

结构性煤体渗透率特性

岳高伟,王辉,赵宇,梁为民

河南理工大学土木工程学院,焦作 454000

摘要 煤渗透率是研究瓦斯渗流特性及运移规律的关键参数,而煤体结构各向异性导致渗透率具有明显的方向性。利用煤岩瓦斯渗流试验系统,对不同变质程度煤样试件在面割理和端割理方向上,进行不同瓦斯压力下的渗透率测试,并根据等效驱替原理,建立各向异性煤体渗透率的计算模型,数值分析了煤体渗流的定向性特征。结果表明:在煤体面割理和端割理方向,渗透率均随瓦斯压力增大成负指数减小;面割理方向的瓦斯渗透率与端割理方向相差可超过1个量级,且煤的变质程度越高,差别越明显。随瓦斯压力增大,煤的瓦斯渗流定向性系数峰值增大,煤层瓦斯渗透定向性增强。在相同瓦斯压力下,煤的变质程度越低,煤层瓦斯渗透定向性越弱。

关键词 渗透率;煤层;结构性;定向性系数

中图分类号 TD712

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.12.008

Permeability characteristics of structurally anisotropic coal

YUE Gaowei, WANG Hui, ZHAO Yu, LIANG Weimin

School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

Abstract The coal permeability is a key parameter for the gas seepage characteristics and the migration law, and the structural anisotropy of the coal seam makes the permeability obvious orientation dependent. In this paper the gas permeability of raw coal specimens is measured in directions of face cleats and butt cleats under different gas pressures by a coal and rock permeability testing system. According to the equivalent displacement principle, the calculation model for the permeability of anisotropic coal is established and the directional characteristics of gas seepage are numerically simulated. It is shown that the structural anisotropy of coal has a great influence on the gas permeability of coal, the permeability in the direction of face cleats is larger than that in the direction of butt cleats, and the difference of coal permeability in the two directions reaches one order of the magnitude, and the more degraded the coal is, the greater the difference is. With the increase of the coal rank, the permeability decreases both in the directions of raw coal face cleats and butt cleats. With the increase of the gas pressure, the permeability decreases exponentially and the directionality coefficient peak increases and the directionality of gas seepage in the coal seam enhances. And under the same gas pressure, the lower the coal rank is, the weaker the directionality of gas seepage will be. This study provides some insight for optimizing the design and the layout of the gas drainage borehole in the coal seam, improving the gas drainage effect and achieving optimal extraction.

Keywords permeability; coal seam; structural anisotropy; directionality coefficient

渗透率是反映煤层瓦斯渗流的物性参数,它不仅是瓦斯抽采难易程度的关键参数,也是研究煤与瓦斯突出、煤层气开采、煤炭地下气化等重大工程中经常用到的重要参数^[1,2]。

针对煤渗透率已有大量理论和实验研究,成果主要集中在应力、温度、吸附膨胀、孔隙裂隙等因素对渗透率的影响规

律^[2-7]。但是,在漫长的地质年代,由于煤储层沉积过程中具有取向性,导致不同方向的渗透率不同,即储层存在各向异性,尤其在层理方向和节理方向上更为明显^[8-10]。在油气田开发过程中开发方式的选择与设计,就充分利用了储层渗透率各向异性的特点,对提高采收率提供了重要的物性资料^[11-13]。

收稿日期:2015-01-16;修回日期:2015-04-17

基金项目:河南省科技攻关计划项目(142102310268);河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室-省部共建国家重点实验室开放课题(WS2013A08);中国博士后科学基金项目(2013M531673)

作者简介:岳高伟,副教授,研究方向为矿业安全与防治,电子信箱:mxlygw@163.com

引用格式:岳高伟,王辉,赵宇,等.结构性煤体渗透率特性[J].科技导报,2015,33(12):50-55.

