

# 气液两相弹状流动的实验研究

## ——液弹长度及 Taylor 气泡长度份额

夏国栋 刘亮 马重芳 苑中显

(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** 研究了垂直及倾斜上升管内, 充分发展弹状流的液弹长度、Taylor 气泡长度份额以及液弹长度在弹状流发展过程中的变化情况. 希望研究结果对改进目前广泛使用的有关倾斜上升弹状流的不全面的理论能有一定的帮助.

**关键词** 弹状流, Taylor 气泡, 液弹

**分类号** O 359.1

液弹长度及 Taylor 气泡长度份额是描述气液弹状流动的两个重要参数, 它不仅对计算弹状流压降至关重要, 而且也是弹状流模型中重要的输入参数. 以往已有一些研究者对此进行了研究<sup>[1, 2]</sup>, 但这些研究多是针对垂直上升流动和水平流动, 对管内倾斜上升气液弹状流动的研究还相当有限<sup>[3]</sup>, 尤其是针对近垂直倾斜管内气液弹状流动的研究, 尚没有详细的报道, 此外, 对管入口区域弹状流发展过程的研究也有限.

为此, 本文利用高速动态分析仪和光纤探针对垂直及倾斜上升管内气液弹状流动的液弹长度及 Taylor 气泡长度份额进行了研究. 希望研究结果对改进目前广泛使用的有关弹状流的不全面的理论能有一定的帮助.

## 1 实验系统及实验方法

本文的实验工作是在空气/水实验回路上进行的. 水和空气为实验工质, 分别用转子流量计测量其流量. 实验段由内径 30 mm, 长 6 m 的有机玻璃管制成, 测点分别设在距入口 0.9、2.4、4.5 m 处. 采用美国柯达公司生产的 EKTAPRO 1000 型高速动态分析仪和光纤探针测量 Taylor 气泡长度及液弹长度. 测量时, 探针头部位于管中心线, 选用 200 Hz 的采样频率, 每工况连续采样时间为 3 000 s, 以保证每次测量的弹单元总数不少于 500 个.

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 充分发展区

#### 2.1.1 液弹长度垂直上升流动

图 2 为气相折算流速  $v_G$  为 0.742 m/s 时, 4 种液相流速  $v_L$  下液弹长度  $L$  统计分布的实验结果,

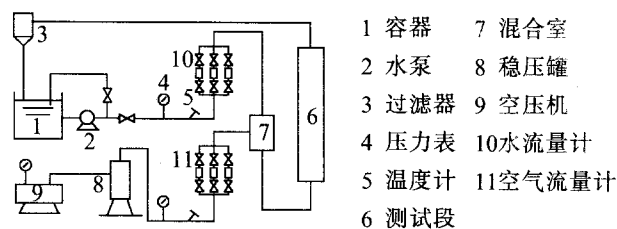


图1 实验系统及实验段结构示意图

收稿日期: 1999-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59236131)

测点距入口  $150D$ , 这时弹状流动已近似达到充分发展<sup>[4]</sup>. 图中可以看到, 随  $v_L$  的增大, 短液弹所占的份额逐渐减小, 平均液弹长度  $L_{\text{mean}}$  增大. 但是当  $v_L = 1.16 \text{ m/s}$  时,  $L_{\text{mean}}$  却略有减小, 小于  $v_L = 0.787 \text{ m/s}$  时的  $L_{\text{mean}}$ , 这或许是由于实验中入口条件的某种随机特性所致. 4 种流速下实验测得的  $L_{\text{mean}}$  为  $16 \sim 20D$ , 最大标准方差可达  $45\%$ . 图 2 中还给出了不同流速下的最大液弹长度  $L_{\text{max}}$ , 各工况下  $L_{\text{max}}$  约为其平均值的 2 倍左右.

应该指出, 4 种实验条件下, 我们都测量到少量短液弹, 这些短液弹的存在表明, 距入口  $150D$  处, 弹状流动尚未达到严格意义上的充分发展. 这一结果与文献 [4] 中关于弹状入口长度的分析相符, 即当所有弹长大于 0.5 倍最小稳定液弹长度之后, 弹状流的发展过程将进行得相当缓慢. 此时弹状流动的主要特性参数将趋于稳定, 可近似认为流动已达到充分发展.

### 2.1.2 倾斜上升流动

如图 3、图 4 所示为两种实验段倾角下测得的液弹长度  $L$  的统计分布. 图中显示了  $L$  随液体流速变化而改变的情况, 测点距实验段入口  $150D$ .  $v_G$  一定, 随  $v_L$  增大, 两倾角测得的  $L$  变化趋势相同, 即  $v_L$  愈大,  $L_{\text{mean}}$  愈大, 图中还显示了各工况  $L$  的标准方差, 这清楚地表明了与液弹长度变化有关的随机性. 每种实验工况均测得了少量约为 2 倍  $L_{\text{mean}}$  的液弹. 与前文给出的垂直上升弹状流相比, 除  $v_L = 1.16 \text{ m/s}$ ,  $v_G = 0.787 \text{ m/s}$  这一工况外, 其余工况测得的  $L_{\text{mean}}$  均随倾角的减小而减小, 这与文献 [3] 报道的空气/煤油系统的实验结果相同.

