



微重力气液两相流动与池沸腾传热^{*,**}

赵建福[†]

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

摘 要 综述了近年来中国科学院微重力重点实验室 (国家微重力实验室) 完成的一系列微重力气液两相流动与池沸腾传热方面的地基实验、飞行实验和理论研究等方面获得的主要成果. 在微重力气液两相流动方面, 提出了半理论 Weber 数模型用于预测微重力条件下气液两相弹-环状流转换, 并采用 Monte Carlo 方法, 针对气泡初始尺寸对弹-环状流转换的影响进行数值研究. 通过俄罗斯“和平号”空间站与 IL-76 失重飞机实验, 获得了微重力下的气液两相流型图, 与此同时在地面利用小尺度毛细管模型模拟了微重力气液两相流动特征. 实验测量了微重力气液两相流压降, 并基于微重力流动特性建立了一个泡状流压降关联模型. 在微重力池沸腾传热方面, 利用我国返回式卫星完成了两次空间实验, 其中, 第 22 颗返回式卫星搭载铂丝表面 R113 池沸腾实验采用控制温度的稳态加热方式, 而实践 8 号育种卫星搭载平面 FC-72 池沸腾实验则采用控制加热电压的准稳态加热方式. 同时, 还进行了地面常重力和落塔短时微重力条件下的对比实验研究. 观察到丝状加热表面微重力时轻微的传热强化现象, 而平板加热表面微重力核态池沸腾低热流时传热强化、高热流时传热恶化. 微重力实验中观察到气泡脱落前存在横向运动现象, 据此分析了气泡行为与传热之间关系, 并提出了一个预测丝状加热表面气泡脱落直径的半理论模型. 旨在对相关领域的进一步发展和空间两相流系统的应用提供数据及理论支持.

关键词 微重力, 两相流, 流型, 池沸腾, 传热

1 引 言

气液两相系统在地面和空间都有着广泛的应用. 在地面上, 它们存在于诸多工艺设备中, 如石油生产设备、冷凝器与再沸器、动力系统和核电厂紧急运控时的核芯冷却. 空间的潜在应用包括主动热控系统、动力环路、低温流体的储存和输送等. 气液两相系统的可靠设计依赖于对两相流动机理的充分了解, 诸如不同气、液流率条件下的相分布 (流型)、压降及传热系数等的变化特征.

目前关于气液两相系统知识的获得, 在很大程度上得益于众多精心设计的实验, 但相关知识远非完善. 常重力条件下, 重力作为主导因素, 对

气液两相流动有着复杂的影响. 重力能够驱动运动、形成边界和挤压流体, 因此强烈地影响着两相流系统的许多现象, 如明显地改变流型, 进而影响与流动有关的压降和传热等. 此外, 重力的存在还会掩盖那些一直存在但影响较小的因素, 阻碍对两相流动与传热机制的揭示. 因此, 微重力气液两相流研究由于重力作用的抑制, 能够简化流动结构, 凸显本质特征, 将有助于揭示机理, 发展更为机制化的两相流动与传热模型, 为地面与空间应用服务.

微重力气液两相流动与传热研究已有 50 多年的历史. 20 世纪 70 年代经过一个短暂的停顿之后, 特别是近 20 年来, 随着各种微重力设施

收稿日期: 2010-06-17, 修回日期: 2010-06-22

* Int. J. Multiphase Flow 惠允版权翻译此文 (published with kind permission from Int. J. Multiphase Flow, volume 36 © 2010 by Int. J. Multiphase Flow), 翻译成中文时, 个别地方略有增补.

** 国家自然科学基金 (10972255, 19789201, 10202025, 10432060)、科技部攀登计划 (95-Yu-34)、中国科学院知识创新工程 (KJCX2-SW-L05, KACX2-SW-02-03) 及国家航天局等的资助.

[†] E-mail: jfzhao@imech.ac.cn

的发展和实验机会的增加,取得了明显进步.关于相关进展的情况,目前已有许多详尽的综述或专著,其中, Hewitt^[1], McQuillen 等^[2], Straub^[3], Di Marco^[4], Kim^[5], Ohta^[6,7] 和 Gabriel^[8] 分别总结了国际上相关的实验与理论研究进展.

自 20 世纪 90 年代中期开始,国家微重力实验室先后完成了一系列微重力条件下的气液两相流动与池沸腾传热研究工作,包括管道内气液两相流动和池沸腾现象中的气泡行为与传热特征等.本文将着重展示通过这些研究得到的主要结果,并对我国近期将要开展的微重力气液两相流动和沸腾传热研究作简要介绍.

2 微重力条件下管道中的气液两相流动

2.1 微重力气液两相流型转换模型

由于浮力作用的消失或极大削弱,微重力气液两相流动结构必然比常重力时有极大简化,如微重力时主要的两相流型是环状流、弹状流和泡状流,尽管一些研究者还区分了一些本质上处于流型过渡区域的过渡流型.因此,在微重力条件下,只需要对弹-环状流型转换和泡-弹状流型转换两种主要的转换进行模化研究.

为了预测微重力条件下的弹-环状流型转换, Dukler 等^[9] 提出了空隙率匹配模型,并由 Colin 等^[10] 和 Bousman^[11] 做了进一步修正,气、液两相均处于湍流状态是其适用条件.不过,如图 1 所示^[12],对于不同的滑移流模型中的相分布参数 C_0 和材料参数 $\zeta = (\rho_G/\rho_L)(\nu_G/\nu_L)^{1/5}$ (这里 ρ 和 ν 表示密度和运动黏性系数,下标 G 和 L 表示气相和液相),这个模型会给出空隙率 α 的 0, 1 或 2 个解;解的特性还会随界面摩擦关系式的不同而变化,如 Wallis^[13] 和 Chen 等^[14] 建议的界面摩擦关系式就给出了显著不同的解.此外, Dukler^[15] 关于弹-环状流转换发生在较小空隙率处的建议也是不可行的,例如,在与 Dukler^[9] 实验条件相当的 $\zeta = 0.001$ 时,该解会落在泡状流区域.

基于气相惯性产生的冲击力与表面张力间的平衡, Zhao 和 Hu^[16] 提出了半理论 Weber 数模型,随后由 Zhao 等^[17] 做进一步修正,用来预测微重力弹-环状流型转换.如图 2 所示,与其他模型^[11,18~21] 相比,该模型具有更高的精度,对相当大范围的工作流体、管道直径和实验方法(包括飞行实验和地面毛细管气液两相实验和等密度或

中性悬浮不混溶液液两相实验等模拟微重力实验)都得到了验证.

