

8-25-2019

Coalbed methane migration mechanism under adsorption-desorption condition in coal

LIU Yongqian

Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; National Key Lab of Coal High Efficient Mining and Clean Utilization(China Coal Research Institute), Beijing 100013, China

ZHANG Shulin

Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; National Key Lab of Coal High Efficient Mining and Clean Utilization(China Coal Research Institute), Beijing 100013, China

SHU Longyong

Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; National Key Lab of Coal High Efficient Mining and Clean Utilization(China Coal Research Institute), Beijing 100013, China

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>

 Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

Recommended Citation

LIU Yongqian, ZHANG Shulin, SHU Longyong, et al. (2019) "Coalbed methane migration mechanism under adsorption-desorption condition in coal," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 47: Iss. 4, Article 4.

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.003

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol47/iss4/4>

This Special Issue Article is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact 380940179@qq.com.

文章编号: 1001-1986(2019)04-0012-07

吸附-解吸状态下煤层气运移机制

刘永茜^{1,2}, 张书林^{1,2}, 舒龙勇^{1,2}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司安全分院, 北京 100013;

2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室(煤炭科学研究总院), 北京 100013)

摘要: 带吸附作用的煤层气运移规律一直是煤层气地质学界关注的焦点问题之一。为研究吸附-解吸状态下的煤层气运移机制, 推导了气体吸附-解吸方程并分析了多孔介质扩散-渗流理论, 开展了煤层气运移实验并对实验结果进行了分析。研究发现: 煤体孔隙结构对煤层气运移具有“容阻效应”, “容储”“阻降”二重特性并存构成了煤基质的基本功能; 气体运移过程中煤体对 CO₂ 和 CH₄ 吸附能力的差异体现在吸附响应时间、吸附速率增长率、吸附平衡时间和最大吸附体积等 4 项指标; 煤层气运移过程中扩散和渗流两种方式并存, 当裂隙及大孔内气体压力较中-微孔隙系统气体压力高时, 气体运移速率以渗流为主, 否则以扩散为主。



关键词: 煤层气运移机制; 吸附-解吸; 容阻效应; 动力吸附; 双重介质; 分子极性

中图分类号: TP028.8 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.003

Coalbed methane migration mechanism under adsorption-desorption condition in coal

LIU Yongqian^{1,2}, ZHANG Shulin^{1,2}, SHU Longyong^{1,2}

(1. Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. National Key Lab of Coal High Efficient Mining and Clean Utilization(China Coal Research Institute), Beijing 100013, China)

Abstract: The migration law of coalbed methane(CBM) with adsorption has always been the focus of attention in the field of coalbed methane geology. In order to study the mechanism of CBM migration under adsorption-desorption state, the deduction of gas adsorption-desorption equation and theoretical analysis of gas diffusion-seepage in porous media were carried out, and new viewpoints were put forward by means of experimental analysis of CBM migration. The results identified that: (1) for the CBM migration, pore structure of coal body has the storage-resistance effect, the dual functions of gas storage and gas pressure drop form the basic feature of coal matrix, (2) adsorption reaction time, adsorption rate, growth rate, adsorption equilibrium time and the maximum adsorption capacity are 4 key indexes of the different gases, (3) diffusion and seepage coexist in the process of CBM migration. When the gas pressure in fracture and macropore is higher than that in medium-micropore system, the gas migration velocity is dominated by seepage, otherwise diffusion is dominant.

Keywords: the migration mechanism of CBM; adsorption and desorption; capacitive resistance effect; dynamic adsorption; binary medium; molecular polarity

煤层气是煤的伴生物质,二者共生共储。而作为典型多孔介质,煤体对煤层气具有吸附和解吸功能^[1]。煤与煤层气之间特殊赋存关系不但给煤矿瓦斯治理带来了技术难题,而且严重制约煤层气资源高效开发。研究吸附-解吸条件下的煤层气运移规律对于服务煤矿安全生产和资源高效利用具有重要的

工程意义。

R. M. Barrer^[2]最早基于天然沸石对气体的吸附作用,开展了带吸附作用的气体运移规律的研究。大量实验数据表明^[1,3],煤层气主要以吸附形态赋存于煤基质表面, M. Mastalerz 等^[4]、S. Swanson 等^[5]通过实验分析认为,煤中孔隙主要由微孔和中孔组

收稿日期: 2019-01-15

基金项目: 国家科技重大专项任务(2016ZX05045-002-006); 国家自然科学基金青年基金项目(51504137, 51704164)

Foundation item: National Science and Technology Major Project(2016ZX05045-002-006); National Natural Science Foundation for Young Scientists of China(51504137, 51704164)

第一作者简介: 刘永茜, 1984 年生, 男, 河南南阳人, 博士, 副研究员, 从事矿山安全技术和渗流力学理论研究工作。E-mail: yqliu518@126.com

引用格式: 刘永茜, 张书林, 舒龙勇. 吸附-解吸状态下煤层气运移机制[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 12-18.

