

DOI: 10.3901/JME.2020.20.214

水平管气液衰减螺旋流的流型及压降发展^{*}

刘 雯 李华峥 王 雪 王树立

(常州大学江苏省油气储运技术重点实验室 常州 213100)

摘要: 气液衰减螺旋流在工业中应用广泛,但是对其中的关键问题,衰减影响下的螺旋流发展运动规律认识不清。通过室内试验研究空气-水两相流在内径 25 mm、长 4 m 的水平管中流型和压降沿流向的变化规律。通过可视化试验获得叶片式起旋器下游不同位置处的螺旋流流型,测量下游沿流向不同区间的压降波动信号。试验发现,在离心力作用下,螺旋流中气液相界面发生重构,形成螺旋流中特有流型。但是由于离心力的衰减,导致螺旋流流型不断变化,逐渐转变成非旋流流型。流动压降沿流向逐渐降低,最终趋于非旋流压降;不同螺旋流流型的维持距离不同,同时也受来流气液相雷诺数的影响。基于流型及压降分析,获得起旋器下游不同位置处的螺旋流流型图。

关键词: 气液两相;螺旋流;流型;压降;衰减

中图分类号: TH172

Development of Flow Pattern and Pressure Drop in Gas-liquid Swirl Flow inside Horizontal Pipe

LIU Wen LI Huazheng WANG Xue WANG Shuli

(Jiangsu Key Laboratory of Oil and Gas Storage and Transportation Technology,
Changzhou University, Changzhou 213100)

Abstract: Gas-liquid decayed swirl flow is widely used in industrial fields, however, the key problem, the effect of decay on the development of flow characteristics in the swirl flow, is unclear. Axial development of flow pattern and pressure drop in an air-water two-phase flow in a horizontal tube with an inner diameter of 25 mm and a length of 4 m is studied by experiment. The swirl flow patterns at different regions downstream of the vane type swirler are studied by visualization experiment, and the pressure drop fluctuation signals in different regions along the streamwise direction are measured. The results show that under the effect of centrifugal force, gas-liquid phase interface in the swirl flow is reconstructed, leading to the formation of special swirling flow patterns. However, due to the swirl decay, swirl flow patterns change continuously, and it gradually transform to non-swirl flow pattern. The pressure drop in the swirl flow gradually decreases along the streamwise, and finally approximates to the pressure drop in a non-swirl flow. Different swirl flow patterns have different maintenance distances, and the distance is affected by the flow rate upstream of the swirler. Finally, according to the analysis of flow pattern and pressure drop signals, the flow pattern maps at different regions in the horizontal swirl flow are proposed.

Key words: gas-liquid two-phase; swirl flow; flow pattern; pressure drop; decay

0 前言

螺旋流存在轴向及切向速度分量,切向速度在流动中影响着流体的运动。螺旋流根据起旋器作用方式的不同有连续螺旋流和衰减螺旋流之

分,连续螺旋流的起旋器布满整个试验管段,旋流强度沿流向的衰减可以忽略;衰减螺旋流的起旋器尺寸相对较小,起旋器下游旋流强度不断衰减且不可忽略。引发衰减螺旋流的起旋器尺寸小、易安装、流动阻力小,具有很好的应用前景。气液两相螺旋流在工业中应用广泛,比如气液分离及强化换热领域^[1-3],近期在石油天然气开采工业中^[4-6]的气井排水采气^[7-9]、水合物输送^[10]、湿气

^{*} 国家自然科学基金(51706024, 51574045)和江苏省政府留学奖学金资助项目。20191126 收到初稿,20200707 收到修改稿

测量^[11-12]等领域都有应用。

气液两相螺旋流中, 气液两相运动在离心力的作用下发生变化, 导致流型和压降等重要流动参数随之改变。垂直管螺旋流研究发现螺旋流流型与光滑管流中流型显著不同^[13-15]。当来流为低含气率的泡状流时, 其中离散的气泡在起旋器作用下会向管道中心运动, 旋流强度相对较强时能形成气柱; 当来流为段塞流时, 在起旋器的作用下, 泰勒泡和液塞段都做螺旋运动, 液塞段中气体集中在管道中心; 当来流为搅拌流时, 搅拌流在离心力作用下转变成螺旋环状流^[16]。同样, 在水平管的螺旋流研究中发现气液相分布在离心力作用下发生变化: 当来流为存在长气泡的泡状流时, 在起旋器作用下会转变成液膜较厚的螺旋环状流; 对于波状流来流, 离心力促进液滴甩至壁面形成螺旋上升的液膜, 在起旋器下游一定位置处转变为环状流。常州大学王树立课题组在前期对叶轮起旋器引起的水平管气液两相螺旋流流型进行了研究^[17-20], 观测并绘制了叶轮起旋器下游不同位置处的流型图, 但流型划分仅依靠观察和个人判断存在很大的主观性。螺旋流中流型与非旋流中流型显著不同, 由于流型是两相流研究的基础, 因此需要对螺旋流中流型进行专门研究。

在气液衰减螺旋流中, 由于旋流强度沿流向一直衰减, 离心力逐渐减弱, 导致气液相分布沿流向上发生变化, 增加了流型研究的复杂性。水平管和垂直管中的研究都发现^[21-22], 起旋器下游较远处, 螺旋流动会逐渐恢复成光滑管流, 螺旋流维持距离有限。除了流型, 旋流衰减同样会影响液滴和液膜行为。研究发现, 衰减会对螺旋环状流中液滴夹带沉积行为、液膜界面波动、液膜流量等产生影响^[23]。衰减螺旋流中由于流型等流动参数沿流向不断变化, 大大增加研究难度, 导致目前对衰减螺旋流动沿流向的发展变化认识不足。

