

基于电阻层析成像技术的弹状流实验研究

赵培华^{1,2}, 李华³, 蔺景德^{1,2}, 张军³, 徐思渊^{1,2}, 刘印华^{1,2}, 钟兴福³

(1. 中石油煤层气有限责任公司 工程技术研究院, 陕西 西安 710003; 2. 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司, 北京 100095; 3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 在气液两相流研究中, 相分布、相速度等流场特征信息对深入了解流动机理、提高模型计算精度有重要意义, 但由于气液流动的复杂性与随机性, 使得它们的准确测量较为困难。该研究基于快速电阻层析成像技术, 首先对垂直向上气液管流中弹状流型下多种工况的流动结构进行图像数据采集与重建; 然后通过互相关算法得到轴向速度场分布, 并与漂移流模型进行对比; 再对按时序排列的横截面图像序列进行调整得到正确比例的空间三维图像; 最后获得段塞长度、频率等特征信息。结果表明, 快速电阻层析成像技术可以测得速度场分布、段塞长度、频率等特征信息, 可用于优化与这些参数相关的理论模型和经验关系式, 有助于提高气液两相流的模型计算精度。

关键词: 气液两相流; 电阻层析成像; 互相关速度计算; 漂移流模型; 段塞参数

中图分类号: O359+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-4956(2023)09-0017-06

Experimental study by the fast electrical impedance tomography technique on gas-liquid slug flow

ZHAO Peihua^{1,2}, LI Hua³, LIN Jingde^{1,2}, ZHANG Jun³, XU Siyuan^{1,2}, LIU Yinhu^{1,2}, ZHONG Xingfu³

(1. Engineering Technology Research Institute, PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Xi'an 710003, China;
2. China United Coalbed Methane National Engineering Research Center Co., Ltd., Beijing 100095, China;
3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In the study of gas-liquid two-phase flow, the flow field characteristics as phase distributions, velocity profiles etc. are important for understanding the gas-liquid flow mechanism and improving the flow model calculation accuracy. However, the measurement of these parameters is very challenging due to the complexity and randomness of the gas-liquid flow. This paper tries to solve this problem via the fast electrical impedance tomography technique. First, the images of a series of gas-liquid slug flows in the vertical upward pipe are collected and reconstructed, then the axial velocity distributions are calculated by the cross-correlation method, and the results are compared with the drift-velocity model. After that, the arrays of the cross-sectional flow images arranged by temporal order are adjusted to the correct spatial 3D images. Finally, the parameters including slug length and frequency are acquired after the image analysis. This study proved that the electrical impedance tomography is capable of measuring the parameters including velocity, slug length and slug frequency, which can be used to improve the relative theoretical models and empirical formulas. Therefore, it is beneficial for improving the precision of the gas-liquid two-phase flow calculation.

Key words: gas-liquid flow; electrical impedance tomography; cross-correlation velocity calculation; drift-velocity model; slug parameter

收稿日期: 2023-03-07

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB22030201); 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“海陆过渡相页岩气勘探开发关键技术研究”(2021DJ2006)

作者简介: 赵培华(1966—),男,北京,博士,教授级高工,主要研究方向为煤层气、海陆过渡相页岩气勘探开发, phzhao@petrochina.com.cn。

通信作者: 李华(1977—),男,北京,博士,助理研究员,主要研究方向为多相流体力学, lihua@imech.ac.cn。

引文格式: 赵培华, 李华, 蔺景德, 等. 基于电阻层析成像技术的弹状流实验研究[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(9): 17-22.

Cite this article: ZHAO P H, LI H, LIN J D, et al. Experimental study by the fast electrical impedance tomography technique on gas-liquid slug flow[J]. Experimental Technology and Management, 2023, 40(9): 17-22. (in Chinese)

气液两相流动在石油、核能、化工等工业领域中十分常见,这些领域对两相流计算、测量技术等的需求非常迫切。由于气液两相流动的复杂性,基于严格理论推导的理论方法困难极大,包括^[1]:①气液界面复杂多变,可发生变形、合并、分裂等多种变化;②气体可压缩;③气液两相存在传热传质;④流动参数多,而且部分参数很难测量;⑤某些流型下流动非常不稳定。因此,在气液两相流研究中,实验方法非常重要,由简化的理论模型与通过实验方法得到的经验关系式相结合形成的两相流模型计算方法,是目前的主要研究手段。可见,两相流参数的准确测量对于气液两相流的研究非常重要,其不仅有助于研究者对流动机理的深入认识,更直接关系到两相流模型计算方法的精度。然而,气液两相流测量难度很高,尤其是对于场分布参数的测量,一直缺少高精度的有效方法。

