

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107877

# 管道压力对界面扰动波演化影响分析<sup>\*</sup>

赵 宁<sup>1,3</sup>, 刘苗苗<sup>1,3</sup>, 李超凡<sup>1,3</sup>, 赵治月<sup>1,2</sup>, 郭素娜<sup>1,3</sup>

(1. 河北大学大学质量技术监督学院 保定 071002; 2. 沧州师范学院机械与电气工程学院 沧州 061001;  
3. 河北大学认证认可研究所 保定 071000)

**摘要:**本文针对界面扰动波的发展演化过程,利用液膜厚度测量传感器,在可调压中压湿气装置上进行了154组界面扰动波的测量实验,并运用递归定量分析方法提取液膜时序信号的确定性等4个特征参量,结合小波分析方法,对气液两相流界面扰动波的演化规律进行了研究,结果表明,在波状环状流中,随着管道压力的增加,界面扰动波的确定性值维持在1附近,递归熵值从4.5下降到3,表明界面波运动的有序性增强,比率值从1增加到2.5,而递归率值从0.5下降到0.3,表明扰动波由非稳态向稳态过渡;在完全环状流中,随着管道压力的增加,两相界面以规则的波纹波为主,界面波的确定性值从1下降到0.6,递归熵值从3下降到2,比率值从2.5突增到15,递归率值从0.3下降到0.1。

**关键词:**递归分析;扰动波;波动特性;环状流

中图分类号: TK313 TH814 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## Influence of pipe pressure on the evolution of interfacial disturbance wave

Zhao Ning<sup>1,3</sup>, Liu Miaomiao<sup>1,3</sup>, Li Chaofan<sup>1,3</sup>, Zhao Zhiyue<sup>1,2</sup>, Guo Suna<sup>1,3</sup>

(1. School of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China;  
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Cangzhou Normal University, Cangzhou 061001, China;  
3. Institute of Certification and Accreditation of Hebei University, Baoding 071000, China)

**Abstract:** Aiming at the development and evolution of the interface disturbance wave, this article uses a liquid film thickness measurement sensor based on near-infrared absorption and attenuation technology to conduct 154 sets of interface disturbance wave measurement experiments on an adjustable and medium pressure wet gas test facility. And the methods of recursive quantitative analysis are utilized to extract four characteristic parameters of the liquid film time sequence signal including the certainty. The wavelet analysis is combined to study the evolution law of the disturbance wave at the gas-liquid two-phase flow interface. Results show that with the increase of pipe pressure, the deterministic value of interface disturbance wave remains around 1, and the recursive entropy value decreases from 4.5 to 3, which indicate that the order of interface wave motion is enhanced. The ratio value suddenly increases from 1 to 2.5, and the recursive ratio value decreases from 0.5 to 0.3, which indicate that the periodicity of disturbance wave is significantly enhanced, and the transition from unsteady state to steady state. In fully annular flow, with the increase of pipe pressure, the two-phase interface is dominated by regular ripple waves. The certainty value of the interface wave decreases from 1 to 0.6, the recursive entropy value decreasing from 3 to 2, the ratio value suddenly increases from 2.5 to 15, and the recursion rate value dropping from 0.3 to 0.1.

**Keywords:** recursive analysis; disturbance wave; wave characteristics; annular flow

收稿日期:2021-05-03 Received Date: 2021-05-03

\*基金项目:河北大学高层次人才科研启动项目(521000981319)、河北省高层次人才资助项目(B2018003003)、河北省高等学校科学技术研究项目(QN2018046)资助

## 0 引言

气液两相环状流是两相流中最典型和常见的流型之一<sup>[1]</sup>,广泛存在于传统和新兴工业领域,如页岩气和凝析天然气管道输送、发电厂锅炉、核反应堆蒸汽发生器,大量传热传质与化学反应工程设备中的各种蒸发器、冷凝器、反应器、蒸馏塔和蒸汽加热系统等<sup>[2]</sup>。管内气液两相流动中,当气相表观流速相对于液相表观流速较大时会出现两相环状流动,其典型特征是管道内壁四周有厚度较薄的液膜,管道中心是沿轴向高速流动且伴有夹带液滴的气核。

