

DOI: 10.11779/CJGE20230184

各向异性层状千枚岩渗透率及有效孔隙率试验研究

王 伟^{1,2}, 陈超维^{1,2}, 刘世藩^{1,2}, 曹亚军^{1,2}, 段雪雷^{1,2}, 聂文俊³

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210024;

3. 中国水利水电第六工程局有限公司, 辽宁 沈阳 110013)

摘 要: 采用岩石全自动三轴伺服仪和气体渗透装置, 对一种致密的各向异性层状千枚岩开展了气体渗透率及有效孔隙率试验, 研究常规三轴压缩和围压循环加卸载 2 种应力路径下, 气体渗透率、有效孔隙率随层理倾角及偏应力的演化规律。结果表明: 围压相同时, 岩样的初始气体渗透率 k_0 随着层理倾角 β 的增大呈“W”型变化, 在 $\beta=45^\circ$ 时取最大值; 在围压循环加卸载过程中, 气体渗透率先随围压的加载而减小, 后随围压的卸载而增大, 卸载时的气体渗透率小于加载时的渗透率; 层状千枚岩有效孔隙率和气体渗透率呈指数关系; 平行于层理方向的气体渗透率远大于垂直于层理方向的气体渗透率; 岩样有效孔隙率和气体渗透率随偏应力变化经历初始压密阶段、线弹性阶段和塑性变形阶段, 随着偏应力的增大, 岩样有效孔隙率和气体渗透率先减小, 接着保持稳定, 最后快速增大, 并在岩样应力-应变曲线斜率接近于 0 时达到最大值。

关键词: 层状岩石; 各向异性; 气体渗透率; 有效孔隙率; 常规三轴压缩; 围压循环加卸载

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)02-0445-07

作者简介: 王 伟(1978—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石材料多场耦合力学、岩体流变力学等方面的教学和科研工作。E-mail: wwang@hhu.edu.cn。

Experimental study on permeability and effective porosity of anisotropic layered phyllite

WANG Wei^{1,2}, CHEN Chaowei^{1,2}, LIU Shifan^{1,2}, CAO Yajun^{1,2}, DUAN Xuelei^{1,2}, NIE Wenjun³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Sinohydro Bureau 6th Co., Ltd., Shenyang 110013, China)

Abstract: The experiments on gas permeability and effective porosity of layered phyllite specimens are conducted by using a rock automatic triaxial servo and gas permeability panel. Two stress paths of conventional triaxial compression and confining pressure cyclic loading and unloading are set up in the experiments. The evolution rules of gas permeability and effective porosity with bedding dip angle and deviatoric stress are studied, respectively. The results show that under the same confining pressure, the initial gas permeability k_0 changes in a "W" shape with the increase of the bedding angle β , and reaches the maximum value at $\beta=45^\circ$. During the confining pressure cyclic loading-unloading process, the gas permeability decreases with the loading of the confining pressure, then increases while unloading. The gas permeability detected during unloading is smaller than that during loading. An exponential relationship is observed between the effective porosity and the gas permeability of the layered phyllite. The gas permeability parallel to the bedding direction is much greater than that perpendicular to the bedding direction. The variation of the effective porosity and gas permeability with deviatoric stress undergoes initial consolidation stage linear elastic stage, and plastic deformation stage. With the increase of the deviatoric stress, the effective porosity and gas permeability of rock specimens decrease first, then keep stable, and finally increase rapidly, and reach the maximum when the slope of stress-strain curve is close to zero.

Key words: bedded rock; anisotropy; gas permeability; effective porosity; conventional triaxial compression; confining pressure cyclic loading and unloading

0 引 言

层状千枚岩作为低渗透岩石, 常见于地下石油储库、天然气储库及核废料处理场等地, 与能源储备、

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12072102); 江苏省六大高峰人才项目(JZ-008); 江苏高校“青蓝工程”项目(苏教师[2020]10号)
收稿日期: 2023-03-03

资源开发和环境保护工程的安全与稳定性问题紧密关联。层状千枚岩的层理面具有较高的压缩性和弱胶结性,使岩石的渗透特性呈现出典型的各向异性。此外,岩石所处的应力场和渗流场会产生耦合作用,影响其渗透率。因此需要加强对层状千枚岩在不同应力状态、不同倾角下渗透特性的研究。

