

doi:10.20008/j.kckc.202406014

# 煤储层等效有效应力系数变化规律实验研究

杜志刚, 黄强, 严少洋, 张晓晨, 严超

(洛阳理工学院土木工程学院, 河南 洛阳 471023)

**摘要** 煤储层进入饱和气体单相流后, 储层有效应力系数的变化规律是正确评估储层渗透性的关键。本文采集不同变质程度的煤岩样品, 对不同外界荷载和孔隙压力条件下煤储层的等效有效应力系数进行了研究, 结果表明: 在孔隙压力一定的条件下, 外界荷载对煤储层等效有效应力系数具有负效应, 随外界荷载加载, 煤储层等效有效应力系数减小, 且外界荷载越大负作用越强; 在外界荷载一定条件下, 随孔隙压力增加, 煤储层等效有效应力系数增大, 孔隙压力对煤储层等效有效应力系数具有正效应; 相对于中阶煤和高阶煤储层, 低阶煤储层由于孔隙类型多样, 孔隙尺度大, 储层的等效有效应力系数在外界荷载和孔隙压力耦合作用下影响程度相对较小。由于煤储层等效有效应力系数在不同外界荷载和孔隙压力下差异较大, 煤储层进入饱和气体单相流后, 在不考虑解吸收缩效应条件下, 煤储层的有效应力变化并非等同于储层孔隙压力的变化, 而与煤阶类型、地应力高低和孔隙压力大小密切相关, 原位高地应力条件下, 由于煤储层的等效有效应力系数较小, 随孔隙压力降低, 煤储层有效应力变化相对微弱。

**关键词** 煤层气; 储层; 有效应力系数; 变化规律

中图分类号: P632.8 文献标志码: A 文章编号: 1674-7801(2024)06-1041-08

## Experimental study on the variation law of equivalent effective stress coefficient of the coal reservoir

DU Zhigang, HUANG Qiang, YAN Shaoyang, ZHANG Xiaochen, YAN Chao

(School of Civil Engineering, Luoyang Institute of Technology, Luoyang 471023, Henan, China)

**Abstract:** The variation law of equivalent effective stress coefficient of the coal reservoir at the stage of the saturation single-phase gas flow is essential in evaluating the reservoir permeability. The coal samples with different degrees of metamorphism were collected and their equivalent effective stress coefficient was studied under different applied loading and pore pressure conditions. The results showed that under a constant pore pressure, with the application of the loading, the equivalent effective stress coefficient of the coal decreases. Applied loading has a negative effect on the equivalent effective stress coefficient of coal reservoirs, and which is strong with the

[收稿日期]2024-05-07; [修回日期]2024-05-15

[基金项目]本文受国家自然科学基金(42172198)、河南省自然科学基金(222300420242)和河南省科技攻关(242102320026, 242300421255)联合资助。

[第一作者简介]杜志刚,男,1987年生,博士,副教授,从事深地能源开发与CO<sub>2</sub>地质封存方面的研究工作;E-mail:ganguzhi@163.com。

[引用格式]杜志刚,黄强,严少洋,张晓晨,严超. 2024. 煤储层等效有效应力系数变化规律实验研究[J]. 矿产勘查, 15(6): 1041-1048.

Du Zhigang, Huang Qiang, Yan Shaoyang, Zhang Xiaochen, Yan Chao. 2024. Experimental study on the variation law of equivalent effective stress coefficient of the coal reservoir[J]. Mineral Exploration, 15(6): 1041-1048.

increase of applied loading. Whereas, at a certain loading, with the increase of pore pressure, the equivalent effective stress coefficient of coal reservoirs increases. Pore pressure has a positive effect on the equivalent effective stress coefficient of coal reservoirs. Compared with the middle- and high-rank coal, there are much more pore types in the coal. And the its pore size is much larger. Under the coupling effect of applied loading and pore pressure, the equivalent effective stress coefficient of low-rank coal reservoir is less affected compared to the middle- and high-rank coal reservoirs. There is a significant difference in the equivalent effective stress coefficient of coal reservoir under different applied loading and pore pressure. Thus for the coal reservoir at the saturation single-phase gas flow stage, without considering the coalbed methane desorption-induced coal matrix shrinkage effect, the effective stress change of coal reservoir is not equivalent to the change of pore pressure. And it is closely related to the magnitude of geo-stress and pore pressure. Under the high in-situ geo-stress condition, due to the small equivalent effective stress coefficient, the change of effective stress for the coal reservoir is little with the decrease of pore pressure.

