



张培森, 许大强, 颜伟, 等. 不同围压下峰后循环载荷对砂岩力学及渗流特性的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 94-105.

ZHANG Peisen, XU Daqiang, YAN Wei, *et al.* Effect of post-peak cyclic load on mechanics and seepage characteristics of sandstone under different confining pressures[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 94-105.

## 不同围压下峰后循环载荷对砂岩力学及 渗流特性的影响研究

张培森<sup>1,2</sup>, 许大强<sup>1,2</sup>, 颜伟<sup>1,2</sup>, 胡昕<sup>3</sup>, 李霄<sup>1,2</sup>, 方家鑫<sup>1,2</sup>, 鞠照强<sup>1,2</sup>, 赵铭<sup>1,2</sup>

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 矿业工程国家级实验教学示范中心, 山东 青岛 266590; 3. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075)

**摘要:** 开采扰动导致煤层底板一定范围内岩体处于峰后状态, 受相邻巷道开挖及煤层开采作用促使峰后岩体经历循环加-卸载过程, 为探究不同地应力环境下峰后循环载荷作用对岩体结构的影响, 明晰煤层底板突水等灾害的孕育过程, 基于 Rock Top 多场耦合试验仪对砂岩开展了 5、10、15、20、25 MPa 围压峰后循环载荷试验研究。研究表明: ① 峰后循环载荷作用之前, 岩石单位渗透率均呈快速下降—趋于平稳—突然上升—突然下降—趋于平稳的变化规律, 峰后循环阶段, 岩石单位渗透率则与轴向载荷近乎呈倒置关系; ② 岩石弹性模量、裂隙闭合应力、起裂应力、损伤应力、峰值应力、残余应力均与围压呈正相关, 泊松比则随围压增大呈先增大后减小的变化特点; ③ 5、10 MPa 围压下, 岩石出现间歇性破坏, 脆性破坏特征有所减弱, 15、20、25 MPa 围压下, 岩石脆性破坏特征明显, 岩石破坏特征由岩石本身性质所决定; ④ 峰后轴向载荷主要对岩石渗透率增大起促进作用, 但该促进作用较围压对岩石渗透率的抑制作用弱, 围压为影响岩石峰后渗透率变化的主导因素; ⑤ 不同围压下, 岩石均产生了一条贯穿剪切裂纹, 但随围压增大, 岩石破坏程度逐渐减弱, 破坏模式趋于简单。

**关键词:** 岩石力学; 峰后循环载荷; 力学特性; 渗流特性; 破坏模式

**中图分类号:** TD74 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2023)07-0094-12

### Effect of post-peak cyclic load on mechanics and seepage characteristics of sandstone under different confining pressures

ZHANG Peisen<sup>1,2</sup>, XU Daqiang<sup>1,2</sup>, YAN Wei<sup>1,2</sup>, HU Xin<sup>3</sup>, LI Xiao<sup>1,2</sup>, FANG Jiabin<sup>1,2</sup>, JU Zhaoqiang<sup>1,2</sup>, ZHAO Ming<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory for Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center for Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** The mining disturbance causes the rock mass in a certain range of the coal seam floor to be in a post-peak state. Due to the excavation of adjacent roadways and the mining of coal seams, the post-peak rock mass undergoes a cyclic loading-unloading process. In order to explore the influence of post-peak cyclic loading on rock mass structure under different in-situ stress environments and clarify the gestation process of disasters such as water inrush from coal seam floor, post-peak cyclic loading tests of sandstone under 5, 10, 15, 20, 25 MPa confining pressure were carried out based on Rock Top multi-field coupling tester. The results show that: ① Before the post-peak cyclic loading, the unit permeability of rock shows a rapid decline-tend to be stable-sudden rise-sudden decline-tend to be stable. In the post-peak cycle stage, the unit permeability of rock is almost inverted with the axial load. ② Rock elastic modulus, crack closure stress, crack initiation stress, damage stress, peak stress and residual stress are positively correlated with confining pressure, while Poisson's ratio

收稿日期: 2023-03-21 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0384

基金项目: 国家重点研发计划子任务资助项目(2018YFC0604702); 国家自然科学基金资助项目(51379119); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2021ME086)

作者简介: 张培森(1977—), 男, 山东曹县人, 教授, 博士。E-mail: peisen\_sky@163.com

通讯作者: 许大强(1997—), 男, 甘肃高台人, 硕士研究生。E-mail: 840684859@qq.com

increases first and then decreases with the increase of confining pressure. ③ Under the confining pressure of 5 and 10 MPa, the intermittent failure of rock occurs, and the brittle failure characteristics are weakened. Under the confining pressure of 15, 20 and 25 MPa, the brittle failure characteristics of rock are obvious, and the failure characteristics of rock are determined by the properties of rock itself. ④ The post-peak axial load mainly promotes the increase of rock permeability, but the promotion effect is weaker than that of confining pressure on rock permeability, and confining pressure is the dominant factor affecting the post-peak permeability change of rock. ⑤ Under different confining pressures, a through-shear crack occurs in all rocks, but with the increase of confining pressure, the degree of rock failure gradually weakens and the failure mode tends to be simple.

**Key words:** rock mechanics; post-peak cyclic load; mechanical properties; seepage characteristics; failure mode

## 0 引言

煤层底板突水问题可归结为水-岩-应力相互作用下的复杂岩体力学问题<sup>[1]</sup>。煤层开采过程中,造成煤层底板岩体应力重新分布,导致煤层底板一定范围内的岩体处于峰后状态<sup>[2-3]</sup>,在集中应力和承压水共同作用下,煤层底板岩体裂隙进一步发育并导通承压含水层,最终诱发突水灾害<sup>[4-5]</sup>。另外,处于峰后状态的岩体受相邻巷道开挖及煤层开采作用而重新加载,复杂开采扰动效应导致峰后岩体连续经历卸载—加载—再卸载—再加载等循环过程,这将对施工安全和稳定性带来巨大威胁<sup>[6-8]</sup>。因此,研究峰后循环荷载作用下岩石力学及渗流特性,不仅在理论认知上具有重要意义,而且对实际工程应用也具有一定参考价值。

岩石力学行为可由相关岩石力学参数进行定量表征,这些参数既可从钻孔中直接获取,也可通过室内试验获取。以往研究表明,处于循环荷载状态下岩石所表现出的力学行为较常规加载更为复杂,循环荷载作用可导致岩石峰值强度有所降低<sup>[9]</sup>,并使岩石应力-应变曲线出现明显滞后现象,SRINIVASAN等<sup>[10]</sup>根据加载后岩石能够保留应力的特性,将岩石样品分为不同程度的岩石应力记忆,认为初始加载和岩石破裂所造成的较高损伤是岩石应力记忆较差的原因;赵军等<sup>[11]</sup>基于不同围压下的常规三轴及循环加卸载试验,发现不同围压下两种应力路径岩石均呈现明显脆性破坏特征,峰值强度、损伤应力随围压线性增大,弹性模量、起裂应力随围压先增大后减小,泊松比随围压先增大后保持不变或减小。循环加卸载条件下岩石损伤行为研究主要集中于岩石裂纹扩展、损伤及贯通<sup>[12]</sup>,李树刚等<sup>[13]</sup>通过开展单调加载及分级循环加卸载试验发现不同加载路径下试样破坏模式均为拉剪复合破坏,破坏形态呈“X”状;刘向御等<sup>[14]</sup>研究认为,岩样原始孔裂隙分布状态对致裂部位及破坏形式起主控作用,在循环荷载作用下,岩样破裂均以剪切破裂为主,并次生了张性破裂;

MENG等<sup>[15]</sup>提出了基于峰值后循环加卸载试验的后续岩石屈服模型。基于上述分析可知,循环荷载作用易造成岩石疲劳损伤,该损失作用不仅导致岩石基本力学参数发生明显改变,也可使岩石破坏形态及破坏模式出现显著差异,其中,岩石所受应力水平是造成岩石性质出现差异的主要原因,岩石破坏形态及破坏模式则主要受初始应力环境和破坏应力所控制。因此,针对不同工程条件,基于不同应力水平,岩石力学特性及破坏特征将会存有差异。

