

# 气液混输管线间歇流动压降研究

李志彪<sup>1</sup>, 许晶禹<sup>2</sup>, 吴应湘<sup>2</sup>

(1 中国石油天然气股份有限公司规划总院, 北京 100083 2 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 间歇流动是水平混输管线的主要流动形式, 压降是两相流动中的关键参数之一, 对间歇流动压降进行了详细的实验研究和理论研究。实验工作是利用水-空气和油-空气作为介质在长约 30 m、内径分别为 50 mm 和 25 mm 的管线上完成的。实验发现液相黏度越大, 两相流动压降越大。气相表观速度或液相表观速度的增加都会使压降增大, 但增加液相表观速度时压降增大幅度更大。管径对两相流动压降有很大的影响, 这种影响与液相表观速度和液相黏度有关。液相表观速度越大, 管径影响越大; 液相黏度越小, 管径影响越大。用常用的 Lockhart-Martinelli 模型进行了验证, 该模型用于水-空气流动时比较准确, 但对于油-空气流动, 该模型计算结果偏差较大。提出了分相流模型的改进模型, 该模型能更好地计算油-空气间歇流动压降。

**关键词:** 混输管线; 间歇流动; 压降; Lockhart-Martinelli 模型; 分相流模型

中图分类号: TE8 文献标识码: A 文章编号: 1004-9614(2011)01-0004-05

## Study of the Pressure Drop During Gas-Liquid Intermittent Flow in a Horizontal Pipeline

LI Zhibiao<sup>1</sup>, XU Jingyu<sup>2</sup>, WU Yingxiang<sup>2</sup>

(1 PetroChina Planning & Engineering Institute Beijing 100083, China

2 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100080, China)

**Abstract** Intermittent flow is a most common flow pattern in a horizontal transportation pipeline and pressure drop is one of the essential parameters in two-phase flow. In this work, intermittent flow pressure drop has been studied experimentally and theoretically. Experiments were carried out in 30 meter long horizontal pipes of 50 mm id and 25 mm id respectively by using water-air and oil-air as the media. It is shown that the pressure liquid velocity. The effect of the superficial liquid velocity on the pressure drop is greater than that of the superficial gas velocity. The pipe's diameter also has a large effect on the intermittent flow pressure drop and this effect is determined by liquid viscosity and velocity. Furthermore, the Lockhart-Martinelli model can be used to estimate the pressure drop for water-air two-phase intermittent flow. But for oil-air two-phase flow, this model has a noticeable deviation regarding the results of computation. The improved separated-phase model can estimate the oil-air two-phase flow pressure drop exactly.

**Key words** gas-liquid pipeline; intermittent flow; pressure drop; Lockhart-Martinelli model; separated-phase model

### 0 引言

近年来全球新发现的大油气田主要位于海上, 海洋石油储量和产量在全球石油产量中所占的份额也在不断增加。目前, 海洋油气勘探开发范围已从浅海、半浅海延伸到深海。随着勘探和开发深度的增加, 海洋石油平台的建设费用也越来越大, 减少平台的建设费用是海洋油气勘探开发提高效益的重大课题。因此, 把海上油田油井产物通过混输管道输送到陆上进行处理, 既降低了平台建设投资, 又减少了在

海底铺设管道的投资, 成为越来越重要的输运手段。

间歇流动是混输管线中最常见的一种流型。详细了解间歇流动的阻力特性, 对于了解油气混输管道中的能耗、混输管线与增压系统的合理设计及混输系统的运行监控等至关重要。因此对混输管道中间歇流动的压降进行实验及理论研究, 具有非常重要的工程意义。

首先, 对混输管线间歇流动中的压降进行了实验研究, 主要分析了管线直径和液相物性对压降的影响。然后对常用的压降计算模型 (Lockhart-Martinelli 模型<sup>[1]</sup>) 进行了验证, 在此基础上对分相流模型进行

了改进并验证了其计算结果的准确性。

### 1 实验

#### 1.1 实验系统构成

实验工作是在中国科学院力学研究所应用流体力学实验室的多相流实验平台上进行的。该平台可以进行空气-水、油-水两相流动或油-气-水三相流动特性研究。

##### 1.1.1 介质供给系统

整个流程管线为内径 50 mm 和 25 mm 的透明有机玻璃管, 管线入口三通到分离器长约 30 m, 实验段包括 2 个长 8 m 的水平管。液相由液相箱经过各自的增压系统(油泵或水泵)增压后, 通过 T 型三通管与气相混合后进入实验段; 气相由空气压缩机增压后, 进入三通与液相混合。气液两相流经实验管线后进入分离器, 气相排入大气中, 液相进入液相箱循环使用。水相由电磁流量计计量, 油相由涡轮流量计计量, 气相由质量流量计计量。

