

# 多相热流体系统中的重力无关性准则

杜王芳<sup>1</sup>, 乐述文<sup>1,2</sup>, 赵建福<sup>1,2</sup>, 李 凯<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所 微重力重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

**摘要:**微重力多相热流体动力学是在航天(尤其是载人航天)事业快速发展推动下形成的一门新兴交叉学科,研究空间微、小重力环境中多相热流体体系的流动、传热与传质等基本规律及其应用,重力效应是关注的核心课题。本文系统分析和评述了多相热流体系统中重力无关性准则研究的主要进展,就基于主导作用力、流动沸腾中的单气泡行为以及气液两相环状流界面波和弹状流液泛现象等的3类重力无关性准则进行了详细的分析和讨论,以增强对其理论和/或经验基础的认识,进而开展更深入的研究,为航天应用多相热流体技术研发服务。同时,相关成果对地面常重力环境多相热流体系统(尤其是微通道多相热流体系统)相关技术应用也有着明确的指导意义。

**关键词:**微重力多相热流体动力学;重力效应;重力无关性

**中图分类号:**O359;TK124      **文献标识码:**A      **DOI:**10.16046/j.cnki.issn2096-5680.2019.02.001

航天工程和技术的高速发展,尤其是以载人空间站和深空探测为代表的大型航天工程的发展,对空间环境中的流体管理和热控技术、动力与推进技术及载人航天器环境控制与生命保障技术等提出的极为严苛的要求,推动形成了微重力多相热流体动力学这一新兴交叉学科。微重力多相热流体动力学研究成果往往可以直接用于解决相关的航天技术研发中遇到的难题;而航天工程所提供的不断完善和丰富的微重力实验平台,同时对该学科的发展提供了坚实的支撑<sup>[1]</sup>。

航天器在研制、测试、发射、在轨飞行、地外行星表面着陆或返回地球等全寿命期间,会经历常重力(地面)、超重力(加速过载)、微重力(在轨自由飞行)和部分重力(如月球表面 $1/6g$ 、火星表面 $1/3g$ )等复杂的重力环境,其中的多相热流体系统也同样如此。和结构件或者物性参数均匀的单相流体不同,多相热流体系统中,由于气、液两相介质往往存在巨大的密度差异(如水和空气密度比可高达 $10^3$ ),重力的存在会导致巨大的浮力作用,引起的相间分离和相间滑移等效应显著影响着流动结构,进而影响流动的其他特性(如摩擦压降、传热等)。因此,重力效应研究一直是微重力多相热流体动力学的核心内容<sup>[2]</sup>。从空间应用多相热流体系统装置研制的角度看,若能在设计时保证其性能与重力无关,则可以更为方便地在地面常重力环境对其设计性能进行试验检测和校核,进而完善空间运控方案和故障应对措施等。另一方面,多相热流体系统影响因素繁多,现象极为复杂,Delil<sup>[3,4]</sup>曾就微重力多相热流体动力学地面模拟研究列出了18个需要满足的无量纲参数,这在实践意义上,除了所有参数均完全对应相等的原型观测外,几乎是不可能实现的。因此,寻找多相热流体体系的重力无关性准则,满足相关空间应用系统研制需求,简化空间多相热流体行为的地面模拟实验要求,成为微重力多相热流体动力学基础研究及其技术应用所关注的重点之一。

## 1 基于主导作用力的重力无关性准则

直观上,若存在其他作用力的效果远远超出了重力,流动将可以被视作是重力无关的,这就是基于主导作用力原则的重力无关性准则的理论基础。表面张力和惯性力是最常见的能抑制重力效应的2个作用力,

收稿日期:2018-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(11802314);中国科学院前沿科学重点研究计划项目(QYZDY-SSW-JSC040)