地下岩体往往遭受水-岩相互作用,自由水存在降低岩石强度的同时也影响着岩石破坏程度及方式<sup>[16]</sup>,杨科等<sup>[17]</sup>通过对不同含水率砂岩进行循环加卸载试验,发现不同含水率砂岩破坏模式由张拉-劈裂破坏向拉-剪混合破坏过渡,饱和状态时则呈现单一剪切破坏。同时,地下岩体在应力场和渗流场共同作用下也发生了复杂的渗透率演化行为,胡大伟等<sup>[18]</sup>从轴向变形角度对渗透率演化规律进行了研究,发现随轴向变形增加,初始压密阶段和弹性变形阶段岩石渗透率均匀减小,循环荷载可引起渗透率产生不可恢复现象;张培森等<sup>[19]</sup>分析了循环荷载作用下峰前峰后岩石渗透性差异,发现峰前渗透率随应力差增大呈现阶段性变化,峰后渗透率则与应力差呈正相关;王如宾等<sup>[20]</sup>研究发现砂岩破坏过程中渗透率演化规律与应力-应变关系密切相关,呈现阶段性变化特征,且无论是加载破坏还是卸荷破坏,岩石渗透率快速增长阶段对应着岩石体积剧烈扩容膨胀,岩石渗透率峰值滞后或超前于应力-应变峰值,这种现象与岩石介质本身特性有关<sup>[21]</sup>;王伟等<sup>[22]</sup>进一步研究了围压和渗压对岩样变形各阶段渗透率的影响,结果表明围压对岩石渗透率的影响较渗压对其影响显著,随围压增大,渗透率逐级减小<sup>[23]</sup>,张闯等<sup>[24]</sup>则进一步研究发现,岩石渗透率随围压增加以负指数形式下降,随围压减小以指数形式增加,随轴向应力加载和卸载基本不发生明显改变。基于上述分析可知,造成岩石力学及渗流特性出现差异的原因主要有2个方面:①由岩石本身性质所决定;②由岩石所

处应力环境所决定,其中包括轴压、围压及水压等作用。

综上所述,上述研究主要以不同应力路径及岩石状态为前提,从特征应力、特殊阶段等方面入手,深入揭示了循环载荷作用下岩石力学及渗流特性,详细阐述了岩石劣化损伤机理,研究成果对正确认识和预测地下工程岩体灾害起到了指导作用。然而,由于试验条件所限,目前研究主要集中于峰前循环载荷作用下岩石力学及渗流特性,对峰后岩石相关性质研究仍然有限。值得关注的是,峰后岩石内部结构已经遭到破坏,出现了尺寸不一、形态复杂的软弱结构面或裂隙网络,该现象是导致岩石渗透率变化的内在原因<sup>[25]</sup>,渗透率演化过程则可直接反映岩体发生突水的可能性。因此,基于应力-渗流耦合作用下,开展5种围压峰后循环载荷试验,分析受载岩样强度、变形特征及渗流特性,以期为不同应力环境下采矿及岩土工程安全问题提供参考。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

砂岩广泛分布于地壳中,隶属沉积岩,是地下工程领域常见的岩石类型之一。试验材料选用均质性较高、离散性较小的云南红砂岩,外观呈红褐色,取芯自完整岩块相邻部位,无明显节理、裂隙等。依据工程岩体试验方法标准<sup>[26]</sup>,制备尺寸为 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 标准圆柱试样(图1),保证岩样上、下端面平整度不超过 $0.03\text{ mm}$ ,轴向偏差不得超过 $0.25^\circ$ ,以满足试验要求。



图1 标准岩石试样

Fig.1 Standard rock samples

试验通过对随机选取的砂岩薄片进行SEM电镜扫描、岩样粉末XRD全岩分析及黏土检测<sup>[27]</sup>,最终鉴定结果为细粒石英砂岩,显微结构描述为细粒砂状结构,块状构造,孔隙式胶结,砂岩平均孔隙率 $0.167$ ,平均密度 $2\ 396\text{ kg/m}^3$ 。砂岩电镜扫描图像如图2所示,矿物含量见表1。此外,试验前采用真空抽气法对砂岩进行6 h强制饱水处理<sup>[28]</sup>,并对强制饱

水后的砂岩采用JSR-DPR 300超声波设备进行声速测试,剔除波速异常砂岩,从而尽可能排除因砂岩离散性对试验结果造成影响。

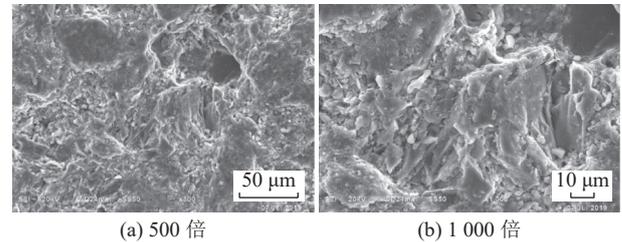


图2 岩样电镜扫描图貌

Fig.2 Electron microscope scanning image of rock samples

表1 岩石矿物含量

Table 1 Mineral content of rock

岩屑物含量					孔隙物含量	%
石英	钾长石	斜长石	方解石	赤铁矿	黏土矿物	
64.5	2.2	12.4	13.3	1.1	6.5	

### 1.2 试验仪器

试验所用仪器为法国里尔科技大学研制的Rock Top多场耦合试验仪(图3),控压精度可达 $\pm 0.01\text{ MPa}$ 。该仪器内部设有自平衡系统,打开自平衡系统,围压室与自平衡腔室将连通并保持等压,轴向荷载加载到试件上的力直接为应力差,文献<sup>[27,29]</sup>介绍了试验仪的具体功能。

### 1.3 试验原理及过程

工程实践表明,受采掘扰动导致的塑性区煤层底板岩体是经历集中应力作用产生破坏后重新形成的平衡状态,这种状态从室内试验角度来看,类似于岩石峰后残余强度阶段,其中,采掘过程或相邻巷道开挖过程对煤层底板岩体所表现出的力学作用则是一个应力加卸载过程。因此,为探究峰后循环载荷作用下砂岩的渗流特性,试验将采用稳态法测其渗透率,稳态法测试计算原理一般为达西定律,为便于岩石渗透率测试与分析,做出如下假定<sup>[30-31]</sup>:①渗流水体为不可压缩流体;②恒压稳定流视为连续渗流;③岩体内部原生裂纹及孔隙分布较均匀,视为孔隙介质;④应力-应变过程中符合达西定律。

渗透率计算公式<sup>[18,23]</sup>为:

$$K_i = \frac{\mu L \Delta Q_i}{A \Delta P \Delta t_i} \quad (1)$$

式中: $K_i$ 为岩石在 $\Delta t_i$ 时间内的平均渗透率, $\text{m}^2$ ; $\mu$ 为流体黏滞系数,取 $\mu = 1.005 \times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ (水温 $20^\circ\text{C}$ ); $L$ 为渗流长度, $\text{m}$ ; $\Delta Q_i$ 为 $\Delta t_i$ 时间内通渗过岩石的流体体

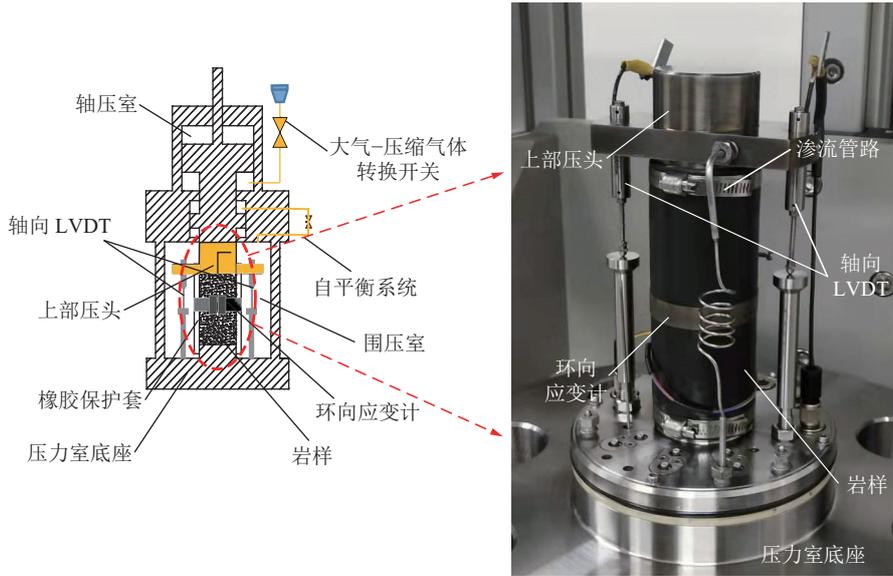


图 3 Rock Top 多场耦合试验仪  
Fig.3 Rock Top multi-field coupling tester

积,  $m^3$ ;  $A$  为岩石横截面积,  $m^2$ ;  $\Delta P$  为岩石渗流上、下游渗透压差, Pa;  $\Delta t_i$  为记录点间隔时间, s。

