

YUE Shuwen, DU Wangfang, LI Kai, ZHAO Jianfu. Gravity independence analysis based on bubble departure in flow boiling (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2020, 40(3): 376-381. DOI:10.11728/cjss2020.03.376

基于流动沸腾气泡脱落行为的重力无关性分析*

乐述文 杜王芳 李凯 赵建福

(中国科学院力学研究所 微重力重点实验室 北京 100190)

(中国科学院大学工程科学学院 北京 100049)

摘要 在流动沸腾现象中, 气液两相密度差异导致重力对流动和传热性能产生很大影响, 因此重力效应研究对于流动沸腾的航天应用具有重要意义. 在对 Bower-Klausner-Sathyanarayan 重力无关准则 (BKS 准则) 分析的基础上, 提出其判据存在理论缺陷, 不能正确反映重力效应. 采用与 BKS 准则相同的气泡脱落模型, 但忽略气泡沿加热管壁的滑动效应, 重新计算常重力条件下不同流动方向起始沸腾阶段单气泡的脱落尺寸, 归纳得到一个新的基于 Fr (Froude 数) 的重力无关准则. 该准则与实验结果符合更好, 且与主导作用力准则基本相符.

关键词 重力无关准则, 气泡脱落, Froude 数, 流动沸腾

中图分类号 V 524, TK 124

Gravity Independence Analysis Based on Bubble Departure in Flow Boiling

YUE Shuwen DU Wangfang LI Kai ZHAO Jianfu

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

(School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The density difference between gas and liquid phases in the flow boiling phenomenon leads to the important influence of gravity on the flow and heat transfer performance. Therefore, the study of gravity effect is of great significance for the space application of flow boiling. The Bower-Klausner-Sathyanarayan gravity independent criterion, *i.e.* BKS criterion, is revisited. It is pointed out that BKS criterion has congenital defect in theory and cannot reflect the gravity effect correctly. Using the same departure model of growing vapor bubble in flow boiling as adopted in BKS criterion, but neglecting the sliding effect of bubble along the heating wall, the departure diameters of single bubble in the initial segment after the boiling incipience under different flow directions in normal gravity are calculated. A new gravity independent criterion based on Froude number is concluded, which is in better agreement with the experimental results. The new criterion is in principle consistent with the dominant force criterion.

Key words Gravity independent criterion, Bubble departure, Froude number, Flow boiling

* 国家自然科学基金项目资助 (11802314, 11972040)

2020-04-15 收到原稿, 2020-04-22 收到修定稿

E-mail: leshuwen@imech.ac.cn. 通信作者 杜王芳, E-mail: duwangfang@imech.ac.cn

0 引言

流动沸腾是一种常见的气液两相流现象, 因液气相变潜热的释放而具有良好的传热性能, 在工程领域得到了广泛应用. 当液体流经热管道时, 在加热壁面的核化点上生成气泡, 继而发生气泡生长、滑移、脱落、聚并、破碎与冷凝等复杂行为. 气泡这些行为受管道结构与安装方位、工质物性与流速、温度、重力等多方面因素影响, 并决定着整个换热系统的换热效率和安全性能. 由于气液两相介质具有很大的密度差异, 重力会引起显著的浮力效应 (相间滑移和分层等). 航天器在其生命周期里会经历常重力 (地面检测)、超重力 (发射过载)、微重力 (轨道自由飞行)、低重力 (月球或火星表面探测) 等复杂重力环境, 重力效应研究对相关应用十分重要. 如果所设计系统能够实现重力无关, 地面性能测试结果将可直接用于全历程性能预测和运控需要, 对流动沸腾装置的空间应用具有重要参考价值.

气液两相流重力无关性研究是微重力科学研究的前沿之一, 目前已提出了多个模型或准则. Du 等^[1,2] 根据该领域最新研究进展, 将现有重力无关模型/准则分为三种类型, 并建议了进一步的研究方向. 其中 Bower 等^[3] 建议采用无量纲参数 $Ja = \frac{\rho_l c_{pl} \Delta T_{sat}}{\rho_v h_{lv}}$ 和 $\Psi = \frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_v} \frac{\mu_l U_1}{\sigma}$ 描述重力相关区与重力无关区间的边界条件 (Bower-Klausner-Sathyanarayan 重力无关准则, 简称 BKS 准则), 即

