

应力敏感对裂缝性油藏合理注水时机及压力保持的影响

郑浩, 苏彦春, 张迎春, 王月杰

中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300452

摘要 对于具有应力敏感的裂缝性油藏,在开发过程中因地层压力下降导致基质与裂缝体积缩小,渗流能力降低。如何有效抑制这种油藏特性对开发效果和最终采收率的影响,是制定裂缝性油藏开发策略的关键。本文以渤海某裂缝性油藏为例,对应力敏感与注水时机及地层压力保持水平之间的密切关系进行分析和研究。结果表明:在不考虑应力敏感时,裂缝性油藏合理注水时机为地层压力降至饱和压力时实施注水;在考虑应力敏感时,裂缝性油藏合理注水时机由应力敏感程度决定。当油藏压力降至饱和压力处渗透率保留率在80%以上时,注水时机为地层压力降至饱和压力时实施注水。否则,必须在原始地层压力实施注水。同时,裂缝性油藏合理地层压力保持水平应该维持合理注水时机下的地层压力不变,但考虑到后期提液、打井等挖潜措施及综合调整的实施,可根据实际情况适当提高。

关键词 应力敏感;裂缝性油藏;注水时机;压力水平;数值模拟

中图分类号 TE341

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.01.003

Effects of stress sensitivity on reasonable water-flooding time and pressure level in fractured reservoir

ZHENG Hao, SU Yanchun, ZHANG Yingchun, WANG Yuejie

Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Limited, Tianjin 300452, China

Abstract For stress-sensitive fractured reservoirs, the decrease of seepage ability is inevitable due to reduction of pore volume caused by formation pressure drop in the process of development. How to effectively restrain the influence of it on the development effectiveness and ultimate recovery is the key to developing fractured reservoir development strategies. This paper takes a fractured reservoir in Bohai Oilfield as an example to study the effects of stress sensitivity on reasonable water-flooding time and formation pressure level. The results show that without consideration of stress sensitivity, the reasonable water-flooding time was when the formation pressure dropped to saturation pressure, while with consideration of stress sensitivity, it was determined by the degree of stress sensitivity. When the retention rate of permeability was above 80% at reservoir saturation pressure, the reasonable water-flooding time was also when the formation pressure dropped to saturation pressure. Otherwise, water-flooding must be carried out at original reservoir pressure. Meanwhile, the formation pressure for reasonable water-flooding time should be kept constant, or slightly elevated with consideration of subsequent developing measures and comprehensive adjustment.

Keywords stress sensitivity; fractured reservoir; water-flooding time; pressure level; numerical simulation

在裂缝性油藏开发过程中,随着油藏压力下降,岩石骨架承受的有效应力逐渐增加,岩石发生弹塑性形变导致储层孔隙结构发生变化,称为油藏应力敏感(又称压敏效应)^[1-3]。

目前,许多学者通过岩石应力敏感性实验研究了裂缝性油藏孔、渗随有效应力变化及应力敏感评价方法和标准^[4-7];也有一些学者通过油藏工程理论推导或油藏数值模拟研究

收稿日期:2014-06-19;修回日期:2014-07-21

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05024-002-007)

作者简介:郑浩,工程师,研究方向为油气田开发及油藏工程,电子信箱:zhenghao2@cnooc.com.cn

引用格式:郑浩,苏彦春,张迎春,等.应力敏感对裂缝性油藏合理注水时机及压力保持的影响[J].科技导报,2015,33(1):22-27.

了应力敏感对油井产能及开采特征等方面的影响^[8-13],但在应力敏感与裂缝性油藏注水时机方面研究甚少^[14-16],只是提出了考虑压敏效应计算合理注水时机的方法,并没有揭示注水时机、压力保持水平与抑制应力敏感对储层伤害之间的密切关系。因此,本研究以渤海某裂缝性油藏为例,通过油藏数值模拟研究应力敏感对裂缝性油藏合理注水时机及地层压力保持水平的影响,并给出具体建议。

