

聚驱后优势渗流通道流线数值模拟识别方法的建立及应用

闫坤¹, 韩培慧^{1,2}, 曹瑞波², 佟卉¹

(1. 东北石油大学石油工程学院, 黑龙江 大庆 163000; 2. 中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712)

摘要:大庆油田聚驱区块陆续进入后续水驱开发阶段, 由于长期水聚驱冲刷, 油层优势渗流通道高度发育, 低效无效循环严重。为了实现聚驱后进一步提高采收率的目标, 必须准确识别并高效封堵优势渗流通道。以往采用常规方法(取心井、测井、剖面测试和生产动态)描述优势渗流通道, 资料少且不连续, 准确率低且费用高昂。针对优势渗流通道识别难的问题, 运用流线数值模拟技术, 以典型区块为研究基础, 筛选了描述优势渗流通道的关键参数, 建立了渗透率时变模型和综合识别指数数学模型, 根据初值迭代方法结合专家经验给出了关键参数权重, 同时依据综合识别指数大小对优势渗流通道进行了定量级别划分。结果表明, 计算的典型区块优势渗流通道分布与实际吸水剖面测试结果高度吻合, 表明建立的方法能够准确描述聚驱后优势渗流通道分布规律。研究内容对识别并高效封堵优势渗流通道具有重要指导意义, 为实现聚驱后进一步高效开发提供有力支撑。

关键词:优势渗流通道; 流线数值模拟; 渗透率; 综合识别指数

中图分类号: TE357

文献标识码: A

Establishment and application of numerical simulation identification method for dominant seepage channels after polymer flooding

Yan Kun¹, Han Peihui^{1,2}, Cao Ruibo² and Tong Hui¹

(1. School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163000, China;

2. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield of CNPC, Daqing, Heilongjiang 163000, China)

Abstract: The polymer flooding blocks in Daqing oilfield had entered the subsequent stage of water flooding development. Due to the long-term water polymer flooding, the preferential seepage channels in the oil layers were highly developed, and the inefficient and ineffective circulation were serious. In order to achieve the goal of further EOR after polymer flooding, the dominant seepage channels must be accurately identified and effectively blocked. The conventional description methods, such as the coring, logging, profile testing and production performance, were with few and discontinuous data, low accuracy and high cost. As it was difficult to identify, by the streamline numerical simulation technique, and based on the study of typical blocks, we screened the key parameters and established the permeability time-varying model and mathematical model of comprehensive identification index. Then according to the initial value iterative method and combined with expert experience, we proposed the weight of the key parameters. At the same time, the dominant seepage channels were quantitatively graded according to the comprehensive identification index. The results showed that the calculated distribution of dominant seepage channels in typical blocks were highly consistent with the actual water absorption profile test results, which meant that the established method could accurately describe the distribution law of dominant seepage channels after polymer flooding. The research had important guiding significance for identifying and effectively sealing the dominant seepage channels, and provides strong support for the further efficient development after polymer flooding

Key words: dominant seepage channel, streamline numerical simulation, permeability, composite identification index

收稿日期: 2018-06-16。

第一作者简介: 闫坤(1990—), 女, 在读博士研究生, 聚驱后提高采收率。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“化学驱后提高采收率技术研究及试验”(2016E-0207)。

经过长期注水开发的非均质油藏开展聚合物驱后,油层层间、层内矛盾在水驱基础上进一步加剧,油层孔隙结构发生了较大变化,造成渗透率增大,孔隙喉道半径增大,从而在油层中发展成以高渗透性和低残余油饱和度为特征的优势渗流通道^[11-6]。沿此通道形成明显的优势渗流,导致注入液低效无效循环^[7-12],为进一步开展聚驱后油层开发带来了挑战。因此,准确识别、高效封堵聚驱后油层优势渗流通道至关重要。对于优势渗流通道的识别技术,国内学者开展了大量的研究。曾流芳等首次将大孔道的形成与地层出砂结合进行研究,用灰色关联和常规动态的资料对大孔道识别进行描述^[13]。赵永强等应用放射性同位素示踪剂技术研究油水井间高渗透层,根据分析结果绘制出示踪剂的产出曲线,对曲线进行分析,解释测试井区储层的非均质情况,达到识别优势渗流通道的目的^[14]。李科星认为利用大量的取心资料可以描述储层非均质情况,提出通过观察岩心的岩性、颜色、含油性可以识别优势渗流通道^[15]。总体来说,上述研究均处于定性研究阶段,且测试或取心费用高昂。为了克服上述常规识别方法存在的问题,创新应用流线数值模拟技术^[16],建立了优势渗流通道综合识别指数数学模型,可实现优势渗流通道快速、准确识别,且费用低廉。

