

李文睿, 赵耀耀, 王登科, 等. 煤中 CH₄ 渗透率估算方法研究 [J]. 矿业科学学报, 2022, 7(2): 185-192. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2022.02.005

Li Wenrui, Zhao Yaoyao, Wang Dengke, et al. Study on estimation method of methane permeability in coal [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(2): 185-192. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2022.02.005

煤中 CH₄ 渗透率估算方法研究

李文睿¹, 赵耀耀¹, 王登科², 刘鹏¹

1. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083;
2. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南焦作 454000

摘要:煤体内部气体流通过程主要由裂隙和孔隙构成,是典型的双重气路结构。为便于量化不同尺度气路的气体传输视渗透率,一般采用单一气路的孔隙或裂隙气路结构来建立渗透率数学模型。随着微结构表征技术的发展,对煤体内部裂隙和孔隙结构的表征更加精确,基于单一气路建立的渗透率模型显然不够精确。因此,本文将微米级气路结构简化为裂隙和孔隙两种形态,运用高精度CT技术获取孔隙、裂隙结构在总气路中的体积占比,即孔隙率、裂隙率;将参数代入渗透率统计分布模型,进而求得孔-裂隙整体视渗透率;将基于单一气路结构的孔隙视渗透率、裂隙视渗透率和双重气路结构的总视渗透率计算结果进行比较分析。结果表明:裂隙视渗透率会高估实际视渗透率,孔隙视渗透率会低估实际视渗透率,孔-裂隙双重结构视渗透率处于二者之间。从单一气路结构与双重气路结构的视渗透率计算相对偏差均值来看,基于孔隙气路的视渗透率相对偏差均值都未超过50%,更接近于实际双重气路结构的视渗透率。

关键词:孔隙;裂隙;统计分布;视渗透率;相对偏差

中图分类号:TE 312

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2022)02-0185-08

Study on estimation method of methane permeability in coal

Li Wenrui¹, Zhao Yaoyao¹, Wang Dengke², Liu Peng¹

1. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, JiaoZuo Henan 454000, China

Abstract: The gas flow path in coal body is mainly composed of slits and pores, which is a typical dual gas flow path structure. Generally, in order to quantify the apparent permeability of gas transport in different scale flow paths, mathematical models of permeability are established using the pore or slit structure of single flow path. With the development of microstructure characterization technology, the characterization of slits and pores in real coal is more accurate, and the permeability model based on single flow path is obviously not accurate enough. Therefore, in this paper, the micron scale gas flow path is simplified into two geometric forms of slit and pore. High-precision CT technology is used to obtain the volume proportion of pore and slit structure in the total gas flow path, namely pore porosity and slit porosity. Then, the parameters are substituted into the statistical distribution model of permeability, and the

收稿日期:2021-08-02 修回日期:2021-10-10

基金项目:国家自然科学基金(51727807)

作者简介:李文睿(1994—),男,河南济源人,博士研究生,主要从事煤矿安全工程、非常规资源与能源开发方面的研究工作。Tel: 18300621582, E-mail: li3wenrui123@163.com

通信作者:赵耀耀(1991—),男,河南驻马店人,博士研究生,主要从事非常规资源与能源开发等方面的研究工作。Tel: 18813110882, E-mail: zhaoyaoyao123@163.com

overall apparent permeability with slits and pores is obtained. Finally, the calculation results of apparent permeability of single flow path pores-based model, slits-based model and the dual flow path pore-slit-based model are compared and analyzed. The results show that the slit-based apparent permeability model overestimates the actual apparent permeability, but the pore-based apparent permeability model underestimates it, and the mixed pore-slit-based permeability is in between. From the mean value of relative deviation of apparent permeability calculated for single gas path structure and dual gas path structure, the mean value of relative deviation of pore-based apparent permeability is no more than 50%, which is closer to that of the real dual flow path pore-slit-based apparent permeability.

Key words: pores; slits; statistical distribution; apparent permeability; relative deviation

煤作为典型的多孔介质,其内部气体传输结构复杂多变。为便于渗透率的计算和分析,通常将气体传输路径简化为孔隙或裂隙两种基本结构,并建立了一系列基于孔隙类管束渗透率模型和基于裂隙类火柴棍渗透率模型^[1]。对于孔隙类管束模型而言,因为表征气路的基本结构单元简单,仅需要孔径尺寸这一关键参数即可对渗透率进行量化分析,因而被广泛使用。圆形截面的孔隙气路引入几何形状修正因子,是提高渗透率计算精度的常用方法^[2-3]。但是,页岩或煤等储气岩体内部除了孔穴类的孔隙结构,还存在大量的原生裂隙状结构,也为气体传输提供了有效路径^[4-5]。在不考虑外部应力干扰情况下,原生裂隙和孔隙的连通性、尺度大小直接决定了储气层的原始渗透率,且后续提高可采储层渗透率的目的也是力求加快原生裂隙的扩展和发育或者产生新生裂隙,因此同时考虑孔隙和裂隙对渗透率模型的建立显得尤为重要。对于由基质体和裂隙在几何空间上规则排布简化而来的裂隙类火柴棍模型,虽然利用几何关系可精确定义孔隙率并计算渗透率,但由于裂隙尺寸和基质体尺寸都是经验性定义,其应用受到限制^[6]。

