

煤基质甲烷扩散系数测试及其影响因素分析

赵俊龙^{1,2} 汤达祯^{1,2}, 许浩^{1,2} 李松^{1,2} 陶树^{1,2} 翟雨阳³ 梁为³ 林文姬³ 霍祥盛³

(1. 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083; 2. 煤层气开发利用国家工程中心煤储层实验室,北京 100083;
3. 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司,北京 100095)

摘要:为准确测试煤岩甲烷扩散系数,通过采用片状煤基质作为检测样品,测试并分析了不同气体压力、煤阶与水分对甲烷扩散系数的影响。结果表明:片状样品保持了煤基质特有的空间结构,煤基质甲烷扩散系数(数量级 $10^{-11} \sim 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)更符合实际;当温度一定时,无论是干燥样品、饱和水样品,还是低、中、高煤阶样品,煤基质甲烷扩散系数均随气体压力的增加而增大;而不同变质程度煤的吸附能力不同,随着煤的变质程度增加,煤岩吸附能力增强,但是煤基质的扩散系数随着变质程度增加呈现先降低后增加的趋势;水分的增加降低了基质对甲烷的吸附能力,难以形成较大浓度梯度,导致饱和水样品煤岩基质甲烷扩散系数比干燥样品低,干燥样品扩散速率快。

关键词:煤基质; 扩散系数; 气体压力; 煤阶; 水分; 甲烷

中图分类号: P618.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)10-0077-06

Measurement of methane diffusion coefficient and analysis of its influencing factors in coal matrix

Zhao Junlong^{1,2}, Tang Dazhen^{1,2}, Xu Hao^{1,2}, Li Song^{1,2}, Tao Shu^{1,2},
Zhai Yuyang³, Liang Wei³, Lin Wenji³, Huo Xiangsheng³

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Coal Reservoir Laboratory of National Engineering Research Center of Coalbed Methane Development & Utilization, Beijing 100083, China;
3. China United Coalbed Methane National Engineering Research Center Co., Ltd., Beijing 100095, China)

Abstract: In order to measure the methane diffusion coefficient accurately in the coal matrix, the coal matrix flakes were used as the samples to be measured, and the influencing factors (such as gas pressure, coal rank and moisture content) of the methane diffusion coefficients were also analyzed. Results showed that due to the preservation of the intrinsic space structure of the coal matrix within the flake samples, the methane diffusion coefficient was on the order of $10^{-11} \sim 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, which were more truthful. Under the identical temperature, the methane diffusion coefficient increases with increasing gas pressure regardless of the water saturation and coal rank. The adsorption capacity increases when the metamorphic degree of coal increases, while the methane diffusion coefficient in coal matrixes exhibit has a trend of first dropping and then rising with an increase in coal rank. Moreover, the increasing moisture can reduce the matrix adsorption capacity for methane, which makes it difficult to form a larger concentration gradient because the diffusion coefficients of dry samples are higher than those of the saturated water samples and the diffusion rates of dry samples are also fast.

Key words: coal matrix; diffusion coefficient; gas pressure; coal rank; moisture; methane

0 引 言

随着煤层气勘探开发的不断深入,煤储层甲烷

扩散作用日益受到重视^[1-5]。扩散是指物质分子从高浓度区向低浓度区运移直到均匀分布的现象,对于煤储层来说,煤吸附甲烷的整个动力学过程就是

收稿日期:2016-07-28;责任编辑:曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.10.015

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05042-002);国家自然科学基金资助项目(41530314,41272175)

作者简介:赵俊龙(1989—),男,河北张家口人,博士研究生。Tel:13426331715,E-mail:zhao739264823@126.com

引用格式:赵俊龙,汤达祯,许浩等.煤基质甲烷扩散系数测试及其影响因素分析[J].煤炭科学技术,2016,44(10):77-82,145.

Zhao Junlong, Tang Dazhen, Xu Hao et al. Measurement of methane diffusion coefficient and analysis of its influencing factors in coal matrix [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(10): 77-82, 145.

