

封堵优势通道动用剩余油机制及策略

肖康^{1,2},穆龙新¹,姜汉桥²,申健³,张鹏宇⁴

[1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249;
3. 中海油研究总院,北京 100028; 4. 中国石油渤海钻探工程公司,天津 300457]

摘要:基于所建立的可模拟水驱优势通道发育的三维物理模型,结合核磁共振,对不同封堵优势通道方法下剩余油宏观分布变化及微观孔隙动用进行了研究,明确了优势通道下剩余油动用内在控制机制,并利用数值模拟,对优势通道下剩余油动用适应性及策略进行了总结。结果表明:通过量化核磁成像图片与流体饱和度关系,可对三维模型进行无探针饱和度监测;考虑封堵效率,短半径高强度调剖与中长半径调驱分别适合于弱与强优势通道,且初始潜力分布对封堵效果有重要影响;大孔隙中剩余油动用对整体提高采收率贡献最大,其也是造成不同封堵方式剩余油动用差异的主要因素,且由于弱优势通道模型各孔隙窜流程度及初始潜力分布较均匀,其中小孔隙动用略好于强通道模型;弱优势通道储层的堵剂溶度不宜过高,以保证其注入性,而强优势通道储层需要较高堵剂注入PV数,以达到封堵目的。该研究对高含水油田调剖堵水决策与优化设计有一定理论指导意义。

关键词:核磁共振;物理模拟;数值模拟;优势通道;剩余油;储层

中图分类号:TE327

文献标识码:A

Mechanisms of remaining oil production by plugging dominant flowing path and the application and strategies

Xiao Kang^{1,2}, Mu Longxin¹, Jiang Hanqiao², Shen Jian³, Zhang Pengyu⁴

[1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 2. Faculty of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China;
4. CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin 300457, China]

Abstract: Based on 3D physical model which can simulate growth of dominant flowing path and nuclear magnetic resonance (NMR), macro remaining oil distribution and production contribution from micro pore under different plugging methods are studied. Furthermore, controlling mechanisms of remaining oil production in dominant flowing path are summarized. Finally, strategy of remaining oil production and its adaptability are obtained through numerical simulation. The results show that, by establishing the correlation between NMR imaging and oil saturation, oil distribution in 3D model can be monitored without probes. Considering the plugging efficiency, short and deep profile controls can be applied to weak and strong dominant flowing paths respectively, and initial potential has the most important influence on the plugging. Remaining oil production in large pore contributes to most part of the overall plugging. It is also the main factor causing different recovery improvement among different plugging methods. Because channeling and initial potential in different kinds of pores are more uniform in weak path model, production of medium and small pores is slightly more efficient than in a strong model. Plugging agent content for weak path should not be too high in order to guarantee injection, and to achieve plugging objective, strong path needs relatively high injection pore volume. This study can provide some theoretical guidance for plugging design and optimization of high water cut oilfield.

Key words: nuclear magnetic resonance, physical simulation, numerical simulation, dominant flowing path, remaining oil, reservoir

目前国内大部分砂岩油藏均经历了多年注水开发,并已进入了“高含水、高采出程度”阶段,但由于有

收稿日期:2016-03-82;修订日期:2017-07-25。

第一作者简介:肖康(1987—),男,博士、工程师,油气田开发工程。E-mail: xiaokang870224@163.com。

基金项目:中石油集团科技项目(2016D-4401, 2016D-4402);国家科技重大专项(2011ZX05030)。

相当一部分储层发育了水驱优势通道,使地下储层仍赋存着较多的被注入水绕流的剩余油^[1-2]。为挖潜此类剩余油,目前国内外学者及现场技术人员对高含水期水驱剩余油表征、调剖堵水决策及增油效果评价和现场堵剂研发设计等方面进行了深入研究^[3-7],并取得了较好效果,但研究对象大多为动态指标及宏观剩余油分布,缺乏对封堵机制的微观评价,对控制封堵效果内在机制的理解不深入,对不同类型优势通道下剩余油动用方法适应性的研究也较少,这都会在一定程度上限制高含水期进一步提高剩余油挖潜的效果。

为此,本研究将以可快速模拟水驱优势通道形成的三维模型为基础,利用核磁成像及 T_2 谱分别对封堵优势通道下剩余油宏观及微观分布特征进行研究,总结剩余油动用内在影响因素,并通过数值试验方法,量化动用方法、储层特征及动用效果等三者间关系,为现场调剖堵水优化设计提供一定理论指导。

