

# 竖直窄缝水工质常压过冷沸腾 流动与传热分析

郭 昂<sup>1</sup>, 杨立新<sup>1</sup>, 陈畏蒞<sup>2</sup>

1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京, 100044; 2. 中国核动力研究设计院, 成都, 610041

**摘要:** 以去离子水为工质, 对常压下竖直窄缝通道内过冷沸腾流动与换热规律进行实验和数值模拟研究。对壁面气泡核化特点进行可视化实验分析, 建立 2 mm 窄缝通道的壁面核化沸腾模型, 包括: 汽化核心密度、气泡脱离直径和气泡脱离频率关联式。以两流体模型为基础, 结合壁面热量分配伦斯勒理工学院 (RPI) 模型以及壁面核化沸腾模型, 建立竖直窄缝通道内过冷沸腾流动传热计算流体动力学 (CFD) 数值模型, 对典型实验工况进行模拟分析, 并与实验结果进行对比, 两者吻合良好。

**关键词:** 窄缝通道; 过冷沸腾; 气泡; CFD

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A

## 0 前 言

核反应堆中燃料组件冷却剂加热通道包括棒束通道类型和矩形窄缝通道类型<sup>[1]</sup>; 前者流道尺寸与燃料棒直径相当, 可以使用较为成熟的经验或半经验关系式预测其热工水力性能; 后者流道由于窄缝方向上尺度较小, 一维受限的空间尺度导致通道内流动传热特性, 尤其是气泡演化特性与常规尺度的矩形通道流动传热具有较大的区别<sup>[2,3]</sup>。因此, 使用目前的经验或半经验关系式预测存在较大的偏差, 而清晰认识这些问题亟需对矩形窄缝流道内流体的过冷沸腾流动和传热特性进行深入地研究。本文以矩形窄缝通道内过冷沸腾流动换热特性为研究目标, 通过可视化实验与数值模拟相结合的手段开展研究。借助高速摄像及图像处理技术, 获得壁面气泡的核化密度、脱离直径和脱离频率等关联式, 建立了 2 mm 窄缝通道的壁面核化沸腾模型。以两流体模型为基础, 结合壁面沸腾模型建立竖直窄缝通道内过冷沸腾流动传热 CFD 数值模型, 对典型实验工况进行了模拟分析, 并与实验结果进行了对比分析。

## 1 实验研究

### 1.1 实验系统与流程

实验系统如图 1 所示, 该系统可进行窄缝通

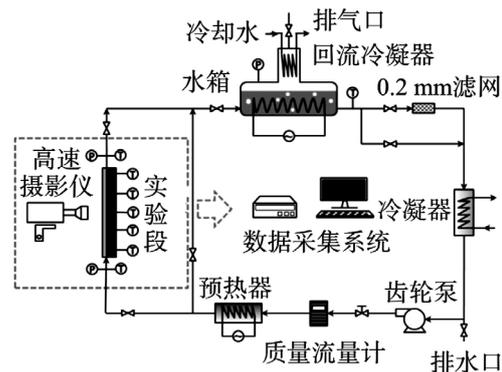


图 1 实验段截面结构示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

道流动换热性能、气泡动力学可视化实验研究。实验系统主要包括实验段、驱动系统、流量测量系统、温度控制系统、数据采集系统以及高速摄像系统等部分。实验工质采用去离子水, 通过持续 3~4 h 的煮沸除去水中可溶性气体; 实验过程中维持水箱中的水为沸腾状态, 阻止气体再度溶入水中; 水蒸汽通过回流冷凝器回收, 保证水不会被烧干; 通过调节冷凝器与预热器共同控制实验段水的入口温度, 通过调节齿轮泵功率来控制质量流量。

### 1.2 实验流道

实验流道如图 2 所示。整个流道长度  $L=330$  mm, 宽度  $W=28$  mm, 流道截面高度  $H=2$  mm;

加热面长度  $L_c=190$  mm, 宽度  $W_c=20$  mm, 加热面两侧均有 4 mm 非加热面。流道两端均有 65.5 mm 长的流动稳定段。经热平衡分析, 整个加热段的热效率可以达到 90% 以上。

