

Research on Pore Structure Change of Core from Triassic Sandstone Reservoir after Scouring with High Multiple Fluid in Tahe Oilfield

Xiaoyu Zhang^{1,2} Puli Chen^{1,2} Xia Wang^{1,2} Ruiming Zhao^{1,2}

1. Experimental center SINOPEC Northwest Company, Urumqi, Xinjiang, 830011, China

2. Key Laboratory for Enhanced Oil Recovery in Fractured Vuggy Reservoir of SINOPEC, Urumqi, Xinjiang, 830011, China

Abstract

Based on the volume sensitivity experiment of the core of Triassic sandstone reservoir in Tahe oilfield, the core pore structure characteristics before and after the experiment are analyzed with core nuclear magnetic resonance (NMR) and scanning electron microscopy (SEM), and the changes of pore structure of the reservoir rocks in the sandstone reservoirs of Tahe oil field after high multiple fluid scour are studied. The results show that the permeability of core decreases with the increase of displacement multiplier, and the average permeability of water drive decreases by nearly 57.9%. There was no significant change in the skeleton structure after water flooding under SEM. The nuclear magnetic resonance experiment shows that the pore radius distribution of the core is moved to the larger radius of the pore radius after the long-term scour of the fluid, and the pores with smaller core diameter (the pore radius < 1 μm) decrease to a certain extent, and the pore size (the pore radius > 1 μm) shows an increasing trend. The mechanism of the change of the permeability characteristics of the reservoir is that the particles and the fillings in the intergranular pores are dissolved, broken and migrated during the process of fluid scouring, a part of the filling is washed away or dispersed along the channel, and a part of the filling is blocked at the fine throat. The distribution range of the pore radius increases, the larger pore is increasing, the number of roar channels and the radius of the roar channel are reduced. That is, with the increase of displacement ratio, rock storage capacity is increasing, permeability is decreasing, and reservoir heterogeneity is enhanced.

Keywords

high-volume fluid scour; permeability; pore structure; core NMR

塔河油田三叠系砂岩储层岩心高倍数流体冲刷后孔隙结构变化研究

张晓宇^{1,2} 陈蒲礼^{1,2} 汪霞^{1,2} 赵瑞明^{1,2}

1. 中国石化西北油田分公司实验中心, 中国·新疆 乌鲁木齐 830011

2. 中国石化缝洞型油藏提高采收率重点实验室, 中国·新疆 乌鲁木齐 830011

摘要

在对塔河油田三叠系砂岩储层岩心进行不同驱替体积倍数的敏感性实验基础上, 结合岩心核磁共振实验、扫描电镜等方法对实验前后岩心孔隙结构特征进行分析, 研究了塔河油田砂岩储层经历高倍数流体冲刷后储层岩石孔隙结构变化规律及原因。结果表明, 随着驱替倍数增加, 岩心渗透率总体呈下降趋势, 水驱渗透率平均减少近 57.9%; 水驱后岩石骨架结构在扫描电镜下观察未发生明显变化; 核磁共振实验反映出流体长期冲刷后岩心的孔隙半径分布呈现出向孔隙半径较大处移动, 且岩心孔径较小的孔隙 (孔隙半径 < 1 μm) 有着一定程度地减少, 孔径较大的孔隙 (孔隙半径 > 1 μm) 呈现出增加的趋势。研究认为储层渗透性特征发生变化的机理主要是在驱替过程中粒间孔中微粒和填隙物发生溶解、破碎和运移, 一部分被流体沿大孔道冲走或冲散, 一部分滞留在细喉道处形成堵塞, 造成孔隙半径分布范围增大, 大孔隙在增多增大, 而吼道数量减少及吼道半径减小, 即随着驱替倍数增加, 岩石储存能力在增大, 渗透性能在减小, 储层非均质性有所增强。

