

## 垂直上升气液两相弹状流模型

夏国栋 彭 岩

(北京工业大学环境与能源  
工程学院, 北京 100022)

周芳德 胡明胜

(西安交通大学动力工程多相流国家  
重点实验室, 西安 710049)

**摘 要** 基于等效弹单元思想, 改进了预测垂直上升管中充分发展气液弹状流流动特性的模型。模型中考虑了界面切应力对液膜运动的影响; 并在液弹空隙度预测中引入临界气体夹带速度的概念, 以此来描述弹状流中大气泡尾部的混合特性。本文提出的模型还考虑了管径对液弹空隙度的影响。弹状流模型的计算结果得到本文及其他作者实验数据的验证。

**关键词** 垂直管 弹状流型 气液两相流

**中图分类号** O 359.1

### 引 言

弹状流是气液两相流的基本流型之一, 其主要特征是由相分布引起的间歇特性, 即使入口条件是稳定的, 人们所看到的流动也是非稳态的。这种具有间歇式流动特性的流型出现在许多实际应用中, 例如: 石油的开采及其在管道内的输送; 地热电站的汽水生产; 电站水、蒸汽系统的沸腾和凝结; 核反应堆事故状态下的堆芯冷却; 化学反应器内气相和液相之间的传热与传质; 热虹吸管再沸腾器等。所以, 研究气液两相弹状流具有非常重要的实际意义。

Wallis<sup>[1]</sup>最先在弹状流研究中引入等效弹单元思想, 并得出理想化的弹状流模型, 即假设  $\langle \alpha_{LS} \rangle = 0$ ; Taitel 等<sup>[2]</sup>在分析中考虑了液弹内气相的存在, 他们假定液弹内空隙度为常数, 该值对应于泡状流中观测到的最大空隙度值; Fernandes<sup>[3]</sup>提出了一个综合模型, 但该模型仍不能很好地解决液弹空隙度预测问题; 另外还有一些研究者相继报道了各自的研究成果<sup>[4,5]</sup>。但到目前为止, 人们对其中一些参数的认识尚未完全统一, 这使得各模型的预测结果差异较大。

本文通过考虑液膜流经 Taylor 气泡尾部时对气体的夹带, 以及其他与液弹内小气泡存在相关的问题, 改进了垂直上升气液两相弹状流模型, 模型计算结果得到了本文及其他实验数据的验证。

### 1 实验系统及实验方法

本文的实验工作在空气/水实验回路上进行<sup>[6]</sup>。实验段由内径 30 mm、长 6 m 的有机玻璃管制成, 测点设在距入口 4.5 m 处, 以消除入口及出口效应。采用美国柯达公司生产的 EK-TAPRO 1000 型高速动态分析仪测量 Taylor 气泡头部形状、速度和长度等参数, 用光纤探针测量液弹及弹单元空隙度。实验中高速动态分析仪的摄像机垂直于管道进行拍摄, 拍摄速度  $1000 \text{ 幅} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 探针采样频率为 3000 Hz, 高混物流速下增加到 5000 Hz, 连续测量

1998-05-20 收到初稿, 1998-12-07 收到修改稿。

联系人及第一作者: 夏国栋, 男, 34 岁, 博士。

30 ~ 60 s, 以保证测得的含气率值是 30 个以上弹单元的平均。采用高速动态分析仪与探针同步测量法确定阈值。

实验条件如下：液相表观速度  $0.032 \sim 1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；气相表观速度  $0.1 \sim 1.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；压力  $0.1 \sim 0.3 \text{ MPa}$ 。

## 2 弹状流模型

管内垂直上升气液弹状流动可以用图 1 所示的弹单元来描述。每个弹单元由液弹、大气泡(Taylor 气泡)和充气液膜 3 部分构成。液弹中含有弥散气泡，由于射流液膜对气体的夹带，液弹前方存在一段高空隙度的混合区。通过分析一个弹单元，推导弹状流方程，模型基于如下假设：

