

竖直窄矩形通道内空气-水两相流中 气弹运动速度研究

王 洋, 阎昌琪*, 孙立成, 幸奠川, 闫超星

(哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:以空气和水为工质,应用高速摄像机,对竖直窄矩形通道(3.25 mm×40 mm)内气液两相弹状流进行了可视化实验研究。气、液相表观速度分别为0.1~2.51 m/s和0.16~2.62 m/s,工作压力为常压。实验中发现窄矩形通道内弹状流与圆管中存在较大差别,气弹多发生变形,高液相流速时变形更为严重。窄边液膜含气量较高,在高液相流速时窄边液膜不下落,宽边液膜中含有由气弹头部进入和气弹尾部进入的气泡。气弹速度受气弹头部形状和宽度影响较大,受气弹长度影响较小。气弹速度可由Ishii & Jones-Zuber模型计算,但在低液相折算速度时偏差较大,其主要原因为漂移速度计算值较实验值偏小。

关键词:窄矩形通道;两相流;气弹速度;弹状流

中图分类号:TL334

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2013)12-2202-06

doi:10.7538/yzk.2013.47.12.2202

Study on Slug Velocity of Air-water Two-phase Flow in Vertical Narrow Rectangular Channel

WANG Yang, YAN Chang-qi*, SUN Li-cheng, XING Dian-chuan, YAN Chao-xing
(*Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

Abstract: Visualized investigation of the air-water two-phase slug flow in vertical narrow rectangular channel (3.25 mm×40 mm) was carried out with the help of a high speed video camera. The work pressure is atmospheric pressure and the superficial velocities of air and water cover 0.1-2.51 m/s and 0.16-2.62 m/s, respectively. The slug flow in narrow rectangular channel is found to be much different from that in circular pipe. Most of the slug bubbles are deformed, and much more seriously at high liquid velocity. The void fraction of narrow side liquid film is larger than that of wide side liquid film, and the film does not descend at high liquid velocity. It is observed that some tiny bubbles in the areas of the nose and tail of a slug bubble are injected into the liquid film along the wide side. The nose shape of the slug bubble as well as its width

收稿日期:2012-08-27;修回日期:2012-11-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11175050);中央高校基本科研业务费专项资助项目(HEUCFZ1122)

作者简介:王 洋(1988—),男,吉林白城人,博士研究生,核能科学与工程专业

* 通信作者:阎昌琪,E-mail: changqi_yan@163.com

has significant effect on its velocity, whereas the effect of the length is very weak. The Ishii & Jones-Zuber drift flux model can predict slug velocity well, except at low liquid superficial velocity by the reason of that the calculated drift velocity is less than experimental values.

Key words: narrow rectangular channel; two-phase flow; slug velocity; slug flow

窄矩形通道由于具有良好的传热性能、相应设备结构紧凑等优点被广泛应用于动力工程、石油化工及核工程等领域。为此国内外学者对窄矩形通道内单相流动特性开展了大量研究^[1-3], 然而, 随着高热流密度换热器的发展, 单相对流换热已不能满足工程需求, 因此近年来窄矩形通道内两相流动特性受到国内外学者广泛关注^[4-6]。

窄矩形通道中两相流动, 由于壁面摩擦力和表面张力的影响, 其流型和阻力特性与圆管中显著不同。窄矩形通道中两相传热性能、流动阻力与流型密切相关, 两相混合物与壁面间相互作用及两相间转变机理依赖于流型。众多学者^[7-8]对窄矩形通道内流型特征进行了实验研究, 发现在两相流动中, 弹状流占有重要地位, 气弹的动力学特性决定着弹状流的传热传质和流动特性。文献^[9]研究了倾斜角度和流体性质对常规矩形通道中气弹速度的影响, 发现倾斜条件下, 流体性质对气弹速度影响更为显著。文献^[10]给出了倾斜角度、通道尺寸和安装方向对窄矩形通道内 Taylor 气弹上升速度的影响。

