

# 气液两相搅拌流内夹带液滴产生机理及粒径分布

王科<sup>1,2</sup>, 叶晶<sup>3,4</sup>, 白博峰<sup>4\*</sup>

1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 100249;

2. 过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室, 北京 100249;

3. 上海船用柴油机研究所, 上海 201108;

4. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049

\* 联系人, E-mail: bfbai@mail.xjtu.edu.cn

2017-01-10 收稿, 2017-01-26 修回, 2017-02-06 接受, 2017-07-14 网络版发表

国家自然科学基金(51276140, 51474229)和中国石油大学(北京)科研基金(2462016YJRC029)资助

**摘要** 对竖直管内气液两相搅拌流内夹带液滴产生机理, 截面液相分布及夹带液滴粒径分布进行深入的实验研究, 讨论了搅拌流内夹带液滴产生方式, 揭示了夹带液滴产生方式对夹带液滴粒径大小影响规律, 获得了搅拌流内液滴粒径分布特性. 结果表明, 不同的流动条件下, 搅拌流内存在液桥破裂、袋式破碎和丝带式破碎3种夹带液滴产生方式. 在弹状流向搅拌流转变时, 液桥被气相来流冲破产生大液块; 当气速较低时, 夹带液滴以袋式破碎为主, 夹带液滴粒径较大, 气相场液滴浓度较高, 液滴夹带效果显著; 随着气速的增加, 袋式破碎机理受到抑制, 丝带式破碎机理作用逐渐显著并最终占主导地位, 夹带液滴粒径较小, 且气相场液滴浓度在搅拌流向环状流转变点附近达到最低.

**关键词** 气液两相流, 搅拌流, 液滴夹带, 液滴粒径, 液泛

搅拌流是目前认知最少的气液两相流流型之一, 在热能动力、化工、油气开发等工业应用领域中, 搅拌流动对单元过程及系统的安全和可靠运行有重要影响<sup>[1,2]</sup>. 由于缺乏丰富的实验观测数据与可靠的理论分析模型, 人们对其流动变化过程中大振幅界面波(大波)失稳产生的液滴夹带这一关键物理过程研究不够深入, 使得搅拌流成为多相流热物理研究中的一个难点<sup>[3~5]</sup>.

液滴夹带是指液膜中部分液体在气相作用下以液滴形式离开液膜进入气相的气液两相质量和动量交换过程. 在液滴夹带现象中, 气液两相流内气相携带有一定数量的液滴, 通常采用液滴夹带份额和液滴夹带速率对液滴夹带现象进行定量描述. 定义气相场中液滴的总质量占总液相流量的比为液滴夹带

份额, 且单位时间单位面积上产生夹带液滴的质量为液滴夹带速率. 实验研究发现, 液滴的产生与气液两相界面波的运动有着密切的联系<sup>[6,7]</sup>. 由界面波运动造成的液滴夹带方式分为以下3种情况<sup>[8]</sup>: 气流剪切夹带(shear-off)、界面波根切(under-cut)以及界面波碰撞夹带(wave coalescence). 目前, 国内外学者对环状流内夹带液滴产生机理和夹带液滴粒径分布特性开展了广泛的研究, 普遍认为环状流内夹带液滴产生方式主要为界面波气流剪切夹带, 并提出了不同的液滴粒径分布表达式<sup>[9~11]</sup>. 与环状流相似的是, 搅拌流内液滴夹带份额和液滴夹带率均随液相流量的增大而增大; 而与环状流不同的是, 搅拌流内液滴夹带份额和液滴夹带速率均随气速的增大而减小, 在搅拌流-环状流转变界限处, 夹带份额和液滴夹带率

**引用格式:** 王科, 叶晶, 白博峰. 气液两相搅拌流内夹带液滴产生机理及粒径分布. 科学通报, 2017, 62: 3490~3497

Wang K, Ye J, Bai B F. The entrainment mechanism and droplet size distribution in gas-liquid churn flow (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3490~3497, doi: 10.1360/N972017-00042

达到最小值<sup>[12~14]</sup>。造成搅拌流与环状流内液滴夹带份额和夹带速率随气速变化趋势不同的原因主要是这两种流型内液滴夹带机理不同导致。然而,由于搅拌流流动更加复杂,导致夹带机理不明,夹带液滴直接观测非常困难<sup>[15]</sup>。传统的液滴粒径测试手段,如使用马尔文粒度仪进行液滴粒径测量时,为了避免液膜对夹带液滴的测量结果的影响,通常采用套有套筒的多孔壁抽出液膜。然而搅拌流内液膜厚度较大且沿周向分布不均匀,并且振荡剧烈<sup>[16~18]</sup>,采用液膜抽吸的办法避免液膜的影响几乎不可行,因此搅拌流内液滴粒径数据非常稀少。

