

doi:10.13582/j.cnki.1674-5876.2023.02.002

湖北高烽磷矿副井白云岩裂隙渗流特性

谢先斌*

(湖南楚湘建设工程集团有限公司, 湖南 长沙 410114)

摘要:为研究湖北高烽磷矿副井岩石的渗流特性,本文选取矿区主要含水层段的白云岩为研究对象,在将其制成标准试件后,通过 RYL-600 剪切流变仪制备裂隙白云岩试件,并在 MTS815 岩石力学试验系统上对其进行渗流试验.研究表明:(1)裂隙白云岩的孔隙压差是关于时间序列的四次多项式,渗流状态为非 Darcy 流,且岩样渗流的非 Darcy 效应随围压的增大不断增强;(2)裂隙白云岩非 Darcy 流的渗透率恒小于 Darcy 流的渗透率,岩样渗透率随围压增大而减小;(3)同一轴压作用下,裂隙白云岩的渗透率与体积应力呈负指数相关,且岩样渗透率在低体积应力作用下更为敏感.

关键词:高烽磷矿;裂隙白云岩;渗透率;围压;体积应力

中图分类号:TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2023)02-0009-06

Seepage Characteristics of Dolomite Fracture in Auxiliary Shaft of Gaofeng Phosphate Mine in Hubei Province

XIE Xianbin

(Hunan Chuxiang Construction Engineering Group Company, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to study the seepage characteristics of the rock in the auxiliary shaft of Gaofeng Phosphate Mine in Hubei Province, this paper selects the dolomite in the main aquifer section of the mining area as the research object. After making it into a standard specimen, the fractured dolomite specimen is prepared by RYL-600 shear rheometer, and the seepage test is carried out on the MTS815 rock mechanics test system. The results show that: (1) The pore pressure difference of fractured dolomite is a polynomial of degree 4 about time series, the seepage state is non-Darcy flow, and the non-Darcy effect of rock sample seepage increases with the increase of confining pressure. (2) The permeability of non-Darcy flow in fractured dolomite is always less than that of Darcy flow, and the permeability of rock sample decreases with the increase of confining pressure. (3) Under the same axial compression, the permeability of fractured dolomite is negatively correlated with the volume stress, and the low volume stress is more sensitive to the permeability of rock samples.

Keywords: Gaofeng Phosphate Mine; fractured dolomite; permeability; confining pressure; volume stress

隧道工程,边坡工程,地下矿井硐室开挖等岩土工程普遍涉及岩体裂隙渗流问题,天然岩体长期受地质作用和工程扰动影响,内部多含大量裂隙,岩体裂隙的渗流特性已成为当前岩体力学研究的热点问题之一^[1-4].为研究裂隙岩体的渗流特性,国内外学者基于数值模拟和室内试验对其进行大量研究.李馨馨等^[5]采用实体单元模拟基质岩块、无厚度单元模拟离散裂隙网络模型,提出裂隙网络岩体渗流传质的三维数值计算方法,并将其应用于预测裂隙岩体溶质浓度分布规律及变化趋势;孟广伟等^[6]基于非均质裂隙岩体的随机渗流原理,提出光滑多尺度裂隙随机配点法,并通过算例证明光滑多尺度随机配点法比传统多尺度随机配点法具有更高的精度和效率;倪绍虎等^[7]通过分析裂隙岩体渗流优势水力路径的形成机理及编制

收稿日期:2023-02-24

*通信作者, E-mail:2864031965@qq.com

相应的分析程序,研究优势水力路径的主要表现形式及其应力相关性;陶煜等^[8]通过分析裂隙岩体主干裂隙系统,建立渗流-应力耦合模型,对裂隙岩体渗流演化规律进行阐述;何忱等^[9]在等效离散裂隙网络模型基础上,提出一种复杂裂隙岩体渗流的三维数值计算方法,通过算例分析裂隙渗透性、大小、方向、相交位置对岩体渗透性的影响,并对裂隙密度与逾渗阈值相关性进行分析.然而,不同岩性的岩石渗流特性亦存在较大差异^[10-13].为深入了解湖北高烽磷矿副井岩石的渗流特性,本文通过 RYL-600 剪切流变仪制备裂隙白云岩试件,并在 MTS815 岩石力学试验系统上对其进行渗流试验.

