

# 煤层气储层应力敏感性定量表征及影响因素研究

王镜惠<sup>1</sup>, 梅明华<sup>2</sup>, 梁正中<sup>1</sup>, 王华军<sup>2</sup>

(1. 榆林学院 化学与化工学院, 陕西 榆林 719000; 2. 中国石油 长庆油田分公司 第二采气厂, 陕西 榆林 719000)

**摘要:**煤层气储层应力敏感性较强,对煤层气开发具有重要影响。采用不同区块天然煤样开展应力敏感性室内实验,应用应力敏感性系数和渗透率伤害系数2个参数评价了各煤样应力敏感性程度,并研究了煤阶、渗透率和储层气体压力等参数对煤岩应力敏感性的影响。结果表明:镜质组反射率 $R_o < 1.7\%$ 时,煤阶越低,应力敏感性程度越大,渗透率伤害程度越高;而镜质组反射率 $R_o > 1.7\%$ 时,煤阶越高,应力敏感性程度越大,渗透率伤害程度越高;煤岩初始渗透率越高,应力敏感性系数越低,应力敏感性越弱,利用初始渗透率与其应力敏感性系数之间的经验公式可以估算煤岩应力敏感性,方便现场应用;储层气体压力越低,渗透率越高,越有利于煤层气开发,而煤岩应力敏感性系数和渗透率伤害系数也略高,需预防应力敏感性造成的渗透率伤害。

**关键词:**煤层气;应力敏感性;渗透率伤害系数;影响因素;实验研究

中图分类号: TE135

文献标识码: A

## Controls and quantitative characterization of stress sensitivity for coal seams

WANG Jinghui<sup>1</sup>, MEI Minghua<sup>2</sup>, LIANG Zhengzhong<sup>1</sup>, WANG Huajun<sup>2</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China;

2. Second Gas Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Branch Company, Yulin, Shaanxi 719000, China)

**Abstract:** The stress sensitivity of coalbed methane reservoirs is strong, which has an important influence on the development of coalbed methane. Natural coal samples from different blocks were used to carry out stress sensitivity experiments, and two parameters, stress sensitivity coefficient and permeability damage coefficient were applied to evaluate the degree of stress sensitivity of coal samples. The stress sensitivity effects of coal rank, permeability and the gas pressure of a coal reservoir were studied. The results showed that when  $R_o$  is lower than 1.7%, the lower the coal rank is, the greater the degree of stress sensitivity is and the higher the extent of the permeability damage. When  $R_o$  is higher than 1.7%, the higher the coal rank is, the greater the degree of stress sensitivity is and the higher the permeability damage is. The empirical formula, put forward by this paper, between initial permeability and stress sensitivity coefficient can be used to predict the stress sensitivity coefficient of coal samples, which is convenient for pilot application. The lower the pressure of a gas reservoir is, the higher the permeability, which is advantageous for CBM development. However, lower gas pressure results in a slightly higher stress sensitivity coefficient and permeability damage coefficient, so avoiding stress sensitivity is important.

**Key words:** coal-bed methane; stress sensitivity; permeability damage coefficient; influencing factor; experiment study

煤层气开发是通过持续排水降压,使甲烷解吸、扩散、渗流产出地面,而煤层割理、裂缝系统复杂<sup>[1-2]</sup>,应力敏感性强,容易导致渗透率伤害,影响煤层气并排水降压效率和产气效率<sup>[3-4]</sup>,因此,有必要开展对煤岩应力敏感性的研究。部分学者对不同区块煤岩应力敏感性进行了实验研究:田永东等<sup>[5]</sup>研究了高煤阶煤岩应力敏感性,认为具有强应力敏感性,但并未分析其原因;杨延辉等<sup>[6]</sup>研究了高阶煤储层应力敏感性,认为有效应力小于

