

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20161726

水平管内多孔板后的气液两相流型可视化实验

彭杰伟¹, 马有福^{1,3}, 吴恒亮², 吕俊复³, 刘媛², 彭安², 焦乾峰¹

(¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093; ²中国船舶重工集团公司第七一一研究所, 上海 200090;

³清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 多孔板后是否形成均匀分散的泡状流型是影响多孔板废气吸收装置吸收效果的关键因素。以空气和水作为两相介质, 对气液两相混合物在水平管内流经多孔板后形成的流型进行实验。通过孔径分别为 2、3、4、5 mm 的 4 只多孔板在内径 98.5 mm 水平有机玻璃管内的可视化流动及高速摄像, 研究了孔径大小、气相流量变化及液相流量变化对多孔板后流型的影响规律。实验结果表明: 水平管内插入多孔板后, 分层/塞状流转变边界向液相流量增大方向推移, 塞状/泡状流转变边界向液相流量减小方向推移; 随气相流量减小或液相流量增大, 多孔板后流型趋于形成泡状流; 孔径大小对多孔板后流型具有重要影响, 减小孔径使塞状/泡状流转变边界移向更大气相流量和更小液相流量, 即形成泡状流的两相流量范围增大; 随孔径减小, 孔板后流型趋于由分层流直接过渡至泡状流, 塞状流趋于消失。为保证多孔板吸收装置的良好流型和吸收效果, 建议多孔板孔径不大于 3 mm。

关键词: 气液两相流; 气泡; 孔板; 流动; 流型; 可视化实验

中图分类号: O 359⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2017) 06—2266—09

Visualization study on flow pattern of gas-liquid two-phase flowing through multi-orifice plate in horizontal pipe

PENG Jiewei¹, MA Youfu^{1,3}, WU Hengliang², LÜ Junfu³, LIU Yuan², PENG An², JIAO Qianfeng¹

(¹School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090, China; ³Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Producing a bubble flow in multi-orifice plate downstream (MOPD) is a basic condition for the exhaust absorber with multi-orifice plates to achieve a satisfied absorption capacity. In this paper, a visualization experiment on the flow pattern of gas-liquid two-phase flowing through a multi-orifice plate in a horizontal pipe was conducted using the air and water as the gas and liquid phase, respectively. Four multi-orifice plates with the orifice diameter of 2, 3, 4 and 5 mm were tested in a horizontal plexiglass pipe with the inner diameter of 98.5 mm by using a high speed camcorder to record the air-water flow, thus the effects of orifice diameter, air flow rate and water flow rate on the flow pattern in the multi-orifice plate downstream were obtained. The results show that the stratified/plug flow transition in MOPD shift to an increased water flow rate while the plug/bubble flow transition shift to a decreased water flow rate in comparison with the flow pattern transition in horizontal pipes. The flow pattern in MOPD is inclined to a bubble flow with the decrease of air flow rate or the increase of water flow rate. Meanwhile, an important dependence on the orifice diameter is found for the flow pattern in MOPD. With the decrease of orifice diameter, the plug/bubble flow transition shift to an increased air flow rate and a decreased

2016-12-09 收到初稿, 2017-03-13 收到修改稿。

联系人: 马有福。第一作者: 彭杰伟 (1993—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0600201)。

Received date: 2016-12-09.

Corresponding author: MA Youfu, imayoufu@163.com

Foundation item: supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFB0600201).

water flow rate, meaning that an increased flow range is obtained to form bubble flow. In addition, as the orifice diameter decreasing, the flow pattern in MOPD is inclined to transfer from wavy stratified flow to bubble flow directly without an occurrence of plug flow. To achieve a satisfied flow pattern and absorption capacity for the exhaust absorber with multi-orifice plates, it is recommended to choose the orifice diameter not larger than 3 mm.

Key words: gas-liquid flow; bubble; orifice plate; flow; flow pattern; visualization experiment

引 言

对水平管内气液两相流动流型已有较为成熟的认识,如 Baker^[1]、Mandhane^[2]以及 Weisman 流型图^[3]等,已在工程设计中得到广泛应用。流型识别主要是通过可视化观察和图像分析,也有基于压差波动和含气率波动的实验方法^[4-5]。影响流型的参数有很多,如气液两相流量、相含率、管径及入口形状等^[6],各因素对流型转变影响复杂,需进行更多深入研究。近期对管内流型的研究主要包括管子横截面尺度大小对管内流型转变边界的影响^[7-9],水平管内油气两相流流型转变机理与预测模型^[10-14],倾斜管、U 形弯管和螺旋管内气液两相流流型与转变特性^[15-19]以及螺旋管内油气水三相流^[20]和油水两相流流型^[21]。

