

微重力气液两相流动与传热¹⁾

赵建福²⁾

(中国科学院微重力重点实验室, 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 微重力条件下的气液两相流动与传热现象不仅在航天科技领域有重要的应用前景, 而且由于抑制了重力和两相密度差所引起的浮力分层与相间滑移等因素的干扰, 能够简化流动复杂性, 突出流动中经由液气界面产生的相互作用, 对揭示气液两相流动与传热现象内在控制机理极为有利, 因此得到国际航天工程界和微重力流体力学界的高度重视, 是目前相当活跃的研究前沿领域之一。本文首先对中国科学院国家微重力实验室在微重力气液两相流动与传热研究方面的主要成果(包括“和平号”空间站气液两相流实验、IL-76 失重飞机气液两相流实验、第 22 颗返回式卫星和实践 8 号育种卫星搭载池内沸腾实验、NML 落塔池内沸腾实验、NML 落塔燃料电池内部气液两相流动及其电性能实验等一系列微重力实验, 以及地面对比实验及理论探索等)予以详细评述, 然后结合该领域国际发展现状与我国航天(尤其是载人航天)事业的发展需求, 对我国微重力气液两相流动与传热研究近期的发展趋势予以探讨。

关键词: 微重力, 气液两相流, 池内沸腾, 燃料电池

引言

气液两相系统广泛存在于化工、能源、冶金、环保、轻工及航天等各个工业领域, 具有重要的应用价值。

气液两相系统中, 气、液两相物质间往往具有极大的密度差异, 在地面常重力环境中, 两相间存在极大的浮力作用, 引起强烈的相间滑移和密度分层等效应, 往往增加了流动的复杂性, 甚至掩盖了流动过程中的内在机制, 这导致了目前关于两相系统流动与传热的知识带有明显的经验性。事实上, 在没有关于气液两相界面相互作用机制的完备知识的局限下, 传统的气液两相流动研究不可避免地遵循着经验主义的方法, 即针对某个特定的实用目标, 精心设计大量实验, 通过对实验所获的经验数据的关联分析, 获得适用于该目标的各种经验关联式, 用于实际的设计及性能预估等。即使基于对气液两相流动某些特定机制开展的理论探索, 最终也总是需要引入由实验数据确定的经验参数, 来弥补理论推导过程中所忽略的次要因素的影响。显然, 由此获得的经验或半经验的关联式, 必然带有极大的局限性, 尽管可以满足特定情形的需要, 但不能保证在其经验基础之外也能具有很好的预测性能, 甚至连基本的变化趋势都无法正确预测。

随着人类航天(尤其是载人航天)事业的发展, 空间微重力环境提供了一个对气液两相流动现象内在机理研究极为有利的平台, 抑制甚至完全消除浮力效应, 简化流动结构, 突出界面作用过程, 凸现气液两相流动与传热过程中的基本机制, 极大地促进了相关学科的发展。当然, 相关研究也是航天技术发展自身需求的反应, 如大型航天器对热管理系统在范围、功率密度、温度均匀性等方面的日益增长的需求, 正逐渐超越传统单相热控制技术所能承担的范围, 使得气液两相系统受到国际航天大国(区域)的重视, 进而投入大量人力物力开展相关研究。此外, 在载人航天器环境控制与生命保障系统、航天器动力系统与流体管理系统以及空间科学实验等中都广泛存在着气液两相流动与传热现象, 也是推动微重力气液两相流动与传热研究的主要动力之一。

¹⁾ 国家自然科学基金项目(19789201、10202025、10432060、50406010)、中国科学院知识创新工程(KJXC2-SW-L05、KACX2-SW-02-03)资助

²⁾ E-mail: jfzhao@imech.ac.cn

中国科学院国家微重力实验室自上个世纪九十年代中期创建伊始，即将微重力气液两相流动与传热作为主要研究方向之一，先后完成了“和平号”空间站气液两相流实验、IL-76 失重飞机气液两相流实验、第 22 颗返回式卫星和实践 8 号育种卫星搭载池内沸腾实验、NML 落塔池内沸腾实验、NML 落塔燃料电池内部气液两相流动及其电性能实验（与北京工业大学合作）等微重力实验研究项目，以及相应的地面对比实验和理论探索。本文将首先对上述成果予以详细评述，然后结合该领域国际发展现状与我国航天（尤其是载人航天）事业的发展需求，对我国微重力气液两相流动与传热研究近期的发展趋势予以探讨。

1 微重力气液两相流型与摩擦压降

1.1 “和平号”空间站气液两相流型实验

1999 年 8 月中国科学院国家微重力实验室与俄罗斯 Keldysh 研究中心合作完成的“和平号”空间站气液两相流型实验，是迄今同类实验中唯一一次在地球轨道长期、稳定的微重力环境中由人参与操作完成的实验^[1, 2]。空间实验中，实验段直径 10mm，长径比 35.6。气相介质为空气，液相则选用空间站上允许使用的一种无色、无味、无毒液体 carbogal ($C_6F_{10} (CF_3)_2$ ，20℃时密度 $\rho_L=1858\text{kg/m}^3$ ，粘度 $\mu_L=1.95\times 10^{-3}\text{kg/m}\cdot\text{s}$ ，表面张力 $\sigma=0.019\text{N/m}$ ，壁面接触角接近 0°)。实验装置安装在“和平”号空间站“晶体”舱 (Kvant module) 内的“波浪-2A (Volna-2A)”流体动力学实验装置上。该装置可以绕其自身旋转轴以一定的角速度转动，因此可以提供 $10^{-5}\sim 0.5 g_0$ (这里 g_0 表示地面标准重力加速度) 的不同残余重力条件。

