胜利油区整装油藏特高含水期水平井提高采收率技术

宋 勇
（中国石化胜利油田分公司 地质科学研究院，山东 东营 257015）

摘要：由于对胜利油区整装油藏特高含水期水平井驱油机理的认识不足，原有的水平井设计技术不能满足当前油田开发需要，水平井的设计难度加大，开发效果不理想。为此，根据实际矿场动态数据，以物理模拟相似准则为基础，建立大型物理胶结模型实验，开展水平井提高采收率研究。引入驱油效率贡献率和波及系数贡献率，以揭示水平井提高采收率的机理，并利用数值模拟技术对储层纵向渗透率级差、夹层渗透率、水平井方位和水平井部署时机等参数进行了影响规律研究。结果表明，水平井投产初期以增大波及系数为主，特高含水期以提高驱油效率为主。储层纵向渗透率级差越大，夹层渗透性越低，水平井的方位越接近垂直于注水井连线方向，水平井部署时机越早，在同一含水率时，波及系数贡献率越低，驱油效率贡献率越高。

关键词：水平井 物理模拟 采收率 贡献率 数值模拟 整装油藏
中图分类号：TE357 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-9603(2015)03-0119-05

EOR technology for the horizontal wells at extra-high water cut stage in integrated oil reservoirs of Shengli oilfield

Song Yong
(*Geoscience Research Institute*, *Shengli Oilfield Company*, *SINOPEC*, *Dongying City*, *Shandong Province*, 257015, *China*)

Abstract: The integrated oil reservoirs have stepped into extra-high water cut stage. Original technologies don't fit to the current development situation, and the design of horizontal wells has become more difficult and the development effect is restricted to the deficient understanding about oil-displacement mechanism of horizontal wells at this stage. A large-scale consolidated model was built based on the similarity criterion in physical simulation according to the practical production data. Enhancing the oil recovery by the horizontal wells was studied. EOR mechanism of the horizontal wells can be revealed through the introduction of contribution rate of oil displacement efficiency and contribution rate of sweep efficiency. The influence of vertical permeability ratio, interlayer permeability, horizontal wells direction and the drilling time on oil recovery were studied with numerical simulation. The result shows that sweep efficiency may be improved at early stage of production and the oil displacement efficiency should be enhanced in the extra-high water cut stage for the horizontal wells. The horizontal well is more perpendicular to the line of injection wells the higher the vertical permeability ratio is and the lower the interlayer permeability is. The contribution rate of oil displace efficiency is higher at the same water cut the earlier the deploying time of horizontal well is and the lower the contribution rate of sweep efficiency is.

Key words: horizontal wells; physical simulation; oil recovery; contribution rate; numerical simulation; integrated oil reservoir

胜利油区是应用水平井最早、技术发展最快的油区之一，油区中各类油藏目前都已广泛应用水平井技术，并取得较好的开发效果和经济效益[1-2]。其中，整装油藏1996年开始利用水平井技术挖潜正韵

收稿日期：2015-03-10。
作者简介：宋勇（1980—），男，山东泰安人，高级工程师，硕士，从事油气田开发方案编制及油藏数值模拟研究。联系电话：13854604469，E-mail：songyong387.slyt@sinopec.com。
基金项目：中国石化科技攻关项目“整装油田水平井提高采收率油藏工程优化技术”（P10074）。

律厚油层顶部剩余油富集区，截至2013年6月，投产正韵律水平井112口，初期平均产油量为17.2 t/d，初期平均含水率为64.3%，平均单井累积产油量为1.1×10^4 t。矿场试验证实，水平井不但提高了采油速度，还有效地提高了采收率。但由于水平井挖潜与原注采井网未形成良好的配置关系，致使水平井初期开发效果较好，后期会出现供液不足等问题，影响水平井的开发效果。因此，笔者通过物理模拟实验，建立了大型物理胶结模型，开展水平井提高采收率的机理研究，并应用数值模拟技术对其进行相关拓展，初步明确了胜利油区整装油藏水平井提高采收率的机理，以期为水平井设计的实际应用，增强水平井设计技术的科学性，提高水平井的适应性和开发效果。

