



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

于宝石,郑 瑞,计玉冰,等.筠连地区煤储层敏感性及其配伍性分析[J].煤炭科学技术,2021,49(9):193-199. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.027

YU Baoshi,ZHENG Rui,JI Yubing,et al.Analysis of coal reservoir sensitivity and compatibility in Junlian Area[J]. Coal Science and Technology,2021,49(9):193-199. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.027

## 筠连地区煤储层敏感性及其配伍性分析

于宝石<sup>1</sup>,郑 瑞<sup>1</sup>,计玉冰<sup>1</sup>,蒋一欣<sup>2</sup>,呼赞同<sup>1</sup>,李 莹<sup>1</sup>

(1.浙江油田公司勘探开发一体化中心,浙江 杭州 310023;2.浙江油田公司西南采气厂,四川 宜宾 645250)

**摘 要:**储层敏感性,包括速敏、水敏、盐敏、酸敏和应力敏感性(五敏),直接影响钻井、压裂等施工过程中的流体选择和煤层气井产能。为查明筠连地区煤储层敏感性和注入流体配伍性,采集筠连地区二叠系乐平组  $C_{2+3}$  和  $C_{7+8}$  号煤层样品,分析其低温液氮吸附和核磁共振分析孔渗特征。在此基础上,通过岩心流动试验进行五敏性测试,并选择不同井的地层水与压裂液进行配伍性试验研究。研究结果表明:测试样品主体为半暗型煤、中高灰分、镜质体反射率在 2.2% 以上。煤层渗流孔发育较少,孔隙类型以吸附孔为主,微孔和小孔占优势且微孔-小孔与较大孔连通性差。低温液氮吸附测试的煤岩比表面积平均为  $4.55 \text{ m}^2/\text{g}$ ,总孔体积平均值为  $0.0049 \text{ mL/g}$ 。针对 JL-1 和 JL-2 两口井段煤岩样品,测试的速敏伤害率为 20.74% 和 25.26%;水敏伤害率分别为 12.52% 和 19.29%;盐敏损害程度分别为 14.68% 和 19.84%;酸敏损害率为负伤害,分别为 -0.077% 和 -0.057%;应力敏感性损害程度分别为 76.82% 和 47.67%。根据 SY/T 5358—2010《储层敏感性流动实验评价方法》,煤储层呈现弱速敏、弱水敏、弱盐敏性和无酸敏性,但分别表现出了中等偏弱和强应力敏感性。将地层水与压裂液过滤后分别按不同体积比例混合(0:1、1:1、1:2)测其浊度,总体压裂液与地层水配伍性良好,浊度清亮,无沉淀产生。相关成果对查明煤储层敏感性影响因素,指导后续压裂施工提供科学依据和技术支持。

**关键词:**配伍性;储层孔渗特征;煤层气开发;压裂改造;四川盆地

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)09-0193-07

## Analysis of coal reservoir sensitivity and compatibility in Junlian Area

YU Baoshi<sup>1</sup>,ZHENG Rui<sup>1</sup>,JI Yubing<sup>1</sup>,JIANG Yixin<sup>2</sup>,HU Zantong<sup>1</sup>,LI Ying<sup>1</sup>

(1.Integrated exploration and development center of Zhejiang Oilfield Company,Hangzhou 310023,China;

2.Southwest gas production plant of Zhejiang Oilfield Company Ltd,Yibin 645250,China)

**Abstract:** Reservoir sensitivities, including velocity sensitivity, water sensitivity, salt sensitivity, acid sensitivity and stress sensitivity (five sensitivities), directly affect the fluid selection and coalbed methane production in the process of drilling, fracturing and other engineering processes. In order to find out the coal reservoir sensitivity and fluid compatibility, samples of  $C_{2+3}$  and  $C_{7+8}$  coal seams of Permian were collected, and the characteristics of porosity and permeability were analyzed by low temperature liquid nitrogen adsorption and nuclear magnetic resonance. On this basis, five sensitivities test were carried out through core flooding, and the compatibility of formation water and fracturing fluid in different wells was studied. The results showed that the coals are mainly semi dull coal, medium to high ash content, with the vitrinite reflectance being higher than 2.2%. There are few seepage pores in the coal, and the pore types are mainly adsorption pores. Micropores and mesopores are dominant, and the connectivity between micro-meso pores and macropores is poor. The average specific surface area of coal is  $4.55 \text{ m}^2/\text{g}$  and the average total pore volume is  $0.0049 \text{ mL/g}$ . Focusing on samples from JL-1 and JL-2 wells, the velocity sensitive damage ratio is 20.74% and 25.26%, with the water sensitive damage of 12.52% and 19.29%, salt sensitive damage of 14.68% and 19.84%, acid sensitive damage of -0.077% and -0.057%, and stress sensitive damage of 76.82% and 47.67%, respectively. According to the standard of SY/T 5358—2010, the coal reservoir shows weak velocity sensitivity, weak water sensitivity, weak salt sensitivity and no acid sensitivity, while shows medium weak and strong stress sensitivity. After filtering formation water and fracturing fluid, the

收稿日期:2021-01-28;责任编辑:郭 鑫

基金项目:中国石油天然气股份有限公司重大科技专项资助项目(2017E-1401)

作者简介:于宝石(1984—),女,浙江杭州人,高级工程师。E-mail:yubs85@petrochina.com.cn

turbidity was measured by mixing them in different volume proportions (0 : 1, 1 : 1, 1 : 2). The overall compatibility of fracturing fluid and formation water was good, the turbidity was clear, and there was no precipitation. The relevant results provide scientific basis and technical support for identifying the influencing factors of coal reservoir sensitivity and guiding the follow-up fracturing construction.

