



核态池沸腾传热现象中的重力标度规律

杜王芳^{1,2}, 赵建福^{1,2*}

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

* 联系人, E-mail: jfzhao@imech.ac.cn

2019-07-27 收稿, 2019-08-21 修回, 2019-08-21 接受, 2019-10-22 网络版发表

国家自然科学基金(U1738105, 11802314)和中国科学院前沿科学重点研究计划(QYZDY-SSW-JSC040)资助

摘要 沸腾过程极强的热传递能力使其在地面常重力环境和空间微重力环境都有着广泛应用. 重力是影响沸腾传热性能的重要因素, 关于重力影响规律的研究对相关空间应用具有重要意义. 本文回顾了有关核态池沸腾传热重力标度规律的研究现状和进展, 特别对基于地基短时失重飞机准稳态沸腾实验结果提出的Raj-Kim-McQuillen重力标度律模型(RKM模型)进行了详细评述, 讨论了其中关于核态池沸腾曲线起、止端点(沸腾起始点和临界热流点)及其渐近性能的基本假设和隐含假设. 通过与经验知识(包括实验观测数据和数值模拟结果)比较, 明确了RKM模型的贡献与不足, 建议了进一步的低重力实验和深入系统的数值模拟等, 以推进该领域研究深入开展.

关键词 核态池沸腾, 重力效应, 重力标度律, 核态沸腾起始, 临界热流密度, 微重力

沸腾过程因相变潜热的释放而具有极强的热传递能力, 不论是在地面常重力环境, 还是在空间微重力环境都有着十分重要和广泛的应用. 强传热能力带来的换热设备小型化、轻量化和紧致化等优点对未来大型空间探测, 特别是深空探测相关技术的发展具有更为重要的应用价值. 然而, 液、气两相介质间往往存在极大的密度差异. 因此, 沸腾形成的气液两相热流体体系在重力场中会受到浮力作用的主导, 进而出现自然分层、相间滑移以及与多相热流体动力学过程耦合形成的其他极为复杂的流动与传热特征^[1,2]. 航天飞行任务的不同阶段会经历常重力(地面研制与性能检测等)、超重力(发射和变轨等)、微重力(轨道自由飞行)和低重力(月球、火星等表面活动)等不同重力环境, 相应的沸腾传热过程会呈现不同的流动与传热特征. 正确设计和预测相关设备性能, 拟定合理的运控方案和事故处理预案以保障空间系统运行的安全可靠, 都离不开对不同重力条件下的沸腾传热基本特征与规律的认识

和掌握, 以及对重力变动时系统响应特性的了解. 对相关设备性能的地面检测和评估, 也有赖于对不同重力场中的沸腾传热性能间的比较研究. 因此, 沸腾现象中的重力作用机制研究, 成为目前国际微重力科学领域广为重视的研究前沿.

在传统的沸腾传热理论中, 往往明显包含了重力加速度参数. 但是, 据以构建相关理论的经验基础往往只是地面常重力条件下的实验结果, 并不能将重力加速度作为真正可控的变量, 也就无从直接验证相关理论的正确与否. 微重力沸腾实验结果表明, 残余重力小于一定数值后, 现有的传热理论往往不再适用. 但是, 由于沸腾传热现象的极端复杂性, 现有微重力沸腾实验, 不论是空间飞行实验, 还是地基短时微重力实验, 往往都只能局限于重力有、无条件下的比较, 难以实现对重力因素的真正孤立与稳定调控, 无法将重力因素作为真正独立的变量进行控制和比较研究, 难以揭示重力在沸腾现象中的作用机制^[3].

引用格式: 杜王芳, 赵建福. 核态池沸腾传热现象中的重力标度规律. 科学通报, 2020, 65: 1629–1637

Du W F, Zhao J F. Gravity scaling law of heat transfer in nucleate pool boiling (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1629–1637, doi: 10.1360/TB-2019-0337

本文基于现有沸腾传热理论框架和沸腾实验结果(特别是微重力沸腾实验关于重力效应的研究成果),系统梳理和评述关于核态池沸腾传热中的重力标度规律研究进展,以期推动该领域研究的深入开展。

1 重力标度指数及其含义辨析

核态池沸腾传热依赖于诸多因素,不失一般性,可以将热流密度 q'' 表示为加热面过热度 ΔT_w 、重力加速度 g 和加热面特征尺度 L 的标度函数之积的形式:

$$q'' = k \Delta T_w^n g^m L^p, \tag{1}$$

其中,比例常数 k 是一个具有特定量纲的常数,依赖于系统压力 p 、液体过冷度 ΔT_{sub} 、表面张力 σ 、汽化潜热 h_{LV} 与液、气两相介质密度 ρ_i 、定压比热 c_{pi} 、动力黏度 μ_i 、导热系数 λ_i (下标 $i=L, V$,分别代表液相和气相)以及加热表面特性;标度指数 n, m 和 p 一般由经验数据确定。加热表面特性一般包括表面粗糙度及与其密切相关的核化空穴形貌、尺寸及数密度分布,以及与液、气相工质物性一同决定的加热表面润湿特性(即接触角)等,是对池沸腾传热特性影响极大但又极难准确刻画的因素,某种意义上也是沸腾传热实验数据分散甚至相互矛盾的主要根源(或至少是主要根源之一)。此外,鉴于加热面尺寸 L 对沸腾传热的影响往往与重力的影响密切相关,式(1)特将其与加热面其他特性参数分离开来。

