

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20190388

水平管环状流液膜厚度与波动参数分布

孙宏军¹, 王伟¹, 桂明洋²

(¹ 天津大学电气自动化与信息工程学院, 过程检测与控制重点实验室, 天津 300072; ² 中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

摘要: 环状流是常见的一种气液两相流型, 基于双平行电导探针阵列传感器设计了环状流液膜动态测量系统, 以水和空气为介质, 进行了气相表观流速 15~35 m/s、液相表观流速 0.1~0.4 m/s 范围内的水平管环状流周向液膜测量实验, 分析了水平管环状流的液膜厚度、相界面波动参数的空间分布与发展变化规律。结果表明, 水平管环状流底部液膜厚度随气相表观流速的增加而减小, 随液相表观流速的增加而增大, 但在高液相表观流速时有饱和趋势, 对应条件下周向其他位置的液膜厚度持续增大, 尤其在 45° 位置显著增大, 下半周液膜分布趋于平缓; 由底部到顶部, 液膜波速和波频在周向上均呈逐渐减小趋势, 与液膜厚度的分布规律一致, 大幅度的扰动波主要分布在底部; 底部液膜波速和波频随气相表观流速增加而增大, 液相表观流速增加时, 波速随之增大, 但波频无明显变化, 对应波长增大。

关键词: 环状流; 双平行电导探针; 液膜厚度; 界面; 波频; 波速; 分布

中图分类号: O 359*.1

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 0438-1157 (2019) 11-4162-10



Distribution of liquid film thickness and wave parameters in horizontal annular flow

SUN Hongjun¹, WANG Wei¹, GUI Mingyang²

(¹ Key Laboratory of Process Detection and Control, School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ² 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, Hebei, China)

Abstract: Annular flow is a common type of gas-liquid two-phase flow. A dynamic measurement system for annular flow liquid film with double parallel conductance probes array sensor is designed. The experiments in horizontal annular flow with superficial gas velocity of 15–35 m/s and superficial liquid velocity of 0.1–0.4 m/s are carried out. And the distribution of liquid film thickness and phase interface wave parameters in horizontal annular flow is analyzed. The results show that the bottom liquid film thickness decreases with the increase of the superficial gas velocity, and increases with the increase of the superficial liquid velocity in the horizontal annular flow. But there is a saturated growth trend at high superficial liquid velocity. Meanwhile, the liquid film thickness at other circumferential positions increases continuously, especially at 45° position. And the distribution of liquid film tends to be uniform at the lower half circumference. From the bottom to the top, the wave velocity and wave frequency of the circumferential liquid film decrease gradually, which is consistent with the distribution of the

收稿日期: 2019-04-16 修回日期: 2019-07-31

通信作者及第一作者: 孙宏军(1974—), 女, 博士, 副教授, sunhongjun@tju.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(61873184)

引用本文: 孙宏军, 王伟, 桂明洋. 水平管环状流液膜厚度与波动参数分布[J]. 化工学报, 2019, 70(11): 4162–4171

Citation: SUN Hongjun, WANG Wei, GUI Mingyang. Distribution of liquid film thickness and wave parameters in horizontal annular flow[J]. CIESC Journal, 2019, 70(11): 4162–4171

liquid film thickness. The large disturbance wave mainly distributes at the bottom. The wave velocity and wave frequency of the bottom liquid film increase with the increase of the superficial gas velocity. However, the influence of the superficial liquid velocity to wave velocity and wave frequency is different. With the increase of superficial liquid velocity, the wave velocity increases, but the wave frequency almost unchanged, and the wavelength increases correspondingly.

Key words: annular flow; conductance probes array; liquid film thickness; interface; wave frequency; wave velocity; distributions

引言

环状流是一种典型的气液两相流动流型,其传热传热性能优良,广泛应用于石油化工、航空航天、核能核电等领域^[1]。环状流体积含液率较低,气相表观流速较快,液相贴管壁流动构成环形液膜,气相被液膜包覆在管道中心形成气芯,两相之间构成环形相界面,气液两相界面存在波动和较强剪切作用,气芯中又夹带部分液滴,两相混合在管道中流动。环状流液膜厚度及其界面处波动参数的测量是环状流研究的重要方向,然而其物理规律和作用过程十分复杂,目前的检测技术与流动理论的研究仍不够完善^[2-5]。

环状流液膜的检测方法较多,其中应用最广泛、结果最可靠的是电导法^[6-8]。电导法利用气液两相电导率的差异对液膜进行检测,电极接触液膜形成闭合回路,由液膜的电导值得到液膜厚度。电导传感器根据电极结构的差异,可分为探针式和贴壁式两种,探针式电极对不同厚度的液膜通用性好,贴壁式电极更适用于较薄液膜的测量。国内外研究者设计了很多电导实验来研究液膜特性,Coney^[9]最早采用平齐安装金属条形电极的方式测量了波动的液膜,通过将金属条分成三部分避免了边缘效应,测量上限为2.5 mm。Wang等^[10]设计了一种插入深度可调的探针来测量波动液膜厚度,并在此基础上,提出了一种基于占空比权重的时间平均液膜厚度计算方法。李广军等^[11]设计了基于双平行电导探针的液膜测量系统,该系统对水平管道内气液两相分层流的液膜厚度进行了准确测量。Al-Sarkhi等^[12]采用侵入式电极结构测量了液膜厚度,将两个金属电导探针齐平插入管道,通过从水平到垂直管环状流的检测,研究了大管径、高流速下管道倾角对环状流波动特性的影响。Andreussi等^[13]采用了与侵入式电极结构相似的平行线探针结构,为了提高电极的稳定性,设计了两根导线贯穿整个管道,通

过测量两个电极之间的电导,进而推导出液膜厚度。这些研究报道了液膜的各自物理性质,各有其侧重点。但目前仍然缺乏宽流速范围下,水平管环状流液膜厚度与波动的周向分布性质的研究数据。

为研究水平管环状流液膜厚度及波动参数的空间分布性质、发展变化规律,本文基于电导法进行了实验,定量研究了环状流液膜的厚度分布与变化、波动参数分布与变化及其影响因素,对水平管液膜的物理性质进行了更加系统的研究。