**Key words:** compatibility; characteristics of reservoir porosity and permeability; coalbed methane development; fracturing; Sichuan Basin

## 0 引言

我国煤层气已进入商业化开发阶段,但是煤层气单井产气量总体偏低<sup>[1]</sup>。煤层沉积之后,在地质演化历史中生烃,物理性质改变,整体比较敏感与脆弱,具有易碎、易受压缩、孔隙度与渗透率低等特点。这些性质控制了煤储层的含气性和物性,进而影响了储层的敏感性。煤层敏感性普遍包括速敏性、水敏性、酸敏性、盐敏性和应力敏感性。目前认为储层的速敏性不仅与流体流速有关,还与流体力场改变有关,此外,流体的盐度等化学性质也是影响速敏性的重要因素<sup>[2-3]</sup>。水敏性试验主要是通过研究煤储层中如蒙脱石等水敏矿物来实现<sup>[4-6]</sup>,其损害产生的原因有2个方面:一是膨胀性黏土遇水膨胀,堵塞了储层孔隙通道;二是非膨胀性黏土遇水产生分散脱落,释放微粒,堵塞孔隙通道。水敏损害程度与注入水盐度以及盐度递减速率有关,煤岩在不含水敏性黏土矿物时为无或弱水敏<sup>[7-9]</sup>。酸敏性是指酸液与煤储层中矿物发生反应的程度,较低渗透率的岩心酸敏损害程度一般比较高,含铁矿物酸化后铁沉淀较为严重,最易发生酸敏性的矿物是含铁较高的绿泥石<sup>[10-12]</sup>。盐敏性是由于注入矿化度不同的流体,造成地层水盐度急剧变化,由于黏土矿物对不同类型和强度的离子产生敏感,破坏了黏土矿物表面与流体的离子平衡,引起黏土膨胀,分散或运移,结构稳定性减弱<sup>[13-15]</sup>。在流体流动状态下,对煤储层的渗透率产生不同程度的破坏。煤储层应力敏感性是会对煤层气井产能的产生影响的一个关键地质因素,煤储层渗透率对应力的响应极为敏感,并且随有效应力的增加呈现负指数函数规律降低,下降趋势呈现由快变慢,最后趋于稳定<sup>[16]</sup>。在碱敏过程中发生碱液对裂缝的侵蚀,加剧了应力敏感程度。破碎的裂缝和在裂缝中加入支撑剂是产生应力敏感性的主要原因,选择合适的支撑剂是降低应力敏感程度的关键<sup>[17]</sup>。

煤层损害因素研究方面,对于前期钻完井作业中所涉及的钻完井液等流体造成的煤层损害比较重视,而对于煤层气井的压裂液与地层水之间的不配伍引起的煤层损害问题重视不够<sup>[18]</sup>。若压裂液与地层水之间的配伍性差,混合后易结垢造成储层堵

塞,会降低煤层渗透率,对储层造成一定的损害,加剧后续工作的处理难度<sup>[19-21]</sup>。这种不配伍造成的煤层损害会严重降低煤层气井的产能。

目前敏感性试验内容大多集中在应力敏感和钻井液、压裂液对煤层渗透率的伤害上,对其他敏感性研究鲜有报道。基于此,通过对筠连地区煤储层五敏性即速敏性、水敏性、酸敏性、盐敏性和应力敏感性以及流体配伍性试验测试,分析储层压裂改造、下泵投产与排采设计优化过程中的储层影响因素,查明储层敏感性的强弱及影响因素,以期对现场技术支持,提高煤层气开采效率。

## 1 区域地质背景

筠连县地形整体南高北低,是四川盆地向云贵高原过渡地带。沐爱地区位于四川省筠连县东部,地表出露最新的地层为第四系全新统,最老地层为志留系中统韩家店组,除缺失志留系上统、泥盆系及石炭系、三叠系中上统、侏罗系、白垩系、第四系和新近系之外,其他地层皆有出露。沐爱地区构造上位于东西向云台寺断层、NE—SW向的武德向斜、老牌坊背斜、铁厂沟向斜与沐爱断层的交汇区(图1)。