1 工程地质概况

高烽磷矿副井位于中国湖北省远安县境内,矿区断层、褶曲发育,地质条件复杂.上覆地层主要由第四系、寒武系和震旦系地层构成:第四系以碎石回填土为主;寒武系水井沱组以泥岩破碎带为主,为泥质松散层;震旦系上统灯影组地层涌水量较大,为施工区主要含水层.

灯影组地层岩石裂隙极为发育,溶隙及不规则的溶洞发育,导水性好,岩溶水储量大.井筒地表岩层与河道相连,有直接水力联系.其矿床水文地质类型是以溶隙充水为主,顶板直接进水、底板间接进水,属于中等岩溶充水矿床.岩层分布复杂,岩性段呈不整合接触,层间间接充水.岩石的岩性随深度质量和渗透性表现不同的特征.岩芯多破碎且具有溶孔现象,地下水通过断裂、溶洞等不良地质构造导致间接充水向直接充水转化.深部含水层补给来源远,水头高,水压大,涌水现象突出.

2 室内试验

2.1 岩样的采集

试验岩样取自高烽磷矿副井位于井深 380~500 m 段的白云岩,所属震旦系上统灯影组为矿区主要含水层.岩芯多破碎且具有溶孔现象,深部含水层补给来源远,水头高,水压大,涌水现象突出,有必要对其渗流特性进行研究.

采用 XY4AA 岩芯钻机和直径 95 mm 的金刚石钻头及双层岩芯管在岩石中钻进,连续取芯,取芯直径为 64.5 mm.并将收集的岩样制备成直径 50 mm、高 100 mm 的标准圆柱形试样.部分取芯如图 1 所示.



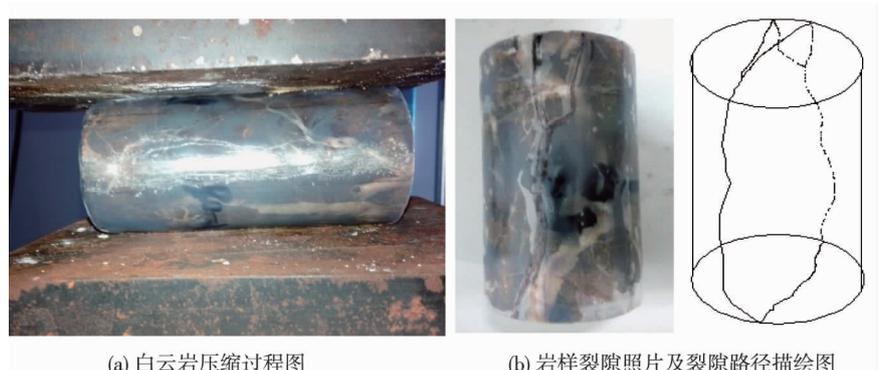
图 1 部分取芯

2.2 裂隙白云岩的制备

致密岩石介质基本是不透水的,岩石裂隙是渗流的优势水力路径,为模拟裂隙岩体真实渗透特性,需要预制一些人工诱发裂隙.为防止裂隙产生过程中裂隙碎块的崩落,在制备成功的标准圆柱形试样表面涂上一层 AB 胶,并套上一层热塑管.采用 RYL-600 剪切流变仪(图 2)以 10 N/s 的加载速率对标准白云岩试件进行轴向加载,加载过程中密切关注岩石裂纹的产生情况,当岩样产生裂隙时,结束试验.图 3a 为白云岩压缩过程图,制备成功的裂隙白云岩及其裂隙路径描绘图如图 3b 所示.