1　水平井提高采收率物理模拟实验

1.1　大型物理胶结模型

针对孤岛油田中一区储层地质开发动态特征，建立纵向正韵律分布的物理胶结模型，模型长、宽、高分别为26，30和4.5 cm，平面上的物性均质，纵向上共分为3层，每层厚度均为1.5 m，从上到下孔隙度分别为0.28，0.32和0.36，渗透率分别为600×10^{-3}，$2\,000\times10^{-3}$和$5\,000\times10^{-3}$ μm^2。考虑到胜利油区河流相储层直井井网形式多为交错排状，因此采取该井网的一个井组单元，挖潜井的部署方式分为直井、水平井垂直注入井连线和水平井平行注入井连线等3类（图1）。

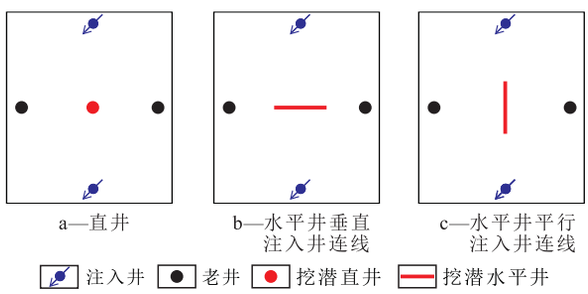

图1　大型物理胶结模型及挖潜方式示意

Fig.1　Schematic plot of large-scale physical consolidated model and potential tapping patterns

1.2　水平井提高采收率机理

应用大型物理胶结模型深入分析不同井型、不同水平井方位对剩余油挖潜的效果，以及水平井增大波及系数和提高驱油效率二者之间的关系，明确水平井相对于直井提高采收率的机理，为特高含水期正韵律储层挖潜提供理论指导。

具体的实验方案设计思路为：①第1阶段，交错排状直井井网单元生产至含水率为90%；②第2阶段，关掉原生产井，在油层顶部剩余油富集区进行挖潜，挖潜方式分别采用直井、水平井垂直注入井连线以及水平井平行注入井连线等3种，生产至含水率为98%时，实验结束。通过实验研究剩余油富集区内的波及特征、挖潜井的生产动态特征以及对采出程度的影响，并分析水平井与直井在增大波及系数以及提高驱油效率两方面的差异性。

水平井提高采收率　实验结果表明，第1阶段水驱结束后，平面上油井之间及模型边角处存在水动力学滞留区，剩余油饱和度较高；油井之间含油区较为集中且区域较大，而模型边角处则相对分散且区域较小[3]（图2）。第2阶段挖潜结束时，水平井垂直注入井连线挖潜方式效果最好，采收率最高为51.53%，剩余油动用程度最大（图3a）；水平井平行注入井连线挖潜方式效果次之，采收率为28.43%，水平井两侧区域剩余油动用程度相对较差（图3b）；直井挖潜效果最差，采收率为23.82%，其周围区域仍存在剩余油富集区（图3c）。3种挖潜方式相对第1阶段水驱结束时，提高采收率分别为33.69%，11.56%和6.61%，水平井提高采收率幅度高于直井。

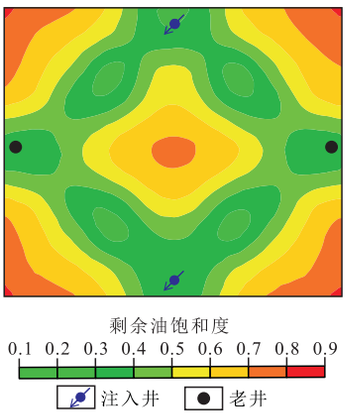

图2　大型物理胶结模型顶层剩余油饱和度分布（含水率为90%）

Fig.2　Remaining oil saturation distribution in the top layer of large-scale physical consolidated model（water cut is 90%）

