

利用注水井压降资料认识地层水驱规律指导实施堵水调驱措施

黄易泽,杨蓉

中国石油长庆油田分公司第一采油厂 陕西延安 716000

通讯作者:Email:huxhu_syky@sinopec.com

引用:黄易泽,杨蓉. 利用注水井压降资料认识地层水驱规律指导实施堵水调驱措施[J]. 油气井测试,2021,30(2):44-50.

Cite: HUANG Yize, YANG Rong. Using the pressure drop data of injectors to understand the formation water drive law and guide the implementation of water plugging and profile control measures [J]. Well Testing, 2021,30(2):44-50.

摘要 安塞油田三叠系油藏天然微裂缝发育,平面非均质性强,注入水沿高渗条带驱替突进,优势渗流方向油井含水上升快,侧向油井见效程度低,亟需堵水调驱提高水驱效率。利用注水井压降资料双对数曲线模型和特征,可准确认识注入水的地层水驱规律;将水驱规律、注采对应关系和生产动态相结合,可有效指导注水井的堵水调驱措施实施。经实例井组堵水措施前后测试资料的对比分析,地层平面水驱不均矛盾得到了改善,有效控制了油井含水上升,提高了注入水的水驱效率,取得了较好的控水稳油及增油效果。利用注水井压降资料认识地层水驱规律,可为油田控水稳油措施提供准确的分析依据。

关键词 安塞油田;特低渗油藏;注水井;压降试井;水驱特征;堵水调驱;含水率

中图分类号:TE353 **文献标识码:**B **DOI:**10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.02.009

Using the pressure drop data of injectors to understand the formation water drive law and guide the implementation of water plugging and profile control measures

HUANG Yize, YANG Rong

First Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Yan'an, Shannxi 716000, China

Abstract: The triassic reservoirs in Ansai Oilfield have developed natural microfractures with strong plane heterogeneity. When the injected water flows along the high-permeability zone, the water cut of the oil well in the dominant seepage direction increases rapidly, and the lateral oil well has low efficiency, so it is necessary to block water and improve the water drive efficiency. By using the double logarithmic curve model and characteristics of pressure drop data of water injection wells, the formation water drive law of injected water can be accurately summarized; In addition, the combination of water drive law, injection-production relationship and production performance can effectively guide the implementation of water plugging and displacement control measures for water injection wells. Through the comparative analysis of the test data before and after the water plugging measures of the example well group, it is found that the uneven water drive contradiction in the formation plane has been improved, the rise of the water cut of the oil well has been effectively controlled, and the water drive efficiency of the injected water has been improved. The effect of stabilizing oil production by water injection controlling and increasing oil production has been obviously improved. The pressure drop data of water injection well can provide accurate analysis basis for controlling water and stabilizing oil production.

Keywords: Ansai Oilfield; ultra-low permeability reservoir; water injection well; pressure drop test; water drive characteristics; water plugging and profile control; water cut

安塞油田三叠系长 4+5、长 6 特低渗透油藏,储层物性差,天然微裂缝发育,平面非均质性强,1989-1990 年工业化开发试验后,已经过了 30 多年的注水开发。目前油田进入中高含水开发阶段。长期注水开发产生诱导裂缝^[1-3],形成注入水沿裂缝等高渗条带驱替突进,平面开发矛盾突出,表现出在

单一方向上,油井的含水上升较快,甚至水淹的现象;而另一方向的油井却见不到注水效果,长期表现出低产、低效的生产特点,影响了注水开发效果的进一步提高。从 1997 年开始,引进并实施化学调剖等堵水措施,其间堵水调剖技术一直在不断改进^[4-6],但由于措施前的资料分析及应用不足,地质

因素的考虑欠缺^[7],措施选井及堵水工艺方案等较为盲目,针对性较差,堵水措施效果一直不理想。提高堵水措施效果,实现控水稳油,成为安塞特低渗透油田目前亟待解决的问题。一些学者认为,认识注入水的地层水驱规律,指导堵水工艺技术的精准实施、用措施前后地层水驱规律的变化对措施效果进行评价,是解决这一问题的关键。目前,大部分水驱规律的研究都着重于测井技术、岩心分析等微观方面^[8-10],忽视了试井曲线所表现出的直观的地层渗流特征,试井作为油藏研究的一种手段,测试资料的曲线特征可以准确反映地层流体的不同流态,确定地层流体的流动驱替方式,为水驱效果分析提供依据^[11-12]。黄文宽等^[13]针对安塞特低渗透油藏试井资料双对数曲线表现出的特征,研究了地层流体的渗流模型及类型,认为注入水的单向驱替突进现象,将会对水驱效率提高和控水稳油产生影响,提出要采取控制注水压力等改善提高水驱效率的注水措施。近年,安塞油田在此前水驱规律研究的基础上,从注水井的压力降落试井资料分析应用入手,对近年来安塞特低渗油田注水井压力降落试井资料双对数曲线的模型、特征进行了分析研究,对注入水在地层的流动驱替规律进行分析,将认识纳入堵水调驱措施选井、堵水工艺方案制定、以及堵水措施效果评价等环节,全过程认识、指导和评价堵水措施及效果,使堵水调驱措施更具针对性、准确性和可比性,确保了堵水调驱措施的有效实施。