试验围压设置 5 个梯度, 分别为 5、10、15、20、25 MPa, 并在同一围压下开展 3~5 次平行试验。具体试验流程如图 4 所示。设置 5、10、15、20、25 MPa 围压, 其目的为模拟平均密度为  $2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  情况下地层埋深为 200、400、600、800、1000 m 地应力环境。此外, 为避免因应力加载速率对试验结果造成影响, 试验在围压与渗透压差保持恒定情况下, 轴向应力差加载过程均以位移控制方式  $0.02 \text{ mm/min}$  恒定速率进行加载, 卸载过程均以应力控制方式  $1 \text{ MPa/min}$  恒定速率进行卸载。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 岩石全应力-应变-渗流曲线

针对岩石试样, 体积应变作为总应变, 除了可由轴向应变和侧向应变表示(式(2)), 还可以由弹性体积应变和裂纹体积应变表示(式(3)), MARTIN<sup>[32]</sup> 率先提出用体积应变/裂纹体积应变与轴向应变关系模型来确定岩石特征应力, 并被广泛应用于脆性岩石三轴压缩试验成果分析。体积应变、弹性体积应变与裂纹体积应变计算公式如下:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad (2)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{ev} + \varepsilon_{cv} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ev} = \frac{1-2\nu}{E}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{cv} = \varepsilon_v - \frac{1-2\nu}{E}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (5)$$

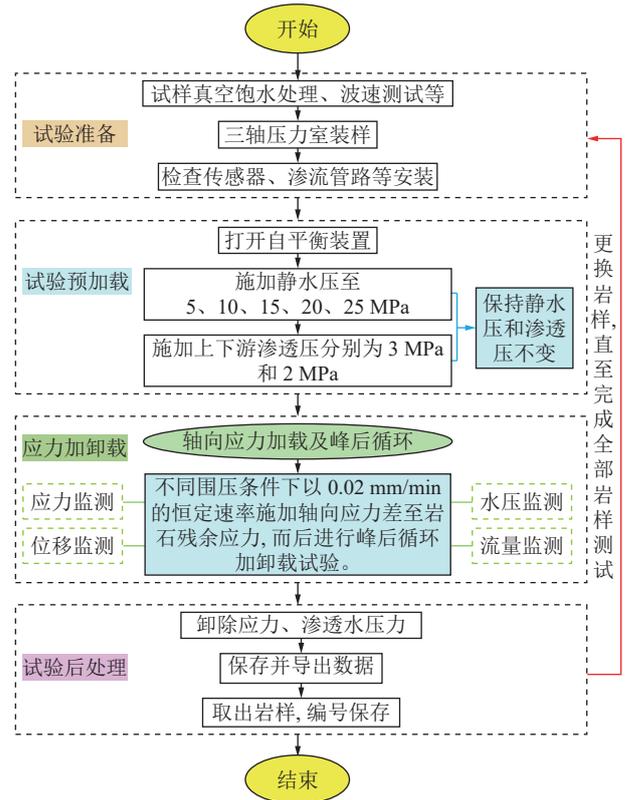


图 4 试验流程  
Fig.4 Test procedure

式中:  $\nu$  为泊松比;  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_3$ 、 $\varepsilon_v$ 、 $\varepsilon_{ev}$ 、 $\varepsilon_{cv}$  分别为轴向应变、侧向应变、体积应变、弹性体积应变与裂纹体积应变;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  与  $E$  分别为轴向应力、围压与弹性模量, MPa。

有关岩石渗流特性方面的研究, 胡大伟等<sup>[18]</sup> 从平均应力  $(\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$  和轴向应力循环加卸载 2 方面入手, 对渗透率演化规律进行了深入分析, 文中则引

入单位渗透率(渗透率与平均应力比值)概念,目的在于深入探究不同条件下应力作用对岩石渗透率的影响,明晰单位载荷作用下岩石渗透率变化特点。基于上述分析及试验结果发现,不同围压下,岩石轴向应力与岩石单位渗透率演化规律相一致,其区别主要在于因围压不同而导致岩石特征应力及单位渗透率量值存有差异,因此,笔者以 25 MPa 围压为例(图 5),给出了岩石全应力-应变-渗流曲线,重点分析不同阶段岩石轴向应力与单位渗透率的对应关系。

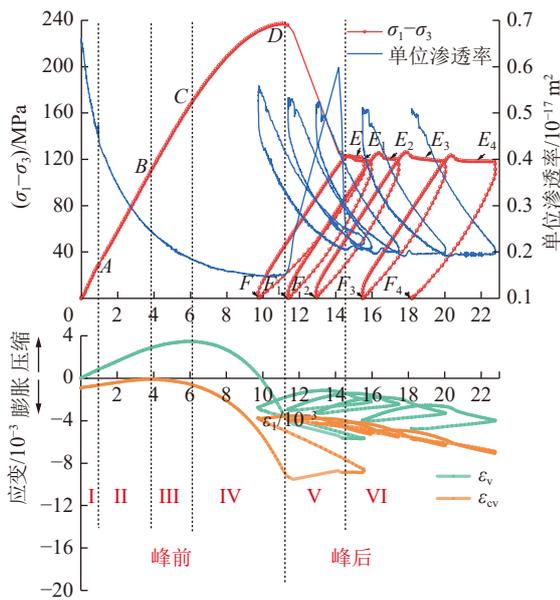


图 5 岩石全应力-应变-渗流曲线

Fig.5 Total stress-strain-seepage curve of rock

基于体积应变、裂纹体积应变、单位渗透率与轴向应变之间的关系,将岩石全应力-应变曲线分为了 6 个阶段(图 5),其中 I ~ IV(OA、AB、BC、CD)阶段分别为原生微裂隙压缩闭合阶段、弹性阶段、裂纹稳定拓展阶段及裂纹非稳定拓展阶段,其上限应力值分别对应岩石裂隙闭合应力( $\sigma_{cc}$ )、起裂应力( $\sigma_{ci}$ )、损伤应力( $\sigma_{cd}$ )和峰值应力( $\sigma_c$ ),第 V 阶段(DE)为岩石应力跌落阶段,最终达到岩石残余应力( $\sigma_{cr}$ ),第 VI 阶段为峰后循环阶段, $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 、 $E_4$  为循环上限, $F$ 、 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  则为循环下限,岩石裂纹体积应变和体积应变拐点对应的应力值分别为岩石起裂应力( $\sigma_{ci}$ )和损伤应力( $\sigma_{cd}$ )。峰前岩石单位渗透率随应力差增大而逐渐减小,但减小速率逐渐放缓,在接近岩石峰值应力时,岩石单位渗透率逐渐趋于水平,表明峰前轴向载荷作用对岩石渗透率影响程度逐渐减弱,岩石渗透率变化量逐渐减小;在应力跌落阶段,岩石单位渗透率先快速上升后突然下降,在峰后循环阶段,岩石单位渗透率则与轴向载荷呈近乎倒置的循环变化

