

水驱油藏均衡驱替开发效果论证

冯其红¹, 王相¹, 王端平², 黄迎松³

(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, 山东 东营 257000;
3.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

摘要:注水开发是目前油田最主要的开发方式之一,受地层、流体、井网等条件的影响,注入水在地下驱替不均衡。油田进入高、特高含水开发阶段,剩余油分布越来越复杂,传统的开发调整措施面临较大的困难。生产实践表明,注入水在地下驱替的均衡程度与油藏开发效果密切相关,为此提出均衡驱替的概念用以指导油田开发调整方案设计,但目前主要是基于经验的定性认识,缺少定量的、理论上的论证。因此,基于油藏工程和渗流力学理论,首先推导注水开发过程中各注采方向累积注水量与累积产油量的关系式,来描述各注采方向的驱替动态;然后推导各注采方向的驱替动态和油田开发净现值的关系式,并对其进行分析;最后推导均衡驱替注采井距及注采压差优化设计公式。

关键词:水驱 油藏开发 均衡驱替 注采井距设计 注采压差优化设计

中图分类号:TE341

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)03-0083-06

Theoretical analysis on the performance of equilibrium displacement in water flooding reservoir

Feng Qihong¹, Wang Xiang¹, Wang Duanping², Huang Yingsong³

(1.School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China; 2.Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China; 3.Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: Water flooding is one of the most important ways to develop oilfields currently. Influenced by reservoirs, fluid, well pattern and other conditions, water displacement in different directions are obviously different from each other. When water flooding reservoir entered to high and extra-high water cut stage, the remaining oil distribution becomes more and more complex, and traditional development adjustment methods may not be applicable. Practices of oilfield development indicate that the production performance is closely related to the equalization degree of displacement by injected water. The equilibrium displacement concept was proposed and used to guide the design of production plan. However, the relationship between the displacement equalization degree and the development performance was mainly studied on the basis of qualitative analysis but lacking of quantitative and theoretical analysis. Based on reservoir engineering and seepage flow mechanics theory, the relationship between the cumulative water injection and cumulative oil production in various injection-production directions during the water flooding was derived to describe the displacement dynamics. Then the relationship between the net present value and the displacement dynamics was derived and analyzed. Moreover, formulas for well spacing and optimization design of injection-production pressure difference was given to achieve equilibrium development.

Key words: water flooding; reservoir development; equilibrium displacement; well spacing design; optimization design of injection-production pressure difference

自20世纪注水开发获得工业化应用以来,已得到广泛应用,并成为最主要的油田开采方式之

一^[1]。截至目前,中国注水开发油田的储量和产量约占全国的80%以上^[2];在较长时间内,注水开发仍

收稿日期:2016-01-08。

作者简介:冯其红(1969—),男,四川南充人,教授,博导,从事油藏工程研究。联系电话:(0532)86981915, E-mail: fengqihong@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“整装油田特高含水期提高采收率技术”(2011ZX05011-002),长江学者和创新团队发展计划“复杂油藏开发和提高采收率的理论与技术”(IRT1294)。