鉴于界面扰动波特征参数的重要性,国内外诸多研究人员对界面扰动波运动特性进行了相关研究,孙宏军等<sup>[3]</sup>利用电导法对水平管内液膜厚度进行了研究,结果表明环状流底部液膜厚度与气相表观流速成反比,与液相表观流速成正比。Alekseenko 等<sup>[4]</sup>利用高速激光诱导荧光技术研究了向下气液环状流的波动特性,结果表明在气相、液相流速足够高时,扰动波开始出现并在液膜波动中占主导地位。Charogiannis 等<sup>[5]</sup>基于亮度的激光诱导荧光技术(structured planar laser-induced fluorescence, S-PLIF)研究了扰动波的发展过程,确定了扰动波发展的3个阶段。Setyawan 等<sup>[6]</sup>分析了表面张力和粘度对波速、波频的影响,结果表明在液体流速较高时,波速随着表面张力的降低而增加;波频随着液体粘度的增加和表面张力的降低而降低。An 等<sup>[7]</sup>利用亮度的移动参考框架的激光诱导荧光方法(moving frame-of-reference brightness-based laser-induced fluorescence, MFB-LIF)研究了单个扰动波在下游演化过程的主要性质,结果表明扰动波波速随着下游距离的增加而增加。Wang 等<sup>[8]</sup>采用超声回波共振主频率(ultrasonic echo resonance main frequency, UERMF)改进了扰动波波速的相关公式,结果表明新的波速相关公式适用于高压系统。Lin 等<sup>[9]</sup>利用图像分析法研究了扰动波特性,结果表明压力梯度在扰动波中起主导作用。Vasques 等<sup>[10]</sup>对小管内垂直环状流中扰动波的波速、纵向尺寸进行了分析,结果表明流动方向对扰动波波速没有明显的影响。Fan 等<sup>[11]</sup>对扰动波进行了数值研究,结果证明了 VOF(volume of fluid)方法的可行性。Fershtman 等<sup>[12]</sup>利用电导传感器研究了扰动波的界面结构,确定了扰动波与管道倾斜角的关系。何辉等<sup>[13]</sup>通过电导传感器对界面波的演化行为进行测量实验,结果表明扰动波是在气芯和液膜的相互作用的基础上发展的。但电学法本身存在因器件(如电极饱和探头老化)所带来的测量误差,超声法因漫反射导致反射波探测困难,且超声波长直接影响液膜厚度测量不确定度,这使得超声法在超薄膜的应用中受限,激光诱导荧光法对实验要求很高,荧光染料造成水污染,近红外在气液中的吸收系数

差别很大,同时受气液界面影响明显,能够很好地反映气液界面的波动情况<sup>[14]</sup>,且相对较高的精度更适合作为界面波实验的测量方法。Sun 等<sup>[15]</sup>运用近红外(near infrared, NIR)设备研究了扰动波的波频,实验表明在两种安装条件下,波频随流速和气体密度的增加而增加。两相流是复杂的非线性运动系统,递归定量分析是一种非线性指标量化的方法<sup>[16]</sup>,能将复杂系统内部规律快速直观有效的展现,具有化繁为简的优势。

本文基于近红外吸收衰减技术测量了扰动波参数,结合递归分析方法探究了不同管道压力下界面扰动波的运动特性和演化规律,然后对时序信号进行小波分析,通过不同频域的递归参量分析,进一步阐述了管道压力对界面波演化的影响。

## 1 实验装置

近红外传感器测量装置如图1所示,该传感器主要由检测器和近红外吸收单元两部分组成。准直激光二极管模块CPS980将980 nm的波长经导光管发送到液相界面上,此时经液膜吸收衰减后,近红外光信号到达光电探测器(J22-18I-R01 M),经光伏调制、整流、放大(前置放大模块(PA-7-70, EG&G))后,由DAQ卡USB6009(NI公司)将采集的输出信号存储在电脑中,其中导光管是一根外径5 mm,内径3.5 mm的304不锈钢管,顶部玻璃窗协助调节导光管深度。实验以空气-水作为流动介质,使用了天津大学可调压中压湿气的气液两相循环装置,管道内径为50 mm,管路长500 mm,如图2所示。实验空气被冷凝器冷凝后传入罗茨风机,再由风机传入涡轮流量计和罗茨流量计(LWQ-1000, LWQ-400 和 LQW100, G10, 1~1 000 m<sup>3</sup>/h, U=1%, k=2)进行测量,增压水泵把水传入电磁流量计(YOKOHAMA, AXF005G, AXF025G, 0.05~8 m<sup>3</sup>/h, U=0.35%, k=2)进行测量,然后通过引射器进入实验管段的前端与空气汇合,再经过200D充分发展后进入到测试管段,最终流入气液分离罐,被分离后的气液两相继续循环以上过程。在整个实验过程中压力由压力变送器(SBWZ-2460, Pt100, U=0.2%, k=2)检测,温度由温度变送器(YOKOHAMA, EJA530A, U=0.2%, K=2)检测。

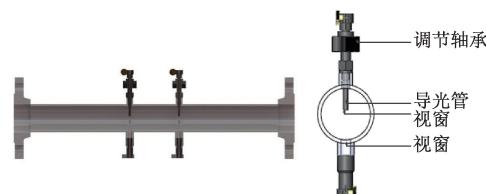


图1 近红外装置

Fig. 1 Near infrared setup

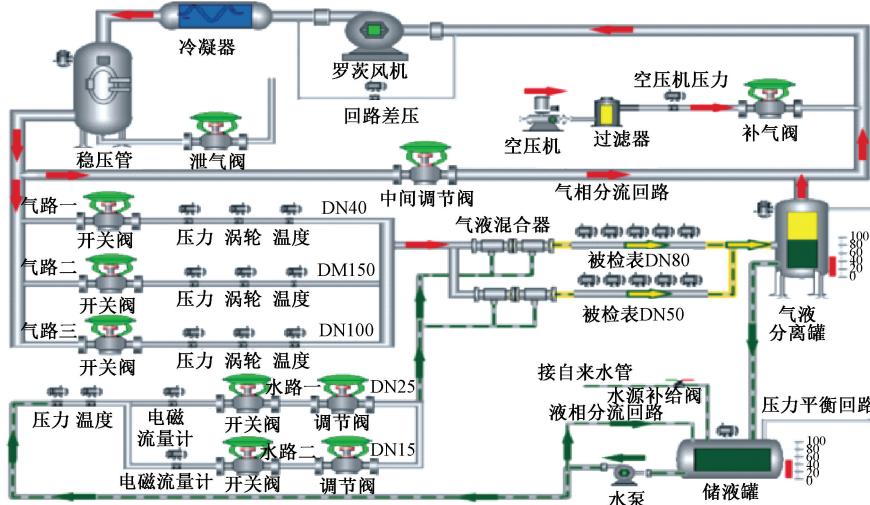


图2 两相流装置

Fig. 2 Two-phase flow setup

实验的工况条件如下:采集的工况点数目为 154 个,压力范围为 0.1~0.8 MPa,气相表观流速为 12.7 m/s、15.6 m/s,液相表观流速范围为 0.045~0.353 m/s,质量含气率范围为 0.062~0.791,采样频率为 2 000 Hz,采样时间为 15 s。

