

# 小曲率矩形截面蛇形微通道气液两相流的实验研究

周云龙, 孙振国

(东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 以空气、水为气液两相工质, 采用 90°Y 型混合器, 在矩形截面为  $800 \times 100 \mu\text{m}$  的蛇形微通道内利用高速摄像仪进行了可视化实验。通过改变气、液两相流量, 在通道 b、c 段观测到一些不同于直微通道的特殊流型, 对泡状流的气泡长度进行分析, 提出新的预测关联式。针对戟形弹状流, 分析了长宽比与毛细数之间的关系, 并将气戟长度、液膜厚度的实验结果与已有文献关联式进行对比, 发现 Qian 等、Que-re 等的预测相对较好。此外, 由于蛇形管剪切作用及向心力的影响, 在弯道 II 处发现气戟的过渡有膨胀拉伸、剪切诱导、直接过渡 3 种方式。

**关键词:** 蛇形微通道; 流型; 气泡长度; 液膜厚度; 长细比

中图分类号: TQ053.6 文献标识码: A

## 符号说明

- $D$ ——弯道平均直径,  $\mu\text{m}$
- $\delta$ ——液膜厚度,  $\mu\text{m}$
- $D_b$ ——气泡当量直径,  $\mu\text{m}$
- $\varepsilon_G$ ——容积含气率, %
- $D_h$ ——通道当量直径,  $\mu\text{m}$
- $\zeta$ ——气泡因子
- $h$ ——通道深度,  $\mu\text{m}$
- $\kappa$ ——曲率
- $j$ ——表观速度,  $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- $\lambda_L$ ——Laplace 常数
- $j_{\text{ref}}$ ——参考流速,  $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- $\mu$ ——粘度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $L$ ——液滴尺寸,  $\mu\text{m}$
- $\mu_{\text{ref}}$ ——参考粘度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$
- $L_B$ ——气戟长度,  $\mu\text{m}$
- $\delta$ ——中空纤维膜的膜厚,  $\mu\text{m}$
- $w$ ——通道宽度,  $\mu\text{m}$
- $\rho$ ——密度,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- $w_B$ ——气戟宽度,  $\mu\text{m}$
- $\sigma$ ——表面张力,  $\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$
- $\gamma$ ——长细比
- $\varphi$ ——两相流速比
- 无量纲参数
- $Ca$ ——毛系数

$Eö$ ——厄特沃什数

$Mo$ ——莫顿数

$Re$ ——雷诺数

$We$ ——韦伯数

下标

G——气相

L——液相

TP——两相

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.05.008

## 引言

随着 20 世纪 90 年代 MEMS(微机电系统概念)的提出, 微流体技术已成为化工领域的重要研究热点。大量学者已对常规通道多相流进行了广泛的研究, 但是对微尺度下多相流的认识比较缺乏。作为最常见的多相流之一, 气液两相流在动力、核能、空调低温制冷、微燃料电池、喷墨打印机等领域有着广泛的应用。流型作为两相流流动行为研究的基础, 在传热传质方面有着重要的影响, 特别在微化工领域, 直接影响到设备的安全与效率。但是由于微通道结构、形状、尺寸、壁面粗糙度、润湿性以及流体相速度、粘度、浓度、表面张力等多种因素的影响, 到目前为止还未得到一个普适性的流型, 各位学者对流型的名称、分类尚未达到统一。

与惯性力和表面张力相比, 重力和粘性力在微通道中将不再起主导作用<sup>[1]</sup>, 这使得微尺度下的两相流显示出一些不同寻常的现象。如今, 一些学者对直微通道两相流型进行了大量的研究。Xu 等在当量直径  $585 \mu\text{m}$  的矩形通道内进行了空气、水两相流实验<sup>[2]</sup>, 结果发现泡状流、弹状流、搅拌流以及环状流。Sur 等以空气、水为两相工质<sup>[3]</sup>, 在内径  $180 \mu\text{m}$  的圆形通道内进行可视化实验, 发现的流型

收稿日期: 2015-05-15; 修订日期: 2015-06-17

作者简介: 周云龙(1960-), 男, 吉林扶余人, 东北电力大学教授。

通讯作者: 孙振国(1989-), 男, 山西大同人, 东北电力大学硕士研究生。

主要有泡状流、弹状流、液环流、环形流,但是在内径 100 μm 的通道内却没有发现泡状流。宋静曾在 400 μm 圆形通道内<sup>[4]</sup>,观察了氮气、水体系的两相流型,发现有泡状流、弹状流、扰动流、环形流,并指出由于表面张力的影响,不存在非球形气泡。和直微通道相比,蛇形微通道的扰流作用,使其在微蒸发器、微冷凝器等微型换热设备中有着广泛的应用。然而,到目前为止有关微尺度下蛇形管内两相流的报道非常少见。

