

一种识别储层非均质性的双示踪剂方法

姚传进^{1,2,3,4}, 雷光伦¹, 薛世峰², 赵宇石^{4,5}, STEENHUIS T S³, CATHLES L M^{4,5}

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 3. 美国康奈尔大学生物与环境工程系, 纽约伊萨卡 14853; 4. 美国康奈尔大学 KAUST-CU 能源和可持续发展研究中心, 纽约伊萨卡 14853; 5. 美国康奈尔大学地球与大气科学系, 纽约伊萨卡 14853)

摘要:根据非均质多孔介质渗流与示踪剂迁移理论,提出一种识别储层非均质性的双示踪剂方法,通过构建考虑层间绕流的非均质单管模型,对双示踪剂方法进行试验验证。该方法利用两种扩散系数存在明显差别的示踪剂(离子型化学示踪剂溴化钾 KBr 和颗粒型荧光标记示踪剂荧光碳纳米颗粒 Cdot)分别反映非均质多孔介质的总孔隙体积和非均质多孔介质内流动区的孔隙体积,识别储层非均质性和评价注入水的波及状况。结果表明:均质条件下 KBr 和 Cdot 的穿透曲线基本重合,而非均质条件下 KBr 和 Cdot 的穿透曲线产生分离,且 KBr 和 Cdot 在多孔介质中的流体置换率或改变率 f_v 值相差较大;在一定的注入速率条件下,通过分析 KBr 和 Cdot 的产出规律及其 f_v 值的变化规律,可识别储层非均质性和评价注入水的波及状况,验证了双示踪剂方法的可行性和有效性。

关键词:储层非均质性; 双示踪剂方法; 对流-扩散系统; 穿透曲线; 非均质单管模型; 体积波及系数

中图分类号:TE 312 **文献标志码:**A

引用格式:姚传进,雷光伦,薛世峰,等.一种识别储层非均质性的双示踪剂方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(1):108-115.

YAO Chuanjin, LEI Guanglun, XUE Shifeng, et al. A dual-tracer method for assessment of reservoir heterogeneity[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(1): 108-115.

A dual-tracer method for assessment of reservoir heterogeneity

YAO Chuanjin^{1,2,3,4}, LEI Guanglun¹, XUE Shifeng², ZHAO Yushi^{4,5}, STEENHUIS T S³, CATHLES L M^{4,5}

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
3. Department of Biological and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca NY 14853, USA;
4. KAUST-Cornell Center for Energy and Sustainability, Cornell University, Ithaca NY 14853, USA;
5. Department of Earth and Atmospheric Science, Cornell University, Ithaca NY 14853, USA)

Abstract: A dual-tracer method for the assessment of reservoir heterogeneity was proposed in this study based on the theory of fluid flow and tracer transport in heterogeneous porous media. Experiments were conducted using a single tube packed with sands simulating heterogeneous layers in order to validate the method. An ionic chemical tracer (KBr) and a fluorescent nano-particle tracer (Cdot) with different diffusion coefficient were used to indicate the total pore volume and flowing pore volume of the heterogeneous porous media, and thus to identify the reservoirs heterogeneity and to evaluate the water flooding effect. The results show that the breakthrough curves of KBr and Cdot under homogeneous conditions are almost coincident with each other, while obvious difference between the breakthrough curves can be observed under heterogeneous conditions. There is a significant difference for the fluid replacement or change rate (the f_v value) in porous media between KBr and Cdot tracers, which can be used to identify the reservoirs heterogeneity by analyzing the output of KBr and Cdot and the variation

收稿日期:2015-09-25

基金项目:中国博士后科学基金项目(2015M570622);国家自然科学基金项目(51574269);国家留学基金项目(201306450015);中央高校基本科研业务费专项(15CX08004A);长江学者和创新团队发展计划(IRT1294);青岛市博士后应用研究项目(T1502092)

作者简介:姚传进(1986-),男,博士,研究方向为渗流机制与模拟、化学驱提高采收率及微生物采油技术。E-mail: ycj860714@163.com。

of their f_v values at a certain injection rate when considering the crossflow characteristics between the heterogeneous layers. These results can validate the feasibility and effectiveness of the dual-tracer method.

Keywords: reservoir heterogeneity; dual-tracer method; convection-diffusion system; breakthrough curve; heterogeneous single-tube model; volumetric sweep efficiency

油藏的储层非均质性严重影响油田的注水开发效果,为了采取措施提高注入水的波及效率,识别和预测油藏的储层非均质性极为重要^[1]。目前,各种调驱技术相继被提出,并广泛应用于改善油藏的储层非均质性^[2]。为了评价调驱剂的调驱性能,需要根据油藏的非均质条件构建非均质物理模型^[3]。目前常用的非均质物理模型为非均质平行双管模型。由于该模型制作简单、计量方便,在评价凝胶、泡沫等调驱剂的封堵和分流特性中发挥了重要作用^[4-5]。但是,该模型是单向流动模型,注入的流体仅在模型的入口处发生分流,不能体现真实油藏的层间绕流特征。构建更能够反映油藏非均质条件和流体流动特征的非均质物理模型具有重要的实际意义。示踪剂技术已成功应用于同位素找水、查找输油管道泄漏、井间示踪检测、单井化学示踪测定残余油饱和度等方面^[6]。应用示踪剂技术进行岩心驱替试验和调驱机制的研究,能够有效地反映岩心驱替过程中流体的分布状态和流动规律,可以掌握注入水的推进方向、驱替速度、波及状况以及岩心的非均质情况、剩余油饱和度分布和渗透率的变化等^[7]。笔者根据非均质多孔介质渗流与示踪剂迁移理论,提出一种识别储层非均质性的双示踪剂方法,通过构建考虑层间绕流的非均质单管模型对双示踪剂方法进行试验验证。

