

安塞油田王窑区水淹层储层微观特征

金拴联^{1,2}, 张永强^{1,2}, 田国才³, 赵向宏^{1,2}

(1. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018; 3. 中国石油长庆油田第四采油厂, 陕西 靖边 718500)

摘 要: 安塞油田王窑区经过 20 多年的注水开发, 储层有不同程度水淹, 长期的水驱冲刷引起储层微观特征改变。针对不同水淹区域部署检查井并进行储层微观特征变化及机理研究, 对检查井密闭取心资料的分析研究表明: 强水淹层段储层的粒度粗, 面孔率高, 孔喉结构较均匀。在强水淹层段有新生矿物方解石的生成, 与原生矿物有明显区别。与注水开发前原始储层相比, 储层粘土矿物的迁移及新生矿物的产生, 导致注水开发后储层的物性变差。注水开发中后期储层吼道中值压力增加, 退汞效率降低, 相渗曲线变差, 水驱油效率降低。

关键词: 储层微观特征; 新生矿物; 粘土矿物; 水淹层; 渗流特征

中图分类号: P618.130.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-6248(2013)03-0183-08

Reservoir Microscopic Characteristics of Water Flooded Layer in Wangyao Area of Ansai Oilfield

JIN Shuan-lian^{1,2}, ZAHNG Yong-qiang^{1,2}, TIAN Guo-cai³, ZHAO Xiang-hong^{1,2}

(1. *Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oil Field Company, Xi'an 710018, China*; 2. *Low Permeability Oil and Gas Field Exploration and Development of National Engineering Laboratory, Xi'an 710018, China*; 3. *No. 4 Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, Jingbian 718500, China*)

Abstract: Through more than 20 years' water flooding development, the microscopic characteristics of reservoirs in Wangyao Area of Ansai Oilfield have been changed in some degree due to long-term water flooding and washing. In order to investigate the changing mechanism of formation characteristics, inspection wells are deployed in different water flood areas, and sealing core data from these inspection wells are analyzed. Results have shown that reservoirs which are strongly watered out have coarse granularity, high surface porosity and good pore throat structure. Besides, neogenic calcite which is obviously different from the original mineral is generated in these intervals. Compared with the initial formation before water driving, physical properties of water flooded reservoirs get worse because of the migration of clay mineral and generation of new minerals. The effects of water flooding mainly show up in the increased median pressure of reservoir throat during the middle and late stage of water flooding. There is lower mercury withdrawal efficiency and poorer relative permeability curve, which decreases the displacement efficiency of water flooding.

Key words: microscopic characteristics of reservoirs; neogenic minerals; clay mineral; water flooded layer; percolation characteristics

收稿日期: 2013-05-28; 修回日期: 2013-07-09

基金项目: 大型油气田及煤层气开发重大专项“鄂尔多斯盆地大型岩性地层油气藏勘探开发示范工程”(2008ZX05044)

作者简介: 金拴联 (1977-), 男, 大学本科学历, 油田开发地质工程师, 主要从事油田开发地质方面的研究。E-mail: jsl_cq@petrochina.com.cn

安塞油田三叠系延长组地层为内陆淡水湖泊三角洲沉积,王窑油藏主力油层长 6_1 为三角洲前缘沉积。区域构造背景为一平缓的西倾大单斜,地层倾角仅半度左右,未发现断层。由于岩性差异,局部地区发育近东西向的低缓鼻状隆起带(赵宏刚,2003)。含油主力层位长 6_1 层可进一步划分为长 6_1^{1-1} 、长 6_1^{1-2} 、长 6_1^{1-3} 层,开发层系长 6_1^{1-2} 、长 6_1^{1-3} 层主要为一套灰褐色中-细粒岩屑质长石砂岩,孔隙类型为原生粒间孔和岩石溶孔,属小孔隙细喉型。平均喉道半径 $0.47\text{ }\mu\text{m}$,中值半径 $0.25\text{ }\mu\text{m}$,平均孔隙直径 $26\text{ }\mu\text{m}$ (陈永胜,2009)。平均孔隙度为 13.7% ,平均渗透率为 $2.29\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,原始地层压力为 9.1 MPa ,压力系数为 $0.7\sim0.8$,属低渗、低压、低产油藏。油层孔隙充填物含量占 $11.38\%\sim14.78\%$ 。其中,粘土矿物含量占 74% ,以酸敏矿物绿泥石、浊沸石及方解石为主(高旺来,2003)。