目前,对于高渗透岩石,如煤岩、砂岩等研究成果十分丰富^[1-5],而针对低渗透岩石的渗透特性研究较少,如花岗岩、片麻岩等。纪文栋等^[6]对层状盐岩开展压汞法测试和电镜扫描试验,发现低孔隙率是低渗透率的充分非必要条件,而高渗透率是高孔隙率的充分非必要条件,高孔隙率的试样有时也会出现低渗透率的情况。包春燕等^[7]采用 RFPA 数值方法系统地了解裂纹从微裂纹萌生、成核、扩展、新裂纹插入到裂纹饱和的全过程。王伟等^[8-9],Wang 等^[10-11]对低渗透花岗岩进行考虑渗透水压作用的三轴渗流-应力耦合试验,分析了在不同阶段,围压和渗压对岩石渗透率的影响程度。王环玲等^[12-13]、孔茜等^[14]通过低渗透岩石的渗流和孔隙率试验研究,发现在围压作用下,有效孔隙率与气体渗透率的变化规律是同步的。刘小刚等^[15]利用单元切割法确定岩石节理单元并赋予相应的本构模型进行计算,研究单轴或不同围压条件下不同节理倾角层状岩石的力学特性,发现节理对岩石强度的影响很显著。李军等^[16]通过对花岗岩试样进行多次恒下限分级循环加卸载,并进行了气体渗透率测量,总结出每个循环中加载应力卸载到限时,应变也不能恢复到上一次循环,随着循环次数的增加,应力下限的轴向应变也随之增加。王俊光等^[17]利用改进的脉冲衰减气体渗透率测量装置对页岩进行不同围压、不同渗透压循环加卸载试验,发现初始围压的大小会影响页岩的初始渗透率,初始围压越大初始渗透率越小。

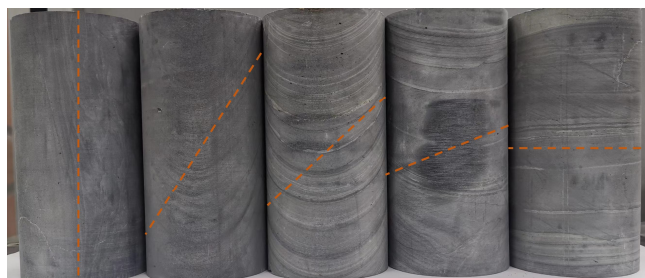
以上研究对低渗透岩石渗透率和孔隙率的变化与应力变化的关系做的工作较多,但对于各向异性岩石在不同方向荷载作用下渗透率和孔隙率的变化规律研究很少。因此,本文以一种惰性气体-氩气作为渗透介质,对层状千枚岩开展了不同应力路径下的渗流应力耦合试验,研究其气体渗透率和有效孔隙率随层理倾角及应力的演化规律。

1 试验原理及方法

1.1 试验岩样及制备

试验岩样为层状千枚岩,取自湖南省某地下工程,整体呈灰色,表面无明显裂隙,岩样完整性较好且未受到风化影响。根据国际岩石力学学会推荐标准,将

岩样制备成 50 mm×100 mm 的标准圆柱状岩样。本文采用 β 表示层理面与水平面的夹角,对岩样进行加工,使其有 β 为 0° , 30° , 45° , 60° , 90° 等 5 种不同的层理倾角。层状千枚岩试样如图 1 所示。



(a) $\beta=90^\circ$ (b) $\beta=60^\circ$ (c) $\beta=45^\circ$ (d) $\beta=30^\circ$ (e) $\beta=0^\circ$

图 1 不同层理倾角的千枚岩岩样

Fig. 1 Phyllite rock samples with different bedding dip angles

1.2 试验仪器

试验采用的系统由岩石全自动三轴伺服仪和气体渗透面板构成,其中气体渗透面板由河海大学和法国里尔力学研究所共同开发研制,渗透面板连接的气压计测量精度为 10^{-4} MPa。该系统中的岩石全自动三轴伺服仪提供静水压力,再通过减压阀控制气罐中的高压氩气,使气体进入压力室,流经特制渗透板形成渗流通道后进行渗流应力耦合条件下的三轴压缩试验。岩石全自动三轴伺服仪和气体渗透面板如图 2 所示。



图 2 低渗透岩石气体渗透测试系统

Fig. 2 Gas permeability testing system for low permeability rock

1.3 试验原理

本文采用稳态渗流法,实际上是准稳态法,即通过压力室进气端控制试件下表面气体压力,而压力室出气端与大气相连,待试件进、出气端面气压差形成稳态渗流后,通过记录进气端气体压力随时间的变化,推求岩石试样材料的气体渗透率^[18]。稳态渗流法示意图如图 3 所示。

