

# 微小通道内流动沸腾压降特性实验研究

王 旭<sup>1</sup>, 陈 宏<sup>1</sup>, 匡 波<sup>1</sup>, 帅剑云<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030;

2. 斯图加特大学 核能与能量系统研究所, 德国 斯图加特 70550)

**摘 要:** 通过对矩形微小通道中流动沸腾的实验, 讨论了通道压降的稳态与动态特征及稳定域判别方法; 对不同实验工况下压降时序进行频域分析, 提出微小通道压降振荡的产生主要源于汽泡产生、传输及微小通道与入口可压缩空间或柔性空间的耦合; 此外, 基于 AR(自回归)模型对系统实验段压降振荡进行实验建模, 结果表明, 较大流量时受限变形汽泡流与环状流出现时压降振荡相对较稳定; 小流量时, 压降不稳定性情况比较复杂, 容易形成不稳定区域。

**关 键 词:** 微小通道; 流动沸腾; 压降; 压降振荡

中图分类号: TK124 文献标识码: A

## 1 引 言

紧凑微小换热结构作为热管理与热质传输的有效手段之一, 已广泛应用于能源、动力、化工、微机电与航天、生物医学工程等现代高新技术领域。由于相变换热能传递更多的能量, 微结构中流动沸腾日益受到重视。

但是, 对于微小通道中流动沸腾现象和特性存在很多问题尚需深入认识。特别应当指出的是, 相对常规流道来说, 尺度效应、局部流动与传输情况等对微小通道中压力与压降振荡影响相当显著。在已有文献中, Kew 和 Cornwell<sup>[1]</sup> 指出了当槽道水力直径接近气泡直径时入口段出现的不稳定情况, 而且根据试验结果提出了环型通道压力波动模型。Ali-goodarz<sup>[2]</sup> 等人观察了具有相同壁面过热度不同尺寸的微槽结构温度不稳定特性。然而, 至今对微槽内压降不稳定的相关报道很少, 本文通过分析对矩形微小通道中流动沸腾时压降及其振荡的实验研究, 讨论了压降特性及其振荡产生原因, 并进行了稳定域判别, 对深入认识微小通道中的流动传输特性具有重要意义。

## 2 实验装置

实验系统及台架如图 1 所示, 功能与原理如下: 以微型泵输送工质在实验回路中流动, 实验段入口前以恒温器控制入口温度; 实验段出、入口处采用 NiCr-NiSi 热电偶测量进出口温度; 以固态压阻压力与压差传感器分别测量进出口压力与压差, 并以 NiCr-NiSi 热电偶均匀布置测量加热通道壁温进行热流测量, 计算加热功率, 估计回路热平衡; 利用计

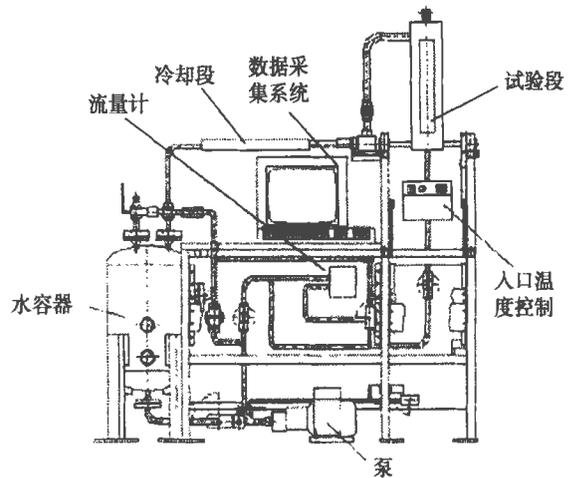


图 1 试验回路

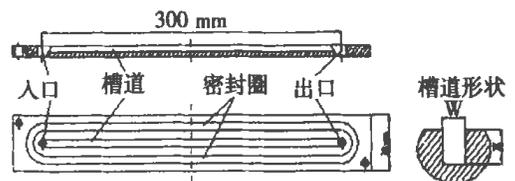


图 2 实验段

算机数据采集系统记录实验段各处压力、压差及温度时间序列;通过高速摄影对流动进行可视化观察。

实验以去离子水为工质。实验研究参数范围是:流量  $200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $700 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;进口温度  $350 \sim 370 \text{ K}$ 。实验段结构如图 2 所示:实验段上刻有矩形微小通道,分别采用  $2.0 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$  和  $0.5 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$  (相应水力直径分别为  $2.67 \text{ mm}$  和  $0.8 \text{ mm}$ ) 两种尺寸。