也可用沸腾换热系数 $\alpha = q''/\Delta T_w$ 来表示沸腾传热效率,由式(1)可知:

$$\alpha = k \Delta T_w^{n-1} g^m L^p. \tag{2}$$

显然,在过热度 ΔT_w (和包括加热面尺度 L 在内的其他因素)恒定的条件下,核态池沸腾传热的重力标度规律可以表示为

$$\left(\frac{q''}{q''_0}\right)_{\Delta T_w} = \left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)_{\Delta T_w} = \left(\frac{g}{g_0}\right)^m. \tag{3}$$

其中,下标0代表参考状态(一般选择地面常重力条件), g_0 为地面重力加速度。这里,为了清楚区分不同条件下的重力标度行为特征,澄清因概念混淆而引起的一些认识模糊和混乱,将重力标度指数 m 称为基于恒定过热度的重力标度指数。

利用式(1)可以将过热度表示成热流密度的函数,代入式(2)即得到 $\alpha = f(q'')$ 形式的沸腾传热曲线:

$$\alpha = k^{1/n} q''^{(n-1)/n} g^{m/n} L^{p/n}. \tag{4}$$

这样,在热流密度 q'' (和包括加热面尺度 L 在内的其他因素)恒定的条件下,核态池沸腾传热的重力标度规律可以表示为

$$\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)_{q''} = \left(\frac{g}{g_0}\right)^{m'}, \tag{5}$$

式中, m' 表示基于恒定热流密度的重力标度指数,其数值与 m 以及过热度的重力标度指数 n 之间存在如下关系:

$$m' = m/n. \tag{6}$$

Warrier等人^[4]曾尝试针对恒定的无量纲热流密度 q''/q''_{CHF} (下标CHF表示临界热流点)寻求核态池沸腾传热随重力的变化,此时式(4)可改写为

$$\alpha = k^{1/n} \left(\frac{q''}{q''_{CHF}}\right)^{(n-1)/n} q''_{CHF}^{(n-1)/n} g^{m/n} L^{p/n}. \tag{7}$$

若已知临界热流密度对重力的依赖规律 $q''_{CHF} \sim g^s$,则在无量纲热流密度 q''/q''_{CHF} (和包括加热面尺度 L 在内的其他因素)恒定的条件下,核态池沸腾传热的重力标度规律可以表示为

$$\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)_{q''/q''_{CHF}} = \left(\frac{g}{g_0}\right)^{m''}. \tag{8}$$

式中, m'' 表示基于恒定无量纲热流密度的重力标度指数,其数值与 m, m' 以及临界热流密度的重力标度指数 s 之间存在如下关系:

$$m'' = m' + \frac{s(n-1)}{n} = \frac{m+s(n-1)}{n}. \tag{9}$$

需要强调的是,上述4个重力标度指数显然具有不同的物理含义,不能不加区分地混用。

2 重力标度律研究进展

目前,关于核态池沸腾临界热流密度的研究,不同机制假设下往往都导致所谓的Kutateladze-Zuber形式的经验关联式:

$$q''_{CHF} = Ku(\rho_V)^{1/2} h_{LV} [g\sigma(\rho_L - \rho_V)]^{1/4}, \tag{10}$$

显示了该表达式的强鲁棒性。式(10)中的经验常数 Ku 常被称为Kutateladze数, Kutateladze^[5]建议 Ku 为0.13~0.16, Zuber^[6]则建议为0.12~0.15。一般将 $Ku = \pi/24 \approx 0.13$ 时的预测结果称为Zuber临界热流密度。式(10)给出了关于池沸腾传热临界热流密度的一个经典的重力标度律,

相应的重力标度指数 $s=1/4$ 。不过,式(10)只是从数值上刻画了临界热流密度和重力的关系,并未明显包含过热度参量。事实上,不同重力条件下临界热流对应的过热度往往并不相等。如前所述,该重力标度指数 $s=1/4$ 与基于不同条件的核态池沸腾传热的重力标度指数 m 、 m' 或 m'' 有着不同的物理含义,需要认真区分,不能混淆。此外,地面常重力实验表明,只有当加热面相对于Taylor临界波长 $\lambda_c=2\pi L_c$ (这里, $L_c=[\sigma/g(\rho_L-\rho_V)]^{1/2}$ 为Laplace长度)足够大时, Ku 才能与加热面特征尺寸无关。因此,式(10)只适于足够大的加热面情形。这里,Taylor临界波长可以视为常重力池沸腾临界热流现象中的一个内禀尺度。对于小尺度加热面, Ku 一般是Bond数 $Bo=gd^2(\rho_L-\rho_V)/\sigma$ 的函数。常用Bond数的平方根 $L'=Bo^{1/2}$ 作为表征临界热流密度尺度效应的无量纲参数,后者也可以看作加热面长度相对于Laplace长度 L_c 的无量纲参量^[7]。柱状加热面往往采用半径 R 作为其特征长度,相应的无量纲参量记为 R' 。

