

基于脉冲衰减法的煤岩渗透率应力敏感性研究

陈浩^{1,2} 秦勇¹ 李贵中² 陈振宏² 庚勳² 邓泽² 田文广² 桑广杰³

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院 江苏 徐州 221008; 2. 中国石油勘探开发研究院 河北 廊坊 065007;

3. 中国石油华北油田公司 河北 任丘 062552)

摘要: 为了弄清不同应力加载条件下的煤岩渗透率应力敏感性关系规律,采用脉冲衰减方法通过分别改变围压和孔压条件下观察煤岩渗透率随应力的变化,并对应力敏感的产生机理从孔隙结构角度进行分析。研究表明:脉冲衰减法较适合于较低渗透率煤岩渗透率应力敏感性试验;煤岩随着不同应力变化都表现出强的应力敏感性,整体呈指数衰减,煤岩对围压变化比孔压变化的应力敏感性更强。在围压先升再降过程中,升压过程较降压过程表现更强敏感性。煤岩渗透率应力敏感产生机理主要是由于应力的变化引起煤岩割理与孔隙吼道的变化;相对渗透率大样品主要以割理和大孔隙为主,渗透率小样品主要为小孔和吼道发育;当所受应力变大时,后者更易孔隙压缩、通道受阻、渗透率急剧变小、敏感性更强。

关键词: 脉冲衰减; 应力敏感; 有效应力; 渗透率

中图分类号: TE122.23

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2018)06-0167-06

Study on stress sensitivity of coal rock permeability based on pulse-decay method

CHEN Hao^{1,2}, QIN Yong¹, LI Guizhong², CHEN Zhenhong², GENG Meng,

DENG Ze², TIAN Wenguang², SANG Guangjie³

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Langfang 065007, China; 3. PetroChina Huabei Oilfield, Renqiu 062552, China)

Abstract: In order to find out the effect of different stress load on coal-rock permeability sensitivity, the pulse decay method had adopted to observe the permeability changes with the stress by respectively changing confining pressure and pore pressure. Meanwhile, stress sensitivity mechanism was analyzed from the perspective of pore structure. The results showed that the pulse-decay method was suitable for the stress sensitivity experiment of low permeability coal samples. Moreover, the coal rocks entirely showed strong stress sensitivity to different stress changes in the exponent attenuation. The stress sensitivity to confining pressure changes was stronger than that to pore pressure changes during confining pressure increasing first and then decreasing, the stress sensitivity to increasing confining pressure was stronger. The stress sensitivity mechanism of coal rocks was mainly caused by the changes of coal rock cuttings and pore throats resulting from the stress changes. Samples of low permeability mainly developed by small holes and throats showed stronger sensitivity as the pores were easier to compress and block and the permeability decreased rapidly.

Key words: pulse-decay; stress sensitivity; effective stress; permeability

0 引言

煤层气开采主要是排水降压,渗透率动态变化是排水降压需要考虑的一个关键影响因素^[1],渗透率动态变化与产能具有直接的耦合关系^[2]。目前,

国内外学者对煤层气开采过程中煤岩的渗透率变化规律进行了广泛研究,并针对渗透率的动态变化对煤层气的开采提出了不同的建议^[3-4],包括考虑滑脱效应、应力敏感、基质收缩等影响因素对渗透率的影响^[5]。其中,大多学者研究认为应力敏感是引起

收稿日期: 2018-04-18; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2018.06.028

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05041); 中国石油天然气股份公司重大科技专项资助项目(2017E14)

作者简介: 陈浩(1985—),男,湖北荆州人,工程师,博士研究生。E-mail: chen hao69@petrochina.com.cn

引用格式: 陈浩,秦勇,李贵中,等.基于脉冲衰减法的煤岩渗透率应力敏感性研究[J].煤炭科学技术,2018,46(6):167-172.

CHEN Hao, QIN Yong, LI Guizhong, et al. Study on stress sensitivity of coal rock permeability based on pulse-decay method[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 167-172.

