

文章编号: 1001-4888(2018)03-0469-08

考虑煤岩变形和煤对瓦斯吸附特性的 煤体渗透规律试验研究^{*}

吕伏^{1,2}, 徐曾和¹, 梁冰³, 孙维吉³

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 辽宁工程技术大学基础教学部, 辽宁葫芦岛 125105;

3. 辽宁工程技术大学研究生学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 通过开展气体在原煤试件中的三轴稳态渗流试验, 研究了煤岩受自身变形及气体吸附作用影响的渗透特性。借助试验数据和控制方程的解析解, 采用遗传初值的高斯-牛顿法, 求解了受外加载荷和孔隙压力影响的渗透系数函数。结果表明, 煤岩变形、煤对瓦斯的吸附作用以及气体的滑脱效应均会对其渗流特性产生影响, 使得吸附性气体在可变形原煤试件中的渗流具有随外加载荷及孔隙压力变化的典型非线性规律。

关键词: 煤; 可变形; 吸附; 渗透系数; 渗透率

中图分类号: TU455

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-155

0 引言

煤体是具有复杂孔、裂隙结构的多孔介质, 这种特殊的结构为瓦斯的赋存及运移提供了空间和可能^[1]。在外加载荷和孔隙压力的作用下, 煤体介质中的孔隙、裂隙结构以及煤对瓦斯的吸附状态^[2]均会发生改变, 从而影响瓦斯在其中的赋存及运移。

文献[3-5]的研究表明, 外加载荷和气体孔隙压力影响煤体介质的孔隙结构, 从而会对瓦斯在煤体试件中的渗流产生影响。研究^[6]发现, 氮气的渗透率比甲烷高 20%~50%, 二氧化碳的渗透率比甲烷低约 20%。文献[7]测定了同一煤样在相同压差条件下, 吸附平衡前后煤样的渗透率变化, 结果表明, 煤样吸附瓦斯后, 在相同的瓦斯压力条件下, 渗透率比吸附前明显减少, 幅度在 50% 左右。文献[6]以及文献[7]的研究表明, 煤对瓦斯的吸附作用, 对瓦斯在煤体试件中的渗流起到不容忽视的作用。

在应力作用下的煤体渗透率变化规律是煤与瓦斯突出机理与瓦斯灾害防治研究中的重要内容。反映瓦斯在煤体中渗流规律的瓦斯运移控制方程, 是研究多场耦合作用下瓦斯运移规律数学模型的重要组成部分。建立受外加载荷和孔隙压力影响的渗透系数函数, 对于利用流固耦合方法研究煤层瓦斯运移规律具有重要意义。

考虑到外加载荷、孔隙气体压力与介质的孔隙结构变化以及介质对于气体的吸附性密切相关, 本文通过开展吸附性不同的气体在原煤试件中的三轴渗流试验, 分析揭示了煤岩变形及煤对瓦斯的吸附特性对瓦斯在煤体中运移的影响, 建立了受外加载荷和流体孔隙压力影响的瓦斯在煤体中的非线性渗透系数函数。

^{*} 收稿日期: 2017-08-02; 修回日期: 2017-11-03

基金项目: 国家重点发展计划项目资助(2016YFC0600704); 国家自然科学基金资助(51504123); 辽宁省教育厅一般项目资助(LJYL029)

通讯作者: 吕伏(1980-), 女, 博士研究生, 副教授。主要从事渗流力学中的数值计算方法及反演算法研究。

Email: lvfu123@sohu.com

1 煤体渗流特性试验研究

1.1 外加载荷影响下的渗流特性

在已有研究中,关于外加载荷(三轴渗流试验中控制的围压和轴压)在弹性阶段引起的介质变形导致孔隙率及渗透特性变化问题,已基本达成共识。在加载初期,随着外加载荷的增加,多孔介质中的孔、裂隙被压缩减小,从而阻碍流体在多孔介质中的流动,使得流体流量减小^[8]。

为说明瓦斯在原煤试件中受应力影响的非线性渗流规律,即煤体介质的变形对瓦斯渗透特性的影响,本文进行了实验室内不同孔隙压力、不同应力状态下瓦斯在原煤试件中的三轴渗透试验。

