

# 核态池沸腾中气泡生长和脱离的动力学特征<sup>\*</sup>

## ——气泡动力学研究回顾

(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】** 系统地总结和分析了近半个世纪以来气泡动力学的研究进展情况,指出了在气泡生长脱离研究中存在的不足及今后的发展方向,以促进气泡动力学研究的深入发展。

**关键词:** 核态沸腾; 气泡; 脱离直径; 脱离频率; 综述

**中图分类号:** TK124

### 1 引言

气泡动力学是近几十年以来逐步发展起来的一个分支学科,它主要研究气泡生长和脱离的规律和条件。研究气泡动力学,对于弄清液体核态沸腾换热的机理具有重要意义。现有的核态池沸腾换热机理模型都是从研究单个气泡的形成、生长和脱离以及伴随这一动力过程的瞬态换热现象着手的<sup>[1~9]</sup>,而且这些机理模型均包含着表征气泡动力过程的主要参数:气泡的脱离直径和脱离频率。气泡动力学经过几十年的发展,已经积累了不少实验数据,取得了许多研究成果,但气泡脱离直径及脱离频率的预测至今还没有取得令人满意的结果,从而限制了这些沸腾换热机理模型的应用。因此,总结和概括几十年以来气泡动力学的研究结果,指出存在的不足和今后的发展方向,对进一步促进气泡动力学的发展,具有重要的意义。

### 2 气泡的脱离直径

气泡在加热面上成长到一定大小后,在各种力的作用下将从加热面上脱离进入液体中。由于气泡脱离直径与沸腾换热的强度有着密切的关系,而且气泡脱离直径又是沸腾换热机理模型的关键参数,因此气泡脱离直径的计算一直是气泡动力学研究的

一个主要问题。大部分研究者从分析气泡脱离时的气泡受力建立所谓的气泡脱离判据来计算气泡脱离直径,例如, Fritz 认为气泡与壁面脱离时作用在气泡上的表面张力和浮升力相平衡,由此得到了著名的 Fritz 公式<sup>[7,8]</sup>:

$$D_b = 0.0208 \theta \sqrt{\sigma / [g(\rho_l - \rho_v)]} \quad (1)$$

Fritz 公式与常压下的实验数据基本相符,但与高压和低压下的实验数据不符。Cole 对低压条件下气泡的生长和脱离进行了系列的实验研究和分析<sup>[9~14]</sup>。Cole 发现,如果记  $D_F = \sqrt{\sigma / [g(\rho_l - \rho_v)]}$  (这相当于取接触角  $\theta = 48^\circ$ ), 则  $\bar{D}_b = D_b / D_F$  是压力的函数, Cole 根据水的实验数据得到<sup>[10]</sup>:

$$\bar{D}_b = 1000 / P \quad (2)$$

在以后的研究中, Cole 进一步将  $\bar{D}_b$  与 Jakob 数相关联以计入压力的影响,这里 Jakob 数定义为  $Ja = \rho_l C_{pl} \Delta T / (\rho_v H_g)$ 。Cole 根据自己的实验结果得到<sup>[11]</sup>。

$$\bar{D}_b = C_J Ja \quad (3)$$

根据式(3)可以推论:随着过热度的增大,气泡脱离直径亦将增大,而已有的实验研究表明,沸腾换热表面上气泡脱离直径的平均值并不随过热度变化<sup>[15~17]</sup>。为解决这一矛盾, Cole 又引入了变形的 Jakob 数  $Ja^* = \rho_l C_{pl} T_s / (\rho_v H_g)$ , 并得到以下拟合关系<sup>[12]</sup>:

$$E_o^{V/2} = C_2 Ja^{*4/5} \quad (4)$$

这里  $E_o$  数定义为:

$$E_o = g(\rho_l - \rho_v) D_b^2 / \sigma = \bar{D}_b^2$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59706007)