安塞油田王窑区于1990年全面投入注水开发,截止到2012年12月底,王窑区动用含油面积为 63.41 km^3 ,动用地质储量为 $4\,227.23\times10^4\text{ t}$,油井884口,开井801口。目前日产液水平 $2\,569.4\text{ m}^3$,日产油 941 t ,平均单井日产油能力 1.18 t 。区块综合含水 56.4% ,采油速度 0.66% ,采出程度 13.3% ,累计注采比1.85。

1 王窑区水淹层储层微观特征

储层经过长期水驱后,储层的微观特征会发生

变化,而且不同水淹程度的储层具有不同的变化规律(王志章,1999)。安塞油田王窑区储层非均质性较强,造成储层水淹程度不均(何文祥,2010)。为了研究不同水淹程度的储层微观特征,通过在王窑中西部典型井组王16-15井组周围不同水驱方向、不同井距部署完钻9口检查井,对检查井密闭取心资料进行岩心分析测试,将分析化验测试资料与储层勘探期岩心分析化验测试资料相对比,研究其储层微观特征的变化(李爱芬,2008)。为了便于研究不同水淹层的储层微观特征,依据中石油行业标准,将岩心不同层段分为强水淹层、中水淹层、弱水淹层和未水淹层(江山,2008)。

1.1 储层岩矿成分特征

本区储层砂岩类型为岩屑长石砂岩,石英含量为 26.15% ,长石含量为 47.24% ,岩屑含量为 10.97% 。储层填隙物主要以绿泥石为主,平均含量 7.41% ,其次为浊沸石(1.65%)、方解石(1.37%)(师调调,2012)。研究区储层以长 6_1^{1-2} 层为主要强水淹层,长 6_1^{1-3} 层水淹程度较弱。研究认为,储层经过长期的注水冲刷,水驱后绿泥石等粘土类矿物明显减少,水驱前绿泥石含量为 8.4% ,水驱后含量为 6.5% 。其中在强水洗段绿泥石含量及填隙物总量最少,中水洗段次之,弱水洗段最多(表1)。

碎屑组分磨圆度较差,多呈次棱状。胶结类型以薄膜~孔隙式胶结为主,粒径主要分布在 $0.1\sim0.25\text{ mm}$,颗粒分选中等—好。储层粒度分布以细砂为主,极细砂次之。结合小层水淹程度研究认为:

表1 研究区不同水淹程度储层填隙物含量对比

Tab.1 The contrast on filler contents of reservoirs in different water flooded layer in the research area

层位	样品块数	水淹程度	伊利石(%)	绿泥石膜(%)	方解石(%)	浊沸石(%)	硅质(%)	长石质(%)	其他(%)	合计(%)
长 6_1^{1-2}	6	强水淹	0.3	3.1	1.3	0.7	0.6	0.0	0.0	5.83
	22	中水淹	0.2	5.1	1.2	1.1	0.5	0.1	0.4	8.52
	23	弱水淹	0.6	8.8	1.2	0.3	0.6	0.3	1.3	12.95
长 6_1^{1-3}	23	中水淹	0.5	6.8	2.6	2.3	0.3	0.0	0.6	13.09
	5	弱水淹	0.2	10.6	1.5	1.3	0.5	0.3	1.4	15.79

水淹程度强的层段粒度相对较粗,水淹程度弱的层段粒度相对较细。

镜下薄片观察研究认为:粘土矿物在部分储层物性较好区域由于强水洗造成粘土矿物及微晶自生

矿物发生迁移(图1),极易在孔喉缩小处堆积堵塞喉道,变小的地方堆积,导致随着水淹程度的增强,粘土矿物含量减少。储层的水淹程度主要决定于储层的物性,储层物性好,水淹程度高,水驱后

