

有效应力对保德区块煤储层渗透率影响研究

薛培, 高潮

(陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西西安 710065)

[摘要]通过有效应力单因素影响保德区块煤岩气体渗流实验,分析了煤岩渗透率应力敏感性以及割理压缩系数变化特征。结果表明:保德区块煤储层渗透率与有效应力呈负指数函数关系;煤层埋深越深,煤岩渗透率变化幅度越小,渗透率应力敏感性下降。渗透率损害系数的线性函数拟合相关系数较低,应力敏感系数的负指数函数拟合相关系数较高,应力敏感系数比渗透率损害系数更具规律性。在高有效应力阶段,煤岩割理压缩系数更趋近于常数,低有效应力阶段,割理压缩系数应视为变量。

[关键词] 有效应力 保德区块 煤储层渗透率 应力敏感性 割理压缩系数

[中图分类号] P618.11 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2016)02-0334-06

Xue Pei, Gao Chao. Study on influence of effective stress on coal reservoir permeability in the Baode block[J]. Geology and Exploration, 2016(2):0334-0339

煤储层渗透率是煤层气可采性评价的重要指标之一,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(李培超等,2002;薄冬梅等,2008)。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(蔡东梅等,2009)。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。

目前我国煤层气开发工作主要集中在高阶煤储层,针对煤岩应力敏感性分析亦多采用高阶煤开展(陈振宏等,2008;孟召平等,2013),笔者选用保德区块中阶煤作为实验对象,分析了保德区块煤岩应力敏感性,同时对比了不同应力敏感性评价参数对煤岩应力敏感性评价的差异,并分析了有效应力对割理压缩系数的影响,为从应力角度建立渗透率数学模型提供了理论依据。

1 实验样品及方案

本次研究所用煤岩样品,均来自保德地区桥头镇煤矿4#煤层,煤岩基础数据见表1。实验所用煤样均为尺寸为 $\Phi 25\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的煤柱,共13个。本文所用煤样均为自然样,未对煤柱进行烘干或保湿处理。

本次研究旨在:(1)分析有效应力单因素影响下,保德区块煤储层渗透率变化规律;(2)分析保德区块煤储层应力敏感性特征;(3)分析保德区块煤储层割理压缩系数变化特征。

表1 煤样基础数据
Table 1 Basic data of coal samples %

采样点	类型	镜质组	壳质组	惰质组	矿物	R _{max}
保德	自然样	67.3	21.3	9.5	1.9	0.63

本次研究只考虑有效应力单因素对保德区块煤储层渗透率的影响。因此在实验操作过程中,应当避免基质收缩效应及滑脱效应对煤储层渗透率的干扰。由于氦气为非吸附性气体,因此选用氦气作为气体介质,以消除基质收缩效应对煤岩的影响;由于滑脱效应发生在低孔隙压力阶段,朱光亚等(2007)通过对低渗气藏气体渗流滑脱效应的研究,明确了天然气渗流计入滑脱效应的地层压力条件为孔隙压力小于1.5MPa,因此设计孔隙压力为2.0MPa、3.0MPa、4.0MPa、5.0MPa以消除滑脱效应对煤储层的影响。为体现有效应力变化对煤储层渗透率的影响,设定有效应力为1.0MPa、2.0MPa、3.0MPa、4.0MPa、5.0MPa。

本次研究共设计4组实验,各组实验压力设计

[收稿日期] 2015-08-07; **[修订日期]** 2016-01-28; **[责任编辑]** 陈伟军。

[基金项目] 国家科技重大专项(编号:2011ZX05042-003-001)资助。

[第一作者] 薛培(1987年-),男,博士,研究方向为非常规油气地质。E-mail: xuepei330@163.com。

见表2。为达到实验设定的初始压力条件,各组实验首先逐步增加围压至初始围压,而后逐步增加孔隙压力至初始条件,之后保持孔隙压力恒定。实验过程中,通过保持孔隙压力恒定,改变围压的方式增加有效应力。每个围压增加过程控制在1h以上,并测定每个围压下渗透率值。

组别	孔隙压力/MPa	围压/MPa	有效应力/MPa	组别	孔隙压力/MPa	围压/MPa	有效应力/MPa
I	2	3	1	III	4	5	1
		4	2			6	2
		5	3			7	3
		6	4			8	4
		7	5			9	5
II	3	4	1	IV	5	6	1
		5	2			7	2
		6	3			8	3
		7	4			9	4
		8	5			10	5