1 实验装置

1.1 双闭环可调压湿气实验装置

实验在天津大学双闭环湿气实验装置^[14]进行,如图1所示,该装置由气相循环回路、液相循环回路、气液混合水平实验管段构成。实验装置管道规格为DN50,实验循环过程依靠计算机控制系统调节。实验气相介质为压缩空气,液相介质为水。气液两相混合前,分别采用涡轮流量计和电磁流量计进行标准计量,精度分别为1%、0.5%。两相混合介质流经60D的前直管段,充分发展后形成稳定的环状流,随后流入6D的实验管路,实验结束后两相分离实现循环利用。

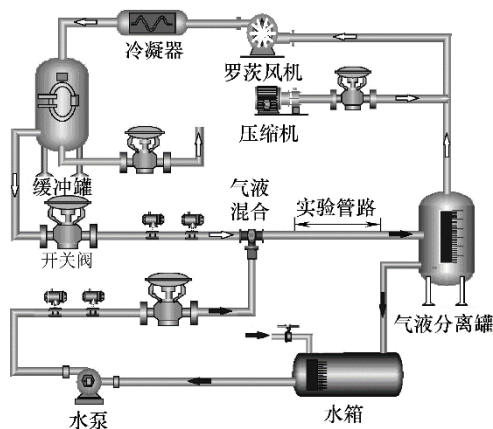
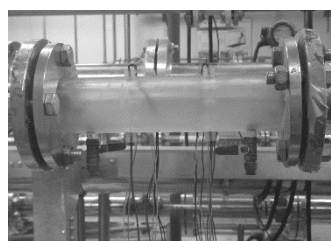


图1 双闭环湿气实验装置

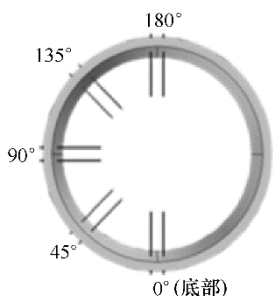
Fig.1 Flow loops of wet gas experimental setup

1.2 双平行电导探针阵列传感器

电导探针是最常见的电导传感器,以其结构简单、应用条件宽泛、测量可靠性好,在多相流检测研究中得到广泛应用^[15]。基于液膜厚度测量原理,设计了测量液膜厚度及其波动参数的双平行电导探针阵列传感器。探针分布于上下游相距 100 mm 的两截面,在每个截面上,沿周向 0°~180°,每隔 45°安装一组双平行电导探针,以实现空间同步分布和相关法速度测量。该传感器的实物图与周向布置方式如图 2 所示。为了保持一定的机械强度,同时尽量减小绕流,探针直径选择为 0.5 mm,为适应液膜厚度的测量范围,两探针间距设计为 3 mm,探针长度 15 mm,管道为有机玻璃材质,探针为不锈钢,两端利用活法兰保持安装时水平。



(a) 传感器实物图



(b) 探针周向分布方式

图 2 双平行电导探针阵列传感器及探针周向分布方式

Fig.2 Double parallel conductance probe and distribution of circumferential probe

COMSOL 仿真结果表明^[16],这种类型的传感器在周向存在信号耦合现象,而上下游之间的耦合可以忽略,所以在周向必须采用分时测量,而在轴向可以采用同时测量,保证了相关测速法进行波速测量的可行性。

1.3 液膜测量系统

如图 3 所示,电导法液膜测量系统包括激励电源、双平行电导探针阵列传感器、时序控制模块、信号处理模块以及数据采集模块。激励电源采 100 kHz 正弦激励信号,在高频交流激励下,水主要表现

电阻性^[9]。时序控制模块可对周向测量时序进行控制,上下游同时检测,每 10 s 切换周向检测位置。信号处理模块由整流电路和放大电路组成,将传感器输出的交流信号整流为直流信号,并将电压幅值适当放大。信号经整流放大后由数据采集卡(NI-USB-6353, 16 位分辨率)传送到 PC 机,进行保存和后续处理。本实验信号采样频率为 2 kHz,采样时间 10 s。

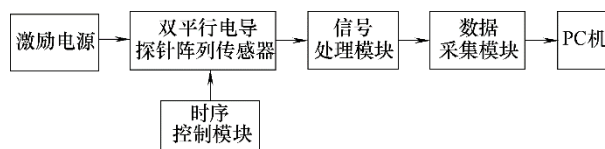


图 3 液膜测量系统

Fig.3 Measurement system of liquid film

2 实验设计及测量原理

2.1 实验设计

实验条件为水平管,实验在常温常压下进行(20℃, 101 kPa),实验数据范围为气相表观流速 15~35 m/s,液相表观流速 0.1~0.4 m/s,共 42 个实验数据点。实验前,根据修正的水平管 Baker 流型图对实验流型进行判别。该流型图的横纵坐标由气液两相的表观流速和流体密度等参数确定,可适用于不同管径条件下水平管流型的判别^[10,17-18]。修正的 Baker 流型图符合本实验工况条件,如图 4 所示,实验数据对应流型均为典型的环状流。