收稿日期: 1998-05-29 修改定稿: 1999-01-11

作者简介: 杨春信(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 多相流, 传热传质, 空调制冷, 通讯处: 100083 北京航空航天大学 505 教研室。

式(4)中的比例系数对于有机物和水要取不同的值,这意味着该式是一个近似的经验关系式。此外,该式的物理意义也不明确。尽管如此,式(4)仍然得到广泛引用。

综上所述, Cole 的研究中遗留了两个疑难问题,即: (1)无法解释过热度对气泡脱离直径的影响; (2)无法统一现有的有机物和水的实验结果。

Fritz 公式是根据流体静力学平衡得到的。实际上,气泡的成长过程并不是处于静止状态,它既有重心向上的运动,也有体积膨胀的径向运动。因此,作用于气泡上的力除有浮力和表面张力外,还有粘性阻力和惯性力。文献[18]曾对这些作用力进行了分析和计算,但由于包含了许多难以测定的参数,表达式又十分复杂,所得结果很难实际应用。文献[19]则认为,气泡的分离主要是由作用在气泡上的非定常生长力和浮力决定的,其表面张力可以忽略,并根据气泡生长的经验关系:

$$R(\tau) = K\tau^n \quad (5)$$

求出了气泡分离直径为<sup>[19]</sup>:

$$D_b = 2 \left\{ \frac{3K^{2/n}}{4g} \left[ \frac{3}{2} C_3 n^2 + n(n-1) \right] \right\}^{n/(2-n)} \quad (6)$$

在推导上式时,应用了近似关系式:

$(\rho_l - \rho_v) / \rho_l \approx 1$ , 且取  $C_3 = 20/3$ 。Zeng 等人对比了大量的实验数据后认为,式(6)优于其它所有研究者提出的拟合公式。应用式(6)时要已知气泡生长的详细信息即  $K$  和  $n$ , 这是该式精度较高的主要原因(可以认为  $K$  和  $n$  包含了诸多因素的综合影响),但同时也限制了其应用范围。

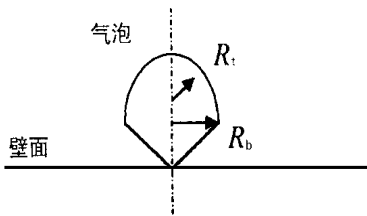


图 1 气泡参数示意图

结果给出了计算气泡体积的经验关系<sup>[20]</sup>:

$$V_b = \frac{4\pi}{3} f(c) R_t^3 \quad (7)$$

式中修正函数  $f(c)$  定义为:

$$f(c) \approx 1 - \frac{3}{4} [1 - \sqrt{1-c^2}]^2 + \frac{1}{4} [1 - \sqrt{1-c^2}]^3 \quad (8)$$

参数  $c$  是按 Zeng 和 Klausner 根据实验结果得到的经验公式计算:

$$c = [ (0.4134 Ja^{0.1655})^{-6} + (1 - 0.1 \exp(0.0005 Ja))^{-6} ]^{-1/6} \quad (9)$$

参数  $c$  定义为:

$$c = R_b / R_t \quad (10)$$

上式中的  $R_b$  和  $R_t$  可参见图 1。

### 3 气泡脱离频率

气泡脱离频率是气泡动力学研究的另一个重要问题。对某一成核地点,设气泡的生长时间为  $\tau_g$  和气泡的等待时间为  $\tau_w$ ,则气泡的脱离频率为:

$$f = 1 / (\tau_g + \tau_w) \quad (11)$$

Mcfadden 和 Grassmann 首先将脱离直径和脱离频率相关联<sup>[21]</sup>。他们根据量纲分析得到:

$$f D_b^{1/2} = 0.56 \sqrt{g} \quad (12)$$

Zuber 推荐气泡脱离直径和脱离频率的解析关联式:

$$f D_b = 0.59 \left[ \frac{\sigma(\rho_l - \rho_v)g}{\rho_l^2} \right]^{1/4} \quad (13)$$