图 2 RYL-600 剪切流变仪



(a) 白云岩压缩过程图

(b) 岩样裂隙照片及裂隙路径描绘图

图 3 裂隙白云岩制备

2.3 渗流试验装置及方案

对于标准尺寸的裂隙白云岩岩样,适宜采用瞬态法测定其渗透特性.为模拟实际工程环境下裂隙岩体所受应力状态,利用 MTS815 电液伺服岩石力学试验系统(图 4a)对裂隙白云岩进行渗流试验,操作步骤如下:

1) 安装试件:根据瞬态法渗流试验的特点,将制备好的岩样放置在渗流试验专用水压装置中,将靠近试件两端的刚性压头分别用密封胶带缠绕,用热缩管将刚性压头与试件接触部分及试件包裹;之后用电热风枪对热缩管进行加热,使热缩管与岩样、水压装置贴合紧密;为防止试验过程中液压油进入试件,用铁丝将上下刚性压头与热缩管进一步固定;最后将包裹好的试件放置到 MTS815 试验机加载平台,将水压装置中心通水小孔和岩样对齐,并调整上下水管的安装位置,安装好环向引伸计和轴向引伸计,如图 4b 所示.

2) 加载阶段:先启动轴压和围压加载系统,以 2 MPa/min 的加载速率将轴压和围压加载至设计值,并维持 2 min.然后以 1 MPa/s 施加孔压至 P_1 ,增加岩样一端的孔隙水压至 P_2 ,在岩样两端形成孔隙压差.

3) 数据采集:采用试验机控制系统每隔 0.05 s 采集一次轴向位移、环向位移等数据.

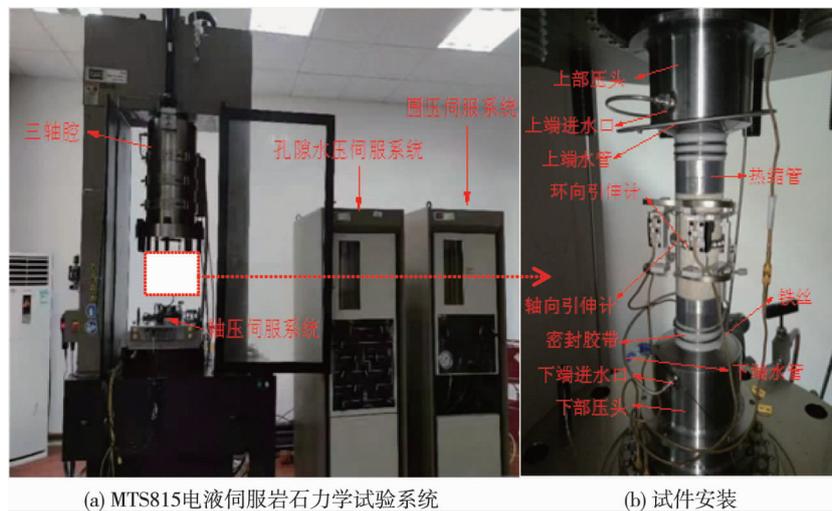


图 4 渗流试验装置

3 裂隙白云岩渗流特性研究

3.1 白云岩裂隙流的非 Darcy 效应

许多试验表明:流体在中高渗透岩石中渗流,其规律满足 Darcy 定律;低渗透岩石孔隙致密,固-液界面张力大,其渗流曲线呈现出非 Darcy 流特征.白云岩裂隙流是否满足 Darcy 定律需要进一步探讨.

对于 Darcy 流,岩样 Darcy 流的渗透率 k_D 和孔隙压差 Δp 可通过式(1)和式(2)计算^[14].

$$k_D = \frac{c_f B H u}{2 t_f A} \ln \frac{\xi_0}{\xi} = \frac{c_f B H u}{2 t_f A} \ln \frac{p_{10} - p_{20}}{p_{1f} - p_{2f}}; \quad (1)$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (p_{10} - p_{20}) \left(- \frac{t}{t_f} \ln \frac{p_{10} - p_{20}}{p_{1f} - p_{2f}} \right). \quad (2)$$

式中: k_D 为岩样 Darcy 流渗透率; c_f 为渗流液体压缩系数; B 为系统内稳压器体积; H 为岩样高度; u 为渗流液体动力黏度; t_f 为试验采样的最终时刻; A 为试件的横截面积; ξ 为岩样的孔隙水压力梯度; ξ_0 为孔隙压差; p_{10} 和 p_{20} 分别为初始时刻两个稳压器作用在岩样两端的水压力; p_{1f} 和 p_{2f} 分别为最终时刻两个稳压器作用在岩样两端的水压力; p_1 和 p_2 分别为两个稳压器的压力.

