

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.09.009

## 多孔介质中示踪剂渗流的油藏特征色谱效应

刘同敬<sup>1a,1b,2,3</sup>, 姜宝益<sup>4</sup>, 刘睿<sup>5</sup>, 张新红<sup>6</sup>, 谢晓庆<sup>7</sup>

- (1. 中国石油大学(北京) a. 提高采收率研究院; b. 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249;  
2. 中国石油天然气集团公司 三次采油重点实验室, 北京 102249; 3. 北京市温室气体封存与资源化利用重点实验室, 北京 102249; 4. 中国华电集团科学技术研究总院有限公司, 北京 100035;  
5. 中国石油大学(北京), 北京 102249; 6. 中国原子能科学研究院同位素研究所, 北京 102413;  
7. 中海油研究总院, 北京 100027)

**摘要:**国内外矿场实践证明,目前油田井间示踪监测解释中存在解释模型部分明显偏离了合理的范畴,存在考虑因素过于单一、片面的问题,不能很好适应多孔介质复杂渗流的定量化描述,为此设计完成了示踪剂微观可视化实验和天然长岩心驱替实验,定性、定量的分析多孔介质示踪剂渗流特征,并提出了示踪剂渗流具有的油藏特征色谱效应。示踪剂微观可视化实验显示:油藏特征色谱效应的基础是存在的,即小分子示踪剂可以进入束缚水、不连通孔隙及低渗团块。天然长岩心驱替实验显示:小尺寸非均质强的天然长岩心,水的突进和绕流明显,油藏特征色谱效应明显,水的运移速度和示踪剂孔隙运移速度差距大。对井间示踪剂监测的量化解释和定性认识具有极其重要的指导意义。

**关键词:**示踪剂; 色谱效应; 多孔介质渗流; 实验; 可视化; 天然长岩心

**中图分类号:** TE133

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2013)09-058-06

## Reservoir characteristics of chromatographic effect of tracer flow in porous medium

LIU Tongjing<sup>1a,1b,2,3</sup>, JIANG Baoyi<sup>4</sup>, LIU Rui<sup>5</sup>, ZHANG Xinhong<sup>6</sup>, XIE Xiaoping<sup>7</sup>

- (1a. EOR Research Institute; 1b. Key Laboratory of Petroleum Engineering, Ministry of Education, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;  
2. CNPC Key Laboratory of Tertiary Oil Recovery, Beijing 102249, China;  
3. Beijing Key Laboratory of GHG Storage and Utilization, Beijing 102249, China;  
4. China Huadian Institute of Science & Technology, Beijing 100035, China;  
5. China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;  
6. Department of Isotope, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;  
7. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

**Abstract:** Oil field practices have proved that the part of the interpretation model significantly deviated from the reasonable scope in interwell tracer interpretation. It is considered too single and unilateral, and can not adapt to the complicated seepage flow in porous medium and the quantitative description. Therefore, after completed the design of tracer microscopic visualized experiment and natural long core displacement experiment, we try to

**收稿日期:** 2013-04-18

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(10802079); 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05009; 2011ZX05054; 2011ZX05011); 中石油创新基金资助项目(2009D-5006-02-01)

**作者简介:** 刘同敬(1972-), 男, 博士, 主要从事油气田开发工程相关的研究和教学工作, (E-mail) ltjhdpu@sohu.com。

qualitative and quantitative analysis the tracer characteristics and propose the reservoir characteristic of chromatographic effect of the tracer flow. The tracer microscopic visualization experiments show that the foundation of reservoir characteristics of the chromatographic effect exists, that is small molecular tracers can enter the irreducible water, unconnected pores and low permeability clumps. The natural long core displacement experiment shows that water breakthrough and flowing around are significantly in the small size of non-homogenous natural long core, and reservoir characteristic of chromatographic effect is also significantly, the migration speed between water and tracer is bigger. That must be considered in interwell tracer interpretations. It has an extremely important guiding significance for quantitative interpretation and qualitative understanding of interwell tracer monitoring.

