

优势渗流通道识别与精确描述

王鸣川¹,石成方²,朱维耀³,丁乐芳³

(1.中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 2.中国石油勘探开发研究院,北京 100083;

3.北京科技大学 土木与环境工程学院,北京 100083)

摘要:优势渗流通道导致注入水在注采井间低效甚至无效循环,严重影响水驱开发效果,是中高渗透砂岩油藏提高水驱采收率必须解决的关键问题。针对油田生产实际,最大限度挖掘油田生产动态资料,利用渗流理论和数学手段,对优势渗流通道进行识别和描述。根据取心井资料,确定渗流场分区,结合数值模拟技术,识别出注采井间的优势渗流通道;依据无效循环量模型、高速非达西渗流公式和Carman-Kozeny公式,定量描述注采井间优势渗流通道的参数;采用模糊数学理论计算井组内注采井间优势渗流通道参数。以杏六中区P23三角洲前缘厚油层典型井组为例,识别出X21井与X11井、X24井与X13井、X26井与X14井之间存在优势渗流通道,并计算出优势渗流通道的无效循环量、平均孔隙半径和渗透率,与实际情况吻合较好,验证了该方法的准确性。

关键词:优势渗流通道 无效循环量 参数计算 高速非达西渗流 砂岩油藏

中图分类号:TE343

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)01-0079-06

Identification and accurate description of preponderance flow path

Wang Mingchuan¹, Shi Chengfang², Zhu Weiyao³, Ding Lefang³

(1. *Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing City, 100083, China*; 2. *PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China*; 3. *School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing City, 100083, China*)

Abstract: Preponderance flow path (PFP) leads to inefficient cycle, even invalid cycle of injected water between injection and production wells, which seriously affects the effect of waterflooding. This is the key problem to improve waterflooding recovery for middle and high permeability sandstone reservoir. For the actual oil production, the dynamic data were mined in maximum degree, and the seepage theory and mathematical methods were applied in identification and description of the PFP. Based on coring well data, seepage partition was determined and PFP between injection and production wells was identified combined with numerical simulation technology. According to invalid cycle model, high velocity non-Darcy flow equation and Carman-Kozeny equation, the parameters of PFP between injection and production wells were quantitatively described, and those in well pattern were calculated using fuzzy set theory. Taking the typical well pattern of thick oil layer in P23 delta front in the Xingliuzhong area for example, the PFPs between Well X21 and Well X11, Well X24 and Well X13 and Well X26 and Well X14 were identified respectively, and the invalid cycle volume, average pore radius and permeability were calculated, which are in good agreement with the actual, and thus the accuracy of the proposed method is verified.

Key words: preponderance flow path; invalid cycle volume; parameter calculation; high velocity non-Darcy flow; sandstone reservoir

由于寻找新油藏的难度越来越大^[1-3],因此越来越多的石油公司将目光转向对老油田的深入开

收稿日期:2015-11-05。

作者简介:王鸣川(1985—),男,湖北孝感人,工程师,博士,从事渗流力学与油气田开发方面的研究。联系电话:(010)82331927, E-mail: wangmc.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“剩余油分布综合预测与精细注采结构调整技术”(2011ZX05010-002)。

发。据估算,以平均采收率为35%为例,中国老油田采收率每提高1%,可采储量就可增加 1×10^8 t,相当于发现一个 2.85×10^8 t的大油田^[1],并且由于老油田地面基础设施比较完善,与开发新油田相比,经济效益更好。因此,挖掘剩余油已成为特高含水期老油田开发调整、提高采收率的关键。而中国老油田多为砂岩油藏,目前的取心井和测井资料已经证实,在注水开发后期,各种类型的砂岩油藏都不可避免地形成优势渗流通道。优势渗流通道导致注入水在注采井间无效循环,降低了水驱波及效率,制约了水驱采出程度的进一步提高^[4],造成水驱油田开发矛盾向层内转化,成为油田开发的主要矛盾。目前老油田主力层均进入特高含水期,注入水无效循环严重,急需为老油田的堵水调剖等提高采收率措施提供理论依据和数据支持,使得措施更有针对性和有效性。

