高含水期井损对高渗透油藏开发效果的影响

罗福全[1],侯 健[2],邴绍献[3],苏映宏[3],李 军[4],薛 成[5]

(1.中国石油冀东油田分公司 勘探开发研究院,河北 唐山 063000; 2.中国石油大学(华东) 石油工程学院,山东 青岛 266580; 3.中国石化胜利油田分公司 地质科学研究院,山东 东营 257015; 4.中国石油川庆钻探工程公司 井下作业公司,四川 成都 610213; 5.中国石油冀东油田分公司 开发处,河北 唐山 063000)

摘要:中国陆上油田已整体进入高含水开发期,大量生产井和注入井因各种原因关停频繁,导致井网完善性遭到破坏,油藏开发效果变差。准确揭示生产井和注入井井损对油藏开发效果的影响规律,为井损恢复措施制定提供决策依据是十分必要的。通过定义油藏可采储量损失百分数,并将其作为井损条件下油藏开发效果评价指标,定量分析了井损因素对高渗透油藏开发效果的影响。研究结果表明:当发生井损时,随井损时刻变晚,相对高渗透部位井的油藏可采储量损失百分数先升高后降低,相对低渗透部位井的油藏可采储量损失百分数单调上升;同一井损时刻下,相对低渗透部位井的油藏可采储量损失百分数大于相对高渗透部位井,且在渗透率非均质条件下井损位置的影响明显,渗透率均质时井损位置的影响幅度很小;同一井损时刻,随渗透率平面变异系数增大,相对高渗透部位井的油藏可采储量损失百分数减小,相对低渗透部位井的油藏可采储量损失百分数增大;同一井损百分数下,生产井的油藏可采储量损失百分数高于注入井,井损后应优先恢复生产井。

关键词:高含水期 高渗透 井损 可采储量 损失百分数 胜坨油田

中图分类号:TE341 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-9603(2015)01-0106-05

The influence of well loss on development effect in the high permeability reservoir at high water cut stage

Luo Fuquan[1], Hou Jian[2], Bing Shaoxian[3], Su Yinghong[3], Li Jun[4], Xue Cheng[5]

(1.*Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan City, Hebei Province*, 063000, *China*; 2.*School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province*, 266580, *China*; 3.*Geoscience Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province*, 257015, *China*; 4.*Downhole Operation Company, PetroChina Chuanqing Drilling Engineering Company, Chengdu City, Sichuan Province*, 610213, *China*; 5.*Development Department, PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan City, Hebei Province*, 063000, *China*)

Abstract: Chinese onshore oilfields have generally stepped into high water cut stage. A large number of wells shut down frequently for various reasons, which results in a damaged well pattern and poor reservoir development effect. It's necessary to accurately reveal the influences of the well loss on the reservoir development effect so as to provide decision-making basis for well loss recovery measures. The loss percentage of reservoir recoverable reserves was defined and taking as an evaluation index of the reservoir development effect under the condition of well loss. The influences of well loss on the development effect in the high permeability reservoir were analyzed quantitatively. The results indicate that with the course of well loss time, the loss percentage of reservoir recoverable reserves increases first and then reduces for the relatively high permeability wells, and it increases for the relatively low permeability wells monotonously; at the same moment of well loss, the loss percentage of reservoir recoverable reserves for the relatively low permeability wells is greater than that for the relatively high permeability wells. Meanwhile, the impact of well loss position under heterogeneous permeability condition is obvious and that under homogeneous permeability condition is weak; at the same moment of well loss, with increasing plane

收稿日期:2014-11-18。

作者简介:罗福全(1985—),男,河北馆陶人,工程师,硕士,从事油气田开发工程研究。联系电话:15132588687,E-mail:tangshanyizhong@163.com。

基金项目:国家科技重大专项"胜利油田特高含水期提高采收率技术"(2011ZX05011),中央高校基本科研业务费专项资金资助项目"多孔介质多尺度多相流动模拟研究"(13CX05007A)。

variation coefficient of permeability, the loss percentage of reservoir recoverable reserves reduces for the relatively high permeability wells and increases for the relatively low permeability wells; the loss percentage of reservoir recoverable reserves of the production wells is higher than that of the injection wells with the same well loss percentage. Priority should be given to recover the production well.

