

DOI: 10.3969/J. ISSN. 1000-3754. 2010. 06. 025

塔河12区单井注水替油效果及 后续增产措施分析

戚明辉¹ 陆正元¹ 袁帅²

(1. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 中国石油大学
石油天然气工程学院, 北京 102249)

摘要: 塔河油田奥陶系油藏储层非均质性极强, 局部位置定容体发育。定容性油藏在开发过程中能量得不到及时补充, 产量递减迅速。注水替油技术能有效提高该类油藏的采出程度。从油水关系角度分析了注水替油效果的影响因素, 认为有效注水空间的大小决定了注水替油效果的好坏。针对注水替油无法继续开采井孔储层上方剩余油的现象, 提出了侧钻和注 N₂ 作为注水替油后续增产措施, 可以进一步提高采出程度。

关键词: 塔河油田; 注水替油; 有效注水空间; 侧钻; 注 N₂

中图分类号: TE344

文献标识码: B

文章编号: 1000-3754 (2010) 06-0121-05

ANALYSES ON EFFECTS OF REPLACING OIL BY WATER-FLOODING AND SEQUENT STIMULATIONS IN BLOCK NO. 12 OF TAHE OILFIELD

QI Ming-hui¹, LU Zheng-yuan¹, YUAN Shuai²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Development Engineering, Chengdu University of Science and Engineering, Chengdu 610059, China; 2. College of Oil and Gas Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The heterogeneity of Ordovician reservoirs in Tahe Oilfield is extremely serious, and the constant volume bodies are partially well-developed. During the development process of the kind of oil reservoirs, because the energy can't be supplemented in time, the production will be decreased rapidly. The technique of replacing oil by water-flooding can effectively enhance the recovery percent of reserves, so this paper analyzes the influencing factors of the above technique from the view of oil/water relationship. The results show that the effects are determined by the size of effective water injection space. In view of the phenomenon that the technique can not produce the remained oil in the upper oil reservoirs, sidetracking and N₂ injection are proposed as the sequent stimulations to further enhance the recovery percent of reserves.

Key words: Tahe Oilfield; replacing oil by water-flooding; effective water injection space; sidetracking; N₂ injection

塔河油田奥陶系油藏储集空间以裂缝、溶蚀孔 非均质性极强, 局部位置定容体发育^[1-13]。钻遇定容体及大型洞穴为主, 基质基本不具备储渗能力, 储层 容体的油井由于储集体规模较小且相对封闭, 开发

收稿日期: 2010-04-21

基金项目: 国家“973”项目“碳酸盐岩缝洞型油藏开发基础研究”(2006cb202403)。

作者简介: 戚明辉, 男, 1984年生, 在读硕士, 从事油气田开发地质研究。

E-mail: qiminghui0215@163.com

过程中能量得不到及时补充,产量下降迅速,开发效果差。针对此现象提出的注水替油技术有效解决了塔河油田定容性油藏能量不足的问题,取得了良好的开发效果和经济效益^[14]。塔河油田 12 区井间连通关系较塔河主区更为复杂,储集体定容性特征更加普遍,通过注水补充油藏能量将更为频繁。目前,该区共有十余口井实施注水替油措施,累计注水 8 104 m³,累计产油超过 5 104 m³,取得了良好的开发效果。本文以 TK1206X 井为例,从注水井开发过程中油水关系角度分析注水替油效果,并对注水井生产后期及部分低效注水井提出后续增产措施,进

一步挖掘油藏开发潜力,提高油藏最终采收率。

1 注水替油机理

单井注水替油机理即通过对定容封闭的单井缝洞单元注入高密度盐水来补充地层能量,由于缝洞单元内部储渗空间以裂缝及裂缝-溶洞为主,导压能力及流动能力强,注入水在焖井后经重力分异实现油水置换,增加油层能量^[16]。经多轮注水替油,可以逐步采出定容储集体内剩余油。其油藏物质平衡方程式^[17,18]

$$N_p [B_o + (R_p - R_s) B_g] = NB_{oi} \times \left\{ \frac{B_o - B_{oi} + (R_{oi} - R_s) B_g}{B_{oi}} + m \frac{B_g - B_{gi}}{B_{gi}} + [(1 + m) \times \frac{C_w S_w + C_p}{1 - S_{wc}}] \Delta p \right\} + W_e + W_{inj} B_w - W_p B_w \quad (1)$$