目前,对优势渗透通道的研究较多。Chan运用数值模拟方法,利用水油比及其对时间导数的双对数曲线,识别油井是否存在水锥、指进和高渗透条带,并在此基础上提出了判断优势渗流通道的水油比双对数曲线^[5]。Albertoni在动态资料的基础上进行了油水井的连通性研究,提出可以用连通性对优势渗透通道进行研究^[6]。Yousef等采用CM模型对井间连通性进行了研究^[7-9]。曾流芳等依据理论水油比和等效流管法,定量计算了疏松砂岩油藏中优势渗流通道的参数^[10]。刘月田等利用专家系统和模糊判别理论,建立优势渗流通道定性识别模型,并提出了优势渗流通道流态定量分析和参数计算方法^[11]。王延忠等根据油水井特征及注水井压力指数来定性判断优势渗流通道的存在^[12-13]。牛世忠等利用层次分析法对动静态指标进行权重计算得到优势渗流通道形成的综合指数^[14]。杨勇采用数值模拟方法对优势渗流通道的形成条件和时机进行了研究^[15]。冯其红等利用动态资料,根据径向流理论公式对优势渗流通道参数进行了定量计算^[16]。丁乐芳等采用高速非达西渗流公式和单根流管定量计算了一注一采井间和井组间优势渗流通道的参数^[17]。综合来看,前人对优势渗流通道多为定性识别研究,对优势渗流通道的参数计算虽为定量计算,但多为半定量或假设其为一根流管,或者对数据的数量和质量要求较高,油田现场难以满足。为此,笔者结合渗流理论与生产实际,将优势渗流通道等效为多根毛细管,以尽量少的数据和尽量简单的计算方法,对优势渗流通道进行识别和精细描述,以为优势渗流通道的识别、描述及治理提供

理论依据和数据支持。

1 优势渗流通道的渗流特征

优势渗流通道内存水率低,接近于0,剩余油饱和度接近残余油饱和度^[18]。李秀兰根据渗流理论公式,计算了达西渗流与高速非达西渗流的水推速度,发现随着井距的减小,示踪剂检测的水推速度是达西渗流计算水推速度的4.4~11倍^[19];而高速非达西渗流公式计算的水推速度与示踪剂检测的水推速度非常吻合。当指数型高速非达西渗流公式的指数越接近0.5时,计算的水推速度与示踪剂检测的速度越相近。因此,采用高速非达西渗流公式来描述优势渗流通道内流体流动。目前,高速非达西渗流的数学表达式主要有Forchheimer公式和指数型公式2类,其表达式分别为

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu_d}{K_d} v + \rho \beta v^2 \quad (1)$$

$$v = \frac{K_d}{\mu_d} \left(\frac{dp}{dx} \right)^\gamma \quad (2)$$

2 优势渗流通道的识别

2.1 识别标准

D油田储层主要为曲流河、辫状河、三角洲前缘相砂岩,根据不同沉积类型砂岩储层大量岩心驱油效率统计数据,以含水率98%为界限,统计得到该油田砂岩油藏无效循环区域的驱油效率(E_0)为66%,并得到3类沉积类型砂岩油藏不同驱油效率下的累积分布频率,以不同沉积类型砂岩储层地质储量与剩余储量为权重,得到砂岩油藏不同驱油效率下的平均累积分布频率(图1)。基于驱油效率累积分布频率、砂岩油藏注水开发实际及水驱油水渗

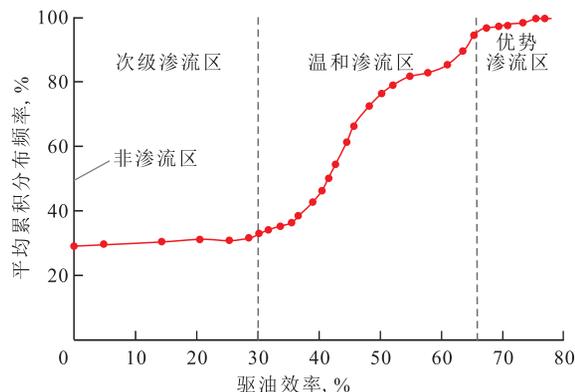


图1 驱油效率与平均累积分布频率的关系

Fig.1 Average cumulative distribution frequency of oil displacement efficiency

流规律,将高含水期后期的渗流场分为优势渗流区($E_D \geq 66\%$)、温和渗流区($30\% \leq E_D < 66\%$)、次级渗流区($0 < E_D < 30\%$)和非渗流区($E_D = 0$)(图1)。其中,优势渗流区即为优势渗流通道,而非渗流区即通常所说的死油区。

