

矩形通道过冷沸腾可视化实验研究

黄家坚¹, 钟明君², 袁园^{1*}, 周源^{1*}, 王丽³

¹四川大学物理学院, 四川 成都

²中国核动力研究设计院, 四川 成都

³中山大学中法核科学与技术学院, 广东 珠海

收稿日期: 2023年5月31日; 录用日期: 2023年7月14日; 发布日期: 2023年7月21日

摘要

板状燃料组件冷却剂通道狭窄, 与常规圆管通道内的气泡生长不同, 其受限流道将引发气泡形变、局部湍流变化等问题, 对气泡的聚合、破碎、形变等造成严重影响。为了解矩形窄缝通道内的气泡生长行为和两相流型变化, 文章以去离子水为工质, 对一面加热三面可视的长为0.5 mm × 2.0 mm的矩形窄缝通道内气泡生长过程进行可视化实验研究, 给出了在系统压力0.5~1.0 MPa, 入口流量50~200 kg/(m²·s), 过冷度低于40 K, 沸腾段壁面热流密度100~500 kW/m²条件下的局部空泡份额变化特性, 得到了过冷沸腾工况下的气泡生长行为和泡状流到弹状流动区域的流型转变特性, 并给出了经可视化图像后处理程序测得的时均空泡份额。

关键词

矩形通道, 过冷沸腾, 泡状流, 弹状流, 可视化方法

Visualization Experiment of Subcooled Boiling in Rectangular Channel

Jiajian Huang¹, Mingjun Zhong², Yuan Yuan^{1*}, Yuan Zhou^{1*}, Li Wang³

¹College of Physics, Sichuan University, Chengdu Sichuan

²Nuclear Power Institute of China, Chengdu Sichuan

³Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai Guangdong

Received: May 31st, 2023; accepted: Jul. 14th, 2023; published: Jul. 21st, 2023

*通讯作者。

文章引用: 黄家坚, 钟明君, 袁园, 周源, 王丽. 矩形通道过冷沸腾可视化实验研究[J]. 核科学与技术, 2023, 11(3): 231-238. DOI: 10.12677/nst.2023.113025

Abstract

The plate fuel assembly coolant channel is narrow, which is different from the bubble growth in the conventional round tube channel. The restricted flow channel will cause bubble deformation and local turbulence change, which will seriously affect the polymerization, breakage and deformation of bubbles. In order to understand the bubble growth behavior and the change of two-phase flow pattern in a rectangular narrow channel, this paper uses deionized water as the working fluid to conduct a visualization experiment on the bubble growth process in a rectangular narrow channel with a length and width of 0.5 mm × 2.0 mm, which is heated on one side and visible on three sides. The system pressure range of 0.5~1.0 MPa is given. When the inlet flow rate ranges from 50~200 kg/(m²·s), the subcooling degree is less than 40 K, and the wall heat flux in the boiling section ranges from 100~500 kW/m², the variation characteristics of local void fraction are obtained. The bubble growth behavior and the flow pattern transformation characteristics of bubble flow to the elastic flow area under the subcooled boiling condition are obtained. The time average void fraction measured by visual image post processing code is also given.

Keywords

Rectangular Channel, Subcooled Boiling, Bubbly Flow, Slug Flow, Visualization Method

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

核反应堆中板状燃料元件由于具有换热面积大、结构紧凑等优势而被广泛关注, 研究人员针对矩形通道中气液两相流的两相流型、压降及空泡份额分布开展了相关实验和数值研究, 其中实验大多集中于非绝热工况[1]。由于矩形通道窄缝结构, 气泡间的相互碰撞空间受到限制, 碰撞和聚合以沿板方向的横向作用为主[2]。