2 实验结果

本次实验获得了有效应力单因素影响下保德区块煤岩渗透率数据。为了更加直观的描述煤储层渗透率变化规律,定义无因次渗透率 K/K_0 为各测试压力点下气测渗透率 K 与实验初始状态下煤岩渗透率 K_0 比值。

图1给出了有效应力单因素影响下保德区块煤储层渗透率变化曲线。由于有效应力增加造成煤岩割理受压缩程度加大,煤岩割理宽度变小,出现了相同孔隙压力下,随着有效应力增加,各组实验条件下煤岩渗透率逐渐减小的现象。

相同有效应力变化范围内,孔隙压力越大,煤岩渗透率下降幅度越小。如孔隙压力 2.0 MPa、3.0 MPa、4.0 MPa、5.0 MPa 下,渗透率下降幅度分别为 79.61%、77.56%、74.50%。各组实验孔隙压力逐渐增大,相应围压亦增加。由于围压对应于煤层埋深,故此现象反应出随着煤层埋深增加,煤岩渗透率应力敏感性下降。

对比四组实验数据表明孔隙压力越大,实验过程中煤岩整体渗透率减小。这是由于实验初期,首先将煤岩围压增加至初始围压设定值,且孔隙压力设定值越大,初始围压越大。例如 I 组实验孔隙压

力为 2.0 MPa,初始围压为 3.0 MPa, II、III、IV 组实验孔隙压力分别为 3.0 MPa、4.0 MPa、5.0 MPa,初始围压依次为 4.0 MPa、5.0 MPa、6.0 MPa。在初始围压增加的前提下,煤岩在实验初始条件下所受压缩强度逐渐增加,煤岩割理宽度变窄。

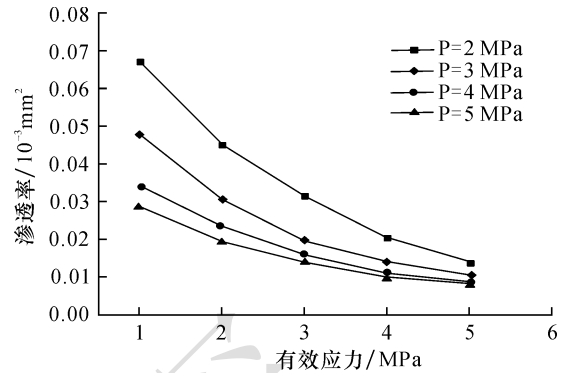


图1 煤岩渗透率随有效应力变化曲线

Fig.1 Curves of coal permeability varying with effective stress

采用负指数函数对无因次渗透率进行拟合,拟合结果见表3。各孔隙压力下渗透率与有效应力负指数函数拟合的相关系数均可达 0.99 以上,拟合相关系数较高,表明保德区块煤储层渗透率随有效应力的增加呈现负指数降低的变化规律。

孟召平等(2013)、陈刚等(2014)对不同阶煤应力敏感性的研究表明,不同阶煤渗透率随有效应力增加呈现负指数变化规律,且随着有效应力增加,渗透率下降幅度呈现明显的阶段性,即有效应力小于 5 MPa 时,渗透率处于快速下降期,平均降幅 87%;有效应力在 5 MPa ~ 10 MPa 时,渗透率处于较快下降期,平均降幅 10.45%;有效应力大于 10 MPa 后,渗透率处于缓慢下降期。本次研究由于设定有效应力变化范围为 1 MPa ~ 5 MPa,在此范围内渗透率—有效应力曲线逐渐变缓,因此渗透率变化没有出现明显的阶段性。

表3 无因次渗透率拟合函数参数
Table 3 Fitting function parameters of dimensionless permeability

拟合函数	孔隙压力/MPa	拟合参数		相关系数
		a	b	
$y = ae^{bx}$	2	1.48	-0.39	0.999
	3	1.49	-0.41	0.992
	4	1.43	-0.36	0.995
	5	1.38	-0.33	0.994

3 实验结果分析

3.1 渗透率应力敏感性分析

为了对保德区块煤储层渗透率应力敏感性进行定量评价,本文选用渗透率损害系数、应力敏感系数作为评价指标。

(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率,按式(1)计算。

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

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, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; σ_i 为第 i 个有效应力值, MPa ; σ_{i+1} 为第 $i+1$ 个有效应力值, MPa 。