- (1) 低压系统平衡、绝热；
- (2) 弹状流为充分发展的稳定流动；
- (3) 气泡上升过程中轻微的膨胀效应可以忽略。

### 2.1 弹单元平均空隙度

$$\langle \alpha_{SU} \rangle = \beta \langle \alpha_{TB} \rangle + (1 - \beta) \langle \alpha_{LS} \rangle \quad (1)$$

### 2.2 质量守恒

如图 1 所示的控制容积  $AABB$  内气相质量守恒

$$U_{SG} = \beta \langle \alpha_{TB} \rangle U_{G,TB} + (1 - \beta) \langle \alpha_{LS} \rangle U_{G,LS} \quad (2)$$

控制容积  $AABB$  内液相质量守恒得

$$U_{SL} = (1 - \beta) \langle R_{LS} \rangle U_{L,LS} - \beta \langle R_{TB} \rangle U_{L,TB} \quad (3)$$

### 2.3 相对坐标系下的连续方程

采用固定在气泡头部的相对坐标系，在该坐标系中，液弹内液相和气相向下流动。从液弹流到大气泡头部的液体流量应等于液膜中流出的液体量

$$(U_{TB} - U_{L,LS}) \langle R_{LS} \rangle = (U_{TB} + U_{L,TB}) \langle R_{TB} \rangle \quad (4)$$

将同样的方法应用于气相，相对坐标系下，任意截面气相流量守恒

$$(U_{TB} - U_{G,LS}) \langle \alpha_{LS} \rangle = (U_{TB} - U_{G,TB}) \langle \alpha_{TB} \rangle \quad (5)$$

### 2.4 液弹内气泡群的速度<sup>[7]</sup>

$$U_{G,LS} = U_{L,LS} + 1.53 \left[ \frac{\sigma g (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right]^{\frac{1}{4}} \langle R_{LS} \rangle^{0.5} \quad (6)$$

### 2.5 大气泡运动速度

影响大气泡运动速度的因素很多，本文作者在文献[8]中用高速动态分析仪研究了垂直上升气液弹状流中大气泡的上升速度，得到了与文献[3,4]形式相同的关式

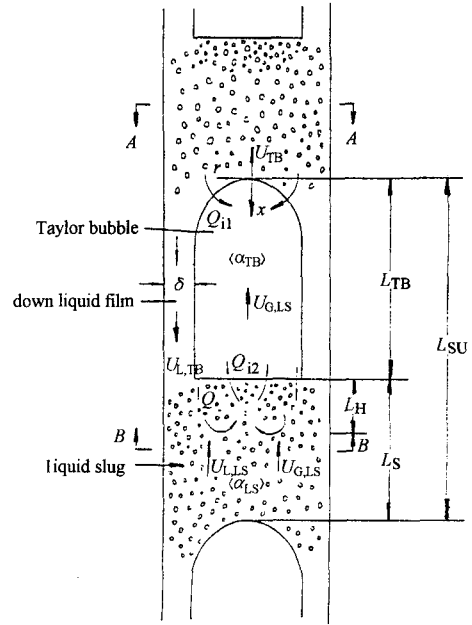


图 1 垂直上升弹状流流动结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of gas - liquid slug flow

$$U_{TB} = 1.219U_s + 0.35\sqrt{gD} \quad (7)$$

式中  $U_s$  为两相混合物速度。

## 2.6 液膜运动

采用坐标原点固定在气泡头部的相对坐标系, 考虑气液界面摩擦力的影响, 建立动量守恒方程。因为气相密度远小于液相密度, 所以忽略大气泡中气相产生的压降, 则

$$\rho_L(U_{TB} + U_{L,TB}) \frac{d(U_{TB} + U_{L,TB})}{dx} = -\frac{\tau_w S_w}{A_{L,TB}} - \frac{\tau_i S_i}{A_{L,TB}} + \rho g \quad (8)$$

其中几何参数  $S_w$ 、 $S_i$  可由下式确定

$$S_w = \pi D \quad (9)$$

$$S_i = \pi(D - 2\delta) \quad (10)$$

应当指出, 虽然上述方程是在相对坐标系中建立的, 但壁面切应力  $\tau_w$  以及界面切应力  $\tau_i$  仍由流体实际速度确定, 这里规定  $U_{L,TB}$  向下为正, 则

$$\tau_w = \frac{1}{2} f_L \rho_L U_{L,TB} |U_{L,TB}| \quad (11)$$

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_G (U_{TB} + U_{L,TB})^2 \quad (12)$$

