研究论文

DOI：10.11949/j.issn.0438-1157.20171411

矩形截面螺旋通道内气液两相流局部含气率分布实验研究

蔡博，夏国栋，贾玉婷，周燕昭，宗露香

（北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室，北京 100124）

摘要：应用电导探针测量技术，对矩形截面螺旋通道内气液两相流局部含气率进行实验研究。在不同的气相折算速度下，应用电导探针测量了弹状流弹单元的长度，并与可视化方法进行对比，验证了电导探针的可靠性，并为信号处理选择合适的阈值。分别在泡状流、弹状流及环状流三种流型的条件下，分析了气相与液相折算速度对局部含气率分布的影响。实验结果发现，螺旋通道气液两相局部含气率呈非对称的抛物线形分布，这种非对称性受流型和液相折算速度的影响。

关键词：矩形截面螺旋通道；气液两相流；电导探针；局部含气率；气泡

中图分类号：O 359　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0438—1157（2018）06—2474—07

Local void fraction distribution of gas-liquid two-phase flow in rectangular helically coiled channel

CAI Bo, XIA Guodong, JIA Yuting, ZHOU Yanzhao, ZONG Luxiang

(*Key Laboratory of Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation of Education Ministry*, *Beijing University of Technology*, *Beijing* 100124, *China*)

Abstract: An electric conductivity probe was designed to study local void fraction of gas-liquid two-phase flow in a rectangular helically coiled channel. Reliability of the electric conductivity probe was verified by measuring length of Taylor bubble at various gas superficial velocity and by comparing it to visualization measurement. A suitable threshold value was determined for signal processing. Effects of liquid and gas superficial velocities on local void fraction distribution were investigated at three regimes of bubbly, slug and annular flow. The experimental results show that local void fraction distribution of gas-liquid two-phases in helically coiled channel is asymmetric parabola, which the asymmetry is dependent on flow regime and liquid superficial velocity.

Key words: rectangular helically coiled channel; gas-liquid two-phase flow; electric conductivity probe; local void fraction; bubble

引　言

螺旋通道内的气液两相流广泛应用于能源工程、石油化工和动力工程等各种领域中[1-2]。与直管换热器元件相比，螺旋通道具有以下几个优点：① 结构紧凑；② 传热系数高；③ 可适用于特殊场合，如柱状热源散热。近些年，随着电子器件的高度集成，散热要求不断提升，矩形或方形通道因其具有传热面积大、传热效率高等优点，逐渐受到国内外学者的关注[3-4]。Liu 等[5]对相同传热面积下的圆形和方形直通道内的 R152a 冷凝特性进行了实验研究。实验结果表明，在相同的质量流速条件下[200、400 kg/(m^2·s)]，方形通道的冷凝传热系数明显高于圆形通道。目前国内外的研究主要集中于对圆形螺

2017-10-24 收到初稿，2017-11-17 收到修改稿。

联系人：夏国栋。**第一作者**：蔡博 (1988—)，女，博士研究生。

基金项目：国家自然科学基金项目(51576005)。

Received date: 2017-10-24.

Corresponding author: Prof. XIA Guodong, xgd@bjut.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51576005).

旋通道的研究[6-7]，对非圆形截面通道的研究较少[8]。因此，对矩形截面螺旋通道两相流流动特性的研究，可以为螺旋通道的应用及数值模拟研究提供理论基础。

在气液两相流过程中，测定和了解流场中的局部含气率分布是研究气液两相流的基础内容之一。电导探针是一种用于两相流相界面特性测量的常用手段，具有响应快、精度高、机械强度好等优点[9-11]。国内很多学者对电导探针测量技术进行了研究。吕术森等[12]认为电导探针输出信号响应滞后与探针要克服表面张力刺破气泡及与探针电极导通距离大小有关。孙科霞等[13]通过将探针导通距离控制在 0.02 mm 以内，改善了电导信号响应滞后的问题，获得了响应较快的脉冲信号。韩梅等[14]发现电导探针导通距离越小，信号响应越快，当导通距离小于 0.025 mm 时，对信号响应影响不明显。朱姝等[15]开发了用于测量反应器、搅拌槽等化工设备内泡状流局部相界面参数的电导探针传感器，通过与可视化或压差法对比，为电导探针的输出信号选择合适的阈值，并测量了环流反应器中气泡运动速度、气泡尺寸分布、空隙率及界面浓度等参数。陈鸥等[16]设计了一种可以用于液相局部速度测量的电导探针，可以测量管道内一定范围内沿径向分布的液相局部速度。

