

水平管内积液特性的实验及理论预测模型

马有福¹, 曾珊珊¹, 吕俊复², 吴雨昕¹, 张玉燕¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;

2. 清华大学 机械工程学院, 北京 100084)

摘要: 为保证水平井的高产优势, 需准确预测水平井的积液排出条件及积液覆盖井壁范围。以空气和水为两相介质, 利用矩形横截面管, 对水平管积液特性进行了可视化两相流实验, 获得了水平管内气相流动参数与管内积液间的关系, 以及积液工况下气液两相界面剪切因子的大小。实验结果表明: 水平管内积液稳定存在对应于一较大的管内气速范围, 在该气速范围内, 积液在管内的滞留长度或积液覆盖范围随气速的增大而减小; 积液工况下水平管内界面剪切因子随管内气相雷诺数的增大略有升高, 但变化不明显。同时, 也对水平管积液特性的理论预测模型进行研究。基于积液液面倾斜机理分析和两相流动受力分析, 建立了水平管积液特性理论预测模型的基础方程; 进而通过包络原理使模型封闭, 结合由实验结果获得的界面剪切因子及壁面剪切因子关联式, 提出了能够用于工程应用的水平管积液特性理论预测模型。该模型的预测结果与实验结果相符良好, 即可用于预测水平井积液排出的条件, 也可用于判断井内积液覆盖井壁的范围。

关键词: 气液两相流; 气井; 积液; 理论模型; 界面剪切因子

中图分类号: TE 375

文献标志码: A

Experiment and theoretical analysis model on liquid loading characteristics of horizontal pipes

MA Youfu¹, ZENG Shanshan¹, LÜ Junfu², WU Yuxin¹, ZHANG Yuyan¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to ensure high-yield of horizontal gas wells, it is significant to accurately predict the emptying condition of the liquid loading, as well as the liquid covered range of the gas well holes. A visualization experiment on the liquid loading characteristic in horizontal pipes was performed using air and water as the gas and liquid phases to test a rectangular cross-section pipe, respectively. From the experiment, the relationship between the gas flow parameters and the liquid loading in horizontal pipes and the shear factor of the gas-liquid interface under the liquid loading condition was obtained. The experimental results show that for a horizontal pipe the existence of liquid loading corresponds to a wide range of the gas velocity in the pipe. Within the gas velocity

收稿日期: 2022-03-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0600203)。

第一作者: 马有福(1978-), 男, 副教授。研究方向: 热力系统优化与气液两相流。E-mail: imayoufu@163.com

range, the length of the liquid loading, or the liquid coverage area in the pipe, decreases with the increase of the gas velocity. Under the liquid loading condition, the interfacial shear factor increases with the increase of the gas phase Reynolds number, while the increase is not significant. Meanwhile, the theoretical prediction model of the liquid loading characteristic in horizontal pipes was also studied. Based on the mechanism analysis of forming an inclined liquid surface and the force analysis of the gas and liquid flows, a basic equation was established to depict the liquid loading characteristic of horizontal pipes. Then, the model was closed by the envelope principle. Thus, combined with the experimental correlations of the interface shear factor and the wall shear factor obtained from the experiment, a closed theoretical prediction model was proposed for predicting the liquid loading characteristic of horizontal pipes in engineering applications. Predicting results of the model show a good agreement with the experimental results. Therefore, this model can be used to predict the emptying condition of the liquid loading in horizontal pipes, as well as the liquid covered range of the horizontal gas well holes.

Keywords: *gas-liquid flow; gas well; liquid loading; theoretical model; interfacial shear factor*

在天然气开采中为提高气井产量,希望伸入气田目的层的井段与产气层有最大的渗流面积。水平气井在增大气井渗流面积从而大幅提高气井产量方面具有明显优势^[1]。积液现象是影响气井稳定生产的主要问题之一。气井中的液体主要来自地层中的间隙水以及烃类气体在上升过程中降温形成的凝析液。若井中气相不能提供足够的能量使液体连续流出井口,井中就会出现积液。积液使气相渗透率减小,从而降低气井产量,严重时可能导致气井停产^[2]。因此对水平井内积液特性进行研究具有重要意义。

