

不同窄缝宽度下窄矩形通道中沸腾临界 可视化流型及触发机理

闫美月^{1,2} 潘良明^{1,2} 马在勇^{1,2} 李想^{1,2} 何清澈^{1,2}

1(重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室 重庆 400044)

2(重庆大学 核工程与核技术系 重庆 400044)

摘要 窄矩形通道因具有结构紧凑等优点而被广泛应用于各个领域。为完善窄矩形通道中临界热流密度(Critical Heat Flux, CHF)的预测方法,提高反应堆安全性和经济性,本文进行了不同窄缝宽度下窄矩形通道内CHF可视化试验来探索CHF触发机理。实验同步采集不同窄缝宽度下可视化结果和热工水力数据,结果发现:当窄缝宽度分别为5 mm、3 mm、2 mm和1 mm时,在发生CHF时,通道内流型分别对应泡状流、弹状流、搅混流和环状流。在发生CHF前,在泡状流、弹状流和搅混流都存在温度波动。在环状流中CHF涉及到区域由初始的干斑逐渐扩展;在搅混流时CHF涉及到的区域较小;而弹状流涉及到的区域最广;在泡状流中加热壁面温度波动频率最高。当系统压力在1~4 MPa范围内、在窄缝宽度为1 mm时,系统压力与CHF之间存在非线性关系,而在其余通道中随着系统压力增加CHF增加。因此,窄缝宽度对窄矩形通道中CHF有非常重要的影响。本文分析结果可为CHF机理模型的建立提供思路。

关键词 临界热流密度, 窄矩形通道, 窄缝宽度, 可视化, 触发机理

中图分类号 TL334

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050606

Flow patterns visualization and triggering mechanisms of critical heat flux in narrow rectangular channels with different gap size

YAN Meiyue^{1,2} PAN Liangming^{1,2} MA Zaiyong^{1,2} LI Xiang^{1,2} HE Qingche^{1,2}

1(Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

2(Department of Nuclear Engineering and Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract [Background] Narrow rectangular channels are widely used in various fields because of their compact structure and other advantages. [Purpose] This study aims to improve the prediction method of critical heat flux (CHF) in narrow rectangular channels for reactor safety and economy by conducting CHF visualization tests in narrow rectangular channels with different gap size to explore the CHF triggering mechanism. [Methods] Firstly, a high-temperature and high-pressure experimental loop with narrow rectangular channels was built, and the visualisation video and thermal-hydraulic data were collected simultaneously. It was found that the flow patterns correspond to bubble flow, slug flow, churn flow and annular flow when CHF occurs with the gap size of 5 mm,

国家自然科学基金(No.U21B2059)、重庆市研究生科研创新项目(No.CYB21023)资助

第一作者: 闫美月, 女, 1993年出生, 2019年于哈尔滨工程大学获硕士学位, 现为博士研究生, 研究领域为反应堆热工水力

通信作者: 潘良明, E-mail: cneng@cqu.edu.cn

收稿日期: 2022-06-28, 修回日期: 2022-09-08

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.U21B2059), Graduate Scientific Research and Innovation Foundation of Chongqing (No.CYB21023)

First author: YAN Meiyue, female, born in 1993, graduated from Harbin Engineering University with a master's degree in 2019, doctoral student, focusing on reactor thermal hydraulic

Corresponding author: PAN Liangming, E-mail: cneng@cqu.edu.cn

Received date: 2022-06-28, revised date: 2022-09-08

3 mm, 2 mm and 1 mm, respectively. **[Results]** Before the occurrence of CHF, bubble flow, slug flow and churn flow experience temperature fluctuations. In the annular flow, the CHF involves a gradual expansion of the area from the initial dry spot; in the churn flow, the CHF covers a smaller area; while the slug flow affected the widest area; in the bubble flow, the temperature fluctuations at the heating wall are the most frequent. Furthermore, when the system pressure is in the range of 1~4 MPa and the gap size is 1 mm, there is a non-linear relationship between the system pressure and the CHF, while in the other channels the CHF increases as the system pressure increases. **[Conclusions]** The narrow gap size has a very important effect on CHF in narrow rectangular channels, and the findings of this paper can lay the foundation for the establishment of a CHF mechanism model in narrow rectangular channel.