在空间站背景微重力环境 ($>10^{-5}g_0$) 中获得的两相流型图示于图 1。在正常液相流速范围内，实验观测到的流型可归为三类：泡状流 (也包括分散细泡流)、间歇流 (包括弹状流和弹-环状流，后者主要源于图像质量不足以对高速流动结构给予清晰判读) 和环状流。空间实验中还观察到较低液相流速条件下存在着的光滑环状流，液气界面相当光滑，上面只有缓慢向下游运动的微弱的扰动波，在个别情形中，扰动波偶尔会引起液膜突然破裂，形成横贯整个流道的“液桥”，并以远大于扰动波传播的速度迅速移出流道。这种现象和在内径 $54\mu\text{m}$ 毛细管内观察到的油/水两相环状流动^[3]极为相似，表明二者间存在有某种联系，为微重力和微尺度两相流动的相互模拟实验研究提供了一定证据。

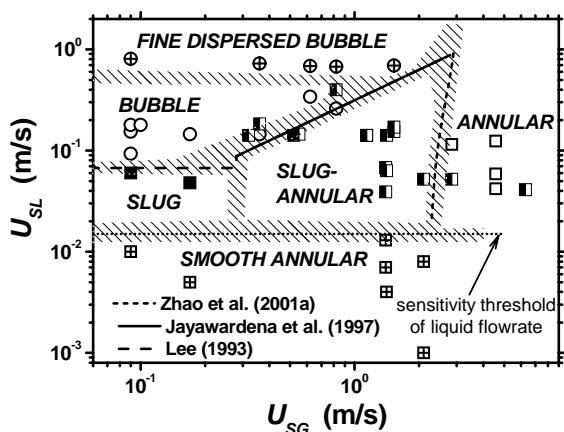


图 1 “和平号”空间站实验中的微重力两相流型图

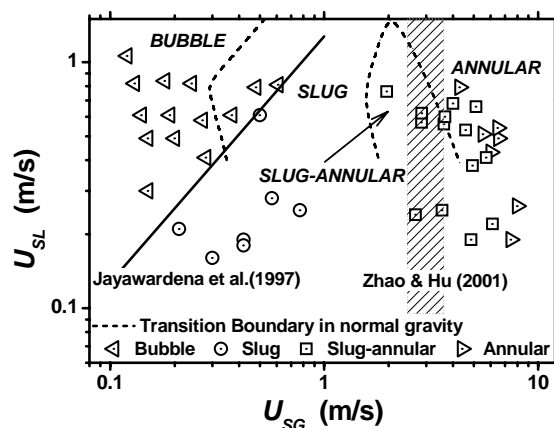


图 2 IL-76 失重飞机实验中的低重力两相流型图

此外，实验中还观测了部分重力 ($10^{-3}g_0$ 和 $0.1g_0$) 条件下气液两相水平流动中的流型特征，为分析气液两相流动中的重力效应提供了实验依据^[4]。

1.2 IL-76 失重飞机气液两相流型与摩擦压降

1999年7月中国科学院国家微重力实验室利用中俄航天合作机会,赴俄罗斯加加林航天员中心完成了IL-76失重飞机方管内气液两相流型与摩擦压降的观测实验。实验介质采用水和空气,有机玻璃通道截面为方形(12×12mm²),长径比为80。与地球轨道上稳定飞行的空间飞行器不同,失重飞机因受大气阻力等因素的影响,残余重力高达10⁻²g₀,并且有着同量级的残余重力波动。

在常重力和低重力条件下均观察到了泡状流、弹状流、环状流和弹-环状过度流等四种流型,低重力条件下弹-环状过度流在流型图上占据了较大的区域(图2)。重力对泡状流和弹状流的特征及其相互转换条件有着明显影响,但对弹状流-环状流转换边界没有明显影响。方管内的流型转换条件与圆管差异微弱(只需考虑截面几何关系修正即可),这主要源于两相介质间的相互作用大大减弱了方管内的二次流的强度^[5]。

目前常用的两相流动摩擦压降模型或关联式都不能很好预测低重力实验的结果,相对而言,Friedel模型与实验数据符合较好,可以用于空间两相系统中摩擦压降的预估^[6]。

对微重力泡状流,实验表明气、液两相局部速度间差别极小($u_G \approx u_L \equiv u$),这意味着在微重力条件下不存在相间局部速度滑移,因此,特征速度的合理选择应该是两相混合流速 $U_M = U_{SG} + U_{SL}$ 。此外,基于对微重力泡状流动结构的分析,即润湿性壁面附近必然存在一个无气泡区,摩擦因子的定义应采用液相的物性参数(密度 ρ_L 和粘性系数 ν_L)。这样,微重力泡状流摩擦因子和两相Reynolds数可定义为

$$f_{TP} = \frac{D}{2\rho_L U_M^2} \frac{dp}{dz}, \quad Re_{TP} = \frac{U_M D}{\nu_L} \quad (1)$$

其中, D 和 dp/dz 分别表示流道水力直径和沿程摩擦压降。基于截面上局部流动速度的指数型分布可推导出二者具有如下依赖关系:

$$f_{TP} = A Re_{TP}^{-1} \quad (2)$$

图2显示了在上述定义框架下的方管低重力泡状流摩擦压降(Zhao等,2002)及文献中部分管内低重力泡状流摩擦压降的数据。可以看到,在小Reynolds数时, $A=35$,满足式(2);但当 $Re_{TP} \geq 3000$ 时,摩擦因子对Reynolds数的依赖关系发生变化,类似于单相流动中的层流-湍流转换^[7]。