关于核态池沸腾传热的经典Rohsenow关联式^[8]为

$$q'' = \mu_L h_{LV} \left[\frac{g(\rho_L - \rho_V)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{c_{pL} \Delta T_W}{C_{sf} h_{LV} Pr_L^n} \right)^3, \quad (11)$$

来自核态池沸腾中气泡脱落运动所驱动的气液两相流动传热和浮力驱动的单相自然对流传热之间的类比。该式表明,基于恒定过热度的重力标度指数 $m=1/2$,而过热度标度指数 $n=3$;相应地,基于恒定热流密度的重力标度指数 $m'=1/6$ 。结合式(10),可以得到基于恒定无量纲热流密度 q''/q''_{CHF} 的重力标度指数 $m''=1/3$ 。显然,基于不同条件的重力标度指数一般有着不同的数值。

式(11)与(10)一样,加热面特征尺度并未出现,这是因为常规核态池沸腾中气泡脱落尺寸这一内禀尺度充当该现象中的特征尺度。相应地,式(11)要求加热面相对于气泡脱落尺寸而言应该是足够大的(这在微重力环境往往并不能得到满足)。和临界热流不同,目前研究中充斥着大量基于不同的机制假设和/或经验数据的核态池沸腾传热模型/关联式,其中重力标度指数 m 的取值范围散布范围很广,多在 $-0.35 \sim 0.5$ 之间^[1],甚至高达 1 ^[9]。因此,不同模型/关联式的预测呈现出极为不同甚至完全相反的变化趋势。显然,这样的现状难以满足航天科技对沸腾传热技术的迫切需求。

微重力沸腾研究的目标之一即揭示重力对沸腾传热的影响机制,得到正确表述沸腾传热相对于重力的标度规律,将对空间微重力环境传热性能的预测和地

面常重力实验结果相关联。目前,微重力沸腾研究一个突出的结果是,微重力条件下的核态池沸腾传热性能并不像经典的Rohsenow关联式预测的那样显著恶化,丝状加热表面的核态池沸腾传热在微重力条件下甚至会有高达20%的强化^[1,10],以至于Dhir^[11]提议将Rohsenow关联式中的重力加速度看作一个量纲常数而非真实的物理变量——这与其机制假设明显矛盾。Zhao等人^[10]利用我国返回式卫星开展了丝状加热器微重力池沸腾实验,发现Lienhard和Dhir^[12]基于流体动力学不稳定性机制对Kutateladze-Zuber模型的扩展能较好地预测不同重力时的临界热流密度,尽管空间实验中加热器无量纲半径 R' 比模型最初的适用范围低至少2个数量级。Straub^[1]曾报道了同样的发现。然而,地面常重力环境通过缩小加热丝直径观测到的临界热流密度数据却呈现出极为不同的变化趋势。表明无量纲半径 R' 在小尺寸加热器情形中,并非能将重力影响从其他相互竞争的因素中区分出来的一个适宜的标度参数。Zhao等人^[10]为了解释该现象,引入极限核化尺寸 d_{LN} ,将其和加热器直径 d_{wire} 组合成一个新的无量纲参数 $\Gamma=d_{LN}/d_{wire}$ 。假设极限核化尺寸不依赖于重力,而仅取决于系统热物理状态参数,如工作流体和加热器材料物性、加热表面状态等。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。此外,如前所述,Warrier等人^[4]曾尝试用固定的无量纲热流密度 q''/q''_{CHF} 来刻画不同的微重力核态池沸腾实验得到的传热特性随重力的变化,发现在 $q''/q''_{CHF} \approx 0.22$ 时 m'' 接近 $1/8$,明显小于基于地面常重力实验结果的Rohsenow关联式和Kutateladze-Zuber关联式联合导出来的数值 $1/3$ 。

不过,微重力实验机会难得、费用昂贵等客观上制约了单次实验参数涵盖范围;重力水平因残余重力的显著跳动(g-jitter,如失重飞机重力跳动与残余重力具有相同量级,均为 $10^{-2}g_0$)而具有很大的测量不确定性。同时,如前所述,沸腾现象影响因素繁多且复杂,甚至包括诸多难以准确刻画的因素。这些都导致不同实验之间的可比性差,往往得到的只是0(微重力、无重力影响)或1(常重力、有重力影响)结果,不同实验的结果无法做统一处理以获得重力可控变化条件下的实验数据,阻碍了对沸腾传热重力标度规律的探索。

Raj等人^[13~16]利用失重飞机开展了不同重力条件下的微加热器阵列上的池沸腾实验,通过对实验数据特别是对失重飞机进、出抛物线飞行时3~5 s时段强瞬态过渡过程中的实验数据的分析,并通过国际空间站(International Space Station, ISS)上长时间微重力池沸腾实验数据的校核,提出了一个较为系统的核态池沸腾传热重力标度律(以下称为Raj-Kim-McQuillen重力标度律模型,简称为RKM模型):

$$q'' = \begin{cases} q''_0 \left(\frac{g}{g_0}\right)^{m_{\text{BDB}}} & (g \geq g_{\text{tran}}), \\ q''_0 \left(\frac{g}{g_0}\right)^{m_{\text{BDB}}} K_{\text{jump}} & (g < g_{\text{tran}}). \end{cases} \quad (12)$$

其中,临界重力加速度为

$$g_{\text{tran}} = \frac{4.41\sigma}{(\rho_L - \rho_V)L_h^2}, \quad (13)$$

与加热表面特征尺度 L_h 相关:加热表面越小,临界值越大.式(13)也可以改写为加热面的无量纲尺度形式,即 $(L_h/L_c)_{\text{tran}}=2.1$.