目前关于窄矩形通道内气弹特性的研究尚不够完善, 系统研究气弹形态特征对掌握弹状流中气弹运动速度、流型转变以及传热传质过程和规律等十分重要。为此, 本文应用高速摄像机对竖直窄矩形通道内气弹运动进行研究。

1 实验系统

1.1 实验装置及实验内容

实验装置如图 1 所示, 由供水系统、供气系统、实验段、数据采集系统和高速摄像系统组成。实验以空气和水为工质, 分别由供水系统和供气系统提供。实验段竖直安放, 主体为有机玻璃窄矩形通道(3.25 mm×40 mm×2 000 mm), 测压点间距 1 000 mm, 为消除入口段效应, 取入口测压点距入口 500 mm。

通过减压阀将流量计入口处空气表压稳定在 0.3 MPa。气液相在混合腔内混合后, 竖直向上进入实验段, 两相混合物流出实验段后, 在气水分离器中依靠重力实现自然分离。压力采用精度为 0.04 级的压力传感器测量; 液体和气体质量流量计的精度分别为 0.1 级和 1.5 级; 温度采用二级标准温度计测量, 水温在水箱回

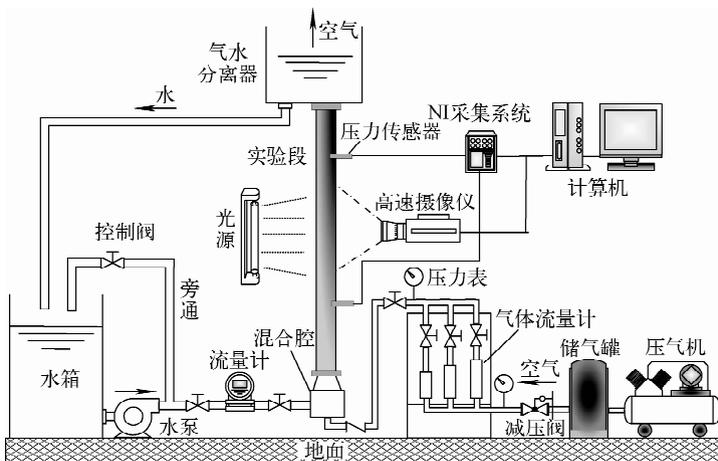


图 1 实验系统

Fig. 1 Schematic of experimental system

水口取样测量,气温以室温为准。流量和压力信号均由 NI 数据采集系统采集,采样频率为 256 Hz,单次数据采集时间为 20 s;图像信息由高速摄像系统采集。本实验中气、液相表观速度分别为 0.1~2.51 m/s 和 0.16~2.62 m/s。

1.2 高速摄像系统及图像处理^[11]

高速摄像系统由高速摄像机、光源和计算机组成。实验中采用 Photron 公司的 FASTCAM SA5 型高速摄像机垂直于实验段宽面进行拍摄,采用漫射的背光为光源。高速摄像机拍摄频率可调,在 $1\,024 \times 1\,024$ 像素下最高拍摄频率为 7 000 帧/s,通过降低拍摄像素,拍摄频率最高可达 1×10^7 帧/s。实验中选用的拍摄频率 f 为 1 000~7 000 帧/s,对每个工况连续拍摄 2~8 s,图像拍摄位置距通道入口 986 mm,流动已充分发展。

图像处理前首先要确定标度因子 α ,实验段宽边尺寸已知,可通过计算其图像像素点的方式来确定标度因子:

$$\alpha = \frac{\text{两点实际距离}}{\text{两点在图像上距离}} \quad (1)$$

气弹头部界面上升速度 v_b 可根据已知时间间隔内气弹头部界面在不同帧图像中的位移确定,即:

$$v_b = \frac{\alpha f \Delta x}{n_2 - n_1} \quad (2)$$

式中, Δx 为 n_2 帧与 n_1 帧图像气弹头部界面沿轴向上位移。为减小主观测量误差,每个气弹速度重复测量 10 次,并对每个工况下 10 个以上气弹进行分析。

