

# 水平气井全井段气水两相流动数值模拟分析

吴墨染<sup>1</sup>, 崔雷<sup>2</sup>, 李盈<sup>2</sup>, 王天意<sup>2</sup>, 刘墨<sup>2</sup>, 王洪军<sup>2</sup>

- 1. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司第一钻井分公司 天津 300280
- 2. 中国石油集团大庆油田有限责任公司大庆钻探工程公司试油测试公司 吉林松原 138000

通讯作者:Email:dqsyiclei@cnpc.com.cn

引用:吴墨染,崔雷,李盈,等. 水平气井全井段气水两相流动数值模拟分析[J]. 油气井测试,2022,31(1):1-7.

Cite: WU Moran, CUI Lei, LI Ying, et al. Numerical simulation analysis of gas-water two-phase flow in the whole well section of horizontal gas well[J]. Well Testing, 2022,31(1):1-7.

**摘要** 水平井井筒内气水两相流动规律和积液过程与直井差异较大。为明确水平井气水两相流动规律,建立水平井积液识别方法,利用相似原理,建立水平气井全井段气水两相流动理论计算模型,应用多相流模拟软件对水平井积液过程进行数值模拟分析。结果表明,水平井积液后水平段的压力损失较小,积液易堆积在造斜段,影响产能。对复杂完井段持液率影响因素分析,当管径大于 40 mm 时,持液率大幅增加;当上倾角为 65°时,持液率出现峰值,且倾角与持液率呈角函数变化关系。利用数值模拟技术,准确判断气水两相流在水平井中的流动状态和持液率变化,为确定水平气井井筒积液情况提供了新的理论分析方法,对后期排水采气增产措施的制定具有指导作用。

**关键词** 水平井;全井段;气水两相流动;数值模拟;积液;相似原理;持液率;影响因素

**中图分类号:**TE353      **文献标识码:**A      **DOI:**10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.01.001

## Numerical simulation analysis of gas-water two-phase flow in the whole well section of horizontal gas well

WU Moran<sup>1</sup>, CUI Lei<sup>2</sup>, LI Ying<sup>2</sup>, WANG Tianyi<sup>2</sup>, LIU Mo<sup>2</sup>, WANG Hongjun<sup>2</sup>

- 1. No. 1 Drilling Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Tianjin 300280, China
- 2. Oil Testing Company, CNPC Daqing Drilling Engineering Company, Songyuan, Jilin 138000, China

**Abstract:** The gas-water two-phase flow law and effusion process in horizontal wells are quite different from those in vertical wells. To clarify the law of gas-water two-phase flow in horizontal wells and establish the identification method of liquid accumulation in horizontal wells, a theoretical calculation model of gas-water two-phase flow in the whole well section of horizontal gas wells is established by using the similarity principle, and the liquid accumulation process in horizontal wells is numerically simulated and analyzed by multiphase flow simulation software. The results show that the pressure drop in the horizontal section is small after the liquid accumulation in the horizontal well, and the liquid is easy to accumulate in the deflecting section to affect the production capacity. In addition, the influencing factors of liquid holdup in complex completion section are analyzed. When the pipe diameter is greater than 40 mm, the liquid holdup increases greatly; When the up-dip angle is 65°, the liquid holdup appears a peak, and the relationship between these factors is an angular function. The numerical simulation technology is used to accurately judge the flow state and liquid holdup change of gas-water two-phase flow in horizontal wells, which provides a new theoretical analysis method for determining the wellbore effusion of horizontal gas wells, and plays a guiding role in the formulation of drainage and gas production stimulation measures in the later stage

**Keywords:** horizontal well; full well section; gas water two-phase flow; numerical simulation; effusion; similarity principle; liquid holdup; influence factor

水平井气水两相流动过程复杂,常规直井管流理论无法准确描述水平井出水和气水两相流动规律。产水气藏水平井两相流动包括多个不同的流动阶段:早期垂向径向流、中期线性流、后期拟径向

流等,不同阶段气水两相流动规律不同。20 世纪 50 年代,国外研究人员对水平管气液两相流动规律开展研究<sup>[1-2]</sup>,90 年代初,我国学者黄建勇、李明忠<sup>[3]</sup>建立了国内第一套小曲率半径水平井井筒多相流