9.5 MPa时应力敏感性强,但并未解释其影响因素;陈刚等<sup>[7]</sup>研究了各阶煤岩应力敏感性情况,认为中、高煤阶煤储层应力敏感性弱于低煤阶,但其研究的样品 $R_o$ 最高仅为2.02%,并不能代表全部高阶煤;鲍清英等<sup>[8]</sup>研究了低阶煤储层应力敏感性,认为低煤阶煤岩应力敏感性强于高煤阶煤岩,研究样品同样没有广泛的代表性;陈术源等<sup>[9]</sup>研究了温度对高阶煤的煤层气储层应力敏感性的影响,认为温度影响较弱;薛培等<sup>[10]</sup>主要研究了有效应力及

收稿日期: 2018-05-25; 修订日期: 2018-09-17。

作者简介: 王镜惠(1984—),男,硕士,讲师,从事油气地质勘探及油气田开发研究。E-mail: 361828422@qq.com。

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划“鄂尔多斯盆地东北部异常压力形成与页岩气富集机理研究”(2017JM4017)资助。

孔隙压力对煤岩应力敏感性的影响。目前对煤层气储层应力敏感性影响因素研究较少且不够系统, 本文首先确定了煤层应力敏感性系数和渗透率损害率 2 个参数来表征煤岩应力敏感性强弱, 然后着重研究了煤阶、煤层初始渗透率和储层气体压力 3 个关键参数对煤层应力敏感性的影响, 以期揭示煤岩应力敏感性影响因素及影响机理, 并为预防煤岩应力敏感性提供合理借鉴。

## 1 应力敏感性定量表征

### 1.1 应力敏感性系数

许多学者<sup>[11-13]</sup>对煤岩应力敏感性进行了室内试验, 认为煤岩渗透率随有效应力的增加呈指数形式降低, 其表达式为:

$$k = k_0 e^{-C(\sigma - \sigma_0)} \quad (1)$$

式中:  $k$  为应力增加后煤层渗透率,  $k_0$  为初始渗透率,  $C$  为煤层应力敏感系数,  $\sigma$  为增加后的应力,  $\sigma_0$  为初始应力。煤层应力敏感性系数表征应力敏感性大小, 系数越大, 应力敏感性越强。

### 1.2 渗透率损害率

$$\alpha = \frac{k_0 - k}{k_0} \times 100 = (1 - e^{-C(\sigma - \sigma_0)}) \times 100 \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为煤层渗透率伤害系数。

煤层渗透率损害率表征由于应力增加导致煤层渗透率降低的程度, 渗透率损害率越大, 在增加相同应力时, 渗透率降低程度越大。由式(2)可知, 煤层渗透率损害率大小与有效应力大小和应力敏感性系数大小有关。根据式(2)模拟得到应力敏感性系数不同时有效应力与渗透率损害率关系(图1), 表明渗透率损害率随有效应力的增加而增

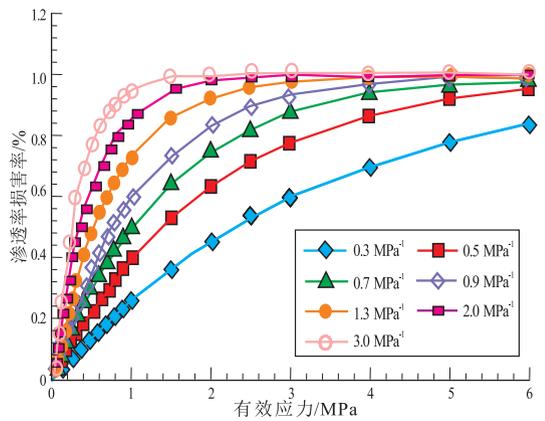


图1 应力敏感性系数不同时有效应力与渗透率损害率关系  
Fig.1 Relationship between effective stress and permeability of coal samples with different stress sensitivity coefficients

加, 且应力敏感性系数越大, 渗透率损害率的增加程度越快。

## 2 应力敏感性实验

### 2.1 实验条件

实验用煤岩样品取自鄂尔多斯盆地、沁水盆地的保德、乡宁和晋城等区块, 加工成长度 5 cm、直径 2.5 cm 的天然煤岩岩柱。煤样镜质体反射率在 0.7%~3.1% 之间, 初始渗透率分布在  $(0.1 \sim 0.83) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  之间, 煤岩组分如表 1 所示。