在较高重力时浮力主导着沸腾传热现象,称为浮力主导沸腾区(buoyancy dominated boiling regime, BDB),其中的重力标度指数可表示为

$$m_{\text{BDB}} = \frac{0.65T^*}{1+1.6T^*}, \quad (14)$$

其中,无量纲温度定义为

$$T^* = \frac{T_W - T_{\text{ONB}}}{T_{\text{CHF}} - T_{\text{ONB}}}, \quad (15)$$

下标ONB代表沸腾起始点.式(14)计算结果将从沸腾起始点处的0值单调上升到临界热流点处的1/4,满足我们关于2个极限状态的渐近假设:(1)沸腾起始点附近低过热度核态池沸腾传热趋于重力无关;(2)临界热流点附近高过热度时则倾向于遵循经典的Kutateladze-Zuber关联式,满足 $g^{1/4}$ 标度律.

在较低重力时表面张力主导沸腾,称为表面张力主导沸腾区(surface tension dominated boiling regime, SDB),其中核态池沸腾传热是重力无关的.不过,在两个区域转换时可能因为气泡突然的附壁生长导致传热恶化,引起热流密度的跳变.该跳变可以采用如下因子表示:

$$K_{\text{jump}} = 1 - e^{-C \cdot Ma}. \quad (16)$$

其中,经验常数 C 与工质相关(对于FC-72而言,

$C=8.3 \times 10^{-6}$),跳变幅度受Marangoni数控制:

$$Ma = \frac{-\sigma_T \Delta T_{\text{sub,app}} L_h}{\lambda_L \mu_L}. \quad (17)$$

式中, σ_T 为表面张力温度系数.表观过冷度定义为

$$\Delta T_{\text{sub,app}} = T_{\text{sat}@p_V} - T_{\text{bulk}}, \quad (18)$$

依赖于蒸汽分压 p_V (而非系统总压 p_t)确定的液体饱和温度与液池温度 T_{bulk} 的差值.蒸汽分压可以根据Henry定律计算:

$$p_V = p_t - p_g = p_t - \frac{c_g}{H(T_{\text{bulk}})}, \quad (19)$$

式中, p_g , c_g 和 H 分别为不凝气体分压、浓度和Henry系数.

图1给出了RKM模型的示意图.对于确定尺寸的加热器,存在一个临界重力加速度 g_{tran} .重力高过该临界值时沸腾现象处于浮力主导区,否则处于表面张力主导区;两个区域内核态池沸腾传热遵循着不同的重力标度规律. Raj等人^[16]比较了RKM模型对小尺度加热面临界热流行为的预测,发现与实验观测符合良好.因此,可以说RKM模型初步整合了目前关于核态池沸腾传热中重力作用的认知,为进一步研究提供了一个适宜基础.

3 比较与讨论

Zhang等人^[17]、Li等人^[18]以单气泡池沸腾过程作为主要研究对象,对Stephan和Hammer^[19]关于生长气泡底部三相接触线模型中的微液区计算模型进行简化,

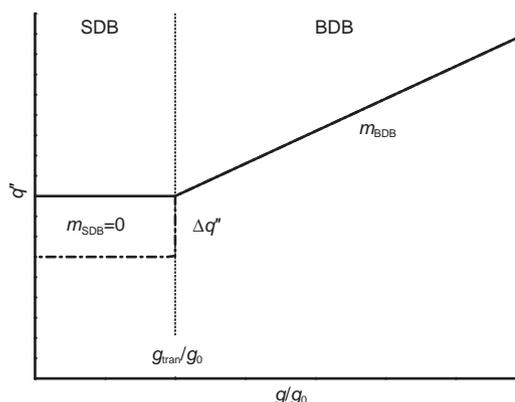


图1 核态池沸腾RKM重力标度律模型示意图
Figure 1 Schematic diagram of RKM model on gravity scaling law of nucleate pool boiling

基于Level Set方法对不同重力条件下核态池沸腾孤立气泡周围局部流动与传热进行数值模拟研究. 计算采用轴对称假设, 并考虑了加热固壁热容的影响. 为适应不同重力条件下的数值模拟要求, 计算区域半径选择为 $1L_c$. 这导致计算结果在不同重力条件下实际上对应着不同的物理尺度, 其结果原则上不能直接比较. 为此, 采用如下方式对结果做相应校正: 以计算中最低重力水平 $0.01g_0$ 对应的加热面物理尺寸为准, 将较高重力水平下的加热面半径扩大为其计算尺寸的 $10(g/g_0)^{1/2}$ 倍, 外扩出来的环状加热表面上温度、热流密度取原计算区域外缘的对应数值(计算模型已验证了外缘附近温度场的均匀性), 进而计算实际加热面在一个完整的气泡周期(生成-长大-脱落-等候)内的平均温度和平均热流密度, 结果如图2所示.

