

130° Y型汇流下蛇形微通道气液两相流型可视化研究

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、去离子水为实验工质,采用130° Y型混合器,在当量直径177.8 μm的蛇形通道内利用高速摄像仪进行可视化实验,比较了上气下液型、上液下气型2种混合方式下的两相流型,并进一步对其产生的原因进行了分析。发现蛇形通道内存在有不同于直微通道的特殊流型,气载长度在流动过程中有增大的趋势,通道上、中、下3段以及弯道处的相分布与流型有着密切的关系。

关键词:蛇形微通道;气液两相流;流型;对比;相分布

中图分类号:0359.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)05-0179-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2016.05.045

Visualization of gas-liquid two-phase flow patterns in serpentine microchannel based on the confluence of 130°Y-junction

ZHOU Yun-long, SUN Zhen-guo*

(School of Energy and Power Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: A visualization experiment is conducted to investigate the gas-liquid two-phase flow patterns in serpentine microchannel by a high speed camera. The test section with the Y-junction of 130°, has a smaller curvature and a rectangular cross-section with the width of 0.8 mm and the height of 0.1 mm. Air and deionized water are used as working fluids and injected into channels through the two inlets in a different order, respectively. Flow regimes based on two contrary mixed schemes are compared one by one. The causes for emergence are further analyzed. There are some special flow patterns observed, which are distinguished from those in straight microchannel. The length of gas halberd is tended to increase in the flow process. Furthermore, gas and liquid phase distribution located in the upper, middle or lower sections are closely related to flow conditions.

Key words: serpentine microchannel; gas-liquid two-phase flow; flow patterns; contrast; phase distribution

近年来,微通道在许多应用领域中显示了独特的魅力,微尺度下的流体力学也日益成为各国学者的研究热点。多功能流体脉冲流动微过滤器、整流器等^[1]的出现更是引起了人们对微通道的广泛关注。

如今,一些学者发现质子交换膜燃料电池中,阴极侧总是聚集着大量的液态水,除水能力直接影响到电池的输出性能。Iranzo等^[2]采用中子成像技术详细研究了电池(蛇形结构、区域面积50 cm²)内的两相分布,认为气流方向对液态水的聚集有着直接影响。Fries等^[3]在深度150 μm的蛇形微通道内,通过改变截面宽度以及曲率半径,对罗丹明B染液、氮气两相流动进行了大量观测,进一步指出这种结构可以增强传质特性,并且不同的流动状态对流场分布具有一定的干扰。相比于直微通道,蛇形结构可以在有限的面积上实现长距离运输,这对微反应器狭小的空间显得尤为重要。本文中以空气、去离子水为实验工质,对气液2种不同混合模式下的流动进行对比分析,以完善对蛇形结构微通道气液两相流的认识,为实际工程应用提供一定的理论依据。

1 实验系统介绍

1.1 微通道定义及尺寸

Ong等^[4]在3种不同直径的圆形通道内详细分析了通道尺寸对流型转变的影响,认为 $Co < 0.3 \sim 0.4$ 时属于常规尺度; $Co > 1.0$ 时则属于微尺度流动。Li等^[5]指出 $Co < 0.57$ 时,表面张力即可忽略,重力仍发挥着主导优势。

$$Co = D_h^{-1} [\sigma / g(\rho_L - \rho_C)]^{0.5} \quad (1)$$

$$E\delta = 0.125\sigma^{-1}g(\rho_L - \rho_C)D_h^2 \quad (2)$$

将式(1)、(2)联立,二者有如下关系:

$$E\delta \cdot Co^2 = 0.125 \quad (3)$$

如图1所示,弯道I、II以及3条水平段构成1个蛇形单元,其中通道截面为矩形(800 μm × 100 μm),求得当量直径为177.8 μm。实验段材质为聚二甲基硅氧烷(PDMS)-玻璃,Y型混合器夹角θ为130°,进口段长度均为10 mm,上、中、下水平段有效长度为50 mm。I、II为半圆形结构,内径均为3 mm,属于小曲率半径。

收稿日期:2015-06-24;修回日期:2016-03-29

作者简介:周云龙(1960-),男,教授,博士生导师,研究方向为气(汽)-液两相流动与传热、多相流检测技术,0432-64807377, ylzhou@mail.nedu.cn;孙振国(1989-),男,硕士生,研究方向为气液两相流动与传热,通讯联系人, sunzky@163.com。

