

# 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

(北京航空航天大学) 吴玉庭 杨春信 袁修干  
(北京工业大学) 马重芳

**摘要:** 活化核心密度是核沸腾过程的重要参数,但其描述方法至今尚未统一。为了避免活化核心密度直接测量的困难,提出根据核沸腾换热机理模型预测沸腾表面的活化核心密度,预测得到的六种表面的活化核心尺度分布曲线与表面活化核心的分形分布相一致,证明了表面活化核心尺度分布具有分形特征这一结论具有普遍意义。

**关键词:** 池沸腾; 活化核心; 尺度分布密度; 传热模型; 分形

中图分类号: TK124

## 符号表

$A$ - 加热壁面的总面积, $m^2$ ;	$q_{bc}$ - 冷液体与表面的接触 换热热流密度, $W/m^2$ ;
$C_{pl}$ - 液体的比热, $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;	$q_{me}$ - 微液层的蒸发换热量 流密度, $W/m^2$ ;
$D_d$ - 气泡的脱离直径, $m$ ;	$R_d$ - 气泡的脱离半径, $m$ ;
$h_{fg}$ - 液体的蒸发潜热, $J/kg$ ;	$R_p$ - 表面的平均粗糙度;
$K$ - 脱离气泡影响面积系数;	$t_g$ - 气泡的生长时间, $s$ ;
$k_l$ - 液体的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$ ;	$t_w$ - 气泡的等待时间, $s$ ;
$Ja$ - 雅可比准则数;	$T_w, T_L$ - 液体和固体的温 度, $K$ ;
$n$ - 活化核心密度, $site/m^2$ ;	$T_{sat}$ - 饱和温度, $K$ ;
$n^*$ - 无量纲活化核心密度;	$\Delta T$ - 加热表面的过热度, $K$ ;
$r$ - 最小可活化核心半径, $m$ ;	$\mu_l$ - 液体的粘性系数, $kg/(m \cdot s)$ ;
$r^*$ - 无量纲最小可活 化核心半径;	$e$ - 液体的表面张力, $N/m$ ;
$q$ - 加热表面的热流密度, $w/m^2$ ;	$d_l, d_g$ - 液体和气体的密度, $kg/m^3$ ;
$q_{nc}$ - 自然对流换热热流 密度, $w/m^2$ ;	$U$ - 液体的体积膨胀系 数, $1/K$ ;

## 1 引言

核态池沸腾换热在工业领域有很重要的应用价值,从 50~70 年代,核态沸腾换热引起了学术界极大的兴趣<sup>[1,2]</sup>。许多学者作了大量实验,提出了各种各样的换热机理模型,但这些模型均包含加热壁面上的活化核心密度这一关键参数,而加热表面的特

性至今尚未有统一说法,加热表面活化核心密度的测量又非常困难,因而限制了这些模型的实际应用。

在过去的几十年中,许多学者对池沸腾表面的活化核心密度进行了大量研究,许多学者曾试图用表面粗糙度来描述活化核心密度,但后来的实践证明,用单一的粗糙度参数无法精确描述加热表面的活化核心密度这一参数。

Griffith 和 Wallis<sup>[3]</sup>通过分析过热液体中气泡核心的热平衡,得到了在给定的过热度下,加热壁上凹坑能够被活化的最小临界口部半径为:

$$r = 2e^2 T_s / (h_{fg} d \Delta T) \quad (1)$$

上式的可靠性已被许多实验(这些实验涉及不同表面、不同液体以及不同表面状况)所证实。对于特定沸腾表面,Griffith 和 Wallis<sup>[3]</sup>发现不同液体、不同压力条件下沸腾的表面活化核心密度  $n$  与最小可活化核心半径  $r$  可用同一条曲线表示。Skoukri<sup>[4]</sup>和 Wang<sup>[5]</sup>等通过实验证实了这个结论,并进一步发现:

$$n = C_s r^{-b} \quad (2)$$

式(2)中的  $C_s$  和  $b$  随表面的不同而不同。上式现已得到了广泛承认,但由于  $C_s$  和  $b$  的变化规律尚未研究清楚,因此上式的通用性受到了限制。