$$Ja = 21.975 \ln(\Psi) + 82.748. \quad (1)$$

其中: ρ_l , μ_l , c_{pl} 分别代表液相的密度、动力黏性系数和定压比热; ρ_v , h_{lv} , σ , ΔT_{sat} 和 U_1 分别代表气相密度、气液相变潜热、表面张力系数、壁面过热度 and 液相平均流速. 由于流动沸腾现象中气相密度通常远小于液相密度, 无量纲参数 Ψ 和毛细数 $Ca = \mu_l U_1 / \sigma$ 可以视为等同, 描述的是黏性力与表面张力间的相对强弱; Ja 代表外部加热作用相对于液气相变传热能力的强弱程度. 式 (1) 不包含能够描述重力效应的变量, 因而无法很好地表征重力无关条件. Bower 和 Klausner^[4] 对式 (1) 预测的结果与地面不同安装方位流动沸腾实验结果进行比较, 发现预测边界明显偏离实验观测到的重力相关/无关区域边界, 大量重力无关数据被错分在重力相关区. 作者认为其研究结果表明式 (1) 偏于保守 (即由此预测的重力无关性

更严格), 能更好地适应航天工程应用中高可靠性的要求. 然而这种解释过于牵强.

本文采用与 BKS 准则一样的气泡脱落模型, 重新计算不同流道方位等条件下生长气泡的脱落直径, 并依据脱落直径变化能否忽略, 进一步讨论流动沸腾的重力无关条件, 尝试给出具有明确物理意义的重力无关准则.

1 气泡脱落模型

流动沸腾现象 (尤其是中低热流条件下沸腾起始阶段) 中, 加热管壁上生成的气泡从管壁脱落时的尺寸 (气泡脱落直径) 是表征气液两相流动和传热特性的重要参数之一. 图 1 给出了流道安装方位角为 φ 时单个气泡的生长与脱落特征, 可以看出, 不同安装方位导致重力对气泡的作用也不同, 其中水平和垂直管道是两种极端情况, 气泡脱落直径的差异可作为重力相关性的有效判据.

本文采用与 Bower 等^[3] 相同的气泡脱落模型, 即由 Klausner 等^[5]、Zeng 等^[6] 和 Thorncroft 等^[7] 提出并完善的计算流动沸腾起始区单个气泡滑移直径 (离开生成位置沿加热面滑动的最小尺寸) 与脱落直径 (离开加热面的最小尺寸) 的气泡受力模型. 与 Bower 等^[3] 同时考虑气泡脱落和滑移行为不同, 这里只考虑气泡的脱落而忽略其在管壁上的滑移. 这是因为 Roy 等^[8] 对加热壁面上生长气泡周围温度场的数值模拟研究结果表明, 忽略气泡滑移会给出更接近实验观测的模拟结果. Chen^[9]、Gungor 等^[10]、Kandlikar^[11] 及 Thome 等^[12] 忽略气泡滑移机制所得结果也都与实验数据吻合良好. 此外, 不考虑滑移使求解更为简便, 且预测结果对气泡倾斜角 θ 的敏感度降低, 在低流速情形下求解不易失真, 能更好地描述单气泡脱落特征.

忽略加热管壁上气泡形成与生长对流动内液相流动的影响, 只考虑气泡受周围液体的作用, 即只考

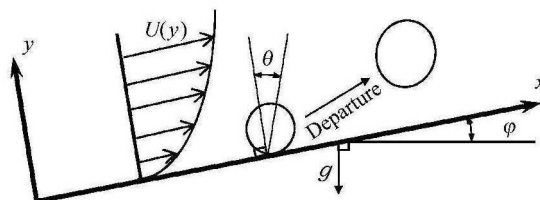


图 1 流动沸腾中气泡脱落行为

Fig. 1 Bubble departure from the wall in flow boiling

虑单向耦合作用. 这仅在流动沸腾起始阶段气泡数目较少时才成立.

从加热面上脱落时, 气泡与管壁间的接触压力为零, 加热面法线方向气泡受力平衡关系可表示为

$$F_b \cos \varphi + F_{s_y} + F_{s_l} + F_g \cos \theta = 0. \quad (2)$$

其中: F_b 为气泡受到的浮力; F_{s_y} 为气泡底部液-气-固三相接触线处表面张力在加热面法线方向的分量; F_{s_l} 为液相对气泡施加的沿加热面法线方向的剪切升力; F_g 为气泡生长导致的附加质量力, 是气泡加速长大对周围液体排挤引起的反作用力, 其方向沿气泡轴线指向加热面, 与加热面法线方向夹角为 θ .