第一作者简介:杜王芳,女,博士,副研究员,主要研究方向是微重力多相热流体动力学。

通讯作者简介:赵建福,男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向是微重力多相热流体动力学。E-Mail:jfzhao@

imech.ac.cn

赵建福<sup>[5]</sup>基于双流体同轴环状 Poiseuille 流动的线性稳定性理论和实验数据归纳分析,给出了其理论依据:

$$Bo \ll \begin{cases} 1 \\ We \\ Ca \end{cases} \quad (1)$$

式中, Bond 数  $Bo = (\rho_L - \rho_G)gd^2/\sigma$ , Weber 数  $We = \rho U^2 d/\sigma$ , 毛细数  $Ca = \mu U/\sigma$ ,  $\rho, g, d, \sigma, U$  和  $\mu$  分别表示密度、重力加速度、特征长度、表面张力系数、特征速度和动力黏性系数,下标 L 和 G 分别表示液相和气相。

式(1)所示第一种情况一般对应低速情形,小的 Bond 数对应着表面张力远大于重力引起的浮力。基于 Bond 数准则,在地面常重力环境中,可以采用微通道气液两相系统或者密度匹配的中性悬浮液液两相系统,实现对微重力气液两相系统的有效模拟<sup>[6]</sup>。第二种情况对应于高流速情形, Bond 数和 Weber 数之比对应于 Froude 数,即  $Fr^2 = [(\rho_L - \rho_G)/\rho] \cdot We/Bo$ , 大的 Froude 数对应着惯性力远大于重力引起的浮力,因此,地面常重力环境可以采用高流速克服重力影响,使得相应的多相流动与传热特征与流道方位无关,即实现重力无关<sup>[7]</sup>。鉴于  $Ca = \sqrt{We/sU}$ , 其中 Suratman 数  $Su = \rho\sigma d/\mu^2$  往往远大于 1, 第三种情况发生前系统将早就处于第二种情况,因此不会呈现出来。

基于主导作用力的重力无关性准则具有明确的物理涵义,事实上将重力、表面张力和惯性力效应划分成 3 个区域:重力主导区、表面张力主导区和惯性力主导区,后两个区域即重力无关区(图 1)。当然,主导作用力的更迭并非是突然发生的,而往往要经历一个此消彼长的渐变过程。因此,各区域间过渡边界往往会是一个区间。此外,和 Bond 数定义的唯一性不同,在多相热流体系统中,速度、密度、黏度等参数都有诸多不同的定义或选择,如气相、液相或基于某种物理原则的折算量,由此产生了 Froude 数、Weber 数等无量纲参数的定义也各不相同。寻找最佳的无量纲参数定义,正确反映真实的多相热流体系统相应过程的内在机制,成为了微重力多相热流体动力学研究的基本目标之一。

Zhao 和 Hu<sup>[8]</sup>认为气相惯性力是影响气液两相流型和其他相关特征的关键因素,相应的 Weber 数和 Froude 数的定义应该基于气相密度  $\rho_G$  和气相表观流

速  $U_{SG}$ , 即气相表观 Weber 数  $We_{SG} = \rho_G U_{SG}^2 d/\sigma$  和气相表观 Froude 数  $Fr_{SG} = U_{SG}/\sqrt{(\rho_L - \rho_G)gd/\rho_G}$ 。这样,重力无关性准则可表示为

$$\begin{cases} Bo < Bo_{cr} \\ Fr_{SG} > Fr_{SG,cr} \end{cases} \quad (2)$$

其中,临界值则基于实验数据归纳得出:  $Bo_{cr} = 1.5 \sim 6$ ,  $Fr_{SG,cr} = 0.54 \sim 2.2$ <sup>[9]</sup>。

杜王芳等<sup>[2]</sup>汇总了微重力多相热流体动力学和微尺度多相流研究中关于重力无关性的研究结果,发现不同作者提出的临界 Bond 数基本处于 1~10 的范围内,最大约 40,最小约 0.1。根据上述临界值,可以推出表面张力主导区与惯性力主导区间的分界为  $We_{SG,cr} = 0.8 \sim 13$ , 与 Reinarts 等<sup>[10]</sup>基于摩擦压降给出的分区判据  $We_{SG,cr} = 10 \sim 20$  相一致,进一步表明其定义及临界值具有较广泛的适用性。