管内积液现象类似于管内气液两相逆向流动中使管内倒流液量恰好为零的工况,该工况下的管内表观气速常被称为临界携液气速。为预测临界携液气速,目前存在两类模型——液滴模型^[3-4]和液膜模型^[5-8]。在临界携液工况下,液滴模型认为液相主要以液滴形式被气流带出气井,液膜模型认为液相主要以液膜形式沿着管壁流出气井。针对垂直气井,Turner等^[3]分别基于液滴模型和液膜模型提出了临界携液气速预报模型,并基于气井生产数据提出了相应的关联式。近期Zhang等^[4]进一步区分了垂直井内出现积液时的3种流型,针对每种流型提出了相应的最大液滴尺寸预测关联式。潘杰等^[9]在液膜模型基础上进一步考虑了液滴夹带对垂直井内实际气速及相界面剪切力的影响,并通过气井生产数据分析了模型的预测准确性。在倾斜气井中,气、液两相倾向于分层流动,因而多是采用基于液膜模型的关联

式预测临界携液气速^[10]。Chen等^[7]在Turner液膜模型的基础上考虑了气井倾斜对液膜重力的影响,从而得出倾斜井积液预测模型并通过相关实验数据分析了模型的预测性能,但该模型仍是以管内环状流为基础进行分析。

迄今对水平井内积液的研究鲜有报道。在常见的气井管径范围(≤ 100 mm),积液工况下水平管内气液两相流动呈典型的分层流流型,因此以往基于环状流或搅拌流的分析模型均不适用于水平管内的积液预报。此外,水平管与垂直管的积液特性有明显差别。在垂直管内,积液发生工况(管内液体恰好不倒流)与积液排出工况(管内液体恰好连续排出)之间的流速差别较小,因而以往文献中未对二者进行严格区分。而在水平管内,积液发生与积液排出对应的气速差别非常明显^[10]。为深入认识水平管积液机理并建立相应的预测模型,笔者对水平管积液特性进行了气液两相流动实验,并通过一维两相流动分析建立了水平管积液预测模型。

1 实验方法与数据处理方法

1.1 实验方法

1.1.1 实验系统

实验以常温的空气和水作为两相流体,采用管长2 m、矩形管截面尺寸高 $\times$ 宽106 $\times$ 60 mm的有机玻璃水平管进行积液特性实验,实验系统见图1。环境空气经高压风机升压后,依次经过空气

稳压箱(降低气流脉动)、整流格栅(降低气体湍流度)、低位水箱(防止水倒灌入风机)和水平管测试段后进入高位水箱,再由高位水箱顶部排入大气。给水箱内的水由水泵送入高位水箱。在高位水箱的排气口侧面设置了玻璃观察窗,排气口对面正对测试管的管轴设置了溢流管。实验

过程中保持水泵运行使水从溢流管连续流出,从而维持高位水箱内水位稳定。如水平管内风速不足以维持管内积液状态,高位水箱内的水会经水平管流入低位水箱。实验中低位水箱底部保留一定水位,从而防止气体从水箱底部排水阀泄露。

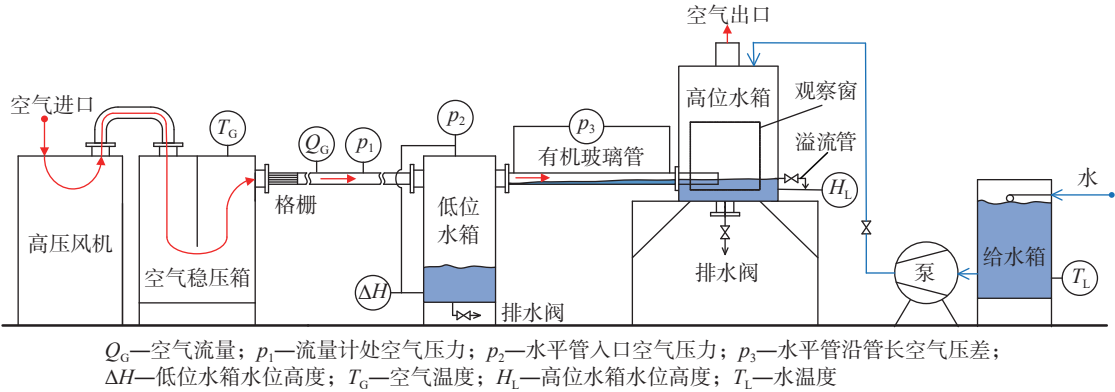


图1 水平管积液特性实验系统

Fig.1 Experimental system used for the liquid loading of horizontal pipes

1.1.2 测量参数

本实验通过测量仪表确定空气在水平测试管内的流量和沿程流动压降,同时监测高、低位水箱的水位高度,采用的仪表见表1。水平管内的滞留水长度和滞留水液面倾角由图像法确定。在一个稳定工况下,各仪表输出的模拟信号由模块采集并输入计算机,同时通过相机拍摄管内两相流动图像。