采用高速摄影机能直观地观察到流动沸腾时气泡的产生、生长、脱离、混合以及两相流流型的变化, 结合流动沸腾的传热特性, 能更好地理解其传热机理。张永豪等[3]对矩形通道的速度边界层进行了空气-水可视化实验研究, 分析了矩形通道边界层内速度分布和雷诺切应力等流场特性, 探究了通道间隙对边界层的影响规律。Liu 等[4]根据水平方向窄缝矩形通道空气-水可视化实验分析了一维气泡流动的特性界面输运特性, 评估了输运方程的适用性。Lu 等[5]根据可视化的矩形通道气泡分布特性分析了气泡流动与核速率和聚结速率的影响特性。居一伟等[6]基于蒸汽加热垂直矩形窄通道实验分析了其传热特性, 并以 Kandlikar 公式为基础改进拟合了新的经验关系式。国内外已有许多两相流可视化实验研究, 受限于高压可视化实验本体的设计, 工况大都在常压或者低压范围。为了解矩形窄缝通道加热工况下的过冷沸腾气泡分布特性, 本文建立了蒸汽加热垂直矩形窄通道沸腾传热特性实验台, 分析入口温度、压力、流量和壁面热流密度下的气泡形态。

2. 实验装置

实验回路(图 1)包含一回路和二回路两个回路系统、仪表系统、电气系统。一回路主要由主泵、稳压

器、预热段、实验段、过滤器、换热器等设备及相关管道、阀门构成。回路设计压力 2.5 MPa，主泵流量 3.5 t/h。补水箱中的去离子水由柱塞泵驱动，经预热器预热到设定温度后，自下而上进入实验本体，再经换热器冷却后回到补水箱，形成循环。二回路由冷却水箱、冷却水泵、换热器及相连管道、阀门组成。换热器为套管式逆流换热器，实验运行时使用氮气稳压器调节实验回路压力，实验本体通过低电压大电流直流发电机直接进行加热。

2.1. 矩形通道可视化试验段

矩形通道试验段用于开展 0~1 MPa 压力条件下水工质的流动沸腾核化现象、沸腾工况下相界面形态及行为观测、空泡份额测算等可视化实验。实验段采用一面加热三面可视窗设计，包含 2 个方向的观测可视窗，以实现高速相机从流道正面和侧面进行拍摄，正面窗口用于观测壁面核化行为，侧面为左右通透的透视可视窗，除可观测近壁核化行为外，还可对沸腾过程中相界面沿径向、轴向演化过程进行观测研究。可视化实验本体总体设计图如图 2(a)所示，测点布置图如图 2(b)所示，试验段的几何参数见表 1。距加热起点 240 mm 的可视窗的总高度为 400 mm，宽度比同位置处的流道宽 2 mm，能够保证全流场宽度的图形观测和图形数据记录。实验段测点包括进口/出口流体温度测点、加热壁面外壁面温度测点(沿轴向分别距加热段起点 283 mm、355 mm、427 mm、499 mm、571 mm 布置 5 个外壁温测点)，用于实验过程中采集实验段的热工参数。