由于驱油效率不易测定和计算,而含水饱和度较易测定;另外,根据密闭取心井含水饱和度与驱油效率的统计关系,拟合出含水饱和度与驱油效率的数学模型(图2),两者相关性较好,故将含水饱和度作为渗流场分区的指标。由驱油效率可得到优势渗流区、温和渗流区、次级渗流区和非渗流区对应的含水饱和度(S_w)的分区标准分别为 $S_w \geq 73.4\%$, $45.7\% \leq S_w < 73.4\%$, $23\% < S_w < 45.7\%$ 和 $S_w \leq 23\%$ 。

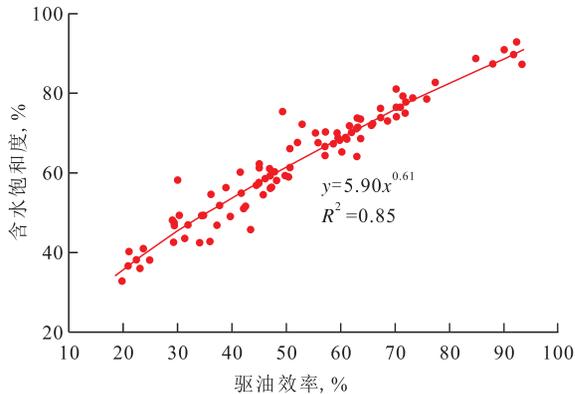


图2 密闭取心井含水饱和度与驱油效率的关系

Fig.2 Relationship between water saturation and oil displacement efficiency in sealed coring wells

不同油田含水饱和度各不相同,直接采用含水饱和度作为分区标准具有很大的局限性。为了提高渗流分区标准的普遍适用性,提出了相对含水饱和度的概念。将相对含水饱和度定义为某油藏含水饱和度与最大含水饱和度之比,以消除不同油藏含水饱和度不同的影响,其表达式为

$$S_s = \frac{S_w}{S_{w \max}} \quad (3)$$

由相对含水饱和度可以得到具有普遍适用性的渗流分区标准,即相对含水饱和度大于等于91.8%为优势渗流区,相对含水饱和度为57.1%~91.8%为温和渗流区,相对含水饱和度为28.8%~57.1%为次级渗流区,相对含水饱和度小于等于28.8%为非渗流区。

2.2 识别实例

根据优势渗流通道的识别标准,设计均质模型,结合油藏数值模拟结果,分别对一注一采(图3a)和五点井组间优势渗流通道(图3b)进行了识别。从图3可以看出,高含水后期,2类井组注采井间均形成了优势渗流通道,注入水锥进严重,导致

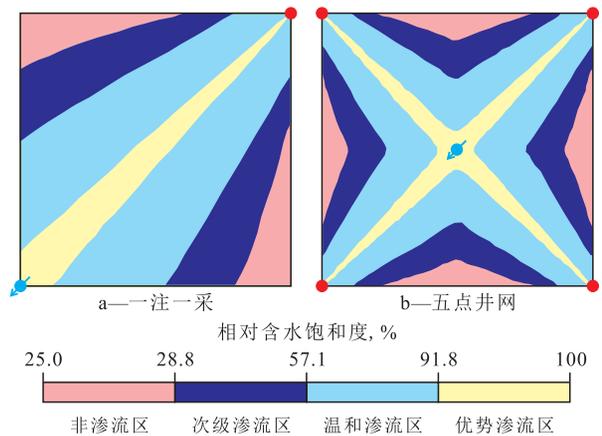


图3 一注一采和五点井组间优势渗流通道识别

Fig.3 Identification of preponderance flow path between injection-production well pair and five-spot well pattern

注入水快速从注水井流入生产井,在注采井间无效循环;优势渗透通道面积分布比例虽然较小,但导致油藏中注入水的大量无效循环。

3 优势渗流通道的精确描述

3.1 无效循环量的确定

优势渗流通道精确描述的基础是确定无效循环量。为保证无效循环量计算的合理性,假设如下:优势渗流通道以外区域为宏观均质油藏,油水流动遵循达西渗流规律;优势渗流通道区在优势渗流通道形成前油水流动遵循达西渗流规律,在优势渗流通道形成后,该区域遵循高速非达西渗流规律;优势渗流通道中流动的水量为无效循环量,并采用流管法计算^[16-17]。无效循环量的计算式为

$$Q_{wd} = Q_{wt} - Q_{wi} \quad (4)$$

其中

$$Q_{wi} = \frac{2\pi K_w h (p_{in} - p_{wf})}{\mu_w \ln \frac{r_c}{r_w}} \quad (5)$$

