

# 自然循环欠热沸腾起始点特性

周涛<sup>1,2</sup>, 杨瑞昌<sup>1</sup>, 刘若雷<sup>1</sup>

(1. 清华大学热能系, 北京 100084; 2. 华北电力大学(北京)动力系核电教研室, 北京 102206)

**摘要:** 利用适于强迫循环的伯格尔斯和罗斯诺经验方法、Davis 和 Anderson 理论方法, 以及本课题组依据自然循环实验提出的预测欠热沸腾起始点的经验公式, 对两种类型的欠热沸腾起始点的热力学平衡干度进行比较计算, 研究自然循环的欠热沸腾起始点的基本特性。研究结果表明: 自然循环欠热沸腾起始点的热力学平衡干度对加热量、进口温度、系统压力有着更大的敏感特性, 在同等条件下, 更早发生欠热沸腾现象。统计物理的微观角度研究进一步指出: 产生这一现象的根本原因在于处于自组织状态的自然循环耗散结构的特点、动力学的涨落力和动量力对热力学平衡的共同影响。此研究结果为今后研究和应用自然循环的欠热沸腾奠定了基础。

**关键词:** 自然循环; 强迫循环; 欠热沸腾; 泡核沸腾起始点; 干度

**中图分类号:** TL364      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2006)02-0172-05

## Characteristic of Onset of Nucleate Boiling in Natural Circulation

ZHOU Tao<sup>1,2</sup>, YANG Rui-chang<sup>1</sup>, LIU Ruo-lei<sup>1</sup>

(1. *Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

*2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)*

**Abstract:** Two kinds of thermodynamics quality at onset of nucleate boiling with subcooled boiling were calculated for force circulation by using Bergles and Rohsenow method or Davis and Anderson method, and natural circulation by using Tsinghua University project group's empirical equations suggested in our natural circulation experiment at same condition. The characteristic of onset of nucleate boiling with subcooled boiling in natural circulation were pointed out. The research result indicates that the thermodynamics quality at onset of nucleate boiling with subcooled boiling in natural circulation is more sensitive for heat and inlet temperature and system pressure. Producing of onset of nucleate boiling with subcooled boiling is early at same condition. The research result also indicates more from microcosmic angle of statistical physics that the phenomena are caused by the effects of characteristic of dissipative structure of natural circulation in self organization, fluctuation force and momentum force of dynamics on

thermodynamics equilibrium. These can lay good basis for study and application on sub-cooled boiling in natural circulation in future.

**Key words:** natural circulation; force circulation; subcooled boiling; onset of nucleate boiling; quality

欠热沸腾起始点(ONB)直接关系到其后的流动传热特性,是一个关键环节<sup>[1]</sup>。以前的研究多集中于强迫循环,以至很多自然循环的理论研究中也借用由强迫循环实验和理论导出的公式。对自然循环欠热沸腾起始点的研究<sup>[2-5]</sup>很少,对其特性的把握不完善。随着核电的发展,对反应堆的固有安全性的要求不断提高,自然循环被大量应用。所以,把握自然循环欠热沸腾起始点的实质特性显得特别重要。通过计算分析,把握变化规律,可为自然循环的广泛应用提供可靠保障。

## 1 基本方法

### 1.1 热力学平衡干度

热力学平衡干度定义式<sup>[1]</sup>如下:

$$x_{\text{ONB}} = \frac{c_{pf} \Delta T_{\text{sub, ONB}}}{h_{fg}} = -\frac{c_{pf} (T_{\text{SAT}} - T_f)}{h_{fg}} \quad (1)$$

其中: $h_{fg}$ 是汽化潜热, kJ/kg;  $T_f$ 、 $T_{\text{SAT}}$ 分别是流体温度和流体饱和温度, K;  $c_{pf}$ 是流体定压比热容, kJ/(kg·K)。

### 1.2 强迫循环欠热沸腾起始点干度计算式

伯格尔斯(Bergles)和罗斯诺(Rohese-now)<sup>[6,7]</sup>根据数种工业光滑管取得的实验数据,得到了欠热沸腾起始点的判据的经验方法。对于0.1~13.8 MPa的水,为:

$$q_{\text{ONB}} = 1.798 \times 10^{-3} p^{1.156} \cdot \left[ \frac{9}{5} (T_w - T_{\text{SAT}}) \right]^{2.282/p^{0.0234}} \quad (2)$$

