

在恒壁面热流条件下汽泡接触周期研究^{*}

翁荣周 蔡 晓 陈 峰

(华侨大学化工与生化工程系, 泉州 362011)

摘要 以湍流漩涡扩散理论为根据,建立了漩涡与壁面接触时液体温度分布方程.再根据汽泡顶点温度必须高于热力平衡温度的原则,确定了接触周期,该计算分析结果与文献所给出的实验数据吻合较好.

关键词 漩涡运动, 汽泡, 接触时间

分类号 TK 224.12

沸腾换热技术在很多部门得到应用,特别在化工、动力和原子能等工业部门中.对于大容积泡状沸腾,汽泡在壁面上产生的频率是沸腾换热中的一个重要问题.汽泡产生频率是与汽泡的接触周期(τ_c)和汽泡的脱离周期(τ_d)有关.汽泡的接触周期是指当汽泡脱离后,补充进来的新鲜流体与加热面接触预热,直到产生第二个汽泡所需的时间;而脱离周期是指汽泡从产生开始经长大到脱离壁面为止所需要的时间.文[1]从假设紧贴壁面存在一薄的热边界层出发,曾研究过恒壁温度条件下汽泡接触周期.由于当汽泡膜在蒸发过程中需要从壁面取得热量,因而使壁面温度不能保持常数^[2],而且在很多情况下恒热流壁面往往作为一个自控条件.本文认为饱和水主要借助湍流漩涡运动由沸腾水内部运动至壁面,随后在一定时间内壁面热流将对该饱和水进行不稳定的导热,直到该漩涡顶部的温度达到热力平衡温度产生汽泡.之后,又经汽泡长大离开壁面被其它漩涡所代替,如此反复进行这个过程.按照湍流漩涡扩散的假设,讨论恒热流壁边界条件下汽泡的接触周期问题.

1 控制方程及求解

按照我们的湍流漩涡扩散的假设,抵达壁面的漩涡在它们的接触时间 τ_c 内,在漩涡内热扩散方程(一维假设)及边界和初始条件如下

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad k \frac{\partial T}{\partial x} = -q, \quad x = 0, \quad \tau = 0,$$

$$T = T_{\text{sat}}, \quad x = \delta, \quad \tau = 0; \quad T = T_{\text{sat}}, \quad 0 < x < \delta, \quad \tau = 0, \quad (1)$$

式中 a 是液体的导温系数($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), k 是液体的导热系数($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), q 是壁面热流($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), T 是温度($^\circ\text{C}$), T_{sat} 是饱和温度($^\circ\text{C}$), τ 是时间(s), x 是距离坐标(m),式(1)的解是

$$T(X, \tau) = T_{\text{sat}} + \frac{q}{k}(\delta - x) + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{2q\delta}{k\pi^2}(-1)^{n+1} \frac{1}{(n + 1/2)^2}$$

$$\times e^{-((n+1/2)^2 a^2 \pi^2 \tau) / \delta^2} \times \sin((n+1/2)\pi/\delta)(\delta-y), \quad (2)$$

式(2)是一个无穷级数和, 由于它收敛很慢, 特别是紧贴壁面处. 为此, 本文还用数值方法求解了式(1). 在数值方法中, 式(1)中的一阶导数项采用向前差分, 二阶导数采用中心差分, 经计算机求解得到不同时刻不同位置旋涡液体的温度分布, 限于篇幅, 数值方法从略.

2 气泡接触周期

从控制方程(1)可以求出旋涡液体温度分布, 为了求出接触周期, 还必须确定过热度. 由于表面张力的影响, 液体内的平衡气泡必须要有过热度, 这个过热度可以通过如下汽泡平衡关系确定, 即

$$\Delta T = 2f T_{\text{sat}}(v'' - v') / \lambda \gamma, \quad (3)$$

式中 f 是液体的表面张力($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$), λ 是液体的汽化潜热($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), v'' 和 v' 分别是饱和汽及饱和液体的比容($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$), $\Delta T = T - T_{\text{sat}}$ 是过热度, T_{sat} 是饱和温度($^{\circ}\text{C}$), r 为平衡汽泡半径(m), 此即为汽化核心半径.

沸腾时, 由于附于壁面的旋涡液体存在温度梯度, 因此产生半径为 r 的汽泡的条件是汽泡顶点的温度至少不低于汽泡的平衡温度. 这样, 根据这个泡化条件, 首先从式(3)中求出半径为 r 的泡化点的平衡温度, 再根据式(1)确定在汽泡顶点($2r$)处达到此热力平衡温度的时间, 这就是接触周期的确定过程.

3 结果与结论

从上面的控制方程(1)和平衡方程(3)可知, 对于一定的液体, 接触时间与热流密度及汽泡几何尺寸有关. 图1为热流密度(q)在 $1.0 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 旋涡液体温度随时间的变化情况, 其中曲线1为平衡曲线, 曲线2~5相应的 τ 值分别为 $5.92 \times 10^{-5} \text{ s}$, $65.1 \times 10^{-5} \text{ s}$, $160 \times 10^{-5} \text{ s}$ 和 $243 \times 10^{-5} \text{ s}$. 对于同一确定位置, 随着时间的增加, 温度也增大, 图1中带点的线是按式(3)的热力平衡曲线. 从图看出, 随着时间的增加, 温度线上移, 当达到某一时刻后, 温度分布线与热力平衡曲线相切. 图中切点为A, 该点表明在此时刻, 相应于横坐标值为直径的汽泡开始形成, 因此, 对于这一时间, 就是接触周期.

