

文章编号:0253-9985(2010)02-0504-07

苏北盆地草舍油田泰州组储层水敏伤害 及其对注水开发的影响

章雄冬¹,朱玉双²,曹海虹¹,马慧杰¹,程秀梅¹

(1. 中国石油化工股份有限公司 华东分公司 规划设计研究院,江苏 扬州 225007;

2. 西北大学 地质学系 大陆动力学国家重点实验室,陕西 西安 710069)

摘要:运用真实砂岩微观模型实验技术,对苏北盆地草舍油田泰州组储集砂岩进行了浸泡型水敏性实验。结果显示,该砂岩具中等水敏。为充分了解水敏伤害对注水开发的影响,开展了真实砂岩微观模型水驱油实验,包括单模型及组合模型两种实验类型,分别模拟微观及宏观水驱油,并比较了水敏伤害前、后水驱油特征的变化。结果表明,水敏伤害没有改变水驱油方式及残余油形态,但单模型的绕流现象整体增强,驱油效率降低,主要受注水压力、注水位置及微观非均质性等因素影响;而组合模型的采收率整体呈下降趋势,受微观非均质性及宏观非均质性共同控制。为避免水敏伤害对注水开发的影响,建议注入水矿化度为 11.99 g/L 左右。

关键词:驱油效率;水敏伤害;真实砂岩微观模型;泰州组;草舍油田;苏北盆地

中图分类号:TE341

文献标识码:A

Water-sensitive damage and its impacts on the waterflood development of the Taizhou Formation reservoirs in Caoshe oilfield, the Subei Basin

Zhang Xiondong¹, Zhu Yushuang², Cao Haihong¹, Ma Huijie¹ and Cheng Xiumei¹

(1. Planning & Designing Institute, SINOPEC East China Company, Yangzhou, Jiangsu 225007, China;

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: Using the experimental technique of natural sandstone micromodel, an emersion experiment of water sensitivity is conducted for the Taizhou Formation reservoir sandstone in the Caoshe oilfield, Subei Basin. The experiment results show that the sandstone is moderate in water sensitivity. In order to fully understand the impact of water-sensitive damage on waterflood development, the water-drive-oil experiments of natural sandstone micromodel are conducted, including two experiment types, i. e. a single model type and a combined model type, which simulate micro-water-drive and macro-water-drive respectively and compare water-drive-oil variances before and after water-sensitive damage. The results show that the water-sensitive damage does not change the style of water drive oil and the configuration of residual oil. For the single model experiment, however, the bypassing phenomenon is strengthened on the whole and the oil displacement efficiency is lowered, mainly controlled by several factors such as water-injection pressure, water-injection location and micro-heterogeneity. For the combined model experiment, the oil recovery ratio tends to decline totally, controlled by both the micro-heterogeneity and macro-heterogeneity. To avoid the impact of water-sensitive damage on waterflood development, it is suggested that the injected water should be around 11.99 g/L in salinity.

Keywords: oil displacement efficiency, water-sensitive damage, natural sandstone micromodel, Taizhou Formation, Caoshe oilfield, Subei Basin

草舍油田位于苏北盆地溱潼凹陷断阶带中段 的东端,构造复杂,断裂发育,为复杂断块油田。新

收稿日期:2009-05-15;修订日期:2010-03-09。

第一作者简介:章雄冬(1979—),男,硕士研究生,储层地质及微观渗流。

生界古近系泰州组是其中的主要含油层位之一。

泰州组主力含油层段主要以细砂岩为主,少量中砂岩和砂砾岩。陆源碎屑中石英类平均占 67.47%,长石类占 27.41%,岩屑类占 7.82%,填隙物平均占到全岩的 21.23%,以碳酸盐矿物及泥质为主。结构成熟度中等,颗粒磨圆度以次棱角状、次圆状为主,颗粒分选程度为好-中等。胶结类型以孔隙式为主,平均面孔率为 7.76%。渗透率一般为 $0.22 \times 10^{-3} \sim 342.40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $24.77 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