流动规律模拟实验装置。2009年,谢宾等<sup>[4]</sup>根据相似性原理,以磨溪气田水平井井筒为模拟对象,结合川渝气区水平井的工况,研制出水平井井筒孔眼分流室内模拟实验装置。2014年,王琦<sup>[5]</sup>为研究水平井各井段的携液能力,建立了水平井井筒流动模拟实验装置,并利用模拟实验装置进行气水两相流动模拟实验,根据实验数据分析不同管段不同工况条件下,气水两相流型、流态的变化规律,以指导建立气体携液理论模型。2016年,Wang等<sup>[6]</sup>通过开展不同管径、不同流量和不同倾斜角度的对比实验,拟合了不同管径下的气量与携液量的相关式,结合角度修正项,建立了临界携液气体流速计算模型。气体携液理论模型的建立为气井积液诊断提供了新方法,从水平管流动规律总结出最容易形成积液的井段,并制定具有针对性的排水措施。Ouyang等<sup>[7]</sup>在常规气液两相管流模型的基础上,根据质量守恒方程建立了水平井筒气液两相变质量流动的流型划分准则及压降模型,并利用水平井模拟实验装置对模型进行验证及关键参数拟合。采用试验手段分析水平井筒气水两相流动规律工作量大,工况不全面,谭晓华等<sup>[8]</sup>针对气水两相渗流过程中,水从气体中析出会改变气藏渗流特征的问题,根据渗流力学基本理论,建立了水平井气水两相渗流的数学模型和物质平衡压降方程。随着研究开展,气液两相流型分析<sup>[9-11]</sup>和页岩气气水两相流数值模拟研究<sup>[12-14]</sup>也进一步深入。综合评价现有的理论模型,发现水平井的积液演变过程及其对于产能的抑制作用尚不明确,无法准确分析预测产能的变化和井筒积液量。水平井生产过程中,水平段球座缩径处产量与持液率会产生较大波动,同时不稳定的流动状态会加速积液进程。为进一步明确水平井气水两相流动规律,利用相似原理建立水平气井全井段气水两相流动理论计算模型,应用多相流模拟软件对水平井积液过程进行数值模拟分析,为建立水平井积液识别方法提供多角度的理论支撑。

## 1 理论计算模型

水平井井身结构包括直井段、造斜段和水平段,井深普遍超过3 500 m,完井方式不同,各井段的管径不同。考虑到水平井完井管柱的复杂性,利用相似理论建立水平井全井段气水两相流动理论计算模型。

### 1.1 几何相似计算模型

如果两个流动的相应点上,所有表征流动状况的物理量都保持各自的固定比例关系,那么两个流动是相似的。几何相似原则是两个流动对应的线段成比例,对应角度相等,对应的边界性质(固体边界的粗糙度或者自由液面)相同。结合水平井井眼轨迹,设计合理的相似比例,作为几何模型尺寸计算的理论基础模型。利用经典的相似原理<sup>[15]</sup>,根据水平井几何结构特点,推导两个流动的长度比例尺可表示为

$$\lambda_l = l_p / l_m \quad (1)$$

面积比例尺和体积比例尺可分别表示为

$$\lambda_A = \frac{A_p}{A_m} = \lambda_l^2 \quad (2)$$

$$\lambda_V = \frac{V_p}{V_m} = \lambda_l^3 \quad (3)$$

式中:下标 p、m 分别代表原型和模型; $l$ 、 $A$ 、 $V$  分别为长度、面积和体积。

其中长度比例尺是几何相似的基本比例尺,在10~100之间取值,其他的比例尺均可用长度比例尺来表示。如果原型与模型的各方向上的尺寸都取同一比例尺,表示为正态模型,反之表示为变态模型。按正态模型设计的话,一方面模型管径会非常小,改变流动性质;另一方面,模拟主要关注单位管长上的压降等参数,不需要模拟整个管道的压降。因此本研究采用变态模型进行模拟。

### 1.2 运动相似计算模型

运动相似原则是两个流动对应点处的同名运动学量成比例。水平井模拟主要是指气水两相流动的速度矢量  $v$  和加速度矢量  $a$  相似。在两个运动相似的流动间,对应流体质点的运动轨迹也应满足几何相似,且流过对应轨迹线上对应线段的时间也应成比例。所以,时间比例尺、速度比例尺和加速度比例尺可表示为

$$\lambda_t = \frac{t_p}{t_m} \quad (4)$$

$$\lambda_v = \frac{v_p}{v_m} = \frac{l_p/t_p}{l_m/t_m} = \frac{\lambda_l}{\lambda_t} \quad (5)$$

$$\lambda_a = \frac{a_p}{a_m} = \frac{v_p/t_p}{v_m/t_m} = \frac{l_p/t_p^2}{l_m/t_m^2} = \frac{\lambda_l}{\lambda_t} = \frac{\lambda_l}{\lambda_t^2} \quad (6)$$