考虑裂隙结构表征困难,一些学者提出了简化的几何气路模型,并进行了相关渗透率计算研究。White^[7]研究表明,微裂隙形状对气体连续流动影响显著,并提出了修正因子。Eldridge、Matson等^[8-9]的研究均表明微裂隙形状对气体努森扩散影响很大。Rahmanian等^[10]研究了不同几何形状气路所适用的流动机制,并据此建立了滑脱流-扩散渗透率模型。吴克柳等^[11]基于裂隙结构单元建立了渗透率数学模型,并研究了微裂隙形状和尺度对页岩气和致密砂岩气传输的影响,发现孔隙和裂隙基本结构的差异会导致二者的渗透率计算存在明显差异。在数值模拟方面,Yu等^[12]针对性利用LBM技术,结合裂隙渗透率模型研究了纳米尺度裂隙的气体传输。基于对数型正态分布理论^[13],Singh等^[14]认为孔隙结构和裂隙结构各自渗透率对整体渗透率的贡献也符合统计分布

规律,由此提出了渗透率统计分布模型。但由于两种结构单元各自的孔隙率占比没有给出确切的取值依据,模型缺乏计算可行性。另外,气体滑移效应的缺失也使得该模型在微尺度的气体流动计算方面存在天然劣势。因此,在孔隙和裂隙两种气路形态结构基础上,进一步考虑气体滑移效应建立渗透率模型,更加符合实际情况。

基于微尺度气体传输滑脱效应,本文分别对裂隙和孔隙气路结构的渗透率模型进行了修正。利用数字岩芯技术获得的关键孔隙参数对双重气路渗透率理论模型进行了求解,并将结果与单一气路结构渗透率模型进行了对比分析,实现了对真实煤体气路结构中渗透率的精准量化。

1 煤体真实气路结构表征

为准确表征煤体内部气路结构,利用SEM设备对干燥颗粒煤体结构进行了显微观察。试验所用煤样取自河南焦煤集团古汉山矿无烟煤,内生裂隙发育,取粒径为3~6 mm的原生碎煤。显微观察结果发现:气路结构主要为圆孔形孔隙和裂缝形孔隙,具体形貌如图1所示。

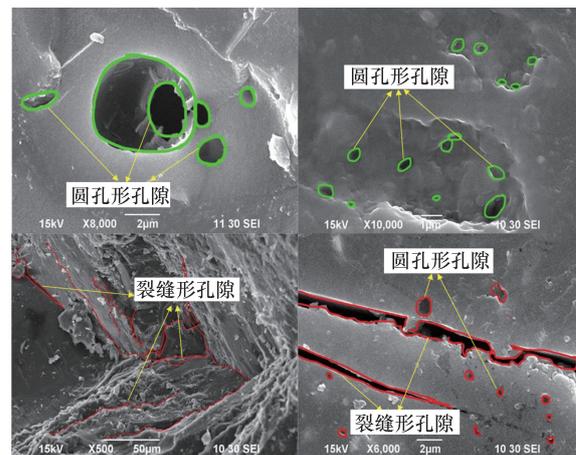


图1 煤体内部气路真实结构的电镜图

Fig. 1 Electron micrograph of real structure of gas flow path in coal

根据图1,煤体内部气路结构中微米级的孔隙和裂隙广泛存在,可将气体的流动通道简化为图2所示的2种形态结构。图2中,孔隙为圆形结构, d 为其截面直径;裂隙为扁平缝状结构,宽度为 h ,因为几何断面为类椭圆形,可进一步将其等效为长 w 、宽 h_i 的矩形。