煤层气渗透-扩散-吸附的综合过程^[6]。当前,煤储层甲烷扩散能力广泛使用扩散系数衡量^[7],扩散系数的测定方法主要包括颗粒法、稳态法和逆扩散法^[8-12]。然而,这些方法均具有一定程度的不足^[12],如颗粒法将煤样粉碎进行测试,破坏了煤基质特有的空间结构,容易造成颗粒堆积,重新形成粒间孔隙,误差较大;稳态法选用圆柱状无缝无大孔煤样在微小压差下进行扩散系数测试,虽然避免了颗粒堆积,但是对煤样要求苛刻(无裂隙),且测试时间长,对环境温度敏感,试验仪器精度要求高等特点限制了该方法的广泛应用,同时压差的存在,难以保证试验过程只发生扩散而不发生渗流;逆扩散法类似于稳态法,虽能保证整个试验过程只出现扩散现象,但仅能在低压下进行,无法测试煤样在高压环境下的扩散系数。此外,不同方法测试原理和测试条件的差异造成这些技术彼此之间亦缺乏对比性^[13]。因此,针对以往测试方法的不足,本次研究采用片状样品,系统测试并分析了不同压力、含水饱和度和变质程度对煤基质甲烷扩散系数的控制作用,以期为深入认识煤层气扩散效应提供有效的技术手段与方法支持。

1 试验与方法

1.1 样品制备与试验装置

试验所用的煤岩样品采自具有不同变质程度的3个煤矿区,分别为低煤阶海拉尔盆地伊敏矿区、中煤阶鄂尔多斯盆地韩城矿区和高煤阶沁水盆地晋城矿区。在测量煤岩基质扩散系数之前,先从各个煤块上磨制出长宽厚约为20 mm×15 mm×3 mm的片状煤样;然后,通过排水法测算出样品体积,利用游标卡尺测量出样品厚度;再将煤样置于110℃恒温箱中烘干,待样品完全干燥后即可进行基质扩散系数的测试。为了对比干燥和润湿条件下煤岩样品扩散系数的差异,当干燥煤样基质扩散系数测试完毕后,再对样品进行蒸馏水饱和,进而测量饱和水条件下的基质扩散系数。

煤岩基质扩散系数测试装置如图1所示,包括煤基质、支架、密封扩散室、恒温装置、恒压装置、气源(甲烷)、计算装置、抽真空装置。利用该装置测试扩散系数的过程为:

1) 先将用铁丝网包裹的煤样悬于图1中的密封扩散室内部,保证煤基质的所有表面与密封扩散室内的煤层气充分接触,然后抽真空40 min,使煤样

充分脱气。

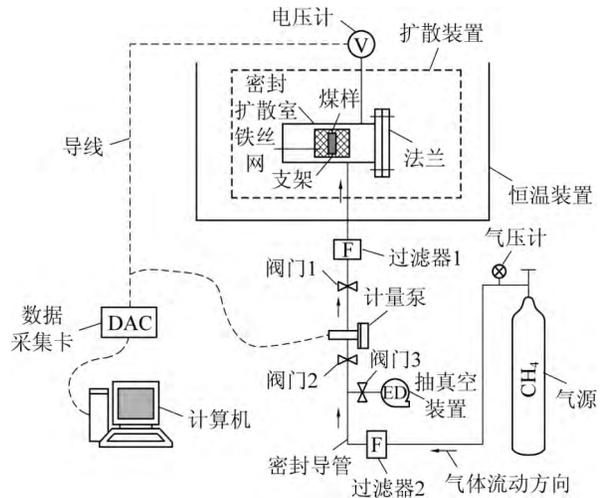


图1 扩散试验装置示意

Fig. 1 Schematic illustration of diffusion experimental setup

2) 再将扩散装置放入恒温装置(水浴池)中,将水浴升温至指定温度(本次实验所测试温度为40℃),使密封扩散室内的温度保持为额定温度。

3) 用恒压装置(计量泵)向扩散室内注入一定压力(本次试验设定压力为1~6 MPa,压力间隔1 MPa)的甲烷,关闭阀门,通过压力传感器(内置压敏元件,可实现压力-电流转换)连续检测并记录扩散室内压力随时间的变化,记录间隔时间为1 s,直至煤吸附饱和,压力不再变化。测试压降之前,如果密封扩散室气压低于额定气压,则通过密封导管向密封扩散室内注入煤层气,使密封扩散室内的煤层气气压达到额定气压。然而,扩散室内气体压力变化极为微小,因此,该压力传感器将测试密封扩散室气体压力的变化转化为测试由于气体压力的变化所导致的电流变化,这样,测试精度明显较直接测试吸附量的变化更高。

4) 利用计算装置(数据采集卡和计算机)根据额定温度、额定气压以及各时刻注入到密封扩散室中的煤层气的量,由平板扩散模型计算煤层气在煤基质中的扩散系数。

该方法能够利用与地下煤层完全相同的块状煤基质作为检测样品,保持了煤基质特有的空间结构,同时,抽真空也使试验能在无其他气体干扰的条件下进行,从而使煤层气的吸附与扩散更为充分,扩散系数的检测结果与煤层气在地下煤层真实块状煤基质中的扩散系数更加接近,这种测试方法进一步提高了测试精度,表1为试验样品基本信息。

