

非常规天然气

流体损害对页岩储层应力敏感性的影响

何金钢¹, 康毅力¹, 游利军¹, 程秋菊²

(1. 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;

2. 中国石化华北分公司, 河南 郑州 450006)

摘要:非常规油气资源正在发挥越来越重要的作用,页岩气以其巨大的资源量及在美国开发的成功事实,促使其成为当前研究的热点。页岩储层富含粘土矿物,流体敏感性损害和应力敏感性损害是损害泥页岩储层的2种重要因素,两者耦合将极大地降低储层的渗透率,制约着开发页岩气工程技术的效果。以泥页岩储层的流体敏感性实验为基础,开展了应力敏感性评价研究,对比流体损害前后的应力敏感性差异。结果表明,储层为中等偏强的水敏性、强的碱敏性和中等偏强的酸敏性;流体损害后的储层应力敏感性系数较损害前增大30%,为强应力敏感程度。粘土矿物微粒分散运移、水化膨胀、流体润滑作用导致岩石强度降低,并使渗流通道更易变窄,加剧了应力敏感性损害。因此,工程作业中减少不配伍流体的侵入对页岩气储层的保护和开发具有特殊意义。

关键词:泥页岩;流体敏感性;应力敏感性;粘土矿物;裂缝

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

文章编号:1672-1926(2011)05-0915-05

引用格式:何金钢,康毅力,游利军,等. 流体损害对页岩储层应力敏感性的影响[J]. 天然气地球科学,2011,22(5):915-919.

0 引言

随着天然气需求的增长以及常规天然气资源的衰竭,非常规天然气资源已经进入人们的视野,其中页岩气被誉为是最有潜力的非常规天然气资源之一。目前页岩气的开发主要集中在以美国为主的北美地区,我国页岩气藏的勘探开发也具有良好的前景^[1-5]。根据致密砂岩气藏开发的经验,Vairogs^[6]和 Thomas 等^[7]证实低渗透砂岩应力敏感性损害能导致渗透率降低90%,产量降低50%。康毅力等^[8-9]指出,裂缝岩样的渗透率应力敏感程度远大于基块。工作液滤液侵入导致近井地带的渗透率发生变化,储层产生流体敏感性损害,进而引起岩石物理化学性质发生改变,影响应力敏感性^[10-12]。与致密砂岩储层相比,页岩气储层的流体敏感性矿物和微裂缝更发育,使得页岩气储层敏感性较致密砂岩储

层更强。

页岩气储层具有裂缝系统才能建立经济产能,因此分层压裂技术被广泛地应用于页岩气储层的开发过程中^[13-15],因此评价裂缝岩样的意义大于基块岩样。在钻井、完井及增产措施等作业过程中,流体敏感性损害均发生于应力敏感性损害之前或同步发生,2种敏感性的耦合将使储层综合损害更严重,甚至不能产生工业气流。由于我国页岩气的开发尚处于试验探索阶段,以往的研究尚未涉及泥页岩储层的敏感性研究。因此,本文选取鄂尔多斯盆地富县地区黑色页岩和泥质粉砂岩为研究对象,首先开展人造裂缝岩样的水敏、碱敏和酸敏性实验评价,然后进行流体敏感性损害前、后的应力敏感性实验对比研究,以评价裂缝岩样应力敏感性对工作液侵入损害的响应,为钻井完井和开发过程中有效地保护页岩气层提供基础参数。

收稿日期:2011-05-06 修回日期:2011-07-15.

基金项目:国家“973”计划项目(编号:2010CB226705)资助.

作者简介:何金钢(1986-),男,黑龙江大庆人,硕士研究生,主要从事非常规气藏开发、储层保护理论与技术研究. E-mail: hkg0501010638@sina.com.

通讯作者:康毅力. E-mail: cwetkyl@vip.sina.com.