近年来,出于强化气体吸收、防止传热恶化等需求,开始关注通过某种措施对管内流型进行改变和控制。王树立等^[22]实验研究了水平管内布置旋转叶轮时的气液两相流型,指出随着叶轮角度增大或者叶片面积减小流型转换边界均向气量增大的方向推移。Milan 等^[23]对垂直管入口分别布置球式混合器和同轴喷嘴的管内气液两相下降流动流型进行了实验研究,Qiao 等^[24]也比较了 3 种入口结构对垂直管内下降流动流型的影响,均得出入口结构对管内流型转换具有重要影响的结论。Farhad 等^[25]研究了管道旋转对垂直管内下降流型的影响,表明增大管道转速会使塞状流和环状流的转换边界向气相流量减小的方向偏移。Annamalai 等^[26]通过电阻层析成像法对水平管内槽式孔板后气液两相流动的均匀性进行了实验,指出在槽式孔板下游 1.5~2.5 倍管内径处两相流均匀性最佳,建议在此处设置流量测量装置。Li 等^[27]和 Jiang 等^[28]实验研究了压缩式制冷系统中的气泡吸收过程,比较了气相喷嘴孔径对垂直上升管内流型及气泡吸收的影响,指出当喷嘴孔径为 2.8 mm 时管内可观察到混状流、段塞流和泡状流 3 种流型,喷嘴孔径减小至 2.0 mm 时段塞流极少出现,喷嘴孔径减小至 1.0 mm 时段塞流完全

消失即混状流直接过渡至泡状流,气泡在上升管内的吸收效果随喷嘴孔径减小显著提高。

由此可见,管内气液两相流型可通过施加某种外部条件得到改变和控制,这对强化吸收、防止传热恶化及减小管路振动等工程应用具有重要意义。例如在一些特殊的船舶中,动力装置废气的隐蔽排放是关键性技术。这种废气的成分为 95% 的 CO₂ 和 5% 的 O₂,利用海水吸收废气从而消除气泡尾流对船舶安全至为关键^[29-31]。本工作提出采用多孔板作为吸收器元件,在多孔板后形成均匀分散的泡状流型和较小的气泡,达到强化废气吸收的目的。然而当前对水平管内节流装置后气液两相流型的研究很不充分,使得此类孔板吸收器的设计缺乏依据。为此,本工作对水平管内多孔板后的气液两相流型进行了可视化实验,为多孔板在气液两相流动中的应用提供研究基础。

1 实验系统及多孔板试件

1.1 实验系统与测点布置

实验系统如图 1 所示。实验中气液两相分别采用空气和水,空气由压气机注入实验管段,水由水箱提供并在实验系统中通过水泵循环使用。水箱在高度方向距离进气管中心 1 m 处设有溢流口,从而保持稳定的水箱内液位高度。水箱内设有高度为 0.8 m 的隔板使进水区和出水区分离,从而使进入水箱的气相从水箱顶部逸出而不进入循环水中。空气流量通过设置在进气管路上的调节阀调节,水流量通过控制水泵转速的变频控制柜调节。

为了满足流型观察的可视化要求,在注气管段后布置两段各 1 m 长的透明无色有机玻璃圆管。玻璃管内径为 98.5 mm,壁厚为 10 mm。多孔板通过定距拉杆固定在玻璃管段中。在多孔板上游管道内水平注入空气,注气口与多孔板相距 250 mm,注气口内径为 25 mm。采用 NAC GX-8F 高速摄像机对孔板前后的两相流动进行摄录和分析。

测点布置如图 1 所示。压缩空气的流量、压力和温度测点设置在进气管路上。在水循环管路

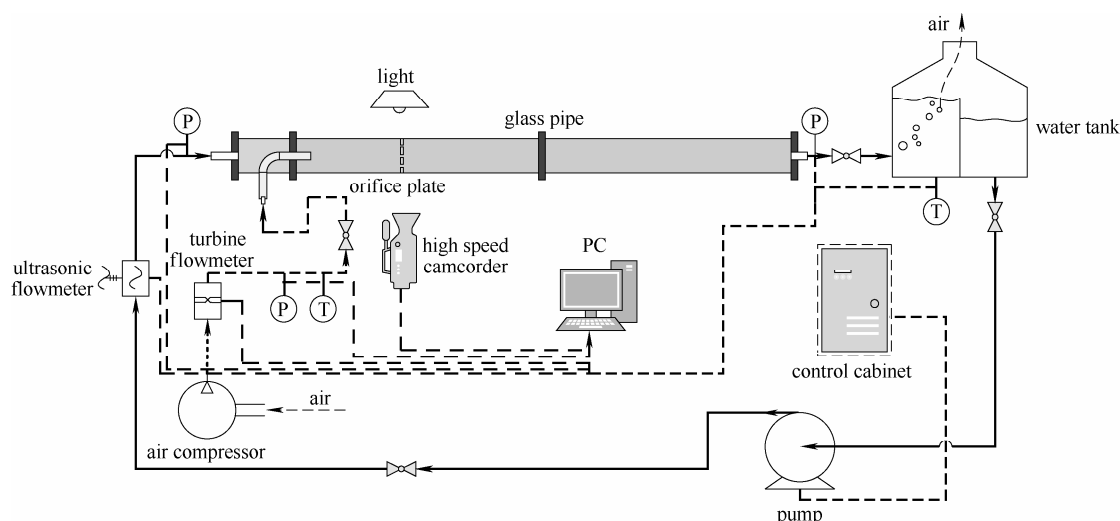


图 1 水平管内多孔板气液两相流动实验系统

Fig.1 Experimental system for air-water flowing through multi-orifice plates in horizontal pipe

