

李成武,薛洪来,刘文彪. 承压煤体瓦斯解吸-扩散特性实验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 717-723. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1260

LI Chengwu, XUE Honglai, LIU Wenbiao. Experimental study on gas diffusion in coal under stress[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 717-723. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1260

承压煤体瓦斯解吸-扩散特性实验研究

李成武,薛洪来,刘文彪

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083)

摘要:为了研究承压条件下含瓦斯煤的解吸-扩散特性,建立了受载煤体瓦斯扩散系数的动态演化模型,并采用单孔模型和双孔模型计算了粒度0.25~0.5,0.5~1和1~2 mm煤样在0~12 MPa轴向压力条件下的瓦斯扩散系数。实验结果表明:双孔模型计算结果与实验数据相关性系数均稳定在99.5%以上,拟合效果优于单孔模型,其中,宏观有效扩散系数在 10^{-4} s^{-1} 数量级上,高出微观有效扩散系数1~2个数量级;瓦斯解吸量、宏观/微观有效扩散系数随轴压升高呈先下降后波动上升的趋势,与受载煤体扩散动态理论模型相符;煤样粒度越大,宏观/微观有效扩散系数对应力越敏感,并且宏观有效扩散系数对应力的敏感性高于微观有效扩散系数;瓦斯解吸量、宏观/微观有效扩散系数随煤样粒度减小而增大。研究结果能为井下构造煤瓦斯扩散规律提供借鉴。

关键词:颗粒煤;应力;瓦斯;解吸;扩散

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2018)03-0717-07

Experimental study on gas diffusion in coal under stress

LI Chengwu, XUE Honglai, LIU Wenbiao

(School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the gas diffusion in coal underground, the gas desorbing process was recorded when coal particles within 0.25-0.5, 0.5-1 and 1-2 mm were applied to axial stresses of 0-12 MPa, respectively. Then, the experimental data was fitted for the diffusion coefficient using the unipore model and the bidisperse model. According to the relationship between the diffusion coefficient and the porosity, the dynamic evolution model of the gas diffusion coefficient was established, which is in accordance with the experimental results. Results show that the bidisperse model can match the experimental data more perfectly than the unipore model. The diffusion coefficients of macro-pores were on the order of 10^{-4} s^{-1} , which were 1-2 order higher than that of micro-pores. Both the desorbed gas and diffusion coefficients increased with the increasing stresses. The desorbed gas and diffusion coefficients increased with the decreasing size of coal particle. Coal samples with larger size were more sensitive to the stress, and the macro-pores showed more sensitive to stresses than the micro-pores. This study would provide some reference to understand gas diffusion in deformed coal underground.

Key words: coal particle; stress; gas; desorption; diffusion

在煤层中,吸附态瓦斯占90%以上,主要以扩散的形式通过孔隙系统进入裂隙空间。采掘作业过程

中,上覆岩层载荷转移至工作面前方形形成应力集中,压缩、破碎煤体,造成孔隙、裂隙系统重新分布,影响

收稿日期:2017-09-13 修回日期:2017-11-27 责任编辑:常明然

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274206);国家自然科学基金青年基金资助项目(51404277)

作者简介:李成武(1969—),男,黑龙江延寿人,研究员。E-mail: fslcw@163.com

通讯作者:薛洪来(1988—),男,河南杞县人,博士研究生。E-mail: xhl_0228@163.com

煤层瓦斯的解吸、扩散。如果采动应力导致煤体瓦斯解吸、扩散速度增大,不仅会增加煤与瓦斯突出的危险性,大量瓦斯涌入工作面还会造成瓦斯超限、甚至瓦斯爆炸。

目前,根据煤矿井下实际物理环境,大量研究主要集中于探讨温度^[1]、水分^[2]、煤质^[3]、瓦斯压力^[4]、破坏类型^[5]等因素对瓦斯解吸-扩散的影响。应力对煤体解吸-扩散特性影响的研究相对较少。何满潮等^[6]研究了单轴压缩破坏过程中原煤解吸-扩散特性,发现煤样初始破坏时,由于内部孔隙、裂隙空间扩大出现瓦斯回流,施加围压后瓦斯大量溢出。唐巨鹏等^[7]研究了三维应力条件下加、卸载过程中瓦斯解吸-扩散规律,发现加载时解吸量大于卸载时解吸量。王登科等^[8]对原煤施加轴压,发现峰值强度之前,瓦斯解吸量与轴压负相关,在峰值强度之后,瓦斯解吸量与轴压正相关。贾彦楠等^[9]实验发现受载原煤瓦斯解吸量与应力之间呈现“V”型关系,最低点出现在试样屈服变形阶段。上述研究对象均为原煤煤样,然而,煤与瓦斯突出多发生在煤体破碎严重的地质构造区域^[10],因此,研究颗粒煤受载条件下的瓦斯解吸-扩散特性,将有助于理解承压条件下构造煤的致突机理。

