

张天军,初雨航,张磊,等.尺寸效应影响的抽采孔周煤体分区渗透特征[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(2):137-145.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250444
ZHANG Tianjun,CHU Yuhang,ZHANG Lei,et al.Regional permeability characteristics of coal around drainage borehole affected by size effect[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2026, 45(2): 137-145. DOI: 10.11956/j. issn. 1008-0562. 20250444

尺寸效应影响的抽采孔周煤体分区渗透特征

张天军,初雨航,张磊,潘红宇,曹妍

(西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安 710054)

摘 要:为阐明煤与瓦斯突出和冲击地压复合灾害矿井中双防钻孔周围气体通道渗透受阻力的影响规律,开展不同高度单一级配与组合体试样三轴渗透试验,分析渗透率与试样高度的关系,揭示渗透率的尺寸效应。引入沿程阻力模型表征考虑沿程水头损失(CFR)的渗透率,明确双防钻孔影响区内的分区渗透特征。研究结果表明,渗透率尺寸效应的主控机制是随渗流通道长度积累而加剧的惯性效应,可基于表征该效应的CFR渗透率界定气体优势运移路径,证实了煤体尺寸是影响渗透能力的关键因素,为优化钻孔布置、提升抽采效率提供理论基础。

关键词:双防钻孔;渗流阻力;渗透率;煤体尺寸;破碎试样;组合体试样

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)02-0137-09

Regional permeability characteristics of coal around drainage borehole affected by size effect

ZHANG Tianjun, CHU Yuhang, ZHANG Lei, PAN Hongyu, CAO Yan

(School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract:To elucidate the influence of gas channel permeability resistance around dual-prevention boreholes in coal mines with compound disasters of coal and gas outbursts and rock bursts, triaxial permeability tests were conducted on single-graded and composite specimens with varying heights. Analyzing the relationship between permeability and specimen height, revealed the size effect of permeability. The head loss along the flow path model was introduced to characterize permeability considering the frictional head loss along the flow path (CFR). The zonal permeability characteristics within the influence area of dual-prevention boreholes were clarified. The results indicate that the primary mechanism behind the permeability size effect is the intensification of inertial effects with increasing seepage channel length. Permeability characterized by the CFR, which accounts for this inertial effect, can be used to identify dominant gas migration pathways. The study confirms that coal mass size is a key factor influencing affecting permeability capacity, providing a theoretical basis for optimizing borehole layout and enhancing gas extraction efficiency.

Keywords: dual-prevention boreholes; seepage resistance; permeability; coal size; broken specimen; composite specimen

0 引言

在煤与瓦斯突出和冲击地压复合灾害矿井的治理中,常采用顺层平行布置预抽钻孔^[1]和卸压钻孔分别对两类灾害进行防治^[2]。巷道形成后,受围

岩松动影响,煤层内产生大量应力状态不同、裂隙发育不一、破坏状态各异的煤体^[3]。当抽采、卸压钻孔共同布置于同一巷道同侧煤壁时,不同状态的煤体在孔周应力集中叠加影响下,会出现异常破碎^[4]。在抽采负压作用下,卸压钻孔中的空气

收稿日期: 2025-10-20 修回日期:2025-11-23 接受日期:2025-11-30 责任编辑:焦丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(52374228; 52104216; 52274226)

作者简介: 张天军(1971-),男,陕西临潼人,博士,教授,主要从事矿山灾害力学机理及防控技术方面的研究。E-mail: tianjun_zhang@xust.edu.cn

沿此类破碎煤体构成的气体通道至抽采钻孔,导致瓦斯抽采浓度偏低问题凸显^[5]。此时,2种钻孔与巷道围成形成类似“U”形的影响区,其内部充斥着大量的破碎-裂隙煤体^[6]。根据煤体破碎程度可将影响区内的破碎-裂隙煤体划分为破碎通道、破碎-裂隙通道和破碎-裂隙-原岩通道3类气体通道,其中前两类气体通道为气体在影响区内渗透的主要运移路径^[7]。因此,解决这类由瓦斯抽采-卸压钻孔(简称“双防钻孔”)结构导致的低浓度抽采问题,关键在于探明气体在这两类气体通道内的渗透特性^[8]。但受双防钻孔几何构型影响,气体在两类气体通道中运移时需穿过不同长度的煤体,且在破碎-裂隙通道中,还需穿过不同裂隙发育状态的煤体^[9]。气体在不同长度通道中流速不同,影响区内存在不同的分区渗透特征^[10],因此阐明不同长度气体通道渗透规律成为解决双防钻孔低浓度抽采问题的基础,其本质是研究煤体长度与这两类气体通道渗透特征的关系。

煤体长度的影响在渗流试验中更多体现为试样尺寸的不同^[11],而不同裂隙发育状态的煤体常用 Talbol 级配表征^[12],同时涉及多个裂隙发育状态煤体时可用组合体试样描述^[13]。不同尺寸多孔砂岩试样渗透率测定试验发现,不同高度试样的渗透率存在差异,被认为是试样内部孔隙不均匀所致^[14]。但在不同尺寸试样围压加卸载渗透^[15]、不同高度试样循环加卸载渗透试验中^[16],不同尺寸试样的初始渗透率仍存在类似现象,此类研究证实了不同尺寸试样渗透率差异的普遍性。然而,目前的研究仅对不同高度试样的渗透率规律进行描述,未揭示其内在物理机制。渗透率反映了多孔介质颗粒结构对流体流动的阻碍能力,这种阻碍能力在物理上表现为渗流阻力的大小。因此渗透率差异现象可认为是由介质内部渗流阻力变化导致。针对破碎试样的渗流阻力,微管沿程水头损失计算^[17]、不同粗糙度的摩阻压降测定^[18]、不同粗糙度微管的临界雷诺数测定试验^[19]、能量损失角度的粗糙管道流动数值模拟^[20]、渗流阻力系数模型^[21]等多孔介质渗流方面的研究,初步形成了计算渗流阻力的方法,为多孔介质试样的渗流阻力计算与表征提供了基础,但针对破碎煤体试样,尤其是组合体试样中渗流阻力随试样尺寸与应力状态的变化规律,以及渗流阻力变化引起的渗透率差异现象仍需进一步分析。

