

狭缝通道内核态沸腾中的气泡动力学研究

郭 雷, 张树生, 程 林, 陈雅群

(山东大学 热科学与工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘 要: 为加深对狭缝通道内核态沸腾气泡动力学机理的探索, 对宽度为 2 mm 的 Γ 形和 Z 形两种不同截面形状的狭缝通道内核态沸腾展开研究, 通过数值模拟的方法探究不同壁面接触角对气泡生成及长大过程的影响, 不同狭缝形状与流动压降的关系, 计算中考虑了重力、表面张力和壁面黏附的作用。发现: 壁面接触角的不同对气泡的形态有很大影响, 壁面接触角越小, 产生的气泡越趋近于圆形, 气泡脱离壁面的时间越短, 反之, 气泡越难脱离壁面; 接触角的变化对换热系数也有影响, 壁面接触角越大, 气泡覆盖的面积越多, 壁面热阻越高, 传热系数降低; 表面张力在狭缝通道沸腾换热过程中所起的作用要远远大于重力; 气泡的成核对边界层产生强烈的扰动, 泡底微层的存在具有强化换热的作用; Z 形通道较 Γ 形通道换热系数有所提高, 但流动压降明显增加。

关 键 词: 核态沸腾; 狭缝通道; 气泡动力学

中图分类号: TK124 文献标识码: A

引 言

Klausner 等人对水平壁面上液体流动沸腾状况下的气泡动力学进行研究^[1], 采用高速摄像技术进行气泡参数的测量, 建立了气泡受力模型; Ishibashi 等人率先在多工作压力下^[2], 多种工质在流道间隙 σ 为 0.97~20 mm 的竖直环隙流道中进行了饱和沸腾实验, 结果发现: 如 $\sigma < 3$ mm 时, 沸腾换热得到显著强化, 换热系数随压力的升高呈上升的趋势。Wambgsans 等人也对细通道内 R113 的沸腾换热进行了研究, 发现核态沸腾和对流沸腾对换热有重要影响^[3]。Bowers 和 Mudawa 对当量直径 $d=0.51$ 和 2.54 mm 的两种微细通道进行了研究^[4], 发现微细通道内的流动沸腾特性与常规尺度通道有明显的差异。Suo 和 Griffith 最早对直径 $d=1$ 和 1.6 mm 的细管内汽液两相流进行了实验研究^[5], 认为表面张力的作用远大于重力。许多有关微细通道内汽液

两相流的研究表明, 表面张力是影响微细通道内汽液两相流流型的重要因素^[6~7]。

高集成度微电子器件对芯片冷却提出了更高的要求, 客观上加速了微细通道内沸腾汽液两相流动换热机理的研究进程。但截至目前仍未看到揭示微细通道沸腾换热机理的成果, 大部分集中于实验研究。本研究针对狭缝通道内沸腾实验条件要求苛刻、实验结果可重复性差等缺点, 提出利用数值模拟的方法对狭缝通道内水沸腾现象进行研究。根据文献[8]的实验条件, 借助 Fluen 软件, 通过 UDF 编程的方法, 对所建立的二维狭缝通道模型内的沸腾气泡动力学特性进行探索。

1 数值模拟过程

1.1 数学模型及其求解方法

对截面形状为 Γ 形和 Z 形的两种狭缝通道展开研究, 通道宽度为 2 mm, 长度为 100 mm。通道左右侧壁作为加热面, 分别设置不同的壁面接触角, 以探究接触角对气泡动力学的影响。

对水沸腾的数值模拟, 需要获得气泡的生成、长大、脱离等过程, 所以必须选用 VOF 模型进行模拟。对相界面的跟踪是通过求解两相容积比率方程来实现的, 选取几何重构选项, 考虑体积力的影响。由于在 Fluen 软件本身没有计算沸腾的模型, 需要通过用户自定义函数 UDF 来实现。沸腾换热的 UDF 程序主要包括: 从液相向汽相转化的质量、从汽相向液相转化的质量、相变潜热及表面张力随温度的变化。另外, 考虑到实际的沸腾过程皆为非均质沸腾, UDF 中还需定义气泡只能在加热壁面处产生。