LIU Yongqian, ZHANG Shulin, SHU Longyong. Coalbed methane migration mechanism under adsorption-desorption condition in coal[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 12-18.

成, 微孔为煤层气吸附提供的空间比例最高, 并决定其吸附气体的能力; 马东民等^[6]、刘永茜等^[7]、N. Skoczylas 等^[8]通过气体等温吸附/解吸实验及煤岩煤质分析实验, 认为煤体吸附甲烷能力与煤体性质和孔隙结构有关。关于煤体性质(变质程度)和孔隙结构对吸附态的煤层气运移影响, 据宜文等^[9]、姜波等^[10]开展了微纳结构孔隙的吸附-解吸和渗流实验, 明确了微孔对气体吸附的贡献, 指出了解吸过程中煤层裂隙密度和尺度对解吸率的影响。

煤变质程度和孔隙结构综合影响其对甲烷的吸附-解吸能力, 而孔隙(裂隙)中的煤层气运移方式也是学术界争论的焦点之一。秦跃平等^[11]通过实验和数值模拟分析指出, 煤体内煤层气运移符合 Darcy 定律; 张志刚等^[12]提出了煤层气渗流非线性模型, 在一定程度上验证 Fick 定律的适用性; 魏建平^[13]指出, 煤体内部煤层气运移的适用条件需结合气体通道尺度, 裂隙通道内气体运移适合 Darcy 定律, 而在微尺度孔隙裂隙内的气体运移、扩散有多种形式, 因此, 煤层气运移是扩散与渗流的联合作用。实验统计发现^[6,8-10], 不同气体在煤体中的吸附量差异显著, 为描述不同气体分子结构和极性大小对煤层气运移的影响, 文献[14]给出了气体动态扩散系数和表面浓度流动系数两个关键表征参数, 这最终可以通过实验的方法进行数据拟合获得。基于气体扩散的质量守恒, 考虑气体运移过程中扩散-渗流的联合作用, 笔者建立了含有吸附压力速度增项的气体运移控制方程, 以此描述煤体内煤层气运移规律; 结合气体运移实验, 研究准静压和动压条件下气体在吸附与解吸过程中的差异, 这对研究煤层气抽采和煤层气资源开发具有一定的理论指导价值。

1 吸附-解吸动力作用下的煤层气运移

1.1 解吸动力学方程

煤层气吸附-解吸是一个动态平衡作用过程, 设定在一定比表面积下煤层气吸附-解吸可逆, 且在一定压力下饱和吸附体积, 煤中煤层气吸附体积与吸附时间满足一定函数关系^[15], 且气体吸附速率随着吸附体积的增大而降低, 在任意状态下, 吸附速率满足:

$$\left(\frac{dV_p}{dt}\right)_a = K_1 \left(1 - \frac{V_p}{V'_a}\right) p \quad (1)$$

式中 V_p 为压力 p 时煤中煤层气吸附体积; t 为吸附或解吸时间; K_1 为吸附速率常数; V'_a 为饱和吸附体积。

解吸与吸附同步, 在任意压力变化条件下, 二

者此消彼长, 最终达到动态平衡, 解吸速率可描述为:

$$\left(\frac{dV_p}{dt}\right)_d = -K_2 \frac{V_p}{V'_a} \quad (2)$$

式中 K_2 为解吸速率常数。联合式(1)和式(2)得到描述吸附-解吸表达式:

$$\frac{dV_p}{dt} = K_1 \left(1 - \frac{V_p}{V'_a}\right) p - K_2 \frac{V_p}{V'_a} \quad (3)$$

设定在任意压力 p 下达到平衡, 利用初始条件 $t=0, V_p=0$, 对式(3)积分得到:

$$V_p(t) = \frac{K_1 V'_a p}{K_1 p + K_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{K_1 p + K_2}{V'_a} t\right)\right) \quad (4)$$

