

浅水三角洲储层水驱波及系数定量评价

刘超,侯亚伟,李林,许万坤,李媛婷

(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459)

摘要:浅水三角洲储层具有砂泥多期叠置薄互层、横向变化快的特点,开发过程中往往波及系数低,水驱效果差。本文在谢尔卡乔夫波及系数公式的基础上,针对浅水三角洲储层沉积特点,加入薄互层分布比例和砂体几何形状因素的影响,对波及系数进行量化修正。利用此公式指导油田开发调整中的层系划分、井距优化,显著提高了该类油藏的波及系数,该评价方法在渤海湾PL油田开发调整中取得良好效果,实践证明基于纵向薄互层分布比例和砂体分布因素的波及系数定量分析,有助于该类油藏开发政策及技术界限的制定。

关键词:薄互层油藏;浅水三角洲;谢尔卡乔夫公式;水驱波及系数

中图分类号:TE341 **文献标志码:**A

Quantitative evaluation of water flooding sweep coefficient in shallow water delta reservoir

LIU Chao, HOU Yawei, LI Lin, XU Wankun, LI Yuanting

(CNOOC Ltd. Tianjin Branch, Tianjin 300459, China)

Abstract: Shallow water delta reservoirs are characterized by thin interlayers superimposed on sand and mud in multiple phases and rapid lateral changes. In the development process, the sweep coefficient is often low, and the water flooding effect is poor. Based on the formula of Selkachev's sweep coefficient, the sweep coefficient is quantitatively corrected by adding the influence of the distribution ratio of thin interlayers and sandbody geometry to the sedimentary characteristics of shallow water delta reservoir. Using this formula to guide the formation division and optimization of well spacing in oilfield development and adjustment, the sweep coefficient of this type of reservoir has been significantly improved. This evaluation method has achieved good results in the development and adjustment of the PL Oilfield in Bohai Bay. It has been proved that the quantitative analysis of the sweep coefficient based on the distribution ratio of longitudinal thin interbeds and the sand body distribution factors can help in formulating of the development policies and technical limits of this type of reservoir.

Key words: the thin interbed reservoir; shallow water delta; Selkachev Formula; water flooding sweep coefficient

引用格式:刘超,侯亚伟,李林,等.浅水三角洲储层水驱波及系数定量评价[J].复杂油气藏,2023,16(3):315-319,328.

LIU Chao, HOU Yawei, LI Lin, et al. Quantitative evaluation of water flooding sweep coefficient in shallow water delta reservoir [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(3): 315-319, 328.

波及系数是影响水驱油田开发效果的重要因素,储层分布特征、渗透率变异系数、水油流度比、地层原油黏度等是影响波及系数的重要因素。在油田开发方案和综合调整方案的研究过程中,根据油田储层特点,量化研究水驱波及系数可以为划分开发层系和优选注采井网提供有力支持,但是由于河流相储层的复杂性,使得波及系数的计算非常困难。例如,渤海湾浅水三角洲沉积的薄互层油藏具有横向变化快、非均质性强、纵向上多层叠置的特征,一次井网难以建立高效的注采关系,有必要开展薄互层油藏沉积储层的水驱开发规律量化

研究,以指导注采井网部署和层系划分。但是前人^[1-3]对该类油藏波及系数的研究中,缺乏对此类储层平面非均质性变化和纵向分布特征对波及系数影响的考虑。国内外文献也罕有专门针对复杂河流相储层水驱开发波及系数的深入研究。

收稿日期:2022-08-02;改回日期:2022-10-12。

第一作者简介:刘超(1979—),硕士,高级工程师,主要从事油气田开发研究工作。E-mail:liuchao@cnooc.com.cn。

基金项目:中海石油(中国)有限公司科技项目“渤海双高油田挖潜关键技术研究”(YXKY-2018-TJ-04)、“渤海油田强化水驱及增产挖潜技术”(CNOOC-KJ 135 ZDXM 36 TJ 01 TJ)。