Key words Critical heat flux (CHF), Narrow rectangular channel, Gap size, Visualization, Triggering mechanism

临界热流密度(Critical Heat Flux, CHF)是影响设备安全运行的关键参数^[1-2],与其他传统通道相比,窄矩形通道由于结构紧凑,换热面积大而拥有广泛的应用前景^[3-4]。因此,了解窄矩形通道的CHF特性及准确预测CHF的发生,在进行反应堆建模以及设计时尤其重要^[5]。本文主要针对窄矩形通道中沸腾临界问题进行可视化研究。

可视化实验是记录和研究气泡行为的重要手段,Wang^[6]在矩形通道可视化实验中观察到了泡状流、搅混流和环状流,分别绘制了0.7 MPa和1.0 MPa压力下的流型图,分析了压力对流型转变的影响,并与已有的流型图和过渡准则进行了比较。对比结果表明,加热状态下泡状流和环状流过渡边界与非加热状态基本一致。周云龙^[7]进行三面加热窄矩形通道可视化实验研究,结果观察到泡状流、弹状流、搅混流和气膜塞状流,并且认为非加热通道、单面加热通道以及三面加热通道在可视化结果中有差异。Zhou^[8]进行不同压力下窄矩形通道中可视化实验研究,结果发现,当压力为0.2 MPa时,通道中会出现泡状流、弹状流和搅混流,但当压力为1 MPa

时,通道中不会发生弹状流。

总结之前的窄矩形通道内沸腾临界可视化实验研究结果可以发现,窄矩形通道中沸腾临界一般发生在搅混流、弹状流和搅混流,非加热情况下的流型转变是否适用于单面加热窄矩形通道值得商榷,而且现有的文献大部分仅涉及对流型的总结,并没有分析不同流型沸腾临界的触发机理,尤其是针对窄缝宽度对流型以及沸腾临界触发机理的影响。因此,本文对不同窄缝宽度下窄矩形通道内的CHF进行可视化实验,获得了不同窄缝下的流型发展过程和CHF触发机理,分析窄缝宽度对CHF的影响,为后续CHF机理模型建立提供思路。

1 CHF 实验

1.1 实验回路

为了研究窄矩形通道中的气泡行为和沸腾临界情况,本实验设计并搭建了高温高压实验回路^[9-11],以去离子水作为工质,主回路中的可视化部分如图1所示。

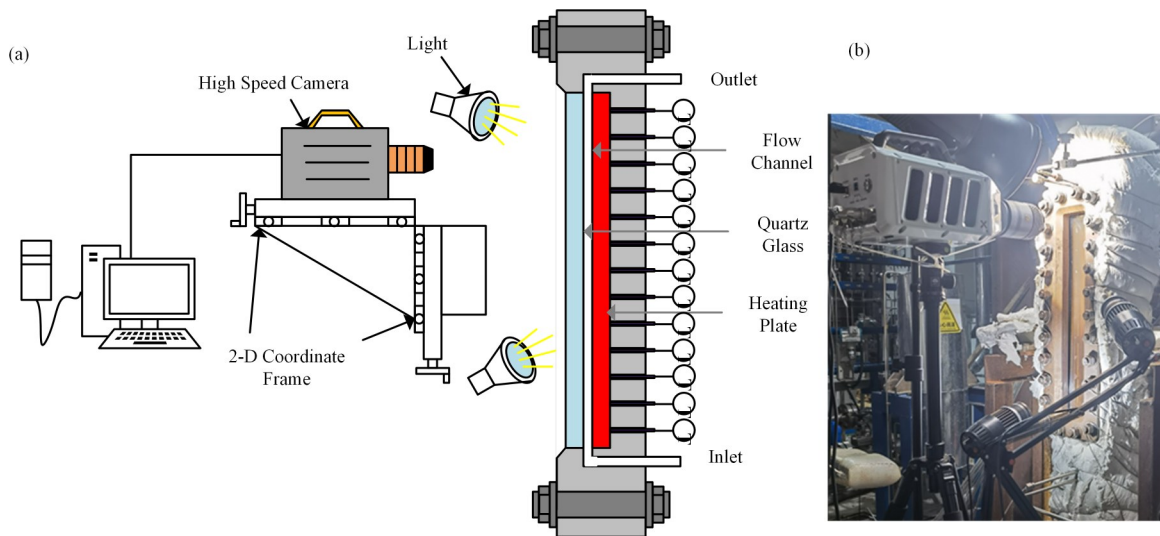


图1 可视化部分设置 (a) 示意图, (b) 现场图
Fig.1 Schematic diagram of the setup of visualization part (a) Schematic diagram, (b) Snapshot of experimental field