Baba 等<sup>[11]</sup>采用基于混合流速  $U_m = U_{SG} + U_{SL}$  和混合密度  $\rho_m = G/U_m$  (这里  $G$  为总的的质量流率)定义的混合 Froude 数  $Fr_m = G/\sqrt{\rho_m(\rho_L - \rho_G)gd}$ , 提出了一个与式(2)类似的重力无关性准则,其中临界 Froude 数  $Fr_{m,cr} = 4$ , 临界 Bond 数  $Bo_{cr} = 0.31$ 。

最近, Gao 等<sup>[12]</sup>在地面重力环境研究了水平和垂直向下的小管道流动沸腾传热系数,发现 2 种 Froude

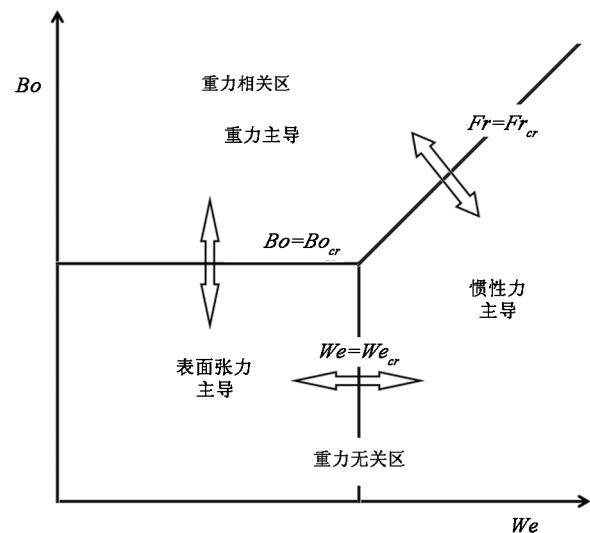


图 1 多相热流体系统中的主导作用力分区图  
Fig. 1 Dominated force regime map in multiphase thermal fluid systems

数定义都不能很好区分实验结果的方位无关与相关区,认为基于绝热流动发展起来的重力无关性判据对于流动沸腾情形可能并不适用,此时重力效应不再是局部的,沿程增长的气相干度导致惯性力逐渐强化,并会影响到上游状态。在利用相关模型预估其重力影响时,作者建议采用基于出口参数的无量纲数作为判断依据。

## 2 基于单气泡行为的重力无关性准则

Bower 等<sup>[13]</sup>对圆管内充分发展的湍流中单个生长气泡受力进行了数值建模,仿真分析了空间微重力及地面常重力环境中水平、垂直向上和垂直向下流动中气泡滑移和脱落尺寸,发现对确定的加热壁面过热度  $\Delta T_w$  (壁面温度  $T_w$  与工质饱和温度  $T_{sat}$  之间的差值),流速超过某个临界值后,上述不同情形中气泡滑移或脱落尺寸间的差异可以忽略不计。作者通过对 FC-87、R113、R12 和 R22 四种工质计算结果的汇总,提出了如下区分重力无关和相关的判断准则:

$$Ja = 21.975 \ln \Psi + 82.748 \quad (3)$$

其中, Jakob 数  $Ja = \rho_L C_{pL} \Delta T_w / \rho_V L$ , 另一个无量纲参数  $\Psi = [\rho_L / (\rho_L - \rho_G)] \mu_L U / \sigma$ 。这里,  $L$  表示相变潜热,  $\Delta T_w = T_w - T_{sat}$  为壁面过热度,  $U$  为管内特征速度(这里为液体平均速度)。考虑到  $\rho_G \ll \rho_L$ , 该准则可以改写毛细数  $Ca$  的形式,即:

$$Ca = \exp\left(\frac{Ja - 82.748}{21.975}\right) \quad (4)$$

然而, Bower 和 Klausner<sup>[14]</sup>通过地面常重力条件下不同安装方位流动沸腾传热实验发现,对比与实测的传热系数所表现的重力无关/相关特性,该准则对固定的 Jakob 数预测的  $\Psi$  值要明显小于实际的数值,导致大量重力无关的实验数据落在了该准则预测的重力相关区(图 2)。尽管作者认为依据准则设计出的重力无关体系能够保证其确实是重力无关的,因此是偏于安全的,但这样明显的差别表明其理论上必然存在着某些缺陷。

