

有效应力对不同阶煤渗透率影响的差异性分析

薛培¹, 郑佩玉², 徐文君², 任小龙², 黄晨², 杜江民^{3,4}

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2. 中石油青海分油田采油二厂, 海西 816400

3. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

4. 石家庄经济学院资源学院, 石家庄 050031

摘要 通过不同阶煤储层渗透率应力敏感性实验, 对比分析了有效应力对不同阶煤渗透率影响的差异。结果显示, 在相同有效应力变化范围内, 低阶煤渗透率下降幅度大于中、高阶煤; 低、高阶煤渗透率变化较中阶煤更符合指数函数变化规律; 低有效应力阶段, 低阶煤渗透率损害系数、应力敏感系数大于中、高阶煤; 相同有效应力下, 低阶煤割理压缩系数大于中、高阶煤; 不同煤阶割理压缩系数随有效应力增加呈现下降趋势, 不应将其视为常数。应力敏感性评价参数拟合结果显示, 中、低阶煤渗透率损害系数、割理压缩系数符合指数函数变化规律, 高阶煤渗透率损害系数、割理压缩系数符合线性函数变化规律; 不同阶煤渗透率应力敏感系数均符合指数变化规律。

关键词 不同阶煤; 有效应力; 渗透率损害系数; 应力敏感系数; 割理压缩系数

中图分类号 P618.11

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.02.010

Influence of effective stress on permeability of different rank coals

XUE Pei¹, ZHENG Peiyu², XU Wenjun², REN Xiaolong², HUANG Chen², DU Jiangmin^{3,4}

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China

2. No.2 Oil Producing Plant, Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Haixi 816400, China

3. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China

4. College of Resources, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China

Abstract Based on the stress sensitivity experiments of various rank coals, the influence of the effective stress on the permeability of different rank coals is studied. It is shown that in the same range of the effective stress variation, the decrease of the low-rank coal permeability is larger than that of the medium-rank and high-rank coals; The permeability variations of the low-rank and high-rank coals more consistently follow an exponential law than the medium-rank coal; In the low effective stress range, the damage coefficient of the permeability and the stress sensitive coefficient of the low-rank coal are greater than those of the medium-rank and high-rank coals; Under the identical effective stress, the cleat compressibility of the low-rank coal is greater than that of the medium-rank and high-rank coals; The cleat compressibility decreases with the increase of the effective stress, and it is not constant. Fitting results of evaluation parameters of the stress sensitivity show that the damage coefficient of the permeability and the cleat compressibility of the low-rank and medium-rank coals follow an exponential law, but for the high-rank coal, they follow a linear function; the stress sensitive coefficient of various rank coals follows an exponential law.

Keywords various rank coals; effective stress; injury coefficient of permeability; stress sensitive coefficient; cleat compressibility

收稿日期: 2014-10-17; 修回日期: 2014-12-16

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05042-003)

作者简介: 薛培, 博士研究生, 研究方向为煤层气及油气地质, 电子信箱: xuepei330@163.com; 杜江民(通信作者), 讲师, 研究方向为石油地质与非常规油气地质, 电子信箱: jiangmin@163.com

引用格式: 薛培, 郑佩玉, 徐文君, 等. 有效应力对不同阶煤渗透率影响的差异性分析[J]. 科技导报, 2015, 33(2): 69-73.

煤储层渗透率是煤层气可采性评价的重要指标之一^[1], 开采过程中煤储层渗透率的动态变化是多种因素综合影响的结果^[2,3]。有效应力作为衡量地应力作用程度大小的重要参数, 是影响煤储层渗透率的重要因素^[4]。在煤层气井排采过程中, 由于孔隙压力下降, 有效应力增加, 引起煤储层割理闭合, 导致渗透率的降低。

目前由于国内煤层气开发工作主要集中在高、中阶煤, 针对煤岩的应力敏感性分析亦多采用高阶煤开展^[5-7], 本文选用不同煤阶煤岩作为试验对象, 对比分析不同阶煤应力敏感性差异, 同时对不同应力敏感性评价参数对煤岩应力敏感性评价的差异进行对比, 并分析有效应力变化对割理压缩系数的影响, 以期从应力角度建立渗透率模型提供依据。