1 样品及方法

1.1 样品选取

实验岩样为选自鄂尔多斯盆地东南部陕北富县勘探区的黑色页岩和泥质粉砂岩。渗透率为 $(0.008\ 48\sim1.38)\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,孔隙度平均为3.16%。孔隙以剩余粒间孔为主,孔隙结构为微细孔喉型,岩石孔喉半径小,多为扁平片状,具有高毛管压力,天然裂缝发育,面孔率小。粒间主要为粘土胶结,粘土通常以薄膜形式大量附着于孔隙壁面。XRD分析表明,粒径 $<10\ \mu\text{m}$,粘土矿物含量为40.33%,其中伊利石占57%、绿泥石占28.4%,伊/蒙间层矿物占10.42%。粘土矿物广泛分布于粉砂的粒表和粒间,伊利石以片状产出,广泛充填于粒间孔;绿泥石以绒球状附着于粒表和粒间;伊/蒙间层矿物以蜂窝状产出。

1.2 实验方法

1.2.1 流体敏感性评价方法

使用裂缝岩样进行流体敏感性实验评价。岩样中裂缝为人工造缝,是平行于岩样轴向的单条裂缝,缝内无充填物。岩样在3MPa有效应力下测量基准渗透率,然后依据《储层敏感性流动实验评价方法》(SY/T5358-2002)进行速敏性、水敏性、碱敏性和酸敏性评价实验。

1.2.2 流体损害后的应力敏感性实验方法

将流体敏感性评价后的岩样用N₂以0.8倍临界流速进行驱替至出口处完全无水相析出。然后采用SCMS-II型岩心多参数测量系统,有效应力点选定为3~30MPa,初始间隔为2MPa,之后逐渐放大,测量加载渗透率。采用应力敏感性系数^[16-17]来评价

岩石的应力敏感程度。应力敏感性系数S_s:

$$S_s = \frac{\left[1 - \left(\frac{K}{K_0}\right)^{1/3}\right]}{\lg \frac{\sigma}{\sigma_0}}$$

式中:S_s为应力敏感性系数; σ 、K分别为有效应力(MPa)和对应有效应力点的渗透率($\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$); σ_0 、K₀分别为初始测点的有效应力(MPa)和渗透率($\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$)。

2 实验结果

2.1 流体敏感性评价结果

速敏性评价实验确定临界流量为1.5 mL/min。流体敏感性评价实验结果显示,岩样为中等偏强的水敏性损害,损害率平均为66.3%;强的碱敏性损害,损害率平均为96.8%;中等偏强的酸敏性损害,损害率平均为24.9%。流体敏感性评价实验结果如表1所示。实验结果表明,岩样的渗透率受流体的影响较强,因此在作业过程中应控制入井流体的流速、矿化度和pH值。

2.2 流体损害后的应力敏感性评价结果

对未经流体处理、水敏处理、碱敏处理和酸敏处理的岩样分别进行应力敏感性实验,结果表明:未经流体处理的岩样呈中等偏强的应力敏感性,流体敏感性损害后的岩样均呈强应力敏感性,实验结果见表2。经流体处理过的岩样较未经处理的岩样的应力敏感性系数增加30%左右。对比4种不同方式处理后岩样的应力敏感性系数,流体对应力敏感性的影响程度依次为酸处理>碱处理>水处理>未处理。

流体敏感性损害和应力敏感性损害耦合后渗透率下降率依次为碱处理>水处理>酸处理>未处理。

表 1 流体敏感性评价实验结果

敏感性评价	岩样	孔隙度/%	气体渗透率/($\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$)	损害率/%	损害程度
速敏	ZF28-20	4.35	0.002 38	69.0%	中等偏强
	ZF25-08	/	/	75.2%	强
	ZF28-12	3.42	0.008 25	73.0%	强
水敏	ZF25-17	7.34	0.034 3	69.0%	中等偏强
	ZF25-04	3.76	0.005 19	69.2%	中等偏强
	ZF25-13	/	/	60.8%	中等偏强
碱敏	ZF25-03	3.39	0.004 2	96.0%	强
	ZF25-09	4.44	0.034	97.8%	强
	ZF25-11	5.05	0.029 5	96.6%	强
酸敏	ZF25-10	4.96	0.020 2	25.6%	中等偏强
	ZF25-18	5.79	0.045 5	24.0%	中等偏强