作为加速度的特例,重力加速度  $g$  的比例尺为

$$\lambda_g = \frac{g_p}{g_m} \quad (7)$$

通常原型与模型都受到重力作用,则  $\lambda_g = 1$  限制了对模型比例尺的选择范围。运动相似也是流动相似的必要条件,只有在两个几何相似和运动相似的流动之间,实现了运动相似才真正实现了流动相似。因此,动力相似是流动相似的主导因素,是流动相似的充分条件。

### 1.3 动力相似计算模型

动力相似是两个流动对应点上的同名动力学量成比例。主要是指作用在流体上的力包括重力  $G$ 、黏性力  $T$ 、压力  $p$ 、弹性力  $E$  等相似,力的比例尺可表示为

$$\lambda_F = \frac{F_p}{F_m} = \frac{G_p}{G_m} = \frac{T_p}{T_m} = \frac{P_p}{P_m} = \frac{E_p}{E_m} \quad (8)$$

假设作用在流体上的合外力  $F$ ,流体的加速度为  $a$ ,流体的质量为  $m$ ,由牛顿第二定律  $F = ma$  可知,力的比例尺  $\lambda_F$  可表示为

$$\lambda_F = \frac{F_p}{F_m} = \frac{m_p a_p}{m_m a_m} = \frac{\rho_p v_p a_p}{\rho_m v_m a_m} = \lambda_p \lambda_v^2 \lambda_a^2 \quad (9)$$

也可以写为

$$\lambda_F = \frac{F_p}{F_m} = \frac{\rho_p l_p^2 v_p^2}{\rho_m l_m^2 v_m^2} \quad (10)$$

或

$$\frac{F_p}{\rho_p l_p^2 v_p^2} = \frac{F_m}{\rho_m l_m^2 v_m^2} \quad (11)$$

其中

$$Ne = \frac{F}{\rho l^2 v^2} = \frac{F}{ma} \quad (12)$$

式中:  $Ne$  为作用在流体上的合外力与惯性力之比,无量纲。

上述(12)式结合(11)式,可得

$$Ne_p = Ne_m \quad (13)$$

在两个动力相似的流动中的无量纲数称为牛顿数,以相似准数是否相等这一条件作为判断流动是否动力相似称为相似准则,即牛顿一般相似原理<sup>[16]</sup>,也称为牛顿相似准则。

### 1.4 压力相似计算模型

当作用在流体上合外力中的压力起主导作用时,则有  $F = p$ , 牛顿数可表示为

$$Ne = \frac{p}{\rho l^2 v^2} = \frac{\rho l^2}{\rho l^2 v^2} = \frac{p}{\rho v^2} \quad (14)$$

引入欧拉数  $Eu = p/\rho v^2$ , 则牛顿数相等这一相似准则就转化为

$$Eu_p = Eu_m \quad (15)$$

欧拉数的物理意义是压力与惯性力的比值。

压力相似准数是欧拉数,压力相似准则是原型与模型的欧拉数相等。

## 2 水平井复杂完井段积液过程数值模拟实例分析

A 井是位于松辽盆地东南断陷区兴城鼻状构造的一口开发井,主要目的层为营城组火山岩储层,附近钻遇天然裂缝带。根据 A 井完井井身结构,利用相似准则,应用 Fluent 多相流模拟软件建立水平井几何模型。

### 2.1 几何模型网格划分

研究井段水平段长度 900 m,造斜段曲率半径为 320 m,垂直段长度为 3 570 m。利用几何相似准则,以 200 作为相似比例,计算得相似模型的水平段长为 4.5 m,造斜段曲率半径为 1.6 m。利用变态模型的机理可得井筒半径为 0.060 7 m,矩形裂缝缝宽为 0.05 m,裂缝半长为 1 m,各裂缝间距 1 m。设置网格大小为 0.01 m 描绘物理模型。

