

王 玉,马华帅,郇金来,等. 涠洲 A 油田水淹储层参数变化规律及机理研究[J]. 海洋地质前沿,2019,35(2):43-49.

涠洲 A 油田水淹储层参数变化规律及机理研究

王 玉,马华帅,郇金来,刘 娟

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江 524057)

摘 要:涠洲 A 油田经过多年注水开发,目前油田综合含水率已达 70%,开展水淹过程储层动态变化研究,对于油田后期开发具有重要意义。通过开展一系列储层微观实验,对比同种岩石相水淹前后储层参数特征,结合地质背景开展机理分析,得到以下两点认识:①水淹导致储层物性明显变差,孔喉结构非均质性变强,粒内溶孔和铸模孔含量增多,泥质含量降低,黏土矿物含量及类型发生改变;②水淹过程中储层物性变化的主控因素为硫酸钡晶体的生成和析出,其次为黏土矿物的水化、膨胀、分散、迁移。注入水与地层水不匹配,导致硫酸钡晶体结晶析出形成沉淀,并堵塞喉道。

关键词:水淹;物性;孔喉结构;黏土矿物;硫酸钡;涠洲 A 油田

中图分类号:P753 **文献标识码:**A **DOI:**10.16028/j.1009-2722.2019.02006

0 引言

油田在注水开发生产过程中,水淹会导致原始储层物性、润湿性、微观孔隙结构等性质发生变化。目前关于水淹层的研究,多是基于测井技术评价水淹级别,且已由常规测井技术定性评价水淹层^[1,2],发展至利用 RMT、核磁共振录井等新技术定量解释水淹级别^[3-6]。水淹导致的地质特征变化,多是通过高倍水驱实验,分析水驱前后储层物性、孔喉结构、润湿性等地质因素变化规律^[7,8],对于产生这种变化的机理分析研究相对较少。厘清水淹导致的储层结构变化机理,对于准确评价高含水或特高含水阶段的储层水淹程度,找寻剩余油,保持油田稳产、高产具有重要意义。

1 油田地质概况

涠洲 A 油田位于南海北部湾盆地涠西南凹陷洼中隆(图 1),为一断层复杂化的断块构造,主要开采层位包括涠二段、涠三段和涠四段,本次研究的目的层位为涠三段,属于边水驱动层状构造油藏,天然能量较弱,主要依靠人工注水驱动。油田范围内涠三段主要发育辫状河三角洲平原分流河道沉积微相,岩性以中—细砂岩为主,属于中孔—中渗储层,油田原始地层水水型为 NaHCO₃,原始地层水矿化度 15 490 mg/L。油田于 1991 年投入开发,采用注海水开发方式,目前已进入开发中后期,油田产水率持续升高(图 2),综合含水率已达 70%,部分井因高含水导致关停,有必要在靶区内开展水淹导致的储层变化特征,并开展机理分析。2015 年于油田构造边部钻探密闭取心井 B33,并于目的层段 W₃IV D 砂体密闭取心 12 m,测井结果表明 W₃IV D 砂体已进入强水淹阶段,含水饱和度达到 61.4%,产水

收稿日期:2018-09-20

基金项目:中海油自有科研项目“复杂断块油藏注水开发剩余油分布规律及主控因素研究”(YXYK-2018-ZJ-02)