国内外很多学者都对直管及螺旋通道内的两相流流动特性进行了数值模拟和实验研究[17-20]。一些学者[21-23]应用电导测量技术对竖直管内的两相流局部含气率及气泡特性进行了实验研究，研究发现竖直管内两相流径向相分布曲线呈对称的抛物线形或马鞍形。Vieira 等[24]、Wang 等[25]实验研究了水平管内气液两相流流动特性，研究表明，受重力影响，下壁面附近位置的局部含气率低于上壁面。Pjontek 等[26]利用电导探针技术对竖直管内泡状流的气泡速度、气泡长度，局部及整体含气率进行了实验研究，研究发现通道内的整体含气率大于局部含气率。Evgenidis 等[27]实验研究了气泡尺寸对含气率波动特性的影响。Xia 等[28-29]模拟研究了矩形截面螺旋管内的气液两相流的压降和相分布特性。Liu 等[30]对矩形截面螺旋通道内的两相流流动特性进行了实验研究，实验结果表明，螺旋通道内的相分布受液相折算速度的影响。

综上所述，通过已有研究发现，对气液两相流相分布的研究主要集中于对直通道的研究，对螺旋通道内气液两相流流动结构的实验研究较少，特别是非圆形的螺旋通道。因此，本文应用电导探针技术，对矩形截面螺旋通道内气液两相流的局部含气率特性进行研究，并分析了流型和混合流速对两相流内部流动结构及相分布的影响。

1　实验装置及实验方法

矩形截面螺旋通道气-水两相流实验系统如图 1 所示，实验工质采用空气和水。水由离心泵从水箱中抽出后，流入实验系统。空气由空气压缩机流出后，注入储气罐，储气罐的压力控制在 0.8 MPa。通过调节水路和气路的调节阀，控制从水箱和储气罐进入实验系统的气体和液体的流量。空气和水的流量分别由热式气体质量流量计和电磁流量计测量。水和空气在混合段内充分混合后，进入实验件，最后由回路流回开式水箱，空气排入大气。

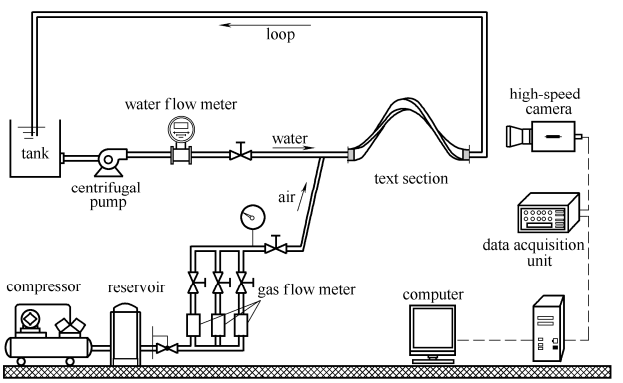


图 1　矩形截面螺旋通道气液两相流实验系统

Fig.1 Air-water two-phase flow experimental setup

矩形截面螺旋通道的结构如图 2 所示，材料为高透明有机玻璃。矩形截面螺旋通道节圆直径 D 为 155 mm，节距 P 为 329.7 mm，螺旋升角 φ 为 0.698 rad。矩形截面的宽度(b)与高度(h)分别为 20、30 mm，矩形螺旋通道的水力直径 d_E 为 $2bh/(b+h)$。矩形截面螺旋通道上任意一点位置由 θ 表示，其中 $0° \leqslant \theta \leqslant 360°$。应用 MotionPro X4 高速摄像机，对矩形截面通道 θ=180° 位置处两相流流动特性进行可视化研究，拍摄时采用背光成像法。

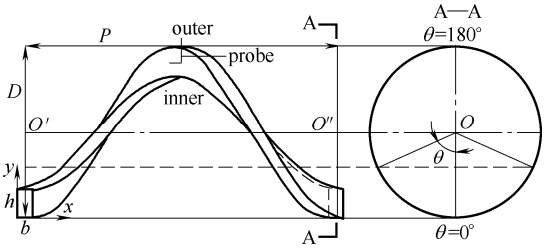


图 2　矩形截面螺旋通道的三维几何结构

Fig.2　Main design of rectangular helically coiled channel

2 电导探针测量方法

2.1 电导探针测量系统

电导探针测量系统由电导探针、测量电路和数据采集系统三部分组成。电导探针的结构及测量电路如图 3 所示。电导探针的结构如下所述：① 探针内部金属杆采用直径为 0.25 mm 的不锈钢针，头部为尖锥形；② 探针外壳采用外径为 1.2 mm 的不锈钢管，探针探头与外壳均采用不锈钢材料，避免产生电氧化腐蚀；③ 探针表面涂绝缘涂料并加毛细热缩管作为绝缘层；④ 探针头部裸露长度小于 50 μm；⑤ 探针主体设计为“L”形，避免长 Taylor 气泡流过探针时，上壁面液膜上的液体会沿电导探针滴落至探针头部，使电导探针正负极导通。