为探究煤体尺寸引起的渗流阻力变化对渗透率的影响,根据影响区内区域分化特性与通道长度变化规律,开展不同高度单一级配与组合体试

样的三轴渗透试验,获得渗透率与试样高度的关系,计算不同高度试样的渗流阻力系数以对渗透过程中的渗流阻力变化进行表征,引入沿程阻力模型得到考虑沿程水头损失的渗透率,分析煤体尺寸引起的渗透率差异问题。研究可为阐明气体在双防钻孔影响区内的渗透规律提供参考,为矿井煤与瓦斯突出和冲击地压的协同防治提供依据。

1 试验设计与方法

1.1 试验系统

采用改进的 LFTD1812-3 型全自动三轴渗透仪开展单一级配及上位变高度破碎组合体渗透试验,试验系统见图 1。

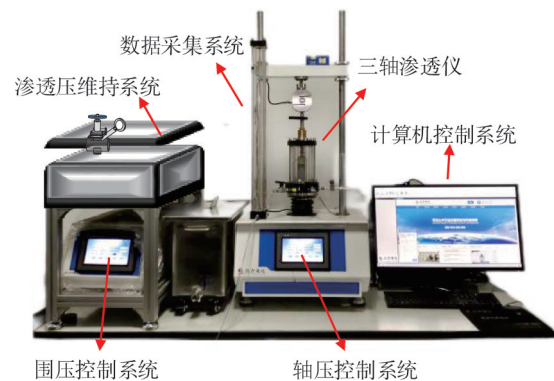


图 1 改进的全自动三轴渗流系统

Fig.1 improved automatic triaxial seepage system

试验中,加载系统通过上方夹具和下方底座的相对运动提供轴压,由加压泵和水箱组成的独立系统提供围压,以上压力由立方通达三轴渗流软件实时记录并控制。渗透压由加压系统提供,由减压装置调节并保持稳定。其中,轴压控制系统量程为 30 kN,轴向力精度为 0.3%;围压控制系统量程为 2 MPa,压力精度为 0.3%;渗透压加载系统量程为 150 kPa,压力精度为 0.5%;数据采集系统量程为 50 mL,精度为 0.1 mL。

1.2 试验设计

根据文献[12]的研究结果,为避免试验组在渗透过程中受到非线性渗透的影响,试验取围压下限(300 kPa)的 Talbol 幂指数为 0.4,围压上限(500 kPa)的 Talbol 幂指数为 0.6,以此为级配选取基准。试验分 2 组,第 1 组探究破碎区气体通道长度对渗透特性的影响,用 Talbol 幂指数 0.4 的煤颗粒制成 5 种试样,试样直径为 50 mm、高度为 60~100 mm;第 2 组探究破碎-裂隙网络区气体通道长度对渗透特性的影响,用 Talbol 幂指数 0.4 的煤颗粒制备高度为 50 mm 的组合体下位部分,再以

Talbol 幂指数 0.6 的煤颗粒制备高度为 10~50 mm 的组合物上位部分, 利用上位与下位组合形成 5 种直径为 50 mm、高度为 60~100 mm 的试样。

1.3 煤样制备

原煤取自某煤矿 11240 工作面, 煤层具有高瓦斯压力与冲击地压倾向性, 易自燃。顶板为薄层状泥岩, 变形量较大, 易发生冒顶、偏帮事故。原煤经过破碎、筛选、级配、塑形等阶段制成所需煤样。利用电动磨粉机将原煤破碎成颗粒状, 再用 200 型标准检验筛分机将颗粒分选成 0~1.25 mm 的 6 种粒径区间。根据泰波 (TALBOLAN) 级配设计方法, 计算所需级配试样的 Talbol 幂指数^[22]。

破碎煤样通过筛孔的比例为

$$P_i = (d_s/D)^n \times 100\%, \quad (1)$$

式中: d_s 为筛孔直径; D 为最大颗粒粒度; n 为 Talbol 幂指数。

将不同的 n 和 d_s 代入式 (1) 得到 P_i , 再计算得到各粒径区间的煤颗粒质量, 并将不同粒径的煤颗粒混合制备成所需级配的煤颗粒备用。向混合制备的煤颗粒中加入与其质量成一定比例的水作为成型介质, 搅拌均匀。将混合液注入圆柱形模具, 利用水的毛细作用使煤颗粒在模具压制中成型, 制成直径为 50 mm、高度不同的型煤试样与变上位高度组合物试样, 具体参数见表 1。

表 1 试样参数
Tab.1 parameters of the sample

试样编号	h_u/mm	h_L/mm	m_t/g	m_u/g	m_L/g	m_w/g
N4H6	0	60	133.30		110	23.30
N4H7	0	70	157.57		130	27.57
N4H8	0	80	181.82		150	31.82
N4H9	0	90	206.06		170	36.06
N4H10	0	100	230.30		190	40.30
N64H6	10	50	145.45	20	100	25.45
N64H7	20	50	169.69	40	100	29.69
N64H8	30	50	193.93	60	100	33.93
N64H9	40	50	218.18	80	100	38.18
N64H10	50	50	242.42	100	100	42.42

注: h_u 、 h_L 分别为试样上、下位高度; m_t 、 m_u 与 m_L 分别为试样总质量、上、下位煤颗粒质量; m_w 为制样时加入水的质量。

1.4 试验方法

采取稳态渗流法, 开展不同围压、轴向载荷与渗透压的分级加载渗透试验。试验分 2 组, 每组重复 3 次。试验开始前, 记录试样的高度与质量, 随后将试样放入渗透仪并进行位移调零, 同时开启液压泵注液饱和。设置试验围压分别为 300 kPa、