1 流线数值模拟识别方法的建立

1.1 精细地质模型的建立

以大庆油田北二西东块聚驱开发区为研究平台,该区块为流线数值模拟识别方法的建立提供基础数据。为了精准描述油层渗流场,建立了北二西东块地质模型。区块面积 7.63 km²,目的层油水井 143 口,地质模型网格划分为 245×125×18=551 250 个网格节点,采用了该区块已有的 979 口井的地质资料,地质模型将 PI 组 6 个自然沉积单元进一步细分为 18 个模拟层,平面网格步长由常规模拟的 50 m 左右缩小为 20 m,以确保满足精细刻画平面和纵向优势渗流通道分布的要求。

1.2 渗透率时变模型的建立

取心井数据分析表明(图 1),聚驱后渗透率较聚驱前明显增加,在粒度中值为 0.1 mm 到 0.15 mm 的

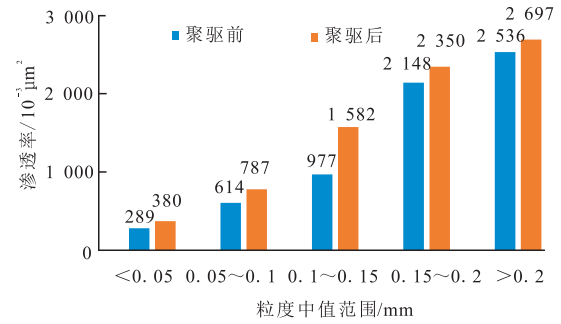


图1 聚驱前后渗透率的变化特征

Fig. 1 Characteristics of permeability variation before and after polymer flooding

区间内,聚驱前后渗透率的增加幅度最大,当粒度中值越大(大于 0.15 mm)和粒度中值越小(小于 0.1 mm)时,渗透率也在增加,但增加的幅度向两侧呈现减小趋势。

渗透率时变模型建立的基本思想就是建立多孔介质的孔隙度与渗透率在不同时间段的对应关系,或者是建立多孔介质的喉道半径与渗透率在不同时间段的对应关系。依据取心井数据分析结果,建立了研究区块细分 5 个级别的渗透率时变关系图版,在数值模拟历史拟合过程按照这一关系图版修正油藏渗透率。

依据渗透率与喉道半径关系理论结合取心井资料,建立了渗透率时变模型。从微观孔隙到微观渗透率,建立渗透率与喉道半径的关系式:

$$K = f_1'(s)f_2'(s)R^2 \quad (1)$$

式中: R 为喉道水力半径,为喉道半径的 1/2, μm ; $f_1'(s)$ 为喉道无量纲因子; $f_2'(s)$ 为孔隙度因子。

$$K_1 = f_1'(s)f_2'(s)\left(\frac{r_1}{2}\right)^2 \quad (2)$$

式中: K_1 为原始渗透率场, μm^2 ; r_1 为原始喉道半径, μm 。

$$K_2 = f_1'(s)f_2'(s)\left(\frac{r_2}{2}\right)^2 \quad (3)$$

式中: K_2 为某一时刻的渗透率场, μm^2 ; r_2 为改变后某一时刻喉道半径, μm ; $r_2 > r_1$, r_2 是时间的函数。

平均渗透率增加:

$$\frac{K_2}{K_1} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 \quad (4)$$

