

多微通道内两相流动阻力特性及气泡行为

严润刚^{1,2}, 潘良明¹, 何辉¹, 黄豪杰¹, 李鹏斐³

⁽¹⁾ 重庆大学动力工程学院, 重庆 400044; ⁽²⁾ 中国航天科技集团公司七三〇四厂, 四川 成都 610100;

⁽³⁾ 河南中烟漯河卷烟厂, 河南 漯河 462000)

摘要: 采用去离子水作为实验工质, 对 14 条水力直径为 $187.5\ \mu\text{m}$ 的平行矩形微通道内两相流动阻力特性及气泡行为进行可视化实验。研究发现, 当质量流速一定时, 随着热通量增大, 汽相逐渐增多, 平行多微通道内压降相应增加; 当热通量一定时, 随着质量流速减小, 压降出现先减小后增大的趋势, 该曲线中的最低点被认为是静态流动不稳定性起始点 (OFI 点)。结合可视化图像并利用气泡动力学理论对 4 种不同的汽相行为特征进行分析, 发现汽核受限、倒流等堵塞流道现象的出现导致系统阻力增大, 压降增加。通过压降实验值与 Kim & Mudawar 关系式在不同质量流速下进行比较发现, Kim & Mudawar 关系式仅能对本实验压降变化趋势进行预估, 而无法对压降数值进行有效预测。

关键词: 微通道; 两相流; 可视化; 压降; OFI 点; 气泡; 动力学

中图分类号: TK 12

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2017) S1—0066—05

Characteristics of two-phase flow resistance and bubble behavior in microchannels

YAN Rungang^{1,2}, PAN Liangming¹, HE Hui¹, HUANG Haojie¹, LI Pengfei³

⁽¹⁾ School of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

⁽²⁾ Factory 7304, China Aerospace Science and Technology Corporation, Chengdu 610100, Sichuan, China;

⁽³⁾ Luohe Cigarette Factory of China Tobacco Henan Industrial Co., Ltd., Luohe 462000, Henan, China)

Abstract: The characteristics of two-phase flow resistance and bubble behavior had been experimentally investigated in a microchannel heat sink containing 14 parallel $0.15\ \text{mm} \times 0.25\ \text{mm}$ rectangular microchannels with hydraulic diameter of $D_h = 187.5\ \mu\text{m}$ by using deionized water as working fluid. The experimental results revealed that vapor phase gradually increase with the increase of heat flux under constant inlet temperature and mass flux, leading to the increase of pressure drop in parallel multiple microchannel. When keeping the heat flux and inlet temperature constant, the pressure drop exhibited a trend of first decrease and then increase with the increase of mass flux. In addition, the lowest point in the curve of pressure drop vs mass flux (Δp_{exp} vs G) is considered to be the starting point of the static flow instability (namely, OFI point). The characteristics of four different bubble behavior are studied by basing on the help of visual image and bubble dynamics theory. It is found that due to the effects of the

2017-04-24 收到初稿, 2017-04-28 收到修改稿。

联系人: 潘良明。第一作者: 严润刚 (1990—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51376201, 51676020)。

Received date: 2017-04-24.

Corresponding author: Prof. PAN Liangming, cneng@cqu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51376201, 51676020).

interaction of buoyancy and flow inertia force, the bubble was rapidly cleared at the initial stage of bubble nucleation. When the bubble size is approximately equal to the height of the channel, the bubble enter the local confined growth phase, leading to the increase of viscous resistance between the bubble and the surface of wall. And under the influence of heat flux, the bubble continues to grow and is limited in the width direction, so that the bubble's growth was completely confined both at height and width direction. Thereafter, the bubble gradually grew and elongated as well as flowed downstream. Moreover, when the surface tension is insufficient to maintain the liquid bridge between two adjacent bubble, the liquid bridge broke and resulted in bubbles merging. It is more interesting that due to the influence of the downstream bubble reversal flow and the flow inertia force, The upstream bubble is gradually compressed, leading to the velocity of the bubble tail lower than that of the bubble head. Finally, by using the current pressure drop data to verify the prediction accuracy of Kim & Mudawar correlation, it is found that the Kim & Mudawar correlation can only predict the variation trend of pressure drop, but can not predict the pressure drop value.