**Keywords:** coalbed methane; coal reservoir; effective stress coefficient; variation law

## 0 引言

中国煤层气高产区,煤层气单井产气量高,多数井产水量几乎为零,煤层气井具有良好的持续稳产能力(柳迎红等,2015;康永尚等,2017;李瑞等,2017;胡海洋等,2020)。煤储层进入饱和气体单相流后,储层有效应力的变化规律对渗透性控制明显,通常基于Terzaghi(1926)有效应力原理,假定有效应力系数固定不变,对排采过程中煤储层的有效应力变化规律进行分析(陈金刚等,2006;蔡振华等,2014;陈亚西等,2015;赵俊龙等,2016)。Terzaghi(1926)提出的有效应力原理是基于土的渗透固结实验,表达式如下:

$$(\sigma_{ef})_i = \sigma_i - P_i \quad (1)$$

式(1)所示的有效应力原理较好地表达了土的散体结构在孔隙水压作用下颗粒基质间有效应力的变化规律,即随着孔隙水压的增加,土颗粒承载的有效应力等量减小。但对煤储层而言,由于煤为凝胶化物质,煤中孔隙孤立分布,以及割理、微裂隙对煤岩组分的选择性和非均质分布特点,使得煤的孔隙、裂隙结构特征与土的散体结构有着本质差异,这就造成狭义的有效应力原理对煤储层而言并不适用。此外,土的渗透固结实验,所用流体为不可压缩的水,而对于饱和气体单相流阶段的煤储层,储层内流体为具有可压缩性的气体,进一步影响了式(1)对煤储层的适用性。

Müller and Sahay(2016)研究指出等效有效应力系数与介质的微裂隙发育情况、孔隙尺度大小等密切相关;Kranz et al.(1979)研究指出张性节理岩体

的等效有效应力系数 $\alpha = 0.56$ ,倘若不考虑等效有效应力系数,将严重高估孔隙流体压力减小过程中,岩体承载有效应力的变化程度;Walsh(1981)研究指出裂隙岩体的有效应力系数 $\alpha = 0.9$ ,相对于Kranz et al.(1979)的研究结果,Walsh(1981)研究获取的等效有效应力系数相对较大,孔隙压力变化对岩体承载有效应力的影响程度相对较大;傅雪海等(2007)对晋城无烟煤在围压大于8 MPa,孔隙压力高于5 MPa条件下测试的等效有效应力系数为0.06和0.04;可见,等效有效应力系数与介质结构特征、外界荷载、孔隙压力等因素密切相关(Terzaghi, 1926; Kranz et al., 1979; Walsh, 1981; 傅雪海等, 2007; Sahay, 2013; Müller and Sahay, 2016)。煤储层进入饱和气体单相流后,储层有效应力的变化规律可采用如下修正后的有效应力原理表达:

$$(\sigma_{ef}) = \sigma_{ij} - \alpha_{ij} P \delta_{ij} \quad (2)$$

式(2)中, $\sigma_{ef}$ 为煤储层的真实有效应力; $\sigma_{ij}$ 为外界荷载; $\alpha_{ij}$ 为等效有效应力系数; $\delta_{ij}$ 为Kronecker符号,取值为1。显然,在外界荷载和孔隙压力一定的条件下,煤储层等效有效应力系数的变化规律决定了煤储层有效应力的变化规律。

## 1 实验样品与方案

### (1) 样品采集

本实验分别采集了神东矿区、平顶山矿区、晋城矿区的煤样,表1和表2分别为样品的煤质分析和煤岩分析结果。结果显示:神东矿区和平顶山矿区采集样品的硫含量高于晋城矿区样品,且密度较高;所有样品中镜质组含量最高,惰质组次之、壳质

组最小;3个矿区采集煤样的镜质组反射率分别为 0.56%、1.32%、2.75%,依次对应于低、中、高阶煤。

表 1 煤质分析结果

样品	工业分析/%				元素分析/%					密度/ (10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )
	$M_{ad}$	$A_d$	$V_{daf}$	$FC_{ad}$	$S_{t,d}$	$O_{daf}$	$C_{daf}$	$H_{daf}$	$N_{daf}$	
低阶煤	13.90	7.69	39.64	47.94	0.79	20.30	73.18	4.48	1.18	1.52
中阶煤	1.01	6.10	16.63	77.49	0.40	3.40	90.51	4.39	1.27	1.31
高阶煤	1.47	8.51	5.93	84.09	0.39	4.42	90.77	3.74	0.64	1.44

