

正方形截面直通道内二次流现象的实验研究

郭亚军^{1,2}, 毕勤成¹, 何永清¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 710055, 西安)

摘要: 以空气-水为介质,通过可视化实验的方法,对边长为 10 mm 的正方形截面通道内空气-水垂直上升流动的两相流流型进行了实验研究,表观气速为 0.04~100 m/s,表观水速为 0.001~6 m/s. 观察到了正方形截面通道内两相流动的典型流型,通过管外可视化及内视镜伸入管道内拍摄到清晰的环状流和爬动流流型,证实了正方形截面直通道内存在“二次流”现象,且对气-液两相流动的相分布有较大影响. 将正方形截面爬动流与圆通道内的溪状流进行了比较,由于其中的作用力不同,它们在发生条件、流动形态及液膜形状上有很多异同点,圆通道内溪状流的液膜是随机出现和分布的,数条液带、液丝的位置不确定,尺寸相差悬殊. 利用单能 γ 射线传感器测量了正方形通道内爬动流及环状流的液膜厚度,得到壁面上液膜厚度的分布图,证明了正方形通道内随着表观气速的增大,二次流作用逐渐增强,使得壁面上液膜分布的不均匀,壁面中心处液膜最厚.

关键词: 正方形截面通道;二次流;爬动流;环状流;相分布

中图分类号: TL334 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)07-0083-05

Experimental Investigation on Secondary Flow of Air-Water Two-Phase Flow in Straight Channel with Square Cross-Section

GUO Yajun^{1,2}, BI Qincheng¹, HE Yongqing¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Environmental and Municipal Administration Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: An experimental investigation was conducted on the vertically upward flow of air-water two-phase in a channel with a square cross-section. The hydraulic diameter of the channel was 10mm; the superficial air velocity was 0.04-100m/s; the superficial water velocity was 0.001- 6 m/s. The typical flow patterns, creep flow and rivulet flow, were observed by flow visualization with a DV camera and an endoscope, and the flow pattern map and flow pattern transition boundaries were obtained. The thickness of liquid film of the creep flow and the annular flow in the square channel was measured by a γ -ray instrument. The results show that the mechanism to form the creep flow in the square channel is different from that to form the rivulet flow in a circular tube and a secondary flow exists in the square channel. The phase distribution on the inner wall of the noncircular channel indicates that the influence of the channel geometry results in the steeper radial distribution of the phases and velocities, and eventually turbulent secondary flow. With the increase in the gas velocity, the film thickness at center of the wall is greater than that at corner, indicating the significant effect of the secondary flow on the phase distribution in the noncircular channel.

Keywords: square channel;secondary flow;creep flow;annular flow;phase distribution

在各种传热设备中,存在大量的非圆形管道.非圆形截面直通道内存在二次流现象,称为第二类普朗特二次流,以区别于弯管内的二次流.由于二次流的产生改变了截面上的速度分布和壁面及角域的切应力的分布,使得流动区域变得非常复杂,二次流速度虽然只有主流速度的百分之几,但对流动和传热有极大的影响.从文献上看,对二次流作用的研究主要集中在单相流体的流动上. Hoagland^[1]首次实验观察到正方形截面通道上的二次流分布. Aly 等人^[2]、Huser 等人^[3]、Hirota 等人^[4]、Vázquez 等人^[5-6]实验或数值模拟研究了二次流对非圆截面通道内的流场、温度场、热流密度的影响以及壁面剪切应力的分布.对两相流动中二次流的研究文献则很少, Wölk 等人^[7]通过对不同通道流型图的比较研究,发现了由于二次流的影响使得非圆通道的流型转换区域发生了变化.郭亚军等人^[8]实验研究了非圆通道内的气液两相流流动,讨论了不同通道形状对流型的影响.

本文针对正方形直通道内的空气-水两相流动进行了较为全面的可视化实验研究,并侧重在气相流速很大而液相流速很小的工况下,采用内视镜伸入管道内拍摄到爬动流和环状流流态,同时采用单能 γ 射线传感器测量了正方形通道内爬动流及环状流的液膜厚度分布,从而验证了正方形通道内的二次流现象及其对相分布的影响.