##### 1.1.2 数据采集系统

压力和压差信号采用传感器测量, 测量信号经过放大器放大后应用 DAQP-12H 数据采集系统进行采集, 采样频率为 100 Hz 第一个压力传感器的位置距管线入口三通 10 m, 差压传感器接在相距 1 m 的管线底部。压力、压差数据处理时采用时间平均方法, 即对每个实验工况下的压力、压差数据进行 2.5 min 时间平均处理。实验介质温度控制在 23~25 °C。

##### 1.1.3 实验介质物性

实验介质为白油、水和空气。

水在 20 °C、0.1 MPa 时, 密度为 998.2 kg/m<sup>3</sup>、动力黏度为 1 mPa·s 表面张力为 7.12 × 10<sup>-2</sup> N/m。

白油在 20 °C、0.1 MPa 时, 密度为 860.0 kg/m<sup>3</sup>、动力黏度为 4.4 × 10<sup>-2</sup> Pa·s 表面张力为 4.45 × 10<sup>-2</sup> N/m。

#### 1.2 单相流动摩擦因子

为了校核实验系统的精确度, 获得正确的气液两相压降, 文中分别对单相的水和油进行了压降的测量, 实验数据的范围: 10 < Re < 2 × 10<sup>5</sup>。实验测得的单相摩擦因子的计算公式为

$$f_{EXP} = \frac{D}{2\rho u_L^2} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (1)$$

式中: Δp/L 为实验测得的压降; D 为管道直径, m; ρ 为液相密度, kg/m<sup>3</sup>; u<sub>L</sub> 为液相速度, m/s

摩擦因子理论计算采用常用布拉休斯公式<sup>[2]</sup>:

$$f_{THE} = 16Re^{-1} \quad \text{层流} \quad (2)$$

$$f_{THE} = 0.079Re^{-0.25} \quad \text{湍流} \quad (3)$$

应用计算结果绘制了摩擦因子的实验值与理论计算值的对比图(图 1)。从图 1 中可以看出, 理论值和实验数据符合的很好, 但是单相的实验值略高于理论值, 这种差异主要是由于理论值没有考虑管道粗糙度的影响。由于液相黏度的影响, 油相速度在小于 2.149 m/s 时为层流; 而对于水相, 在流速等于 0.042 m/s 时已经发展为湍流。所以, 对于实验系统, 单相的油为层流, 水相为层流或湍流。

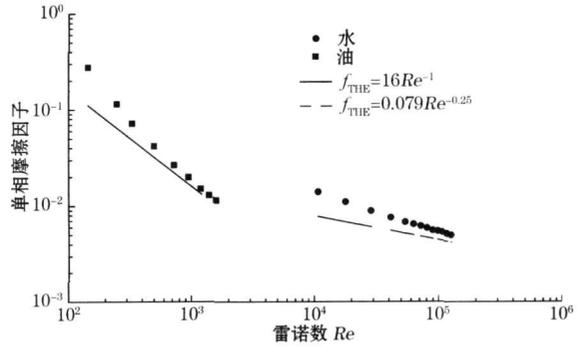
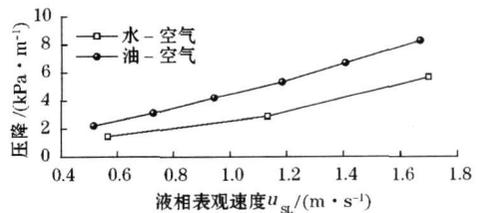