粘土矿物含量与储层物性的相关性也证明了注水开发期粘土矿物的迁移特点（图 2）。

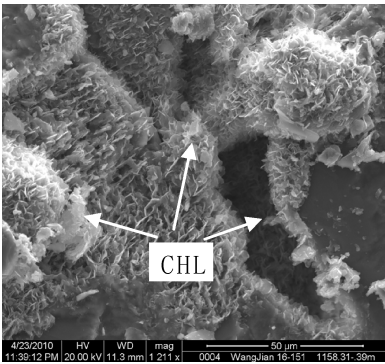


图 1 王检 16-153 井, 1 178.62 m

Fig.1 Wangjian16-153 well, 1 178. 62 m
CHL. 注水期脱落迁移的绿泥石晶片

研究区地层水以氯化钙水型为主，局部存在碳酸氢钠水型（齐亚林，2009）。由于注入水与地层

水的不配伍性以及注水开发过程中压力平衡系统的破坏，极易使地层水中大量的 Ca^{2+} 沉淀形成方解石结晶。这种注水开发期形成的方解石称为注水期新生矿物方解石（图 3）。

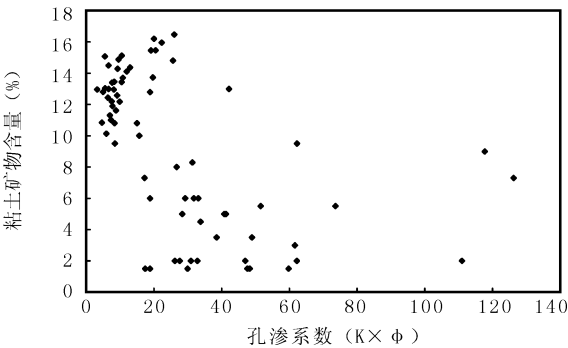


图 2 水淹层粘土矿物含量与储层物性关系

Fig.2 The relation ship between clay mineral content and reservoir physical property in the water flooded layer

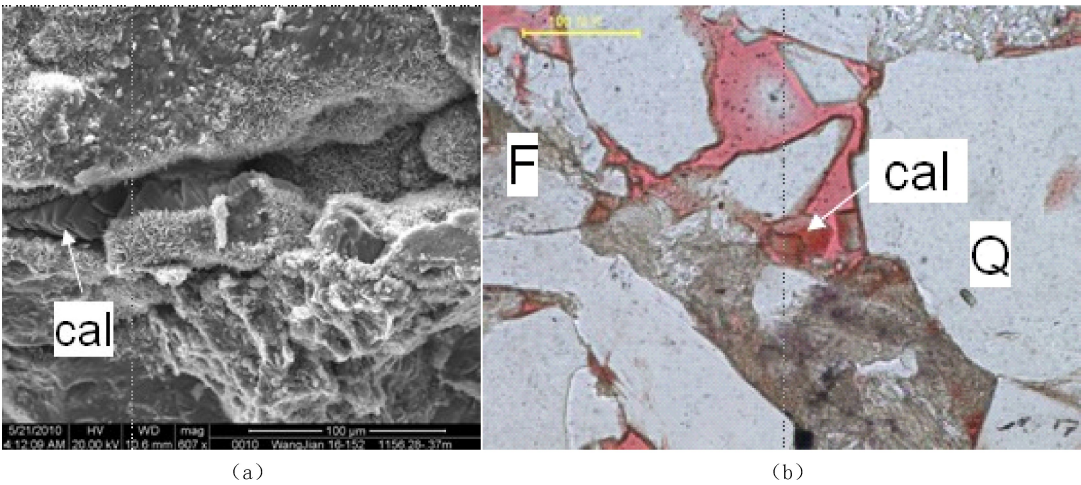


图 3 注水开发期形成的新生矿物方解石

Fig.3 The dyed protogenesis calcite and the waterflooded calcite
a. 王检 16-152 井, 1 158.58 m; b. 王检 16-153 井, 1 180.27 m
cal. 注水期形成的方解石，柱状，结晶较小；F. 长石；Q. 石英



通过与勘探初期薄片的对比以及能谱对比分析，认为注水前后形成的方解石类矿物在标型特征方面存在两个方面的差异。

（1）元素组成方面的差异：注水前形成的碳酸盐矿物为铁方解石〔 $(\text{Ca}, \text{Fe})\text{CO}_3$ 〕，FeO 含量明显较高，未发现方解石（ CaCO_3 ）；注水后除大