### 2.2 计算参数设置与模拟结果分析

根据水平气井全井段气水两相流动理论计算模型,设置 Fluent 计算模型,选择 3D,采用双精度求解器,稳态计算,mixture 多相流模型,Realizable k- $\epsilon$  湍流模型,求解方法选用 Simplec。设置井筒中流动介质一相为甲烷,另一相为水,裂缝四周为入口,垂直段顶端为出口,根据气体组分检测结果(99.9%是甲烷气体),模拟设置每条裂缝入口甲烷体积分数为 99.9%,水相质量流量为 0.1%,压力为 20 MPa,气层厚度 45 m,裂缝半长 1 m,裂缝 10 条,渗透率  $1 \times 10^{-4}$  mD,原始地层压力 35 MPa,产气量  $2.3 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d。

图 1 是水平井模型速度矢量云图,表征从裂缝到井筒出口流体速度的变化,图中黄色代表高流速,蓝色代表低流速。

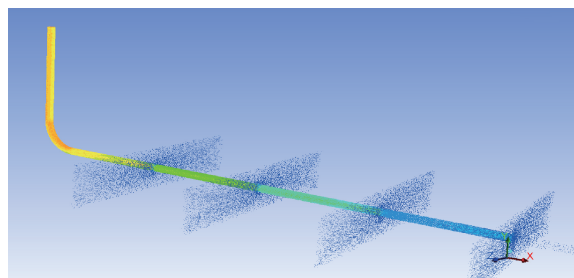


图 1 水平井模型速度矢量图

Fig. 1 Velocity vector diagram of horizontal well model

从图 1 中可以看出,水平段流体速度逐渐增大,且井筒上部位流速增加速度大于下部位,分析原因

造斜段是液相更容易聚集的地方,受重力影响,造斜段临界携液气量较大,气井产量不变的条件下,积液易集中在造斜段。因此,在造斜段内弯处出现流速峰值。

水平井模型平面压力云图表征从裂缝到井筒出口压力的变化。水平井的变质量流特性及井筒中存在积液,且积液集中在造斜段<sup>[17]</sup>,图2中红色代表高压,蓝色代表低压。从图中可以看出,压力在水平段的衰减较小,进入造斜段后压力大幅下降。

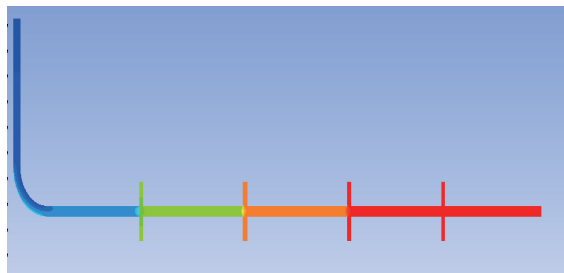


图2 水平井模型平面压力云图

Fig. 2 Plane pressure nephogram of horizontal well model

### 3 复杂完井段持液率影响因素分析

利用数值模拟软件,对水平井气水两相管流模型、造斜段管流模型及垂直段管流模型的持液率进行分析研究<sup>[18-20]</sup>,确定管径和倾斜角对不同管段持液率的影响规律。

#### 3.1 管径对持液率的影响

根据水平井完井管柱内通径,分别设置了20 mm,40 mm,60 mm,80 mm 管径进行模拟计算,绘制了不同井段持液率随管径的变化曲线。从图3可以看出,水平管段持液率随管径变化。管径在0~0.4 m 范围内时,持液率基本保持不变。当管径大于0.4 m 时,持液率随管径的增加逐渐增大。垂直管段持液率变化平稳,在40 mm 管径处出现峰值(图4)。

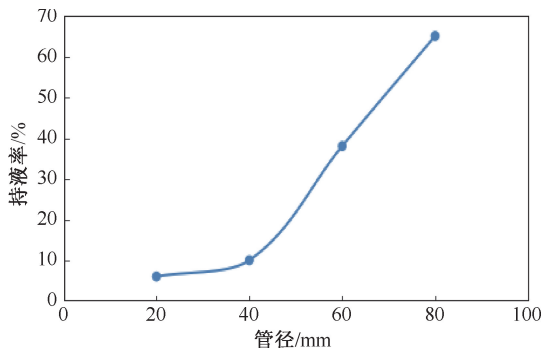


图3 水平管段持液率随管径的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of liquid holdup in horizontal pipe section with pipe diameter