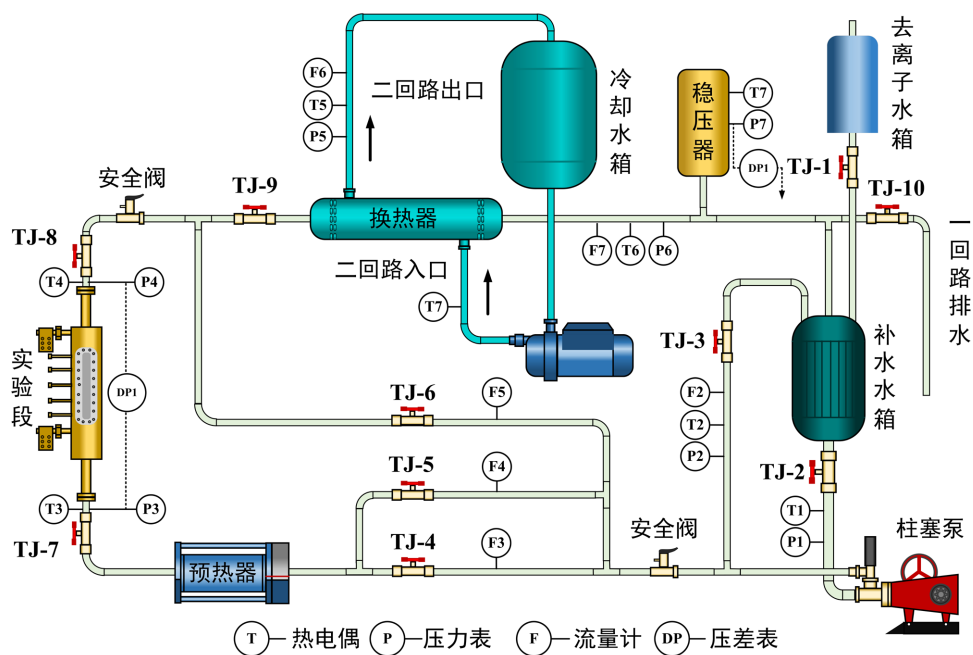


Figure 1. Schematic of rectangular channel experiment loop
图 1. 矩形通道实验回路示意图

Table 1. The geometry parameter of the test channel
表 1. 实验段几何参数

板材	厚度/mm	长度/mm	宽度/mm	Tin2-Tin3 距离/mm	拍摄段长度/mm
Inconel600	2.2	600	10	340	90

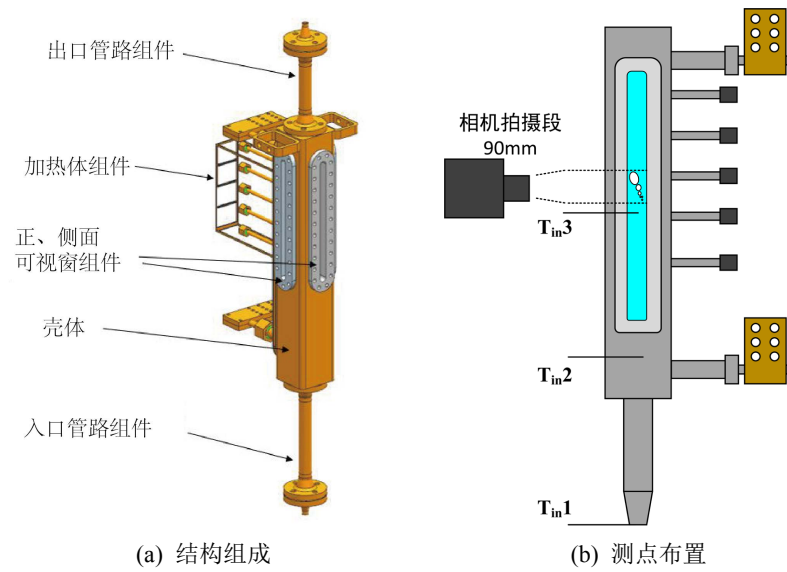


Figure 2. Schematic of rectangle test channel
图 2. 矩形通道实验段结构示意图

2.2. 实验工况

为探究矩形通道内在不同参数范围下过冷沸腾的气泡生长特性，流场可视化测量工况选取覆盖了泡状流区域到弹状流区域工况，如表 2 所示。

Table 2. Experimental parameter range
表 2. 实验工况参数范围

	系统压力/MPa	入口流量/kg·m ⁻² ·s ⁻¹	过冷度/K	壁面热流密/kW·m ⁻²
参数范围	0.5~1.0	50.0~200.0	<40.0	100.0~500.0

实验段进出口温度分别为 T_{in1} 和 T_{out} ，流量为 F ，给定功率为 P ，根据热量公式， $Q = C_p m \Delta T$ ，得到全段有效功率 P' 为公式(1)。由于实验段的散热，热效率(P'/P)在 30%~50%，温度升高，热效率升高。热效率测量结果见表 3。

$$P' = C_p F (T_{out} - T_{in1}) \tag{1}$$

Table 3. Experimental section thermal efficiency
表 3. 实验段热效率

压力/MPa	$T_{in1}/^{\circ}\text{C}$	$T_{out}/^{\circ}\text{C}$	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$C_p/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	流量 $F/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	给定功率 P/kW	热效率
0.506	120.7	140.3	914.6	4.314	92.1	2.344	0.33
0.504	119.8	144.9	915.3	4.312	90.4	2.657	0.37
0.764	138.1	159.4	899.2	4.362	91.1	2.522	0.34
0.761	138.1	161.4	899.2	4.362	90.9	2.610	0.35
0.746	135.9	157.6	899.7	4.360	127.6	2.645	0.46