表1 煤样镜质组反射率、工业分析、显微组分、等温吸附测试结果

Table 1 Results of vitrinite reflectance, proximate analysis, coal composition and isothermal adsorption test

样品号	煤层	$R_{o, \max}/\%$	样品尺寸		工业分析			显微组分/%				等温吸附	
			体积/ cm^3	厚度/ mm	水分/%	灰分/%	挥发分/%	镜质组	惰质组	壳质组	矿物质	兰氏体积/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	兰氏压力/ MPa
WMC	2	0.42	0.946 2	3.54	12.35	19.02	51.27	76.71	4.74	1.75	16.80	3.51	3.87
SJ	3	1.85	1.092 1	3.82	0.61	11.18	11.63	77.44	11.26	0	11.30	22.94	2.20
XS	5	1.79	0.647 0	2.40	0.87	9.81	11.34	78.57	14.63	0	6.80	21.30	2.08
YC	11	1.90	1.352 2	3.53	0.43	12.54	10.38	83.68	11.52	0	4.80	24.05	2.24
NG	11	1.68	1.105 7	3.34	0.52	17.63	9.99	80.88	13.31	0	5.80	25.95	2.20
TA	3	3.20	1.361 2	3.58	0.13	12.43	9.68	70.61	23.50	0	5.89	43.57	3.75

注:等温吸附试验样品为粉样。

1.2 计算模型

为了量化气体在煤中的扩散,单孔模型和双孔模型被相继提出^[14-15]。但是单孔模型仅适用于一些亮煤的扩散^[16],双孔模型基于等温吸附曲线为直线这一假设并不符合煤岩等温吸附实际^[10]。因此,针对上述模型的不足,本次研究采用片状样品进行实验,通过平板扩散定律进行求解过程。

将厚度为 L 的含有孔隙的平行薄煤基质块置于容积一定的充满甲烷的密闭扩散室,则气体在薄煤块中的等温扩散满足 Fick 第二定律^[17]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: c 为气体浓度; x, t 分别为空间和时间坐标; D 为扩散系数。

初始时刻,扩散室真空, $x=0$ 处为煤样表面,煤样没有吸附气体,则方程(1)的初始条件为

$$c(x, 0) = 0 \quad (0 < x < L) \quad (2)$$

当煤样的表面与扩散室内处于平衡状态(气体从煤表面进入扩散室的速率等于其由扩散室进入煤样的速率),则方程(1)的边界条件

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial t} = 0 & (x = \frac{1}{2}L, t > 0) \\ \frac{aL}{2} \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial c}{\partial x} & (x = 0, t > 0) \\ a = \frac{V_g}{\alpha AL} \end{cases} \quad (3)$$

式中: a 为气体体积与样品体积之比; V_g 为容器中气体总体积; A 为片状煤样最大的面积,且样品体积 $V_{sa} = AL$; α 为配分系数,通常取 1。

联立方程(1)和方程(3),即在初始条件(2)和边界条件(3)下,方程的解为

$$1 - \frac{q_t}{q_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2a(1+a)}{1+a+a^2q_n^2} \exp\left(-\frac{4q_n^2Dt}{L^2}\right) \quad (4)$$

其中: q_t 为 t 时刻煤对气体的吸附量; q_∞ 为煤的饱和吸附量; q_n 为方程 $\tan q + aq = 0$ 的连续非零正根。

对于气体来说,有

$$1 - \frac{q_t}{q_\infty} = \frac{p - p_\infty}{p_2 - p_\infty} \quad (5)$$

式中: p 为 t 时刻气体压力; p_2 为初始气体压力; p_∞ 为煤饱和时的气体压力。

将方程(5)代入方程(4)得

$$\frac{p - p_\infty}{p_2 - p_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2a(1+a)}{1+a+a^2q_n^2} \exp\left(-\frac{4q_n^2Dt}{L^2}\right) \approx \frac{2a(1+a)}{1+a+a^2q_1^2} \exp\left(-\frac{4q_1^2Dt}{L^2}\right) \quad (6)$$

式中 q_1 为方程 $\tan q + aq = 0$ 首个非零正根。

对方程(6)两边取自然对数,则

$$\ln(p - p_\infty) = \ln\left[\frac{2a(1+a)}{1+a+a^2q_1^2}(p_2 - p_\infty)\right] - \frac{4q_1^2Dt}{L^2} \quad (7)$$