本文针对竖直接管内气液两相搅拌流液滴夹带机理开展实验研究,获得搅拌流条件下夹带液滴产生方式、横截面液相分布及夹带液滴粒径分布特征,丰富了对搅拌流型特征的认识,具有十分重要的学术意义和科学价值。

## 1 实验装置及方法

### 1.1 实验装置

图1所示为实验系统图,主要包括水路、空气路、实验段、辅助设备、测量系统及采集系统。实验段为透明有机玻璃管,内径 $d_T$ 为19 mm,长度为2 m,入水段与抽水段间隔30 mm。为保证进、排水均匀稳定,入水段与抽水段均采用独特蜂窝状多孔壁结构,即管壁面均匀致密地分布直径约为1 mm的小孔。在实验段顶端设计安装扁嘴型喷嘴,引入旁路空气通过喷嘴产生高速气流将液体离开实验段的液体瞬间吹入液体收集器。

测量系统包括高速摄像系统和高清图像拍摄系统。高速摄像系统主要用于观测夹带液滴产生过程,主要设备包括:日本NAC公司Memrecam fx K3高速摄像机、Nikon公司60 mm 2.8 d微距镜头、控制计算机和NAC高亮度光纤光源等。高清图片拍摄系统主要用于截面液相分布及液滴粒径测量,包括:尼康D700单反相机(日本)、适马150 2.8微距镜头和Metz 58af闪光灯,闪光灯指数58度。

### 1.2 实验方法

由于弹状流到搅拌流的转变与弹状流内Taylor气泡周围的下降液膜出现液泛产生大振幅界面波有着密切的联系<sup>[19]</sup>,且当液泛产生时,入水口的上方

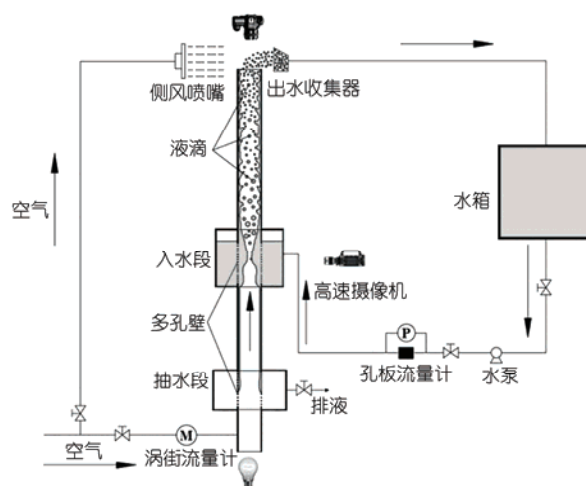


图1 实验系统图  
Figure 1 Test facility

气液两相流动状态与搅拌流相似<sup>[20]</sup>。因此本文借鉴液泛的实验方法,获得竖直接管内气液搅拌流,并将气液界面上出现紊乱大振幅界面波作为液泛产生的判据。实验过程中首先稳定较小的气量,缓慢调节出水阀门使液量达到实验值,观察到水从入水孔进入实验段后在重力的作用下形成下降液膜。调节连接出水腔阀门,使得下降液膜在流经出水段时被气流抽吸出实验段。下降液膜与气流逆向流动,在气液界面形成界面波并随下降液膜向下运动。逐渐增大气量,当观察到下降液膜在排水孔附近停滞形成大振幅界面波,并在气流的作用下随气流向上运动,认定此时液泛在实验段内产生,逐渐增大气量至实验值。本实验在常温、常压下进行,实验工质为空气-水,气相流量 $Q_g$ 为5.0~50.0 m<sup>3</sup>/h,液相流量 $M_l$ 为 $16.29 \times 10^{-3}$ ~ $40.89 \times 10^{-3}$  kg/s。

### 1.3 测量方法及数据处理

为了观测到大振幅界面波运动及夹带过程,实验过程中,高速摄像机镜头正对入水段,并从实验段背后打白光照亮入水段。高速摄像机采集频率为1000帧/s。液滴粒径主要采用阴影法获得。高分辨率相机正对实验段出口,拍摄管内距离出口3 mm处截面液相分布。高分辨率相机与闪光灯通过同步触发器相连,相机拍摄速率为5幅/s。采用阴影法拍摄时,光源从实验管段底端射入,在管段外包裹铝箔以减小光强损失,同时铝箔反射出来的散射光线能进一步强化背景光强均匀度。在所拍摄平面下5 mm至出

口段包裹一圈防光橡胶层,以减少拍摄面上部杂光影响,同时由于液滴的凸透镜效应,可将黑色的防光橡胶圈折射呈现在最终的拍摄图像中,从而明晰液滴、液膜边缘.实验开始前需要拍摄纯气相时的管子截面图像作为管径的对比,实验过程中,每组工况拍摄约20张清晰图像(约2000个液滴),如图2所示.