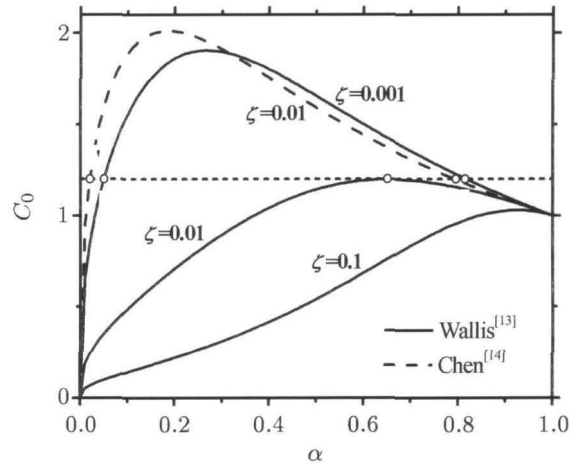


图 1 微重力条件下弹-环状流转换的空隙率匹配模型解的特性^[12]

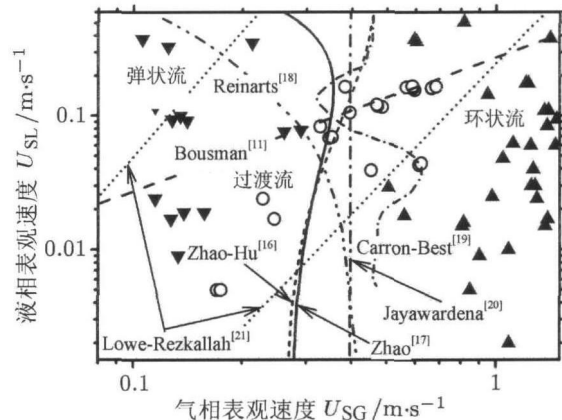


图 2 半理论 Weber 数模型及其它常用模型与 Reinarts^[22] 实验数据的比较^[17]

为了预测微重力泡-弹流型转换,文献中常采用滑移流率模型^[9,23], Jayawardena 等^[20] 提出的经验模型也可改写为同样的形式.不过,微重力常规尺寸管道与常重力微尺度管道的泡状流存在着显著差异,其原因可能在于两种情况下气泡初始尺寸的不同.赵建福^[24] 基于气泡聚合机制,采用 Monte Carlo 方法模拟了气泡初始尺寸 d_b 对泡-弹状流型转换的影响,表明无量纲碰撞速率是气泡无量纲直径 d_b/D 的普适函数(这里 D 是管道直径),在 0.03~0.4 范围内,气泡初始尺寸对泡-弹状流型转换有明显影响.假设临界空隙率 α_{cr} 仅取决于无量纲碰撞速率,则可得到 $\alpha_{cr} = 0.60 - 2.32d_b/D$.这一结果与 Song 等^[25] 和 Cheng 等^[26] 的实验数据符合甚好(图 3).

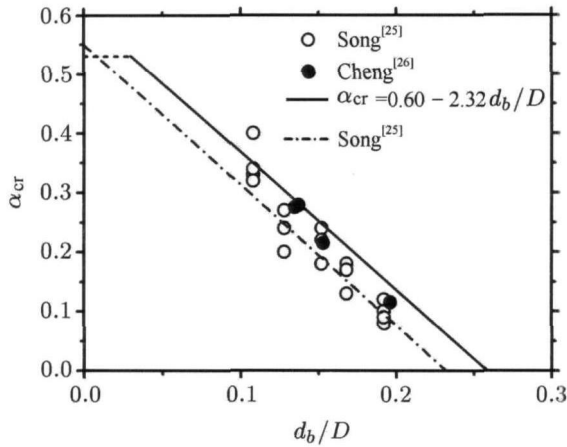


图 3 弹 - 环状流转换中气泡初始尺寸的影响^[24]

2.2 微重力条件下的气液两相流型图

与俄罗斯 Keldysh 研究中心合作, 国家微重力实验室于 1999 年 8 月完成的“和平号”空间站微重力圆管两相流型实验^[17,27], 是迄今唯一的在长期、稳定的微重力环境中, 有人参与的两相流实验研究. 实验中管道内径 10 mm, 长 365 mm, 气相为空气, 而液相为 carbogal(该液体无色、无味、无毒, 与管道接触角 $\leq 7^\circ$). 与其他研究相似, 实验中也观察到了泡状流、弹状流和环状流; 在高液相表观流速时观察到了弥散泡状流; 在中等气相表观流速时观测到具有较宽的弹 - 环状流区域; 当液相表观流速很低时, 首次观察到了一个新的具有光滑界面的环状流区域, 其成因目前仍无法得以完善的解释. 通过对“和平号”空间站的可靠实验数据与文献中常用模型(如 Lee^[28]) 预测结果的细致比较, 可以推测在低气相表观流速时, 由于管道长径比较小, 观察到的流型可能尚处于发展之中; 而当气相表观流速较大时, 入口效应对流型转换的影响很小, 可以忽略不计. 图 4 是根据“和平号”空间站微重力实验结果绘制的流型图. 此外, Zhao 等^[29] 报道了在“和平号”空间站上采用实验设备恒速旋转所得到的部分重力条件下的气液两相流型实验结果.

1999 年 7 月, Zhao 等^[30] 完成了俄罗斯 IL-76 失重飞机搭载水 - 空气两相流型实验, 方形流道截面尺寸为 12 mm × 12 mm. 实验中观察到了泡状流、弹状流、弹 - 环状流与环状流. 图 5 给出了所得到的微重力两相流型图, 同时还给出了地面常重力实验所得到的结果以作比较. 若不将弹 - 环状流视为主要流型, 而仅作为弹状流与环状流间

的过渡流型, 考虑了形状因子修正的半理论 Weber 数模型能很好地预测常重力和微重力条件下的弹 - 环状流转换. Jayawardena 等^[20] 的预测结果与微重力泡状流和弹状流间的边界相一致. 此外, 常重力条件下具有大 Froude 数的泡 - 弹状流转换所对应的临界空隙率, 和微重力条件下的临界空隙率及气相在管道横截面占据的相对份额有着直接关系.