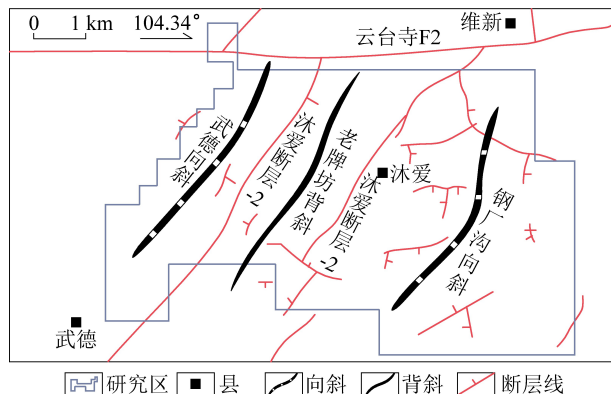


图1 筠连沐爱区域构造图

Fig.1 Regional structural distribution of Junlian Muai Area

二叠系上统乐平组为海陆交互相或陆相含煤沉积,与下伏峨眉山玄武岩组呈平行不整合接触。乐平组上段平均厚 45.27 m,发育 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>5</sub>、C<sub>7</sub>、C<sub>8</sub>、C<sub>9</sub>号煤层,主力煤层为 C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>7</sub>、C<sub>8</sub>。C<sub>2</sub>和 C<sub>3</sub>煤层分布较稳定,煤层间距一般变化不大。C<sub>7</sub>和 C<sub>8</sub>煤层之间的层间距变化较大,变化规律与其间的岩性组合密切相关,当其间岩性主要为砂岩时,则层间距

随砂岩厚度增大而增加,而随泥岩含量增多而减小。 $C_7$ 煤层及其顶底板中常见团块状黄铁矿; $C_8$ 煤中黄铁矿主要分布在煤的上分层,特别是顶部分层中,以线理状和小透镜状为主。

2 煤岩煤质特征

乐平组煤层的镜质体反射率  $R_o$  为 2.2% ~ 3.2%,该煤为高煤阶煤(无烟煤)。煤质以半暗型煤为主, $C_{2+3}$ 煤层镜质组体积分数为 43.5% ~ 64.2%,平

均体积分数为 54.6%,惰质组体积分数为 8.9% ~ 56.5%,平均体积分数为 27.5%。 $C_{7+8}$ 煤层镜质组体积分数为 44.4% ~ 64.6%,平均体积分数为 52.25%;惰质组体积分数为 35.4% ~ 69.9%,平均体积分数为 52.2%。 $C_{7+8}$ 和  $C_{2+3}$ 煤层镜质组体积分数均超过 50%, $C_{7+8}$ 较  $C_{2+3}$ 镜质组体积分数略高,利于气体生成和割理发育(表 1)。由表 1 知  $C_{7+8}$ 和  $C_{2+3}$ 煤为中高灰分煤。该处的煤层密度偏大, $C_{2+3}$ 煤层的密度为 1.61 g/cm<sup>3</sup>, $C_{7+8}$ 煤层的密度为 1.68 g/cm<sup>3</sup>。

表 1 乐平组主要煤层显微组分和灰分特征

Table 1 Maceral composition and ash yield of main coal from

煤层	宏观煤岩类型	有机显微组分体积分数/%		密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	灰分/%
		镜质组	惰质组		
$C_{2+3}$	半暗煤	43.5~64.2	8.9~56.5	1.61	15.62~24.44
		54.6	27.5		21.18
$C_{7+8}$	半暗煤	44.4~64.6	35.4~69.9	1.68	16.91~26.65
		52.25	52.2		21.76

注:数据格式 $\frac{\text{最小} \sim \text{最大}}{\text{平均}}$ 。

3 储层孔渗特征

采用低温液氮吸附法表征 JL-1 井和 JL-2 井煤样的孔隙特征(表 2),在此以 JL-2 井为例进行阐述。由表 2 数据可知,7 组样品的 BET 比表面积为 0.56~11.16 m<sup>2</sup>/g,平均为 4.55 m<sup>2</sup>/g。BJH 总孔体积为 0.001 5~0.012 mL/g,平均值为 0.004 9 mL/g。孔直径为 4.35~12.31 nm,平均为 7.50 nm。对于不同的井,其  $C_{2+3}$ 和  $C_{7+8}$ 号煤层的孔隙分布差别不大。

样品的核磁共振测试结果见表 2,结果表明:在饱和水状态下,煤岩样品中核磁共振弛豫时间小于 10 ms 的孔隙占总孔隙体积的 98% 以上,表明煤储

层孔隙直径总体较小,大孔径孔隙比例极低。煤样的  $T_2$ 谱主峰,基本位于低弛豫时间(0.01~10.00 ms)。 $T_2$ 谱总体表现形态为:1 个主峰和 1 个很小的次峰,指示煤样中发育极少量较大的孔隙或裂隙,以微孔和小孔占优势,且 2 个峰之间不连续,说明微孔-小孔与较大孔隙之间的连通性较差。

基于核磁(水测)孔隙度的结果,可进一步将孔隙度划分为可动流体孔隙度和束缚流体孔隙度。研究区煤岩的可动流体孔隙占比很小,仅为 6.45%~10.536%;束缚流体孔隙占 89.464%~93.55%,远远高于可动流体孔隙,同样表明煤岩孔隙类型以吸附孔为主,渗流孔发育程度很差。

表 2 低温液氮吸附和核磁共振测试结果

Table 2 Results of low temperature liquid nitrogen adsorption and nuclear magnetic resonance test

