

文章编号: 1000-0747(2016)04-0621-09 DOI: 10.11698/PED.2016.04.15

裂缝性特低渗透油藏水窜水淹逐级调控多级井间化学示踪技术

蒲春生¹, 景成¹, 何延龙¹, 谷潇雨¹, 张志营², 魏吉凯³

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院; 2. 中国石化东北油气分公司; 3. 中国石油吐哈油田工程技术研究院)

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX05009, 2011ZX05001); 国家自然科学基金(51104173, 51274229)

摘要: 为了有效监测多段塞逐级调控过程中地层参数和波及状况的动态变化情况, 结合裂缝性特低渗透油藏逐级深部调控技术主要特点和化学示踪监测技术的基本原理, 提出多级井间化学示踪动态监测技术, 并进行了矿场应用。依据逐级调控设计方案及裂缝性特低渗透油藏水窜水淹特征, 建立了多级井间化学示踪级次设计方法, 优化了多级化学示踪剂筛选原则和用量计算公式, 研究了裂缝性特低渗透油藏逐级调控示踪剂分类解释模型, 形成了基于多级井间化学示踪的逐级调控参数优化预测方法。矿场应用结果表明: 逐级调控多级井间化学示踪技术可有效反映裂缝参数动态变化规律, 监测结果与矿场实际生产动态测试结果吻合, 具有很好的适用性。图7表1参20

关键词: 裂缝性油藏; 特低渗透油藏; 逐级调控; 多级井间化学示踪; 动态监测

中图分类号: TE331 文献标识码: A

Multistage interwell chemical tracing for step-by-step profile control of water channeling and flooding of fractured ultra-low permeability reservoirs

PU Chunsheng¹, JING Cheng¹, HE Yanlong¹, GU Xiaoyu¹, ZHANG Zhiying², WEI Jikai³

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. Northeast Bureau of Sinopec, Changchun 130000, China; 3. Tuha Oilfield Engineering Technology Research Institute, Hami 838202, China)

Abstract: To monitor the dynamic variations of sweep area and formation parameters during the process of multiple slugs step-by-step profile control, the multistage interwell chemical tracing technique was proposed and tested in field, in line with the features of the step-by-step profile control in fractured ultra-low permeability reservoirs and the basic principle of chemical tracing test. According to the design scheme of step-by-step profile control and the characteristics of water channeling and flooding in fractured ultra-low permeability reservoirs, this study worked out times-design method for interwell tracing, optimized the selection principle of chemical tracer and calculation formula of tracer dosage, and set up the parameter optimization forecasting method of step-by-step profile control based on multistage interwell tracing. The application results of the method show multistage interwell chemical tracing can reflect dynamic variation of fractured parameters effectively, and the monitoring results match with the dynamic production testing results, demonstrating good adaptability of the method.

Key words: fractured reservoir; ultra-low permeability reservoir; step-by-step profile control; multistage interwell tracing; dynamic monitoring

0 引言

裂缝性特低渗透油藏具有基质致密、裂缝系统复杂多变和储集层非均质性强等特点, 注水过程中极易形成水窜通道, 油藏水窜水淹严重^[1-4]。目前多段塞逐级调控技术是治理该类油藏水窜水淹的主要手段^[5-6], 主要通过实时动态监测确保逐级调控效果。井间化学示踪技术作为定量监测井间动态的重要手段之一, 已形成一套完整的理论体系, 逐渐被矿场实践所认可^[7-17]。但是解析、数值和半解析示踪剂定量化解释方法

都是把油藏处理为由互不连通的一些层组成的“千层饼”^[11-17], 对于裂缝性特低渗透油藏的示踪剂解释已不适用^[2-3]。同时, 逐级调控过程中注入流体的波及范围和地层参数会随时间发生改变, 传统的示踪剂测试缺乏连续性、动态性, 不能有效监测逐级调控过程中的动态变化情况^[7-10]。

本文提出与裂缝性特低渗透油藏水窜水淹逐级调控相配套的多级井间化学示踪技术, 通过实时监测逐级调控过程中各级窜流通道的封堵情况、裂缝参数与注入水波及动态变化情况, 优化与预测逐级调控参数,

达到提高逐级调控效果的目的。该技术可为裂缝性特低渗透油藏逐级调控参数实时优化及效果预测评价提供重要依据。

1 示踪剂测试级次设计方法

逐级调控多级井间化学示踪测试是保证示踪监测和逐级调控顺利进行的前提^[18]。示踪剂监测级次的设计不仅要考虑示踪剂监测与逐级调控施工周期,而且应避免凝胶段塞注入后对示踪剂监测结果的影响。

以逐级调控注入方案为依据,明确凝胶段塞与示踪剂段塞的注入次序和示踪剂监测次数。示踪剂监测的是在一定压力下的注入流体分布,凝胶段塞的注入势必会使地层压力产生波动。考虑到凝胶交联时间和压力传导的延迟性,当前 1 级次示踪剂浓度达到峰值浓度后进行凝胶段塞的注入对示踪剂监测结果影响较小。假设共注入 E 个凝胶段塞、 F 个级次示踪剂,为保证在时间 T 内顺利完成施工,应使各段塞注入时间及其成胶时间与示踪剂监测时间之和小于等于 T ,即:

$$\sum_{e=1}^E \left(\frac{V_e}{Q} + a_e \right) + \sum_{f=1}^F \left(\frac{V_f}{Q} + t_{pf} \right) \leq T \quad (1)$$

其中

$$t_{pf} = \max t_{pji} \quad (2)$$

假设生产井 j 发育 i 个裂缝条带,每个裂缝条带可发育多条裂缝,第 i 个裂缝条带等效为由 n_{ji} 个直径为 D_{ji} 的流管组成的流管束,则:

$$t_{pji} = \frac{\pi S_{ji}^2 \left(\sum_{i=1}^{N_j} \frac{n_{ji} D_{ji}^4}{S_{ji}} \right) \left(\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} \frac{n_{ji} D_{ji}^4}{S_{ji}} \right)}{4 Q D_{ji}^2 \left(\pi \sum_{i=1}^{N_j} \frac{n_{ji} D_{ji}^4}{S_{ji}} - 4 D_{ji}^2 f_j V_e \right)} \quad (3)$$