为了便于试验和分析,做出如下假定:①渗流气体为理想气体;②渗流气体恒压稳定,可视为连续渗

流, 且满足达西定律。根据达西定律推导出等效气体渗透率^[14]为

$$k = \frac{2\mu L v \Delta P_1}{A(P_{\text{moy}}^2 - p_a^2)\Delta t} \quad (1)$$

式中: μ 为氩气黏度, 常温常压下 $\mu = 2.20 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; L 为试样长度 (m); v 为气体渗流速度; ΔP_1 为进气端压力变化值 (MPa); A 为岩样横截面积 (m^2); P_{moy} 为 Δt 时间段内压力室内的平均气体密度 (kg/m^3); p_a 为大气压力, 取 0.1 MPa 。

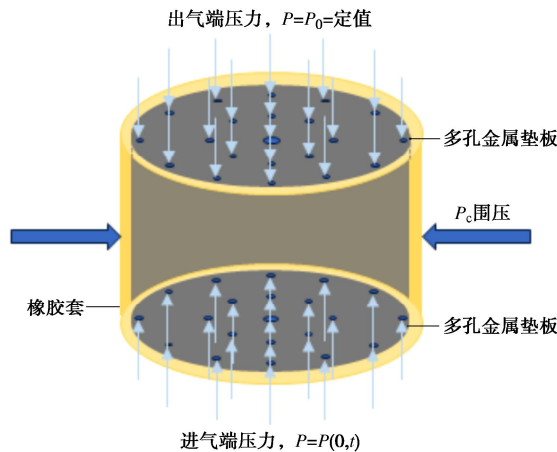


图3 气体渗透试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of gas permeability tests

本文定义岩石有效孔隙率为

$$\varphi = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (2)$$

式中: V_v 为试样内相互连通的孔隙体积 (m^3); V 为岩样体积 (m^3)。

1.4 试验方法

将进气口与气体控制面板相连并开启出气口, 保持气体压力稳定加载, 使试样气体饱和。待气体渗透曲线斜率趋于稳定后, 记录进气端气压随时间的变化, 再计算求得试样的气体渗透率。具体试验步骤如下:

(1) 将标准试样装入全自动三轴伺服仪中, 调整轴向 LVDT 与环向应变计, 设定初始值。

(2) 操作围压泵加载围压至预定值, 确保无气体泄露后, 打开气体管道使进气口压力达到试验预设值, 记录初始气体压力、体积和温度。

(3) 观察进气口压力表读数, 待压力表读数下降速度趋于稳定后, 记录气体压力和结束温度, 将数据代入岩石孔隙率计算公式计算岩样有效孔隙率。气压处于 20 bar 左右开始计时, 记录岩样气压下降 60 s 后气体压力数值, 计算岩样气体渗透率。常规三轴压缩试验和围压循环加卸载试验皆采用流量加载方式进行压力加载, 加载速率分别为 $0.5, 3 \text{ ml}/\text{min}$, 对每一级压力条件, 先测量有效孔隙率, 接着测量气体渗透率,

再改变压力进行下一级测量。

(4) 测定结束后关闭进出气阀门, 卸载偏压和围压, 拆除岩样, 整理数据。

(5) 重复上述步骤 (1) ~ (4), 测定不同围压等级下岩样的有效孔隙率和气体渗透率。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

为研究不同层理倾角、不同围压及循环加卸载对层状千枚岩气体渗透率的影响, 分别在 $3, 5, 10, 15 \text{ MPa}$ 围压下对岩样进行三轴试验, 并对不同层理岩样进行围压循环加卸载试验, 试验结果如图 4, 5 所示。

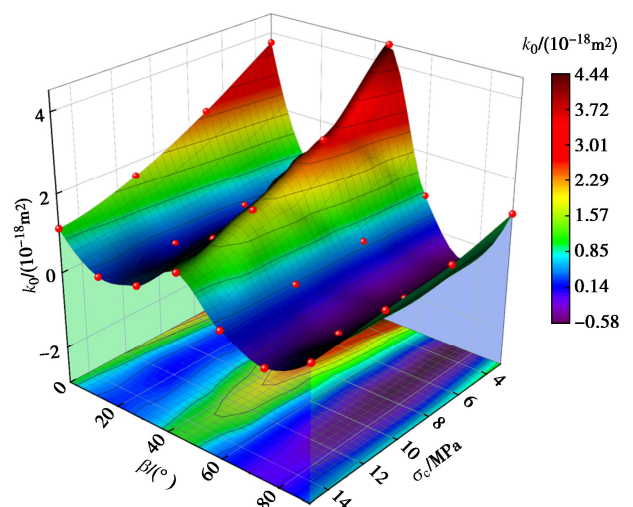


图4 不同围压下气体渗透率随倾角的变化

Fig. 4 Variation of gas permeability with dip angle under different confining pressures