Continued

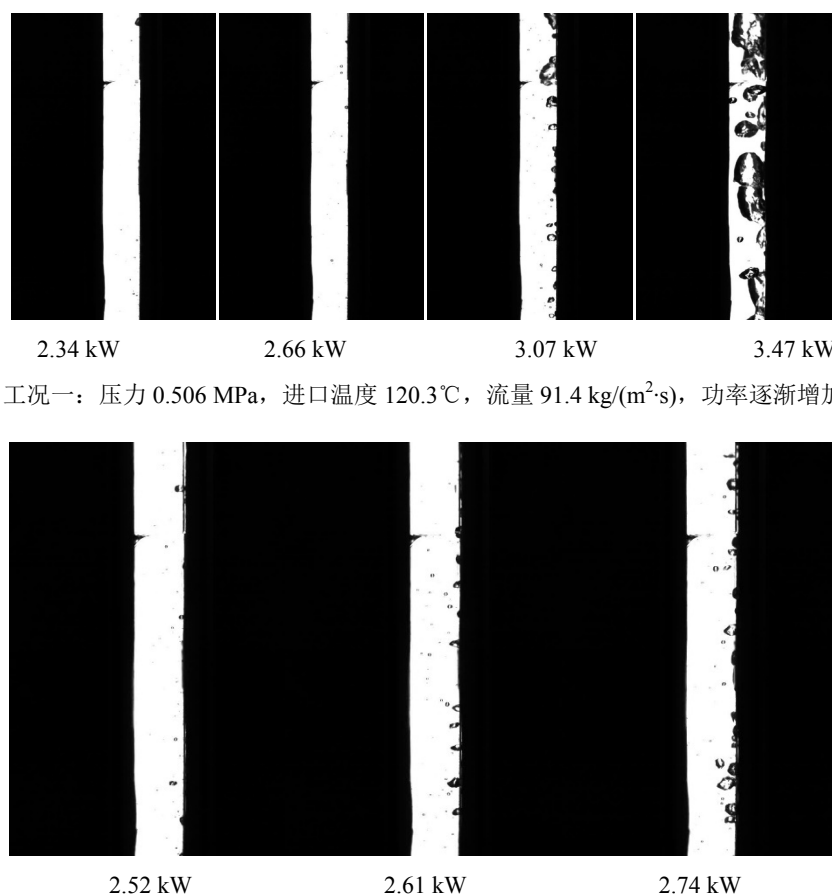
0.748	134.9	158.9	899.7	4.360	125.2	2.754	0.47
0.765	135.4	159.9	898.7	4.364	124.8	2.847	0.47
0.761	135.8	161.1	899.2	4.362	125.7	3.017	0.46
0.752	135.5	162.5	899.7	4.360	125.5	3.173	0.47

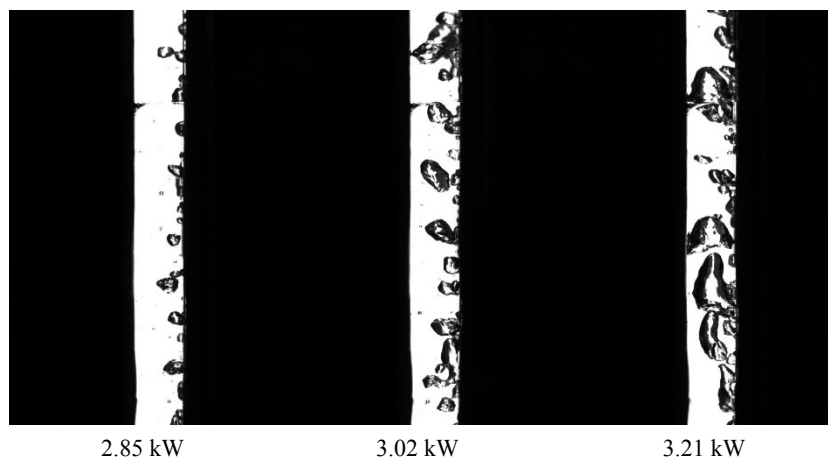
实验回路通过调节稳压器和背压阀调节系统压力，通过回流阀和实验支路调节阀调节实验段进口流量，通过预热器调节实验段进口温度。当实验段进口压力、流量、温度达到预设工况后，开展沸腾传热实验，逐步增加实验段功率，分别通过热电偶和高速相机监控壁温和流型演变规律，直至达到指定工况，记录实验数据，降低功率，切换工况。