(2) 应力敏感系数

低渗透岩石渗透率对应力敏感性的研究常采用有效应力敏感系数,为定量探讨有效应力对煤岩渗透率的影响程度,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率,按公式(2)计算。

$$\alpha_k = -\frac{1}{K_0} \frac{\partial K}{\partial \sigma} \quad (2)$$

式中, α_k 为有效应力敏感性系数, MPa^{-1} ; ∂K 为煤岩渗透率变化量, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; $\partial \sigma$ 为有效应力变化量, 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_k 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。

利用公式 1、公式 2 计算渗透率损害系数及应力敏感系数(图 2,图 3),计算结果显示同一孔隙压力下,随有效应力增加,二者均逐渐降低;相同有效应力变化范围内,孔隙压力越大,二者下降幅度均减小。渗透率损害系数及应力敏感系数随有效应力及孔隙压力变化呈现相同的变化规律,二者同时表明,随着有效应力增加,煤岩渗透率应力敏感性下降,且围压越高,煤岩渗透率应力敏感性越低。

利用线性函数和负指数函数分别对渗透率损害系数及应力敏感系数进行拟合(图 2,图 3)。从拟合结果来看,渗透率损害系数的线性函数拟合相关系数相对较低,规律性不强。应力敏感系数的负指

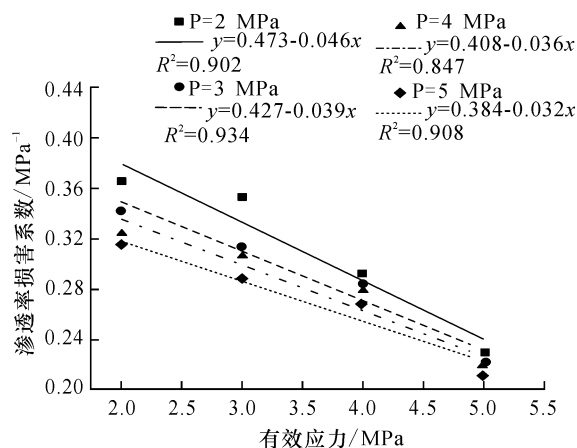


图 2 渗透率损害系数与有效应力拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves of permeability damage coefficient and effective stress

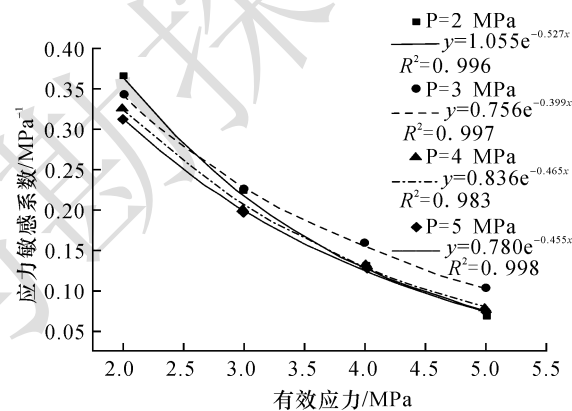


图 3 有效应力敏感系数与有效应力拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of effective stress sensitivity coefficient and effective stress

数函数拟合相关系数较高,均达到 0.99 以上。表明在对保德区块煤储层应力敏感性评价方面,应力敏感系数较渗透率损害系数更能规律性反应煤岩应力敏感性。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。二者的区别在于,当渗透率从有效应力 i 点向有效应力 $i+1$ 点变化过程中,渗透率损害系数反映渗透率变化量相对于有效应力 i 点下渗透率的比例,如此渗透率损害系数分子、分母均包含有效应力影响;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,只有分子包含有效应力影响,分母为初始渗透率,因此应力敏感系数较渗透率损害系数更能规律性反映煤岩渗透率的应力敏感性,在对煤岩渗透率敏感性评价中应着重采用应力敏感系数作为评价

