

考虑非达西渗流的致密气藏采收率计算新方法

何文发¹ 杨国军¹ 曾 丽¹ 陈伟敏¹ 查 蓓¹ 王庆鹏² 王 正²

1. 中国石油天然气集团有限公司青海油田采气三厂, 甘肃 敦煌 736202;

2. 北京斯堪帕维科技有限公司, 北京 100101

摘 要: 天然气在致密气藏储层条件下流动呈非达西渗流特征, 存在启动压力梯度, 压裂是提高致密气藏采收率的重要手段。为提高致密气藏采收率预测精度, 利用气藏工程方法, 综合考虑启动压力梯度和不同井型渗流形态, 推导了常规直井、压裂直井、常规水平井、压裂水平井的采收率计算公式, 提出了致密气藏采收率计算新方法, 并以 X 致密气藏为例, 进一步研究了启动压力梯度、压差、半缝长、裂缝间距、压裂水平井长度等致密气藏采收率影响因素。结果表明: 致密气藏采收率随启动压力梯度的增大而降低, 压裂井采收率降幅明显小于常规井采收率降幅。对于压裂直井, 随着半缝长增加, 采收率提高, 但增幅变缓, 存在最优值; 对于压裂水平井, 半缝长对采收率的影响比裂缝间距对采收率的影响更大, 且在一定泄气范围内存在水平段最优长度。矿场实例应用表明, 致密气藏采收率计算新方法计算精度满足工程要求, 能够指导致密气藏开发设计优化。致密气藏采收率计算新方法对致密气藏压裂设计及采收率计算具有重要指导意义。

关键词: 致密气藏; 启动压力梯度; 采收率; 压裂井; 影响因素

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.04.011

A new method for calculating recovery of tight gas reservoir considering non-Darcy seepage

HE Wenfa¹, YANG Guojun¹, ZENG Li¹, CHEN Weimin¹, ZHA Bei¹, WANG Qingpeng², WANG Zheng²

1. Gas Production Plant 3 of Qinghai Oilfield CNPC, Dunhuang, Gansu, 736202, China;

2. Essca Energy Service Company Limited, Beijing, 100101, China

Abstract: The seepage of gas in tight reservoir condition is non-Darcy. There exists threshold pressure gradient during the seepage in tight gas reservoir. Fracturing is an important method to improve the recovery of tight gas reservoir. To improve the prediction accuracy of recovery of tight gas reservoir, with the threshold pressure gradient and the seepage patterns of different well types taken into account, the calculation formulas for the recovery factor of conventional vertical well, fracturing vertical well, conventional horizontal well, and fracturing horizontal well were deduced using the gas reservoir engineering method. The effects of different parameters on tight gas recovery were further discussed relying on X tight gas reservoir. The results showed that the tight gas recovery decreased with the increment of threshold pressure gradient, and the decreasing amplitude of gas recovery of fractured well was obviously smaller than that of conventional well. For the vertical fractured well, the gas recovery increased with the increasing of

收稿日期: 2022-04-01

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技重大专项“柴达木盆地老气区控水稳气及新气区高效开发技术研究”(2016E-0106GF)

作者简介: 何文发(1988-), 男, 湖南郴州人, 工程师, 学士, 长期从事气田开发相关工作。E-mail: hewfqh@petrochina.com.cn

half-length and there existed an optimum length value. For the horizontal fractured well, the effect of half-length on gas recovery is more sensitive than fracture spacing. There is an optimal well length under a certain drainage area. The field application shows that the new method has a high calculation accuracy satisfying the engineering requirements, which can guide the design optimization of tight gas reservoir.