试验系统如图 1 所示,主要由煤样加载压力室,轴压、围压加载系统,气体孔隙压力加载系统,稳压系统及气体流量测量系统组成。

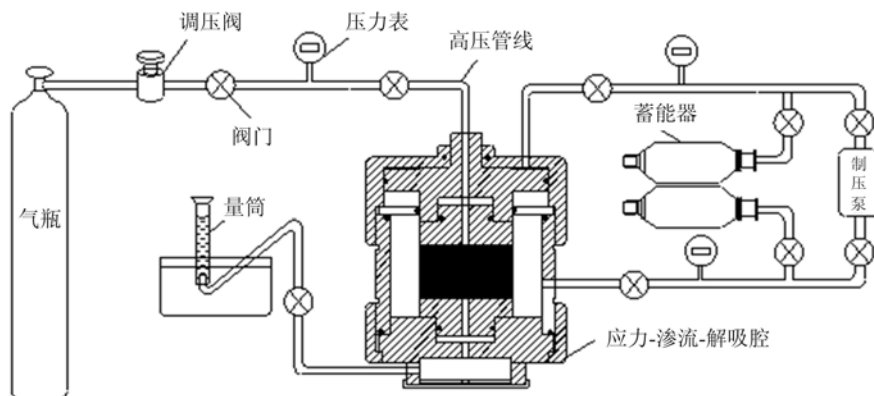


图 1 试验系统示意图

Fig. 1 Diagram of experimental system

试验用煤样取自山西省保德矿 8# 煤层,使用岩石切割机和 ZPM-200 型自动(手动)磨石机将现场采集的煤样加工成 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的标准试件,以体积应力为变量,考虑甲烷气体在相同温度、不同轴压、不同围压、相同孔隙压力状态下的受载煤体中的渗透特性。

控制进口气体压力为 0.5MPa ,试件围压为 3MPa ,保持温度不变(24°C),待瓦斯吸附平衡后利用排水法测定轴压分别为 4MPa 、 6MPa 、 8MPa 、 10MPa 、 12MPa 情况下的甲烷气体流量,改变原煤试件的围压分别为 2MPa 、 3MPa 、 4MPa 、 5MPa 、 6MPa 、 8MPa ,重复上述过程,为一组试验。改变进口气体压力为 1.0 、 1.5 、 2.0 、 2.5 共计进行 5 组试验,得到的试验数据分析图如图 2、图 3 所示。

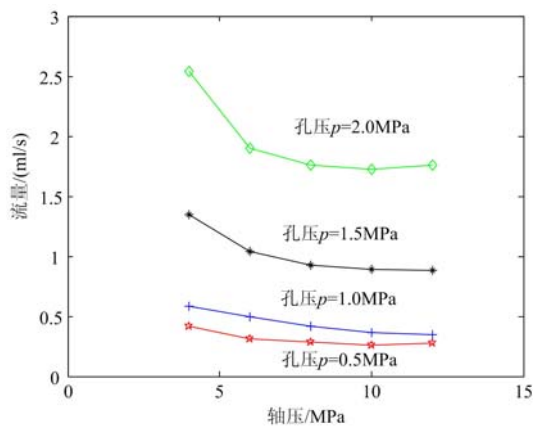


图 2 流量随轴压变化

Fig. 2 Flow change with axial compression

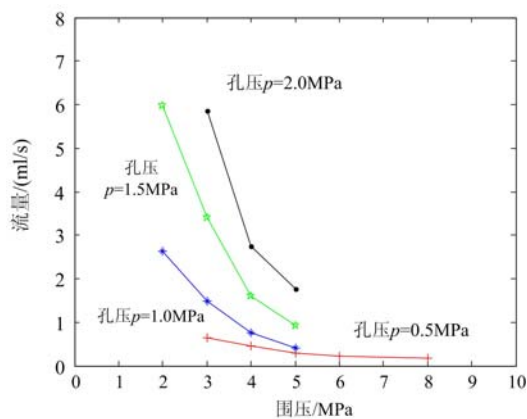


图 3 流量随围压变化

Fig. 3 Flow change with confining pressure

由图 2、图 3 可见,在孔隙压力一定的前提下,气体的渗流量随轴压的增加呈递减趋势,并且随围压

的增加也呈递减趋势。由图4可见,对于相同的轴、围压,渗流量随孔隙压力的增加而增加,对于相同的孔隙压力,体积应力较高的情况对应的曲线位于较低情况的下方,亦即流量随体积应力的增加呈降低的变化趋势。在外加载荷的作用下,原煤介质的孔、裂隙被压缩,气体的有效渗流空间变小,从而渗流量降低,与前人得到的结论一致^[8-10]。

