

文章编号:0253-9985(2012)02-0307-07

准噶尔盆地乌尔禾油田三叠系百口泉组 储层敏感性评价

官清顺¹, 寿建峰¹, 姜忠朋², 黄革萍¹, 王艳清¹, 倪国辉²

(1. 中国石油 勘探开发研究院 杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023;

2. 中国石油 长城钻探工程有限公司 解释研究中心, 北京 100101)

摘要:针对准噶尔盆地乌尔禾油田三叠系百口泉组低孔低渗的冲积扇储层, 储层天然能量较差, 未经储层改造难以获得工业油流的问题, 采用水基压裂液改造后试油未能获得成功, 而在 W36 井采用油基压裂液压裂后试油获得成功。依据储层分析技术和实验分析技术, 参照碎屑岩储层评价标准, 分析大量岩心流动实验测试数据, 针对百口泉组冲积扇砂砾岩储层敏感性深入研究, 指出分析储层敏感性和改善压裂工艺将对油层保护及开发起到关键作用。通过研究发现, 伊/蒙混层和高岭石等粘土矿物含量高是造成储层具有较强敏感性的主要原因; 百口泉组储层水敏感性、盐敏感性和体积流量敏感性中等偏强, 速度敏感性较弱。通过研究结果和生产试验, 建议采取脱水油基压裂液、压裂液盐度控制在 6 000 mg/L 以上、控制流速和体积流量等措施, 有效地降低不同敏感性造成的储层伤害, 提高油气产量。

关键词:敏感性; 冲积扇; 储层; 百口泉组; 乌尔禾油田; 准噶尔盆地

中图分类号: TE112.322

文献标识码: A

Reservoir sensitivity evaluation of the Triassic Baikouquan Formation in Wuerhe oilfield, Junggar Basin

Gong Qingshun¹, Shou Jianfeng¹, Jiang Zhongpeng², Huang Geping¹, Wang Yanqing¹ and Ni Guohui²

(1. PetroChina Hangzhou Research Institute of Petroleum Geology, Hangzhou 310023, China;

2. Interpretation Research Center, PetroChina Greatwall Drilling Company, Beijing 100101, China)

Abstract: Triassic Baikouquan Formation reservoirs in Wuerhe oilfield in Junggar Basin are of alluvial fan facies with low-porosity and low-permeability. No industrial oil flow can be tested without stimulation due to the low initial energy. Previous stimulation with water-based fracturing fluid failed, but stimulation with oil-based fracturing fluid in W36 well was successful. By using reservoir evaluation technique and experimental analysis technology and referring to the standards of clastic reservoir evaluation, this paper thoroughly studied the sensitivity of sandy conglomerate reservoirs sensitivity within alluvial fan of Baikouquan Formation based on analysis of large amount of core flow test data. It is pointed out that understanding reservoir sensitivity and improving fracturing technique are quite important for prevention of formation damage and oil recovery. The study indicates that high content of clay minerals such as mixed illite/smectite and kaolinite is the main cause of strong sensitivity of the reservoir. Water sensitivity, salt sensitivity and volume flow rate sensitivity of the reservoir in Baikouquan Formation are moderate to strong (above average). Velocity sensitivity is a relatively weak. According to the results and production experiments, following measures, such as using dewatered oil-based fracturing fluid, controlling salinity of fracturing fluid (above 6 000 mg/L) and controlling flow velocity/volume flow rate, are proposed for preventing reservoir damage from sensitivity and increasing oil-gas production.

收稿日期: 2011-11-12; 修订日期: 2012-01-15。

第一作者简介: 官清顺 (1979—), 男, 工程师, 沉积岩石学。

基金项目: 中国石油天然气勘探与生产公司项目 (09-15E-02)。

Key words: reservoir sensitivity, alluvial fan, reservoir, Baikouquan Formation, Wuerhe oilfield, Junggar Basin

