

循环荷载下含层理页岩渗透特性试验研究

张 闯^{1,2}, 任 松^{1,2}, 吴 斐^{1,2}, 刘 杰^{1,2}, 周旭晖^{1,2}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044)

摘 要: 深入理解含层理以及含宏观裂缝页岩在循环荷载扰动下渗透率的演化规律, 对于页岩气隧道安全施工而言意义重大。利用 GCTS 岩石力学测试系统对含轴向层理及轴向宏观裂缝页岩试件在循环轴向应力和循环围压下渗透率的演化规律开展相关试验研究。结果表明: 含轴向层理页岩试件渗透率随轴向应力的加载和卸载基本不发生明显改变, 而随围压增加以负指数的形式下降, 随围压的减小以指数的形式增加; 含宏观裂缝页岩试件的渗透率随轴向应力的加、卸载近似以线性形式降低和增加, 而随围压的增大以负指数形式下降, 随围压的减小以指数形式增加; 含轴向裂缝页岩试件的渗透率相较含轴向层理页岩试件而言有大幅提升, 其二者比值约为 9 倍左右; 页岩试件对围压的敏感性约为轴向应力的 26 倍; 试件渗透率几乎不随轴向应力循环次数发生明显改变, 而随围压循环次数的增加呈负指数式下降, 且其降幅主要集中在第 1 循环阶段内。研究成果可对页岩气隧道的安全施工提供一定的理论支撑。

关 键 词: 隧道; 页岩; 层理; 裂缝; 循环荷载

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 03-0649-10

Experimental study on the permeability characteristics of laminated shale under cyclic loading

ZHANG Chuang^{1,2}, REN Song^{1,2}, WU Fei^{1,2}, LIU Jie^{1,2}, ZHOU Xu-hui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Resources and Safety Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: It is of great significance for the safe construction of shale gas tunnels to deeply understand the evolution law of permeability of laminated shale with macro fractures under cyclic disturbance. The permeability evolution of shale specimens containing axial beddings and axial macro fractures under cyclic axial stress and cyclic confining pressure was experimentally studied using the GCTS rock mechanics testing system. The results show that the permeability of shale specimens containing axial beddings did not change significantly during the loading and unloading of axial stress, but it decreased in a negatively exponential form with the increasing confining pressure and increased exponentially with the decreasing confining pressure. The permeability of shale samples containing macroscopic fractures decreased linearly with the increasing axial stress and increased linearly with the decreasing axial stress, while it decreased in a negatively exponential form with increasing confining pressure and increased exponentially with the increasing confining pressure. The permeability of shale specimens containing axial fractures is significantly higher than that of shale specimens with axial beddings, about 9 times the later one. The sensitivity of shale specimens to confining pressure is about 26 times that to axial stress. The permeability of the specimen almost keeps constant regardless of the number of axial stress loadings and unloadings, but decreases in a negatively exponential form with the increasing confining pressure cycles, and the major reduction occurs in the first cycle. The findings can somewhat provide theoretical support for the safe construction of shale gas tunnels.

Keywords: tunnel; shale; bedding; fracture; cyclic loading

1 引 言

中国页岩气储量丰富, 在世界各国之中位居前

列^[1-3]。其中, 丘陵及山区可采页岩气储量分别占据全国总量的 29.28%和 31.38%^[4]。此外, 伴随我国基建事业的飞速发展, 页岩气隧道在公路隧道修建过

收稿日期: 2021-04-17

修回日期: 2021-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.52074048, No.51774057)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52074048, 51774057).

第一作者简介: 张闯, 男, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学与工程等方面研究工作。E-mail: xfzhang@cqu.edu.cn

通讯作者: 任松, 男, 1975 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程及可靠度分析等方面研究工作。E-mail: rs_rwx@163.com

程中不断涌现。而相较煤系地层而言,页岩气隧道瓦斯涌出往往具有随机性和不确定性^[5],因此,瓦斯事故在页岩气隧道修建过程中层出不穷,造成了巨大的生命财产损失^[6]。此外,隧道修建过程中,随着掌子面逐渐向前推进,其前方围岩处于循环荷载应力状态,并且循环次数随掌子面距离的增加而增多。因此,加强循环荷载下页岩渗透特性试验研究对深入理解页岩气在围岩体内运移规律、精准预测隧道瓦斯涌出量以及有效规避瓦斯事故等方面均具有重要意义。

国内外学者针对页岩的渗透特性开展了大量研究工作,并取得了丰富的研究成果。在页岩渗透机制方面,崔景伟等^[7]对页岩孔隙的表征技术、类别划分以及演化规律进行了归纳;Zhang 等^[8]指出页岩内渗流通道主要包括有微孔隙、微裂隙、层理以及水力裂缝,并对页岩气在不同尺度通道内的渗流机制进行了研究;Chen 等^[9]表示页岩气在孔隙内的运输主要受孔隙率、孔径大小以及孔隙连通率等因素的影响;Sang 等^[10]表示页岩渗透率还受页岩气的吸附、解吸以及滑移等效应的影响;魏明强等^[11]也表示页岩气在页岩中的渗流过程主要包括解吸、扩散、滑脱以及达西流动等。在页岩气渗流模型方面,Singh 等^[12]在综合考虑页岩内部孔径大小、气体压力以及页岩气等温吸附等因素的基础上,提出了一种新的表征页岩气渗透率的模型;Gao 等^[13]在考虑页岩气吸附、解吸的基础上建立了页岩气表观渗透率非线性流动模型;Li 等^[14]建立了适用于真三轴应力各向异性的页岩渗透率模型;张宏学等^[15-17]表示页岩储层渗透率模型主要包括岩芯渗透率模型、破碎岩芯渗透率模型以及裂隙渗透率模型 3 类,并对裂隙渗透率模型以及页岩气储层渗透率演化规律进行了深入研究。此外,页岩渗透率与应力之间的关系被广泛研究^[18-22],结果表明页岩渗透率的变化与应力大小密切相关,比如页岩渗透率具有随有效应力增加而逐渐减小的变化趋势;陈天宇等^[23]对含层理页岩的渗透特性进行了试验研究,指出含层理页岩渗透特性具有显著的各向异性和围压敏感性的特征;蒋长宝等^[24]对真三轴条件下含层理页岩的渗透特性进行了研究,表示中间主应力以及层理方向是影响页岩渗透特性的两大主要因素;彭辉华等^[25]研究了页岩内部粗糙裂隙的渗流特性,表示压力梯度和流量之间关系与围压密切相关,在低围压下,二者之间关系可用 Forchheimer 方程描述,而高围压下,裂隙将趋于闭合,流量将趋于稳定;马占国等^[26]通过对破碎页岩渗透特性的研究,指出破

