

胜利油田低渗透水驱油藏含水变化特征及影响因素

王建忠¹, 于新畅¹, 孙志刚², 李荣强¹, 徐进杰¹

[1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257000]

摘要:生产中含水率的变化特征在一定程度上可以反映水驱油效果的好坏。见水早、含水上升快、水驱油效率低等问题一直困扰着低渗透油藏开发。水驱油藏含水率的变化问题属于岩石中油水两相渗流的范畴,含水变化特征必然决定于岩石物性、油水特征和驱动力等因素。针对胜利油田低渗透水驱油藏,通过大量实验数据分析了储层孔隙结构特征、原始含水饱和度、应力敏感性和驱替压力等因素对含水率变化和水驱油效率的影响。研究发现孔隙的连通性是影响含水上升规律的重要因素,而初始含水率主要是由原始含水饱和度决定,适当的控制驱替压力有利于控制含水率,提高水驱油效率。考虑到低渗透储层渗透率的应力敏感性,建议实施超前注水,避免压力下降造成的渗透率伤害,从而利于提高水驱油效率。

关键词:含水率;水驱油效率;应力敏感;低渗透油藏;水驱油藏;渤海湾盆地

中图分类号:TE348

文献标识码:A

Characteristics and influential factors of water cut change in low permeability water-drive oil reservoirs in Shengli oilfield

Wang Jianzhong¹, Yu Xinchang¹, Sun Zhigang², Li Rongqiang¹, Xu Jinjie¹

[1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Exploration and Development Research Institute of Shengli Oilfield Branch Co., Ltd., SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China]

Abstract: The characteristic change of water cut can reflect the effectiveness of waterflooding to some extent. Early water breakthrough, fast water cut rise, and low efficiency of waterflooding have always been the obstacles preventing the development of low permeability reservoirs. Variation of water cut in waterflooding oil reservoirs involves two-phase flow of oil and water in rocks, thus is controlled by petrophysical property, oil-water features and driving force. In regard to the low permeability water-drive oil reservoirs in Shengli oilfield, we analyzed the factors influencing the variation of water cut and waterflood efficiency based on large amounts of experimental data. These factors are characteristics of reservoir pore structure, original water saturation, stress sensitivity and displacement pressure. The results show that pore connectivity is the major factor for water cut rising, while the initial water cut mainly depends on original water saturation. Appropriate control on displacement pressure is beneficial for controlling water cut and increasing waterflood efficiency. Considering the stress sensitivity of permeability in low permeability reservoirs, we suggested the implementation of advanced water injection to avoid the permeability damage caused by pressure drop, so as to improve waterflood efficiency.

Key words: water cut, waterflood efficiency, stress sensitivity, low permeability reservoir, water-drive oil reservoir, Bohai Bay Basin

随着我国油气资源状况的不断变化和油气田开发技术的快速进步,低渗透油藏已经成为我国石油开发的重要对象。而在低渗透油藏开发过程中所暴露出来

的问题也越来越受到人们的重视。低渗透油藏中的流体流动有别于常规油藏,常常表现为渗流阻力大、油水两相互相干扰、启动压力明显、有非达西渗流特征等

收稿日期:2017-04-05;修订日期:2018-06-07。

第一作者简介:王建忠(1973—)男,博士,副教授,油气渗流理论和油气田开发技术。E-mail: wangjzh@upc.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(51490654);国家科技重大专项(2016ZX05014-004-007)。

等^[1]。水驱低渗油藏开发中常常存在见水早、含水上
升快、水驱效率低等问题。因此确定含水变化规律和
特征,弄清含水变化的影响因素,对注水开发低渗油
藏,提高该类油藏采收率有重要意义。

水驱低渗透油藏含水率的变化问题属于岩石中油
水两相渗流的范畴,含水变化特征必然决定于岩石物
性、油水特征和驱动力等因素。近些年,国内学者围绕
这一领域开展了广泛的研究,比如王建民等对该类油
藏的高含水特征和成因做了研究^[2],孙志刚、刘金玉等
通过实验分析该类油藏的含水变化规律^[3-4],苏海波、
刘万涛、刘义坤、计秉玉、束青林等学者围绕着低渗油
藏的渗流物理问题也做了很有价值的研究^[5-9],但是
都缺少对于含水率影响因素的全面分析。低渗透砂岩
油藏中微小尺度的孔隙喉道占大部分比例。孔隙是主
要的储集空间,而喉道是主要的渗流通道,作用于多相
流体的界面张力在狭窄喉道中对水驱油影响不可忽
视。毛管力和贾敏效应在水驱油过程会导致流动阻力
的变化^[10-13]。这些因素都可能影响水驱油效果,导致
含水率变化。