本文根据孔隙度动态演化规律建立了受载煤体瓦斯扩散动态演化模型,对3种粒度煤样施加不同轴向应力,测试瓦斯解吸过程,最后分析、讨论了应力对颗粒煤瓦斯解吸-扩散的影响机理。

1 受载煤体扩散系数模型

1.1 孔隙动态演化模型

施加轴向载荷后,煤体产生弹、塑性变形以及损伤破裂,导致外观体积、孔隙体积以及骨架体积发生收缩或膨胀。假设煤体骨架体积、外观体积变化量分别为 $\Delta V_m, \Delta V_{ap}$ (mm^3),则加载后煤体孔隙度^[11]为

$$\varphi = 1 - (1 - \varphi_0) \frac{1 + \Delta V_m/V_{m0}}{1 + \Delta V_{ap}/V_{apo}} \quad (1)$$

式中, φ_0 为初始状态煤体孔隙度, mm^3/mm^3 ; V_{m0} 为初始状态煤体骨架体积, mm^3 ; V_{apo} 为初始状态煤体外观体积, mm^3 。

对于颗粒煤而言,煤样孔隙体积包括煤粒之间空隙(粒间孔)和煤粒内部的孔隙(粒内孔)。施加轴向载荷的过程中,松散状态的煤颗粒首先发生相互错动,粒间孔逐渐被填充、压实,煤样外观体积变化量为 ΔV_{aps} (mm^3);随着继续加载,压实的煤颗粒相互挤压,发生弹、塑性变形以及裂纹的扩展,煤样外观体积变化量为 ΔV_{apm} (mm^3)。因此,外观体积变化量为两

部分之和,即

$$\Delta V_{ap} = \Delta V_{aps} + \Delta V_{apm} \quad (2)$$

联立式(1)和(2),得

$$\varphi = 1 - \frac{1 - \varphi_0}{1 + \varepsilon_{aps}^V + \varepsilon_{apm}^V} (1 + \varepsilon_m^V) \quad (3)$$

式中, $\varepsilon_{aps}^V, \varepsilon_{apm}^V$ 分别为煤颗粒相互错动、煤体骨架变形导致的煤样外观体积应变; ε_m^V 为瓦斯、温度造成的煤体骨架体积应变(体积膨胀取正,体积压缩取负)。

煤体骨架体积应变包括3部分:①温度变化引起的热膨胀变形;②孔隙压力变化引起的压缩变形;③瓦斯吸附量变化引起的膨胀变形。假设煤体骨架服从弹性变形,则体积应变 ε_m^V 为^[12]

$$\varepsilon_m^V = K_T \Delta T - \frac{3(1 - 2\mu)\Delta p}{E} + \varepsilon_{a\&d}^V \quad (4)$$

式中, K_T 为热膨胀系数; ΔT 为绝对温度变化量, $\Delta T = T_1 - T_0$,其中 T_1 为煤体实际温度,K; T_0 为初始状态煤体温度,K; Δp 为孔隙压力变化量, $\Delta p = p_1 - p_0$, p_1 为实际孔隙压力,Pa; p_0 为初始状态孔隙压力,Pa; E 为弹性模量,Pa; μ 为泊松比; $\varepsilon_{a\&d}^V$ 为吸附量变化引起的煤体骨架体积应变。

瓦斯吸附过程中,煤体骨架产生膨胀变形,在吸附平衡时达到最大。当瓦斯解吸时,吸附量不断降低,煤体骨架产生连续收缩变形。因此,解吸过程中,煤体体积应变为吸附膨胀体积应变^[13]与解吸收缩体积应变^[14]的差值,即

$$\varepsilon_{a\&d}^V = \frac{2apRT(1 - 2\mu)\ln(1 + bp_b)}{VE} - \frac{cdt}{1 + dt} \quad (5)$$

式中, a, b 为煤的Langmuir吸附平衡常数; ρ 为煤的视密度, t/m^3 ; p_b 为吸附平衡瓦斯压力,Pa; R 为通用气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为吸附平衡时绝对温度,K; V 为摩尔容积, $V = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$; c, d 为拟合系数,且 $c, d > 0$; t 为解吸时间,s。

将式(4)和(5)代入式(3),得到受载煤体解吸-扩散过程中的孔隙动态演化模型

$$\varphi = 1 - \frac{1 - \varphi_0}{1 + \varepsilon_{aps}^V + \varepsilon_{apm}^V} \left\{ 1 + K_T \Delta T + \frac{3(1 - 2\mu)(p - p_a)}{E} + \left[\frac{2apRT(1 - 2\mu)\ln(1 + bp_b)}{VE} - \frac{cdt}{1 + dt} \right] \right\} \quad (6)$$

1.2 扩散系数动态演化模型

在多孔介质中,气体依靠气体分子之间的相互碰撞、气体分子与介质壁面的碰撞两种方式进行扩散。气体分子运动路径受到孔隙通道约束,因而,孔隙通道直径越小、曲折度越高,则气体分子平均速率和平

