



## 低渗煤层CO<sub>2</sub>-ECBM过程的CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>的扩散特征

刘峻麟 刘会虎 张琨 薛生

### 引用本文:

刘峻麟, 刘会虎, 张琨, 等. 低渗煤层CO<sub>2</sub>-ECBM过程的CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>的扩散特征[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 112-121.  
LIU Junlin, LIU Huihu, ZHANG Kun. Diffusion characteristics of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in CO<sub>2</sub>-ECBM process of low permeability coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 112-121.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1296>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 煤中CH<sub>4</sub>扩散影响因素的分子动力学分析

Molecular dynamics analysis of influencing factors of CH<sub>4</sub> diffusion in coal

煤炭科学技术. 2021, 49(2): 85-92 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.011>

#### 基于Fick定律的柱状煤瓦斯扩散系数变化规律及模型构建

Direct determination of the diffusion coefficient variation of coal based on Fick's law and model establishment

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 140-149 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0966>

#### 受限空间煤粒瓦斯吸附扩散特性及模型适配差异分析

Analysis of gas adsorption and diffusion characteristics of coal particles in confined space and model adaptation differences

煤炭科学技术. 2020, 48(9): 146-151 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/242c6fe8-b3d2-488c-b989-8ad527d28a72>

#### 基于多物理场耦合求解的煤层CO<sub>2</sub>-ECBM数值模拟研究

Numerical simulation study on coal seam CO<sub>2</sub>-ECBM based on multi-physics fields coupling solution

煤炭科学技术. 2019(9) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/45520ed1-aff3-4e38-bf2f-05038555b077>

#### 密度梯度驱动的煤粒瓦斯解吸扩散模型及试验研究

Gas desorption and diffusion model driven by density gradient in coal particle and its experimental study

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 169-176 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5e74b2a0-fb91-4497-a1c4-43b982697510>

#### 基于气水两相流的注热CO<sub>2</sub>增产CH<sub>4</sub>数值模拟研究

Numerical study of heat injection CO<sub>2</sub> to increase CH<sub>4</sub> production based on gas-water two-phase flow

煤炭科学技术. 2024, 52(3): 115-128 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0690>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

刘峻麟, 刘会虎, 张 琨, 等. 低渗煤层 CO<sub>2</sub>-ECBM 过程的 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的扩散特征[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 112-121.

LIU Junlin, LIU Huihu, ZHANG Kun, *et al.* Diffusion characteristics of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in CO<sub>2</sub>-ECBM process of low permeability coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 112-121.

## 低渗煤层 CO<sub>2</sub>-ECBM 过程的 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的扩散特征

刘峻麟<sup>1</sup>, 刘会虎<sup>1</sup>, 张 琨<sup>1</sup>, 薛 生<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 合肥综合性国家科学中心能源研究院 (安徽省能源实验室), 安徽 合肥 230031)

**摘 要:** 气体扩散能力的强弱是决定 CO<sub>2</sub>-ECBM 成败的关键因素之一。以中国两淮低渗含煤区刘庄矿 13 煤和祁东矿 7 煤的煤储层孔隙特征为研究对象, 开展 CO<sub>2</sub>-ECBM 过程中 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 气体的扩散行为研究, 以期获取 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 气体在储层条件下的扩散规律, 为研究低渗煤层 CO<sub>2</sub>-ECBM 过程的扩散规律提供理论依据。研究表明: 刘庄矿 13 煤和祁东矿 7 煤 2 种煤样中气体扩散类型以 Fick 型扩散为主, 占比 50% 以上, 其次为过渡型扩散, 占比接近 30%, CH<sub>4</sub> 的 Knudsen 型扩散约占 10%, CO<sub>2</sub> 的 Knudsen 型扩散接近 20%; CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 气体进行 Fick 型扩散和过渡型扩散时, 其扩散系数与温度变化关系不明显, 在压力 2 MPa, 刘庄矿 13 煤中的气体扩散系数约为 10 m<sup>2</sup>/s, 祁东矿 7 煤中的气体扩散系数达到 13 m<sup>2</sup>/s 以上, 且随压力增加 2 种类型的扩散系数均开始降低, 在 0~5 MPa 的压力区间内下降速率最快, 当压力值达到 20 MPa 后, 气体 2 种扩散类型的扩散系数基本趋于稳定, 同 2 MPa 时的扩散性系数相比, 缩小了近 10 倍; 当气体扩散为 Knudsen 型扩散时, 温度每增加 6 ℃, 其扩散系数增加 0.2 m<sup>2</sup>/s, 呈较缓的线性增长; 对不同扩散类型的气体扩散系数进行比较, 可知 CH<sub>4</sub> 比 CO<sub>2</sub> 在 Fick 型扩散中更具优势, CO<sub>2</sub> 则在另外 2 种扩散类型中更具优势; 通过比较 CH<sub>4</sub> 在不同扩散类型中的扩散速率, 发现 CH<sub>4</sub> 气体在低渗煤中以 Fick 型或 Knudsen 型扩散时扩散较快, 以过渡型扩散为扩散类型为主时扩散速度较慢; CO<sub>2</sub>-ECBM 过程中, CO<sub>2</sub> 在微孔及小孔中相比 CH<sub>4</sub> 扩散更快, 能够更加有效地置换出微孔中的 CH<sub>4</sub>, 提高 CH<sub>4</sub> 的产量。

**关键词:** CO<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub>; Fick 型扩散; Knudsen 型扩散; 过渡型扩散; 扩散系数; 扩散速率

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)S1-0112-10

### Diffusion characteristics of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in CO<sub>2</sub>-ECBM process of low permeability coal seam

LIU Junlin<sup>1</sup>, LIU Huihu<sup>1</sup>, ZHANG Kun<sup>1</sup>, XUE Sheng<sup>2</sup>

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Technology, Huainan 232001 China; 2. The Energy Research Institute of the Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230031 China)

**Abstract:** The ability of gas diffusion is one of the key factors that determine the success or failure of CO<sub>2</sub>-ECBM. Taking the pore characteristics of coal reservoirs of No. 13 Coal Seam of Liuzhuang Coal Mine and No. 7 Coal Seam of Qidong Coal Mine in the low permeability coal bearing area of Huaihe River and Huaihe River in China as the research object, the diffusion behavior of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> gas in the process of CO<sub>2</sub>-ECBM was studied in order to obtain the diffusion law of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> gas under the reservoir conditions and provide a theoretical basis for the study of the diffusion law of the low permeability coal seam in the process of CO<sub>2</sub>-ECBM. The research results show that the Fick type diffusion is the main type of gas diffusion, accounting for more than 50%, followed by the transitional type diffusion, accounting for nearly 30%, the Knudsen type diffusion of CH<sub>4</sub> accounts for about 10%, and the Knudsen type diffusion of CO<sub>2</sub> accounts for nearly 20%; When CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> gas undergo Fick type diffusion and transitional type diffusion, their diffusion coefficients have

收稿日期: 2022-10-20

责任编辑: 常 琛

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1296

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42277483); 能源研究院合肥综合性国家科学中心资助项目(21KZS218); 安徽省自然科学基金资助项目(2008085MD121)

