

核态池沸腾中气泡生长和脱离的动力学特征

—— 气泡的脱离直径与脱离频率

(北京航空航天大学) 杨春信 吴玉庭 袁修干
(北京工业大学) 马重芳

摘 要: 在前人工作的基础上提出了表征核态池沸腾中气泡脱离和生长过程的特征时间和特征尺度,并进而得到了气泡生长时间和气泡脱离直径的通用关系式,应用传热学类比方法建立了计算气泡脱离直径的一般公式。本文的研究结果与前人的实验结果甚为相符。

关键词: 核态沸腾; 气泡;
脱离直径; 脱离频率

中图分类号: TK124

符号表

A_b — 气泡与壁面的接触面积;
 Γ — 液体热扩散系数;
 A, B — 常数, 详见文献〔1〕;
 C_f — 式(3)的拟合常数;
 C_b — 式(4)的常数;
 c_p — 液体的比热;
 c — 气泡的形状因子;
 D_b — 气泡的脱离直径;
 ΔT — 沸腾表面过热度;
 T_s — 液体的饱和温度;
 D_b^* — 气泡的无因次脱离直径;
 $f(c)$ — 气泡的体积因子;
 H_{fg} — 液体的汽化潜热;
 h — 对流换热系数;
 k_f — 传热系数;
 Nu_b — 气泡的努塞尔准则数;
 L_0 — 特征长度;
 Q_b — 气泡的换热量;
 Re_b — 气泡的雷诺数;
 Pr_f — 液体的普朗特数;
 U_0 — 特征速度;
 γ — 高压下气泡生长的修正系数, 详见文献〔1〕;
 f_g — 气泡的无因次生长时间;
 t_0 — 特征时间;
 ρ — 液体的密度;
 μ — 液体的动力粘度;
 j, Z — 修正因子。

1 引言

核态池沸腾是具有重要工业应用的换热过程,对这一换热过程已进行了广泛的研究。对于气泡脱离直径,目前已发表了大量实验研究结果和拟合公式,但并未得到精度较高而同时又具有通用性的结论;对于气泡脱离频率,一般的作法是将脱离直径和脱离频率关联起来。目前,如何计算气泡的脱离直径和脱离频率仍然是核沸腾换热的研究热点。

本文的主要研究目的是:提出表征气泡生长过程的特征时间和特征尺度,在此基础上得到气泡生长过程的通用规律,并进而建立计算气泡脱离直径的一般公式。

2 气泡生长脱离的特征时间和特征尺度

文献〔1〕中, Mikic 等根据特征时间和特征尺度建立的气泡生长率预测式可以很好地预测低压下过热液体中气泡生长的全过程〔2〕。这提示我们,该式中包含的特征尺度和特征时间应该同样适用于气泡的脱离(气泡的脱离是其生长过程的终点)。但文献〔2〕

的分析是以 Plesset 和 Zwick 的解〔3〕为基础的,应该考虑用 Labuntsov〔4〕的结论进行修正,以使结果可以用于高压条件。因此,我们提出用以下的特征长度,特征时间和特征速度表征气泡生长的动态过程:

$$L_0 = \frac{\gamma B^2}{A} f_b = \gamma \left(\frac{B}{A}\right)^2 f_b \quad (1)$$

3 气泡脱离直径与生长时间的关系

采用上节提出的特征时间和特征尺度,并把气泡脱离直径和生长时间分别表示为以下量纲形式:

$$D_b^* = \frac{D_b}{L_0} = \frac{AD_b}{\gamma B^2}, f_g = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{A}{B}\right)^2 f_g \quad (2)$$

这样,可以将不同实验条件下得到的实验结果用无量纲的形式表示出来。图 1 给出了根据 Cole〔5〕, Han 和 Griffith〔6〕, Stralen〔7〕, 和 Staniszewski〔8〕等人的实验结果建立的 $D_b^* \sim f_g$ 关系。可以看到,在相当宽泛的数量级内, D_b^* 和 f_g 呈现出很强的相关性,且有:

$$D_b^* = C\tau(f_g)^{2/3} \quad (3)$$

考虑到图 1 中包括了多种物

收稿日期: 1998-05-29; 修订日期: 1999-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59706007)