400 kPa, 每级围压下分别设置轴向载荷为 100 kPa、150 kPa、200 kPa、250 kPa。围压与轴向载荷分级加载, 加载速率为 15 kPa/min。待轴压与围压控制系统加载至指定压力稳定后, 开启渗透压加压系统, 控制加载速度为 60 kPa/min, 确保围压、轴向载荷稳定, 缓慢地对试样加载。当渗透压分别加载至 40 kPa、60 kPa、80 kPa、100 kPa 时, 启动稳压系统, 调整并控制渗透压, 确保渗透压加载对试样结构无影响。当围压、轴向载荷与渗透率均维持在设定值时, 开始渗透试验, 记录量筒内的液体体积。渗透结束后, 卸载并排空渗透仪内的液体, 拆除试样, 试验结束。

2 试验结果与分析

2.1 等效孔隙率

加载过程中, 组合物试样变化不完全均匀, 参考标准试样的孔隙率计算等效孔隙率^[23]为

$$\varphi = \mu_h \frac{\pi r_0^2 (h_0 - \Delta h) - \sum_{i=1}^2 \Delta V_i - \Delta V_0}{\pi r_0^2 (h_0 - \Delta h) - \sum_{i=1}^2 \Delta V_i}, \quad (2)$$

式中: μ_h 为横向变形系数; r_0 为煤样初始半径; h_0 为煤样初始高度; Δh 为实时轴向位移; V_0 为煤样初始体积, 由质量和密度的比得到; ΔV_i 为每级围压的体积差, i 取 1 或 2 (试验设置 0.3 MPa 和 0.4 MPa 两级围压梯度, 产生 2 个体积差)。

等效孔隙率 φ 随轴向载荷 σ_1 的变化见图 2。由图 2 (a) 可见, φ 随试样高度降低呈增大趋势, 说明高度对试样内部结构有影响, 这与加载过程中颗粒结构的变化有显著关联。在轴向载荷加载过程中, 试样两端受摩擦约束影响^[24], 内部煤颗粒移动受限, 无法充分侵入彼此的孔隙, 导致试样两端等效孔隙率较高。试样中间区域受端部摩擦较小, 压实程度更高, 等效孔隙率相对较低。这种沿试样轴向方向形成“两端高, 中间低”的孔隙率非均匀分布现象可称为“端部效应”。

试样高度降低, 高孔隙率的端部区域占试样总体积比增大, 导致单一级配试样的等效孔隙率增大。对比不同高度的组合物试样发现, 等效孔隙率随试样高度的增加呈现上升趋势。其原因在于: 组合物试样同样受端部效应影响, 但其等效孔隙率变化主要由试样内部结构控制。随试样高度增加, 级配 n 为 0.6 煤体的占比增加。试样等效孔隙率随级配上升而呈增大趋势^[12], 导致组合物试样等效孔隙率随试样高度增加而增加。

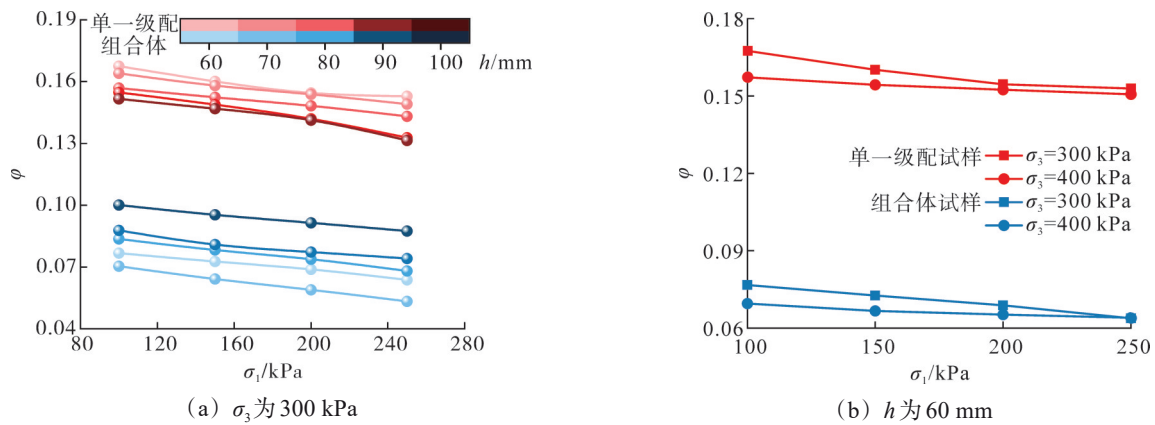


图2 加载过程中的等效孔隙率变化

Fig.2 changes in porosity during stress loading

由图2(a)可见, 组合体试样的等效孔隙率小于单一级配试样, 且随试样高度增加而增加, 两种试样等效孔隙率测定值的差异呈现减小趋势。这种现象与连续级配煤体渗透试验的孔隙率变化规律有所区别^[12]。这说明组合体试样上下位边界对试样等效孔隙率存在抑制作用, 但试样高度的增加会弱化该作用。原因是加载过程中, 小颗粒侵入大颗粒的孔隙^[22], 等效孔隙率下降。组合体试样的上下位存在级配差距。在界面处, 级配 n 为0.6的上位煤颗粒构成含较大孔隙的骨架结构, 级配 n 为0.4的下位煤颗粒在压实过程中侵入并填充这些孔隙, 颗粒侵入现象更加显著^[25], 导致组合体试样界面处等效孔隙率降低。随单一级配试样与组合体试样的高度同时增加, 组合体界面效应影响的区域占比降低, 两种试样的等效孔隙率差异减小。

选取围压为300 kPa、400 kPa、试样高度为60 mm的2种试样, 其不同围压下的等效孔隙率见图2(b)。试样等效孔隙率随围压增加呈现减小趋势, 且孔隙率曲线变化平缓。同时, 试样类型对围压的作用基本一致。这意味围压对孔隙率有抑制作用, 且轴向载荷对试样等效孔隙率的作用效果减弱。这是因为, 试样在初次加载时等效孔隙率大、承载能力和稳定性差, 经试验机压缩后试样在侧限约束与轴向载荷作用下发生压实变形, 试样内部煤颗粒发生位移重组, 应力承载能力明显提升, 试样受轴向载荷影响减少。