1 封堵优势通道物理模拟

1.1 三维模型建立

本文以胜利油田中高渗砂岩油藏为研究对象,对已发育优势通道井点的渗透率变化进行统计,通过量化累计过水倍数与渗透率扩大倍数间关系来表征优势通道发育过程^[8],总结出了强与弱两类水驱优势通道发育模式,见公式(1)和(2)。以此为基础,在传统胶结岩心中加入可溶性离子(钠和钾为主),通过控制压制压力及离子含量,来拟合两类实际优势通道变化模式。

强优势通道:

$$y = 1 + 11[1 - \exp(-k_1 x^2)], k_1 = 8 \sim 12 \quad (1)$$

弱优势通道:

$$y = 1 + 5(1 + \alpha^{-\beta})^{-1} \quad (2)$$

式中: x 为累计注入 PV 数与最大累计注入 PV 数比值,小数; y 为渗透率扩大倍数,小数; α 为 0.008 ~ 0.012; β 为 5.5 ~ 6.5。

基于公式(1)和(2),建立了可发育强与弱两类优

势通道的三维模型(图1),通过注入水冲刷,使油水井间快速发育优势通道。其中,图1中阀门均由高强度高分子化合物材料制成,不与核磁共振仪器的磁场发生反应,且耐压能力符合此次实验要求。两类模型主要参数如表1。

1.2 实验流程

模型的高矿化度会对电阻探针监测产生较大影响,因此这里采用核磁成像获得模型含油饱和度分布,并利用 T_2 谱测试获取孔隙动用分布。

实验的总体流程如下:

- 1) 模型抽真空饱和可溶性离子水,进行核磁成像;
- 2) 模型饱和氟油(无核磁信号),进行核磁成像,然后在模型中均匀钻取 25 个岩心,分别测 T_2 谱,将未钻孔模型静置老化 48 h;
- 3) 将未钻孔模型进行地层水驱油,水驱方向为单对角线驱替,单井注入速度 1.0 mL/min,直至含水达到 98% 为止,进行核磁成像及 T_2 谱测试流程;
- 4) 对每类模型中未钻孔模型分别进行小剂量高分子量聚合物调剖及延缓交联型弱凝胶调驱,含水再次达到 98% 时,进行核磁成像及 T_2 谱测试流程。

其中,流程 4) 中聚合物浓度及分子量分别为

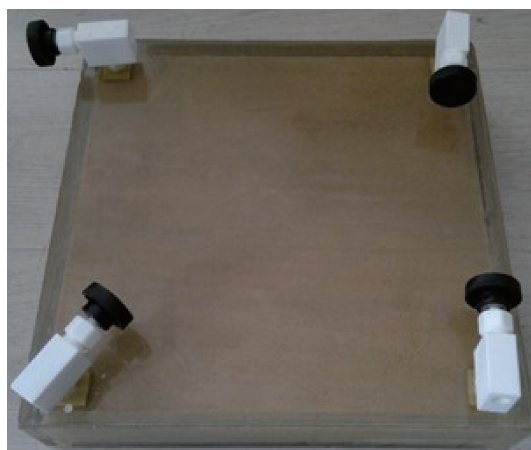


图1 强优势与弱优势通道三维物理模型

Fig. 1 Strong and weak path 3D physical model

表1 三维模型岩心基本参数
Table 1 Parameters of 3D physical models

三维模型类型	顶底层	(长/cm) × (宽/cm) × (高/cm)	初始渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	渗透率级差	孔隙度/%	孔隙体积/mL
强优势通道	低渗	29.7 × 29.5 × 4.1	198.56	10.14	23.15	415.80
	高渗		2 012.45		26.73	480.10
弱优势通道	低渗	29.6 × 29.9 × 4.0	202.52	2.03	23.42	414.55
	高渗		410.25		24.01	425.00

注:模型纵向分成2层,每层在驱替初始保持均质,具有纵向正韵律特征;每类模型包括4块相同模型,同时进行驱替及检测,以弥补钻孔取心进行 T_2 谱测试时造成的模型破坏,表中数据均为4块模型参数平均值。

2 000 mg/L 和 2 500 万, 剪切后粘度为 80 ~ 120 mPa · s, 封堵半径为油水井连线 1/6 ~ 2/6, 后置段塞为浓度 500mg/L 和分子量 1 000 万的聚合物; 弱凝胶由浓度 1 000 mg/L 和分子量 1 000 ~ 1 500 万的聚合物溶液、浓度 70 ~ 90 mg/L 含有 Cr 的金属有机化合物溶液及含硫脲的溶液配成, 成胶时间 35 ~ 48h (期间关井), 封堵半径为油水井连线 3/6 ~ 4/6, 后置段塞与调剖一致。