碎页岩渗透率随轴向应力增加逐渐降低,且二者关系服从对数分布。

综上可知,目前关于页岩渗透特性方面的研究工作主要集中在页岩微观结构的表征、渗流路径的划分、渗流机制的揭示以及渗透模型的建立等方面,关于页岩渗透特性试验研究方面的工作虽有所涉及,但其绝大部分均是针对均质页岩的常规压缩试验开展的,关于含层理或宏观裂缝页岩试件在循环荷载作用下渗流特性演化规律方面的研究则鲜有涉及。作为一种典型沉积岩,页岩内部层理发育,在施工扰动下,沿层理发育方向往往有宏观裂缝产生;此外,由于地层赋存的随机性,隧道开挖方向既可能平行于层理发育方向,又可能垂直于层理发育方向。鉴于此,本文选择层理角度最不利下的页岩试件(含轴向层理的页岩试件)为研究对象,基于 GCTS 岩石力学测试系统,分别对循环轴向荷载和循环围压下页岩渗透特性演化规律开展相关试验研究,其研究内容可为页岩气隧道的安全施工提供有力保障。

2 试验概况

2.1 试样加工

试件取自重庆市南川区马嘴隧道掌子面处,系龙马溪组页岩,其内部层理发育。将现场所取岩块带回实验室,沿层理平行方向钻取岩芯,并将钻取后的岩芯进行切割、打磨等工序,将其加工成为 50×100 mm 标准圆柱形试件,加工后页岩试件如图 1 所示。由图 1 可知,试件内部发育优于试件轴向平行的层理。

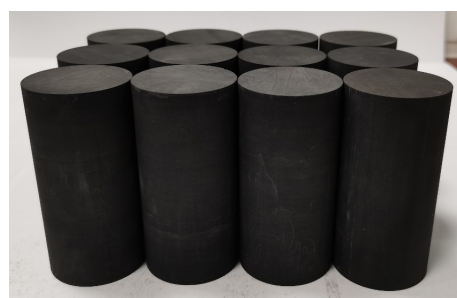


图 1 加工后的岩样
Fig.1 Shale samples

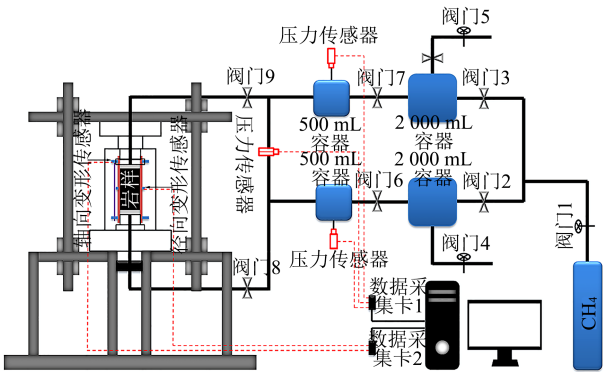
2.2 试验设备

本次试验基于重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室的 GCTS 岩石力学试验系统完成,试验设备如图 2 所示。该设备不仅能够模拟深部地下岩体所处应力、孔隙压力及温度条件,而且

可开展单轴压缩、间接拉伸、三轴压缩、疲劳、蠕变、松弛等试验，甚至具备高温高压下岩石超低渗透率测试功能。其性能参数如下：最大轴向力为 2 800 kN，最大围压可达 80 MPa，最大气体压力为 15 MPa，气体压力传感器精度为 0.01 MPa。综上可知，该设备功能及参数完全满足本次试验需求。



(a) 设备实物图



(b) 设备原理图

图 2 GCTS 岩石力学试验系统
Fig.2 GCTS rock mechanics test system

2.3 试验方案

取一半加工好的试件（6 个），沿层理发育方向将试件一劈为二，并将劈裂后的试件沿劈裂面重新组装起来，则劈裂试件内部则含有平行于试件轴向方向的宏观裂缝。

将含层理页岩试件（6 个）和含宏观裂缝页岩试件（6 个）一分为二，并分别编号为 I-1、I-2、I-3，II-1、II-2、II-3，III-1、III-2、III-3 和 IV-1、IV-2、IV-3。试验过程中对 I 类和 III 类试件进行轴向加卸载试验，而对 II 类和 IV 类试件则进行围压加卸载试验，其应力路径图如图 3 所示。此外，每类试件的应力大小和循环次数等试验信息详见表 1。

特别说明的是，根据马嘴隧道实际地质情况可知，隧址区龙马溪组页岩密度平均为 2.6 g/cm³ 左右，隧道埋深为 150 m 左右，围岩内部页岩气气体

压力为 2.5 MPa 左右。鉴于此，文中选取 3~6 MPa 的应力区间为含层理页岩循环荷载区间；此外，考虑到含宏观裂隙页岩试件渗透率相较含层理页岩大，需要更大的应力才能使渗透率下降到相对统一水平，因此，选择 5~10 MPa 的应力区间作为含裂隙页岩试件循环荷载区间。