## 1 实验系统和方法

### 1.1 蛇形微通道结构

和常规尺度(宏观)相比,微尺度(介观)下的一些流动与其尺寸有着密切的关系。不同学者对微通道提出了不同的分类依据。Kew 等认为当  $Co > 0.5$  时<sup>[5]</sup>,可将通道定义为微通道。Brauner 等研究了通道直径尺寸对流型的影响<sup>[6]</sup>,并指出微尺度的临界  $Eö$  值应为 0.2。按照 Kew 的理论<sup>[5]</sup>,当  $Co > 0.5$  时  $Eö < 0.5$ 。

$$Co = \frac{1}{D_h} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)}} \quad (1)$$

$$Eö = \frac{g(\rho_L - \rho_G) D_h^2}{8\sigma} = \frac{1}{8Co^2} \quad (2)$$

Serizawa 等则将微通道界限划分为<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\lambda_L}{D_h} \geq 3.3 \quad (3)$$

式中:  $\lambda_L$ —Laplace 常数;标准条件下大约为 3 mm,其定义如式(4)。

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)}} \quad (4)$$

本试验所用微通道材质为聚二甲基硅氧烷(PDMS)-玻璃,其形状及尺寸如图 1 所示。Y 型混合器夹角  $\theta$  为 90°,进口段长度均为 10 mm,直管段有效长度 50 mm,中央主通道区为 30 mm,3 段通道由上到下编号依次为 a、b、c,截面采用矩形(800 μm × 100 μm)。其中,弯道 I、II 内径均 3 mm,曲率为 0.047,其定义如下:

$$\kappa = D_h/D \quad (5)$$

### 1.2 实验系统简介

在本次多相流实验控制中采用压力驱动方式,实验中压力驱动所用注射泵型号为 SDS-MP10(调

整步距 0.1 ml/h,速度控制精度 ±2%)。为清晰捕捉到各种典型的流型图像,在每组工况稳定 5 min 后,采用 HSS4G(德国 LaVision 公司,最大分辨率 1 024 × 1 024,最大帧频 2 000 fps)高速摄像机拍摄流型。光源采用色温 6 400 K 的三基色光管,芯片背面铺设硫酸纸可使光线均匀分布。进口和出口部位通过不锈钢金属细管(内径 0.5 mm,外径 0.7 mm)与 PTFE 导管(内径 0.5 mm,外径 0.9 mm)连接,实验系统的设备如图 2 所示。

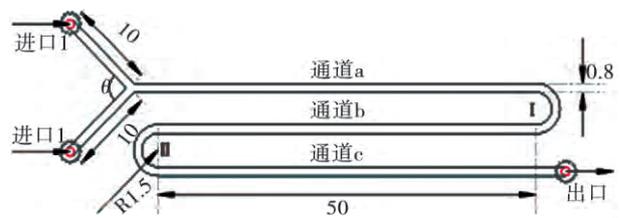


图 1 蛇形微通道

Fig. 1 Snake-shaped microchannel

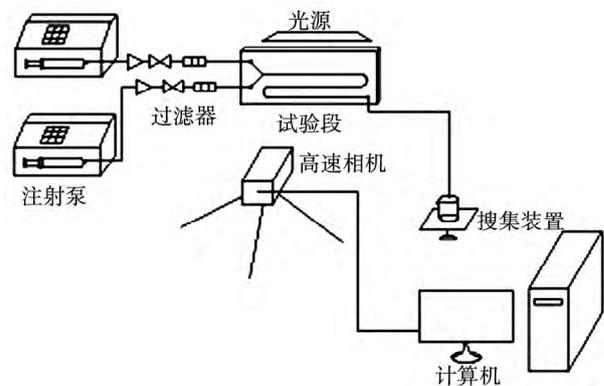


图 2 实验系统图

Fig. 2 Diagram of a test system

实验中将微通道在垂直面内横向放置,进口 1、2 分别注入气相和液相,通过数字注射泵驱动两相流体在 Y 型入口处汇合。用高速相机分别采集不同工况下的流型,并实时监测记录有关气泡尺寸的变化。所有实验均在 18.6 °C 和常压条件下进行。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 流型观测及特点

Saisorn 等曾在内径 530 μm,长 320 mm 的水平圆形微通道内<sup>[8]</sup>,对空气、水两相流动观察到弹状

流、喉形环状流、搅拌流、小溪环状流 4 种流型。在 Tsaoulidis 等的实验中也出现了喉形环状流、小溪环状流<sup>[9]</sup>。本实验采用 Y 型入口,在蛇形通道内观测到的主要流型有毛细泡状流、泡状流、麦状流、戟形弹状流、液环流、环状流。如图 3 所示,本研究主要针对前 4 种流型做如下分析。

