

文章编号:1009-9603(2020)01-0101-06

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2020.01.015

低渗透油藏CO₂驱气窜通道识别方法

张世明

(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:低渗透油藏CO₂驱开发过程中,面临的最大问题是容易发生气窜。针对目前尚无定量的气窜识别标准,以及现有的气窜通道体积计算方法实用性较差等问题,通过分析产出气中CO₂含量的动态变化特征,将气窜类型划分为明显气窜和微弱气窜两大类,明确了见气时间确定方法,建立了气窜识别判断标准。在此基础上,利用物质守恒原理分别计算注入端和产出端的气窜通道体积,并借助气窜通道体积交会图实现对气窜通道体积的校正,从而消除单井产液比例系数或井网形状因子对气窜通道体积计算结果的影响。通过对实际气窜单井的分析和计算表明,该方法具有较强的操作性和实用性,一方面实现了对气窜类型和气窜程度的定性评价,另一方面实现了对气窜通道体积和气窜通道横截面积的定量计算,为后期合理设计封堵措施和堵剂用量提供理论依据。

关键词:低渗透油藏;CO₂驱;气窜判断标准;气窜通道体积;识别方法

中图分类号:TE357.45

文献标识码:A

Study on identification method for gas channeling of CO₂ flooding in low permeability reservoirs

ZHANG Shiming

(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: During the development of CO₂ flooding in low permeability reservoirs, the most serious problem is gas channeling. At present, there are no quantitative gas channeling identification standards, and the existing calculation methods of gas channeling volume are not practical. The dynamic variation characteristics of CO₂ content in the produced gas are analyzed, and the types of gas channeling are divided into the obvious gas channeling and the weak gas channeling. The calculation method of gas breakthrough time is determined, and the identification and evaluation criteria for gas channeling are established. On this basis, gas channel volumes from the injection side and the production side are calculated respectively by using the principle of material conservation. In order to eliminate the influence of single well fluid production ratio or pattern shape factor on the gas channel volume, the gas channel volume is corrected by the gas channel volume intersection diagram. The calculation method of gas channel volume has strong operability and practicability according to the results of gas channeling wells in a tight reservoir. On one hand, this method realizes the qualitative evaluation on gas channeling type and gas channeling degree. On the other hand, this method realizes the quantitative calculation of gas channeling volume and gas channeling horizontal area. It can provide theoretical basis for reasonable design of plugging measures and dosage of plugging agent in the later development stage.

Key words: low permeability reservoirs; CO₂ flooding; gas channeling evaluation standard; gas channeling volume; identification method

CO₂驱是一种能够大幅提高原油采收率的三次采油方法,是中国低、特低渗透等致密油藏最具潜

力的一种开发方式^[1-3]。气窜是CO₂驱开发过程中面临的重大问题^[4-5]。目前,国内对气窜识别和气窜

收稿日期:2019-08-15。

作者简介:张世明(1975—),男,湖北随州人,教授级高级工程师,博士,从事油田开发理论、复杂介质油藏渗流机理及油藏数值模拟技术研究工作。E-mail: zhangshm855.slyt@sinopec.com。

基金项目:中国石化重大示范工程“胜利油田低渗透油藏CO₂驱开发技术研究及示范应用”之子课题“示范区跟踪调控与综合评价研究”(P18088-6)。

类型的认识相对统一,对气窜通道体积计算方法的研究则方兴未艾。常用的气窜识别方法有4种:PVT参数拟合图版法、井间示踪剂检测法、生产气油比经验法和微地震动态监测法^[6-8]。依据气窜位置一般将气窜类型划分为垂向窜、侧向窜和混向窜^[9-10]。气窜通道体积计算方法主要包括理论计算、数值模拟和生产动态3种类型。其中,刘义刚等从不同思路提出的理论计算方法各具代表性^[11-20],但在实际应用过程中考察因素较多、计算量偏大。数值模拟方法受人为建模水平的影响较大,在实际研究过程中很少采用。生产动态方法是最简单、快捷的方法,但现有方法的准确性相对较差。

