

砂岩与砂质泥岩渗透性能试验研究*

张豫川, 潘增志, 王祖耀, 卢连长

(兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室; 土木工程与力学学院, 兰州 730000)

摘 要:利用柔性壁渗透仪对取自兰州地区的砂岩和砂质泥岩试样进行了渗透性能的试验研究,通过施加不同围压和渗透压,比较砂岩与砂质泥岩两者的渗透性能,并根据试验数据对渗透系数与渗透压进行拟合,同时,利用扫描电镜(SEM)对渗透前后的砂岩和砂质泥岩进行微观分析。试验结果表明:在200 kPa围压时,渗透系数随渗透压增加有增长趋势,在300 kPa、400 kPa围压时,渗透系数随渗透压增加先增大后保持稳定;在同等围压和渗透压下,砂质泥岩的渗透系数要大于砂岩;根据物理力学性质指标,可通过岩石吸水率和孔隙率对渗透系数进行判定。通过观察电镜结果可知,渗透试验前后,两者内部结构变化较大。

关键词:砂岩;柔性壁渗透仪;渗透系数;吸水率;扫描电镜

中图分类号:TU42 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2017)02-0301-06

Testing Study on Permeability of Sandstone and Sandy Mudstone

Zhang Yuchuan, Pan Zengzhi, Wang Zuyao, Lu Lianchang

(Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China of Ministry of Education;
School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou university, Lanzhou 730000, P.R.China)

Abstract: A flexible wall permeameter was used to test permeability of sandstone and sandy mudstone samples taken from Lanzhou. Permeability of sandstone and sandy mudstone was compared by applying different confining pressures and seepage pressures. The relationship between permeability coefficient and seepage pressure was fitted according to test data. Using SEM to analysis the microscopic of sandstone and sandy mudstone before and after penetrant test. The results show that under the confining pressure of 200 kPa, with increasing of seepage pressure, the permeability coefficient maintains a growth trend; while under the confining pressure of 300 kPa and 400 kPa, with the increasing of seepage pressure, the permeability coefficient increases first and then remains stable. Under the same confining pressure and seepage pressure, permeability coefficient of sandy mudstone is greater than that of sandstone; The permeability can be determined by water absorption and porosity of rock according to physical and mechanical properties index. The results of SEM show that before and after the penetrant test, sandstone and sandy mudstone both have bigger change in internal structure.

Keywords: sandstone; flexible-wall permeameter; permeability coefficient; water absorption; SEM

0 引言

对于高速发展的工程建设活动,随着地上空的逐渐饱和,地下空间的开发与利用显得尤为重要。大型地下空间如地下停车场、大型地下室等,需要

考虑建筑物整体的抗浮设防。建筑物进行抗浮设计时,要根据设防水位,通过增加基础配重或抗浮桩等来达到抗浮要求。在开挖的深基坑中,经常遇到砂岩和粘性土等渗透性非常小的地层,采用一般的抗浮设计既不经济又浪费时间,因此,研究砂岩

* 收稿日期:2016-08-27(修改稿)
作者简介:张豫川(1963-),女,宁夏银川人,硕士,副教授,主要从事基础工程与地基处理教学与科研工作。
E-mail:yuch99999@sina.com

和砂质泥岩的物理力学性质对于建筑抗浮至关重要。砂岩和砂质泥岩主要受成岩时间长短以及围压大小等因素影响^[1],浅层砂岩和砂质泥岩成岩时间短,胶结较差,极易软化崩解,与埋藏于地层深部的砂岩和砂质泥岩的性质有很大的差别。砂岩的变形破坏对渗透性具有很大的影响^[2],砂岩与砂质泥岩虽然属于不透水岩石,但单体岩块具有遇水软化,饱水崩解等性质,水理性质较差,工程作为地基要注意防护^[3]。