1 试井曲线及水驱规律特征

安塞油田处于西倾的陕北斜坡中部,油藏区域构造背景为一平缓的西倾单斜,倾角仅半度左右。油层属于内陆淡水湖泊三洲沉积,储层结构具有反韵律和复合韵律的特点。储层成岩后生作用强烈,以次生孔隙为主,属小孔喉高密度分布的低渗致密酸敏性砂岩,同时发现有少量微细裂缝。其中主力层长 6 物性较差,油层气测平均渗透率仅 1.3 mD,平均有效孔隙度 11%~14%,原始地层压力 8.31~10.00 MPa,油井自然产能极低,常规钻井无初产,油基泥浆和泡沫负压钻井中途测试初产仅 0.3~0.5 t/d,压裂改造后试采单井产能 1~2 t/d,属于低渗、低产、低压、高饱和溶解气驱岩性油藏^[14-17]。

试井资料双对数导数曲线的形态,可以准确反

映地层流体的渗流特征^[18-19]。对于安塞长 6 特低渗油藏,与试井资料双对数导数曲线形态所对应的主要渗流模型有:径向均质渗流模型、径向复合渗流模型和单向线性渗流模型等^[20-23]。

1.1 径向均质渗流模型

此类曲线形态变化单一,具有以下资料特征(图 1):

- (1)曲线开始呈单位斜率直线;
- (2)压差和导数曲线分叉后开口较小,导数曲线呈弧形变化趋势,且峰值不高;
- (3)导数曲线上平面径向流和外边界影响特征很少出现。

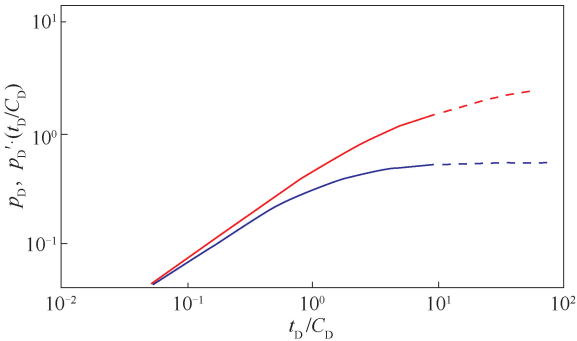


图 1 径向均质渗流模型双对数曲线图
Fig. 1 Double logarithm curves of radial homogeneous seepage model

此类曲线的特征表明(图 2),测试井所处区域油层物性均一,地层各向渗流能力差异不大,注入水在地层流动驱替均匀,但地层物性、传导性差,流体渗流扩散速度慢。

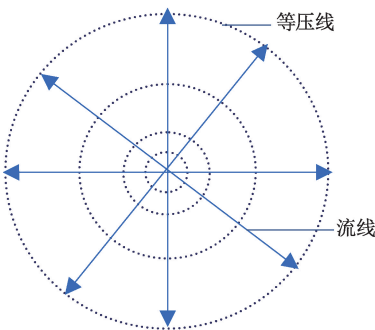


图 2 径向均质渗流模型油藏结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of reservoir structure for radial homogeneous seepage model

1.2 径向复合渗流模型

该模型压力降落资料双对数导数曲线具有以下变化特征(图 3):

- (1)曲线早期呈单位斜率直线;
- (2)压差和导数曲线分叉后,导数曲线出现短

暂的水平直线；

(3)导数曲线末端为等于或大于 1/4 斜率的上翘直线。

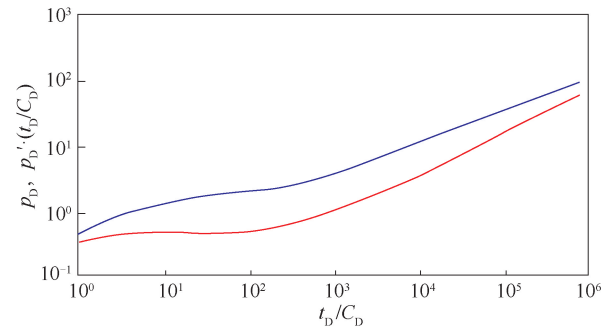


图 3 径向复合渗流模型双对数曲线图
Fig. 3 Double logarithm curves of radial composite seepage model