图 1 单相摩擦因子实验值与理论计算值比较

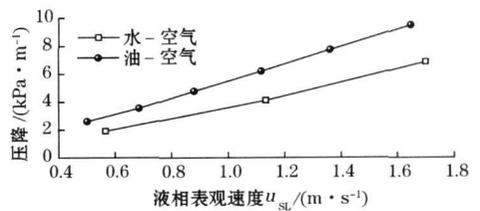
### 2 实验结果分析

#### 2.1 液相介质对压降的影响

图 2 给出了油-空气和水-空气在管道中流动时, 气相表观速度不变, 增大液相表观速度时的压降变化曲线。



(a) u<sub>SG</sub> = 2.038 m/s



(b) u<sub>SG</sub> = 3.397 m/s

图 2 不同物性下液相表观速度对压降的影响

从图 2 中可以看出, 随着液相表观速度的增加, 油-空气和水-空气两相流压降均增大。这是因为, 速度增加, 两相流动中紊流程度增大, 能耗增大, 压降随之增大。在两种气相表观速度下, 液相表观速度相等时油-空气流动的压降均大于水-空气流动。这是

因为油的黏度大于水的黏度, 随着液相表观速度的增加, 黏度大的液体流动压降增加有越来越快的趋势, 并且, 在相同的混合流速下, 油 - 空气流动的压降是水 - 空气的 1.5~2 倍。

图 3 是固定液相表观速度, 增加气相表观速度时油 - 空气和水 - 空气两相流动压降变化曲线。与图 2 相似, 随着气相表观速度增加, 两相流动压降相应增大, 并且在两种液相表观速度条件下, 油 - 空气两相流动的压降大于水 - 空气两相流动。油 - 空气和水 - 空气两相流动压降在液相表观速度低时有相似的变化趋势, 这是因为液相表观速度的变化对压降的影响更显著。

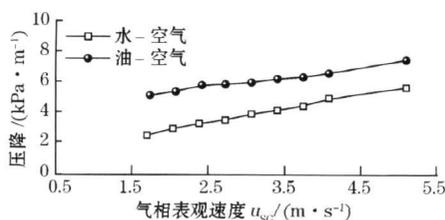
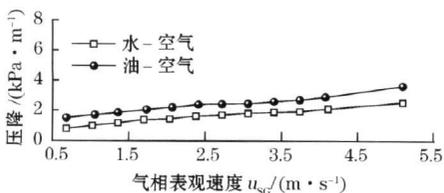
(a)  $u_{SL} = 1.132 \text{ m/s}$ (b)  $u_{SL} = 0.566 \text{ m/s}$ 

图 3 不同物性下气相表观速度对压降的影响

对比图 2 和图 3 可以看出, 在实验工况下, 液相黏度越大, 两相流动压降越大。气相表观速度或液相表观速度的增加都会造成压降增大, 但增加液相表观速度时压降增大幅度更大。

## 2.2 管径对压降的影响

图 4 是不同管径中气相表观速度固定, 增大液相表观速度时油 - 空气两相表观流动压降变化曲线。

从图 4 中可以看出, 两种管径下, 液相表观速度的增加都会导致压降增大。在相同的混合速度下, 小管径中两相流动的压降大于大管径中两相流动的压降, 并且混和速度越大, 两者差别越大。同时, 从图 4 中也可以看出, 两种气相表观速度条件下管径对两相流动压降的影响趋势基本相同。

图 5 是不同管径中液相表观速度固定, 增大气相表观速度时油 - 空气两相流动压降变化曲线。随着气相表观速度的增加, 两相流动的压降也相应增大。从图 5 中明显可以看出, 管径不同, 相同的混合流速下两相流动压降相差很大, 并且液相表观速度越大, 管

径对两相流动压降的影响越大。

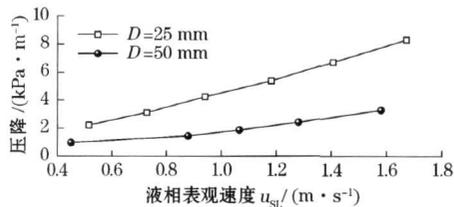
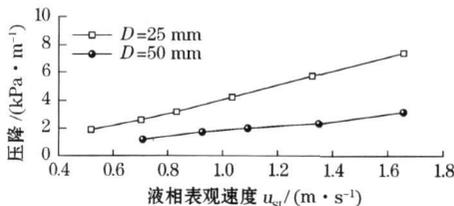
(a)  $u_{gC} = 2.039 \text{ m/s}$ (b)  $u_{gC} = 1.358 \text{ m/s}$ 

