热烈庆祝中国地质学会
成立100周年
1922～2022
www.
geojournals.cn/georev

煤样渗透率有效应力与基质收缩双重耦合效应及其与煤阶关系

曹明亮[1)],邓泽[2)],康永尚[3)],李忠城[1)],张兵[1)],秦绍锋[1)],邓志宇[1)],郭明强[1)]

1)中联煤层气有限责任公司,北京,100016;

2)中国石油天然气集团有限公司非常规油气重点实验室,河北廊坊,065000;

3)中国石油大学(北京)地球科学学院,北京,102249

内容提要:为研究煤层气在排采过程中不同煤阶煤储层渗透率动态变化规律,利用煤岩三轴应力应变(基质收缩膨胀)测试系统,对褐煤、气煤和无烟煤样开展了有效应力与基质收缩双重效应物理模拟实验。固定轴压和围压不变,改变气体平衡压力,模拟开发过程中储层压力变化特征,测试其动态渗透率。利用实验结果,分析了不同煤阶煤岩在排采过程中动态渗透率反弹特征,并对比分析煤岩动态渗透率改善效果的差异性。研究表明:气体平衡压力从5 MPa降至1 MPa过程中,在有效应力和基质收缩双重效应作用下,褐煤样的归一化渗透率依次为1.00、0.60、0.57、0.57、0.52,气煤样依次为1.00、0.64、0.50、0.54和0.55,无烟煤样依次为1.00、0.74、0.58、0.50和0.56。随气体平衡压力下降,中阶及高阶煤样动态渗透率先下降后上升,整体呈不对称"V"型变化规律,但拐点略有不同;低阶煤样动态渗透率呈先下降后基本稳定的趋势,整体呈斜"L"型变化规律。在有效应力和基质收缩双重效应影响下,中阶及高阶煤样动态渗透率改善效果优于低阶煤样。

关键词:煤岩;有效应力;基质收缩;动态渗透率;物理模拟

在煤层气井排采中后期,煤储层渗透率一方面受有效应力负效应的影响,随着排采进行而降低(全方凯等,2012;刘皓,2017;于文龙,2018;侯世辉,2018);另一方面受基质收缩正效应的影响,随着排采进行而升高(张松航等,2012;裴柏林等,2017)。二者耦合作用使得煤储层渗透率在排采过程中呈现动态变化特征(陈亚西,2016)。因此,认识不同煤阶煤岩在开发过程中渗透率动态变化规律,对比分析不同煤阶煤岩动态渗透率改善效果的差异性,可为煤层气排采工作制度优化提供理论依据。国内外学者对排采过程中煤岩渗透率动态演化进行过一些研究(Seidle,1992;Enever et al.,1997;Gray,1987;Levine,1996;邓泽等,2009;孟艳军等,2015;袁梅等,2018;孟雅,2018)。例如,傅雪海(2001)采用现代测试方法与理论,厘定了多相介质煤岩体的吸附/解吸、扩散与渗流特征,并构建相关数学模型,首次对渗透率与主控因素之间关系进行了系统地耦合分析。秦勇等(2005)提出煤储层弹性自调节作用的概念及其成藏效应,建立起煤储层在有效应力—吸附—解吸条件下产生弹性体积变形的模式。汪吉林等(2012)计算并分析了有效应力、煤基质收缩、气体滑脱效应等因素对渗透率的影响及其叠加作用的表现。综上所诉,前人对煤岩动态渗透率及变形特征的认识取得了丰硕的成果,但在三轴应力状态下,不同煤阶煤样在双重效应作用下动态渗透率响应特征尚需进一步研究。为进一步深化认识,笔者选取3个地区不同煤阶煤样开展物理模拟实验,揭示不同煤阶煤岩在有效应力与基质收缩双重效应影响下渗透率变化特征,并对比分析不同煤阶煤岩渗透率改善效果的差异性。

1 样品及实验方法

1.1 煤样及其制备

煤样采自二连盆地白音华矿区下白垩统以及鄂尔多斯盆地东部兴县矿区石炭系煤层、沁水盆地南部阳城矿区石炭二叠系煤层,分别为褐煤、气煤和无烟煤,代表低阶、中阶、高阶煤样品(表1)。

根据国际岩石力学学会(ISRM)建议的三轴压

注:本文为国家重大专项(编号:2016ZX05041-001)的成果。

收稿日期:2021-11-16;改回日期:2022-03-11;网络首发:2022-04-20;责任编辑:刘志强。Doi:10.16509/j.georeview.2022.04.011

作者简介:曹明亮,男,1993生,硕士,工程师,主要从事煤层气勘探开发方面的研究;Email:2652235951@qq.com。

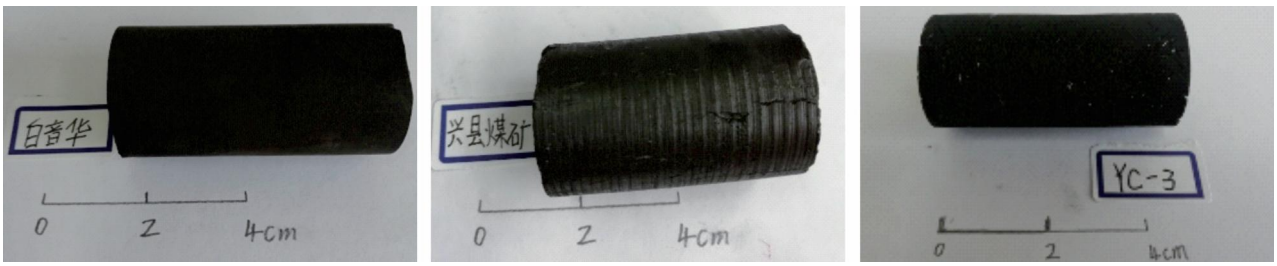


图 1 不同煤阶实验煤样:(a) 白音华矿区煤样 ;(b) 兴县矿区煤样;(c) 阳城矿区煤样

Fig. 1 Experimental coal samples of different coal ranks:(a) Baiyinhua coal sample;(b) Xingxian coal sample;(c) Yangcheng coal sample

