

文章编号:1673-5005(2006)02-0059-05

考虑裂缝和含水饱和度的致密砂岩应力敏感性

游利军¹, 康毅力¹, 陈一健¹, 程秋菊², 尤欢增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:致密砂岩气藏裂缝发育和有效应力高的特征使其易发生应力敏感性损害, 钻井完井液侵入或凝析水在近井地带聚集也将影响砂岩应力敏感性, 这些因素都会对致密砂岩气藏的经济开发产生影响。考虑裂缝和含水饱和度的影响, 选取鄂尔多斯盆地上古生界典型致密砂岩岩样, 分别用于岩样、人工造缝岩样和含水饱和度低于束缚水饱和度的岩样进行了致密砂岩基块与裂缝的应力敏感性实验, 并从岩石学特征入手, 利用毛细管渗流模型和化学压实等理论分析了裂缝和含水饱和度对岩石变形的影响, 探讨了致密砂岩应力敏感性损害机理。研究表明, 致密砂岩应力敏感性损害严重, 应力敏感性系数与基块渗透率线性负相关, 而与裂缝岩样渗透率的对数线性正相关; 水的存在加剧了致密砂岩应力敏感性程度, 且含水饱和度越高应力敏感性越强。

关键词:致密砂岩; 应力敏感性; 裂缝; 含水饱和度; 钻井完井液; 化学压实; 损害机理

中图分类号:TE 122.33 **文献标识码:**A

Stress sensitivity of fractured tight gas sands in consideration of fractures and water saturation

YOU Li-jun¹, KANG Yi-li¹, CHEN Yi-jian¹, CHENG Qiu-ju², YOU Huan-zeng²

(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: Tight gas sands have potential damage of stress sensitivity due to its fractures development and high effective stress, and the drill-in fluids and condensate water near borehole can also affect stress sensitivity, which prevent economical development of reservoirs. Considering the effects of fractures and water saturation on stress sensitivity of tight gas sands, experiments of stress sensitivity were conducted under pressure repetitive increasing and lowering, and various water saturations that are lower than irreducible water saturation with dry core sample, tight gas sandstone matrix and man-made fractured cores from Ordos Basin. And the effects of water saturation and fractures on stress sensitivity of tight sandstones were investigated by capillary flow model and chemical compaction theory. The results suggest that the severity of stress sensitivity is linear inverse correlation with permeability of matrix, and linear positive correlation with logarithm of the permeability of fractures. Water saturation and fractures strengthen the severity of stress sensitivity, and the severity increases with water saturation increasing.

Key words: tight gas sands; stress sensitivity; fracture; water saturation; drilling and completion fluid; chemical compaction; damage mechanism

在钻井完井、开发和增产措施等作业过程中, 致密砂岩气层的孔隙结构特征和裂缝宽度会随有效应力的变化而变化, 气层渗透率将受到影响, 即气层产生应力敏感性损害。钻井完井液滤液侵入或凝析水在井底聚集, 会导致近井地带含水饱和度升高, 引起

气层岩石物理化学性质发生改变, 影响气层应力敏感性。低渗透砂岩应力敏感性损害能导致渗透率降低 90%^[1], 产量降低 50% (Vairogs 等, 1971)。张新红等^[2]的研究证实, 岩石渗透率、孔隙度、压缩系数与有效应力呈指数递减关系; Thomas 和 Ward^[1]研

收稿日期: 2005-08-23

基金项目: 四川省青年科技基金资助项目(02ZQ026-042)

作者简介: 游利军(1976-), 男(汉族), 河南新安人, 博士研究生, 主要从事储层损害与保护理论及技术、非常规储层岩石物理特性研究。

究表明,致密砂岩含水饱和度为 50% 时,气体渗透率只有干岩样的 10%~20%;张琰和崔迎春^[3]对围压 3~13 MPa 下岩心应力敏感性进行了实验研究,指出含水量越高,岩心渗透率对围压的敏感性越强;游利军等^[4]研究指出,含水饱和度和有效应力联合作用对致密砂岩有效渗透率损害更严重;景岷雪等^[5]研究表明,在静应力为 15 MPa 时,碳酸盐岩天然裂缝渗透率损害率为 80% 左右,人造缝渗透率损害率可达 90% 以上,人造裂缝岩样的不可逆程度大于天然裂缝岩样;杨满平等^[6]研究表明,随着气井产量增加,储层有效应力增加,导致束缚水饱和度增加,甚至使束缚水变成自由水。因此,考虑裂缝和含水饱和度对致密砂岩应力敏感性的影响,尤其二者与高有效应力耦合作用对气相渗透率影响的研究十分必要,但以往此类研究很少。笔者选取鄂尔多斯盆地典型致密砂岩岩心,对裂缝和含水饱和度对致密砂岩应力敏感性的影响进行研究,为评价初始含水饱和度和有效应力下储层渗透率和裂缝宽度以及在钻井完井和开发过程中有效地保护致密气层提供指导。