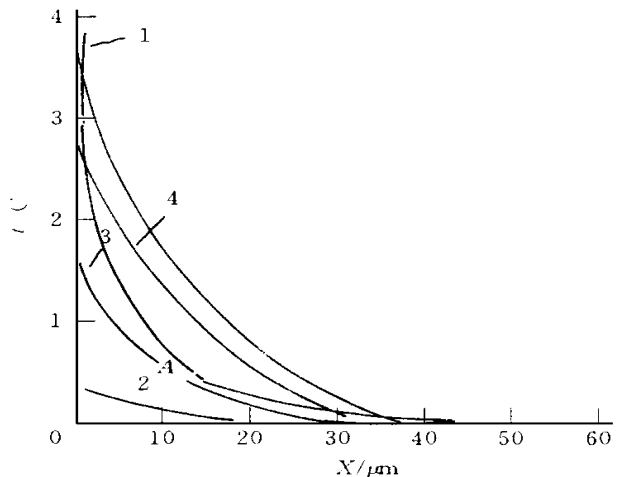


图1 接触时间的确定

本文以文[6]的一组实验数据进行了计算比较, 其热流 q 为 $3.28 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 所得 τ_c 为 $4.8 \times 10^{-4} \text{ s}$, 按文[6]的实验值则为 $5.0 \times 10^{-4} \text{ s}$. 本文计算值与实验值仅差4%, 说明本文的分析方法与实验结果相符.

图 2 画出热流密度(q) 分别为 $1.5 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $2.0 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时漩涡液体的温度分布及热平衡曲线. 在图 2(a) 中, 曲线 1 为平衡曲线, 曲线 2~4 的相应 τ 值分别为 $1.83 \times 10^{-4} \text{ s}$, $4.56 \times 10^{-4} \text{ s}$ 和 $5.92 \times 10^{-4} \text{ s}$. 在图 2(b) 中, 曲线 1 也为平衡曲线, 曲线 2~4 相应的 τ 值分别为 $3.73 \times 10^{-4} \text{ s}$, $4.85 \times 10^{-4} \text{ s}$ 和 $5.68 \times 10^{-4} \text{ s}$.

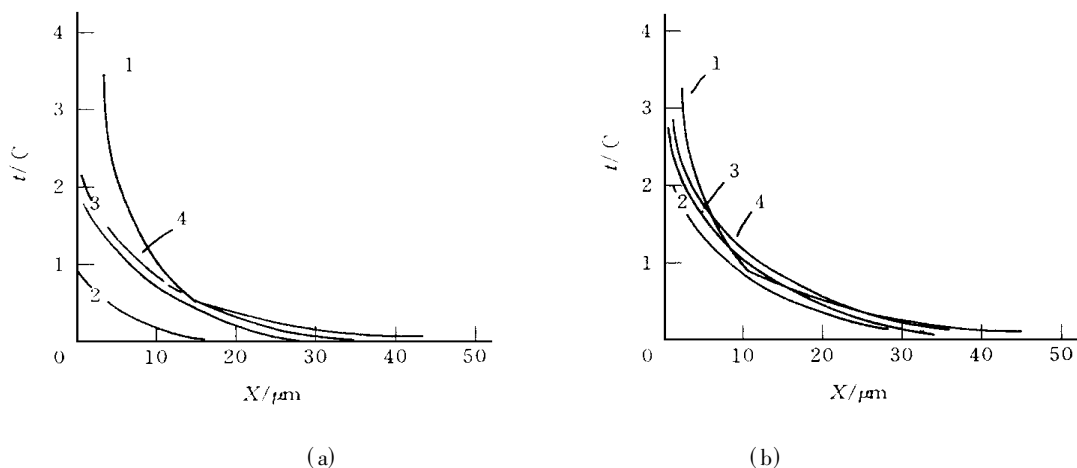


图 2 漩涡液体温度分布线

从上面的分析结果, 可以得到如下结论: (1) 对于同一泡化直径, 随着热流密度的增加, 其接触时间 τ 减少, 表明气泡产生频率增加, 沸腾加剧; (2) 在同一热流密度下, 随着接触时间的增加, 泡化直径减少, 表明此时有更多的活化点, 沸腾增强.

参 考 文 献

- 1 Hsu Y Y. On the size of range of active nucleation cavities on a heating surface. ASME ser. C, J. Heat Transfer, 1962, 84: 207 ~ 216
- 2 科利尔 J G. 对流沸腾和凝结. 北京: 科学出版社, 1982. 145 ~ 146
- 3 汤 孙. 沸腾传热和两相流. 北京: 机械工业出版社, 1975. 26 ~ 27

A Study of Contact Period of Bubbles under the Condition of Constant Wall Heat Flow

Weng Rongzhou Cai Xiao Chen Zheng

(Dept. of Chem. & Biochem. Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract Based on the theory of turbulent vortex diffusion, an equation of temperature distribution of fluid during the contact of vortex with the wall is established. Based on the principle by which the top temperature of the bubbles has to be higher than the temperature of thermodynamic equilibrium, the contact period is determined. The results of computing and analysis coincide with experimental data given by literatures.

Keywords vortex motion, bubbles, contact time