将渗流试验得到的孔隙压差和通过 Darcy 定律获得的孔隙压差分别与试验时间拟合,得到不同围压作用下孔隙压差与时间序列的拟合曲线如图 5 所示.

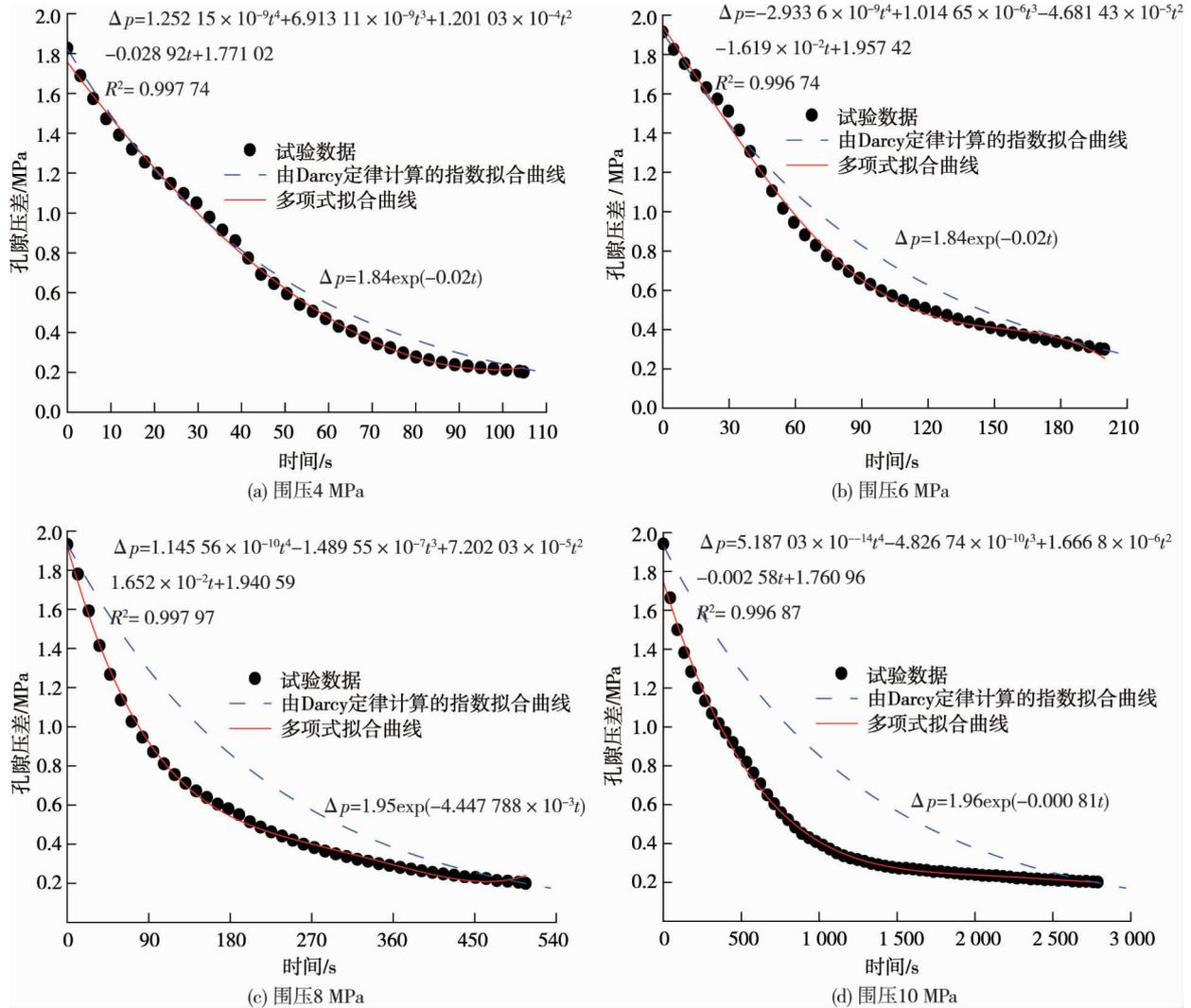


图 5 不同围压作用下孔隙压差时间序列及其拟合曲线

由图 5 可知:由 Darcy 定律计算出的指数变化曲线与试验数据存在较大误差,由此可知试件的孔隙压差随时间变化曲线不符合 Darcy 定律;而四次多项式的孔隙压差时间曲线有很好的拟合效果,相关性系数高达 0.99 以上,其拟合曲线方程见表 1.裂隙白云岩的实际渗流状态与 Darcy 流有较大差异,其渗透试验的渗流状态为非线性时变渗流.

岩样渗流的非 Darcy 效应受应力作用变化明显,在围压 4 MPa 时,由 Darcy 定律计算出的渗流曲线与试验数据近似吻合,但随着围压的增大,裂隙白云岩的实际渗流曲线与 Darcy 渗流曲线之间的误差不断增大,岩样渗流的非 Darcy 效应不断增强.证明围压是试件由 Darcy 渗流状态转变为非 Darcy 渗流状态的关键因素.

表 1 不同围压下孔隙压差时间序列拟合曲线方程

| 围压/MPa | 孔隙压差时间序列四次多项式拟合曲线 | 相关系数 |
|--------|---|----------------|
| 4 | $\Delta p = 1.2521 \times 10^{-9}t^4 + 6.9131 \times 10^{-9}t^3 + 1.2010 \times 10^{-4}t^2 - 0.0289t + 1.7710$ | $R^2 = 0.9977$ |