水平井既可以增大波及系数也可以提高驱油效率　采收率是波及系数与驱油效率的乘积[4-5]，为了明确水平井提高采收率过程中2个参数所起的作用，提出驱油效率贡献率和波及系数贡献率2个概念，其表达式分别为

$$E_D' = \frac{\Delta E_{R1}}{\Delta E_R}\times100\% \tag{1}$$

$$E_V' = \frac{\Delta E_{R2}}{\Delta E_R}\times100\% \tag{2}$$

式中：E_D'为驱油效率贡献率，%；ΔE_{R1}为直井

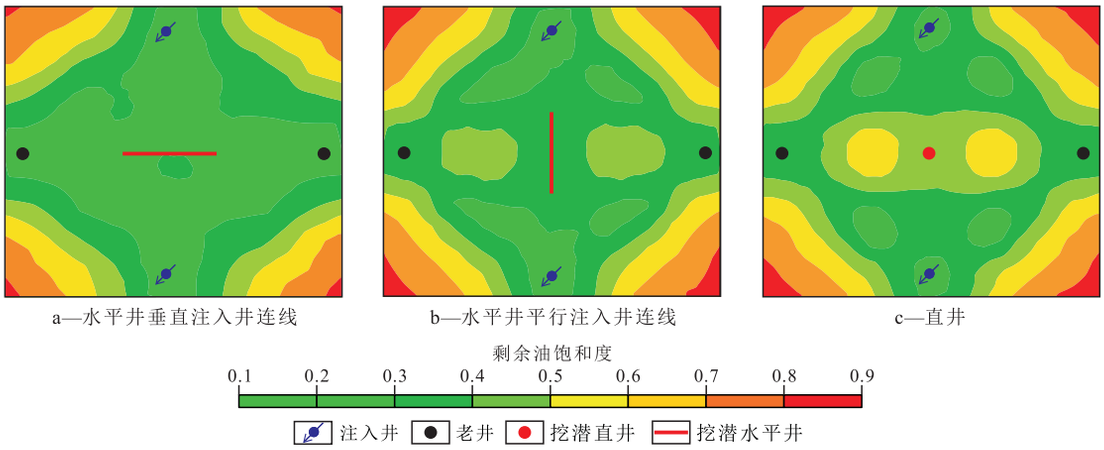

图3　3种挖潜方式下的顶层剩余油饱和度分布(含水率为98%)

Fig.3　Remaining oil saturation distribution in the top layer with three potential tapping patterns(water cut is 98%)

波及区域内水平井相对直井提高的采收率,%; ΔE_R 为水平井比直井挖潜提高的采收率,%; E_V' 为波及系数贡献率,%; ΔE_{R2} 为直井波及区域以外水平井波及区域以内水平井相对直井提高的采收率,%。

统计分析不同含水率、不同水平井挖潜方式下的波及系数与驱油效率贡献率(表1)可以看出:水平井相对于直井来说,增大波及系数和提高驱油效率均能提高水驱采收率,但贡献率随含水率变化有所不同;随着含水率的上升,波及系数贡献率逐渐减小,而驱油效率贡献率逐渐增大,当含水率为98%时,波及系数贡献率低于驱油效率贡献率;水平井垂直注入井连线的波及系数贡献率明显大于水平井平行注入井连线的,主要是由于当水平井平行注入井连线时,水平井两端易发生水窜,影响了水平井扩大波及范围的作用。

表1　不同含水率阶段提高采收率状况

Table1　EOR situation in different water cut periods

含水率,%	水平井垂直注入井连线			水平井平行注入井连线		
	波及系数贡献率,%	驱油效率贡献率,%	贡献率比值	波及系数贡献率,%	驱油效率贡献率,%	贡献率比值
80	86.79	13.21	6.57	74.13	25.87	2.87
90	76.07	23.93	3.18	49.51	50.49	0.98
98	47.73	52.27	0.91	36.73	63.27	0.58

