

裂缝性注水开发油藏多轮次调剖机理研究

何涛,王健,余恒,徐鹏,刘旭文

(西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都610500)

摘要:为了探讨多方向见水井控水的技术对策,有必要弄清油藏多方向见水规律,认识多轮次调剖技术的调剖机理。实验通过设计制作平面裂缝—基质可视化模型,模型为一注三采,不同注采端口之间的渗透率不同,研究在裂缝—基质条件下凝胶的运移特征及封堵机理,后续水驱的液流改向,残余油的分布特征;通过不等渗透率并联填砂管岩心流动实验,模拟油藏的层间非均质性,对单次调剖和多级调剖操作的实验数据进行对比。实验结果发现对于裂缝性油藏,多轮次调剖可以充分发挥协同作用提高调剖效果,能使裂缝渗流通道得到有效封堵,具有良好的促进后续流体转向的作用,且调剖效果存在逐次递减现象;多轮次调剖技术较单次调剖技术能更好适用于裂缝性地质构造的调剖施工作业,起到更好的缓解层间矛盾的作用。

关键词:裂缝性油藏;物理模拟;可视化模型;多方向见水;多轮次调剖;提高采收率

中图分类号:TE357 **文献标识码:**A

Mechanism study on multi-round profile control technique in fractured water flooding reservoir

He Tao, Wang Jian, Yu Heng, Xu Peng and Liu Xuwen

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: In order to discuss the technical measures of the multi-directional water breakthrough, it is essential to find out the water breakthrough discipline and the understand the mechanism of the multi-round profile control technique. Therefore, we designed and the established the fracture-matrix visualization model with one-injection well for three production wells. The permeability between the different injection-production ends was inequality. By this model, we studied the migration characteristics and the plugging mechanism of the gel, the fluid diverting of subsequent water flooding and the distribution characteristics of the residual oil on the condition of the fracture-matrix. Through the core flow experiment of the shunt-wound sand-filled pipes with different permeability. And by the simulation of the interlayer heterogeneity, we compared the experimental data of the single and multi-round profile control measures. The results show that the multi-round profile control can fully play the synergistic effect to improve the performance and plug the fractured seepage channel effectively along with the promotion of the fluid diverting, and the profile control effect reduces with time of the injection. The multi-round profile control technique is better than the single profile control technique in the respect of adapting the fractured geological structure, and has a better effect on relieving the interlayer contradiction.

Key words: fractured reservoir, physical simulation, visualization model, multi-directional water breakthrough, multi-round profile control, EOR

长庆油田元284区块为典型的超低渗透裂缝性油藏,天然裂缝和人工裂缝对注水作业带来了严重的负面影响,影响到油藏的开发^[1]。结合国内外调剖

经验,长庆油田在原有调剖堵水段塞设计的基础上进行了优化,将原来的单一段塞改变为多轮次段塞,使渗流通道得到有效封堵,取得了显著的现场应用

收稿日期:2017-04-25。

第一作者简介:何涛(1992—),男,在读硕士研究生,提高油气采收率方面研究。

效果^[2-3]。但是对于多轮次调剖而言,现场应用效果具有不确定性,调剖机理尚不明确。因此,本文通过进行可视化模型^[4]和并联填砂管岩心流动实验,对多轮次调剖过程中油、水、调剖体系的运移特征进行分析,对调剖机理进行总结,以进一步指导现场进行施工作业,提高原油采收率。

1 实验部分

1.1 实验药剂与仪器

甲基蓝:深蓝色粉末,溶于水呈蓝色,不溶于油,用于将水染色,便于观察水相流动规律,达到更好的摄像效果,成都市科龙化工试剂厂。凝胶:根据长庆油田的调剖施工配方,实验室配制。原油、煤油:长庆油田超低渗透油藏研究中心提供。岩心片,石英砂,恒流泵,压力表,精密天平,烘箱,全套岩心流动实验装置。