当 $t \rightarrow +\infty$ 时, 式(4)可以简化为:

$$V_p = \frac{(K_1 / K_2) V'_a p}{(K_1 / K_2) p + 1} \quad (5)$$

如果令 $V'_a = a$, $(K_1 / K_2) = b$, 式(5)可表示为 Langmuir 形式:

$$V_p = \frac{abp}{1 + bp} \quad (6)$$

高压吸附饱和以后, 吸附速率和解吸速率相近, 则 $b \approx 1$, $a = V_p$, 则高压平衡下的 Langmuir 方程对于气体吸附和解吸同时适用。

1.2 吸附动力作用下煤层气扩散

在双重介质中研究一维方向的煤层气运移, 需要分析孔隙和裂隙之间煤层气运移模式差异^[15]。Langmuir 方程描述的是特定压力或含量条件下的吸附能力, 考虑到扩散过程中吸附压力增长率的影响, 在式(6)的左端增加关于压力的增速项。设定煤体的孔隙率为 φ , 实体颗粒占据的体积为 $1-\varphi$, 而与之对应的吸附面积为 $(1-\varphi)S$, 则单位体积内的有效吸附体积为 $(1-\varphi)S/\varphi$, 将有效吸附体积对时间求导就得到有效吸附量增长率, 则式(6)就转化为:

$$D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - v_s \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1-\varphi}{\varphi} S \frac{\partial V_p}{\partial t} \quad (7)$$

式中 D 为气体表面扩散系数; S 为吸附表面积; v_s 为气体流动速度。

结合式(6)和式(7)关于压力和时间求导可得:

$$D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - v_s \frac{\partial p}{\partial x} = \left(1 + \frac{1-\varphi}{\varphi} \frac{Sab}{(1+bp)^2}\right) \frac{\partial p}{\partial t} \quad (8)$$

式(8)为二阶变系数偏微分方程, 是煤层气解吸-扩散计算依据。在不同的压力(梯度)条件下, 左端两项的权重有差异。当 $D=0$, 描述的是忽略扩散作用条件; 而当 $v_s=0$, 式(8)描述的是淡化渗流作用; 在极端条件下, 如果 $b \rightarrow 0$, 则 $K_1 \ll K_2$, 该状态描述的是气体的高速解吸作用。上述几种状态, 在特定的

条件下都有解，然而复合条件下式(8)的解较为复杂。

1.3 吸附-解吸下的煤层气渗流

假设煤体原生孔隙和裂隙均匀分布，形成两重覆盖的连续体，且这个连续体均质、各向同性，在吸附平衡条件下，气体在孔隙和裂隙中的流动均服从达西定律^[11]：

$$v_s = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (9)$$

式中 k 为煤体渗透率； μ 为气体黏度。

通常描述煤层气解吸条件下的运移速度(v)是扩散速度(v_d)和渗流速度(v_s)的综合贡献：

$$v = v_d + v_s \quad (10)$$

且存在：

$$v_d = -F_g \frac{d\bar{V}_p}{dt} \quad (11)$$

式中 F_g 为几何因子； \bar{V}_p 为吸附体积变化量。为方便解吸实验研究，引入解吸时间 τ ，并将其作为参数直接引入模型中，其定义^[16]为：

$$\tau = \frac{1}{D\sigma} \quad (12)$$

式中 σ 为基质形状因子。解吸时间 τ 可由解吸实验直接测定。在稳态扩散条件下：

$$\frac{d\bar{V}_p}{dt} = \frac{1}{\tau} (V'_a - V_p) \quad (13)$$

联立式(9)—式(13)可得：

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} - \frac{F_g}{D\sigma} (V'_a - V_p) \quad (14)$$

2 煤层气运移交换机制

2.1 孔隙-裂隙间的气体交换

在煤体内，孔隙系统与裂隙系统之间动态的气体交换，按照理想气体考虑，双重介质内的气体交换量为：

$$Q_d = \xi \frac{(p_p - p_f) M \phi}{\rho T R} \quad (15)$$

式中 Q_d 为煤层气交换体积； p_p 、 p_f 分别为孔隙、裂隙内煤层气平均压力； T 为介质温度； R 为常数； M 为煤层气摩尔质量； ξ 为交换系数； ϕ 为孔隙率。

以任意单元 n 为研究对象，设定系统由 m 个单元组成，根据连续性方程^[17]：

$$\sum_{n=1}^m \left[\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} - \frac{\rho b_n^2}{12\mu} \frac{p_i - p_{ni}}{L_n} \right] + W_i = 0 \quad (16)$$