3.2 一注一采井间优势渗流通道的精确描述

一注一采井间优势渗透通道参数计算的关键是优势渗透通道的等效假设。笔者将优势渗流通道等效为 n 根等截面积的毛细管,并令优势渗流通道的渗流指数为0.5,那么优势渗流通道内无效循环量可表示为

$$Q_{wd} = n\pi r_d^2 \frac{K_d}{\mu_d} \left(\frac{dp}{dx} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

根据泊肃叶定律可知

$$\phi = n\pi r_d^2 \quad (7)$$

流体流动的边界条件为

$$p|_{x=0} = p_{in} \quad (8)$$

$$p|_{x=L} = p_{wf} \quad (9)$$

对式(6)进行积分,再将式(7)一式(9)代入式(6),可得到无效循环量表达式为

$$Q_{wd} = \frac{\phi^2 r_d^2}{8\tau^2 \mu_d} \left(\frac{p_{in} - p_{wf}}{L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

根据Carman-Kozeny公式,可得

$$r_d = \sqrt{\frac{8K_d \tau^2}{\phi}} \quad (11)$$

联立式(10)和式(11),得到优势渗流通道的渗透率、孔隙半径和体积的计算式分别为

$$K_d = \frac{Q_{wd} \mu_d}{\phi} \times \left(\frac{L}{p_{in} - p_{wf}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$r_d = \left(\frac{8\tau^2 Q_{wd} \mu_d}{\phi^2} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{L}{p_{in} - p_{wf}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (13)$$

$$V_d = \phi \tau L \quad (14)$$

3.3 井组内部优势渗流通道精确描述

井组内部优势渗流通道参数计算的关键是无效循环量的劈分。以五点法井组为例,采用改进的容积模型(CM模型)进行井组间产水量劈分^[7-9,17,20],对井组内部的优势渗流通道参数进行计算。

生产井产液量的CM模型为

$$\nabla^2 Q = \sum_{i=1}^4 \frac{\lambda_i}{\nabla^2 \delta_i + 1} \nabla^2 I_i \quad (15)$$

经过拉普拉斯变换后,关于时间(时间域)的产液量就变成了拉氏空间的产液量,在一定程度上消除了产液量的时间滞后效应。

井组时间域的注水量与产液量的关系式为

$$Q = M \times Z \quad (16)$$

其中

$$Q = \begin{pmatrix} q(t_1) \\ \vdots \\ q(t_n) \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$M = \begin{pmatrix} m_1(t_1) & \cdots & m_4(t_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ m_1(t_n) & \cdots & m_4(t_n) \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$Z = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$q(t_j) = q(t_c) - q(t_0) e^{\frac{t-t_0}{\delta}} - J q'_{wf}(t_j) \quad (20)$$

$$m_i(t_j) = \frac{1}{\delta_i} \int_{\xi=t_0}^{\xi=t} e^{\frac{t-\xi}{\delta_i}} I_i(\xi) d\xi \quad (21)$$

$i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, \dots$

由式(16)一式(21)可以看出,如果 δ 已知,则向量 M 和向量 Q 均可计算得到,那么向量 Z 就可根据式(16)计算得到。因此,问题就归结为优化参数 δ ,使由式(16)计算得到的产液量与实际的产液量之间的误差最小,即

$$\min(\delta) = \|Q - Q^*\|_2 \quad (22)$$

其中

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix} \quad (23)$$

利用模糊数学理论,采用 δ 次抛物线建立参数 λ 和 δ 模糊分布模型,其隶属函数表达式分别为

$$A_\lambda(x) = \begin{cases} 1 & x < a \\ \left(\frac{b-x}{b-a} \right)^\delta & a \leq x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (24)$$

$$A_\delta(x) = \begin{cases} 0 & x < m \\ \left(\frac{x-n}{n-m} \right)^\delta & m \leq x < n \\ 1 & x \geq n \end{cases} \quad (25)$$