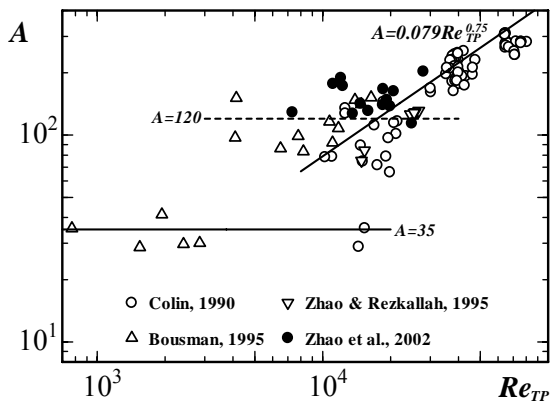


图3 微重力泡状流摩擦压降

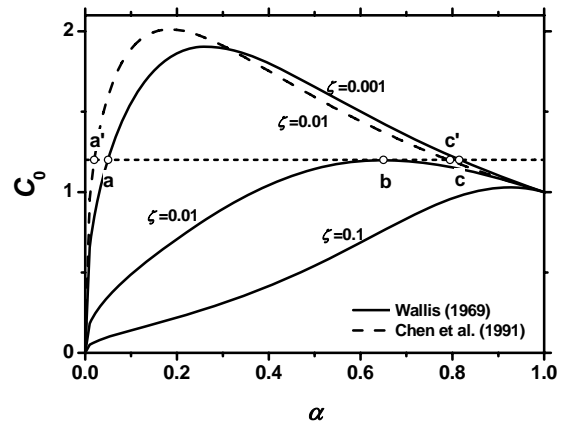


图4 微重力弹-环状流型转换的空袭率匹配模型典型解

1.3 微重力气液两相弹状流-环状流转换的半理论 Weber 数模型

微重力气液两相弹状流-环状流转换的首个模型是Dulker等^[8]提出并由Colin等^[9]、Bousman^[10]修订的空袭率匹配模型。该模型假设弹状流-环状流转换对应于某种过渡状态,该状态既可以视作弹状流,

又可以视作环状流，因此，由描述弹状流运动的滑移流率方程与描述环状流摩擦压降的方程所构成的方程组的解即弹状流-环状流转换条件。但是，我们的分析^[11]表明（图 4），此类模型对不同的气、液体系会存在 0、1 或 2 个解，解的具体位置还依赖于环状流摩擦压降方程中采用的相间摩擦因子的经验关联式，而且为保证解的存在气相分布参数 C_0 存在一个系物性参数 $\zeta = (\rho_G/\rho_L)(v_G/v_L)^{1/5}$ 增大而减小的最大可能值。然而，解的不同数目导致应用上的选择困难，相间摩擦因子关联式的经验性制约了模型的适用范围，而气相分布参数最大可能值特性更是没有经验依据。

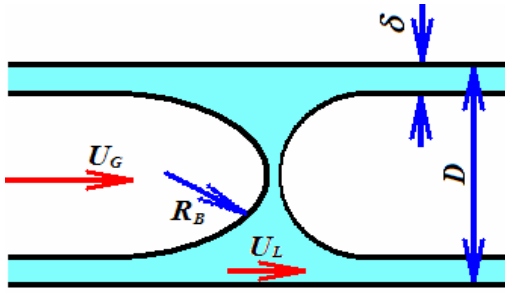


图 5 微重力弹状流-环状流型转换示意图

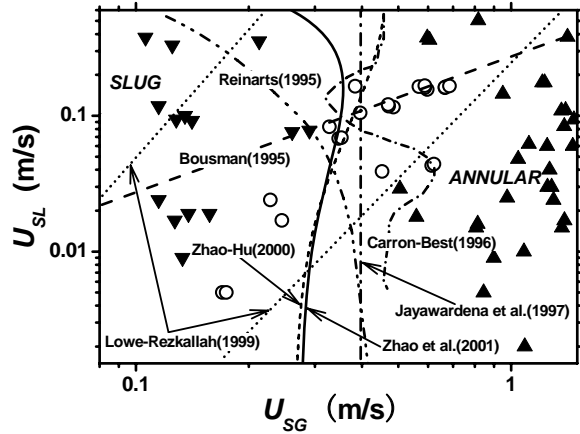


图 6 微重力弹状流-环状流型转换模型与实验数据的比较

另一类模型可统称为Weber数模型。此类模型基于微重力气液两相弹状流和环状流分别由表面张力和惯性力起主导作用的事实，认为相应的流型转换机理在于表面张力和惯性力间平衡关系的破坏。Zhao和Hu^[12]基于图 5 所示的流动构型特征，认为惯性力应为气流惯性产生的对横贯整个流道的“液桥”的冲击力。由于“液桥”运动的特征速度可以用液相平均速度 $U_L = U_{SL}/(1-\alpha)$ 来表示，因此，作用于“液桥”上的惯性冲击力的特征表达式应为 $\rho_G U_{SG}(U_G - U_L)$ ，其中， $\rho_G U_{SG}$ 表示气相介质的质量流率， $U_G = U_{SG}/\alpha$ 表示气相介质的平均速度，而 $(U_G - U_L)$ 代表气相介质相对于液相介质（即“液桥”）的速度。利用滑移流率方程，Zhao和Hu^[12]提出了如下半理论Weber数模型：

$$\begin{cases} U_{SG} = \sqrt{\frac{2\kappa\zeta C_0(1-\alpha)\alpha^{3/2}\sigma}{(C_0-1)\rho_G D}} \\ U_{SL} = \frac{1-C_0\alpha}{C_0\alpha} U_{SG} \end{cases} \quad (3)$$

其中， κ 为一个量级为 1 的经验参数， ζ 反映了截面形状的影响（对圆管和方管其值分别为 2 和 $\pi^{1/2}$ ）。气相分布参数为另一个经验参数，对圆管和方管分别取为 1.16 和 1.35^[13]。图 6 表明，该模型明显改善了预测精度，并且适用于相当广泛的两相体系、流道尺寸及实验方法（如微重力飞行实验和毛细管与中性悬浮地面模拟微重力实验）等。

2 微重力池沸腾传热

2.1 核态沸腾

沸腾一般是指发生在固-液界面上并伴有大量气泡生成的剧烈的传热现象。当加热面温度 T_w 超过系统压力下液体的饱和温度 T_{sat} 时就会发生这种过程。池沸腾是指没有外部强迫流动式的沸腾现象，有时又称为大容器沸腾。池沸腾又划分为核态沸腾、膜态沸腾等不同模式，其中核态沸腾中用很小的壁面过热度 $\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$ 就可获得很高的传热系数，因此获得了广泛的应用和高度的重视。