油气增产和提高采收率是油气勘探和开发工程中的两个重要问题,储层保护是解决这些问题的重要前提之一^[1]。研究区储集砂岩具亲水性。岩心敏感性测试结果表明,平均水敏指数为 0.66,具中等水敏,弱-无速敏。正是由于水敏现象的存在,给注水开发带来了诸多困难,迫切需要进一步认识水敏伤害对注水开发的影响。

1 模型水敏性评价

真实砂岩微观模型(西北大学地质系,1997,获国家专利)是由实际岩心经切片、磨平、粘贴在两片玻璃之间制作而成的,它保留了储层岩石本身的孔隙结构特征、岩石表面物理性质及部分填隙物^[2~9]。大量实验表明,运用该模型所进行的水敏性评价实验与岩心实验结果较为一致,能很好地反映储层的敏感程度^[5~7]。本次研究所涉及的注入水质有地层水(依据油田地层水性质配制而成,矿化度为 23.98 g/L)、现场实际注入水(矿化度为 0.58 g/L)及蒸馏水。

1.1 实验方法

岩石在地下流体浸泡过程中,随地下流体性质的变化,岩石表面性质会发生不同程度的变化,特别是各种敏感性矿物。为有效模拟储层的水敏

性伤害,进行了浸泡型模型水敏性实验,其主要实验步骤如下:

- 1) 将模型抽真空饱和地层水;
- 2) 在低压下进行地层水流动(目的是排除速敏的影响),渗流稳定后测模型渗透率,然后放置老化 24 h,该过程所测的渗透率为老化前地层水渗透率;
- 3) 恢复 2) 中的压力,待流动稳定后,测模型渗透率,该过程所测的渗透率为老化后地层水渗透率;
- 4) 改注注入水,在低压下进行注入水流动,渗流稳定后测模型渗透率,然后放置老化 24 h,该过程所测的渗透率为老化前注入水渗透率;
- 5) 恢复 4) 中的压力,待流动稳定后,测模型渗透率,该过程所测的渗透率为老化后注入水渗透率;
- 6) 改注蒸馏水,在低压下进行蒸馏水流动,渗流稳定后测模型渗透率,然后放置老化 24 h,该过程所测的渗透率为老化前蒸馏水渗透率;
- 7) 恢复 6) 中的压力,待流动稳定后,测模型渗透率,该过程所测的渗透率为老化后蒸馏水渗透率。

1.2 实验结果及讨论

模型水敏实验数据见表 1。比较各模型老化前、后的渗透率,无论是地层水、注入水还是蒸馏水,老化后各流体的渗透率均较老化前低;比较各类流体的渗透率,无论是老化前抑或是老化后,模型渗透率均随流体矿化度的下降而降低。

水敏伤害程度可用损害率来表示,由公式(1)计算。老化后的渗透率数据反映了储层中的敏感物质与注入流体得以充分接触,并发生了相对稳定的变化,用它来判断储层的敏感性及其敏感程度更加真实可靠。分析结果如图 1 所示,4 块实验样品蒸馏水老化后的损害率均大于 0.3,普遍大于

表 1 模型水敏实验数据
Table 1 Model datasheet from the water-sensitive experiment

模型号	老化前渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)			老化后渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)		
	地层水	注入水	蒸馏水	地层水	注入水	蒸馏水
1	2.59	1.69	0.99	1.94	1.45	0.89
2	5.57	1.12	0.32	4.04	0.50	0.23
3	3.27	2.25	1.88	2.67	2.00	1.69
4	2.26	1.98	0.93	2.13	1.80	0.86

