



竖直上升圆管内气液两相流流型特性的数值模拟

俞强强, 施红辉, 董若凌, 彭双双

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘要: 为了研究竖直上升圆管内气液两相流的流型特性, 利用 Fluent 软件对气相表观速度为 0.480~10.105 m/s、液相表观速度为 0.089~1.065 m/s 和管道直径为 20.0 mm 的竖直圆管气液两相流进行数值模拟。将数值模拟结果与相对应的实验结果进行对比, 结果表明: 内径为 20.0 mm 的竖直上升圆管内出现的主要流型为泡状流、弹状流、搅混流和环状流, 与实验结果相同; 通过将 20.0 mm 管径圆管数值模拟数据点代表的各流型区域与 Hewitt 和 Roberts 绘制的 31.2 mm 管径圆管各流型区域进行对比, 发现流型区域大部分重合, 小部分流型边界存在差别; 20.0 mm 管径竖直圆管相较于 31.2 mm 管径竖直圆管, 其泡状流与弹状流流型边界所需的液相表观速度减小, 并且液相表观速度较低时, 弹状流与搅混流流型边界所需的气相表观速度增大; 截面含气率在流型为泡状流时保持稳定, 截面在弹状流、搅混流和环状流时, 管道中心截面含气率较高, 管道中心向两侧壁面移动, 含气率数值呈递减的趋势。通过结合 VOSET 方法和 PISO 求解算法可准确模拟管道内气液两相流, 为探索竖直上升圆管气液两相流流型特性提供了研究思路。

关键词: 竖直上升圆管; 气液两相流; 数值模拟; 流型; 管径; 截面含气率

中图分类号: O359.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2022) 05-0397-08

Numerical simulation of flow pattern characteristics of gas-liquid two-phase flow in vertical rising pipes

YU Qiangqiang, SHI Honghui, DONG Ruoling, PENG Shuangshuang

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang

Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to study the flow pattern characteristics of gas-liquid two-phase flow in a vertical rising pipe, the Fluent software was used to simulate the gas-liquid two-phase flow in a vertical pipe with gas phase apparent velocity of 0.480—10.105 m/s, liquid phase apparent velocity of 0.089—1.065 m/s and pipe diameter of 20.0 mm. Through the comparison between the numerical simulation results with the corresponding experimental results, it was found that the main flow patterns in the vertical rising tube with inner diameter of 20.0 mm were bubble flow, slug flow, agitated flow and annular flow, which were consistent with the experimental results. By comparing the flow pattern regions represented by the numerical simulation data points of 20.0 mm diameter pipe with the flow pattern regions of 31.2 mm pipe drawn by Hewitt and Roberts, it was found that most of the flow pattern regions coincided and the boundaries of a small number of distributary patterns were different. For the vertical circular pipe with 31.2 mm diameter, compared with the vertical circular pipe with 20.0 mm diameter, the liquid phase apparent velocity required by the bubble flow and slug flow boundary decreased, and when the liquid phase

收稿日期: 2021-11-07 网络出版日期: 2022-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(11772309); 浙江省基础公益研究计划项目(LGG19A020002)

作者简介: 俞强强(1996—), 男, 安徽淮南人, 硕士研究生, 主要从事流体输送技术方面的研究。

通信作者: 施红辉, E-mail: hhshi@zstu.edu.cn

apparent velocity was relatively low, the gas phase apparent velocity required by the slug flow and agitated flow pattern boundary increased. The void fraction of the cross section remained stable when the flow pattern was bubble flow, and when the cross section was slug flow, agitated flow and annular flow, the void fraction of the central section of the pipe was relatively high, the center of the pipe shifted to the walls on both sides, and the void fraction value showed a decreasing trend. In this paper, the gas-liquid two-phase flow in the pipe can be accurately simulated by combining the VOSET method and the PISO algorithm, thus providing a research idea for exploring the flow pattern characteristics of gas-liquid two-phase flow in a vertical rising pipe.