针对核磁成像饱和度标定作简要介绍: ①将不同渗透率岩心进行抽真空饱和水, 进行核磁成像, 每根岩心得到一幅灰度图, 并得到灰度值总和; ②每根岩心水驱油至不同含水阶段, 进行核磁成像, 得到相应灰度值总和; ③做出不同含水饱和度下灰度值总和与完全饱和水时灰度值总和的比值与相应含水饱和度的曲线关系图, 进行回归, 得到拟合曲线[公式(3)], 针对不同阶段核磁成像灰度图进行含油饱和度反演。

$$y = 1.068(1 + 0.07x^{-4})^{-1} \quad (3)$$

式中: x 为含水饱和度, 小数; y 为某含水饱和度下灰度值总和与完全饱和水时的比值, 小数。

在核磁成像过程中, 对所钻取岩心进行小、中、大孔隙绝对含油饱和度反演计算^[9-10], 再进行平面插值, 得到不同阶段顶底层孔隙绝对含油饱和度分布。

1.3 封堵机制分析

1.3.1 提高采出程度

由表 2 可看出, 在调驱与调剖两种封堵方式下, 强优势通道模型的封堵效果均好于弱通道模型, 这是由于强通道模型剩余油富集程度高、剩余潜力大, 在封堵半径一致下, 其采出油量也越多。此外, 由于调驱封堵半径大, 注入水在模型深部仍可改变流向以驱替剩余油, 且调剖在强通道模型中易使优势渗流再次发生, 因此强通道模型调驱封堵效果及效率均远好于调剖; 而弱通道模型剩余油潜力较小, 虽调驱提高采出程度略高于调剖, 但调剖封堵效率要好于调驱。强优势通道适合于封堵半径大的调驱封堵, 弱通道适合于封堵半径小的调剖封堵。总之, 优势通道规模、剩余油潜力和封堵方式等因素共同决定了优势通道下剩余油动用方式的选择, 其中调驱过程中关井待堵剂成胶是关键, 防止未成胶堵剂发生窜流。