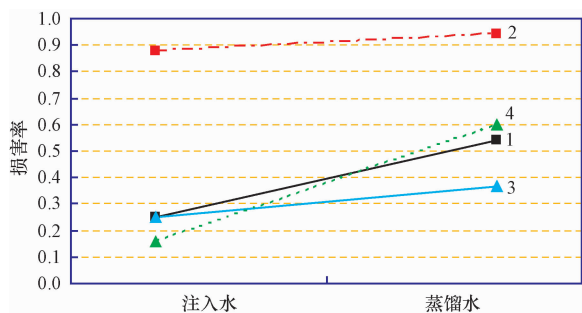


图1 注入流体类型与损害率的关系

Fig. 1 Interrelation of injecting fluid and damage ratio

0.5, 平均为0.6, 说明草舍油田泰州组具有中等水敏性($D_K < 0.05$ 为无水敏; $D_K = 0.05 \sim 0.3$ 为弱水敏; $D_K = 0.3 \sim 0.5$ 为中等偏弱水敏; $D_K = 0.5 \sim 0.7$ 为中等偏强水敏; $D_K > 0.7$ 为强水敏)。

$$D_K = (K - K_i) / K \quad (1)$$

式中: D_K 为损害率, 小数; K 为地层水下测定的岩样渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_i 为某注入流体老化后测定的岩样渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2 水敏伤害对注水开发的影响

为切实了解水敏伤害对注水开发的影响, 选用真实砂岩微观模型实验来进行研究。利用真实砂岩模型实验的最大优点是, 可以通过体视显微镜和图像采集系统直接观察流体在实际油层岩石孔隙空间的渗流特征^[6]。研究中所使用的油根据地下原油高压物性测试结果, 运用机械泵油加煤油配制而成, 粘度为 $11.736 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。为了使实验现象更加明显、便于观测, 实验注入水质为地层水及蒸馏水。其中, 实验配制的油加油溶红呈红色, 地层水无色, 蒸馏水加甲基蓝呈深蓝色。

2.1 模型实验方法

为充分了解水敏伤害对注水开发的影响, 设计了单模型实验及组合模型实验。单模型实验用以反映水敏对同一孔隙结构特征的储层所带来的伤害, 进而评价水敏伤害对微观水驱油特征的影响; 而组合模型实验是将具有不同渗透率的模型并联组合到一起(图2), 观察水敏前、后各模型的水驱油变化情况, 借此分析水敏伤害对宏观注水开发的影响。

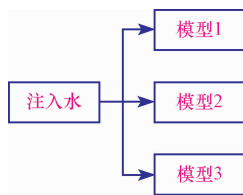


图2 组合模型示意图

Fig. 2 Sketch map showing combined models

2.1.1 单模型实验方法

单模型实验的主要步骤是:

- 1) 将模型抽真空, 然后饱和地层水;
- 2) 在一定压力下继续饱和地层水, 待渗流稳定后, 测定模型的渗透率;
- 3) 进行一次油驱地层水实验, 观察油驱地层水特征, 统计原始含油饱和度;
- 4) 进行地层水驱油实验, 观察地层水驱油特征, 统计不同压力下的地层水驱油效率;
- 5) 进行二次饱和油, 方法与3)相同, 并将两次饱和油的状态进行比较;
- 6) 二次水驱油, 将流体换为注入水, 方法与4)相同, 比较两次水驱油特征的异同点。

2.1.2 组合模型实验方法

组合模型实验的主要步骤是:

- 1) 分别将组合模型中的各模型进行抽真空饱和地层水;
- 2) 分别将组合模型中的各模型在一定压力下继续注入地层水, 渗流稳定后, 测定各模型的渗透率;
- 3) 分别进行一次油驱地层水实验, 观察油驱地层水特征, 统计各模型的原始含油饱和度;
- 4) 将各模型并联组合在一起(图2), 同时进行地层水驱油实验, 观察地层水驱油特征, 统计不同压力下各模型的地层水驱油效率;
- 5) 分别将各模型进行二次油驱地层水实验, 方法与3)相同, 并与前一次饱和油特征进行比较;
- 6) 二次组合水驱油, 将流体换为蒸馏水, 方法与4)相同, 比较两次水驱油特征的异同点。