本文通过室内试验研究了水平管中叶片式起旋器引发的气液螺旋流, 获得了该流动沿流向上流型及压降的发展变化规律, 为螺旋流在起旋器下游的维持距离提供参考, 有利于螺旋流在排水采气和地面输送等工程领域的应用。

1 试验系统和方法

本试验系统包括气液相的供应循环系统、试验管路和测量记录系统。气液相的供应循环系统水泵、水箱、空气压缩机、储气罐、压力表、流量计及阀门连接件等组成。试验管路主要由透明圆管、透明

方砖和起旋器三部分组成, 试验系统如图 1 所示。透明圆管为有机玻璃管, 内径 25 mm、总长 4 m。起旋器上游为长 2 m 的稳定段, 下游为长 2 m 的试验观测段。气路和液路提供的气、液单相流体流经各自的管路经过流量计计量后一起进入气液混合器, 在气液混合器当中气液两相充分混合, 之后进入试验管路起旋器前的稳定段。在试验管路中气液两相混合物通过稳定段流经起旋器后进入观测段, 在观测段进行压降数据采集和流型记录后通过回流回水箱, 与此同时气体排入大气中。其中起旋器由光敏树脂 3D 打印制成, 结构如图 1 所示: 由 4 根倾角都为 45°、叶片厚度 2 mm、扭转 180°的螺旋叶片均匀分布在直径为 15 mm 的中心轴上。流型拍摄过程中在试验管段外加装透明方砖以消除圆管带来的拍摄误差。

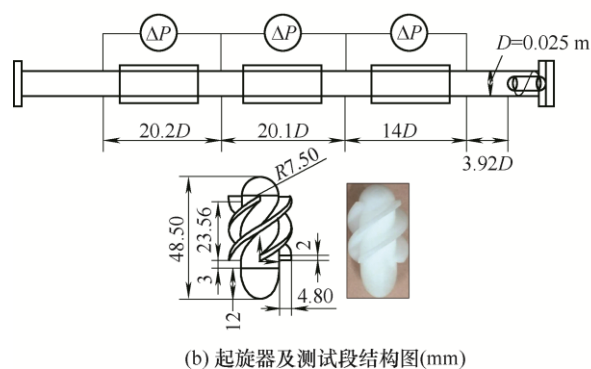
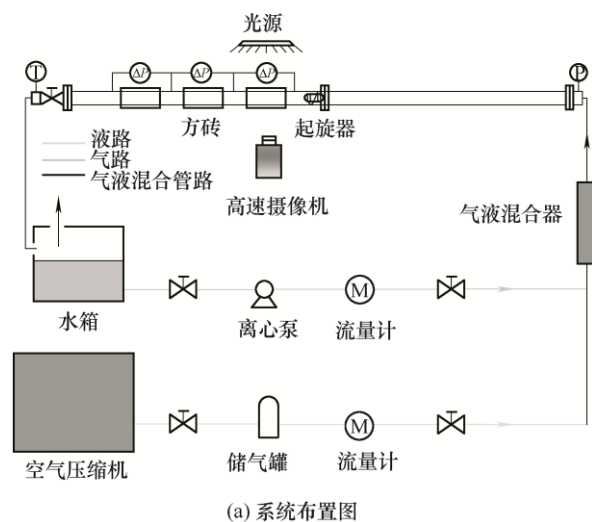


图 1 试验系统示意图

流型的记录和采集通过高速摄像机和数码相机完成, 采用背光成像法进行拍摄。以起旋器出口为位置原点, 4 个观测区间距原点的位置分别为 5.32~13.92 倍管径(D)、22.9~31.5 倍管径、43.3~51.9 倍管径和 62.9~71.5 倍管径, 试验过程中高速相机的采集频率和分辨率分别设置为 2 000 帧/s 和 920×

168。不同位置(原点后 3.92~17.92 倍管径、17.92~38.02 倍管径和 38.02~58.22 倍管径处)的压降信号通过压差传感器测得, 试验系统的温度和测试段入口的压力分别通过温度传感器和压力传感器测量。各个电子传感器的电流信号通过数据采集系统(NI USB-6218)的采集并转化为电压信号, 记录在计算机的软件系统中, 采集频率为 1 000 次/s。

试验介质为室温下的空气和水, 试验表压范围 0.003~0.170 MPa, 气相雷诺数范围为 16.89~23 902.03, 液相雷诺数范围为 12.38~37 871.29。

试验数据不确定性分析如表 1 所示。

表 1 试验参数的不确定性分析

名称	最大不确定度(%)
压力	0.50
压差	1.24
温度	0.46
液体流量	2.82
气体流量	4.20

2 试验结果与讨论

2.1 螺旋流典型流型及其沿轴向的发展试验方法

为了减少流型识别的主观性, 本试验除肉眼观察外, 还对原始差压信号进行了预处理, 包括滤波降噪和去均值等。并除以测量段长度得到单位压降(ΔP), 采用离散信号的统计分析方法, 对压降的时间序列进行统计, 得到不同流型下压降的概率密度函数(Probability density function, PDF)分布曲线, 作为客观分类和区分流型的方式。研究不同气液来流流型在起旋器作用下的流型变化。根据可视化和压降分析的结果, 结合目前已有的螺旋流流型定义, 对起旋器出口 5.32~13.92 倍管径处的流型划分为螺旋泡状流、螺旋气柱流、螺旋间歇流、螺旋环状流 4 种流型, 并研究这些典型螺旋流流型及其压降沿流向的发展变化规律。