其中

$$f_j = m_j / \sum_{j=1}^M m_j \quad (4)$$

2 示踪剂的筛选原则及用量计算方法

选择不同级次的示踪剂和计算各级次示踪剂用量是裂缝性特低渗透油藏水窜水淹逐级调控多级井间化学示踪测试方案设计的重要组成部分^[18-19]。

2.1 多级井间化学示踪剂筛选评价原则

仅测 1 次的传统示踪剂在示踪剂筛选评价中只需考虑示踪剂的物理化学性质、油藏岩石性质、油田水及注入水性质、经济、安全和环境保护等因素^[18],多级井间示踪剂的筛选评价除需考虑上述因素外,还需

考虑不同级次间示踪剂的相互影响以及示踪剂与所注入凝胶的物理化学特性。为有效避免各级次示踪监测之间的影响,应至少筛选 2 种示踪剂,采用多级次交替注入的方法^[15,18]。多级示踪剂筛选除需进行耐热性、配伍性(示踪剂与注入水、地层水)、岩石对示踪剂的吸附性和储集层伤害评价外^[18],还必须进行示踪剂间配伍性以及凝胶对示踪剂吸附性的评价。因此,应选取最大吸光波长差距大、凝胶对示踪剂吸附小的多级化学示踪剂。

2.2 多级井间化学示踪剂用量计算方法

由裂缝性特低渗透油藏水窜水淹特点可知,注入水主要波及流动阻力小的裂缝体系,示踪剂跟踪注入水监测裂缝状况。因此本文在 Brigham-Smith 水驱条件下^[11,19],将五点法井网化学示踪剂用量公式改写为可用于裂缝性特低渗透油藏井间化学示踪剂用量计算的公式:

$$m_T = 4.442 \times 10^{-6} \phi_f \bar{h} \frac{\rho_o f_{ws}}{\rho_o f_{ws} + \rho_w B_o (1 - f_{ws})} \frac{d}{a} C_{s \max} L^{1.735} \quad (5)$$

上式适用于五点法井网示踪剂用量的计算,对于其他井网类型只需改变示踪剂地面最大采出浓度与油层中的最大采出浓度之间的转换系数即可^[18]。

(5) 式中含水率可由井组内各生产井生产动态数据求得。由于裂缝孔隙度的求解相对比较复杂,逐级调控之前第 1 级次示踪剂监测的裂缝孔隙度主要根据研究区裂缝密度和裂缝规模参数求取,因此可得到第 1 级次示踪剂用量计算公式:

$$m_{T1} = 4.442 \times 10^{-6} \frac{lwh_f \rho_f H}{V} \bar{h} \frac{\rho_o f_{ws}}{\rho_o f_{ws} + \rho_w B_o (1 - f_{ws})} \times \frac{d}{a} C_{s \max} L^{1.735} \quad (6)$$

随着逐级调控的进行,各级裂缝逐步封堵,裂缝孔隙度和含水率逐渐减小,根据上一次示踪剂解释结果可得其裂缝体积,进而求得相应裂缝的孔隙度。因此,可推导出不同级次井间化学示踪剂用量计算公式:

$$m_{Tf} = 4.442 \times 10^{-6} \frac{\phi_f V - \sum_{e=1}^k V_e}{V} \bar{h} \frac{\rho_o f_{ws}}{\rho_o f_{ws} + \rho_w B_o (1 - f_{ws})} \times \frac{d}{a} C_{s \max} L^{1.735} \quad (f=2, 3, \dots, F) \quad (7)$$

3 逐级调控多级示踪剂分类解释模型

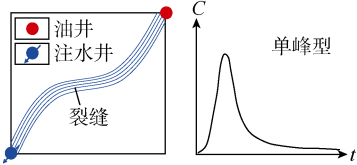
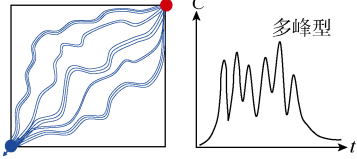
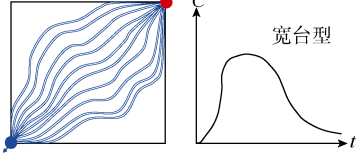
示踪剂曲线的综合解释是裂缝性特低渗透油藏水

窜水淹逐级调控多级井间化学示踪技术的核心内容。对该类油藏水窜水淹井大量示踪剂产出曲线的分析结果表明：水窜裂缝系统主要包括窜通型、差异交互型和相对均匀推进型等 3 类，其相应的示踪剂曲线形态依次表现为单峰型、多峰型和宽台型（见表 1）。针对不同类型水窜裂缝系统特征，建立了 1/4 注采井网裂缝条带分布物理模型（见表 1），其基本假设为：①注入水为连续流动的不可压缩流体；②示踪剂在注入过程中类似于水，对示踪剂运动的分析就相当于对水运动的分析；③把裂缝性特低渗透油藏复杂的水窜裂缝系统等效为一系列由注水井到采油井互不相交的裂缝条带，每条裂缝条带均可等效为一定数量流管组成的流

管束，裂缝中的流动相当于流管束中的流动；④忽略流体重力及毛细管力，在流管中示踪剂与注入水为流度比等于 1 的活塞式驱替；⑤流体在流管中的流动符合 Hagen-Poiseuille 方程；⑥忽略示踪剂纬向弥散和分子扩散的影响，示踪剂不吸附到岩石壁面上；⑦忽略基质与裂缝的渗吸置换，流体仅在裂缝中流动。

利用等效流管法将裂缝条带等效为符合 Hagen-Poiseuille 方程的流管束^[11-14]，利用不同裂缝条带示踪剂浓度在生产井的叠加，将宏观生产信息（ f_j 、 Q 和 V_d ）与微观裂缝信息（ N_j 、 n_{ji} 、 D_{ji} 和 s_{ji} 等）结合，推导了裂缝性特低渗透油藏水窜水淹逐级调控示踪剂分类解释模型（见表 1）。