作者简介: 刘峻麟(1998—), 男, 重庆璧山人, 硕士研究生。E-mail: 603093502@qq.com

通讯作者: 刘会虎(1978—), 男, 江西九江人, 博士生导师, 教授。E-mail: xixiinformation@163.com

no obvious relationship with temperature change. At a pressure of 2 MPa, the gas diffusion coefficient in Coal 13 of Liuzhuang Mine is about 10 m<sup>2</sup>/s, and the gas diffusion coefficient in Coal 7 of Qidong Mine is above 13 m<sup>2</sup>/s. With the increase of pressure, the diffusion coefficients of both types begin to decrease, and the drop rate is the fastest in the pressure range of 0~5 Mpa. When the pressure reaches 20 MPa, The diffusion coefficients of the two types of gas diffusion basically tend to be stable, which is nearly 10 times smaller than that at 2 MPa; When the gas diffusion is Knudsen type, the diffusion coefficient increases by 0.2 m<sup>2</sup>/s for every 6 °C increase in temperature, showing a slow linear growth; Comparing the gas diffusion coefficients of different diffusion types, CH<sub>4</sub> has more advantages than CO<sub>2</sub> in Fick type diffusion, and CO<sub>2</sub> has more advantages in the other two diffusion types; By comparing the diffusion rate of CH<sub>4</sub> in different diffusion types, the diffusion rate of CH<sub>4</sub> gas in low permeability coal is faster when Fick type or Knudsen type is used as diffusion type, and slower when transition type is used as diffusion type; In the process of CO<sub>2</sub>-ECBM, CO<sub>2</sub> diffuses faster in micropores and small pores than CH<sub>4</sub>, which can more effectively replace CH<sub>4</sub> in micropores and improve CH<sub>4</sub> production.

**Key words:** CO<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub>; Fick type diffusion; Knudsen type diffusion; transition type diffusion; diffusion coefficient; diffusion rat

## 0 引 言

面对能源供需格局新变化、国际能源发展新趋势, CO<sub>2</sub>-ECBM 作为集温室气体减排和新能源开发于一体的煤层气强化开采手段, 符合国家的能源安全新战略要求。在 CO<sub>2</sub>-ECBM 技术中, CO<sub>2</sub> 注入煤层后会在气体浓度梯度的驱动下扩散流动, 气体扩散能力的强弱也是决定 CO<sub>2</sub>-ECBM 成败的关键因素, 了解气体在煤层中的扩散行为有助于理解 CO<sub>2</sub>-ECBM 过程中 CO<sub>2</sub> 是如何进行贮存和 CH<sub>4</sub> 如何进行采收<sup>[1]</sup>。

煤的扩散系数是指当浓度梯度为一个单位时, 单位时间内通过单位面积煤中气体量; 其大小主要取决于气体成分、煤岩煤质及其温度-压力-应力等条件<sup>[2-9]</sup>。张时音<sup>[3]</sup>和张登峰<sup>[4]</sup>等应用吸附扩散理论模型计算了不同煤阶煤的扩散系数, 认为扩散系数与总孔容正相关, 扩散系数与吸附量、比表面积成正比。CHARRERE 等<sup>[10]</sup>在 283~333 K 范围内研究了温度对扩散的影响, 结果表明随着温度的升高, CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 吸附速率均增大。同样地, BUSCH 等<sup>[11]</sup>在 2011 年的综述文章中也得到了相同的结论。STAIB 等<sup>[12]</sup>采用湿煤研究了不同气体在煤中的扩散, 结果发现当温度由 300 K 升温至 313 K, CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 吸附速率增大。李志强等<sup>[13]</sup>研究了升温和恒温情况下瓦斯在湿煤粒中的扩散, 发现同压不同温 (303~373 K、4 MPa) 气体吸附后的恒温扩散系数随温度的升高呈现先增大后减小的趋势, 在 333 K 时扩散系数达到极大值, 而同温同压 (293~333 K、0.5 MPa) 气体吸附后升温扩散时的扩散系数随温度的升高呈指数关系增大。此外, 相同条件下 CO<sub>2</sub> 在煤中的扩散系数明显大于 CH<sub>4</sub>。

在压力对于气体在煤层中的扩散影响方面, CIEMBRONIEWICZ 等<sup>[14]</sup>使用简化的 unipore 模型

研究了 CO<sub>2</sub> 在硬煤中的动力学特性, 结果发现随着压力的增加扩散系数增大。CHARRIERE 等<sup>[10]</sup>使用简化的 unipore 模型研究了压力对扩散系数的影响, 结果发现与 0.1 MPa 相比, 相同温度下压力为 5 MPa 时 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 在煤中的扩散系数更大。

国内外学者对煤的渗透性及其控制因素方面已开展了较多的研究<sup>[15-16]</sup>, 对于煤中气体扩散行为的研究相对较少<sup>[17]</sup>, 在以往的煤层气体扩散研究中<sup>[18-21]</sup>, 压力条件较局限, 压力范围较小, 压力值较低, 未能更加实际地反映储层条件下气体的扩散特征, 且煤层中不同孔隙条件下的气体扩散特征没能直观的体现。

煤层气开采效益和产量在近年来的生产中没有达到预期效果, 刘庄煤矿与祁东煤矿作为两淮地区典型的低渗煤层气田, 以该地区煤样为研究对象, 能够为研究两淮地区低渗煤层气田的高效开发利用提供理论依据。笔者研究了储层条件 (24~48 °C、2~20 MPa) 下刘庄矿 13 煤和祁东矿 7 煤 2 个地区煤样在不同孔隙条件下的扩散模式, 模拟不同位置储层压力条件下气体在煤样中的扩散方式, 以揭露 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 气体在低渗煤样中的扩散规律为目的, 进一步探究 2 种气体在煤样中扩散的差异性, 以期研究低渗煤层 CO<sub>2</sub>-ECBM 过程的扩散规律提供理论依据。

## 1 材料与试验

刘庄煤矿和祁东煤矿为两淮地区典型的低渗煤层气田, 其中刘庄煤矿处于淮南复向斜中次一级褶皱 (陈桥背斜) 的南翼, 煤层主要分布在谢桥向斜北翼及西转折部位, 本区分别以板集断裂、陈桥断裂为东、西部边界, 按构造形态及断层分布情况 (图 1)<sup>[22]</sup>, 煤矿中二叠系的山西组与上下石盒子组为主要含煤层段, 刘庄 13 煤层为主要可采煤层之一, 煤种类以气煤为主, 平均总厚度 18.51 m。祁东煤矿位于淮北

煤田宿县矿区宿南向斜内,宿南向斜的大地构造位置属徐淮隆起的徐宿拗陷区的南部(图 2)<sup>[23]</sup>,祁东矿主要含煤地层为二叠系山西组、下石盒子组、上石盒子组,其中祁东 7 煤层位于中~下部富煤段,煤种类为 1/3 焦煤和肥煤。

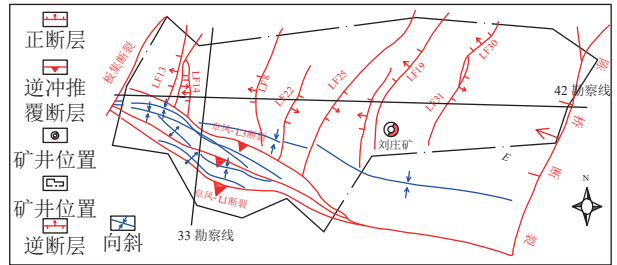


图 1 刘庄煤矿构造纲要图<sup>[22]</sup>

Fig.1 Structural outline map of Liuzhuang Coal Mine<sup>[22]</sup>



图 2 祁东煤矿构造纲要图<sup>[23]</sup>

Fig.2 Structural outline map of Qidong Coal Mine<sup>[23]</sup>

试验对象为刘庄 13 煤和祁东 7 煤的煤岩样品,煤样工业分析结果见表 1。

表 1 煤样工业分析表

Table 1 Analysis table of coal sample industry

样品名	刘庄13煤	祁东7煤
煤类	气煤	肥煤
采样深度/m	763	1 044
水分 $M_{ad}/\%$	1.25	0.88
挥发分 $V_{ad}/\%$	39.34	38.59
固定碳 $FC_{ad}/\%$	39.81	49.51
灰分 $A_{ad}/\%$	19.60	11.02
平均真相密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	1.36	1.45
镜质组反射率 $R_0/\%$	0.725 2	0.755 8