1.2 模型的设计与制作

实验采用装填岩心片的平面可视化模型和填充石英砂的平面可视化模型,模拟现场多方向见水的裂缝性油藏,进行多轮次调剖机理研究。

平面可视化模型由上下两块 15 cm×15 cm 的正方形有机玻璃及岩心片组成,岩心片被有机玻璃夹合,岩心片之间的接触面为模拟裂缝。模型四周及与有机玻璃接触面均由涂有环氧树脂胶的硅胶片密封。模型见图 1,模型为一注三采设计,实验时水平放置,右端为注入口,上端、左端、下端为采出口。在铺置岩心片时,人为将左右两端连线方向铺置为渗透率较高的通道。

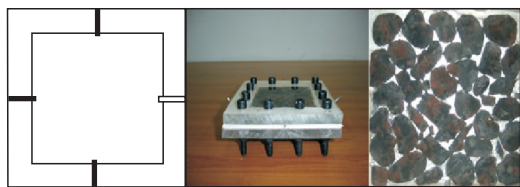


图1 平面可视化模型示意图

Fig. 1 Plane visual model

1.3 可视化模型实验方法

①物理模型建立之后称重,将平面可视化模型与岩心流动装置连接好;②饱和水:将注入水(甲基

蓝按 0.1% 浓度染成蓝色)以恒速 1 mL/min 向模型中注入,使其被水所充分饱和和后称重,计算孔隙体积 PV;③饱和油:用模拟油(元 284 区块采出油,加入少量煤油混合)驱替水,建立束缚水饱和度,记录采油量;④水驱油:水驱至采出端无油相流出,建立剩余油饱和度,对水驱油过程和剩余油分布进行录像;⑤多轮次调剖:将弱凝胶分多级(3 轮次,每轮次 0.15PV)注入模型,每轮次注入后进行后续水驱,记录采油量,对驱替的平面过程进行录像,分析凝胶堵剂运移特征、水流改向及封堵机理。

1.4 并联填砂管实验方法

1) 填砂,饱和水:选取三根填砂管,分别填入不同粒径的石英砂,模拟不同渗流能力通道。分别饱和水,测定孔隙度和渗透率^[5-6]。

2) 水驱:将三根填砂管同时水驱,流量为 1 mL/min,直至压力稳定,测定水驱相对吸水量。

3) 一轮次调剖:在水驱稳定后,一轮次调剖从三根填砂管的入口端一次性笼统注入堵剂 0.45PV,接着进行后续水驱,流量为 1 mL/min,待驱替压力稳定后,测定调剖后的相对吸水量。

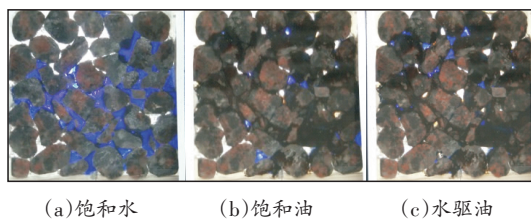
4) 多轮次调剖:在水驱稳定后,多轮次调剖为从三根填砂管的入口端先注入堵剂 0.15PV,接着进行后续水驱,流量为 1 mL/min,测定相对吸水量。待驱替压力稳定后重复之前程序,进行第二和第三轮次调剖(同为 0.15PV),与一轮次调剖进行对比。

2 实验结果分析

2.1 可视化模型

模型饱和水—饱和油—水驱油的过程对比见图 2,各轮次凝胶调剖后剩余油效果对比见图 3,各轮次凝胶调剖及后续水驱后剩余油效果对比见图 4。水驱结束时的剩余油状态见图 2(c),水驱油过程中注入水优选选择高渗透区域,而含窄小孔道多的低渗透区域启动较慢,与实际开采中水驱沿高渗通道水窜现象相符。上侧、下侧和右侧 3 个出口端均见水,右侧和上侧出水最多,下侧见水较少,具有明显的多方向见水特征,整个模型中,离开主流线较远的区域(图 2c 左下角和右上角区域)水驱波及效率低,剩余油富集。对比图 3 中各驱替阶段过程图可知,注入弱

