

页岩气储层损害机制及保护水基钻完井液技术

黄维安¹, 邱正松¹, 岳星辰¹, 李树皎², 高宏松³, 曹杰¹, 刘文迪⁴

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油长城钻探工程公司, 北京 100101; 3. 中海油能源发展股份有限公司天津人力资源服务分公司, 天津 300452; 4. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580)

摘要:针对页岩气藏特征及开采方式,通过 X 射线衍射、扫描电镜分析、气体膨胀置换法、脉冲衰减法和敏感性评价等手段,分析胜利油田沙河街组页岩气储层潜在损害因素及敏感性损害程度。提出页岩气储层保护水基钻完井液对策,研选出微乳型页岩气储层保护剂 YYBH-1 和聚胺类表面水化抑制剂 BMYZ-1,研制出页岩气储层水基钻完井液体系。结果表明:该页岩气储层黏土矿物以伊利石为主,孔隙度分布在 0.45% ~ 2.50%,平均孔隙直径主要在 4.54 ~ 6.17 nm,渗透率小于 $0.026 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为低孔超低渗储层;页岩气储层存在中等偏弱水敏性和碱敏性损害以及中等程度应力敏感性损害;页岩气储层水基钻完井液体系能有效防止水敏性,增强水的返排能力,降低页岩渗透率损害率和对甲烷气体的吸附能力,具有优良的页岩气储层综合保护作用。

关键词:页岩气储层; 损害机制; 微乳液; 水基钻井液; 等温吸附

中图分类号:TE 254

文献标志码:A

Damage mechanism and water-based drilling fluid protection technology for shale gas reservoir

HUANG Wei-an¹, QIU Zheng-song¹, YUE Xing-chen¹, LI Shu-jiao²,
GAO Hong-song³, CAO Jie¹, LIU Wen-di⁴

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. PetroChina Great Wall Drilling Company Limited, Beijing 100101, China;

3. CNOOC Energy Development Corporation Limited, Tianjin Branch of Human Resources, Tianjin 300452, China;

4. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Aimed at the features of shale gas reservoir and shale gas exploitation manners, the potential damage factors and sensitivities of shale formation in Shahejie Formation of Shengli Oilfield were analyzed by X-ray diffraction, scanning electron microscope, gas expansion displacement method, pulse decay method, and sensitivity evaluation. The protection measurement of water-based drilling and completing fluid for shale gas reservoir was proposed. The water-based drilling fluid formulation was developed based on the selecting of microemulsion shale gas formation protector YYBH-1 and polyamine surface hydration inhibitor BMYZ-1. Then the water-based drilling and completing fluid for shale gas reservoir was prepared. The results show that the clay mineral of shale formation is mainly composed of illites, in which the porosity distribution varies from 0.45% to 2.50%, the average pore diameter is between 4.54 nm and 6.17 nm, and the permeability is less than $0.026 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. It is classic low porous and ultra-low permeable reservoir and has less medium water sensitivity, alkaline sensitivity, as well as medium stress sensitivity. This system can prevent water sensitivity and improve the flowback of water effectively, decrease the loss ratio of shale permeability and absorptive capacity of methane. It has excellent protection function for shale gas formation.

Key words: shale gas reservoir; damage mechanism; microemulsion; water-based drilling fluid; isothermal adsorption

页岩气属于一种新型、非常规的油气资源,是储存于暗色泥页岩或高碳泥页岩中的天然气^[1-2]。中国的地质条件非常有利于页岩气的富集,可采页岩气资源潜力位居世界第一^[3-4]。页岩气自身储集成藏,其一部分以游离态存在于孔隙和裂缝中,一部分吸附于有机质和黏土矿物内表面,以大面积含气、隐蔽圈闭机制、可变的盖层岩性和较短的烃类运移距离为特征^[5-7]。因此,在页岩气勘探开发过程中,其储层受到的伤害远大于常规储层,直接影响到页岩气的解吸、扩散和流动^[8-9]。笔者以胜利油田沙河街组页岩气储层为研究对象,开展页岩气储层损害机制及保护水基钻井液研究。