1 浅水三角洲储层沉积特征及调整前的开发状况

进入二十一世纪以来,渤海湾盆地勘探开发的步伐逐步加快,在渤海湾渤东区域的明化镇组下段和馆陶组发现了相当规模的浅水湖盆沉积。浅水三角洲作为重要的储油地质体就发育在渤海湾浅水湖盆的大型河流入湖处。根据渤海湾已有的资料统计,目前渤海湾已发现的新近系油田中,以河流相为主的油田有8个,以浅水三角洲为主的油田有13个。这些油田绝大部分采用的是水驱保压开采的方式,而且很多油田已经到了第一次综合调整的关键时期,搞清楚水驱波及情况对指导剩余油分布的研究意义重大。由此可见,基于浅水三角洲储层特征定量化研究其水驱波及系数和分层系开发技术界限,对渤海湾油气田的开发调整具有非常现实的意义^[4]。

渤海湾发育的浅水三角洲前缘沉积微相包括河口坝、水下分流河道、前缘席状砂、分流间湾等。受河流的控制作用,砂体往往顺流向呈枝状展布,平面形态呈现出坨状、网状、枝状分布,砂体宽度不等,宽厚比在100左右,具有较好的延伸性和连通性^[5]。

受上升型中期基准面旋回的控制,浅水三角洲

沉积垂向层序呈现退积型序列,即自下而上单层砂岩厚度减薄、泥岩加厚、砂泥比降低的特征,代表了可容纳空间增加、水体面积不断变大、三角洲逐渐向陆地迁移的过程。自下而上,单砂体厚度规模和展布范围逐渐变小,连续性变差。

例如渤海湾PL油田^[6]主力储层发育退积型沉积序列,自下而上,按照砂体平面分布形态分为辫状河道型(I类)、辫状河与曲流河共生/转换型(II类)、枝状三角洲型(III类)三种沉积样式。

辫状河道型砂体分布最广,平面呈现宽条带状,剖面中间厚,向两侧逐渐或突然尖灭,宽厚比100~120左右(见图1a);辫状河与曲流河共生型砂体分布较广,平面呈现宽条带状与窄条带状共生,剖面中间厚,向两侧逐渐或突然尖灭,宽厚比大约100左右(见图1b);枝状三角洲型砂体平面多呈窄条带状,剖面具有中间厚,两侧均匀减薄的特点,其宽厚比通常约80(见图1c)。

浅水三角洲沉积的薄互层砂体主要发育在分流河道中,层数多,储层薄,泥质隔层厚,显示出“泥包砂”的总体形态。分流河道砂体物性分布规律受砂岩厚度、微相单元的分布影响,储层物性平面变化剧烈^[7]。实钻井资料充分表明了浅水三角洲储层分布具有平面变化大、纵向差异大和砂泥互层的特征。