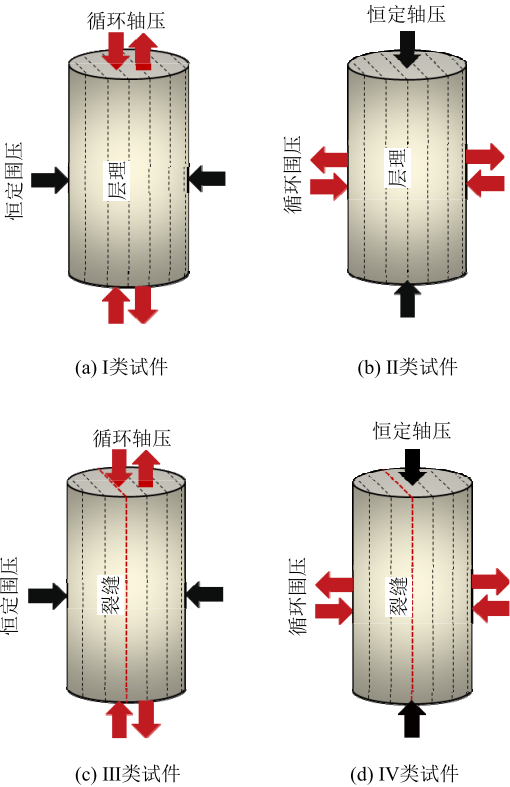


图 3 加载路径图
Fig.3 Loading path

表 1 试验方案
Table 1 Test scheme

试件编号	循环应力	荷载大小	循环次数 <i>n</i>	气体压力 <i>p</i> /MPa
I-1 I-2 I-3	轴向应力	σ_1 为 3~6 MPa, σ_3 为 3 MPa	5	2.5
II-1 II-2 II-3	围压	σ_1 为 3 MPa, σ_3 为 3~6 MPa	5	2.5
III-1 III-2 III-3	轴向应力	σ_1 为 5~10 MPa, σ_3 为 5 MPa	5	2.5
IV-1 IV-2 IV-3	围压	σ_1 为 5 MPa, σ_3 为 5~10 MPa	5	2.5

注：σ₁ 为轴向应力，σ₃ 为围压。

2.4 试验步骤

试验装置原理图如图 2(b)所示，以 I 类试件为例，现将试验步骤详述如下：

（1）首先，在试件外部包裹一层热缩管，然后，将套有热缩管的试件放入应力加载室内，并将腔室密封完好；

(2) 以 0.05 MPa/s 的加载速率将试件轴压和围压等速率加载至 3 MPa;

(3) 打开阀门 1、阀门 2 和阀门 6, 气体逐渐注入下部气体存储室内, 直至存储室内气体压力达到 2.5 MPa 时, 关闭阀门 1、阀门 2 和阀门 6;

(4) 打开阀门 8 和阀门 9, 气体逐渐由下部气体存储室内经由试件流向上部气体存储室内, 在此过程中, 记录试件上下部气体存储室内气体压力随时间的变化, 直至上下气体存储室内气体压力趋于平衡;

(5) 打开阀门 4、阀门 5、阀门 6 和阀门 7, 排除存储室内存储气体, 将轴向应力按 0.5 MPa 的梯度加载至下一应力水平, 直至轴向应力加载至 6 MPa 后, 以 0.5 MPa 的梯度对轴向应力进行卸载, 如此循环 5 次, 并在每个应力水平下重复步骤 (3) 和步骤 (4), 以便获取该应力水平下试件渗透率大小。

3 试验结果及分析

由于页岩试件具有低渗透性的特点, 故文中采用瞬态法对页岩试件渗透率进行计算, 其计算公式如下所示:

$$(p_u - p_f) = \Delta p_0 \times \frac{v_d}{v_u + v_d} \times e^{-\alpha t} \quad (1)$$

$$\alpha = -\frac{kA}{\mu c_f L} \times \left(\frac{1}{v_u} + \frac{1}{v_d} \right) \quad (2)$$

式中: k 为渗透率 (m^2); c_f 为气体可压缩系数 ($1/\text{Pa}$); μ 为动力黏度 ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$); L 和 A 分别为试件的长度 (m) 和面积 (m^2); v_u 和 v_d 分别为上、下部气体储藏室的体积 (m^3); p_u 为上部气体储藏室气体压力 (Pa); p_f 为气体最终平衡压力 (Pa); Δp_0 为初始压差 (Pa); t 为时间 (s); α 为半对数衰减曲线的斜率。

为消除试验离散性所带来的试验误差, 对每类试验均采用 3 个试件, 并用其平均值对试验结果进行分析。

3.1 各循环荷载下渗透率演化规律

各循环荷载作用下页岩试件渗透率演化规律如图 4 所示, 图中, n 为循环轴向应力和循环围压所对应的循环次数。由图可知:

对于循环轴向应力下含轴向层理的页岩试件而言, 随着轴向应力的加载, 试件渗透率基本维持不变, 即恒为 $1.47 \times 10^{-15} \text{ m}^2$; 当轴向应力增至一定值时, 试件渗透率出现些许下降, 其降幅为 $0.08 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 约为应力加载前的 5% 左右; 随着轴

向应力的卸载, 试件渗透率又逐渐恢复至原有水平; 随着轴向应力循环次数的增加, 渗透率发生突变所对应的有效轴向应力逐渐减小, 如加载路径下渗透率发生突变时的有效轴向应力依次为 4.25、3.77、3.77、3.72、3.29 MPa, 卸载段路径下渗透率发生突变的有效轴向应力依次为 4.26、3.79、3.29、3.25、3.24 MPa。由上述分析可知, 含轴向层理页岩试件在轴向应力循环加卸载过程中, 其渗透率基本保持不变 (如图 4(a) 所示)。

对于循环围压下含轴向层理的页岩试件而言, 围压加载过程中, 试件渗透率随有效围压的增加呈负指数式降低; 围压卸载过程中, 试件渗透率随有效围压的降低呈指数式增加; 同一循环次数、相同有效围压条件下, 加载路径下的试件渗透率明显大于卸载路径下的试件渗透率, 且二者的差值随有效围压的减小而增大; 同一有效围压作用下, 试件渗透率在加载路径与卸载路径下的差值随循环次数的增加而减小, 如随着循环次数的增加, 有效围压在 1.75 MPa 条件下的加载路径与卸载路径下试件渗透率的差值依次为 1.39×10^{-15} 、 0.95×10^{-15} 、 0.82×10^{-15} 、 0.75×10^{-15} 、 $0.08 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ (如图 4(b) 所示)。此外, 由图 4(b) 可知, 随着围压循环次数的增加, 含轴向层理页岩试件的渗透率在围压加载与卸载段内的平均变化幅值依次为 1.16×10^{-15} 、 0.88×10^{-15} 、 0.79×10^{-15} 、 0.76×10^{-15} 、 $0.76 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。相较图 4(a) 和图 4(b) 可知, 对含轴向层理页岩试件而言, 其渗透率在循环围压下的变化幅值要明显大于其在循环轴向应力下的变化幅值, 即其渗透率随有效应力的变化规律具有明显的各向异性。