过程成像技术是近年来快速发展的一种非侵入式检测技术,电阻层析成像(electrical impedance tomography, EIT)技术是其中的一种。它的测量原理如下^[2]:被测量场中的不同介质具有不同的电导率,通过布置在被测量场周边的电极进行电流激励与电压测量;当场内介质分布发生变化,相应的电导率分布也发生变化,场内电流和电势的分布也随之改变,最终引起场边界上的测量电压发生变化;通过基于 Radon 变换的图像重建算法,由边界上的测量值重建得到场内电导率的分布图像,通过电导率与介质的对应关系,就可对被测量场的介质分布进行分析。在应用于管流测量时,通过在上下游不同位置处安装测量传感器,再使用互相关算法,就可得到速度场的分布。由此可见,过程成像技术通过对流动进行连续的图像重建,得到流动结构的详细信息,可以实现气液两相流动场分布信息的测量。

漂移流模型(drift flux model, DFM)是一种半经验模型,1965年由 Zuber & Findlay^[3]提出,由于它既考虑了气液间的速度滑脱现象,也考虑了流动截面上气液的分布规律,具有连续可微、相对简单的优点;之后多名学者对其进行了研究和改进,例如 Bankoff^[4]应用该模型对蒸汽-水两相流中的泡状流流型进行了研究;Wallis^[5]在其专著中对该模型进行了系统总结,指出 DFM 不仅可用于气液流动,还可用于流化床等液固流动,不仅适用于稳态流动,在非稳态流动分析中也非常有用;Ishii^[6]对核工业相关的多种气液流型的流动进行了理论分析与实验验证,考虑了界面结构、体力场、剪切力、界面动量传递等多种因素对相间滑移速度的影响;文献[7—10]中多名学者将该模型应用于石油工业相关的气液两相流中,并根据油井中流动

的特点对其进行了改进,使其在石油工业中也得到了广泛的应用。

本研究的创新之处在于采用 EIT 技术这种先进的过程成像技术对气液两相流进行测量,并发展了针对这种技术和气液两相流具体流型特点的流动参数提取方法。一方面,在一般的气液两相流中,大量气液界面的存在会对测量带来干扰,比如界面上的反射、折射、散射等效应使得 PIV 技术不再适用,肉眼观察、高速摄像等手段通常也只能观测到透明管道近壁面处的情况,对内部结构的观测误差很大;而 EIT 与医学的 CT 断层扫描技术类似,不受这些光学效应的影响,不对流动造成干扰即可获得流场的分布信息。另一方面,这种技术不同于高速摄像技术在同一时刻对一段流动进行整体拍摄,它的测量是在管道某一个或数个固定横截面处快速连续测量,想要获得流动沿轴向的空间信息,需要发展相应的图像处理方法,重建流动三维空间结构后就可以进行流动结构参数分析。

在应用 EIT 技术对气液两相流进行测量的最新进展方面,张立峰等^[11]不进行图像重建,直接对 EIT 系统的多通道原始信号进行数字信号处理,采用基于模态分解与卷积神经网络的算法进行流型识别研究;仝卫国等^[12]利用 EIT 系统的原始测量数据结合神经网络与电磁流量计,提高了气液两相流中液相体积分量的测量精度;Hou 等^[13]采用 EIT 技术与高速摄像机对水平气液分层流的界面特性进行了详细研究,其中 EIT 主要用于提供管道横截面的重建图像进而分析界面形状与位置;Yan 等^[14]采用低速 EIT 系统与高速摄像机等对 Y 型微槽道内的气液流动进行了研究,其中 EIT 用于横截面成像进而进行含率分析。

上述研究均没有进行气液流动三维空间结构图像重建及相关参数分析,而本研究采用快速 EIT 技术,对垂直向上气液管流中的弹状流进行图像采集与重建,然后进行点对点的互相关速度计算得到气相速度,并与漂移流模型进行对比分析。在此基础上,建立了一种基于 EIT 技术的弹状流特征参数提取方法,在三维空间流动结构重建之后得到了段塞长度、频率等特征信息。结果表明通过快速 EIT 技术可以获得速度场分布、段塞长度、频率等特征参数,这些参数在两相流模型计算中通常通过理论模型或经验关系式计算得到,因此,实现这些参数的准确测量对提高气液两相流的模型计算精度有很大帮助。

