

李伟,张博成,康健,等.围岩-水压耦合作用下煤岩渗流特性演化规律[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(1):1-7.
doi:10.11956/j.issn.1008-0562.20240003

LI Wei, ZHANG Bocheng, KANG Jian, et al. Evolution law of coal rock seepage characteristics under the coupling effect of surrounding rock and water pressure[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(1): 1-7. doi: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240003

围岩-水压耦合作用下煤岩渗流特性演化规律

李伟¹, 张博成¹, 康健¹, 杨逾^{2*}

(1. 国能神东煤炭集团有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 017000;

2. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 为探究煤体在不同围压及水力荷载下渗流规律, 利用SEM微观扫描图像及二值化分析系统, 基于孔裂隙分形特征模型, 模拟计算煤岩内部孔隙度及静态渗透率, 并通过GDS-DYNTTS型软岩流变仪, 开展不同水压-围压耦合场下动态渗流试验。研究表明: 基于微观结构图像及渗透率模型, 利用合理分形维度, 可得到较真实的静态渗透率; 双场耦合中固定水压不同围压条件下, 煤体具备3个不同的渗流阶段: 孔隙受压闭合期、孔隙变形缓释期及孔隙变形快速恢复期, 当围压高于6 MPa时, 渗透率对水压敏感度较低, 低于4 MPa时, 渗透率随着水压增大呈指数增长; 双场动态耦合下, 煤体渗透率整体变化趋势出现平台期及急增期2个明显特征。研究结果可为开采卸压后煤层涌水路径、水量估算及突水风险预测提供参考。

关键词: 煤岩渗流特性; 孔裂隙结构; 渗流水压; 卸压; 渗透率

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)01-0001-07

Evolution law of coal rock seepage characteristics under the coupling effect of surrounding rock and water pressure

LI Wei¹, ZHANG Bocheng¹, KANG Jian¹, YANG Yu^{2*}

(1. Guoneng Shendong Coal Group Limited Company, Ordos 017000, China;

2. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: To investigate the permeability characteristics of coal under different confining pressures and hydraulic loads, SEM micro-scan images and a binary analysis system were used. Based on the fractal characteristics of pore and fracture networks, a model was developed to simulate the porosity and static permeability of the coal rock. Dynamic permeability tests under different water pressures and confining pressures were conducted using a GDS-DYNTTS soft rock rheometer. The research results show that by using reasonable fractal dimensions based on the microstructure images and permeability model, realistic static permeability values can be obtained. Under the coupling of fixed water pressure and different confining pressures, the coal exhibit three different stages of permeability: the stage of pore compression closure, the stage of slow pore deformation release, and the stage of rapid pore deformation recovery. When the confining pressure exceeds 6 MPa, the sensitivity of permeability to water pressure was relatively low. However, when the confining pressure was below 4 MPa, the permeability increase exponentially with increasing water pressure. Under dynamic coupling conditions, the overall trend of coal permeability showed two distinct features: a plateau period and a rapid increase period. The research results provide references for understanding water inflow paths, estimating water quantities in coal seams after mining-induced stress relief, and predicting water inrush risks.

Key words: coal-rock permeability; pore-fracture structure; hydraulic pressure; unloading; permeability

收稿日期: 2024-01-03 修回日期: 2024-04-06 接受日期: 2024-04-18 责任编辑: 焦丽

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0604705); 国家自然科学基金项目(51774167); 辽宁省重点实验室资助项目(LJZS002)

作者简介: 李伟(1986-), 男, 内蒙古通辽人, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿井地质与防治水方面的研究。E-mail: 422316908@qq.com

通信作者: 杨逾(1973-), 男, 甘肃张掖人, 博士, 教授, 主要从事矿山开采致灾机理及防控、采煤沉陷及其综合治理方面的研究。

E-mail: yangyu9300@163.com

0 引言

中国煤炭资源开采逐步向深部发展,由“三高一扰动”复杂环境带来的工程难题日益增多,极大地制约着煤炭资源的高效开采与利用^[1-3]。其中煤层突水涌水是诱发煤矿矿井灾害的主要因素之一。在深部开采过程中,煤体处于多物理场耦合作用中,工作面采动卸压运移导致煤体应力场发生改变。此外,煤岩的成因构造致使其内部为多孔非均质结构,并赋存高水头压的孔隙水^[4]。因此,研究深部采动煤体在耦合变化的应力场中渗透特性的变化规律,对于煤炭资源开发利用与灾害防治,保护人民生命财产的安全具有重大意义^[5]。