图3(a)是采用阴影法获得的界面液相分布原始图像.为尽可能提高图片分辨率、降低信噪比,采用单色CCD传感器原件,在后期处理中转存为拥有三通道的RGB文件,因而图片整体存在一定的偏黄.在原始图像的部分图片中运动的液滴、液膜出现了拖线,且由于气流的作用,部分液滴呈现出非球形.将原图转换为8 bits进行预处理.编写MATLAB程序将原图像中由于虚焦或拖尾造成的阴影部分去掉,并使焦距上的液滴与背景形成较强的对比,处理后图片如图3(b)所示.值得注意的是,为了防止管壁液膜对气相场中液滴粒径计算产生影响,提前将液膜去除,仅保留气相场中液滴,因此在处理过程中不可避免地会将液膜附近的液滴人为去除.本文对同一幅图像进行多次处理取平均值,并采用Image J软件对大量液滴进行统计来消除人为因素造成的影响.液滴尺寸采用等效直径 $d$ 进行描述,利用Image J量取液滴的面积 $A$ 和周长 $P$ ,通过式(1)计算,液滴尺寸的典型分布如图3(c)所示.

$$d = 2\sqrt{A/\pi}. \quad (1)$$

#### 1.4 液滴尺寸测量误差分析

由于本文采用图像处理的方案来测量液滴尺寸,图片的分辨率决定了图像的清晰度和所能捕捉到的最小尺寸液滴.另外,根据实际观察的结果,搅拌流中液滴外形各有不同而且并非正圆形,由此引入的非圆度误差会通过逐层传播从而扩散到液滴平均尺

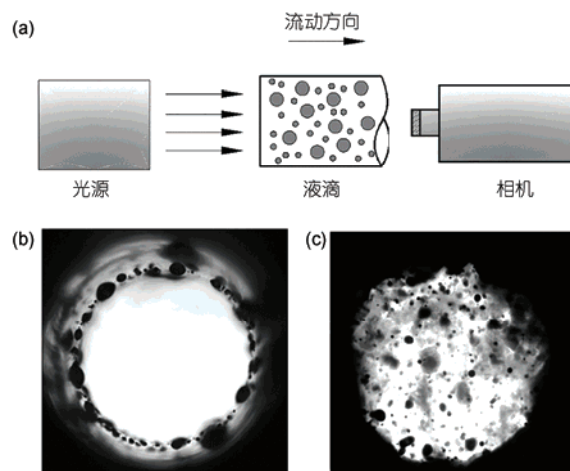


图2 阴影法测量原理及拍摄效果. (a) 测量原理; (b) 纯气相; (c) 搅拌流态下载面液滴分布

Figure 2 Methods for capturing droplets. (a) Measurement principle; (b) pure gas phase; (c) droplets in churn flow

寸的计算中.

为了获取图片分辨率造成的误差,对图像测距的定标误差进行了研究.忽略相机镜头曲率以及相机与焦点平面垂直度的误差,选取管道的内径圆周长作为标尺,利用Image J多次测量管道周长,计算得到相对误差不大于1%.根据式(1)和误差传递理论,可以计算出此时的液滴直径的误差 $\varepsilon_1^d$ ,其中,液滴面积 $A$ 的误差按 $A = P^2/4\pi$ 进行误差传递计算,周长 $P$ 的误差按图像的定标误差计算.