在研究砂岩、砂质泥岩地基时发现,学者们更关注于其承载力的确定方法,而对渗透性进行研究时,则更关注于深部砂岩的渗透性能研究,彭苏萍等^[4]分析了全应力-应变过程中渗透率的变化规律和不同围压下岩石的孔渗性,建立了砂岩岩石应力-应变与渗透率之间的定性定量关系;黄远智等^[5]提出了低渗透岩石渗流过程中存在明显的流固耦合效应,并指出低渗透岩石渗透率与有效围压之间的关系可以用一元二次多项式来描述;王伟等^[6]采用流量法测量不同围压和渗透压作用下的砂岩渗透率,揭示了围压和渗透压对砂岩渗透率的影响规律,并给出了围压与渗透率的拟合关系式;

张渊等^[7]研究了岩样变形和破坏过程中的轴向应变与渗透率之间的关系,分析了岩样环向应变对渗透率的影响规律,探讨了岩样变形破坏前后渗透压差随时间的变化关系。了解渗透性也可以指导砂岩相似材料的制作^[8]。对于抗浮设计,渗透性是很重要的参考依据,并与折减系数的大小有关,从而影响工程建设成本,所以研究浅层软岩的渗透性对建筑物抗浮有重要的参考价值。本文拟从工程实际出发,基于物理力学性质试验,对砂岩和砂质泥岩的渗透性进行测试分析,为建筑抗浮设计提供参考依据。

1 试验样品与方法

1.1 试样性质

试样取自于兰州市某高层项目基坑,在南北两侧各取得砂岩与砂质泥岩样品两块,依据勘察报告认定为第三系巨厚层红砂岩和第三系砂质泥岩,取样深度为地面标高以下 13 m,试样基本保持原状并且受扰动较小。对取得的试样进行物理力学指标测定,测得数据如表 1 所示。

表 1 岩石物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of rock

	孔隙率 /%	含水率 /%	吸水率 /%	饱和单轴抗压 强度/MPa	天然单轴抗压强度 /MPa	弹性模量 /MPa
砂质泥岩	14.57	6.23	34.05	0.05	0.36	0.1
砂岩	16.02	7.27	32.87	0.06	0.38	0.52

从表 1 可知,两种岩石相比于同地区、同种岩石的含水率较小,但吸水率很大,且吸水过程中发生崩解,两者内部胶结性不强,岩石内部胶结松散,粘结力较小,这种特性将影响岩石的渗透性,因为吸水产生崩解,所以饱和单轴抗压强度偏小,工程性质较差,孔隙率两者相差较大,孔隙率是衡量渗透性的一个重要指标^[9-10]。

1.2 渗透试验

试验采用美国 HUMBOLDT 公司生产的 HM-4160A 型柔性壁渗透仪^[11],如图 1 所示。该仪器可精确测量渗透系数较低的岩石,可以灵活调节围压和渗透压的大小。且该仪器可对试样施加反压进行饱和,以缩短渗透时间,减少试样内部气泡,以免其影响试验结果。

渗透试验通过监测渗流变水头管水位变化,利用公式(1)计算试样的渗透系数 K :

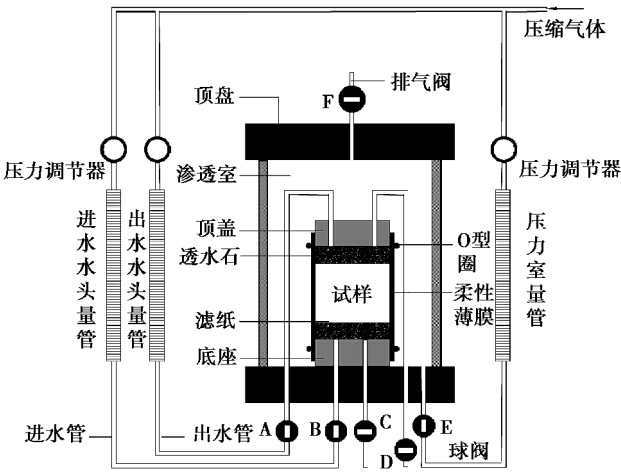


图 1 柔性壁渗透仪示意图

Fig.1 Sketch of flexible-wall permeameter

$$K=2.3\frac{al}{At}\lg\frac{h_1}{h_2}\tag{1}$$

式中: a 为水头管截面积, cm^2 ; l 为试样高度, cm ; h_1 为初始水头, cm ; h_2 为终止水头, cm ; A 为试样的横截面积, cm^2 ; t 为试验持续时间, s 。