Key words: high water cut stage; high permeability; well loss; recoverable reserves; loss percentage; Shengtuo oilfield

注采井网控制着驱替流体推进规律及面积波及系数，是影响油藏开发效果的重要因素[1-5]。生产井和注入井由于套损、液量低、含水率高等原因长期关停发生井损[6-7]，导致注采井网完善性遭破坏，且随油藏含水率升高，油藏井损规模越来越大，对油藏开发效果的不利影响越来越突出。目前，对不同井网形式、井距、排距下油藏采收率的变化规律以及为进一步提高油藏采收率调整加密井网的研究较多[8-16]，但针对生产井和注入井发生井损后，井损因素对油藏采收率的影响及不同井损条件下油藏可采储量的变化尚未开展系统研究。笔者选取胜坨油田二区沙二段1—2单元作为高渗透油藏典型区块，以油藏可采储量损失百分数作为井损条件下油藏开发效果评价指标，基于数值模拟技术定量分析了高含水期井损因素对油藏开发效果的影响，得到了不同井损条件下油藏可采储量的变化规律。

1　高渗透油藏数值模拟模型的建立

选取胜坨油田二区沙二段1—2单元作为典型区块，建立油藏数值模拟模型。该区块平均渗透率为$2\ 530\times10^{-3}\ \mu m^2$，是典型的高渗透水驱开发油藏，对其生产历史进行拟合，在拟合好的区块模型上截取井组模型作为研究的基础方案。基础方案中石油地质储量为250.47×10^4 t，网格数为$31\times31\times7$共6 727个，渗透率场平面分布如图1所示，渗透率平向变异系数均为0.5，地层原油粘度为20 mPa·s，束缚水饱和度、残余油饱和度分别为0.32和0.184。井网形式为五点法井网，井距为400 m，油、水井采用定液量模式生产或注入，边、角井产液量及注入量按照中心井的1/4和1/2倍进行劈分折算。

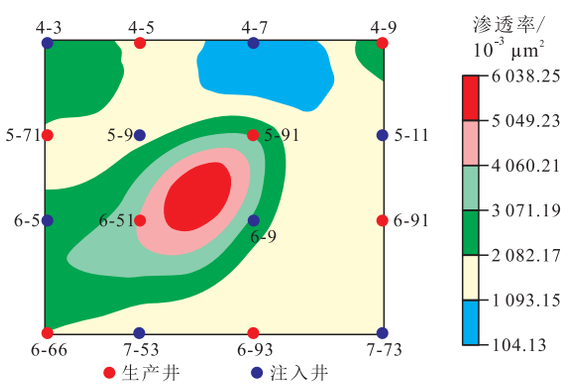

图1　基础方案渗透率场平面分布
(以第5层为例，平均渗透率为$2\ 200\times10^{-3}\ \mu m^2$)

Fig.1　Base scheme of permeability plane distribution (Taking the fifth layer for example, the average permeability is $2\ 200\times10^{-3}\ \mu m^2$)

2　井损因素对高渗透油藏开发效果的影响

为定量评价井损条件下油藏的开发效果，定义了油藏可采储量损失百分数这一指标，该指标含义为井损发生后油藏可采储量损失量与油藏可采储量剩余量的比值，其表达式为

$$\Delta E_r=\frac{N_r}{N}\times100\%=\frac{N_p-N_s}{N_p-N_{ps}}\times100\% \qquad (1)$$

式中：ΔE_r为油藏可采储量损失百分数，%；N_r为油藏可采储量损失量，10^4 t；N为井损时刻油藏剩余可采储量，10^4 t；N_p为无井损条件下油藏最终可采储量，10^4 t；N_s为有井损条件下油藏最终可采储量，10^4 t；N_{ps}为截至井损时刻油藏累积可采储量，10^4 t。