表 1 裂缝性特低渗透油藏水窜水淹逐级调控示踪剂分类解释模型

模型类型	模型等效	物理模型示意图及其示踪剂产出曲线形态	数学模型
窜通型水窜裂缝系统（Ⅰ类）	等效为 1 条裂缝条带		$\frac{C}{C_0} = \frac{f_j V_d \times 10^6}{\sqrt{n \pi D^2 \alpha f_j Q t}} \exp \left[-\frac{(n \pi D^2 s \times 10^{-6} - 4 \times 10^6 f_j Q t)^2}{16 n \pi D^2 \alpha f_j Q t} \right]$
差异交互型水窜裂缝系统（Ⅱ类）	等效为渗流差异较大的 N 条裂缝条带		$\frac{C}{C_0} = \frac{f_j V_d \times 10^6}{\pi \sum_{i=1}^N \frac{n_i D_i^4}{s_i} \sqrt{f_j Q \sum_{i=1}^N \frac{n_i D_i^4}{s_i}}} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{n_i D_i^5}{s_i \sqrt{\alpha_i s_i t}} \exp \left[-\frac{\left(\pi s_i^2 \sum_{i=1}^N \frac{n_i D_i^4}{s_i} \times 10^{-12} - 4 f_j Q D_i^2 t \right)^2}{16 \times 10^{-12} \pi \alpha_i f_j Q s_i D_i^2 \sum_{i=1}^N \frac{n_i D_i^4}{s_i} t} \right] \right\}$
相对均匀推进型水窜裂缝系统（Ⅲ类）	等效为渗流差异较小的 N 条裂缝条带		$\frac{C}{C_0} = \frac{f_j V_d \times 10^6}{\pi \sum_{i=1}^N n_i \sqrt{f_j Q \left(\sum_{i=1}^N n_i \right)}} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{n_i}{D_i \sqrt{\alpha_i t}} \exp \left[-\frac{\left(\pi D_i^6 R \left(\sum_{i=1}^N n_i \right) \times 10^{-6} - 4 \times 10^6 f_j Q t \right)^2}{16 \pi \alpha_i D_i^2 f_j Q \left(\sum_{i=1}^N n_i \right) t} \right] \right\}$

示踪剂产出曲线的拟合可看作是非线性优化问题：

$$\min \sum_{q=1}^r (C_q^* - C_q)^2 \tag{8}$$

目前常用的优化算法有遗传算法、差分进化法、蚁群算法、模拟退火法等。本文采用遗传算法进行井间示踪剂产出曲线的自动拟合。

以井组生产动态资料和示踪剂测试数据为基础，采用裂缝性特低渗透油藏水窜水淹逐级调控示踪剂分类解释数学模型，利用遗传算法，编制了裂缝性特低渗透油藏水窜水淹逐级调控示踪剂解释软件。具体流程如下：①根据输入的各生产井生产动态数据及示踪剂监测数据，计算向不同采油井的注入水分配系数 f_j ；②执行示踪剂曲线形态判断算子，根据示踪剂曲线峰值形态判断所采用的解释模块（单峰模块 1、多峰模块

2 和宽台模块 3）；③随机产生需拟合参数的初始值代入相应的示踪剂解释模型，求得示踪剂浓度曲线，分析其与实测曲线的拟合误差。若满足误差要求，则输出裂缝参数信息，若不满足误差要求，则利用遗传算法生成新的参数值，分析其拟合误差，重复这一流程直到满足误差要求。

4 逐级调控参数优化与预测方法

根据逐级调控示踪剂测试结果，结合生产动静态资料，预测调驱段塞注入后压力的变化情况，对逐级调控注入参数进行实时优化与调整^[20]，确保逐级调控效果。

4.1 逐级调控调驱剂注入压力的优化

逐级调控中，为使调驱剂段塞前缘向地层深部推

进,一方面要控制延迟交联时间,另一方面要有足够的注入压力。对于裂缝性特低渗透油藏而言,采用过大的注入压力强行挤注,可能使更多的天然裂缝开启,形成新的水窜通道。因此,可依据实验得出适用于目的储集层逐级调控体系的可控延迟交联时间范围^[6-8],选取矿场可实现可控延迟交联时间上下限,推导出调驱剂注入压力范围,即需满足(9)式:

$$\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} n_{ji} A_{ji} v_{ji}(p_z) t_j = V_k \quad (9)$$

其中

$$A_{ji} = \frac{\pi D_{ji}^2}{4} \quad v_{ji}(p_z) = \frac{D_{ji}^2 \Delta p_j(p_z)}{32 \mu_w s_{ji}}$$

$$p_z = \Delta p_j + \rho_w g h_{qj} - \rho_w g h_z$$

同时,考虑到采油井为压裂投产,井周存在大规模人工裂缝,为了防止过多的调驱剂被回采,一般使调驱剂段塞前缘位置在离注水井井筒注采井距 2/3 处即可,需满足:

$$\frac{2}{3} s_{ji} \geq v_{ji}(p_z) t_j \quad (10)$$

最后根据(9)式及(10)式可得逐级调控不同级别的最优调驱剂注入压力。

4.2 交联成胶后注入压力预测

调驱剂在裂缝条带中交联成胶后,以正常配注量注水,注入压力会有所升高,预测其注入压力变化可评价逐级调控提压效果。假设交联成胶后,任一生产井 j 的裂缝条带流管当量直径由 D_{ji} 变为 $\bar{D}_{ji}$,则任一生产井 j 的注采压差表示为:

$$\Delta p_j(p'_j) = \frac{128 \mu_w f'_j Q}{\pi \sum_{i=1}^{N_j} \frac{n_{ji} \bar{D}_{ji}^4}{s_{ji}}} \quad (11)$$

其中

$$\bar{D}_{ji}^2 = D_{ji}^2 - \frac{4 f_j V_k}{\frac{\pi}{D_{ji}^4} \sum_{i=1}^{N_j} \frac{n_{ji} D_{ji}^4}{s_{ji}}}$$

$$f'_j = \sum_{i=1}^{N_j} \frac{n_{ji}}{\frac{s_{ji}}{\bar{D}_{ji}^4} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} \frac{n_{ji} \bar{D}_{ji}^4}{s_{ji}}}$$