为研究煤阶对应力敏感性的影响, 分别在保德、乡宁、延川、长治和晋城 5 个区块各选 2 块煤岩样品, 各区的 2 块煤岩样品渗透率分别为  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  和  $0.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  左右且其镜质体反射率应相近; 选取晋城区块煤阶相近而初始渗透率分别为  $0.05 \times 10^{-3}, 0.2 \times 10^{-3}, 0.29 \times 10^{-3}, 0.53 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的 4 块煤岩样品, 研究煤岩初始渗透率对应力敏感性的影响; 选取晋城区块初始渗透率为  $0.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$

表 1 沁南—鄂东缘不同煤阶煤岩样品基本参数

Table 1 Basic parameters of coal samples of different ranks from the southern Qinshui Basin and the eastern margin of Ordos Basin

区块	$R_0$ / %	$k_0$ / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	$C$ / $\text{MPa}^{-1}$	镜质组/ %	惰质组/ %	壳质组/ %	水分/ %	灰分/ %	挥发分/ %
保德	0.7	0.81	0.28	66.8	9.7	23.5	2.40	4.6	40.2
	0.8	0.11	0.45	60.1	10.2	29.7	2.20	4.8	37.6
乡宁	1.7	0.79	0.15	75.5	24.5		1.60	7.1	25.5
	1.6	0.12	0.21	73.2	26.8		1.40	6.9	27.1
延川	2.1	0.83	0.17	79.1	20.9		1.10	10.9	18.3
	2.2	0.11	0.25	80.2	19.8		0.90	17.7	16.9
长治	2.5	0.78	0.20	85.5	14.5		1.00	14.3	10.2
	2.5	0.12	0.48	84.3	15.7		0.90	14.0	12.8
晋城	3.1	0.81	0.27	87.4	12.6		0.96	16.9	7.9
	3.0	0.10	0.64	88.9	11.1		0.52	12.3	8.5

的煤岩样品,分别在气体压力为2,3,4,5 MPa 时测定煤岩渗透率,研究储层气体压力对应力敏感性的影响。

实验仪器包括气体渗透率测试仪、岩心夹持器、高压甲烷气瓶、调压阀、恒速恒压泵、皂沫流量计和恒温箱等。

### 2.2 实验步骤

实验在室温条件下(20 ℃)进行,严格按照石油天然气行业标准《储层敏感性流动试验评价方法:SY/T5358—2002》进行试验测试。分别在有效应力为1,3,5,7,9,12 MPa 条件下测定煤岩渗透率,得到不同煤阶煤岩样品在不同有效应力条件下的渗透率,根据式(1)和(2)计算出应力敏感性系数和渗透率损害率,结果如表1、图2所示。

## 3 结果讨论

### 3.1 煤阶对应力敏感性的影响

选取不同区块、不同煤阶煤岩样品进行应力敏感性试验(表1,图2)。由表1和图2可知,在渗透率相近情况下,随着煤阶增加,煤岩应力敏感性系数先增加后降低,而煤岩渗透率损害率先降低后增加。在实验所用的10块煤岩样品中,渗透率相近时,保德区块( $R_0=0.8\%$ )和晋城区块( $R_0=3.0\%$ )应力敏感性系数最高,渗透率损害率最大;乡宁区块( $R_0=1.7\%$ )应力敏感性系数最低,渗透率损害

