

低渗透油藏平面波及系数评价及改善潜力

曹仁义¹,周焱斌^{1,2},熊琪^{1,3},阎逸群¹

(1.中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249; 2.中海石油(中国)天津分公司,天津 300450;

3.中海石油(中国)深圳分公司研究院,广东 广州 510000)

摘要:对于裂缝较发育的低渗透油藏,其各向异性对平面波及系数影响较大,目前还没有形成一套完整的评价方法。通过引用等饱和度前缘界面来定义平面波及系数,利用数值模拟流线技术,建立了一套低渗透油藏平面波及系数的评价方法。研究结果表明,利用该评价方法计算的见水时平面波及系数与油藏工程方法的计算结果一致,并验证了其合理性。基于长庆油区某开发区块资料,利用该评价方法绘制出正方形反九点井网不同各向异性系数下的平面波及图版,分析不同各向异性系数下的平面波及特征,并针对低渗透油藏中缓解平面矛盾、改善平面波及状况的角井转注、水平井加密和堵水调剖等对策,预测调整后平面波及系数提高幅度,并绘制相应图版。

关键词:低渗透油藏 各向异性 平面波及系数 评价方法 改善潜力

中图分类号:TE348

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)01-0074-04

Evaluation and improvement of areal sweep efficiency for low permeability reservoir

Cao Renyi¹, Zhou Yanbin^{1,2}, Xiong Qi^{1,3}, Yan Yiqun¹

(1.College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China; 2.Tianjin Branch Company, China National Offshore Oil Corporation, Tianjin City, 300450, China; 3.Research Institute of Shenzhen Branch Company, China National Offshore Oil Corporation, Guangzhou City, Guangdong Province, 510000, China)

Abstract: In the low permeability reservoir where nature fractures developed, anisotropy has a great impact on areal sweep efficiency of water flooding. However the current methods have not taken the influence of anisotropy into consideration. The frontal water isosaturation interface was introduced, and the concept of areal sweep efficiency was defined. A new method for evaluating the areal sweep efficiency was established in the low permeability reservoir using streamline simulation technique. The results show that the calculated areal sweep efficiency while water breakthrough by this method is the same as that by reservoir engineering method. Based on the data from a block in Changqing oilfield, the method was applied to make the charts of the areal sweep efficiency under various aeolotropies in quadrate inverted nine-spot pattern, and the areal sweep properties under different aeolotropies were analyzed. Improvement strategies of easing areal sweep contradictions were proposed and the range of the increased areal sweep efficiency after the adjustment was predicted and the corresponding charts were made.

Key words: low permeability reservoir; anisotropy; areal sweep efficiency; evaluation method; improvement potential

目前,对于水驱开发油藏平面波及系数^[1]如何定量评价,如何反映平面波及的效果等相关研究较少。有些学者把初始含油饱和度与任意时刻含油

饱和度的差值大于某一临界值时,定义为平面波及^[2],但对于临界值定义为多少才算合理并没有定论;还有些学者用流管理论对平面波及系数进行研究^[3],

收稿日期:2014-11-11。

作者简介:曹仁义(1981—),男,山东潍坊人,讲师,博士,从事油气藏数值模拟与动态分析研究。联系电话:(010)89733218, E-mail: caorenyi@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“鄂尔多斯盆地大型低渗透岩性地层油气藏开发示范工程”(2011ZX05044),国家教育部博士点基金资助项目“致密油藏亚微米—超纳米级孔喉渗流机理研究”(20130007120014),北京市自然科学基金资助项目“介观尺度纳米级孔喉渗流机理研究”(3144033)。

但是流管理论只局限地应用于各向同性油藏的平面波及系数,不能反映各向异性较强的低渗透油藏的平面波及系数,且计算较复杂。因此,笔者引用等饱和度前缘界面,对平面波及系数进行重新定义,以正方形反九点井网为例,通过数值模拟流线技术,建立低渗透油藏平面波及系数评价方法,分析长庆油田低渗透油藏某区块各向异性的平面波及特征,并针对低渗透油藏缓解平面矛盾、改善平面波及状况的角井转注、水平井加密和堵水调剖^[4-11]对策,进行油藏平面波及系数改善潜力研究。