从20世纪中期开始,学者们以煤岩孔裂隙分布率及断裂延伸特征为切入点,开展了大量的煤岩渗流特性理论及试验的研究^[6-8]。郭保华等^[9]通过自制的渗流系统对大理岩开展渗流试验,分析了9种不同的裂隙形态的试件渗流数据,得到加卸载过程与水压大小等因素对含裂隙岩石渗流的影响规律。杨秀荣等^[10]以石灰岩为研究对象,开展多场耦合作用下的三轴压缩试验,得到石灰岩在围压加卸载及渗透水压变化过程中的渗透量变化特征,并利用FLAC^{3D}数值软件对不同裂隙角度的石灰岩渗透规律进行全过程模拟计算。TIAN等^[11]对不同比例的细砂岩、砂岩及组合体岩体开展渗流试验,分析在不同孔隙水压力和围压的影响下,试件渗透系数的演化趋势,结果表明岩体渗透系数随孔隙水压力增加呈线性增长,而随围压增加呈指数下降的变化规律。王环玲等^[12]以钙质泥岩为研究对象,开展渗流条件下岩体三轴流变试验,研究渗流场对红层软岩流变加速的影响规律,通过引入损伤因子及比奥系数,提出一种不同渗流压力作用下软岩损伤劣化流变本构模型。曹翎楼等^[13]利用SEM电镜扫描技术,获得煤体的微观孔裂隙结构,并通过COMSOL算法对非均质孔裂隙进行量化表征与计算,为煤体微观结构图像求解计算渗透率提供了较好例证。ZHAO等^[14]通过对3种不同孔裂隙分布的石灰岩进行渗流试验,得到赋存裂隙因素下岩体在渗透-应力场中的渗流特征及演化规律,并提出考虑裂隙形貌特性和岩石力学特征的渗透率分析模型。段玲玲等^[15]利用单裂隙灰岩开展考虑长期浸泡及流动更新因素的渗流试验,分析水-

岩作用下,裂隙灰岩的渗流特性变化特征及机制,并提出在微观结构形貌与溶液离子浓度变化影响下,灰岩渗透系数呈现先快后慢的增长趋势。

综上,已有研究结果表明岩体内部孔裂隙结构在多应力场的耦合作用下将发生改变,直接影响岩体渗透特性及演化规律。但多数研究基于试验中单因素渗透数据,与岩体内部微观孔裂隙结构特征建立联系较少。基于此,为揭示煤岩渗透特性与微观结构孔隙度的关系,及其在渗流-应力场中的变化规律开展相关试验。利用SEM技术通过分形维度计算渗透率,建立孔隙度与渗透系数表征关系。采用岩石渗透分析仪对煤体开展不同围压-水压渗流试验,分析煤岩渗流特性及演化规律。

1 煤岩试样加工制备

为研究煤岩不同水压条件下卸载围压过程中的渗流规律,取陕西榆林锦界煤矿三盘区31301工作面的煤岩原岩为研究对象。该煤岩新鲜断面具有结构相对规则、孔隙分布均匀的特征,采用保鲜膜将煤岩整体包裹并运至试验室。首先使用SPQJ-300型双刀岩石切割机对煤岩原岩预切割,再使用SHM-200型双端面岩石磨平机对预切割后的岩样端面细致磨平,最后将煤岩制成高为100 mm、直径为50 mm、上下端面平行度小于0.02 mm的标准试件,备用。