井号	井段/m	煤层	BET 比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	BJH 总孔容/ (cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	平均孔 直径/nm	核磁共振孔隙度/%	
						可动流体	束缚流体
JL-1	494.00—494.35	$C_{2+3}$	0.99	0.001 8	8.73	9.819	90.181
JL-1	494.85—495.15	$C_{2+3}$	6.38	0.006 8	5.33	9.445	90.555
JL-1	496.95—497.30	$C_{7+8}$	0.72	0.001 6	10.06	9.953	90.047
JL-1	504.35—504.65	$C_{7+8}$	10.55	0.012 0	5.53	10.536	89.464
JL-2	465.10—465.40	$C_{2+3}$	0.56	0.001 5	12.31	6.450	93.550
JL-2	471.60—471.90	$C_{2+3}$	1.46	0.001 6	6.16	10.515	89.485
JL-2	507.05—507.40	$C_{7+8}$	11.16	0.009 1	4.35	9.834	90.166
平均			4.55	0.004 9	7.50	9.510	90.490

4 五敏性分析及煤层伤害机理

岩心流动试验是评价储层应力敏感性的常规方

法,是认识和评价煤层和煤层损害的重要手段。试验涉及的储层敏感性相关研究参照 SY/T 5358—2010《储层敏感性流动实验评价方法》执行,在煤储



层中,使用盐水作为试验流体进行岩心流动试验以对储层敏感性做出评价。

#### 4.1 速敏性

速敏性评价试验的目的在于了解地层渗透率的变化与地层中的流体流速变化的关系,并找出其临界流速或临界流量,为室内及现场选择合适的流速提供依据。在 20 ℃ 条件下,配置质量分数为 8% 的标准盐水 ( $\text{NaCl} : \text{CaCl}_2 : \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 7.0 : 0.6 : 0.4$ , 质量比), 将完全饱和的岩石装入岩心夹持器中,加 2.0 MPa 围压;按照流量 0.10、0.25、0.50、0.75 和  $1.00 \text{ cm}^3/\text{min}$  依次进行测定;按照要求测量压力、流量、时间及温度,待流动状态趋于稳定后,记录检测数据;在一定流速及不间断流动的情况下,迅速切换流体注入方向,通过岩心正反向渗透率的变化来研究流动对岩心渗透率的影响程度。

目标储层为低孔、低渗储层,通过岩心取样发现其岩心非常致密,在较高的驱替压力下流体流动依然十分缓慢,不足以引起由于地层微粒运移而造成的堵塞或者形成“桥堵”,因此,基本不具备发生速敏伤害的条件。

速敏损害程度评价指标为:  $\leq 5\%$  为无损害程度,  $5\% \sim < 30\%$  为弱速敏性,  $30\% \sim < 50\%$  中等偏弱速敏性,  $50\% \sim < 70\%$  为中等偏强速敏性,  $\geq 70\%$  表现为强速敏性。由试验结果可知, JL-1 井段和 JL-2 井段岩心伤害率分别为 20.74% 和 25.26%, 临界流速分别为  $0.75 \text{ cm}^3/\text{min}$  和  $0.50 \text{ cm}^3/\text{min}$ , 2 个井段岩心均表现出弱速敏性(图 2)。

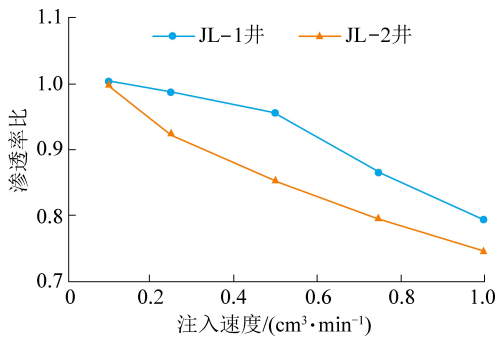


图2 JL-1和JL-2岩心速敏曲线

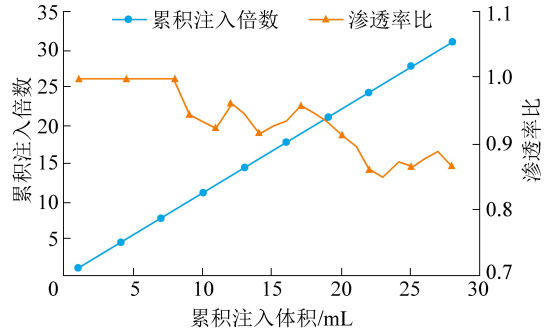
Fig.2 Core velocity sensitivity curve of JL-1 and JL-2