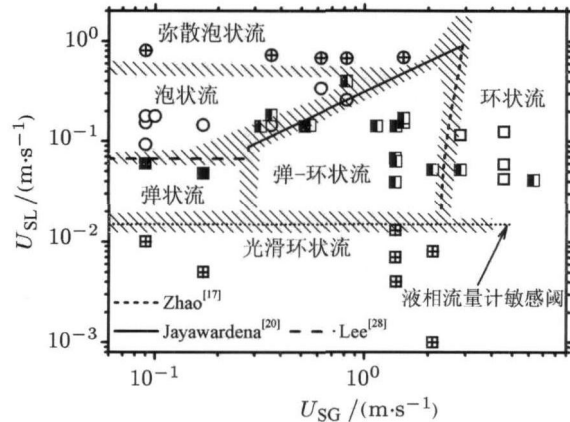


图 4 “和平号”空间站实验所得到的微重力两相流型图^[27]

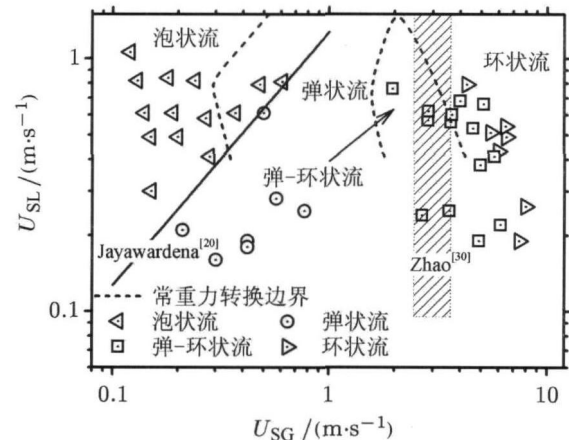


图 5 方管微重力水 - 空气两相流型图^[30]

Zhao 和 Gabriel^[31] 分析了加拿大萨斯喀彻温大学微重力研究组得到的微重力条件下 90° 弯道气液两相流型特征. 研究涉及 3 种流型, 即弹状流、弹 - 环状流和环状流(图 6), 相邻流型间的转换与直管道中的情形相似, 并可采用 Weber 数模型^[16,21] 很好地给以预测. 分析表明弹状流中的弹状气团与环状流中的气核往往被强烈扭转, 这可以从存在于气液界面、与流动方向成锐角并从内向外延伸的条纹得以断定. 这种现象可能源于弯

管内的二次流现象, 后者由于气相的存在而改变了流谱结构 (即从对称的双胞结构改变为环绕管

壁的非对称螺旋结构). 这些结果对构建更成熟的弯道两相流模型有很大帮助.

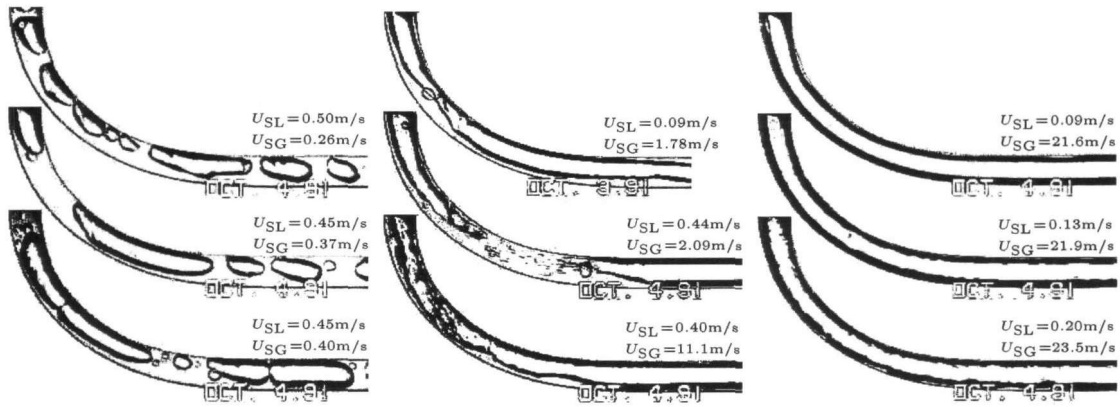


图 6 90° 弯管中的微重力流型特征 [31]

Zhao 等 [32] 采用小尺度模拟方法研究了模拟微重力条件下的两相流特征. 流道采用 1mm×1mm 的毛细方管, 进口混合器内液相直通、气相经由与管道轴线垂直方向上的 4 个直径 0.7mm 的孔流入. 与文献中其他数据及具有相同 Bond 数的常规管道微重力实验数据比较发现, 向环状流的转换条件相互符合; 而与 Jayawardena 等 [20] 的经验关联式预测的结果相比, 小尺度泡-弹状流转换对应的临界空隙率要小得多. 常规管道微重力条件下和小尺度常重力条件下的泡状流具有明显的不同. 如前所述, 这可能是由于两种情况下气泡初始尺寸不同造成的. 因此, 小尺度模拟可以用来研究微重力条件下常规管道内高流率两相流特征, 但不能用于对微重力两相泡状流特征的模拟研究.

2.3 微重力条件下两相流的压降

在 1999 年 7 月完成的俄罗斯 IL-76 失重飞机搭载实验中, 还同时测量了两相流压降 [33]. 实验数据与文献中常用的经验关联式或模型 (如均相模型、Lockhart-Martinelli-Chisholm 模型和 Friedel 模型) 的预测有着明显偏差, 其中 Friedel 模型与实验数据符合相对较好. 不过, 构建一个更精确的模型需要基于对流动特征的物理分析和大量实验的数据, 后者又依赖于常重力与微重力条件下精心设计的实验.

基于对微重力气液两相泡状流流动结构的分析, Zhao 等 [34] 建议两相摩擦因子和 Reynolds 数

均应采用混合流速 U_m 和液相的物性来定义, 即 $f_{TP} = [(dp/dz)_F D]/(2\rho_L U_m^2)$ 和 $Re_{TP} = \rho_L U_m D/\mu_L$, 并得到一个半理论关系式 $f_{TP} = A Re_{TP}^{-1}$, 其中, A 取决于 Reynolds 数并由经验确定. 将方管数据与 Zhao 和 Rezkallah [35], Bousman [11] 圆管数据比较 (图 7), 发现流道截面形状的影响可以忽略; 参数 A 的取值在 $Re_{TP} < 3000$ 时为 35, 而当 $Re_{TP} > 4000$ 时为 120, 反映了在 $3000 < Re_{TP} < 4000$ 时流动结构发生了某种类似单相流中层流向湍流的转换那样的改变. 不过, 与 Colin [36] 更大参数范围数据的进一步比较发现, 两相摩擦因子和 Reynolds 数依赖关系中 Reynolds 数的指数在 0 与 -1 之间可能更符合大 Reynolds 数时的情况.

