

·油气采收率·

低渗透油藏高含水期层间径向钻孔 油藏工程优化研究

崔传智¹,王秀坤¹,杨勇²,曹刚²,崔小朵²

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛266580; 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:受层间储层物性差异的影响,低渗透油藏高含水期层间动用程度差异显著。层间径向钻孔是改善层间动用程度差异的重要技术之一,径向孔个数和长度是影响径向钻孔效果的主要因素。以2层合采油藏为例,以层间均衡动用为目标,以油水两相不稳定渗流理论和等值渗流阻力法为基础,综合考虑层间物性差异和动用程度差异,建立了高含水期油藏径向孔个数及长度的优化方法,并编制了相应的计算程序。采用油藏数值模拟技术对计算结果进行了验证,结果表明,采用新建方法计算结果进行径向钻孔后,层间动用程度差异改善显著,提高了油藏采收率,也表明了所建优化方法的可行性与准确性。

关键词:低渗透油藏 高含水期 径向钻孔 优化模型 均衡驱替

中图分类号:TE348

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2014)05-0061-04

中国低渗透油藏分布广泛,储量丰富。近年来,新增探明储量中低渗透以及特低渗透储层占到了50%以上^[1-3]。受层间储层物性差异的影响,低渗透油藏高含水期层间动用程度差异大,层间矛盾突出^[4-7]。现场实践证实,利用层间径向钻孔技术,在储层物性较差的小层钻出多个径向孔,不但可提高该层的产能,还可有效改善低渗透油藏的层间动用程度差异,从而提高油藏采收率。

径向钻孔技术,即超短半径水平井技术,其主要工艺是利用特殊的高压软管形成高压水射流,在同一层或多个层中,穿透并钻出多个水平方向上的井眼,进而增大泄油面积,提高油井产能。目前中外学者在径向钻孔工艺方面的研究较多^[8-13],Dickinson等最早介绍了径向钻孔系统^[8-9];胡强法等详细研究了径向钻孔的工艺技术^[10];杨永印等介绍了径向钻孔技术在辽河油田的现场应用^[11];崔龙连等介绍了目前新型的径向钻孔技术^[12];Bruni等介绍了径向钻孔在阿根廷地区的应用^[13]。但在油藏工程优化方面中外学者研究较少,蒋佳骏简述了径向钻孔技术在头台油田应用时的选井原则和方案设计原则^[14];刘银风采用油藏数值模拟技术研究了径向孔个数和长度对渗流场的影响及产能的影响^[15]。为此,笔者针对高含水期低渗透油藏层间储层物性和动用程度差异,以均衡驱替为目标,以油水两相

不稳定渗流理论和等值渗流阻力法为基础,建立了层间径向孔个数和长度优化方法。

1 基本优化思路

以多层合采油藏层间均衡驱替^[16-19]为优化目标,即在径向钻孔后给定的调控时间内,通过优化储层物性较差小层的径向孔的个数和长度,使各小层的采出程度即平均剩余油饱和度相同。为简便起见,选取2个小层作为研究对象,假定第1小层的储层物性较差,采出程度低,需要进行径向钻孔。

对于存在储层物性差异和平均剩余油饱和度差异的2层合采模型,在给定的相同生产压差下进行生产。对于不需要径向钻孔的第2小层,根据目前小层的储层物性和剩余油饱和度,计算在给定的调控时间结束时地层的平均含水饱和度和出口端含水饱和度。该层的平均含水饱和度即为第1小层在径向钻孔后需要达到的目标。

对于需要进行径向钻孔的第1小层,首先给定一组径向钻孔的个数与长度,计算经过调控时间后的平均含水饱和度,判断该小层的平均含水饱和度与前面计算出的第2小层的平均含水饱和度是否相等或者满足精度要求;如不满足,改变径向孔个数与长度,重新进行计算,直至计算出的2个小层的平

收稿日期:2014-07-28。

作者简介:崔传智,男,教授,博士,从事油气渗流理论、油气田开发技术研究。联系电话:13705469592, E-mail:ccz2008@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“胜利油田特高含水期提高水驱采收率技术”(2011ZX05011)。