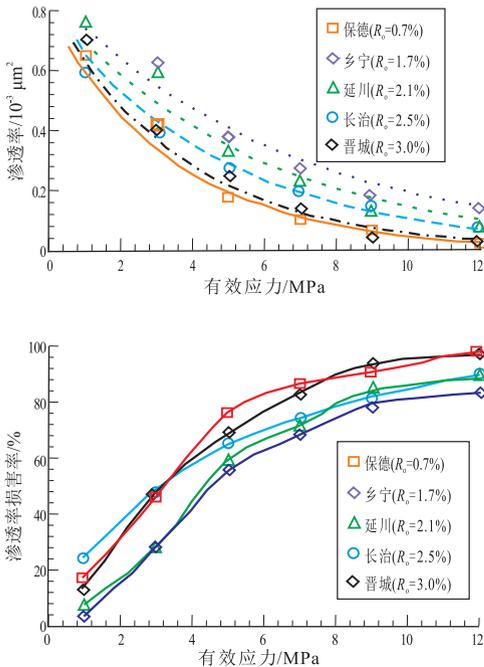


图2 沁南—鄂东缘不同煤阶煤样有效应力与渗透率关系  
Fig.2 Relationship between effective stress and permeability of coal samples with different coal ranks in the southern Qinshui Basin and the eastern margin of Ordos Basin

率最小。表明镜质组反射率  $R_0 < 1.7\%$  时,煤阶越低,应力敏感性程度越大,渗透率损害率越高;而镜质组反射率  $R_0 > 1.7\%$  时,煤阶越高,应力敏感性程度越大,渗透率损害率越高。这主要是由于镜质组反射率  $R_0 > 1.7\%$  时,热演化程度越高,煤岩弹性模量越高、泊松比越低,构造运动形成的裂隙密度降低且裂缝宽度减小<sup>[14]</sup>。因此,随着应力增加,裂缝闭合作用导致渗透率下降程度增加,应力敏感性增强;而当镜质组反射率  $R_0 < 1.7\%$  时,煤阶越低,煤岩孔隙度越大,随有效应力的增加,孔隙压缩程度越高,渗透率下降程度越高,则应力敏感性越强。

### 3.2 煤岩初始渗透率对应力敏感性的影响

图3反映了4块不同初始渗透率的煤样在不同有效应力条件下渗透率的变化趋势,图3表明4块煤样渗透率均随有效应力的增加而降低。依据式(1)对图3中数据进行拟合,得到各煤样应力敏感性系数(表2),表明煤岩初始渗透率越高,其应力敏感性系数越低,即应力敏感性越弱。对每个区块煤阶相近而渗透率不同的煤岩样品,分别测试不同渗透率条件下应力敏感性系数(表1),结果同样表明煤阶相同时,初始渗透率越高,煤岩应力敏感性系

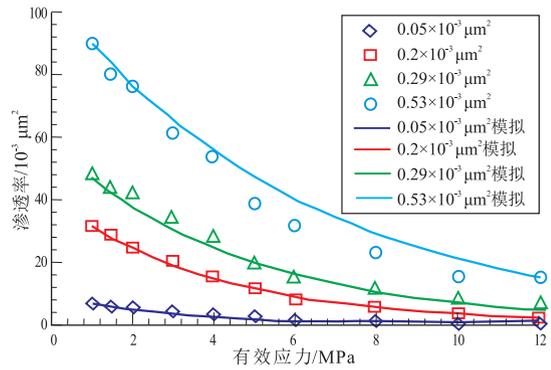


图3 沁南—鄂东缘不同初始渗透率煤样渗透率与有效应力关系  
Fig.3 Relationship between permeability and effective stress of samples with different initial permeabilities in the southern Qinshui Basin and the eastern margin of Ordos Basin

表2 沁南—鄂东缘实验煤样初始渗透率与应力敏感性系数

Table 2 Initial permeability and stress sensitivity coefficient of the 4 coal samples from the southern Qinshui Basin and the eastern margin of Ordos Basin

$R_0/\%$	$k_0/10^{-3} \mu\text{m}^2$	$C/\text{MPa}^{-1}$
2.1	0.05	0.33
2.2	0.20	0.25
2.0	0.29	0.20
2.1	0.53	0.18

