

水平管气液两相泡状流入口段流速场的实验研究

杨 建¹, 张鸣远², 李荣先¹, 侯洪宁², 苏玉亮²

(1. 深圳清华大学研究院, 518057, 深圳; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 用热膜测速技术对水平管气液两相泡状流入口段中的液流速度及局部含气率分布进行了研究. 实验时液流折算速度为 3.5 ~ 4.0 m/s, 气流折算速度为 0 ~ 0.44 m/s. 结果表明, 在入口段中液流速度随液流折算速度的增加而增加, 随气流折算速度的增加而分布更不均匀. 含气率随气流折算速度的增加而增加, 随液流折算速度增加分布趋于均匀. 在本实验范围内, 当实验测试段长度与管径比 L/D 大于 109 后, 液流速度和局部含气率的分布随 L/D 的变化已不很明显, 可认为达到充分发展区域.

关键词: 泡状流; 入口段; 流速场; 相分布

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)03 - 0254 - 04

Velocity Distribution in the Entry Region of a Horizontal Air-Water Bubbly Flow

Yang Jian¹, Zhang Mingyuan², Li Rongxian¹, Hou Hongning², Su Yuliang²

(1. Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An experimental study of the velocity distribution in the entry region of a horizontal air-water bubbly flow was presented, where hot-film anemometry technique was applied to the measurements of local liquid velocities and void fractions, and the superficial liquid velocities were taken as 3.5 ~ 4.0 m/s, and the superficial air velocities as 0 ~ 0.44 m/s. The experimental result indicates that the liquid velocity near the region increases with the increasing superficial one, and distributes more asymmetrically. The local void fraction increases with accelerated gas flow and the distribution tends more symmetrical. In the experimental region, where the ratio of the length to diameter L/D is larger than 109, the liquid velocity and void fraction profiles doesn't obviously vary with L/D , which means that a fully developed state is achieved.

Keywords: bubbly flow; developing length; liquid velocity; void fraction

当流体从一个容腔(或管道)流进另一个容腔(或管道)时,流体的流动速度和压力等特性将发生变化,经过一段长度后,即可达到稳定状态.通常将流动特性发生了改变的那一部分管段称为进口起始段或入口段,而后一部分称为完全发展段,流动特性发生改变的那一段长度称为入口段长度.

Salcudean 等人^[1~3]用实验方法研究了气液两相流通过水平管和垂直管中的圆形、扇形和环形等障碍物时的入口段长度,结果表明,对泡状流为 30 L/D 左右(L 为被测截面距入口处的距离, D 为实

验段的内径),对环状流为 15 L/D . Hrringe 等人^[4]用电导探针测量了垂直管环状流中 108 L/D 以前的流动,发现流动结构主要由气液两相流量决定. Kocamuslafaogullari 等人^[5]在水平管泡状流中用双头电导探针研究了 $L/D = 25, 148, 253$ 三个截面的流动状态,指出第一截面位于入口段中,后两个截面位于充分发展段中. Warren 等人^[6]对气液两相泡状流流过轴对称孔板的入口段做了系统的研究,指出壁面切应力入口段的长度在 8 $L/D \sim 15 L/D$ 之间.作者曾对水平管泡状流中采用轴向进气和径向

进气两种形式的混合器对壁面切应力入口段的影响进行了研究^[7],结果表明壁面切应力入口段长度在 $30 L/D \sim 40 L/D$.

本文在水空气实验回路上对水平管内气液两相泡状流入口段中液流速度分布、含气率分布进行了实验研究,发现入口段中液流速度分布随 L/D 的变化规律主要与局部含气率的分布规律密切相关.当含气率分布达到充分发展时,液流速度分布即达到充分发展,入口段的长度可认为是 $109 L/D$.

1 实验装置及测试系统

1.1 实验装置

实验系统如图1所示,水由一台离心泵提供.水流量通过孔板流量计测量,数据通过1151差压变送器读出.孔板流量计实验前用称重法进行了严格的标定,误差小于3.9%.压缩空气通过一台滑片式空气压缩机提供.气体流量由玻璃管浮子流量计测量,精度为2.7%.水和压缩空气经混合器混合后进入实验段.

实验中所用混合器的结构如图2所示.在混合器中与实验段内径相同的有机玻璃管管壁上均匀地打了16排孔径为0.3 mm的小孔,每一排等间隔地分布8个小孔,气流通过小孔沿径向进入管道.混合器与管道通过法兰连接.