在油气勘探开发过程中,由于外来流体的侵入及开采过程中流体性质和流动状态的改变等,会引起储层的敏感性,从而不同程度损害油层产能,导致产量下降^[1-5]。

乌尔禾油田百口泉组油藏发现于2006年,发现井是W36井。该油藏发现过程曲折,在W36井发现之前,该区钻井在百口泉组录井和岩心普遍见到良好油气显示,但始终未能发现有工业价值的油层。究其原因在于该储层为低孔低渗型,自身弹性能量差,压力系数低,泥质含量较高,试油过程中未能正确认识储层敏感性危害,采用水基压裂液进行压裂改造,造成储层污染,导致勘探遇阻。自W36井采用油基压裂液改造后,试油取得成功,获得工业油流,从而发现百口泉组油藏。由此可见,准确掌握储层敏感性特征及程度,及时调整压裂工艺及注采开发措施,对于保护油层和提高产能具有十分重要的意义。

在大量实验测试数据分析的基础上,结合百口泉组沉积和储层特征研究,首次针对储层敏感性特征进行系统分析,提出对应的储层保护建议。

1 研究区概况

准噶尔盆地西北缘表现为前陆盆地性质^[6],伴随区域构造运动,形成一系列逆掩推覆体和逆冲断裂^[7-8]。乌尔禾油田区域构造位于准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带西端(图1),构造形态为大型的断鼻构造。三叠系百口泉组是研究区主要的目的层,其残余地层厚度为40~150 m,与下伏二叠系乌尔禾组为区域不整合接触,与上覆克拉玛依组整合接触。

受同生逆断裂控制,二叠纪—三叠纪时期,西北缘广泛发育各类扇体(包括冲积扇和扇三角洲等),阶梯式逆冲断裂则形成多级扇体的幕式叠加^[9-10]。研究表明,百口泉组主要发育一套近源快速堆积的冲积扇沉积体系^[11-12],岩石类型主要为砂砾岩、含砾砂岩、不等粒砂岩、细砂岩及泥岩。据研究区岩心、铸体薄片、扫描电镜、X-衍射和压汞等岩矿分析测试资料研究表明,百口泉组储层具有成分成熟度低、结构成熟度中等的岩石学特征,