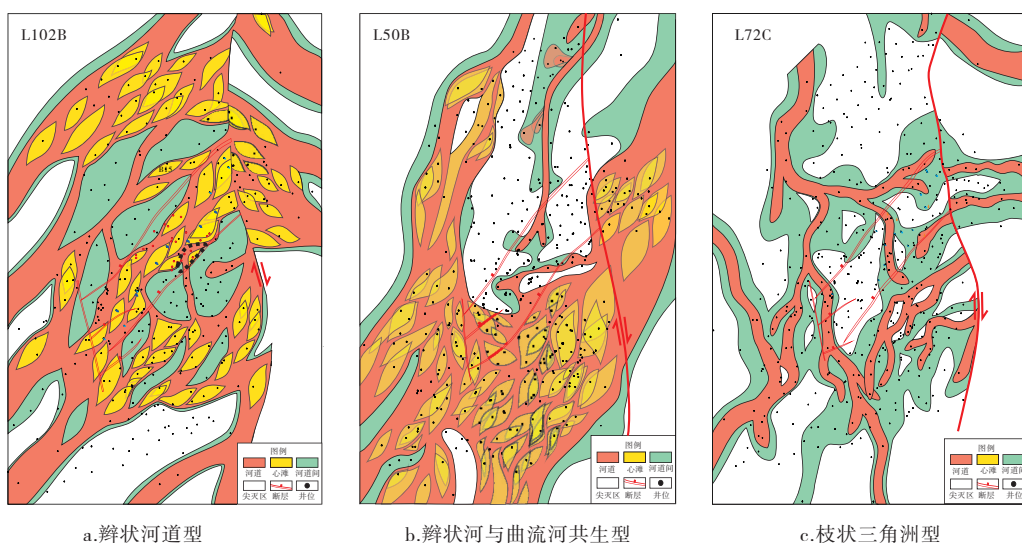


图1 浅水三角洲沉积相

由于浅水三角洲油藏纵向砂泥薄互层分布多和平面砂体展布变化大,该油田一次井网注采连通率仅61%,开发中面临注采受效差、层间矛盾加剧、水驱动用程度低等问题,在调整前油田综合含水率

85%,采出程度17.8%,预期最终采收率仅26%。因此,亟待对水驱波及系数进行深入分析,量化砂泥薄互层分布和平面砂体展布变化对波及系数的影响,并通过优化调整油田开发策略,改善油田开发效果。

2 考虑砂泥互层特征和几何形状的波及系数校正

浅水三角洲储层受沉积微相控制,储层呈现砂泥薄互层分布状态,以及砂体的平面分布形态、规模、连续性的变化非常剧烈,直接影响水驱波及系数的提高,进而对油藏的水驱开发效果影响较大。

前人对波及系数的研究通常以流度比、渗透率变异系数和水油比为主要影响因子^[9-11],而没有考虑浅水三角洲储层在纵向上的厚薄储层间互分布特征和储层平面上的变化特征。

谢尔卡乔夫公式是普遍应用于井网密度和采收率关系的成熟公式,陈元千等人^[12-15]将其进行推导得到平均井控面积与波及系数之间的关系:

$$E_v = \exp[-0.04544\exp(-9.309 \times 10^{-3} K/\mu_o)W_s]$$
 (1)

式中: E_v 为水驱体积波及系数; f ; K 为储集层空气渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ_o 为地层原油黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; W_s

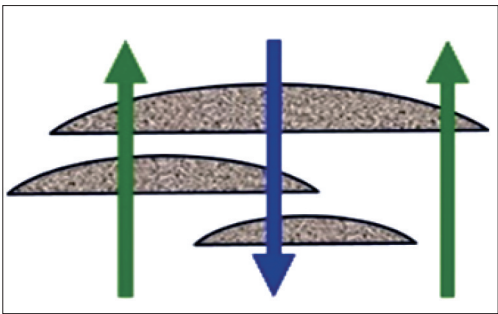
为平均井控面积, $\text{hm}^2\cdot\text{口}^{-1}$ 。

针对薄互层油藏,在陈元千基于谢尔卡乔夫推导的水驱波及系数公式基础上,开展水驱波及系数校正研究,并首次提出水驱波及系数的薄层比例校正因子 z 。该因子基于浅水三角洲沉积储层的砂泥互层分布特征得来,是薄层所占储层总厚度的比例对水驱开发效果的影响因子(见图2)。利用一系列油藏数值模拟和油藏物理模型,采用统计法得出不同薄层比例对应的校正因子。薄层在整个井段中占的比例越大,校正因子就越小,进而使得波及系数越小。

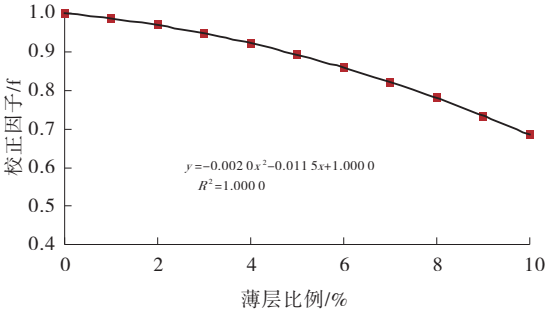
$$z = -0.0020R^2 - 0.0115R + 1.0000$$
 (2)