1 页岩气储层潜在损害机制分析

1.1 岩石矿物组成

表 1 为胜利油田沙河街组页岩气储层全岩矿物组成分析结果。可以看出,胜利油田沙河街组页岩气储层中石英平均含量为 28%,方解石平均含量为 20%,钾长石和斜长石总平均含量为 13%,脆性矿物达 61%,水力压裂时易产生裂缝网络^[10-11]。黏土矿物平均含量达 31%,其中伊利石含量平均达 69%(表 2),这有利于页岩气以吸附状态赋存,且对储层后期压裂造缝有利^[12],但伊利石为速敏性矿物,因

此页岩气储层同时也存在了潜在速敏性。

表 1 胜利油田沙河街组页岩气储层全岩矿物组成分析结果

样品深度/km	矿物组成/%							
	石英	钾长石	斜长石	方解石	铁白云石	菱铁矿	黄铁矿	黏土矿物
3.530	28	5	14	17	2	2	3	29
3.534	26	3	12	19	3	1	3	33
3.572	30	2	5	25	0	4	4	30

表 2 胜利油田沙河街组页岩气储层黏土矿物相对含量分析结果

样品深度/km	相对含量/%				
	高岭石	绿泥石	伊利石	伊/蒙间层	伊/蒙间层比
3.530	3	2	68	27	20
3.534	2	2	72	24	20
3.572	4	3	67	26	20