关键词

高倍流体冲刷; 渗透率; 孔隙结构; 岩心核磁共振

【作者简介】张晓宇 (1985-), 男, 研究生学历, 现任职于中国石化西北油田分公司工程室, 从事油气藏开发研究。

1 引言

长期注水开发或在大底水条件下的油藏开发均会导致储层特征发生变化。前人对不同地区、不同流体物性、不同的岩性、不同的驱替速度下不同油田长期注水开发后储集层物性参数变化已进行了大量的研究^[1-4]，并对不同地区的储层物性参数进行特定的分析。研究普遍认为，长期注水开采或储集层经历高倍数流体冲刷后，岩石孔隙结构的宏观物性参数孔隙度和渗透率会发生较大的变化。引起这种变化的主要原因包括随着油藏开采程度的不同，油藏温度、压力的变化、流体性质的改变及注入水动力作用所引起的岩石微观结构的变化。其中，注入水动力作用是引起岩石微观结构变化的主导因素，这种作用包括物理和化学两个方面。物理作用主要表现为动力冲刷引起的岩石结构的物理变化，化学作用则表现为由于注入流体的不配伍性引起岩石中特殊矿物的吸水膨胀、结晶、沉淀和溶蚀等现象。岩石微观机理的改变，直接在宏观上得到体现，并由此引发流动单元宏观物性参数的动态演化。

随着塔河油田三叠系砂岩储层开采进入后期，含水率不断上升，由于缺乏对大底水油藏长期开发后储层岩石孔隙结构特征和渗流规律的研究，使油藏数值模拟参数调整、剩余油分布研究缺少依据，油田开采难度越来越大，有必要对开发后期储层的渗流特征及变化规律进行研究，为后期提高采收率技术提供一定的理论支持。

论文利用塔河油田具有代表性三叠系砂岩岩心，通过室内水驱实验模拟长期注水（或大底水）开发，对比分析水驱前后储层物性、孔隙结构特征及变化规律，研究高倍数驱替后储层孔隙结构变化特征。

2 实验条件和样品的选取

2.1 实验条件

本实验选取的是 S9X 井三叠系砂岩储集层岩心进行的高倍数驱替实验。实验在室温条件下（25℃），实验用水采用 S9X 井区块地层水资料配制模拟地层水，矿化度 216714mg/L，驱替速度是依据同区块速敏实验所获得的临界流速，为 0.6ml/min。岩心为塔河油田 S9X 井储层的天然岩心。将岩心前期处理后烘干，分别测定每一块岩样的质量、孔隙度、渗透率等参数，之后对岩心进行抽真空再饱和地层水，称量

样品湿重后，再采用恒速法分别对岩心进行高倍数水驱实验，同时记录累积液量，测定冲刷前后和不同驱替倍数下的液测渗透率，累积注水体积倍数不小于 100 倍。

核磁共振实验采用 MacroMR12-125H-G 全岩心核磁共振分析系统进行测试。测试原理是当岩心完全被水饱和时，单一孔隙的 T₂ 值与孔隙的表面积与体积的比值成正比，它就是孔隙尺寸的度量。这样实验测得的所有孔隙的 T₂ 分布就代表岩石的孔径分布。本次实验参数为：

回波间隔（TE）：0.15ms。

回波个数：8000。

采样累加次数：32。

2.2 样品的选取

通过统计 345 块该井的孔渗资料得出，S9X 井三叠系储层孔隙度范围为 5.3%~27%，平均孔隙度为 21.6%，渗透率范围为 0.16mD~4278mD，平均渗透率为 620mD。

S9X 井三叠系储层中，粘土矿物以高岭石和绿泥石为主，平均百分比分别为 47% 和 32%，伊利石比例较低，平均百分比为 8%，局部深度伊蒙混层较高，整体平均百分比为 13%。岩石样品粘土矿物特征统计见表 1。

表 1 S9X 井粘土矿物统计信息

序号	层位	深度	蒙脱石	高岭石	伊利石	绿泥石	绿蒙混层	伊蒙混层	伊蒙混层比
1	T	4533.23~4605.77		27	5	38		30	
2				38	7	42		13	
3				34	15	27		24	
4				34	10	37		19	
5				63	4	29		4	8
6				69	4	23		4	9
7				39	8	44		9	8
8				50	10	29		11	5
9				55	9	24		12	5
10				56	9	25		10	6
11				48	11	32		9	5
平均值				47	8	32		13	

