第 14 卷　第 28 期　2014 年 10 月
1671—1815(2014)28-0200-04

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 14　No. 28　Oct. 2014
ⓒ　2014　Sci. Tech. Engrg.

石油技术

基于层间均衡驱替的低渗透油藏径向钻孔油藏工程优化研究

崔传智　王秀坤
(中国石油大学(华东)石油工程学院, 青岛 266580)

摘　要　低渗透油藏受层间储层物性差异的影响,层间动用程度差异大,层间矛盾突出。层间径向钻孔技术是解决层间矛盾的重要技术之一。依据层间均衡驱替的原则,考虑启动压力梯度,应用等值渗流阻力法,建立了径向钻孔长度及分支个数的优化模型,并提出了现场实用的交会图版求解方法。利用油藏数值模拟技术,对优化方法进行了验证,证实了此方法的可行性与准确性。

关键词　径向钻孔　低渗透油藏　长度优化　交会图　均衡驱替
中图法分类号　TE242.9;　　**文献标志码**　A

层间径向钻孔技术由于其成本低、作业工期短、储层伤害少等一系列优势,在低渗透油藏的开发中得到了广泛的应用。所谓径向钻孔技术,即超短半径水平井技术,主要就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,穿透并钻进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。

近些年来,国内外学者对径向钻孔的工艺技术以及现场应用的研究较多。Dickinson W 等人[1,2]最早介绍了径向钻孔系统;胡强法等[3]详细研究了径向钻孔的工艺技术;杨永印等[4]给出了径向钻孔技术在辽河油田的现场应用;崔龙连等[5]介绍了目前新型的径向钻孔技术;Bruni M 等[6]介绍了径向钻孔在阿根廷地区的应用情况。此外,Oursegov S 等[7]介绍了径向钻孔与蒸汽吞吐相结合在俄罗斯油气田的应用;侯玉品[8]和张义[9]对于径向钻孔技术开采煤层气也进行了探讨。但对于径向钻孔如何与油藏储层特征相结合,优化其钻进长度、分支数等方面的研究较少。

在进行多层合采时,由于层间储层物性差异的影响,层间渗流能力不同,导致层间动用程度差异大,产生层间矛盾。本文的基于多层油藏均衡驱替的层间径向钻孔油藏工程优化,就是通过优化径向钻孔分支数,分支长度,改变层间的流动差异,进而最大程度的实现层间的均衡驱替,对于减缓低渗透油藏层间动用差异,进而提高采收率,具有指导意义。

1　低渗透油藏径向钻孔小层的渗流阻力

假定一生产井实施径向钻孔措施,在某小层中平面上钻了 n 个径向分支,每个分支的长度均为 a。地层流体通过两种流动方式流入垂直井筒:①地层流体直接流入垂直井筒[图 1(a)];②地层流体首先流入径向分支井,然后经分支井筒进入垂直井筒[图 1(b)]。流动方式如图 1 所示。

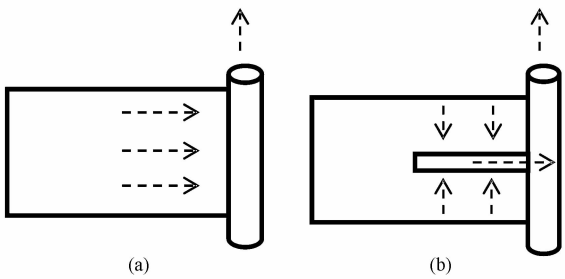

图 1 地层流体向垂直井筒的两种流动方式
Fig. 1　Two ways that the fluid flow into the vertical wellbore

1.1　地层流体直接流入垂直井筒的渗流阻力

此流动方式认为是平面径向流,考虑启动压力梯度的运动方程为

$$v = \frac{k}{\mu}\left(\frac{\partial p}{\partial r} - G\right) \tag{1}$$

2014 年 4 月 19 日收到　　长江学者和创新团队发展计划(IRT1294)、国家科技重大专项(2011ZX05011-003)资助
第一作者简介:崔传智,男,教授,博士。研究方向:油气渗流理论、油气田开发技术。E-mail: ccz2008@126.com。