1 孔隙的连通性是影响含水变化的重
要因素

相对渗透率曲线是正确认识油藏油水两相渗流特
征重要依据。对取自胜利油田两口井同层位的两块岩
心样品做相对渗透率测试发现,虽然绝对渗透率相近
($20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右),但相对渗透率却差别却很大,如

图 1 所示。两块岩心在相同饱和度下的水相渗透率明
显不同,残余油下水的相对渗透率(下文用 K_{rwmax} 表
示)分别为 0.768 和 0.211,相差 3.6 倍。根据相对渗
透率理论, K_{rwmax} 越大意味着水相渗透率随含水饱和度
地增大而增大的速度越快,含水率会迅速上升。生产
中也证实了这两口井的含水变化情况确实如此。经进
一步分析发现这两块岩心的孔隙结构存在较大差别
(表 1),其结构系数分别是 5.60 和 1.43,特征结构系
数分别为 0.19 和 0.76。结构系数和特征结构系数都
是反映孔隙连通性的参数,均为无量纲量。这两个系
数的表达式如下:

$$C_s = \frac{1}{D_r \Phi_p} \tag{1}$$

$$\Phi_p = \frac{\Phi}{8K} R^2 \tag{2}$$

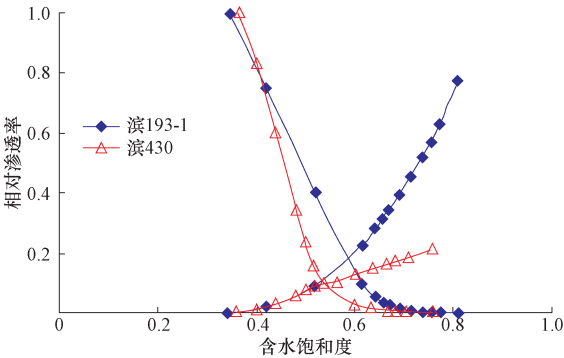


图 1 胜利油田两口井的油水相对渗透率曲线

Fig. 1 Oil-water relative permeability curve for two wells in Shengli oilfield

表 1 胜利油田 Es⁴ 层 17 口井的 K_{rwmax} 与孔隙结构特征参数

Table 1 K_{rwmax} and pore structure characteristic parameters for 17 Wells in the Es⁴, Shengli oilfield

井号	孔喉半径/ μm	分选系数	变异系数	结构系数	均质系数	岩性系数	特征结构系数	$K_{\text{rwmax}}/(10^{-3} \mu\text{m}^2)$
滨 193 - 1	3.41	3.24	0.95	5.60	0.24	0.16	0.19	0.77
滨 430	2.27	2.09	0.92	1.43	0.33	0.54	0.76	0.21
车 271 - 1	1.14	1.75	1.54	1.53	0.12	0.36	0.42	0.29
高 89 - 8	1.29	1.14	0.88	3.61	0.38	0.23	0.31	0.58
垦 628	1.84	1.37	0.74	3.00	0.38	0.28	0.45	0.62
莱 1 - 401	5.06	4.97	0.98	4.37	0.26	0.17	0.23	0.53
莱 1 - 401	0.72	0.90	1.24	1.55	0.19	0.50	0.52	0.24
利 853 - 2	0.17	0.12	0.67	1.99	0.34	0.60	0.74	0.29
梁 112 - 1	0.89	1.08	1.21	1.70	0.18	0.57	0.48	0.65
永 924	0.69	0.81	1.17	0.75	0.19	0.87	0.70	0.33
樊 142 - 1	0.27	0.25	0.89	2.58	0.23	0.58	0.62	0.50
樊 142 - 11	0.78	0.57	0.75	4.37	0.29	0.21	0.30	0.78
盐 22 - 斜 1	0.66	0.58	0.89	3.18	0.27	0.28	0.35	0.56
滨 427	0.81	0.70	0.87	3.63	0.24	0.26	0.31	0.68
滨 425	2.60	1.99	0.76	2.13	0.50	0.39	0.61	0.58
滨 706	1.41	0.98	0.70	2.07	0.43	0.41	0.68	0.30
永 924	2.71	2.14	0.79	3.98	0.34	0.22	0.31	0.50