1.3 利用流线数值模拟器进行历史拟合

依据渗透率时变关系,利用流线数值模拟器准确拟合了北二西东块聚驱开发历史,为优势渗流通

道量化提供了基础数据。通过全区开发历史拟合曲线对比表明(图2),考虑了渗透率时变模型的聚驱开发历史拟合效果更好,单井符合率85%以上。同时,流线数值模拟器计算的含油饱和度与密闭取心井实测含油饱和度对比变化趋势基本一致,表明流线数值模拟方法比较准确刻画了水驱和聚驱流体动态变化规律。

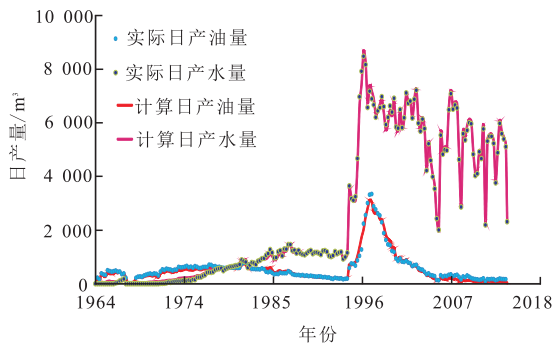


图2 全区开发历史拟合结果对比

Fig. 2 Comparison of development history fitting results in whole region

1.4 优势渗流通道综合识别指数数学模型的建立

由于优势渗流通道的形成是长期对油藏改造的结果,因此,优势渗流通道定量表征参数应具有可累积,可量化的属性,能从动静时空方面量化识别优势渗流通道。选取了井间过水倍数、渗透率变化值、注水效率和含水饱和度作为关键参数。井间过水倍数体现了注入水体流动的方向性,渗透率变化值表示了储层物性内在变化性,注水效率代表注入流体油藏波及性,含水饱和度表示了变化发生时间和程度。上述关键参数反映了流体在油藏中渗流特征,从动静时空方面综合描述了优势渗流通道性质。

针对研究区块五点法井网每个存在受效关系注采井对,为每个油层定义综合识别指数,描述优势渗流通道发育程度,第*i*个井对第*j*层综合识别指数是井间过水倍数、渗透率变化值、注水效率和含水饱和度函数,建立优势渗流通道综合识别指数数学模型为:

$$E_{ij} = \sum_{k=1}^n \lambda_{k,ij} d_{k,ij} \quad (5)$$

式中: $d_{k,ij}$ 为第*i*个井对第*j*层*k*个关键参数标准化值,无因次; $\lambda_{k,ij}$ 为第*i*个井对第*j*层第*k*个关键参数权重系数,无因次; E_{ij} 为第*i*个井对第*j*层综合识别指数,无因次。

根据初值迭代方法结合专家经验给出了关键参数权重,关键参数权重确定见表1。通过综合识别指数数学模型计算得出研究区块第*i*个井对第*j*层综合识别指数,作为考虑多因素综合影响后优势渗流通道识别指标,按照综合识别指数大小,对北二西东块聚驱开发区所有注井对包含的油层确定划分了4个优势渗流通道级别(表2)。

表1 关键参数确定

Table 1 Determination of key parameters

关键参数	权重
井间过水倍数	0.55
渗透率变化值	0.15
注水效率	0.15
含水饱和度	0.15

表2 优势渗流通道划分级别

Table 2 Rank of preferential seepage channels

类型	综合识别指数取值范围
I级 ≥ 0.6	强优势渗流通道
II级 0.43 ~ 0.6	中级优势渗流通道
III级 0.3 ~ 0.43	弱或初级优势渗流通道
IV级 < 0.3	非优势渗流通道

2 应用实例

为了验证基于流线数值模拟技术的优势渗流通道综合识别指数数学模型的准确性,应用该方法计算了北二西东块不同开发阶段优势渗流通道综合识别指数,并与实际吸水剖面测试资料进行对比(图3)。对比结果表明,新方法计算值与实测结果高度吻合,如1996年,计算的PI_{2,22}和PI_{3,12}、PI_{3,2}单元综合识别指数处于强优势渗流通道范围(> 0.6),而吸水剖面测试曲线显示在上述层位吸水量明显增大,表明建立的方法能够准确识别聚驱后优势渗流通道分布部位。