UDF 程序中所涉及的汽液两相相互转化关系如下为^[9]:

收稿日期: 2010-05-20 修订日期: 2010-06-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(2007CB206900)

作者简介: 郭 雷(1983-), 男, 山东莱芜人, 山东大学博士研究生。

当 $T \geq T_{sat}$ (沸腾状态)

$$R_L = -\lambda_{\alpha_L} \rho_L \frac{|T - T_{sat}|}{T_{sat}}, R_w = \lambda_{\alpha_L} \rho_L \frac{|T - T_{sat}|}{T_{sat}}$$

当 $T < T_{sat}$ (凝结状态)

$$R_L = \lambda_{\alpha_v} \rho_v \frac{|T - T_{sat}|}{T_{sat}}, R_w = -\lambda_{\alpha_v} \rho_v \frac{|T - T_{sat}|}{T_{sat}}$$

式中: α_v, α_L —汽相和液相体积分数, $\alpha_v + \alpha_L = 1$; ρ_v, ρ_L —汽相和液相的密度; R_w, R_L —相间传质; T —系统温度; T_{sat} —饱和温度, λ —松弛因子。界面处的传热量通过下式计算: $q = m \times h_{fg}$, 其中 m 为汽液间相互转化的质量, FLUENT中可以通过 C-VOF和 C-R两个宏得到。

另外, 根据文献 [10] 的实验结果, 设定表面张力与温度的关系为:

$$\sigma = 0.09537 - 2.24 \times 10^{-6} T - 2.560 \times 10^{-7} T^2$$

1.2 网格划分及边界条件的设定

狭缝通道内的沸腾模型对网格的敏感度非常高, 贴近加热壁面的薄层是气泡产生的区域, 其对网格要求更加苛刻, 此处网格尺寸的细微变化都有可能引起解的不收敛。

对贴壁薄层进行网格加密处理, 最小网格尺寸由气泡临界半径确定。根据气泡临界半径可得^[11],

$$r_c = \frac{2\sigma T_{sat}}{h_{fg} \rho_v (T_i - T_{sat})_c}$$

在确定加热表面温度的情况下, 可以估算出气泡半径, 依据经验, 最小网格尺寸取为 r_c 的 1/10 较为合适。

表面张力是一种作用在表面上的力, 表面张力的不同引起液体与壁面接触角的变化。FLUENT中表面张力模型是由 Brackbill 提出的连续表面力模型。由于三角形和四面体网格上表面张力影响的计算不如四边形和六面体网格的计算精确, 所以表面张力影响最重要的区域应当采用四边形和六面体网格。

采用 VOF模型进行相界面跟踪时, 必须设定表面张力, 在细通道沸腾换热中, 有时表面张力的影响甚至大于重力的影响。表面张力对数值模拟的影响是否重要取决于两个无量纲数: 雷诺数 Re 和毛细数 Ca 或雷诺数 Re 和韦伯数 (Weber number) We

水沸腾过程中, 壁面处有气泡产生, 当壁面、水、蒸汽 3 种物质互相接触时, 气泡和壁面之间会形成一个角度, 把这一角度称为接触角。当 VOF模型与表面张力模型联合使用时, 指定一个壁面接触角是必要的。在 Young方程中, 接触角的值不是唯一的, 具有随意性, 可在两个相对稳定值之间变化, 最大值

称为前进接触角, 最小值称为后退接触角^[12]。在 UDF中, 设定气泡产生的一刻为气泡生长周期的零时刻, 气泡脱离的时刻为这一周期的终时刻。在一个气泡周期内假定气泡接触角的是随时间线性单调递减变化, 根据铜和水的物性, 设定接触角的变化范围为 $120 \sim 60^\circ$ 。

