

文章编号：0258-0926(2014)01-0052-04

矩形通道临界热流密度计算模型的实验评价

盛程¹, 周涛¹, 琚忠云¹, 黄彦平², 肖泽军²

1. 华北电力大学核热工安全与标准化研究所, 北京, 102206; 2. 中核集团核反应堆热工水力技术重点实验室, 成都, 610041

摘要：自然循环条件下，矩形通道内的临界热流密度（CHF）发生受到很多因素影响，目前对其特征的把握尚不完善。将本研究得到的实验结果与 Katto 的强迫循环和 Zhang 的自然循环两种 CHF 模型的计算值进行比较，分析两种模型在实验条件下的适用性以及入口流速、出口质量含汽率和压力对 CHF 的影响。研究表明：Katto 模型的计算结果普遍高于实验值，而 Zhang 模型的计算结果与实验值符合较好。随着入口流速的增大，自然循环和强迫循环 CHF 均逐渐增大；随着出口质量含汽率的增大，两类循环的 CHF 均减小；随着压力的增大，两类循环的 CHF 都增大，而在较大压力条件下自然循环 CHF 的增长速率随系统压力的增大而减小。

关键词：自然循环；矩形通道；临界热流密度

中图分类号：TK124 文献标志码：A

0 引言

两相沸腾换热具有较高的传热效率。然而，由于受到传热恶化等的限制，热流密度无法得到进一步提高。国内外对临界热流密度（CHF）的研究较多，矩形通道内的流动传热也是目前关注的热点。由于研究者所提出的预测模型的条件存在差异，并且对不同循环方式下矩形通道内的 CHF 发生研究的还不充分，因此在应用上存在一定的局限性。

本研究通过计算已有的自然循环和强迫循环条件下的矩形通道 CHF 模型，并和本课题实验研究中得到的自然循环矩形通道的 CHF 实验值进行比较，以对两种计算模型的适用性进行评价，并找出关键参数的影响作用和 2 种循环方式下发生 CHF 的差异，以更好地认识矩形通道内自然循环下 CHF 的发生特点。

1 实验装置和方法

1.1 实验装置

图1和图2分别给出了自然循环实验台架和实验段结构的示意图。

如图1所示，自然循环实验回路主要包括实验

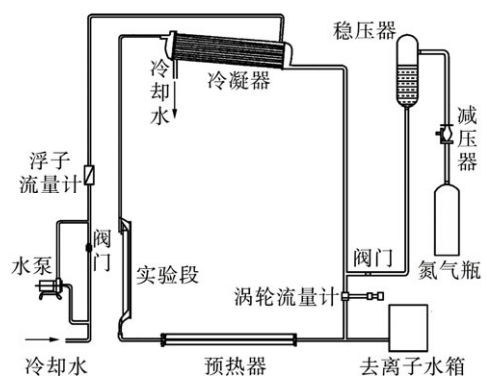


图1 自然循环实验回路简图

Fig. 1 Experimental Loop of Natural Circulation

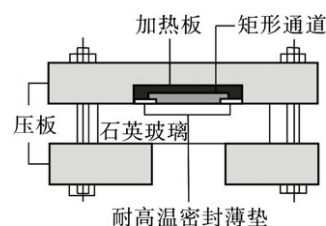


图2 实验段结构

Fig. 2 Structure of Test Section

段、预热器、稳压器和冷凝器等设备。实验台架高约3.3 m，宽约2 m。图2中，竖直向上实验段通道的长度为1000 mm。通过在石英玻璃背面加工

收稿日期：2012-06-19；修回日期：2013-01-20

基金项目：国家自然科学基金资助(50976033)；华北电力大学“211工程”三期校内面上项目(X10011)；中国核动力研究设计院空泡物理与自然循环国家重点实验室基金(9140C7101030902)

开槽，并通过压板将其固定于加热板正面，形成横截面为40 mm×2 mm的窄矩形通道。通道正面可视面积的尺寸为1000 mm×40 mm。此外，在加热板竖直侧面等距离插入12根总功率为30 kW的加热管，对通道进行加热。而在距离通道加热面0.5 cm位置，沿入口到出口方向等间距插入20根误差为0.25%的铠装热电偶。

1.2 实验方法

以去离子水作为工质，首先向回路注入去离子水，并开启回路上部的安全阀以排除难溶气体。回路充满水后通过稳压系统，使回路的压力达到实验所需的大小。接着调节预热段功率，使实验段进口工质的温度稳定在预定值，同时开启冷却水泵，并调节冷却水二回路的阀门，使冷却水流量稳定在一个合适的值。然后以3 kW/(m²·min)的速率逐渐增大实验段热流密度。同时启动数据采集软件，以0.5 s的采集周期记录温度和功率信号。当壁面温度出现突升时认为CHF发生^[1]，此时温度自动保护通过预先设定壁温及壁面升温速率的上限值，当数据采集系统监测到壁温大小或壁温的升温速率超过各自上限时，加热元件自动断电、停止加热，以保证实验设备安全。此时保存温度和功率数据，并记录发生CHF时的热流密度。