实验段为内径35 mm、外径45 mm、长10 m的透明有机玻璃管,测量截面分别取在混合器后 $23D$ 、 $52D$ 、 $109D$ 、 $143D$ 和 $172D$ 5个截面处.图2中混合器上标注的 $L/D = 0$ 截面即视为入口段的起点.截面上的测点分布如图3所示.在实验段尾部有一快关阀用于测量体积含气率.

实验参数如下:液体折算速度 $j_l, 3.5 \sim 4.5 \text{ m/s}$; 气体折算速度 $j_g, 0 \sim 0.44 \text{ m/s}$; 体积含气率, $0 \sim 0.12$; 绝对压强, $214 \sim 319 \text{ kPa}$; 水温 $28 \text{ }^\circ\text{C}$.

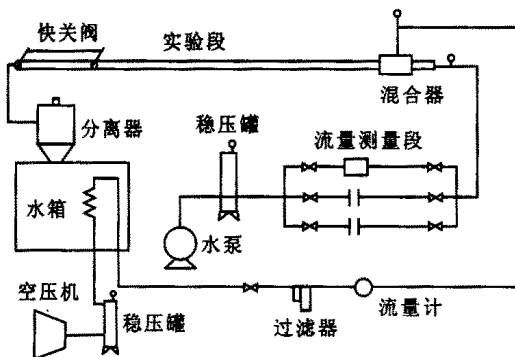


图1 水平管气液两相泡状流实验系统

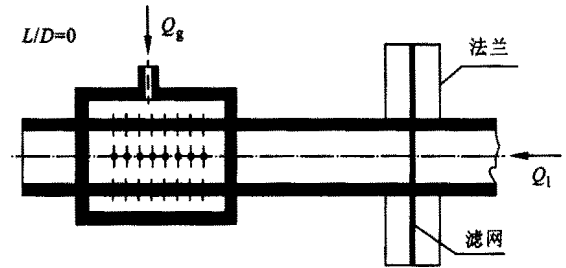


图2 实验用的混合器

1.2 气液两相测量

TSI-100 恒温热膜测速仪的测试系统如图4所示.流体速度的变化使探头产生的电压信号经 TSI-100 放大处理后,输入 IFA-200 进行 A-D 转换,然后输入计算机.采得的电压信号通过自编的程序对其进行相鉴别和处理.

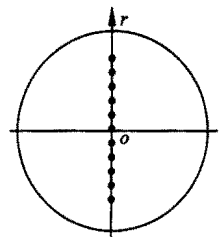


图3 截面上的测点分布

热膜测速技术不仅可对含气水流的时均流速、紊流强度进行量测,而且还可测量局部含气率与气泡尺寸、气泡相对液相的运动速度等等.通过对测得的电压信号的处理分析,便可得到液相的相对时均速度、脉动流速、含气率与气泡尺寸等重要参数.本文用此方法测量了水平管内气液两相泡状流中混合器后入口段中的液流速度和局部含气率分布.

若采样时间为 T , 探针在气相中的时间为 T_g , 则某一点局部含气率的简单估算式为

$$= T_g / T \quad (1)$$

式中: α 为局部含气率.一般情况下,特别是 α 较大时,难于由热膜测速仪输出信号直接确定 T_g 的大小.

如将气相部分滤掉,就可以用其计算当地平均液流速度等参数.

平均轴向速度可用以下公式计算

$$U_{\text{mean,local}}(r) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_k(r) \quad (2)$$

式中: $U_k(r)$ 是第 k 个数据点的液相瞬时轴向速度, $k = 1, \dots, N$; N 是采样点的总数量.

2 实验结果及分析

图5为单相液流的速度分布.图中 r 为被测点

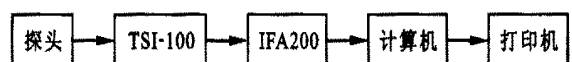


图4 TSI-100 热膜测速仪示意图

在截面上的位置坐标(见图3), R 为实验段半径. 在单相液流情况下, 该混合器即为一直管, 速度分布直接受混合器上游滤网的影响. 入口段起点应从滤网算起, 图中虚线为 $1/7$ 次方指数分布规律. 显然, 当 $L/D = 109$ 时速度分布已与该曲线很接近, 最大偏差点的液流速度仅相差 2.9% , 此处即可认为已达到充分发展.

图6给出了混合器后各截面上液流速度沿径向的分布(铅垂方向). 由图可见, 在 $L/D = 23$ 处由于混合器进气方式是轴对称的, 所以在距混合器不远处液流速度分布从管下壁到管上壁的变化还较弱, 只是略有减小, 速度分布还比较均匀. 随着 L/D 的增大, 受浮力影响, 气泡逐渐向管道上部聚集, 速度分布的不均匀程度急剧增大, 到 $L/D = 109$ 后变化相对减缓, 液流速度在管道下部已基本与 $L/D = 172$ 处的重合, 在管道上部液流速度最大偏差点也仅差 5.0% , 可认为已达到液流速度分布的充分发展区.