1 双示踪剂方法的理论基础

1.1 示踪剂的迁移过程

示踪剂作为一种溶质,其在多孔介质中的迁移过程主要包括对流、弥散和扩散^[8]。对流是指示踪剂随着流动的流体在多孔介质中迁移。对流是示踪剂迁移的主要方式,只要有流体流动就存在对流迁移,且流体的流动速度越大,对流作用越强。弥散是指示踪剂在对流迁移过程中由于多孔介质的不均匀性引起流体流速以及流线的改变而产生的示踪剂在横向和纵向上的分散现象。这些变化可能是孔隙壁面与流体之间的摩擦引起的,也可能是孔径尺寸不等或流路长度变化而产生的。扩散是由于浓度梯度和无规则运动引起的分散现象。扩散存在于示踪剂的所有运动过程中,即使没有流动,示踪剂也会从高

浓度区域向低浓度区域迁移。

1.2 对流—扩散系统

考虑示踪剂在非均质多孔介质中的迁移过程,根据非均质多孔介质的特点和流体在非均质多孔介质内的流动特征,可将整个多孔介质研究区域划分为两个不同又共存的体系,分别称为流动区和非流动区^[9-10]。在流动区,示踪剂的迁移以对流为主;在非流动区,示踪剂的迁移以扩散为主,如图1所示。

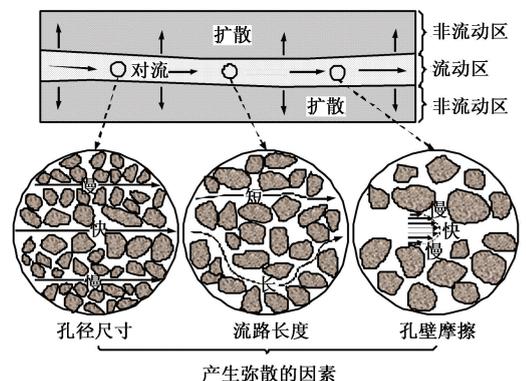


图1 非均质多孔介质渗流与示踪剂迁移示意图

Fig.1 Diagram for seepage and tracer migration in heterogeneous porous media

1.3 示踪剂的穿透曲线

基于上述对流—扩散系统,考虑3种不同的示踪剂迁移系统,分析弥散作用和扩散作用对示踪剂迁移的影响。如图2所示,在多孔介质的入口端面以一定的注入速率 Q 连续注入质量浓度为 C_0 的示踪剂,并考察出口端面 C/C_0 (C 为产出示踪剂质量浓度) 随时间 t 的变化,即穿透曲线。

对于非均匀的单一对流系统 I,假设多孔介质研究区域存在非流动区,且不考虑弥散作用和扩散作用时,示踪剂的整个对流迁移前缘以完全一致的速度向前推进,并在 t_4 时刻到达出口端,产生穿透曲线 l_1 (即对流峰 l_1)。

对于非均匀的对流—弥散系统 II,假设多孔介质研究区域存在非流动区,考虑弥散作用但不考虑扩散作用时,从 t_2 时刻开始,穿透曲线 l_{II} 在弥散过程中产生,并在对流锋 l_1 两侧形成一个置换液体和被置换液体的混合带。混合带的尺寸直接反映了弥散作用的强弱;混合带越大,弥散作用越强。假设没有弥散作用,则 l_{II} 将与 l_1 完全重合。

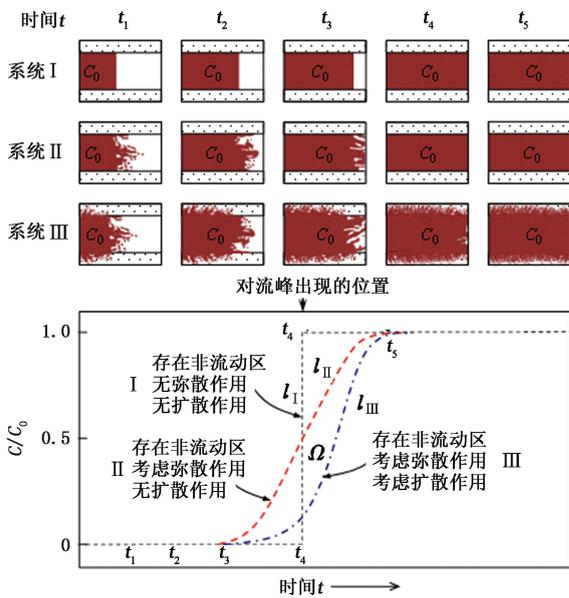


图2 弥散和扩散对示踪剂迁移的影响
Fig. 2 Effect of dispersion and diffusion on tracer migration

在非均匀的对流—扩散系统Ⅲ中,考虑同时存在弥散作用和扩散作用的情况,从 t_2 时刻开始,穿透曲线 l_{III} 在弥散和扩散过程中产生。在这类体系中,示踪剂扩散进入非流动区,减少了流动区中对流迁移的示踪剂质量,降低了示踪剂呈指状在流动区内长距离迁移的趋势,其结果与仅考虑流动区内示踪剂的对流迁移(系统Ⅱ)相比,示踪剂的分布更均匀,示踪剂的迁移也更慢^[11]。这一特征体现在穿透曲线上,表现为穿透曲线 l_{III} 与 l_{II} 之间存在一个封闭区域 Ω 。封闭区域 Ω 的面积越大,示踪剂在非流动区内的扩散作用越强。假设没有扩散作用,则穿透曲线 l_{III} 将与 l_{II} 完全重合。