如令  $n^* = n/m a$ ,  $r^* = r/r_0$ , 则得到上式的无量纲形式为:

$$n^* = (r^*)^{-b} \quad (3)$$

最近,作者提出用分形理论来描述加热表面活化核心分布密度<sup>[6]</sup>,正则的无量纲活化核心密度的分形分布应是:

$$dn^*/dr^* = c_1 (r^*)^{-b-1} = c_1 (r^*)^{-m} \quad (4)$$

式中的  $m$  被定义为分形维数。

上述结论是否具有普遍意义,还需进行广泛和深入的研究工作。前已提到,活化核心的尺度分布很难测量,直接的测量结果很少,而  $q$  和  $\Delta F$  的实验数据则很多。因而如可根据核沸腾换热机理模型,利用已有的大量的  $q$  和  $\Delta F$  实验数据来预测  $n$  和  $r$ (即本

收稿日期: 1998-07-28; 收订日期: 1998-10-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59706007)

作者简介: 吴玉庭(1970-),男,博士研究生,主要从事空调制冷、热能动力、多相流传热等方面的研究。通讯处: 100083 北京航空航天大学

505 教研室人环工程研究所

文所指的活化核心密度分布), 则可在更广泛的意义上比较和验证上述模型, 得到更具普遍性的结论。本文的研究目的主要是: 为了避免活化核心密度的直接测量和在广泛的意义上研究沸腾表面的活化核心密度规律, 提出用沸腾换热机理模型预测活化核心密度, 并根据沸腾试验数据运用此模型验证上述结论的普遍性

## 2 活化核心密度的预测模型

活化核心密度的预测可通过池沸腾换热机理模型来预测。为了阐明池沸腾换热机理, 许多学者建立了不同类型的机理模型, 如对流类比模型、气液交换机理模型、微层汽化机理模型和复合模型。其中, Judd和 Hwang<sup>[7]</sup>在二氯甲烷在玻璃表面的沸腾实验基础上提出的核态沸腾换热复合模型全面正确反映了核态沸腾换热的全过程。该模型认为: 液体核态沸腾过程包括下列三种最基本的能量转移过程:

(1) 液体和加热面之间的非稳态导热过程。这一过程发生在气泡刚脱离壁面后, 温度较低的液体进入原气泡所占据的加热面以及附近空间, 与加热面直接接触的一段时间。

(2) 在气泡的长大过程中, 气泡底部的微液层蒸发吸热过程。

(3) 液体与加热面之间的自然对流换热过程。

因此加热面的总热量为:

$$q = q_{nc} + q_{bc} + q_{me} \quad (5)$$

假定气泡脱离时影响区域的面积为  $K^c R_d^2$ , 其中  $K$  为反映气泡影响区大小的系数。Hahn和 Griffith建议  $K$  取  $4^{[3]}$ , 这个结果得到了广泛引用。Judd根据二氯甲烷在玻璃表面的沸腾实验数据得到  $K = 1.8^{[4]}$ , 但缺少普遍性, 因而未得到广泛引用。

气泡脱离后冷液体与表面的接触换热量可由非稳态导热得到, 其热流密度为:

$$q_{bc} = 2f \frac{k_1 d_1 c_{p1} T_w}{c} \Delta T K n^c R_d^2 \quad (6)$$

非沸腾影响区的自然对流换热热流密度为:

$$q_{nc} = 0.14k_1 [g U_{d1}^2 / (k_1 - 1)]^{1/3} \Delta T^{4/3} (1 - K n^c R_d^2 n) \quad (7)$$