上设置有水流量测点,在玻璃管段前、后的管路上设有压力测点,水温测点设置在水箱底部。各测量仪表的型号及参数见表 1 (其中空气流量 $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 是由串联在进气管路上的量程 $0.5 \sim 5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 浮子流量计 LZB-10L 测得)。各仪表输出的模拟信号由数据采集模块采集,再由 A/D 通讯模块输入计算机。

表 1 实验用仪表

Table 1 Meters for experiment

Measuring parameter	Measuring meter	Model of meter	Range of meter	Accuracy of meter
air flow rate	turbine flowmeter	LWQ-MK-25B	$1.5 \sim 15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	1.0
air pressure	pressure sensor	MIK-P300	$0 \sim 0.6 \text{ MPa}$	0.5
inlet water pressure	pressure sensor	MIK-P300	$0 \sim 100 \text{ kPa}$	0.5
outlet water pressure	pressure sensor	MIK-P300	$0 \sim 50 \text{ kPa}$	0.5
water flow rate	ultrasonic flowmeter	Endress+Hauser Prosonic Flow 91W	$6 \sim 60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	2.0
temperature of air and water	platinum resistance	Pt100	$0 \sim 100^\circ\text{C}$	0.5

1.2 多孔板试件

本实验中的多孔板主要区别于其小孔孔径 d 不同,分别为 2、3、4、5 mm。多孔板设计以小孔均匀布满整个孔板为原则,因此各个试件的小孔孔数也不同。4 个多孔板试件的实物如图 2 所示,结构参数见表 2。

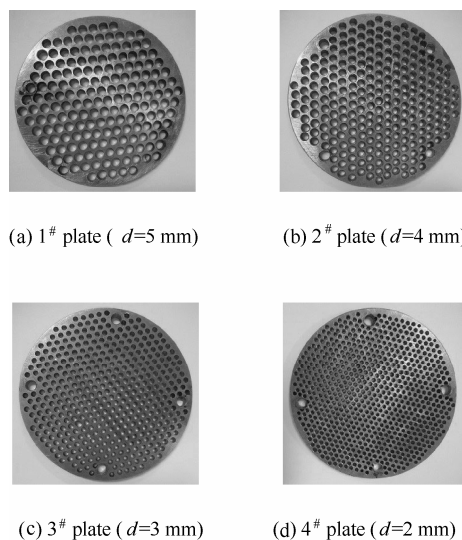


图 2 多孔板试件实物

Fig. 2 Pictures of tested multi-orifice plates

表 2 多孔板试件结构参数

Table 2 Geometric parameters of tested multi-orifice plates

Geometric parameters	1 [#] plate	2 [#] plate	3 [#] plate	4 [#] plate
orifice diameter d/mm	5	4	3	2
orifice spacing s/mm	6	5	4	3
number of orifices	172	259	412	744
thickness of plates δ/mm	5	5	5	5
equivalent diameter ratio of orifice's to pipe's	0.666	0.654	0.618	0.554

1.3 实验工况设计

为了分析气液两相各自流量变化对流型的影响,对空管和每个多孔板试件均设计了 8 个实验工

表3 两相流实验工况设计

Table 3 Tested conditions for air-water two-phase flow

Tested conditions	Water flow rate $Q_w / \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Water superficial velocity $J_w / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Air flow rate $Q_a / \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Air superficial velocity $J_a / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
(a)	45	1.6	1	0.04
(b)	45	1.6	3	0.11
(c)	45	1.6	5	0.18
(d)	45	1.6	7.5	0.26
(e)	45	1.6	10	0.35
(f)	15	0.6	5	0.18
(g)	30	1.1	5	0.18
(h)	55	2.0	5	0.18

况，见表3。

表3中的第1组工况(a)~(e)是在一定水流量 $45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 下改变空气流量；第2组工况(f)~(h)及(c)是在一定空气流量 $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 下改变水流量。实验时调节两相流量，使其尽量与该工况设计流量一致。与设计值相比，实验各工况下液相流量和气相流量的偏差分别在 $\pm 1.0\%$ 和 $\pm 6.0\%$ 以内。