图7和图8给出了 $L/D = 52$ 截面上液流速度随气流折算速度和液流折算速度的变化规律. 由图7可见, 随气流折算速度的增大, 靠管道上部的液流速度变小, 靠管道下部的液流速度变大. 这主要是因为气泡受浮力作用向管道上部聚集, 将液体挤到管道下部所致. 由图8可见, 随着液流折算速度的增加, 液流速度的分布曲线形状变化不大, 只是数值有明显增加.

局部含气率在铅垂直径方向的分布与液流速度分布在管道上、下部有相反的趋势(见图9~图11). 它的分布也是随着 L/D 的增大而越来越不均匀, 在 $L/D > 109$ 后这种变化趋势明显减缓. 含气率的分

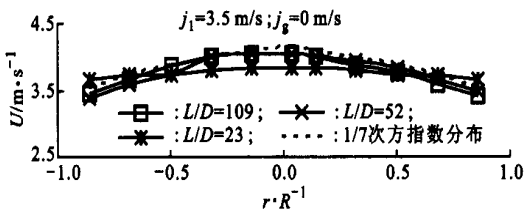


图5 单相液流入口段中的速度分布

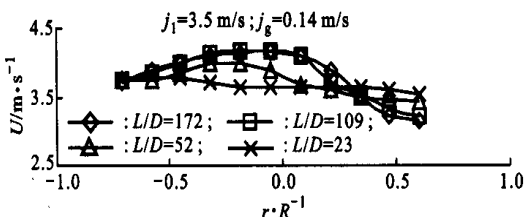


图6 入口段中的液流速度分布

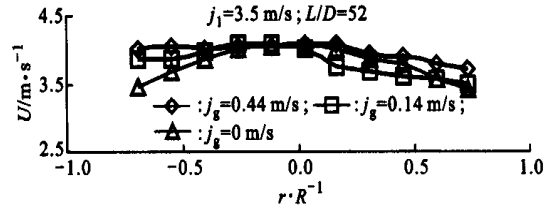


图7 液流速度分布随气流折算速度的变化

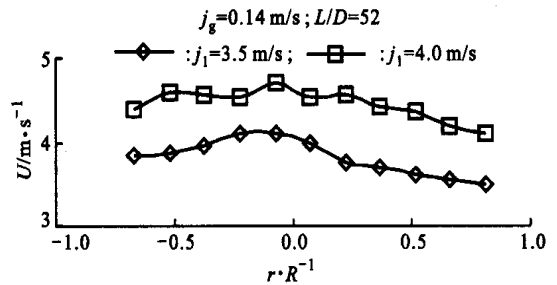


图8 液流速度分布随液流折算速度的变化

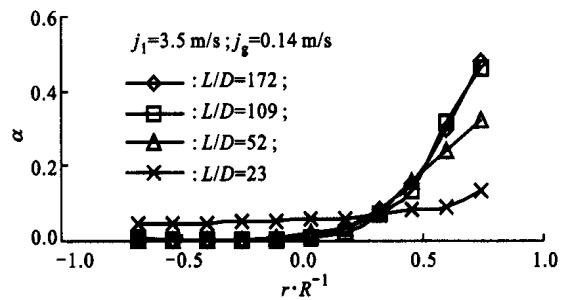


图9 入口段中的局部含气率分布

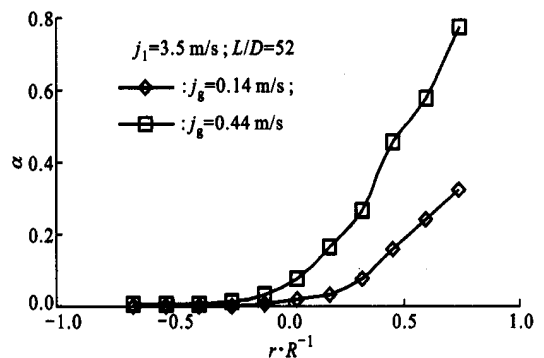


图10 含气率分布随气流折算速度的变化

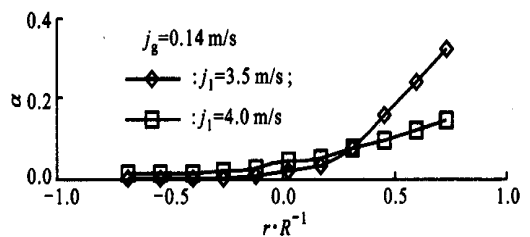


图11 含气率分布随液流折算速度的变化

布是越靠近管道上部,其数值越大.当液流速度不变时,在同一截面上含气率分布随气流折算速度的增加而明显增大(图10);当气流折算速度不变时,随着液流折算速度的增加,含气率沿径向的分布趋于均匀(图11).