1 实验样品及方法

为对比分析不同煤阶煤岩渗透率对有效应力响应的差异性, 试验所用煤样分别来自沁水盆地、鄂尔多斯盆地和吐哈盆地, 实验样品的基础数据如表1所示。将煤岩样品制成 $\Phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的煤柱, 在温度设定为 70°C 的干燥环境中干燥 24 h 制成干样, 后在干燥箱中保存以备试验取用。

表1 试验样品基础数据

Table 1 Basic data of the coal samples

采样地点	煤样类型	煤样尺寸/cm		镜质体反射率/%	弹性模量/MPa	泊松比	初始渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
		直径	长度				
吐哈盆地	干样	2.50	5.27	0.68	4463	0.17	0.033954
鄂尔多斯盆地	干样	2.50	5.18	1.57	2580	0.53	0.155134
沁水盆地	干样	2.49	4.72	2.14	4517	0.31	0.058161

考虑实验的安全性, 实验选用 CO_2 作为流体介质, 实验温度为 25°C 。实验过程中, 保持孔隙压力恒定(孔隙压力设定为 4 MPa), 采用改变围压的方式实现增加有效应力的目的, 有效应力设定为 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 MPa, 有效应力点上升控制在 30 min, 待流量计保持稳定之后测定流量。

2 试验结果与分析

根据第1节实验方法, 测得有效应力变化过程中, 煤样对 CO_2 的渗透率 K 数据(表2、图1), 并对无因次渗透率 K/K_0 进行了拟合(图2)。

图1给出在有效应力增加过程中, 不同阶煤渗透率的变化曲线。随着有效应力的增加, 不同阶煤渗透率均呈现下降趋势, 其中低阶煤渗透率的下降幅度大于中、高阶煤, 高阶煤渗透率下降幅度略大于中阶煤。为了对比不同阶煤渗透率下降幅度的差异, 取有效应力 2~14 MPa 作为基准, 则在有效应力增加过程中, 低阶煤渗透率从 $0.033954 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 下降至

$0.000203 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 下降幅度为 99.40%; 中阶煤渗透率从 $0.155134 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 降至 $0.020154 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 下降幅度为 87.01%; 高阶煤渗透率从 $0.058161 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 下降至 $0.005394 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 下降幅度为 90.73%。

表2 有效应力变化过程中不同阶煤渗透率

Table 2 Permeability of various rank coals under different effective stresses

有效应力/MPa	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$		
	高阶煤	中阶煤	低阶煤
2	0.058161	0.155134	0.033954
4	0.033524	0.073161	0.003395
6	0.019778	0.047123	0.001322
8	0.013978	0.036274	0.000576
10	0.009862	0.029605	0.000474
12	0.006968	0.025422	0.000372
14	0.005394	0.020154	0.000203
16	0.004582	0.017051	—
18	0.004002	0.014881	—
20	0.003654	—	—

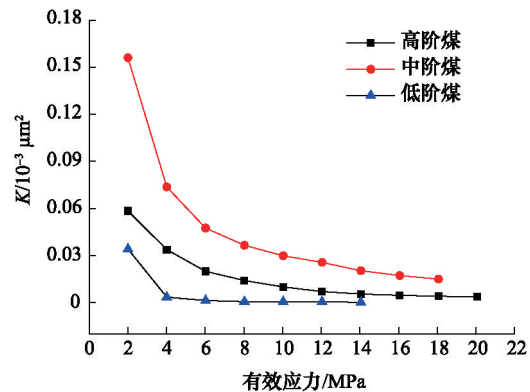


图1 渗透率变化曲线

Fig. 1 The curve of permeability

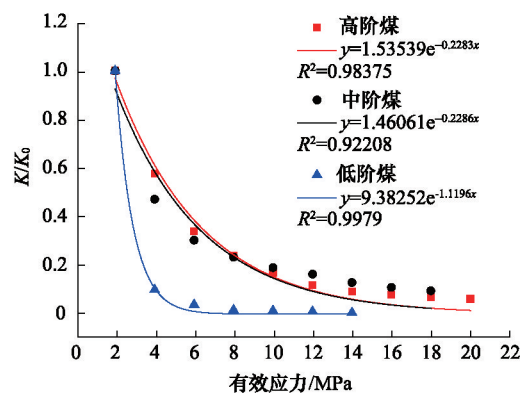


图2 无因次渗透率拟合曲线

Fig. 2 Fitting curve of dimensionless permeability

图2给出在有效应力增加过程中,不同阶煤无因次渗透率的拟合曲线。采用指数函数对无因次渗透率进行拟合,拟合结果显示,低、高阶煤渗透率变化曲线较中阶煤更符合指数函数变化规律,低、高阶煤渗透率拟合曲线相关系数可达98%以上,而中阶煤渗透率拟合曲线相关系数为0.92208。