1.2 岩石矿物微观构造

图 1 为胜利油田沙河街组页岩气储层矿物微观构造分析。可以看出:胜利油田沙河街组页岩气储

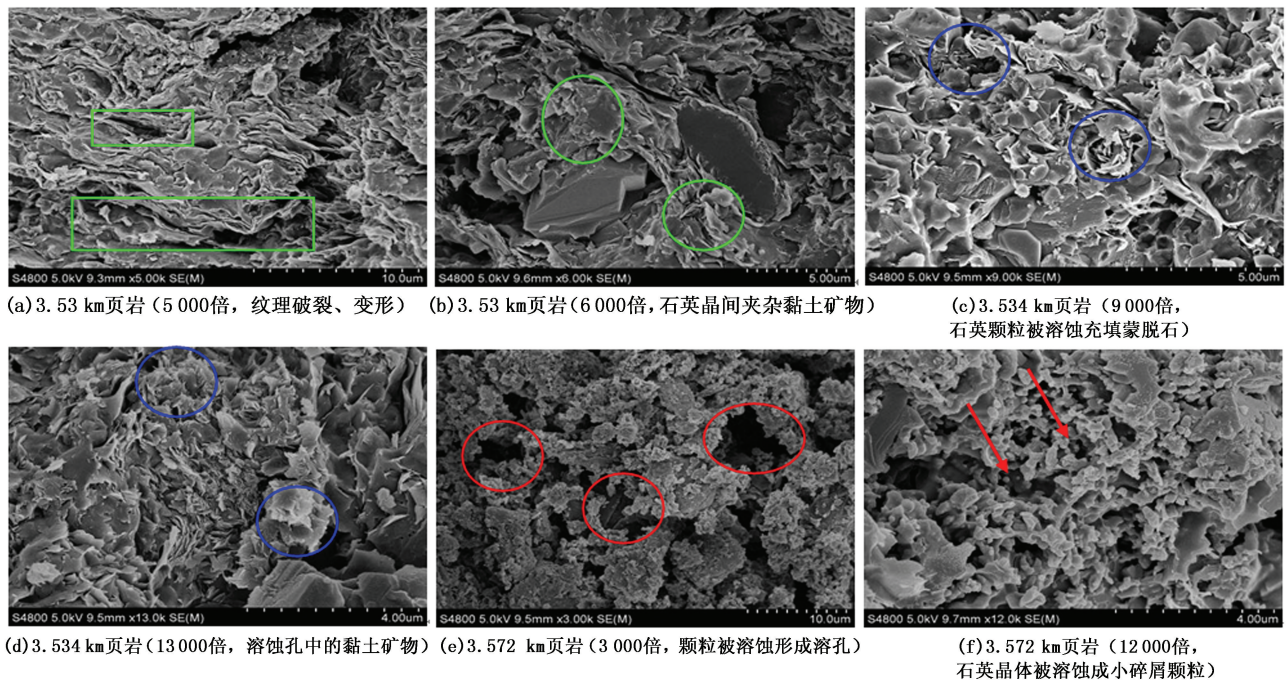


图 1 胜利油田沙河街组页岩气储层矿物微观构造分析

Fig. 1 Results of mineral micro-structure analysis of shale gas formation in Shahejie Formation of Shengli Oilfield

层纹理和微裂缝发育,有的矿物颗粒被溶蚀形成溶孔;黏土矿物或夹杂在石英晶体颗粒之间,或填充在

溶蚀孔隙中;部分石英晶体被溶蚀形成小碎屑颗粒。页岩气储层中石英和黏土矿物这种“互嵌”、“互填”

式微观构造,一方面有利于增加页岩气储层孔隙体积和增强渗透性,同时也增加了微粒运移和速敏性损害机制。

1.3 孔隙结构分析

采用阿基米德原理-气体膨胀置换法、毛细冷凝现象和体积等效交换原理^[13],分析了胜利油田沙河街组页岩气储层的孔隙度和孔径分布特征,结果见表 3 和图 2。结果表明,页岩样品的孔隙度分布在 0.45%~2.50%,孔径范围在 1.7~66.3 nm,平均孔隙直径主要分布在 4.54~6.17 nm。由此可知,页岩岩心的孔隙不发育,且大多数孔隙直径只有

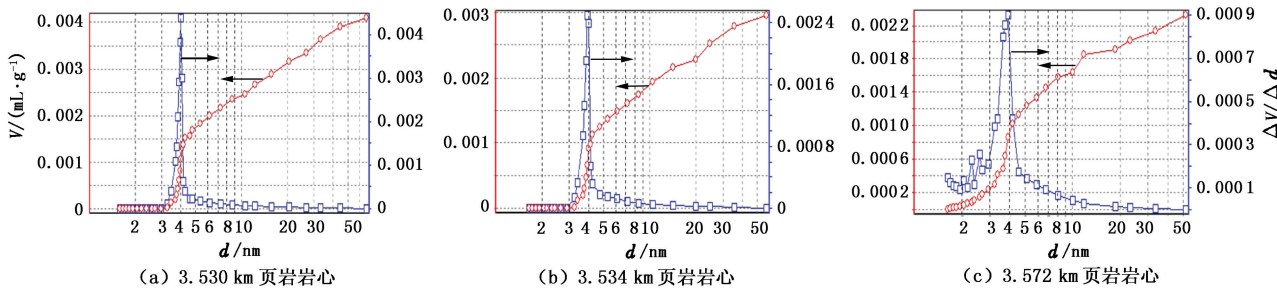


图 2 胜利油田沙河街组页岩气储层 BJH 法孔径分布测试曲线

Fig.2 Aperture distribution test curve of shale gas reservoir in Shahejie Formation of Shengli Oilfield by BJH method

1.4 页岩渗透率特征分析

按美国石油学会标准 API RP-40 要求,采用脉冲衰减法,在模拟地层覆压条件下,测试了胜利油田沙河街组页岩气储层对甲烷气体的克氏渗透率,其计算式^[14]如下:

$$k_g = c - [\mu \beta L V_1 V_2 / A (V_1 + V_2)] \ln(p_1 - p_f) t. \quad (1)$$

式中, K 为气测渗透率, μm^2 ; p_1 为岩样上流的压力, MPa; V_1 和 V_2 分别为上、下流容器体积, m^3 ; p_f 为 V_1 和 V_2 平衡压力值, MPa; A 为样品横截面积, m^2 ; L 为样品长度, m; β 为流动介质的压缩率, MPa^{-1} ; μ 为黏滞系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; c 为积分常数; t 为 V_1 的压力衰变时间, s。