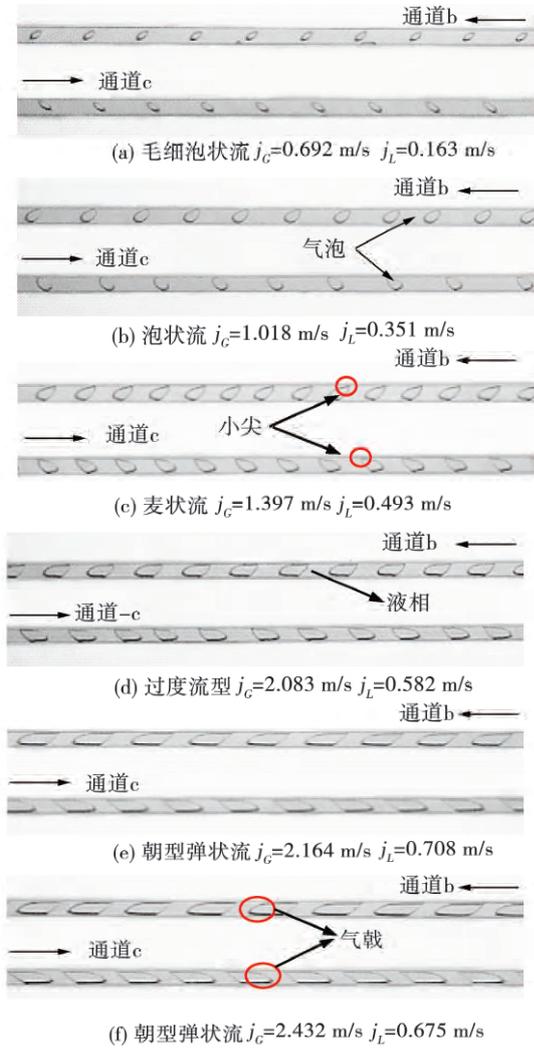


图 3 蛇形微通道主要分段流型

Fig. 3 Main sectional flow patterns in the snake-shaped microchannel

泡状流: 气泡呈椭球形,与水平方向的倾斜角大约为 45°,周云龙等在方形截面通道内也曾观测到椭球形的气泡<sup>[10]</sup>,这与宋静所报道的不存在非球形气泡这一结论有所区别<sup>[4]</sup>。当气、液相流速相对较低时,可观测到毛细泡状流,如图 3(a) 此时气泡非常微小,在通道内单独分散,并与上下壁面间存在着一定的间隙。

麦状流: 当气相流速较高时,产生了麦状流,该流型下气泡像麦芽状,故由此得名。其头部沿着流动方向向外凸出,尾部上扬带有小尖儿,如图 3(c) 所示。再进一步增加气速,实验中发现“麦粒”也随之增大。当气相流速增大到一定程度,就会出现图 3(d) 所示的过渡流型,该流型介于麦状流和下述一种特殊的弹状流。

戟形弹状流: 此时气戟和液塞交替出现,气戟的长度大于通道直径。液膜环绕在气戟周围将其与壁面隔开。该流型与以往文献中报道的气弹头部、尾部都呈规则的半球帽截然不同。弯道的扰流以及剪切作用,使得该流型下气弹头部比较尖锐,就像“戟”一样,其头部成流线型,这有利于气弹在流动过程中降低阻力,从而维持高速运行。经实验测定该气弹的长宽比( $L_B/w_B$ ) 可达到 3.2 左右。

针对戟形弹状流这一特殊流型,在实验中发现弯道 II 处气戟的过渡形式总共有 3 种,如图 4 所示。

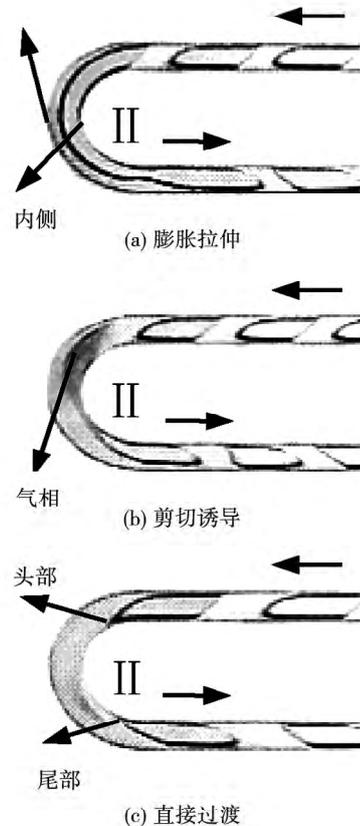


图 4 气戟过渡方式

Fig. 4 Gas-halberd transition modes

膨胀拉伸: 空气相几乎占满整个弯道并且紧贴

内壁 在快要离开弯道时经过拉伸 ,最后形成新的气戟。

剪切诱导: 上游 b 段通道内的气相经过弯道时 ,由于惯性效应的影响 ,使得气弹发生剪切 在圆弧的诱导下过渡到下游 c 段。

直接过渡: 这种过渡方式常发生在气相流速相对较高的情况下 ,此时弯道处气相已经很少 ,来自上游的气弹直接过渡到下游 ,而且 b 段气戟的头部与 c 段气戟尾部基本构成半圆弧。

### 2.2 气泡(弹)长度及液膜厚度的比较

针对泡状流图 3 (a) 、(b) 以及戟形弹状流图 3 (e) 、(f) 通过 ImageJ 图像处理软件获得各自的气泡(弹)长度。

为定量描述不同形状的气泡 ,Bozzano 等曾引入描述微气泡外形的两个无量纲参数<sup>[11]</sup> ,并提出气泡因子的概念:

$$\zeta = \frac{10(1 + 1.3Mo^{1/6}) + Eo}{10(1 + 1.3Mo^{1/6}) + 3.1Eo} \quad (6)$$