可见,对 $\ln(p - p_\infty)$ 和 t 进行线性拟合,根据斜率 k 就可计算甲烷在煤中的扩散系数 D 。

$$D = -\frac{kL^2}{4q_1^2} \quad (8)$$

将本次研究根据上述计算过程利用 Mathmatic5.0 软件编程,输入煤样厚度 L 、体积 V_{sa} 及注入的气体总体积 V_g ,通过计算机便可以在试验结束后直接获得样品的扩散系数。然而,由于该试验是在设定温度下向容器中注入一定体积的气体,在煤样未达到吸附饱和前,扩散系数是随着累计吸附量变化而变化的。因此,为了描述整个吸附过程的扩散效应,需要对整个吸附过程进行拟合,获得平均扩散系数。NG 湿润样品在注入压力 5 MPa 时压差(对数)-时间曲线如图 2 所示,40 °C 时,6 个煤矿 11 个样品的扩散系数结果见表 2。

表 2 40 °C 时不同压力下的甲烷扩散系数测试结果

Table 2 Results of methane diffusion coefficients at 40 °C under different gas injection pressures

注入压力/ MPa	扩散系数/(10 ⁻¹⁰ m ² ·s ⁻¹)											
	WMC		SJ		XS		NG		YC		TA	
	干燥	湿润	干燥	湿润	干燥	湿润	干燥	湿润	干燥	湿润	干燥	湿润
1	2.04	—	2.07	1.24	1.12	0.95	1.02	0.82	1.45	0.55	2.79	1.86
2	3.35	—	2.45	1.85	1.83	1.15	2.29	1.09	1.86	1.07	5.16	3.12
3	5.11	—	3.09	2.11	2.58	1.99	3.85	1.85	2.09	1.57	6.99	3.96
4	5.81	—	3.96	2.85	3.86	2.37	4.80	2.58	2.80	2.42	9.07	6.17
5	6.92	—	4.80	3.46	6.47	2.98	6.48	3.26	3.56	3.57	11.90	7.29
6	9.32	—	5.27	4.32	7.93	3.97	7.63	3.63	4.86	3.83	15.50	9.17

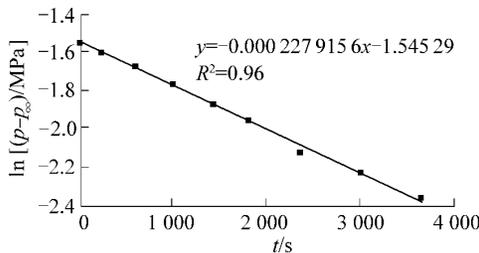


图 2 NG 湿润煤样在注入压力 5 MPa 下的扩散压降曲线($D = 3.26 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)

Fig. 2 Differential pressure-time curve of NG wet sample under injection pressure of 5 MPa ($D = 3.26 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)

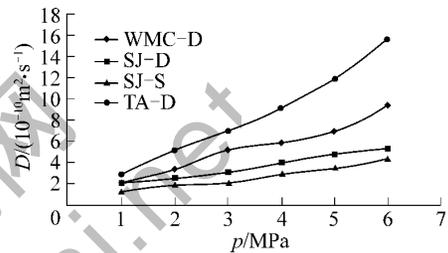


图 3 不同压力条件下的煤基质扩散系数

Fig. 3 Diffusion coefficients in matrix at different gas pressures

2 结果与讨论

2.1 气体压力对扩散系数的影响

压力是影响煤层气在煤中吸附/解吸及扩散能力的重要因素,一般而言,当温度一定时,煤对甲烷的吸附能力随着压力的升高而增大,当压力升到一定值时,煤的吸附能力达到饱和^[18]。4 个典型样品在不同注入压力下的煤基质扩散系数曲线如图 3 所示,可以看到,样品不同,甲烷的扩散系数不同,甲烷在煤岩样品中扩散系数的数量级为 $10^{-11} \sim 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。对于同一样品,随着气体压力从 1 MPa 增加到 6 MPa,无论是干燥样品(WMC-D、SJ-D、TA-D, D 代表干燥)、饱和水样品(SJ-S, S 代表湿润),还是低(WMC-D)、中(SJ-D)、高(TA-D)变质煤样,都显现出一致的规律,即煤基质的甲烷扩散系数随着压力的增加而增大(图 3)。

事实上,甲烷在不同压力下扩散的快慢取决于甲烷在煤岩中的扩散机理(扩散模式)。依据甲烷分子平均自由程和煤基质微小孔径大小,扩散模式可以分为 Fick 型扩散、Knudsen 型扩散、过渡型扩