1.2 孔隙压力影响下渗流特性的试验研究

煤体试件是可变形的,并且对在其孔隙中渗流的瓦斯气体具有吸附性,此时瓦斯气体的孔隙压力对于煤体介质的渗透能力影响较为复杂^[9,10]。孔隙压力的增加,一方面会使得有效应力降低,孔隙扩展^[11];另一方面,由于吸附量增加,吸附膨胀应力又会改变有效应力,从而产生介质孔隙结构的变化,最终影响吸附性气体在可变形煤体介质中的渗透^[12-16]。由上述分析可见,渗流量与瓦斯压力梯度间不再是简单的线性关系。

分别采用氦气和氮气进行相同外加载荷、不同压差,不同进、出口气压条件下的三轴渗透试验。通过在三轴渗流仪的出口端增加高压背压阀和压力表,控制固定的孔隙压力差,研究孔隙压力与渗透系数函数间的关系,进而建立受外加载荷和孔隙压力影响的煤体中吸附性气体渗流模型,试验得到的氦气和氮气渗流量的对比及同压差不同孔隙压力下流量的变化如图5、图6所示。

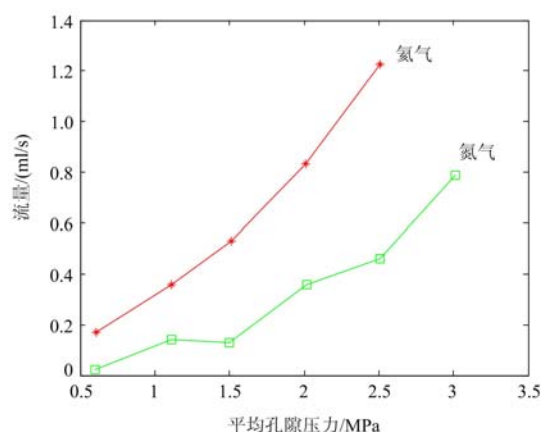


图5 氮气和氦气流量对比

Fig. 5 Flow contrast between Nitrogen and Helium

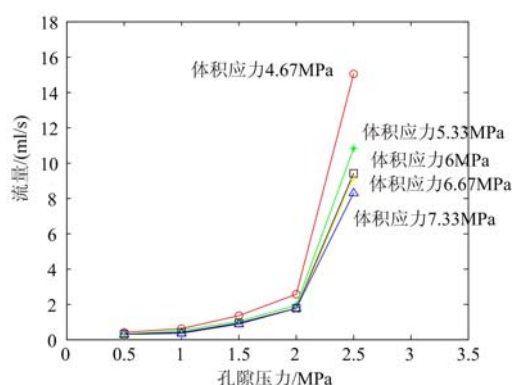


图4 流量随孔隙压力变化

Fig. 4 Flow change with the pore pressure

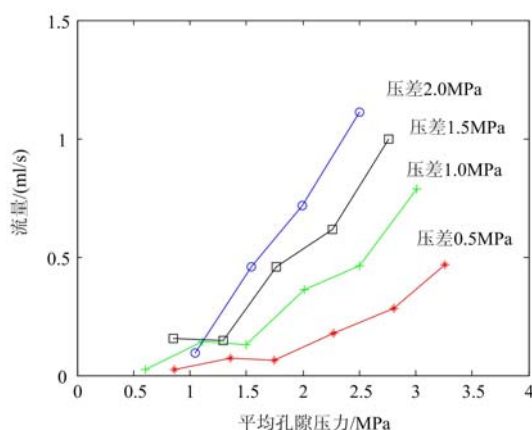


图6 不同压差条件的流量变化

Fig. 6 Flow under the different pressure differential

1.3 试验结果分析

如图4所示,随平均孔隙压力的增加,渗流量呈增加的趋势,相同条件下吸附性氮气的渗流量低于非吸附性氦气的渗流量。如图5所示,在试件两端的压力差不变的情况下,随平均孔隙压力的增加,流量呈非线性增加的趋势,渗流量与孔隙压力梯度间不再是简单的线性关系。