把方程(2)与单相强迫对流传热方程  $q = h(T_w - T_{f, \text{ONB}})$  联合求解,得到:

$$T_{f, \text{ONB}} = T_{\text{SAT}} + \Delta\theta_j - \frac{q}{h} \quad (3)$$

式中: $T_{f, \text{ONB}}$ 是沸腾起始点的流体温度;壁面过热度  $\Delta\theta_j$  按伯格尔斯和罗斯诺方程(2)求得:

$$\Delta\theta_j = T_w - T_{\text{SAT}} = (\Delta T_{\text{SAT}})_{\text{ONB}} \quad (4)$$

其中: $T_w$ 、 $T_{\text{SAT}}$ 分别是壁面温度和流体饱和温度, K。

因此,式(1)可变换为:

$$x_{\text{ONB}} = \frac{c_{pf}}{h_{fg}} \left[ \frac{5}{9} \left( \frac{q}{1.798 \times 10^{-3} p^{1.156}} \right)^{\frac{0.0234}{2.282}} - \frac{q}{h} \right] \quad (5)$$

Davis 和 Anderson 理论公式<sup>[7,8]</sup>如下:

$$q_{\text{ONB}} = \frac{k_f \rho_g h_{fg}}{8\sigma T_{\text{SAT}}} (T_w - T_{\text{SAT}})^2 \quad (6)$$

$$x_{\text{ONB}} = \frac{c_{pf}}{h_{fg}} \left( \sqrt{\frac{8\sigma T_{\text{SAT}}}{k_f h_{fg} \rho_g}} - \frac{q}{h} \right) \quad (7)$$

式中: $k_f$ 是液相导热系数, W/(m·K);  $\sigma$ 是张力, N/m;  $\rho_g$ 是汽相密度, kg/m<sup>3</sup>;  $p$ 是压力, Pa;  $q$ 是热量, W/m<sup>2</sup>;  $h$ 是换热系数, W/(m<sup>2</sup>·K)。

### 1.3 自然循环欠热沸腾起始点干度计算式

本课题组依据自然循环实验提出的预测欠热沸腾起始点的两个经验式<sup>[9]</sup>如下:

$$x_{\text{ONB}} = -0.017053 \left( \frac{q}{Gh_{fg}} \right)^{0.22045} \cdot Pr_f^{6.18160} \left( \frac{p}{p_j} \right)^{2.06994} \quad (8)$$

$$x_{\text{ONB}} = -0.0059166 \left( \frac{q}{Gh_{fg}} \right)^{0.04819} \cdot \left( \frac{G^2}{gD_e \rho_f^2} \right)^{0.21071} Pr_f^{6.00119} \left( \frac{p}{p_j} \right)^{1.97643} \quad (9)$$

以上经验式的适用范围为:压力  $p = 7.6 \sim 13.73$  MPa; 质量流速  $G = 130 \sim 340$  kg/(m<sup>2</sup>·s); 热流密度  $q = 50 \sim 440$  kW/m<sup>2</sup>; 欠热沸腾起始点热力学平衡干度  $x_{\text{ONB}} = -0.512 \sim -0.0595$ ;  $p_j$ 为介质水的临界压力, MPa;  $D_e$ 为流道直径, m;  $\rho_f$ 为流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $g$ 为重力加速度, 9.8 m/s<sup>2</sup>。

## 2 算例

### 2.1 加热量与欠热沸腾起始点热力学平衡干度关系

取  $q = 50.0 \sim 225.0$  kW/m<sup>2</sup>, 进口温度  $T_{in} = 80$  °C,  $p = 13.73$  MPa,  $G = 340$  kg/(m<sup>2</sup>·s),  $D_e = 0.1$  m,  $p_j = 22.798$  MPa。图 1a 显示了加热量与  $x_{\text{ONB}}$  间的关系。除曲线 4 显示了  $x_{\text{ONB}}$  基本不随加热量改变外, 其它曲线皆显示: 无论是强迫循环还是自然循环,  $x_{\text{ONB}}$  皆随加热

量的增大而减小。由图 1a 可看出,自然循环的  $x_{\text{ONB}}$  明显比强迫循环的小。这一结论和实验观测一致<sup>[9]</sup>。

## 2.2 进口温度与欠热沸腾起始点热力学平衡干度关系

选取  $q=225.0 \text{ kW/m}^2$ ,  $T_{\text{in}}=60\sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p=13.73 \text{ MPa}$ ,  $G=340 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $D_e=0.1 \text{ m}$ ,  $p_{\text{ij}}=22.798 \text{ MPa}$ 。图 1b 显示了进口温度与  $x_{\text{ONB}}$  间的关系。在同等条件下,强迫循环的  $x_{\text{ONB}}$  基本上不随进口温度变化;自然循环的  $x_{\text{ONB}}$  却正比于进口温度,小于并逐步接近强迫循环的  $x_{\text{ONB}}$ 。从图 1b 还可看出,用伯格尔斯和罗斯诺经验方法与 Davis 和 Anderson 理论公式计算得到的强迫循环欠热沸腾起始点热力学平衡干度数值很接近,用本课题组两个公式计算的自然循环欠热沸腾起始点平衡干度数值也很接近。