式中 i 为单元节点； b_n 为裂隙宽度； L_n 为裂隙长度； p_i 为节点 i 的气体压力； p_{ni} 为与 n 连接的第 i 个单元

另一段的气压； W_i 为各裂隙单元储存煤层气质量。

联合式(8)、式(9)、式(14)—式(16)，形成煤体煤层气运移的控制方程组。

2.2 煤层气运移的“容阻效应”

研究发现^[2]，由于气体性质或煤体表面能差异，不同的气-固组合呈现出差异性的渗流曲线，导致这种现象的原因就是吸附剂(多孔介质)和吸附质(气体)的吸附-解吸特性差异。大量的实验统计^[12-13]表明，吸附作用导致煤层气在煤体中渗流不完全适用于经典的 Darcy 定律，而解吸作用下煤层气扩散实验数据也证实 Fick 定律的局限性，由此引发人们对双重介质内气体扩散-渗流耦合作用的研究。

实验数据统计^[7,17]发现，煤层气渗流实验过程中，初始注入流量中的一部分煤层气被煤体吸附，直到煤体介质吸附气体饱和后达到稳定渗流状态，进出流速稳定；当关闭进气气源后，由于煤层气解吸作用，出口端仍能保持一定的流量。研究发现，煤层气运移过程中煤体功能与电路中的电阻、电容功能类似，具备压降、容储的二元特性。进气端和排气端的气压差类似于电路中的电压(图 1)，基本单元由一个电阻 R 和一个电容元件 C 并联而成，单元串联成煤层气运移系统。当注入高压气体形成通路初期，煤体吸附作用导致部分煤层气被封存(如同电容充电)，而电阻作用产生压降，形成气体运移系统；经过一段时间达到吸附饱和(如同电容充电完成)后，流速稳定；当关闭高压进气端后，孔隙-裂隙系统产生压差，煤体内吸附态煤层气开始解吸(如同电容放电)，形成新的气体运移系统，排气端煤层气维持一定流量，笔者将上述煤层气运移现象称为多孔介质内气体运移的“容阻效应”。

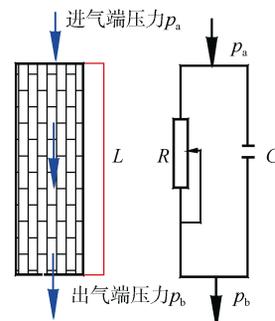


图 1 煤体煤层气运移单元等效示意图

Fig.1 Unit equivalent diagram of CBM migration in coal

煤体内的煤层气运移包含孔隙-裂隙内煤层气扩散和渗流的二重特性，而上述等效模型也反映了其特性，其中“电容功能”是孔隙系统吸附-解吸-扩散特性的反映，而“电阻”功能反映了裂隙系统渗流特性，煤体的“容阻效应”决定了煤层气运移的复杂性。

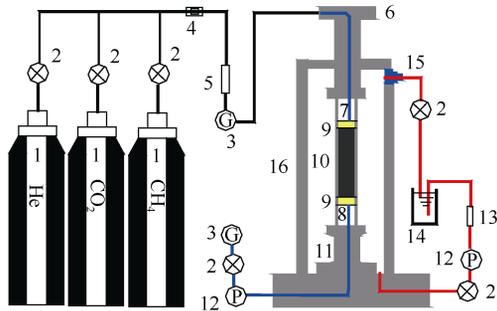
3 吸附-解吸条件煤层气运移实验

3.1 煤样制备

实验选取河南平顶山八矿己₁₅煤层原煤煤样。为适应三轴渗透仪测试要求,将煤样制成直径 $\Phi=50.01$ mm,高度 $h=100.03$ mm的圆柱体标准试件。实验煤样孔隙率 $\varphi=4.46\%$,弹性模量 $E=3.2$ GPa,泊松比 $\nu=0.34$,密度 $\rho=1.41$ g/cm³,试件质量 $m=278.82$ g。

3.2 实验设备

本实验采用的高压三轴渗透仪,主要包括数字压力控制系统(施加围压和轴压)、高压气瓶(CH₄、CO₂和He)、三轴气体渗透仪、高精度气体流量计、压力传感器、油压泵和气体净化器等,实验装置示意图如图2所示。实验系统可测试不同应力条件下煤体的渗流特性,其中围压范围0~12.0 MPa,煤层气压力0~5.0 MPa,轴向加载0~300 kN,精密流量计量程0~100 cm³/min,精度0.02%(F.S.),实验室内测试环境温度为20℃。



1—高压气瓶;2—阀门;3—精密流量计;4—气体净化器;5—调压阀;6—加载压头;7—上压头;8—下压头;9—多孔板;10—试件;11—底座;12—油压泵;13—过滤器;14—储油缸;15—转换接头;16—液压室