非圆度的误差可以表示为

$$\varepsilon_2^d = \left| \frac{4\pi A}{P^2} - 1 \right|. \quad (2)$$

两个误差按照式(3)进行合成,即可得到某一工况下的总误差,

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_1^d + \varepsilon_2^d}. \quad (3)$$

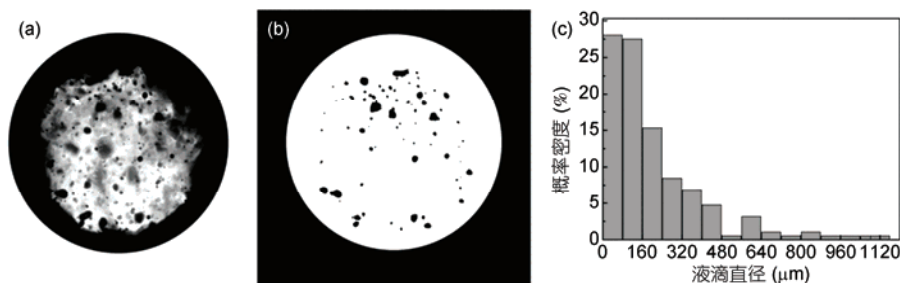


图3 截面液相分布图像处理. (a) 原始图像; (b) 处理后图像; (c) 典型液滴粒径分布

Figure 3 Droplets image process. (a) Original; (b) after processing; (c) droplet diameter distribution

根据上述计算方法计算 $u_{sl}=0.08$  m/s, 且 $u_{sg}=12.7$  m/s时的液滴直径总误差约为9%.

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 夹带液滴产生方式

实验发现, 在搅拌流状态下, 夹带液滴的产生方式同时存在液桥(液塞)撕裂、袋式破碎和丝带式破碎3种方式, 如图4所示. 在气液两相逆向流动过程中, 当达到液泛产生条件时气液相界面会产生波幅较大的大振幅界面波. 在弹状流向搅拌流流型转变过程中以及当大波波幅足够大以致形成液桥时, 液桥在来流气流的作用下破裂形成较大的液块, 然后液块

破裂形成小液滴, 如图4(a)所示. 搅拌流内当气速 $u_{sg}$ 较低、液速 $u_{sl}$ 较高时, 气液界面以大波为主, 液滴夹带方式主要是袋式破碎, 如图4(b)所示. 实验现象显示, 由于进入实验段液速较高、液量较大, 形成的界面波波幅较大, 界面波在重力的作用下与气流逆向流动并发展. 由于重力的增幅大于气相场作用力的增幅, 界面波波峰由于惯性向下形成类似于开放式口袋. 口袋内压强逐渐增大最终使得口袋破裂形成液块, 并使得界面波附近气体突然加速, 液块在加速气流的作用下撕裂成许多小液滴并随气流向上运动. 袋式破碎产生的液滴由于具有较大的径向速度, 液滴产生后又很快重新沉积到液膜表面. 随着气速的增加, 大波的发展受到抑制, 从而减少了袋式破碎发

