

煤岩体基质和裂隙渗透率的试验测算方法

魏明尧¹, 皇甫昊棋², 陆春钦², 高康², 蔚立元³, 郭奉献²

(1. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心 矿山互联网应用技术国家地方联合工程实验室, 江苏 徐州 221008;
2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 深地工程智能建造
与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 煤体是由微观基质和宏观裂隙系统组成的双重孔隙介质。基质孔隙内的流体运移、气体吸附/解吸、气体滑脱和扩散等行为是影响流体长期运移的重要因素。目前由于无法单独测量基质渗透率, 大量研究中将煤体裂隙渗透率假定为整体渗透率, 忽略了基质在整体流动过程中的控制作用。基于微观基质内滑脱效应引起的渗透率偏离特征, 提出了一种煤岩体基质和裂隙渗透率的测算方法。通过对煤样在不同孔压和有效应力条件下的整体表观渗透率进行数据处理, 得出了有效应力影响下的煤体基质和裂隙渗透率演化规律。同时采用高精度CT扫描仪测得无荷载下的煤体裂隙渗透率值, 对比验证了本测算方法的准确性。结果表明: 同种煤样在相同有效应力下的基质渗透率比裂隙渗透率小2~3个数量级; 不同变质程度煤样, 基质和裂隙渗透率均随着有效应力的增加逐渐减小; 煤样渗透率的应力敏感程度与变质程度密切相关, 无烟煤变化幅度最明显, 褐煤次之, 烟煤最小。

关键词: 基质渗透率; 裂隙渗透率; 滑脱效应; 有效应力

中图分类号: TD 313 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)02-0413-10

Experimental measurement method of matrix and fracture permeability of coal and rock mass

WEI Mingyao¹, HUANGFU Haoqi², LU Chunqin², GAO Kang², YU Liyuan³, GUO Fengxian²

(1. National and Local Joint Engineering Laboratory of Internet Application Technology on Mine, IoT Perception Mine Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Coal body has a complex pore-fracture structure and can be regarded as a dual pore medium composed of matrix and fracture system. The flow behaviors such as fluid migration, gas adsorption/desorption, gas slip and diffusion in the matrix pores have important impacts on the overall fluid migration. Due to the inability to measure the matrix permeability independently, the single fracture permeability of the coal body is assumed to be the overall permeability in many studies. The controlling role of the matrix permeability in the overall

收稿日期: 2024-09-22 修回日期: 2024-12-20 DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.20240458

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0128300); 中央高校基本科研业务费专项资金(2023ZDPYTD04)

通信作者: 魏明尧(1984—), 男, 江苏省徐州市人, 副研究员, 工学博士, 从事多孔介渗流方面的研究。

E-mail: cumtwmy@sina.com Tel: 0516-83590839

引用格式: 魏明尧, 皇甫昊棋, 陆春钦, 等. 煤岩体基质和裂隙渗透率的试验测算方法[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(2): 413-422.

WEI Mingyao, HUANGFU Haoqi, LU Chunqin, et al. Experimental measurement method of matrix and fracture permeability of coal and rock mass[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(2): 413-422.

flow process is ignored usually. Based on the permeability deviation characteristics caused by the gas slippage effect in the matrix, this paper presents a measurement method of the coal matrix and fracture permeability. By calculating and processing the overall permeability data of different coal samples, the evolution laws of the matrix and fracture permeability of the tested coal sample under different effective stresses are obtained. Meanwhile, the fracture permeability value of the coal body under no load is obtained by high-precision CT scanning of the coal samples, and the accuracy of this measurement method is verified by comparison. The results show that for the same coal sample, under the same effective stress, the matrix permeability is 2 to 3 orders of magnitude smaller than the fracture permeability; for the four different sets of tested coal samples, both the matrix and fracture permeability gradually decrease with the increase of effective stress. But due to the different metamorphic degrees of the coal samples, the reduction amplitudes are also different, with anthracite having the most obvious decrease, followed by lignite, and bituminous coal having the smallest.

Key words: matrix permeability; fracture permeability; slippage effect; effective stress

我国拥有丰富的煤层瓦斯资源,但多数资源由于受到地质条件和开采技术等综合情况的制约未能有效开采.随着我国煤层气资源开采向深部发展,煤层应力和瓦斯压力不断升高,造成深部开采瓦斯灾害问题更加严重^[1].煤体渗透率作为反映煤储层中气体流动的关键性参数,是决定瓦斯抽采效率的重要指标.我国煤田分布范围广,地质条件差异大,煤体孔隙结构各不相同,不同尺度下渗透性能差异导致瓦斯抽采效果也千差万别.因此,研究煤体不同尺度孔隙的渗透特性及演化规律对提高瓦斯抽采效率和矿井安全高效开采具有重要意义.

由于煤中孔隙在微观和宏观范围均分布广泛,煤体通常被认为是一种典型的基质-裂隙双重孔隙介质^[2].基质系统为主要的储气空间,裂隙系统为流体提供流动通道,孔裂隙的性质对煤体气体吸附和运移特性有直接的影响^[3-4].基质孔隙孔径范围一般为 $10^{-8} \sim 10^{-3}$ cm,裂隙网络则由小到毫米级的细观裂隙至大到米级的宏观裂隙、断层等组成.煤储层基质微观孔隙结构控制着煤层中煤层气的赋存状态、吸附/解吸、渗流和扩散等过程,不仅影响煤层气含气量,而且对煤层气的可采性及抽采效率有重要影响.大量学者采用氮气吸附、二氧化碳吸附、压汞法和 CT 试验测试了煤体的多尺度孔隙、裂隙结构,认为数量较高的微孔和小孔含量影响瓦斯吸附能力,煤体的极限吸附能力受微孔和中孔的共同影响,而尺寸较大的中孔和裂隙系统发育好坏直接决定了煤储层气体是否具有可采性^[5-7].