笔者结合产出气体中CO₂含量动态变化特征,分析气窜类型及成因,明确见气时间初始点的确定方法,给出基于产出气体中CO₂含量的气窜识别方法和气窜类型划分依据。在此基础上,借鉴现有生产动态方法的研究思路,提出一种新的低渗透油藏CO₂驱气窜通道参数动态反演方法。该方法利用物质守恒原理计算注入端和产出端的气窜通道体积,通过气窜通道体积交会图对气窜通道体积进行校正,从而消除单井产液比例系数或井网形状因子等不确定因素对气窜通道体积计算结果的影响,以确保气窜通道参数动态反演结果的准确性。

1 气窜识别方法及判别标准

1.1 气窜类型划分

对于CO₂驱开发油藏,当井组中有油井出现气窜现象时,产出气体中CO₂的含量就会异常升高。因此,通过监测产出气中CO₂含量的动态变化特征,可以判断被监测油井是否发生气窜。

通过对大量实际井组CO₂含量监测结果的分析 and 统计发现,产出气体中CO₂含量的动态变化曲线通常表现出2种特征:一种表现为短时间剧烈波动,一种表现为长时间内缓慢抬升。因此,根据产出气体中CO₂含量的高低,将CO₂驱油井的气窜类型划分为2类:明显气窜(I类气窜)和微弱气窜(II类气窜)。结合实际监测动态数据和现场经验总结,以产出气体中CO₂的含量分别达到6%和0.5%,作为划明显气窜和微弱气窜的判断标准。

明显气窜通常由裂缝或连续网络通道引起,因此,产出气中CO₂含量高,易于发觉和判别。微弱气窜产出气中初始CO₂含量较低,通常不易发觉和判别,但在很长一段时间内,CO₂含量都呈现出明显上升的趋势。这表明地层中虽然没有裂缝或连续网

络通道,但开发井组间由于生产压差的作用,导致注采井间产生了贯通效应。因此,对于微弱气窜,虽然产出气中的CO₂含量不高,但是不能忽略。

1.2 见气时间判断

气窜时间是指见气时间点至气窜结束时的整个时间段,是CO₂驱气窜通道几何参数反演的一个关键因素,它将直接影响气窜体积计算结果的准确性。根据大量实际井组产出气体中CO₂含量的动态监测结果分析发现,见气时间点不能简单地认为是CO₂含量第一次达到6%或0.5%时所对应的时间点。由于气窜速度快、产出气体中CO₂含量波动大等因素,需要选取一个合理的见气时间点,作为判断稳定气窜特征及气窜类型的依据。结合产出气体中CO₂含量动态曲线的变化特征,将见气时间点的判断方法分为2种:对于单调变化型曲线,见气时间点选取为CO₂含量第一次达到6%或0.5%时所对应的时间点,气窜结束时间点选取为CO₂含量的平均值所对应的时间点;对于非单调变化型曲线,见气时间点选取为CO₂含量第一次达到6%或0.5%时所对应的时间点,气窜结束时间点选取为CO₂含量的半坡值所对应的时间点。

1.3 气窜识别判断标准

依据气窜类型划分标准和见气时间判断方法,提出气窜识别判断标准(表1)。

表1 气窜识别判断标准

Table1 Gas channeling identification and evaluation criteria		
气窜类型	气窜产生原因	气窜判别标准
明显气窜(I类)	裂缝或连续网络通道	①CO ₂ 含量大于6%; ②符合条件①的时间大于1周; ③符合条件①的点大于3个; ④变化特征符合生产历史及调整措施规律
微弱气窜(II类)	井间贯通效应	①CO ₂ 含量为0.5%~6%; ②符合条件①的时间大于20 d; ③符合条件①的点大于6个; ④变化呈上升趋势或与前期特征差异明显

