

基于吸水剖面资料的优势通道分类方法

——以孤东油田为例

王 森¹,冯其红¹,宋玉龙¹,王 鹏¹,陈德坡²,唐从见²

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 青岛 266555; 2.中国石化胜利油田分公司地质科学研究院,山东 东营 257015)

摘要:针对目前优势通道分类方法仅考虑绝对指标而忽略相对指标的缺陷,以孤东油田为研究对象,根据不同级别优势通道渗流状态及其不同的分布形式,采用数值模拟与油藏工程相结合的方法,利用相对吸水量和吸水强度比2个相对指标绘制孤东油田优势通道分类图版,同时还考虑了优势通道发育级别较高时可能出现的非达西渗流特征,将优势通道划分为优势通道发育不明显储层、普通高渗透层、强高渗透条带和大孔道4个级别。该图版克服了常规分类方法的缺陷,充分体现了优势通道的相对概念,并且只需要吸水剖面资料即可完成优势通道的分类和级别划分,方便有效,有利于现场的推广应用。将基于吸水剖面资料的优势通道分类方法应用于孤东油田七区西Ng6³⁺⁴开发单元,判别结果与时变油藏数值模拟结果、示踪剂测试结果相吻合,从而验证了该方法的可靠性。

关键词:优势通道 非达西渗流 图版法 相对吸水量 吸水强度 孤东油田

中图分类号: TE341

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)05-0099-04

目前中国东部大多数油田已进入高含水期,注入水的长期冲刷使得储层内优势通道发育。优势通道的存在造成大量注入水低效或无效循环,加剧了层内、层间矛盾,增强了驱替的不均衡性,严重影响了水驱开发效果^[1-4]。中外研究者针对优势通道进行了大量研究,然而,目前的研究多局限于优势通道的识别、描述方法^[5-13]和形成机理^[14-18],针对其分类方法的研究甚少。笔者以孤东油田为研究对象,根据不同级别优势通道渗流状态及其不同的分布形式,考虑相对指标,利用数值模拟和油藏工程相结合的手段对优势通道的分类方法进行研究,最终建立了基于吸水剖面资料的优势通道分类图版。

1 研究思路

目前常用的优势通道分类方法是陈月明等^[19]提出的。该方法仅考虑绝对指标(渗透率),而忽略了相对指标。由于优势通道本身是相对概念,当对渗透率较低的储层运用该方法进行判别时,经常会导致判断错误;而且须预先确定优势通道的渗透率,但是该参数是难以获得的,因此限制了该方法的广泛应用。

参考相对指标,按照优势通道发育程度将其划

分为4个级别:①优势通道发育不明显储层。该类储层没有发育明显的优势通道,吸水或产液剖面比较均匀,不存在明显的强吸水层或水淹层。②普通高渗透层。其优势通道的发育程度较低,与正常储层相比,渗透率稍有增大,可视为具有较高渗透率的薄层。③强高渗透条带。其优势通道的发育程度比较高,渗流能力比较强,可视为一条沿水平方向展布的裂缝。在河流相正韵律油藏底部注采井间的主流线方向上常发育强高渗透条带。④大孔道。优势通道发育程度很高,大孔道内流体的流动规律已不遵循达西定律,而是遵循高速非达西渗流^[20-22]。

为了对调剖剂粒径选择和用量设计提供指导,优势通道的描述主要针对渗透率和厚度2个参数,因此进行优势通道的级别划分主要选择以下2个相对指标:①优势通道的相对吸水量。即优势通道的吸水量与整个储层总吸水量的比值,其主要反映了优势通道的地层系数与整个储层地层系数之比。优势通道的相对吸水量越大,则发育级别越高。②优势通道的吸水强度比。即整个储层的吸水强度与优势通道吸水强度的比值。由于优势通道的渗流能力高于正常储层,因此该值越小,优势通道的发育级别越高。

收稿日期:2013-07-12。

作者简介:王森,男,在读博士研究生,从事油气渗流理论与应用、优势通道识别与描述和油藏数值模拟等方面的研究。联系电话:13793292830, E-mail:wangsen1@126.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目“中高渗透水驱油藏整体深部调驱技术研究”(P10072)。