2.1.1 螺旋泡状流

当液相雷诺数较低的泡状来流经过起旋器后, 在起旋器下游形成气泡在管道中心的螺旋泡状流。沿流向上, 管中心做螺旋运动的气泡逐渐向圆管顶部靠近, 直至抵达圆管顶部, 形成了气泡分布在圆管顶部的气泡流。螺旋泡状流维持的距离较短, 观察到大概在 14 倍管径附近衰减为气泡流(图 2)。文中所有图片流动方向均为自右向左。压降的 PDF 曲线显示起旋器出口附近(5.32D~13.92D)和较远处(43.3D~51.9D), 压降的 PDF 曲线在零点附近存在一个明显的波峰, 流动

相对稳定; 在两者之间(22.9D~31.5D), PDF 出现多个波峰。这主要因为起旋器出口旋流强度强, 流型显现典型的螺旋泡状流; 沿流向上, 旋流强度衰减, 流型由螺旋泡状流向非螺旋的泡状流转变, 导致压降波动大; 起旋器下游较远处, 流型恢复成泡状流, 压降波动相对较低。

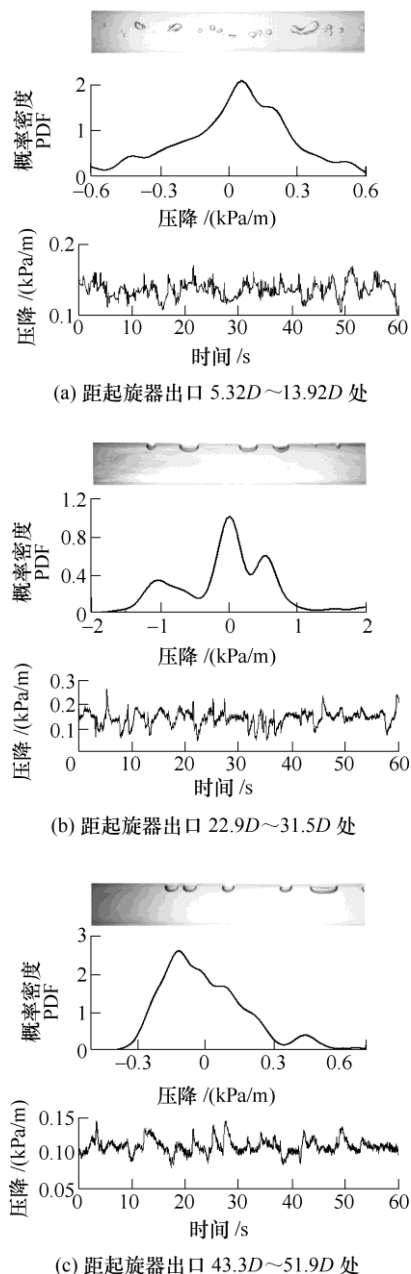


图 2 螺旋泡状流沿流向的衰减和对应位置的压降 PDF 图
($Re_l=6\ 930.69$, $Re_g=28.72$)

2.1.2 螺旋气柱流

当泡状来流的液相雷诺数相对较高时, 在起旋器下游的管道中心出现连续的气柱, 转变成螺旋气柱流。旋流强度沿流向逐渐衰减, 管中心的连续气柱尺寸发生变化, 在管道后段直径逐渐减小。气柱直径较小处液相占比高, 导致连续气柱的中断, 连

续的气柱转变成离散是做螺旋运动的气泡且形状和尺寸各异。大气泡在液相的作用下变为细长状气泡, 与小气泡一起在液体中做螺旋运动。在起旋器出口较远处, 最终恢复成气泡分布在管道顶部的泡状流动, 整个转变过程如图 3 所示。螺旋气柱流的维持距离有限。试验发现该距离与液相雷诺数有关, 液相雷诺数越高维持的距离较长。压降波动信号的 PDF 曲线显示: 在起旋器出口附近, 流动显现稳定的气柱流动, 压降波动小, 在零点附近出现一个明显的波峰; 沿着流向的发展, 气柱逐渐转变成离散的气泡运动, 该过程中流动不稳定, 压降 PDF 曲线出现多个小的波峰。

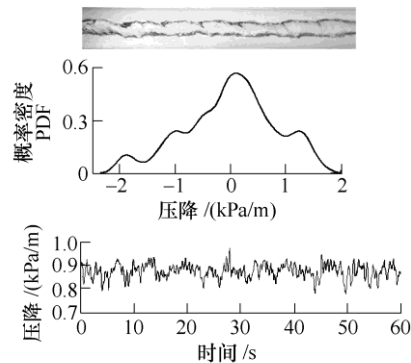
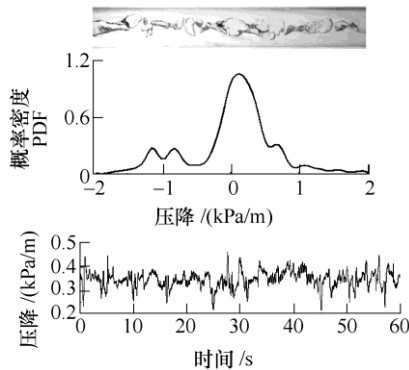
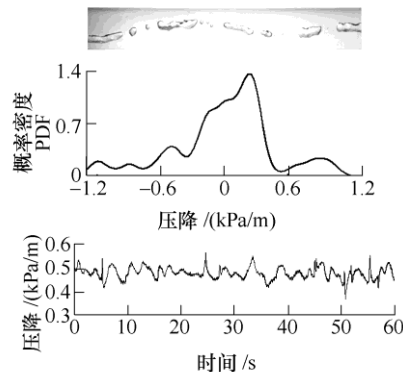
(a) 距起旋器出口 $5.32D \sim 13.92D$ 处(b) 距起旋器出口 $22.9D \sim 31.5D$ 处(c) 距起旋器出口 $43.3D \sim 51.9D$ 处