池沸腾的微重力实验发现，核态池沸腾的传热系数相比于地面常重力环境中的数据而言究竟是增大还是减小，决定于壁面过热度以及加热面形状等因素。一般而言，在低过热度（热流）时，微重力核态池内沸腾会有所强化，原因在于浮力驱动的自然对流被抑制后，加热表面附近液体温度升高，导致成核点活化提前，高效的相变传热在总的传热效率中所占比重增加，不仅弥补了被抑制的自然对流，甚至能传递更多的热给流体。与此相反，在高过热度（热流）时，气泡脱离加热表面的动力极大地被削弱后，难以及时离开表面，导致密集生成的气泡相互干扰和合并，堵塞液体对表面的重新补给。稳定的核态池沸腾得以维持的机制在于^[14]：邻近加热表面的聚并大气团起着“热库”的作用，它会不断地吸收表面生成的小气泡。在过冷沸腾中，这个大气团的顶部因与过冷液体接触而凝结，使得该气团能够维持其尺寸不变。这样，过冷度不仅可以有效地强化传热，而且能够大大增强稳定的核态池沸腾存在的可能性。在微重力过冷沸腾中，观察到小气泡从其生成位置沿表面向大气团迁移的现象，分析表明约 40%的传热增强效应来自于气泡的迁移现象，而这种迁移被认为源于 Marangoni 效应。

图 7 显示了平板加热面上 FC-72 池沸腾曲线。微重力实验是 2006 年 9 月搭载我国实践 8 号育种卫星进行的，采用了控制加热电压按指数形式增长的准稳态加热方式，并通过压力、温度控制系统对系统压力、液体过冷度等进行控制^[15]。微重力沸腾曲线的一个显著特征是曲线变得极为平缓，这和人采用稳态加热实验所得到的趋势相同^[16]。这里，采用准稳态实验的好处在于可以获得连续的沸腾曲线，从而避免空间微重力沸腾稳态实验数据的稀缺与分散引起沸腾曲线变化趋势模糊不清的弊端。

图 8 则显示了微重力条件下 R113 在铂丝表面的核态池沸腾传热强化因子的变化特征^[17]，其中，长时间稳定的微重力实验数据取自 2005 年 9 月搭载我国第 22 颗返回式卫星进行的池沸腾实验，而地基短时微重力实验则是在中国科学院力学研究所国家微重力实验室落塔中进行的^[18]。可以明显看到，对于丝（柱）状加热表面，由于径向液体补给相对并不困难，微重力沸腾中即使在高过热度时依然具有不低于地面时的传热系数，甚至还略有增强。

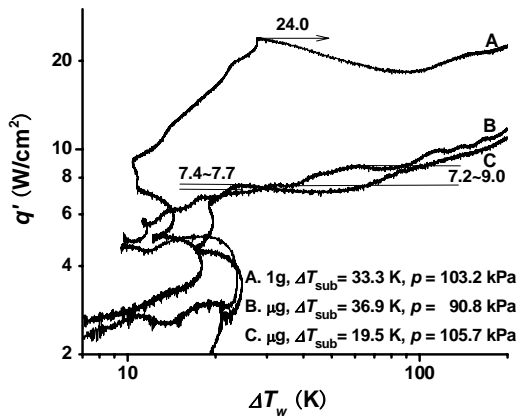


图 7 平板加热表面微重力池沸腾曲线

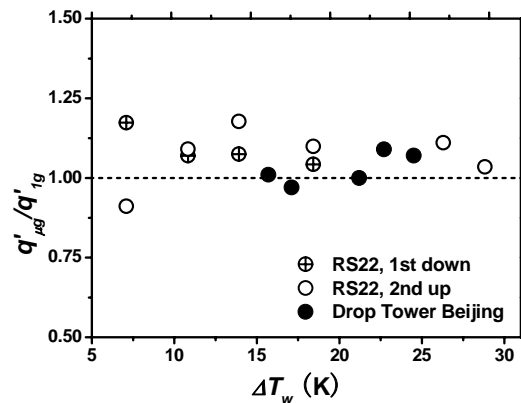


图 8 铂丝表面微重力核态池内沸腾传热强化因子

2.2 临界热流

临界热流（CHF）对应于核态沸腾曲线中的热流最大值，此时，由于大量蒸气的产生，液体难以持续润湿表面，若进一步增大热流，沸腾将由核态沸腾转变为膜态沸腾，表面温度急剧增大，甚至超过材料容许极限而导致加热器烧毁，因此临界热流也被称为“烧毁极限”。显然，临界热流对相关应用十分重要，对空间应用而言尤为重要。

半个多世纪以来，各国学者先后提出多种机制来解释和预测临界热流。不过，无论哪种模型方法，最后往往都将预测的临界热流归于 Zuber-Kutateladze 关联的形式：

$$\frac{q'_{CHF}}{\rho_G^{1/2} \lambda [g \sigma (\rho_L - \rho_G)]^{1/4}} = Ku \quad (4)$$

式中，常数 Ku 通常被成为库塔捷拉泽 (Kutateladze) 数。对于饱和状态下的大尺寸加热器，Kutateladze 建议其取值范围为 0.13~0.16；而在 Zuber 的流体动力学不稳定性分析中，其取值范围为 0.12~0.15，不过一般将 $Ku = \pi/24 \approx 0.131$ 时的临界热流预测值称为 Zuber 临界热流。