对于循环轴向应力下含轴向宏观裂缝的页岩试件而言, 轴向应力加载过程中, 试件渗透率随轴向有效应力的增加近似以线性形式降低; 轴向应力卸载过程中, 试件渗透率随有效轴向应力的减小近似以线性形式增加; 相同有效轴向应力作用下, 试件渗透率随循环次数的增加呈逐渐增加的变化趋势, 如有效轴向应力在 8.75 MPa 条件下, 不同循环次数下的试件渗透率依次为 12.35×10^{-15} 、 12.48×10^{-15} 、 12.54×10^{-15} 、 12.60×10^{-15} 、 $12.60 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ (如图 4(c) 所示)。此外, 由图 4(c) 可知, 随着轴向应力循环次数的增加, 含轴向宏观裂缝页岩试件的渗透率在轴向应力加载与卸载段内的平均变化幅值依次为 0.41×10^{-15} 、 0.22×10^{-15} 、 0.22×10^{-15} 、 0.19×10^{-15} 、 $0.19 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。结合图 4(a) 和图 4(c) 可知, 循环轴向应力作用下, 含轴向宏观裂缝页岩试件渗透率随轴压的变化幅值相较含轴向层理页岩试件更为显著。

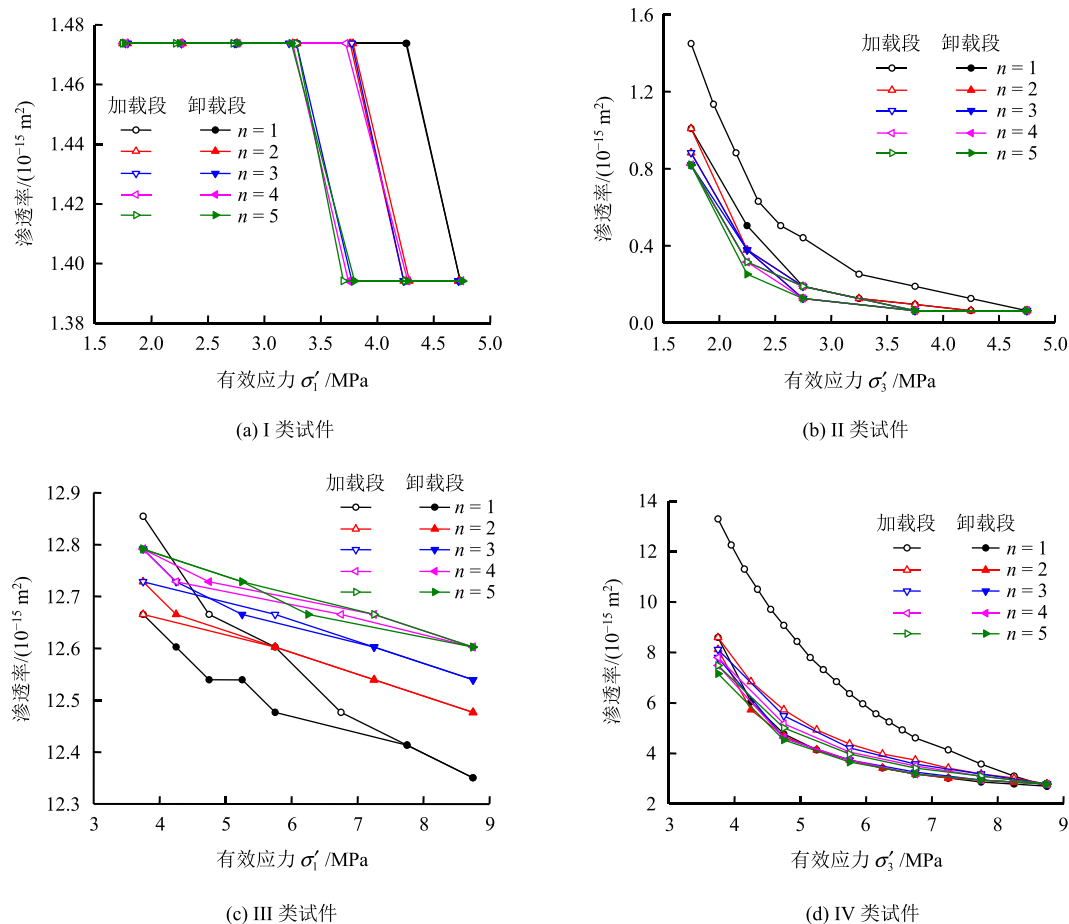


图4 各个循环荷载下渗透率-应力关系

Fig.4 Relationships between permeability and stress under each loading and unloading round

对于循环围压下含轴向宏观裂缝的页岩试件而言,其渗透率随循环围压的变化趋势与含轴向层理页岩试件随循环围压的变化规律基本一致,即随围压的增加呈负指数式降低,随围压的增加呈指数式增加,相同围压条件下,加载路径下的试件渗透率明显大于卸载路径下的试件渗透率,且二者的差值随围压的降低而增加,随循环次数的增加而减小。所不同的是,含轴向宏观裂缝页岩试件渗透率随围压的变化幅值要明显大于含轴向层理页岩试件渗透率随围压的变化幅值,如不同循环围压下,含轴向层理页岩试件渗透率的平均变化幅值依次为 8.24×10^{-15} 、 5.57×10^{-15} 、 5.17×10^{-15} 、 4.85×10^{-15} 、 $4.54 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ (如图4(d)所示)。此外,相较图4(c)和图4(b)可知,相较循环轴向应力下含轴向宏观裂缝页岩试件渗透率的变化幅值而言,循环围压下的变化幅值更为显著,即含轴向宏观裂缝页岩试件渗透率随有效应力的变化规律亦具有明显的各向异性。

综上所述,页岩试件渗透随有效应力的演化规律受试件内部结构类型(轴向层理或是轴向宏观裂

缝)、荷载方向(循环轴向应力或是循环围压)以及循环次数等因素的影响。

3.2 试件渗透率对其内部结构的响应规律

实际工程中,工程扰动普遍存在,进而导致工程岩体存在不同程度的损伤,加强页岩试件渗透率对其内部不同结构响应规律的研究,对于深入理解页岩气在工程岩体中的渗流规律具有重要意义。