## 2.3 质量流速与欠热沸腾起始点热力学平衡干度关系

选取  $q=225.0 \text{ kW/m}^2$ ,  $T_{\text{in}}=80 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p=13.73 \text{ MPa}$ ,  $G=140\sim 340 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $D_e=0.1 \text{ m}$ ,  $p_{\text{ij}}=22.798 \text{ MPa}$ 。图 2a 显示了质量流速与欠热沸腾起始点热力学平衡干度关系。在同等条件下,强迫循环的  $x_{\text{ONB}}$  随质量流速的增大显著增大,自然循环的  $x_{\text{ONB}}$  随质量流速的增大变化则不如前者的变化明显,甚至出现用计算自然循环的两经验式的结果有某种程度的相

反变化,结果之间显示了较大的误差。

## 2.4 压力与欠热沸腾起始点热力学平衡干度关系

选取  $q=225.0 \text{ kW/m}^2$ ,  $T_{\text{in}}=80 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p=9.73\sim 13.73 \text{ MPa}$ ,  $G=340 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $D_e=0.1 \text{ m}$ ,  $p_{\text{ij}}=22.798 \text{ MPa}$ 。图 2b 显示了压力与欠热沸腾起始点热力学平衡干度关系。在同等条件下,强迫循环和自然循环的  $x_{\text{ONB}}$  均随压力升高而降低。显然,在同等压力下,自然循环的  $x_{\text{ONB}}$  比强迫循环的低。从图 2b 中还可看出,计算强迫循环的  $x_{\text{ONB}}$  的两个经验式的计算数值趋势变化较为接近,计算自然循环的  $x_{\text{ONB}}$  的两个经验式的计算数值趋势变化也较为接近。

## 3 结果分析

### 3.1 宏观分析

#### 1) 加热量对欠热沸腾起始点的影响

当加热量增大时,处于较低热力学平衡干度的液相可能容易获得足够的能量,产生气泡并以致产生跃离,即导致欠热沸腾起始点热力学平衡干度减小。实际上,图 1a 中曲线 4 表示的自然循环的  $x_{\text{ONB}}$  值也是随加热量增大略微减小的,其基本保持不变的原因是该加热量的增大间隔被很小的指数关系予以削弱。这是因为,在自然循环的大密度差中,气泡处于较低的热力学平衡干度时更易发生跃离,这是由自然

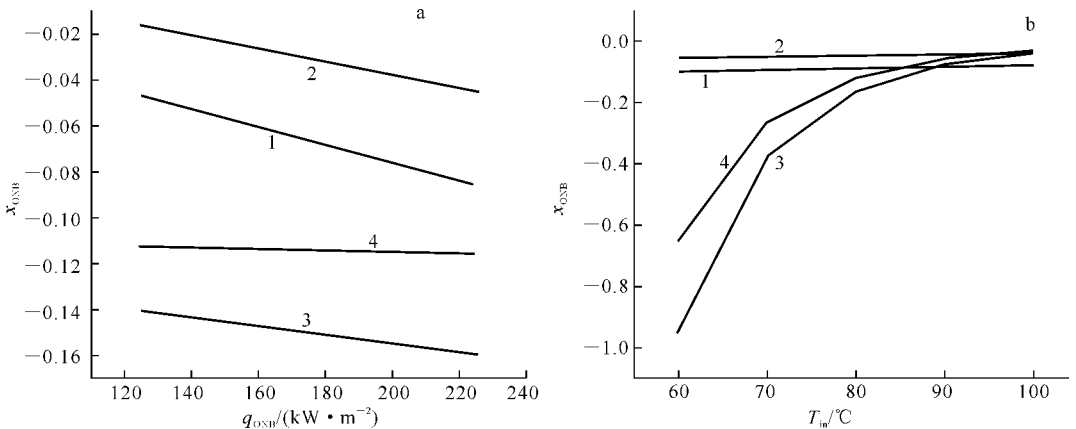


图 1 加热量(a)或进口温度(b)与欠热沸腾起始点热力学平衡干度关系

Fig. 1 Relation between heat(a) or inlet temperature(b) and thermodynamics quality at onset of nucleate boiling with subcooled boiling