界面摩阻系数确定如下<sup>[1]</sup>

$$f_i = f_G(1 + 300 \delta/D) \quad (13)$$

其中壁面摩阻系数  $f_k$  ( $k = L, G$ ) 由文献[9]推荐的单相流体圆管内流动的关系式确定

$$\frac{1}{\sqrt{f_k}} = -2.0 \lg \left\{ \frac{\epsilon/D}{3.7} - \frac{5.02}{Re_k} \lg \left[ \frac{\epsilon/D}{3.7} - \frac{5.02}{Re_k} \lg \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{13}{Re_k} \right) \right] \right\} \quad (14)$$

式中  $\epsilon$  为管壁粗糙度。对工业常用管路, 取  $\epsilon = 0.08 \text{ mm}$ ;  $Re_L$  和  $Re_G$  分别定义为

$$Re_L = \frac{\rho_L |U_{L,TB}|}{\mu_L} \cdot \frac{4A_{L,TB}}{\pi D} \quad (15)$$

$$Re_G = \frac{\rho_G U_{TB}}{\mu_G} \left( 1 - \frac{A_{L,TB}}{A} \right) D \quad (16)$$

方程(8)求解的边界条件为

$$(U_{TB} + U_{L,TB})|_{x=0} = U_{TB} - U_{L,LS} \quad (17)$$

## 2.7 液弹空隙度

如图1所示, Taylor 气泡运动过程中不断追赶并吞并液弹内的小气泡, 单位时间通过这一路径进入 Taylor 气泡的气体量  $Q_{il}$  为<sup>[3]</sup>

$$Q_{il} = A \langle \alpha_{LS} \rangle (U_{TB} - U_{G,LS}) \quad (18)$$

在 Taylor 气泡尾部, 液膜以壁面射流的形式进入后面的液弹。研究表明, 当液膜速度超过一定值后, 会产生对气相的夹带。夹带量是速度、气液接触周长以及流体物性等的函数。文献[10]研究了液膜进入静止水中时对气体的夹带。据此可定义液膜的特征速度  $U_{cr}$  为

$$U_{cr} = \sqrt{\frac{gA_{L,TB}}{S_i}} \quad (19)$$

将上式应用于气液弹状流动, 液膜夹带气量  $Q_0$  可表示为

$$Q_0 = k_1 S_i (U_{TB} + U_{L,TB} - U_{cr}) \quad (20)$$

式中  $k_1$  是与管径及管倾角有关的参数.

液膜卷吸夹带的结果使得气泡尾部形成一段高空隙度的混合区, 该区域的空隙度可以通过下式来计算

$$\alpha_H = \frac{Q_0}{(U_{TB} - U_S)A} \quad (21)$$

当液膜以壁面射流的形式进入液弹时, 在大气泡尾部将形成强烈的旋涡, 受其影响液弹中的部分弥散相气泡将通过大气泡尾部进入大气泡. 从大气泡尾部进入气泡的气体量  $Q_{i2}$  表示为

$$Q_{i2} = k_2 \alpha_H A U_{C0} \quad (22)$$

式中  $k_2$  为量纲为 1 的系数,  $U_{C0}$  为小气泡的漂移速度.

大气泡内守恒条件要求

$$Q_0 = Q_{i1} + Q_{i2} \quad (23)$$

将式(18)、式(20)、式(22)代入式(23), 并整理得到关于液弹空隙度  $\langle \alpha_{LS} \rangle$  的表达式

$$\langle \alpha_{LS} \rangle = k_1 \frac{S_i}{A} \left( 1 - k_2 \frac{U_{C0}}{U_{TB} - U_S} \right) \left( \frac{U_{TB} + U_{LTBt} - U_{*r}}{U_{TB} - U_{G,LS}} \right) \quad (24)$$

式中 系数  $k_1, k_2$  通过对实验数据进行回归分析确定.