### 3 流动沸腾的微小通道内压降的稳态与动态实验结果

#### 3.1 压降测量的稳态结果

图 3 和图 4 给出了两种尺寸实验段中流动沸腾两相压降随加热功率的变化趋势。可以看出,  $0.5 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$  通道中的总压降远高于  $2.0 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$  通道中的总压降。而且随着加热功率的增加,在恒定入口流量的情况下,  $0.5 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$  通道的压降曲线要比  $2.0 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$  通道的压降曲线陡。这一点容易理解,在低加热功率下(图 3 和图 4 中没有示出),整个通道内流动为单相,由于近壁面液体的粘性随着热流的增加而降低,则压降减少直至壁温达到 ONB 点。随着加热功率进一步增加,ONB 点向通道进口方向推移。此时的通道内同时包括了单相段与两相段。压降亦随着通道内的空泡份额增加而增加。最后,当通道中主要由变形汽泡或环流型所占据时,压降更大。通道尺寸越小,这一变化趋势越明显,从而压降曲线越陡。

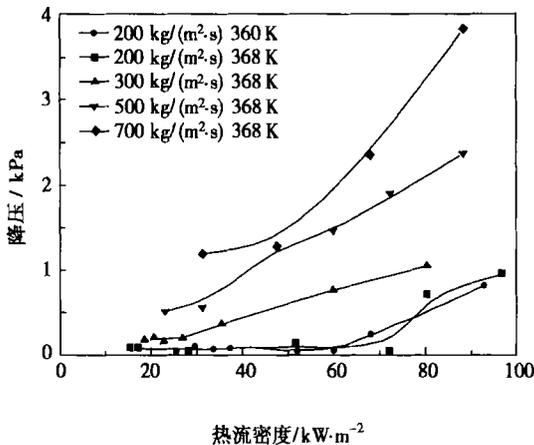


图 3 压降同热流密度关系 ( $2 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  通道)

由图 3 和图 4 还可看出,不同的通道尺寸中压降是不同的。通道水力直径越小,压降越大。这主

要是由于微小通道对变形汽泡产生一个附加的毛细抽吸作用<sup>[3]</sup>,造成变形汽泡有一个向出口的附加迁移速度,且通道越小抽吸作用越强,从而使汽泡与液膜间相对速度随通道尺寸减小而增加,加大了两相之间摩擦与耗散,造成压降随通道水力直径减小而增加。此外,图 3 和图 4 还反映出其它的一些压降特性,它们是:(1)压降随质量流速增加而增加,且通道尺寸越小,质量流速影响越小;(2)入口欠热度对微小通道内压降影响几乎可忽略。

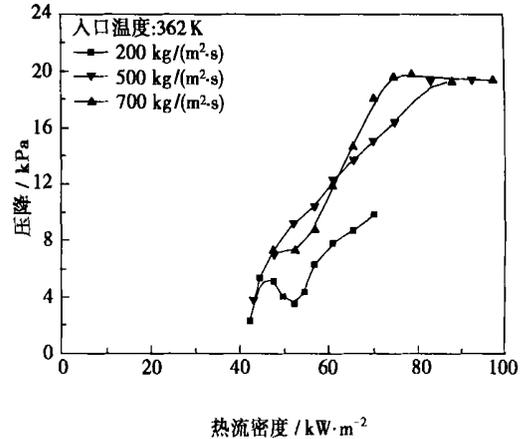


图 4 压降同热流密度关系 ( $0.5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  通道)

#### 3.2 微小通道内的压降振荡

对采用微小通道的蒸发器设计而言,压降稳态特性是一个关键指标;对其运行而言,通道内的压降不稳定性,或者说压降振荡,则是应用时不得不考虑的重要问题。

图 5 和图 6 分别为  $0.5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的矩形微小通道中相同入口温度 ( $362 \text{ K}$ )、不同质量流速(选取  $200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $700 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )、不同加热热流条件下的典型压降时序。