缩实验方法制备实验煤柱样。利用岩石切割机垂直层理面钻取长度为 50 mm、直径为 25 mm(公差小于 0.5 mm)的标准圆柱体。每个大样各钻取若干柱体样,对煤柱样两端进行抛光处理,以保证两端平滑、彼此平行且垂直于圆柱的轴线(公差小于 0.02 mm)(图 1)。

白音华煤样宏观煤岩成分以暗煤、丝炭为主,宏观煤岩类型为半暗型,煤体结构为碎裂结构,煤体构造为层状构造,外生裂隙基本不发育,无裂隙充填物;兴县煤样宏观煤岩成分以暗煤、亮煤为主,夹有镜煤条带,宏观煤岩类型为半光亮型,煤体结构为原生结构,煤体构造为层状构造,外生裂隙基本不发育,无裂隙充填物;阳城煤样宏观煤岩成分以暗煤、丝炭为主,宏观煤岩类型为半暗型,煤体结构为碎裂结构,煤体构造为层状构造,外生裂隙极其发育,密度 20~30 条/5 cm。

表 1 实验煤样基本信息

Table 1 Basic information of experimental coal samples

样品产地	煤阶	$R_{o,max}$(%)	力学性质	显微组分(%,全煤基)			
			弹性模量(GPa)	镜质组	壳质组	惰质组	无机矿物
白音华	褐煤(低阶)	0.33	1.1284	76.1	0.5	2.7	20.7
兴县	气煤(中阶)	0.88	3.8024	57.9	8.2	23.5	10.4
阳城	无烟煤(高阶)	3.04	4.3201	58.8	0	30.6	10.6

表 2 有效应力与基质收缩双重效应物理模拟实验方案

Table 2 Physical simulation experiment scheme of effective stress and matrix contraction effects

实验压力点	轴压(MPa)	围压(MPa)	实验用气体	气体平衡压力(MPa)	有效应力(MPa)
1	79.00	8.00	CH_4	1.00	7.33
2	9.00	8.00	CH_4	2.00	6.33
3	9.00	8.00	CH_4	3.00	5.33
4	9.00	8.00	CH_4	4.00	4.33
5	9.00	8.00	CH_4	5.00	3.33

1.2 模拟实验方案与流程

模拟实验方案见表 2。轴压(垂向应力)和围压(侧应力)固定不变,轴压设计为 9 MPa,围压设计为 8 MPa,以模拟煤岩所处的三轴应力状态。气体平衡压力(煤样吸附时的稳定气压)分别设计为 1 MPa、2 MPa、3 MPa、4 MPa 和 5 MPa,实验气体为甲烷,以模拟煤层气解吸过程中的基质收缩效应。根据有效应力计算公式(式 1)(曹明亮等,2021),得到有效应力分别为 7.33 MPa、6.33 MPa、5.33 MPa、4.33 MPa 和 3.33 MPa,考虑有效应力效应。

$$\sigma_e = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 \times 2}{3} - P \tag{1}$$

式中:σ_e 为有效应力,MPa;σ_1 为轴压,MPa;σ_3 为围压,MPa;P 为孔隙压力,MPa。

通过以上实验设计,可实现有效应力负效应及基质收缩正效应对煤样渗透率动态变化的耦合作用。共完成 3×5 个实验样点,对每个实验样点测试其对应的渗透率。由于煤岩吸附与解吸具有可逆性(彭守建等,2012),从气体平衡压力自 5 MPa 降至 1 MPa 这一角度研究,可模拟浅部煤层气排采过程,分析煤储层渗透率随储层压力降低的动态变化特征。

物理模拟实验流程如下:

(1)实验前对实验煤样进行拍照及宏观煤岩描述,包括宏观煤岩成分、宏观煤岩类型、煤体结构及构造、裂隙发育情况。

(2)使用塑胶管将试样进行塑封并固定在岩心夹持器上,安装轴向位移传感器和径向位移传感器,然后将样品放入压力室,并用密封圈紧固,最后对传感器校准调零并完成上样。

(3)轴压加载速率保持在 0.02 MPa/s,围压加载速率同样保持在 0.02 MPa/s,采用交替加压方式加载至实验设计方案的初始压力点,加载过程中始终保持轴压大于围压。

(4)按照实验设计向气体入口及出口同时通甲烷气体,使煤样充分吸附 12 h 以上,在吸附膨胀应变量基本不再增加后,采用"脉冲法"测试实验煤样的渗透率。

(5)依次加载到下一压力点,并重复步骤 4,直至完成某一恒定有效应力下的所有 5 个测试点。

1.3　实验装置及渗透率测试

采用中国石油勘探开发研究院 LFLab-I 煤岩三轴应力应变(基质收缩膨胀)测试系统(图 2)。该装置主要由气源、应力加载系统、应变测量系统、气压监测系统及数据采集系统等单元组成;最大限制轴压为 400 MPa,精度 1×10^{-3} MPa;最大限制围压为 30 MPa,精度 1×10^{-3} MPa;最大限制气体压力 7 MPa,精度 1×10^{-6} MPa;最大限制试样长度为 50 mm,尺寸精度为 0.1 mm;时间精度为 1×10^{-6} h。