表2为含轴向层理页岩试件在破坏前后渗透率的对比表。由表2可知,循环荷载作用前,含轴向层理和含轴向宏观裂缝页岩试件的渗透率依次为 $1.47 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 和 $13.02 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,即破坏后页岩试件的渗透率是破坏之前的8.86倍;经5次循环轴向应力作用后,含轴向层理页岩试件的渗透率为 $1.47 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,相较循环轴向应力前基本为发生改变,而含轴向宏观裂缝页岩试件的渗透率为 $12.79 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,相较循环轴向应力前降低了 $0.65 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,此时,破坏后页岩试件的渗透率是破坏之前的8.70倍;经过5次循环围压作用后,含轴向层理页岩试件的渗透率为 $0.82 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,相较循环围压前降低了 $0.23 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,而含轴向宏观裂

缝页岩试件的渗透率为 $7.48 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 相较循环围压前降低了 $5.54 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 此时, 破坏后页岩试件的渗透率是破坏之前的 9.12 倍。由上述分析可知, 破坏后页岩试件的渗透率相较破坏之前有大幅的提升, 并且页岩试件渗透率在破坏前后的比值受循环载荷的影响, 即破坏前后试件渗透率的比值与循环轴向应力呈负相关, 而与循环围压呈正相关。

因此, 对于页岩气隧道而言, 为提升隧道的施工安全, 应尽可能降低隧道内的瓦斯涌出量, 即应尽可能降低开挖围岩体损伤范围以及尽可能早的给予破碎围岩体以较强的支护措施。

表 2 试件破坏前后渗透率对比表 (单位: m^2)

Table 2 Comparison of the permeability before and after failure (unit: m^2)

试件	循环荷载前	5 次循环轴压后	5 次循环围压后
破坏前	1.47×10^{-15}	1.47×10^{-15}	0.82×10^{-15}
破坏后	13.02×10^{-15}	12.79×10^{-15}	7.48×10^{-15}

3.3 试件渗透率对荷载方向的响应规律

实际工程中, 岩体内部层理发育往往具有随机性, 而外界的施工扰动却常常具有定向性, 加强对荷载与层理之间夹角对页岩渗透率影响规律的研究具有重要工程意义。

定义页岩试件渗透率对应力的敏感性系数 C_k 为

$$C_k = \frac{1}{k_{n0}} \frac{\Delta k_n}{\Delta p_n} \quad (3)$$

式中: k_{n0} 为第 n 次循环前的试件渗透率; Δk_n 为第 n 次加载段渗透率的变化量; Δp_n 为第 n 次加载段应力的变化量。

不同试验条件下, 试件渗透率对应力的敏感性系数如表 3 所示。由表 3 可知: 试件破坏前, 5 次循环轴向应力内, 试件渗透率对轴向应力敏感性系数的均值为 0.018, 而对围压敏感性系数的均值为 0.311, 后者是前者的 17 倍左右; 试件破坏后, 5 次循环围压内, 试件渗透率对轴向应力敏感性系数的均值为 0.004, 而对围压敏感性系数的均值为 0.136, 后者是前者的 34 倍左右。由上述分析可知, 试件渗透率对围压的敏感性要远大于其对轴压的敏感性。

因此, 在页岩气隧道施工过程中, 为了尽可能的降低岩体的渗透率, 进而保证隧道的安全施工环境, 除了需要尽可能减小隧道围岩松动圈外, 还需要尽可能的保证沿垂直于页岩内层理的方向施工。

表 3 试件渗透率对应力的敏感性系数
Table 3 Sensitivity coefficient of the specimen permeability to stress

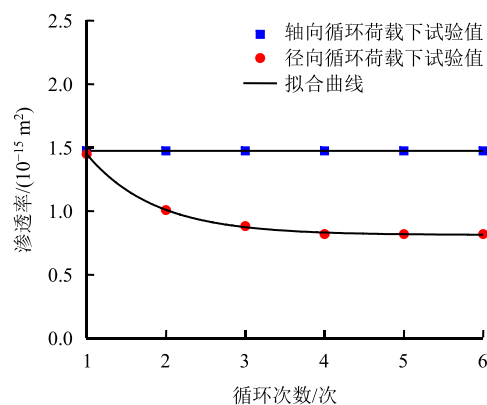
循环次数	轴向加卸载		围压加卸载	
	破坏前	破坏后	破坏前	破坏后
1	0.018	0.008	0.319	0.159
2	0.018	0.003	0.313	0.135
3	0.018	0.003	0.310	0.131
4	0.018	0.003	0.308	0.129
5	0.018	0.003	0.308	0.126

注: 轴向加卸载、围压加卸载破坏前、后敏感性系数平均值 $\bar{C}_k$ 分别为 0.018、0.004、0.311、0.136。

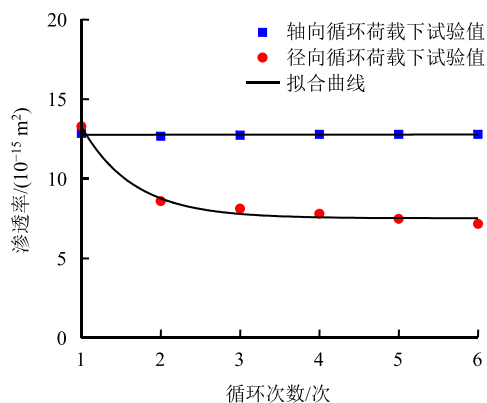
3.4 试件渗透率对荷载循环次数的响应规律

此外, 由于工程岩体所承受的荷载大多为循环荷载, 因此, 加强页岩渗透率随循环次数变化规律的研究亦具有重要的工程意义。

页岩试件渗透率随循环次数的演化规律如图 5 所示。由图可知, 对含轴向层理页岩试件而言, 循环荷载作用前试件渗透率为 $1.47 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 循环轴向应力下, 试件渗透率随循环次数的增加基本维持



(a) 试件破坏前



(b) 试件破坏后

图 5 渗透率与循环次数关系拟合曲线
Fig.5 Fitting curves of the relationship between permeability and cycle numbers