结合该井三叠系储层四个韵律段孔渗特征，本实验选取了 4 块储层岩心，岩心渗透率范围在 100mD~1000mD 之间，基本代表了三叠系储层段主要渗透率范围。实验样品基础参数见表 2。

表2 本次实验样品孔渗信息表

样品号	孔隙度 (%)	气测渗透率 (mD)
S9X-A101	24	651
S9X-A111	25.1	942
S9X-A280	19.3	130
S9X-A345	20.1	357

3 高倍流体冲刷前后液测渗透率变化特征

通过对4块岩心分别进行了100倍以上孔隙体积倍数的驱替实验,各岩心的液测渗透率变化见图1。

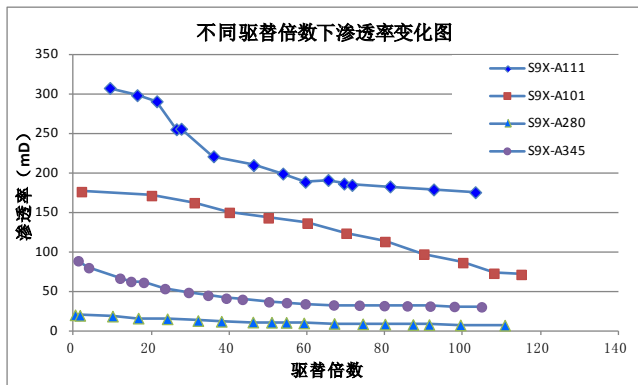


图1 岩石渗透率随驱替倍数的变化图

从图1看出,随驱替倍数的增加,四块样品的渗透率均呈现出逐渐下降的趋势。S9X-A101样品的液测渗透率随着驱替倍数的增大从初始的88.3mD下降到35.9mD,渗透率下降了59.4%; S9X-A111样品的液测渗透率从初始的307mD下降到175.9mD,渗透率下降了42.8%; S9X-A280样品的液测渗透率从初始的20.6mD下降到7.46mD,渗透率下降了63.7%; S9X-A345样品的液测渗透率从初始的89.1mD下降到30.7mD,渗透率下降了65.6%。四块样品的液测渗透率平均下降了57.9%。

4 高倍流体冲刷前后孔隙结构的变化规律

4.1 孔隙结构扫描电镜的变化特征

我们将驱替前后洗盐烘干后的样品,在扫描电镜下观察端面的孔隙特征,见图2。

从图2中可以看出,S9X-A101和S9X-A111样品在经过100个体积倍数驱替后,岩心的骨架颗粒未发生破裂和位移;驱替入口端面粒间孔中间的填充物数量有一定的减少,填充物向内部发生了运移,势必会造成岩心内部孔隙结构和孔隙大小等发生一定的变化。