Key words: microchannels; two-phase flow; visualization; pressure drop; OFI point; bubble; dynamics

引 言

近年来，微电子、微型机电系统（MEMS）等迅速发展，微型设备工作散热成为一个紧迫的问题。微通道因具有较常规通道更高的面积体积比，换热性能较常规通道更高^[1]；但随流道尺度减小，液体表面张力作用逐步增强，导致流动压降大幅增加，使微通道内流动呈现出与常规通道不一样的特征。如 Steinke 等^[2]、Chang 等^[3]、Bogojevic 等^[4]均在实验中观察到汽核逆流现象。

已有诸多学者对微小通道内流动阻力特性进行了研究^[5-12]，但未形成统一结论。Wang 等^[13]报道微小通道内压力梯度较常规尺度下更高，并认为这是由微通道内表面粗糙引起的，提出了一个粗糙度黏度模型来解释该现象。Li 等^[14]认为，随流道尺度减小表面张力逐渐上升为主导作用，当 $1.5 < \text{Bond} \leq 11$ 时表面张力、惯性力和黏滞力将起重要的作用，当 $\text{Bond} \leq 1.5$ 时表面张力将占主导而惯性力和黏滞力作用可忽略，而在 $\text{Bond} > 11$ 时表面张力作用可忽略。Kim 等^[15]认为，在微小通道内表面张力和黏滞力影响十分显著，而体积力影响却可忽略。因此，Kim 等^[16]引入 Reynolds 数、Weber 数、毛细管数、Suratman 数和密度比等对不同流动状态下的 Chisholm 参数 C 进行修正，获得了一个新两相摩擦压降关联式。

本工作对 14 条水力直径为 $187.5\ \mu\text{m}$ 的平行

矩形微通道内两相流动阻力特性及汽相行为进行可视化实验研究。对压降随热通量、质量流速变化情况进行分析，结合可视化图像并利用气泡动力学理论对气泡行为进行研究，将压降值与 Kim 等^[16]关系式进行比较，以获得多微通道内流动阻力变化及气泡行为的特性。

1 实验系统及误差分析

1.1 实验系统及回路

实验回路如图 1 所示。采用电导率为 $1\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的去离子水为实验工质，经储液罐沸腾一段时间排除不凝气，经过滤器过滤后由齿轮泵供入实验回路。工质流经质量流量计，并由恒温浴锅将其预热至 55°C 后，通入实验段。

实验段采用无氧铜为微通道加热基体，顶部加工有 14 条水力直径为 $187.5\ \mu\text{m}$ 的平行矩形微通道，参数见表 1，表中 D_h 为水力直径、 L 为实验段长度、 H 为流道高度、 W 为流道宽度。分别采用压力压差变送器测量进出口联箱压力波动和压降。