实验段由石英玻璃和不锈钢加热板形成了窄矩形通道,为了观察加热通道内的气泡行为和沸腾临界情况,通道被设计为单面加热,两侧为承压装置和紧固螺栓,高速摄影仪(Revealer X113)从宽边角度记录通道内气泡行为,为了获得通道内更加清晰完整气泡行为,两个光源和高速摄影仪被布置在二维导轨上,高速摄影仪可以沿着导轨水平和竖直移动,从而获得加热壁面上不同位置处的可视化图像。

为了及时反映沸腾危机发生时温度的突然升高并保护试验段,加热板一共布置了31支T型铠装热电偶,温度测点布置如图2所示。在本实验中,由于采用均匀加热,这种情况下沸腾临界一般发生在发热段靠近出口的位置,因此,在加热片的出口附近位置热电偶布置密集,以更好地判断临界的发生位置和时间。

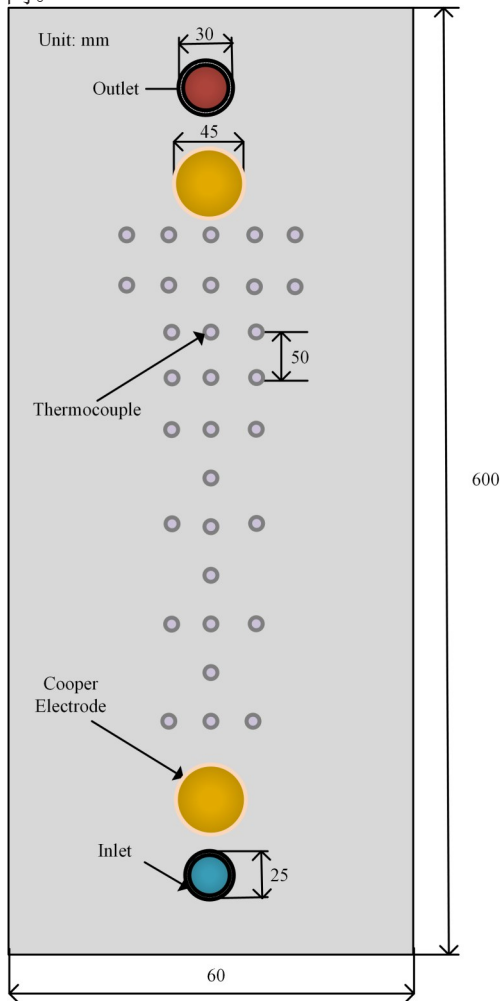


图2 热电偶布置图

Fig.2 Schematic diagram of thermocouple locations

1.2 参数范围

为了研究不同几何参数(流道间隙)以及热工参数(系统压力、质量流速、入口过冷度)下汽液两相演化特征以及不同运行条件对沸腾临界造成的影响。

实验的参数范围如表1所示。

表1 实验参数工况范围
Table 1 Range of experimental parameters

名称 Parameter	范围 Range
实验压力 System pressure / MPa	1~4
窄缝宽度 Gap size / mm	1~5
质量流速 Mass flux / $\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	350~2 000
入口过冷度 Inlet fluid subcooling	60~120 K