1 实验设备及仪器

1.1 气液实验管路

气液两相实验管路如图 1 所示,测试段由透明玻璃管组成,高约 3 m,管道内径 50 mm, EIT 双圈电

极传感器、绝对压力传感器、温度传感器均安装在测试段的顶部附近。气相为空气, 由外部高压气源提供, 在垂直测试段之前的水平段经过位于管道中央的细管导入, 液相为水, 由水泵从循环水箱中驱动先进入

水平段再进入测试段。液相体积流量由安装在液相支路的涡轮流量计测量, 气体的体积流量(标准状态)则由安装在气相支路的气体质量流量控制器测量并调控。

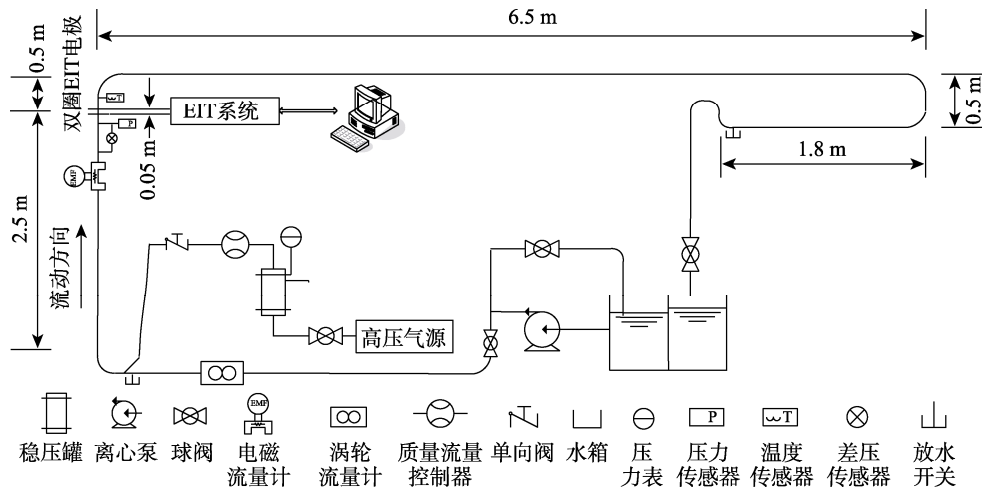


图1 气液两相实验管路结构示意图

1.2 电阻层析成像系统

该研究所使用的电阻层析成像系统型号为英国ITS公司的ITS Z8000^[15], 系统组成如图2所示, 主要由电极传感器、数据采集系统、传输线缆、图像重建计算机等组成。电极传感器为双圈, 每圈各16电极, 上下游两电极圈间的距离为50 mm, 电极沿圆周等距排列并与管路内管壁齐平, 因此不会对流动产生干扰。数据采集系统在测量时采用快速采集模式, 采集速度为863双幅图像每秒(即每秒钟上下游两圈传感器分别采集了863幅图像的数据)。

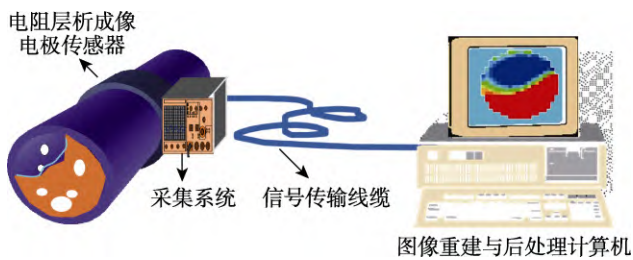


图2 电阻层析成像系统示意图

1.3 测试工况

该研究对12种气液垂直流动工况进行了测试, 流型均为弹状流。这些流动工况是3种不同液相流量和4种不同气相流量的组合, 具体如表1所示。

表1 气液垂直流动测试工况

体积流量	1	2	3	4
气相流量 Q_a (L/min, SLPM)	20	30	50	95
液相流量 Q_w (m ³ /h)	3	4.5	6	

2 数据处理

2.1 图像重建

图像重建采用敏感系数反投影算法(SBP), 由管道横截面周边电极测得的电压值重建得到管道横截面内的电导率分布图。鉴于每种流动工况单次测量产生的一个典型数据文件包含超过8 000双幅图像, 再考虑到传感器电极的数量, 确定图像重建采取的网格数为316, 如图3所示, 图3(a)中的数字1—16代表电极编号。这样既保证图像具有一定的空间分辨率, 又保证了大量数据处理的效率。

