

文章编号:1000-582X(2002)08-0051-04

# 矩形窄缝流道流动过冷沸腾起始点的实验研究<sup>\*</sup>

潘良明<sup>1</sup>, 辛明道<sup>1</sup>, 何川<sup>1</sup>, 王飞<sup>2</sup>

(1. 重庆大学工程热物理研究所, 重庆 400044; 2. 中国核动力研究设计院, 成都 610041)

**摘要:**通过高速摄像可视化观察并结合基础传热数据采集,给出了模化工质在中压条件下,竖直矩形窄缝流道内过冷流动沸腾起始点的实验结果。讨论了影响矩形窄缝流道内过冷流动沸腾起始点的各因素,在 Bowering 关系式的基础上,考虑质量流速和压力对过冷流动沸腾起始点的影响,使用多元线性回归的方法,得到了关于矩形窄缝流道过冷流动沸腾起始点的修正关系式,与实验数据进行比较,误差范围为  $\pm 30\%$ 。

**关键词:**过冷沸腾起始点; Bowering 模型; 两相流; 窄缝流道

**中图分类号:**TK124

**文献标识码:**A

窄缝造成的汽泡动力学特征与非窄缝流道内的情况有很大差异。在工程技术中,有许多窄缝流动的应用:在微电子行业中的冷却系统经常使用窄缝流道;在核反应堆工程中,制作高转换反应堆、液态金属冷却堆、高热流密度研究堆的核元件时经常使用窄缝形状。确定流动传热是处于单相或者多相区对于传热和流动阻力计算都非常重要。通常将流道内沿加热壁面观察到有汽泡开始产生但附着加热壁面并不脱离的第一个点定义为过冷沸腾起始点(ONB)。由于在加热的过冷沸腾通道内过冷沸腾起始点可以看作是单相流与两相流的分界点,此点前后流体的传热特性和流动特性都会发生很大变化。在压水反应堆中,过冷沸腾起始点对堆芯冷却剂通道内的中子慢化性能及流动不稳定性都有重要的影响。因此在压水反应堆的设计中,过冷沸腾起始点的计算除了对传热和压降计算至关重要外,还直接影响反应堆的安全性。

从 60 年代以来各国学者先后进行了理论和实验研究。具代表性的理论分析研究有 Levy<sup>[1]</sup>和 Rogers<sup>[2]</sup>等的模型;具有代表性的实验研究有 Saha 和 Zuber<sup>[3]</sup>以及 Unal<sup>[4]</sup>等。他们根据实验和理论分析的结果得到了过冷沸腾起始点处的过冷度计算关系式。为了进行对窄缝过冷流动沸腾的换热性能、强化换热机理、气泡动力学、流型等问题进行研究,使用 F-12 作为模拟介质,在大型热工实验台架上进行了定尺度、高过冷条件

下的系列窄缝过冷流动沸腾可视化实验。使用高速摄像等可视化方法研究了过冷流动沸腾起始点的问题,并根据相关的实验结果,分析了窄缝流道内过冷沸腾起始点与大通道和其它形状流道内的异同。

## 1 实验装置及实验参数范围

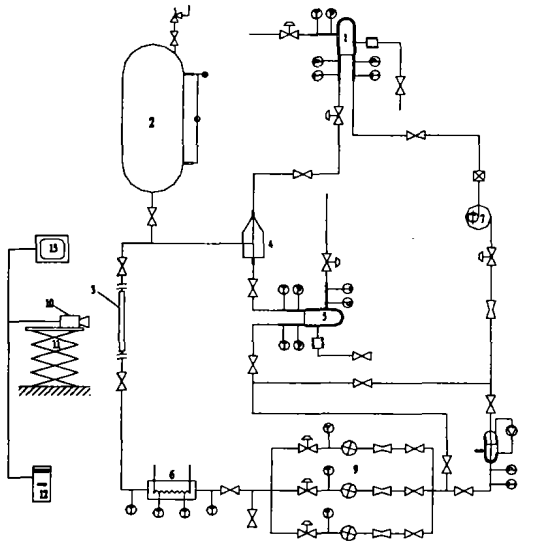
图 1 是一个大型热工实验装置,该系统可以进行多种流道的沸腾换热性能、气泡动力学、流型、流动沸腾压降、CHF 等的模拟研究。整个系统是由工质回路系统、冷却水回路、电源系统、试验台架控制系统、监视系统等组成。实验回路系统为该装置的主系统,它由主循环泵、制冷机组、预热器、实验段、冷凝器、辅助换热器、主换热器、稳压器以及流量测量装置、阀门、管道等组成。

