



有效应力对孔周破裂煤体渗透率演化规律的影响

张天军 孟钰凯 庞明坤 张磊 武晋宇

引用本文:

张天军, 孟钰凯, 庞明坤, 等. 有效应力对孔周破裂煤体渗透率演化规律的影响[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 122–131.
ZHANG Tianjun, MENG Yukai, PANG Mingkun. Effect of effective stress on the evolution of permeability patterns in perforated fractured coal bodies[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 122–131.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1349>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高煤阶煤样水力压裂前后应力渗透率试验研究

Experimental study on stress-permeability of high rank coal samples before and after hydraulic fracturing
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 353–360 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1789>

三轴加载煤样声波速度与孔隙率关系试验研究

Experimental study on relationship between acoustic velocity and porosity of coal samples under tri-axial loading
煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/33524081-5319-40a4-9b67-9ea8421b679c>

滇东黔西地区煤岩裂缝渗透率应力敏感性试验研究

Experimental study on stress sensitivity of coal and rock fracture permeability in eastern Yunnan and western Guizhou
煤炭科学技术. 2019(8) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d96e59e3-544e-4d03-8247-7d8c8272e30a>

瓦斯压力和应力对裂隙影响下的渗透率模型研究

Study on permeability model under the influence of gas pressure and stress on fracture
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 115–121 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.015>

应力作用下含水煤岩渗透率及水膜动态演化机制

Dynamic evolution mechanism of water-bearing coal permeability and water film under stress
煤炭科学技术. 2023, 51(6): 91–100 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0493>

煤岩孔裂隙结构分形特征及渗透率模型研究

Study on fractal characteristics of coal and rock pore fissure structure and permeability model
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 226–231 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.026>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张天军, 孟钰凯, 庞明坤, 等. 有效应力对孔周破裂煤体渗透率演化规律的影响[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 122-131.

ZHANG Tianjun, MENG Yukai, PANG Mingkun, *et al.* Effect of effective stress on the evolution of permeability patterns in perforated fractured coal bodies[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 122-131.

有效应力对孔周破裂煤体渗透率演化规律的影响

张天军¹, 孟钰凯¹, 庞明坤², 张磊², 武晋宇¹

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054)

摘要:有效应力是影响煤体渗流特性的主要原因。为研究瓦斯预抽过程中钻孔周围破裂煤体的渗透特性演化, 基于 Ergun 方程, 利用多孔介质有效应力理论, 开展 4 种不同级配混合粒径破碎煤体的渗流试验, 研究了在三轴应力作用下不同孔隙结构煤体孔隙结构特征, 得到了有效应力对孔隙结构煤体渗流的作用机制。研究表明: ① 在三轴应力下破碎煤体内部渗流状态贴近于非 Darcy 渗流, 当围压一定时, 轴向压力越大, 其非线性拟合的现象更加显著。② 粒径级配和孔隙率等骨架状态参数影响破碎煤体渗透性能, 基于 Ergun 方程推导出孔隙率与渗透率和非 Darcy 流因子之间的函数关系式, 得到破裂煤样孔隙结构变化与渗透率和非达西流因子的变化规律符合指数函数拟合。③ 在三轴作用下, 在有效应力加载到 0.55~0.75 MPa 区间情况下, 煤样的渗透率急剧减小, 特别是在 $n=0.8$ 的情况下, 渗透率减小幅度最大, 而在有效应力加载超过 0.75 MPa 的情况下, 渗透率减小速度越来越小, 渗透率随有效应力演化的规律可用 $k = ae^{b\sigma_e} + c$ 公式表示。综合以上结果, 在孔周煤体受到外部应力(地应力)和内部应力(孔隙压力)共同作用时, 破裂煤体的渗流规律与骨架变形和孔隙结构变化密切相关, 结合有效应力变化与孔隙渗透率之间的内在联系, 可以准确计算出瓦斯预抽过程中孔周煤体渗透性能演变历程, 对破裂煤体渗流规律的研究可作为瓦斯抽采设计实施与效果评估的重要参考依据。

关键词: 渗流特性; 有效应力; 破裂煤样; 渗透率; 孔隙率

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)S1-0122-10

Effect of effective stress on the evolution of permeability patterns in perforated fractured coal bodies

ZHANG Tianjun¹, MENG Yukai¹, PANG Mingkun², ZHANG Lei², WU Jinyu¹

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. College of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The effective stress is the main reason affecting the percolation characteristics of the coal body. In order to study the evolution of percolation characteristics of fractured coal bodies around boreholes during gas pre-pumping, based on the Ergun equation and using the theory of effective stress in porous media, seepage tests of four different grades of mixed grain size fractured coal bodies were carried out to study the pore structure characteristics of different pore structure coal bodies under the action of triaxial stress, and the mechanism of the effective stress on the seepage of pore structure coal bodies was obtained. The test results show that: ① under triaxial stress, the internal seepage state of broken coal is close to non Darcy seepage. When the confining pressure is constant, the deviation from linear fitting is more obvious with the increase of axial pressure. ② The skeletal state parameters such as particle size gradation and porosity affect the permeability performance of fractured coal bodies. Based on the Ergun equation, a functional relationship between porosity and permeability and non-Darcy flow factor was derived, and the change in pore structure of fractured coal samples was obtained to fit the exponential function with the change in permeability and non-Darcy flow factor. ③ In the triaxial action, when the effective stress is loaded to the in-

收稿日期: 2022-08-20

责任编辑: 常琛

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1349

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2021JM-390); 中国博士后科学基金资助项目(2020M683680XB)

作者简介: 张天军(1971—), 男, 陕西西安人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: tianjun_zhang@126.com

terval of 0.55-0.75 MPa, the permeability decreases sharply, especially when $n=0.8$, the permeability of the coal sample decreases the most, when the effective stress is greater than 0.75 MPa, the permeability decrease rate becomes smaller and smaller, the law of permeability evolution with effective stress can be expressed by the equation $k = ae^{b\sigma_e} + c$. Based on the above results, external stress is applied around the hole (σ) When combined with internal stress (pore pressure P), the seepage law of broken coal is closely related to skeleton deformation and pore structure change. Combined with the internal relationship between effective stress change and pore permeability, the evolution process of coal permeability around the hole in the process of gas drainage can be accurately calculated. The research on the seepage law of broken coal can be used as an important reference for the implementation of gas drainage design and effect evaluation.

