

有效应力对煤样变形和渗透性的影响研究

祝捷^{1,2}, 王学¹, 于鹏程¹, 陈孟达¹, 陈赫¹, 何法¹

(1. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为了研究渗透率随有效应力的变化特征, 利用含瓦斯煤热-流-固耦合三轴伺服渗流装置, 在外部应力不变、降低进口气体压力, 外部应力、进气口压力同步降低 2 种实验条件下, 观测了赵各庄煤矿 9 号煤层样品的应变和气相(氦气)渗透率, 研究有效应力对煤样变形和渗透性的影响。实验结果显示, 随着有效应力升高, 煤样的收缩应变加剧, 有效应力为 5.2~6.5 MPa, 收缩体积应变与有效应力之间符合线性关系, 有效应力大于 6.5 MPa 或小于 5.2 MPa, 应力-应变曲线发生偏折, 部分煤样出现扩容现象; 气体渗流速度随进口气体压力的降低而降低; 升高或降低有效应力, 煤样渗透率均随着进口气体压力的降低而增大。由此可见研究有效应力变化条件下的渗透率变化特征, 应适当考虑气体滑脱效应的影响。

关键词: 采矿工程; 渗透率; 煤样应变; 气体压力; 有效应力; 气体滑脱

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2017)09-2213-07

Effects of the effective stress on deformation and permeability of coal

ZHU Jie^{1,2}, WANG Xue¹, YU Pengcheng¹, CHEN Mengda¹, CHEN He¹, HE Fa¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to investigate the effect of the effective stress on deformation and permeability of coal, the strain and permeability of coal cores from No. 9 coal seam of Zhaogezhuang Coal Mine in Kailuan Mine area were measured with the triaxial servo-controlled seepage device. The experiments were carried out under two types of conditions. One type of condition was to reduce the inlet gas pressure while the confining stress was kept constant. Another type of condition was to reduce the gas pressure and confining stress synchronously. The coal shrinkage was found to increase with the effective stress. There was a linear correlation between the volumetric strain of coal and the effective stress within the range of 5.2 MPa and 6.5 MPa. When the effective stresses were outside the range, the stress-strain lines were not straight anymore, and coal dilatation was observed from some samples. The gas flow velocity decreased with the decreasing of gas pressure of inlet port. However the coal permeability increased regardless the decreasing or increasing of effective pressure. Therefore the effect of gas slippage should be considered when the coal permeability change with effective stress is investigated.

Key words: mining engineering; permeability; coal strain; gas pressure; effective stress; gas slippage

收稿日期: 2017-03-16; **修回日期:** 2017-05-05

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0801401); 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室访问学者基金项目(2011DA105287-FW201508); 中央高校基本科研业务费专项资金(2010QL02)

Supported by the State Key Research Development Program of China(Grant No. 2016YFC0801401), Scientific Research Foundation of State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University(Grant No. 2011DA105287-FW201508) and Fundamental Research Funds for the Central Universities of China(Grant No. 2010QL02)

作者简介: 祝捷(1978-), 女, 1998年毕业于南昌大学土木工程专业, 现任副教授, 主要从事岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: zhujie@cumt.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0234

1 引言

煤层渗透率是影响煤层气开采效益、研究煤层瓦斯运移规律、防治煤与瓦斯突出的重要参数。煤基质和裂隙系统组成了煤中的双重孔隙结构,其中裂隙系统是气体运移的主要通道^[1]。P. Q. Huy 等^[2]认为随着有效应力的增大,包含微裂隙的渗流通道变窄,部分微裂隙甚至完全闭合,这使得在高有效应力条件下,煤的渗透率急剧降低。J. Q. Shi 等^[3]的实验表明,有效应力导致了煤渗透率呈指数函数降低。

煤矿现场瓦斯压力随着距工作面距离的变化,是一个平缓渐变加突变过程^[4],瓦斯压力对煤岩渗透性的影响受到关注^[5]。王刚等^[6]研究表明,渗透率随瓦斯压力的增加而不断下降。赵阳升等^[7]发现,气体压力升高过程中存在临界点,当气压低于临界点时,渗透系数随气压增加而衰减;气压高于临界点时,渗透系数随气压增加而增加。曹树刚等^[8]指出煤样渗透率随瓦斯压力的增加,呈现先减小后增大的变化特征,原因在于 Klinkenberg 效应。Klinkenberg 效应是当气体平均分子自由程接近多孔介质的孔隙尺寸时,管壁上的气体分子处于运动状态,又称滑脱现象或克氏效应。林柏泉和周世宁^[9]认为,低压条件下 Klinkenberg 效应对煤渗透率的影响显著。王登科等^[10]依据煤样渗透率随气体压力增加而降低的实验结果,提出了考虑 Klinkenberg 效应的煤岩渗透率计算方法。许江等^[11]研究了在升压和降压阶段,气体滑脱效应对型煤渗透率的影响,认为滑脱效应引起的渗透率变化量随气体压力增加呈幂指数函数降低。