模拟过程中, 根据文献 [8] 的实验条件, 设定左侧竖直壁面作为加热面, 底部流体流入的质量流量为 $83.6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 上部出口为自由出口, 采用恒定热流加热方式, 设定初始系统温度为 370 K , UDF中设定沸腾温度为 373.15 K , 入口压力为 125 kPa , 壁面粗糙度为 $6.4 \mu\text{m}$ 。

1.3 求解设置

计算中采用 Geo.Reconstuc 的方法, 定义水为主相, 水蒸气为第二相。为提高解的收敛性, 打开 Body Force Formulation选项, 选择 Specified Operating Density 并且在 Operating Density下设定水蒸气密度。压力插值采用 PRESIO方法, 速度压力耦合方案采用 PISO方法。

1.4 相界面热质交换

所建立模型包含两种介质水和水蒸气, 两相克努森数 k_n 远远小于 0.001 , N-S方程适用于本模拟对象。本模型沸腾换热过程汽液界面 $S_c(r, t)$ 上同时存在着传热和传质过程, 在相界面上, 温度连续但不光滑, 比焓、密度和法向渗流速度都不连续。

在相界面上, 存在质量守恒方程, 对于汽相有:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v V_v) = \nabla \cdot (\rho_v D_v \nabla \alpha_v) + \Gamma_v$$

对于液相有:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l V_l) = \nabla \cdot (\rho_l D_l \nabla \alpha_l) + \Gamma_l$$

蒸发或冷凝速率 Γ_v 由下式给出^[13]:

$$\Gamma_v = \frac{h_v A_v (T_{sat} - T_i)}{h_g}, \Gamma_l = \frac{h_v A_v (T_i - T_{sat})}{h_g}$$

式中: h_v —相间传热系数; A_v —单元体积的界面面积; T_{sat} —饱和温度; h_g —汽化潜热。质量守恒方程中的 D 代表与相的有效粘度相等的扩散系数。

在相界面上, 还存在能量守恒方程, 液相和汽相假设为不可压缩, 压力对时间的倒数可以忽略, 汽相能量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v c_v T_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v c_v V_v T_v) = \nabla \cdot (k'_v \nabla T_v) + q_v + \Gamma_v h_f$$

液相能量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l c_l T_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l c_l V_l T_l) =$$

$$\nabla \cdot (k' \nabla T_1) + q_1 + \Gamma v_1 h$$

式中: q_1 、 q_1 —汽液两相转化所需要的能量; h —液相的焓; h —汽相的焓。

1.5 气泡动力学模型

附着在加热壁上生长着的气泡受到浮力 F_B 、气泡生长的压力 F_P 、主流速度推力 F_T 、表面张力 F_S 、阻力 F_D 及惯性力 F_I 的作用^[14], 如图 1(a) 所示。

其中表面张力 F_S 和阻力 F_D 阻止气泡脱离壁面, 惯性力 F_I 阻止气泡的生长, 这 3 个力视为负力; 浮力 F_B 、气泡生长的压力 F_P 和主流速度推力 F_T 促使气泡脱离壁面, 视为正力。它们之间的平衡方程为: $F_B + F_P + F_T = F_S + F_D + F_I$ 气泡直径较小时, 垂直方向上受到的浮力 F_B 和主流推力 F_T 的合力较小, 当气泡直径逐渐变大, 气泡会在 F_B 和 F_T 的合力作用下发生变形。

假定气泡的生长主要是在加热壁面上完成, 气泡完全脱离壁面之后, 所受力如图 1(b) 所示, $F_B + F_T = F_D + F_I$, F_I 为惯性力, 只要存在 $|F_I| > 0$, 则气泡将加速上浮。

