

刘会虎 桑树勋 冯清凌 等. 沁水盆地南部煤层气井排采储层应力敏感研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(9): 1873-1878. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.8007

Liu Huihu, Sang Shuxun, Feng Qingling, et al. Study on stress sensitivity of coal reservoir during drainage of coal-bed methane well in Southern Qinshui Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1873-1878. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.8007

## 沁水盆地南部煤层气井排采储层应力敏感研究

刘会虎<sup>1</sup> 桑树勋<sup>2</sup> 冯清凌<sup>3</sup> 胡宝林<sup>1</sup> 胡友彪<sup>1</sup> 徐宏杰<sup>1</sup> 程 乔<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008; 3. 淄博金宅测绘公司, 山东 淄博 255000)

**摘 要:**为分析煤层气排采不同阶段煤储层应力敏感性及其渗透率变化的影响因素,采集沁水盆地南部煤样,开展了不同实验条件的应力敏感实验。结果表明:有效应力从0增加到10 MPa时,煤样渗透率减少了50%~70%;有效应力从10 MPa增加到20 MPa时,损失量仅约占初始渗透率的10%;有效应力低于2.5 MPa时,应力敏感性较强;有效应力增加到3.5 MPa的过程中,渗透率损害系数急剧上升,渗透率损耗为20%~30%;有效应力从2.5 MPa增加到9 MPa时,应力敏感性最强,有效应力从3.5 MPa上升至9 MPa时,渗透率损害系数快速下降,渗透率损耗约60%;有效应力自9 MPa之后,渗透率损害系数缓慢下降,渗透率损耗约10%;渗透率损害率介于30%~65%,临界应力为7~11 MPa。有效应力较低且不变时,煤样渗透率随孔隙压力增加而增加。围压不变时,随有效应力下降和孔隙压力增加,煤样渗透率下降,这与有效应力和孔隙压力变化引起的煤储层渗透率变化量有关。

**关键词:**沁水盆地南部;煤层气井;排采;煤储层渗透率;应力敏感;有效应力;孔隙压力

中图分类号:P618.11 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2014)09-1873-06

### Study on stress sensitivity of coal reservoir during drainage of coal-bed methane well in Southern Qinshui Basin

LIU Hui-hu<sup>1</sup>, SANG Shu-xun<sup>2</sup>, FENG Qing-ling<sup>3</sup>, HU Bao-lin<sup>1</sup>, HU You-biao<sup>1</sup>, XU Hong-jie<sup>1</sup>, CHENG Qiao<sup>1</sup>

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Resource and Earth Science, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China; 3. Jinzhai Surveying and Mapping Company, Zibo 255000, China)

**Abstract:** Coal samples from Southern Qinshui Basin were sampled and experimental study on stress sensitivity under different experimental condition was performed in order to analyze stress sensitivity and affecting factors on permeability of coal reservoir at different stage of coal-bed methane drainage. The results show that permeability of coal samples decline 50% - 70% when the effective stress increase from 0 to 10 MPa and the loss of coal reservoir permeability is about 10% when the effective stress increase from 10 MPa to 20 MPa. The stress sensitivity of coal samples are relatively stronger when the effective stress is below 2.5 MPa. The damage coefficient of permeability increase quickly and the loss of permeability is about 20% - 30% of the initial permeability from coal samples when the effective stress increase to 3.5 MPa. The stress sensitivity is strongest when the effective stress increase from 2.5 MPa to 9 MPa. The damage coefficients of permeability decrease quickly and the initial permeability from coal samples lose 60% when the effective stress increases from 3.5 MPa to 9 MPa. The damage coefficient of permeability decrease slowly and the loss

收稿日期:2014-04-15 责任编辑:常琛

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41330638, 41302129);山西省煤层气联合研究基金资助项目(2012012008)

作者简介:刘会虎(1978—),男,江西九江人,讲师。E-mail: xixiinformation@163.com

of permeability is about 10% of the initial permeability from coal samples when the effective stress beyond 9 MPa. The damage rate of permeability from coal samples is between 30% and 65% and the critical stress is 7 MPa to 11 MPa. The permeability of coal samples increase with increase of pore pressure ,when the effective stress is relatively lower and constant. The permeability of coal samples decrease with the decline of effective stress and increase of pore pressure when the confining pressure is constant ,which is related to the variation of permeability caused by the variation of effective stress and pore pressure on coal reservoir.