Key words: vertical rising pipe; gas-liquid two-phase flow; numerical simulation; flow pattern; pipe diameter; cross-section void fraction

0 引言

管道内气液两相流广泛应用于管道输水、石油化工、航空航天等领域,对管内气液两相流的研究可以促进管道输水、石油化工等工业领域的发展,因此管内气液两相流研究是多相流体力学研究的重要课题之一。管道内气液两相的相互作用使得气液两相相界面呈现不同的图形样式,学者们将该图形样式定义为气液两相流流型^[1]。管道内气液两相流出现不同流型的原因是管道内气液两相流的流动条件和流动特性不同,所以气液两相流流型特性的研究能够促进人们对管内两相流流动特性的理解^[2-5]。众多学者研究了不同方向圆管内的气液两相流,运用观察法将实验中的流型进行分类,并根据实验数据绘制了流型图^[6-7]。对于竖直圆管内的两相流流型,根据实验现象可分为泡状流、弹状流、搅混流和环状流^[8]。Hewitt 和 Roberts^[9-10]绘制的流型图是目前竖直圆管应用最广泛的流型分类图之一。Hewitt 和 Roberts 在 31.2 mm 管径的竖直圆管内,在 0.14~0.59 MPa 压力下改变气液两相表观速度,绘制了竖直圆管流型图,但是当改变垂直管段管径或者改变管内压力时,该流型图的可靠性存疑。刘雪敏等^[11]对管径为 20.0 mm 和 8.0 mm 的锅炉水冷壁圆管开展实验,发现不同管径内的流型存在不同的变化规律;而流动条件(如流体性质、流体方向和管径等)对流型的影响也有报道^[12-14]。

计算流体力学的发展极大地推动了管内气液两相流流动特性的研究。雷丽等^[15]对小通道圆管内气液两相流进行了模拟,结果表明数值模拟结果与实验结果拟合较好;小通道圆管内气泡的发展主要受到惯性力、重力、剪切力和表面张力的作用。张赫铭等^[16]利用欧拉多相模型对不同管径的水平管道进行数值模拟,结果表明数值模拟可以直观显示两

相流流型转变过程;不同直径管道内流型转换的主要区别在于流型转换条件不同,当水平圆管内气相表观速度不变时,随着管径的增大,流型转换过程中所需的液相表观速度也随之增大。张馨玉^[17]在不同管径竖直圆管的模拟研究中,运用 VOSET 多相流模型追踪气液界面,发现 VOSET 模型相较于 VOF 模型具有更好的耦合性和界面捕捉能力。赵艳明等^[18]在数值模拟过程中设置多条平行于管壁的直线,并且通过计算这些直线上含有气体部分的直线长度与总直线长度之比的方式,得到了流道内截面含气率分布图,为 CFD 模拟计算气液两相流截面含气率提供思路。

近几十年来,为研究气液两相流流型特性,虽然众多学者进行了大量实验研究,但是对于竖直圆管内两相流流型转换界限的数值研究并不多。本文在 Sur 等^[14]的基础上,利用商业仿真软件 Fluent 对管道直径为 20.0 mm 的竖直圆管内气液两相流进行数值模拟,将得到的模拟结果与文献实验结果进行对比,探究 CFD 模型的合理性,并在数值模拟的基础上研究气液两相流的流型特征,借助 Hewitt 和 Roberts^[9-10]绘制的通用流型图探讨不同管径对流型转换界限的影响,探究竖直圆管内不同流型的截面含气率分布情况,为后续管内气液两相流流型特性研究提供依据。

1 研究对象与数值方法

1.1 研究对象

本文以文献^[11]中内径为 20.0 mm 的竖直圆管气液两相流实验为参照展开数值研究,建立了竖直圆管几何模型,主体为透明有机玻璃管,管径 20.0 mm,管长 1500.0 mm,竖直圆管实验装置示意图如图 1 所示。流体介质为空气和水,空气和水采用相同的混合段入口,其表观速度分别为 0.480~10.105、0.089~1.065 m/s。



图 1 竖直圆管实验装置示意图

1.2 数值方法

1.2.1 几何模型

本文根据图 1 竖直圆管实验装置示意图建立了二维几何模型,如图 2(a)所示。几何模型中左侧为管道气液两相流入口,管道整体计算域为 1500.0 mm×20.0 mm。运用 ICEM 软件进行网格划分,如图 2(b)所示;采用结构性网格,由于实际实验过程中,气液两相流受到圆管内壁影响,因此对管壁附近的网格进行加密,最后确定总体网格数量为 106330。

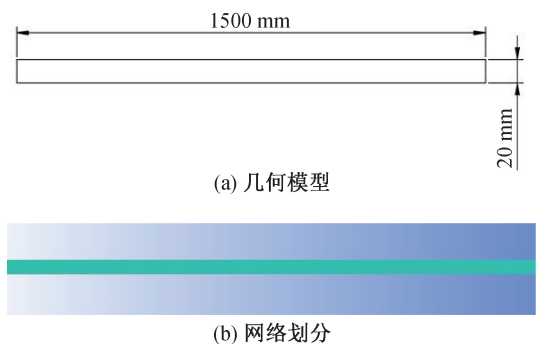


图 2 竖直圆管几何模型及网格划分示意图

1.2.2 控制方程

数值模拟过程中采用 VOFET 方法对非稳态气液两相界面进行捕捉。耦合了 VOF 模型和 Level Set 函数的 VOFET 方法,在数值模拟计算非稳态气液两相过程中,不仅保持了气液两相的质量守恒,还有效减小了 VOF 模型中相位函数界面曲率较大的误差,能更有效离散表面张力,使数值模拟结果更贴近实验结果。