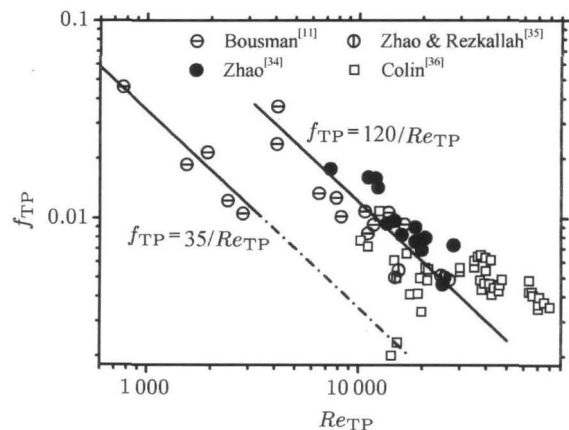


图 7 微重力气液两相泡状流摩擦压降 [34]

3 微重力池沸腾传热

3.1 微重力丝状表面池沸腾传热

Wan 等^[37]研制了一套控制温度的池沸腾设备 (TCPB) 用于我国第 22 颗返回式卫星 (RS-22) 搭载实验. 一根直径 $60\mu\text{m}$ 、长度 30mm 的铂丝作为加热元件的同时, 也作为电阻温度计用来测量自身平均温度. 铂丝的电阻值及相应的平均温度, 采用与常温热线风速仪相似的桥式反馈电路调节并在每个设定值持续时间内自动保持恒定. 每个设定温度持续约 30s 以保证实现稳态池沸腾^[3]. 实验液池内充满除气后的常压 R113 液体, 液池一端装有波纹管稳压器用于保持实验中液池内压力不变.

Zhao 等^[38]利用北京落塔提供的 3.6s 微重力环境, 完成了短时微重力实验. 空间实验于 2005 年 9 月搭载我国第 22 颗返回式卫星完成^[39], 卫星残余重力约为 $(10^{-3} \sim 10^{-5})g$ (g 为地面重力加速度). 空间实验前后还用同样设备进行了地面对比实验.

与常重力实验结果相比, 微重力条件下核态沸腾传热有轻微的强化 (图 8), 而双模态过渡沸腾在微重力条件下热流密度约减少 20% 到 40%.

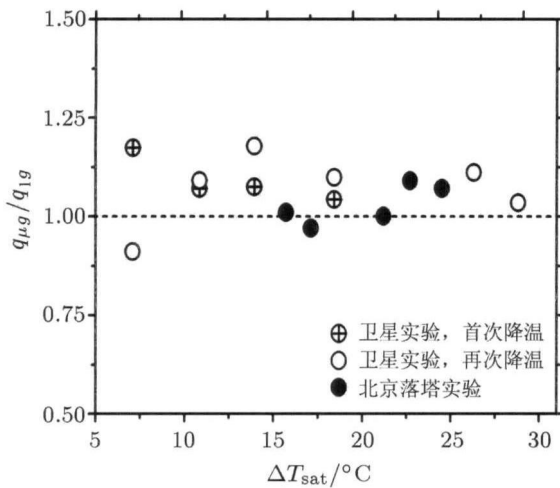


图 8 微重力核态池沸腾传热特性^[40]

图 9 给出了临界热流 (CHF) 的实验数据与 Lienhard 和 Dhir 模型^[41] 的比较, 其中还显示了文献中报道的其他实验数据. 从图中可以看到, 尽管加热元件无量纲半径 $R' = R\sqrt{(\rho_L - \rho_G)g/\sigma}$ (σ 为表面张力) 远远超出了模型最初的适用范围, 基于流体动力学不稳定性机制的 Lienhard 和 Dhir 模型仍能较好地预测不同重力时的临界热流. Straub^[3] 同样报道了该现象. 若将图 9 中的临界热流变化

趋势与地面变加热元件直径实验数据相比, 自然可以推断出与 Di 等^[42] 相同的结论, 即无量纲半径 R' , 或等价地, Bond 数, 在小尺寸加热元件情形中, 可能并非一个适宜的标度参数, 不能将重力影响从其他相互竞争的因素中区分出来. Zhao 等^[40] 为了解释该现象, 引入了极限核化尺寸 d_{LN} 和无量纲参数 $\Gamma = d_{LN}/d_{\text{wire}}$. 假设极限核化尺寸不依赖于重力, 而仅决定于系统热物理状态参数, 如工作流体和加热器的材料性质、加热器表面条件等. 当 Γ 足够小时, 气泡的初始尺寸会比加热表面小很多, 临界热流的产生将遵循流体动力学不稳定性机制; 当 Γ 比较大时, 气泡的初始尺寸比细丝直径 d_{wire} 大很多, 导致气泡很容易包裹加热元件, 临界热流的产生将源于局部干斑扩展机制. 不过, 如何区分两种机制作用范围尚需进一步研究.

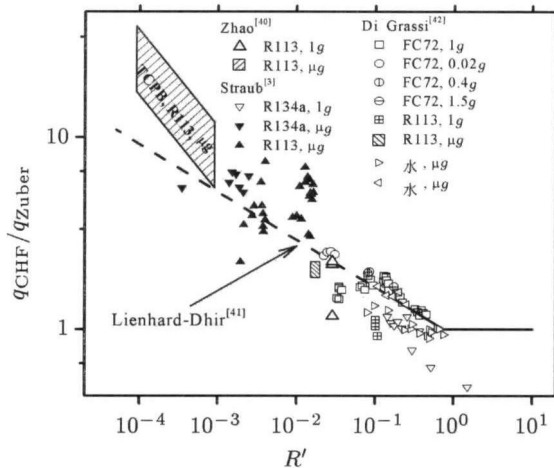


图 9 临界热流与重力的关系^[40]

落塔实验中, 重力的急剧变化, 导致气泡行为存在显著差异. 在常重力条件下, 细丝表面的核态池沸腾中是很难观察到气泡的横向振荡现象, 但在短时和长期的微重力条件下这种运动总能观察到. 这种运动会造成相近气泡间的聚合及聚合气泡随后从细丝上的脱落. 聚合气泡有时会包裹细丝, 在细丝相应位置出现亮斑. 然而, 这种现象并不能长久维持, 沸腾仍维持为核态. 在双模态过渡沸腾区, 微重力条件下 Taylor 不稳定性消失, 表面张力将使常重力时膜态沸腾部分的波状液气界面变形成为一个包裹细丝的球状大气泡, 并导致膜态沸腾部分缩小而核态沸腾部分扩张. 球状大气泡的中心会沿着细丝不断摆动, 尺寸则缓慢增长. 球状气泡中心处细丝有时会发亮, 但在短时微重力实验中并没有观察到真正的烧毁.