散^[19]。如果气体分子的平均自由程 λ 符合麦克斯韦尔分布,那么其表达式为

$$\lambda = \frac{KT}{\sqrt{2} \pi d^2 p_\infty} \quad (9)$$

其中: K 为玻尔兹曼常量,取 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 为试验温度, K ; d 为气体分子的有效直径, μm 。

通过方程(9)可以计算得到甲烷分子在 40 °C (313 K) 时各个平衡压力下的气体平均自由程及不同扩散类型所对应的孔径范围(表 3)。

以平衡压力 1 MPa 为例,当孔隙直径大于 67.3 nm 时,扩散类型以 Fick 型扩散为主,当孔隙直径小于 0.67 nm 时,以 Knudsen 型扩散为主。然而, CH_4 分子(有效分子直径为 0.33 nm)与煤表面发生作用的有效距离约 0.55 nm(对应孔径应大于 1.1 nm),吸附势阱距离约 0.36 nm,也就是说,在 0.33 ~ 1.10 nm 的孔径范围内,甲烷分子由于受到煤表面的作用,不能自由运动,以吸附相存在,这时的扩散类型主要以表面扩散为主,而试验条件下 Knudsen 型扩散的孔径范围均低于 0.7 nm。可见,试验条件下的扩散类型以 Fick 型扩散和过渡型扩散为主。

表 3 40 °C 时甲烷气体分子在不同压力下的平均自由程及不同扩散类型对应的孔径范围
Table 3 Mean free paths and corresponding pore size ranges of different diffusion types in coal matrix under different equilibrium pressures at 40 °C

平衡压力/MPa	自由程 λ/mm	不同扩散类型的孔径范围/nm		
		Fick 型扩散 ($d \geq 10\lambda$)	过渡型扩散 ($10\lambda > d > 0.1\lambda$)	Kundsen 型扩散 ($d \leq 0.1\lambda$)
1	6.73	≥ 67.3	0.67~67.3	≤ 0.67
2	3.37	≥ 33.7	0.34~33.7	≤ 0.34
3	2.24	≥ 22.4	0.22~22.4	≤ 0.22
4	1.68	≥ 16.8	0.17~16.8	≤ 0.17
5	1.35	≥ 13.5	0.14~13.5	≤ 0.13
6	1.12	≥ 11.2	0.11~11.2	≤ 0.11

2.2 煤阶对煤基质扩散系数的影响

煤阶对于甲烷在煤储层中扩散系数的影响主要与不同煤阶煤岩孔隙结构差异引发的煤岩吸附能力差异有关^[20]。表 1 表明,随着煤的变质程度增加,煤岩吸附能力增强,高煤阶晋城样品兰氏体积最大,低煤阶伊敏样品最小。

甲烷扩散系数与煤阶之间呈现“U”形关系如图 4 所示,即扩散系数随着煤阶的增大先降低后升高的变化趋势,高煤阶晋城煤样的甲烷扩散系数最大,低煤阶的伊敏煤样次之,而中煤阶的韩城煤样的甲烷扩散系数最低且相近。结合 Gürdal^[21]对土耳其

Zonguldak 盆地 40 种不同煤阶的煤样进行孔隙结构表征结果(证实煤样微孔比表面与煤阶之间也呈现出“U”形规律,其中,煤的镜质组反射率为 1.0%~1.1% 范围内的煤样的比表面积最小)可以推断,高煤阶煤岩样品微孔含量最高,比表面积最大,孔隙结构最为复杂,相比于中、低煤阶样品来说,吸附能力更强,所以高煤阶煤岩在同等温度、压力条件下,扩散系数最大;而低煤阶样品之所以扩散系数高于中煤阶样品,主要由于低煤阶样品煤岩演化过程中,煤岩受压程度较低,天然裂缝网络较中煤阶样品更为发育导致^[22]。