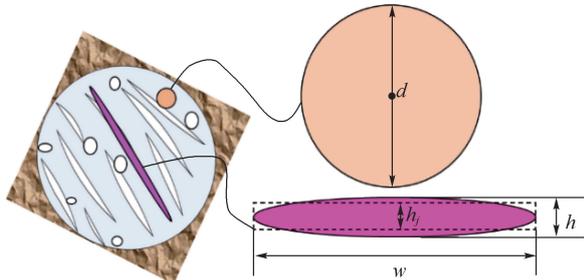


图2 孔-裂隙的简化形态结构

Fig.2 Simplified structures of slit and pore

2 基于气路结构的视渗透率

2.1 单一气路结构

气体分子运动的平均分子自由程可表示为

$$\lambda = \frac{K_B T}{\sqrt{2} \pi \delta^2 p} \quad (1)$$

式中, K_B 为玻尔兹曼常数, 1.38×10^{-23} J/K; T 为环境温度,K; δ 为气体分子直径,nm; p 为气体压力,Pa。

克努森数为气体平均分子自由程与气路通道特征长度的比值。当孔隙结构断面为圆形时,其流体通道特征长度为圆直径 d ,所以克努森数可表示为

$$Kn^p = \frac{\lambda}{d} \quad (2)$$

图2中,裂隙的椭圆形几何截面积等效于矩形面积,则有

$$S = \frac{\pi h}{2} \frac{w}{2} = h_i w \quad (3)$$

由式(3)可得出裂隙气路的特征长度,即椭圆短轴长度为

$$h = \frac{4h_i}{\pi} \quad (4)$$

同理,可求出裂隙中的克努森数为

$$Kn^s = \frac{\lambda}{h} = \frac{\lambda \pi}{4h_i} \quad (5)$$

对于孔隙形圆截面和类平板的矩形截面,其流体渗透率计算公式^[15]为

$$k_p = \frac{\phi_p d^2}{32} \quad (6)$$

$$k_s = \frac{\phi_s h^2}{12} \quad (7)$$

气路的可压缩系数是有效应力作用下固体孔

隙体积变化的函数,表示为

$$C_i = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma_e} \right)_{p_c} = \frac{1}{\phi_i} \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial \sigma_e} \right)_{p_c} \quad (8)$$

式中, C_i 为可压缩系数,下标 i 取 p 和 s 分别对应于孔隙和裂隙的压缩系数 C_p 、 C_s ,1/MPa; V 为孔隙总体积; σ_e 为动态有效应力,MPa; p_c 为煤体外部围压,MPa; ϕ_i 为动态孔隙率,下标 i 取 p 和 s 分别对应孔隙率 ϕ_p 和裂隙率 ϕ_s 。

在初始状态下,当总孔隙率为 ϕ_0 时, $\phi_s = \phi_0 - \phi_p$ 。

将式(8)简化,得到有效应力作用前后孔隙率的变化表达式为

$$\frac{\phi_i}{\phi_{i0}} = 1 + C_i (\sigma_e - \sigma_{e0}) \quad (9)$$

式中, σ_{e0} 为初始有效应力; ϕ_{i0} 为初始状态孔隙率。

由于气体吸附主要发生在纳米微孔中,所以微米尺度气路内,有效应力仅由外部围压和内部孔隙压力共同决定,暂不考虑气体吸附影响,即

$$\sigma_e = p_c - \alpha_i p \quad (10)$$

式中, α_i 为Biot系数,也称有效应力系数,是多孔介质本身的一种属性,其值介于0~1之间。

将式(10)代入式(9)中,可得孔隙部分的孔隙率表达式为

$$\frac{\phi_p}{\phi_{p0}} = 1 + C_i [p_c - \alpha_i p - (p_{c0} - \alpha_i p_0)] \quad (11)$$

对于孔隙和裂隙2种形态结构的气路而言,有效应力的变化都会导致有限的气路通道出现压缩或膨胀(图3)。孔隙虽然几何形状相对均匀但连通性较差,煤体变形主要是整体的收缩或膨胀,所以孔隙气路渗透率的变化由孔隙率的动态变化所决定。对于结构狭窄的裂隙而言,裂隙的长和宽的大小存在较大悬殊($h/w \approx 0$)^[16],受力发生变形后主要是裂隙的开合大小变化,因此裂隙气路渗透率的变化主要是由裂隙宽度的动态变化所决定的。

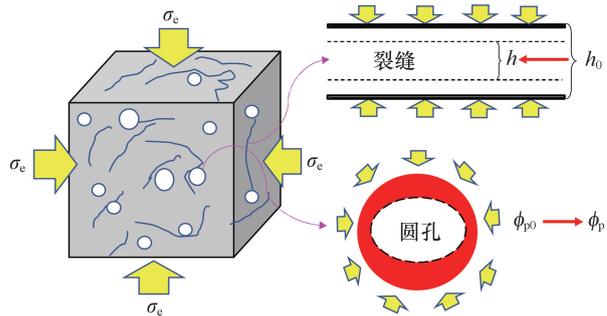


图3 有效应力下的气路简化结构变化

Fig.3 Simplified structure change of gas flow path under effective stress loading