对于小尺寸加热器，实验发现 Ku 是关于 Bond 数的一个函数，其中 Bond 数 $Bo = gL^2(\rho_L - \rho_G)/\sigma$ 代表着浮力与毛细力之比。不过，研究中通常采用无量纲参数 $L' = \sqrt{Bo} = L\sqrt{g(\rho_L - \rho_G)/\sigma}$ 来衡量尺度效应，对于丝（柱）状加热器，则用丝（柱）的无量纲半径 $R' = R\sqrt{g(\rho_L - \rho_G)/\sigma}$ 来表征。根据无量纲尺度/半径的定义，许多在地面常重力环境中属于大尺度加热表面的情形，在空间微重力环境中将变成小尺度问题，因此，临界热流的尺度效应对沸腾传热的空间应用具有特别重要的意义。

图9显示了第22颗返回式卫星搭载池沸腾实验及空间飞行实验前后的地面常重力对比实验中测量的临界热流^[19]，同时对比了其他研究者报道的实验数据。在重力为变量的条件下，池沸腾临界热流依然可以用Lienhard和Dhir^[20]模型描述，尽管相比于该模型原始的适用范围 $R' \geq 0.15$ ，无量纲半径范围扩大了 3~4 个数量级。这和地面常重力环境中关于临界现象尺度效应的研究结果存在极大差异，表明无量纲半径在小Bond数情形中，已不再是描述临界热流尺度效应的唯一参数。

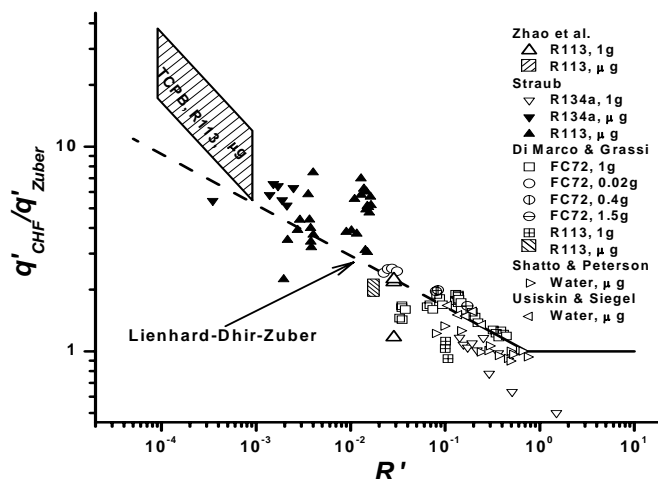


图9 不同重力条件下池内沸腾中的临界热流

我们由此提出了“极限核化尺寸”的概念^[19]——极限核化尺寸 d_N 是指加热表面核化点过热液体汽化时体积瞬间膨胀后所形成汽泡的最小尺寸。显然，极限核化尺寸将与系统压力、壁面过热度、表面张力、加热表面润湿性、液体过冷度等系统热物理状态参数及加热表面活化空穴尺寸、形状等有关，而与加热柱体直径、重力加速度等无关。因此，对于给定的系统状态，极限核化尺寸为定值，将不随重力变化而改变。由此可以组成一个新的无量纲参数 R ：极限核化尺寸与加热柱体直径的比值 $R = d_N/d$ ，该参数将与CHF机制的转变有着直接的关系。

常重力环境中，由于重力保持不变，Bond 数 R' 的变化是通过改变热丝的直径来实现的。 R' 较大时，对应热丝直径大，无量纲参数 R 比较小，汽泡难于包裹热丝，而倾向于从侧面脱离加热面，此时发生 CHF 的条件将满足流体动力学不稳定性机制； R' 较小时，对应热丝直径小，无量纲参数 R 比较大，汽泡易于包裹热丝，从而难于从加热面脱离，只能沿加热面横向扩展，此时发生 CHF 的条

件，极有可能遵循干斑扩展机制。而在变重力条件下， R' 的变化可以在保持热丝尺寸不变的前提下，通过改变重力水平来实现。由于重力不会影响极限核化尺寸，因此无量纲参数 R 不会受到重力改变的影响，只要常重力时流体动力学不稳定性机制控制着热丝表面 CHF 现象的发生，则在微重力条件下同样热丝表面 CHF 的发生将依然遵循流体动力学不稳定性机制。

不过，如何确定极限核化尺寸以及区分不同 CHF 机制的临界无量纲参数 R 值，将是今后研究工作的一个重要方面。

2.3 气泡脱落模型

在沸腾现象中，蒸气泡的生长及其动力学特征，与壁面过热度、表面特性及表面张力等流体热物理性之间有着复杂的联系，并反过来影响着表面附近的流体运动，进而强烈影响着沸腾换热系数。显然，常规条件下，蒸气密度远小于液体密度，重力（实际上是浮力）作用对蒸气泡的动力学特征必然存在极大影响，从而导致地面常重力和空间微重力环境中的沸腾现象具有不同的特征。

在第 22 颗返回式卫星搭载的池内沸腾实验中，还发现在长期微重力环境中，孤立气泡区内气泡脱落行为有着与常重力时迥然不同的特征^[21]：较小的汽泡（直径约为 0.3~1.0mm）不断在铂丝表面生成、脱落并缓慢远离加热表面；中等尺寸汽泡（直径约为 3.5~6.5mm）粘附在铂丝上做横向振动，并不断合并所碰到的小汽泡；铂丝表面还粘附有一个大汽泡（直径约 8.5mm），但它并未包裹细丝，随着热流增大，该汽泡不断长大（其间也吸收底部其他小汽泡），最终从丝上脱落。实验过程中也观察到了气泡向加热表面的运动。现有模型均无法完全描述相关发现。我们认为其根源在于没有考虑 Marangoni 效应对气泡脱落过程影响。同时考虑汽泡表面上浮力、表面张力、粘性阻力、惯性力、压差力和等效 Marangoni 力的影响（图 10），可将气泡生长过程中所受到的力表示为

$$f(y) = C_4 y^4 + C_3 y^3 + C_1 y + C_0 \quad (5)$$

$$y = \tau^{1/2} \quad (6)$$

$$C_4 = \frac{4}{3} \pi E^3 (\rho_L - \rho_G) g \quad (7)$$

$$C_3 = -2\pi K |\sigma_T| \nabla T_\infty E^2 \quad (8)$$

$$C_1 = 4\sigma R_0 \sin^2 \beta + \frac{\pi}{3} \rho_L E^4 \quad (9)$$

$$C_0 = \rho_L R_0 E^3 \sin^2 \beta \left(\frac{1}{3} - \frac{3}{8} C_d \right) \quad (10)$$

$$E = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} Ja \sqrt{\alpha_L} \quad (11)$$

$$C_d = 5360 \left(\frac{R_B}{v_L} \frac{dR_B}{d\tau} \right)^{-0.79} \quad (12)$$