不变；循环围压作用下，试件渗透率随循环次数的增加而降低，其值依次为 1.01×10^{-15} 、 0.88×10^{-15} 、 0.82×10^{-15} 、 0.82×10^{-15} 、 $0.82 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。对含轴向裂缝页岩试件而言，循环荷载作用前试件渗透率为 $13.29 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ，循环轴向应力下，试件渗透率随循环次数的增加基本维持不变；循环围压作用下，试件渗透率随循环次数的增加而降低，其值依次为 8.60×10^{-15} 、 8.12×10^{-15} 、 7.80×10^{-15} 、 7.42×10^{-15} 、 $7.16 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。可见，无论是对含轴向层理页岩试件还是含轴向裂缝页岩试件而言，其渗透率均随循环次数的增加而降低，所不同的是，相较循环轴向应力而言，循环围压下的试件渗透率的降幅更大；试件在破坏前，随着围压循环次数的增加，试件渗透率逐渐减小，并在3次循环荷载作用后基本保持稳定，特别地，第1循环荷载内试件渗透率的降幅高达69.84%左右；同样地，试件在破坏后，随着围压循环次数的增加，试件渗透逐渐减小，并在5次循环荷载作用后基本保持稳定，特别地，第1循环荷载内试件渗透率的降幅高达80.72%左右。

由上述可知，无论含轴向层理页岩试件破坏与否，在循环围压作用下，试件渗透率随循环次数的增加而减小；循环围压作用下，第1循环内试件渗透率的降幅最为显著；一定次数的循环荷载作用后，试件的渗透率基本趋于稳定。

对图5中的试验结果拟合可得试件在破坏前后的渗透率随围压循环次数的变化函数，见表4。由表4可知，试件在循环围压作用下，其渗透率对循环次数的响应规律服从下式形式的指数函数：

$$k = a - b \times c^n \quad (4)$$

式中： k 为试样的渗透率； a 、 b 、 c 为与试件有关的参数。

式(4)为试件渗透率与围压循环次数之间的函数关系式，对式(4)进行求导可知：

$$k' = -b \ln c \times c^n \quad (5)$$

因此，参数 $-b \ln c \times c^n$ 可在一定程度上表征试件渗透率对循环次数变化程度的大小。结合表4可知，在第1循环阶段，即 $n=1$ 时，试件破坏前 $-b \ln c \times c^n = 0.75$ ，而试件破坏后 $-b \ln c \times c^n = 8.80$ ，故在第1循环加卸载阶段，破坏后试件渗透率的降低值要明显大于破坏前的；类似地，相同循环次数条件下，随着循环次数的改变，上述规律不发生明显的改变。此外，由式(4)还知，由于 $0 < c < 1$ ，当 $n \rightarrow \infty$ 时， $k \rightarrow a$ ，故 a 值代表试件经多次循环荷载作用后，渗透率的

最终稳定值。结合表4可知，经多次围压的循环作用后，破坏前后的试件的渗透率最终将稳定在 $0.812 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 和 $7.516 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 左右。

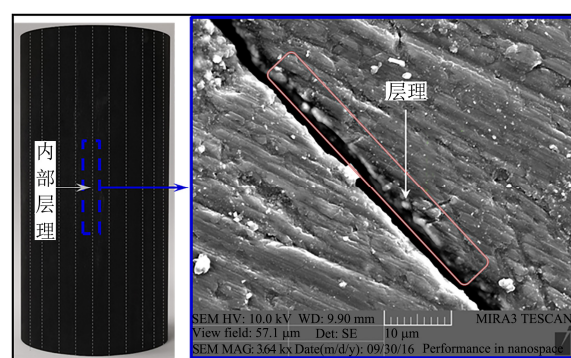
表4 循环围压下试件渗透率与循环次数的拟合函数
Table 4 Fitting functions between permeability and cycle numbers under cyclic confining pressure

试件	拟合曲线	相关系数 R^2
破坏前	$k = 0.812 + 2.05 \times 0.312^n$	$R^2 = 0.999$
破坏后	$k = 7.516 + 26.54 \times 0.217^n$	$R^2 = 0.980$

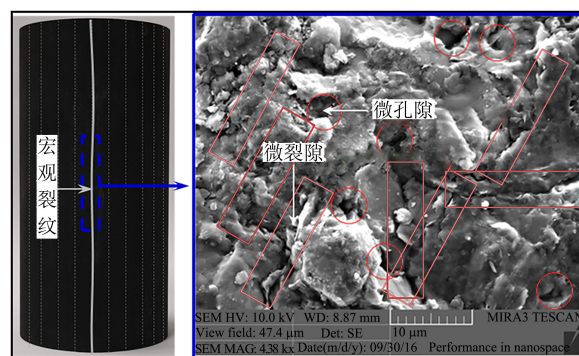
因此，还可通过提升围岩体支护应力施加频次来降低开挖隧道内瓦斯涌出量；并且第1次外力施加的效率为最优。

4 机制分析

图6为页岩试件切片的CT扫描图。其中，图6(a)为试件破坏前垂直层理面处电镜扫描图，由图6(a)可知，页岩试件内部有层理发育，且层理在试件内部呈定向性分布；图6(b)为试件破坏后平行于破裂面处的电镜扫描图，由图6(b)可知，页岩试件内部有大量微孔隙和微裂隙发育，并且微孔隙和微裂隙在试件内部呈随机性分布。