2 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 在煤层中的扩散机理

气体在煤层中的扩散,其本质是气体分子的不

规则热运动。煤作为一种典型的多孔介质,可将气体在煤层中的扩散总体分为:气相扩散、吸附相扩散、溶解相扩散、固溶体扩散 4 种类型。其中气相扩散分为: Fick 型扩散、Knudsen 型扩散、过渡型扩散 3 种扩散类型。气体扩散类型可以用表示孔隙直径和分子运动平均自由程相对大小的诺森(Knudsen)数表示<sup>[20]</sup>:

$$K_n = \frac{d}{\lambda} \tag{1}$$

式中,  $d$  为孔隙平均直径, nm;  $\lambda$  为气体分子平均自由程, nm。

理想气体下的分子平均自由程可以通过式(2)<sup>[19]</sup>计算:

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi d_0^2 p} \tag{2}$$

式中,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $1.38 \times 10^{-23}$ , J/K;  $T$  为绝对温度, K;  $p$  为气体压力, MPa;  $d_0$  为分子有效直径, nm。

根据诺森数的取值,可以划分气体的扩散类型(表 2),分子自由程的值可以判断气体分子在煤层不同孔隙直径中的扩散类型,该类型也决定了气体在煤层中的扩散速率,根据 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的分子直径,模拟不同埋深的温度压力条件,可计算得到气体分子的平均自由程(表 3),根据表 3 所示进一步计算能够得到关于不同埋深条件下的不同扩散类型所对应的孔隙直径(表 4)。

表 2 扩散类型及其对应诺森数

Table 2 Diffusion type and its counterpart

扩散类型	$K_n$
Fick型扩散	$K_n \geq 10$
过渡型扩散	$0.1 \leq K_n \leq 10$
Knudsen型扩散	$K_n \leq 0.1$

表 3 模拟不同埋深条件下的气体分子自由程

Table 3 Simate the molecular free path of gas under different burial depths

模拟埋深 条件/m	温度 $T/\text{K}$	压力 $p/\text{MPa}$	分子有效直径 $d_0/\text{nm}$		平均分子自由程 $\lambda/\text{nm}$	
			CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
-1 500	321.15	15			0.461	0.611
-1 200	315.15	12			0.565	0.749
-900	309.15	9	0.380	0.330	0.739	0.980
-600	303.15	6			1.087	1.441
-300	297.15	6			1.065	1.413



表 4 不同扩散类型的煤体孔分布情况  
Table 4 Distribution of coal body holes in different diffusion types

埋深条件/m	扩散孔径分布/nm					
	Knudsen型扩散		过渡型扩散		Fick型扩散	
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
-1 500	0.046	0.061	0.046~4.61	0.061~6.11	4.61	6.11
-1 200	0.057	0.075	0.057~5.7	0.075~7.45	5.65	7.49
-900	0.074	0.098	0.074~7.39	0.098~9.80	7.39	9.80
-600	0.108	0.144	0.108~10.87	0.144~14.42	10.87	14.42
-300	0.107	0.141	0.107~10.65	0.141~14.13	10.65	14.13

表 3 和表 4 中数据显示,埋藏深度为 300 m 时,CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的 Fick 型扩散类型分别发生在直径 14.13 nm 以及 10.65 nm 以上的孔隙中;埋藏深度为 1 500 m 时,CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的 Fick 型扩散类型分别发生在直径 4.61 nm 以及 6.11 nm 以上的孔隙中。该结果表明随温度及压力的增加即埋藏深度的增加,Fick 型扩散类型会发生在更小的孔隙直径中,代表气体分子随着压力及温度的增加,同煤层孔隙壁所产生的碰撞会减小,这将更有利于气体的在煤层中的扩散。同时,根据表中数据可看出,随埋深增加,CH<sub>4</sub> 的 Knudsen 型扩散所处孔隙直径分布由原来的小于 0.107 nm 缩小到了小于 0.046 nm;过渡型扩散所处孔隙直径分布分别由原来 0.107 ~ 10.6 nm 缩小到了 0.046 ~ 4.61 nm,产生该种扩散类型的孔隙直径区间进一步缩小。

### 3 低渗煤层 CO<sub>2</sub>-ECBM 过程 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的扩散模式

以刘庄矿 13 煤和祁东矿 7 煤两处的煤样作为试验样品,取温度条件 24、30、36、42、48 ℃,取压力条件 2、4、6、8、10、12、14、16、18、20 MPa,该温压条件能模拟 2 个矿区各深度煤层的储层情况,通过计算后获取两处煤矿的煤样在不同孔隙结构中气体的扩散类型分布情况以及不同扩散类型的扩散系数。

#### 3.1 低渗煤层中气体扩散类型

根据式(2)计算可得物理模拟试验条件下(温度 24 ~ 48 ℃,压力 2 ~ 20 MPa)对应的分子自由程变化范围(表 5)。

根据储层条件(24 ~ 48 ℃、2 ~ 20 MPa),计算分子自由程变化范围为 CO<sub>2</sub>(0.424 ~ 4.580 nm)、CH<sub>4</sub>(0.295 ~ 3.454 nm),根据诺森数  $K_n$  的值将分子的扩散类型分为:Fick 型扩散、Knudsen 型扩散、过渡型扩散,由分类标准(表 2)可知:当  $K_n \leq 0.1$ ,即 5 nm 以下的孔隙

表 5 气体分子平均自由程结果表

Table 5 Table of the average free course results of the gas molecules

气体种类	$\lambda$ /nm
CO <sub>2</sub>	0.424~4.580
CH <sub>4</sub>	0.295~3.454

中,CO<sub>2</sub> 在煤岩中以 Knudsen 型扩散为主;当  $0.1 \leq K_n \leq 10$ ,即 5 nm 以上 40 nm 以下的孔隙中,CO<sub>2</sub> 在煤岩中以过渡型扩散为主;当  $K_n \geq 10$ ,即在 40 nm 以上的孔隙中,CO<sub>2</sub> 在煤岩中以 Fick 型扩散为主。同理,当  $K_n \leq 0.1$ ,孔隙大小在 3 nm 以下时,CH<sub>4</sub> 在煤岩中以 Knudsen 型扩散为主;当  $0.1 \leq K_n \leq 10$ ,孔隙条件在 3 ~ 30 nm 时,CH<sub>4</sub> 在煤岩中以过渡型扩散为主;当  $K_n \geq 10$ ,孔隙条件在 30 nm 以上时,CH<sub>4</sub> 在煤岩中以 Fick 型扩散为主。

