

渤中BZ油田沙二段注水时机研究及应用

凌浩川, 吴 铮, 孙 强, 王记俊, 赵 卓

(中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459)

摘要:渤中BZ油田沙二段属于异常高压低渗透油藏, 压力系数1.42, 合理注水时机的确定对低渗透油藏注水开发至关重要。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透储层应力敏感、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。通过实际注水试验生产效果表明: 在压力系数降至1.0开始注水, 既能充分利用天然能量, 又能防止油层脱气、保证水驱开发效果, 为油田后续全面水驱开发提供技术支撑。

关键词:低渗透油藏; 注水时机; 应力敏感; 压力系数

中图分类号:TE348 **文献标志码:**A

Study and application of water injection timing in the second member of Sha Formation in BZ Oilfield of Bozhong

LING Haochuan, WU Zheng, SUN Qiang, WANG Jijun, ZHAO Zhuo

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

Abstract: The second member of Sha Formation in the BZ Oilfield of Bozhong is an abnormally high-pressure and low-permeability reservoir with a pressure coefficient of 1.42. It is very important to determine the reasonable timing of water injection for the water injection development in low-permeability reservoirs. Based on fully investigating the timing of water injection in abnormally high-pressure and low-permeability onshore oilfield and considering the stress sensitivity of low-permeability reservoir, the pressure difference between injection and production wells as well as numerical simulation results, the optimal timing of water injection in the Second member of Sha Formation in BZ Oilfield of Bozhong is proposed to be the injection of water at the time when the pressure coefficient is lowered to 1.0. The results of the actual water injection test show that when the pressure coefficient drops to 1.0, starting water injection can not only make full use of natural energy, but also prevent oil reservoir degassing, ensure the effect of water drive development, and provide technical support for the subsequent comprehensive water-driven development of oil fields.

Key words: low permeability reservoir; water injection timing; stress sensitivity; pressure coefficient

引用格式:凌浩川, 吴铮, 孙强, 等. 渤中BZ油田沙二段注水时机研究及应用[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(3): 325-328.

LING Haochuan, WU Zheng, SUN Qiang, et al. Study and application of water injection timing in the second member of Sha Formation in BZ Oilfield of Bozhong [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(3): 325-328.

合理注水时机的确定对油藏注水开发至关重要。注水时间早, 油藏可延长自喷采油期以及提高油井产量; 但是, 早期注水相对晚期注水投资大、油井无水采油期缩短、不能充分利用油藏天然能量。注水时间晚, 可以充分利用油藏的天然能量, 减少注水投资; 但是, 地层原油脱气后, 原油黏度升高, 会降低水驱开发的效果。低渗透油藏大多数弹性能量低、渗流阻力大, 加之应力敏感效应, 油井投产后压力和产量下降快, 并且压力、产量降低后恢复起来十分困难^[1-4]。因此陆地低渗透油田一般主张超前注水以降低低渗透储层应力敏感效应对注水开

发的影响, 提高油井的产液能力^[5-7]。对于异常高压低渗油藏注水一般主张早期充分利用天然能量开发, 当压力系数降至一定程度后才开始注水补充地层能量, 但是关于异常高压注水时机的选择也没有统一的定论, 一般而言当地层压力降至静水压力左右开始注水^[8-9]。渤中BZ油田沙二段属于异常

收稿日期: 2023-03-01; 改回日期: 2023-04-16。

第一作者简介: 凌浩川(1987—), 硕士, 高级工程师, 主要从事油藏工程和数值模拟方面的研究。E-mail: xuanmuzixu@163.com。

基金项目: 中国海洋石油有限公司“十四五”重大科技项目“海上油田大幅提高采收率关键技术”(KJGG2021-0505)。

高压低渗油藏,油藏平均埋深3 300 m,原始地层压力46.9 MPa,压力系数1.42。在充分调研陆地异常高压低渗油藏注水时机的基础上,综合考虑低渗储层应力敏感、注采压差以及水驱采收率,开展油田的注水时机研究。

1 相似油田调研

通过对陆上相似油田的调研分析可知:对于异

常高压一般低渗透油藏,当地层压力下降到静水柱压力或饱和压力附近时注水时机最佳,当地层压力下降至静水柱压力0.8倍时开始注水的油藏水驱开发效果明显较差(见表1)。

渤中BZ油田沙二段储层平均渗透率 $31.5\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,原始地层压力系数1.42,也属于异常高压一般低渗透油藏,注水时机的选择对水驱开发效果影响较大。