体积输运方程为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (1)$$

Level Set 函数为:

$$\phi_{i,j}^0 = \begin{cases} -\max(L, W), & \alpha_{i,j} \geq 0.5; \\ \max(L, W), & \alpha_{i,j} < 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

其中: t 为时间,s; \mathbf{u} 为速度,m/s; ϕ 为 Level Set 函数; i,j 为计算域单元索引; α 为某一相的体积比; L 为计算域的长度,m; W 为计算域的宽度,m。

对包括具有表面张力和重力的不可压缩气液两相流进行数值模拟,忽略热传导效应,守恒方程使用连续介质方程和动量方程。

连续介质方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

动量方程为:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + E^c = E^v + S \quad (4)$$

其中: ρ 为密度,kg/m³; E^c 为对流项; E^v 为扩散项; S 为源项。

1.2.3 初始条件和边界条件

本文选用压力求解器进行瞬态模拟,考虑重力和表面张力因素的影响。涉及工质包括水和空气,二者均为不可压缩、常温、常物性流体,其热传导忽略不计,气液两相流管道进出口压差较小,所以将气体和液体设为不可压缩流体;求解方法采用以压力—速度耦合方式进行计算的压力隐式算子分割法(Pressure implicit with splitting of operators, PISO);压力方程选用压力插值算法(Pressure staggering option, PRESTO);体积分数差值选择几何重构方案(Geo-Reconstruct);动力指数、湍流动能、湍流耗散率均选用一阶迎风格式,以便简化计算;竖直圆管内为无旋流动的气液两相湍流,所以采用 Standard $k-\epsilon$ 湍流模型; $k-\epsilon$ 湍流模型中第一层网格应落在湍流边界层对数区范围内,即 $y^+ = 30 \sim 300$ ^[19],本文数值模拟过程中 y^+ 选取的数值为 50;数值模拟初始时刻默认管内充满水,气液两相流数值模拟材料的参数如表 1 所示;管内气液两相流动时会受到体积力和表面张力的作用,所以在数值模拟过程中勾选体积力方程和表面张力模型,空气和水相互作用的表面张力系数为 0.072。

表 1 数值模拟管内流体参数值

参数	密度 ρ / (kg·m ⁻³)	动力黏度 μ / (Pa·s)	表面张力系数
空气	1.23	1.79×10^{-5}	0
水	998.00	0.01×10^{-5}	7.20×10^{-2}

在实际实验过程中,管道入口为气液两相流混合入口,所以在数值模拟过程中,管道入口为混合质量流量入口,质量流量入口中气液两相参数根据空气和水的表观速度进行计算和设置,湍流参数选择湍流强度和水力直径;管道壁面选择无滑移壁面;管道出口选择自由流出口。

1.3 网格相关性验证

为了验证网格的无关性,本文分别对网格数为

68428、106330 和 158266 的算例进行了数值模拟。瞬态计算残差设置为 10^{-6} , 此时流场计算达到收敛, 得到了在 3 种网格达到收敛条件下的竖直圆管内泡状流截面含气率分布图。网格无关性验证如图 3 所示, 其中 x 为垂直于流动方向距离流道中心线的距离。从图 3 可以看出, 3 种网格数计算得到的泡状流截面含气率分布基本一致, 网格数为 68428 和网格数为 158266 的泡状流截面含气率存在较大计算相对误差, 网格数为 106330 和网格数为 158266 的泡状流截面含气率的计算结果相对误差小于 1%。在保证计算精度的前提下, 为节约时间成本, 选择网格数为 106330 的网格模型开展数值模拟。