作者简介:王 玉(1991—),女,助理工程师,主要从事油气田开发地质及储层研究。E-mail: wangyu20@cnooc.com.cn

率 90.23%。密闭取心井的钻探为靶区开展地质研究提供了资料基础,对于本地区开展水淹

层储层研究,厘清水淹层地质变化机理具有重要意义。

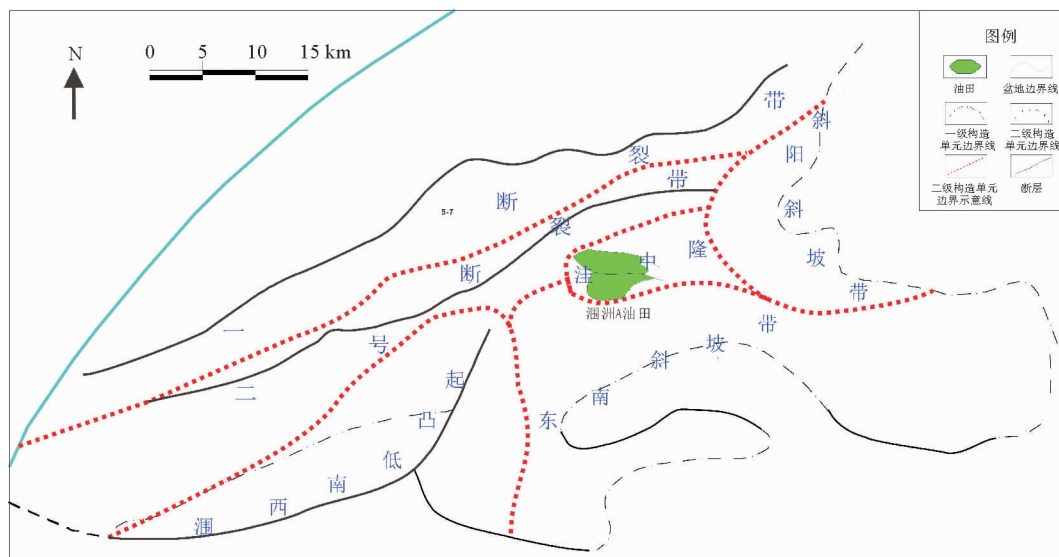


图 1 涠洲 A 油田构造位置图

Fig. 1 The location map of Weizhou A Oilfield

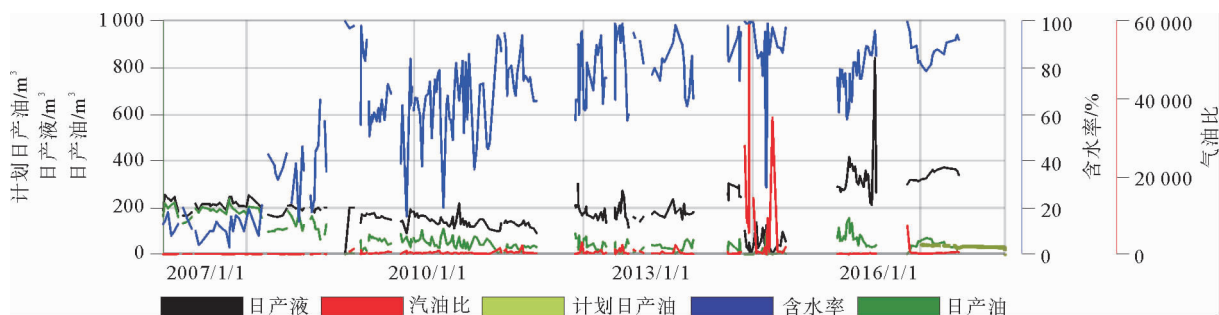


图 2 涠洲 A 油田 A1 井生产动态图

Fig. 2 The map of production dynamics of Well A1 in Weizhou A Oilfield

2 岩石相划分

涠洲 A 油田中块 3 井区探井 3 井(油田投产后改名为 A5 井)位于水下分流河道主河道中心处, B33 井位于水下分流河道支河道边缘处, 二者沉积相带存在一定差异。在开展水淹地质影响因素研究前进行岩石相划分, 针对同一种岩石相开展对比, 尽可能排除沉积相带导致的储层参数差异, 确保数据对比基础的可靠性。

在岩心描述的基础上, 利用粒度分析结果对岩心描述结果进行校正。结合岩性与沉积构造, 在涠洲 A 油田 W_3 IV D 砂体内共识别出 6 种岩石相: 斜层理细砂岩相、块状层理细砂岩相、波状层理细砂岩相、块状层理粉细砂岩相、波状层理粉砂岩相、块状层理粉砂岩相。其中斜层理细砂岩相、块状层理细砂岩相、块状层理粉细砂岩相、块状层理粉砂岩相在探井和密闭取心井中具有可对比性, 各岩石相特征见表 1。中块 3 井区储层岩石相以块状层理细砂岩和斜层理细砂岩为主。