2.2 模型实验结果与讨论

2.2.1 单模型实验

水敏前、后单模型实验结果表明:

1) 水敏伤害前、后,水驱油方式没有发生变化,仍是以活塞式驱油为主。水所波及的区域,驱油效率较高;未波及的区域是残余油的主要富集区,主要是由于绕流所形成,以簇状为主,油滴及油膜较少(图3a,b)。

2) 在相同的孔隙结构和实验条件下,注入水驱油过程中绕流现象比地层水驱油时整体加剧,剩余油增多,驱油效率降低(图3c—f)。分析原因认为,由于水敏伤害的存在,部分孔喉被缩小甚至

被堵死,使得渗流通道减少或渗流阻力变大,从而降低了注入水的微观波及系数即单模型的驱油效率。

3) 地层水的驱油效率与注入水的驱油效率都随注水压力的上升而增加(图3c—h)。这表明随着压力的增加,注入水可以进入原注入水绕过的区域驱油,逐步增加压力在一定程度上能缓解油层伤害对开采效果的影响。

4) 剩余油的分布与注入水的位置及层内非

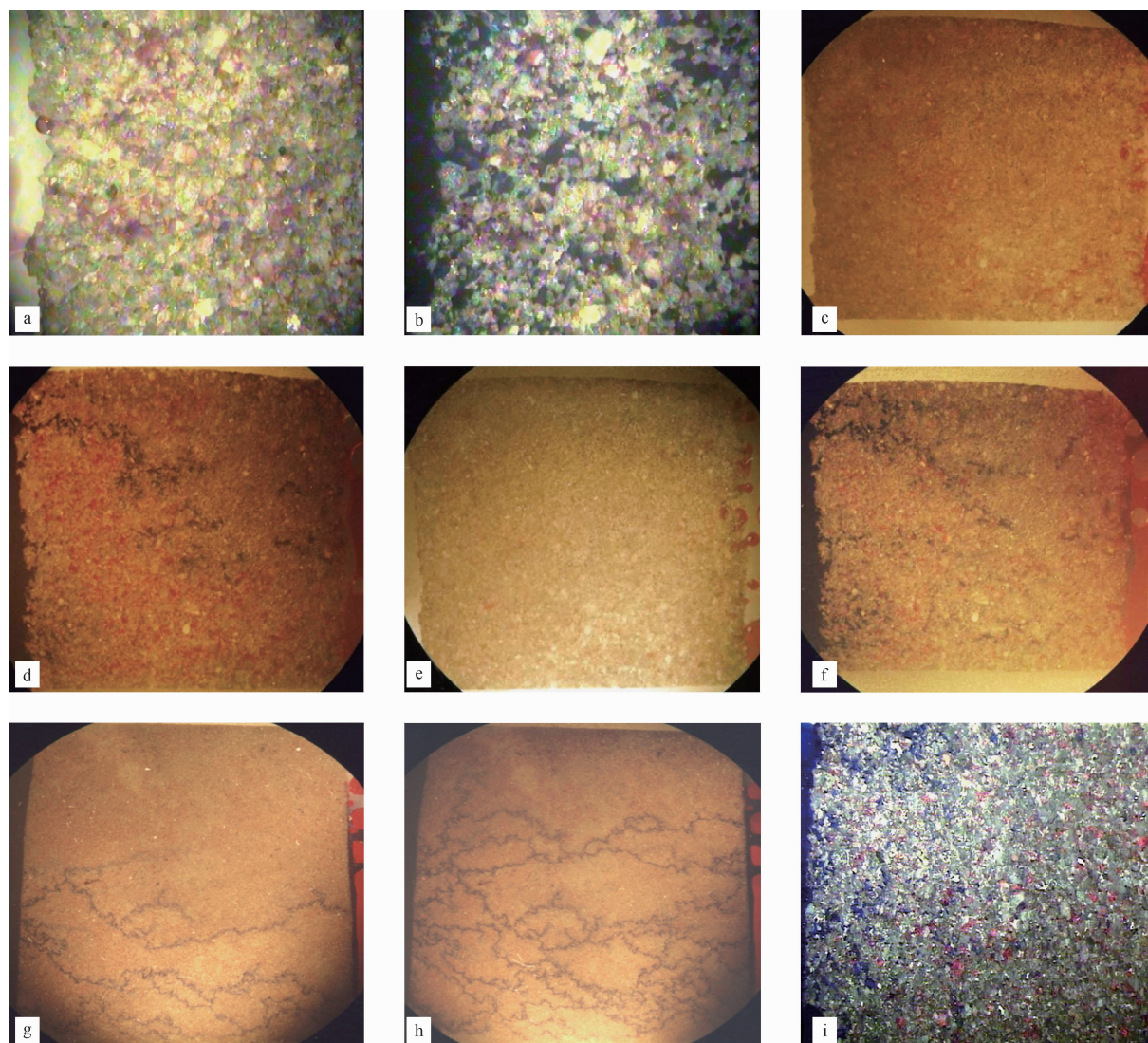


图3 模型水驱油照片

Fig. 3 Photos of models of oil displacement with water drive

- a. S1号模型地层水驱油后残余油形态,0.05 MPa;b. S1号模型蒸馏水驱油后油、水分布状态,0.05 MPa,与照片1同模型、同视域;c. S2号模型地层水驱油,0.03 MPa;d. S2号模型蒸馏水驱油,0.03 MPa;e. S2号模型地层水驱油,0.07 MPa;