2.2 渗流阻力系数

渗流速度^[13]为

$$v = V/At, \quad (3)$$

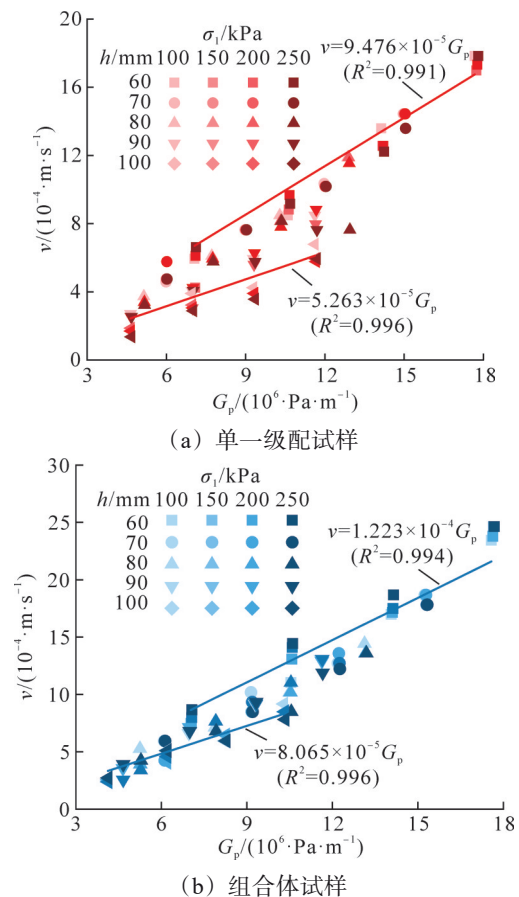
式中: V 为渗流体积; A 为面积; t 为渗透时间。

由试样两端的渗透压差计算压力梯度^[26]为

$$G_p = -\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{P_1 - P_2}{H}, \quad (4)$$

式中: P_1 为流体流入试样的孔隙压力; P_2 为流体流出煤样的孔隙压力, 渗流出口端连通大气压, 取0; H 为试样高度。

根据式(3)、式(4), 结合试验数据得到两类试样流速与压力梯度关系, 见图3。

图3 σ_3 为400 kPa条件下2类试样流速与压力梯度关系Fig.3 relationship between flow velocity and pressure gradient of two kinds of samples under σ_3 is 400 kPa

渗流阻力系数为煤体两端的压力梯度与流体流经该段煤体的流速的比,即单位流速下的压力梯度^[21],表示为

$$\gamma = G_p / v_0 \quad (5)$$

渗流阻力系数与试样高度的关系见图4。2种试样的渗流阻力系数随试样高度和轴向载荷的增加呈增大趋势,这说明试样高度和轴向载荷的增

大均有增大渗流阻力系数的作用。当轴向载荷一定时,对比单一级配试样与组合体试样的渗流阻力系数发现,组合体试样渗流阻力系数较小,这说明试样内部大粒径煤颗粒占比的增加对渗流阻力系数有抑制作用。此外,2种试样渗流阻力系数随围压增加均呈增大趋势,且曲线分布紧密,这说明围压增加有增大阻力系数的作用,且围压弱化了轴向载荷促进渗流阻力系数增大的作用。

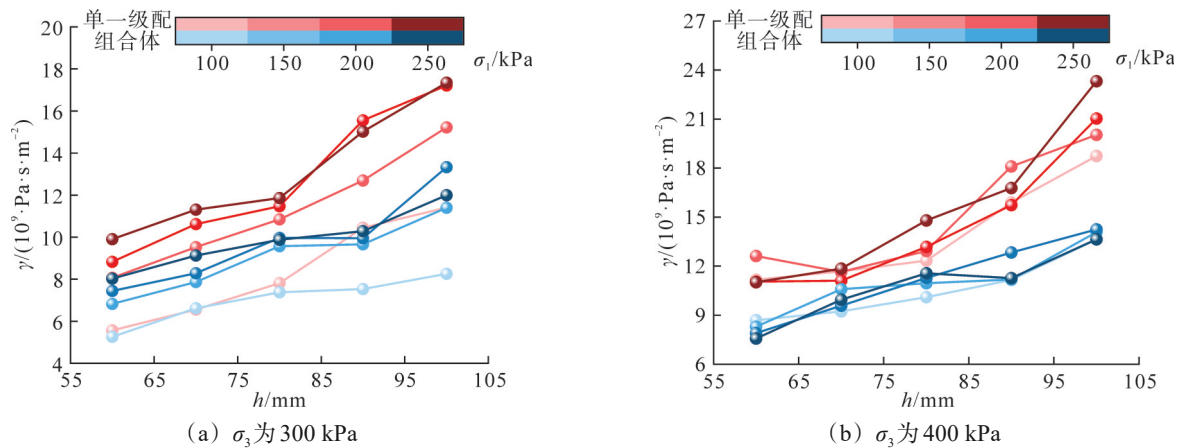


图4 不同围压下渗流阻力系数与试样高度的关系

Fig.4 relationship between seepage resistance coefficient and sample height under different confining pressures

2.3 渗透率

对图3中的数据点进行线性回归,其决定系数 R^2 均大于0.99,表明两类试样的流速与压力梯度呈高度线性相关,根据达西定律计算渗透率^[27]。

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{k} v, \quad (6)$$

式中: p 为孔压; μ 为流体在标准状态下的动力黏

度; k 为试样渗透率。

不同围压下试样渗透率与高度关系见图5。不同轴向载荷下,两种试样渗透率随高度增大均呈现减小趋势。围压为400 kPa时,渗透率曲线分布更加紧密,说明围压对试样渗透率有抑制作用,同时弱化了轴向载荷的作用。