完成后加热表面空穴内会有残留的微气泡, 微气泡会导致空穴易于被活化, 因此沸腾会在较低的壁面过热条件下开始。

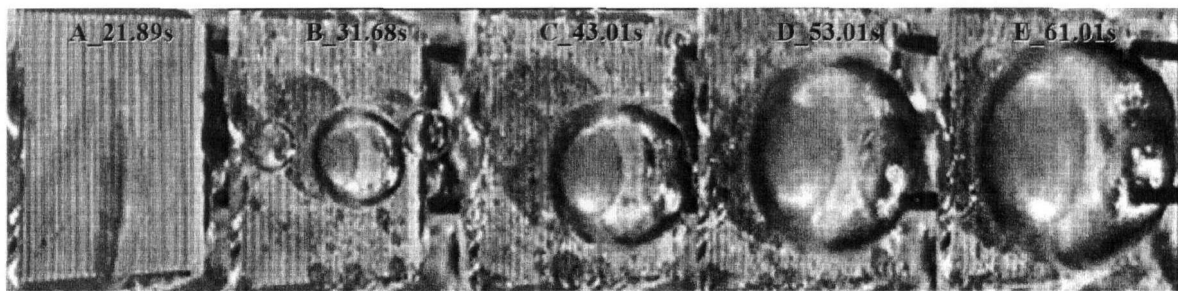
实验中观察到, 原生气泡不断生成, 并在表面上滑移、合并, 形成一个较大的聚合气泡. 尽管图像来自一个与加热表面法向成 45° 夹角的摄像头, 但仍能观察到一些原生气泡在聚合气泡底部产生. 聚合气泡也会吸收它附近的小气泡. 正如 Ohta 等 [48] 所推测的, 在聚合气泡下存在着一个宏观层, 其中有原生气泡产生。

高过冷度时, 聚合气泡表面比较光滑, 并围绕加热面中心附近晃动. 在相同的加热时间内, 过冷度越大, 聚合气泡尺寸越小, 表面也越光滑. 在表面张力的作用下, 聚合气泡呈球形, 其尺寸随着表面温度的增加而增大, 但很难覆盖整个加热表面. 因此, 在高热流情况下, 聚合气泡的底部可能产生局部干涸, 而在加热面其他区域, 特别在加热面四角处, 仍维持着核态沸腾. 遗憾的是, 该实验中无法直接观察到干斑的存在. 不过, 加热面温度十分平缓的增长和沸腾曲线不存在对应于临界热流的拐点等事实, 表明伴随着局部干斑的扩展, 沸腾模式

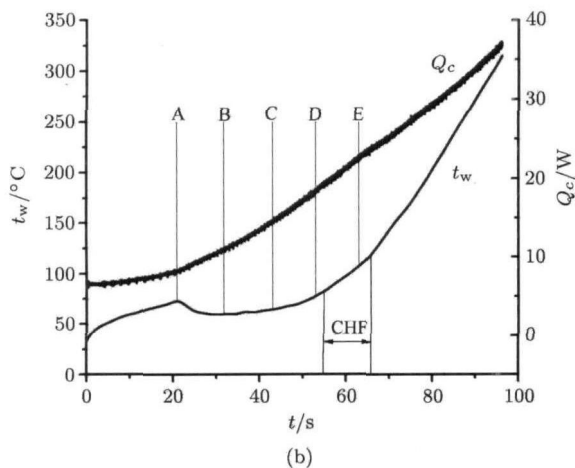
渐进地向膜态沸腾过渡 [49]. Oka 等 [50] 也有过类似的描述. 在此情况下很难确定临界热流的准确值. 不过, 加热面温度随时间变化曲线的特征, 还是可以提供一些有关临界热流的信息. 假设加热面温度迅速增加对应着过渡沸腾的开始, 而温度曲线达到固定斜率对应于转换的完成, 则临界热流及相应壁面过热度范围可以估算出来, 如图 11 所标出的那样. 由此估算出来的数据及相应空间实验条件列于表 1.

表 1 空间实验条件和估算的临界热流范围 [47]

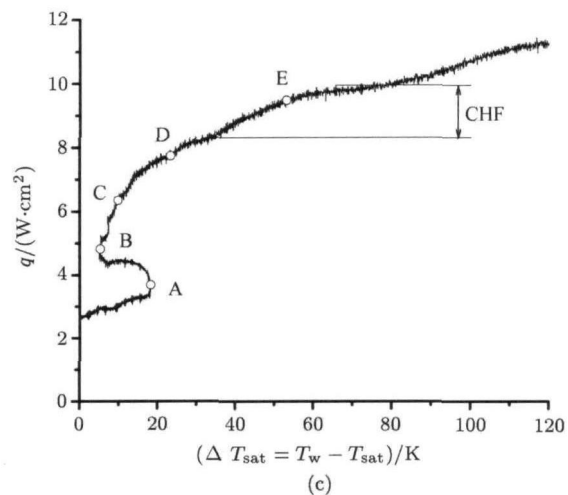
编号 #	压力 p/kPa	过冷度 $\Delta T_{\text{sub}}/\text{K}$	临界热流 $q_{\text{CHF}}/(\text{W}\cdot\text{cm}^{-2})$	过热度 $\Delta T_{\text{sat}}/\text{K}$
I-1	90.8	36.9	8.3 ~ 10.0	28 ~ 66
I-2	97.3	25.8	6.6 ~ 9.1	34 ~ 76
I-3	102.3	21.8	7.0 ~ 7.6	40 ~ 56
I-4	105.7	19.5	7.7 ~ 8.2	20 ~ 29
I-5	111.7	18.4	8.6 ~ 8.9	11 ~ 17
II-1	57.2	24.5	5.7 ~ 6.9	24 ~ 42
II-2	91.1	18.8	7.4 ~ 9.5	26 ~ 55
III-1	65.5	27.5	6.3 ~ 6.6	30 ~ 35