作者简介: 杨春信(1965-),男,教授、博导,主要从事多相流动与传热、飞行器环境控制及安全救生等方面的研究。通讯处: 100083 北京航空航天大学 505 室

质在宽广的压力和过热度范围内的实验结果,本文提出的特征时间和特征尺度可以正确地表征气泡生长的动态过程.图 1 的结果还有助于澄清一个问题.长期以来,研究者们习惯于将脱离直径和脱离频率相关联,但这一研究思路只能给出相当粗略的结果,其原因在于:脱离频率中同时包括了气泡等待时间和生长时间 ($f^{-1} = t_w + t_g$),而只有气泡生长时间是与气泡脱离直径直接相关的.数据分散的主要原因是将气泡等待时间引入关联式中所致

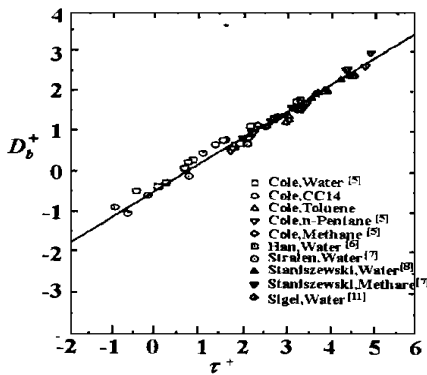


图 1 无量纲气泡生长时间与无量纲气泡脱离直径的关系

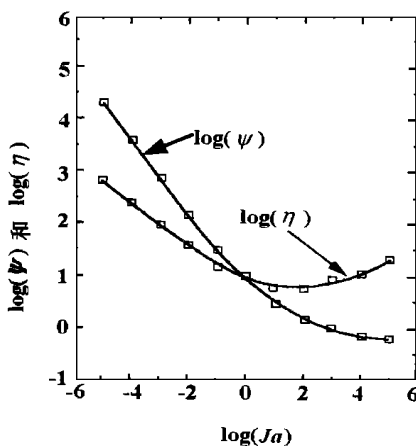


图 2 修正因子与雅克比数的关系

4 气泡脱离直径的通用计算关系式

得到表征气泡生长过程的特征时间和特征尺度之后,可以进

一步应用对流换热与沸腾换热的类比方法推导计算气泡脱离直径的关系式.一般的对流换热准则关系式可以写为^[9]:

$$\frac{Re_b Pr_n}{Nu_b} = C_b Re_b^m Pr_n^n \quad (4)$$

这里准则数 Nu, Re 和 Pr 分别定义为: $Nu_b = hL_0 / k_l, Re_b = dU_0 L_0 / \nu_l, Pr_n = \rho c_p / k_l$ 并认为式 (4) 对于沸腾换热仍然成立,并将 Nu 准则数改写为:

$$Nu_b = \frac{Q_b L_0}{t_0 A_b \Delta T_{kl}} = \frac{Q_b U_0}{A_b \Delta T_{kl}}$$

(5)

上式中的 Q_b, A_b 和 k_l 分别按下式计算:

$$Q_b = \frac{c}{6} f(c) d D_b^3 H_g$$

$$A_b = \frac{c}{4} D_b^2$$

$$k_l = T_l c_{pl}$$

将上述关系式和特征长度与特征速度的定义式代入准则数 Nu 和 Re 的定义式中,可以得到:

$$Nu_b = \frac{2f(c)}{3c^2} \frac{D_b A}{T_l Ja}, Re_b = \dots \frac{d B^2}{-1}$$

将上述准则数的表达式代入换热准则关系式 (5) 中并整理,则有:

$$D_b^+ j = \frac{3}{2C_b} \left(\frac{c}{12}\right)^m Ja^{1-2m} Pr_n^{m-n} \quad (6)$$

这里修正因子 j 定义为:

$$j = \frac{c^2}{\left(\frac{c}{12}\right)^{m-1} [f(c)]^{2/3}} \quad (7)$$

上式即为本文提出的计算当量气泡脱离直径的关系式

图 2 给出了修正因子 j 随雅克比数 Ja 的变化.图 3 和图 4 中给出了按式 (6) 整理的实验数据,其中的图标说明分别见表 1 和表 2 从图 3 和图 4 可以看到,有机物和水的实验数据可以用同一个

关系式关联,且有 $m = 1.4, n = 0.8$ 考虑到实验数据本身的离散度,本文给出的结果是适当的.这不仅在一定程度上证明式 (7) 具有一定的通用性,而且解决了 Cole 研究中的第二个疑难^[1].

