

变应力条件下气体吸附对煤岩渗流特性的影响

陈德飞¹,康毅力²,孟祥娟¹,李相臣²,彭永洪¹

(1. 中国石油塔里木油田分公司 油气工程研究院,新疆 库尔勒 841000;
2. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500)

摘要:煤层气钻采及注气过程中,在外力扰动下煤岩所受到的轴向或环向载荷出现较大幅度的变化,在应力的变化过程中,煤岩内部的孔隙与裂隙处于动态变化过程,导致煤层的渗透率也发生动态变化,且不同气体的渗透率变化规律存在差异。以宁武盆地9号煤层为研究对象,运用自行研制的三轴渗流实验装置,分别利用非吸附性气体氦、吸附性气体甲烷和二氧化碳研究在增加围压过程中渗透率随有效应力的变化,以及增加轴压至煤岩破坏过程中渗透率—应变曲线与应力—应变曲线之间的关系。结果表明,在增加围压的过程中,初始阶段煤样对氦的渗透率最大,其次是甲烷,最后为二氧化碳;随着围压的增加,有效应力增加,渗透率降低;在煤岩轴向加载至破坏过程中,渗透率—应变曲线与应力—应变曲线的变化规律基本一致,但渗透率的变化滞后于应力的变化,且气体的吸附性越强,滞后效应越明显。

关键词:煤层气 煤岩 等温吸附 岩石力学 应力敏感 渗流特性

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2016)01-0107-06

Effect of gas adsorption on seepage characteristic of coal seam under the condition of varying stress

Chen Defei¹, Kang Yili², Meng Xiangjuan¹, Li Xiangchen², Peng Yonghong¹

(1. Research Institute of Oil and Gas Engineering, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang, 841000, China;
2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu City, Sichuan Province, 610500, China)

Abstract: During the process of drilling and gas injection in coal seam, under the external force disturbance, the axial or circumferential load on coal seam will change significantly. The pore and fracture in coal seam will change dynamically due to stress change and then the permeability of coal seam also changes dynamically with variation of gas types. Using the No.9 coal seam in Ningwu basin as the research object, the self-developed triaxial gas seepage experiment device was used to study the permeability variation of coal samples with increased confining pressure, and also the relationship between permeability-strain and stress-strain while axial press was increased to damage coal samples by using He, CH₄, CO₂ respectively. The results show that in the process of increasing confining pressure, at the initial stage the permeability of coal sample for He is the largest, moderate for CH₄, smallest for CO₂. With the increase of confining pressure, the effective stress increases and the permeability decreases. While stress is being increased to broken the coal seam at the direction of axial press, the permeability-strain curves and stress-strain curves are basically identical, but the change of permeability lags behind the change of stress and the greater the gas adsorption, the more obvious the lag effect.

Key words: CBM; coal; isothermal adsorption; rock mechanics; stress sensitivity; seepage characteristic

在煤层气开采过程中,伴随着气、水的采出煤岩储层渗透率发生一系列变化。当储层压力降低,

气体从煤基质中解吸,导致煤基质收缩和裂隙扩大,从而使渗透率增大;随着储层压力降低,有效应

收稿日期:2015-11-11。

作者简介:陈德飞(1988—),男,四川西充人,工程师,硕士,从事储层保护理论与技术及油田化学相关研究。联系电话:13558716376, E-mail:dephey.chen@163.com。

基金项目:国家“973”计划“页岩气水平井钻完井关键基础研究”(2013CB228003)。

力增大,对裂隙的压缩作用增强,此时煤岩表现出较强的应力敏感性^[1-3]。煤层气钻井、开发及增产过程中,在外力扰动下煤岩受到的轴向载荷出现较大变化,在轴压变化过程中,煤岩内部孔隙与裂隙处于动态变化,导致煤层渗透率也发生动态变化,且不同气体渗透率与轴向应力的变化规律不同^[4]。