**Key words:** Southern Qinshui Basin; coal-bed methane; drainage; coal reservoir permeability; stress sensitivity; effective stress; pore pressure

煤层气井开发过程中由于排采过快易引起煤储层应力敏感(压敏)造成渗透率降低,已获得普遍共识<sup>[1-6]</sup>。国内外学者通过不同条件的应力敏感实验和结合模型分析,开展了煤储层应力敏感研究工作,揭示了不同应力条件煤储层渗透率的变化特征<sup>[7-13]</sup>指出影响煤储层应力变化过程中渗透率的变化经过应力主导的渗透率降低过程、煤基质收缩效应主导的渗透率变化过程及气体分子滑脱效应主导的渗透率回返过程<sup>[14-15]</sup>,认为影响因素包括煤储层孔隙压力、净应力、煤岩含水饱和度、煤基质收缩效应、气体分子滑脱效应等<sup>[16-20]</sup>。然而,煤层气排采过程中先后伴随有净应力变化、气水流体压力变化、煤基质收缩等对煤储层渗透率的影响。因而研究煤储层应力敏感性时需要综合考虑结合煤层气排采过程和特点来开展工作。

为分析煤层气排采不同阶段(排水降压阶段、产气期、停排重启阶段)煤储层应力敏感性,笔者以沁水盆地南部为例,开展孔隙压力不变条件下不同围压条件、孔隙压力变化下围压变化条件、孔隙压力条件变化相同围压下的应力敏感实验,探讨煤层气排采储层应力敏感对渗透率的影响及其发生条件。

## 1 实验材料与方法

实验研究区目标地层为石炭二叠系山西组3号煤层。采集煤样40块,其中32块煤样(郑庄区块)采自煤层气钻孔取芯8块来采自于沁水长平煤矿和天安润宏煤矿。所有样品均为干样,具有完整结构。所有样品在进行实验前均进行原始渗透率测试。表1为实验样品的基础数据。

第1部分为孔隙压力不变条件下围压变化下的应力敏感实验,过程参照石油天然气行业标准(SY 5358—2002)进行。实验采用加煤样的净围压模拟地层有效应力的变化(将有效应力定义为净围压,其大小等于围压与孔隙压力的差),测量渗透率随净围压变化的情况,分别计算渗透率损害系数、渗透率损害

表1 煤样实验样品基础数据

Table 1 Basic data of coal samples

样品 编号	实验样品尺寸/cm		含水 情况	初始渗透 率/ $10^{-15} \text{ m}^2$
	直径	长度		
1	5.02	2.52	干样	1.826
...	...	...	...	...
32	5.21	2.52	干样	1.815
33	4.27	2.52	干样	0.179
34	5.26	2.52	干样	0.521
35	4.43	2.52	干样	3.040
36	4.49	2.52	干样	1.205
37	5.01	2.52	干样	0.364
38	6.10	2.52	干样	0.283
39	3.70	2.52	干样	0.751
40	4.40	2.52	干样	3.150

率,并确定渗透率损害率发现明显变化的拐点,揭示煤层气在排水阶段快速排采时储层压敏发生的应力变化条件。实验仪器为岩心流动装置。

第2部分为围压变化条件下孔隙压力变化下的应力敏感实验,采用逐级增压水驱实验,实验过程:保持有效应力不变(5 MPa),逐渐增加围压至8.5 MPa,分别测试不同压力平衡状态煤储层的渗透率,揭示有效应力趋于稳定阶段渗透率变化的特征及原因。实验仪器为岩心流动装置。