f. S2号模型蒸馏水驱油,0.07 MPa;g. S3号模型蒸馏水驱油,0.03 MPa;h. S3号模型蒸馏水驱油,0.07 MPa;
i. S4号模型蒸馏水驱油,0.50 MPa
(水驱油方向均为从左向右)

均质性^[10,11]有关。在注水压力、加压方式等实验条件相同的情况下,比较水敏伤害前、后的残余油分布特点发现,对于较为均质的模型,在注入口附近水驱油效率较高,残余油较少;往出口端方向,残余油有增多趋势(图 3i)。分析原因认为,在注水开发过程中,由于注水压力在地层中总体是递减的,在远离注水井处可能就难以突破孔喉所需的压力,从而造成残余油的出现。这说明在注水开发过程中,注入水近井地带残余油较少。而对于非均质性较强的模型,残余油的分布主要受非均质性所控制,水驱路线主要沿大孔道方向延伸(图 3g,h)。

2.2.2 组合模型实验

选取不同渗透率的 3 块模型并联组合到一起,进行组合模型实验。在地层水及注入水驱条件下,即在水敏伤害前、后进行组合模型的水驱油特征及采收率比较。共进行了两组组合模型实验,各模型的参数如表 2 所示。

两组合模型在地层水驱及注入水驱过程中具有同一规律:注入流体在较小压力下优先进入高渗模型,加大注水压力后逐渐进入中渗模型,低渗模型在实验压力下始终未进入,整体的波及系数均为 2/3(图 4,图 5)。分析原因认为,高渗模型其孔喉相对较大,启动压力较小,在较低的压力条件下,流体优先进入;增大压力后,当压力达到中渗模型的启动压力时,流体便开始进入。在注入水驱过程中,由于水敏伤害的存在,在相同实验条件下,单模型的驱油效率均较地层水驱时要低。