图2中, 圆圈代表加热固壁底面过热度10 K时不同重力条件下的热流密度变化情况, 其他符号则是对Zhao等人^[20]不考虑加热固壁热容效应的单气泡池沸腾结果做同样校正后加热面过热度分别为5, 10和15 K时热流密度随重力的变化情况. 可以清楚地看到: (1) 在较高重力水平时热流密度确实满足 g^m 规律变化, 但在低重力下变化趋于0, 呈现出明显的浮力主导和表面张力主导的分区特征; (2) BDB和SDB转换边界对应于 L_h/L_c 约为2.3~3.2, 与RKM模型极为相近; (3) 基于恒定过热度的重力标度指数 m 确实随着过热度增大从0.36单调增大到0.51, 定性上与RKM模型相符, 但数值明显大于RKM模型. 图中, 同为10 K过热度, 是否考虑加热固壁热容效应, 对传热性能的影响在浮力主导区域内并不明显, 但在表面张力主导区域则相当明显.

显然, RKM模型具有较强的预测性, 但同样存在着明显缺陷. 后者可能与模型自身假设(包括一些隐含假设)以及目前经验数据(包括可靠的的不同重力核态池沸腾实验结果和数值模拟结果)的不足有关.

首先, 式(15)无量纲温度的定义和Raj等人^[13-16]对实验数据的处理, 隐含了如下两个假设: (1) 核态池沸腾区间的起始温度是一个与重力无关的常数; (2) 临界热流现象发生的温度也是一个与重力无关的常数. 因此, 式(14)给出的重力标度指数 m_{BDB} 确实是基于恒定过热度的. 其次, 作者在对重力标度指数 m_{BDB} 进行经验拟合时明示的两个渐近状态假设, 也与这两个隐含假设相关, 下面将分别予以讨论.

首先, 核态池沸腾起始的异质核化理论(如Hsu^[21])确实预言了与重力无关的沸腾起始过热度. 但是, 如

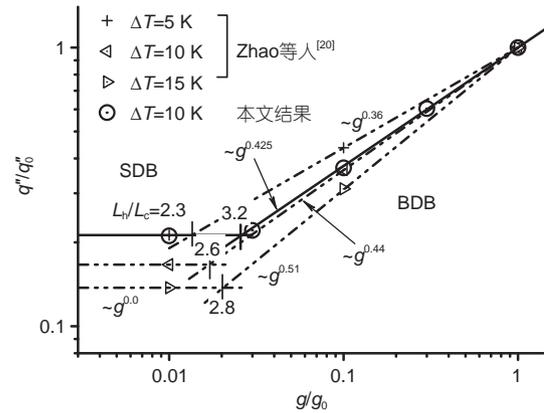


图2 不同重力条件下单气泡池沸腾传热性能的比较
Figure 2 Comparison between heat transfer performances of single bubble pool boiling in different gravity conditions

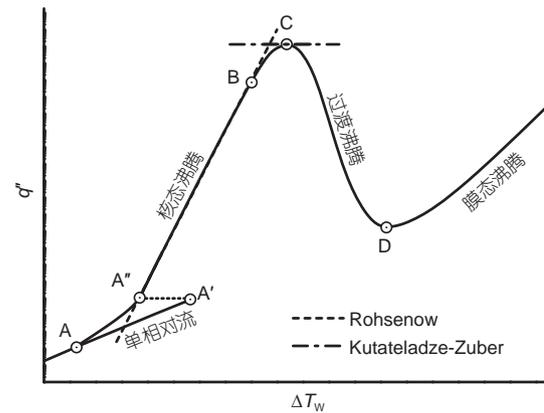


图3 典型的池沸腾传热曲线
Figure 3 Typical heat transfer curve of pool boiling

图3所示, 异质核化理论预言的“沸腾起始过热度”指的是沸腾发生前单相自然对流传热曲线终止点A'处的过热度, 并非核态池沸腾曲线起始点A对应的过热度, 绝大部分情形中二者并不一致. 为明晰起见, 以下将核态池沸腾曲线的起始点A温度称作沸腾起始温度(即RKM模型中的 T_{ONB}), 而将单相自然对流传热曲线的终止点A'对应状态用沸腾起始过热度 $\Delta T_{w,INC}$ 表示, 二者间没有直接的数量关联. 此外, 采用壁温或热流密度提升的方式来实验测定沸腾传热曲线, 往往并不能直接测到沸腾起始温度, 导致对其研究极为缺乏; 即使经典的Rohsenow关联式往往也不能很好预测临近沸腾起始点时的实际变化.