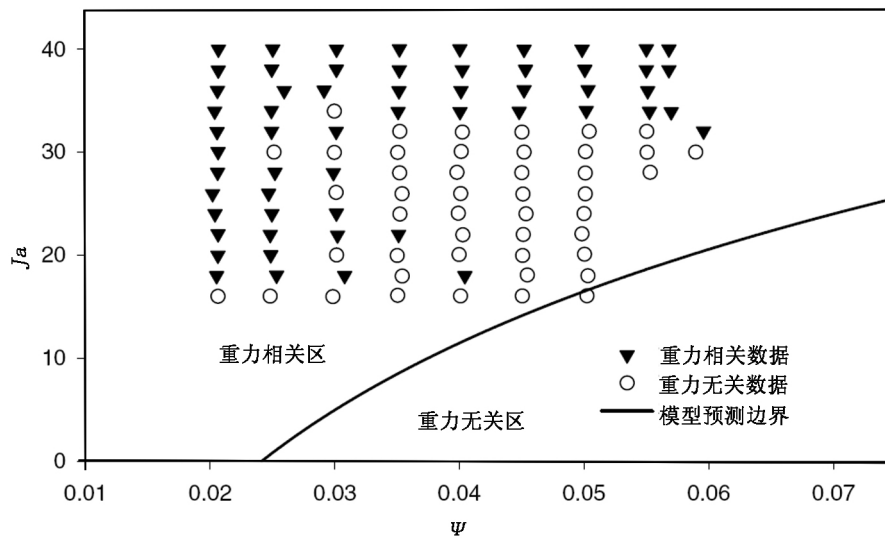


图 2 基于单气泡行为的重力无关性准则与实验数据的比较

Fig. 2 Comparison between the experimental data and the prediction of the criterion of gravity independence based on single bubble behaviors

Yue 等<sup>[15]</sup>重新回顾了 Bower 等<sup>[13]</sup>的计算,发现并不能很好地重现其结果,并发现原文中存在难以自治的结果。Yue 等<sup>[15]</sup>根据最新研究进展,对 Bower 等<sup>[13]</sup>模型进行了修订,重新计算了 R113 工质中单个气泡的受力与滑移尺寸,发现在中低 Jakob 数和高 Reynolds 数情形,重力无关性可以采用基于主导作用力原则的液相 Froude 数准则表达。

严格地说,基于单气泡行为的讨论只能适用于流动沸腾起始阶段极低干度流动情形,将其推广到旺盛沸腾显然缺乏合理性。此外,毛细数  $Ca$  代表的是黏性力与表面张力之比,本质上无法与重力效应相关联,也

许这正是该判据失效的内在原因之一。

### 3 基于界面波与液泛现象的重力无关性准则

Zhang 等<sup>[16]</sup> 基于以下原则讨论了重力效应对流动沸腾临界热流密度 CHF 的影响:1)垂直于加热管壁面的重力分量会引起流体动力学不稳定性;2)平行于加热管壁面的重力分量会影响蒸气的移除并在低速时触发液泛现象;3)波长过大会阻止液体与加热管壁面接触。这些因素将引起 CHF 随重力的变化,也因此能够用来判断是否呈现重力无关性。

鉴于 CHF 现象中存在波状蒸气层,原则 1 将对应着两相环状流液界面的开尔文-亥姆霍兹不稳定性,忽略相变传热影响,界面波临界波长在满足下述准则的前提下是重力无关的:

$$\left| \frac{(\rho_L - \rho_G)(\rho_L + \rho_G)^2 \sigma g \cos\theta}{\rho_L^2 \rho_G^2 (u_G - u_L)^4} \right| \ll \frac{1}{4} \quad (5)$$