式中, z 为水驱波及系数的薄层比例校正因子; R 为薄层厚度占储层总厚度的比例, %。

受沉积条件的影响,PL油田储层分布形态不规则,储层在连通的情况下形态各异,一套储层可以由单个或多个砂体组成,均影响井网控制程度和储量动用。



a. 储层展布与注采对应率



b. 薄层比例与注采对应率校正因子关系图版

图2 PL油田薄互层油藏注采对应率校正因子应用图版

目前没有定量的表征储层发育形态与储量动用程度的计算方法和技术,因此基于油田储层实际展布形态、提出了定量描述储层形态的综合几何形状因子 C_{TM} 。创新建立了基于综合几何形状因子的储量动用表征方法(见图3)。形状因子越大,储量动用程度越高,近似线性关系,表明综合几何形状因子可作为影响动用程度的关键因素(指标)。

$$C_{TM} = \frac{4\pi \sum_{i=1}^n A_i}{(\sum_{i=1}^n P_i)^2}$$
 (3)

式中, C_{TM} 为储层综合几何形状因子; A_i 为砂体的面积, km^2 ; P_i 为砂体的周长, km 。

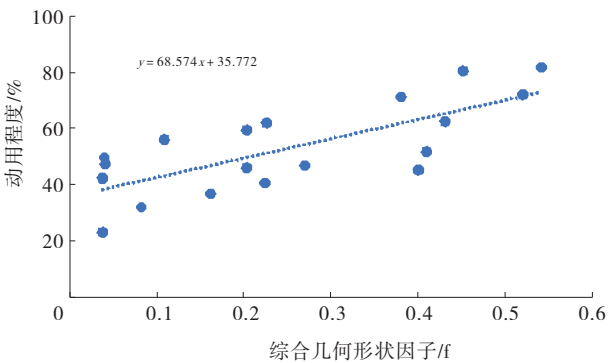


图3 综合几何形状因子对动用程度的影响

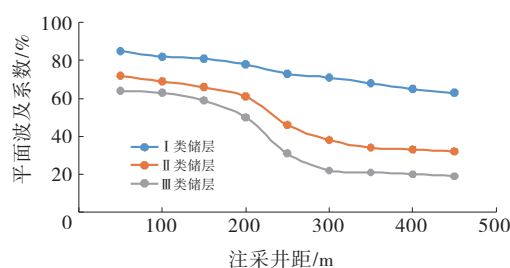
把公式(2)和公式(3)代入公式(1),并考虑渗透率非均质性,经过公式变换,得出薄互层分布和砂体形态校正后的体积波及系数计算公式(4)。

$$E_v = z C_{TM} \exp[-0.04544 \exp(-9.309 \times 10^{-3} \\ [\sqrt{(\sum_{i=1}^n K_i)^2 + (nV_k^2 - 1) \sum_{i=1}^n K_i^2 - \sum_{i=1}^n K_i}] / (nV_k^2 - 1) \\ \mu_0) W_s] \quad (4)$$

