

# 边水对油水过渡带注水井调剖影响研究

刘常清<sup>1</sup>,陈增辉<sup>2</sup>,吴慎渠<sup>2</sup>,于晓涛<sup>2</sup>,徐浩<sup>2</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津300459;2. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司,天津300452)

**摘要:**渤海K油田开发过程中受边水作用较大,由于油藏非均质性较强,边水突进速度较快,导致含水上升速度快,油藏采收率偏低。对油水过渡带注水井调剖能在一定程度上抑制边水突进速度。研究边水对油水过渡带注水井调剖的影响,对油田后期开展调剖决策具有重要意义。通过数值模拟技术和物理模拟技术,研究边水本身的性质(距离和能量)和调剖时机对调剖效果的影响。结果表明:随着水体倍数的增大,调剖效果减弱;适中的边水距离开展调剖效果较好;调剖时机越早,提高采收率值越高,早期调剖对采收率提升效果比较显著。

**关键词:**边水 调剖 数值模拟 物理模拟

中图分类号:TE343 文献标志码:A

## Effect of edge water on profile control of injection well in oil – water transitional zone

LIU Changqing<sup>1</sup>, CHEN Zenghui<sup>2</sup>, WU Shenqu<sup>2</sup>, YU Xiaotao<sup>2</sup>, XU Hao<sup>2</sup>

(1. Cnooc (China) Co. LTD. Tianjin Branch, Tianjin 300459, China;

2. Engineering Technology Branch of Cnooc Energy Development Co. LTD., Tianjin 300452, China)

**Abstract:** During the development of Bohai K Oilfield, the edge water is significant effect. Because of stronger heterogeneity of reservoir and faster breakthrough of edge water, this can result in rapid rise in water cut and lower oil recovery rate. However, the breakthrough rate of edge water can be controlled by adopting the profile control of water injection wells in oil – water transitional zone. So it was carried out studies on the effect of edge water on the profile control of water injection wells in oil – water transitional zone, which is significant to the profile control decision at later stage of oilfield development. Through the numerical simulation and physical modelling technique, it was studied the effect of the nature of the edge water itself (such as water body size and edge water distance) and profile control timing on profile control effect. The results show that with the water volume multiple increases, the effect of profile control becomes to be poor. Besides, moderate distance of side water is benefit for adopting profile control measures. The earlier the profile control timing, the higher the oil recovery rate is, and the profile control at early stage is significant to improve oil recovery rate.

**Key words:** edge water; profile control; numerical simulation; physical modelling

渤海K油田在开发过程中受边水作用较大,油藏非均质性较强,边底水突进速度较快,导致含水上升速度快,油藏采收率偏低。以K油田S井区为例,S井区为3注6采,渗透率极差为6.8,该区2014年5月投产,截至2016年8月,井区采出程度9.8%,平均含水56.1%,其中该区从2014年到2016年的含水上升率为5.3%,高于标准含水上升率4.3%。含水上升速度较快,开发效果较差,边水水侵是导致该区油藏采收率偏低的重要原因,对边水附近注水井调剖能一定程度抑制边水突进速度,改善

开发效果<sup>[1-2]</sup>。因此,研究边水对油水过渡带注水井调剖的影响,有助于为后期开展调剖措施提供必要的依据。

通过对国内外文献的调研发现,油藏本身的性质如原油粘度、地层倾角、油层厚度、平面非均质性、采油速度等对油水过渡带注水井调剖均会产生影

收稿日期:2017-10-18;改回日期:2017-12-04。

第一作者简介:刘常清(1984—),工程师,现从事油气田增产、增注技术研究与管理工作。E-mail:andycoman13142000@163.com。

响<sup>[3~4]</sup>。本文在渤海K油田油藏地质与开发参数的基础上,采用构建数值模拟模型和物理模型的方法,着重研究边水对油水井以及调剖效果的影响。主要选取了边水本身的性质(距离和能量)作为研究对象,此外,为了考虑边水对调剖效果的影响程度,选取注入调剖剂时机作为其中的一个研究对象。

## 1 物理模拟研究

### 1.1 物理模型

针对K油田油藏地质特征及开发特征,建立了用以模拟研究K油田边水油藏开采方法的平面模型<sup>[5~7]</sup>。模型尺寸为:700 mm×100 mm×100 mm,耐压1 MPa,平面模型如图1所示。

