

纵向非均质低渗油藏水驱开发适应性评价



张烜玮, 封奔, 于季灏, 杨丕辉, 曾顺鹏*

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆 401331

摘要: 低渗油藏的纵向非均质性是制约水驱开发效果的主要原因, 严重影响原油的采出程度。为了研究纵向非均质性对低渗油藏水驱开发效果, 用填砂管模拟该类储层渗透率范围内的岩心进行室内驱替实验研究, 紧密围绕纵向非均质性对低渗油藏水驱开发效果的影响, 使用提高采收率评价装置, 开展不同条件下低渗油藏水驱开发效果实验, 揭示渗透率极差、驱替速度和注采方式对低渗油藏水驱开发效果的影响规律。实验研究表明, 渗透率极差越大, 见水时间越早; 随着驱替速度的增加, 见水时间早; 采出程度曲线在初始阶段线性增加, 后缓慢增加, 最后保持稳定; 随着驱替速度的增加, 采收率降低; 分注合采采收率最大, 合注合采次之, 合注分采的方式则效果最差。

关键词: 低渗油藏; 水驱油实验; 纵向非均质性; 采收率

DOI: 10.57237/j.jest.2024.01.003

Experimental Study of Water Flooding in Low Permeability Reservoirs Considering Longitudinal Heterogeneity

Zhang Xuanwei, Feng Ben, Yu Jihao, Yang Pihui, Zeng Shunpeng*

School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China

Abstract: The vertical heterogeneity of oil reservoirs with low permeability is the most important reason that restricts the water-drive development effect, which seriously affects the recovery of oil. In order to study the impact of vertical heterogeneity on water-drive development effect of low permeability reservoirs, indoor displacement experiments were carried out by using sand-filled tubes for simulating cores with the permeability in the range of the oil reservoir with low permeability. The experiments were closely focused on the impact of vertical heterogeneity on water-drive development effect of low permeability reservoirs. By using the recovery rate evaluation device, experiments were conducted under different conditions to investigate water-drive development effect of low permeability reservoirs. The influencing laws of permeability ratio, displacement velocity, injection-production pattern on water-drive development were revealed. Experimental results indicate that the larger the permeability ratio, the earlier the water breakthrough. As the

基金项目: 超临界 CO₂ 强化开采过程中页岩气储层渗透率变化机理研究 (基金号: YKJCX2320127).

*通信作者: 曾顺鹏, z-boshi@163.com

收稿日期: 2023-12-30; 接受日期: 2024-02-27; 在线出版日期: 2024-03-11

<http://www.energysci-tech.org>

displacement velocity increases, the water breakthrough later; the recovery curve increases linearly in the initial stage, then increases slowly, and finally remains stable; as the displacement velocity increases, the recovery decreases; the recovery rate of separate injection and production is the largest, followed by combined injection and production, while the combined injection and separate production has the worst effect.

Keywords: Low Permeability Reservoir; Water Flooding Experiment; Longitudinal Heterogeneity; Recovery Factor

1 引言

近年来，中国石油探明储量中，低渗透油藏储量所占比例高达 60%以上，但其受渗透率低、存在启动压力梯度、储层变形等因素的影响[1-4]，依靠地层自身能量很难对其开发，开发效果和经济效益差。低渗透油藏为渗透率小于 50.0mD 的油藏，并可进一步划分为低渗透储层、特低渗透储层和超低渗透储层。为了提高多层系非均质油藏的开发效果及最终采收率，大多数油田都普遍采取注水开发，以补充和保持地层压力，并成为中后期开采阶段油田开发的主要方式。但实施注水开发也存在许多难以避免的问题，尤其在非均质性强的储层应用效果不太理想[5-8]。渗透率低、孔隙度小、非均质性强和粘土矿物含量高是控制注水开发效果不理想的主要因素。

低渗透油藏进行注水开发过程中，注入压力普遍偏高，部分注入井出现注不进的现象，也存在驱替效率低，波及系数低等问题[9-10]，使得注入水不能把原油有效的驱替出来，无法达到预期效果；其次，低渗透油藏开发过程中采油井见水后普遍存在含水率上升快，采油指数降低等问题，主要是由于岩石的物性差和不合理的开采方式，导致原油的绕流、卡段和水的窜流，产生水锁现象不能有效驱替原油，导致水驱油的采收率不及预期[11, 12]。