式 (2) 中, 气泡受到的浮力可表示为

$$F_b = (\rho_l - \rho_v)gV_b. \quad (3)$$

其中, 气泡体积 $V_b = \frac{4\pi r^3}{3} - \frac{\pi h^2}{3}(3r - h)$. 这里忽略气泡底部微液膜的影响, 假设气泡形状为截球, $h = r(1 - \cos \alpha_m)$ 为截球的截除高度, r 为球面半径. 气泡与加热面间的平均接触角 $\alpha_m = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$, 这里 α_1 和 α_2 分别表示前进和后退接触角.

表面张力法向分量可表示为

$$F_{s_y} = d_w \sigma \frac{\pi}{\alpha_1 - \alpha_2} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (4)$$

其中 d_w 为气泡底部的接触直径. Yun 等 [13] 假设 $d_w = \frac{1}{15}d_b$, 其随气泡的生长而增大. 不过 Lebon 等 [14] 实验观察到气泡脱落前 d_w 并未随气泡生长而增加, 而是在一个较小的范围内变化. 这里采用 Klausner 等 [5] 的做法, 取 $d_w = 0.09 \text{ mm}$.

剪切升力可表示为

$$F_{s_l} = \frac{1}{2}\pi\rho_l r^2 |U - u| (U - u) \Gamma^{1/2} \left\{ \left[\frac{1.146 J(\varepsilon)}{Re_b^{1/2}} \right]^2 + \left(\frac{3}{4} \Gamma^{1/2} \right)^2 \right\}^{1/2}. \quad (5)$$

式中: U 和 u 分别表示气泡质心处液体和气泡自身的轴向速度分量; r 为气泡半径; 速度剪切率 $\Gamma = \frac{r}{|U - u|} \frac{\partial U}{\partial y}$; 气泡 Reynolds 数 $Re_b = 2r|U - u|/v_l$, 其中 v_l 为液相运动黏性系数; 气泡半径 r 采用 Zuber 模型 [15] 表示, 即

$$r(t) = \frac{2b}{\sqrt{\pi}} Ja \sqrt{\eta t}. \quad (6)$$

其中, η_l 代表液相热扩散系数, b 为与气泡对球状偏离程度相关的经验常数, Zeng 等 [6] 建议 b 取值为 0.9. $J(\varepsilon)$ 为关于参数 $\varepsilon = \sqrt{2\Gamma}/Re_b$ 的分段函数, 有

$$J(\varepsilon) = \begin{cases} 0.6765[1 + \tanh(2.51g\varepsilon + 0.191)] \cdot \\ \{0.667 + \tanh[6(\varepsilon - 0.32)]\}, & \varepsilon \leq 1000; \\ 2.255, & \varepsilon > 1000. \end{cases} \quad (7)$$

在液相处于充分发展的湍流状态假设下, 近壁区液相速度 U 可用 Reichardt 模型 [16] 描述, 即

$$\frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(1 + \kappa \frac{y u_\tau}{v_l} \right) + C \left[1 - \exp \left(- \frac{y u_\tau / v_l}{\chi} \right) - \frac{y u_\tau / v_l}{\chi} \exp \left(- 0.33 \frac{y u_\tau}{v_l} \right) \right]. \quad (8)$$

其中, $\kappa = 0.4$, $\chi = 11$, $C = 7.4$, 壁面摩擦速度 $u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho_l} = U_1 \sqrt{c_f / 2}$, c_f 为光滑圆管湍流的局部摩擦系数 (依赖于液相 Re , $Re = UD/v_l$, D 表示管道直径), 气泡质心纵向坐标 $y = r - h$, 气泡质心速度的轴向分量 $u = \dot{r} \sin \theta$, \dot{r} 为气泡半径对时间的一阶导数.

因此, 气泡生长引起的附加质量力可表示为

$$F_g = \pi \rho_l r^2 \left(2\ddot{r} + \frac{2}{3} r \ddot{r} \right). \quad (9)$$

其中, 气泡半径对时间的二阶导数 \ddot{r} 表征气泡对周围液体的加速排斥. 附加质量力的方向沿气泡轴线方向指向加热面.