表 2 煤岩分析结果

样品	地层	$R_{o,max}/\%$	煤岩显微组分组成/%			
			镜质组	壳质组	惰质组	矿物
低阶煤	侏罗纪(J <sub>2</sub> y)	0.56	80	1	7	12
中阶煤	二叠纪(P <sub>1</sub> sh)	1.32	74	0	19	7
高阶煤	二叠纪(P <sub>1</sub> sh)	2.75	93	0	2.0	5

## (2) 实验方法

以采集的煤样模拟不同煤阶的煤储层,通过向煤体注入特定压力的气体模拟不同的孔隙压力,分别对低、中、高阶煤在不同荷载和不同孔隙压力条件下的等效有效应力系数进行测试。考虑到煤储层进入饱和气体单相流阶段后,随着气体的持续产出,煤基质孔隙表面吸附态的甲烷气体不断解吸,由此引起的煤基质解吸收缩行为无疑会对煤储层的有效应力产生影响(Zhang et al., 2021; Du et al., 2022),为了排除煤基质解吸收缩行为的影响,实验拟采用非吸附性气体 He 气模拟孔隙压力。通过向承载煤体注入非吸附性 He 气体,测量样品在等量孔隙压力与围压加载下的径向应变比值关系,确定不同条件下煤储层的等效有效应力系数;测试程序按以下步骤进行:

①测试样品在 1 MPa、2 MPa、3 MPa、4 MPa、5 MPa、6 MPa 应力荷载下产生的径向应变,每次加载至目标应力值后,保持稳定 2 min,进行下一阶段应力加载,直至目标荷载达 12 MPa,以此获取的径向应变作为基准应变值 $(\varepsilon_r)_{S(i)}$ ;

②测试煤体分别在荷载 2 MPa、4 MPa、6 MPa、8 MPa、10 MPa、12 MPa 下,依次注入 1 MPa、2 MPa、3 MPa、4 MPa、5 MPa、6 MPa 的 He 气体,所产生的径向应变变量 $(\varepsilon_r)_{He(i)}$ ;

③ $(\varepsilon_r)_{He(i)}/(\varepsilon_r)_{S(i)}$ 为不同条件下模拟实验获取的煤储层等效有效应力系数, $\alpha_{ij}$ 。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 煤储层等效有效应力系数变化规律

表 3 为获取的低、中、高阶煤储层的等效有效应力系数,其中低阶煤为 0.48~0.82,中阶煤为 0.06~0.31,高阶煤为 0.012~0.240。在测试围压和孔隙压力条件下,不同样品的等效有效应力系数差异明显,但整体上表现为高阶煤储层最低,中阶煤储层次之,低阶煤储层最高的规律。

低、中、高阶煤储层的等效有效应力系数与围压和孔压之间呈现出线性关系,图 1 为不同煤阶煤储层等效有效应力系数与围压和孔压的关系图,拟合模型见表 4。

低、中、高阶煤储层的等效有效应力系数与围压和孔压之间分别呈现出线性关系,这与以往研究结果相一致(赵阳升和胡耀青,1995),除此之外有如下规律:(1)孔隙压力一定的条件下,随着外界荷载的加载,等效有效应力系数减小;(2)围压一定的条件下,随着孔隙压力的增加,等效有效应力系数增大。由于煤储层的等效有效应力系数在不同荷载和孔隙压力下差异较大,由式(2)可知:煤储层进入饱和气体单相流阶段后,储层承载有效应力的变化将小于孔隙压力的变化,且原位高地应力条件下,由于等效有效应力系数较小,此时受储层孔隙压力变化影响,煤储层的有效应力变化相对较小;而一定荷载条件下,高孔隙压力所能引起的煤储层有效应力变化较低孔隙压力要大,此时孔隙压力变化对煤储层的变形作用相对显著。

恒定孔隙压力条件下,储层的等效有效应力系数与围压之间满足关系:

$$(\alpha_{ef})_{\sigma} = a_{\sigma}\sigma + b_{\sigma} \quad (3)$$

恒定围压条件下,储层的等效有效应力系数与孔压之间满足关系:

表3 煤储层的等效有效应力系数

样品	围压/MPa	孔压/MPa					
		1	2	3	4	5	6
低阶煤	6	0.640	0.720	0.760	0.800	0.820	
	8	0.600	0.680	0.720	0.760	0.800	0.820
	10	0.550	0.600	0.680	0.720	0.760	0.780
	12	0.480	0.530	0.580	0.620	0.640	0.680
中阶煤	6	0.120	0.180	0.210	0.240	0.280	
	8	0.100	0.160	0.180	0.200	0.240	0.310
	10	0.080	0.120	0.160	0.180	0.220	0.261
	12	0.060	0.112	0.130	0.160	0.201	0.240
高阶煤	6	0.067	0.110	0.134	0.168	0.200	
	8	0.037	0.102	0.130	0.153	0.190	0.240
	10	0.020	0.081	0.115	0.130	0.173	0.220
	12	0.012	0.059	0.083	0.106	0.144	0.174

$$(\alpha_{ef})_p = a_p p + b_p \quad (4)$$

式(4)中,参数 $a_\sigma$ 表征了外界荷载对等效有效应力系数的影响程度,参数 $a_p$ 表征了孔隙压力对等效有效应力系数的影响程度。其中, $a_\sigma < 0$ ,表明外界荷载对等效有效应力系数具有负效应,在孔隙压力一定条件下,随着外界荷载增加, $a_\sigma$ 绝对值整体上呈现增大趋势,表明外界荷载对低孔隙压力储层的等效有效应力系数弱化作用更明显; $a_p > 0$ ,表明孔隙压力对等效有效应力系数具有正效应,在孔隙压力一定条件下,随外界荷载增加, $a_p$ 整体上呈现减小趋势。

由于低、中、高阶煤储层的等效孔隙压力系数与外界荷载和孔隙压力均具有线性相关性,对其关系进行双线性拟合分析(图2),获取不同外界荷载和孔隙压力下煤储层的等效孔隙压力系数,如下:

$$\alpha_{\sigma p} = 0.78 - 0.027\sigma + 0.053p - 0.00095\sigma p, \quad R^2=0.96(\text{低阶煤}) \quad (5)$$

$$\alpha_{\sigma p} = 0.15 - 0.010\sigma + 0.042p - 0.00075\sigma p, \quad R^2=0.97(\text{中阶煤}) \quad (6)$$

$$\alpha_{\sigma p} = 0.07 - 0.007\sigma + 0.041p - 0.00075\sigma p, \quad R^2=0.97(\text{高阶煤}) \quad (7)$$

式(5)~式(7)中, $\sigma$ 表示外界荷载, $p$ 表示孔隙压力, $\sigma p$ 表示外界荷载和孔隙压力的耦合作用,双线性拟合结果综合考虑了外界荷载和孔隙压力对煤储层等效有效应力系数的影响,可以看出:外界荷载和孔隙压力耦合作用下,低阶煤储层等效孔隙压力系数受其影响最小,中阶煤和高阶煤相当。其主

要原因可能在于低阶煤储层在成煤作用过程中煤体的沉积压实程度相对较低,煤的孔隙度较大,气体更易渗透到煤的孔隙中所致(张瑶和赵军龙,2020)。

## 2.2 煤储层等效有效应力系数差异性的微观机理

在不考虑构造应力作用对煤储层结构破坏的情况下(杜志刚等,2014;程远平和雷杨,2021),从结构组成来看,土体与煤储层最大的区别在于,土体具颗粒结构,土颗粒之间形成的粒间孔,提供了流体渗透运移的空间路径;而煤是在地质历史过程中经成岩作用和煤化作用形成的一种沉积有机岩,随着成岩作用和煤化作用的进行,煤岩的物理结构,尤其是孔隙结构,经历了沉积压实作用和热演化作用的共同主导,对流体的渗透运移控制明显(刘爱华等,2013;李祥春等,2019;张广宇,2019)。

图3显示了扫描电镜下煤储层中的孔隙。其中,变质程度较低的低阶煤孔隙类型较为多样,除少数气孔外,存在大量植物组织孔,且孔隙尺度较大(图3a);随着煤化程度的增加,至中等变质程度的中阶煤出现拉长的热变气孔,但气孔数量较少,孔隙零星分布、排列无序(图3b);随煤化程度的进一步增加,至高变质程度的高阶煤,电镜下观测显示煤中孔隙以气孔为主,且孔隙尺度更小(图3c)。整体上,对于不同煤阶的煤储层,随煤化作用增加,储层内孔隙由低阶煤的植物组织孔、气孔等多种孔