| 6 | $\Delta p = -2.933 \times 10^{-9}t^4 + 1.0146 \times 10^{-6}t^3 - 4.6814 \times 10^{-5}t^2 - 1.619 \times 10^{-2}t + 1.9574$ | $R^2 = 0.9967$ |
| 8 | $\Delta p = 1.1455 \times 10^{-10}t^4 - 1.4895 \times 10^{-7}t^3 + 7.2020 \times 10^{-5}t^2 - 1.652 \times 10^{-2}t + 1.9405$ | $R^2 = 0.9980$ |
| 10 | $\Delta p = 5.1870 \times 10^{-14}t^4 - 4.8267 \times 10^{-10}t^3 + 1.666 \times 10^{-6}t^2 - 0.0025t + 1.7609$ | $R^2 = 0.9969$ |

3.2 白云岩裂隙流的 Darcy 流与非 Darcy 流分析

试验表明,白云岩裂隙流不满足 Darcy 定律,非 Darcy 流的渗透率可以通过式(3)计算^[15].

$$k = \frac{\mu V}{-\xi - \rho c_a \frac{dV}{dt} + \rho \beta V^2} \tag{3}$$

式中: k 为非 Darcy 流渗透率; V 为渗透速度; ρ 为密度; c_a 为加速度系数, 与压力梯度符号相同; β 为非 Darcy 流因子。

对式(1)计算的 Darcy 流渗透率和式(3)计算的非 Darcy 流渗透率进行分析, 得到在轴压 6 MPa 和 8 MPa 下裂隙白云岩的渗透率随围压变化曲线, 如图 6 所示。