中外学者对煤层气渗透率的动态变化进行了大量的实验研究^[5-13],靳钟铭等利用自行研制的大型煤三轴渗透率测量装置,研究轴压及围压变化对煤岩渗透率的影响,以及煤层气压力对煤岩变形强度的影响^[5]。周军平等通过自行研制的三轴渗流实验装置,研究煤岩在吸附不同气体后渗透率变化特征,但实验煤样为型煤,且实验压力较低^[6]。孟召平等通过实验研究发现,地应力、地质构造、煤层埋深、煤质、煤阶及裂隙发育程度等因素均影响煤层渗透率^[7]。许江等利用三轴测试实验装置,研究三轴应力下不同温度作用对煤岩渗透率的影响,结果表明,随着温度升高,煤岩内部颗粒发生膨胀导致渗透性变差^[8]。王臣等分别利用非吸附性气体氦以及吸附性气体甲烷和二氧化碳,通过自行研制的三轴渗流实验装置,测定型煤在应力—应变过程中渗透率变化规律;研究结果表明,在应力—应变过程中利用3种气体测得的渗透率—应变曲线的变化趋势大致相同,均表现为一定的滞后性,其中煤岩对气体的吸附性越强滞后效应越明显^[10]。Harpalani等通过开展一系列实验,研究煤岩在解吸气体后煤基质收缩对渗透率的影响规律^[11]。Meng等通过自行研制的渗透率测量仪,研究微裂隙、水分含量、煤阶等因素对煤岩应力敏感性的影响,结果表明,随着镜质组含量及微裂隙发育程度增加,煤岩渗透率升高,随着水分含量的增加,煤岩渗透率降低,但实验过程中未考虑轴向应力的影响^[13]。目前主要是利用型煤研究气体吸附对煤岩渗流特性的影响,实验温度及压力较低,且未考虑回压的影响,特别是针对考虑轴压作用的三轴渗流的实验较少。为此,笔者利用不同气体研究变围压过程中煤岩的渗透率变化规律,以及变轴压条件下应力—应变过程中煤岩渗透率的变化规律,进而研究变应力条件下气体吸附对煤岩渗流特性的影响。研究成果对提高煤层气开发效率具有重要的指导意义。

1 实验器材、步骤及数据处理

1.1 实验器材

实验煤样采自山西省宁武盆地9号煤层,以半

暗—光亮型及半亮—光亮型煤岩为主。煤岩的水分含量为1.28%,灰分含量为8.88%,挥发分含量为34.32%,固定碳含量为55.52%,镜质组反射率为0.97;且整体较破碎,裂隙发育,导致煤层稳定性较差。采用水泥浇筑固定法^[14-15]钻取柱状煤样,将钻取的煤样两端切平,在真空干燥箱中抽真空干燥处理48 h。为防止实验过程中气体溢出,实验前将煤样的环面均匀涂抹1层厚度约为1 mm的硅胶保护层。

为研究围压及轴压变化对煤岩渗流特性的影响,采用西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室自行研制的三轴渗流实验装置(图1)。该装置由加载系统、三轴压力室、压力控制系统和数据采集系统组成,可以用来测量煤岩破坏过程中的渗透率。

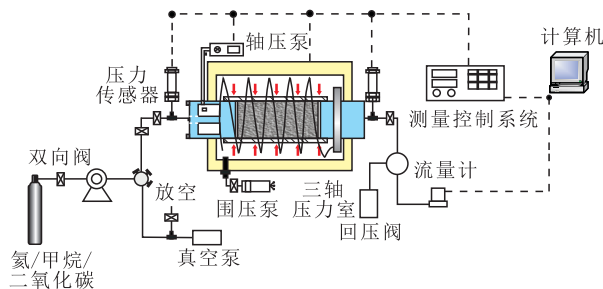


图1 三轴渗流实验装置示意

Fig.1 Experiment device of triaxial flow

1.2 实验步骤

实验过程中,为便于将渗透率测量结果与等温吸附实验结果建立联系,在整个渗透率测量过程中采用的实验温度与吸附实验的温度统一为38℃。

1.2.1 变围压实验

变围压实验步骤具体包括:①将煤样装入三轴压力室,按照实验要求连接好实验仪器;首先施加一定的轴压,将煤样压住;然后施加初始围压,并将轴压加载至设定值。②打开真空泵对煤样进行抽真空处理2 h,随后在进口端与出口端加载设定气体压力的实验气体,并连续通气48 h使煤样充分吸附实验气体;待流量计读数稳定时,记录气体流量并计算气体渗透率。③升高围压至一定有效应力水平,对煤样持续通气24 h;煤样吸附平衡后,记录气体流量并计算气体渗透率。④重复步骤3,直至煤样围压达到设定值。