图 7 和图 8 分别为上述压降时序对应的功率谱密度图。

当外加压头为恒定值时,沸腾通道内压降不稳定性通常发生在负  $dp/dm$  区。同时,由于微小通道相对容积非常小,具有可压缩容积的稳压罐或其上游的管道或腔室对压降振荡也起到一定作用(回路的耦合效应)。当加热通道入口处流速由于任意扰动而减小时,沸腾蒸发速率增加,这会造成流速进一步减小。此时,由于总压头保持不变,则一部分流体被“挤回”稳压罐等可压缩容积,导致稳压罐等内部的压力增加;同时,由于阻力增加,回路中的流速也会减小。但是回路中流速的减小量要比加热通道中

的流速减小量来得小且存在延迟。因此，平衡被打破。一旦密度较小的两相混合物离开加热流道，流阻重新变小，在可压缩容积内的压力与驱动压头共同作用下，大量流体又重新“涌进”加热通道，流速又

漂移回到通道特性曲线的正斜率区；随着流速急剧增加，流道内的流阻开始增加，流动又重新沿着特性曲线下降，从而形成一个与上述相反的过程。这样的脉动就造成了压降同时发生振荡。

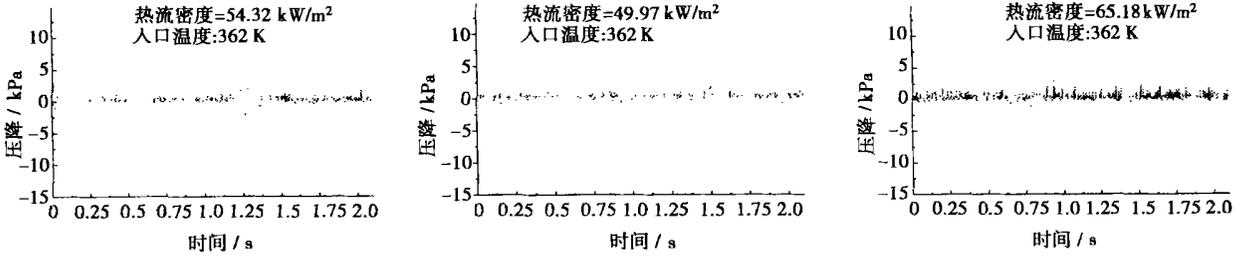


图5 质量流速 200 kg/(m<sup>2</sup>·s)下微小通道中的典型压降时序

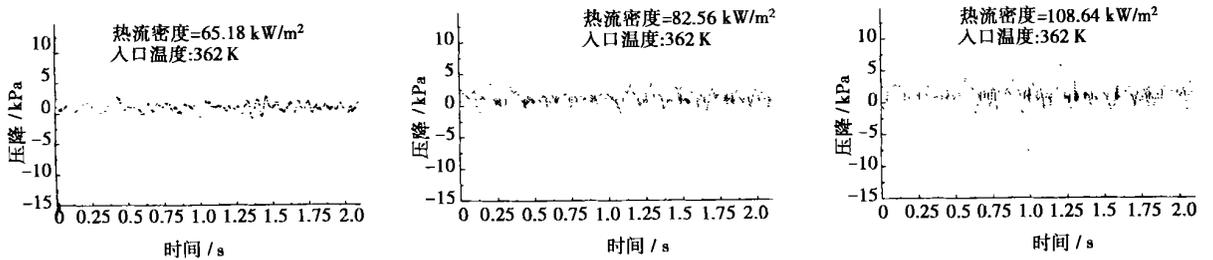


图6 质量流速 700 kg/(m<sup>2</sup>·s)下微小通道中的典型压降时序

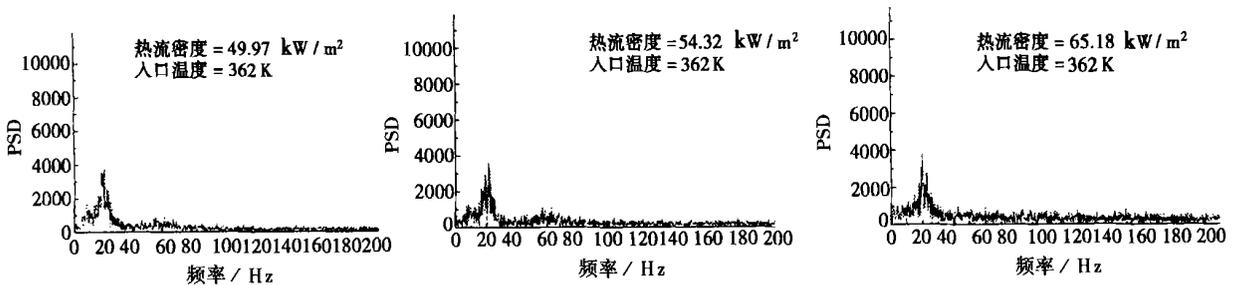


图7 质量流速 200 kg/(m<sup>2</sup>·s)下微小通道中压降时序功率谱密度

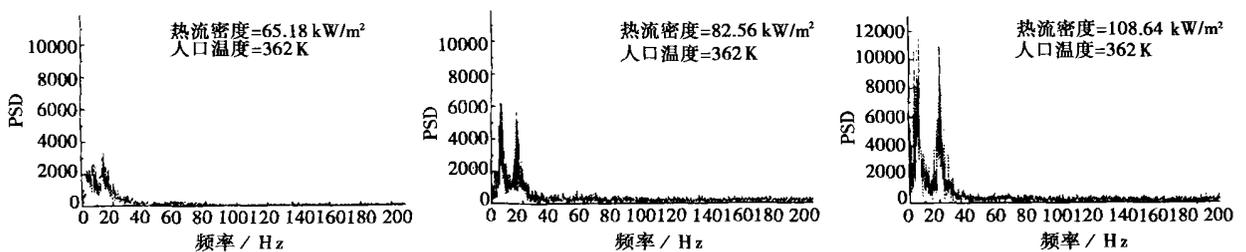


图8 质量流速 700 kg/(m<sup>2</sup>·s)下微小通道中压降时序功率谱密度