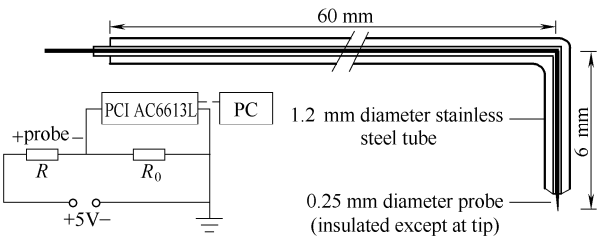


图 3 电导探针结构及测量电路系统

Fig.3 Measurement system of electric conductivity probe

本文电导探针测量电路采用 5 V 的直流电源供电，电导探针和测试电阻 R_0 串联接入电路中，探针外壳与直流电源正极相连。数据采集模块 PCI6613L 并联在测试电阻 R_0 两端，通过对测试电阻两端的电压信号的测量，实现对电导探针两端电压的检测。

电导探针测量方法目前主要应用于对水平/竖直管内泡状流的测量，电导探针一般垂直或水平布置在实验管段上[22-24]。本文的电导探针垂直布置在距离通道入口 180° 位置处（θ=180°），电导探针通过方形法兰与实验件进行固定。实验时，在 θ=180° 截面上沿通道高度方向上的 15 个位置处 (y/h=0.03, 0.1, 0.17, 0.23, 0.3, 0.37, 0.43, 0.5, 0.57, 0.63, 0.7, 0.77, 0.83, 0.9, 0.97)，对不同工况下的局部含气率进行测量。实验时每组数据连续采集 15 s，采集频率为 1 kHz。

2.2 数据处理及阈值选择

在泡状流实验条件下(U_{SL}=0.75 m·s^{-1}, U_{SG}=0.27 m·s^{-1})，应用电导探针采集的电压时间序列如图 4(a)所示。由于气相与液相的电导率相差较大，当探针接触气泡时，探针输出信号的响应速度较快。设电导探针测量系统输出的原始电压时间序列为 $V(t)=v_1, v_2, \ldots, v_i, \ldots, v_n$，当给定的阈值 V_{Th} 条件下，采用单阈值法[17]，将探针测量的时间序列转换为相识别函数 $P(t)$，如图 4(b)所示。当 $v_i<V_{Th}$ 时，此时的流体为气相，则 $P(t)$=0；当 $v_i \geqslant V_{Th}$ 时，此时的流体为液相，则 $P(t)$=1。相识别函数 $P(t)$的定义可表示为

$$P(t)=\begin{cases}0 & v_i<V_{Th}\\ 1 & v_i \geqslant V_{Th}\end{cases} \tag{1}$$

在螺旋通道 θ=180° 截面位置处，沿通道高度上某一给定位置处的局部含气率可表示为

$$\alpha_y=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}[1-P(t)] \tag{2}$$

式中，N 为采集时间段内采集的数据点的个数。单个气泡流过探针所用的时间$\Delta t_{TB,i}$ 可以从相识别函数中获得，如图 4(b)所示。因此，在弹状流条件下，单个 Taylor 气泡和液弹的长度可分别表示为

$$L_{TB,i}=\Delta t_{TB,i}\,U_{TB} \tag{3}$$

$$L_{S,i}=\Delta t_{S,i}\,U_{TB} \tag{4}$$

式中，$\Delta t_{S,i}$ 为单个液弹流过探针所用的时间，$L_{S,i}$ 和 $L_{TB,i}$ 分别为单个液弹和单个 Taylor 气泡的长度，U_{TB} 为 Taylor 气泡在螺旋通道内的运动速度。本文采用 Liu 等[30]拟合得到的矩形截面螺旋通道内的 Taylor 气泡的运动速度的计算公式。