## 2 递归理论与分析

### 2.1 递归理论

递归定量分析 (recurrence quantification analysis, RQA) 是将一维时间序列  $\{x_i\}$  通过嵌入原理得到一个高维相空间  $\{X_i\}$ , 再经过一定的转换形成递归矩阵  $R_{i,j}$ , 最后将递归图中递归点和主对角线方向的线段特征量量化, 此过程展现了相空间轨迹的递归现象, 反映了系统的运动趋势。 $R_{i,j}$  公式如下:

$$R_{i,j} = \Theta(\varepsilon - \|X_i - X_j\|), i, j = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中:  $N$  是时间序列  $\{x_i\}$  点数;  $\|X_i - X_j\|$  表示相空间中任意两轨迹间的距离;  $\varepsilon$  为设定的距离参考值;  $\Theta(\cdot)$  为阶跃函数, 即 Heaviside 函数;  $R_{i,j}$  只能为 0 或 1 (0 表示相空间没有递归现象发生, 1 表示相空间轨迹有递归现象发生)。本文选用确定性 (determinism, DET)、比率 (ratio)、递归率 (recurrence rate, RR) 和递归熵 (recurrence entropy, ENTR) 4 个特征参量来表征界面扰动波的演化规律, 各个特征参数的表达式如下。

$$D_{ET} = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N lP(l)}{\sum_{i,j=1}^N R_{i,j}} \quad (2)$$

$$R_{atio} = \frac{D_{ET}}{R_R} = \frac{N^2 \left[ \sum_{l=l_{\min}}^{N-1} lP(l) \right]}{\left( \sum_{i,j=1}^N R_{i,j} \right)^2} \quad (3)$$

$$R_R = \frac{\sum_{i,j=1}^N R_{i,j}}{N} \quad (4)$$

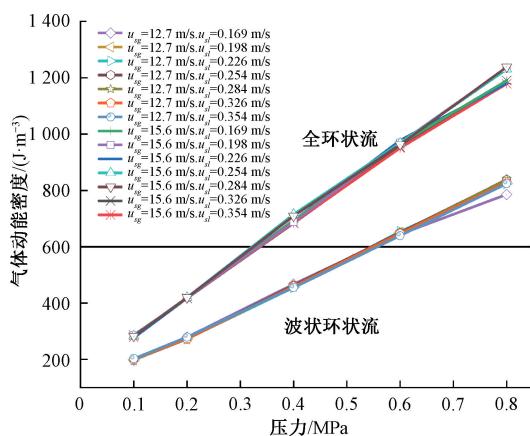
$$E_{NTR} = \sum_{l=l_{\min}}^N p(l) \ln p(l) \quad (5)$$

其中,  $l_{\min}$  表示主对角线位置上最小线段长度;  $p(l)$  表示平行于  $45^\circ$  方向中长度为  $l$  的分布概率。

环状流界面动力学特性具有复杂性、不确定性, 难以用数学模型表示, 但 RQA 法对分析系统动力学特性具有优势。从物理意义上说, 确定性和递归熵能表明系统内部有序性、复杂程度, 比率和递归率反映系统是否处于过渡阶段<sup>[17]</sup>。因此, 以上 4 个特征参量均能反映系统动力学特征以及近红外信号中的物理共性, 可作为评估界面扰动波演化过程的特征参数。

### 2.2 递归分析

由于环状流有波状环状流和完全环状流两种状态, 且波状环状流与完全环状流的区别在于液膜厚度的不对称程度和不同的剪切行为, Schubring 认为波状环状流的气体动能密度 (the gas kinetic energy density,  $KE_{sg}$ ) 的值小于  $600 \text{ J/m}^3$ , 而完全环状流的气体动能密度的值大于  $600 \text{ J/m}^3$ <sup>[18]</sup>。为进一步说明完全环状流与波状环状流间波动特性的差异, 图 3 展示了气体动能密度  $KE_{sg}$  随压力增大而增大的趋势, 气体密度随之增加, 更多动量从气芯传递到液膜, 当  $P=0.6 \text{ MPa}$  时, 系统达到新的动态平衡, 逐步完成了从波状环状流到完全环状流的过渡。

图3 气体动能密度  $KE_{sg}$  随压力的变化Fig. 3 The change of gas kinetic energy density  $KE_{sg}$  with pipe pressure

将原始信号进行递归分析,以气相表观流速 $u_{sg} = 12.7 \text{ m/s}$ 和 $u_{sg} = 15.6 \text{ m/s}$ 时为例,衰减后的近红外光强时序信号的确定性、比率、递归率和递归熵随液相表观流速和管道压力的变化如图4~7所示。