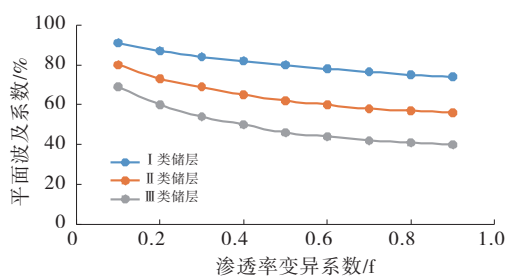
式中, V_k 为纵向渗透率变异系数; n 为砂体个数。

3 利用波及系数公式优化井网井距和层系划分

利用上述波及系数定量表征计算式, 结合本文



a. 注采井距对平面波及系数的影响

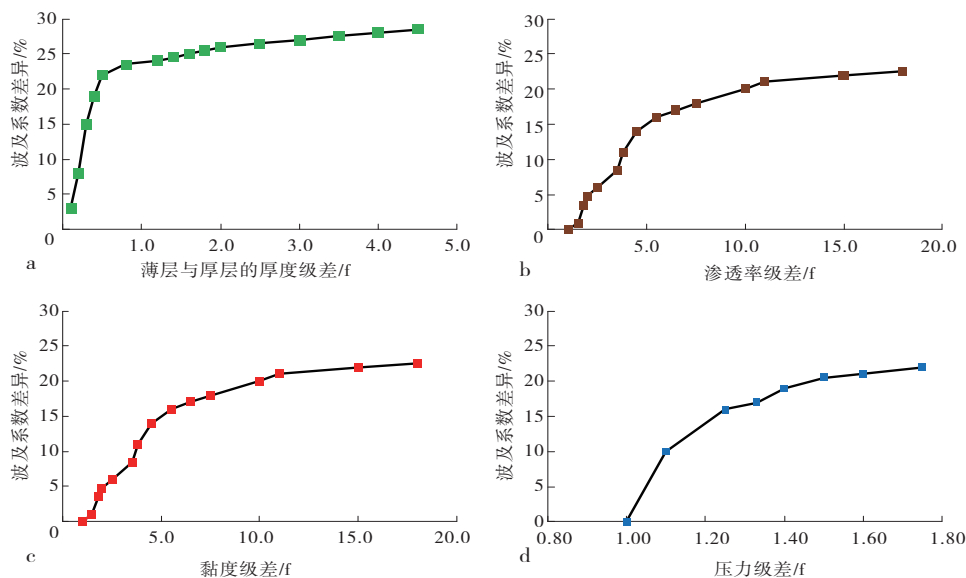


b. 渗透率变异系数对平面波及系数的影响

图4 渤海湾PL油田薄互层油藏平面波及系数应用图版

渤海湾PL油田纵向上发育47个小层, 跨度达到500 m, 小层数量多, 油层跨度大, 储量规模大, 是典型的薄互层油藏, 各层之间储层类型和流体性质差异大, 早期采用一套层系大井距多层合采的开发方式^[19-20], 开发过程中层间干扰严重, 仅依靠动态监测资料已无法满足开发调整层系划分的需求, 利用本文计算公式, 对薄层比例、渗透率级差、黏度级

差、压力级差进行敏感性分析, 对不同的层系划分方案进行对比, 提出渤海湾PL油田层系划分的技术界限(见图5): 即薄层与厚层的厚度级差小于0.6左右、渗透率级差小于5左右、黏度级差小于3左右和层间压力级差小于1.2左右(为便于开展剩余油研究, 采用波及系数差异来表达与完全均质的理想情况下波及系数的减少量)。



a. 不同薄层与厚层的厚度级差 b. 不同渗透率级差 c. 不同黏度级差 d. 不同压力级差

图5 渤海湾PL油田薄互层油藏分层系开发技术界限图版

4 应用效果

在浅水三角洲储层精细刻画的基础上,充分运用本研究成果,采取了一系列调整措施:

(1)纵向合理划分开发层系。利用本文研究成果对47个小层进行技术界限论证,划分了3~5个开发层系,层间压力差异从调整前的1~3 MPa减缓为调整后的小于1 MPa,纵向波及系数明显提高。

(2)平面上优化注采井距和注采井网。一方面针对不同的储层类型制定不同的注采井距,Ⅰ类储层注采井距250~300 m;Ⅱ类储层注采井距150~200 m;Ⅲ类储层注采井距100~150 m。另一方面,在储层沉积微相认识的基础上,利用本研究成果优化部署注采井网,增加必要的注水井点。从早期的九点井网逐步转化为排状注水与五点井网相结合。如图6所示,为提高水驱波及系数,优化调整井V61H井的位置,将其部署在心滩有利部位,同时增加C07ST01注水井点,并转注D17井,利用稳定河道控制D05和D17注水推进,实际投产后效果很好,调整井日产油80 t,含水率长期稳定在70%左右。

