

DOI: 10.11779/CJGE201508015

不同粒度砂岩力学和渗透特性试验研究

邹航^{1,2}, 刘建锋^{*1,2}, 边宇^{1,2}, 周志威^{1,2}, 卓越^{1,2}

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为探讨砂岩粒度对力学行为和渗透特性的影响, 利用 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统, 对取自同一工程的粗粒砂岩、中粒砂岩和细粒砂岩进行常规三轴试验和三轴压缩全过程渗透试验。研究表明: 随着粒度减小, 砂岩抗压强度及抗剪强度参数 c 和 ϕ 均增大; 渗透水压作用下砂岩强度降低 5.15%~24.66%。渗透率变化规律与变形变化特征呈阶段对应: 线弹性阶段砂岩内部孔隙被压密, 渗透率降低; 弹塑性阶段渗透率先是缓慢增加然后急剧上升, 在峰后达到最大值; 峰后继续破坏阶段渗透率又呈逐渐降低特征。相同粒度砂岩的渗透性随围压增加而降低, 且不同围压下渗透率可拟合成线性函数; 相同围压下不同粒度砂岩渗透率整体特征表现为: 粗粒砂岩渗透率 K 约为中粒砂岩的 10^5 倍, 中粒砂岩渗透率 K 约为细粒砂岩的 10 倍。

关键词: 砂岩; 粒度; 常规三轴试验; 三轴渗透试验; 渗透率

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)08-1462-07

作者简介: 邹航(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石力学与工程。E-mail: zhcsol314@163.com。

Experimental study on mechanical and permeability properties of sandstone with different granularities

ZOU Hang^{1,2}, LIU Jian-feng^{1,2}, BIAN Yu^{1,2}, ZHOU Zhi-wei^{1,2}, ZHUO Yue^{1,2}

(1. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Chengdu 610065, China; 2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to investigate and reveal the influence of granularity on mechanical behavior and permeability characteristics of sandstone, the conventional triaxial tests and triaxial compression and penetration tests are conducted on coarse sandstone, medium sandstone and fine sandstone of a project by using the MTS815 Flex Test GT rock mechanics test system. The researches show that the strength of sandstone and the parameters of shear strength, cohesion c and internal friction angle ϕ , increase with the decrease of granularity. The strength of sandstone has a decrease of the range between 5.15% and 24.66%. The permeability varies according to the characteristics of deformation: at the elastic stage, the holes inside the sandstone are compacted and the permeability decreases; at the elastic-plastic stage, the permeability increases slowly at first, and then moves up sharply and reaches the maximum value at the post-peak; finally, permeability decreases. The permeability of sandstone with the same granularity decreases with the increase of confining pressure, and the permeabilities of all samples under different confining pressures can be drawn as a linear function. Under the same confining pressure, there is a magnitude difference between the permeabilities of sandstone with different granularities. As for the overall performance of permeability, the permeability of the coarse sandstone is about 10^5 times that of the medium sandstone, and the permeability of the medium sandstone is about 10 times that of the fine sandstone.

Key words: sandstone; granularity; conventional triaxial test; triaxial compression and penetration test; permeability

0 引言

地下工程建设中不可避免会面临地下水对工程岩体的影响的问题。地下水不仅会导致岩体力学性能劣化, 还会导致岩体渗透性能增加, 对工程建设造成不利影响。砂岩作为常见的沉积岩之一, 更是大量工程建设的常见岩体, 其力学特性和渗透特性对工程安全尤为重要。

近年来众多学者对于砂岩力学特性和渗透特性进行了大量研究, 取得了丰富的研究成果: 黄先伍等^[1]对破碎砂岩进行稳态渗透试验, 得出了渗透率、非

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2011CB201201); 国家自然科学基金项目(51120145001, 513741481)

收稿日期: 2014-11-16

*通讯作者

Darcy 流 β 因子和孔隙率之间的关系; 康瀚^[2]通过对四川地区的中、细两种粒度的砂岩进行三轴试验, 分析了不同粒度砂岩的强度和变形特性并探讨了粒度对于砂岩强度的影响; 王小江等^[3]利用三轴耦合试验机进行粗粒砂岩不同围压条件下的变形破坏过程渗流试验, 分析了粗粒砂岩变形破坏过程中渗透性变化规律和围压对于粗粒砂岩渗透性质的影响; 张守良等^[4]利用高温高压岩石三轴仪器测试了不同胶结程度的砂岩的应力-应变全过程渗透率变化规律, 分析了岩石渗透性与其应力状态和力学参数间的相应关系; 王环玲等^[5]利用伺服试验机对灰岩以及砂岩进行了应力应变全过程渗透试验, 揭示了岩石在变形与破坏过程中的轴向应力和渗透率间的关系并分析了环向变形对其渗透率的影响规律和岩样破坏前后渗透压差随时间的变化规律。李佳伟等^[6]利用 MTS815 岩石力学试验系统, 通过对岩体受力状态模拟、无水压岩体力学特性测试、水岩耦合试验等几个阶段试验, 对砂板岩岩体力学特性的高空隙水压效应进行了试验研究从而揭示了水对于岩石的力学特征具有重要的影响; 李世平等^[7-8]通过试验研究了砂岩应力-应变全过程中渗透率的变化规律, 并给出了该砂岩的渗透率-应变方程。