(a)



(b)

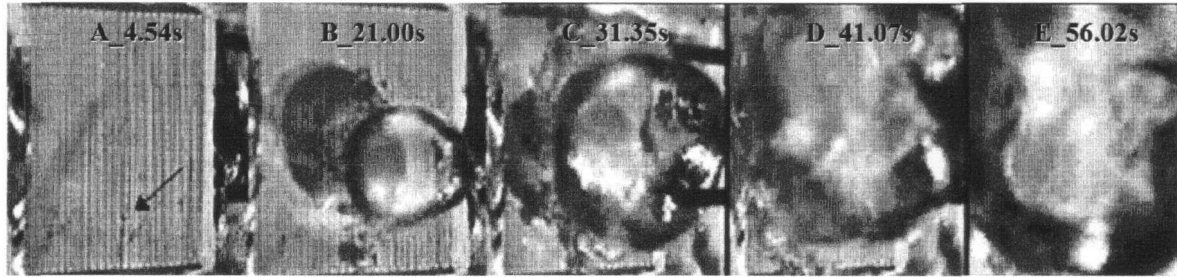


(c)

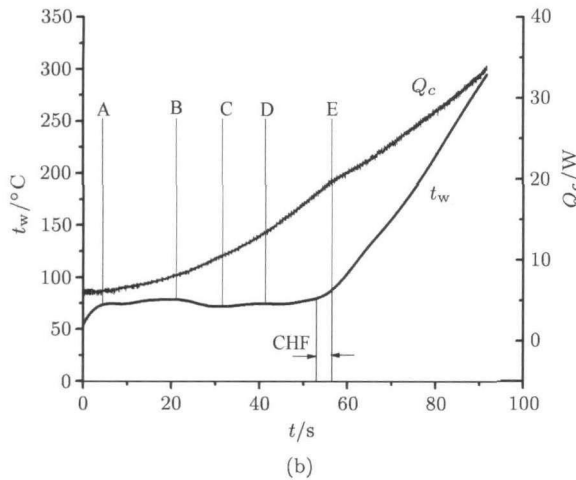
图 11 空间实验 I-1 中的气泡行为 (a)、加热过程 (b) 和沸腾传热曲线 (c) [47]

低过冷度时的气泡行为和沸腾曲线的特征和高过冷度时不同. 在这些实验中, 如图 12 给出的实验 I-4, 聚合气泡尺寸的增加非常快, 且其表面振荡剧烈. 压力越大, 表面振荡也越强烈. 而且, 在突然转变为膜态沸腾前, 随着时间的增加, 热流密度不断增加, 但加热面温度增加缓慢甚至有所下降. 该

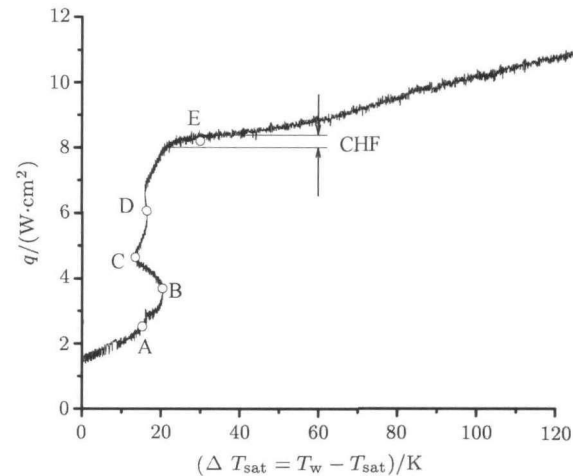
现象可以解释如下: 由于表面张力会随着饱和温度与相应压力的增大而减小, 聚合气泡表面的剧烈振荡使得底部干斑不能稳定地扩展, 而极可能被周围液体再次润湿, 从而在加热面上维持着核态沸腾, 甚至会有更多的核化点被激活, 使得传热增强.



(a)



(b)



(c)

图 12 空间实验 I-4 中的气泡行为 (a)、加热过程 (b) 和沸腾传热曲线 (c)^[47]

微重力沸腾曲线间的比较发现: 在相同压力下, 过冷度降低会使传热恶化; 而在相同过冷度下, 压力的增加会使传热加强. 按上述方法估算的临界热流值在相同压力时随过冷度的增加而增大, 在相同过冷度时随压力的增加同样增大, 这与常重力时趋势相似. 不过, 在相同压力和过冷度时, 微重力临界热流值仅为常重力时的三分之一左右. 遗憾的是, 空间实验中液池压力的控制是被动调节的, 液体的压力和温度并不能完全地分离开来, 因此, 实验数据中包含有某些压力和过冷度对临界热流的交叉影响.

图 13 比较了具有相同压力和过冷度时不同重力条件下的沸腾传热曲线. 总体来看, 与常重力时的沸腾传热相比, 微重力时 (特别是高过热度或高热流密度时) 传热恶化; 而在沸腾刚刚开始时微重力沸腾传热则存在显著强化, 这与 Lee 等^[51]

的观测相一致. 同时, 还可以观察到微重力沸腾起始所对应的壁面过热度与常重力时相同, 这也与 Straub^[3] 的观测相一致.