将气液两相速度差  $u_G - u_L$  用管内特征速度  $U$  (Zhang 等<sup>[16]</sup> 对进口单相流情形采用进口处液相速度) 表示,并引入密度加权的 Weber 数和考虑安装方位角影响的 Bond 数,即

$$We = \frac{\rho_L \rho_G U^2 L}{(\rho_L + \rho_G) \sigma} \quad (6)$$

$$Bo = \frac{(\rho_L - \rho_L) g L^2 \cos\theta}{\sigma} \quad (7)$$

式(5)可以表示为  $Bo/We^2$  的形式,具体的重力无关性准则临界值由实验结果确定为  $Bo/We^2 \leq 0.09$ 。

原则 2 对应于弹状气团周围液体逆流(即液泛)现象。弹状气泡在管道内的上升速度为

$$U_0 = 0.35 \sqrt{\frac{(\rho_L - \rho_L) g D \sin\theta}{\rho_L}} \quad (8)$$

式中,  $D$  为管道直径。当气泡上升速度  $U_0$  远小于液相速度  $U$ , 即

$$Fr = \left| \frac{\rho_L U^2}{(\rho_L - \rho_L) g D \sin\theta} \right| \gg 0.1225 \quad (9)$$

便可以有效消除液泛现象,即完全消除重力影响。考虑到  $\theta = \pi/2$  时条件最为恶劣,结合实验数据,Zhang 等<sup>[16]</sup> 得到相应的重力无关性准则为  $Fr \geq 7.7$ 。

原则 3 则对应低流速是可能形成远大于加热部件长度  $L$  的扰动波波长,从而阻止液相接触加热表面。同样基于环状流液界面的开尔文-亥姆霍兹不稳定性理论,可得到最大的临界波长为

$$\lambda_c = \frac{2\pi\theta(\rho_L + \rho_G)}{\rho_L \rho_G U^2} \quad (10)$$

相应的重力无关性准则为

$$We = \frac{\rho_L \rho_G U^2 L}{\sigma(\rho_L + \rho_G)} \geq 2\pi \quad (11)$$

基于上述 3 原则建立的重力无关性准则构成如图 3 所示的分区图,其中左上角区域为重力无关区,显然,随着重力增加,所要求的流速会相应增大。

Konishi 等<sup>[17]</sup> 针对进口为两相流状态的流动沸腾,将液相流速用总的的质量流速  $G$  和液相密度的比值  $G/\rho_L$  (即所谓的“全液相速度”) 代替,并考虑了进口处初始的热力

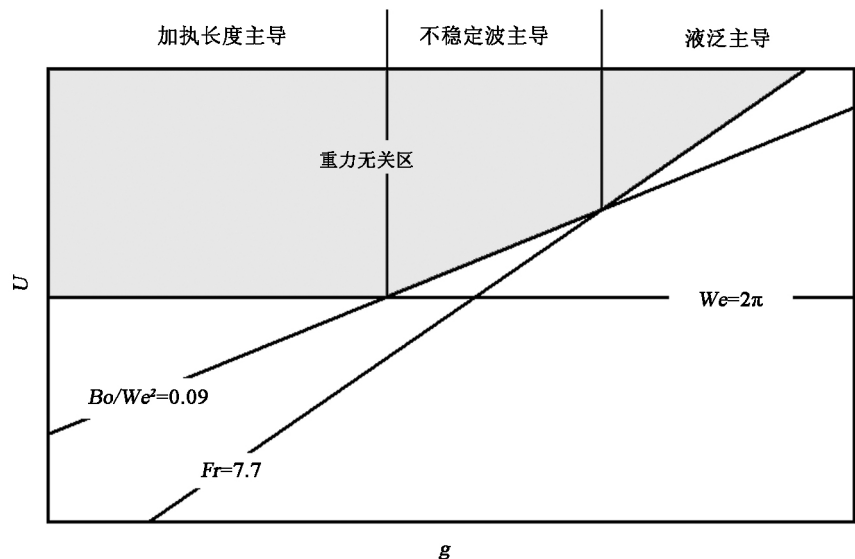


图 3 基于界面波与液泛现象的重力无关性准则

Fig. 3 The criteria of gravity-independence based on interfacial wave and liquid flooding