尽管国内外已对砂岩的力学行为和渗透特性开展了大量研究^[9-13], 但不同区域的砂岩沉积历史环境不同, 其物质含量和内部结构会具有较大差异, 导致砂岩的力学行为及渗透特性不同。因此对于不同工程建设中的砂岩仍需进行研究。本文结合国内某煤矿工程开采中面临的不同深度地层砂岩的力学行为及渗透性对煤矿开采安全的影响难题, 通过室内试验对取自该矿不同深度的不同粒度砂岩的力学行为和渗透性特性进行分析和探讨, 揭示围压和粒度对力学行为和渗透特性的影响, 并为该煤矿安全开采提供基础数据。

1 试样制备及测试方案

1.1 试样制备

试验采用试样取自煤矿的沉积砂岩, 现场通过钻孔取芯的方法钻取不同深度的砂岩进行取芯, 取样深度为 500~700 m, 根据粒径大小将砂岩分为粗粒砂岩 (0.5~1 mm)、中粒砂岩 (0.25~0.5 mm) 和细粒砂岩 (0.125~0.25 mm) 3 种。现场钻孔取芯后分别对取样岩芯进行编录, 并利用塑料膜进行封装保存。在室内按《工程岩体试验方法标准 GB/T50266—99》^[14]中加工精度要求, 通过采用钻、切、磨的方法加工试验测试的标准试样 (图 1), 试样尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ (高)。室内加工标准试件 24 个, 其中每种粒度的岩芯加工标准试件 8 个。试验所采用砂岩试样粗粒

砂岩孔隙率为 20.97%, 中粒砂岩孔隙率为 14.04%, 细粒砂岩孔隙率为 10.18%。

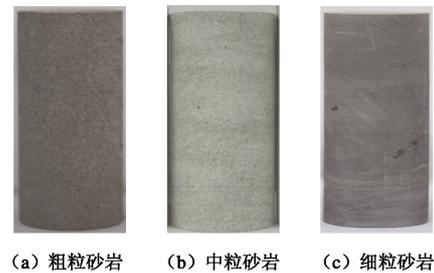


图 1 标准试样示例照片

Fig. 1 Photos of rock samples

1.2 试验方案

试验测试分为常规三轴压缩和三轴压缩全过程渗透测试两类, 试验过程中均包括 4 个不同围压, 分别为 5, 10, 15, 20 MPa; 渗透水压和渗透压差均为 1 MPa。常规三轴压缩试验试件为风干状态, 渗透试验试件为饱和状态, 其饱和过程按标准^[14-16]中推荐的真空饱和法进行。

试验均利用 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统 (图 2) 完成。本次测试中选用的轴向荷载传感器量程为 2600 kN, 围压为 140 MPa, 渗透压力为 14 MPa, 渗透压差为 3 MPa, 轴向引伸计为 -2.5~5.0 mm, 横向引伸计为 -2.0~8.0 mm, 各传感器精度均为 0.5%RO。



图 2 MTS 815 Flex Test GT 岩石力学试验系统

Fig. 2 MTS815 Flex Test GT rock mechanics test system

三轴渗透试验在加载全过程中在 8 个应力点测试渗透率, 8 个测试渗透率的应力点的应力与加载应力大致成比例, 其中峰前测试 5 次, 峰后测试 3 次。为获得水压对试验力学行为的影响, 并使加载过中试件内部形成恒定渗透压力的渗流场, 加载过程中在试样下端施加水压力 P_w , 压力大小为 1 MPa, 上端连通大气。渗透率测试采用压差衰减法进行测试, 测试中试件上部为和下部的初始压差 1.0 MPa, 其中试件下部渗透压力高于试件上部, 渗透率测试的第一个点为围压加载至目标值后的静水压力下测试。渗透试件安装示例见图 3, 渗透率按下式进行计算:

$$K = \nu \cdot \beta \cdot V \left[\frac{\ln\left(\frac{\Delta P_i}{\Delta P_f}\right)}{2 \cdot \Delta t \left(\frac{A_s}{L_s}\right)} \right] \quad (1)$$