2 不同窄缝宽度下CHF实验结果及触发机理

2.1 窄缝宽度5 mm时可视化实验结果及CHF触发机理

当窄缝通道为5 mm时,窄矩形通道中从壁面沸腾发展到CHF的典型流型发展过程如图3(a)所示。可以看到,通道内首先产生大量气泡,而气泡尺寸与窄缝尺寸相当,为泡状流,加热壁面与汽相接触时,对应的壁面温度上升;加热壁面与液相接触时,对应区域温度下降。由于加热壁面不断交替汽相和液相接触,因此加热壁面温度存在波动(图3(b)),而且对于气泡尺寸较小,因此热电偶波动频率较高。随着热流密度的增加气泡发生聚合,聚合气泡尺寸逐渐增加,发展到合并泡状流。聚合而产生的气泡随着热流密度的增加而逐渐增大,当气泡尺寸足够大、气泡层足够致密时,会导致冷流体无法透过致密的气泡层到达加热壁面,加热壁面无法得到冷却,从而引起加热壁面温度突然升高,导致CHF的发生。

2.2 窄缝宽度3 mm时可视化实验结果及CHF触发机理

如图4(a)所示,当窄缝通道为3 mm时,与窄缝通道为5 mm时相比,在垂直加热壁面方向的汽相被压缩,可以看到窄矩形通道中形成大的气泡弹,气泡弹尺寸几乎等于窄矩形通道宽度。当加热通道中形成大的气泡弹时,加热壁面会与大气泡弹接触,气泡弹对应的区域壁面温度上升;对于气泡弹的间隙,加热壁面与液相接触时,对应区域内由于被液体冷却从而导致温度下降,加热壁面不断交替与汽相和液相接触,因此加热壁面温度存在波动(图4(b))。又由于气泡弹尺寸较大,且气泡弹和气泡弹之间存在稳定液区,从而导致加热壁面的温度波动频率较泡状流来说较小。但是当气泡弹的尺寸足够大,导致气泡弹底部区域的热量始终无法导出,从而造成对应区域的温度超过临界温度,最终触发CHF的发生,又由于气泡弹尺寸较大,因此气泡弹存在时发生CHF涉及到的区域较大。

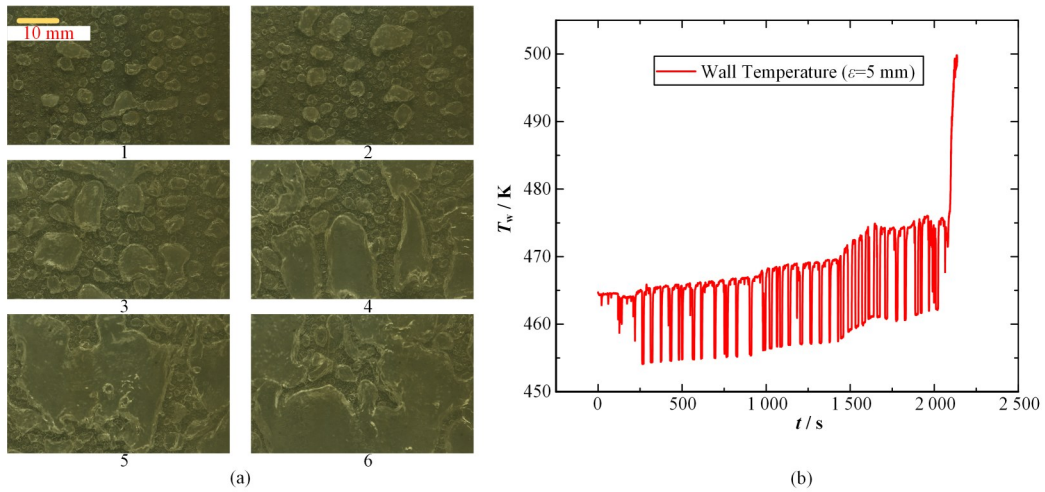


图3 $\epsilon=5$ mm时CHF触发机理 (a) 流型演变, (b) 温度变化
 Fig.3 CHF trigger mechanism in the $\epsilon=5$ mm (a) Flow pattern evolution, (b) Temperature variation