该类型曲线对应的解释模型为径向复合油藏模型(图 4),油藏由不同渗流能力的两个及以上区域组成,在近井区域范围内,由于措施改造或注入水流动冲刷,注入水在地层的流动较为均匀,出现了平面径向均质渗流特征;而在远井区域,由于储层物性的非均质性 & 局部地层流动性变差等,注入水沿裂缝等优势渗流通道驱替,表现为单方向流动驱替特征。

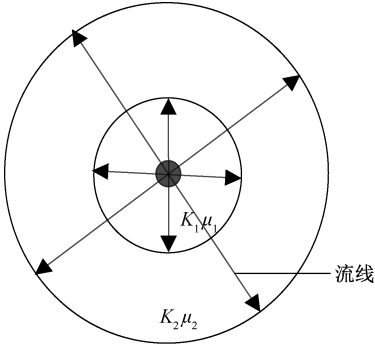


图 4 径向复合渗流模型油藏结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of reservoir structure for radial composite seepage model

1.3 单向线性渗流模型

此类渗流模型压力降落资料双对数曲线具有如下特征(图 5)：

- (1)曲线早期呈单位斜率直线；
- (2)压差和导数曲线分叉后,开口较小,导数曲线呈 1/2 或 1/4 斜率直线形态,为无限或有限导流垂直裂缝渗流特征,导数与压差曲线呈基本平行趋势延伸；
- (3)曲线很少有平面径向流和外边界影响特征表现。

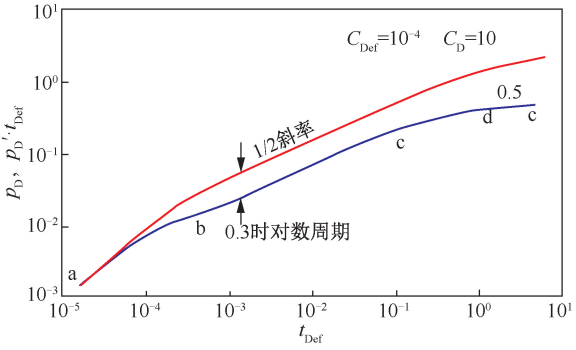


图 5 单向线性渗流模型双对数曲线图
Fig. 5 Double logarithm curves of unidirectional linear seepage model

此类曲线特征表明(图 6),测试井近井地带地层由于物性差异、天然裂缝或后期改造及注入水高压冲刷等因素,出现优势渗流通道,与相邻地层孔隙渗流形成较大差异,注入水沿优势渗流通道流动驱替,表现为单方向的线性渗流特征。

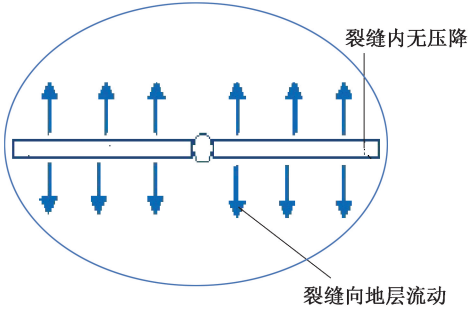


图 6 单向线性渗流模型油藏结构示意图
Fig. 6 Schematic diagram of reservoir structure for unidirectional linear seepage model

对 2015 年长 4+5、长 6 油藏 86 口注水井压力降落资料双对数曲线反映的渗流特征统计分析,注入水在地层径向均质渗流驱替的比例为 27.9%,径向复合渗流驱替的比例为 19.8%,单向线性渗流驱替的比例为 52.3%。由于注入水在地层的不均匀驱替,导致油层单方向油井快速见水,而侧向油井长期低产低效的开发矛盾出现,影响了油藏的良好稳定开发。

针对出现的开发矛盾,安塞油田在近两年加大了注水井堵水调驱措施力度,地层水驱不均的开发矛盾有所缓解。对 2019 年测试 170 口注水井压力降落资料反映的地层渗流规律进行统计分析,注入水在地层径向均质渗流驱替的比例上升到了 45.1%,径向复合渗流驱替的比例为 9.3%,单向线性渗流驱替的占比下降为 45.6%,地层的水驱不均状况得到了一定改善,提高了水驱波及体积及效率,取得了较好的堵水效果。