1 低渗透油藏平面波及系数评价方法的建立

1.1 平面波及系数的定义

在数值模拟流线技术中,将平面波及定义为前缘含水饱和度端面沿流线推进过的轨迹。平面波及系数定义为某一时刻等饱和度前缘端面形成的界面所围成面积与井网控制面积之比,其表达式为

$$E_A = \frac{S_{ADO}}{S_{ABC}} \quad (1)$$

式中: E_A 为平面波及系数; S_{ADO} 为波及面积, m^2 ; S_{ABC} 为1/8单元的井网面积, m^2 。

1.2 平面波及系数的计算

在计算平面波及系数之前,需要确定某一时刻等饱和度前缘界面的位置,包括3个步骤。

步骤1 根据油水相对渗透率曲线和含水率的定义式,得到含水率与含水饱和度的关系式为

$$f_w = \frac{S_{wD}^n}{S_{wD}^n + A(1 - S_{wD})^m} \quad (2)$$

其中

$$S_{wD} = \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{or} - S_{wc}} \quad (3)$$

式中: f_w 为含水率; S_{wD} 为无因次含水饱和度; n , A 和 m 皆为常数; S_w 为含水饱和度; S_{wc} 为束缚水饱和度; S_{or} 为残余油饱和度。

步骤2 水驱前缘含水率对含水饱和度导数的表达式为

$$\left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_{S_{wf}} = \frac{f_w(S_{wf})}{S_{wf} - S_{wc}} \quad (4)$$

式中: S_{wf} 为前缘含水饱和度。

式(2)两端对 S_w 求导并结合式(4)可得到水驱前缘含水饱和度的表达式为

$$S_{wD}^n + A(1 - S_{wD})^m =$$

$$An(1 - S_{wD})^m + AmS_{wD}(1 - S_{wD})^{m-1} \quad (5)$$

式中: S_{wD} 为无因次水驱前缘含水饱和度。

步骤3 前缘含水饱和度可通过迭代法进行求解。通过数值模拟流线技术可以得到某一时刻每根流线上水驱前缘含水饱和度端面的位置,并将所有水驱前缘含水饱和度端面连接起来,形成等饱和度前缘端面,再应用数值模拟软件计算平面波及面积,从而求得任意时刻的平面波及系数。

1.3 平面波及系数计算方法的适用性

利用数值模拟方法建立五点井网的理论模型,通过对比前人在平面波及系数的评价方法及成果来验证平面波及系数计算方法的适用性。根据式(5)所计算的前缘含水饱和度为0.664,进而求得见水时平面波及系数为0.682。前人用流管理论计算五点法井网见水时的平面波及系数为0.71^[12];根据丹尼洛夫研究结果可以得到见水时的平面波及系数为0.702^[13];根据Dyes的经验公式计算见水时的平面波及系数为0.697^[14]。对比以上计算结果可以看出,数值模拟流线技术计算的结果偏小。其原因是在流线模拟过程中,考虑了油水粘度差和油水重力差对平面波及系数的影响;流管理论没有考虑这些影响因素;经验公式没有考虑油水重力差的影响。另外,渗流过程中存在死油区,也会导致数值模拟流线技术计算结果偏小,但其更接近于实际油藏。

2 低渗透油藏平面波及系数评价方法的应用

以长庆油区低渗透油藏某区块为例,利用新建立的低渗透油藏平面波及系数评价方法进行评价研究。研究区储量丰度为 66×10^4 t/km²,平均油层厚度为10.3 m,平均渗透率为 2.5×10^{-3} μm^2 ,地层原油粘度为14.5 mPa·s,各向异性和平面非均质性较弱,采用正方形反九点井网,井距为300 m。截至2013年6月,综合含水率为70%,采油速度为1.5%,采出程度为11.64%。根据研究区动态资料,绘制其生产动态图版,并建立各向异性系数分别为1,3和5的理论模型。当各向异性系数等于3时,与实际生产动态匹配的等效理论模型为角井先见水,见水后含水率迅速上升;而边井见水晚,见水后含水率也迅速上升。角井平均累积产油量是边井的1.35倍,理论与实际基本吻合,可用于研究区平面波及系数的评价。

以研究区的地质特征和油藏参数为基础,建立正方形反九点油藏数值模拟模型,模拟各向异性系数分别为1,3和5条件下的剩余油分布(图1)。根据剩余油分布、水驱前缘推进规律和平面波及系数定义,并结合数值模拟流线技术,建立不同各向异性系数下的平面波及系数图版(图2)。从图2中可以看出,含水率相同时,平面波及系数随各向异性系数的增加而减小;含水率小于40%的低含水率阶段,各向异性系数对平面波及系数的影响较大;含水率为40%~80%的中高含水阶段,各向异性系数对平面波及系数的影响变小。各向异性系数相同时,平面波及系数随含水率的上升而增大;当各向异性系数较大时,平面波及系数较低,开发效果较差,且各向异性系数越大,平面波及效果越差。