均自由程减小,扩散系数下降。研究表明,在多孔介质中,气体扩散系数与介质孔隙度存在如下关系^[15]:

$$D = D_0 \varphi^i \quad (7)$$

式中, D 为气体在多孔介质中的扩散系数, mm^2/s ; D_0 为气体在自由空间中的扩散系数, mm^2/s ; i 为多孔介质复杂性因子, $i > 1$ 。

煤体受到轴向载荷时,内部孔隙尺寸、数量随载荷增大不断变化。由式(7)知,加载前、后扩散系数 D, D_0 可通过孔隙度确定:

$$\frac{D}{D_0} = \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^i \quad (8)$$

将式(6)带入式(8),可得受载煤体解吸过程中扩散系数的动态演化模型:

$$\frac{D}{D_0} = \left\{ \frac{1}{\varphi_0} - \frac{1 - \varphi_0}{\varphi_0} \frac{1}{1 + \varepsilon_{\text{aps}}^V + \varepsilon_{\text{apm}}^V} \left\{ 1 + K_T \Delta T + \left[\frac{2apRT(1 - 2\mu) \ln(1 + bp_b)}{VE} - \frac{cdt}{1 + dt} \right] + \frac{3(1 - 2\mu)(p - p_a)}{E} \right\} \right\}^i \quad (9)$$

2 实验

2.1 实验样品

万峰煤矿 1121 工作面地质条件比较复杂,在进风巷、回风巷已探明地质构造包括向斜、背斜和正断层。煤层透气性系数 $1.935 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,瓦斯含量 $8.40 \sim 11.56 \text{ m}^3/\text{t}$,属于焦煤煤种。试验煤样采自构造煤发育区域,强度较低,坚固性系数 f 实测为 0.53。选出少量样品用于实验室测试煤样工业分析、吸附常数等基础参数,结果见表 1。将剩余的大块煤样敲碎成约 5 cm 的碎块,先放入碎煤机中破碎成 1~2 cm 的大颗粒,再用球磨机粉碎,从中筛选出 0.25~0.5, 0.5~1, 1~2 mm 的煤样分别放入自封袋中密封保存。构造煤是原始煤体在构造应力作用下发生挤压、剪切以及揉搓形成的产物。在地质构造运动剧烈区,原始煤体甚至破碎成为颗粒状、粉末状的碎粒煤和糜棱煤。因此,实验采取对煤颗粒加载轴压的方式来研究构造煤受载后的瓦斯解吸-扩散特性。

2.2 实验系统

实验系统主要包括充气单元、吸附-加压单元、脱气单元和气体收集单元,如图 1 所示。充气系统包括钢瓶、减压阀、参考罐和数字压力表。其中,参考罐主要有两个用途:一是测定吸附平衡压力;二是确定初始解吸时刻。数字压力表最大精度为 0.000 1 MPa。吸附-加压单元由千斤顶和煤样罐通过密封件组合而成,能够对煤样施加 0~75 MPa

的轴向载荷。脱气单元由真空泵和真空计相互配合,能够保证真空度达到 10 Pa 以下。实验采用排水集气法测试气体解吸量。

表 1 煤样基础参数

Table 1 Properties of coal sample

工业分析/%			吸附常数	
挥发分	灰分	水分	a	b
22.55	16.50	0.43	22.418	0.712

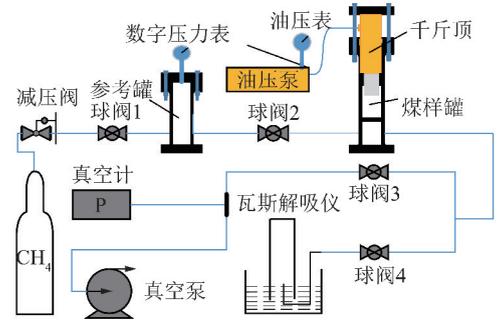


图 1 实验装置

Fig. 1 Experiment system

2.3 实验步骤

实验前 30 min 开始调节室内温度,并始终维持在 $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。称量 $(200 \pm 0.1) \text{ g}$ 煤样包裹在棉质布袋中,放入煤样罐。关闭阀门 2,4,打开真空泵和阀门 3 进行脱气,保证真空度维持在 10 Pa 以下 2 h,关闭阀门 3 和真空泵。打开阀门 1,调节减压阀,向参考罐中冲入 1 MPa 甲烷。关闭阀门 1,缓慢打开阀门 2,使甲烷气体进入煤样罐中进行吸附。每间隔 20 min,通过控制阀门 1,2 向煤样罐中反复充气、吸附,直至数字压力表读数不再变化,认为吸附达到平衡。通过手动油压泵对煤样施加轴向载荷,压力达到设定值并保持 5 min 后,打开阀门 4,将游离瓦斯放散到大气中。当数字压力表降到室内大气压时,关闭阀门 2 并迅速将管道与瓦斯解吸仪相连,开始测试瓦斯解吸量。解吸 100 min 时,实验结束,更换煤样,重复上述操作进行下组实验。