表 1 涠洲 A 油田典型岩石相特征

Table 1 The typical features of lithofacies in Weizhou A Oilfield

岩石相	岩性	沉积构造	渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$		孔隙度/%		粒度中 值/mm	平均孔喉 半径/ μm	泥质含 量/%	典型照片
			取值范围	平均值	取值范围	平均值				
块状层理细砂岩相	细砂岩	块状层理	6.76~728	428.60	14.5~22.8	19.90	0.18	3.94	6.9	
斜层理细砂岩相	细砂岩	斜层理	3.85~978	206.80	14~22.8	19.04	0.12	3.03	9.77	
块状层理粉细砂岩相	粉细砂岩	块状层理	2.94~13.1	8.40	11.9~16.8	15.00	0.04	0.55	24.17	
块状层理粉砂岩相	粉砂岩	块状层理	0.02~0.03	0.03	1.9~3.3	2.80	0.06	—	12.83	

3 水淹前后地质参数变化规律

3.1 水淹前后物性变化

对比未水淹的探井 3 井与强水淹的 B33 井物性,不同的岩石相其物性具有明显不同的变化趋势(表 2)。针对粒度较粗的块状层理细砂岩相和斜层理细砂岩相,水淹前后孔隙度相差不大,水

淹后岩石渗透率表现出降低的趋势,渗透率均值由水淹前的 $206.8\sim 428.6\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 降至水淹后的 $78.0\sim 145.0\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均下降了 64%;粒度较细的块状层理粉细砂岩水淹后,物性明显变好,探井中有效储层平均孔隙度 15%,平均渗透率 $8.4\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,密闭取心井中平均孔隙度 19.8%,渗透率 $115.2\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。平均粒径与孔隙度、渗透率相关性表明,对于粒度相同的样品,水淹后其孔隙度、渗透率均呈现增大趋势(图 3)。

表 2 水淹前后孔渗参数变化

Table 2 The parameter changes in porosity and permeability after water logging

岩石相	3 井		B33 井		变化值	
	孔隙度/%	渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度/%	渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度/%	渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$
斜层理细砂岩	19.1	206.8	18.8	78.0	-0.3	-128.8
块状层理细砂岩	19.9	428.6	19.8	145.0	-0.1	-283.6
块状层理粉细砂岩	15.0	8.4	19.8	115.2	4.8	106.8

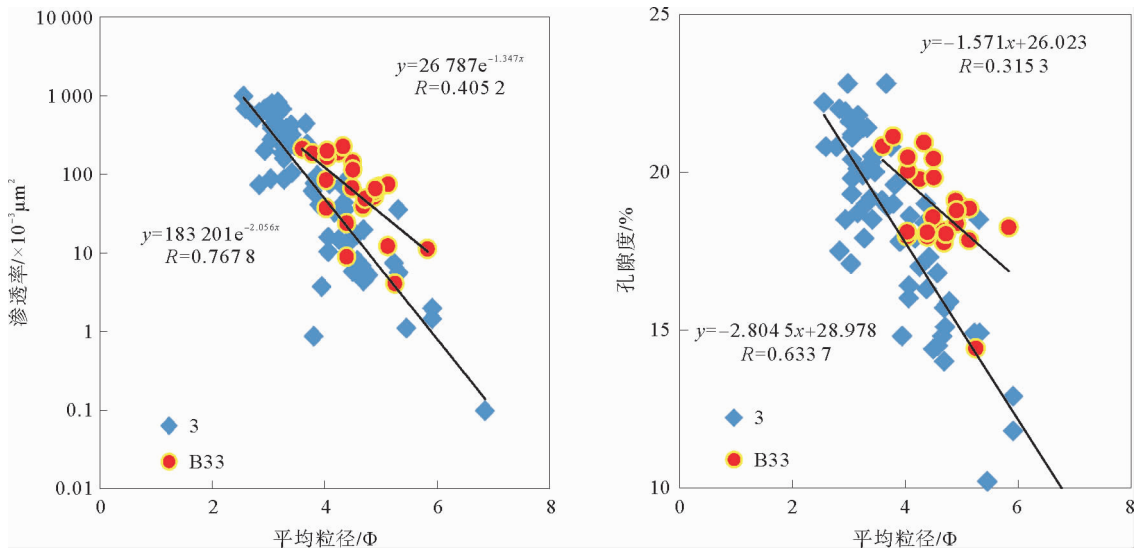


图 3 水淹前后平均粒径与孔渗相关性

Fig. 3 The correlation between average grain diameter and porosity/permeability before and after water logging