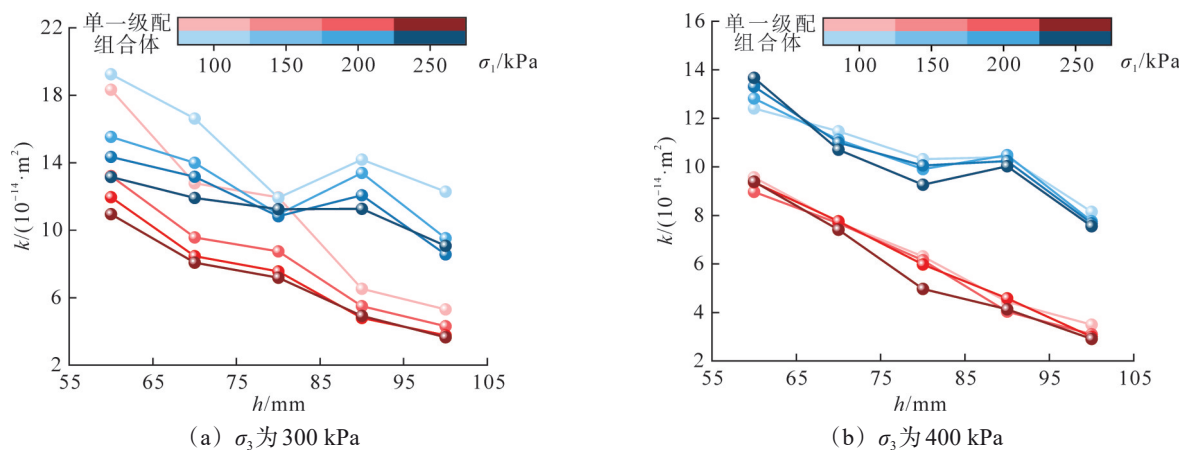


图5 不同围压下渗透率与试样高度关系

Fig.5 relationship between permeability and sample height under different confining pressures

图5表明,试样渗透率随高度增加呈现规律性降低趋势。而基于黏性力主导的达西定律线性本构关系计算的渗透率,被定义为流体穿过多孔介

质的固有属性,其理论值应与试样尺寸无关^[28]。试验现象与理论预期虽存在差异,但该现象在相关研究中时有发生^[15]。这意味着破碎煤体渗透存在由

尺寸效应主导的渗透率差异机制。为揭示该机制,下文将从微观角度对渗流过程进行分析。

3 讨论

3.1 不同高度试样渗透率差异机制与表征

达西定律表征的是黏性力主导的线性渗流过程^[29],其基础假设为介质均匀且各向同性,并将流体受固体颗粒阻碍的复杂渗流简化为流体穿过固体颗粒的直线运动^[19]。然而,型煤试样内部煤颗粒呈现随机填充的密实堆积结构^[30],导致颗粒间的渗流通道蜿蜒曲折。受此影响,流体在渗透过程中需不断克服因速度方向变化产生的惯性效应。这种试样结构导致的流线迂曲与达西定律的假设不同。因此,基于达西定律计算的渗透率与试样的实际渗透能力存在偏差,表现为渗透率差异现象。

试样高度增加时,流体流经的通道长度增加,惯性效应更明显,积累的能量损失也随之增加。以往在多孔介质的渗透能力研究中,通常采用标准试样,流体所受惯性效应差别不显著。但当试样尺寸不同时,渗透过程放大了惯性效应的影响,由此产生的积累能量损失不可被忽略。不同高度试样渗透率差异原理见图6。

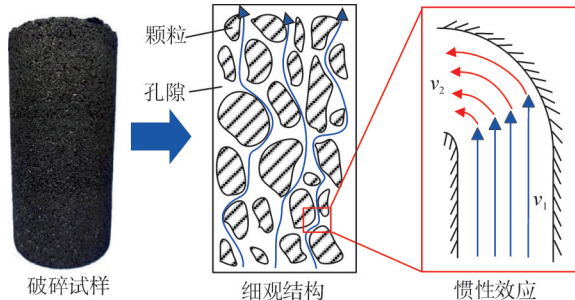


图6 不同高度试样渗透率差异原理

Fig.6 principle of permeability difference of samples at different heights

流体在渗流通道中,因方向变化导致能量损失持续发生,但直接衡量发生次数较为困难,因此将此能量损失等效为粗糙微管的沿程水头损失。

流体在多孔介质中的渗透可简化为流体沿粗糙毛细管形成管束的一维定常流动,由此产生的沿程水头损失 h_f 可用Dancy-Weibach公式^[17]表征,即

$$h_f = \lambda l v^2 / 2dg, \quad (7)$$

式中: λ 为摩阻系数^[18]; l 为试样长度; d 为试样直径; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。