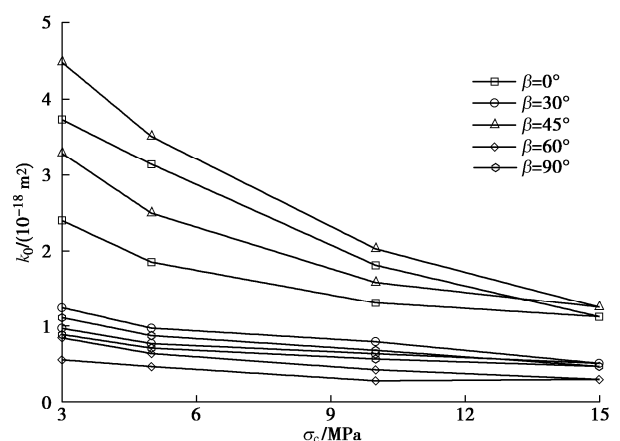


图5 不同层理倾角气体渗透率随围压循环加卸载变化曲线

Fig. 5 Variation curves of gas permeability with confining pressure cyclic loading and unloading under different bedding dip angles

在 5 MPa 围压下对不同层理倾角层状千枚岩进行三轴压缩试验, 得到不同层理倾角层状千枚岩偏应力/气体渗透率/有效孔隙率曲线如图 6 所示。

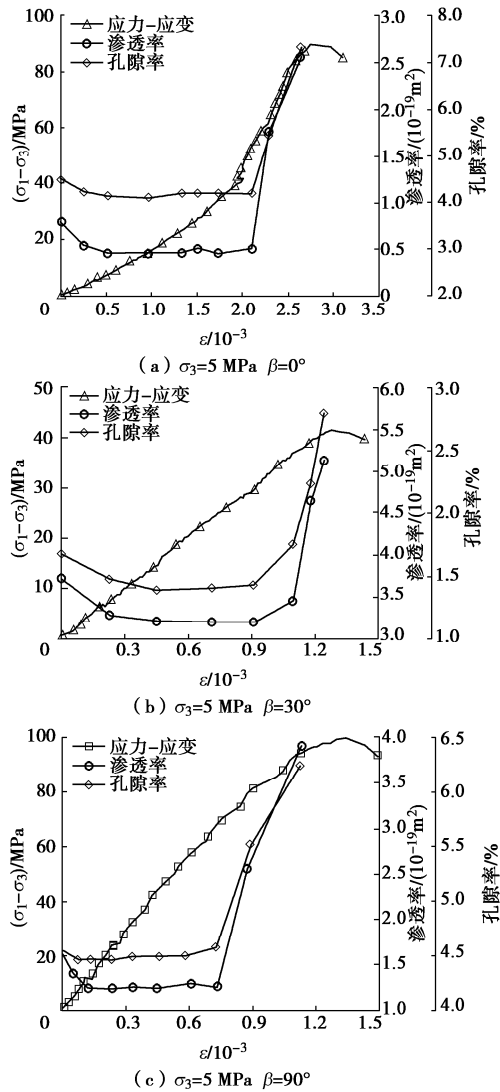


图6 有效孔隙率、气体渗透率随偏应力变化曲线

Fig. 6 Variation curves of effective porosity and gas permeability with deviatoric stress

2.2 渗透率随倾角变化规律

在不同围压下层状千枚岩气体渗透率随倾角变化趋势相同,在3,5,10,15 MPa围压不同倾角层状千枚岩气体渗透率见图4。以围压为5 MPa为例, β 从 0° 增大到 90° , k_0 分别为 21.20×10^{-19} , 8.21×10^{-19} , 31.30×10^{-19} , 6.12×10^{-19} , $9.53 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 。随着 β 的增大,岩样初始气体渗透率呈“W”型变化, $\beta=0^\circ$ 时 k_0 较大, β 为 30° , 60° , 90° 时 k_0 较小, $\beta=45^\circ$ 时 k_0 取得最大值。岩石内部的孔隙和微裂隙决定了岩石气体渗透率的大小,由于原生裂隙随层理倾角呈各向异性分布,使得初始有效孔隙率不同,从而导致初始渗透率随层理倾角变化。

而在围压的作用下,岩样内部的孔隙和微裂缝被压密闭合,同时也有新的微裂隙产生。新裂隙的产生受不同因素的影响,其中岩石本身的层理倾角对新裂隙影响较大,当微裂隙发展到层理面附近时往往会发