将是油田的主要开发方式,以注水为中心的综合调整是当前和今后一段时期内改善开发效果、实现油田稳产、提高采收率的重要支撑。

目前,中国大部分注水开发油田已进入高、特高含水阶段,受地层、流体、井网等条件的影响,实际油田注水开发过程中,驱替往往是不均衡的。到油田开发后期,储层剩余油分布呈现总体高度分散、局部相对富集的格局^[3-6]。油田开发实践及室内实验表明:驱替的均衡程度与油田开发效果密切相关,注入水在储层中驱替的越均衡,开发效果越好^[7-12]。诸多学者以均衡驱替开发为指导,开展了层系井网设计、注采调配等一系列探索性的工作,取得了一定的成果^[13-17]。实现均衡驱替已经逐渐成为注水开发油田开发调整方案设计的目标之一,越来越受到重视。但是,均衡驱替开发理念目前仍处于起步阶段,对于驱替的均衡程度与油田开发效果的关系,主要是基于大量矿场实践经验的定性认识,缺少定量的、理论上的论证。笔者在定性分析的基础上,基于油藏工程和渗流力学理论^[18-19],首先推导出注水开发过程中各注采方向累积注水量与累积产油量的关系式,来描述各注采方向的驱替动态;然后推导出各注采方向驱替动态和油田开发净现值的关系式,并对其进行分析;最后推导出均衡驱替井距及注采压差优化设计公式。通过研究分析,从理论上证明了均衡驱替是水驱油田最经济、最高效开发的根本条件,同时建立的均衡驱替注采井距及注采压差优化设计公式为油田开发方案设计提供了指导。

1 各注采方向驱替动态描述

对于某油藏,分析某注水井到其对应生产井间驱替动态,假设条件包括:①油藏中渗流为等温渗流;②油藏中流体为油水两相,每一相的渗流均符合广义达西定律;③忽略毛管压力和重力的影响;④岩石、流体均不可压缩。

油水两相渗流条件下,油、水两相相对渗透率比值与饱和度近似成直线关系,其关系式为

$$\frac{K_{ro}}{K_{rw}} = de^{-cs_w} \quad (1)$$

根据达西定律可知,油、水两相的运动方程式分别为

$$q_o = -\frac{KK_{ro}A}{\mu_o} \Delta p \quad (2)$$

$$q_w = -\frac{KK_{rw}A}{\mu_w} \Delta p \quad (3)$$

对式(1)、式(2)、式(3)整理后可得

$$q_w = \frac{1}{d} \times \frac{\mu_o}{\mu_w} q_o e^{cs_w} \quad (4)$$

油藏累积产水量表达式为

$$W_p = \int_0^t q_w dt = \frac{1}{d} \times \frac{\mu_o}{\mu_w} \int_0^t q_o e^{cs_w} dt \quad (5)$$

根据物质平衡原理,油藏累积产油量表达式为

$$N_p = V(S_w - S_{wc}) \quad (6)$$

由油藏产油速度与累积产油量的关系可得

$$q_o = \frac{dN_p}{dt} = V \frac{dS_w}{dt} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)并积分后可得

$$W_p = \frac{1}{c} \times \frac{1}{d} \times \frac{\mu_o}{\mu_w} V (e^{cs_w} - e^{cs_{wc}}) \quad (8)$$

根据物质平衡原理可知,当注采平衡时,累积注水量等于累积产水量与累积产油量之和,即

$$W_i = W_p + N_p \quad (9)$$

将式(6)和式(8)代入式(9)得

$$W_i = \frac{1}{c} \times \frac{1}{d} \times \frac{\mu_o}{\mu_w} e^{cs_w} V \left(e^{\frac{N_p}{cV}} - 1 \right) + N_p \quad (10)$$

式(10)中的 $\frac{1}{c} \times \frac{1}{d} \times \frac{\mu_o}{\mu_w} e^{cs_w}$ 各个参数均为与油藏性质相关的参数,对于给定油藏可以认为该项是一个定值。

令

$$D = \frac{1}{c} \times \frac{1}{d} \times \frac{\mu_o}{\mu_w} e^{cs_w} \quad (11)$$

式(10)可以简写为

$$W_i = DV \left(e^{\frac{N_p}{cV}} - 1 \right) + N_p \quad (12)$$

式(12)即为油藏累积注水量与累积产油量的关系式,各注采方向的驱替动态可用此关系式来描述。从根据式(12)所绘制的某注采方向累积注水量与累积产油量的关系曲线(图1)可以看到,累积产油量随着累积注水量的增加而增加,但增加速度是逐渐变缓的,也就是说,随着注入水在储层中驱