1 裂缝性油藏模型建立

利用 Petrel 软件在建立统一构造格架基础上,针对基质系统和裂缝系统不同储集空间特点选择相应物性建模方法建立模型。其中,裂缝系统应用 Petrel 软件集成的离散化裂缝网格建模 (DFN) 技术实现对裂缝系统的有效分布规律描述与预测,最终整合输出符合油藏非均质性特点的基质和裂缝双重介质模型。

应用 Eclipse 油藏数值模拟软件 E100 黑油模块将 Petrel 双重介质模型转换为油藏模型。其中,平面网格数 $32 \times 29 = 928$,网格步长 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$;纵向模拟层数 20,网格步长 4.4 m 。由于双重介质模型包括基质和裂缝两套系统,因此模型实际三维总网格数为上述网格数 2 倍。

油藏总地质储量 $828.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,包括基质储量 $621.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、裂缝储量 $207.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,无边底水存在。正方形反五

点井网,开发井数 5 口。其中,水平采油井 4 口、水平注水井 1 口。地质油藏基础参数:基质孔隙度 5.72% ,基质渗透率 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,裂缝孔隙度 1.08% ,裂缝渗透率 $465 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,油藏温度 75°C ,中部海拔深度 -1760 m ,原始地层压力 17.50 MPa ,饱和压力 10.25 MPa ,原油密度 0.80 g/cm^3 ,地层原油黏度 $2.36 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,地层原油体积系数 $1.172 \text{ m}^3/\text{m}^3$,原始溶解气油比 $35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

2 不考虑应力敏感时的注水时机及压力保持影响分析

2.1 注水时机

为研究裂缝性油藏不同地层压力下降水平下实施注水对开发效果的影响,设计了保持原始地层压力、地层压力下降 1.00 、 2.00 、 3.00 、 4.00 、 5.00 、 6.00 MPa ,以及地层压力降至饱和压力 8 套注水时机方案进行对比分析。

从图 1(a)可以看出,随着注水时机的逐渐延后,地层压力不断降低(由 17.50 MPa 下降至 10.25 MPa)、采收率逐渐提高(由 22.4% 提高至 26.5%);从图 1(b)可以看出,见水时间与注水时机一致。方案 1 在原始地层压力状态下实施注水开发,无水采油期短且采出程度仅为 2% 。方案 8 在地层压力降至饱和压力时实施注水开发,无水采油期较长且采出程度为 7% 。与方案 1 相比,方案 8 最终采收率提高 4% 。

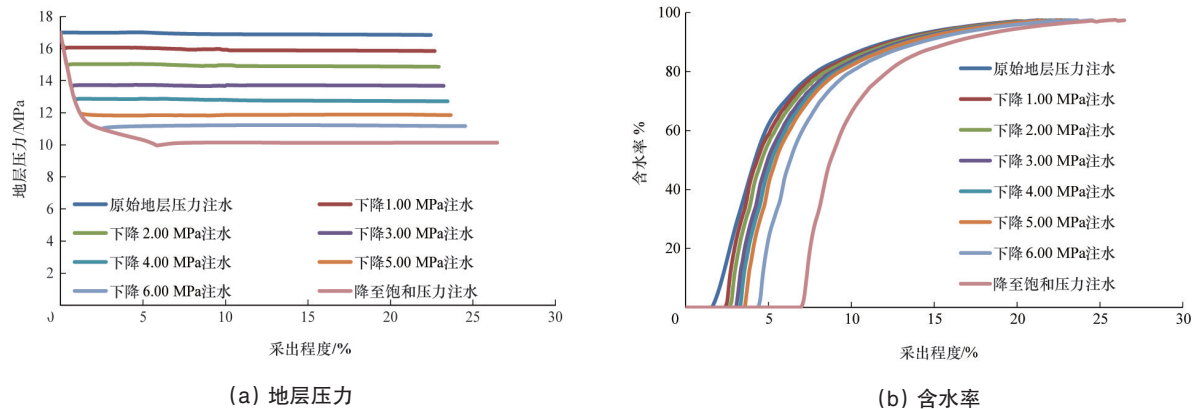


图 1 不考虑应力敏感时的裂缝性油藏地层压力、含水率与采出程度关系曲线

Fig. 1 Relationships of formation pressure, water cut and recovery efficiency in fractured reservoir without considering stress sensitivity