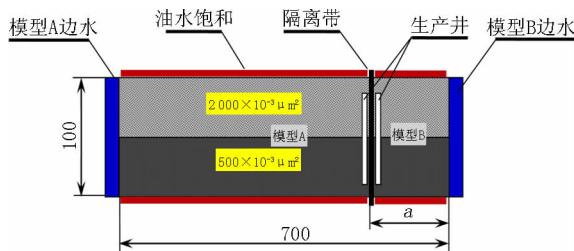


图1 模型设计

储层模型为无机胶结石英砂模型,模型A和模型B为两个由不渗透带隔离的独立系统,以避免实验过程中相互干扰,并可实现开采动态、采收率的分段测试和计量。

模型A与模型B根据实验要求调整大小,两模型间装有隔离带,模型内采用两层非均质岩心,渗透率分别为 $500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $2000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,模型左右两侧装有边水槽模拟边水侵入;模型上下两侧留有孔槽用以饱和水和饱和油,生产井位于隔离带左右两侧。

### 1.2 实验步骤

研究共进行两部分实验研究,第一部分为:不同边水距离对生产井的影响研究;第二部分在第一部分研究的基础上选出最优的边水距离,进行不同含水期调剖技术研究。实验中现场脱水原油,模拟原油20 °C时粘度为160~330 mPa·s,模拟储层渗透率为 $(500 \sim 2000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,实验采用定压驱替方式模拟边水能量。

具体实验步骤:

- (1)根据实验测试内容准备好驱替液(地层水)和模拟油等。
- (2)抽真空饱和水。
- (3)模型饱和油。通过操作系统控制,打开驱

替管路阀和排液阀,调好泵流量并运行,用油驱水,直至出口含油率达到100%,停泵。

(4)采用恒压边水驱,注入压力为0.3 MPa,测取开采动态曲线。

(5)边水驱至含水98%,计算边水驱采收率。

(6)由边水部位注入调剖剂,注入调剖剂时采用恒速驱,驱替流速为5 mL/min,模拟边水部位注水井调剖。

(7)调剖后采用恒压边水驱,注入压力为0.3 MPa。

(8)测取调剖后边水驱开采动态曲线。

(9)边水驱至含水98%,计算调剖后边水驱采收率。

### 1.3 实验结果及分析

#### 1.3.1 生产井与边水距离对开采效果及调剖的影响

针对不同边水与生产井距离对采收率的影响研究,最终开展150,250,450,550,700 mm 5组实验,实验结果见表1。

表1 生产井与边水距离对采收率的影响

生产井与边水距离/mm	150	250	450	550	700
水驱采收率/%	38.5	41.1	44.5	51.1	51.5
调剖后最终采收率/%	46.9	20.1	55.3	63.6	63.5
提高采收率/%	8.4	9.0	10.8	13.1	12.6

通过实验可以看出,随着边水距离的增大,调剖后提高采收率值逐渐上升,在550 mm时达到最高,说明岩心长度550 mm范围调剖效果最好。

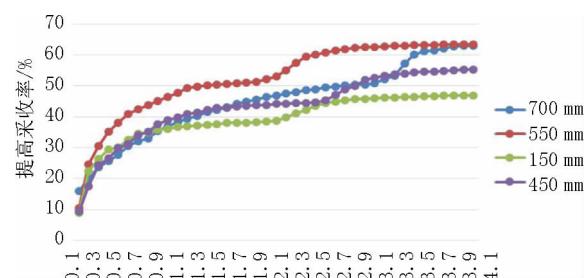


图2 不同边水距离对采收率的影响

通过图2曲线可以看出,550 mm岩心实验提高采收率高于其他距离岩心实验,分析原因主要为:恒压驱替情况下,注入压力与岩心阻力平衡关系很重要,岩心长度太短易形成水流优势通道(如150 mm岩心),调剖措施还未进行有效封堵,便被后续水驱破坏,实验过程中提高采收率值更多表现的是水的冲刷效应;岩心长度太长,注入压力低于岩心阻力,表现在注入过程中注入速度不断下降,调剖措施后,由于注