指标。

3.2 割理压缩系数变化特征

Seidle *et al.*, (1992) 基于火柴棍模型,即将煤岩视为同型立方体柱的等间距列阵分布,假设流体在各立方体柱间隔空间中流动,提出了有效应力与渗透率的理论关系式:

$$K = K_0 e^{-3C_f(\sigma - \sigma_0)} \quad (3)$$

式中, C_f 为煤岩割理压缩系数, MPa^{-1} ; σ_0 为初始水平有效应力, MPa ; σ 为水平有效应力, MPa ; K 为煤岩渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_0 为煤岩初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在现有的从应力角度建立的渗透率分析模型中,如 SD 模型(Shi *et al.*, 2004, 2005)、CB 模型(Cui *et al.*, 2005, 2007),大多采用公式(3)作为连接有效应力与渗透率的桥梁。且在公式应用过程中视割理压缩系数为常数。公式(3)反映了水平有效应力对煤岩割理渗透率的影响。对公式(3)变形得割理压缩系数的拟合函数公式(4)及解析函数公式(5)。

$$\ln \frac{K}{K_0} = -3C_f(\sigma - \sigma_0) \quad (4)$$

$$C_f = \ln \frac{K}{K_0} / -3(\sigma - \sigma_0) \quad (5)$$

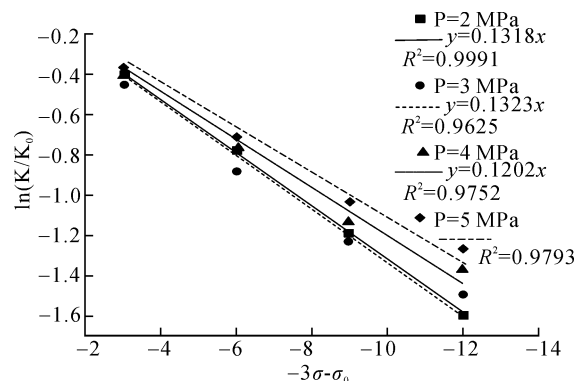


图4 割理压缩系数函数拟合求算

Fig. 4 Fitting function of cleat compressibility

利用公式(4)对有效应力及无因次渗透率进行拟合,便可以得到在所研究的有效应力变化范围内的割理压缩系数均值。J. Q. Shi 和 S. Durucan (Shi *et al.*, 2004, 2005) 求算了低有效应力阶段及高有效应力阶段煤岩割理压缩系数,认为当储层压力大于等于 300psi 时,取值为 0.00096 psi^{-1} ;当储层压力小于 300 psi 时,取值为 $0.00063 \text{ psi}^{-1} \sim 0.00096 \text{ psi}^{-1}$ 。即对于一定覆压条件下的煤储层而言,在低储层压力阶段,割理压缩系数为变量,而在高储层