有关储层非均质性的研究最早出现在上世纪七十年代至八十年代，而在中国正式开始进行储层非均质性研究是在 1985 年，原石油工业部在昆明召开的“岩矿工作会议”上，“中国陆相储层特征及其评价”项目被列为部级科技重点攻关项目，由此开启了中国对于储层非均质性研究的新篇章。与此同时，储层非均质性也慢慢成为了众多地质学者和油田开发学者们关注的重点[13-17]，并在此后中国关于储层非均质性的相关研究开始了迅速地发展。物理模拟[18-19]、数值分析[20]是研究非均质性油藏水驱规律的主要手段，前人通过多层长岩芯水驱油实验研究认为，各油层自身物性

以及层间干扰是各层动用状况差异较大的主要原因[21]。也有学者通过数值模拟研究了渗透率极差对水驱效率的影响，可以明显发现高渗透率部分易形成高渗通道，使油藏大范围形成多相流降低了原油的流动能力[22]。

近年来，在储层非均质性上所取得的研究成果，在对油田开发阶段的工艺调整等方面起到了指导作用，但低渗油藏水驱开发效果仍有极大的提升空间。但有关开采制度对非均质低渗油藏开发效果的研究较少，无法指导为实际生产制度的调整。

为此，本文以渗透率极差大小为纵向非均质评价指标，从渗透率极差、驱替速度和注采方式这三方面因素分别对低渗油藏水驱油开发效果进行研究，并揭示其分别对低渗油藏水驱油开发效果的影响规律，对指导现场开发参数设计尤为重要。

2 实验设计

2.1 实验器材

该模拟实验中，使用标准盐水来模拟地层水，以及在 60℃ 条件下粘度为 1.27mPa·s 的实验用油作为地层油。利用 40~70 目的石英砂模拟储层。

表 1 标准盐水配方

成分	KCl	NaCl	MgCl ₂	CaCl ₂
质量分数 (%)	2.00	5.50	0.45	0.55

2.2 实验参数及条件

实验在温度在 60℃ 的恒温箱中进行，利用石英砂制作填砂管模拟储层低渗条件，将不同渗透率的填砂管并联，模拟储层纵向非均质特征，具体参数见表 1。

为有效地模拟储层开采过程，保证驱替压力以及压力梯度在合理的范围内，在出口端设置回压阀，保证实验条件合理。

通过使用平流泵、中间容器和填砂管等设备，模拟低渗条件下，渗透率极差、驱替速度和注采方式三方面因素对注水开发效果的影响。具体实验流程如图 1 所示。

#1、#2、#3 渗透率极差依次升高，采用合注合采的方式，以 $0.2\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度注入，研究渗透率极差对非均质低渗油藏的开发影响；#4、#5、#6、#7、#8 渗透率极差相似，可用来模拟不同驱替速度（ $0.1\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $0.2\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $0.3\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $0.4\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $0.5\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ）对低渗油藏水驱开发效果的影响；#9、#10、#11 渗透率极差相似，以 $0.2\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 驱替速度，采用不同的开采方式（合注合采、分注合采、合注分采），以研究不同开采制度对非均质低渗油藏开采效果的影响。

2.3 实验流程

- ①制备填砂管，标准盐水以及原油，并连接实验设备。
- ②确定填砂管基础物性参数（如孔隙度和渗透率），并饱和油。主要从三方面保证流体充分饱和，一是对填砂管进行抽真空饱和水，二是由驱替速度低速注入缓慢升高直至出口端不在出气泡为止，三是利用重力充分饱和。
- ③依照表 2 驱替实验参数，将填砂管并联形成非均质模型，依次连接到实验设备中。
- ④根据表 2 中的实验条件进行模拟实验，并对出口段流体进行收集。
- ⑤将数据进行处理和计算。