显然, 沸腾起始温度恒定的隐含假设并没有理论依据, 而且往往与经验相悖. Zhao等人^[22]、Wu等人^[23]

发现微重力条件下核态池沸腾会在更低的过热度 and 热流密度条件下提前发生, 沸腾起始温度并不恒定. 另外, 沸腾起始阶段热流密度低, 测量不确定度相对增大, 传热性能对重力的依赖性往往难以得到准确反映. 而在 Raj 等人^[13-16]实验中, 低热流密度时加热固壁热惯性的显著影响, 导致失重飞机进、出抛物线飞行瞬态过程传热性能变化路径不能保持一致, 临近沸腾起始时的可比数据无法获得, RKM模型在该区域没有经验数据可依, 其趋势不能得到直接检验. Wu 等人^[23]对低热流密度核态池沸腾的长期稳定的微重力实验研究发现, 空间微重力和地面常重力下核态池沸腾传热曲线近似处于相同位置, 呈现出了重力无关的特征. 但是, Zhao 等人^[22]报道微重力沸腾曲线显著变缓, 在核态池沸腾全参数范围内均呈现出强重力相关特征. 显然, 围绕沸腾起始区域更为深入的研究, 尤其是长时间稳定状态下的低重力实验测试, 对正确回答和模化其行为具有重要意义.

其次, RKM模型关于临界热流点附近的隐含和明示假设, 明显混淆了前述4个不同的重力标度指数的含义, 并不符合实际情况. 如前所述, 不同重力条件下临界热流对应的过热度往往并不相等. 利用核态池沸腾传热的 Rohsenow 关联式和临界热流密度的 Kutateladze-Zuber 关联式, 可以推出临界热流点对应的壁面过热度与重力加速度满足 $\Delta T_w \sim g^{1/12}$, 随重力减弱而降低. 当然, 趋近临界热流时 Rohsenow 关联式往往并不适用, 上述推论定性意味远大于定量预测. 在 Raj 等人^[13-16]实验中, 为避免加热面烧毁限制了热流密度, 使得 RKM 模型在临界热流附近缺乏经验数据的支持. Feng 等人^[24]采用 Lattice-Boltzmann 模型计算了均匀电场作用下的池沸腾现象, 发现电场作用会显著强化传热和提升临界热流, 电场对气泡的作用力类似于增强了重力; 而计算得到的传热曲线明确显示临界热流点温度随电场增强而提升. Ma 等人^[25]采用 Lattice-Boltzmann 模型计算了不同重力条件下的池沸腾现象, 发现重力减弱传热会恶化, 临界热流点温度也会随重力减弱而降低. 此外, Kutateladze-Zuber 关联式只是从数值上刻画了临界热流密度和重力的关系, 并未显含过热度参量. 当临界热流点温度不能保持恒定, 基于恒定温度的重力标度指数 m 将不能也不应该趋向于 Kutateladze-Zuber 关联式预言的临界热流的重力标度指数 $s=1/4$.

最后, Raj 等人^[13-16]基于有限的准稳态核态池沸腾实验数据归纳出来的经验关联式(10)预言的重力标度

指数的数值, 从沸腾起始点处的0单调上升到临界热流点处的1/4, 明显小于图2数值模拟的结果, 也与最为常用的 Rohsenow 关联式预言的1/2相去甚远(图4). 不过, 目前尚无足够的经验数据, 无法断言 RKM 模型在变重力情形中的适用性及其适用范围. 图4中, 为了强调 Rohsenow 关联式和 RKM 模型在趋于沸腾起始和临界热流时不能适用或缺乏数据支持, 它们在这两个区域的预言均用点线而非实线表示; 为了强调临界热流现象在不同重力条件下对应的温度并非固定不变, Kutateladze-Zuber 关联式的预言采用点划线段而不是单个点来表示; 上、下两条水平虚线表示的则是目前研究中相关重力标度指数取值范围的上、下边界. 显然, 进一步的研究不仅是相关的空间应用技术研发所迫切需要的, 而且对沸腾传热理论的发展有着极为重要的意义.

为了揭示全参数范围(尤其是低热流密度近沸腾起始点附近)的核态池沸腾传热重力标度规律, Zhao 等人^[26]最近提出了一个新的空间实验方案, 拟在建设中的中国载人空间站上, 利用变重力科学实验柜中离心机稳定旋转产生的不同模拟重力水平($0.01g_0 \sim 2g_0$), 采用同一套实验装置和相同的加热器, 系统开展稳定的不同重力条件下的核态池沸腾传热实验研究, 以期获得系统翔实的实验数据, 为构建适用性广泛的重力标度模型提供可靠的经验依据.