气源①是管路气源,通过两个阀门实现甲烷气体及氦气的分别供应。气体增压泵②的作用是通过缩小气体储存空间增大气体压力,满足实验要求。入口气压传感器③和出口气压传感器④可实时记录入口气压及出口气压值,根据出入口气压随时间变化值,利用"脉冲法"计算煤样渗透率。热缩管起到封闭煤样防止渗油及固定煤样的作用。

脉冲渗透率计算参考 SY/T 5336-2006《岩心分析方法》第 6.8 节的 D.6.8.4,计算公式如下:

$$Kg = \frac{-A_1 C_2 \mu L f_z}{C_1 f_1 A P_m \left(\frac{1}{V_u} + \frac{1}{V_d}\right)} \tag{2}$$

其中:

$$\ln\left[\frac{\Delta P_t^2}{\Delta P_0^2}\right] = A_1 \times t + A_0 \tag{3}$$

$$f_z = 1 - \frac{P_m \times (-0.0166)}{0.9989 - 0.0166 \times P_m} \tag{4}$$

$$f_1 = EXP(A_0) \tag{5}$$

式中:Kg 为气测渗透率,10^{-3} μm²;$\Delta P_{(0)}$ 为渗透率测试开始时刻入口气压与出口气压的压差,MPa;$\Delta P_{(t)}$ 为渗透率测试 t 时刻入口气压与出口气压的压差,MPa;A_1 为直线 $\ln\left[\frac{\Delta P_t^2}{\Delta P_0^2}\right]$ —t 的斜率,无量纲;A_0 为直线 $\ln\left[\frac{\Delta P_t^2}{\Delta P_0^2}\right]$ —t 的截距,无量纲;C_1 和 C_2 为达西方程常数,无量纲,C_1 和 C_2 分别取 0.068 和 1000;μ 为甲烷气体黏度,取 11.067×10^{-3} mPa·s;L 为煤样长度,cm;f_z 为实际气体偏离理想气体的特性值,无量纲;f_1 为质量流量校正系数,无量纲;A 为煤样截面积,cm²;P_m 为入口及出口气压达到平衡时的气压;V_u 为气体入口至煤样底端之间连接管线体积,1.1781 cm³;V_d 为煤样顶端至气体出口之间连接管线体积,1.1781 cm³。

以兴县煤样气体平衡压力为 1 MPa 时数据为

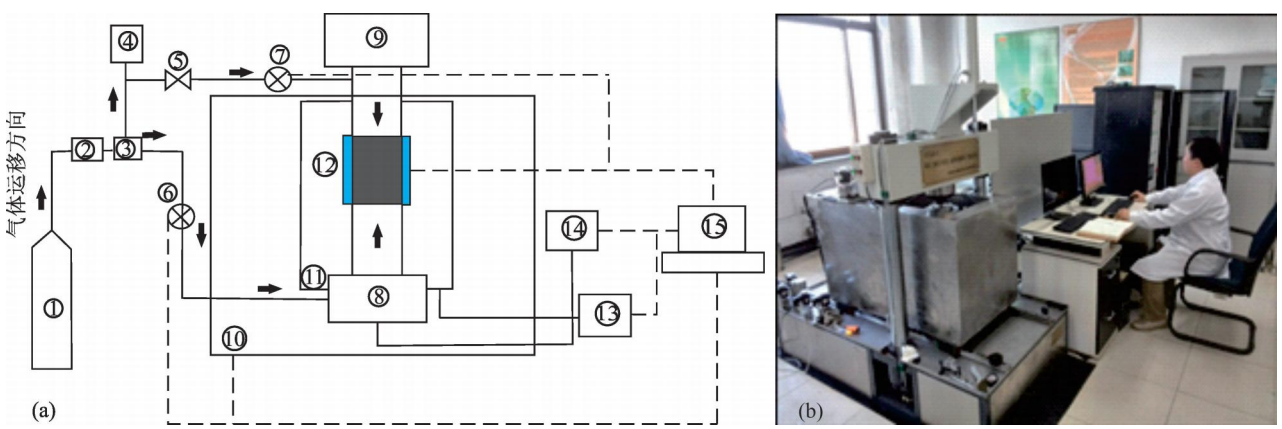


图 2 LFLab-I 煤岩三轴应力应变测试系统:(a) 实验装置示意图;(b) 实验设备

Fig. 2 LFLab-I coal rock triaxial stress—strain test system: (a) schematic diagram of experimental device; (b) experimental equipment)

① 气源 gas source;② 三通阀 three-way valve;③ 出气装置 air outlet;④ 阀门 valve;⑤ 气体增压泵 gas booster pump;⑥ 入口气压传感器 inlet air pressure sensor;⑦ 出口气压传感器 outlet air pressure sensor;⑧ 底座 base;⑨ 顶座 top seat;⑩ 实验槽 experimental tank;⑪压力室 pressure chamber;⑫带传感器的组装样品 assembled sample with sensor;⑬围压控制器 confining pressure controller;⑭轴压控制器 axial pressure controller;⑮数据采集和控制系统 data acquisition and control system