动态渗透率变化的主要因素^[6-7]。因此,渗透率与有效应力变化之间的相互关系就显得尤为重要。前人也开展了大量基于稳态法条件下围压对渗透率的影响试验^[8],并建立了原煤孔隙率动态演化模型和利用吸附热力学参数及瓦斯压力表达的有效应力方程^[9-11]。但是在围压与孔压变化对渗透率的敏感性分析方面,研究内容较少,而且在进行渗透率应力敏感性试验时,以往测量方法主要采用稳态法测量^[12-13]。随着低渗透储层的勘探开发,气体在低渗透介质中的渗流存在非达西流动特点,应用达西流动公式计算介质渗透率不准确,储层渗透率很低时需要很高的驱替压差和很长的流速稳定时间,而且操作时需要不断进行数据记录,人为误差比较大^[14-15]。基于以上因素,本次试验将基于非稳态方法进行不同应力加载下的渗透率敏感性试验分析。通过分别改变孔隙压力和围压以及先升压再降压进行敏感性评价。然后借助核磁共振试验与液氮吸附试验对其敏感性产生机理进行分析。

1 测试方法与步骤

1.1 试验方法

本次试验选用 NDP-605 型超低渗透率测试仪进行测试,试验设备由脉冲发生器、岩心夹持器、围压倍增器、上下游气体仓组成,其中气体仓还包括一个小体积仓可供选择。在试验时,上下游储室体积大小根据所测岩心孔隙体积的大小来调整,以达到降低岩心孔隙体积与上下游储室体积比值,减小因孔隙体积误差而导致渗透率测量误差的目的;据文献推荐岩心孔隙体积与上下游储室体积比值为 0.25~0.50,以保证在相对较短的测试时间内减少误差^[17-19]。在计算渗透率时,上游储室体积还应包括上游连接管线和压力监测仪中孔隙体积,上下游储室体积保持对称,以减小误差。通过监测微差压力和下流压力随着时间的变化情况,假设初始时岩样内的孔隙压力平均分布,在时间 $t=0$ 时,上流气罐在岩样的上端施加了一个压力脉冲 $\Delta P(0)$ 随着气体流动通过上游储室体积 V_1 进入岩样, V_1 室中压力降低,下游储室体积 V_2 中的压力在短时间内保持常数,直到压力脉冲通过岩样的全长。然后,压力 V_2 上升。因为上游压力 $P_1(t)$ 降低,下游压力 $P_2(t)$ 上升, $\Delta P(t)$ 连续减小。压力衰减的速度取决于渗透率,渗透率越低,衰减的越缓慢。通过测试压力衰减与时间的关系进行渗透率测定。原理如下:

将运动方程、状态方程、质量守恒方程联立得到单相微可压缩流体不稳定单向渗流的扩散方程如下:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{C_1 \mu \phi}{K} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

初始条件为

$$P(x, 0) = P_2(0) \quad 0 < x < L \quad (2)$$

用无量纲压差作为时间函数对方程求解得

$$\ln \Delta P_D = \ln f_0 - \left(\frac{\theta_1^2 K}{(C_g + C_{pv}) \mu_g \phi L^2} \right) t \quad (3)$$

根据试验数据拟合曲线求得斜率,即可得出渗透率为

$$K = \frac{-A_1 \mu_g L f_x}{f_1 A P_m \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right)} \quad (4)$$

式中: P 为孔隙压力; C_1 为压缩系数; μ 为流体黏度; t 为时间; K 为渗透率; ϕ 为孔隙度; μ_g 为气体黏度; L 为岩样长度; x 为在岩心一端到另一端的任意位置; ΔP_D 为无量纲压差; A_1 为直线斜率; θ_1 、 f_0 为引入常数; C_g 为气体压缩系数; C_{pv} 为岩样孔隙体积压缩系数; f_x 为实际气体偏离理想气体的特性值; A 为岩样截面积; P_m 为测试平均压力。

1.2 试验步骤

试验步骤为:①将脉冲渗透率仪器于试验前 30 min 打开进行预热;②按要求开启气源,检查密封性后将岩样放入夹持器,施加 9 MPa 左右围压进行试压;③在仪器软件中设置围压点数据,调节孔压开始测试,脉冲渗透率仪器相关阀门打开和关闭,使下游压力达到测试压力,等待仪器上游腔室、岩样孔隙及下游腔室压力达到热和压力平衡。④按照仪器提示,手动降低下游腔室压力,使上下游压差约 0.07 MPa (10 psi),以形成初始衰减压力脉冲,仪器自动测试压力衰减数据及计算给出不同围压与孔压点脉冲衰减渗透率数值。