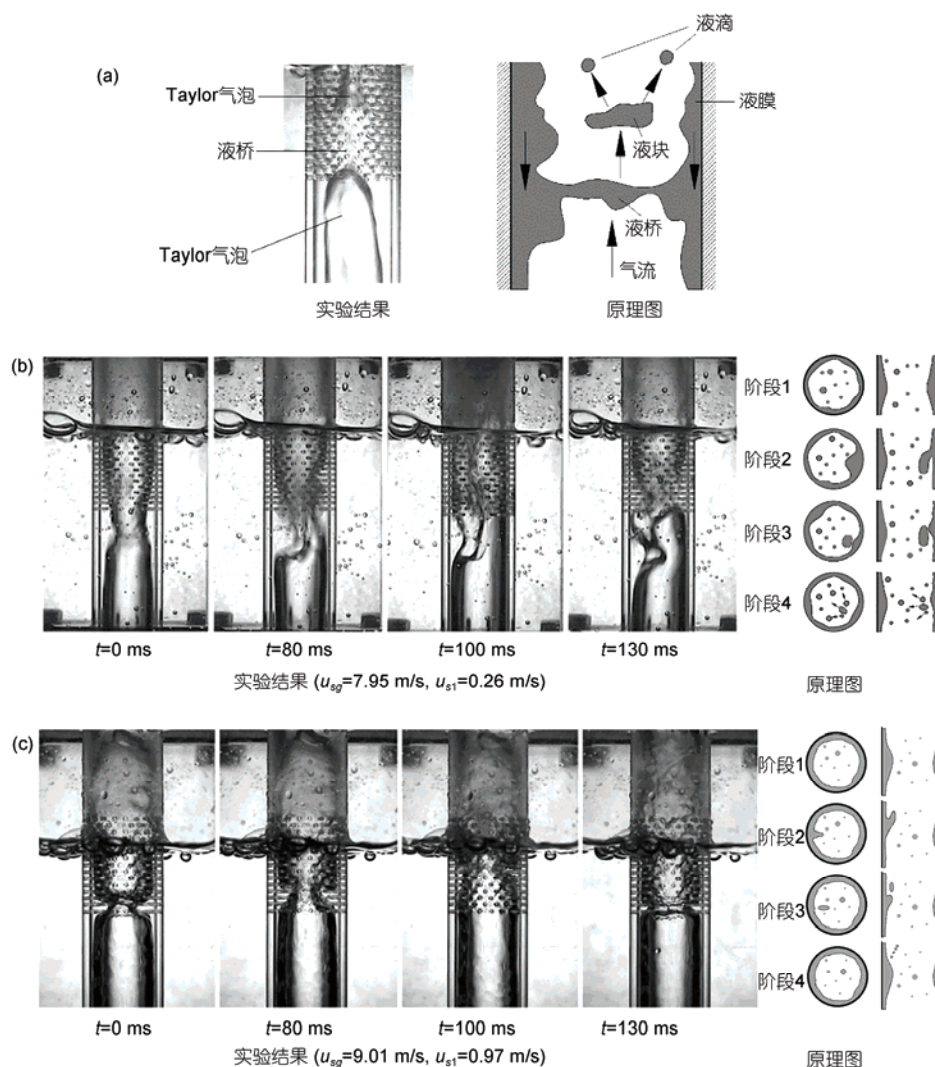


图4 搅拌流内夹带液滴主要产生方式. (a) 液桥破裂; (b) 袋式破碎; (c) 丝带式破碎

Figure 4 The mechanisms of droplets generation. (a) Bridge break down; (b) bag breakup; (c) ligament breakup

生频率,抑制了夹带液滴的产生.同时,伴随大波产生的扰动波的作用明显加强,夹带液滴产生方式逐渐过渡到以丝带式破碎为主,如图4(c).在气流作用下,界面波波幅沿轴向和径向不断发展,波峰在高速气流作用下伸入气相场并沿流动方向拉伸,当作用于波峰处的气相场拖曳力大于表面张力时,波峰最终被气流切断形成液滴进入气相场.丝带式破碎产生的夹带液滴粒径通常较小,造成界面波波峰处气液界面明显模糊.

## 2.2 截面液相分布

从搅拌流向环状流转变过程中的截面液相分布变化规律如图5所示.在搅拌流初期,液膜厚度大,且沿周向分布不均匀,袋式破碎的作用显著,气相场内出现较大的液块,且液量越大,出现大液块的数量越多.当液量一定时,随着气速的增加,液膜厚度逐渐减小,液膜沿周向分布也逐渐趋于均匀,气相场内的液滴浓度逐渐减小.此外,由于气速的增加,气相场内产生的大液块数量逐渐减小,在接近搅拌流与环状流转变界限处时,气相场内液滴粒径均较小,无大液块产生.因此,实验结果表明,在搅拌流向环状流转变过程中,大液块数量逐渐减少,小液滴数量逐渐增多,说明袋式破碎受到抑制,丝带式破碎作用增强,且夹带液滴份额逐渐减小,在搅拌流与环状流的转变界限处减少至最低.

## 2.3 夹带液滴粒径分布

本文采用归一化的概率密度函数来描述搅拌流中的液滴尺寸分布.将被测量的液滴从最小值到最大值等分为若干区间,在每个小尺寸区间内统计落入该区间的液滴数量 $N_i$ .因此,归一化概率密度 $f_d(d_i)$ 可采用如下表达式求取.

$$f_d(d_i) = \frac{N_i}{NW}, \quad (4)$$

其中, $N$ 为统计的液滴总数量, $W$ 为等分的尺寸区间宽度.图6显示了4种不同液相折算速度下的典型液滴尺寸的概率密度分布.每个工况共统计了约2000个液滴,尺寸区间宽度设置为50  $\mu\text{m}$ ,以便在出现较大尺寸的液滴时能够有足够的分辨率.

在图6(a)和(b)中,液相表观速度 $u_{sl}$ 分别为0.32和0.24 m/s,此时的流型正处于典型的搅拌流区域内,液滴破碎以袋式破碎为主.由于袋式破碎时,存在少部分尺寸较大的液滴,因此在图中可以清晰地看到围绕在2200  $\mu\text{m}$ 附近有较小的尺寸概率密度分布.然而,当液速较高时,尺寸小于50  $\mu\text{m}$ 的小液滴更容易形成.当液相表观速度 $u_{sl}$ 继续降低时(图6(c), (d)),液滴尺寸的概率密度分布呈现出对数正态分布的形式,与环状流中的液滴尺寸分布类似,从而也说明,流型正从搅拌流向环状流转变.