表 1 实验段参数

Table 1 Test section parameters

n	$D_h/\mu\text{m}$	L/cm	$H/\mu\text{m}$	$W/\mu\text{m}$
14	187.5	4.6	150	250

1.2 仪表精度及误差分析

齿轮泵可实时接收质量流量计反馈信号，并据

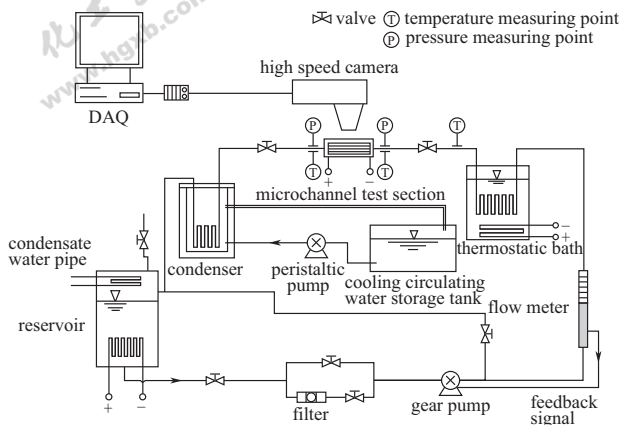


图 1 实验回路系统

Fig. 1 Experimental system loop

此调节泵入系统的质量流量，以实现流量的稳定输送，质量流量计精度为 $(\pm 0.2\% \text{ Rd}) + (\pm 0.2 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1} \text{ ZS})$ ；压力变送器精度为 $\pm 0.15\%$ ，压差变送器精度为 $\pm 0.13\%$ ，并采用精度为 $\pm 0.5\%$ 的 I 级 T 型热电偶对进出口水温 and 壁温进行测量；实验段长和宽采用游标卡尺进行测量，直接测量误差值为 0.01 mm ；流道高和宽采用光学三维形貌测试仪进行测量，直接测量误差为 $0.01 \mu\text{m}$ ；电压和电流测量误差分别为 0.5% 和 0.52% 。因此，热通量和质量流速等参量的间接测量误差可根据误差传递公式计算，即

$$\delta_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta_i)^2} \quad (1)$$

式中， δ_R 为某一间接测量参量 R 的相对误差， δ_i 为第 i 个对参量 R 造成影响的直接测量误差。

1.3 实验过程

在系统压力 $p = 1.03 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、入口温度 $T_{\text{in}} = 55^\circ\text{C}$ 条件下，维持质量流速 G （热通量 q ）不变，改变热通量 q （质量流速 G ）进行实验。通过 NI 数据采集程序对温度、电流、电压、质量流量和压力压差等进行实时监控与数据采集。设置连续采样频率为 500 Hz ，待工况稳定一段时间后数据进行采集，将采集数据进行时均化处理得到压降时均值。利用 Phantom Miro M310 高速摄像机以每秒 1200 帧的帧率进行可视化拍摄。

2 实验结果与讨论

2.1 实验数据分析

图 2 所示为压降和出口干度在不同质量流速下随热通量的变化情况。从图 2 中可以看出，当质量

流速一定时，随着热通量增大，汽相逐渐增多，平行多微通道内的压降相应增加。当热通量一定时，将质量流速为 $110.86 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 与 $128.84 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的压降特性进行对比，发现在热通量较小时质量流速小的压降值大于质量流速大的压降值。这是由于质量流速小的出口干度稍大于质量流速较大的工况，使得由汽相增加引起的压降大于由质量流速增加带来的压降增量；但随着热通量增大，质量流速大的压降相较于质量流速小的压降增加得更为迅速。热通量大于 $51 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 后，质量流速大的压降值便超过了质量流速小的压降值，这是由于汽相增加所带来的压降增量已不足以弥补由于质量流速增加所引起的压降变化。这说明热通量、质量流速和干度均会对压降变化产生较大影响。在热通量较小时，干度相较于质量流速对压降变化的影响占据着更为重要的地位，但在热通量较大时质量流速所带来的影响相较于干度却显得更为强烈。

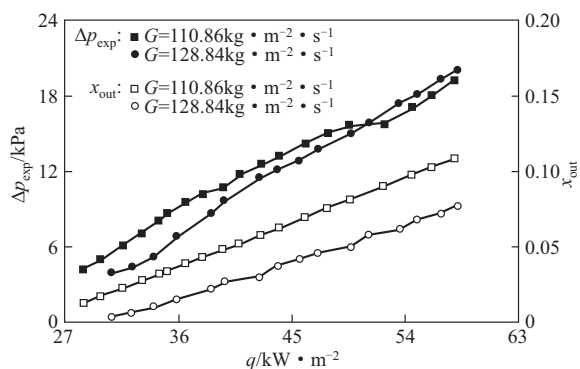


图 2 压降和出口干度在不同质量流速下随热通量的变化
Fig. 2 Variation of pressure drop and outlet quality with heat flux under different mass flux