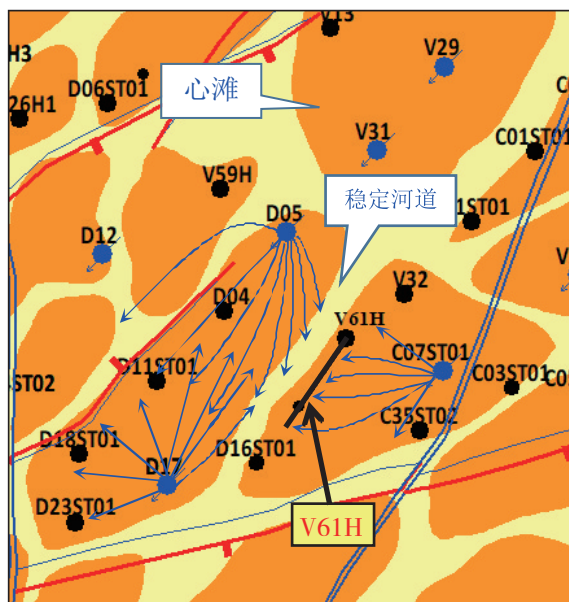


图6 渤海湾PL油田注采井网调整提高波及系数

(3)该油田采用本研究成果分三次逐个区块进行了综合调整,先后部署调整井150余口,注采连通率从61%提高到79%,水驱体积波及系数从65%提高到80%,预期采收率从26%提高到31%。

5 结论

(1)浅水三角洲储层具有砂泥互层、横向变化快的特征,在开发过程中水驱波及系数较低。

(2)基于浅水三角洲储层特点,充分考虑储层砂泥互层和平面展布变化快的特征,利用谢尔卡乔夫公式,加入平面渗透率变异系数和纵向薄互层比例因子,实现了对浅水三角洲储层波及系数的定量分析。

(3)利用本文推导的波及系数计算公式,结合浅水三角洲的储层特点,形成了不同注采井距和渗透率变异系数下的波及系数评价图版,对注采井网优化和开发层系划分具有指导意义。

(4)本技术对于具有浅水三角洲储层沉积特征的油藏具有较强的适应性,有效指导了该类油藏的调整,对其他类似油藏具有较强的参考意义。

参考文献:

- [1] 段宇,戴卫华,李金宜,等. 渤海水驱油田不同开发阶段波及系数和驱油效率计算方法研究[J]. 石油地质与工程, 2017, 31(2): 81-86.
- [2] 王国先,谢建勇,李建良,等. 储集层相对渗透率曲线形态及开采特征[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(3): 301-304.
- [3] 刘英宪. 水驱砂岩油藏理论递减规律计算新方法[J]. 中国海上油气, 2016, 28(3): 97-100.
- [4] 吴小红,吕修祥,周心怀,等. 黄河口凹陷浅水三角洲沉积特征及其油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 165-172.
- [5] 代黎明,李建平,周心怀,等. 渤海海域新近系浅水三角洲沉积体系分析[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(4): 75-81.
- [6] 朱伟林,李建平,周心怀,等. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探[J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 575-582.
- [7] 姚光庆,马正,赵彦超,等. 浅水三角洲分流河道砂体储层特征[J]. 石油学报, 1995, 16(1): 24-31.
- [8] 李兵,马悦. 水驱体积波及系数预测方法研究[J]. 石油化工与应用, 2017, 36(2): 89-92.
- [9] 刘晨,张金庆,李文忠,等. 基于近似理论水驱曲线的油藏水驱体积波及系数动态计算方法[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(5): 112-118.
- [10] 张顺康. 利用动态资料计算水驱波及系数方法研究[J]. 复杂油气藏, 2018, 11(1): 49-51.
- [11] 陈朝晖,柳茜茜,潘豪,等. 无因次采液指数曲线形态特征的影响因素[J]. 断块油气田, 2019, 26(1): 62-65.
- [12] 陈元千,邹存友. 对谢尔卡切夫(Шелкачев)公式的推导及拓展[J]. 断块油气田, 2010, 17(6): 729-732.
- [13] 陈元千. 水驱体积波及系数变化关系的研究[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(6): 49-51.

(下转第328页)

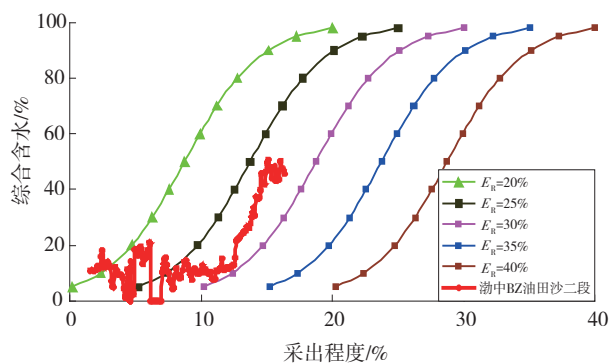


图4 渤中BZ油田沙二段含水与采出程度曲线

4 结论和认识

(1)在充分调研陆地异常高压低渗透油田注水时机的基础上综合考虑低渗储层应力敏感、注采压差以及数值模拟结果,提出了渤中BZ油田沙二段最佳注水时机为压力系数降至1.0开始注水。