2 气窜通道参数反演方法

根据物质守恒原理,利用开发过程中的实际生产动态数据,即可反演出气窜通道体积和气窜通道横截面积等气窜通道几何参数,其中气窜通道体积是研究气窜程度的重要参数,也是确定气窜通道横截面积的依据。

2.1 气窜通道体积

利用生产动态数据反演气窜通道体积时,存在2个方面的物质守恒:一是气窜通道体积与注入体积相当,二是气窜通道体积与产出体积相当。气窜通道体积物质守恒原理如图1所示。

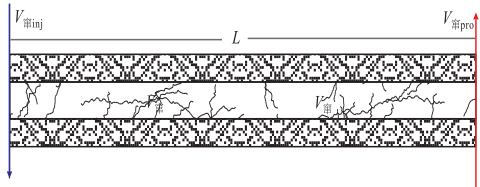


图1 气窜通道体积物质守恒原理示意

Fig.1 Schematic diagram of mass conservation of gas channeling volume

注入端计算方法 依据注入端内注入气体体积与气窜通道体积相当的物质守恒原理,气窜通道

体积的表达式可以写为:

$$V_{\text{窜inj}} = V_{\text{g注}} + V_{\text{w注}} = C \left(\frac{Q_{\text{g累注}}}{\rho_{\text{g}}} + \frac{Q_{\text{w累注}}}{\rho_{\text{w}}} \right) \quad (1)$$

其中:

$$C = \frac{q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (2)$$

产出端计算方法 依据产出端的物质守恒,气窜通道体积的表达式为:

$$V_{\text{窜pro}} = V_{\text{o产}} + V_{\text{w产}} = a \left(\frac{Q_{\text{o累产}}}{\rho_{\text{o}}} + \frac{Q_{\text{w累产}}}{\rho_{\text{w}}} \right) \quad (3)$$

当注采井均为直井时, a 为0.25;当注采井为一个直井一个水平井时, a 为0.5;当注采井均为水平井时, a 为0.5(图2)。

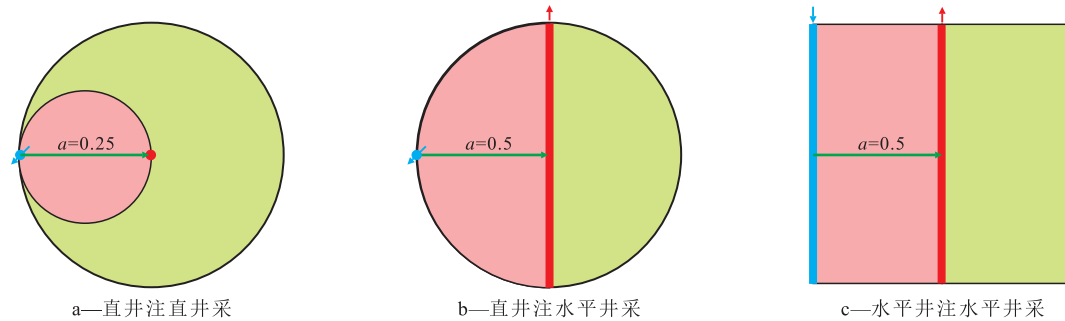


图2 注采井间流体波及范围形状因子示意

Fig.2 Shape factor of fluid swept volume between injection wells and production wells

体积校正方法 实际计算过程中,无论是利用注入端物质守恒计算得到的气窜通道体积,还是利用产出端物质守恒计算得到的气窜通道体积,都存在一定程度的计算误差。这是由于 C 和 a 是理想状态下的计算结果,没有考虑由于储层平面以及纵向非均质性导致的流体波及形状和范围的不规则性。因此,需要对注入端和产出端计算得到的气窜通道体积进行校正。