根据塔河油田实际情况,式(1)可以简化为

$$N_p B_o = NB_{oi} C_o \Delta p + W_{inj} B_w - W_p B_w \quad (2)$$

注水使得式(2)右边项的值增大,显然左边项 N_p 随之增大,即累计产油量增大,注水替油效果得以实现。

单井注水替油由注水、焖井、生产 3 个阶段形成一个完整的吞吐周期。注水阶段地层能量增加,但井筒附近由于水驱影响含油饱和度下降^[15]。焖井阶段因重力作用油水发生置换,油水界面上升,油体压缩后能量增加,井筒周围含油饱和度提高。开井后生产直至油层能量耗尽,进行下一轮注水,以此往复,逐步采出原油(图 1)。

2 典型注水井分析

TK1206X 井在钻完井过程中 3 次放空,漏失钻井液、油田水、泥浆共计 3 822 m³,常规完井。注水前累计产油 3 886 m³,平均日产油达到 134 m³,产水 154 m³(集中在投产前两天)。截至目前 TK1206X 井实施注水替油 14 次,累计注水 38 733 m³,产油 22 106 m³,产水 557 m³,平均注采比 1.71,注水替油效果理想。

TK1206X 井在投产初期高产纯油,同时定容特征表现明显:压力从 30 MPa 跌至 2 MPa,产油量从最高时的 320 m³ 降至 6 m³,未见水。此后注水。从注水前生产特征来看,TK1206X 井井孔储层距油水界面较远,且具有一定的控制储量,注水替油前景较好。注水生产从第一轮到第十二轮情况类似,即在注水焖井后油井恢复高产,平均日产油

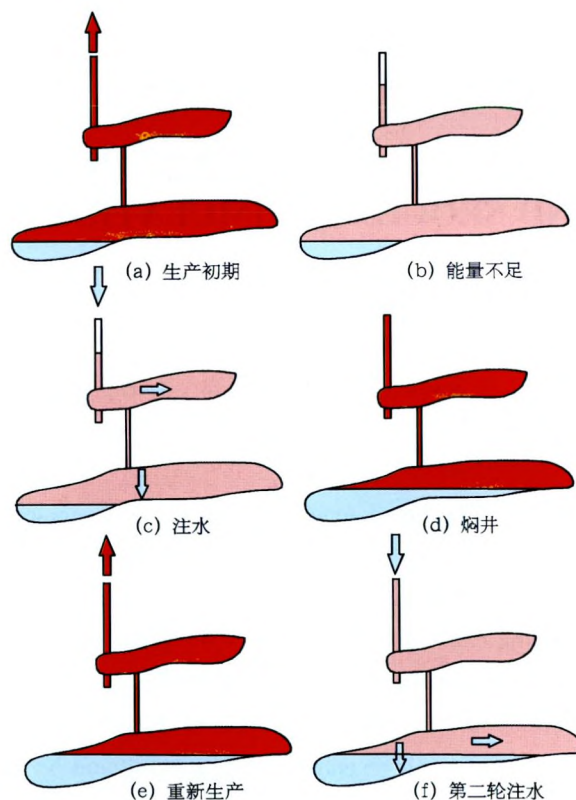


图1 注水替油示意图

Fig.1 Sketch map of replacing oil by water-flooding

140 m³,但每轮注水持续生产时间仅 10 d 左右,持续供液能力稍显不足。少量产水可能为部分残留于井筒附近的注入水。第十三轮注水生产末期含水率超过 30%,第十四轮注水后开井含水即达到 33%,次日上升至 56.6%,关井压锥无效,开井后含水率为 100%,说明缝洞单元中的水体已经上升到井孔储层的高度,此时继续注水只能增加地层

能量，但对剩余油采出作用不大。显然这种水体是通过井口注入的，为油藏次生底水。地层原有水体可能存在，但能量有限。TK1206X井具体生产数据如表1。

表1 TK1206X井注水替油生产数据
Table 1 Production data of replacing oil by water-flooding in Well TK1206X

轮次	注水量 /m ³	关井时间 /d	生产时间 /d	产油 /m ³	产水 /m ³	注采比
1	2 140	2	18	1 532	2.1	1.4
2	2 587	2	11	1 394	0.8	1.9
3	3 024	2	10	1 451	0	2.0
4	3 012	1	10	1 371	13.3	2.2
5	2 825	1	10	1 176	0	2.4
6	2 981	2	10	1 634	2.1	1.8
7	3 009	1	11	1 370	1.3	2.2
8	2 419	2	12	1 678	0	1.4
9	2 640	2	11	1 892	6.6	1.4
10	2 512	1	12	2 011	29	1.2
11	2 516	2	10	1 574	8.4	1.6
12	3 015	2	20	3 155	0	1.0
13	3 010	1	9	1 608	39	1.8
14	3 043	2	2	260	557	3.7