第3部分为相同围压条件下孔隙压力变化下的应力敏感实验,采用逐级增压气驱实验,实验过程:将岩心装入岩心夹持器中,加围压至10 MPa(模拟上覆地层压力),连接气源,采用调压阀设置气驱压力从低压开始逐级增压进行气驱,每个压力点气驱时间1.0 h以上直至气流量稳定,保证岩样变形达到一定的平衡状态,分别测试每个不同孔隙压力下煤样的渗透率,耦合分析渗透率随孔隙压力、有效应力的变化特点,揭示煤基质体积应变和气体滑脱效应对渗透率产生的影响。实验仪器为岩心驱替系统。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 孔隙压力不变情况下煤储层渗透率与应力的关系

依据1~32号煤样的应力敏感实验结果对煤层气排采时煤储层渗透率变化与有效应力之间的关系进行分析,如图1所示。

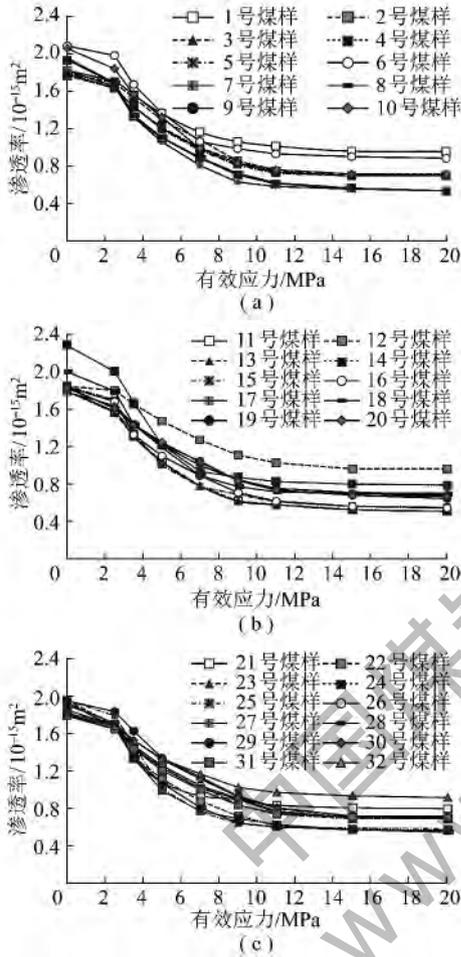


图1 煤样渗透率随有效应力的变化

Fig. 1 Variation of permeability with effective stress for coal samples

从煤样渗透率随有效应力的变化结果看,煤样渗透率的变化表现为随有效应力的增加而逐渐降低,但渗透率随有效应力增加过程而呈现的变化特点与以往研究结果并不完全一致,具有一定的差异,表现为:①当有效应力从0增加到10 MPa时,煤样渗透率为初始渗透率的30%~50%,减少了50%~70%;②有效应力从10 MPa增加到20 MPa的过程中,煤样渗透率降低趋势明显变缓,损失量仅约占初始渗透率的10%;③在有效应力增加到2.5 MPa以前,煤样的渗透率变化表现为较快速下降,应力敏感性较强;④在有效应力从2.5 MPa增加到9 MPa时,煤样的渗透率变化表现为快速下降,应力敏感性最强。

根据石油天然气标准(SY 5358—2002)渗透率损害系数计算公式,计算了渗透率损害系数随有效应力的变化结果,绘制了32个煤样的应力敏感曲线,对煤样的应力敏感进行了评价,如图2所示。