式中 K 为渗透率 (m^2)； V 为基准体积 (稳压容器的体积) (cm^3)； ΔP_i 为初始压差； ΔP_f 最终压差 (MPa)； Δt 为持续时间 (s)； L_s 为试样高度 (cm^2)； A_s 为横断面面积 (cm^2)； ν 为孔隙流体的黏度 ($10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$)； β 为孔隙流体的压缩系数 ($4.53 \times 10^{-10} \text{Pa}^{-1}$)。

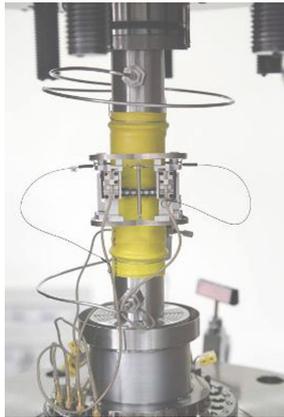


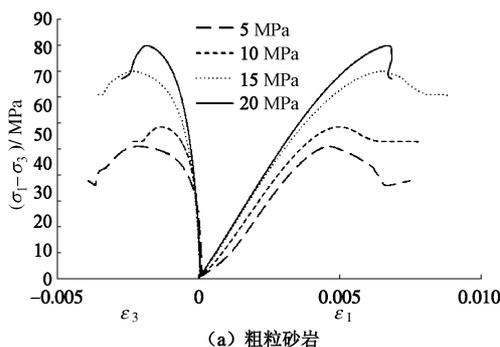
图3 渗透测试示例照片

Fig. 3 Penetration tests on samples

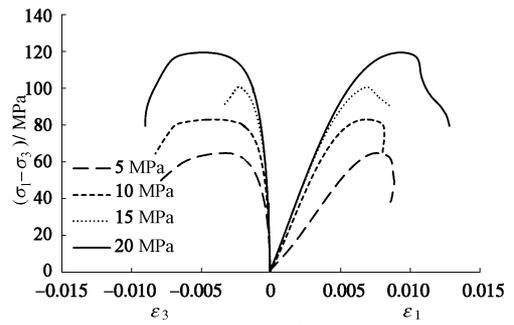
2 试验结果及分析

2.1 变形特征

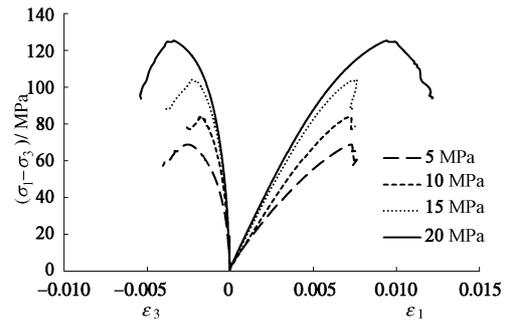
常规三轴试验中, 3种粒度砂岩在不同围压下的应力-应变曲线特征相似 (图4), 均表现为围压越高, 其线性变形段的斜率越大, 说明围压增大有助于提高岩石刚度; 当围压达到 15 MPa 后, 围压为 20 MPa 时的线性段应力应变曲线与 15 MPa 时接近重合, 表明对应本文研究的砂岩, 当围压压力达到 15 MPa 时, 会使其内部原有缺陷充分闭合。峰值应力时, 细粒砂岩和中粒砂岩的轴向变形量接近, 但随粒度增加, 轴向变形量呈近似减小特征, 粗粒砂岩的变形量最小。



(a) 粗粒砂岩



(b) 中粒砂岩



(c) 细粒砂岩

图4 常规三轴试验应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of test samples of conventional triaxial tests

三轴渗透试验中, 由于试件在试验前已经历了真空抽气法饱和, 并且在整个加载过程中还处于 1 MPa 水压的恒定渗透压力下, 其变形与常规三轴略有不同 (图5)。从图5中3种不同粒度砂岩的整体变形特征可以看出, 虽然随粒度增加, 峰值时的轴向变形量仍呈近似减小特征, 但粗粒砂岩和细粒砂岩在围压为 20 MPa 时的轴向应力与轴向应变的斜率小于 15 MPa 时的结果。分析认为 15 MPa 围压使试件内部损伤充分闭合后, 围压增加会使试件两端的水压难以达到平衡, 从而使试件两端的有效应力不等, 导致试件高水压端的承载能力降低, 中粒砂岩在 15 MPa 下出现了与粗粒砂岩及细粒砂岩不同的响应, 表明虽然同组试验试件取自深度连续的另一钻孔, 但试件间仍会存在一定差异。