在原煤试件的稳态渗流试验过程中,由于煤体对于瓦斯的吸附性,每改变一次试验条件,均要在吸附平衡后进行试验,亦即每次试验中的外加载荷和孔隙压力是可控条件,试件一端流出的气体流量为可测量,而吸附状态会随着条件的改变而变化。并且,在稳定渗流阶段,流量不随时间的变化而改变,但可能沿煤样轴向的位置变化。因此,再利用线性 Darcy 定律来研究渗流规律是不合适的。寻找到合适的受外加载荷及孔隙压力影响的渗透系数函数,并给出该函数的有效可行的求解方法,对于吸附性气体在可变形煤体试件中渗流规律的研究具有非常重要的意义。

2 渗透系数函数及求解

2.1 渗透系数与渗透率

渗透系数是 Darcy 定律下流体渗流量与孔隙压力梯度的比例系数,反映着某种流体通过多孔介质能力的强弱。若视煤体为不可变形多孔介质,采用非吸附性气体,则在煤体的三轴渗流试验中,由 Darcy 定律可有^[17]:

$$\frac{Q}{S} = -K \frac{dp}{dx} = K \frac{p_2 - p_1}{L} \quad (1)$$

其中, K 为渗透系数; p_2 为入口气体压力; p_1 为出口端气体压力; S 为试件断面积; L 为试件长度; Q 为标准大气压下气体流量。

渗透率,是多孔材料的一种性质,它表征在外加压力梯度的作用下一种流体通过多孔材料的难易程度,反映多孔材料的流体传导性。渗透率仅与骨架性质有关,与气体的性质无关,是衡量介质本身对于气体通过能力强弱的一个量。在(1)式的基础上可有^[18]:

$$k = \mu P_n K / p = 2\mu P_n QL / (S(p_2^2 - p_1^2)) \quad (2)$$

其中, k 为平均渗透率, mD; p_2 为入口气体压力, kPa; p_1 为出口端气体压力, kPa; P_n 为标准大气压, kPa; μ 为气体动力黏性系数, Pa·s; S 为试件断面积, cm²; L 为试件长度, cm; Q 为标准大气压下气体流量, cm³/s。这种计算煤体渗透率的方法通常称为拟压力法。公式(2)是基于介质不可变形的假设,并且不考虑介质对于气体的吸附性,在线性 Darcy 定律的基础上得到的。在现有关于瓦斯在煤体中的渗透率的研究中,多采用该公式计算煤体的平均渗透率。

煤体作为一种可变形多孔吸附介质,外加载荷以及所通气体的孔隙压力势必会对其渗透特性产生影响。宏观上,这种影响表现为瓦斯在煤体中的渗流呈现出随外加载荷及孔隙压力的非线性变化规律,亦即不再符合线性 Darcy 定律。自然,利用上述公式计算的渗透系数、渗透率不再能完全准确表征煤体的渗透特性。

2.2 受外加载荷及孔压影响的煤体渗透模型

本文建立的渗透模型基于以下假设^[19]:①煤样均质各向同性;②煤样在固体骨架应力与孔隙压力作用下的变形处于弹性阶段;③变形是可逆的;④试件中渗流的游离态瓦斯气体为理想气体。