由图 2(a)可以看出,保持原始地层压力注水方案基质系统依靠渗吸作用采收率接近 6% 。随着注水时机的逐渐延后,基质系统窜流作用越发明显。方案 8 通过基质与裂缝系统压差造成的窜流在天然能量开发阶段采出程度高达 3% ,其对基质系统动用程度的提高不容忽视。与此同时,地层压力降至饱和压力注水方案基质系统采收率为 11.3% ,与保持原始地层压力注水方案相比提高 5% 。一方面由于饱和压力附近,地下原油黏度最小、最易流动;另一方面,地下原油逐渐出现脱气,但气泡数量少、分布散且体积小,脱出的自由气无法聚并形成连续相,不易产生贾敏效应。因此,溶解气的

膨胀能成为基质系统原油流动的有效动力,在一定程度上提高了采收率。

从图 2(b)可以看出,随着注水时机逐渐延后,地层压力下降速度越来越快。这主要由于裂缝系统渗流阻力很小且排油过程近似管流,无论天然能量还是注水开发均可达到较高的波及体积和动用程度。正因如此,保持原始地层压力注水方案和地层压力降至饱和压力注水方案采收率差别不大。与基质系统相比,饱和压力状态下溶解气析出对于扩大裂缝系统波及体积以及驱替裂缝系统原油作用较小。由此可见,合理的注水时机,对提高基质系统采收率意义更大。

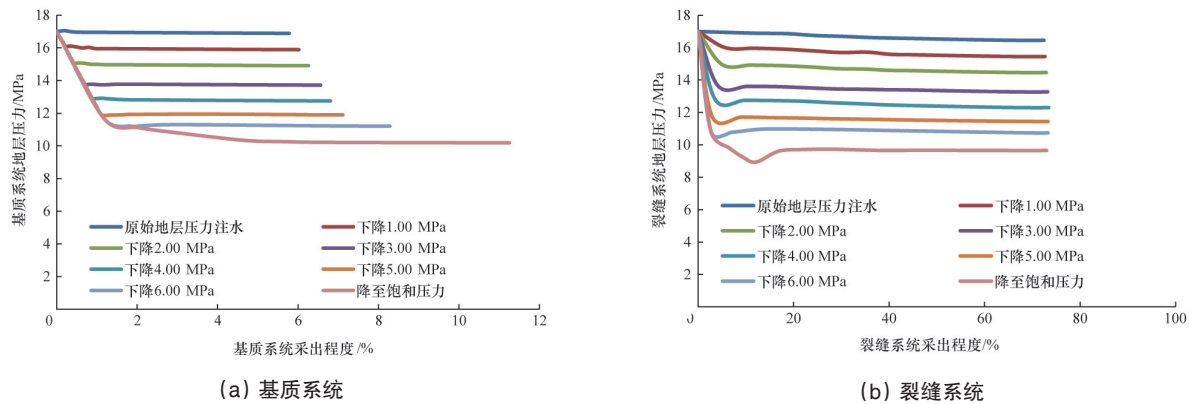


图2 不考虑应力敏感时的基质系统、裂缝系统地层压力与采出程度关系曲线

Fig. 2 Relationships of formation pressure and recovery efficiency in matrix and fracture systems without considering stress sensitivity

2.2 油藏压力保持水平

在确定油藏压力降至饱和压力实施注水为最佳注水时机基础上,设计了地层压力维持饱和压力附近不变、恢复1.00、2.00、3.00、4.00、5.00、6.00 MPa以及恢复至原始地层压力8套注水恢复地层压力方案,对合理的地层压力保持水平进行分析和研究。

由图3(a)可以看出,基质系统随着地层压力的逐渐恢复(由10.25 MPa提高至17.50 MPa),采收率逐渐降低(由11.3%下降至6.7%)。主要原因是注水恢复地层压力过程中,首先压力恢复的是裂缝系统,通过裂缝系统地层压力的提高恢复基质系统地层压力,从而达到整个系统地层压力的恢复。在