图 3 为热通量 $q = 62.30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 与 $q = 86.73 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的压降值随质量流速的变化情况。当热通量一定时，发现随着质量流速减小压降出现先减小后增大的趋势，而该曲线中的最低点则被认为是静态流动不稳定性的起始点（OFI 点）^[17]。随着热通量增大，OFI 点向质量流速增大的方向移动，并且对应的压降值也相应增大。

2.2 汽相行为分析

Lee 等^[18]和 Kandlikar^[19]认为，在汽核受限生长堵塞流道后，蒸发动力 F_{back} 大于来流惯性力 F_{forward} ，将发生汽核倒流，汽核倒流的发生导致流动不稳定性发生。这种汽核受限生长和汽核倒流造

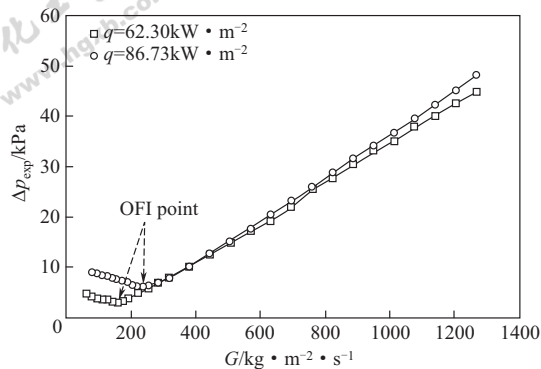


图 3 压降在不同热通量下随质量流速的变化

Fig. 3 Variation of pressure drop with mass flux under different heat flux

成流道堵塞,使得入口压力不断增大,当来流惯性力 F_{forward} 大于蒸发动量力 F_{back} 后,气泡将被来流清扫出流道。正是这种周期性汽核生长、受限、倒流和清扫导致入口压力周期性振荡,以至于产生系统不稳定性振荡,并且随着汽相增多和不稳定性增强压降也呈现出增加的趋势。

因此,结合可视化图像并根据气泡动力学理论对气泡行为进行研究,发现气泡核化生长初期气泡尺寸较小,气泡与壁面为点接触,接触角较小,附着力较小,受本身浮力和来流惯性力共同作用而被快速清扫 [图 4 (a)]。因实验段高宽比为 0.6,当气泡大小与流道高度相当时将进入局部受限生长阶段,气泡与壁面间的黏性阻力增加,而在热流继续作用下,汽核继续生长并在宽度方向受限,达到完全受限生长,并在向下游流动时逐渐生长拉长,形成弹状或拉长弹状流 [图 4 (b)]。由于受下游大气泡堵塞流道影响,图 4 (c) 中汽核在流道内长时间滞留,因继续受热,两汽核间液桥逐渐变薄,汽核逐渐靠拢。当表面张力不足以维持液桥稳定时,液桥断裂,气泡聚合。但在气泡聚合初期 ($t_3 + 1.7$),两汽核聚合处的顶部形成了一微液层,当汽核继续受热长大,微液层中的液体被排挤和蒸发,使得微液层消失,进而聚合完成。图 4 (d) 示出了流道内汽核的倒流。从图 4 (d) 看出,上游汽核紧随下游大气泡一起逆向倒流,但受上游来流影响,上游汽核被逐渐压缩,使得气泡尾部倒流速度低于其头部倒流速度。