1 实验

实验岩样选自鄂尔多斯盆地北部上古生界气藏盒 3+2、盒 1、山 2 和山 1 段。研究区渗透率主要分布在 $(0.01 \sim 0.8) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.627 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属典型致密砂岩气藏。岩石类型主要为岩屑砂岩和岩屑石英砂岩,碎屑成分以石英和岩屑为主,粒间主要为硅质、钙质和泥质胶结;有效应力高,平均约为 30 MPa;孔隙以缩小粒间孔为主,孔壁上有石英加大边或伊利石粘土膜。气藏岩石束缚水饱和度为 42.05%~79%,初始含水饱和度低于束缚水饱和度,油基钻井液密闭取心资料表明,本区初始含水饱和度最低为 12%,即气藏存在超低含水饱和

度^[7,8]。岩石孔喉半径小、毛管压力高,孔喉多为扁平片状,天然裂缝亦以微裂缝为主,铸体薄片下的微裂缝多为粒缘缝及粒间缝,呈网络状,少数微裂缝部分溶蚀。粘土矿物含量高,主要为伊利石和高岭石,广泛分布于粒表和粒间,伊利石产状主要有片状、丝状、桥接状等,高岭石产状为蠕虫状和书状。

实验岩样的含水饱和度利用毛管自吸法^[9]建立,且都低于束缚水饱和度,含水岩样含水饱和度为 9.3%~53.24%。岩样中裂缝为人工造缝,且为平行于岩样轴向的单条裂缝,缝内没有充填物,缝宽为 1.54~21.92 μm 。含水裂缝岩样在基块岩样中建立所需的含水饱和度后,人工造缝而得。实验采用 SCMS-I 型高温高压岩心多参数自动测试系统,有效应力点 σ_i 选定为 3.0~40.0 MPa,间隔从 2.0 MPa 增大到 10.0 MPa,然后逐渐卸压,测量不同有效应力 σ_i 对应的渗透率 k_i 。

应力敏感性系数 S_s 的计算公式为

$$S_s = [1 - (k_i/k^*)^{1/3}] \lg(\sigma_i/\sigma^*)$$

式中, k^* 为参考应力点 σ^* 对应的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

计算出 S_s 后即可根据评价标准^[10]对实验结果进行评价。

2 应力敏感性实验结果

2.1 致密砂岩干岩样应力敏感性

13 块基块岩样渗透率为 $(0.11 \sim 0.763) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.302 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 加压过程的应力敏感性系数为 0.224~0.74, 平均为 0.487, 总体上应力敏感性为中等。加压过程的应力敏感性系数大于卸压过程的应力敏感性系数;基块岩样渗透率和应力敏感性系数线性负相关,相关式为 $S_s = -0.0646k + 0.2224$, 即渗透率越低应力敏感系数越大,应力敏感程度越强(图 1(a))。

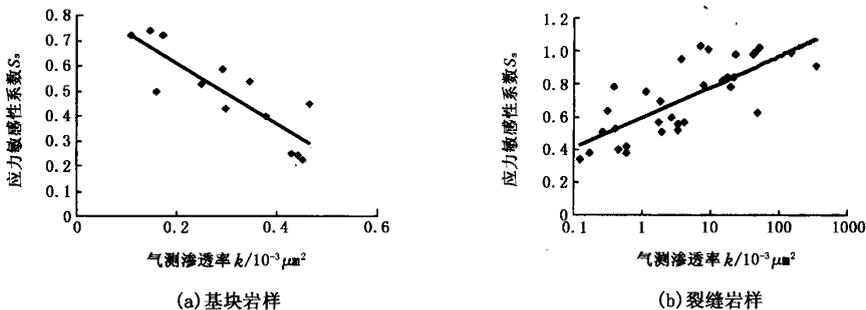


图 1 致密砂岩应力敏感性系数与气测渗透率的关系

33 块裂缝岩样渗透率为 $(0.121 \sim 351) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 裂缝宽度为 $1.54 \sim 21.92 \mu\text{m}$ 。实验结果表明, 加压过程中的应力敏感性系数为 $0.34 \sim 1.03$, 平均为 0.709 。与基块岩样相比, 裂缝岩样加压和卸压过程中的应力敏感性系数相差更大, 卸压后裂缝渗透率恢复率更低, 裂缝的应力敏感性系数和裂缝渗透率的对数线性正相关(图 1(b)), 即 $S_s = 0.082 \times \ln k + 0.5951$, 说明裂缝的存在加剧了应力敏感程度, 裂缝越宽, 渗透率越高, 应力敏感性越强。