基于不同生产井动液面测试结果,依据(9)式和(11)式可计算出注入压力。考虑到动液面测试的误差,注入压力取平均值,预测交联成胶后注水井注入压力为:

$$\bar{p}'_z = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M p'_{zj} \quad (12)$$

5 矿场应用实例

SH 油田 8-1 区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡中部,主力开发层系为三叠系延长组长 6¹ 段,平均孔隙度为 12.5%,平均渗透率为 $1.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,天然微裂缝广泛发育,属于典型的裂缝性特低渗透油藏。由于储集层致密、非均质性强、转注等复杂原因,注水水窜水淹严重,平均综合含水率为 73.4%。为实时监测逐级调控主要裂缝参数变化,优化逐级调控参数、提高和评价逐级调控效果,选取 S583 井组实施多级井间化学示踪技术。S583 井组注水井正常日配注量为 14.4 m^3 ,注水井 S583 井注入压力 4.0 MPa,对应 4 口采油井(S583-1 井, S583-2 井, S583-3 井, S583-5 井)含水率均大于 80.0%。逐级调控调驱剂设计总用量为 720.53 m^3 ,预处理液、前置液、主体剂、顶替液和后置液分别为 55.08 m^3 、 145.20 m^3 、 355.00 m^3 、 100.17 m^3 和 65.08 m^3 ,其中 1—4 级主体段塞为 $70 \text{ m}^3/\text{级}$,5 级主体段塞为 75 m^3 。

5.1 逐级调控多级井间化学示踪方案设计及矿场实施

5.1.1 多级井间化学示踪剂的筛选与评价

通过分析该井组采出水原始组分的本底浓度(背景浓度),对初选的硫氰酸铵、溴化钠、乙醇和硝酸钠 4 种示踪剂进行了耐热性、示踪剂之间的配伍性、吸附性、储集层伤害等评价实验。耐温性实验结果表明,45 °C 下,50 d 后 4 种示踪剂浓度保留率均大于 80%,耐温性能良好;4 种示踪剂分别与注入水、地层水按比例混合 72 h 后检测混合液示踪剂浓度,注入水混合液示踪剂浓度未改变或有轻微变化,地层水混合液中硫氰酸铵和溴化钠浓度基本不变,乙醇和硝酸钠浓度明显下降;岩石和凝胶吸附实验表明,随着示踪剂浓度的增加,岩石和凝胶对硫氰酸铵和溴化钠的吸附量均增大,但浓度保留率呈增大趋势,浓度保留率均大于 97%,吸附量均小于 $10\ 000 \text{ mg/t}$ (见图 1、图 2);储集层伤害实验表明 4 种拟选示踪剂对储集层伤害程度较低,储集层平均伤害率小于 17%,为弱伤害。

综上所述,在 4 种拟选示踪剂中,硝酸钠和乙醇与地层水不配伍,硫氰酸铵和溴化钠背景浓度低、耐温性好、配伍性好、对岩石和凝胶的吸附量小。因此,选取硫氰酸铵和溴化钠作为示踪剂,利用交替注入示踪剂的方式,进行多级井间示踪动态监测。

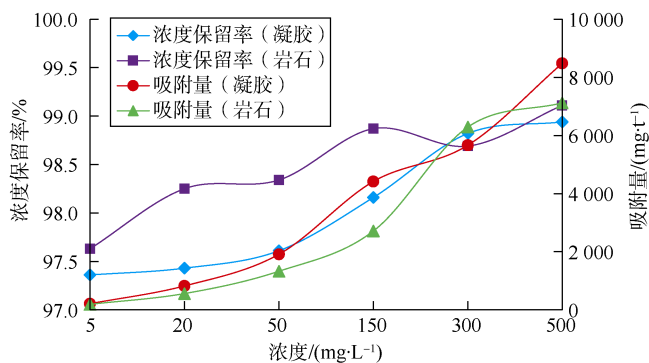


图1 凝胶、岩石对硫氰酸铵吸附曲线

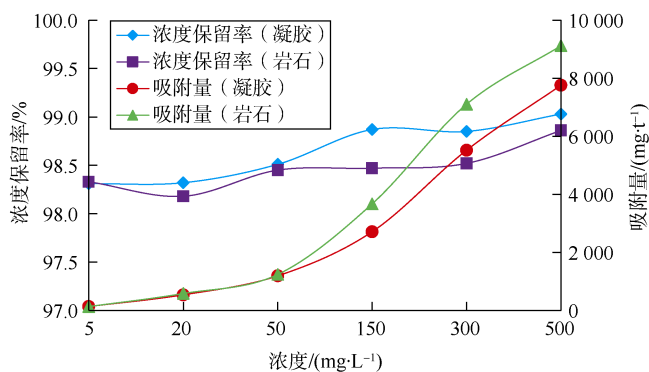


图2 凝胶、岩石对溴化钠吸附曲线

5.1.2 多级井间化学示踪级次及用量设计

根据逐级调控调驱剂用量、延迟交联时间(2~5 d)及矿场施工周期(120 d),利用(1)式,计算调控过程中 F 为1,最佳示踪剂注入总级次应该为3次,即调控前1次,调控过程中1次(注完1—4级逐级调控主体剂段塞后)和调控后1次(注完逐级调控设计所有段塞体积)。

根据示踪剂级次设计和各级次间主体段塞用量,利用多级井间化学示踪剂用量计算公式(6)式和(7)式,可得第1、第2和第3级次示踪剂用量分别为0.724 t、0.604 t和0.466 t。

5.1.3 矿场实施情况

依据多级井间化学示踪设计方案,进行了各级次的化学示踪监测。2014年3月26日进行第1级次示踪测试,注入初始浓度为800 mg/L的硫氰酸铵 10 m^3 ,实际用量为0.80 t;然后注入逐级调控主体剂段塞 280 m^3 后,待压力稳定后,于2014年6月16日进行第2级次示踪测试,注入初始浓度为650 mg/L的溴化钠 10 m^3 ,实际用量为0.65 t;逐级调控结束后待压力稳定,于2014年8月5日注入初始浓度为500 mg/L的硫氰酸铵 10 m^3 进行了第3级次示踪监测。3次示踪剂监测累计采样464个,各生产井不同级次示踪剂曲线特征