1.2.2 变轴压实验

变轴压实验步骤具体包括:①将煤样装入三轴压力室,按照实验要求连接好实验仪器;首先施加一定的轴压,将煤样压住;然后施加初始围压,并将

轴压加载至设定值。②打开真空泵对煤样进行抽真空处理2 h,随后在进口端与出口端加载设定气体压力的实验气体,并连续通气48 h使煤样充分吸附实验气体。③煤样吸附平衡后,打开流量计并由电脑实时计算渗透率;在保持围压恒定的情况下,逐渐施加轴压,进行含吸附气煤样的应力—应变以及渗透率测试;实验过程中采用力加载方式,加载速率为0.01 MPa/s,直至煤样破坏停止实验。

1.3 实验数据处理

在变围压和变轴压实验过程中,不同气体的渗透率依据达西定律来计算,其表达式为

$$K = \frac{200\mu qp_a L}{A(p_1^2 - p_2^2)} \quad (1)$$

式中: K 为气体渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ 为实验气体的动力粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; q 为气体流速, cm^3/s ; p_a 为标准大气压, MPa , 取值为0.1; L 为煤样的长度, cm ; A 为煤样的截面面积, cm^2 ; p_1 和 p_2 分别为三轴压力室进口端和出口端的压力, MPa 。

实验过程中有效应力的计算公式为

$$\sigma_e = \left(\frac{\sigma_1 + 2\sigma_2}{3} \right) - \left(\frac{p_1 + p_2}{2} \right) \quad (2)$$

式中: σ_e 为有效应力, MPa ; σ_1 为轴向应力, MPa ; σ_2 为围压, MPa 。

2 实验结果与分析

2.1 围压变化对渗透率的影响

在变围压实验过程中,选取渗透率相同的3块煤样,分别利用非吸附性气体氮、吸附性气体甲烷和二氧化碳开展实验。在轴压为8 MPa,煤岩进口端的压力和出口端的压力分别为2和1 MPa条件下,逐步升高围压来增加有效应力并测量对应的渗透率,结果(表1,图2)表明,在相同轴压、围压和孔隙压力的条件下,煤样对氮的渗透率最大,其次是甲烷,最后为二氧化碳。

在相同的轴压及孔隙压力条件下,煤样的渗透率随有效应力的增加而逐渐降低。当有效应力小于10 MPa时,降低幅度较明显;当有效应力大于10 MPa时,渗透率降低幅度有所减缓。这主要是由于在加载初期随着围压的增加,煤样中的孔隙和裂隙不断被压缩,进而逐渐闭合,导致气体的流动通道缩小,渗流能力降低,且围压越大,压缩越明显。但当围压超过10 MPa以后,煤样中的裂隙已经变得极窄;随着围压的继续增加,其压缩效应有所减弱,渗

表1 变围压实验过程中煤样渗透率测量结果
Table1 Measurement of coal sample permeability with changing the confining pressure $10^{-3} \mu\text{m}^2$

围压/MPa	氮	甲烷	二氧化碳
3	9.060	4.851	3.186
4	7.146	3.565	2.642
5	5.400	2.643	1.984
7	3.803	1.890	1.345
9	2.950	1.430	0.964
11	2.194	1.170	0.721
13	1.845	0.950	0.575
15	1.599	0.829	0.414
18	1.278	0.632	0.302
21	1.041	0.510	0.226
25	0.750	0.380	0.159
29	0.528	0.210	0.109

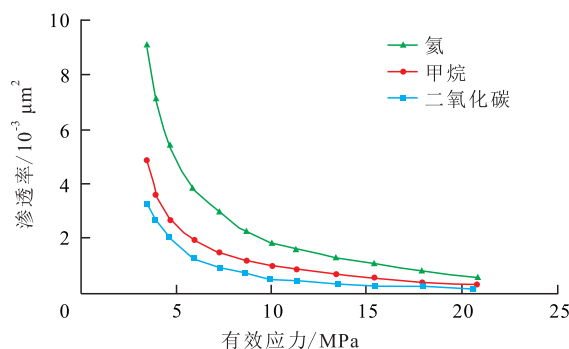


图2 变围压实验过程中煤样渗透率随有效应力的变化

Fig.2 Variation curves of coal sample permeability of different types of gas with the change of effective stress during confining pressure changing