3 注水井油水关系及影响因素

通过典型井分析发现，井孔储层位置、油井控制油体大小及储层物性是影响注水替油效果的3个主要因素。井孔储层位置与油水界面之间的储集空间为有效注水空间。注水替油的过程即油水界面不断上升、有效注水空间不断缩小的过程。对于一口既定的井，井孔储层位置的高低决定了有效注水空间的大小，即决定了注水替油效果的好坏。经统计发现大部分注水井均存在漏失现象，井孔储层位置可以通过这些漏失液的产出情况来衡量。一般高效的注水替油井在注水前及注水生产的前期基本无水生产，或仅出现极为短暂的产水期。漏失液经重力分异后处于缝洞单元底部，较高的井孔储层部位使得这些水体远离井筒，而水体本身能量又十分有限，所以油井保持无水生产。随着注入水体的增大，缝洞单元内油水界面缓慢上升，如TK1206X井自第13轮起每一轮注水生产后期都高含水，原因就在于此。同样，部分效果较差的注水替油井则因为井孔位置低在注水前已含水生产，注水后油水

界面进一步上升，严重制约该类井注水替油效果。井孔储层位置与注水效果示意图如图2（黄色部分为有效注水空间）。显然，井孔储层位置较高的井有效注水空间大，注水替油效果好。

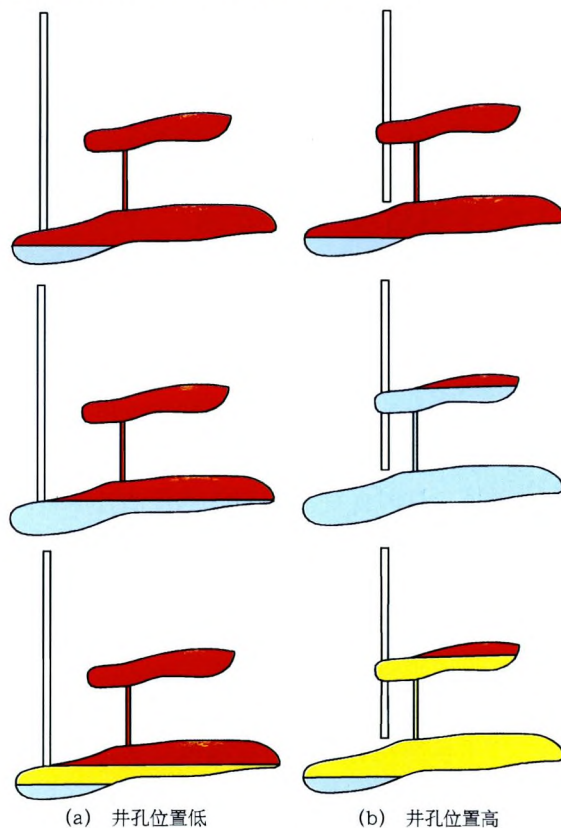


图2 井孔储层位置与注水效果示意图
Fig.2 Sketch map of relation between drilled reservoirs and water flooding effects

注水井控制油体大小是影响注水替油效果的另一重要因素，可想而知，若储集体无油可采，注水替油当然没有效果。注水前产出量在一定程度上反映了注水井控制储量（同时也反映储层物性、流体性质等）。经统计发现注水替油效果好的井（如TK1206X），注水前短时间内均为高产井。另一方面，根据有效注水空间的定义，当井孔储层位置一定时，该位置与油水界面之间的油体体积越大，注水空间也就越大，即注水替油潜力越大。当然，所谓储量的大小是相对定容体而言，实际上，当油井控制储量足够大或底水能量很强时，注水替油的意义就不大了。

储层物性（主要是渗流特性）也对注水替油效果产生很大影响。一般情况下高效注水替油井为溶洞型储层的原因就在于此。注水过程即水驱油的过程，注水结束后井筒附近含油饱和度很低，显然

不适合生产。焖井使得注入水在重力作用下实现油水分离，最终表现为地层压力增高，井筒附近富集油体。如果储层垂向渗透能力不强，则注入水无法彻底进入缝洞单元底部，油井投产后部分水体直接进入井筒造成能量损失，注水替油效果大打折扣。由于定容体原始水体及注入水能量都有限，不可能形成大规模的水侵，所以垂向渗透性对注水替油几乎无负面影响。