明显,可作为解释分析的数据基础。

5.2 基于示踪剂解释结果的逐级调控参数优化

根据S583井组多级井间化学示踪监测到的3个级次共12组示踪剂产出浓度数据及其生产动态资料,利用裂缝性特低渗透油藏水窜水淹逐级调控示踪剂分类解释方法进行相关参数解释与曲线拟合,得到注水井到不同生产井间裂缝条带个数 N_{ji} 、等效流管个数 n_{ji} 、等效流管当量直径 D_{ji} 和等效流管长度 s_{ji} 等裂缝参数信息。根据实时解释的裂缝参数,利用(9) — (12)式,计算出注入5级主体剂段塞时的注入压力,以达到逐级调控最佳效果。最终计算的各级段塞注入压力分别为5.2 MPa、5.8 MPa、6.7 MPa、7.5 MPa和8.8 MPa。

在上述不同级次主体剂注入压力下注入段塞,待各级段塞交联成胶后,以正常配注量 14.4 m^3 为标准,利用(11) — (12)式,可预测每级调控后正常注水注入压力分别4.3 MPa、5.4 MPa、6.1 MPa、6.3 MPa和7.2 MPa。与矿场试注时实测注水压力相比较(见图3),两者相对误差较小,在3%~11%,该预测方法可有效评价裂缝性特低渗透油藏水窜水淹逐级调控增压效果。

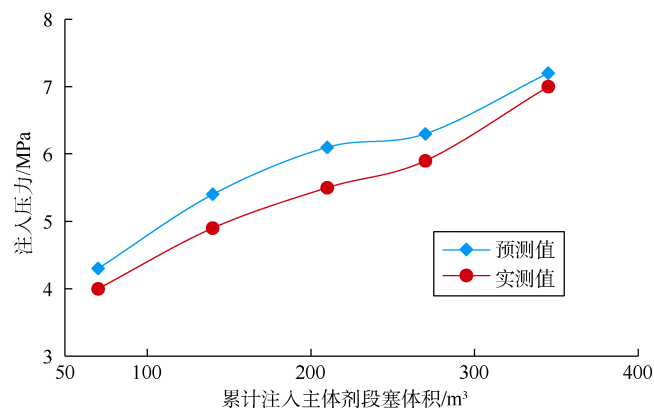


图3 S583井组各级次调控后预测注入压力与试注实测压力对比图

5.3 逐级调控多级井间化学示踪结果分析

多级井间示踪监测结果、逐级调控采油井生产动态变化与注水井压降曲线变化(见图4—7)对比分析表明,逐级调控多级井间化学示踪监测结果与生产动态测试结果相吻合。

5.3.1 逐级调控前——第1级次示踪测试

逐级调控前井组平均综合含水率高达86.7%,平均日产油量仅为 1.95 m^3 (见图4)。由图5可知:逐级调控前,S583井组注入压力仅为4.0 MPa,地层阻力

很小,停注 4.5 h 后,井口压力即降为零,计算充满度仅为 0.246,说明注入水对地层能量的增加贡献很小,注入水无效循环,水窜水淹严重。

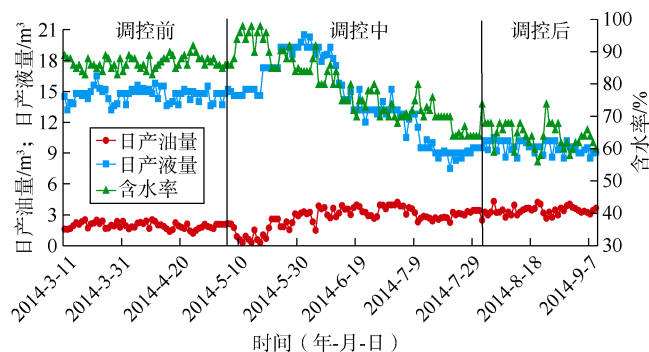


图 4 S583 井组逐级调控生产动态曲线图

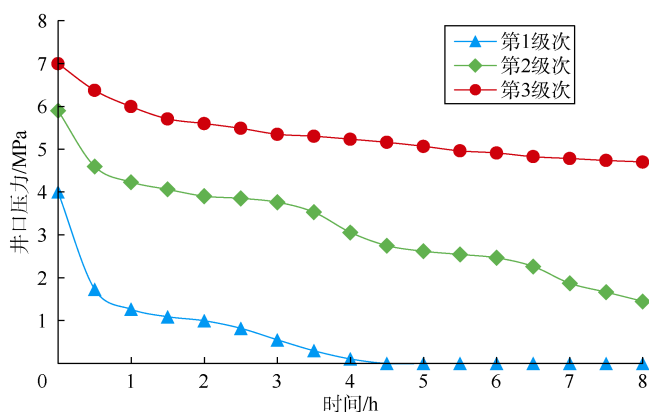
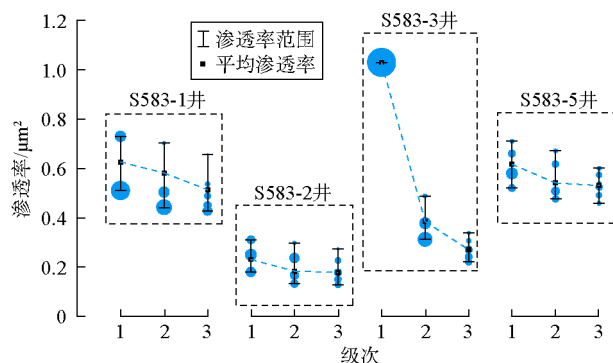


图 5 S583 井组注水井逐级调控压降曲线对比图

逐级调控前第 1 次示踪剂监测结果 (见图 6、图 7a) 表明:注采井间均不同程度地发育明显的水窜裂缝条带,其中注水井 S583 井与采油井 S583-3 井间存在一条渗透率高达 $1.05 \mu\text{m}^2$ 的水窜裂缝条带,为窜通型水窜裂缝系统, S583-3 井注入水分配系数高达 0.59,一半以上的注入水都经由该条井间裂缝条带流入井筒,同时该井示踪剂见剂时间最短,仅为 2 d,注入水推进速度很快,说明 S583-3 井是该井组水窜水淹的主要方向。