1.3 敏感性评价方法

1.3.1 渗透率应力敏感系数

渗透率应力敏感系数又称渗透率模量,主要表征渗透率随有效应力的变化符合指数关系,而这种指数关系在许多低渗透储层应力敏感试验中都得到了验证^[19]。渗透率模量 γ 反映了渗透率随有效应力的动态变化关系,这种关系被称为应力敏感系数^[20],应力敏感系数越高,渗透率随有效应力下降越明显。

$$\gamma = - \frac{1}{K} \frac{dK}{d\sigma} \quad (5)$$

式中 σ 为有效应力,MPa。

1.3.2 不可逆渗透率损害率

为了准确反映有效应力对渗透率的影响大小,在进行煤岩升压后降压渗透率随应力变化试验时,根据部颁行业标准^[21]引入渗透率损害率 D_k 的概念,并参照此标准进行评价。 D_k 定义如下:

$$D_k = \frac{K_i - K'_i}{K_i} \times 100\% \quad (6)$$

式中: K_i 为初始围压下岩心渗透率, μm^2 ; K'_i 为加压后恢复到初始围压下岩心渗透率, μm^2 。

2 不同应力模式下渗透率敏感试验

为了探索不同应力加载模式对渗透率的影响情况,设计了3组加载方式,第1组为在保持围压恒定情况下,采用孔隙压力逐级加大,观察渗透率变化对孔隙压力的敏感性;第2组保持孔隙压力恒定,改变围压,随着围压增大,有效应力增大,观察渗透率随围压变化的敏感性;接着围压依次减小,观察升压后降压渗透率的损害程度。

2.1 渗透率对孔隙压力变化的应力敏感性

试验设定围压恒定在2 000 psi(约13 MPa),孔

隙压力从增大,依次为300 psi(2 MPa)、500 psi(约3.5 MPa)、700 psi(约5 MPa)、900 psi(约6.5 MPa)、1100 psi(约8 MPa),通过试验曲线可以看出,随着孔隙压力变大,最开始两点低孔隙压力阶段,渗透率变小,之后渗透率逐渐变大,拐点出现在2.8 MPa左右。总体渗透率呈现先降后升趋势;孔隙压力变大,煤岩所受有效应力减小,煤岩割理回弹,渗透率增大。有学者认为在低孔压阶段,存在气体滑脱效应^[22]。气体滑脱效应^[23]是指气体在细小毛管或低渗多孔介质孔道内流动时,随气体压力降低,出现在靠近孔道壁表面的气体分子流速不为0,使得气体渗透率大于液体渗透率的一种现象。本次试验结果与前人相似^[23],说明在低气体压力和小孔隙条件下的输送是达西流(在此状态下,流动速率与压力梯度成正比)和扩散流(在此状态下,沿着流动通道壁输送分子)的混合状态。试验结果在2.8 MPa前的趋势是由于受滑脱效应的作用。在大于2.8 MPa后,渗透率随孔隙压力增大而微弱增大。