此外, 发展先进的池沸腾现象数值模拟方法, 包括适用于大的气、液两相物性参数差异和能够自发产生异质相变的 Lattice-Boltzmann 模型以及基于可靠的核化机制子模型、多气泡、三维连续介质沸腾模型等, 开展涵盖整个沸腾传热曲线的数值研究, 也将是该领

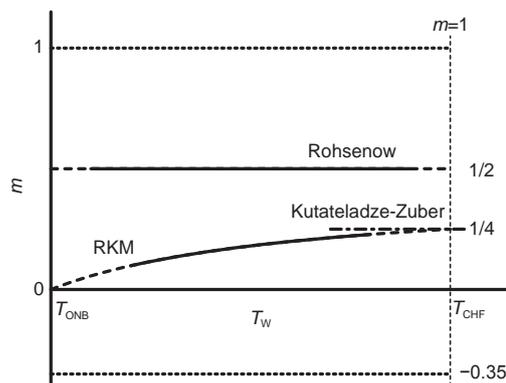


图4 核态池沸腾传热重力标度指数 m 的变化
Figure 4 Variation of the scaling exponent m for nucleate pool boiling heat transfer

域重要的发展方向之一。

4 结束语

核态池沸腾传热的重力标度规律是微重力沸腾传热研究的重要课题,对相关空间应用技术研发及地面传热设备性能提升等都有着重要意义。

本文回顾了相关研究现状和进展,首先明确定义了基于恒定过热度 ΔT_w 、基于恒定热流密度 q'' 、基于恒定无量纲热流密度 q''/q''_{CHF} 的重力标度指数 m 、 m' 和 m'' ,并强调了它们和临界热流密度的重力标度指数 s 之间的不同,以避免该领域常见的混淆和错乱。其次,回顾了关于核态池沸腾传热的重力标度律研究进展,基于经典的Rohsenow核态池沸腾传热关联式和Kutateladze-Zuber池沸腾临界热流关联式,详细论述了上述4

个不同的重力标度指数的差异,并特别介绍了基于地基短时失重飞机准稳态沸腾实验结果提出的核态池沸腾传热重力标度律的RKM模型,详细讨论了其中关于核态池沸腾曲线起、止端点(沸腾起始点和临界热流点)及其渐近性能的基本假设和隐含假设中存在的不足。通过与经验知识(包括实验观测数据和数值模拟结果)的比较,在肯定RKM模型贡献的同时,详细分析了RKM模型存在的问题及其原因,并据此建议了进一步的微(低)重力实验和深入系统的数值模拟等,揭示重力对沸腾传热的影响机制,推进核态池沸腾传热重力标度律研究的深入开展,并满足空间和地面诸多工程领域相关应用技术研发的需求。

参考文献

- 1 Straub J. Boiling heat transfer and bubble dynamics in microgravity. *Adv Heat Transf*, 2001, 35: 57-172
- 2 Zhao J F. Two-phase flow and pool boiling heat transfer in microgravity. *Int J Multiphase Flow*, 2010, 36: 135-143
- 3 Du W F, Zhao J F, Li H X, et al. Thermal dynamics of growing bubble and heat transfer in microgravity pool boiling. In: Hu W R, Kang Q, eds. *Physical Science Under Microgravity: Experiments on Board the SJ-10 Recoverable Satellite*. Beijing: Science Press & Springer, 2019. 73-99
- 4 Warriar G R, Dhir V K, Chao D F. Nucleate pool boiling experiment (NPBX) in microgravity: International space station. *Int J Heat Mass Transf*, 2015, 83: 781-798
- 5 Kutateladze S S. On the transition to film boiling under natural convection. *Kotloturbostroenie*, 1948, 3: 10-12
- 6 Zuber N. Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer. Doctor Dissertation. Los Angeles: University of California, 1959
- 7 Zhao J F, Lu Y H, Du W F, et al. Revisit on the scaling of the critical heat flux on cylinders. *Interfac Phenom Heat Transf*, 2015, 3: 69-83
- 8 Rohsenow W M. A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids. *Trans ASME*, 1952, 74: 969-976
- 9 Raj R. Development of a boiling regime map and gravity scaling parameter for pool boiling heat transfer. Doctor Dissertation. College Park: University of Maryland, 2010
- 10 Zhao J F, Wan S X, Liu G, et al. Subcooled pool boiling on thin wire in microgravity. *Acta Astronaut*, 2009, 64: 188-194
- 11 Dhir V K. Nucleate Boiling. In: Kandlikar S, Shoji M, Dhir V K, eds. *Handbook of Phase Change-Boiling and Condensation*. Taylor and Francis, 1999. 86-89
- 12 Lienhard J H, Dhir V K. Hydrodynamic prediction of peak pool-boiling heat fluxes from finite bodies. *J Heat Transf*, 1973, 95: 152-158
- 13 Raj R, Kim J, McQuillen J. Subcooled pool boiling in variable gravity environments. *J Heat Transf*, 2009, 131: 091502
- 14 Raj R, Kim J, McQuillen J. Gravity scaling parameter for pool boiling heat transfer. *J Heat Transf*, 2010, 132: 091502
- 15 Raj R, Kim J, McQuillen J. On the scaling of pool boiling heat flux with gravity and heater size. *J Heat Transf*, 2012, 134: 0115021
- 16 Raj R, Kim J, McQuillen J. Pool boiling heat transfer on the International Space Station: Experimental results and model verification. *J Heat Transf*, 2012, 134: 101504
- 17 Zhang L, Li Z D, Li K, et al. Influence of heater thermal capacity on bubble dynamics and heat transfer in nucleate pool boiling. *Appl Therm Eng*, 2015, 88: 118-126
- 18 Li Z D, Zhang L, Zhao J F, et al. Numerical simulation of bubble dynamics and heat transfer with transient thermal response of solid wall during pool boiling of FC-72. *Int J Heat Mass Transf*, 2015, 84: 409-418
- 19 Stephan P, Hammer J. A new model for nucleate boiling heat transfer. *Heat Mass Transf*, 1994, 30: 119-125
- 20 Zhao J F, Li Z D, Zhang L. Numerical simulation of single bubble pool boiling in different gravity conditions. In: Li J C, ed. *New Trends in Fluid Mechanics Research*. AIP Conf Proc, 2011, 1376: 565-568
- 21 Hsu Y Y. On the size range of active nucleation cavities on a heating surface. *J Heat Transf*, 1962, 84: 207-216
- 22 Zhao J F, Li J, Yan N, et al. Bubble behavior and heat transfer in quasi-steady pool boiling in microgravity. *Micrograv Sci Technol*, 2009, 21: S175-S183
- 23 Wu K, Zhao J F, Li H X, et al. SOBER-SJ10: Space experiment on microgravity boiling heat transfer. In: 11th Asian Microgravity Symposium-