透率降低趋势也相应减缓。

为更好地表征有效应力升高导致煤样渗透率的变化程度,引入渗透率应力敏感性系数的概念^[16],其表达式为

$$S_s = \frac{1 - \sqrt[3]{\frac{K_i}{K_0}}}{\lg \frac{\sigma_i}{\sigma}} \quad (3)$$

式中: S_s 为渗透率应力敏感性系数; K_i 为煤样在某一有效应力下的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_0 为初始有效应力条件下的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; σ_i 为对应围压下的有效应力, MPa ; σ 为初始围压下的有效应力, MPa 。

根据变围压实验过程中煤样渗透率测量结果,利用式(3)分别对氮、甲烷和二氧化碳的测试结果进行计算,结果表明,宁武盆地9号煤岩渗透率应力敏感性系数均在0.8以上,且相关系数较高,渗透率应力敏感程度强;其中,利用氮、甲烷和二氧化碳测量得到的煤岩渗透率应力敏感性系数分别为0.822,

0.841和0.912;其相关系数分别为0.967 1, 0.959 5和0.986 7。因此,煤岩的渗透率应力敏感程度远大于致密砂岩及页岩的渗透率应力敏感程度;利用吸附性气体甲烷和二氧化碳测量得到的煤岩的渗透率应力敏感性系数大于利用非吸附性气体氮的,利用二氧化碳测量得到的煤岩的渗透率应力敏感性系数大于利用甲烷测量得到的煤岩的渗透率应力敏感性系数,表明煤样对气体的吸附能力越强,其渗透率应力敏感性也就越强。

2.2 轴压变化对渗透率的影响

在煤样三轴力学实验过程中,当围压恒定时,随着轴压的增加,煤样渗透率—应变曲线与应力—应变曲线之间具有一定的关系。为更好地研究应力—应变过程中气体吸附对煤岩渗透率—应变过程的影响,选取纵波波速和渗透率基本一致的4块煤样,分别利用非吸附性气体氮,吸附性气体氮、甲烷和二氧化碳开展实验。

在实验过程中,随着轴向应力的增加,煤样的孔隙及微裂隙不断被压缩,导致渗流通道变窄,致使渗透率呈逐渐降低的趋势。随着轴向应力的继续增加,煤样发生弹性变形,应力—应变曲线呈线性变化,在应力—应变过程中煤样内部并未发生破坏,仅为煤样中原始孔隙、裂隙继续被压缩,渗透率

持续降低,如果在该阶段进行压力卸载,煤样所发生的变形可以得到恢复。轴向应力继续增加,导致煤样由压缩状态逐渐发生径向膨胀,在剪应力作用下煤样内部颗粒之间发生相对滑移,煤样原有的大量微小裂隙不断扩展,并生成新的大裂隙,导致煤样渗透率开始逐渐增加。当轴向应力达到峰值后,煤样内部裂隙经过不断扩展最终形成宏观裂隙,煤样失去完整性,导致渗透率急剧增加。在煤样发生破坏以后,煤样所受轴向应力基本稳定在某一数值,但在轴向应力的作用下轴向应变不断增加,煤样发生蠕变,此时煤样处于残余应力状态,煤样压缩破坏产生的裂隙在围压作用下,又逐渐被压密,导致渗透率缓慢增加并最终又呈现逐渐降低的趋势。

由变轴压实验过程中煤岩渗透率变化曲线(图3)可以看出,吸附性气体渗透率的变化明显滞后于非吸附性气体;在吸附性气体中,二氧化碳明显滞后于甲烷,表明吸附性越强,滞后效应也越明显。在轴向压缩初始阶段,相同围压条件下煤样对吸附性气体的渗透率明显低于对非吸附性气体的渗透率;而在吸附性气体中,二氧化碳的渗透率明显低于甲烷。