气泡底部的微液层蒸发换热热流密度为:

$$q_{me} = \frac{4}{3} d h_{fg} f n^c R_d^3 \quad (8)$$

如令  $q'_{nc} = \frac{q_{nc}}{1 - k^c R_d^2 n}$ ,  $q'_{bc} = \frac{q_{bc}}{k n^c R_d^2}$ ,

则可得:

$$n = \frac{q - q'_{nc}}{(q'_{bc} - q'_{nc}) k^c R_d^2 + 4 d h_{fg} f^c R_d^3 / 3} \quad (9)$$

气泡的脱离直径根据 Cole关系式预测<sup>[1]</sup>, 即:

$$D_d = c_1 \left[ \frac{e}{g(d - d_1)} \right]^{1/2} Ja^* \frac{5}{4} \quad (10)$$

式中:  $c_1$  为拟合常数, 对于水取  $1.5 \times 10^{-4}$ , 对于其它液体取  $4.65 \times 10^{-4}$ ;  $Ja^*$  为变形的 Jakob数:

$$Ja^* = d_1 c_{p1} T_s / (d h_{fg})$$

上述预测式在整个范围内与各种液体的实验数据都甚为相符, 因此得到了广泛应用。脱离频率  $f$  使用 Zuber基于实验观察到的气泡的上升速度等于  $D_b / f_g$  和  $f_g = f_w$  的关系, 经

推导得到的解析表达式<sup>[1]</sup>:

$$f D_d = 0.59 \left[ e (d_1 - d) g / d \right]^{1/4} \quad (11)$$

根据液体自然对流曲线和沸腾曲线的交点即可求得对应的起始沸腾的活化核心临界半径  $r_0$ , 进而求出对应的活化核心密度  $n_0$ 。根据  $n_0$  和  $r_0$  求得各点的无量纲活化核心密度  $n^*$  和最小可活化核心半径  $r^*$ , 则:

$$\frac{dn^*}{dr^*} = \frac{dlg(n^*)n^*}{dlg(r^*)r^*} = k_c \frac{n^*}{r^*} \quad (12)$$

## 3 活化核心密度的预测和分析

运用上述预测模型, 根据 Cole<sup>[8]</sup> 和 Hahn<sup>[2]</sup> 的试验数据, 对不同压力、不同物质条件下两种沸腾表面的活化核心密度进行了预测 (如图 1 2所示)。图 1 是根据 Cole的试验数据 (系统压力从 6.7 kPa 到 101 kPa) 预测的活化核心密度分布曲线。在该图的预测中, 气泡的脱离直径和脱离频率均采用实验值, 这就消除了这两个参数预测误差的影响。图 2 是根据 Hahn的实验数据 (系统压力从 367 kPa 到 3884 kPa) 得到的活化核心密度分布预测图。从预测的结果来看, 不同液体、不同压力下预测得到的同一表面的  $lg(n)$  与  $lg(r)$  呈现了很强的相关性, 得到的分布曲线与式 (2) 相一致, 其精度与 Griffith等由实验得到的结果相当。由于上述活化核心密度的预测涉及两种表面, 宽广的压力范围 (6.7 kPa~ 3840 kPa) 和不同液体, 因此可以证明用前述模型预测活化核心密度是可靠的。