学平衡干度  $x_{e,m}$  的影响,将相关准则扩展为

$$Bo/We^2 = \frac{(\rho_L - \rho_G)(\rho_L + \rho_G)^2 \rho_L^2 \sigma g}{\rho_G^2 G^4} \leq 0.230e^{-67.03x_{e,m}} + 0.00249 \quad (12)$$

$$Fr = \frac{G^2}{\rho_L(\rho_L - \rho_L)gD} \geq (0.0184e^{-37.07x_{e,m}} + 0.0016)^{-1} \quad (13)$$

$$We = \frac{\rho_G G^2 L}{\sigma \rho_L (\rho_L + \rho_G)} \geq 1015e^{8.682x_{e,m}} - 595 \quad (14)$$

这里,作者考虑了不同机制中最严苛的流道方位,取消了准则中的方位角因子。若  $x_{e,m}=0$ ,即进口单相流状态,原则上应该回到 Zhang 等<sup>[16]</sup>。但事实上二者并不一致。Konishi 等<sup>[17]</sup>收集了更多数据,所归纳得到的重力无关性准则要求的临界速度一般更高;只有  $Bo/We^2$  临界值增大,对应临界速度会有所降低。

O'Neill 等<sup>[18]</sup>将上述准则进一步扩展到进口为饱和蒸气的流动冷凝情形,此时,界面扰动波长变化不会影响壁面冷凝传热,因此只需要 2 个准则:

$$\frac{Bo}{We^2} = \left| \frac{(\rho_L - \rho_G)(\rho_L + \rho_G)^2 \sigma g \cos\theta}{\rho_L^2 \rho_G^2 \Delta U^4} \right| < 5.12 \times 10^{-5} \quad (15)$$

$$Fr = \left| \frac{\rho_L \Delta U^2}{(\rho_L - \rho_L)gD_F \sin\theta} \right| > \frac{0.235}{aRe_c^n} \quad (16)$$

式(15)中,特征速度  $\Delta U$  定义为出口气、液两相速度差,即

$$\Delta U = \frac{G_{G,out}}{\rho_G \alpha_{out}} - \frac{G_{L,out}}{\rho_L (1 - \alpha_{out})} \quad (17)$$

其中,气、液两相质量流速  $G_k$  (下标  $k=L$  和  $G$ ) 及气相空隙率  $\alpha$  与总质量流速  $G$  和气相热力学平衡干度  $x_e$  满足如下关系:

$$G_G = x_e G \quad (18)$$

$$G_L = (1 - x_e) G \quad (19)$$

$$\alpha = \left[ 1 + \frac{1 - x_e}{x_e} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{2/3} \right]^{-1} \quad (20)$$

式(16)中,参数  $a$  和  $n$  对应于核心区蒸气的流动状态,依赖于核心区蒸气的 Reynolds 数  $Re_c = \rho_G \Delta U (D - 2\delta) / \mu_G$  (这里,  $\delta$  为液膜厚度,可以由环状流构型下的气相空隙率  $\alpha$  计算得到),具体取值为:1)  $0 \leq Re_c \leq 2000$  时,  $a=16, n=-1$ ; 2)  $2000 \leq Re_c \leq 20000$  时,  $a=0.079, n=-0.25$ ; 3)  $Re_c \geq 20000$  时,  $a=0.046, n=-0.20$ 。Froude 数中的特征长度  $D_F = 4\delta(D - \delta) / (D - 2\delta)$ ,为环状液膜水力直径。

不过,式(15)和(16)中真实的特征速度分别对应于核心区蒸气相对于液膜或气液界面的速度差  $U_G - U_L$  和  $U_G - U_i$ ,式(17)是二者的近似。若采用分离流模型直接计算相应速度差,可以将液膜和核心区蒸气速度与流道方位角耦合求解,而不是像采用式(17)时在无量纲准则数定义中简单地引入重力分量了事。这会导致重力无关性准则中经验常数的变化,作者建议 2 个经验常数分别由  $5.12 \times 10^{-5}$  和  $0.235$  调整为  $2.32 \times 10^{-5}$  和  $0.195$ 。