2 模型建立

对于大孔道,采用油藏工程方法考虑大孔道内非达西渗流的影响并对相对吸水量和吸水强度比进行计算;对于优势通道发育不明显储层、普通高渗透层和强高渗透条带,分别建立不同的概念模型,采用Eclipse软件进行数值模拟求取优势通道的相对吸水量和吸水强度比。

2.1 数值模拟模型建立

根据孤东油田河流相正韵律油层的特征建立概念模型。以五点井网的1/4为研究对象,网格宽度为5 m;纵向上采用上粗下细的非均匀精细网格模型,自上而下划分为4段:第1段,10个网格,每个网格厚度为0.3 m;第2段,15个网格,每个网格厚度为0.2 m;第3段,20个网格,每个网格厚度为0.15 m;第4段,30个网格,每个网格厚度为0.1 m。

模拟方案的设计为:①优势通道发育不明显储层,主要考虑渗透率级差和原油粘度的影响,储层渗透率级差分别为1,1.5,2,2.5和3,地层原油粘度分别为20,50,80和110 mPa·s。②普通高渗透层,主要考虑渗透率和厚度的影响,优势通道的渗透率分别为2,2.5,3,3.5,4和5 μm^2 ,厚度占储层总厚度的比例分别为10%,15%和20%。③强高渗透条带,主要考虑渗透率、厚度和宽度的影响,优势通道渗透率分别为3,3.5,4,4.5,5,5.5,6,6.5,7,7.5和8 μm^2 ,厚度占储层总厚度的比例分别为3.33%,6.67%,10%,15%和20%;宽度为15和35 m。④大孔道储层总厚度为12 m,模型宽度为8 m,总注入量为45 m^3/d ,正常储层的渗透率为1.5 μm^2 。由于大孔道内已达到残余油饱和度,因此只有水参与流动^[23]。地层流体粘度为0.5 mPa·s,密度为1 g/cm^3 ,正常储层中流体为油水混合物,平均含油饱和度为0.5;据相渗曲线可求得正常储层中水的相对渗透率为0.073。大孔道渗透率分别为5,10,30,50,70,90,110,130和150 μm^2 ;大孔道厚度占储层总厚度的比例分别为1%,2%,3%,4%,5%,10%,15%和20%。

2.2 大孔道非达西渗流机理推导

当优势通道的渗透率增大到一定程度后,形成大孔道。笔者通过建立注采井间的一维剖面模型,利用油藏工程方法,推导了大孔道非达西渗流对生产动态的影响公式。

大孔道高速非达西流动方程为

$$G_p = \frac{\mu_d}{K_d} v_d + \rho_d \beta v_d^2 \quad (1)$$

式中: G_p 为压力梯度, 10^{-1} MPa/cm; μ_d 为大孔道中地层流体粘度, mPa·s; K_d 为大孔道的渗透率, μm^2 ; v_d 为大孔道中流体渗流速度, cm/s; ρ_d 为大孔道中地层流体密度, g/cm^3 ; β 为非达西流动系数, 10^6 cm^{-1} ,只有当 β 是0时为达西流动^[22]。

由式(1)进行求解,可得注入大孔道中水的流量为

$$Q_d = v_d A_d = v_d w h_d = \frac{w h_d}{2 \rho_d \beta} \left[-\frac{\mu_d}{K_d} + \sqrt{\left(\frac{\mu_d}{K_d}\right)^2 + 4 \rho_d \beta G_p} \right] \quad (2)$$

式中: Q_d 为注入到大孔道中水的流量, cm^3/s ; A_d 为大孔道的截面积, cm^2 ; w 为注采井间剖面模型的宽度, cm; h_d 为大孔道的厚度, cm。

由达西定律可求得注入正常储层中水的流量为

$$Q_1 = v_1 A_1 = v_1 h_1 w = h_1 w \frac{K K_{rw}}{\mu_w} G_p \quad (3)$$

式中: Q_1 为注入到储层中水的流量, cm^3/s ; v_1 为储层中流体的流动速度, cm/s; A_1 为储层的截面积, cm^2 ; h_1 为储层的厚度, cm; K_{rw} 为储层中水的相对渗透率; μ_w 为地层水粘度, mPa·s。