Keywords: Tight gas reservoir; Threshold pressure gradient; Gas recovery; Fractured well; Influencing factors

0 前言

中国致密气资源丰富,其勘探开发受到越来越多的关注^[1-2]。不同于常规气藏,致密气藏储层物性差,依靠弹性能量衰竭式开发时,气体在储层中流动呈非达西渗流特征,压力梯度需大于一定数值(即启动压力梯度),气体才能流动^[3-7]。

采收率是致密气藏经济开发决策的重要依据,也是开发方案优化设计的重要指标,加砂压裂是目前提高致密气藏采收率的通用技术手段^[8-10]。废弃压力是确定气藏采收率的关键参数,而对于致密气藏,启动压力梯度会对废弃压力的确定产生明显影响,进而影响致密气藏采收率的合理计算^[11-15]。目前,关于启动压力梯度对低渗透油藏开发效果及指标的影响已有广泛研究,但对致密气藏开发指标的影响鲜有报道^[16-17]。

本文利用气藏工程方法,建立了一套综合考虑启动压力梯度和不同井型(常规直井、压裂直井、常规水平井、压裂水平井)渗流形态的致密气藏采收率计算新方法。在此基础上,考虑压裂增产措施,研究生产压差、半缝长、裂缝间距等压裂参数对采收率的影响,以期进一步指导致密气藏压裂方案设计。

1 采收率计算方法

对于致密气藏定容开发,计算采收率通常采用物质平衡方法^[16]:

$$E = 1 - \frac{z_i p_a}{z_a p_i} \quad (1)$$

式中: E 为采收率; p_i 、 p_a 分别为常规气藏原始地层压力和废弃压力,MPa; z_i 、 z_a 分别为 p_i 、 p_a 下的气体压缩因子;下标*i*、*a*分别为常规气藏原始状态和废弃状态。

式(1)中 p_a 是计算采收率的关键,在不考虑技术经济条件时,假设致密气藏开发直至结束,此时 p_a 可取生产井最低井底流压。

对于致密气藏,当泄气范围内任意一点驱替压力梯度与启动压力梯度相等时,开发结束。此时,泄气范围内任意一点地层压力为:

$$p(r) = p_{wf} + Gr \quad (0 < r < r_{lim}) \quad (2)$$

式中: p 为地层压力,MPa; G 为启动压力梯度,MPa/m;

p_{wf} 为井底流压,MPa; r 为泄气半径,m; r_{lim} 为极限泄气半径,m。

利用常规采收率计算方法,废弃压力 $p_a = p_{wf}$ 。考虑启动压力梯度,泄气范围内任意一点压力为 $p_a + Gr$,因此,需要计算废弃压力并对式(1)中 p_a 进行修正,才能得到准确的致密气藏采收率。修正后的采收率公式为:

$$E = 1 - M \frac{z_i p_a}{z_a p_i} \quad (3)$$

$$M = \bar{p}_a / p_a \quad (4)$$

式中: M 为压力校正系数; $\bar{p}_a$ 为平均废弃压力,MPa。

2 考虑启动压力梯度的压力校正系数

2.1 单相气体平面线性渗流

假设致密气藏边界处为供给边缘,气井处为排气通道,气体从供给边缘单向流向排气通道。地层两端间距为 A ,开发期末平均地层压力(即平均废弃压力)为:

$$\bar{p}_a = \frac{1}{A(r_{max} - r_w)} \int_0^A \int_0^{r_{max}} (p_{wf} + Gx) dx dy \quad (5)$$

式中: A 为地层两端距离,m; r_{max} 为实际泄气半径,m; r_w 为气井半径,m。

结合式(4),可得平面线性渗流状态下压力校正系数 M_p 为:

$$M_p = \left(1 + \frac{1}{2} \frac{Gr_{max}}{p_a} \right) \quad (6)$$

2.2 单相气体平面径向渗流

假设1口常规直井位于致密气藏中心,气体从供给边缘径向地流向生产井,则开发期末平均地层压力为:

$$\bar{p}_a = \frac{1}{\pi(r_{max}^2 - r_w^2)} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{max}} (p_{wf} + Gr) r dr d\theta \quad (7)$$