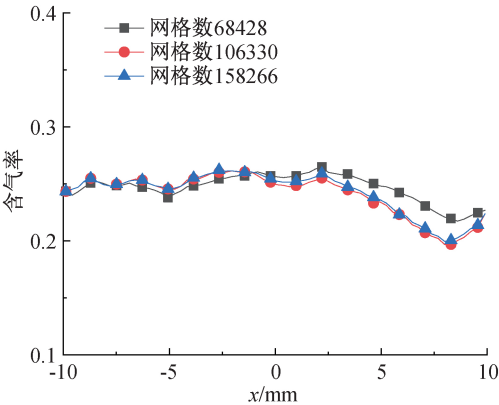


图 3 竖直圆管内泡状流截面含气率分布图

2 模拟结果与分析

2.1 数值模拟结果与实验结果对比

为验证数值模拟方法的准确性, 本文将数值模拟结果与文献[14]实验结果进行对比, 对比结果如图 4 所示。在图 4(a) 中, 管内气相表观速度为 0.974 m/s, 液相表观速度为 1.065 m/s, 此时在数值模拟结果和实验结果中观察到的流型均为泡状流, 管道内气泡均匀分布, 气泡尺寸较小, 形状一般为球形和非球形, 数值模拟结果与实验结果基本一致。在图 4(b) 中, 管内气相表观速度为 0.885 m/s, 液相表观速度为 0.089 m/s, 此时数值模拟结果和实验结果均出现形状如子弹状的气泡, 国内外学者将管道内子弹状气泡称为 Taylor 气泡, 将出现这种气泡的流型称为弹状流^[17], 数值模拟结果与可视化实验结果高度相似。在图 4(c) 中, 管内气相表观速度为 2.477 m/s, 液相表观速度为 0.177 m/s, Taylor 气泡出现破裂变形, 气液两相相互混合和扰动, 形成搅混流, 数值模拟结果和实验结果均出现明显搅混流现象。在图 4(d) 数值模拟结果中, 保持液相表观速度不变, 提高气相表观速度到 8.479 m/s, 此时搅混流中互不相连的气泡连接合并, 最终气泡相互融合, 出现圆管中心气相呈连续状的环状流现象, 同时液相沿管道内壁向上运动形成液膜。由于气相与液相的相互作用, 气液相界面出现波动现象, 界面失稳使得少量小液滴进入管道中心连续气相区域, 并且少量小气泡进入管壁附近液相区域。在实验拍摄过程中, 由于相机像素、相机拍摄角度、管道流体对拍摄的阻碍等因素, 可视化实验结果无法清晰显示圆管内环状流细节现象; 并且实验管道入口与数值模拟管道入口处气液两相比比例无法时刻保持一致, 存在细微误差, 所以数值模拟结果与实验结果整体一致但同时存在细微差别。图 4 数值模拟结果与实验结果基本一致, 表明本文采用的数值模拟求解算法能准确反映竖直圆管内气液两相流的实际情况。

此时搅混流中互不相连的气泡连接合并, 最终气泡相互融合, 出现圆管中心气相呈连续状的环状流现象, 同时液相沿管道内壁向上运动形成液膜。由于气相与液相的相互作用, 气液相界面出现波动现象, 界面失稳使得少量小液滴进入管道中心连续气相区域, 并且少量小气泡进入管壁附近液相区域。在实验拍摄过程中, 由于相机像素、相机拍摄角度、管道流体对拍摄的阻碍等因素, 可视化实验结果无法清晰显示圆管内环状流细节现象; 并且实验管道入口与数值模拟管道入口处气液两相比比例无法时刻保持一致, 存在细微误差, 所以数值模拟结果与实验结果整体一致但同时存在细微差别。图 4 数值模拟结果与实验结果基本一致, 表明本文采用的数值模拟求解算法能准确反映竖直圆管内气液两相流的实际情况。