### 1.3 实验参数

实验系统开口压力为 1 个大气压。实验各参数取值范围为: 质量流速  $G=122\sim 656.7$  kg/(m<sup>2</sup>·s), 壁面过热度  $\Delta T_w=38\sim 12$  , 工质主流过冷度  $\Delta T_{sub}=3.2\sim 27$  。

流量测量采用 DMF-1-3-A/DX 型质量流量计, 测量误差不超过  $\pm 0.2\%$ ; 进出口工质温度测量采用端头直径为 3.0 mm 的 K 型铠装热电偶, 误差为  $\pm 0.3$  ; 加热段的热电偶采用误差为  $\pm 0.2$  的 T 型热电偶, 通过 3 排共 15 只热电偶的测量值可以算出加热热流密度与壁面温度分布; 实验本体进出口压力测量则采用精密等级为 0.2 级的压力变送器 HSTL-800。由于通道缝隙太小, 无法直接测量沿程各截面流体主流平均温度, 而是通过测量进出口温度与压强间接求出。

实验中可视化观测采用 MotionPro Y4 型高速摄影仪, 其最高帧频可达 20000 帧/s。利用图像处理软件 MIDAS2.0 进行图像分析, 由此得到汽化核心密度与气泡脱离直径等数据。

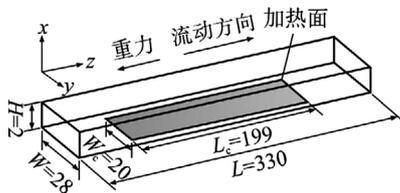


图 2 流道尺寸

Fig. 2 Dimension of Narrow Channel

## 2 实验结果分析

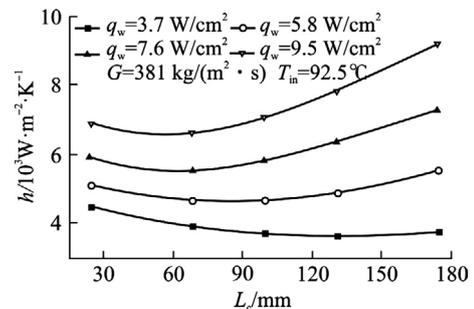
### 2.1 换热特性

在分别改变有效壁面热流密度 ( $q_w$ )、入口温度 ( $T_{in}$ ) 和入口质量流速  $G$  中的 1 个参数, 而另外 2 个参数保持不变的情况下对窄缝通道沿程换热系数 ( $h$ ) 进行实验研究。如图 3a ~图 3c 是典型实验工况下  $h$  沿程变化情况。由于入口效应的存在, 在加热段的始端  $h$  较高, 随之  $h$  逐渐下降, 如果流动为单相流, 没有产生气泡,  $h$  降低后会保持不变; 如果流动是过冷沸腾, 有气泡产生,  $h$  沿流动方向会先下降后上升, 原因是相变提高了  $h$ 。

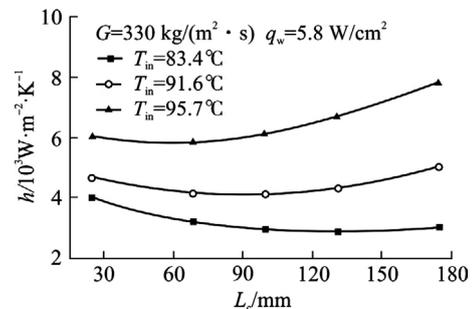
由图 3a 可知, 沿程  $h$  随  $q_w$  的增加而增加; 由图 3b 可知, 沿程  $h$  随  $T_{in}$  的升高而增加; 而由图 3c 可知, 沿程  $h$  与  $G$  并非简单的单调关系, 不同  $G$  工况下的 4 条换热曲线出现了交叉情况, 而这也与相变的出现有关。对单相流动,  $G$  越高,  $h$  越大; 而随着  $G$  降低, 在加热段后段越容易产生相变, 相变的发生极大提高了局部换热系数, 故低  $G$  工况的  $h$  呈现后来居上的趋势。