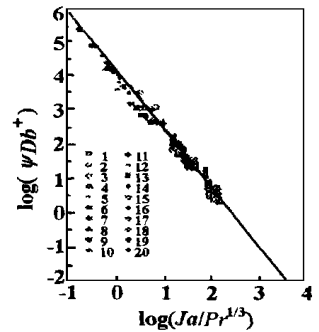


图 3 有机物的气泡直径的预测值和实验值比较

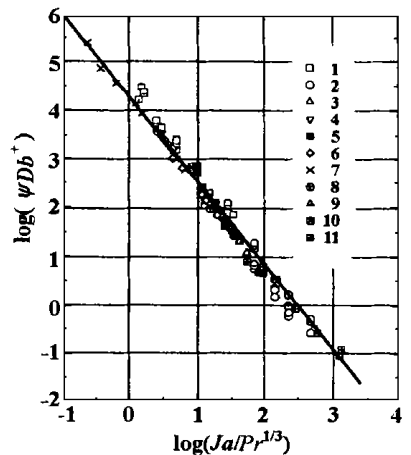


图 4 水的气泡直径的预测值和实验值比较

为了考虑过热度的影响,将 m 和 n 的数值及 A 和 B 的表达式^[1]代入式 (7) 中,得到:

$$D_b = 3.0557 \times 10^3 \frac{d}{d} \frac{C_{pl} T_s}{H_{fg}} \frac{TD_n^{3.5}}{Z} \quad (8)$$

这里: $Z = j Ja^{0.3}$. 根据上式,过热度 ΔT 对当量分离直径的影响是通过 Z 产生的.在图 2 中我们同时给出了 Z 随 Ja 的变化.可以

看出,在 $Ja = 1 \sim 1000$ 的范围内, Z 随 Ja 的变化很小,也就是

说,过热度 ΔT 对当量分离直径的影响很小. 这样,我们就解决了

Cole研究中的第一个疑难^[1].

表 1 图 3 中的图标说明

序号	作者	压力 (kPa)	物质	序号	作者	压力 (kPa)	物质
1	Cole[5]	30.3	丙酮	11	Tolubinsky[12]	101	丙三醇
2	Cole[5]	18.34	四氯化碳	12	Tolubinsky[12]	101	甲醇
3	Cole[5]	18.18, 27.27, 40.4, 52.52, 71.71	甲烷	13	Tolubinsky[12]	101	正丁醇
4	Cole[5]	69.69, 101	正戊烷	14	Tolubinsky[12]	101	R-12
5	Cole[5]	6.38	甲苯	15	Wanninger[13]	101	已戊烷
6	Haider[10]	101	R-123	16	Wanninger[13]	858.5, 1111, 1414	丙烷
7	Judd[11]	50.5, 60.6, 80.8, 101	四氯甲烷	17	Perkins[14]	101	甲醇
8	Tolubinsky[12]	101	苯	18	Staniszewski[8]	274.72	甲醇
9	Tolubinsky[12]	101	四氯化碳	19	McFaden[15]	101	液氮
10	Tolubinsky[12]	101	乙醇	20	Nakayama[16]	101	R-11