式中:  $Eo$ 、 $Mo$  分别定义如下:

$$Eo = \frac{D_b^2(\rho_L - \rho_G)g}{\sigma} \quad (7)$$

$$Mo = \frac{\mu_L^4(\rho_L - \rho_G)g}{\rho_L^2\sigma^3} \quad (8)$$

由于气相密度相对较小 ,式(8)可以简化为如下形式:

$$Mo = \frac{\mu_L^4g}{\rho_L\sigma^3} \quad (9)$$

图 5 显示了  $j_L = 0.4 \text{ m/s}$   $j_G = 0.872 \sim 1.341 \text{ m/s}$  ,气泡因子随气相表观速度的变化趋势。由图可知 ,当液相流速一定时 ,随着气相速度的增加 ,气泡因子在逐渐减小。相比重力 ,惯性力和表面张力在微通道内尤为重要。为研究气泡尺寸 ,笔者重新定义  $We_{G,TP} = \frac{\rho_G(j_G + j_L)^2 D_h}{\sigma}$  ,并分析不同流速对气泡长度的影响。如图 6 所示 ,当两相表观速度一定时 ,气泡长度与气、液流速比基本成线性关系 ,随着  $j_G/j_L$  的增加 ,气泡长度在逐渐增加。

图 7 显示了  $j_G/j_L = 3.5$  液相流速不太高的情况下 ,气泡长度与  $We_{G,TP}$  之间的变化关系。当两相表观速度比一定时 ,气泡长度随  $We_{G,TP}$  的增加而增加 ,在起始阶段气泡长度增加比较迅速 ,到后期增加的幅度有所降低 ,这说明流速对气泡前期增长的影响

最为显著。

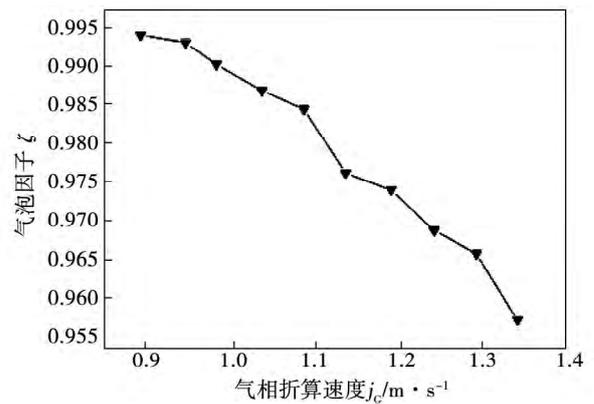


图 5 气相表观速度对气泡因子的影响

Fig. 5 Influence of the gas-phase superficial velocity on the air bubble factor

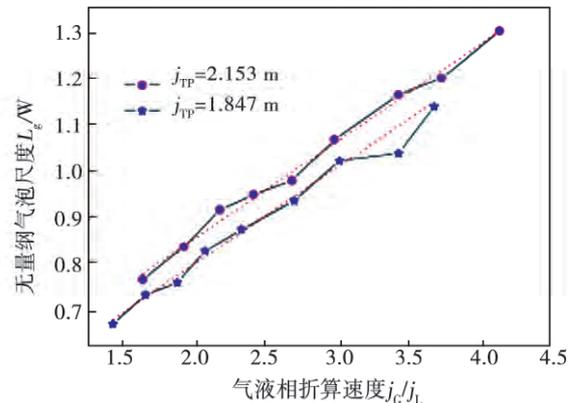


图 6  $j_G/j_L$ 对气泡长度的影响

Fig. 6 Influence of  $j_G/j_L$  on the length of an air bubble

通过图 6 ~ 图 7 的分析比较 ,气泡长度与各相流速以及韦伯数有着很大的关系。本研究将所获气泡长度数据进行关联 ,提出以下预测微气泡尺寸的关联式:

$$\frac{L_b}{w} = A + We_{G,TP}^B \left(\frac{j_G}{j_L}\right)^C \quad (10)$$

式中:  $A = 0.164$   $B = 0.203$   $C = 0.697$ 。

弹状流 ,也称泰勒流 ,是气液两相流动中最为重要的流型 ,其优良的传热传质性能归结于液塞内部存在内循环<sup>[12]</sup>。谢蕴峰曾对内径 1 ~ 2 mm 的通道内泰勒流行为进行了模拟<sup>[13]</sup> ,结果发现随着液膜厚度的增加 ,循环中心逐渐接近于管道中心 ,气弹以及液塞长度也直接影响到气液两相的接触面积。通常