图 3 螺旋气柱流沿流向的衰减和对应位置的压降 PDF 图
($Re_f=21\ 039.60$, $Re_g=114.86$)

2.1.3 螺旋环状流

当分层流、波状流以及环状流来流经过起旋器后, 转变成螺旋环状流: 气体在管道中心、液体以液膜形式附着在管壁上做螺旋向前运动。沿流向上离心力逐渐减弱, 圆管顶部的液膜在重力作用下沿管壁向下运动, 导致液膜无法完全润湿管壁而转变成分层流动(图 4)。试验发现螺旋环状流动的维持距离与气相雷诺数相关, 气相雷诺数越大维持距离较长。基于压降的 PDF 曲线分析可以发现: 起旋器出口附近的螺旋环状流压降波动相对较大, 在零点左边出现了一个显著的波峰; 沿流向上, 仍保持一个明显的波峰, 且波峰对应的 PDF 值增大, 说明螺旋环状流逐渐转变为分层流过程中, 压降波动逐渐降低。

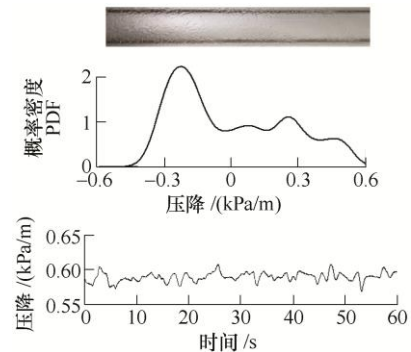
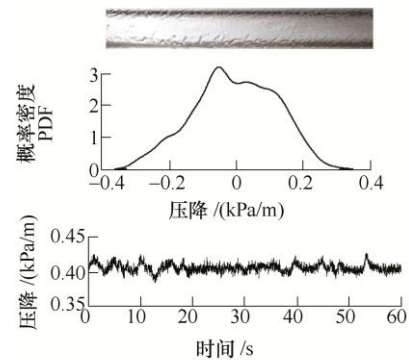
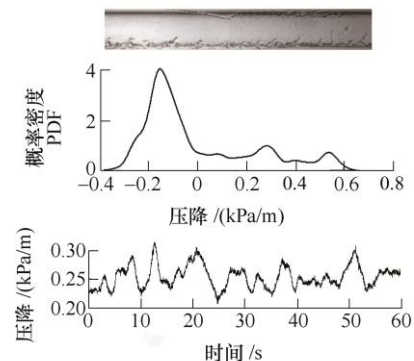
(a) 距起旋器出口 $5.32D \sim 13.92D$ 处(b) 距起旋器出口 $22.9D \sim 31.5D$ 处(c) 距起旋器出口 $43.3D \sim 51.9D$ 处

图 4 螺旋环状流沿流向的衰减和对应位置的压降 PDF 图
($Re_f=141.09$, $Re_g=12\ 432.43$)

2.1.4 螺旋间歇流

当来流为气团和液塞交替的段塞流来流时,起旋器下游的流型随着来流气液相分布的不同而转变成不同的流型,比如螺旋环状流、螺旋气柱流和分层流。同时,由于气相和液相雷诺数的不同,导致螺旋流流型的维持距离不同:液塞段经过起旋器后主要转变为螺旋气柱流,维持距离较长;气团段经过起旋器后主要转变为螺旋环状流,维持距离相对较短(图 5)。从压降的 PDF 曲线可以发现:起旋器出口附近 PDF 曲线近似为梯形,压降波动很大;沿流向上虽然压降仍旧变化很大,但有趋稳的势头,PDF 曲线图逐渐有波峰出现。螺旋间歇流相对于上述的其他螺旋流流型压降的 PDF 曲线,呈现“矮胖”型,说明螺旋间歇流的压降波动很大,流动不稳定。

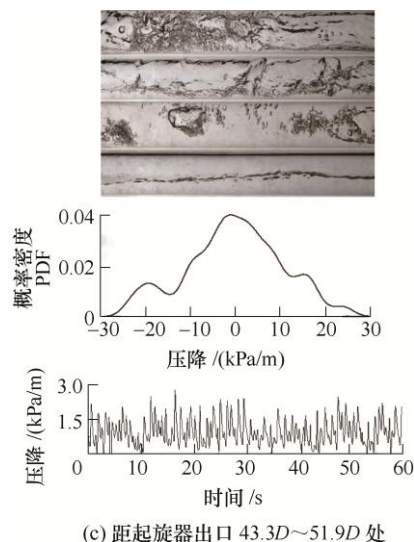
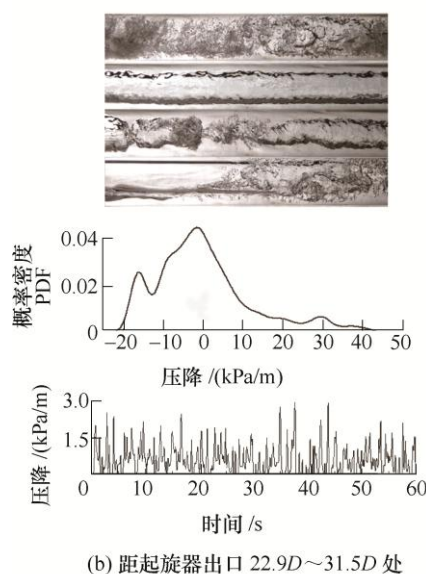
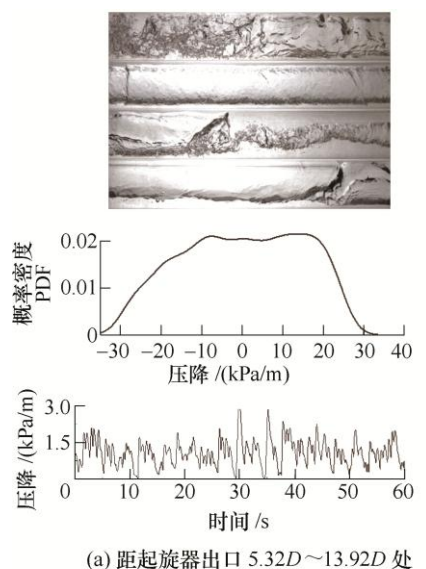
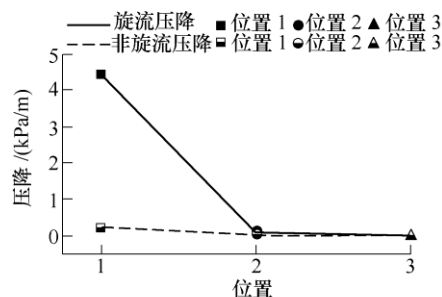