4 注水替油后续增产措施

注水替油后期，随着油水界面的不断升高，注水替油效果逐渐下降，最后油水界面将淹没井孔储层。此时继续注水仅增加地层能量，但无法继续采出油藏顶部剩余油。另外，对于部分直接钻遇定容性油藏低部位的井，也无法通过注水采出井孔储层上方的油体。这时候继续挖掘注水替油井潜力就需要其他方法。侧钻井可以显著提高井孔储层高度，根据有效注水空间的定义，也就是提高了注水替油井的采出程度。考虑到水体压缩性十分有限，所以降低油水界面很难实现。而注 N_2 可以在不抬升油水界面的前提下增加油藏能量，提高最终采收率。因此，注水替油井后续增产措施也可从这两方面入手。

4.1 侧钻提高井孔储层位置

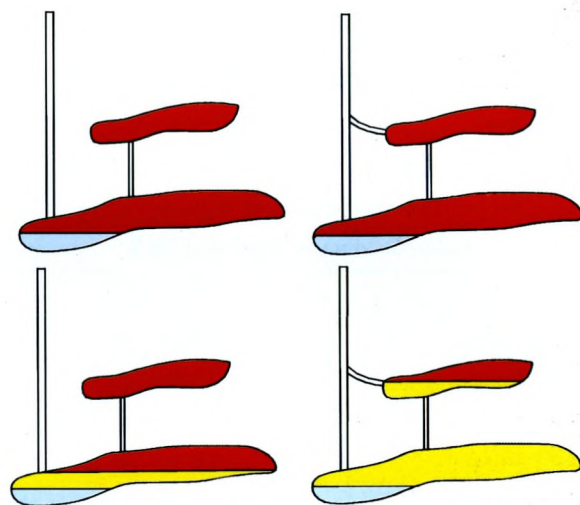
对于一个既定的缝洞单元，油体大小是客观存在的，储层渗透能力在达到一定程度后也很难再改变，此时改变井孔储层位置对于提高注水替油效率是最现实可行的方法。当然，侧钻时必须对油藏构造有个清晰的把握。从油水关系角度很容易发现侧钻增大了有效注水空间，即提高了注水替油效率（图3）

4.2 注 N_2 补充油藏能量

N_2 最小混相压力远高于研究区地层压力，所以油藏条件下注 N_2 是在非混相条件下进行的^[19]。此时 N_2 能在重力作用下进入更细小的裂缝空间，提高波及程度，储集体顶部剩余油重新富集并整体下移。由于油藏顶部次生气顶的存在，气水之间油体被压缩，油层能量提高，同时井筒附近锥进水体回落，原油富集，开井后顺利生产（图4）。

5 结 论

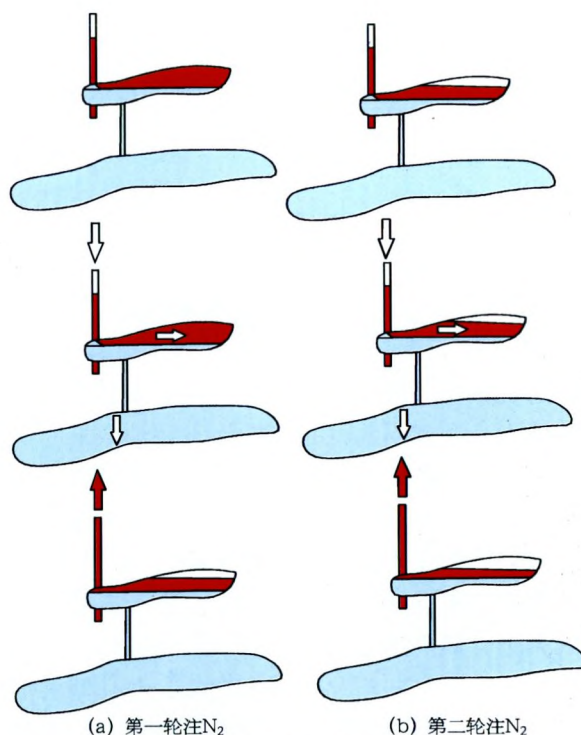
(1) 注水替油即对定容性油藏注入高密度盐水，焖井后经重力分异实现油水置换，增加油层能



(a) 侧钻前有效注水空间 (黄色) (b) 侧钻后有效注水空间 (黄色)

图3 侧钻井油水关系示意图

Fig. 3 Sketch map of the relation between oil and water in sidetracking



(a) 第一轮注 N_2 (b) 第二轮注 N_2

图4 注 N_2 油水关系示意图

Fig. 4 Sketch map of relation between oil and water in N_2 injection

量使得开井后顺利生产。该方法能有效提高塔河油田定容性油藏的采收率。

(2) 从油水关系角度分析，有效注水空间的大小决定了注水替油效果的好坏。因此，决定该空间大小的井孔储层位置，油体体积及储层物性成为影响注水替油效果的3个主要因素。