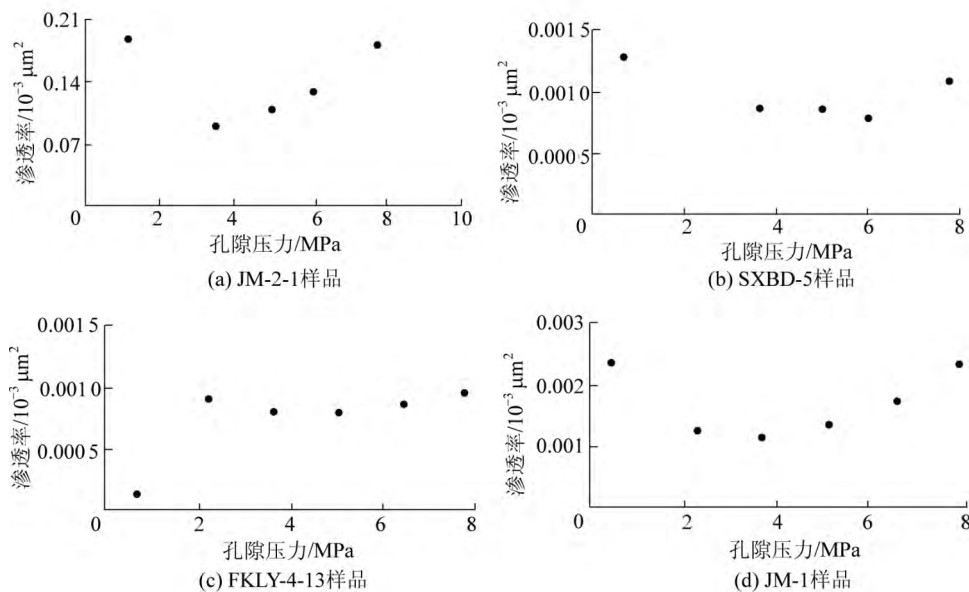


图1 渗透率随孔隙压力变化曲线

Fig.1 Curves of pore pressure with permeability changes

2.2 围压先升高再降低对渗透率的敏感性

煤岩在施加压力后随有效应力增大渗透率降低,释放压力,有效应力减小,渗透率将变大,恢复的渗透率将低于原始状态对应应力下的渗透率。为定量评价不可逆渗透率损害程度,试验设置为孔隙压力300 psi(约2.07 MPa),围压依次为800 psi(约

5.52 MPa)、1 000 psi(约6.90 MPa)、1 200 psi(约8.28 MPa)、1 400 psi(约9.66 MPa)、1 600 psi(约11.03 MPa)、1 800 psi(约12.41 MPa);之后围压依次降低。通过试验结果看出,无论围压升高阶段还是围压降低阶段,渗透率与有效应力都呈良好指数关系。

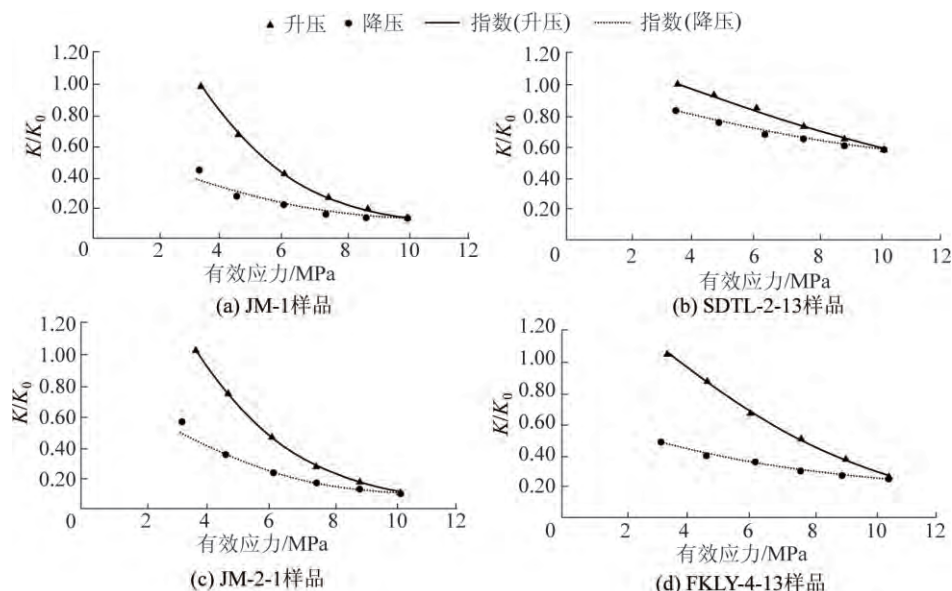
图 2 围压先升高后降低无因次渗透率 K/K_0 随有效应力变化曲线

Fig.2 Dimensionless permeability versus effective stress with confining pressure fall after the first rise