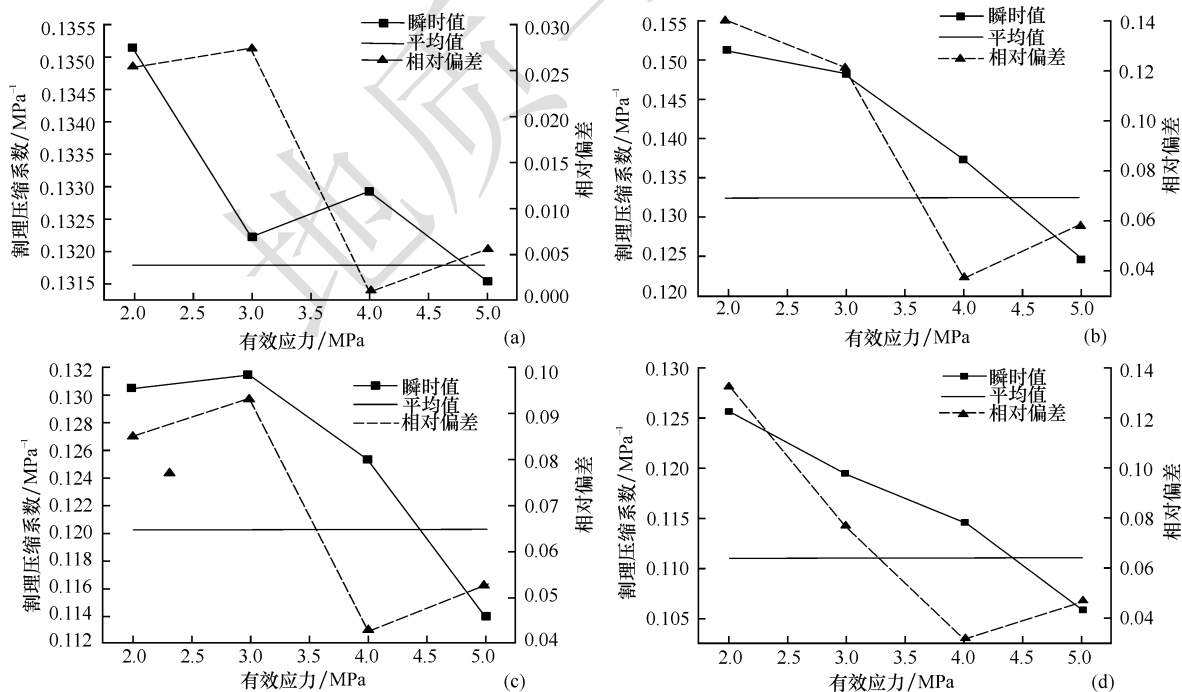


图5 不同孔隙压力下割理压缩系数拟合求算与解析求算结果对比

Fig. 5 Comparison of the results of cleat compressibility calculated by the fitting and analytic methods under different pore pressures

a - 孔隙压力 2MPa; b - 孔隙压力 3MPa; c - 孔隙压力 4MPa; d - 孔隙压力 5MPa
a-pore pressure 2MPa; b-pore pressure 3MPa; c-pore pressure 4MPa; d-pore pressure 5MPa

压力阶段,割理压缩系数可视为常数。利用函数(式4)拟合求算不同孔隙压力下,各煤样在实验设定的有效应力范围内的割理压缩系数均值,拟合结果见图4。结果显示,随着孔隙压力的增大,煤样割理压缩系数均值逐渐减小。孔隙压力2、3、4、5 MPa下,保德区块煤岩在有效应力1 MPa~5 MPa范围内,割理压缩系数分别为 0.1318 MPa^{-1} 、 0.1323 MPa^{-1} 、 0.1202 MPa^{-1} 、 0.1109 MPa^{-1} 。这表明随着煤层埋深增加,煤岩割理压缩系数减小。

利用解析函数(式5)直接计算不同孔隙压力下,煤岩在各有效应力点下的割理压缩系数瞬时值,计算结果见图5。结果显示,不同孔隙压力下,随着有效应力的增加,煤岩割理压缩系数瞬时值呈现递减趋势。

以不同孔隙压力下割理压缩系数均值作为基准值,分析各有效应力点下的割理压缩系数瞬时值相对于基准值的相对偏差(图5)。结果显示,随着有效应力的增加,相对偏差值存在一定的递减趋势。这表明,在高有效应力阶段,函数拟合求算的割理压缩系数均值与解析函数求算的割理压缩系数瞬时值更为接近。换言之,在高有效应力阶段,煤岩割理压缩系数更接近于常数;在低有效应力阶段,煤岩割理压缩系数应视为变量,在应用过程中应按照解析公式逐一计算,方能获得较高的准确率。

4 结论

本次研究通过实验测定了有效应力单因素影响下保德区块煤岩渗透率,并就实验结果进行了渗透率应力敏感性分析及割理压缩系数变化特征分析,得到以下主要结论:

(1)实验条件下,保德区块煤储层渗透率与有效应力呈现负指数函数关系,且孔隙压力越大,煤岩渗透率下降幅度越小;

(2)渗透率损害系数及应力敏感系数均与有效应力呈负相关关系,且孔隙压力越大,二者下降幅度均减小,表明随着有效应力增加,煤岩渗透率应力敏感性下降,且围压越高,煤岩渗透率应力敏感性越低;

(3)渗透率损害系数的线性函数拟合相关系数较低,应力敏感系数的负指数函数拟合相关系数较高;

(4)在高有效应力阶段,煤岩割理压缩系数更趋近于常数,低有效应力阶段,割理压缩系数应视为变量。

[References]