但在组合 1 中,水敏伤害前、后驱油效率的差异性有所变化(图 4)。在地层水驱过程中,在 0.08 MPa 时,C1-2 比 C1-3 的驱油效率高 3%;在 0.10 MPa 时,C1-2 比 C1-3 的驱油效率低 10%。这说明,大孔喉能为储层提供优势渗流通道。在模型实验上表现为,在低压条件下,高渗模型驱油效率较高;但随着压力的升高,由于非均质性的存在,含水率上升较快,驱油效率逐渐被中渗模型赶上并超过。在注入水驱过程中,在 0.08 MPa 时,C1-2 比 C1-3 的驱油效率高 13%;在 0.10 MPa 时,C1-3 的驱油效率虽然最终高于 C1-2,但仅仅相差 1%。这与 C1-2 号模型

表 2 组合模型参数

Table 2 Parameters of combined models

组合	模型号	液测渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	孔隙体积/ mL	微观非均质 程度
组合 1	C1-1	0.13	0.03	弱
	C1-2	19.97	0.04	中等偏弱
	C1-3	0.89	0.05	弱
组合 2	C2-1	8.42	0.04	弱
	C2-2	4.66	0.03	较强
	C2-3	0.15	0.04	弱

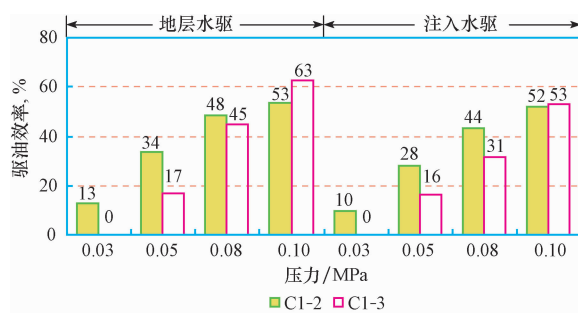


图 4 组合模型 1 地层水驱与注入水驱驱油效率统计

Fig. 4 Statistics of oil displacement efficiency between stratum fluid and injecting fluid by combined model 1

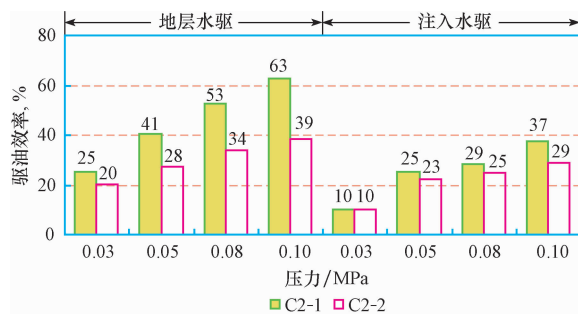


图 5 组合模型 2 地层水驱与注入水驱驱油效率统计

Fig. 5 Statistics of oil displacement efficiency between stratum fluid and injecting fluid by combined model 2

孔喉较大,对伤害的调节能力较强有一定的关系。相比较而言,水敏伤害对 C1-3 号模型的影响更大。

而对于组合 2,在地层水驱时,渗透率较高的 C2-1 号模型,地层水优先进入,而且在各压力点的驱油效率均高于 C2-2 号模型;并随着压力的不断上升,两模型的驱油效率差距也不断增大。

这与 C2-2 号模型的微观非均质性相对较强有直接的关系。在注入水驱时,两模型在各压力点的驱油效率均有所降低,但 C2-1 号模型的下降幅度明显要大(图 5)。这说明,水敏伤害对各模型的影响有所差异,使储层的非均质性变得复杂,可能与水敏性矿物分布的不均一性有关,包括水敏性矿物的含量、类型及产状等。

由此得出:

1) 有、无水敏伤害时的驱油效率差别很大,在相同的压力条件下,组合模型的每个单模型均表现为地层水的驱油效率高于注入水的驱油效率;

2) 地层水驱采收率均要大于注入水驱采收率,从组合模型实验结果来看,尽管水敏伤害没有改变宏观波及系数,但由于单个模型的驱油效率即微观波及系数降低,致使宏观采收率也随之降低;

