和空间生物技术三个主要部分．在微重力环境中，浮力驱动的对流极大地减弱，沉淀几乎消失，流体内部的静压梯度接近于零，由此而发展了无容器过程．理解和利用这些过程就可以充分开发微重力资源，可以进行地面实验室难于进行的基础科学研究以及生产昂贵的药物和材料．空间站和空间平台的建立为微重力研究提供了理想的实验条件．

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，例如极大的典型尺度，极高的真空抽吸率，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新领域，它研究在微重力环境中的物质的运动规律，特别是传质、传热、物理化学以及电磁作用规律．微重力科学的发展正在促进空间材料加工产业的形成．

一、微重力科学的环境条件

地球表面以外的物体受到地球的重力与该物体距地心距离的平方成反比．所以，距地球表面 h 处的重力 g 与地球表面重力 g_0 的比为

$$g/g_0 = r_E^2/(r_E + h)^2,$$

其中 $r_E = 6378\text{km}$ 为地球半径．为了在地面或地球附近的空间获得"失重"状态，就必须通过运动或者外加的体积力造成与重力相平衡的局部力学系统．在这个局部系统中，重力和运动产生的惯性力，同磁场形成的洛仑兹力相抵消，使这个局部系统中的物体可处于"失重"状态．如果用局部系统的有效重力 g_{eff} 来表示系统中与地球重力抵消后单位体积中单位质量的物体所受到的净力，则 g_{eff}/g_0 就是该系统失重状态的特征量．在有些飞行器中，比值 g_{eff}/g_0 可达 10^{-6} 的量级，因而称作微重力．当然，在远离天体的宇宙空间中，有广延的微重力区域．但人们目前更感兴趣的微重力环境还是限于近地空间．

在特定的运动系统中产生微重力状态是目前广泛采用的方法．最简单的失重系统是自由落体系统，由此而建立了落塔和落管．在落管装置中，实验件从竖直并抽真空的长管顶部向下自由落下，管的直径比较小．落塔装置有一个抽真空的下落器，实验件放在下落器中与下落器一起自由落下，它的尺寸比较大．对于140m 高的自由落体装置，可得到 5s 的实验时间．落塔或落管中的 g_{eff} 可达 10^{-3}—$10^{-6}g_0$．利用飞机做抛物线飞行，飞机在抛物线顶部附近持续 30s 左右，可达 $g_{eff}/g_0 = 10^{-1}$—10^{-2}．这样的抛物线飞行可重复十余次．探空火箭也能发射抛物线轨道．如果发射高度为 250km，可得到 5 min 左右的实验时间，而 $g_{eff}/g_0 = 10^{-4}$—10^{-6}．比较理想的微重力环境还是在近地空间以圆轨道绕地球运行的空间飞行器中，例如卫星、平台、航天飞机以及空间站等．那里

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

有较长时间的实验环境，g_{eff}/g_0 可达 10^{-6}。

微重力过程的研究始于空间飞行器中流体管理的技术需要。从六十年代后期，特别是七十年代以来，进行了大量空间材料过程的研究。人们期望在微重力环境中培养和生长出高质量的或新型的材料，这些材料在地面很难制造或无法制造。预计空间材料的生产可以具有开发价值。为了理解微重力过程的基本特性，作为微重力科学的基础而发展了微重力流体科学。近年来，微重力科学和应用发展很快，每年世界上用在这个领域的费用已达数亿美元。

二、微重力环境中的物理过程

微重力环境中的主要物理过程可以归纳为：浮力驱动的对流随重力的减小而变弱，沉淀几乎消失，流体内部的静压梯度接近于零，以及可以发展无容器过程。理解和利用这些过程就能开发微重力资源，但伴随着这些特征过程，也出现了一些不利的条件[1]。

1. 对流

对流是流体中传质和传热的重要形式之一。在地面的 Benard 对流问题中，常引用 Rayleigh 数

$$\mathrm{Ra} = \frac{\beta g \Delta T l^3}{\nu \kappa},$$

其中 β，ν，κ 分别是热膨胀系数、运动粘性系数、热扩散系数，l 为特征长度，ΔT 为下壁与上壁之间的温差。当 $\mathrm{Ra} \simeq 1700$ 时，可建立 Benard 对流胞；Ra 再增加，可造成温度涨落，甚至发展成湍流。对于更复杂的流场，特征量将不能只归结为一个 Ra 数，而可能与 Grashof 数（缩写为 Cr 数，$\mathrm{Gr} = \beta g \Delta T l^3/\nu^2$）和 Prandtl 数（缩写为 Pr 数，$\mathrm{Pr} = \nu/\kappa$）有关。

在地面的材料生长过程中，由于浮力驱动对流所产生的混合、扰动等不利因素会直接影响材料的质量，因此往往需要采取复杂的技术措施来控制这种对流。在微重力环境中，g_{eff}/g_0 达到 10^{-6} 左右，相应的 Ra 和 Gr 也减到 10^{-6} 倍。这就极大地抑制了浮力驱动的对流，使材料生长过程中扩散控制条件较容易实现，输运过程相对简化。这样的条件对材料的生长和分离极为有利。