如图4所示,当压力低于0.6 MPa时,系统的确定性在1附近,说明系统内部结构的确定性较高,有序性强,在该流动条件下,环状流夹带作用不明显,且处于波状环状流状态,时序信号的确定性主要体现为扰动波具有特定周期性;当压力高于0.6 MPa时,根据图3可看出,环状流处于完全环状流状态,压力的增加使产生液滴夹带的临界液相流速变小,即在相同气相和液相表观流速下夹带率增加。在高压状态下,液膜雾化和液滴沉降作用剧烈,导致信号DET值减小,说明界面扰动波的不确定性增加,原因在于随着液相表观流速的增加,液膜雾化和液滴沉降、液滴间聚并和破裂作用加强,导致系统的不确定性增大。

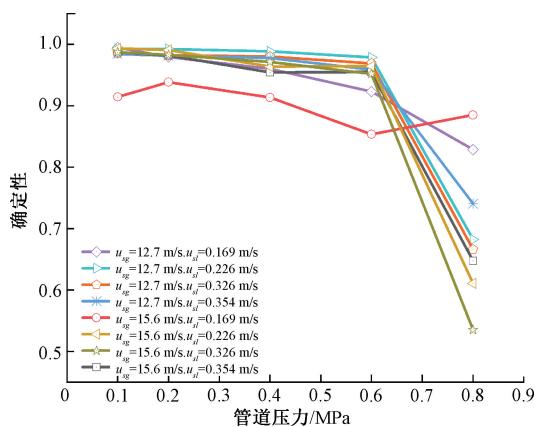


图4 确定性与管道压力的关系

Fig. 4 Relationship between determinism and pipe pressure

如图5所示,管道压力在0.1~0.6 MPa之间时,Ratio值几乎没有变化,可认为界面扰动波维持在一种特定状态中,此时,气相与液相间的剪切力不断增大,界面扰动波处于变化状态;随着压力的继续增大,Ratio值大幅度上升,表明界面扰动波的状态出现了转变,即较大剪切作用使得扰动波的幅值减小,相界面则变得平坦,出现越来越多的规则波。而图6中RR值的下降和Ratio值的基本不变是系统状态转变的有力证明,RR值的下降意味着嵌入不规则状态的周期性越来越不明显,波动变得有规律。

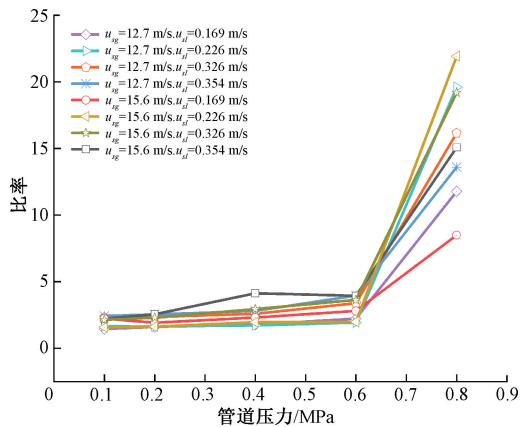


图5 比率与管道压力的关系

Fig. 5 Relationship between ratio and pipe pressure

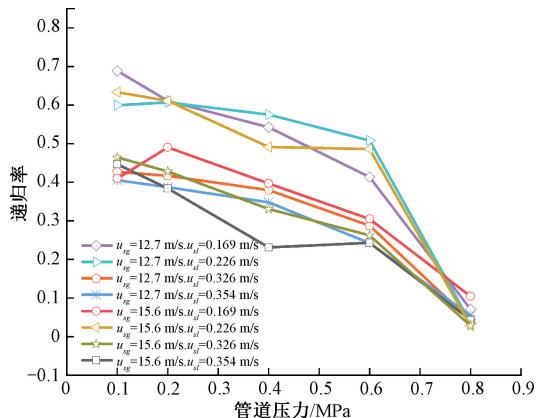


图6 递归率与管道压力的关系

Fig. 6 Relationship between recurrence rate and pipe pressure

如图7所示,ENTR值整体呈现出下降趋势,说明界面扰动波的复杂性降低,有序性加强,此时界面扰动波的振幅随着压力的增加而减小,规律性也越来越强,这是由于压力的增大,使得部分动量增量从气芯转移到夹带的液滴,并促进气芯中的夹带液滴加速,同时两相界面处的剪切力也随之增强,大振幅的波峰被剪切掉,产生液滴夹

带,更多的夹带液滴加速进入气芯,导致气相密度增加,界面波幅变小,界面波变得越来越有规律,两相界面出现更多规则的波纹波。

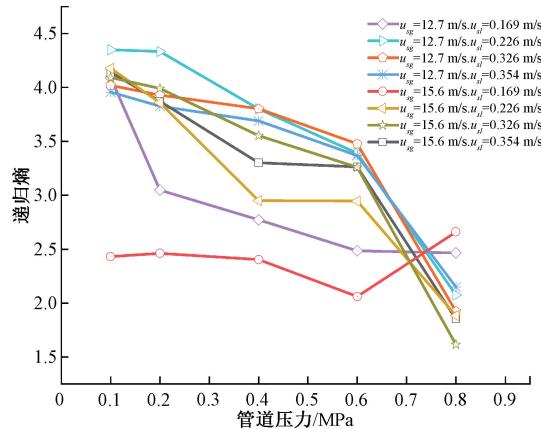


图7 递归熵与管道压力的关系

Fig. 7 Relationship between recurrence entropy and pipe pressure

以气相表观流速  $u_{sg} = 12.7 \text{ m/s}$  和  $u_{sg} = 15.6 \text{ m/s}$  的工况点为例,分析液相表观流速的变化对原始信号的4个递归参量的影响,其结果如图8~11所示。