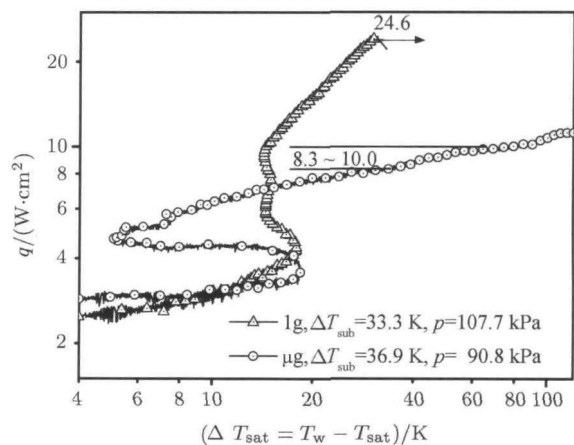


图 13 不同重力条件下的池沸腾传热曲线^[47]

4 中国未来微重力两相流与沸腾研究

一个新的研究项目“DEPA-SJ10”将会在不久的将来搭载我国实践 10 号 (SJ-10) 返回式卫星进行 [52]。在该项目中, 将利用单个人工空穴产生单气泡沸腾作为纯物质核态池沸腾现象的简化模型, 研究其局部过程。实验将观察气泡的形成、长大和脱离的瞬态过程, 同时测量在过冷和饱和条件下核化点附近的温度分布。研究的主要目标是描述微重力条件下气泡的行为及其周围局部对流, 从而深入理解微尺度的传热机制, 并揭示核态沸腾传热控制机理。

国内研究人员还提出了其他一些微重力两相流动和沸腾传热研究项目, 包括在电子元件冷却应用方面利用微型方柱表面强化沸腾传热 [53]、机械泵驱两相主动热控系统 [54,55]、燃料电池 [56] 或电解池内部的两相流动以及水气混合物的膜分离等。

这些研究项目的开展, 不仅将促进涉及两相流动和沸腾传热现象的空间应用系统的研发, 同时也有助于深化对两相流动和沸腾传热现象的认识。

致谢: 感谢胡文瑞院士、解京昌研究员、万士昕高工以及所有对这些研究做出贡献的研究人员, 并感谢日本九州大学的 H. Ohta 教授、加拿大 UOIT 的 K. S. Gabriel 教授和西安交通大学的李会雄教授与作者富有成效的讨论和合作。

参考文献

- Hewitt GF. Multiphase flow: the gravity of the situation. In: 3rd Microgravity Fluid Physics Conf., Cleveland, Ohio, USA, 1996-07. 13~15
- McQuillen J, Colin C, Fabre J. Ground-based gas-liquid flow research in microgravity conditions: state of knowledge. *Space Forum*, 1998, 3: 165~457
- Straub J. Boiling heat transfer and bubble dynamics in microgravity. *Adv. Heat Transfer*, 2001, 35: 57~172
- Di Marco P. Review of reduced gravity boiling heat transfer: European research. *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.*, 2003, 20(4): 252~263
- Kim J. Review of reduced gravity boiling heat transfer: US research. *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.*, 2003, 20(4): 264~271
- Ohta H. Review of reduced gravity boiling heat transfer: Japanese research. *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.*, 2003, 20(4): 272~285
- Ohta H. Microgravity heat transfer in flow boiling. *Adv. Heat Transfer*, 2003, 37: 1~76
- Gabriel KS. *Microgravity Two-phase Flow and Heat Transfer*. El Segundo: Springer, 2007
- 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
- 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
- Bousman WS. *Studies of two-phase gas-liquid flow in microgravity: [PhD Thesis]*. TX: Univ. of Houston, 1995
- 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
- Wallis GB. *One-dimensional Two-phase Flow*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1969
- Chen I, Downing R, Keshock E, et al. Measurements and correlation of two-phase pressure drop under microgravity conditions. *J. Thermophys.*, 1991, 5: 514~523
- Dukler AE. Response. *Int. J. Multiphase Flow*, 1989, 15(4): 677
- Zhao JF, Hu WR. Slug to annular flow transition of microgravity two-phase flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 2000, 26(8): 1295~1304
- 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: 1931~1944
- Reinarts TR. Slug to annular flow regime transition modeling for two-phase flow in a zero gravity environment. In: Proc. 30th Int. Energy Conversion Eng. Conf., Orlando, FL, 1995-07-30~08-04
- Carron I, Best F. Microgravity gas/liquid flow regime maps: can we compute them from first principles. In: AICHE Heat Transfer Symp., Nat. Heat Transfer Conf., Houston, TX, 1996-08
- Jayawardena SS, Balakotaiah V, Witte LC. Flow pattern transition maps for microgravity two-phase flows. *AIChE J.*, 1997, 43(6): 1637~1640
- Lowe DC, Rezkallah KS. Flow regime identification in microgravity two-phase flows using void fraction signals. *Int. J. Multiphase Flow*, 1999, 25: 433~457
- Reinarts TR. *Adiabatic two phase flow regime data and modeling for zero and reduced (horizontal flow) acceleration fields: [PhD Thesis]*. TX: Texas A&M Univ., 1993
- Colin C, Fabre J, McQuillen J. Bubble and slug flow at microgravity conditions: state of knowledge and open questions. *Chem. Eng. Comm.*, 1996, 141/142: 155~173
- 赵建福. 气泡初始尺寸对泡弹状流型转换的影响. *工程热物理学报*, 2005, 26(5): 793~795
- Song CH, No HC, Chung MK. Investigation of bubble flow developments and its transition based on the instability of void fraction waves. *Int. J. multiphase Flow*, 1995, 21(3): 381~404
- Cheng H, Hills JH, Azzopardi BJ. Effects of initial bubble size on flow pattern transition in a 28.9 mm diameter column. *Int. J. Multiphase Flow*, 2002, 28(7): 1047~1062