均含水饱和度之差达到工程计算允许的精度,此时的径向孔个数及长度即为最终优化结果。

2 未径向钻孔小层平均含水饱和度计算方法

2.1 地层平均含水饱和度与出口端含水饱和度的确定

要确定第2小层给定调整时间结束时出口端的含水饱和度,首先需要确定调整前出口端的含水饱和度。根据未径向钻孔小层的孔隙体积及累积产油量求得第2小层的平均含水饱和度,其表达式为

$$\bar{S}_{w2}(t=0) = S_{wc} + \frac{N_p}{V_p} \quad (1)$$

式中: $\bar{S}_{w2}(t=0)$ 为第2小层的平均含水饱和度; t 为实施径向钻孔措施的时间; S_{wc} 为束缚水饱和度; N_p 为第2小层的累积产油量, m^3 ; V_p 为第2小层的孔隙体积, m^3 。

在已知第2小层平均含水饱和度的条件下,由 Welge 公式^[17]可求得第2小层出口端的含水饱和度,其表达式为

$$S_{w2}(t=0) = \bar{S}_{w2}(t=0) - \frac{1-f_w(S_{w2})}{f'_w(S_{w2})} \quad (2)$$

式中: $S_{w2}(t=0)$ 为第2小层出口端的含水饱和度; $f_w(S_{w2})$ 为含水饱和度为 S_{w2} 时对应的含水率; $f'_w(S_{w2})$ 为含水饱和度为 S_{w2} 时对应的含水上升率。

2.2 调控时间结束时地层平均含水饱和度的计算方法

在整个调控时间 T 内,保持压差 Δp 生产,随水的不断注入,第2小层的产液量不断发生变化。为此,将调控时间 T 细分为 N 个时间步长,每个时间步长内的产液量看作定值。

根据等值渗流阻力方法,则第1个时间步长内的产液速度为

$$q(t=dt) = \frac{\Delta p - Gr_e}{R_2} \quad (3)$$

式中: $q(t=dt)$ 为 dt 时刻的产液速度, cm^3/s ; Δp 为生产压差, $0.1 MPa$; G 为启动压力梯度, $0.1 MPa/cm$; r_e 为供给半径, cm ; R_2 为 dt 时间内第2小层的渗流阻力, $0.1 MPa \cdot s/cm^3$ 。

第2小层流体的流动形态为平面径向流,以上一时间步的平均含水饱和度 $\bar{S}_{w2}(t=0)$ 对应的渗流阻力作为整个小层的渗流阻力,此时油相和水相的渗流阻力分别为

$$R_{o2} = \frac{\mu_o}{2\pi K_2 K_{ro}(\bar{S}_{w2}) h_2} \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (4)$$

$$R_{w2} = \frac{\mu_w}{2\pi K_2 K_{rw}(\bar{S}_{w2}) h_2} \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (5)$$

式中: R_{o2} 为第2小层油相的渗流阻力, $0.1 MPa \cdot s/cm^3$; μ_o 为地层原油粘度, $mPa \cdot s$; K_2 为第2小层的渗透率, μm^2 ; $K_{ro}(\bar{S}_{w2})$ 为含水饱和度为 \bar{S}_{w2} 时油相相对渗透率; h_2 为第2小层厚度, cm ; r_w 为井径, cm ; R_{w2} 为第2小层水相的渗流阻力, $0.1 MPa \cdot s/cm^3$; μ_w 为地层水粘度, $mPa \cdot s$; $K_{rw}(\bar{S}_{w2})$ 为含水饱和度为 \bar{S}_{w2} 时水相相对渗透率。

根据水电相似原理,认为水相与油相的渗流阻力满足并联关系,总的渗流阻力为

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{o2}} + \frac{1}{R_{w2}} \quad (6)$$

在求得第2小层的产液速度后,可求得此时间步长 dt 内的累积产液量,其表达式为

$$\Delta L = q(t=dt) dt \quad (7)$$

式中: ΔL 为第1个时间步长内的累积产液量, cm^3 。

假定第1个时间步长结束时第2小层出口端含水饱和度为 $\bar{S}_{w2}(t=dt)$, 则根据 B-L 渗流理论,可得

$$\Delta L = \frac{V_p}{f'_w(S_{w2}(t=dt))} - \frac{V_p}{f'_w(S_{w2}(t=0))} \quad (8)$$