2.3 压降分析

实验段进出口与联箱截面积不同,导致工质在微通道入口处流速增大、压力降低,在微通道出口

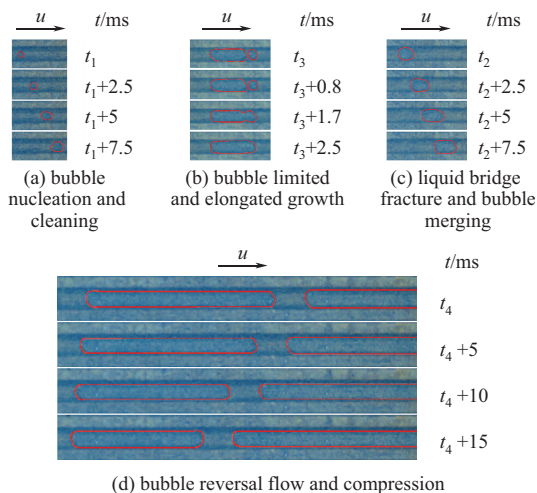


图 4 4 种不同的气泡行为特征

Fig. 4 Four different characteristics of bubble behavior

处流速减小、压力升高。这两部分由于截面突然变化而引起的压降可分别由进口压缩压力损失 $\Delta p_{\text{cont}}^{[20]}$ 和出口扩张压力恢复 $\Delta p_{\text{expa}}^{[20]}$ 表示。考虑到实验段入口工质有一定的过冷度,实验段将在进口一段存在单相液体区域。因此微通道内流动的总压降 Δp 将由单相段总压降 Δp_{sp} 与两相段总压降 Δp_{tp} 组成,总压降的预估计算可表达为

$$\Delta p_{\text{pred}} = \Delta p_{\text{cont}} + \Delta p_{\text{expa}} + \Delta p_{\text{sp}} + \Delta p_{\text{tp}} \quad (2)$$

单相段总压降与两相段总压降分别由摩擦压降与加速压降组成,则两联箱间的总压降为

$$\Delta p_{\text{pred}} = (\Delta p_{\text{cont}} + \Delta p_{\text{expa}}) + (\Delta p_{\text{sp,a}} + \Delta p_{\text{sp,f}}) + (\Delta p_{\text{tp,a}} + \Delta p_{\text{tp,f}}) \quad (3)$$

其中两相段摩擦压降 $\Delta p_{\text{tp,f}}$ 采用 Kim 和 Mudawar 关系式^[15]计算。

与 Kim 和 Mudawar 关系式^[16]进行比较 (图 5),发现该关系式仅能对压降变化总趋势进行预估,具

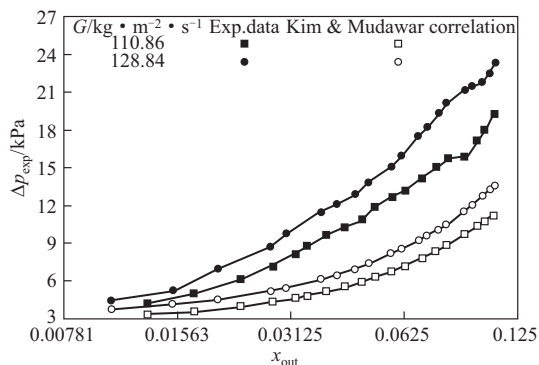


图 5 实验压降与 Kim 和 Mudawar 关系式比较

Fig. 5 Comparison of experimental pressure drop and Kim & Mudawar relation

体数值误差很大。Kim 和 Mudawar 关系式^[16]以 2000 为流动转捩 Reynolds 数存在明显问题,因微通道内汽核生长迅速、界面蒸发剧烈、汽核周期性倒流等将使流动湍动增强,系统脉动增强,导致流动转捩提前发生,故随着出口干度增大汽相 Reynolds 数增大,压降预估精度也就呈现出逐渐降低的趋势。

3 结 论

以去离子水为工质,对 14 条水力直径为 187.5 μm 的平行矩形微通道内的流体流动阻力特性及汽相行为进行可视化实验研究,结论如下。

(1) 在质量流速一定时,随着热通量增大,压降增大;当热通量一定时,随着质量流速减小,压降出现先减小后增大的趋势,该曲线中的最低点即为静态流动不稳定性起始点 (OFI 点)。