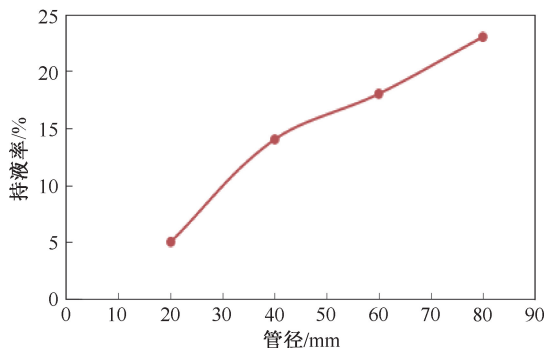


图4 垂直管段持液率随管径的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of liquid holdup in vertical pipe section with pipe diameter

从图5可以看出,不同倾角的倾斜管段持液率随管径的增加而增大,增加幅度和趋势基本不变;当管径大于0.4 m 时,持液率增大的幅度(曲线斜率)表现出明显增大的趋势。

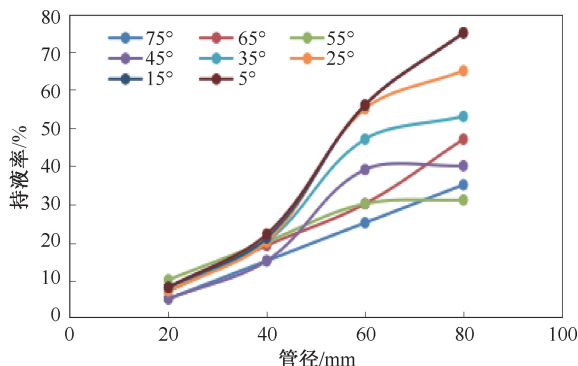


图5 倾斜管段持液率随管径的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of liquid holdup in inclined pipe section with pipe diameter

#### 3.2 倾斜角对持液率的影响

根据深层水平气井井眼轨迹,分别设置了不同上倾斜角和下倾斜角进行模拟计算分析,并绘制不同井段持液率随倾斜角的变化曲线。从图6可以看出,持液率随上倾斜角的增大而逐渐降低,管径越大,降低幅度越大,倾角在55°~75°之间,持液率出现先增大后降低的趋势(当管径为80 mm 时,趋势明显),分析原因是倾角与临界携液流量呈角度函数关系,在倾角为65°时,携液能力最强,持液率出现峰值。从图7可以看出,持液率随下倾斜角的减小而逐渐增大,管径越小,变化趋势越明显,分析原因是管径越小,气体流速越大,携液能力越强。

#### 3.3 气相流速对持液率的影响

根据深层水平气井井底气相流速,分别设置了不同气相流速进行模拟计算分析,绘制了水平管、倾斜管、垂直管不同井段持液率随气流量的变化曲线(图8~10)。



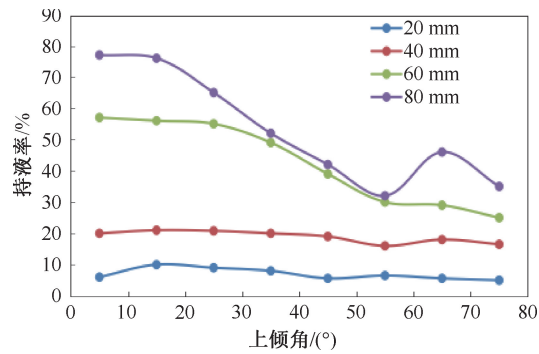


图 6 持液率随上倾斜角变化曲线  
Fig. 6 Variation curve of liquid holdup with up inclination angle

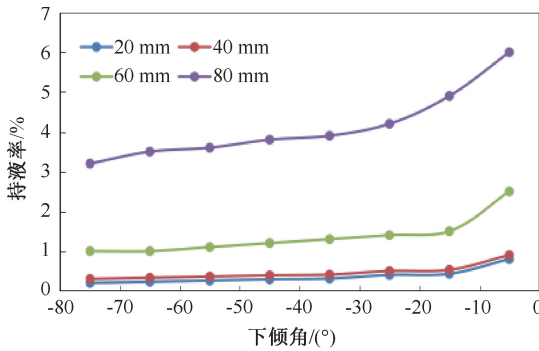


图 7 持液率随下倾斜角变化曲线  
Fig. 7 Variation curve of liquid holdup with down inclination angle