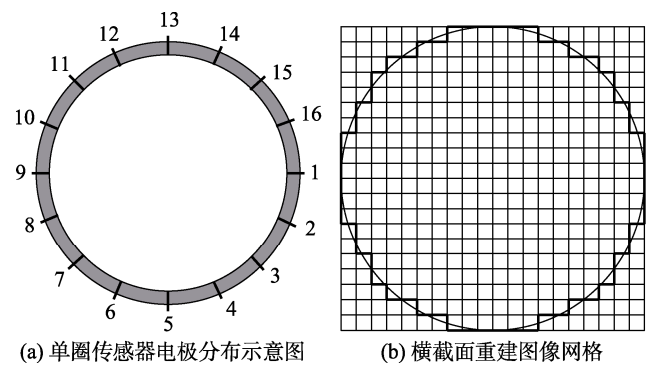


图3 横截面 EIT 传感器电极分布示意图和重建网格

2.2 速度互相关计算

在垂直管流的充分发展段, 速度的主要分量是轴向速度, 径向速度分量和周向速度分量相比之下是少量。同时, EIT 上下游两圈电极距离很近, 在此距离内流动的相分布结构变化很小。因此, 在两圈传感器都得到反映流动相分布的横截面图像后, 就可以进行

点对点的速度互相关计算。该研究只计算轴向速度，上游图像的像素编号与下游图像的像素编号相同即可。对于某一确定的像素，互相关计算式如下：

$$R_{12}(n) = \sum_{m=1}^l f_1(m)f_2(m+n) \quad (1)$$

其中 l 为相关样本的长度，即用于相关计算的图像帧数； n 为下游图像相对于上游图像偏移的图像帧数； $f_1(m)$ 为第 m 帧上游图像中该像素点的数值， $f_2(m+n)$ 为第 $m+n$ 帧下游图像中该像素点的值。

令该像素点的编号为 k (该研究中 k 的取值范围为 1~316)，则在使用式 (1) 计算得到 n 之后，可得到该像素点的互相关速度：

$$v_k^{\text{EIT}} = \frac{Lf_s}{n} \quad (2)$$

其中 L 为两圈电极传感器的间距， m ； f_s 为电阻层析成像系统的图像采集频率，Hz。上述互相关速度为气相速度，因为在该研究中，所测试的流动流型为弹状流，此时液相为连续相，气相为离散相。

2.3 漂移流模型

气液两相垂直向上管流情况下，漂移流模型的基本形式为

$$v_g = C_0 v_m + v_d \quad (3)$$

其中 v_g 为截面气相平均速度，m/s； C_0 为分布系数； v_m 为混合速度，m/s； v_d 为气相漂移速度，m/s。

Zuber & Findlay 给出 C_0 的值为 1~1.5^[3]；Ansari、Hasan & Kabir^[7-8] 建议在泡状流和弹状流下 C_0 取值 1.2，在环雾流下应趋近于 1。在该研究中，由于测试工况下流型为弹状流，所以 C_0 取值为 1.2。

Harmathy^[16] 推导了气相漂移速度的表达式，建议 v_d 取值 $1.53v_c$ ，特征速度 v_c 的定义为：

$$v_c = \left[\frac{\sigma_{gl}g(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right]^{1/4} \quad (4)$$

其中， σ_{gl} 为气液表面张力，N/m； g 为重力加速度，m/s²； ρ_l 、 ρ_g 分别为液相和气相的密度，kg/m³。

2.4 段塞参数提取

在垂直管流流型图中，弹状流位于中间位置，与其他流型存在过渡边界，对它的研究具有重要意义。弹状流是一种非常不稳定的流型，参数变化剧烈，测量难度大，在两相流建模计算中，段塞参数如液塞的长度及分布规律等通常都依靠经验关系式来进行估算。

该研究建立了一种基于电阻层析成像技术的弹状流特征参数提取方法，主要步骤包括：①通过图像重建得到不同时刻在管道同一横截面处测得的横截面流

动图像；②将不同时刻的二维横截面图像按时间顺序排列，得到“2 维空间+1 维时间”的组合三维流动图像；③通过互相关速度计算得到气塞的速度；④根据气塞速度、图像间时间间隔将时间轴转换为空间轴，从而将组合三维流动图像转换为三维空间图像；⑤为了处理方便，根据流动的对称特性，截取二维轴截面图像进行分析，得到液塞、气塞的长度分布、频率等参数。

