

安塞油田长 6 油层组长期注水后储层变化特征

靳文奇, 王小军, 何奉朋, 陈堂锁

(中国石油天然气集团公司长庆油田公司 第一采油厂, 陕西 延安 716000)

摘要: 在注水开发模拟实验及现场测试资料的基础上, 以压汞实验、物性测试等方法对模拟实验前后岩芯进行分析, 研究了安塞油田长 6 油层组长期注水开发后储层特征变化规律及成因。结果表明, 随着注水量增加, 渗透率总体明显降低, 渗透率平均变化 4.72%; 水驱后孔隙度平均增加 0.15%, 而孔隙组合类型未发生明显变化; 退汞效率平均降低 4.39%; 喉道中值半径变小但分布类型没变化; 储层润湿性整体向亲水方向发展。低渗透储层特征发生变化的机理主要是: 储层中颗粒和填隙物在注入水的冲刷作用下发生溶解、破碎和迁移, 一部分被水冲出, 一部分滞留在细喉道处形成堵塞, 导致孔喉连通性变差, 储层非均质性增强; 注入水冲刷作用使储层岩石表面及孔喉表面性质发生变化, 进而引起储层润湿性发生变化。

关键词: 低渗储层; 孔隙结构; 润湿性; 注水开发; 渗透率; 长 6 油层组; 安塞油田

中图分类号: TE122.2; P618 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)03-0239-06

Characteristics of Chang-6 Oil-bearing Formation Changes After Long Term Waterflood Development in Ansai Oilfield

JIN Wen-qi, WANG Xiao-jun, HE Feng-peng, CHEN Tang-suo

(No.1 Oil Recovery Factory, Changqing Oilfield Company, China National Petroleum Corporation,
Yan'an 716000, Shaanxi, China)

Abstract Based on waterflood development simulated experiment and field data analyses, core was analyzed by mercury injection experiment and physical-mechanical test, characteristics of Chang-6 Oil-bearing Formation changes after long term waterflood development in Ansai Oilfield was discussed. The result showed that permeability evidently decreased with the increase of water injection rate as a whole, the average rate of change was 4.72%; porosity increased by an average of 0.15% and there was no apparent change in the type of pore combination; efficiency of mercury withdraw decreased by an average of 4.39%; the median radius of throats diminished, however, there was no significant change of distribution characteristics; reservoir wettability transformed from lipophile to hydrophile on the whole. Characteristics of low-permeability reservoir varied after long term waterflood development. The mechanisms were that the clay particle and interstitial material in reservoir dissolved, crushed and moved by the action of injected water washing, one part was carried away by injected water, and the another part still stayed in thin pore throat, caused the pore connectivity worse and the heterogeneity of reservoir was stronger; the variation of the properties of reservoir rock and pore-throat surfaces caused the change of reservoir wettability.

Key words: low-permeability reservoir; pore structure; wettability; waterflood development; permeability; Chang-6 Oil-bearing Formation; Ansai Oilfield

0 引言

长期注水开发导致储层特征发生变化, 前人对

中高渗油藏注水开发后储层特征的变化已进行了许多研究^[1-8]。注入水的长期水洗和冲刷提高了储层渗透率^[1-4]、改变了孔隙结构^[5]以及润湿性^[6]等,

收稿日期: 2009-12-08

基金项目: 国家科技重大专项项目 (2008ZX05013-005)

作者简介: 靳文奇 (1971-) 男, 河南太康人, 高级工程师, 从事油田开发研究。E-mail: jwq1971@petrochina.com.cn

© 1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

使注水开发后储层微观结构复杂度增加^[7-11], 部分学者对这些变化机理进行了研究^[12]。有关鄂尔多斯盆地内低(特低)渗储层长期注水开发后储层变化的研究较少, 因此加强对低渗油藏长期注水开发后储层特征变化研究具有重要意义。安塞油田是典型的低渗、低压、低产的“三低”油藏, 经过长期注水后含水率不断上升, 由于缺乏对油藏注水后储层变化规律的研究, 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。为了进一步提高安塞油田的采收率, 有必要对安塞油田注水开发后储层变化特征及渗流规律进行研究, 为提高注水开发效果提供理论支持。

笔者利用安塞油田具有代表性的长 6 油层组岩芯(表 1)通过室内水驱实验模拟长期注水开发, 对比分析水驱前后储层物性、孔隙结构特征及渗流特征变化规律, 研究长期注水开发对储层的影响。