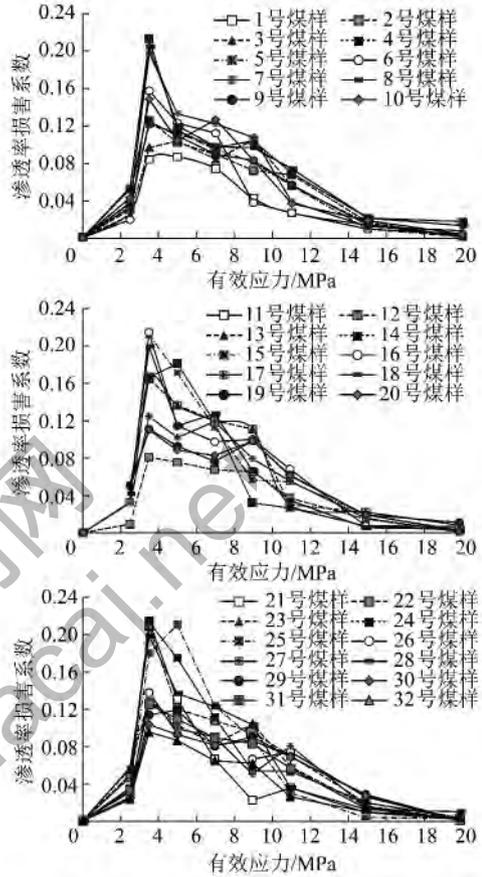


图2 煤样渗透率损害系数随有效应力的变化

Fig. 2 Variation of damage coefficient of permeability with effective stress for coal samples

由图2可知,在有效应力增加到3.5 MPa过程中,煤样的渗透率损害系数表现为急剧上升的特点,表明煤样在有效应力增加到3.5 MPa的过程中煤样渗透率损害较大(渗透率损耗为20%~30%),从3.5~20.0 MPa过程中,渗透率损害系数呈现下降的特点。其中,有效应力由3.5 MPa增加至9 MPa的过程中,虽然渗透率损害系数表现出快速下降的特点,但该过程中煤样渗透率损害最大(渗透率损耗约为60%)。自9 MPa之后,渗透率损害系数表现为缓慢下降的特点,表明煤样渗透率损害较小(渗透率损耗约为10%)。

通过对图2分析,发现研究的32煤样在有效应力为7.9,11 MPa时,渗透率损害系数出现明显的拐点,即确定临界应力为7~11 MPa。同时根据32个煤样在临界应力点对应的渗透率值和第1个应力点对应的煤样渗透率值,计算有效应力增加过程中渗透

率的损害率 结果如图 3 所示。

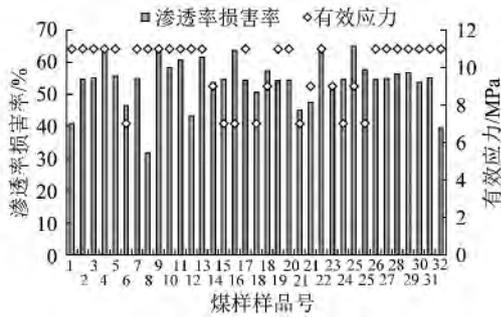


图 3 煤样渗透率损害率随有效应力的变化

Fig. 3 Variation of damage rate of permeability with effective stress for coal samples

由 32 个煤样渗透率损害率随有效应力的变化, 可以发现: 渗透率损害率介于 30% ~ 65%, 绝大多数介于 40% ~ 60%, 渗透率损害程度为中等偏弱到中等偏强。结合临界应力, 对渗透率损害率值和对应的临界应力进行了频数统计, 结果显示: 23 个煤样应力敏感的临界应力为 11 MPa, 5 个煤样应力敏感的临界应力为 9 MPa, 7 个煤样应力敏感的临界应力为 7 MPa。需要指出的是, 其中 18 号煤样、21 号煤样及 25 号煤样应力敏感的临界应力有 2 个, 分别为 7 和 9 MPa, 即煤样渗透率损害系数出现 2 个明显的拐点。