表 2 图 4 中的图标说明

序号	作者	压力 (kPa)
1	Akyiama[17]	20.2
2	Cole[5]	6.64, 8.63, 13.91, 47.84
3	Geartner[18]	101
4	Han[6]	40.4, 42.72
5	Nishikawa[19]	90.9, 101
6	Tolubinsky[20]	20.2, 50.5, 80.8, 101, 303, 404, 605, 707, 808, 909, 1010
7	Semeria[22]	101, 404, 580.75, 1010, 2020, 2777.5, 5050, 7655.8, 13332
8	Siegel[21]	101
9	Siegel[23]	101
10	Staniszewski[8]	101, 193.92, 274.72, 206.4, 12
11	Stralen[7]	13.34, 20.48, 26.98, 101

(3) 在一般情况下,应将气泡脱离直径和气泡生长时间相关联,而不是和气泡脱离频率相关联

5.2 讨论与说明

5.2.1. 本文建立的气泡脱离直径计算式中未包括重力加速度的影响,因而只适用于常重力加速度(即 1g)的情况;

5.2.2. 本文在推导气泡脱离直径计算式时应用了对流换热准则式, Rohsenow 著名的沸换热准则式即以该式为基础^[8].

5.2.3. 本文建立的气泡脱离直径计算式中还未包括表面张力的影响, Zeng, Klausner 和 Mei 在文献[24]中对这一作法已给予了详细的解释;应用本文建立的关系式(8),进一步说明可以不包括表面张力的影响却仍然得到了精度很好的结果. 如果认为式(8)给出的结果即为气泡平均脱离直径的准确值,那么用计算得到的 D_b 代入文献[1]式(2)中可以得到该式右端的结果. 图 5 给出了对于水计算得到的 D_b / D_F 随 P / P_0 的变化值(这里参考压力 $P_0 = 101 \text{ kPa}$). 可以看到,在相当宽广的压力范围内, D_b / D_F 随

P / P_0 的变化确实可以用 $1000 / P$ 或 $1.3158 P_0 / P$ 很好地近似. 而且,在 $P = 101 \text{ kPa}$ 时, D_b / D_F 也近似为 1.0. 实际上,对于很多物质,在 $P = 101 \text{ kPa}$ 时, D_b 与 D_F 均为较接近(参看表 3). 可以认为,本文建立的气泡平均脱离直径计算式的计算精度至少在数量级上相当于 Fritze 公式,而后者在常压下的预测精度已经过实验验证.

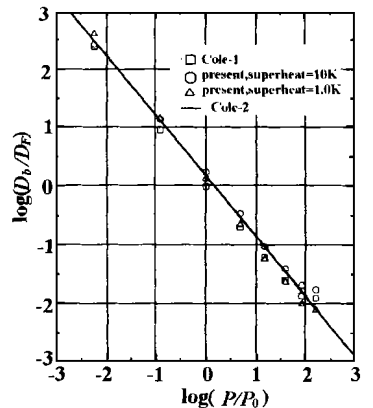


图 5 本文关系式和 Cole 公式(文献[1]中的式(2)和式(4)),对不同压力下水沸腾时气泡脱离直径的计算结果比较

注: Cole-1: $D_b = 1000 / P$
 Cole-1: $E_0 = C_2 Ja^{* 5/4}$

5 结论与讨论

5.1 结论

通过本文的研究工作我们得到以下结论:

(1) 本文提出的特征尺度可以正确地表征气泡生长过程的动态过程;

(2) 本文建立的气泡脱离直径计算式可以统一现有的有机物和水的实验数据;

5. 2. 4 进一步的研究包括在气泡脱离直径计算式中计入重力加速度的影响, 并与更广泛的实验数据以及其他研究者提出的计算式比较。这方面的工作正在进行。

表 3 对有机物和水在常压下沸腾时当量气泡脱离直径的计算结果与 Fritiz 公式的比较 (计算时取 $Z \cong 6.31$, 这相当于设 $Ja = 10.0$)

物质名称	D_b/D_F	物质名称	D_b/D_F
甲醇	1.0657	异戊烷	1.2628
乙醇	1.0463	二氯甲烷	0.8241
正丁醇	0.8187	四氯化碳	0.7349
丙三醇	2.3592	R-11	0.4655
己二醇	0.5143	R-12	0.8466
甲醚	0.6135	甲苯	1.9378
乙醚	0.9673	乙苯	1.8655
液氮	0.5525	水	0.8267
丙酮	0.7330	R-123	0.8821
甲烷	0.3950	R-113	1.2707
乙烷	0.4904	R-114	1.2474
丙烷	0.5658	苯	0.2944
正戊烷	1.2091	R21	2.6988