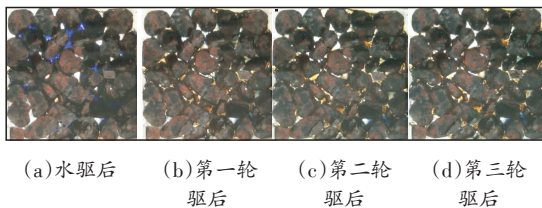
凝胶后,第一轮效果最好,剩余油明显启动,波及效率明显增大;第二轮较第一轮效果次之;第三轮效果最差,但对模型仍有调剖效果。对比图4中各驱替阶段过程图可知,蓝色区域出现的位置发生变化,弱凝胶的注入具有明显的流体转向作用。在平面驱替实验中还发现,在弱凝胶驱替过程中大量小孔隙中的油被驱替出来,在大孔道中逐渐汇集成油块往前推移,驱替前缘绿油驱油、油驱水现象也很常见。在驱替前缘还可以形成连续的油墙,油墙的厚度随着驱替的进行而变厚,最后以油块形式运移到出口流出。



(a)饱和水 (b)饱和油 (c)水驱油

图2 模型饱和水、饱和油、水驱油实物

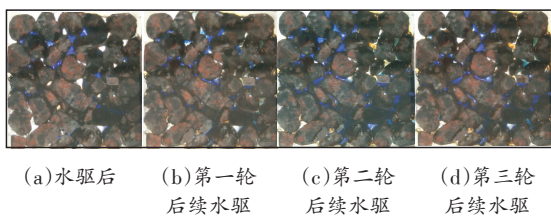
Fig. 2 Model saturated water, saturated oil and water displacing oil



(a)水驱后 (b)第一轮驱后 (c)第二轮驱后 (d)第三轮驱后

图3 水驱、各轮次凝胶调剖后剩余油效果对比

Fig. 3 Comparison of residual oil effects after water displacing and gel profile control of every round



(a)水驱后 (b)第一轮后续水驱 (c)第二轮后续水驱 (d)第三轮后续水驱

图4 水驱、各轮次凝胶调剖及后续水驱后剩余油效果对比

Fig. 4 Comparison of residual oil effects of water displacing, gel profile control and subsequent water flooding effect of every round

各驱替阶段采油量数据记录见表1。分析表中数据可知,水驱过程注入水主要沿高渗透带流动,使得左端采油量大大高于上下两端;第一轮调剖后,凝胶首先沿高渗透带向前突进,阻碍了高渗透带通道,

上下两端采油量上升,左端采油量显著下降,说明后续水驱因为前一轮凝胶的封堵改向至低渗透带,使得低渗透带的原油开始驱动,凝胶起到了显著的流体转向功效。经过第二轮调剖后可以发现,第二轮注入凝胶顶替着第一轮凝胶使其向前推进,驱动第一轮未被波及到的原油产出,明显扩大了后续水驱的波及面积,可以开采出第一轮未波及到的原油,增油效果明显。第三轮调剖转后续水驱后波及面积虽进一步扩大,但采收率提高幅度明显降低,模型中原油呈残余油状态。从三轮调剖实验中不难发现,在多轮次调剖中,调剖效果逐次递减。

表1 各驱替阶段各采出端采油量对比

Table 1 Oil production of every displacement stage and production ends

调剖轮次	采油量/mL			采收率,%
	上端	下端	左端	
水驱	11	4	41	25.7
第一轮	14	9	8	14.2
第二轮	12	8	3	10.6
第三轮	5	3	1	4.1
总计	42	24	53	54.6

2.2 并联填砂管

实验室采用三根并联填砂管,模拟不同渗透率级差下的多方向见水油藏分别进行单次调剖与多级调剖并将结果进行对比。并联填砂管单次调剖实验结果见表2,并联填砂管多级调剖实验结果见表3。相对吸水量为单根填砂管吸水量占三根填砂管总吸水量的比值。由分析结果可知,单次调剖对模型吸水剖面改善程度较多级调剖中的第一轮次调剖的结果好,但和经过二轮、三轮调剖后的结果比较则较差,单次调剖中弱凝胶集中进入相对高渗的流道,调剖后渗透率级差依然较大;多级调剖中由于上一轮弱凝胶的注入已经起到了部分改善吸水剖面的作

表2 并联填砂管单次调剖结果

Table 2 Single profile control results of parallel filling pipes

填砂管编号	渗透率/ μm^2	水驱(调剖前)相对吸水量,%	单次调剖后相对吸水量,%
1#	7.48	70.00	38.36
2#	2.99	28.18	56.21
3#	0.68	1.82	5.43

表3 并联填砂管多级调剖结果
Table 3 Multistage profile control results of parallel filling pipes