量的原生铁方解石外，还有丰富的注水期形成的方解石，注水期形成的方解石 FeO 明显很低（表 2）。

（2）结晶形态方面的差异。通过薄片观察及扫描电镜观察，注水前形成的铁方解石由于结晶时间长，晶体粗大，为粗-巨晶状，连晶状充填孔隙，他型，交代碎屑；注水期形成的方解石由于结晶时间短，结晶较小，为细-粉晶，菱面体晶形发育，柱状方解石常见，自形。

表 2 注水前后形成的方解石类矿物能谱分析对比表

Tab. 2 The comparison on the energy spectral analysis of calcite minerals in diffirent period

井 号	深度 (m)	注水前形成的铁方解石			注水期形成的方解石		
		CaO	MgO	TFeO	CaO	MgO	TFeO
ZJ30 井	1 858.1	95.72	0.23	4.05			
ZJ29 井	1 803.89	95.82	0.34	3.84			
王检 16—153 井	1 180.27				99.82	0.07	0.11
柳检 75—60 井	1 739.5	94.97	0.22	4.81	99.68	0.23	0.09
盘检 41—301 井	1 905.05	95.89	0.1	4.01	99.82	0.11	0.07
于检 42—24 井	1 689.86				99.69	0.21	0.1
平 均		95.6	0.223	4.178	99.75	0.155	0.093

注水期新生矿物方解石与与原生方解石在组合剂染色后的镜下薄片观察在颜色和晶体形态方面有明显区别（图 3、图 4）。

1.2 物性特征

研究区长 6₁⁻² 储层物性较好，平均渗透率为

2.1×10⁻³ μm²，孔隙度为 12.4％。长 6₁⁻³ 物性较差，平均渗透率为 1.1×10⁻³ μm²，孔隙度为 11.25％。整体上来看，各小层水驱前后物性对比，渗透率、孔隙度减小，物性变差（表 3）。

引起水淹前后储层物性变化的因素为以下。

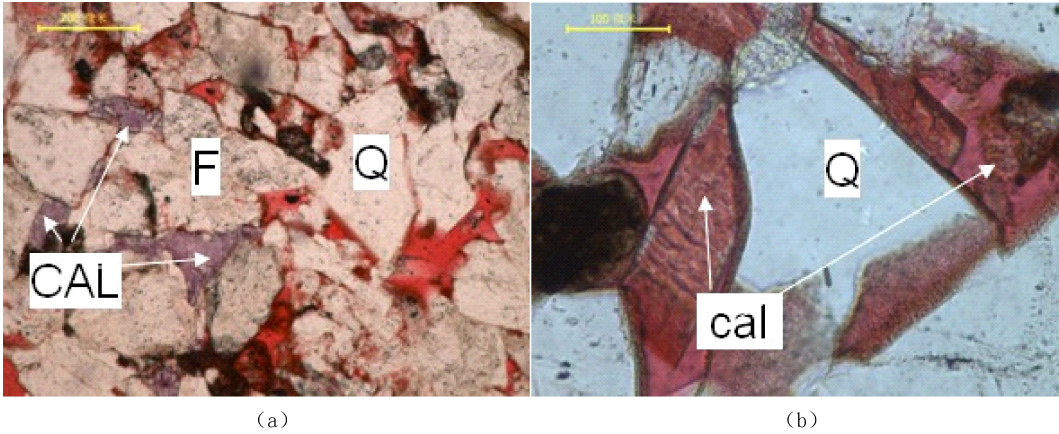


图 4 经组合染色剂染色后的原生方解石与注水期方解石

Fig. 4 The neogenic calcite developed in waterflooding period

a. ZJ30 井，1 689.86 m，充填孔隙的原生铁方解石，组合染色剂染色后呈紫红色；b. 王检 16—153 m，1 180.27 m，充填孔隙的注水期形成的方解石，组合染色剂染色后呈大红色；F. 长石；Q. 石英；CAL. 原生方解石；cal. 注水期新生方解石

表 3 水淹前后储层物性对比

Tab. 3 The physical property of reservoirs before and after waterflooding

层 位	类 别	渗透率 (10 ⁻³ μm ²)		孔隙度 (%)	
		样品数	平均	样品数	平均
长 6 ₁ ¹⁻²	水淹前	1 411	3.39	1 578	14.30
	水淹后	810	2.10	810	12.13
长 6 ₁ ¹⁻³	水淹前	1 422	2.10	1 513	13.40
	水淹后	586	1.10	586	11.25