从图3可见:①落在红线下的点, $V_{\text{窜inj}} > V_{\text{窜pro}}$, 表明单井依据注入端物质守恒计算得到的气窜通道体积,大于依据产出端物质守恒计算得到的气窜通道体积。说明该井计算过程中, C 取值偏大,或者 a 取值偏小。②落在红线上的点, $V_{\text{窜inj}} < V_{\text{窜pro}}$, 表明单井依据注入端物质守恒计算得到的气窜通道体积,小于依据产出端物质守恒计算得到的气窜通道体积。说明该井计算过程中, C 取值偏小,或者 a 取值偏大。由此可见,需要对 $V_{\text{窜inj}}$ 和 $V_{\text{窜pro}}$ 进行校正,消除 C 或者 a 对气窜通道体积计算结果的影响。

以图3中任意实际点 N 为例,说明气窜通道体积的校正思路及计算方法,具体为:①以 $(0,0)$ 点为

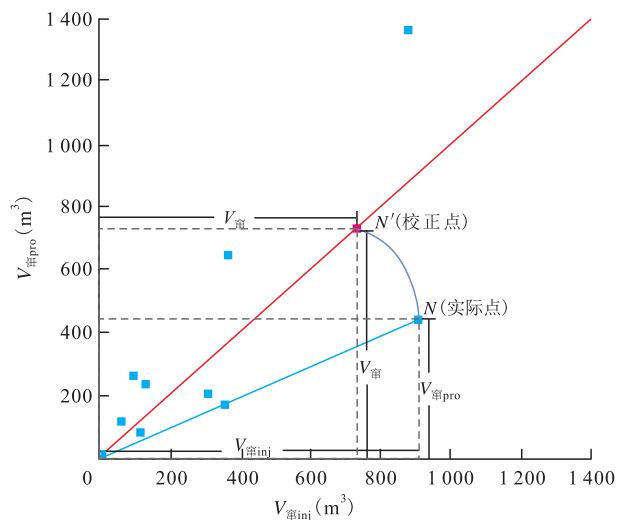


图3 气窜通道体积校正方法示意

Fig.3 Schematic diagram of correction method of gas channeling volume

起点,做一个以 $(0,0)$ 点和 N 点为斜边的直角三角形,则 $V_{\text{窜inj}}$ 和 $V_{\text{窜pro}}$ 分别为该直角三角形的两条直角边对应的数值。②根据勾股定理,得到该直角三角形斜边的数值。③以该直角三角形斜边的数值为依据,在红线上找到斜边数值相等的点 N' 。

由于 N' 点所对应 $V_{\text{窜inj}}$ 和 $V_{\text{窜pro}}$ 在数值上是相等的,消除了 C 或者 a 对气窜通道体积计算结果的影响。因此,将 N' 点作为 N 点的校正点, N' 点所在直角三角形的2条直角边所对应的数值,即为校正后的气窜通道体积。气窜通道体积的最终表达式为:

$$V_{\text{窜}} = \frac{\sqrt{V_{\text{窜inj}}^2 + V_{\text{窜pro}}^2}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

2.2 气窜通道横截面积

在气窜通道几何参数中,常用的气窜通道横截面积参数包括气窜通道孔隙横截面积和气窜通道岩石横截面积。

气窜通道孔隙横截面积 根据气窜通道体积,得到气窜通道孔隙横截面积的表达式为:

$$A_{\text{孔隙}} = \frac{V_{\text{窜}}}{L} \quad (5)$$

气窜通道岩石横截面积 根据气窜通道体积,得到气窜通道岩石横截面积的表达式为:

$$A_{\text{岩石}} = \frac{V_{\text{窜}}}{L\phi(1 - S_{\text{wc}} - S_{\text{or}} - S_{\text{gc}})} \quad (6)$$

3 应用实例

3.1 单井气窜特征判断

依据气窜识别判断标准,根据产出气中 CO_2 含量变化特征(图4),某油田1口实际气窜单井M井截至目前共发生2次气窜:1次微弱气窜和1次明显气窜。具体气窜特征判断依据见表2。