有效应力、气体滑脱和基质变形共同控制渗透率的变化,S. Harpalani 和 G. Chen^[12]的实验结果显示,气体压力小于 1.7 MPa 时,气体滑脱和基质收缩效应共同影响煤岩渗透率。傅雪海等^[13]认为,煤岩渗透率受有效应力和煤基质收缩的综合控制,高阶煤渗透率随储层压力的降低而逐渐减小,中阶煤渗透率随储层压力的降低而逐渐增大。汪吉林等^[14]认为滑脱效应对渗透率的贡献远小于基质收缩效应,随着压力梯度增大,滑脱效应几乎可以忽略。李俊乾等^[15]观测了气体压力升高过程中渗透率的变化,得到渗透率由减小变增大的转折发生在平均气体压力 1.0 MPa 时,由此认为平均气体压力小于

1.0 MPa 时,气体滑脱效应强于有效应力效应,导致了渗透率升高。

目前,关于瓦斯压力对煤渗透率影响的研究大多基于升压渗流实验,降低瓦斯压力条件下观测煤样渗透性的实验较少,同时有效应力和滑脱效应对煤渗透率影响的量化描述也有待深入。考虑到在煤层瓦斯开发过程中,气体压力不断降低的实际情况,本文在降低气体压力条件下进行了煤样渗透试验,并且对气体滑脱和有效应力对煤样渗透率的综合作用进行了量化分析。

2 煤样制备和实验方案

实验煤样取自开滦矿区赵各庄煤矿 9 号煤层,该煤层瓦斯含量为 7.5~8.5 m³/t。现场取出煤块之后沿着层理方向钻出岩心,按照《煤与岩石物理力学性质测定方法》要求制作成直径 50 mm、高度 100 mm 的圆柱体样品。煤样经烘干机高温(90 °C)烘干 24 h,测量煤样直径和长度后放入干燥器备用。实验在重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点试验室含瓦斯煤热-流-固耦合三轴伺服渗流装置上进行(见图 1)。实验装置主要由伺服加载系统、三轴压力室、孔隙压力控制系统、数据测量系统和辅助系统等部分组成。此装置可用于测试煤岩体在围压、轴压和气体压力变化条件下的气体渗透性,也可进行型煤和原煤试样的全应力-应变过程的气体渗流实验。



图 1 三轴伺服渗流装置

Fig.1 Triaxial servo-controlled seepage rig

本文重点研究有效应力对煤样力学响应的影响,暂不考虑气体吸附性对渗透性的影响作用,因

此笔者选择无吸附性气体(氦气)进行实验。实验在室温(25 ℃)下进行,测定煤样渗透性时采用 2 种实验方案:实验方案 1(T1),轴压和围压保持不变、降低进口气体压力;实验方案 2(T2),轴压、围压、进口气体压力同时降低。依据 Terzaghi 原理可知,有效应力 σ_e 按下式进行计算:

$$\sigma_e = \frac{\sigma_z + 2\sigma_r}{3} - \frac{p_1 + p_2}{2} \quad (1)$$

式中: σ_z , σ_r 分别为煤样受到的轴压和围压; p_1 , p_2 分别为煤样进、出口两端的气体压力。各测点轴压、围压及进出口气体压力和有效应力如表 1 所示。

表 1 煤样渗透性实验测点的应力和气体压力

Table 1 The stresses and gas pressures at measuring points in coal permeability experiments

实验方案	轴压/MPa	围压/MPa	进口压力/MPa	出口压力/MPa	有效应力/MPa
T1	7.0	7.0	2.0	0.1	5.95
			1.5	0.1	6.20
			1.0	0.1	6.45
			0.5	0.1	6.70
			0.3	0.1	6.80
T2	7.0	7.0	2.0	0.1	5.95
			6.5	0.1	5.70
			6.0	0.1	5.45
			5.5	0.1	5.20
			5.3	0.1	5.10