2 堵水措施效果分析

安塞油田发展至现阶段,纵向对比历年的油水井试井资料,各区块地层越来越多的呈现裂缝油藏渗流特征,水驱规律日益复杂.结合区块整体压力保持水平,以及含水不断上升的情况,自 2016 年以来,安塞油田大力推广以聚合物微球调驱为主的堵水调驱措施,实现了动用深部剩余油的目的,取得了较好的效果,成为了控水稳油的主要措施。

2.1 堵水调驱

X-1 井组注采层位为长 6_1^2 、长 6_2 和长 6_3 层,井组有 5 口油井,注水井 X-1 井采用地面油套分注注水工艺。2017 年初井组日产油下降,含水上升(图 7)。2017 年 9 月分层压力降落测试,上部层位长 6_1^2 和下部层位长 6_2 、长 6_3 层均表现为无限导流垂直裂缝渗流特征(图 8),反映注入水在地层均有沿单一方向驱替流动的现象。2018 年 1 月 20 日至 4 月 5 日,对该井进行微球调驱堵水措施。措施后,2018 年 6 月测试压力降落资料双对数曲线显示(图 9),地层水驱规律发生了较大变化,上下两层均表现为均质水驱特征。措施后,注入水的地层水驱波及面积增大,驱替效率得到提高,地层渗流规律的变化得到该井组生产动态的进一步证实(图 7),井组日产油由措施前的 5.00 t/d 上升到 2019 年 1 月的 11.00 t/d,含水由 70.6%下降到 54.1%。井组 5 口油井均见到降水增油效果,其中 X-1-1 井最高日增油 2.97 t/d,含水下降了 9.2%,取得了较好的控水增油措施效果。堵水调驱提高了水驱波及面积,达到控水增油目的。

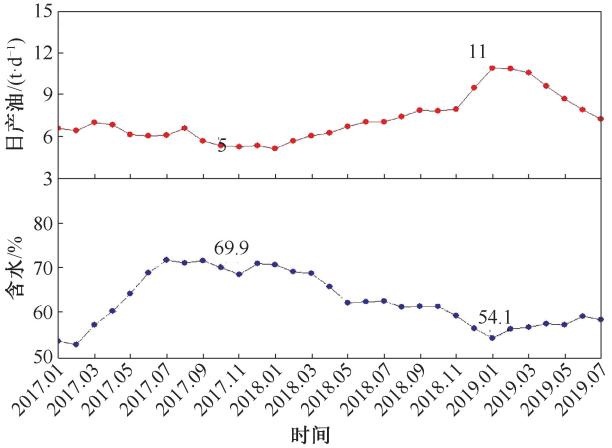


图 7 X-1 井组生产曲线图
Fig. 7 Production curve of well group X-1

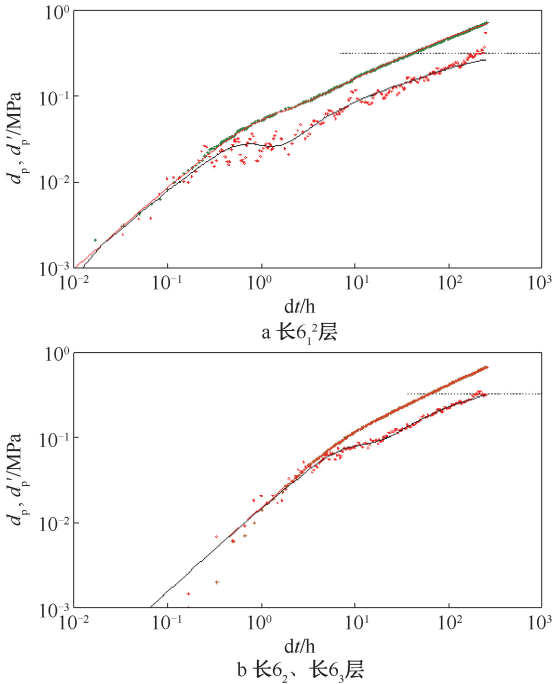


图 8 措施前 X-1 井压力降落双对数曲线图
Fig.8 Pressure drop log curve of Well X-1 before the measures