氟里昂装置控制系统是由 Modcell 控制器、微机系统、监控软件和触摸屏组成的集散控制系统,系统对压力进行自动调节控制,精度在  $\pm 2\%$  以内。试验段流量由气动调节阀控制,由小流量文特里管流量计测量;试验段入口温度由预热器加热功率和制冷机组制冷量控制,精度在给定值的  $\pm 1^\circ\text{C}$ ;试验段加热功率由直流电源的输出电压调节控制,精度在  $0.8\%$  以内。试验段及流体出入口各个温度信号由 0.2 级 T 型碰底铠装热电偶测量,流量差压信号由 ST-3000 压差变送器测量,压力信号由 STG960 压力变送器测量,以上仪表的

• 收稿日期:2002-04-10

基金简介:国家重点基础研究专项经费(2000026305)、空泡物理和自然循环重点实验室开放基金资助。

作者简介:潘良明(1970-),男,四川巴中人,讲师,重庆大学博士研究生。主要从事传热、流体力学及燃烧等相关领域研究。

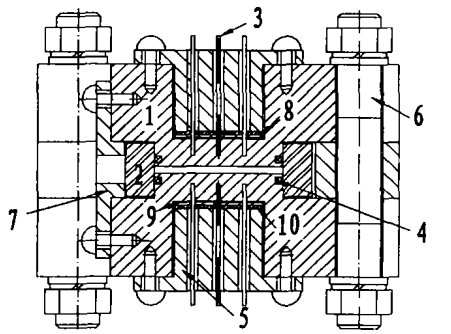


1 主换热器 2 稳压器 3 实验段本体 4 冷凝器 5 辅助换热器 6 预热器 7 主泵 8 制冷机组 9 流量测量系统 10 高速摄像机 11 升降台 12 计算机 13 监视器

图1 试验回路系统示意图

测量精度都是0.2级,氟里昂装置的数采系统采用IMP分布式数采模块和微机系统等组成。该系统测量精度为0.03%,速度8~10次/(秒·通道)。采集全部数据在0.2秒内采完,精度不低于 $\pm 0.5\%$ 。

试验段设计为间壁加热式可视化流道,可进行换热性能、流动沸腾压降、气泡动力学等试验研究,如图2所示。



1 流道大板 2 玻璃 3 铠装热电偶 4 O型圈  
5 加热片压紧块 6 主螺栓 7 玻璃压紧块  
8 加热片 9 云母片 10 绝缘片

图2 试验段结构示意图

数据处理中,由于加热方式是平面加热,通过数值计算,在流道侧的壁面上热流是均匀热流密度 $q$ ,由于为过冷沸腾,断面介质的温度是根据该断面的焓和压力,通过物性拟和关系计算出液体温度值,进而计算出液体过冷度,加热壁面温度是根据测量点的温度使

用傅立叶导热公式计算的。

$$q = k(t_i - t_w) / \Delta x \quad (1)$$

其中, $\Delta x$ 为测点距加热壁面的距离, $t_i$ 为测点温度, $t_w$ 为需要计算的壁面温度。

本文研究的实验参数范围为:试验段的有效长度0.4 m,断面尺寸为35 mm × 2 mm,介质质量流速为700 ~ 1500 kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,热流密度25 ~ 70 kW·m<sup>-2</sup>,压力1.3 ~ 2.0 MPa,入口过冷度10 ~ 26 °C,出口过冷度4 ~ 8 °C。

## 2 实验方法及实验结果

### 2.1 实验方法

实验装置准备就绪后,启动回路稳压器升压至工况压力,然后启动氟利昂热工实验装置并调节流量和入口温度至预定工况,向试验段逐步增加加热功率直至出口温度达到预定温度,待稳定一定时间后各个监视点的参数基本不发生变化时,采集试验段各温度测点的数据并记录过冷沸腾起始点的位置,并同时启动高速摄像机进行拍摄,然后降低功率,当沸腾停止时,切除功率。共测得在不同实验条件下的窄缝过冷流动沸腾起始点计97个实验点,另外还获得了多个过冷流动沸腾起始点处的高速摄像图像。

### 2.2 实验结果

通过以上的实验装置和实验方法,获得了如图3所示的过冷沸腾起始点处壁面过热度与热流密度及压力的关系,可见,在各个压力下,随着热流密度的增加,壁面过热度在不断增加,该现象不难解释;另外,过热度增加的幅度因压力的不同而不同。过冷流动沸腾起始点的状况如图4所示。