事实上, 在微小通道这一特定情况下, 液体的沸腾蒸发对入口流速的影响非常明显, 上游的任何小空间相对微小通道而言都可视为类似稳压罐的作用。在本实验台架上预热段是一波纹管, 且为安装热电偶与压力(降)传感器, 微小通道入口处还有一个小腔室。这些相对于微小通道容积都可视为“可压缩空间”, 因此, 上述不稳定性机理就很有可能是形成微小通道内压降振荡的一个主要因素。此外, 在微小通道内受限的变形气泡两端还存在一个与之相应的压降, 在低干度情况下(特别是沸腾初始阶段), 由于通道内体积膨胀较小, 则气泡的产生与通过局部流道也是微小通道中的主要压力振荡源之一。

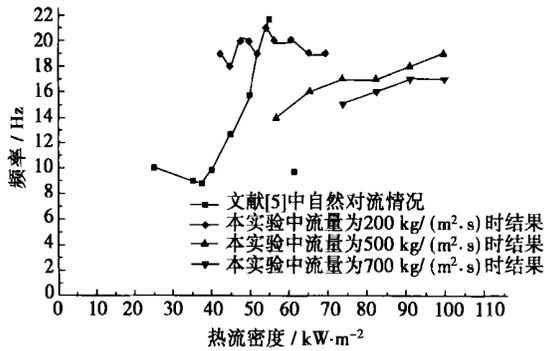


图 9 压降振荡第二谱峰频率与文献[5]中结果的比较(0.5 mm 间隙)

还可以看到, 在多数情况下, 压降振荡的功率谱密度上有两个谱峰: 第一谱峰位于 5~7 Hz(此峰在低流速情况下并未出现); 而第二谱峰则位于 14~21 Hz。在较低质量流速(200 kg/(m<sup>2</sup>·s))下, 当加热热流增至 29~42 kW/m<sup>2</sup> 时, 通道出口附近可以观察到极小气泡的产生, 这时, 由于通道中空泡份额极小, 接近单相, 故如前所述, 不大可能出现“可压缩容积”对应的压降振荡。从频率范围来看, 第二谱峰对应于气泡产生与传输的频率。事实上, 由于此时产生的气泡相对于通道尺寸仍然很小, 气泡的产生频率应与文献[4]中池内沸腾气泡产生频率(约 20~40 Hz)量级相当; 此时, 尽管通道内流速会对此频率有影响, 但在如此低速(约 0.2 m/s)的流动中, 影响相当有限。此外, 从文献[5]中也可找到佐证: 在 0.5 mm 窄空间的自然对流沸腾实验中发现, 在 42~69 kW/m<sup>2</sup> 的热流范围内, 气泡产生与通过的频率约为 12~21 Hz, 这与本文实验中所得到的第二谱峰频率相近。而诸如 500 kg/(m<sup>2</sup>·s) 和 700 kg/(m<sup>2</sup>·s) 等