$$\lambda = \zeta / Re^\alpha, \quad (8)$$

式中: ζ 和 α 为与流态相关的经验系数和指数, ζ 取 $0.8P_1 \sim 3.2P_1$, α 取3; Re 为雷诺数,流态可通过 Re

判断^[31]。

$$Re = \rho v L_c / \mu, \quad (9)$$

式中: ρ 为流体密度; L_c 为特征长度。

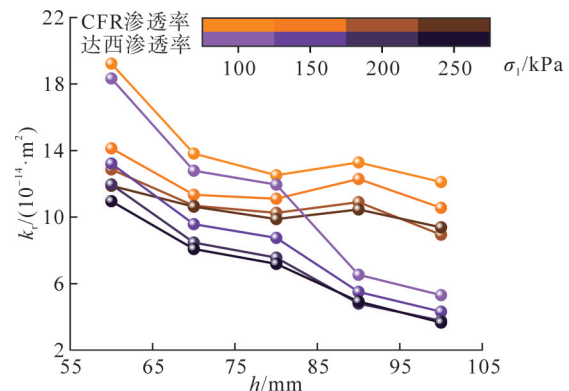
试验中,沿程水头损失造成的压降损失为

$$G_{pf} = \frac{P_1 - \rho g h_f - P_2}{H}. \quad (10)$$

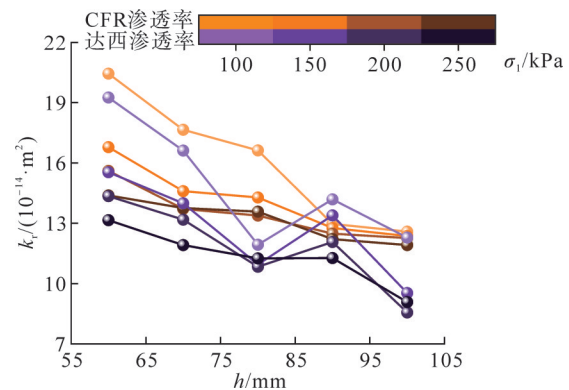
将式(10)代入式(6)得到考虑沿程水头损失(considering the effect of filtrational resistance, CFR)的渗透率为

$$k_r = H \mu v / (P_1 - \rho g h_f - P_2). \quad (11)$$

k_r 与试样高度的关系见图7。对比图5和图7可见, k_r 与 k 分布相似,但两种试样的 k_r 随高度增加下降得更平缓,这说明 k_r 对考虑流体惯性效应的渗透能力表征更准确。



(a) 单级配试样



(b) 组合体试样

图7 σ_3 为300 kPa条件下CFR与试样高度的关系

Fig.7 relationship between CFR and specimen height under the condition of σ_3 is 300 kPa

3.2 CFR作用的双防钻孔间气体渗透规律

以往对负压作用下的孔周气体流动规律的研究,通常将其简化为气体从无穷远处沿连续、均匀煤体中的渗透过程^[32],而未能考虑煤体尺寸变化引起的渗透率差异,从而对孔周气体流动规律产生影响。CFR在一定程度上考虑了双防钻孔间由

通道长度带来的影响。因此,可根据CFR渗透率获得典型双防钻孔之间的流速分布。

由式(3)和式(6)可得

$$v = k\Delta p / \mu L_B, \quad (12)$$

式中: Δp 为破碎煤样两端的压差; L_B 为渗透试验中试样长度。

实验结果显示,渗透率与试样长度 L 的关系可表示为 $k = e^{-L}$, 代入式(12)可得

$$v = e^{-L} / L. \quad (13)$$

渗流速度与试样长度的关系见图8。随试样长度的增加,渗流速度先急剧下降,后渐趋平缓。根据此变化过程,将渗流速度分为3个区域^[13],分别为I区、II区和III区。

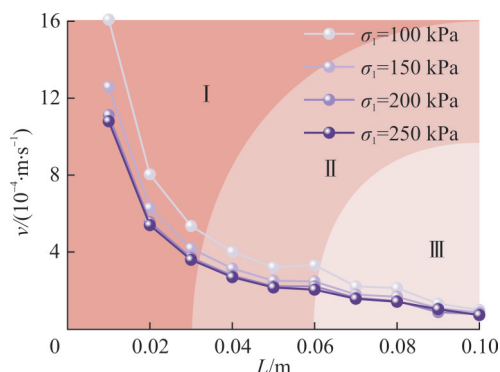


图8 渗流速度与试样长度的关系

Fig.8 relationship between seepage velocity and region length

根据相似第一定理,工程尺度的几何、运动构型与试验存在如下关系^[33]

$$L_A / L_B = \lambda_L, \quad (14)$$

$$v_A / v_B = \lambda_v, \quad (15)$$

式(14)~式(15)中: λ_L 为几何相似比; λ_v 为运动相似比; L_A 为双防钻孔影响区内气体通道的长度; v_A 为空气沿气体通道运移时的流速; v_B 为流体通过破碎煤样的渗流速度。

在多孔介质渗透中,流体黏性力起主导作用,当几何构型相似时,工程与试验雷诺数满足

$$\frac{\rho_A v_A L_A}{\mu_A} = Re_A = Re_B = \frac{\rho_B v_B L_B}{\mu_B}, \quad (16)$$

式中: ρ_A 为空气的密度,取 1.2 kg/m^3 ; μ_A 为空气在标准状态下的动力黏度,取 $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$; Re_A 为空气双防钻孔影响区气体通道内运移时的雷诺数; Re_B 为流体穿过破碎煤样时的雷诺数; ρ_B 为流体的密度,取 1000 kg/m^3 ; μ_B 为流体在标准状态下的动力黏度,取 $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

当满足雷诺数与运动构型相同时,几何构型的相似条件为

$$\lambda_A = \frac{\rho_B \mu_A}{\rho_A \mu_B} = 15. \quad (17)$$

实际矿井瓦斯抽采绝对压力小于 88 kPa , 典型冲击地压矿井强卸压区的渗透率为 $100 \sim 1000 \text{ mD}$ ^[34], 气体流速为 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ^[35]。试验结果中, k 为 $1 \times 10^{-13} \sim 2 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 。空气沿气体通道运移时,渗流速度、试样长度与 100 mm 试样在试验条件下的流速相近 (v 为 $1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$), L_A 约为 L_B 的15倍,即 1.5 m ,与双防钻孔布孔间距为同一量级。根据图8,结合布孔间距,绘制抽采钻孔周径向流速区分布,见图9。