2 自然状态下煤岩孔隙度定量表征

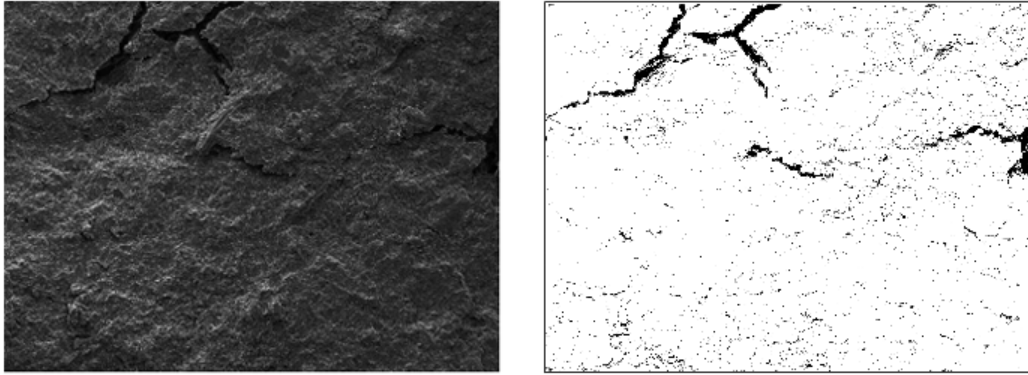
2.1 电镜扫描及图像预处理

利用SEM扫描电子显微镜,对煤岩试样进行扫描成像。为较为清晰真实地记录分析煤岩内部孔裂隙分布情况,选取4组新鲜断面平整且无明显褶皱的剥离体作为扫描观测试样,编号G1~G4,分别对应煤岩相隔离部位。为保证煤岩内部结构接近自然状态,试验前将待扫描样剂进行镀膜及真空处理。最终得到不同量级的清晰孔裂隙内部结构图像。

通过微观扫描图像能够直观地看出煤体内部孔隙分布及裂隙发育情况,可定性分析内部渗流水力通道,但不能定量地表达出裂孔裂隙分布率。因此,对原始的SEM微观扫描图像进行数字化处理,利用图像不同的光反射吸收率,分割提取图像并进行二值化分析,准确计算煤体内部

的孔裂隙结构的平面占比^[6]。

设置合理的分割阈值进行图形识别和二值化计算, 标识出孔裂隙结构, 利用 Matlab 软件计算得到煤岩 SEM 图像及对应二值图, 见图 1。由图 1 可以看出, 煤岩内部无序随机的孔隙及不规则断续的裂隙结构, 可较好地转变为边界清晰且分形



(a) SEM 图像

(b) 二值图

图 1 煤岩 SEM 图像及对应二值化分析过程

Fig. 1 SEM image of coal and rock and its corresponding binarization analysis process

2.2 基于孔裂隙分形特征的渗透率模型

由于煤体为多孔连续的介质, 且孔径大小差异性较大, 因此具有典型的分形特征。利用基于分形几何原理建立的微观结构参数岩体孔隙度模型, 可以较好地分析孔隙结构对宏观渗流参数的影响。故可以得出, 孔隙累积数 N 与孔隙直径 η 服从如下的分形幂律关系^[17]

$$N(L \geq \eta) = \left(\eta_{\max}/\eta\right)^{D_f}, \quad (1)$$

式中: D_f 为裂隙分形维数; η_{\max} 为孔隙最大尺寸, μm ; L 为标准直径, μm 。

对式 (1) 微分可得

$$-dN = D_f \eta_{\max}^{D_f} \eta^{-(D_f+1)} d\eta, \quad (2)$$

利用式 (2) 可得 η 和 $\eta+d\eta$ 区间内的孔隙值, 其中 $-dN > 0$ 。

从 η_{\min} 到 η_{\max} 的孔隙累积个数为

$$N_i(L \geq \eta_{\min}) = \left(\eta_{\max}/\eta_{\min}\right)^{D_f}, \quad (3)$$

式中: N_i 为孔隙累积个数; η_{\min} 为孔隙最小尺寸。

由式 (2) 和式 (3) 可得

$$\frac{-dN}{N_i} = D_f \eta_{\min}^{D_f} \eta^{-(D_f+1)} d\eta. \quad (4)$$

由于煤体中水迁移路径与孔裂隙分布直接相关, 因此煤体中流体也具备分形特征^[6], 整理得

特征明显的分析解^[6]。其中微观图像中发育复杂的孔裂隙结构分布特征与分析解中对比分化结果吻合度较高, 图像处理过程中, 煤岩孔隙度与分形维数直接相关。因此, 通过合理分形维数可以准确地定量得出煤体内部静态孔隙度。

$$L_t(\eta) = \eta^{1-D_f} L_0^{D_f}, \quad (5)$$

式中: D_f 为迂曲度分形维数; L_0 为流体迁移路程长度, μm ; $L_t(\eta)$ 为直径 η 的流体通路真实长度, μm , 且 $L_t(\eta) \geq L_0$ 。