较高流速情况下的压降振荡由于随流速增加, 加热表面换热更好, 气泡产生的频率更低, 于是其第二谱峰对应的频率稍低一些。这些解释可由图 9 很清楚地看到。图 10 和图 11 则给出了第二谱峰频率随质量流速及入口温度的变化趋势。

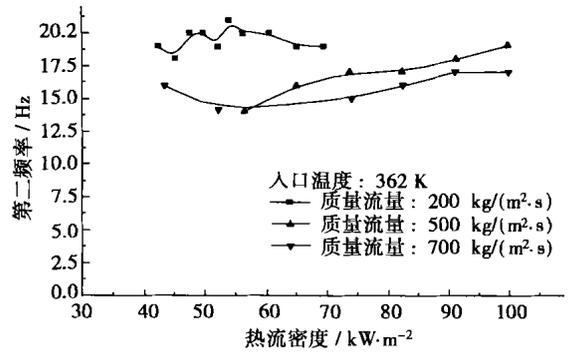


图 10 压降振荡第二谱峰频率随质量流速的变化趋势(入口温度: 362 K)

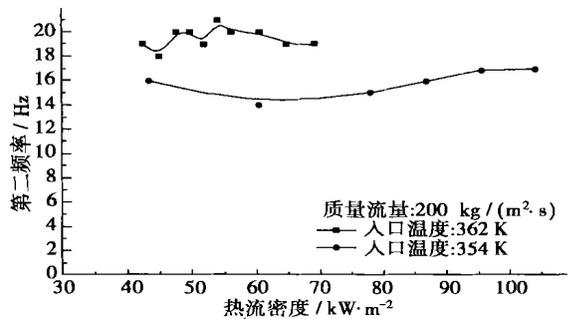


图 11 压降振荡第二谱峰频率随入口温度的变化趋势(质量流速: 200 kg/(m<sup>2</sup>·s))

而第一谱峰则是随加热热流增高而愈加明显。此时, 由于空泡份额的增加, 前述的“可压缩容积”耦合的压降振荡机理更为明显。鉴于此, 文献[6]中分别对微小通道上游安装刚性与柔性接管的流动沸腾实验结果给出了比较直接的证据。

#### 4 基于时间序列模型的压降不稳定性定量分析

由于物理机理与数学处理上的困难, 迄今对于包含微小通道的回路中的微小通道压降振荡尚无满意的模型。为此, 本文采用实验模型来定量描述, 并基于时间序列分析(Time Series Analysis), 选用长 AR(自回归)模型, 其定义为:

$$(\Delta p)_i = \sum_{j=1}^n \varphi_j (\Delta p)_{i-j} + \alpha_i, \alpha_i \sim NID(0, \sigma_\alpha^2) \quad (1)$$

其中： $\varphi_i$  为自回归系数； $(\Delta p)_i$  是采样的压降时序 (本文实验采样间隔为  $1.28 \times 10^{-3}$  s)。

本文采用 Marple 算法, 对每一加热热流工况计算了微小通道压降的长 AR 模型, 得到最大熵谱 (Marple 谱), 该谱反映了与前述功率谱相似的谱峰分布规律。

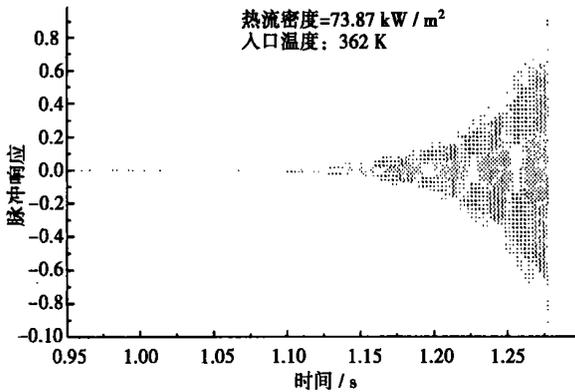


图 12 在  $500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  质量流速下,  $0.5 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$  通道内一个压降脉冲响应