结合不同岩石相孔渗分析结果认为,块状层理细砂岩相和斜层理细砂岩密闭取心井水淹前后孔隙度相当,渗透率明显较低,主要由于水淹导致岩石内部结构发生改变。块状层理粉细砂岩孔隙度差异较大,是由于样品本身的差异性导致,3井中取到的样品泥质含量相对较高,块状层理粉细砂岩孔隙度、渗透率变化对于分析水淹过程中储层参数变化不具有参考价值。

3.2 水淹前后孔隙结构变化

孔喉结构的变化将直接导致岩石的物性发生改变^[9,10]。对比未水淹3井与水淹B33井块状层理粉细砂岩孔喉特征(图4),3井平均孔喉半径为 $3.82\text{ }\mu\text{m}$,分选系数3.26,B33井平均孔喉半径为 $4.94\text{ }\mu\text{m}$,分选系数7.65,水洗后孔喉半径平均值增加了 $1.12\text{ }\mu\text{m}$ 。平均孔喉直方图上,孔喉主峰范围变化趋势不一,主要集中于 $4\sim 12\text{ }\mu\text{m}$,B33井孔喉分布直方图上, $<1\text{ }\mu\text{m}$ 的喉道含量较3井有所增加,同时, $>15\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙数量也有所增多,即孔喉非均质性增强。2口井典型样孔喉分布直方图显示,3井孔喉以微孔微吼为主,水洗后B33井中以小孔细喉为主,储层储集性能相对变

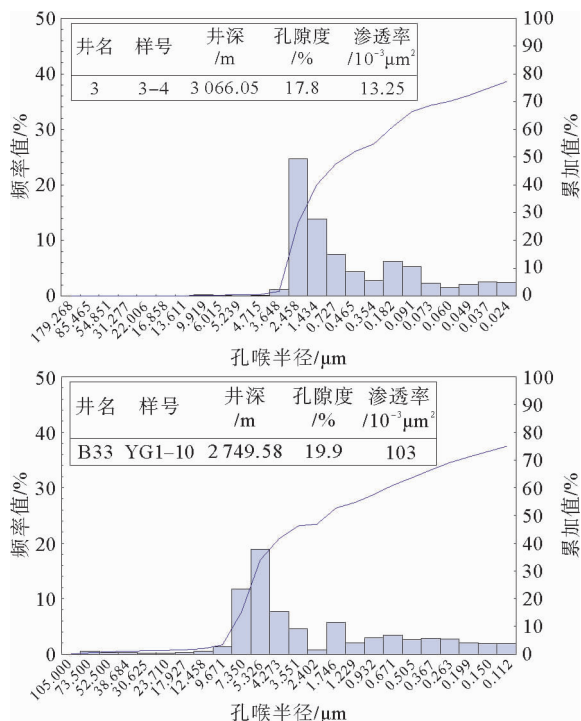


图4 水淹前后孔喉半径展布直方图

Fig. 4 The distribution histogram of pore throat radius before and after waterflood

好,但孔喉集中程度相对分散,孔喉结构非均质性变强。

3.3 水淹前后孔隙类型变化

探井与密闭取心井中孔隙类型均以粒间孔为主(图5),探井中孔隙含量其次的为粒间溶孔和长石溶孔,伴随注入水的长期冲刷,颗粒和填隙物被溶解、破碎或迁移,岩石中流体运移通道增大,粒内溶孔和铸模孔明显增多,其面积百分比由探井中的6.1%增加至密闭取心井中的15.4%,增加了9%左右。