瓦斯在煤层中的渗流是一个多尺度和多物理

场的动态过程,其渗流特性不仅受多尺度孔裂隙结构特征影响,还受到煤体力学性能等多重耦合因素的影响.在宏观裂隙尺度上,煤体渗透率不仅可以反映瓦斯的渗流特性,同时还是瓦斯抽采和煤层气开发的重要参数.因此大量学者针对煤体渗透率的演化规律开展了试验研究,包括研究瓦斯吸附、瓦斯压力、有效应力、滑脱效应、损伤等对渗透率的影响规律^[8-12].并提出了多种考虑不同边界条件、围压、吸附等因素的煤体渗透率模型^[13].同时由于真实储层中气体在裂隙流动和基质内扩散机制不同,并且 2 个系统存在相互影响关系^[14-16].但据研究发现,微观基质孔隙内的多相流动、气体吸附/解吸、气体滑脱和扩散等非达西组分对煤层瓦斯抽采等有很大的影响.

气体在致密基质中流动时,气体分子与储层表面之间没有紧密接触,在储层表面具有一定的非零速度,导致气测渗透率大于液测渗透率,这种现象称为气体滑脱效应.在致密储层的微小孔道中流动时,气体的滑脱效应更为明显.近年来,气体滑脱效应在煤层气、页岩气和致密气开发研究时受到了广泛关注.许多学者对滑脱效应的机理、适用性及其对渗透率的影响进行了大量的研究.文献[17]在 1934 年定义了努森数 K_n ,无量纲,认为 $K_n > 0.001$ 时,气体在煤体渗流中出现滑脱效应,滑脱现象的实质是气体分子与孔壁表面的相互作用.文献[18]在研究一系列孔隙压力和不同含水饱和度下的气体渗透性和扩散率的基础上,建立了一个修正的 Klinkenberg 方程来确定滑动系数,并发现由新型孔渗关系导出的特征孔径指数与滑动系数具有良好的相关性.文献[19]分析

了不同等级煤在有效应力作用下的透气性,提出了一种新的气滑效应评价方法,利用煤的渗透性改善程度定量评价瓦斯滑脱效应对煤渗透性的影响程度.文献[20]研究了煤层特征对 Klinkenberg 效应的影响,在火柴棒概念模型的基础上,提出了一种将克林肯伯格效应与恒有效应力下渗透率变化隔离的修正模型.文献[21]研究了 Klinkenberg 方程无法准确描述低渗透介质的滑脱效应,并提出了一个类似于 Klinkenberg 的理论方程来描述滑脱效应,新方程准确地预测了气体流动数据的表观渗透率,并显示了表观渗透率与压力倒数之间的二次关系.文献[22]提出了固体变形与气体流动的耦合数学模型,用数值程序求解了含 Klinkenberg 效应的气体流动方程,研究了气体压力和气体解吸对气体渗透性的依赖关系对气体流动的重要影响.

综上所述,近些年来煤体渗流理论模型和相关试验被大量研究,但由于基质渗透率在一般情况下要比裂隙渗透率小 2~3 个数量级,众多学者都将裂隙渗透率统一归为煤体整体渗透率^[23-24],忽略了基质渗透率在渗流中的作用.而煤体作为一种由基质系统和裂隙系统组成的双重孔隙介质,虽然包括人工裂缝和天然裂隙对短期的气体流动有重要影响,但基质孔隙内的多相流动、气体吸附/解吸、气体滑脱和扩散等因素决定了煤层瓦斯的长期抽采效果.因此,有必要分别研究基质和裂隙系统渗透率的演化规律.

本文将煤体的多尺度孔隙分布简化为微观的基质孔隙和宏观的裂隙孔隙,整体表观渗透率即是基质渗透率和裂隙渗透率的叠加.基于微观孔隙的滑脱效应理论框架,通过计算微观基质内滑脱效应引起的渗透率偏离量,首次建立了一种煤体基质渗透率计算模型及其测算方法,实现了微观基质和宏观裂隙 2 种孔隙系统渗透率的准确测量.并采用室内试验、理论模型分析的研究手段,深入研究了微观基质和宏观裂隙渗透率在不同有效应力影响下的演化规律.本测算技术能够为深入研究不同尺度孔隙结构的演化规律提供数据支持,进而为煤层瓦斯资源安全开发利用等提供理论依据.

1 基于滑脱效应的基质渗透率计算模型

1.1 考虑滑脱效应的渗透率模型

在煤体微孔和中孔(纳米级)中,气体通过纳米孔输送时,气体分子与孔壁之间的碰撞作用占

主导地位,而不是气体分子之间的碰撞,靠近孔隙表面的气体分子的流动速度与孔道中心的几乎相同.当气体在多孔介质中流动时,随着气体压力的降低,气体分子在孔隙壁面附近的速度不为零,这使得气体渗透性大于液体渗透性,这种现象被称为气体滑脱效应^[25].渗透率与孔隙气体压力倒数近似成线性关系,一种表征考虑气体滑脱效应的渗透率与压力线性关系的经典模型^[25]为

$$k_a = k_\infty \left(1 + \frac{b_k}{P}\right), \quad (1)$$

式中: k_a 为气体表观渗透率, μD ; k_∞ 为煤体固有渗透率或者绝对渗透率, μD ; P 为孔隙压力,Pa; b_k 为气体滑脱系数,又称滑脱因子,Pa.

在一定的压力条件下,煤体的视渗透率和绝对渗透率的差异是显著的,滑脱系数 b_k 表征了达西定律因滑脱效应而偏离的程度,表达式^[26-27]为

$$b_k = \frac{16c\mu}{\omega_p} \sqrt{\frac{2RT}{\pi M_g}}, \quad (2)$$

式中: M_g 为气体分子质量,kg/mol; c 为常数,通常取值为 0.9; μ 为气体的动力黏度系数,Pa·s; ω_p 为孔隙直径, $\omega_p = 2r_e$, r_e 为有效孔隙半径,m; T 为温度,K; R 为理想气体常数,为 8.314 J/(mol·K).