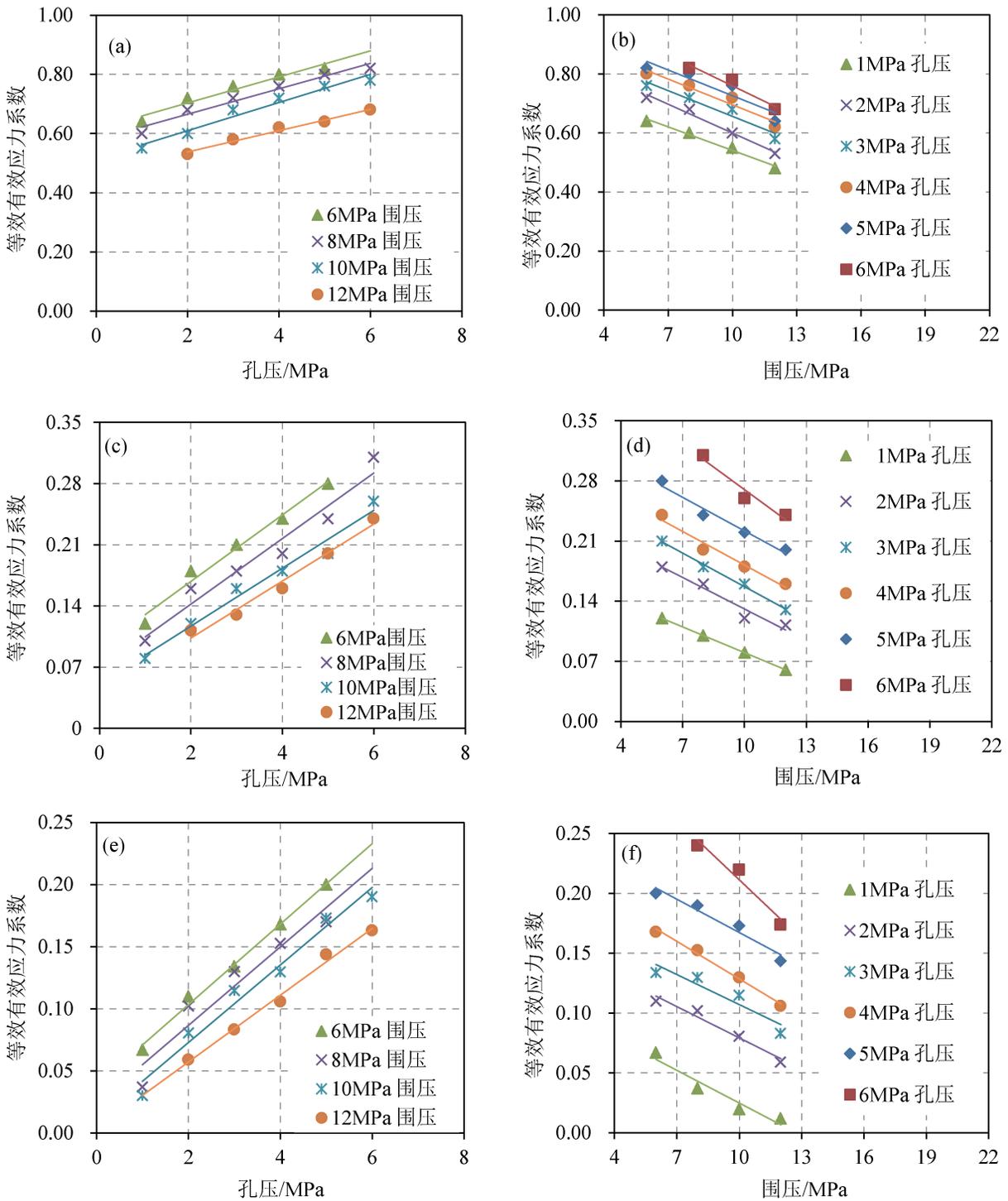


图 1 煤储层等效有效应力系数与围压和孔压的关系图

a、b—低阶煤；c、d—中阶煤；e、f—高阶煤

隙成因类型向高阶煤以气孔为主的孔隙成因类型演化,且孔隙尺度不断变小。

前人研究指出介质的等效有效应力系数与孔隙尺度大小密切相关(Müller and Sahay, 2016),而不同煤阶煤储层在外界荷载和孔隙压力耦合作用下,

低阶煤储层由于孔隙尺度较大,流体更易渗透进入储层孔隙系统,可以有效承担孔隙压力,使得储层的等效孔隙压力系数受其影响最小,而中阶煤和高阶煤储层的孔隙尺度不断减小,且以基质内部的气孔为主,缺少粒间孔,流体不易渗透进入储层孔隙