此期间,基质系统通过系统压差发生反向窜流,原油不但无法采出甚至有所增加,从而导致采出程度在地层压力恢复阶段没有变化甚至略有降低。当整个系统地层压力恢复至方案设计值并维持不变时,基质系统中的原油才通过渗吸作用逐渐采出,而维持地层压力在饱和压力附近注水开发过程,基质系统中的原油一直通过渗吸作用采出,采收率最高。

从图3(b)可以看出,裂缝系统随着地层压力的逐渐恢复(由10.25 MPa提高至17.50 MPa),采收率变化不大(71%左右)。主要原因是裂缝系统油水流动近似管流,注水的作用主要体现在恢复地层压力,对提高裂缝系统动用程度作用较小。

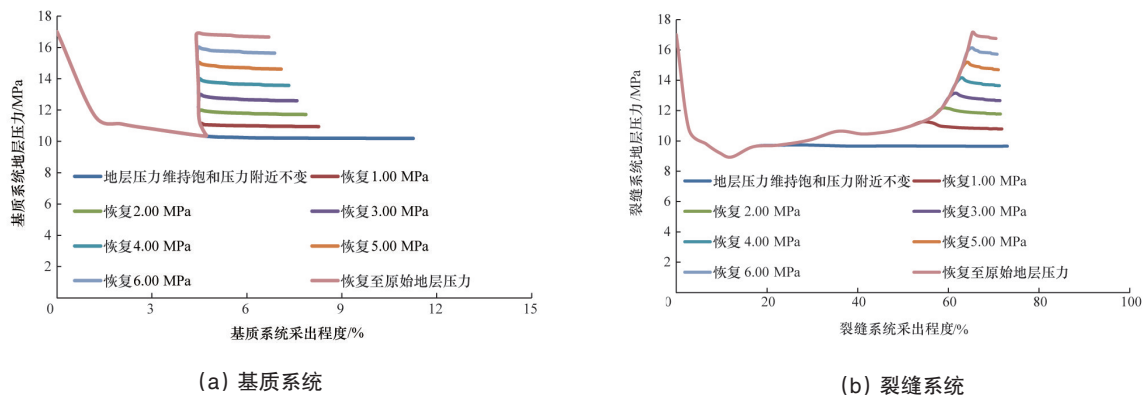


图3 不考虑应力敏感时的基质系统、裂缝系统压力保持水平关系曲线

Fig. 3 Formation pressure levels in matrix and fracture systems without considering stress sensitivity

3 考虑应力敏感时的注水时机及压力保持影响分析

对于应力敏感的裂缝性油藏而言,如果注水时机过早,虽然应力敏感对储层孔、渗等物性的伤害得到有效抑制,却不能充分利用天然能量,可能过早出现注入水沿裂缝的水淹、水窜;如果注水时机过晚,油藏生产能力会由于地层压力水平过低而大幅下降;另一方面,极有可能发生地层脱气而