生转向并沿着层理面继续发展。如图4所示,当 $\beta=45^\circ$ 时,岩样的渗透率随围压增大而减小了72%,是各层理倾角岩样中减小比例最多的,这是由于岩样内部产生的新裂隙截断了渗流通道,因此围压变化对渗透率造成的影响最大。当 β 为 0° , 90° 时,岩样渗流通道垂直或平行于层理倾角,因此岩样在围压作用下渗流通道变化也较大,气体渗透率发生明显变化。当 β 为 30° , 60° 时,岩样渗流通道随围压变化最小,因此气体渗透率变化发生的变化较小。

2.3 渗透率随围压变化规律

如图5所示,不同层理倾角下层状千枚岩气体渗透率随围压循环加卸载具有相同变化趋势。以 $\beta=0^\circ$ 为例,在加载阶段,气体渗透率随围压的增大而减小,在卸载阶段,气体渗透率随围压减小而增大。卸载阶段渗透率曲线在加载阶段渗透率曲线下方,卸载后层状千枚岩渗透率虽然恢复了部分但不能达到岩样的初始渗透率。

在加载阶段,随着围压增大岩石内部的原生孔隙和裂隙被逐渐压密闭合,使得岩石中气体流通通道逐渐减小,从而导致气体渗透率减小。随着岩样内部孔隙和裂隙闭合,岩石被压密的难度也逐渐提高,因此气体渗透率减小的速率也减小,表现为渗透率曲线逐渐平缓。在卸载阶段,随着围压的减小岩样内部的孔隙和裂隙逐渐张开,岩石气体渗透率增大。在加卸载完成后,由于岩石本身的非线性变形特性,岩样内部产生了残余变形。岩石中部分被压密闭合的孔隙不能恢复,从而使气体渗透率减小,因此卸载后气体渗透率虽然恢复了部分但不能达到岩石的初始渗透率。

为量化不同层理倾角层状千枚岩在围压加卸载下产生的残余变形,定义在3 MPa围压下岩样在卸载阶段与在加载阶段的渗透率之比作为渗透率恢复率。 β 为 0° , 30° , 45° , 60° , 90° 的岩样渗透率恢复率分别为64%,78%,73%,66%,80%。由此可见,层状千枚岩渗透率恢复率为60%~80%。

2.4 有效孔隙率、气体渗透率随倾角变化规律

如图6所示,不同层理倾角层状千枚岩有效孔隙率和气体渗透率变化趋势相同。因为岩石中的孔隙裂缝是控制岩石渗透的关键因素,孔隙裂缝减少,使得流体渗流通道减小,从而导致岩石渗透率减小。

通过对本文试验数据进行分析,得知层状千枚岩有效孔隙率和气体渗透率呈指数关系,3种岩样拟合的关系系数均在90%以上,其表达式为

$$k = a\phi^b \quad (3)$$

式中: k , ϕ 分别为岩样气体渗透率和有效孔隙率试验值; a 为材料参数(m^2); b 为无量纲参数;均通过试验测得。

如图7所示,对在5 MPa围压下不同层理倾角层状千枚岩施加偏应力,通过对岩样有效孔隙率和气体渗透率进行拟合,发现数据呈指数关系但并未完全拟合。这是由于岩样内部孔隙裂缝随层理倾角呈各向异性分布,且在偏应力作用下岩石内部裂隙受层理倾角影响向不同方向扩展,导致试验数据偏离拟合曲线。