入速度低,调剖体系不能有效地推入到水流优势通道,从而削弱对边水的抑制能力。上述情况通过下面的注入速度对采收率的影响分析可以明显看出。

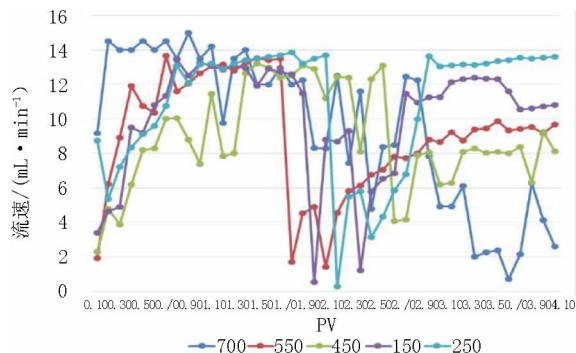


图3 不同岩心长度注入速度曲线

根据实验数据分析,450~550 mm进行调剖效果最佳。岩心过长主要表现为驱替介质的渗流效

应,注入调剖体系由于注入压力较低,不能有效推动至高渗通道。而如果岩心过短,主要表现在驱替介质的冲刷效应,注入调剖体系还没有建立起阻力,便被后续高强度驱替介质推至生产井附近,没有有效抑制边水突进(见图3)。

### 1.3.2 边水驱调剖时机对调剖效果的影响

根据生产井与边水距离实验研究,确定两者距离为550 mm,在调剖效果实验中,按照实验方案设计,分别研究了生产井含水50%,70%,98%时调剖(注入调剖剂0.3 PV,然后转水驱至含水99%以上)对生产井的影响。

不同含水时机进行边水调剖的实验中,选择含水50%,70%,98%三个调剖时机,将3组实验在不同含水时机进行调剖对应的PV数、含水和采收率实验数据进行对比,如表2所示。

表2 不同含水时机调剖对采收率的影响

含水时机	驱替PV数	含水/%	采收率/%	相对提高采收率(含水98%)/%	最终提高采收率/%
50%	0.32	60.87	33.88	16.11	34.07
	0.46	85.19	38.02		
	1.49	99.04	66.55		
	3.15	99.69	67.95		
70%	0.32	59.09	32.30	14.48	27.78
	0.46	77.68	38.27		
	1.49	99.40	64.92		
	3.46	99.77	66.05		
98%	0.32	62.32	33.63	13.12	13.12
	0.47	81.54	38.10		
	1.49	98.03	50.44		
	4.16	99.59	63.56		

通过3组实验数据对比分析:

(1)3组实验在含水70%时提高采收率值比较相近,其中含水到达98%时,1#含水50%进行调剖的岩心采收率>2#含水70%进行调剖的岩心采收率>3#含水98%进行调剖的岩心采收率。含水在70%~98%范围对采收率贡献较大,主要是因为含水50%进行调剖时处于含水快速上升阶段,含水50%上升至70%时间较短,驱替的PV数较小,所以调剖效果不明显。

(2)含水50%,70%,98%进行调剖的3组实验,在含水98%水驱的基础上提高采收率值分别为16.11%,14.48%,13.12%,调剖时机越早,提高采收率值相应较高,早期调剖对采收率提升效果比较显著。

## 2 数值模拟研究

### 2.1 数模模型建立

由于本次模拟涉及到调剖作业,采用传统的黑

油模型不能满足模拟的要求,因此采用CMG公司的CMG-STARS模拟器作为模拟计算的软件。本次模拟采用的参数见表3。

表3 模拟采用的参数

参数	取值
有效网格/个	50×50×1
网格长宽高/m	10×10×30
相组分	oil, water
单位	Metric
孔隙度,小数	0.2
渗透率/( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	1 000(优势通道20 000)
纵向渗透率(横向渗透率倍数)	0.1
水密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1000
油密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	911.3
初始压力/kPa	23 500
初始含油饱和度,小数	0.773
井径/m	0.086
井网	1注1采

模型研究采用网格水体,并采用加大孔隙体积

的方式来实现不同水体大小,进而研究边水能量对生产的影响。由于定液生产中油藏整体压力保持平衡,导致加入边水后,水体侵入并不明显,不适合边水影响分析。为了更好地反映边水侵入的影响,选择采用定井底压力生产的方式进行研究。