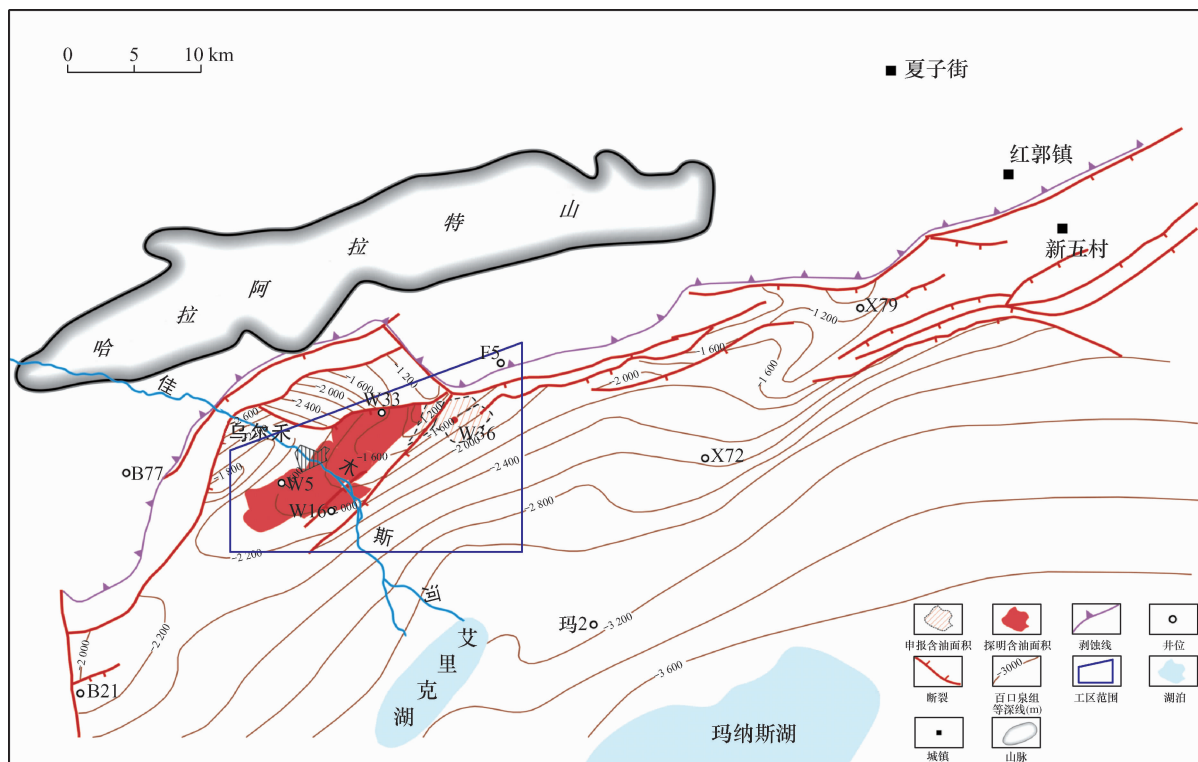


图1 研究区构造位置

Fig. 1 Structure location of the study area

储集空间以剩余原生粒间孔为主,其次为颗粒压碎缝和溶蚀孔;储层综合评价为大孔、中细喉-细喉的低孔、低渗型储层。

2 储层敏感性评价

2.1 评价思路

敏感性产生的主要内在原因是储层的岩石组成及结构特征,特别是粘土矿物的分布类型及产状。依据不同粘土矿物晶体结构特征的差异,通常认为蒙脱石、伊/蒙混层粘土矿组易产生水敏感性,高岭石易产生速敏感性,而绿泥石易产生酸敏感性^[13-15]。

研究区三叠系百口泉组冲积扇型成因砂体由于近源、快速堆积等因素,总体上分选较差,粘土杂基含量较高,平均为4.3%,局部地区含量高,达到20%,粘土矿物含量及构成变化较大。据X-衍射粘土矿物分析,百口泉组储层粘土矿物组成主要为伊/蒙混层矿物(I/S)和高岭石(K)为主,分别占52%和29%,其次为绿泥石(C)和伊利石(I)(图2),且不同粘土矿物形态各异,伊/蒙混层矿物呈粒表不规则状与似蜂巢状;高岭石呈粒间充填的蠕虫状与不规则状;绿泥石呈粒表叶片状与不规则片状;伊利石呈粒表片状、弯曲片状和定向片状(图3)。根据对粘土矿物组成的分析认为,研究区百口泉组储层具有潜在的水敏感性和速敏感

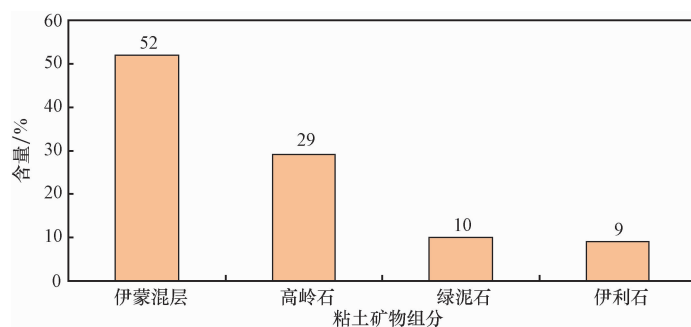


图2 乌尔禾油田百口泉组粘土矿物组成含量分布直方图

Fig. 2 Histogram showing clay mineral content of Baikouquan Formation in Wuerhe oilfield