根据隶属函数求出参数 λ 和 δ 的隶属度,建立 i 口井间单个因素的评价矩阵为

$$R = \begin{pmatrix} RR_\lambda(1) & \cdots & RR_\lambda(i) \\ RC_\delta(1) & \cdots & RC_\delta(i) \end{pmatrix} \quad (26)$$

由隶属函数与评价矩阵,可得权重矩阵为

$$B = AR = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_i) \quad (27)$$

由权重矩阵可得到生产井中无效循环量来自邻近注水井的比例。因此,各方向上生产井与注水井之间的无效循环量为

$$Q_{wdi} = \eta_i Q_{wd} \quad (28)$$

考虑到实际生产数据和引入的经验评价等带来的不确定性,设定当 $\eta_i \geq 0.5$ 时,生产井与注水井存在优势渗流通道,否则忽略生产井与注水井可能存在的优势渗流通道。

由式(10)和式(28)可得

$$Q_{wdi} = \frac{\phi_i^2 r_{di}^2 \eta_i}{8\tau_i^2 \mu_{di}} \times \left(\frac{p_{in} - p_{wf}}{L} \right)_i^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

由式(12)和式(29)可计算出优势渗流通道的平均渗透率、平均孔隙半径和体积分别为

$$K_{di} = \frac{Q_{wdi} \mu_{di}}{\phi_i \tau_i} \times \left(\frac{L}{p_{in} - p_{wf}} \right)_i \quad (30)$$

$$r_{di} = \left(\frac{8\tau_i^2 Q_{wdi} \mu_{di}}{\phi_i^2} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{L}{p_{in} - p_{wf}} \right)_i^{\frac{1}{4}} \quad (31)$$

$$V_d = \sum_{i=1}^n \phi_i \tau_i L_i \quad (32)$$

4 应用实例

选取某油田杏六中区 P23 厚油层典型井组(图 4)进行优势渗流通道识别与精确描述。P23 厚油层为水下分流河道砂岩储层,主要发育水下分流河道和分流间湾 2 种沉积微相,储集空间为粒间孔隙。储层非均质性较强,孔隙度为 21.5%~28.8%,平均为 26.4%,平均孔隙半径为 4.58 μm ,平均渗透率为 $484.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。地层原油粘度为 13.86 $\text{mPa} \cdot \text{s}$,地层原油密度为 0.852 g/cm^3 。P23 厚油层典型井组经过多年的注水开发,分布在分流间湾上的生产井(X12 井)产液量较低,而位于河道砂上的生产井(X11, X13, X14 井)产液量大,含水率上升快,且含水率接近极限含水率,初步判断该井组内存在优势渗流通道。

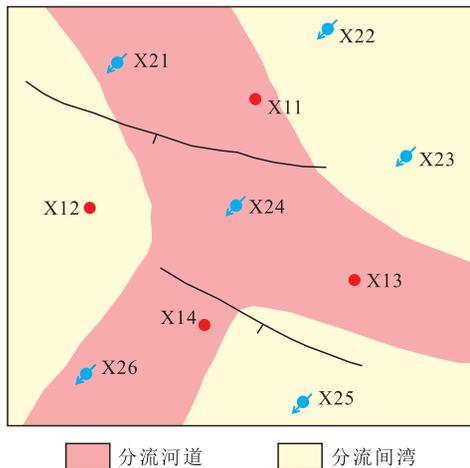


图4 杏六中区 P23 厚油层典型井组分布

Fig.4 Typical well pattern of P23 thick oil layer in the Xingliuzhong area

采用 CM 模型对 P23 厚油层典型井组生产井的产水量进行劈分,根据无效循环量模型和模糊评判对井间优势渗流通道进行判断,并对优势渗流通道参数进行计算。计算结果表明: X13 井与 X24 井、X11 井与 X21 井及 X14 井与 X26 井之间均形成了优势渗流通道,无效循环量分别为 65.32, 58.47 和 47.95 m^3/d ,平均孔隙半径分别为 46.21, 40.38 和 36.84 μm ,渗透率分别为 $3\ 045.6 \times 10^{-3}$, $2\ 586.2 \times 10^{-3}$ 和 $2\ 209.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其中 X13 井与 X24 井位于河道中心,且与古河流水流方向一致,形成的优势渗流通道孔隙半径和渗透率最大;储层一旦形成优势渗流通道,储层的孔隙半径和渗透率均急剧变大,储层优势渗流通道的孔隙半径均超过 36 μm ,渗透率