2 双示踪剂方法的提出

从示踪剂迁移的角度考察穿透曲线 l_{II} 与 l_{III} 之间存在封闭区域 Ω 的物理意义。仍然以非均匀的对流—扩散系统Ⅲ为研究对象,并假设非均质多孔介质的总孔隙体积为 V_t 、流动区的孔隙体积为 V_m 、非流动区的孔隙体积为 V_{im} ,则非均质多孔介质的体积波及系数 E_v 可表示为流动区的孔隙体积 V_m 与非均质多孔介质的总孔隙体积 V_t 之比^[12],即

$$E_v = \frac{V_m}{V_t} = \frac{V_t - V_{im}}{V_t} = 1 - \frac{V_{im}}{V_t} \quad (1)$$

式中, E_v 为非均质多孔介质的体积波及系数。

多孔介质中示踪剂的迁移过程实质上是一个流体置换或流体改变的过程^[11]。在流动区,示踪剂主

要以对流的方式置换其中的流体(流体驱替过程);而在非流动区,示踪剂主要以扩散的方式改变其中的流体(示踪剂浓度变化过程)。当无因次浓度 C/C_0 达到1.0时整个流体置换或流体改变的过程结束。基于上述分析,在不存在示踪剂损耗的情况下,可将多孔介质中的流体置换率或流体改变率 f_v 表示为相同时间内流入和流出多孔介质的示踪剂体积差与非均质多孔介质的总孔隙体积 V_t 的比值,即

$$f_v = \frac{\int_0^{t_f} Q \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt}{V_t} \quad (2)$$

式中, t_f 为示踪剂的注入时间,min; Q 为示踪剂的注入速率,mL/min。

从理论上讲,存在两种扩散系数有明显差别的示踪剂A和B,并同时在非均质多孔介质的入口端面上以恒定的注入速率 Q 连续注入,且这两种示踪剂之间互不干扰。其中,示踪剂A几乎不能扩散进入非流动区(对应穿透曲线 l_{II}),而示踪剂B可以充分扩散进入并填满整个非流动区(对应穿透曲线 l_{III}),并假设穿透曲线 l_{II} 与 l_{III} 之间封闭区域 Ω 的面积为 S_Ω ,则有:

$$S_\Omega = \int_0^{t_f} \left(\frac{C_A}{C_{0A}} - \frac{C_B}{C_{0B}} \right) dt, \quad (3)$$

$$V_m = \int_0^{t_f} \left(1 - \frac{C_A}{C_{0A}} \right) dt, \quad (4)$$

$$V_t = \int_0^{t_f} \left(1 - \frac{C_B}{C_{0B}} \right) dt, \quad (5)$$

$$V_{im} = V_t - V_m = Q \int_0^{t_f} \left(\frac{C_A}{C_{0A}} - \frac{C_B}{C_{0B}} \right) dt = QS_\Omega. \quad (6)$$

式中, C_A/C_{0A} 为示踪剂A的无因次产出浓度; C_B/C_{0B} 为示踪剂B的无因次产出浓度。

此时,多孔介质中的流体置换率或流体改变率 f_v 可表示为

$$f_v = \begin{cases} V_m/V_t = E_v (l=l_{II}); \\ V_t/V_t = 1 (l=l_{III}). \end{cases} \quad (7)$$

由上述分析可知,示踪剂A的穿透曲线 l_{II} 可以反映非均质多孔介质内流动区的孔隙体积,示踪剂B的穿透曲线 l_{III} 可以反映非均质多孔介质的总孔隙体积,穿透曲线 l_{II} 与 l_{III} 之间封闭区域 Ω 的面积 S_Ω 与注入速率 Q 的乘积可以反映非均质多孔介质内非流动区的孔隙体积,从而识别多孔介质中高渗透层的存在情况和评价注入水的波及状况。基于此,提出一种新的识别储层非均质性的双示踪剂方法。

3 双示踪剂方法的验证试验

3.1 双示踪剂的基本性质

示踪剂的选择是实现双示踪剂方法的关键。根据双示踪剂方法的基本思路以及油田示踪剂的筛选标准^[13],本研究选择了两种扩散系数存在明显差别的示踪剂。一种是阴离子型化学示踪剂溴化钾(KBr),一种是颗粒型荧光标记示踪剂荧光碳纳米颗粒(Cdot)。

KBr是油田常用的一种示踪剂,在25℃下,其扩散系数约为 $2.45 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。KBr作为化学示踪剂的一种,具有在油田地层水中含量极少,易溶于水而不溶于油,溶于水后完全电离且水溶液呈中性,在地层中的吸附量少且耐高温、不易与地层流体和岩石发生化学反应,灵敏度高、容易检测,无毒、无污染等优点^[14]。