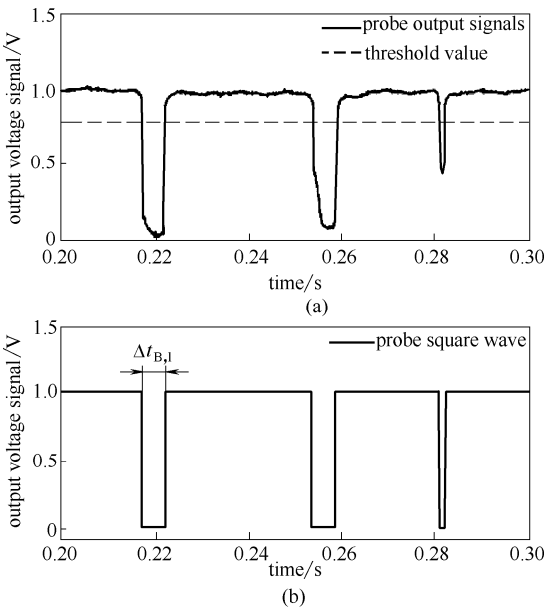


图 4 电导探针测量系统输出电压信号

Fig.4 Output signal of electric conductivity probe

尽管电导探针对气液变化的响应速度较快，但是探针信号阈值 V_{Th} 的选择仍然对局部含气率的处理结果有一定的影响。为了更精确地获得两相流局部含气率，对电导信号数据处理时的阈值 V_{Th} 进行

选择。首先，应用电导探针测量系统对弹状流弹单元长度进行测量，发现当阈值 V_{Th} 在 0.72 MAX< V_{Th} < 0.77 MAX 范围内变化时，采用电导探针测量的弹单元长度分布变化较小。其次，与可视化方法测量得到的弹单元平均长度进行对比，当 V_{Th} = 0.75 MAX 时，发现电导测量方法与可视化方法符合得最好，对比结果如图 5 所示。最后，在不同的气液折算速度下，对比可视化方法和电导测试方法所获得的弹单元个数、平均长度和分布标准差，如表 1 所示。从表中可以看出，在阈值 V_{Th}=0.75 MAX 时，与可视化方法相比，电导探针测量的 Taylor 气泡和液弹个数 n 的误差分别小于 5.71%和 7.41%，平均长度的误差<L>分别小于 3.78%和 5.92%，分布标准差 σ 的误差分别小于 9.29%和 10.95%。因此，在实验条件范围内（U_{SG}=0.13～10 m·s^{-1},U_{SL}=0.39～0.83 m·s^{-1}），应用电导探针测量气液两相流局部含气率具有较高的精确度。

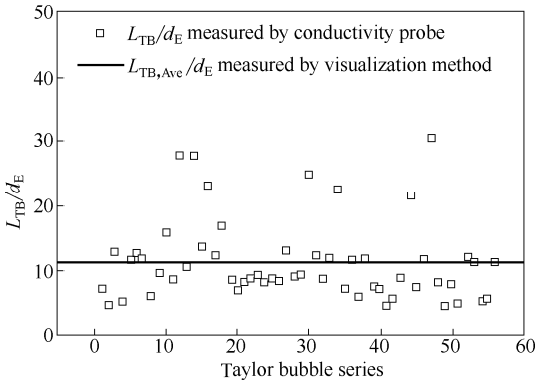


图 5　对比电导法与可视化方法测量 Taylor 气泡长度 (U_{SL}=0.39 m·s^{-1}, U_{SG}=1.55 m·s^{-1})

Fig.5　Comparison results of Taylor bubble length measured by two methods

表 1　不同气相折算速度下可视化与探针方法测量弹单元长度的对比(U_{SL}=0.39 m·s^{-1})

Table 1　Comparison results of Taylor bubble length measured by two methods with different gas flow rates(U_{SL}=0.39 m·s^{-1})

Item	U_{SG}=0.55 m·s^{-1}			U_{SG}=0.83 m·s^{-1}			U_{SG}=1.55 m·s^{-1}		
	n	<L>	σ	n	<L>	σ	n	<L>	σ
Taylor bubbly									
visualization	35	7.08	3.21	40	9.65	5.00	52	11.36	6.41
probe	37	6.88	2.80	41	9.28	4.74	54	11.61	6.53
error/%	5.71	2.80	9.29	2.50	3.78	5.33	3.85	2.20	1.81
liquid slug									
visualization	27	24.35	10.74	27	22.48	16.27	44	20.07	16.72
probe	26	23.59	10.07	29	22．83	14.49	44	21.26	15.03
error/%	3.70	3.10	6.66	7.41	1.61	10.95	0	5.92	10.10