表 1 长 6 油层组岩芯样品特征

Tab. 1 Characteristic of Samples from Chang-6				
Oil-bearing Formation				
样品编号	长度/cm	直径/cm	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)
A	6.97	2.51	10.90	0.398
B	6.48	2.51	11.60	0.766
C	6.35	2.51	13.71	0.397
D	6.69	2.51	14.10	0.463
E	6.96	2.51	13.30	1.552
F	6.88	2.51	12.90	0.138

1 储层物性变化特征

1.1 渗透率变化特征

从图 1 可以看出, 水驱前后岩芯渗透率发生明显变化。经过注入水冲刷后岩芯渗透率总体明显

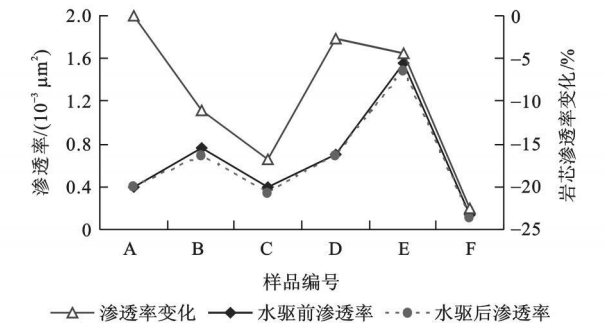


图 1 不同样品水驱前后渗透率及其变化特征

Fig. 1 Characteristic of Permeability and Its Rate Before and After Water driver for Different Samples

降低, 绝对变化量为 $(0 \sim 0.085) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 但渗透率变化平均为 4.7%, 最高可达 22.46%, 水驱后孔隙度略有增加, 平均增大 0.15%。从水相渗透率与注入水体积倍数关系(图 2)可以看出, 水相渗透率随注入水注入倍数增加呈下降趋势。因此, 对低渗储层而言, 长期注水开发使储层渗透性变差而孔隙度略有增加, 储层非均质增强, 这与中高渗储层渗透率变化特征明显不同^[1-4]。中高渗储层经长期注水开发后在一定程度上提高了渗透率, 改善了储层微观孔隙结构, 说明低渗储层长期注水开发后储层变化规律更加复杂。

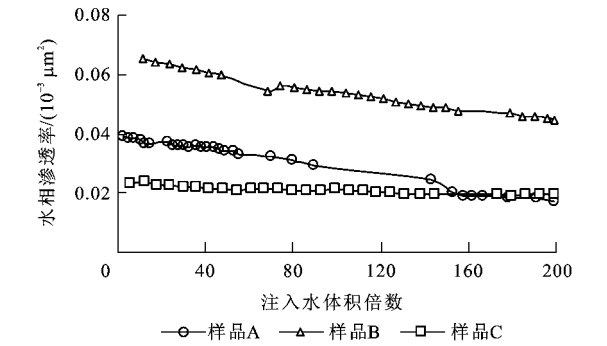


图 2 水相渗透率与注入水体积倍数的关系

Fig. 2 Relationship Between Water Phase Permeability and Injection Water Volume

1.2 孔隙类型变化

前人研究表明^[13-20], 安塞油田孔隙类型以粒间孔、溶蚀孔和微孔隙混合型为主, 溶蚀孔以浊沸石和长石溶孔为主, 孔隙组合类型为溶孔-粒间孔、粒间孔-溶孔。由图 3 可知, 水驱前后样品孔隙类型未发生明显变化, 岩芯经水洗后溶蚀孔隙含量略增加, 变化较大的为长石溶孔和岩屑溶孔(图 3a), 导致面孔率略有增大, 可见水洗作用对地层的孔隙度有一定影响, 尽管增加量不大, 但全部样品几乎都呈增大趋势, 说明注水冲刷可使地层的溶蚀孔隙含量增加。

1.3 喉道特征变化规律

压汞曲线可用来研究储层孔隙结构, 通过形态和参数判断储层孔喉分布特征。由不同样品水驱前后压汞曲线形态和参数(表 2、图 4)可以看出, 低渗储层长期冲刷后中值半径均变小, 中值压力增大, 最大汞饱和度整体呈减小趋势, 平均减少 2.96%, 退汞效率均降低, 平均降低 4.39%, 这些参数反映了喉道与孔隙的综合信息, 其变化表明低渗储层长期受注水冲刷后储层变差、非均质性增强。