图7所示为搅拌流中液滴尺寸的累积分布函数,可以通过对概率密度函数进行积分获得液滴尺寸的累积分布,从而完整描述液滴尺寸分布情况,如式(5)所示.

$$F_d(d_i) = W \sum_{i=1}^j f_d(d_i), \quad (5)$$

其中, $F_d(d_i)$ 为液滴尺寸累积分布函数, $j$ 表示液滴直径小于 $d_j$ 时的等分区间个数.总的来说,处于搅拌流向环状流流型转变区域时( $u_{sl}=0.08$  m/s)的液滴尺寸分布增长率要明显快于搅拌流刚发生时( $u_{sl}=0.32$  m/s)的液滴尺寸分布增加率.这也进一步说明了,液滴在搅拌流中的发展较于环状流更加复杂,因为环状流中的液滴分布更均匀.值得注意的是,当 $u_{sl}=0.17$  m/s时,液滴尺寸的累积分布函数的增长速率要快于当 $u_{sl}=0.08$  m/s时的累积分布函数的增长速率.

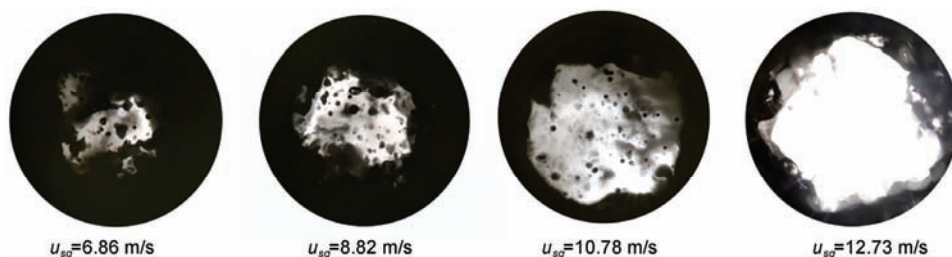


图5 搅拌流内截面液相分布在从搅拌流向环状流的转变过程中的变化规律( $u_{sl}=0.08$  m/s)

Figure 5 The detailed process of liquid phase distribution during the transition of churn flow to annular flow ( $u_{sl}=0.08$  m/s)