图2 煤层气运移实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of gas migration experiment device

3.3 实验步骤

a. 试件封装

首先将煤样试件、热缩管和加载压头一同安装到煤层气渗流密封缸体内,保持试件轴线始终与上下压头平面垂直;然后加温热塑管,使其紧贴试件,并将封闭硅胶涂抹均匀;夹紧密闭缸体的外部器件,保证系统的密封性。

b. 液压及应力加载

启动油压泵,均匀注入流体,充满液压室,当油压达到预定阈值(3.0 MPa)后关闭油压泵,封闭油压阀门;继而对实验装置进行轴向应力加载,达到预应力阈值(4.5 MPa)后,维持状态稳定。

c. 密闭监测

首先注入 He 气,维持稳压 0.4 MPa,启动

监测系统。认为 He 不被吸附,依据达西定律测定试件渗透率 k ; 随后打开 CH₄ 阀门,关闭 He 气体阀门,保持稳压 0.4 MPa 驱替 He 气,观测进出端流量变化(出口压力 0.1 MPa),直到流量稳定,计算渗透率 k_1 ; 关闭进气端阀门,观测排气端煤层气流速变化; 再次开启 He 气阀门,关闭甲烷阀门,维持 0.4 MPa,采用 He 气驱替甲烷,直到流量稳定; 开启高压 CO₂ 阀门,关闭 He 阀门,维持 0.4 MPa,驱替 He,与 CH₄ 驱替 He 类似,重复步骤和,计算渗透率 k_2 ,记录排气端流速变化。

d. 数据处理

依据进气端和排气端气体流速(流量)变化、响应时间,结合气体状态方程计算煤体吸附-解吸速率和渗透率变化。

4 结果分析

4.1 气体运移过程的吸附性能比较

根据气体流量法^[18]进行渗透率测试,根据 He 气的测试数据,煤样在上述应力条件下渗透率 $k=5.41 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,流速稳定在 $Q=44.39$ mL/min。当关闭 He 气的高压阀门,同时启动 CH₄ 阀门后,吸附响应时间 $\tau_1=5.4$ min 后,进气口流量计和出气口流量计的数据不再完全一致(图3),这是由于吸附压力下,气体扩散速率增长,注入的 CH₄ 一部分被煤体吸附,稳定流速为 $Q_1=44.16$ mL/min。

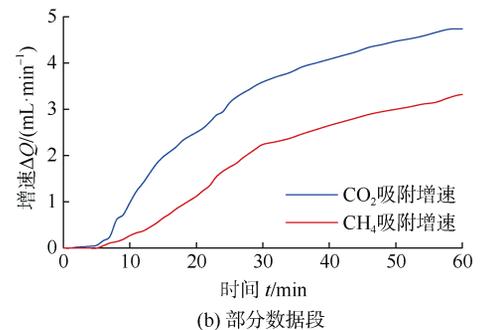
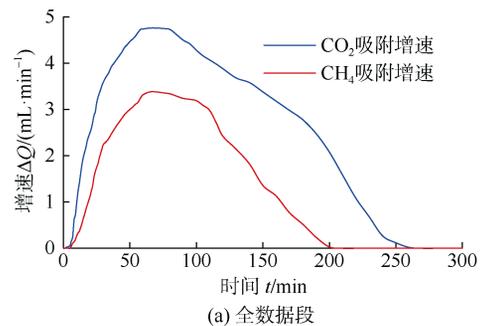


图3 气体吸附速率比较及局部放大图

Fig.3 Comparison of gas adsorption rate and partial enlargement

CO₂ 较 CH₄ 吸附反应更敏感, $\tau_1=3.9$ min, 即在阀门启动 3.9 min 后, 进出流量产生差异, 且吸附速度较 CH₄ 更快, 流速稳定在 $Q_2=44.02$ mL/min。在本实验系统和实验条件下, CO₂ 和 CH₄ 达到最大吸附速率(Q_{max})的时间(τ_2)分别为 62 min 和 69 min, 最大吸附速率(Q_{max})分别为 4.79 mL/min 和 3.40 mL/min, 流速恢复时间(τ_3)分别是 270 min 和 190 min。