根据本次研究煤岩样品的压汞试验得到的孔隙结构分布,通过式(2)计算所得诺森数  $K_n$ ,对不同孔径孔隙进行占比计算,具体结果见表 6。

煤岩样品的孔隙分布及扩散类型占比,可以分析得出在该煤岩样品中气体的主要扩散类型,考虑气体在煤层中的运移时,便可采用该类型的扩散渗流理论来分析气体的流动规律。在本次的煤岩样品刘庄矿 13 煤和祁东矿 7 煤中,微孔及小孔孔容占比最高,分别约占总孔容的 35% 和 38%。同时,储层条件下(24 ~ 48 ℃、2 ~ 20 MPa),样品中的 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 气体主要以 Fick 型扩散类型为主,约占总扩散类型的 50% 以上,过渡型扩散约占 30%,CO<sub>2</sub> 的 Knudsen 型扩散约占 18%,CH<sub>4</sub> 的 Knudsen 型扩散最少,仅占总体的约 10%。

#### 3.2 低渗煤层中气体扩散能力变化特征

##### 3.2.1 扩散系数的变化特征

不同的扩散类型有不同的扩散系数计算方式,Fick 型扩散系数( $D_f$ )主要取决于温度及压力,同煤岩

表 6 不同孔径中 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 气体的不同扩散类型占比

Table 6 Results of different diffusion types of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> gas in different pore sizes

气体类型	煤岩样品	总孔容/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	孔隙体积分布/%				以诺森数分类计/%		
			微孔(<10 nm)	小孔(10~10 <sup>2</sup> nm)	中孔(10 <sup>2</sup> ~10 <sup>3</sup> nm)	大孔(10 <sup>3</sup> ~10 <sup>4</sup> nm)	Fick型扩散	过渡型扩散	Knudsen型扩散
CO <sub>2</sub>	刘庄	0.015	34.780	38.353	10.280	16.588	52.436	30.174	17.390
	祁东	0.019	36.457	37.966	10.934	14.644	50.888	30.884	18.228
CH <sub>4</sub>	刘庄	0.015	34.780	38.353	10.280	16.588	56.697	32.869	10.434
	祁东	0.019	36.457	37.966	10.934	14.644	55.106	33.957	10.937

孔径大小无关, Knudsen 型扩散系数( $D_k$ )主要取决于温度及压力, 同煤岩孔径大小无关; 过渡型扩散系数( $D_p$ )处于 Fick 型扩散以及 Knudsen 型扩散两者之间, 同时受到温度、压力以及孔隙大小的共同影响。

1) Fick 型扩散系数。Fick 型扩散系数  $D_f$  可表示为<sup>[24]</sup>:

$$D_f = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{k_B^3}{M\pi^3}} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{pd_0^2} \quad (3)$$

有效 Fick 扩散系数由式(4)计算<sup>[20]</sup>:

$$D_{fe} = \frac{D_f \theta}{\tau} \quad (4)$$

式中,  $M$  为气体分子摩尔质量, g/mol;  $\theta$  为多孔介质孔隙率, %;  $\tau$  为曲折因子, 为修缮扩散路径变化而引入。

2) Knudsen 型扩散系数。Knudsen 型扩散系数由式(5)计算<sup>[24]</sup>:

$$D_k = \frac{1}{3} d \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi M}} \quad (5)$$

有效 Knudsen 型扩散系数由式(6)计算<sup>[20]</sup>:

$$D_{ke} = \frac{D_k \theta}{\tau} \quad (6)$$

3) 过渡型扩散系数。过渡型扩散受 Fick 型扩散

和 Knudsen 型扩散 2 种扩散类型制约, 恒压下的有效过渡型扩散系数同 Fick 型扩散和 Knudsen 扩散 2 种类型有关, 其有效扩散系数由式(7)计算<sup>[20]</sup>:

$$D_{pe} = \left( \frac{1}{D_{fe}} + \frac{1}{D_{ke}} \right)^{-1} \quad (7)$$

根据上述公式, 分别计算刘庄矿 13 煤和祁东矿 7 煤样品在不同温度压力(24~48 °C、2~20 MPa)下的 Fick 型扩散系数、Knudsen 型扩散系数以及过渡型扩散系数, 具体计算结果如图 3—7 所示, 显示了在不同压力温度条件下 Fick 扩散系数、Knudsen 型扩散系数以及过渡型扩散系数的变化趋势。

由图 3、图 4 可以看出, 当温度条件 48 °C, 压力条件 20 MPa 时, 刘庄矿 13 煤样品中 CO<sub>2</sub> 的 Fick 型扩散系数为 0.82 m<sup>2</sup>/s, CH<sub>4</sub> 的 Fick 型扩散系数为 0.97 m<sup>2</sup>/s; 祁东矿 7 煤样品中 CO<sub>2</sub> 的 Fick 型扩散系数为 1.36 m<sup>2</sup>/s, CH<sub>4</sub> 的 Fick 型扩散系数为 1.62 m<sup>2</sup>/s。温度条件 48 °C, 压力条件 2 MPa 时, 刘庄矿 13 煤样品中 CO<sub>2</sub> 的 Fick 型扩散系数为 8.21 m<sup>2</sup>/s, CH<sub>4</sub> 的 Fick 型扩散系数为 9.74 m<sup>2</sup>/s; 祁东矿 7 煤样品中 CO<sub>2</sub> 的 Fick 型扩散系数为 13.61 m<sup>2</sup>/s, CH<sub>4</sub> 的 Fick 型扩散系数为 16.16 m<sup>2</sup>/s。

同时可以看出, 同温度条件下, 随着压力的增加, 气体的 Fick 型扩散系数逐渐减小, 且初始时扩散系

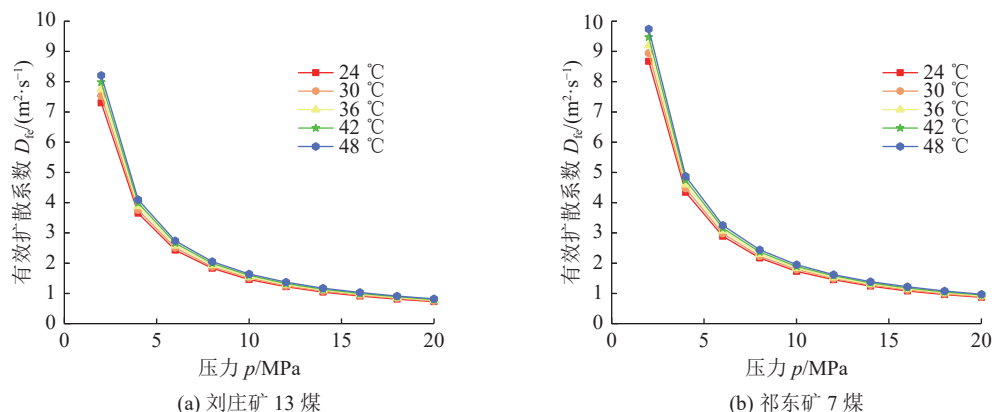


图 3 研究区样品中 CO<sub>2</sub> 的 Fick 型扩散系数随压力变化

Fig.3 Change diagram of the Fick-type diffusion coefficient of CO<sub>2</sub> in the study area sample along with the pressure