大量的空间实验表明，随着浮力驱动对流的减弱，其他在地面上不明显的对流效应就变得突出了，例如表面张力梯度驱动的对流，重力跳动引起的对流，可压缩流体中压力驱动的热声对流，以及相变过程中引起的相变对流[2]。特别是由于液体分界面上温度梯度或浓度梯度引起表面张力变化所产生的对流更具有突出的重要性，这种对流也称为 Marangoni 对流，常用 Marangoni 数来描述其特性。Marangoni 的定义为

$$\mathrm{Ma} = \frac{\rho |d\sigma/dT| \Delta T l}{\kappa \mu}.$$

2. 沉淀和悬浮

在重力作用下，流体具有沿垂直于重力方向分层的趋势。密度较大的组分下沉，密度较轻的组分上浮。两种不溶的液体在容器中平衡时，一般具有明确的界面；只有密度相同的不溶液体，才能使一种液体悬浮在另一种之中。与此相应地，流体也倾向于沿垂直于重力方向分层地流动，这类流动称为分层流。通常用 Froude 数 Fr 来描述垂直于分层方向的速度 w 与分层方向的速度 v 的比值的相对大小，即

$$\mathrm{Fr}^2 \equiv \frac{\rho_0 v^2}{g l^2 |d\rho_0/dz|} \simeq \frac{w}{v}.$$

分层流时，$\mathrm{Fr} \ll 1$.

在地面生产不同密度组分的混合产物（例如某些合金或化合物）时，克服重力场产生的分层并使不同组分均匀混合常常是难于解决的问题。在微重力环境中，流体可以相互掺混，不同密度介质之间可以没有清晰的分界面地彼此悬浮在一起，这种性质为材料加工提供了地面难于做到的条件。

空间实验证实了流体的上述特性，并根据这些特性生产出了品质较好的合金样品。另一方面，空间实验也发现，实际情况远比预想的要复杂。在地球重力作用下的分层效应中，被掩盖的一些过程在微重力环境中都突出地表现出来了。例如，一种液体成分沿固体边界弥散是分离的主要原因；一种液体成分会由于弥散增

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

强而聚集并受抑制等。在微重力环境中，气泡的控制变成比较困难的问题。

3. 流体的静压梯度

在重力场的作用下，流体的力学平衡满足

$$\nabla p = \rho g_{\mathrm{eff}}.$$

在流体中存在静压梯度，流体底层的静压比上层的大，下层的流体要支承上层流体的重量。在微重力环境中，由于有效重力($g_{\mathrm{eff}} = g - f$)很小(f 是非重力加速度)，所以流体中的静压梯度几乎消失。这样，液体就可能被表面张力约束住，即使表面张力值很低的液体也可在有限的空间(例如悬浮区等)内约束成特定的位形。

流体的静压分布情况在液体界面和液体内部都会造成影响。根据 Laplace 公式，在液体界面处的内、外压差 $\Delta p = p_{内} - p_{外}$ 与界面处表面张力和粘性力的关系为

$$\Delta p + \sigma\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = 0,$$

其中 R_1 和 R_2 为界面的主曲率半径和次曲率半径。当界面有法向速度时，上式右端应加上相应的粘性力一项。所以，液体表面的静压分布将影响液面的形状。在液体内部，静压分布可影响液体的流动。在静力学中，微重力条件提供了非常均匀的流体内部压力，因而可以准确地研究相变过程，进行临界点实验。这种研究具有重大的学术价值，受到极大的重视。

4. 无容器过程

在失重的情况下，液体不再需要用容器装盛，它可以自由地悬浮在空间。利用这个性质，可使材料加工具有许多优点。无容器的材料加工过程，可以消除由容器壁所引进的杂质和由器壁所感应的成核。这就为生产超高纯材料，控制材料加工中的成核，以及进行亚稳相的研究创造了条件。在空间制造玻璃和难混材料时，人们广泛地采用无容器技术。此外，由于消除了容器的影响，人们可以更好地测量材料的热物理性质。

三、微重力科学的内容

微重力科学主要包括三方面的内容，即微重力流体科学、空间材料科学以及空间生物技术。在流体科学中，又可分为流体物理、输运现象、燃烧等（如表 1 所示）。各国对微重力科学

表 1　微重力科学的主要内容

微重力流体科学：它是理解微重力过程的基础，是改进空间材料过程的先导。其主要内容包括对流和扩散输运、多相混合、临界点现象、流体的热物理性质、毛细过程、流体管理、燃烧。