为比较煤体特定条件下的吸附性能, 在此定义吸附速率增长率 ΔQ :

$$\Delta Q = \frac{Q_{max}}{\tau_2 - \tau_1} \quad (17)$$

CO₂ 和 CH₄ 的 ΔQ 值分别为 0.083 mL/min 和 0.052 mL/min。实验数据比较发现, 两种气体运移过程中的吸附特性差异体现在吸附响应时间、吸附速率增长率、吸附平衡时间和最大吸附体积等 4 项指标, 这与气体吸附过程中最大吸附体积(V_a)和吸附-解吸速率常数(K_1 、 K_2)相关。

通过上述实验数据发现, 相同条件下, 运移中的 CO₂ 和 CH₄ 的吸附量和平衡时间都比常规煤体吸附实验数据偏小, 这受控于气体动压作用。另外, 比较图 3 中两条曲线发现, 在速率恢复区段(速率最大值过后), 两条曲线表现出差异: CH₄ 气体的速率经过一段时间相对稳定后, 以近似线性回落, 而 CO₂ 气体流速则在短暂的高速稳定后, 流速呈分阶段状态回落。在相同的固体介质中, 导致上述气体速率差异的根本原因可能是气体本身分子结构决定的极性差异。而 CO₂ 和 CH₄ 气体形成的两条非对称曲线与横坐标轴线分别围成的区域面积, 就是两种气体在煤体试件中的吸附体积, 分别达到了 687 mL 和 438 mL。

4.2 解吸状态下气体扩散-渗流性能分析

研究解吸状态下的气体扩散-渗流特征, 是在关闭进气端高压气体后, 基于排气端流量计的历史数据统计分析得出。在此状态下, 气体孔隙压力高于裂隙压力, 孔隙系统处于气体输出状态, 裂隙单元储存的煤层气量(式(16)中的 W_i)维持短暂的高压气体输出。据统计数据(图 4—图 5), 气体解吸主要集中在前 45 min, 尤其是前 30 min 数据变化明显。该状态下的煤层气运移, 类似于“电容放电”, 大量吸附态的气体分子如电荷一样迅速释放(解吸-扩散), 维持系统内气体的持续运移。数据结果显示, 该状态下的气体放散速率与时间关系符合负指数关系, 见式(18), 这与文献[14]结论吻合; 比较发现, 尽管 CO₂ 的放散初速率较 CH₄ 偏大, 但其速率衰减系数较 CH₄ 偏低。

$$\begin{cases} Q_{CO_2} = 37.242e^{-0.124t} \\ Q_{CH_4} = 34.298e^{-0.141t} \end{cases} \quad (18)$$

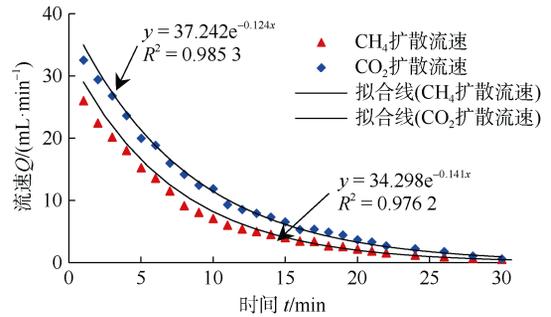


图 4 气体扩散流速
Fig.4 CH₄ and CO₂ velocity

根据监测数据显示, CO₂ 和 CH₄ 的气体解吸体积在前 45 min 内已接近完成总吸附量的 41.9%和 54.5%, 而后续近 2 000 min 的气体放散体积变化微小, 最终解吸体积分别达到 244 mL 和 320 mL, 分别达到吸附体积的 46.6%和 55.7%。

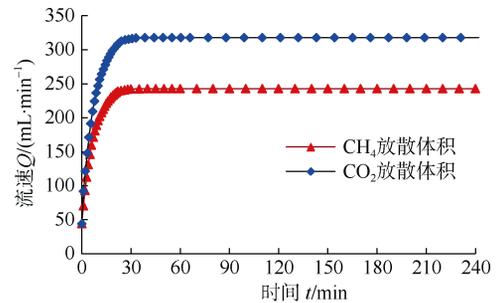


图 5 CH₄ 和 CO₂ 气体放散体积累积曲线对比
Fig.5 Comparison of gas volume accumulation curves

结合式(18)可知, 在高压气体关闭的瞬间($t=0$), CO₂ 和 CH₄ 气体的扩散初始速率 v_d 分别为 37.242 mL/min 和 34.298 mL/min, 分别占初始流速的 93.1%和 77.5%, 系统中残存气体压力控制下的渗流速度 v_s 贡献微弱; 如果将上述两个气体扩散初始速率代入式(12)–式(14), 可分别求得对应的气体扩散系数; 而孔隙内气体解吸-扩散进入裂隙的质量(或体积)可以通过式(15)和式(16)求解(给定均质属性, 单元数量在小于 100 的情况下), 可得 CO₂ 和 CH₄ 气体的扩散初始速率 v_d 分别为 36.541 mL/min 和 35.013 mL/min, 计算结果与实验数据有较好的一致性(平均误差小于 5%)。