规律,即轴向载荷与渗透率变化量呈负相关,峰前、峰后轴向载荷作用与岩石单位渗透率的对应关系具有相似性。该现象表明,宏观破裂面的形成对岩石渗透率的促进作用已占主导地位,随后伴随轴向应力跌落及围压束缚作用影响,岩石破断面间的开度逐渐减小,加之岩石破断面在位移载荷的持续作用下发生相对滑动,岩石碎屑堵塞原有渗流通道,导致岩石渗流受阻,岩石单位渗透率开始持续下降,峰后循环载荷作用阶段,岩石单位渗透率则随岩石裂隙启闭等效效应产生交替循环变化。综上可知,当岩石单位渗透率减小幅度变缓或趋于不变时,此时岩石已接近承载极限,因此可通过单位渗透率变化来定量表征岩石变形破坏过程。为进一步明确围压与轴向载荷作用对岩石渗透率的影响,图 6 为不同围压下岩石单位渗透率演化规律。

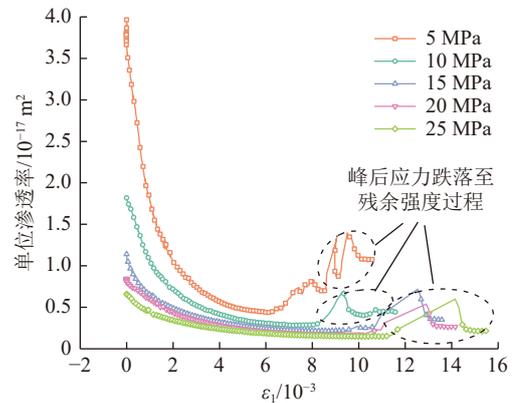


图 6 不同围压下岩石单位渗透率演化规律

Fig.6 Evolution law of rock unit permeability under different confining pressures

由图 6 可知,不同围压下岩石单位渗透率均随轴向应变增加均呈现出快速下降—趋于平稳—突然上升—突然下降—趋于平稳的发展趋势,表明岩石在整个破坏过程中,轴向载荷作用对岩石渗透率的影响能力呈强—弱更替变化规律;同时可以发现,随围压增大,岩石单位渗透率明显降低,但降低幅度逐渐变缓,表明围压作用可使岩石原生微裂隙、孔隙逐渐收缩,但随围压增大,岩石内部缺陷收缩能力逐渐减弱,导致岩石渗透率变化量逐渐减小,围压对岩石渗透率的影响程度逐渐减弱,这与轴向载荷作用导致岩石单位渗透率演变规律相一致。由此说明,轴向应力或围压作用下,岩石渗透率均呈现非线性变化特点。

峰后循环载荷作用下,岩石骨架颗粒及宏观破断面始终处于压缩—膨胀变化过程中,使其内部颗粒沿颗粒中心连线的轴向和侧向方向持续往复运动

[33], 当加载和卸载时颗粒之间压缩和拉伸路径不一致, 一方面导致岩石渗透率出现差异, 另一方面也导致岩石出现应变累积。假设峰后岩石第  $i$  次开始循环时轴向应变为  $\varepsilon_{1i}^e$ , 循环结束后轴向应变为  $\varepsilon_{1i}$ , 所产生的塑性损伤应变即为  $\Delta\varepsilon_{1i}^p$ ,  $n$  次循环造成累计损伤应变则为  $\Delta\varepsilon_1^p$ (见式(6)、(7))。

$$\Delta\varepsilon_{1(i)}^p = \varepsilon_{1(i)} - \varepsilon_{1(i)}^e \quad (6)$$

$$\Delta\varepsilon_1^p = \sum_{i=1}^n \Delta\varepsilon_{1(i)}^p \quad (7)$$

由式(6)、式(7)及图 5 可知, 随循环次数增多, 岩石累计损伤应变增大, 岩石受损加重, 因此, 在实际工程中, 应尽量避免对岩石进而二次破坏或多次破坏, 以尽可能减少岩石损伤。

### 2.2 岩石强度与变形特征

岩石是一种含有多裂纹的非均匀材料, 其变形破坏实质上是岩石内部裂纹萌生、扩展直至贯通破坏的动态演化过程[34], 不同围压下, 岩石所表现出的力学特性存有差异。图 7 为不同围压下岩石应力-应变曲线, 由图 7 可知, 5~25 MPa 围压下, 岩石脆性破坏特征明显, 岩石峰值应力与峰值应变均与围压呈正相关, 其原因在于围压越大, 岩石因围压束缚作用而导致岩石承载能力有所提高, 在相同位移加载速率下, 轴向载荷作用时间较长, 导致岩石峰值应变逐渐增大, 但当岩石进入峰后变形阶段后, 岩石侧向变形特征具有明显差异, 15、20、25 MPa 围压下, 岩石侧向及体积应变均随围压增大而增大, 而在 5、10 MPa 围压下, 岩石侧向应变及体积应变却随围压增大而减小, 且在岩石抵达残余应力时, 15、20、25 MPa 围压下岩石侧向及体积应变明显小于 5、

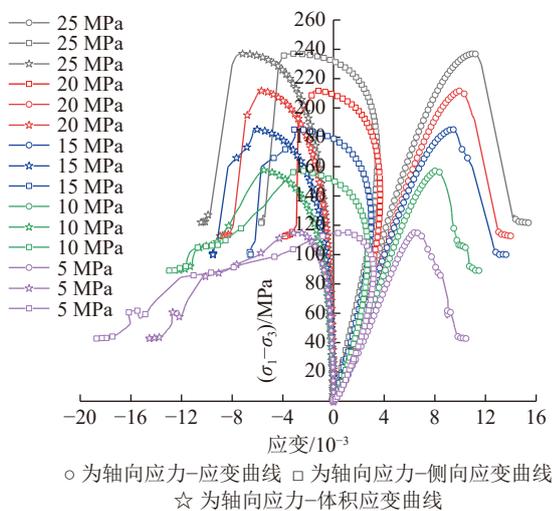


图 7 岩石应力-应变曲线  
Fig.7 Rock stress-strain curve

10 MPa。分析认为, 5、10 MPa 围压下, 岩石侧向束缚能力较小, 岩石抵抗侧向变形能力较弱, 在轴向载荷作用下, 岩石侧向变形明显, 而在 15、20、25 MPa 较高围压下, 受围压束缚影响, 轴向载荷作用不能导致岩石侧向发生明显变形, 仅在轴向载荷作用下因时间效应造成应变累积, 进而使岩石变形量逐渐增大。

由图 7 可知, 5、10 MPa 围压下, 岩石峰值应力并非瞬间减小至接近岩石残余应力, 而是表现出明显的间歇性破坏方式, 但这种间歇性破坏方式随围压增大而有所改善。一般认为, 随围压增大岩石破坏特征逐渐由脆性向塑性发生转变, 但本次试验中, 15、20、25 MPa 围压下, 三轴压力室传出了岩石破坏时发出的脆响声, 而 5、10 MPa 围压下, 岩石破坏时却未传出脆响声, 并从间歇性破坏过程来看, 岩石脆性破坏特征有所减弱。因此, 可以认为, 岩石破坏特征主要由岩石本身性质所决定, 仅有当围压达到一定值后, 岩石破坏特征才能由脆性向延性发生转变, 显然 25 MPa 围压值并未达到当前岩石发生延性破坏的临界围压值。

内摩擦角和黏聚力是 Mohr-Coulomb 强度准则中的重要参数, 在采矿和岩土工程界被广泛应用[35], 基于 Mohr-Coulomb 强度准则, 以轴向应力差为纵坐标, 围压为横坐标, 给出了不同围压岩石峰值应力拟合曲线, 如图 8 所示。

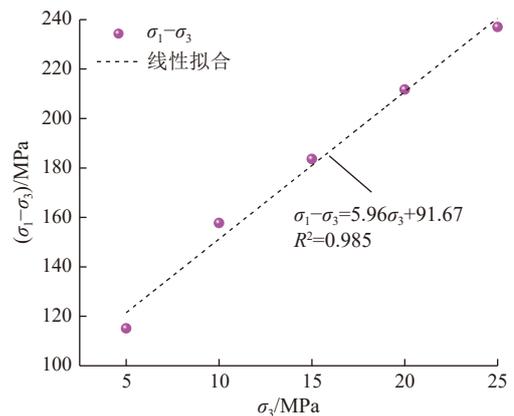


图 8 不同围压下岩石峰值应力  
Fig.8 Peak stress of rock under different confining pressures

该坐标形式下, 岩石强度包络线表达式见式(8), 具体为图 8 直线拟合公式, 而后利用式(9)、式(10)即可得到岩石黏聚力和内摩擦角, 并结合图 5, 给出了不同围压下的岩石特征应力值及基本力学参数, 见表 2。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k\sigma_3 + R_c \quad (8)$$