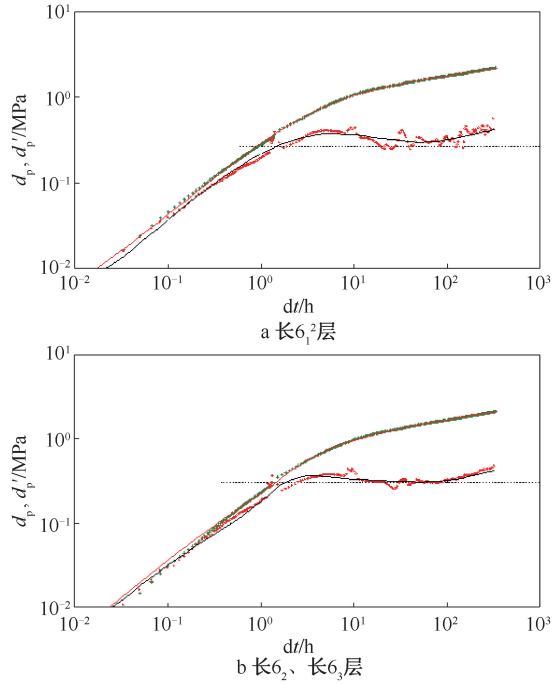


图 9 措施后 X-1 井压力降落双对数曲线图
Fig.9 Pressure drop log curve of Well X-1 after the measures

2.2 注水调整+堵水调驱

S-1 井组注采层位为长 4+5 层,井组有 5 口油井。2017 年 6 月井组含水由 32.6%上升到 50.6%(图 10),8 月注水井 S-1 井测试压力降落资料,双对数曲线为无限导流线性渗流特征(图 11a),显示注入水在地层驱替不均,动态反映 S-1-3、S-1-1、S-1-2 三口油井含水上升,其中 S-1-3 井含水由 46%上升

到 76%(图 12)。2017 年 7 月,将注水井 S-1 井注水量由 36 m³/d 逐步下调,井组含水出现缓慢降落态势。2017 年 12 月,井组含水下降到 42.6%(图 10),日产油稳定在 14 t,S-1-3 井含水下降到 42.5%(图 12)。2018 年 4~6 月,对注水井 S-1 井进行堵水措施,措施后,2019 年 5 月,注水井压力降落资料双对数曲线表现为均质渗流特征(图 11b),地层水驱状况得到较大改善,注水调控+堵水调驱措施使井组含水保持下降趋势(图 10),日产油水平稳中有升。2019 年 6 月,含水稳定在 40%左右,日产油达到 15 t 以上,S-1-3 井含水下降了 36%。目前,保持在 40%,日产油由 3 t 上升到 7 t(图 12),控水增油效果显著。注水调整+堵水调驱,确保控水增油措施取得较好效果。

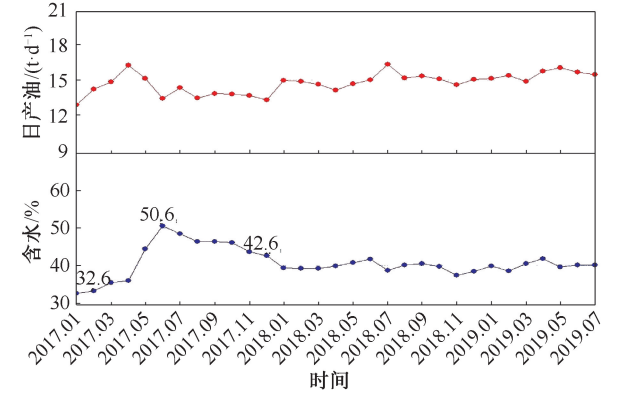


图 10 S-1 井组生产曲线
Fig. 10 Production curve of well group S-1

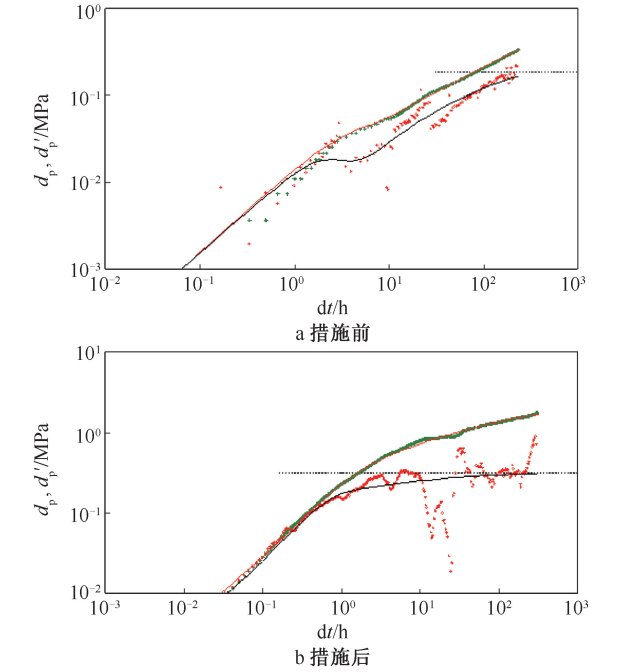


图 11 S-1 注水井压力降落双对数曲线图
Fig. 11 Pressure drop double logarithm curve of water injection Well S-1