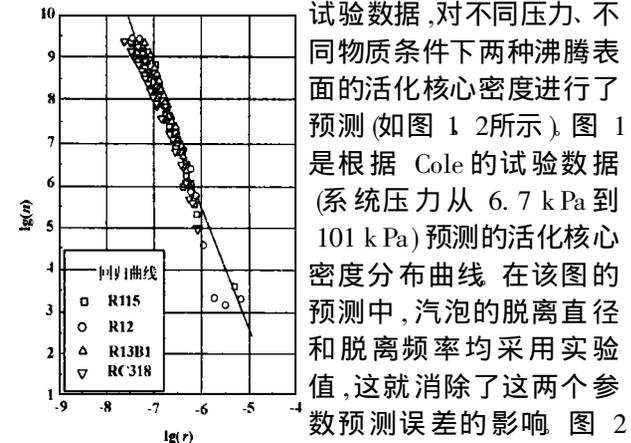


图 1 水平铜管表面活化核心密度预测图

图 2 是根据 Hahn的实验数据 (系统压力从 367 kPa 到 3884 kPa) 得到的活化核心密度分布预测图。从预测的结果来看, 不同液体、不同压力下预测得到的同一表面的  $lg(n)$  与  $lg(r)$  呈现了很强的相关性, 得到的分布曲线与式 (2) 相一致, 其精度与 Griffith等由实验得到的结果相当。由于上述活化核心密度的预测涉及两种表面, 宽广的压力范围 (6.7 kPa~ 3840 kPa) 和不同液体, 因此可以证明用前述模型预测活化核心密度是可靠的。

图 3~ 4是采用 Judd - Hwang传热模型根据 Bier<sup>[9]</sup> 和 Nishikawa<sup>[10]</sup> 的试验数据预测得到的各种