表1 实验用仪表

Tab.1 Instruments used for the experiment

测点名称	仪表名称	仪表量程	仪表精度
$Q_G / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	涡街流量计	35~350	1.5级
p_1 / kPa	压力变送器	0~100	0.2级
p_2 / kPa	绝压变送器	1.30~130	0.2级
p_3 / kPa	微差压计	0~1.90	0.2级
$\Delta H / \text{kPa}$	差压变送器	0.50~10	0.2级
H_L / kPa	液位变送器	0~100	0.5级
$T_G, T_L / ^\circ\text{C}$	铂电阻温度计	0~100	0.2级

在靠近气体流量计和水平管入口的位置设置压力测点,并测量气体温度,从而由气体流量计测得结果换算出水平管内气体容积流量。在水平管上方设置2个取压孔,由微差压计获得沿管长的气相压降。入口侧取压孔距离水平管进口100 mm,出口侧取压孔距离水平管出口200 mm,取压孔间

距1.70 m。

1.1.3 实验过程

首先进行积液特性实验。a. 开启高压风机,调节风机风量至较大值。b. 开启水泵,向高位水箱注水至高位水箱溢流管有水流出;调节风机风量,使水平管内无积液。c. 通过变频调节逐渐减小风机风量,至水平管内有水滞留;在一个稳定的管内滞留液长度 L_W (排气口至管内滞留水末端的水平距离)下采集实验数据; L_W 随风机风量减小而增大,在 L_W 为0~2.0 m范围内采集6个稳定工况;同时通过拍摄每个实验工况下水平管内的积液照片,获得管内滞留液长与液面倾角。

之后对该矩形截面水平空管进行气相压降实验,以获得该水平管的壁面剪切因子。该实验中气相流量范围参照积液特性实验的气相流量范围确定,在该流量范围内测量了6个工况。

1.2 实验数据处理方法

1.2.1 气相 Wallis 数

在管内气液两相逆流极限(counter current flow limitation, CCFL)研究中,常通过无量纲气相 Wallis 数^[1]表征管内气速大小。管内积液与 CCFL 流动中的零液渗透点(Zero Liquid Penetration)相似,故本文由气相 Wallis 数表征管内气速,其表达式为

$$J_G^* = \frac{J_G \rho_G^{1/2}}{[gh_0(\rho_L - \rho_G)]^{1/2}} \quad (1)$$

式中: J_G^* 为气相 Wallis 数; J 为管内流体表观速度; g 为重力加速度; h_0 为特征尺寸(对水平矩形管, 宜取其为流道高度 $h_0^{[12 \sim 15]}$); ρ 为流体密度; 下角标 L 和 G 分别表示液相和气相。

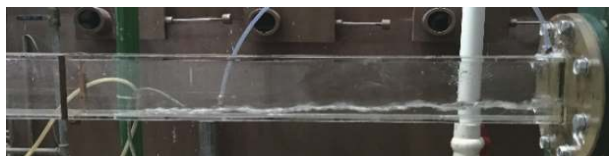
管内气相表观流速 J_G 为

$$J_G = Q_G / A_0 \quad (2)$$

式中: Q_G 为管内气相容积流量; A_0 为水平管的流通横截面积。

1.2.2 滞留液长

在水平管内, 积液现象在一个较大的 J_G 范围内始终存在^[16], 在该范围内, 管内积液的滞留长度 L_W 随 J_G 的增大而减小, 如图 2。因而本文通过 $J_G^*-L_W$ 关系表征水平管积液特性。 L_W 的确定方法为: 将积液照片导入 AutoCAD 软件中, 以已知水平管长度 2 m 为标尺, 按比例求出 L_W 。对于水平井, L_W 的大小可表征积液的范围大小或严重程度, 因而由 $J_G^*-L_W$ 表征水平管积液具有明确的物理意义。



(a) $J_G = 10.02$ m/s, $L_W = 1.00$ m



(b) $J_G = 8.79$ m/s, $L_W = 1.50$ m



(c) $J_G = 8.10$ m/s, $L_W = 2.00$ m

图 2 水平管内积液实况图

Fig.2 Flow scenes of liquid loading in the horizontal pipe

1.2.3 液面倾角

为通过实验获得气液两相界面剪切因子, 需确定积液工况下的管内空泡份额。在水平管内, 积液的液层厚度沿气相流动方向逐渐增厚, 即: 管内滞留水的液面呈一定倾斜角度, 在积液段, 管内空泡份额沿气相流动方向逐渐减小。为求得积液段平均液膜厚度(即平均空泡份额), 本文由