积分得

$$Q = \frac{2\pi kh}{\mu \ln R_e / r_w}(\Delta p - GR_e) \tag{2}$$

依据水电相似原理[10],则对应的渗流阻力 R_v 为

$$R_v = \frac{\mu}{2\pi kh}\ln\frac{R_e}{r_w} \tag{3}$$

式(3)中,k 为渗透率,G 为启动压力梯度,Q 为产量,h 为小层厚度,μ 为流体黏度,R_e 为供给半径,r_w 为井径,Δp 为压差。

1.2　地层流体向径向分支井筒流动的渗流阻力

把此种流动方式分解为内外两个流动过程。外部过程是在平面上的流动过程,可以看作成地层流体向径向分支井的流动,由保角变换可得[11,12]

$$\frac{2\pi kh}{\mu}\frac{(p_i - p_f - GR_e)}{Q} = \ln\frac{4^{\frac{1}{n}}R_e}{a} \tag{4}$$

式(4)中,p_f 为分支井筒中的平均压力;a 为分支井长度;n 为分支数。

内部流动过程即垂直平面上的径向流动过程,利用镜像反映原理可得[11,12]

$$p_f - p_w = \frac{\mu Q}{2\pi kh}\frac{\beta h}{na}\ln\frac{\beta h \cdot [\sin(\pi h_o/h)]^{-1}}{\pi(1+\beta)r_{wh}} \tag{5}$$

式(5)中,$\beta = \sqrt{k/k_z}$,k_z 垂向渗透率,k 为水平渗透率,r_{wh} 表示径向钻孔井眼直径,h_o 表示径向分支井距离小层底面的垂向距离。

综合式(4),式(5)可得

$$\Delta p_w - GR_e = \frac{Q\mu}{2\pi kh}\left\{\ln\frac{4^{\frac{1}{n}}R_e}{a} + \frac{\beta h}{na}\ln\frac{\beta h[\sin(\pi h_o/h)]^{-1}}{\pi(1+\beta)r_{wh}}\right\} \tag{6}$$

由水电相似原理,可以知道对应的渗流阻力 R_h 为

$$R_h = \frac{\mu}{2\pi kh}\left\{\ln\frac{4^{\frac{1}{n}}R_e}{a} + \frac{\beta h}{na}\ln\frac{\beta h[\sin(\pi h_o/h)]^{-1}}{\pi(1+\beta)r_{wh}}\right\} \tag{7}$$

1.3　低渗透油藏径向钻孔小层的渗流阻力

以上两个流动过程,可以简化成地层流体向径向分支井筒流动的渗流阻力 R_h 与地层流体直接流向垂直井筒的渗流阻力 R_v 的并联。依据水电相似原理,得到实施径向钻孔后小层对应的渗流阻力为

$$R = \frac{\mu}{2\pi kh}\frac{\left\{\ln\frac{4^{\frac{1}{n}}R_e}{a} + \frac{\beta h}{na}\ln\frac{\beta h[\sin(\pi h_o/h)]^{-1}}{\pi(1+\beta)r_{wh}}\right\}\ln\frac{R_e}{r_w}}{\ln\frac{4^{\frac{1}{n}}R_e^2}{ar_w} + \frac{\beta h}{na}\ln\frac{\beta h[\sin(\pi h_o/h)]^{-1}}{\pi(1+\beta)r_{wh}}} \tag{8}$$

2　低渗透油藏层间径向钻孔油藏工程优化方法

关于均衡驱替,很多学者给出了一些研究标准[13—15],对于多层合采油藏来讲,是指水驱开发过程中,各层的动用情况均衡。本文的研究中,以各层见水时间相同作为均衡驱替的标准。简单起见,选取两个小层合采作为研究对象。假定第一层的储层物性较差,进行径向钻孔,径向分支井筒无限导流(即井筒内压力处处相等),两个小层流态均为平面径向流,具体模型如图 2 所示。