式(12)成立的前提有两个:(1)气泡等待时间和生长时间近似相等( $\tau_w = \tau_g$ ); (2)气泡长大速度和气泡上升速度近似相等( $U_b = U_R$ )。Cole 指出,根据式(1)和式(11)可以推出式(12)<sup>[11]</sup>。当  $C_s = 1.0$  时, Cole 给出的比例系数为  $3.61$ <sup>[23]</sup>。Cole 还研究了式(12)的通用性,他将  $\overline{f D_b} = f D_b / \left[ \frac{\sigma(\rho_l - \rho_v)g}{\rho_l^2} \right]^{1/4}$  作为 Jakob 数的函数来考察不同条件下的实验结果,发现式(12)是一个相当粗略的近似式<sup>[11]</sup>。Ivey 分析了大量实验数据后指出,可以根据气泡生长的不同阶段得到不同形式的脱离直径与脱离频率的关系。

Ivey 根据理论分析和实验数据得到<sup>[24]</sup>:

水动力区:  $f D_b^{1/2} = 0.90 \sqrt{g}$

过度区:  $f D_b^{3/2} = 0.44 \sqrt{g}$

热动力区:  $f D_b^2 = \text{常数}$

此外, Ivey 还研究了 Zuber 的假设(2)是否成立。他指出,  $U_b$  和  $U_R$  只在量级上近似相当。这与 Cole 的相应结论是一致的。

这里我们还要指出,式(6)反映的实际上仍然是关系式(11)。这是因为,如果认为式(5)在气泡分离时仍成立,则有:

$$K = D_b / 2 \tau_b^n \quad (14)$$

将  $K$  的上述表达式代入式(6)整理后得到:

$$D_b \tau_g^{-2} = 2 \left\{ \frac{3}{4g} \left[ \frac{3}{2} C_3 n^2 + n(n-1) \right] \right\}^{-1} \quad (15)$$

显然, 如果认为 Zuber 的假设(1)成立(即  $(\tau_w = \tau_g)$ ), 则上式即为:

$$D_b^{1/2} = \sqrt{2} \left\{ \frac{3}{4g} \left[ \frac{3}{2} C_3 n^2 + n(n-1) \right] \right\}^{-1/2} = C \sqrt{g} \tag{16}$$

这就是不同的研究者根据各自的实验数据给出的比例系数不尽相同的原因, 由于不同实验条件下气泡的生长率不同,  $n$  的取值也不一样。

### 4 气泡生长过程

准确地预测气泡生长过程是核沸腾换热研究中的基本问题之一。在气泡生长的初期, 气泡的生长主要由气泡内外的压力差控制。这时的气泡生长规律可以由 Royleigh 方程描述<sup>[1]</sup>:

$$R = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{\Delta P}{\rho_l}} \tau \tag{17}$$

在气泡生长的后期, 气泡的生长取决于过热液体向汽液分界面的传热, Plesset 和 Zwick<sup>[23]</sup> 以及 Forster 和 Zuber<sup>[24]</sup> 假定传热温降发生在包围气泡的薄液层内, 这样求出的气泡生长规律为:

$$R(\tau) = 2C_s \sqrt{a_1} \tau \tag{18}$$

他们给出的解的区别仅在于系数  $C_s$  的不同:

$$C_s = Ja \sqrt{\frac{3}{\pi}} \text{ (Plesset 和 Zwick)}$$

$$C_s = Ja \sqrt{\frac{\pi}{2}} \text{ (Forster 和 Zuber)}$$

Scriven 和 Birkhoff 不依靠气泡周围存在热边界层的假定求出了能量方程的精确解, 据此得到的气泡生长规律仍然具有式(17)的形式, 但  $C_s$  为  $Ja$  数的函数且可由数值积分求出。Labuntsov 进一步指出  $C_s$  可以按下述拟合公式计算<sup>[27]</sup>:

$$C_s = Ja \sqrt{\frac{3}{\pi}} \phi^{1/2} \tag{19}$$

这里:

$$\phi = \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{6Ja} \right)^{2/3} + \frac{\pi}{6Ja} \right] \tag{20}$$