1.2 煤岩体基质渗透率计算模型

在不考虑滑脱效应的作用下,煤体内裂隙和基质的孔隙空间是导致流体运移的通道,总渗透率是基质和裂隙渗透率的叠加^[28],可以定义为

$$k = k_m + k_f, \quad (3)$$

式中: k 不考虑滑脱效应的煤体整体固有渗透率, μD ,可在高孔压下测得; k_m 为煤体基质固有渗透率, μD ; k_f 为煤体裂隙渗透率, μD .

气体分子碰撞的宏观行为是黏性流动,而气体分子与孔壁的碰撞表现为滑脱.当气体压力较小时,气体平均自由程增大,同时如果孔径尺寸较小,气体分子与孔壁碰撞的比例增大,导致滑脱效应显著^[19].研究表明在低渗低压渗流过程中,滑脱效应对基质渗流的影响非常明显^[29].通常认为基质系统内微观孔隙尺度较小,而裂隙系统的宏观孔裂隙较大.在大量低渗储层的双重孔隙模型中,基质渗流模型均考虑了滑脱效应的影响,而认为裂隙系统的滑脱效应可以忽略^[30].文献[31]基于滑脱效应与孔径的关系,提出可以利用滑脱效应计算孔隙尺寸.因此为了区分微观孔隙和宏观孔裂隙结构,可认为较低气压下滑脱效应只发生在

煤体低渗透性的基质内部,高渗透性的裂隙内部不受滑脱效应影响.由此基于基质内滑脱效应引起的渗透率偏离特征提出了基质渗透率的求解模型.

受到滑脱效应影响的煤体整体表观渗透率为

$$k_a = k_m \left(1 + \frac{b_k}{P} \right) + k_f. \quad (4)$$

多孔介质的渗透率与孔隙结构密切相关,煤体基质渗透率模型^[32]可以描述为

$$k_m = \frac{\phi_m r_c^2}{\alpha \tau^2}, \quad (5)$$

式中: ϕ_m 为基质孔隙率; α 为有效系数; τ 为迂曲度,可根据 Archie 第一定律 $\tau/\phi_m = a' \phi_m^{-n}$ 求得^[33],其中 $a' = 0.6, n = 2$.

因此,联立式(2)~(5)得到基于滑脱效应方程的整体表观渗透率的表达式:

$$k_a = k_m \left(1 + \frac{8c\mu}{r_c} \sqrt{\frac{2RT}{\pi M_g}} \frac{1}{P} \right) + (k - k_m). \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)中并简化变形为

$$k_a = \frac{8r_c c \mu \phi_m}{\alpha \tau^2} \sqrt{\frac{2RT}{\pi M_g}} \frac{1}{P} + k. \quad (7)$$

由于滑脱效应只发生在孔隙直径较小的基质内,造成测得的渗透率大于真实值.由此可通过试验测定的不同气压条件下整体表观渗透率数据,将较高孔压下测量值认定为样品固有渗透率 k ,然后采用不同孔压下的整体表观渗透率值对式(7)拟合,得到所测煤体样品有效孔隙半径 r_c ,最终通过式(3)和(5)计算可得出煤体样品基质固有渗透率和裂隙渗透率值.

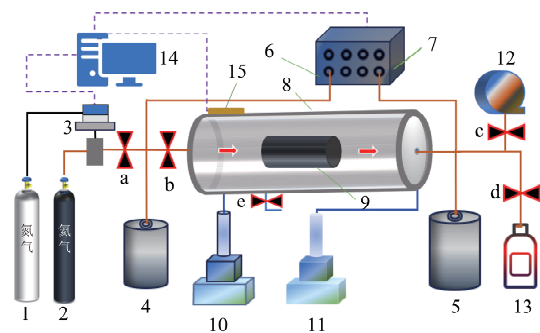
Knudsen 数是反映气体的滑脱效应程度的表征值.当 Knudsen 数较小时(通常小于 0.01),流体可近似看作连续介质,滑脱效应不明显,此时 $k = k_m + k_f$.随着 Knudsen 数逐渐增大,特别是当它处于过渡区(0.01~0.10 左右)和自由分子流区(Knudsen 数较大)时,滑脱效应逐渐变得显著.Knudsen 数主要由孔径和孔压决定,孔压和孔径越小,Knudsen 数越大.在忽略孔压影响时,孔隙直径 $0.13 \mu\text{m}$ 对应的 Knudsen 数是 0.01,表明孔径小于 $0.13 \mu\text{m}$ 会发生滑脱效应.大量压汞和核磁共振的孔径分布测试发现煤体具有典型双重孔隙结构,微孔和宏观孔隙分界线通常分布在 $0.1 \mu\text{m}$ 附近^[29],这与本方法的基质孔径测算范围是一致的.因此采用滑脱效应计算的基质有效孔径值能够表征微观尺度的孔径分布.

2 不同煤种的基质渗透率试验测试

2.1 试验测试设备及方案

采用自主研发的煤岩体气固耦合渗流试验系统开展了煤样不同条件下的渗透率测试.该测试系统包括岩心渗流三轴夹持器、液压加载系统、气压控制系统、计算机数据采集系统、温度控制系统以及抽真空系统.

试验系统如图 1 所示,煤体试样放置于岩心渗流三轴夹持器内部,试验过程中由气压控制器控制气瓶内排出气体压力.2 台液压加载泵控制试样的围压和轴压,上下游各连接一个标准储气罐和气体压力传感器,压力数值由计算机数据采集系统实时记录.



1/2-试验气瓶,3-气压控制器,4/5-标准容积储气罐,a/b/c/d/e-控制阀,6-上游压力传感器,7-下游压力传感器,8-岩心渗流三轴夹持器,9-煤体试样,10-环向注液加载泵,11-轴向注液加载泵,12-真空泵,13-废气储集瓶,14-计算机数据采集设备,15-温度传感器.