由式(1)可见，该指标以整个油藏可采储量作为统计对象，适用于对单井发生井损、同类别多井发生井损、不同类别井同时发生井损等各种情况下油藏开发效果的评价。

在建立油藏可采储量损失百分数评价指标的基础上，利用其定量研究了井损位置、储层非均质性、井损时刻、井损井别、井损百分数对油藏开发效果的影响规律，其中，井损百分数是指损失井数与油藏总井数之比。

2.1　井损位置

选取研究区油藏含水率为90%作为井损时刻，研究了井损百分数为22.22%时不同井损位置对油藏开发效果的影响，其中，为消除不同井位处渗透率差异对模拟结果的影响，此处将基础方案转换为均质场模型，后续讨论均与基础方案一致，采用非均质场模型。由模拟结果(表1)可见，在渗透率均质条件下，中心井井损对应的油藏可采储量损失量及损失百分数较小，边、角井对应的值较大；但井损

表1　渗透率均质条件下井损位置对油藏开发效果的影响

Table1　The influence of well loss position on the reservoir development effect under permeability homogeneity

井损位置	损失井井号	截至井损时刻油藏累积可采储量/10^4 t	井损时刻油藏剩余可采储量/10^4 t	油藏可采储量损失量/10^4 t	油藏可采储量损失百分数,%
中心井	6-51	63.34	28.20	3.97	14.08
边井	5-71,6-93	63.34	28.20	4.14	14.68
边、角井	5-71,6-66,4-9	63.34	28.20	4.22	14.96

位置对油藏开发效果的影响幅度很小。

保持井损时刻不变,研究了渗透率非均质条件下井损位置对油藏开发效果的影响。由模拟结果(图2)可见,与相对高渗透部位相比,在同一油藏含水率下相对低渗透部位剩余油饱和度高,开发潜力大,故相对低渗透部位井的油藏可采储量损失量及损失百分数均较大,且在渗透率非均质条件下井损位置影响明显。

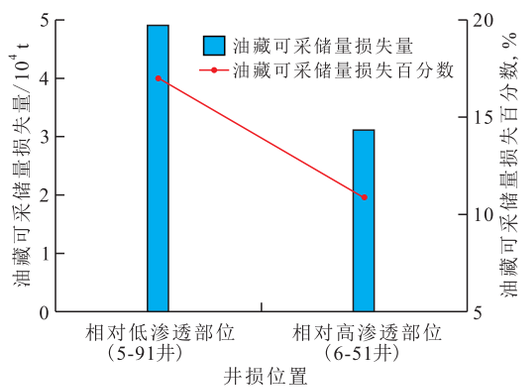

图2　渗透率非均质条件下井损位置对油藏开发效果的影响

Fig.2　The influence of well loss position on the reservoir development effect under permeability heterogeneity

2.2　储层非均质性

选取油藏含水率为90%作为井损时刻,研究了井损百分数为22.22%时渗透率平面变异系数对油藏开发效果的影响。由模拟结果(图3)可见,随渗透率平面变异系数增大,相对高渗透部位发生井损时,油藏可采储量损失百分数减小,而相对低渗透部位井损对应的油藏可采储量损失百分数增大。主要原因是:同一井损时刻、不同渗透率平面变异系数下发生井损时,油藏剩余可采储量差异较小,随渗透率平面变异系数增大,相对高渗透部位水淹越来越严重,开发潜力越来越小,而相对低渗透部位水线推进越来越慢,开发潜力越来越大。

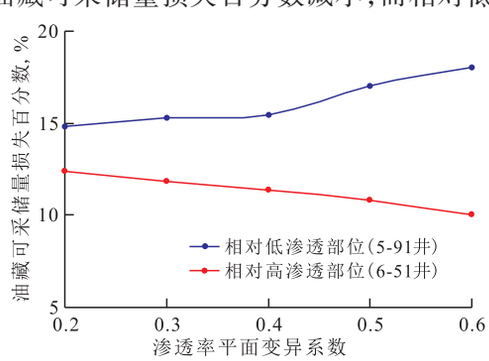

图3　储层非均质性对油藏开发效果的影响

Fig.3　The influence of reservoir heterogeneity on the reservoir development effect