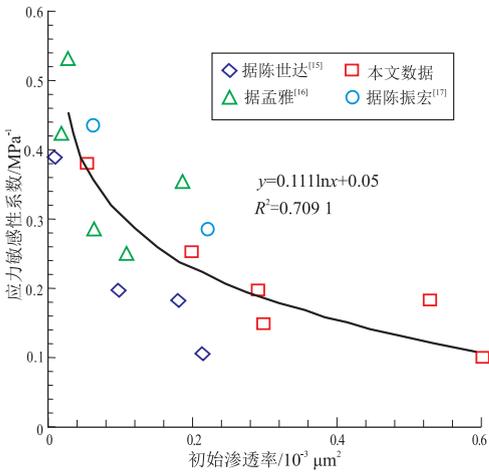


图4 沁南—鄂东缘初始渗透率与应力敏感性系数关系  
Fig.4 Relationship between initial permeability and stress sensitivity coefficient of coal in the southern Qinshui Basin and the eastern margin of Ordos Basin

数越低。利用本文数据和前人数据<sup>[15-17]</sup>作不同煤样初始渗透率与其应力敏感性系数之间的关系图(图4),表明煤岩应力敏感性系数随煤样初始渗透率的增加而降低。二者关系可用下式表征:

$$C = -0.111 \ln k_0 + 0.05 \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)并整理可得煤岩渗透率随有效应力变化的计算公式:

$$k = \frac{k_0^{[0.111(\sigma-\sigma_0)+1]}}{e^{0.05(\sigma-\sigma_0)}} \quad (4)$$

利用式(4)对4块煤样渗透率随有效应力变化情况进行模拟,模拟结果(图3)表明,式(4)能很好地拟合试验数据。

### 3.3 储层气体压力对应力敏感性的影响

图5a为同一煤样在不同储层气体压力时渗透率随有效应力的变化,表明在相同有效应力条件下,储层气体压力越低,渗透率越高,且应力敏感性越高。如气体压力为2 MPa时,煤岩初始渗透率为 $0.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,拟合后得到的应力敏感性系数为

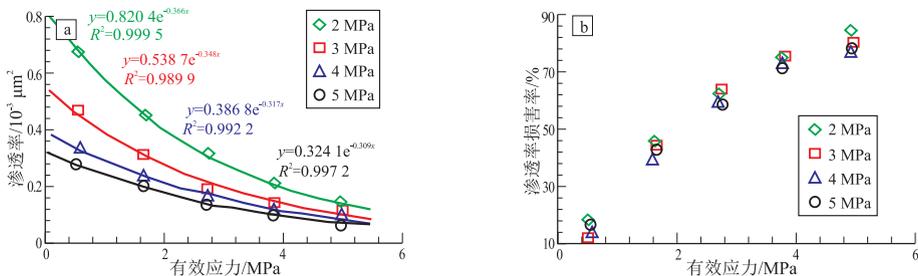


图5 沁南—鄂东缘不同储层压力对煤样应力敏感性和渗透率伤害程度的影响  
Fig.5 Effects of gas pressure on stress sensitivity and permeability damage content of coal samples in the southern Qinshui Basin and the eastern margin of Ordos Basin

$0.366 \text{ MPa}^{-1}$ 。而气体压力为5 MPa时,煤岩储层渗透率只有 $0.32 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,比2 MPa时降低了60%;此时拟合后得到的应力敏感性系数为 $0.309 \text{ MPa}^{-1}$ ,比2 MPa时降低了2%。这主要是由于:第一,储层中气体压力越低,气体滑脱效应越大,则气体渗透率越高;第二,储层气体压力越低,煤岩吸附的气体量越小,所造成的基质膨胀效应越低,煤岩有效渗流通道较大,因此渗透率较高。同时,由于上覆岩层应力一定,即围压固定,此时储层气体压力越低,煤岩承受的有效应力越大,裂缝闭合程度越高,因此,应力敏感性系数越大,应力敏感性越强。

图5b为同一煤样在不同储层气体压力时渗透率损害率随有效应力的变化,表明总体上气体压力较低时,渗透率损害率也略高,气体压力为2 MPa和3 MPa时的渗透率损害率略高于气体压力为4 MPa和5 MPa时的渗透率损害率。这是由于气体压力越低,有效应力增加造成压缩作用越大,从而应力敏感性越强,渗透率损害率增加。图5整体分析表明,储层气体压力越低,渗透率越高,越有利于煤层气开发,但需要预防应力敏感性造成的渗透率伤害。