3 结论

本文对气液两相泡状流混合器后入口段中液流速度及局部含气率分布进行了实验研究.结果表明,在入口段中受气泡的影响,液流速度入口段长度要比单相液流的长.由于气泡趋于向管道上部集中,随气流折算速度增大截面上的液流速度分布在管上部将减小,在下部将增大;在本实验范围内,液流折算速度的增加对液流速度的大小有明显影响,而对分布曲线的形状影响不大.随气流折算速度的增加,气相在管上部占据的空间份额也将随之增加,从而使截面上部含气率明显增大,同时使分布曲线形状发生显著改变;随着液流速度的增大,截面上液相所占份额将增大,从而使液流速度沿径向分布更加均匀.随着 L/D 的增加,液流速度分布和含气率分布都趋于稳定.在本实验参数范围内,可认为入口段长度 $L/D > 109$.

参考文献:

[1] Salcudean M, Groeneveld D C, Leung L. Effect of flow

obstruction geometry on pressure drops in horizontal air-water flow [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1983, 9(1): 73 ~ 85.

[2] Salcudean M, Chun J H, Groeneveld D C. Effect of flow obstruction geometry on the flow pattern transitions in horizontal two-phase flow [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1983, 9(1): 87 ~ 90.

[3] Salcudean M, Chun J H, Groeneveld D C. Effect of flow obstruction geometry on void distribution in horizontal air-water flow [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1983, 9(1): 91 ~ 96.

[4] Herringe R A, Davis M R. Structural development of gas-liquid mixture flows [J]. *J Fluid Mech*, 1976, 73(1): 97 ~ 123.

[5] Kocamustafagullari G, Huang W K, Razi J. Measurement and modeling of average void fractions, bubble size and interfacial area [J]. *Nucl Eng Des*, 1994, 148(2/3): 437 ~ 453.

[6] Warren B A, Klausner J F. Developing lengths in horizontal two-phase bubbly flow [J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1995, 117(3): 512 ~ 518.

[7] 杨建,张鸣远,张超杰,等.水平管内气液两相流泡状流进口段的实验研究[J].*西安交通大学学报*, 2001, 35(9): 895 ~ 898.

(编辑 荆树蓉)

(上接第253页)

(3) 氧气量的大小是决定 NO_x 生成量的主要因素之一,从 r_{O} 为6.0开始,随着氧气量的增加, N_2O 的生成量急剧增加.缺氧状态下,在CO含量较高的还原气氛中, NO_x 的生成将会在很大程度上受到抑制.温度也是决定 NO_x 生成的主要因素,当温度高于850 时, N_2O 向 NO 、 NO_2 转化,当温度大于1 000 时, N_2O 全部转变为 NO 、 NO_2 .

(4) 在650 ~ 850 的温度范围内,吡啶氧化时大量生成 N_2O ,热解过程中大量生成腈类物质,这2个驼峰的温度范围、形状、位置均十分相像.有关腈类物质与 N_2O 的内在关系有待进一步研究.

参考文献:

[1] 毛健雄,毛健全.煤的清洁燃烧[M].北京:科学出版社,1998.

[2] Schafer S, Bonn B. Hydrolysis of HCN as an important

step in nitrogen oxide formation in fluidised combustion: part 1 [J]. *Fuel*, 2000, 79(10): 1 239 ~ 1 246.

[3] 冯志华,常丽萍.煤热解过程中氮的分配及存在形态的研究进展[J].*煤炭转化*, 2000, 23(3): 6 ~ 11.

[4] 刘艳华,车得福,李荫堂,等.X射线光电子能谱确定铜川煤及其焦中氮的形态[J].*西安交通大学学报*, 2001, 35(7): 661 ~ 665.

[5] Lifshitz A, Tamburu C, Suslensky A. Isomerization and decomposition of pyrrole at elevated temperatures: study with a single-pulse shock tube [J]. *J Phys Chem*, 1989, 93(15): 5 802 ~ 5 808.

[6] Axworthy A E, Dayan V H, Martin G B. Reactions of fuel-nitrogen compounds under conditions of inert pyrolysis [J]. *Fuel*, 1978, 57(1): 29 ~ 35.

[7] 钟北京,付维标.燃烧过程中快速型氧化氮形成机理及影响因素[J].*燃烧科学与技术*, 1997, 3(4): 388 ~ 393.

(编辑 王焕雪)