（1）在注入水的长期流动过程中对绿泥石膜的长期冲刷作用，使的一部分细小的绿泥石晶片从绿泥石膜上脱落下来，在孔隙中形成分散的数微米

的颗粒，堵塞喉道。另外一少部分形成绿泥石泥团，降低储层的渗透率。同时由于较淡水对绿泥石的长期浸泡作用和冲刷作用，使绿泥石膜从颗粒上

脱落下来，使一个较大的孔隙变为两个或数个较小的孔隙，从而对储层的渗透率造成伤害。

(2) 长期注水过程中，由于注入水与地层水的接触加大，极易在孔喉缩小处形成新生矿物方解石和重晶石等垢样沉积堵塞吼道，使得物性变差（吴素英，2006）。

为了对比不同水淹程度的层段水淹前后储层物性变化规律，将长 6_1^{1-2} 再细分为 4 个小层，长 6_1^{1-3}

细分为 3 个小层。研究发现，长 6_1^{1-2-3} 小层主要为强水淹层，长 6_1^{1-2-2} 和长 6_1^{1-2-4} 小层为中水淹层，长 6_1^{1-3-1} 和长 6_1^{1-3-2} 小层为弱水淹层，长 6_1^{1-2-1} 和长 6_1^{1-3-3} 小层主要为未水淹层。经岩心分析测试并与原始状况相对比研究表明：强水淹层储层孔隙度、渗透率与原始状况储层相比孔隙度、渗透率增大；中水淹层渗透率减小，孔隙度变化不大；弱水淹层储层物性基本保持不变（表 4）。

表 4 不同水淹层段储层物性变化规律

Tab. 4 The variation law of reservoir physical property in different water flooded layer

水淹程度	样品块数	主要分布层位	目前测试值		注水开发前测试值	
			孔隙度 (%)	渗透率 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	孔隙度 (%)	渗透率 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)
强水淹	133	长 6_1^{1-2-3}	15.30	5.10	14.10	3.13
中水淹	252	长 6_1^{1-2-2} 、长 6_1^{1-2-4}	14.00	1.98	13.9	2.61
弱水淹	113	长 6_1^{1-3-1} 、长 6_1^{1-3-2}	12.10	1.41	12.3	1.37

1.3 孔喉结构特征

储层粒间孔发育，长石溶孔次之。长 6_1^{1-2} 油层粒间孔为 4.69%，长石溶孔为 0.72%，面孔率为 5.78%；长 6_1^{1-3} 油层粒间孔为 2.46%，长石溶孔

为 0.59%，面孔率为 3.28%。

按小层水淹程度分析，粒间孔发育则面孔率值一般较高，面孔率高水淹程度高，面孔率由高变低，水淹程度由强变弱（表 5）。

表 5 研究区不同水淹程度储层孔隙类型对比表（%）

Tab. 5 The comparison table of reservoir pore types in different water flooded layers in the research area（%）

层位	样品块数	水淹程度	面孔率	粒间孔	长石溶孔	浊沸石溶孔
长 6_1^{1-2}	6	强水淹	7.20	6.17	0.75	0.30
	22	中水淹	5.80	4.85	0.57	0.40
	23	弱水淹	5.40	4.15	0.85	0.38
长 6_1^{1-3}	23	中水淹	3.35	2.52	0.60	0.31
	5	弱水淹	2.93	2.16	0.54	0.20

储层孔喉类型属小孔隙、细微喉道型，中值孔喉半径为 $0.21\sim 0.25\mu\text{m}$ ，排驱压力为 $0.33\sim 0.85\text{MPa}$ ，退汞效率为 $23.5\%\sim 31.64\%$ 。

做检查井水淹后岩心压汞实验，实验共用 68

块岩心，与水淹前 60 块岩心的压汞资料相对比：储层变异系数增大，非均质性增强，中值压力明显增加，中值半径相对减小（表 6）。

不同水淹程度压汞试验资料表明：孔喉结构越

表 6 水淹前后孔喉参数变化表

Tab. 6 The pore parameters variation before and after waterflooding

层位	类别	样品块数	分选系数	变异系数	排驱压力 (MPa)	中值压力 (MPa)	中值半径 (μm)	最大进汞率 (%)	退汞效率 (%)
长 6_1^{1-2}	水淹前	29	2.33	0.21	0.42	4.12	0.212	79.6	29.6
	水淹后	47	2.39	0.24	0.85	6.79	0.108	72.5	27.55
长 6_1^{1-3}	水淹前	31	2.35	0.21	0.45	3.85	0.253	75.1	26.4
	水淹后	21	2.59	0.23	0.33	6.47	0.116	74.2	24.40