5 讨论

有学者^[19-20]认为, 气体吸附(或解吸)导致的基质变形是煤体渗透率变化的关键因素, 而基质变形大小与吸附气体量成正比, 大量的实验数据^[1,21]证实,

除了媒体孔隙结构和媒体成熟度影响气体的吸附, 气体自身分子极性也是决定因素, 然而气体的极性差异主要受控于分子结构(官能团)。本实验研究过程中, He、CH₄ 和 CO₂ 三种气体在相同条件下的流速差异证实了其分子极性强弱排序: CO₂>CH₄>He; 而 CO₂ 流速最低的原因, 可能是气体吸附体积最大导致基质膨胀变形量显著, 从而降低了媒体渗透率。

与岩石不同, 媒体的吸附特性决定了其孔隙-裂隙系统在气体交换过程中交换系数 ξ 较小, 甚至 $\xi < 0.5$, 这也是与常规天然气渗流量差异原因之一。影响双重介质中气体交换的重要条件是两个系统本身的结构特性, 其中系统之间的连通性尤为重要, 气体运移过程中媒体结构的“容阻效应”正是孔隙-裂隙系统功能的映射: 微孔和非连通型微裂隙是吸附和容储气体的主要载体(电容功能), 而连通型大-中孔隙和裂隙是气体渗流阻力通道(电阻功能)。

本实验中统计的吸附流速增加量和解吸扩散流速变化量受实验系统和仪表测试精度的影响, 部分数据可能存在时滞误差, 如 He 阀门关闭、CH₄ 阀门开启形成气体交替置换过程中, 吸附开始的响应时间、最大吸附速率与累计吸附体积的时间同步性等。与此雷同, 在关闭高压气体进行气体解吸-扩散速率计量时, 同样面临系统响应时间与流速变化的精准对应等技术难题。总体而言, 本实验数据解释了一维条件下吸附动力学现象, 验证了吸附气体动力学理论, 但对于深入剖析复杂的煤层气运移机制, 需要更多的数据样本。

6 结论

a. 媒体内气体运移能力主要受媒体的孔隙-裂隙结构控制, 其次受气体本身的分子结构和极性特性影响, 媒体中气体运移速率由气体扩散速率和渗流速率两部分组成; 与密闭空间内的气体吸附实验相比, 动压作用下的气体吸附量下降、吸附平衡时间缩短。

b. 对于煤层气运移, 媒体结构具备“容”“阻”二重特性, 与电路元件类似, 由一个电容和一个电阻并联组成的通路构成了媒体的基本单元; 在煤层气运移过程中, 媒体中微孔和非连通型微裂隙是吸附和封存气体的主要载体(电容功能), 而连通型大-中孔隙和微裂隙是气体渗流阻力通道(电阻功能)。

c. 气体运移过程中的吸附特性差异体现在吸附响应时间、吸附速率增长率、吸附平衡时间和最大吸附体积等4项指标, 相同条件下 CO₂ 气体较 CH₄ 气体吸附速率大、吸附周期长、解吸效率低, 这是

气体分子极性差异的宏观表现。

d. 煤层气运移速率, 除了受煤岩组分和孔隙结构影响外, 还受控于煤层气压力梯度和煤层气赋存状态: 当裂隙及大孔内煤层气压力较中-微孔隙系统煤层气压力高时, 煤层气运移速率以渗流为主, 否则以扩散为主。