3　结果与讨论

竖直管内流动的气液两相流在流动横截面上具有局部含气率沿径向对称的特点[22]，而螺旋通道内的气液两相流局部含气率在流动横截面上的各个方向上均不对称。因此，本文在泡状流、弹状流和环状流三种流型的条件下，分别测量了沿矩形截面高度方向上不同位置处的局部含气率，并对气相和液相折算速度对螺旋通道内两相流局部含气率分布的影响进行了分析。

3.1　泡状流局部含气率分布

图 6 (a)、(b)为气相和液相折算速度对矩形截面螺旋通道内泡状流局部含气率的影响。从图中可以看出，泡状流局部含气率分布曲线呈非对称的抛物线形。在图 6 (a)中，随着气相折算速度的增大，探针所测量位置处的局部含气率都增大，并且局部含气率分布曲线的峰值向通道外壁面移动。这说明随

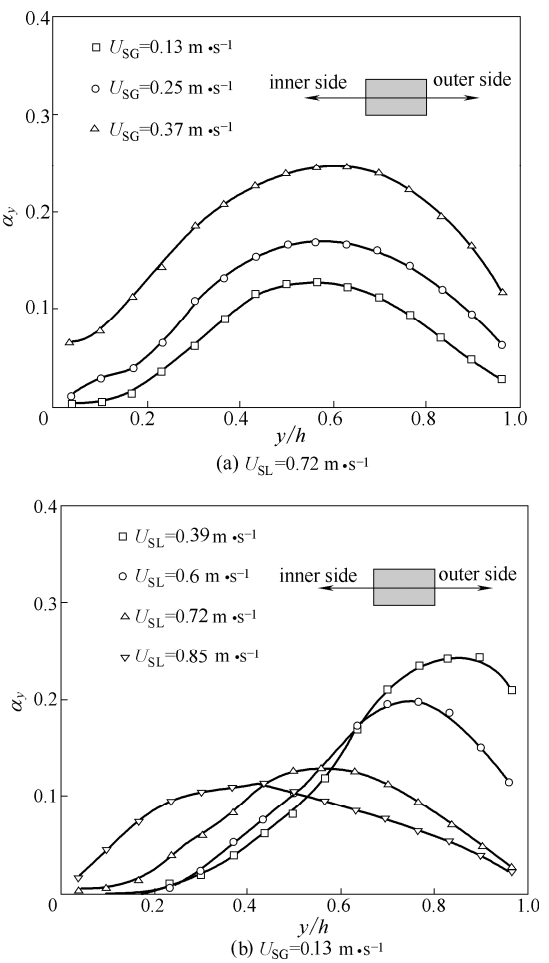


图 6　矩形截面螺旋通道泡状流局部含气率分布

Fig.6　Local void fraction profiles of bubbly flow in rectangular helically coiled channel

着气相折算速度的增大，小气泡的运动轨迹向通道外壁面移动。随着液相折算速度的增大，如图 6 (b)所示，靠近外壁面位置处的局部含气率减小，靠近内壁面位置处的局部含气率增大，并且局部含气率分布曲线的峰值向通道内壁面移动。这是由于随着液体折算速度的增大，液相所受的离心力增大，克服了重力作用，使更多的液相向通道的外壁面流动。

3.2　弹状流局部含气率分布

图 7 (a)、(b)为气相和液相折算速度对矩形截面螺旋通道内弹状流局部含气率分布的影响。在图 7(a)中，随着气相折算速度的增大，探针所测量位置处的局部含气率都增大；随着液相折算速度的增大，如图 7(b)所示，靠近外壁面位置处的局部含气率减小，靠近内壁面位置处的局部含气率增大，并且局部含气率分布曲线的峰值向通道内壁面移动。对比图 6(a)与图 7(a)可以发现，在液相流量几乎保持一致的条件下，弹状流局部含气率分布曲线的峰值在靠近内壁面附近，而泡状流局部含气率曲线的峰值在靠近外壁面附近。从可视化实验中可以发现 Taylor 气泡在靠近通道内壁面附近流动，并且气弹头部靠近通道内壁面。这说明在液相折算速度不变时，当气相折算速度由泡状流增大到弹状流流型时，在气相剪切力的作用下，更多的液体由通道的内壁面被甩到通道的外壁面。

