

水平气井全井段气水两相流动数值模拟分析

宋国强, 崔雷

中国石油集团大庆钻探工程有限公司试油测试公司 吉林松原 138000

通讯作者: Email: 279327255@qq.com

引用: 宋国强, 崔雷. 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(3): 16-20.

Cite: SONG Guoqiang, CUI Lei. Numerical simulation analysis of gas-water two-phase flow in full-hole of horizontal gas well[J]. Well Testing, 2022, 31(3): 16-20.

摘要 水平井钻采技术井筒形态复杂, 导致井筒管流产生相应的变化, 影响地面井控装置操作参数的确定。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。模拟结果表明, 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, 对产能造成较大影响。各井段持液率的影响因素分析结果显示, 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度函数变化趋势。该研究对建立水平井积液识别方法提供理论支撑。

关键词 水平井; 气井; 积液识别; 全井段; 气水两相流动; 数值模拟; 持液率; 产能分析

中图分类号: TE353 **文献标识码:** B **DOI:** 10. 19680/j. cnki. 1004-4388. 2022. 03. 003

Numerical simulation analysis of gas-water two-phase flow in full-hole of horizontal gas well

SONG Guoqiang, CUI Lei

Oil Testing Company, CNPC Daqing Drilling & Exploration Engineering Co., Ltd., Songyuan, Jilin 138000, China

Abstract: The shape of wellbore with horizontal well drilling and production technology is complex, which leads to corresponding changes in wellbore pipe-flow and then affects the determination of the operating parameters of surface well control device. In order to clarify the pattern of gas-water two-phase flow in horizontal wells and establish a method for identifying liquid load in horizontal wells, a theoretical calculation model of gas-water two-phase flow in full-hole of horizontal gas well was established according to the similarity principle, and the process of liquid loading in horizontal well was numerically simulated using the multi-phase flow simulation software. The results show that the pressure loss in the horizontal section after liquid loading is small, and the liquid easily accumulates in the deflection section, which has a great impact on the productivity. According to the analysis of factors influencing the liquid holdup in each well section, when the pipe diameter is greater than 40 mm, the liquid holdup increases significantly; when the up-dip angle is 65°, the liquid holdup reaches a peak, and the dip angle and the liquid holdup tend to change as an angle function. This study provides a theoretical support for establishing a method for identifying liquid load in horizontal wells.

Keywords: horizontal well; gas well; liquid load identification; full-hole; gas water two-phase flow; numerical simulation; liquid holdup; productivity analysis

水平井气水两相流动过程复杂^[1], 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^[2-3]。前人学者已经对产水气藏水平井两相流动的流动阶段的流动阶段进行了时间上的划分: 早期垂向径向流、中期线性流、后期拟径向流等^[4-6], 不同的阶段气液两相的流动规律不同, 主要体现在储层油气相的渗流方向变化上^[7-9]。对于水平段井筒管流中的流体流型亦有变化, 根据管内混相总流量的大小可以划分为分层流、气泡流、段塞流两种, 同时随着气液比例的变化, 还可能出现分散气泡流

和波浪流等流型^[10-12]。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^[13], 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将会产生较大波动, 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理论支撑。

1 水平气井全井段气水两相流动理论计算模型

考虑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各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。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。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(指固体边界的粗糙度或者自由液面)相同。

两个流动的长度比例尺可表示为

$$\lambda_l = \frac{l_p}{l_m} \quad (1)$$

式中: λ_l 为长度比例尺(在 10 ~ 100 之间取值); l_p 为原型长度, m; l_m 为模型长度, m。

面积比例尺和体积比例尺可表示为

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

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

式中: λ_A 为面积比例尺; λ_V 为体积比例尺; A_p 为原型面积, m^2 ; A_m 为模型面积, m^2 ; V_p 为原型体积, m^3 ; V_m 为模型体积, m^3 。

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。如果按正态模型设计的话,一方面模型管径将会非常的小,改变了流动性质;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,采用变态模型进行模拟。

1.2 运动相似的计算模型

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

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

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

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

式中: λ_t 为时间比例尺; λ_v 为速度比例尺; λ_a 为加速度比例尺; t 为流动时间, s; v 为流动速度, m/s; a 为流动加速度, m/s^2 ; 下标 p 和 m 分别代表原型和模型。