图像法确定 L_W 的同时, 也用相同方法获得液面倾角 θ , 如图 3。

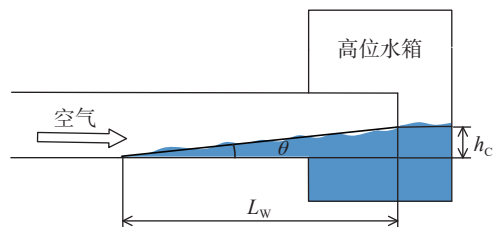


图 3 水平管内积液的滞留液长与液面倾角

Fig.3 Liquid length and inclination angle of the liquid loading in horizontal pipes

进而求出水平管出口处液面高度 h_C 。相应地, 积液段的管内平均空泡份额由 $h_C/2$ 确定。

$$\tan \theta = h_C / L_W \quad (3)$$

式中: θ 为水平管内积液液面与水平方向所成角度; h_C 为水平管出口处液层高度。

1.2.4 气壁剪切因子

由该水平管的气相单相压降特性实验, 确定气相—壁面(简称气壁)剪切因子 f_{WG} , 从而获得 f_{WG} 与气相雷诺数 Re_G 的关系

$$f_{WG} = \frac{2\Delta p_G A_0}{\rho_G U_G^2 S_0 L_H} \quad (4)$$

式中: Δp_G 为水平管上两取压孔间的气相压差; U_G 为管内实际平均气速; S_0 为水平管单相流动湿周; L_H 为水平管上两取压孔间的距离。

1.2.5 界面剪切因子

将水平管内积液段视为平均高度为 $0.5h_C$ 的滞留液膜(如图 4 所示), 则积液工况下水平管上两取压孔间气相压降为

$$\Delta p_{GL} = \tau_{WG} \frac{S_0}{A_0} (L_H - L'_W) + \tau_{WG} \frac{S_G}{A_G} L'_W + \tau_i \frac{S_i}{A_G} L'_W \quad (5)$$

$$\tau_{WG} = f_{WG} \frac{\rho_G U_G^2}{2} \quad (6)$$

$$\tau_i = f_i \frac{\rho_G U_G^2}{2} \quad (7)$$

式中: Δp_{GL} 为积液时水平管上两取压孔间的气相压降; τ_{WG} 、 τ_i 分别为气壁、气液界面剪切应力; S_G 、 S_i 分别为气相与管壁、液相的润湿周界; A_G 为气相在水平管内的实际流通面积; L'_W 为压降测量段内的滞留液长, $L'_W = L_W - 0.20$ 。

其中, A_G 为

$$A_G = \alpha A_0 \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{2h_0 - h_C}{2h_0} \quad (9)$$

式中： α 为水平管积液段平均空泡份额； h_0 为水平管流道高度。

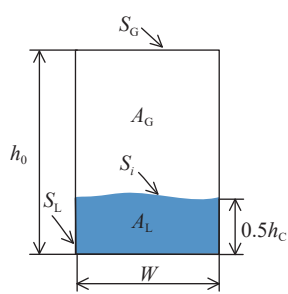


图 4 水平管横截面内积液两相分布示意图
Fig.4 Schematic of the gas and liquid distribution in the cross-section of horizontal pipes under liquid loading

因而在不同 Re_G 下，根据已知的 f_{WG} 预测方法、实验获得的 L_W 和 θ ，可求出界面剪切因子 f_i 。

$$f_i = \frac{2\Delta p_{GL} - f_{WG}\rho_G U_G^2 \left[\frac{S_G}{A_G} L'_W + \frac{S_0}{A_0} (L_H - L'_W) \right]}{\rho_G U_G^2 \frac{S_i}{A_G} L'_W} \quad (10)$$

1.2.6 实验结果不确定度

根据误差分析，本文由实验获得的 J_G^* ， L_W 和 θ 的不确定度见表 2。

表 2 实验结果的不确定度
Tab.2 Uncertainties of the experiment result

$Q_G/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	不确定度 / %		
	$U(J_G^*)$	$U(L_W)$	$U(\theta)$
185.46~349.07	1.77~2.88	0.2	0.2