渗透试验主要由反压饱和与渗透两部分组成,试验过程中时刻记录温度变化^[12]。

反压饱和阶段:将进水管B与出水管A联通,则将在进水管与出水管上施加相等的反向压力,等到进水管的读数与出水管的读数相等时,则反压饱和阶段结束。

渗透阶段:渗透试验开始后,施加200 kPa的围压,保持围压不变的情况下,分别施加20、40、60、80、100、120 kPa的渗透压。测试完毕后,变换300 kPa和400 kPa围压进行试验,分别施加以上渗透压。

2 试验结果与分析

2.1 渗透系数与围压的关系

如图2和图3所示,砂岩与砂质泥岩的渗透系数都随围压的增大而减小,砂岩渗透系数减小的幅度远远小于砂质泥岩;在同等围压下,砂质泥岩的渗透系数要大于砂岩。在围压增大的过程中,大量的孔隙和裂隙在围压的作用下由开口逐渐闭合,围压越大,则闭合的孔隙和裂隙数量会越多,渗透系数会越小。渗透试验采用的试样较小,而渗透压相对较大,在渗透过程中,砂质泥岩相比于砂岩更容易被冲刷出导水通道,砂岩内部闭合的微小孔隙较多,渗透性会更小一些。

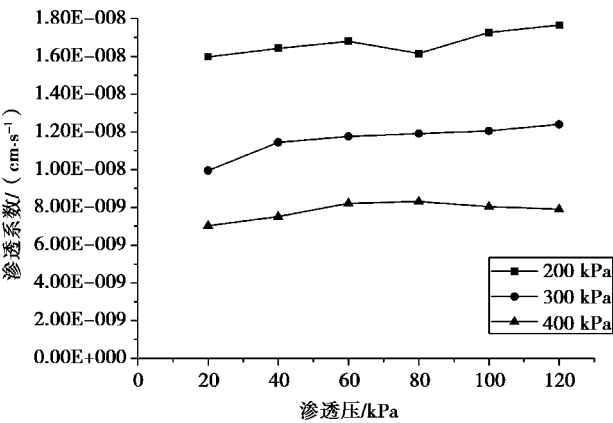


图2 不同围压下的砂质泥岩渗透系数变化曲线
Fig.2 Permeability coefficient changing curves of sandy mudstone under different confining pressure

如图2和图3所示,在200 kPa围压时,随着渗透压的增大,渗透系数有增大的趋势,渗透压增

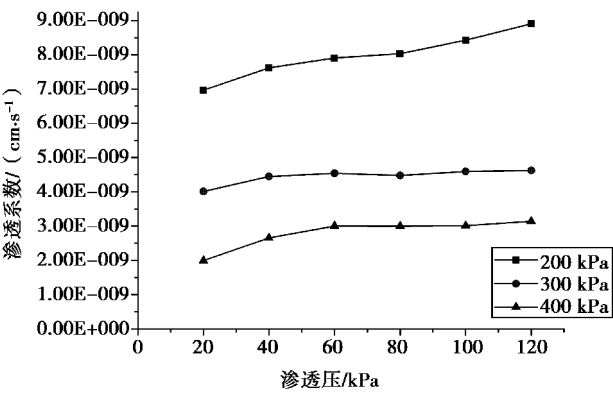


图3 不同围压下的砂岩渗透系数变化曲线
Fig.3 Permeability coefficient changing curves of sandstone under different confining pressure

大破坏了内部孔隙,将各个分散的孔隙导通和扩展成为大的裂隙带,因为围压较小,在导通和扩展的过程中受到的阻力较小,渗透系数呈现出增大的趋势;在300 kPa和400 kPa时,渗透系数变化为先增大,后趋于稳定,主要是因为:孔隙和裂隙在扩展的过程中,较大的围压限制了岩样本身的变形,使导水通道不能继续扩大,等达到稳定之后,即使增加更大的渗透压,渗透系数变化幅度也不明显。在工程实际中围压一般较小,要防止软弱岩石内部孔隙的重组和扩展,适当进行排水,降低渗透压,加固基坑侧壁,避免孔隙扩大。