## 2.2 研究内容

(1)采用9组不同水体倍数的水驱模型和9组不同水体倍数的调剖模型,研究水体倍数对生产井调剖效果影响,见表4。

表4 边水模型

方案编号	内容	方案编号	内容
1-1	2倍水体	2-1	2倍水体+调剖
1-2	4倍水体	2-2	4倍水体+调剖
1-3	6倍水体	2-3	6倍水体+调剖
1-4	8倍水体	2-4	8倍水体+调剖
1-5	10倍水体	2-5	10倍水体+调剖
1-6	15倍水体	2-6	15倍水体+调剖
1-7	20倍水体	2-7	20倍水体+调剖
1-8	50倍水体	2-8	50倍水体+调剖
1-9	100倍水体	2-9	100倍水体+调剖

(2)改变生产井与边水的距离,分别取与边水80,180,330 m的距离,研究生产井与边水距离对开采效果及调剖的影响。

(3)分别在含水50%,70%,90%时进行调剖,研究边水驱调剖时机对调剖效果的影响。

## 2.3 结果分析

### 2.3.1 水体倍数对生产井调剖效果的影响

从计算结果可以看出,随着水体倍数的增加,调剖降低含水率效果逐渐变差,水体倍数越大,降水效果越差(见图4)。累产油量明显增加,但是调剖的增油效果逐渐变差,见图5。

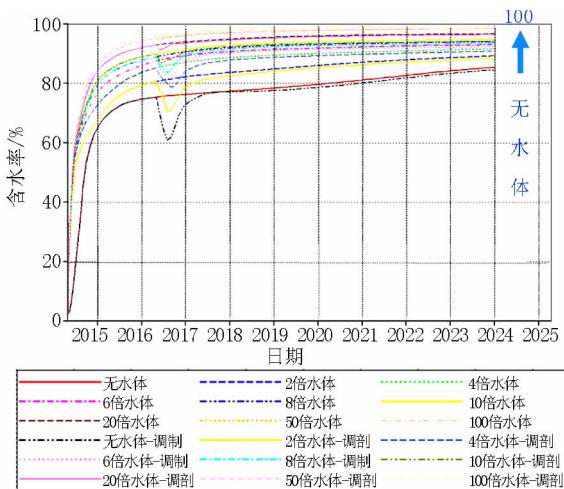


图4 不同水体倍数调剖降水效果

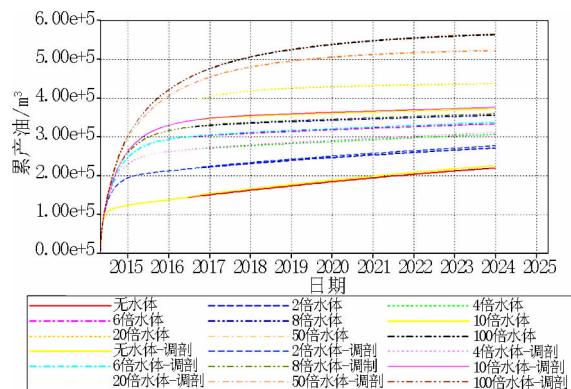


图5 不同水体倍数累产油变化

为了进一步深入研究水体倍数对调剖效果的影响,定义增油幅度和降水幅度如下:

$$\text{增油幅度} = \frac{\text{增油量}}{\text{无调剖累产油量}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{降水幅度} = \frac{\text{含水率差值}}{\text{无调剖含水率}} \times 100\% \quad (2)$$

根据数值模拟计算结果,可以得到不同水体倍数条件下的增油幅度和降水幅度,如表5所示。

表5 不同水体倍数的调剖增油幅度及含水率下降幅度

水体倍数	调剖增油幅度/%	含水率下降幅度/%
0	2.70	14.92
2	2.02	10.89
4	1.51	7.76
6	1.11	5.93
8	1.01	4.11
10	0.99	3.25
20	0.89	1.97
50	0.60	0.84
100	0.35	0.46

可以看出,随着水体倍数的增大,调剖增油幅度大幅下降,在6倍水体以上时,增油幅度降为1%以下;随着水体倍数的增大,含水率下降幅度减小,在6倍水体以上时,含水率下降幅度在5%以下。水体对调剖效果影响较大。