测试结果表明,胜利油田沙河街组 3.530、3.532、3.572 km 岩心的渗透率分别为 0.018×10^{-3} 、 0.026×10^{-3} 和 $0.011 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,分布在 $0.011 \times 10^{-3} \sim 0.026 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于超低渗储层。

2 页岩气储层敏感性评价

对于超低渗透率的页岩气储层,不能依据 SY/T5358-2010 储层敏感性流动实验评价方法进行敏感性分析。为此,结合页岩气开采特点,利用页岩本身毛管自吸效应强的特征,采用真空饱和方法使实验流体进入到测试岩样中,并通过非稳态的脉冲衰

减法测试岩样对高纯氮气的渗透率变化,以此判断其敏感性类型及强弱。

表 3 胜利油田沙河街组页岩气储层的孔隙度及孔径分布测量结果

Table 3 Results of porosity measurement and aperture distribution of shale gas reservoir in Shahejie Formation of Shengli Oilfield

样品深度/km	体积/mL	孔隙体积/mL	孔隙度/%	孔径范围/nm	平均孔隙直径/nm
3.530	20.5479	0.5262	2.50	1.7~66.3	6.17
3.534	19.9423	0.0868	0.43	1.7~57.4	6.16
3.572	19.9155	0.2102	1.04	1.7~52.0	4.54

减法测试岩样对高纯氮气的渗透率变化,以此判断其敏感性类型及强弱。

2.1 水敏性评价

首先用标准盐水饱和页岩岩心 24 h,用高纯氮气测定岩心的克氏渗透率 k_i ,再分别用次标准盐水和去离子水饱和岩心,测试岩心的渗透率 k_{i1} 和 k_{i2} 。实验结果见图 3。从图 3 看出,胜利油田沙河街组页岩岩心的平均水敏性损害程度为 26.2%,属于中等偏弱。

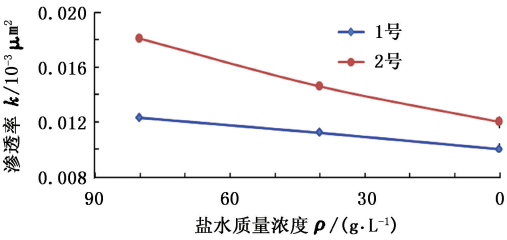


图 3 水敏测试实验曲线

Fig.3 Experimental curves of water sensitivity test

2.2 盐敏性评价

分别测试页岩岩心用标准盐水、3/4 标准盐水、1/2 标准盐水、1/4 标准盐水、1/8 标准盐水和去离子水真空饱和前后的高纯氮气渗透率。实验结果见图 4。从图 4 看出,胜利油田沙河街组 1 号岩心的临界矿化度为 30 g/L,渗透率损害率为 22.5%,2 号

岩心的临界矿化度为 20 g/L, 渗透率损害率为 24.2%, 盐敏损害规律与水敏损害规律基本吻合, 表明该页岩气储层存在中等偏弱的水敏性损害。

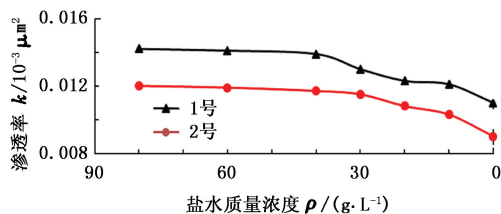


图 4 盐敏测试实验曲线

Fig. 4 Experimental curves of salt sensitivity test

2.3 碱敏性评价

配制不同 pH 值的盐水。首先用标准盐水真空饱和岩心(pH=7), 然后逐级升高 pH 值, 最后一级盐水的 pH 值定为 12, 测定每个 pH 值下岩心的高纯氮气渗透率(图 5)。从图 5 看出, 胜利油田沙河街组 1 号岩样碱敏指数为 23%, 2 号岩心碱敏指数为 15.2%, 均为中等偏弱碱敏, 临界 pH 值为 10。