1.3.2 含油饱和度分布

由图 2 可知, 由于受剩余潜力小、封堵改变流线条度有限等限制, 弱优势通道模型顶底层的调驱封堵扩

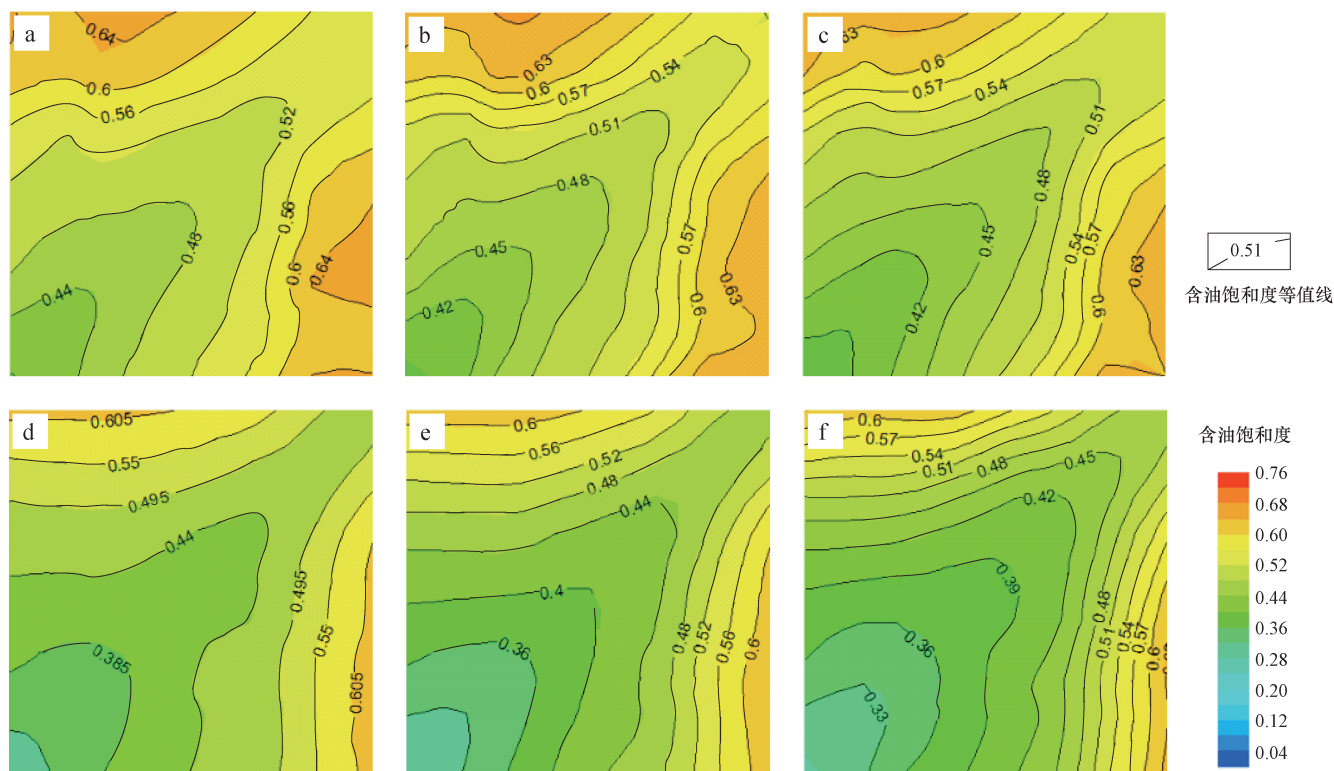


图 2 弱优势通道模型封堵后含油饱和度分布变化

Fig. 2 Remaining oil distribution in weak path model after plugging

a. 顶层水驱末; b. 顶层调剖末; c. 顶层调驱末; d. 底层水驱末; e. 底层调剖末; f. 底层调驱末

表 2 不同封堵方式下提高采收率情况
Table 2 Enhanced oil recoveries under different
plugging methods

二维模型 类型	封堵提高 采收率/%		每 mL 堵剂下提高 采收率/%	
	调驱	调剖	调驱	调剖
弱优势通道	5.020	3.930	0.046	0.054
强优势通道	10.570	5.790	0.098	0.079

大波及范围的效果略好于调剖。且顶底层优势渗流差异较小,降低了堵剂封堵差异。考虑封堵效率,调剖适合于弱通道模型。

由图 3 可知,强优势通道模型调驱效果,尤其是底层,要远好于调剖,调剖易引发二次窜流,封堵效果较差。此外,顶底层窜流差异较大,调驱堵剂优先进入底层进行封堵,使底层波及变化较明显。综上,调驱适合于强通道模型。

1.3.3 孔隙动用分布

1) 弱优势通道模型

由图 4 可知,由于调驱封堵半径大,弱优势通道模型各级孔隙调驱效果均好于调剖,但又由于弱通道模型潜力较小,削弱了两类动用方式的差异,也使两类方

式改善效果均有限。在不同动用方式下,顶底层各级孔隙动用差异不大,大孔隙动用贡献略高于中小孔隙,这是由于弱通道模型窜流程度低,各级孔隙水驱波及差异小,使堵剂对各级孔隙波及的改善差异也较小。总之,从孔隙动用的角度,并结合封堵效率,调剖也适合于弱优势通道。

2) 强优势通道模型

由图 5 可知,强优势通道模型各级孔隙,尤其是大孔隙,调驱效果远好于调剖,中小孔隙的动用差异很小。这是由于强通道模型窜流主要发生在大孔隙,堵剂优先封堵大孔隙,大幅提高了其动用程度,且由于强通道模型剩余潜力大,充分发挥了调驱封堵能力,使两类封堵方式差异较大。此外,顶底层动用差异也由于大孔隙封堵差异而变大。总之,调驱凭借着其较强的使液流在平面及纵向转向能力,大幅提高强通道模型孔隙动用。