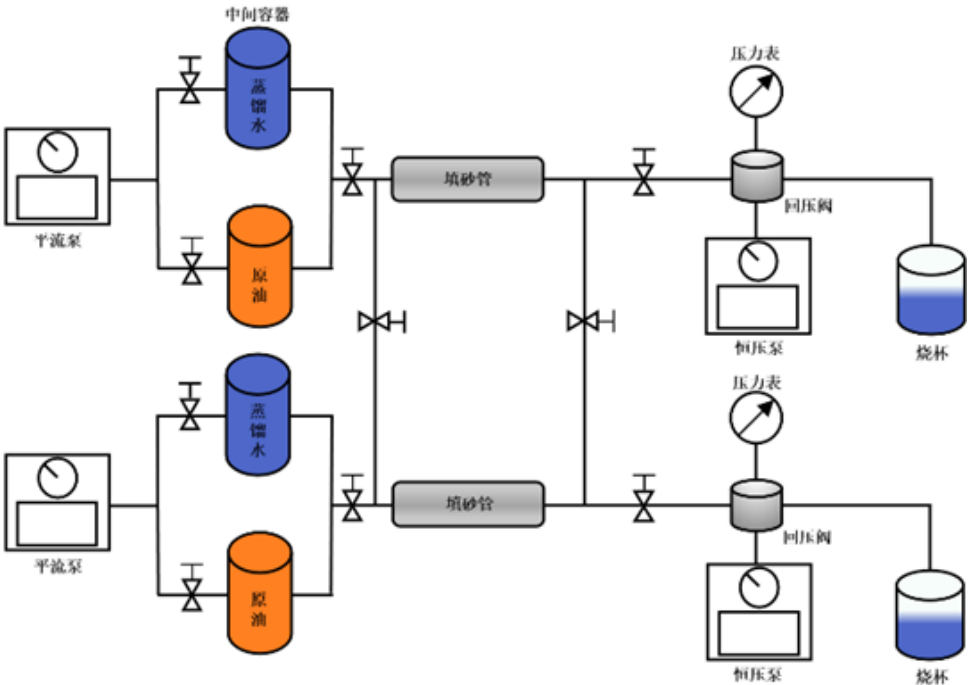


图 1 驱替实验流程图

表 2 驱替实验参数表

模型编号	填砂管编号	渗透率 (D)	渗透率极差	注采方式	驱替速度 ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	孔隙体积 (mL)
#1	1-A	0.018	1.17	合注合采	0.2	66.2
	1-B	0.021				
#2	2-A	0.021	6.19	合注合采	0.2	75.5
	2-B	0.130				
#3	3-A	0.021	74.47	合注合采	0.2	85.3
	3-B	1.564				
#4	4-A	0.022	1.18	合注合采	0.1	65.0
	4-B	0.025				
#5	5-A	0.021	1.25	合注合采	0.2	67.4
	5-B	0.026				

模型编号	填砂管编号	渗透率 (D)	渗透率极差	注采方式	驱替速度 (mL·min ⁻¹)	孔隙体积 (mL)
#6	6-A	0.019	1.09	合注合采	0.3	64.9
	6-B	0.021				
#7	7-A	0.025	1.12	合注合采	0.4	66.3
	7-B	0.028				
#8	8-A	0.024	1.11	合注合采	0.5	65.1
	8-B	0.027				
#9	9-A	0.022	1.10	合注合采	0.2	70.3
	9-B	0.024				
#10	10-A	0.027	1.12	分注合采	0.2	73.2
	10-B	0.030				
#11	11-A	0.024	1.11	合注分采	0.2	74.0
	11-B	0.027				

3 实验结果分析

3.1 渗透率极差对驱替效果的影响

使用渗透率极差为 1.17、6.19、74.47 的三组非均质模型，以 0.2 mL·min⁻¹ 的注入速度，开展合注合采驱替实验。

3.1.1 产油速度曲线特征

产油速度与注入量之间关系如图 2 所示，可以看出，水驱过程中前期出油速度较快，产出速度约等于注水速度。随着注入量的增加，在注入量为 0.3-0.5PV 之间，产出速度快速下降，后产出速度以较慢的速度保持下降，直至产出速度为 0 mL·min⁻¹ 结束。

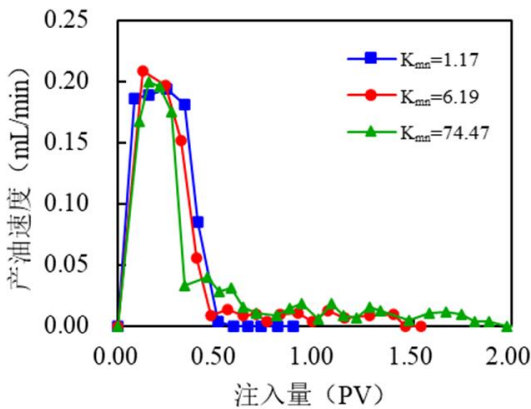


图 2 产油速度与注入量之间的关系

当以相同驱替速度，对不同渗透率极差的模型进行驱替时，可以看出，驱替初期采出速度相似，均在 0.2 mL·min⁻¹ 左右。随着注入量的增加，K_{mn}=74.47 的非均质模型最先出现了产出速度的下降，并且随着渗透率极差的减小该现象明显延后，主要原因是因为，渗透率极差大导致驱替相跟容易容易出现指进现象，形成