利用式 (2) 可以计算给定工况参数时无滑移单气泡的脱落尺寸. 特别地, 如果给定液相速度恒为 0, 上述模型回归为池沸腾情形. 对于水的池沸腾现象, 该模型预测的气泡脱落直径 $d_b = 2.17 \text{ mm}$, 与 Fritz 公式 [17,18] 预测结果及实验观测一致, 这证明了模型预测的可靠性.

2 结果与讨论

在地面常重力环境下, 浮力对流动沸腾中气泡脱落行为的影响程度与流道倾角 φ 有直接关系. 垂直向上流动 ($\varphi = \pi/2$) 和水平流动底部加热面 ($\varphi = 0$) 两种情形中的气泡脱落可以看作两个极端, 根据其气泡脱落尺寸差异可以判断流动是否重力无关. 根据模型预测与实验数据的比较, 这里将除流道倾角外其他参数相同的两个极端情形中气泡脱落尺寸差异不大

于 1% 时的工况视为重力无关; 反之则为重力相关。

流动沸腾现象中, 影响气泡脱落直径的因素较多。分析表明, 除工质物性外, 主要的影响参数包括 Re , Ja , We , Bo 和 Fr , 其中 $We = \rho_l U^2 D / \sigma$, $Bo = (\rho_l - \rho_v) g D^2 / \sigma$, $Fr = \rho_l U^2 / [(\rho_l - \rho_v) g D]$, 这里 D 为流道直径。这些参数并非是完全和相互独立的, 例如 $Fr = We / Bo$, 因此需要进一步研究描述重力无关准则的适宜参数。

考虑到上述模型建立过程中相关假设条件的约束, Re 不宜过低, 这里取 $Re \geq 5000$, 保证液相处于充分发展的湍流状态; Ja 不宜过大, 这里取 $Ja \leq 30$, 保证壁面加热不致过于剧烈而导致气泡生长过大或出现多气泡现象, 使气泡对液相流动的影响不能忽略。此外, 由于缺乏实测数据, 将前进接触角与后退接触角统一按 R113 实测结果取值, 即 $\alpha_1 = 23.2^\circ$ 和 $\alpha_2 = 8.4^\circ$ ^[3]; 相应地, 平均接触角 $\alpha_m = 15.8^\circ$ 。由于气泡脱落直径对气泡脱落时其轴线与加热面法线的夹角并不敏感^[3], 这里采用 Klausner 等^[5] 的建议, 近似取 $\theta = 45^\circ$ 。

图 2 给出了 R113 在 $Re = 40000$ 和 $Ja = 8$ 时的计算结果。由于 BKS 模型中 Ψ 不能描述重力效应, 将计算结果以 We 和 Bo 为坐标轴给出, 可以看到, 重力无关区域随流速增大而扩大, 其与重力相关区之间的边界呈直线状, 对应于恒定的 Fr 。这表明 Fr 可用来表征重力效应的强弱, 该边界线对应的临界 Fr 可用来表述重力无关条件。

由于 Fr 代表惯性力与浮力之比, Fr 越大, 惯性

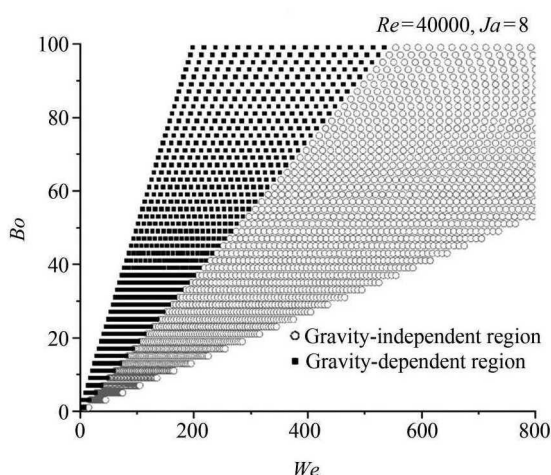


图 2 R113 流动沸腾重力效应分区

Fig. 2 Gravity-dependency of R113 flow boiling

力相对于浮力则越强, 对系统流动与传热性能的影响也越强, 甚至主导系统特性。因此, 图 2 中计算结果与主导力分区模型的结论是一致的^[1,2]。Zhao 等^[19] 主要基于双组分气液两相流型实验数据, 归纳得到以气相介质参数表征惯性力作用的准则; Baba 等^[20] 以小管道流动沸腾传热特性为依据, 归纳得到以气液混合参数表征惯性力作用的准则。准则中的表达式依赖于实验参数的直接可测性 (双组分气液两相流可以准确测量各相介质的流量, 而流动沸腾通常测量的是总质量流量)。如前所述, 本文基本假设针对的是流动沸腾起始现象, 气相对流动的影响可忽略, 惯性力的描述只依赖于液相参数。尽管在沸腾起始段气相含量趋于 0, 这里的表述本质上等价于 Baba 等的^[20], 但所得临界 Fr 比 Baba 等^[20] 的略大。