情况下,气弹形状都比较对称,然而本研究在当前通道内发现的弹状流不太符合常规,现有气弹长度以及液膜厚度的预测模型能否继续应用于本实验需要进一步探讨。

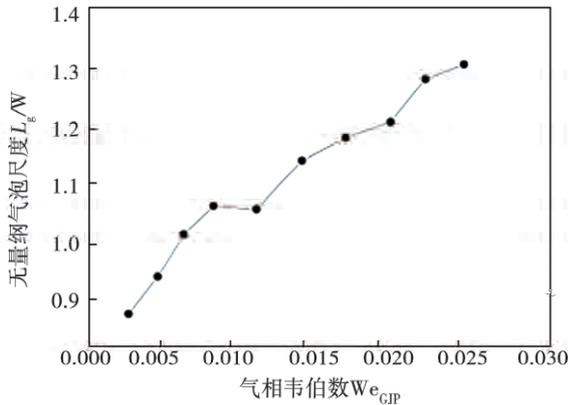


图 7  $We_{c,TP}$ 对气泡长度的影响

Fig. 7 Influence of  $We_{c,TP}$  on the length of an air bubble

Qian 等对 T 型微通道气液两相泰勒流进行了大量的数值模拟<sup>[1]</sup>,发现入口处气液混合是否良好直接决定了后续气弹以及液塞长度的大小,并提出预测气弹长度的关联式:

$$\frac{L_C}{D_h} = 1.637 \varepsilon_C^{0.107} (1 - \varepsilon_C)^{-1.05} Re^{-0.075} Ca^{-0.0687} \quad (11)$$

Sobieszuk 等对不同截面、不同材质的 3 种 Y 型微通道进行了气液两相流的实验研究<sup>[14]</sup>,在 Qian 等的基础上将所得系数进行平均<sup>[1]</sup>,提出改进后的最简化形式:

$$\frac{L_C}{D_h} = 1.3 \varepsilon_C^{0.07} (1 - \varepsilon_C)^{-1.01} We^{-0.1} \quad (12)$$

式中:  $Re = \frac{j_{TP} D_h \rho_L}{\mu_L}$ ,  $Ca = \frac{\mu_L j_{TP}}{\sigma}$ ,  $We = \frac{j_{TP}^2 D_h \rho_L}{\sigma}$ ,  $\varepsilon_C = \frac{j_C}{j_C + j_L}$ 。

Dang 等在正方形(500  $\mu\text{m}$   $\times$  500  $\mu\text{m}$ )截面的微通道内考察了空气、葡萄糖溶液的两相流动<sup>[15]</sup>,系统分析了表观流速以及液体粘度对气弹长度的影响,并提出以下经验关系式:

$$\frac{L_B}{D_h} = (1 + 1.71 \frac{j_C}{j_L}) \left(\frac{j_{TP}}{j_{ref}}\right)^{-0.28} \left(\frac{\mu_L}{\mu_{ref}}\right)^{-0.06} \quad (13)$$

式中:  $j_{ref} = 1 \text{ m/s}$ ,  $\mu_{ref}$  一水的粘度。

针对戟形弹状流如图 3(e)、(f)所示,为减小误差,将实验中所拍图像上有关气弹的所有参数长度、宽度、液膜厚度,如图 8 所示分别多次测量求取平均作为实验结果。本研究结合以上关联式将气弹长度实验值和预测值进行对比,得图 9 所示曲线。由图 9 可知, Sobieszuk 以及 Dang 的预测结果明显偏低<sup>[14~15]</sup>,而 Qian 的预测相对较好<sup>[1]</sup>。

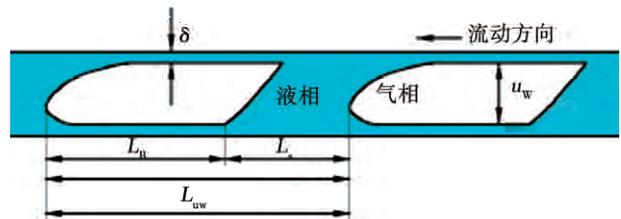


图 8 戟形弹状流模型

Fig. 8 Halberd shaped slug flow model

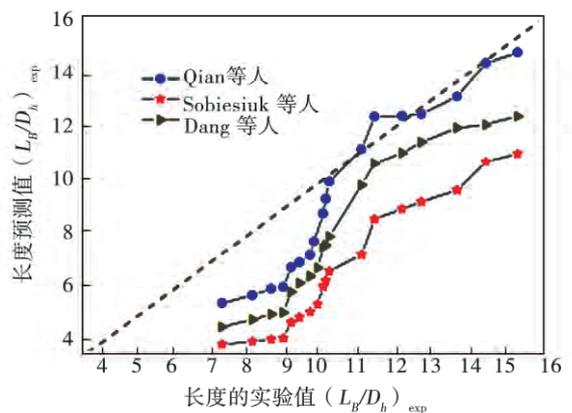


图 9 气弹长度实验值与预测值的比较

Fig. 9 Comparison of experimental and predicted values about gas slug length

目前,大量学者指出泰勒流液膜厚度主要与毛细数有关。Kolb 等进行了方形截面通道内泰勒流的研究<sup>[16]</sup>,发现液膜厚度是毛细数的函数,估算液膜厚度时要考虑惯性作用的影响。Bretherton 也同样发现液膜厚度与毛细数有关<sup>[17]</sup>,并提出以下关联式:

$$\frac{\delta}{D_h} = 0.67 Ca^{2/3} \quad (14)$$

基于泰勒前期的工作,Quere 等则提出泰勒定律来反映液膜厚度的变化<sup>[18]</sup>:

$$\frac{\delta}{D_h} = \frac{0.67 Ca^{2/3}}{1 + 3.35 Ca^{2/3}} \quad (15)$$

Han 以空气、乙醇、水、FC-40 为实验介质<sup>[19]</sup>, 在 0.3 ~ 1.3 mm 的通道内进行了大量实验, 综合了液膜厚度与  $Ca$ 、 $Re$ 、 $We$  三者间的关系, 给出如下液膜厚度表达式:

$$\frac{\delta}{D_h} = \frac{0.67Ca^{2/3}}{1 + 3.13Ca^{2/3} + 0.54Ca^{0.672}Re^{0.589} - 0.352We^{0.692}} \quad (16)$$