### 2.2 壁面气泡核化规律分析

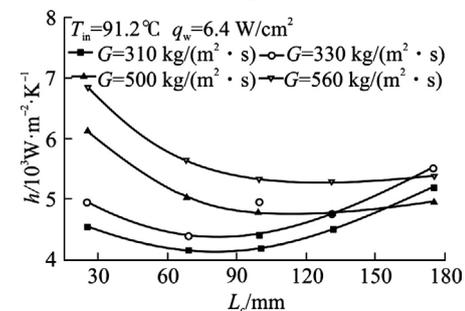
实验发现: 汽化核心密度只与壁面过热度有关, 随着壁面过热度的升高, 汽化核心密度明显增加; 气泡脱离直径与质量流速、壁面过热度 and 主流过冷度有关, 其中壁面过热度的影响因子最大, 主流过冷度的影响因子最小; 气泡脱离频率



a  $q_w$  的影响



b  $T_{in}$  的影响



c  $G$  的影响

图 3 不同参数对沿程换热系数的影响

Fig. 3 Effect of Different Parameters on Heat Transfer Coefficient along Flow Direction

由气泡等待时间主导, 主要与壁面过热度有关。依据实验数据, 并根据文献[4,5]的分析方法, 可以得到如下经验公式。

汽化核心密度:

$$N_a = 0.28\Delta T_w^{2.66} \quad (1)$$

式中,  $N_a$  为汽化核心密度,  $N/cm^2$ ;  $\Delta T_w$  为壁面过热度。公式在  $\Delta T_{w,ONB} < \Delta T_w < 12^\circ C$  的范围内有效, 这里  $\Delta T_{w,ONB}$  为沸腾起始点的壁面过热度。

气泡脱离直径:

$$D_d = 0.0058l_c e^{-0.0001Re_1} Ja_{sup}^{1.45} e^{-0.015Ja_{sub}} \quad (2)$$

式中,  $D_d$  为气泡脱离直径,  $m$ ;  $l_c = \sqrt{\sigma/g(\rho_l - \rho_v)}$  为特征长度;  $Re_1$  为液体入口雷诺数;  $Ja_{sup}$  和  $Ja_{sub}$  分别为过热和过冷雅克比数。公式在  $1500 < Re_1 < 8000$ ,  $11 < Ja_{sup} < 36$ ,  $3 < Ja_{sub} < 61$  的参数范围内有效。

气泡脱离频率:

$$f = 0.032\Delta T_w^{3.08} \quad (3)$$

$$t_w = (1 - 0.45f^{0.8})/f \quad (4)$$

式中,  $f$  为气泡脱离频率,  $Hz$ ;  $t_w$  为气泡等待时间,  $s$ 。公式在  $\Delta T_{w,ONB} < \Delta T_w < 12^\circ C$  的参数范围内有效。

### 3 数值模拟

#### 3.1 数学模型

完整描述矩形狭缝通道内过冷沸腾流动传热的数值模型主要有: 描述两相作用的两流体模型; 描述两相湍流特性的湍流模型; 描述壁面加热沸腾现象的壁面热流分配伦斯勒理工学院(RPI)模型<sup>[6]</sup>; 描述壁面过冷沸腾气泡核化特性的核化模型。

本文以两流体模型作为基本框架, 通过RPI模型, 将上节实验获得的矩形狭缝通道壁面核化模型与两相流模型耦合, 建立完整描述窄缝壁面过冷沸腾流动传热现象的CFD数学模型, 实现微观的核化沸腾与宏观的气液两相流动耦合模拟求解。

#### 3.2 模型设置

本文数值模型中, 水为连续相, 湍流方程为  $k-\varepsilon$  模型, 对壁面为无滑移边界条件; 水蒸气为离散相, 设为层流, 对壁面为自由滑移边界条件。相间曳力模型为Ishii Zuber模型, 并考虑非曳力的影响(升力、壁面润滑力以及紊流耗散力)。气泡

本身的聚合和破碎会增强周围流体的紊流特性, 引入Sato模型<sup>[7]</sup>描述相间的紊流效应。相间换热模型采用Ranz Marshall模型。求解软件采用ANSYS CFX。

#### 3.3 几何及网格模型

根据实验通道结构(图2), 建立三维几何模型。根据流速范围, 确定近壁面第一层网格的高度, 使壁面  $y^+ > 11.06$ , 满足  $k-\varepsilon$  模型中标准壁面函数对网格的要求。通过网格敏感性分析, 最终采取  $71 \times 12 \times 7(L \times W \times H)$  的网格方案。