1 实验系统及设备

本文实验在图1所示的空气-水两相流实验台上完成.空气经压缩机升压进入流量测量系统,水由水泵升压后,一路与来自压缩机的空气混合后进入实验段,另一路作为旁路系统流回水箱.空气、水分别进入混合器,混合均匀后进入实验段和观察段后排出.可视化实验是本文研究的主要内容之一,使用

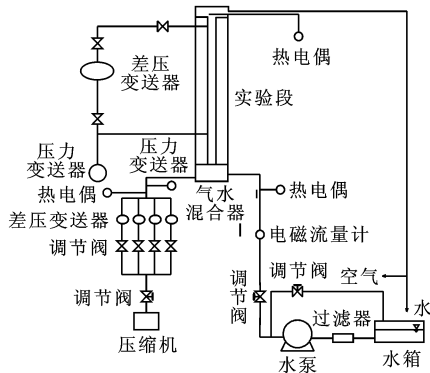


图1 空气-水两相流实验系统图

索尼数码摄像机将图像传入计算机采集.拍摄轴向流动形态照片时,采用 Gradient Lens Corp 生产的 HawkeyeTM内视镜伸入管道采集图像,将视野放大后与上述数码摄像机相接,得到管内周向的流动图像.此外还安装了单能 γ 射线传感器,利用 γ 射线对空气和水穿透力的不同,由安装在计算机中的 AdvantechTM计数器卡 PCL-1780U 采集其输出信号,并配以自主开发的软件来测量并确定环状流及爬动流的液膜厚度.

2 通道内空气-水流型研究

2.1 流型简述

正方形截面通道内空气-水两相流动在气相速度 $v_{sg} = 0.04 \sim 100$ m/s,液相速度 $v_{sl} = 0.001 \sim 6$ m/s 实验范围内进行.实验中观察到了6种流型(见图2).

图2是可视化拍摄到的各种流型.图3是各种流型之间的转换曲线.在气相流速较大和液相流速较小时,在非圆通道内观察到爬动流,如图4所示.为了进行比较,同时也进行了垂直圆管内(直径为14 mm)的空气-水两相流动可视化实验,得到了溪状流流型.

在 $v_{sg} < 0.1$ m/s、 $v_{sl} < 2.0$ m/s 的范围内,气相是以气泡散落在液体中的泡状流(见图2a).气相速度较小时,气泡很少,随着气相速度的增大,气泡大小不变,但气泡数量增加,大小均匀的非圆形气泡一团一团随着液体前行.当气相速度增大到 $v_{sg} > 0.15$ m/s 时,一团团的气泡聚合在一起,流型开始转为弹状流A.此时,气相形成了占据大部分流通截面的气弹,即弹状流A(见图2b),此时气弹较短,周围及尾部光滑而规则,尾随的气泡较少.随着气相速度的增大,气弹变长,长度超过500 mm,而气弹周围和尾部的气泡也增多.直到 $v_{sg} > 2$ m/s 左右,气弹周围和尾部形成浓密的气泡区,气弹扭曲和变形,形状不规则,即为弹状流B(见图2c).当 $v_g > 3.5$ m/s 时,剧烈的气体在液体内搅拌,气弹完全变形形成块状流(见图2d).块状流均为间歇流,由于气量的增大,气液两相出现剧烈振荡,形成气液两相搅拌混合物.环状流(见图2e)发生在 $v_{sg} > 12$ m/s 时,此时气芯速度高到足以排开液体并带动液膜向上运动.环状流液膜总是连续稳定地上升,并带有波纹.随着气相速度的增加,环状流的液膜波纹更细密,但当液相速度过大时,环状流又转换成块状流(见图3).弥散泡状流(见图2f)发生在液速较高时,即 $v_{sl} > 3.0$ m/s