假设注水井的注入量恒定,则总注水量为

$$Q = Q_d + Q_1 \quad (4)$$

式中: Q 为总注水量, cm^3/s 。

将式(2)和式(3)代入式(4)可得

$$\frac{w h_d}{2 \rho_d \beta} \left[-\frac{\mu_d}{K_d} + \sqrt{\left(\frac{\mu_d}{K_d}\right)^2 + 4 \rho_d \beta G_p} \right] + h_1 w \frac{K K_{rw}}{\mu_w} G_p - Q = 0 \quad (5)$$

式(5)为非线性方程,可采用Newton迭代方法求解。将其函数定义为

$$f(G_p) = \frac{w h_d}{2 \rho_d \beta} \left[-\frac{\mu_d}{K_d} + \sqrt{\left(\frac{\mu_d}{K_d}\right)^2 + 4 \rho_d \beta G_p} \right] + h_1 w \frac{K K_{rw}}{\mu_w} G_p - Q \quad (6)$$

将式(6)进行求导可得

$$f'(G_p) = w h_d \left[\left(\frac{\mu_d}{K_d}\right)^2 + 4 \rho_d \beta G_p \right]^{-\frac{1}{2}} + h_1 w \frac{K K_{rw}}{\mu_w} \quad (7)$$

因此,Newton迭代法的迭代格式为

$$G_{p(k+1)} = G_{p(k)} - \frac{f(G_{p(k)})}{f'(G_{p(k)})} \quad (8)$$

式中: $G_{p(k+1)}$ 为第 $k+1$ 次迭代所得到的压力梯度; $G_{p(k)}$ 为第 k 次迭代所得到的压力梯度。

当 $|G_{p(k+1)} - G_{p(k)}| \leq 10^{-10}$ 时迭代结束,求得压力梯度,进而分别计算出相对吸水量和吸水强度比。

3 优势通道的分类图版

对所建立的模型进行模拟,计算不同模型中优势通道的相对吸水量和吸水强度比,将各模型的模拟结果绘制成散点图,发现由相对吸水量和吸水强度比所围成的方形区域被划分为4个部分,分别代表了优势通道发育不明显储层、普通高渗透层、强高渗透条带和大孔道4个级别,由此形成优势通道分类图版(图1)。

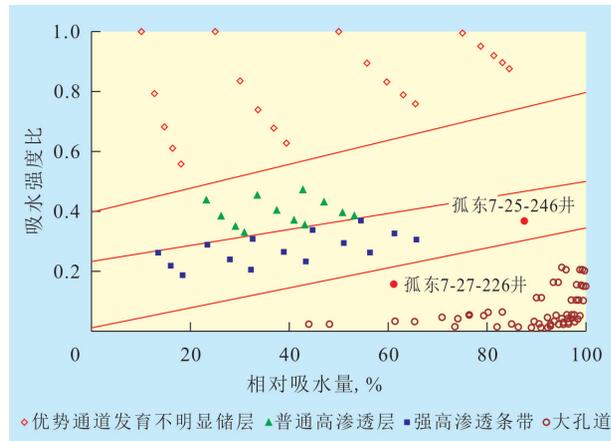


图1 基于吸水剖面资料的优势通道分类

优势通道分类图版克服了常规优势通道分类方法仅考虑绝对指标而忽略相对指标的缺陷,而且只需要吸水剖面资料即可完成优势通道的分类和级别划分,方便有效,有利于现场的推广应用。

4 应用实例

将所建立的优势通道分类图版应用于孤东油田七区西 $Ng6^{3+4}$ 开发单元。2007年11月对孤东7-25-246井进行吸水剖面测试。该井射孔厚度为14.4 m, $Ng6^4$ 小层虽然厚度仅为4.6 m,占射孔厚度的31.9%,但其相对吸水量却达88.44%,吸水强度比为0.361 2,将 $Ng6^4$ 小层的相对吸水量和吸水强度比分别作为横、纵坐标,绘制在分类图版中,发现散点落在强高渗透条带区域,说明该井已经形成优势通道,发育级别为强高渗透条带。

考虑储层和流体物性在不同开发阶段的变化,建立了孤东油田七区西 $Ng6^{3+4}$ 开发单元的时变油藏

地质模型,采用分阶段历史拟合方法,实现了时变油藏数值模拟^[24-25](图2)。结合孤东7-25-246井区目前的渗透率分布和生产动态资料,判断该井周围高渗透条带,与优势通道分类图版判别结果一致。