3 实验结果与分析

3.1 应力对煤粒瓦斯解吸量的影响

平衡瓦斯压力 1 MPa 条件下,对粒度 1~2, 0.5~1 和 0.25~0.5 mm 煤样分别施加 0, 1, 2, 3, 6, 9 和 12 MPa 轴向应力,并记录前 100 min 瓦斯解吸过程,结果如图 2 所示。从横向上看,随着解吸时间增加,任意轴向应力条件下瓦斯解吸量均不断增加,但是曲线斜率逐渐平缓,即瓦斯解吸速度由快转慢,依

然符合煤体瓦斯解吸的一般特征。从纵向上看,随着轴向应力增大,瓦斯解吸量均出现了不同程度的增、减。与不加轴压相比,随着轴压增大,0.25~0.5, 0.5~1, 1~2 mm 煤样 6 000 s 累计瓦斯解吸量增长率分别为-6.78%~10.96%, -7.18%~18.23%和-6.78%~27.11%。由此可见,应力对瓦斯解吸量具有显著影响。

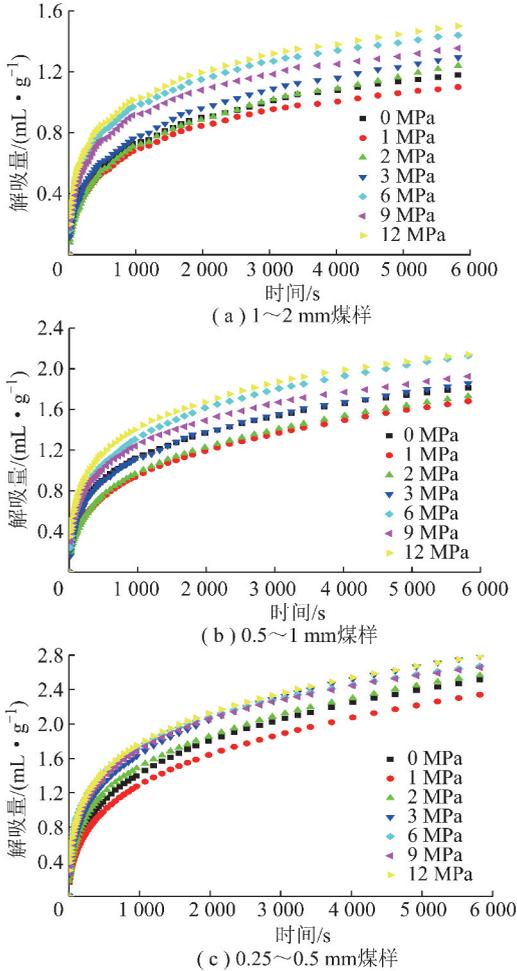


图2 不同应力条件下瓦斯解吸曲线

Fig. 2 Gas desorbed curves under different stress

与轴向应力 0 MPa 相比,轴向应力为 1, 2, 3, 6, 9 和 12 MPa 时, 1~2 mm 煤样 6 000 s 内累计瓦斯解吸量 Q_{6000} 分别增加了 -6.78%, 5.08%, 9.75%, 22.03%, 14.83% 和 27.12%; 0.5~1 mm 煤样 Q_{6000} 分别增加了 -7.18%, -4.42%, 2.49%, 17.4%, 6.35% 和 18.23%; 0.25~0.5 mm 煤样 Q_{6000} 分别增加了 -6.77%, 2.19%, 11.16%, 6.37%, 5.78% 和 10.96%。由此可见,当轴向应力较低时(0~1 MPa),累计瓦斯解吸量 Q_{6000} 随轴向应力增大而降低;当轴向应力较大时(1~12 MPa),累计瓦斯解吸量 Q_{6000} 随轴向应力增大波动上升,尤其是 0.25~0.5 mm 煤样波动特别明显,这可以从如图 3 中直观

地表现出来。总体而言,煤粒受载后,累计瓦斯解吸量随加载应力增大呈先降低后波动上升的趋势。与原煤受载解吸结果^[8-9]相比,随着轴向应力增大,颗粒煤累计瓦斯解吸量下降段应力范围较窄,在 1 MPa 以后开始上升。从图 3 中可以看出,1~2, 0.5~1 和 0.25~0.5 mm 煤样累计瓦斯解吸量 Q_{6000} 分别为 1.1~1.5, 1.68~2.14, 2.34~2.78 mL/g。表明相同轴向应力条件下,瓦斯解吸量随煤样粒度减小而增大。

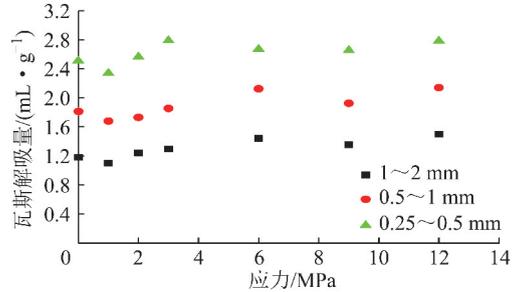


图3 6 000 s 累计瓦斯解吸量随应力的变化

Fig. 3 Accumulated desorbed gas in 6 000 s with stress

3.2 扩散系数计算

计算煤体瓦斯扩散系数的理论模型主要有单孔模型^[16]和双孔模型^[17]两种。根据文献[18]所述,当没有极限瓦斯解吸量时,可以采用式(10)和(11)分别计算单孔模型和双孔模型中的扩散系数。