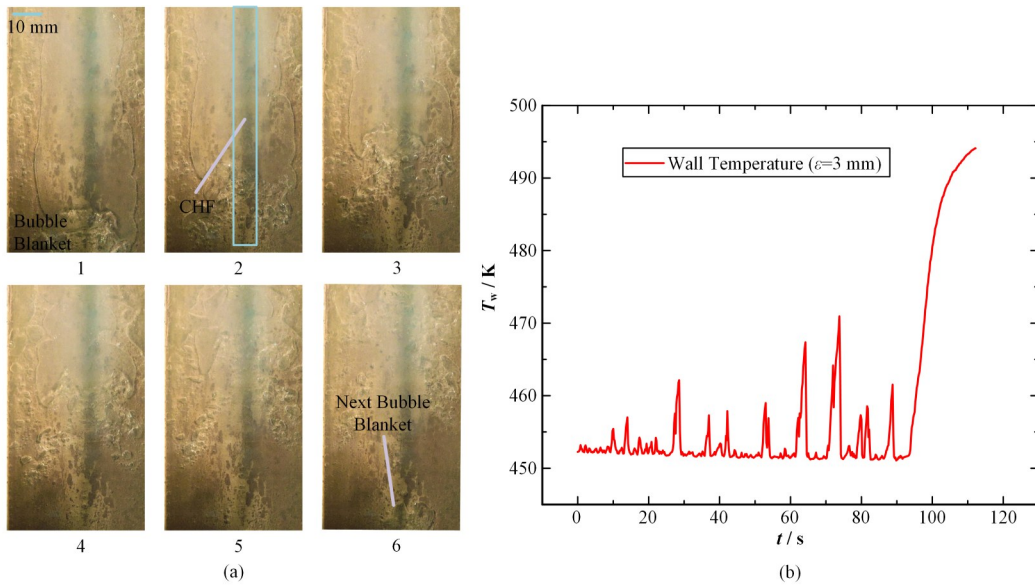


图4 $\epsilon=3$ mm时CHF触发机理 (a) 流型演变, (b) 温度变化
 Fig.4 CHF trigger mechanism in the $\epsilon=3$ mm (a) Flow pattern evolution, (b) Temperature variation

2.3 窄缝宽度 2 mm 时可视化实验结果及 CHF 触发机理

当窄缝通道为 2 mm 时,形成一种汽相和液相没有明显的分界面的搅混流,一个不稳定流态(图 5 (a)),搅混流具有振荡性,是弹状流与环状流之间的重要过渡流型。如图 5(b)所示,由于搅混流中汽液两相没有明显的分界面,加热壁面不断与汽相和液相接触,因此加热壁面温度存在波动。又因为流动具有不稳定性,因此加热壁面温度不存在一个类似图 4(b)中的基准温度。在搅混流中,加热壁面不断与汽相和液相接触,汽液交界面不断变化,此时发生 CHF 的判据为,加热壁面的温度变化速率,当加热壁面温度变化速率超过设定值时,同样会

导致 CHF 的发生(即差报型 CHF)。

2.4 窄缝宽度 1 mm 时可视化实验结果及 CHF 触发机理

如图 6(a)所示,随着窄缝宽度的减小,当窄缝宽度为 1 mm 时,通道中上表面限制效果显著,在临近 CHF 发生时,通道中大多数情况均为环状流。在发生沸腾临界时,气泡底部的液膜蒸干形成干斑,然后干斑的尺寸会逐渐扩大,此时加热壁面温度飞升(图 6(b))。窄缝宽度为 1 mm 时,通道环状流时,实际上通道里就仅存在一个薄薄的微液层,当这部分微液层出现干斑,相当于与大量气相接触,因此在窄缝宽度为 1 mm 的窄矩形通道中环状流下的 CHF 温升会比在其他流型的更高。