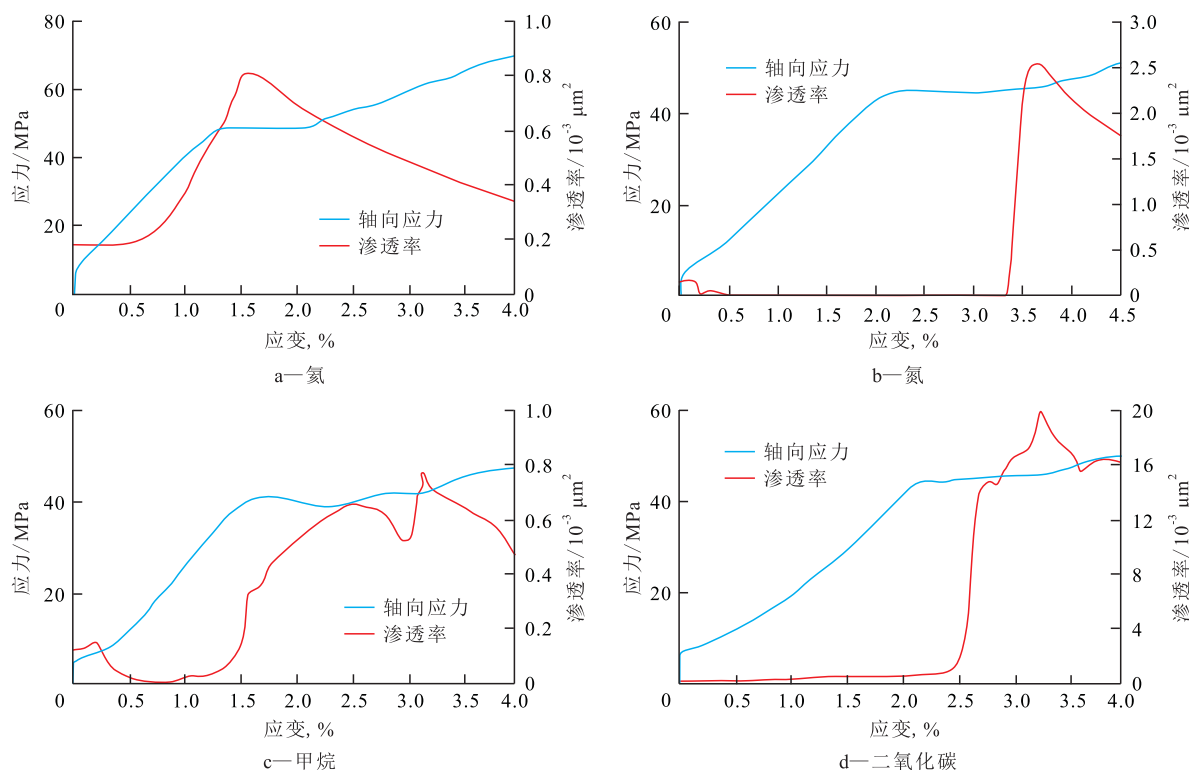


图3 变轴压实验过程中煤岩渗透率变化曲线

Fig.3 Variation curves of coal sample permeability with the varying axial pressure

3 煤岩渗透率变化机理

煤岩中含有大量的微裂隙,这些裂隙是气体渗流的主要通道。在气体流动的过程中,吸附性气体吸附于裂隙的表面,并导致煤基质发生膨胀,造成其渗透率降低;且气体的吸附性越强,裂隙中吸附气体的量越多,膨胀量越大,渗透率降低的幅度也越大。

煤样渗透率的变化与煤岩对气体的吸附性有关。在恒定的有效应力条件下,随着孔隙压力的增加,煤岩对气体的吸附量增加,导致煤岩孔隙及裂隙中气体吸附层的厚度增加;由于二氧化碳的吸附量大于甲烷的吸附量,使得二氧化碳的气体吸附层明显厚于甲烷的。煤岩在吸附气体后主要赋存于微孔中,导致煤基质发生膨胀,进而减小气体流动通道的截面积,导致渗流能力降低;煤岩对气体的吸附性越强,渗流通道中吸附的气体量越大,渗流

通道越窄,渗透率也越低。

中外学者针对煤岩吸附气体产生的膨胀量的理论计算模型已进行了大量研究^[6,14,17-18]。选用Pan提出的与地层实际情况最为接近的理论模型^[17]来进行计算。该模型基于能量守恒定律,认为吸附作用导致的表面能降低值与煤岩弹性能的变化值相等,据此可以得到煤岩吸附气体后所产生的膨胀量,其表达式为^[17]

$$\varepsilon = RTV_L \ln(1 + \frac{P}{P_L}) \frac{\rho_s}{E_s} f(x, v_s) - \frac{P}{E_s} (1 - 2v_s) \quad (4)$$