图 1 煤岩体气固耦合渗流试验系统示意

Fig. 1 Coal-gas coupled seepage experimental system diagram

测试样品为不同区域煤矿井下采集的原煤,包括 3 种变质程度,分别为无烟煤、褐煤和烟煤.根据试验需求用岩心取样机按照垂直于煤样层理方向钻取尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准煤样若干,经过加工后的煤样均在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干箱内干燥约 24 h,直至样品恒重,以消除煤样内部的水分,而后用保鲜膜将干燥后的若干煤样密封备用.共加工 4 个煤样,其中无烟煤 2 个,褐煤和烟煤各 1 个.

为探索不同应力条件下的煤岩气固耦合渗流规律,开展了不同外部围压和不同孔隙压力下的煤体渗流试验.为了消除气体吸附对煤样渗透率测量的影响,本试验采用无吸附性的氦气作为试验气体.试验过程的有效应力(围压与气压之差)分别为 2, 3, 4, 5, 6 MPa,试验过程中的各组气体压力参数取值见表 1.

表 1 不同应力边界条件下的渗流试验方案
Table 1 Experimental scheme for gas seepage under different stress boundary conditions

分组 编号	孔隙压力/ MPa	轴压/ MPa	围压/ MPa	有效应力/ MPa	分组 编号	孔隙压力/ MPa	轴压/ MPa	围压/ MPa	有效应力/ MPa
I	0.5	2.5	2.5	2→3→4→5→6	IV	3.5	5.5	5.5	2→3→4→5→6
		3.5	3.5				6.5	6.5	
		4.5	4.5				7.5	7.5	
		5.5	5.5				8.5	8.5	
		6.5	6.5				9.5	9.5	
II	1.5	3.5	3.5	2→3→4→5→6	V	4.0	6.0	6.0	2→3→4→5→6
		4.5	4.5				7.0	7.0	
		5.5	5.5				8.0	8.0	
		6.5	6.5				9.0	9.0	
		7.5	7.5				10.0	10.0	
III	2.0	4.0	4.0	2→3→4→5→6	VI	5.0	7.0	7.0	2→3→4→5→6
		5.0	5.0				8.0	8.0	
		6.0	6.0				9.0	9.0	
		7.0	7.0				10.0	10.0	
		8.0	8.0				11.0	11.0	

2.2 煤样整体表观渗透率测试结果

图 2 为 4 组煤样在不同孔隙压力下试样整体表观渗透率随有效应力的变化规律。从煤样渗透率结果整体来看,无烟煤、褐煤和烟煤在不同孔隙压力条件下整体表观渗透率均随有效应力增加呈现负指数函数下降。由于孔隙结构是影响煤体渗透性的主要因素,在孔隙压力固定情况下,由于有效应力的增加,导致煤体内孔隙度和裂隙开度减

小,从而阻碍了孔隙之间的连通,因此致使煤体整体表观渗透率减小。从煤样的种类来看,可以发现相同的试验条件下,所测煤样的整体表观渗透率值由低到高依次为:无烟煤<褐煤<烟煤。对于同一种煤样,当有效应力一定时,试样整体表观渗透率随着孔隙压力的降低逐渐增大。这是由于煤体基质内在相对较低的孔隙压力下会发生滑脱效应,导致煤体渗透率相较于高压下增大。

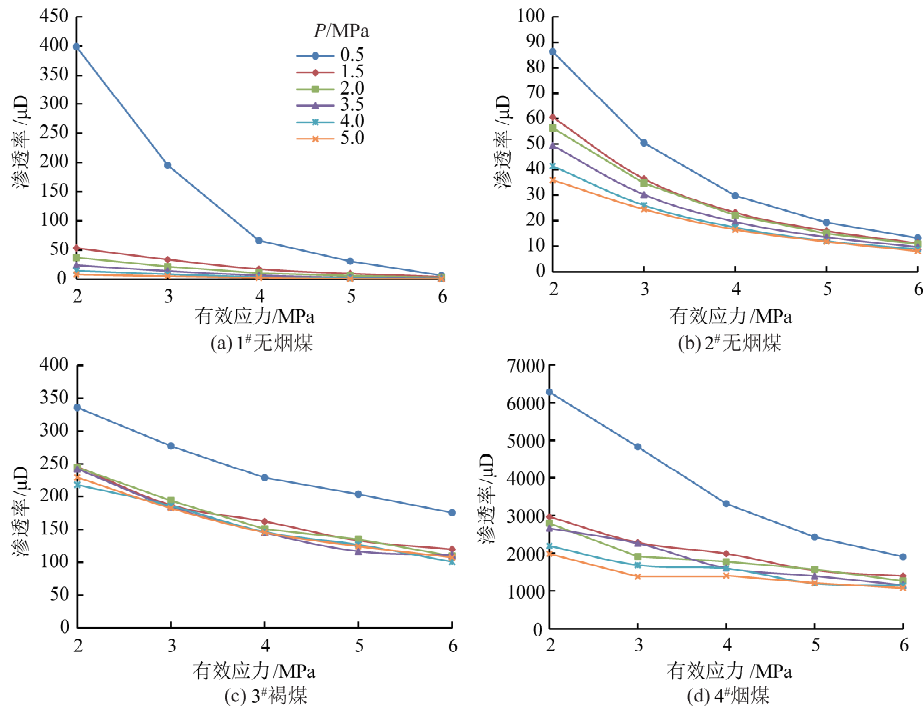


图 2 不同孔压下 4 组煤样整体表观渗透率与有效应力的关系

Fig. 2 Overall apparent permeability versus effective stress for four coal samples at different pore pressures

3 煤体基质渗透率测算结果

3.1 基质渗透率的试验数据处理

由式(7)可知煤体试样的整体固有渗透率 k 与孔隙压力倒数 $1/P$ 呈线性变化. 为了得出煤体

试样在不同应力条件下的基质和裂隙渗透率值, 根据 5 组不同有效应力下的气测整体表观渗透率试验数据, 线性拟合测量数据与气压的关系, 拟合结果如表 2 所示.