2 流型实验结果

本工作对无孔板空管和4个多孔板进行了实验，每个试件均获得了8个工况的流型。

2.1 空管实验结果

图3为空管实验时注气口之后管内气液两相流动的发展过程。由图3可见，由于注气口布置在水管轴心位置，排气进入水流后随水流向前运动，同时也在浮力作用下向管子上部运动，最终集中在管子上部向前运动。排气进入水管后并非周期地形成单个气泡，而是在运动水流的黏性作用下形成一定长度的气柱。这股气柱在注气口后约150 mm处分裂破碎，形成尺寸不一的气泡，气泡受浮力作用富集在管子上部。当液相流量较小时，气液分层界面较为清晰；随液相流量和气相流量增大，气液分层界面趋于剧烈波动和紊乱，分散在管子下部水流中的气泡也趋于增多。

在远离注气口的第2段玻璃管中，气液两相流动在大部分工况下呈塞状流流型，如图4(a)中工况。但在液相流量较小时，呈现出气液分层界面清晰的分层流流型，如图4(b)中工况。这与水平管Weisman流型图的预测结果相符。

2.2 多孔板实验结果

图5~图8分别为1[#]~4[#]多孔板的管内流型，每个工况包含孔板前后流型及板后充分发展流型。

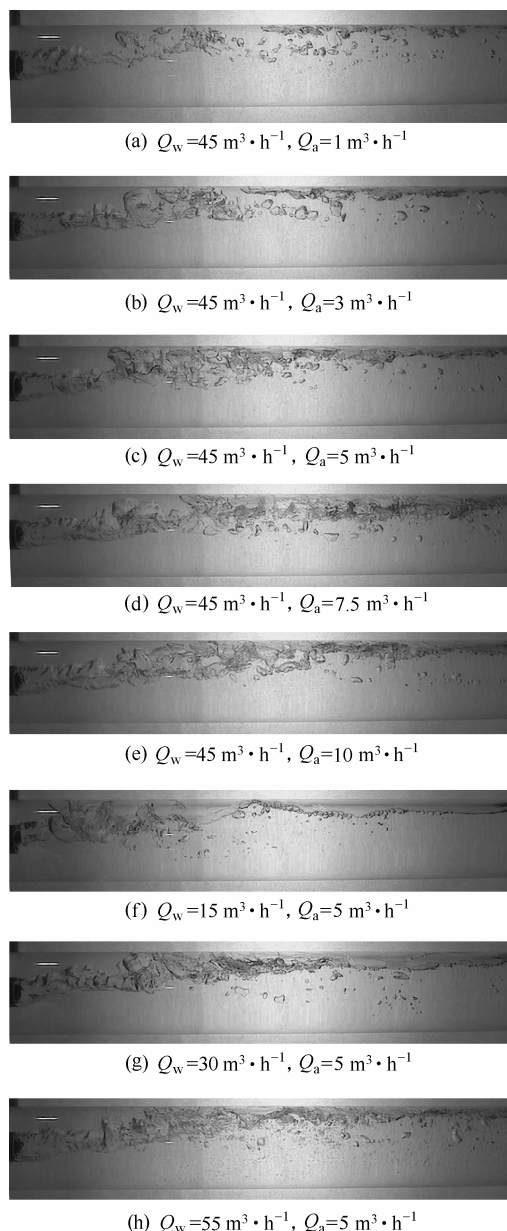


图3 空管内注气口之后两相流型实验结果

Fig. 3 Air-water flow results for exhaust port downstream in horizontal pipe without multi-orifice plates

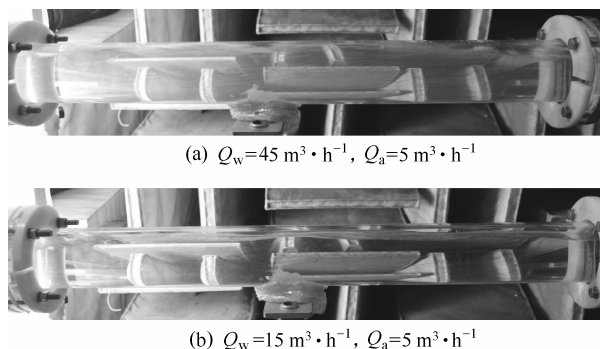


图4 空管内充分发展段两相流型实验结果

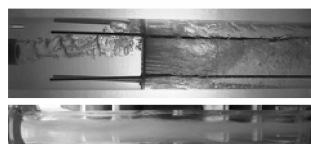
Fig. 4 Air-water flow results for fully developed region in horizontal pipe without multi-orifice plates



(a) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



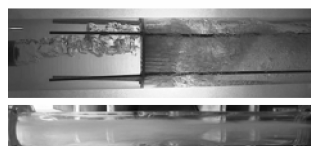
(b) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



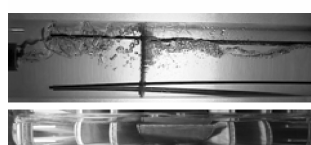
(c) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



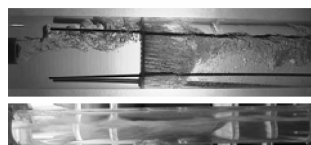
(d) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=7.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