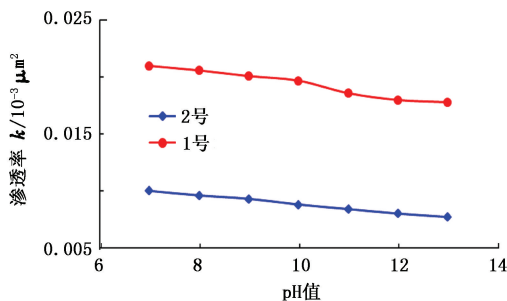


图 5 碱敏测试实验曲线

Fig. 5 Experimental curves of alkali sensitivity test

2.4 应力敏感性评价

在低孔低渗和裂缝性储层中, 应力敏感性损害相对更为严重。应力敏感性评价是在模拟围压条件下考察物性随有效应力的变化关系。本研究在有效应力分别为 2.5、5、7.5、10、20、30、40 MPa 下, 测试了胜利油田沙河街组页岩岩心的应力敏感性损害。页岩岩样对应力的敏感性可用 S_s 表征, S_s 越大, 岩样的应力敏感性越强。其计算式如下:

$$S_s = \left(1 - \left(\frac{k}{k_0} \right)^{1/3} \right) / \lg \frac{\sigma}{\sigma_0}, \quad (2)$$

即

$$\left(\frac{k}{k_0} \right)^{1/3} = 1 - S_s \lg \frac{\sigma}{\sigma_0}. \quad (3)$$

式中, S_s 为应力敏感性系数; σ 和 k 为有效应力 (MPa) 和对应有效应力点的渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$); σ_0 和 k_0 为初始测点的有效应力 (MPa) 和渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)。

实验结果见图 6、7。可以看出, 胜利油田沙河街组页岩岩心受有效应力影响较大, 有效应力小于 10 MPa 时, 渗透率随有效应力的增加下降较快, 有效应力大于 10 MPa 时, 渗透率随有效应力的增加变化较小; 从应力敏感性系数看出, 渗透率的应力敏感程度为中等。

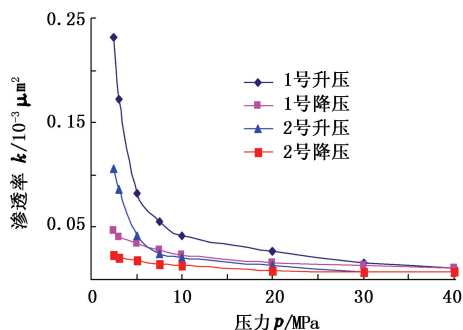


图 6 应力敏感性测试实验曲线

Fig. 6 Experimental curves of stress sensitivity test

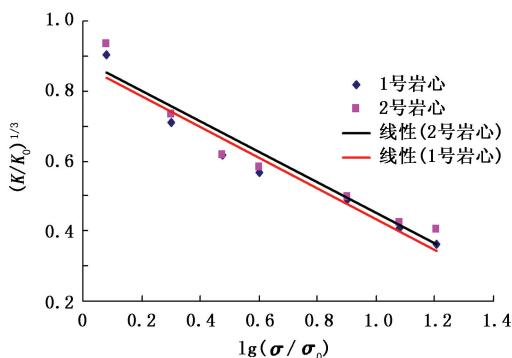


图 7 应力敏感性系数

Fig. 7 Stress sensitivity coefficient

3 页岩气储层保护水基钻完井液

针对胜利油田沙河街组页岩气储层低孔隙度、超低渗透性特征, 以及存在的水敏性、碱敏性、应力敏感性损害, 保护该储层的水基钻完井液性能应满足以下几点:

(1) 合理的密度。钻完井液密度过低不足以平衡页岩气储层孔隙压力, 密度过高会使井底压差增大, 增加钻完井液侵入页岩气储层的量, 加大损害程度。

(2) 较强的抑制性。页岩中的黏土矿物水化产生的微小膨胀也会堵塞微裂隙, 降低储层导流能力, 需加强钻完井液抑制性, 特别是加强防止页岩表面水化, 从根本上降低页岩气储层的水敏性和增强井壁稳定性。

(3) 较低的表面张力。页岩中有机质和黏土矿

物颗粒具有较大的比表面积,外来流体表面张力较低,液体分子能占据更多的有机质和黏土矿物表面,减少甲烷吸附的有效表面积,促进页岩气的解析;同时外来流体的表面张力越低,在微裂隙中形成的毛细管压力越小,减小水锁效应对气体流动的影响。

(4)pH 值不宜过高。页岩气储层存在碱敏性损害,pH 值过高的强碱性钻井液会降低储层的渗透率,钻井液的 pH 值不宜过高,最好不超过 10。

为有效降低液锁损害,研发了具有低表面张力特性和润湿反转特性的微乳型页岩气储层保护剂 YYBH-1;为抑制水敏性损害,开发了高效聚胺类表

面水化抑制剂 BMYZ-1。通过优化其他处理剂和配伍性优化,研制出了页岩气储层水基钻井液体系 YYZJY:3%~4% 膨润土+0.15%~0.3% 高黏羧甲基纤维素 CMC-HV+1%~2% 羧甲基淀粉 CMS+1%~2% 微纳米级可变形弹性封堵防塌剂 WNF-1+0.1%~0.2% YYBH-1+0.4%~0.6% BMYZ-1。

3.1 基本性能及抑制性

YYZJY 体系的基本性能及抑制性评价结果见表 4。可以看出,YYZJY 体系黏度和切力适中,API 和高温高压滤失量均较低,页岩回收率达 99.21%、页岩膨胀率降低达 76.44%,抑制性强。

表 4 YYZJY 体系的基本性能及抑制性评价结果

Table 4 Evaluation results of basic performance and inhibition of YYZJY system

实验条件	表观黏度/ (mPa·s)	塑性黏度/ (mPa·s)	动切力/ Pa	初切力~终切力/Pa	FL _{API} 体积 (mL)~pH	FL _{HHP} / mL	回收率/ %	防膨率/ %
常温下	23	19	4	1.5~4	4.4~9	—	—	—
105℃老化 16 h	19	16	3	1~3	4.8~8.5	14.6	99.21	76.44

注:页岩分散实验采用胜利油田沙河街组页岩岩样,页岩膨胀实验采用安丘二级膨润土。

3.2 润湿性及低表面张力特性

将胜利油田沙河街组页岩岩样磨光片在 2000 号金相砂纸上抛光、去氧化膜,放入 2%~5% 的 NaOH 溶液中煮沸 2~5 min,分别测试用 YYZJY 体系滤液处理前后页岩表面对标准盐水的接触角和 25℃ 下用铂金板法测定实验液的表面张力,结果见图 8、9。

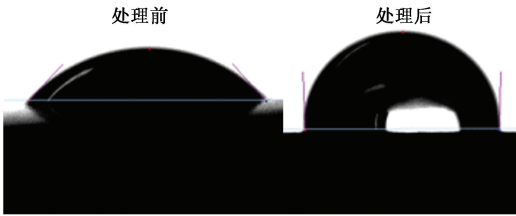


图 8 YYZJY 体系对页岩润湿性的影响
Fig.8 Effect of YYZJY system on wettability of shale

度。从图 9 看出,YYZJY 体系滤液在实验液中浓度增大,实验液表面张力降低,当其浓度达到 4% 后,表面张力降低缓慢,最终趋于平稳值 22.6 mN/m,YYZJY 体系滤液的低表面张力特性有利于降低其毛管压力、促进其返排。