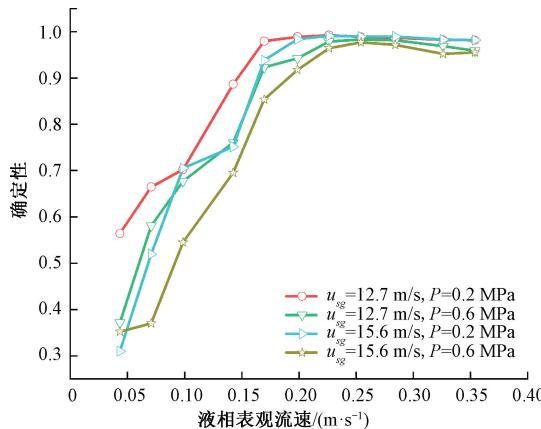


图8 确定性与液相表观流速的关系

Fig. 8 Relationship between determinism and liquid superficial velocity

如图8所示,当  $u_{sl} < 0.17 \text{ m/s}$  时,  $DET$  值从 0.3 呈现直线上升,确定性逐渐变大,表明液膜厚度随液相表观流速的增大而增大,界面扰动程度加剧,大振幅的扰动波出现,夹带作用增强,两相界面的随机性和复杂性增加,界面扰动波不规则变化;此外,在相同的管道压力和液相表观流速下,气相表观流速越大,  $DET$  值反而越小,表明气相表观流速的增加使得剪切作用增强,界面扰动波的振幅减小,液膜变薄,抑制界面扰动波的不规则发展,界面

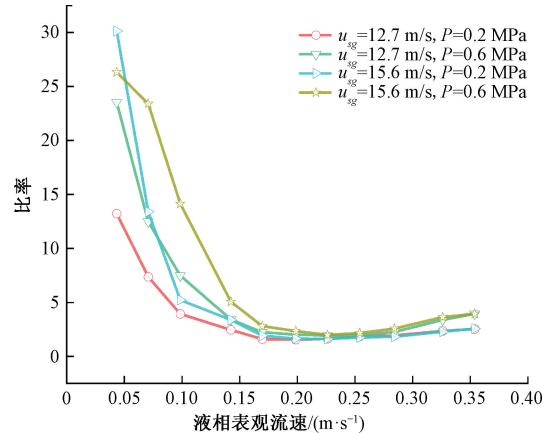


图9 比率与液相表观流速的关系

Fig. 9 Relationship between ratio and liquid superficial velocity

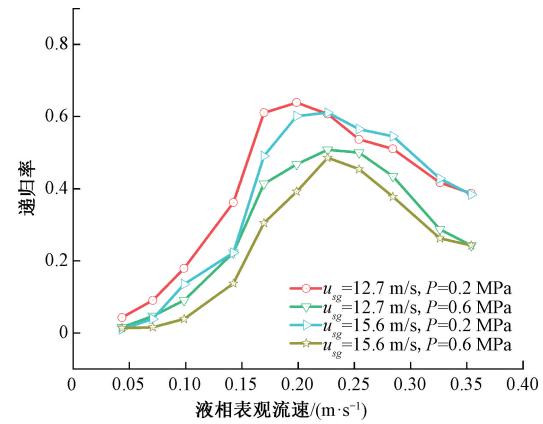


图10 递归率与液相表观流速的关系

Fig. 10 Relationship between recurrence rate and liquid superficial velocity

扰动波周期性增强。当  $u_{sl} > 0.17 \text{ m/s}$  时,系统的  $DET$  值维持在 1 附近,两相界面趋于平稳,以周期性较强、幅值较小的波纹波为主。

如图9所示,随着液相表观流速的增加,  $Ratio$  值从 30 大幅度下降到 2.5,之后在 2.5 附近上下浮动;图10中的  $RR$  值不断变大。 $Ratio$  值和  $RR$  值的变化趋势说明系统内部嵌入不规则状态的周期性越来越显著,界面扰动波不稳定性增强,两相界面的扰动波随机性增强,波动变得不规则。

如图11所示,当  $u_{sl} < 0.25 \text{ m/s}$  时,  $ENTR$  值不断变大,表明系统内部越来越复杂,随着液相表观流速的增加,液滴的夹带率随之升高,夹带液滴在气芯中的分布分散更加均匀,两相间作用力增强,界面扰动波的幅度增大,导致混乱度增强,  $ENTR$  值变大。当  $u_{sl} > 0.25 \text{ m/s}$  时,夹带率达到最大夹带率值,则系统内部处于动态平衡状态。