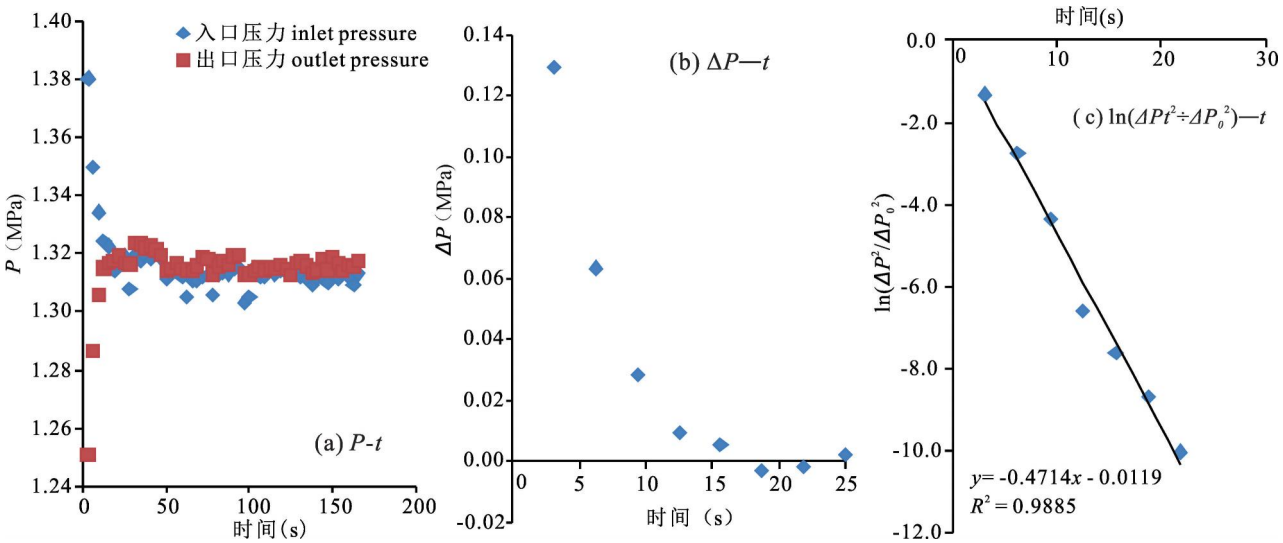


图 3 脉冲渗透率原始测试数据及数据解释

Fig. 3 The original test data of pulse permeability and data interpretation

例,展示脉冲渗透率原始测试数据及数据处理过程(即 A_0 和 A_1 求取过程)。图 3a 为兴县煤样在气体平衡压力 1 MPa 时脉冲渗透率原始测试数据,即渗透率测试时入口气压和出口气压随时间变化曲线。图 3b 为入口压力与出口压力差随时间变化曲线,压力差接近于零时表明出入口气体压力达到平衡。然后经过数据处理得到图 3c,求得式 3 所需的 A_0(-0.0119)和 A_1(-0.4714),最后利用式(2)—式(5)计算出动态渗透率。

2 实验结果及分析

模拟实验渗透率测试结果见表 3。白音华煤样外生裂隙发育不明显,煤体结构为原生—碎裂结构,兴县煤样外生裂隙不发育,煤体结构为原生结构,阳城煤样外生裂隙发育明显,密度为 20~30 条/5 cm,煤体结构为碎裂结构。故在气体平衡压力 1 MPa 时,阳城煤样测试渗透率相对较高,而兴县煤样测试渗透率较低。为方便描述渗透率改善特征,在表 3 中列出了经简单处理后的归一化渗透率,归一化渗透率是指某一加载压力下的渗透率与最后压力点渗透率的比值。

气体平衡压力从 5 MPa 降至 1 MPa 过程中,白音华煤样归一化渗透率依次为 1.00、0.60、0.57、0.57、0.52,兴县煤样归一化渗透率依次为 1.00、0.64、0.50、0.54 和 0.55,阳城煤样归一化渗透率依次为 1.00、0.74、0.58、0.50 和 0.56。

就白音华煤样来看,气体平衡压力下降至 4~3 MPa 时,渗透率快速降低,之后随气体平衡压力继续降低,渗透率不再继续下降,基本稳定在一定水平,整体呈斜“L”型变化规律(图 4)。

对于兴县煤样,随气体平衡压力降低,煤样渗透率经历了先降低后略微增加的过程,整体呈不对称“V”型变化趋势,渗透率从降低转为增加的拐点为 3 MPa。与白音华低阶煤样实验结果不同,兴县中阶煤样渗透率在较低气体平衡压力阶段出现明显的反弹趋势(图 5)。

阳城煤样与兴县煤样相似,随气体平衡压力下降,渗透率出现先降低后增加的趋势,整体呈不对称“V”型变化规律,但渗透率从降低转为增加的拐点为 2 MPa(图 6)。

实验证明,在高气体平衡压力阶段,煤岩应力敏感性较强,随气体平衡压力下降,煤岩应力敏感性逐渐减弱(孟召平等,

表 3 煤样有效应力及基质收缩双重效应物理模拟实验结果

Table 3 Physical simulation results of coal samples under effective stress and matrix contraction

气体平衡压力(MPa)	有效应力(MPa)	测试渗透率($\times10^{-3}$ μm²)			归一化渗透率		
		白音华	兴县	阳城	白音华	兴县	阳城
1.00	7.33	0.2564	0.0406	0.6559	0.52	0.55	0.56
2.00	6.33	0.2819	0.0396	0.5842	0.57	0.54	0.50
3.00	5.33	0.2829	0.0366	0.6884	0.57	0.50	0.58
4.00	4.33	0.2967	0.0476	0.8687	0.60	0.64	0.74
5.00	3.33	0.4920	0.0739	1.1801	1.00	1.00	1.00