3) 无论是地层水驱还是注入水驱,逐渐增加注水压力,均能提高单模型的驱油效率及其组合模型的采收率;

4) 水敏伤害使储层孔隙结构变得复杂,主要受水敏性矿物分布不均一性的影响,另外储层本身的孔隙结构也有一定的控制调节能力,渗透率较大的储层受水敏伤害的影响要小得多,如组合 1 中的 C1-2。

比较组合 1 及组合 2,组合 1 的宏观非均质性明显要强于组合 2,但在地层水驱时,最终采收率却明显要高于组合 2,而二者的宏观波及系数相同,均为 2/3。分析认为,组合 2 中的 C2-2 号模型微观非均质性较强,驱油效率相对较低,是造成这一差异的主要原因。这说明,采收率不仅受宏观非均质性控制,还受到微观非均质性的影响。

此外,组合 1 中的 C1-1 号模型及组合 2 中的 C2-3 号模型在水敏伤害前、后均未被波及。造成这种情况的原因可能有两种:一是模型本身非常致密,在设计压力范围内,注入流体无法进入;二是由于模型的组合造成的,流体沿高渗透通道运移,低渗区成为残余油的富集区,即主要受宏观非均质性的影响。针对于此,在进行完组合实验之后,将两块模型取出,分别按组合模型的实验压差进行单模型实验。结果显示,C1-1

号模型在压力为 0.05 MPa 时注入水即进入模型,随着压力的增大,驱油效率不断升高,至 0.10 MPa 时驱油效率达 39.78%;C2-3 号模型具有类似的规律。由此说明,在进行多层合注、合采开发过程中,要充分考虑宏观非均质性的影响。

3 合理的注入水矿化度

为有效避免注水开发中水敏所带来的伤害,选择合理的注入水质就显得尤为重要。为此,运用真实砂岩微观模型进行了合理注入水矿化度^[12]研究。

3.1 实验步骤

实验步骤如下:

1) 首先将模型抽真空并饱和地层水;

2) 在低压下进行地层水流动(目的是排除速敏的影响),待流动稳定后,测模型渗透率,然后放置老化 24 h,该过程所测的渗透率为老化前地层水的渗透率;

3) 恢复 2) 中的压力,待流动稳定后,测模型渗透率,该过程所测的渗透率为老化后地层水的渗透率;

4) 改注不同矿化度的注入水,在低压下进行注入水流动,待流动稳定后,测模型渗透率,然后放置老化 24 h,该过程所测的渗透率为老化前该矿化度注入水的渗透率;

5) 恢复 4) 中的压力,待流动稳定后,测模型渗透率,该过程所测的渗透率为老化后该矿化度注入水的渗透率;

6) 重复 4) 和 5) 的步骤,直至完成实验所设计的水型。

本实验所设计选用的不同矿化度的流体依次为:地层水,3/4 地层水,2/4 地层水,1/4 地层水,现场注入水,蒸馏水;它们的矿化度依次为:23.98,17.99,11.99,6.00,0.58,0 g/L。注入流体的次序由高矿化度到低矿化度。

3.2 实验结果及讨论

实验结果如表 3、图 6 所示。从图中可以看出:

表 3 不同流体的模型渗透率变化情况统计
Table 3 Varieties of model permeability with different fluids

实验状态	模型号	注入水矿化度/(g·L ⁻¹)					
		23.98	17.99	11.99	6.00	0.58	0.00
老化前	S5	2.26	0.95	0.82	0.60	0.56	0.48
	S6	2.18	1.65	1.61	1.42	1.23	0.98
老化后	S5	1.48	0.85	0.82	0.56	0.43	0.38
	S6	1.59	1.30	1.28	1.26	1.03	0.77