2 实验结果及分析

2.1 管内滞留液长实验结果

水平管内滞留液长 L_W 与管内气相 Wallis 数 J_G^* 间的关系如图 5。由图 5 可见，水平管内积液的存在对应于一个较大 J_G^* 范围(0.33~0.55)，与垂直管或倾斜管的积液特性明显不同。对气井而言，这意味着 $J_G^*>0.55$ 时积液被气相排出水平段， J_G^* 在 0.33~0.55 时积液在水平段稳定滞留， $J_G^*<0.33$ 时积液可倒流进更深的井段。

由图 5 可知，在 $J_G^* = 0.33 \sim 0.55$ 范围， L_W 随 J_G^* 的增大而减小。但二者之间并非线性关系，随着 J_G^* 的增大， L_W 的减小呈现出先快后慢的特点。对于水平井， L_W 的大小可反映积液的范围大小或严重程度，故构建 J_G^* 与 L_W 的关系模型(即在实际

应用中由 J_G^* 预测 L_W)具有重要意义。为进一步认识水平管积液机理，基于下文所述壁面、界面剪切因子实验结果，本文提出了水平管积液特性($J_G^*-L_W$)的理论预测模型。

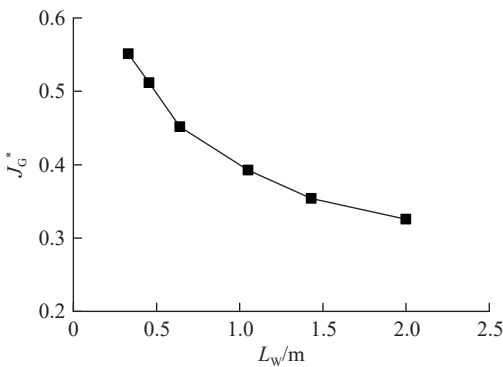


图 5 水平管内滞留液长实验结果
Fig.5 Experimental results of the liquid length in horizontal pipes under liquid loading conditions

2.2 气壁剪切因子实验结果

气壁剪切因子 f_{WG} 实验结果如图 6。由图 6 可知， f_{WG} 随管内气相雷诺数 Re_G 的增大而降低，处于层流至湍流的过渡区。图 6 中也示出了 Blasius 公式的预测结果，可见本文实验测得的 f_{WG} 较之 Blasius 公式计算结果平均偏低约 9%，在 Blasius 公式的预测精确度(15%)之内。

对图 6 所示结果进行拟合，可得 f_{WG} 关联式

$$f_{WG} = \frac{0.0616}{Re_G^{0.236}} \quad (11)$$

式中， Re_G 的定义为

$$Re_G = \frac{D_h U_G}{\nu_G} \quad (12)$$

式中： D_h 为水平管内气相流道的水力直径，气体单相流动时 $D_h = 4A_0/S_0$ ，气液双相流动时 $D_h = 4A_G/(S_i+S_G)$ ； ν_G 为气相运动粘度。

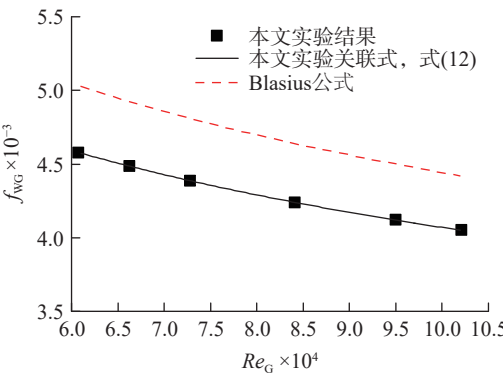


图 6 气壁剪切因子实验结果
Fig.6 Experimental results of the shear factor between the gas phase and pipe wall

2.3 界面剪切因子实验结果

气液两相界面剪切因子 f_i 实验结果如图 7。由图 7 可知, 本文实验获得的 f_i 随 Re_G 增大而略有升高; 但变化不明显, 随 Re_G 由 60 988 增大至 101 247, f_i 由 0.063 升高至 0.108。这因于随管内气速增大, 气液两相界面的波动更加剧烈, 使 f_i 随 Re_G 的增大而升高。

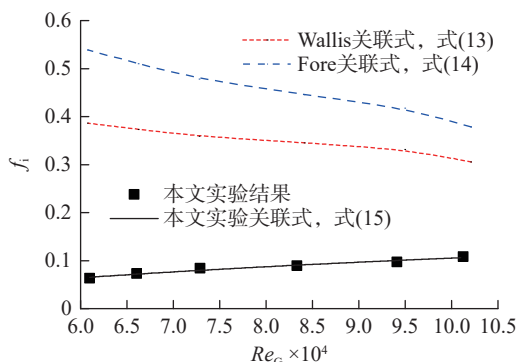


图 7 气液两相界面剪切因子实验结果

Fig.7 Experimental results of the interfacial shear factor between the gas and liquid phases