注:“/”表示小于仪器测量下限(孔隙度小于0.5%;渗透率小于 $0.001\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$)

表 2 应力敏感性评价实验结果

岩样号	$K_{f1}/$ ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	实验方法	$K_{f2}/$ ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	$K_{f3}/$ ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	流体损害率 /%	S_s	综合损害率 /%	评价结果
ZF25-07	1.73	干样—加载	/	0.076	0	0.640 8	95.61	中等偏强
ZF25-21	11.2	干样—加载	/	0.672	0	0.598 7	94.00	中等偏强
ZF25-04	1 300	水敏—加载	112	1.48	91.38	0.891 4	99.88	强
ZF25-13	571	水敏—加载	30.7	0.489	94.62	0.899 3	99.91	强
ZF25-09	342	碱敏—加载	0.396	0.005 2	99.88	0.891 2	99.99	强
ZF25-11	31	碱敏—加载	1.11	0.017	96.41	0.902 1	99.94	强
ZF25-10	120	酸敏—加载	28	0.392	76.66	0.905 2	99.67	强
ZF25-18	68	酸敏—加载	20	0.274	70.58	0.910 1	99.59	强

注: K_{f1} 为有效应力 3MPa 时渗透率; K_{f2} 为有效应力 3MPa 时损害后渗透率; K_{f3} 为有效应力 30MPa 时应力敏感性损害后渗透率

酸处理的岩样应力敏感性最强,但酸处理后的流体损害的渗透率下降程度较另 2 种流体处理要小,使得总的渗透率下降率为流体处理岩样中的最小值。

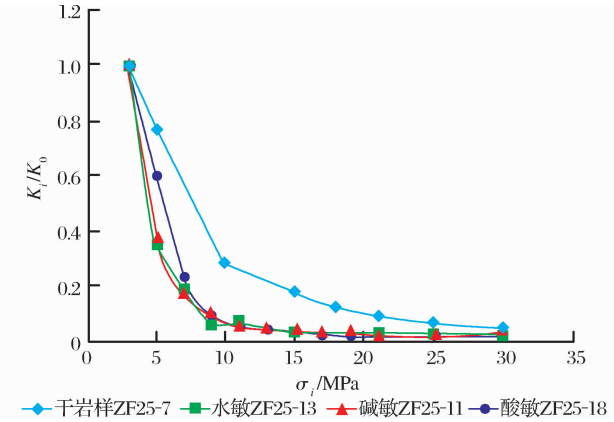


图 1 渗透率比率随有效应力变化

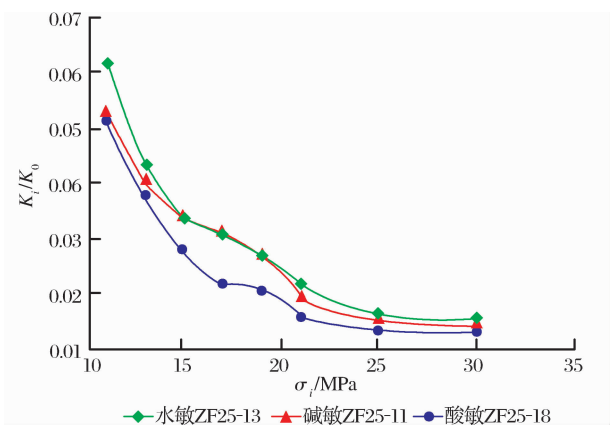


图 2 渗透率比率随有效应力变化放大

随着有效应力的增加,未处理岩样的渗透率比率下降相对其他处理方法缓慢,因此考虑流体敏感性损害后的应力敏感性损害更强。流体处理后的岩样的渗透率比率在原地有效应力(9MPa)之前下降幅度巨大,渗透率比率随有效应力变化如图 1。图 2 放大了图 1 原地有效应力之后的部分,渗透率变化率为酸处理>碱处理>水处理。