图 5 螺旋间歇流沿流向的衰减和对应位置的压降 PDF 图

($Re_l=14\ 108.91$, $Re_g=1\ 908.78$)

2.2 螺旋流的单位压降

沿流向上,气液螺旋流的流型逐渐转变为非螺旋流动,同时,压降也逐渐接近非螺旋流动(图 6)。图中位置 1 为 3.92~17.92D,位置 2 为 17.92~38.02D,位置 3 为 38.02~58.22D。比较了沿流向上不同螺旋流流型(螺旋泡状流、螺旋气柱流、螺旋环状流、螺旋间歇流)与非螺旋流动对应位置的压降,发现起旋器出口附近(位置 1)螺旋流强度高,此时螺旋流的单位压降高于非螺旋流动。其中各螺旋流流型的压降大小关系为螺旋间歇流>螺旋气柱流>螺旋环状流>螺旋泡状流。随着螺旋流逐渐转变为非螺旋流,压降显著降低,接近非螺旋压降。比较不同位置处的压降可以发现,螺旋环状流在起旋器出口相对较远处(位置 2)的压降仍高于非螺旋流,而其他三种流型在此处的压降与非螺旋压降不明显,螺旋环状流的影响距离相对较远。此时螺旋环状流的气相雷诺数在比较的流型中最大,液相雷诺数最小。在位置 2 处与非螺旋流的压降比较中,表现次于螺旋环状流的是螺旋气柱流,其液相雷诺数在比较的流型中最大。气液相雷诺数的不同影响着螺旋流的流型,对于螺旋流的作用距离,有着明显主次相的流动,主相的雷诺数越大,螺旋流作用距离越远。



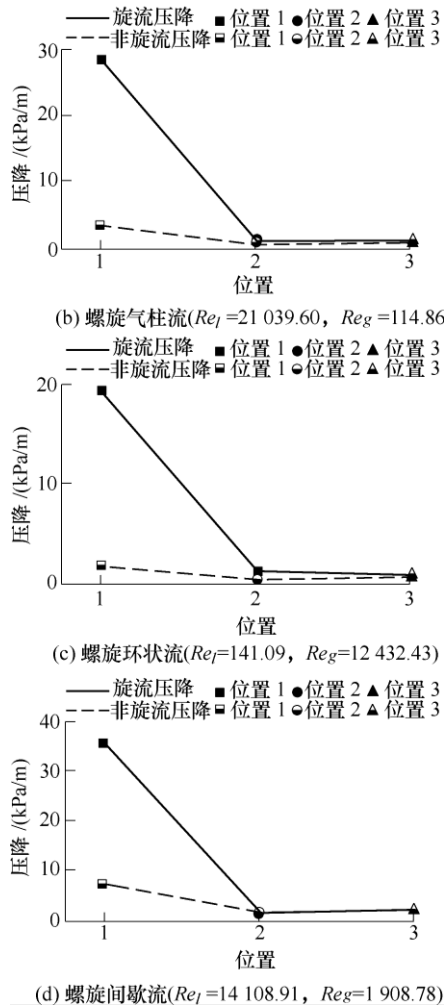


图 6 旋流和非旋流单位压降对比

2.3 螺旋流的作用距离

在试验工况条件下,研究了气液相雷诺数对不同螺旋流流型作用距离的影响。由于螺旋间歇流的作用距离随来流气液相分布影响非常大,难以准确判断气液相雷诺数对其作用距离的影响,因此该流型在本文不做讨论(螺旋间歇流的作用距离试验中观察到大概在 30~50 倍管径附近)。对于螺旋泡状流,由于增加液相雷诺数会向螺旋气柱流转变,故只研究气相雷诺数对其作用距离的影响。螺旋气柱流以及螺旋环状流分别研究了气液相雷诺数对螺旋流作用距离的影响(图 7)。

固定液相雷诺数不变($Re_l=6\ 930.69$),螺旋泡状流的作用距离随着气相雷诺数的增加逐渐变短。气相雷诺数的增加导致气泡的尺寸增大,气体所受浮力增大,进而起旋器之后的气泡难以继续维持在管道中心,气泡向圆管顶部运动转变为泡状流。固定螺旋气柱流的液相雷诺数不变($Re_l=21\ 039.60$),随着气相雷诺数的增加,该流动作用距离缩短;控制螺旋气柱流的气相雷诺数不变($Re_g=114.86$),随着液相雷诺数的增加,离心力