图 4 不同管径中液相表观速度对压降的影响

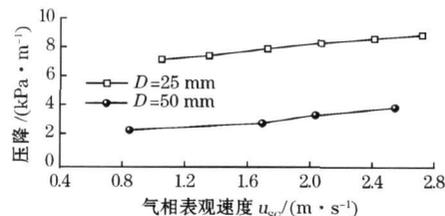
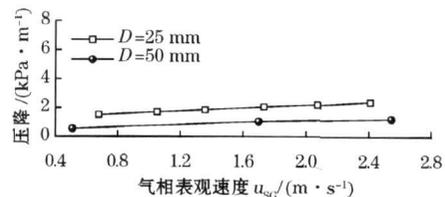
(a)  $u_{SL} = 1.657 \text{ m/s}$ (b)  $u_{SL} = 0.521 \text{ m/s}$ 

图 5 不同管径中气相表观速度对压降的影响

对比图 4 和 5 可以看出, 管径对两相流动压降影响很大, 并且这种影响随液相表观速度的增加而增大。

从分析可知, 管径对两相流动压降有很大的影响, 这种影响与液相表观速度和液相黏性有关。液相表观速度越大, 管径影响越大; 液相黏度越小, 管径影响越大。

## 3 压降计算

管内气液两相流动的总压降由 3 部分组成:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_{TP} = \left(\frac{dp}{dx}\right)_F + \left(\frac{dp}{dx}\right)_g + \left(\frac{dp}{dx}\right)_a \quad (4)$$

式中:  $\left(\frac{dp}{dx}\right)_{TP}$  为两相流动总压降;  $\left(\frac{dp}{dx}\right)_F$  为两相流动摩擦压降;  $\left(\frac{dp}{dx}\right)_g$  为两相流动重位压降;  $\left(\frac{dp}{dx}\right)_a$  为两相流

动加速压降。

对于等直径绝热水平管道中的两相流动, 重位压降和加速压降可以忽略, 于是两相流总压降等于摩擦压降, 即:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_{TP} = \left(\frac{dp}{dx}\right)_F \quad (5)$$

摩擦压降的求解多采用均相流模型法或分相流模型法。均相流模型法是把两相混合物看成均匀介质, 其流动参数取两相相应参数的某种平均值。两相流的摩擦压降与单相流摩擦压降有相似的形式。分相流模型通过引入分液相或分气相摩擦因子后, 将两相流动的摩擦压降转换为单向流动的摩擦压降与相应的摩擦因子乘积。

### 3 1 Lockhart Martinelli模型

为了更好地分析实验数据, 首先应用 Lockhart Martinelli模型对于气液两相流动的摩擦压降进行分析。Lockhart Martinelli模型的函数可以表示成  $\Phi_{TP}^2 = F(X)$  的形式, 其中  $\Phi_{TP}^2$  和  $X$  分别被定义为

$$\Phi_{TP}^2 = \frac{\Delta p_{TP} L}{\Delta p_L L}, X = \left(\frac{\Delta p_L L}{\Delta p_G L}\right)^{0.5} \quad (6)$$

Chisham (1967)<sup>[3]</sup> 重新研究了原 Lockhart Martinelli关系图, 给出了下面的关系式:

$$\Phi_{TP}^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (7)$$

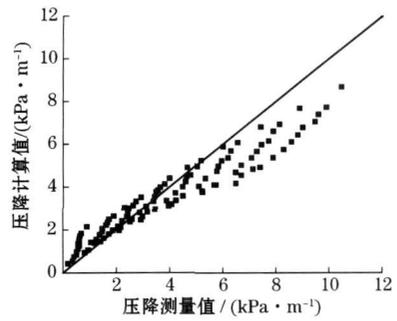
式中, 关联参数  $C$  的取值由流态决定。

Chisham 给出了 4 种组合的  $C$  值: 气液两相为层流 - 层流,  $C = 5$ ; 气液两相为层流 - 湍流,  $C = 10$ ; 气液两相为湍流 - 层流,  $C = 12$ ; 气液两相为湍流 - 湍流,  $C = 20$ 。

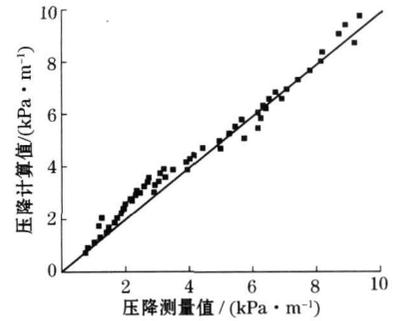
图 6 是应用 Lockhart-Martinelli模型预测的压降计算值与测量值比较结果。从图 6 中可以看出, 在两种管径下, 液相为水时模型计算结果与测量结果吻合较好, 而油 - 空气两相流动中压力模型计算结果与测量结果偏差较大。因为 Lockhart-Martinelli模型方法是以水 - 空气为介质的实验数据得到的, 所以该方法更适合于低黏液体, 如果液相黏度增加, 计算结果与测量结果偏差较大。