(3) 注水替油后期,继续注水无法采出井孔储层上方的油体。此时通过侧钻和注入 N_2 可以有效解决这一难题,进一步提高注水替油井生产效率。

符号注释:

- N_p ——累计产油量, m^3 ;
 B_o ——压力为 p 时地层原油体积系数;
 R_p ——累计生产气油比;
 R_s ——油藏压力下降到 p 时的溶解气油比, m^3/m^3 ;
 B_g ——压力为 p 时气体体积系数;
 N ——原始地质储量, m^3 ;
 B_{oi} ——原始条件下地层原油体积系数;
 R_{si} ——原始溶解气油比, m^3/m^3 ;
 m ——原始气顶容积与油带容积之比;
 B_{gi} ——原始条件下气体体积系数;
 C_w ——地层水压缩系数, MPa^{-1} ;
 S_w ——含水饱和度;
 C_p ——岩石(孔隙体积)的压缩系数, MPa^{-1} ;
 S_{wc} ——束缚水饱和度;
 W_e ——油藏压力降到 p 时的底水量, m^3 ;
 W_{inj} ——注入水量, m^3 ;
 B_w ——压力为 p 时地层水体积系数;
 W_p ——累计产水量, m^3 。

参考文献:

- [1] 陈志海,戴勇,郎兆新.缝洞型碳酸盐岩油藏储渗模式及其开采特征[J].石油勘探与开发,2005,32(3):101-105.
 [2] 李鹤,李允,吴锋,等.缝洞型油藏孤立溶洞注水替油机理实验[J].大庆石油地质与开发,2010,29(2):82-86.
 [3] 康志江.缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟新方法[J].大庆石油地质与开发,2010,29(1):29-32.
 [4] 董平川,雷均.缝洞型碳酸盐岩储层测井响应与储层识别[J].大庆石油地质与开发,2009,28(4):6-10.
 [5] 程倩,李阳,熊伟,等.缝洞型碳酸盐岩油藏介质理论[J].大庆石油地质与开发,2009,28(4):35-38.
 [6] 王黎栋,万力,于炳松.塔中地区 T_4^1 界面碳酸盐岩古岩溶发育控制因素分析[J].大庆石油地质与开发,2008,27(1):34-38.
 [7] 杨宇,康毅力,张凤东,等.塔河油田缝洞型油藏流动单元的定义和划分[J].大庆石油地质与开发,2007,26(2):31-33.
 [8] 杨园园,朱玉波,胡志方,等.塔中地区下古生界碳酸盐岩储层特点及预测方法[J].大庆石油地质与开发,2006,25(3):7-9.
 [9] 唐谢,赵军,黄毅,等.复杂储集空间油气藏的测井表征[J].大庆石油地质与开发,2008,27(1):134-138.
 [10] 郑松青,李阳,张望明,等.缝洞型油藏复合介质模型及流体流动数学模型[J].大庆石油地质与开发,2009,28(2):63-66.
 [11] 蔡东梅,陈焯菲,赵伦,等.随机建模技术在国外某大型碳酸盐岩油田的应用[J].大庆石油地质与开发,2008,27(6):27-30.
 [12] 洪余刚,陈景山,代宗仰,等.古地貌恢复在风化壳溶型储层研究中的应用——以川中一川南过渡带奥陶系为例[J].大庆石油地质与开发,2007,26(1):1-5.
 [13] 刘宏,谭秀成,周彦,等.基于灰色关联的复杂碳酸盐岩测井岩相识别[J].大庆石油地质与开发,2008,27(1):122-125.
 [14] 杨东,杨兆中,甘振维,等.单井注水吞吐在塔河油田的应用[J].天然气勘探与开发,2006,29(2):32-35.
 [15] 罗娟,陈小凡,涂兴万,等.塔河缝洞型油藏单井注水替油机理研究[J].石油地质与工程,2007,21(2):52-54.
 [16] 王庆魁,陆正元,钟伟,等.单井缝洞单元注水替油开发中的油水关系分析[J].桂林工学院学报,2008,28(2):179-183.
 [17] 秦同洛,陈元千.实用油藏工程方法[M].北京:石油工业出版社,1989.
 [18] 涂兴万,王世洁,林江,等.塔河油田碳酸盐岩油藏单井注水吞吐的物质平衡计算[M].北京:中国石化出版社,2005.
 [19] 徐克彬,徐念平.雁翎油田注氮气提高采收率工艺技术[J].石油钻采工艺,1998,20(3):69-75.

编辑:邵宪志