图 7 中也示出了 Wallis 等^[17] 和 Fore 等^[18] 基于垂直管内气液逆流 CCFL 实验得出的 f_i 关联式

$$f_i = 0.005(1 + 300\delta^*) \quad (13)$$

$$f_i = 0.005 \left\{ 1 + 300 \left[\left(1 + \frac{17500}{Re_G} \right) \delta^* - 0.015 \right] \right\} \quad (14)$$

式中: δ^* 为无量纲液膜厚度, 对于圆管 $\delta^* = \delta/D$, 对于矩形截面管 $\delta^* = \delta/h_0$; δ 为管内平均液膜厚度。

由图 7 可见, 本文由水平管实验获得的 f_i 明显低于这 2 个关联式的预测结果, 这与水平管与垂直管在积液气速、界面面积、液膜厚度、界面流动行为等方面的不同均有关系。因此, 基于本文 f_i 实验结果, 提出关联式如下:

$$f_i = 0.0153(Re_{GS}/10000)^{0.964} \quad (15)$$

为便于应用, 式中雷诺数 Re_{SG} 的计算采用了表观气速 J_G 和单相流动水力直径 D_{h0} , 其定义为

$$Re_{GS} = \frac{D_{h0}J_G}{\nu_G} \quad (16)$$

式中, 水平管单相流动水力直径 $D_{h0} = 4A_0/S_0$ 。

3 理论分析模型的建立与验证

3.1 水平管内积液的液面倾斜机理

除积液工况对应的管内气速范围较大这个特点外, 水平管积液的另一重要特征是积液液面呈

倾斜状, 如图 8。与管内 CCFL 流动相似, 积液工况下, 气相为压差驱动流动, 液相为重力驱动流动, 气液两相通过相界面的切向粘性作用和法向压力平衡互相制约, 形成特有的一一对应关系。由于气相压力沿流动方向降低, 因而积液液面呈倾斜状。随着 J_G 的增大, 气相对液相的曳力增大, 同时单位管长的气相压降增大, 因而表现为随 J_G 增大, L_W 减小, 液面倾角 θ 增大。

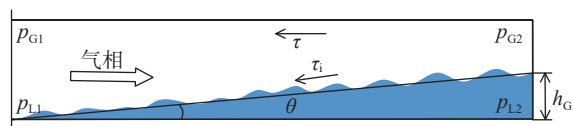


图 8 水平管积液时两相流动的受力分析

Fig.8 Force analysis of the gas and liquid phases for the liquid loading in horizontal pipes

3.2 水平管积液特性的预测模型

3.2.1 模型的基础方程

为建立水平管内液相滞留长度与气相表观速度之间的理论关系, 对积液段两相流动进行受力分析, 如图 8 所示。将积液段内两相流动视为具有一定液膜厚度的气液分层流动, 忽略液相与管壁间的粘性损失, 对气、液两相分别建立动量方程, 得

$$p_{G1} - p_{G2} = \tau_{WG} \frac{S_G}{A_G} L_W + \tau_i \frac{S_i}{A_G} L_W \quad (17)$$

$$p_{L2} - p_{L1} = \tau_i \frac{S_i}{A_L} L_W \quad (18)$$

式中: p_G 为管内气相压力; p_L 为管内液相压力; A_L 为管内液相流通面积, $A_L = A_0 - A_G$; 下角标 1 和 2 分别表示积液段的进气端和排气端。

由图 8 可知, 在积液段两端存在如下关系:

$$p_{L1} = p_{G1} \quad (19)$$

$$p_{L2} = p_{G2} + \rho_L g h_C \quad (20)$$

将式(19)、式(20)代入式(18), 并进一步和式(17)联立消去压力项, 可得

$$\tau_{WG} \frac{S_G}{A_G} L_W + \tau_i \frac{S_i}{A_G} L_W + \tau_i \frac{S_i}{A_L} L_W = \rho_L g h_C \quad (21)$$

假定液膜厚度在积液段内沿管长线性增大, 则积液段内平均液层高度为 $0.5h_C$ 。因而, A_G 、 A_L 、 S_i 、 S_G 均可由 h_0 、管内流道宽度 W 及 h_C 表征, 如

$$\begin{cases} A_G = (h_0 - 0.5h_C)W \\ A_L = 0.5h_C W \\ S_i = W \\ S_G = 2(h_0 - 0.5h_C) + W \end{cases} \quad (22)$$