- Bo Dong-mei, Zhao Yong-jun, Jiang Lin. 2008. Research method and main influencing factors of coal reservoir permeability[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 15(1): 18-21 (in Chinese with English abstract)
- Cai Dong-mei, Sun Li-dong, Zhao Yong-jun. 2009. Research on development mechanism of coal seam permeability based on coal evolution degree[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 28(2): 22-27 (in Chinese with English abstract)
- Chen Gang, Qin Yong, Yang Qing, Li Wu-zhong. 2014. Different stress sensitivity of different coal rank reservoir permeability and its effect on the coal bed methane output[J]. *Journal of China Coal Society*, 39(3): 504-509 (in Chinese with English abstract)
- Chen Zhen-hong, Wang Yi-bing, Guo Kai, Sun Qing-ping, Zhang Ya-pu. 2008. Stress sensitivity of high-rank coalbed methane reservoir[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(10): 1390-1395 (in Chinese with English abstract)
- Cui X J, Bustin R M. 2005. Volumetric strain associated with methane desorption and its impact on coalbed gas production from deep coalseams[J]. *The American Association of Petroleum Geologists*, 89(9): 1181-1202
- Cui X J, Bustin R M, Chikatarla L. 2007. Adsorption-induced coal swelling and stress: Implications for methane production and acid gas sequestration into coal seams[J]. *Journal of Geophysical Research*, 112(B10): 202
- Li Pei-chao, Kong Xiang-yan, Zeng Qing-hong, Lu De-tang. 2002. Summarizing and analyzing the factors affecting the coefficient of permeability of coal beds[J]. *Natural Gas Industry*, 22(5): 45-49 (in Chinese with English abstract)
- Meng Zhao-ping, Hou Quan-lin. 2013. Coupling model of stress-dependent permeability in high-rank coal reservoir and its control mechanism[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(2): 667-675 (in Chinese with English abstract)
- Seidle J P. 1992. Application of Matchstick Geometry to Stress Dependent Permeability in Coal[A]. In: the SPE Rocky Mountain Regional Meeting. Casper, Wyoming, May: 18-21
- Shi J Q, Durucan S. 2004. Drawdown Induced Changes in Permeability of Coalbeds: A New Interpretation of the Reservoir Response to Primary Recovery[J]. *Transport in Porous Media*, 56: 1-16
- Shi J Q, Durucan S. 2005. A model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recovery[J]. *Reservoir Evaluation & Engineering*, 8(4): 291-299
- Zhu Guang-ya, Liu Xian-gui, Li Shu-tie, Huang Yan-zhang, Hao Ming-qiang. 2007. A study of slippage effect of gas percolation in low permeability gas pools[J]. *Natural Gas Industry*, 27(5): 44-47 (in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

- 薄冬梅, 赵永军, 姜林. 2008. 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*, 15(1): 18-21
- 李培超, 孔祥言, 曾清红, 卢德唐. 2002. 煤层渗透率影响因素综述与分析[J]. *天然气工业*, 22(5): 45-48

蔡东梅, 孙立东, 赵永军. 2009. 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), 28(2): 22-27

陈 刚, 秦 勇, 杨 青, 李五忠. 2014. 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, 39(03): 504-509

陈振宏, 王一兵, 郭 凯, 孙钦平, 张亚蒲. 2008. 高煤阶煤层气藏储层应力敏感性研究[J]. 地质学报, 82(10): 1390-1395

孟召平, 侯泉林. 2013. 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, 56(2): 667-675

朱光亚, 刘先贵, 李树铁, 黄延章, 郝明强. 2007. 低渗气藏气体渗流滑脱效应影响研究[J]. 天然气工业, 27(5): 44-47

Study on Influence of Effective Stress on Coal Reservoir Permeability in the Baode Block

XUE Pei, GAO Chao

(Research Institute of Yanchang Petroleum(Group) CO. LTD, Xi'an, Shaanxi 710065)

Abstract: This study is based on the gas seepage experiments of coal in the Baode Block under the influence of the single factor of effective stress. The purpose is to analyze the stress sensitivity of permeability and the change features of cleat compressibility. The results show that the coal permeability in the Baode Block decreases according to a negative exponential function with the increase of effective stress. The deeper the buried depth of coal seam, the smaller the change in coal permeability, meanwhile permeability stress sensitivity decreases. The correlation coefficient of linear function fitting of permeability damage coefficient is low. The correlation coefficient of negative exponential function fitting of the stress sensitivity coefficient is high. The stress sensitivity is more regular than permeability damage coefficient. In the high effective stress stage, cleat compressibility is close to a constant. In the low effective stress stage, cleat compressibility can be regarded as a variable.

Key words: effective stress, Baode block, coal reservoir permeability, stress sensitivity, cleat compressibility