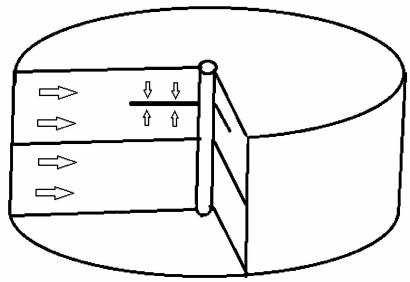

图 2　基本优化模型示意图

Fig. 2　Schematic of the basic optimization model

由等饱和度移动方程的径向流形式,可知见水时刻满足[15]

$$R_e^2 = \frac{f'_{wf}(S_{wf})}{\pi\phi h}\int_0^t Q\mathrm{d}t = \frac{f'_{wf}(S_{wf})}{\pi\phi h}\bar{Q}t \tag{9}$$

式(9)中,f'_{wf} 为含水上升率,S_{wf} 为前缘含水饱和度,$\bar{Q}$ 为 t 时间内的平均流量,ϕ 为孔隙度。

对于每一个层都满足式(9),所以对于第一层和第二层分别有

$$R_e^2 = \frac{f'_{wf}(S_{wf})}{\pi\phi_1 h_1}\int_0^t Q\mathrm{d}t = \frac{f'_{wf}(S_{wf})}{\pi\phi_1 h_1}\bar{Q}_1 t_1 \tag{10}$$

$$R_e^2 = \frac{f'_{wf}(S_{wf})}{\pi\phi_2 h_2}\int_0^t Q\mathrm{d}t = \frac{f'_{wf}(S_{wf})}{\pi\phi_2 h_2}\bar{Q}_2 t_2 \tag{11}$$

由于是均衡驱替,见水时间相同,即 $t_1 = t_2$,所以由式(10)/式(11)整理可得

$$\frac{\bar{Q}_1}{\bar{Q}_2} = \frac{\phi_1 h_1}{\phi_2 h_2} \tag{12}$$

对于第 i 层有

$$\bar{Q}_i = \frac{\Delta p - G_i R_e}{R_i} \tag{13}$$

式(13)中,R_i 为第 i 层的渗流阻力。

将式(13)代入式(12)可得

$$\frac{(\Delta p - G_1 R_e)/R_1}{(\Delta p - G_2 R_e)/R_2} = \frac{h_2\phi_2}{h_1\phi_1} \tag{14}$$

对于进行径向钻孔的第一层,由式(8)可得到

对应的渗流阻力。

第二层为常规的平面径向流,由达西定律知其渗流阻力为

$$R_2 = \frac{\mu}{2\pi k_2 h_2}\ln\frac{R_e}{r_w} \tag{15}$$

上述式(14)、式(8)和式(15)就构成了基于层间均衡驱替的径向钻孔油藏工程优化模型。根据各层储层物性,依据此模型就可以计算出实现多层均衡驱替时对应的径向钻孔的分支个数 n,以及分支长度 a 的最优值。

3 模型求解

考虑到式(14)为超越方程,所以 a 值不可以直接求解,一般采用数值迭代方法求解。下面介绍一种简单的交会图求解方法。

对于式(14)进行简化整理可得

$$\ln\frac{4^{\frac{1}{n}}R_e}{a} + \frac{\beta h_1}{na}\ln\frac{\beta h_1/\sin(\pi h_o/h_1)}{\pi(1+\beta)r_{wh}} = \frac{\alpha}{1-\alpha}\ln\frac{R_e}{r_w} \tag{16}$$

式(16)中,

$$\alpha = \frac{\phi_1 h_1^2 k_1(\Delta p - G_1 R_e)}{\phi_2 h_2^2 k_2(\Delta p - G_2 R_e)}。$$