填砂管 编号	渗透率/ μm^2	水驱油(调剖前) 相对吸水量, %	第一轮调剖后 相对吸水量, %	第二轮调剖后 相对吸水量, %	第三轮调剖后 相对吸水量, %
1#	5.48	69.60	47.17	14.49	24.25
2#	1.936	19.80	37.74	39.13	47.95
3#	0.327	10.60	15.09	46.38	27.80

用,缩小了渗透率级差,使得后一轮弱凝胶的注入更为分散,说明多级调剖可以更好地改善吸水剖面,缓解储层非均质性对油藏水驱效果的影响。多级调剖可以更好起到动态封堵高渗层,启动低渗层的渗流通道的作用。

3 多轮次调剖机理

3.1 多轮次调剖协同调剖机理

从可视化平板模型实验可以看出,注入的弱凝胶首先进入被水占据的大孔道,并在不断的注入过程中产生类似于聚合物驱的作用,驱走一部分剩余油。当进行后续水驱时,占据大孔道的弱凝胶在后续水驱的作用下,沿着渗流阻力小的大孔道前进,由于大孔道中的弱凝胶增加了渗流阻力,会迫使后续注入水改变流向,这样就扩大了水的波及面积,从而增加水驱采收率。

从可视化平板模型实验可以看出,对于裂缝性油藏,多轮次调剖可以充分发挥协同作用,提高调剖效果^[7]。在多轮次调剖过程中,在首轮注入弱凝胶后,后续轮次注入的弱凝胶不断改向,进入远离主流线的剩余油区,这样在多轮次的协同作用下,将很好地启动剩余油,扩大水驱的波及效率,提高整个水驱油藏的采收率^[8]。传统的单一段塞调剖通过大剂量堵剂进行对裂缝的强封堵,初期效果明显,使后续水驱改向进入微裂缝或高渗层,但随着注水开发时间的增加,其又会形成新的渗流通道,从而造成油井水淹。多轮次调剖通过小剂量、多轮次的手段,根据最小阻力原则动态到达裂缝,进行深部调剖^[9]。前一轮堵剂暂堵裂缝后,后一轮堵剂会继续推动其向裂缝深处运移,当阻力到达一定值后,后续轮次堵剂会改变流向,转向封堵其他微裂缝或高渗层,从而使后续水驱扩大波及面积,实现多方向见水井组的综合控水稳油^[10]。

3.2 多轮次调剖逐次递减规律

平面可视化模型的结果表明,在裂缝性油藏运用多轮次调剖技术,其调剖效果存在逐次递减现象。在多轮次调剖实验中,随着注入轮次的增加,最终的调剖效果在逐渐降低,当注入轮次过多时,最后的调剖实验完全没有效果。多轮次调剖与单一轮次调剖相比,其调剖效果更好,但是也不会随着调剖轮次的增加无限制的变好。在多轮次调剖过程中,调剖效果会受调剖波及面重叠、调剖径向距离、调剖时机、注入工艺的影响。为了减缓多轮次调剖逐次递减现象造成的影响,可以通过优化每轮次堵剂强度、堵剂用量、调剖时机等参数进一步控制多轮次调剖的调剖效果。

4 结论

1) 室内设计并制作的多方向见水裂缝性油藏的平面可视化模型,得到了多轮次调剖的协同调剖机理及多轮次调剖逐次递减规律。

2) 在裂缝性地质构造中,多轮次调剖较单轮次调剖能更好地改善吸水剖面,缓解渗透率级差,起到稳油控水作用,从而提高采收率。

3) 影响多轮次调剖效果的因素是多方面的,如每轮次堵剂强度、堵剂用量、调剖时机等因素,需要通过物理模拟实验和数值模拟进一步验证。

参考文献

- [1] 郝明强,胡永乐,刘先贵.裂缝性低渗透油藏特征综述[J].特种油气藏,2007,14(3):12-15.
- [2] 王健,倪聪,王丹玲,等.弱凝胶调驱的宏观作用及微观机理认识[J].天然气与石油,2014,32(2):39-41.
- [3] 尹文军,王青青,王业飞,等.多轮次调剖效果逐次递减机理研究[J].油气地质与采收率,2004,11(2):48-50.
- [4] 郭小美,孙雷,周涌沂,等.裂缝性油藏大尺度可视化水驱油物理模拟实验[J].特种油气藏,2011,18(3):109-111.
- [5] 陈志明,蔡雨桐,刘冰,等.低渗透岩石渗流规律的实验研究