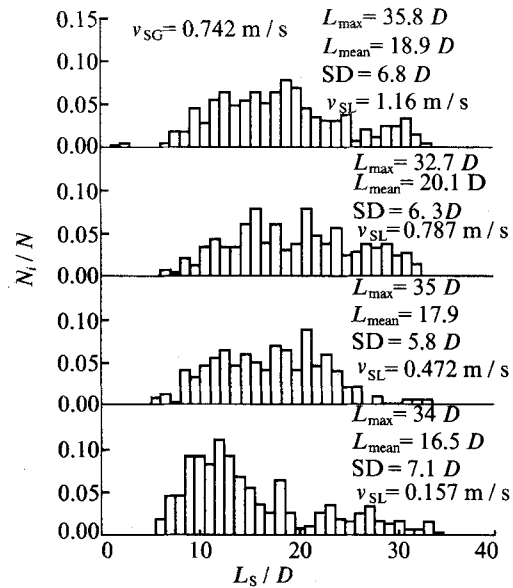


图2 充分发展弹状流中液弹长度分布( $\theta = 90^\circ$ )

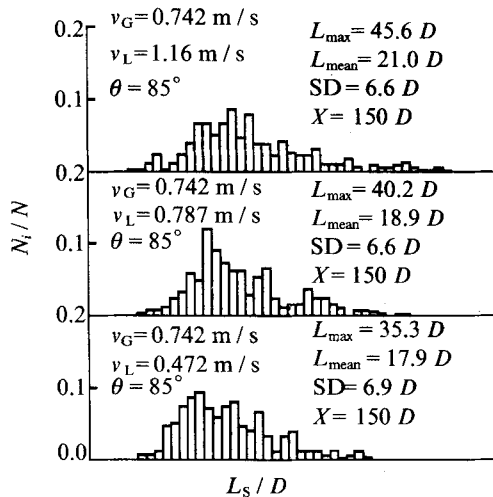


图3 充分发展弹状流中液弹长度分布( $\theta = 85^\circ$ )

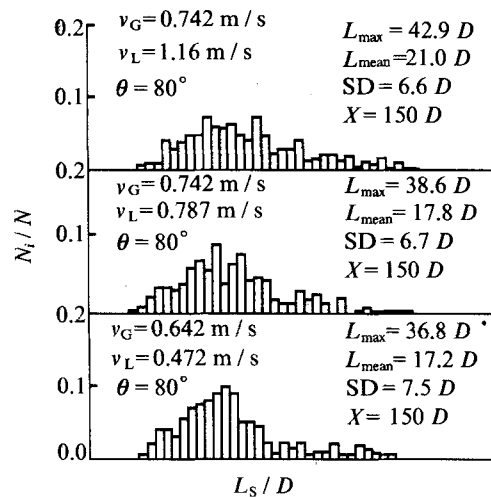


图4 充分发展弹状流中液弹长度分布( $\theta = 80^\circ$ )

## 2.2 入口区域液弹长度分布

本文研究了管入口区域  $L_s$  分布情况. 两根光纤探针分别安装在距入口  $30D$ 、 $80D$  处. 4 种实验条件下, 垂直上升流动中弹长统计分布的实验结果示于表 1, 其中  $v_G$  均为  $0.742 \text{ m/s}$ . 可以看出, 在管入口附近,  $L_{\text{mean}}$  较短, 长度小于  $10D$  的液弹所占比例较大, 距入口  $30D$  处 4 种实验条件下的  $L_{\text{mean}}$  均为  $10D$  左右. 随流动发展, 气泡合并, 部分短液弹消失.  $v_L = 1.16 \text{ m/s}$  时,  $80D$  处  $L_{\text{mean}}$  已达  $18D$ ; 而  $v_L = 0.157 \text{ m/s}$  时, 合并过程相对迟缓. 但在  $x = 150D$  处, 4 种条件下  $L_{\text{mean}}$  都趋于稳定, 短液弹明显减少, 流动已接近充分发展.

3 种实验条件下倾斜上升流动中  $L$  发展情况列于表 2, 其中  $v_G$  均为  $0.742 \text{ m/s}$ . 可以看到距入口  $30D$

处,受入口条件的影响,短弹数量很大,液体速度和平均弹长之间找不出任何有规律的关系,相对误差约为81%。在距入口80D处,实验段入口随机效应的影响逐渐减弱,但尚有一定数量的短液弹存在;到150D处,3种实验条件下短弹比例均明显减少,已近似达到充分发展的弹状流动。

表1 垂直上升流动中液弹长度统计分布的实验结果

位置X	$v_L$									D倍		
	$0.157 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$			$0.472 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$			$0.787 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$			$1.160 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$		
	$L_{\text{mean}}$	$L_{\text{max}}$	SD	$L_{\text{mean}}$	$L_{\text{max}}$	SD	$L_{\text{mean}}$	$L_{\text{max}}$	SD	$L_{\text{mean}}$	$L_{\text{max}}$	SD
30 D	7.3	31.5	7.4	12.4	32.4	7.6	15.0	32.4	7.7	7.0	32.0	5.9
80 D	9.4	32.0	9.0	15.3	34.6	8.1	18.8	33.7	7.1	18.0	33.0	7.8
150 D	16.5	34.0	7.1	17.9	35.1	5.8	20.1	33.7	6.3	18.9	35.8	6.8