5.3.2 逐级调控中——第 2 级次示踪测试

注入 280 m^3 主体剂段塞后,井组平均综合含水率明显下降,为 73.3%,平均日产量有所增加,为 2.55 m^3 (见图 4)。由图 5 可知:注水井 S583 注入压力升高为 5.9 MPa,地层阻力有所增加,停注 8.0 h 后,井口压力仍保持在 1.5 MPa 左右,计算充满度为 0.539,说明井组水窜水淹已得到有效控制,逐级调控“增油降水”效果显现。



图中蓝色圆代表对应渗透率的裂缝条带等效流管个数占总流管数的百分比,蓝色虚线代表平均渗透率的变化趋势

图 6 S583 井组裂缝条带渗透率动态变化对比图

逐级调控中第 2 次示踪剂监测结果 (见图 6、图 7b) 表明:注采井间水窜裂缝条带的渗透率明显降低,且相对低渗裂缝条带个数在增加,注入水分配系数也逐步趋于均匀,表明优势裂缝条带得到了有效封堵,液流明显转向,注水综合利用率提高。S583 井与 S583-3 井间的高渗裂缝条带 (渗透率为 $1.05 \mu\text{m}^2$) 转变为 3 条相对低渗的裂缝条带 (渗透率为 $0.49 \mu\text{m}^2$ 、 $0.38 \mu\text{m}^2$ 和 $0.31 \mu\text{m}^2$),其注入水分配系数由 0.59 下降到 0.46;同时,示踪剂见剂时间变大,注入水推进速度变慢,说明 S583-3 井间窜通型裂缝条带已逐步得到封堵,注入水逐渐波及到渗透率较小的渗流通道。

5.3.3 逐级调控后——第 3 级次示踪测试

逐级调控后,井组平均综合含水率由 73.3% 进一步下降到 64.4%,平均日产量也明显下降,平均日产量增加至 3.41 m^3 (见图 4)。由图 5 可知:注水井 S583 注入压力由逐级调控前的 4.0 MPa 增加到 7.0 MPa,停注 8.0 h 后,井口压力仍保持在 4.7 MPa 的较高水平,充满度也由逐级调控前的 0.246 增加到 0.863,表明注入水持压时间长,压力可持续向地层深部传导,逐级调控“增油降水”效果明显。

实施逐级调控后第 3 次示踪剂监测结果 (见图 6、图 7c) 表明:注采井间水窜裂缝条带的渗透率进一步降低,不同裂缝条带之间的渗透率差异变小,注入水分配系数均趋于 0.25,表明优势裂缝经封堵后,储集层非均质性得到明显改善,注入水波及范围增大,注入水综合利用率大幅度提高。

通过分析不同级次示踪剂曲线形态的变化亦可反映逐级调控动态变化情况。从 S583 井组多级井间化学示踪各生产井 3 个级次的示踪剂曲线 (见图 7) 形态可以看出,其基本都呈现由“单峰型”到“多峰型”再到“宽台型”、或“多峰型”到“多峰型”再到“宽

