

非线性渗流对低渗气藏采收率的影响

汪益宁¹,王晖¹,曹淑慧¹,倪军²,梅士盛¹,欧阳静芸¹

1. 中国兵器工业集团振华石油控股有限公司,北京 100031

2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院,西安 710075

摘要 低渗透气藏开发过程中普遍存在非线性渗流,研究非线性渗流对采收率影响对于合理开发此类气藏具有一定意义。选取塔里木某低渗透气藏的岩心开展不同渗透率和含水饱和度条件下的非线性渗流实验,实验表明低渗透气藏存在启动压力梯度和较强的应力敏感性。渗透率越低、含水饱和度越高,启动压力梯度越大,应力敏感性越强,非线性渗流特征越明显。非线性渗流对低渗透气藏采收率有较大影响。启动压力梯度越大、应力敏感性越强的气藏,最终地层废弃压力越高,采收率越低。在低渗透气藏开发部署时,尽量寻找较高渗透率和较低含水饱和度的储层,优先开发。同时,井网加密调整、储层改造、降低含水饱和度也是提高低渗透气藏采收率的有效途径。

关键词 非线性;低渗透;采收率;应力敏感性;启动压力梯度

低渗透气藏储量丰富,开发潜力巨大,但是由于具有低孔、低产、低渗透率的特点^[1],气体在低渗透储层流动时存在非线性渗流特征^[2]。为了科学高效地开发此类气藏,低渗透气藏非线性渗流机理一直得到广泛关注,研究主要集中在滑脱效应、启动压力梯度、应力敏感性几个方面^[3-5]。滑脱效应主要发生在低压条件下,而在气藏开采过程地层压力下可以忽略^[5,6]。而大量的实验研究证明,由于低渗透气藏致密的孔隙特征,启动压力梯度和应力敏感性普遍存在^[1]。前人的研究主要包括启动压力梯度和应力敏感性的测试和评价,而对低渗透气藏采收率的影响研究较少。本文以塔里木某低渗透气藏为研究对象,针对启动压力梯度和应力敏感性引起的非线性渗流开展实验研究。

1 低渗透气藏非线性渗流实验

选取塔里木某低渗气藏的5块岩心,分别开展启动压力和应力敏感性实验,基础物性参数如表1所示。

1.1 启动压力梯度实验

岩心抽真空饱和水并建立一定束缚水饱和度后放入夹持器,根据岩心的取心深度,设置岩心承受的围压为20 MPa。夹持器入口连接气源,通过高精度空压阀控制入口气体压力和流量,夹持器出口连接皂泡流量计计量气体流速。开始实验时,逐步提高入口端气体的压力,气体开始突破岩心时的压力梯度为启动压力梯度,然后继续增加入口端的压力,确

表1 岩心基础物性数据
Table 1 Core basic properties

岩心编号	直径/cm	长度/cm	孔隙度/%	气测渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
T1	2.52	5.6	10.0	0.1
T2	2.49	6.2	11.2	0.35
T3	2.51	5.0	12.9	1.2
T4	2.50	7.3	14.1	2.1
T5	2.49	6.8	15.0	3.6

定每个流量下流动稳定时对应的驱替压力,建立驱替压力梯度与流速曲线,获得启动压力梯度及非线性渗流曲线。实验过程中确保岩心含水饱和度不发生变化,即气体在岩心中流动时不会将水驱替出来。改变岩心的束缚水饱和度,重复以上流程,测试不同含水饱和度下的启动压力梯度。

岩心T2在含水饱和度分别为30%、40%、50%条件下压力梯度与流速的关系曲线如图1所示。每条曲线压力梯度最小的点为启动压力梯度,当压力梯度小于此值时,气体没有流速。另外,由图1可见压力梯度与流速不符合气体流动的达西规律,呈现非线性渗流特征。由于启动压力梯度的存在,流速随压力梯度的增加不是线性的,当压力梯度增加到

收稿日期:2015-09-17;修回日期:2015-10-27

基金项目:国家油气重大专项(2011ZX05007-001)