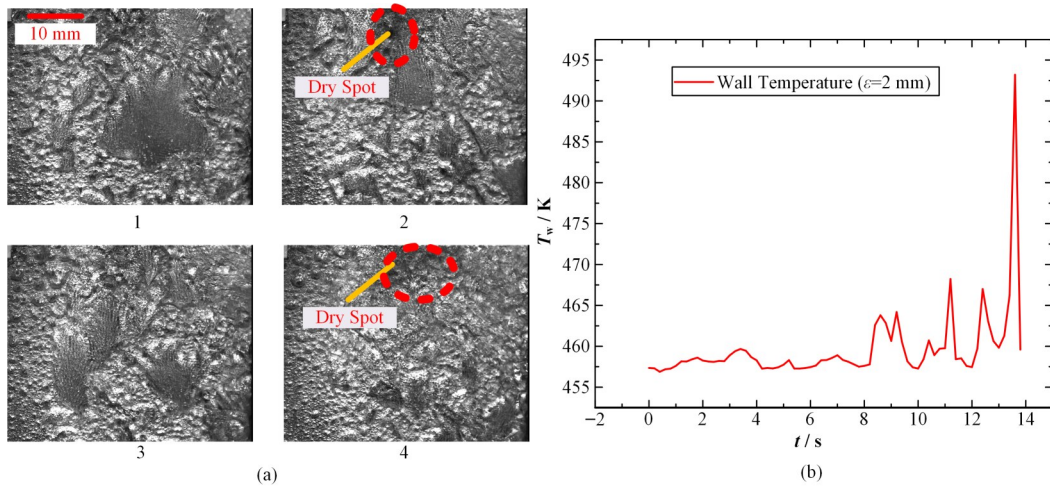


图5 $\varepsilon=2$ mm时CHF触发机理 (a) 流型演变, (b) 温度变化
Fig.5 CHF trigger mechanism in the $\varepsilon=2$ mm (a) Flow pattern evolution, (b) Temperature variation

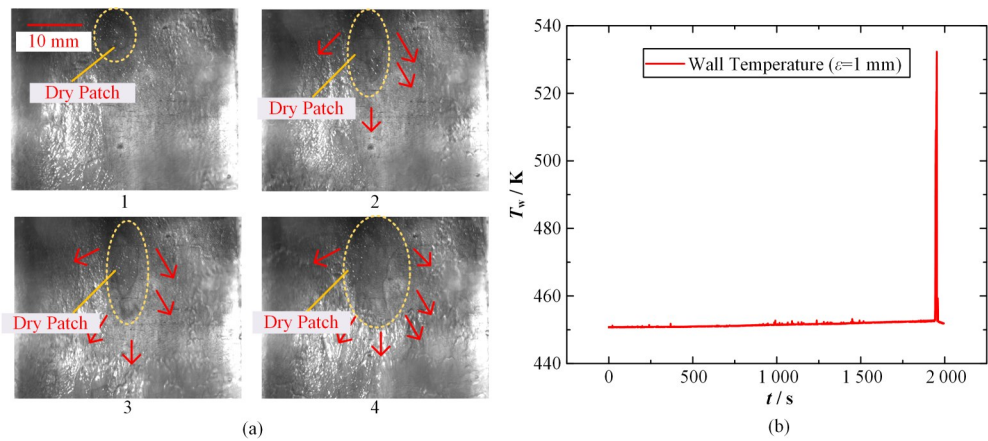


图6 $\varepsilon=1$ mm时CHF触发机理 (a) 流型演变, (b) 温度变化
Fig.6 CHF trigger mechanism in the $\varepsilon=1$ mm (a) Flow pattern evolution, (b) Temperature variation

3 窄缝宽度对CHF影响

3.1 CHF随窄缝宽度的变化规律

固定其他条件(入口过冷度、质量流速),图7显示了窄缝宽度对临界热流密度的影响,可以看出,窄缝宽度在5 mm下的临界热流密度值均大于3 mm下的临界热流密度值。这是因为:随着窄缝宽度减小,当热流密度较高时,由于窄缝通道的限制,气泡更不容易脱离加热壁面,从而导致气泡更容易聚集在加热壁上,聚合程度增加;而大量的气泡的聚集会导致流动阻力增加,阻碍液体流动以及液体的及时补充,且蒸汽的导热性能较差,因此各因素综合导致临界热流密度会随窄缝尺寸的减小而降低。