通过该方法计算了北二西东块不同开发阶段优势渗流通道综合识别指数量化演变过程。计算结果绘制栅状图(图4)。从图4可以看出,1994年注聚前,由于经历了近30年的水驱开发,油藏局部存在优势渗流通道,形成低效、无效循环。该区块1996年注聚合物,2001年聚驱处于含水低值期,由于聚合物增加水相黏度和滞留引起油层渗透率下降产生的剖面调整作用,与注聚前相比,综合识别指数总体处于小于0.3的范围,优势渗流通道得到明显控制。2003年

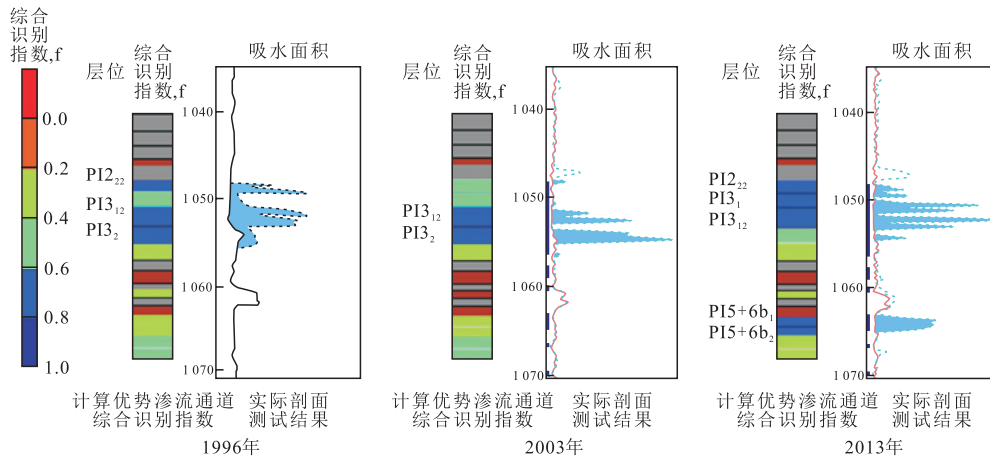


图3 B2-5-P36井不同时期优势渗流通道与实际剖面测试结果对比

Fig. 3 Comparison of dominant seepage channels with actual profile test results in different stages of well B2-5-P36