增大,该流动作用距离延长。对于螺旋环状流,固定液相雷诺数不变($Re_l=141.09$),随着气相雷诺数的增加,螺旋环状流的作用距离延长。气相雷诺数的增加使得更多液体被气液卷积起来环绕管壁做螺旋运动,液膜此时能完全润湿管壁;固定螺旋环状流的气相雷诺数不变($Re_g=12\ 432.43$),随着液相雷诺数的增加,螺旋环状流的作用距离先延长后缩短:液相雷诺数较小时,液体无法完全润湿管壁,以丝带状的形式环绕管道做螺旋向前运动;随着液相雷诺数的增加,丝带宽度变宽,最终完全润湿管壁,其作用距离也延长;液相雷诺数继续增加,完全润湿管壁的螺旋环状流中液膜厚度增大,气体携带液体做螺旋运动所需要的界面剪切力更高,现有气相雷诺数工况下不足以提供足够的剪切力,导致螺旋环状流的作用距离缩短。

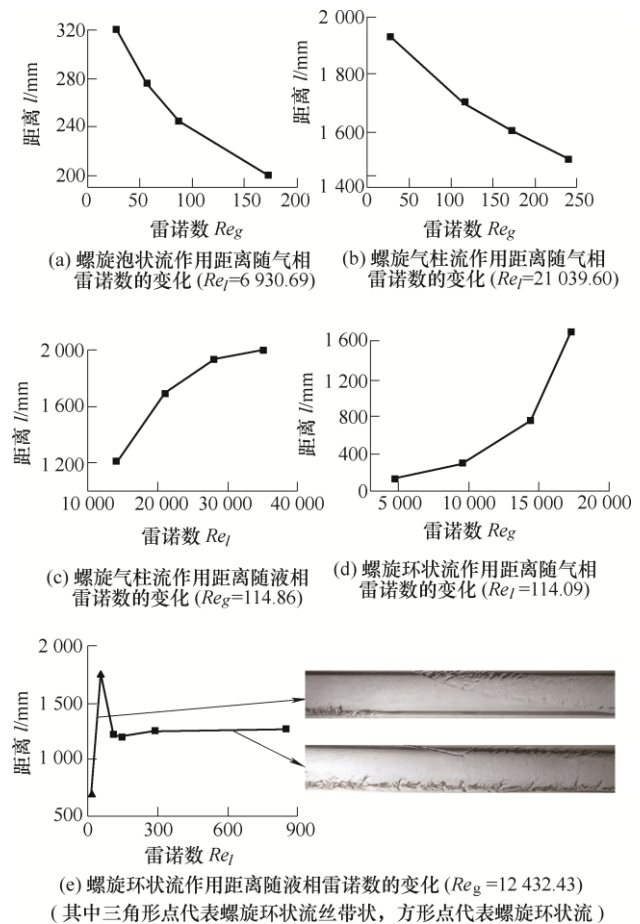


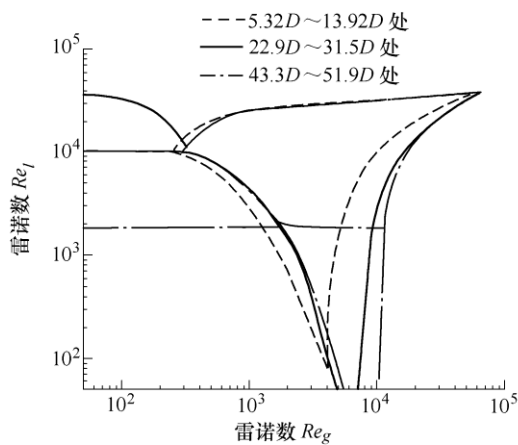
图 7 气液相雷诺数对螺旋流作用距离的影响

2.4 螺旋流流型图

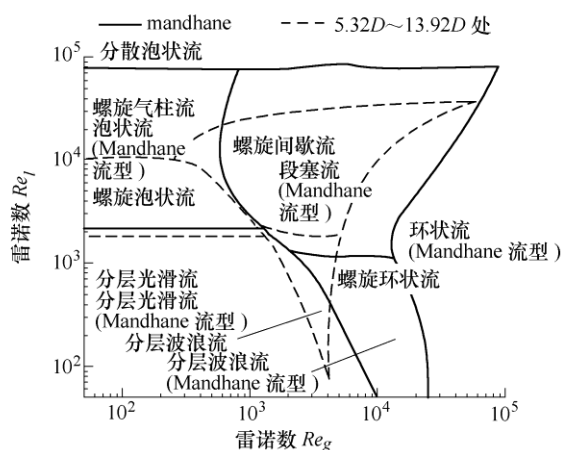
根据流型的可视化结果,并结合压降波动的 PDF 分析,绘制了气液两相螺旋流沿流向不同位置(5.32~13.92 倍管径处、22.9~31.5 倍管径处和 3.3~51.9 倍管径处)的流型图。流型图的横纵坐标分别为

气相和液相的雷诺数(图8)。从图8中可以看出螺旋泡状流随着液相雷诺数的增大会转变为螺旋气柱流,随着气相雷诺数的增大则会转变为螺旋间歇流;随着气相雷诺数的继续增大,螺旋间歇流会向螺旋环状流转变;气液相雷诺数都较高的情况下,随着液相雷诺数的降低,螺旋间歇流向螺旋环状流和分层流转变;继续降低气相雷诺数或增大液相雷诺数都会转变为螺旋气柱流;同时,螺旋环状流随着气相雷诺数的降低也会向分层流转变。