3 应力敏感性分析

3.1 应力敏感性分析参数

采用3个评价参数对煤岩渗透率的有效应力敏感性进行评价。

1) 渗透率损害系数。渗透率损害率是指在单位有效应力增量作用下,煤储层渗透率的损害程度,即有效应力每变化一个单元所引起的煤岩渗透率相对于上一个有效应力点下煤岩渗透率的变化量,计算公式为

$$D_k = \frac{K_i - K_{i+1}}{K_i(p_{i+1} - p_i)} \quad (1)$$

式中, D_k 为渗透率损害系数, MPa^{-1} ; K_i 为第*i*个有效应力下的煤样渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_{i+1} 为第*i+1*个有效应力下的煤样渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; p_i 为第*i*个有效应力值,MPa; p_{i+1} 为第*i+1*个有效应力值,MPa。

2) 有效应力敏感系数。低渗透岩石渗透率对有效应力敏感性的研究常采用有效应力敏感系数^[8],为定量探讨有效应力对不同阶煤渗透率的影响程度,定义煤岩有效应力敏感系数,即有效应力每变化一个单位所引起的煤岩渗透率相对于初始渗透率的变化量,其计算公式为

$$\alpha = -\frac{1}{K_0} \frac{\partial K}{\partial p} \quad (2)$$

式中, α 为有效应力敏感性系数, MPa^{-1} ; K_0 为煤岩的初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。有效应力敏感系数反映煤岩渗透率随有效应力的变化趋势。 α 值越大,表明煤岩渗透率对有效应力的变化越敏感,反之则敏感性不高。

3) 割理压缩系数。在现有的从应力角度建立的渗透率动态模型中,如SD模型^[9,10],CB模型^[11,12],大多认为有效应力与渗透率存在关系:

$$K = K_0 e^{-3c_t(p-p_0)} \quad (3)$$

式中, c_t 为煤岩割理压缩系数, MPa^{-1} ; p_0 为初始有效应力,MPa。此类模型在应用过程中视割理压缩系数为常数。式(3)反映了有效应力对割理渗透率的影响,变形可得

$$c_t = \ln \frac{K}{K_0} / [-3(p-p_0)] \quad (4)$$

3.2 应力敏感性分析

图3给出有效应力增加过程中,不同阶煤渗透率损害系数的拟合曲线。不同阶煤渗透率损害系数整体呈现下降趋势,高阶煤渗透率损害系数从0.2118 MPa^{-1} 下降至0.0435 MPa^{-1} ,中阶煤渗透率损害系数从0.2642 MPa^{-1} 下降至0.0636 MPa^{-1} ,低阶煤渗透率损害系数从0.4500 MPa^{-1} 下降至0.0672 MPa^{-1} (表3)。说明随着有效应力的增加,有效应力负效应对煤岩渗透率的影响将逐渐降低。

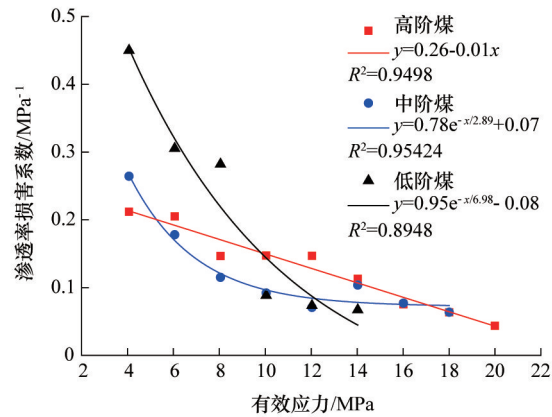


图3 渗透率损害系数拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of damage coefficient of permeability

表3 有效应力变化过程中不同阶煤渗透率损害系数

Table 3 Damage coefficient of permeability of various rank coals under different effective stresses