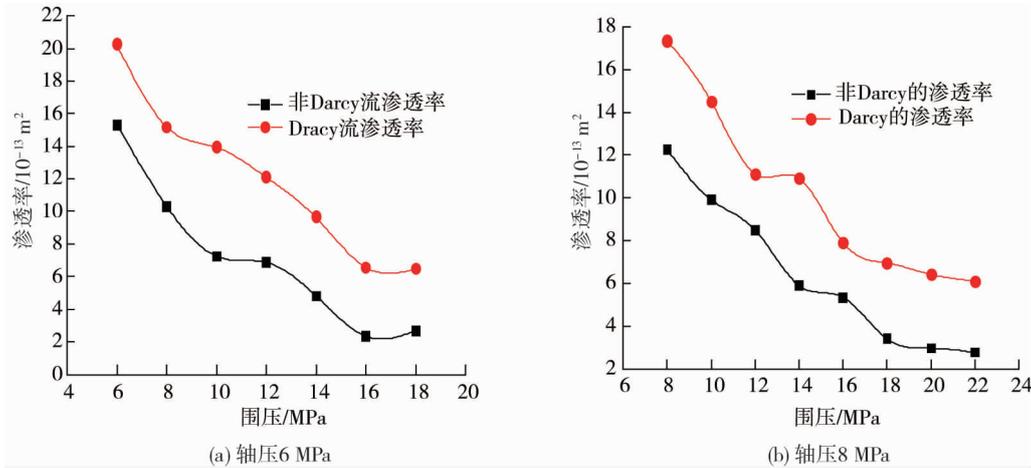


图 6 裂隙白云岩非 Darcy 流与 Darcy 流的渗透率与围压拟合曲线

根据图 6 可以看出: 裂隙白云岩非 Darcy 流的渗透率恒小于 Darcy 流的渗透率; 非 Darcy 流渗透率与 Darcy 流渗透率随围压变化趋势一致, 岩样渗透率随围压增大呈减小趋势。

由于渗流过程中孔隙压差随时间减少, 试验的非 Darcy 流因子 β 恒大于 0, 故裂隙白云岩的非 Darcy 流渗透率比 Darcy 流的渗透率低。与散粒状沙石或土的透水性能不同, 裂隙白云岩的渗透率主要是岩样中的裂隙发挥作用。岩石裂隙具有空间几何形状的特点, 相比孔隙来说, 裂隙在应力作用下的变形响应要比孔隙的变形更加灵敏。围压的增大, 导致试件的裂隙张开度减小, 裂隙闭合区增大。岩石裂隙闭合后, 导通性能变差, 导致水压的作用区减小, 使得渗透率降低。

4 体积应力与孔压作用下的渗流规律

为进一步分析应力对非 Darcy 流渗透率的影响, 对裂隙白云岩渗透率和体积应力进行分析, 得到在孔压 2 MPa, 轴压分别为 6, 8 MPa 时的裂隙白云岩的渗透率随体积应力变化曲线, 如图 7 所示。

体积应力采用式(4)计算。

$$\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 \tag{4}$$

式中: θ 为体积应力; σ_1 为轴压; σ_3 为围压。

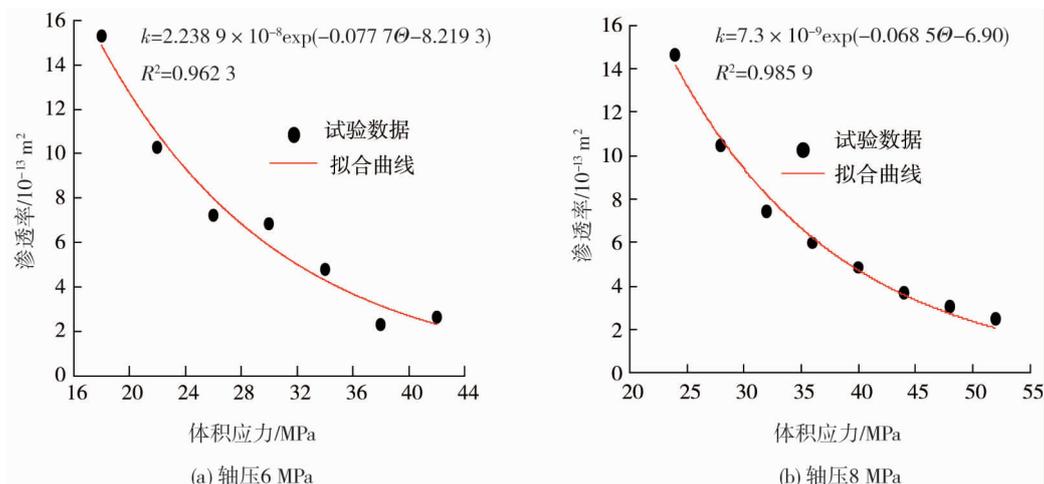


图 7 孔压 2 MPa 下裂隙白云岩非 Darcy 流的渗透率与体积应力拟合曲线

根据图7渗透率与体积应力的拟合曲线拟合得到式(5).

$$k = ae^{(-b\theta+c)}. \quad (5)$$

式中: a 、 b 和 c 均为试验拟合参数.系数 a 、 b 和 c 与岩石裂隙的发育程度有关.