实验须确保设备气密性。煤样经热缩管包裹,利用吹风机加热使热缩管紧贴煤壁。将煤样装入三轴伺服渗流装置,安装引伸计,关闭压力腔体,再次检查气密性;按表 1 施加轴压、围压,抽真空 2 h 后通入氦气(He),通过压力表控制进口气体压力,出口直接连通大气,记录气体的稳定流量以及煤样的径向变形和轴向变形。按表 1 所示依次调整轴压、围压和进口气体压力,重复上述步骤直到完成煤样实验。

3 实验结果

3.1 出口处的气体渗流速度

实验测得出口处气体渗透速度与进口气体压力关系实验曲线如图 2 所示。

由图 2 可知,煤样的气体渗流速度存在个体差异,1 号样品的渗透速度低于 2 号和 3 号煤样。随着进口气体压力的降低,渗透速度随之降低。这是因为煤样两端气体压力梯度减小,单位时间内渗透过煤样截面的气体流量随之减小。进口气体压力从

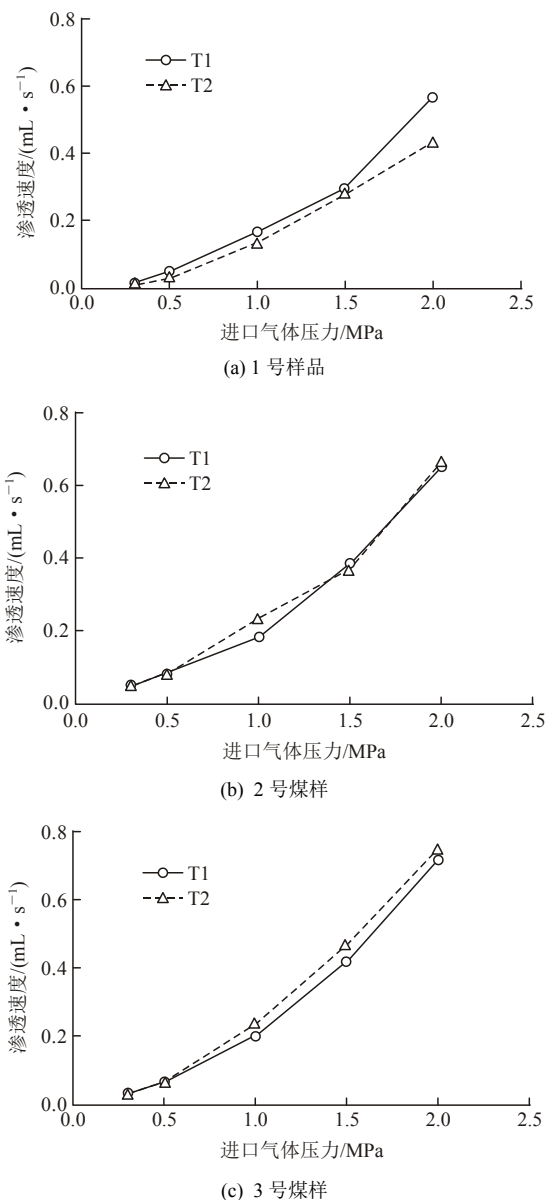


图 2 气体渗透速度与进口压力关系曲线

Fig.2 Relationships between gas seepage velocity and inlet gas pressure

2.0 MPa 降低至 0.3 MPa,方案 T1 的气体平均渗透速度由 0.65 mL/s 降低到 0.03 mL/s,降低幅度达到 95.3%;方案 T2 的气体平均渗透速度由 0.61 mL/s 降低到 0.03 mL/s,降低幅度达到 95.1%。

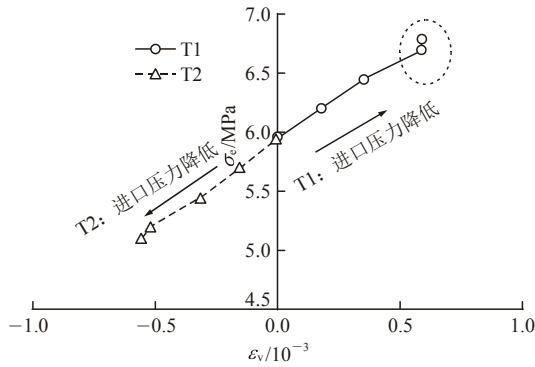
3.2 煤样的体积变形

在测得煤样出口气体流量的同时,本文还监测了煤样的径向应变 ε_r 和轴向应变 ε_z 。根据体积应变的定义:

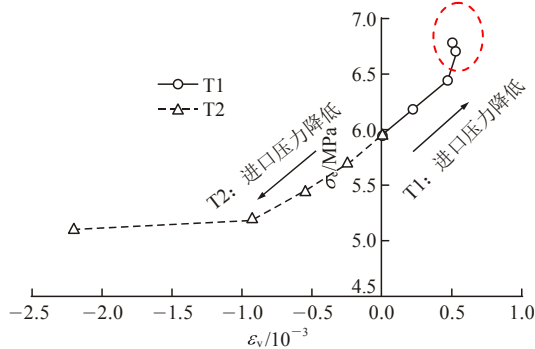
$$\varepsilon_v = \varepsilon_z + 2\varepsilon_r \quad (2)$$

初始条件下,即进口气体压力为 2.0 MPa,轴压和围压的应力值为 7.0 MPa(有效应力为 5.95 MPa),煤样体积变形为 0。随着进口压力的变化,煤样

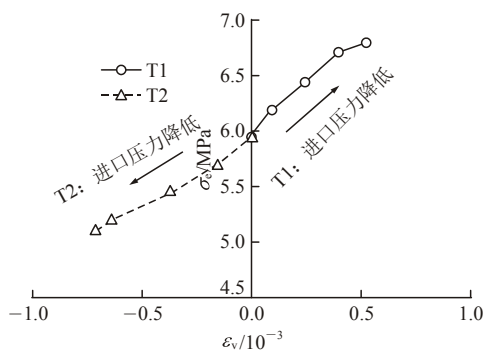
有效应力与体积应变如图 3 所示。实验中进口气体压力都从 2.0 MPa 降低至 0.3 MPa，但是 2 种方案的有效应力变化不同。由表 1 可知，方案 T1 的有效应力由 5.95 MPa 增大至 6.80 MPa，方案 T2 的有效应力由 5.95 MPa 降低至 5.10 MPa。图中压缩应变设为“正”，膨胀应变设为“负”。



(a) 1号煤样



(b) 2号煤样



(c) 3号煤样

图 3 煤样有效应力与体积应变的关系曲线

Fig.3 Relationships between the effective stresses and coal volumetric strains

方案 T1 实验结果显示：轴压、围压应力维持不变(7.0 MPa)，进气口压力从 2.0 MPa 降低至 0.3 MPa，煤样产生收缩变形；有效应力越高，煤样收缩变形越大；当有效应力 $\sigma_e \leq 6.5$ MPa 时，有效应力与体积应变之间保持线性关系；当 $\sigma_e > 6.5$ MPa 时，应力 - 应变曲线偏离线性关系；如图 3(a)和(b)

中圆圈显示，1 号和 2 号煤样在有效应力为 6.8 MPa 时，出现扩容现象。由此可见煤样的变形过程是一个孔隙压密、裂隙发生与扩展的过程。

方案 T2 实验结果显示：轴压、围压从 7.0 MPa 逐级降低至 5.3 MPa，进气口压力从 2.0 MPa 降低至 0.3 MPa，煤样宏观上表现为膨胀变形；有效应力越低，煤样膨胀变形越大；煤样的有效应力 - 体积应变曲线基本上保持线性关系，但是 2 号煤样在 $\sigma_e = 5.1$ MPa 时的体积膨胀显著增加至 2.20×10^{-3} ，这促使其应力 - 应变曲线发生了偏离，可以推断煤样内部可能产生微裂缝扩展。

从煤样的体积应变变化曲线看，有效应力和体积应变的关系是明确的，即随着有效应力的升高，煤样收缩变形增大，当有效应力在 5.2~6.5 MPa 时，体积应变与有效应力之间保持良好的线性关系，如下式：

$$\Delta \epsilon_v = \frac{\Delta \sigma_e}{K} \quad (3)$$

式中： $\Delta \epsilon_v$ 和 $\Delta \sigma_e$ 分别为体积应变和有效应力的变化量， K 为煤样的体积模量。由有效应力和煤样体积应变的实验数据，拟合得到煤样的体积模量(见表 2)。由表 2 可知，2 号煤样拟合相关系数仅为 0.789 7，其拟合效果比 1 号和 3 号煤样差。主要原因在于，2 号煤样在有效应力为 5.1 MPa 时其膨胀变形骤然增大，导致有效应力 - 体积应变曲线产生了明显的偏折。