将式(6)、(7)、(22)代入式(21), 可得

$$f_{WG} \frac{2h_0 - h_C + W}{(2h_0 - h_C)W} + f_i \frac{2h_0}{(2h_0 - h_C)h_C} = \frac{\rho_L g h_C}{\rho_G L_W U_G^2} \quad (23)$$

将 $U_G = J_G/\alpha$ 代入式(23), 得

$$f_{WG} \frac{2h_0 - h_C + W}{(2h_0 - h_C)W} + f_i \frac{2h_0}{(2h_0 - h_C)h_C} = \frac{\alpha^2 \rho_L g h_C}{\rho_G L_W J_G^2} \quad (24)$$

再将式(9)代入式(24)消去 α , 得

$$f_{WG} \frac{4h_0 - 2h_C + 2W}{W(2h_0 - h_C)} + f_i \frac{4h_0}{h_C(2h_0 - h_C)} = \frac{\rho_L g h_C (2h_0 - h_C)^2}{2\rho_G L_W h_0^2 J_G^2} \quad (25)$$

式(25)反映了 L_W 与 J_G 的内在关系, 是水平管积液特性理论分析模型的基础方程。

3.2.2 模型的封闭

式(25)中, h_0 和 W 为已知结构参数, f_{WG} 和 f_i 可通过实验关联式求得, 因此对应于每一 L_W , 未知数有 2 个, 分别为 J_G 和 h_C 。鉴于 J_G 与 h_C 存在一一对应的唯一性关系, 基于包络原理, 由式(25)对 h_C 求偏导, 可得

$$f_{WG} \frac{4h_0 - 2h_C + 3W}{W} + f_i \frac{4h_0(2h_C - h_0)}{h_C^2} = \frac{\rho_L g (2h_0 - h_C)^4}{4\rho_G L_W h_0^2 J_G^2} \quad (26)$$

联立式(25)和(26), 即为封闭的水平管积液特性理论预测模型。

3.2.3 模型的无量纲化

将式(1)代入式(25)和式(26), 可相应整理出以 J_G^* 和 L_W 表征的积液特性预测模型

$$f_{WG} \frac{4h_0 - 2h_C + 2W}{W(2h_0 - h_C)} + f_i \frac{4h_0}{h_C(2h_0 - h_C)} = \frac{\rho_L h_C (2h_0 - h_C)^2}{2(\rho_L - \rho_G) L_W h_0^3 J_G^{*2}} \quad (27)$$

$$f_{WG} \frac{4h_0 - 2h_C + 3W}{W} + f_i \frac{4h_0(2h_C - h_0)}{h_C^2} = \frac{\rho_L (2h_0 - h_C)^4}{4(\rho_L - \rho_G) L_W h_0^3 J_G^{*2}} \quad (28)$$

3.3 模型实验验证

基于式(27)和式(28)所示模型, 其中 f_{WG} 和 f_i 分别由式(11)和式(15)确定, 对本文予以实验的矩形截面水平管的积液特性进行计算, 所得结果如图 9 所示。作为比较, 图 9 中同时也示出了本文实验结果。由图 9 可见, 本文基于一维两相

分层流动建立的水平管积液特性理论模型的预测结果与实验结果间的相对偏差小于 8.0%, 二者相符良好。因此本文建立的理论分析模型可用于水平管积液特性的预测。本文模型建立是以矩形截面管为例, 对于水平圆管, 仅区别于 A_G , A_L , S_i , S_G 等结构参数的几何计算方法, 读者可自行推导出水平圆管的理论预测模型。

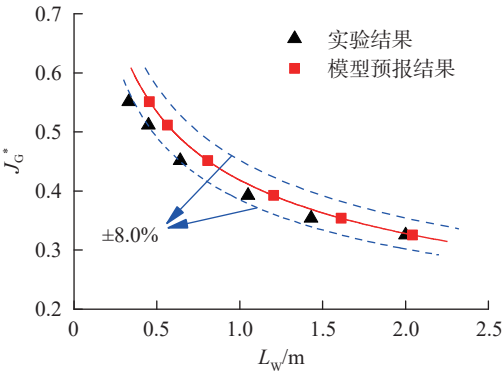


图 9 水平管积液特性的模型预报结果与实验结果比较
Fig.9 Comparison of the liquid loading characteristics in horizontal pipes between the experimental results and the corresponding predicting results by the proposed model