最后, 模型计算中需要液弹长度作为输入参数, 对垂直上升流动, 采用文献[8]推荐关系式计算液弹长度 ( $L_S$ )

$$L_S/D = 4.0 + 0.0526 Re_j^{0.5} \quad (25)$$

$$Re_j = \frac{\rho_L D (U_{TB} + U_{LTBt})}{\mu_L} \quad (26)$$

气泡长度 ( $L_{TB}$ ) 可由下式确定

$$L_{TB} = \frac{\beta}{1 - \beta} L_S \quad (27)$$

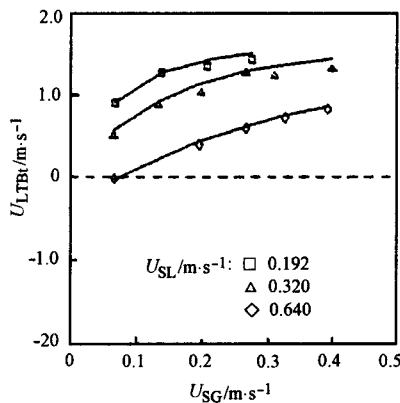


图 2 液膜终极速度计算值与测量值的比较

Fig.2 Comparison of the calculated  $U_{LTBt}$  with the experimental data  
— model

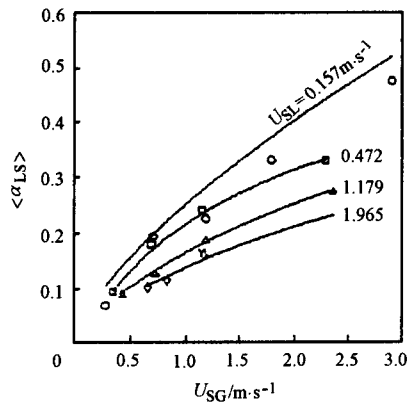


图 3 液弹空隙度计算值与本文实验数据的比较

Fig.3 Comparison of the calculated  $\langle \alpha_{LS} \rangle$  with the current data  
— model

### 3 计算结果与实验数据的比较及讨论

模型计算前首先要根据实验数据确定式(24)中的系数  $k_1, k_2$ . 对垂直上升流动, 采用本文以及文献[4,11,12]中推荐的 5 种管径的实验数据拟合得  $k_2 \approx 1.0$ , 而  $k_1$  则与管径有关,  $k_1 = 0.024D$ . 系数确定后, 即可由控制方程进行求解.

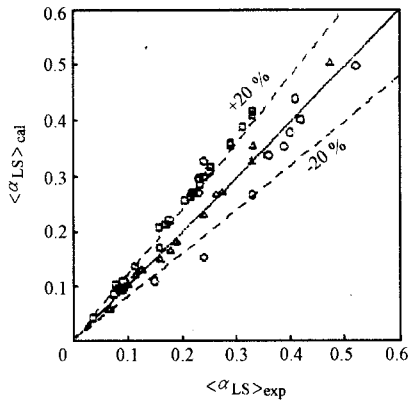


图 4 模型计算  $\langle \alpha_{LS} \rangle$  与文献[4,11]及本文数据的比较

Fig.4 Comparison of the calculated  $\langle \alpha_{LS} \rangle$  with the experimental data  
□ lit. [4]; ○ lit. [11]; △ current data

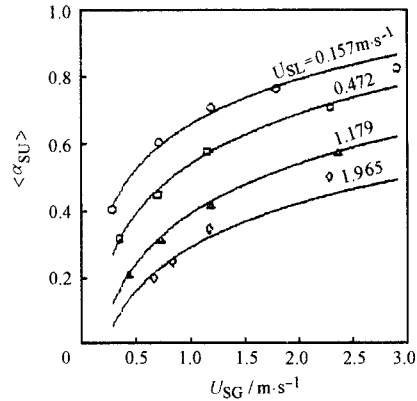


图 5 模型计算  $\langle \alpha_{SU} \rangle$  与本文数据的比较

Fig.5 Comparison of the calculated  $\langle \alpha_{SU} \rangle$  with the current data  
— model