空间生物技术

主要任务：通过基础研究、过程发展研究和产品发展研究，生产纯净药物和生长生物大分子。

主要内容：包括粒子和大分子电动理学和动理学，细胞培养，大分子结晶，生物流变。

关键技术：电泳仪，生物晶体生长器，循环式等势聚焦装置，生物反应器。

空间材料科学

(1) 玻璃和陶瓷方面：

主要任务：研究低衰耗玻璃纤维和高品质玻璃，生产高强度、高热抗、低密度陶瓷。

主要内容：玻璃的生长，纯度和结构的研究。

关键技术：悬浮技术，成壳技术和纤维拉细技术。

(2) 电子材料方面：

主要任务：研制大的、完整的、低杂质含量和缺陷少的晶体。

主要内容：扩散控制，分凝的性质、原因和模型，对流的影响。

关键技术：Bridgeman 生长，溶液生长，气相生长，悬浮区生长炉(等温、梯度、镜面反射)。

(3) 金属合金和复合材料方面：

主要任务：发展微重力冶金学。

主要内容：两相混合物的粗化和稳定性，两相熔体的固化和合金分凝，尺度定律，热物理性质，离子溶液形成金属时的沉淀，对流作用。

关键技术：先进的定向固化炉，电磁悬浮炉，过程实验炉等

支撑三要素：课题(理论预研、实验分析)，仪器设备(实验仪器、生产设备)，空间实验(空间站、平台、卫星等)。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的分类不尽相同。要强调的是，流体科学是整个空间材料科学的基础，而空间材料科学又不断地向流体科学提出新的问题。由于空间实验显示出的空间过程远比人们设想的要复杂，流体科学越来越受到人们的重视。在微重力科学中，流体力学还在与各种具体的物理和化学过程相结合，并包含特定的表面过程，形成新的交叉学科[3-5]。

在空间进行实验以前，要求在地面做大量的工作，包括理论分析和计算，地面实验室研究，以及利用落塔、火箭或飞机进行短时间的微重力试验。不少研究集体在地面进行一、二十年的艰苦准备才争取到一次上天实验的机会。另外，发展空间实验的仪器设备，使空间实验条件能被严格控制，是保证空间实验成功的关键环节之一。在微重力环境中，材料生长过程表现得相当复杂。定性的实验可以显示微重力过程的某些特性，只有定量的实验才能揭示微重力过程的机理。人们进行了许多空间材料生长的实验，发现有的材料性能比地面生长的要好，有的差不多，也有的比地面生长的还差。

四、微重力科学的发展趋势

从七十年代开始，人们研制成功一批空间材料实验装置。用这些装置进行实验，取得了一批重要结果，其中包括生长出一些优质的材料，取得了一批微重力实验数据，检验了许多在微重力实验设备上所进行的工作。八十年代以来，人们根据初期实验的结果和应用的需要，更强调了基本规律的研究，并发展了一批新一代的仪器设备。

各国的微重力科学计划都将商业化应用作为主要目标。美国空间政策中心预测 2000 年时空间产业的年收益可达 650 亿美元，其中制药为 270 亿美元，玻璃加工为 115 亿美元，半导体电子材料（如砷化镓等）为 31 亿美元，空间材料的三项占总收益的64%。各国政府都极重视将研究成果及时商业化，以形成空间材料的高技术产业。苏联和平号空间站的扩充，九十年代中期的国际空间站计划（以美国航宇局为主，参加者还有欧洲空间局和日本、加拿大），这些计划的实现，为研究微重力科学和应用提供了极好的条件，必将加速研究成果向商业化的转化过程。

目前，大多数空间材料过程的研究还处于研究和概念论证阶段，即处于探索基本规律的过程中。但是美国麦克唐纳·道格拉斯宇航公司和美国航宇局制订的空间电泳生长（EOS）计划则已完成商业化预研阶段，即将进入雏型工厂阶段。EOS计划是要发展一套空间的连续流动式电泳仪，并在航天飞机上用它来进行生物材料的分离和提纯。制药公司利用这些经过提纯的生物材料，可以生产出价格昂贵的新药。根据分析估计，即使在航天飞机有效载荷舱内安装雏型的大型装置进行七天的生长，在商业上也是有利可图的。在此背景下，西方的私人公司已开始向微重力研究和应用领域投资。

[1] L. Steg, (Edt.), Material Processes in Space, AIAA, (1977).
[2] S. Ostrach, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 14(1982), 313.
[3] V. S. Avduyevsky, (Edt.), Manufacturing in Space, MIR Publisher, (1985).
[4] P. Goldsmith, *J. Crystal Growth*, 79 (1986), 37.
[5] S. Maekawa, *Space Technology*, 7(1987), 165.

（上接第 60 页）

[10] 南怀仁撰，刘蕴德笔受，新制灵台仪象志，清钦天监刊印，卷 2，(1674).
[11] 丁韪良，格物入门，同文馆，卷 5，(1868).
[12] 江南制造局编，江南制造局刻印的第 365 册书，江南制造局出版，(1871－1880).
[13] 张文虎编，武陵山人遗书，独山莫祥芝刻印，(1883)，第 8 卷.
[14] 富强斋主人编，富强斋丛书正集第 3 种，小仓山房石印，(1896).

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net