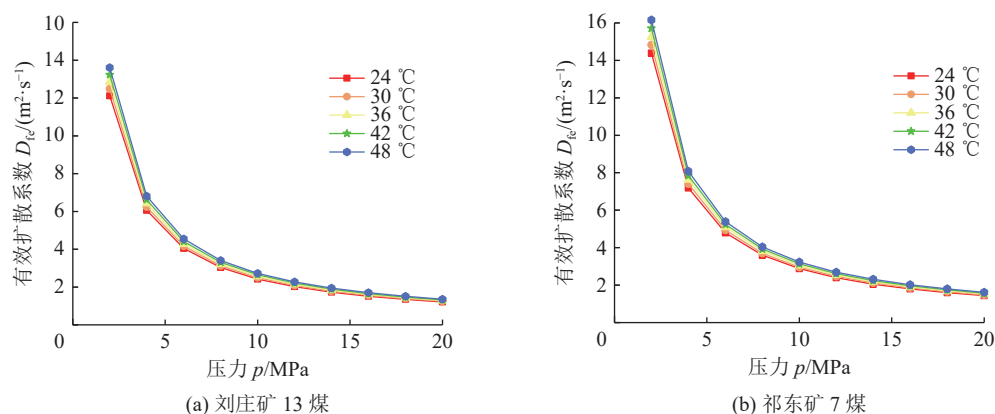
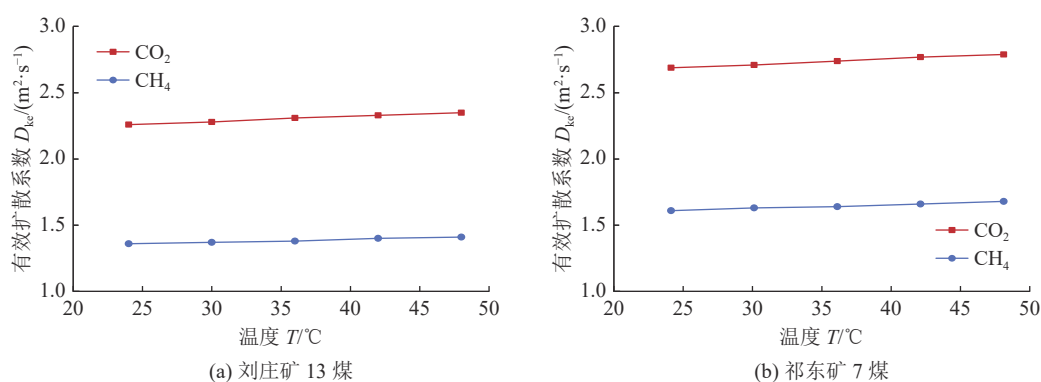
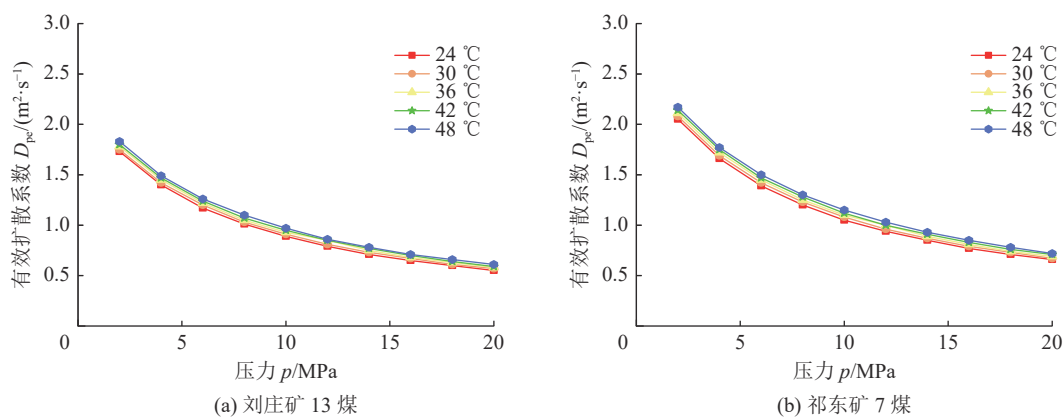
图 4 研究区样品中 CH<sub>4</sub> 的 Fick 型扩散系数随压力变化Fig.4 Change diagram of the Fick-type diffusion coefficient of CH<sub>4</sub> in the study area sample along with the pressure

图 5 研究区样品中气体的 Knudsen 型扩散系数随温度变化

Fig.5 Change diagram of Knudsen-type diffusion coefficient of gas in the study area

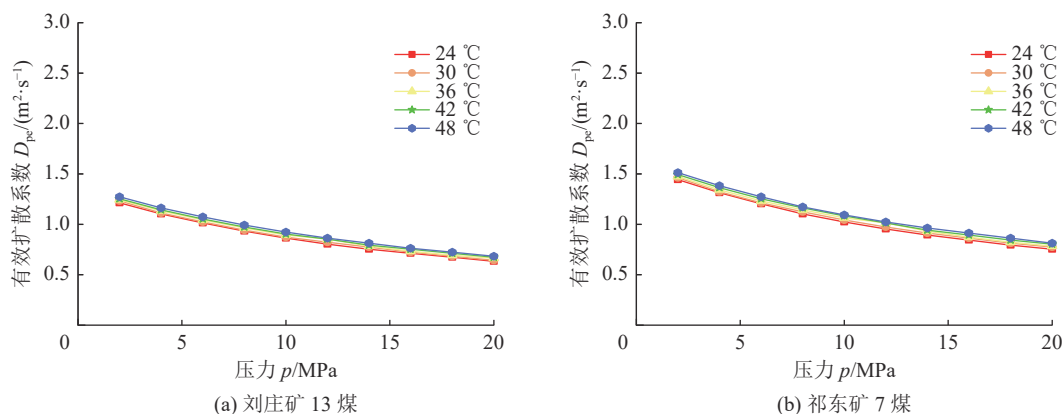
图 6 研究区样品中 CO<sub>2</sub> 的过渡型扩散系数随压力变化Fig.6 Change diagram of the transition-type diffusion coefficient of CO<sub>2</sub> along with the pressure in the study area samples

数随压力变化更明显,当压力条件增加至 20 MPa 后,达到一个平衡值,基本不再随压力增加而增加;同压力条件下,扩散系数的大小随温度的变化并不明显,并且当压力增加时这种影响会变得更小,但温度的增加仍与扩散系数呈正相关,如图 3 所示。由此分析可知,储层中的气体的扩散系数主要取决于储层中压力,温度的影响性较小。同时,在同一样品中温

压条件相同的条件下,CO<sub>2</sub> 的扩散系数明显低于 CH<sub>4</sub> 的扩散系数,可见气体分子量也是影响 Fick 型扩散系数的重要条件,气体分子量小的 CH<sub>4</sub> 同煤岩孔壁的接触更少,Fick 扩散更加占优势。

图 5 展示了研究区样品中气体的 Knudsen 型扩散系数与温度的关系。

从图 5 中可以看出,CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 气体的 Knud-

图 7 研究区样品中  $\text{CH}_4$  的过渡型扩散系数随压力变化Fig.7 Change diagram of the transition-type diffusion coefficient of  $\text{CH}_4$  along with the pressure in the study area samples

sen 型扩散系数随温度增加每  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 扩散系数增加  $0.2\text{ m}^2/\text{s}$ , 受温度影响变化不明显, 但其受煤层孔隙直径及气体类型影响明显。

