

过冷流动沸腾汽泡浮升直径的理论研究

肖仁杰, 闫 晓, 詹元锋

(中国核动力研究设计院 中核核反应堆热工水力技术重点实验室, 四川 成都 610213)

摘要: 汽泡浮升直径模型已成为两相流领域理论分析与数值计算方法的重要子模型。为研究各力对汽泡浮升的影响规律, 本文理论推导了过冷流动沸腾汽泡的受力方程, 建立了预测汽泡浮升直径的无量纲模型, 并与实验数据进行了对比验证, 分析了汽泡浮升直径随各无量纲数的变化规律。结果表明, 无量纲模型能准确预测水与 R113 工质中汽泡的浮升直径; 浮升直径随 Ja 的增加而升高, 随 Re 、 Ca 、 Pr 与 Ar 的增加而降低; 结合无量纲数的定义, 可认为生长力与表面张力抑制了汽泡的浮升效应, 导致浮升直径升高; 剪切升力与浮升力促进了汽泡的浮升效应, 导致浮升直径降低。

关键词: 过冷流动沸腾; 汽泡浮升直径; 受力分析; 无量纲模型; 理论研究

中图分类号: TL33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2017)11-1949-06

doi: 10. 7538/yzk. 2017. youxian. 0125

Theoretical Analysis of Bubble Lift-off Diameter in Subcooled Flow Boiling

XIAO Ren-jie, YAN Xiao, ZAN Yuan-feng

(CNNC Key Laboratory on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics Technology,
Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: Bubble lift-off diameter model is one of the most important sub-models in the field of two-phase flow and numerical computation method. In order to study the influence of different forces on bubble lift-off, theoretical analysis was carried out about the force equation of a single bubble in subcooled flow boiling, which proposed a dimensionless model for the prediction of bubble lift-off diameter. The comparison between predictions and experimental data, which involved water and R113, was made and the changing rule of bubble lift-off diameter as dimensionless numbers was analyzed. The results show that the predicted lift-off diameters agree well with the experimental values of water and R113. Bubble lift-off diameter increases with Ja and decreases with the increase of Re , Ca , Pr and Ar . Combined with the definition of dimensionless numbers, it is concluded that the growth force and the surface tension force restrain bubble from departing the wall, which results in a larger lift-off diameter. The shear lift force and the buoyance force promote bubble to depart, causing the decrease of lift-off diameter.

Key words: subcooled flow boiling; bubble lift-off diameter; force analysis; dimensionless model; theoretical analysis

随着沸腾传热与气(汽)液两相流动在核能、航天、石油、化工等领域的广泛应用,微观沸腾过程越来越受到科研和工业领域的重视。沸腾过程伴随汽泡的核化、生长、脱离与浮升等行为,干扰流动边界层和热边界层,进而影响传热^[1]。脱离表示汽泡在核化点生长到一定尺寸后,离开核化点的行为;浮升表示汽泡离开加热壁面进入液体的行为。汽泡脱离直径与汽泡浮升直径分别定量描述脱离与浮升效应发生时汽泡的尺寸,已成为部分沸腾传热研究的重要子模型。

汽泡脱离直径与浮升直径的研究始于1935年,Fritz^[2]根据汽泡受力分析,通过浮升力与表面张力的平衡方程推导得到汽泡脱离直径。已有的研究主要集中于实验数据拟合与汽泡受力分析,Klausner等^[3]、Zeng等^[4]、Al-Hayes等^[5]、Xu等^[6]通过加热壁面汽泡受力方程得到了汽泡脱离直径与浮升直径模型,Hamzekhani等^[7]提出利用表征汽泡受力的无量纲数组成的无量纲方程来预测汽泡的浮升直径。本文拟从基本汽泡受力方程出发,针对各力的关键因素进行理论推导,构建表征汽泡受力的无量纲数,尝试建立适用于过冷流动沸腾工况汽泡浮升直径的无量纲模型,并与公开发表文献中的实验数据进行对比以验证无量纲模型的可靠性。