作为加速度的特例,重力加速度的比例尺为

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

式中: λ_g 为重力加速度比例尺; g_p 为原型重力加速度; g_m 为模型重力加速度。

通常原型与模型都受到重力作用,则 $\lambda_g = 1$ 。这样,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,实现了动力相似,才真正实现了流动相似。

1.3 动力相似的计算模型

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

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

式中: λ_F 为力的比例尺; F 为作用在流体上的合外力, N; G 为作用在流体上的重力, N; T 为作用在流体上的黏性力, N; p 为作用在流体上的压力, N; E 为作用在流体上的弹性力, N。

F 由牛顿第二定律 $F = ma$ 可知,力的比例尺可表示为

$$\lambda_F = \frac{F_p}{F_m} = \frac{m_p a_p}{m_m a_m} = \frac{\rho_p V_p a_p}{\rho_m V_m a_m} = \lambda_p \lambda_l^3 \lambda_t^{-2} = \lambda_p \lambda_l^2 \lambda_v^2 \quad (9)$$

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

也可以写为

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

式中: m 为流体质量, kg; ρ 为流体密度, kg/m^3 。

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

$$\text{则} \quad Ne_p = Ne_m \quad (13)$$

式中: Ne 为牛顿数。

由此可得,动力相似的判据为牛顿数相等,这就是牛顿一般相似原理。在两个动力相似的流动

中的无量纲数称为相似准数,例如牛顿数。作为判断流动是否动力相似的条件称为相似准则,如牛顿数相等这一条件。因此,牛顿一般相似原理也可称为牛顿相似准则。

1.4 压力相似的计算模型

当作用在流体上的合外力中压力起主导作用时,则有 $F=p=pA$, 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

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

式中: Eu 为欧拉数。

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分析

应用多相流模拟软件 Fluent 建立几何模型、划分网格、设置计算参数,对水平井复杂完井段积液过程进行数值模拟分析。

2.1 几何模型建立与网格划分

根据长深平 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。水平段长度为 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。

2.2 计算参数设置与模拟结果分析

Fluent 中 Dimension 选择 3D,采用双精度求解器,稳态计算,多相流模型选用 Mixture,湍流模型选用 Realizable $k-\varepsilon$, 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,每条裂缝入口甲烷体积分数为 99.99%,水相质量流量为 0.000 1%,压力为 20 MPa。进行数值模拟后所得结果如图 1~图 3。

从水平井模型的气相组分云图中可以看出,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。从水平井模型平面压力云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。从速度矢量图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,分析原因是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,因此,在造斜段内弯处出现流速峰值。

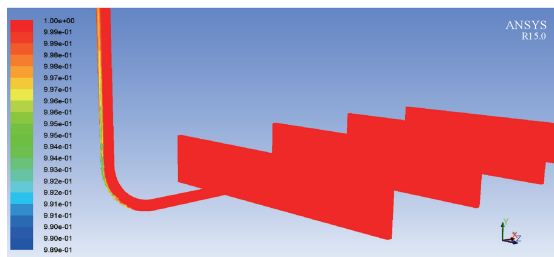


图 1 水平井模型气相组分云图

Fig. 1 Gas-phase component cloud pattern of horizontal well

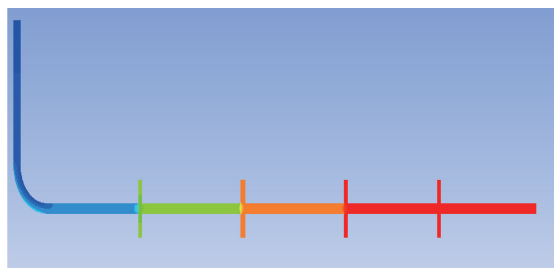


图 2 水平井模型平面压力云图

Fig. 2 Plane pressure clouds for horizontal well model

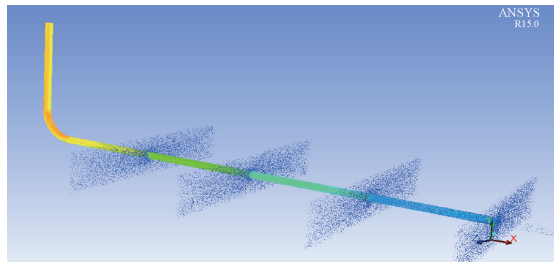


图 3 水平井模型速度矢量图

Fig. 3 Velocity vector 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对持液率进行分析研究,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(图 4~图 6)。