表 2 不同应力整体表观渗透率与气压倒数拟合曲线方程
Table 2 Equation of the fitted curve of overall apparent permeability and pore pressure inverse for coal samples under different stresses

煤样	有效应力/ MPa	拟合曲线方程	R^2	煤样	有效应力/ MPa	拟合曲线方程	R^2
1# 无烟煤	2	$k_2 = 9.084/P \times 10^{-11}/P + 8.121 \times 10^{-18}$	0.974	3# 褐煤	2	$k_2 = 6.066 \times 10^{-11}/P + 2.131 \times 10^{-16}$	0.876
	3	$k_3 = 5.7 \times 10^{-11}/P + 5.2 \times 10^{-18}$	0.972		3	$k_3 = 5.324 \times 10^{-11}/P + 1.671 \times 10^{-16}$	0.864
	4	$k_4 = 2.972 \times 10^{-11}/P + 2.6 \times 10^{-18}$	0.972		4	$k_4 = 4.766 \times 10^{-11}/P + 1.32 \times 10^{-16}$	0.878
	5	$k_5 = 1.82 \times 10^{-11}/P + 7.2 \times 10^{-19}$	0.986		5	$k_5 = 4.574 \times 10^{-11}/P + 1.101 \times 10^{-16}$	0.885
	6	$k_6 = 7.848 \times 10^{-12}/P + 6.2 \times 10^{-19}$	0.985		6	$k_6 = 3.974 \times 10^{-11}/P + 9.479 \times 10^{-17}$	0.891
2# 无烟煤	2	$k_2 = 2.489 \times 10^{-11}/P + 3.883 \times 10^{-17}$	0.878	4# 烟煤	2	$k_2 = 1.844 \times 10^{-9}/P + 1.818 \times 10^{-15}$	0.915
	3	$k_3 = 1.324 \times 10^{-11}/P + 2.512 \times 10^{-17}$	0.899		3	$k_3 = 1.283 \times 10^{-9}/P + 1.417 \times 10^{-15}$	0.908
	4	$k_4 = 6.725 \times 10^{-12}/P + 1.706 \times 10^{-17}$	0.931		4	$k_4 = 1.067 \times 10^{-9}/P + 1.269 \times 10^{-15}$	0.958
	5	$k_5 = 3.827 \times 10^{-12}/P + 1.213 \times 10^{-17}$	0.913		5	$k_5 = 6.554 \times 10^{-10}/P + 1.133 \times 10^{-15}$	0.942
	6	$k_6 = 2.416 \times 10^{-12}/P + 8.759 \times 10^{-18}$	0.930		6	$k_6 = 4.434 \times 10^{-10}/P + 1.036 \times 10^{-15}$	0.984

由式(7)可知, 每组渗透率数据拟合曲线都对应一个斜率和截距. 与纵坐标相交的一段截距所对应的一点为不受滑脱效应影响的煤体等效固有渗透率 k . 斜率为式(7)中与气压倒数 $1/P$ 相乘的系数, 该系数与有效孔隙半径 r_e 、基质孔隙度 ϕ_m 、气体动力黏度系数 μ 和迂曲度 τ 等因素相关. 由表 2 可以看出拟合曲线的拟合度平均大于 0.92, 表明拟合公式与试验数据拟合效果较好, 拟合结果误差较小.

3.2 基质和裂隙渗透率演化规律

采用 Auto Pore 9505 型全自动压汞仪测试 4

个煤样 5 mm 粒径样品孔容积, 计算得到基质孔隙率分别为 3.12%, 3.5%, 4.2% 和 7.0%. 结合式(5)和式(7)可知, 当煤体基质孔隙度 ϕ_m 确定时, 公式中其他参数可根据有关文献记载^[32-33]获取. 因此根据煤体整体表观渗透率和气压倒数 $1/P$ 存在的线性关系所拟合出对应斜率和截距值, 即可拟合得到 r_e , 进而由式(5)计算出所对应的煤体基质渗透率. 由式(3)中相对高孔压下所对应的不受滑脱效应影响的煤体固有渗透率 k 与基质渗透率 k_m 的关系, 可得出对应应力条件下的裂隙渗透率值. 不同煤样在不同应力下的 r_e , k_m 和 k_f 如表 3 所示.

表 3 不同应力下的煤体基质和裂隙渗透率拟合值

Table 3 Fitted values of coal matrix and fissure permeability at different stresses

煤样	有效应力/MPa	r_e/nm	$k_m/\mu\text{D}$	$k_f/\mu\text{D}$	煤样	有效应力/MPa	r_e/nm	$k_m/\mu\text{D}$	$k_f/\mu\text{D}$
1# 无烟煤	2	58.20	2.74	5.38	3# 褐煤	2	97.00	12.23	200.87
	3	36.50	1.08	4.12		3	85.10	9.42	157.68
	4	19.00	0.29	2.31		4	76.20	7.55	124.45
	5	11.70	0.11	0.61		5	73.10	6.95	103.15
	6	5.03	0.02	0.60		6	63.60	5.25	89.54
2# 无烟煤	2	40.40	2.06	36.77	4# 烟煤	2	146.00	565.31	1 415.39
	3	21.50	0.58	24.54		3	101.00	273.60	1 106.90
	4	10.90	0.15	16.91		4	84.60	189.23	1 216.97
	5	6.21	0.05	12.09		5	52.00	71.41	1 138.69
	6	3.92	0.02	8.74		6	35.20	32.67	1 046.23

根据表 3 中相关数据,可以描绘出煤体基质和裂隙渗透率随不同有效应力的变化关系,如图 3 所示.从图中变化趋势可以看出,基质渗透率和裂隙渗透率均是随有效应力的增大而减小.其中 1[#]无烟煤渗透率在高应力条件下变化幅度较小,4[#]烟煤裂隙渗透率在 3 MPa 的低谷段推测为测量误差

导致.对于同一种煤样,相同的应力条件下基质渗透率比裂隙渗透率小 2~3 个数量级,这是由于煤体自身的物理结构特征所决定的.此外,基质渗透率与裂隙渗透率的大小与煤的种类有关,通过所测煤样可以看出无烟煤的基质和裂隙渗透率均小于褐煤和烟煤,而烟煤的基质和裂隙渗透率最大.