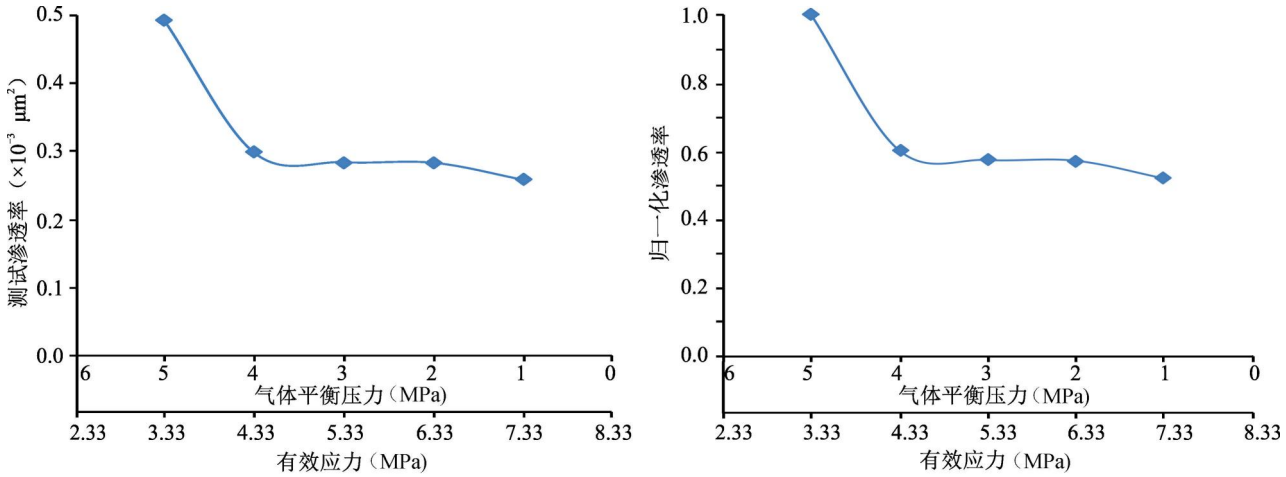


图 4 白音华煤样动态渗透率曲线：(a) 测试渗透率;(b) 归一化渗透率

Fig. 4 Dynamic permeability curves of Baiyinhua: (a) test permeability; (b) normalized permeability

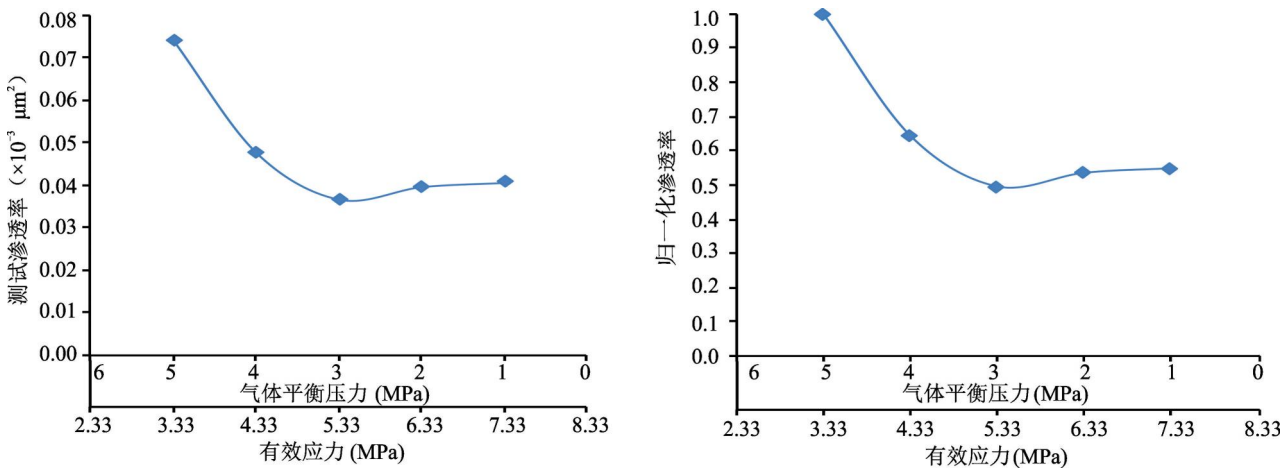


图 5 兴县煤样动态渗透率曲线：(a) 测试渗透率;(b) 归一化渗透率

Fig. 5 Dynamic permeability curves of Xingxian coal samples: (a) test permeability; (b) normalized permeability

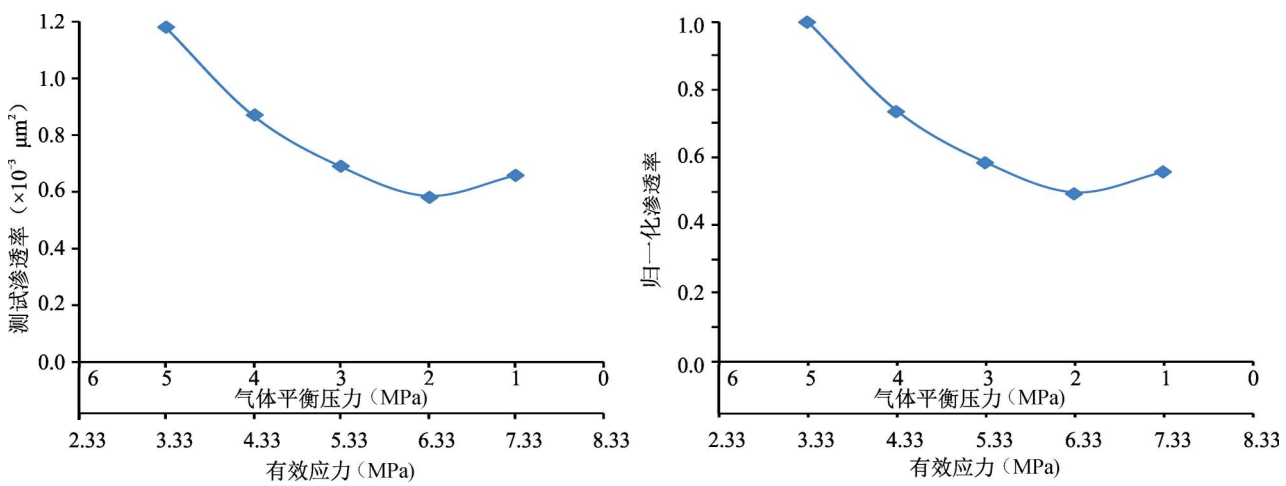


图 6 阳城煤样动态渗透率曲线：(a) 测试渗透率;(b) 归一化渗透率

Fig. 6 Dynamic permeability curves of Yangcheng coal samples: (a) test permeability; b: normalized permeability