作者简介:汪益宁,高级工程师,研究方向为油气田开发,电子信箱:wangyn@zhenhuaoil.com

引用格式:汪益宁,王晖,曹淑慧,等.非线性渗流对低渗透气藏采收率的影响[J].科技导报,2016,34(2):147-151;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.023

一定值时,流速与压力梯度线性相关。随着含水饱和度增加,启动压力梯度越大,非线性特征越明显。

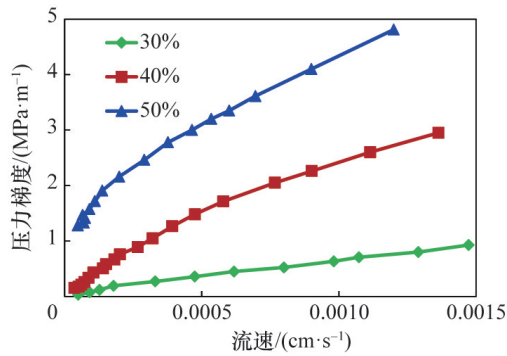


图1 压力梯度与流速的关系(T2岩心,不同含水饱和度)
Fig. 1 Relationship between pressure gradient and flow rate (T2, different water saturations)

岩心T2、T3、T4在含水饱和度40%的条件下压力梯度与流速的关系曲线如图2所示。由图2可见,渗透率对启动压力梯度也有较大影响。随着渗透率的增加,启动压力梯度随之减小。渗透率越低,启动压力梯度越大,非线性渗透特征

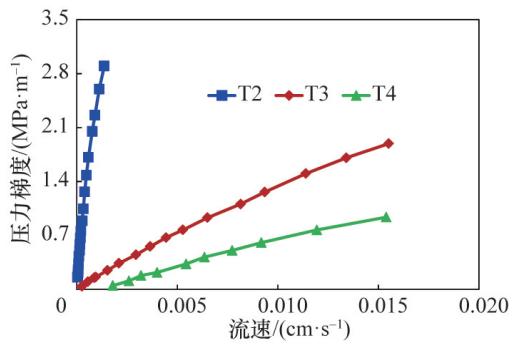


图2 不同渗透率条件下压力梯度与流速的关系
(含水饱和度40%)
Fig. 2 Relationship between pressure gradient and flow rate under different permeabilities (water saturation=40%)

越明显。

图3为T2、T3、T4岩心在含水饱和度为30%、40%、50%条件下启动压力梯度。可见,低渗气藏启动压力梯度受渗透率和含水饱和度的影响较大。随着渗透率的降低,启动压力梯度升高。当含水饱和度大于40%时,随着含水饱和度的增加,启动压力梯度急剧升高。

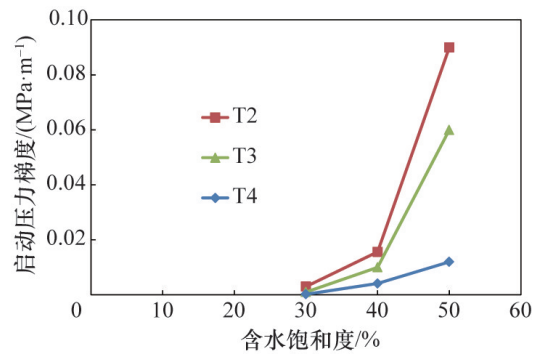


图3 启动压力梯度与含水饱和度的关系
Fig. 3 Relationship between start-up pressure gradient and water saturation

1.2 应力敏感性实验

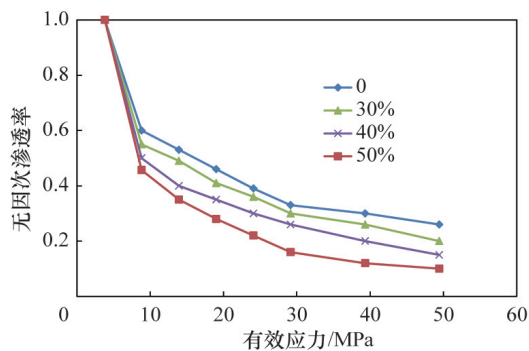
采用表1中T1、T5两块岩心开展了低渗气藏应力敏感性实验。实验方法参照中国石油天然气行业标准SY/T 5358—2002设计^[7],手摇泵施加围压,皂泡流量计测量低流速气体流量,用浮子流量计测量高速气体流量。