依据气窜识别判断标准给出的见气时间点确定方法,找出见气时间点对应的日期,具体确定方法及确定结果详见表3。

3.2 气窜通道几何参数计算

利用(1)—(6)式,依次求解出气窜通道几何参数。从表4可以看出:M井微弱气窜阶段虽然产出 CO_2 含量较低,但是由于产出时间长,气窜通道体积

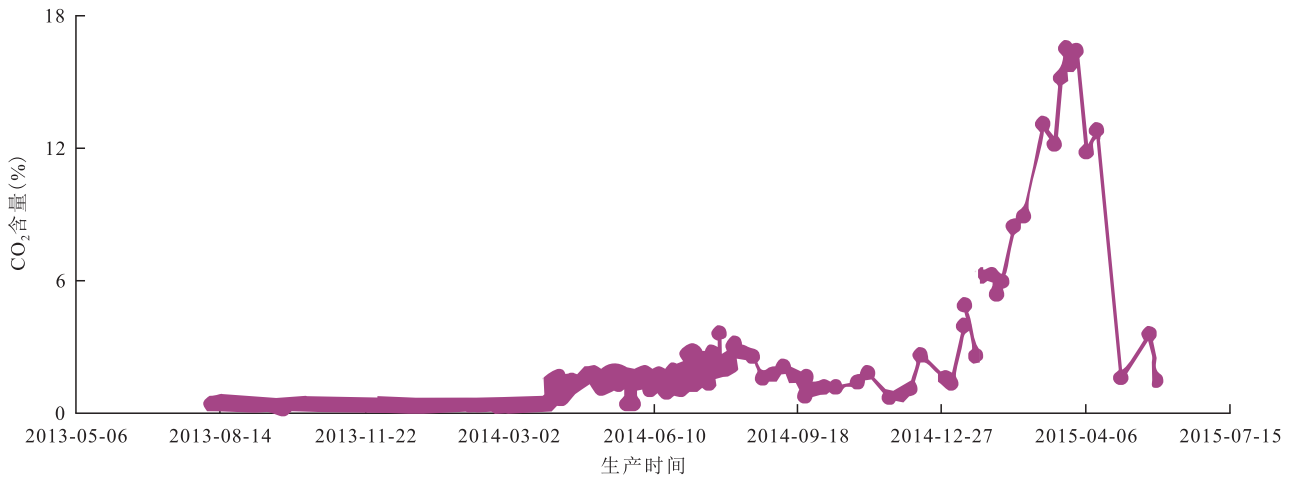


图4 M井产出气体中 CO_2 含量变化曲线

Fig.4 Variation curve of CO_2 content in produced gas in Well M

表2 M井气窜特征判断结果

Table2 Evaluation results of gas channeling characteristics in Well M

气窜阶段	气窜类型	气窜判断标准	气窜判断标准对应特征
第1段	微弱气窜 (II类)	CO_2 含量为0.5%~6%对应时间段	2014-03-28—2015-01-20
		CO_2 含量为0.5%~6%对应天数及点数	299 d, 146个数据点
		CO_2 含量为0.5%~6%时动态特征	①气窜前注 CO_2 为主;气窜期间注起泡沫液为主,注 CO_2 为辅; ②2013-06-25开始注 CO_2 ,气窜前平均注入速度为5.5 t/d,气窜期间平均注入速度为11.1 t/d; ③2013-07-19开始注起泡沫液,气窜前平均注入速度为5.9 t/d,气窜期间平均注入速度为15.6 t/d
第2段	明显气窜 (I类)	CO_2 含量大于6%对应时间段	2015-01-26—2015-04-13
		CO_2 含量大于6%对应天数及点数	78 d, 16个数据点
		CO_2 含量大于6%时动态特征	①2015-03-26停注 CO_2 ,气窜前平均注入速度为6.9 t/d,气窜期间平均注入速度为13.1 t/d; ②2015-03-29停注起泡沫液,气窜前平均注入速度为14.1 t/d,气窜期间平均注入速度为10.9 t/d