表2 不同围压下岩石特征应力值及基本力学参数

Table 2 Characteristic stress value and basic mechanical parameters of rock under different confining pressures

围压/ MPa	渗压/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	裂隙闭合应力/ MPa	起裂应力/ MPa	损伤应力/ MPa	峰值应力/ MPa	残余应力/ MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
5	1	19.12	0.18	11.15	31.49	88.71	115.08	42.60	18.78	45.45
10	1	22.06	0.24	15.66	47.18	101.32	157.69	85.53	18.78	45.45
15	1	24.84	0.16	20.19	73.61	124.69	183.60	101.22	18.78	45.45
20	1	25.47	0.14	22.39	98.23	153.04	211.68	113.20	18.78	45.45
25	1	28.71	0.12	30.69	112.11	170.16	236.99	121.99	18.78	45.45

$$k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (9)$$

$$R_c = \frac{2c(1 + \sin \varphi)}{\cos \varphi} \quad (10)$$

式中： $\sigma_1 - \sigma_3$  为轴向应力差，MPa； $\sigma_3$  为围压，MPa； $K$  为拟合直线斜率； $R_c$  为拟合直线与纵轴截距，理论上为岩石单轴抗压强度，MPa； $c$  为岩石黏聚力，MPa； $\varphi$  为岩石内摩擦角，(°)。

由表2可知，岩石弹性模量、裂隙闭合应力、起裂应力、损伤应力、峰值应力、残余应力均与围压呈正相关，其中，裂隙闭合应力约占峰值应力9%~13%，起裂应力约占峰值应力27%~48%，损伤应力约占峰值应力64%~78%，残余应力约占峰值应力37%~56%。泊松比则随围压增大表现出先增大后减小的变化特点，其原因在于5、10 MPa围压束缚作用较小，岩石侧向变形较显著，15、20、25 MPa围压束缚作用较大，抑制了岩石侧向变形，导致泊松比出现先增大后减小的变化特点，泊松比变化特点与图7所反映出的岩石应力应变曲线关系相对应。

### 2.3 峰后循环载荷对岩石渗透率的影响

峰后循环载荷作用下，岩石沿宏观破断面发生挤压滑动，该过程伴有裂纹萌生与发育，此举将对岩石渗透率增大起促进作用，与此同时，岩石颗粒、碎屑受挤压摩擦及水力搬运等作用出现剥落，进而堵塞渗流通道，此举将对渗透率增大起抑制作用，然而，关于峰后循环载荷作用下两者作用关系强弱还未能可知，因此，依据达西定律给出了不同围压峰后循环上限应力值与渗透率的关系，如图9所示，旨在重点分析围压与峰后循环载荷对岩石渗透率的影响。

由图9知，10、15、20、25 MPa围压下，岩石峰后循环上限应力值均与渗透率呈现出明显对应关系，即同一围压下，循环上限应力值越大，岩石渗透率就越大，而5 MPa围压下岩石循环上限应力值与渗透率变化关系则呈现相反的变化特点。分析认为，5 MPa围压下，岩石发生了明显间歇性破坏，岩石破

坏较为严重，岩石颗粒之间胶结程度较弱，渗压作用下易导致岩石颗粒发生搬运堆积，导致岩石渗流通道受阻，进而出现岩石承载力缓慢上升的同时渗透率缓慢下降，而其余围压下，循环上限应力值则主要对岩石起损伤作用，上限应力值越大，岩石损伤越明显，岩石渗流通道增多，渗透率增大，表明峰后轴向载荷作用下，岩石损伤对岩石渗透率的影响占据主导地位。5 MPa围压下由 $E_2$ 到 $E_3$ 其上限应力值明显减小，而渗透率显著增大，其原因在于，峰后循环载荷作用导致岩石二次损伤明显，出现又一明显破断面，岩石渗流通道增多，渗流抑制作用减弱，渗透率出现明显抬升。此外，可以发现除个别循环上限应力值随循环次数增加而增大外，整体呈现出循环上限应力值随循环次数增加而减小，原因在于循环载荷作用使岩石出现反复挤压滑动，进一步增加了岩石损伤，但同时也会因岩石颗粒填充及颗粒支撑效应导致岩石出现短暂应力增大现象。不同循环上限应力值对应的渗透率有所差异，表明循环加卸载过程中岩石渗透率存在一定的变化规律，因此，为进一步探究岩石在峰后循环加卸载过程中渗透率变化特点，图10、11分别为循环上、下限渗透率随围压的变化关系。

循环上限渗透率是围压和循环上限应力值共同作用的结果，由图10、图11可知，峰后岩石循环上限渗透率均与围压呈明显负相关，由此可以说明，虽然5~25 MPa围压下，岩石峰后循环上限应力值逐渐增大，但循环上限应力值对岩石渗透率增大的促进作用相对于围压对岩石渗透率增大的抑制作用弱，围压对峰后岩石渗透率的影响占据主导地位。此外，不同围压下，循环上限渗透率介于 $13.35 \times 10^{-17} \sim 21.65 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ，循环下限渗透率则介于 $12.65 \times 10^{-17} \sim 20.05 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ，同一围压下，峰后岩石循环上限渗透率均明显大于循环下限渗透率，表明峰后轴向载荷作用主要对岩石渗透率增大起促进作用，原因在于峰后循环载荷加载阶段岩石内部宏观破断面具有张