有效应力/ MPa	渗透率损害系数/ MPa^{-1}		
	高阶煤	中阶煤	低阶煤
4	0.2118	0.2642	0.4500
6	0.2050	0.1780	0.3053
8	0.1466	0.1151	0.2821
10	0.1472	0.0919	0.0885
12	0.1467	0.0706	0.0734
14	0.1129	0.1036	0.0672
16	0.0753	0.0770	—
18	0.0633	0.0636	—
20	0.0435	—	—

对比不同阶煤渗透率损害系数,在试验初始阶段,低阶煤渗透率损害系数要明显大于中、高阶煤,例如在有效应力4 MPa下,低阶煤渗透率损害系数为0.4500 MPa^{-1} ,中、高阶煤渗透率损害系数分别为0.2642,0.2118 MPa^{-1} 。随着有效应力增加,中、低阶煤渗透率损害系数下降较快,在10~16 MPa高阶煤渗透率损害系数要高于中、低阶煤,随着有效应力的持续增加,中、低阶煤渗透率渐趋于稳定,而高阶煤渗透率损害系数仍持续下降。

采用指数函数对低阶煤渗透率损害系数进行拟合,拟合曲线相关系数为0.8948。低阶煤渗透率损害系数的变化可以划分为两个阶段,即以有效应力10 MPa为界,有效应力小于10 MPa时,渗透率损害系数较高,且下降幅度较大;有效应力大于10 MPa时,渗透率损害系数较低,且下降幅度较小,基本保持稳定。这表明有效应力效应对低阶煤渗透率的影响具有明显的阶段性。同样采用指数函数对中阶煤渗透率损害

系数进行拟合,拟合曲线相关系数为0.95424,明显高于低阶煤,这表明中阶煤渗透率损害系数变化规律更符合指数方程。与低阶煤渗透率损害系数变化的阶段性一致,中阶煤渗透率损害系数也可以10 MPa为界,划分为两个阶段。对高阶煤的渗透率损害系数采用线性方程拟合,拟合曲线相关系数为0.9498。在试验设定的有效应力范围内,高阶煤渗透率损害系数变化规律并没有表现出类似低、中阶煤的阶段性。

图4给出有效应力增加过程中,不同阶煤应力敏感系数的拟合曲线。有效应力增加过程中,不同阶煤应力敏感系数整体呈现下降趋势,高阶煤应力敏感系数从0.2118 MPa⁻¹降至0.0030 MPa⁻¹,中阶煤应力敏感系数从0.2642 MPa⁻¹降至0.0070 MPa⁻¹,低阶煤应力敏感系数从0.4500 MPa⁻¹降至0.0008 MPa⁻¹(表4)。有效应力4~14 MPa⁻¹范围内,高、中阶煤应力敏感系数下降幅度为93.67%、低阶煤应力敏感系数下降幅度为99.82%,低阶煤应力敏感系数变化幅度明显大于中、高阶煤。

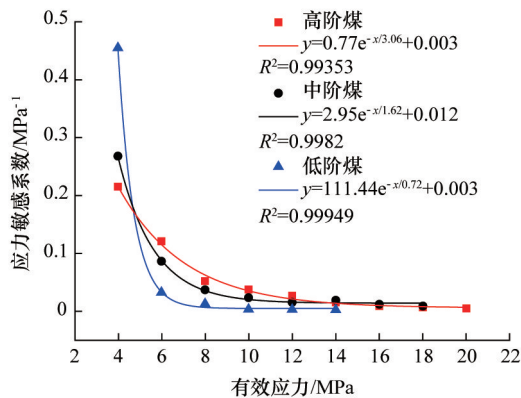


图4 应力敏感系数拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of stress sensitive coefficient

表4 有效应力变化过程中不同阶煤应力敏感系数

Table 4 Stress sensitive coefficient of various rank coals under different effective stresses

有效应力/ MPa	应力敏感系数/MPa ⁻¹		
	高阶煤	中阶煤	低阶煤
4	0.2118	0.2642	0.4500
6	0.1182	0.0839	0.0305
8	0.0499	0.0350	0.0110
10	0.0354	0.0215	0.0015
12	0.0249	0.0135	0.0012
14	0.0135	0.0170	0.0008
16	0.0070	0.0100	—
18	0.0050	0.0070	—
20	0.0030	—	—