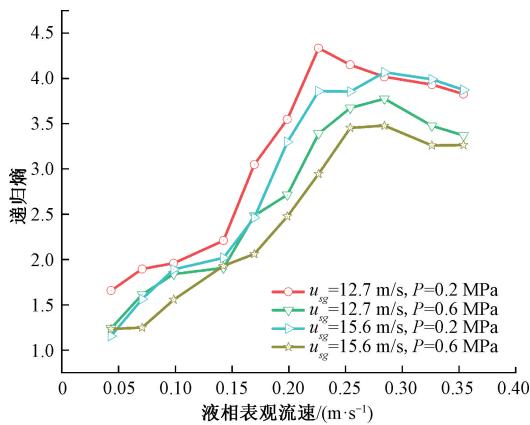


图 11 递归熵与液相表观流速的关系

Fig. 11 Relationship between recurrence entropy and liquid superficial velocity

### 3 基于小波的递归分析

为了进一步细化不同频域的时序信号所对应的信息,通过小波变换进行时频处理,选用具有正交性和紧支集的Daubechies系列4阶小波(db4),时序信号s被3层小波分解成低频系数a3和较高频系数d3~d1,以气相表观流速为12.7 m/s,液相表观流速为0.142 m/s为例,分析不同管道压力下小波分解后的各递归特征参量变化曲线。考虑到递归图呈现效果的实际状况,设置嵌入维数m、延迟时间 $\tau$ 、阈值半径 $\varepsilon$ 和 $l_{\min}$ 分别是4、3、0.25和3。

从图12~15,可以看出随着压力的变化,低频段a3的4个递归特征参量的整体趋势与时序信号的每个递归参量的趋势基本吻合,且液膜能量变化缓慢,说明扰动波信息主要集中分布于低频段;卷吸作用的复杂性和夹带液滴的随机性导致高频段表现得更加无序。

如图12所示,低频段的DET值在1附近浮动,表明系统内部的确定性较高,重复性较强,而高频段DET值不断减小,说明总体上扰动波处于一个有序状态,夹带液滴无序运动;在压力为0.6 MPa时,高频段DET值急剧向1靠近,表明液膜的雾化和液滴的沉降已经达到动态平衡,夹带液滴的有序性增强,此时界面扰动波变得更有规律。

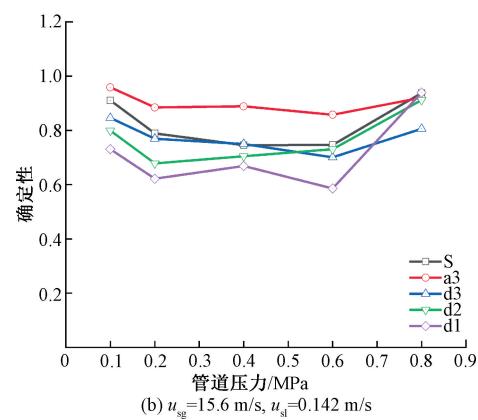
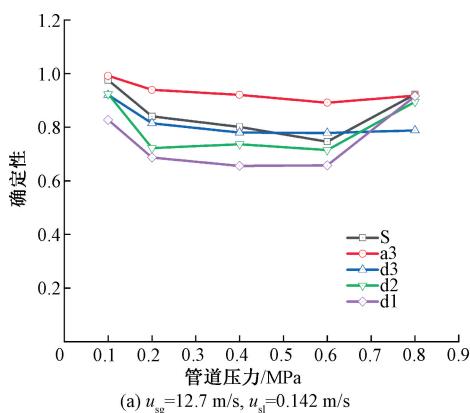


图 12 各尺度下确定性与管道压力关系

Fig. 12 Relationship between determinism of different scales and pipe pressure

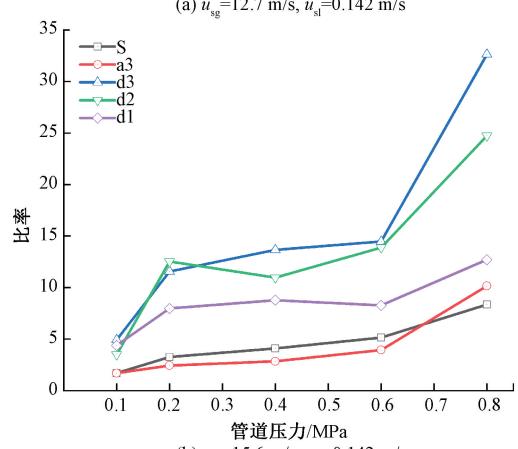
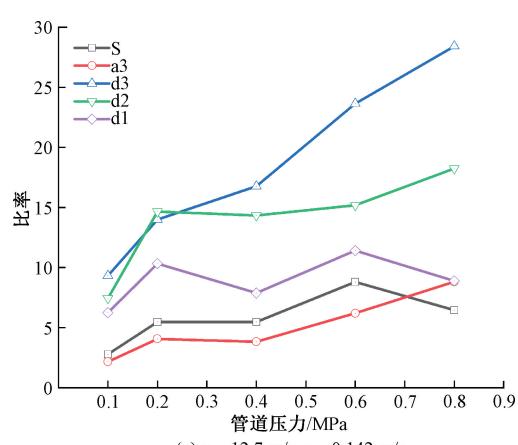


图 13 各尺度下比率与管道压力关系

Fig. 13 Relationship between ratio of different scales and pipe pressure

如图13所示,随着压力的增加,低频段Ratio值不断变大,高频段Ratio值在7.5附近上下浮动;由图14可知,当管道压力较小( $P<0.2$  MPa)时,高、低频RR值急剧下降,之后随着压力的增加,高频段RR值几乎没有变化,而低频段RR值却大幅度下降。上述分析结果揭示夹带液滴始终处于无序状态,表现为非周期性,而界面扰动波随压力增加随机性变弱,周期性显著增强。