近年来,随着对煤层瓦斯抽采力度的加大,煤层瓦斯渗透率各向异性的问题也逐渐引起学者的重视。Koenig等^[14]对美国Warrior盆地煤层的渗透率测试表明,不同层理方向渗透率比达17:1;Wang等^[15]和Li^[16]等在不同层理、节理条件下进行了渗透实验,指出层理、节理构造对渗透和变形均有重要影响。傅雪海等^[17]基于煤割理压缩实验,建立了应力与割理宽度之间的数学模型,可对深部煤储层渗透率进行预测。潘荣银等^[18]和刘星光^[19]采集了具有层理构造的大块煤样,制取了平行层理的原煤试样,深入研究不同加、卸载条件下层理裂隙煤体的变形和渗透演化特性。黄学满^[9]对煤样试件平行层理和垂直层理方向上的渗透率测定表明,2个方向上的渗透率大小相差约1个数量级,并建立了煤样瓦斯渗流的串联和并联阻流模型。

已有研究仅考虑了层理或割理方向上渗透特性,而与煤层成一定角度位置的煤体渗透率却未见报道。本研究在不同瓦斯压力下,对不同变质程度煤的面割理和端割理方向渗透率进行实验。

1 煤体各向异性渗透率测试

1.1 煤样制备

实验煤样取自潘北气肥煤(QF)、新元贫煤(P)和焦作九里山无烟煤(WY)的原煤块,煤体中存在正交的天然裂隙,而连续性较弱的端割理的发育受限于连续性较强的面割理,如图1所示。

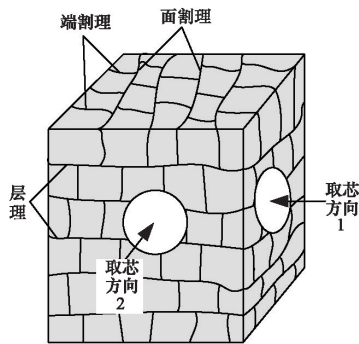


图1 煤结构示意

Fig. 1 Physical representation of coal structure

本实验取样利用KD-2新型岩芯钻取机,分别按图1中的2个方向取芯:取芯方向1为垂直于面割理方向(测试端割理方向渗透率),取芯方向2为垂直于端割理方向(测试面割理方向渗透率)。取芯后用切割机将上下端面打磨光滑、平行,煤样试件 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,如图2(试件1、4为WY;试件2、5为P;3、6为QF)。试验气体采用纯度为99.99%的甲烷。

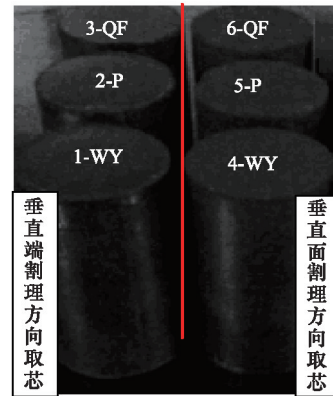


图2 煤样试件

Fig. 2 Raw coal specimens

1.2 试验装置

试验采用河南理工大学瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室受载煤岩瓦斯渗流试验系统,该试验系统主要由煤样夹持器、应力加载系统、充气系统、真空脱气系统、温度控制系统及数据采集系统组成,试验系统如图3所示,主要性能参数如表1所示。

表1 试验系统性能参数

Table 1 Performance parameters of test system

参数	测试范围	精度
围压/MPa	0~30	± 0.1
瓦斯压力/MPa	0~10	± 0.01
轴向压力/MPa	0~70	± 0.1
流量/($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	0~700	± 2.0
温度/ $^{\circ}\text{C}$	25~100	± 0.1