图 3 分别显示了 4 种常用制冷剂 (R113, R134a, R12, R22) 在不同 Ja , Re 和 Bo 条件下临界 Fr 的变化。从图 3 可以看出: Bo 对临界 Fr 几乎没有影响; 工质和 Re 相同时, Ja 对临界 Fr 的影响在 $Ja \leq 8$ 时也可以忽略 ($Re = 40000$ 时的变化不超过 10%), 即低 Ja 时壁面过热状态对重力依赖特性影响不大; Re 对临界 Fr 的影响不能忽略, Re 较小时临界 Fr 明显增大; 物性参数对临界 Fr 具有一定影响。

图 4 给出了 $Ja = 4$ 时 4 种常用制冷剂临界 Fr 随 Re 的变化, 更清楚地反映了物性参数和 Re 的影响, 其中物性参数影响可以表征为 $Fr \propto Pr^{-0.36}$,

因此图 4 采用 $Fr Pr^{0.36}$ 作为纵坐标, 使得不同制冷剂的曲线重合到一条曲线上。另外, Re 的影响在其较低时变化更为剧烈, 当 Re 不是太低时, 临界 Fr 变化趋缓, 可近似视为不变。

图 5 以 R113 为例给出了临界 Fr 与 Ja 和 Re 的关系, 除了低 Re 、高 Ja 区域, 临界 Fr 的变化趋缓。因此, 在相当大的区域里可以近似采用恒定的临界 Fr 来区分流动的重力相关或无关性, 例如对于 R113, 临界 Fr 约为 2。

图 6 比较了本文计算结果与利用原始 BKS 模型^[3,4] 对 10mm 圆管内 R113 流动沸腾现象中重力无关区与重力相关区之间边界的预测结果。清楚起见, 这里采用 BKS 模型参数 (无量纲参数 Ψ 和 Ja) 作为坐标轴。从图 6 中可以清楚看出, $Ja < 10$ 时, 本文预测的边界线与 Ja 无关, 但 BKS 模型^[3,4] 却表现出显著变化; Ja 更高时, 本文预测要求更高的临界