单孔模型:

$$\frac{Q_t}{Q_{6000}} = \frac{1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-n\pi^2 B_e t)}{1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-6000n\pi^2 B_e)} \quad (10)$$

式中, Q_t 为 t 时刻累计瓦斯扩散量, mL/g; B_e 为有效扩散系数, s^{-1} ; $B_e = D/r^2$, r 为煤粒半径, mm。

双孔模型:

$$\frac{Q_t}{Q_{6000}} = \beta' \frac{1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-\pi^2 n B_{mac} t)}{1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-6000\pi^2 n B_{mac})} + (1 - \beta') \frac{1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-\pi^2 n B_{mic} t)}{1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-6000\pi^2 n B_{mic})} \quad (11)$$

式中, β' 为 6 000 s 内宏观扩散量占比; B_{mac} 为宏观有效扩散系数, s^{-1} ; $B_{mac} = D_{mac}/r^2$, D_{mac} 为宏观扩散系数, mm^2/s ; B_{mic} 为微观有效扩散系数, s^{-1} ; $B_{mic} = D_{mic}/r^2$, D_{mic} 为微观扩散系数, mm^2/s 。

根据式(10)和(11),采用 MATLAB 软件编程对

实验数据进行数值计算。计算得到实验数据的有效扩散系数及最大相关性系数 R^2 见表2。从表2可以看出,对于任意轴向应力条件下的瓦斯解吸数据,双孔模型计算结果均优于单孔模型,前者相关性系数能够达到 99.51% ~ 99.95%,后者相关性系数只有 96.40% ~ 99.15%。虽然相关性系数差别不大,但是

双孔模型计算结果与实验数据之间的和方差只有单孔模型的 0.025 ~ 0.5 倍,具有更高的吻合度。双孔模型宏观有效扩散系数在 10^{-4} s^{-1} 数量级上,比微观有效扩散系数高出 1 ~ 2 个数量级。单孔模型有效扩散系数在 10^{-5} s^{-1} 数量级上,位于宏观有效扩散系数与微观有效扩散系数之间。

表2 瓦斯有效扩散系数计算结果

Table 2 Fitting results of experimental data using the unipore model and bidisperse model

粒度/ mm	应力/ MPa	有效扩散系数/ s^{-1}			和方差		相关性系数 $R^2/\%$	
		双孔模型		单孔模型	双孔模型	单孔模型	双孔模型	单孔模型
		B_{mac}	B_{mic}	B_e				
1 ~ 2	0	1.51×10^{-4}	2.10×10^{-6}	5.49×10^{-5}	1.54×10^{-2}	3.21×10^{-2}	99.61	98.16
	1	1.23×10^{-4}	1.82×10^{-6}	5.31×10^{-5}	1.21×10^{-2}	2.79×10^{-2}	99.58	99.37
	2	2.27×10^{-4}	2.88×10^{-6}	3.62×10^{-5}	1.20×10^{-2}	3.32×10^{-2}	99.75	99.29
	3	3.60×10^{-4}	4.60×10^{-6}	4.48×10^{-5}	1.74×10^{-2}	3.79×10^{-2}	99.54	99.15
	6	4.90×10^{-4}	6.42×10^{-6}	7.69×10^{-5}	1.00×10^{-2}	1.28×10^{-1}	99.82	97.09
	9	4.40×10^{-4}	6.17×10^{-6}	7.74×10^{-5}	1.74×10^{-2}	1.05×10^{-1}	99.76	97.66
	12	5.98×10^{-4}	7.96×10^{-6}	8.49×10^{-5}	1.63×10^{-2}	1.52×10^{-1}	99.71	96.40
0.5 ~ 1	0	3.15×10^{-4}	6.90×10^{-6}	5.19×10^{-5}	2.53×10^{-2}	1.04×10^{-1}	99.51	97.01
	1	2.38×10^{-4}	5.73×10^{-6}	3.20×10^{-5}	1.40×10^{-2}	2.80×10^{-2}	99.65	99.29
	2	2.66×10^{-4}	5.99×10^{-6}	3.09×10^{-5}	2.90×10^{-3}	1.95×10^{-2}	99.93	99.53
	3	4.43×10^{-4}	9.76×10^{-6}	4.37×10^{-5}	7.30×10^{-3}	5.51×10^{-2}	99.86	98.63
	6	5.84×10^{-4}	1.19×10^{-5}	4.97×10^{-5}	6.60×10^{-3}	7.31×10^{-2}	99.85	98.07
	9	4.83×10^{-4}	1.08×10^{-5}	6.01×10^{-5}	1.60×10^{-2}	9.21×10^{-2}	99.73	97.46
	12	6.43×10^{-4}	1.36×10^{-5}	6.64×10^{-5}	3.70×10^{-3}	1.32×10^{-1}	99.92	96.54
0.25 ~ 0.5	0	4.03×10^{-4}	1.10×10^{-5}	2.90×10^{-5}	3.90×10^{-3}	3.79×10^{-2}	99.93	99.31
	1	2.84×10^{-4}	8.98×10^{-5}	2.79×10^{-5}	2.00×10^{-4}	1.83×10^{-2}	99.97	99.6
	2	4.82×10^{-4}	1.16×10^{-5}	3.86×10^{-5}	3.90×10^{-3}	4.82×10^{-2}	99.91	98.91
	3	7.98×10^{-4}	1.40×10^{-5}	3.40×10^{-5}	2.94×10^{-2}	6.68×10^{-2}	99.52	98.73
	6	6.73×10^{-4}	1.46×10^{-5}	5.29×10^{-5}	8.30×10^{-3}	1.46×10^{-1}	99.84	96.75
	9	5.32×10^{-4}	1.29×10^{-5}	4.90×10^{-5}	4.60×10^{-3}	9.80×10^{-2}	99.92	97.95
	12	7.18×10^{-4}	1.57×10^{-5}	4.60×10^{-5}	3.40×10^{-3}	1.36×10^{-1}	99.93	97.09