Cdot是近几年发展起来的一种新型荧光标记示踪剂,该示踪剂是采用来源广泛的水柠檬酸为碳源、乙醇胺为辅剂(摩尔比例为1:3),通过一步水热反应合成的一种具有高荧光强度和强表面亲水性的碳纳米颗粒,具有荧光稳定性强、在高离子强度的水溶液中可以稳定存在的优点^[15]。本研究所选用的Cdot荧光激发波长为358 nm,荧光发射波长峰值为460 nm;利用Nano-ZS型Zeta电位测试分析仪(英国Malvern公司)测得Cdot的粒径为2~5 nm,平均粒径为3.9 nm,在pH值为7的水溶液中,其Zeta电位约为-5 mV。根据斯托克斯-爱因斯坦方程^[16],在25℃下,Cdot的扩散系数计算值为 $9.77 \times 10^{-7} \sim 2.45 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$,平均值约为 $1.25 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

3.2 双示踪剂方法的试验设计

3.2.1 非均质单管模型

非均质单管模型采用透明有机玻璃管加工制作而成,模型主要由接头、密封垫圈、有机玻璃管、圆柱形铜网和圆盘状铜网组成,如图3所示。其中,有机玻璃管的长度 L 为17.50 cm、内径 D_1 为1.95 cm,圆柱形铜网的内径 D_2 为1.04 cm;两端接头处的圆柱形凹槽用来确保圆柱形铜网位于有机玻璃管的中心;有机玻璃管中心圆柱形铜网包裹形成的空间作为相对高渗石英砂(k_h)的充填空间,有机玻璃管中心圆柱形铜网和有机玻璃管内壁之间形成的环形空间作为相对低渗石英砂(k_l)的充填空间。两种不同渗透性的石英砂通过不同目数的分样筛进行制备,充填石英砂过程中相对高渗区和相对低渗区的充填

交替进行,同时加入少量水润湿砂(保证水面高于砂面),并不断轻轻敲打有机玻璃管以确保石英砂充填密实、均匀。该非均质单管模型能够体现真实油藏的层间绕流特征,而且该模型清洗方便,可以重复填制使用。

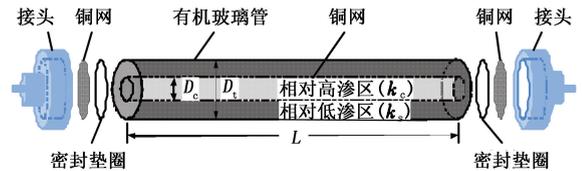


图3 非均质单管模型示意图

Fig. 3 Diagram of heterogeneous single-tube model

3.2.2 试验材料与试剂

试验材料与试剂包括:KBr(美国ACROS公司,分析纯);Cdot(试验合成);美国AGSCO公司的石英砂产品,粒径为74~250 μm,密度为 2.65 g/cm^3 ,在去离子水中的pH值为6.8~7.2,主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 ZrO_2 和CaO等,使用前经研磨、筛分、酸洗、水洗和烘干处理^[17];注入水(按试验要求用去离子水配制的一定质量浓度的NaCl水溶液)、盐酸、NaCl和去离子水。

3.2.3 试验设备及流程

试验设备主要包括:蠕动泵、针管泵、注射器、非均质单管模型、阀门、三通接头、毛细玻璃管、钢板尺、自动取样器、取样试管、真空泵、真空釜、磁力搅拌器、烘干机、锥形瓶、电子天平、量筒、烧杯、管线、分样筛等。试验流程如图4所示。

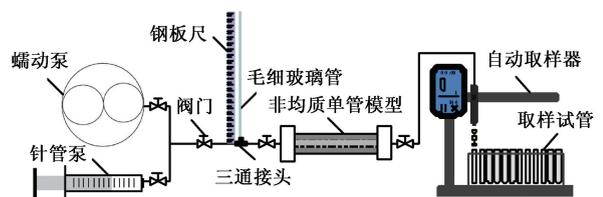


图4 试验流程图

Fig. 4 Experimental flow diagram

3.2.4 试验方法与步骤

试验在25℃条件下进行,试验方法与步骤为:

(1)用分样筛制备两种石英砂样品(粒径分别为177~250和74~106 μm),并置于去离子水中润湿10 d。

(2)分别用两种石英砂填制均质模型,抽真空饱和去离子水,通过称重法计算模型的孔隙度 φ ,并测量模型的渗透率 k 。

(3)按要求填制一组均质单管模型1#,用粒径为177~250 μm的石英砂充填高、低渗区;一组非

均质单管模型 2[#],用粒径为 177 ~ 250 和 74 ~ 106 μm 的两种石英砂分别充填高、低渗区。两模型有机玻璃管的长度 L 均为 17.50 cm、内径 D_1 均为 1.95 cm,圆柱形铜网的内径 D_c 均为 1.04 cm,分别模拟均匀的对流—弥散系统和非均匀的对流—扩散系统。

(4)将模型抽真空饱和和去离子水,通过称重法计算模型的总孔隙体积 V_1 。

(5)根据 L 、 D_1 、 D_c 、 φ 和 k 等参数确定模型中高渗区的孔隙体积 V_c 、渗透率 k_c 以及低渗区的渗透率 k_s ,两组单管模型的基本参数见表 1。