2 封堵优势通道策略研究

2.1 数值模拟模型建立

根据物理实验,建立水驱末实验室尺度数值模拟模型,量化研究封堵策略。

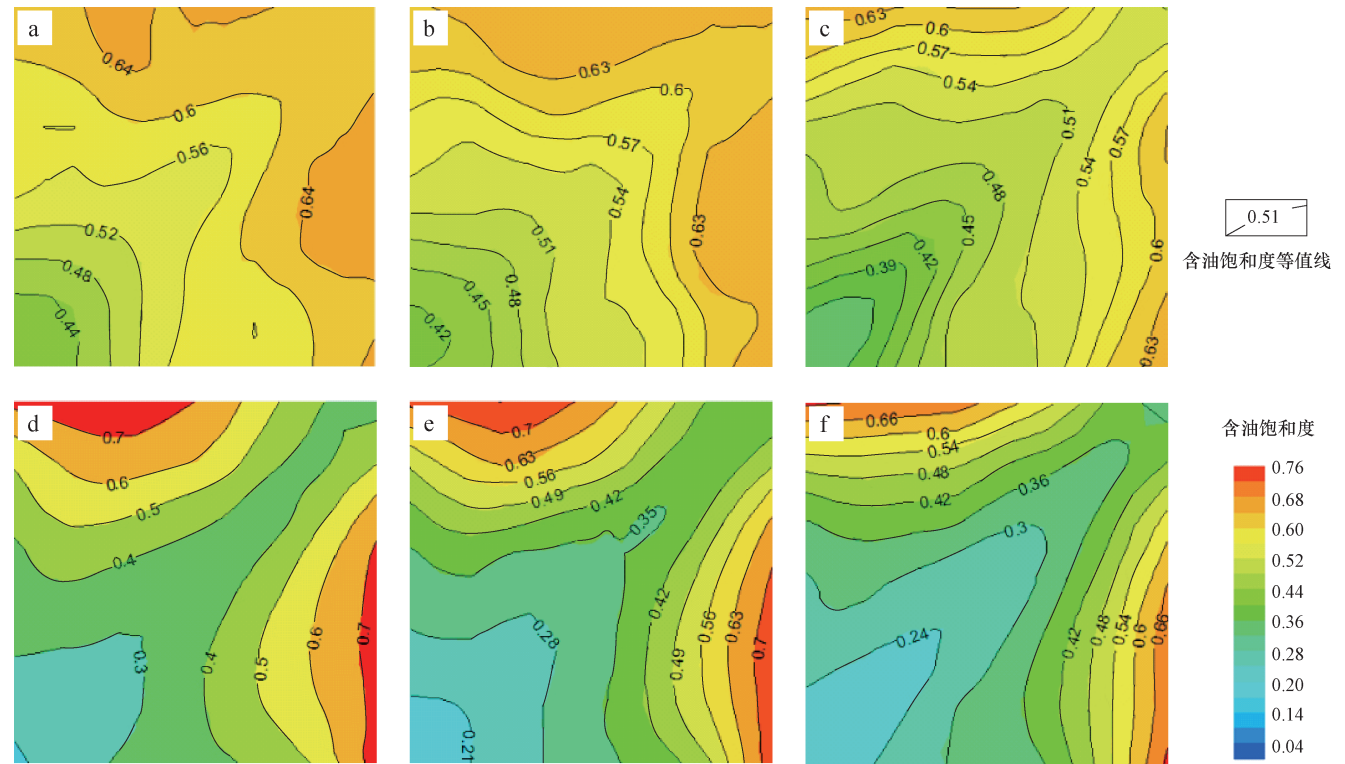


图 3 强优势通道模型封堵后含油饱和度分布变化

Fig. 3 Remaining oil distribution in strong path model after plugging

a. 顶层水驱末; b. 顶层调剖末; c. 顶层调驱末; d. 底层水驱末; e. 底层调剖末; f. 底层调驱末

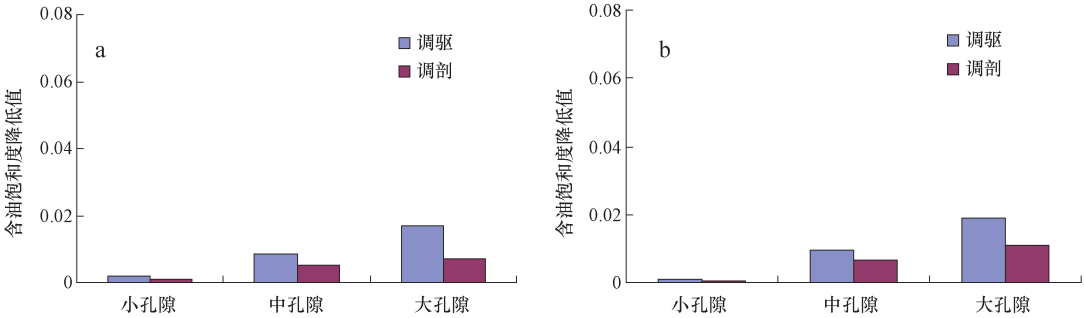


图 4 弱优势通道模型纵向不同部位孔隙动用情况
Fig. 4 Production from different types of pores in weak path model after plugging
a. 顶层;b. 底层

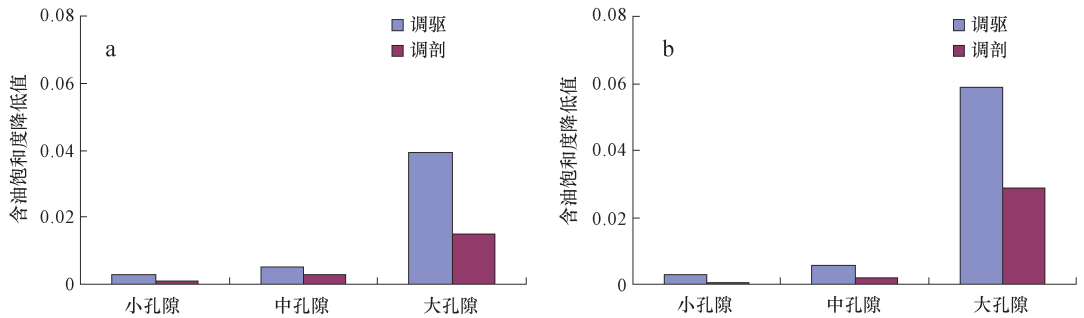


图 5 强优势通道模型纵向不同部位孔隙动用情况
Fig. 5 Production from different types of pores in strong path model after plugging
a. 顶层;b. 底层