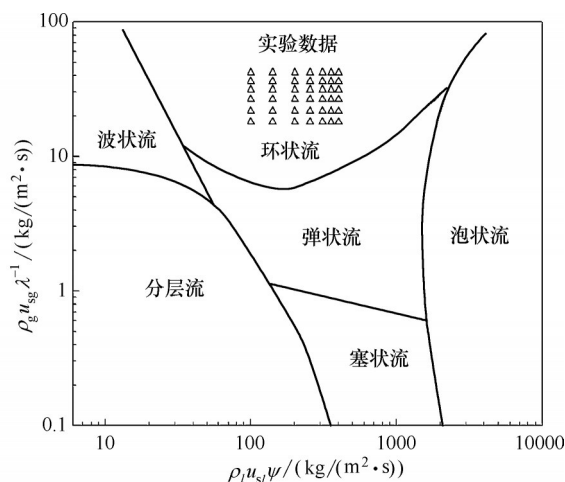


图 4 修正的 Baker 流型图及实验数据

Fig.4 Modified Baker flow pattern map and experimental data

2.2 静态标定

实验前,双平行电导探针阵列传感器需进行静态标定,且液膜厚度的测量精度依赖于静态标定的

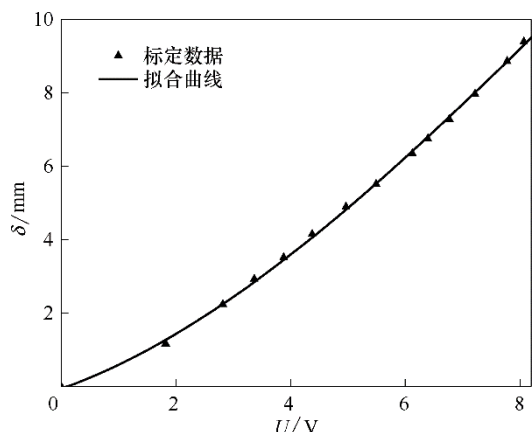


图5 静态标定与拟合结果

Fig.5 Static calibration and fitting

精度^[19]。标定过程中,采用螺旋测微器直接测量液膜厚度,其精度为0.01 mm,对标定结果进行函数拟合,结果如图5所示。

对应的液膜厚度与探针间电压值的函数关系如式(1)所示

$$\delta = -0.00365U^3 + 0.105U^2 + 0.552U - 0.0604 \quad (1)$$

式中, δ 为液膜厚度, U 为传感器采集的电压值。

通过计算可知,该拟合结果的最大误差为2.47%,测量不确定度为3.49%。

2.3 波动参数测量原理

环状流气核与液膜之间存在界面波,界面波包括扰动波和波纹。波纹是气液界面粗糙的一种现象,幅值小而较规则,影响相间剪切力。而扰动波幅值远高于波纹,且具有随机性,对环状流换热效率和空间发展等有显著影响^[20-21]。扰动波波速和波频可反映相界面波动的空间形态特征,是环状流界面波研究的关键参数^[12,22-23]。

2.3.1 波速测量原理 扰动波波速并非物理意义上的波速,而是相界面波在空间形态的传播速度,因而可依据相关法求解^[16,24],即可由双平行电导探针阵列传感器的上下游时域信号相关性,推算扰动波波速。两列时域信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 对应的互相关函数可表示为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t-\tau)dt \quad (2)$$

式中, T 为积分时间, τ 为渡越时间。对不同采样点获取的信号进行分析,获取相关信号的渡越时间,再由上下游探针间的距离,即可计算出扰动波的平均传播速度。

2.3.2 波频测量原理 波频求解依据功率谱密度函数^[25-26],根据维纳-辛钦定理,功率谱密度函数 P_{xx}

(w)可等效为原始信号自相关函数 $R_{xx}(\tau)$ 的傅里叶变换,从而得到随机信号的频域分布,如式(3)、式(4)所示

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t-\tau)dt \quad (3)$$

$$P_{xx}(w) = F[R_{xx}(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-jw\tau} d\tau \quad (4)$$

3 结果与讨论

3.1 液膜厚度测量及分布

水平管环状流底部液膜最厚,是其他位置液膜形成的基础,对环状流的性质影响最大,因此重点研究底部液膜厚度^[27]。不同气相表观流速下,部分底部液膜厚度测量时序信号如图6所示,该信号存在明显波动,上下游信号波形相似且存在一定延时,随着气相表观流速增加液膜厚度呈逐渐减小趋势,同时信号波动频率增加,波动更加规则。该现象与理论预期相符,系统可满足测量需求。

底部液膜厚度与液相表观流速的关系如图7所示,整体上,底部液膜厚度随液相表观流速的增加而增大,相应地,随气相表观流速的增加而减小,这种变化趋势与以往研究工作的结论是一致的^[10,27-28]。但在高液相表观流速下,底部液膜厚度有出现饱和并进而略微减小的异常变化趋势,并随着气相表观流速的增加,饱和点逐渐向更高液相表观流速迁移。

由环状流发展理论可知^[29],液相表观流速增加时,液膜厚度增大,波动更加剧烈,相间剪切作用加强,液膜流速加快。根据周向实验数据,底部液膜厚度减小时,周向液膜厚度仍然增加,尤其是距底部45°位置厚度显著增加,如图8所示。因此,底部液膜厚度在高液相表观流速下呈减小趋势也与界面波动现象紧密相关,随着液相表观流速增加,管道中液相波动更加剧烈,在夹带-沉积机理和二次流机理等作用下^[30],底部的液相在形成剧烈波动后向周向平铺的作用加强。

周向液膜厚度分布规律如图9所示,不同实验条件下液膜厚度值相差较大,但周向分布规律基本相同。周向液膜厚度随角度的增加而减小,0°、45°两个位置的液膜厚度比90°及以上位置的大,90°和135°位置的液膜厚度比较接近,略大于180°位置的液膜厚度。

周向平均液膜厚度估计值为周向五个位置液膜厚度的平均值,由于周向液膜厚度分布曲线为下

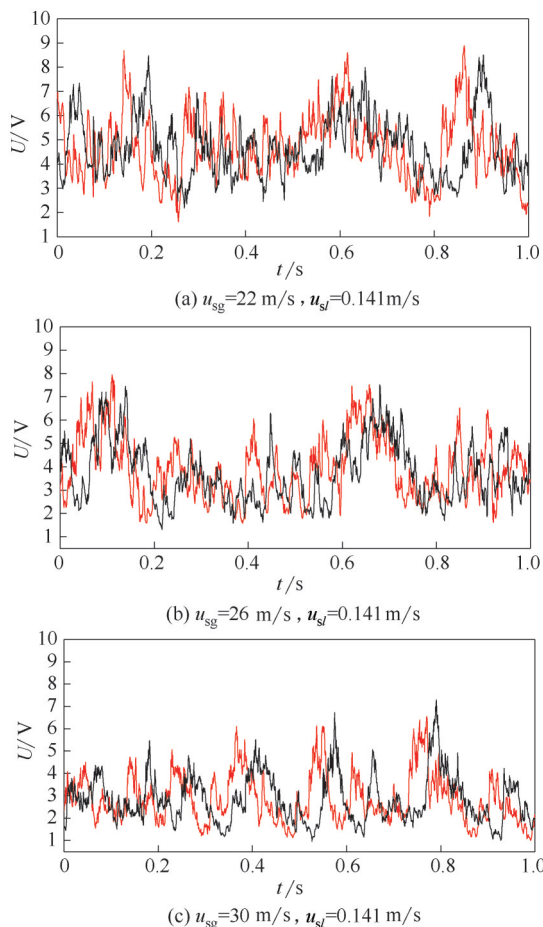


图 6 不同气相表观流速下底部液膜时序信号(红色为上游信号,黑色为下游信号)