使原油性质变差,并且由于气相的存在加剧贾敏效应。最为重要的是,应力敏感对储层孔、渗物性的伤害将不可避免且无法恢复。

3.1 应力敏感对开发效果影响

为研究应力敏感考虑与否对裂缝性油藏开发效果影响,以无应力敏感条件下地层压力降至饱和压力实施注水开发

为对比方案,设计如下5种不同程度应力敏感油藏压力降至饱和压力实施注水开发方案,应力敏感程度见图4。

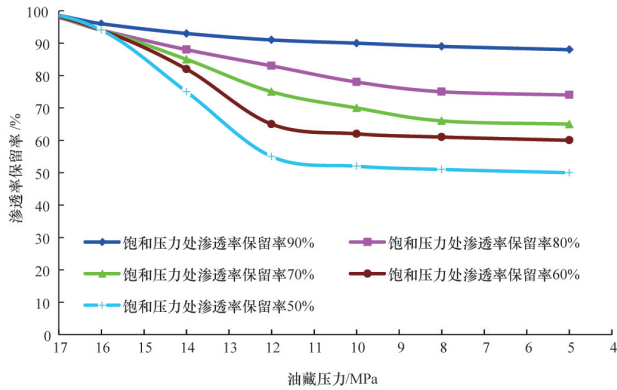
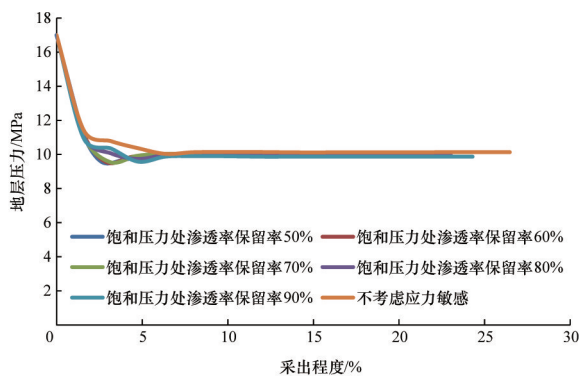


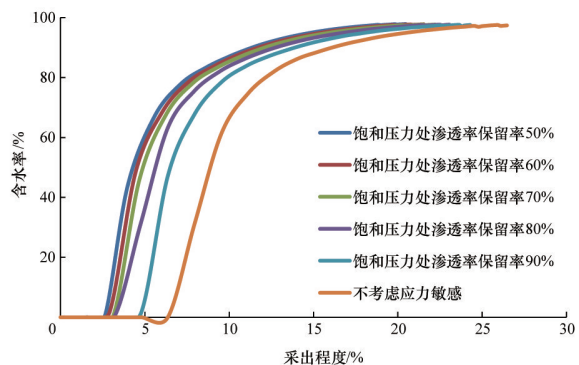
图4 不同应力敏感程度下裂缝性油藏渗透率随油藏压力变化曲线

Fig. 4 Variation of permeability with formation pressure of fractured reservoir under different stress sensitivity

从图5可以看出,随着应力敏感程度的加剧,裂缝性油藏地层能量保持能力降低、地层压力下降速度加快,从而导致降至饱和压力实施注水开发时间以及油藏见水时间的提前,采收率从26.5%下降至20.6%。在相同采出程度下,应力敏感程度越严重,含水率越高,最终采收率越低。



(a) 地层压力

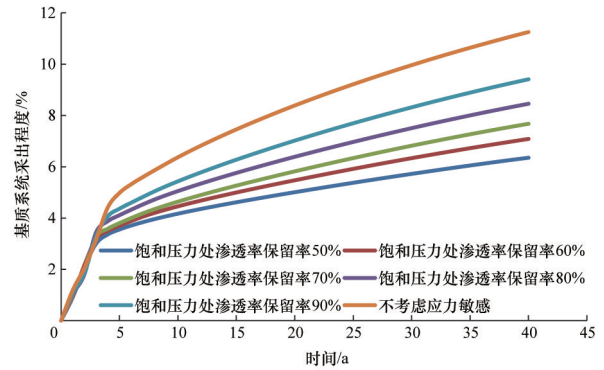


(b) 含水率

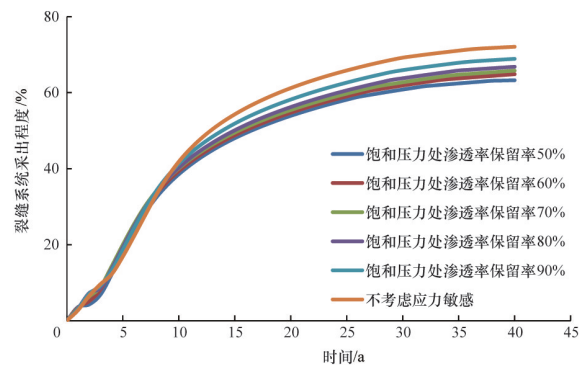
图5 不同应力敏感程度对裂缝性油藏开发效果影响关系曲线

Fig. 5 Influence of different stress sensitivity on development effectiveness of fractured reservoir

从图6可以看出,随着应力敏感程度的加剧,基质与裂缝系统储层渗流能力均有下降,严重影响了开发效果。其中,基质系统采收率从11.3%下降至6.4%;裂缝系统采收率从72.0%下降至63.0%。