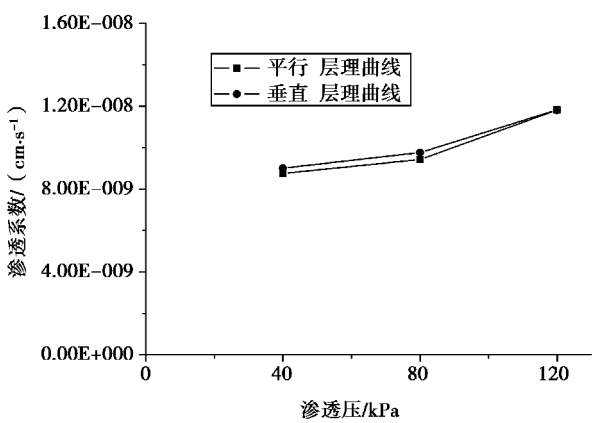


图4 平行和垂直层理取样砂岩的渗透系数变化曲线
Fig.4 Permeability coefficient changing curves of parallel and vertical stratification sampling of sandstone

如图4所示,在200 kPa围压下,对砂岩分别按平行层理和垂直层理进行制样,通过渗透试验发现两种情况渗透系数比较接近,所以在低围压低渗透压下,砂岩的层理对渗透影响不大。砂岩在沉积过程中,经过压实作用后层理并不明显,相邻两层之间胶结完好,并没有形成导水通道,当水流从基坑侧壁经过时,不会因为层理构造而产生导水裂隙带,从而危及基坑安全。

2.2 渗透系数与渗透压的关系

通过数据分析软件,将所测砂岩和砂质泥岩的渗透压与渗透系数曲线进行拟合,如图 5 和图 6 所示,拟合参数值及判定系数 R^2 如表 2 和表 3 所示。由数据可知:判定系数大部分达到 0.9 以上,拟合程度很高,这说明在围压变化过程中,砂质泥岩的渗透压与渗透系数之间存在一元二次函数关系,砂

岩的渗透压与渗透系数之间存在对数函数关系。
砂质泥岩拟合公式:
$$k = AP^2 + BP + C \tag{2}$$

砂岩拟合公式如下:
$$k = A\ln(P) + B \tag{3}$$

式中: k 为渗透系数, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; P 为渗透压, kPa; A , B , C 均为常数系数。

表 2 砂质泥岩拟合参数参考表
Table 2 Reference table for fitting parameters of sandy mudstone

曲线	常数系数拟合值			判定系数 R^2
	A	B	C	
围压 200 kPa 砂质泥岩	$1.186\ 8 \times 10^{-13}$	$-1.905\ 0 \times 10^{-12}$	$1.612\ 4 \times 10^{-8}$	0.745 3
围压 300 kPa 砂质泥岩	$-2.858\ 7 \times 10^{-13}$	$6.031\ 0 \times 10^{-11}$	$9.099\ 3 \times 10^{-9}$	0.911 6
围压 400 kPa 砂质泥岩	$-3.141\ 6 \times 10^{-13}$	$5.265\ 4 \times 10^{-11}$	$6.050\ 1 \times 10^{-9}$	0.941 7

表 3 砂岩拟合参数参考表
Table 3 Reference table for fitting parameters of sandstone

曲线	常数系数拟合值		判定系数 R^2
	A	B	
围压 200 kPa 砂岩	$9.770\ 2 \times 10^{-10}$	$3.977\ 8 \times 10^{-9}$	0.942 3
围压 300 kPa 砂岩	$3.113\ 0 \times 10^{-10}$	$3.173\ 3 \times 10^{-9}$	0.842 4
围压 400 kPa 砂岩	$6.110\ 6 \times 10^{-10}$	$2.995\ 9 \times 10^{-10}$	0.904 2