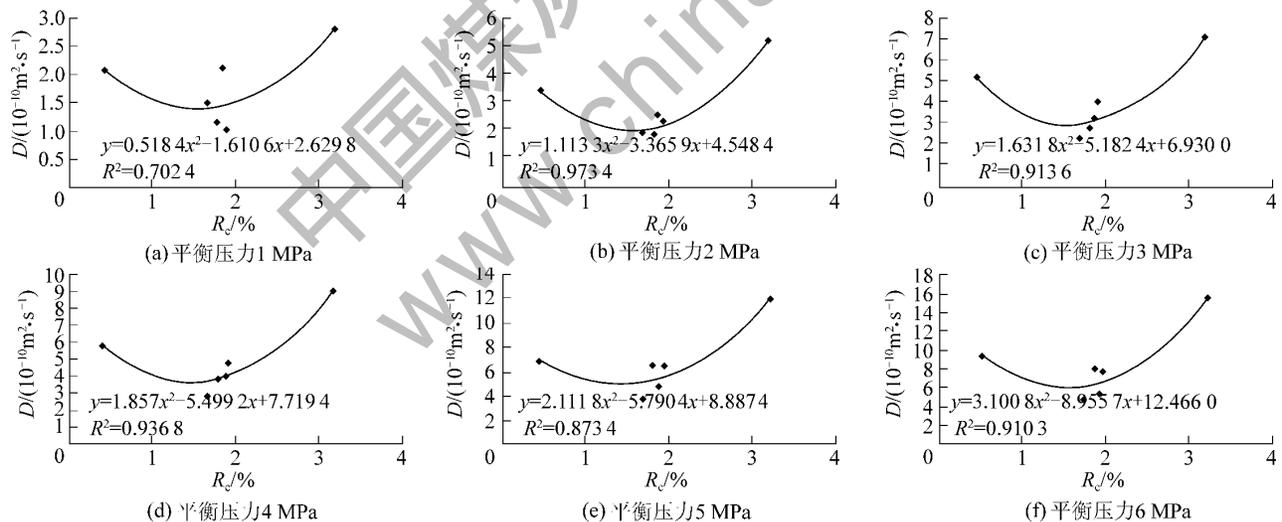


图 4 不同压力下各变质程度的煤与煤基质扩散系数关系

Fig. 4 Diffusion coefficients in matrix of different rank coals under different pressures

2.3 水分对扩散系数的影响

水分子进入煤岩孔隙后,不仅可以占据一定的孔体积,降低孔隙比表面积,致使甲烷吸附量减少(图 5),同时,赋存于煤的微孔隙内的甲烷,在较高毛细管压力束缚下,解吸性能也会明显降低^[23]。同等压力条件下,由于外在水分对煤的吸附扩散作用的影响,饱和水的煤基质扩散系数明显比干燥样品

低。这是因为,煤表面的极性官能团具有表面活性,对水的润湿性较好,而煤基质水分增加,煤岩发生膨胀^[10],基质对甲烷分子的吸附作用力明显减小,甲烷分子难以被吸附,不易形成较大浓度梯度,因而润湿样品的甲烷扩散系数小,扩散速率慢,干燥样品甲烷扩散系数大,扩散速度快。

此外,低煤阶伊敏样品由于黏土矿物(伊利石、

蒙脱石等)含量较高(16.8%),遇水发生膨胀,破坏了样品,所以无法制成水饱和条件下的煤岩样品,无法对比其润湿与干燥条件下的扩散系数大小。然

而,从上述中煤阶及高煤阶样品扩散系数对比结果可以推断,水饱和条件下的低煤阶样品的扩散系数同样会低于干燥条件下样品的扩散系数。

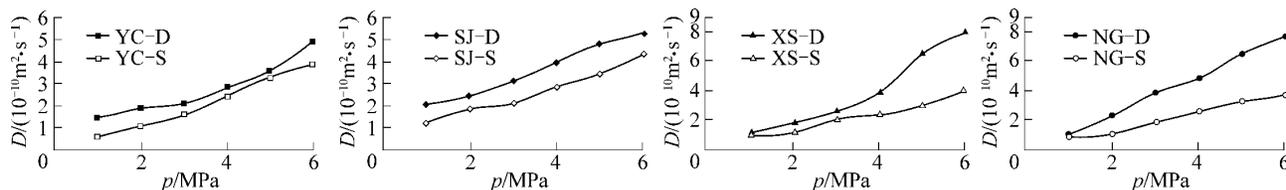


图5 饱和水和干燥煤样的煤基质扩散系数

Fig. 5 Diffusion coefficients in matrix of dry and water saturated coals

3 结 论

1) 通过片状煤基质作为检测用的样品,保持了煤基质特有的空间结构,同时,试验在安全、无干扰的条件下进行,使煤层气的吸附与扩散更为充分,结果更加接近煤层气在地下煤层真实块状煤基质中的扩散系数。

2) 甲烷在煤基质中的扩散系数数量级为 $10^{-11} \sim 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。当温度一定时,试验压力从 1 MPa 增加到 6 MPa,无论是干燥样品、饱和水样品,还是低、中、高煤阶样品,煤基质的甲烷扩散系数均随着压力的增加而增大。