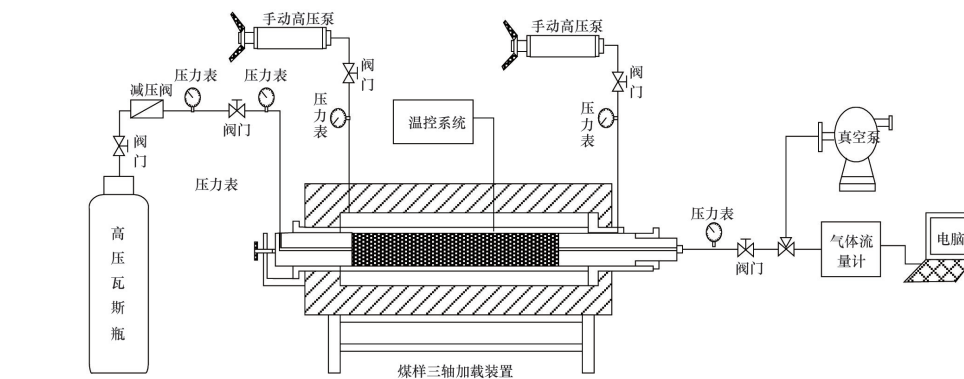


图3 实验系统示意

Fig. 3 Schematic diagram of test system

1.3 试验方法

- 1) 将制备好的煤样装入煤样夹持器中,进行密封处理。
- 2) 真空脱气 12 h 以上,排除杂质气体对试验造成的误差。
- 3) 调节恒温装置,使试验过程处于 30℃ 恒温环境。
- 4) 采用应力加载系统中的手动高压泵,对煤样加载至设定围压。
- 5) 对煤样通入瓦斯气体,待吸附压力 2 h 之内变化小于 0.01 MPa,即认为气体达到吸附平衡。
- 6) 打开煤样气体出口端,直至气体渗流达到稳定状态,测定瓦斯渗透量。
- 7) 更换其他煤样,重复以上步骤,完成所有煤样试验。

1.4 测试结果及分析

试验采用达西稳定流方法测定煤样的渗透率,分别测定煤样在不同吸附瓦斯压力条件下稳态时的气体流量,根据气体通过煤样的流量和煤样进出口两端的渗透压力差等参数计算煤样的平均渗透率 k ,表达式^[9,20]为

$$k = \frac{2\mu p_0 Q L}{S(p_1^2 - p_2^2)} \quad (1)$$

式中, Q 为标准状况下的气体渗流量, cm^3/s ; p_0 为一个标准大气压, Pa ; μ 为瓦斯气体动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; L 为煤样试件长度, cm ; p_1 、 p_2 分别为煤样渗透气体进、出口压力, Pa ; S 为煤样试件横截面积, cm^2 。

根据不同煤样取样位置埋深及上覆岩层状况,对不同试验煤样设置不同的围压。潘北气肥煤样埋深约 490 m,上覆岩层主要为灰岩、泥岩、黏土岩等,平均密度取 $2.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,考虑地质构造原因,测压系数取 0.8,因而设置试验围压为 8 MPa;新元贫煤样埋深约 420 m,上覆岩层主要为泥岩、砂质泥岩、砂岩等,平均密度取 $2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,考虑地质构造原因,测压系数取 0.83,因而设置试验围压为 7.5 MPa;九里山无烟煤样埋深约 360 m,上覆岩层主要为沙岩、泥岩、灰岩等,平均密度取 $2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,考虑地质构造原因,测压系数取 1.12,因而设置试验围压为 9.5 MPa。在不同瓦斯压力下测试煤样的渗透率,结果如表 2 所示。

绘制试验煤样面割理/端割理方向渗透率随瓦斯压力变化曲线,如图 4 所示。可以看出,不同变质程度煤样面割理和端割理方向渗透率均不相同,无论是面割理还是端割理方向,渗透率均随瓦斯压力增大而减小,可采用指数形式拟合:

$$k = a + be^{-cp} \quad (2)$$

式中, a 、 b 、 c 为拟合参数; p 为瓦斯压力,MPa。拟合相关系数均达到 0.95 以上,拟合参数如表 3 所示。

从图 4 还可看出,不同变质程度煤样面割理方向瓦斯渗透率明显大于端割理方向,主要是因为面割理方向裂隙发育连续性较强,而端割理方向裂隙发育连续性较弱,进而影响了瓦斯渗流。若面割理、端割理方向渗透率用 k_x 和 k_y 表示,则不同瓦斯压力下面割理、端割理方向渗透率之比 k_x/k_y 如图 5 所示。