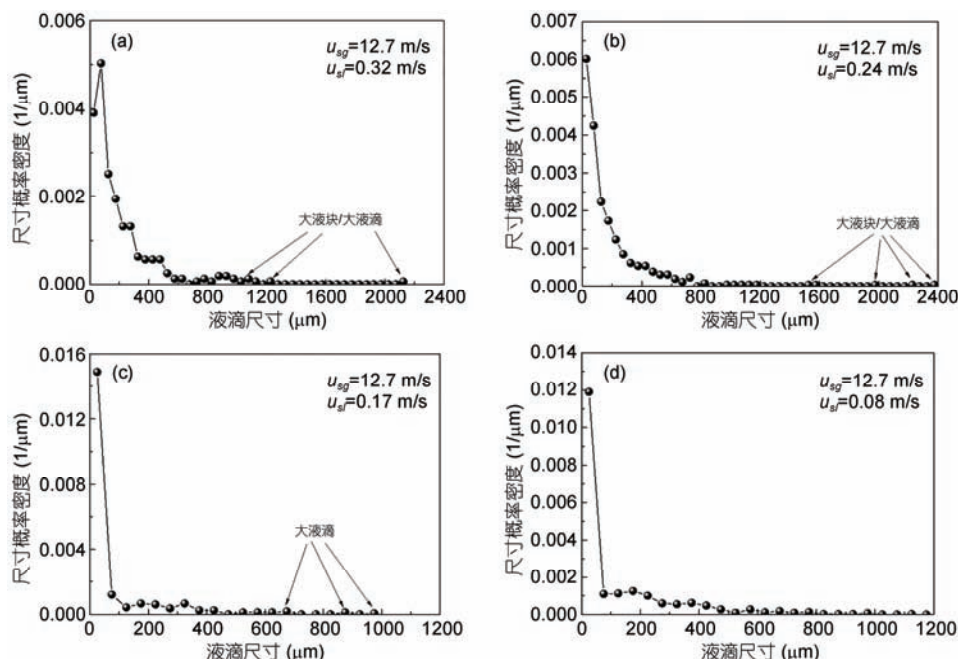


图6 液滴尺寸概率密度分布对比  
Figure 6 Size probability density distributions

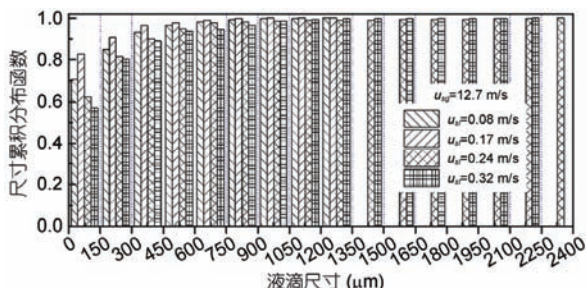


图7 液滴尺寸累积的累积分布函数对比  
Figure 7 Size cumulative distribution

这表明在搅拌流的后期,随着液相折算速度的减小,小液滴的数目会先增大而后再减小。

### 3 结论

本文以竖直管内气液两相搅拌流为研究对象,采用高速摄像系统和高清图片拍摄系统对搅拌流内夹带液滴产生方式、截面液相分布以及夹带液滴粒径分布进行了研究,获得了相关实验结果。本文研究成

果大大丰富了对搅拌流这一目前认知最少的流型的认识,具有重要的学术和应用价值。全文主要结论如下。(1) 搅拌流内夹带液滴的产生方式同时存在液桥撕裂、袋式破碎和丝带式破碎3种方式。其中,液桥撕裂是弹状流向搅拌流转变过程中液滴产生的主要方式;搅拌流内当气速较小时,液滴产生方式主要以袋式破碎为主,并形成较大的液块;随着气速的增加,大液增长受到限制,抑制袋式破碎的产生,而扰动波丝带式破碎作用日益明显,产生粒径较小的液滴。(2) 截面液相分布实验结果表明,在搅拌流内,液膜厚度较大且分布不均匀,气相场中分布大量液滴,随着气速的增大至环状流状态时,液膜厚度较小,夹带液滴数量减小,在搅拌流到环状流转变界限处,气相场内液滴夹带份额减小至最低。(3) 由于夹带液滴产生机理的不同,大液块的产生使得搅拌流内液滴粒径分布不连续。随着气速的增加,搅拌流逐渐向环状流过渡,液滴尺寸的概率密度分布逐渐呈现出对数正态分布的形式。

### 参考文献

- Govan A, Hewitt G, Richter H, et al. Flooding and churn flow in vertical pipes. *Int J Multiphas Flow*, 1991, 17: 27-44
- Jayanti S, Hewitt G F. Prediction of the slug-to-churn flow transition in vertical two-phase flow. *Int J Multiphas Flow*, 1992, 18: 847-860

- 3 Barbosa J, Govan A H, Hewitt G F. Visualization and modeling studies of churn flow in a vertical pipe. *Int J Multiphas Flow*, 2001, 27: 2105–2127
- 4 Hewitt G F. Churn and wispy annular flow regimes in vertical gas-liquid flows. *Energ Fuel*, 2012, 26: 4067–4077
- 5 Parsi M, Vieira R E, Torres C F, et al. Experimental investigation of interfacial structures within churn flow using a dual wire-mesh sensor. *Int J Multiphas Flow*, 2015, 72: 155–170
- 6 Berna C, Escriva A, Munozcobo J L, et al. Review of droplet entrainment in annular flow: Interfacial waves and onset of entrainment. *Prog Nucl Energ*, 2014, 74: 14–43
- 7 Berna C, Escriva A, Munozcobo J L, et al. Review of droplet entrainment in annular flow: Characterization of the entrained droplets. *Prog Nucl Energ*, 2015, 79: 64–86
- 8 Ishii M, Grolmes M A. Inception criteria for droplet entrainment in two-phase concurrent film flow. *AIChE J*, 1975, 21: 308–318
- 9 Azzopardi B. Drops in annular two-phase flow. *Int J Multiphas Flow*, 1997, 23: 1–53
- 10 Westende J M, Kemp H K, Belt R J, et al. On the role of droplets in cocurrent annular and churn-annular pipe flow. *Int J Multiphas Flow*, 2007, 33: 595–615
- 11 Zhang R, Liu H, Liu M, et al. A probability model for fully developed annular flow in vertical pipes: Prediction of the droplet entrainment. *Int J Heat Mass*, 2015, 84: 225–236
- 12 Barbosa J R, Hewitt G F, König G, et al. Liquid entrainment, droplet concentration and pressure gradient at the onset of annular flow in a vertical pipe. *Int J Multiphas Flow*, 2002, 28: 943–961
- 13 Azzopardi B, Wren E. What is entrainment in vertical two-phase churn flow? *Int J Multiphas Flow*, 2004, 30: 89–103
- 14 Ahmad M, Peng D J, Hale C P, et al. Droplet entrainment in churn flow. In: *Proceedings of International Conference of Multiphase Flow*. Florida, 2010
- 15 Wang K, Bai B F, Ma W M. Huge wave and drop entrainment mechanism in gas-liquid churn flow. *Chem Eng Sci*, 2013, 104: 638–646
- 16 Sharaf S, Meulen G P V D, Agunlejika E O, et al. Structures in gas-liquid churn flow in a large diameter vertical pipe. *Int J Multiphas Flow*, 2015, 78: 88–103
- 17 Tekavčič M, Končar B, Kljenak I. Simulation of flooding waves in vertical churn flow. *Nucl Eng Des*, 2015, 299: 214–224
- 18 Parsi M, Agrawal M, Srinivasan V, et al. Assessment of a hybrid CFD model for simulation of complex vertical upward gas-liquid churn flow. *Chem Eng Res Des*, 2016, 105: 71–84
- 19 McQuillan K, Whalley P. Flow patterns in vertical two-phase flow. *Int J Multiphase Flow*, 1985, 11: 161–175
- 20 Chaudhry A, Emerton A, Jackson R. Flow regimes in the co-current upwards flow of water and air. In: *Proceedings of Symposium on Two-phase Flow*. Exeter, 1965