结合图 1~3, 煤样渗透率在有效应力为 2.5 MPa 之前下降较慢, 渗透率损害系数在有效应力为 3.5 MPa 之前上升急剧, 且此时渗透率损耗较大; 在有效应力自 2.5 MPa 或 3.5 MPa 之后的增加过程中, 煤样渗透率下降迅速, 渗透率损害系数虽然下降但渗透率损耗最高, 至有效应力到达临界值范围 (7 ~ 11 MPa), 渗透率基本降到最低值, 损害系数也基本到达了拐点。

综上, 在煤层气排水降压过程中仅考虑流体压力下降和有效应力增加的前提下, 煤储层发生明显的应力敏感效应, 尤其是当快速排采时会加快煤储层的压缩, 产生应力体积应变, 造成渗透率的快速损耗。另外, 在产气期提高排水量, 使有效应力增加也会使煤储层发生压缩, 使煤储层渗透率发生二次损耗。因而排采时应适当有效延长排水降压期的排采降压时间, 避免大幅提高排水速率, 以防止煤储层渗透率的大幅损耗。

## 2.2 有效应力不变情况下煤储层渗透率与流体压力的关系

排采过程中储层压力临近解吸压力阶段, 如果快速排采仍然产生应力敏感。为更好地讨论产气期间煤储层渗透与流体压力之间的关系, 消除有效应力的影响, 本次研究设置有效应力不变 (5 MPa), 通过改

变孔隙压力进行煤样的敏感性实验, 分析储层流体压力在低值范围内发生改变时煤储渗透率与储层流体压力之间的关系, 实验结果如图 4 所示。

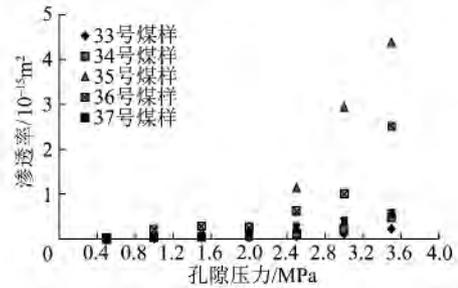


图 4 煤样渗透率随孔隙压力的变化

Fig. 4 Variation of permeability with pore pressure for coal samples

由图 4 可知, 在有效应力为较低定值时, 随着孔隙压力的增加, 渗透率表现出上升的特点, 对比表 1 中 33 ~ 37 号煤样的原始渗透率, 原始渗透率越高, 渗透率增幅越大。实验结果表明: 在有效应力较低时, 随孔隙压力增大 (最高 3.6 MPa), 煤储层渗透率不断得到改善, 且煤储层原始渗透率越高, 这种改善越明显。分析认为煤储层渗透率得到改善与煤基质收缩效应和气体分子滑脱效应有关, 尤其是煤基质的收缩效应引起渗透率的改善更加显著, 因为只有当储层压力低于 1 MPa (文献值为 0.7 和 0.8 MPa<sup>[14-15 20]</sup>) 时, 气体分子滑脱效应引起渗透率的增量才比较显著。

根据上文分析, 煤层气排采过程中, 当动液面临近煤储层, 储层压力接近临界解吸压力时, 应合理控制排水量, 降低动液面下降速度, 保证一定的孔隙流体压力, 发挥煤储层基质收缩效应对渗透率的改善作用。

## 2.3 围压不变情况下煤储层渗透率与流体压力、有效应力之间的耦合变化关系

为分析煤储渗透率与储层流体压力、有效应力之间的关系, 在设置围压不变前提下增加孔隙压力和降低有效应力的条件下进行了煤样的应力敏感性实验, 实验结果如图 5 所示。

由实验条件可知, 增加气驱之前, 围压增加到 10 MPa 的过程中, 煤样的有效应力增加而渗透率下降, 渗透率与原始渗透率相比, 下降了 1 ~ 2 个数量级, 因而本次研究工作的第 3 部分为围压不变情况下回压 (有效应力) 下降的应力敏感实验。