**Key words:** tracers; chromatographic analysis; flow in porous medium; experiment; visualization; natural long core displacement experiment

井间示踪方法能够监测井间、层间,尤其是层内突出的非均质特征和驱替状况,已经在国内外各个油田得到了现场推广和应用<sup>[1-6]</sup>。随着中国二次采油的推广,三次采油的普及,以及四次采油的矿场试验,均对示踪剂监测提出了更高的量化解释要求,使井间示踪方法成为能够满足或基本满足精细化开发的支撑手段之一。近年来,国内外学者对于示踪剂的研究主要集中在特殊矿场应用和示踪曲线拟合算法的改进上,例如,Aymen Mechergui等将挪威Snorre油田高矿化度和高温影响的因素考虑到示踪剂的解释过程中<sup>[7]</sup>;E. Stalgorova等利用随机运动粒子跟踪模型对天然裂缝油藏进行示踪剂运移解释<sup>[8]</sup>;Randi Valestrand等建立基于EnKF的示踪剂自动拟合方法<sup>[9-10]</sup>;刘同敬、张新红和郭文敏等将示踪方法应用到聚驱后和特高含水等复杂条件下的油藏<sup>[11-19]</sup>。但是,由于多孔介质渗流的复杂性,岩石微观孔喉结构特征对示踪剂传质扩散影响往往被忽略,导致示踪剂产出曲线的解释分析结果与实际出现偏差,存在解释模型部分明显偏离的合理的范畴,不能很好的适应多孔介质复杂渗流的定量化描述。

因此,为了直观的观察微观多孔介质传质扩散过程和机理,开展了微观可视化实验和天然长岩心常规驱替实验,定性和定量的描述了油藏特征色谱效应,即由于多孔介质中存在束缚水、不连通孔隙、低渗团块以及吸附作用,示踪剂在多孔介质中的混合作用明显,有效渗流截面积大,因此示踪剂的孔隙运移速度比水慢。微观可视化实验定性的验证低渗团块的影响明显,从流动的角度存在明显的绕流;天然长岩心常规驱替实验验证了由于实际岩心的小尺寸非均质,绕流加强,导致油藏特征色谱效应增强。

## 1 示踪剂微观可视化实验

应用激光刻蚀的微观孔隙模型,通过室内微观驱替渗流实验,研究多孔介质中小分子示踪剂的微观渗流机理和动态特征。材料主要包括:①玻璃仿真微观模型,尺寸5 cm×5 cm,渗透率10~50 μm<sup>2</sup>,孔喉半径30~200 μm,孔隙体积约为0.149 mL,根据实际岩心的电镜扫描,通过激光刻蚀得到。②示踪剂,为了在实验过程中便于观察示踪剂的渗流情况,选用蒸馏水配制质量浓度为1%的蓝色亚甲基蓝溶液作为示踪剂。③聚合物,为了突出聚合物的封堵效果,选用中高分子量聚合物(分子量为1 800万),溶液质量浓度为1 000 mg/L(蒸馏水配制)。④注入水,注入水为蒸馏水。驱替速度0.016 mL/min;实验温度为常温25℃。

### 1.1 实验步骤

- 1)模型抽空饱和水;
- 2)称重法测模型孔隙体积;
- 3)进行第一次水驱(5 PV);
- 4)第一次注入示踪剂段塞(5 PV),模拟仅存在水相条件下示踪剂的运移过程;
- 5)注入与水流量不同的物质——聚合物段塞(5 PV);
- 6)转第二次水驱(2 PV);
- 7)第二次注入示踪剂段塞(5 PV),模拟孔隙中存在与水流量不同的物质(例如油)时,示踪剂的运移过程。

### 1.2 实验现象

#### 1.2.1 第一次注入示踪剂段塞

水驱过程中注入示踪剂段塞,由于浓度梯度、渗流的存在,多孔介质中发生传质扩散作用。由于多孔介质的非均质,导致示踪剂运移具有如下特征:

1) 图 1(b) 可以看出, 示踪剂运移方向上, 质点渗流路线是一条弯曲程度很高的曲线, 表明实际渗流过程中, 迂曲度较大(黑色箭头为实际渗流路径, 白色箭头为两点间直线渗流路径, 两者之比即迂曲度), 有助于多孔介质的传质和扩散, 且示踪剂存在孔道级别上的“水动力滞留”, 如图 1(b) 框中, 连通孔隙周围呈现蓝色, 但中心仍呈现白色。随着注入的进行, 这些夹在稍大孔道中间的小孔道将会被示踪剂扩散到。

2) 由图 1(b)~图 1(c) 可以看出, 示踪剂运移开始时首先沿渗透率大的大孔隙和粗喉道向前突破, 在孔道的交叉点, 显示出很强的混合作用, 并且不同方向上的传质扩散速度不同, 有相对主要的传质扩散方向, 但是微观均质(相对实际地层多孔介质)模型中, 由于多孔介质的网络结构, 造成示踪剂边移动边产生横向传质扩散, 随着时间的推移, 浓度前缘横向扩展明显, 同时, 随着注入的进行, 示踪剂前缘变得越来越不规则, 逐步由孔道级别的“水动力滞留”扩展到多孔道级别的“水动力滞留”, 说明了随着示踪剂在多孔介质中的运移, 其绕流的规模有可能会越来越大。