由式(8)可求得第2小层在第1个时间步长结束时出口端的含水饱和度,并根据式(2)求得第2小层此时的平均含水饱和度。

基于第1个时间步长结束时计算得到的第2小层平均含水饱和度和出口端含水饱和度,可继续计算得到第2个、第3个、直至第 N 个时间步长后第2小层的平均含水饱和度。

3 径向孔个数及长度优化方法

对于需要进行径向钻孔的第1小层,其平均含水饱和度的计算方法与第2小层的计算过程类似,所不同的只是其渗流阻力的计算方法。

3.1 径向钻孔小层渗流阻力计算方法

对于实施径向钻孔的小层,地层流体通过2种方式流入垂直井筒:①地层流体直接流入垂直井筒;②地层流体先流入径向孔,然后经径向孔流入垂直井筒。

当地层流体直接流入垂直井筒时,此时的流动方式为平面径向流,其渗流阻力的计算与未进行径

向钻孔小层的相同,其表达式为

$$R_{11} = \frac{1}{2\pi K_1 h_1} \times \frac{\mu_o \mu_w}{\mu_o K_{rw}(\bar{S}_{w1}) + \mu_w K_{ro}(\bar{S}_{w1})} \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (9)$$

式中: R_{11} 为地层流体直接流入垂直井筒时的渗流阻力, $0.1 \text{ MPa}\cdot\text{s}/\text{cm}^3$; K_1 为第1小层的绝对渗透率, μm^2 ; $K_{rw}(\bar{S}_{w1})$ 为含水饱和度为 \bar{S}_{w1} 时水相的相对渗透率; $K_{ro}(\bar{S}_{w1})$ 为含水饱和度为 \bar{S}_{w1} 时油相的相对渗透率。

当地层流体通过径向孔流入垂直井筒时,首先将径向孔看作是小井眼的水平分支井,再根据分支井的产能计算公式^[20-22],可得到第1小层平均含水饱和度为 \bar{S}_{w1} 时油相和水相的渗流阻力分别为

$$R_{o1} = \frac{\mu_o}{2\pi K_1 K_{ro}(\bar{S}_{w1}) h_1} \times \left[\ln \frac{4^n r_e}{a} + \frac{\beta h_1}{na} \ln \frac{\beta h_1}{\pi(1+\beta)r_{wh} \sin \frac{\pi h_o}{h_1}} \right] \quad (10)$$

$$R_{w1} = \frac{\mu_w}{2\pi K_1 K_{rw}(\bar{S}_{w1}) h_1} \times \left[\ln \frac{4^n r_e}{a} + \frac{\beta h_1}{na} \ln \frac{\beta h_1}{\pi(1+\beta)r_{wh} \sin \frac{\pi h_o}{h_1}} \right] \quad (11)$$

式中: R_{o1} 为第1小层油相的渗流阻力, $0.1 \text{ MPa}\cdot\text{s}/\text{cm}^3$; h_1 为第1小层的厚度, m ; n 为径向孔个数; a 为径向孔长度, cm ; β 为垂向与水平渗透率比值; r_{wh} 为径向孔半径, cm ; h_o 为径向孔到第1小层底面的距离, m ; R_{w1} 为第1小层水相的渗流阻力, $0.1 \text{ MPa}\cdot\text{s}/\text{cm}^3$ 。

同样水相与油相的渗流阻力均满足并联关系,可求得地层流体向径向孔流动的渗流阻力为

$$R_{12} = \frac{\mu_w}{2\pi K_1 h_1} \left[\frac{\mu_o \mu_w}{\mu_o K_{rw}(\bar{S}_{w1}) + \mu_w K_{ro}(\bar{S}_{w1})} \right] \times \left[\ln \frac{4^n r_e}{a} + \frac{\beta h_1}{na} \ln \frac{\beta h_1}{\pi(1+\beta)r_{wh} \sin \frac{\pi h_o}{h_1}} \right] \quad (12)$$