参照渗透率敏感性评价方法,对实验测得的渗透率进行了归一化处理。对于发生应力敏感性的储层,无因次渗透率与有效应力可以用指数关系表示^[8,9]:

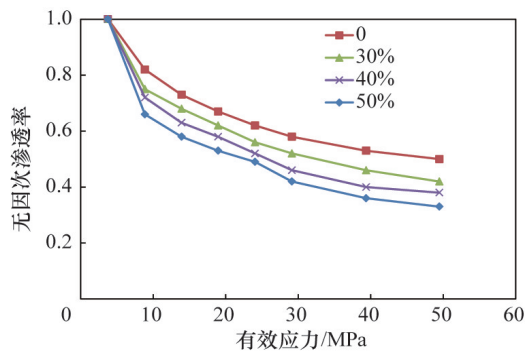
$$\frac{k}{k_i} = e^{-\alpha \Delta P} \quad (1)$$

其中, k_i 为初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; k 为有效应力下的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; α 为应力敏感性系数, MPa^{-1} ,反映渗透率对有效应力的敏感程度, α 越大,应力敏感性越强。

图4为岩心T1、T5在含水饱和度为0、30%、40%、50%的



(a) T1



(b) T5

图4 不同含水饱和度下应力敏感性曲线
Fig. 4 Curves of stress sensitivity under different water saturations

条件下应力敏感性曲线。由图可见,随着有效应力的增加,无因次渗透率逐渐下降,有效应力增加的初期,渗透率下降速度较快,随着有效应力的逐渐增加,渗透率下降速度逐渐减慢。当岩心受到的有效应力一定时,含水饱和度越高,应力敏感性造成的渗透率下降幅度越大,应力敏感性越强。

岩心 T1、T5 在含水饱和度为 0、30%、40%、50% 的应力敏感性系数如图 5 所示。随着含水饱和度的增加,两块岩心的应力敏感性系数均随之增加。含水饱和度增加初期,应力敏感性系数增加较缓慢,当含水饱和度超过 30%,应力敏感性系数升高速度较快。岩心孔喉中的赋存水一般存在于孔道壁上和喉道内,使得渗流通道变得更狭窄,因此含水饱和度增加了应力敏感性。同时,含水饱和度一定时,渗透率高的岩心 T5 的应力敏感性低于 T1,因为 T5 的渗透率较高,孔喉通道较宽,应力敏感性相对较弱。

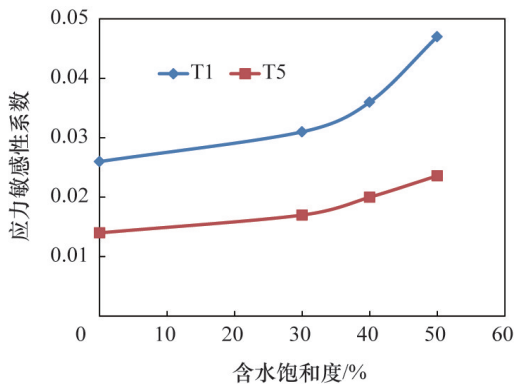


图5 不同含水饱和度下应力敏感性系数

Fig. 5 Coefficients of stress sensitivity under different water saturations

2 非线性渗流对低渗透气藏采收率的影响

通过以上实验研究发现,由于启动压力梯度和应力敏感性,低渗透气藏气体渗流过程中存在明显的非线性渗流。对此,实验研究与气藏工程理论相结合论证了非线性渗流对气藏采收率的影响。

采用压降法计算气藏采收率^[10]:

$$\frac{p}{Z} = \frac{p_i}{Z_i} \left(1 - \frac{G_p}{G} \right) \quad (2)$$

$$E_R = \frac{G_p}{G} = \left(1 - \frac{p/Z}{p_i/Z_i} \right)$$

其中, p 为当前地层压力, MPa; p_i 为原始地层压力, MPa; Z 为当前气体偏差系数, 无因次; Z_i 为原始气体偏差系数, 无因次; G_p 为气藏累计产气量, 10^8 m^3 ; G 为气藏静态地质储量, 10^8 m^3 ; E_R 为气藏最终采收率, %。