## 4 结论

(1)煤层应力敏感性系数越大,应力敏感性越强。煤层渗透率损害率随有效应力的增加而增加,且应力敏感性系数越大,渗透率损害率的增加程度越大。

(2)镜质组反射率 $R_0 < 1.7\%$ 时,煤阶越低,应力敏感性程度越大,渗透率损害率越高,因为煤阶越低,煤岩孔隙度越大,随着有效应力增加孔隙压缩程度越高;而镜质组反射率 $R_0 > 1.7\%$ 时,煤阶越高,应力敏感性程度越大,渗透率损害率越高,因为热演化程度越高,煤岩成岩过程中基质收缩作用越强,割理—裂隙越发育,应力增加导致的裂缝闭合作用越强。

(3) 煤岩初始渗透率越高,其应力敏感性系数越低,应力敏感性越弱。根据实验数据得到的初始渗透率与其应力敏感性系数之间经验公式对实验数据拟合性较好,因此,在煤阶相近时,可以根据煤岩初始渗透率估算其应力敏感性,方便现场应用。

(4) 储层气体压力越低,渗透率越高,而煤岩应力敏感性系数和渗透率损害率也略高,这主要是由于储层中气体压力越低,气体滑脱效应越大,则渗透率越高;同时,由于气体压力越低,裂缝闭合程度越高,因此煤岩应力敏感性系数和渗透率损害率较大。因此,煤层气藏气体压力越低,越有利于煤层气开发,但需要预防应力敏感性造成的渗透率伤害。