Fig.6 Time-domain signals of bottom liquid film at different superficial gas velocity (red for upstream signal, black for downstream signal)

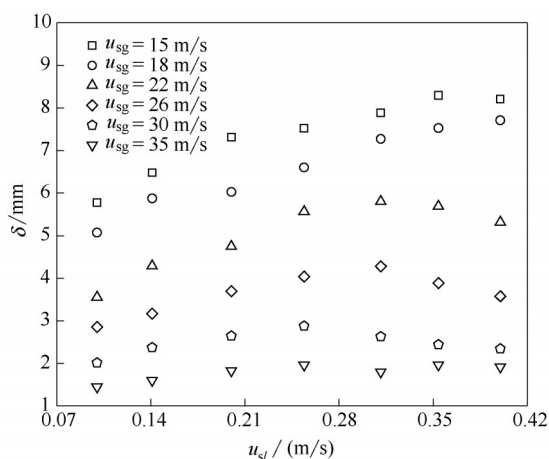


图 7 底部液膜厚度随液相表观流速的变化

Fig.7 Variation of bottom liquid film thickness with superficial liquid velocity

凸弧,该方法得到的周向平均液膜厚度估计值略大于实际的周向平均液膜厚度。得到的周向平均液

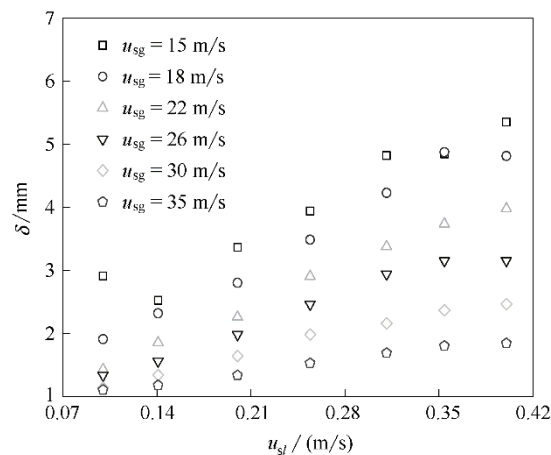


图 8 45°位置液膜厚度测量结果

Fig.8 Measurement results of liquid film thickness at 45°

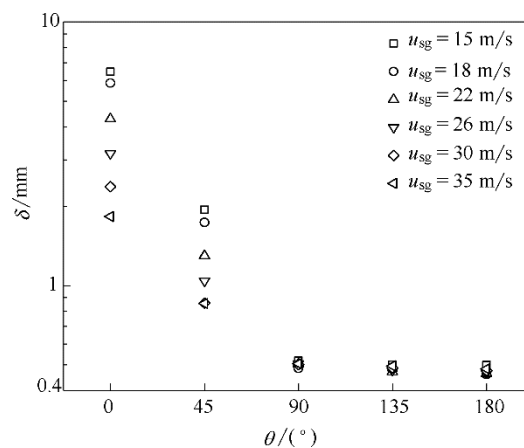


图 9 周向液膜厚度分布 ($u_{sl} = 0.254$ m/s)

Fig.9 Distribution of circumferential liquid film thickness ($u_{sl} = 0.254$ m/s)