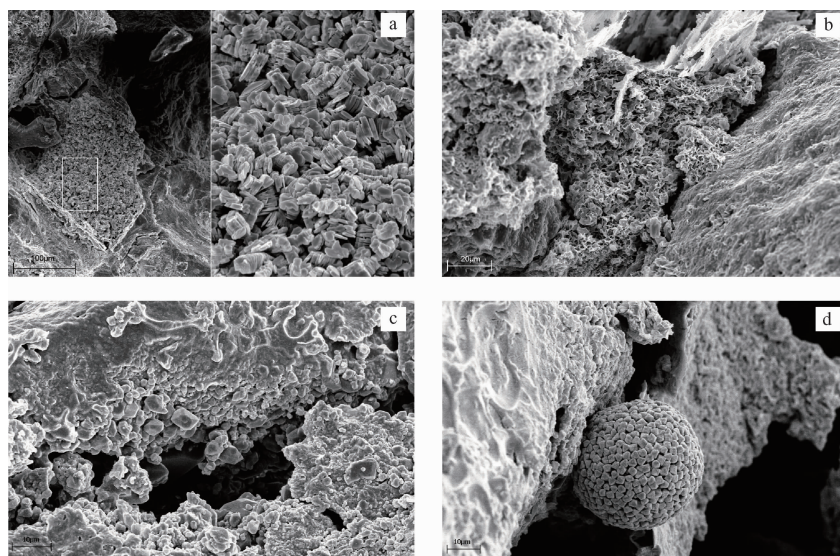


图3 乌尔禾油田百口泉组储层微观孔隙结构特征

Fig. 3 Microscopic pore structure of Baikouquan Formation in Wuerhe oilfield

- a. W103 井,1 704.93 m, T₁b, 粒间高岭石; b. W102 井, 928.89 m, T₁b, 粒间似蜂巢状伊/蒙混层;
c. W36 井, 1 446.10 m, T₁b, 粒间自生石英晶体; d. W36 井, 1 443.18 m, T₁b, 粒间球粒状黄铁矿

性。此外,自生石英、石英加大及其他自生矿物的存在,也导致储层具有一定的潜在敏感性(图3)。

2.2 敏感性评价

敏感性研究的基础手段是室内的岩心流动实验,配制不同类型的工作液来模拟储层损害的动态过程,依据工作液(外来流体)的性质及实验过程,评价不同类型的敏感性并分析其对储层造成损害程度的大小^[16-19]。

2.2.1 水敏感性

储层的水敏感性是指当与地层不配伍的外来流体进入地层后,引起粘土矿物的水化、膨胀、分散及迁移,导致渗透率不同程度下降的现象。储层水敏程度一方面取决于储层内粘土矿物的类型及含量,另一方面取决于外来流体的矿化度。

水敏性的强弱与水敏指数(I_w)成正比。其中,水敏指数定义为:

$$I_w = (K_i - K_w) / K_i \quad (1)$$

式中: I_w ——水敏评价指数,即淡水与饱和盐水之间渗透率的降低幅度,无因次;

K_i ——岩样未发生水化膨胀等物理化学作用的液体渗透率,通常用克氏渗透率代表, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

K_w ——蒸馏水渗透率或去离子水渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

参照石油天然气行业标准(SY/T5358——2002)储层敏感性流动实验评价方法($I_w \leq 5$,无水敏; $5 < I_w \leq 30$,弱水敏; $30 < I_w \leq 50$,中等偏弱水敏; $50 < I_w \leq 70$,中等偏强水敏; $70 < I_w \leq 90$,强水敏; $I_w > 90$,极强水敏),试验分析结果表明百口泉组普遍具有中等强度的水敏感性(表1),局部W104井水敏感性增强,这与该井储层粘土组合以伊/蒙混层粘土矿物为主(平均占84%)的特征吻合。

2.2.2 速敏感性

储层的速敏感性是指当与岩石矿物相配伍的流体(如地层水)流速过大时,会引起储层中微粒运移,阻塞吼道,导致岩石渗透率降低。衡量岩石速敏性的指标有:渗透率伤害率(D_k)、速敏指数(I_v)和临界速度(v_c)。本次研究中选用渗透率伤害率(D_k)对储层速敏强度进行评价。

$$D_k = \frac{K_L - K_{Lmin}}{K_L} \quad (2)$$

式中: D_k ——速敏性导致的渗透率伤害率,无因次;

K_L ——小于临界流速时,流体的原始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

K_{Lmin} ——大于临界流速、小于或等于 $6 \text{ cm}^3/\text{min}$ 的流量范围内,流体渗透率最小值, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

表1 乌尔禾油田百口泉组储层水敏感性实验数据

Table 1 Experimental data of water sensitivity of Baikouquan Formation in Wuerhe oilfield