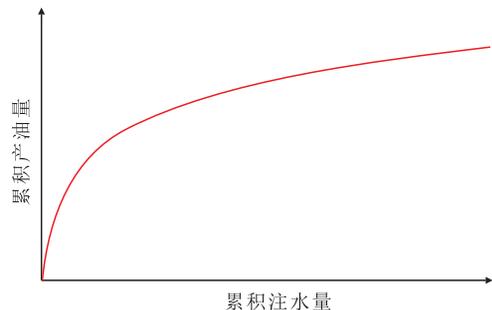


图1 油藏累积注水量与累积产油量的关系

Fig.1 Relationship curve between cumulative water injection and cumulative oil production

替的不断进行,单位注水量所能驱替出的油量越来越少,驱替效率越来越低。

2 驱替动态与经济效益的关系

油藏开发的根本目的就是经济效益最大化,经济效益可以用净现值来描述。以一注两采井组为例,注水井与生产井间孔隙体积分别为 V_1 和 V_2 ,渗透率分别为 K_1 和 K_2 ,孔隙度分别为 ϕ_1 和 ϕ_2 。

不考虑年利率,油藏开发净现值可以表示为

$$NPV = C_o N_{pt} - C_{wi} W_{it} - C_{wp} W_{pt} \quad (13)$$

对于注采平衡的油藏,根据物质平衡原理,油藏累积产水量等于累积注水量减去累积产油量,故式(13)可以改写为

$$NPV = (C_o + C_{wp}) N_{pt} - (C_{wp} + C_{wi}) W_{it} \quad (14)$$

对于一注两采井组而言,油藏累积产油量与油藏累积注水量等于该井组2个注采方向的累积产油量与累积注水量之和,即

$$NPV = (C_o + C_{wp})(N_{p1} + N_{p2}) - (C_{wp} + C_{wi})(W_{i1} + W_{i2}) \quad (15)$$

将式(12)代入式(15)可得

$$NPV = (C_o + C_{wp})(N_{p1} + N_{p2}) - (C_{wp} + C_{wi}) \times \left[DV_1 \left(e^{\frac{N_{p1}}{cV_1}} - 1 \right) + N_{p1} + DV_2 \left(e^{\frac{N_{p2}}{cV_2}} - 1 \right) + N_{p2} \right] \quad (16)$$

式(16)给出了油藏开发净现值和各注采方向累积产油量的关系。将注采方向2的累积产油量用油藏累积产油量减去注采方向1的累积产油量表示,并代入式(16)可以得到

$$NPV = (C_o + C_{wp}) N_{pt} - (C_{wp} + C_{wi}) \times \left[DV_1 \left(e^{\frac{N_{pt}}{cV_1}} - 1 \right) + DV_2 \left(e^{\frac{N_{pt} - N_{p1}}{cV_2}} - 1 \right) + N_{pt} \right] \quad (17)$$

从式(17)可以看出,在油藏累积产油量一定的条件下,油藏开发净现值取决于注采方向1的累积产油量。对式(17)关于 N_{p1} 求导可得

$$\frac{dNPV}{dN_{p1}} = -cD(C_{wp} + C_{wi}) \left(e^{\frac{N_{pt}}{cV_1}} - e^{\frac{N_{pt} - N_{p1}}{cV_2}} \right) \quad (18)$$

油藏开发净现值关于 N_{p1} 的二阶导数为

$$\frac{d^2 NPV}{dN_{p1}^2} = -c^2 D(C_{wp} + C_{wi}) \left(\frac{1}{V_1} e^{\frac{N_{pt}}{cV_1}} - \frac{1}{V_2} e^{\frac{N_{pt} - N_{p1}}{cV_2}} \right) \quad (19)$$

对式(18)和式(19)分析可以看出,在 $[0, N_{pt}]$ 区

间内,当且仅当 $N_{p1} = \frac{V_1}{V_1 + V_2} N_{pt}$ 时, $\frac{dNPV}{dN_{p1}} = 0$ 。并且,在 $[0, N_{pt}]$ 区间内, $\frac{d^2 NPV}{dN_{p1}^2} < 0$ 。因此,可以判断,