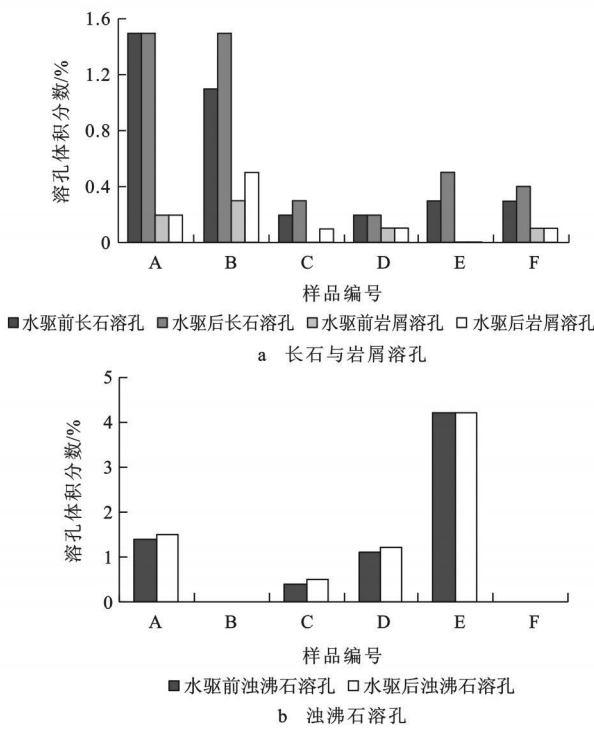


图 3 不同样品水驱前后溶孔体积分数变化

Fig. 3 Changes of Volume Fraction of Dissolved Pore Before and After Water-driver for Different Samples

从水驱前后孔喉半径分布对比图(图 5)可以看出, 样品喉道半径主要为小于 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的细喉道和微细喉道, 汞主要集中在半径小于 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的喉道所