2.3　井损时刻

2.3.1　相对高渗透部位井井损

以6-51井为例(平均渗透率为3 776.1×10^{-3} μm^2),研究不同井损时刻对油藏开发效果的影响。由模拟结果(图4)可见,当相对高渗透部位井发生井损时,井损时刻越晚,油藏可采储量损失量越小,可采储量损失百分数先升高后降低,并存在转折点。主要原因是:相对高渗透部位井产液量高,当油藏含水率升高但低于某临界值时,相对高渗透部位井产油量依然较大,井损时对应的油藏可采储量损失百分数较高;当油藏含水率超过该临界值后,相对高渗透部位井水淹严重,此时开发潜力低,井损时对应的油藏可采储量损失百分数较低。

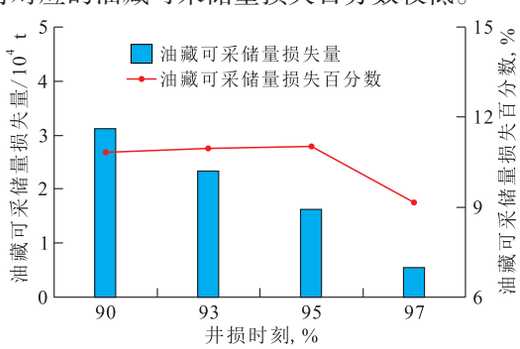

图4　相对高渗透部位井发生井损时井损时刻对油藏开发效果的影响

Fig.4　The influence of well loss moment on the reservoir development effect while well loss occurs in the position of relatively high permeability

2.3.2　相对低渗透部位井井损

以6-91井为例(平均渗透率为1 353.6×10^{-3} μm^2),研究不同井损时刻对油藏开发效果的影响。由模拟结果(图5)可见,当相对低渗透部位井发生井损时,井损时刻越晚,油藏可采储量损失量越小,可采储量损失百分数单调上升。主要原因是:在整

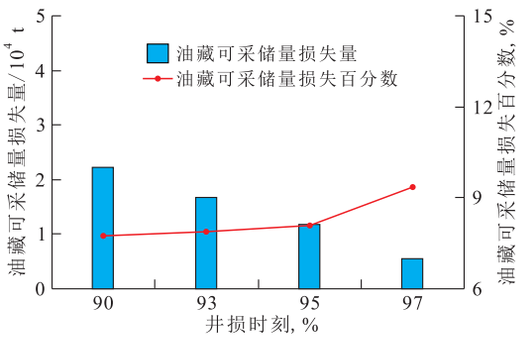

图5　相对低渗透部位井发生井损时井损时刻对油藏开发效果的影响

Fig.5　The influence of well loss moment on the reservoir development effect while well loss occurs in the position of relatively low permeability

个油藏中相对低渗透部位井附近水线推进速度慢，剩余油饱和度高，即使油藏含水率较高，相对低渗透部位井开发潜力也始终较大，故井损时刻变晚，油藏可采储量损失百分数升高。

2.4　井损井别及井损百分数

选取油藏含水率为90%作为井损时刻，研究了不同井损百分数下注入井井损、生产井井损对油藏开发效果的影响，其中，某一特定井损百分数对应多种井损方案，各方案计算结果不同，该特定井损百分数下油藏可采储量损失量及损失百分数的取值为各井损方案计算结果的平均值。

由模拟结果（图6）可见，当注入井、生产井发生井损时，油藏可采储量损失百分数与井损百分数的关系曲线均位于45°对角线下方，表明油藏可采储量损失百分数小于与其对应的井损百分数，其主要原因是存在液流转向作用。当生产井发生井损后，生产井所在注采井组剩余可采储量将全部损失，但由于整个油藏是一个压力相互连通的系统，关井将导致注入流体向其他有利于驱替的方向流动，其余注采井组累积产油量增加。因此，井损后油藏可采储量损失量下降，油藏可采储量损失百分数低于对