驱替相的高渗通道，一旦驱替相从出口端产出，被驱替相所受到渗流阻力快速增加，产出速度减小。

并且，当产出程度快速下降后，K_{mn}=1.17 的非均质模型产出速度下降到 0 mL·min⁻¹，而 K_{mn}=74.47 的条件下，采出速度仍会保持一个较高值慢慢下降。可以看出，随着渗透率极差的减小，后期持续开采时间更长。

3.1.2 含水率曲线特征

含水率于注入量的关系曲线如图 3 所示，可以看出，注水开发过程中，含水率变化曲线基本可以分成三个阶段，第一阶段为无水阶段，第二阶段为含水率上升阶段，第三阶段为高含水阶段。

由不同渗透率极差条件下的含水率曲线，可以看出，K_{mn}=74.47 的非均质模型见水时间早，最先出现了含水率上升，并且随着渗透率极差的增加，无水产油期在缩短，而高含水阶段在延长。

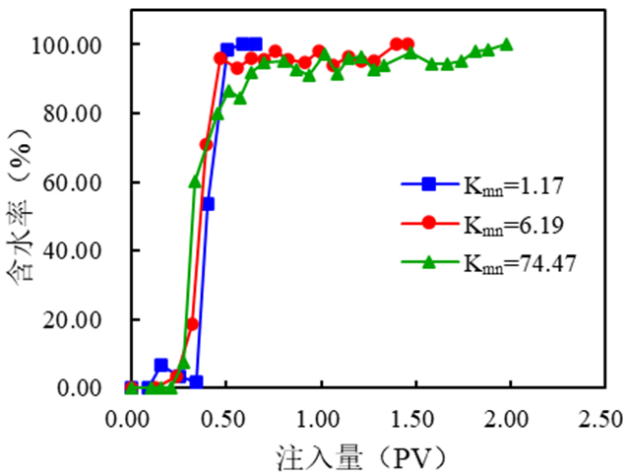


图 3 含水率与注入量的关系

3.1.3 采出程度曲线特征

采出程度与注入量关系的曲线如图 4 所示，可以

看出, 在驱替初期, 采出程度与注入量成正比, 到后期采出程度与注入量之间关系的斜率逐渐减小, 最终, 采出程度随注入量变化保持稳定。

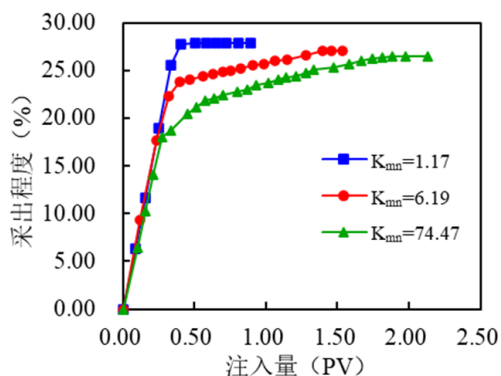


图4 采出程度与注入量之间的关系

水驱初期, 在不同渗透率极差条件下, 采出程度随注入量变化基本一致, 但随着注入量的增加, 渗透率极差大的非均质模型更早的出现了拐点, 并随着渗透率极差的减小, 拐点出现的时间越晚。并且从最终采出程度可以看出, 渗透率极差越小采出程度越高, 同时, 高渗透率极差条件小, 达到水驱最大采出程度所需注入量远远大于低渗透率极差条件下对应的注入量。

在不同渗透率极差条件下, 进行水驱驱替实验, 通过对产油速度、含水率以及采出程度的比较发现, 相较于高渗透率极差, 低渗透率极差条件下, 无水采油期长, 采出程度高, 驱替效率高。应对高渗透率极差带来的影响, 最有效的手段是合理划分开发层系,

3.2 驱替速度对水驱油效果的影响

使用渗透率极差为 1.18、1.25、1.09、1.12 和 1.11 的五组非均质模型, 在驱替速度为 0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下, 开展合注合采驱替实验。