1 理论分析

过冷流动沸腾过程中,汽泡在加热壁面生长时的受力示意图如图1所示,汽泡沿 x 方向(平行壁面)与 y 方向(垂直壁面)的受力方程分别为:

$$\sum F_x = F_{qs} + F_{sx} + F_{bx} + F_{dux} \quad (1)$$

$$\sum F_y = F_{sl} + F_{sy} + F_{by} + F_{duy} + F_h + F_{cp} \quad (2)$$

式中: F_{qs} 为流动液体对汽泡施加的曳力; F_s 为维持汽泡稳定状态的表面张力; F_b 为两相密度差引起的浮升力; F_{du} 为汽泡非均匀生长带来的生长力; F_{sl} 为流体速度梯度引起的剪切升力;

F_h 为汽泡接触面顶部压力带来的水动压力; F_{cp} 为汽泡内外压差引起的接触压力。

Yun等^[8]通过实验得到汽泡直径与接触直径之比接近60,即 $D_b/d_w=60$,因此,仅含 d_w 的水动压力、接触压力与含 D_b 的曳力、浮升力、生长力、剪切升力相比,为小量;虽然表面张力不含 D_b ,但是Zeng等^[9]的研究表明,与表面张力相比,水动压力、接触压力均可忽略。因此,本文在后续理论推导中,忽略水动压力与接触压力的作用。

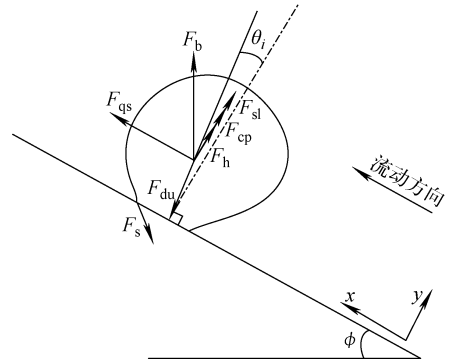


图1 流动沸腾汽泡受力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of force acting on bubble in flow boiling

理论研究^[3-6]认为,汽泡脱离的临界条件是 $\sum F_x$ 恰好不等于0,汽泡浮升的临界条件是 $\sum F_y$ 恰好不等于0,因此,分别求解临界方程 $\sum F_x = 0$ 和 $\sum F_y = 0$ 即可获得汽泡的脱离直径与浮升直径。

1.1 汽泡生长力的无量纲化

已有研究^[3,10]认为,生长力是汽泡附加虚拟质量受到的非稳定曳力,Chen等^[10]提出的附加虚拟质量模型为:

$$m_v = \rho_l V_v = \rho_l \frac{11}{12} \pi R_b^3 \quad (3)$$

式中: m_v 为生长汽泡质量,kg; ρ_l 为液相密度,kg/m³; V_v 为生长汽泡体积,m³; R_b 为汽泡半径,m。

汽泡生长方向 θ_i 的动量定理可写为:

$$F_{du} = \frac{d(m_v U_i)}{dt} \quad (4)$$

式中, U_i 为汽泡沿生长方向速度, m/s。

汽泡沿生长方向速度 U_i 的大小为 $2dR_b/dt$, 进而整理得到生长力表达式为:

$$F_{du} = \rho_l \pi R_b^2 \left(\frac{11}{2} \dot{R}_b^2 + \frac{11}{6} R_b \dot{R}_b \right) \quad (5)$$

对表征汽泡生长速度的汽泡生长率模型 $R_b(t) = f(t)$ 进行推导如下。

由质量守恒可知, 单位时间内汽泡质量的变化量等于汽-液界面蒸发产生的质量, 可表示为:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi R_b^3 \rho_g \right) = 4 \pi R_b^2 m_{lg} \quad (6)$$

式中: ρ_g 为汽相密度, kg/m^3 ; m_{lg} 为蒸发质量流率, 满足式(7)所示能量守恒方程。式(7)的物理含义是单位时间、单位质量的液体自汽泡界面外部输运进汽泡内部时, 其能量的增加量等于汽泡界面处的热流密度。

$$m_{lg} (h_{in} - h_{out}) = q_{lg} \quad (7)$$

式中: h_{in} 、 h_{out} 分别为液体输运的内、外焓值, J/kg ; q_{lg} 为汽泡界面热流密度, W/m^2 。

忽略汽相密度的变化, 联立式(6)、(7)可得:

$$\frac{dR_b}{dt} = \frac{q_{lg}}{\rho_g (h_{in} - h_{out})} \quad (8)$$

汽泡界面热流密度可由傅里叶定律求得:

$$q_{lg} = -k_l \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_b} \quad (9)$$