根据 Hagen-Poiseuille 方程^[17], 流体在煤体中通过多孔介质组成的毛细通道流量为

$$q(\eta) = \frac{\pi}{128} \frac{\Delta p}{L_t(\eta)} \frac{\eta^4}{\mu}, \quad (6)$$

式中: Δp 为水体压力差, MPa; μ 为流体的动力黏性, Pa·s。

经过煤体横截面积 A 的总流量为

$$Q = - \int_{\eta_{\min}}^{\eta_{\max}} q(\eta) dN = \frac{\pi}{128} \frac{\Delta p}{\mu} L_0^{-D_f} \times \frac{D_f}{3+D_f-D_f} \eta_{\max}^{3+D_f} \left[1 - \left(\eta_{\min}/\eta_{\max}\right)^{3+D_f-D_f}\right]. \quad (7)$$

由于煤体内部为多孔介质, 则 $\eta_{\min}/\eta_{\max} \leq 10^2$, 式 (7) 可化简为

$$Q = \frac{\pi}{128} \frac{\Delta p L_0^{-D_f}}{\mu} \frac{D_f}{3+D_f-D_f} \eta_{\max}^{3+D_f}. \quad (8)$$

煤体初始渗透率可表示为

$$k_0 = \frac{\mu L_0 Q}{A \Delta p} = \frac{\pi}{128} \frac{L_0^{1-D_f}}{A} \frac{D_f}{3+D_f-D_f} \eta_{\max}^{3+D_f}. \quad (9)$$

在有效横截面中流体通道可等效为不同数量

的直径为 η 的圆。则累积圆面积 A_p 可表示为

$$A_p = \int_{\eta_{\min}}^{\eta_{\max}} \frac{\pi}{4} \eta^2 (-dN) = \frac{\pi D_f \eta_{\max}^2}{4(2-D_f)} \left[1 - \left(\frac{\eta_{\min}}{\eta_{\max}} \right)^{2-D_f} \right] \quad (10)$$

煤岩横截面积可表示为

$$A = \frac{A_p}{\varphi} = \frac{1-\varphi}{\varphi} \frac{\pi D_f \eta_{\max}^2}{4(2-D_f)} \quad (11)$$

式中, φ 为煤岩观测孔隙率。

将式(10)、式(11)代入式(9), 则煤体初始渗透率与孔裂隙分形维数的关系为

$$k_0 = \frac{(\pi D_f)^{\frac{1-D_f}{2}} [4(2-D_f)]^{\frac{1+D_f}{2}}}{\varphi} \times \left(\frac{1-\varphi}{\varphi} \right) \frac{1+D_f}{2} \eta_{\max}^2 \quad (12)$$

将分形维度计算解代入式(12)得G1~G4组不同部位下煤岩的观测孔隙度及静态渗透率, 见表1。

根据图1中孔裂隙微观结构及表1数据可知, 煤岩内部孔裂隙分布连续, 岩体质地较为密实。基于分形理论计算得到自然状态下煤岩的渗透率最大为 $41.3698 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 最小为 $39.9697 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $41.3975 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

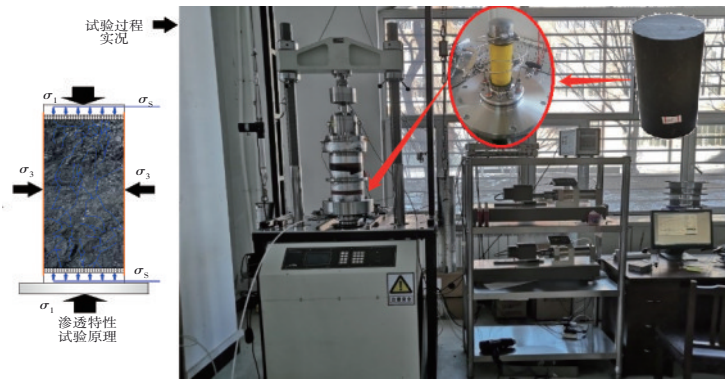


图2 渗透特性试验原理及试验过程

Fig. 2 test principle and process of permeability characteristics

煤岩渗透特性试验前, 确保煤岩试样均处于饱水状态。依次在GDS软岩流变仪加载台上安放煤岩及上下疏水钢板, 将组装好的渗流煤岩试样用耐油热塑管套裹, 上下端部嵌套防油“O”型圈, 以隔离外侧围压与内部水压。