井号	深度/m	岩性	孔隙度/%	气体渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	克氏渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	水敏指数	水敏性评价
W004	1 916.24	粗砂岩	15.1	1.550	1.120	34.0	中等偏弱
W004	1 960.48	砂砾岩	13.1	0.334	0.239	45.0	中等偏弱
W102	940.15	砂砾岩	31.6	3.210	2.460	33.0	中等偏弱
W102	948.77	砂砾岩	28.0	26.900	22.400	42.0	中等偏弱
W103	1 706.9	含砾粗砂岩	17.8	29.300	24.000	81.0	强水敏
W103	1 713.65	砂砾岩	24.4	20.300	16.800	20.0	弱水敏
W36	1 442.16	砂砾岩			28.200	60.8	中等偏强
W36	1 444.27	砂砾岩			70.200	28.2	中等偏弱
W104	1 719.81	砂砾岩	18.3	35.00	28.800	99.0	极强水敏性
W104	1 738.89	砂砾岩	19.8	7.670	5.870	93.0	极强水敏性
W104	1 745.55	砂砾岩	20.3	16.800	14.000	46.0	中等偏弱
W1003	812.02	砂砾岩			1.230	59.2	中等偏强
W1003	823.33	砂砾岩			1.450	60.6	中等偏强

表 2 乌尔禾油田百口泉组储层速敏感性实验数据

Table 2 Experimental data of velocity sensitivity of Baikouquan Formation in Wuerhe oilfield

井号	深度/m	岩性	孔隙度/%	气体渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	地层水渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	伤害率	速敏性评价
W004	1 916. 24	粗砂岩	16. 6	3. 29	1. 160	0. 17	弱速敏
W102	929. 07	砂砾岩	28. 4	9. 60	0. 473	0. 32	中等偏弱
W102	948. 77	砂砾岩	28. 0	76. 90	0. 037	-0. 28	无速敏
W103	1 700. 48	砂砾岩	13. 4	3. 05	0. 0776	-0. 17	无速敏
W103	1 702. 74	砂砾岩	13. 5	1. 37	0. 102	-0. 22	无速敏
W36	1 442. 16	砂砾岩			4. 230		无速敏
W104	1 745. 55	砂砾岩	17. 9	158. 00	102. 000	0. 57	中等偏强
W1003	829. 61	砂砾岩					弱速敏

参照储层敏感性流动实验评价方法行业标准 (SY/T5358—2002) ($D_k \leq 0.05$, 无速敏; $0.05 < D_k \leq 0.3$, 弱速敏; $0.3 < D_k \leq 0.5$, 中等偏弱速敏; $0.5 < D_k \leq 0.7$, 中等偏强速敏; $D_k > 0.7$, 强速敏) 的实验分析结果表明 (表 2), 百口泉组速敏感性相对较弱, 多为弱速敏感性-无速敏感性, 局部 W104 井速敏感性中等。

2.2.3 盐敏感性

储层盐敏感性是指当外来流体矿化度发生变化, 引起粘土矿物水化、膨胀而导致渗透率下降的现象。储层盐敏感性实际上是储层耐受低盐度流体能力的度量, 度量指标即为临界盐度。本次试验采用标准盐水, 其临界盐度表示为 S_c , 单位为 mg/L。

参照于兴河^[20] 盐敏性流动实验评价指标 ($S_c \leq 1\,000$, 无盐敏; $1\,000 < S_c \leq 2\,500$, 弱盐敏; $2\,500 < S_c \leq 5\,000$, 中等偏弱盐敏; $5\,000 < S_c \leq 10\,000$, 中等偏强盐敏; $10\,000 < S_c \leq 30\,000$, 强盐敏; $S_c \geq 30\,000$, 极强盐敏), 由盐敏特征曲线分析

可知 (图 4), 在高矿化度情况下渗透率损失率小, 随着注入水矿化度的减小, 岩样渗透率损失率加大。W36 井断块的 W36 井、W104 井和 W103 井, 多数样品在注入水矿化度下降到 6 000 mg/L 时, 渗透率损失率大于 60%, 当注入水矿化度降低到 2 000 mg/L 以下, 渗透率损失率急剧加大, 达 70% 以上; W101 井断块的 W102 井和 W1003 井的样品曲线分散, 渗透率损失率变化幅度差异大: W102 井在注入水矿化度从 12 500 mg/L 下降到 2 000 mg/L 时, 渗透率损失率只有 30% 左右, 注入水矿化度下降到 2 000 mg/L 以下时, 渗透率损失率急剧增大, 最大接近 60%; 而 W1003 井注入水矿化度从 14 000 mg/L 下降到 10 800 mg/L 时, 渗透率损失率已大于 60%, 体现出强盐敏特点。综合评价, 储层表现为较高临界盐度的中等偏强的盐敏感性。