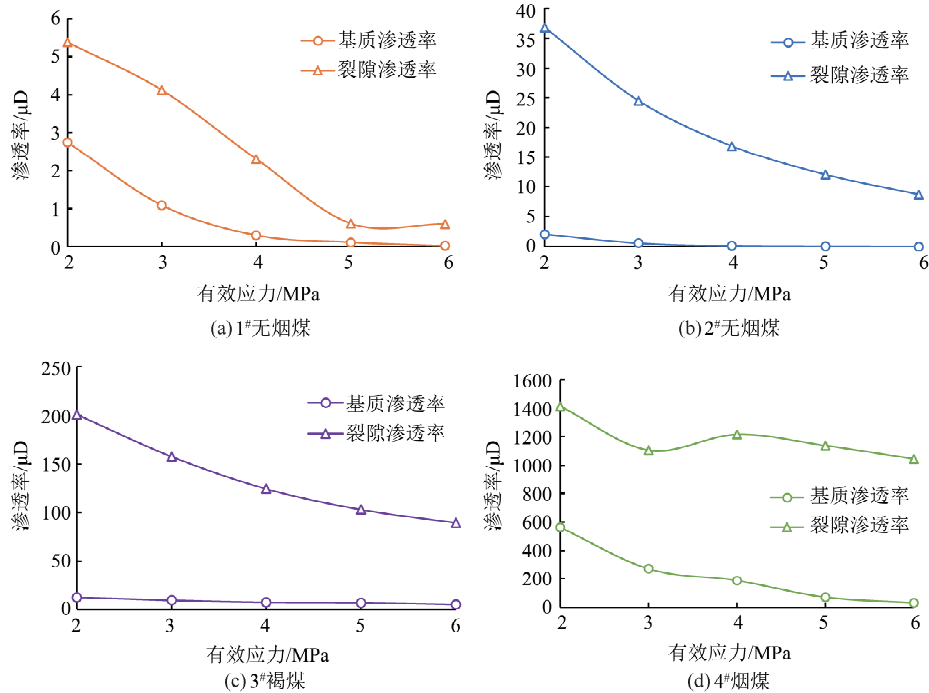


图 3 不同有效应力下的煤体基质和裂隙渗透率变化曲线
Fig. 3 Evolution of matrix and fracture permeability under different effective stresses

4 基于 CT 数字岩芯裂隙渗透率验证

为了验证测算结果的准确性,开展了 4 个煤样高精度 CT 三维可视化扫描试验,提取了三维裂隙网络结构.采用数据处理软件重构了原始煤样的三维可视化模型,通过交互式阈值分割,对二维 CT 切片中的孔裂隙提取,而后三维渲染提取的孔裂隙,得出 4 个煤样 CT 扫描状态下的样品形状和

裂隙结构分布.煤样裂隙重构及不同高度位置切面如图 4 所示.提取和渲染原始煤样内部孔裂隙结构,经过渲染后的三维孔裂隙结构模型呈现出原始煤样内孔裂隙的真实状态.为了量化原始煤样内的孔裂隙结构分布特征,计算煤样的孔隙率大小等特征,得出三维空间下的数字岩芯总孔隙度,结果如表 4 所示.

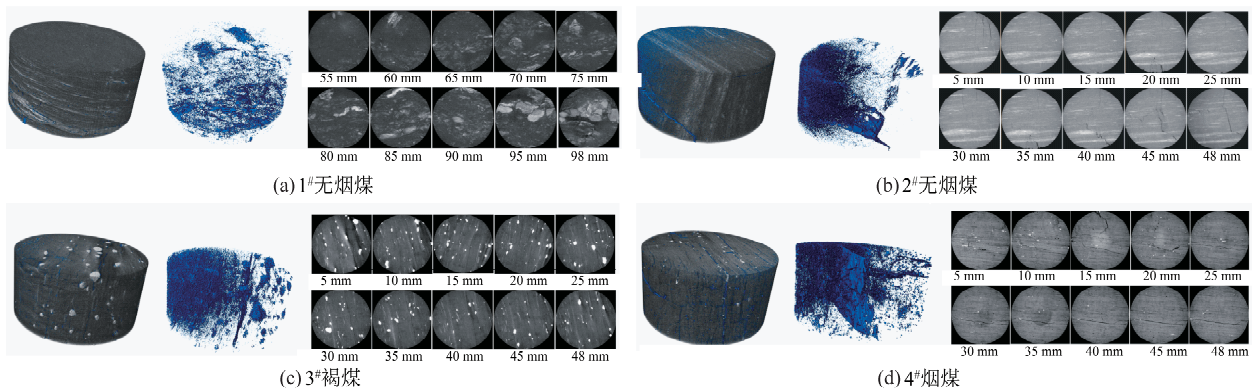


图 4 煤样三维裂隙网络重建后的数字模型
Fig. 4 Numerical models of four coal samples after reconstruction of three-dimensional fracture networks

当微观孔裂隙结构内甲烷分子的平均自由程与孔裂隙特征长度的比值小于 0.001 时,即流体的连续流动符合低雷诺数和低流速条件,煤体内裂隙的连续流动可采用 Navier-Stokes 方程描述. 构建的渗流模型的一端处设置进口压力,另一端处设置出口压力,煤体孔裂隙空间四周被固体边界封闭,流体只是从一端进另一端出,出入口的流量保持不变. 数字煤样三维裂隙网络提取之后,通过煤体的连通孔裂隙结构的 Z 方向进行相同压力梯度下的渗流模拟,通过煤样连通性的计算,得到煤样在无荷载作用下 CT 扫描裂隙渗透率计算结果,如表 4 所示.