试验过程中, 首先需预施加1 MPa的主应力, 设初始围压为8 MPa, 当达到设定值并稳定后, 开始施加渗透水压并保持不变。每组试验过程中, 渗透压固定, 围压逐级卸载, 卸压共分5个等级,

表1 自然状态下煤岩孔隙度和渗透率

Tab.1 porosity and permeability of coal and rock in natural state

试样编号	孔隙度/%	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
G1	27.742 5	41.369 8
G2	28.102 6	42.247 3
G3	27.854 7	42.003 5
G4	26.938 7	39.969 7
平均值	27.659 6	41.397 5

3 煤岩渗透特性试验研究

3.1 试验设备及方案

在实际工程中, 煤岩内部的孔裂隙分布差异性较大, 基于分形理论计算得到的静态渗透率, 并不能准确描述煤岩动态渗流特征。因此, 应开展围压-水压双因素耦合场下煤岩动态渗流试验, 以提高煤岩动态渗流特性研究的精确度。

利用GDS-DYNTTS型软岩流变仪, 对煤岩开展渗透特性试验。该仪器由压力室、数据采集系统、围压控制器及孔隙水压控制器组成, 其中软件系统AdvancedLoading.dll(自动化高级加载模块)能独立完成煤岩渗透特性试验。渗透特性试验原理及试验过程见图2。

分别为8 MPa、6 MPa、4 MPa、3 MPa和2 MPa。共开展4组平行试验, 渗透压分别为0.5 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa及2.0 MPa。在渗流过程中围压始终大于渗透水压, 待围压稳定5 min后开始采集煤岩内部渗流量变化值, 采集时长4 h, 同时记录渗流量累积值。

3.2 煤岩渗流特性试验结果

在不同水压-围压耦合条件下, 煤岩渗流试验渗流量见表2。

表 2 不同水压-围压作用下煤岩渗流量变化

Tab.2 variation of coal-rock seepage under different water pressure and confining pressure

编号	孔隙率计算值/%	水压/MPa	不同围压下渗流量/mL				
			2 MPa	3 MPa	4 MPa	6 MPa	8 MPa
G1	41.369 8	0.5	27.34	18.13	9.86	6.61	2.93
G2	42.247 3	1.0	87.52	73.41	60.32	49.05	44.57
G3	42.003 5	1.5	243.83	185.64	129.46	92.73	78.40
G4	39.969 7	2.0	684.17	501.23	231.62	108.77	90.30

结合表 2, 根据 Darcy 定律准则, 利用式 (13) 计算煤岩渗透特性相关参数^[18-20]。

$$k_i = \frac{\mu H \Delta V_i}{A \sigma_s \Delta t_i}, \quad (13)$$

式中: k_i 为 Δt_i 内的平均渗透率, μm^2 ; μ 为水动力黏度系数, 与试验过程中液体温度相关, 试验温度为 25 °C 时, 取 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$; H 为试件高, mm; ΔV_i 为 Δt_i 内进入煤岩内部渗流量, mL; A 为试件截面面积, m^2 ; σ_s 为渗透水压, MPa; Δt_i 为渗透周期, s。

由式 (13) 计算得到不同水压-围压作用下煤岩渗透率, 见表 3。

表 3 不同水压-围压作用下煤岩渗透率

Tab.3 permeability of coal and rock under different water pressure and confining pressure conditions

水压/ MPa	不同围压下煤岩渗透率/ μm^2				
	2 MPa	3 MPa	4 MPa	6 MPa	8 MPa
0.5	0.174	0.115	0.063	0.042	0.019
1.0	0.279	0.234	0.192	0.156	0.142
1.5	0.517	0.394	0.275	0.173	0.152
2.0	1.089	0.798	0.369	0.179	0.153