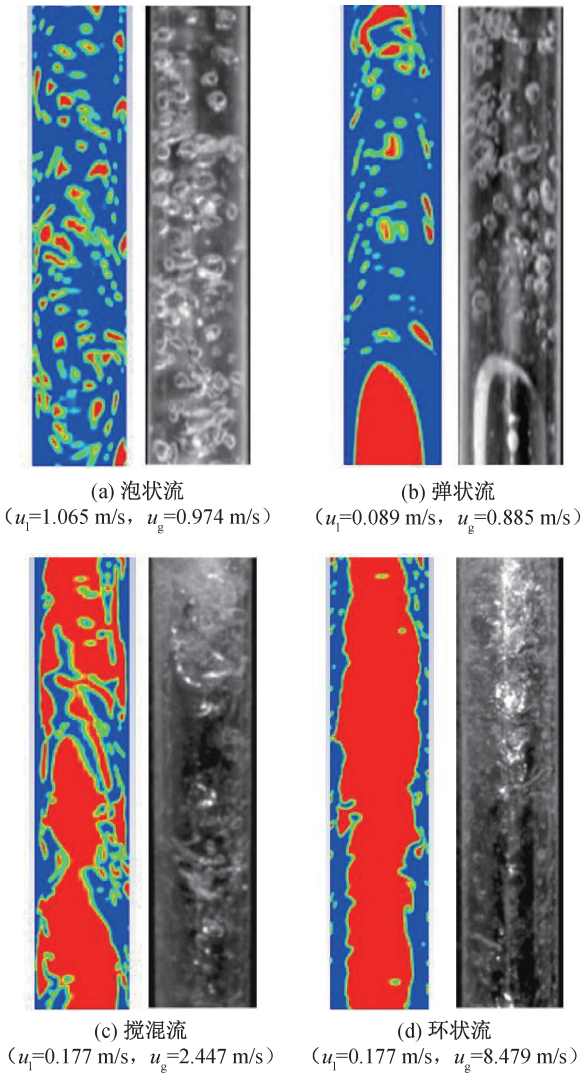


图 4 4 种流型的数值模拟与实验气相图

2.2 气液两相流流型特征

图 5 为竖直上升圆管内气液两相流数值模拟气

相图。本文数值模拟调整了气液两相流入口处混合质量流量的大小和气液两相的含量,以分析气液两相流表观速度变化产生的不同流型特征。利用 Tec-plot 软件对数值模拟后的图像结果进行处理,所得高清晰图像有助于更好分析管内两相流流型的物理细节。本文根据竖直圆管内气泡分散程度、气泡尺寸大小和数量将气液两相流型分为泡状流、弹状流、搅混流和环状流。

a)泡状流。如图 5(a)所示,竖直圆管内较低的气相流速和较高的液相流速可以产生泡状流,液相在管道内以连续形式流动,小尺寸气泡在管道内以离散形式流动,气泡多数以椭圆或者狭长形状存在于管道中,气泡尺寸远小于管道直径。在竖直圆管气液两相流中,气泡均匀分布在管道内。

b)弹状流。如图 5(b)所示,随着气相流速的增大和液相流速的减小,管道内产生尺寸接近管道直径的气泡,气泡头部呈圆锥形,尾部较为扁平,形状与子弹大致相似,也称为 Taylor 气泡,同时 Taylor 气泡周围也会分散存在小尺寸、圆形或狭长型的小气泡,我们将产生 Taylor 气泡的流型称为弹状流。

c)搅混流。如图 5(c)所示,管道内气相流速增大,弹状流中 Taylor 气泡及小气泡产生聚合,连接在一起,液体和气体相互掺混,气体主要分布在管道中心,产生间歇性、无序性、不确定性和气液界面不规则的两相流动结构,将这种具有混沌和脉动特性的流动结构称为搅混流^[17]。

d)环状流。如图 5(d)所示,圆管内液相表观速度为 0.187 m/s,气相表观速度为 9.416 m/s,此时两相流流型表现为环状流。气相速度的增大使得具有不规则气液界面和无序性特性的搅混流转变为管道中心形成连续性气芯,管道内壁形成薄液膜现象的环状流。相较于图 4(d)环状流的数值模拟结果,图 5(d)形成的环状流气液界面更加平滑、规则。这是由于管道内壁液膜流速大致相等,气相表观速度更大,气液两相的相间作用更小,气体流动阻碍更小,此时环状流更稳定。但由于竖直圆管内环状流的气液界面仍存在不规则扰动,所以液膜产生的少量小液滴会被夹带至气芯中心。

2.3 管径为 20.0 mm 的垂直圆管流型转换

本文将管径为 20.0 mm 的竖直圆管在数值模拟中得到的数值模拟数据点绘制在 Hewitt 和 Roberts 竖直圆管流型图上,并将数值模拟结果与 Hewitt 和 Roberts 流型图进行比较。