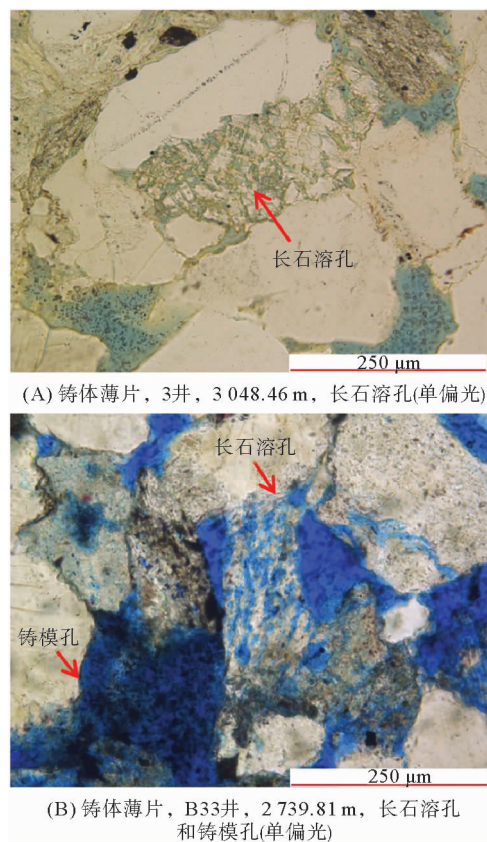


图5 水淹前后薄片鉴定照片对比

Fig. 5 Comparison of thin section before and after waterflood

3.4 水淹前后泥质含量变化

通过对粒度分析资料进行分析研究,发现随着水洗程度的加强,储层中泥质含量相对增加。涠洲A油田水淹过程中,不同岩石相其泥质含量变化规律相同,水淹后B33井较水淹前3井泥质

含量表现出增加的趋势。其中 3 井 36 个样品平均泥质含量为 9.62%, B33 井 17 个样品平均泥质含量为 13.71%, 平均泥质含量增加了 4.09%。

3.5 水淹前后黏土矿物变化

水驱前后黏土 X 衍射全岩分析结果表明, 注入水的冲洗导致黏土矿物的含量及类型发生改变^[11]。3 井中伊蒙混层相对含量 4.4% ~ 24.1%, 平均值 9.05%; 伊利石相对含量 19.7% ~ 42.2%, 平均值 26.6%; 高岭石相对含量 16.1% ~ 33%, 平均值 29.1%; 绿泥石相对含量 17.6% ~ 44%, 平均值 35.25%。B33 井中伊蒙混层相对含量 12% ~ 18%, 平均值 16.45%; 伊利石相对含量 16% ~ 22%, 平均值 19.18%; 高岭石相对含量 28% ~ 42%, 平均值 35.36%; 绿泥石相对含量 23% ~ 38%, 平均值 29%。B33 井较 3 井伊/蒙混层、高岭石含量上升, 伊利石和绿泥石含量减少(图 6)。

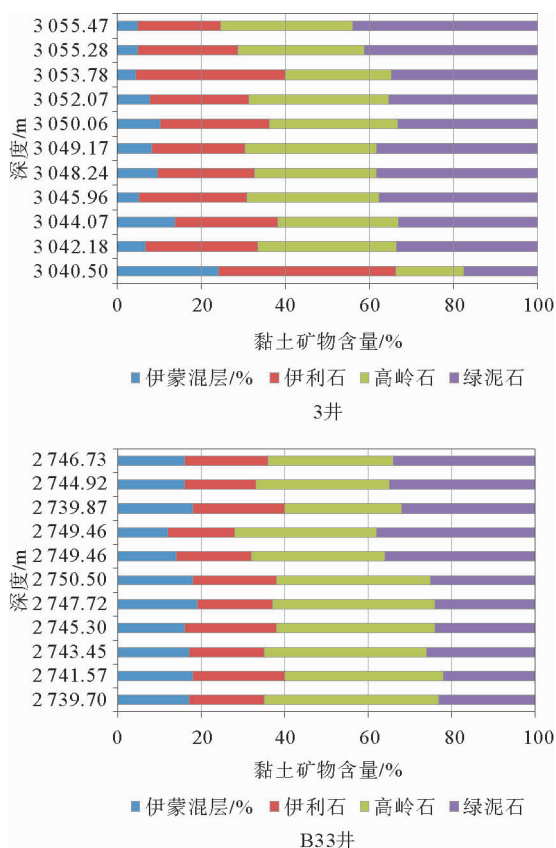


图 6 水淹前后黏土矿物相对含量对比

Fig. 6 The relative content of clay mineral before and after water-flood

3.6 地层水矿化度变化

伴随着注水开采过程, 地层水的矿化度及各种离子含量不断发生变化^[8]。生产井早期地层水水型为 NaHCO_3 , 地层水矿化度 15 094 mg/L, 注入水类型为海水, 水型 MgCl_2 , 矿化度 34 691 mg/L, 随着注入水与地层水的混合, 混合水矿化度逐渐升高, 矿化度可达 25 474 mg/L, 此时水型为 CaCl_2 型。地层水与注入水不配伍, 混合地层水中 SO_4^{2-} 与 Ba^{2+} 最高共存能力为 SO_4^{2-} 100 mg/L、 Ba^{2+} 10 mg/L, 开发开采过程中, 二者生成硫酸钡晶体^[12], 沉淀并伴随注入水析出地层。