结合式(4),可得平面径向流动下压力校正系数 M_R 为:

$$M_R = \left(1 + \frac{2}{3} \frac{Gr_{max}}{p_a} \right) \quad (8)$$

对比式(6)和式(8),在相同启动压力梯度和泄气半径下, $M_R > M_p$,结合式(3)可知平面线性渗流状态下采收率更高。

3 致密气藏采收率计算新方法

当致密气藏采用不同井型压裂开发时,井筒及裂缝

附近气体渗流形态可用上述单相气体平面线性渗流和单相气体平面径向渗流的形态综合表征,进而计算得到考虑启动压力梯度的不同渗流形态综合压力校正系数:

$$M = \sum M_j V_j / \sum V_j \quad (9)$$

式中: M_j 为不同渗流形态压力校正系数; V_j 为不同渗流形态对应的渗流体积, m^3 ; 下标 j 为采用不同井型压裂开发时气体的不同渗流形态。

3.1 常规直井开发采收率计算方法

假设1口常规直井位于供给半径为 R_e 的圆形气藏中心位置(若实际井网单井控制面积为 S , $R_e = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$), 则渗流形态为平面径向渗流,由式(3)和式(8)可得:

$$E_v = 1 - \left(1 + \frac{2}{3} \frac{Gr_{\max}}{p_a}\right) \frac{z_i p_a}{z_a p_i} \quad (10)$$

式中: E_v 为常规直井开发致密气藏采收率。

3.2 压裂直井开发采收率计算方法

压裂直井渗流场模型见图1。垂直裂缝方向近似为平面线性渗流,裂缝端部近似为平面径向渗流。

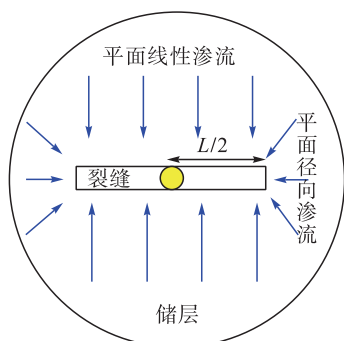


图1 压裂直井渗流场模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of seepage model of fractured vertical well

对于平面线性渗流,由式(6)可得:

$$M_1 = \left(1 + \frac{1}{2} \frac{GR_e}{p_a}\right) \quad (11)$$

式中: M_1 为平面线性渗流对应综合压力校正系数。

其渗流对应体积:

$$V_1 = 2R_e L h \quad (12)$$

式中: V_1 为平面线性渗流对应体积, m^3 ; L 为压裂缝长, m ; h 为气层有效厚度, m 。

对于平面径向流,由式(8)可得:

$$M_2 = \left(1 + \frac{2}{3} \frac{G \sqrt{R_e \left(R_e - \frac{2L}{\pi}\right)}}{p_a}\right) \quad (13)$$

式中: M_2 为平面径向渗流对应综合压力校正系数。

其渗流对应体积:

$$V_2 = \pi R_e^2 h - 2R_e L h \quad (14)$$

式中: V_2 为平面径向渗流对应体积, m^3 。

联合式(3)、(9)以及式(11)~(14),可得:

$$E_{vf} = 1 - \left(\frac{\sum_{j=1}^2 M_j V_j}{\pi R_e^2 h} \right) \frac{z_i p_a}{z_a p_i} \quad (15)$$

式中: E_{vf} 为压裂直井开发致密气藏采收率。

3.3 常规水平井开发采收率计算方法

对于常规水平井开发,若忽略近井区域渗流,亦可将渗流形态简化为平面线性渗流和平面径向渗流。将图1中压裂直井压裂缝长取为常规水平井长度,则常规水平井开发采收率可用式(15)计算。

3.4 压裂水平井开发采收率计算方法

对于多段压裂水平井^[17-20],假设在水平段上均匀分布 n 条裂缝,半缝长为 L_f ,渗流形态可以简化为3个平面线性渗流。压裂水平井渗流场模型见图2。

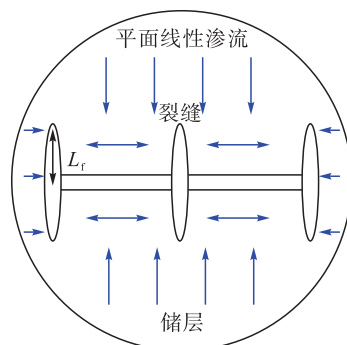


图2 压裂水平井渗流场模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of seepage model of fractured horizontal well