式中， τ 、 β 、 σ_T 、 R_B 和 R_0 分别表示气泡生长时间、接触角、表面张力温度系数、气泡半径和加热丝半径， $Ja = \rho_L c_{pL} \Delta T / \rho_L \lambda$ 为雅各布（Jakob）数，经验参数 K 的引入是为了修正加热表面附近温度场分布及气泡运动的非线性等导致的与气泡热毛细迁移现象的经典线性理论间的差异。该模型中假设气泡生长受传热控制，并且 $R_B = E\tau^{1/2}$ 。 $f(y) < 0$ 表示气泡合力指向加热表面，气泡将停留在热丝上；反之， $f(y) > 0$ 时，气泡将被驱离加热表面，从而脱落；而对应于 $f(y) = 0$ 时的临界气泡尺寸即为气

泡脱落直径。

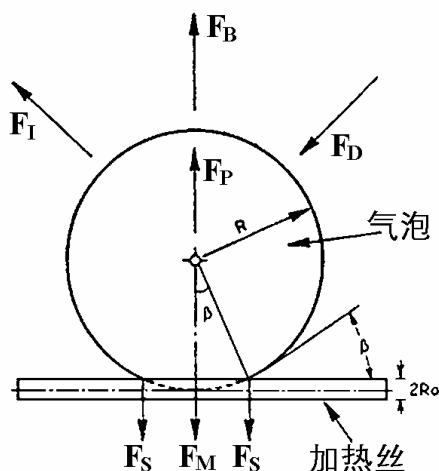


图 10 细丝上生长气泡的受力分析

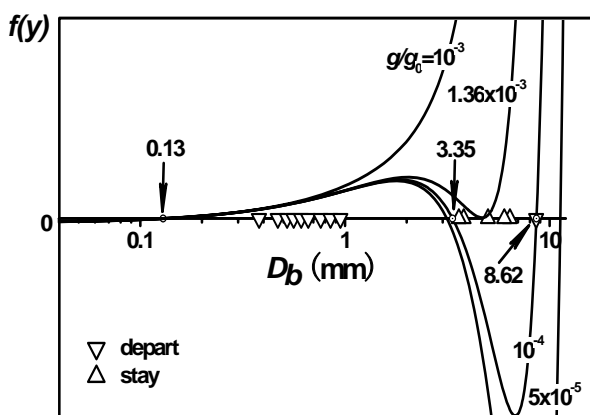


图 11 铂丝表面微重力核态池内沸腾中的气泡脱落现象

针对第 22 颗返回式卫星搭载的池内沸腾实验条件（压力 0.1 MPa，平均过冷度 26 K，壁面过热 30 K，接触角 5° ），取 $K=0.035$ ，计算结果与空间飞行实验示于图 11。可以看到，在常重力条件下，气泡所受合力只有 1 个零值点，并且其位置随着重力加速度的降低并没有明显变化；但是，当重力加速度降低到某个临界值（ $1.36 \times 10^{-3} g_0$ ）时，气泡所受合力的第二个零值点出现；进一步降低重力加速度，气泡所受合力将存在 3 个零值点，将气泡划分为四个区域：附着生长-脱落-再附着-再脱落。取返回式卫星上残余重力加速度为 $10^{-4} g_0$ ，可以得到与实验观测结果相一致的预测。显然，热毛细效应在微重力池内沸腾现象中对气泡动力学行为有着重要作用。

3 不同重力条件下燃料电池气液两相流与电性能

利用国家微重力实验室落塔提供的短时微重力条件，我们和北京工业大学合作开展了不同重力条件下燃料电池气液两相流与电性能的实验研究^[22-24]。实验共分为三个阶段，前两个阶段均采用直接甲醇燃料电池（DMFC），而最后一个阶段则采用氢质子交换膜燃料电池（H₂PEMFC）。这两类燃料电池本质上是相近的，但其内部两相流动形态却有着相当大的差异——前者在阳极流道内形成甲醇水溶液-CO₂两相流动，并且是由泡状流逐渐演化为弹状流，甚至环状流；而后者则是在阴极流道内形成氧气-水两相流动，两相流动的形成是由凝水形成的液滴逐渐扩大，最后堵塞流道并被气流吹扫、携带。不过，不论在哪种燃料电池中，两相介质间的巨大密度差异，都将导致电池内部的两相流动行为特征随重力有显著变化，进而影响电池的电性能。因此，对不同重力条件下燃料电池内部伴有电化学反应的气液两相流动特征及其电性能进行实验研究，对相应的空间应用具有重要意义。

DMFC阳极流道采用平行流道结构，电池安装方位保证流道垂直向上，工作温度 80 °C。图 12 为DMFC落塔实验及落塔实验前后地面对比实验结果的比较。图中还标注了落塔实验日期，从中清楚显示了电池性能的变化。不过，图 12 明确说明，DMFC电性能在在浓差极化区存在显著的重力效应，电性能的恶化随浓差极化程度的加强而增大。