2 弹状流特性

2.1 窄矩形通道内弹状流特性

窄矩形通道中的弹状流,气相以气弹的形式出现,且多发生变形,很少出现理想 Taylor 气弹,大部分气弹非中心对称。随液相流速的增加,湍流作用增强,气弹头部变形严重,高液相流速时,气弹头部多为分叉形、锥形、凹凸形,且气弹界面不光滑,出现小波纹,如图 2a~e 所示。气弹头部变形及气弹界面的小波纹会改变气弹的受力特性,从而影响气弹速度。

气弹宽度接近通道宽度,长度大于通道宽度,气弹与通道窄边间液膜较厚,其中包含气泡

较多,且尺寸较大,如图 2f 所示。在低液相折算流速下,窄边液膜中气泡会随液膜下落,高液相折算速度 ($j_L > 1.0$ m/s) 时,气泡同液膜一起向上运动。

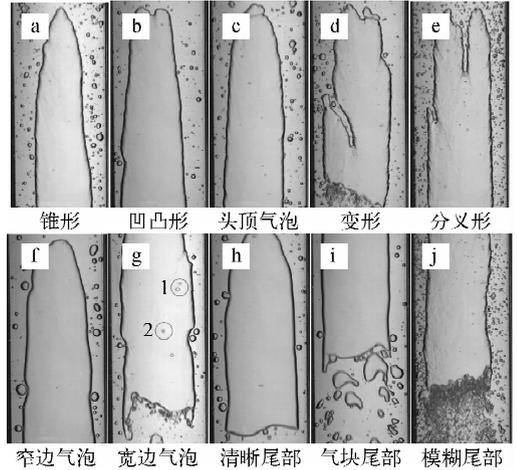


图 2 窄矩形通道内的弹状流

Fig. 2 Slug flow in narrow rectangular channel

气弹与宽边间液膜较薄,包含气泡较少且尺寸较小,其中气泡可分为两类:1) 气弹上升过程中,由气弹头部进入气泡,气泡开始随气弹向上运动,随后减速,最终相对壁面静止,由于受到壁面和气弹间挤压,此类气泡呈饼状且边界较圆,如图 2g 中气泡 1 所示;2) 气弹上升过程中,由气弹尾部进入气泡,气弹尾部由于受尾流漩涡搅混急剧收缩,将尾部打碎成小气泡,并高速射入宽边液膜中,此类气泡运动速度较快,约为气弹速度的 0.76~2 倍,如图 2g 中气泡 2 所示,此类气泡可能与宽面弹体聚合,或撞击窄面弹体界面,或撞击气弹头部界面并引起气弹头部变形。

在低液相流速时,气弹尾部界面清晰光滑,液弹中包含小气泡或帽状气泡较少,如图 2h、i 所示;随液相流速的增大,湍流作用增强,液弹中大气泡破裂成弥散的小气泡,同时气弹尾部由于聚集大量小气泡与涡旋搅混,界面变得模糊不清,如图 2j 所示。

2.2 通道形状对弹状流特性的影响

通过与文献[12]常规圆管 ($D=25$ mm) 及文献[13]微圆管 ($D=1\sim 4$ mm) 中弹状流对比,发现通道形状对弹状流特性影响较大,窄矩

形通道内弹状流与圆管内中存在以下区别。

1) 常规圆管中气弹头部为半球形,气弹中心对称,且界面较光滑,微圆管内气弹头部为理想半球形,且气弹相对较长。窄矩形通道内气弹受壁面挤压和表面张力影响呈扁平状,且变形严重,出现圆管中未曾出现的锥形和分叉形气弹,气弹头部很少出现半圆形,大部分气弹非中心对称,高液相流速下气弹界面出现小波纹,与圆管中光滑界面存在较大的差别。

2) 常规圆管中气弹与管壁间为环形下降液膜,液膜界面光滑,气弹头部以下区域内沿流动方向的液膜厚度较均匀,其中包含气泡较少;微圆管内气弹液膜极薄,其中不含气泡。窄矩形通道内宽边和窄边皆存在液膜,窄边液膜较厚,沿流动方向左右液膜厚度不均匀,其中包含气泡较多且直径较大,更易引起界面变形,高流速时窄边液膜随气弹向上运动;宽边液膜中含有从气弹尾部高速射入的气泡,此类气泡在圆管中未曾观察到。