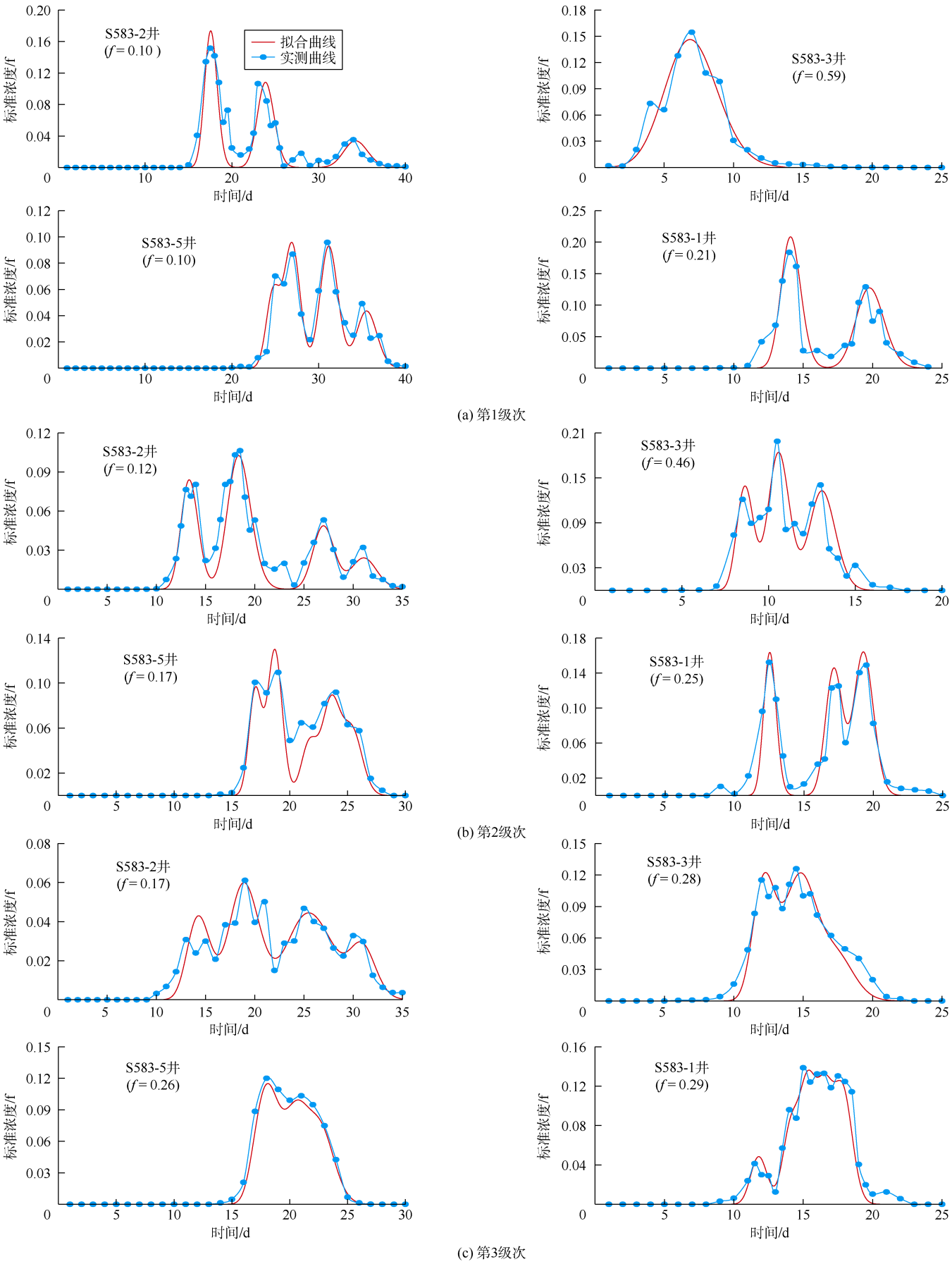


图 7 S583 井各级次示踪剂曲线-注入水分配系数图 (标准浓度为示踪剂产出浓度与示踪剂初始注入浓度的比值)

台型”的变化趋势。这表明随逐级调控进行, S583 井组水窜裂缝系统逐渐向相对均匀推进型水窜裂缝系统转换, 反映井间非均质性逐渐改善, 逐级调控效果明显。

6 结论

为实时监测裂缝性特低渗油藏逐级调控裂缝系统的动态变化, 提出了多级井间化学示踪动态监测技术, 其核心内容包括多级示踪级次设计、多级示踪剂筛选和用量计算以及示踪剂的分类解释, 形成了多级井间化学示踪逐级调控参数优化预测方法, 并在 SH 油田某井组成功应用。

矿场试验结果表明: 示踪剂曲线形态具有单峰型、多峰型和宽台型特点, 随着逐级调控的进行, 示踪剂曲线形态逐步转化为宽台型, 参数解释结果反映水窜裂缝条带的渗透率逐步减小、注入水分配系数趋于均匀, 与井组实测压降曲线及增油降水效果分析结果相吻合, 表明多级井间化学示踪技术能很好地反馈逐级调控过程中主要油藏参数的动态变化。

符号注释:

a ——生产井井距, m; a_e ——第 e 个级次凝胶候凝关井时间, d; A_{ji} ——生产井 j 第 i 条裂缝条带等效流管横截面积, μm^2 ; B_o ——原油体积系数, f; C ——示踪剂产出浓度, mg/L; C_0 ——示踪剂初始注入浓度, mg/L; C_q ——模型计算示踪剂浓度, mg/L; C_q^* ——矿场实测示踪剂浓度, mg/L; $C_{s\max}$ ——地面最大示踪剂采出浓度, mg/L; d ——注水井到生产井排的距离, m; D ——I 类水窜裂缝系统裂缝条带等效流管当量直径, μm ; D_i ——II 类和 III 类水窜裂缝系统第 i 条裂缝条带等效流管当量直径, μm ; D_{ji} ——生产井 j 第 i 条裂缝条带等效流管当量直径, μm ; $\overline{D}_{ji}$ ——凝胶交联成胶后生产井 j 第 i 条裂缝条带等效流管当量直径, μm ; e ——凝胶注入级次, 取值为 1, 2, ..., E ; E ——注入凝胶段塞的总次数; f ——示踪剂测试级次, 取值为 1, 2, ..., F ; f_j ——生产井 j 的注水分配系数, f; f'_j ——预测生产井 j 注水分配系数, f; f_{ws} ——井组平均含水率, f; F ——示踪剂测试总次数; g ——重力加速度, m/s^2 ; h_{dj} ——生产井 j 的动液面高度, m; h_f ——裂缝切深, m; $\bar{h}$ ——油层平均有效厚度, m; h_z ——注水层段深度, m; H ——井组注水井与所有生产井注采井距之和, m; j ——生产井编号, 取值为 1, 2, ..., M ; k ——注入凝胶段塞的级次; l ——裂缝长度, m; L ——注采井距, m; m_j ——生产井 j 的示踪剂采出总量, mg; m_T ——示踪剂用量, t; m_{T1} ——第 1 级次示踪剂用量, t; m_{Tf} ——不同级次示踪剂用量, t; M ——井组生产井总数; n ——I 类水窜裂缝

系统裂缝条带等效流管数; n_i ——II 类和 III 类水窜裂缝系统第 i 条裂缝条带等效流管数; n_{ji} ——生产井 j 第 i 条裂缝条带的等效流管数; N ——裂缝条带总数; N_j ——生产井 j 裂缝条带总数; p_z ——注水井注入压力, MPa; p'_{zj} ——预测的注水井注入压力, MPa; $\overline{p'_z}$ ——注水井平均注入压力, MPa; Δp_j ——生产井 j 的注采压差, MPa; q ——示踪剂监测采样编号, 取值为 1, 2, ..., r ; Q ——注水井日注入量, m^3/d ; r ——示踪剂监测累计采样个数; R ——等效流阻, $\text{m}/\mu\text{m}^4$; s ——I 类水窜裂缝系统裂缝条带长度, m; s_i ——II 类和 III 类水窜裂缝系统第 i 条裂缝条带等效长度, m; s_{ji} ——生产井 j 第 i 条裂缝条带的等效长度, m; t ——示踪剂注入天数, d; t_j ——延迟交联时间, d; t_{pf} ——第 f 级次示踪剂测试的示踪剂峰值浓度时间, d; t_{pji} ——生产井 j 第 i 条裂缝条带的示踪剂峰值时间, d; T ——逐级调控施工时间, d; v_{ji} ——生产井 j 第 i 条裂缝条带的示踪剂平均运移速度, m/d ; V ——井组油藏总体积, m^3 ; V_d ——示踪剂初始注入体积, m^3 ; V_e ——第 e 个级次凝胶注入体积, m^3 ; V_f ——第 f 级次的示踪剂注入体积, m^3 ; V_k ——第 k 级次凝胶段塞注入体积, m^3 ; w ——裂缝宽度, m; α ——I 类水窜裂缝系统裂缝条带水动力弥散度, m; α_i ——II 类和 III 类水窜裂缝系统第 i 条裂缝条带水动力弥散度, m; μ_w ——水的黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; ρ_w ——水的密度, g/cm^3 ; ρ_f ——裂缝线密度, 条/m; ρ_o ——原油密度, g/cm^3 ; ϕ_f ——裂缝孔隙度, f。