(e) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



(f) $Q_w=15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



(g) $Q_w=30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



(h) $Q_w=55 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

图 5 1#试件流型实验结果

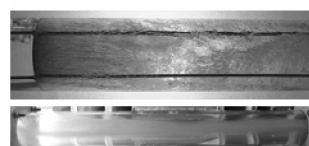
Fig. 5 Air-water flow results for 1# plate



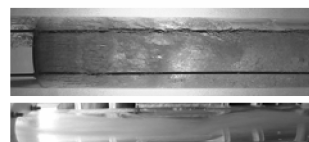
(a) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



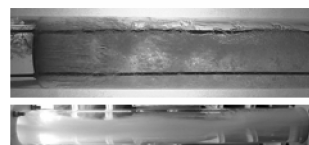
(b) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



(c) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



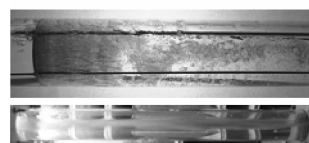
(d) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=7.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



(e) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



(f) $Q_w=15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



(g) $Q_w=30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



(h) $Q_w=55 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

图 6 2#试件流型实验结果

Fig. 6 Air-water flow results for 2# plate

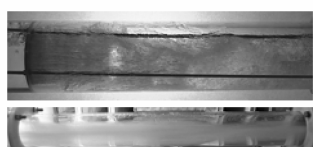
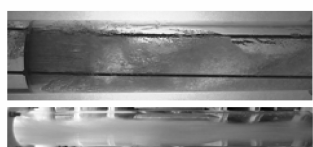
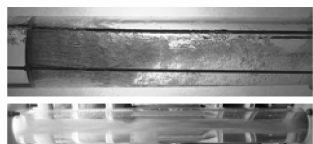
(a) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (b) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (c) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (d) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=7.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (e) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (f) $Q_w=15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (g) $Q_w=30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (h) $Q_w=55 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

图7 3#试件流型实验结果

Fig. 7 Air-water flow results for 3# plate

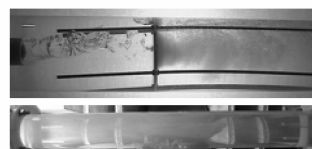
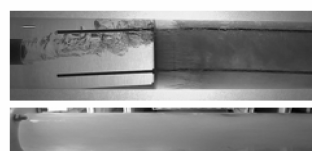
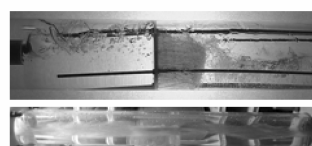
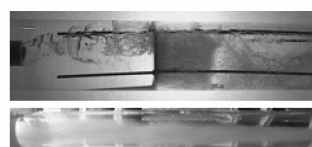
(a) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (b) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (c) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (d) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=7.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (e) $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (f) $Q_w=15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (g) $Q_w=30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (h) $Q_w=55 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

图8 4#试件流型实验结果

Fig. 8 Air-water flow results for 4# plate

3 多孔板实验结果分析

通过对多孔板后流型的观察和分析,在本工作实验的工况范围可将孔板后流型分为分层流、塞状流和泡状流 3 类。实验结果表明气液两相流量大小以及多孔板孔径大小均对多孔板后流型具有影响。为了直观地示出多孔板后流型与水平管内流型的区别,将多孔板实验结果绘制在 Weisman 流型图上,如图 9 所示。

3.1 多孔板孔径对板后流型的影响

由图 9 可见,多孔板后两相流型的转变边界与水平管明显不同。与水平管相比,多孔板后分层/塞状流转变边界向液相流量增大方向推移,塞状/泡状流转变边界向液相流量减小方向推移,变化幅度非常显著。在 $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时,分层/塞状流转变的表观液速约由 $0.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大至 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,塞状/泡状流转变的表观液速约由 $9.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小至 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (1#孔板) 和 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (4#孔板)。

孔径对气液两相流过多孔板后的流型具有重要影响。在一定的液相-气相流量下,随着多孔板孔径在 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 范围内逐渐减小,孔板后流型由分层流向泡状流过渡,所以孔径越小越有利于在多孔板后形成泡状流。在流型图上表现为随着孔径减小多孔板后形成泡状流的流型转换边界向液相流量减小的方向推移。也即减小孔径可在更加宽广的两相流量范围内形成泡状流,对形成泡状流的两相流量要求降低。

由图 9 可知,随着孔径减小,多孔板后的塞状流形成区域越来越小,分层/塞状流转变边界与塞状/泡状流转变边界之间的距离逐渐缩短,即分层流越来越迅速地向泡状流过渡。例如在孔径为 2 mm 的 4#孔板中未观察到塞状流流型,两条流型转变边界几乎重合,即分层流直接过渡为泡状流。