在常围压状态下 ($\Delta p_e = 0$), 决定圆孔渗透率变化的孔隙率可表示为

$$\phi_p = \phi_{p0} [1 + \alpha_p C_p (p_0 - p)] \quad (12)$$

类似于圆孔的孔隙率变化, 对于直接导致裂隙内渗透率变化的裂隙宽, 也可表示为

$$h = h_0 [1 + \alpha_s C_s (p_0 - p)] \quad (13)$$

不同于宏观尺度的达西流, 微纳米级尺度流体速度滑移效应明显, 经过滑移修正后的视渗透率表示为

$$k_p = \frac{\phi_{p0} (1 + \beta_p Kn^p) \left(1 + \frac{6Kn^p}{1 + Kn^p}\right) d^2 [1 + \alpha_p C_p (p_0 - p)]}{32} \quad (15)$$

$$k_s = \frac{(\phi_0 - \phi_{p0}) h_0^2 [1 + \alpha_s C_s (p_0 - p)]^2 (1 + \beta_s Kn^s) \left(1 + \frac{6Kn^s}{1 + Kn^s}\right)}{12} \quad (16)$$

2.2 双重气路结构

根据 Fenton^[13] 对数型正态分布理论的广义阐述, Singh 等^[14] 认为孔隙和裂隙在空间尺度分布上遵从对数分布特点, 两种气路结构对于整体渗透率的贡献也同样遵从对数型分布, 其满足的数学关系式为

$$\ln k_{total} = x \ln k_s + (1 - x) \ln k_p \quad (17)$$

进一步, 可得

$$k_{total} = k_s^x k_p^{(1-x)} = \left(\frac{k_s}{k_p}\right)^x k_p \quad (18)$$

$$k_{total} = \left[\frac{8h_0^2 \phi_s [1 + \alpha_s C_s (p_0 - p)]^2 (1 + \beta_s Kn^s) \left(1 + \frac{6Kn^s}{1 + Kn^s}\right)}{3d^2 \phi_{p0} [1 + \alpha_p C_p (p_0 - p)] (1 + \beta_p Kn^p) \left(1 + \frac{6Kn^p}{1 + Kn^p}\right)} \right]^x \times \frac{\phi_{p0} (1 + \beta_p Kn^p) \left(1 + \frac{6Kn^p}{1 + Kn^p}\right) d^2}{32} \times [1 + \alpha_p C_p (p_0 - p)] \quad (19)$$

2.3 不同气路结构的孔隙率测定

孔隙率测定所用的 Phoenix V|tome|xS 型显微 CT 试验系统 (图 4), 来自于河南理工大学瓦斯灾害预测与防治重点实验室。该系统配备有高精度微米焦点和高分辨率纳米焦点独特的双射线管, 可进行小于 0.5 μm 的细节观测。其基本原理是通过高穿透性 X 射线透射多孔介质, 获取实体内部结构的海量信息数据, 将大体量数据进行后处理即可重构出多孔介质的三维可视化图形, 辅以 VG Studio MAX 专业分析软件, 利用其强大丰富的数据分析功能, 获得煤样内部表面积、孔隙率、裂隙延展区域、孔-裂隙连通性等一系列参数信息。本文研究中, 仅进行不同形态气路结构的孔隙率测定。

$$k = k_i (1 + \beta Kn) \left(1 + \frac{6Kn}{1 + Kn}\right) \quad (14)$$

$$\beta = \frac{128Kn}{15\pi^2} \arctan(4Kn^{0.4})$$

式中, β 为气体稀薄系数; k_i 为没有滑移修正的初始渗透率, m^2 。

将式(6)和式(7)分别代入式(14), 得到滑移修正后的孔隙视渗透率和裂隙视渗透率:

式中, k_{total} 为孔隙和裂隙双重气路结构决定的总渗透率, m^2 ; x 为裂隙率占比。

当 $x=0$, 即只存在孔隙结构气路时, 式(18)可简化为 $k_{total} = k_p$; 当 $x=1$, 即只存在裂隙结构气路时, 式(18)可简化为 $k_{total} = k_s$ 。由此可见, 基于孔隙气路或裂隙气路建立的渗透率模型, 都是双重气路结构模型的特例。

将式(15)和式(16)代入式(18), 可得裂隙和孔隙双重气路结构的气体传输视渗透率:

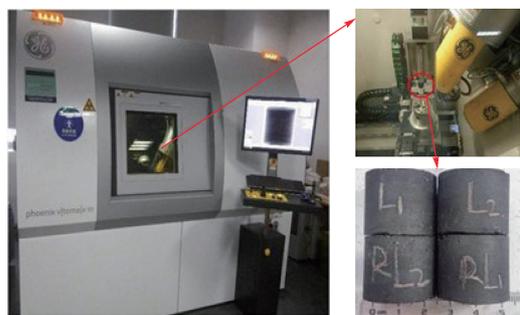


图4 高精度显微 CT 试验系统

Fig. 4 High precision microscopic CT test system

实验中, 首先进行煤样制备, 将取自河南焦煤集团古汉山矿的无烟煤, 利用切磨机加工 4 组尺寸为 $\phi 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的顺层柱状煤样, 经过恒温干燥箱干燥脱水 48 h 后依次标记为 M1、M2、M3、