首先是模型初始化,包括渗透率、含油饱和度及压力等 3 类场分布,前两个可从实验直接获得。压力场获得方法如下:将实验水驱末渗透率及饱和度场、均质压力场赋给模型,水驱模拟至含水 98%,此时压力场作为此次模拟初始压力场。由于封堵时间较短,不考虑渗透率变化。

然后进行实验封堵拟合,模型考虑了堵剂的粘浓、剪切、吸附、残余阻力及凝胶生成过程等机理^[11-13],拟合结果见表 3。由表 3 可知拟合结果良好,可进行下一步封堵策略优化研究。

2.2 响应面优化

目前利用响应面原理进行多因素研究^[14-15],已在多个领域取得了较好效果,这里将引入响应面分析,量化分析封堵效果与影响因素之间的响应关系。

影响封堵效果的因素较多,全部考虑会使响应面分析复杂化,因此这里利用数值模拟通过偏相关分析获得此次封堵的主要影响因素^[10],即调剖/驱注入 PV 数(x_1)、调剖/驱注入浓度(x_2)及模型初始渗透率级差(x_3),同时也得到三者合适的优化范围,见表 4,响应变量为单位调剖(驱)剂用量下采出程度提高值(y)。

根据表 4,利用 Box – Behnken 设计方法进行数值试验设计,并分别对调剖与调驱进行二次多元方程回归,并对其参数及方程项进行检验^[15-16],最终得到两类封堵的响应面函数:

表 3 封堵数值模拟模型与物理模型拟合情况
Table 3 Match of results between numerical and physical models

模型类型	调剖提高采收率/%			调驱提高采收率/%		
	实验	数模	误差	实验	数模	误差
弱通道	3.93	3.88	1.27	5.02	5.09	-1.39
强通道	5.79	5.87	-1.38	10.57	10.78	-1.99

表 4 响应面分析因素参数
Table 4 Parameters of two sealing styles

封堵方式	注入 PV 数	注入浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	初始渗透率级差	挖潜效果对比指标
调剖	0.03 ~ 0.10	2 000 ~ 3 000	2 ~ 5	单位堵剂下采收率提高值
调驱	0.10 ~ 0.17	1 000 ~ 2 000	5 ~ 10	单位堵剂下采收率提高值