表 4 煤体 CT 岩芯和试验数据预测裂隙渗透率
Table 4 Fracture permeability of CT scan and experimental prediction

煤体样品	总孔隙度/%	CT 岩芯裂隙渗透率/ μD	指数渗透率模型预测/ μD
1 [#] 无烟煤	6.82	10.2	22.2
2 [#] 无烟煤	8.28	68.4	72.7
3 [#] 褐煤	10.47	467.0	291.0
4 [#] 烟煤	13.89	823.0	1.5

由于 CT 扫描是在无荷载状态,而试验测试求解的裂隙渗透率值均为应力加载状态,无法直接对比验证. 为了对比无加载状态下的裂隙渗透率,对表 3 中裂隙渗透率值进行模型预测. 由于大量研究表明渗透率与有效应力的关系可由指数函数表示^[29],可以采用指数函数预测得到无加载状态下的裂隙渗透率. 采用如图 5 中所列公式,式中: k_{10} 为无荷载渗透率; ω 为应力敏感系数; σ_e 为有效应力. 拟合表 3 中不同有效应力下的渗透率,拟合的 k_{10} 即为无荷载状态下的渗透率. CT 重构模型中的裂隙渗透率结果与试验数据的模型预测结果对比如图 5 所示.

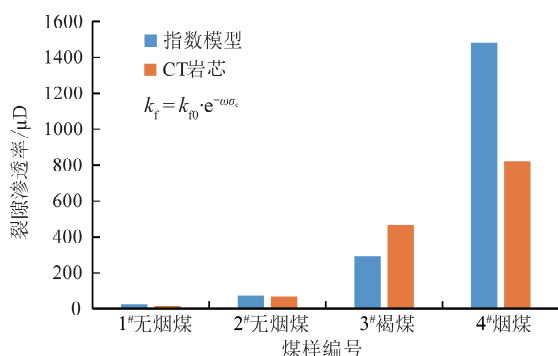


图 5 CT 岩芯和指数模型预测得到的煤体裂隙渗透率对比

Fig. 5 The comparison of the coal fracture permeability obtained by CT core and exponential model prediction

可以看出无烟煤的 2 组数据之间差别较小,烟煤的 2 组数据差别较大,而整体 2 组数据间相关系

数为 0.92,表明 2 组数据比较吻合. 这也说明了基于滑脱效应理论框架所提出的煤体基质和裂隙渗透率模型的合理性和可靠性.

5 结 论

1) 基于低渗介质的滑脱效应理论,建立了考虑基质滑脱效应的整体表观渗透率模型,获得了基质有效孔隙半径与整体表观渗透率的关系式,由此提出了基于基质有效孔径的基质渗透率测算方法. 并根据整体固有渗透率为基质渗透率和裂隙渗透率叠加的关系,同时实现裂隙渗透率的测算. 该方法能够实现不同有效应力条件下的基质渗透率和裂隙渗透率的测算,为不同尺度孔隙的演化规律研究提供了试验测试方法.

2) 在不同有效应力条件下测试样品渗透率,揭示了煤基质和裂隙渗透率在有效应力影响下的演化规律. 随着有效应力的增加,煤基质和裂隙渗透率均呈现下降的趋势. 无烟煤、褐煤和烟煤由于变质程度不同,孔隙尺度随变质程度减小而增大,其应力敏感程度也随变质程度降低而减小. 在相同有效应力条件下,煤基质渗透率比裂隙渗透率小 2~3 个数量级左右,裂隙渗透率的应力敏感度远大于基质.

3) 采用高精度 CT 扫描提取出了 4 个煤样裂隙三维结构分布特征和总孔隙率大小,分析了煤样无荷载状态下的连通性和裂隙渗透率. 裂隙指数模型的预测数据和 CT 岩芯模型结果趋势吻合,验证了煤体基质和裂隙渗透率试验测算结果的准确性和合理性.

参考文献:

- [1] 袁 亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1-6.
YUAN Liang. Strategic considerations for the simultaneous extraction of deep coal and gas in China[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1-6.
- [2] WARREN J E, ROOT P J. The behavior of naturally fractured reservoirs[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1963, 3(3): 245-255.
- [3] 郭勇义, 高亚斌, 曹 敬, 等. 基于修正压汞法的不同瓦斯含量煤样孔隙结构及分形特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6): 1075-1083.
GUO Yongyi, GAO Yabin, CAO Jing, et al. Study on pore structure and fractal characteristics of coal samples with different gas content based on modified MIP[J]. Journal of China University of Mining &