式中:ε为膨胀量,%;R为气体常数,J/(mol·K),取值为8.314;T为平衡温度,K;V_L为Langmuir体积常数,cm³/g;P为吸附平衡压力,MPa;P_L为Langmuir压力常数,MPa;ρ_s为固相密度,g/cm³;E_s为固相弹性模量,GPa;x为常数,取值为0.5;v_s为固相泊松比。

用于模拟煤岩吸附不同气体后膨胀量的实验参数如表2所示,模拟结果见图4。

表2 煤岩吸附不同气体的膨胀量模拟实验参数

Table2 Experiment parameters for expansion simulation of the coal seam after adsorption of different gases

气体	Langmuir体积常数/(cm ³ ·g ⁻¹)	Langmuir压力常数/MPa	孔隙度,%	固相密度/(g·cm ⁻³)	固相弹性模量/GPa	固相泊松比
氮	6.31	3.19	5.61	1.46	8.95	0.41
甲烷	15.46	3.01	5.61	1.46	7.36	0.49
二氧化碳	35.70	2.95	5.61	1.46	5.47	0.52

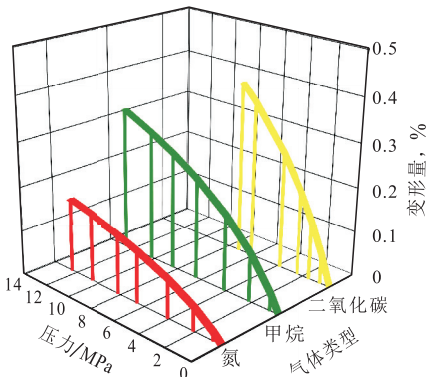


图4 煤岩吸附不同气体后的膨胀量模拟实验结果

Fig.4 Expansion modeling of coal seam after adsorption of different gases

由煤岩吸附不同气体后膨胀量的计算结果表明,在恒温条件下,煤岩吸附同种气体时,煤岩的膨胀量随着压力的升高而增加。而根据煤岩等温吸附实验结果可知,随着压力升高,气体吸附量增加,表明气体的吸附量越大,膨胀量也越大。在恒温以及压力相同时,煤岩吸附二氧化碳后引起的膨胀量最大,其次是甲烷,吸附氮膨胀量最小。因此,气体

的吸附性越强,在相同条件下的膨胀量越大,气体渗流通道越窄,渗透率也越低。

在围压相同的条件下,煤岩内气体渗流并发生吸附时的力学强度明显低于非吸附性气体;在吸附性气体中,利用二氧化碳测试的力学强度最低,其次是甲烷,最后是氮,这主要是由于煤岩对气体的吸附性越强,表面能降低幅度越大,煤岩的力学强度变得越弱,这也更好地解释了在相同条件下煤岩吸附甲烷和二氧化碳后的力学强度低于吸附氮的力学强度,吸附二氧化碳后的力学强度更低于吸附甲烷的力学强度,且其力学强度降低越大,渗透率应力敏感性越强。在地层条件下,甲烷的存在使原本力学强度较低的煤岩的力学强度进一步降低,导致钻井、开采过程中煤层易垮塌;二氧化碳的注入进一步弱化煤岩的力学强度,导致煤层更易于发生失稳、垮塌,严重影响注气效率。