高速摄像机在 5 min 内拍摄 1500 张图片进行空泡份额的测定，根据可视化图像后处理程序测得空泡份额为时均空泡份额，根据测点位置，生成某一位置存在空泡的时间占比，将各个位置的时均空泡份额进行成像，得到实验段内空泡份额分布。

3. 实验结果与分析

矩形窄缝通道由于壁面的限制作用，区别于常规圆管通道，带来了气泡形变、局部湍流变化等问题，会对气泡的聚合、破碎、形变等计算造成严重影响。为了解气泡在矩形窄缝通道内的生长情况，图 3 给出了不同工况下，气泡在不同压力、入口温度和不同功率下的可视化图片。





工况二：压力 0.761 MPa，进口温度 138.1℃，流量 89.5 (m²·s)，功率逐渐增加

Figure 3. Experimental visualization picture

图 3. 实验可视化图片

3.1. 数据处理

根据可视化图像后处理程序测得空泡份额为时均空泡份额，方法是基于测点位置，测量 5 min 时间内某一位置存在空泡的时间占比，将各个位置的时均空泡份额进行成像，得到实验段内空泡份额分布。当实验工况为压力 0.767 MPa，进口温度 138.3℃，87.8 kg/m²s，功率 2.848 kW，高速摄像机 5 min 长时间拍摄模式得到 1500 张照片，经过可视化图像后处理程序处理后，得到可视化实验段时均空泡份额(图 4)，以及加热板不同距离空泡份额(图 5)。

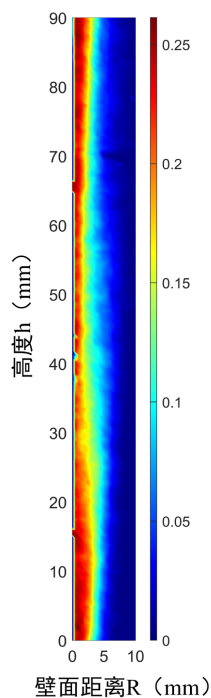


Figure 4. Time-average void fraction in experimental section

图 4. 实验段时均空泡份额

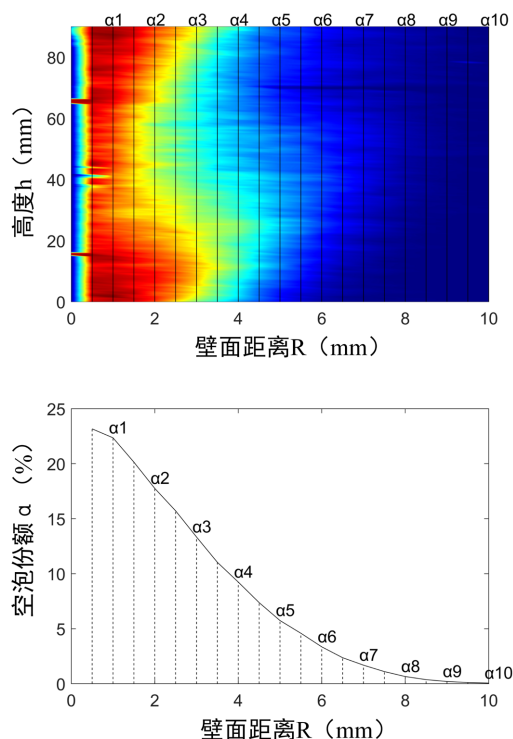


Figure 5. Average void fraction of heating plate at different distances in experimental section