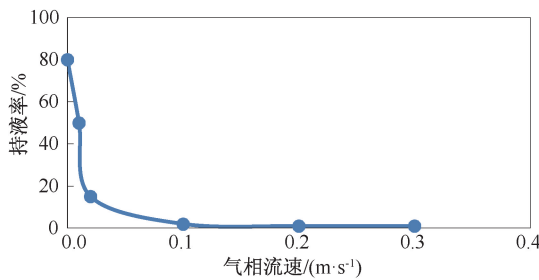


图 8 水平管段持液率随气相流速变化曲线  
Fig. 8 Variation curve of liquid holdup with gas phase flow rate in horizontal pipe section

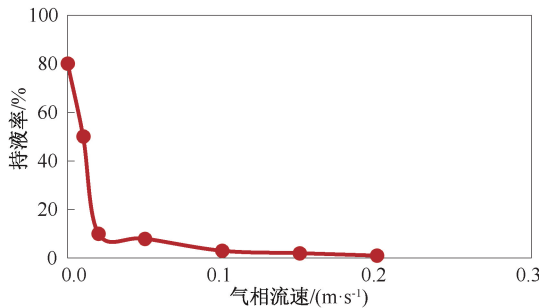


图 9 倾斜管段持液率随气相流速变化曲线  
Fig. 9 Variation curve of liquid holdup with gas phase flow rate in inclined pipe section

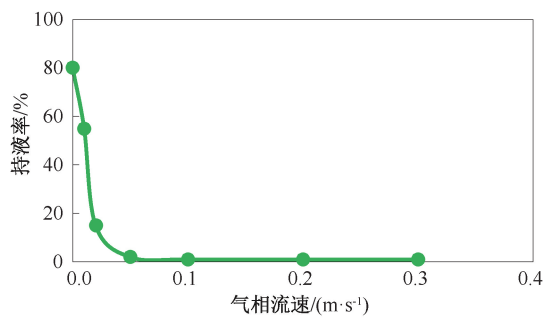


图 10 垂直管段持液率随气相流速的变化曲线  
Fig. 10 Variation curve of liquid holdup with gas phase flow rate in vertical pipe section

从气相流动速度对持液率的影响关系曲线图可以看出,总体上持液率随气相流速的增大而减小,但流速在 0~0.05 m/s 范围内时,持液率急剧下降,且在流速大于 0.05 m/s 时,持液率随气相流速的变化而基本保持不变。三种不同井段的变化规律相似。

### 3.4 压力对持液率的影响

根据深层水平气井井口压力,分别设置了不同压力进行模拟计算分析,绘制了不同井段持液率在 3 MPa 和 5 MPa 压力下随气体流量的变化曲线(图 11~13)。

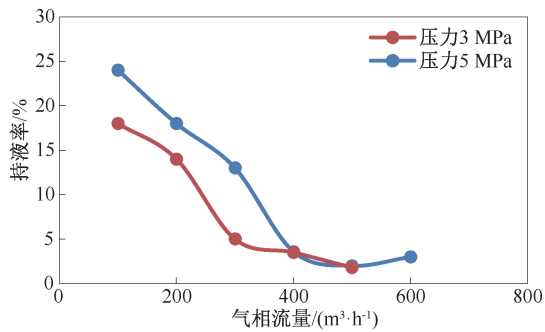


图 11 水平管段持液率随气流量变化曲线  
Fig. 11 Variation curve of liquid holdup with gas flow in horizontal pipe section

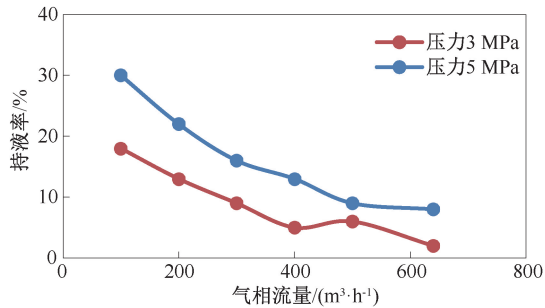


图 12 倾斜管段持液率随气流量变化曲线  
Fig. 12 Variation curve of liquid holdup with gas flow in inclined pipe section