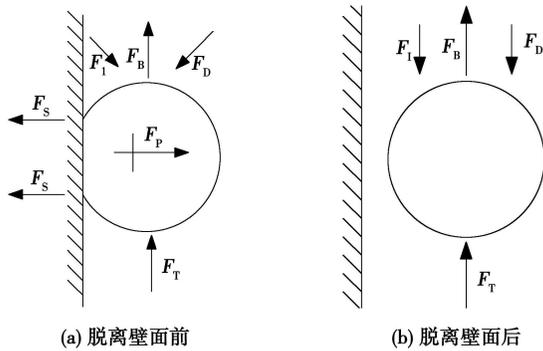


图 1 动态气泡生长所受矢量力

2 数值模拟结果及分析

2.1 壁面接触角对气泡形态的影响

图 2 所示 Z 形通道左侧壁面接触角 α 设定为 120° , 右侧壁面接触角设定为 30° 。两侧壁面所生成的气泡形态有明显区别, 左侧壁面润湿性较差, 气泡呈扁平状, 右侧壁面生成的气泡呈较规则的圆形。壁面接触角大导致气泡铺展生长, 与壁面的接触面积增大, 气泡体积会比右侧气泡大一些, 势必会影响气泡的生长速度和脱离频率。从图中可以清楚的看到, 右侧气泡的脱离直径较小, 脱离频率较高, 而左侧气泡脱离速度极为缓慢。15 ms 时间内, 右侧壁

面的气泡已经完成了从生成到脱离的全部过程, 而左侧的大气泡仍未完成脱离。左侧壁面附近的小气泡是来流夹带的气泡, 并非从左侧壁面脱离的气泡。

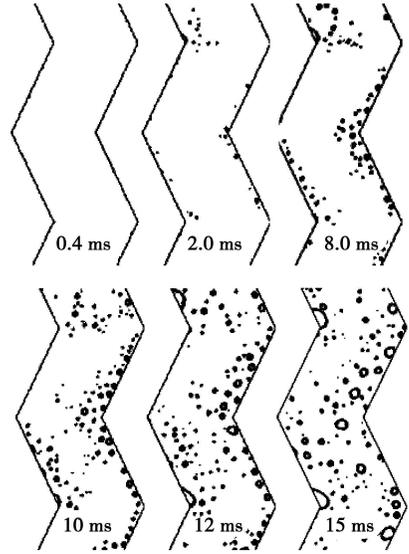


图 2 气泡生长过程示意图 (左侧 $\alpha = 120^\circ$, 右侧 $\alpha = 30^\circ$)

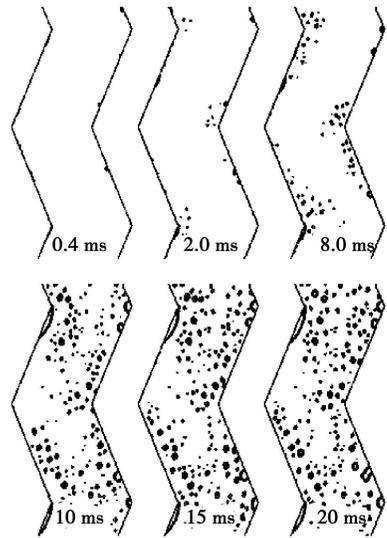


图 3 气泡生长过程示意图 (左侧 $\alpha = 160^\circ$, 右侧 $\alpha = 60^\circ$)

图 3 所示 Z 形通道左侧壁面接触角 α 设定为 160° , 右侧壁面接触角设定为 60° 。相比图 2 左侧壁面接触角继续增大, 其结果是所生成的气泡更加具有贴壁特性, 脱离过程更加困难, 在 20 ms 时间内左侧壁面气泡没有脱离迹象。右侧壁面生成气泡不再接近圆形, 壁面接触角的增大, 减小了壁面的润湿特性, 气泡与壁面的接触面积增大, 气泡脱离时间增

长,脱离频率下降。

2.2 气泡成核对换热特性的影响

气泡的成核是在壁面的特定区域产生的,即便是在流速极低的狭缝通道内,成核区域周围的液体流速也是很大的,可以达到 0.3 m/s 。如此高的速度是造成壁面附近温度边界层扰动的动力,这种扰动所影响的区域是以气泡核为中心,两倍于气泡直径的区域,被扰动的液体产生了平移、旋转和振动,并且造成了气泡底部上下两侧产生了漂流区。漂流区的存在将过热液体推向主流,在来流速度的影响下,过热液体的速度方向又发生改变,如图 4 所示。