好，越容易水洗。同理，水洗程度高的层段，孔喉结构均比较好。纵向上强水洗段排驱压力、中值压力低，中值半径大，退汞效率高，(图 5、图 6)。

1.4 渗流特征

选取检查井岩心做水驱油实验，相渗曲线表明：水淹后储层油相相对渗透率下降速度快于水淹

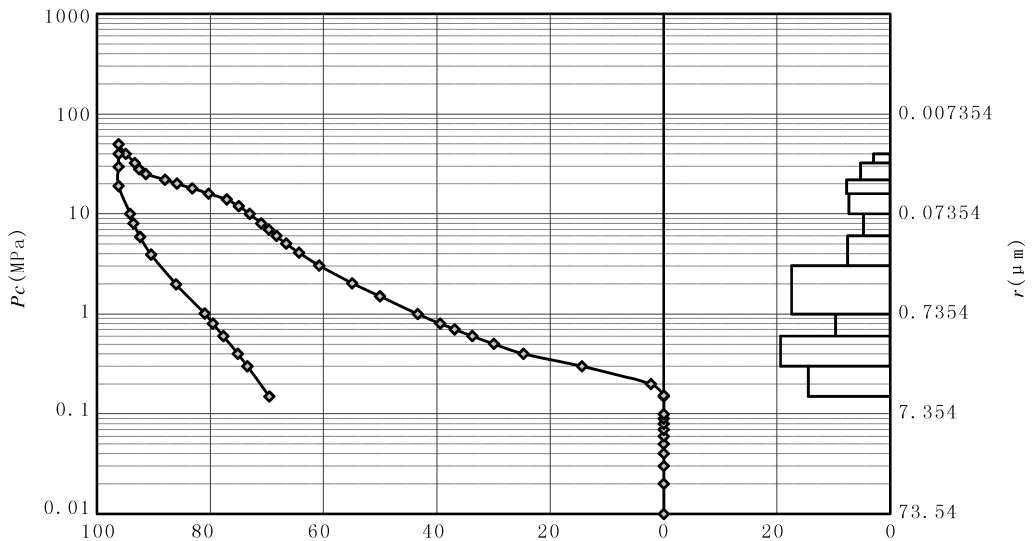


图 5 王检 16—151, 1 167.07~1 167.19 m, 强水淹段
Fig. 5 Wangjian16-151, 1 167.07-1 167.19m, intensively watered layer

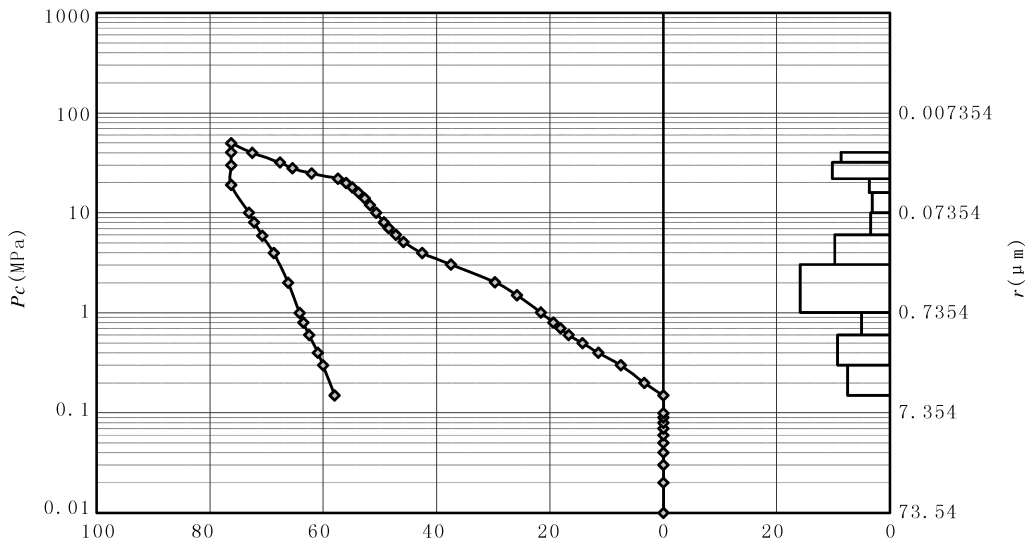


图 6 王检 16—151, 1 166.29~1 166.39 m, 弱水淹段
Fig. 6 Wangjian16-151, 1 166.29-1 166.39m, weakly watered layer