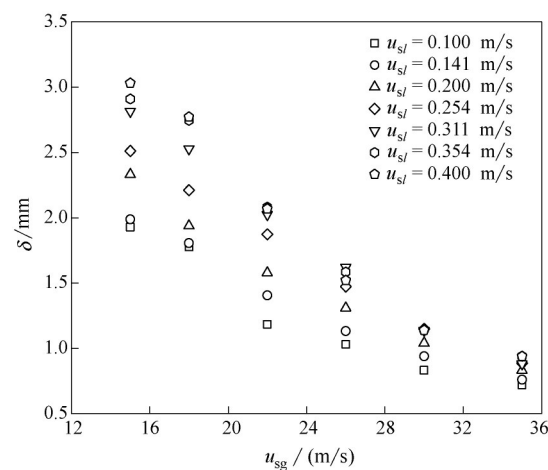


图 10 周向平均液膜厚度分布

Fig.10 Distribution of circumferential average liquid film thickness

膜厚度分布如图 10 所示,周向平均液膜厚度随气相表观流速增加而减小,随液相表观流速增加而

增大。

3.2 液膜波动参数分析

3.2.1 波速 周向波速分布如图 11 所示,该工况下,渡越时间在周向递增,波速沿周向递减,反映了波速周向分布的不均匀性,按照底部液膜厚、顶部

液膜薄的性质,厚液膜处壁面阻滞作用影响小,气相剪切作用强,因此波速快,而液膜薄时波速慢。

另外,沿周向相关函数逐渐变平缓、峰值的幅值逐渐变小,表明上下游探针信号的相关性变弱,反映了波动程度逐渐减弱。在 0° 、 45° 位置的波速在

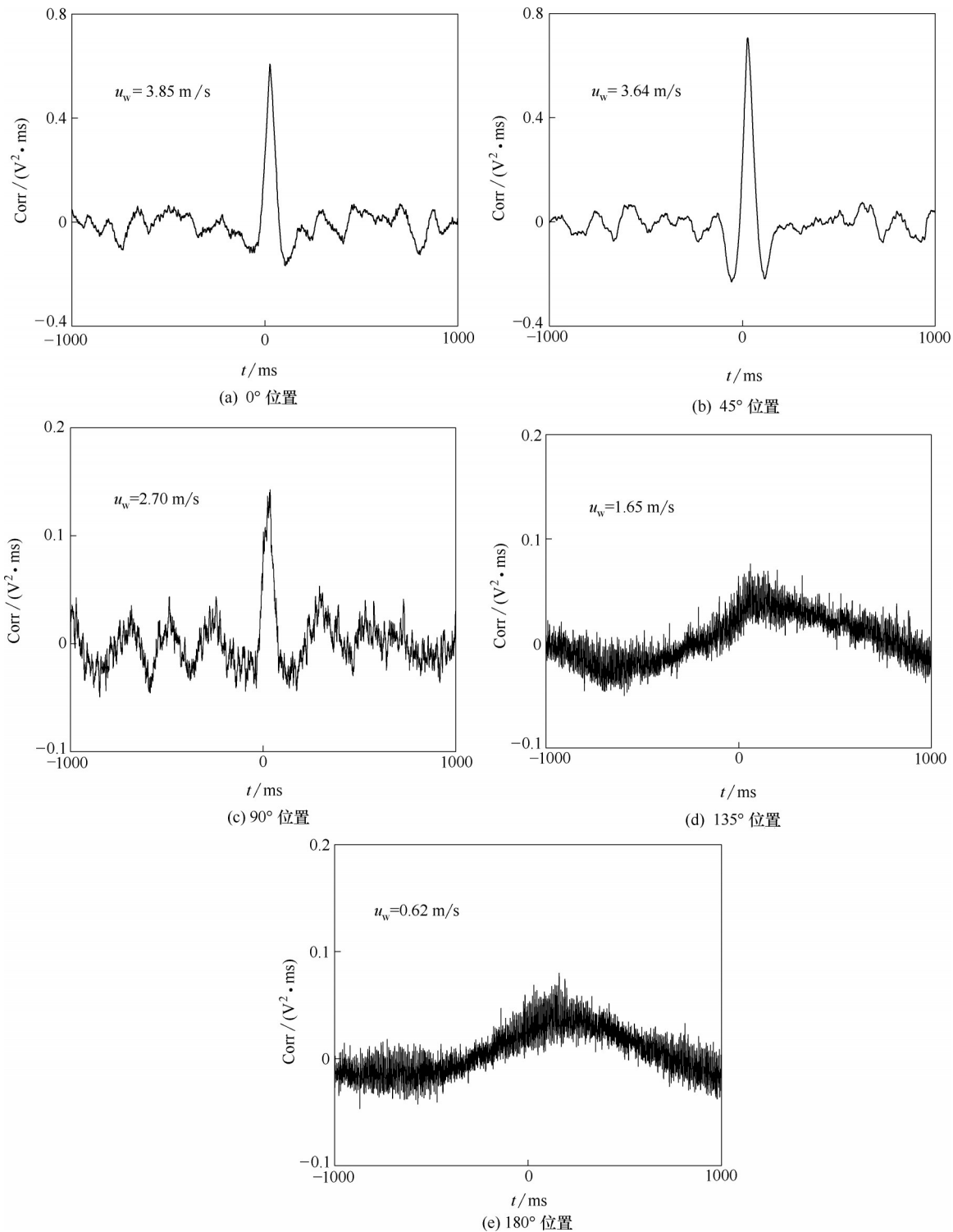


图 11 周向波速分布 ($u_{\text{sg}} = 26 \text{ m/s}$, $u_{\text{sl}} = 0.311 \text{ m/s}$)

Fig.11 Distribution of circumferential wave velocity ($u_{\text{sg}} = 26 \text{ m/s}$, $u_{\text{sl}} = 0.311 \text{ m/s}$)

很多工况下近似相等,这表明水平管扰动波在周向具有一定连续性,但这种连续性仅限于 0° 与 45° 位置, 90° 位置不再存在。在 135° 和 180° 位置上,相关函数曲线平缓,峰值不突出,速度计算结果误差大。这两个位置的信号还常常在 0° 附近出现一个单点的峰值,表明在这两个位置空间连续的扰动波的作用已经小于液膜上的非相干细小波纹的作用,扰动波主要存在于底部,在 90° 以上扰动波作用微弱,顶部基本不存在扰动波。

扰动波主要分布于液膜底部,因此波速、波频的定量分析以底部液膜波动为主^[31]。底部液膜波速随气、液相表观流速关系如图 12 所示,可以看出,波速随气相、液相表观流速的增加而增大。这一现象与 Schubring 等^[32]基于光学法测量液膜波速的研究结论是一致的。

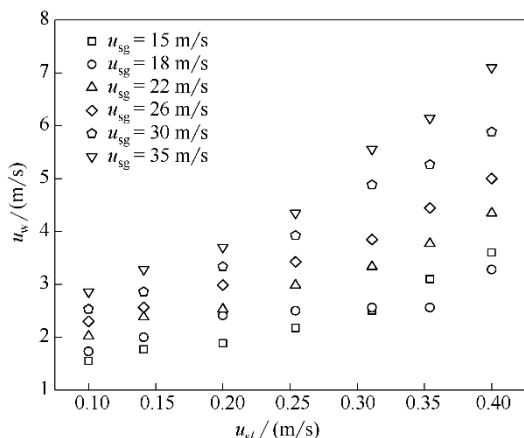


图 12 波速随液相表观流速的变化

Fig.12 Variation of wave velocity with superficial liquid velocity

Schubring 等^[33]认为影响波速最主要的因素是相间剪切作用。由实验结果来看,气相表观流速增加对液膜波速增大的作用更为显现,液膜受到高速气相的剪切作用时,两相发生动量转移,气相表观流速越大,两相速度差越大,剪切作用就越强,液膜从气相中获得的动量就越多,波速也就越大。液相表观流速增加时,对波速有两方面影响,液相表观流速越大,液膜厚度越厚,气液界面也就越远离壁面,受到壁面处液相阻滞作用就越小,同时液膜厚度增加也会使波幅增加,使波动更加剧烈,气液界面整体粗糙度增大,相间剪切作用增强,波速随之增大。