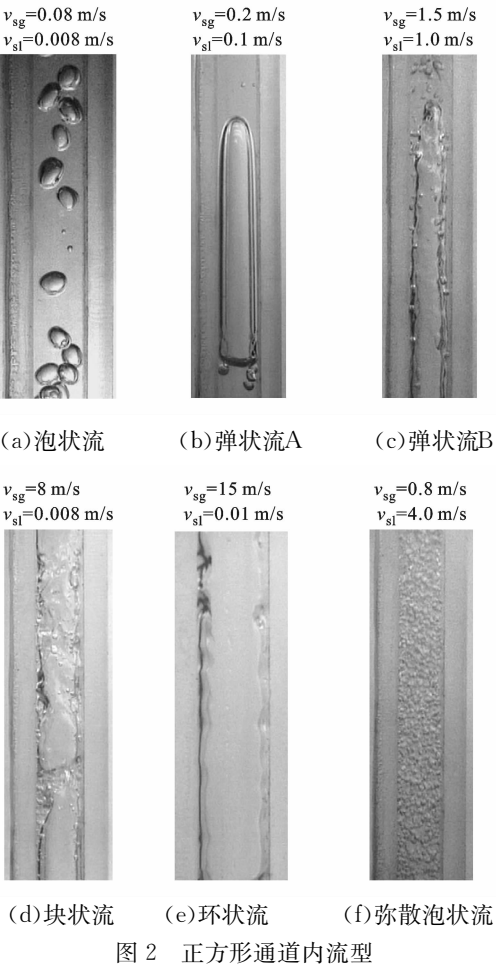


图 2 正方形通道内流型

以后,随着液相速度的不断增大,剧烈的紊流作用使得较大气泡或气弹变形、断裂、离散,最后成为密集的球形小气泡,均匀细密地分布在液相之中.

2.2 爬动流

当 $v_{sg} > 20 \text{ m/s}$, $v_{sl} < 0.01 \text{ m/s}$ 时,在正方形通道内发现爬动流. 图 4 是利用摄像机从外部拍摄到的边长为 10 mm 的正方形通道壁面上的爬动流和环状流,壁面上的液丝清晰可见. 这是由于在高气相

速度、极低液相速度时,由正方形通道内二次流的发生而形成的流型. 在折算气相速度相对较小(v_{sg} 刚超过 20 m/s)时,液丝不整齐,有些弯曲,向上爬行的速度也慢,而且在截面的 4 个角区也有向上的液丝(见图 4a),但随着气相速度的增大,液丝只在每个壁面中心处存在,而且气相速度越大,液丝就越直、越细. 在一定的折算气相速度下,折算液相速度由小到大逐渐增加时,壁面中心处的液丝逐渐加宽成水膜(见图 4b、图 4c、图 4d),最后转换为环状流(见图 4e).

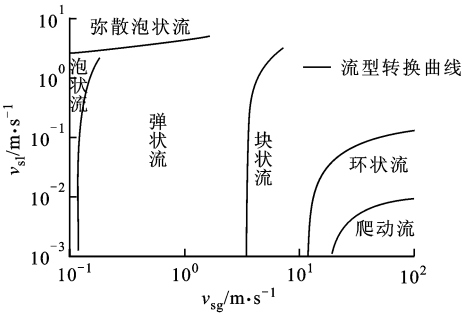


图 3 正方形通道流型转换曲线

为了能更直观地观察各个截面上的流动情况,利用内视镜伸入管道内,拍摄得到了不同流速下的爬动流和环状流流型,见图 5.

爬动流流型是流体在非圆直通道内高速流动时,因二次流的发生产生二次流漩涡所引发的流型. 非圆形管道内紊流充分发展时,其流动是一种带有漩涡的流动,这种旋转运动从本质上来说是通道截面上的二次流引起的. 二次流发生的同时,产生了剪切应力,这个力的作用是维持不对称横截面上的雷诺应力和压力梯度的平衡. 当折算气相速度足够大时,在正方形通道的横截面上,以每个角平分线为对称轴,每个角区分别存在 2 个二次流漩涡,因此正方