参考文献:

- [1] 郝明强, 胡永乐, 刘先贵. 裂缝性低渗透油藏特征综述[J]. 特种油气藏, 2007, 14(3): 12-15.
HAO Mingqiang, HU Yongle, LIU Xiangui. An overview on characteristics of low-permeability fractured reservoirs[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2007, 14(3): 12-15.
- [2] 袁士义, 宋新民, 冉启全. 裂缝性油藏开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
YUAN Shiyi, SONG Xinmin, RAN Qiquan. Fractured reservoir development technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [3] 王友净, 宋新民, 田昌炳, 等. 动态裂缝是特低渗透油藏注水开发中出现的新的开发地质属性[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 222-228.
WANG Youjing, SONG Xinmin, TIAN Changbing, et al. Dynamic fractures are an emerging new development geological attribute in water-flooding development of ultra-low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 222-228.
- [4] 宋付权. 低渗透油藏注水开发的水突进特征[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3): 106-108.
SONG Fuquan. Water fingering feature in low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(3): 106-108.

- [5] 杨红斌, 蒲春生, 李森, 等. 自适应弱凝胶调驱性能评价及矿场应用[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(6): 83-86.
YANG Hongbin, PU Chunsheng, LI Miao, et al. Laboratory evaluation and field application on profile control of self-adaptive weak gel[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(6): 83-86.
- [6] 李之燕, 王学民, 陈美华, 等. 多段塞复合凝胶调驱技术研究与应用[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(2): 35-37.
LI Zhiyan, WANG Xuemin, CHEN Meihua, et al. Research and application of profile control and oil displacement technology with sectional compounding gel[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(2): 35-37.
- [7] 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.
CHEN Yueming, JIANG Hanqiao, LI Shuxia. Application of well-to-well tracer test on reservoir heterogeneity description[J]. Journal of the University of Petroleum (Natural Science Edition), 1994, 18(Supp.): 1-7.
- [8] 赵国瑜. 井间示踪剂技术在油田生产中的应用[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(4): 92-95.
ZHAO Guoyu. The application of interwell tracer method in oilfield production[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(4): 92-95.
- [9] 汪玉琴, 陈方鸿, 顾鸿君, 等. 利用示踪剂研究井间水流优势通道[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(5): 512-514.
WANG Yuqin, CHEN Fanghong, GU Hongjun, et al. Using tracer to study interwell water flow predominant channel[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(5): 512-514.
- [10] 张钊, 陈明强, 高永利. 应用示踪技术评价低渗透油藏油水井间连通关系[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2006, 21(3): 48-51.
ZHANG Zhao, CHEN Mingqiang, GAO Yongli. Estimation of the connectivity between oil wells and water injection wells in low-permeability reservoir using tracer detection technique[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2006, 21(3): 48-51.
- [11] BRIGHAM W E, SMITH D H. Prediction of tracer behavior in five-spots flow[R]. SPE 1130, 1965.
- [12] YUEN D L, BRIGHAM W E, CINCO-L H. Analysis of five-spots tracer test to determine reservoir layering[R]. California: Stanford University, 1979.
- [13] MAGHSOOD A D, BRIGHAM W E. Analysis of unit mobility ratio well-to-well tracer flow to determine reservoir heterogeneity[R]. California: Stanford University, 1983.
- [14] GHORI S G, HELLER J P. Use of well-to-well tracer tests to determine geostatistical parameters of permeability[R]. SPE 24138, 1992.
- [15] 姜瑞忠, 姜汉桥, 杨双虎. 多种示踪剂井间分析技术[J]. 石油学报, 1996, 17(3): 85-91.
JIANG Ruizhong, JIANG Hanqiao, YANG Shuanghu. A new technique for the analysis of interwell tracers[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(3): 85-91.
- [16] 张毅, 姜瑞忠, 郑小权. 井间示踪剂分析技术[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(2): 76-78.
ZHANG Yi, JIANG Ruizhong, ZHENG Xiaoquan. Analysis technology of interwell tracer[J]. Journal of the University of Petroleum (Natural Science Edition), 2001, 25(2): 76-78.
- [17] 刘同敬, 姜汉桥, 李秀生, 等. 井间示踪剂测试半解析方法体系数学模型[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 118-123.
LIU Tongjing, JIANG Hanqiao, LI Xiusheng, et al. Semi-analytical mathematical model for well-to-well tracer test system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 118-123.
- [18] 宋吉水, 王岩楼, 廖广志, 等. 井间示踪技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
SONG Jishui, WANG Yanlou, LIAO Guangzhi, et al. Inter well tracing technique[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [19] 张善杰, 冯向东. 井间示踪测试中示踪剂用量计算方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(4): 48-50.
ZHANG Shanjie, FENG Xiangdong. Computing method for tracer dosage in the process of interwell tracer test[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(4): 48-50.
- [20] 李宝莹, 刘贵满, 郑晓松. 示踪剂资料在锦16块整体调驱设计中的应用[J]. 特种油气藏, 2012, 19(2): 59-61.
LI Baoying, LIU Guiman, ZHENG Xiaosong. Application of tracer data in profile control and oil displacement design for Jin 16 block[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012, 19(2): 59-61.

第一作者简介: 蒲春生(1959-), 男, 四川广安人, 博士, 中国石油大学(华东)石油工程学院教授, 主要从事低渗、特低渗、稠油、超稠油等特种油气藏物理-化学强化开采及资源环境保护理论与技术方面的教学与研究工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 中国石油大学(华东)石油工程学院, 邮政编码: 266580。E-mail: chshpu@163.com

联系作者: 景成(1987-), 男, 陕西西安人, 中国石油大学(华东)石油工程学院在读博士研究生, 主要从事低渗透油藏及致密气藏开发地质、测井储集层评价及低渗透油田开发动态监测方面的研究。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 中国石油大学(华东)石油工程学院, 邮政编码: 266580。E-mail: jich.0704@163.com

收稿日期: 2015-10-19 修回日期: 2016-05-30

(编辑 张敏)