3 敏感系数评价与机理分析

通过围压不变孔压变化试验结果分析,在孔压小于 2.8 MPa 时,滑脱效应表现出正效应,孔压越大,渗透率越小。在孔压大于 2.8 MPa 后,随着孔压变大,应力变小,渗透率变大,渗透率敏感系数为 0.06~0.20,敏感性较弱。煤岩先升压后降压渗透率变化规律表明,升压过程敏感系数为 1.4~2.9,降压系数为 0.60~1.09,升压过程敏感性强于降压过程,应力敏感性都大于孔压变化组。同时渗透率与应力

变化具有不可逆性,在升压后在降压到原来应力状态,渗透率损失严重。根据不可逆渗透率损害率计算发现,不可逆渗透率损害率为 17.5%~56.4%,敏感性强样品损害率也大。同时,发现与初始渗透率有关,初始渗透率高的样品相对损害率低,SDTL-2-13 初始渗透率为 $5.37 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,渗透率贡献主要来源于割理和较大孔隙, JM-1 初始渗透率为 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,渗透率主要来源于基质微孔隙,基质孔隙封闭后不易于开启,而割理相对具有较好的反弹性。

表 1 不同加载条件下渗透率应力敏感性评价

Table 1 Permeability stress sensitivity evaluation under different loading conditions

样品编号	初始渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔压变化渗透 率敏感系数	升压渗透率 敏感系数	降压渗透率 敏感系数	不可逆渗透率 损害率/%
SDTL-2-13	5.370	0.073 47	0.086 90	0.155 78	17.5
JM-2-1	1.080	0.196 77	0.334 67	0.055 95	44.6
JM-1	0.020	0.200 87	0.317 26	0.222 15	56.4
FKLY-4-13	0.005	0.066 33	0.198 44	0.181 57	17.5

通过液氮吸附和核磁谱图对孔隙结构进行分析。液氮吸附试验主要测试孔径范围为 2~100 nm,从图 3 可以看出,孔径分布主要在 10~100 nm,1~10 nm 下的孔径分布较少,初始渗透率与孔径分布有较好的线性关系,孔体积越多,渗透率越大,说明 10~100 nm 的孔径对渗透率起了主要贡献作用。张睿等^[25-26]利用 Kozeny 毛管模型对页岩样品应力敏感的机理进行了推导,推导了毛管半径随有效应力的变化关系,毛管半径随有效应力的变化关系符合指数函数。并指出孔隙几何形状是影响应力敏感的

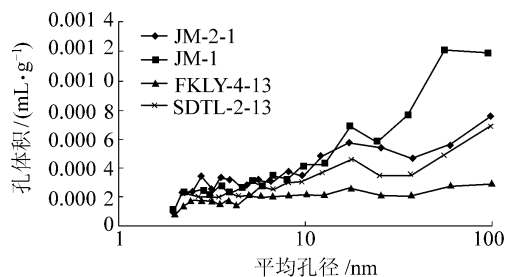


图 3 液氮吸附孔径分布曲线

Fig.3 Pore size distribution curves under liquid nitrogen adsorption

主要原因。核磁共振弛豫谱可反映煤岩样品不同孔径分布,通过核磁共振 T_2 谱图分析(图4),JM2-1样品在弛豫时间 100~1 000 ms 还存在一个峰值,说明有一定的割理或大孔隙存在;双峰结构明显,孔径分布不均一,在受应力作用过程中,通道闭合,影响