图5 应力应变曲线中的不平滑处是由于渗透率测试造成的: 在峰值应力前进行渗透率测试时采用应力控制, 此时轴向加载应力未超出试件承载能力, 而不会因应力控制而导致试件突然破坏, 在测试时保持轴向荷载不变; 峰值应力后若仍采用应力控制, 则会导致试件突然破坏, 故进行渗透率测试时采用轴向位移控制, 位移不变应力下降, 因而图5中应力应变曲线出现应力下跌。

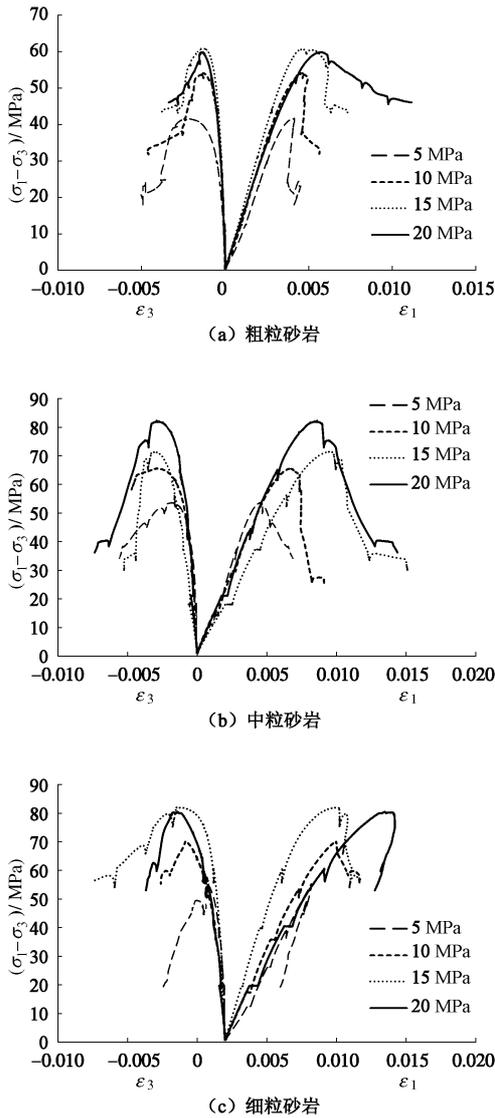


图 5 三轴渗透试验应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of test samples of triaxial compression and penetration tests

2.2 强度特征

由图 6, 7 可知, 无论是常规三轴试验, 还是渗透试验, 围压压力相同时, 砂岩强度随粒度增加而降低; 对于相同粒度砂岩, 其抗压强度与围压具有良好线性关系。由于砂岩处于饱和状态, 且在试验过程中试样下端始终存在 $P_w=1$ MPa 的水压, 水化作用弱化岩石强度及水压力的作用降低了砂岩的有效应力, 受以上双重作用的影响相同粒度砂岩渗透三轴强度小于常规三轴试样强度。为定量分析相同围压下水压对同粒度砂岩强度的影响, 假定 $F(x)$ 为强度弱化比:

$$F(x) = \frac{f_1(x) - f_2(x)}{f_1(x)} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $f_1(x)$ 为砂岩常规三轴试验应力和围压线性拟合关系函数表达式, $f_2(x)$ 为砂岩三轴渗透试验应力和围

压线性拟合关系函数表达式。

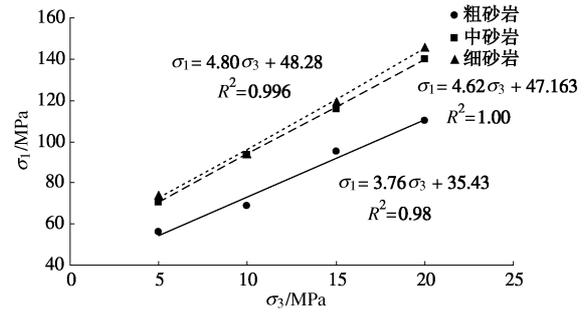


图 6 常规三轴试验轴向应力与围压关系

Fig. 6 Curves of axial stress-confining pressure of conventional triaxial tests

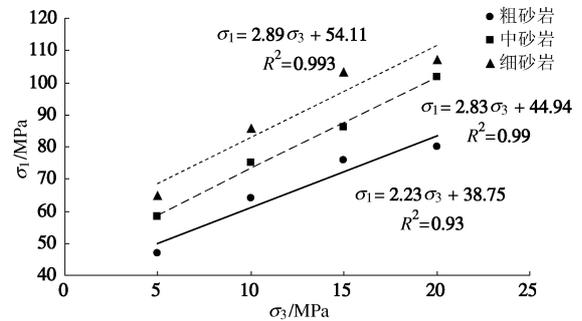


图 7 渗透试验轴向应力与围压关系

Fig. 7 Stress-confining pressure curves of triaxial compression and penetration tests