式中, k_l 为液相导热系数, $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$ 。

汽泡所处温度场满足球坐标下无内热源的非稳态导热方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \eta \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (10)$$

式中, η 为热扩散系数, m^2/s 。根据文献[11]的假设, 认为汽泡在无限大的静止过热液体中生长, 液体温度为 T_l , 汽泡表面温度为 T_l^{gs} , 满足 $T_l^{gs} < T_l$ 。因此, 式(10)的初始条件和边界条件如下:

$$t = 0, r = R_b, T = T_l^{gs} \quad (11)$$

$$t = 0, r > R_b, T = T_l \quad (12)$$

$$r = R_b, T = T_l^{gs} \quad (13)$$

$$r = \infty, T = T_l \quad (14)$$

联立式(9)~(14)得到汽泡界面热流密度表达式:

$$q_{lg} = \rho_l c_{pl} (T_l - T_l^{gs}) \sqrt{\frac{3\eta}{\pi t}} \quad (15)$$

将式(15)代入式(8), 得到汽泡生长速率为:

$$\frac{dR_b}{dt} = \frac{\rho_l c_{pl} (T_l - T_l^{gs})}{\rho_g (h_{in} - h_{out})} \sqrt{\frac{3\eta}{\pi t}} \quad (16)$$

假设汽泡表面温度 T_l^{gs} 为对应压力下汽相的饱和温度 T_{sat} , 并用壁面温度 T_w 表示过热液体温度 T_l , 用汽化潜热 h_{lg} 表示焓升 $h_{in} - h_{out}$, 整理式(16)可得:

$$\frac{dR_b}{dt} = Ja \sqrt{\frac{3\eta}{\pi t}} \quad (17)$$

$$Ja = \frac{\rho_l c_{pl} \Delta T_w}{\rho_g h_{lg}} \quad (18)$$

Ja 是衡量汽泡生长的过热液体边界层温度的无量纲数。 $\eta = k_l / \rho_l c_{pl}$ 为液相的热扩散系数, 表征液体边界层温度趋于均匀的能力。对于过冷流动沸腾过程, 引入 Pr 来考虑 η 的影响, 对 η 作无量纲处理, 表征液体温度边界层发展速度的相对大小, 同时, Pr 也考虑了流动边界层对汽泡生长的影响。

因此, 汽泡生长速率 dR_b/dt 可由无量纲数 Ja 和 Pr 表示, 由式(5)可知, 汽泡生长力 F_{du} 的相对大小可由无量纲数 Ja 和 Pr 表示。

1.2 其他力的无量纲化

生长汽泡所受各力均与汽泡尺寸 R_b 密切相关, 本节仅对汽泡受到各力的关键因素进行无量纲处理。

表面张力 F_s 的主要影响因素包括表面张力系数 σ 和接触角 θ , 在垂直壁面方向, 引入无量纲数 Ca 来表示表面张力的相对大小, Ca 的物理意义为黏性力与表面张力的相对大小, 其表达式为:

$$Ca = \frac{\mu_g U_g}{\sigma \sin \theta} \quad (19)$$

考虑接触角 $\theta = 0^\circ$ 的特殊情况, 表面张力在垂直壁面方向的分量为 0, 故接触角以 $\sin \theta$ 的形式存在。

剪切升力 F_{sl} 由汽泡附近流体的速度梯度引起, 其代表量是流体与汽泡质心的速度差 ΔU , 对于在核化点生长的汽泡, 质心速度为 0, 故可认为 $\Delta U = U_l$ 。引入无量纲数 Re 来反映流体流速 U_l 的相对大小, Re 的表达式为:

$$Re = \frac{\rho_l U_l l_c}{\mu_l} \quad (20)$$

l_c 为特征长度,其表达式为:

$$l_c = \sqrt{\sigma/g(\rho_l - \rho_g)} \tag{21}$$

浮升力 F_b 是由汽-液相密度差引起的,其影响因素为密度差项 $(\rho_l - \rho_g)g$,引入无量纲数 Ar 来表示浮升力的相对大小, Ar 的物理意义为浮升力与黏性力的相对大小,此处引入黏性力是为了抵消 Ca 中引入的黏性力, Ar 的表达式为:

$$Ar = \frac{(\rho_l - \rho_g)g\rho_l l_c^3}{\mu_l^2} \tag{22}$$

对于气泡尺寸,将其提取出来单独考虑,以获得显式模式。引入 Bo 来对气泡尺寸进行无量纲化处理, Bo 表示浮升力与表面张力的相对大小,未带来其他力的干扰。 Bo 的表达式为:

$$Bo = \frac{(\rho_l - \rho_g)gD_b^2}{\sigma} \tag{23}$$

考虑气泡浮升的临界时刻,垂直壁面的受力平衡恰好被打破,为简化理论模型,参考量纲分析的 π 定理,假设表征各力的无量纲数满足简单的乘积关系,建立预测流动沸腾气泡浮升直径的无量纲模型表达式:

$$Bo = Ja^{C_1} Pr^{C_2} Re^{C_3} Ca^{C_4} Ar^{C_5} \tag{24}$$

式中, $C_1 \sim C_5$ 为经验常数,基于 Okawa 等^[12] 的实验数据得到其值分别为 1.95、-5.89、-0.41、-1.63、-1.12。即本文建立预测气泡浮升直径的新模型为:

$$Bo = Ja^{1.95} Pr^{-5.89} Re^{-0.41} Ca^{-1.63} Ar^{-1.12} \tag{25}$$

该模型基于过冷流动沸腾加热壁面生长气泡的受力方程建立,故模型适用对象为过冷流动沸腾过程加热壁面的生长气泡。由于模型用特征长度 l_c 表征气泡生长局部区域的尺寸,暂

未考虑通道尺寸与截面形状对气泡浮升行为的影响。

考虑到 Hamzekhani 等^[7] 也提出了预测气泡浮升直径的无量纲数模型,做出基于 Okawa 等^[12] 的实验数据修正后的 Hamzekhani 模型:

$$Bo = Ca^{-2.89} Ja^{3.01} Ar^{2.82} \tag{26}$$

2 结果与分析

图 2 为新模型与修正后 Hamzekhani 模型对气泡浮升直径的预测情况。结果表明,新模型有 96.4% 的预测值与实验值的相对偏差在 $\pm 20\%$ 以内,说明新模型能较好地预测过冷流动沸腾工况中气泡的浮升直径。修正后的 Hamzekhani 模型仅有 51.7% 的预测值与实验值的相对偏差在 $\pm 20\%$ 以内,说明 Hamzekhani 建立的无量纲数模型对过冷流动沸腾工况中气泡浮升直径的预测能力相对较差。进一步分析可认为,对于流动沸腾过程气泡浮升直径的预测,仅依靠 Ca 、 Ja 与 Ar 3 个无量纲数来分析气泡受力是不够的,须引入 Re 和 Pr 两个无量纲数,以考虑浮升方向剪切升力的作用,以及过冷流体对气泡生长速率的影响。

为验证新模型(式(25))的拓展性,选用 Zeng 等^[4] 以有机液体 R113 进行的流动沸腾实验数据进行验证,验证结果如图 3 所示。新模型有 62.6% 的预测值与实验值的相对偏差在 $\pm 20\%$ 以内,有 91.9% 的预测值与实验值的相对偏差在 $\pm 30\%$ 以内,说明本文建立的预测气泡浮升直径的无量纲模型具有一定的应用拓展性。