表3 M井各气窜阶段见气时间
Table3 Gas breakthrough time at each gas channeling stage in Well M

气窜阶段	CO ₂ 含量峰值(%)	CO ₂ 含量半坡值(%)	CO ₂ 含量平均值(%)	见气时间选取依据	CO ₂ 含量实际值(%)	见气时间点日期
第1段	4.67	2.34	1.44	非单调/半坡值	2.30	2014-08-03
第2段	16.27	8.14	10.93	非单调/半坡值	8.37	2015-02-16

表4 M井气窜通道几何参数计算结果
Table4 Inversion results of gas channeling geometric parameters in Well M

气窜阶段	气窜类型	$C(f)$	$a(f)$	$L(m)$	$V_{\text{窜inj}}(m^3)$	$V_{\text{窜pro}}(m^3)$	$V_{\text{窜}}(m^3)$	$A_{\text{孔隙}}(m^2)$	$A_{\text{岩石}}(m^2)$
第1段	微弱(Ⅱ类)	0.125	0.25	760	364.81	641.42	521.78	0.69	26.30
第2段	明显(Ⅰ类)	0.126	0.25	760	355.58	172.05	279.32	0.37	14.08
合计					720.39	813.47	801.10	1.05	40.39

和气窜通道横截面积的反演结果均显著高于明显气窜的反演结果,前者约为后者的两倍。

由此可见,虽然微弱气窜的气窜特征不明显,但是由于已经存在了井间贯通效应,且生产时间较长,导致最终产生的气窜量很大,因此微弱气窜阶段不能忽略。鉴于在微弱气窜阶段的产出气体中,CO₂的含量在很长时间内都处于相对较低的状态,不易察觉已经发生了气窜。所以,借助笔者所建立的气窜识别判别标准来进行气窜识别,一方面实现了对气窜类型和气窜程度的定性评价,另一方面实现了对气窜通道体积和气窜通道横截面积的定量计算。

4 结论

根据产出气体中CO₂含量的高低,将CO₂驱发生气窜油井的气窜类型划分为明显气窜(Ⅰ类气窜)和微弱气窜(Ⅱ类气窜)两类。以产出气体中CO₂的含量分别达到6%和0.5%,作为划分明显气窜和微弱气窜的判断标准。

明确了见气时间的定义,给出了见气时间点的判断方法。对于单调变化型曲线,见气时间点为气窜期间内CO₂含量的平均值所对应的时间点;对于非单调变化型曲线,见气时间点为气窜期间内CO₂含量的半坡值所对应的时间点。

利用物质守恒原理得到注入端和采出端的气窜通道体积,借助气窜通道体积交会图,消除单井产液比例系数或井网形状因子对气窜通道体积计算结果的影响,实现对气窜通道体积的校正,得到合理的气窜通道体积表达式。