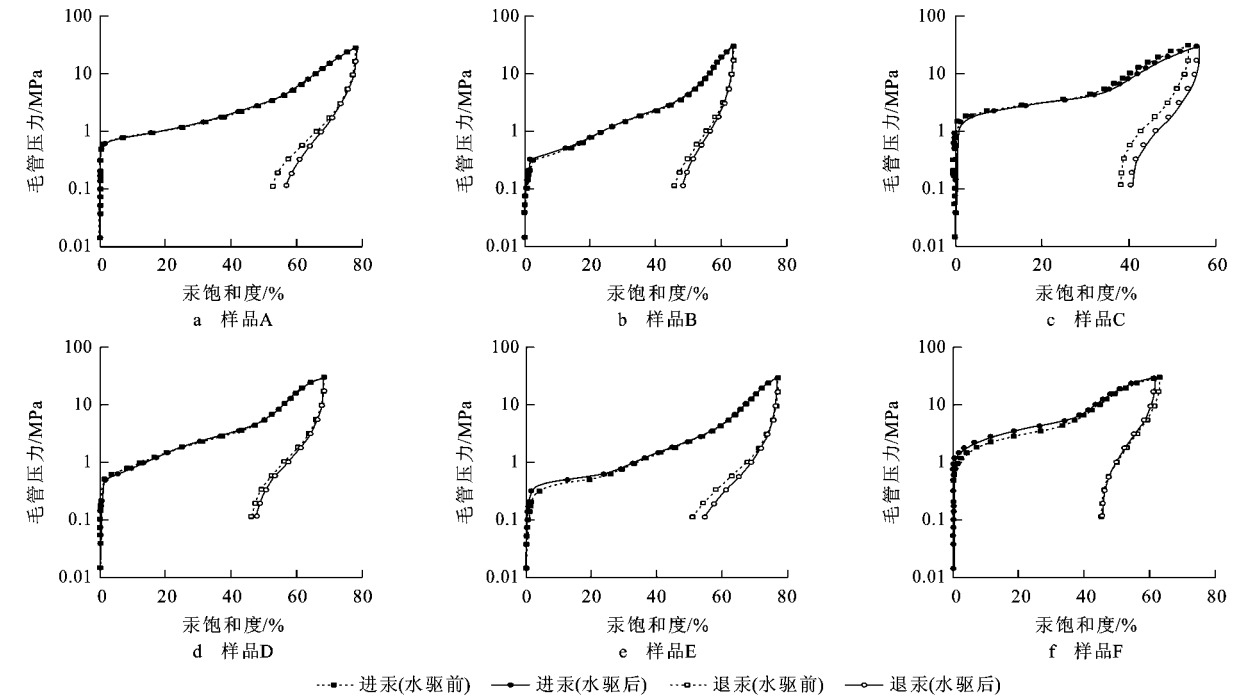


图 4 不同样品水驱前后压汞曲线

Fig. 4 Mercury Injection Curve Before and After Water-driver for Different Samples

1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

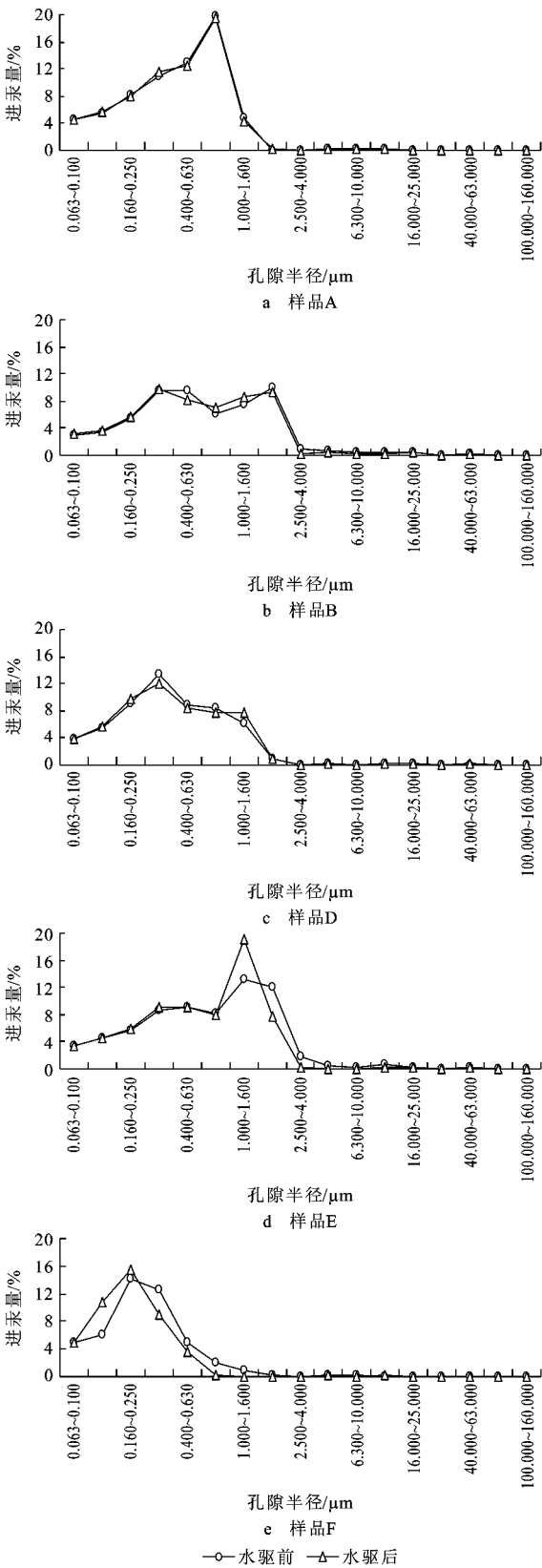


图 5 不同样品水驱前后孔喉半径分布特征

Fig 5 Distribution Characteristics of Pore-throat Radius Before and After Water-driver for Different Samples

流体在另一种不相混溶流体存在时对固体的相对吸引力,决定了润湿相与非润湿相在孔道中的分布状态以及各自成为连续相的饱和度大小。储层岩石润湿性可通过相对渗透率曲线评定(表 3)。

表 3 不同润湿性岩芯相对渗透率曲线特征

Tab. 3 Characteristics of Relative Permeability Curve in Different Wettability Cores

参数	强亲水	亲水	中性	亲油	强亲油
束缚水饱和度/%	> 35	20 ~ 30	15 ~ 20	10 ~ 15	< 10
交点含水饱和度/%	> 60	50 ~ 60	50	40 ~ 50	< 40
$K_w(S_{or})/K_o(S_{wc})$	< 0.1	0.1 ~ 0.25	0.5	0.5 ~ 0.7	0.7 ~ 1.0