式中: C_s 为特征结构系数, 其值越小表示孔隙连通性越差; Φ_p 为结构系数, 其值越大表示孔隙连通性越差; R 是平均孔喉半径, μm ; K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; Φ 是孔隙度, 小数; D_r 是相对分选系数。

为了找出水相相对渗透率与岩石孔隙的某些结构特征是否存在相关性, 选取了该油区沙河街组 4 段 (E_s^4) 层位 17 口井的低渗透岩心进行油水相对渗透率测定和压汞法孔隙结构特征参数测定, 对比 $K_{rw\max}$ 与孔隙结构特征参数相关性。这些表征孔隙结构特征的参数包括平均孔喉半径、分选系数、变异系数、均质系数、结构系数、岩性系数及特征结构系数共 7 个 (表 1)。

根据表 1 中数据, 分别建立 $K_{rw\max}$ 与以上 7 项参数的散点图, 然后计算机采用各种规律自动拟合, 并给出相关系数 (R^2), 7 项特征参数的最大相关系数如图 2 所示。由图可以看出反映孔隙连通程度结构系数和特征结构系数与 $K_{rw\max}$ 相关性最好 ($R^2 > 0.5$)。而其他 5 项参数与 $K_{rw\max}$ 的相关性不大。这基本可以推测岩石孔隙的连通性明显影响水相相对渗透率, 从而影响含水率变化。

为了进一步证明孔隙连通性与水相相对渗透率的相关性, 对胜利油田各低渗油区的 464 口井的岩心样品测试资料进行了统计分析。胜利油田低渗砂岩储集层的物性较差, 孔隙度多数小于 20%, 渗透率范围为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 具有中孔低渗或低孔低渗的特点^[14]。根据这 464 口井取心测试资料, 把它们分为两组, 第一组为 $K_{rw\max} < 0.5$ 的有 342 口井, 第二组是 $K_{rw\max} > 0.5$ 的有 122 口井。分别建立上述两组并取心样品的孔隙度和渗透率的关系曲线, (图 3)。可以看出第一组孔隙度渗透率关系曲线的斜率明显大于

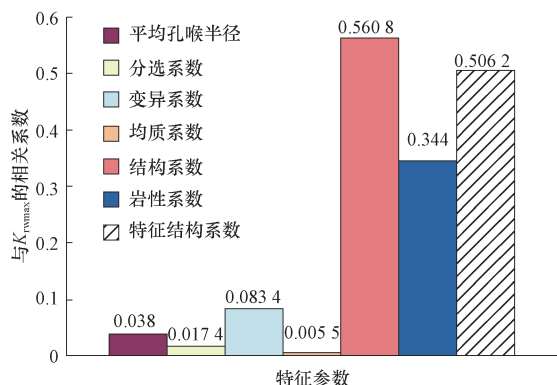


图 2 胜利油田 E_s^4 层 7 项孔隙结构特征参数与 $K_{rw\max}$ 的相关性

Fig. 2 Correlation of $K_{rw\max}$ and 7 pore structure characteristic parameters in the E_s^4 , Shengli oilfield

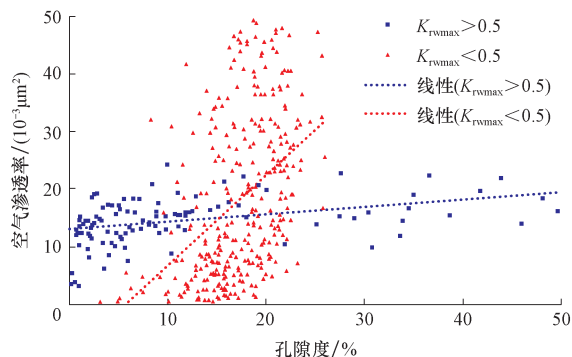


图 3 胜利油田低渗透油藏的孔渗关系曲线

Fig. 3 Relationship between permeability and porosity of low permeability reservoirs in Shengli oilfield

第二组, 这表明增加相同的孔隙度时第一组岩心渗透率增加的多, 即该类储层的连通性更好。换句话说, $K_{rw\max} < 0.5$ 的储层比 $K_{rw\max} > 0.5$ 的储层连通性要好一些。由此可以进一步断定, 孔隙的连通性是影响低渗油藏水驱特征的重要因素之一, 孔隙连通性越好水相相对渗透率随饱和度增大而增大的趋势越缓慢, 含水上升越慢, 水驱效果越好。