#### 参考文献:

- [1] 贾慧敏.高煤阶煤岩孔隙结构分形特征研究[J].石油化工高等学校学报,2016,29(1):53-56.  
JIA Huimin.The fractal feature of the pore structure for high coal rank coal porous media[J].Journal of Petrochemical Universities,2016,29(1):53-56.
- [2] 熊波,刘坤,郭凯,等.基于X-CT技术对黔西滇东区域煤储层物性特征的研究[J].石油实验地质,2016,38(3):407-412.  
XIONG Bo,LIU Kun,GUO Kai,et al.Characterization of the physical properties of coal reservoirs in the western Guizhou and eastern Yunnan by X-ray computed tomography[J].Petroleum Geology & Experiment,2016,38(3):407-412.
- [3] 陈振宏,陈艳鹏,杨焦生,等.高煤阶煤层气储层动态渗透率特征及其对煤层气产量的影响[J].石油学报,2010,31(6):966-969.  
CHEN Zhenhong,CHEN Yanpeng,YANG Jiaosheng,et al.Reservoir dynamic permeability of high rank coalbed methane and its effect on the coalbed methane output[J].Acta Petrolei Sinica,2010,31(6):966-969.
- [4] 贾慧敏,孙世轩,毛崇昊,等.基于煤岩应力敏感性的煤层气井单相流产水规律研究[J].煤炭科学技术,2017,45(12):189-193.  
JIA Huimin,SUN Shixuan,MAO Chonghao,et al.Study on single-phase flow water production law of coalbed methane well based on coal and rock stress sensitivity[J].Coal Science and Technology,2017,45(12):189-193.
- [5] 田永东,武杰.沁水盆地南部高煤阶煤储层敏感性[J].煤炭学报,2014,39(9):1835-1839.  
TIAN Yongdong,WU Jie.Sensitivity of high-rank coal-bed methane reservoir in the southern Qinshui Basin[J].Journal of China Coal Society,2014,39(9):1835-1839.
- [6] 杨延辉,陈彦君,郭希波,等.沁水盆地南部高煤阶煤岩渗透率压敏效应分析[J].煤炭科学技术,2015,43(12):152-156.  
YANG Yanhui,CHEN Yanjun,GUO Xibo,et al.Analasis on effect of stress sensitivity on permeability of high-rank coal in southern Qinshui Basin[J].Coal Science and Technology,2015,43(12):152-156.
- [7] 陈刚,秦勇,杨青,等.不同煤阶煤储层应力敏感性差异及其对煤层气产出的影响[J].煤炭学报,2014,39(3):504-509.  
CHEN Gang,QIN Yong,YANG Qing,et al.Different stress sensitivity of different coal rank reservoir permeability and its effect on the coalbed methane output[J].Journal of China Coal Society,2014,39(3):504-509.
- [8] 鲍清英,东振,张义,等.低煤阶应力敏感性机理及其对产气的影响:以二连盆地为例[J].煤炭学报,2017,42(3):671-679.  
BAO Qingying,DONG Zhen,ZHANG Yi,et al.Stress sensitivity mechanism of low-rank coal and its influence on gas production: a case study from Erlian Basin[J].Journal of China Coal Society,2017,42(3):671-679.
- [9] 陈术源,秦勇,申建,等.高阶煤渗透率温度应力敏感性试验研究[J].煤炭学报,2014,39(9):1845-1851.  
CHEN Shuyuan,QIN Yong,SHEN Jian,et al.Temperature-stress sensitivity of high-rank coal permeability[J].Journal of China Coal Society,2014,39(9):1845-1851.
- [10] 薛培,高潮.有效应力对保德区块煤储层渗透率影响研究[J].地质与勘探,2016,52(2):334-339.  
XUE Pei,GAO Chao.Study on influence of effective stress on coal reservoir permeability in the Baode block[J].Geology and Exploration,2016,52(2):334-339.
- [11] 张羽,张遂安,杨立源,等.煤样三维渗透率应力敏感性试验研究[J].煤田地质与勘探,2016,44(3):51-56.  
ZHANG Yu,ZHANG Suian,YANG Liyuan,et al.The experimental study on stress sensitivity of three dimensional permeability of coal[J].Coal Geology & Exploration,2016,44(3):51-56.
- [12] 贾慧敏,胡秋嘉,刘忠,等.缝应力敏感性对煤层气井单相流段产水影响及排采对策[J].中国煤层气,2017,14(5):31-34.  
JIA Huimin,HU Qiujia,LIU Zhong,et al.Influence of fractures stress sensitivity on water production law for the single-phase flow of CBM wells and drainage countermeasures[J].China Coalbed Methane,2017,14(5):31-34.
- [13] 魏建平,李明助,王登科,等.煤样渗透率围压敏感性试验研究[J].煤炭科学技术,2014,42(6):76-80.  
WEI Jianping,LI Mingzhu,WANG Dengke,et al.Experimental research on sensibility of coal samples permeability under confining pressure[J].Coal Science and Technology,2014,42(6):76-80.
- [14] 毕建军,苏现波,韩德馨,等.煤层割理与煤级的关系[J].煤炭学报,2001,26(4):346-349.  
BI Jianjun,SU Xianbo,HAN Dexin,et al.The relation between cleat frequency and coal rank[J].Journal of China Coal Society,2001,26(4):346-349.
- [15] 陈世达,汤达祯,高丽军,等.有效应力对高煤级煤储层渗透率的控制作用[J].煤田地质与勘探,2017,45(4):76-80.  
CHEN Shida,TANG Dazhen,GAO Lijun,et al.Control of effective stress on permeability in high-rank coal reservoirs[J].Coal Geology & Exploration,2017,45(4):76-80.
- [16] 孟雅,李治平.覆压下煤的孔渗性实验及其应力敏感性研究[J].煤炭学报,2015,40(1):154-159.  
MENG Ya,LI Zhiping.Experimental study on the porosity and permeability of coal in net confining stress and its stress sensitivity[J].Journal of China Coal Society,2015,40(1):154-159.
- [17] 陈振宏,王一兵,郭凯,等.高煤阶煤层气藏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].Acta Geologica Sinica,2008,82(10):1390-1395.