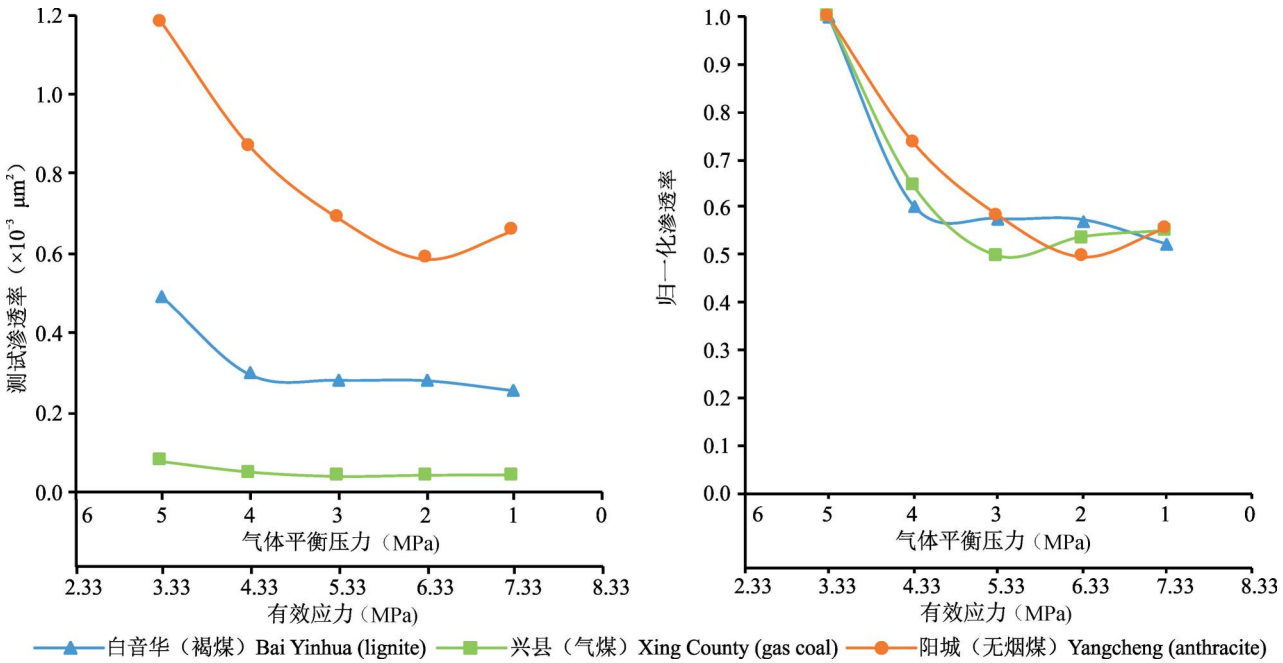


图 7 不同煤阶煤样动态渗透率对比：(a) 测试渗透率；(b) 归一化渗透率

Fig. 7 Comparison of dynamic permeability coal samples with different coal rank: (a) test permeability; (b) normalized permeability

2013)，同时，在基质收缩效应单因素影响下，随气体平衡压力降低，低、中及高煤阶煤样渗透率均呈指数函数式增加(曹明亮等，2021)。所以，煤样渗透率动态曲线出现上述“拐点”，主要在于气体平衡压力降低至“拐点”之前，有效应力对渗透率影响的负效应占据主导作用，煤样渗透率出现大幅度下降。之后，基质收缩正效应基本上相当于甚至大于有效应力负效应，渗透率逐渐稳定或反弹增长。这一变化趋势与前人利用 P & M 模型预测动态渗透率结果有很高的一致性(邓泽等，2009)。

3 不同煤阶煤样渗透率改善效果对比分析

由图 7 可见，随气体平衡压力下降(即模拟排采过程)，中阶和高阶煤样动态渗透率呈先下降后上升趋势，整体呈不对称“V”型变化规律，动态渗透率显示出明显的反弹现象。与此不同，低阶煤样动态渗透率随气体平衡压力下降，呈先下降后基本稳定的趋势，整体呈斜“L”型规律变化。

仅就实验煤样而言，中阶及高阶煤样在气体平衡压力变化过程中动态渗透率改善效果好于低阶煤样。

一方面，低、中、高阶煤样弹性模量分别为 1.1284 GPa、3.8024 GPa、4.3201 GPa，随煤阶升高，弹性模量增大，这与前人认识一致。煤岩弹性模量越大，其抵抗有效应力负效应的能力越强，渗透率损害越小，故中阶及高阶煤样在后期叠加基质收缩正效应的作用下，渗透率出现明显反弹现象。而低阶煤样抵抗有效应力负效应的能力较弱，故后期基质收缩正效应基本上相当于有效应力负效应，渗透率基本稳定在一定程度。另一方面，由于不同煤阶煤岩吸附性能存在差异，中阶及高阶煤吸附能力强于低阶煤(孟雅，2018)。同时，根据实验结果，整个实验过程中低阶煤累计体积应变量为 0.0985%，中阶煤累计体积应变量为 0.3139%，高阶煤累计体积应变量为 0.5868%。中阶及高阶煤基质收缩引起的体积应变量较大，割理及裂隙拉张程度更高，导致中、高阶煤渗透率改善程度较好。