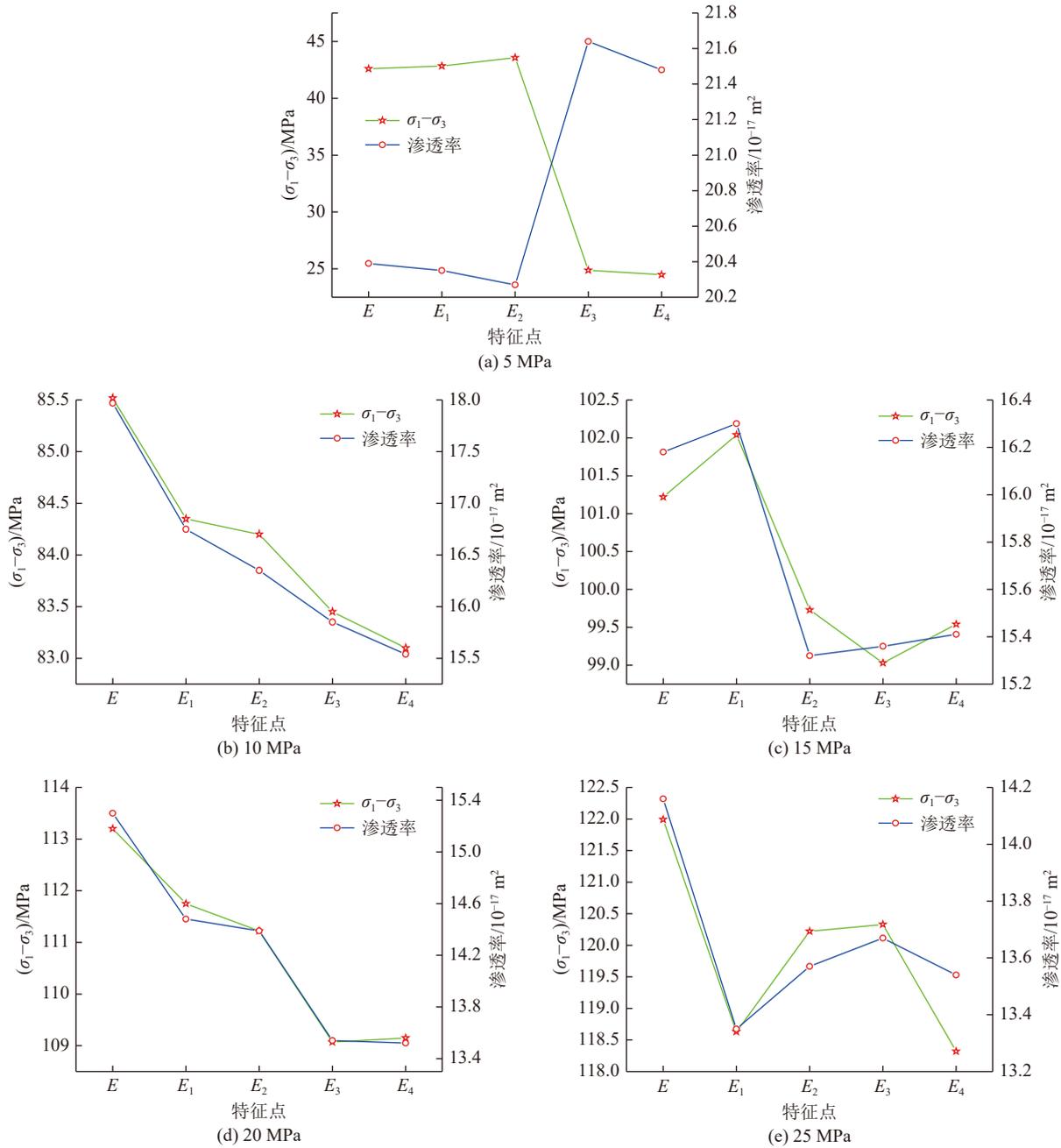


图 9 不同围压峰后循环上限应力值与渗透率的关系

Fig.9 Relationship between post-peak cyclic upper limit stress and permeability under different confining pressures

开趋势, 岩石渗流通道开启, 同时, 岩石破断面因轴向载荷作用发生滑移扩展进而萌生新的裂纹并相互促进, 导致岩石损伤程度加重, 岩石渗流通道增多, 渗透率增大, 峰后循环载荷卸载阶段, 因轴向应力释放及围压束缚作用影响, 岩石宏观破断面及内部裂纹具有闭合趋势, 岩石渗流通道变窄, 渗透率减小, 这与峰前<sup>[22]</sup>循环加卸载过程中渗透率变化规律恰好相反。基于上述分析可知, 围压因束缚作用可使岩石内部裂隙孔隙压缩闭合, 从而引起渗透率降低, 轴向载荷作用下, 既可使岩石内部缺陷进一步压缩闭合, 导致渗透率降低, 也可使岩石出现裂隙萌生及发

育, 导致渗透率增大, 但对峰后岩石来讲, 围压对岩石渗透率的影响占据主导地位。图 12 为不同特征应力(循环上、下限对应的应力值)岩石单位渗透率随围压的演化规律, 发现不同特征应力下岩石单位渗透率均与围压呈幂函数关系, 且具有较高拟合度, 具体拟合结果见表 3。

由图 12、表 3 可知, 无论循环上限还是循环下限, 均随循环次数增加, 围压与单位渗透率的相关性逐渐减弱, 但循环下限单位渗透率与围压的拟合效果明显优于循环上限。该现象表明, 围压与单位渗透率关系近乎符合幂函数关系, 即随围压增大, 岩石

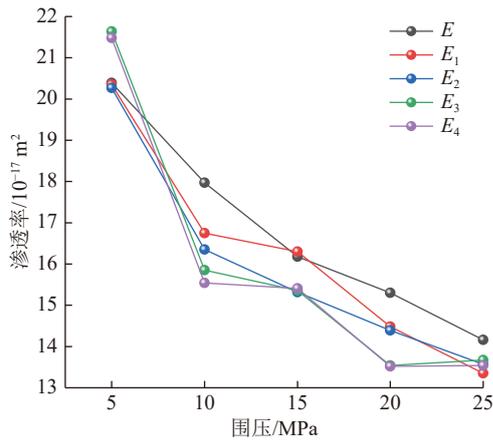


图10 不同围压下循环上限渗透率

Fig.10 Upper limit permeability under different confining pressures

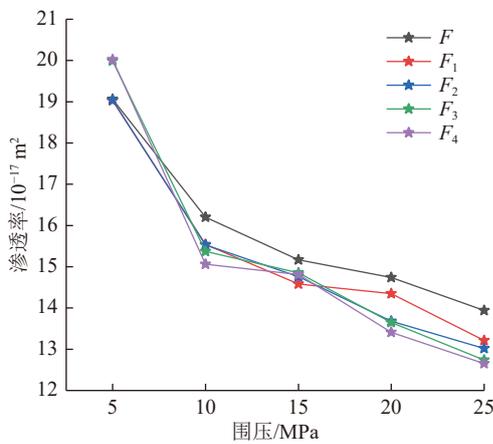


图11 不同围压下循环下限渗透率

Fig.11 Lower limit permeability under different confining pressures

渗透率变化量逐渐减小,而轴向载荷作用仅能影响岩石单位渗透率与围压的拟合效果,不能改变整体变化规律,但随着循环次数增多,轴向载荷作用影响效果逐渐凸显,其定量表现为拟合曲线相关系数随循环次数增加而逐渐减小。

### 2.4 岩石破坏前后渗透率演化特点

前文谈到,岩石渗透率演化规律主要由岩石裂隙萌生与扩展、岩石骨架颗粒压缩与堆积这2个因素所共同决定,前者对渗透率增大起促进作用,后者对渗透率增大起抑制作用,为明确峰后循环载荷作用下两者对渗透率作用关系强弱,图13为岩石破坏前后不同静水压下的渗透率。

由图13可知,除5 MPa静水压外,其余静水压条件下,岩石峰后较峰前渗透率明显降低,且随静水压增大,渗透率降低幅度逐渐增加,表明峰后循环载荷作用使岩石破断面发生相对滑动,岩石受持续反复摩擦作用导致岩石颗粒、碎屑出现剥落,堵塞岩石

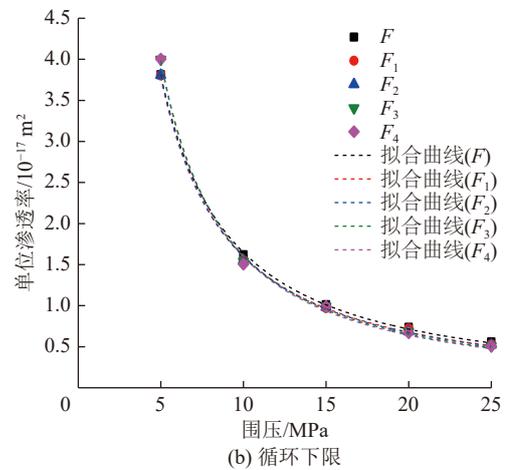
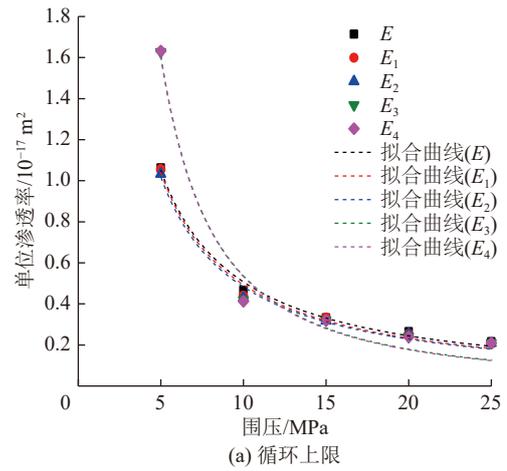


图12 不同特征应力岩石单位渗透演化规律

Fig.12 Evolution law of rock unit permeability under different characteristic stresses

表3 峰后特征应力单位渗透率拟合曲线

Table 3 Post-peak characteristic stress unit permeability fitting curve

特征点	拟合曲线	$R^2$
$E$	$y=5.72x^{-1.05}$	0.994
$E_1$	$y=5.94x^{-1.08}$	0.991
$E_2$	$y=5.79x^{-1.08}$	0.990
$E_3$	$y=20.56x^{-1.58}$	0.982
$E_4$	$y=21x^{-1.59}$	0.981
$F$	$y=26.53x^{-1.21}$	0.999
$F_1$	$y=28.08x^{-1.24}$	0.999
$F_2$	$y=28.47x^{-1.25}$	0.999
$F_3$	$y=32.52x^{-1.30}$	0.999
$F_4$	$y=33.33x^{-1.32}$	0.998