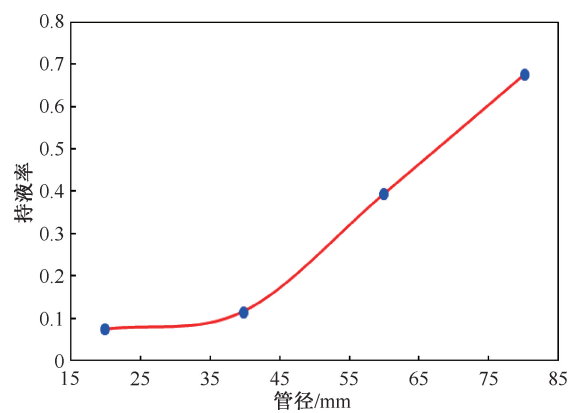


图 4 水平管段持液率随管径变化曲线
Fig. 4 Curve of Liquidity with Diameter in Horizontal Pipe Section

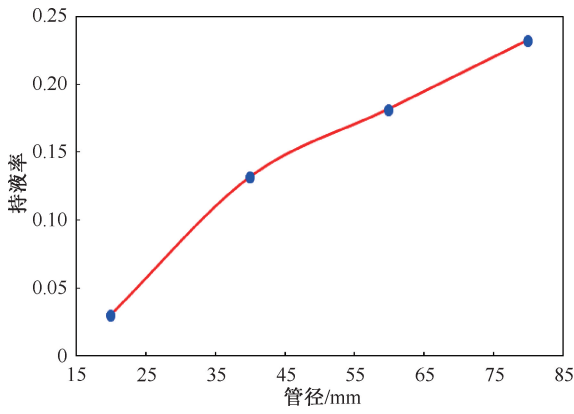


图 5 垂直管段持液率随管径变化曲线
Fig. 5 Curve of Liquidity with Diameter in Vertical Pipe Section

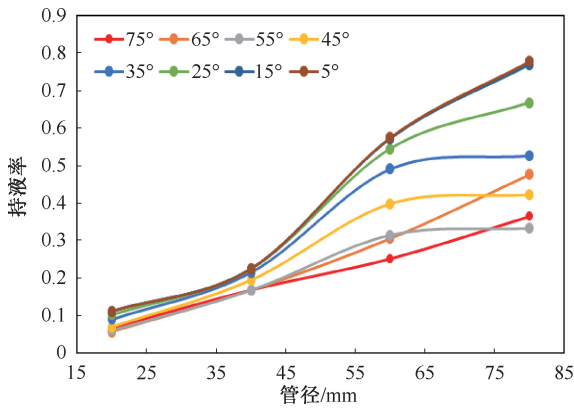


图 6 倾斜管段持液率随管径变化曲线
Fig. 6 Curve of Liquidity with Diameter of Tilt Pipe Section

从水平管段持液率随管径的变化曲线可以看出,管径在 0.0~0.4 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。从垂直管段持液率随管径的变化曲线可以看出,总体上持液率随管径的增加而增大,增加幅度和趋势基本不变。从倾斜管段持液率随管

径的变化曲线可以看出,持液率随管径的增大而增大,当管径大于 0.4 m 时,增大的幅度表现出明显增大的趋势。

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,绘制了不同井段持液率随倾斜角的变化曲线(图 7、图 8)。