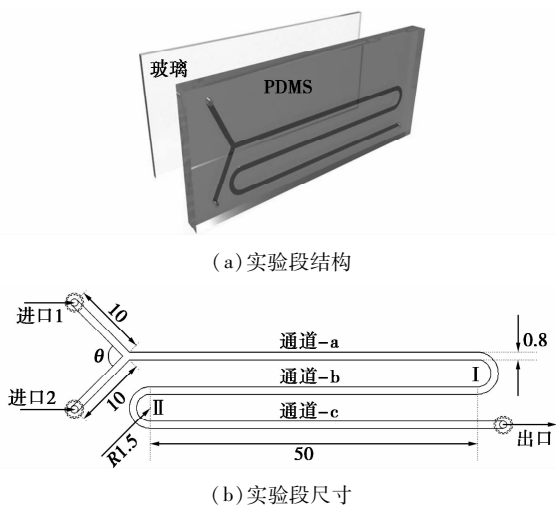


图 1 蛇形微通道

1.2 实验装置

图 2 为当前实验系统。实验中压力驱动所用注射泵型号为 SDS-MP10。为清晰捕捉到各种典型的流型图像,所用高速摄像机型号为 HSS4G。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)与聚四氟乙烯导管(内径 0.5 mm,外径 0.9 mm)连接。

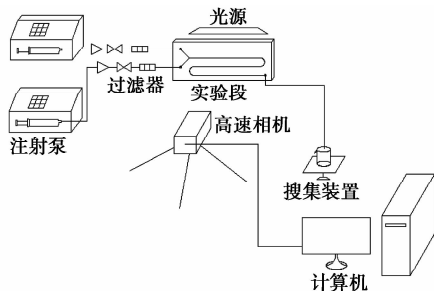


图 2 实验系统图

实验中对 2 个进口分别采用图 3 所示 2 种方案(上气下液型、上液下气型)。由于 PDMS 的疏水亲油性,实验前先用质量分数 0.06% 的 NaHCO_3 溶液将通道壁面润湿,通过调节两相的流速,待流型稳定 5 min 后,用高速摄像机采集各工况下的不同流型,所有实验均在常压、18.6℃ 的环境下进行。

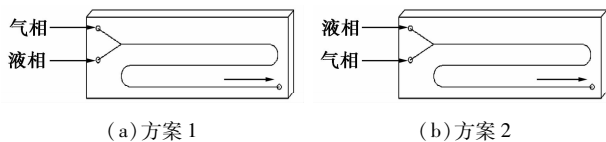


图 3 2 种实验方案

2 实验结果与讨论

马友光等^[6]曾对空气、乙醇垂直上升以及水平

流动的情况进行了对比,发现后者分层流存在的条件范围比较窄而且气液界面凹凸不平,这说明不同的流动方式会使流态具有一定的差异。基于当前通道,本文中对 2 种混合模式—上气下液型(下称方案 1)、上液下气型(下称方案 2)分别进行了实验,结果发现,前者所特有的流型为泡状流,而后者特殊流型为犬牙交错流。戟形弹状流、附壁流、液环流以及环状流为二者共有流型。现对此分别做如下分析和讨论。

2.1 二者共有流型

一些文献将气弹头部、尾部形状描述为规则的半球帽^[7-8],而在流速较高时则接近子弹形。笔者在本次实验中,采集到一种特殊的流型——戟形弹状流,与常规弹状流类似,气弹与壁面之间仍然间隔有一层液膜,液塞与气弹在通道内交替出现,但是气弹形状却截然不同,如图 4、图 5,其尾部上扬且与流动方向以一定角度倾斜,而头部比较尖锐,如同古代兵器“戟”一样呈流线型。由于弯道的扰流以及剪切作用,气戟的长度并非严格一致,在通道下游段离出口较近的地方其长度达到最大。

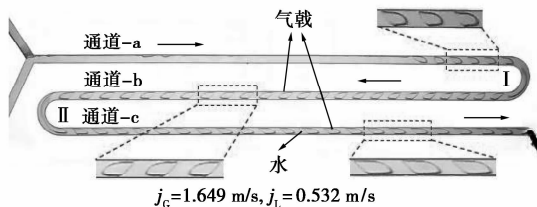


图 4 方案 1—戟形弹状流

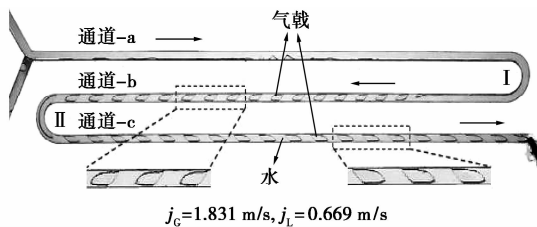


图 5 方案 2—戟形弹状流

当气相流速较高、液相流速相对较低时,可观测到附壁流。此时由于惯性效应以及康达效应的影响,有一层薄薄的气流附着于壁面流动。在方案 1 中,其上、下段气膜位于液相上方,而中段气膜则位于下方,进一步表明微尺度下重力将不占主导优势。如图 6 所示,2 个弯道处气、液相的分布也有所差异,弯道 I 处气流偏向于外壁,而弯道 II 处气流却偏向于内壁。方案 2 中水平段以及弯道处的相分布则恰好与此相反,如图 7。因此,气液相的混合方式对二者的分布产生了明显的影响,在实际应用中应对