参考文献

- [1] 杨春信等. 核态池沸腾中气泡生长和脱离的动力学特征—气泡动力学研究回顾. 热能动力工程, 1999, 14(4): 246~249.
- [2] Mikic B B, Rohsenow W M, Griffith P. On bubble growth rates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1969, 13: 657~666.
- [3] Plesch M S, Zwick S A. The growth of vapor bubbles in superheated liquids. *Journal of Applied Physics*, 1954, 25: 493~500.
- [4] Labuntsov D A I. Current theories of nucleate boiling of liquids. *Heat Transfer-Soviet research*, 1975, 7(3): 1~15.
- [5] Robert Cole. Bubble frequencies and departure volumes at subatmospheric pressures. *A. I. Ch. E. Journal*, 1967, 13: 779~783.
- [6] Han Chi-Yeh, Griffith P. The mechanism of heat transfer in nucleate pool boiling—part I. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1965, 8: 887~904.
- [7] Van Stralen S J D, Soha M S, Cole R, Sluyter W M. Bubble growth rates in pure and binary systems Combined effect of relaxation and evaporation microlayers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1975, 18: 453~467.
- [8] Staniszewski B E. Nucleate boiling bubble growth and departure. *Tech. Rep.* 16, Div. Sponsored Res., MIT, 1959, 8.
- [9] Rohsenow W M. A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids. *Trans. of ASME, Journal of Heat Transfer*, 1965, 74: 969~952.
- [10] Iman Haider S, Webb Ralph L. A transient micro-convection model of nucleate pool boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40: 3675~3688.
- [11] Judd R L, Hwang K S. A comprehensive model for nucleate pool boiling heat transfer including microlayer evaporation. *Journal of Heat Transfer*, 1976, 99: 624~629.
- [12] Tolubinskiy V I, Konstanchuk D M, Kriveshko A A, Ostrovskiy Yu N. Correlation of data on boiling heat transfer for fluid on the basis of the internal characteristics of the process. *Heat Transfer-Soviet Research*, 1975, 7(1): 1~7.
- [13] Waminger W. *Chem. Ing. Tech.*, 1965, 37: 939.
- [14] Perkins A S, Westwater J W. Measurements of bubbles formed in boiling methanol. *A. I. Ch. E. Journal*, 1956, 2: 471.
- [15] McFadden P W, Grassmann P. Relationships between bubble frequency and diameter during nucleate pool boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1962, 5: 169~173.
- [16] Nakayama W, Dalkoku T, Kuwahara N, Nakajima T. Dynamic model of enhanced boiling heat transfer on porous surfaces. *J. of Heat Transfer*, 1980, 102: 451~456.
- [17] Akiyama M, Tachibana F, Ogawa N. Effect of pressure on bubble growth in pool boiling. *Bull. JSME*, 1969, 12(53): 1121~1128.
- [18] Gaertner R F. Photographic study of nucleate pool boiling on horizontal surface. *Trans. of ASME, Journal of Heat Transfer*, 1965, 87(1).
- [19] Nishikawa K, Urakawa K. An experiment of nucleate boiling under reduced pressure. *Mem. Fac. Eng. Kyushu University*, 1960, 19(139): 63~71.
- [20] Tolubinsky V L, Ostrovskiy J N. On the mechanism of boiling heat transfer (vapor bubble growth rate in the process of boiling of liquids, solutions, and binary mixtures). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1966, 9: 1463~1470.
- [21] Siegel R, Keshock E G. Effects of reduced gravity on nucleate boiling bubble dynamics in saturated water. *A. I. Ch. E. Journal*, 1964, 10: 509~517.
- [22] Semeria R L. Caracteristiques des bulles de vapeur sur une paroi chauffante dans l'eau en ebullition a haute pression. *Comptes Rendus, De L'Academie Des Sciences*. Paris, 1963, 256: 1227~1230.
- [23] Keshock E G, Siegel R. Forces acting on bubbles in nucleate boiling under normal and reduced gravity conditions. *NASA Tech. Note*. TN D-2299, 1964.
- [24] Zeng L Z, Klausner J F, Mei R. A unified model for the prediction of bubble detachment diameters in boiling system—1. pool boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, 36: 2261~2270.