表 4 煤储层等效有效应力系数与围压和孔压关系的拟合模型

孔隙 压力 /MPa	围压 (6 MPa、8 MPa、10 MPa、12 MPa)		围压 /MPa	孔压 (1 MPa、2 MPa、3 MPa、4 MPa、5 MPa、6 MPa)			
	线性拟合模型	$R^2$		线性拟合模型	$R^2$		
1	低阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.0265\sigma + 0.806$	0.98	低阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = 0.044p + 0.616$	0.95	
	中阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.01\sigma + 0.18$	1.00	6	中阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = 0.038p + 0.092$	0.98
	高阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.0009\sigma + 0.116$	0.93	6	高阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = 0.0324p + 0.0386$	0.99
2	低阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.0325\sigma + 0.925$	0.98	8	低阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = 0.047p + 0.515$	0.97
	中阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.012\sigma + 0.252$	0.95		中阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = 0.0374p + 0.0673$	0.95
	高阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.0087\sigma + 0.1664$	0.97		高阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = 0.0317p + 0.023$	0.92
3	低阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.029\sigma + 0.946$	0.94	10	低阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = 0.043p + 0.58$	0.96
	中阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.013\sigma + 0.287$	0.99		中阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = 0.033p + 0.0507$	0.97
	高阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.0084\sigma + 0.191$	0.88		高阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = 0.0312p + 0.0104$	0.98
4	低阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.029\sigma + 0.986$	0.94	12	低阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = 0.036p + 0.466$	0.98
	中阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.013\sigma + 0.312$	0.97		中阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = 0.0326p + 0.038$	0.98
	高阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.01\sigma + 0.233$	0.99		高阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = 0.0269p + 0.0035$	0.99
5	低阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.029\sigma + 1.02$	0.87				
	中阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.013\sigma + 0.352$	0.97				
	高阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.0093\sigma + 0.260$	0.95				
6	低阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.035\sigma + 1.11$	0.94				
	中阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.0175\sigma + 0.445$	0.94				
	高阶煤	$(\alpha_{ef})_{\sigma_p} = -0.0165\sigma + 0.376$	0.95				