4 水淹前后地质参数变化机理分析

储集层物性、孔隙结构、泥质含量变化的微观原因是黏土矿物的水化、膨胀、分散、迁移及其他地层微粒运移^[13,14]。结合涪洲 A 油田结垢现象严重, 分析该区储层变化主要是由于黏土矿物与地层垢共同作用导致。

涪洲 A 油田注入水为处理之后的海水, pH 值 6.14, 偏酸性。注入水对储层的冲洗作用, 主要包括对颗粒骨架、储层孔隙以及地层水等的相互作用, 注入水的离子与地层中的离子发生相互作用或为地层中化学反应的进行提供良好的反应条件。

4.1 注入水对黏土矿物的作用

水淹过程中储层中黏土矿物的含量变化明显, B33 井较 A5 井高岭石、伊/蒙混层含量上升, 绿泥石和伊利石含量减少, 究其原因主要是不同的黏土矿物遇水表现出不同的变化形式^[15]。黏土矿物遇水后其变化机制存在明显差异, 其中伊/蒙混层为水敏性的黏土矿物, 对地层的损害方式主要为水化膨胀堵塞; 高岭石、伊利石、绿泥石主要为运移堵塞^[16]。

(1) 伊/蒙混层

伊/蒙混层为水敏性矿物, 遇水膨胀, 体积可膨胀至原来的多倍, 导致伊/蒙混层绝对含量有所增加。

(2) 高岭石

岩石薄片鉴定表明密闭取心井中长石溶蚀现

象更为明显,铸模孔含量明显升高。主要因为偏酸性注入水条件下,地层中的长石发生溶蚀作用,形成高岭石矿物,从而导致水淹后高岭石含量增加。

(3) 绿泥石和伊利石

绿泥石和伊利石属于相对稳定矿物。贴附于颗粒表面或环绕颗粒,结晶格架较紧密,不易遭到破坏,水驱过程中容易被冲刷迁移,绝对含量减少。

黏土矿物在水化、膨胀、运移等多种遇水变化机制的共同作用下,孔喉结构复杂性变化明显,孔喉非均质性增强,储层有效渗透空间缩小。

4.2 注入水与地层水的不配伍性

涠洲 A 油田开采过程中,井筒结垢现象明显,主要原因是地层水与注入海水不配伍,海水中含有大量的 SO_4^{2-} ,容易与地层中的 Ba^{2+} 反应,生成 BaSO_4 晶体^[17],当混合水中 BaSO_4 含量超出其溶解度 0.000 24 g/100 g 时, BaSO_4 晶体析出并形成沉淀, BaSO_4 晶体直径一般 $< 0.4 \mu\text{m}$,地层中表现为细粒物质,容易附着在岩石表面或孔喉中,并以其为中心,不断长大,进而堵塞孔隙或喉道。

4.3 注海水开发油藏水淹过程中储层动态变化机理

涠洲 A 油田水淹过程中储层物性变化的主控因素为 BaSO_4 晶体的析出,其次为黏土矿物的相互转化。伴随着海水的注入,一方面长石向高岭石转化,另一方面 BaSO_4 晶体析出,二者均导致储层中细粒物质增加,表现为泥质含量的增加,溶蚀孔和铸模孔含量增加,随着地层水的冲洗作用,地层垢和黏土矿物易分散、迁移,堵塞在小孔喉中,在大孔道中形成优势通道,表现为小喉道数量增加,大孔隙增加,孔喉结构非均质性增强。

5 结论及建议

(1)海水注入开发储层,水淹过程中,涠洲 A 油田储层物性变差,孔喉结构非均质性增强,长石溶孔和铸模孔含量增加,颗粒泥质含量增加,黏土矿物含量减少。

(2)水淹导致储层物性变差的主要因素是 BaSO_4 晶体的生成和析出,其次为黏土矿物的水化、膨胀、分散、迁移。硫酸钡晶体的析出使得储层中细粒物质含量增加,容易堵塞小孔喉,导致储层物性变差。