从煤样压缩破坏前后的扫描电子显微照片(图5)可以看出,煤样在加载破坏前较为致密,无明显渗流通道,但加载压力达到峰值强度后,在压应力

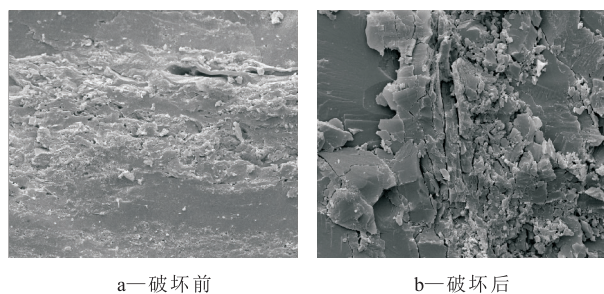


图5 煤样压缩破坏前后扫描电子显微照片

Fig.5 Scanning electron micrograph of coal samples before and after compression

的作用下经变形破坏后形成大量裂隙,为气体的流动提供大量的渗流通道,导致渗透率明显增大。

4 结论

在恒定轴压及孔隙压力条件下,随着围压的增加,煤岩的渗透率逐渐降低,最后趋于稳定;在相同条件下,气体的吸附性越强,渗透率越低。在恒定围压及孔隙压力时,煤岩加载至破坏过程中,初始阶段随着轴向应力的增加,渗透率逐渐降低;随着轴向应力的继续增加,煤岩发生破坏,导致渗透率逐渐增大;当煤岩达到极限强度,失去完整性,煤岩渗透率急剧增大;在煤岩发生破坏后,其中裂隙在围压作用下,又逐渐被压密,导致渗透率增幅变缓并最终呈逐渐降低趋势。由扫描电子显微照片可以看出,煤岩含有许多微小裂隙,实验过程中气体在这些微小裂隙中流动;在持续轴向压缩过程中,微裂隙不断变化,气体在煤岩中渗流需寻找新的连通裂隙,导致应力—应变过程中渗透率的变化滞后于应力的变化。不同气体在煤岩的渗流过程中,由于煤岩对气体的吸附性不同,导致煤岩对气体的吸附性越强,在相同条件下的膨胀量越大,气体渗流通道越窄,渗透率也越低。针对煤层气开采以及注二氧化碳或氮强化煤层气开采时,除考虑应力作用对煤岩的渗透性影响,还应考虑煤岩吸附或解吸不同气体产生的膨胀或收缩的差异性,以及压力的施加路径对煤岩渗透率的影响。

参考文献:

- [1] 王南,裴玲,雷丹凤,等.中国非常规天然气资源分布及开发现状[J].油气地质与采收率,2015,22(1):26-31.
Wang Nan, Pei Ling, Lei Danfeng, et al. Analysis of unconventional gas resources distribution and development status in China[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 26-31.
- [2] Sakurovs R, Day S, Weir S, et al. Temperature dependence of sorp-

- tion of gases by coals and charcoals[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 73(3): 250-258.
- [3] 孟艳军,汤达祯,李治平,等.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[J].油气地质与采收率,2015,22(2):66-71.
Meng Yanjun, Tang Dazhen, Li Zhiping, et al. Dynamic variation characteristics and mechanism of permeability in high-rank CBM wells at different drainage and production stages[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(2): 66-71.
- [4] 林柏泉,周世宁.含瓦斯煤体变形规律的实验研究[J].中国矿业学院学报,1986,15(3):67-72.
Lin Baiquan, Zhou Shining. Experimental investigation on the deformation law of coal body containing methane[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1986, 15(3): 67-72.
- [5] 靳钟铭,赵阳升,贺军,等.含瓦斯煤层力学特性的实验研究[J].岩石力学与工程学报,1991,10(3):271-280.
Jin Zhongming, Zhao Yangsheng, He Jun, et al. An experimental study on the mechanical properties of gas-bearing coal seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(3): 271-280.
- [6] 周军平,鲜学福,李晓红,等.吸附不同气体对煤岩渗透特性的影响[J].岩石力学与工程学报,2010,29(11):2 257-2 263.
Zhou Junping, Xian Xuefu, Li Xiaohong, et al. Effect of different adsorptional gases on permeability of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2 257-2 263.
- [7] 孟召平,田永东,李国富.沁水盆地南部地应力场特征及其研究意义[J].煤炭学报,2010,35(6):975-981.
Meng Zhaoping, Tian Yongdong, Li Guofu. Characteristics of in-situ stress field in Southern Qinshui Basin and its research significance[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 975-981.
- [8] 许江,张丹丹,彭守建,等.三轴应力条件下温度对原煤渗流特性影响的实验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(9):1 847-1 854.
Xu Jiang, Zhang Dandan, Peng Shoujian, et al. Experimental research on impact of temperature on seepage characteristics of coal containing methane under triaxial stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9): 1 847-1 854.
- [9] 李向良.温度和注入压力对二氧化碳驱油效果的影响规律实验[J].油气地质与采收率,2015,22(1):84-87,92.
Li Xiangliang. Experimental study on the effect of temperature and injection pressure on CO₂ flooding[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 84-87, 92.
- [10] 王臣,鲜学福,周军平,等.含不同气体煤岩全应力-应变渗透特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(3):492-496.
Wang Chen, Xian Xuefu, Zhou Junping, et al. Experimental study on permeability of coal during the complete stress-strain process with different gases[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(3): 492-496.
- [11] Harpalani S, Schraufnagel R A. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal[J]. Fuel, 1991, 69(5): 551-556.