(6)以一定的注入速率 Q 注入矿化度为 5 g/L 的 NaCl 水溶液,注入量为 4.0 倍的孔隙体积。

(7)以一定的注入速率 Q 注入用矿化度为 5 g/L 的 NaCl 水溶液配制而成的 KBr 和 Cdote 的混合溶液(KBr 的质量浓度为 1 g/L、Cdote 的质量浓度为 50 mg/L),注入量为 4.0 倍的孔隙体积。在注入 KBr 和 Cdote 混合溶液的过程中,通过自动取样器收集产出液(取样间隔为 2 mL),然后分别采用美国 Jenco Instruments 公司的 6230N 微机型精密溴离子浓度计和美国 Molecular Devices 公司的 SpectraMax M2e 型荧光分光光度计测量 KBr 和 Cdote 的产出浓度。

表 1 单管模型基本参数

Table 1 Basic parameters for single-tube models

模型编号	总孔隙体积 V_1/cm^3	高渗区孔隙体积 V_c/cm^3	高渗区渗透率 $k_c/\mu\text{m}^2$	低渗区渗透率 $k_s/\mu\text{m}^2$	k_c/k_s
1 [#]	20.13	5.40	23.87	23.87	1.00
2 [#]	21.43	5.73	23.87	3.28	7.27

4 试验结果分析

4.1 均质条件下 KBr 和 Cdote 的产出规律

利用均质单管模型(1[#])模拟均匀的对流—弥散系统,试验过程中的注入速率 Q 均为 0.1 mL/min。均质条件下 KBr 和 Cdote 的穿透曲线如图 5 所示。

由图 5 可以看出:在注入 KBr 和 Cdote 混合溶液的过程中,注入的 KBr 和 Cdote 主要以对流的方式在均质多孔介质中迁移,当注入 KBr 和 Cdote 混合溶液 0.80 V_1 左右时,KBr 和 Cdote 开始从多孔介质中产出,随着 KBr 和 Cdote 混合溶液的不断注入,KBr 和 Cdote 的无因次产出浓度 $C(L,t)/C_0$ 均呈直线增加,当注入 KBr 和 Cdote 混合溶液 1.20 V_1 左右时,KBr 和 Cdote 的 $C(L,t)/C_0$ 达到 1.0。KBr 和 Cdote 的穿透曲线均在 1.0 V_1 左右两侧形成一个置换液体和

被置换液体的混合带,说明 KBr 和 Cdote 在均质多孔介质中的迁移均受到了一定程度的弥散作用的影响。虽然 KBr 和 Cdote 的扩散系数相差较大(相差 20 倍左右),但两者的穿透曲线基本重合,说明 KBr 和 Cdote 在均质多孔介质中的迁移受扩散作用的影响较小。

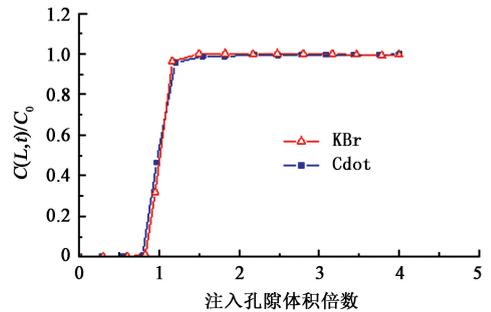


图 5 均质条件下 KBr 和 Cdote 的穿透曲线

Fig. 5 Breakthrough curves of KBr and Cdote under homogeneous condition

4.2 非均质条件下 KBr 和 Cdote 的产出规律

利用非均质单管模型(2[#])模拟非均匀的对流—扩散系统。

4.2.1 穿透曲线的变化

非均质条件下 KBr 和 Cdote 的穿透曲线如图 6 所示。可以看出:非均质条件下 KBr 和 Cdote 的穿透曲线与均质条件下 KBr 和 Cdote 的穿透曲线之间存在明显的差别。在非均质条件下,当注入 KBr 和 Cdote 混合溶液 0.23 V_1 左右时,KBr 和 Cdote 开始从多孔介质中产出,而当注入 KBr 和 Cdote 混合溶液 2.85 V_1 左右时,KBr 和 Cdote 的 $C(L,t)/C_0$ 才能达到 1.0;非均质条件下 KBr 和 Cdote 的穿透曲线在 1.0 V_1 左右两侧形成的置换液体和被置换液体的混合带均明显增大;非均质条件下 KBr 和 Cdote 的穿透曲线呈现出台阶状变化特征,且注入速率越大,这种台阶状变化特征越明显。不同的注入速率条件下,KBr 和 Cdote 的穿透曲线均不重合,说明 KBr 和 Cdote 在非均质多孔介质中的迁移受扩散作用的影响较大,且注入速率越小,扩散作用的影响越明显。

注入速率反映了 KBr 和 Cdote 混合溶液的注入强度和流体在多孔介质中的流动状况,进而影响非均质条件下 KBr 和 Cdote 的产出规律。

为了更直观地阐述注入速率对非均质条件下 KBr 和 Cdote 的产出规律的影响,将相同注入速率情况下的非均质条件下 KBr 和 Cdote 的穿透曲线分别绘制在同一张坐标纸上,结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出:非均质条件下 KBr 的穿透曲

线和 Cdot 的穿透曲线之间均存在一个封闭区域 Ω , 且 KBr 的穿透曲线在下方, Cdot 的穿透曲线在上方; 随着注入速率 Q 的增加, KBr 的穿透曲线和 Cdot 的穿透曲线之间封闭区域 Ω 的面积先增大后减小, 在试验设定的 4 种注入速率中, 当注入速率 Q 为 0.1 mL/min 时, 该封闭区域的面积最大。当注入速率 Q 为 10 mL/min 时, 即较高的注入速率下, KBr 的穿透曲线和 Cdot 的穿透曲线均呈现出明显的台阶