式中: R_{12} 为地层流体向径向孔流动的渗流阻力, $0.1 \text{ MPa}\cdot\text{s}/\text{cm}^3$ 。

根据水电相似原理,地层流体直接流入垂直井筒的渗流阻力与地层流体向径向孔流动的渗流阻力满足并联关系,据此可得第1小层总渗流阻力为

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} \quad (13)$$

式中: R_1 为第1小层总的渗流阻力, $0.1 \text{ MPa}\cdot\text{s}/\text{cm}^3$ 。

3.2 径向孔个数及长度优化步骤

径向孔个数及长度优化步骤主要分为4个步骤:①依据生产动态数据,由式(1)和式(2),确定第2小层的平均含水饱和度和出口端含水饱和度;②给定一组 a 与 n 值,由式(9)、式(12)和式(13)确定第1小层的渗流阻力;③根据式(3)、式(7)和式(8)计算第1个时间步长结束时的平均含水饱和度;④计算第2步到第 N 步结束时的平均含水饱和度 $\bar{S}_{w1}(t=T)$,判断此时的 $\bar{S}_{w1}(t=T)$ 与优化目标 $\bar{S}_{w2}(t=T)$ 之差是否满足精度要求,若不满足,则改变径向孔个数和长度,返回步骤②重新进行计算,直至两者的差距在工程计算允许精度内,从而得到满足层间均衡驱替时的径向孔个数和长度。

4 模型校验与影响因素分析

某低渗透油藏生产井组,2层合采,上、下层油层厚度均为 10 m ,渗透率分别为 5×10^{-3} 和 $30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,供给半径为 200 m ,开发一段时间后2层均已见水,采出程度分别为 12.53% 和 21.9% 。此时采用径向钻孔技术,调整时间为 2 a ,利用新建方法计算得到满足层间均衡驱替时的径向孔个数和长度。

计算结果为,当径向孔个数为 $1, 2, 3, 4, 5$ 和 6 时,径向孔长度分别为 $111, 100, 94, 90, 88$ 和 86 m ,说明在层间差异情况相同的条件下,钻孔个数越多,满足层间均衡驱替时需要的径向钻孔长度越小。现场应用时,需要综合考虑径向钻孔措施成本、工艺条件及井网井距等因素,以确定合理的钻孔个数和长度。

采用油藏数值模拟方法,分析了径向钻孔对开发效果的影响。模型中垂向上细分为 21 个层, $1 \sim 10$ 模拟层为第1小层, $12 \sim 21$ 为第2小层,中间的第 11 模拟层为隔层,2个小层的渗透率分别为 5×10^{-3} 和 $30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,生产 10 a 后的采出程度分别为 12.53% 和 21.9% 。采用径向钻孔技术改善层间动用差异状况,生产井分不进行径向钻孔和进行径向钻孔2种生产方式。依据计算结果和工艺技术限制,选取径向孔个数为 3 、长度为 94 m 的方案进行数值模拟。数值模拟结果表明:未进行径向钻孔时,2个小层的采出程度分别为 15.3% 和 24.76% ,相差 9.46% ;而进行径向钻孔之后,2个小层的采出程度分别为 23.62% 和 24.29% ,仅相差 0.67% ,说明层间动用差异明显改善,提高采出程度 3.93% 。

在保持径向孔个数为1的条件下,分析了层间渗透率差异和采出程度差异对径向孔长度的影响。假定目前2个小层的采出程度均为12.53%,保持第1小层渗透率为 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 不变,第2小层相对于第1小层的渗透率级差从1~10变化时,计算所需要的径向孔长度。由图1可以看出,随着层间渗透率级差的增大,所需要的径向孔长度也逐渐增大,当渗透率级差为10倍时,低渗透层的径向孔长度要达到88 m才能满足均衡驱替的要求。

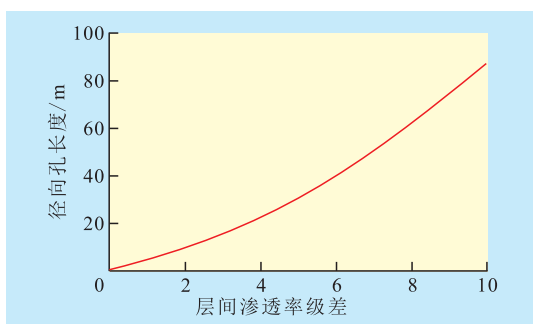


图1 层间渗透率级差对径向孔长度的影响

假定2个小层的渗透率均为 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,但2个小层的剩余油饱和度不同且第1小层较高,由第1小层所需要的径向孔长度(图2)可以看出,层间剩余油饱和度差异越大,高剩余油饱和度层所需要的径向孔长度越长。