取刘庄矿 13 煤煤样孔隙直径为  $5\text{ nm}$ , 祁东矿 7 煤煤样孔隙直径为  $3\text{ nm}$ , 由于 Knudsen 型扩散系数同压力无关, 因此取不考虑压力条件, 当温度条件为  $48\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 刘庄矿 13 煤样品中  $\text{CO}_2$  的 Knudsen 型扩散系数为  $2.35\text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\text{CH}_4$  的 Knudsen 型扩散系数为  $1.41\text{ m}^2/\text{s}$ , 祁东矿 7 煤样品中  $\text{CO}_2$  的 Knudsen 型扩散系数为  $2.79\text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\text{CH}_4$  的 Knudsen 型扩散系数为  $1.68\text{ m}^2/\text{s}$ ; 温度条件  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 刘庄矿 13 煤样品中  $\text{CO}_2$  的 Knudsen 型扩散系数为  $2.26\text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\text{CH}_4$  的 Knudsen 型扩散系数为  $1.36\text{ m}^2/\text{s}$ , 祁东矿 7 煤样品中  $\text{CO}_2$  的 Knudsen 型扩散系数为  $2.69\text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\text{CH}_4$  的 Knudsen 型扩散系数为  $1.61\text{ m}^2/\text{s}$ 。

根据数据比较分析, 同一煤岩样品中气体的 Knudsen 型扩散系数变化会随温度增加有较小的增长。同温度条件下, 气体的类型对于 Knudsen 型扩散系数有着更大的影响,  $\text{CO}_2$  的扩散系数明显高于  $\text{CH}_4$  的扩散系数。同时, 样品的孔隙直径越大反而不利于气体在煤层中进行 Knudsen 型扩散。

图 6、图 7 显示, 研究区样品中气体的过渡型扩散系数与压力变化的关系。

由图 6、图 7 可以看出, 当温度条件  $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 压力条件  $20\text{ MPa}$  时, 刘庄矿 13 煤样品中  $\text{CO}_2$  的过渡型扩散系数为  $0.61\text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\text{CH}_4$  的扩散系数为  $0.69\text{ m}^2/\text{s}$ ; 祁东矿 7 煤样品中  $\text{CO}_2$  的扩散系数为  $0.72\text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\text{CH}_4$  的扩散系数为  $0.82\text{ m}^2/\text{s}$ 。当温度条件  $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 压力条件  $2\text{ MPa}$  时, 刘庄矿 13 煤样品中  $\text{CO}_2$  的扩散系数为  $1.83\text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\text{CH}_4$  的扩散系数为  $1.28\text{ m}^2/\text{s}$ ; 祁东矿 7 煤样品中  $\text{CO}_2$  的扩散系数为  $2.17\text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\text{CH}_4$  的扩散

系数为  $1.52\text{ m}^2/\text{s}$ 。

对比图 6 和图 7, 能够明显看出气体类型对于过渡型扩散系数的影响, 分子直径更小的气体, 即  $\text{CO}_2$  在压力较低的条件能够有更大的扩散系数。但当压力开始下降时, 分子直径更小的气体其敏感性更高, 下降速率在压力  $2\sim 10\text{ MPa}$  区间内尤其明显, 而当压力达到  $10\text{ MPa}$  以后下降速率降低, 压力达到  $20\text{ MPa}$  后基本趋于平缓。当压力达到一定值时, 气体分子直径小的过渡型扩散系数反而会低于气体分子直径更大气体。

### 3.3 扩散速率的变化特征

本文扩散速率变化特征以  $\text{CH}_4$  气体为研究对象, 温度选取  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$  以及  $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 压力条件为  $2\sim 20\text{ MPa}$ 。

#### 3.3.1 计算公式推导

气体由煤基质系统向裂隙系统扩散过程符合 Fick 第一定律, 其中扩散通量即扩散速率 ( $\text{cm}^3/(\text{g}\cdot\text{s})$ ) 表达式<sup>[25]</sup>可表示为:

$$q_m = \frac{1}{D\sigma} [C(p) - C] \quad (8)$$

平衡条件下基质边缘气体质量浓度 ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ), 可表示为<sup>[25]</sup>:

$$C(p) = (C_p + C_r) \quad (9)$$

煤基质孔隙系统中吸附气体质量浓度 ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ), 可表示为<sup>[25]</sup>

$$C_p = \frac{V_L p}{p_L + p} \quad (10)$$

游离气质量浓度 ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) 可表示为<sup>[25]</sup>:

$$C_r = \frac{V_{STP}}{m} \quad (11)$$

所计算气体体积受温度及压力影响, 需要将气体校正到标准状态下, 才能进行同一尺度的比较和计算, 标准状态下的气体体积 ( $\text{cm}^3$ ), 可表示为<sup>[25]</sup>:



$$V_{STP} = \frac{TP_0V_m}{P_0T} \quad (12)$$

将扩散系数  $D$  与基质形状因子  $\sigma$  结合起来, 定义一个时间常数  $\varepsilon$ , 如下<sup>[17]</sup>

$$\varepsilon = \frac{1}{D\sigma} \quad (13)$$

完全推导后的扩散通量可表示为<sup>[17]</sup>:

$$q_m = \frac{1}{\varepsilon}[C(p) - C] \quad (14)$$

式中,  $D$  为扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\sigma$  为基质形状因子,  $\text{m}^{-2}$ ;  $C$  为煤中气体平均质量浓度,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $C_p$  为煤颗粒在压力  $p$  达到吸附平衡时, 煤基质边界气体质量浓度,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;

$C_p$  为煤基质孔隙系统中吸附气体质量浓度,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $C_r$  为游离气体质量浓度,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $V_{STP}$  为标准状态下气体体积,  $\text{cm}^3$ ;  $P_0$  为标准大气压, 101.33 KPa;  $P_m$  为介质压力, MPa;  $P_L$  为朗格缪尔压力, MPa;  $V_L$  为朗格缪尔体积,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $V_m$  为孔隙体积,  $\text{cm}^3$ ;  $m$  为样品质量, g。

形状因子选取根据基质形状, 通过表 7 选取。

表 7 煤基质单元形态因子<sup>[26]</sup>

Table 7 Coal matrix unit morphfactor

基质单元几何形状	特征参数	形态因子
板状	板宽 $L$	$(\pi/L)^2$
柱状	底面半径 $R$	$5.78/R^2$
球状	球体半径 $R$	$(\pi/R)^2$

通过式 (8)—式 (13), 取温度条件 42、48 °C, 压力条件 2 ~ 20 MPa, 计算 CH<sub>4</sub> 气体在刘庄矿 13 煤和祁东矿 7 煤样品中不同孔隙类型里的扩散速率, 即气体不同扩散类型的扩散速率, 结果如图 8—10 所示。

从图 8—10 可以看出, 温度条件 48 °C, 压力条件 20 MPa 下, 刘庄矿 13 煤样品中 Fick 型扩散类型的扩散速率为 0.370  $\text{cm}^3/(\text{g}\cdot\text{s})$ , 祁东矿 7 煤样品中 Fick 型扩散类型的扩散速率为 0.370  $\text{cm}^3/(\text{g}\cdot\text{s})$ ; 刘庄矿 13 煤样品中 Knudsen 型扩散类型的扩散速率为 0.310  $\text{cm}^3/(\text{g}\cdot\text{s})$ , 祁东矿 7 煤样品中 Knudsen 型扩散类型的扩散速率为 0.277  $\text{cm}^3/(\text{g}\cdot\text{s})$ ; 刘庄矿 13 煤样品中过渡型扩散类型的扩散速率为 0.161  $\text{cm}^3/(\text{g}\cdot\text{s})$ , 祁东矿 7 煤样品中过渡型扩散类型的扩散速率为 0.152  $\text{cm}^3/(\text{g}\cdot\text{s})$ 。CH<sub>4</sub> 气体在煤基质中 Fick 型扩散