#### 3.4 模拟结果与实验结果对比分析

3.4.1 沿程壁面温度分布 首先以沿程壁面温度为参考, 将数值模拟结果与相应的实验结果进行对比分析。选取了两种不同入口条件下的实验结果, 其中质量流速和入口温度都有一个较大的变化。对比结果表明, 模拟结果与实验数据的分布。

3.4.2 平均壁面温度 为进一步验证数值模拟的有效性, 保持入口条件不变而增加热流密度, 对壁面平均温度变化趋势进行预测。在两种不同入口条件下进行分析。发现数值模拟结果不仅与实验数据有较好的吻合度, 还能够较好的预测变化趋势, 表明本文建立的数值模型可以较好地预测窄缝通道换热特性。

### 4 结论

(1) 竖直矩形窄缝通道内过冷沸腾沿程换热系数呈先减小后增大的趋势, 并随壁面热流密度、入口温度和质量流速的变化表现出不同的规律。

(2) 通过气泡可视化图形分析建立了  $2 \text{ mm}$  窄缝通道壁面核化沸腾模型, 给出了气泡脱离直径, 气泡脱离频率和汽化核心密度的关联式。

(3) 以两流体模型为基础, 结合 RPI 以及壁面核化模型建立了完整描述窄缝过冷沸腾流动传热现象的 CFD 数学模型, 通过典型工况数值模拟结果与实验测量结果的对比, 验证了窄缝通道壁面核化模型的准确性。

参考文献:

- [1] Ha T, Garland W J. Hydraulic study of turbulent flow in MTR-type nuclear fuel assembly[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236(9): 975-984.
- [2] Bergles A E, Rohsenow W M. The determination of forced-convection surface-boiling heat transfer[J]. Journal of Heat Transfer, 1964, 86(3): 365-372.

- [3] Lie Y M, Lin T F. Subcooled flow boiling heat transfer and associated bubble characteristics of R-134a in a narrow annular duct[J]. International journal of heat and mass transfer, 2006, 49(13): 2077-2089.
- [4] Basu N, Warriar G R, Dhir V K. Onset of nucleate boiling and active nucleation site density during subcooled flow boiling[J]. Journal of heat transfer, 2002, 124(4): 717-728.
- [5] Basu N, Warriar G R, Dhir V K. Wall heat flux partitioning during subcooled flow boiling: Part 1—model development[J]. Journal of heat Transfer, 2005, 127(2): 131-140.
- [6] Kurul N, Podowski M Z. On the modeling of multidimensional effects in boiling channels[C]//ANS Proceedings of 27th National Heat Transfer Conference, Minneapolis. 1991: 28-31.
- [7] Sato Y, Sekoguchi K. Liquid velocity distribution in two-phase bubble flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1975, 2(1): 79-95.

## Investigation of Flow and Heat Transfer of Subcooled Boiling of Water in Vertical Narrow Channel at Atmosphere Pressure

Guo Ang<sup>1</sup>, Yang Lixin<sup>1</sup>, Chen Weihong<sup>2</sup>

1. Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China; 2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

**Abstract:** In the present paper, the flow and heat transfer characteristics of subcooled boiling of deionized water was investigated in a vertical rectangular narrow channel at atmospheric pressure. Flow visualization experiments were conducted to study the bubble nucleation on the heating wall. Based on the experimental observations, empirical models were proposed to correlate the active nucleation site density, bubble departure diameter and bubble departure frequency with given flow conditions for 2mm vertical narrow channel. Then, computational fluid dynamics (CFD) models were developed to simulate the subcooled flow boiling in the narrow channel by combining the two-fluid model, the Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) wall heat flux partitioning model and the proposed bubble nucleation correlations. The numerical results show excellent agreement with the experimental data under the typical test conditions simulated.

**Key words:** Narrow channel, Subcooled boiling, Bubble, CFD

作者简介:

郭 昂 (1989—), 男, 硕士研究生。2011年毕业于北京交通大学热能与动力工程专业, 获学士学位。现主要从事沸腾传热的实验与模拟研究。

杨立新 (1969—), 男, 副教授。2001年毕业于清华大学工程热物理专业, 获博士学位。现从事工程热物理相关研究工作。

陈畏洪 (1977—), 男, 高级工程师。2004年毕业于清华大学工程物理系, 获博士学位。现从事反应堆热工水力与安全分析研究工作。

(责任编辑: 杨洁蕾)