式(19)适用于任意的  $Ja$  数, 且计算值与实验值的偏差小于 2%。

Mikic 等人综合了以上两种典型的研究思路, 得到了以下形式的解<sup>[28]</sup>:

$$R^+ = \frac{2}{3} \left[ (\tau^+ + 1)^{3/2} - \tau^{+3/2} - 1 \right] \tag{21}$$

上式中的无量纲半径和无量纲时间分别定义为:

$$\tau^+ = (A/B)^2 \tau \tag{22}$$

$$R^+ = AR/B^2 \tag{23}$$

这里常数  $A, B$  按下式计算:

$$A = \sqrt{\frac{2\rho_v \Delta T_s H_{fg}}{3\rho_l T_s}}, B = Ja \sqrt{\frac{12}{\pi}} a_1$$

式(21)可以很好地预测低压下过热液体中气泡生长的全过程。这提示我们, 式(22)和式(23)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 Mikic、Rohsenow 和 Griffith 的分析是以 Plesset 和 Zwick 的解为基础的, 应该考虑用 Labuntsov 的结论进行修正以使结果可以用于高压条件。

### 5 结束语

气泡动力学经过几十年的发展, 已经取得了许多研究成果。在气泡生长率的预测方面, Mikic 等人综合前人研究成果, 运用特征时间及特征尺度建立的预测气泡的生长率模型能很好地预测低压下气泡生长率。为了适用于高压条件, 应该考虑用 Labuntsov 的结论进行修正; 在气泡脱离直径和脱离频率的预测方面, 虽然提出许多关系式, 但与实验结果偏差比较大, 还有待进一步研究。

#### 符 号 表

$C_1, C_2$ —分别为式(3)、(4)中的拟合常数;	$E_o$ —俄特沃斯数;
$C_3$ —式(6)中的经验常数;	$H_{fg}$ —液体的蒸发潜热;
$C_{\mu}$ —液体的比热;	$Ja$ —雅可比准则数;
$c$ —气泡的形状系数;	$Ja^*$ —变形的雅可比数;
$D_b$ —气泡的脱离直径;	$K, C_s$ —气泡的生长常数;
$D_f$ —接触角为 48 度时的 Fritz 直径;	$n$ —气泡的生长指数;
$\bar{D}_b$ —气泡的无因次脱离直径;	$R$ —气泡的半径;
$f$ —气泡的脱离频率;	$R_1$ —气泡的生长半径;
$f(c)$ —气泡的体积校正系数;	$R_b$ —气泡的底部半径;
$\theta$ —气泡与壁面的接触角;	$T_s$ —液体的饱和温度;
$\rho_l, \rho_v$ —液体和气体的密度;	$\Delta T$ —沸腾表面的过热度;
$a_1$ —液体的热扩散系数;	$\Delta p$ —气泡内外的压差;
$R^+$ —气泡的特征半径;	$\sigma$ —液体的表面张力;
$\tau_g$ —气泡的生长时间;	$P$ —系统压力;
	$\phi$ —高压下气泡生长的修正系数;
	$\tau^+$ —气泡的特征时间;
	$\tau_w$ —气泡的等待时间

#### 参 考 文 献

[1] 施明恒, 甘永平, 马重芳. 沸腾与凝结. 北京: 高等教育出版社, 12: 303.  
 [2] Han Chi-Yeh, Griffith P. The mechanism of heat transfer in nucleate