该研究中电极传感器安装在流动发展已比较充分的位置，流经此处的气液流动结构比较稳定，因此，使用该方法得到的三维空间图像与真实的三维空间流体结构偏差较小。该方法直接基于图像分析，可显著提高所测参数的准确性。

3 结果与分析

3.1 图像重建结果

图 4 给出了部分重建图像的例子，这些流动图像的测试流动工况是 $Q_w=3 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q_a=30 \text{ L}/\text{min}$ (SLPM)。上部的 5 幅圆形图像为上游 EIT 传感器得到的管道横截面重建图像，每幅图像的采集时间为 1/863 s，下部的水平图像为 1 s 时间跨度的轴截面图像，它是由在 1 s 时间内采集的 863 双幅横截面图像依次排列组成三维组合图像后再截取垂直轴截面图像而来。轴截面图像也有上下两部分，分别由 EIT 上游传感器和下游传感器得来。图像中蓝色部分代表低电导率即高含气区域，黄绿色部分代表高电导率即高含水区域。横截面图像在轴截面图像中的位置也在图中标出，由图可见，从横截面图像对流型、流动结构尺度等进行分析比较困难，而从轴截面图像就直观的多，图中可清晰见到 2 个气塞先后通过上下游电极圈的过程。有鉴于此，在后续的段塞尺度特征分析中，也以轴截面图像为基础。需要指出的是，此处的轴截面图像横向长度与纵向长度的比例并非真实空间比例。

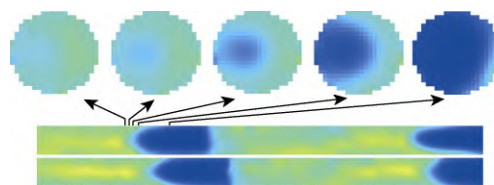


图 4 $Q_w=3 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q_a=30 \text{ L}/\text{min}$ (SLPM) 工况下的部分横截面和轴截面重建图像

3.2 互相关速度计算结果

基于横截面图像进行点对点的互相关计算之后，就可以得到横截面上的轴向速度分布，如图 5 所示，该图像是在工况 $Q_w=3 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q_a=20 \text{ L}/\text{min}$ (SLPM) 下得到的。

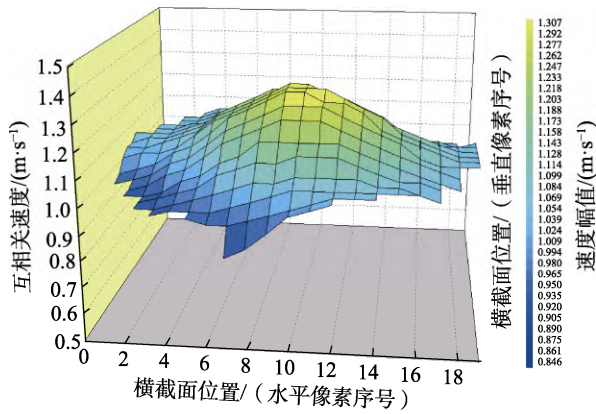


图5 $Q_w=3 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q_a=20 \text{ L}/\text{min}$ (SLPM) 工况下的横截面轴向分布

考虑到对称性和对比方便, 将横截面速度分布沿周向平均, 得到速度沿半径的剖面图, 如图 6 所示, 其中横坐标 r/D 为无因次径向坐标, r 代表管道横截面内该位置离管道中心的距离, D 代表管道内径。每幅图包含相同液相流量、4 种不同气相流量下的气相速度剖面图, 可见所有曲线都呈中央高边缘低的形态分布。对比图 6(a)—6(c) 中不同液相流量、相同气相流量下的曲线, 可见随着液相流量变小时, 曲线分布更加平坦, 这是由于此时气塞在横截面内的尺度更大造成的。