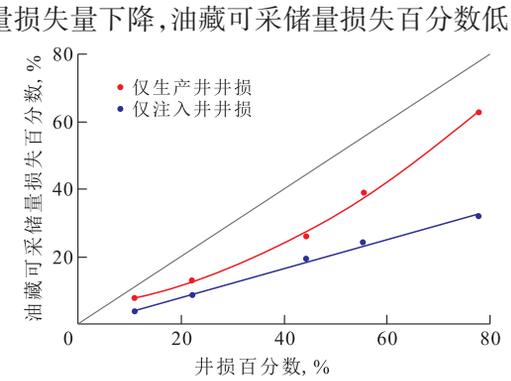

图6　井损井别及井损百分数对油藏开发效果的影响

Fig.6　The influences of well loss type and well loss percentage on the reservoir development effect

应的井损百分数。注入井井损原理类似。

对油藏可采储量损失百分数与井损百分数变化规律进行拟合，生产井井损和注入井井损的相关关系分别为

$$y = 0.725\,2x^2 + 0.188\,4x + 0.047$$
$$R^2 = 0.994\,9 \quad (2)$$
$$y = 0.426\,8x - 0.006$$
$$R^2 = 0.99 \quad (3)$$

式中：y 为油藏可采储量损失百分数，%；x 为井损百分数，%；R 为相关系数。

由式（2）、式（3）及图6可见，生产井井损时油藏可采储量损失百分数与井损百分数呈二次函数关系，注入井井损时二者呈线性关系；在同一井损百分数下，生产井井损的油藏可采储量损失百分数大于注入井井损的油藏可采储量损失百分数，故井损后应优先恢复生产井。

3　结论

对油藏可采储量损失百分数进行了定义，该指标以整个油藏可采储量作为统计对象，适用于对单井发生井损、同类别多井发生井损、不同类别井同时发生井损等各种井损情况下油藏开发效果的定量评价。

运用油藏数值模拟手段，得到了井损位置、储层非均质性、井损时刻、井损井别及井损百分数对高渗透油藏开发效果的影响规律，由于存在液流转向作用，油藏可采储量损失百分数小于与其对应的井损百分数。

建立了不同井损井别条件下油藏可采储量损失百分数与井损百分数的相关关系，生产井呈二次函数关系，注入井呈线性关系，在同一井损百分数下，生产井井损对应的油藏可采储量损失百分数高于注入井井损的油藏可采储量损失百分数，井损后应优先恢复生产井。

参考文献：

[1]　袁向春，杨凤波.高含水期注采井网的重组调整[J].石油勘探与开发，2003，30(5)：94-96.
Yuan Xiangchun，Yang Fengbo.Regrouping adjusting of the producer-injector well-pattern in the high aquifer period of oilfield development[J].Petroleum Exploration and Development，2003，30(5)：94-96.

[2]　崔传智，杨赤宸，牛栓文，等.复杂断块油藏高含水期合理井距确定方法及其影响因素[J].油气地质与采收率，2013，20(4)：53-56.

Cui Chuanzhi, Yang Chichen, Niu Shuanwen, et al.Determination of reasonable well spacing and influencing factors for the complicated fault-block reservoirs at high water cut stage[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(4): 53-56.

[3] 钟显彪, 王岚岚, 赵世新, 等.扶余油田二次开发体系实施效果[J].石油学报, 2009, 30(5): 722-726.
Zhong Xianbiao, Wang Lanlan, Zhao Shixin, et al.Application of secondary development system in Fuyu Oilfield[J].Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 722-726.

[4] 王友净, 林承焰, 董春梅, 等.长堤断裂带北部地区剩余油控制因素与挖潜对策[J].中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(4): 12-16.
Wang Youjing, Lin Chengyan, Dong Chunmei, et al.Control factors of remaining oil distribution and potential exploitation measures in the northern part of Changdi fault belt[J].Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2006, 30(4): 12-16.