3.2.2 波频 周向波频分布如图 13 所示,该工况下, 0° 位置波动信号的功率谱峰值突出且幅值较大,在 45° 位置出现了两个峰值,分别与 0° 和 90° 位置的

峰值相同,说明 45° 位置波动近似为 0° 与 90° 位置波动的叠加,并且 45° 位置功率谱幅值更大,液膜波动更剧烈。 90° 位置峰值与 45° 位置峰值中频率较小的一个频率相等,但峰值的幅值远远小于 45° 位置。 135° 和 180° 位置峰值相同,且频率值和幅值较小,说明该位置的液膜波动十分微弱。这些现象与 Paras 等^[34]的电导实验结论基本一致。整体上,液膜波频与波速的空间分布规律相同,在周向呈逐渐减小的趋势。

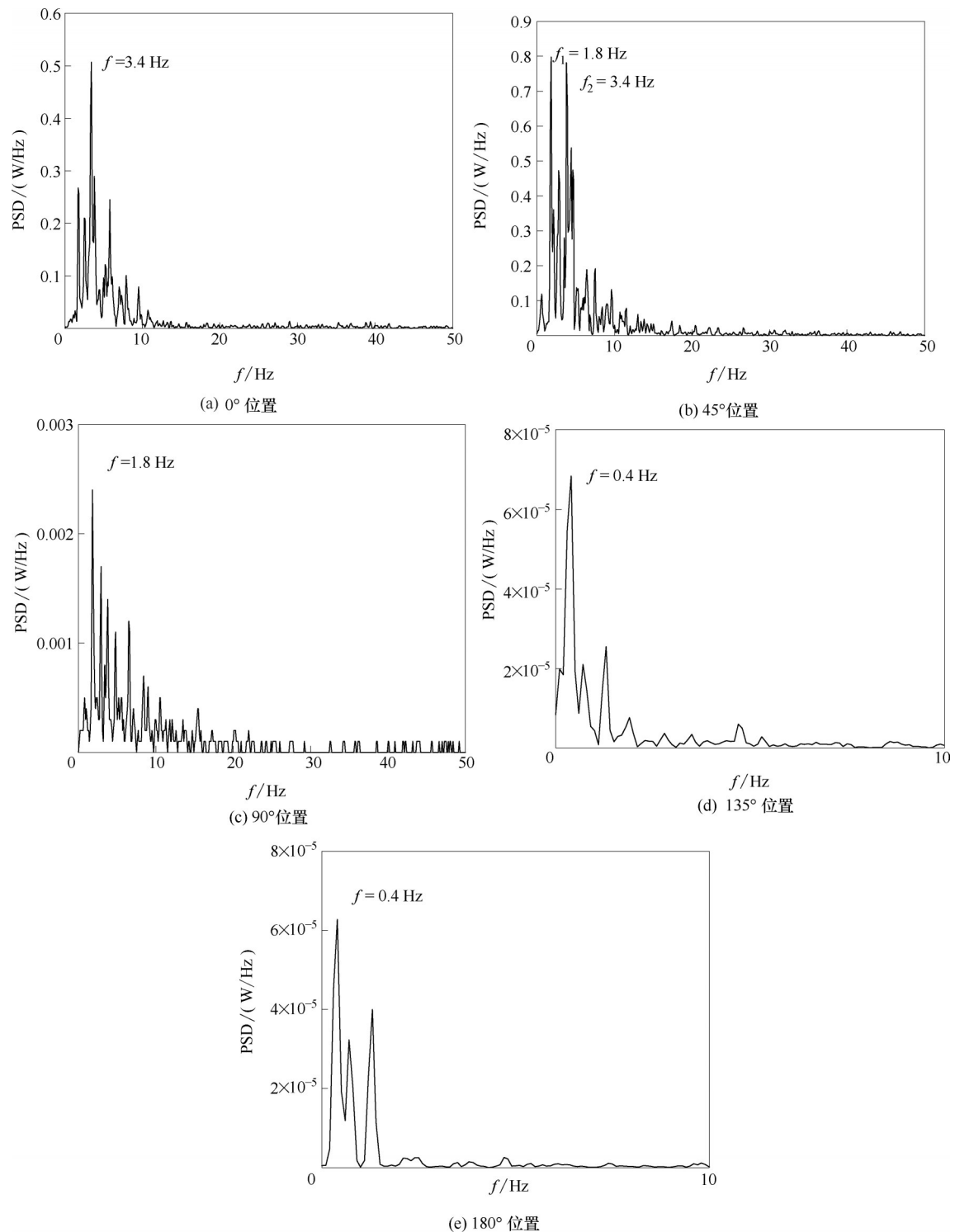
对底部液膜波频进行定量研究,底部液膜波频随气液两相表观流速增加而增大,但波频受气相表观流速影响大,液相表观流速影响较小,且随机性较强,规律性较差。为研究其定量关系,将其中一相表观流速取平均,研究另一相表观流速对波频的影响,如图 14、图 15 所示,常温常压下,水平管环状流平均波动频率随气相表观流速的增加而增大,随液相表观流速变化规律不明显。随着气相表观流速增加,波速逐渐增大,波频也对应增大,波动的规律性也逐渐加强。但液相表观流速增加时,波速对应逐渐增大,而波频没有明显变化,这是波频与波速性质的主要不同。

由测量结果可知,波速和波频存在耦合关系,但两者的影响因素不完全相同。波速增加时,受液膜波动影响,液膜更快地通过管道流通截面,在波形不变的条件下,波频应线性增加,但在水平管环状流底部,液膜厚度对波形产生了影响。当液相表观流速增加时,更厚的液膜支撑了更大几何结构的波形成,这种大波结构不仅幅值大,空间上波长也更长,虽然相间剪切作用使波速明显增加,但由于波的叠加,波峰在空间上的数量却减少了,因此固定位置上的传感器观测到的波频无明显变化。