表 2 煤样的体积模量拟合结果

Table 2 The fitting results of volumetric moduli of coal cores

煤样编号	体积模量/MPa	拟合相关系数
1号	947.4	0.982 1
2号	627.9	0.789 7
3号	1 432.8	0.981 4

3.3 煤样渗透率

煤储层渗透率是反映煤层内瓦斯渗流难易程度的物性参数，计算煤渗透率常用的计算公式如下：

$$k = \frac{2Qp_0\mu L}{A(p_1^2 - p_2^2)} \quad (4)$$

式中： k 为煤样的气体渗透率， Q 为通过煤样的流量， p_0 为大气压， μ 为流体动力黏度， L 为煤样长度， A 为煤样横截面面积。利用式(4)得到煤样渗透率见表 3。

根据表 2 中渗透率的计算结果，得到煤样渗透率与有效应力的关系如图 4 所示，图中 σ_0 为实验开始时煤样受到的有效应力，即初始有效应力。

4 分析与讨论

以往研究认为, 有效应力是影响煤样渗透率变化的主要因素, 气体渗透率随有效应力增加而降低, 广泛采用指数函数, 即用下式来表示渗透率 k 和有效应力 σ_e 的关系^[16]:

表 3 煤样的渗透率

Table 3 Coal permeability of the cores

实验方案	煤样编号	平均气压/MPa	有效应力/MPa	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)		
	1 号	1.05	5.95	3.099		
		0.80	6.20	2.920		
		0.55	6.45	3.667		
		0.30	6.70	4.534		
		0.20	6.80	4.532		
		1.05	5.95	3.533		
		0.80	6.20	3.709		
		T1	2 号	0.55	6.45	4.010
	2 号	0.30	6.70	7.511		
		0.20	6.80	13.516		
		1.05	5.95	3.884		
		0.80	6.20	4.019		
		T1	3 号	0.55	6.45	4.361
			3 号	0.30	6.70	5.990
				0.20	6.80	8.982
				1.05	5.95	2.370
0.80	5.70			2.757		
1 号	0.55			5.45	2.933	
	1 号			0.30	5.20	3.022
				0.20	5.10	4.532
				1.05	5.95	3.624
		0.80	5.70	3.547		
		T2	2 号	0.55	5.45	5.103
			2 号	0.30	5.20	7.511
				0.20	5.10	13.516
				1.05	5.95	4.064
0.80	5.70			4.501		
T1	3 号			0.55	5.45	5.087
	3 号			0.30	5.20	5.990
				0.20	5.10	8.982

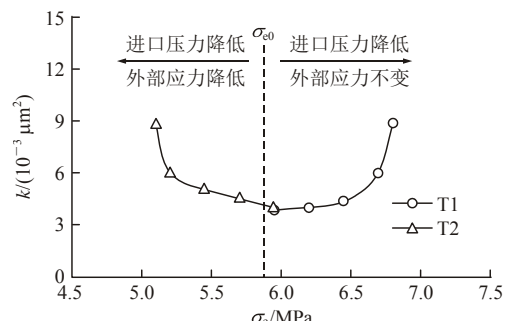
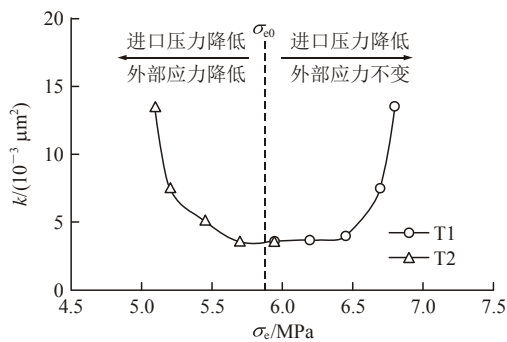
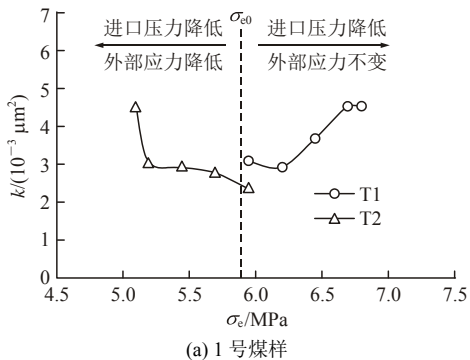