为研究微小通道流动沸腾的压降不稳定性, 最

实际的办法是确定稳定与不稳定区域。以往对于稳定性边界的确定, 多采用实验直接观测或者用线性稳定性理论来确定。前者带有一定主观性; 而后者则由于线性近似与真实情况有一定误差。本文基于 AR 实验模型研究微小通道流动沸腾的压降不稳定性。由前面时序建模得到 AR 系数, 并计算相应压降脉动的 Green 函数 (对应于系统压降的脉冲响应)。图 12 为在  $500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  质量流速下, 加热热流为  $73.87 \text{ kW}/\text{m}^2$  时计算得到的  $0.5 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$  通道内一个压降脉冲响应。其意义为: 当系统在此稳态工况下受到一个单位脉冲扰动, 则压降脉动会持续增长 (放大), 即处于压降不稳定工况 (若压降脉动是衰减或等幅振荡的, 则处于压降不稳定工况)。

为进一步定量说明其稳定性特征, 采用了对数衰减率与阻尼比来近似评价稳定性特征。对数衰减率  $\hat{\delta}_i$  与阻尼比  $\hat{\xi}$  分别定义如下:

$$\hat{\delta}_i = \frac{1}{n} \ln \frac{\alpha_1}{\alpha_{n+1}}, \hat{\xi} = \frac{\hat{\delta}_i}{\sqrt{4\pi + \hat{\delta}_i^2}} \quad (2)$$

当  $\hat{\delta}_i, \hat{\xi}$  大于或等于 0 时, 系统压降振荡在单位脉冲作用后, 随时间延续而逐渐衰减或稳定在某一幅值附近, 系统是稳定的; 而当这两个值都小于 0 时, 即所谓“负阻尼”, 则系统压降在单位脉冲扰动以后, 将逐渐放大, 系统为不稳定的。以此方法, 我们

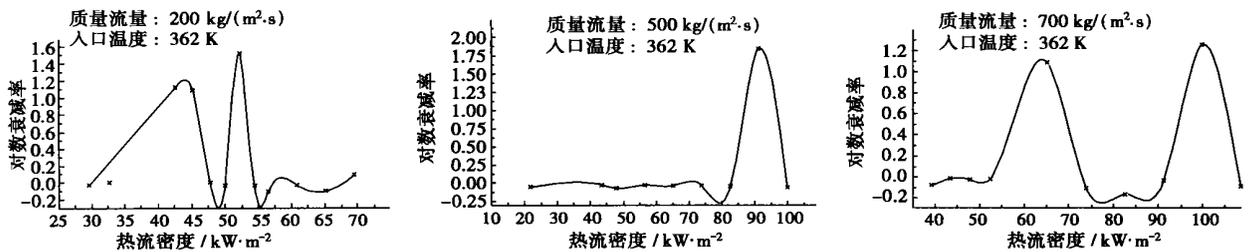


图 13 压降时序的对数衰减率随加热热流变化的趋势 ( $0.5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  通道; 质量流速: 200、500、700  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 入口温度: 362 K)

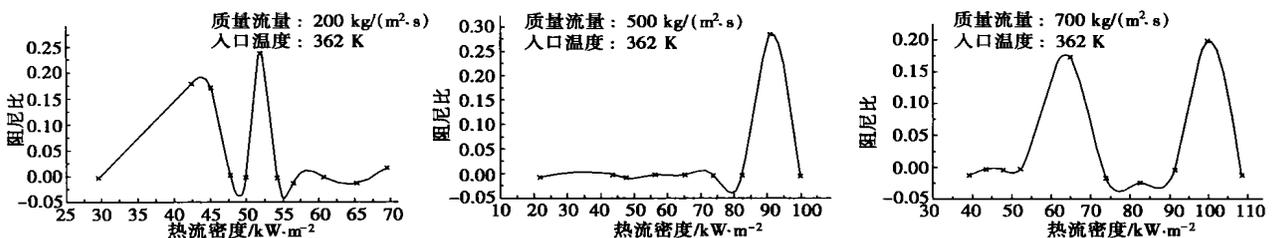


图 14 压降时序的阻尼比随加热热流变化的趋势 ( $0.5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  通道; 质量流速: 200、500、700  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 入口温度: 362 K)