#### 4.2 水敏性测试

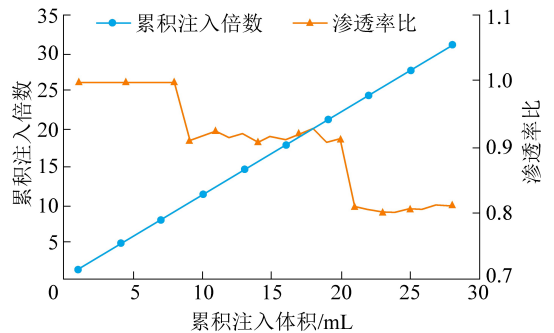
配制质量分数为 8% 的标准盐水,岩样抽空饱和标准盐水;将饱和标准盐水岩样放入岩心夹持器中,加 2.0 MPa 围压;测定岩样渗透率;用 1/2 初始流体矿化度盐水驱替 10~15 倍岩样孔隙体积,停止驱替,保持围压和温度不变(12 h 以上),再用 1/2 初始流体矿化度盐水测定岩样的渗透率;采用同样方法进行蒸馏水驱替试验,并测定蒸馏水条件下岩

样渗透率。

水敏损害程度评价指标为:  $\leq 5\%$  为无损害程度,  $5\% \sim < 30\%$  为弱水敏性,  $30\% \sim < 50\%$  为中等偏弱水敏性,  $50\% \sim < 70\%$  为中等偏强水敏性,  $70\% \sim < 90\%$  为强水敏性,  $\geq 90\%$  表现为极强水敏性。由试验结果可知, JL-1 井段和 JL-2 井段岩心均表现出弱水敏性(图 3)。经过由高矿化度到低矿化度的地层水依顺序注入岩心后测试,伤害率分别为 12.52% 和 19.29%(图 3)。



(a) JL-1岩心水敏曲线



(b) JL-2岩心水敏曲线

图3 JL-1和JL-2岩心水敏曲线

Fig.3 Core water sensitivity curve of JL-1 and JL-2

#### 4.3 盐敏性测试

配制质量分数为 8% 的标准盐水,岩样抽空饱和标准盐水;将饱和标准盐水后的岩样放入岩心夹持器中,加 2.0 MPa 围压;测定岩样渗透率;用体积分数 7% 标准盐水驱替岩样 10~15 倍孔隙体积,停止驱替,保持围压和温度不变(12 h 以上),再用体积分数 7% 标准盐水测定岩样的渗透率;采用同样方法进行 6%~0 的驱替试验,并分别测定岩样渗透率;依据试验结果,绘制渗透率随盐度的变化曲线,确定出临界盐度,即岩心在注入液盐度下降到某一值时,岩心渗透率明显下降,此时注入液盐度叫做临界盐度。

盐敏损害程度评价指标为:  $\leq 5\%$  为无损害程度,  $5\% \sim < 30\%$  为弱盐敏性,  $30\% \sim < 50\%$  为中等偏弱盐敏性,  $50\% \sim < 70\%$  为中等偏强盐敏性,  $70\% \sim < 90\%$  为强盐敏性,  $\geq 90\%$  表现为极强盐敏性。由试

验结果可知,JL-1井段和JL-2井段岩心渗透率最大变化率分别为14.68%和19.84%,2个井段岩心渗透率均为弱盐敏(图4)。

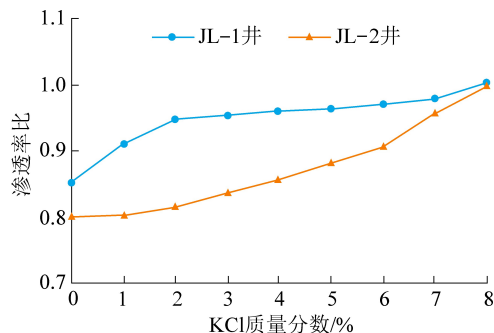


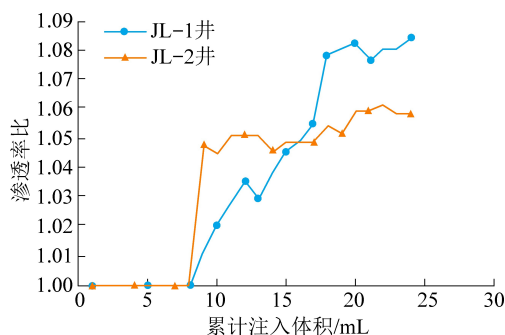
图4 JL-1和JL-2盐敏性曲线

Fig.4 Salt sensitivity curve of JL-1 and JL-2

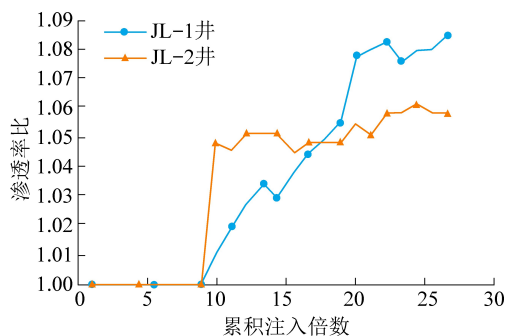
#### 4.4 酸敏性测试

岩样抽空饱和模拟地层水,将饱和好的地层岩样装入岩心夹持器中,测定岩心渗透率。反向注入1倍孔隙体积的体积分数为15%的盐酸,停止驱替,充分反应2 h,正向注入模拟地层水,测定渗透率。