图 4 煤样渗透率与有效应力的关系曲线

Fig.4 The experimental curves of coal volumetric strains vs the effective stresses

$$k = k_0 \exp(-3C_f \Delta \sigma_e) \tag{5}$$

式中: k_0 为初始渗透率, 即为煤样渗透性实验的第一个测点(轴压、围压为 7.0 MPa, 进口压力为 2.0 MPa, 出口压力为 0.1 MPa)得到的渗透率; C_f 为煤中裂隙体积压缩系数。式(5)是建立在煤岩弹性变形阶段的渗透率模型。

由图 4 可知, 方案 T2 中煤样渗透率随着有效应力的降低而增大, 符合式(5)的变化趋势。但是方案 T1 中随着有效应力的升高, 煤样渗透率增大, 这不符合式(5)的变化趋势。由此可见有效应力不是控制煤样渗透率变化的唯一因素。

由于氦气为非吸附性气体, 煤样渗透率的变化与气体吸附/解吸作用无关, 所以本文得到的渗透率是有效应力和气体滑脱效应的综合结果。

Y. Gensterblum 等^[17]指出裂隙体积压缩性属于孔弹性效应, 气体滑脱效应是流体动力学现象, 两者共同影响渗透率的变化。气体滑脱效应的数学表达式为

$$k = k_1 \left(1 + \frac{b}{p_m} \right) \tag{6}$$

式中: k_1 为克氏渗透率; p_m 为平均气体压力, $p_m = \frac{p_1 + p_2}{2}$; b 为滑脱因子, $b = \frac{4c\lambda}{r} p_m$, 其中 c

为比例因子， λ 为气体分子平均自由程， r 为孔道的平均半径。在一定温度条件下，滑脱因子的大小只和气体类型、渗流孔道的平均半径有关。由此将渗透率 k 表示为

$$k = k_0 + \Delta k_\sigma + \Delta k_s \quad (7)$$

式中： Δk_σ 和 Δk_s 分别为有效应力和气体滑脱效应引起的渗透率变化量。

将式(5)和(6)代入式(7)，并近似认为 $b \approx b_0$ ，即可得到

$$k = k_0 \exp(-3C_f \Delta \sigma_e) + k_1 b \left(\frac{1}{p_m} - \frac{1}{p_{m0}} \right) \quad (8)$$

式中： p_{m0} 为初始条件下的平均气体压力。

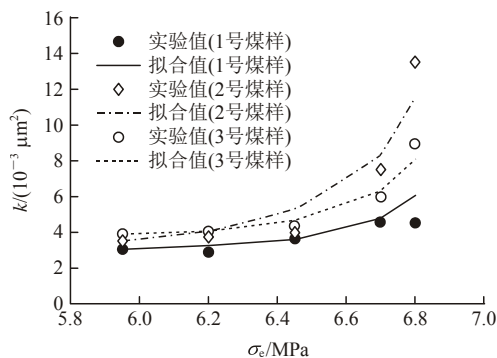
式(8)综合考虑了有效应力与气体滑脱对煤样渗透率的影响，将 2 种效应量化表征于同一个表达式中。表达式右边的第一项对应有效应力的影响，第二项为气体滑脱引起煤样渗透率的变化量。两者叠加得到了有效应力和气体滑脱对煤样渗透率的综合作用。

对于方案 T1，即外部应力维持不变，降低进口气体压力，式(8)可进一步写成：

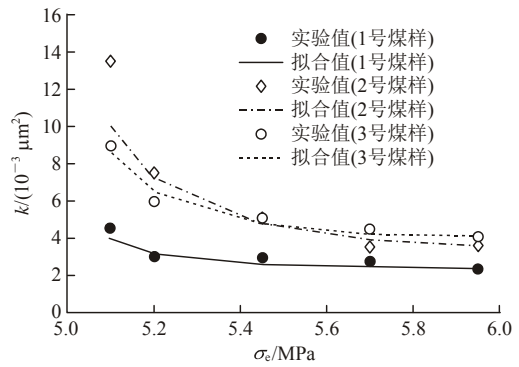
$$k = k_0 \exp[3C_f \Delta p_m] + k_1 b \left(\frac{1}{p_m} - \frac{1}{p_{m0}} \right) \quad (9)$$