3) 由图 1(c)~图 1(d) 可以观察到明显的多孔道级别上的“水动力滞留”, 由于微观非均质造成了很强的绕流效应, 但是随着注入的进行, 分子扩散以及机械弥散, 使得示踪剂可以进入水动力滞留区、束缚水、不连通孔隙和低渗团块。

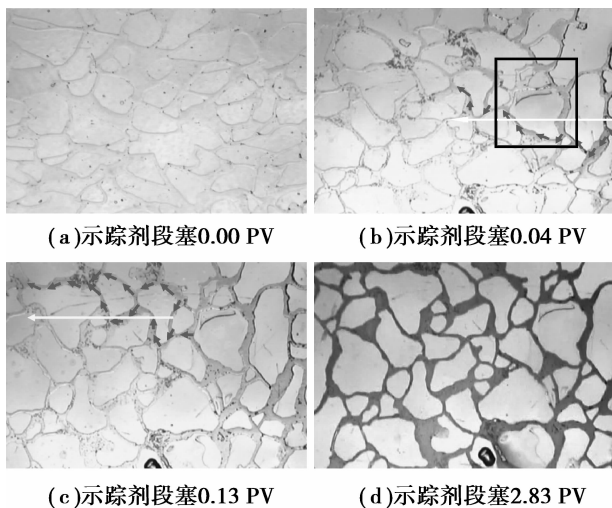


图 1 第一次注入示踪剂阶段模型图片

### 1.2.2 聚驱与第二次水驱阶段

注聚阶段, 由于聚合物溶液具有黏度大、分子量大、水动力半径大等特点, 所以聚合物溶液驱替示踪

剂水溶液的过程中, 可以看到以下特征:

1) 图 2(b)~图 2(e) 可以看到, 聚合物存在明显的不可入孔隙体积, 包括较细的孔道和喉道, 与水驱相比, 聚合物溶液能够形成更大尺寸的绕流区域, 形成“水动力滞留”的现象(图 2 框中和箭头指示部分), 同时, 较细喉道的控制作用比水驱过程中要强很多, 表现为示踪剂在相当长一段时间内维持较高浓度。

2) 图 3(c)~图 3(d) 与水驱对比, 可以看到聚合物溶液流动过程中, 微观前缘较水驱稳定, 但是具有明显的窜流通道特征, 短期内横向扩展的宽度小, 同时, 验证了多孔介质传质扩散中的“凝胶色谱效应”, 即凝胶大分子优先进入大孔道, 不能进入部分小孔道, 造成在注入凝胶数量小于孔隙体积的情况下, 出口已经产出, 显示了小分子的示踪剂比大分子的聚合物到达的范围更大, 渗流速度会低于聚合物的渗流速度。