式中:  $Ca = \frac{\mu_l j_G}{\sigma}$ ,  $Re = \frac{\rho_c j_G D_h}{\mu_c}$ ,  $We = \frac{\rho_c j_G^2 D_h}{\sigma}$ 。

由图 10 可知, 关于液膜厚度的预测, Bretherton、Han 偏离实验值较大, 前者绝大部分偏高, 后者整体偏低<sup>[17, 19]</sup>。而 Quere 的预测相对较好<sup>[18]</sup>, 进一步验证了毛细数对弹状液膜厚度有着较大的影响。有关气弹长度及液膜厚度预测的偏差如表 1、表 2 所示。

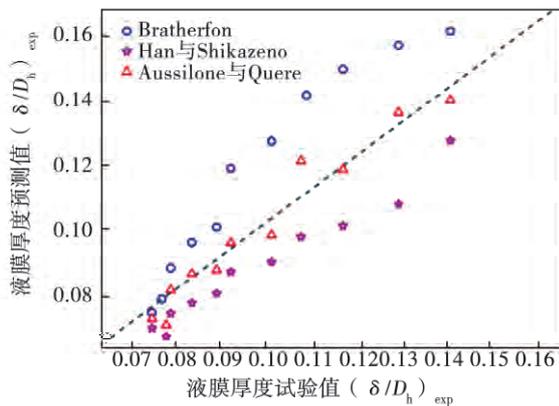


图 10 液膜厚度实验值与预测值的比较

Fig. 10 Comparison of experimental and predicted values about liquid film thickness

表 1 气戟长度预测偏差

Tab. 1 Deviation of the length of the gas halberd predicted

	Qian	Sobieszuk	Dang
平均偏差	13.89%	40.56%	27.38%

表 2 液膜厚度预测偏差

Tab. 2 Mean deviation for liquid film thickness

	Bretherton	Quere	Han
平均偏差	20.67%	4.01%	15.13%

实验中还发现随着流速的变化, 气戟的形状也相应发生变化, 笔者研究了长细比随毛细数的变化关系, 如图 11, 当  $Ca < 0.043$  时, 气戟长细比随毛细

数显著增加; 当  $Ca > 0.043$  时, 长细比随毛细数的增加幅度在减小, 其变化比较缓慢。其中, 长细比如下定义:

$$\gamma = \frac{L_B}{w_B} \quad (17)$$

式中:  $L_B$ 、 $w_B$ —气戟的长度、宽度。把当前实验数据进行多项式拟合, 得到长细比与毛细数的关联式, 其拟合度达 0.948。

$$\gamma = -945.57Ca^2 + 98.79Ca + 0.6095 \quad (18)$$

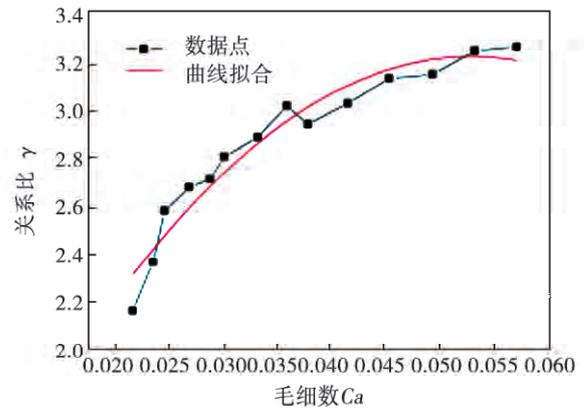


图 11 长细比随毛细数的变化

Fig. 11 Changes of the slenderness ratio with the capillary number

### 3 结 论

本研究在 90°Y 型入口的蛇形微通道内进行了空气、水体系的两相流实验, 发现了一些与直微通道不同的特殊流型, 并将气泡长度等参数的实验结果与现有关联式进行对比, 得到以下结论:

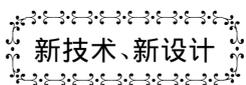
- (1) 本实验所观测到的不同于常规直微通道的流型有麦状流、戟形弹状流以及二者间的过渡流型。
- (2) 蛇形管弯道处气戟的过渡方式有膨胀拉伸、剪切诱导、直接过渡 3 种。
- (3) 相比于其他关联式, Qian、Quere 可以分别较好地预测气戟长度及液膜厚度。
- (4) 气戟长细比随毛细数呈抛物线函数关系。

### 参考文献:

[1] Qian D, Lawal A. Numerical study on gas and liquid slugs for Taylor flow in a T-junction microchannel [J]. Chemical Engineering Science 2006 61(23): 7609-7625.