实验初期,低阶煤的应力敏感系数明显高于中、高阶煤,但低阶煤应力敏感系数下降迅速,中、高阶煤应力敏感系数下降较低阶煤缓慢,有效应力4 MPa之后,低阶煤应力敏感系数即低于中、高阶煤。

采用指数函数对不同阶煤应力敏感系数进行拟合,高、中、低阶煤指数拟合曲线相关系数分别为0.99353,0.9982,0.99949,拟合度高。不同阶煤应力敏感系数呈现明显的阶段性,即在低有效应力阶段应力敏感系数下降快,在高有效应力阶段应力敏感系数基本保持稳定。区别在于不同阶煤应力敏感系数阶段划分的有效应力位置不同,低阶煤在有效应力8 MPa之后应力敏感系数趋于稳定,中阶煤应力敏感系数在10 MPa之后趋于稳定,高阶煤应力敏感系数则在14 MPa之后趋于稳定。

渗透率损害系数及应力敏感系数同样作为有效应力对渗透率影响参数的评价指标,都反映了在单位有效应力变化过程中渗透率的相对变化量。二者区别在于,在渗透率从第*i*点向第*i+1*点变化过程中,渗透率损害系数反映渗透率变化量相对于第*i*点渗透率的比例;应力敏感系数反映渗透率变化量相对于初始渗透率的比例。对比图3、图4可以发现,在对有效应力对煤岩渗透率应力敏感性评价方面,应力敏感系数比渗透率损害系数更具规律性,究其原因,渗透率损害系数计算公式中,渗透率项分子、分母均包含有效应力影响,而应力敏感系数计算公式中,渗透率项只有分子包含有效应力影响,分母为初始渗透率。

图5给出有效应力增加过程中,不同阶煤割理压缩系数的拟合曲线。相同有效应力下,低阶煤割理压缩系数大于中、高阶煤,中阶煤割理压缩系数在10 MPa之前大于高阶煤,10 MPa之后小于高阶煤。取有效应力4~14 MPa间割理压缩系数,低阶煤割理压缩系数从0.38376 MPa⁻¹下降至0.14211 MPa⁻¹,下降幅度为62.97%;中阶煤割理压缩系数从0.12513 MPa⁻¹下降至0.05667 MPa⁻¹,下降幅度为54.71%;高阶煤割理压缩系数从0.09136 MPa⁻¹下降至0.06598 MPa⁻¹,下降幅度为27.78%(表5)。割理压缩系数变化幅度由高到低依次为低阶煤、中阶煤、高阶煤。采用指数函数对低、中阶煤割理压缩系数进行拟合,拟合曲线相关系数分别为0.99198、0.99919;采

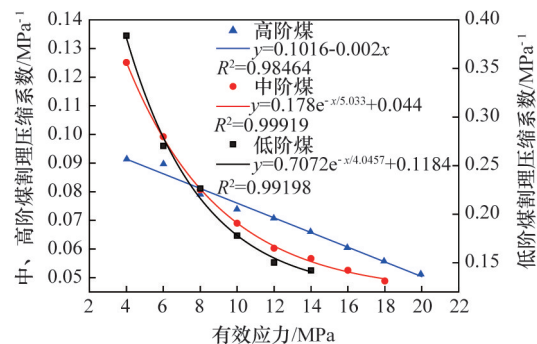


图5 割理压缩系数拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of cleat compressibility

表5 有效应力变化过程中不同阶煤割理压缩系数
Table 5 Cleat compressibility of various rank coals
under different effective stresses

有效应力/ MPa	割理压缩系数/MPa ⁻¹		
	高阶煤	中阶煤	低阶煤
4	0.09136	0.12513	0.38376
6	0.08966	0.09923	0.27035
8	0.07905	0.08069	0.22636
10	0.07383	0.06898	0.17786
12	0.07068	0.06026	0.15033
14	0.06598	0.05667	0.14211
16	0.06044	0.05255	—
18	0.05570	0.04882	—
20	0.05120	—	—

用线性方程对高阶煤割理压缩系数进行拟合,拟合曲线相关系数为0.98464。表明在试验有效应力变化范围内,低、中阶煤割理压缩系数符合指数变化规律,高阶煤割理系数符合线性变化规律。