- 27 Zhao JF, Xie JC, Lin H, et al. Microgravity experiments of two-phase flow patterns aboard Mir space station. *Acta Mech. Sinica*, 2001, 17(2): 151~159
- 28 Lee J. Scaling analysis of gas-liquid two-phase flow pattern in microgravity. In: 31st Aerospace Sci. Meeting Exhibit, Reno, NV, 1993-01. 11~14
- 29 赵建福, 解京昌, 林海等. 部分重力条件下气液两相流型研究. *工程热物理论*, 2004, 25(1): 85~87
- 30 Zhao JF, Xie JC, Lin H, et al. Experimental study on two-phase gas-liquid flow patterns at normal and reduced gravity conditions. *Sci. China E*, 2001, 44(5): 553~560
- 31 Zhao JF, Gabriel KS. Two-phase flow patterns in a 90° bend at microgravity. *Acta Mech. Sinica*, 2004, 20(3): 206~211
- 32 Zhao JF, Liu G, Li B. Two-phase flow patterns in a square micro-channel. *J. Thermal Sci.*, 2004, 13(2): 174~178
- 33 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
- 34 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
- 35 Zhao L, Rezkallah KS. Pressure drop in gas-liquid flow at microgravity conditions. *Int J Multiphase Flow*, 1995, 21(5): 837~849
- 36 Colin C. Ecoulements diphasiques à bulles et à poches en micropesanteur: [PhD Thesis]. Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, 1990
- 37 Wan SX, Zhao JF, Liu G, et al. TCPB device: description and preliminary ground experimental results. In: 54th Int. Astronautical Cong., Bremen, Germany, 2003-09-29~10-03
- 38 Zhao JF, Wan SX, Liu G, et al. Subcooled pool boiling in microgravity: results of drop tower testing. In: 7th Drop Tower Days, Bremen, Germany, 2004-09. 12~25
- 39 刘刚. 不同重力条件下细铂丝表面过冷池沸腾传热研究: [硕士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2006年5月
- 40 Zhao JF, Wan SX, Liu G, et al. Subcooled pool boiling on thin wire in microgravity. *Acta Astronautica*, 2009, 64(2-3): 188~194
- 41 Lienhard JH, Dhir VK. Hydrodynamic prediction of peak pool boiling heat fluxes from finite bodies. *J. Heat Transfer*, 1973, 95: 152~158
- 42 Di M P, Grassi W. About the scaling of critical heat flux with gravity acceleration in pool boiling. In: Proc. XVII UIT Nat. Heat Transfer Conf., Ferrara, 1999. 139~149
- 43 Zhao JF, Liu G, Li ZD, et al. Bubble behaviors in nucleate pool boiling on thin wires in microgravity. In: 6th Int. Conf. Multiphase Flow, Leipzig, Germany, 2007年7月9~13
- 44 Zhao JF, Liu G, Wan SX, et al. Bubble dynamics in nucleate pool boiling on thin wires in microgravity. *Microgravity Sci. Tech.*, 2008, 20(2): 81-89.
- 45 闫娜. 微重力池沸腾传热实验研究: [硕士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2007
- 46 Johnson HA. Transient boiling heat transfer to water. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1971, 14: 67~82
- 47 Zhao JF, Li J, Yan N, et al. Bubble behavior and heat transfer in quasi-steady pool boiling in microgravity. *Microgravity Sci. Tech.*, 2009, 21(Suppl. 1): S175~S183
- 48 Ohta H, Kawasaki K, Azuma H, et al. On the heat transfer mechanisms in microgravity nucleate boiling. *Adv. Space Res.*, 1999, 24(10): 1325~1330
- 49 Zhao JF, Li J, Yan N, et al. Transition to film boiling in microgravity: influence of subcooling. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, 27(7): 076401
- 50 Oka T, Abe Y, Mori YH, et al. Pool boiling of n-pentane, CFC-113 and water under reduced gravity: parabolic flight experiments with a transparent heater. *J. Heat Transfer Trans. ASME*, 1995, 117: 408-417
- 51 Lee HS, Merte H Jr, Chiaramonte F. Pool boiling curve in microgravity. *J. Thermophys. Heat Transfer*, 1997, 11(2): 216~222
- 52 Wan SX, Zhao JF. Pool boiling in microgravity: recent results and perspectives for the project DEPA-SJ10. *Microgravity Sci. Tech.*, 2008, 20(3-4): 219-224
- 53 Wei JJ, Zhao JF, Yuan MZ, et al. Boiling heat transfer enhancement by using micro-pin-finned surface for electronics cooling. *Microgravity Sci. Tech.*, 2009, 21(Suppl. 1): S159~S173
- 54 Sun XH, He ZH, Huang ZC, et al. Analysis of temperature oscillations in parallel evaporators of a carbon dioxide two-phase loop. *Microgravity Sci. Tech.*, 2009, 21(Suppl. 1): S299~S304
- 55 Huang ZC, He ZH, Mo DC, et al. Coupling between an accumulators and a loop in a mechanically pumped carbon dioxide two-phase loop. *Microgravity Sci. Tech.*, 2009, 21(Suppl. 1): S23~S29
- 56 Guo H, Zhao JF, Ye F, et al. Two-phase flow and performance of fuel cell in short-term microgravity condition. *Microgravity Sci. Tech.*, 2008, 20(3-4): 265~270

中国科学院力学研究所 彭超, 李晶 译自

Two-phase flow and pool boiling

heat transfer in microgravity,

Int. J. Multiphase Flow,

2010, 36(2): 135-143

中国科学院力学研究所 赵建福 校

TWO-PHASE FLOW AND POOL BOILING HEAT TRANSFER IN MICROGRAVITY*

ZHAO Jianfu[†]

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

Abstract Researches on two-phase flow and pool boiling heat transfer in microgravity, which included ground-based tests, flight experiments, and theoretical analyses, were conducted in the National Microgravity Laboratory/CAS. A semi-theoretical Weber number model was proposed to predict the slug-to-annular flow transition of two-phase gas-liquid flows in microgravity, while the influence of the initial bubble size on the bubble-to-slug flow transition was investigated numerically using the Monte Carlo method. Two-phase flow pattern maps in microgravity were obtained in the experiments both aboard the Russian space station Mir and aboard IL-76 reduced gravity airplane. Mini-scale modeling was also used to simulate the behavior of microgravity two-phase flow on the ground. Pressure drops of two-phase flow in microgravity were also measured experimentally and correlated successfully based on its characteristics. Two space experiments on pool boiling phenomena in microgravity were performed aboard the Chinese recoverable satellites. Steady pool boiling of R113 on a thin wire with a temperature-controlled heating method was studied aboard RS-22, while quasi-steady pool boiling of FC-72 on a plate was studied aboard SJ-8. Ground-based experiments were also performed both in normal gravity and in short-term microgravity in the drop tower Beijing. Only slight enhancement of heat transfer was observed in the wire case, while enhancement in low heat flux and deterioration in high heat flux were observed in the plate case. Lateral motions of vapor bubbles were observed before their departure in microgravity. The relationship between bubble behavior and heat transfer on plate was analyzed. A semi-theoretical model was also proposed for predicting the bubble departure diameter during pool boiling on wires. The results obtained here are intended to become a powerful aid for further investigation in the present discipline and development of two-phase systems for space applications.

Keywords microgravity, two-phase flow, flow pattern, pool boiling, heat transfer

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10972255, 19789201, 10202025, 10432060), the Ministry of Science and Technology of China (95-Yu-34), the Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-L05, KACX2-SW-02-03), and the Chinese National Space Agency.

[†] E-mail: jfzhao@imech.ac.cn