孔板后形成分层流动不利于废气被海水高效快速吸收。为强化海水对废气的吸收效果,希望在孔板后形成均匀分散的泡状流。所以,在采用多孔板作为废气吸收元件时,孔径大小的选择非常重要。通过增多孔数减小孔径从而在多孔板后形成泡状流强化吸收,对于多孔板吸收装置的优化设计具有重要的指导意义。工程应用中应根据发动机排气流量和海水流量的大小及比例选择合适的小孔孔径,避免在孔板后形成不利于废气吸收的分层流动。

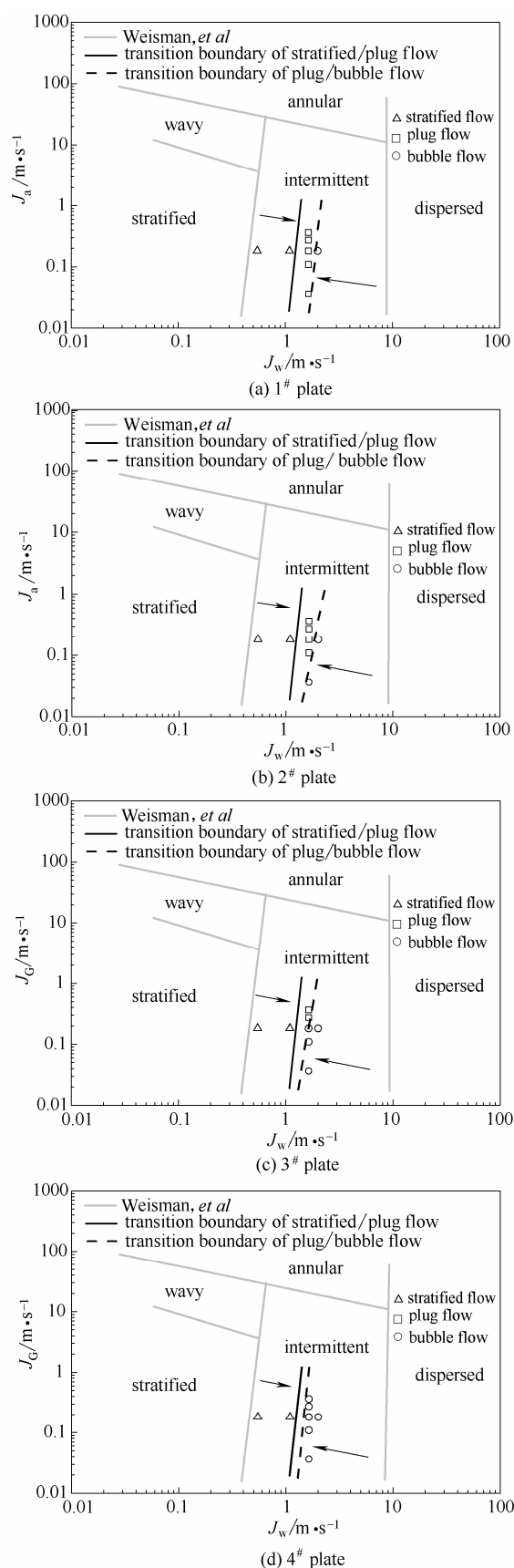


图 9 多孔板后流型的转变边界

Fig. 9 Transition boundary of flow pattern in multi-orifice plate downstream

3.2 气相流量变化对多孔板后流型的影响

每个试件中气相流量对孔板后流型的影响可由第1组实验工况的流型实验结果比较得出。由图5~图8可见,在相同液相流量 $45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 下,随着气相流量在 $1 \sim 10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 范围内增大,1#孔板后流型均为塞状流,4#孔板后流型均为泡状流,而2#和3#孔板后流型由泡状流转变为塞状流。

可见,在一定液相流量下,随着气相流量增大,某一孔径多孔板后的两相流动由泡状流向非泡状流过渡,也即气相流量越小越有利于在多孔板后形成泡状流。因此图9所示塞状/泡状流转变边界线与横坐标并不垂直,与水平管塞状/泡状流转变边界有一定区别。

但同时也可看出,这种流型转换除了与气液两相流量大小相关外,还与多孔板的孔径密切相关。在一定液相流量下,随着孔板孔径减小,形成泡状流所需的气相流量的上限增大,即可以在更大的气相流量下形成泡状流。在 $Q_w=45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时,随着孔板孔径由5 mm减小至2 mm,塞状/泡状流转变的临界表观流速由约 $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大至 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。

3.3 液相流量变化对板后流型的影响

液相流量对板后流型的影响可由第2组实验工况的结果比较得出。由图5~图8及图9可见,对于1#、2#及3#孔板,在相同气相流量 $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 下,随着液相流量在 $15 \sim 55 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 范围内增大,多孔板后流型先由波动分层流转变为塞状流,再从塞状流转变至泡状流。而4#孔板在实验的液相流量工况中是分层流直接转变为泡状流。