2　水平井提高采收率数值模拟技术

在室内实验基础上,应用油藏数值模拟技术[6-7],考虑水平井储层参数以及工作制度等诸多因素[8-9],进一步研究水平井相对直井增大波及系数与提高驱油效率的关系。

2.1　储层纵向渗透率级差

针对河流相正韵律储层特性,分别考虑储层纵向渗透率级差为3,8,15时,研究水平井相对直井增大波及系数与提高驱油效率的关系。结果(图4)表明,随着含水率的上升,波及系数贡献率逐渐减小,驱油效率贡献率逐渐增大,且当含水率小于95%时,波及系数贡献率大于驱油效率贡献率,而当含水率大于98%时,驱油效率贡献率逐渐大于波及贡献率;储层纵向渗透率级差越大,同一含水率条件下,波及系数贡献率越低,驱油效率贡献率越高;储层纵向渗透率级差越大,波及系数贡献率与驱油效率贡献率的相交点越向左移,即交点处的含水率越低。

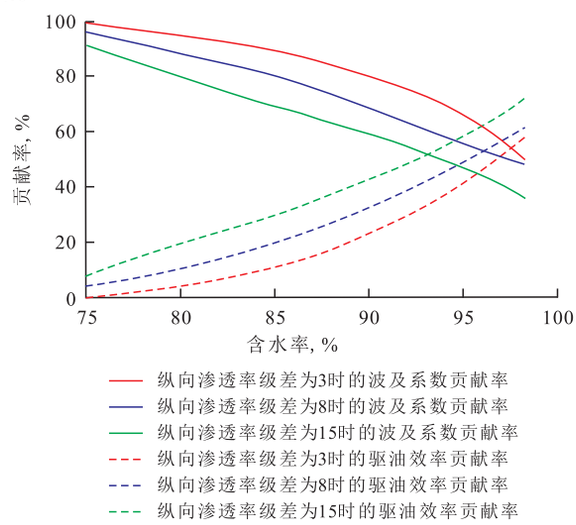

图4　不同储层纵向渗透率级差下贡献率与含水率的关系

Fig.4　Relationship between the contribution rate and water cut with different vertical permeability ratios

2.2　水平井方位

针对特高含水期剩余油分布模式,当水平井与注入井连线的夹角分别为0°,45°和90°时,研究水平井相对直井增大波及系数与提高驱油效率的关系(图5)。研究结果表明,水平井与注入井连线的

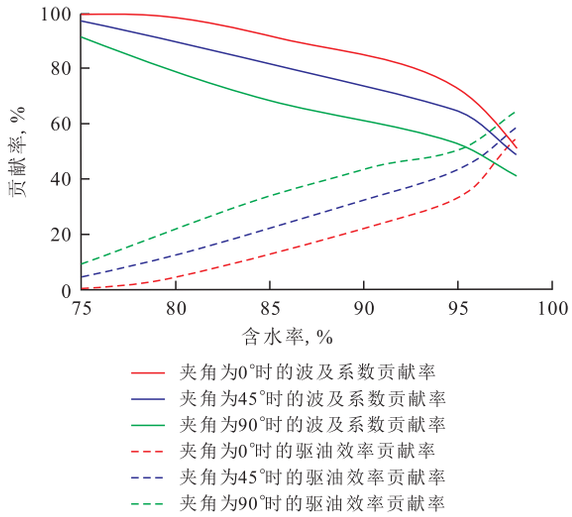

图5　不同夹角下的贡献率与含水率关系

Fig.5　Relationship between the contribution rate and water cut with different angles between horizontal wells and injection wells

夹角越大，即水平井越接近平行于油井井排方向，同一含水率时，波及系数贡献率越低，驱油效率贡献率越高；水平井与注入井连线的夹角越大，波及系数贡献率与驱油效率贡献率的相交点越向左移，即交点处的含水率越低。

2.3　水平井部署时机

针对不同的水平井挖潜时机，考虑含水率分别为85%，90%和95%时进行水平井挖潜，研究水平井相对直井增大波及系数与提高驱油效率的关系。研究结果（图6）表明，随着含水率的上升，波及系数贡献率逐渐减小，驱油效率贡献率逐渐增大，且当含水率小于95%时，波及系数贡献率大于驱油效率贡献率，而当含水率大于98%时，驱油效率贡献率大于波及系数贡献率；含水率越低且同一含水率时的波及系数贡献率越低，驱油效率贡献率越高；且含水率越低时进行水平井挖潜，波及系数贡献率与驱油效率贡献率的相交点越向左移，即交点处的含水率越低。