3 讨论

流体损害后的应力敏感性变化主要表现在流体的润滑作用、粘土矿物和微粒运移的影响。

3.1 粘土矿物的影响

粘土矿物的类型和微结构对于研究储层损害机理有着重要意义。岩样中伊利石、绿泥石、高岭石及伊/蒙间层矿物发育。人工造缝的裂缝开启方向为岩石的弱结构面方向。观察裂缝表面,泥质通常以薄膜形式附着于碎屑颗粒上(图 3),由于粘土颗粒相对石英等骨架颗粒小得多,因此在骨架之间起到“润滑”作用使骨架颗粒之间的滑动摩擦变为滚动摩擦,降低了岩石抵御结构变形的能力。

据 DLVO 及临界盐浓度(CSC)理论,流体矿化度低于临界盐浓度时,伊利石双电层间距将增加,微观晶层之间的连接力将被破坏。粘土矿物自身的瓦解也使骨架颗粒和粘土矿物之间的连接力被破坏,岩石自身强度减弱,受到有效应力作用更易发生形变。其次,研究区的伊/蒙间层矿物含量较高(图 3),粘土遇水后发生表面水化,水化膨胀作用在流体直接接触的裂缝表面尤甚,伊利石与蒙脱石的水化膨胀系数不同将产生非均匀的膨胀应力,破坏原有的岩石结构,于是在裂缝两壁面附近形成类似“风化壳”的“破碎带”。在“破碎带”处更加疏松,降低了裂缝面处的岩石整体抗压强度,产生强的应力敏感性。使应力敏感性表现为水处理>未处理。

由于研究区地层水呈酸性,此时微晶石英及粘土矿物表面带负电荷,方解石等矿物表面带正电荷,因此粘土矿物及微晶石英与方解石等矿物依靠离子键连接,连接紧密。随着碱性工作液不断侵入,当 pH>9 后,方解石、粘土矿物及微晶石英表面同时带负电荷。由于同种电荷相互排斥,粘土矿物及微晶石英与方解石之间的连接力被破坏,形成类似“风

化壳”的“破碎带”。pH 值升高过程伴随着矿化度的变化,因此 pH 值升高和矿化度变化耦合后使岩石产生强应力敏感性。使应力敏感性表现为碱处理>水处理。

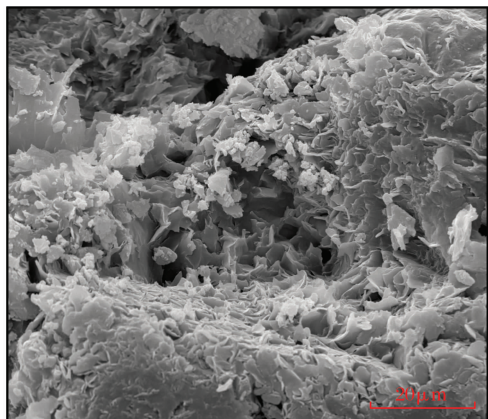


图 3 附着于颗粒表面的粘土薄膜

当酸液侵入时,储层流体 pH 值降低,在抑制电荷变化的同时与岩石中的矿物发生化学反应,溶蚀裂缝附近的颗粒及胶结物。由于岩石的非均质性,溶蚀将增大渗流空间,但岩石中绿泥石含量较高,与酸液接触后,绒球状绿泥石被溶蚀,结构被破坏,绿泥石与其他颗粒的连接力也被破坏,降低了对岩石结构的支撑能力。同时,与酸液生成沉淀物阻塞裂缝,减小了渗流空间,加剧了流体敏感性损害,经过酸处理后非但没达到解堵反而增强了堵塞效果。裂缝附近经过非均匀溶蚀后,不仅胶结物溶蚀使岩石强度下降,裂缝壁面附近也仅存在少量的不溶颗粒支撑缝面,使接触点应力集中增强。因此,在有效应力的作用下,酸处理后的岩样表现出了最强的应力敏感性。