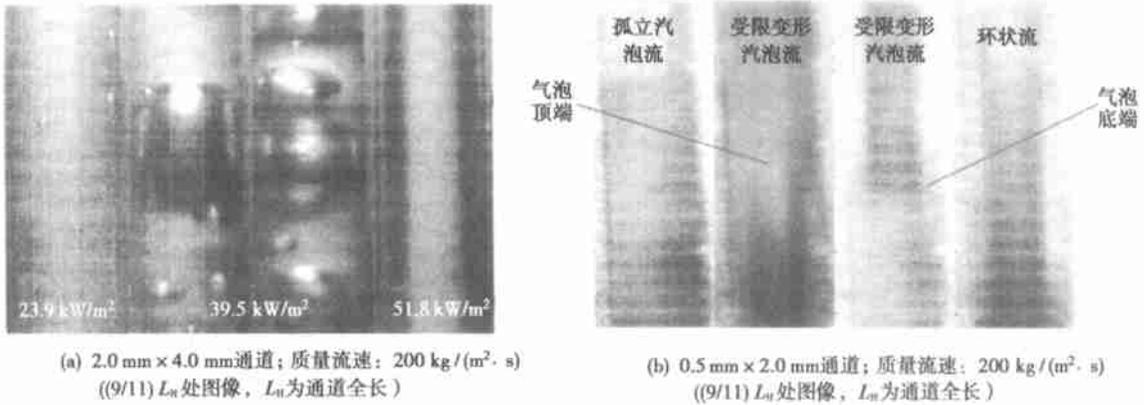


图 15 高速摄影得到的加热微小通道中典型流型的可视化图像

可以大致判定微小通道内压降的稳定与不稳定区域。本文分析了所有实验工况下压降采样序列的脉冲响应, 得到图 13 和图 14 所示的对数衰减率与阻尼比随加热热流变化的情况。

对照可视化观测的流型分布结果(图 15 是  $200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  质量流速下,  $0.5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  通道中各种典型流型可视化图像), 可以看到: 对较大质量流速(如:  $700$  与  $500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ), 当出现变形汽泡流或环状流时, 呈现压降振荡的稳定区域; 而对小质量流速情况(例如:  $200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ), 稳定与非稳区域分布则比较复杂, 控制参数的任何变化都很容易造成不稳定性特征的变化。也就是说, 小质量流速情况容易出现不稳定, 且较难控制。应当指出, 为得到实际应用的稳定域分布谱图及其规律乃至稳定性数据库, 亟待较大参数范围内进行有关稳定性实验研究。

## 5 结 论

(1) 对实验段尺寸为  $2.0 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$  和  $0.5 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$  (水力直径分别为  $2.67$  和  $0.8 \text{ mm}$ ) 的两个矩形微小通道的实验回路进行了流动沸腾实验, 通过对压降平均值与振荡时序的研究, 辅以高速摄影的可视化图像, 分析了通道压降的稳态与动态特征;

(2) 基于实验段压降振荡的动态实验, 得到不同工况下的压降时间序列, 进一步地进行了频域分析(功率谱分析)。研究分析表明, 微小通道压降振荡产生的主要原因是汽泡的产生、传输和通道与回路的耦合作用;

(3) 基于时序分析的 AR 模型对回路系统中实验段压降振荡的实验建模, 研究了稳定域分布特征。结果表明对较大流量, 受限变形汽泡流与环状流出现时压降振荡工况处于较稳定区域; 小流量时, 压降不稳定性情况比较复杂, 任何扰动都容易形成不稳定区域。