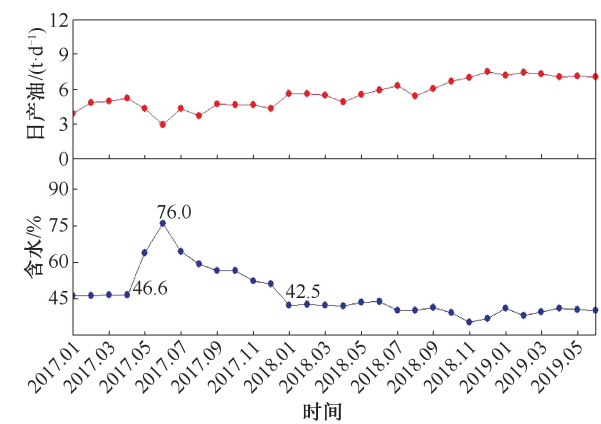


图 12 S-1-3 油井生产曲线图
Fig. 12 Production curve of Well S-1-3

2.3 封堵裂缝高渗流驱通道

根据生产动态资料分析,W-1 注水井位于裂缝高渗流通道上,2010 年注水井 W-1 井压力降落测试双对数导数曲线末端下掉(图 13a),反映该井远井地层存在恒压水驱边界特征,显示其与相邻注水井已出现高度连通状态,注入水沿裂缝连通优势方向驱替突进明显。

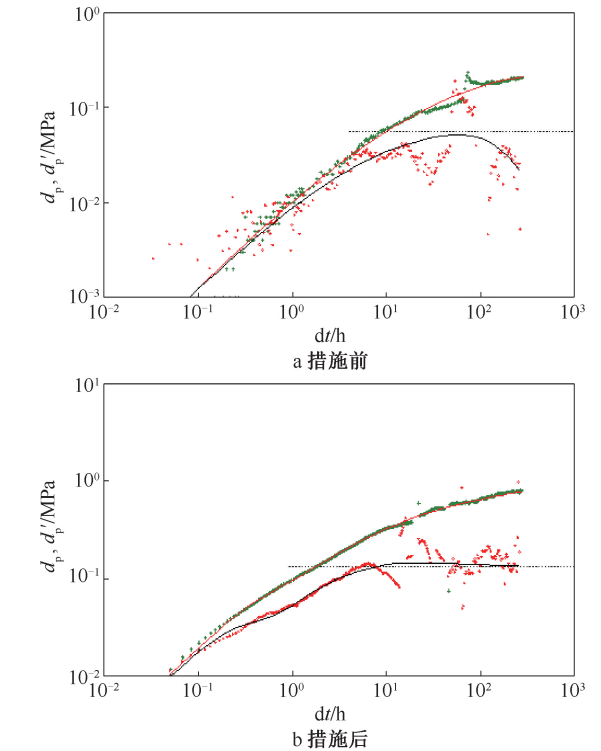


图 13 W-1 注水井压力降落双对数曲线图
Fig. 13 Pressure drop double logarithm curve of water injection Well W-1

该井侧向有油井 7 口。井组注采曲线显示(图 14),2018 年初井组含水在 40%左右,平均单井日产油 0.6 t/d,侧向油井见效程度低,开发矛盾突出,

2018年9–11月对该注水井进行堵水措施。2019年3月压力降落资料显示(图13b),该井水驱边界消失,远井地层水驱均匀,堵水措施后井组油井含水下降,日产油上升。2019年6月井组含水下降到32.1%,日产油由3 t最高上升到6.2 t,平均单井日产油最高上升到1.31 t,堵水措施目前仍然有效。封堵裂缝高渗流水驱通道,促使侧向油井见效,达到控水稳油目的。