气体的渗流,应力敏感性变强。JM-1 样品弛豫时间分布在 1~20 ms,以小孔为主,在受应力挤压后,小孔变形,渗流通道受阻,渗流能力变弱,应力敏感性

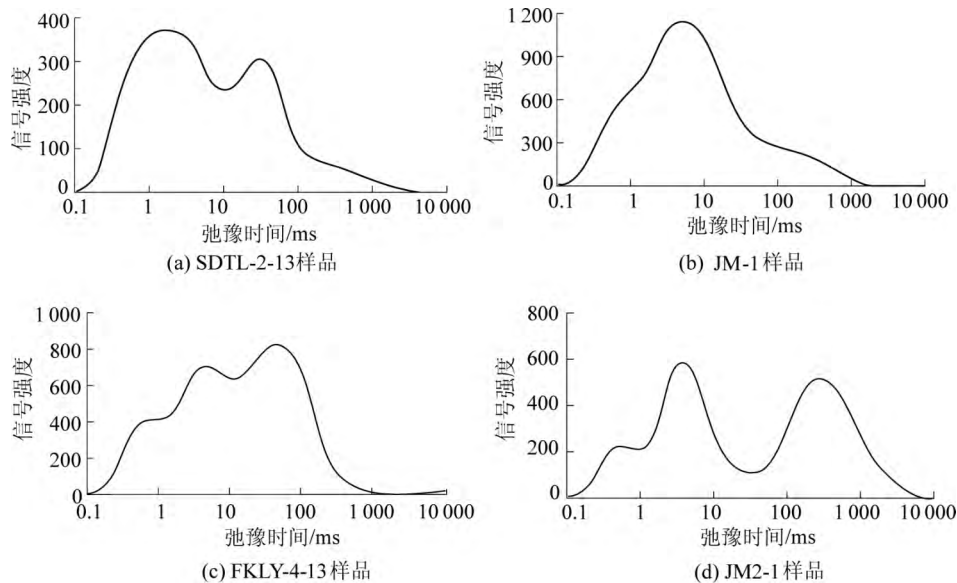


图4 核磁共振 T_2 谱图

Fig.4 Diagram of NMR T_2 spectrum

4 结 论

1) 与传统稳态法渗透率测试相比,利用脉冲衰减法测量煤岩应力敏感性试验具有测试时间短,能测量超低渗透率煤岩渗透率变化特征,更适合于较低渗透率煤岩样品渗透率应力敏感试验。

2) 渗透率对围压变化比孔压变化明显,同时,渗透率随围压变化呈指数变化,随着孔压变大,应力变小,渗透率变大,敏感性较弱。煤岩先升压后降压,渗透率变化规律表明,升压过程敏感性强于降压过程,应力敏感性都大于孔压变化组。同时渗透率与应力变化具有不可逆性,在升压后在降压到原来应力状态,渗透率损失严重。

3) 煤岩应力敏感机理主要受孔隙结构的影响;对样品孔隙结构分析,渗透率较大样品孔隙以割理和较大孔隙发育,渗透率小样品以小孔和吼道发育;在受到应力加载时,孔隙变形闭合,后者通道更易阻塞,渗透率敏感性更大。

参考文献(References):

[1] 张遂安,曹立虎,杜彩霞.煤层气井产气机理及排采控压控粉研究[J].煤炭学报,2014,39(9):1927-1931.

ZHANG Suian, CAO Lihu, DU Caixia. Study on CBM production mechanism and control theory of bottom-hole pressure and coal fines during CBM well production [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1927-1931.

[2] 朱庆忠,汤达祯,左银卿,等.樊庄区块开发过程中煤储层渗透率动态变化特征[J].煤炭科学技术,2017,45(7):85-92.

ZHU Qingzhong, TANG Dazhen, ZUO Yinqing, et al. Permeability dynamic variation features of coal reservoir in exploitation process of Fanzhuang Block [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 85-92.

[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):966-970.

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 Petroli Sinica, 2010, 31(6): 966-970.

[4] 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):947-952.

DENG Ze, KANG Yongshang, LIU Honglin, et al. Dynamic variation character of coalbed methane reservoir permeability during depletion [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 947-952.

[5] 薛永超,程林松.不同级别渗透率岩心应力敏感试验对比研究[J].石油钻采工艺,2011,33(3):38-41.