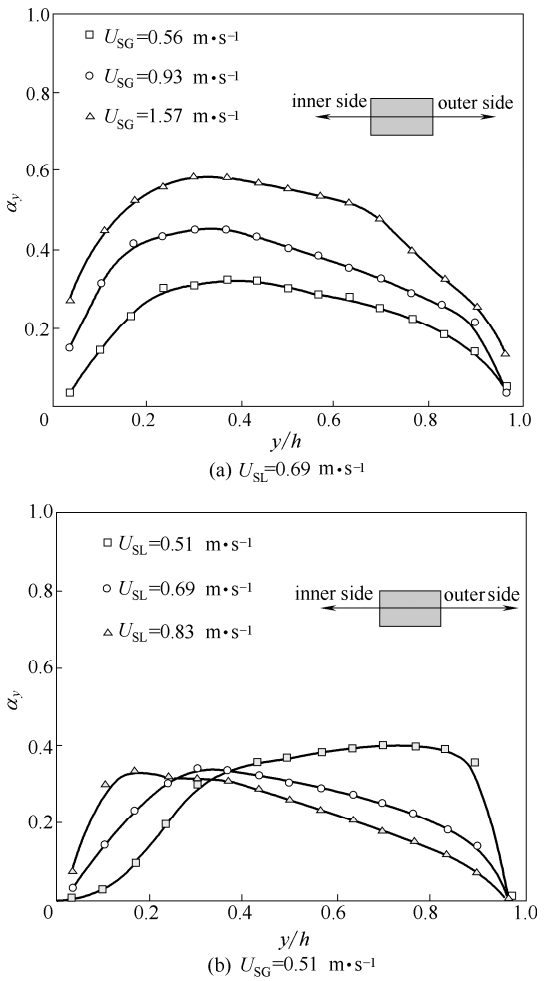


图 7　矩形截面螺旋通道弹状流局部含气率分布

Fig.7　Local void fraction profiles of slug flow in rectangular helically coiled channel

3.3　环状流局部含气率分布

图 8(a)、(b)为气相和液相折算速度对矩形截面螺旋通道环状流局部含气率的影响。从图中可以发现，环状流气芯位置处的局部含气率较大，其范围为 0.985～0.999。在图 8(a)中，随着气相折算速度的增大，探针所测量位置处的局部含气率都增大；随着液相折算速度的增大，靠近通道内壁面附近位置处局部含气率增大，靠近通道外壁面附近位置处局部含气率显著减小。从图 8 (a)、(b) 中可以发现，无论是随着气相流量还是液相流量的增加，环状流局部含气率分布曲线的峰值都在靠近内壁面附近位

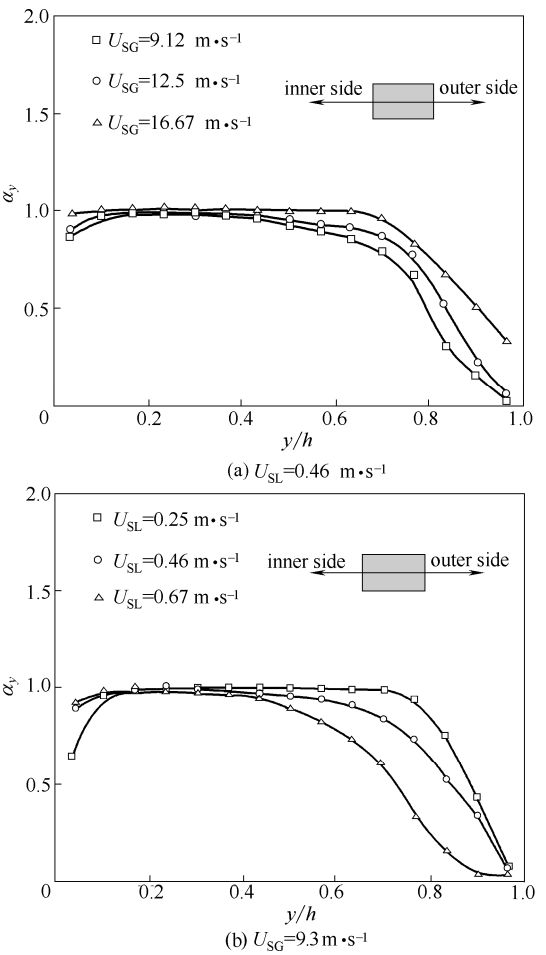


图 8　矩形截面螺旋通道环状流局部含气率分布

Fig.8　Local void fraction profiles of annular flow in rectangular helically coiled channel

置处。由于气液两相流在螺旋通道内高速流动时，往往伴随着强烈的旋流运动。两相流的旋流运动增强了离心力对液相的作用，使更多的液相被甩向通道的外壁面，而离心力的作用使液相集中在通道的外壁面附近流动，因此环状流外壁面附近的局部含气率较低。