3) 通过对比, 认为大分子的聚合物改善了主流通道上的非均质, 使得驱替前缘更为稳定, 但是也造成了更多、更大尺寸上的绕流效应。这 2 种作用同时存在。

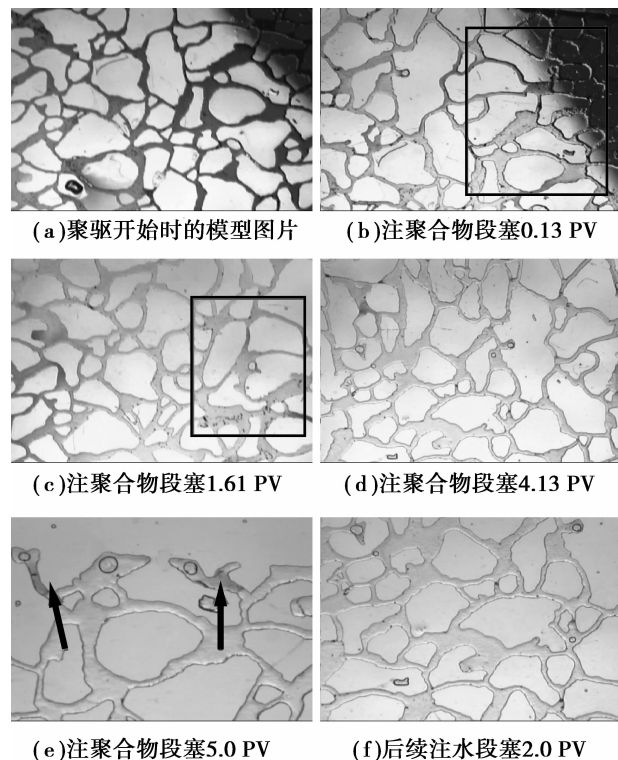


图 2 聚驱与第二次水驱阶段残留示踪剂特征图片

### 1.2.3 聚驱后第二次注入示踪剂段塞

在聚驱后的后续水驱过程中注入示踪剂段塞,

用来反映孔隙中存在与水流量不同的物质(例如油)时,示踪剂的传质扩散规律特征:

1)由于聚合物溶液的滞留,造成聚驱后多孔介质多孔道级别的非均质有所加强,表现为示踪剂绕流的最大尺寸增加,在绕流区边缘示踪剂传质扩散能力有所降低。

2)由于聚合物溶液的残留,造成部分单孔道级别的传质扩散也受到影响。

3)由于示踪剂的油藏特征色谱效应,随着输入过程的延续,示踪剂最终进入了几乎所有的连通孔隙中。

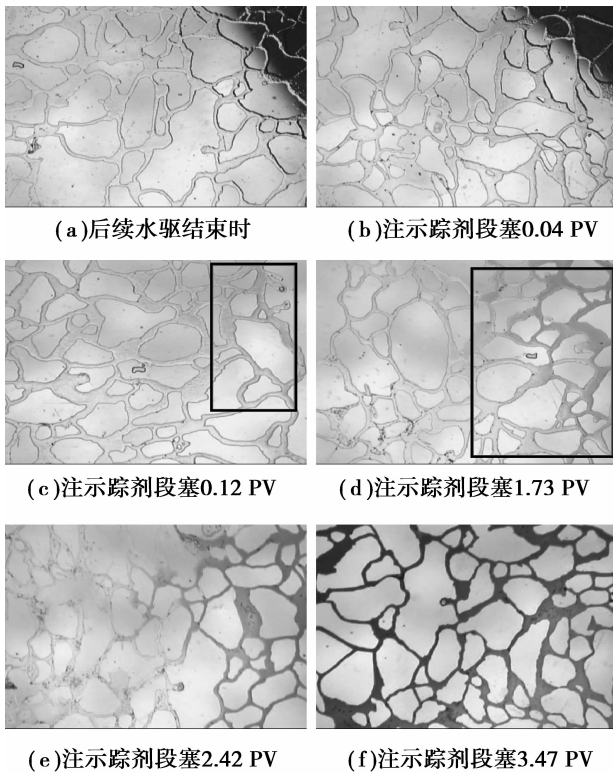


图3 聚驱后示踪剂段塞阶段模型图片

### 1.3 实验分析

1)对于示踪剂运移,微观上具有明显的绕流效应,且随着示踪剂在多孔介质中的推进,绕流尺寸明显增大,因此,单个孔道的迂曲度、多个孔道的网络结构产生的示踪剂绕流效应在数学建模过程中必须加以考虑。

2)随着示踪剂向前推进,其浓度前缘由于混合作用明显,浓度梯度减小,且前缘不再规则,同时横向宽度明显增大,并且,由于分子扩散以及机械弥散作用,即使在注入封堵效果很好的聚合物后,多孔介质中的束缚水、不连通孔隙和低渗团块由于混合作

用也能逐步被示踪剂扩散到,验证的油藏特征色谱效应存在的基础。

## 2 天然长岩心常规驱替实验

为了确认并量化油藏特征色谱效应的影响程度,利用不同渗透率的天然长岩心(直径2.5 cm,长度25 cm左右),进行不同注入速度下天然长岩心常规驱替实验研究。材料主要包括:天然长岩心3块,50 mg/L的 $SCN^-$ 溶液若干、地层水若干。实验温度:地层温度 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 。操作参考国家标准SY5835-97。