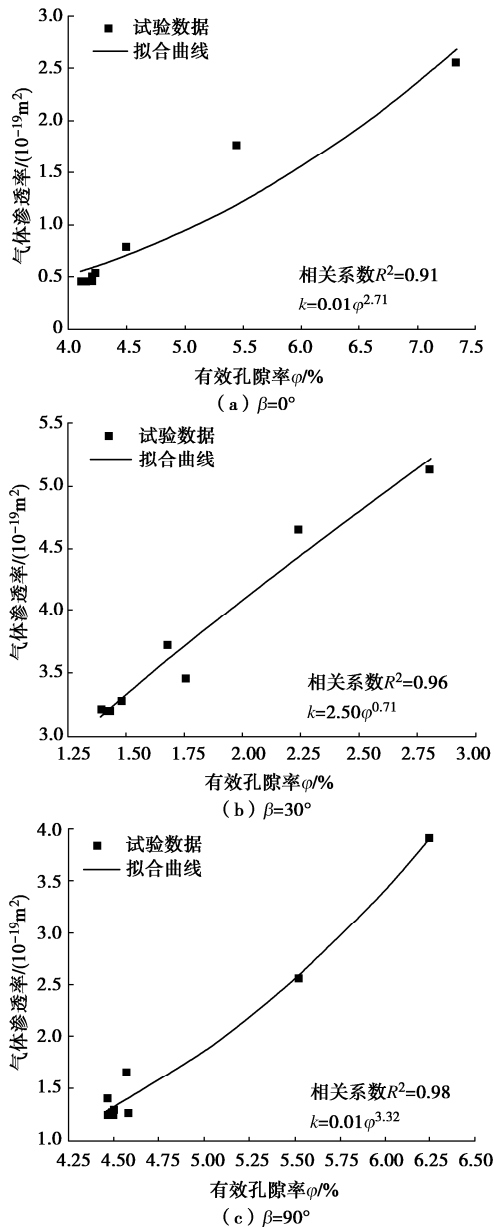


图7 5 MPa围压下不同层理倾角试样有效孔隙率与渗透率关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between effective porosity and permeability of specimens with different bedding dip angles under confining pressure of 5 MPa

2.5 有效孔隙率、气体渗透率随偏应力变化规律

岩石变形过程中有效孔隙率随着偏应力的增大先减小,接着保持稳定,最后逐渐增大,气体渗透率和有效孔隙率的演化规律相似。层状千枚岩有效孔隙率

和气体渗透率随偏应力变化曲线如图6所示,将曲线分为3个阶段。

(1) 初始压密阶段

施加围压到预定值以后,岩样的有效孔隙率和气体渗透率在相对稳定的数值附近上下波动, β 为 0° , 30° , 90° 的岩样的有效孔隙率分别为4.49%,1.67%,4.57%,气体渗透率分别为 0.79×10^{-19} , 3.72×10^{-19} , $1.65 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 。在施加偏应力之后,岩样有效孔隙率和气体渗透率减小,初始压密阶段结束后, β 为 0° , 30° , 90° 的岩样的有效孔隙率分别为4.10%,1.39%,4.47%,气体渗透率分别为 0.46×10^{-19} , 3.20×10^{-19} , $1.24 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 。在这一阶段,影响气体渗透率的主要因素为偏应力,随着偏应力的增大,岩石有效孔隙率和气体渗透率逐渐减小。这是由于岩样原生孔隙和裂隙在先期围压加载下被逐渐压密但并未完全闭合,偏应力加载后未充分压密闭合的裂隙逐渐闭合完全,使得岩样有效孔隙率减小,从而导致气体渗透率减小。

(2) 线弹性阶段

在从初始压密阶段过渡到线弹性阶段的过程中,岩样有效孔隙率和气体渗透率随偏应力的增大略微减小,进入到线弹性阶段以后整体保持稳定,略有波动。在线弹性阶段,岩样有效孔隙率和气体渗透率随偏应力变化较小,基本保持不变。这是由于岩石原生孔隙和裂隙已经闭合完全,又未产生新的裂隙,因此有效孔隙率和气体渗透率不发生变化。

(3) 塑性变形阶段

岩石的有效孔隙率和气体渗透率随偏应力的增大快速增大,在应力-应变曲线斜率接近于0时达到最大值,此时 β 为 0° , 30° , 90° 的岩样有效孔隙率分别为7.33%,2.80%,6.24%,气体渗透率分别为 2.56×10^{-19} , 1.24×10^{-19} , $3.91 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 。在这一阶段,岩石出现塑性变形特征,细观表现为岩样内部产生大量孔隙和裂隙,且新形成的孔隙、裂隙之间和原生孔隙之间不断连通,形成新的渗流通道,使得岩样有效孔隙率和气体渗透率快速增大,直到岩样表面出现贯通的宏观裂缝其有效孔隙率和渗透率达到最大值。

从图6可以看出不同层理倾角层状千枚岩的有效孔隙率和气体渗透率曲线变化趋势相似,但不同层理倾角的层状千枚岩有效孔隙率和气体渗透率变化量与变化速率皆不相同,这是由于层状岩石损伤的各向异性导致裂隙向不同方向发展,从而使得变化量和变化速率有所差别。