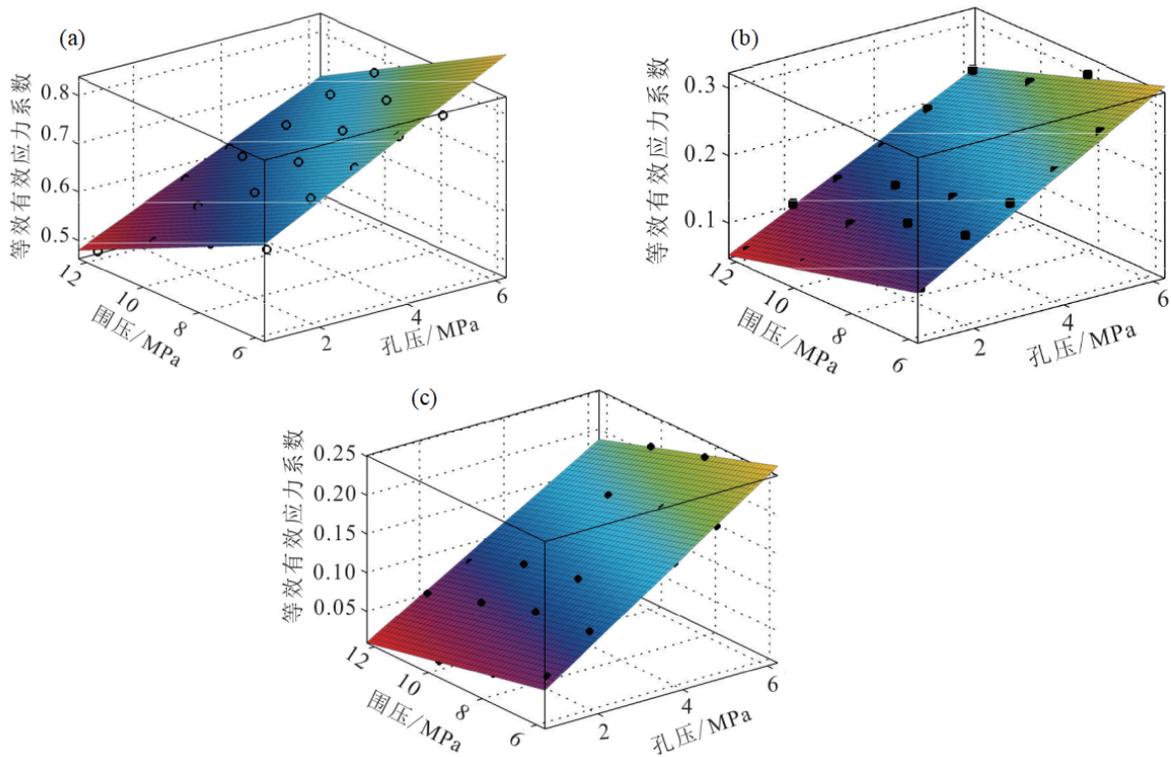


图 2 煤储层等效有效应力系数与围压和孔压的双线性拟合关系

a—低阶煤;b—中阶煤;c—高阶煤

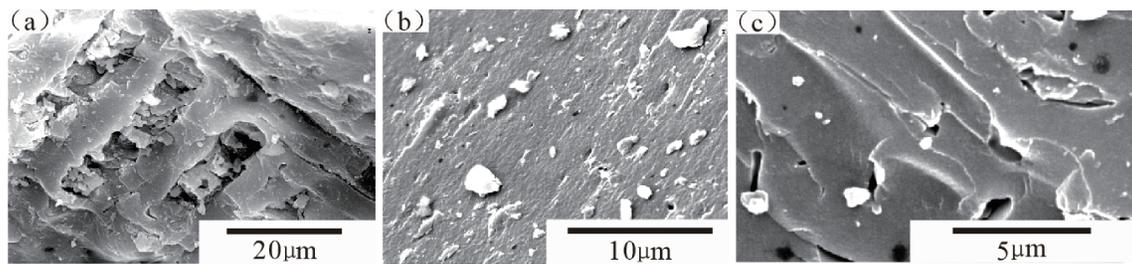


图3 扫描电镜下观测到的煤储层孔隙

a—低阶煤;b—中阶煤;c—高阶煤

系统,无法有效承担孔隙压力,使得这两类储层的等效有效应力系数在外界荷载和孔隙压力耦合作用下影响相对明显。

### 3 结论

(1)孔隙压力一定条件下,外界荷载对煤储层的等效有效应力系数具有负效应,随外界荷载加载,煤储层等效有效应力系数减小,且外界荷载越大负作用越强;外界荷载一定条件下,孔隙压力对煤储层等效有效应力系数具有正效应,随孔隙压力增加,煤储层等效有效应力系数增大。

(2)煤储层等效有效应力系数与围压和孔压之间符合双线性关系,外界荷载和孔隙压力耦合作用对煤储层等效有效应力系数呈现出负效应,相对于中阶煤和高阶煤储层,低阶煤储层在成煤作用过程中由于煤体的沉积压实程度相对较低,煤的孔隙度较大,气体更易渗透到煤储层孔隙系统,使得低阶煤储层的等效有效应力系数在外界荷载和孔隙压力耦合作用下影响程度相对较小。

(3)由于煤储层等效有效应力系数在不同荷载和孔隙压力下差异较大,煤储层进入饱和气体单相流后,在不考虑解吸收缩效应条件下,煤储层有效应力的变化并非等同于储层孔隙压力的变化,而与地应力高低和孔隙压力大小密切相关,原位高地应力条件下,由于等效有效应力系数相对较小,随孔隙压力降低,煤储层有效应力变化相对微弱。