不同围压下砂岩强度弱化趋势曲线见图 8。饱和砂岩试样在试验过程中由于下端 $P_w=1$ MPa 水压影响, 强度出现较为明显的弱化现象, 在渗透水压作用下砂岩强度下降 5.15%~24.66%。其中中粒砂岩强度降低幅度最大, 粗粒砂岩次之, 细粒砂岩下降幅度最小。试验中细砂岩渗透率低, 当加载应力达到造成试件内部损伤贯通前, 高压水端易造成砂岩局部强度弱化; 粗粒砂岩渗透率较大, 渗透水压在试件内部呈均匀状态, 在试样中产生一定的膨胀作用, 加大砂岩了破坏程度, 同时且渗流水会弱化砂岩内部的泥质胶结物, 因而粗粒砂岩强度减弱且幅度大于细粒砂岩; 中粒砂岩渗透性高于细粒砂岩, 低于粗粒砂岩, 从而受到上述双重作用, 强度减弱最为明显。同粒度砂岩随着围压增大, 虽然加渗透压前后的强度差值百分比增加, 但变化速率减小。

在常规三轴试验和三轴渗透试验中, 砂岩峰值抗压强度随粒度的减少而增大: 粒度越小砂岩内部颗粒排列越紧密, 颗粒间接触面积更大, 砂岩内部胶结程度更好, 砂岩强度越大。按照规范^[15]分别计算得到砂岩的在不同状态下的抗剪强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。

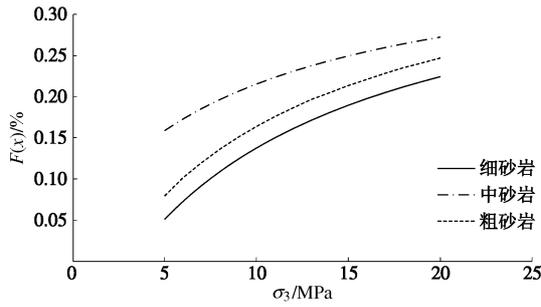


图8 砂岩强度弱化比 $F(x)$ 与围压的关系曲线

Fig. 8 Curves of $F(x)-\sigma_3$ of sandstone

图9中试样在干燥和饱和两种状态下,砂岩黏聚力 c 及内摩擦角 φ 随着粒度减少而增大,粒度越小颗粒间胶结咬合程度越好从而砂岩的抗剪强度参数越高。饱和状态下砂岩黏聚力 c 大于干燥状态下的砂岩,分析原因是由于砂岩经饱和后,砂岩内部的泥质粘土物质在水的作用下,颗粒间粘接性较干燥状态增强,从而使砂岩的黏聚力 c 增加,但饱和后砂岩在渗透水压下,内部孔隙间孔隙水压增大,削弱了颗粒间有效应力,使饱和状态下砂岩内摩擦角 φ 在小于干燥状态下的内摩擦角 φ 。

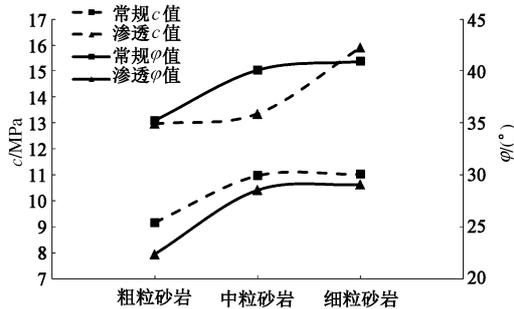


图9 不同粒径的砂岩抗剪强度参数

Fig. 9 Shear strength parameters of sandstone with different granularities

2.3 渗透特性

砂岩渗透率在荷载作用过程中随应力不断发生变化,当应力达到峰值应力渗透率逐渐趋于最大值,为了便于分析砂岩渗透率与围压的关系,图10以粗粒砂岩为例给出了围压对渗透性的影响,该图表明随着围压增加,会使岩石结构更加密实从而渗透性减小。