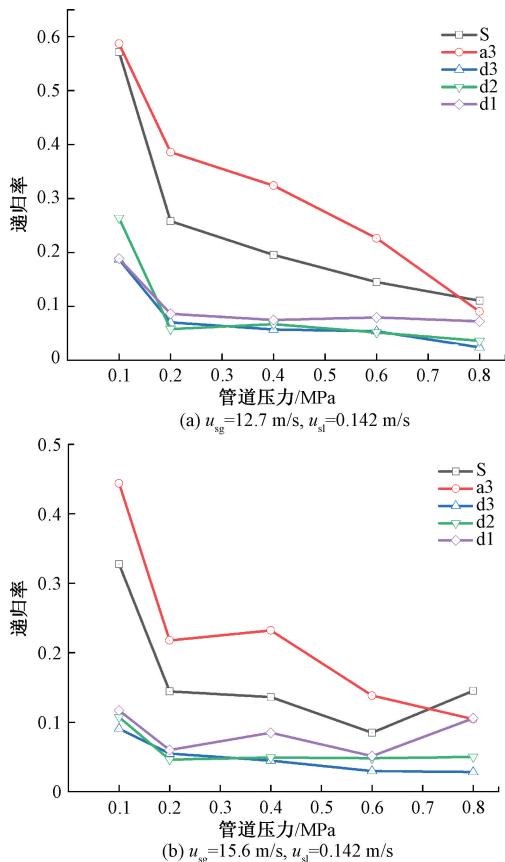


图14 各尺度下递归率与管道压力关系

Fig. 14 Relationship between recurrence rate of different scales and pipe pressure

如图15所示,在 $P<0.2$  MPa时,低频段递归熵的变化幅度最大,信号的随机性随压力的增加而减弱,波动越来越有规律,随着压力继续增大,低频ENTR值仍缓慢减小,信号的复杂程度也越来越小,而高频ENTR值始终低于低频ENTR值,说明界面扰动波处于有序状态,夹带率小;当 $P>0.6$  MPa时,相较于高频ENTR值急剧增加,低频的变化幅度远小于高频的变化幅度,原因可能是随着管道压力的增加,气相剪切作用增强,夹带液滴的聚并及破裂现象更为剧烈,液膜雾化与液滴沉降显著,上述夹带液滴的作用导致ENTR值增大,表现为导光管与液膜间的液滴夹带的混乱程度加大;而此时液膜以基膜和波纹为主,剔除夹带液滴影响,该实验结果符合在 $P=0.6$  MPa时由波状环状流向完全环状流过渡的规律。

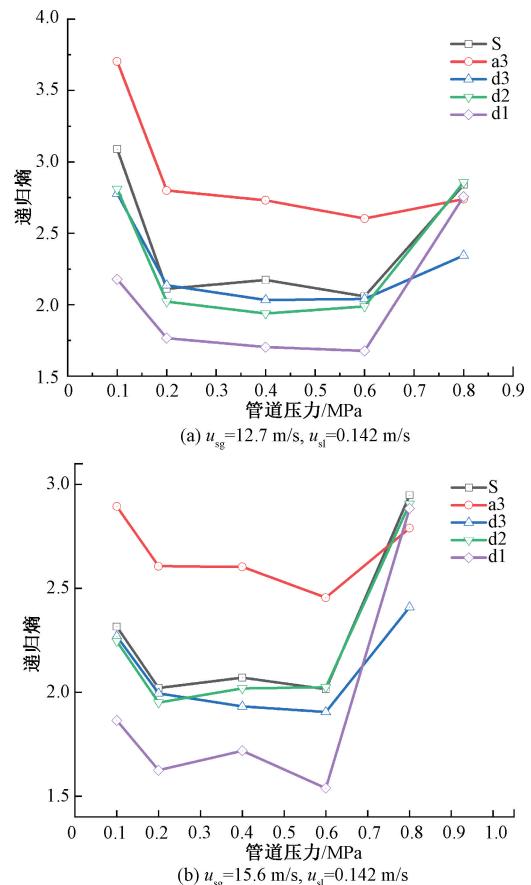


图15 各尺度下递归熵与管道压力关系

Fig. 15 Relationship between recurrence entropy of different scales and pipe pressure

## 4 结论

本文在不同工况条件下,利用递归分析和小波变换,对界面扰动波演化规律进行研究,主要结果如下:

1)  $KE_{sg}$  将环状流划分为波状环状流和完全环状流,递归分析表明,在环状流处于波状环状流状态时,随着管道压力的增加,界面波运动由不稳定向稳定过渡,体现在递归参量上的变化趋势为:界面扰动波的确定性值在1附近,比率值由1增加到2.5,递归率值由0.5下降到0.3,递归熵值由4.5下降到3。

2) 小波分析方法表明界面扰动波主要分布于低频段,随着压力的增大,界面扰动波有序性增强,波动的周期性更加显著;随着压力的增大,夹带液滴非周期、无序性体现为高频段的随机性,夹带液滴的聚并及破裂现象更加剧烈,液膜雾化与液滴沉降显著,夹带液滴的混乱程度加剧,最终达到动态平衡。

## 参考文献

- [1] AL-AUFI Y A, HEWAKANDAMBY B N, DIMITRAKIS G, et al. Thin film thickness measurements in two phase