对于式(16),令左边 = $f(a,n)$,右边 = f_o,即

$$f(a,n) = \ln\frac{4^{\frac{1}{n}}R_e}{a} + \frac{\beta h_1}{na}\ln\frac{\beta h_1/\sin(\pi h_o/h_1)}{\pi(1+\beta)r_{wh}} \tag{17}$$

$$f_o = \frac{\alpha}{1-\alpha}\ln\frac{R_e}{r_w} \tag{18}$$

可以看出,右边 f_o 只与储层参数相关,$f(a,n)$ 与分支个数 n 和分支井长度 a 相关,因此,在已知基础数据的情况下,可以计算出 f_o;然后依次给定分支个数 n 的数值可以做出一系列对应的 $f(a,n)$ 与 a 的关系曲线,这一系列的曲线与 $y = f_o$ 直线的交点就是对应的实现层间均衡驱替时径向钻孔分支个数 n 以及分支长度 a 的值,如图 3 所示。

4 实例分析与数模验证

假设某低渗透油藏生产井组,两个小层合采,孔隙度均为 0.2。上下两层油层厚度分别为 5 m 和 7 m,渗透率分别为 10×10^{-3} μm² 和 20×10^{-3} μm²,注采井距为 150 m,根据本文方法所做的交会图如图 3 所示,可知径向井分支个数 $n=2$ 时,分支长度 $a=32$ m;$n=3$ 时,$a=24$ m。

对于上述问题,进行数值模拟验证,垂向上细分为 21 个层,1 ~ 10 层为第一小层,12 ~ 21 为第二小层,中间第 11 小层为隔层。四注一采五点法井网定压生产 15 年,生产井分不进行径向钻孔与进行径向钻孔两种生产方式。

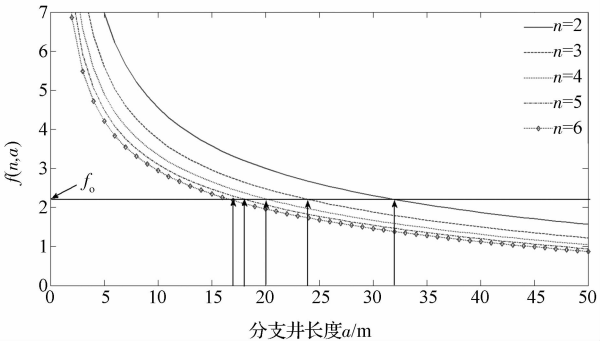

图 3 交会图法求解方程

Fig. 3 Cross-plot method solving the equation

通过数值模拟结果可知,未进行径向钻孔的两小层采出程度分别为 19.47% 与 28.85%,相差 9.38%,而根据本文计算结果进行径向钻孔之后,采出程度分别为 29.86% 与 28.85%,只相差 1.01%,层间动用差异得到了有效改善。

5 结论

针对低渗透油藏层间动用差异状况,基于均衡驱替的原则,考虑启动压力梯度,利用等值渗流阻力法,提出了层间径向钻孔分支数及长度的油藏工程优化方法,并给出了方便现场应用的交会图版求解方法。

采用实例对径向钻孔分支数及长度的优化方法进行了应用分析,并采用油藏数值模拟技术进行了验证。结果表明,径向钻孔技术有效的改善了层间矛盾,提高了油藏采收率。

参 考 文 献

1 Dickinson W, Dykstra H, Nees J M, *et al*. The ultrashort radius radial system applied to thermal recovery of heavy oil. SPE Western Regional Meeting. 1992

2 Dickinson W, Anderson R R, Dickinson R W. The ultrashort-radius radial system. SPE Drilling Engineering, 1989; 4(3): 247—254

3 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. 石油机械, 2009; 37(012): 12—15
Hu Qiangfa, Zhu Feng, Zhang Youjun. The study and application of zero radius water jet drilling technology. Petroleum Mechanics, 2009; 37(012): 12—15