对于垂直裂缝间渗流,由式(6)可得:

$$M_3 = \left(1 + \frac{1}{2} \frac{G \frac{L}{2(n-1)}}{p_a}\right) \quad (16)$$

式中: M_3 为垂直裂缝间线性渗流对应综合压力校正系数。

其渗流对应体积:

$$V_3 = 2LL_f h \quad (17)$$

式中: V_3 为垂直裂缝间线性渗流对应体积, m^3 。

对于平行井间渗流,由式(6)可得:

$$M_4 = \left(M_3 + \frac{1}{2} \frac{G(R_e - L_f)}{p_a}\right) \quad (18)$$

式中: M_4 为平行井间线性渗流对应综合压力校正系数。

其对应渗流体积:

$$V_4 = 2(R_e - L_f) L h \quad (19)$$

式中: V_4 为平行井间线性渗流对应体积, m^3 。

对于井两端的线性渗流,由式(6)可得:

$$M_5 = \left(1 + \frac{G(\pi R_e^2 - 2R_e L)}{4L_f p_a}\right) \quad (20)$$

式中: M_5 为两端线性渗流对应综合压力校正系数。

其对应渗流体积:

$$V_5 = (\pi R_e^2 - 2 R_e L) h$$

(21)

式中： V_5 为两端线性渗流对应体积， m^3 。

联合式(3)、(9)以及式(16)~(21)，可得：

$$E_{\text{hf}} = 1 - \left(\frac{\sum_{j=3}^5 M_j V_j}{2 R_e L h} \right) \frac{z_i P_a}{z_a P_i}$$

(22)

式中： E_{hf} 为压裂水平井开发致密气藏采收率。

表 1 X 致密气藏基础参数表

Tab. 1 Parameters of X tight gas reservoir

原始地层 压力 /MPa	原始地层压力下 气体压缩因子	废弃压力下气 体压缩因子	水平井 长度 /m	裂缝半 长 /m	启动压力梯度 / (MPa·m ⁻¹)	气井井底 流压 /MPa	泄气半 径 /m	气层有效 厚度 /m	水平井裂 缝数 /条
21	0.998	1	500	100	0.02	5	400	20	10

4.1 启动压力梯度

不同启动压力梯度下 4 种井型的致密气藏采收率见图 3。应用常规方法计算 4 种井型下的采收率均为 75%，考虑启动压力梯度后，致密气藏采收率明显降低，随启动压力梯度增大致密气藏采收率近似呈直线降低，且压裂井采收率较常规井采收率降速明显变缓，表明压裂改造能有效改善致密气藏渗流开发效果，启动压力梯度越大，改善效果越明显，越适合采用压裂井开发。

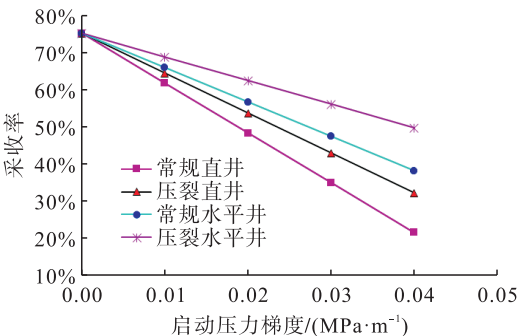


图 3 致密气藏采收率随启动压力梯度变化规律图

Fig. 3 Variation of recovery factor of tight gas reservoirs with threshold pressure gradient

4.2 压差

不同压差下(原始地层压力与废弃时生产井井底流压之差)的致密气藏采收率见图 4。

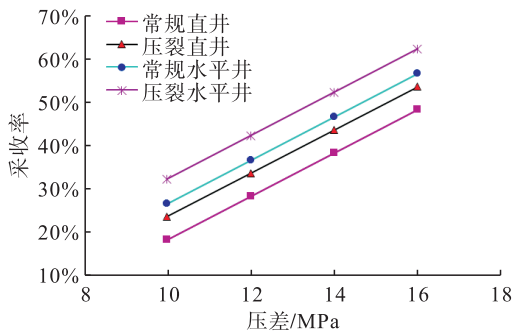


图 4 致密气藏采收率随压差变化规律图

Fig. 4 Variation of recovery factor of tight gas reservoirs with differential pressure