2 实验结果和模型计算值的比较

选取Katto^[2]的强迫循环矩形通道CHF模型和Zhang Ming^[3]等得到的适用范围较宽的自然循环条件下窄矩形通道CHF计算模型，与自然循环条件下矩形通道的CHF实验进行比较。

Katto模型对于低流速高出口含汽率和流速较大条件均适用。适用范围：压力0.1~20 MPa，质量流速0~6500 kg/(m²·s)。Zhang模型的适用范围：压力0.1~2.0 MPa，质量流速50~1000 kg/(m²·s)。

2.1 入口流速对CHF发生的影响

入口流速为实验条件下发生流量漂移后在一定范围内趋于稳定的平均值。通过改变加热段入口过冷度等条件可以得到不同的值。在压力为0.1 MPa条件下进行了自然循环CHF实验。不同入口流速下，CHF的实验值和模型计算值的分布如图3所示。

从图3可以看到，随着入口流速增大，Katto模型和Zhang模型的计算值与实验中得到的CHF

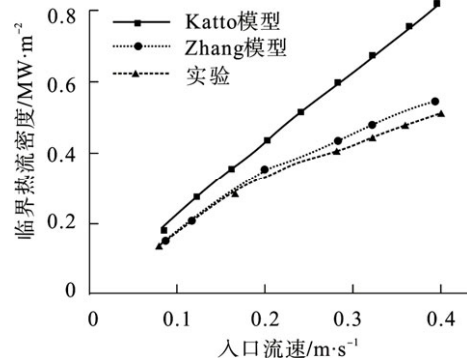


图3 CHF和入口流速的关系

Fig. 3 Relationship between CHF and Inlet Velocity

值都逐渐增大。Katto模型的计算值大于Zhang模型的计算值和本文的实验结果，Zhang模型的计算值更接近实验得到的结果。随着入口流速增大，Zhang模型计算值和实验值的增长速度逐渐变小，而Katto模型的计算值随入口流速增大而几乎呈线性增长。

入口流速增大，加热面上的气泡脱离频率变大，脱离后的运动速度也加快，蒸汽很快从加热段出口流出，因此不易产生环状流型和气泡堵塞现象。此外流速增大意味着有更多的过冷液体从通道入口进入加热段，加热面上将得到更好的冷却，因而CHF需在较大的加热条件下才能发生。

2.2 出口质量含汽率对CHF发生的影响

在系统压力为0.1 MPa，质量流量为0.012 kg/s条件下进行了自然循环CHF实验。不同出口质量含汽率下，CHF实验结果和模型计算值的分布如图4所示。

从图4可见，随着加热段出口质量含汽率的增大，Katto模型和Zhang模型的计算值与自然循环实验结果都逐渐减小，并且Katto模型的计算值要大于实验值和Zhang模型计算值。

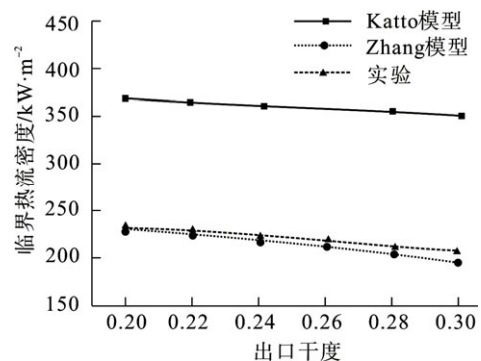


图4 CHF和出口质量含汽率的关系

Fig. 4 Relationship between CHF and Outlet Quality

随着出口质量含汽率的增加,出口附近工质的焓值增大,蒸发所需热量减小,因而发生传热恶化时需要的热量逐渐减小。

2.3 系统压力对CHF发生的影响

在质量流量为0.012 kg/s、出口质量含汽率为0.25以及0.1~1.5 MPa的压力范围内进行了实验。不同压力下,CHF的实验值和模型计算值的分布如图5所示。