依据式(8)，得到了 2 种实验方案相应的渗透率，计算值与实验数据的对比情况见图 5。图 5(a)显示，气体压力降低过程中，煤样渗透率随有效应力增大而增大，这是气体滑脱对渗透率增大的贡献大于有效应力增加引起渗透率减小的效应的结果。图 5(b)中气体压力降低的过程中，煤样渗透率随有效应力降低而增大，这是有效应力和气体滑脱的叠加作用导致的。

笔者依据实验数据拟合渗透率系数 C_f 和 b 时，发现 C_f 和 k_1 不变， b 随着气体压力的降低发生微小变化，如表 4 所示。方案 T1 的实验条件是煤样在外部应力不变情况下降低气体压力，方案 T2 为煤



(a) 实验方案 T1



(b) 实验方案 T2

图 5 煤样渗透率的实验值和拟合值

Fig.5 The experimental data and numerical fitting value of coal permeability

表 4 煤样 C_f 、 k_1 和 b 的拟合值

Table 4 The fitting values for C_f , k_1 and b of coal cores

实验方案	煤样编号	C_f/MPa^{-1}	$k_1/(10^{-3} \mu\text{m}^2)$	b/MPa
T1	1号	0.35	5.43	0.26/0.21/0.20/0.19/0.16
	2号	0.40	7.46	0.52/0.55/0.45/0.61/0.65
	3号	0.57	5.27	0.35/0.35/0.32/0.33/0.39
T2	1号	0.05	5.43	0.25/0.25/0.23/0.21/0.23
	2号	0.08	7.45	0.55/0.50/0.55/0.55/0.61
	3号	0.07	5.29	0.32/0.32/0.32/0.30/0.31

注：表中 b 的数值共 5 个，依次对应进口气体压力为 2.0, 1.5, 1.0, 0.5 和 0.3 MPa 的 b 值。

样的外部应力和气体压力同时降低。当有效应力变化量相同时，方案 T1 的煤样裂隙压缩变形更大，因此表 4 显示方案 T1 中 C_f 值大于方案 T2 中 C_f 值。

在本文实验条件下，即实验温度不变(25 °C)、实验气体为氦气，滑脱因子 b 的大小只和渗流孔道的平均半径有关。方案 T1 采用外部应力不变降低气体压力的方式，即采取增大有效应力的加载方式，煤样的孔裂隙压缩程度大于方案 T2。这使得方案 T1 煤样孔裂隙的压缩程度增加、渗流孔道变窄，进而导致方案 T1 的煤样具有更高的 b 值。

由图 5 可知，依据式(8)计算的煤样渗透率与实验数据的变化趋势一致，且与实验数值相当。煤样应力 - 应变曲线在进口气体压力 2.0 MPa 降至 0.5 MPa 范围内保持线性关系(见图 3)，式(8)对实验数据的拟合效果很好；煤样应力 - 应变曲线在进口气体压力从 0.5 MPa 降至 0.3 MPa，偏离线性关系，数据拟合的效果变差。这是因为式(8)右边的第一项是以煤岩弹性变形的渗透率模型为基础的，进口气体压力从 0.5 MPa 降至 0.3 MPa，煤样内部产生微裂缝扩展，部分煤样甚至发生扩容。因此式(8)更加适用于表征仅发生弹性变形或弹性变形为主的煤样

渗透率随有效应力的变化特征。

5 结 论

本文在外部应力不变、降低进口气体压力和外部应力、进气口压力同步降低2种实验条件下观测了煤样应变,计算了煤样的渗透率,得到以下主要研究结论:

(1) 在出口口维持大气压力的条件下,随着进口气体压力的降低,煤样两端气体压力梯度减小,单位时间内渗透过煤样截面的气体流量减小,气体渗透速度随之降低,即气体流量与气体压力梯度成正比。

(2) 随着有效应力的升高,煤样的收缩变形增大。当有效应力为5.2~6.5 MPa,体积应变与有效应力保持线性关系;当有效应力大于6.5 MPa或小于5.2 MPa时,应力-应变曲线出现弯折,部分煤样应变陡增或出现扩容现象。

(3) 在进口气体压力的降低过程中,不论有效应力是增加或者降低,煤样渗透率均增大,这表明渗透率并非随着有效应力的变化呈现一致性的变化,即随着有效应力的增大,渗透率并非呈现一致性降低或升高的趋势。可见研究煤样渗透率随有效应力的变化特征必须合理考虑气体滑脱效应的影响。

参考文献(References):