1——伯格尔斯和罗斯诺经验方法;2——Davis 和 Anderson 理论公式;3——本课题组经验式(8);4——本课题组经验式(9)

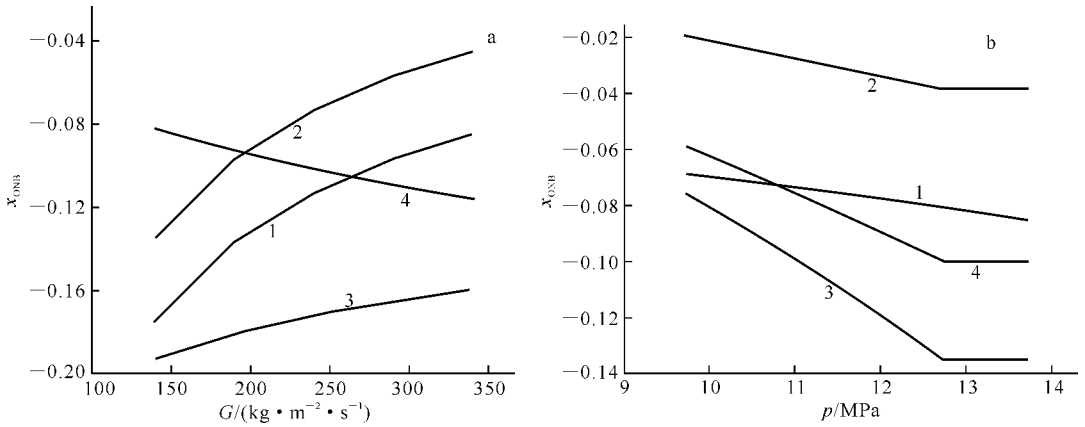


图2 质量流速(a)、压力(b)与欠热沸腾起始点热力学平衡平衡干度关系

Fig. 2 Relation between mass flow rate(a) or system pressure(b) and thermodynamics quality at onset of nucleate boiling with subcooled boiling

1——伯格尔斯和罗斯诺经验方法;2——Davis 和 Anderson 理论公式;3——本课题组经验式(8);4——本课题组经验式(9)

循环的大密度差环境造成的。在图 1a 中,强迫循环和自然循环的经验式两计算结果间均有误差,但与其循环类型的差别相比,这个误差显然较小。计算自然循环的  $x_{\text{ONB}}$  曲线 3 和 4 的差异是曲线 4 考虑了  $Fr(\frac{G^2}{gD_c r_i^2})$  数的影响而产生的。

#### 2) 进口温度对欠热沸腾起始点的影响

在加热量相同条件下,自然循环欠热沸腾将在较低入口温度下出现欠热沸腾起始点,此时的热力学平衡干度较低,并随入口温度的提高而增大。入口温度的变化较大地影响了普朗特数,随着入口温度增大,普朗特数减小,自然循环的  $x_{\text{ONB}}$  增大。普朗特数所表征的动量与热量扩散的比正关系反映了自然循环的由热产生密度差带来运动的基本特点。在强迫循环中,由于所选温度变化范围还不是很大,造成相关计算参数包括物性均很小,因此,在该温度变化范围内,强迫循环的  $x_{\text{ONB}}$  基本不变。

#### 3) 质量流速对欠热沸腾起始点的影响

一般而言,随流速增大,扰动增加,气泡产生并更易脱离壁面。图 2a 中的曲线 4 表征了自然循环的  $x_{\text{ONB}}$  随质量流速的增大而减小这一基本涵义。图中的其它曲线表征了流量的增大同时减弱了同等热量对流体的贡献,增大热容量,导致  $x_{\text{ONB}}$  随质量流速的增大可能增大。至于在同等流量下,自然循环的  $x_{\text{ONB}}$  小于强迫循环的  $x_{\text{ONB}}$ ,则是由于此时自然循环中有较大的密度差环境,扰动增加,气泡更易产生。

#### 4) 压力对欠热沸腾起始点的影响

压力的影响较复杂。一方面,随压力升高,液体的表面张力减小,汽化核心增多,容易提前出现欠热沸腾起始点;另一方面,汽水密度差减小,气泡不易产生并脱离加热面,延长受热过程,使欠热沸腾起始点延迟,起始点热力学平衡干度变大。显然,在图 2b 的参数范围内,张力减小是主导因素,因而,无论是强迫循环还是自然循环,随着压力的增大,  $x_{\text{ONB}}$  均降低。在自然循环中,降低幅度较大是因自然循环靠大密度差产生运动、压力变大对密度差变小的幅度不大造成的。在强迫循环中,压力变大使本来不大的密度差变得更小,从而削弱压力的主导作用,使强迫循环的  $x_{\text{ONB}}$  降低幅度较小。