前储层，水相相对渗透率增速高于注水前，水淹后储层两相共渗区间变窄，束缚水饱和度较注水前高，驱油效率较注水前明显降低，平均采油速度较水淹前储层降低（表 7）。

对比不同水淹程度岩心的相渗曲线发现：水淹

程度高的层段两相共渗区间大，残余油饱和度低，束缚水饱和度低。水淹程度高的层段驱油效率高，水淹程度高的层段两相等渗点高，水淹程度高的层段油水相渗变化慢，水洗程度高的层段采油速度高。

表 7 水驱前后储层相渗曲线对比

Tab. 7 The contrast on reservoir relative permeability curve before and after water driving

开发阶段	束缚水饱和度 (%)	残余油饱和度 (%)	见水前平均采油速度 (ml/min)	驱油效率 (%)	残余油时含水饱和度 (%)	残余油时水相对渗透率 (mD)
开发初期	37.8	26.6	0.08	57.2	73.4	0.57
研究区检查井	42	34.2	0.06	41.1	65.8	0.42

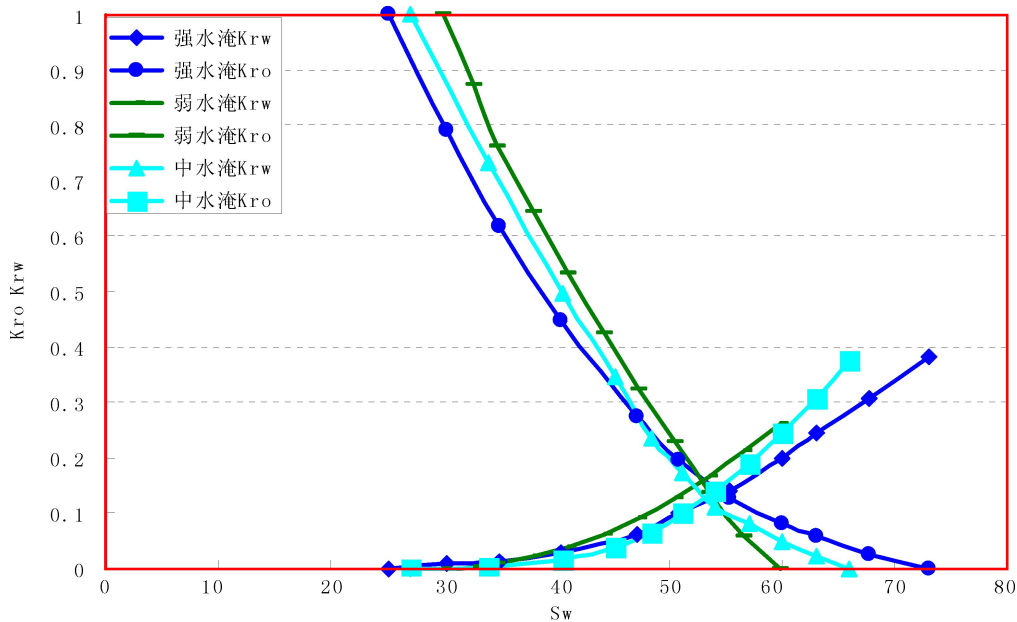


图 7 不同水淹程度层段相渗曲线对比

Fig. 7 The contrast on relative permeability curve of different water flooded layers