表2 不同轴向位置倾斜上升弹状流中液弹长度的实验结果

位置X	$v_L$									D倍		
	$0.472 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$			$0.787 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$			$1.160 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$					
	$L_{\text{mean}}$	$L_{\text{max}}$	SD	$L_{\text{mean}}$	$L_{\text{max}}$	SD	$L_{\text{mean}}$	$L_{\text{max}}$	SD			
85°	30 D	13.9	31.8	8.2	14.3	31.2	7.9	14.4	31.8	7.7		
	80 D	16.3	35.3	7.1	17.9	37.7	7.8	19.6	43.4	7.8		
	150 D	17.9	35.3	6.9	18.9	40.2	6.6	21.0	45.6	7.9		
80°	30 D	8.5	29.3	6.9	11.4	29.9	6.5	11.0	36.4	6.5		
	80 D	12.8	33.2	7.5	15.5	34.1	7.7	17.8	39.5	6.5		
	150 D	17.2	36.8	7.5	17.8	38.6	6.7	19.9	42.9	7.3		

### 2.3 充分发展区 Taylor 气泡的长度份额

Taylor 气泡的长度份额  $\beta$  是计算弹单元空隙度的重要参数,  $\beta$  定义为

$$\beta = L_B / (L_S + L_B)$$

式中:  $L_B$  为气泡长度;  $L_S$  为液弹长度。

本文采用高速动态分析仪和光纤探针测定液弹及气泡长度。设第  $i$  个液弹和气泡通过测点的时间分别为  $\Delta t_s, \Delta t_b$  则

$$L_S = v_L \cdot \Delta t_s$$

$$L_B = v_B \cdot \Delta t_b$$

其中 Taylor 气泡速度  $v_B$  采用高速动态分析仪测定。

3种倾角下 Taylor 气泡  $\beta$  的实验结果在表3中给出。可以看出, 恒定  $v_L$  下, 随  $v_G$  的增加,  $\beta$  明显增大; 而当  $v_G$  一定时,  $\beta$  随  $v_L$  的增加而减小, 而且  $v_G$  愈小,  $\beta$  减小得愈缓慢。另一方面, 随管路逐渐偏离垂直位置, 各对应工况的  $\beta$  略有增加。目前还没有这一现象的机理解释, 不过因倾角减小而引起的平均液弹长度的减小有可能导致气泡长度份额的增加。

表3 大气泡长度份额的实验结果

$v_G /$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$v_L /$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	气泡长度份额 $\beta$		
		$\theta = 90^\circ$	$\theta = 85^\circ$	$\theta = 80^\circ$
0.287	0.157	0.449	0.483	0.492
0.742	0.157	0.610	0.603	0.625
1.792	0.157	0.810	0.806	0.816
2.902	0.157	0.863	0.882	0.894
0.358	0.472	0.335	0.343	0.327
0.742	0.472	0.474	0.479	0.510
1.156	0.472	0.594	0.595	0.617

## 3 结论

- 1)  $v_G$  一定时, 随  $v_L$  的增大,  $L_{\text{mean}}$  略有增加;
- 2) 近垂直倾斜管的  $L$  小于对应工况下垂直上升流动的  $L$ ;
- 3)  $\beta$  随倾角减小而增大;

4) 充分发展的垂直上升弹状流中  $L_{\text{mean}}$  为  $16\sim 20 D$ , 可能出现的  $L_{\text{max}}$  为平均弹长的 2 倍左右, 最小稳定弹长为  $14 D$ .

### 参 考 文 献

- 1 Mao Z S, Dukler A E. An experimental study of gas-liquid slug flow. *Experiments in Fluids*, 1989, 8: 169~182
- 2 Nakoryakov V E. Experimental study of gas liquid slug flow in a small diameter vertical tube. *Int J Multiphase Flow*, 1986(12): 337~355
- 3 Felizola H, Shoham O. A unified model for slug flow in upward inclined pipes. *ASME J Energy Resources Technology*, 1995, 17: 7~12
- 4 Taitel Y, Dukler A E. Modeling flow pattern transitions for steady upward gas liquid flow in vertical pipes. *AIChE J*, 1980, 26: 345~354

## An Experimental Study on Gas Liquid Two-phase Slug Flow- Liquid Slug Length and the Fraction of Taylor

Xia Guodong Liu Liang Ma Chongfang Yuan Zhongxian

( College of Environment and Energy Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing, 100022 )

Zhou Fangde Hu Mingsheng

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

**Abstract** The length of liquid slug and Taylor bubble in the vertical and inclined slug flow had been investigated by using the high speed motion analyzer and optical probes. Meanwhile, the data of liquid slug length in different axial position had been obtained.

**Keywords** slug flow, Taylor bubble, liquid slug