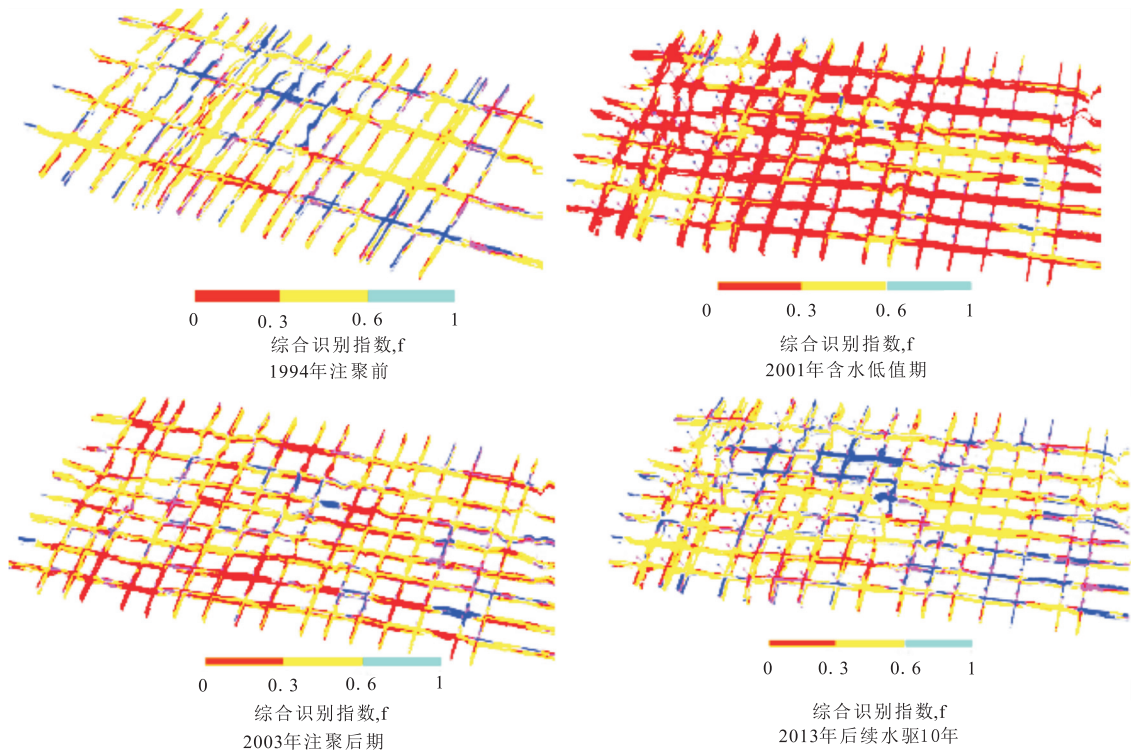


图4 北二西东块不同开发阶段优势渗流通道综合识别指数空间分布

Fig. 4 Composite identification index distribution of dominant seepage channels in B2D block at different development stages

处于注聚后期,由于产油高峰期已过,油水相对流动能力发生了改变,局部区域出现优势渗流通道,需要采取调剖控水措施。2013年已进行后续水驱10年,强优势渗流通道大面积发育,经统计,全区共1286个井对层,其中优势渗流通道井对层356个,所占比例27.7%,优势渗流通道厚度比例占总厚度的18.5%。

典型区块研究结果表明,建立的新方法可准确识别和量化优势渗流通道的时空演化过程,该方法

克服了常规方法需要连续测试资料、耗费高的问题,具有快速、准确、价格低廉的优点。

3 结论

1) 聚驱后优势渗流通道高度发育,致使低效、无效循环严重,是制约聚驱后进一步提高采收率的技术瓶颈之一。

2) 依据典型聚驱区块开发数据,建立地质模型,筛选了描述优势渗流通道的关键参数,建立了渗透率时变模型和综合识别指数数学模型,建立了基于流线数值模拟技术的优势渗流通道识别方法,为快速识别优势渗流通道提供了工具。

3) 典型区块计算结果表明,基于流线数值模拟技术的优势渗流通道识别方法与实测数据高度吻合。

参考文献

- [1] 冀之林,曾流芳,张志海,等.大孔道诊断和描述技术研究[J].石油勘探与开发,2001,28(1):75-77.
- [2] 刘海波.大庆油区长垣油田聚合物驱后优势渗流通道分布及渗流特征[J].油气地质与采收率,2014,21(5):69-72.
- [3] 于九政,刘易非,唐长久.对储层大孔道识别方法的再认识与构想[J].油气地质与采收率,2009,16(3):34-37.
- [4] 钟大康,朱筱敏,吴胜和,等.注水开发油藏高含水期大孔道发育特征及控制因素——以胡状集油田胡12断块油藏为例[J].石油勘探与开发,2007,34(2):207-211.
- [5] 胡书勇,张烈辉,罗建新,等.砂岩油藏大孔道的研究——回顾与展望[J].特种油气藏,2006,13(6):10-14.
- [6] 孙明,李志平.注水开发砂岩油藏优势渗流通道识别与描述技术[J].新疆石油天然气,2009,5(1):51-55.
- [7] 谭光明.河31断块优势渗流通道识别及治理方法[J].特种油气藏,2007,14(1):87-90.
- [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.
- [9] 陈程,宋新民,李军.曲流河点砂坝储层水流优势通道及其对剩余油分布的控制[J].石油学报,2012,33(2):257-263.
- [10] 陈德坡,冯其红,王森,等.利用井间动态连通性模型定量描述优势通道[J].大庆石油地质与开发,2013,32(6):81-85.
- [11] 孟凡顺,孙铁军,朱炎,等.利用常规井资料识别储层大孔道方法研究[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2007,37(3):463-468.
- [12] 冯其红,史树彬,王森,等.利用动态资料计算大孔道参数的方法[J].油气地质与采收率,2011,18(1):74-76.
- [13] 曾流芳,陈柏平,王学忠.疏松砂岩油藏大孔道定量描述初步研究[J].油气地质与采收率,2002,9(4):53-55.
- [14] 赵永强,王秀鹏,史田,等.放射性同位素示踪剂技术研究油水井间高渗透层[J].断块油气田,2002,9(2):77-80.
- [15] 李科星,蒲万芬,赵军,等.疏松砂岩油藏大孔道识别综述[J].西南石油大学学报:自然科学版,2007,29(5):42-44.
- [16] Liu Xiantai, Wang Zhonghe, Wang Yanzhong. Medium-high permeability mature reservoir management study: An innovative methodology and case study[C]// paper SPE-130134-MS presented at the International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, 8-10 June 2010, Beijing, China.