- annular flows using ultrasonic pulse echo techniques [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2019, 66: 67-78.
- [2] 顾建飞,田昌,刘继承.气液两相流超声过程层析成像理论与实验[J].*仪器仪表学报*,2020,41(7):146-154.
- GU J F, TIAN C, LIU J C. Theory and experiment of ultrasonic process tomography for gas-liquid two-phase flow measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(7): 146-154.
- [3] 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.
- SUN H J, WANG W, GUI M Y. Horizontal pipe annular flow liquid film thickness and fluctuation parameter distribution [J]. *Chemical Industry*, 2019, 70(11): 4162-4171.
- [4] ALEKSEENKO S V, CHERDANTSEV A V, CHERDANTSEV M V, et al. Study of formation and development of disturbance waves in annular gas-liquid flow [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 77: 65-75.
- [5] CHAROGIANNIS A, AN J S, VOULGAROPOULOS V, et al. Structured planar laser-induced fluorescence (S-PLIF) for the accurate identification of interfaces in multiphase flows [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 118: 193-204.
- [6] SETYAWAN 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 and Fluid Science*, 2016, 71: 25-41.
- [7] AN J S, CHERDANTSEV A V, ZADRAZIL I, et al. Study of disturbance wave development in downwards annular flows with a moving frame-of-reference brightness-based laser-induced fluorescence method [J]. *Experiments in Fluids: Experimental Methods and their Applications to Fluid Flow*, 2020, 61(7): 65-75.
- [8] WANG M, ZHENG D, WU Y. Experimental and modeling study on interfacial disturbance wave velocity in horizontal gas-liquid flow by ultrasonic method [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 109: 109908.
- [9] LIN R N, WANG K, LIU L, et al. Study on the characteristics of interfacial waves in annular flow by image analysis [J]. *Chemical Engineering*, 2020, 212: 115336.
- [10] VASQUES J, CHERDANTSEV A, CHERDANTSEV M, et al. Comparison of disturbance wave parameters with flow orientation in vertical annular gas-liquid flows in a small pipe [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 97: 484-501.
- [11] FAN W Y, LI H, ANGLART H. Numerical investigation of spatial and temporal structure of annular flow with disturbance waves [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 110: 256-272.
- [12] FERSHTMAN A, ROBERS L, PRASSER H M, et al. Interfacial structure of upward gas-liquid annular flow in inclined pipes [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, 132: 103437.
- [13] 何辉,任全耀,叶停朴,等.环状流液膜界面扰动波湍流诱导形成机制研究[J].*核动力工程*,2021, 42(2): 77-81.
- HE H, REN Q Y, YE T P, et al. Study on the formation mechanism of turbulence induced by disturbance wave at the liquid film interface of annular flow [J]. *Mechanical Engineering*, 2021, 42(2):77-81.
- [14] 方立德,梁玉娇,李小亭,等.基于近红外技术的气液两相流检测装置[J].*电子测量与仪器学报*,2014, 28(5): 528-532.
- FANG L D, LIANG Y J, LI X T, et al. Gas-liquid two-phase flow detection device based on near-infrared technology [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2014, 28(5): 528-532.
- [15] SUN H, GUI M. Analysis of annular flow disturbance wave frequency in two different installation conditions [C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1065(9): 092018.
- [16] 陈超,沈飞,严如强.改进LSSVM迁移学习方法的轴承故障诊断[J].*仪器仪表学报*,2017, 38(1): 33-40.
- CHEN CH, SHEN F, YAN R Q. Improved ISSVM migration learning method for bearing fault diagnosis [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(1): 33-40.
- [17] 何冬,黄国勇,钱恩丽,等.基于总变差降噪与RQA的单向阀故障诊断[J].*电子测量与仪器学报*,2021, 35(2): 65-72.
- HE D, HUANG G Y, QIAN EN L, et al. Check valve fault diagnosis based on total variation de-noising and recurrence quantification analysis [J]. *Journal of*

- Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(2): 65-72.
- [18] SCHUBRING D, SHEDD T A. Wave behavior in horizontal annular air-water flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2008, 34(7): 636-646.

### 作者简介



赵宁,2007年于河北大学获得学士学位,2010年于河北大学获得硕士学位,2018年于天津大学获得博士学位,现为河北大学副教授,主要研究方向为多相流测试技术与仪器。

E-mail: zhaoning1983@tju.edu.cn

**Zhao Ning** received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Hebei University in 2007 and 2010, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2018. He is currently an associate professor at Hebei University. His main research interests include multiphase flow measurement technology and instruments.



刘苗苗,2018年于沧州师范学院获得学士学位,现为河北大学在读硕士研究生,主要研究方向为多相流测试技术与仪器。

E-mail: liumiaomiao189314@163.com

**Liu Miaomiao** received her B. Sc. degree from Cangzhou Normal University in 2018. She is currently a master student at Hebei University. Her main research interests include multiphase flow measurement technology and instruments.

郭素娜(通信作者),2004年于郑州轻工业学院获得学士学位,2007年于河北工业大学获得硕士学位,2015年于天津大学获得博士学位,现为河北大学光学工程博士后研究员流动站在站人员、硕士生导师,主要研究方向为流量检测技术与标准装置、CFD 仿真技术与流场分析。

E-mail: guosunatju@163.com

**Guo Suna** (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Zhengzhou university of Light Industry in 2004, received her M. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2007, and received her Ph. D. degree from Tianjin University in 2015. She is currently a postdoctoral fellow of the Optical Engineering Postdoctoral Research Mobile Station and a master advisor at Hebei University. Her main research interests include flow detection technology and standard equipment, CFD simulation technology and flow field analysis.