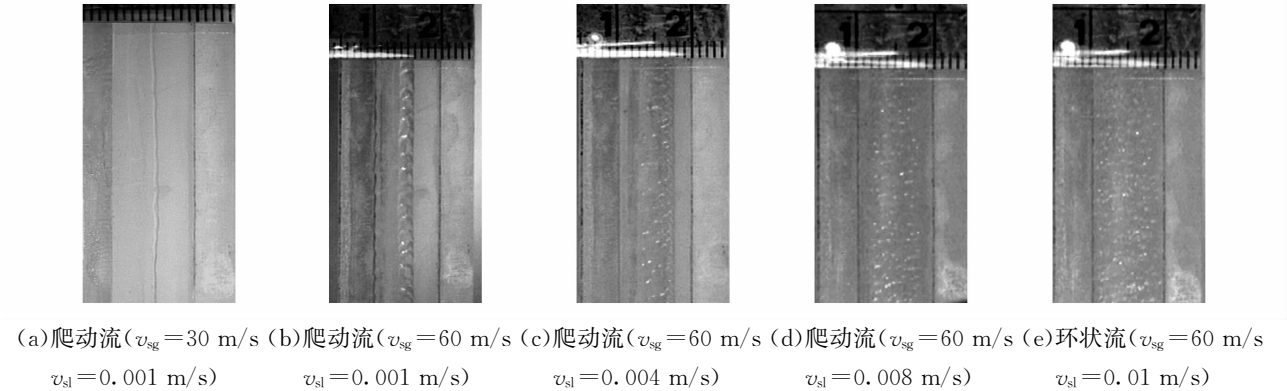


图 4 正方形通道内的流型(外摄)

形横截面上共形成8个完全相同的二次流漩涡. 横截面上的二次流漩涡从每个角沿壁面向每个边的中心运动, 沿边平分线向截面中心运动, 再沿角平分线流回各角. 对空气-水两相流来说, 当气相速度较大而液相速度极小($v_{sg} > 20 \text{ m/s}$, $v_{sl} < 0.01 \text{ m/s}$)时, 在高速气流引起的二次流作用的推挤下, 极少量的水聚积到了壁面的中心形成液带, 在主流带动下沿着壁面中心向上爬行. 折算气相速度不大(v_{sg} 刚超过 20 m/s , 见图4a)时, 二次流作用较弱, 液丝不整齐, 有些弯曲, 而且在截面的4个角区也可以观察到有向上行走的液丝. 折算气相速度越大($v_{sg} > 40 \text{ m/s}$), 二次流就越强, 此时4个角区处已经观察不到液丝了, 液丝只在每个壁面中心处存在, 随气流沿着壁面中心向上爬行. 而且气相速度越大, 液丝也越直、越细, 向上爬行的速度也越快.

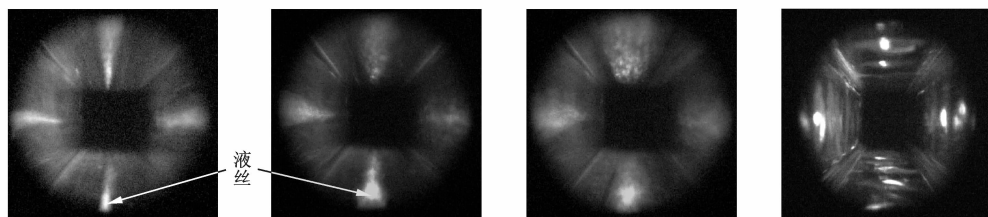
为了进行对比, 同时进行了圆通道内两相溪状流的实验, 拍摄到的溪状流见图6. 从可视化实验中可以发现, 溪状流为一条或几条液丝(带、膜)沿管内壁面如同小溪形态的流动, 溪状流在壁面上出现的位置比较随机, 液膜有宽的也有细条的, 流动轨迹也随机变化. 数次重复实验中, 溪状流在壁面上出现的位置比较随机, 液带、液丝的位置是不确定的, 随意分布在壁面上, 而爬动流液膜沿正方形截面的壁面

中心区域向上爬动, 位置固定. 这表明了爬动流与圆通道内的溪状流的作用机理是不同^[9-10]. 圆通道内的液膜所受的作用力包括气流的剪切力、壁面表面张力和液膜质量力, 都是垂直方向上的力, 故溪状流受表面张力、接触角的影响很大. 随表面张力和接触角的不同, 溪状流液膜在管壁面上发生的位置和厚度有很大差异. 由此可见, 爬动流与溪状流在发生条件、流动形态及液膜形状上有很多异同点, 要对其有更深入的认识还应该进行进一步的研究.