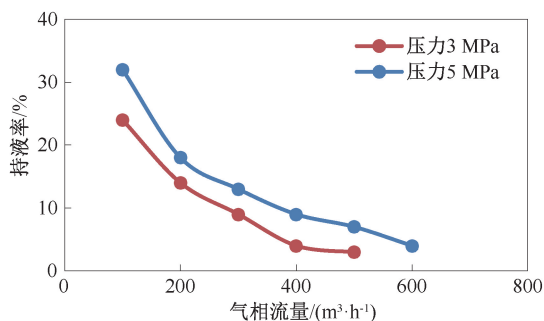


图 13 垂直管段持液率随气流量变化曲线

Fig. 13 Variation curve of liquid holdup with gas flow in vertical pipe section

从压力对持液率的影响关系曲线图可以看出,压力对气液流动有明显的影响<sup>[21-22]</sup>,总体来说,持液率随压力增加而增加。气体流量很大时,持液率相对较低,说明此时井筒中气流虽然能够有效携液,但持液率随气体流量的增大而减小。

## 4 结论

(1) 利用相似原理可简化水平井复杂完井结构,分别考虑几何相似、运动相似、动力相似和压力相似原则,建立水平气井全井段气水两相流动理论计算模型。结合水平井两相流动特点,推导出符合模拟计算条件的数学模型,对建立其全井段两相流动数学模型有借鉴意义。

(2) 应用多相流数值模拟软件,对水平井复杂完井段积液过程数值模拟分析,受重力影响,造斜段临界携液气量较大,气井产量不变的条件下,积液易集中在造斜段。由于水平井井况复杂,室内模拟实验难度大,采用数值模拟的方法可以模拟不同工况条件下的流动特征,快速得到结果,一旦计算收敛,可以认为计算是准确的,最大程度的接近真实实验结果,是一种有效的分析方法。

(3) 对不同管径的持液率进行模拟计算,绘制不同井段持液率随管径的变化曲线,持液率随管径的增大而增大,当管径大于 0.4 m 时,表现出明显增大的趋势;对不同倾角的持液率进行分析,绘制持液率随倾斜角的变化曲线,上倾角在 55°~75°之间,持液率出现先增大后降低的趋势,当上倾角为 65°时,持液率出现峰值,且倾角与持液率呈角度函数变化趋势;持液率随气相流速的增大而减小,随压力增加而增加。

(4) 准确识别积液是制定排采措施、恢复气井产能的基础,模拟计算得到的持液率结论性规律对于水平井积液识别与预测研究有一定指导意义。

致谢:感谢大庆油田大庆钻探工程公司试油测试公司同意本文公开发表。

## 参考文献

- [1] LOCKHART R W, MARTINELLI R C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes [J]. Chemical Engineering Progress, 1949(45):39-48.
- [2] 陈家琅,陈涛平. 石油气液两相管流[M]. 北京:石油工业出版社,2010:107-146.
- [3] 黄建勇,李明忠. 水平井井筒流动模拟实验装置[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),1994(S1):56-60. HUANG Jianyong, LI Mingzhong. Development of the experimental facility for modelling multiphase flow in horizontal wellbore [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 1994(S1):56-60.
- [4] 谢宾,陆灯云,张剑,等. 水平井连续油管冲砂与分流实验装置的研制[J]. 天然气工业,2009,29(11):67-69. XIE Bin, LU Dengyun, ZHANG Jian, et al. Development of experimental facilities for sand washing and fluid diverting of coiled tubing in horizontal wells [J]. Natural Gas Industry, 2009,29(11):67-69.
- [5] 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. WANG Qi. Experimental study on gas-liquid flowing in the wellbore of horizontal well [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [6] WANG Zhibin, GUO Liejin, WU Wen, et al. Experimental study on the critical gas velocity of liquid-loading onset in an inclined coiled tube [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016,34(6):22-33.
- [7] OUYANG LB, ARBABI S, AZIZ K. General wellbore flow model for horizontal, vertical, and slanted well completions [J]. SPE Journal, 1998,3(2):124-133.
- [8] 谭晓华,李晓平,刘从领,等. 确定气水同产水平井流入动态关系的新方法[J]. 石油钻采工艺,2014,36(3):59-64. TAN Xiaohua, LI Xiaoping, LIU Congling, et al. A new method for ascertaining the influx dynamic relation in water-gas producing horizontal wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014,36(3):59-64.
- [9] 张金红. 气液两相流流型实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2005. ZHANG Jinhong. The experimental study on flow pattern in gas-liquid two-phase flow [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [10] 赵铎. 水平管内气液两相流流型数值模拟与实验研究[D]. 东营:中国石油大学(华东),2017. ZHAO Duo. Numerical simulation and experimental study on flow pattern of gas-liquid two-phase flow in horizontal pipes [D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2017.