### 3.2 微观机理

宏观上,本工作计算分析的强迫循环和自然循环欠热沸腾起始点的条件相同,但计算结果不同。其原因只能从微观上分析。处于自组织状态的自然循环耗散结构的特点显然与强迫循环有很大差别,热量、压力、进口温度和质量流速等存在相应的微量。在起始点附近的强烈涨落和关联,不仅有动量力,而且有涨落力,它们共同决定了气泡的出现、欠热沸腾起始点的发生。这时的热量、压力、进口温度和质量流速等微量的分布和涨落均不同程度对自然循环欠热沸腾起始点的位置产生影响。这是体系内存在的特性如温度、压力、浓度等各类非平衡过程的交叉耦合效应,一般是非线性的。此时,

过程的发展方向并不单纯由纯粹的热力学决定,而同时受动力学行为的影响。与强迫循环相比,自然循环欠热沸腾起始点较早发生,这说明近壁区流场和温场结构更加接近主流情况,其速度场发展应更加平缓。与目前仅测定流体平均参数的作法不同,如在今后实验中,对诸如速度等参数分布性态作出测定,把握近壁区流场和温场结构,对于进一步理解自然循环欠热沸腾起始点的产生和发展具有一定的突破意义。对于一个参考定态,一很小的扰动可使体系越来越偏离这个空间而发展到一新的对应于某种时空有序的结构,这属于远离平衡条件下的非线性不可逆过程热力学所研究的范畴。

#### 4 结论

1) 在同样条件下,自然循环欠热沸腾起始点的热力学平衡干度明显比强迫循环的小,即欠热沸腾起始点提前发生,更易发生欠热沸腾。

2) 强迫循环的欠热沸腾起始点计算公式对进口温度变化不敏感,而自然循环的欠热沸腾起始点热力学平衡干度正比于进口温度。

3) 流量和压力显著影响强迫循环欠热沸腾起始点热力学平衡干度。

4) 在自然循环流量变化时, $Fr(\frac{G^2}{gD_e r_i^2})$ 数对欠热沸腾起始点热力学平衡干度影响很大。两自然循环经验式显示出较大变化趋势差异。因此,此时应用带有  $Fr$  的经验式更能反映实际情况。

5) 自然循环欠热沸腾起始点有很多不同于强迫循环欠热沸腾起始点的特性,值得进一步进行理论与实验研究。应特别注意用耗散结构及自组织临界(SOC——Self Organization Critical)理论进行有效解析和数值研究。同时,重视随机力和涨落对系统的影响。

#### 参考文献:

[1] 于平安,朱瑞安,喻真焯.核反应堆热工分析

[M].北京:原子能出版社,1986;83-342.

- [2] DORRA H, LEE S C, BANKOFF S G. A critical review of predictive models for the onset of significant void in forced convection subcooled boiling [R]. United States: Westinghouse Savannah River Co., Aiken, 1993.
- [3] 孙奇,杨瑞昌,赵华.低流速过冷沸腾净蒸汽产生点计算模型[J].核动力工程,2003,24(5):417-421.
- SUN Qi, YANG Ruichang, ZHAO Hua. Prediction model for initial point of net vapor generation for low-flow boiling[J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(5): 417-421 (in Chinese).
- [4] YANG Ruichang, WANG Yanwu, TANG Hong, et al. Onset of nucleate boiling, point of net vapor generation and void fraction for low-flow natural circulation with subcooled boiling[C]//4th international conference on multiphase flow. New Orleans; School of Engineering Tulane University, 2001; 23-30.
- [5] YANG Ruichang, WANG Yanwu, TANG Hong, et al. Experimental study of flow instability in a natural circulation system with subcooled boiling [C]// Proceedings of the 1st international conference on engineering thermophysics. Beijing: Chinese Society of Engineering Thermophysics, 1999; 572-579.
- [6] BERGLES A E, ROHSENOW W M. The determination of forced-convection surface-boiling heat transfer[J]. J Heat Trans, 1964, 86C(3): 365-372.
- [7] COLLIER J G, THOME J R. Convective boiling and condensation[M]. England: Oxford University Press, 1994; 13-70.
- [8] DAVIS E J, ANDERSON G H. The incipience of nucleate boiling in forced convection flow[J]. AIChE Journal, 1966, 12(4): 774-780.
- [9] 杨瑞昌,鲁钟琪,施德强,等.自然循环工况下过冷沸腾起始点的计算方法研究报告[R].北京:清华大学,1998.