弯头的不同侧壁面给予注意。

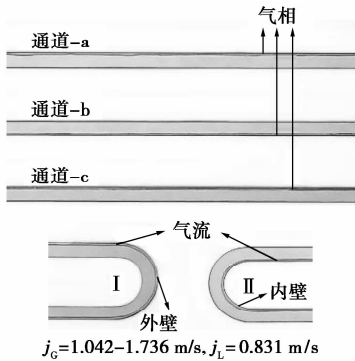


图6 方案1—附壁流

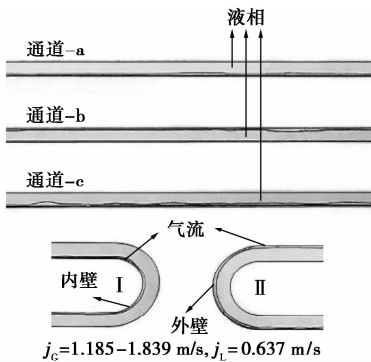


图7 方案2—附壁流

作为微通道内所特有的流型,液环流在常规通道中几乎从来没有出现过, Serizawa 等^[9]认为该流型的产生主要依赖于黏性力以及剪切力的作用。液膜围绕在气核周围,在液相的剪切下气流颈部收缩形成像指环一样的结构,图8、图9显示了2种方案下液环流的对比情况。由图可知,前者液环流产生

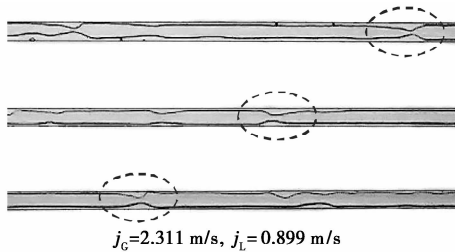


图8 方案1—液环流

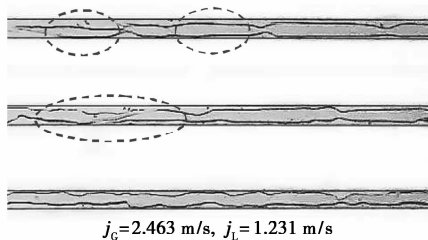


图9 方案2—液环流

的位置比较分散,而后者则聚集有连续的多液环结构,并且气液界面波动较大,并时常有液环拉丝的现象发生。

进一步增加气相流速,就会产生典型的环状流,此时气核位于通道中央,周围围绕着一层液膜。在上气下液型(图10)中,弯道的扰流作用使得水平段中的气核容易产生扭曲,而上液下气型中上层液相对下层气相存在较大的挤压,致使气核在液相的剪切下不能维持连续的形状,而是分成了许多段,断口多呈平行四边形,如图11所示。在这2种混合模式中,由于液相密度较大且流速较高,从而使得弯道处气核的位置分布均偏向于内侧,而液相则偏向于外侧(图12),这与图6、图7中的现象有所不同,进一步表明流体的分布与流型存在着较大的关系。

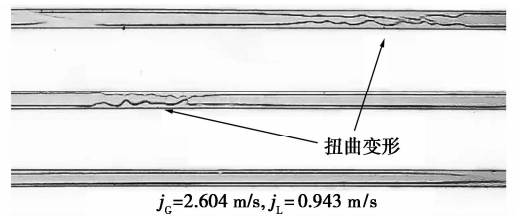


图10 方案1—环状流

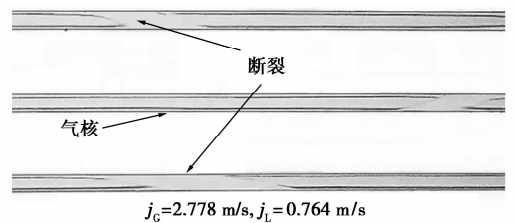


图11 方案2—环状流



图12 弯道处气相分布位置

2.2 二者不同的流型

2.2.1 上气下液型(方案1)

Sur 等^[10]在内径 100、180、324 μm 的圆形玻璃通道内对空气、水两相体系进行了研究,实验发现,内径最小的通道内并没有出现泡状流,而后两者却可以观测到这一流型。此外,由于表面张力的影响,气泡形状比较圆润而且只有1种。当前实验采集到2种典型的气泡,如图13,其形状受到流速、表面张力、通道形状3方面因素的影响。首先,蛇形结构使

得气泡整体上呈倾斜的椭球体,当流速较小时,表面张力起主导作用,气泡相对较为饱满一些,但随着流速的增加,表面张力逐渐失去优势,由于惯性效应的影响,气泡受到液相的挤压严重变形,致使其呈扁状。