由式(2)可知,气藏最终采收率与废弃压力有关,气藏开发结束时地层废弃压力越低,采收率越高。而地层废弃压力受单井经济极限产量影响,前人通过分析大量的实际矿场生产数据^[11-13],认为低渗透气藏的单井极限经济产量大概为

$1000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。气藏开发过程中,随着地层压力的下降单井产量逐渐降低,当地层压力下降到某一值时,单井产量达不到经济极限产量,该地层压力即为废弃压力。而启动压力和应力敏感性会影响气井产能,因此研究非线性对低渗透气藏采收率的影响有一定的实际意义。

2.1 启动压力梯度对采收率的影响

假定低渗透气藏厚度为 15 m,泄流半径 800 m,原始地层压力 25 MPa,井筒半径 0.1 m,单井极限经济产量 $1000 \text{ m}^3/\text{d}$,考虑启动压力梯度的气井产能模型为式(3)^[14],式(2)与式(3)相结合计算不同渗透率的低渗透气藏,在不同启动压力梯度影响下的采收率。

$$Q_{sc} = \frac{774.6K h (P_c^2 - P_w^2) - 2\bar{P}\lambda(r_c - r_w)}{\bar{\mu}\bar{Z}T_i \ln\left(\frac{r_c}{r_w}\right)} \quad (3)$$

低渗透气藏渗透率分别为 0.3×10^{-3} 、 0.8×10^{-3} 、 $1.5 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$ 情况下启动压力梯度对采收率的影响如图 6 所示。首先由于渗透率越低的气藏,当气井产量达到单井经济极限产量时的地层废弃压力越高,从而采收率越低,因此当启动压力一定时,渗透率越高的气藏采收率越高。另外,当渗透率一定时,随着启动压力的增加,不同渗透率的气藏采收率都会下降。

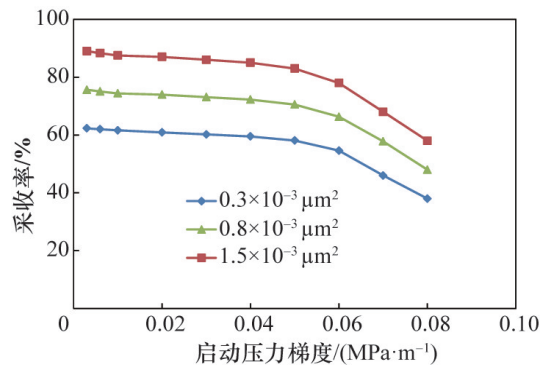


图6 启动压力梯度对采收率的影响

Fig. 6 Effect of start-up pressure gradient on recovery factors

对于存在启动压力梯度的低渗透气藏,可以通过加密井网、缩小井距提高生产压差来提高采收率,同时,由于启动压力梯度受含水饱和度和渗透率的影响,也可以通过降低含水饱和度、储层改造的方式提高采收率。

2.2 应力敏感性对采收率的影响

假定低渗透气藏厚度为 15 m,泄流半径 800 m,原始地层压力 25 MPa,井筒半径 0.1 m,单井极限经济产量 $1000 \text{ m}^3/\text{d}$,考虑应力敏感性的气井产能模型为式(4)^[14],式(2)与式(4)相结合计算不同渗透率的低渗透气藏,在不同应力敏感性影响下的采收率。

$$Q_{sc} = \frac{1549.2k_o h e^{-\alpha p_i}}{\bar{\mu}\bar{Z}T_i \ln\frac{r_c}{r_w}} \left[\frac{1}{\alpha} (p_c e^{\alpha p_c} - p_w e^{\alpha p_w}) - \frac{1}{\alpha^2} (e^{\alpha p_c} - e^{\alpha p_w}) \right] \quad (4)$$