含水率与注入量之间的关系如图 5 所示, 可以看出, 含水率变化曲线基本可以分成三个阶段, 第一阶段为无水阶段, 第二阶段为含水率上升阶段, 第三阶段为高含水阶段。随着注水速度的增加, 见水时间早, 无水产油期明显减小, 其中注水速度为 0.5 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的无水产油期最短, 最先进入含水率上升阶段, 同时, 也最先达到 100% 含水率。

采出程度与注入量之间的关系如图 6 所示, 可以看出, 在注入体积较少时, 采出程度与注入量呈线性

相关, 然后随着注入量的增加, 采出程度变化程度呈现出变缓的现象。并且通过观察不同驱替速度下的采出程度曲线, 可以发现, 随着驱替速度的升高, 采出程度出现下降。

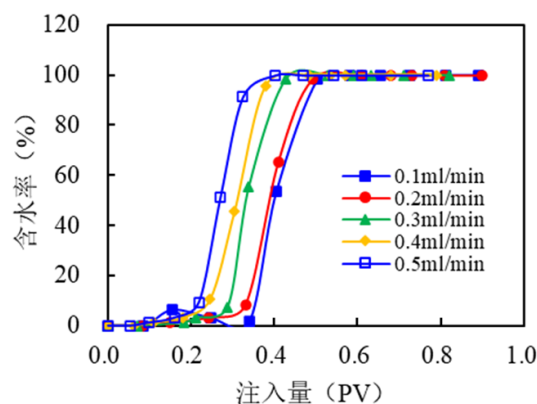


图5 含水率与注入量之间的关系

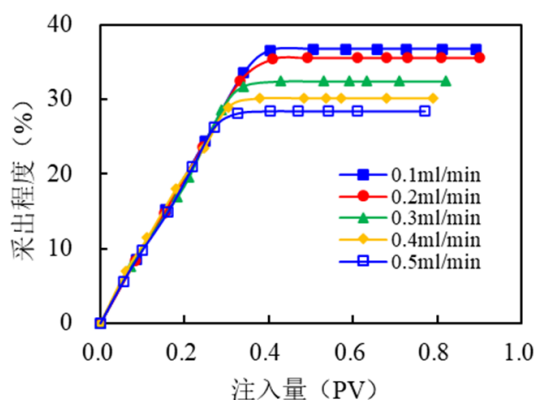


图6 采出程度与注入量之间的关系

3.3 注采方式对水驱油效果的影响

为研究注采方式对水驱油效果的影响, 将渗透率极差相似的两个非均质模型以 0.2 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的注水速度分别进行合注合采、分注合采以及合注分采的方式进行开发。

采收率和开采方式的关系如图 7 所示, 可以看出, 不同注水方式下的采收率不同, 其中分注合采最高, 合注合采次之, 合注分采最低。分开注水效果明显好于受层间干扰较大的合层注水, 合采效果明显好于分采效果。

有实验结果表明, 分开注水的方式减少了层间干扰对驱替相渗流状态的影响, 驱替相可以分别进入渗透率不同的两个油层, 更有利于储层的开发。而合注合采和合注分采之间的差异主要为, 当注入端压力一