Summary for “气液两相搅拌流内夹带液滴产生机理及粒径分布”

# The entrainment mechanism and droplet size distribution in gas-liquid churn flow

WANG Ke<sup>1,2</sup>, YE Jing<sup>3,4</sup> & BAI BoFeng<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

<sup>2</sup> Beijing Key Laboratory of Process Fluid Filtration and Separation, Beijing 102249, China;

<sup>3</sup> Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108, China;

<sup>4</sup> State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

\* Corresponding author, E-mail: bfbai@mail.xjtu.edu.cn

Knowledge of entrained liquid is important in calculation of pressure drop and in the determination of the film flow rate and thence its dryout and consequent deterioration in heat transfer in heating systems. Note that the excessive liquid entrainment may cause the liquid film completely removed from the wall (dryout), which could lead to disastrous accident. As one of the least understood gas-liquid flow regimes, churn flow appears a highly-disturbed flow of gas and liquid. According to the observation, churn flow is characterized by huge waves with flow reversal between the waves and the highly oscillatory liquid film, which is accompanied a continuous gas core with considered amount of entrained liquid. Although there have been enduring efforts to show that the entrained fraction is high in churn flow and reaches the minimum around the churn/annular transition, the underlying mechanisms of droplet entrainment in churn flow are still not well explored. Additionally, there is a dearth of data about entrained droplets in churn flow due to its chaotic nature. The measurement techniques which are suitable to determine entrained droplets in annular flow have limitations when applied to churn flow because they might not be able to distinguish between liquid carried as droplets and that transported in huge waves. In this study, we focused on the entrainment mechanism, liquid distribution and droplet size distribution under churn flow condition. The high-speed camera and the high-resolution camera were employed to capture a more detailed description of the huge wave breakup and the liquid distribution in the cross-section of the pipe with the inner diameter of 19 mm. In order to obtain the high-resolution images of entrained droplets, a delicate shadow detecting method was developed in the present paper, which provides a reliable approach to capture the entrained droplets with various sizes. Subsequently, Matlab was employed to analyze the complete series of pictures and recognize each of the blobs. The blobs were interpreted as droplets after the sharpness was satisfied. Every accepted edge datum is considered to be a droplet and thus its diameter can be obtained by Image J. The results indicate that there are three mechanisms for droplet generation in churn flow: liquid bridge breakup dominants at slug/churn transition, bag breakup plays a dominant role at low gas superficial velocities, but ligament breakup comes to gain greater importance with the increase of gas flow rate. Accordingly, the amount of liquid entrained is high in the chaotic churn flow regime and gradually decreases during the transition from churn flow to annular flow and finally reaches a minimum around the churn/annular transition boundary. Detailed process of droplet entrainment was also provided. Based on observation, large droplets (chunks) are related to the breakdown of slugs and bag breakup mechanism, whereas smaller droplets can be ascribed to the breakup of chunks, ligament breakup. No doubt, the present paper helps understand the mechanism of the entrainment in churn flow, which is essential for the development of mechanistic models to predict the pressure drop and dryout condition.

**gas-liquid two-phase flow, churn flow, entrained droplet, droplet size, flooding**

doi: 10.1360/N972017-00042