2.3 环状流液膜厚度的实验研究

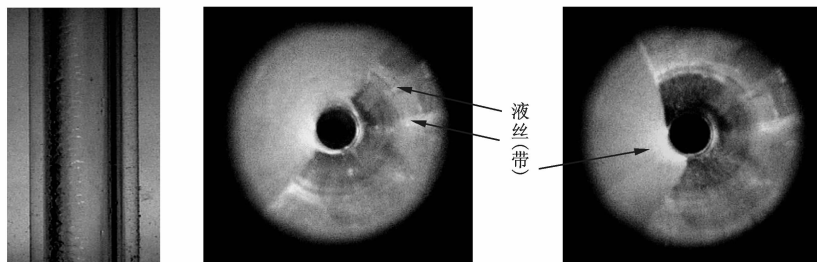
当折算气相速度达到一定值时, 才能产生环状流. 环状流是贴近管壁的液膜包裹着管道中心携带液滴的气芯, 高速气芯推动液膜克服重力的运动, 而液膜波动且有破碎倾向. 只有气芯速度高到足以托起夹带液滴时, 环状流才能发生. 否则, 夹带的液滴就会下降, 形成液桥, 这时将发生块状流或弹状流.

环状流的液膜总是连续不断地稳定地上升, 并且带有波纹(见图5d). 随着气相速度的增加, 环状流的液膜波纹更细密. 对非圆通道来说, 由于二次流的作用, 横截面上的二次流漩涡是从每个角沿壁面向每个边的中心运动, 使得截面侧壁中心处的液膜厚度大于两边. 若折算液相速度增大, 则液膜会在整个截面出现聚合而转换成块状流.



(a)爬动流($v_{sg}=60 \text{ m/s}$, $v_{sl}=0.001 \text{ m/s}$) (b)爬动流($v_{sg}=60 \text{ m/s}$, $v_{sl}=0.004 \text{ m/s}$) (c)爬动流($v_{sg}=60 \text{ m/s}$, $v_{sl}=0.008 \text{ m/s}$) (d)环状流($v_{sg}=60 \text{ m/s}$, $v_{sl}=0.01 \text{ m/s}$)

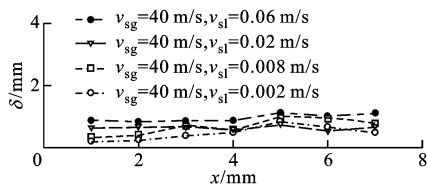
图5 正方形通道内的爬动流流型(内摄)



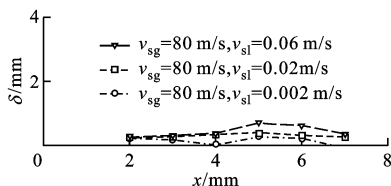
(a)外部拍摄($v_{sg}=40 \text{ m/s}$, $v_{sl}=0.004 \text{ m/s}$) (b)内部拍摄($v_{sg}=60 \text{ m/s}$, $v_{sl}=0.004 \text{ m/s}$) (c)内部拍摄($v_{sg}=80 \text{ m/s}$, $v_{sl}=0.004 \text{ m/s}$)