另外，中阶及高阶煤样渗透率从降低转为增加的“拐点”略有不同，高阶煤样“拐点”出现较晚。这是由于阳城高阶煤样外生裂隙发育明显，密度为 20~30 条/5 cm，煤体结构碎裂，更易受有效应力负效应的影响，有效应力负效应主导时间较长。

4 结论

(1)气体平衡压力从 5 MPa 降至 1 MPa 过程

中,在有效应力和基质收缩双重耦合效应作用下,褐煤样的归一化渗透率依次为 1.00、0.60、0.57、0.57、0.52;气煤样的归一化渗透率依次为 1.00、0.64、0.50、0.54 和 0.55;无烟煤样的归一化渗透率依次为 1.00、0.74、0.58、0.50 和 0.56。

(2)随气体平衡压力下降,中阶及高阶煤样动态渗透率先下降后上升,整体呈不对称“V”型变化规律,但拐点略有不同;低阶煤样动态渗透率呈先下降后基本稳定的趋势,整体呈斜“L”型变化规律。

(3)在有效应力和基质收缩双重效应作用下,中阶及高阶煤样动态渗透率改善效果优于低阶煤样,基质收缩效应引起的正效应相对较强。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

曹明亮, 康永尚, 秦绍锋, 张兵, 邓泽. 2021. 不同阶煤岩基质收缩效应单因素物理模拟实验研究. 煤炭学报, 46(S1): 365~377.

陈亚西. 2016. 煤层气开发过程中储层渗透率动态变化及合理排采速度分析. 导师: 刘大锰. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1~60.

邓泽, 康永尚, 刘洪林, 李贵中, 王勃. 2009. 开发过程中煤储层渗透率动态变化特征. 煤炭学报, 34(7): 947~951.

傅学海. 2001. 多相介质煤岩体物性的物理模拟与数值模拟. 导师: 秦勇. 中国矿业大学博士学位论文: 1~132.

侯世辉. 2018. 煤层气井排采过程中不同煤体结构储层渗透率动态变化特征研究. 导师: 王星锦. 中国地质大学博士学位论文: 1~160.

刘皓. 2017. 煤层气储层应力敏感性室内测试方法. 导师: 郑力会. 中国石油大学(北京)硕士学位论文: 1~52.

孟雅. 2018. 高煤阶煤中气体扩散渗流机制及煤层气井产能评价研究. 导师: 李治平. 中国地质大学(北京)博士学位论文: 1~132.

孟艳军, 汤达祯, 李治平, 许浩, 陶树, 李松. 2015. 高煤阶煤层气井不同排采阶段渗透率动态变化特征与控制机理. 油气地质与采收率, 22(2): 66~71.

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. 地球物理学报, 6(2): 667~675.

裴柏林, 郝杰, 张遂安, 杨立源. 2017. 煤基质膨胀收缩对储层渗透率影响的新数学模型. 煤田地质与勘探, 45(1): 51~55.

彭守建, 许江, 尹光志, 蒋长宝, 杨红伟. 2012. 基质收缩效应对含瓦斯煤渗流影响的实验分析. 重庆大学学报, 35(5): 109~114.

秦勇, 傅雪海, 吴财芳, 傅国友, 卜英英. 2005. 高煤级煤储层弹性自调节作用及其成藏效应. 科学通报, 50(S1): 82~86.

全方凯, 李鑫, 鲁军. 2012. 原位煤层气排采储层伤害机理与制度优化. 中国煤层气, 9(4): 42~44.

汪吉林, 秦勇, 傅雪海. 2012. 多因素叠加作用下煤储层渗透率的动态变化规律. 煤炭学报, 37(8): 1348~1353.

于文龙. 2018. 煤岩渗透率与有效应力耦合关系及控制机理. 煤矿安全, 49(8): 10~14.

袁梅, 王玉丽, 王珍, 李波波, 许石青. 2018. 水—力耦合对含瓦斯煤渗透率影响的试验研究. 工业安全与环保, 44(1): 35~37+77.

张松航, 唐书恒, 万毅, 舒广强. 2012. 三轴围压下煤岩吸附膨胀特性与渗透性动态变化. 高校地质学报, 18(3): 539~543.

Cao Mingliang, Kang Yongshang, Qin Shaofeng, Zhang Bing, Deng Ze. 2021&. Single-factor physical simulation experimental study on the shrinkage effect of different rank coal and rock matrix. Journal of China Coal Society, 46(S1): 365~377.

Chen Yaxi. 2016&. Analysis of the dynamic change of reservoir permeability and reasonable drainage rate during the development of coalbed methane. Supervisor: Liu Dameng. Master´s degree thesis of China University of Geosciences (Beijing): 1~60.

Deng Ze, Kang Yongshang, Liu Honglin, Li Guizhong, Wang Bo. 2009&. Dynamic change characteristics of coal reservoir permeability during development. Journal of China Coal Society, 34(7): 947~951.

Enever J R, Hennig A. 1997. The relationship between, permeability and effective stress for Australian coals and its implications with respect to coalbed methane exploration and reservoir modelling. Proceedings of the 1997 International Coalbed Methane Symposium: 13~22.

Fu Xuehai. 2001&. Physical and numerical simulation of the physical properties of coal mass in multiphase media. Supervisor: Qin Yong. Doctoral Dissertation of China University of Mining and Technology: 1~132.

Gray I. 1987. Reservoir engineering in coal seams: Part 1. The physical process of gas storage and movement in coal seams. SPE Reservoir Engineering, 2(1): 28~34.

Hou Shihui. 2018&. Research on the dynamic change characteristics of reservoir permeability with different coal body structures during the process of coalbed methane well drainage. Supervisor: Wang Xingjin. Doctoral Dissertation of China University of Geosciences: 1~160.