- pool boiling—Part 1. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1965, 8: 887~904.
- [3] Mikić B B, Rohsenow W M. A new correlation of pool-boiling data including the effect of heating surface characteristics. *Transaction of ASME, Journal of Heat Transfer*, 1969, 92: 245~250.
- [4] 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.
- [5] Benjamin R J, Balakrishnan A R. Nucleate pool boiling heat transfer of pure liquids at low to moderate heat fluxes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996, 39: 2495~2504.
- [6] Haider S Iman, Webb Ralph L. A transient micro-convection model of nucleate pool boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40: 3675~3688.
- [7] Fritz W, Ende W. Berechnung des maximalvolumens von dampfblasen. *Physik, Zeitschr*, 36, 1935: 379~384
- [8] Fritz W and Ende W. Über den verdampfungsvorgang nach kinematographischen aufnahmen an dampfblasen. *Physik, Zeitschr* 37, 1936: 391~401.
- [9] Robert Cole. A photographic study of pool boiling in the region of the critical heat flux. *A. I. Ch. E. Journal*, 1960, 6: 533~538.
- [10] Robert Cole and Shulman H L. Bubble departure diameters at subatmospheric pressures. *Chemical Engineers Progress Symposium Series*, 1966, 62(64): 6~16.
- [11] Robert Cole. Bubble frequencies and departure volumes at subatmospheric pressures. *A. I. Ch. E. Journal*, 1967, 13: 779~783.
- [12] Robert Cole and Rohsenow W M. Correlation of bubble departure diameters for boiling of saturated liquids. *Chemical Engineers Progress Symposium Series*, 1966, 65(92): 211~213.
- [13] Cole R, Shulman H L. Bubble growth rates at high jakob numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1966, 9: 1377~1399.
- [14] Stewart J K, Cole R. Bubble growth rates during nucleate pool boiling at high jakob numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1972, 15: 655~663.
- [15] Perkins A S, Westwater J W. Measurements of bubbles formed in boiling methanol. *A. I. Ch. E. Journal*, 1956, 2: 471.
- [16] Gaertner R F and Westwater J W. Population of active sites in nucleate boiling heat transfer. *Chemical Engineers Progress Symposium Series*, 1960, (30), (39), (46).
- [17] Gaertner R F. Photographic study of nucleate pool boiling on horizontal surface. *Trans. of ASME, Journal of Heat Transfer*, 1965, 87 (1).
- [18] 哈恩, 古力格尔(编). 沸腾换热. 王兴国, 华诚生(译). 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [19] 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.
- [20] Mei Renwei, Chen Wenchin, Klausner James F. Vapor bubble growth in heterogeneous Boiling—1. Formation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, 38: 909~919.
- [21] McFadden P W, Grassmann P. Relationships between bubble frequency and diameter during nucleate pool boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1962, 5: 169~172.
- [22] Zuber. Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer. Ph. D. thesis University of California, Los Angeles, 1959.
- [23] van Stralen S J D, Soha M S, Cole R, Slyter W M. I. 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.
- [24] Ivey H J. Relationships between bubble frequency, departure diameter and rise velocity in nucleate boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1967, 10: 1023~1040.
- [25] Plesktt M S, Zwick S A. The growth of vapor bubbles in superheated liquids. *Journal of Applied Physics*, 1954, 25: 493~500.
- [26] Forster H K, Zuber N. Growth of vapor bubble in a superheated liquid. *Journal of Applied Physics*, 1954, 25: 474~478.
- [27] Labuntsov D A I. Current theories of nucleate boiling of liquids. *Heat Transfer—Soviet Research*, 1975, 7(3): 1~15.
- [28] Mikić B B, Rohsenow W M, Griffith P. On bubble growth rates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1969, 13: 657~666.

( 辉 编 )

## 运行维护

## 热惯性成象监测仪

据“Power”1998年11—12月号报道,美国加利福尼亚州Walnut Creek市的叶片科学公司已研制成了热惯性成象(TII)监测系统,用来在运行中监视燃气轮机高温部分的工作。

研制的TII仪由高分辨率的红外摄像仪、大功率的UNIX计算机和能源组成。所有系统和子系统均装在标准组件罩壳内。

堵塞的冷却通路是使用系统的“传递方式”程序识别的。这时把热燃气注入涡轮叶片底面,迫使燃气流过冷却通路,同时进行一系列红外扫描。TII程序把一系列扫描转换成一个合成的热流图。通过其热流图与已知标准叶片热流图的比较,可以测定未知叶片的状况。