M4;然后,分别对 4 组煤样进行 CT 三维立体全尺寸透射扫描;重建岩体的三维可视化结构,将结构体中的缺陷域默认为总孔隙率(标定阈值设为 80%),重构图像如图 5 所示。

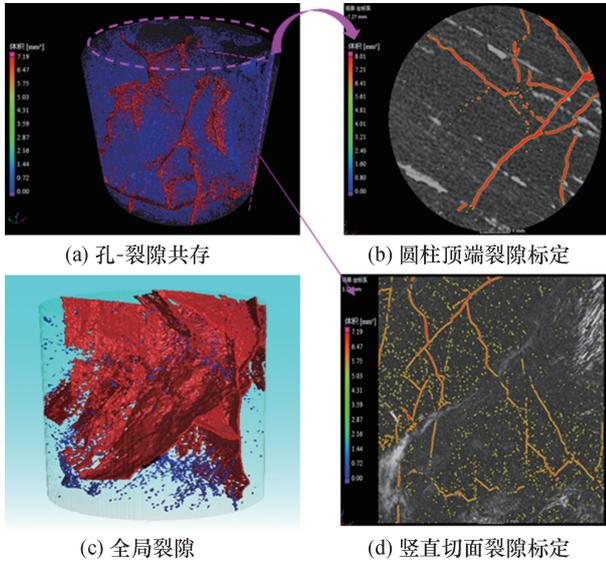


图 5 煤体三维重构图像

Fig. 5 Three-dimensional reconstructed images of coal

煤体中的气路结构标定依据是将孔洞类腔体域默认为孔隙,连通条状域默认为裂隙。图 5(a)为数字重构的煤样孔-裂隙共存结构图,其中红色区域为裂隙,蓝色区域为孔洞,二者共同构成了煤体中的气体传输网络结构;图 5(b)为俯视图;图 5(c)为包含所有裂隙结构的三维立体图;图 5(d)为竖直切面图。

总孔隙率和裂隙率均可由软件孔隙率测定模块直接得到,孔隙率值由总孔隙率值减去裂隙状孔隙率值得出,测定结果见表 1。

表 1 4 组煤样不同形态孔的孔隙率
Tab. 1 Porosities of different shape type in four samples coal

样品编号	总孔隙率/%	裂隙率/%	孔隙率/%	裂隙率占比 x
M1	4.37	2.63	1.74	0.602
M2	1.91	1.00	0.91	0.524
M3	3.31	1.05	2.26	0.317
M4	2.64	1.07	1.57	0.405

3 视渗透率计算及结果比较

无论是根据致密岩的水动力学方程拟合流体实验求得的裂隙尺度^[18],还是根据压汞法原理测

得的裂隙尺度(最大孔径约为 10 μm)^[19],或是采用高精度 CT 扫描配合数字岩芯重构技术进行的尺寸标定,裂隙的尺度普遍为微米级^[20-21]。由于气路尺度越小滑脱效应越显著,本文选取了 0.1 μm 、1 μm 和 5 μm 的气路尺度计算渗透率,以揭示滑脱效应显著存在情况下,不同气路简化结构所计算的视渗透率值差异。其他参数设定见表 2。

对于不同气路简化结构所导致的视渗透率计算偏差,可采用相对偏差系数加以分析,其表达式为

$$D_i = \frac{|k_i - k_{\text{total}}|}{k_{\text{total}}} \times 100\% \quad (20)$$

式中, D_i 是偏差系数,下标 i 取 p 和 s,分别代表孔隙气路视渗透率、裂隙气路视渗透率与双重气路结构的总视渗透率之间的相对偏差。

表 2 视渗透率计算相关参数及取值

Tab. 2 Calculating parameters for the apparent permeability

特性参数	参数取值
孔隙初始直径 $d/\mu\text{m}$	0.1、1、5
裂隙初始宽度 $h_0/\mu\text{m}$	0.1、1、5
裂隙压缩系数 C_p/MPa^{-1}	1.8×10^{-2} ^[22]
孔隙压缩系数 C_s/MPa^{-1}	2.9×10^{-4} ^[22]
孔隙 Biot 系数 α_p	1 ^[23]
裂隙 Biot 系数 α_s	0.91 ^[24]
甲烷分子直径 δ/m	3.8×10^{-10}
上覆层应力 p_c/MPa	20
孔隙气体压力 p/MPa	0.5~8
初始总孔隙率 $\phi_0/\%$	1
环境温度 T/K	338
裂隙率占比 x	见表 1