均大于 $2\ 200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

5 结论

依据岩心驱替统计数据,利用驱油效率将渗流场分为优势渗流区、温和渗流区、次级渗流区和非渗流区;根据密闭取心井的驱油效率与含水饱和度的经验关系式,得到以含水饱和度为识别标准的渗流场分区。提出相对含水饱和度的概念,得到普遍适用的优势渗流通道识别标准,并结合数值模拟结果,对一注一采和五点井组井间优势渗流通道进行了识别。

以尽量少的数据和尽量简单的算法,结合高速非达西渗流理论,提出无效循环量计算方法,建立精确描述井间优势渗流通道的方法,采用该方法对杏六中区 P23 厚油层典型井组井间优势渗流通道进行了识别和精确描述,结果与实际情况吻合较好,验证了该方法的准确性和实用性。

符号解释:

$\frac{dp}{dx}$ ——压力梯度, MPa/m ; p ——压力, MPa ; x ——长度, m ; μ_d ——优势渗流通道中流体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; K_d ——优势渗流通道渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; v ——渗流速度, m/s ; ρ ——地层流体密度, kg/m^3 ; β ——非达西流动系数; γ ——渗流指数,其值为 0.5~1; S_r ——相对含水饱和度; S_w ——含水饱和度; $S_{w\max}$ ——最大含水饱和度; Q_{wi} ——注采井间的无效循环量, m^3/d ; Q_{wi} ——生产井实际的产水量, m^3/d ; Q_{wi} ——生产井按达西渗流理论计算得到的理论产水量, m^3/d ; K_w ——水相有效渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; h ——吸水层段有效厚度, m ; p_m ——供给压力, MPa ; p_{wf} ——生产井井底压力, MPa ; μ_w ——地层水粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; r_e ——供给半径, m ; r_w ——井底半径, m ; n ——等效毛细管数量; r_d ——优势渗流通道孔隙半径, m ; ϕ ——孔隙度; τ ——迂曲度,其值为 1.5~5.5; L ——注采井距, m ; V_d ——优势渗流通道体积, m^3 ; Q ——生产井产液量, m^3 ; i ——生产井对应注水井的序号,其值为 1, 2, 3, 4; λ_i ——每口注水井流向生产井的水量占该生产井总产水量的比例; δ_i ——生产井对其对应的注水井注水量变化的响应敏感程度; I_i ——第 i 口注水井的注水量, m^3 ; Q ——生产井时间域的产液量, m^3 ; M ——注水井时间域的注水量, m^3 ; Z ——注水井流向生产井的水量占该生产井总产水量的比例; $q(t_i)$ —— t_i 时刻生产井的产液量, m^3 ; $q(t_e)$ ——有效时间内生产井的产液量, m^3 ; t_e ——有效时间, s ; $q(t_0)$ —— t_0 时刻生产井的产液量, m^3 ; t_0 ——初始时间, s ; J ——注水井对生产井采液指数的贡献量; $q'_{wi}(t_i)$ ——井底压力变化对产液量的影响,在选取时间段较

短的情况下,可以认为其近似为常数; $m_i(t_j)$ —— t_j 时刻第 i 口注水井的注水量, m^3 ; ξ ——时间 t 的积分因子; Q^* ——生产井的实际产液量, m^3 ; A_λ —— λ 的隶属函数; A_δ —— δ 的隶属函数; a, b, ϑ, m, n ——常数; \mathbf{R} ——评价矩阵; $RR_\lambda(i)$ ——生产井与第 i 口注水井的 λ 评价矩阵; $RC_\delta(i)$ ——生产井与第 i 口注水井的 δ 评价矩阵; \mathbf{B} ——权重矩阵; \mathbf{A} ——影响程度矩阵; η_i ——生产井无效循环量来自井组内第 i 口注水井的比例; Q_{wdi} ——生产井与第 i 口注水井井间无效循环量, m^3/d ; ϕ_i ——生产井与第 i 口注水井井间孔隙度; r_{di} ——生产井与第 i 口注水井井间优势渗流通道平均孔隙半径, m ; τ_i ——生产井与第 i 口注水井井间迂曲度, 其值为 $1.5 \sim 5.5$; K_{di} ——生产井与第 i 口注水井井间优势渗流通道平均渗透率, $10^{-3} \mu m^2$ 。