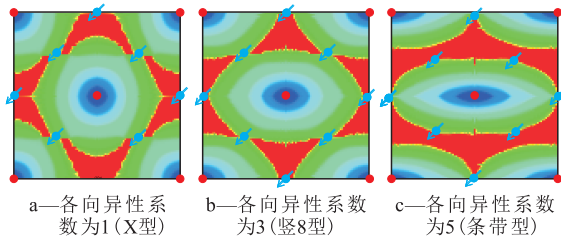


图1 正方形反九点井网不同各向异性系数下的剩余油分布

Fig.1 Remaining oil distributions in quadrate inverted nine-spot pattern at different anisotropy coefficients

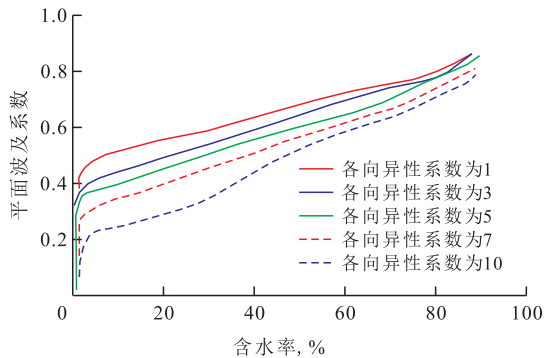


图2 正方形反九点井网不同各向异性系数下的平面波及系数图版

Fig.2 Areal sweep charts of quadrate inverted nine-spot pattern under different anisotropies

3 低渗透油藏平面波及系数改善潜力

3.1 角井转注

对于各向异性较大的低渗透油藏,正方形反九点井网注水开发过程中,角井易见水,从而造成水

线沿角井突破,导致平面波及系数降低(图2)。当各向异性系数为3时,利用数值模拟模型法,研究了角井含水率分别为60%,70%,80%和90%时转注后平面波及系数的潜力。从图3中可以看出,4种含水率的平面波及系数增量皆呈上升趋势,且角井含水率为60%时实行转注的平面波及系数提高较大,即在角井含水率达到60%时转注平面波及系数改善潜力较大。因此,角井转注措施具有一定的平面波及系数改善潜力。

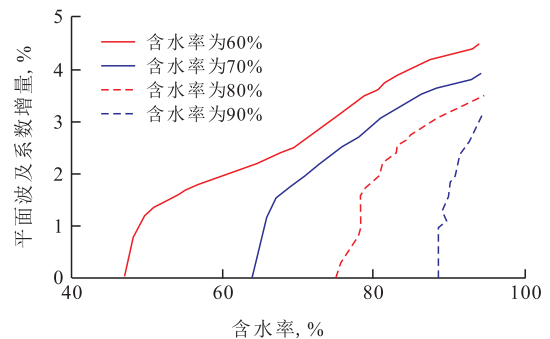


图3 不同转注时机平面波及系数改善潜力图版

Fig.3 Charts of areal sweep improvement potential under different converting time

3.2 水平井加密

对于存在各向异性的低渗透油藏,正方形反九点井网条件下,水井至垂直主应力方向的角井流线稀疏,平面波及程度较低,造成剩余油主要集中在垂直主应力方向的角井附近(图1),因此,在剩余油集中的角井附近进行加密井网具有很好的挖潜潜力。设计加密水平井垂直主应力方向,贯穿角井,水平井长度为400 m。加密后角井附近流线变得密集,平面波及面积增大,平面波及效果改善,角井附近剩余油得到有效挖潜。

对比角井含水率为60%,70%,80%和90%时水平井加密前后平面波及系数提高幅度(图4)可见,随含水率升高,水平井加密后平面波及系数增量呈先增大后减小的趋势,且角井含水率为60%时平面波及系数提高幅度最大,即含水率为60%时进行调

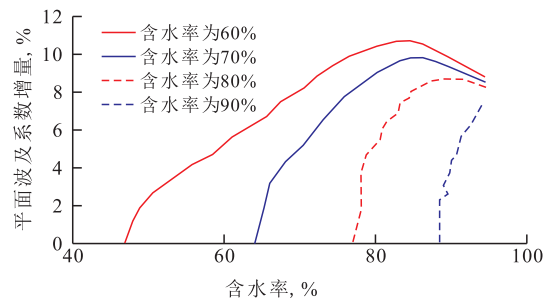


图4 不同加密时机平面波及系数改善潜力图版

Fig.4 Charts of areal sweep improvement potential under different infilling time

整改善潜力较大。因此,油井加密措施具有一定的平面波及系数改善潜力。

3.3 堵水调剖

根据研究区实际动态资料分析,部分井组在水井至角井主应力方向存在裂缝,造成角井水淹,边井见水较晚且含水率低,边井平均累积产油量是角井的3.5倍。根据研究区优势渗流通道监测资料和动态资料,建立等效数值模拟模型,反映井组的动态响应特征。利用数值模拟评价聚合物微球调剖效果发现,近井地带优势渗流通道得到封堵,改变了其渗流场(图5),注水井与边井和侧向角井之间的平面波及状况得到一定程度上的改善,调剖后剩余油面积(红色流线包围面积)也变小。从图6中可以看出,堵水调剖措施后平面波及系数增量呈先增大后减小的趋势,且角井含水率为60%时平面波及系数提高幅度最大,即较早地实施堵水调剖可以提高平面波及系数。