### 2.1 实验现象

分别对3块来自同一区块同一层系的天然岩心进行了驱替实验,并对产出液的浓度进行了测定,得到了如图4所示的驱替结果。

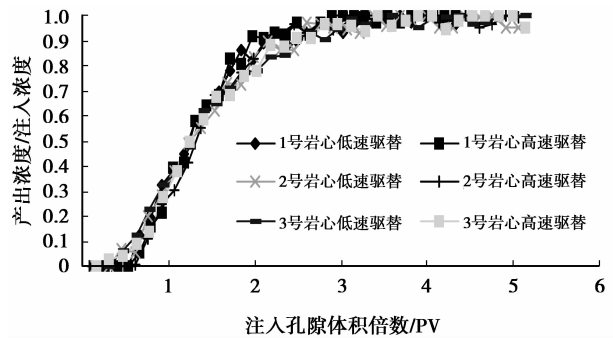


图4 一维天然长岩心驱替实验结果图

根据测试结果,分析多孔介质中示踪剂和水的运移速度,速度对比曲线见图5。

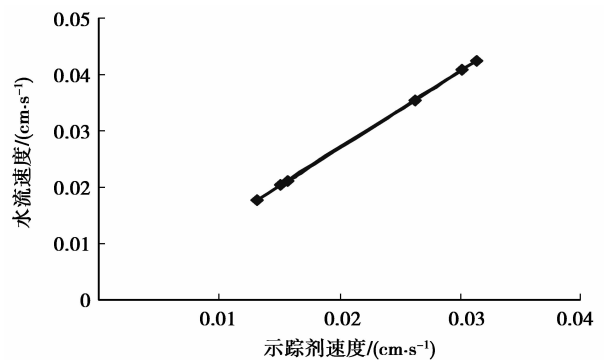


图5 示踪剂与水运移速度对比曲线

并利用一维流动情况下,考虑吸附、束缚水和不流动孔隙的一维单重介质示踪剂传质扩散改进基础数学模型(1),对测试曲线拟合,见图6。

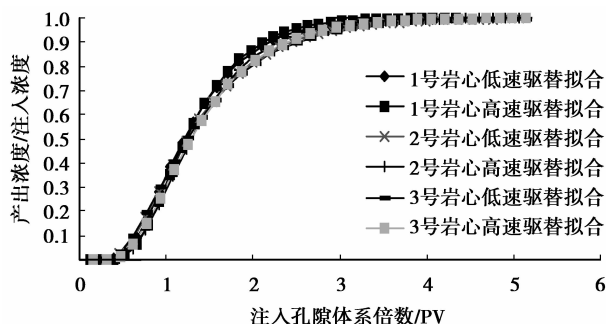


图6 一维天然长岩心驱替结果拟合图

得到岩心的传质扩散混合系数和混合常数,见表1。

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{[\varphi(1 - S_o) + a(1 - \varphi)\rho_r]}{\varphi_f(1 - S_o - S_{wc})} \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (1)$$

$$D_L = \frac{D_m}{l_L \varphi} + \alpha_L u^{1.2}. \quad (2)$$

式中: $D_L$ 为传质扩散混合系数, $\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\alpha_L$ 为混合常数, $\text{cm}$ ;  $S_{wc}$ 为束缚水饱和度, $f$ ;  $\varphi$ 为孔隙度; $\varphi_f$ 为流动孔隙度; $S_o$ 为剩余油饱和度, $f$ ;  $C$ 为示踪剂浓度, $\text{mg}/\text{L}$ ;  $a$ 为吸附常数,由实验确定; $u$ 为流动速度, $\text{cm}/\text{s}$ ;  $\rho_r$ 为岩石密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $t$ 为测试时间, $\text{s}$ ;  $x$ 为距离, $\text{cm}$ ;  $D_m$ 为分子扩散系数, $\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $l_L$ 为岩石迂曲度,无因次。

表1 一维天然长岩心驱替实验结果

No.	渗透率/ mD	流量/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$D_L$ / ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\alpha_L$ / cm
1	1 570	0.020	0.037	2.8
	1 570	0.040	0.060	2.3
2	610	0.020	0.053	3.5
	610	0.040	0.077	2.6
3	230	0.020	0.063	4
	230	0.040	0.096	3.1

## 2.2 实验分析

1)随着渗透率的减小,注入速度接近的情况下,混合系数增大,混合常数增大。

2)注入速度增加,压差大,启动的孔隙数量较少,孔隙网络“窜通效应”减小,混和系数增大,混合常数稍有减小。

3)受束缚水、不流动孔隙、吸附的影响,示踪剂

流动速度明显低于水的流动速度,呈现出一种特殊的色谱效应,即油藏特征色谱效应。

## 3 结语

通过示踪剂微观可视化实验认识了油藏特征色谱效应的基础是存在的,即小分子的示踪剂可以进入束缚水、不连通孔隙和低渗团块;通过天然长岩心驱替实验明确和量化了油藏色谱效应的影响程度。小尺寸非均质强的天然长岩心,水的突进和绕流明显,油藏特征色谱效应明显。因此,在实际的现场示踪剂解释分析过程中,示踪剂渗流所具有的油藏特征色谱效应是不能被忽略的。