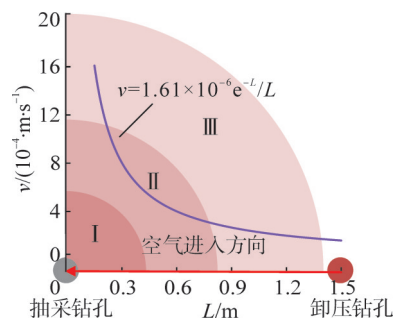


图9 抽采钻孔周径向流速区分布

Fig.9 distribution of radial velocity zone around extraction borehole

空气自卸压钻孔运移至抽采钻孔时, $v = 1.61 \times 10^{-6} e^{-L} / L_A$, 由此可将孔周裂隙煤体划分为3个区域: 激流区 (I区), 抽采钻孔径向 0.3 m 内煤体, v 为 $5.4 \times 10^{-4} \sim 1.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, 其内部存在高强度气体运移, 为主要渗透路径; 稳流区 (II区), 抽采钻孔径向 $0.3 \sim 0.9 \text{ m}$ 煤体, v 为 $2.0 \times 10^{-4} \sim 5.4 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, 其内部产生稳定的气体运移, 为次要渗透路径; 缓流区 (III区), 抽采钻孔径向 0.9 m 以外的煤体, v 为 $7.1 \times 10^{-5} \sim 2.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, 其内部产生较弱的气体运移, 为微渗透路径。

4 结论

(1) 破碎煤体等效孔隙率受外部载荷与内部细观结构的耦合作用。试样高度增长具有抑制单一级配试样的“端部效应”与组合体试样的“界面效应”的作用,且能够降低单一级配试样等效孔隙率,增大组合体试样等效孔隙率。

(2) 随试样高度增加,破碎煤体渗透率降低,渗流阻力系数增加,其细观作用核心机制为渗流通道迂曲结构诱发的惯性效应随渗流路径累积。

(3) CFR渗透率从压降损失角度量化了惯性效应的影响,有效表征了受尺寸效应影响的煤体渗透能力。基于该模型计算的气体流速与抽采孔周径向距离关系表明,双防钻孔存在激流区、稳

流区与缓流区三大影响区。

本研究引入沿程阻力模型表征了尺寸效应对破碎煤体渗透率的影响,揭示了惯性效应是导致渗透率随试样尺寸变化的关键。然而该模型本质是惯性阻力作用的粗糙微管沿程水头损失等效,还需进一步从物理本质直接表征惯性阻力,揭示破碎煤体中复杂的惯性效应变化规律。

参考文献(References):

- [1] 张庆贺,袁亮,杨科,等.深井煤岩动力灾害的连续卸压开采防治机理[J].采矿与安全工程学报,2019,36(1):80-86,102.
ZHANG Qinghe, YUNG Liang, YANG Ke, et al. Mechanism analysis on continuous stress-relief mining for preventing coal and rock dynamic disasters in deep coal mines[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(1):80-86,102.
- [2] 朱小景,潘一山,齐庆新,等.矿震诱发巷道冲击地压力学机制及判别准则研究[J].采矿与安全工程学报,2024,41(3):493-503.
ZHU Xiaojing, PAN Yishan, QI Qingxin, et al. Study on mechanical mechanism and criterion of roadway rockburst induced by mine earthquake [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(3):493-503.
- [3] ZHANG L, JING C, LI S G, et al. Seepage law of nearly flat coal seam based on three-dimensional structure of borehole and the deep soft rock roadway intersection[J]. Energies,2022,15(14):5012.
- [4] 张国川,张海庆,寇建新,等.深部回采区段极近距离煤层的卸压消突响应范围[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(6):641-650.
ZHANG Guochuan, ZHANG Haiqing, KOU Jianxin, et al. Response range of pressure relief and outburst elimination in extremely close distance coal seams of deep mining sections [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2025,44(6):641-650.
- [5] 马智会,潘荣锐,马智勇,等.顺层钻孔瓦斯抽采漏气规律及封孔技术研究[J].煤炭科学技术,2020,48(8):90-96.
MA Zhihui, PAN Rongkun, MA Zhiyong, et al. Study on gas leakage law and hole sealing technology of gas drainage in layered drilling [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8):90-96.
- [6] ZHANG L, CAO Y, PAN H Y, et al. Permeability of the composite coal in the grouting section around the CBM drainage borehole in the coal mine[J]. Scientific Reports, 2025,15: 29434.
- [7] 傅雪海,齐琦,程鸣,等.煤储层渗透率测试、模拟与预测研究进展[J].煤炭学报,2022,47(6):2369-2385.
FU Xuehai, QI Qi, CHENG Ming, et al. Review of research on test, simulation and prediction of coal reservoir permeability [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2369-2385.
- [8] 魏建平,吴松刚,王登科,等.温度和轴向变形耦合作用下卸载含瓦斯煤渗流规律研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(1):168-174.
WEI Jianping, WU Songgang, WANG Dengke, et al. Seepage rules of loaded coal containing gas under the coupling effect of temperature and axial deformation [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015,32(1):168-174.
- [9] 王宁,李团结,刘文岗,等.顺层双防钻孔密封段煤体渗透特性[J].煤炭科学技术,2025,53(10):138-153.
WANG Ning, LI Tuanjie, LIU Wengang, et al. Permeability characteristics of coal body around sealing section of double-prevention bedding boreholes[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 138-153.
- [10] 胡皓宇.深埋薄基岩覆岩水渗流规律[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(4):403-410.
HU Haoyu. Overburden water seepage law of deep buried thin bedrock [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2025, 44 (4): 403-410.
- [11] 王磊,邹鹏,谢广祥,等.冲击载荷下不同尺寸煤岩动力学分析及损伤特性研究[J].振动与冲击,2023,42(22):322-331.
WANG Lei, ZOU Peng, XIE Guangxiang, et al. Dynamic analysis and damage characteristics of coal rock with different sizes under impact loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(22): 322-331.
- [12] 张磊,杨世华,武晋宇,等.有效应力下连续级配煤体的渗透特性试验[J].煤炭学报,2024,49(9):3872-3883.
ZHANG Lei, YANG Shihua, WU Jinyu, et al. Permeability characterization tests of continuous graded coal bodies under effective stresses [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(9): 3872-3883.
- [13] PAN H Y, ZHANG Y, ZHANG L, et al. Permeability characteristics of combined coal with different water contents[J]. Energies, 2025, 18(1): 200.
- [14] HEAP M J. The influence of sample geometry on the permeability of a porous sandstone[J]. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 2019, 8(1):55-61.
- [15] 彭永伟,齐庆新,邓志刚,等.考虑尺度效应的煤样渗透率对围压敏感性试验研究[J].煤炭学报,2008,33(5):509-513.
PENG Yongwei, QI Qingxin, DENG Zhigang, et al. Experimental research on sensibility of permeability of coal samples under confining pressure status based on scale effect[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(5):509-513.
- [16] 王辰霖,张小东,李贵中,等.循环加卸载作用下不同高度煤样渗透性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(10):2299-2308.
WANG Chenlin, ZHANG Xiaodong, LI Guizhong, et al. Experimental study on the permeability of coal samples with different heights under cyclic loading and unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(10): 2299-2308.
- [17] 王永功,范兴科,吴普特.微管沿程水头损失计算方法试验研究[J].灌溉排水学报,2005,24(3):68-70.
WANG Yonggong, FAN Xingke, WU Pute. The study on the head loss calculation of micro-tube[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(3):68-70.
- [18] 周宁杰,孙涛.计算不同管壁粗糙度产生的井筒摩阻压降[J].内蒙古石油化工,2021,47(10):34-37.
ZHOU Ningjie, SUN Tao. Calculation and analysis of different