3.2 流体的润滑作用

在有效应力作用下,裂缝壁面附近的颗粒接触点应力集中,颗粒接触点之间压实或错动变形,导致裂缝宽度发生变化。流体在颗粒表面吸着力作用下附着于裂缝壁面附近的岩石颗粒上,在颗粒之间形成水楔或在颗粒表面形成液膜。液膜的存在减小了阻碍错动变形的摩擦阻力。因此,流体的润滑作用使裂缝更容易被压实,增强应力敏感性。当有效应力增加到一定程度,裂缝和喉道共同参与渗透率贡献,此时岩石整体受到流体的润滑作用,增强了应力敏感性。

3.3 微粒运移的影响

流体敏感性实验结果显示,微粒运移是产生流体敏感性损害的原因之一。在发生流体敏感性损害之后,微粒将以“架桥”的形式沉积于裂缝的狭窄处

并阻塞裂缝,减小流动空间。当有效应力增加时,裂缝的开度进一步减小,微粒的“架桥”和沉积方式将发生变化并重新调整。原有的多颗粒“架桥”式阻塞转化为单颗粒阻塞。新的变化将使微粒进一步“封堵”裂缝系统,极大地减小渗流通道,表现为更强的应力敏感性损害。

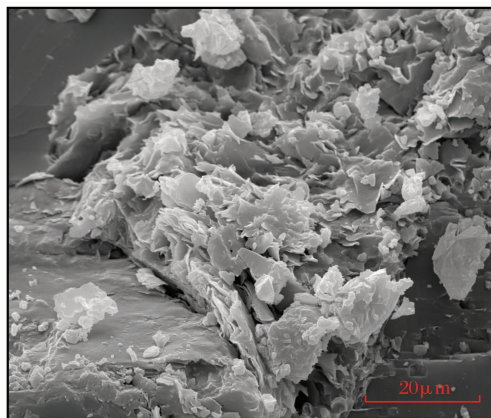


图 4 粉砂颗粒间孔充填的粘土矿物

4 结 论

(1)富县黑色页岩和泥质粉砂岩岩层呈中等偏强的水敏性、强的碱敏性和中等偏强的酸敏性损害,因此在各环节的作业中应合理控制入井流体的矿化度和 pH 值。

(2)未损害黑色页岩和泥质粉砂岩储层呈中等偏强的应力敏感性,流体损害后的岩样应力敏感程度强。流体损害对应力敏感的影响程度依次为酸处理>碱处理>水处理。流体损害后的粘土微结构变化、粘土矿物水化膨胀、流体润滑作用及微粒运移强化了岩石应力敏感性。

(3)鉴于作业过程中不可能完全避免发生流体敏感性损害,为更准确地评价储层应力敏感性,推荐先考虑开展流体敏感损害实验,再进行应力敏感性实验,并与未损害的岩样应力敏感性实验对比。

参考文献(References):

- [1] Jenkins D. Coalbed and shale gas reservoirs[J]. Journal of Petroleum Technology, 2008, 24(2): 92-99.
- [2] Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan, *et al.* Exploration potential of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 136-140. [张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.]
- [3] Li Jianzhong, Dong Dazhong, Chen Gengsheng, *et al.* Prospects and strategic position of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 11-16. [李建忠, 董大忠, 陈更生, 等. 中国页岩气资源前景与战略地位[J]. 天然气工业,