2 应力敏感性对含水变化的影响

由于岩石孔隙内压力下降, 受上覆压力的影响, 孔隙结构在应力作用下发生变化导致渗透率和孔隙度的降低, 通常称这种现象为储层的应力敏感性。低渗透储层多发育天然微裂缝, 而且在开发过程中多采用压裂方式。对于这类存在大量裂缝的低渗储层, 在开发过程中, 随着地层压力的不断下降, 裂缝在岩效应力的作用下会趋于闭合, 从而导致应力敏感性更加明显^[15]。大量的实验表明, 应力变化对低渗透油藏的渗透率有较大的影响, 而且裂缝越多、基岩渗透率越小影响越大。而对于孔隙度的影响几乎可以忽略。应力变化, 孔隙结构变化, 渗透率变化, 这些必然导致油水两相流动特征的变化, 引起含水率的变化。

低渗油藏渗透率 K 随地层压降 Δp 的变化关系通常用公式 (3)^[16] 表示。式中, K_0 初始地层压力下的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; γ 为渗透率变异指数, 又称渗透率变化模量, 可以通过实验获得; Δp 为地层压降, MPa。

$$K = K_0 e^{-\gamma \Delta p} \quad (3)$$

通过对胜利油田的部分低渗透岩心样品做应力敏感性测试, 得到渗透率的应力敏感性曲线如图 4 所示。实验中是用围压模拟上覆压力。从图 4 可以看出, 渗透率随地层应力下降明显。以滨 425-2 号岩样为例, 初始渗透率是 $K_0 = 17.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 用公式 (3) 拟合

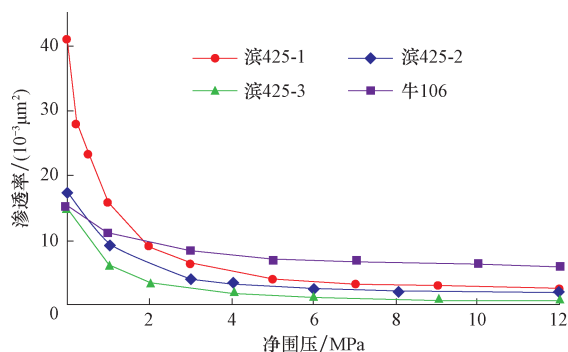


图4 胜利油田低渗透油藏渗透率应力敏感性测试曲线

Fig. 4 Stress sensitivity of low permeability reservoirs in Shengli oilfield

的结果是 $\gamma = 0.249$ 。这样可以很容计算出地层压力只要下降 2.8 MPa 渗透率就会降到原来的 50%。

低渗透油藏的开发普遍存在能量补充不足的情况,所诱发的应力敏感性伤害不可避免。这种伤害主要集中在两个方面:一是储层绝对渗透率的改变,二是相对渗透率改变。由于低渗透油藏孔隙度对应力的敏感性并不明显,所以渗透率应力敏感的内在机理主要是因为孔隙喉道变小,连通性变差所致,这必然会加剧含水上升速度。

3 原始含水饱和度决定初始含水率

很多低渗透油藏开发初期即见水。胜利油田桩74块投产的加密井,初期平均综合含水为 61.5%,樊31块北块的10口井,投产初期平均含水为 40.4%。笔者认为这主要是因为较高的原始含水饱和度所致。根据 Buckley-Leverett 水驱油理论,含水率是相对渗透率的函数,而相对渗透率又与饱和度有直接关系(相渗曲线),所以原始含水饱和度与初始含水率必然存在一种内在关系。以下用实验可以证实这一点。

通过对原始含水饱和度分别为 60.2%、59.1% 和 22.1% (束缚水) 的低渗透储层(物理模型)做水驱油的物理模拟实验,所得数据绘制含水率、采出程度与注入水的孔隙体积倍数之间的关系曲线(图5)。由图可以看出,对于原始含水饱和度为 60% 左右的两种情况,油井投产即见水,且初始含水率较高(48% 左右),投产初期含水迅速上升,然后进入一个上下波动的中期阶段,到后期是一个长期稳定的特高含水阶段,对于仅含束缚水的情况,明显存在一个无水采油期,注入倍数约为 0.1 PV 时油井见水,中期阶段还有一个明显的低含水期。这些可以表明,低渗透油藏的原始含水饱和度是决定见水早晚和初始含水率高低的因素之