在裂隙率占比 x 不同情况下,孔隙视渗透率、裂隙视渗透率和孔-裂隙共存总视渗透率的变化趋势基本相同,因此这里仅绘出 $x = 0.602$ 时的视渗透率值对比和模型计算偏差(图 6)。

如图 6 所示,在 0.1 μm 、1 μm 和 5 μm 3 个特征尺度条件下,视渗透率皆存在 $k_s > k_{\text{total}} > k_p$ 。随着孔隙压力的增大,有效应力不断减小,气体滑脱效应逐渐减弱,3 种气路结构的视渗透率都不断减小。同时, D_s 与 D_p 值都不断增大。这些表明,基

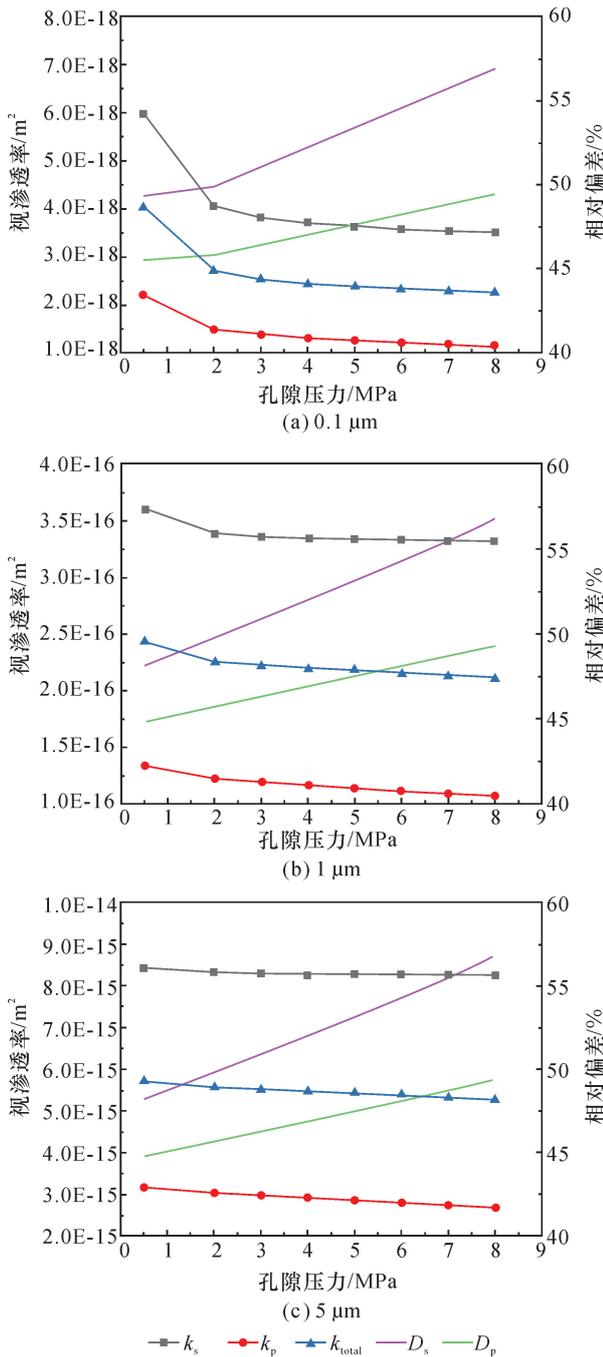


图6 单一气路结构和孔-裂隙双重气路结构的视渗透率对比

Fig. 6 Comparisons of the apparent permeability of pore structure, slit structure and pore-slit structure

于单一气路结构假设的孔隙模型或裂隙模型与实际的双重气路结构模型之间的计算偏差不断增大;基于单一气路结构建立的渗透率模型不够精确。然而,孔隙视渗透率模型计算与实际气路结构相对偏差始终小于裂隙模型,则说明基于孔隙气路结构的视渗透率模型精度较高。

在裂隙率占比取值不同情况下,为探究视渗透率的相对偏差变化,对4组样品的裂隙视渗透率和孔隙视渗透率相对偏差进行了计算,结果见表3。为进一步直观比较相对偏差均值随孔隙率占比变化规律,将表3数据绘制成曲线,如图7所示。

表3 单一气路结构视渗透率与双重气路结构视渗透率的相对偏差均值

Tab. 3 Average values of relative deviation of gas apparent permeability between single flow path and double flow paths