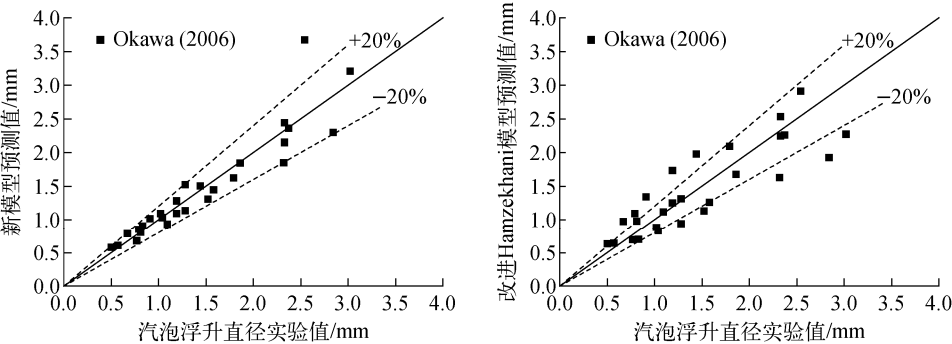


图 2 新模型、修正后 Hamzekhani 模型的预测值与 Okawa 气泡浮升直径实验值的对比
Fig. 2 Predictions of bubble lift-off diameter by new model and modified Hamzekhani's model versus experimental data of Okawa

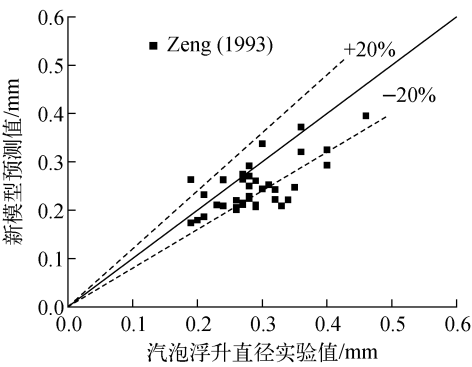


图 3 新模型预测值与 Zeng 汽
泡浮升直径实验值的对比

Fig. 3 Prediction of bubble lift-off diameter
by new model versus experimental data of Zeng

气泡浮升直径随 Ja 、 Re 与 Ca 的变化规律如图 4 所示,发现气泡浮升直径随 Ja 的增加而升高,随 Re 、 Ca 的增加而降低。 Ja 是衡量气泡生长力大小的无量纲数, Ja 越大,反映气泡生长力越大,生长力抑制了气泡的浮升效应,导

致气泡浮升难度增加,浮升直径升高。 Re 是衡量气泡剪切升力的无量纲数, Re 越大,剪切升力越大,剪切升力促进了气泡的浮升效应,导致气泡浮升难度降低,浮升直径降低。 Ca 是衡量表面张力大小的无量纲数,由于表面张力系数在 Ca 的分母中,故 Ca 越大,反映表面张力越小,表面张力抑制了气泡的浮升效应,导致气泡浮升难度降低,浮升直径降低。

气泡浮升直径随 Pr 和 Ar 的变化规律如图 5 所示,发现气泡浮升直径随 Pr 、 Ar 的增加而降低。 Pr 是衡量流动工况流动边界层与温度边界层之比的无量纲, Pr 越大,说明流动边界层效应较温度边界层越强,越不利于气泡生长,故在气泡受力不变的情况下, Pr 升高减慢了气泡的生长速度,有降低浮升直径的效果。 Ar 是衡量浮升力相对大小的无量纲, Ar 越大,浮升力效应越强,浮升力促进了气泡的浮升效应,导致气泡浮升难度降低,浮升直径降低。

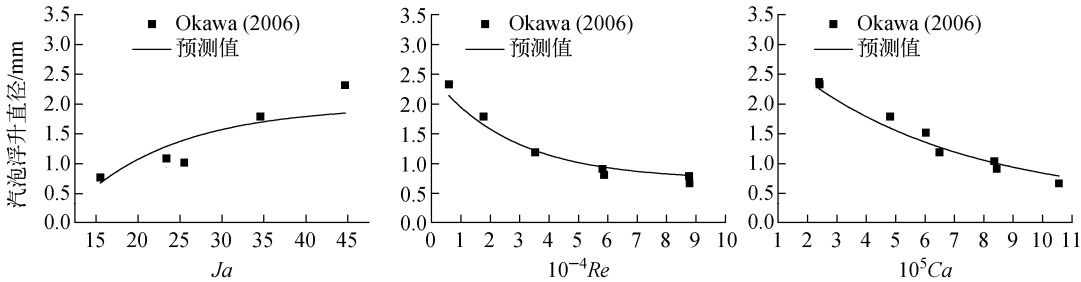


图 4 气泡浮升直径随 Ja 、 Re 和 Ca 的变化

Fig. 4 Bubble lift-off diameter variation with Jacob number,
Reynolds number and Capillary number