致谢: 本文工作得到了德国斯图加特大学核能与能量系统研究所(IKE)Kulenovic 先生与 Mertz 博士的热情支持与帮助, 在此表示感谢。

## 参考文献:

- [1] KEW P A, CORNWELL K. Confined bubble flow and boiling in narrow space[ A]. **Proc Tenth International Heat Transfer Conference** [ C]. UK: Brighton 1994. 473—478.
- [2] ALIGOODARZ M R, YAN Y, KENNING D B R. Wall temperature and pressure variations during flow boiling in narrow channels[ A]. **Proc 11th Int Heat Transfer Conf** [ C]. Korea: Kyongju, 1998. 225—230.
- [3] KUANG B. Some experimental aspects on the heat transfer performance, pressure drop and pressure drop instabilities of flow boiling in mini-channels[ R]. Stuttgart: IKE, 2002.
- [4] COLLIER J G, THOME J R. Convective boiling and condensation [ M]. 3rd Edition. Oxford: Clarendon Press, 1994.
- [5] BONJOUR J, LALLEMAND M. Flow patterns during boiling in a narrow space between two vertical surfaces[ J]. **Int J Multiphase Flow**, 1998, 24: 947—960.
- [6] BRUTIN D D, TOPIN F, LADRIST L. On the thermo-hydraulic instabilities in small channels during flow boiling[ A]. **Proc of Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics** [ C]. Canada: Banff, 2001. 273—277.

(何静芳 编辑)

新型热管技术开发及应用 = **Development and Application of Innovative Heat Pipe Technology** [刊, 汉] / CHEN Yan-ze, DING Xin-wei, YU Jian-liang, et al (Institute of Chemical Engineering under the Dalian University of Science & Technology, Dalian, China, Post Code: 116012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 1~3

The theory of innovative heat pipe technology, such as refrigeration heat pipes (RHP) and thermosyphon Rankine (TSR) engines as well as current study results are described with an emphasis on the TSR technology, which integrates the technology of heat pipes with that of turbines. The TSR technology represents a new approach to energy utilization and recovery, and offers wide prospects for engineering applications. The refinement and in-depth research of the TSR technology can be conducive to enhancing the conversion efficiency of heat energy to mechanical power. **Key words:** heat pipe, thermosyphon, Rankine engine, refrigerating heat-pipe

微小通道内流动沸腾压降特性实验研究 = **Experimental Investigation of Pressure Drop Characteristics of Flow Boiling in Mini-channels** [刊, 汉] / WANG Xu, CHEN Hong, KUANG Bo, et al (Institute of Mechanical and Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 4~9

In the wake of experimental tests of flow boiling in rectangular mini-channels discussions are held concerning the steady and dynamic characteristics of pressure drop in the channels and a method for stable domain discrimination. After a frequency domain analysis of pressure-drop time series under various experimental operating conditions it is found that the emergence of pressure-drop oscillations in mini-channels can mainly be attributed to vapor generation, transmission and the coupling of mini-channels with inlet compressible or flexible space. Moreover, based on an autoregression model of time-series analysis a model for testing pressure drop oscillations along a test section has been set up. The test results indicate that during a relatively great flow rate the pressure-drop oscillations in the presence of a restricted and deformed steam-bubble flow and an annular flow was found to be relatively stable. However, in the case of a small flow rate the unstable condition of the pressure drop is rather complicated, tending to set up an unstable zone. **Key words:** mini-channel, flow boiling, pressure drop, pressure drop oscillation

射流泵内部流动的实验研究 = **Experimental Study of Flows in a Jet Pump** [刊, 汉] / HE Pei-jie, LONG Xin-ping, LIANG Ai-guo (Institute of Power & Mechanical Engineering under the Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072), LIU Hou-lin (Research Institute of Fluid Machinery under the Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu Province, China, Post Code: 212014) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 10~13

For carrying out the experimental study of the turbulent mixing between water jets in a jet-pump confined space and its surrounding low-velocity water-flow streams, static pressure taps were arranged at 11 axial locations. The pressure taps assume the following layout: one tap at the inlet of a converging conical throat, 6 taps in the throat, and the remaining 4 in a diffuser pipe. Wall-surface static pressure was measured at 11 pressure measuring points by using a U-type tube. Measurements were taken of the water jets in a confined space at the jet pump throat inlet and inside the throat by using a particle image velocimetry device. As a result, the distribution of velocity vector and axial velocity on the symmetrical flow field was obtained under four flow-rate ratios. The measurement results may provide a reliable basis for the analysis of internal flows of a jet pump. **Key words:** particle image velocimetry, jet pump, flow velocity measurement

气液两相流横掠错列圆柱形成旋涡脱落诱发管束振动的试验研究 = **Experimental Investigation of Tube Bundle Vibrations Induced by a Vortex Shedding Generated by Gas-liquid Two-phase Flows Sweeping Across Staggered Tube Arrays** [刊, 汉] / SU Xin-jun, ZHANG Xiu-gang, WANG Dong, et al (Institute of Energy and Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 14~16, 51