酸敏损害程度评价指标为:  $\leq 5\%$  为无损害程度,  $5\% \sim 30\%$  为弱酸敏性,  $30\% \sim 50\%$  为中等偏弱酸敏性,  $50\% \sim 70\%$  为中等偏强酸敏性,  $> 70\%$  为强酸敏性。由试验结果可知,JL-1井段和JL-2井段岩心酸敏损害率均为负伤害,分别是 $-0.077\%$ 和 $-0.057\%$ ,说明酸液的正向作用大于负向作用,且2个井段均没有酸敏(图5)。



(a) JL-1岩心



(b) JL-2岩心

图5 JL-1和JL-2岩心酸敏曲线

Fig.5 Rock heartbreak sensitivity curve of JL-1 and JL-2

#### 4.5 应力敏感性测试

试验流体为8%的氯化钾溶液配置8%的氯化钾溶液。采用标准盐水抽空饱和岩样,浸泡24 h;将饱和好的地层岩样装入岩心夹持器中,保持进口压力不变;以初始净压力5.5 MPa为初始围压,慢慢增加围压至最大值,在每个设定的围压点上保持30 min以上,在该期间按照要求测定每个点的压力、流量、时间及温度,待流动状态趋于稳定后,记录检测数据;加载到最大围压(净压力)后,按照试验规定的净压力间隔,依次缓慢降低净压力至原始静压力点(在每个设定的净压力点上应保持1 h以上),再次按照要求测定每个点的压力、流量、时间及温度,待流动状态趋于稳定后,记录检测数据。

应力敏感性损害程度评价指标为:  $\leq 5\%$  为无损害程度,  $5\% \sim < 30\%$  为弱应力敏感性,  $30\% \sim < 50\%$  为中等偏弱应力敏感性,  $50\% \sim < 70\%$  为中等偏强应力敏感性,  $\geq 70\%$  为强应力敏感性。试验结果表明,JL-1井段和JL-2井段最大岩心伤害损害率分别为76.82%和47.67%,损害程度分别为强和中等偏弱(图6)。

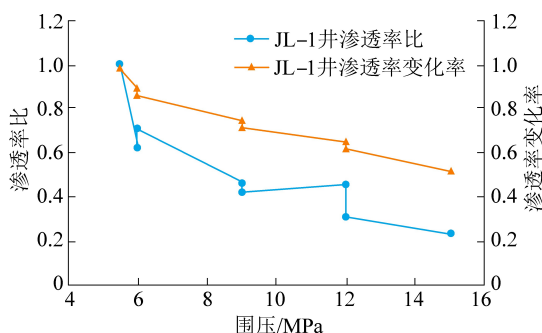


图6 JL-1岩心应力敏感性曲线

Fig.6 Core stress sensitivity curve of JL-1

#### 4.6 储层敏感性综合分析

综上所述,JL-1的551.2—557.5井段和JL-2的493.6—504.6井段岩心的敏感性试验测试分析结果见表3。

表3 JL-1和JL-2岩心敏感性评价

Table 3 Core sensitivity evaluation of JL-1 and JL-2

敏感性	敏感程度
速敏	弱速敏,伤害程度均低于26%
水敏	弱水敏,伤害均低于20%
盐敏	无盐敏
酸敏	无酸敏,负伤害
应力敏感	JL-1为强,JL-2为中等偏弱

由五敏试验结果可知,煤层主要伤害因素是应力敏感,在应力较高区域产气量较低。对比普遍高产的YSL103平台和普遍低产的YSL104平台,2个

平台位置相邻,测井参数相近,但 YSL104 井压裂施工过程中裂缝延伸压力及停泵压力都较高,其渗透率的应力敏感性更强,导致该井产量偏低。

## 5 配伍性分析

对于配伍性分析主要针对煤层水和压裂液之间的配伍。当注入水和不配伍的地层水相遇时,使原有的地层水和煤岩之间的离子化学平衡被破坏,注入水和地层水之间随注入水不断介入将逐渐建立一个新的化学平衡。在打破旧的平衡建立新的平衡过程中,只要流体中遇到 2 种以上不配伍的水存在或在流动过程中随压力和温度或流体的化学组分不平衡,都存在结垢的可能,不可避免的造成对储层的一定损害。

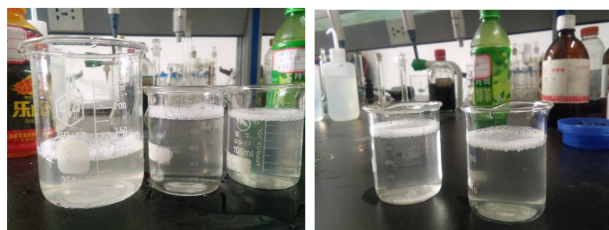
配伍性研究方法为常温及地层温度下注入水的自身稳定性,反映了注入水在管柱及储层中结垢状况。在地层温度(30℃)的条件下,通过测定水中形成的沉淀对光的吸收效果,即结垢趋势。注入水与地层流体不配伍主要表现在两者按不同比例混合后是否产生固相物质。将地层水与注入水过滤后分别按不同体积比例混合(0:1、1:1、1:2)测其浊度。压裂液配方为煤粉分散剂质量浓度 0.5%+助排剂质量浓度 0.5%+杀菌剂质量浓度 0.05%+质量浓度 1% KCl,地层水本身浊度较大,经过过滤后外观清亮。