由图 5 可以看出, 随着有效应力下降和孔隙压力增加, 煤样的渗透率表现出下降的特点, 与目前多数研究的结果并不一致。但有文献指出渗透率随孔隙压力的变化存在一个临界压力, 孔隙压力小于临界压力时, 渗透率随孔隙压力的增加而减小<sup>[19-21]</sup>, 同时有

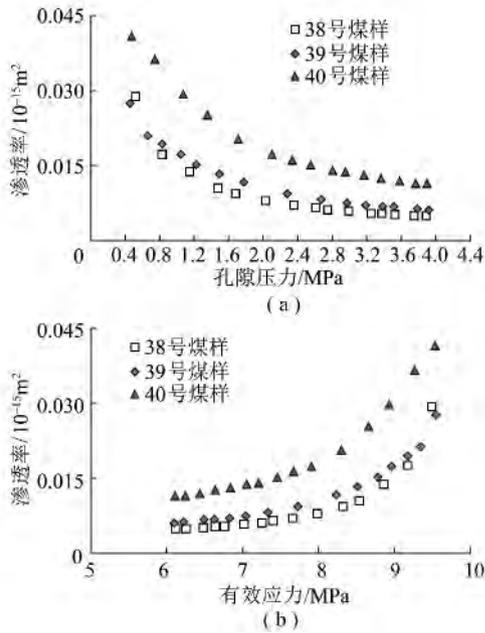


图5 煤样渗透率随孔隙压力和有效应力的变化

Fig. 5 Variation of permeability with pore pressure and effective stress for coal samples

分析认为:在当煤储层有效应力较低(低于4 MPa)时,有效应力为定值条件下,随着注入气压(孔隙压力)增加(从2.4 MPa增加到5.5 MPa),孔隙压力较低时煤基质体积应变所产生的渗透率下降量远高于气体分子的滑脱效应所引起的煤样渗透率增量,且这种现象有随着有效应力的增加而明显增加的趋势<sup>[22]</sup>。

结合以上分析和本次实验结果,认为:在孔隙压力从0.8 MPa增加到3.6 MPa的过程中,孔隙压力低于渗透率发生变化的临界压力,表现为煤储层渗透率随孔隙压力的增大而减小,且在此过程中煤基质应力体积应变虽有下降趋势,有效应力降低引起的煤储层渗透率增加量仍低于煤基质体积应变所产生的渗透率下降量,因而导致煤样的渗透率随有效应力的降低而降低。

由煤储层渗透率与流体压力、有效应力之间的耦合变化关系分析可知:煤层气井排采期间如发生修井、卡泵等停抽事故时,在造成孔隙流体压力回升、煤层有效应力下降的条件下煤储层渗透率仍然可能下降,因而排采期间应尽量避免停抽事故,防止因排采事故引起的煤储层渗透率大幅损伤。

### 3 结 论

(1)有效应力从0增加到10 MPa时,渗透率减少了50%~70%;有效应力从10 MPa增加到20 MPa时,渗透率降低趋势明显变缓,损失量仅约占初始渗

透率的10%;在有效应力增加到2.5 MPa以前,应力敏感性较强;有效应力从2.5 MPa增加到9 MPa时,应力敏感性最强。

(2)有效应力增加到3.5 MPa过程中,煤样的渗透率损害系数急剧上升,渗透率损耗20%~30%;有效应力从3.5 MPa上升至9 MPa的过程中,渗透率损害系数快速下降,而煤样渗透率损害最大,损耗约60%,自9 MPa之后,渗透率损害系数缓慢下降,煤样渗透率损害较小,损耗约10%;渗透率损害率介于30%~65%,绝大多数介于40%~60%,渗透率损害程度为中等偏弱到中等偏强,临界应力介于7~11 MPa。