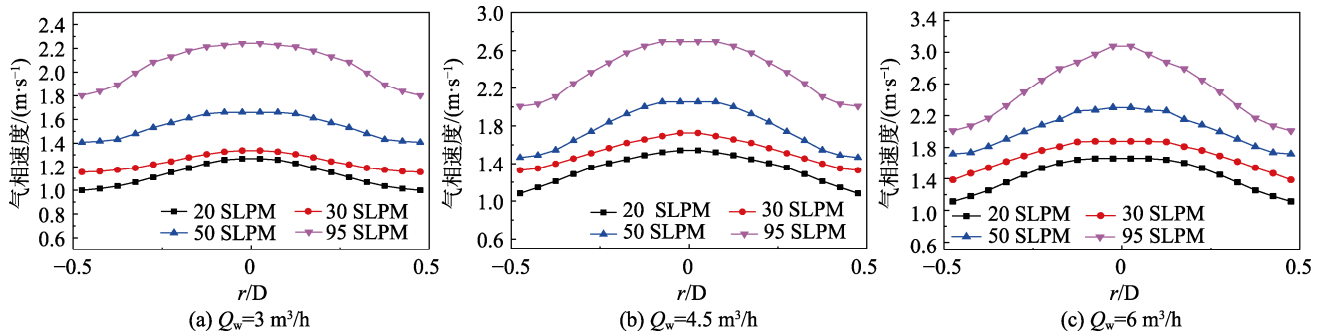


图6 不同工况下的气相速度剖面图

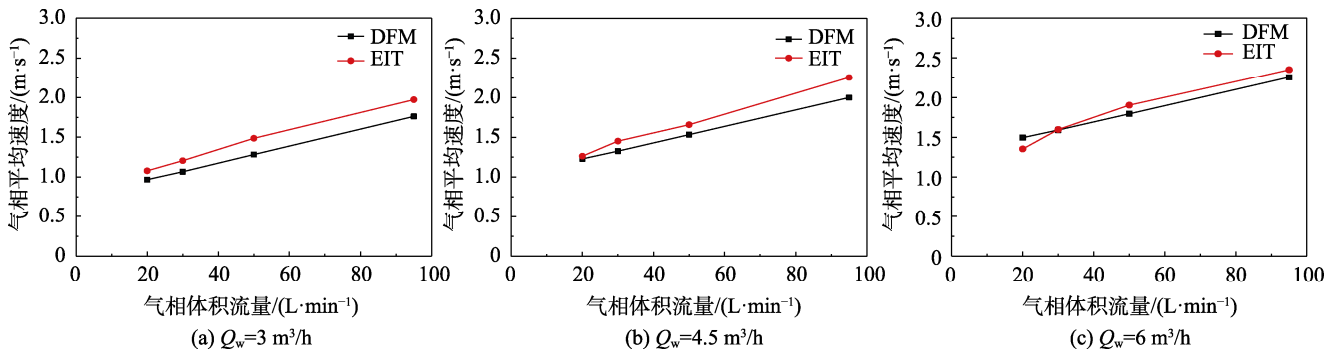


图7 不同工况下的气相截面平均速度

3.4 段塞长度与频率

按照节 2.4 的方法得到正确比例的空间二维轴界面图像后, 在图中测量代表每个段塞长度的水平像素

3.3 漂移流模型计算结果与互相关速度计算结果对比

使用漂移流模型计算气相截面平均速度时, 首先根据压力、温度传感器数据得到每种工况下的平均压力和温度, 再根据状态方程得到气相密度和实际体积流量, 然后计算混合流速。由于测试中管道流体温度在 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 上下, 所以取液相密度 $\rho_l=995.6 \text{ kg}/\text{m}^3$, 气液表面张力 $\sigma_{gl}=0.071 \text{ N}/\text{m}$, 重力加速度 $g=9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ 。再由式 (3) 和 (4) 即可得到每种工况下的气相截面平均流速。为了将漂移流模型速度计算结果与互相关速度计算结果进行对比, 将横截面的互相关速度分布取算数平均, 然后将同一液相流量、不同气相流量下的结果显示在同一幅图中, 如图 7 所示, 图例中 EIT 代表基于 EIT 图像重建数据进行互相关计算再进行平均后得到的横截面气相平均速度, DFM 代表应用漂移流模型计算得到的横截面气相平均速度。可见: ①绝大多数工况下互相关速度计算的结果都要大于漂移流模型计算结果, 这是因为互相关速度计算时高估了近壁面区域的速度, 这一区域的流速按照无滑移假设应该趋向于 0; ②随着液相速度的提高, 两者的差距逐渐变小, 这是由于液相速度提升引起混合流速提高, 此时两相间速度滑差减小。

数, 再与代表管径 (0.05 m) 的垂直像素数相比较, 就可得到每个段塞的长度。图 8 给出了一个气塞长度测量的例子, 该轴截面图像的测试流动工况与图 4 相同。



图8 气塞长度测量示例 ($Q_w=3 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q_a=30 \text{ L}/\text{min}$ (SLPM) 下 1 s 内流动图像)