通过对实际气窜单井M井的分析和计算表明,该方法具有较强的操作性和实用性,为后期合理设

计封堵措施和堵剂用量提供理论依据。

符号解释

$V_{\text{窜inj}}$ ——根据注入端计算得到的气窜通道体积, m³;
 $V_{\text{窜pro}}$ ——依据产出端计算得到的气窜通道体积, m³; L ——气窜井与注气井之间的井距, m; $V_{\text{g注}}$ ——从开始注气至气窜见气时间点前注入的CO₂体积, m³; $V_{\text{w注}}$ ——从开始注气至气窜见气时间点前注入的起泡液体积, m³; C ——单井产液比例系数,为从开始注气至气窜见气时间点前单井平均产液速度 q_i 占注气井组总产液速度的比例, f ; $Q_{\text{g累注}}$ ——从开始注气至气窜见气时间点前的CO₂累积注入量, t; ρ_{g} ——注入的CO₂气体地下密度, g/cm³; $Q_{\text{w累注}}$ ——从开始注气至气窜见气时间点前的起泡液累积注入量, t; ρ_{w} ——注入的起泡液或产出水的地下密度, g/cm³; $V_{\text{o产}}$ ——从开始注气至气窜见气时间点前产出的原油体积, m³; $V_{\text{w产}}$ ——从开始注气至气窜见气时间点前的产出水体积, m³; a ——井间平面波及形状因子,为油水井间波及面积与平面径向流波及面积的比值, f ; $Q_{\text{o累产}}$ ——从开始注气至气窜见气时间点前产出的原油累积产量, t; $Q_{\text{w累产}}$ ——从开始注气至气窜见气时间点前的累积产水量, t; ρ_{o} ——地层原油密度, g/cm³; $V_{\text{窜}}$ ——气窜通道体积, m³; $A_{\text{孔隙}}$ ——气窜通道孔隙横截面积, m²; $A_{\text{岩石}}$ ——气窜通道岩石横截面积, m²; ϕ ——储层平均孔隙度, f ; S_{wc} ——束缚水饱和度, f ; S_{or} ——残余油饱和度, f ; S_{gc} ——残余气饱和度, f 。

参考文献

- [1] 王丽, 卜祥福, 伍锐东. CO₂混相驱提高原油采收率的研究现状及发展前景[J]. 石油化工应用, 2010, 29(2): 4-7.
WANG Li, BU Xiangfu, WU Ruidong. Research status and development prospects of CO₂ miscible flooding enhanced oil recovery [J]. Petrochemical Industry Application, 2010, 29(2): 4-7.
- [2] 涂军, 赵楠, 陆晓峰, 等. 混相驱提高石油采收率技术的应用与发展[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(17): 81-82.
TU Jun, ZHAO Nan, LU Xiaofeng, et al. Application and development of miscible flooding to improve oil recovery [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, 36(17): 81-82.