(a) 基质系统



(b) 裂缝系统

图6 不同应力敏感程度对基质系统、裂缝系统开发效果影响关系曲线

Fig. 6 Influence of different stress sensitivity on development effectiveness in matrix and fracture systems

3.2 注水时机

为研究不同应力敏感程度对注水时机影响,以无应力敏感条件下保持原始地层压力实施注水开发为对比方案,将第3.1节所述5种不同程度应力敏感方案与之对比、分析。

从图7可以看出,随着应力敏感程度的加剧,采收率逐渐降低。当油藏压力降至饱和压力处渗透率保留率在80%以上时,其采收率将高于保持原始地层压力实施注水开发方案。即先期利用天然能量开发,可以充分发挥基质系统与裂缝系统间的窜流作用和溶解气的膨胀能。当油藏压力降至饱和压力实施注水开发时,可以最大程度延缓注入水沿裂缝水淹、水窜并有效保持地层能量。两个开发阶段对裂缝性油藏动用程度和最终采收率的提高大于保持原始地层压力实施注水开发抑制应力敏感的贡献;而当油藏压力降至饱和压力处渗透率保留率在80%以下时,应力敏感对裂缝性油藏最终采收率的影响将起主导作用。此种情况下,裂缝性油藏必须在原始地层压力实施注水开发。

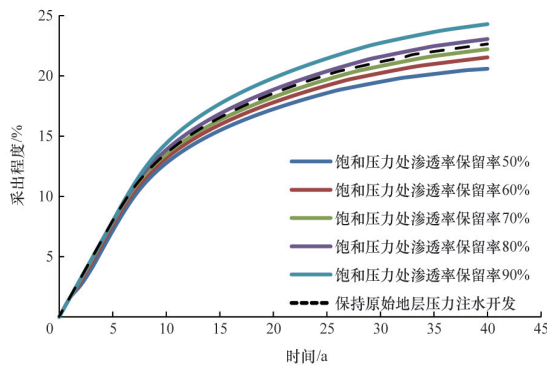
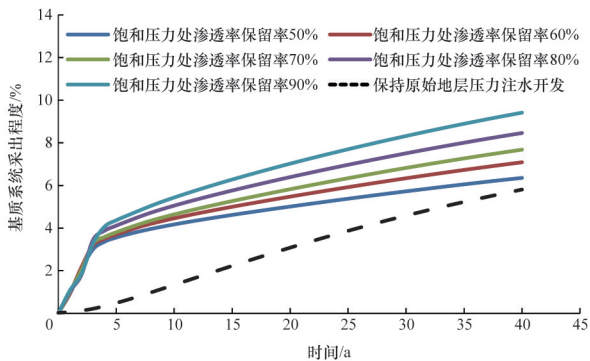
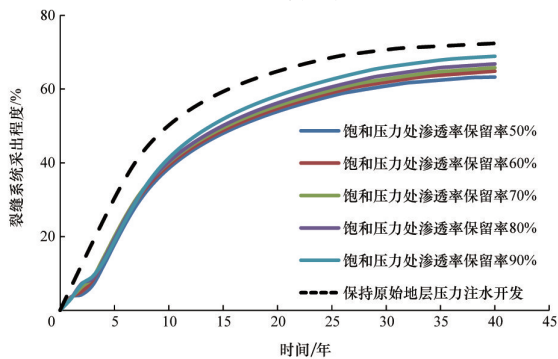


图7 不同应力敏感程度下裂缝性油藏采出程度曲线
Fig. 7 Recovery efficiency of fractured reservoir under different stress sensitivity

从图8(a)可以看出,随着应力敏感程度的加剧,基质系统采收率逐渐降低,但仍高于保持原始地层压力实施注水开发方案。由此可见,应力敏感的存在对基质系统采收率有一定影响,但适时实施注水可以充分发挥基质系统的窜流和渗吸作用,其对采收率的总贡献要大于保持原始地层压力实施注水开发过程中基质系统仅能发挥的渗吸作用;从图8(b)可以看出,随着应力敏感程度的加剧,裂缝系统采收率逐渐降低,且均低于保持原始地层压力实施注水开发方案。由此可见,应力敏感的存在对裂缝系统孔隙空间的压实和渗流能力的降低比基质系统更为明显、影响更大。