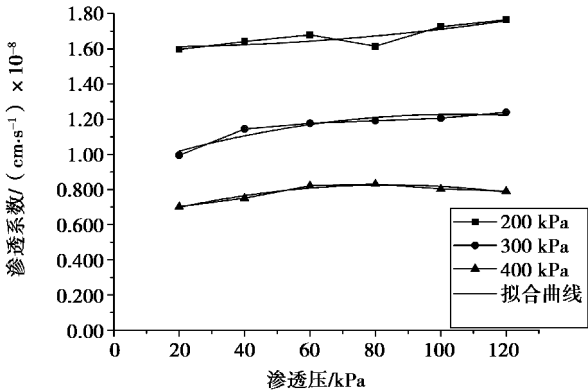


图 5 砂质泥岩渗透压与渗透系数拟合曲线
Fig. 5 Seepage pressure and permeability coefficient fitting curves of sandy mudstone

通过确定常数系数项,可以确定砂岩与砂质泥岩的渗透系数随渗透压变化的大小。

2.3 渗透系数与物理力学性质的关系

由表 1 知,砂质泥岩的孔隙率为 14.57%,小于砂岩 16.02%,但前者的吸水率是 34.05%,大于后者 32.87%,相同围压和渗透压下,砂质泥岩的渗透系数大于砂岩。由孔隙率与渗透系数对比可知,孔

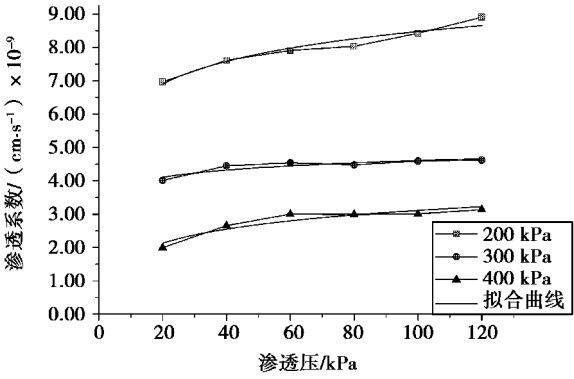


图 6 砂岩渗透压与渗透系数拟合曲线
Fig. 6 Seepage pressure and permeability coefficient fitting curves of sandstone

隙开闭合程度对渗透系数有影响。此外,渗透系数与吸水率有一定关系,虽然砂质泥岩的孔隙率小,但是对比吸水率推测其导通孔隙较多,能够通过更多水分;砂岩有更多的闭合孔隙,影响其吸水率,在低围压渗透过程中这些孔隙很难破坏,难以形成导水通道,不利于渗透,因此,吸水率大的岩石往往渗透系数也较大。由此可见,岩体孔隙率和吸水率与

渗透系数并不成正比关系,且二者与渗透系数的关系主要受岩体内部结构的孔隙通道的影响。

砂岩天然单轴抗压强度和饱和单轴抗压强度为 0.38 MPa 和 0.06 MPa,砂质泥岩分别为 0.36 MPa 和 0.05 MPa,两者天然状态下单轴抗压强度远大于饱和强度,并且在两种状态下,砂岩的抗压强度都大于砂质泥岩的抗压强度。在渗透试验中,岩体抗压强度的大小反映了围压对其影响的大小,砂岩抗压强度大、作用低围压时,内部结构破坏程度小,产生砂粒骨架搭建的闭合孔隙,使其渗透性能减弱。砂质泥岩遇水软化后,在围压作用下,内部结构先闭合,增加渗透压后,岩样内部将破坏重组,产生更多导水裂隙。由此,对于此二种岩体而言,渗透性能与内部结构孔隙通道有较强关系,并且内部结构的稳定性、结构破坏程度反映在其抗压强度指标上。