3.3 对页岩渗透率伤害评价

选用胜利油田沙河街组页岩岩心,利用 PDP-200 型气体渗透率测量仪测量岩心饱和前后渗透率的大小,并计算渗透率损害率。采用真空饱和方法使实验流体进入到测试岩样中。从表 5 看出,实验流体对岩心渗透率均有不同程度的损害,清水对岩心渗透率的损害率最高(68.5%),YYZJY 体系滤液最低(41.2%),较清水有显著降低,其保护页岩气储层效果最佳。

表 5 实验流体对岩心渗透率伤害实验结果

Table 5 Results of core permeability damage by different experiment fluids

岩心编号	实验流体	原始气体渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	湿测气体渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	渗透率损害率/%
1	清水	0.0158	0.0108	68.5
2	0.2% YYBH-1 溶液	0.0187	0.0097	52.3
3	YYZJY 体系滤液	0.0162	0.0067	41.2

3.4 对页岩吸附特性影响评价

页岩气的产出经历解析-扩散-渗流的过程,与常规气藏不同,页岩气的产出还需考虑外来流体对解吸过程的影响^[15]。将胜利油田沙河街组页岩岩心饱和不同实验流体,测试了它们对页岩吸附性能的影响。根据等温吸附理论^[16-17],可通过 Langmuir

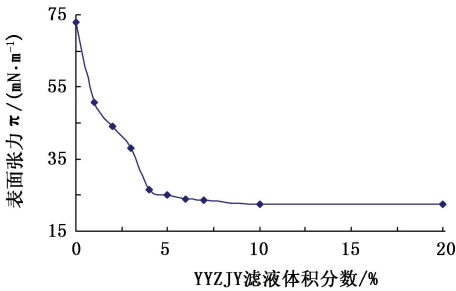


图 9 YYZJY 体系滤液表面张力随浓度的变化
Fig.9 Surface tension change with filtration of YYZJY system in tested liquid

从图 8 看出,YYZJY 体系滤液处理后,胜利油田沙河街组页岩对标准盐水的接触角增大、亲水性减弱,这有利于返排页岩气储层中的水、降低其饱和

参数反映解吸难易程度,Langmuir 体积 V_L 是每克吸附剂的表面覆盖满单分子层时的吸附量,表征煤具有的最大吸附能力,Langmuir 压力 p_L 是解吸速率常数与吸附常数的比值,表示页岩的吸附量为其最大吸附量一半时的压力。因此,吸附等温实验中 V_L 越小 p_L 越大,则越有利于页岩气的解吸。从表 6 和图 10 看出,经 YYZJY 体系滤液处理后的岩样吸附量最小,且 Langmuir 体积 V_L 最小,最有利于页岩气解析,经 YYBH-1 溶液处理后的岩样其次。

表 6 不同实验流体作用后页岩吸附等温线 Langmuir 参数

Table 6 Langmuir parameters of adsorption isotherm after shale absord different fluids		
实验流体	$V_L/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	p_L/MPa
干测	10.204	6.847
清水	7.407	7.504
0.2% YYBH-1 溶液	5.650	6.808
YYZJY 体系滤液	2.890	5.298

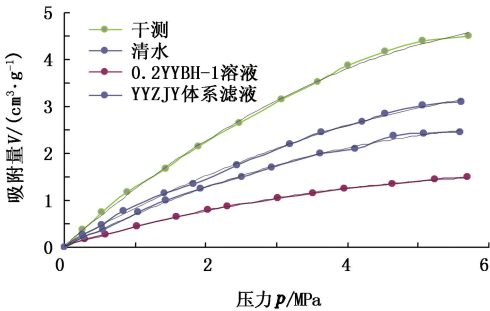


图 10 YYZJY 体系滤液对页岩吸附特性影响
Fig.10 Effect of filtration of YYZJY system on characterization of adsorption of shale

4 结 论

- (1) 胜利油田沙河街组页岩气储层黏土矿物以伊利石为主,发育微裂隙,孔隙度分布在 0.45% ~ 2.50%,平均孔隙直径主要分布在 4.54 ~ 6.17 nm,渗透率小于 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为低孔超低渗储层。
- (2) 胜利油田沙河街组页岩气储层存在中等偏弱水敏性和碱敏性,中等程度应力敏感性损害。
- (3) 研制的页岩气储层水基钻井液可有效抑制水敏性,通过降低滤液表面张力和改变润湿性增强水的返排能力,降低页岩渗透率损害率和促进甲烷气体解吸附,具有综合的页岩气储层保护作用。

参考文献:

[1] JARVIE D, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-

gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007,91(4):475-499.