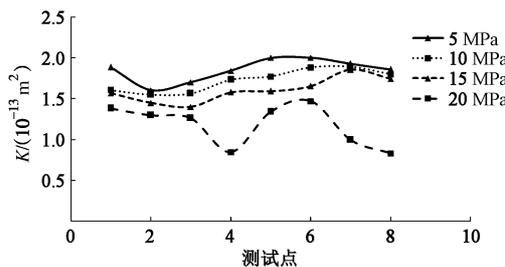
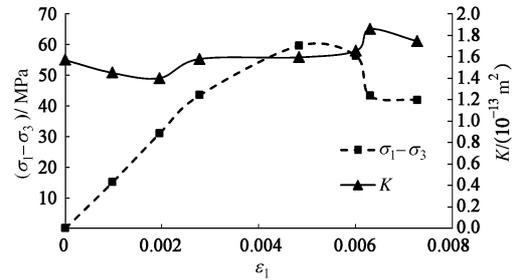


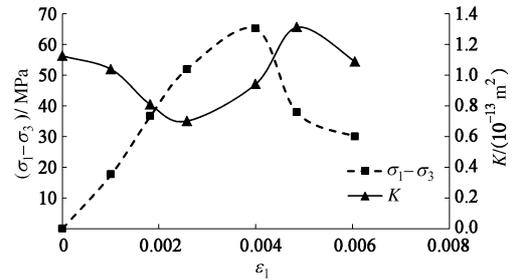
图10 粗粒砂岩渗透率变化曲线

Fig. 10 Variation curves of permeability of coarse sandstone

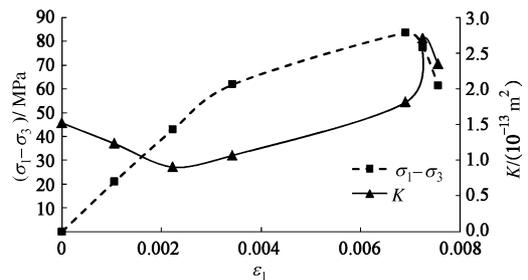
图11以相同围压为例 ($\sigma_3=15$ MPa),给出了不同粒度砂岩渗透性和全过程偏应力与轴向应变 ϵ_1 的变化特征。



(a) 粗粒砂岩



(b) 中粒砂岩



(c) 细粒砂岩

图11 砂岩偏应力-应变曲线、渗透率-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain and permeability-strain curves of sandstone

砂岩在变形破坏的过程中,水主要通过砂岩内部颗粒间孔隙和破裂面进行渗流,不同粒度的砂岩具有相似的渗透变化特征,可分为3个阶段:3种砂岩中的渗透率变化规律与应力应变曲线呈阶段对应,在弹性变形阶段,由于砂岩内部颗粒间孔隙被压密,渗透率随围压增大而降低,进入屈服变形阶段后,随着破裂面扩展和贯通,渗透率先是缓慢增加然后急剧上升,峰后达到最大值且渗透率峰值滞后于应力峰值,峰后继续破坏过程中,破裂面在轴向荷载作用下被压密,且被由破坏产生的碎屑和泥化物质堵塞,渗透率又出现降低特征^[17]。

为揭示砂岩破坏前粒度和围压对渗透性的影响,对不同粒度砂岩的初始渗透率(试样加载静水围压后且未加载轴压前所测得砂岩渗透率)和围压的关系进行了分析(如图12)。从该图中可以看出粒度对砂岩初始渗透率影响极大,图12中3种不同粒度砂岩渗透率之间存在量级差异,试验全过程中粗粒砂岩组渗透

率 K 值在 $(0.8 \sim 2.0) \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 范围内; 中粒砂岩初始渗透率 K 值在 $(0.6 \sim 3.1) \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 范围内; 细粒砂岩 K 值在 $(0.7 \sim 4.3) \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 范围内, 各组不同粒度的砂岩渗透率 K 整体特征: 粗粒砂岩渗透率 K 约为中粒砂岩渗透率 K 的 10^5 倍, 中粒砂岩的渗透率 K 约为细粒砂岩渗透率 K 的 10 倍。由于不同砂岩间渗透率 K 相差极大, 采用普通坐标系无法真实反映不同粒度间砂岩渗透率差别, 故纵坐标轴采用对数刻度。图 12 中在相同围压下不同粒度时, 随着砂岩粒度减小砂岩的渗透率 K 减小。当粒度相同时, 各组试样在相同测试点所测渗透率 K 随围压增大而减小。在初始渗透测定中, 砂岩内部渗流主要依靠颗粒间的孔隙, 处于相同围压下砂岩粒度越小, 砂岩内部颗粒间排列越紧密, 颗粒间的孔隙就越小, 砂岩的初始渗透率 K 值就越低。粒度相同时, 随着围压的增大砂岩内部颗粒被压密, 颗粒间孔隙减少, 随围压增大砂岩初始渗透率减小。