与 Zhang 等<sup>[16]</sup>、Konishi 等<sup>[17]</sup>基于实验数据提出流动沸腾情形中的重力无关性准则相关的临界值有所不同,O'Neill 等<sup>[18]</sup>关于流动凝结研究主要基于控制容积的环状流数值模拟,只有有限的实验观测数据被用来验证准则预测趋势的正确性,因此,还需要进一步开展参数范围更广泛深入研究。

基于环状流气液界面波与弹状流液泛现象的重力无关性准则,除了没有考虑沿流道方向的相变传热影响外,还预设了重力效应的存在,而不论流道和/或重力的实际大小。正如基于主导作用力的重力无关性准则所预测的那样,图 3 左侧必然会遇到 Bond 数准则所界定的重力无关区,从进对速度不再有限制要求。

## 4 结论

鉴于气、液两相介质一般存在巨大的密度差异,多相热流体系统在不同重力环境表现出迥异的特征,给

空间多相热流体技术应用带来极大困难和挑战。设计重力无关的空间多相热流体体系,可以给相关技术在地面常重力环境开展试验测试并据此设计空间运控流程提供极大的便利,因此得到了广泛关注。

本文回顾了目前关于多相热流体体系重力无关性准则研究的主要进展,就基于主导作用力、流动沸腾中的单气泡行为以及气液两相环状流界面波和弹状流液泛现象等的3类重力无关性准则进行了详细的分析和讨论,以增强对其理论和/或经验基础的认识,进而开展更深入的研究,为航天应用多相热流体技术研发服务。同时,相关成果对地面常重力环境多相热流体系统(尤其是微通道多相热流体系统)相关技术应用也有着明确的指导意义。