(2) 热通量、质量流速和出口干度均会对压降产生较大影响。在热通量较小时,干度相较于质量流速对压降变化的影响占据着更为重要的地位;但在热通量较大时,质量流速所带来的影响相较于干度更为强烈。

(3) 气泡在壁面核化后,可能出现受限拉长生长、气泡聚合、汽核倒流等多种行为,而且汽核受限、倒流等堵塞流道现象的出现导致系统阻力变大,入口压力增大,压降增加。

(4) Kim 和 Mudawar 关系式仅能对压降变化趋势进行预估,而无法对压降数值进行有效预测。

References

- [1] WU Z, SUNDEN B. On further enhancement of single-phase and flow boiling heat transfer in micro/minichannels [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **40**: 11-27.
- [2] STEINKE M E, KANDLIKAR S G. An experimental investigation of flow boiling characteristics of water in parallel microchannels [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2004, **126**: 518-526.
- [3] CHANG K H, PAN C. Two-phase flow instability for boiling in a microchannel heat sink [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2007, **50**: 2078-2088.
- [4] BOGOJEVIC D, SEFIANE K, WALTON A J, *et al.* Two-phase flow instabilities in a silicon microchannels heat sink [J]. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2009, **30**: 854-867.
- [5] HARIRCHIAN T, GARIMELLA S V. Flow regime-based modeling of heat transfer and pressure drop in microchannel flow boiling [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2012, **55**: 1246-1260.
- [6] BALASUBRAMANIAN K, LEE P S, TEO C J, *et al.* Flow boiling heat transfer and pressure drop in stepped fin microchannels [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2013, **67**: 234-252.
- [7] LEE P S, GARIMELLA S V. Saturated flow boiling heat transfer and pressure drop in silicon microchannel arrays [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2008, **51**: 789-806.
- [8] QUAN X, CHENG P, WU H. An experimental investigation on pressure drop of steam condensing in silicon microchannels [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2008, **51**: 5454-5458.
- [9] 戴勇. 微槽道沸腾传热及流阻特性的实验研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
DAI Y. Experimental investigation of flow boiling and resistance features in microchannels [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [10] BALASUBRAMANIAN K, LEE P S, JIN L W, *et al.* Experimental investigations of flow boiling heat transfer and pressure drop in straight and expanding microchannels—a comparative study [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, **50**: 2413-2421.
- [11] LAW M, LEE P S. A comparative study of experimental flow boiling heat transfer and pressure characteristics in straight-and oblique-finned microchannels [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2015, **85**: 797-810.
- [12] QU W, MUDAWAR I. Measurement and prediction of pressure drop in two-phase micro-channel heat sinks [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2003, **46**: 2737-2753.
- [13] WANG G, CHENG P, WU H. Unstable and stable flow boiling in parallel microchannels and in a single microchannel [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2007, **50**: 4297-4310.
- [14] LI W, WU Z. A general correlation for adiabatic two-phase pressure drop in micro/mini-channels [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2010, **53**: 2732-2739.
- [15] KIM S M, MUDAWAR I. Theoretical model for annular flow condensation in rectangular micro-channels [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2012, **55**: 958-970.
- [16] KIM S M, MUDAWAR I. Universal approach to predicting two-phase frictional pressure drop for adiabatic and condensing mini/micro-channel flows [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2012, **55**: 3246-3261.
- [17] WANG G, CHENG P, BERGLES A E. Effects of inlet/outlet configurations on flow boiling instability in parallel microchannels [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2008, **51**: 2267-2281.
- [18] LEE H J, LIU D Y, YAO S C. Flow instability of evaporative micro-channels [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2010, **53**: 1740-1749.
- [19] KANDLIKAR S G. Heat transfer mechanisms during flow boiling in microchannels [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2004, **126**: 8-16.
- [20] COLLIER J G, THOME J R. *Convective Boiling and Condensation* [M]. Oxford: Oxford Science Publication, 1994.