表1 异常高压油田开发状况简表^[10]

油田区块	开采层位	埋藏深度/m	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	原始地层压力/MPa	压力系数	饱和压力/MPa	注水时地层压力/MPa	2000年底采出程度/%	2000年底含水率/%
大港马西	沙一段	3 944	11	56.8	1.44	38.6	38.8	35.1	63.3
中原文东	沙二段	3 450	32	59.9	1.75	34.7	33.5	19.3	77.3
尕斯库勒	沙三段	3 478	48	59.1	1.70	11.9	39.3	25.9	42.0
胜利牛20块	沙三段	3 050	19	45.5	1.49	7.95	23.9	10.7	57.0

2 注水时机研究

2.1 应力敏感对注水时机影响

根据渤中BZ油田沙二段低渗储层的应力敏感实验数据,5块不同渗透率级别岩心的渗透率损失

率为9.84%~45.31%。渗透率为 $36.62\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的岩心渗透率损失率仅为9.84%,渗透率为 $0.64\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的岩心渗透率损失率达到了45.31%,渗透率越小的岩心应力敏感越严重(见表2)。但总体而言,渤中BZ油田沙二段应力敏感性表现为弱—中等偏弱。

表2 渤中BZ油田沙二段岩心应力敏感实验数据

项 目	岩心1	岩心2	岩心3	岩心4	岩心5
渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	36.62	18.22	5.74	3.36	0.64
渗透率损失率/(有效应力5 MPa增加至40 MPa)	9.84	16.74	20.38	33.33	45.31
渗透率损失率/(有效应力30 MPa增加至40 MPa)	1.02	3.19	3.59	3.86	5.41

储层初始条件下存在一定的有效应力,这会导致油藏实际应力敏感较室内实验测试的要小^[11-12]。沙二段上覆岩石压力为75.9 MPa,油藏在原始地层压力条件下,储层有效应力已经接近30 MPa,在此条件下增加有效应力,其渗透率损失率将不到6%;但随着地层压力降低,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(见图1)。

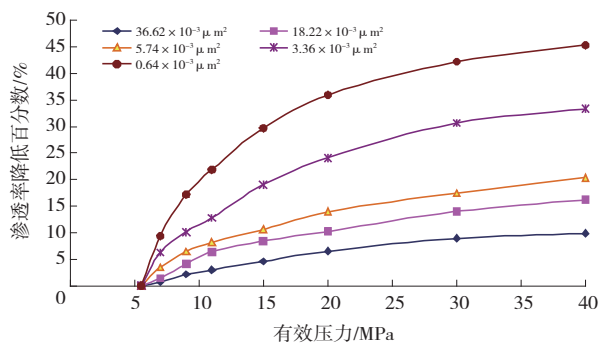


图1 渤中BZ油田沙二段不同岩心应力敏感实验结果

2.2 注采压差对注水时机要求

根据国内油田注水开发实践经验,为保证注水

安全,最大井底压力取油层破裂压力的0.85倍,同时根据渤中BZ油田实测油层破裂压力计算注水井最大井口压力(见表3)。

$$p_{\max} = 0.85p_f - \frac{\rho_w gh}{1000} + p_s \tag{1}$$

式中, p_f 为破裂压力,MPa; p_{\max} 为最大井口压力,MPa; p_s 为沿程摩阻,MPa; ρ_w 为水密度, g/m^3 ; h 为储层中深,m。

油田注水井实际最大注水压力25 MPa,最大井底压力可达58 MPa,考虑注水压差15 MPa,因此注水时地层压力最高保持水平为43 MPa,即地层压力系数1.3。渤中BZ油田沙二段油藏饱和压力为17.8 MPa,为了防止油层脱气导致开发效果变差,油井最低井底流压保持在饱和压力的0.85,即油井最低井底流压15.1 MPa,考虑生产压差15 MPa,因此地层压力的最低保持水平为30.1 MPa,即地层压力系数为0.9。考虑注采压差,渤中BZ油田沙二段注水时机应该在压力系数降至0.9~1.3之间。

表3 渤中BZ油田沙二段破裂压力和最大井口注水压力

井区	储层中深/ m	破裂压力/ MPa	最大井底压力/ MPa	最大井口压力/ MPa
BZ24-1-4	3 342	69.5	59.1	25.7
BZ24-1-5	3 314	68.9	58.6	25.5