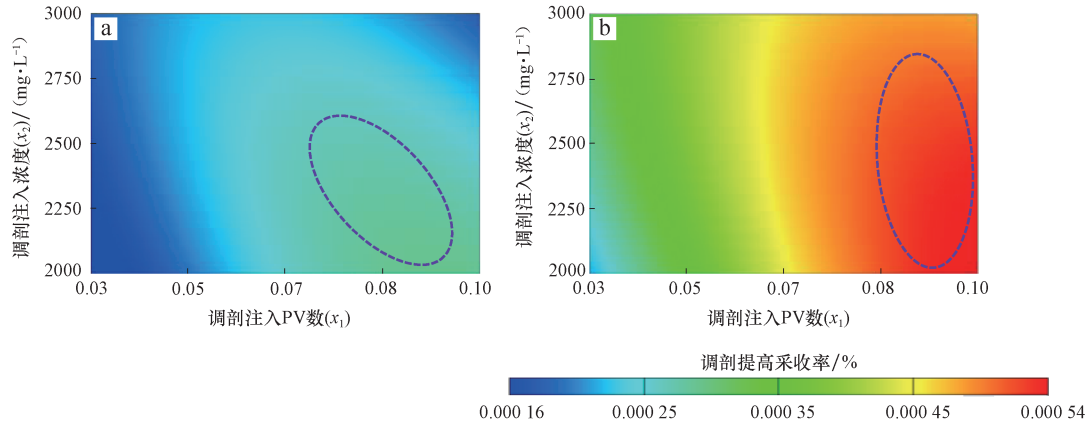


图6 不同初始渗透率级差在不同调剖参数下提高采收率变化

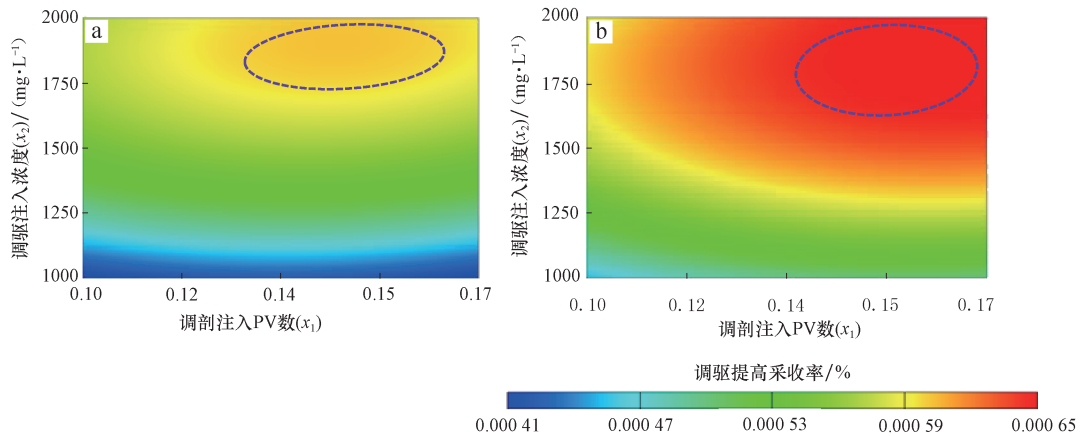
Fig. 6 Enhanced oil recovery for different initial permeability and by different strategies of short radius plugging
a. 级差 2; b. 级差 5

图7 不同初始渗透率级差在不同调驱参数下提高采收率变化

Fig. 7 Enhanced oil recovery for different initial permeability and by different strategies of large radius plugging
a. 级差 5; b. 级差 10

$$y_1 = 10^{-5} (12.47x_1 + 2.792x_2 + 9.162x_3 - 4.386x_1x_2 + 4.015x_1x_3 + 0.7386x_2x_3 - 5.320x_1^2 - 1.477x_2^2 - 14.61x_3^2 + 49.70) \quad (4)$$

$$y_2 = 10^{-5} (1.658x_1 + 8.028x_2 + 2.782x_3 + 0.5792x_1x_2 + 1.128x_1x_3 - 0.8583x_2x_3 - 1.751x_1^2 - 5.561x_2^2 + 0.8137x_3^2 + 58.61) \quad (5)$$

其中: y_1, y_2 为单位堵剂调剖、调驱提高采收率, %。

根据式(4)和式(5),在自变量的取值范围内求偏导^[15-16],进行调剖/驱因素研究及其参数优化设计(图6,图7)。

图6和图7中虚线椭圆包含范围即为特定优势通道下最优调剖/驱工作制度范围。针对调剖,较强优势通道最优注入PV数与最优注入浓度均大一些,注入浓度变化较明显,且浓度过大会使调剖效率降低,因此,调剖中,在合适的注入PV数下,浓度可适当降低

以提高调剖效率与堵剂注入性;针对调驱,强优势通道的最优注入浓度与PV数也较大,注入PV数变化较明显,且由于适合于调驱的优势通道发育规模较大,因此较高的注入浓度不会影响调驱效率与注入能力,此时,应适当提高堵剂注入PV数,以保证封堵质量。

3 结论

1) 根据实际油藏渗透率变化规律,建立了可在室内快速模拟水驱优势通道发育的三维物理模型,并通过量化核磁共振与饱和度变化的关系,可获得无探针监测下的含油饱和度分布。

2) 基于核磁共振处理,针对不同封堵方法下提高采出程度及宏观含油饱和度分布进行了分析,考虑封堵效率,近井调剖及深部调驱分别适合于弱与强优势通道,且发生二次窜流的程度及初始潜力的大小很大

程度上决定着封堵效果。

3) 根据核磁 T_2 谱分析,针对不同级别孔隙在不同封堵方法下的动用特征进行了总结。在调驱下,强优势通道的大孔隙动用对整体贡献最高,而调剖时弱通道各级别孔隙动用差异不大;同时,大孔隙动用差异是影响不同封堵方法的主要因素,且孔隙内窜流程度对堵剂流向有重要影响,并控制着封堵效果。

4) 利用响应面分析,对封堵方法进行了优化设计。弱优势通道在调剖时,应使堵剂浓度不易过高,以保证其注入性;强优势通道在调驱时,可适当提高堵剂注入 PV 数及浓度,以增强封堵能力。