(2)随着地层压力降低,储层有效应力会进一步增加,尤其在注采井近井地带会产生较大的应力敏感现象。因此对于渤中BZ油田沙二段低渗储层而言,当有效压力大于30 MPa时,基本可以忽略应力敏感;但当有效压力降至30 MPa以下,则不可以忽略应力敏感对注水时机的影响。

(3)实例应用表明,渤中BZ油田沙二段地层压力系数降至1.0时开始注水既能充分利用异常高压油藏的天然能量,又能防止因油井脱气,在无新井实施的情况下通过优化注水实现了连续3年的持续稳产,取得了较好的水驱开发效果。

参考文献:

- [1] 罗瑞兰,程林松,彭建春,等.油气储层渗透率应力敏感性与启动压力梯度的关系[J].西南石油学院学报,2005,27(3):20-22.
- [2] 王道富,李忠兴,赵继勇,等.低渗透油藏超前注水理论及其应用[J].石油学报,2007,28(6):78-81,86.
- [3] 周思宾,曲建山,张书勤.特低渗油藏注水时机对开发的影响[J].断块油气田,2008,15(1):63-65.
- [4] 陈民锋,秦立峰,荣金曦,等.低渗透应力敏感储层衰竭开发产量递减规律研究[J].复杂油气藏,2022,15(3):78-83.
- [5] 谢晓庆,姜汉桥,王全柱,等.低渗透油藏压敏效应与注水时机研究[J].石油学报,2009,30(4):574-577,582.
- [6] 张兆林,黄伟.江苏复杂小断块中低渗油藏开发实践与认识[J].断块油气田,2004,11(4):36-38.
- [7] 徐春碧,黄小亮,唐海,等.低渗透油藏注水开发时机研究[J].钻采工艺,2011,34(2):53-55.
- [8] 陈艳玉,陈月明,肖淑明.牛20高压低渗透油藏的开发[J].石油大学学报(自然科学版),1994,18(S1):85-89.
- [9] 黄小亮,戚志林,雷登生.异常高压低渗油藏注水时机研究[C].环境系统科学与工程,大连:智能信息技术应用学会,2011:323-327.
- [10] 李道品.低渗透油田开发决策论[M]第2版.北京,石油工业出版社,2016,129-132.
- [11] 杨满平,李允.考虑储层初始有效应力的岩石应力敏感性分析[J].天然气地球科学,2004,15(6):601-603.
- [12] 刘建东,张玉荣,沈露禾,等.储层应力敏感性三轴测试方法研究[J].复杂油气藏,2009,2(3):11-13.

(编辑 卞 炜)

(上接第319页)

- [14] 陈元千,郭二鹏.预测水驱油田体积波及系数和可采储量的方法[J].中国海上油气,2007,19(6):387-389.
- [15] 唐林,郭肖,邓钦月,等.一种预测水驱油田体积波及系数的新方法[J].新疆石油地质,2013,34(5):557-559.
- [16] 安桂荣,许家峰,周文胜,等.海上复杂河流相水驱稠油油田井网优化——以BZ油田为例[J].中国海上油气,2013,25(3):28-31.
- [17] 张金庆,安桂荣,耿站立,等.中国近海陆相典型沉积类型油田水驱高效开发模式探讨[J].中国海上油气,2017,29(2):70-77.
- [18] 邓景夫,李云鹏,贾晓飞,等.海上高含水期油田细分层系技术界限研究[J].特种油气藏,2018,25(2):116-119.
- [19] 蔡晖,阳晓燕,张占华,等.层间干扰定量表征新方法在渤南垦利区域的应用[J].特种油气藏,2018,25(4):91-94.
- [20] 张运来,廖新武,胡勇,等.海上稠油油田高含水期开发模式研究[J].岩性油气藏,2018,30(4):120-126.

(编辑 卞 炜)