注: $K_w(S_{or})/K_o(S_{wc})$ 为相渗曲线中残余油饱和度对应水相渗透率与束缚水饱和度对应油相渗透率比值; K_w 为水相渗透率; S_{or} 为残余油饱和度; K_o 为油相渗透率; S_{wc} 为束缚水饱和度

通过对水驱前后相对渗透率曲线的变化研究储层润湿性变化。从图 6 可以看出,等渗点对应的含水饱和度均高于 50%,说明储层为亲水性。从图 6 还可以看出,在岩石的润湿性变化过程中,相对渗透率曲线呈规律性变化:每组油水两相曲线逐渐右移,水相曲线上升平缓,曲线等渗点对应含水饱和度逐渐增大,交叉点依次右移,水相端点(即残余油饱和度下的水相相对渗透率值)由高变低。这种变化表明,长期注水冲刷使储层亲水性增强。

2 储层特征变化机理

研究表明,在安塞油田注水开发过程中,注水井吸水剖面伽马曲线出现负偏移(图 7),而且强吸水部位曲线形态变化更为明显。由侧钻井与相邻井测井解释结果对比可以看出(表 4),泥质体积分数平均降低 4.74%,表明随着注入水量增加及其对储层水洗和冲刷作用的不断增强,使黏土质含量不断减少,这些黏土颗粒和填隙物在注入水的作用下普遍发生溶解、破碎和迁移^[21-25],一部分被注入水沿大孔道冲走或冲散,另一部分细小颗粒同样也发生溶解和迁移,但因其直径大于储层最小可流动孔喉直径而滞留于储层内部的细小孔道引起堵塞,导致储层孔隙度整体有所增大而连通性变差,表现为渗透率降低、储层非均质性增强、退汞效率降低。中高渗储层经长期注水开发造成储层砂岩极细砂粒级沉积物丢失^[4],喉道平均直径和喉道中值明显增加,最小可流动孔喉直径增大^[2],从而引起渗透率大幅度提高,但由于喉道的分选程度降低,储层非均质性也增强,退汞效率降低^[2]。长期注水开发

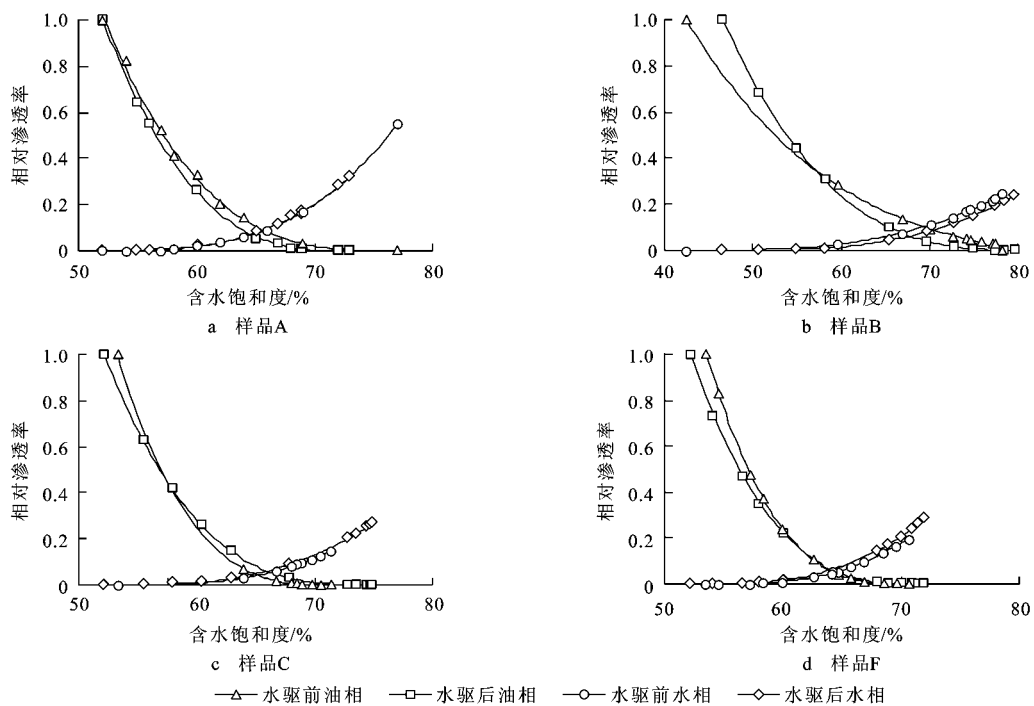


图 6 不同样品水驱前后油水相对渗透率分布特征

Fig 6 Distribution Characteristics of Oil and Water Relative Permeabilities Before and After Water-driver for Different Samples