状变化特征, 且两者基本重合, 说明此时 KBr 和 Cdot 主要在非均质多孔介质内的流动区发生对流迁移, 而在非均质多孔介质内非流动区的扩散迁移较弱。当注入速率 Q 为 1/60 mL/min 时, 即较低的注入速率下, KBr 和 Cdot 的穿透曲线均向右下方移动, 且台阶状变化特征基本消失, 说明此时 KBr 和 Cdot 在非均质多孔介质内非流动区的扩散迁移比较明显。

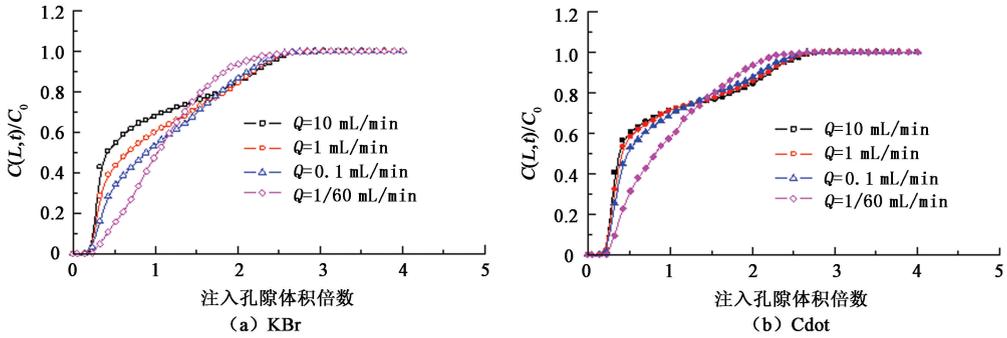


图 6 非均质条件下 KBr 和 Cdot 的穿透曲线

Fig. 6 Breakthrough curves of KBr and Cdot under heterogeneous condition

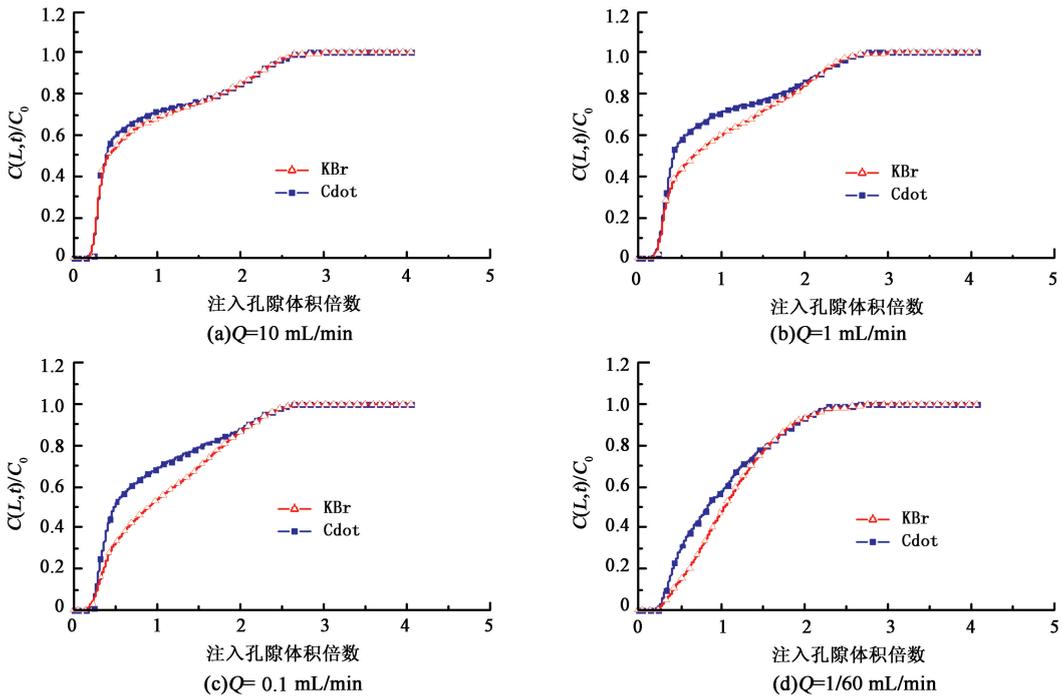


图 7 注入速率对非均质条件下 KBr 和 Cdot 穿透曲线的影响

Fig. 7 Effect of injection flow rate on breakthrough curves of KBr and Cdot under heterogeneous condition

4.2.2 f_v 值曲线的变化

根据非均质条件下 KBr 和 Cdot 的穿透曲线, 利用式(2) 计算了非均质条件下 KBr 和 Cdot 的 f_v 值, 如图 8、9 所示。

在较大的注入速率下, 示踪剂没有充足的时间扩散进入非均质多孔介质内的非流动区, 此时, $f_v \rightarrow$

$V_m/V_t (V_m \geq V_c)$ 。在较小的注入速率下, 示踪剂有充足的时间扩散进入非均质多孔介质内的非流动区, 此时, $f_v \rightarrow V_t/V_t$, 如图 8 所示。

当注入速率 Q 为 10 mL/min 时, KBr 和 Cdot 的穿透曲线基本重合, 且 KBr 和 Cdot 的 f_v 值相差很小, 其中 f_{v-KBr} 值为 0.7809, f_{v-Cdot} 值为 0.7444, 差值