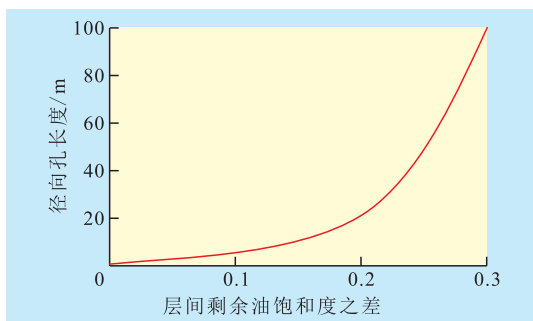


图2 层间剩余油饱和度之差对径向孔长度的影响

5 结束语

层间径向钻孔是解决多层合采油藏高含水期层间动用程度差异的重要技术。以2层合采油藏为例,以层间均衡动用为目标,建立了径向孔个数和长度的优化方法。该方法计算结果经油藏数值模拟验证,能够显著改善层间动用程度差异,提高采收率。多层合采情况下,在进行径向孔的个数和长度优化时,要综合考虑层间储层物性和剩余油饱和度等参数差异的影响,同时也要考虑井网井距和经济成本等因素。

参考文献:

- [1] 江怀友,李治平,钟太贤,等.世界低渗透油气田开发技术现状与展望[J].特种油气藏,2009,16(4):13-17.
- [2] 雷群,李熙喆,万玉金,等.中国低渗透砂岩气藏开发现状及发展方向[J].天然气工业,2009,29(6):1-3.
- [3] 胡文瑞.中国低渗透油气的现状与未来[J].中国工程科学,2009,11(8):29-37.
- [4] 高宝国,滑辉,丁文阁,等.低渗透油田特高含水期开发技术对策——以渤南油田义11井区为例[J].油气地质与采收率,2013,20(6):97-99,103.
- [5] 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.
- [6] 李南,程林松,陈泓全,等.超低渗透油藏注水方式研究[J].油气地质与采收率,2012,19(4):78-80.
- [7] 徐亮.低渗透油藏差异开发技术研究与实践——以济阳坳陷博兴洼陷为例[J].油气地质与采收率,2014,21(4):107-110.
- [8] Dickinson W, Anderson R R, Dickinson R W. The ultrashort-radius radial system[J]. SPE Drilling Engineering, 1989, 4(3): 247-254.
- [9] Dickinson W, Dykstra H, Nees J M, et al. The ultrashort radius radial system applied to thermal recovery of heavy oil[C]. SPE Western Regional Meeting, Bakersfield, California, 30 March-1 April, 1992.
- [10] 胡强法,朱峰,张友军.零半径水射流径向钻井技术的研究与应用[J].石油机械,2009,37(12):12-15.
- [11] 杨永印,杨海滨,王瑞和,等.超短半径辐射分支水平钻井技术在韦5井的应用[J].石油钻采工艺,2006,28(2):11-14.
- [12] 崔龙连,汪海阁,葛云华,等.新型径向钻井技术[J].石油钻采工艺,2008,30(6):29-33.
- [13] Bruni M, Biasotti J, Salomone G. Radial drilling in Argentina[C]. Latin American & Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, 15-18 April, 2007.
- [14] 蒋佳骏.水力径向孔治理低产低效井效果分析[J].内蒙古石油化工,2011,20(8):65-66.
- [15] 刘银凤.低渗透油藏径向钻孔技术增产机理研究[D].大庆:东北石油大学,2012.
- [16] 崔传智,姜华,段杰宏,等.基于层间均衡驱替的分层注水井层间合理配注方法[J].油气地质与采收率,2012,19(5):94-96.
- [17] 吴家文,王家春,刘剑,等.基于剩余油分布的分层注水方案优选[J].大庆石油学院学报,2006,30(4):12-15.
- [18] 杜庆龙,朱丽红.油水井分层动用状况研究新方法[J].石油勘探与开发,2004,31(5):96-98.
- [19] 石晓渠,马道祥.注水井合理配注水量计算方法研究[J].西部探矿工程,2008,20(9):94-96.
- [20] 张建国,雷光伦,杜殿发,等.油气藏渗流力学[M].东营:中国石油大学出版社,2008.
- [21] 程林松,李春兰.分支水平井产能的研究[J].石油学报,1995,16(2):49-55.
- [22] 郎兆新.油气地下渗流力学[M].东营:石油大学出版社,2001:36-46.