### 2.3.2 生产井与边水距离对开采效果及调剖的影响

计算结果见图6和表6。

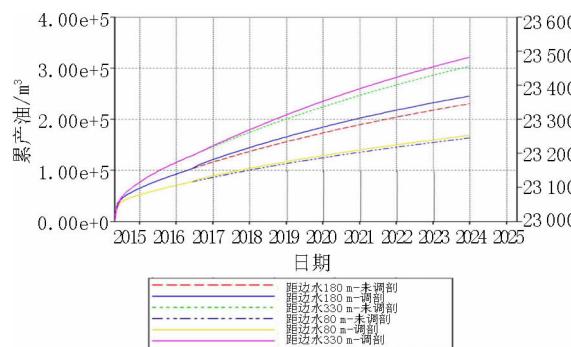


图6 不同边水距离累产油变化

表 6 不同边水距离的调剖增油幅度及含水率下降幅度

与边水距离/m	调剖增油幅度/%	含水率下降幅度/%
80	3.14	0.08
180	3.58	0.25
330	3.50	0.23

从计算结果可以看出,由于与边水距离增加,边水影响面积增加,因此累积产油量增加。但当井距较大时,注入调剖体系由于渗流阻力增加,而注入压力较低,不能有效推动至高渗通道。而井距距离过小时,注入调剖体系还未建立起阻力,便被后续高强度驱替介质推至生产井附近,未有效抑制边水突进。因此适中的边水距离有利于开展调剖作业。

### 2.3.3 边水驱调剖时机对调剖效果的影响

计算结果见图 7。

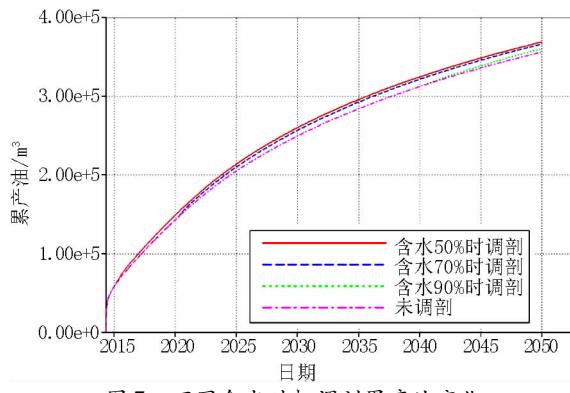


图 7 不同含水时机调剖累产油变化

从图 7 可以看出, 分别在含水 50%, 70%, 90% 进行调剖时, 其累产油量较未调剖累产油量逐渐降低, 因此调剖时机越早, 提高采收率值也相应较高, 早期调剖对提高采收率效果比较显著。

## 3 结论

(1) 水体对调剖效果影响较大。随着水体倍数的增大, 调剖增油幅度大幅下降, 在 6 倍水体以上时, 增油幅度降至 1% 以下; 随着水体倍数的增大, 含水率下降幅度减小, 在 6 倍水体以上时, 含水率下降幅度在 5% 以下。

(2) 随着边水与生产井距离的增加, 调剖后提高采收率幅度越大, 岩心长度 550 mm 以上时增幅变缓, 到一定距离后, 影响越来越小, 说明适中的边水距离开展调剖效果较好。

(3) 调剖时机越早, 提高采收率值也相应较高, 早期调剖对采收率提升效果比较显著。

## 参考文献:

- [1] 曹立迎, 刘慧卿, 张宗元, 等. 边水油藏水平井见水规律及控水措施研究 [J]. 断块油气田, 2010, 17(4): 448–450.
- [2] 杜殿发, 王玉清, 侯加根, 等. 薄层边底水油藏水淹模式——以陆梁油田陆 9 井区呼二三油藏为例 [J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(5): 91–93.
- [3] 江如意, 蔡磊, 刘玉章. 海上油田深部调剖先导试验方案研究 [J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(4): 147–148.
- [4] 刘玉章, 熊春明, 罗健辉, 等. 高含水油田深部液流转向技术研究 [J]. 油田化学, 2006, 23(3): 248–249.
- [5] 任熵, 赵福麟. 用于驱油的可视化物理模拟驱替平面模型: 中国, 01261327.4[P]. 2002-07-17.
- [6] 韩学强. 国外高含水油田堵水、调剖、封堵大孔道配套技术及应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 15–30.
- [7] 陈铁龙, 周晓俊, 赵秀娟, 等. 弱凝胶在多孔介质中的微观驱替机理 [J]. 石油学报, 2005, 26(5): 74–77.

(编辑 谢葵)