3.3 应力对煤粒瓦斯扩散系数的影响

在相同温度和吸附平衡压力条件下,同一粒度煤样瓦斯吸附量相同,累计瓦斯解吸量 Q_t 与有效扩散系数正相关,因而随着轴压增大,宏观、微观有效扩散系数表现出与累计瓦斯解吸量近似的变化趋势,如图3和4所示。整体而言,除了 0.25 ~ 0.5 mm 煤样宏观有效扩散系数之外,其余有效扩散系数与应力之间大致呈现“V”形关系。

以 0 MPa 为基准,计算了不同轴向应力条件下宏观(微观)有效扩散系数增长率,如图5(a)所示。0.25 ~ 0.5, 0.5 ~ 1 和 1 ~ 2 mm 煤样宏观有效扩散系数增长率分别为 -29.6% ~ 78.2%, -23.37% ~ 106.5% 和 -17.7% ~ 293.3%; 微观有效扩散系数增长率分别为 -18.4% ~ 42.7%, -16.9% ~ 88.4%

和 -13.4% ~ 276.2%。由此可见,粒度越大,宏观(微观)有效扩散系数增长率越大,而且宏观有效扩散系数增长率普遍高于微观有效扩散系数。这表明煤样粒度越大,对应力越敏感;宏观扩散孔隙对应力的敏感性高于微观扩散孔隙。根据表2统计了相同轴向应力条件下煤样之间宏观(微观)有效扩散系数之间的比值,如图5(b)所示,其中, S 为有效扩散系数。轴向应力由 0 MPa 增大至 12 MPa, 0.5 ~ 1 mm 煤样与 1 ~ 2 mm 煤样宏观(微观)有效扩散系数比值从 2.1(3.3)降至 1.1(1.6); 0.25 ~ 0.5 mm 煤样与 0.5 ~ 1 mm 煤样宏观(微观)有效扩散系数比值从 1.8(1.9)降至 1.1(1.2)。这说明随着轴向应力增大,粒度大的煤样宏观(微观)有效扩散系数比粒度小的煤样增长速度快。进一步印证了粒度大的煤样