- 2016 (AMS2016). Sapporo, Japan, October 25–29, 2016
- 24 Feng Y, Li H, Guo K, et al. Numerical study on saturated pool boiling heat transfer in presence of a uniform electric field using lattice Boltzmann method. *Int J Heat Mass Transf*, 2019, 135: 885–896
- 25 Ma X, Cheng P, Gong S, et al. Mesoscale simulations of saturated pool boiling heat transfer under microgravity conditions. *Int J Heat Mass Transf*, 2017, 114: 453–457
- 26 Zhao J F, Du W F, Li X, et al. vgBoiling: Study on gravity scaling law of pool boiling phenomena utilizing VGR of CSS. In: 26th European Low Gravity Research Association Biennial Symposium and General Assembly & 14th International Conference on Two-Phase Systems for Space and Ground Applications. Granada, Spain, September 24–27, 2019

Summary for “核态池沸腾传热现象中的重力标度规律”

Gravity scaling law of heat transfer in nucleate pool boiling

Wangfang Du^{1,2} & Jianfu Zhao^{1,2*}

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

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

* Corresponding author, E-mail: jfzhao@imech.ac.cn

Boiling phenomenon can realize high performance heat exchange due to latent heat transportation accompanying the liquid-vapor phase change, resulting in its wide applications for high heat flux transfer both in normal gravity on the ground and in space microgravity environment. It is well known that gravity strongly affects boiling phenomenon by creating forces in the systems that drive motions, shape boundaries, and compress fluids. The study of the influence of gravity on boiling heat transfer is of great significance for relevant space applications. Our current knowledge on boiling phenomenon, however, is often composed of a great amount of empirical correlations and semi-mechanistic models for engineering applications, which are mainly depended upon empirical data obtained from elaborately designed experiments on the ground. Although many empirical correlations and semi-mechanistic models include gravity as a parameter, they usually fail when extended beyond the empirical range they were based on. Microgravity experiment offers a unique opportunity to study the complex interactions in boiling phenomenon without gravity, and thus to reveal the mechanism of gravity, or gravity scaling law, underlying boiling phenomenon by comparing microgravity experimental data with those obtained in normal gravity. Review of the up-to-date progress on gravity scaling law of nucleate pool boiling heat transfer is made in the present paper, especially focusing on the RKM (Raj-Kim-McQuillen) gravity scaling law which presents a unified framework for scaling behaviours of nucleate pool boiling heat transfer relevant to gravity based on the quasi-steady state, ground-based short-term reduced gravity experimental results acquired during transition periods of approximately 3–5 s when the acceleration varied continuously from hypergravity to low- g , or *vice versa*, in parabolic flights. The gravity scaling parameter for heat flux was updated based on high quality microgravity data aboard ISS (the International Space Station), and its robustness in predicting low gravity heat transfer is further demonstrated by predicting many of the trends in the pool boiling literature that cannot be explained by any single model. There are, however, some deficiencies and/or unsolved problems in the RKM gravity scaling law. The definition of the dimensionless temperature involves the temperatures of the boiling incipency and of the CHF (critical heat flux). It was implicitly assumed that these two characteristic temperatures are constants in different gravity conditions. These assumptions, however, have no theoretical or empirical basis in fact. Moreover, recent numerical studies utilizing the lattice Boltzmann method, as well as some experimental evidences, showed that the temperature of CHF increases with the gravity level. Furthermore, the hypotheses on the asymptotic behaviours near the boiling incipency and the critical heat flux confused the meaning of different gravity scaling parameters, which are defined clearly in the present paper. An important reason for the deficiencies of the RKM gravity scaling law is the lack of empirical data, especially experimental results in long-term, steady state pool boiling in different levels of reduced gravity. Thus, a variable gravity pool boiling experiment project utilizing CSS (the Chinese Manned Space Station) under construction, as well as systematic numerical simulations, are suggested in order to promote the research in this field.

nucleate pool boiling, gravity effect, gravity scaling law, incipency of nucleate boiling, critical heat flux, microgravity

doi: 10.1360/TB-2019-0337