2.4 扫描电镜(SEM)试验结果分析

利用扫描电镜对渗透试验前后砂岩和砂质泥岩试样进行微观分析。砂岩试样选取 200 MPa 围压、120 kPa 渗透压渗透试验后试样。

对于砂岩试样,进行渗透试验之前如图 7 所示,通过观察发现其矿物颗粒相互胶结紧密,完整性好,中间并无明显裂隙;历经渗透试验之后,胶结

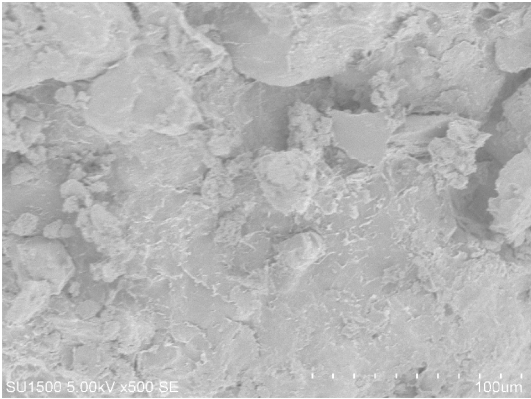


图 7 渗透试验前砂岩试样

Fig. 7 Sample of sandstone before penetrant test

作用被大量破坏,如图 8 所示,砂粒成独立个体存在,且出现走势相互交叉的裂隙。应当注意的是,砂岩结构内部胶结物相比于砂质泥岩要少,因此,所产生的裂隙宽度并不大。由此可以推断,在渗透压和冲刷的作用下,岩样内部逐渐失去胶结作用,砂粒个体性逐渐凸显。

对于砂质泥岩,渗透试验之前如图 9 所示,可以观察到砂粒被泥质胶结物牢牢包裹,无明显裂隙发育,岩样表现出较好的整体性;历经渗透试验之后,如图 10 所示,可以观察到:岩样内部泥质胶结

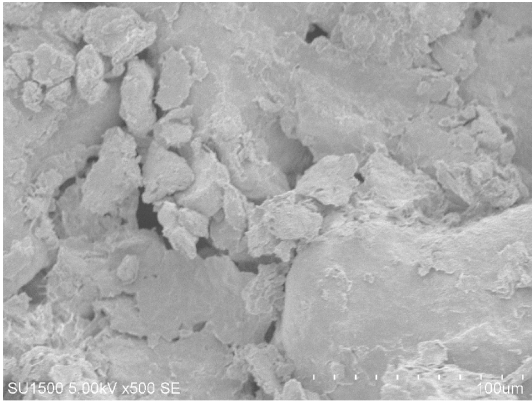


图 8 渗透试验后砂岩试样

Fig.8 Sample of sandstone after penetrant test



图 9 渗透试验前砂质泥岩试样

Fig. 9 Sample of sandy mudstone before penetrant test

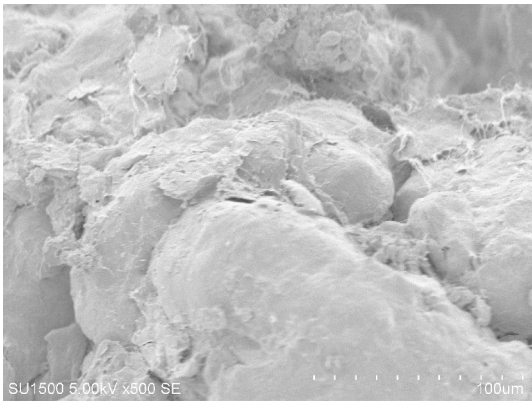


图 10 渗透试验后砂质泥岩试样

Fig.10 Sample of sandy mudstone after penetrant test

结构被破坏,被包裹的砂粒逐渐裸露,在原先泥质胶结物填充处出现明显的渗透通道,且通道直径较大,因此,导致其渗透系数大于砂岩试样。

随着试验进度的推移,砂岩与砂质泥岩的内部结构均被逐渐破坏,渗流条件发生变化。因此,在通常情况下将砂岩和砂质泥岩作为不透水层计算时,应考虑随着时间推移所造成的影响,也就是其渗透性的变化。所以,当以二者为地基时,基础的地下水抗浮问题必须重新考虑并慎重对待。

3 结论

(1)在300、400 kPa围压下,砂岩与砂质泥岩随渗透压的增大渗透系数都趋于稳定;200 kPa围压下随渗透压的增大,渗透系数在不断增大,围压对岩石渗透性影响较大。在同等围压和渗透压下,砂质泥岩的渗透系数要大于砂岩。