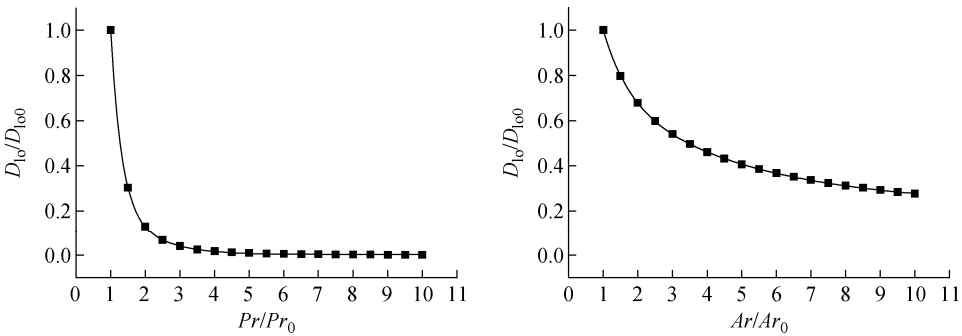


图 5 气泡浮升直径随 Pr 与 Ar 的变化

Fig. 5 Bubble lift-off diameter variation with Prandtl number and Archimedes number

3 结论

理论分析是过冷流动沸腾过程气泡行为研究的核心之一。本文将影响气泡受力的关键因素无量纲化,建立了预测过冷流动沸腾气泡浮升直径的无量纲模型,并结合实验数据对模型进行了验证。验证结果表明,模型预测值与实验值符合较好,能预测水与 R113 工质中气泡的浮升直径;无量纲模型能预测气泡浮升直径随各无量纲数的变化规律,浮升直径随 Ja 的增加而升高,随 Re 、 Ca 、 Pr 与 Ar 的增加而降低。

参考文献:

- [1] BASU N. Modeling and experiments for wall heat flux partitioning during subcooled flow boiling of water at low pressures[M]. USA: University of California, 2003.
- [2] FRITZ W. Berechnung des maximalvolumen von dampfbblasen[J]. Phys Z, 1935, 36: 379-388.
- [3] KLAUSNER J F, MEI R, BERNHARD D M, et al. Vapor bubble departure in forced convection boiling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1993, 36(3): 651-662.
- [4] 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]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1993, 36(9): 2 271-2 279.
- [5] AL-HAYES R A M, WINTERTON R H S. Bubble diameter on detachment in flowing liquids [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1981, 24(2): 223-230.
- [6] XU J J, CHEN B D, XIE T Z. Experimental and theoretical analysis of bubble departure behavior in narrow rectangular channel[J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 77: 1-10.
- [7] HAMZEKHANI S, FALAHIEH M M, AK-BARI A. Bubble departure diameter in nucleate pool boiling at saturation: Pure liquids and binary mixtures[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 46: 50-58.
- [8] YUN B J, SPLAWSKI A, LO S, et al. Prediction of a subcooled boiling flow with advanced two-phase flow models[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 253: 351-359.
- [9] ZENG L Z, KLAUSNER J F, MEI R. A unified model for the prediction of bubble detachment diameters in boiling systems, I: Pool boiling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1993, 36(9): 2 261-2 270.
- [10] CHEN Y, GROLL M, MERTZ R, et al. Force analysis for isolated bubbles growing from smooth and evaporator tubes[M]// Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery. [S. l.]: [s. n.], 2003: 57-74.
- [11] KOLEV N I. Multiphase flow dynamics, 2: Thermal and mechanical interactions[M]. USA: Springer Science & Business Media, 2007.
- [12] OKAWA T, KUBOTA H, ISHIDA T. Simultaneous measurement of void fraction and fundamental bubble parameters in subcooled flow boiling[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(10): 1 016-1 024.