4 结 论

水平管内积液的特点为: 管内积液稳定存在对应于一较大的管内气速范围; 在该积液气速范围内, 积液在管内的滞留长度或积液覆盖范围随气速的增大而减小, 但二者并非线性关系。管长 2 m 的水平管的实验结果表明, 其发生积液的 J_G^* 范围为 0.33~0.55。

气液两相界面剪切因子的大小是建立水平管积液特性理论预报模型的关键参数。本文由实验获得, 在水平管积液工况下, 气液两相界面剪切因子随管内气相雷诺数增大略有升高, 但变化不明显; 随雷诺数由 60988 增大至 101247, 剪切因子由 0.063 升高至 0.108。基于本文的实验结果, 提出了预测气液两相界面剪切因子的实验关联式。

基于积液液面倾斜机理分析和两相流动受力分析, 以及将水平管积液段内两相流动简化为具有一平均液层高度的气液分层流动, 根据两相分相流一维分析, 获得水平管积液特性, 即 J_G^* 与 L_W 关系——理论分析模型的基础方程。进而基于包络原理使模型封闭, 提出了水平管积液特性理

论预测模型。

所提出理论模型的积液特性预报结果与本文实验结果间的相对偏差小于8.0%,二者相符良好,说明该模型可用于水平管积液特性的预测。

参考文献:

- [1] 刘永辉, 罗程程, 刘通, 等. 水平气井井筒气液两相流型预测[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2019, 41(3): 107–112.
- [2] 李金潮, 邓道明, 沈伟伟, 等. 气井积液机理和临界气速预测新模型[J]. 石油学报, 2020, 41(10): 1266–1277.
- [3] TURNER R G, HUBBARD M G, DUKLER A E. Analysis and prediction of minimum flow rate for the continuous removal of liquids from gas wells[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1969, 21(11): 1475–1482.
- [4] ZHANG Z N, SUN B J, WANG Z Y, et al. Whole wellbore liquid loading recognition model for gas wells[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 60: 153–163.
- [5] LIU Y H, LUO C C, ZHANG L H, et al. Experimental and modeling studies on the prediction of liquid loading onset in gas wells[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 57: 349–358.
- [6] PAGOU A L, WU C D, ZHU Z Y, et al. Liquid film model for prediction and identification of liquid loading in vertical and inclined gas wells[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 188: 106896.
- [7] CHEN D C, YAO Y, FU G, et al. A new model for predicting liquid loading in deviated gas wells[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 34: 178–184.
- [8] OKORO E E, BASSEY C I, SANNNI S E, et al. Application of non-uniform film thickness concept in predicting deviated gas wells liquid loading[J]. *MethodsX*, 2019, 6: 2443–2454.
- [9] 潘杰, 王武杰, 王亮亮, 等. 考虑液滴夹带的气井连续携液预测模型[J]. 石油学报, 2019, 40(3): 332–336.
- [10] 王琦. 水平井井筒气液两相流动模拟实验研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
- [11] 马有福, 彭杰伟, 吕俊复, 等. 水平矩形管内气/液两相逆向流动极限试验[J]. 内燃机学报, 2019, 37(1): 90–95.
- [12] WALLIS G B. Flooding velocities for air and water in vertical tubes[R]. Reactor Group, Winfrith: United Kingdom Atomic Energy Authority, 1961.
- [13] ZAPKE A, KRÖGER D G. Countercurrent gas-liquid flow in inclined and vertical ducts—I: flow patterns, pressure drop characteristics and flooding[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2000, 26(9): 1439–1455.
- [14] VALLÉE C, SEIDEL T, LUCAS D, et al. Comparison of countercurrent flow limitation experiments performed in two different models of the hot leg of a pressurized water reactor with rectangular cross section[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2011, 133(5): 052917.
- [15] WALLIS G B, DODSON J E. The onset of slugging in horizontal stratified air-water flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1973, 1(1): 173–193.
- [16] UTANOHARA Y, KINOSHITA I, MURASE M, et al. Numerical simulations for steam-water CCFL tests using the 1/3 scale rectangular channel simulating a PWR hot leg[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2012, 249: 14–23.
- [17] WALLIS G B. One-dimensional two-phase flow[M]. New York: McGraw-Hill, 1969: 315–330.
- [18] FORE L B, BEUS S G, BAUER R C. Interfacial friction in gas-liquid annular flow: analogies to full and transition roughness[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2000, 26(11): 1755–1769.

(编辑: 董 伟)