2.2.4 体积流量敏感性

体积流量敏感性是指流过储层的液量增大, 导致储层渗透率变化的现象。通常采用体积敏感

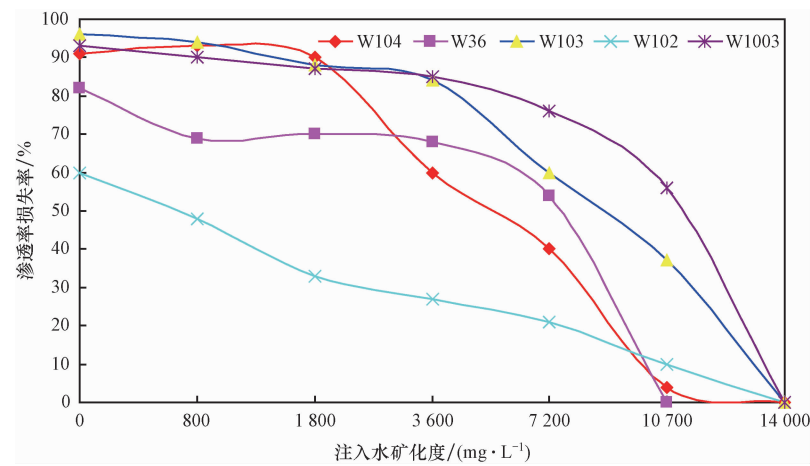


图 4 乌尔禾油田百口泉组储层盐敏感性评价

Fig. 4 Salt sensitivity evaluation of Baikouquan Formation in Wuerhe oilfield

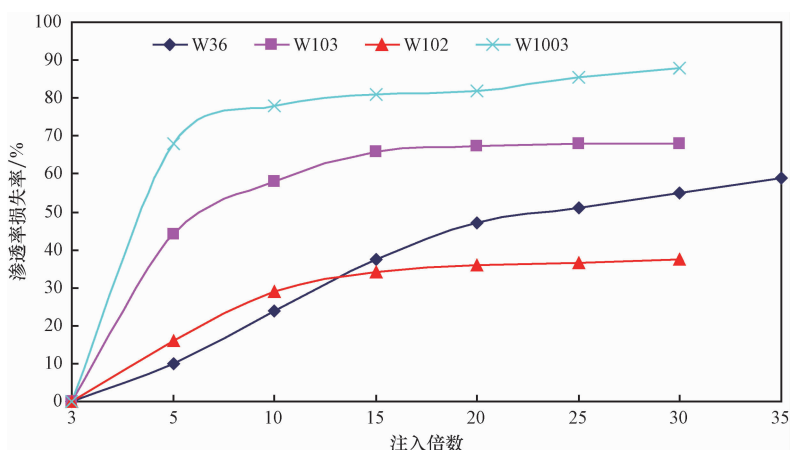


图5 乌尔禾油田百口泉组储层体积流量敏感性评价

Fig. 5 Volume flow rate sensitivity evaluation of Baikouquan Formation in Wuerhe oilfield

指数(l_q)来评价体积流量对储层的损害程度。

体积敏感指数定义如下:

$$l_q = \frac{K_l - K_{lq}}{K_l} \quad (3)$$

式中: l_q ——体积敏感指数,无因次;