图 13 则显示了实验中观测到的典型的阳极流道内部的气液两相流动特征^[25]。图中标注时间零点对应落舱释放时刻，即负值对应释放前的常重力条件，而正值则对应微重力条件。可以看到，在常重力条件下，CO₂气泡在MEA表面生成后，由于重力和流体粘性拖曳的共同作用，在很小尺寸即脱落，并以相当快的速度向出口运动，在阳极流道内形成泡状流。但是，进入微重力环境后，MEA表面生成的气泡，只受到流体粘性拖曳作用，很难从表面脱落，而是附着在MEA表面不断长大，相邻

气团足够大时会接触、合并，并在进入微重力约 3s 前后，形成明显的 Taylor 气团，使阳极流道内呈现弹状流特征。需要说明的是，和常规弹状流不同，这里气团的一个侧面是和流道的一个侧面（即 MEA 表面）相连接的。因此，Taylor 气团的形成会阻碍甲醇向 MEA 运动，导致传质恶化，受传质影响的浓差极化现象提前出现，并逐渐强化，最终引起电池电性能的下降。实验还发现，随着电流密度的增大，产气量增加，不同重力条件下的两相流动特征差异更为明显，流道内甚至出现气团阻塞流道的现象，并导致不同流道间流动特征的巨大差异。由此可以推断，在长期微重力环境，必须对流道及其内部流动速度进行细致的优化设计，保证在失去浮力作用后气泡能及时脱落，从而避免浓差极化现象的出现。

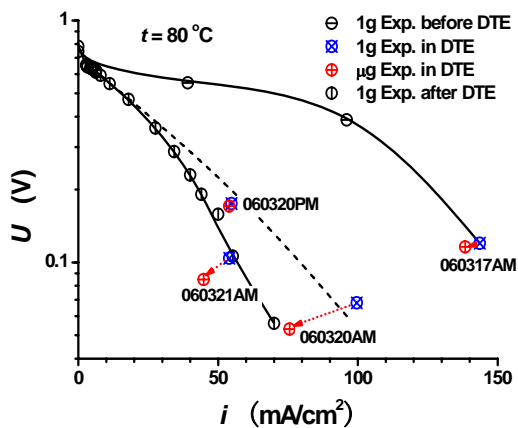


图 12 重力因素对 DMFC 电性能的影响
 甲醇溶液进口流量 5.6 ml/min, 浓度 0.5 mol/l
 氧气进口流量 400 ml/min, 出口背压 0 kPa

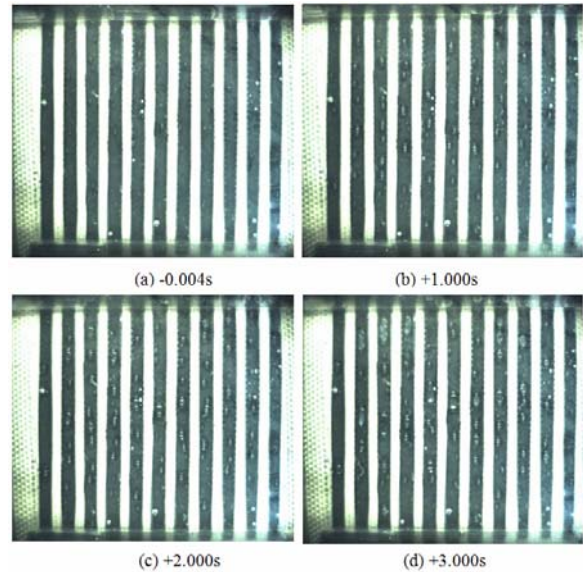


图 13 DMFC 阳极流道内的气液两相流动特征
 甲醇溶液进口流量为 10 ml/min, 电流密度约 160 mA/cm²
 其他与图 12 相同

H₂PEMFC 采用蛇形流道，流道整体处于垂直面内，并采用水平和垂直两种排布方式。实验发现电池内部凝水与随后发展的两相流形态及相应的电性能均与进口氧气流量、电池工作温度极流道排布方式等有着复杂的关联，需要进一步深入与系统的实验测定。

4 结束语

目前，国际上对微重力气液两相流动与传热的研究，逐渐转移到对相关细观过程与机制的探索，我国近期的研究工作也同样强调了这种趋势。例如，在沸腾传热方面，我们提出以具有若干人工空穴的加热面上气泡的形成、发展、脱落及其运动为主要研究对象，通过改变加热功率或加热面温度、压力、液体温度等实验条件，实现微重力池沸腾起始过程及随后的稳定沸腾过程，并测量微重力环境中传热效率等宏观平均的参数以及加热面局部温度分布、气泡周围液体内部微流动结构等局部参数的变化，综合利用地面实验、地基短时微重力实验和返回式卫星或飞船实验等多种实验手段，结合数值模拟研究，对微重力环境中沸腾传热特性、气泡形成—成长—脱落过程特性、液—气—固相互作用、液体内部热毛细流动及其对传热的影响等进行深入研究，以获得微重力沸腾过程中气泡动力学特征及传热特性数据，加深对相关流动与传热规律的认识^[26, 27]。

另一方面，针对空间应用（尤其是载人航天应用）中的两相系统技术开发，也已成为国内外学术界与工程界共同关注的重点，这些方面突出的例子包括 ALPHA 磁谱仪轨迹探测器机械泵驱两相热