Key words: seepage characteristics; effective stress; fractured coal samples; permeability; porosity

0 引言

钻孔瓦斯预抽是矿井灾害防治的主要方法,能有效降低煤层瓦斯含量,从根本上治理矿井瓦斯灾害^[1-2]。受采动应力和应力集中的影响,孔周煤体孔隙、裂隙结构将重新分布,在此过程中有效应力是影响其渗透率演化的重要因素^[3]。因此,从有效应力角度对预抽钻孔孔周破裂区煤体渗透率演化特征展开深入研究,可对我国煤矿瓦斯的防治与煤层瓦斯抽采提供指导作用。

近年来,国内外学者在煤体渗透特性方面开展了大量研究^[4-5]。考虑到瓦斯压力对含瓦斯煤渗透特性的影响,黄启翔等^[6]利用自行设计的瓦斯渗流设备,得出了渗透率与有效应力、围压、体积应力的关系曲线,以及不同瓦斯压力下的渗流方程。在此之后,许江^[7]、袁梅^[8]等通过三轴渗流试验系统,进一步得到渗透率随着瓦斯压力呈指数变化趋势。李波等^[9]探究了孔隙压力梯度对渗流的影响,推导出了满足非线性渗流的压力梯度与渗流速度的关系式。考虑到有效应力对煤体渗透率的影响,李晓泉等^[10]针对全应力应变情况下的有效应力对含瓦斯煤渗流的影响方面,考虑煤体三轴作用下损伤变形,推导出了描述煤样三轴压缩状态下全应力应变过程的有效应力计算式。李波波等^[11]对煤岩体开展了三轴渗流试验,得出了煤岩体的渗透率与有效应力之间的关系曲线呈负指数函数变化趋势。采用实验室测试、微观结构观察建模相结合的方法,GHABEZLOO 等^[12]研究了有效应力对煤岩渗流规律的影响,提出了渗透率与有效应力满足幂函数关系。从应力路径的角度出发,尹光志等^[13]分析了不同加卸载条件下原煤有效应力系数的影响因素,建立了有效应力的渗透率模型,并发现煤岩渗透率与有效应力理论值与试验值高度吻合。李鹏等^[14]通过复合加卸载作用下的含瓦斯煤样三轴渗流试验,根据煤样变形破坏特征,得出了复合加卸载煤样等效有效应力方程。

由于之前关于有效应力对煤岩渗透性影响的理论模型尚不成熟。针对三轴应力应变条件下煤岩体孔隙渗透率模型问题,程远平^[15]、白鑫^[16]等引入 Kozeny-Carman(KC) 方程,建立了考虑有效应力作用的煤体渗透率理论模型,揭示了煤层瓦斯渗流的主控因素。基于此,张天军等^[17-19]采用自主研发的破碎煤岩三轴渗流试验系统,分析得出了有效应力与孔隙率符合一次函数关系,并向 KC 方程引入中值定理,通过大量渗透参数计算和分析,得到了描述有效应力对渗流影响的方程式。

综上所述,相关学者分别从应力作用、结构演化、以及煤体渗透率理论模型等方面对煤体渗透特性演化机制的影响开展了大量研究,但关于孔周破裂煤体有效应力作用机制不明,渗透率计算方法不统一。鉴于此,笔者开展了不同级配破裂煤体三轴渗流试验,并探讨轴压、围压、渗透压及级配的改变对渗透率演化机制的影响。同时利用 Ergun 方程巧妙回避了其他因素对渗透率的影响,进一步分析有效应力对破裂煤样孔隙结构及渗透特性的影响,为煤与瓦斯突出和突水灾害提供理论指导。

1 试验方法

1.1 试验系统

为得到煤样孔隙率、渗透率相关参数,采用全自动三轴渗透试验系统开展试验。试验系统主要由渗透压力控制系统、三轴荷载仪和数据分析系统 3 部分组成。三轴渗透压力室内试样尺寸为直径 50 mm、高度 100 mm,荷载架量程为 30 kN,轴向力精度为 0.3%;围压压力和孔压量程分别都为 2 MPa,压力精度为 0.3%;全自动三轴岩石渗透试验系统如图 1 所示。

试验所需围压和渗透压分别由围压控制系统和渗透压力控制系统提供。试样由橡胶膜包裹。本次试验为静水压条件,相当于在样品的边界上施加了均匀的围压,并且样品可以自由变形。使用轴向和

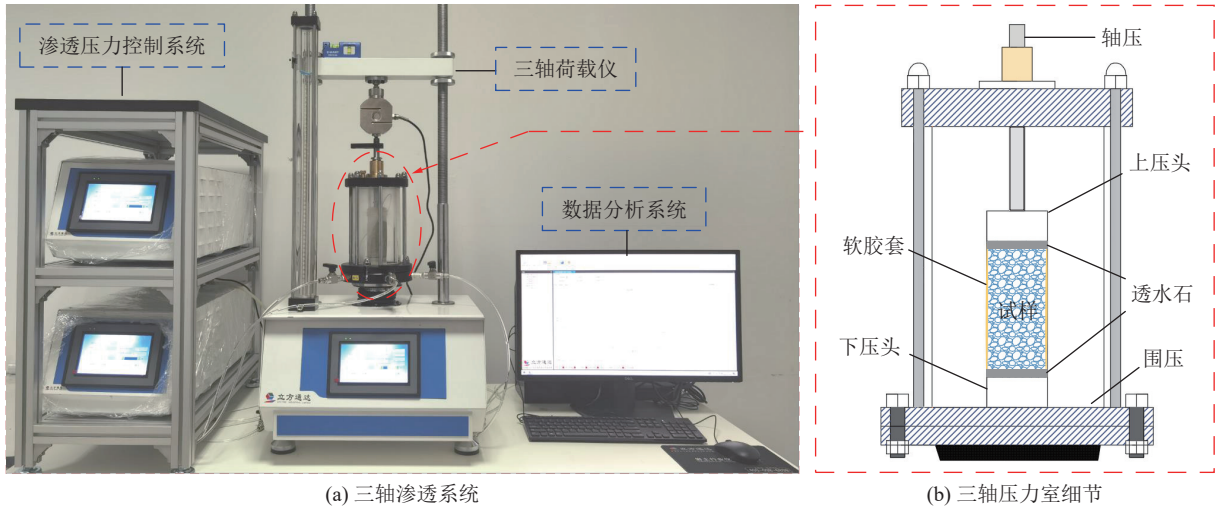


图 1 全自动三轴岩石渗透试验系统
Fig.1 Fully automatic triaxial rock penetration test system

径向应变计测量体积应变,使用高压柱塞泵控制围压和孔隙压力。

1.2 试样选取

试验煤样取自陕西彬长大佛寺煤矿,试验选用煤样硬度在 0.5~1 之间,试验前将其大块进行破碎后筛分,得到不同粒径的煤颗粒,分别为 0~0.5、0.5~1.0、1.0~2.0、2.0~4.0 mm 作为 4 种基本粒径。图 2 为不同孔隙结构的试样,4 种基本粒径煤样质量分别为 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 。试验煤样根据 Talbol 连续级配公式^[20]进行配样:

$$P = (d/D)^n \times 100\% \quad (1)$$

式中: P 为破碎煤样粒径大于 d 的比例; d 为当前煤样粒径, mm; D 为级配中的最大粒径, mm; n 为 Talbol 幂指数。

$n=0.2$	$n=0.4$	$n=0.6$	$n=0.8$
m_1 : 219.7 g	m_1 : 120.7 g	m_1 : 66.3 g	m_1 : 36.4 g
m_2 : 70.2 g	m_2 : 89.4 g	m_2 : 86.0 g	m_2 : 73.9 g
m_3 : 58.3 g	m_3 : 93.1 g	m_3 : 111.6 g	m_3 : 119.4 g
m_4 : 51.8 g	m_4 : 96.9 g	m_4 : 136.1 g	m_4 : 170.3 g

图 2 4 种试样的基本粒径

Fig.2 Basic particle sizes of the four specimens

考虑试验缸筒的体积,缸筒内能容纳的煤样质量为 400 g,通过计算得到煤样中各粒径区间质量如图 2 所示。

1.3 试验原理

试验过程中轴压、围压、孔压梯度发生改变破碎煤样内部孔隙结构发生改变,其内部颗粒重组、破碎和脱落,孔隙结构的变化是影响破碎煤样渗流特性

的主要原因。因此,三轴压力室内乳胶套内破碎煤样的孔隙率是由轴压和围压共同决定的。在试验中,试样在任意阶段的孔隙率通过以下公式计算得到^[21]:

$$\varphi = \frac{V_1 - V_0}{V_1} \quad (2)$$

式中: V_1 为试样在三轴作用下乳胶套内的体积, m^3 ; V_0 为试样初始体积, m^3 ; 试样初始体积 V_0 可以通过质量和密度的比值计算得到。

试验进行时,围压加压的过程中缸筒内试样体积压缩,其中渗透液排出的体积 ΔV_i 即为试样减小的体积。 ΔV_i 由围压控制器测得并记录在计算机中。

$$V_1 = \pi r_0^2 (h_0 - \Delta h) - \sum_{i=1}^4 \Delta V_i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

式中: r_0 为三轴压力室内缸筒半径, m; Δh 实时轴向位移, m; ΔV_i 为每级围压的体积差, m^3 ; h_0 为试样初始高度, m。

将式(3)代入到式(2)中得到三轴作用下任意渗透时间内的孔隙率:

$$\varphi = \frac{\pi r_0^2 (h_0 - \Delta h) - \sum_{i=1}^4 \Delta V_i - V_0}{\pi r_0^2 (h_0 - \Delta h) - \sum_{i=1}^4 \Delta V_i} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

1.4 试验方案

试验中通过轴压和围压控制系统来调整试样的初始孔隙度。试验过程中,当压力梯度达到固定值时,开始测定流量的稳定值,根据量筒中的液面示数差来计算出流量,进而计算出渗流速度的大小。根据预设的轴向压力梯度、渗透压力梯度进行渗透试

验,并记录数据。在实验中,采用 4 种轴向应力控制梯度 1.0、1.5、2.0 和 2.5 kN,为了保证主应力方向始终为轴向不变,围压设定为 0.2、0.25、0.3、0.35、0.4 MPa 一共五个级别。根据颗粒配比和初始孔隙率设定渗透压力为 40 Pa ~ 60 Pa 区间,每增加 0.5 Pa 依次一个渗透压。对具有不同级配结构的煤样进行渐进加载渗滤试验。

具体试验步骤如下:

1)试样破碎筛分。首先利用破碎机将煤块进行破碎,然后利用分选筛分离得到四种不同粒径的破碎煤颗粒,根据 Talbol 理论配比出幂指数 n 为 0.2、0.4、0.6、0.8 的试样。

2)试样制备。将适量的水倒入散体煤样中搅拌均匀,然后将承膜筒放置在对开模中固定,并向其中放入起始高度为 h_0 的破碎煤样,再利用三轴击实器将煤样击实,拆掉对开模,取出用乳胶膜包裹的煤试样安装到三轴压力室中。

3)设定试验模块。在计算机中设定应力和压力参数,并设定数据记录方式,按照预先设定的试验参数目标值,将每一级试验条件分别进行测试,试验设备自行判断是否提供相应应力环境,才可以开始试验。

4)数据处理与分析。试验过程中,数据处理软件每三秒自动采集一次数据并显示测试参数图,试验结束,预览数据,存储理想的数据以供进一步分析。

完成上述过程后,更换下一组试样。继续执行步骤 2),步骤 3),步骤 4),以此类推,直到完成所有样本组。

2 试验结果

文中以 $n=0.2$ 的破碎煤样为例,根据渗流速度与压力梯度关系进行分析,可以得到破碎煤岩渗流特性参数(表 1)。

3 试验数据分析

3.1 不同孔压梯度下渗流速度的变化特征

传统 Darcy 定律认为在多孔介质中,渗流速度与压力梯度呈线性相关,其渗透率为渗透质本体具有的特性,与渗透剂的种类、流态等无关^[22],即:

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{k}v \quad (5)$$

式中: p 为孔隙压力,MPa; μ 为流体动力黏度,Pa·s; v 为流体渗流速度,m/s。

目前关于破碎煤体渗流规律的研究大多是围绕 Forchheimer 型非达西流计算方法开展的,该计算方

表 1 破碎煤样三轴渗透参数

Table 1 Table of triaxial permeability parameters for crushed coal samples

轴压/ kN	围压/ MPa	孔隙率 φ	渗透率 $k \times 10^{-8}/m^2$	非Darcy流因子 $\beta \times 10^{-6}/m^{-1}$
1.0	0.2	0.306 5	3.405	1.884
	0.25	0.282 3	2.379	2.286
	0.3	0.260 1	1.839	2.089
	0.35	0.239 5	1.642	2.473
	0.4	0.220 6	1.492	2.572
1.5	0.2	0.185 1	1.374	2.680
	0.25	0.174 6	1.296	2.779
	0.3	0.164 7	1.235	2.475
	0.35	0.155 3	1.191	3.163
	0.4	0.146 5	1.160	3.567
2.0	0.2	0.134 6	1.131	3.765
	0.25	0.117 1	1.112	4.454
	0.3	0.101 9	1.109	5.459
	0.35	0.088 7	1.088	6.356
	0.4	0.077 1	1.078	7.203
2.5	0.2	0.066 1	1.068	8.090
	0.25	0.047 1	1.062	8.780
	0.3	0.033 5	1.057	9.322
	0.35	0.023 9	1.055	1.005
	0.4	0.016 9	1.053	1.133

程认为流体的能量损耗是影响渗流因素之一,能够较为准确描述非 Darcy 渗流状态^[23],即:

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{k}v + \beta\rho v^2 \quad (6)$$

式中: ρ 为流体密度,kg/m³。

当破碎煤样渗流稳定时,通过试样两端的渗透压力差以及试样高度,可得破碎煤样渗流稳定时的孔压梯度:

$$G_p = -\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_1 - p_2}{h_0 - \Delta h} \quad (7)$$

式中: p_1 为流入试样的渗透压力,MPa; p_2 为流出时的渗透压力,MPa。由于出口端与大气相通,所以 p_2 为 0。

渗透速度为单位时间内流经煤体试样的体积流量 Q 计算得:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

式中: Q 为流体通过试样的流量,m³/s; A 为渗流过程中的截面积,m²。

通过逐级改变渗透压力, 试样的渗流速度与孔压梯度随之改变, 将试验中采集的数据进行拟合, 选

取 $n=0.2$ 试样为例绘制拟合曲线及相关系数, 如图 3 所示。

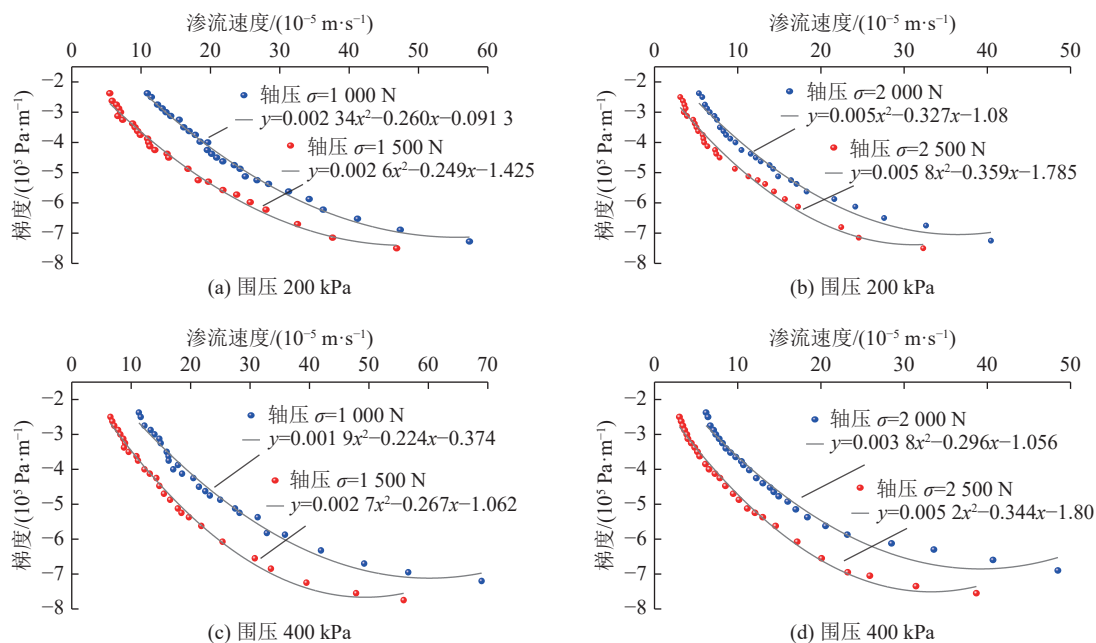


图 3 渗流速度-压力梯度关系曲线

Fig.3 Seepage velocity - pressure gradient relationship curve

由图 3 可以看出, 级配煤样骨架颗粒在轴压从 1.0 kN 增大到 2.5 kN, 当围压加载为 200 和 400 kPa 等 2 个级别时, 利用 Forchheimer 公式对流速和孔压力梯度进行了拟合。在压力梯度较低的情况下, 渗流速度与梯度可用达西定律进行拟合, 随着渗透压力差逐渐增大, 当压力梯度 G_p 高于 0.5 MPa/m 时, 试验数据逐渐偏离达西定律的拟合, 呈现出 Forchheimer 型非线性渗流状态即符合二次函数拟合。说明在三轴应力作用下, 其内部渗流状态更贴近于非 Darcy 渗流。当围压一定时, 当轴向荷载增加时, 其非线性拟合的现象更加显著。出现此现象的原因可能是由于轴压和围压增大, 使得缸筒内破碎煤颗粒迅速被压实压密, 试样内部渗流通道减少, 孔隙率减低, 渗透过程中所受的阻力也随之增加, 使其与线性拟合的偏差也更大。

3.2 不同骨架结构煤体变形破坏特征分析

钻孔的开挖会引起钻孔周围煤体应力重新分布, 孔周呈现环状的“三区”应力状态(原岩应力区、塑性区和破碎区)^[24-25]。为研究抽采钻孔孔周煤体的渗透特性影响因素, 模拟钻孔周围的真实受力环境, 考虑不同轴压和围压其内部孔隙结构的变化。通过开展三轴破碎煤岩体渗透试验, 分析在破碎煤样偏应力的影响下, 破碎煤体变形破坏与渗透特性的关系。

在整个实验过程中, 数据由计算机自动收集。在施加每个轴向压力的步骤中, 测量煤样的偏应力和渗透系数差异随时间的变化。样品的渗透性是用以下公式计算:

$$K = \frac{\Delta Q L}{A(h_1 - h_2)} \quad (9)$$

式中: K 为渗透系数, m/s; ΔQ 为给定时间间隔内的流量, m^3/s ; L 为试样实时高度, m; $h_1 - h_2$ 为试样上下两端水头高度的差值。