$N_{p1} = \frac{V_1}{V_1 + V_2} N_{pt}$ 为式(17)的最大值,此时油藏开发净现值最大。

当 $N_{p1} = \frac{V_1}{V_1 + V_2} N_{pt}$ 时,则有

$$N_{p2} = \frac{V_2}{V_1 + V_2} N_{pt} \quad (20)$$

由此,可得到

$$\frac{N_{p1}}{N_{p2}} = \frac{V_1}{V_2} \quad (21)$$

式(20)、式(21)与 $N_{p1} = \frac{V_1}{V_1 + V_2} N_{pt}$ 等效,均是油

藏开发净现值取得最大值的充要条件。也就是说,各注采方向累积产油量之比等于各注采方向孔隙体积之比时,油藏开发净现值最大。

根据式(12),由式(20)可以推导出

$$\frac{W_{i1}}{W_{i2}} = \frac{V_1}{V_2} \quad (22)$$

根据油藏工程理论,对于某油藏的累积注水量与注入孔隙体积倍数、含水饱和度、采出程度皆为一一对应的关系,因此,由式(22)可以分别推导出

$$Q_{i1} = Q_{i2} \quad (23)$$

$$S_{w1} = S_{w2} \quad (24)$$

$$R_1 = R_2 \quad (25)$$

式(20)一式(25)为油藏开发净现值取得最大值的一系列等效充要条件。其中,式(25)说明各注采方向采出程度相同时,油藏开发净现值最大,此时油田开发经济效益最好。在均衡驱替的定义中,当注入水在各个方向的采出程度相同时,即为均衡驱替。均衡驱替时,油藏开发净现值最大。根据油藏开发净现值的定义,即式(13),相同的油藏累积产油量下,油藏开发净现值最大时,所需要的注水量最少。由此说明,均衡驱替时驱替效率最高。综上所述可知,均衡驱替是水驱油田最经济、最高效开发的根本条件。

对于注水开发油藏,只要满足式(20)一式(25)中任何1个条件,均可认为该油藏实现了均衡驱替。判断均衡驱替的评价指标包括各注采方向上的注水量、注入孔隙体积倍数、含水饱和度以及采出程度等。通过对各注采方向评价指标的差异程度或离散程度进行评价,由此可以对注水开发油藏驱替均衡程度进行定量的评价^[20-22]。油藏均衡驱替

程度的定量描述和评价是均衡驱替理论中的重要研究方向。

3 均衡驱替注采井距和注采压差优化

井网调整和注采调整是水驱油藏开发调整中的2个最基本的手段。均匀的井网部署和注采压差方案下,受储层非均质的影响,注入水单方向突进过快,油藏驱替不均衡,从而影响开发效果。油藏均衡驱替开发要求以实现油藏最大化均衡驱替为目标,对油藏注采井距和注采压差进行优化,调整注入水在各注采方向的驱替动态,从而实现井网注采与储层流体物性和剩余油分布的匹配。基于油藏工程理论,推导均衡驱替注采井距和注采压差设计公式,为油藏井网注采调整提供指导。

对某油藏,油水井井位和井底流压已知,可以确定该油藏注采方向数目及各注采方向的井距和生产压差。对于第*i*个注采方向,当前时刻为 t_0 时,该方向的注入孔隙体积倍数为

$$Q_{ii}^{t_0} = \frac{W_{ii}^{t_0}}{V_i} = \overline{S_{wi}^{t_0}} + D \left[e^{c(S_{wi}^{t_0} - S_{wc})} - 1 \right] - S_{wc} \quad (26)$$