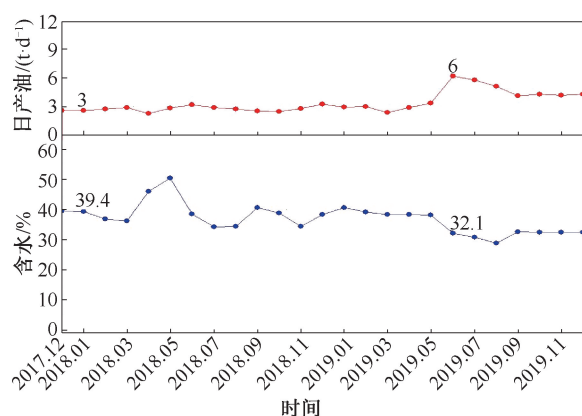


图14 W-1井组生产曲线图

Fig. 14 Production curve of well group W-1

3 结论

(1)特低渗油田长4+5、长6层,由于地层物性差、非均质性强及天然微裂缝发育,导致注入水在地层驱替不均的矛盾较为突出。

(2)针对水驱不均、波及面积小,油井受效不均、单向见水的开发矛盾,通过堵水调驱措施可以有效改善地层的水驱状况,达到降低油井含水上升速度,控水稳油、增油,降低递减的目的。

(3)堵水调驱措施工艺,应结合注水井压力降落资料所反映的地层水驱规律、油水接触关系及驱替类型有的放矢进行,以提高堵水措施的有效性。

(4)堵水措施后,应及时准确录取注水井压力降落资料,对措施效果进行评价,为堵水措施提供依据。

致谢:感谢长庆油田分公司第一采油厂同意该论文发表;感谢第一采油厂测试实验大队黄文宽高级工程师给与的指导与帮助。

参考文献

[1] 赵向元,曾联波,靳宝光,等. 低渗透油藏注水诱导裂缝特征及形成机理——以鄂尔多斯盆地安塞油田长6油藏为例[J]. 石油与天然气地质,2018,39(4):696–705.
ZHAO Xiangyuan, ZENG Lianbo, JIN Baoguang, et al. Characteristics and formation mechanisms of waterflood

induced fractures in low-permeability reservoirs; A case study from Chang 6 reservoir in Ansai Oilfield, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018,39(4):696–705.

[2] 范天一,宋新民,吴淑红,等. 低渗透油藏水驱动态裂缝数学模型及数值模拟[J]. 石油勘探与开发,2015,42(4):496–501.
FAN Tianyi, SONG Xinmin, WU Shuhong, et al. A mathematical model and numerical simulation of waterflood induced dynamic fractures of low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(4):496–501.

[3] 赵向元,吕文雅,王策,等. 低渗透砂岩油藏注水诱导裂缝发育的主控因素——以鄂尔多斯盆地安塞油田W区长6油藏为例[J]. 石油与天然气地质,2020,41(3):586–595.
ZHAO Xiangyuan, LYU Wenya, WANG Ce, et al. Major factors controlling waterflooding-induced fracture development in low-permeability reservoirs——A case study of Chang 6 reservoir in W block in Ansai Oilfield, Ordos basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020,41(3):586–595.

[4] 李伶东,刘哲,李堪远. 安塞油田长6油藏油井见水分析及增产技术对策——以塞158区块为例[J]. 石油化工应用,2017,36(5):30–33.
LI Lindong, LIU Zhe, LI Kanyun. Analysis of water breakthrough in Chang-6 reservoir of Ansai Oilfield and research of production increase technology, a case study of Sai 158 block [J]. Petrochemical Industry Application, 2017,36(5):30–33.

[5] 魏学刚,刘德来,刘雨峰,等. 安塞油田高含水油井化学堵水研究与现场应用[J]. 云南化工,2019,46(12):156–157.
WEI Xuegang, LIU Delai, LIU Yufeng, et al. Study and field application of chemical water shutoff for high water cut well in Ansai Oilfield [J]. Yunnan Chemical Technology, 2019.46(12):156–157.

[6] 易永根,黄战卫,师现云,等. 注水井深部调剖技术在安塞油田的适用性评价[J]. 中国石油和化工标准与质量,2014,34(4):167.
YI Yonggen, HUANG Zhanwei, SHI Xianyun, et al. Applicability evaluation of deep profile control technology in Ansai Oilfield [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2014,34(4):167

[7] 吴文超,刘超. 影响裂缝-孔隙型油藏调剖效果因素的分析——以安塞油田某区为例[J]. 石油化工应用,2018,37(3):81–84.
WU Wenchao, LIU Chao. Analysis of factors affecting profile control effect in fractured porous reservoir: A case study of an area in Ansai Oilfield [J]. Petrochemical Industry Application, 2018,37(3):81–84

[8] 魏晓娥. 低渗透油藏水淹层识别及水驱规律研究——以杏河-侯市地区为例[D]. 西安:西北大学,2017.
WEI Xiao'e. Water-flooded zone identifying and water