2.2 含水致密砂岩应力敏感性

致密砂岩含水岩样比致密砂岩干岩样应力敏感性强, 12 块岩样渗透率为 $(0.205 \sim 0.633) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 岩样含水饱和度为 $9.3\% \sim 53.24\%$, 加压过程的应力敏感性系数为 $0.38 \sim 0.92$, 说明水的存在加剧了岩样的应力敏感程度。物性相近的同组岩样含水饱和度越高应力敏感性越强, 这是由于随着岩样含水饱和度增大, 气体渗流的实际通道减小, 或者因为水使得岩石在应力作用下发生物理化学变化, 降低了岩石的强度, 加重了应力敏感程度。因此含水饱和度和有效应力综合作用对气层损害更严重^[4]。

岩样 1 ($S_w = 0$), 2 ($S_w = 13.5\%$), 3 ($S_w = 26.98\%$) 在加压和卸压过程中渗透率与有效应力的关系见图 2。

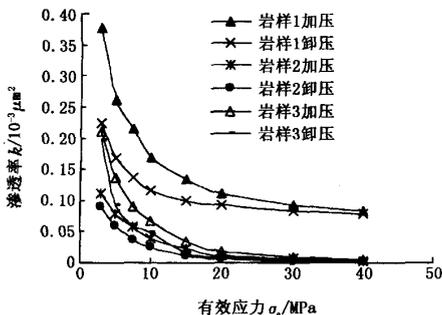


图 2 加压和卸压过程中不同含水饱和度岩样渗透率与有效应力的关系

含水岩样应力敏感性实验中出现了干岩样实验中没有出现的现象, 即在卸压过程中, 在 20 MPa 以下的有效应力和渗透率关系曲线上出现了拐点, 这使卸压过程的应力敏感性系数为 $0.385 \sim 1.03$, 大于加压过程的应力敏感性系数。

2.3 含水裂缝致密砂岩应力敏感性

6 块含水裂缝岩样的渗透率为 $(2.19 \sim 336) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $143.45 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 裂缝宽度为 $2.6 \sim 21.56 \mu\text{m}$ 。含水裂缝岩样实验结果(表 1)表明, 加压过程的应力敏感性系数为 $0.46 \sim 0.877$, 平

均为 0.603 , 应力敏感程度为中等到强, 与裂缝干岩样相比, 含水裂缝岩样应力敏感程度并没有显著增加。这说明水的存在并未显著增加裂缝致密砂岩的应力敏感程度。

表 1 裂缝岩样不同含水饱和度应力敏感性评价

样号	层位	含水饱和度 $S_w/\%$	气测渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$			应力敏感性系数 S_s
			3 MPa	30 MPa	40 MPa	
1	盒 2+3	29.26	2.190	0.230	0.185	0.539
2	盒 1	28.04	26.20	0.368	0.192	0.877
3	山 2	19.83	211.0	6.200	3.350	0.644
4	山 2	42.84	283.0	39.60	24.30	0.460
5	山 1	21.13	336.0	52.50	9.250	0.489
6	山 1	38.13	2.19	0.35	0.172	0.609

3 结果分析与讨论

3.1 裂缝对应力敏感性的影响

Kozeny 毛细管渗流模型指出, 岩石渗透率与毛细管平均半径的 4 次方成正比^[11]。由公式 $k = 10^{11} \times W^3 h / (12A)$ 可知, 裂缝渗透率 k 与裂缝宽度 W 的 3 次方成正比。因此, 毛细管平均半径和裂缝宽度的微量变化将引起渗透率的显著变化。致密砂岩喉道多为片状和弯片状, 且对渗透率贡献较大的偏粗喉道或微裂缝所占比例相对较少, 这些偏粗喉道或微裂缝对应力十分敏感, 有效应力稍有增加, 这些弯片状偏粗喉道或微裂缝就闭合, 所以储层渗透率越低, 越易发生应力敏感性损害。

同理, 裂缝对致密砂岩储层的导流能力起主导作用, 实验岩心中裂缝为人工造缝, 缝内没有填充物, 当有效应力增加时, 相对宽的未充填缝更容易闭合^[10], 导致渗透率显著降低。因此, 裂缝的存在加剧了致密砂岩的应力敏感程度。