[2] HILL R J, ZHANG E, KATZ B J, et al. Modeling of gas generation from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin 2007,91(4):501-521.

[3] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010,37(6):641-653.

ZOU Cai-neng, DONG Da-zhong, WANG She-jiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010,37(6):641-653.

[4] 张丽雅, 李艳霞, 李净红, 等. 页岩气成藏条件及中上扬子区志留系页岩气勘探前景分析[J]. 地质科技情报, 2011,30(6):90-93.

ZHANG Li-ya, LI Yan-xia, LI Jing-hong, et al. Accumulation conditions for shale gas and it's future exploration of silurian in the central-upper Yangtze region[J]. Geological Science and Technology Information, 2011,30(6):90-93.

[5] 聂海宽, 张金川, 李玉喜. 四川盆地及其周缘下寒武统页岩气聚集条件[J]. 石油学报, 2011,32(6):959-967.

NIE Hai-kuan, ZHANG Jin-chuan, LI Yu-xi. Accumulation conditions of the Lower Cambrian shale gas in the Sichuan Basin and its periphery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(6):959-967.

[6] 聂海宽, 唐玄, 边瑞康. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报, 2009,30(4):484-491.

NIE Hai-kuan, TANG Xuan, BIAN Rui-kang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009,30(4):484-491.

[7] 张雪芬, 陆现彩, 张林晔, 等. 页岩气的赋存形式研究及其石油地质意义[J]. 地球科学进展, 2010,25(6):597-604.

ZHANG Xue-fen, LU Xian-cai, ZHANG Lin-ye, et al. Occurrence of shale gas and their petroleum geological significance[J]. Advances in Earth Science, 2010,25(6):597-604.

[8] ROSS D J, BUSTIN R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the western Canada sedimentary basin: application of an integrated formation evaluation [J]. AAPG Bulletin, 2008,92(1):87-125.

[9] BUSTIN R M. Gas shale tapped for big play [J]. AAPG Explorer, 2005,26(2):5-7.

- [10] 田华, 张水昌, 柳少波, 等. 压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 419-427.
TIAN Hua, ZHANG Shui-chang, LIU Shao-bo, et al. Determination of organic-rich shale pore features by mercury injection and gas adsorption methods [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 419-427.
- [11] 王玉满, 董大忠, 李建忠, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 551-561.
WANG Yu-man, DONG Da-zhong, LI Jian-zhong, et al. Reservoir characteristics of shale gas in Longmaxi Formation of the Lower Silurian, southern Sichuan [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 551-561.
- [12] 孙海成, 汤达祯. 四川盆地南部构造页岩气储层压裂改造技术[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(增刊1): 34-40.
SUN Hai-cheng, TANG Da-zhen. Shale gas formation fracture stimulation in the south Sichuan Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(s1): 34-40.
- [13] MANIKA P, ARPITA P, MERRICK J, et al. Rock physics of the unconventional [J]. The Leading Edge, 2009: 34-38.
- [14] JAVADPOUR f. Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2009, 48(8): 15-20.
- [15] RAMOS S. The effect of shale composition on the gas sorption potential of organic-rich mud rocks in the Western Canadian sedimentary basin [D]. Vancouver: The University of British Columbia, 2004, 30-34.
- [16] CHALMERS G, BUSTIN R. The organic matter distribution and methane capacity of the Lower Cretaceous strata of Northeastern British Columbia [J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 70(1): 223-239.
- [17] ROSS D J K, BUSTIN R M. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(6): 916-927.

(编辑 刘为清)