在线性 Darcy 定律的基础上,考虑受外加载荷和孔隙压力影响的非线性渗透系数函数,即

$$\frac{Q}{S} = V = K(p, \sigma) \frac{dp}{dx} \quad (3)$$

由式(3),渗流量最终是受外加载荷、孔隙压力以及孔隙压力梯度共同作用的,其中后两个因素在渗流试验的过程中是相互关联并且变化的。对于单次稳态渗流试验,吸附平衡后,可以利用基于线性 Darcy 定律得到的公式(2)计算其平均渗透率。随着试验条件的改变,煤样对瓦斯的吸附情况也会发生变化,即不同次试验改变的不仅仅是可控的外加载荷和孔隙压力,还有难以定量描述的煤样对瓦斯吸附情况。基于以上原因,对于每次稳态渗流试验,从质量守恒方程出发,考虑气体的可压缩性,试件中渗流的瓦斯符合理想气体状态方程:

$$\rho = P/RT \quad (4)$$

其中, ρ 为瓦斯气体的密度; R 为气体常数; T 为气体温度; P 为气体压力。

在三轴渗流试验中,控制试件的外加载荷、出入口孔隙压力及试验温度,则在稳定渗流阶段,由式(3)、(4)可有:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} \left[pK(p, \sigma) \frac{dp}{dx} \right] = 0 \\ p(x=0) = p_2, p(x=l) = p_1 \end{cases} \quad (5)$$

解该微分方程有

$$Q_{\text{标}} = pK(p, \sigma) \frac{dp}{dx} S = \frac{F(p_2, \sigma) - F(p_1, \sigma)}{L} S \quad (6)$$

其中, $F(p, \sigma)$ 为 $pK(p, \sigma)$ 的原函数, 已知渗透系数函数 $K(p, \sigma)$ 的函数关系带入公式(6)得到标准气压下流量的计算值 $Q_{\text{标}}$, 再配合试验所测得的实际流量 $Q_{\text{测}}$, 构造非线性最小二乘模型, 即可确定所设的渗透系数函数中的待定参数, 从而最终确定渗透系数函数。

2.3 模型的求解

参考已有研究^[20]的结论, 考虑到气体的滑脱效应和吸附作用, 设渗透系数函数为

$$K(p, \sigma) = k_0 \left[1 + \frac{x_1}{p} \right] e^{x_2 p - x_3 \sigma} \tag{7}$$

带入 n 次稳定渗流试验中控制的外加载荷和出、入口孔隙压力, 以及实测的出口端流量数据, 上述问题可转化为最小二乘模型

$$f(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{F(p_{2i}, \sigma_i) - F(p_{1i}, \sigma_i)}{L} S - Q_i \right]^2 \tag{8}$$

式(8)中待定参数的范围, 根据实际的物理意义和数量级背景, 参数 k_0 为试件的原始渗透系数, 具有渗透系数的量纲。公式(7)中右端指数函数前的第二个因子 $\left[1 + \frac{x_1}{p} \right]$ 体现气体的滑脱作用对于渗透系数的影响, 其取值应为正数, 且不超过 2, 因而参考试验中的平均孔隙压力, 将参数 x_1 的取值范围定为 $(-1, 1)$; 参数 x_2 的意义是孔隙压力对于煤体介质变形的影响在渗流中的反映, 在拉为正、压为负的前提下, 其取值范围定为 $(0, 1)$; 参数 x_3 反映的是外加载荷对于渗流的影响, 其取值范围定为 $(0, 1)$ 。为克服高斯-牛顿法求解线性最小二乘问题的初值依赖问题, 采用随机遗传的方法选取初值, 再结合改进的高斯-牛顿法, 求解上述的待定参数。经过上述方法运算, 解决了初值选定困难问题, 克服了算法严重的初值依赖问题, 同时也提高了运算速度。由本文方法得到氦气和氮气的计算结果分别见表 1 和表 2。表 2 中氮气的计算流量相较于实测流量, 平均相对误差为 3.38%, 其中最大相对误差在 6.64%, 最小相对误差仅为 1.22%。

表 1 氦气计算结果
Tab. 1 Calculation results of Helium

外加载荷	入口压力 /MPa	出口压力 /MPa	实测流量 /(cm ³ /s)	计算流量 /(cm ³ /s)	相对误差 /%
4.6700	1.1170	0.1000	0.1680	0.1731	3.02
4.6700	1.6030	0.6160	0.3580	0.3488	2.58
4.6700	2.0010	1.0230	0.5310	0.5311	0.01
4.6700	2.5110	1.5130	0.8330	0.8427	1.17
4.6700	3.0040	2.0090	1.2270	1.2232	0.31