选取 $n=0.2$ 的煤样为例, 得到了随着时间的变化不同级别偏应力对煤样渗透系数的变化规律的影响, 如图 4 所示。

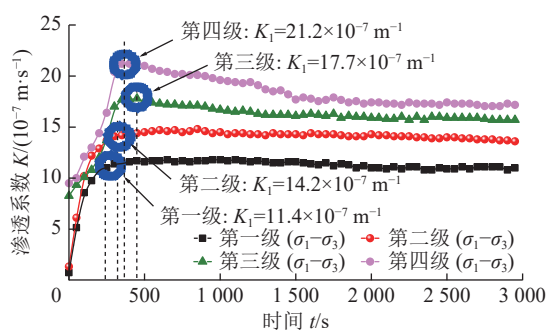


图 4 不同偏应力下渗透系数的变化

Fig.4 Variation of permeability coefficients for different deflection stresses

通过分析试样不同偏应力下渗透系数的变化,整个孔隙渗流变化的过程可大致分为 3 个阶段:快速增大、均速回落和相对稳定。试样在不同级别偏应力下的渗透系数随时间在渗透过程中变化趋势相似。随着时间的增大渗透系数均趋近于某一水平,偏应力越大时,其渗透系数越小,渗透系数达到峰值之后回落的幅度越小。通过对比不同初始偏应力突变时刻发现,较大偏应力较小条件下,渗透系数稳定所需的时间越长,这是因为偏应力越小试样受到的固体有效应力越小。

3.3 不同孔隙结构的煤体渗透特性分析

渗透率是描述多孔介质中流体传输的关键因素。它直接影响着流体在多孔介质中的迁移速度。Ergun 方程在渗流领域被广泛应用^[26-27],其表达式如下:

$$J_{Ergun} = 150 \frac{\mu(1-\varphi)^2}{d^2 \varphi^3} v + 1.75 \frac{(1-\varphi)\rho}{d \varphi^3} v^2 \quad (10)$$

式中: J 为压力梯度, MPa/m; d 为颗粒直径, 式中 d 可取 d_{50} 。

根据 Forchheimer 型经典渗流方程,可以得到黏性阻力系数和惯性阻力系数分别为:

$$\begin{cases} A_E = 150 \frac{(1-\varphi)^2}{\varphi^3} \frac{\mu}{d^2} \\ B_E = 1.75 \frac{(1-\varphi)\varphi\rho}{\varphi^3} \frac{1}{d} \end{cases} \quad (11)$$

根据粒度中值计算原理在大小不同的颗粒中,

存在一个粒径值,大于该颗粒和小于该粒径的颗粒均占 50%,即就定义该粒径颗粒是中值粒径^[28]。通过计算 4 组试样中的中值粒度 d_{50} 。如图 5 为 4 种不同级配试样的中值粒径取值柱状图。

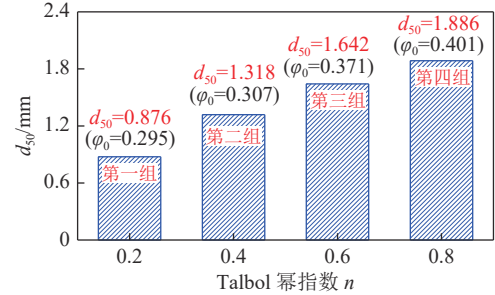


图 5 不同级配试样中值粒径取值柱状图

Fig.5 Histogram of median particle size values for different graded specimens

通过对比 Forchheimer 型渗流方程和 Ergun 型渗流方程,可以推算出渗透率 k_E 与非达西流 β_E 因子随着孔隙率 φ 的关系式。

$$k_E = \frac{D_{50}^2 \varphi^3}{150(1-\varphi)^2}, \beta_E = 1.75 \frac{(1-\varphi)}{D_{50} \varphi^3} \quad (12)$$

各组不同级配试样孔隙率与非 Darcy 流 β_E 因子的拟合关系曲线图,如图 6 所示。

由图 6 可以看出,孔隙率与非 Darcy 流 β_E 因子之间符合负指数函数关系,有效应力作用下破碎煤样骨架发生变形,随着三轴荷载的增加,有效应力使得煤样内部孔隙通道数量减少,非 Darcy 流 β_E 因子

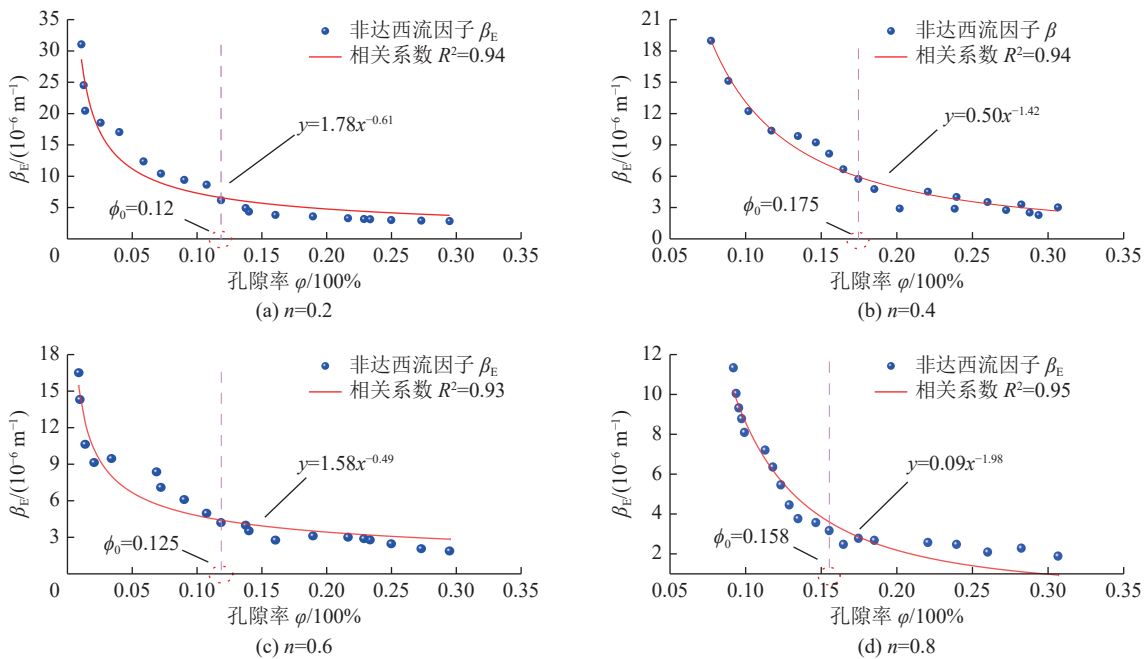


图 6 不同级配煤样孔隙率与非 Darcy 流 β_E 因子的曲线

Fig.6 Curves of porosity versus non-Darcy flow β_E -factor for coal samples with different grading