仅为0.0365,如图9(a)所示;当注入速率 Q 较小时,KBr和Cdot的穿透曲线产生明显的分离,且两者的 f_v 值相差较大,与注入速率 Q 为1.0、0.1、1/60 mL/min相对应, f_{v-KBr} 值依次为0.8925、0.9708、0.9904, f_{v-Cdot} 值依次为0.7464、0.7633、0.8726,差值依次为0.1461、0.2074、0.1218,如图9(b)、(c)

和(d)所示;当注入速率 Q 为1/60 mL/min这样的较小值时,KBr能够充分扩散进入并填满非均质多孔介质内的非流动区, f_{v-KBr} 值与1仅差0.0096,此时, f_{v-Cdot} 值与1之间仍存在0.1274的差距,如图9(d)所示。

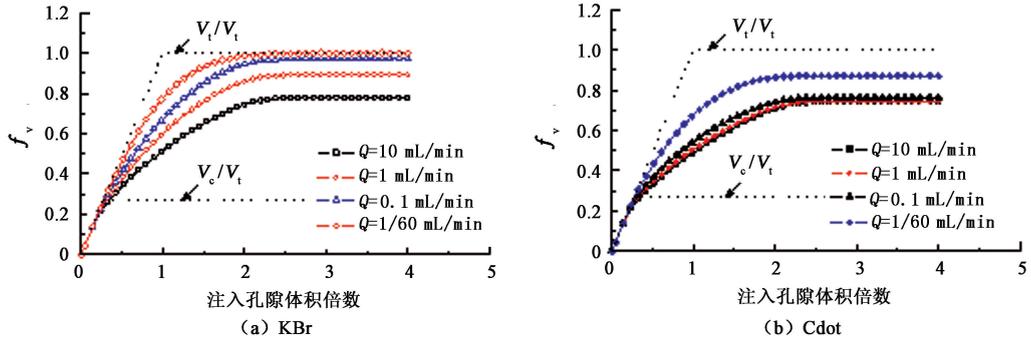


图8 非均质条件下KBr和Cdot的 f_v 值变化曲线

Fig.8 Change curves of f_v values for KBr and Cdot under heterogeneous condition

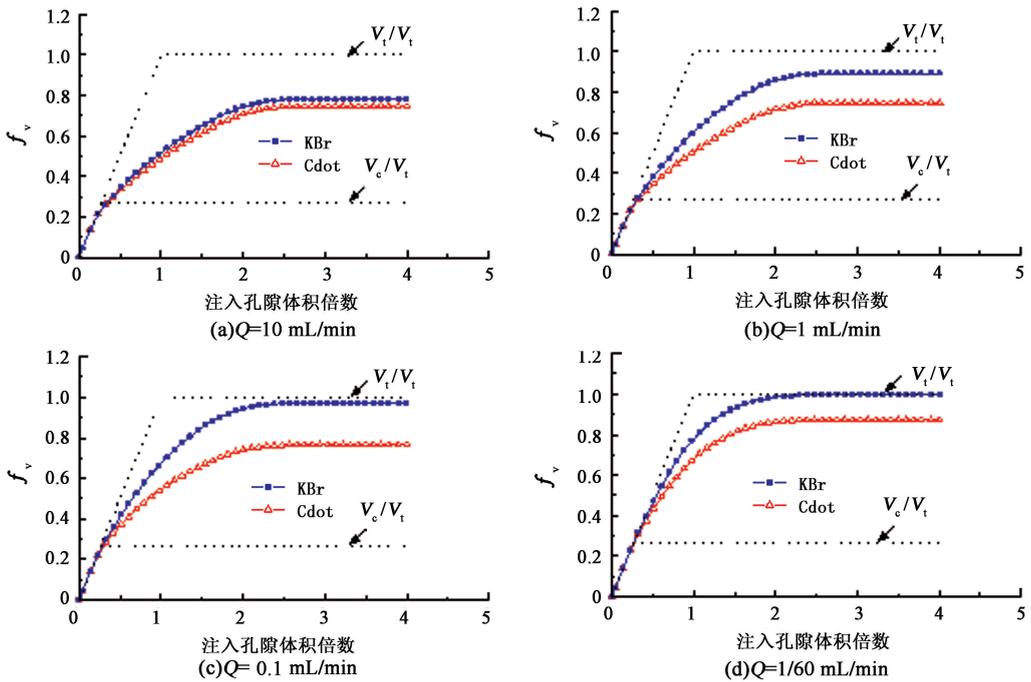


图9 注入速率对非均质条件下KBr和Cdot的 f_v 值变化曲线的影响

Fig.9 Effect of injection flow rate on change curves of f_v values for KBr and Cdot under heterogeneous condition

为了确保双示踪剂方法试验结果的可比性,须选择合适的注入速率。对比不同注入速率下KBr和Cdot的 f_v 值变化曲线(图8)可以看出,注入速率分别为0.1和1/60 mL/min时, f_{v-KBr} 值差别不大;注入速率分别为0.1、1.0和10 mL/min时, f_{v-Cdot} 值差别不大。以注入速率为0.1 mL/min情况下 f_{v-KBr} 值和 f_{v-Cdot} 值所对应的 V_{i-KBr} 值和 V_{m-Cdot} 值分别作为非均质多孔介质总孔隙体积 V_t 和非均质多孔介质内