气路尺度/ μm	相对偏差均值	x			
		0.317 2	0.405 3	0.523 6	0.602
0.1	$\bar{D}_s/\%$	106.6	88.1	66.0	52.7
	$\bar{D}_p/\%$	28.6	35.0	42.7	47.3
1.0	$\bar{D}_s/\%$	106.2	87.8	65.7	52.5
	$\bar{D}_p/\%$	28.6	35.0	42.6	47.2
5.0	$\bar{D}_s/\%$	106.2	87.8	65.7	52.5
	$\bar{D}_p/\%$	28.6	35.0	42.6	47.2

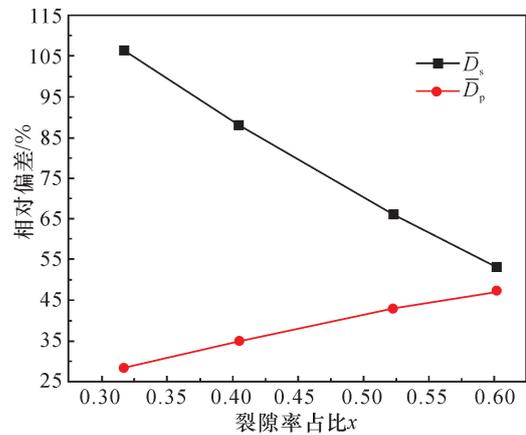


图7 随裂隙率增大不同气路结构视渗透率的相对偏差均值变化

Fig. 7 The change of mean value of relative deviation with the increase of slit porosity

由图7可知,裂隙率占比不断增大情况下,裂隙视渗透率与总视渗透率的相对偏差均值不断减小;孔隙视渗透率与总视渗透率的相对偏差均值不断增大。同时也发现,真实煤体气路结构中裂隙占比无论在最高或者最低,以裂隙气路计算的视渗透率的相对偏差,都要高于孔隙气路的,这也从侧面反映了煤体的多孔属性。

考虑双重气路结构,裂隙与孔隙在总气体传输空间中的占比也影响到渗透率的估测。一般情况下孔隙压缩系数比裂隙更小,意味着同等受力状态

下孔隙压缩性小,比裂隙更难被压缩。当整体气路中孔隙占比不断增大,表明煤整体气路结构紧密性增强,难以发生弹性变形,因此裂隙模型计算结果与真实模型之间的偏差不断增大。相应地,若裂隙率占比不断增大,则意味着煤整体结构更加松散,可压缩性变强,更容易发生弹性变形,此时衡量渗透率变化的孔隙模型与实际孔-裂隙模型之间的偏差就不断增大。

4 结 论

(1) 煤体中微米级气路真实结构以裂隙和孔隙为主。本文基于简化几何结构建立的视渗透率理论模型,同时考虑了这两种气路结构。利用数字岩芯技术可获取不同气路结构的孔隙率占比。将获取的关键参数应用于 Singh 提出的正态分布渗透率模型,可计算得出更贴近于真实煤体的视渗透率。

(2) 采用单一气路结构建立煤体视渗透率模型与实际存在一定误差,裂隙模型会高估视渗透率,孔隙模型会低估视渗透率。通过与本文的双重气路结构真实视渗透率计算的偏差分析,裂隙气路的视渗透率计算偏差大于孔隙气路的视渗透率计算,误差主要体现在不同气路结构的孔隙率占比。随着对煤体真实气路结构精细表征的不断发展,理论模型的参数取值更加科学合理,这将有助于渗透率精度的不断提高。