浊度的测量方法:采用国际标准 ISO 7027—1984《水质—浊度的测定》,主要方法有 2 种:分光光度法和目视比色法。试验结果表明,施工过程中压裂液与各井地层流体的配伍性良好,无沉淀产生(表 4,图 7)。

表 4 压裂液配伍性试验结果

Table 4 Experimental results of fracturing fluid compatibility

井号	压裂液:地层水(质量比)	混合后现象	浊度
209-5	0:1	清亮	34
	1:1	清亮	41
	1:2	清亮	43
205-2	0:1	清亮	23
	1:1	清亮	27
	1:2	清亮	33
205-4	0:1	清亮	37
	1:1	清亮	40
	1:2	清亮	43
204-2	0:1	清亮	42
	1:1	清亮	48
	1:2	清亮	50
204-1	0:1	清亮	22
	1:1	清亮	26
	1:2	清亮	31



(a) 209-5, 205-2, 205-4 井按压裂液:地层水 0:1 配比后情况 (b) 204-2, 204-1 井按压裂液:地层水 0:1 配比后情况

图 7 配伍性试验

Fig.7 Experiment of compatibility test

## 6 结 论

1) 沐爱区块乐平组煤镜质体反射率  $R_o$  为在 2.2%~3.2%,该煤为高煤阶煤(无烟煤);煤质以半暗型煤为主,中高灰分、密度偏大。BET 比表面积平均为  $4.55 \text{ m}^2/\text{g}$ , BJH 总孔体积平均值为  $0.0049 \text{ mL/g}$ 。煤储层孔径总体较小,微孔和小孔占 90% 以上,孔隙连通性较差,可动孔隙在 10% 以下。

2) JL-1 和 JL-2 井岩心速敏伤害率分别为 20.74% 和 25.26%;水敏伤害率分别为 12.52% 和 19.29%;盐敏损害程度分别为 14.68% 和 19.84%;酸敏损害率分别为 -0.077% 和 -0.057%;应力敏感性损害程度分别为 76.82% 和 47.67%,均表现为弱速敏性、弱水敏性和弱盐敏性,应力敏感性分别表现为强和中等偏弱,基本无酸敏。煤层伤害的主要因素应力敏感。

3) 通过现场压裂液与地层水混合进行配伍性实验,压裂液与地层水按不同比例混合后浊度均表现为清亮,无沉淀产生,证明压裂液与地层流体的均配伍性良好。为煤层气开展规模化压裂施工奠定了基础。

### 参考文献(References):

- [1] 罗平亚.关于大幅度提高我国煤层气井单井产量的探讨[J].天然气工业,2013,33(6):1-6.  
LUO Pingya. A discussion on how to significantly improve the single-well productivity of CBM gas wells in China [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(6): 1-6.
- [2] 任大忠,张 晖,周 然,等.塔里木盆地克深地区巴什基奇克组致密砂岩储层敏感性研究[J].岩性油气藏,2018,30(6):27-36.  
REN Dazhong, ZHANG Hui, ZHOU Ran, et al. Sensitivity of tight sandstone reservoir of Bashijiqike Formation in Keshen area, Tarim Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(6): 27-36.
- [3] 李永寿,伊向艺,卢 渊,等.煤层气测速敏实验新方法探索[J].石油地质与工程,2010,24(5):132-133,136.  
LI Yongshou, YI Xiangyi, LU Yuan, et al. Exploration of a new method of coal bed methane velocity sensitivity experiment [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2010, 24(5): 132-133, 136.