(3)有效应力较低且不变条件下,煤样渗透率随孔隙压力的增加而增加,煤基质收缩效应引起渗透率改善比较显著,且煤样原始渗透率越高,渗透率增幅越大。

(4)围压达到较高定值且保持不变时,随有效应力下降和孔隙压力增加,煤样渗透率下降,这与有效应力和孔隙压力变化时引起的煤储层渗透率变化量有关。

(5)煤层气排采时应适当控制排水速率,发挥煤储层基质收缩效应对渗透率的改善作用,并应尽量避免停抽事故,有效抑制因煤层气排采引起应力敏感造成的储层大幅损伤。

### 参考文献:

- [1] 李金海,苏现波,林晓英,等.煤层气排采速率与产能的关系[J].煤炭学报,2009,34(3):376-380.  
Li Jinhai, Su Xianbo, Lin Xiaoying, et al. Relationship between discharge rate and productivity of coalbed methane wells[J]. Journal of China Society, 2009, 34(3):376-380.
- [2] 李仰民,王立龙,刘国伟,等.煤层气井排采过程中的储层伤害机理研究[J].中国煤层气,2010,7(6):39-45.  
Li Yangmin, Wang Lilong, Liu Guowei, et al. Study on coal reservoir damage mechanism in dewatering and extraction process of CBM wells[J]. China Coalbed Methane, 2010, 7(6):39-45.
- [3] 郭春华,周文,孙晗森,等.考虑应力敏感性的煤层气井排采特征[J].煤田地质与勘探,2011,39(5):27-30.  
Guo Chunhua, Zhou Wen, Sun Hansen, et al. The relationship between stress sensitivity and production of coal bed methane wells[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(5):27-30.
- [4] Liu Huihu, Sang Shuxun, Formolo Michael, et al. Production characteristics and drainage optimization of coalbed methane wells: A case study from low-permeability anthracite hosted reservoirs in southern Qinshui Basin, China[J]. Energy for Sustainable Development, 2013, 17:412-423.
- [5] Tao Shu, Wang Yanbin, Tang Dazhen, et al. Dynamic variation effects of coal permeability during the coalbed methane develop-