油藏从当前时刻 t_0 开始生产 Δt 时间,在 Δt 时间内,注采方向*i*的注入孔隙体积倍数可表示为

$$\Delta Q_{ii} = \frac{\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} q_{ii}^{\tau} d\tau}{A_i \overline{\phi}_i L_i} \quad (27)$$

根据达西定律,时刻 τ 注采方向*i*的注入速度和注采压差的关系式为

$$q_{ii}^{\tau} = q_{oi}^{\tau} + q_{wi}^{\tau} = 0.0864 \frac{\overline{K}_i A_i}{L_i} \Delta p_i \left[\frac{K_{ro}(S_{wi}^{\tau})}{\mu_o} + \frac{K_{rw}(S_{wi}^{\tau})}{\mu_w} \right] \quad (28)$$

将式(28)代入式(27), Δt 时间内注采方向*i*的注入孔隙体积倍数为

$$\Delta Q_{ii} = 0.0864 \frac{\overline{K}_i}{\overline{\phi}_i L_i^2} \Delta p_i \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \frac{K_{ro}(S_{wi}^{\tau})}{\mu_o} + \frac{K_{rw}(S_{wi}^{\tau})}{\mu_w} d\tau \quad (29)$$

$t_0 + \Delta t$ 时刻,注采方向*i*的注入孔隙体积倍数等于 t_0 时刻注采方向*i*的注入孔隙体积倍数与 Δt 时间内注采方向*i*的注入孔隙体积倍数之和,即

$$Q_{ii}^{t_0+\Delta t} = Q_{ii}^{t_0} + \Delta Q_{ii} = \overline{S_{wi}^{t_0}} + D \left[e^{c(S_{wi}^{t_0} - S_{wc})} - 1 \right] - S_{wc} +$$

$$0.0864 \frac{\overline{K}_i}{\overline{\phi}_i L_i^2} \Delta p_i \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \frac{K_{ro}(S_{wi}^{\tau})}{\mu_o} + \frac{K_{rw}(S_{wi}^{\tau})}{\mu_w} d\tau \quad (30)$$

根据式(6)和式(12), $t_0 + \Delta t$ 时刻,注采方向*i*的注入孔隙体积倍数还可以表示为

$$Q_{ii}^{t_0+\Delta t} = \frac{W_{ii}^{t_0+\Delta t}}{V_i} = \overline{S_{wi}^{t_0+\Delta t}} + D \left[e^{c(S_{wi}^{t_0+\Delta t} - S_{wc})} - 1 \right] - S_{wc} \quad (31)$$

联立式(30)与式(31),并将式(11)代入,可以得到注采方向*i*均衡驱替注采井距的计算公式为

$$L_i = \sqrt{0.0864 \frac{\overline{K}_i \Delta p_i}{\overline{\phi}_i} \times \frac{\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \frac{K_{ro}(S_{wi}^{\tau})}{\mu_o} + \frac{K_{rw}(S_{wi}^{\tau})}{\mu_w} d\tau}{\overline{S_{wi}^{t_0+\Delta t}} - \overline{S_{wi}^{t_0}} + \frac{1}{cd} \times \frac{\mu_o}{\mu_w} \left(e^{cS_{wi}^{t_0+\Delta t}} - e^{cS_{wi}^{t_0}} \right)}} \quad (32)$$

类似地,可以得到注采方向*i*均衡驱替注采压差的计算公式为

$$\Delta p_i = 11.574 \frac{\overline{\phi}_i L_i^2}{\overline{K}_i} \times \frac{\overline{S_{wi}^{t_0+\Delta t}} - \overline{S_{wi}^{t_0}} + \frac{1}{cd} \times \frac{\mu_o}{\mu_w} \left(e^{cS_{wi}^{t_0+\Delta t}} - e^{cS_{wi}^{t_0}} \right)}{\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \frac{K_{ro} S_{wi}^{\tau}}{\mu_o} + \frac{K_{rw} S_{wi}^{\tau}}{\mu_w} d\tau} \quad (33)$$