2.6 平行与垂直于层理方向气体渗透率变化规律

当 β 为 0° , 90° 时,岩样层理倾角与渗流方向分别垂直和平行,因此对比 β 为 0° , 90° 时岩样气

体渗透率可得出平行与垂直于层理方向的气体渗透率变化规律。以 5 MPa 围压条件下的试验结果为例, 岩石的气体渗透率随偏应力变化曲线如图 8 所示。

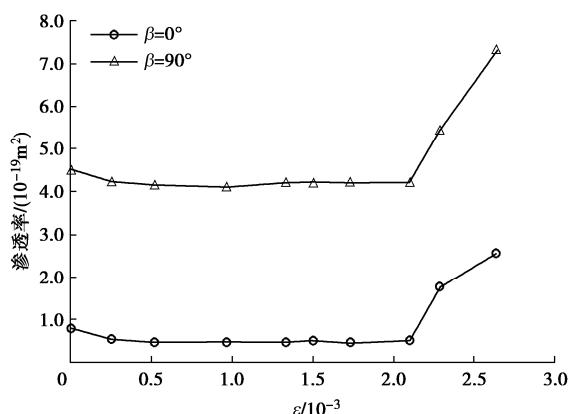


图 8 5 MPa 围压下气体渗透率随偏应力变化曲线

Fig. 8 Variation curves of gas permeability with deviatoric stress under confining pressure of 5 MPa

从图 8 中可以看出, 在相同围压下, 随着偏应力的加载, 平行于层理方向的气体渗透率远大于垂直于层理方向的气体渗透率, 前者约为后者的 5 倍, 这是由于层理倾角与渗流方向平行时, 层理作为气体渗流的重要通道, 可极大提高岩样的气体渗透率。

3 结 论

采用气体渗透的方法对层状千枚岩开展了不同围压下的渗流应力耦合试验, 在试验结果的基础上分析其有效孔隙率和气体渗透率随层理倾角及应力的各向异性演化规律。得出 4 点结论。

(1) 围压相同时, 岩样的初始气体渗透率随着层理倾角 β 的增大呈“W”型变化, 在 $\beta=45^\circ$ 时气体渗透率取得最大值。平行于层理方向的气体渗透率远大于垂直于层理方向的气体渗透率。

(2) 在围压循环加卸载过程中, 气体渗透率随围压的增大而减小, 随围压减小而增大。因不可恢复变形, 卸载阶段渗透率曲线在加载阶段渗透率曲线下方, 即卸载后层状千枚岩渗透率不能达到初始渗透率。层状千枚岩渗透率恢复率在 60%~80%。

(3) 层状千枚岩有效孔隙率和气体渗透率呈指数关系, 但由于岩石内部孔隙裂隙随层理倾角呈各向异性分布, 且在偏应力作用下裂隙受层理倾角影响向不同方向扩展, 导致试验数据偏离拟合曲线。

(4) 岩石有效孔隙率和气体渗透率随偏应力变化分为初始压密阶段、线弹性阶段和塑性变形阶段 3 阶段。随偏应力的增大, 岩样有效孔隙率和气体渗透率先减小, 接着保持稳定, 最后快速增大, 并在岩样应力-应变曲线斜率接近于 0 时达到最大值。

参考文献:

- [1] 段淑蕾, 李波波, 成巧耘, 等. 应力作用下含水煤岩渗透率及水膜动态演化机制[J]. 煤炭科学技术, 2023, **51**(6): 91-100. (DUAN Shulei, LI Bobo, CHENG Qiaoyun, et al. Dynamic evolution mechanism of water-bearing coal permeability and water film under stress[J]. Coal Science and Technology, 2023, **51**(6): 91-100. (in Chinese))
- [2] 付佳乐, 李波波, 高 政, 等. 不同孔隙压力和围压下煤岩渗透及力学特性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, **51**(8): 150-159. (FU Jiale, LI Bobo, GAO Zheng, et al. Experimental study on permeability and mechanical properties of coal under different pore pressure and confining pressure[J]. Coal Science and Technology, 2023, **51**(8): 150-159. (in Chinese))
- [3] 蒋长宝, 余 塘, 魏文辉, 等. 加卸载应力作用下煤岩渗透率演化模型研究[J]. 岩土力学, 2022, **43**(增刊 1): 13-22. (JIANG Changbao, YU Tang, WEI Wenhui, et al. Permeability evolution model of coal under loading and unloading stresses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(S1): 13-22. (in Chinese))
- [4] 蒲钰昕, 赵 东, 蔡婷婷, 等. 不同煤岩组合渗透率的影响因素试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, **41**(12): 88-98. (PU Yuxin, ZHAO Dong, CAI Tingting, et al. Experimental research on influence factors of permeability of different coal-rock combinations[J]. Mining Research and Development, 2021, **41**(12): 88-98. (in Chinese))
- [5] 周 凤, 姜永东, 覃 超, 等. 应力环境对煤岩吸附变形和渗透率的影响试验研究[J]. 煤矿安全, 2021, **52**(10): 19-23, 29. (ZHOU Feng, JIANG Yongdong, QIN Chao, et al. Experimental study on influence of stress environment on coal-rock adsorption deformation and permeability[J]. Safety in Coal Mines, 2021, **52**(10): 19-23, 29. (in Chinese))
- [6] 纪文栋, 杨春和, 刘 伟, 等. 层状盐岩细观孔隙特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(10): 2036-2044. (JI Wendong, YANG Chunhe, LIU Wei, et al. Experimental investigation on meso-pore structure properties of bedded salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(10): 2036-2044. (in Chinese))
- [7] 包春燕, 唐春安, 唐世斌, 等. 单轴拉伸作用下层状岩石表面裂纹的形成模式及其机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(3): 474-482. (BAO Chunyan, TANG Chunan, TANG Shibin, et al. Research on formation mode and mechanism of layered rock surface fractures under uniaxial tension load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2013, **32**(3): 474-482. (in Chinese))
- [8] 王 伟, 徐卫亚, 王如宾, 等. 低渗透岩石三轴压缩过程中的渗透性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(1): 40-47. (WANG Wei, XU Weiya, WANG Rubin, et al. Permeability of dense rock under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(1): 40-47. (in Chinese))
- [9] 王 伟, 张 宽, 曹亚军, 等. 层状千枚岩各向异性力学特性与脆性评价研究[J]. 岩土力学, 2023, **44**(4): 975-989. (WANG Wei, ZHANG Kuan, CAO Yajun, et al. Anisotropic mechanical properties and brittleness evaluation of layered phyllite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, **44**(4): 975-989. (in Chinese))
- [10] WANG W, DUAN X L, JIA Y, et al. Damage evolution of sandstone based on acoustic emission under different seepage conditions[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2023, **27**(4): 1796-1812.
- [11] WANG W, MEI S Y, CAO Y J, et al. Experimental study on property modification of jointed rocks subjected to chemical corrosion[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2023, **27**(6): 2313-2324.
- [12] 王环玲, 徐卫亚, 左 婧, 等. 低渗透岩石渗透率与孔隙率演化规律的气渗试验研究[J]. 水利学报, 2015, **46**(2): 208-216. (WANG Huanling, XU Weiya, ZUO Jing, et al. Evolution law of the permeability and porosity for low-permeability rock based on gas permeability test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, **46**(2): 208-216. (in Chinese))
- [13] 王环玲, 徐卫亚, 巢志明, 等. 致密岩石气体渗流滑脱效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(5): 777-785. (WANG Huanling, XU Weiya, CHAO Zhiming, et al. Experimental study on slippage effects of gas flow in compact rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(5): 777-785. (in Chinese))
- [14] 孔 茜, 王环玲, 徐卫亚. 循环加卸载作用下砂岩孔隙度与渗透率演化规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(10): 1893-1900. (KONG Qian, WANG Huanling, XU Weiya. Experimental study on permeability and porosity evolution of sandstone under cyclic loading and unloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(10): 1893-1900. (in Chinese))
- [15] 刘小刚, 张艺山, 于志方. 基于 FLAC^{3D} 的层状岩石强度特征研究[J]. 矿冶工程, 2018, **38**(6): 39-43, 47. (LIU Xiaogang, ZHANG Yishan, YU Zhifang. Probe into strength characteristics of layered rock based on FLAC^{3D}[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, **38**(6): 39-43, 47. (in Chinese))
- [16] 李 军, 张 杨, 胡大伟, 等. 花岗岩三轴循环加卸载条件下的气体渗透率[J]. 岩土力学, 2019, **40**(2): 693-700. (LI Jun, ZHANG Yang, HU Dawei, et al. Gas permeability of granite in triaxial cyclic loading/unloading tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(2): 693-700. (in Chinese))
- [17] 王俊光, 孙清林, 梁 冰, 等. 渗透压循环加卸载作用下页岩渗透率演化规律研究[J]. 振动与冲击, 2021, **40**(7): 253-259. (WANG Janguang, SUN Qinglin, LIANG Bing, et al. Permeability evolution law of shale under cyclic loading and unloading of osmotic pressure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, **40**(7): 253-259. (in Chinese))
- [18] 王 欣. 致密岩石渗透特性的气渗试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2013. (WANG X. Experimental Study on Permeability of Tight Rock by Gas Permeation[D]. Nanjing: Hohai University, 2013. (in Chinese))
- [19] DOOLIN D M, MAULDON M. Fracture permeability normal to bedding in layered rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38**(2): 199-210.