因此,在一定气相流量下,随着液相流量增大,多孔板后两相流动趋于由分层流转变为泡状流,所以液相流量越大越有利于在多孔板后形成泡状流。但这种流型转换除了与气液两相流量大小相关外,也与多孔板的孔径相关。在一定气相流量下,随着孔板孔径减小,形成泡状流所需的液相流量的下限减小,也即可以在更小的液相流量下在板后形成泡状流。在 $Q_a=5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时,随着孔板孔径由5 mm减小至2 mm,塞状/泡状流转变的临界表观流速由约 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小至 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

所以,对多孔板废气吸收装置而言,增大海水流量既有利于提供更多海水溶解吸收废气,也有利于在多孔板后形成均匀分散的泡状流流型,从而进一步强化海水吸收废气的效果。

4 结 论

通过可视化气液两相流实验系统对气液两相混合物流经多孔板后形成的流型进行实验,研究了多孔板孔径、气相流量及液相流量变化对多孔板后流型的影响规律,主要结论如下。

(1) 与水平管相比,水平管内多孔板后气液两相流型的转变边界发生了明显改变。孔板后分层/塞状流转变边界向液相流量增大方向推移,塞状/泡状流转变边界向液相流量减小方向推移。

(2) 随着气相流量减小或液相流量增大,多孔板后流型趋于形成泡状流。实验发现孔径大小对多孔板后流型具有重要影响,在一定的气相及液相流量下,在孔径2~5 mm范围减小孔径使孔板后流型趋于泡状流。

(3) 随着孔径减小,孔板后塞状流或分层流向泡状流转变的边界向更大气相流量和更小液相流量方向推移,即形成泡状流的两相流量范围增大。而且,随着孔径减小,孔板后流型逐渐趋于由分层流直接转变至泡状流,塞状流趋于消失。

(4) 在多孔板废气吸收装置中,为了在孔板后形成均匀分散的泡状流从而强化海水对废气的吸收效果,宜减小多孔板孔径、增大海水流量。

(5) 需注意孔径及气液两相流量对多孔板后泡状流形成的耦合作用机理。为保证吸收装置吸收效果,建议在多孔板设计时孔径不大于3 mm。

References

- [1] BAKER O. Simulations flow of oil and gas[J]. Oil and Gas Journal, 1954, 53(26): 185-190.
- [2] MANDHANE J M, GREGORY G A, AZIZ K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1974, 1(4): 537-553.
- [3] WEISMAN J, DUNCAN D, GIBSON J, *et al.* Effects of fluid properties and the pipe diameter on two-phase flow pattern in horizontal lines[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1979, 5(6): 437-462.
- [4] 姜俊泽, 张伟明, 王志明. 气液两相管流型识别理论研究进展[J]. 后勤工程学院学报, 2010, 26(4): 40-47.
- [5] JIANG J Z, ZHANG W M, WANG Z M. The development of gas-liquid two-phase flow regime identification in pipe[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2010, 26(4): 40-47.
- [6] 劳力云, 郑之初, 吴应湘, 等. 关于气液两相流型及其判别的若干问题[J]. 力学进展, 2002, 32(2): 235-249.
- [7] LAO L Y, ZHENG Z C, WU Y X, *et al.* On the gas-liquid two-phase flow regimes and their recognition methods[J]. Advances in Mechanics, 2002, 32(2): 235-249.
- [8] 蒋昌华. 水平管道油水两相流型研究综述[J]. 工程研究, 2013, 5(4): 365-373.