- flooding law in low permeability reservoirs: An example from Xinghe-Houshi Oilfield [D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- [9] 袁晓琪. 华庆油田白 257 区长 6 油藏裂缝识别及水驱规律研究[D]. 西安:西安石油大学,2019.
YUAN Xiaoqi. Study on fractures identification and water flooding law of Chang 6 reservoir in Bai 257 area of Huaqing Oilfield [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou university, 2019.
- [10] 张洪军,高月刚,王学生,等. 安塞特低渗透油藏水淹层识别方法及应用[J]. 复杂油气藏,2015,8(4):49-52.
ZHANG Hongjun, GAO Yuegang, WANG Xuesheng, et al. Recognition method for water-flooded layers in Ansai extra-low permeability reservoir and its application [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2015,8(4):49-52.
- [11] (法)布尔特(Bourdet D.)(著). 张义堂(译). 现代试井解释模型及应用[M]. 北京:石油工业出版社,2007:3-167.
- [12] 张英魁. 试井解释技术与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2019:1-14.
- [13] 黄文宽,张亚利,董美玲,等. 安塞特低渗油田试井资料特征及应用[J]. 油气井测试,2008,17(1):21-23,27.
HUNG Wenkuan, ZHANG Yali, DONG Meiling, et al. Characteristic and application of testing data in super low percolation oilfield of Ansai [J]. Well Testing, 2008,17(1):21-23,27.
- [14] 《中国油气田开发志》总编纂委员会. 中国油气田开发志·长庆油气区油气田卷(上)[M]. 北京:石油工业出版社,2011:93-94.
- [15] 王建民,刘生福,李军,等. 陕北中生界特低渗透高含水油藏特征及成因[J]. 石油勘探与开发,2011,38(5):583-588.
WANG Jianmin, LIU Shengfu, LI Jun, et al. Characteristics and causes of Mesozoic reservoirs with extra-low permeability and high water cut in northern Shaanxi [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011,38(5):583-588.
- [16] 姚涇利,邓秀芹,赵彦德,等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J]. 石油勘探与开发,2013,40(2):150-158.
YAO Jingli, DENG Xiuqin, ZHAO Yande, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang formation, Ordos basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(2):150-158.
- [17] 杨华,邓秀芹. 构造事件对鄂尔多斯盆地延长组深水砂岩沉积的影响[J]. 石油勘探与开发,2013,40(5):513-520.
YANG Hua, Deng Xiuqin. Deposition of Yanchang formation deep-water sandstone under the control of tectonic events, Ordos basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(5):513-520.
- [18] 常宝华,强小龙,杨亚涛,等. 低渗透气藏压裂水平井试井曲线特征及影响因素[J]. 油气井测试,2018,27(2):1-6.
CHANG Baohua, QIANG Xiaolong, YANG Yatao, et al. Well testing curves of fractured horizontal wells in low-permeability gas reservoirs: characteristics and influencing factors [J]. Well Testing, 2018,27(2):1-6.
- [19] 赵润冬,王锦昌,周瑞立,等. 大牛地气田分段压裂水平井压力恢复试井曲线特征[J]. 油气井测试,2017,26(4):22-24.
ZHAO Rundong, WANG Jinchang, ZHOU Ruili, et al. Curve characteristics of pressure build up welling test for staged fracturing to horizontal well in Daniudi gas field [J]. Well Testing, 2017,26(4):22-24.
- [20] 廖新维,沈平平. 现代试井分析[M]. 北京:石油工业出版社,2002:107-177.
- [21] 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 第5版. 北京:石油工业出版社,2008:72-104.
- [22] 《中国油气井测试资料解释范例》编写组. 中国油气井测试资料解释范例[M]. 北京:石油工业出版社,1994:124-205.
- [23] 任超峰,王雪芹,赵文军,等. 长庆榆林气田分支水平井试井资料解释方法[J]. 油气井测试,2020,29(1):67-73.
REN Chaofeng, WANG Xueqin, ZHAO Wenjun, et al. Interpretation method for well testing data of branched horizontal wells in Changqing Yulin gas field [J]. Well Testing, 2020,29(1):67-73.

编辑 穆立婷

第一作者简介:黄易泽,男,1992年出生,助理工程师,2015年毕业于中国矿业大学银川学院资源勘查工程专业,主要从事油田开发试井解释工作。电话:029-86508259; Email: hwk_cq@petrochina.com.cn。通信地址:陕西省延安市河庄坪镇第一采油厂,邮政编码:716000。