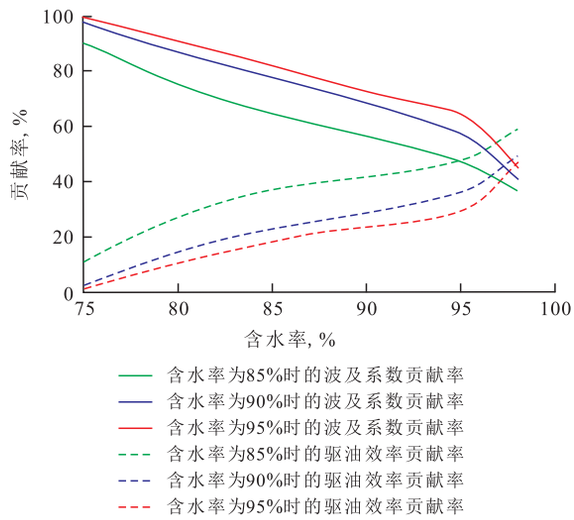

图6　不同部署时机的贡献率与含水率关系

Fig.6　Relationship between the contribution rate and water cut with different deploying time of horizontal wells

2.4　夹层渗透率

考虑到夹层对流体纵向运移的阻隔作用[10-11]，分别设定夹层渗透率为0，20×10^{-3}，50×10^{-3} μm^2时，研究水平井相对直井增大波及系数与提高驱油效率的关系。研究结果（图7）表明，夹层的渗透率越低，同一含水率时的波及系数贡献率越低，驱油效率贡献率越高；夹层的渗透率越低，波及系数贡献率与驱油效率贡献率的相交点越向左移，即交点处的含水率越低；当含水率达到98%时，夹层渗透率对波及系数贡献率和驱油效率贡献率对夹层渗透率不确定、不敏感。

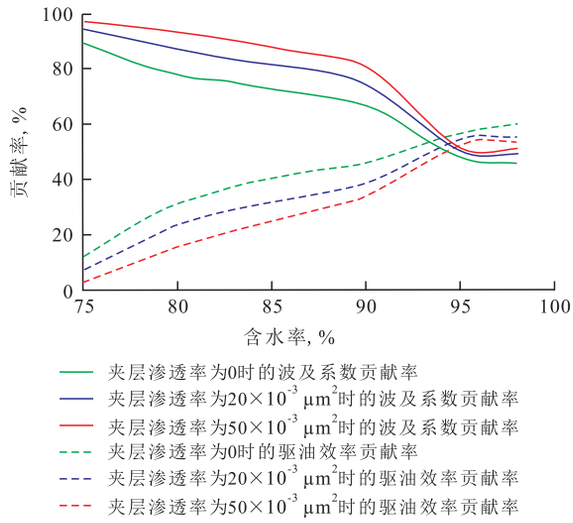

图7　不同夹层渗透率下的贡献率与含水率关系

Fig.7　Relationship between the contribution rate and water cut with different interlayer permeabilities

3　结束语

应用物理模拟手段，首次揭示了水平井剩余油挖潜提高采收率的机理，即生产初期以增大波及系数为主，特高含水期以提高驱油效率为主。并利用数值模拟技术对储层纵向渗透率级差、夹层渗透率、水平井方位和水平井部署时机等参数进行了敏感性分析，结果表明储层纵向渗透率级差越大，夹层渗透性越低，水平井方位越垂直于注水井连线方向，水平井部署时机越早，在同一含水率时，波及系数贡献率越低，驱油效率贡献率越高。通过实际矿场应用取得了显著的增油效果，2010年以来共投产水平井58口，累积增油量为13.78×10^4 t，初期产油

量为7.7 t/d,初期含水率为80.5%;共投产新直井211口,平均初期产油量仅为3.8 t/d,初期含水率为90.1%,水平井初期产油量是直井的2倍,初期含水率比直井低10个百分点,水平井开发效果较好。

参考文献:

[1] 郭文敏,李治平,吕道平,等.基于一维岩心实验参数的三维油藏采收率预测方法及应用[J].油气地质与采收率,2014,21(6):79-83.
Guo Wenmin,Li Zhiping,Lü Daoping,et al.A three-dimensional oil recovery prediction method based on one-dimensional core experimental parameters[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2014,21(6):79-83.