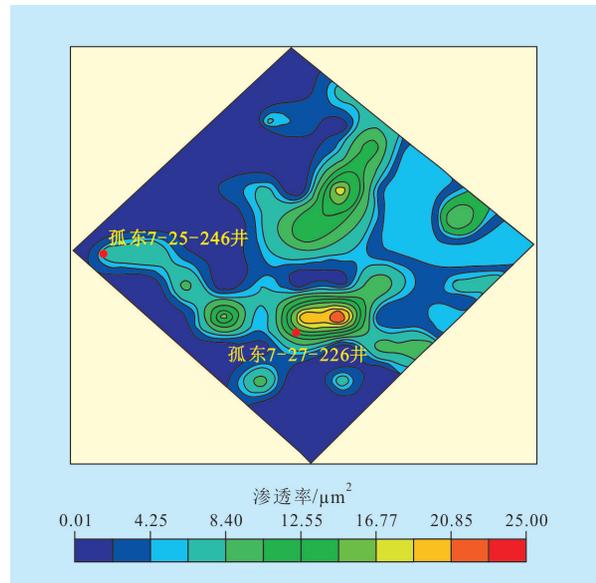


图2 孤东油田七区 $Ng6^{3+4}$ 开发单元渗透率分布

2009年6月孤东7-27-226井吸水剖面测试结果表明,该井射孔厚度为15.3 m,在1 329.9 m处出现明显的强吸水层,虽然厚度只有1.5 m,占射孔厚度的9.8%,但其相对吸水量却达60.15%,吸水强度比为0.162 9,由分类图版判断该井发育大孔道。2009年8月对孤东7-27-226井及其周围的生产井进行示踪剂测试,结果表明,其前缘水线推进速度为4.07~33.30 m/d,较投产初期增长了30~70倍,而且示踪剂突破厚度都很小,结合时变油藏数值模拟结果,可判断该井周围已形成大孔道。优势通道分类图版的判别结果与该结果一致,进而验证了优势通道分类图版的可靠性。

5 结束语

以孤东油田为例,根据不同级别优势通道渗流状态和不同的分布形式,基于相对吸水量和吸水强度比2个相对指标绘制了优势通道分类图版。将该分类图版应用于孤东油田七区西 $Ng6^{3+4}$ 开发单元,验证了该方法的可靠性。优势通道分类图版克服了常规方法仅使用绝对指标而忽略相对指标的缺陷,考虑了优势通道发育级别较高时可能出现的非达西渗流特征,而且只需要吸水剖面资料即可完成优势通道的分类和级别划分,方便有效,利于现场的推广应用。

参考文献:

- [1] 韩大匡.中国油气田开发现状、面临的挑战和技术发展方向[J].中国工程科学,2010,12(5):51-57.
- [2] 李阳,王端平,刘建民.陆相水驱油藏剩余油富集区研究[J].石油勘探与开发,2005,32(3):91-96.
- [3] 李阳.陆相高含水油藏提高水驱采收率实践[J].石油学报,2009,30(3):396-399.
- [4] 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.
- [5] 姜汉桥,刘奋,洪光明,等.用概率模型方法确定下东油田高渗通道地质参数的研究[J].石油勘探与开发,1997,24(1):55-58.
- [6] 窦之林,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.
- [7] 于九政,刘易非,唐长久,等.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.
- [8] 刘月田,孙保利,于永生.大孔道模糊识别与定量计算方法[J].石油钻采工艺,2003,25(5):54-59.
- [9] 尹文军,陈永生,王华,等.水力探测大孔道和剩余油饱和度解释模型的建立[J].油气地质与采收率,2005,12(1):63-65.
- [10] 彭仕宓,史彦尧,韩涛,等.油田高含水期窜流通道定量描述方法[J].石油学报,2007,28(5):79-84.
- [11] 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.
- [12] Feng Qihong, Wang Sen, Gao Guoqiang, et al. A new approach to thief zone identification based on interference test [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 75(1/2): 13-18.
- [13] Feng Qihong, Wang Sen, Wang Shoulei, et al. Identification of