从式(32)可以看出,各注采方向设计的注采井距与该注采方向的渗透率、注采压差、当前时刻含水饱和度、生产时间等因素成正相关性,与该注采方向的孔隙度、最终时刻含水饱和度等因素成负相关性。从式(33)可以看出,各注采方向设计注采压差与该注采方向的孔隙度、井距、最终时刻含水饱和度等因素成正相关性,与该注采方向的渗透率、当前时刻含水饱和度、生产时间等因素成负相关性。

当各注采方向设定相同的最终时刻含水饱和度时,利用式(32)和式(33)即可分别计算得到可以实现均衡驱替的注采井距和注采压差。

对于未开发的新油藏,各注采方向当前时刻含水饱和度相同,均等于油藏初始含水饱和度。此时任意2个注采方向的均衡驱替注采井距之比和注采压差之比可以分别简化为

$$\frac{L_1}{L_2} = \sqrt{\frac{\overline{K}_1}{\overline{K}_2} \times \frac{\overline{\phi}_2}{\overline{\phi}_1} \times \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2}} \quad (34)$$

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \frac{\overline{K}_2}{\overline{K}_1} \times \frac{\overline{\phi}_1}{\overline{\phi}_2} \times \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \quad (35)$$

新油藏均衡驱替注采井距和注采压差的设计公式较为简单,而对于实际油藏,均衡驱替注采井距和注采压差的设计往往需要迭代求解。对于大型油藏的多个井组,由于井与井之间的相互影响,减小某2口井井距的同时往往会增大与其他井的井距;同样,减小2口井间的注采压差的同时可能会增加其他井间的注采压差,因此,很难实现油藏完全均衡驱替,只能通过井距和注采调整,尽可能地改善油藏驱替不均衡的状况。

4 结论

受地层、流体、井网等条件影响,油藏注水开发过程中注入水往往沿某一方向突进较为明显,驱替不均衡,最终影响油藏开发效果。所谓均衡驱替,是指注入水在各个注采方向的采出程度都相同。在对注水开发油藏各注采方向驱替动态进行描述的基础上,理论推导出油藏开发净现值和各注采方向驱替动态的定量关系式,首次从油藏工程理论的角度论证了均衡驱替是油藏注水开发最经济、最高效的条件。以实现均衡驱替为目标,推导出均衡驱替注采井距及注采压差的定量设计公式,为现场实施提供指导。

目前,注水开发油藏均衡驱替的开发理念越来越受到重视,但对于注水开发油藏驱替均衡程度的定量描述与评价方法,如何通过井网和注采等开发调整手段和调整措施优化调整各注采方向的驱替动态,实现措施—油藏—驱替动态三者的相互匹配等诸多问题还有待于进一步研究。

符号解释:

K_o, K_w ——油相和水相相对渗透率; d, c ——与储层和流体物性有关的常数; S_w ——含水饱和度; q_o ——产油速度, m^3/d ; K ——渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; A ——横截面积, m^2 ; μ_o, μ_w ——油相和水相粘度, $mPa \cdot s$; Δp ——注采压差, MPa ; q_w ——产水速度, m^3/d ; W_p ——累积产水量, m^3 ; t ——生产时间, d ; N_p ——累积产油量, m^3 ; V ——孔隙体积, m^3 ; S_{wc} ——束缚水饱和度; W_i ——累积注水量, m^3 ; V_1, V_2 ——注采方向1和注采方向2的孔隙体积, m^3 ; K_1, K_2 ——注采方向1和注采方向2的渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; ϕ_1, ϕ_2 ——注采方向1和注采方向2的孔隙度; NPV ——油藏开发净现值, 元; C_o ——油价, 元/ m^3 ; N_{pi} ——油藏累积产油量, m^3 ; C_{wi} ——注水所需相关费用, 元/ m^3 ; W_{ii} ——油藏累积注水量, m^3 ; C_{wp} ——产水所需相关费用, 元/ m^3 ; W_{pi} ——油藏累积产水量, m^3 ; N_{p1}, N_{p2} ——注采方向1和2的累积产油量, m^3 ; $W_{i1},$