表 2 氮气计算结果
Tab. 2 Calculation results of Nitrogen

外加载荷	入口压力 /MPa	出口压力 /MPa	实测流量 /(cm ³ /s)	计算流量 /(cm ³ /s)	相对误差 /%
4.6700	1.100	0.100	0.0732	0.0753	3.03
4.6700	1.609	0.615	0.142	0.1514	6.64
4.6700	2.000	1.000	0.198	0.2227	1.22
4.6700	2.532	1.501	0.360	0.3457	3.99
4.6700	3.011	2.001	0.462	0.4693	1.57

利用表 1 中数据得到的渗透系数函数为

$$K = 0.11 \left[1 + \frac{0.1566}{p} \right] e^{0.0325 p - 0.0553 \sigma}$$

利用表 2 中数据得到的渗透系数函数为

$$K = 0.1104 \left(1 + \frac{0.2535}{p} \right) e^{0.0235 p - 0.0714 \sigma}$$

对比表 1 和表 2 中的结果可以看到,由于吸附性的影响,相同控制条件下,氮气的渗透系数中的 3 个参数相对于氦气具有一定变化:参数 α_1 反映气体的滑脱效应,由于吸附导致孔隙变小,使得该参数增大;参数 α_2 反映孔隙压力对于渗流的影响,由于孔隙压力的增加,会使得吸附量增加,孔隙变小,因而该参数的值减小;参数 α_3 反映的是外加载荷对于渗流的影响,由于外加载荷使介质收缩孔隙变小,吸附量增加,因而该参数增大。

由表 3 可见,利用两端压差为 1MPa 情况下的试验数据求得的渗透系数函数,计算压差为 1.5MPa 情况下的流量,结果与实测流量吻合良好,可见文中方法得到的渗透系数可以描述该试件在假设范围内的渗流规律。

表 3 结果检验

Tab. 3 Test of results

外加载荷	入口压力 /MPa	出口压力 /MPa	实测流量 /(cm ³ /s)	计算流量 /(cm ³ /s)	相对误差 /%
4.6700	2.525	1.000	0.459	0.4285	6.64
4.6700	3.013	1.510	0.615	0.6037	1.84

按照线性 Darcy 意义下的公式计算出的平均渗透率与文中方法得到的渗透率的对比如图 7 所示。由图可见,传统意义下计算出的平均渗透率与平均孔隙压力间呈现明显的非线性关系,并且即使是相同的函数结构,按照平均渗透率和平均孔隙压力的关系进行回归也得不到真正反映渗透率与孔隙压力间关系的函数。在试件两端气体压力控制为 1MPa 的情况下,吸附性气体和非吸附性气体渗透系数对比见图 8 所示。吸附性气体的渗透率明显低于非吸附性气体,可见吸附作用会导致渗透系数减小,并且无论何种气体,其渗透系数均呈现出随孔隙压力的非线性变化规律,而非常数,亦即气体在可变形原煤试件中的渗流不再符合线性 Darcy 定律,自然,在其基础上得到的计算公式不再适用于研究此时的渗流规律。