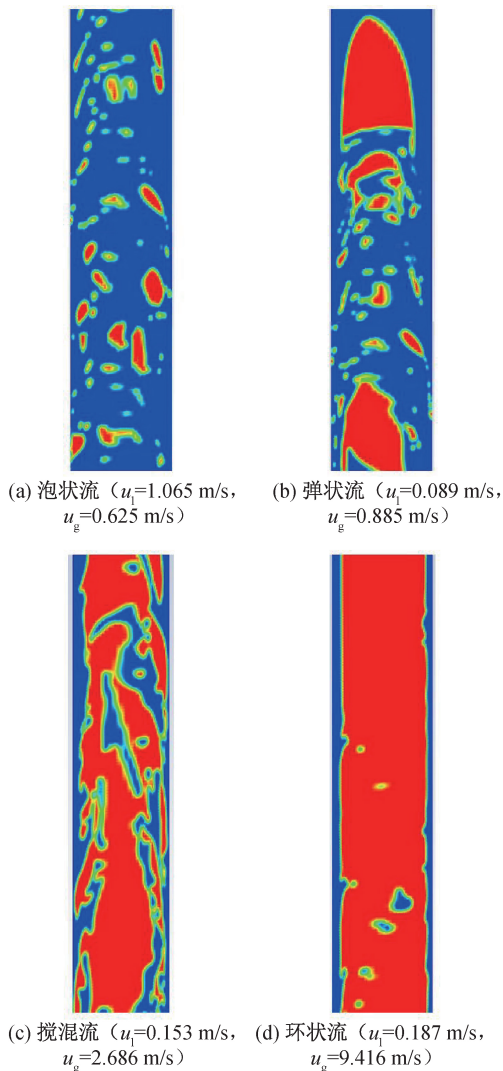


图5 竖直上升圆管内气液两相流数值模拟气相图

管径为 20.0 mm 的管内数值模拟结果与 Hewitt 和 Roberts 流型图的比较如图 6 所示。由图 6 可知,管径为 20.0 mm 的竖直圆管部分数值模拟结果大多在 Hewitt 和 Roberts 流型图相对应的区域内,但是流型转换边界上的部分数值模拟数据点与 Hewitt 和 Roberts 流型图存在差别,存在差别的数值模拟结果低于 10%。存在细微差别的区域主要分布在图 6 的泡状流、弹状流和搅混流区域。从图 6 中可以看出:Hewitt 和 Roberts 流型图的弹状流区域中出现了数值模拟结果中表示泡状流的数据点,相较于 Hewitt 和 Roberts 通过管径为 31.2 mm 垂直圆管绘制的流型图,本文采用的竖直圆管管径更小,液体对气体的表面张力更大,所以小气泡相互融合转化为 Taylor 气泡所需的临界含气率也就更大;低液相表观速度下小部分弹状流数值模拟结果处于 Hewitt 和 Roberts 流型图的搅混流区域,因为当液相表观速度处在较小的速度区间时,

数值模拟管径相较于 Hewitt 和 Roberts 流型图所使用的管径更小,液相对 Taylor 气泡的作用力越强,气泡越稳定,向搅混流转换所需的气相表观速度越大;高液相表观速度下小部分搅混流数值模拟结果处于 Hewitt 和 Roberts 流型图的弹状流区域,这是由于当液相表观速度较大时,表观速度较大的液相对 Taylor 气泡产生较大扰动,使气泡破碎变形,从而形成气液相互掺混的搅混流。

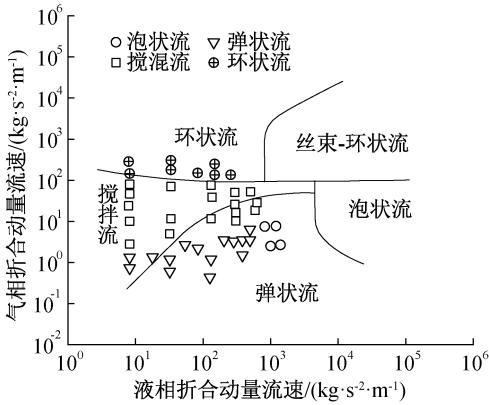


图6 管径为 20.0 mm 的管内数值模拟结果与 Hewitt 和 Roberts 流型图比较

本文数值模拟采用的管径比 Hewitt 和 Roberts 绘制流型图时采用的管径更小,根据数值模拟结果,将 20.0 mm 管径各流型的转换边界绘制在 Hewitt 和 Roberts 流型图上,结果如图 7 所示。由图 7 可知,数值模拟建议的边界与 Hewitt 和 Roberts 流型图原边界相比,泡状流向弹状流的转换所需的液相表观速度减小,原因是泡状流中小气泡相互融合并充满管径才能形成弹状流,所以不同管径泡状流向弹状流的转化边界存在一定区别;弹状流向搅混流的流型转换所需的气相表观速度增大,原因是小管径子弹状气泡相较于大管径内子弹状气泡形状更加稳定,相界面更加光滑,所以在气相表观速度较小的情况下大管径子弹状气泡更易破碎,从而形成搅混流,因而大管径的弹状流向搅混流转换边界形状更加陡峭;搅混流向环状流转换所需要的气相表观速度基本保持恒定。数值模拟建议的边界与实验建议的边界基本一致,其中泡状流向弹状流转化的数值模拟建议边界与实验建议边界相差小于 5%,存在较小差别的原因可能是:实际实验过程中无法保证所有时刻进入竖直圆管的气液两相比比例均保持恒定;数值模拟过程中假设空气为不可压缩流体,实际生活中空气为可压缩流体。