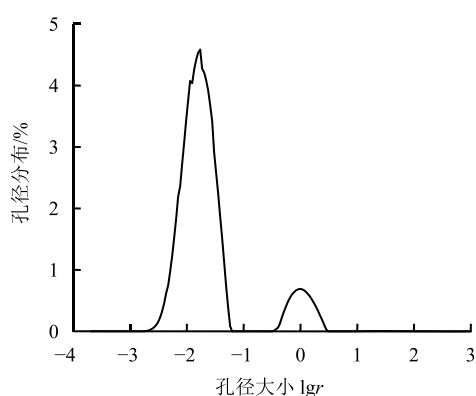
(a) 层理结构



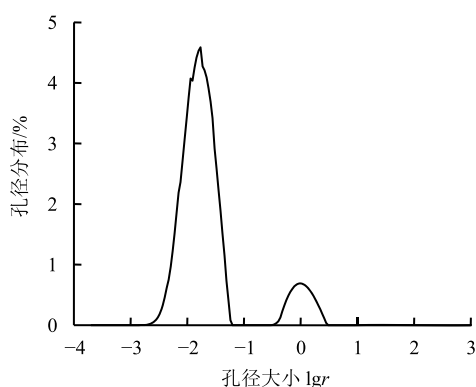
(b) 微孔隙/微裂隙结构

图6 试件切片的电镜扫描图
Fig.6 SEM images of specimen slices

为了解试件内部微缺陷（如微孔隙、微裂隙、层理以及宏观裂缝等）的尺度分布大小，对破坏前后页岩试件进行核磁共振试验，并基于 T_2 分布图获取试件内部孔径分布特征，结果如图 7 所示，图中， r 为孔径大小（ μm ）。由图可知：试件破坏之前，试件内部主要存在 3 种类型的微缺陷：微孔隙、微裂隙和层理，并且微孔隙和微裂隙孔径大小基本一致，即主要在 $0.001\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 之间分布，其均值约为 $0.01\ \mu\text{m}$ ，而层理孔径大小主要分布在 $0.32\sim 3.16\ \mu\text{m}$ 之间，其均值约为 $1\ \mu\text{m}$ ；试件破坏后，其内部缺陷除了微孔隙、微裂隙以及层理等原始缺陷之外，多了另外一种缺陷，即宏观裂缝，且相较于试件破坏之前，破坏后试件内部的微孔隙、微裂隙以及层理的孔径分布范围以及均值大小均发生显著变化，而其宏观裂缝孔径大小的分布范围主要集中在 $5.02\sim 31.62\ \mu\text{m}$ 之间，其均值约为 $10\ \mu\text{m}$ 左右。



(a) 含轴向层理页岩试件



(b) 含轴向裂缝页岩试件

图 7 试件孔径分布图

Fig.7 Sample aperture profiles

综上所述，在页岩试件破坏前，其内部渗流通道包括有微孔隙、微裂隙和层理；试件破坏后，其内部渗流通道包括有微孔隙、微裂隙、层理和宏观

裂缝，孔径大小在微孔隙/微裂隙、层理以及宏观裂缝之间均存在数量级上的差异，且试件内部的层理和宏观裂缝的分布均具有一定的方向性，即沿试件轴向方向展布。

由上述分析可知，试件破坏前，其渗透率的主控因素为层理；试件破坏后，其渗透率的主控因素为宏观裂缝，而二者对渗透率影响规律方面具有一致性，即与其开度大小成正比。相较于层理而言，宏观裂隙的开度大小有数量级上的提升，因此，破坏后试件渗透率相较于破坏前而言具有很大的提升。此外，无论是对层理还是宏观裂缝而言，影响其开度的主要原因来自于结构面两侧岩体的“毗合”作用，而该“毗合”作用与结构面粗糙度、作用于结构面法向方向的应力以及应力的循环次数等因素有关。由于层理以及宏观裂缝在试件内部均沿试件轴向方向分布，因此，围压是通过直接作用于层理或宏观裂缝来影响结构面开度，而轴向应力则是通过试件的泊松效应来间接影响结构面开度，故而相较于轴向应力而言，试件渗透率对围压的变化更为敏感；相较于层理而言，宏观裂缝表面更为粗糙，因此，破坏后试件对围压敏感性更为强烈。随着围压循环次数的增加，层理以及宏观裂缝之间的“毗合”作用逐渐达到极限状态，因此，试件渗透率对围压的敏感性随着循环次数的增加逐渐减低，最终其渗透率逐渐趋于恒定值。

综上，对含轴向层理的页岩试件而言，其内部渗流通道主要表现为层理，外界应力主要通过影响层理开度来影响其渗透率大小，而层理开度由其两侧结构面的“毗合”程度所决定；类似地，对于含轴向宏观裂缝的页岩试件而言，其内部渗流通道主要表现为宏观裂缝，外界应力主要通过影响宏观裂缝开度来影响其渗透率的大小，裂缝开度亦由其两侧的“毗合”程度所决定。

5 结 论

基于对含轴向层理和含轴向裂缝页岩试件在循环轴向荷载和循环围压下渗透率的演化规律的研究，得出以下几点结论：

(1) 对于含轴向层理页岩试件而言，循环轴向应力加卸载过程中，试件渗透率随轴向应力的加载与卸载基本不发生改变，循环围压加卸载过程中，试件渗透率随围压的增加呈负指数式降低，随围压的减小呈指数式增加；对于含轴向裂缝页岩试件而言，循环轴向应力加卸载过程中，试件渗透率随轴向应力的加载近似线性减小，随轴向应力的卸载近

似呈线性增加, 循环围压加卸载过程中, 试件渗透率随围压的增加呈负指数式降低, 随围压的降低呈指数式增加。

(2) 含轴向裂缝页岩试件渗透率较含轴向层理页岩试件有大幅提升。其中, 循环荷载作用前, 轴向裂缝页岩试件渗透率是轴向层理页岩试件的 8.86 倍; 5 次轴向应力加卸载后, 轴向裂缝页岩试件是轴向层理页岩试件的 8.70 倍; 5 次围压加卸载后, 轴向裂缝页岩试件是轴向层理页岩试件的 9.12 倍。

(3) 对于含轴向层理页岩试件和含轴向裂缝页岩试件而言, 其渗透率对围压的敏感性远大于其对轴压的敏感性。其中, 含轴向层理页岩试件对围压的敏感性系数为 0.311, 对轴压的敏感性系数为 0.018, 二者的比值约为 17.28; 含轴向裂隙页岩试件对轴压的敏感性为 0.004, 对围压的敏感性系数为 0.136, 二者比值约为 34。

(4) 循环轴向应力下, 试件渗透率几乎不随循环次数的增加而发生变化; 循环围压下, 试件渗透率随着循环次数的增加呈指数式降低; 试件渗透率随循环围压的降幅主要集中在第 1 循环阶段, 如该阶段内破坏前试件的降幅约为 69.84%, 破坏后试件的降幅约为 80.72%。

(5) 基于以上研究成果可知, 对于页岩气隧道施工安全而言, 可通过降低围岩松动圈、尽可能沿垂直于层理方向开挖以及提升对开挖围岩体支护的频次等相关措施, 来有效降低隧道内的瓦斯涌出量。