**液膜终极速度** 液膜终极速度计算值与实验数据的比较在图 2 中给出. 由图可见, 当液相流速一定时,  $U_{LTB}$  随气相速度的增大而增大; 但当气相流速一定时,  $U_{LTB}$  随液体表面速度的增大而减小. 而且当气相流速较小、液相流速较大时, 液膜在流经气泡周围时, 有可能不发生运动方向的改变, 即  $U_{LTB}$  的方向有可能是向上的. 这可从图中  $U_{SL} = 0.64 m \cdot s^{-1}$  的曲线上看到: 当  $U_{SG} < 0.1 m \cdot s^{-1}$  时, 液膜离开气泡尾部时仍向上运动. 实验观测到, 气泡较短时, 会出现上述情况.

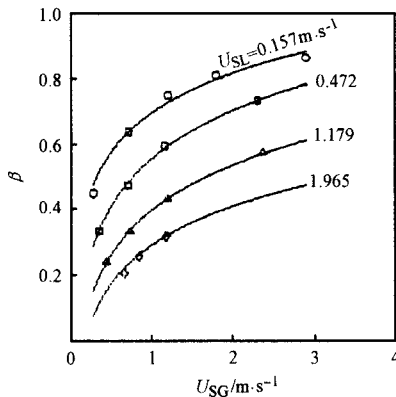


图 6 气泡长度份额计算值与实验数据的比较

Fig.6 Comparison of the calculated  $\beta$  with the experimental data  
— model

液膜在流经气泡周围时, 有可能不发生运动方向的改变, 即  $U_{LTB}$  的方向有可能是向上的. 这可从图中  $U_{SL} = 0.64 m \cdot s^{-1}$  的曲线上看到: 当  $U_{SG} < 0.1 m \cdot s^{-1}$  时, 液膜离开气泡尾部时仍向上运动. 实验观测到, 气泡较短时, 会出现上述情况.

**液弹空隙度** 图 3 给出了垂直上升流动时液弹空隙度模型计算值与本文实验数据的比较, 液弹空隙度随气体表面速度的升高而增大, 随液体表面速度的升高而减小. 总体上, 计算值略高于测量结果. 图 4 所示为模型计算值与文献[4,11]及本文实验结果的比较. 模型预测值与文献[11]数据相符很好, 略低于文献[4]实验结果, 相对误差为 20%.

**弹单元空隙度** 图 5 所示为模型计算  $\langle \alpha_{SU} \rangle$  与本文实验数据的比较, 可以看出, 弹

单元空隙度随气体表观速度的升高而增大, 随液体表观速度的升高而减小. 尤其需要指出的是, 尽管模型计算液弹空隙度略高于实验数据, 但弹单元空隙度预测值却与实验数据相符很好, 这表明, 低表观液速下, 对弹单元空隙度起决定性影响的是 Taylor 气泡区的含气量; 随表观气速的升高, 液弹空隙度的影响作用变得重要起来.

**气泡长度份额** 图 6 所示为气泡长度份额计算值与实验数据的比较, 计算及实验结果均表明, 气泡长度份额随折算气速的增加而增大, 随折算液速的增加而减小. 从总体上看, 理论计算值与测量值相符良好.

## 4 结 论

本文改进了预测垂直上升弹状流流动特性的模型. 该模型具有良好的适用性, 一旦输入气液流速、管径和流体物性, 则可计算描述弹状流流动特性的主要参数; 文中将模型预测值与可利用的实验数据进行了比较, 结果表明两者相符良好, 各主要参数的误差均在可容许的范围内.