参 考 文 献

- [1] 印森林,陈恭洋,戴春明,等. 河口坝内部储层构型及剩余油分布特征——以大港油田枣南断块长轴缓坡辫状河三角洲为例[J]. 石油与天然气地质,2015,36(4):630-639.
Yin Senlin, Chen Gongyang, Dai Chunming, et al. Reservoir architecture and remaining oil distribution in mouth bar—A case study on the braided delta of long-axis gentle slope in Zaonan fault block of Dagang Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4):630-639.
- [2] 王凤兰,白振强,朱伟. 曲流河砂体内部构型及不同开发阶段剩余油分布研究[J]. 沉积学报,2011,29(3):512-519.
Wang Fenglan, Bai Zhenqiang, Zhu Wei. Study on geological 3D reservoir architecture modeling and distribution of remaining oil of different development stage in meandering reservoir[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3):512-519.
- [3] 高大鹏,叶继根,李奇等. 大庆长垣特高含水期表外储层独立开发方法[J]. 石油与天然气地质,2017,38(1):181-188.
Gao Dapeng, Ye Jigen, Li Qi, et al. An independent development method of low permeability oil thin layers with extreme high water cut in Changyuan Structure, Daqing oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1):181-188.
- [4] 耿站立,姜汉桥,陈民锋,等. 高含水期油藏剩余油潜力量化表征新方法[J]. 油气地质与采收率,2007,14(6):100-102.
Geng Zhanli, Jiang Hanqiao, Chen Minfeng, et al. A new method for quantitative characterization on remaining oil potential in high water cut oil reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(6):100-102.
- [5] 冯其红,陈月明,姜汉桥等. 区块整体调剖效果预测[J]. 石油大学学报(自然科学版),1997,21(4):32-34.
Feng Qihong, Chen Yueping, Jiang Hanqiao, et al. Prediction of performance of profile control in block-wide[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1997, 21(4):32-34.
- [6] 杨中建,贾锁刚,张立会等. 高温高盐油藏二次开发深部调驱技术与矿场试验[J]. 石油与天然气地质,2015,36(4):681-687.
Yang Zhongjian, Jia Suogang, Zhang Lihui, et al. Deep profile correction for redevelopment of high-temperature and high-salinity reservoirs and pilot test[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4):681-687.
- [7] 李东文,汪玉琴,白雷等. 深部调驱技术在砾岩油藏的应用效果[J]. 新疆石油地质,2012,33(2):208-210.
Li Dongwen, Wang Yuqin, Bai Lei, et al. Application of Deep Profile Control Technology to Karamay Conglomerate Reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(2):208-210.
- [8] 冯其红,齐俊罗,尹晓梅等. 大孔道形成与演化过程流固耦合模拟[J]. 石油勘探与开发,2009,36(4):498-502.
Feng Qihong, Qi Junluo, Yin Xiaomei, et al. Simulation of fluid-solid coupling during formation and evolution of high-permeability channels[J]. Petroleum Exploration And Development, 2009, 36(4):498-502.
- [9] Xiao K, Jiang H Q, Wang Q, et al. Adaptability Study on Plugging Thief Zones with Asphalt Particle in Polymer Flooding Offshore Field. SPE-169931, SPE Trinidad & Tobago Energy Resources Conference, Port of Spain, Trinidad and Tobago, 2014:220-230.
- [10] 肖康,姜汉桥,范英彬等. 窄条边水油藏水驱后期孔隙分布及动用特征[J]. 大庆石油地质与开发,2015,34(3):129-133.
Xiao Kang, Jiang Hanqiao, Fan Yingbin, et al. Pore distributions and developed characteristics for the narrow-stripe edge-water oil reservoirs at the late period of the water flooding[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(3):129-133.
- [11] Flory P J. Principles of Polymer Chemistry[M]. New York: Cornell University Press, 1953.
- [12] Meter D M, Bird R B. Tube Flow of Non-Newtonian Polymer Solutions, Parts I and II Laminar Flow and Rheological Models[J]. AIChE J., 1964 878-881, 1143-1150.
- [13] Coats K H. In-situ combustion model[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1980, 20(06):533-554.
- [14] 江元翔,高淑红,陈长华. 响应面设计法优化腺苷发酵培养基. 华东理工大学学报(自然科学版),2005,31(3):309-313.
Jiang Yuanxiang, Gao Shuhong, Chen Changhua. Optimization of medium components for adenosine production by bacillus subtilis using response surface design[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2005, 31(3):309-313.
- [15] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
Li Yunyan, Hu Chuanrong. Experiment design and data processing[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2005.
- [16] 谢宇. 回归分析[M]. 北京:社会科学文献出版社,2010.
Xie Yu. Regression analysis[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press(China), 2010.

(编辑 张玉银)