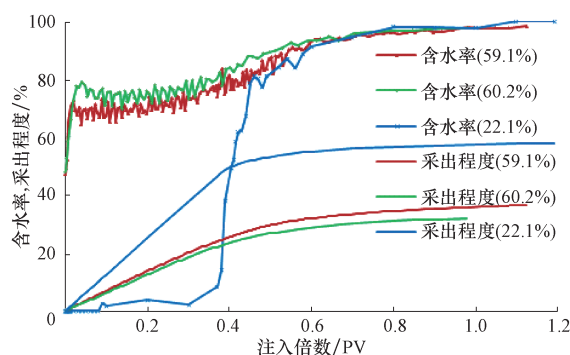


图5 胜利油田低渗透油藏不同原始含水饱和度下含水率、采出程度与注入倍数的关系

Fig. 5 Relationship between water cut, recovery degree and pore volume injected for varying original water saturation in low permeability reservoirs, Shengli oilfield

一。油田生产中,一些原始含油饱和度较低的低渗油藏往往投产初期就会见水,有的含水率还很高,就是这个原因所致。

图5中还可以看出,原始含水饱和度越高采收率就越低,无论原始含水饱和度高低,中期阶段过后,大约注入倍数超过 0.5 PV 时,水驱效率都会变得很低。所以,低渗透油藏的原始含水饱和度也是影响水驱效率和采收率的重要因素。

4 驱替压力对初始含水率的影响

前面的物理模拟实验中发现,即使在相同的原始饱和度下,驱替速度不同,含水率的变化规律也不同,这说明驱替压力的大小影响含水率变化。为了证实这一点,选择了5块平行岩心样品,初始含水饱和度约 60% (技术原因略有差别),以不同驱替压力做水驱油实验,发现驱替压力小于 0.1 MPa 时初始含水率为零,0.2 MPa 时初始含水率为 14%,0.5 MPa 时为 60%,0.8 MPa 时为 83% (图6)。这说明,虽然储层中有可流动的水,但仍有可能存在无水采油期。分析其原因,认为是润湿性和毛管力所致。对于亲水岩石来说,水的自发吸渗会导致水的产出需要克服毛管力作用,所以在较小的压力下油更容易从岩心中产出,而水则无法克服毛管力而有向内自吸的趋势。所以水相产出需要一个启动压力。从图6不难发现,这个试验中的水相启动压力应该在 0.1 ~ 0.2 MPa 之间。当驱替压力大于这个启动压力时,将不再存在无水采油期,而且初始含水率随着驱替压力的增大而增大。这一现象也表明,在低渗透油藏中,所谓“束缚水”其实是个相对的概念,较小压力梯度下的“束缚水”随着压力梯度

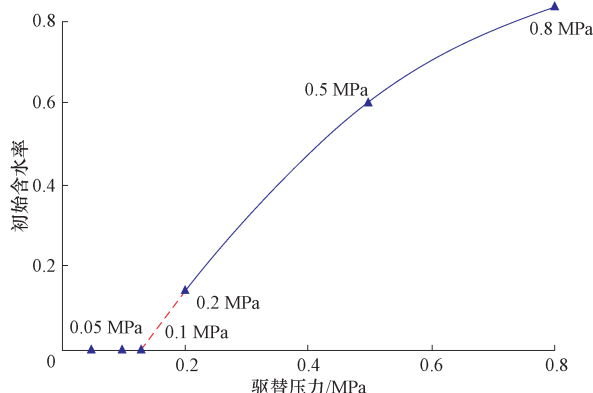


图6 胜利油田低渗透油藏初始含水率与驱替压力的关系

Fig. 6 Relationship between the initial water cut and displacement pressure for low permeability reservoirs in Shengli oilfield

的增大而会变得可以流动。因此注水开发低渗透油藏,适当的控制注入压力有利于控制含水率,提高注水效率。

油水两相间的界面张力在低渗透油藏狭小的孔隙和喉道中呈现更为突显的毛管力和贾敏效应。考虑到毛管力的大小和贾敏效应的强弱都与饱和度有关,所以,启动压力的大小除了与岩石物性有关之外,必然与含水饱和度存在一定关系。根据油水毛管力曲线,不难断定含水饱和度越大,存在于相对较大孔道中的水所占比例就越多,水相的启动压力梯度就越小。所以孔隙结构、应力敏感性、含水饱和度、毛细管力、驱替压力等这些因素在影响含水变化特征的同时,也会相互影响。