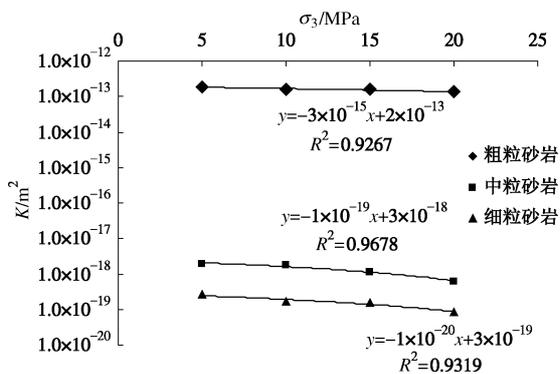


图 12 初始渗透率 K 值 - 围压曲线

Fig. 12 Curves of initial permeability - confining pressure

图 13 是各组试样到达峰值应力破坏后首次测得的破坏后渗透率与围压关系, 纵坐标轴同为对数坐标。砂岩破坏后进行渗透测试结果呈现与初始渗透率相似的规律: 同围压下不同粒度时, 随着砂岩粒度减小砂岩的渗透率 K 减小; 粒度相同时, 各组试样峰后所测渗透率 K 随围压增大而减小。由于砂岩破坏后的渗流通道主要依靠破坏后形贯通裂隙, 渗透率大于初始渗透率, 此时粒度对于砂岩渗透率影响体现在砂岩破坏后形成的碎屑对渗流通道的堵塞, 砂岩粒度越小, 堵塞越密实, 砂岩峰后测得渗透率越低; 当砂岩粒度相同时, 随围压的增大, 砂岩破坏后内部裂隙被挤压的越紧密, 砂岩渗透率越低。

图 12, 13 中在粒度相同时各组试样在不同围压下的渗透率呈现较好的线性关系。下述线性方程可作为在 1 MPa 水压下渗透率 K 值随围压的变化模型:

$$f(K) = a\sigma_3 + b \quad (3)$$

式中, σ_3 为围压, a, b 为受砂岩种类影响的值。从式

(3) 中可以推断, 当 $a \leq 0$, 砂岩渗透率随围压增加呈负相关, 即随着围压增大, 砂岩渗透率逐渐减小。

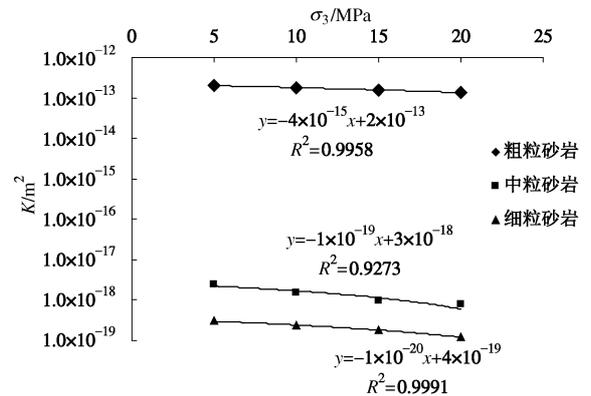


图 13 破坏后渗透率 K 值 - 围压曲线

Fig. 13 Curves of fractured permeability - confining pressure

3 结 论

(1) 粒度对于砂岩强度特性影响较大, 随着粒度减小, 砂岩强度增加; 在渗透水压作用下砂岩强度降低 5.15%~24.66%, 中粒砂岩强度降低幅度最大, 粗粒砂岩次之, 细粒砂岩强度降低幅度最小。

(2) 不同粒度砂岩石在变形破坏全过程中的渗透性具有相似特征, 可分为 3 个阶段: 弹性阶段渗透性随轴向应力增加而减小; 屈服变形阶段渗透率逐渐增大, 并在峰后达到最大, 渗透率峰值滞后于应力峰值; 残余变形阶段渗透率又呈降低特征。

(3) 随围压增加砂岩渗透率减小, 粒度越大初始渗透率越高; 随粒度减小砂岩渗透率降低, 粗粒砂岩渗透率约为中粒砂岩渗透率的 10^5 倍, 中粒砂岩的渗透率约为细粒砂岩渗透率的 10 倍。

参考文献:

- [1] 黄先伍, 唐 平, 缪协兴, 等. 破碎砂岩渗透特性与孔隙率关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1385 - 1388. (HUANG Xan-wu, TANG Ping, MIU Xie-xing, et al. Testing study on seepage properties of broken sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1385 - 1388. (in Chinese))
- [2] 康 瀚. 不同粒径砂岩三轴压缩力学特性试验研究[J]. 路基工程, 2013(6): 94 - 96. (KANG Hang. Experimental study on mechanical characteristics of triaxial compression of sandstone in different size[J]. Subgrade Engineering, 2013(6): 94 - 96. (in Chinese))
- [3] 王小江, 荣 冠, 周创兵. 粗砂岩变形破坏过程中渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(A01): 2940 - 2947. (WANG Xiao-jiang, RONG Guan, ZHOU Chuang-bing. Permeability experimental study of gritstone in deformation

- and failure process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(A01): 2940 - 2947. (in Chinese))
- [4] 张守良, 沈琛, 邓金根. 岩石变形及破坏过程中渗透率变化规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000(增刊1): 885 - 888. (ZHANG Shou-liang, SHEN Chen, DENG Jin-gen. Testing study on the law of permeability variation in process of rock deformation and damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000(S1): 885 - 888. (in Chinese))
- [5] 王环玲, 徐卫亚, 杨圣奇. 岩石变形破坏过程中渗透率演化规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(10): 1703 - 1708. (WANG Huan-ling, XU Wei-ya, YANG Sheng-qi. Experimental investigation on permeability evolution law during course of deformation and failure of rock specimen[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(10): 1703 - 1708. (in Chinese))
- [6] 李佳伟, 徐进, 王璐, 等. 砂板岩岩体力学特性的水岩耦合试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(3): 599 - 604. (LI Jia-wei, XU Jin, WANG Lu, et al. Water-rock coupling tests on mechanical properties of sandy slate rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(3): 599 - 604. (in Chinese))
- [7] 李世平, 李玉寿, 吴振业. 岩石全应力应变过程对应的渗透率 - 应变方程[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(2): 13 - 19. (LI Shi-ping, LI Yu-shou, WU Zhen-ye. The permeability strain equations relating to complete stress-strain path of the rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(2): 13 - 19. (in Chinese))
- [8] LI S P, WU D X, XIE W H, et al. Effect of confining pressure, pore pressure and specimen dimension on permeability of Yin Zhuang sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, **34**(3/4): 435 - 441.
- [9] 韩铁林, 陈蕴生, 宋勇军, 等. 不同应力路径下砂岩力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(A02): 3959 - 3966. (HAN Tie-lin, CHEN Yun-sheng, SONG Yong-jun, et al. Experimental study of mechanical characteristics of sandstone under different loading paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(A02): 3959 - 3966. (in Chinese))
- [10] JIANG J Q, YANG G L. Field tests on mechanical characteristics and strength parameters of red-sandstone[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, **17**(2): 381 - 387.
- [11] 曹广祝, 仵彦卿, 丁卫华. 低渗透压力条件下砂岩渗透性质的 CT 试验[J]. 煤田地质与勘探, 2005, **33**(4): 59 - 62. (CAO Guang-zhu, WU Yan-qing, DING Wei-hua. Permeability experiment of sandstone under low seepage pressures by X-ray CT test[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, **33**(4): 59 - 62. (in Chinese))
- [12] 李小琴, 李文平, 李洪亮, 等. 砂岩峰后卸除围压过程的渗透性试验研究[J]. 工程地质学报, 2005, **13**(4): 481 - 484. (LI Xiao-qin, LI Wen-ping, LI Hong-liang, et al. Experimental Study on permeability of sandstone during post-peak unloading of the confining pressure[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, **13**(4): 481 - 484. (in Chinese))
- [13] 王贵荣, 任建喜. 基于三轴压缩试验的红砂岩本构模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, **26**(6): 48 - 51. (WANG Gui-rong, REN Jian-xi. Constitutive model of red sandstone based on triaxial compression test[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2006, **26**(6): 48 - 51. (in Chinese))
- [14] GB/T50266—99 工程岩体试验方法标准[S]. 1999. (GB/T50266—99 Standard for tests method of engineering rock masses[S]. 1999. (in Chinese))
- [15] SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 2001. (SL264—2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. 2001. (in Chinese)).
- [16] DL/T5368—2007 水电水利工程岩石试验规[S]. 2007. (DL/T5368—2007 Code for rock tests hydroelectric and water conservancy engineering[S]. 2007. (in Chinese)).
- [17] 彭苏萍, 屈洪亮, 罗立平, 等. 沉积岩石全应力应变过程的渗透性试验研究[J]. 煤炭学报, 2000, **25**(2): 113 - 116. (PENG Su-ping, QU Hong-liang, LUO Li-ping, et al. An experimental study on the penetrability of sedimentary rock during the complete stress-strain path[J]. Journal of China Coal Society, 2000, **25**(2): 113 - 116. (in Chinese))