表 2 不同煤样渗透率试验结果

Table 2 Permeability test results of different coals

煤样	围压/ MPa	面割理方向		端割理方向	
		瓦斯压力/ MPa	渗透率/ $10^{-4} \mu\text{m}^2$	瓦斯压力/ MPa	渗透率/ $10^{-4} \mu\text{m}^2$
潘北 气肥 煤	8	0.48365	1.45248	0.51187	0.33876
	8	1.00090	1.07820	0.99418	0.22584
	8	1.43753	0.92248	1.50067	0.18304
	8	2.01254	0.86056	2.00045	0.14752
新元 贫煤	8	2.44245	0.81776	2.54590	0.14024
	7.5	0.51724	1.19932	0.49440	0.23768
	7.5	0.97671	1.00808	0.95387	0.17120
	7.5	1.42006	0.84052	1.50067	0.13660
九里 山无 烟煤	7.5	1.98298	0.78224	2.19525	0.11292
	7.5	2.43708	0.75492	2.69637	0.09744
	9	0.55755	1.02356	0.48365	0.18304
	9	1.00090	0.85236	0.94850	0.10928
烟煤	9	1.39722	0.63836	1.48858	0.06648
	9	1.98836	0.56824	2.18988	0.03460
	9	2.44245	0.52180	2.67891	0.03096

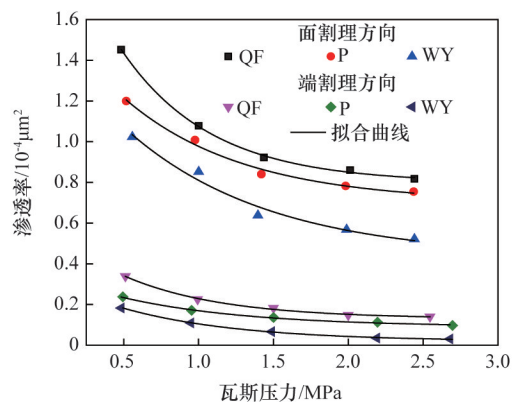


图 4 不同变质程度煤渗透率变化规律

Fig. 4 Permeability of different metamorphic grade coal

表 3 煤层渗透率拟合参数

Table 3 Fitting parameters of permeability

煤质	割理方向	a	b	c	R ²
QF	面割理	0.798	1.467	1.669	0.995
	端割理	0.130	0.454	1.530	0.993
P	面割理	0.701	0.959	1.246	0.982
	端割理	0.090	0.260	1.184	0.993
WY	面割理	0.430	1.083	1.045	0.957
	端割理	0.020	0.308	1.285	0.997

由图5可知,煤层面割理方向渗透率是端割理方向的5倍以上,且随着瓦斯压力增大,渗透率比值增大,其中变质程度最高的无烟煤面割理、端割理方向渗透率比值变化尤为明显,在瓦斯压力超过1.5 MPa时,其比值可达10倍以上。

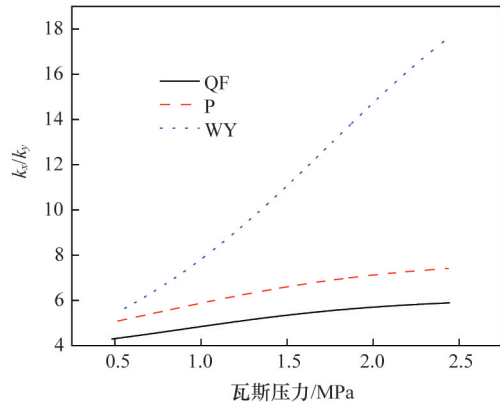


图5 面割理/端割理方向渗透率比值

Fig. 5 Permeability ratio in parallel and vertical beddings

2 各向异性煤体渗透率计算模型

2.1 等效驱替原理

煤层面割理和端割理是近似正交的天然裂隙,由此煤体是正交各向异性,即直角坐标系的 x 轴和 y 轴与最大、最小渗透率方向一致。在此, x 、 y 轴分别指煤体面割理方向和端割理方向,如图6。在模型中,煤层瓦斯在面割理和端割理方向上的渗透率分别为 k_x 和 k_y ; ∇p_n 为 n 方向上的瓦斯驱动压力梯度; A 为与 ∇p_n 垂直的渗流截面面积; ∇p_n 对煤层中瓦斯的驱替作用可等效为在 x 方向上分量 ∇p_{nx} 和 y 方向上分量 ∇p_{ny} 的共同驱替,该原理称为等效驱替原理^[13,21]。