4 致密气藏采收率影响因素

X 致密气藏位于鄂尔多斯盆地东缘，先后采用常规直井、压裂直井、常规水平井、压裂水平井 4 种井型进行天然能量开发，该致密气藏基础参数见表 1。利用新建的方法计算了不同井型开发方式的采收率，并对影响因素进行了分析。

由图 4 可见，致密气藏采收率随压差的增加近似线性提高。从压差对致密气藏采收率贡献率的角度分析，单位压差下的致密气藏采收率见图 5。

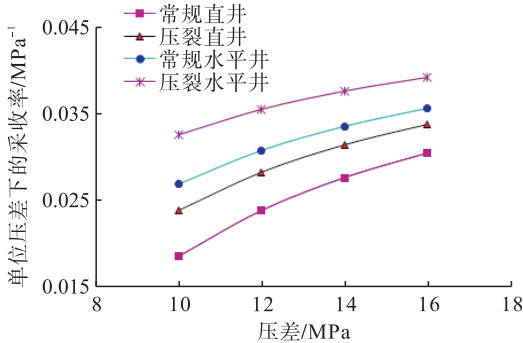


图 5 单位压差下的致密气藏采收率随压差变化规律图

Fig. 5 Variation of recovery factor per unit of tight gas reservoirs with differential pressure

由图 5 可见，致密气藏单位压差下的采收率随压差的增加而提高，但增幅逐渐变缓，表明随压差的增加，可以更好地克服启动压力梯度的影响，提高动用程度，进而提高致密气藏采收率。

4.3 压裂直井半缝长

对于压裂直井，不同半缝长时致密气藏采收率变化规律见图 6。

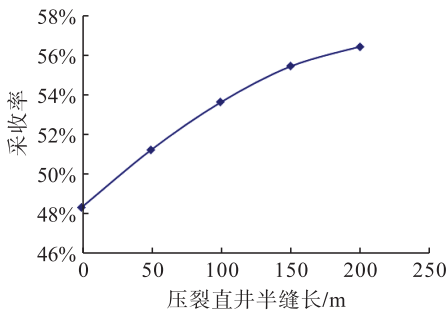


图 6 致密气藏采收率随压裂直井半缝长的变化规律图

Fig. 6 Variation of recovery factor of tight gas reservoirs with half fracture length of fractured vertical well

随着半缝长的增加,致密气藏采收率增大,但增幅逐渐变缓,当半缝长达到 150 m 以上时,致密气藏采收率增幅明显变缓,出现拐点,为算例最优压裂半缝长。

4.4 压裂水平井半缝长和裂缝间距

对于水平段长度为 500 m 的压裂水平井,不同半缝长及裂缝间距下致密气藏采收率见图 7。增加半缝长或缩短裂缝间距均可提高致密气藏采收率,但前者作用更明显,尤其当裂缝间距小于 100 m 后,采收率增幅非常有限。因此,对于水平井压裂开发的致密气藏而言,宜采用相对“稀、长缝”而非“短、密缝”。

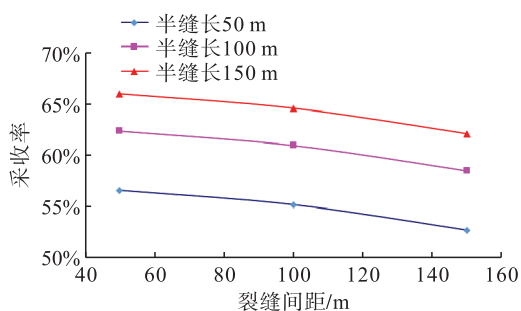


图 7 致密气藏采收率随压裂水平井半缝长和裂缝间距变化规律图

Fig. 7 Variation of recovery factor of tight gas reservoirs with half fracture length and spacing of fractured horizontal well