### 3 2 分相流模型

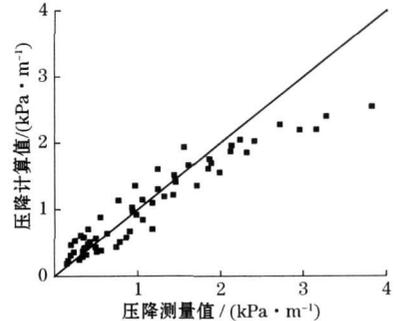
从计算中可以看出, Lockhart-Martinelli模型无法对油 - 气体两相流动的压降进行精确的预测, 因此采用分相流模型进行进一步预测。假设液膜内不含分散的气泡, 气液两相均为不可压流体, 通过一个弹状流单元的气相、液相质量平衡方程为<sup>[4]</sup>



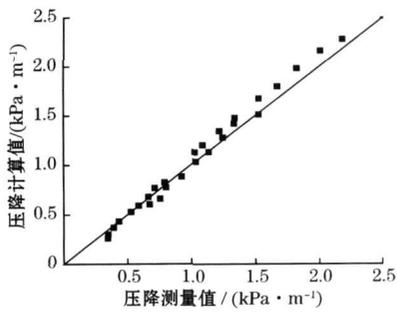
(a) 油为液相,  $D = 25 \text{ mm}$



(b) 水为液相,  $D = 25 \text{ mm}$



(c) 油为液相,  $D = 50 \text{ mm}$



(d) 水为液相,  $D = 50 \text{ mm}$

图 6 模型预测结果与实验结果比较

$$u_{sl} = \frac{1}{L_U} \left[ (1 - \epsilon_s) L_s U_T + \int_0^{L_U} u_L (1 - \epsilon_L) dx \right] \quad (8)$$

$$u_{sg} = \frac{1}{L_U} \left[ \epsilon_s L_s U_T + \int_0^{L_U} u_G \epsilon_L dx \right] \quad (9)$$

式中:  $u_G$  为长气泡运动速度,  $m/s$ ;  $L_U$  为弹状流单元长度,  $m$ ;  $\epsilon_s$  为液塞含气率;  $L_s$  为液塞长度,  $m$ ;  $U_T$  为液塞速度,  $m/s$ ;  $u_L$  为液膜中的液体速度;  $\epsilon_L$  为液膜含气

率;  $u_G$  为长气泡运动速度,  $m/s$ ;  $L_L$  为液膜长度。

液塞的速度  $U_T$  可表示为<sup>[5]</sup>:

$$U_T = 0.432 + 1.607U_m - 0.039U_m^2 \quad (10)$$

式中  $U_m$  为表观气相和液相流速之和,  $m/s$

考虑气液交换速度  $u_s$  得质量平衡方程为

$$\varepsilon_L(u_s - u_G) = \varepsilon_S(u_S - u_T), \quad u_S = C_0 U_T + u_d \quad (11)$$

式中:  $C_0$  为位于长气泡头部的速度剖面的影响参数, 当两相混合流动为湍流时,  $C_0 = 1.2$  层流时,  $C_0 = 2.0$   $u_d$  为长气泡漂移速度,  $m/s$   $u_T$  为弹状流单元运行速度,  $m/s$

对于水平流动, Bendiksen(1984)<sup>[6]</sup> 给出了如下求解公式:

$$u_d = 0.35 \sqrt{gD} \sin\alpha \quad (12)$$

式中:  $\alpha$  为管线倾角, 对于水平管线,  $\alpha = 0$   $D$  为管道直径;  $g$  为重力加速度。

弹状流单元内的平均空泡份额  $\varepsilon$  为

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_S L_S + \int_0^{L_U} \varepsilon_L dx}{L_U} \quad (13)$$

将方程(13)代入方程(9)得:

$$\varepsilon = \frac{1}{u_S} (u_{SC} - \varepsilon_S U_T) + \varepsilon_S \quad (14)$$