剧烈的扰动是换热系数增加的主要原因。但此时,泡底微层的存在对换热系数的增加也有着重要的贡献。图 4 所示泡底微层沿壁面以与主流方向相反的速度流入成核区域,此微层液体所传递的热量大大超过形成气泡所需的汽化潜热。气泡底部的温度低于壁面温度,气泡要从壁面吸热,气泡顶部的温度高于周围液体的温度,气泡向液体放热。图中所示换热系数最高处即为泡底微层所在处。

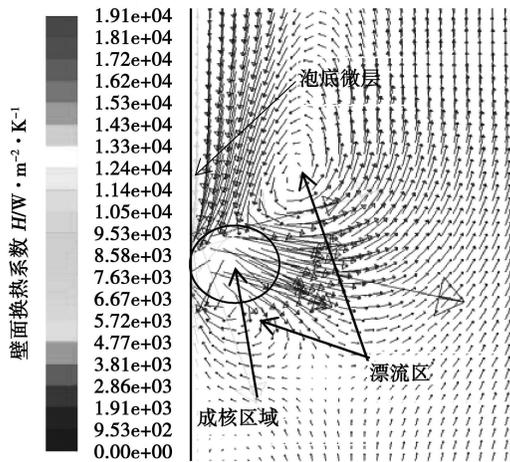


图 4 Z形狭缝气泡运动与换热关系

2.3 压力及换热系数与加热时间的关系

由图 5 可知, Z形狭缝的流动压降明显增加,平均增幅在 20% 以上,压降对于通道形状具有敏感性。加热初始阶段为单相流动阶段,两种通道的压差差距较小,但当有气泡产生开始,两种通道的压差有了明显的差别, Z形狭缝压差有明显升高趋势,而 I形通道的压差升速较缓。