W_{i2} ——注采方向1和2的累积注水量, m^3 ; Q_{i1}, Q_{i2} ——注采方向1和2的注入孔隙体积倍数; S_{w1}, S_{w2} ——注采方向1和2的含水饱和度; R_1, R_2 ——注采方向1和2的采出程度; i ——注采方向; t_0 ——某油藏当前时刻; $Q_{ii}^{t_0}$ —— t_0 时刻注采方向 i 的注入孔隙体积倍数; $W_{ii}^{t_0}$ —— t_0 时刻注采方向 i 的累积注水量, m^3 ; V_i ——注采方向 i 的孔隙体积, m^3 ; $\overline{S_{wi}^{t_0}}$ —— t_0 时刻注采方向 i 的平均含水饱和度; Δt ——某油藏生产时间, d ; ΔQ_{ii} —— Δt 时间内注采方向 i 的注入孔隙体积倍数; q_{ii}^τ —— τ 时刻注采方向 i 的注入速度, m^3/d ; τ ——某油藏开发时刻; A_i ——注采方向 i 的横截面积, m^2 ; $\overline{\phi}_i$ ——注采方向 i 的孔隙度; L_i ——注采方向 i 的注采井距, m ; q_{oi}^τ —— τ 时刻注采方向 i 的产油速度, m^3/d ; q_{wi}^τ —— τ 时刻注采方向 i 的产水速度, m^3/d ; Δp_i ——注采方向 i 的注采压差, MPa ; $\overline{S_{wi}^\tau}$ —— τ 时刻注采方向 i 的平均含水饱和度; $Q_{ii}^{t_0+\Delta t}$ —— $t_0+\Delta t$ 时刻注采方向 i 的注入孔隙体积倍数; $W_{ii}^{t_0+\Delta t}$ —— $t_0+\Delta t$ 时刻注采方向 i 的累积注水量, m^3 ; $\overline{S_{wi}^{t_0+\Delta t}}$ —— $t_0+\Delta t$ 时刻注采方向 i 的平均含水饱和度; L_1, L_2 ——注采方向1和注采方向2的注采井距, m ; $\overline{K_1}, \overline{K_2}$ ——注采方向1和注采方向2的平均渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; $\overline{\phi}_1, \overline{\phi}_2$ ——注采方向1和注采方向2的平均孔隙度; $\Delta p_1, \Delta p_2$ ——注采方向1和注采方向2的注采压差, MPa 。

参考文献:

- [1] 姜汉桥,姚军,姜瑞忠.油藏工程原理与方法[M].东营:石油大学出版社,2000.
Jiang Hanqiao, Yao Jun, Jiang Ruizhong. Principle and method of reservoir engineering [M]. Dongying: University of Petroleum Press, 2000.
- [2] 韩大匡.准确预测剩余油相对富集区提高油田注水采收率研究[J].石油学报,2007,28(2):73-78.
Han Dakuang. Precisely predicting abundant remaining oil and improving the secondary recovery of mature oilfields [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 73-78.
- [3] Tayfun Babadagli. Development of mature oil fields—A review [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 57(3): 221-246.
- [4] Batycky R, Thiele M, Baker R, et al. Revisiting reservoir flood-surveillance methods using streamlines [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2008, 11(2): 387-394.
- [5] 韩大匡.关于高含水油田二次开发理念、对策和技术路线的探讨[J].石油勘探与开发,2010,37(5):583-591.
Han Dakuang. Discussions on concepts, countermeasures and technical routes for the redevelopment of high water-cut oilfields [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(5): 583-591.
- [6] 胡文瑞.论老油田实施二次开发工程的必要性与可行性[J].石油勘探与开发,2008,35(1):1-5.
Hu Wenrui. Necessity and feasibility of PetroChina mature field redevelopment [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008,