### 参考文献

- Du Z G, Tao Y W, Zhang X D, Ding W X, Huang Q. 2022. CBM exploration: Permeability of coal owing to cleat and connected fracture[J]. *Energy Exploration and Exploitation*, 40(1):38-56.
- Kranz R L, Frankel S D, Engelder T, Scholz C. 1979. The permeability of whole and jointed Barre granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 16: 225-234.
- Müller T M, Sahay P N. 2016. Biot coefficient is distinct from effective pressure coefficient[J]. *Geophysics*, 81(4):27-33.
- Sahay P N. 2013. Biot constitutive relation and porosity perturbation equation[J]. *Geophysics*, 78(5):57-67.
- Terzaghi K. 1926. *Principles of Soil Mechanics* [M]. New York: McGraw-Hill.
- Walsh J B. 1981. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 18: 429-439.
- Zhang X D, Zhang S, Du Z G, Wang G X, Heng S, Liu X, Lin J F. 2021. CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> adsorption/desorption effects and thermodynamic characteristics in confined coal [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 207:109166.
- 蔡振华, 廖新维, 杜志强, 张倩, 范希良. 2014. 煤层气排采时渗透率动态特征研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 33(2):149-153.
- 陈金刚, 秦勇, 傅雪海. 2006. 高煤级煤储层渗透率在煤层气排采中的动态变化数值模拟[J]. *中国矿业大学学报*, 35(1): 49-53.
- 陈亚西, 杨延辉, 刘大锰, 姚艳斌, 张航, 闫涛滔. 2015. 樊庄区块煤层气排采数据分析与储层渗透率动态预测[J]. *煤炭科学技术*, 43(11):121-128.
- 程远平, 雷杨. 2021. 构造煤和煤与瓦斯突出关系的研究[J]. *煤炭学报*, 46(1):180-198.
- 杜志刚, 严家平, 谢焰, 胡水根. 2014. 煤体结构差异对气体运移影响的试验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 10(4):74-79.
- 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 2007. *煤层气地质学* [M]. 徐州:中国矿业大学出版社.
- 胡海洋, 赵凌云, 陈捷, 颜智华, 李云魁. 2020. 发耳矿区煤储层敏感性对煤层气排采影响及控制对策[J]. *煤炭科学技术*, 48(7):334-340.
- 康永尚, 张兵, 鱼雪, 王金, 姜杉钰, 叶建平, 张守仁. 2017. 沁水盆地寿阳区块煤层气排采动态成因机理及排采对策[J]. *天然气地球科学*, 28(1):116-126.
- 李瑞, 王生维, 吕帅锋, 肖宇航, 粟冬梅, 吴川. 2017. 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*, 45(7):93-99.
- 李祥春, 李忠备, 张良, 高佳星, 聂百胜, 孟洋洋. 2019. 不同煤阶煤样孔隙结构表征及其对瓦斯解吸扩散的影响[J]. *煤炭学报*, 44(S1):142-156.

- 刘爱华, 傅雪海, 梁文庆, 路露, 罗培培. 2013. 不同煤阶煤孔隙分布特征及其对煤层气开发的影响[J]. 煤炭科学技术, 41(4): 104-108.
- 柳迎红, 房茂军, 廖夏. 2015. 煤层气排采阶段划分及排采制度制定[J]. 洁净煤技术, 21(3):121-124.
- 张广宇. 2019. 河南火店南煤勘查区煤岩层对比[J]. 矿产勘查, 10(7):1571-1576.
- 张瑶, 赵军龙. 2020. 基于地球物理测井的煤体结构识别及对煤层气开采的影响[J]. 矿产勘查, 11(10):2194-2199.
- 赵俊龙, 汤达祯, 高丽军, 许浩, 孟艳军, 吕玉民. 2016. 煤层气排采过程中煤储层孔隙度模型及变化规律[J]. 煤炭科学技术, 44(7):180-185.
- 赵阳升, 胡耀青. 1995. 孔隙瓦斯作用下煤体有效应力规律的实验研究[J]. 岩土工程学报, 17(3):36-31.

## 《矿产勘查》杂志

欢迎投稿、欢迎订阅、欢迎刊登广告

月刊, 全年定价 600 元, 国内统一刊号: CN11-5875/TD, 邮发代号 2-656, 国内外公开发行

《矿产勘查》杂志是经国家新闻总署批准、由《有色金属矿产与勘查》《岩土工程界》相继更名而来, 是中国有色金属工业协会主管, 有色金属矿产地质调查中心主办, 中国有色金属工业协会地质矿产分会、中国有色金属学会地质学术委员会、中国地质学会矿山地质专业委员会联合协办的地学和矿业领域综合性技术类刊物。

办刊宗旨: 本刊力求全面展示基础地质、资源地质、民生地质领域的新理论、新方法、新技术和新成果, 纪实报道政策资讯、行业动态和矿业权信息等, 为行业科技理论成果展示提供平台支撑。

读者定位: 以地勘行业基层一线科技工作者为主要服务对象, 同时辐射自然资源管理、矿业界、环保界、投资界、院校及科研院所等相关技术和管理人员。

栏目设置: 基础地质、矿床地质、勘查技术、技术方法、水工环地质、境外勘查、产业经济、专家论坛、生态地质、农业地质、城市地质、旅游地质、地学科普等。

主编: 杨自安; 常务副主编: 王学明; 编辑部主任: 贺昕宇

编辑部联系电话: 010-84925664; 传真: 010-84925353

E-mail: kuangchankanca@126.com

地址: 北京市朝阳区安外北苑 5 号院 4 区科研楼

邮编: 100012