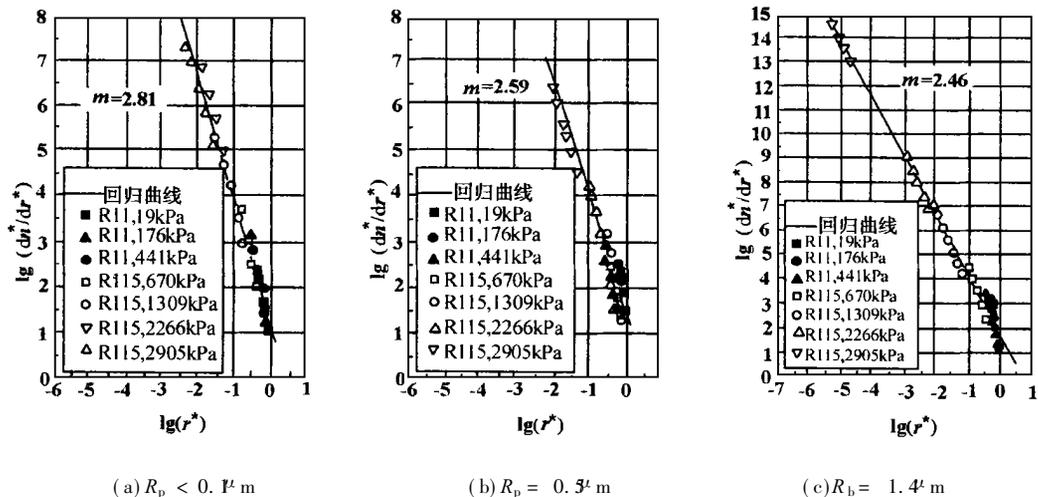


图 3 Bier 试验沸腾表面活化核心密度分布

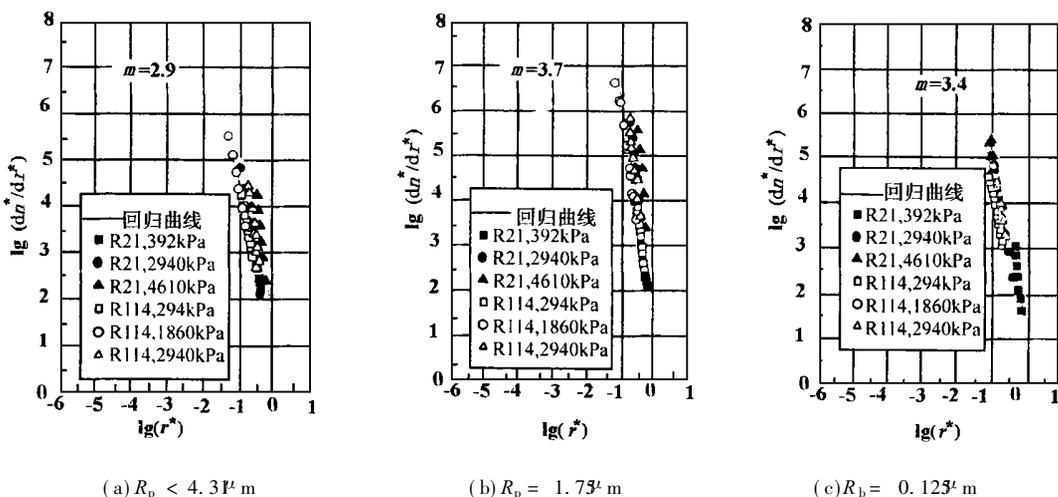


图 4 Nishikawa 试验沸腾表面活化核心密度分布

(3) 通过对不同粗糙度表面活化核心密度分布的预测证明了沸腾表面活化核心分布具有分形特征这一结论具有普遍意义;

(4) 进一步的研究工作包括对气泡的一系列动力学参数的计算预测,运用该模型从更广泛的意义上研究各种表面活化核心密度的规律。这方面的工作正在进行。

表面的活化核心密度分布曲线 其中,气泡的动力学参数(气泡的脱离直径和脱离频率)采用式(10)、(11)进行预测。从图中可以看出,对于同一表面的  $\lg(dn^*/dr^*)$  和  $\lg(r^*)$  呈现了很强的相关性,并与前面提到的加热表面活化核心密度的正则分形分布相一致。由于这些实验数据涉及许多表面、液体和宽广的压力范围,这就说明式(4)具有一定的通用性,也就是说沸腾表面活化核心尺度分布具有分形特征这一结论具有普遍意义。

### 4 结论

通过本文的研究,可得出如下结论:

(1) 用沸腾换热机理模型预测饱和池沸腾加热表面的活化核心密度,能够避免活化核心密度的直接测量,从而可以在广泛的意义上研究沸腾表面活化核心密度的规律;

(2) 由此机理模型得到的各种条件下的两种预测活化核心密度分布曲线,与 Brown 等的实验所证实的曲线形式相一致,从而证明了该模型的可靠性;

### 参考文献

- [1] 施明恒,甘永平等. 沸腾和凝结. 北京:高等教育出版社,1995.
- [2] 哈恩,古力格(编). 沸腾换热. 王兴国,华诚生(译). 北京:国防工业出版社,1988.
- [3] Griffith P and Wallis J D. The role of surface conditions in nucleate boiling. *Chem. Engng. Prog. Symp. Series*, 1960, 56: 49.
- [4] Shoukri M and Judd R L. Nucleation site activation in saturated boiling. *J. Heat Transfer*, 1975, 97: 93.
- [5] Wang C H and Dhir V K. Effect of surface wettability on active nucleation site density during pool boiling of water on a vertical surface. *Trans. ASME J. Heat Transfer*, 1993, 115: 659.
- [6] Chunxin Y. Reexamination of correlations for nucleate site distribution on boiling surface by fractal theory. *J. of Thermal Science*, 1997, 6: 119.
- [7] Judd R L and Hwang K S. A comprehensive model for nucleate pool boiling heat transfer including microlayer evaporation. *J. Heat Transfer*, 1976, 98: 623.
- [8] Cole R. Bubble frequencies and departure volumes at subatmospheric pressures. *AIChE Journal*, 1967, 13: 779.
- [9] Ber K, Gorenflo D, Salem M and Tanes Y. Pool boiling heat transfer and size of active nucleation centers for horizontal plates with different surface roughness. *Proc. 6th Int. Heat Trans. Con.* 1978, 1: 151.
- [10] Nishikawa K and Fujita Y. Effect of the surface roughness on the nucleate boiling heat transfer over the wide range of pressure. *Proc. 7th Int. Heat Trans. Con.* 1982, 4: 61.

(复 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**