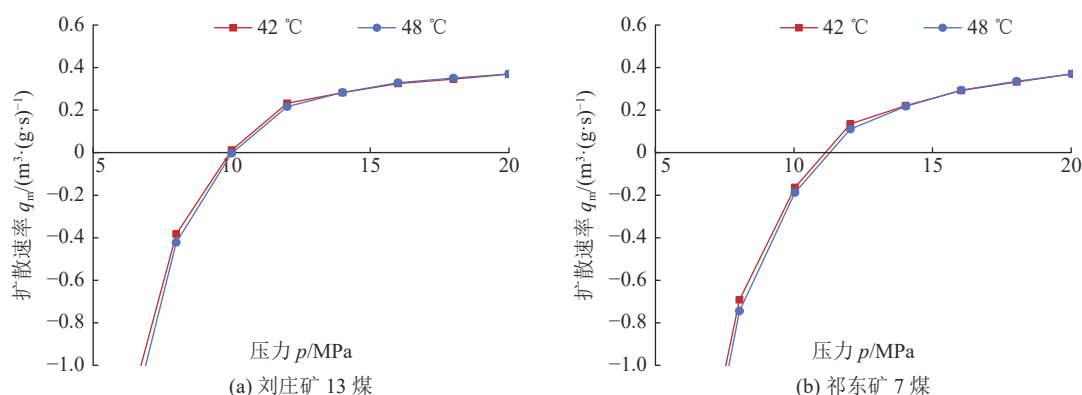


图 8 研究区样品中 CH<sub>4</sub> 的 Fick 型扩散速率随压力变化

Fig.8 Change diagram of the Fick-type diffusion rate of CH<sub>4</sub> with pressure in the study area samples

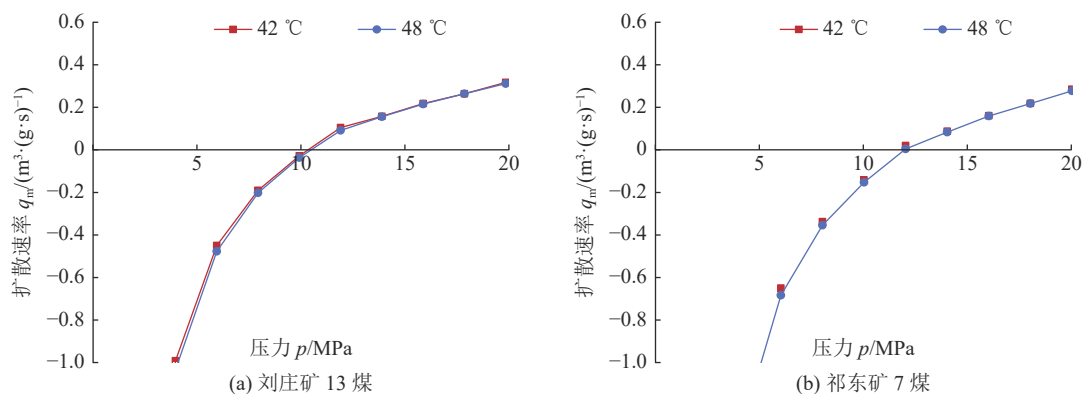
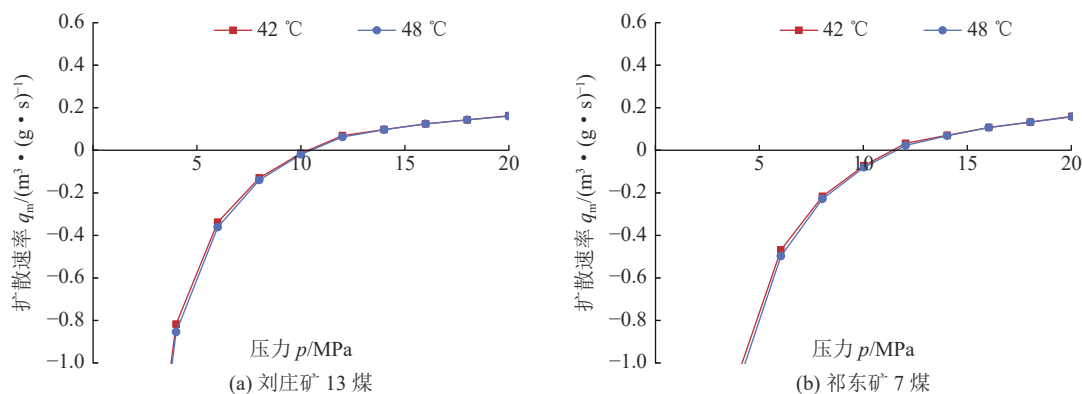


图 9 研究区样品中 CH<sub>4</sub> 的 Knudsen 型扩散速率随压力变化

Fig.9 Change diagram of the Knudsen-type diffusion coefficient of CH<sub>4</sub> in the study area sample along with the pressure

图 10 研究区样品中  $\text{CH}_4$  的过渡型扩散系数随压力变化Fig.10 Change diagram of the transition-type diffusion coefficient of  $\text{CH}_4$  along with the pressure in the study area samples

的扩散速率明显高于 Knudsen 型扩散的扩散速率, 过渡型扩散的扩散速率最低, 表明在刘庄矿 13 煤和祁东矿 7 煤样品中,  $\text{CH}_4$  气体扩散类型以 Fick 型扩散为主时能够较快的扩散, 以过渡型扩散为扩散类型为主时会降低扩散速度。

同时, 还可以看出, 42 和 48  $^{\circ}\text{C}$  扩散速率随压力变化曲线基本重合, 表明温度对于扩散速率的影响并不大。

### 3.4 气体扩散差异对 $\text{CO}_2$ -ECBM 的影响

根据表 6 的数据显示, 储层条件 (24 ~ 48  $^{\circ}\text{C}$ 、2 ~ 20 MPa) 下, 刘庄矿与祁东矿的煤样中的  $\text{CH}_4$  与  $\text{CO}_2$  气体均以 Fick 型扩散为主, 而根据图 3—7 的气体扩散系数的数据显示,  $\text{CH}_4$  相比  $\text{CO}_2$  在 Fick 型扩散中更具优势, 但在 Knudsen 型扩散和过渡型扩散中  $\text{CO}_2$  气体扩散系数要高于  $\text{CH}_4$ 。

在  $\text{CO}_2$ -ECBM 过程中,  $\text{CO}_2$  的扩散路径为压裂裂缝-宏观孔隙-内生裂隙-显微孔隙-大孔-中孔-微孔,  $\text{CH}_4$  的扩散路径刚好相反,  $\text{CO}_2$  在微孔中的扩散能够快速扩散, 不仅能够提高  $\text{CO}_2$  的注气速度, 还能够更快地同  $\text{CH}_4$  进行置换, 提高  $\text{CH}_4$  的产量。

## 4 结 论

1) 刘庄矿 13 煤和祁东矿 7 煤样品, 孔隙分布中以微孔及小孔孔容占比最高, 储层条件下 2 个煤样中气体均主要以 Fick 型扩散为主, 过渡型扩散次之, Knudsen 型扩散占比最低。

2) 温度对于 Fick 型扩散系数以及过渡扩散类型系数的影响远远小于压力的影响, 2 种扩散类型的扩散系数都随压力的增加而降低, 且气体扩散系数在 0 ~ 5 MPa 内随压力下降变化速率最大。当压力值达到 20 MPa 后, 2 种扩散类型的扩散系数基本都趋于平衡, 相较于 2 MPa 时的扩散系数, 缩小了近