2.3 注水时机数值模拟研究

为了研究渤中BZ油田沙二段合理注水时机,基于目前井网(5注14采),分别设计了5个方案进

行数值模拟预测。当沙二段油藏压力下降至某一压力系数时开始考虑注水井保持注采平衡注水,当含水达到98%时关井,得到不同压力系数开始注水的采收率(见图2)。从数模结果可以分析得出:当地层压力系数降至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导致的原油黏度增加从而影响水驱开发效果。因此,渤中BZ油田沙二段最佳的注水时机是地层压力系数降至1.0左右。

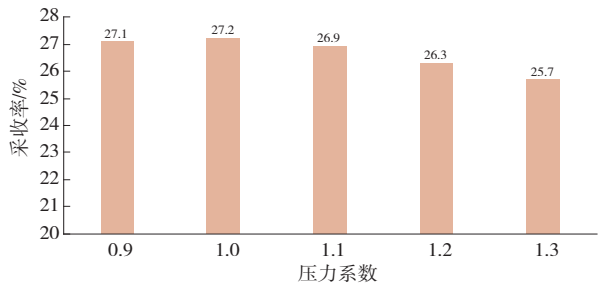


图2 渤中BZ油田沙二段不同压力系数下开始注水的水驱采收率

3 实际应用

渤中BZ油田沙二段于2005年2月投产,生产7年后地层压力系数逐渐降至1.0左右。油田自2012年开始开展注水试验,形成了目前的5注14采井网。实施注水以来,油田液量稳定在600 m³/d水平,年自然递减率控制在15%以内。尤其是2017年以来通过增注和智能流场调控,在无新井实施的情况下实现了连续3年持续稳产(见图3)。

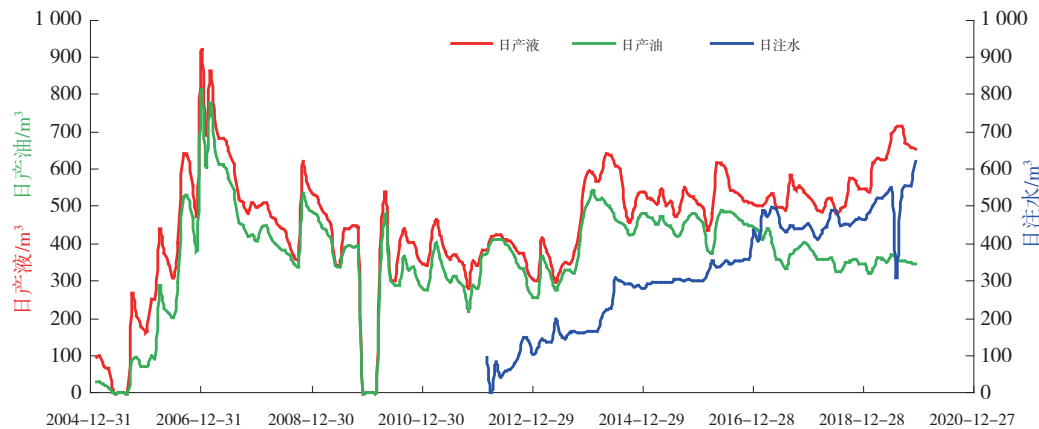


图3 渤中BZ油田沙二段注采曲线

从沙二段含水与采出程度曲线可以看出,在地层压力系数降至1.0开始全面注水后,取得了较好

的水驱开发效果,目前采出程度达到了16.3%,预计目前井网采收率能达到27.2%(见图4)。

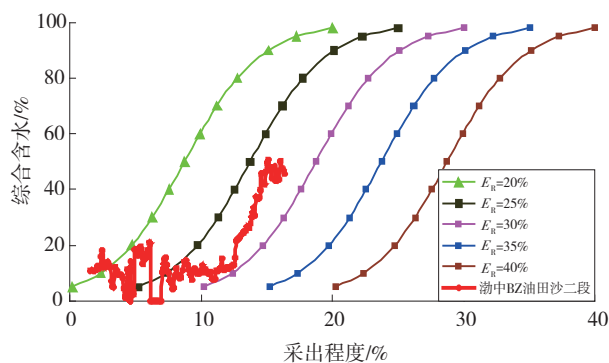


图4 渤中BZ油田沙二段含水与采出程度曲线

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)