渗流通道,进而抑制岩石渗流,且该抑制作用占据主导地位。5 MPa围压下,岩石在峰后经历第三次循环时发生了明显破裂,导致岩石渗透率出现激增,此时岩石损伤对渗透率增大起明显促进作用,且该促进

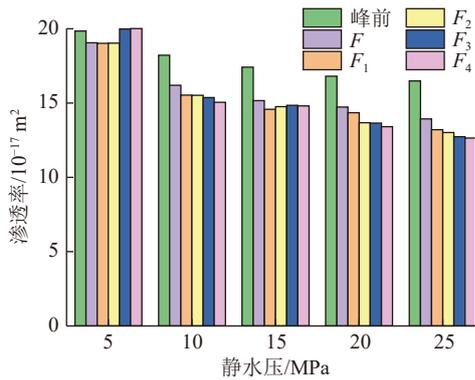


图 13 岩石破坏前后不同静水压下的渗透率

Fig.13 Permeability under different hydrostatic pressures before and after rock failure

作用占据主导地位,进而出现峰后静水压渗透率大于峰前。

### 2.5 岩石破坏模式分析

据前文分析可知,试验所用岩石试样在不同围压下均表现为脆性破坏,岩石破坏作为外力驱动下的失稳现象,可由岩石破坏模式进行直观反映。因此,图 14 给出了 5~25 MPa 围压下典型试样破坏模式。

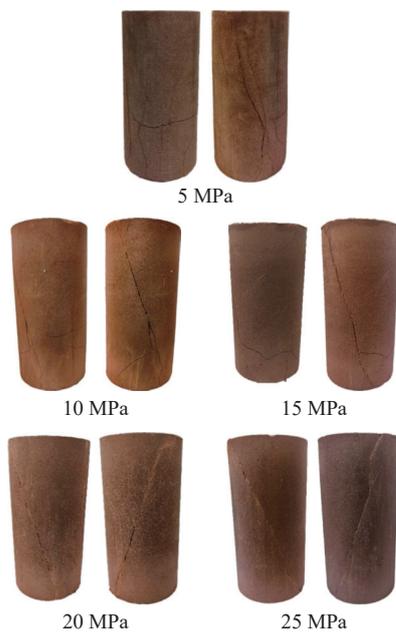


图 14 不同围压下岩石破坏模式

Fig.14 Failure modes of rock under different confining pressures

由图 14 知,5 MPa 围压下,岩石裂纹分布体现出高度无序性,即有明显贯穿剪切裂纹,也有张拉裂纹,共同组成了纵横交错的裂纹网络,岩石破坏非常严重;10、15 MPa 围压下,岩石裂纹发育逐渐改善,次生张拉裂纹明显减少,但都伴有一条明显横向裂纹与贯穿剪切裂纹相交,岩石破坏程度有所减弱。此

外,由于岩石本身具有不均匀性,岩石张拉裂纹无规则形状,且部分裂纹未完全贯通至岩石端部,由此可见,裂纹发育过程是从中部某个软弱面开始斜向延伸,最后贯通至岩石端部,原因在于岩石中部受端面效应影响较小,泊松效应显著<sup>[36]</sup>,所以岩石破坏是从中部某弱势面开始,而后直至岩石失稳,5、10、15 MPa 围压下岩石破坏模式也证实了这一点;20、25 MPa 围压下,岩石破坏模式则相对简单,主要由一条贯穿剪切裂纹构成,附带极少数张拉裂纹,未形成裂纹网络。综上分析认为,岩石作为天然损伤体,其内部以倾斜裂纹为主<sup>[11]</sup>,低围压作用下,岩石束缚作用较弱,轴向载荷作用使岩石内部倾斜裂纹会随裂纹滑移而扩展,进而生成张拉裂纹,较高围压则可抑制这一过程,使岩石张拉裂纹生成受阻<sup>[37]</sup>。综上可知,不同围压下岩石破坏模式共同点在于岩石均产生了一条明显贯穿剪切裂纹,区别在于随围压增大,岩石破坏程度逐渐降低,围压的存在可有效抑制岩石裂纹的产生,使岩石破坏模式趋于简单。

### 3 结 论

1) 岩石全应力-应变曲线可分为 6 个阶段, I ~ IV 阶段为峰前段, V ~ VI 阶段为峰后段。峰前岩石单位渗透率随应力差增大而减小,但减小速率逐渐放缓,接近岩石峰值应力时,岩石单位渗透率趋于水平;峰后循环阶段,岩石单位渗透率则与轴向载荷呈近乎倒置变化规律,即轴向载荷与岩石单位渗透率呈负相关。

2) 岩石弹性模量、裂隙闭合应力、起裂应力、损伤应力、峰值应力、残余应力均与围压呈正相关,泊松比则随围压增大呈先增大后减小的变化特点;5、10 MPa 围压下,岩石间歇性破坏明显,脆性破坏特征有所减弱,15、20、25 MPa 围压下,岩石未出现间歇性破坏,脆性破坏特征增强,表明岩石破坏特征由岩石本身性质所决定,仅有当围压达到一定值后,随围压增大岩石才可能由脆性向延性发生转变。

3) 峰后轴向载荷主要对岩石渗透率增大起促进作用,但该促进作用相对于围压对岩石渗透率增大的抑制作用弱,围压为影响岩石峰后渗透率变化的主导因素,且不同特征应力下围压与岩石单位渗透率均呈幂函数关系;不同围压下,岩石均具有一条明显贯穿剪切裂纹,区别在于随围压增大,岩石破坏程度、裂纹分布无序性逐渐减弱,张拉裂纹明显减少,裂纹网络逐渐消失,围压束缚作用使岩石破坏模式趋于简单。