由图7可知:孔压2 MPa和轴压6,8 MPa时,裂隙白云岩的渗透率与体积应力的拟合方程的相关性系数分别为0.962 3和0.985 9,这表明负指数型函数关系式(式(5))可很好地表征渗透率与体积应力的关系.

同一轴压作用下,裂隙白云岩的渗透率随体积应力增大而减小,且岩样渗透率在低体积应力下比高体积应力作用下更为敏感.这表明围压的存在抑制白云岩裂隙的扩张变形,导致试件的裂隙张开度减小,裂隙闭合区增大.当裂隙闭合到一定程度后,渗透率对围压的敏感度下降.

5 结论

1)裂隙白云岩的孔隙压差是关于时间序列的四次多项式,裂隙白云岩的渗流是非线性时变渗流,其实际渗流状态为非Darcy流,且岩样渗流的非Darcy效应随围压的增大不断增强.

2)裂隙白云岩非Darcy流的渗透率恒小于Darcy流的渗透率,且非Darcy流渗透率与Darcy流渗透率随围压变化趋势一致,岩样渗透率都随围压增大而减小.

3)同一轴压作用下,裂隙白云岩的渗透率与体积应力呈负指数相关,且岩样渗透率在低体积应力作用下更为敏感.

参考文献:

- [1] 彭述权,康景宇,张珂嘉,等.微生物诱导碳酸钙沉淀填充裂隙岩体渗流规律试验研究[J].矿冶工程,2020,40(3):15-19.
- [2] 周新,盛建龙,叶祖洋,等.岩体粗糙裂隙几何特征对其Forchheimer型渗流特性的影响[J].岩土工程学报,2021,43(11):2075-2083.
- [3] 徐树媛,张永波,相兴华,等.采空区裂隙岩体渗流特征及渗透性试验研究[J].煤矿安全,2022,53(4):36-44.
- [4] 赵延林,王卫军,黄永恒,等.裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合分析与工程应用[J].岩土工程学报,2010,32(1):24-32.
- [5] 李馨馨,徐轶.裂隙岩体渗流溶质运移耦合离散裂隙模型数值计算方法[J].岩土工程学报,2019,41(6):1164-1171.
- [6] 孟广伟,李霄琳,周立明,等.裂隙岩体渗流的光滑多尺度随机配点法[J].水利学报,2015,46(1):34-41.
- [7] 倪绍虎,何世海,汪小刚,等.裂隙岩体渗流的优势水力路径[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(6):108-115.
- [8] 陶煜,刘卫群.裂隙岩体渗流-应力耦合等效渗流阻模型[J].岩土力学,2012,33(7):2041-2047.
- [9] 何忱,姚池,杨建华,等.基于等效离散裂隙网络的三维裂隙岩体渗流模型[J].岩石力学与工程学报,2019,38(S1):2748-2759.
- [10] 吕闰生,李树武,薛交,等.煤岩渗流特征及应力敏感性实验研究[J].煤矿安全,2022,53(11):23-30.
- [11] 张培森,许大强,张睿,等.不同围压及循环载荷下砂岩的渗流、力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(12):2432-2450.
- [12] 李文亮,周佳庆,贺香兰,等.不同围压下破碎花岗岩非线性渗流特性试验研究[J].岩土力学,2017,38(S1):140-150.
- [13] 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.
- [14] HOEK P J. A simple and accurate description of nonlinear fluid leakoff in high-permeability fracturing[J]. SPE Journal, 2002,7(1):14-23.
- [15] 四旭飞,陈占清,缪协兴,等.利用瞬态法提取岩样非Darcy流渗透特性[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2006(3):16-20.