- 35(1):1-5.
- [7] Liu Ming, Zhan Shengyun, Yan Weige, et al. How to make injection more effective and get production more optimum—A good case from China[C]. SPE 170996, 2014.
- [8] Omara E A, El hawary A F, Nosseir M, et al. Identifying opportunities in a complex mature oil reservoir; a company's experience [C]. IPTC 17538, 2014.
- [9] Ahmed Alhuthali, Adedayo Oyerinde, Akhil Datta-Gupta. Optimal waterflood management using rate control[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2007, 10(5): 539-551.
- [10] 徐亮. 低渗透油藏差异开发技术研究与实践——以济阳拗陷博兴洼陷为例[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(4): 107-110.
Xu Liang. Research and practice of differential development technologies in low permeability oil reservoirs: case study of Boxing sag, Jiyang depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4): 107-110.
- [11] Tailai Wen, Marco R Thiele, David Echeverría Ciaurri, et al. Waterflood management using two-stage optimization with streamline simulation[J]. Computational Geosciences, 2014, 18(1): 1-22.
- [12] 曹仁义, 周焱斌, 熊琪, 等. 低渗透油藏平面波及系数评价及改善潜力[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(1): 74-77, 83.
Cao Renyi, Zhou Yanbin, Xiong Qi, et al. Evaluation and improvement of areal sweep efficiency for low permeability reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 74-77, 83.
- [13] 李传亮, 李炼民. 各向异性地层的井距设计研究[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(6): 559-561.
Li Chuanliang, Li Lianmin. Well spacing design for anisotropic reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(6): 559-561.
- [14] 李阳, 王端平, 李传亮. 各向异性油藏的矢量井网[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 225-227, 245.
Li Yang, Wang Duanping, Li Chuanliang. Vectorial well arrangement in anisotropic reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(2): 225-227, 245.
- [15] 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.
Cui Chuanzhi, Jiang Hua, Duan Jiehong, et al. Reasonable injection rate allocation method of separate-layer water injection wells based on interlay equilibrium displacement [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(5): 94-96.
- [16] 崔传智, 杨赤宸, 牛栓文, 等. 复杂断块油藏高含水期合理井距确定方法及其影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(4): 53-56.
Cui Chuanzhi, Yang Chichen, Niu Shuanwen, et al. Determination of reasonable well spacing and influencing factors for the complicated fault-block reservoirs at high water cut stage [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(4): 53-56.
- [17] 严科, 张俊, 王本哲, 等. 平面非均质油藏均衡水驱调整方法研究[J]. 特种油气藏, 2015, 22(5): 86-89.
Yan Ke, Zhang Jun, Wang Benzhe, et al. Balance waterflooding adjustment of plane heterogeneous reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(5): 86-89.
- [18] Tarek Ahmed. Reservoir engineering handbook [M]. Boston: Gulf Professional Publishing, 2006.
- [19] 冯其红, 王波, 王相, 等. 多层非均质油藏开发指标预测方法[J]. 特种油气藏, 2014, 21(4): 85-88.
Feng Qihong, Wang Bo, Wang Xiang, et al. Prediction approach of development indices of multi-layer heterogeneous reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(4): 85-88.
- [20] Jerry L Jensen. Statistics for petroleum engineers and geoscientists [M]. Boston: Gulf Professional Publishing, 2000.
- [21] Lake L W, Jensen J L. A review of heterogeneity measures used in reservoir characterization [C]. SPE 20156, 1989.
- [22] 徐健. 高邮凹陷北斜坡韦码地区阜宁组油气富集差异分析[J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 164-171.
Xu Jian. Petroleum accumulation diversity of Funing Formation in Weima area, northern slope belt of Gaoyou Sag [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 164-171.

编辑 王星