3.3 渗流-应力场作用下渗透率敏感度分析

为定量分析围压-水压对煤岩渗透率的敏感程度, 结合试验数据的变化规律, 采用 Origin 软件中 Poly2D 函数对围压、水压-煤岩渗透率试验数据进行非线性二维曲面拟合分析, 得到 Poly2D 函数为

$$k = 192.79 + 429.36\sigma_s - 124.61\sigma_3 + 97.54\sigma_s^2 + 16.53\sigma_3^2 - 85.18\sigma_s\sigma_3, \quad (14)$$

Poly2D 函数的相关系数 R^2 为 0.896 64, 说明相关性较好, 可利用该函数曲面变化趋势对煤岩渗流-应力场作用下的渗透率进行敏感度定量分析, 其函数二维曲面见图 3。

由图 3 可知, 围压-水压双因素耦合应力场中煤岩渗流试验数据点与拟合曲面吻合度较高, 但高围压低水压情况下, 试验值与曲面拟合值的离散度较大, 围压为 8 MPa、水压为 0.5 MPa 时, 煤岩渗透率的试验值为 $0.019 \mu\text{m}^2$, 函数拟合值为

$0.152 \mu\text{m}^2$ 。而实际工程中, 此情况下岩石一般处于较为安全状态, 故该条件下拟合曲面失真, 对于整体拟合应用效果影响较小。

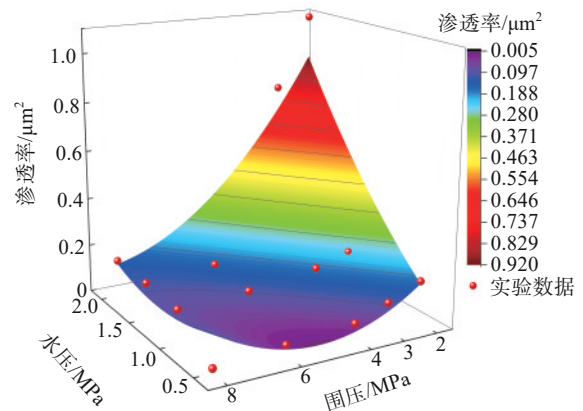


图 3 渗透率水压随水压、围压的变化情况

Fig.3 variation of permeability water pressure with water pressure and confining pressure

根据图 3 拟合曲面变化趋势, 双因素耦合应力场作用下, 围压保持不变, 渗透率随着水压的增大逐渐升高; 而水压保持不变时, 渗透率随着围压的增加逐渐降低。当围压为 2 MPa、水压为 2 MPa 时, 煤岩渗透率出现极大值, 为 $1.089 \mu\text{m}^2$ 。而当围压为 8 MPa、水压为 0.5 MPa 时, 煤岩渗透率出现最小值, 为 $0.019 \mu\text{m}^2$ 。

由图 3 还可以明显看出, 在水压-围压双因素应力场耦合作用下, 渗透率二维曲面有明显的平台期和急增期。平台期耦合应力场边界可映射的渗透率区间为 $0.15 \sim 0.2 \mu\text{m}^2$ 。平台期内的围压应力场与渗流应力场相互制衡, 煤岩内部渗透率不易出现较大波动, 说明此时双场耦合作用下, 煤岩内部有效的体积应力做功较小。

将自然状态下煤岩静态渗透率与渗透试验数据关联对比分析可知, 静态渗透率计算平均值为 $0.041 \mu\text{m}^2$, 结合实际工作面, 岩体承压水压力为 1.09 MPa。煤岩静态渗透率低于平台期下限阈值, 说明煤岩静态渗透率在应力场动态影响下波动较大, 在无应力状态下内部孔裂隙出现了闭合。与

静态渗透率对应,在双因素耦合应力场中,煤岩内部动态渗透率处于较低水平,内部无明显的渗流活动,这是由于外部荷载对渗流应力处于压制状态,但该状态下渗透率对水头压力高度敏感,若水压高于围压将直接进入渗透率急增期,导致煤岩渗透率指数增加。