借助于第二个叫做“反射方式”的测试过程,TII系统可以识别热障涂层的剥落和铸件内的几何变化。

(思娟 供稿)

船用增压锅炉技术的新进展 = **New Developments in Marine Supercharged Boilers** [刊, 中] / Liu Changhe (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1999, 14 (4). -

A brief description is given of the working principles, construction design, performance parameters of naval supercharged boilers as well as their research and development history and operating experiences. Also proposed is a more advanced overall layout scheme based on an improved boiler design. **Key words:** boiler, supercharged boiler, design, research and development

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 = **Dynamic Characteristics of Bubble Growth and Detachment in the Course of Nucleate Boiling - Part I: A Review of Bubble Dynamic Study in Nucleate Boiling** [刊, 中] / Yang Chunxin, Wu Yuting, Yuan Xiugan (Beijing Aeronautical and Aerospace University), Ma Chongfang (Beijing Industrial University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1999, 14 (4). -

This paper presents a systematic review and analysis of the research progress of bubble dynamics over the past fifty years. Some deficiencies in the study of bubble growth and detachment have been identified with the orientation of future development conducive to a further in-depth study of the bubble dynamics being pinpointed. **Key words:** nucleate boiling, bubble, detachment diameter, detachment frequency, overview

燃气轮机进气用蒸发式冷却器中的气水分离技术实验研究 = **An Experimental Study of the Gas/Water Separation Technology for a Gas Turbine Inlet Air Evaporative Cooler** [刊, 中] / Lin Feng, Li Weishun, et al (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1999, 14 (4). -

Proceeding from the aim of enlarging engineering applications the authors have conducted an experimental study of the characteristics of a novel plant-mesh pad type gas/water separator developed by No. 703 Research Institute on its own. Meanwhile, performance evaluation was made of corrugated-plate inertial-grade gas/water separators commonly used in industries nowadays under certain specific conditions. The results thus obtained are of practical value for facilitating engineering applications. **Key words:** evaporative cooler, gas/water separation, large water droplet separator

燃油喷嘴气液两相流雾化特性研究 = **A Study of the Two-phase Flow Atomizing Characteristics of Oil Spray Nozzles** [刊, 中] / Li Guangjun, Wang Xinjun, Xiang Yu, et al (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1999, 14 (4). -

With air and water serving as working media a detailed experimental study was conducted of the atomizing characteristics of a two-phase flow atomizing nozzle with the help of a Malvern particle size analyzer. During the study measurements were made of the particle size distribution of atomized liquid particles formed after having passed the spray nozzles under different inlet pressure ratio conditions of the gas/liquid two-phase flow. Discussed and analyzed in detail was the influence on the nozzle atomizing effectiveness of the gas/liquid two-phase pressure and the gas and liquid feeding mode. As a result, determined was the variation relationship between the gas/liquid two-phase flow rate and gas/liquid two-phase pressure in the course of nozzle atomizing process as well as the optimum atomizing principles. In addition, the nozzle atomizing mechanism has also been discussed. **Key words:** spray nozzle, gas/liquid two-phase flow, atomizing characteristics, liquid particle size distribution

煤粉浓缩器阻力特性的试验研究 = **An Experimental Investigation of the Resistance Characteristics of Pulverized Coal Concentrators** [刊, 中] / Shi Liming, et al (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1999, 14 (4). -

By the use of an approximation simulation method a study was conducted of two types of pulverized coal concentrator without guide plates with respect to the variation of their mound-body and louver resistance characteristics with the change of structural parameters. The test results show that with the increase in mound-body inclined surface length there is an increase in the resistance factor. The louver resistance factor increases with an increase in the blade inclined angle or blade width. The variation of blade spacing ratio has a fairly significant effect on fluid flow. A relatively small flow resistance is