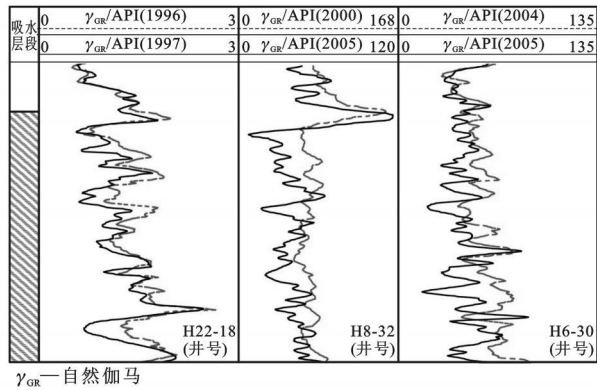


图 7 注水井自然伽马曲线

Fig. 7 Gamma Ray Curve of Water Infection Well

后低渗和高渗储层非均质性均增强, 但二者成因不同。对于中高渗储层, 孔隙和可流动喉道半径均增大但二者增幅不同, 导致孔喉比增大, 从而使储层非均质性增强, 而低渗储层由于颗粒堵塞引起储层连通性变差, 进而导致储层非均质性增强。

水驱后, 由于注入水对颗粒之间及孔喉表面黏土矿物等起到了机械冲刷及分散、溶解作用, 储层岩石表面及孔喉内壁变的比较光滑, 从而使亲水的石英、长石、黏土等矿物暴露出来, 岩石吸附能力减弱且极性物质脱附, 岩石表面向亲水性转化^[21-22]。同时在开发过程中, 地层压力、地层水性质及含水饱和度等均发生变化, 引起油、水、岩石三者之间

表 4 测钻井与相邻井测井解释结果对比

Tab. 4 Comparison of Well-logging Interpretation Between Test Drilling and Its Adjoined

序号	井号	完井时间	泥质体积分数/ %	泥质体积分数变化量/ %	孔隙度/ %	孔隙度变化率/ %
1	X14-8	1997	20.020	-4.178	12.18	5.29
	XC14-8	2007	15.842		12.82	
2	X7-4	1994	20.135	-4.457	11.84	-0.30
	XC7-4	2007	15.678		11.81	
3	W21-24	1990	22.975	-10.785	13.15	5.28
	WC21-24	2008	12.190		13.84	
4	W14-25	1991	14.967	-0.272	12.83	3.05
	WC14-25	2007	14.695		13.23	
5	H18-13	1992	20.794	-4.008	13.98	4.16
	HC19-14	2005	16.786		14.56	

原有的平衡关系遭到破坏, 使岩石的润湿性整体向更加亲水方向发展^[26-28]。

3 结语

(1)模拟注水开发实验表明, 低渗储层长期注水冲刷后储层渗透率降低, 孔隙度略有增大, 主要为溶蚀孔隙增加, 孔隙类型未发生明显改变, 喉道中值半径减小, 喉道半径分布特征仍以单峰型为

主, 储层孔喉微观非均质性增强, 退汞效率降低。

(2) 水驱前后相对渗透率曲线呈规律性变化, 每组油水两相曲线逐渐右移, 水相曲线上升平缓, 水相端点由高变低, 水驱后等渗点对应的含水饱和度有增大的趋势, 长期注水冲刷使储层亲水性增强。

(3) 注水开发进程中, 储层中的颗粒和填隙物在注入水的冲刷作用下发生溶解、破碎和迁移, 一部分滞留于岩石内部的细小喉道导致堵塞, 另一部分随注入水沿大孔道被驱出, 导致储层连通性变差, 储层非均质性增强, 退汞效率降低。黏土矿物含量及储层岩石表面性质变化, 导致岩石的润湿性整体向更加亲水方向发展。

参考文献:

- [1] 彭仕宓, 尹旭, 张继春, 等. 注水开发中黏土矿物及其岩石敏感性的演化模式[J]. 石油学报, 2006, 27(4): 71-75.
- [2] 黄思静, 杨永林, 单钰铭, 等. 注水开发对砂岩储层孔隙结构的影响[J]. 中国海上油气(地质), 2000, 14(2): 122-128.
- [3] 李继红, 曲志浩, 陈清华. 注水开发对孤岛油田储层微观结构的影响[J]. 石油实验地质, 2001, 23(4): 424-428.
- [4] 杨永林, 黄思静, 单钰铭, 等. 注水开发对储层砂岩粒度分布的影响[J]. 成都理工学院学报, 2002, 29(1): 56-60.
- [5] 李存贵, 徐守余. 长期注水开发油藏的孔隙结构变化规律[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 94-96.
- [6] 郭莉, 王延斌, 刘伟新, 等. 大港油田注水开发过程中油藏参数变化规律分析[J]. 石油实验地质, 2006, 28(1): 85-90.
- [7] 王天琦, 施泽进, 郑红军, 等. 注水前后储层微观孔隙结构的分形表征[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(2): 242-244.
- [8] 李浩, 王香文, 刘双莲. 老油田储层物性参数变化规律研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(2): 85-89.
- [9] 付国民, 李鑫, 梁志录, 等. 油层砂岩成岩作用及其对储层性质的影响[J]. 西安科技大学学报, 2007, 27(3): 377-381.
- [10] 苏玉亮, 李东霞, 郝永卯, 等. 黏弹性稠油的松弛特性对其注水开发的影响[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(2): 146-148.
- [11] 冯娟萍, 郭艳琴, 董海波, 等. 何家集区延长组储层特征及其主控因素分析[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(2): 195-199.
- [12] 张洪波, 王志章, 戴胜群, 等. 水驱前后油藏参数变化机理研究[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(4): 665-666.
- [13] 赵虹, 党永潮, 等. 安塞油田延长组储集层特征及物性影响因素分析[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(4): 45-48.
- [14] 赵虹, 党永胜, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区三叠系延长组长 2 油层组储层特征及影响因素[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(5): 579-583.
- [15] 刘学刚, 崔智林, 王娟. 安塞油田塞 160 井区长 6 油层组沉积微相研究[J]. 西北地质, 2008, 41(3): 86-91.
- [16] 朱玉双, 曲志浩, 孔令荣, 等. 安塞油田坪桥区、王窑区长 6 油层组储层特征及驱油效率分析[J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 279-283.
- [17] 金拴联, 蒋远征, 杨晓莲, 等. 安塞油田注水开发技术研究[J]. 西北地质, 2008, 41(1): 115-120.
- [18] 许建红, 程林松, 鲍朋, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组油藏地质特征[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2007, 29(5): 13-17.
- [19] 姜亭, 魏仙样, 杭健, 等. 延长油田郑庄区长 6 油层组小层对比划分在注水开发中的应用[J]. 西北地质, 2007, 40(3): 85-91.
- [20] 蒋远征, 金拴联, 杨晓刚, 等. 特低渗油田注水效果存水率和水驱指数评价法[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(6): 63-65.
- [21] 黄福堂. 油田注水开发过程中储层岩石表面性质变化因素研究[J]. 石油勘探与开发, 1985, 12(3): 45-50.
- [22] 贺凤云, 于天忠, 张继芬, 等. 水驱对储层和地层原油性质的影响[J]. 大庆石油学院学报, 2002, 26(2): 21-23.
- [23] 王锐, 岳湘安, 尤源, 等. 裂缝性低渗油藏周期注水与渗吸效应实验[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(6): 56-59.
- [24] 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(1): 58-60.
- [25] 闫健, 张宁生, 刘晓娟. 低渗透油田超前注水增产机理研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(5): 43-45.
- [26] 单华生, 姚光庆, 周锋德. 储层水洗后结构变化规律研究[J]. 海洋石油, 2004, 24(1): 62-66.
- [27] 李军, 蔡毅, 崔云海. 长期水洗后储层孔隙结构变化特征[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(2): 68-70.
- [28] 徐守余. 渤海湾盆地胜坨油田二区储层微观渗流场演化研究[J]. 石油实验地质, 2003, 25(4): 381-384.