(2)通过拟合数据获得关系曲线,砂质泥岩的渗透压与渗透系数之间存在一元二次函数关系,砂岩的渗透压与渗透系数之间存在对数函数关系,根据拟合曲线可以推测不同渗透压下的渗透系数,了解变化趋势。

(3)渗透系数与岩石的吸水率和孔隙率有关,吸水率大小可以反映导通裂隙的情况,孔隙率提供了受围压后通道可能发展的空间,两者综合分析可得到渗透系数变化趋势。

(4)砂岩与砂质泥岩经历200 MPa围压、120 kPa渗透压渗透时,内部会发生结构破坏,形成微小裂隙,将影响其渗透性。

(5)工程实践中,岩石可能会产生裂隙等,将影响建筑抗浮,在设计中要引起足够重视。两者作为地基时,浮力能否进行折减,还有待进一步研究。

参考文献(References)

- [1] 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 Xiaoqin, Li Wenping, Li Hongliang, et al. Experimental study on permeability of sandstone during postpeak unloading of the confining pressure[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(4): 481-484. (in Chinese))
- [2] 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 Huanling, Xu Weiya, Yang Shengqi. 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))
- [3] 董莉. 砂质泥岩工程地质特性及其灾害防治对策[J]. 山西科技, 2004(3): 64-66. (Dong Li. The engineering geological features of the crag and the disaster prevention countermeasures[J]. Shangxi Science and Technology, 2004(3): 64-66. (in Chinese))
- [4] 彭苏萍,孟召平,王虎,等. 不同围压下砂岩孔渗规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 742-746. (Peng Suping, Meng Zhaoping, Wang Hu, et al. Testing study on pore ratio and permeability of sandstone under different confining pressures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2003, 22(5): 74-746. (in Chinese))
- [5] 黄远智,王恩志. 低渗透岩石渗透率与有效围压关系的试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(3): 340-343. (Huang Yuanzhi, Wang Enzhi. Experimental study of laws between the effect confining pressure and rock permeability [J]. Journal of Tsinghai University (Science and Technology), 2007, 47(3): 340-343. (in Chinese))
- [6] 王伟,吕军,刘桃根,等. 静水条件下砂岩渗透性的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2013(6): 719-724, 729. (Wang Wei, Lü Jun, Liu Taogen, et al. Experimental study on seepage properties of sandstone in hydrostatic condition [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013(6): 719-724, 729. (in Chinese))
- [7] 张渊,万志军,康建荣,等. 温度、三轴应力条件下砂岩渗透率阶段特征分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 677-683. (Zhang Yuan, Wan Zhijun, Kang Jianrong, et al. Analysis of stage characteristics of sandstone permeability under conditions of temperature and triaxial stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 677-683. (in Chinese))
- [8] 耿晓阳,张子新. 砂岩相似材料制作方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(1): 23-28, 142. (Geng Xiaoyang, Zhang Zixin. Study on preparation methods for similar materials of sandstone [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(1): 23-28, 142. (in Chinese))
- [9] 刘建军,刘先贵. 有效压力对低渗透多空介质孔隙度、渗透率的影响[J]. 工程地质学报, 2001, 7(1): 41-44. (Liu Jianjun, Liu Xiangui. The effect of effective pressure on porosity and permeability of low permeability porous media [J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 7(1): 41-44. (in Chinese))
- [10] 连会青,夏向学,王世东,等. 含水层微观孔隙分形特征与渗透性关联研究[J]. 工程勘察, 2014, 42(1): 36-41. (Lian Huiqing, Xia Xiangxue, Wang Shidong, et al. Association study of fractal characteristics of microscopic pore with permeability of aquifer [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, 42(1): 6-41. (in Chinese))
- [11] Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter ASTM(D5084-03) [S].
- [12] 贺玉龙,杨立中. 温度和有效应力对砂岩渗透性影响的试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(2): 36-38. (He Yulong, Yang Lizhong. Testing study concerning the effect of temperature and effective stress on permeability of sandstone [J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32(2): 36-38. (in Chinese))