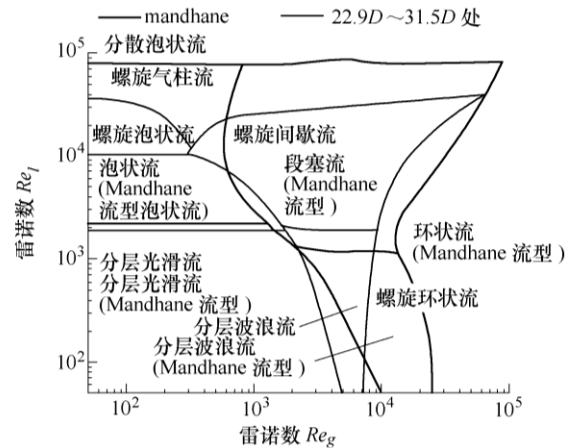
沿流向上由于旋流强度逐渐衰减,流型不断变化,在22.9~31.5倍管径处的流型图如图8c所示,低液相雷诺数的螺旋泡状流无法长距离保持,逐渐转变为泡状流;部分螺旋气柱流中的液体无法一直使气体聚集成气柱在管道中间,气柱直径沿流向逐渐变小,最终转变为螺旋泡状流;气相雷诺数相对较低的螺旋环状流维持距离较短,距起旋器出口22.9~31.5倍管径处衰减为分层波浪流,气相雷诺数相对高的螺旋环状流在此位置仍能继续保持。距起旋器出口相对较远的43.3~51.9倍管径处的流型图如图8d所示,螺旋气柱流向螺旋泡状流转变;螺旋环状流向分层波浪流转变。



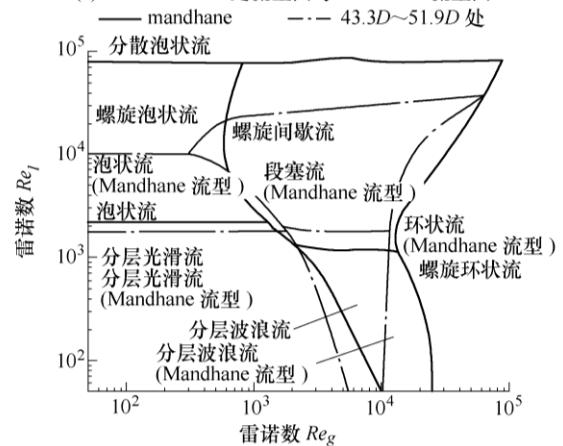
(a) 各位置水平管中气液两相螺旋流流型图



(b) 5.32D~13.92D处流型图与Mandhane流型图



(c) 22.9D~31.5D处流型图与Mandhane流型图



(d) 43.3D~51.9D处流型图与Mandhane流型图

图8 气液两相螺旋流沿流向不同位置的流型图

2.4.1 与非旋流流型图比较

与非旋流的Mandhane流型图对比结果见图8。从图8中可以看出,在起旋器出口附近流型变化较大,除部分分层光滑流、分层波浪流外,流型都向螺旋流流型转变。原泡状流区域工况在加入起旋器后出现三个不同的螺旋流工况,分层波浪流的工况区域大幅缩小,因起旋器的存在产生离心力向螺旋流转变。流型转变界限向雷诺数较小的工况转移。随着流动沿轴向的发展,旋流强度衰减,22.9~31.5倍管径处部分螺旋泡状流已经衰减为泡状流,分层波浪流的工况区域也在进一步扩大,有向非旋流流型图靠拢的趋势。在试验管路末端的43.3~51.9倍管径处,旋流强度的进一步衰减,螺旋气柱流消失,流型转变界限的趋势与非旋流大致相同逐渐趋同于非旋流流型。从图8可以看出,螺旋流流型从起旋器出口开始在流向上不断变化,随着运动距离的延长不断衰减。本试验范围内,在试验管路末端螺旋流型已经衰减到接近非旋流的流型。

3 结论

本文通过可视化试验研究了水平管内气液螺旋流流型及压降沿流向的发展, 主要获得了以下结论。

(1) 水平管中典型气液螺旋流流型(螺旋泡状流、螺旋气柱流、螺旋间歇流和螺旋环状流)的作用距离有限: 起旋器下游随着流动的发展, 螺旋泡状流衰减为泡状流, 螺旋气柱流衰减为螺旋泡状流, 螺旋环状流衰减为分层光滑流和分层波浪流。

(2) 除了流型, 螺旋流对压降的作用距离同样有限: 起旋器出口附近旋流压降远高于非旋流压降; 随着流动的发展, 压降逐渐降低接近非旋流压降。

(3) 螺旋流作用距离与气液相雷诺数及来流相分布有关。液相雷诺数较低且含气率较低时, 随着气相雷诺数的增加, 螺旋流作用距离缩短, 随着液相雷诺数的增加, 螺旋流作用距离延长; 高含气率时, 随着气相雷诺数的增加, 螺旋流作用距离延长。相同气液相雷诺数下, 来流相分布同样影响下游的流型以及作用距离的长短。