参 考 文 献

- [1] 李建忠, 董大忠, 陈更胜, 等. 中国页岩气资源前景与战略地位[J]. 地质与勘探, 2009, 29(5): 11-16.
LI Jian-zhong, DONG Da-zhong, CHEN Geng-sheng, et al. Shale gas resource prospect and strategic position in China[J]. **Geology and Exploration**, 2009, 29(5): 11-16.
- [2] 董大忠, 王玉满, 李新景, 等. 中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 19-32.
DONG Da-zhong, WANG Yu-man, LI Xin-jing, et al. New breakthroughs and development prospects of shale gas exploration and development in China[J]. **Natural Gas Industry**, 2016, 36(1): 19-32.
- [3] 程勇, 陈国栋, 尹琼, 等. 中国页岩气勘探开发现状及北美页岩气的启示[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2017, 33(1): 16-24.
CHENG Yong, CHEN Guo-dong, YIN Qiong, et al. Shale gas exploration and development in China and its implications for North America[J]. **Journal of Kunming Metallurgical College**, 2017, 33(1): 16-24.
- [4] 龙胜祥, 曹艳, 朱杰, 等. 中国页岩气发展前景及相关问题初探[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(6): 847-853.
LONG Sheng-xiang, CAO Yan, ZHU Jie, et al. Shale gas development prospect and related problems in China[J]. **Oil & Gas Geology**, 2016, 37(6): 847-853.
- [5] 张闯. 公路隧道页岩段瓦斯涌出规律及其治理措施研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
ZHANG Chuang. Study on gas emission law and control measures in shale section of highway tunnel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [6] 康小兵. 隧道工程瓦斯灾害危险性评价体系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
KANG Xiao-bing. Study on gas hazard evaluation system of tunnel engineering[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- [7] 崔景伟, 邹才能, 朱如凯, 等. 页岩孔隙研究新进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(12): 1319-1325.
CUI Jing-wei, ZOU Cai-neng, ZHU Ru-kai, et al. New advances in shale porosity research[J]. **Advances in Earth Science**, 2012, 27(12): 1319-1325.
- [8] ZHANG J, SCHERER G W. Permeability of shale by the beam-bending method[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2012, 53: 179-191.
- [9] CHEN S, HAN Y, FU C, et al. Micro and nano-size pores of clay minerals in shale reservoirs: implication for the accumulation of shale gas[J]. **Sedimentary Geology**, 2016, 342: 180-190.
- [10] SANG G, ELSWORTH D, MIAO X, et al. Numerical study of a stress dependent triple porosity model for shale gas reservoirs accommodating gas diffusion in kerogen[J]. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 2016, 32: 423-438.
- [11] 魏明强, 段永刚, 方全堂, 等. 页岩气藏孔渗结构特征和渗流机理研究现状[J]. 油气藏评价与开发, 2011, 1(4): 73-77.
WEI Ming-qiang, DUAN Yong-gang, FANG Quan-tang, et al. Current research situation of porosity & permeability characteristics and seepage mechanism of shale gas reservoir[J]. **Reservoir Evaluation and Development**, 2011, 1(4): 73-77.
- [12] SINGH H, JAVADPOUR F. Langmuir slip-Langmuir

- sorption permeability model of shale[J]. **Fuel**, 2016, 164: 28-37.
- [13] GAO J, YU Q, LU X. Apparent permeability and gas flow behavior in carboniferous shale from the Qaidam Basin, China: an experimental study[J]. **Transport in Porous Media**, 2016, 116(2): 585-611.
- [14] LI M, YIN G, XU J, et al. Permeability evolution of shale under anisotropic true triaxial stress conditions[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2016, 165: 142-148.
- [15] 张宏学, 刘卫群. 页岩气开采的相关实验、模型和环境效应[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 85-100.
ZHANG Hong-xue, LIU Wei-qun. Relevant experiments, models and environmental effect of shale gas production[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Suppl.2): 85-100.
- [16] 张宏学, 刘卫群, 朱立. 页岩储层裂隙渗透率模型和试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 719-729.
ZHANG Hong-xue, LIU Wei-qun, ZHU Li. Fracture permeability model and experiments of shale gas reservoirs[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 719-729.
- [17] 张宏学, 刘伟群. 非平衡解吸状态下页岩气储层渗透率演化机制[J]. 岩土力学, 2021, 42(10): 2696-2704.
ZHANG Hong-xue, LIU Wei-qun. Permeability evolution mechanism of shale gas reservoir under non-equilibrium desorption state[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(10): 2696-2704.
- [18] 汪吉林, 刘桂建, 王维忠, 等. 川东南龙马溪组页岩孔裂隙及渗透性特征[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 772-777.
WANG Ji-lin, LIU Gui-jian, WANG Wei-zhong, et al. Characteristics of pore-fissure and permeability of shales in the Longmaxi formation in Southeastern Sichuan Basin[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(5): 772-777.
- [19] KWON O, KRONENBERG A K, GANGI A F, et al. Permeability of illite-bearing shale: 1. anisotropy and effects of clay content and loading[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2004, 109(B10): jb003052.
- [20] NING Y, HE S, CHEN T, et al. Simulation of shale gas transport in 3D complex nanoscale-pore structures using the lattice Boltzmann method[J]. **SPE Asia Pacific Unconventional Resources Conference and Exhibition**, 2015: <http://doi:10.2118/176997-ms>.
- [21] HELLER R, VERMYLEN J, ZOBACK M. Experimental investigation of matrix permeability of gas shales[J]. **AAPG Bulletin**, 2014, 98(5): 975-995.
- [22] SONG W, YAO J, LI Y, et al. Apparent gas permeability in an organic-rich shale reservoir[J]. **Fuel**, 2016, 181: 973-984.
- [23] 陈天宇, 冯夏庭, 杨成祥, 等. 含气页岩渗透率的围压敏感性和各向异性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(4): 639-643.
CHEN Tian-yu, FENG Xia-ting, YANG Cheng-xiang, et al. Research on confining pressure sensitivity and anisotropy for gas shale permeability[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2014, 31(4): 639-643.
- [24] 蒋长宝, 陈昱霏, 尹光志, 等. 中间主应力与层理方向对页岩力学和渗透特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1570-1578.
JIANG Chang-bao, CHEN Yu-fei, YIN Guang-zhi, et al. Experimental study on the effect of intermediate principal stress and bedding direction on mechanical properties and permeability of shale[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(7): 1570-1578.
- [25] 彭辉华, 周雷, 卢义玉. 甲烷气通过页岩粗糙裂隙特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 2): 3644-3652.
PENG Hui-hua, ZHOU Lei, LU Yi-yu. Experimental study on conductivity of rough shale fractures using methane[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl.2): 3644-3652.
- [26] 马占国, 缪协兴, 李兴华, 等. 破碎页岩渗透特性[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 260-264.
MA Zhan-guo, MIAO Xie-xing, LI Xing-hua, et al. Permeability of broken shale[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2007, 24(3): 260-264.