- thief zones by dimensionless pressure index in waterfloods [C]. SPE 143926-MS, 2011.
- [14] 宋万超,孙焕泉,孙国,等.油藏开发流体动力地质作用——以胜坨油田二区为例[J].石油学报,2002,23(3):52-55.
- [15] 徐守余,李红南.储集层孔喉网络场演化规律和剩余油分布[J].石油学报,2003,24(4):48-53.
- [16] 房士然.夹层对优势通道形成与演化的影响[J].油气地质与采收率,2010,17(1):90-92.
- [17] 毛振强,谷建伟,董平志,等.疏松砂岩油藏大孔道形成机理与预测[J].油气地质与采收率,2011,18(1):77-79.
- [18] 马代鑫,温鸿滨,赵明宸,等.水驱开发油藏流体通道描述及定量封堵技术[J].油气地质与采收率,2012,19(1):104-106.
- [19] 陈月明,姜汉桥,李淑霞.井间示踪剂监测技术在油藏非均质性描述中的应用[J].石油大学学报:自然科学版,1994,18(增刊):1-7.
- [20] 张贤松.水驱油藏特高含水期非线性渗流产生条件[J].中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(2):90-93.
- [21] 崔传智,杨勇,曹刚,等.疏松砂岩油藏大孔道中高速非达西渗流对产能的影响分析[J].石油天然气学报,2009,31(3):122-125.
- [22] 刘睿,姜汉桥,陈民峰,等.窜流通道高速非达西渗流规律实验[J].大庆石油地质与开发,2010,29(1):65-69.
- [23] Bane R K, Parker R A, Storbeck W G, et al. Reservoir management of the Fullerton Clearfork unit [C]. SPE 27640, 1994.
- [24] 姜汉桥,谷建伟,陈民峰,等.时变油藏地质模型下剩余油分布的数值模拟研究[J].石油勘探与开发,2005,32(2):91-93.
- [25] 刘显太.中高渗透砂岩油藏储层物性时变数值模拟技术[J].油气地质与采收率,2011,18(5):58-62.

编辑 王星

(上接第98页)

水开发后期应用中的矛盾,可以满足特高含水期油藏的经济极限井网密度、极限加密潜力等技术经济政策界限计算的需要。

参考文献:

- [1] 冉启佑,胡建国,肖玉茹.水驱特征曲线对原油粘度不存在选择性[J].油气地质与采收率,2006,13(6):59-62.
- [2] 周金应,万怡姝.高含水后期开发阶段合理井网密度计算方法的改进[J].特种油气藏,2008,15(2):52-55.
- [3] 刘斌.油田经济极限井网密度计算方法探讨[J].西安石油学院学报:自然科学版,2001,16(1):31-35.
- [4] 杨磊,程俊,汪奇,等.老油田经济合理井网密度计算方法的改进[J].断块油气田,2006,13(5):37-38.
- [5] 陈元千.水驱体积波及系数变化关系的研究[J].油气地质与采收率,2001,8(6):49-51.
- [6] 于乐香.特高含水期油田的合理经济极限井网密度研究[J].新疆石油地质,2001,22(2):143-144.
- [7] 俞启泰,赵明,林志芳.应用生产资料预测可采储量的方法评价[J].石油学报,1987,8(4):65-75.

- [8] 苏继洪,石忠仁,王力娜,等.油田调整期增加可采储量的评价方法探讨与认识[J].石油勘探与开发,1995,22(6):88-89.
- [9] 陈元千.油田可采储量计算方法[J].新疆石油地质,2000,21(2):130-137.
- [10] 齐梅,侯建锋,蒋漫旗,等.可采储量标定的合理确定性探讨[J].油气地质与采收率,2007,14(6):62-65.
- [11] 陈元千.预测油气田可采储量和剩余可采储量的快速方法[J].新疆石油地质,2005,26(5):544-548.
- [12] 邴绍献.水驱油藏单井可采储量影响因素权重定量研究[J].油气地质与采收率,2011,18(6):78-81,85.
- [13] 王俊魁.油气藏产量递减规律的研究与可采储量的预测[J].新疆石油地质,2007,28(2):190-193.
- [14] 黄金山.油田经济极限井网密度计算新方法[J].油气地质与采收率,2013,20(3):53-55,59.
- [15] 冉启佑,赵庆飞,方开璞,等.水驱油田剩余经济可采储量计算方法[J].石油与天然气地质,2005,26(3):379-383.
- [16] 刘斌,郭福军.油田经济可采储量确定方法研究[J].西南石油学院学报,1999,21(1):83-87.

编辑 武云云