4.5 压裂水平井长度

对于压裂水平井,假设每隔 50 m 间距增加 1 条压裂缝,不同长度压裂水平井的致密气藏采收率见图 8。

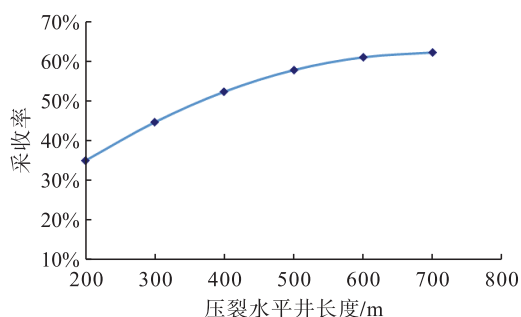


图 8 致密气藏采收率随压裂水平井长度变化规律图

Fig. 8 Variation of recovery factor of tight gas reservoirs with fractured horizontal well length

从图 8 可见,随压裂水平井长度的增加致密气藏采收率提高,但增幅逐渐变缓,压裂水平井长度大于 600 m 以后增幅很小。不同的泄气范围存在不同最优压裂水平井长度,实际应用中,应结合气藏特征、工艺技术条件和经济性综合评价对压裂水平井长度进行优化。

5 矿场实例

X-3 井为 X 致密气藏 2020 年投产的 1 口多段压裂水平井,共压裂 24 段,水平段长度 560 m,井区平均储层

厚度 14.3 m,孔隙度 12.3%,渗透率 1.69 mD,含气饱和度 59.3%,地层压力 15.2 MPa,生产压差 11.0 MPa,压力恢复试井解释平均半缝长 82 m、启动压力梯度 0.045 MPa/m。利用致密气藏采收率计算新方法计算该井采收率为 31.4%,与利用现代生产分析 Blasigame 方法计算得出的采收率 29.6% 接近。利用新方法计算 X 致密气藏 3 口压裂直井和 5 口压裂水平井的采收率,与现代生产分析 Blasigame 方法计算结果对比,平均相对误差分别为 5.7% 和 6.2%,表明新方法的计算精度较高,且新方法具有计算简单、快速的优势,能够为开发方案设计优化提供决策依据。

6 结论

1) 致密气藏渗流存在启动压力梯度,对致密气藏采收率影响较大,常规方法计算得出的致密气藏采收率偏小、误差较大,需进行修正。

2) 受启动压力梯度影响,不同渗流形态下致密气藏采收率不同,通过压裂可将常规的径向渗流改变为线性渗流,进而提高致密气藏采收率。

3) 致密气藏采收率随压差和半缝长的增加而提高,但增幅不同且逐渐变缓,存在最优值;致密气藏采收率随裂缝间距的缩短而提高。

4) 致密气藏采收率计算新方法考虑了致密气藏存在的启动压力梯度,适用于常规直井、压裂直井、常规水平井、压裂水平井衰竭开发情形下致密气藏采收率的理论计算。

5) 矿场实例应用表明致密气藏采收率新方法计算精度较高,满足矿场工程要求,可用于指导致密气藏开发和压裂设计。

参考文献:

- [1] 马新华,贾爱林,谭健,等. 中国致密砂岩气开发工程技术与实践[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 572-579.
MA Xinhua, JIA Ailin, TAN Jian, et al. Tight sand gas development technologies and practices in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 572-579.
- [2] 卢涛,刘艳侠,武力超,等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田致密砂岩气藏稳产难点与对策[J]. 天然气工业, 2015, 35(6): 43-52.
LU Tao, LIU Yanxia, WU Lichao, et al. Challenges to and countermeasures for the production stabilization of tight sandstone gas reservoirs of the Sulige Gasfield, Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(6): 43-52.
- [3] 凌云,李宪文,慕立俊,等. 苏里格气田致密砂岩气藏压裂技术新进展[J]. 天然气工业, 2014, 34(11): 66-72.
LING Yun, LI Xianwen, MU Lijun, et al. New progress in