虽然近年来针对液塞持液率或空泡份额的研究较多<sup>[7]</sup>, 但式(14)中,  $\varepsilon_S$  仍按照式(15)近似求解(Gregory, 1978)<sup>[8]</sup>:

$$\varepsilon_S = 1 - \frac{1}{1 + (U_m / 8.66)^{1.39}} \quad (15)$$

假设液膜高度一致, 那么对于一个弹状流单元, 列动量方程能够得出其平均压降的计算公式:

$$\left( \frac{\Phi}{dx} \right)_{TP} = \rho_L g \sin\alpha + 2 \rho_S U_T^2 \frac{f_S L_S}{DL_U} + \frac{4}{\pi D^2} \cdot \left[ \frac{L_L}{L_U} \left( \frac{f_G \rho_G u_G^2}{2} S_G + \frac{f_L \rho_L u_L^2}{2} S_L \right) \right] \quad (16)$$

式中:  $\rho$  为弹状流单元的平均密度,  $kg/m^3$ ;  $\rho_S$  为液塞的平均密度,  $kg/m^3$ ;  $f_S$  为液塞的摩擦因子;  $f_G$  为气相摩擦因子;  $\rho_G$  为气相密度;  $S_G$  为气相与管壁接触面积;  $f_L$  为液相摩擦因子;  $\rho_L$  为液相密度;  $S_L$  为液膜与管壁接触面积。

可以按照下列雷诺数分别求解:

$$Re_S = \frac{\rho_S U_T D}{\mu_L} \quad (17)$$

式中  $\mu_L$  为液相黏度。

如果将液膜和长气泡的流动作为分层流来考虑, 可以应用分层流的求解方法迭代求得  $\varepsilon_L$  和  $u_G$ , 能够得到气液两相的压降。模型预测值与实验值比较结

果如图7所示。图7中, 油为液相,  $D = 50$  mm。

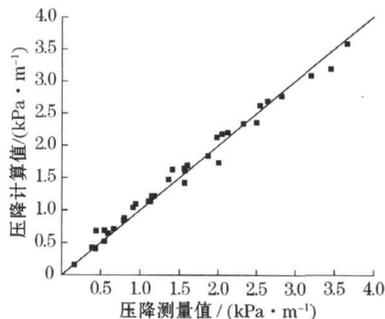


图7模型预测结果与实验结果比较

对比图6和图7可以看出, 相对于 Lockhart-Martinelli模型来说, 分相流模型可以准确预测油-气间歇流动压降。

#### 4 结束语

对间歇流动中压降进行了详细的实验及理论研究, 得出如下主要结论:

对于气液间歇流动, 两相表观速度的提高均会使压降增大, 但液相表观速度的作用高于气相表观速度; 相同表观流速下, 管道直径的缩小将提高两相流动压降。

Lockhart-Martinelli模型可以精确地预测水-气流动压降, 但对于高液相黏度的油气流动, 改造后的分相流模型比 Lockhart-Martinelli模型预测的结果更为合理。

参考文献:

- [1] LOCKHART R W, MARTINELLI R C. Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-phase Two-component Flow in Pipes Chem Eng Prog, 1949(45): 39-48
  - [2] 章梓雄, 董曾南. 粘性流体力学. 北京: 清华大学出版社, 1998 351-390
  - [3] CHISHOM D. A Theoretical Basis for the Lockhart-Martinelli Correlation for Two-phase Flow. Int J Heat Mass Transfer 1967(10): 1767-1778
  - [4] 郭烈锦. 两相与多相流动力学. 西安: 西安交通大学出版社, 2002 125-131
  - [5] 李志彪. 水平圆管内气液两相流间歇流动研究: [学位论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2008
  - [6] BENDIKSEN K H. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes Int J Multiphase Flow, 1984(10): 467-483
  - [7] 陈振瑜, 王海琴, 李志彪, 等. 水平管段塞流液塞持液率试验研究与预测模型对比. 管道技术与设备, 2008(1): 5-7
  - [8] GREGORY G A, NICHOLSON M K, AZIZ K. Correlation of the liquid volume fraction in the slug for horizontal gas-liquid slug flow. Int J Multiphase Flow, 1978(4): 33-39
- 作者简介: 李志彪(1979-), 工程师, 从事油气田地面工程方面的研究工作。