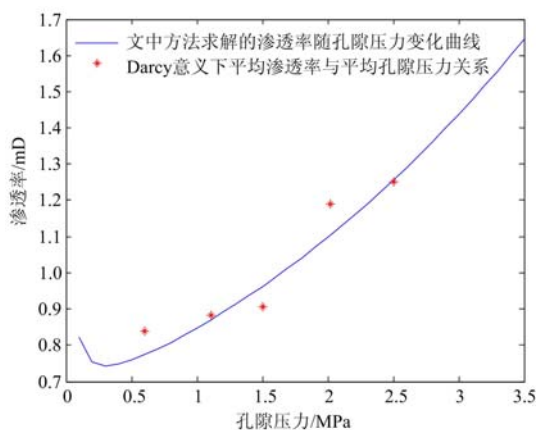


图 7 渗透率对比

Fig. 7 Contrast of permeability

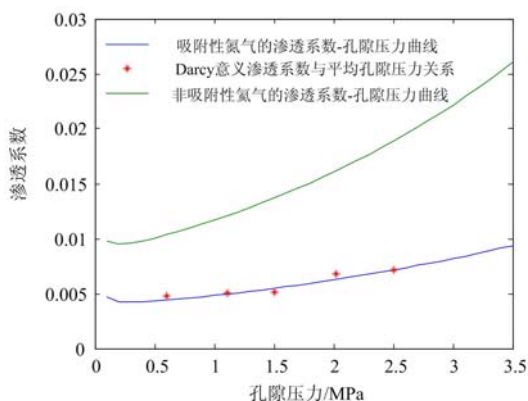


图 8 渗透系数对比

Fig. 8 Contrast of permeability coefficient

3 结论

通过本文分析可以得出以下结论:

(1) 在外加载荷及孔隙压力作用下,吸附性气体在可变形煤体介质中的渗流不再符合线性 Darcy 定律描述的规律,基于线性 Darcy 定律定义并计算的渗透系数和平均渗透率无法准确反映吸附性气体

在可变形煤体中的渗流规律;

(2) 基于三轴稳定渗流试验数据,借助渗流的控制方程,采用随机遗传初值的高斯-牛顿法,可以稳定、高效地求出受外加载荷和孔隙压力影响的渗透系数函数,为分析渗流特性与外加载荷和孔隙压力间的关系,揭示煤岩变形及气体的滑脱效应和吸附性对于渗流的影响,为流固耦合模型的顺利、准确求解提供了依据和可行的方法;

(3) 通过分析所给方法求解出的渗透系数函数,可以得到气体在可变形煤体试件中的渗透系数随孔隙压力呈先减小后增加的趋势,吸附性气体的渗透性低于非吸附性气体,可见煤岩变形、煤对瓦斯的吸附作用以及气体的滑脱效应,均会对其渗流特性产生影响,使得吸附性气体在可变形原煤试件中的渗流具有随外加载荷及孔隙压力变化的典型非线性规律。

参考文献:

- [1] 林柏泉,周世宁. 煤样瓦斯渗透率的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 1987, 16(1):21-28 (LIN Boquan, ZHOU Shining. Experimental study on gas permeability of coal example[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1987, 16(1):21-28 (in Chinese))
- [2] 陶云奇,许江,彭守建,等. 含瓦斯煤孔隙率和有效应力影响因素试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11):3417-3423 (TAO Yunqi, XU Jiang, PENG Shoujian, et al. Experimental study of influencing factor of porosity and effective stress of gas-filled coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11):3417-3423 (in Chinese))
- [3] Hema S, Igor H, Robert M, et al. Influence of carbon dioxide on coal permeability determined by pressure transient methods[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 77(1-2):109-118.
- [4] 尹光志,蒋长宝,李晓泉,等. 突出煤和非突出煤全应力-应变瓦斯渗流试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6):1613-1620 (YIN Guangzhi, JIANG Changbao, LI Xiaquan, et al. An experimental study of gas permeabilities of outburst and nonoutburst coals under complete stress-strain process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6):1613-1620 (in Chinese))
- [5] 王登科,彭明,魏建平,等. 煤岩三轴蠕变-渗流-吸附解吸试验装置的研制及应用[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3):644-652 (WANG Dengke, PENG Ming, WEI Jianping, et al. Development and application of tri-axial creep-seepage-adsorption and desorption experimental device for coal[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3):644-652 (in Chinese))
- [6] 罗新荣. 煤层瓦斯运移物理与数值模拟分析[J]. 煤炭学报, 1992, 17(2):50-57 (LUO Xinrong. Physical simulation and analysis of methane transport in coal seams[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1992, 17(2):50-57 (in Chinese))
- [7] 隆清明. 煤的吸附作用对瓦斯渗透特性的影响[D]. 重庆:煤炭科学研究总院, 2008 (LONG Qingming. Experimental study on coal permeability by adsorption[D]. Chongqing: General Coal Science Research Institute, 2008 (in Chinese))
- [8] 周世宁,林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1990 (ZHOU Shining, LIN Baiquan. The theory of gas flow and storage in coal seams[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1990 (in Chinese))
- [9] 姜德义,张广洋,胡耀华,等. 有效应力对煤层气渗透率影响的研究[J]. 重庆大学学报, 1997, 20(5):22-25 (JIANG Deyi, ZHANG Guangyang, HU Yaohua, et al. Effective stress affecting on the permeability[J]. Journal of Chongqing University, 1997, 20(5):22-25 (in Chinese))
- [10] 孙培德. 变形过程中煤样渗透率变化规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001(增刊):1801-1804 (SUN Peide. Testing study on coal specimen permeability during solid deformation process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001(Supp):1801-1804 (in Chinese))
- [11] 岳立新,孙可明. 超临界 CO₂ 作用后煤微观结构与渗透率变化规律实验研究[J]. 实验力学, 2017, 32(3):397-406 (YUE Lixin, SUN Keming. Experimental study of coal microstructure and permeability variation after of supercritical penetration[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(3):397-406 (in Chinese))
- [12] 方志明,李晓春,白冰. 煤岩吸附量-变形-渗透系数同时测量方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9):1828-1833 (FANG Zhiming, LI Xiaochun, Bai Bing. Study of method of simultaneously measuring