- [2] Xu J L ,Cheng P ,Zhao T S. Gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini/micro gaps [J]. International Journal of Multiphase Flow ,1999( 25) : 411 - 432.
- [3] Sur A ,Liu D. Adiabatic air-water two-phase flow in circular microchannels [J]. International Journal of Thermal Sciences ,2012 ( 53) : 18 - 34.
- [4] 宋 静. 微通道内气 - 液两相流动特性研究 [J]. 青岛科技大学学报 2006 27( 4) : 299 - 303.  
SONG Jing. Study of the flow characteristics of a gas-liquid two-phase flow inside a microchannel [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology 2006 27( 4) : 299 - 303.
- [5] Kew P A ,Cornwell K. Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels [J]. Applied Thermal Engineering ,1997 ( 17) : 705 - 715.
- [6] Brauner N ,Ullmann A. The prediction of flow boiling maps in minichannels [R]. Kyoto 2006.
- [7] Serizawa A ,Feng Z ,Kawara Z. Two-phase flow in microchannels [J]. Experimental Thermal and Fluid Science ,2002 26( 6 - 7) : 703 - 714.
- [8] Saisorn S ,Wongwises S. Flow pattern ,void fraction and pressure drop of two-phase air-water flow in a horizontal circular microchannel [J]. Experimental Thermal and Fluid Science ,2008 ( 32) : 748 - 760.
- [9] Tsaoulidis D ,Dore V ,Angeli P ,Plechko N V ,Seddon K R. Flow patterns and pressure drop of ionic liquid-water two-phase flows in microchannels [J]. International Journal of Multiphase Flow , 2013 54: 1 - 10.
- [10] 周云龙 龚华荣 孙 斌. 水平正方形小通道内氮气 - 水两相流型特性 [J]. 工程热物理学报 2008 29( 9) : 1507 - 1510.  
ZHOU Yun-long ,DOU Hua-rong ,SUN Bin. Flow pattern characteristics of a nitrogen-water two-phase flow inside a small horizontal square channel [J]. Journal of Engineering Thermophysics , 2008 29( 9) : 1507 - 1510.
- [11] Bozzano G ,Dente M. Shape and terminal velocity of single bubble motion: a novel approach [J]. Computers & Chemical Engineering 2001 25( 4 - 6) : 571 - 576.
- [12] Choi C W ,Yu D I ,Kim M H. Adiabatic two-phase flow in rectangular microchannels with different aspect ratios: Part II -bubble behaviors and pressure drop in single bubble [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2010 53: 5242 - 5249.
- [13] 谢蕴峰. 细通道内气液两相 Taylor 流传质研究 [D]. 天津: 天津大学 2012.  
XIE Yun-feng. Study of the mass transfer of a gas-liquid two-phase Taylor flow in a slim channel [D]. Tianjin: Tianjin University 2012.
- [14] Sobieszuk P ,Cygański P ,Pohorecki R. Bubble lengths in the gas-liquid Taylor flow in microchannels [J]. Chemical Engineering Research and Design 2010 88: 263 - 269.
- [15] Dang Minhui ,Yue Jun ,Chen Guangwen ,Yuan Quan . Formation characteristics of Taylor bubbles in a microchannel with a converging shape mixing junction [J]. Chemical Engineering Journal , 2013 223: 99 - 109.
- [16] Kolb W B ,Cerro R L. The motion of long bubbles in tubes of square cross section [J]. Physics of Fluids A ,1993 5( 7) : 1549 - 1557.
- [17] Bretherton F P. The motion of long bubbles in tubes [J]. Journal of Fluid Mechanis ,1961 ,10 ,166 - 188.
- [18] Quere D ,Aussillous P. Quick deposition of a fluid on the wall of a tube [J]. Physics of Fluids 2000 ,12( 10) : 2367 - 2371.
- [19] Han Y ,Shikazono N. Measurement of the liquid film thickness in micro tube slug flow [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow 2009 30: 842 - 853.

( 刘 瑶 编辑)



## 墨西哥对路易斯 - 德拉巴斯联合循环电站投入运行

据《燃气轮机世界》2015 年 7 - 8 月刊报道 ,荷兰发电公司 Inter Gen 已开始运行在墨西哥瓜纳华托州对路易斯 - 德拉巴斯市附近天然气联合循环电站。

在 20 年协议期间 ,由圣路易斯 - 德拉巴斯电站多数发电量将出售给一个矿业公司 ,剩余部分将供给该地区的其它工业企业。

该电站由安大略 Teachers' Pension Plan 和中国华能/广东粤电共同拥有 ,Inter Gen 在英国、荷兰、墨西哥和澳大利亚的总装机容量达 7 892 MW。Inter Gen 总经理和首席执行官 Neil Smith 说“我们正在扩大我们在墨西哥的业务并给该国各用户提供能源”。