- troleum Geology and Engineering, 2010, 24(5): 132-133, 136.
- [4] 耿学礼, 吴智文, 黄毓祥, 等. 低渗储层新型防水锁剂的研究及应用[J]. 断块油气田, 2019, 26(4): 537-540.  
GENG Xueli, WU Zhiwen, HUANG Yuxiang, *et al.* Research and application of new waterproof locking agent for low permeability reservoir[J]. Fault - Block Oil & Gas Field, 2019, 26(4): 537-540.
  - [5] 巩泽文. 贵州对江南井田煤储层黏土矿物特征及敏感性评价[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(29): 39-45.  
GONG Zewen. Clay mineral characteristics and sensitivity evaluation of coal reservoirs in Duijiangnan Mine Field, Guizhou province[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(29): 39-45.
  - [6] 李克向. 保护油气层钻井完井技术[M]. 黑龙江大庆, 石油工业出版社, 1993.
  - [7] 汪伟英, 唐周怀, 吕迎红, 等. 储层岩石水敏性影响因素研究[J]. 江汉石油学院学报, 2001(2): 49-50.  
WANG Weiyang, TANG Zhouhuai, LYU Yinghong, *et al.* Influencing factors of water sensitivity in reservoir rock [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2001(2): 49-50.
  - [8] 郑军, 贺承祖, 冯文光, 等. 煤气储层应力敏感、速敏和水敏性研究[J]. 钻井液与完井液, 2006(4): 77-78, 94.  
ZHENG Jun, HE Chengzu, FENG Wenguang, *et al.* Sensitivity of stress, velocity and water of coal gas reservoir [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006(4): 77-78, 94.
  - [9] 田宇, 郭庆, 李燕, 等. 西峰油田长 8 储层的酸敏性评价[J]. 断块油气田, 2009, 16(4): 108-110.  
TIAN Yu, GUO Qing, LI Yan, *et al.* Acid sensitivity evaluation at Chang 8 reservoir in Xifeng Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(4): 108-110.
  - [10] 贾然, 邓南, 徐德月, 等. 高尚堡油田 G5 断块储集层敏感性评价[J]. 录井工程, 2019, 30(3): 154-159.  
JIA Ran, DENG Nan, XU Deyue, *et al.* Reservoir sensitivity evaluation of G 5 fault block in Gaoshangpu Oilfield [J]. Mud Logging Engineering, 2019, 30(3): 154-159.
  - [11] 卢欢, 王清斌, 杜晓峰, 等. 低渗透储层类型划分及储层敏感性主控因素: 以渤海海域古近系为例[J]. 石油学报, 2019, 40(11): 1331-1345, 1367.  
LU Huan, WANG Qingbin, DU Xiaofeng, *et al.* Low - permeability reservoir types classification and reservoir sensitivity controlling factors: a case study of Paleogene in Bohai Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(11): 1331-1345, 1367.
  - [12] 许诗婧. 致密砂岩油藏增产过程中储层伤害机理[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(23): 92-99.  
XU Shijing. Reservoir damage mechanism during stimulation of tight sandstone reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(23): 92-99.
  - [13] 邵东波, 陈建文. 鄂尔多斯盆地致密砂岩储层敏感性特征及其控制因素: 以新安边地区延长组长 6 储层为例[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017, 32(3): 55-60, 67.  
SHAO Dongbo, CHEN Jianwen. Sensitivity of tight sandstone reservoir in ordos basin and its controlling factor: taking the Chang 6 Reservoir of Yanchang Formation in Xin'anbian Area as example [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2017, 32(3): 55-60, 67.
  - [14] 徐会林, 王新海, 魏少波, 陈岩, 陈鹏. 四川盆地高石梯—磨溪区块震旦系储层敏感性实验评价[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(2): 13-17, 25.  
XU Huilin, WANG Xinhai, WEI Shaobo, *et al.* Evaluation of reservoir sensitivity of Sinian in Gaoshiti-Moxi block, Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(2): 13-17, 25.
  - [15] 李凯, 张浩, 邵振滨, 等. 川西南筇竹寺组页岩盐敏性实验评价新方法[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(29): 121-123.  
LI Kai, ZHANG Hao, SHAO Zhenbin, *et al.* A New Experimental method to evaluate salt sensitivity of shale from Qiongzhusi Formation[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(29): 121-123.
  - [16] 杨延辉, 孟召平, 张纪星. 煤储层应力敏感性试验及其评价新方法[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(1): 38-42, 46.  
YANG Yanhui, MENG Zhaoping, ZHANG Jixing. Research on stress sensitivity of coal reservoir and a new method for its evaluation [J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(1): 38-42, 46.
  - [17] 康毅力, 白佳佳, 李相臣, 等. 水-岩作用对富有机质页岩应力敏感性的影响: 以渝东南地区龙马溪组页岩为例[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(5): 54-62.  
KANG Yili, BAI Jiajia, LI Xiangchen, *et al.* Influence of water-rock interaction on stress sensitivity of organic-rich shales: a case study from Longmaxi formation in the southeast area of Chongqing [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(5): 54-62.
  - [18] 甘秀玉, 刘书杰, 张滨海, 等. 寿阳区块煤层气井地层水配伍性及对煤层损害研究[J]. 长江大学学报(自科科学), 2017, 14(21): 24-26, 35.  
GAN Xiuyu, LIU Shujie, ZHANG Binhai, *et al.* Research on formation water compatibility of CBM Well and damage to CM in Shouyang Block [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2017, 14(21): 24-26, 35.
  - [19] 段泽辉, 李蔚萍, 孟文波, 等. 陵水 17-2 气田深水测试液类型选择[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(6): 39-42, 105.  
DUAN Zehui, LI Weiping, MENG Wenbo, *et al.* Analysis of causes of reservoir damage in Lingshui 17-2 Gas Field and Selection of test fluid for reservoir protection in deep water area [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2015, 32(6): 39-42, 105.
  - [20] 刘清云, 黄卫红, 刘磊, 等. 克拉玛依油田注水储层伤害与水质问题分析[J]. 地质科技情报, 2017, 36(4): 210-214.  
LIU Qingyun, HUANG Weihong, LIU Lei, *et al.* Reservoir damage and quality index of injected water in Karamay Oilfield [J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(4): 210-214.
  - [21] 付文耀, 彭冲, 张汝权, 等. HC 油田 N138 区注入水配伍性研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2019, 16(10): 39-45, 51.  
FU Wenyao, PENG Chong, ZHANG Ruquan, *et al.* Study on injection water compatibility in area N138 of HC Oilfield [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2019, 16(10): 39-45, 51.