[2] 侯健,罗福全,李振泉,等.岩心微观与油藏宏观剩余油临界描述尺度研究[J].油气地质与采收率,2014,21(6):95-98.
Hou Jian,Luo Fuquan,Li Zhenquan,et al.The critical description scale study on core microscopic and reservoir macroscopic remaining oil [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2014,21(6):95-98.

[3] 尹洪军,周洪亮,李美方,等.水平井井网渗流场的流线分析[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2009,28(增刊1):82-84.
Yin Hongjun,Zhou Hongliang,Li Meifang,et al.Study on streamline distribution in seepage field of horizontal well pattern[J].Journal of Liaoning Technical University:Natural Science,2009,28(supplement1):82-84.

[4] 俞启泰,赵明,林志芳.水驱砂岩油田驱油效率和波及系数研究(一)[J].石油勘探与开发,1989,16(2):48-52.
Yu Qitai,Zhao Ming,Lin Zhifang.A study of the displacement efficiency and the conformance factor in waterflooded sandstone reservoirs in China(part one)[J].Petroleum Exploration and Development,1989,16(2):48-52.

[5] 俞启泰,赵明,林志芳.水驱砂岩油田驱油效率和波及系数研究(二)[J].石油勘探与开发,1989,16(3):46-54.
Yu Qitai,Zhao Ming,Lin Zhifang.A study of the displacement efficiency and the conformance factor in waterflooded sandstone reservoirs in China(part two)[J].Petroleum Exploration and Development,1989,16(3):46-54.

[6] 何鲁平,陈素珍,俞启泰.注水正韵律油层水平井开采剩余油数值模拟研究——以五点注水井网为例[J].石油勘探与开发,1996,23(1):47-50.
He Luping,Chen Suzhen,Yu Qitai.Numerical simulation of producing remaining oil from a positive rhythm reservoir with horizontal wells after waterflooding[J].Petroleum Exploration and Development,1996,23(1):47-50.

[7] 吕广忠,郭迎春,牛祥玉.水驱砂岩油藏水平井多段流描述及数值模拟研究[J].石油天然气学报,2010,32(1):123-127.
Lü Guangzhong, Guo Yingchun, Niu Xiangyu.The research of multi-sectional flow description and numerical simulation for horizontal wells in waterflooding sandstone reservoirs[J].Journal of Oil and Gas Technology,2010,32(1):123-127.

[8] 窦宏恩.油田开发中水平井主要参数设计方法[J].特种油气藏,2012,19(6):61-64.
Dou Hong'en.A design method of main parameters of a horizontal well in oilfield development[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2012,19(6):61-64.

[9] 王家宏.中高渗透油藏水平井整体开发水平段设计方法[J].石油学报,2008,29(3):399-404.
Wang Jiahong.Horizontal section design method for overall development of horizontal well with middle-high permeability reservoir[J].Acta Petrolei Sinica,2008,29(3):399-404.

[10] 陈程,孙义梅.厚油层内部夹层分布模式及对开发效果的影响[J].大庆石油地质与开发,2003,22(2):24-27.
Chen Cheng,Sun Yimei.The distribution patterns of the interlayers within thick pays and their impact on recovery efficiency,Shuanghe oilfield[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2003,22(2):24-27.

[11] 屈亚光,丁祖鹏,潘彩霞,等.厚油层层内夹层分布对水驱效果影响的物理实验研究[J].油气地质与采收率,2014,21(3):105-107,110.
Qu Yaguang,Ding Zupeng,Pan Caixia,et al.Physical experiment on distribution of interlayers impact on water flooding recovery efficiency[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2014,21(3):105-107,110.

编辑　王　星