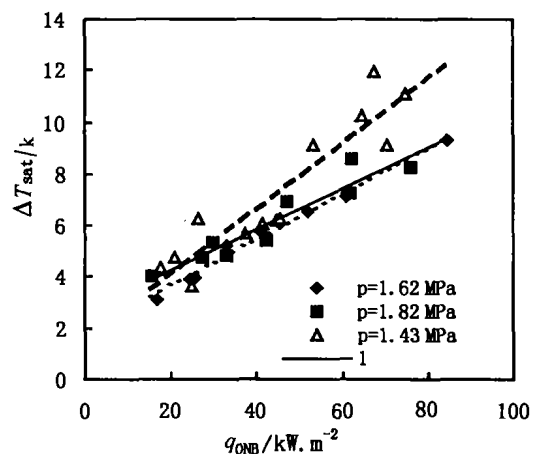


图3 过冷沸腾起始点处壁面过热度与热流密度及压力的关系

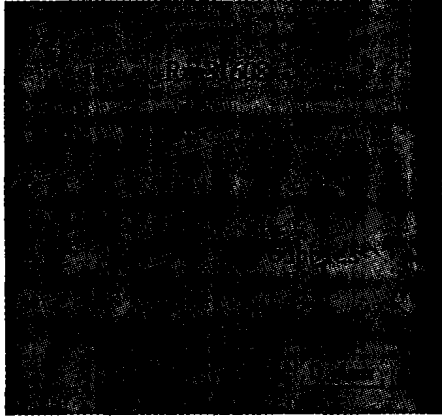


图 4 处于初期生长阶段的汽泡

2.3 Bowering 关系式的修正

Davis 与 Anderson 用分析法导出大直径管内强迫对流的始沸点为

$$q_{ONB} = (K_g H_{fg} \rho_w / 8 \sigma T_s) (T_w - T_s)_{ONB}^2 \quad (2)$$

R. W. Bowering<sup>[5]</sup> 针对各种性质不同的流体,以  $Pr_l$  准则对  $q_{ONB}$  加以修正,即

$$q_{ONB} = (K_g H_{fg} \rho_w / 8 \sigma T_s) [(T_w - T_s)_{ONB} / Pr_l]^2 \quad (3)$$

(3) 式未考虑压力、质量流速等对高过冷沸腾起始点的影响,考虑对上式增加一个修正系数  $C_1$ ,使

$$q_{ONB} = C_1 (K_g H_{fg} \rho_w / 8 \sigma T_s) [(T_w - T_s)_{ONB} / Pr_l]^2 \quad (4)$$

由于流道的狭窄,对大空间流道的沸腾的 ONB 点影响很小的因素可能会对窄空间的流动沸腾 ONB 产生较大的影响,在图 5 中示出了修正系数  $C_1$  与质量流速、压力等的变化关系,可以看到,质量流速和压力对 ONB 的影响巨大,在该类流动沸腾中,不能够忽略。

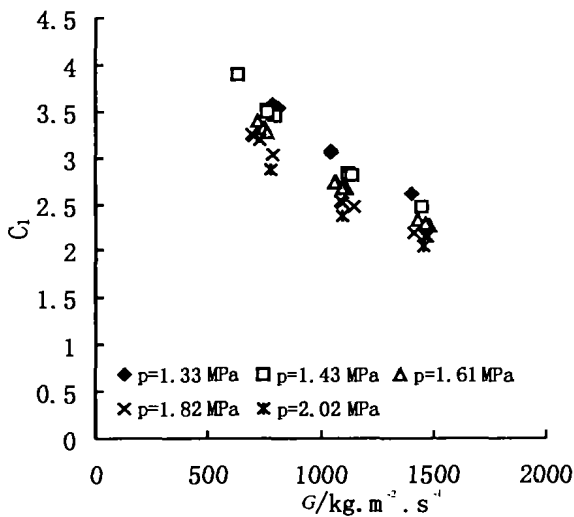


图 5 修正系数与压力和质量流速的关系

从图 5 可以看出,随着质量流速的增加,  $C_1$  是逐渐下降的,也就是说,随着流速的增加,在其他条件相同的情况下, ONB 发生时受质量流速的影响逐渐降低;另外,从图中也可以看出,压力对 ONB 也有相当的影响,在对  $q_{ONB}$  进行修正时,可以考虑使用关于质量流速以及压力的准则数进行修正。

使用  $Re$  可以考虑到流动的影响,而  $Eu$  数可以考虑到压力的影响。设  $C_1$  的关系式为

$$C_1 = f(Re, Eu) = K_1 Re^{K_2} Eu^{K_3} \\ = K_1 \left( \frac{G\delta}{\mu_l} \right)^{K_2} \left( \frac{p}{\rho u^2} \right)^{K_3}$$