- JIANG C H. Review of the study on oil-water two phase flow patterns in horizontal pipelines[J]. *Journal of Engineering Studies*, 2013, **5**(4): 365-373.
- [7] 孙宝江, 颜大椿. 垂直气-液两相管流中的流型转换机制与控制[J]. *北京大学学报*, 2000, **36**(3): 382-388.
- SUN B J, YAN D C. The transition mechanism of the flow regimes and its control of gas-liquid two-phase flow in vertical pipes[J]. *Journal of Peking University*, 2000, **36**(3): 382-388.
- [8] 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*, 2012, **27**(5): 531-536.
- LIU X M, LI Z H, WU Y X, *et al.* Effect of tube size on flow pattern of air-water two-phase flow in vertical tubes[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2012, **27**(5): 531-536.
- [9] CHINNOV E A, RON'SHIN F V, KABOV O A. Two-phase flow patterns in short horizontal rectangular microchannels[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, **80**: 57-68.
- [10] 刘洁净. 水平管内油气两相流流型及流型转换的实验和理论研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- LIU J J. The experimental and theoretical study on flow regimes and regime transport of oil-gas in horizontal pipe[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [11] 胡志华, 钱焕群, 鹿院卫, 等. 水平管内油气两相流型转变的实验研究[J]. *油气储运*, 2001, **20**(4): 31-35.
- HU Z H, QIAN H Q, LU Y W, *et al.* Experimental study on the flow pattern of oil-gas two-phase flow in horizontal pipe[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2001, **20**(4): 31-35.
- [12] 姚海元, 宫敬. 水平管内油水两相流流型转换特性[J]. *化工学报*, 2005, **56**(9): 1649-1653.
- YAO H Y, GONG J. Oil-water flow patterns and transition characteristics in horizontal pipes[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering(China)*, 2005, **56**(9): 1649-1653.
- [13] 刘夷平. 水平油气两相流流型转换及其相界面特性的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- LIU Y P. Study on the flow regime transition in horizontal gas-oil flow and the characteristics of gas-liquid interface[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [14] 姜俊泽, 张伟明. 水平管道气液两相段塞流参数计算的精确模型[J]. *化工学报*, 2012, **63**(12): 3826-3831.
- JIANG J Z, ZHANG W M. Accurate model for computing parameters of gas-liquid slug flow in horizontal pipe[J]. *CIESC Journal*, 2012, **63**(12): 3826-3831.
- [15] HANAFIZADEH P, HOJATI A, KARIMI A. Experimental investigation of oil-water two-phase flow regime in an inclined pipe[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, **136**: 12-22.
- [16] 曹夏昕, 阎昌琪. 倾斜管内气液两相流流型的实验研究[J]. *核动力工程*, 2005, **26**(6): 572-575.
- CAO X X, YAN C Q. Experimental study of gas-liquid flow pattern in inclined pipe[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2005, **26**(6): 572-575.
- [17] MOZAFARI M, AKHANVAN-BEHABADI M A, QOBADI-AREAE H, *et al.* Experimental study on condensation flow patterns inside inclined U-bend tubes[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, **68**: 276-287.
- [18] PIETRZAK M. Flow patterns and volume fractions of phases during liquid-liquid two-phase flow in pipe bends[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, **54**: 247-258.
- [19] 周云龙, 张立彦. 矩形截面螺旋管内气液两相流型转换数值模拟[J]. *化工学报*, 2014, **65**(12): 4767-4774.
- ZHOU Y L, ZAHNG L Y. Numerical simulation of flow pattern transition for gas-liquid two-phase flow in helical square ducts[J]. *CIESC Journal*, 2014, **65**(12): 4767-4774.
- [20] CHEN X, GUO L. Flow patterns and pressure drop in oil-air-water three-phase flow through helically coiled tubes[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1999, **25**(6): 1053-1072.
- [21] 李广军, 郭烈锦, 高晖, 等. 螺旋管内油-水液液两相流流型[J]. *化工学报*, 2000, **51**(2): 239-242.
- LI G J, GUO L J, GAO H, *et al.* Flow patterns of oil-water liquid-water two-phase flow in helically coiled tubes[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2000, **51**(2): 239-242.
- [22] 王树立, 饶永超, 武玉宪, 等. 水平管内气液两相螺旋流实验研究[J]. *实验力学*, 2013, **28**(1): 77-86.
- WANG S L, RAO Y C, WU Y X, *et al.* Experimental research on gas-liquid two-phase spiral flow in a horizontal pipe[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, **28**(1): 77-86.
- [23] MILAN M, BORHANI N, THOME J R. Adiabatic vertical downward air-water flow pattern map: influence of inlet device, flow development length and hysteresis effects[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2013, **56**: 126-137.
- [24] QIAO S X, MENA D, KIM S. Inlet effects on vertical-downward air-water two-phase flow[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2017, **312**: 375-388.
- [25] FARHAD R, EBRAHIM H, MORTEZA B. Effect of pipe rotation on downward co-current air-water flow in a vertical pipe [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, **81**: 1-14.
- [26] ANNAMALAI G, PIROUZPANAH S, GUDIGOPURAM S R, *et al.* Characterization of flow homogeneity downstream of a slotted orifice plate in a two-phase flow using electrical resistance tomography[J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2016, **50**: 209-215.
- [27] LI J, XU S, KONG S. Visual experimental research on bubble absorption in a vertical tube with R124-DMAC working pair[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2016, **74**: 1-10.
- [28] JIANG M, XU S, WU X, *et al.* Visual experimental research on the effect of nozzle orifice structure on R124-DMAC absorption process in a vertical bubble tube[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, **68**: 107-117.
- [29] 周洪举. 闭式循环柴油机排气冷却吸收系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- ZHOU H J. Study on the exhaust cooling absorption system of the closed cycle diesel engine[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [30] 李大鹏, 张晓东. 俄罗斯非核动力潜艇推进系统的选择与发展趋势[J]. *中国舰船研究*, 2011, **6**(6): 102-108.
- LI D P, ZHANG X D. Solutions and development trends of Russian navy's non-nuclear submarine propulsion system[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2011, **6**(6): 102-108.
- [31] 赵建华, 黄次浩, 章林柯. AIP 装置废气处理技术综述[J]. *舰船科学技术*, 2002, **24**(5): 14-17.
- ZHAO J H, HUANG C H, ZHANG L K. The summarization of exhaust gas treatment technology of AIP equipment[J]. *Ship Science and Technology*, 2002, **24**(5): 14-17.