4 结 论

基于双平行电导探针阵列传感器设计了水平管环状流液膜测量系统,以实验为基础,对环状流的液膜厚度、波速、波频进行了定量研究,分析了其物理规律,结论如下。

(1) 环状流周向液膜厚度分布不均匀,底部最厚且沿周向递减,整体上,底部液膜厚度随气相表观流速增加而减小,随液相表观流速增加而增大。在高液相表观流速下有饱和趋势,底部液膜在剧烈

图13 周向波频分布 ($u_{sg} = 22 \text{ m/s}$, $u_{sl} = 0.311 \text{ m/s}$)Fig.13 Distribution of circumferential wave frequency ($u_{sg} = 22 \text{ m/s}$, $u_{sl} = 0.311 \text{ m/s}$)

的波动作用下沿周向铺开,下半周液膜厚度分布趋于均匀。气相表观流速增加时,底部液膜厚度显著减小,顶部液膜厚度变化较小,周向液膜整体趋于均匀。

(2)从底部到顶部,液膜波动的波速、波频在周

向均呈递减趋势,与液膜厚度一致,对应波动的幅值也显著减小,扰动波主要存在于底部液膜,90°及以上位置扰动波现象非常微弱,界面波主要为波纹。

(3)底部液膜的波速、波频均随气相表观流速

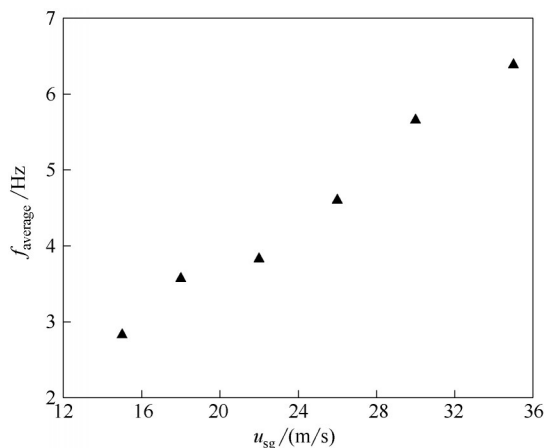


图 14 不同气相表观流速下的波频特性

Fig.14 Wave frequency characteristics at different superficial gas velocity

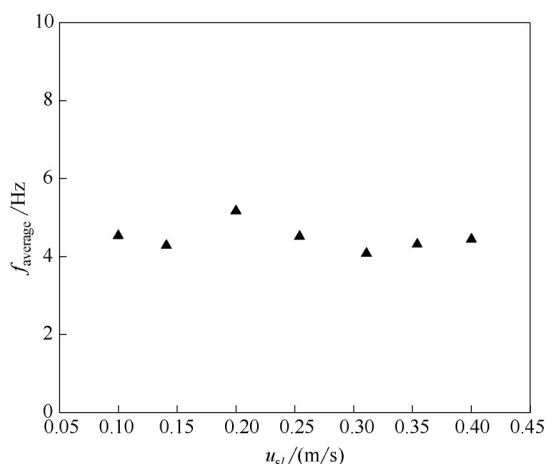


图 15 不同液相表观流速下的波频特性

Fig.15 Wave frequency characteristics at different superficial liquid velocity

的增加而增大,但液相表观流速对两者的影响不同,液相表观流速增加时,波速随之增大,但波频无明显变化,对应波长增加,剧烈的波动有叠加趋势,波的空间体积随液膜厚度的增加而增大。

符 号 说 明

Corr——相关度, $V^2 \cdot ms$

f ——频率, Hz

$f_{average}$ ——平均波动频率, Hz

PSD——功率谱密度, W/Hz

U ——电压, V

u_{sg}, u_{sl} ——分别为气相、液相表观流速, m/s

u_w ——底部液膜波动速度, m/s

δ ——液膜厚度, mm

θ ——周向角度, $^\circ$

下角标

g——气相

l——液相

参考文献

- [1] 李卫东, 李荣先, 王跃社, 等. 预测水平管气-液环状流周向液膜厚度分布的理论模型[J]. 化工学报, 2001, **52**(3): 204-208.
Li W D, Li R X, Wang Y S, et al. Model for prediction of circumferential distribution of film thickness in horizontal gas-liquid annular flow[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2001, **52**(3): 204-208.
- [2] Setyawan A, Indarto, Deendarlianto, et al. Experimental investigations of the circumferential liquid film distribution of air-water annular two-phase flow in a horizontal pipe[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, **85**: 95-118.
- [3] 赵宁, 王超, 孙宏军, 等. 一种测量环状流液膜参数的传感器研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, **49**(4): 231-238.
Zhao N, Wang C, Sun H J, et al. Measuring sensor of liquid film parameter in annular flow[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, **49**(4): 231-238.
- [4] Cioncolini A, Thome J R. Liquid film circumferential asymmetry prediction in horizontal annular two-phase flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2013, **51**: 44-54.
- [5] 马晓旭, 田茂诚. U形弯头单元内气液两相流型及压降波动特性[J]. 化工学报, 2018, **69**(5): 1972-1981.
Ma X X, Tian M C. Flow regimes of gas-liquid two-phase flow in a U-bend unit and characteristics of pressure drop fluctuations[J]. CIESC Journal, 2018, **69**(5): 1972-1981.
- [6] 李卫东, 李荣先, 周力行. 水平管内气液环状流液膜及扰动波特性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, **40**(11): 23-26.
Li W D, Li R X, Zhou L X. Liquid layer and disturbance waves properties in horizontal annular flow[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2000, **40**(11): 23-26.
- [7] Tiwari R, Damsohn M, Prasser H M, et al. Multi-range sensors for the measurement of liquid film thickness distributions based on electrical conductance[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2014, **40**: 124-132.
- [8] Samarjeet C, Balaji C, Venkateshan S P. Non-intrusive measurement of thermal contact conductance at polymer-metal two-dimensional annular interface[J]. Heat and Mass Transfer, 2019, **55**(2): 327-340.
- [9] Coney M W E. The theory and application of conductance probes for the measurement of liquid film thickness in two-phase flow[J]. Journal of Pharmacy & Pharmacology, 1973, **19**(11): 768-769.
- [10] Wang C, Zhao N, Chen C, et al. A method for direct thickness measurement of wave liquid film in gas-liquid two-phase annular flow using conductance probes[J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2018, **62**: 66-75.
- [11] 李广军, 郭烈锦, 陈学俊, 等. 气液两相流界面波的双平行电导探针测量方法研究[J]. 计量学报, 1997, **18**(3): 167-172.
Li G J, Guo L J, Chen X J, et al. Development of two parallel-wire conductance probe for measuring instantaneous liquid film thickness in gas-liquid two-phase flow[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1997, **18**(3): 167-172.
- [12] Al-Sarkhi A, Sarica C, Magrini K. Inclination effects on wave