围压-水压双因素耦合作用下,以围压应力场为基准进行分析。当围压维持在 8 MPa 时,煤岩渗透率随水压变化波动较小,基本不变,这是由于在高围压下,煤岩内部孔裂隙受压闭合并达到峰值,流体通道阻断,该阶段为孔裂隙受压闭合期;围压为 4~6 MPa 时,渗透率的增长速率较为平缓,不同水压下的渗透率差值较小,此时内部的孔裂隙受压变形逐渐舒缓,可认为处于峰后平台阶段,这一阶段孔裂隙变形多为缓释状态。当围压卸载至 4 MPa 后,渗透率随水压增加增幅十分明显,此过程中内部孔裂隙受卸压影响,出现较大范围的扩展延伸,孔裂隙之间的连通性和渗透性急剧增强,该阶段为孔裂隙变形快速恢复期。在考虑水压应力场单因素影响下,渗透率主要以围压作用下的煤岩内部孔裂隙结构变化为主导,当孔隙度较大时,渗透率对水压变化最敏感,整体变化规律与水压呈正相关关系。

4 讨论

基于微观结构图像及渗透率模型,利用合理分形维度计算观测孔隙度,可得到较为准确的静态渗透率。在动态渗流试验中,根据拟合二维曲面演化规律可以看出,煤岩渗流特性受渗流应力场与围压应力场共同影响,主要通过改变煤体内部孔裂隙结构,调整内部渗流压力及路径,从而引起煤岩渗透率变化。根据二维曲面拟合趋势可以看出,围压以外部载荷形式对多孔介质施加压力,改变内部结构的孔裂隙分布及形态,故围压应力场作为直接因素决定煤岩动态渗透率。渗流应力场的表现形式为静水压力,主要作用于煤岩内部流体,作为间接因素控制耦合场中煤岩渗透特性变化规律。从对平台期、急增期的拟合效果来看,拟合曲面具有较高的工程指导价值。

根据二维曲面拟合结果可见,当动态渗透率低于平台期下限阈值时,曲面趋势无法较为真实地表现动态渗透变化。因此,对于高围压低水压条件下渗透数据的变化趋势,有待对 Poly2D 函数

引入新参数进行改进,以提高改进后函数对煤岩渗流全过程的拟合吻合度。

5 结论

(1) 由 SEM 图像及对应二值化计算得到的煤岩孔隙度为 27.65%, 平均静态渗透率为 $0.041 \mu\text{m}^2$, 低于动态渗流平台期下限阈值,说明无应力状态下煤岩内部孔裂隙出现了闭合。

(2) 在双因素耦合应力场中,水压一定时煤岩具备 3 个不同的渗流阶段。当围压低于 4 MPa 时,随着水压增大煤岩动态渗透率呈指数增长,动态渗透率变化具有平台期,此时围压与渗透水压处于平衡状态;当围压高于 6 MPa 时,动态渗透率基本不再受渗透水压影响。

(3) 双因素耦合应力场下,围压通过改变煤岩内部结构的孔裂隙分布及形态,作为直接因素决定煤岩动态渗透率。而渗流应力场通过静水压力作用于煤岩内部流体,作为间接因素控制着耦合场中煤岩渗透特性变化趋势。因此,通过监测煤层开采卸压后应力变化情况,可有效预测煤岩突水路径、涌水量。

参考文献(References):