4 结 论

本文应用电导探针测量技术，分别在泡状流、弹状流和环状流三种流型条件下，对矩形截面螺旋通道内的局部含气率特性进行了实验研究，得到的主要结论如下。

（1）应用可视化方法对电导探针测量局部含气率的准确性进行校正，在阈值 V_{TH}=0.75MAX 时，电导测量与可视化法测量的弹单元长度平均值的误差小于 6%。

（2）非对称性是螺旋通道内气液两相流相分布的主要特征，这种非对称性不仅受两相流流型影响，而且还受气相及液相折算速度的影响。

（3）在泡状流与弹状流的低液相流速条件下，两相流的主导作用力为重力，这导致液相主要分布在通道的内壁面附近；当增大液相流量时，离心力逐渐成为主导作用力，导致液体逐渐集中在通道外壁面附近。在环状流条件下，由于旋流作用与离心力的共同作用机制，导致液相主要分布在通道外壁面附近。

符 号 说 明

b ——矩形截面宽度，m

D ——矩形截面螺旋通道节圆直径，m

h ——矩形截面高度，m

$L_{TB,i}$, $L_{S,i}$ ——分别为单个 Taylor 气泡和液弹长度，m

P ——矩形截面螺旋通道节距，m

$\Delta t_{TB,i}$, $\Delta t_{S,,i}$ ——分别为单个 Taylor 气泡和液弹流过探针所用的时间，s

U_{SG}, U_{SL} ——分别为气相和液相折算速度，$m\cdot s^{-1}$

U_{TB} ——Taylor 气泡速度，$m\cdot s^{-1}$

V_{Th} ——阈值

α_y ——局部含气率

φ ——螺旋升角，rad

σ ——标准差

References

[1] HIBIKI T, MI Y, SITU R, *et al*. Interfacial area transport of vertical upward bubbly two-phase flow in an annulus[J]. Int. J. Heat Mass Tran., 2003, **46**: 4949-4962.

[2] MURAI Y, INABA K, TAKEDA Y, *et al*. Backlight imaging tomography for slug flows in straight and helical tubes[J]. Flow Meas. Instrum., 2007, **18**: 223-229.

[3] HUA C, WANG X H, GAO X, *et al*. Experimental research on the start-up characteristics and heat transfer performance of pulsating heat pipes with rectangular channels[J]. Appl. Therm. Eng., 2017, **126**: 1058-1062.

[4] MAEDA A, FUJISAWA N, YAMAGATA T, *et al*. Characterization of exchange flow in vertical pipes of circular and square cross-sections under unstable density gradient[J]. Int. Commun. Heat Mass, 2017, **82**: 81-88.

[5] LIU N, LI J M, SUN J, *et al*. Heat transfer and pressure drop during condensation of R152a in circular and square microchannels[J]. Exp. Therm. Fluid Sci. , 2013, **47**: 60-67.

[6] RIPPLE G R, EIDT C M. Two-phase flow in a coiled tubes[J]. Int. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., 1996: **5**(1): 32-39.

[7] XIN R C, AWWAD A. An investigation and comparative study of the pressure drop in air-water two-phase flow in vertical helicoidal pipes[J]. Int. J. Heat Mass Tran., 1996, **39**(4): 735-743.

[8] LIU X F, XIA G D, ZHAI Y L, *et al*. Numerical analysis of two-phase pressure drop and liquid distribution in single screw expander prototype[J]. Chinese Sci. Bull. , 2014, **54**: 4388-4396.

[9] XU L J, XU W F, CAO Z, *et al*. Multiple parameters' estimation in horizontal well logging using a conductance-probe array[J]. Flow Meas. Instrum. , 2014, **40**: 192-198.

[10] 周媛. 结构化多相反应器单通道及床层尺度流动与混合特性研究[D]. 北京：北京化工大学, 2011.
ZHOU Y. Hydrodynamics and liquid mixing at single channel and whole bed scales in multiphase monolithic reactor[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011.

[11] BARNEA D, ROITBERG E, SHEMER L. Spatial distribution of void fraction in the liquid slug in the whole range of pipe inclinations[J]. Int. J. Mulitiph. Flow, 2013, **52**: 92-101.

[12] 吕术森, 陈雪莉, 于广锁, 等. 应用电导探针测定鼓泡塔内气泡参数[J]. 化学反应工程与工艺, 2003, **4**: 344-351.
LÜ S S, CHEN X L, YU G S, *et al*. Study on flow parameter in bubble column with conductivity probe[J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2003, **4**: 344-351.