Samsung Engineering(三星工程公司)管理该电站的建设。

(吉桂明 摘译)

that of the recompression cycle. The efficiencies of other cycles are relatively low and their devices are comparatively complex, thus they are not widely used. As a result, the efficiency of the recompression cycle is regarded as the highest. In addition, the configuration of its system is simple and pressures can be easily controlled, thus the recompression cycle is deemed as the optimum cycle. On this basis, a further thermal calculation of the recompression cycle was conducted and the influence of the cyclic parameters on the performance of the cycle was analyzed. To this end, the optimum operating parameters for achieving the highest efficiency of the cycle were obtained: when the temperature at the inlet of the turbine is 823.15 K, the optimum temperature at the inlet of the compressor will be 305 K, the optimum pressure at the inlet of the compressor will be 7.7 MPa, the optimum pressure ratio will be 2.6 and the efficiency of the cycle will be as high as 45%. **Key words:** supercritical carbon dioxide, power generation cycle, cycle efficiency

分轴燃气轮机甩负荷试验的分析及仿真研究 = **Analysis and Simulation Study of the Load-rejection Test of a Split-shaft Gas Turbine** [刊, 汉] XU Xin, ZHOU Jian-hua, ZHANG Ya-dong ( Shenyang Engine Design Research Institute, China Aviation Industry Corporation, Shenyang, China, Post Code: 110015), SUN Yong ( Engine Co. Ltd., China Aviation Industry Corporation, Beijing, China, Post Code: 100028) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(5). -47 ~ 53

With a split-shaft gas turbine generator unit serving as the prototype, the dynamic characteristics of the gas turbine were analyzed by using the multi-loop feedback PI control and compressor inter-stage air bleeding technology under the condition of the unit being forced to shed its load. In the meantime, according to the volume and inertia method, a nonlinear mathematic model for gas turbines was established and then in accordance with the model thus established, a model for simulating the dynamic performance of a gas turbine was built by making use of a Matlab/simulink platform. The test and simulation results show that the above-mentioned split-shaft gas turbine has an ability to suddenly reject 80% of its rated load. Among them, when the load of the gas turbine is 20%, its control quality is relatively ideal. The simulation model can correctly reflect the dynamic characteristics of the gas turbine under the condition of the gas turbine subjected to a big disturbance, thus meeting the precision and real-time requirements for dynamic simulation. **Key words:** split-shaft gas turbine, multi-loop feedback PI control, volumetric inertia, dynamic simulation, load rejection

小曲率矩形截面蛇形微通道气液两相流的实验研究 = **Experimental study of a Gas-liquid Two-phase Flow in a Small Curvature Rectangular Section Snake-shaped Micro-channel** [刊, 汉] ZHOU Yun-long, SUN Zhen-

guo ( College of Energy Source and Power Engineering ,Northeast University of Electric Power ,Jilin ,China ,Post Code: 132012) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31( 5) . -54 ~60

With air and water serving as the gas-liquid two-phase flow working media and by using a Y type mixer having an angle of 90 degrees ,a visualization experiment was performed by employing a high-speed video camera inside a snake-shaped micro-channel with a rectangular cross section of  $800\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ . Through changing the gas-liquid two-phase flow rate ,some special flow patterns different from those in a straight micro-channel were observed in the section b and c along the micro-channel. The length of the air bubble in an air bubble flow was analyzed and a new correlation formula was proposed. For a halberd-shaped slug flow ,the relationship between the length/width ratio and the number of capillary was analyzed and the test results of the length of the gas halberd and liquid film thickness were compared with those obtained by using the currently available correlation formulae in the literatures. It has been found that the prediction accuracy by using the formulae proposed by Qian and Quere is relatively good. Moreover ,due to the action of the shearing and centripetal force exerted by the snake-shaped tube ,the transition of the air halberd at the elbow II is found to have the following three modes: expansion and elongation ,shearing induction and direct transition. **Key words:** snake-shaped micro-channel ,flow pattern ,air bubble length ,liquid-film thickness ,length and width ratio

基于分析法对 Jet - A 燃料进行燃烧反应机理简化的研究 = **Study of the Simplification of the Mechanism Governing the Combustion Reaction of Jet-A Fuel Based on the Analytic Method** [刊 ,汉] WANG Wei ,LIU Shuai ,BAI Jie ( Key Laboratory on Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance ,Civil Aviation University of China ,Tianjin ,China ,Post Code: 300300) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31( 5) . -61 ~67

The coupling path flux analytic method and sensitivity one were chosen to simplify the combustion reaction mechanism of Jet-A type aero-kerosene under the operating conditions of the combustor of an aero-engine. The combustion reaction mechanism of POSF-4658 ( involving 1607 components and 6633 reactions) was selected to substitute the detailed combustion reaction mechanism of Jet-A type aero-kerosene under the operating conditions of the combustor of an aero-engine. With the operating conditions of the combustor serving as the initial conditions for the simplification process ,a mechanism ( involving 122 components and 331 reactions) simplified for substituting that of the Jet-A type aero-kerosene was obtained through an analysis. By analyzing and comparing the reaction mechanism simplified for substituting that of the Jet-A type aero-kerosene ,a detailed reaction mechanism of Jet-A type aero-kerosene ,