同时,图7也表明在同一窄缝宽度下,当窄缝宽度为3 mm和5 mm时,保持入口过冷度和质量流速不变时,在1~4 MPa范围内,CHF随着压力的升高而升高。

但值得注意的是,当窄缝宽度为1 mm时,通道

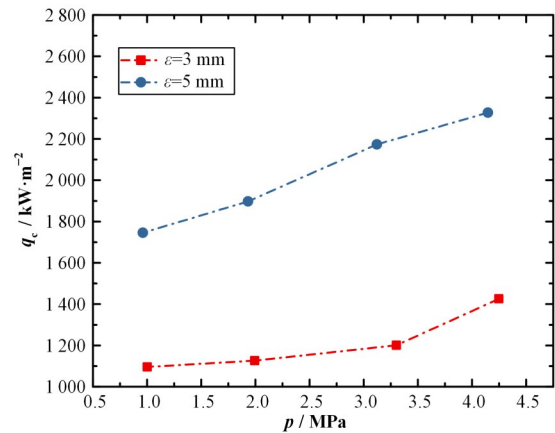


图7 窄缝宽度为3 mm和5 mm时CHF随压力变化情况
Fig.7 CHF changes with pressure when gap size is 3 mm and 5 mm, respectively

中的实验数据表明临界热流密度与系统压力之间存在非线性关系,如图8所示。即随着系统压力的升高,临界热流密度先升高后降低。综合考虑图8和

图7,不同窄缝宽度下CHF随压力的变化情况可以发现,窄缝宽度对压力峰值的出现位置也有一定影响。

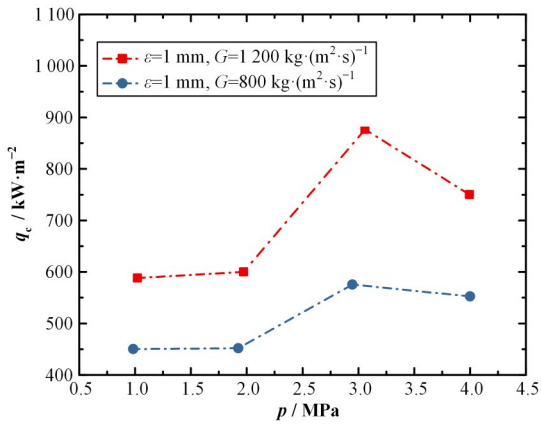


图8 窄缝宽度为1 mm时CHF随压力变化情况
Fig.8 CHF changes with pressure when the gap size is 1 mm

从上面结果可以发现,窄缝宽度对系统压力折点的出现有影响,这是因为在临界热流密度随系统压力同步上升的低压区,起主要影响的气泡尺寸和气泡数量,随着压力升高,气泡数量升高,从而强化壁面换热,但是在窄缝宽度为1 mm的窄矩形通道中,窄缝宽度尺寸限制了气泡尺寸,即随着气泡数量增加到一定程度后,气泡无法及时从加热壁面脱离,大量气泡更易聚集成为气泡弹,使得加热壁面上转变成为膜态沸腾,换热系数降低,造成临界热流密度减小。

3.2 窄矩形通道不同窄缝宽度流型图

质量流速是对临界热流密度最具有直接影响的物理量。为了清晰表明不同窄缝宽度下CHF发生时窄矩形通道内流程图,本文作出的流型图如图9所示。

图中:

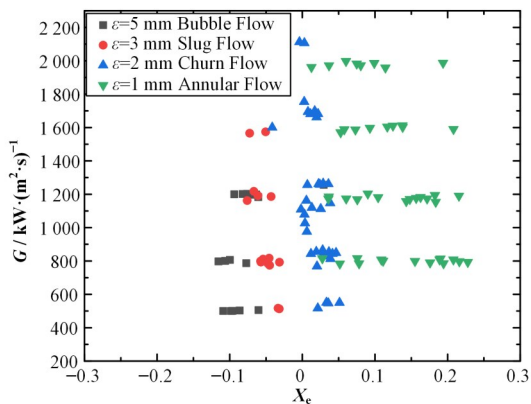


图9 窄矩形通道中CHF发生时流型图
Fig.9 Flow pattern when CHF occurs in a narrow rectangular channel

$$X_c = \frac{q_c}{Gh_{fg}} \cdot \frac{L}{\epsilon} - \frac{\Delta h_m}{h_{fg}} \quad (1)$$

式中: X_c 为热平衡含气率; h_m 为入口流体焓, $J \cdot kg^{-1}$; G 为质量流速, $kg \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$; L 为加热段长度, m ; ϵ 为矩形通道窄缝宽度, m ; q 为有效热流密度, $W \cdot m^{-2}$ 。