3) 微圆管由于空间较小,气泡极易碰撞聚合,液弹中气泡含量极少,且小气泡发生振荡运动。窄矩形通道内气泡运动受限程度介于常规圆管与微圆管之间,气泡聚合概率高于常规圆管、低于微圆管,为此,液弹中气泡含量低于常规圆管、高于微圆管;在高液相流速时,液弹中湍流作用增强,其中弥散的小气泡增多,更接近常规圆管。

3 气弹速度 v_b

3.1 气弹头部形状对 v_b 的影响

在液相流速较低时,气弹头部形状对 v_b 影响较大,头部曲率半径 R 越小, v_b 越大,如图3所示,主要原因为较小的头部曲率半径可减小气弹运动过程中所受的阻力,进而运动速度较快。随液相流速的升高,气弹头部半径对 v_b 的影响变小,可由图3中渐进直线斜率绝对值变小看出,主要原因为随流速的增加,液相湍流度增加,因头部形状不同引起的阻力变化减小。

3.2 气弹长度 L 对 v_b 的影响

v_b 随 L 的变化如图4所示。由图中比较可发现, v_b 随 L 变化不大,且在平均值附近波动,速度波动主要是由气弹头部形状不同引起

的。由上述分析可知, v_b 主要受头部形状影响, L 对 v_b 影响较小。

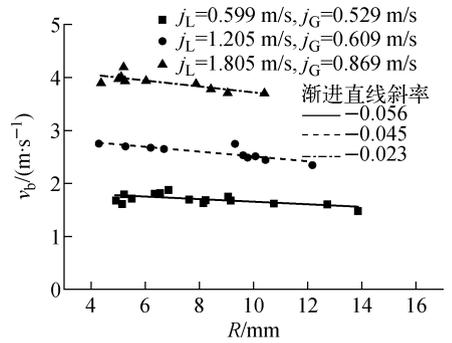


图3 v_b 随 R 的变化

Fig. 3 Variation of slug velocity with slug nose radius

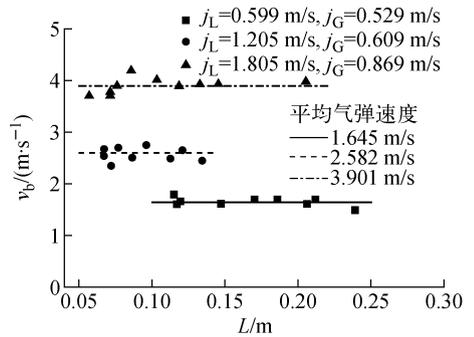


图4 v_b 随 L 的变化

Fig. 4 Variation of slug velocity with slug length

3.3 气弹宽度 W 对 v_b 的影响

v_b 随 W 的变化如图5所示。由图5可见,同一工况下 W 变化不大,在低液相流速时, v_b 随 W 的增大而减小,随液相流速的增大, v_b 减小趋势变缓,高液相流速下, W 对 v_b 的影响可忽略。其原因为:在低流速时,随 W 的增加,头

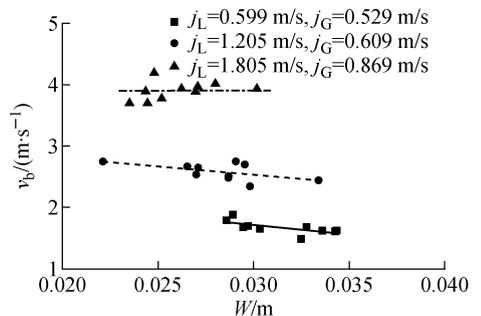


图5 v_b 随 W 的变化

Fig. 5 Variation of slug velocity with slug width

部半径增大,气弹头部所受液相阻力增大,同时气弹变宽,气弹所受摩擦阻力增加,所以 v_b 变小;高液相流速时,气弹头部半径随 W 的变化很小,同时因 W 变化较小,由其引起的摩擦阻力变化很小,所以 W 变化对 v_b 的影响可忽略。