(编辑 尹淑容)

(上接第24页)

3) 该方法可以用来预测窄河道普通稠油油藏注水开发的各项指标,为指导海上窄河道普通稠油油田的高效开发提供了理论依据。

参考文献

- [1] 许家峰,孙福街,田冀,等.考虑启动压力梯度时普通稠油非线性渗流模型解析求解方法[J].中国海上油气,2011,23(1):32-35.
- [2] 张代燕,彭军,谷艳玲,等.稠油油藏启动压力梯度实验[J].新疆石油地质,2012,33(2):201-204.
- [3] 计秉玉,李莉,王春艳.低渗透油藏非达西渗流面积井网产油量计算方法[J].石油学报,2008,29(2):256-261.
- [4] 郭粉转,唐海,吕栋梁,等.渗流启动压力梯度对低渗透油田五点井网面积波及效率影响[J].大庆石油学院学报,2010,34(3):65-68.
- [5] 武兵厂,姚军,吕爱民.水平井与垂直井联合井网波及系数研究[J].石油学报,2006,27(4):85-88.
- [6] 吕栋梁,唐海,郭粉转,等.低渗透油田反九点井网面积波及效率影响研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(1):147-153.
- [7] 何聪鸽,范子菲,方思东,等.特低渗透各向异性油藏平面波及系数计算方法[J].油气地质与采收率,2015,22(3):77-83.
- [8] 苗彦平,唐林,高遵美,等.边水油藏水平井含水上升规律影响因素研究[J].油气藏评价与开发,2013,3(5):41-45.
- [9] 朱圣举,刘萍,柳良仁.低渗透油藏正方形反九点井网见效见水关系研究[J].特种油气藏,2013,20(3):79-81,154.
- [10] 舒杰,唐海,王营营,等.含裂缝正方形反九点井网面积波及效率影响研究[J].断块油气田,2014,21(3):360-363.
- [11] 李馨悦,吕栋梁,唐海.低渗油藏五点井网产水规律研究[J].油气藏评价与开发,2016,6(6):21-26.
- [12] 计秉玉,战剑飞,苏致新.油井见效时间和见水时间计算公式[J].大庆石油地质与开发,2000,19(5):24-26.
- [13] 沈非,程林松,黄世军,等.基于流管法的普通稠油水驱波及系数计算方法[J].石油钻采工艺,2016,38(5):645-649.
- [14] 喻秋兰,唐海,吕栋梁,等.复杂断块油藏见水后面积波及系数的修正[J].特种油气藏,2011,18(4):70-72.
- [15] 戚涛,吕栋梁,李标,等.四点井网含水率与采出程度关系的确定[J].断块油气田,2014,21(2):208-212.
- [16] 程林松.高等渗流力学[M].北京:石油工业出版社,2011:287-299.
- [17] 罗宪波,李波,刘英,等.存在启动压力梯度时储层动用半径的确定[J].中国海上油气,2009,21(4):248-250.

(编辑 尹淑容)