K_l ——用标准盐水或地层水测定的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

K_{lq} ——用工作液测定的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

参照于兴河^[20]体积流量流动实验评价指标($l_q \leq 0.3$,弱体敏感性; $0.3 < l_q \leq 0.5$,中等偏弱体敏感性; $0.5 < l_q \leq 0.7$,中等偏强体敏感性; $l_q \geq 0.7$,强体敏感性),由体积敏感性特征曲线(图5)可知,注入水注入初期,岩样渗透率损失率整体急剧增大。W36井断块(W36井和W103井)和W101断块(W102井和W1003井)渗透率损失程度有差异,W36井断块注入体积是孔隙体积的6倍时,曲线出现拐点、渗透率损失率减缓,一个样品损失率达50%、另外一个样品为15%左右,平均体敏指数为0.57;W101井断块注入体积是孔隙体积的8倍时曲线出现拐点,一个样品损失率高达75%以上、另外一个样品为25%左右,平均体敏指数为0.61。综合评价,储层表现为中等偏强体敏感性特征。

3 结论与建议

实验分析结果表明,三叠系百口泉组储层具有中等偏强水敏感性、较高临界盐度的中等偏强盐敏感性、中等偏强体积流量敏感性及弱速度敏感性。因此,在油气勘探与开发过程中,必须针对不同的敏感性,尤其重点关注水敏感性、盐敏感性和体

敏性对储层的伤害,选择合理的施工工艺与措施,避免储层伤害给生产带来巨大经济损失。对应的防治建议如下:

1) 选择脱水原油体系作为压裂液,同时重点考虑原油的降阻性能和粘度,在复合原油中添加油基减阻增稠剂,有效避免水敏性对储层的伤害。

2) 控制合理的压裂液盐度,压裂液盐度要在6 000 mg/L以上,W101井断块局部地区还需进一步提高盐度至10 000 mg/L。在注水开发初期时,需严格控制注入水水质以及注入水矿化度,避免对储层造成较大的伤害

3) 针对储层的体敏性较强和弱速敏性特征,应当控制施工液的流速及注入体积流量,减少对储层造成的伤害。

参 考 文 献

- [1] 邱隆伟,于杰杰,郝建民,等. 南堡凹陷高南地区东三段低渗储层敏感性特征的微观机制研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2009,28(1):78-86.
Qiu Longwei, Yu Jiejie, Hao Jianmin, et al. A microscopic study of the formation mechanism of low permeability reservoir sensitivity of Ed₃ in Gaonan area, NaPu Sag[J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2009,28(1):78-86.
- [2] 谢爱华,刘社芹. 东濮凹陷桥口低渗气藏储层敏感性对策研究[J]. 石油与天然气地质, 2008,29(3):365-368.
Xie Aihua, Liu Sheqin. Reservoir sensitivity in low permeability Qiaokou gasfield, the Dongpu Sag and the solutions to it[J]. Oil & Gas Geology, 2008,29(3):365-368.
- [3] 常学军,尹志军. 高尚堡沙三段油藏储层敏感性实验研究及其形成机理[J]. 石油实验地质, 2004,26(1):84-88.
Chang Xuejun, Yin Zhijun. Sensitivity experimental study and its mechanism analysis of reservoirs in the third member of the