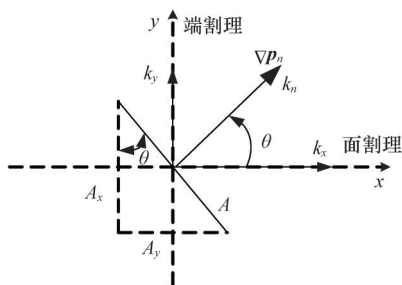


图6 各向异性煤体渗透率计算模型示意

Fig. 6 Permeability calculation model of anisotropic coal

若在 ∇p_{nx} 作用下瓦斯沿 x 方向通过截面 A 的流量为 q_x ,在 ∇p_{ny} 作用下瓦斯沿 y 方向通过截面 A 的流量为 q_y ,则根据等效驱替原理可知,在 ∇p_n 的作用下通过渗流截面 A 的流量 q_n ,应等于 q_x 和 q_y 之和,即

$$q_n = q_x + q_y \quad (3)$$

2.2 渗透率计算模型

如图6所示,若 n 方向上煤体渗透率为 k_n , n 方向上瓦斯渗流速度为 v_n ,则根据Darcy定律^[21]可得:

$$v_n = -\frac{k_n}{\mu} \nabla p_n \quad (4)$$

式中, μ 为瓦斯黏度。

则通过渗流截面 A 的流量为

$$q_n = v_n A = -A \frac{k_n}{\mu} \nabla p_n \quad (5)$$

若 A_x 表示渗流截面 A 在 x 方向上的有效渗流面积(即与 x 方向垂直的渗流面积), A_y 表示渗流截面 A 在 y 方向上的有效渗流面积(即与 y 方向垂直的渗流面积),用 θ 表示 n 方向与 x 方向的角度,则

$$\begin{cases} A_x = A \cos \theta \\ A_y = A \sin \theta \end{cases} \quad (6)$$

∇p_n 在 x 、 y 方向上的分量 ∇p_{nx} 和 ∇p_{ny} 可表示为

$$\begin{cases} \nabla p_{nx} = \nabla p_n \cos \theta \\ \nabla p_{ny} = \nabla p_n \sin \theta \end{cases} \quad (7)$$

在 ∇p_{nx} 和 ∇p_{ny} 作用下沿 x 、 y 方向通过截面 A 的渗流速度分别为

$$\begin{cases} v_x = -\frac{k_x}{\mu} \nabla p_{nx} \\ v_y = -\frac{k_y}{\mu} \nabla p_{ny} \end{cases} \quad (8)$$

则在 ∇p_{nx} 和 ∇p_{ny} 作用下,沿 x 、 y 方向通过截面 A 的流量分别为

$$\begin{cases} q_x = v_x A_x \\ q_y = v_y A_y \end{cases} \quad (9)$$

将式(6)~(8)代入式(9),可得:

$$\begin{cases} q_x = -A \frac{k_x}{\mu} \nabla p_n \cos^2 \theta \\ q_y = -A \frac{k_y}{\mu} \nabla p_n \sin^2 \theta \end{cases} \quad (10)$$

将式(5)、式(10)代入式(3),整理得:

$$k_n = k_x \cos^2 \theta + k_y \sin^2 \theta \quad (11)$$

式(11)即为各向异性煤体渗透率的计算模型。在煤层中,已知沿煤层面割理和端割理方向的渗透率(即 k_x 和 k_y),即可采用式(11)计算出平面内任意方向所对应的煤体渗透率。

3 煤体各向异性渗透率计算与分析

以水平煤层(0°)为例,对不同 θ 角方向的煤体渗透率进行计算分析,结果如图7所示。图7可以直观地反映煤体不同方向渗透率的分布规律,随瓦斯压力增大,不同变质程度煤体渗透率均减小,且渗透率在端割理方向最小,而后向面割理方向逐渐增大,在面割理方向($\theta=0^\circ$)达到最大,此时瓦斯在煤层中主要沿面割理方向流动。