流动区孔隙体积 V_m 的近似值,识别多孔介质中高渗透层的存在情况和评价注入水的波及状况。

综上所述,均质条件下KBr和Cdot的穿透曲线基本重合,非均质条件下KBr和Cdot的穿透曲线产生分离,且在注入速率为0.1 mL/min的条件下,可以用 f_{v-KBr} 值和 f_{v-Cdot} 值识别多孔介质中高渗透层的存在情况和评价注入水的波及状况,验证了双示踪剂方法的正确性和有效性。

5 结 论

(1)根据非均质多孔介质渗流与示踪剂迁移理论,提出了一种识别储层非均质性的双示踪剂(离子型化学示踪剂溴化钾 KBr+颗粒型荧光标记示踪剂荧光碳纳米颗粒 Cdot)方法。

(2)均质条件下 KBr 和 Cdot 的穿透曲线基本重合,而非均质条件下 KBr 和 Cdot 的穿透曲线产生分离,且在注入速率为 0.1 mL/min 的条件下,可以用 f_{v-KBr} 值和 f_{v-Cdot} 值所对应的 V_{t-KBr} 值和 V_{m-Cdot} 值分别作为非均质多孔介质总孔隙体积 V_t 和非均质多孔介质内流动区孔隙体积 V_m 的近似值以识别多孔介质中高渗透层的存在情况和评价注入水的波及状况,验证了双示踪剂方法的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] 封从军,单启铜,时维成,等.扶余油田泉四段储层非均质性及对剩余油分布的控制[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(1):1-7.
FENG Congjun, SHAN Qitong, SHI Weicheng, et al. Reservoirs heterogeneity and its control on remaining oil distribution of K_{i4}^4 , Fuyu Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(1):1-7.
- [2] 雷光伦.孔喉尺度弹性微球深部调驱新技术[M].东营:中国石油大学出版社,2011.
- [3] 孙乾,李兆敏,李松岩,等. SiO₂ 纳米颗粒稳定的泡沫体系驱油性能研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(4):124-131.
SUN Qian, LI Zhaomin, LI Songyan, et al. Oil displacement performance of stabilized foam system by SiO₂ nanoparticles[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(4):124-131.
- [4] 李兆敏,孙茂盛,林日亿,等.泡沫封堵及选择性分流实验研究[J].石油学报,2007,28(4):115-118.
LI Zhaomin, SUN Maosheng, LIN Riyi, et al. Laboratory study on foam plugging and selective divided-flow[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007,28(4):115-118.
- [5] 姚传进,李蕾,雷光伦,等.孔喉尺度弹性微球的深部调驱性能[J].西南石油大学学报(自然科学版),2013,35(4):114-120.
YAO Chuanjin, LI Lei, LEI Guanglun, et al. Deep profile control and flooding performance of throat-scale elastic microspheres[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013,35(4):114-120.
- [6] 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.

- [7] 于瑞香,张泰山,周伟生.油田示踪剂技术[J].工业水处理,2007,27(8):12-15.
YU Ruixiang, ZHANG Taishan, ZHOU Weisheng. Technique in oil filed tracer[J]. Industrial Water Treatment, 2007,27(8):12-15.
- [8] 菲利普 B B,哈纳迪 S R,查尔斯 J N.地下水污染——迁移与修复[M].施周,杨朝辉,陈世洋,译.2版.北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [9] COATS K H, SMITH E D. Dead-end pore volume and dispersion in porous media[J]. SPE Journal, 1964, 4(1):73-84.
- [10] van GENUCHTEN M T, WIERENGA P J. Mass transfer studies in sorbing porous media: II experimental evaluation with tritium (³H₂O)[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977,41:272-278.
- [11] 郑春苗,贝涅特 G D.地下水污染物迁移模拟[M].孙晋玉,卢国平,译.2版.北京:高等教育出版社,2009.
- [12] 俞启泰,赵明,林志芳.水驱砂岩油田驱油效率和波及系数研究(二)[J].石油勘探与开发,1989,16(3):46-54.
YU Qitai, ZHAO Ming, LIN Zhifang. Research on displacement efficiency and sweep efficiency of water flooding in sandstone oilfield (II)[J]. Petroleum Exploration and Development, 1989,16(3):46-54.
- [13] 油气田开发专业标准化委员会.油田注水化学示踪剂的选择方法:SY/T5925-2012[S].北京:石油工业出版社,2012.
- [14] 王金生,王国华,李书绅,等.不流动水对黄土包气带溶质运移影响的实验研究[J].水利学报,2004,35(6):52-55.
WANG Jinsheng, WANG Guohua, LI Shukun, et al. Experimental study on effect of immobile water on solute transport in aerated zone of loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,35(6):52-55.
- [15] KRYSMANN M J, KELARAKIS A, DALLAS P, et al. Formation mechanisms of carbogenic nanoparticles with dual photoluminescence emission[J]. Journal of the American Chemical Society, 2012,134(2):747-750.
- [16] 尹小勇.扩散系数微观研究[D].天津:天津大学,2006.
YIN Xiaoyong. Microscopic research on the diffusion coefficient[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [17] YAO Chuanjin, LEI Guanglun, LI Lei, et al. Selectivity of pore-scale elastic microspheres as a novel profile control and oil displacement agent[J]. Energy & Fuels, 2012,26(8):5092-5101.

(编辑 李志芬)