图6 圆通道内的溪状流

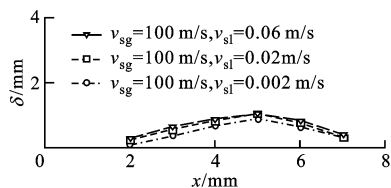
为了研究二次流对壁面上液膜分布的影响,试验中采用 γ 射线仪测量正方形通道内壁面上的液膜分布。由于液膜波动比较厉害,用 γ 射线仪测量时,自行编制了采集程序,每个实验点采集2次。第1次每隔0.055 s采集一次发射的粒子数,采集时间1 min,得到1 100组以上的数据;第2次每隔0.99 s采集一次发射的粒子数,采集时间1 min。最后取其平均值得到该点的液膜厚度。由图7可以发现,表观气相速度对液膜厚度的分布具有较大的影响。当 $v_{sg}=40$ m/s时,液膜分布较为平坦(见图7a);当 $v_{sg}=80$ m/s时,在壁面中心处液膜明显高于两边(见图7b);当 $v_{sg}=100$ m/s时中心处液膜最高(见图7c)。这也证明了随着表观气相速度的增大,二次流作用逐渐增强,靠近角区的液膜由于受气流涡旋的推挤而向壁面中心推移,使得中心处液膜逐渐增厚,导致壁面两侧的液膜减薄。



(a) $v_{sg}=40$ m/s 时的液膜厚度



(b) $v_{sg}=80$ m/s 时的液膜厚度



(c) $v_{sg}=100$ m/s 时的液膜厚度

图7 3种表观气速下的液膜厚度

3 结 论

(1)通过正方形截面通道内空气-水两相流动的可视化实验研究,获得了正方形截面通道内流型转换图,对工程应用具有一定的参考价值。

(2)采用内视镜手段分别拍摄得到了圆管内的湍流流型与正方形通道内的蠕动流流型图。由于流体在截面上所受的作用力的不同,它们的发生条

件,流动形态及液膜形状有很多异同点,对其更深入的认识还有待进一步的研究。

(3)首次采用 γ 射线仪测量得到正方形通道内壁面上的液膜分布,并得到不同表观气速下液膜厚度的分布图。图中显示,在正方形通道内随着表观气速的增大,二次流作用逐渐增强,造成壁面上液膜分布不均匀,壁面中心处液膜最厚。

参考文献:

- [1] HOAGLAND L C. Turbulent flow in straight rectangular ducts-secondary flow, its cause and effect on the primary flow [D]. Boston, Mass., USA: MIT School of Engineering, 1960.
- [2] ALY M, TRUPP A, GERRARD A. Measurements and prediction of fully developed turbulent flow in an equilateral triangular duct [J]. J Fluid Mech, 1978, 85 (1): 57-83.
- [3] HUSER A, BIRINGEN S, HATAY F F. Direct simulation of turbulent flow in a square duct: Reynolds-stress budgets [J]. Phys Fluids, 1994, 6(9): 3144-3152.
- [4] HIROTA M, FUJITA H, YOKOSAWA H, et al. Turbulent heat transfer in a square duct [J]. Int J of Heat and Fluid Flow, 1997, 18(1): 170-180.
- [5] VÁZQUEZ M S, MÉTAIS O. Large eddy simulation of the turbulent flow through a heated square duct [J]. J Fluid Mech, 2002, 453: 201-238.
- [6] VÁZQUEZ M S, RODRIGUEZ W V, ISSA R. Effects of ridged walls on the heat transfer in a heated square duct [J]. Int J of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(10): 2050-2063.
- [7] WÖIK G, DREVER M, RATH H J. Flow patterns in small diameter vertical non-circular channels [J]. Int J of Multiphase Flow, 2000, 26(6): 1037-1061.
- [8] 郭亚军,毕勤成,何永清. 空气-水在垂直非圆截面通道内流型研究[J]. 核动力工程, 2006, 27(5): 48-52. GUO Yajun, BI Qincheng, HE Yongqing, et al. Flow patterns of air-water two-phase flow in vertical noncircular channels [J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(5): 48-52.
- [9] BARAJAS A M, PANTON R L. The Effect of contact angle on two-phase flow in capillary tubes [J]. Int J of Multiphase Flow, 1993, 19(2): 337-346.
- [10] HUGHES D T. Minimum thickness of a liquid film flowing down a vertical tube [J]. Int J of Multiphase Flow, 1998, 41(2): 253-260.

(编辑 王焕雪)