煤层瓦斯渗透存在定向性,在此采用煤层瓦斯渗流定向性系数 r ,用于表征渗透特性的方向性。 r 越大,表明渗透方向性越强,瓦斯在煤体中渗流定向性越明显^[23]。

$$r = k_n / k_{\min} \quad (12)$$

式中, k_n 为 n 方向渗透率(n 方向与 x 方向所成角度为 θ), k_{\min} 为渗透率最小值(在研究中为端割理方向渗透率)。

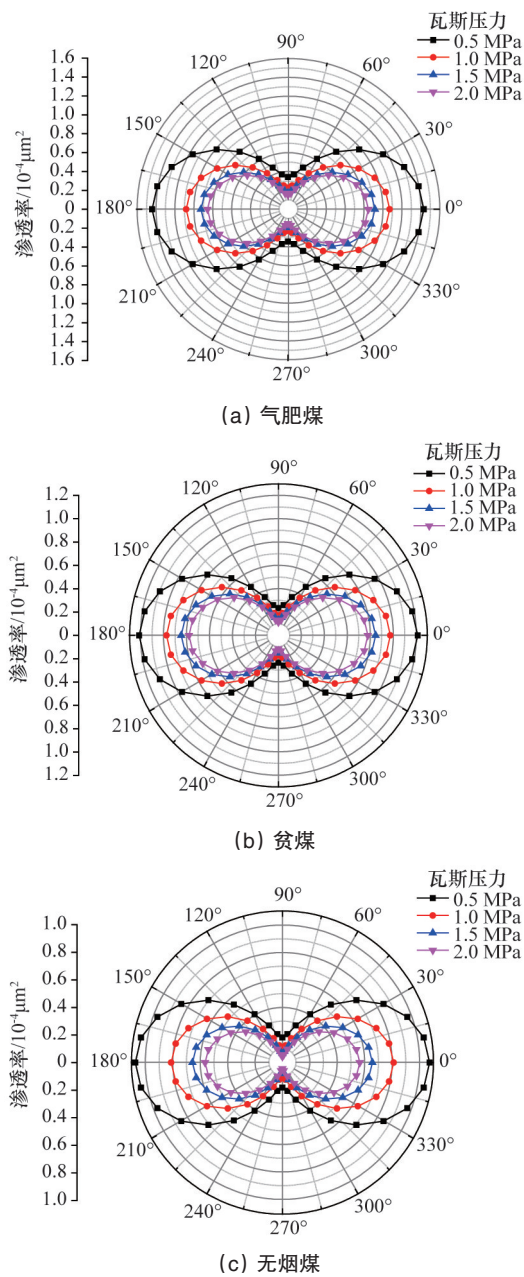


图7 煤体不同方向角的渗透率

Fig. 7 Coal permeability in different direction angles

图8分析了不同变质程度煤层瓦斯渗流定向性系数随不同方向角 θ 的关系。根据分析结果,当 $\theta=0^\circ$, r 最大,此时渗透定向性特征最强,主渗透方向水平分布;随着方向角 θ 增加,定向性系数 r 减小至极小值($\theta=90^\circ$),而后在 $\theta=180^\circ$ 时又增大至极大值,此后以上述规律变化。

此外,不同瓦斯压力下,煤的瓦斯渗流定向性系数也不同,且随着瓦斯压力增大,定向性系数峰值增大,表明煤层瓦斯渗透定向性增强,如图8所示。而且不同变质程度煤的瓦斯渗流定向性系数峰值也不同,在相同瓦斯压力下,无烟煤中的定向性系数峰值最大,其次是贫煤,气肥煤最小,表明煤的变质程度越低,煤层瓦斯渗透定向性越弱。