- characteristics in annular gas-liquid flows[J]. *AIChE Journal*, 2012, **58**(4): 1018-1029.
- [13] Andreussi P, Pitton E, Ciandri P, et al. Measurement of liquid film distribution in near-horizontal pipes with an array of wire probes [J]. *Flow Measurement Instrumentation*, 2016, **47**: 71-82.
- [14] 于培宁, 徐英, 张涛, 等. 基于截面气含率的文丘里湿气压降模型[J]. *化工学报*, 2014, **65**(12): 4692-4698.
Yu P N, Xu Y, Zhang T, et al. Venturi moisture pressure drop model based on cross-section gas hold up[J]. *CIESC Journal*, 2014, **65**(12): 4692-4698.
- [15] Fossa M. Design and performance of a conductance probe for measuring the liquid fraction in two-phase gas-liquid flows[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1998, **9**(2): 103-109.
- [16] 王超, 陈超, 赵宁, 等. 用于水平环状流周向液膜特性测量的电导探针阵列[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, **31**(9): 1408-1413.
Wang C, Chen C, Zhao N, et al. Conductivity probe array for circumferential liquid film characteristic measurement in horizontal annular flow[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, **31**(9): 1408-1413.
- [17] Baker O. Simultaneous flow of oil and gas[J]. *Oil and Gas Journal*, 1954, **26**(7): 185-195.
- [18] Bell K J, Taborek J, Fenoglio F. Interpretation of horizontal in-tube condensation heat transfer correlations with a two-phase flow regime map[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1970, **65**(1): 51-58.
- [19] Zhao Y, Markides C N, Matar O K, et al. Disturbance wave development in two-phase gas-liquid upwards vertical annular flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2013, **55**: 111-129.
- [20] Han H, Zhu Z, Gabriel K. A study on the effect of gas flow rate on the wave characteristics in two-phase gas-liquid annular flow[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2006, **236**(24): 2580-2588.
- [21] Ousaka A, Mopioka I, Fukano T. Air-water annular two-phase flow in horizontal and near horizontal tubes disturbance wave characteristics and liquid transportation [J]. *Multiphase Flow*, 1992, **6**(9): 80-87.
- [22] 赵宁, 王配配, 郭素娜, 等. 垂直管气液两相环状流的界面扰动波速度[J]. *化工学报*, 2018, **69**(7): 2926-2934.
Zhao N, Wang P P, Guo S N, et al. Interfacial disturbance wave velocity of gas-liquid two-phase annular flow in vertical pipe[J]. *CIESC Journal*, 2018, **69**(7): 2926-2934.
- [23] Azzopardi B J. Disturbance wave frequencies, velocities and spacing in vertical annular two-phase flow[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1986, **92**(2): 121-133.
- [24] Alekseenko S, Antipin V, Cherdantsev A, et al. Two-wave structure of liquid film and wave interrelation in annular gas-liquid flow with and without entrainment[J]. *Physics of Fluids*, 2009, **21**(6): 061701.
- [25] 连龙杰, 林伟国, 吴海燕. 基于功率谱比对的液氯输送管道泄漏检测方法[J]. *化工学报*, 2013, **64**(12): 4461-4467.
Lian L J, Lin W G, Wu H Y. Liquid-chlorine leak detection method based on power spectrum comparison[J]. *CIESC Journal*, 2013, **64**(12): 4461-4467.
- [26] 孙宏军, 桂明洋, 赵宁. 垂直管气液两相环状流界面扰动波频率特性[J]. *化工学报*, 2018, **69**(5): 1915-1922.
Sun H J, Gui M Y, Zhao N. Frequency characteristics of interfacial perturbation waves in gas-liquid two-phase annular flow in vertical pipes [J]. *CIESC Journal*, 2018, **69**(5): 1915-1922.
- [27] Shedd T A, Newell T A. Characteristics of the liquid film and pressure drop in horizontal, annular, two-phase flow through round, square and triangular tubes[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2004, **126**(5): 807-817.
- [28] Dasgupta A, Chandraker D K, Kshirasagar S, et al. Experimental investigation on dominant waves in upward air-water two-phase flow in churn and annular regime[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, **81**: 147-163.
- [29] Hurlburt E T, Newell T A. Optical measurement of liquid film thickness and wave velocity in liquid film flows[J]. *Experiments in Fluids*, 1995, **21**(5): 357-362.
- [30] Butterworth D. Two-phase flow and heat transfer[J]. *Transport Phenomena in Multiphase Systems*, 2005, **68**(2): 853-949.
- [31] Stryawan A, Indarto, Deendarlianto. The effect of the fluid properties on the wave velocity and wave frequency of gas-liquid annular two-phase flow in a horizontal pipe[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2016, **71**: 25-41.
- [32] Schubring D, Shedd T A. Prediction of wall shear for horizontal annular air-water flow[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2009, **52**(1/2): 200-209.
- [33] Schubring D, Shedd T A. Wave behavior in horizontal annular air-water flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2008, **34**(7): 636-646.
- [34] Paras S V, Karabelas A J. Properties of the liquid layer in horizontal annular flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1991, **17**(4): 439-454.