图 5. 实验段加热板不同距离平均空泡份额

3.2. 参数分析

流体入口段处于过冷状态，通道右侧为加热板，功率较低时实验段内没有气泡产生。随着功率的增加，加热板附近开始出现气泡，并向上流动。功率持续增加，实验段内气泡变大，数量变多呈现出泡状流，气泡位置贴近加热板。随着功率继续增大，实验段内开始出现弹状流。从空泡份额的云图可以看出(图 4)，气泡从壁面产生，随后向主流区扩散，气泡产生后，在同一轴向位置上，由于壁面润滑力的作用，空泡份额最高的地方不是壁面，而是离壁面一定距离的地方。气泡在离开成核位置后，总是沿着受热面滑动，并且在滑动过程中，滑动气泡的直径增大(图 3)。

比较不同热流密度可以发现，随着热流密度的增大，壁温升高的速度变快，过冷沸腾起始点随着热流密度的增加而提前，且气泡的脱离直径随加热功率的增大而增大。质量流速越大，壁温越低，较不容易发生过冷沸腾，需要更高的流体温度才会发生过冷沸腾。

4. 结论

本文通过可视化实验研究了压力、壁面过热度、质量流速和流体过冷度对矩形窄缝通道气泡分布特性的影响，得到如下结论：

- 1) 三面可视窗加热实验的工况范围为系统压力 0.5~1.0 MPa，入口流量 50~200 kg/(m²·s)，过冷度小于 40 K，沸腾段壁面热流 100~500 kW/m²，观测流型范围为泡状流区域到弹状流区域。
- 2) 基于可视化图像后处理程序可以得到试验段二维分布的时均空泡份额。
- 3) 实验观测到在受热面上成核的气泡离开成核点后，会沿着垂直加热壁面向上滑移，最高空泡份额点出现在壁面附近区域，且在滑动过程中气泡的直径增大。

4) 过冷沸腾起始点随着加热功率的增大而提前, 气泡的脱离直径随加热功率的增大而增大。质量流速越大, 壁温越低, 较不容易发生过冷沸腾。

本实验观测的气泡形态可为矩形通道气泡流行判断和聚合破碎模型提供数据支持。

基金项目

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室资助项目(HT-KFKT-02-2020002); 广东省基础与应用基础研究青年基金资助项目(2020A1515110512)。

参考文献

- [1] Chen, H.T., Wei, S.Y., Ding, W.T., *et al.* (2021) Interfacial Area Transport Equation for Bubble Coalescence and Breakup: Developments and Comparisons. *Entropy (Basel, Switzerland)*, **9**, 1106. <https://doi.org/10.3390/e23091106>
- [2] 于洋, 宋小明, 刘东, 等. 矩形通道双群组界面浓度输运模型与验证方法研究[J]. 核动力工程, 2021, 42(S1): 113-120.
- [3] 张永豪, 于晓勇, 刘卢果, 等. 矩形通道速度边界层可视化实验研究[J]. 原子能科学技术, 2023, 57(3): 503-513.
- [4] Liu, A.T., Cheng, L.H., Yan, C.Q., *et al.* (2023) Characteristics of One-Dimensional Bubbly Flow Interfacial Area Transport in Horizontal Narrow Rectangular Channel. *Chemical Engineering Research & Design*, **189**, 30-45. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.10.039>
- [5] Lu, Q., Chen, D.Q., Zhou, L.L., *et al.* (2019) Experimental Investigation on the Distribution Characteristics of Bubble Contact Areas in the Narrow Channel. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, **137**, 876-881. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.001>
- [6] 居一伟, 陶乐仁, 金程, 等. 蒸汽加热垂直矩形窄通道传热特性实验研究[J]. 化学工程, 2023, 51(2): 41-45, 56.