通道形状的变化势必会引起换热系数的变化,如图 6 所示, Z形通道换热系数较 I形通道明显升高,平均增幅为 13%,但换热系数的增加是以增加

流动压降为代价的。狭缝形状改变之后,换热系数的增幅不及流动压降增幅大,经济性较差。

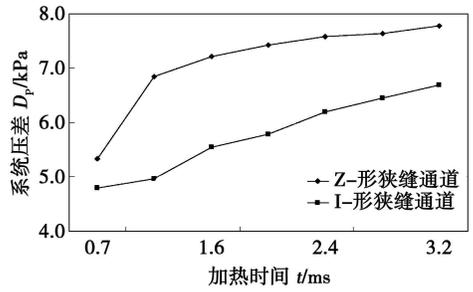


图 5 系统压差随加热时间的变化

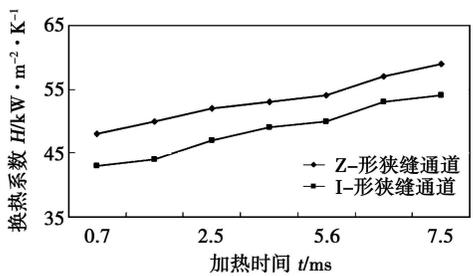


图 6 换热系数随加热时间的变化

分析认为,宽度为 2 mm 的狭缝通道内流动,本身阻力较大,通道形状的细微改变都会引起流动压降的剧增,通道宽度越窄,压降对通道形状越敏感。

2.4 狭缝形状对流动换热的影响

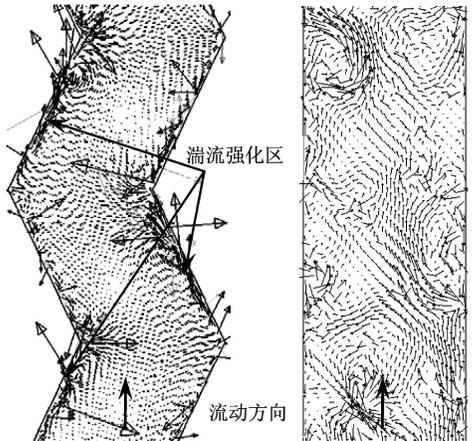


图 7 狭缝形状对流动换热的影响

图 7 为 Z形和 I形狭缝通道内流场分布,经过相同的加热时间, Z形狭缝迎来来流面速度变化剧烈,出现明显的湍流强化现象,而背向来流的面上,流速变化较缓慢。 Z形狭缝的迎来流面速度的强烈变化,主流速度推力 F_T 较大,使气泡脱离壁面的力量

增加, 势必会导致此面上生成气泡的脱离频率的增加。通道形状的改变, 强化了扰动, 使流场不像 形通道那样的分布均匀, 推力 F_T 的方向不再是平行于壁面, 这时 F_T 具有了促使气泡脱离的作用。

相比 Z 形狭缝, 形狭缝内的流场分布较规则, 虽然壁面上气泡的生成会对流场的分布产生一定影响, 但速度场的分布较 Z 形通道分布更均匀。形狭缝内气泡的产生和脱离频率也较低, 但脱离气泡的最大直径较大。气泡产生和脱离频率的减小, 使得对边界层的扰动作用不够强烈, 这是 形狭缝换热系数不如 Z 形狭缝高的原因之一。

3 结 论

(1) 壁面接触角对气泡形态有明显影响, 接触角越小, 生成的气泡越接近规则的圆形。接触角越大, 气泡与壁面的接触面积增大, 气泡的生长速度和脱离频率减小。

(2) 泡底微层的存在加速了壁面附近的对流换热, 气泡运动产生的漂流区加剧了扰动, 破坏了温度边界层, 对于沸腾换热系数的提高有较大贡献。

(3) Z 形狭缝在强化换热方面的作用是明显的, 但要综合分析压降增加与换热强化的关系。

(4) 壁面接触角为线性变化和表面张力是温度的函数等理想化假设的引入, 使模拟结果与实验值相比仍有较大误差。

参考文献:

[1] KLAUSNER J F, MEI R, BERNHARD D M et al. Vapor bubble departure in forced convection boiling [J]. Int J Heat Mass Transf, 1993, 136(3): 651—662.

- [2] ISHIBASHI E, NISHIKAWA K. Saturated boiling heat transfer in narrow spaces [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1969, 12: 863—894.
- [3] WAMBEGANSS M W, FRANCE D M, JENDRZEJCAYK J A et al. Boiling heat transfer in a small diameter tube [J]. ASME J Heat Transfer, 1992, 115(4): 963—972.
- [4] BOWERS M B, MUDAWAR I. High flux boiling in low flow rate low pressure drop in channel and micro channel heat sinks [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37(2): 321—332.
- [5] SUO M, GRIFFITH P. Two-phase flow in capillary tubes [J]. Trans ASME J Basic Eng Series D, 1964, 86(3): 576—582.
- [6] MISHIMA K, HIBIKI T. Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes [J]. Int J Multiphase Flow, 1996, 22(4): 703—712.
- [7] 陈二锋, 厉彦忠, 王斯民. 竖直环管内低压水过冷沸腾数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 855—859.
- [8] 陈德奇, 潘良明, 袁德文, 等. 竖直矩形窄流道内气泡生长的实验研究 [J]. 核动力工程, 2008, 29(5): 52—55.
- [9] LEE W H. A pressure iteration scheme for two-phase flow modeling [R]. (Technical Paper IA-UR-79-975) Los Alamos, New Mexico, USA, Los Alamos National Laboratory, 1979.
- [10] 汤传义. 水的表面张力与温度的关系 [J]. 安庆师范学院学报 (自然科学版), 2000, 6(1): 73—74.
- [11] 林瑞泰. 沸腾换热 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [12] 王新平, 陈志方, 沈之荃. 高分子表面动态行为与接触角时间依赖性 [J]. 中国科学 B 辑, 2005, 35(1): 64—69.
- [13] SAD TALEBI, FARSHAD ABBASI, HADI DAVLUI. A 2D numerical simulation of subcooled flow boiling at low pressure and low flow rates [J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(1): 140—146.
- [14] 哈恩 E, 格里古尔 U. 沸腾换热 [M]. 王兴国, 华诚生, 译. 北京: 国防工业出版社, 1988.