- fracturing technologies for tight sandstone gas reservoirs in the Sulige Gas Field, Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34 (11): 66-72.
- [4] 李 奇. 致密砂岩气藏采收率影响机理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- LI Qi. Study on influence mechanism of recovery in tight sandstone gas reservoir [D]. Beijing University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [5] 李 尧. 致密气藏理论采收率标定方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- LI Yao. Study on calibration method of theoretical recovery rate of tight gas reservoir [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [6] 汪益宁, 王 晖, 曹淑慧, 等. 非线性渗流对低渗气藏采收率的影响[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 147-151.
- WANG Yining, WANG Hui, CAO Shuhui, et al. Effect of nonlinear percolation on recovery factor of low permeability gas reservoirs [J]. Science & Technology Review, 2016, 34 (2): 147-151.
- [7] 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, JIANG Lin, 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.
- [8] 李 洋, 雷 群, 刘先贵, 等. 微尺度下的非线性渗流特征[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(3): 336-340.
- LI Yang, LEI Qun, LIU Xiangui, et al. Characteristics of micro scale nonlinear filtration [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38 (3): 336-340.
- [9] 张汝生, 李克智, 黄志文. 定北区块致密气储层水平井压裂参数优化[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(2): 249-253.
- ZHANG Rusheng, LI Kezhi, HUANG Zhiwen. Horizontal well fracturing parameter optimization for the tight gas reservoir in Dingbei Block [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39 (2): 249-253.
- [10] 王道成, 李 闽, 乔国安, 等. 天然气启动压力梯度实验研究[J]. 钻采工艺, 2007, 30(5): 53-55.
- WANG Daocheng, LI Min, QIAO Guoan, et al. Experimental study of gas starting pressure gradient [J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30 (5): 53-55.
- [11] 胡 勇. 气体渗流启动压力实验测试及应用[J]. 天然气工业, 2010, 30(11): 48-50.
- HU Yong. Experimental test analysis of the threshold pressure in tight sandstone gas flow: A case study of the Sulige Gas Field [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30 (11): 48-50.
- [12] 章 星, 杨胜来, 张 洁, 等. 致密低渗气藏启动压力梯度实验研究[J]. 特种气气藏, 2011, 18(5): 103-104.
- ZHANG Xing, YANG Shenglai, ZHANG Jie, et al. Experimental study on threshold pressure gradient of tight and low permeability gas reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18 (5): 103-104.
- [13] 张晓亮, 杨仁锋, 李 娜. 考虑启动压力梯度的弹性采收率计算方法及影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(2): 72-77.
- ZHANG Xiaoliang, YANG Renfeng, LI Na. Computing method and influencing factors of natural depletion oil recovery in consideration of threshold pressure gradient [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22 (2): 72-77.
- [14] 李 奇, 高树生, 杨朝蓬, 等. 致密砂岩气藏阈压梯度对采收率的影响[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(9): 1444-1450.
- LI Qi, GAO Shusheng, YANG Zhaopeng, et al. Influence of the threshold pressure gradient on tight sandstone gas reservoir recovery [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25 (9): 1444-1450.
- [15] 牟松茹, 张士诚, 张 平. 考虑启动压力梯度的致密气藏压裂井产能分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(34): 8434-8437.
- MU Songru, ZHANG Shicheng, ZHANG Ping. Production analysis of hydraulic wells in tight gas reservoir considering of start-up pressure gradient [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11 (34): 8434-8437.
- [16] 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.
- [17] 王修朝. 致密砂岩气藏井型优化方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(4): 166-170.
- WANG Xiuchao. Optimizing method of the well type in tight sandstone gas reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37 (4): 166-170.
- [18] 赵 阳. 八屋致密砂岩气藏压裂水平井开发技术对策研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- ZHAO Yang. Study on policy of fractured horizontal well development technique for Ba Wu tight gas reservoirs [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [19] 董旭阳. 致密气藏分段压裂水平井生产数据分析方法[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- DONG Xuyang. A method about analyzing the production data of multiple-fractured horizontal wells in tight gas reservoirs [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [20] 曹丽娜. 致密气藏不稳定渗流理论及产量递减动态研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- CAO Lina. Research on unsteady percolation theory and rate transient analysis in tight gas reservoirs [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.