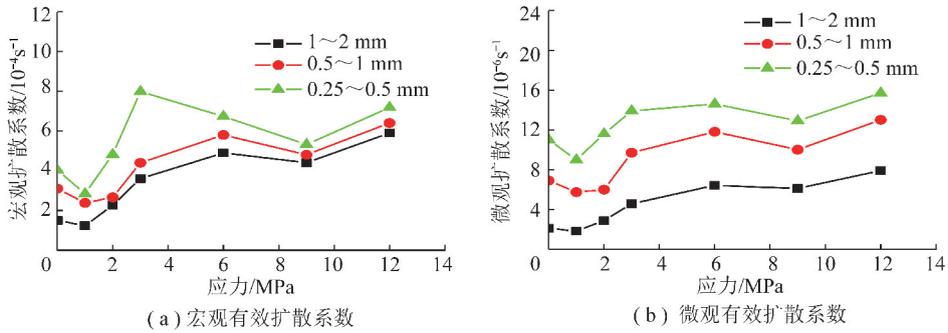


图4 双孔模型有效扩散系数与应力的关系

Fig. 4 Relationship between diffusion coefficients and stress

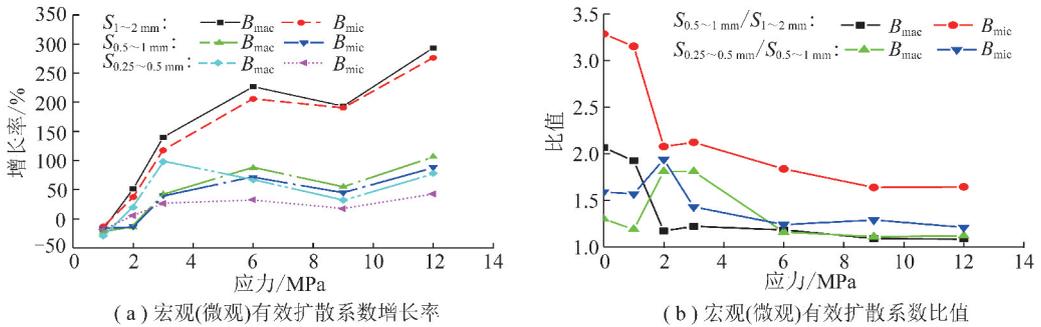


图5 不同煤样有效扩散系数对比

Fig. 5 Comparison of diffusion coefficient

有效扩散系数对应力更敏感。

4 受载煤粒瓦斯扩散特性的讨论

忽略温度、瓦斯压力、吸附量对煤体孔隙的微小影响,式(9)简化为

$$\frac{D}{D_0} = \left\{ \frac{1}{\varphi_0} - \frac{(1 - \varphi_0)}{\varphi_0} \frac{1}{1 + \varepsilon_{aps}^V + \varepsilon_{apm}^V} \right\}^i \quad (12)$$

一般而言,原煤煤样单轴压缩过程中经历压密、弹性变形、塑性屈服和峰值强度等典型阶段,煤体先压缩后扩容,体积应变先减后增,由式(12)可知,扩散系数、瓦斯解吸量随应力增大呈现“V”形关系,这可以从文献[8-9]得到验证。但是煤颗粒之间通过点接触相互作用,施加轴向应力时煤粒接触面容易产生应力集中,表现出来的物理力学性质与原煤煤样必定有所区别,因此,扩散系数与应力的关系也会有所不同。轴向应力较小(0~1 MPa)时,煤颗粒相互错动,粒间孔隙压实。同时,受到挤压的煤粒尚处于弹性变形阶段,煤基质压缩导致体积应变减小,因而扩散系数降低。轴向应力较大(1~12 MPa)时,压实的煤粒从弹性变形、塑性变形发展到损伤破裂,粒间孔隙继续较小,而粒内孔隙由于破裂出现扩容,有 $|\varepsilon_{aps}^V| > |\varepsilon_{apm}^V|$,所以扩散系数增大。轴压9 MPa处扩散系数出现下降,这可能是由于煤体沿着尺寸较大的裂纹、孔隙断裂,破碎后煤粒宏观孔隙、裂隙减少,

均质度升高,破碎难度增加,煤样出现压实。当应力增大到再次破碎强度时,煤粒会再次出现扩容,扩散系数上升。

煤样粒度越小,粒内扩散路径越短,则有效扩散系数越大。同时,煤样粒度减小,单位质量比表面积增加,极限瓦斯解吸量 Q_∞ 增加^[19],因而单位时间瓦斯解吸量增大。但是,煤样粒度越小,均质度越高,抵抗破坏能力增强,而且煤粒间隙更容易被小颗粒填充、压实。因此,当轴向应力增大时,煤样粒度越小,粒间孔隙减小速度越快,而粒内孔隙增长速度越慢,导致有效扩散系数增长率下降。此外,由于宏观孔隙尺寸较大,受载时容易形成应力集中发生扩展、贯通,因而有效扩散系数增长速度比微观孔隙较快。

5 结论

(1)根据扩散系数与孔隙度的关系,建立了受载煤体扩散系数的动态演化模型。理论研究表明,扩散系数主要受到煤体外观体积应变的控制,同时也受温度、孔隙压力和吸附量变化的影响。

(2)煤样粒度相同时,含瓦斯煤有效扩散系数、解吸量随轴向应力增大呈现先减小再波动上升的趋势,与理论模型的相符。

(3)煤样粒度越大,对应力也越敏感,并且宏观扩散对应力敏感性高于微观扩散。

(4) 轴向应力相同条件下,含瓦斯煤有效扩散系数、解吸量均随煤样粒度减小而增大。因此,构造煤发育的煤层,煤体粉碎越严重,瓦斯解吸-扩散速度越快,煤与瓦斯突出危险性越高。

(5) 双孔模型数值计算结果与实验数据相关性系数均在 99.5% 以上,明显高于单孔模型。双孔模型宏观有效扩散系数在 10^{-4} s^{-1} 数量级上,比微观有效扩散系数高出 1~2 个数量级,而单孔模型有效扩散系数均在宏观孔隙有效扩散系数与微观孔隙有效扩散系数之间。

参考文献 (References):