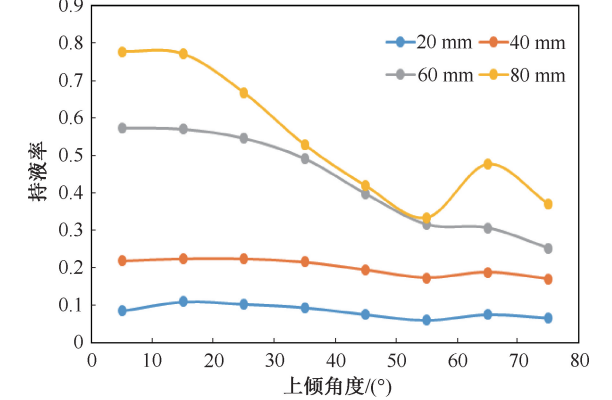


图 7 持液率随上倾斜角变化曲线
Fig. 7 Curve of Liquidity with Up-sloping Angle

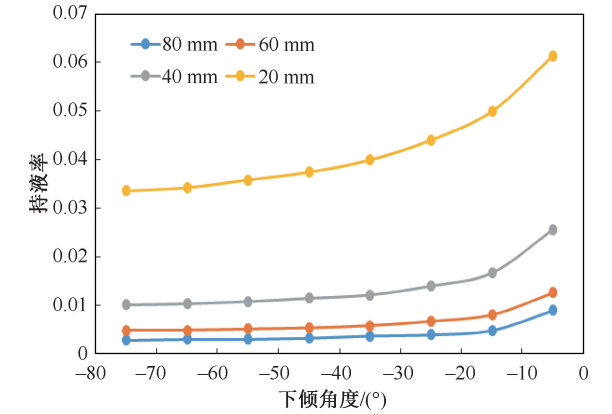


图 8 持液率随下倾斜角变化曲线
Fig. 8 Curve of Liquidity with Lower Inclination

从持液率随上倾斜角的变化曲线可以看出,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,临界携液流量最低,携液能力最强,持液率出现峰值。从持液率随下倾斜角的变化曲线可以看出,持液率随倾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。

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,建立了水平气井全井段气水两相流动力学理论计算模型。

(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。模拟结果表明,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。

(3)通过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;对不同倾角的持液率进行模拟计算,绘制持液率随倾斜角的变化曲线,从而为建立水平井积液识别方法提供了理论支撑。分析结果表明,持液率随管径的增大而增大。当管径大于0.4 m时,增大的幅度表现出明显增大的趋势。

致谢:感谢大庆钻探工程有限公司试油测试公司对本文提供的技术支持。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 罗启源. 水平气井气水两相井筒流动压降研究[D]. 成都:西南石油大学,2011.
LUO Qiyuan. Study on flow pressure drop in horizontal gas well gas-water two-phase wellbore [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2011.
- [4] 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.
- [5] 张金红. 气液两相流流型实验研究[D]. 哈尔滨工程大学,2005.
ZHANG Jinhong. The experimental study of flow patterns in gas-liquid two-phase flow [D]. Harbin Engineering University, 2005.
- [6] 赵铎. 水平管内气液两相流流型数值模拟与实验研究[D]. 中国石油大学(华东),2007.
ZHAO Duo. Numerical simulation and experimental study of gas-liquid two-phase flow pattern in horizontal tube [D]. China University of Petroleum, 2007.
- [7] 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.
- [8] 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):13-20.
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):13-20.
- [9] 任桂蓉. 川西水平气井井筒两相管流流型实验研究[D]. 成都:西南石油大学,2016.
REN Guirong. Experimental study on two-phase flow pattern of horizontal gas well bore in western Sichuan [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [10] 王琦. 水平井井筒气液两相流动模拟实验研究[D]. 西南石油大学,2014.
WANG Qi. Experimental study on gas-liquid two-phase flow simulation of horizontal wellbore [D]. Southwest Petroleum University, 2014.
- [11] 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 of gas-liquid two-phase variable mass flow in horizontal wellbore [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2002,26(6):46-49.
- [12] 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. A study on the simulation of gas-water two-phase seepage in porous medium [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [13] 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. The productivity study of gas-water two phase production capacity of horizontal well in low-permeability gas reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2014,25(9):55-61.

编辑 穆立婷

第一作者简介:宋国强,男,1982年出生,工程师,2007年毕业于大庆石油学院石油工程专业,现主要从事试油气技术的研究与应用工作。电话:0438-6280846,13596962613;Email:279327255@qq.com。通信地址:吉林省松原市宁江区新世纪小区5排3栋,邮政编码:138000。