4 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. 石油钻采工艺, 2006; 28(2): 11—14
Yang Yongyin, Yang Haibin, Wang Ruihe, *et al*. Application of ultrashort radius radial wells drilling technology in Wei-5 well. Oil Drilling and Production Technology, 2006; 28(02): 11—14

5 崔龙连, 汪海阁, 葛云华, 等. 新型径向钻井技术. 石油钻采工艺, 2008; 30(6): 29—33

Cui Longlian, Wang Haige, Ge Yunhua, *et al*. New radial drilling technologies. Oil Drilling and Production Technology, 2008; 30(06): 29—33

6 Bruni M, Biasotti J, Salomone G. Radial drilling in Argentina. Latin American & Caribbean Petroleum Engineering Conference, 2007

7 Oursegov S, Petrov N. Design and initial performance of pilot cyclic steam stimulations of vertical wells with radial horizontal bores in low-permeable heavy oil carbonates. SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, 2008

8 侯玉品, 张永利, 章梦涛. 超短半径水平井开采煤层气的探讨. 河南理工大学学报(自然科学版), 2005; 24(1): 46—49
Hou Yupin, Zhang Yongli, Zhang Mengtao. Inquiry into gas mining with ultrashort radial drilling system. Journal of Henan Polytechnic University, 2005; 24(1):46—49

9 张　义, 鲜保安, 赵庆波, 等. 超短半径径向水平井新技术及其在煤层气开采中的应用. 中国煤层气, 2008; 5(3): 20—24
Zhang Yi, Xian Baoan, Zhao Qingbo, *et al*. Ultra-short radius radial horizontal well technology and its application in CBM exploration. China Coalbed Methane, 2008; 5(3): 20—24

10 葛家理. 现代油藏渗流力学原理. 北京:石油工业出版社, 2003
Ge Jiali. The modern mechanics of fluids flow in oil reservoir. Beijing:Petroleum Industry Press, 2003

11 程林松, 李春兰. 分支水平井产能的研究. 石油学报, 1995; 16(2): 49—55
Cheng Linsong, Li Chunlan. The productivity study of multi-lateral horizontal well. Acta Petrolei Sinica, 1995; 16(2): 49—55

12 郎兆新. 油气地下渗流力学. 北京:石油大学出版社, 2001
Lang Zhaoxin. Mechanics of oil and gas flow through porous media. Beijing:Petroleum University Press, 2001

13 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. 油气地质与采收率, 2012; 19(5): 94—96
Cui Chuanzhi, Jiang Hua, Duan Jiehong, *et al*. Reasonable injection rate allocation method of separate-layer water injection wells based on interlayer equilibrium displacement. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012; 19(5): 94—96

14 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. 大庆石油学院学报, 2006; 30(4): 12—15
Wu Jiawen, Wang Jiachun, Liu Jian, *et al*. The optimization of layered water injection scheme based on residual oil distribution. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2006; 30(4): 12—15

15 石晓渠, 马道祥. 注水井合理配注水量计算方法研究. 西部探矿工程, 2008; 23(9): 94—96
Shi Xiaoqu, Ma Daoxiang. Study on reasonable water injection calculation method. West-china Exploration, 2008;23(9): 94—96

The Optimization of the Radial Drilling Techniques Aiming at Multi-layer Equilibrium Displacement in the Low Permeability Reservoir

CUI Chuan-zhi, WANG Xiu-kun

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, P. R. China)

[**Abstract**] During the development of low permeability reservoirs, the degree of multi-layer displacement is quite different and the conflicts between the layers are obvious. The radial drilling technique is one of the useful ways to solve multi-layer conflicts. Using the equivalent seepage resistant methods, considering the starting pressure gradient, according to the multilayer equilibrium displacement principle, the optimization model of radial length and branch number is established. Simple cross plot method used for the field workers is also presented. Last using the reservoir simulation technology according to the predicted results the above methods are proved to be valid and accurate.

[**Key words**] radial drilling　low permeability reservoir　length optimization　cross plot　equilibrium displacement