定时, 高渗层更易形成流动通道, 在采出端形成流动, 加大了生产压差, 而合注分采中, 采出端相互独立, 减少了相互的影响, 从而抑制的开发效果。

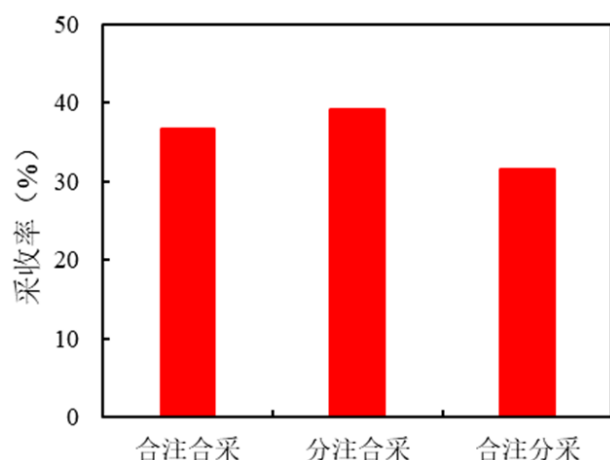


图7 不同注采方式下采收率

4 结论

- 1) 渗透率极差、驱替速度以及开采方式对纵向非均质低渗油藏注水开发效果有较大影响。
- 2) 渗透率极差对水驱驱替效果有较大影响。对渗透率极差大的储层进行注水开发时, 开发效果较差, 驱替效果受层间干扰影响大, 并且驱替效率低, 采出程度也有一定的减小。
- 3) 驱替速度对无水产油期的长短和最终采出程度有较大的影响。减小驱替速度, 可以明显提高无水产油期, 提高采出程度。
- 4) 不同注水方式下的采出程度不同。其中, 分注合采开发效果最好, 合注分采开发效果最差。
- 5) 在实际油藏开发过程中, 油田应根据自身油藏条件设置合适的开发方式。合理划分开发层系, 分层注水降低层间干扰; 制定合理的驱替速度和注采方式, 提高原油采出程度。

参考文献

- [1] 雷传玲. 低渗透油藏改善开发效果技术对策研究 [J]. 科学技术创新, 2020, (31): 18-19.
- [2] 李忠兴, 韩洪宝, 程林松, 等. 特低渗油藏启动压力梯度新的求解方法及应用 [J]. 石油勘探与开发, 2004, (03): 107-109.
- [3] 曹雪刚. 特低渗储层非均质性对注水开发的影响 [D]. 西安石油大学, 2017.
- [4] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例 [J]. 石油学报, 2012, 33(02): 173-187.
- [5] 万海乔, 王盛, 刘学良. 低孔低渗稠油油藏注水增能效果影响因素 [J]. 新疆石油地质, 2023, 44(03): 347-351.
- [6] 朱维耀, 岳明, 刘昀枫, 等. 中国致密油藏开发理论研究进展 [J]. 工程科学学报, 2019, 41(09): 1103-1114.
- [7] 刘辉, 何顺利, 李俊键, 等. 特低渗油藏水驱开发效果评价方法研究 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(01): 58-60, 187.
- [8] 王亚静, 蒋珍, 马东博, 等. 常规低渗透油藏注水开发技术对策 [J]. 化学工程与装备, 2022, (07): 170, 176.
- [9] 胡继聪, 梁雨田, 王梦妮, 等. 低渗油藏注采结构调整与挖潜技术研究 [J]. 清洗世界, 2023, 39(04): 68-70.
- [10] 王维. 注水油田提高采收率技术研究与应用 [J]. 石化技术, 2023, 30(10): 180-182.
- [11] 高斌, 许诗婧, 胡心玲, 等. 水敏感性对低渗油藏油水两相渗流影响实验研究 [J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2022, 37(06): 75-81.
- [12] 唐海, 黄炳光, 曾凡华, 等. 模糊综合评判法确定油藏水驱开发潜力 [J]. 石油勘探与开发, 2002, (02): 97-99.
- [13] 于春生, 李闽, 乔国安, 等. 纵向非均质油藏水驱油实验研究 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(01): 84-86, 191-192.
- [14] 严科, 杨少春, 任怀强. 储层宏观非均质性定量表征研究 [J]. 石油学报, 2008, (06): 870-874, 879.
- [15] 于翠玲, 林承焰. 储层非均质性研究进展 [J]. 油气地质与采收率, 2007, (04): 15-18, 22, 111-112.
- [16] 莫建武, 孙卫, 杨希濮, 等. 严重层间非均质油藏水驱效果及影响因素研究 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2011, 41(01): 113-118.
- [17] Yue Lu, Liu Zhonghua, Ding Zhongpei, et al. Experimental study on the effect of polymer concentration and slug size on recovery degree in hyper-permeability reservoir [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 189: 032072.
- [18] 王杰祥, 王腾飞, 韩蕾, 等. 特低渗油藏空气泡沫驱提高采收率实验研究 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(05): 130-134.
- [19] 陈民锋, 姜汉桥, 曾玉祥. 严重非均质油藏开发层系重组渗透率级差界限研究 [J]. 中国海上油气, 2007, (05): 319-322, 326.

- [20] 韩洪宝, 程林松, 张明禄, 等. 特低渗油藏考虑启动压力梯度的物理模拟及数值模拟方法 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, (06): 49-53.
- [21] 沈瑞, 赵芳, 高树生, 等. 低渗透纵向非均质油层水驱波及规律实验研究 [J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(04): 91-93, 117.
- [22] 赵文景, 王敬, 钱其豪, 等. 非均质油藏水驱优势渗流通道演化规律 [J]. 断块油气田, 2023, 30(05): 847-857.