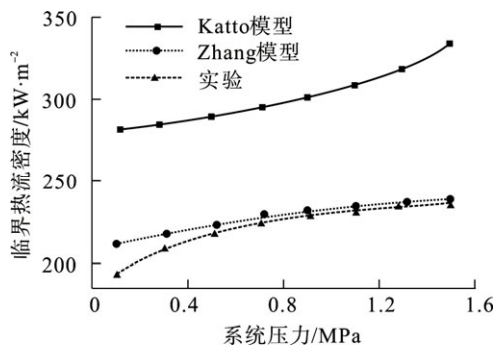


图5 CHF和系统压力的关系

Fig. 5 Relationship between CHF and System Pressure

从图5可见,随着压力的增大,Katto模型和Zhang模型的CHF计算值与自然循环CHF实验结果都逐渐增大。Katto模型的计算值大于实验结果和Zhang模型的计算值,Zhang模型可以较好地反映随压力改变自然循环实验的结果。

系统压力会带来2个主要影响作用:压力升高,工质的饱和温度和饱和密度增大,需要更高的热流密度才能将加热表面的液体蒸干,因此CHF增大;压力增大,汽液两相的差异性减小,密度差减小,自然对流效应减弱,因此造成较高压力下,换热能力变差,从而使实验系统在较小的热流密度下便能发生CHF。其中,第一种效应起着最主要的作用。

3 结 论

(1) 本文窄矩形通道自然循环实验条件下,

Katto模型的计算值普遍高于实验结果,而Zhang模型可以比较好地对实验值进行预测。

(2) 随着通道入口流速的增大,加热面上汽泡脱离频率加快,不易形成汽泡堵塞,同时更多的过冷液体进入通道,因而CHF增大。由于自然循环是依靠加热量形成流动,流速较低,并且达到某个流量上限后还会出现流量漂移,流量大幅下降,这使得自然循环下的流动换热能力比强迫循环下的换热能力差,因此在较小的热流密度下就会发生CHF。

(3) 通道出口质量含汽率的增加使得出口附近工质的焓值增大,在较小的加热条件下便能发生加热面干涸。此外,由于强迫循环的通道换热环境较好,因此需要更大的热流密度才能发生CHF,而自然循环CHF的发生情况则与之相反。

(4) 压力对CHF发生会产生2种相反的效应。第一,压力增大,工质的饱和温度增大,需要更多的热量才能使之汽化;第二,压力增大使汽液两相的差异性减小,通道内的自然对流效应减弱,这会降低通道的换热能力。第一种效应对强迫循环和自然循环都起着主导作用,CHF均逐渐增大,而第二种效应对自然循环的影响更大,在较高压力下CHF的增长速率逐渐变小,并趋向于某个稳定值。

参考文献:

- [1] 盛程,周涛,李精精,等.窄通道自然循环临界热流密度的非线性分析[J].原子能科学技术,2012,46(11):1330-1335.
- [2] Katto Y. General Features of CHF of Forced Convection Boiling in Uniformly Heated Rectangular Channels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1981, 24(8): 1413-1419.
- [3] Zhang M, Zhou T, Liu P, et.al. Study on the Critical Heat Flux Mechanism Model Under the Condition of Low Velocity And Subcooled Boiling in the Narrow Channel[C]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 130-134: 3962-3966.

Experimental Evaluation of Critical Heat Flux Calculation Models of Rectangular Channel

Sheng Cheng¹, Zhou Tao¹, Ju Zhongyun¹, Huang Yanping², Xiao Zejun²

1. Institute of Nuclear Thermal-hydraulic Safety and Standardization, North China Electric Power University, Beijing, 102206, China;
2. CNNC Key Laboratory on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics Technology, Chengdu, 610041, China

Abstract: Under the natural circulation conditions, the CHF occurring in rectangular channels is influenced by lots of factors, which have not understood completely yet. The experimental results obtained from current research were compared with the calculation results of Katto forced circulation model and Zhang natural circulation model. The applicability of the two models and effects of inlet velocity, outlet quality and pressure on the CHF under the experimental conditions were analyzed. Research indicated that the calculation results of Zhang model coincided better with the experimental values than that of Katto model. As the inlet velocity increased, the CHF of both natural and forced circulations would increase. As the outlet quality increased, the CHF of both circulations would decrease. As the system pressure increased, the CHF of both circulations would increase, and the increment speed of CHF would decrease under the higher pressure condition in natural circulation.

Key words: Natural circulation, Rectangular channel, Critical heat flux

作者简介：

盛 程（1985—），男，在读博士研究生。2008年毕业于华北电力大学热能与动力工程专业，获学士学位。现从事反应堆热工水力安全方面的研究。

周 涛（1965—），男，教授。1987年毕业于西安交通大学核能与热能专业。现从事反应堆热工水力安全方面的研究。

琚忠云（1987—），男，在读硕士研究生。2012年毕业于华北电力大学核科学与工程专业，获学士学位。现从事反应堆热工水力安全方面的研究。

（责任编辑：刘胜吾）