- adsorption-deformation-permeability of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9):1828—1833 (in Chinese))
- [13] 王刚, 程卫民, 郭恒, 等. 瓦斯压力变化过程中煤体渗透特性的研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(5): 735—740 (WANG Gang, CHENG Weimin, GUO Heng, et al. Study on permeability characteristics of coal body with gas pressure variation[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(5):735—740 (in Chinese))
- [14] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出的球壳失稳机理及防治技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1998 (JANG Chenglin, YU Qixiang. Failure mechanism and prevention technology of spherical shell of coal and gas outburst [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1998 (in Chinese))
- [15] 郭平. 基于含瓦斯煤体渗流特性的研究及固-气耦合模型的构建[D]. 重庆大学, 2010 (GUO Ping. Research on gas seepage characteristics and the construction of gas and solid coupling model[D]. Chongqing University, 2010 (in Chinese))
- [16] 王登科, 刘建, 尹光志, 等. 突出危险煤渗透性变化的影响因素探讨[J]. 岩土力学, 2011, 31(11):3469—3474 (WANG Dengke, LIU Jian, YIN Guangzhi, et al. Research on influencing factors of permeability change for outburst-prone coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 31(11):3469—3474 (in Chinese))
- [17] 孙讷正. 地下水流的数学模型和数值方法[M]. 地质出版社, 1981 (SUN Nezheng. Mathematical model and numerical method of groundwater flow[M]. Geological Publishing House, 1981 (in Chinese))
- [18] 孙培德. Sun 模型及其应用——煤层气越流固气耦合模型及可视化模拟[M]. 浙江大学出版社, 2002 (SUN Peide. SUN model and its applications—the model of coupled solid deformation and gas leak flow and visual simulations[M]. Zhejiang University Press, 2002 (in Chinese))
- [19] 赵阳升, 胡耀青. 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, 1995, 17(3):26—31 (ZHAO Yangsheng, HU Yaoqing. Experimental study of the law of effective stress by methane pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(3):26—31 (in Chinese))
- [20] Klindenberg L J. The permeability of porous media to liquids and gases[J]. API Drilling and Production Practices, 1941(2):200—213.

Experimental study on the seepage law of coal considering deformation of the coal rock and the adsorption characteristics

LV Fu^{1,2}, XU Zeng-he¹, LIANG Bing³, SUN Wei-ji³

(1. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Department of Basic Teaching, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China; 3. Graduate School, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Through tri-axial steady state seepage flow experiment for gas in raw coal specimen, the permeation characteristics of coal petrography affected by its own deformability and gas adsorption were studied. With the assistance of experimental data and the analytical solution of governing equation, using Gauss-Newton method with genetic initial value, the permeability coefficient function affected by external load and pore pressure is solved. Study results show that the gas adsorption induced by coal deformability and the gas slippage effect may affect the permeation characteristics. The seepage of adsorptive gas in the deformable raw coal specimen has the typical nonlinear pattern with the change of external load and pore pressure.

Keywords: coal; deformable; adsorption; permeability coefficient; permeability