- [1] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报,2019,44(5):1283-1305.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [2] 邹光华,王崇智,马龙,等.基于泥砂介质的浆液裂隙渗流与孔隙渗透机理[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2023,42(2):152-159.
ZOU Guanghua, WANG Chongzhi, MA Long, et al. Mechanism of slurry fracture seepage and pore seepage based on mud sand media [J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2023, 42(2): 152-159.
- [3] WANG L C, CARDENAS M B, SLOTTKE D T, et al. Modification of the Local Cubic Law of fracture flow for weak inertia, tortuosity, and roughness[J]. Water Resources Research, 2015, 51(4): 2064-2080.
- [4] 潘永亮,简文星,杨光辉,等.水压力作用下三峡库区侏罗系软岩损伤演化特性研究[J].工程地质学报,2021,29(3):693-701.
PAN Yongliang, JIAN Wenxing, YANG Guanghui, et al. Damage and evolution characteristics of Jurassic soft rock in Three Gorges Reservoir area under water pressure[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 693-701.
- [5] 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.
- [6] 张英,李鹏,郭奇峰,等. 水力耦合裂隙岩体变形破坏机制研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报,2020,52(6):21-41.
ZHANG Ying, LI Peng, GUO Qifeng, et al. Research progress of deformation and failure mechanism in fractured rock mass under hydromechanical coupling[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2020,52(6):21-41.
- [7] GAN L, CHEN G Y, SHEN Z Z, et al. Modification method of seepage parameters for rough fractures based on digital image technique[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2022, 209:109967.
- [8] 张培森,赵成业,侯季群,等. 高温与不同水压下深部砂岩渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(6):1117-1128.
ZHANG Peisen, ZHAO Chengye, HOU Jiqun, et al. Experimental study on seepage characteristics of deep sandstone under high temperature and different hydraulic pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(6):1117-1128.
- [9] 郭保华,程坦,陈岩,等. 大理岩裂隙渗流特性及充填砂土影响[J]. 水利学报,2019,50(4):463-474.
GUO Baohua, CHENG Tan, CHEN Yan, et al. Seepage characteristic of marble fracture and effect of filling sands[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(4):463-474.
- [10] 杨秀荣,姜谔男,张峰瑞,等. 破裂石灰岩在渗透压-应力耦合作用下渗流特性研究[J]. 煤炭学报,2019,44(增刊1):101-109.
YANG Xiurong, JIANG Annan, ZHANG Fengrui, et al. Seepage characteristics of fractured limestone under osmotic pressure-stress coupling[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(Suppl. 1):101-109.
- [11] TIAN Z X, ZHANG W S, DAI C Q, et al. Permeability model analysis of combined rock mass with different lithology[J]. Arabian Journal of Geosciences,2019,12:755.
- [12] 王环玲,王廷超,胡明涛,等. 渗流作用下红层软岩流变力学特性试验与本构模型研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2023,45(5):31-37.
WANG Huanling, WANG Tingchao, HU Mingtao, et al. Experimental study on the rheological properties of red-bed soft rock under the effect of hydraulic and constitutive model[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2023,45(5): 31-37.
- [13] 曹栩楼,刘江峰,倪宏阳,等. 基于SEM图像的煤层气渗流裂隙开度影响的模拟研究[J]. 煤矿安全,2020,51(5):173-176.
CAO Xulou, LIU Jiangfeng, NI Hongyang, et al. Simulation study on effect of crack opening degree of coalbed methane seepage based on SEM image[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(5): 173-176.
- [14] ZHAO Y, WANG C L, BI J. Analysis of fractured rock permeability evolution under unloading conditions by the model of elastoplastic contact between rough surfaces[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2020, 53(12):5795-5808.
- [15] 段玲玲,邓华锋,齐豫,等. 水-岩作用下单裂隙灰岩渗流特性演化规律研究[J]. 岩土力学,2020,41(11):3671-3679,3768.
DUAN Lingling, DENG Huafeng, QI Yu, et al. Study on the evolution of seepage characteristics of single-fractured limestone under water-rock interaction[J]. Rock and Soil Mechanics,2020,41(11): 3671-3679,3768.
- [16] 姜涛,徐维,苏壮壮. 利用小岛法对砂岩SEM图像进行渗透率计算分析[J]. 华北科技学院学报,2018,15(5):54-59.
JIANG Tao, XU Wei, SU Zhuangzhuang. Calculation and analysis of permeability of sandstone SEM image by small island method [J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2018, 15(5): 54-59.
- [17] 李波波,王斌,杨康,等. 煤岩孔裂隙结构分形特征及渗透率模型研究 [J]. 煤炭科学技术,2021,49(2):226-231.
LI Bobo, WANG Bin, YANG Kang, et al. Study on fractal characteristics of coal pore fissure structure and permeability model[J]. Coal Science and Technology,2021,49(2):226-231.
- [18] 李治豪,陈世江,杜广盛,等. 不同围压和水压加载下煤岩渗流规律研究[J]. 煤炭科学技术,2020,48(12):101-108.
LI Zhihao, CHEN Shijiang, DU Guangsheng, et al. Research on coal and rock seepage laws under different confining pressures and hydraulic pressures[J]. Coal Science and Technology,2020,48(12):101-108.
- [19] GAN L, LIU Y, XU T, et al. Experimental investigation of the seepage characteristics of a single fracture in limestone with different roughness and seepage fluids[J]. Journal of Hydrology, 2023,622:129699.
- [20] WANG P F, ZHANG X Y. Experimental study on seepage characteristics of a soil-rock mixture in a fault zone[J]. Fluid Dynamics and Materials Processing,2021,18(2):271-283.