3) 不同变质程度煤的吸附能力不同,达到饱和吸附需要的压力也不同;随着煤的变质程度增加,煤岩吸附能力增强,但是煤基质的扩散系数随着变质程度增加而先降低后增加。

4) 润湿的煤基质对甲烷分子的吸附能力较干燥样品低,难以形成较大浓度梯度,因而饱和水样品煤岩基质甲烷扩散系数比干燥样品低,扩散速率慢。

参考文献(References):

[1] 李长宝,黄瑞峰.煤屑瓦斯扩散理论研究与展望[J].中州煤炭,2016(6):22-25,29.
Li Changbao,Huang Ruifeng.Research and prospect of gas diffusion theory of cinder [J].Zhongzhou Coal 2016(6):22-25,29.

[2] Shi J Q,Durucan S.A bidisperse pore diffusion model for methane displacement desorption in coal by CO_2 injection [J].Fuel,2003,82(10):1219-1229.

[3] 陈同刚,汤达祯,许浩,等.煤储层基质扩散系数研究:以韩城地区为例[C]//2012全国煤层气学术研讨会论文集.北京:石油工业出版社,2012:126-130.

[4] 马东民,曹石榴,李萍,等.页岩气与煤层气吸附/解吸热力学特征对比[J].煤炭科学技术,2015,43(2):64-67.
Ma Dongmin,Cao Shiliu,Li Ping,et al.Comparison on adsorption and desorption thermodynamics features between shale gas and

coalbed methane [J].Coal Science and Technology,2015,43(2):64-67.

- [5] 李朝辉,钟川.瓦斯灾害防治基本参数测定实验室建设方案[J].华北科技学院学报,2013,10(1):72-76.
Li Zhaohui,Zhong Chuan.The laboratory construction scheme for the determination of basic parameters of gas disaster prevention and control [J].Journal of North China Institute of Science and Technology,2013,10(1):72-76.
- [6] Staib G,Sakurovs R,Gray E M A.A pressure and concentration dependence of CO_2 diffusion in two Australian bituminous coals [J].International Journal of Mining Science and Technology,2013(9):106-116.
- [7] 张小东,刘炎昊,桑树勋,等.高煤阶煤储层条件下的气体扩散机制[J].中国矿业大学学报,2011,40(1):43-48.
Zhang Xiaodong,Liu Yanhao,Sang Shuxun,et al.Study of the gas diffusion mechanism in high-rank coal reservoirs [J].Journal of China University of Mining & Technology,2011,40(1):43-48.
- [8] Kumar A J.Methane diffusion characteristics of Illinois coals [D].Carbondale:Southern Illinois University,2007:1-84.
- [9] Chhajed P.Diffusion characterization of coal for enhanced coalbed methane production [D].Carbondale:Southern Illinois University,2008:1-87.
- [10] Pan Z J,Connell L D,Camilleri M,et al.Effects of matrix moisture on gas diffusion and flow in coal [J].Fuel,2010,89(11):3207-3217.
- [11] Li Y B,Xue S,Wang J F,et al.Gas diffusion in a cylindrical coal sample: a general solution,approximation and error analysis [J].International Journal of Mining Science and Technology,2014(1):69-73.
- [12] Xu H,Tang D Z,Zhao J L,et al.A new laboratory method for accurate measurement of the methane diffusion coefficient and its influencing factors in the coal matrix [J].Fuel,2015,158(10):239-247.
- [13] Karaiskakis G,Gavril D.Determination of diffusion coefficients by gas chromatography [J].Journal of Chromatography A,2004,1037(5):147-189.
- [14] Crank J.The mathematics of diffusion [M].The 2nd edition.London:Oxford University Press,1975:1-415.

(下转第145页)