- Shahejie Formation, Gaoshangpu oilfield [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 2004, 26(1): 84–88.
- [4] 陈志海, 任利军, 陈亮宇, 等. 复杂断块超低渗油气藏试采动态评价与开发对策——以松辽盆地南部十屋油田营城组及沙河子组一段油藏为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(1): 133–141.
- Chen Zhihai, Ren Lijun, Chen Liangyu, et al. Performance evaluation on production tests in the extra low permeability reservoirs of complex fault blocks and development strategies-examples from oil reservoirs in the Yingcheng Formation and the first member of the Shahezi Formation in Shiwu oilfield of the southern Songliao Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(1): 133–141.
- [5] 谭锋奇, 李洪奇, 武鑫, 等. 砾岩油藏水淹层定量识别方法——以新疆克拉玛依油田六中区克下组为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(2): 232–239.
- Tan Fengqi, Li Hongqi, Wu Xin, et al. Quantitative identification of water-flooded zones in conglomerate reservoirs-an example from the Kexia Formation in the Liuzhong block of Karamay oilfield [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(2): 232–239.
- [6] 金之钧, 汤良杰, 杨明慧, 等. 陆缘和陆内前陆盆地主要特征及含油气性研究 [J]. *石油学报*, 2004, 25(1): 8–12.
- Jin Zhijun, Tang Liangjie, Yang Minghui, et al. Geological characteristic and hydrocarbon potential between epicontinental and intracontinental foreland basins [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(1): 8–12.
- [7] 雷振宇, 鲁兵, 蔚远江, 等. 准噶尔盆地西北缘构造演化与扇体形成和分布 [J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(1): 86–91.
- Lei Zhenyu, Lu Bing, Wei Yuanjiang, et al. Tectonic evolution and development and distribution of fans on northwestern edge of Junggar basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(1): 86–91.
- [8] 管树巍, 李本亮, 侯连华, 等. 准噶尔盆地西北缘下盘掩伏构造油气勘探新领域 [J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(1): 17–22.
- Guan Shuwei, Li Benliang, Hou Lianhua, et al. New hydrocarbon exploration areas in footwall covered structures in northwestern margin of Junggar basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(1): 17–22.
- [9] 雷振宇, 卞德智. 准噶尔盆地西北缘扇体形成特征及油气分布规律 [J]. *石油学报*, 2005, 26(1): 8–12.
- Lei Zhenyu, Bian Dezhi. Characteristics of fan forming and oil-gas distribution in west-north margin of Junggar basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(1): 8–12.
- [10] 何登发, 贾承造. 冲断构造与油气聚集 [J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(2): 55–62.
- He Dengfa, Jia Chengzao. Thrust tectonics and hydrocarbon accumulation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(2): 55–62.
- [11] 赵澄林, 朱筱敏. 沉积岩石学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 229–254.
- Zhao Chenglin, Zhu Xiaomin. *Sedimentary petrology and facies* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 229–254.
- [12] 郑占, 吴胜和, 许长福, 等. 克拉玛依油田六区克下组冲积扇岩石相及储层质量差异 [J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(4): 463–471.
- Zheng Zhan, Wu Shenghe, Xu Changfu, et al. Lithofacies and reservoirs of alluvial fan in the Lower Keramay Formation in the block 6 of Karamay oilfield, the Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(4): 463–471.
- [13] 吴胜和, 熊琦华. 油气储层地质学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 122–168.
- Wu Shenghe, Xiong Qihua. *Oil and gas reservoir geology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 122–168.
- [14] 袁亦楠, 薛叔浩. 油气储层评价技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 26–68.
- Qiu Yanan, Xue Shuhao. *Oil-gas reservoir evaluation technology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 26–68.
- [15] 贾统权. 粘土矿物与油藏演化的对应关系对储层敏感性的影响 [J]. *油气地质与采收率*, 2007, 14(5): 12–15.
- Jia Tongquan. The influence of relationship between clay mineral and evolution reservoir on reservoir sensibility [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2007, 14(5): 12–15.
- [16] 张昭槐, 罗平亚. 保护储集层技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 1–45.
- Zhang Zhaokui, Luo Pingya. *Reservoir protection technology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 1–45.
- [17] 章雄冬, 朱玉双, 曹海虹, 等. 苏北盆地草舍油田泰州组储层水敏伤害及其对注水开发的影响 [J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(4): 504–510.
- Zhang Xiongdong, Zhu Yushuang, Cao Haihong, et al. Water sensitive damage and its impacts on the waterflood development of the Taizhou Formation reservoirs in Caoshe oilfield, the Subei Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(4): 504–510.
- [18] 汤战宏, 张继超, 涂文利, 等. 孤东油田注入水对储层损害研究 [J]. *油气地质与采收率*, 2003, 10(增刊): 75–76.
- Tang Zhanhong, Zhang Jichao, Xu Wenli, et al. The reservoir damage induced by water injection in Gudong oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2003, 10(S1): 75–76.
- [19] 袁明琦. 王庄油田强水敏性稠油油藏开发方式优化研究 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2006, 25(6): 56–58.
- Yuan Mingqi. Optimizing study on heavy oil reservoir recovery of high water sensitivity in Wangzhuang oilfield [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2006, 25(6): 56–58.
- [20] 于兴河. 油气储层地质学基础 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 78–120.
- Yu Xinghe. *Basis of hydrocarbon reservoir geology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 78–120.

(编辑 张亚雄)