4 结论

1) 有效应力增加过程中,不同阶煤渗透率均呈现下降趋势,其中低阶煤渗透率下降幅度大于中、高阶煤,高阶煤渗透率下降幅度略大于中阶煤;低、高阶煤渗透率变化较中阶煤更符合指数函数变化规律。

2) 在实验初期,低阶煤渗透率损害系数明显大于中、高阶煤;在试验设定有效应力范围内,中、低阶煤渗透率损害系数符合指数函数变化规律,以有效应力10 MPa为界,具有明显的阶段性,高阶煤渗透率损害系数符合线性函数变化规律,无阶段性变化特征。

3) 在实验初期,低阶煤渗透率应力敏感系数明显大于中、高阶煤;低、中、高阶煤渗透率应力敏感系数均符合指数变化规律,相关系数均达到99%以上,表明不同阶煤应力敏感系数具有阶段性特征。

4) 在对有效应力对煤岩渗透率应力敏感性评价方面,应力敏感系数比渗透率损害系数更具规律性。

5) 不同煤阶割理压缩系数随有效应力增加呈现下降趋势,不应将其视为常数;相同有效应力下,低阶煤割理压缩系数大于中、高阶煤;割理压缩系数变化幅度由高向低依次为低阶煤、中阶煤、高阶煤;低、中阶煤割理压缩系数符合指数变化规律,高阶煤割理压缩系数符合线性变化规律。

参考文献(References)

[1] 秦勇,叶建平,林大扬,等.煤储层厚度与其渗透性及含气性关系初步探讨[J].煤田地质与勘探,2000,28(1):24-27.

- Qin Yong, Ye Jianping, Lin Dayang, et al. Relationship of coal reservoir thickness and its permeability and gas bearing property[J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 28(1): 24-27.
- [2] 李培超,孔祥言,曾清红,等.煤层渗透率影响因素综述与分析[J].天然气工业,2002,22(5):45-49.
- Li Peichao, Kong Xiangyan, Zeng Qinghong, et al. Summarizing and analyzing the factors affecting the coefficient of permeability of coal beds[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(5): 45-49.
- [3] 薄冬梅,赵永军,姜林.煤储层渗透性研究方法及主要影响因素[J].油气地质与采收率,2008,15(1):18-21.
- Bo Dongmei, Zhao Yongjun, Jiang Lin. Research method and main influencing factors of coal reservoir permeability[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(1): 18-21.
- [4] 蔡东梅,孙立东,赵永军.基于煤演化程度的煤储层渗透率发育机理初探[J].山东科技大学学报:自然科学版,2009,28(2):22-27.
- Cai Dongmei, Sun Lidong, Zhao Yongjun. Research on development mechanism of coal seam permeability based on coal evolution degree[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2009, 28(2): 22-27.
- [5] 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.
- [6] 孟召平,侯泉林.高煤阶煤储层渗透性与应力耦合模型及控制机理[J].地球物理学报,2013,56(2):667-675.
- Meng Zhaoping, Hou Quanlin. Coupling model of stress-dependent permeability in high-rank coal reservoir and its control mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(2): 667-675.
- [7] 孟召平,侯泉林.煤储层应力敏感性及其影响因素的试验分析[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 Coal Society, 2012, 37(3): 430-437.
- [8] 黄远智,王恩志.低渗透岩石渗透率对有效应力敏感系数的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):410-414.
- Huang Yuanzhi, Wang Enzhi. Experimental study on coefficient of sensitiveness between percolation rate and effective pressure for low permeability rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 410-414.
- [9] Shi J Q, Durucan S. Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: A new interpretation of the reservoir response to primary recovery[J]. Transport in Porous Media, 2004(56): 1-16.
- [10] Shi J Q, Durucan S. A model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recovery[J]. Reservoir Evaluation & Engineering, 2005(4): 291-299.
- [11] Cui X J, Bustin R M. Volumetric strain associated with methane desorption and its impact on coalbed gas production from deep coalseams[J]. The American Association of Petroleum Geologists, 2005 (9): 1181-1202.
- [12] Cui X J, Bustin R M, Chikatamarla L. Adsorption-induced coal swelling and stress: Implications for methane production and acid gas sequestration into coal seams[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(B10): 202.

(责任编辑 刘志远)