### 符 号 说 明

$A$ ——面积, $m^2$	$\delta$ ——液膜厚度, $m$
$D$ ——直径, $m$	$\sigma$ ——表面张力, $N \cdot m^{-1}$
$f$ ——摩擦系数	$\mu$ ——动力粘度系数, $N \cdot s \cdot m^{-2}$
$g$ ——重力加速度, $m \cdot s^{-2}$	$\rho$ ——密度, $kg \cdot m^{-3}$
$k$ ——系数	$\tau$ ——切应力, $N \cdot m^{-2}$
$L$ ——长度, $m$	
$Q$ ——体积流量, $m^3 \cdot s^{-1}$	<b>下角标</b>
$R$ ——含液率	cr——特征值
$Re$ ——Reynolds 数	G——气相
$S$ ——周长, $m$	H——混合区
$U$ ——速度, $m \cdot s^{-1}$	i——气液界面
$U_{sc}$ ——气体折算速度, $m \cdot s^{-1}$	L——液相
$U_{sl}$ ——液体折算速度, $m \cdot s^{-1}$	LS——液弹
$x$ ——轴向坐标, $m$	LTBt——液膜
$\alpha$ ——截面含气率	SU——弹单元
$\beta$ ——大气泡长度份额	TB——Taylor 气泡
	w——壁面

### References

- Wallis G B. One - dimensional Two - phase Flow. New York: McGraw Hill, 1969
- Taitel Y, Barnea D. Adv. Heat Transfer, 1990, 20: 83—132
- Fernandes R C, Semiat R, Dukler A E. AIChE J., 1983, 14: 981—989
- Zhang Haoqin(张浩勤), Lu Meijuan(陆美娟), Lian Chunguang(连春光), Zhu Shiliang(朱士亮). J. of Chemical Engineering of Chinese Universities(高校化学工程学报), 1991, 5(2):102—111
- Sylvester N D. ASME J. Energy Resources Technology, 1987, 109: 111—120
- Xia Guodong(夏国栋), Zhou Fangde(周芳德), Hu Mingshen(胡明胜). J. of Chemical Industry and Engineering(化工学报), 1997, 48(6): 729—735

- 7 Zuber N, Hench J. General Electric Report, 1962, 62 GL100
- 8 Xia G D, Zhou F D, Hu M S. Nuclear Science and Techniques, 1996,7(4):18—23
- 9 Zigrang D J, Sylvester N D. AIChE J., 1982,28:514—515
- 10 Kalinske A A, Robertson J M. Trans. ASCE, 1943, 108: 1435—1447
- 11 Mao Z S, Dukler A E. Experiments in Fluids, 1989,8:169—182
- 12 Van Hout R, Shemer L, Barnea D. Int. J. Multiphase Flow, 1992,18:831—845

## HYDRODYNAMIC MODEL OF UPWARD GAS - LIQUID SLUG FLOW IN VERTICAL TUBES

**Xia Guodong and Peng Yan**

(College of Environmental & Energy Engineering,  
Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

**Zhou Fangde and Hu Mingsheng**

(National Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering,  
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Abstract** By reducing intermittency to periodicity, the very complex slug flow structure is simplified to an equivalent unit consisting of a liquid slug, one adjacent Taylor bubble and an aerated liquid film. A region with high local concentration of dispersed bubbles is formed in the front of the liquid slug, because the liquid film entrains gas penetrating the liquid slug. In the current paper, a hydrodynamic model is constructed for gas - liquid two - phase slug flow in vertical tubes, which considers the gas exchange between the Taylor bubble and its following liquid slug. It can predict the flow characteristics of this complex flow pattern. A detailed experimental investigation was carried out in air/water system. An EKTAPRO 1000 high speed motion analyzer and the optical probes were used as measuring instruments. The results predicted by this model are in better agreement with the available experimental data.

**Keywords** vertical tube, slug flow, gas - liquid two - phase flow

### 欢迎订阅新版《化工学报》

2000年起,《化工学报》(双月刊)将改为大16开本,每期144页。内容更丰富,印刷更精美。每本定价20.00元,全年定价120.00元,免邮费。可从银行或邮局汇款至编辑部订阅。欢迎垂询!

#### 银行汇款订阅

户名:北京进展化工期刊社

开户银行:北京市商业银行亚运村支行

帐号:7001201050731 - 56

联系人:王琳

联系电话:(010)64982559、64982557

E-mail:bihgxbj@choice.cheminfo.gov.cn

#### 邮局汇款订阅

地址:北京市朝阳区惠新里3号 化工出版社

《化工学报》编辑部

邮编:100029