参考文献:

- [1] Babadagli T. Development of mature oil fields—A review [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 57 (3/4): 221–246.
- [2] Blaskovich F T. Historical problems with old field rejuvenation [C]. SPE 59471–MS, 2000.
- [3] Ivanhoe L F. Get ready for another oil shock [J]. The Futurist, 1997, 31(1): 20.
- [4] 王森, 冯其红, 宋玉龙, 等. 基于吸水剖面资料的优势通道分类方法——以孤东油田为例 [J]. 油气地质与采收率, 2013, 20 (5): 99–102.
Wang Sen, Feng Qihong, Song Yulong, et al. Preferential flow path classification method based on injection profile data—taking Gudong oilfield as an example [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(5): 99–102.
- [5] Chan K S. Water control diagnostic plots [C]. SPE 30775–MS, 1995.
- [6] Albertoni A. Inferring interwell connectivity from well–rate fluctuations in waterfloods [C]. SPE 75225–MS, 2002.
- [7] Yousef A A, Lake L W, Jensen J L. Analysis and interpretation of interwell connectivity from production and injection rate fluctuations using a capacitance model [C]. SPE 99998–MS, 2006.
- [8] Yousef A A, Jensen J L, Lake L W. Integrated interpretation of interwell connectivity using injection and production fluctuations [J]. Mathematical Geosciences, 2009, 41(1): 81–102.
- [9] Yousef A A. Investigating statistical techniques to infer interwell connectivity from production and injection rate fluctuations [D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2006.
- [10] 曾流芳, 赵国景, 张子海, 等. 疏松砂岩油藏大孔道形成机理及判别方法 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(3): 268–276.
Zeng Liufang, Zhao Guojing, Zhang Zihai, et al. The macroscopic throats forming mechanism of unsolidated sand–reservoir and their identifying method [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2002, 10(3): 268–276.
- [11] 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.
Liu Yuetian, Sun Baoli, Yu Yongsheng. Fuzzy identification and quantitative calculation method for big pore throat [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(5): 54–59.
- [12] 王延忠. 河流相正韵律厚油层剩余油富集规律研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
Wang Yanzhong. Research of concentrating rules of remaining oil in fluvial facies positive rhythmic thick formation [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2006.
- [13] 郝金克. 利用无因次压力指数定性识别优势通道 [J]. 特种油气藏, 2014, 21(4): 123–125.
Hao Jinke. Qualitative identification of prevailing channel by dimensionless pressure index [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(4): 123–125.
- [14] 牛世忠, 胡望水, 熊平, 等. 红岗油田高台子油藏储层大孔道定量描述 [J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 202–206.
Niu Shizhong, Hu Wangshui, Xiong Ping, et al. Quantitative description of high–capacity channels in Gaotaizi Reservoir of Honggang Oil Field [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(2): 202–206.
- [15] 杨勇. 正韵律厚油层优势渗流通道的形成条件和时机 [J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(3): 105–107.
Yang Yong. Forming condition and opportunity of preponderant flowing channel in thick positive rhythm reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(3): 105–107.
- [16] 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.
Feng Qihong, Shi Shubin, Wang Sen, et al. Identification of thief zones based on dynamic data [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(1): 74–76.
- [17] 丁乐芳, 朱维耀, 王鸣川, 等. 高含水油田大孔道参数计算新方法 [J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(5): 92–95.
Ding Lefang, Zhu Weiyao, Wang Mingchuan, et al. A new method of calculating the big channel parameters in high water cut oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(5): 92–95.
- [18] 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.
Liu Haiibo. Dominant flowing channels distribution and seepage characteristics after polymer flooding in Daqing oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5): 69–72.
- [19] 李秀兰. 优势渗流通道中的高速非达西渗流动态特征分析 [J]. 石油地质与工程, 2009, 23(6): 93–96.
Li Xiulan. Dynamic characteristics analysis of non–Darcy flow with high velocity in preferred flowing path [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2009, 23(6): 93–96.
- [20] 金志勇. 高含水油田渗流优势通道预测技术研究 [D]. 北京: 中国石油勘探开发研究院, 2009.
Jin Zhiyong. Research on the prediction technology of high permeability channel in high water cut oilfield [D]. Beijing: PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, 2009.