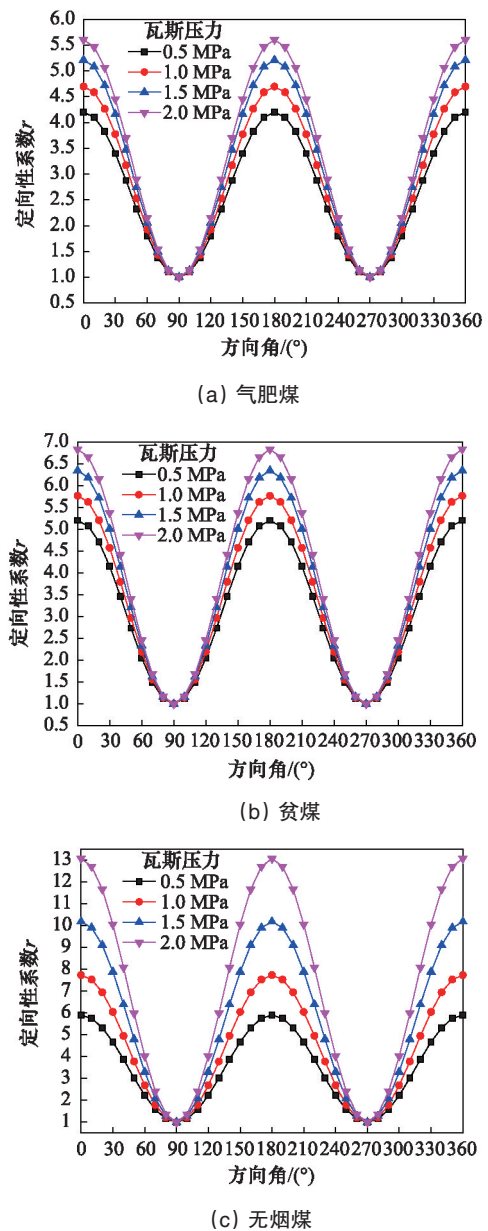


图8 不同方向角瓦斯渗透定向性系数变化规律

Fig. 8 Directionality coefficient of gas permeation at different direction angles

4 结论

基于煤体结构各向异性的特点,利用煤岩瓦斯渗流试验系统,在不同瓦斯压力下,对不同变质程度煤样试件在面割理和端割理方向上进行渗透率测试,同时,根据等效驱替原理,建立各向异性煤体渗透率的计算模型,数值计算分析煤体渗流的定向性特征。研究表明:

- 1) 在煤体面割理和端割理方向,渗透率均随瓦斯压力增大而减小,可采用指数形式拟合。
- 2) 不同变质程度煤样面割理方向的瓦斯渗透率是端割理方向的数倍以上,且煤的变质程度越高,差别越明显。
- 3) 煤体渗透率在端割理方向最小,而后向面割理方向逐

渐增大,在面割理方向达到最大,瓦斯在煤层中主要沿面割理方向流动。

4) 在水平煤层,瓦斯渗流定向性系数在面割理方向时最大,渗透定向性特征最强。随瓦斯压力增大,煤的瓦斯渗流定向性系数峰值增大,煤层瓦斯渗透定向性增强。

5) 在相同瓦斯压力下,无烟煤中的定向性系数峰值最大,其次是贫煤,气肥煤的最小,表明煤的变质程度越低,煤层瓦斯渗透定向性越弱。

此研究将为煤层瓦斯抽采钻孔的设计和布置提供参考,对提高抽采效果和实现抽采最大化具有重要意义。

参考文献(References)