- [11] 宋红伟,郭海敏,戴家才. 水平井生产测井气水两相流流型试验分析[J]. 石油天然气学报,2011,33(12):96-101.  
SONG Hongwei, GUO Haimin, DAI Jiakai. Experimental analysis of gas-water flow pattern during production well logging in horizontal wells [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011,33(12):96-101.
- [12] 郭松林,于绍辉,方萌. 页岩气水平井气水两相流流型数值模拟[J]. 石油化工应用,2017,36(4):18-23.  
GUO Songlin, YU Shaohui, FANG Meng. Numerical simulation of gas-water two-phase flow patterns in shale gas horizontal wells [J]. Petrochemical Industry Application, 2017,36(4):18-23.
- [13] 薛永超,张雪娇,丁冠阳. 页岩气井返排早期气水两相流数学模型研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(24):213-217.  
XUE Yongchao, ZHANG Xuejiao, DING Guanyang. Mathematical model study on gas and water two-phase of early-time flowback in shale gas wells [J]. Science Technology and Engineering, 2017,17(24):213-217.
- [14] 张琪,周生田,吴宁. 水平井气液两相变质量流的流动规律研究[J]. 石油大学学报(自然科学版),2002,26(6):46-49.  
ZHANG Qi, ZHOU Shengtian, WU Ning. Laws gas-liquid two-phase variable mass flow in horizontal wellbore [J]. Journal of the University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2002,26(6):46-49.
- [15] 杨川东. 采气工程[M]. 北京:石油工业出版社,2001:96-101.
- [16] 陈玲玉. 多孔介质内气—水两相渗流特性模拟研究[D]. 大连:大连理工大学,2014.  
CHEN Lingyu. The study on gas-water two phase percolation characteristics simulation in porous media [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [17] 李聪,王勇,李韬,等. X气田出水类型判断[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2014,16(6):52-54.  
LI Cong, WANG Yong, LI Tao, et al. How to determine the water type of X gas field [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014,16(6):52-54.
- [18] 聂延波,李晓平,王金明. 水平井筒压降计算理论与方法综述[J]. 国外油田工程,2010,(12):32-36.  
Nie Yanbo, LI Xiaoping, WANG Jinming. Review on the calculation theory and method of pressure drop in horizontal wellbore [J]. Foreign Oilfield Engineering, 2010,(12):32-36.
- [19] 任桂蓉. 川西水平气井井筒两相管流流型实验研究[D]. 西南石油大学,2016.  
Ren Guirong. Experimental study on wellbore two-phase pipe flow pattern of horizontal gas well in western Sichuan [D]. Southwest Petroleum University, 2016.
- [20] 袁淋,李晓平. 低渗透气藏水平井气水两相产能研究[J]. 天然气地球科学,2014,25(9):55-61.  
Yuan Lin, Li Xiaoping. Study on gas-water two-phase productivity of horizontal well in low permeability gas reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2014,25(9):55-61.
- [21] 汪志明,肖京男,王小秋,等. 水平井变质量流动压降规律实验研究[J]. 实验流体力学,2011,25(5):26-29.  
WANG Zhiming, XIAO Jingnan, WANG Xiaoqiu, et al. Experimental study for pressure drop of variable mass flow in horizontal well [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011,25(5):26-29.
- [22] 彭壮,汪国琴,徐磊,等. 水平井筒气水两相流动压降规律研究[J]. 天然气与石油,2015,33(3):74-78.  
PENG Zhuang, WANG Guoqin, XU Lei, et al. Study on pressure drop regularity of gas/water two phase flow s in horizontal well [J]. Natural Gas and Oil, 2015,33(3):74-78.

编辑 苏璇

**第一作者简介:**吴墨染,男,1987年出生,工程师,2009年毕业于大庆石油学院机械设计制造及其自动化专业,现主要从事钻井工程工作。电话:0438-6336655;Email:wumoran@cnpc.com.cn。通信地址:天津市滨海新区大港油田红旗路128号渤海钻探第一钻井分公司,邮政编码:300280。