3.4 气弹平均速度

窄矩形通道内弹状流的气相主要集中在气弹中,液膜中气泡在气相中所占比例很小,可忽略,液弹中含气量同样较小,且其中气泡速度接近 v_b ,为此 v_b 与气相真实速度近似相等,并可基于漂移流模型,由以下关系式计算:

$$v_b = C_0 j + v_{G0} \quad (3)$$

式中: j 为两相混合物折算速度, m/s ; C_0 为分布参数; v_{G0} 为漂移速度, m/s ; C_0 和 v_{G0} 分别按 Ishii^[14] 和 Jones-Zuber^[15] 关联式^[8] 计算:

$$C_0 = 1.35 - 0.35(\rho_G/\rho_L)^{0.5} \quad (4)$$

$$v_{G0} = (0.23 + 0.13s/w) \sqrt{\Delta\rho g w / \rho_L} \quad (5)$$

式中: ρ_G 、 ρ_L 和 $\Delta\rho$ 分别为气、液相密度和两相密度差, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; s 和 w 分别为实验段窄边和宽边尺寸, m 。

v_b 随 j 的变化如图 6 所示。由图 6 可见, Ishii & Jones-Zuber 模型对气弹速度整体预测精度较高,但在分液相折算速度小于 $0.4 m/s$ 时,其预测值小于实验值,且偏差较大。为此,基于漂移流模型,对实验数据进行回归,回归结果与实验数据符合良好,数据点误差均小于 10% ,平均误差为 2.38% 。

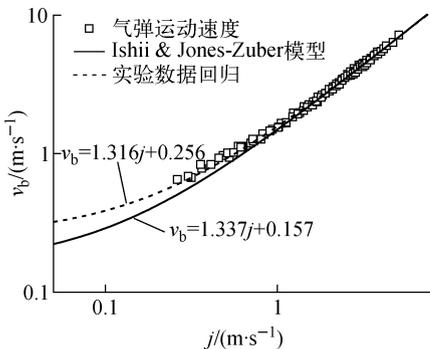


图 6 气弹运动速度

Fig. 6 Slug velocity

由实验数据回归得到的 C_0 ($C_0 = 1.316$) 与式(4)计算得到的 C_0 ($C_0 = 1.337$) 近似相等,可见 Ishii 关联式可较准确地计算窄矩形通道内

分布参数;但 v_{G0} 实验值 $0.256 m/s$ 大于式(5)计算值 $0.157 m/s$ 。 v_{G0} 预测值偏小的原因可能为:式(5)是源于单个气弹运动速度的实验数据,弹状流中连续上升气弹与单个气弹的运动情况不尽相同。文献[16]研究发现,圆管池式双气弹运动过程中,先导气弹的尾流漩涡会扰动液弹中的流场和压力场,从而使尾随气弹发生变形并侧向运动,尾随气弹所受曳力减小,速度增大。本实验中漂移速度高于预测值,可能基于相似原因。由上述可知, Ishii & Jones-Zuber 模型对 $j_L < 0.4 m/s$ 数据点预测精度较低的原因:由式(5)计算的 v_{G0} 偏小,在低流速时 v_{G0} 在 v_b 计算值中所占比重较大,预测精度较低,随两相流速的增大, v_{G0} 所占比重减小,预测精度提高。在后续工作中,将对多个尺寸的窄矩形通道内气弹速度进行研究,进一步考察 Ishii & Jones-Zuber 模型在窄矩形通道中的适用性,并通过分析大量实验数据,获得更为完善的气弹速度计算模型。

4 结论

通过对 $3.25 mm \times 40 mm$ 竖直窄矩形通道内弹状流的实验研究,得出以下结论。

1) 窄矩形通道中弹状流与圆管中存在较大差别,气弹多发生变形;窄边液膜含气量较高,高流速时液膜不下落;宽边液膜中含有由气弹头部进入和气弹尾部进入的气泡,前者相对壁面近似静止,后者速度较快;液弹中含气量低于常规圆管、高于微圆管。