(辉 编)

煤粉直接点火燃烧器技术及其进展 = **Directly Ignited Pulverized-Coal Burner Technology and Its Development** [刊,中] / Li Wenjiao, Yao Qiang, Zhou Junhu, et al (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 327~ 329

In improving the pulverized-coal burners of utility boilers the main focus of attention should be accorded to directly ignited pulverized-coal burners. Based on an integration of direct ignition techniques with combustion stabilization technology the authors have designed a directly ignited pulverized-coal burner. Such burners can be rationally classified into two types: directly ignited pulverized-coal burners without using any fuel oil and directly ignited pulverized-coal ones using only a small quantity of fuel oil. Presented in this paper are the current status of development of these two kinds of burners and their respective drawbacks. It is recommended that main efforts should now be directed to the improvement of directly ignited pulverized-coal burners using no fuel oil. The paper can offer some guidelines during the study of directly ignited pulverized-coal burners for utility boilers. **Key words** pulverized coal, boiler, directly ignited pulverized-coal burner

核态池沸腾中气泡生长和脱离的动力学特征——气泡的脱离直径与脱离频率 = **Dynamic Characteristics of Bubble Growth and Departure in Nucleate Boiling—Bubble Departure Diameter and Frequency** [刊,中] / Yang Chunxin, Wu Yuting, Yuan Xiugan (Beijing University of Astronautics and Aeronautics), Ma Chongfang (Beijing University of Industrial Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 330~ 333

On the basis of currently available study results this paper introduces a characteristic length scale and time scale to describe the dynamic growth and departure process of bubbles in nucleate boiling. A general correlation between bubble departure diameter and bubble growth time is thereby obtained. Through the use of heat transfer analogous method a general formula has been worked out to calculate the bubble departure diameter. The study results of the present paper are in full agreement with experimental ones provided by other researchers. **Key words** nucleate boiling, bubble, departure diameter, departure frequency

具有煤种和负荷自适应性的新型燃烧器的研究 = **The Study of a New Type of Burner with Self-Adaptation to Coal Sort and Load Changes** [刊,中] / Chi Zuohe, et al (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 334~ 336

Analyzed are the contradictory mechanisms existing among such factors as intensified ignition, stable combustion during low-load operation, boiler furnace slagging and nozzle burnout, etc. On this basis a self-adaptation principle of burners with respect to coal sort and boiler loads is proposed and some satisfactory application results have been obtained through lab and on-site tests of such boilers. **Key words** pulverized-coal burner, stable combustion at low loads, boiler furnace slagging, control

用饱和核态池沸腾换热机理模型预测加热壁面活化核心密度 = **Prediction of the Active Nucleation Density of Heated Wall Surfaces through the Use of a Model Incorporating the Mechanism of Saturated Nucleate Pool Boiling Heat Transfer** [刊,中] / Wu Yuting, Yang Chunxin, Yuan Xiugan, et al (Beijing University of Astronautics and Aeronautics) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 337~ 339

Active nucleation density represents a major parameter in the nucleate boiling process. However, there lacks a unified method for its description. To avoid the difficulty involved in the direct measurement of the active nucleation density, the authors have proposed a prediction method with the help of a model featuring the mechanism of nucleate boiling heat transfer. The measured active nucleate size distribution curves of six types of surfaces are in good agreement with experimental results given by predecessors active in this area of research. This fully demonstrates the reliability of the above-cited model. **Key words** nucleate boiling, active nucleus, size distribution density, heat transfer model

单相螺旋管圈动态特性研究 = **A Study of the Dynamic Characteristics of Single-Phase Spiral Tube Coils**