低渗气藏渗透率分别为 0.3×10^{-3} 、 0.8×10^{-3} 、 $1.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 情况下应力敏感性对采收率的影响如图7所示。同样渗透率越低的气藏,相同生产压差情况下单井产能越低,当气井产量达到单井经济极限产量时的地层废弃压力越高,从而采收率越低,因此应力敏感系数一定时,渗透率越低的气藏采收率越低。对于渗透率一定的气藏,随着应力敏感性的增强,单井产能降低,单井产能降到经济极限产量的地层废弃压力升高,采收率降低。不同渗透率的气藏表现为相同趋势。

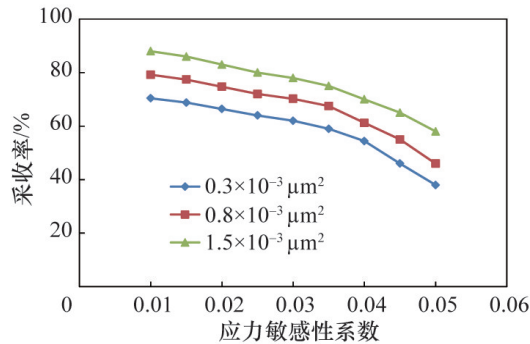


图7 应力敏感性对采收率的影响

Fig. 7 Effect of stress sensitivity on recovery factors

根据以上实验研究结论,对于存在应力敏感性的低渗透气藏,渗透率越低,含水饱和度越高,应力敏感性系数越大,应力敏感性越强,最终采收率越低。因此对于低渗透气藏,应该适当控制生产压力,避免地层压力迅速下降。另外,在低渗透气藏开发部署时,尽量寻找较高渗透率和较低含水饱和度的储层,优先开发。同时,储层改造、降低含水饱和度也是提高存在应力敏感性的低渗透气藏采收率的有效途径。

3 结论

1) 由于启动压力梯度的存在,气体在低渗透气藏中的流动为非线性渗流。启动压力梯度受渗透率和含水饱和度的影响,渗透率越低,含水饱和度越高,启动压力梯度越大,非线性特征越明显。

2) 低渗透气藏开采过程中随着地层压力降低,有效应力增加,渗透率随之降低,存在较强的应力敏感性,引起气体的非线性渗流。应力敏感性与储层绝对渗透率和含水饱和度相关,绝对渗透率越低,含水饱和度越高,应力敏感性越强。

3) 非线性渗流对低渗透气藏采收率有较大影响。启动压力梯度越大、应力敏感性越强的气藏,最终地层废弃压力越高,采收率越低。在低渗透气藏开发部署时,尽量寻找较高渗透率和较低含水饱和度的储层,优先开发。同时,井网加密调整、储层改造、降低含水饱和度也是提高低渗透气藏采收率的有效途径。

参考文献 (References)