- [1] 李波,魏建平,王凯,等. 煤层瓦斯渗流非线性运动规律实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增1): 3219-3224.
Li Bo, Wei Jianping, Wang Kai, et al. Experimental study of nonlinear motion law for gas seepage in coal seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Suppl 1): 3219-3224.
- [2] 傅雪海,李大华,秦勇,等. 煤基质收缩对渗透率影响的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2): 129-131.
Fu Xuehai, Li Dahua, Qin Yong, et al. Experimental research of influence of coal matrix shrinkage on permeability[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(2): 129-131.
- [3] Wang Jianguo, Liu Jishan, Kabir Akim. Combined effects of directional compaction, non-Darcy flow and anisotropic swelling on coal seam gas extraction[J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 109-110: 1-14.
- [4] 胡雄,梁为,侯△靖,等. 温度与应力对原煤、型煤渗透特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1222-1229.
Hu Xiong, Liang Wei, Hou Sijing, et al. Experimental study of effect of temperature and stress on permeability characteristics of raw coal and shaped coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1222-1229.
- [5] George J D, Barakat M A. The change in effective stress associated with shrinkage from gas desorption in coal[J]. International Journal of Coal Geology, 2001, 45(2): 105-113.
- [6] Yin Guangzhi, Jiang Changbao, Wang Jianguo, et al. Combined effect of stress, pore pressure and temperature on methane permeability in anthracite coal an experimental study[J]. Transport in Porous Media, 2013, 11(1): 1-16.
- [7] 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): 735-749.
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): 735-749.
- [8] Laubach S E, Marrett R A, Olson J E, et al. Characteristics and origins of coal cleat: A review[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35: 175-207.
- [9] 黄学满. 煤结构异性对瓦斯渗透特性影响的实验研究[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(2): 1-3.
Huang Xueman. Experimental study on influence of structural anisotropy of coal upon gas permeability[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2012, 39(2): 1-3.
- [10] Wang Kai, Zang Jie, Wang Gongda, et al. Anisotropic permeability evolution of coal with effective stress variation and gas sorption: Model development and analysis[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 130(15): 53-65.
- [11] Bagheri M, Settari A. Methods for modeling full tensor permeability in reservoir simulators[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2007, 46(3): 31-38.
- [12] 孙东生,李阿伟,王红才,等. 低渗砂岩储层渗透率各向异性规律的实验研究[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(3): 1101-1106.
Sun Dongsheng, Li Awei, Wang Hongcai, et al. Experimental on anisotropy of permeability with tight sandstone[J]. Progress in Geophys, 2012, 27(3): 1101-1106.
- [13] 王端平,周涌沂,马泮光,等. 方向性岩石渗透率的矢量特性与计算模型[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1294-1297.
Wang Duanping, Zhou Yongyi, Ma Panguang, et al. Vector properties and calculation model for directional rock permeability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1294-1297.
- [14] Koenig P A, Stubbs P B. Interference testing of a coal-bed methane reservoir[C]. SPE Unconventional Gas Technology Symposium, Louisville, Kentucky, May 18-21, 1986.
- [15] Wang Shugang, Elsworth Derek, Liu Jishan. Permeability evolution in fractured coal: The roles of fracture geometry and water-content[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 87(1): 13-25.
- [16] Li Huoyin, Shimada Sohei, Zhang Ming. Anisotropy of gas permeability associated with cleat pattern in a coal seam of the Kushiro coalfield in Japan[J]. Environmental Geology, 2004, 47(1): 45-50.
- [17] 傅雪海,秦勇,姜波,等. 煤割理压缩实验及渗透率数值模拟[J]. 煤炭学报, 2001, 26(6): 573-577.
Fu Xuehai, Qin Yong, Jiang Bo, et al. Compress experiment of coal cleat and mathematical simulation of coal reservoir permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(6): 573-577.
- [18] 潘荣昆,程远平,董骏,等. 不同加卸载下层理裂隙煤体的渗透特性研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 473-477.
Pan Rongkun, Cheng Yuanping, Dong Jun, et al. Research on permeability characteristics of layered natural coal under different loading and unloading[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 473-477.
- [19] 刘星光. 含瓦斯煤变形破坏特征及渗透行为研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
Liu Xingguang. Study on the deformation and failure characteristics and the permeation behavior of gas-saturated coal[J]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2013.
- [20] 魏建平,李明助,王登科,等. 煤样渗透率围压敏感性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 76-80.
Wei Jianping, Li Mingzhu, Wang Dengke, et al. Experimental research on sensibility of coal samples permeability under confining pressure [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 76-80.
- [21] Barna A S. Permeability of orthotropic porous mediums[J]. Water Resources Research, 1968, 4(4): 801-808.
- [22] Danilo Bandiziol, Gerard Massonnat, Elf Aquitaine. Horizontal permeability anisotropy characterization by pressure transient testing and geological data (SPE 24667) [M]. Texas, USA: SPE Technical Publications, 1992.
- [23] 王培涛,杨天鸿,于庆磊,等. 基于离散裂隙网络模型的节理岩体渗透张量及特性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(增2): 448-455.
Wang Peitao, Yang Tianhong, Yu Qinglei, et al. Permeability tensor and seepage properties for jointed rock masses based on discrete fracture network model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Suppl 2): 448-455.

(编辑 陈华姣)