(编辑 伟)

新技术、新工艺

华能 930 MW 联合循环热电站项目

据《Gas Turbine World》2010 年 7~8 月号报道, 华能电力国际公司宣布华能北京热电站扩建工程已得到北京市发展和改革委员会的批准。

该热电站将由 2×1 (两台燃气轮机和一台汽轮机) F 级燃气轮机联合循环供给动力, 供热容量为 650 MW, 具有低 NO_x 排放、低噪声、水处理和环境保护的设施。

华能电力国际 (HPI) 是中国最大的独立的公共电力生产者, 并且具有在中国开发、建造电厂及营运权, 同时管理并拥有一些大型的火力发电站。

(吉桂明 摘译)

monitoring points is smaller than that under off design operating conditions. Key words: centrifugal pump; non-steady; pressure pulsation

狭缝通道内核态沸腾中的气泡动力学研究 = Study of the Bubble Kinetics in Nucleate Boiling Inside Narrow Gap Passages [刊, 汉] GUO Lei, ZHANG Shu-sheng, CHENG Lin, et al (Research Center for Thermal Sciences and Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 299 ~ 303

To deepen the exploration of the mechanism governing the bubble kinetics in nucleate boiling inside narrow gas passages, studied was the nucleate boiling in narrow gap passages of two different sectional shapes, i.e. I-shape of 2 mm wide and Z-shape. By adopting a numerical simulation method, the influence of different wall surface contact angles on the bubble formation and growth process and the relationship between the gap shapes and flow pressure drops were investigated. During the calculation, the effect of the gravity force, surface tension and wall surface adhesion were taken into consideration. It has been found that the wall surface contact angles exercise a very big influence on the morphology of the bubbles. The smaller the wall surface contact angle, the more close to a circle the bubbles produced and the shorter the time for the bubbles to depart from the wall surface. Contrarily, it is more difficult for the bubbles to depart from the wall surface. Any change in the contact angle also influences the heat exchange coefficient. The bigger the wall surface contact angle, the more the area covered by the bubbles, the bigger the heat resistance of the wall surface and the smaller the heat conduction coefficient. The surface tension plays a role far bigger than the gravity force in the boiling heat exchange in the gap passages. The nucleation of bubbles will lead to a strong disturbance to the boundary layer. The existence of the thin layer at the bottom of the bubbles can function to intensify the heat exchange. The heat exchange coefficient of the Z-shaped passage is somewhat improved compared with that of the I-shaped passage and the pressure drop in the flow process, however, increased conspicuously. Key words: nucleate boiling; narrow gap passage; bubble dynamics

流体纵掠多孔泡沫金属换热器中顺列传热管外表面的试验研究 = Experimental Study of a Fluid Longitudinally Sweeping the Outer Surface of the Heat Pipes Arranged in Line in a Porous Foam Metal Heat Exchanger [刊, 汉] WANG Jing-hao, GOU Qing-ge (East China Design Subcompany, China National Petroleum Corporation (CNPC), East China Designing Institute, Qingdao, China, Post Code: 266071), LI Ju-xiang (College of Energy Source, Nanjing Polytechnical University, Nanjing, China, Post Code: 210009), SHI Yu (Nantong Acetic Acid Fiber Co. Ltd., Nantong, China, Post Code: 226008) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 304 ~ 309

An experimental study was performed of the flow and heat transfer of a fluid in the shell side longitudinally sweeping the outer surface of the heat conduction tubes in the porous foam metal Brinkman-Forchheimer extended Darcy flow