- [1] 郭平, 张茂林, 黄全华, 等. 低渗透致密砂岩气藏开发机理研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
Guo Ping, Zhang Maolin, Huang Quanhua, et al. Low permeability tight sandstone gas reservoir development mechanism[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [2] 公言杰, 柳少波, 姜林, 等. 致密砂岩气非达西渗流规律与机制实验研究——以四川盆地须家河组为例[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(6): 804-809.
Gong Yanjie, Liu Shaobo, Jianglin, et al. Experimental study of seepage characteristic and mechanism in tight gas sands: A case from xujiahe reservoir of Sichuan basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(6): 804-809.
- [3] 熊健, 黄亮, 崔玲. 非线性流下井筒压降影响的水平井产能分析[J]. 科技导报, 2012, 30(35): 33-38.
Xiong Jian, Huang Liang, Cui Ling. Effect of wellbore pressure drop on the horizontal well productivity with non-linear seepage[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(35): 33-38.
- [4] Fulton P F. The effect of gas slippage on relative permeability measurements[J]. Producers Monthly, 1951, 15(12): 14-19.
- [5] 朱光亚, 刘先贵, 李树铁, 等. 低渗气藏气体渗流滑脱效应影响研究[J]. 天然气工业, 2007, 27(5): 44-47.
Zhu Guangya, Liu Xiangui, Li Shutie, et al. A study of slippage effect of gas percolation in low permeability gas pools[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(5): 44-47.
- [6] 罗瑞兰, 程林松, 朱华银, 等. 研究低渗气藏气体滑脱效应需注意的问题[J]. 天然气工业, 2007, 27(4): 92-94.
Luo Ruilan, Cheng Linsong, Zhu Huayin, et al. Problems on the study of slippage effect in low permeability[J]. Gas Reservoirs Natural Gas Industry, 2007, 27(4): 92-94.
- [7] 于忠良, 熊伟, 高树生, 等. 致密储层应力敏感性及其对油田开发的影响[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 95-98.
Yu Zhongliang, Xiong Wei, Gao Shusheng, et al. Stress sensitivity of tight reservoir and its influence on oilfield development[J]. Acta Petrole Sinica, 2007, 28(4): 95-98.
- [8] 王新海, 宋岩, 王玮, 等. 塔里木油田砂岩储层压力敏感系数变化规律研究[J]. 钻采工艺, 2008, 31(1): 66-67.
Wang Xinhai, Songyan, Wangwei, et al. Variation law of coefficient of sensitivity to pressure in sandstone reservoir in tarm oilfield[J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(1): 66-67.
- [9] 赵明跃, 王新海, 雷霆, 等. 储层参数压力敏感性研究[J]. 油气井测试, 2001, 10(4): 3-4.
Zhao Mingyue, Wang Xinhai, Lei Ting, et al. Study on sensitivity to pressure on reservoir factors[J]. Well Testing, 2001, 10(4): 3-4.
- [10] 李士伦. 天然气工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
Li Shilun. Gas engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [11] 田冷, 李杰, 何顺利, 等. 储层流动单元划分方法在苏里格气田的应用[J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 44-46.
Tian Leng, Li Jie, He Shunli, et al. Application of the division method of reservoir flow unit in sulige gas field[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(10): 44-46.
- [12] 毛美丽, 李跃刚, 王宏, 等. 苏里格气田气井废弃产量预测[J]. 天然气工业, 2010, 30(4): 64-66.
Mao Meili, Li Yuegang, Wang Hong, et al. Prediction of gas well aban-

- donment production in the Sulige gas field[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(4): 64-66.
- [13] 李涛, 王乐之. 天然气藏可采储量标定新思路及增加可采储量的技术途径[J]. 断块油气田, 2000, 7(4): 45-47.
- Li Tao, Wang Lezhi. Thought of recoverable reserves calibration for natural gas and technical method to improve recoverable reserve[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2000, 7(4): 45-47.
- [14] 黄全华, 王富平, 尹琅, 等. 低渗气藏气井产能与动态储量计算方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- Huang Quanhua, Wang Fuping, Yin Lang, et al. The computing methods of productivity and dynamic reserves for low permeability gas reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.

Effect of nonlinear percolation on recovery factor of low permeability gas reservoirs

WANG Yining¹, WANG Hui¹, CAO Shuhui¹, NI Jun², MEI Shisheng¹, OUYANG Jingyun¹

1. Zhenhua Oil Co., Ltd., CNIGC, Beijing 100031, China

2. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an 710075, China

Abstract Non-linear seepage generally exists in the development of low permeability gas reservoirs. It is meaningful to study the effect of non-linear seepage on recovery factors for reasonably exploiting these low permeability gas reservoirs. Cores from the Tarim gas field are adopted and non-linear seepage experiments are conducted under different permeabilities and different water saturations. The experiment results show that low permeability gas reservoirs exhibit a start-up pressure gradient and strong stress sensitivity. The lower the permeability and the higher the water saturation, the larger the start-up pressure gradient, the stronger the stress sensitivity, and the more obvious the non-linear seepage behavior. Non-linear seepage impacts the recovery factor of low permeability gas reservoirs strongly. With the increase of start-up pressure gradient and stress sensitivity, the abandonment pressure of the gas field rises, and the recovery factor declines. During the development and deployment of low permeability gas reservoirs, the area with high permeability and low water saturation should be exploited firstly. Furthermore, well pattern infilling, reservoir stimulation and reducing water saturation are the effective methods to improve the recovery factor of low permeability reservoirs.

Keywords non-linear flow; low permeability; recovery factor; stress sensitivity; start-up pressure gradient

(责任编辑 刘志远)