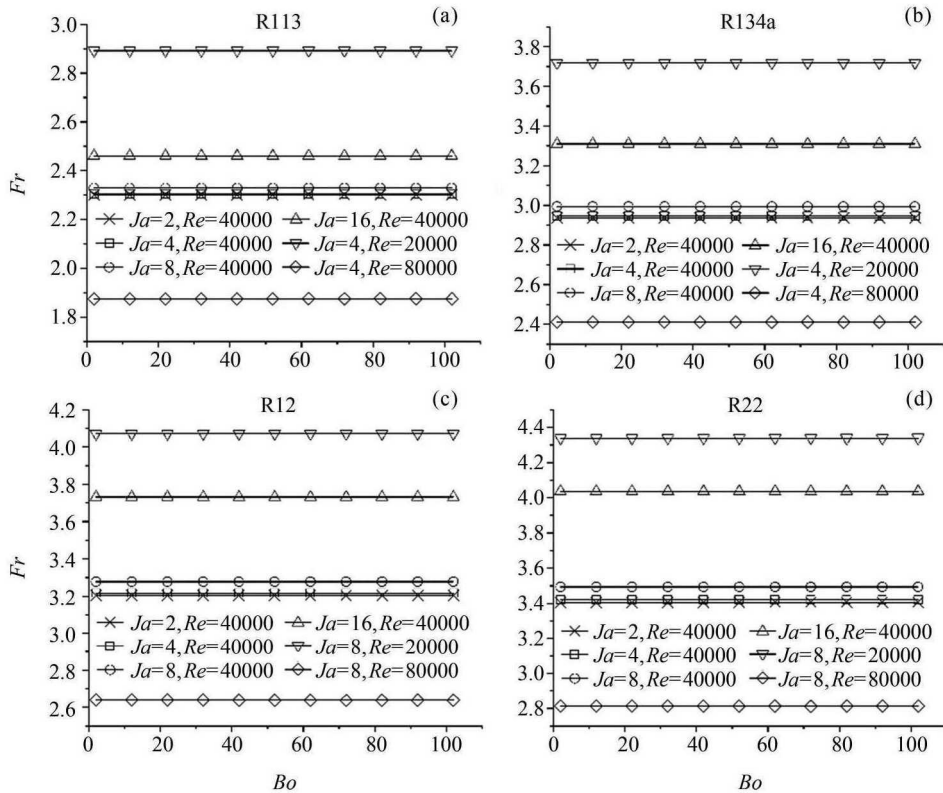


图 3 不同工质临界 Fr 的变化

Fig. 3 Variations of the critical value of Froude number for different fluids

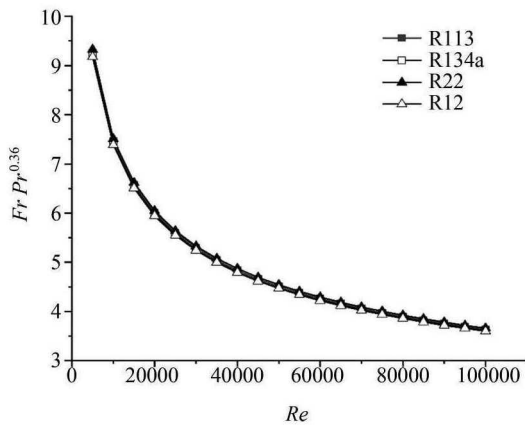


图 4 $Ja = 4$ 时不同工质临界 Fr 的变化

Fig. 4 Variations of the critical value of Froude number for different fluids at $Ja = 4$

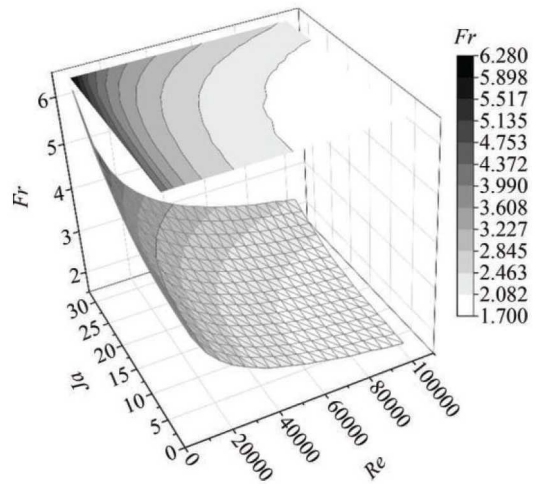


图 5 R113 临界 Fr 曲面

Fig. 5 Surface of the critical Froude number of R113

Fr (相应会有更大的 Ψ 值), 与实验观测到的边界变化趋势符合较好, 而 BKS 模型 [3,4] 却将几乎全部实验数据都划归至重力相关区, 明显偏离实验结果。