- [3] YU Hongwei, SONG Xinmin, YANG Siyu, et al. Experimental and numerical simulation study on single layer injectivity for CO₂ flooding in low permeability oil reservoir [C]. SPE 144042, 2011.
- [4] 毕卫宇, 张攀峰, 章杨, 等. 低渗透油田用 CO₂ 气溶性泡沫体系研发及性能评价 [J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(6): 71-77.
BI Weiyu, ZHANG Panfeng, ZHANG Yang, et al. Development and performance evaluation on CO₂-soluble surfactant foam system for low permeability reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(6): 71-77.
- [5] 万国赋, 刘同敬, 祝奎, 等. 低渗透油藏 CO₂ 驱 SF₆ 微量气体示踪实验研究 [J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(5): 141-145.
WAN Guofu, LIU Tongjing, ZHU Kui, et al. Experiment of micro-size amount SF₆ tracer for CO₂ flooding in low permeability reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011, 33(5): 141-145.
- [6] 袁玉凤, 宫汝祥, 张伟, 等. 海上稠油油藏多元热流体吞吐开采气窜规律研究 [J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2018, 20(4): 49-52, 73.
YUAN Yufeng, GONG Ruxiang, ZHANG Wei, et al. Research on gas channeling law of offshore heavy oil reservoir multi-component thermal fluid huff & puff development [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2018, 20(4): 49-52, 73.
- [7] 刘东, 张久存, 王永红, 等. 凝析气藏循环注气气窜判别方法及应用 [J]. 天然气勘探与开发, 2008, 31(4): 27-29, 36.
LIU Dong, ZHANG Jiucun, WANG Yonghong, et al. Gas channeling discriminant methods of cyclic gas injection in condensate gas reservoir and its application [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2008, 31(4): 27-29, 36.
- [8] 刘东, 张久存, 张明亮. 凝析气井气窜后的产能特征变化及调整措施效果评价 [J]. 新疆石油天然气, 2008, 4(4): 81-84.
LIU Dong, ZHANG Jiucun, ZHANG Mingliang. The influence of gas breakthrough on productivity feature of condensate gas well [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2008, 4(4): 81-84.
- [9] 李承龙. 特低渗透油藏二氧化碳驱气窜影响因素及规律 [J]. 特种油气藏, 2018, 25(3): 82-86.
LI Chenglong. Gas channeling influencing factors and patterns of CO₂-flooding in ultra-low permeability oil reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(3): 82-86.
- [10] 赵伦, 赵晓亮, 宋珩, 等. 凝析气顶油藏气顶气窜研究——以让纳若尔Γ北油藏为例 [J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(4): 77-79.
ZHAO Lun, ZHAO Xiaoliang, SONG Heng, et al. Gas breakthrough research of condensate gas-cap reservoir—case of Zanaro Γ reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(4): 77-79.
- [11] 刘义刚, 王传军, 孟祥海, 等. 基于传质扩散理论的高渗油藏窜流通道量化方法 [J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(4): 393-398.
LIU Yigang, WANG Chuanjun, MENG Xianghai, et al. Quantitative method of channeling-path by diffusion theory in high permeability reservoir [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(4): 393-398.
- [12] 陈存良, 牛伟, 郭龙飞, 等. 基于井间动态连通性计算低渗油藏窜流通道 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(26): 41-44.
CHEN Cunliang, NIU Wei, GUO Longfei, et al. Characterization of thief zones using interwell dynamic connectivity in low permeability reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(26): 41-44.
- [13] 汪庐山, 关悦, 刘承杰, 等. 利用油藏工程原理描述优势渗流通道的新方法 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(5): 1 155-1 159.
WANG Lushan, GUAN Yue, LIU Chengjie, et al. A method of describing preferential flowing path by reservoir engineering principles [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(5): 1 155-1 159.
- [14] 刘慧卿, 张红玲, 王书林, 等. 井楼油田注汽井调剖参数优化设计方法研究 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(6): 55-58.
LIU Huiqing, ZHANG Hongling, WANG Shulin, et al. Optimization design of profile control parameters for steam injection wells in Jinglou Oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2006, 30(6): 55-58.
- [15] 张红玲, 刘慧卿, 王晗, 等. 蒸汽吞吐汽窜调剖参数优化设计研究 [J]. 石油学报, 2007, 28(2): 105-108.
ZHANG Hongling, LIU Huiqing, WANG Han, et al. Optimization design of profile control parameters for steam stimulation wells [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 105-108.
- [16] 郑强, 刘慧卿, 李芳, 等. 油藏注水开发后期窜流通道定量识别方法 [J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 92-95.
ZHENG Qiang, LIU Huiqing, LI Fang, et al. Quantitative identification of breakthrough channel in water flooding reservoirs at later stage [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 92-95.
- [17] 郑强, 刘慧卿. 水驱油藏注采井连通体积计算 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12(28): 7 194-7 197.
ZHENG Qiang, LIU Huiqing. Calculating the interwell connected volume in waterflooding reservoirs [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(28): 7 194-7 197.
- [18] 郑强, 刘慧卿, 李芳, 等. 蒸汽驱后汽窜通道定量描述 [J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(6): 684-688.
ZHENG Qiang, LIU Huiqing, LI Fang, et al. Quantitative description of steam channels after steam flooding [J]. Scientia Sinica Technologica, 2013, 43(6): 684-688.
- [19] 李承龙, 韩昊. 用灰色模糊综合评估法识别注气初期 CO₂ 气窜通道 [J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(6): 116-120.
LI Chenglong, HAN Hao. Identification of the gas channeling by grey-fuzzy complex judging method at the early stage of CO₂ flooding [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(6): 116-120.
- [20] 赵传峰, 曹博文, 邓伟兵, 等. 考虑重力超覆的气窜通道体积计算方法 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(14): 146-151.
ZHAO Chuanfeng, CAO Bowen, DENG Weibing, et al. Gravity-override-driven volume calculation of gas channeling paths in gas-flooded reservoirs [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(14): 146-151.