- 方法[J]. 天然气与石油, 2012, 30(3): 49-51.
- [6] 赵永强, 闫国亮, 谭猛. 应用 Darcy-Stokes 方程求解缝洞型介质的渗透率[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4): 121-124.
- [7] Kelechi Isaac Ojukwu, Klaus Mueller, Abdulsattar Murshidi, et al. Life-cycle profile control in subhydrostatic wells of south oman[C]// paper SPE-97034-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 9-12 October 2005, Dallas, Texas, USA.
- [8] Xiao Guo, Yue Yang. An integrated eor successfully applied in chang-6 ultra-low permeability reservoir[C]// paper SPE-145024-MS presented at the SPE Enhanced Oil Recovery Conference, 19-21 July 2011, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [9] 张兵, 浦春生, 于浩然, 等. 裂缝性多段塞凝胶调剖技术研究及应用[J]. 油田化学, 2016, 33(1): 46-50.
- [10] Victor C. Ogoke, CeLeste Osasere Aiheyba, Franz Marketz. Cost-effective life-cycle profile control completion system for horizontal and multilateral wells[C]// paper SPE-102077-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 24-27 September 2006, San Antonio, Texas, USA.

(编辑 尹淑容)

(上接第 67 页)

- [5] Brown M L, Ozkan E, Raghavan R S, et al. Practical solutions for pressure transient responses of fractured horizontal wells in unconventional reservoirs[J]. Journal of Petroleum Technology, 2010, 62(2): 63-64.
- [6] Stalgorova E, Mattar L. Practical analytical model to simulate production of horizontal wells with branch fractures[C]// paper SPE-162515-MS presented at the SPE Canadian Unconventional Resources Conference, 30 October-1 November 2012, Calgary, Alberta, Canada.
- [7] Stalgorova E, Mattar L. Analytical model for unconventional multifractured composite systems[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2012, 16(3): 246-256.
- [8] 姚军, 殷修杏, 樊冬艳, 等. 低渗透油藏的压裂水平井三线性流试井模型[J]. 油气井测试, 2011, 20(5): 1-5.
- [9] 谢亚雄, 刘启国, 刘振平, 等. 低渗透油藏压裂水平井压力动态特征研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(19): 64-68.
- [10] 王本成, 贾永禄, 李友全, 等. 多段压裂水平井试井模型求解新方法[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1150-1156.
- [11] 高杰, 张烈辉, 刘启国, 等. 页岩气藏压裂水平井三线性流试井模型研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2014, 29(1): 108-113.
- [12] 郭小哲, 周长沙. 页岩气储层压裂水平井三线性渗流模型研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(2): 86-94.
- [13] 程时清, 刘斌, 李双, 等. 多段生产水平井试井解释方法[J]. 中国海上油气, 2014, 26(6): 44-50.
- [14] 姚军, 刘丕养, 吴明录. 裂缝性油气藏压裂水平井试井分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 107-113.
- [15] 樊冬艳, 姚军, 孙海, 等. 页岩气藏分段压裂水平井不稳定渗流模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(5): 116-123.
- [16] 尹洪军, 杨春城, 徐子怡, 等. 分段压裂水平井压力动态分析[J]. 东北石油大学学报, 2014, 38(3): 75-80.
- [17] 何军, 范子菲, 宋珩, 等. 压裂水平井渗流理论研究进展[J]. 地质科技情报, 2015, 34(4): 158-164.
- [18] L Fan, J W Thompson, J R Robinson. Understanding gas production mechanism and effectiveness of well stimulation in the Haynesville shale through reservoir simulation[C]// paper SPE-136696-MS presented at the Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, 19-21 October 2010, Calgary, Alberta, Canada.
- [19] 高杰. 页岩气藏多段压裂水平井压力动态特征研究[D]. 四川成都: 西南石油大学, 2014.
- [20] 马希文. 正交设计的数学理论[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981: 55-58.

(编辑 尹淑容)