2) 低流速时,气弹速度受气弹头部形状和宽度的影响较大,受气弹长度的影响较小,随液相折算流速的增大,头部形状和宽度影响变小,高液相流速时气弹宽度影响可忽略。

3) 气弹速度与两相折算速度近似满足 Ishii & Jones-Zuber 模型,但在低液相折算速度时偏差较大,主要原因为此模型漂移速度计算值偏小。

参考文献:

[1] 幸莫川, 阎昌琪, 曹夏昕, 等. 摇摆条件下单相水强制循环阻力特性实验研究[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(6): 672-676.

XING Dianchuan, YAN Changqi, CAO Xiaxin,

- et al. Experimental study on forced circulation resistance characteristics of single-phase water flow under rolling condition[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(6): 672-676 (in Chinese).
- [2] 谢清清, 阎昌琪, 曹夏昕, 等. 窄矩形通道内单相水阻力特性实验研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(2): 181-185.
XIE Qingqing, YAN Changqi, CAO Xiaxin, et al. Experimental study on single-phase flow characteristics in narrow rectangular channel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(2): 181-185(in Chinese).
- [3] LEE H J, LEE S Y. Pressure drop correlations for two-phase flow within horizontal rectangular channels with small heights[J]. Int J Multiphase Flow, 2001, 27(5): 783-796.
- [4] 王广飞, 阎昌琪, 曹夏昕, 等. 摇摆状态下窄矩形通道内两相流流型特性研究[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(11): 1 329-1 334.
WANG Guangfei, YAN Changqi, CAO Xiaxin, et al. Flow pattern characteristics of two-phase flow through narrow rectangular channel under rolling condition[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(11): 1 329-1 334(in Chinese).
- [5] 王广飞, 阎昌琪, 孙立成, 等. 窄矩形通道内两相流动压降特性研究[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(6): 677-681.
WANG Guangfei, YAN Changqi, SUN Licheng, et al. Investigation on resistance characteristics of two-phase flow through narrow rectangular duct[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(6): 677-681(in Chinese).
- [6] HIBIKI T, MISHIMA K. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical narrow rectangular channels[J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 203(2-3): 117-131.
- [7] XU J L, CHENG P, ZHAO T S. Gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini/micro gaps [J]. Int J Multiphase Flow, 1999, 25(3): 411-432.
- [8] MISHIMA K, HIBIKI T, NISHIHARA H. Some characteristics of gas-liquid flow in narrow rectangular ducts[J]. Int J Multiphase Flow, 1993, 19(1): 115-124.
- [9] MANERI C C, ZUBER N. An experimental study of bubbles rising at inclination[J]. Int J Multiphase Flow, 1974, 1(5): 623-645.
- [10] BHUSAN S, GHOSH S, DAS G, et al. Rise of Taylor bubbles through narrow rectangular channels[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 155(1-2): 326-332.
- [11] 夏国栋, 周芳德, 胡明胜. 倾斜上升弹状流中 Taylor 气泡运动速度研究[J]. 化学工程, 1997, 25(5): 36-41.
XIA Guodong, ZHOU Fangde, HU Mingsheng. Study on the velocity of Taylor bubble in inclined upward slug flow [J]. Chemical Engineering, 1997, 25(5): 36-41(in Chinese).
- [12] 曹夏昕. 摇摆对竖直管内气液两相流型的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [13] MISHIMA K, HIBIKI T. Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes[J]. Int J Multiphase Flow, 1996, 22(4): 703-712.
- [14] ISHII M. One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes, ANL-77-47[R]. USA: ANL, 1977.
- [15] JONES O C, ZUBER N. The inter relation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow[J]. Int J Multiphase Flow, 1975, 2(3): 273-306.
- [16] KAWAJI M, DEJESUS J M, TUDOSE G. Investigation of flow structures in vertical slug flow [J]. Nuclear Engineering and Design, 1997, 175(1-2): 37-48.