- ment process in the Qinshui Basin ,China[J]. International Journal of Coal Geology 2012 93:16 - 22.
- [6] 任广磊,李治平,张跃磊,等. 渗透率应力敏感对煤层气井产能的影响[J]. 煤炭科学技术 2012 40(4):104 - 107.  
Ren Guanglei ,Li Zhiping ,Zhang Yuelei ,et al. Stress sensitivity of permeability affected to production capacity of coal bed methane well [J]. Coal Science and Technology 2012 40(4):104 - 107.
- [7] Durucan S ,Ewards J S. The effects of stress and fracturing on permeability of coal[J]. Mining and Technology 1986 3:205 - 216.
- [8] Jose G. Numerical simulation of coupled fluid-flow/geomechanical behavior of tight gas reservoirs with stress sensitive permeability [A]. Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference [C]. SPE 39055 ,Rio de Janeiro ,1997:1 - 15.
- [9] Palmer I ,Mansoori J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: A new model [J]. SPE 52607 ,1998 ,1 (6) : 539 - 544.
- [10] Min K B ,Rutqvist J ,Tsang C F ,et al. Stress-dependent permeability of fractured rock masses:A numerical study [J]. International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences 2004 41 (7) :1191 - 1210.
- [11] 杨胜来,杨思松,高旺来. 应力敏感及液锁对煤层气储层伤害程度实验研究[J]. 天然气工业 2006 26(3):90 - 92.  
Yang Shenglai ,Yang Sisong ,Gao Wanglai. Experimental study of damage of stress and liquid sensitivities to coal-bed gas reservoir [J]. Natural Gas Industry 2006 26(3):90 - 92.
- [12] 陈振宏,王一兵,郭凯,等. 高阶煤煤层气储层应力敏感性研究[J]. 地质学报 2008 82(10):1390 - 1395.  
Chen Zhenhong ,Wang Yibing ,Guo Kai ,et al. Stress sensitivity of high-rank coalbed methane reservoir [J]. 2008 ,82 (10) :1390 - 1395.
- [13] 孟召平,张纪星,刘贺,等. 考虑应力敏感性的煤层气井产能模型及应用分析[J]. 煤炭学报 2014 39(4):593 - 599.  
Meng Zhaoping ,Zhang Jixing ,Liu He ,et al. Productivity model of CBM wells considering the stress sensitivity and its application analysis [J]. Journal of China Coal Society ,2014 ,39 (4) :593 - 599.
- [14] 邓泽,康永尚,刘洪林,等. 开发过程中煤储层渗透率动态变化特征[J]. 煤炭学报 2009 34(7):947 - 951.  
Deng Ze ,Kang Yongshang ,Liu Honglin ,et al. Dynamic variation character of coal bed methane reservoir permeability during depletion [J]. Journal of China Coal Society 2009 34(7):947 - 951.
- [15] 艾池,栗爽,李净然,等. 煤岩储层渗透率动态变化模型[J]. 特种油气藏 2013 20(1):71 - 74.  
Ai Chi ,Li Shuang ,Li Jingran ,et al. Model of dynamic permeability variation of coal seam [J]. Special Oil and Gas Reservoirs 2013 20 (1) :71 - 74.
- [16] 白建梅,秦义,石惠宁,等. 沁水盆地煤储层应力敏感分析及工艺对策[J]. 石油钻采工艺 2009 31(4):94 - 96.  
Bai Jianmei ,Qin Yi ,Shi Huining ,et al. Analysis on stress sensitivity of coalbed methane reservoir in Qinshui Basin and Strategies [J]. Oil Drilling & Production Technology 2009 31(4):94 - 96.
- [17] 孟召平,侯泉林. 煤储层应力敏感性及其影响因素的实验分析[J]. 煤炭学报 2012 37(3):430 - 437.  
Meng Zhaoping ,Hou Quanlin. Experimental research on stress sensitivity of coal reservoir and its influencing factors [J]. Journal of China Society 2012 37(3):430 - 437.
- [18] 程远方,吴百烈,李娜,等. 应力敏感条件下煤层压裂裂缝延伸模拟研究[J]. 煤炭学报 2013 38(3):1634 - 1639.  
Cheng Yuanfang ,Wu Bailie ,Li Na ,et al. Research on the propagation of hydraulic fracture under coal-bed stress sensitivity [J]. Journal of China Coal Society 2013 38(3):1634 - 1639.
- [19] 孙培德. 变形过程中煤样渗透率变化规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报 2001 20(S1):1801 - 1804.  
Sun Peide. Testing study on coal specimen permeability during solid deformation process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2001 20(S1):1801 - 1804.
- [20] 陈金刚,陈庆发. 煤岩力学性质对其基质自调节能力的控制效应[J]. 天然气工业 2005 25(2):140 - 144.  
Chen Jingang ,Chen Qingfa. Control effect of coal mechanical property on its matrix self-regulating ability [J]. Natural Gas Industry , 2005 25 (2) :140 - 144.
- [21] 周军平,鲜学福,姜永东,等. 考虑有效应力和煤基质收缩效应的渗透率模型[J]. 西南石油大学学报(自然科学版) 2009 31(1):4 - 10.  
Zhou Junping ,Xian Xuefu ,Jiang Yongdong ,et al. A permeability model considering the effective stress and coal matrix shrinking effect [J]. Journal of Southwest Petroleum University ( Science & Technology Edition) 2009 31(1):4 - 10.
- [22] Li Junqian ,Liu Dameng ,Yao Yanbin ,et al. Evaluation and modeling of gas permeability changes in anthracite coals [J]. Fuel ,2013 , 111 :606 - 612.