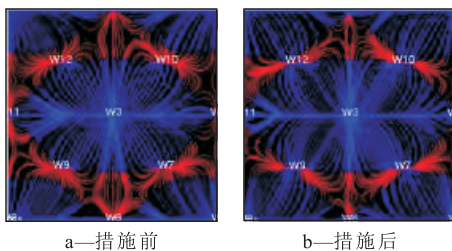


图5 堵水调剖措施前后渗流场分布

Fig.5 Seepage field distributions before and after water plugging and profile modification

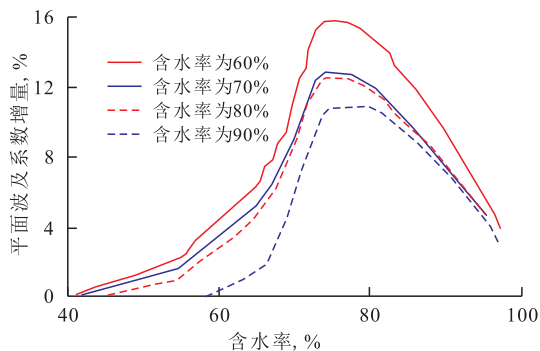


图6 不同措施时机平面波及系数改善潜力图版

Fig.6 Chart of areal sweep improvement potential under different treating time

4 结束语

引用等饱和度前缘界面,对平面波及系数进行定义,建立了平面波及系数评价方法,并通过计算五点井网见水时的平面波及系数,验证了平面波及系数定义的适用性。基于长庆油区低渗透油藏某

区块的正方形反九点井网,绘制了各向异性系数分别为1,3和5时的平面波及系数图版,评价研究区角井转注、水平井加密和堵水调剖对平面波及系数的改善潜力。研究所建立的数值模拟模型和图版只针对正方形反九点井网,考虑了各向异性对平面波及系数的影响,但渗透率和孔隙度为均质模型,没有考虑启动压力梯度的影响,还需在新评价方法的基础上,深入研究考虑非均质性对平面波及系数的影响。

参考文献:

- [1] 程林松.渗流力学[M].北京:石油工业出版社,2011.
Cheng Linsong. Fluid mechanics in porous medium [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [2] 俞启泰,赵明,林志芳.水驱砂岩油田驱油效率和波及系数研究(二)[J].石油勘探与开发,1989,16(3):46-54.
Yu Qitai, Zhao Ming, Lin Zhifang. A study of the displacement efficiency and the conformance factor in waterflooded sandstone reservoirs in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 1989, 16(3):46-54.
- [3] 郭粉转,唐海,吕栋梁,等.渗流启动压力梯度对低渗透油田四点井网面积波及效率影响[J].大庆石油学院学报,2010,34(1):33-38.
Guo Fenzhuan, Tang Hai, Lü Dongliang, et al. Effects of seepage threshold pressure gradient on areal sweep efficiency for 4-spot pattern of low permeability reservoir [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2010, 34(1):33-38.
- [4] 熊春明,唐孝芬.国内外堵水调剖技术最新进展及发展趋势[J].石油勘探与开发,2007,34(1):83-88.
Xiong Chunming, Tang Xiaofen. Technologies of water shut-off and profile control: An overview [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1):83-88.
- [5] 赵曼玲.堵水调剖技术在吉林油田的应用和发展[D].大庆:大庆石油学院,2009.
Zhao Manling. Application and development in Jilin oil field under profile control and water shut off technology [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2009.
- [6] 徐亮,毛振强.低渗透油藏提高采收率研究——以大芦湖油田为例[J].天然气地球科学,2005,16(4):535-539.
Xu Liang, Mao Zhenqiang. The study of enhance oil recovery of the low permeability reservoir—Dalu lake oil field [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(4):535-539.
- [7] 刘华,张宁生,王志伟,等.低渗透油田提高采收率发展现状[J].钻采工艺,2004,27(4):44-46.
Liu Hua, Zhang Ningsheng, Wang Zhiwei, et al. The newest progress of enhanced oil recovery for low-permeability oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2004, 27(4):44-46.
- [8] 王香增,江绍静,余华贵,等.延长油区低渗透油藏提高采收率技术对策[J].应用化工,2009,38(6):884-887.