2 结论

安塞油田王窑区储层经过多年的注水开发后，储层的微观特征发生了一定的变化。

(1) 水淹前后粘土矿物发生了迁移，并在孔吼相对变小的地方堆积，导致储层物性好的层段粘土矿物含量减少，物性差的层段粘土矿物含量增加。

(2) 与注水开发前相比，储层变异系数增大，非均质性增强，中值压力增加，中值半径相对减小，退汞效率降低，孔喉结构变差。

(3) 长期的注水开发，储层中形成了新生矿物方解石和重晶石。与原生矿物相比，存在明显差异，新生矿物主要分布于强水洗层段。

(4) 与注水开发前相比，强水淹层段孔隙度、渗透率增加，中水淹层段渗透率减小；弱水淹层段物性基本无变化。

(5) 注水开发后注水后两相共渗区间变窄，束

缚水饱和度、残余油饱和度较开发前变高，采油速度、驱油效率较开发前变低，相渗曲线变差。强水淹层段相渗曲线好于弱水淹层段相渗曲线。

参考文献 (References):

赵宏刚，陈全红，王文武，等．鄂尔多斯盆地南部上三叠统层序地层学研究[J]．西北地质，2003，36（4）：35-38.

Zhao Honggang, Chen Quanhong, Wang wenwu, et al. Researches on sequence stratigraphy of the Upper Triassic in the South Odors basin [J]．Northwestern Geology, 2003，36（4）：35-38.

陈永胜，赵虹，郑小杰，等．鄂尔多斯盆地志丹探区延长组储层特征研究及评价[J]．西北地质，2009，42（2）：83-89.

Chen yongsheng, Zhao hong, Zheng xiaojie, et al.

- Reservoirs Characteristics and Evaluation of Yanchang Formation in Zhidan Area, Ordos Basin [J]. *Northwestern Geology*, 2009, 42 (2): 83-89.
- 高旺来. 安塞低渗油田孔隙结构对流体特征曲线的影响 [J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30 (1): 79-80.
- Gao Wanglai. The effect of pore structure on the characteristics of percolation flow curves of Ansai low-permeability reservoir [J]. *Petroleum Exploration and Development*. 2003, 30 (1): 79-80.
- 王志章, 蔡毅, 杨蕾. 开发中后期油藏参数变化规律及变化机理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- Wang Zhizhang, Cai Yi, Yang Lei. Changing law and mechanization in mid and late development of reservoir parameters [M]. *Petroleum Industry Press*, Beijing, 1999.
- 何文祥, 谭文才, 马超亚. 特低渗透储层水驱前后储层特征变化规律及机理研究 [J]. *石油天然气学报*, 2010, 32 (5): 56-59.
- He Wenxiang, Tan Wencai, Ma Chaoya. Law and Mechanism of Characteristic Changes of Ultra-low Permeability Reservoirs Before and After Waterflooding [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32 (5): 56-59.
- 李爱芬, 刘敏, 张少辉, 等. 特低渗透油藏渗流特征实验研究 [J]. *西安石油大学学报* 2008, 23 (2): 35-41.
- Li Aifen, Liu Min, Zhang Shaohui, et al. Experimental study on the percolation characteristic of extra low-permeability reservoir [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*. 2008, 23 (2): 35-41.
- 江山, 蒋明煊, 程彦武. A 油田储层非均质性研究 [J]. *西南石油大学学报*, 2008, 30 (6): 101-106.
- Jiang Shan, Jang Mingxuan, Cheng Yanwu. Study on The Reservoir Heterogeneity in Oilfield A [J]. *Journal of Southwest Petroleum University*. 2008, 30 (6): 101-106.
- 师调调, 孙卫, 何生平, 等. 低渗透储层微观孔隙结构与可动流体饱和度关系研究 [J]. *地质科技情报*, 2012, 31 (4): 81-85.
- Shi Tiaotiao, Sun Wei, He Shengping, et al. Relationship between Micro-pore Structure and Movable Fluid Saturation in Low Permeability Reservoir [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2012, 31 (4): 81-85.
- 齐亚林, 宋江海, 王立社, 等. 鄂尔多斯盆地正宁地区延长组长 6、长 8 砂岩储层成岩作用特征 [J]. *西北地质*, 2009, 42 (3): 95-102.
- Qi Yalin, Song Jianghai, Wang Lishe, et al. Reservoir Diagenesis of Chang6-8 in Yangchang Formation of Zhengning Area in Ordos Basin [J]. *Northwestern Geology*, 2009, 42 (3): 95-102.
- 吴素英. 长期注水冲刷储层参数变化规律及对开发效果的影响 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2006, 25 (4): 35-39.
- Wu Suying. Variation Rule of Oil Layer Parameters Washed by Long-term Injected Water and Its Impact on Development Effect [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2006, 25 (4): 35-39.