- [1] PAN Z, CONNELL L D. Modelling permeability for coal reservoir: A review of analytical models and testing data[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 92(1): 1 - 44.
- [2] HUY P Q, SASAKI K, SUGAI Y, et al. Carbon dioxide gas permeability of coal core samples and estimation of fracture aperture width[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 83(1): 1 - 10.
- [3] SHI J Q, DURUCAN S, SHIMADA S. How gas adsorption and swelling affects permeability of coal: a new modelling approach for analyzing laboratory test data[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 128(3): 134 - 142.
- [4] 梁冰, 王泳嘉. 瓦斯对煤的力学性质及力学响应影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 12 - 18.(LIANG Bing, WANG Yongjia. The experimental research on the effect of gas on mechanical properties and mechanical response of coal[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 12 - 18.(in Chinese))
- [5] 尹光志, 李小双, 赵洪宝, 等. 瓦斯压力对突出煤瓦斯渗流影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 697 - 702.(YIN Guangzhi, LI Xiaoshuang, ZHAO Hongbao, et al. Experimental study of effect of gas pressure on gas seepage of outburst coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 697 - 702. (in Chinese))
- [6] 王刚, 程卫民, 郭恒, 等. 瓦斯压力变化过程中煤体渗透率特性的研究[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 China University of Mining and Technology, 2012, 29(5): 735 - 740.(in Chinese))
- [7] 赵阳升, 胡耀青, 杨栋. 三维应力下吸附作用对煤岩体气体渗流规律影响的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 651 - 653.(ZHAO Yangsheng, HU Yaoqing, YANG Dong. The experimental study on the gas seepage law of rock related to adsorption under 3D stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 651 - 653.(in Chinese))
- [8] 曹树刚, 李勇, 郭平, 等. 瓦斯压力对原煤渗透特性的影响[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 595 - 599.(CAO Shugang, LI Yong, GUO Ping, et al. Effect of gas pressure on gas seepage of outburst coal[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 595 - 599.(in Chinese))
- [9] 林柏泉, 周世宁. 煤样瓦斯渗透率的实验研究[J]. 中国矿业学院学报, 1987, 1: 21 - 28.(LIN Baiquan, ZHOU Shining. Experimental investigation on the permeability of the coal samples containing methane[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1987, 1: 21 - 28.(in Chinese))
- [10] 王登科, 魏建平, 付启超, 等. 基于Klinkenberg效应影响的煤体瓦斯渗流规律及其渗透率计算方法[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 2 029 - 2 036.(WANG Dengke, WEI Jianping, FU Qichao, et al. Coalbed gas seepage law and permeability calculation method based on Klinkenberg effect[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 2 029 - 2 036.(in Chinese))
- [11] 许江, 张敏, 彭守建, 等. 不同温度条件下气体压力升降过程中瓦斯运移规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1 579 - 1 587.(XU Jiang, ZHANG Min, PENG Shoujian, et al. Experimental study of migration laws of gas during loading-unloading process at different temperatures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1 579 - 1 587. (in Chinese))
- [12] HARPALANI S, CHEN G. Influence of gas production induced volumetric strain on permeability of coal[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1997, 15(4): 303 - 325.
- [13] 傅雪海, 李大华, 秦勇, 等. 煤基质收缩对渗透率影响的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2): 129 - 132.(FU Xuehai, LI Dahua, QIN Yong, et al. Experimental study on gas slippage effects in hypotonic coal reservoir[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2002, 31(2): 129 - 132.(in Chinese))
- [14] 汪吉林, 秦勇, 傅雪海. 多因素叠加作用下煤储层渗透率的动态变化规律[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1 348 - 1 353.(WANG Jilin, QIN Yong, FU Xuehai. Dynamic changes laws of the coal reservoirs permeability under the superimposition of multi influential factors[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1 348 - 1 353.(in Chinese))
- [15] 李俊乾, 刘大锰, 姚艳斌, 等. 气体滑脱及有效应力对煤岩气相渗透率的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(5): 1 074 - 1 078.(LI Junqian, LIU Dameng, YAO Yanbin, et al. Controls of gas slippage and effective stress on the gas permeability of coal[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 1 074 - 1 078.(in Chinese))
- [16] SHI Q, DURUCAN S. Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: a new interpretation of the reservoir response to primary recovery[J]. Transport in Porous Media, 2004, 56(1): 1 - 16.
- [17] GENSTERBLUM Y, GHANIZADEH A, KROOSS B M. Gas permeability measurements on Australian subbituminous coals: fluid dynamic and poroelastic aspects[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 19(7): 202 - 214.