10 倍。

3) 温度对于 Knudsen 型扩散系数的影响比较明显地高于其他 2 种扩散类型, 温度每增加 6  $^{\circ}\text{C}$ , 其扩散系数增加 0.2  $\text{m}^2/\text{s}$ , Knudsen 型扩散系数基本呈较缓的线性增长。

4)  $\text{CH}_4$  相比  $\text{CO}_2$  在 Fick 型扩散中更具优势, 但在 Knudsen 型扩散和过渡型扩散中  $\text{CO}_2$  气体扩散系数要高于  $\text{CH}_4$ 。

5)  $\text{CH}_4$  气体以 Fick 型扩散或 Knudsen 型扩散为扩散类型时能够较快的在煤孔隙中扩散, 以过渡型扩散为扩散类型为主时扩散速度会较慢;

6)  $\text{CO}_2$ -ECBM 过程中,  $\text{CO}_2$  在微孔及小孔中相比  $\text{CH}_4$  更具有扩散优势, 增加煤层的微孔及小孔占比能够提高  $\text{CO}_2$  的注气速度以及  $\text{CH}_4$  的产量, 增强  $\text{CO}_2$ -ECBM 的产气效果, 对实现  $\text{CO}_2$ -ECBM 技术突破提供理论依据。

### 参考文献(References):

- [1] 邢万丽. 煤中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2$  及多元气体吸附/解吸、扩散特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.  
XING Wanli. Study on adsorption / desorption and diffusion characteristics of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$  and multicomponent gases in coal[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [2] RUCKENSTEINE, VAIDYANATHAN S A, YOUNGQUIST R G. Sorption by solids with bidisperse pore structures[J]. *Chemical Engineering Science*, 1971, 26: 1305-1318.
- [3] 张时音, 桑树勋. 不同煤级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 Coal-bed methane in different rank coals[J]. *Coal Geology of China*, 2009, 21(3): 24-27.
- [4] 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.
- [5] LI Xiangchun, NIE Baisheng, ZHANG Ruming, *et al.* Experiment of gas diffusion and its diffusion mechanism in coal[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2012, 22(6): 885–889.
- [6] MENG Ya, LI Zhiping. Experimental study on diffusion property of methane gas in coal and its influencing factors[J]. *Fuel*, 2016, 185: 219–228.
- [7] LI Guoqing, MENG Zhaoping. A preliminary investigation of CH<sub>4</sub> diffusion through gas shale in the Paleozoic Longmaxi Formation, southern Sichuan basin, China[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 36: 1220–1227.
- [8] WANG Yucang, XUE Sheng, XIE Jun. A general solution and approximation for the diffusion of gas in a spherical coal sample[J]. *International Journal of Mining Science Technology*, 2014, 24(3): 345–348.
- [9] MENG Ya, LI Zhiping. Experimental comparisons of gas adsorption, sorption induced strain, diffusivity and permeability for low and high rank coals[J]. *Fuel*, 2018, 234: 914–923.
- [10] CHARRIERE D, POKRYSZKA Z, BEHRA P. Effect of pressure and temperature on diffusion of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> into coal from the Lorraine basin (France)[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 81(4): 373–380.
- [11] BUSCH A, GENSTERBLUM Y. CBM and CO<sub>2</sub>-ECBM related sorption processes in coal: A review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 87(2): 49–71.
- [12] STAIB G, SAKUROVS R, GRAY E M A. Dispersive diffusion of gases in coals. Part II: An assessment of previously proposed physical mechanisms of diffusion in coal[J]. *Fuel*, 2015, 143: 620–629.
- [13] 李志强, 段振伟, 景国勋. 不同温度下煤粒瓦斯扩散特性试验研究与数值模拟[J]. *中国安全科学学报*, 2012, 22(4): 38–42.
- LI Zhiqiang, DUAN Zhenwei, JING Guoxun. Experimental study on gas diffusion characteristics from coal at different temperatures and their numerical simulation[J]. *China Safety Science Journal*, 2012, 22(4): 38–42.
- [14] CIEMBRONIEWICZ A, MARECKA A. Kinetics of CO<sub>2</sub> sorption for two Polish hard coals[J]. *Fuel*, 1993, 72(3): 405–408.
- [15] MENG Ya, LI Zhiping, LAI Fengpeng. Experimental study on porosity and permeability of anthracite coal under different stresses[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 133: 810–817.
- [16] PAN Z J, CONNELL L D. Modelling permeability for coal reservoirs: A review of analytical models and testing data[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 92: 1–44.
- [17] 孟召平, 张贵元, 刘金融, 等. 低煤阶煤中甲烷扩散性能分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(2): 84–89.
- MENG Zhaoping, ZHANG Guiyuan, LIU Jinrong, *et al.* Analysis of diffusion properties of methane in low rank coal[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(2): 84–89.
- [18] 韦重韬, 周荣福. 煤层气多煤层扩散逸失地质历史模型及数值模拟[J]. *高校地质学报*, 2003, 9(3): 390–395.
- WEI Chongtao, ZHOU Rongfu. Geological history model and its numerical simulation of coalbed methane emission for multi-Coal seams[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(3): 390–395.
- [19] 何学秋, 聂百胜. 孔隙气体在煤层中扩散的机理[J]. *中国矿业大学学报*, 2001, 30(1): 3–6.
- HE Xueqiu, NIE Baisheng. Diffusion mechanism of porous gases in coal seams[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2001, 30(1): 3–6.
- [20] 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): 27–31.
- NIE Baisheng, HE Xueqiu, WANG Enyuan. Mechanism and modes of gas diffusion in coal seams[J]. *China Safety Science Journal*, 2000, 10(6): 27–31.
- [21] 曹成润, 牛 伟, 张遂安等. 煤层气在煤储层中的扩散及其影响因素[J]. *世界地质*, 2004, 9(3): 266–269.
- CAO Chengrun, NIU Wei, ZHANG Suian, *et al.* Diffusion and its influences of coalbed methane in coal reservoirs[J]. *Global Geology*, 2004, 9(3): 266–269.
- [22] 张磊. 刘庄煤矿突水水害危险性评价与涌水量预测[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021. 000653.
- ZHANG Lei. Water inrush risk assessment and water inflow prediction in Liuzhuang Coal Mine[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2021, 000653.
- [23] 田强国. 祁东煤矿地质构造对煤与瓦斯突出的影响研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2009.
- TIAN Guoqiang. The Study on The Influence of Geologic Structure on Gas Outburst in Qidong Coal Mine[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2009.
- [24] 闫宝珍, 王延斌, 倪小明. 地层条件下基于纳米级孔隙的煤层气扩散特征[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(6): 657–660.
- YAN Baozhen, WANG YanBin, NI Xiaoming. Coalbed methane diffusion characters based on nano-scaled pores under formation conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(6): 657–660.
- [25] 杨兆彪, 秦 勇, 王兆丰, 等. 钻井液条件下煤芯煤层气解吸-扩散模型及逸散量求取[J]. *中国科学:地球科学*, 2010, 40(2): 171–177.
- YANG Zhaobiao, QIN Yong, WANG Zhaofeng, *et al.* Desorption-diffusion model and lost gas quantity estimation of coalbed methane from coal core under drilling fluid medium[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 2010, 40(2): 171–177.
- [26] PRICE H S, MCCULLOCH R C, EDWARDS J C, *et al.* A computer model study of methane migration in coal beds[J]. *Canad Min Metallurg Bull*, 1973, 66: 103–112.