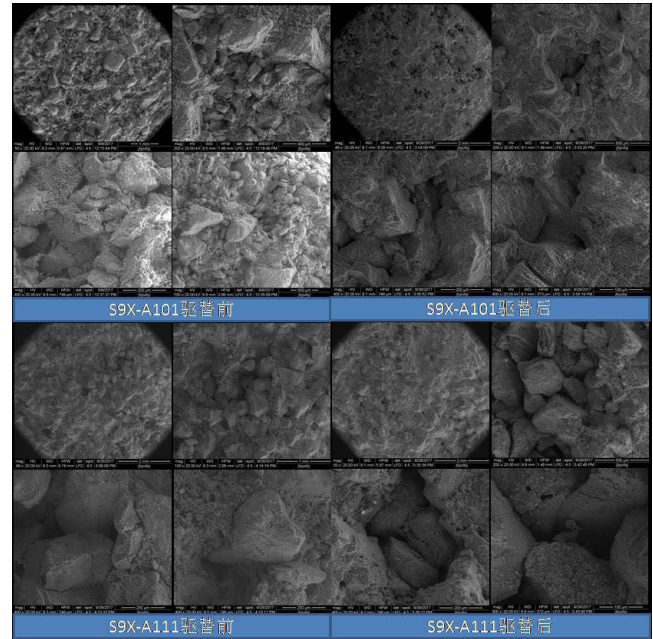


图2 驱替前后岩石端面孔隙特征扫描电镜图

4.2 驱替前后样品的粘土矿物的变化特征

我们将驱替前后洗盐烘干后的样品,取部分进行粘土矿物含量X衍射分析,结果见表3。

表3 驱替前后样品粘土矿物含量表

样品号	高岭石		伊利石		绿泥石		伊蒙混层	
	驱替前	驱替后	驱替前	驱替后	驱替前	驱替后	驱替前	驱替后
S9X-A101	38	34	7	9	42	39	13	18
S9X-A111	55	52	9	7	24	26	12	15
S9X-A280	48	43	6	4	23	21	23	32
S9X-A345	45	41	7	6	25	23	23	30

从表3中可以看出,四块样品的粘土矿物以高岭石和绿泥石为主,且样品在经历了高倍数流体冲刷后,粘土矿物的相对含量没有十分明显的变化,说明了流体冲刷可能在一定程度上造成了粘土矿物的运移,但是并没过多的粘土矿物被流体冲刷出岩心。

4.3 孔隙结构核磁共振参数的变化特征

为研究岩心高倍数水驱后微观孔隙结构特征变化规律,对高倍水驱实验前后样品进行核磁共振实验,对比研究其孔隙结构特征。

氢核在多孔岩石中主要发生面扩散弛豫^[5],弛豫时间不仅与岩石的表面弛豫率 ρ 有关,还与孔隙体积 V 与表面积 S 的比值有关,而 V/S 与孔隙半径 r 呈正比。因此,横向弛豫时间 T_2 可表达为:

$$T_2 = \frac{1V}{\rho s} = \frac{1r}{\rho c} \quad (1)$$

由 (1) 式可知, 已知表面弛豫率 ρ 和孔隙形状因子 c , 利用 T_2 频谱可直接得到孔隙大小分布。根据核磁共振与其他实验 (如压汞法) 得到比表面积 (S/V)、累计孔隙体积或孔隙大小分布的相关性可标定得到 ρ 。 T_2 频谱中任意一个很窄区间均是由很多具有相似 V/S 的孔隙组成, 当孔隙形状差异大时, 该区间其实是由一系列不同大小的孔隙构成。如狭长平行板状、管束状和球形孔隙, c 值分别为 1、2 和 3, 对于相同 T_2 值 (即 V/S 相同), 球形孔隙对应半径最大, 狭长板状孔隙最小。本次实验表面弛豫率 ρ 是依据前期该区储层样品的核磁共振实验经验值选定, c 值的选用管束状模型值 2。