(a) 基质系统



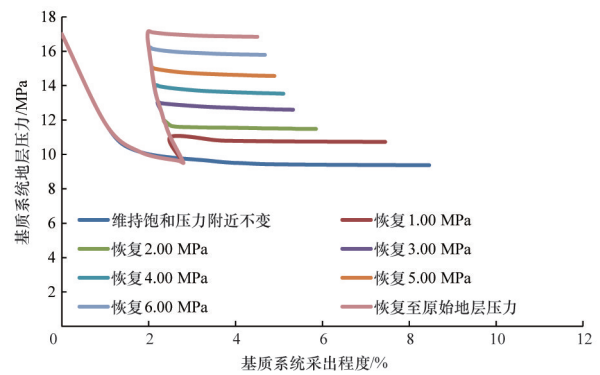
(b) 裂缝系统

图8 不同应力敏感程度下基质系统、裂缝系统采出程度曲线
Fig. 8 Recovery efficiency of matrix and fracture systems under different stress sensitivity

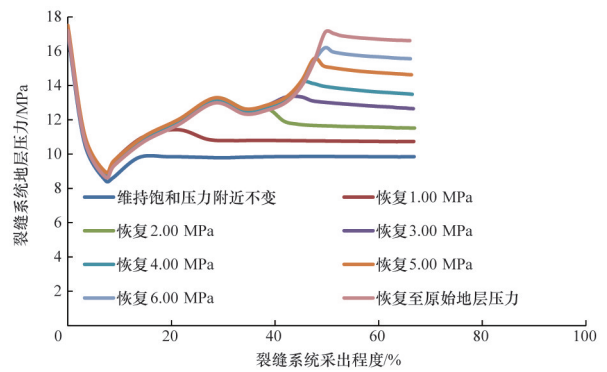
3.3 油藏压力保持水平

针对地层压力降至饱和压力处渗透率保留率在80%以上的油藏,最佳注水时机为饱和压力注水开发。在此基础上,本研究设计了同第2.2节的8套注水恢复地层压力方案,对应力敏感的裂缝性油藏(地层压力降至饱和压力处渗透率保留率80%)合理压力保持水平进行了的分析和研究。

如图9所示,与第2.2节无压敏效应情况一样,各方案随着地层压力的逐渐恢复,基质系统与裂缝系统间的反向窜流越发明显、地层压力恢复的难度越来越大,采收率逐渐降低。通过注水提高裂缝性油藏地层压力,抑制应力敏感、提高渗流能力的同时,更加快了注入水沿裂缝的水淹、水窜,从而导致含水率的快速上升。



(a) 基质系统



(b) 裂缝系统

图9 应力敏感的裂缝性油藏(饱和压力处渗透率保留率80%)压力保持水平关系曲线

Fig. 9 Formation pressure levels of stress-sensitive fractured reservoir (with retention rate of permeability being 80% at saturation pressure)

4 结论

1) 在不考虑应力敏感情况下,裂缝性油藏合理注水时机为地层压力降至饱和压力时实施注水。这样可以最大限度利用地层能量充分发挥基质与裂缝系统间的窜流作用,同时延缓注入水沿裂缝的水淹、水窜,控制含水上升速度并有效保持地层能量。

2) 在考虑应力敏感情况下,裂缝性油藏合理注水时机由应力敏感程度决定。饱和压力处渗透率保留率在80%以上时,注水时机为地层压力降至饱和压力时实施注水。当饱和压力处渗透率保留率在80%以下时,应力敏感对裂缝性油藏孔、渗的压实和渗流能力的降低将起主导作用,必须在原始地层压力实施注水。