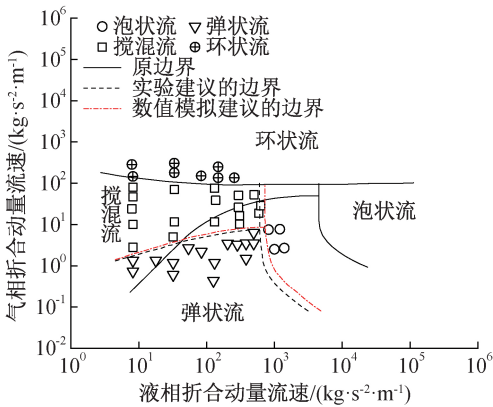


图7 管径为 20.0 mm 的管内数值模拟转换边界与实验结果转换边界

2.4 截面含气率分布

竖直升圆管内气液两相流截面含气率对于管内两相流流型特征和流型转变机理研究具有重要意义。本文数值模拟过程中在管道内取 19 条直线,这些直线相互平行且全部平行于管道中心线,所有相邻直线间距为 1.0 mm,通过对所有直线上不同位置含气率各自求和的方式,计算获得了竖直管道内 4 种流型截面含气率分布情况。

竖直升圆管内 4 种典型流型的含气率分布如图 8 所示。从图 8 中可以看出:泡状流的截面含气率数值较为平稳,弹状流、搅混流和环状流的截面含气率数值分布均呈现较大差异,管道中心附近截面含气率明显高于壁面附近截面含气率。由于泡状流中的小气泡在管内均匀分布,使得泡状流截面含气率数值基本稳定,在 0.25 左右;弹状流中的 Taylor 气泡位于管道中心,尺寸接近管道尺寸,管道中心位置的截面含气率较高,数值维持在 0.7 左右,靠近壁面处,由于气泡对液膜的卷吸作用,使得壁面处气泡夹杂少量液体,壁面处液相夹杂少量小气泡。所以从管道中心到近壁面处,含气率下降明显且最终含气率数值处于较低位置;搅混流中,气相和液相在管道中心处相互掺混,气液两相流具有无序性和不确定性,管道内气泡破碎和融合增强了湍流的扰动作用,所以搅混流管道中心部分的截面含气率数值较高并且出现上下波动的现象;在搅混流的基础上继续增大气相折算速度,最终搅混流转变为环状流,环状流管道中心为夹杂少量小液滴的连续性气芯,所以管道中心处截面含气率数值大于 0.9 且含气率数值较为平稳,气芯在壁面处与液相产生卷吸作用,并且近壁面处液体受到管壁粘滞力作用,在近壁面形成薄液膜,使得靠近壁面处的截面含气率较低。

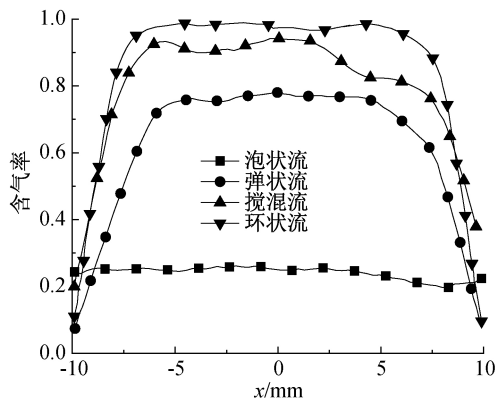


图8 竖直圆管内不同流型截面含气率分布

3 结 论

本文运用 Fluent 软件对内径为 20.0 mm 的竖直圆管气液两相流流型进行数值模拟, 采用 VOSSET 模型和 PISO 求解算法, 将数值模拟结果与实验结果进行对比分析, 研究了常温常压管道内不同气液相表观速度对流型的影响, 分析了管内两相流流型特征和流型转换机理, 比较了数值模拟结果与 Hewitt 和 Roberts 通用流型图的差别, 探究了流型对管道内截面含气率的影响, 得出以下主要结论:

a) 本文数值模拟运用的 VOSSET 方法结合 PISO 求解算法能够有效离散表面张力, 减小相界面曲率误差, 准确计算管道内气液两相流动, 数值模拟结果与实验结果较好吻合。