对其中的 60 组实验数据进行多元回归,其余数据用于检验,回归结果为:回归相关度  $R = 0.64$ ,回归参数为:  $K_1 = 5.445 \times 10^3$ ,  $K_2 = -0.8$ ,  $K_3 = -0.123$ ,即

$$C_1 = K_1 (G\delta/\mu_l)^{-0.8} (\rho p/G^2)^{-0.123} \quad (5)$$

从(5)式可以看出,过冷流动沸腾起始点的热流密度和流动特性及压力特性紧密相关。在其他条件不变的条件下,当流速增高时,过冷流动沸腾起始的热流密度相对降低。这是由于,在高流速的作用下,相应的过冷沸腾起始点会在流道上退后,断面的过冷度减小,需要的热流密度相应减小,导致修正系数  $C_1$  减小。

另外,压力对过冷流动沸腾起始点也有影响,随着压力的增高,修正系数有下降的趋势,正如文献[6]中报道的结果一样,由于压力的增高,表征流道狭窄程度的 Bond 数增加,使窄缝的特征趋向于不明显,从而使窄缝的强化换热特征降低,导致修正系数  $C_1$  减小。

由于沸腾现象的复杂性,使实验数据分散度较高,实验数据与预测值进行比较的结果示于图 6 中,可以看出,绝大多数的实验点落在了误差为 30% 的范围内。

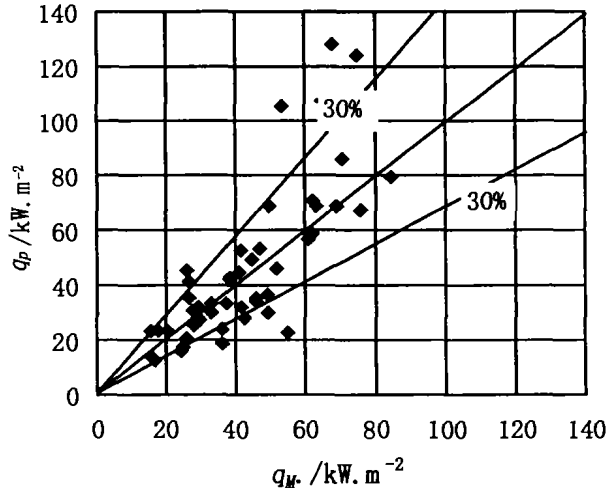


图 6 预测结果与实验结果的比较

### 3 结 论

从以上实验结果和分析中,可以看出:

1) 矩形窄缝流道内过冷流动沸腾起始点相对于其它流道有显著的不同,相对于大流道,有一个较大的修正系数  $C_1$ 。

2) 修正系数  $C_1$  与流道内的流速和压力条件紧密相关,流速增加,则修正系数减小,提示在相同条件下,ONB 点退后;随着压力的增加,修正系数也逐渐减小。

3) 修正关系式与实验结果相比较,误差带为  $\pm 30\%$ ,这也说明了沸腾的复杂性。

#### 参考文献:

[1] LEVY S. Forced Convection Subcooled Boiling Prediction of Vapor Volumetric Fraction[J]. Int. J. Heat Mass Transfer,

1967, 10: 951 - 965.

[2] ROGERS J. The Onset of Significant Void in Upflow Boiling of Water at low pressure and velocities[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1987, 30:2 247 - 2 260.

[3] SAHA P, ZUBER N. Point of Net Vapor Generation and Vapor Void Fraction in Subcooled Boiling[A]. In: Proc. of the 5th International Heat Transfer Conference[C], Tokyo, 1974.

[4] UNAL H H. Determination of the initial point of net vapor generation in flow boiling system[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1975, 18:1 095 - 1 099.

[5] BOWERING R W. Physical Model Based on Bubble Detachment and calculation of Stream Voidage in the subcooled Region of Heated Channel[R].Norway: Halden Reactor Project, 1962.

[6] 潘良明,辛明道,何川,等.垂直矩形窄缝流道内的过冷流动沸腾换热[J].工程热物理学报,2002,23(2):215 - 217.

## Onset of Nucleate Boiling in the Vertical Narrow Rectangular Channel

PAN Liang - ming<sup>1</sup>, XIN Ming - dao<sup>1</sup>, HE Chuan<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>

(1. Institute of Engineering Thermophysics of Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Institute of Nuclear Power of China, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** ONB experimental and high - speed video results gotten about F - 12 subcooled boiling in vertical narrow rectangular channel with cross - section of  $35 \times 2 \text{ mm}^2$ , and mass fluxes between  $700 \sim 1\ 500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , heat fluxes between  $25 \sim 70 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  and saturation pressure between  $1.3 \sim 2.0 \text{ MPa}$ . The effect of mass flux, surrounding pressure on the ONB are reported. On the basis of Bowering Model about ONB of flow boiling using n. multiple linear regression and considering Re and Eu number, the correlation about ONB in vertical narrow rectangular channel was Qained, compared with experiment results, the error is  $\pm 30\%$ .

**Key words:** ONB; Bowering Model; Two - phase flow; narrow rectangular channel

(责任编辑 陈移峰)