3) 具有应力敏感的裂缝性油藏合理地层压力保持水平应该是最大限度降低应力敏感对开发效果的影响,不能过分采用注水恢复地层压力来抑制应力敏感的发生。因此,建议裂缝性油藏维持合理注水时机下的地层压力不变,但考虑到后期提液、打井等挖潜措施及综合调整的实施,可根据实际情况适当提高。

参考文献(References)

- [1] 张李, 张茂林, 梅海燕, 等. 低渗透气藏应力敏感性分析及对开采的影响[J]. 特种油气藏, 2007, 14(3): 55-58.
Zhang Li, Zhang Maolin, Mei Haiyan, et al. Stress sensibility analysis of low permeability gas reservoir and its influence on exploitation[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2007, 14(3): 55-58.
- [2] 阮敏, 王连刚. 低渗透油田开发与压敏效应[J]. 石油学报, 2002, 23(3): 73-76.
Yuan Min, Wang Liangang. Low permeability oilfield development and pressure sensitive effect[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(3): 73-76.
- [3] 阮敏. 压敏效应对低渗透油田开发的影响[J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 2001, 16(4): 40-45.
Yuan Min. Effect of pressure-sensitive damage on the development of low permeability reservoirs[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition, 2001, 16(4): 40-45.
- [4] 兰林, 康毅力, 陈一健, 等. 储层应力敏感性评价实验方法与评价指标探讨[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(3): 1-4.
Lan Lin, Kang Yili, Chen Yijian, et al. Discussion on evaluation methods for stress sensitivities of low permeability and tight sandstone reservoirs[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005, 22(3): 1-4.
- [5] Zhu S Y. Experiment research of tight sandstone gas reservoir stress sensitivity based on the capillary bundle mode[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, USA, September 30-October 2, 2013.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. SY/T 5358—2002 储层敏感性流动实验评价方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
The people's Republic of China State Administration of Quality Supervision Inspection and quarantine, Chinese National Standardization Management Committee. SY/T 5358—2002 Formation damage evaluation by flow test[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [7] 李闽, 乔国安, 陈昊. 低渗砂岩储层岩石应力敏感实验与理论研究[J]. 钻采工艺, 2006, 29(4): 91-93.
Li Min, Qiao Guoan, Chen Hao. Experimental and theoretical study on rock stress-sensitivities in low permeability sandstone[J]. Drilling & Production Technology, 2006, 29(4): 91-93.
- [8] Tadesse W, John A, Najeeb A, et al. Pressure and rate analysis of fractured low permeability gas reservoirs: numerical and analytical dual-porosity models[C]. SPE Middle East Unconventional Gas Conference and Exhibition, Muscat, Oman, January 28-30, 2013.
- [9] Sarah P K, Turgay E. Analysis of production decline characteristics of a multisatge hydraulically fractured horizontal well in a naturally fractured reservoir[C]. SPE Eastern Regional Meeting, Lexington, Kentucky, USA, October 3-5, 2012.
- [10] Xu F, Guo X, Zhang Y, et al. Case study: Numerical simulation on formation damage in low-permeability gas reservoir[C]. Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Abuja, Nigeria, July 30-August 3, 2011.
- [11] Lei Q, Xiong W, Yuan J R, et al. Analysis of stress sensitivity and its influence on oil production from tight reservoirs[C]. SPE Eastern Regional Meeting, Lexington, Kentucky, USA, October 17-19, 2007.
- [12] Sun H D, Xiao X J, Yang J P, et al. Study on productivity evaluation and performance prediction method of over-pressured, stress-sensitive gas reservoirs[C]. SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, October 30-November 1, 2007.
- [13] Alcalde O R, Teufel L W. Diagnosis of formation damage by rock deformation/compaction through numerical well-test simulations[C]. SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, USA, February 15-17, 2006.
- [14] 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): 574-582.
Xie Xiaoqing, Jiang Hanqiao, Wang Quanzhu, et al. Discussion on pressure-sensitivity effect and water-flooding timing in low-permeability reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 574-582.
- [15] 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.
Wang Daofu, Li Zhongxing, Zhao Jiyong, et al. Advance water-flooding theory for low-permeability reservoirs and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 78-81.
- [16] 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 Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 95-98.

(责任编辑 刘志远)



《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。