- Science and Technology 2015 43(S1): 57-58.
- [6] 张伟杰, 赵启峰, 王玉怀. 悬臂式掘进机机载式多功能支护作业平台设计[J]. 煤炭工程 2013(9): 122-125.
Zhang Weijie, Zhao Qifeng, Wang Yuhuai. Design on attached type multi function construction platform of boom type roadheader [J]. Coal Engineering 2013(9): 122-125.
- [7] 陈加胜, 张强, 邓海顺. 掘进巷道临时支护装备的现状与发展趋势[J]. 煤矿机械 2014 35(5): 4-7.
Chen Jiasheng, Zhang Qiang, Deng Haishun. Present situation and development trend of roadway temporary support equipment [J]. Coal Mine Machinery 2014 35(5): 4-7.
- [8] 王士伟, 王宇, 赵成雷. 掘进机机载临时支护机的设计与研究[J]. 煤矿机械 2011 32(6): 52-53.
Wang Shiwei, Wang Yu, Zhao Chenglei. Design and study of roadheader-mounted provisional shoring machine [J]. Coal Mine Machinery 2011 32(6): 52-53.
- [9] 胡学军, 王树忠, 王继林. 巷道快速掘进机前配套改造设计及分析[J]. 煤矿机械 2012 33(9): 187-188.
Hu Xuejun, Wang Shuzhong, Wang Jilin. Design and analysis rapid excavation machine for roadway [J]. Coal Mine Machinery 2012, 33(9): 187-188.
- [10] 孙军. 井下巷道快速支护装备作业平台设计与分析[D]. 淮南: 安徽理工大学 2014.
- [11] 王鹏, 权钰云. 掘进机与机载锚杆钻机共泵液压系统设计[J]. 煤矿机械 2011 32(4): 140-141.
Wang Peng, Quan Yuyun. Roadheader and bolting machine on roadheader to pump hydraulic system design [J]. Coal Mine Machinery 2011 32(4): 140-141.
- [12] 胡建华, 王峥, 李健. 基于 ANSYS 的掘进机行走部关键部件有限元分析[J]. 煤矿机械 2014 35(8): 93-94.
Hu Jianhua, Wang Zheng, Li Jian. Finite element analysis on important component of roadheader crawler based on ANSYS [J]. Coal Mine Machinery 2014 35(8): 93-94.
- [13] 丁勇, 李绍泉, 秦震东, 等. 松河矿煤巷快速掘进技术研究[J]. 中国煤炭 2011 37(12): 101-103.
Ding Yong, Li Shaoquan, Qin Zhendong et al. Research on rapid driving technology of coal roadway in Songhe Coal Mine [J]. China Coal 2011 37(12): 101-103.
- [14] 陈勇, 孔凤阁, 胡晓东. 机载临时支护机在深井大断面硬岩巷道的应用[J]. 煤矿机械 2014 35(10): 204-206.
Chen Yong, Kong Fengge, Hu Xiaodong. Application of roadheader-mounted temporary supporting machine in large section roadway with hard rock in deep mine [J]. Coal Mine Machinery, 2014 35(10): 204-206.
- [15] Ruckenstein E, Vaidyanathan A S, Youngquist G R. Sorption by solids with bidisperse pore structures [J]. Chemical Engineering Science 1971 26(9): 1305-1318.
- [16] Clarkson C R, Bustin R M. The effect of pore structure and gas pressure upon the transport properties of coal: a laboratory and modeling study: adsorption rate modeling [J]. Fuel, 1999, 78(11): 1345-1362.
- [17] Rong Z M, Vadgama P. Simple expressions for diffusion coefficient determination of adsorption within spherical and cylindrical absorbents using direct simulation method [J]. Journal of Colloid and Interface Science 2006 303(1): 75-79.
- [18] Smith D M, Williams F L. Diffusional effects in the recovery of methane from coalbeds [J]. SPE Journal, 1984, 24(5): 529-535.
- [19] 聂百胜, 何学秋, 王恩元. 瓦斯气体在煤层中的扩散机理及模式[J]. 中国安全科学学报 2000, 10(6): 24-28.
Nie Baisheng, He Xueqiu, Wang Enyuan. Mechanism and modes of gas diffusion in coal seams [J]. China Safety Science Journal, 2000, 10(6): 24-28.
- [20] Gan H, Nandi S P, Walker Jr P L. Nature of the porosity in American coals [J]. Fuel, 1972 51(4): 272-277.
- [21] Gürdal G, Namik Y M. Pore volume and surface area of the Carboniferous coals from the Zonguldak basin (NW Turkey) and their variations with rank and maceral composition [J]. International Journal of Coal Geology 2001 48(12): 133-144.
- [22] 张登峰, 崔永君, 李松庚, 等. 甲烷及二氧化碳在不同煤阶煤内部的吸附扩散行为[J]. 煤炭学报 2011 36(10): 1693-1698.
Zhang Dengfeng, Cui Yongjun, Li Songgeng et al. Adsorption and diffusion behaviors of methane and carbon dioxide on various rank coals [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1693-1698.
- [23] 张时音, 桑树勋. 不同煤阶煤层气吸附扩散系数分析[J]. 中国煤炭地质 2009 21(3): 24-27.
Zhang Shiyin, Sang Shuxun. Adsorption-diffusion coefficient analysis of coalbed methane in different rank coals [J]. Coal Geology of China 2009 21(3): 24-27.

(上接第 82 页)