- wall roughness of wellbore friction pressure drop[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2021,47(10):34-37.
- [19] HUANG K, WAN J W, CHEN C X, et al. Experimental investigation on friction factor in pipes with large roughness[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013,50:147-153.
- [20] LI Z X, WAN J W, ZHAN H B, et al. An energy perspective of pore scale simulation and experimental evidence of fluid flow in a rough conduit[J]. Journal of Hydrology, 2020,587:125010.
- [21] 张建中,高树生,熊伟,等.基于致密砂岩储层气水渗流阻力系数的产能新模型[J].天然气工业,2023,43(1):177-187.
- ZHANG Jianzhong, GAO Shusheng, XIONG Wei, et al. A new productivity model based on gas-water seepage resistance coefficient for tight sandstone reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2023,43(1):177-187.
- [22] 冯梅梅,吴疆宇,陈占清,等.连续级配饱和破碎岩石压实特性试验研究[J].煤炭学报,2016,41(9):2195-2202.
- FENG Meimei, WU Jiangyu, CHEN Zhanqing, et al. Experimental study on the compaction of saturated broken rock of continuous gradation [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2195-2202.
- [23] 尚宏波,靳德武,张天军,等.三轴应力作用下破碎煤体渗透特性演化规律[J].煤炭学报,2019,44(4):1066-1075.
- SHANG Hongbo, JIN Dewu, ZHANG Tianjun, et al. Permeability evolution of broken coal under triaxial stress [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4):1066-1075.
- [24] MEDHURST T P, BROWN E T. A study of the mechanical behaviour of coal for pillar design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(8):1087-1105.
- [25] 王成,李洋,刘江斌,等.不同浸泡时间下煤岩组合体破坏特征点能量演化机制[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(3):265-272.
- WANG Cheng, LI Yang, LIU Jiangbin, et al. Mechanisms of energy evolution at damage characterization points of coalrock assemblages under different immersion time [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2025, 44(3): 265-272.
- [26] PANG M K, ZHANG T J, MENG Y K, et al. Experimental study on the permeability of crushed coal medium based on the Ergun equation[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 23030.
- [27] 张磊,曹妍,张尧,等.注浆-级配组合煤体渗透的“水塞”效应研究[J].采矿与安全工程学报,2025,42(3):648-659.
- ZHANG Lei, CAO Yan, ZHANG Yao, et al. The study of the “water plug” effect on the permeability of the composite coal mass mixed with grouting and graded sample[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025, 42(3): 648-659.
- [28] CUI X, BUSTIN A M M, BUSTIN R M. Measurements of gas permeability and diffusivity of tight reservoir rocks: different approaches and their applications[J]. Geofluids, 2009, 9(3): 208-223.
- [29] BARREE R D, CONWAY M W. Beyond beta factors: a complete model for darcy, forchheimer, and trans-forchheimer flow in porous media[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. September 26-29, 2004. Houston, Texas. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2004: SPE 89325-MS.
- [30] 吴双右,相彪,刘文杰,等.基于细观力学特性的堆石料三轴数值模拟及尺寸效应研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2025,44(3):283-292.
- WU Shuangyou, XIANG Biao, LIU Wenjie, et al. Triaxial numerical simulation and size effect of rockfill materials based on meso-mechanical properties [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2025, 44(3): 283-292.
- [31] 陈方兴,郝小礼,陈世强,等.采空区球-柱组装体压损预测模型及多孔介质流动特性[J].煤炭学报,2025,50(8):3953-3965.
- CHEN Fangxing, HAO Xiaoli, CHEN Shiqiang, et al. Prediction model for pressure loss of sphere column assembly in goaf and flow characteristics of porous media [J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(8): 3953-3965.
- [32] 张天军,庞明坤,蒋兴科,等.负压对抽采钻孔周煤体瓦斯渗流特性的影响[J].岩土力学,2019,40(7):2517-2524.
- ZHANG Tianjun, PANG Mingkun, JIANG Xingke, et al. Influence of negative pressure on gas percolation characteristics of coal body in perforated drilling hole [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7):2517-2524.
- [33] 杨科,吴犇牛,刘钦节,等.地下空间储能防渗实验装置研制与初步应用[J].岩石力学与工程学报,2025,44(1):43-55.
- YANG Ke, WU Benniu, LIU Qinjie, et al. Development and preliminary application of experimental device for energy storage and seepage prevention in underground space [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44 (1): 43-55.
- [34] 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.
- 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.
- [35] 程详,赵光明,李英明,等.软岩保护层开采卸压增透效应及瓦斯抽采技术研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(5):1045-1053.
- CHENG Xiang, ZHAO Guangming, LI Yingming, et al. Study on relief-pressure antireflective effect and gas extraction technology for mining soft rock protective seam [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018,35(5):1045-1053.