## 参考文献:

- [1] 姜汉桥,刘同敬. 示踪剂测试解释原理与矿场实践[M]. 东营:石油大学出版社,2001.
- [2] Zemel B. Tracers in the oil field [M]. New York: Elsevier Science,1995.
- [3] Ohno, Kenji, Nanba, et al. Analysis of an interwell tracer test in a depleted heavy-oil reservoir [J]. SPE Formation Evaluation,1987,2(4):487-494.
- [4] Allison S B, Pope G A, Sepehrnoori K. Analysis of field tracers for reservoir description [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1991, 5 (2): 173-186.
- [5] Gupta A D, Lake L W, Pope G A, et al. Type-curve approach to analyzing two-well tracer tests [J]. SPE Formation Evaluation,1995,10(1):40-48.
- [6] Du Y, Guan L. Interwell tracer tests: lessons learned from past field studies [J]. Society of Petroleum Engineers,2005;1-9.
- [7] Mechergui A, Morel D. Feasibility study of single well tracer test for high salinity and high temperature reservoirs [C]// Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition, November 11-14, 2012, Abu Dhabi, UAE. [S. l.]; SPE, 2012; 161618.
- [8] Stalgorova E, Babadagli T. Field-scale modeling of tracer injection in naturally fractured reservoirs using the random-walk particle-tracking simulation [J]. SPE Journal, 2012, 17(2): 580-592.
- [9] Valestr R, Sagen J, Navdal G, et al. The effect of including tracer data in the Ensemble-Kalman-Filter approach [J]. Society of Petroleum Engineers, 2010, 15(2):454-470.
- [10] Huseby O, Sagen J, Wangen M, et al. Planning and interpretation of offshore-field tracer tests using accurate

- and refined tracer simulations [C]// Proceedings of the SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, December 1-3, 2010, Lima, Peru. [S. l.]:SPE,2010:139170.
- [11] 郭文敏,刘同敬,姚友龙,等. 聚驱井含水率特征曲线在示踪剂综合解释技术中的应用[J]. 同位素,2009,22(4):226-229.
- GUO Wenmin, LIU Tongjing, YAO Youlong, et al. Application of polymer flooding water cut curve in tracer interpretation technology [J]. Journal of Isotopes,2009,22(4):226-229.
- [12] 张新红,刘同敬,张培信,等. 塔里木油田井间示踪测试综合解释[J]. 同位素,2005,18(1/2):9-14.
- ZHANG Xinhong, LIU Tongjing, ZHANG Peixin, et al. The interwell tracer test interpretation in the Tarim Donghe oli field [J]. Journal of Isotopes,2005,18(1/2):9-14.
- [13] 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.
- [14] 葛家理. 现代油藏渗流力学原理[M]. 北京:石油工业出版社,2001.
- [15] 程庆甫,胡景伍,赵强,等. 井间示踪技术在油水井监测中的应用[J]. 油气井测试,2003,12(6):46-47.
- CHENG Qingfu, HU Jingwu, ZHAO Qiang, et al. Application of the tracer technique between wells in monitoring the oil and water wells [J]. Well Testing, 2003,12(6):46-47.
- [16] 冯宝峻,杜兴家,于采. 井间示踪技术在大庆油田的应用[J]. 大庆石油地质与开发,1996,15(3):49-52.
- FENG Baojun, DU Xingjia, YU Cai. Application of interwell tracer technology in Daqing Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oil Field Development in Daqing,1996,15(3):49-52.
- [17] 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(Sup):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,China,1994,18(Sup):1-7.
- [18] 丁山,周芮莹,闫素芝,等. 井间示踪剂监测技术及其在文25东块的应用[J]. 油气井测试,2005,14(5):67-70.
- DING Shan, ZHOU Ruiying, YAN Suzhi, et al. Interwell tracer monitor tech and its application in Wen25 north block [J]. Well Testing. 2005,14(5):67-70.
- [19] 杨士荣,刘同敬. 微量物质井间示踪测试技术简介[J]. 测井技术,2007,31(5):408-412.
- YANG Shirong, LIU Tongjing. Brief introduction on interwell tracer test with micro-materials [J]. Well Logging Technology,2007,31(5):408-412.

(编辑 郑洁)