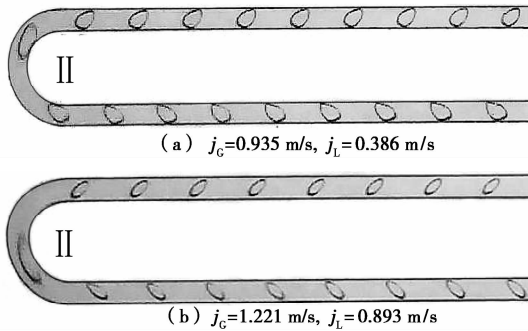


图 13 泡状流

2.2.2 上液下气型(方案 2)

在方案 2 中,当 $j_G = 2.778 \text{ m/s}$, $j_L = 0.764 \text{ m/s}$ 时,可获得另外一种特殊的流型,如图 14,气相和液相经由 Y 型汇流后,位于通道上段的气液界面较为平缓,但随着流动的进行,中、下段气液界面则形成像“犬牙”一样的形状,这种流型在实际应用中为汽化核心的形成创造了有利条件,极易对设备形成较大的安全隐患。为方便起见,截取通道中、下段将该流型的演化过程说明如下。

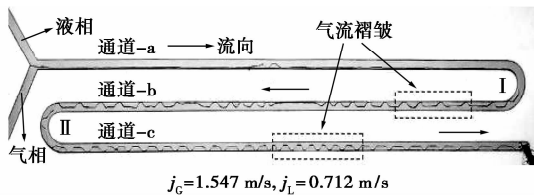


图 14 犬牙交错流

如图 15 所示,起初通道中、下段中的气层受挤压程度不太明显,“犬牙”整体上比较平坦,随着流动的进行,下段气流首先被挤压且发生皱褶,此时“犬牙”变得非常尖锐,随后一直波及到上游的中

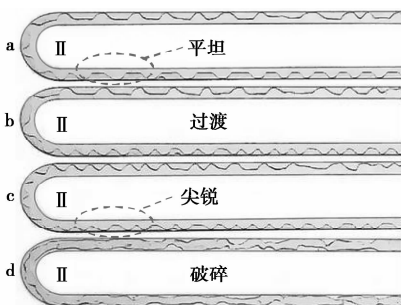


图 15 犬牙交错流演化过程

段,最后当气相受挤压程度达到最大限度时就会完全破碎,形成无规则的流动形态。

3 结论

在 130° Y 型入口的蛇形通道内,基于可视化方法,对比了 2 种混合模式下的气液两相流型,具体得到以下结论。

(1)通道结构、气液混合方式严重影响着微通道内的两相流型。

(2)蛇形通道内可观测到的不同于常规直微通道的特殊流型有戟形弹状流、附壁流以及犬牙交错流。

(3)水平段、弯道处相的分布与流型以及气液混合方式有关。

(4)并非所有的气泡都呈规则的球体,其外形在蛇形通道和直通道内是有区别的。

参考文献

- [1] 李战华. 微流控芯片中的流体流动[M]. 北京: 科学出版社, 2012:48-49.
- [2] Iranzo A, Boillat P, Biesdorf J, et al. Liquid water preferential accumulation in channels of PEM fuel cells with multiple serpentine flow fields[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39: 15687-15695.
- [3] Fries D M, Waelchli S, Rohr P R. Gas-liquid two-phase flow in meandering microchannels[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 135S: S37-S45.
- [4] Ong C L, Thome J R. Macro-to-microchannel transition in two-phase flow: Part I—Two-phase flow patterns and film thickness measurements[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35: 37-47.
- [5] Li Junming, Wang Buxuan. Size effect on two-phase regime for condensation in micro/minitubes[J]. Heat Transfer—Asian Research, 2003, 32(1): 65-71.
- [6] 马友光, 季喜燕, 付涛涛, 等. 垂直放置矩形微通道内气液二相流流型研究[J]. 化学工程, 2009, 37(10): 25-27.
- [7] Choi C W, Yu D I, Kim M H. Adiabatic two-phase flow in rectangular microchannels with different aspect ratios; Part—bubble behaviors and pressure drop in single bubble[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53: 5242-5249.
- [8] Yao Chaoqun, Zhao Yuchao, Ye Chunbo, et al. Characteristics of slug flow with inertial effects in a rectangular microchannel[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 95: 246-256.
- [9] Serizawa A, Feng Z, Kawara Z. Two phase flow in microchannels [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(6/7): 703-714.
- [10] Sur A, Liu D. Adiabatic air-water two-phase flow in circular microchannels[J]. International Journal of Thermal Science, 2012, 53: 18-34. ■