综合考虑长期注水开发导致涠洲 A 油田储层物性变差,为充分防止和减少水淹作用对油田储层储集物性造成的伤害,一方面考虑改善注入水的成分,有效改善地层水与注入水的不匹配性,然而海上油田注水成本较高,改善注入水成分措施实施较为困难;另一方面建议在油田开发生产过程中注入合适的化学试剂,抑制 BaSO_4 晶体的形成,为油田高效开发提供保障。

参考文献:

- [1] 申辉林,韩情忠,匡立春,等.测井多井解释技术在克拉玛依砾岩油藏水淹层评价中的应用[J].石油大学学报:自然科学版,1998,22(2):21-25.
- [2] 许小琼,王志战,慈兴华.利用磁共振录井技术定量评价水淹层[J].波谱学杂志,2012,29(2):209-214.
- [3] 陈科贵,刘顺生,曹鉴华,等.吐哈 MW 油田水淹层测井解释方法与应用[J].西南石油学院学报,2004,26(6):5-8.
- [4] 邵维志,梁巧峰,丁娱娇,等.核磁共振测井评价水淹层方法的研究及应用[J].测井技术,2004,28(1):34-44.
- [5] 张学磊,沈楠,樊茹,等.神经网络技术在复杂断块油藏水淹层评价中的应用[J].复杂油气藏,2015,8(3):55-70.
- [6] 徐静,高伟,楚延军,等.RMT在保浪油田水淹层评价中的应用[J].西南石油大学学报:自然科学版,2008,30(6):135-137.
- [7] 郭小燕,魏远明,郭蓓蕾,等.八面河油田水淹层储层性质变化及测井响应特征研究[J].中国西部科技,2011,10(14):13-15.
- [8] 何文祥,许雅.港东开发区水淹前后储层参数变化规律及机理研究[J].断块油气田,2010,17(2):191-193.
- [9] 操应长,蒯克来,朱如凯,等.松辽盆地南部泉四段扶余油层致密砂岩储层微观孔喉结构特征[J].中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(5):7-15.
- [10] 杨正明,姜汉桥,李树铁,等.低渗气藏微观孔隙结构特征参数研究—以苏里格和迪那低渗气藏为例[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2007,29(6):108-119.
- [11] 俞军.大庆油田注水开发后期储层性质变化研究[J].油气田地面工程,2007,26(3):15-16.
- [12] 王娜,句振伟,王汉军,等.水淹层测井评测方法在鄯善油田二次开发中的应用[J].工程地球物理学报,2013,10(1):35-40.

- [13] 王志章,蔡毅,杨蕾,等. 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,1999:87-94.
- [14] 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(江汉石油学院学报),2005,27(4):665-666.
- [15] 赵晓东,杨少春,钟思瑛,等. 注水开发油田黏土矿物变化及其对剩余油形成影响[J]. 矿物学报,2014,34(4):591-598.
- [16] 何文祥,谭文才,马超亚,等. 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.
- [17] 李跃喜,付美龙,熊帆,等. 涠洲 12-1 油田油井结垢现状分析及对策研究[J]. 石油天然气学报,2010,32(2):327-329.

CHANGES IN RESERVOIR PARAMETERS AFTER WATER FLOODING IN WEIZHOU A OILFIELD

WANG Yu, MA Huashuai, HUAN Jinlai, LIU Juan

(Zhanjiang Branch Company of China National Offshore Oil Corporation, Zhanjiang 524057, Guangdong, China)

Abstract: After years of waterflooding, the total water cut has grown up to 70% in the Weizhou A Oilfield. It is urgently required to carry out researches on the dynamic changes in reservoir parameters during water-flood process for future development and production. Through a series of reservoir microscopic experiments, we made a comparison of the reservoir parameters before and after flooding for the reservoir of same lithofacies. Mechanism analysis based on geological background was also carried out. It is concluded that, waterlogging may result in obvious deterioration of reservoir properties, such as strong heterogeneity in pore throat structures, increase in pores and moldic holes, decrease in mud content and changes of clay in both content and type; during flooding process, the main factor for the changes in reservoir property is the production and precipitation of barium sulfate crystals, followed by hydration, expansion, dispersion and migration of clay minerals. As the injected water does not match well with the formation water, barium sulfate crystals crystallized and precipitated, eventually clogged up the throat and led to poor physical properties.

Key words: water-flood; physical properties; pore throat structure; clay minerals; barium sulfate; Weizhou A Oilfield