该研究对每种流动工况下 9 s 时间内的流动图像进行了气塞总数统计,并对每个气塞进行了长度测量。

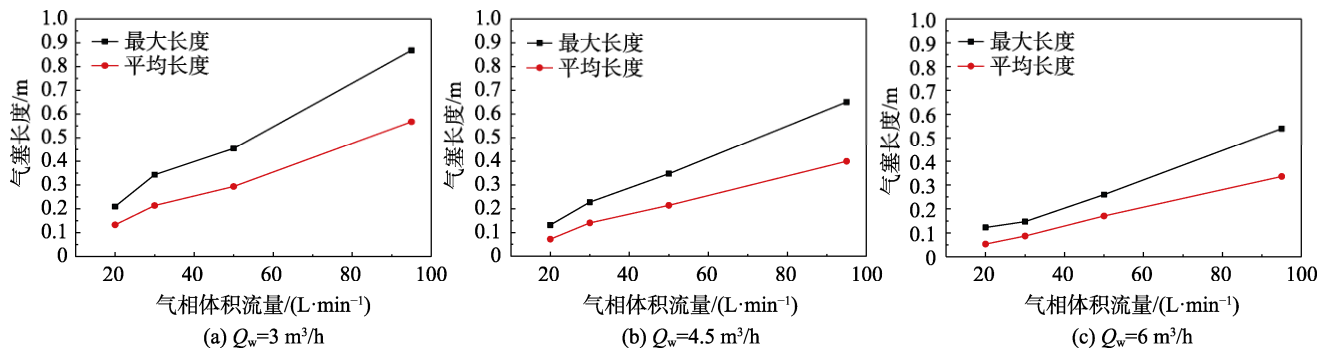


图9 不同工况下的气塞最大长度和平均长度

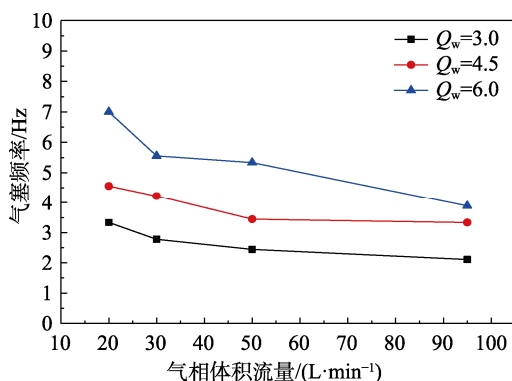


图10 不同工况下的气塞频率

4 结语

该研究采用快速电阻层析成像技术对垂直向上气液管流中的弹状流进行了深入研究,得到主要结论如下:

(1) 基于横截面重建图像得到的互相关速度数值略高于漂移流模型计算的结果,但随着液相流量的增加,两者趋于一致。

(2) 使用互相关速度结果将空间和时间组合的 EIT 重建图像转换为真实比例的三维空间图像,然后成功获取了段塞长度、频率等特征信息。结果显示,气相流量增加或液相流量减小可导致气塞长度增加和气塞频率降低。

综上所述,电阻层析成像技术是一种强有力的两相流场测量技术,通过对流动结构细节的重现,可增加对两相流流动机理的深入了解,促进两相流计算模型的优化设计。

据此可得到气塞的频率、最大长度、平均长度、分布规律等信息,同理也可以得到液塞的类似信息。图 9 给出了各工况下气塞的最大长度和平均长度,可见气相流量的增加、液相流量的减小均会导致气塞最大长度和平均长度的增加。图 10 给出了不同工况下的气塞频率,可见随着气相体积流量的增加,气塞频率逐渐降低,而液相体积流量增加时,气塞频率上升。

参考文献 (References)

- [1] HETSRONI G. Handbook of multiphase systems[M]. Washington: Hemisphere publishing corporation, 1982.
- [2] WILLIAMS R A, BECK M S. Process tomography-principles, techniques and applications[M]. Stoneham: Butterworth-heinemann, 1995.
- [3] ZUBER N, FINDLAY J. Average volumetric concentration in two-phase flow systems[J]. Heat Transfer Trans ASME, 1965, 87: 453-468.
- [4] BANKOFF S G. A variable density single fluid model for two-phase flow with particular reference to steam-water flow [J]. Heat Transfer Trans ASME, 1960, 82: 265-272.
- [5] WALLIS G B. One-dimensional two-phase flow[M]. New York: McGraw Hill, 1979.
- [6] ISHII M. One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes[R]. Argonne Illinois: Argonne National Lab Report, ANL 77-47.
- [7] HASAN A R, KABIR C S. Aspects of heat transfer during two-phase flow in wellbores[J]. SPE Prod & Faci, 1994, 9(3): 211-216.
- [8] HASAN A R, KABIR C S, WANG X. A robust steady-state model for flowing-fluid temperature model in complex wells [J]. SPE Prod & Oper, 2009, 24(2): 269-276.
- [9] ODDIE G, SHI H, DURLOFSKY, et al. Experimental study of two and three phase flows in large diameter inclined pipes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2003, 29: 527-558.
- [10] SHI H, HOLMES J A, DURLOFSKY, et al. Drift-flux modeling of two-phase flow in wellbores[J]. SPE Journal, 2005, 10(1): 24-33.