这表明本文模型有更强的预测能力, 可用于指导地面模拟微重力流动沸腾实验的设计, 并为航天应用中相关系统研发提供参考。

3 结论

根据已有气液两相流重力无关性研究结果, 分析提出 BKS 模型在原理上存在不足, 采用与其相同的气泡脱落模型, 针对流动沸腾起始阶段不计滑移效应

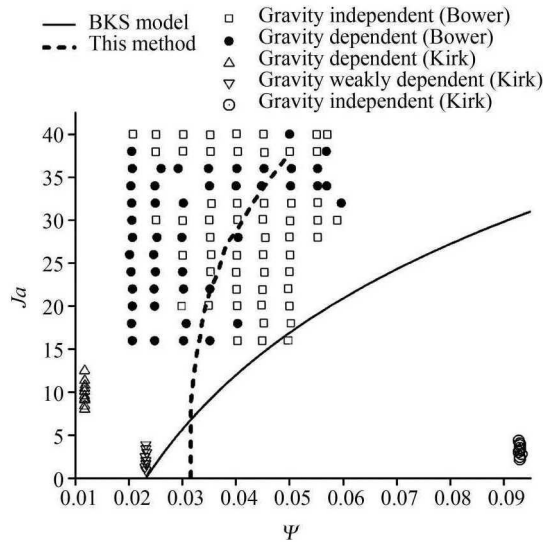


图6 本文模型与BKS模型和实验数据的比较

Fig. 6 Comparison of the present work with BKS model and the experimental data

的气泡脱落过程, 计算了4种常用制冷剂工质在地面常重力环境下水平和垂直流道中气泡脱落直径的差异, 分析了重力无关性准则的适宜表述形式, 主要结论如下. (1) 流动沸腾现象中, 重力无关区与重力相关区之间的边界可以采用临界 Fr 来表述. (2) 临界 Fr 主要依赖于 Re 与 Ja , 前者表示入口流动条件, 后者则代表管内加热条件. (3) 壁面过热度不是很高 ($Ja \leq 8$) 时, 过热度的影响可以忽略不计. (4) 临界 Fr 随 Re 递减, 中高 Re 时变化趋缓, 可以用常数近似.

参考文献

- [1] DU Wangfang, ZHAO Jianfu, LI Kai. Criteria for dominated force regime map in multiphase thermal fluid system [J]. *J. Hebei Univ. Water Res. Elec. Eng.*, 2018, 1: 1-5, 12
- [2] DU Wangfang, YUE Shuwen, ZHAO Jianfu, et al. Criterion of gravity independence in multiphase thermal fluid system [J]. *J. Hebei Univ. Water Res. Elec. Eng.*, 2019, 2: 1-7
- [3] BOWER J S, KLAUSNER J F, SATHYANARAYAN S. High heat flux, gravity independent, two-phase heat exchangers for spacecraft thermal management [J]. *SAE J. Aerosp.*, 2002, 24(4): 695-712
- [4] BOWER J S, KLAUSNER J F. Gravity independent subcooled flow boiling heat transfer regime [J]. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2006, 31(2): 141-149
- [5] KLAUSNER J F, MEI R, BERNHARD D M, et al. Vapor bubble departure in forced convection boiling [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1993, 36(3): 651-662
- [6] ZENG L Z, KLAUSNER J F, BERNHARD D M, et al. A unified model for the prediction of bubble detachment diameters in boiling systems-II. Flow boiling [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1993, 36(9): 2261-2270
- [7] THORNCROFT G E, KLAUSNER J F, MEI R. Bubble forces and detachment models [J]. *Multiphase Sci. Tech.*, 2001, 13(3-4): 35-76
- [8] ROY C, VENUVANALINGAM P, KLAUSNER J F, et al. On the mechanism of bubble induced forced convective heat transfer enhancement [J]. *Front. Heat Mass Transfer*, 2018, 11(1): 1-12
- [9] CHEN J C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow [J]. *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, 1966, 5(3): 322-329
- [10] GUNGOR K E, WINTERTON R H S. A general correlation for flow boiling in tubes and annuli [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1986, 29(3): 351-358
- [11] KANDLIKAR S G. A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes [J]. *J. Heat Transfer*, 1990, 112(1): 219-228
- [12] THOME J R, DUPONT V, JACOBI A M. Heat transfer model for evaporation in microchannels, part I: presentation of the model [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2004, 47(14-16): 3375-3385
- [13] YUN B J, SPLAWSKI A, LO S, et al. Prediction of a subcooled boiling flow with advanced two-phase flow models [J]. *Nucl. Eng. Des.*, 2012, 253: 351-359
- [14] LEBON M, SEBILLEAU J, COLIN C. Dynamics of growth and detachment of an isolated bubble on an inclined surface [J]. *Phys. Rev. Fluids*, 2018, 3(7): 073602
- [15] REICHARDT H, MUNZNER H. Rotationally symmetric source-sink bodies with predominantly constant pressure distributions [J]. *Arm. Res. Est. Trans*, 1950, 50(1): 1-7
- [16] ZUBER N. The dynamics of vapor bubbles in nonuniform temperature fields [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1961, 2(1-2): 83-98
- [17] FRITZ W. The calculation of the maximum volume of steam bladders [J]. *Phys. Zeitschr.*, 1935, 36: 379-384
- [18] FRITZ W, ENDE W. The evaporation procedure after cinematographic absorption on steam bubbles [J]. *Physik. Zeitschr.*, 1936, 37: 391-401
- [19] ZHAO J F, XIE J C, LIN H, et al. Experimental study of two-phase flow in microgravity [A]//Proc. 51st International Astronautical Congress [C]//Rio de Janeiro, Brazil: IAF, 2000
- [20] BABA S, SAKAI T, SAWADA K, et al. 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