5 结语

低渗透油藏的水驱开发是一个复杂的过程,生产中含水率的变化特征在一定程度上可以反映水驱油效果的好坏。有很多因素会影响含水率变化规律,从本文研究结果来说,储层岩石的孔隙连通性会影响含水率的变化特征,根据原始含水饱和度的大小可以大致确定初始含水率和含水率的变化趋势,适当地控制驱替压力有利于控制含水率,提高水驱效率,如果考虑储层的应力敏感性,建议实施超前注水,以免能量不足造成不可逆的渗透率伤害。

参 考 文 献

[1] 丁景辰,杨胜来,聂向荣,等. 低渗-特低渗油藏油水相对渗透率及水驱油效率影响因素研究[J]. 科学技术与工程, 2013,

13(36):10903-10907.

Ding Jingchen, Yang Shenlai, Nie Xiangrong, et al. Study on influencing factors of oil-water relative permeability and waterflooding efficiency in low permeability and extra-low permeability reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(36): 10903-10907.

[2] 王建民,刘生福,李军等. 陕北中生界特低渗透高含水油藏特征及成因[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(5): 583-588.

Wang Jianmin, Liu Shengfu, Li Jun, et al. Characteristics and causes of Mesozoic reservoirs with extra-low permeability and high water cut in northern Shaanxi[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 583-588.

[3] 孙志刚. 低含油饱和度砂岩油藏水驱特征实验[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(2): 105-107.

Sun Zhigang. Water drive characteristic experiment for low oil saturation sandstone oil reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(2): 105-107.

[4] 刘金玉,王殿生,刘柏林,等. 低渗低饱和砂岩水驱油过程中含水率变化规律研究[J]. 西安石油大学学报, 2011, 26(1): 37-41.

Liu Jinyu, Wang Diansheng, Liu Bolin, et al. Study on the variation law of the water-cut of low-permeability low-saturation sandstone reservoirs in water displacing oil[J]. Journal of Xi'an Shiyou University, 2011, 26(1): 37-41.

[5] 苏海波,于金彪,张同伍,等. 低渗透储层水驱油渗流阻力特征[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(1): 117-121.

Su Haibo, Yu Jinbiao, Zhang Tongwu, et al. Features of seepage resistance during water flooding in low permeability reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(1): 117-121.

[6] 刘万涛,何小娟,王选茹,等. 超低渗透油藏油井流入动态及合理流压研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(5): 234-237.

Liu Wantao, He Xiaojuan, Wang Xuanru, et al. The study of inflow performance and proper bottom-hole fluid pressure in ultra-low permeability sandstone reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(5): 234-237.

[7] 刘义坤,王凤娇,胡超洋. 薄差储层油水渗流规律研究[J]. 特种油气藏, 2013, 20(5): 89-93.

Liu Yikun, Wang Fengjiao, Hu Chaoyang. Study on oil/water percolation in thin and poor pay zone[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2013, 20(5): 89-93.

[8] 计秉玉,赵宇,宋考平,等. 低渗透油藏渗流物理特征的几点新认识[J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 129-133.

Ji Bingyu, Zhao Yu, Song Kaoping, et al. New insights into the physical percolation features of low-permeability reservoirs[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 129-133.

[9] 束青林,郭迎春,孙志刚,等. 特低渗透油藏渗流机理研究及应用[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(5): 58-64.

Shu Qinglin, Guo Yingchun, Sun Zhigang, et al. Research and application of percolation mechanism in extra-low permeability oil reservoir