b) 内径为 20.0 mm 竖直圆管内不同气液相表观速度主要产生 4 种流型, 低气相表观速度和高液相表观速度产生气泡分布均匀的泡状流; 降低液相表观速度能够获得管道中心处含有 Taylor 气泡的弹状流; 增加气相表观速度能够将弹状流转化为气液相互掺混的搅混流; 高气相表观速度和低液相表观速度能够产生管道中心为连续气芯的环状流。

c) 将数值模拟结果绘制在 Hewitt 和 Roberts 通用流型图上并与实验结果比较, 发现随着管径减小, 大部分数值模拟结果与在 Hewitt 和 Roberts 通用流型图能够较好地拟合, 泡状流与弹状流的转换界限向液相表观速度减小的方向移动, 低液相流速下弹状流与搅混流的转换界限向气相表观速度增大的方向移动, 转化为环状流所需的气相表观速度保持恒定。

d) 由于管道内气泡分布均匀, 泡状流的截面含气率低于 0.3, 且含气率数值基本保持平稳; 除泡状流外, 由于气体多存在与管道中心处, 壁面附近气体

对液膜产生卷吸作用, 管壁对液体产生粘滞力, 所以弹状流、搅混流和环状流在壁面附近截面含气率较低, 在管道中心附近截面含气率较高。

参考文献:

- [1] 徐济鳌. 沸腾换热与两相流[M]. 北京: 原子能出版社, 2001: 15-35.
- [2] Saisorn S, Wongwises S. A review of two-phase gas-liquid adiabatic flow characteristics in micro-channels [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(3): 824-838.
- [3] 张金红. 气液两相流流型实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005: 64-72.
- [4] 刘自龙, 廖锐全, 雷宇, 等. 不同管径水平管油气两相流压降模型[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(34): 137-143.
- [5] 禹法文, 刘向东, 张程宾. 小型热虹吸管脉动流动传热特性的可视化实验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(5): 945-949.
- [6] Sudarja, Haq A, Deendarlianto, et al. Experimental study on the flow pattern and pressure gradient of air-water two-phase flow in a horizontal circular mini-channel[J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(1): 102-116.
- [7] Hong W P, Niu G Q, Jin M L. Characterization of two-phase flow patterns in small round tubes[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 525: 256-259.
- [8] Kumar A, Bhowmik S, Ray S, et al. Flow pattern transition in gas-liquid downflow through narrow vertical tubes[J]. AIChE Journal, 2017, 63(2): 792-800.
- [9] Hewitt G F, Roberts D N. Studies of Two-Phase Flow Pattern by Simultaneous X-ray and Flash Photography [R/OL]. UK, Harwell: Atomic Energy Research Establishment, 1969. (1969-02-15) [2021-11-07]. <https://www.osti.gov/biblio/4798091>.
- [10] Hewitt G F, Roberts D N. Investigation of Interfacial Phenomena in Annular Two-Phase Flow by Means of the Axial View Technique [R/OL]. UK, Harwell: Atomic Energy Research Establishment, 1969. (1969-01-01) [2021-11-07]. <https://www.osti.gov/biblio/4762873>.
- [11] 刘雪敏, 李舟航, 吴玉新, 等. 管径对垂直上升管内气液两相流流型的影响[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2012, 27(5): 531-536.
- [12] Sudarja, Jayadi F, Indarto, et al. The effect of liquid viscosity on the gas-liquid two-phase flow pattern in horizontal mini-channel [C]// Proceedings of The 9th

International Conference on Thermofluids 2017. Indonesia: Yogyakarta, 2018, 2001(1): 030010.

[13] Mehta H B, Banerjee J. An investigation of flow orientation on air-water two-phase flow in circular minichannel[J]. Heat and Mass Transfer, 2014, 50 (10): 1353-1364.

[14] Sur A, Liu D. Adiabatic air-water two-phase flow in circular microchannels [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 53: 18-34.

[15] 雷丽, 黄楠燕. T 型小通道气液两相流动特性的数值研究[J]. 山东化工, 2020, 49(15): 223-225.

[16] 张赫铭, 李文昊, 何新林, 等. 不同管径水平管道气液两相流动数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39 (5): 488-494.

[17] 张馨玉. 介质、管径及倾角对管内气液两相流型影响的数值模拟[D]. 吉林: 东北电力大学, 2019: 14-37.

[18] 赵艳明, 潘良明, 张文志. 垂直上升矩形流道内气液两相流流型图的数值模拟[J]. 核科学与工程, 2012, 32 (3): 254-259.

[19] Zhang L T, Feng Z L, Sun M Y, et al. Numerical study of air flow induced by shock impact on an array of perforated plates[J]. Entropy, 2021 23(8): 1051.

(责任编辑:康 锋)