- [1] 刘彦伟,魏建平,何志刚,等. 温度对煤粒瓦斯扩散动态过程的影响规律与机理[J]. 煤炭学报,2013,38(S1):100-105.
LIU Yanwei, WEI Jianping, HE Zhigang, et al. Influence rules and mechanisms of temperature on dynamic process of gas diffusion from coal particles[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1):100-105.
- [2] 陈向军,程远平,王林. 外加水对煤中瓦斯解吸抑制作用试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(2):296-301.
CHEN Xiangjun, CHENG Yuanping, WANG Lin. Experimental study on the inhibition of injection water to the gas desorption of coal[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(2):296-301.
- [3] 李志强,刘勇,许彦鹏,等. 煤粒多尺度孔隙中瓦斯扩散机理及动扩散系数新模型[J]. 煤炭学报,2016,41(3):633-643.
LI Zhiqiang, LIU Yong, XU Yanpeng, et al. Gas diffusion mechanism in multi-scale pores of coal particles and new diffusion model of dynamic diffusion coefficient[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3):633-643.
- [4] 聂百胜,杨涛,李祥春,等. 煤粒瓦斯解吸扩散规律实验[J]. 中国矿业大学学报,2013,42(6):975-981
NIE Baisheng, YANG Tao, LI Xiangchun, et al. Research on diffusion of methane in coal particles[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(6):975-981.
- [5] 李钰魁. 构造煤瓦斯吸附、解吸与扩散特性研究[D]. 焦作:河南理工大学,2015:47.
LI Yukui. Research on the methane adsorption/desorption/diffusion characteristics of tectonic coal[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2015:47.
- [6] 何满潮,王春光,李德建,等. 单轴应力-温度作用下煤中吸附瓦斯解吸特征[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(5):865-871.
HE Manchao, WANG Chunguang, LI Dejian, et al. Desorption characteristics of adsorbed gas in coal samples under coupling temperature and uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5):865-871.
- [7] 唐巨鹏,潘一山,李成全,等. 三维应力作用下煤层气吸附解吸特性实验[J]. 天然气工业,2007,27(7):34-38.
TANG Jupeng, PAN Yishan, LI Chengquan, et al. Experimental study of adsorption and desorption of coalbed methane under three dimensional stress[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(7):34-38.
- [8] 王登科,王洪磊,姚邦华,等. 受载原煤中瓦斯的扩散规律[J]. 煤田地质与勘探,2016,44(3):10-13.
WANG Dengke, WANG Honglei, YAO Banghua, et al. Experimental investigation of gas desorption law of loaded raw coal[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(3):10-13.
- [9] 贾彦楠,温志辉,姚邦华. 受载含瓦斯原煤解吸规律实验研究[J]. 煤田地质与勘探,2014,42(4):21-30.
JIA Yannan, WEN Zhihui, YAO Banghua. Experiment of the desorption law of loaded gas-filled raw coal[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(4):21-30.
- [10] 彭立世,袁崇孚. 瓦斯地质与瓦斯突出预测[M]. 北京:中国科学技术出版社,2009.
- [11] 李培超,孔祥言,卢德唐. 饱和多孔介质流固耦合渗流的数学模型[J]. 水动力学研究与进展,2003,18(4):419-426.
LI Peichao, KONG Xiangyan, LU Detang. Mathematical modeling of flow in saturated porous media on account of fluid-structure coupling effect[J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(4):419-426.
- [12] PAN Zhejun, LUKE D C. A theoretical model for gas adsorption-induced coal swelling[J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 69(4):243-252.
- [13] 吴世跃,赵文. 含吸附煤层气煤的有效应力分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(10):1674-1679.
WU Shiyue, ZHAO Wen. Analysis of effective stress in adsorbed methane coal system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10):1674-1679.
- [14] 张遵国,曹树刚,郭平. 原煤和型煤吸附解吸瓦斯变形特性对比研究[J]. 中国矿业大学学报,2014,43(3):388-396.
ZHANG Zunguo, CAO Shugang, GUO Ping. Comparison of the deformation characteristics of coal gas adsorption-desorption process for raw and briquette in coals[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(3):388-396.
- [15] CURRIE J A. Gaseous diffusion in porous media. Part 2: dry granular materials[J]. Br. J. Appl. Phys., 1960, 11:318-323.
- [16] WANG Kai, ZANG Jie, FENG Yufeng. Effects of moisture on diffusion kinetics in Chinese coals during methane desorption[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21(2):1005-1014.
- [17] 王佑安,杨思敬. 煤和瓦斯突出危险煤层的某些特征[J]. 煤炭学报,1980(1):47-53.
WANG Youan, YANG Sijing. Some characteristics of coal seams with hazard of outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1980(1):47-53.
- [18] PAN Zhejun, CONNELL L D, CAMILLERI M, et al. Effects of matrix moisture on gas diffusion and flow in coal[J]. Fuel, 2010, 89:3207-3217.
- [19] 张晓东,桑树勋,秦勇,等. 不同粒度的煤样等温吸附研究[J]. 中国矿业大学学报,2005,34(4):427-432.
ZHANG Xiaodong, SANG Shuxun, QIN Yong, et al. Isotherm adsorption of coal samples with different grain size[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(4):427-432.