XUE Yongchao, CHENG Linsong. Experimental comparison study

- on stress sensitivity of different permeability cores [J]. Oil Drilling & Production Technology 2011, 33(3): 38–41.
- [6] 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.
- [7] 孟召平, 侯泉林. 高煤级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.
- [8] 李瑞, 王生维, 吕帅锋, 等. 煤层气排采过程中储层压降动态变化影响因素 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(7): 93–99.
LI Rui, WANG Shengwei, LYU Shuaifeng, et al. Dynamic varied influence factors of pressure drop in coal reservoir during coalbed methane drainage process [J]. Coal Science and Technology 2017, 45(7): 93–99.
- [9] 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 coalbed methane output [J]. Journal of China Coal Society 2014, 39(3): 504–509.
- [10] 尹光志, 蒋长宝, 许江, 等. 煤层气储层含水率对煤层气渗流影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 3401–3406.
YIN Guangzhi, JIANG Changbao, XU Jiang, et al. Experimental study of influences for water content in coalbed gas reservoirs on methane seepage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2011, 30(2): 3401–3406.
- [11] SHI J Q, DURUCAN S. A model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recovery [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering 2005, 8(4): 291–299.
- [12] HARPALANI S, CHEN G L. Influence of gas production induced volumetric strain on permeability of coal [J]. Geotechnical and Geological Engineering 1997, 15(4): 303–325.
- [13] 张广洋, 胡耀华, 姜德义, 等. 煤的渗透性试验研究 [J]. 贵州工学院学报, 1995, 24(4): 65–68.
ZHANG Guangyang, HU Yaohua, JIANG Deyi, et al. A test study concerning coal permeability [J]. Journal of Guizhou Institute of Technology 1995, 24(4): 65–68.
- [14] BRACE W F, WALSH J B, FRANGOS W T. Permeability of granite under high pressure [J]. Journal of Geophysical Research, 1968, 73(2): 2225–2236.
- [15] BOURBIE T, WALLS J. Pulse decay permeability: analytical solution and experimental test [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1982, 22(5): 719–721.
- [16] JONES S C. A technique for faster pulse-decay permeability measurements in tight rocks [J]. SPE Formation Evaluation, 1997, 12(1): 19–25.
- [17] ZHANG M, TAKAHASHI M, MORIN R H, et al. Evaluation and application of the transient pulse technique for determining the hydraulic properties of low permeability rocks (Part 1): theoretical evaluation [J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 23(1): 83–90.
- [18] YANG Y, APLIN A C. A permeability porosity relationship for mudstones [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(8): 1692–1697.
- [19] 杨泽皓, 董明哲, 宫厚健, 等. 测量页岩径向渗透率和孔隙度的新方法 [J]. 石油学报, 2015, 36(4): 482–489.
YANG Zehao, DONG Mingzhe, GONG Houjian, et al. A new method to measure radial permeability and porosity of shale [J]. Acta Petrolei Sinica 2015, 36(4): 482–489.
- [20] DAVID C, WONG T F, ZHU Wenlu, et al. Laboratory measurement of compaction-induced permeability change in porous rocks: implications for the generation and maintenance of pore pressure excess in the crust [J]. Pure and Applied Geophysics 1994, 143(3): 425–456.
- [21] SY/T 5358—2010, 储层敏感性流动试验评价方法 [S].
- [22] 李俊乾, 刘大锰, 姚艳斌, 等. 气体滑脱及有效应力对煤层气相渗透率的控制作用 [J]. 天然气地球科学, 2013, 24(5): 1074–1078.
LI Junqian, LIU Dameng, YAO Yanbin, et al. Control of gas slippage and effective stress on the gas permeability of coal [J]. Natural Gas Geoscience 2013, 24(5): 1074–1078.
- [23] 陈代珣. 渗流气体滑脱现象与渗透率变化的关系 [J]. 力学学报, 2002, 34(1): 96–100.
CHEN Daixun. Gas slippage phenomenon and change of permeability when gas flows in tight porous media [J]. Acta Mechanica Sinica 2002, 34(1): 96–100.
- [24] 张睿, 宁正福, 杨峰, 等. 页岩应力敏感试验与机理 [J]. 石油学报, 2015, 36(2): 224–231, 237.
ZHANG Rui, NING Zhengfu, YANG Feng, et al. shale stress sensitivity experiment and mechanism [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2): 224–231, 237.
- [25] 张睿, 宁正福, 杨峰, 等. 微观孔隙结构对页岩应力敏感影响的试验研究 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25(8): 1284–1289.
ZHANG Rui, NING Zhengfu, YANG Feng, et al. Experimental study on microscopic pore structure controls on shale permeability under compaction process [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(8): 1284–1289.