与孔隙率呈负指数相关,一开始非 Darcy 流 β_E 因子急剧减小,随后孔隙率增加到一个临界值之后逐渐平缓进入稳定阶段,不同级配煤样的孔隙率临界值区间为 0.12 ~ 0.175,平均临界值为 0.145。同时可以看出,不同级配试样非 Darcy 流效应存在差异, $n=0.2$ 时,破碎煤颗粒小颗粒粒径越多,临界值 ϕ 最小为 0.12,非 Darcy 流效应越明显。这是因为,小颗粒越多密实度越大,即渗流通道越窄越曲折,导致渗流阻力增大,非 Darcy 流 β_E 因子值增大。

各组不同级配试样孔隙率与渗透率的拟合关系曲线图,如图 7 所示。

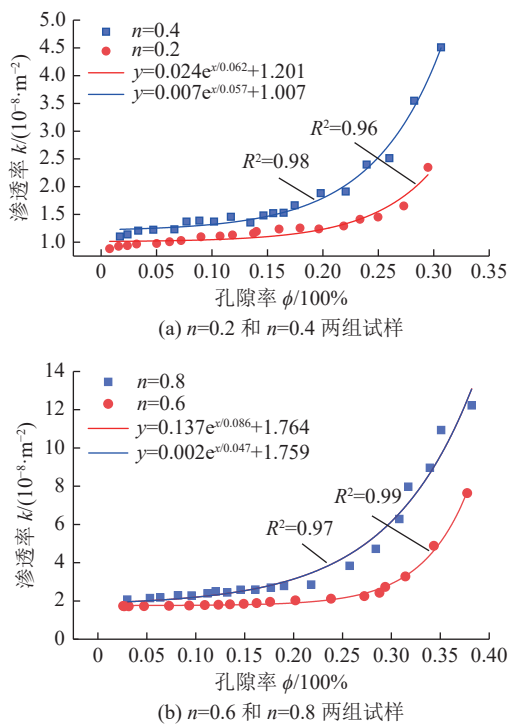


图 7 不同级配煤样孔隙率与渗透率的拟合曲线

Fig.7 Fitting curves for porosity and permeability of coal samples with different grading

如图 7 给出了不同试样孔隙率与渗透特性之间的关系。破碎煤体试样受到轴压、围压以及渗透压后,其试样内部骨架结构发生变形,孔隙结构可能出现不同程度的增大过程。在加载初始阶段,由于试样结构松散,孔隙率急剧下降,试样内部颗粒发生错动、破碎,渗流通道数量大量减小,从而渗透率也急剧减小。随着加载载荷增大,煤体结构相对紧实和压密,此时渗透率对孔隙率变化的敏感程度较低。

3.4 有效应力对煤体渗透率演化的影响

在采矿工程中地下破碎煤岩体的孔隙率在所处岩层和岩石孔隙中流体共同作用下逐渐改变,进而使得破碎煤岩体渗透特性发生动态演变,在煤岩渗

透参数演变过程中,有效应力能较好地反应三轴应力作用下破碎煤颗粒的真实受力状态。1923 年 TERZAGHI^[29] 首次提出了有效应力的概念,并将一维压实的有效应力原理引入到煤岩多孔介质的受力中,以应力平衡的形式可以表示为如下关系式:

$$\sigma = p + \sigma_e \quad (13)$$

式中: σ 作用在多孔介质上的总应力, MPa; σ_e 为有效应力, MPa。

在压实过程中,颗粒之间发生相互滑动和颗粒本身变形,引起孔隙率发生改变,因此,多孔介质有效应力研究过程中,通过不断的改进有效应力的计算公式,引入孔隙率作为衡量多孔介质结构特性的重要参数,从骨架有效应力和结构有效应力两个方面研究煤介质对各应力的响应关系,可得到有效应力的真实应力表达式^[30-31]:

$$\sigma = \varphi p + (1 - \varphi) \sigma_e \quad (14)$$

在钻孔周围破碎区煤体受到瓦斯等流体的孔隙压力 p 、来自外部围岩的应力共同作用以及颗粒应力,如图 8 所示为有效应力作用示意图。

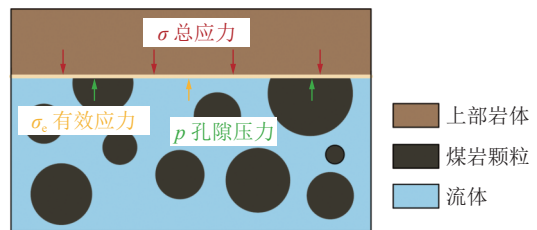


图 8 破碎煤岩多孔介质中各应力示意

Fig.8 Schematic diagram of each stress in a porous medium of broken coal rock

由式(4)可以得到煤骨架结构特性的重要参数孔隙率 φ , 进而分析得到煤体介质与各种应力的关系。有效应力是一种很好的方法,它可以反映煤颗粒在渗流过程中的实际受力情况。我们分析并计算了每组的所有试样,以获得有效应力和渗透率之间的关系(图 9)。

从图中得到:不同级配结构煤体渗透率随着有效应力的增加呈指数下降。有效应力直接决定破碎煤样的真实受力情况。在渗流行为发生时,有效应力可以较好反映煤样的力学特征。在有效应力增大的过程中,破碎煤颗粒之间滑动和颗粒本身可能发生破碎变形,骨架结构不断被压实变密,导致孔隙渗流通道发生闭合,煤样的渗透率减小。

通过函数拟合可以得到用来表征有效应力与渗透率的回归方程为:

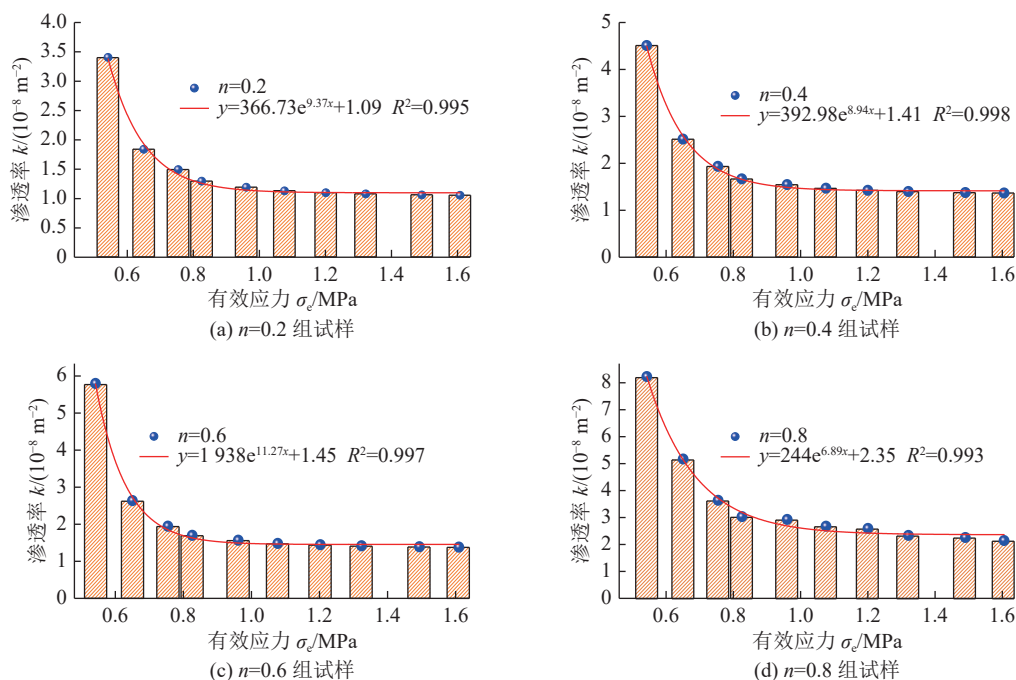


图9 不同级配试样有效应力与渗透率的拟合曲线

Fig.9 Fitted curve of effective stress versus permeability for different graded specimens

$$k = ae^{b\sigma_e} + c \quad (15)$$

式中：曲线相关性系数 R^2 均大于 0.95。

有效应力是导致破碎煤样渗透率变化的主要因素。有效应力加载到 0.55 MPa ~ 0.75 MPa 之间时，煤样孔隙结构被快速重组压缩压密，渗流通道快速闭合减小，渗透率快速减小。当有效应力大于 0.75 MPa 时，渗透率减小速率越来越低，最后趋于稳定。这是因为有效应力的增大使得破碎煤颗粒发生再次破碎、重组、骨架结构变形，进一步煤样内部孔隙被破碎颗粒填充，煤样孔隙结构压密压实程度趋于稳定则有效渗流通道数量及通道大小趋于稳定，导致破碎煤样渗透率减小速率逐渐趋于 0。同时，可以看出，破碎煤岩体渗透率与粒径级配和孔隙率等骨架状态参数有关。

4 结 论

1) 通过拟合三轴作用下不同压力梯度煤体试样渗透状态，发现破碎煤样内部渗流状态更贴近于非 Darcy 渗流。当压力梯度 G_p 高于 0.5 MPa/m 时，压力梯度与渗流速度的拟合曲线开始趋近于二次函数。同时当煤样所受的偏应力逐步增大时，其渗透系数稳定时的数值越来越小。

2) 基于 Ergun 方程定义，引入中值粒径计算方法，结合 Forchheimer 型渗流方程，推算出只与颗粒大小和孔隙率相关的渗透率公式，利用函数拟合得到在孔隙率 φ 处于 0.02 ~ 0.12 之间时非 Darcy 流因

子 β_E 出现急剧下降阶段，不同级配煤样孔隙率临界区间为 0.12 ~ 0.175，对应的 β_E 值处于过渡阶段，而在平均临界值 $\varphi_0=0.145$ 之后 β_E 数值基本稳定。

3) 有效应力在测定煤体孔隙渗透率演化方面起到了关键作用。在孔隙相关渗透率的测定中，试样的渗透率随着孔隙率的减小而减小，符合关系： $k=735e^{9.12\sigma}+1.58$ 。通过研究不同级配结构试样有效应力与渗透率拟合曲线，发现渗透率随有效应力变化的拐点出现在 0.7 MPa 附近。随着有效应力的增加，其骨架的变形过程也可分为 3 个阶段，初始阶段呈现出快速下降，称为快速压力密度阶段。之后，破碎的颗粒发生旋转、摩擦和姿态调整，逐渐收敛到最佳压实结构。最终进入完全压实状态，此时其结构的孔隙率极低。

参考文献(References):

- [1] 袁 亮, 张平松. 煤炭精准开采地质保障技术的发展现状及展望[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2277-2284.
YANG Liang, ZHANG Pingsong. Development status and prospect of geological guarantee technology for precise coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2277-2284.
- [2] 程远平, 周红星. 煤与瓦斯突出预测敏感指标及其临界值研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 146-154.
CHENG Yuanping, ZHOU Hongxing. Research progress of sensitive index and their critical values for coal and gas outburst prediction[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 146-154.