(下转第 28 页)

- responsive phototherapy[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2018, 7(20): 1800351.
- [7] 梁锐, 李明阳, 高翔鹏, 等. 选矿废水中残留黄药光催化处理及降解效率改进方式研究进展[J]. *过程工程学报*, 2022, 22(1): 1-13.
- LIANG R, LI M Y, GAO X P, et al. Research progress on photocatalytic treatment of residual xanthate in mineral processing wastewater and improvement of degradation efficiency[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2022, 22(1): 1-13. (in Chinese)
- [8] 杨焯鹏, 李懿舟, 王家强, 等. 光催化技术在处理废水中的规模化应用[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(3): 565-571.
- YANG H P, LI Y Z, WANG J Q, et al. Large-scale application of photocatalytic technology in wastewater treatment[J]. *Journal Of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2019, 41(3): 565-571. (in Chinese)
- [9] SINGH R, DUTTA S. A review on H₂ production through photocatalytic reactions using TiO₂/TiO₂-assisted catalysts[J]. *Fuel*, 2018, 220(15): 607-620.
- [10] 陈春飞. 改性 TiO₂ 光催化氧化硫化矿浮选捕收剂的研究[D]. 南昌: 江西理工大学, 2016.
- CHEN C F. Study on photocatalytic oxidation of sulfide ore flotation collector by modified TiO₂[D]. Nanchang: Jiangxi University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [11] 杨国英, 张洪. 煅烧温度对 TiO₂ 晶型转变的促进作用研究[J]. *化学工程与装备*, 2019(6): 16-18, 22.
- YANG G Y, ZHANG H. The influence of calcination temperature on the crystal transition of TiO₂[J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2019(6): 16-18, 22. (in Chinese)
- [12] SUN Q, HU X, ZHENG S, et al. Influence of Calcination Temperature on the Structural, Adsorption and Photocatalytic Properties of TiO₂ nanoparticles Supported on natural Zeolite[J]. *Powder Technology*, 2015, 274: 88-97.
- [13] ZHANG J, YANG S, FU L, et al. Photocatalytic degradation of rhodamine B on anatase, rutile and brookite TiO₂[J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2011, 32(6): 983-991.

(编辑: 张利芳)

(上接第 22 页)

- [11] 张立峰, 王智. 基于多元经验模态分解与卷积神经网络的气液两相流型识别[J]. *计量学报*, 2023, 44(1): 73-79.
- ZHANG L F, WANG Z. Flow pattern recognition method of gas-liquid two-phase flow based on multiple empirical mode decomposition and convolution neural network[J]. *ACTA Metrologica Sinica*, 2023, 44(1): 73-79. (in Chinese)
- [12] 仝卫国, 曾世超, 李芝翔, 等. 基于 LSTM 的气液两相液相流量测量方法[J]. *仪表技术与传感器*, 2021(11): 94-98.
- TONG W G, ZENG S C, LI Z X, et al. Liquid phase flow measurement method of gas-liquid two-phase flow based on LSTM[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2021(11): 94-98. (in Chinese)
- [13] HOU L T, YANG M, WANG L S, et al. Three-dimensional interface structures and characteristics in a stratified gas-liquid pipe flow[J]. *Chemical Engineering Science*, 2023, 277: 1-23.
- [14] YAN P, JIN H B, TAO F F, et al. Flow characterization of gas-liquid with different liquid properties in a Y-type microchannel using electrical resistance tomography and volume of fluid model[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2022, 136: 1-18.
- [15] WANG M, MA Y, HOLLIDAY N, DAI Y, et al. A High-performance EIT System[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, 5(2): 289-299.
- [16] HARMATHY T Z. Velocity of large drops and bubbles in media of infinite and restricted extent[J]. *AIChE Journal*, 1960, 6: 281-288.

(编辑: 张利芳)