通过对样品核磁共振 T_2 谱图的计算, 可以得到岩心内部的孔隙半径分布等信息, 见图 3。

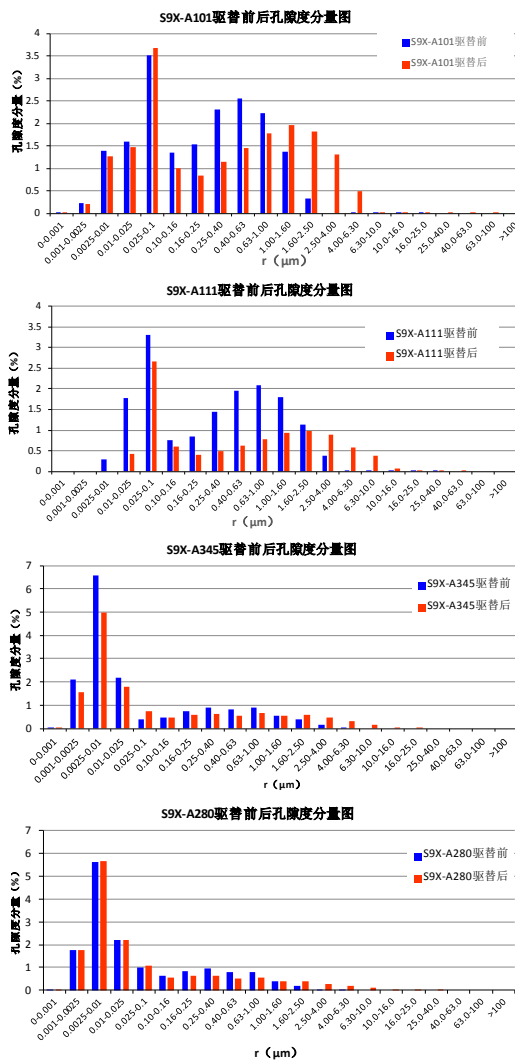


图 3 高倍数水驱实验前后孔隙半径分布直方图

由图 3 可以看出, 经过高倍数水驱后, S9X-A101、S9X-A111、S9X-A280 和 S9X-A345 四块样品的主要孔隙半径分布范围均有所增大, S9X-A101 的主要孔径分布范围从 $0.001\mu\text{m}\sim 2.5\mu\text{m}$, 扩大到 $0.001\mu\text{m}\sim 6.3\mu\text{m}$, 孔径低于 1.0 微米的孔隙呈现了下降的趋势, 其相对比例从水驱前的 90.5% 下降到 69.7%; S9X-A111 的主要孔径分布范围从 $0.001\mu\text{m}\sim 4.0\mu\text{m}$, 扩大到 $0.001\mu\text{m}\sim 16\mu\text{m}$, 孔径低于 1.0 微米的孔隙呈现了下降的趋势, 其相对比例从水驱前的 78.1% 下降到 60.8%; S9X-A280 的主要孔径分布范围从 $0.001\mu\text{m}\sim 6.3\mu\text{m}$, 扩大到 $0.001\mu\text{m}\sim 25\mu\text{m}$, 孔径低于 1.0 微米的孔隙呈现了下降的趋势, 其相对比例从水驱前的 94.6% 下降到 89.1%; S9X-A345 的主要孔径分布范围从 $0.001\mu\text{m}\sim 2.5\mu\text{m}$, 扩大到 $0.001\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$, 孔径低于 1.0 μm 的孔隙呈现了下降的趋势, 其相对比例从水驱前的 91.5% 下降到 83.4%。

通过核磁共振 T_2 谱计算得到的样品孔径变化特征说明了经历高倍数水驱后, 孔径较小 ($< 1\mu\text{m}$) 的孔隙在减少, 孔径较大 ($> 1\mu\text{m}$) 的孔隙在增多, 样品孔隙半径分布范围均有所增大, 岩石孔隙特征的微观非均质性有所增强。

5 高倍流体冲刷后孔隙结构变化和渗透率降低原因分析

通过岩心的核磁共振实验可以得出, 通过高倍数水驱之后, 岩心孔径较小的孔隙 (孔隙半径 $< 1\mu\text{m}$) 有着一定程度的减少, 孔径较大的孔隙 (孔隙半径 $> 1\mu\text{m}$) 呈现出增加的趋势。扫描电镜结果表明岩心样品的入口端面孔隙有着一定的增多, 主要可能是因为粒间孔的充填物 (如粘土矿物) 向岩心内部发生了运移。从图 3 中可以看出, 孔隙半径为 $0.01\sim 0.16\mu\text{m}$ 以后的孔隙呈现出向孔隙半径更大的孔隙变化的趋势。