[13] 孙科霞, 陈学俊, 张鸣远, 等. 应用双头电导探针技术测量气液两相泡状流局部参数[J]. 计量学报, 1999, **4**: 297-303.
SUN K X, CHEN X J, ZHANG M Y, *et al*. Measurement of local bubble flow parameter with dual-conductivity probe[J]. Acta Metrologica Sinica, 1999, **4**: 297-303.

[14] 韩梅, 沙作良, 伍倩, 等. 双探针电导探头测量气泡参数的信号质量[J]. 过程工程学报, 2009, **9**(2): 222-227.
HAN M, SHA Z L, WU Q, *et al*. Signal quality of dual-tip electrical conductivity probe for measurement of bubble parameters [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, **9**(2): 222-227.

[15] 朱姝, 包雨云, 陈雷, 等. 用电导探针测定气-液多层桨搅拌槽内气泡尺寸分布[J]. 高校化学工程学报, 2011, **6**(12): 977-984.
ZHU S, BAO Y Y, CHEN L, *et al*. Study on bubble length distribution in a stirred tank using a conductivity probe[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2011, **6**(12): 977-984.

[16] 陈鸥, 杨献勇, 徐光捷. 气液两相流中液相局部速度测量实验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, **45**(2): 238-241.
CHEN O, YANG X Y, XU G J. Experimental study on liquid velocity[J]. Journal of Tsinghua University, 2005, **45**(2): 238-241.

[17] ZHENG D H, CHE D F. Experimental study on hydrodynamic characteristics of upward gas-liquid slug flow[J]. Int. J. Multiph. Flow, 2006, **32**: 1191-1218.

[18] VAN DER WELLE R. Void fraction, bubble velocity and bubble size in two-phase flow[J]. Int. J. Multiph. Flow, 1985, **11** (3): 317-345.

[19] RÜDISÜLI M, SCHILDHAUER T J, BIOLLAZ S M A, *et al*. Bubble characterization in a fluidized bed by means of optical probes[J]. Int. J. Multiph. Flow, 2012, **41**: 56-67.

[20] LIN T J, BANKOFF S G. Structure of air-water bubbly flow in a vertical pipe-Ⅰ, Ⅱ[J]. Int. J. Heat Mass Tran., 1993, **7**(36): 1049-1072.

[21] HIBIKI T, MI Y, SITU R, *et al*. Interfacial area transport of vertical upward bubbly two-phase flow in an annulus[J]. Int. J. Heat Mass Tran., 2003, **46**: 4949-4962.

[22] ZHAI L S, BIAN P, GAO Z K, *et al*. The measurement of local flow parameters for gas-liquid two-phase bubbly flows using a dual-sensor probe array[J]. Chem. Eng. Sci., 2016, **144**: 346-363.

[23] TYAGI P, BUWA V V. Experimental characterization of dense gas-liquid flow in a bubble column using voidage probes[J]. Chem. Eng. J., 2017, **308**: 912-928.

[24] VIEIRA R E, KESAANA N R, TORRES C F, *et al*. Experimental investigation of horizontal gas-liquid stratified and annular flow using wire-mesh sensor[J]. J. Fluids Eng., 2014, **136**(12): 121301.

[25] WANG X, WANG T J, HE L M. Measurement of gas entrainment from stationary liquid slug in horizontal tube with double-sensor conductivity probe[J]. Flow Meas. Instrum., 2012, **27**: 81-91.

[26] PJONTEK D, PARISIEN V, MACCHI A. Bubble characteristics measured using a monofibre optical probe in a bubble column and freeboard region under high gas holdup conditions[J]. Chem. Eng. Sci. , 2014, **111**: 153-169.

[27] EVGENIDIS S P, KARAPANTSIOS T D. Effect of bubble size on void fraction fluctuations in dispersed bubble flows[J]. Int. J. Multiph. Flow, 2015, **75**: 163-173.

[28] XIA G D, LIU X F. An investigation of two-phase flow pressure drop in helical rectangular channel[J]. Int. Commun. Heat Mass, 2014, **54**: 33-41.

[29] XIA G D, LIU X F, ZHAI Y L, *et al*. Single-phase and two phase flows through helical channels in single screw expander prototype[J]. J. Hydrodyn. Ser. B, 2014, **26**: 114-121.

[30] LIU X F, XIA G D, YANG G. Experimental study on the characteristics of air-water two-phase flow in vertical helical rectangular channel[J]. Int. J. Multiph. Flow, 2015, **73**: 227-237.