- [3] 袁 亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716–725.
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716–725.
- [4] 鞠 杨, 任张瑜, 谢和平, 等. 岩石灾变非连续结构与多物理场效应的透明解析与透明推演[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 210–232.
JU Yang, REN Zhangyu, XIE Heping, et al. Transparent analysis and transparent derivation of discontinuous structure and multi-physical field effects in rock catastrophes[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 210–232.
- [5] 谢和平, 苗鸿雁, 周宏伟. 我国矿业学科“十四五”发展战略研究[J]. 中国科学基金, 2021, 35(6): 856–863.
XIE Heping, MIAO Hongyan, ZHOU Hongwei. Development strategy of mining discipline in China during the 14th Five-Year Plan period[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(6): 856–863.
- [6] 黄启翔, 尹光志, 姜永东. 地应力场中煤岩卸围压过程力学特性试验研究及瓦斯渗透特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1639–1648.
HUANG Qixiang, YIN Guangzhi, JIANG Yandong. Experimental study of mechanical characteristics of coal specimen in process of unloading confining pressure in geostress field and analysis of gas seepage characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1639–1648.
- [7] 许 江, 魏仁忠, 程 亮, 等. 煤与瓦斯突出流体多物理参数动态响应试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 159–168.
XU Jiang, WEI Renzhong, CHENG Liang, et al. Experimental study on the dynamic response of coal and gas outburst fluid with physical parameters[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 159–168.
- [8] 袁 梅, 王玉丽, 李 闯, 等. 粒径-温度耦合作用下煤中瓦斯解吸规律试验研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(12): 32–35, 40.
YUAN Mei, WANG Yuli, LI Chuang, et al. Experimental study on the coupling effect of particle size and temperature on gas desorption in coal[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(12): 32–35, 40.
- [9] 李 波, 任永婕, 张路路, 等. 液氮对含水煤岩体增透作用的影响机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(12): 145–150.
LI Bo, REN Yongjie, ZHANG Lulu, et al. Study on influence mechanism of liquid nitrogen to permeability improved function of water bearing coal and rock mass[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(12): 145–150.
- [10] 李晓泉, 尹光志. 含瓦斯煤的有效体积应力与渗透率关系[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(8): 103–108.
LI Xiaoquan, YIN Guangzhi. Relationship between effective volumetric stress and permeability of gas-filled coal[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(8): 103–108.
- [11] 李波波, 王 斌, 杨 康, 等. 贵州六盘水矿区煤岩孔隙发育程度及渗透率演化规律研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(4): 1305–1314.
LI Bobo, WANG Bin, YANG Kang, et al. Growing degree of t-he coal pores and the permeability evolution regularity in Liupanshui mine area, Guizhou[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(4): 1305–1314.
- [12] GHABEZLOO S, SULEM J, GUEDON S, et al. Effective stress law for the permeability of a limestone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 297–306.
- [13] 鲁 俊, 尹光志, 高 恒, 等. 真三轴加载条件下含瓦斯煤体复合动力灾害及钻孔卸压试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1812–1823.
LU Jun, YIN Guangzhi, GAO Heng, et al. Experimental study on compound dynamic disaster and drilling pressure relief of gas-bearing coal under true triaxial loading[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1812–1823.
- [14] 李 鹏. 复合加卸载条件下含瓦斯煤渗流特性及其应用研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015: 19–39.
LI Peng. Research on seepage characteristics of coal containing gas under complex loading-unloading and its application[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2015: 19–39.
- [15] 程远平, 刘洪永, 郭品坤, 等. 深部含瓦斯煤体渗透率演化及卸荷增透理论模型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1650–1658.
CHENG Yuanping, LIU Hongyong, GUO Pinkun, et al. A theoretical model and evolution of characteristic of mining-enhanced permeability in deeper gassy coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1650–1658.
- [16] 白 鑫, 王登科, 田富超, 等. 三轴应力加卸载作用下损伤煤岩渗透率模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(8): 1536–1546.
BAI Xin, WANG Dengke, TIAN Fuchao, et al. Permeability model of damaged coal rock under triaxial stress loading-unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(8): 1536–1546.
- [17] 张天军, 李 洋, 庞明坤, 等. 砾石含水层中质量流失对孔隙渗透率的影响[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2360–2368.
ZHANG Tianjun, LI Yang, PANG Mingkun, et al. Effect of mass loss on pore permeability in gravel aquifers[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2360–2368.
- [18] PANG Mingkun, ZHANG Tianjun, et al. Measurement of the coefficient of seepage characteristics in pore-crushed coal bodies around gas extraction boreholes[J]. Energy, 2022: 124276.
- [19] PANG M, ZHANG Tianjun, MENG Yukai, et al. Experimental study on the permeability of crushed coal medium based on the Ergun equation[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1–10.
- [20] 张天军, 刘 楠, 庞明坤, 等. 级配破碎煤岩体压实过程中再破碎特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(2): 380–387.
ZHANG Tianjun, LIU Nan, PANG Mingkun, et al. Re-crushing characteristic in the compaction process of graded crushed coal rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(2): 380–387.
- [21] SHEN Xianwen, LI Longjian, CUI Wenzhi, et al. Improvement of fractal model for porosity and permeability in porous materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 121: 1307–1315.
- [22] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.

- KONG Xiangyin. Higher seepage mechanics [M]. Hefei. University of Science and Technology of China Press, 2010.
- [23] KHAN M I, SHOAIB M, ZUBAIR G, et al. Neural artificial networking for nonlinear Darcy –Forchheimer nanofluidic slip flow[J]. *Applied Nanoscience*, 2022: 1–20.
- [24] 尹光志, 鲁俊, 张东明, 等. 真三轴应力条件下钻孔围岩塑性区及增透半径研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(S1): 1–10.
- YIN Guangzhi, LU Jun, ZHANG Dongming, et al. Study on plastic zone and permeability-increasing borehole surrounding rock under true triaxial stress conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(S1): 1–10.
- [25] 张天军, 庞明坤, 蒋兴科, 等. 负压对抽采钻孔孔周煤体瓦斯渗流特性的影响[J]. *岩土力学*, 2019, 40(7): 2517–2524.
- ZHANG Tiajun, PANG Mingkun, JIANG Xingke, et al. Influence of negative pressure on gas percolation of coal body in perforated drilling hole[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(7): 2517–2524.
- [26] SOBIESKI W, ZHANG Q. Sensitivity analysis of Kozeny-Carman and Ergun equations[J]. *Technical Sciences/University of Warmia and Mazury in Olsztyn*, 2014 (17 (3)): 235–248.
- [27] PERRET F, BABICH A, SENK D. Effect of pulverized coal residues on the blast furnace streaming conditions[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2022: 1–7.
- [28] NOMURA S, YAMAMOTO Y, SAKAGUCHI H. Modified expression of Kozeny–Carman equation based on semilog–sigmoid function[J]. *Soils and Foundations*, 2018, 58(6): 1350–1357.
- [29] 毛小龙, 刘月田, 冯月丽, 等. 双重有效应力再认识及其综合作用[J]. *石油科学通报*, 2018, 3(4): 390–398.
- MAO Xuailong, LIU Yuetian, FENG Yueli, et al. Re-recognition of dual effective stresses and comprehensive effect[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2018, 3(4): 390–398.
- [30] HEYMANN G, BRINK G. Soil collapse from an effective stress perspective[J]. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 2014, 56(3): 30–33.
- [31] 李传亮, 朱苏阳. 再谈双重有效应力——对《双重有效应力再认识及其综合作用》一文的讨论与分析[J]. *石油科学通报*, 2019, 4(4): 414–429.
- LI Chuanliang, ZHU Suyang. Discussion of dual effective stresses in porous media—Analysis on the paper of recognition of dual effective stresses and the comprehensive effect[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 4(4): 414–429.