参考文献

- [1] Lu S Q, Cheng Y P, Li W. Model development and analysis of the evolution of coal permeability under different boundary conditions[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 31: 129-138.
- [2] 聂百胜, 王科迪, 樊埏, 等. 基于小角 X 射线散射技术计算不同孔形的煤孔隙特征比较研究[J]. *矿业科学学报*, 2020, 5(3): 284-290.
Nie Baisheng, Wang Kedi, Fan Yü, et al. The comparative study on calculation of coal pore characteristics of different pore shapes based SAXS[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 5(3): 284-290.
- [3] 董川龙, 滕腾, 李志虎, 等. 考虑微观孔隙几何的砂岩自发渗吸理论模型[J]. *矿业科学学报*, 2021, 6(4): 418-428.
Dong Chuanlong, Teng Teng, Li Zhihu, et al. Theoretical model of water spontaneous imbibition of sandstone considering microscopic pore geometry [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(4): 418-428.
- [4] Wang G, Qin X J, Shen J N, et al. Quantitative analysis of microscopic structure and gas seepage characteristics of low-rank coal based on CT three-dimensional reconstruction of CT images and fractal theory [J]. *Fuel*, 2019, 256: 115900.
- [5] Fang H H, Sang S X, Liu S Q, et al. Methodology of three-dimensional visualization and quantitative characterization of nanopores in coal by using FIB-SEM and its application with anthracite in Qinshui basin [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 182: 106285.
- [6] 李立功, 康天合, 李彦斌. 考虑动态克林伯格系数的煤储层渗透率预测模型[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(1): 304-310.
Li Ligong, Kang Tianhe, Li Yanbin. Prediction model of permeability in coal reservoirs considering the dynamic Klinkenberg coefficient [J]. *Chinese J Geophys*, 2018, 61(1): 304-310.
- [7] White F M. *Viscous fluid flow* [M]. New York: McGraw-Hill Education (ISE Editions), 1974.
- [8] Eldridge B D, Brown L F. The effect of cross sectional pore shape on Knudsen diffusion in porous materials [J]. *Aiche Journal*, 1976, 22: 942-944.
- [9] Matson S L, Quinn J A. Knudsen diffusion through noncircular pores: textbook errors [J]. *Aiche Journal*, 1977, 23(5): 768-770.
- [10] Rahmanian M R, Aguilera R, Kantzas A. A new unified diffusion-viscous-flow model based on pore-level studies of tight gas formations [J]. *SPE Journal*, 2013, 18(1): 38-49.
- [11] 吴克柳, 李相方, 陈掌星, 等. 页岩气和致密砂岩气藏微裂隙气体传输特性 [J]. *力学学报*, 2015, 47(6): 955-964.
Wu Keliu, Li Xiangfang, Chen Zhangxing, et al. Gas transport behavior through micro fractures of shale and tight gas reservoirs [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(6): 955-964.
- [12] Yu H, Fan J C, Chen J, et al. Pressure-dependent transport characteristic of methane gas in slit nanopores [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 123: 657-667.
- [13] Fenton L F. The sum of log-normal probability distributions in scatter transmission systems [J]. *Communications Systems Ire Transactions on*, 1960, 8(1): 57-67.
- [14] Singh H, Javadpour F, Ettehadtavakkol A, et al. Non-empirical apparent permeability of shale [J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2014, 17(3): 414-424.

- [15] Veltzke T, Thöming J. An analytically predictive model for moderately rarefied gas flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 698:406-422.
- [16] Pang Y, Soliman M Y, Sheng J. Investigating gas-adsorption, stress-dependence, and non-Darcy-flow effects on gas storage and transfer in nanopores by use of simplified local density model [J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2018, 21(1):73-95.
- [17] 曲鸿雁, 彭岩, 刘继山, 等. 气体吸附对页岩裂隙表观渗透率和页岩气采收率的影响 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48(8):891-900.
Qu Hongyan, Peng Yan, Liu Jishan, et al. Impact of gas adsorption on apparent permeability of shale fracture and shale gas recovery rate [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2018, 48(8):891-900.
- [18] Quinn P M, Parker B L, Cherry J A. Using constant head step tests to determine hydraulic apertures in fractured rock [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2011, 126(1-2):85-99.
- [19] Gensterblum Y, Ghanizadeh A, Cuss R J, et al. Gas transport and storage capacity in shale gas reservoirs-A review. Part A: transport processes [J]. *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*, 2015, 12:87-122.
- [20] 张平, 王登科, 于充, 等. 基于工业 CT 扫描的数字煤心构建过程及裂隙形态表征 [J]. *河南理工大学学报: 自然科学版*, 2019, 38(6):10-16.
Zhang Ping, Wang Dengke, Yu Chong, et al. Digital coal core construction process and crack characterization based on industrial CT scanning [J]. *Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science*, 2019, 38(6):10-16.
- [21] 宋党育, 何凯凯, 吉小峰, 等. 基于 CT 扫描的煤中孔裂隙精细表征 [J]. *天然气工业*, 2018, 38(3):41-49.
Song Dangyu, He Kaikai, Ji Xiaofeng, et al. Fine characterization of pores and fractures in coal based on a CT scan [J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(3):41-49.
- [22] Oudinot A Y, Riestenberg D E, Koperna G J. Enhanced gas recovery and CO₂ storage in coal bed methane reservoirs with N₂ co-injection [J]. *Energy Procedia*, 2017, 114:5356-5376.
- [23] Wang G D, Ren T, Wang K, et al. Improved apparent permeability models of gas flow in coal with Klinkenberg effect [J]. *Fuel*, 2014, 128(1):53-61.
- [24] 王磊, 梁卫国. 超临界 CO₂ 压裂下煤岩体裂隙扩展规律试验研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(2):65-70.
Wang Lei, Liang Weiguo. Experimental study on crack propagation of coal-rock mass under supercritical CO₂ fracturing [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(2):65-70.

(责任编辑: 王晓玲)