控系统^[28]、电解制氧装置等。

这些项目的实施,将有助于我们对微重力两相流动与传热规律的认识,极大地促进该学科的发展及其在相关技术领域的应用。

参 考 文 献

- 1 Zhao J, Xie J, Lin H, et al. Microgravity experiments of two-phase flow patterns aboard Mir space station. *Acta Mechanica Sinica*, 2001, 17(2): 151-159.
- 2 Zhao JF, Xie JC, Lin H, et al. Experimental studies on two-phase flow patterns aboard the Mir space station. *Int. J. Multiphase Flow*, 2001, 27(11): 1931-1944.
- 3 Aul RW, Olbricht WL. Stability of a thin annular film in pressure-driven, low-Reynolds-number flow through a capillary. *J. Fluid Mech.*, 1990, 215: 585-599.
- 4 赵建福, 解京昌, 林海等. 部分重力条件下气液两相流型研究. *工程热物理学报*, 2004, 25(1): 85-87.
- 5 Zhao JF, Xie JC, Lin H, et al. Experimental study on two-phase gas-liquid flow patterns at normal and reduced gravity conditions. *Science in China E*, 44(5): 553 - 560.
- 6 赵建福, 林海, 解京昌等. 低重力条件下气/液两相流摩擦压降实验研究. *应用基础与工程科学学报*, 2001, 9(4): 373-380.
- 7 Zhao JF, Xie JC, Lin H, et al. Pressure drop of bubbly two-phase flow through a square channel at reduced gravity. *Adv. Space Res.*, 2002, 29(4): 681-686.
- 8 Dukler AE, Fabre JA, McQuillen JB, et al. Gas-liquid flow at microgravity conditions: flow patterns and their transitions. *Int J Multiphase Flow*, 1988, 14(4): 389-400.
- 9 Colin C, Fabre J, Dukler AE. Gas-liquid flow at microgravity conditions-I. Dispersed bubble and slug flow. *Int J Multiphase Flow*, 1991, 17(4): 533-544.
- 10 Bousman WS. Studies of two-phase gas-liquid flow in microgravity. Ph.D. thesis, Univ of Houston, 1995.
- 11 赵建福. 论微重力弹-环状流转换的空隙率匹配模型. *应用基础与工程科学学报*, 2000, 8(4): 394 - 397.
- 12 Zhao J F, Hu W R. Slug to annular flow transition of microgravity two-phase flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 2000, 26(8): 1295-1304.
- 13 赵建福. 微重力条件下气/液两相流动研究[博士后研究报告]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2000年7月.
- 14 Straub J. Boiling heat transfer and bubble dynamics in microgravity. *Adv. Heat Transfer*, 2001, 35: 57-172.
- 15 闫娜. 微重力池沸腾传热实验研究[硕士学位论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2007年5月.
- 16 Lee, H.S., Merte, H., Jr., Chiaramonte, F.. Pool boiling curve in microgravity. *J. Thermophy. Heat Transfer*, 1997, 11(2), 216-222.
- 17 刘刚. 不同重力条件下细铂丝表面过冷池沸腾传热研究[硕士学位论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2006年5月.
- 18 J.F. Zhao, S.X. Wan, G. Liu, W.R. Hu. Experimental study on subcooled pool boiling in microgravity utilizing Drop Tower Beijing/NMLC. In: *Proceeding of the 5th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion* (Edited by Liejin Guo, Xuejun Chen, Zonghu Lin), Vol. 4, pp. 1730 - 1735, Xi'an Jiaotong University Press, Xi'an, China, 2006.
- 19 Zhao J F, Wan S X, Liu G, et al. Subcooling pool boiling on thin wire in microgravity. *Acta Astronautica*, 2009, 64(2-3): 188-194.
- 20 Lienhard J H, Dhir V K. Hydrodynamic prediction of peak pool-boiling heat fluxes from finite bodies. *J. Heat Transfer Trans. ASME*, 1973, 95: 152-158.
- 21 Zhao J F, Liu G, Wan S X, et al. Bubble dynamics in nucleate pool boiling on thin wires in microgravity. *Microgravity*

- Sci. Technol., 2008, 20(2): 81-89.
- 22 律翠萍. 微重力下直接甲醇燃料电池阳极流道内两相流的实验研究[硕士学位论文]. 北京工业大学, 2006年5月.
- 23 吴峰. 小型直接甲醇燃料电池在微重力环境中的实验研究[硕士学位论文]. 北京工业大学, 2007年5月.
- 24 刘璿. 微重力环境下质子交换膜燃料电池内两相流体动力学特性研究[博士学位论文]. 北京工业大学, 2008年10月.
- 25 赵建福, 郭航, 叶芳等. DMFC 内部气液两相流动与电性能的短时落塔实验研究. 空间科学学报, 2008, 28(1): 17-21.
- 26 Wan SX, Zhao JF. Pool Boiling in Microgravity: Recent Results and Perspectives for the Project DEPA-SJ10. Microgravity Sci. Technol., 2008, 20(3-4): 219-224.
- 27 Zhao JF. Two-phase gas-liquid flow and pool boiling in microgravity (Chapter 4). In: Advances in Microgravity Sciences (Ed. Hu WR), Kerala: Transworld Research Network, 2008.
- 28 黄臻成, 莫冬传, 吕树申等. 一种应用在航天探测器上的二氧化碳两相回路热控系统冷凝器的设计优化. 空间科学学报, 2008, 28(1): 44-48.

TWO-PHASE FLOW AND HEAT TRANSFER IN MICROGRAVITY

ZHAO Jianfu

(Key Laboratory of Microgravity (National Microgravity Laboratory), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences.
Beijing 100190)

Abstract Two-phase gas-liquid flow and heat transfer phenomena in microgravity have not only a wide range of potential space applications, but also an obvious advantage to reveal the mechanisms underlying these phenomena due to restraining or weakening the buoyancy effects caused by the gravity and large difference between two phases. Thus, the study on two-phase gas-liquid flow and heat transfer in microgravity is one of active frontiers in international communities of space engineering and microgravity fluid mechanics. The present paper summarizes the major results of two-phase gas-liquid flow and heat transfer phenomena in microgravity in the National Microgravity Laboratory/CAS, including the experiments of two-phase gas-liquid flow aboard the MIR space station and IL-76 reduced gravity airplane, the experiments of pool boiling aboard the Chinese recoverable satellites RS-22 and SJ-8, the experiments of pool boiling and fuel cell utilizing the drop tower Beijing/NML, and the ground experimental and theoretical studies in this field. Some important directions are also highlighted based on the state-of-the-art development in this field and the requirements from space engineering, particularly manned space engineering, in China.

Key words Microgravity, Two-phase gas-liquid flow, Pool boiling, Fuel cell