- [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(5): 58 – 64.
- [10] 高文君, 徐冰涛, 黄瑜, 等. 水驱油田含水率预测方法研究及拓展[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 993 – 999.
- Gao Wenjun, Xu Bingtao, Huang Yu, et al. Research on and development of prediction method of water cut in water flooding oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 993 – 999.
- [11] 鄢捷年. 油藏岩石润湿性对注水过程中驱油效率的影响[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1998, 22(3): 39 – 42.
- Yan Jienian. Effect of rock wettability on oil recovery by waterflooding[J]. Journal of the University of Petroleum China, 1998, 22(3): 39 – 42.
- [12] 李荣强, 吕爱民, 王建忠, 等. 低渗透油藏仿水平井注采井网产能[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 439 – 443.
- Li Rongqiang, Lv Aimin, Wang Jianzhong, et al. Productivity of the imitation horizontal well pattern in low permeability reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 439 – 443.
- [13] 张绍东, 王绍兰, 李琴, 等. 孤岛油田储层微观孔隙结构特征及其对驱油效率的影响[J]. 石油大学学报, 2002, 26(3): 47 – 54.
- Zhang Shaodong, Wang Shaolan, Li Qin, et al. Microstructural characteristics of reservoir and their effects on oil displacement efficiency in gudao oilfield[J]. Journal of the University of Petroleum China, 2002, 26(3): 47 – 54.
- [14] 蔡进功, 谢忠怀, 刘宝军, 等. 胜利油区深部砂岩储集层类型及特征[J]. 石油学报, 2001, 22(5): 34 – 37.
- Cai Jingong, Xie Zhonghui, Liu Baojun, et al. Types and characteristics of deep sandstone reservoirs in Shengli petroleum province[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(5): 34 – 37.
- [15] 王建忠, 姚军. 变渗透率模量与双重孔隙介质压力敏感性[J]. 中国石油大学学报, 2010, 34(3): 80 – 83.
- Wang Jianzhong, Yao Jun, Zhang Kai, et al. Variable permeability modulus and pressure sensitivity of dual-porosity mediums[J]. Journal of the University of Petroleum China, 2010, 34(3): 80 – 83.
- [16] Kikani J. Pedrosa O. Perturbation analysis of stress-sensitive reservoirs[J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6(3): 379 – 386.

(编辑 张亚雄)

(上接第832页)

- [19] 郝明强, 王晓冬, 胡永乐. 压敏性特低渗透油藏压裂水平井产能计算[J]. 中国石油大学学报自然科学版, 2011, 35(6): 99 – 104.
- Hao Mingqiang, Wang Xiaodong, Hu Yongle. Productivity calculation of multi-fractured horizontal well in ultra-low permeability pressure-sensitive reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum Edition of Natural Sciences, 2011, 35(6): 99 – 104.
- [20] 徐庆岩, 杨正明, 何英, 等. 超低渗透油藏非线性渗流数值模拟[J]. 深圳大学学报理工版, 2012, 29(6): 504 – 508.
- Xu Qingyan, Yang Zhengming, He Ying, et al. Numerical simulation of nonlinear seepage in super-low permeability reservoirs[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2012, 29(6): 504 – 508.
- [21] 曲占庆, 张琪, 吴志民, 等. 水平井压裂产能电模拟实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(3): 53 – 55.
- Qu Zhanqing, Zhang Qi, Wu Zhimin, et al. Experimental research on electric analogy of the productivity of fractured horizontal well[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(3): 53 – 55.
- [22] 林飞, 欧阳传湘, 李春颖, 等. 低渗透油藏注水开发调整方案数值模拟研究[J]. 当代化工, 2016, 45(3): 549 – 551.
- Lin Fei, OuYang Chuanxiang, Li Chunying, et al. Numerical simulation on adjustment scheme of water injection development of low permeability reservoir[J]. Contemporary Chemical Industry, 2016, 45(3): 549 – 551.
- [23] 杨正明, 刘先贵, 孙长艳, 等. 低渗透油藏产量递减规律及水驱特征曲线[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(3): 55 – 63.
- Yang Zhengming, Liu Xiangui, Sun Changyan, et al. Production decline law and water drive characteristic curves in low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(3): 55 – 63.
- [24] 计秉玉, 王春艳, 李莉, 等. 低渗透储层井网与压裂整体设计中的产量计算[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 578 – 582.
- Ji Bingyu, Wang Chuanyan, LiLi, et al. Calculation method for production rate of rectangular well pattern and fracturing integration production mode in low-permeability reservoir[J]. ACTA PETROLEI SINICA, 2009, 30(4): 578 – 582.
- [25] 蒲军, 刘传喜, 尚根华. 基于流线积分法的面积井网注水开发非稳态产量计算模型[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(5): 97 – 106.
- Pu Jun, Liu Chuanxi, Shang Genhua. Non-steady water-flooding production model of areal well pattern based on flow line integral method[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2016, 38(5): 97 – 106.
- [26] 李晓平. 地下油气渗流力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 89 – 92.
- Li Xiaoping. Seepage mechanics of underground oil & gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 89 – 92.

(编辑 张玉银)