可以直观地发现,窄矩形通道中窄缝宽度从5 mm下降到1 mm时,通道中流型分别为泡状流、弹状流、搅混流和环状流。

4 结语

本文观察了不同窄缝宽度下发生CHF时的流型特征,从可视化的实验现象和物理机理来解释沸腾危机的发生机理,发现窄缝宽度对CHF发生时的流型有非常重要的影响:

1)随着窄缝宽度增大,发生CHF时的流型依次经历环状流、搅混流、弹状流和泡状流。在环状流时发生CHF时涉及到区域由初始的干斑逐渐扩展,温升最大;在搅混流时发生的是差报型CHF;而弹状流涉及到的区域最广;在泡状流中壁面温度波动频率最大。

2)在1~4 MPa的范围内,当窄缝宽度为1 mm时,在窄矩形通道中CHF与系统压力呈现非线性关系,而在其他窄缝宽度中CHF随压力增大而增大。

作者贡献声明 闫美月负责设计实验并实施,采集和分析数据,起草文章;潘良明、马在勇负责对文章的知识性内容作批评性审阅,获取研究经费;李想、何清澈负责进行统计分析数据,整理资料。

参考文献

- Kim H, Bak J, Jeong J, *et al.* Investigation of the CHF correlation for a narrow rectangular channel under a downward flow condition[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, **130**: 60 - 71. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.073.
- 刘伟, 彭诗念, 江光明, 等. 临界热流密度机理模型发展综述[J]. *核动力工程*, 2021, **42**(3): 211 - 217. DOI: 10.13832/j.jnpe.2021.03.0211.
LIU Wei, PENG Shinian, JIANG Guangming, *et al.* Review on development of critical heat flux mechanistic model[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2021, **42**(3): 211 - 217. DOI: 10.13832/j.jnpe.2021.03.0211.
- Choi G S, Jeong Y H, Chang S H. A study on prediction methods of the critical heat flux for upward flow in a vertical narrow rectangular channel[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2015, **294**: 103 - 116. DOI: 10.

- 1016/j.nucengdes.2015.07.022.
- 4 Kim H, Moon J, Kim T, *et al.* Power transient critical heat flux in a narrow rectangular channel under downward flow[J]. Nuclear Engineering and Design, 2022, **386**: 111587.
 - 5 Gui M, Tian W, Di W, *et al.* Study on CHF characteristics in narrow rectangular channel under complex motion condition[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, **116**: 114629.
 - 6 Wang J F, Huang Y P, Wang Y L, *et al.* Visualized investigation on flow regimes for vertical upward steam-water flow in a heated narrow rectangular channel[J]. Annals of Nuclear Energy, 2012, **45**: 115 - 123. DOI: [10.1016/j.anucene.2012.03.003](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.03.003).
 - 7 周云龙, 陈旭, 郭新田, 等. 三面加热窄矩形通道内气液两相流型研究[J]. 原子能科学技术, 2018, **52**(7): 1262-1267.
ZHOU Yunlong, CHEN Xu, GUO Xintian, *et al.* Study of gas-liquid two phase flow pattern in three-sided heating narrow rectangular channel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, **52**(7): 1262-1267.
 - 8 Zhou J, Ye T, Zhang D, *et al.* Experimental study on vertically upward steam-water two-phase flow patterns in narrow rectangular channel[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2021, **53**(1): 61-68.
 - 9 Yan M Y, Ma Z Y, Pan L M, *et al.* An evaluation of critical heat flux prediction methods for the upward flow in a vertical narrow rectangular channel[J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, **140**: 103901. DOI: [10.1016/j.pnucene.2021.103901](https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103901).
 - 10 Yan M Y, He Q C, Ma Z Y, *et al.* Experimental investigation and a mechanical model of critical heat flux in a narrow rectangular channel[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2021, **128**: 110432. DOI: [10.1016/j.expthermflusci.2021.110432](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110432).
 - 11 Yan M Y, Deng J, Ma Z Y, *et al.* Visualization experiments and a new correlation of critical heat flux in a narrow rectangular channel[J]. Nuclear Engineering and Design, 2022, **389**: 111687. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2022.111687](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111687).