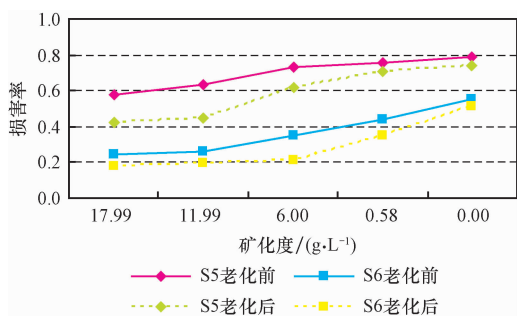


图 6 不同矿化度注入流体下模型水敏伤害损害率
Fig. 6 Water-sensitive damage ratio of the model under different salinity

- 1) 无论是老化前抑或是老化后,当注入流体的矿化度逐渐降低时,渗透率均呈逐渐降低的趋势;
- 2) 无论是老化前还是老化后,模型水敏伤害的损害率随矿化度的降低而呈上升趋势;
- 3) 模型发生较大水敏伤害的转折点在 11.99 ~ 6.00 g/L 之间,故认为该储层合理的注入水矿化度应为 11.99 g/L 左右。

4 结论与建议

- 1) 经浸泡型模型水敏性实验分析,该地区具有中等水敏。
- 2) 水敏伤害没有改变水驱油的方式——以活塞式驱油为主,及剩余油的形态——以绕流形成的簇状残余油为主,但绕流现象整体比无水敏伤害时严重,剩余油增多,驱油效率降低。
- 3) 水敏伤害前、后,逐渐增大注水压力,均能提高模型的采收率。
- 4) 在注水压力、加压方式等实验条件相同的情况下,对于单模型,剩余油的分布主要受注水位

置及微观非均质性双重因素控制;而对于组合模型,剩余油的分布则主要受宏观及微观非均质性控制。

5) 为避免该地区的水敏性伤害,建议合理的注入水矿化度应为 11.99 g/L 左右。

参 考 文 献

1 郑荣才. 辽河盆地第三系砂岩储层的敏感性研究[J]. 矿物岩石,1997,17(1):77~84

2 黄书先,张超谟. 孔隙结构非均质对剩余油分布的影响[J]. 江汉石油学院学报,2004,26(3):124~125

3 赵阳,曲志浩. 裂缝水驱油机理的真实砂岩微观模型实验研究[J]. 石油勘探与开发,2002,29(1):116~119

4 曲志浩,孔令荣. 低渗透油层微观水驱油特征[J]. 西北大学学报(自然科学版),2002,32(4):329~334

5 朱玉双,曲志浩,蔺方晓,等. 油层受水敏伤害进水驱油渗流特征[J]. 石油学报,2004,25(2):59~64

6 朱玉双,李庆印,王小孟. 马岭油田北三区延 10 油层注水开发中储层伤害研究[J]. 石油与天然气地质,2006,27(2):264~268

7 宋成鹏,朱玉双,艾芳,等. 木钵延 10 油层水敏伤害研究[J]. 西北大学学报(自然科学版),2005,35(2):203~206

8 刘林玉,王震亮,柳益群. 鄂尔多斯盆地西峰地区长 8 砂岩微观非均质性的实验分析[J]. 岩矿测试,2008,27(1):29~32

9 朱玉双,曲志浩,孔令荣,等. 靖安油田长 6、长 2 油层驱油效率影响因素[J]. 石油与天然气地质,1999,20(4):333~335

10 熊敏,王勤田. 盘河断块区孔隙结构与驱油效率[J]. 石油与天然气地质,2003,24(1):42~44

11 尹志军,鲁国永,邹翔,等. 陆相储层非均质性及其对油藏采收率的影响——以冀东高尚堡和胜利永安镇油藏为例[J]. 石油与天然气地质,2006,27(1):106~110

12 Theresa B, Noam W, John S S. On the critical salt concentrations for particle detachment in homogeneous sand and heterogeneous Handford sediments[J]. Geoderma, 2005, 124(1-2):121~132

(编辑 李 军)