#### 参 考 文 献

- [1] 赵建福. 气液两相流动与相变传热[A]. 见:胡文瑞等. 微重力科学概论[M]. 北京:科学出版社,2010,第127-164页. / Zhao JF. Two-phase Gas-liquid Flow and Heat Transfer with Phase Change [A]. In: Hu WR, et al. An Introduction of Microgravity Science[M]. Beijing, Science Press,2010.
- [2] 杜王芳,赵建福,李凯. 多相热流体系统中的主导作用力分区准则[J]. 河北水利电力学院学报,2018,(1):1-5/12. /Du WF, Zhao JF, Li K. Criteria for dominated force regime map in multiphase thermal fluid system. [J]. Hebei Univ. Water Res. Ele. Eng.,2018,(1):1-5/12.
- [3] Delil AAM. Gravity dependent condensation pressure drop and heat transfer in ammonia two-phase heat transport systems[R]. NASA TR No. 94,1992.
- [4] Delil AAM. On thermal-gravitational modelling, scaling and flow pattern mapping issues of two-phase heat transport systems[R]. AIP Ser. 458(1), pp. 761-771,1999.
- [5] 赵建福. 微重力条件下气/液两相流动研究[D]. 中国科学院力学研究所博士后研究报告,中国北京,2000年7月. / Zhao JF. Study on Two-phase Flow at Microgravity [D]. Postdoctoral Research Report, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, July 2000.
- [6] 赵建福. 微重力条件下气/液两相流流型的研究进展[J]. 力学进展,1999,29(3):369-382. /Zhao JF. A review of two-phase gas-liquid flow patterns under microgravity conditions [J]. Adv. Mech.,1999,29(3):369-382.
- [7] 吕成道,李佛金,王汉强,程尚模. 地面模拟微重力下两相流动沸腾换热的分析[J]. 华中理工大学学报,1998,26(4):81-83. /Lv C, Li F, Wang H, Cheng S. Analysis on modeling conditions of two-phase flow boiling heat transfer under microgravity [J]. Chin. J. Huazhong Univ. Sci. Tech., 1998,26(4):81-83.
- [8] Zhao JF, Hu WR. Slug to annular flow transition of microgravity two-phase flow [J]. Int. J. Multiphase Flow, 2000,26(8):1295 - 1304.
- [9] Zhao JF, Xie JC, Lin H, Hu WR, Ivanov AV, Belyeav AYu. Experimental studies on two-phase flow patterns aboard the Mir space station [J]. Int. J. Multiphase Flow, 2001,27(11):1931 - 1944.
- [10] Reinarts T R, Ungar E K, Butler C D. Adiabatic two-phase pressure drop in microgravity: TEMP2A-3 flight experiment measurements and comparison with predictions[C]. In: 33rd Aerospace Sci. Meeting & Exhibit, Reno, NV, Jan. 9-12,1995.
- [11] Baba S, Sakai T, Sawada K, Kubota C, Wada Y, Shinmoto Y, Ohta H, Asano H, Kawanami O, Suzuki K, Imai R, Kawasaki H, Fujii K, Takayanagi M, Yoda S. Proposal of experimental setup on boiling two-phase flow on-orbit experiments onboard Japanese experiment module "KIBO"[J]. J. Phys. Conf. Ser., 2011,327:012055-1/12.
- [12] Gao W, Xu X, Liang X. Experimental study on the effect of orientation on flow boiling using R134a in a mini-channel evaporator [J]. Appl. Thermal Eng., 2017,121:963 - 973.
- [13] Bower JS, Klausner JF, Sathyanarayan S. High heat flux, gravity independent, two-phase heat exchangers for spacecraft thermal management [J]. SAE J. Aerospace, (002,747 - 755, Paper2002-01-3196.
- [14] Bower JS, Klausner JF. Gravity independent subcooled flow boiling heat transfer regime [J]. Exp. Thermal Fluid Sci., 2006,31:141 - 149.
- [15] Yue SW, Du WF, Liu P, Zhao JF, Li K, Li W. Revisiting of BKS gravity-independent criterion [C]. 12th Asian Microgravity Symposium (AMS2018), Zhuhai, China, November 12-16,2018.
- [16] Zhang H, Mudawar I, Hasan MM. A method for assessing the importance of body force on flow boiling CHF [J]. J. Heat Transfer Trans. ASME, 2004,126:161 - 168.

- [17] Konishi C, Mudawar I, Hasan MM. Criteria for negating the influence of gravity on flow boiling critical heat flux with two-phase inlet conditions [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2013,65:203 – 218.
- [18] O'Neill LE, Park I, Kharangate CR, Devahdhanush VS, Ganesan V, Mudawar I. Assessment of body force effects in flow condensation – part II: Criteria for negating influence of gravity [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2017,106:313 – 328.

## Criteria of Gravity Independence in Multiphase Thermal Fluid System

DU Wang-fang<sup>1</sup>, YUE Shu-wen<sup>1,2</sup>, ZHAO Jian-fu<sup>1,2</sup>, LI Kai<sup>1, 2</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 100190, Beijing, China;

2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing, China)

**Abstract:** Microgravity multiphase thermal fluid dynamics is a newly formed interdisciplinary subject motivated by the rapid progress of space engineering, especially the manned spaceflight. Its topics include the fundamentals of flow, heat and mass transfer of multiphase thermal fluid system in low and microgravity in space, as well as their applications. The gravity effect is one of the key problems in the field of microgravity multiphase thermal fluid dynamics, which has attracted wide attention. In this paper, the main progress of gravity-independent criteria in multiphase thermal fluid systems is reviewed exhaustively. Three kinds of gravity-independent criteria based on the dominant force, single bubble behavior in flow boiling, interfacial wave in gas-liquid two-phase annular flow and flooding in slug flow are analyzed and discussed in detail to improve the understanding of their theoretical and/or empirical bases and to promote further research. The results are helpful for the research and development of multiphase thermal fluid technology in space applications, as well as for those in ground applications, such as micro-channel multiphase thermal fluid system.

**Keywords:** microgravity multiphase thermal fluid dynamics; gravity effect; gravity independence

(责任编辑:郭书俊)