- 2009,29(5):11-16.]
- [4] Wang Xiuli, Wang Tianjiao. The Shale Gas Potential of China [R]. SPE142304, 2011.
- [5] Sutton R P, Cox S A, Barree R D. Shale Gas Plays: A Performance Perspective[R]. SPE138447, 2010.
- [6] Vairogs. Pressure transient tests in formations having stress-sensitive permeability[J]. Journal of Petroleum Technology, 1973,25(8):965-970.
- [7] Thomas R D, Ward D C. Effect of over-burden pressure and water saturation on gas permeability of the tight sandstone cores[J]. Journal of Petroleum Technology, 1972,24(2):120-124.
- [8] Kang Yili, Zhang Hao, Chen Yijian, *et al.* Comprehensive research of tight sandstones gas reservoirs stress sensitivity in Daniudi gas field[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(3): 335-338. [康毅力, 张浩, 陈一健, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田致密砂岩气层应力敏感性综合研究[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(3): 335-338.]
- [9] Zhang Hao, Kang Yili, Chen Yijian, *et al.* Theory of rock deformation and stress sensitivity of tight sandstone reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(5): 482-486. [张浩, 康毅力, 陈一健, 等. 致密砂岩油气储层岩石变形理论与应力敏感性[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(5): 482-486.]
- [10] You Lijun, Kang Yili, Chen Yijian, *et al.* Stress sensitivity of fractured tight gas sands in consideration of fractures and water saturation[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2006, 30(2): 59-63. [游利军, 康毅力, 陈一健, 等. 考虑裂缝和含水饱和度的致密砂岩应力敏感性[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(2): 59-63.]
- [11] You Lijun, Kang Yili, Chen Yijian, *et al.* Influence of water saturation and effective stress on permeability of tight sandstone[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(12): 105-107. [游利军, 康毅力, 陈一健, 等. 含水饱和度和有效应力对致密砂岩有效渗透率的影响[J]. 天然气工业, 2004, 24(12): 105-107.]
- [12] Yang Jian, Kang Yili, Liu Jing, *et al.* Reinforcement of damage caused by drilling and completion fluids on stress-sensitivity of tight sandstone[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(8): 60-62. [杨建, 康毅力, 刘静, 等. 钻井完井液损害对致密砂岩应力敏感性的强化作用[J]. 天然气工业, 2006, 26(8): 60-62.]
- [13] Agrawal A, Wei Y, Cheng K, *et al.* A Technical and Economic Study of Completion Techniques in Five Emerging US Gas Shales[R]. SPE135396, 2010.
- [14] Andrade J, Civan F, Sigal R, *et al.* Accurate Simulation of Shale-Gas Reservoirs[R]. SPE135564, 2010.
- [15] Kalatari Dahaghi A, Mohaghegh S D. Numerical Simulation and Multiple Realization for Sensitivity Study of Shale Gas Reservoir[R]. SPE141058, 2011.
- [16] Wang Yezhong, Kang Yili, Zhang Hao, *et al.* Responses of carbonate stress sensitivity to loading time under effective pressure[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(3): 105-108. [王业众, 康毅力, 张浩, 等. 碳酸盐岩应力敏感性对有效应力作用时间的响应[J]. 钻采工艺, 2007, 30(3): 105-108.]
- [17] Lan Lin, Kang Yili, Chen Yijian, *et al.* Discussion on evaluation methods for stress sensitivities of low permeability and tight sandstone reservoirs[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005, 22(3): 1-4. [兰林, 康毅力, 陈一健, 等. 储层应力敏感性评价实验方法与评价指标探讨[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(3): 1-4.]

Influence of Fluid Damage on Shale Reservoir Stress Sensitivity

HE Jin-gang¹, KANG Yi-li¹, YOU Li-jun¹, CHENG Qiu-ju²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation in Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Huabei Branch Company, China PetroChemical Corporation, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: Unconventional oil and gas resources are playing an increasingly important role. Shale gas has become a hot spot and frontier in current research due to huge resources and successful exploitation in the United States. Since shale reservoir is rich in clay mineral, the damages of fluid sensitivity and stress sensitivity are two important damage factors. The coupling action of two damages will greatly decrease the permeability of reservoir and restrict the engineering effect on developing shale gas. Based on fluid sensitivity of clay shale reservoir, we carried out the stress sensitivity, in comparison with difference of stress sensitivity before and after fluid damage. The results show that the stress sensitivity coefficients after fluid damage increase by 30% for the three type reservoirs with medium-strong degree water sensitivity, strong degree alkali sensitivity and medium-strong degree acid sensitivity, indicating the strong stress sensitive degree. The discrete migration of clay mineral particle, hydrate expansion, fluid lubrication cause the decrease of rock strength, make the seepage channel become narrow, and increase the stress sensitivity damage. Therefore, it is a special significance for the protection and economic development of gas shale reservoir to reduce the invasion of incompatible fluid in the well operation.

Key words: Shale; Fluid sensitivity; Stress sensitivity; Clay minerals; Fracture.