- Technology,2023,52(6):1075-1083.
- [4] 林柏泉,刘厅,杨威.基于动态扩散的煤层多场耦合模型建立及应用[J].中国矿业大学学报,2018,47(1):32-39.
LIN Baiquan, LIU Ting, YANG Wei. Establishing and applying a multi-field coupling model of coal seams based on dynamic diffusion[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2018,47(1):32-39.
- [5] 王刚,陈雪畅,程卫民,等.煤孔裂隙多尺度表征及其对渗透率的影响分析:以中国14个大型煤炭基地为例[J].重庆大学学报,2024,47(4):34-50.
WANG Gang, CHEN Xuechang, CHENG Weimin, et al. Multi-scale characterization of coal pore-fractures and its influence on permeability: A case study of 14 large coal bases in China[J]. Journal of Chongqing University,2024,47(4):34-50.
- [6] 姚艳斌,刘大锰,黄文辉,等.两淮煤田煤储层孔-裂隙系统与煤层气产出性能研究[J].煤炭学报,2006(2):163-168.
YAO Yanbin, LIU Dameng, HUANG Wenhui, et al. Study on the pore-fracture system of coal reservoirs and the production performance of coalbed methane in the Huainan and HuaiBei coalfields[J]. Journal of China Coal Society,2006(2):163-168.
- [7] 李子文,林柏泉,郝志勇,等.煤体孔径分布特征及其对瓦斯吸附的影响[J].中国矿业大学学报,2013,42(6):1047-1053.
LI Ziwen, LIN Baiquan, HAO Zhiyong, et al. Characteristics of coal pore size distribution and its influence on gas adsorption[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2013,42(6):1047-1053.
- [8] 范楠.煤孔隙结构多尺度表征及其对瓦斯运移特性影响的实验研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2021.
FAN Nan. Multi-scale characterization of coal pore structure and its experimental study on the influence of gas migration characteristics[D]. Fuxin: Liaoning Technical University,2021.
- [9] 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. Influence of adsorbed gas on the seepage characteristics of outburst coal[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(9):2091-2096.
- [10] 许江,李波波,周婷,等.加卸载条件下煤岩变形特性与渗透特征的试验研究[J].煤炭学报,2012,37(9):1493-1498.
XU Jiang, LI Bobo, ZHOU Ting, et al. Experimental study on the deformation characteristics and permeability of coal and rock under loading and unloading conditions[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(9):1493-1498.
- [11] 叶平平,李波波,吴学海,等.孔隙压力循环加卸载下煤岩渗流演化机制研究[J].中国矿业大学学报,2023,52(4):739-749.
YE Pingping, LI Bobo, WU Xuehai, et al. Study on coal seepage evolution mechanism under cyclic loading and unloading of pore pressure[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2023,52(4):739-749.
- [12] WEI M, LIU J, SHI R, et al. Long-term evolution of coal permeability under effective stresses gap between matrix and fracture during CO₂ injection[J]. Transport in Porous Media,2019,130(3):969-983.
- [13] 王伟,余金昊,方志明,等.基于体应变的煤体渗透率模型及影响参数分析[J].煤炭学报,2024,49(6):2741-2756.
WANG Wei, YU Jinhao, FANG Zhiming, et al. Coal body permeability model based on volumetric strain and analysis of influencing parameters[J]. Journal of China Coal Society,2024,49(6):2741-2756.
- [14] LIU H, RUTQVIST J, OLDENBURG C M. A new coal-permeability model: Internal swelling stress and fracture-matrix interaction [J]. Transport in Porous Media,2010,82(1):157-171.
- [15] WEI M, LIU J, ELSWORTH D, et al. Influence of gas adsorption induced non-uniform deformation on the evolution of coal permeability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2019,114:71-78.
- [16] NEUMAN S P. Multiscale relationships between fracture length, aperture, density and permeability [J]. Geophysical Research Letters,2008,35(22):L22402.
- [17] AKHLAGHI H, ROOHI E, STEFANOV S. A comprehensive review on micro- and nano-scale gas flow effects: Slip-jump phenomena, Knudsen paradox, thermally-driven flows, and Knudsen pumps [J]. Physics Reports,2023,997:1-60.
- [18] PENG S. Advanced understanding of gas flow and the Klinkenberg effect in nanoporous rocks [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2021,206:109047.
- [19] MENG Y, LI Z, LAI F. Influence of effective stress on gas slippage effect of different rank coals[J]. Fuel,2021,285:119207.
- [20] WANG G, REN T, WANG K, et al. Improved ap-

- parent permeability models of gas flow in coal with Klinkenberg effect[J]. *Fuel*, 2014, 128: 53-61.
- [21] ASHRAFI M A, CHALATURNYK R, WILCOX J. Expansion of the Klinkenberg's slippage equation to low permeability porous media [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 123: 2-9.
- [22] ZHU W C, LIU J, SHENG J C, et al. Analysis of coupled gas flow and deformation process with desorption and Klinkenberg effects in coal seams[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(7): 971-980.
- [23] ZHANG J J, LIU H, BOUDJATIT M. Matrix permeability measurement from fractured unconventional source-rock samples: Method and application [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2020, 233: 103663.
- [24] AGBAJE T Q, GHANBARIAN B, HYMAN J D. Effective permeability in fractured reservoirs: Discrete fracture matrix simulations and percolation-based effective-medium approximation[J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(11): e2023WR036505.
- [25] KLINKENBERG L J. The permeability of porous media to liquids and gases[M]. Washington: Drilling and Production Practice, 1941.
- [26] ERTEKIN T, KING G R, SCHWERER F C. Dynamic gas slippage: A unique dual-mechanism approach to the flow of gas in tight formations[J]. *SPE Formation Evaluation*, 1986, 1(1): 43-52.
- [27] WANG Y, LIU S, ELSWORTH D. Laboratory investigations of gas flow behaviors in tight anthracite and evaluation of different pulse-decay methods on permeability estimation[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 149: 118-128.
- [28] LIU J, CHEN Z, ELSWORTH D, et al. Evaluation of stress-controlled coal swelling processes[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 83(4): 446-455.
- [29] LIU C, YU B, ZHAO H, et al. Effective stress effect and slippage effect of gas migration in deep coal reservoirs [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 155: 105142.
- [30] ZHANG Q X, HOU B, LIN B T, LIU X, GAO Y F. Integration of discrete fracture reconstruction and dual porosity/dual permeability models for gas production analysis in a deformable fractured shale reservoir[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 93: 104028.
- [31] HELLER R, VERMYLEN J, ZOBACK M. Experimental investigation of matrix permeability of gas shales[J]. *AAPG Bull.*, 2014, 98(5): 975-995.
- [32] NISHIYAMA N, YOKOYAMA T. Permeability of porous media: Role of the critical pore size[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(9): 6955-6971.
- [33] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. *SPE Reprint Series*, 1986, 21: 310-314.

(责任编辑 沈菊全 腾)