Levine J R. 1996. Model study of the influence of matrix shrinkage on absolute permeability of coal bed reservoirs. Geological Society, London: Special Publications, 109(1): 197~212.

Liu Hao. 2017&. Laboratory testing method for stress sensitivity of coalbed methane reservoirs. Supervisor: Zheng Lihui. Master´s thesis of China University of Petroleum (Beijing): 1~52.

Meng Ya. 2018&. Research on Gas Diffusion Seepage Mechanism in High Rank Coal and CBM Well Productivity Evaluation. Supervisor: Li Zhiping. Doctoral Dissertation of China University of Geosciences (Beijing): 1~132.

Meng Yanjun, Tang Dazhen, Li Zhiping, Xu Hao, Tao Shu, Li Song. 2015&. Dynamic characteristics and control mechanism of permeability change in different drainage stages of high-rank coalbed methane wells. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 22(2): 66~71.

Meng Zhaoping, Hou Quanlin. 2013&. High-rank coal reservoir permeability and stress coupling model and control mechanism. Chinese Journal of Geophysics, 6(2): 667~675.

Pei Bolin, Hao Jie, Zhang Suian, Yang Liyuan. 2017&. A new mathematical model for the influence of coal matrix expansion and contraction on reservoir permeability. Coal Geology and Prospecting, 45(1): 51~55.

Peng Shoujian, Xu Jiang, Yin Guangzhi, Jiang Changbao, Yang Hongwei. 2012&. Experimental analysis of the influence of matrix shrinkage on gas coal seepage. Journal of Chongqing University, 35

(5): 109~114.

Qin Yong, Fu Xuehai, Wu Caifang, Fu Guoyou, Bu Yingying. 2005&. The elastic self-adjustment and accumulation effect of high-rank coal reservoirs. Chinese Science Bulletin, 50(S1): 82~86.

Quan Fangkai, Li Xin, Lu Jun. 2012&. Reservoir damage mechanism and system optimization of in-situ CBM drainage and extraction. China Coalbed Methane, 9 (4): 42~44.

Seidle J P. 1992. Application of Matchstick Germetry to Stress Dependent Permeability in Coal. In: the SPE Rocky Mountain Regional Meeting. Casper, Wyoming.

Wang Jilin, Qin Yong, Fu Xuehai. 2012&. Dynamic change law of coal reservoir permeability under the superimposed action of multiple factors. Journal of China Coal Society, 37(8): 1348~1353.

Yu Wenlong. 2018&. Coupling relationship between coal rock permeability and effective stress and control mechanism. Coal Mine Safety, 49 (8): 10~14.

Yuan Mei, Wang Yuli, Wang Zhen, Li Bobo, Xu Shiqing. 2018&. Experimental study on the influence of hydraulic—mechanical coupling on gas coal permeability. Industrial Safety and Environmental Protection, 44(1): 35~37+77.

Zhang Songhang, Tang Shuheng, Wan Yi, Shu Guangqiang. 2012&. Adsorption and swelling characteristics of coal under triaxial confining pressure and dynamic changes of permeability. Geological Journal of China Universities, 18(3): 539~543.

The dual coupling effect of coal sample permeability effective stress and matrix shrinkage and its relationship with coal rank

CAO Mingliang[1), DENG Ze[2), KANG Yongshang[3), LI Zhongcheng[1), ZHANG Bing[1),
QIN Shaofeng[1), DENG Zhiyu[1), GUO Mingqiang[1)

1) *China United Coalbed Methane Corporation, Ltd. Beijing*, 100016;

2) *Key Laboratory of Unconventional Oil and Gas, China National Petroleum Corporation, Langfang, Hebei*, 065000;

3) *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing*, 102249

Abstract: In order to study the dynamic permeability changes of coal reservoirs of different coal ranks during drainage and production, the coal rock triaxial stress—strain (matrix contraction and expansion) test system was used to carriy out physical simulation experiments on the dual effects of effective stress and matrix shrinkage on lignite, gas coal and anthracite. Fixing the axial pressure and confining pressure unchanged, changing the gas balance pressure, simulating the characteristics of the reservoir pressure change during the development process, and testing its dynamic permeability. Using experimental results, the rebound characteristics of dynamic permeability of coals of different ranks during drainage and production are analyzed, and the differences in the improvement effects of dynamic permeability of coals are also analyzed. Research shows that: In the process of reducing the gas balance pressure from 5 MPa to 1 MPa, under the dual effects of effective stress and matrix shrinkage, the normalized permeability of lignite coal sample were 1.00, 0.60, 0.57, 0.57, 0.52 in sequence, gas coal sample were 1.00, 0.64, 0.50, 0.54, and 0.55, the anthracite coal sample were 1.00, 0.74, 0.58, 0.50, and 0.56. As the gas equilibrium pressure decreases, the dynamic permeability of the coal samples of middle-rank and high-rank declines first and then rises, and the overall is asymmetrical "V" type change law, but the inflection point is slightly different. The dynamic permeability of low-rank coal sample shows a trend of first decreasing and then basically stable, and the overall is oblique "L". Under the influence of the dual effects of effective stress and matrix shrinkage, the dynamic permeability improving effect of the middle-rank and high-rank coal samples is better than that of low-rank coal sample.

Keywords: coal; effective stress; matrix shrinkage; dynamic permeability; physical simulation

Acknowledgements: This study was financially supported by National Science and Technology Major Project (No. 2016ZX05041-001)

First author: CAO Mingliang, male, born in 1993, master, engineer, mainly engaged in research on coalbed methane exploration and development; Email: 2652235951@qq.com

Manuscript received on: 2021-11-16; Accepted on: 2022-03-11; Network published on: 2022-04-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.04.011 **Edited by**: LIU Zhiqiang