参考文献

- [1] 张子敏. 瓦斯地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.
- [2] BARRER R M. Diffusion in and through solid[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1951.
- [3] 孟召平, 刘珊珊, 王保玉, 等. 不同媒体结构煤的吸附性能及其孔隙结构特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1865-1870.
MENG Zhaoping, LIU Shanshan, WANG Baoyu, et al. Adsorption capacity and its pore structure of coals with different coal body structure[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1865-1870.
- [4] MASTALERZ M, DROBNIAK A, STRAPOC D, et al. Variations in pore characteristics in high volatile bituminous coals: Implications for coalbed gas content[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 76: 205-216.
- [5] SWANSON S, MASTALERZ M D, ENGLE M, et al. Pore characteristics of Wilcox Group Coal, U.S. Gulf Coast Region: Implications for the occurrence of coalbed gas[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 139: 80-94.
- [6] 马东民, 李来新, 李小平, 等. 大佛寺井田4号煤 CH₄ 与 CO₂ 吸附解吸实验比较[J]. 煤炭学报, 2014, 39(9): 1938-1944.
MA Dongmin, LI Laixin, LI Xiaoping, et al. Contrastive experiment of adsorption-desorption between CH₄ and CO₂ in coal seam 4 of Dafosi coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1938-1944.
- [7] 刘永茜, 张浪, 李浩荡, 等. 含水率对煤层气渗流的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(9): 1840-1844.
LIU Yongqian, ZHANG Lang, LI Haodang, et al. Effect of moisture content on CBM seepage[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1840-1844.
- [8] SKOCZYLAS N, DUTKA B, SOBCZYK J. Mechanical and gaseous properties of coal briquettes in terms of outburst risk[J]. Fuel, 2014, 134: 45-52.
- [9] 据宜文, 林红, 李小诗, 等. 煤岩构造变形与动力变质作用[J]. 地质前缘, 2009, 16(1): 158-166.
JU Yiwen, LIN Hong, LI Xiaoshi, et al. Tectonic deformation and dynamic metamorphism of coal[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(1): 158-166.
- [10] 姜波, 据宜文. 构造煤结构及其储层物性特征[J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 27-29.
JIANG Bo, JU Yiwen. Tectonic coal structure and its petrophysical features[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(5): 27-29.
- [11] 秦跃平, 王健, 郑赞, 等. 煤粒瓦斯变压吸附数学模型及数值

- 解算[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 923-928.
- QIN Yueping, WANG Jian, ZHENG Yun, et al. Coal particle gas adsorption mathematical model and numerical solution under variable pressures[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 923-928.
- [12] 张志刚, 程波. 含瓦斯煤体非线性渗流模型[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 453-459.
- ZHANG Zhigang, CHENG Bo. Study of a nonlinear seepage model of coal containing gas[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(3): 453-459.
- [13] 魏建平, 王洪磊, 王登科, 等. 考虑渗流-扩散的煤层瓦斯流动修正模型[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5): 873-878.
- WEI Jianping, WANG Honglei, WANG Dengke, et al. An improved model of gas flow in coal based on the effect of penetration and diffusion[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(5): 873-878.
- [14] 刘永茜, 张玉贵, 张浪. 煤层瓦斯运移机制的关键参数表征[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1145-1151.
- LIU Yongqian, ZHANG Yugui, ZHANG Lang. Key parameters for gas migration mechanism in coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1145-1151.
- [15] KING G R. Numerical simulation of the simultaneous flow of methane and water through dual porosity coal seams during the degasification process[D]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 1985.
- [16] BOYER C M. Methane modeling-predicting the inflow of methane gas into coal mines[R]. Final Report, DOE Contract Number DE-AC22-80PC30123, 1982.
- [17] 张东明, 齐消寒, 宋润权, 等. 采动裂隙煤岩体应力与瓦斯流动的耦合机理[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 774-780.
- ZHANG Dongming, QI Xiaohan, SONG Runquan, et al. Coupling mechanism of rock mass stress and gas flow in coal mining fissures[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 774-780.
- [18] 尹光志, 黄启翔, 张东明, 等. 地应力场中含瓦斯煤岩变形破坏过程中瓦斯渗透特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 336-343.
- YIN Guangzhi, HUANG Qixiang, ZHANG Dongming, et al. Test study of gas seepage characteristics of gas-bearing coal specimen during process of deformation and failure in geo-stress field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 336-343.
- [19] 姜德义, 袁曦, 陈结, 等. 吸附气体对突出煤渗流特性的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 2091-2096.
- JIANG Deyi, YUAN Xi, CHEN Jie, et al. Effect of adsorptional gases on permeability of outburst coal[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 2091-2096.
- [20] 周动, 王辰, 冯增朝, 等. 煤吸附解吸甲烷微观结构变形试验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2238-2245.
- ZHOU Dong, WANG Chen, FENG Zengchao, et al. Experiment on the deformation of the meso-structure of coal during the methane adsorption and desorption[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2238-2245.
- [21] 侯泉林, 雒毅, 韩雨贞, 等. 煤的变形产气机理探讨[J]. 地质通报, 2014, 33(5): 715-722.
- HOU Quanlin, LUO Yi, HAN Yuzhen, et al. Gas production mechanism in the process of coal tectonic deformation[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(5): 715-722.

(责任编辑 范章群)