[5] 石占中, 张一伟, 熊琦华, 等.大港油田港东开发区剩余油形成与分布的控制因素[J].石油学报, 2005, 26(1): 79-82, 86.
Shi Zhanzhong, Zhang Yiwei, Xiong Qihua, et al.Control factors for formation and distribution of residual oil in Gangdong development area of Dagang Oilfield[J].Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(1): 79-82, 86.

[6] 王陶, 杨胜来, 朱卫红, 等.塔里木油田油水井套损规律及对策[J].石油勘探与开发, 2011, 38(3): 352-361.
Wang Tao, Yang Shenglai, Zhu Weihong, et al.Law and countermeasures for the casing damage of oil production wells and water injection wells in Tarim Oilfield[J].Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(3): 352-361.

[7] 刘东升, 任志刚, 杨延滨, 等.高含水后期套损井综合治理配套技术[J].大庆石油地质与开发, 2006, 25(5): 61-64.
Liu Dongsheng, Ren Zhigang, Yang Yanbin, et al.Matching technique of comprehensive harness of casing damage wells in later stage of high water cut[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(5): 61-64.

[8] 王家宏.多油层油藏分层注水稳产条件与井网加密调整[J].石油学报, 2009, 30(1): 80-83.
Wang Jiahong.Stable production conditions and well pattern infilling for development of multilayered reservoir with separate zone water injection[J].Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 80-83.

[9] 魏兆胜.二次加密后井网适应性研究[J].石油勘探与开发, 1998, 25(2): 53-56.
Wei Zhaosheng.A study on well pattern suitability after the secondary infill drilling adjustment[J].Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(2): 53-56.

[10] 彭昱强, 涂彬, 魏俊之, 等.油气田开发井网研究综述[J].大庆石油地质与开发, 2002, 21(6): 22-25.
Peng Yuqiang, Tu Bin, Wei Junzhi, et al.The summarization of the studies on the well patterns during the development of an oil and gas field[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2002, 21(6): 22-25.

[11] 于洪文, 郑兴范.大庆油田北部地区二次井网加密调整研究[J].石油勘探与开发, 1992, 19(4): 52-59.
Yu Hongwen, Zheng Xingfan.A detailed infill drilling program in northern part of Daqing oilfield[J].Petroleum Exploration and Development, 1992, 19(4): 52-59.

[12] 覃建华, 周锡生, 唐春荣, 等.克拉玛依砾岩油藏高含水区块井网加密潜力[J].新疆石油地质, 2010, 31(3): 269-272.
Qin Jianhua, Zhou Xisheng, Tang Chunrong, et al.The potentials of well pattern infill development of high water-cut blocks in Karamay conglomerate reservoirs[J].Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(3): 269-272.

[13] 黄金山.油田经济极限井网密度计算新方法[J].油气地质与采收率, 2013, 20(3): 53-55, 59.
Huang Jinshan.A new method of economic limit well pattern density calculation in oilfields[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(3): 53-55, 59.

[14] 陆程, 程敏华, 刘雄.平面各向异性油藏变形五点井网研究[J].特种油气藏, 2013, 20(3): 111-113, 126.
Lu Cheng, Cheng Minhua, Liu Xiong.Research on skewed five-spot pattern for planar anisotropic reservoir[J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(3): 111-113, 126.

[15] 侯健, 张言辉, 宫汝祥.高渗透稀油强边水油藏开发技术政策优化——以春光油田排2油藏为例[J].油气地质与采收率, 2012, 19(6): 82-86.
Hou Jian, Zhang Yanhui, Gong Ruxiang.Efficient development technique of high permeability sweet oil active edgewater drive reservoir: case of Pai2 reservoir of Chunguang Oilfield[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 82-86.

[16] 郑舰, 李顺明, 康波, 等.温米油田轻质油藏高含水期剩余油分布与技术对策[J].油气地质与采收率, 2012, 19(5): 104-107.
Zheng Jian, Li Shunming, Kang Bo, et al.Residual oil distribution and technical measures in high water-cut period for light oil reservoir, Wenmi oilfield[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(5): 104-107.

编辑 刘北羿