这可能是由于 S9X 井三叠系储层中, 主要的粘土矿物为高岭石和绿泥石, 高岭石是充填在颗粒中间且较容易发生破碎和运移的颗粒矿物, 在驱替过程中粒间孔中微粒和填隙物发生溶解、破碎和运移, 一部分被流体沿大孔道迁移或冲散, 一部分运移到更小孔隙半径的孔附近。在岩心经历高倍数水驱过程中, 部分粒间孔中的粘土矿物发生运移, 由于绿泥石、伊蒙混层等粘土矿物的阻挡作用或者因为桥架原理而被附着, 滞留在细喉道处形成堵塞, 造成岩心孔隙半径分布范围增大, 大孔隙在增多增大, 而吼道数量减少及吼道半径减小, 从而导致随着

驱替倍数增加, 渗透性能在减小, 储层非均质性有所增强。

如果我们定义较大孔隙半径 ($> 1.0\mu\text{m}$) 的孔代表了颗粒间的孔隙, 较小的孔隙半径 ($\leq 0.4\mu\text{m}$) 的孔代表了连通颗粒间孔的喉道。通过表 4 对比, 可以得出这种结论: 岩心经过高倍数地层流体冲刷后, 虽然较大孔径的孔隙有着一定程度地增加, 但是小孔径的孔隙有着较为明显地降低, 孔喉之间的配比 (表 4 中 A/B) 有着较为明显地降低, 也就是连通颗粒间孔之间的喉道有着较为明显的减少, 这势必会导致样品的渗透率有所下降, 和驱替实验结果反映出的趋势是一致的。

表 4 不同孔径孔隙度分量统计表

	孔径 $\leq 0.4\mu\text{m}$ 孔隙度分量 % (A)	孔径 $> 1\mu\text{m}$ 孔隙度分量 % (B)	A/B	驱替前后 A/B 差值
S9X-A101 驱替前	13.01	1.90	6.86	5.14
S9X-A101 驱替后	9.61	5.58	1.72	
S9X-A111 驱替前	8.41	3.37	2.50	1.31
S9X-A111 驱替后	4.57	3.85	1.19	
S9X-A280 驱替前	13.04	0.63	20.70	12.21
S9X-A280 驱替后	12.58	1.48	8.49	
S9X-A345 驱替前	13.41	1.15	11.62	6.69
S9X-A345 驱替后	10.80	2.19	4.93	

6 结论

(1) 塔河油田 S9X 井三叠系储层岩心经历高倍数流体

冲刷后, 岩心的骨架颗粒未发生破裂和位移, 粘土矿物成分没有较明显变化, 孔隙结构未发生根本性的变化; 而造成岩心大孔隙增多, 小孔隙 (或吼道) 减少主要和孔隙中微粒因水体冲刷而运移有关, 与孔隙结构本身无关。

(2) 随着驱替倍数增加, 岩心总体渗透性能在降低, 主要是因为驱替过程部分颗粒间的粘土矿物发生运移, 由于绿泥石、伊蒙混层等粘土矿物的阻挡作用或者因为桥架原理而被附着, 滞留在细喉道处形成堵塞, 造成岩心孔隙半径分布范围增大, 大孔隙在增多增大, 而吼道数量减少及吼道半径减小, 从而导致随着驱替倍数增加, 渗透性能在减小, 储层非均质性有所增强。

参考文献

- [1] 王昕立, 姚远, 刘峰, 等. 长期冲刷条件下的储层物性参数变化规律研究 [J]. 重庆科技学院学报 (自然科学版), 2011(03):8-9+20.
- [2] 玉珍, 吴素英, 张广振, 等. 注水开发过程中储集层物理特征变化规律研究 [J]. 油气采收率技术, 1996(04):53-58.
- [3] 袁盛贵, 官凤英. 关于油层水淹后岩石物性参数变化的讨论 [J]. 大庆石油地质与开发, 1986(02):69-74.
- [4] 吴素英, 孙国, 程会明, 等. 长期水驱砂岩油藏储层参数变化机理研究 [J]. 油气地质与采收率, 2004(02):9-11.
- [5] SAIDIAN M, PRASAD M. Effect of mineralogy on nuclear magnetic resonance surface relaxivity: A case study of Middle Bakken and Three Forks formations [J]. Fuel, 2015(161): 197-206.