参 考 文 献

- [1] 李玉星, 冯叔初. 油气水多相管流[M]. 1版. 青岛: 中国石油大学出版社, 2011.
LI Yuxing, FENG Shuchu. Oil, gas and water multiphase flow in pipelines[M]. 1st ed. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2011.
- [2] 熊鳌魁, 魏庆鼎. 一种强螺旋流现象的实验研究[J]. 流体力学实验与测量, 1999, 13(4): 8-13.
XIONG Aokui, WEI Qingding. Experiment study on a sort of strong swirling flow[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 1999, 13(4): 8-13.
- [3] 靳文字, 李永业, 张乐元, 等. 螺旋流研究进展及工业应用[J]. 山西水利, 2009, 25(1): 66-67.
JIN Wenyu, LI Yongye, ZHANG Leyuan, et al. Research progress and industrial application of swirling flow[J]. Shanxi Water Resources, 2009, 25(1): 66-67.
- [4] ZOHIR A E, AZIZ A A A, HABIB M A. Heat transfer characteristics in a sudden expansion pipe equipped with swirl generators[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2011, 32: 352-361.
- [5] SKOPICH A, PEREYRA E, SARICA C. Pipe-diameter effect on liquid loading in vertical gas wells[J]. SPE Production and Operations, 2015, 30(2): 164-176.
- [6] VEEKEN C A M, BELFROID S P C. New perspective on gas-well liquid loading and unloading[J]. SPE Production and Operations, 2011, 26(4): 343-356.
- [7] 张翠婷. 涡流工具在天然气井井底排液中的应用[D]. 大庆: 东北石油大学, 2012.
ZHANG Cuiting. The application of vortex tools in bottom's drainage of the natural gas wells[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2012.
- [8] 杨旭东, 卫亚明, 肖述琴, 等. 井下涡流工具排水采气在苏里格气田探索研究[J]. 钻采工艺, 2013, 36(6): 125-127.
YANG Xudong, WEI Yaming, XIAO Shuqin, et al. Study of drainage gas production by downhole vortex tool in Sulige gas field[J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(6): 125-127.
- [9] ALI A J, SCOTT S L, FEHN B. Investigation of a new tool to unload liquids from stripper-gas wells[J]. SPE Production & facilities, 2005, 20(4): 306-316.
- [10] 马国光, 李晓婷, 张峰, 等. 涡流工具在气田地面集输上的应用研究[J]. 油气田地面工程, 2015, 34(11): 49-51.
MA Guoguang, LI Xiaoting, ZHANG Feng, et al. Research on the application of vortex tool on gathering and transportation in gas field[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2015, 34(11): 49-51.
- [11] SURENDRA M, FALCONE G, TEODORIU C. Investigation of swirl flows applied to the oil and gas industry[C]// Society of Petroleum Engineers. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, September 9-21, 2008, Denver, Colorado. Denver: SPE, 2008: 1-8.
- [12] FALCONE G, HEWITT G F, LAO L, et al. ANUMET: A novel wet gas flowmeter[C]// Society of Petroleum Engineers. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, October 5-8, 2003, Denver, Colorado. Denver: SPE, 2003: SPE-84504-MS.
- [13] LIU W, BAI B F. Two-phase flow patterns and pressure drop inside a vertical pipe containing a short helical tape insert[C]// American Society of Mechanical Engineers. Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, August 3-7, 2014, Chicago, Illinois. Chicago: ASME, 2014: V01DT38A00.
- [14] 刘雯, 骆政园, 白博峰. 管内螺旋涡流的数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(12): 2060-2063.
LIU Wen, LUO Zhengyuan, BAI Bofeng. Numerical study of helical vortices in a circular pipe[J]. Journal of

- Engineering Thermophysics, 2011, 32(12): 2060-2063.
- [15] 刘雯, 张铎, 曹学贵, 等. 短纽带作用下气液两相旋流液膜的形成及发展[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(5): 906-909.
- LIU Wen, ZHANG Duo, CAO Xuegui, et al. Formation and development of liquid film in gas-liquid two phase swirling flow induced by a short twisted tape[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(5): 906-909.
- [16] LIU W, LÜ X F, BAI B F. The effect of swirl on transition from churn flow to annular flow in an intermediate diameter pipe[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019: 109.
- [17] WANG S L, RAO Y C, WU Y X, et al. Experimental research on gas-liquid two-phase spiral flow in horizontal pipe[J]. China Petroleum Processing and Petrochemical Technology, 2012, 14(3): 24-32.
- [18] 饶永超, 梁俊, 王树立, 等. 以叶轮起旋的气液两相螺旋流摩擦阻力特性实验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2017, 32(1): 88-95.
- RAO Yongchao, LIANG Jun, WANG Shuli, et al. Experimental study on the frictional resistance of gas-liquid two-phase spiral flow generated by vane[J]. Journal of Hydrodynamics, 2017, 32(1): 88-95.
- [19] 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 Shuli, RAO Yongchao, WU Yuxian, 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.
- [20] 李建敏, 王树立, 饶永超, 等. 表面活性剂对气液两相螺旋管流流动特性的影响[J]. 水动力学研究与进展, 2015, 30(1): 18-23.
- LI Jianmin, WANG Shuli, RAO Yongchao, et al. Effect of surfactant on flow characteristics of gas-liquid two-phase spiral tube flow[J]. Hydrodynamics Research and Progress, 2015, 30(1): 18-23.
- [21] LIU W, BAI B F. Transition from bubble flow to slug flow along the streamwise direction in a gas-liquid swirling flow[J]. Chemical Engineering Science, 2019, 202: 392-402.
- [22] LIU W, BAI B F. Swirl decay in the gas-liquid two-phase swirling flow inside a circular straight pipe[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 68: 187-195.
- [23] LIANG F C, FANG Z J, CHEN J, et al. Investigating the liquid film characteristics of gas-liquid swirling flow using ultrasound doppler velocimetry[J]. AIChE Journal, 2017, 63(6): 2348-2357.
-
- 作者简介: 刘雯(通信作者), 女, 1988 年出生, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为多相流。
- E-mail: liuwen@cczu.edu.cn