## 参考文献(References):

- [1] 李杨杨, 张士川, 孙熙震, 等. 煤层采动底板突水演变过程可视化试验平台研制与试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3515-3524.  
LI Yangyang, ZHANG Shichuan, SUN Xizhen, *et al.* Development and experimental study on visualization test platform for water inrush evolution process of coal seam mining floor[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3515-3524.
- [2] 辛亚军, 安定超, 李梦远, 等. 高强度红砂岩峰后分级加载蠕变及强度特征[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1714-1723.  
XIN Yajun, AN Dingchao, LI Mengyuan, *et al.* Creep and strength characteristics of post-peak stage loading in high strength red-sandstone[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1714-1723.
- [3] 郭臣业, 鲜学福, 姜永东, 等. 砂岩加载试验峰后变形、破坏与应变能特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S2): 3892-3898.  
GUO Chenye, XIAN Xuefu, JIANG Yongdong, *et al.* Characteristics of deformation, failure and strain energy of sandstone under cycling loading in post-peak[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 3892-3898.
- [4] 曾一凡, 刘晓秀, 武强, 等. 双碳背景下“煤-水-热”正效协同共采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 538-550.  
ZENG Yifan, LIU Xiaoxiu, WU Qiang, *et al.* Theory and technical conception of coal-water-thermal synergistic co-extraction under the dual carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 538-550.
- [5] 李术才, 许振浩, 黄鑫, 等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例剖析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1041-1069.  
LI Shucai, XU Zhenhao, HUANG Xin, *et al.* Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1041-1069.
- [6] MENG Qingbin, ZHANG Mingwei, HAN Lijun, *et al.* Acoustic emission characteristics of red 400 sandstone specimens under uniaxial cyclic loading and unloading compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(4): 969-988.
- [7] ZHOU H W, WANG Z H, WANG C S, *et al.* On acoustic emission and post-peak energy evolution in Beishan granite under cyclic loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(1): 283-288.
- [8] 孟庆彬, 王从凯, 黄炳香, 等. 三轴循环加卸载条件下岩石能量演化及分配规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2047-2059.  
MENG Qingbin, WANG Congkai, HUANG Bingxiang, *et al.* Rock energy evolution and distribution law under triaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 2047-2059.
- [9] 倪智伟, 吴小刚, 陈浩, 等. 分级循环加卸载试验下砂岩的力学特性研究[J]. 金属矿山, 2021(10): 21-27.  
NI Zhiwei, WU Xiaogang, CHEN Hao, *et al.* Study on mechanical properties of sandstone under grading cyclic loading and unloading test[J]. Metal Mine, 2021(10): 21-27.
- [10] SRINIVASAN V, GUPTA T, ANSARI T A, *et al.* An experimental study on rock damage and its influence in rock stress memory in a metamorphic rock[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(8): 4335-4348.
- [11] 赵军, 郭广涛, 徐鼎平, 等. 三轴及循环加卸载应力路径下深埋硬岩变形破坏特征试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1521-1530.  
ZHAO Jun, GUO Guangtao, XU Dingping, *et al.* Experimental study of deformation and failure characteristics of deeply-buried hard rock under triaxial and cyclic loading and unloading stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1521-1530.
- [12] DUAN S D, JIAN Q, XU D P, *et al.* Experimental study of mechanical behavior of interlayer staggered zone under cyclic loading and unloading condition[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(3): 04019187.
- [13] 李树刚, 刘思博, 林海飞, 等. 分级循环加卸载煤体变形破坏特征试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 199-205.  
LI Shugang, LIU Sibao, LIN Haifei, *et al.* Experimental research on deformation and failure characteristics of coal by staged cyclic loading and unloading[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 199-205.
- [14] 刘向御, 柴肇云, 刘绪, 等. 循环荷载下粉砂岩孔隙扩展及卸载破坏特征[J]. 煤炭学报, 2022, 47(S1): 77-89.  
LIU Xiangyu, CHAI Zhaoyun, LIU Xu, *et al.* Pore fracture propagation and unloading failure characteristics of siltite under cyclic loads[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 77-89.
- [15] MENG Q B, LIU J F, REN L, *et al.* Experimental study on rock strength and deformation characteristics under triaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(2): 777-797.
- [16] 汪泓, 杨天鸿, 刘洪磊, 等. 循环荷载下干燥与饱和砂岩力学特性及能量演化[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1600-1608.  
WANG Hong, YANG Tianhong, LIU Honglei, *et al.* Mechanical properties and energy evolution of dry and saturated sandstone under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1600-1608.
- [17] 杨科, 张寨男, 池小楼, 等. 循环荷载下含水砂岩裂纹演化与损伤特征试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(7): 1791-1802.  
YANG Ke, ZHANG Zhainan, CHI Xiaolou, *et al.* Experimental study on crack evolution and damage characteristics of water bearing sandstone under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(7): 1791-1802.
- [18] 胡大伟, 周辉, 潘鹏志, 等. 砂岩三轴循环加卸载条件下的渗透率研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2749-2754.  
HU Dawei, ZHOU Hui, PAN Pengzhi, *et al.* Study of permeability of sandstone in triaxial cyclic stress tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2749-2754.
- [19] 张培森, 许大强, 张睿, 等. 不同围压及循环荷载下砂岩的渗流、力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2432-2450.  
ZHANG Peisen, XU Daqiang, ZHANG Rui, *et al.* Experimental

- study on seepage and mechanical properties of sandstone under different confining pressures and cyclic loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(12): 2432–2450.
- [20] 王如宾, 徐波, 徐卫亚, 等. 不同卸荷路径对砂岩渗透性演化影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(3): 467–475.  
WANG Rubin, XU Bo, XU Weiya, *et al.* Experimental research of the influence of different unloading stress paths on permeability evolution of sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(3): 467–475.
- [21] 刘先珊, 王科, 许明. 低渗储层砂岩渗流-应力-损伤渐变过程的渗透特性演化研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(9): 1584–1592.  
LIU Xianshan, WANG Ke, XU Ming. Permeability evolution of low-permeability reservoir sandstone considering hydraulic-mechanical-damage coupling effect during gradual fracturing process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(9): 1584–1592.
- [22] 王伟, 郑志, 王如宾, 等. 不同应力路径下花岗片麻岩渗透特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(2): 260–267.  
WANG Wei, ZHENG Zhi, WANG Rubin, *et al.* Experimental study of permeability properties of granitic gneiss under different stress paths[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(2): 260–267.
- [23] 赵阳, 周宏伟, 任伟光, 等. 循环荷载下深部煤层工作面顶板砂岩的渗透率演化规律[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(5): 1495–1507.  
ZHAO Yang, ZHOU Hongwei, REN Weiguang, *et al.* Permeability evolution of roof sandstone at deep coal seam working face under cyclic loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1495–1507.
- [24] 张闯, 任松, 吴斐, 等. 循环荷载下含层理页岩渗透特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(3): 649–658.  
ZHANG Chuang, REN Song, WU Fei, *et al.* Experimental study on the permeability characteristics of laminated shale under cyclic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(3): 649–658.
- [25] 马丹, 侯文涛, 张吉雄, 等. 空心岩样径向渗流-轴向应力特征与巷道围岩渗透突变机理[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1180–1195.  
MA Dan, HOU Wentao, ZHANG Jixiong, *et al.* Radial seepage-axial stress characteristics of hollow rock sample and seepage mutation mechanism of roadway surrounding rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1180–1195.
- [26] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50266-99. 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [27] 张培森, 赵成业, 侯季群, 等. 高温与不同水压下深部砂岩渗透特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(6): 1117–1128.  
ZHANG Peisen, ZHAO Chengye, HOU Jiqun, *et al.* Experimental study on seepage characteristics of deep sandstone under high temperature and different hydraulic pressures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(6): 1117–1128.
- [28] 中华人民共和国行业标准. SL264—2001. 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [29] 张培森, 侯季群, 赵成业, 等. 不同应力状态下底板岩体渗流特性分析研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 127–133.  
ZHANG Peisen, HOU Jiqun, ZHAO Chengye, *et al.* Analysis and study on seepage characteristics of floor rock mass under different stress states[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 127–133.
- [30] 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.
- [31] 张培森, 赵成业, 侯季群, 等. 温度-应力-渗流耦合条件下红砂岩渗流特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(10): 1957–1974.  
ZHANG Peisen, ZHAO Chengye, HOU Jiqun, *et al.* Experimental study on seepage characteristics of deep sandstone under temperature-stress-seepage coupling conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(10): 1957–1974.
- [32] MARTIN C D. The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, 34(5): 698–725.
- [33] 陈运平, 席道瑛, 薛彦伟. 循环荷载下饱和岩石的应力-应变动态响应[J]. *石油地球物理勘探*, 2003, 38(4): 409–413.  
CHEN Yunping, XI Daoying, XUE Yanwei. Dynamic stress-strain response of saturated rock under cyclic loading[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2003, 38(4): 409–413.
- [34] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下岩石能量演化的非线性特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(6): 1198–1207.  
ZHANG Zhizhen, GAO Feng. Research on nonlinear characteristics of rock energy evolution under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(6): 1198–1207.
- [35] 赵永川, 杨天鸿, 秦涛, 等. 围压效应对钙泥质胶结砂岩强度和变形的影响[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(2): 254–259.  
ZHAO Yongchuan, YANG Tianhong, QIN Tao, *et al.* Effects of confining pressure paths on strength and deformation of calcareous argillaceous cemented sandstones[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2018, 39(2): 254–259.
- [36] 李欣慰, 姚直书, 黄献文, 等. 循环卸加载下砂岩变形破坏特征与能量演化研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(6): 1693–1704.  
LI Xinwei, YAO Zhishu, HUANG Xianwen, *et al.* Investigation of deformation and failure characteristics and energy evolution of sandstone under cyclic loading and unloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(6): 1693–1704.
- [37] 韩兵, 杨宏伟. 不同围压下页岩三轴压缩声发射能量分布特性研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(4): 90–95.  
HAN Bing, YANG Hongwei. Study on distribution characteristics of shale triaxial compression acoustic emission energy under different confining pressures[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(4): 90–95.