3.2 含水饱和度对应力敏感性的影响

水对岩石力学性质的影响主要表现在水楔作用、润滑作用和溶蚀作用。水在毛管力和颗粒表面吸着力作用下进入致密砂岩, 在颗粒之间形成水楔或在颗粒表面形成水膜(图 3(a))。水膜使喉道半径减小, 渗透率降低。在有效应力作用下, 颗粒接触点应力集中, 岩石颗粒间距减小, 导致喉道半径减小。水的润滑作用使岩石强度降低, 颗粒和孔喉进一步被压缩, 因此含水致密砂岩比致密砂岩干岩样应力敏感性强。含水量越高, 含粘土矿物的岩石强度降低幅度越大, 因此宏观上表现为含水饱和度越大, 应力敏感性越强。

当有效应力 σ_e 继续增大, 岩石中石英颗粒表面的水膜化学势失去平衡^[12], 发生压溶作用或化学压

实,导致 SiO_2 沉淀,产生石英次生加大,使孔喉半径(图 3(b))和渗透率降低。致密砂岩中的石英颗粒之间伊利石等粘土膜不仅极大地扩大压溶物质的扩散和渗透通道,而且伊利石粘土膜在应力和富含 CO_2 孔隙水作用下构成碱性微环境,加速压溶的速度^[13]。当压溶继续进行,逐渐形成压溶缝(图 3(c)),如果应力继续增大,压溶缝保持闭合状态,表现为渗透率没有多大变化,而应力释放后,压溶缝张开,渗透率升高较快,产生含水致密砂岩卸压过程的应力敏感性系数大于加压过程中的应力敏感性系数的现象。

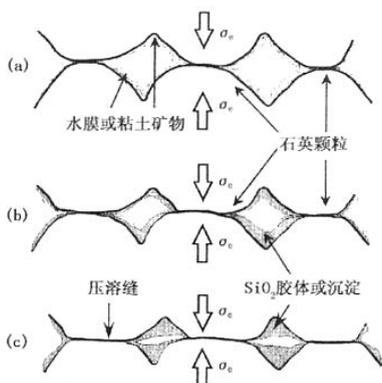


图 3 含水致密砂岩在有效应力逐渐增大时产生压溶作用并出现压溶缝

据薄片观察,裂缝岩样颗粒之间多为线或面接触,说明裂缝岩样的石英颗粒之间不能产生应力集中,因此含裂缝岩样的基块变形在水作用下并没有纯基块岩样变形明显,岩样变形主要为裂缝的闭合或张开,这取决于有效应力和裂缝面的粗糙程度。因为实验岩样中裂缝没有充填物,且致密砂岩裂缝面相对光滑,水对裂缝面影响在短时间内很难表现出来,所以含水饱和度对裂缝应力敏感性影响不明显。由于岩样的裂缝平行于轴向,实验未能考虑裂缝面含水饱和度增加产生水相圈闭对基块与裂缝传质能力的损害,作业过程中滤液长期浸泡和开采过程中近井地带水对储层裂缝面的损害不容忽视。

4 结 论

(1)致密砂岩储层具较强的应力敏感性,含裂缝时更强,应力敏感程度与基块渗透率线性负相关,与裂缝渗透率的对数线性正相关。

(2)水使致密砂岩强度降低,并使其在高有效应力作用下产生压溶作用,加剧基块岩样应力敏感性程度,含水饱和度越高应力敏感性越强,而短期内对

人工造缝的致密砂岩应力敏感性影响不明显。

(3)低应力条件下观测的裂缝宽度和测量的渗透率不能代表原始地层条件下的致密气层裂缝宽度和渗透率,推荐在考虑含水饱和度情况下,利用应力敏感性研究将其校正为储层条件下的裂缝宽度和渗透率。

(4)在钻井完井过程中保持压差恒定和开发过程中制定合理的工作制度,有利于防止应力敏感损害致密砂岩气层。滤液侵入或气层产水会使近井地带含水饱和度升高,加剧气层应力敏感程度。

参考文献:

- [1] THOMAS R D, WARD D C. Effect of over-burden pressure and water saturation on gas permeability of the tight sandstone cores[J]. JPT, 1972,24(2):120-124.
- [2] 张新红,秦积舜. 低渗岩心物性参数与应力关系的试验研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,2001,25(4):56-57.
ZHANG Xin-hong, QIN Ji-shun. Relation of ground stress with the properties of low permeable core[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2001,25(4): 56-57.
- [3] 张琰,崔迎春. 低渗气藏应力敏感性评价方法的研究[J]. 现代地质,2001,15(4):453-457.
ZHANG Yan, CUI Ying-chun. The stress sensitivity and the evaluating method of low permeability gas reservoirs [J]. Geoscience,2001,15(4):453-457.
- [4] 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.
YOU Li-jun, KANG Yi-li, CHEN Yi-jian, et al. Influences of water saturation and effective stress on effective permeability of tight sands [J]. Natural Gas Industry, 2004,24(12):105-107.
- [5] 景岷雪,袁小玲. 碳酸盐岩岩心应力敏感性实验研究[J]. 天然气工业,2002,22(增刊):114-117.
JING Min-xue, YUAN Xiao-ling. Experimental research on core stress sensitivity of carbonate rock [J]. Natural Gas Industry,2002,22(suppl):114-117.
- [6] 杨满平,李允,彭彩珍. 气藏储层含束缚水的应力敏感性分析[J]. 天然气地球科学,2004,15(4):391-394.
YANG Man-ping, LI Yun, PENG Cai-zhen. Analysis of stress sensitivity for irreducible water of gas reservoir [J]. Natural Gas Geoscience,2004,15(4):391-394.
- [7] BENNION D B, THOMAS F B, BIETZ R F, et al. Water and hydrocarbon phase trapping in porous media-diagnosis, prevention and treatment [J]. JCPT, 1996,35

(10):29-36.

[8] NEWSHAM K E. Use of vapor desorption data to characterize high capillary pressure in a basin-centered gas accumulation with ultra-low connate water saturations[R]. SPE 84596 2003.

[9] 游利军,康毅力,陈一健.致密砂岩含水饱和度建立新方法——毛管自吸法[J].西南石油学院学报,2004,27(1):28-31.
YOU Li-jun, KANG Yi-li, CHEN Yi-jian. New method of water saturation of tight gas—spontaneous imbibition [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004, 27(1):28-31.

[10] 张浩,康毅力,陈一健,等.岩石组分和裂缝对致密砂岩应力敏感性的影响[J].天然气工业,2004,24(7):55-57.
ZHANG Hao, KANG Yi-li, CHEN Yi-jian, et al. Influence of the components and fractures on tight sandstone stress sensitivity[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7):55-57.

[11] 秦积舜.变围压条件下低渗砂岩储层渗透率变化规律研究[J].西安石油学院学报:自然科学版,2002,17(4):28-31,35.
QIN Ji-shun. Variation of the permeability of the low-permeability sandstone reservoir under variable confined pressure[J]. Journal of Xian Petroleum Institute (Natural Science Edition), 2002, 17(4):28-31, 35.

[12] SHELDON Heather A, WHEELER John, WORDEN Richard H. et al. An analysis of the roles of stress, temperature, and pH in chemical compaction of sandstones[J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(1):64-71.

[13] 冯增昭.沉积岩石学[M].2版(上册).北京:石油工业出版社,1993:200-201.

(编辑 李志芬)

下 期 要 目

王贵文,等	塔里木盆地塔中志留系测井沉积相研究
陈雪莲,等	相控线阵声波辐射器阵元个数变化对充液井孔中各种模式的影响
郭兴伟,等	渤海湾盆地济阳拗陷新生代构造沉降特征
金 强,等	金湖凹陷闵桥玄武岩微量元素向烃源岩的迁移及其地质意义
吴金龙,等	济阳拗陷低阻油气藏微观机理的宏观地质控制因素研究
于红枫,等	川西拗陷松华镇——白马庙地区须二段储层裂缝特征及控制因素
李淑霞,等	天然气水合物开采方式及数值模拟研究评述
吕开河,等	强抑制性多元醇海水钻井液研究及应用
赵立新,等	复杂结构水平井产能关系研究
林英松,等	爆炸载荷对饱和水泥试样损伤破坏规律研究
李会银,等	基于 CPLD 的多功能核能谱测井仪器检测系统
赵洪华,等	管道传声特性的研究及典型破声的识别
卜文平,等	打孔管道焊接修复结构的残余应力测试
杨 颖,等	非离子型 Gemini 表面活性剂的表面活性与固液界面吸附研究
邢定峰,等	硫化氢间接电解制氢电极材料性能研究
胡松青,等	Si, Ti 取代 AIPO-11 分子筛的合成及表征
戴彩丽,等	薄层底水油藏水锥控制可视化研究
王艳松,等	基于暂态分量的配电网单相接地故障选线新方法