DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201711027

溶蚀作用对破碎泥岩渗透特性的影响

吴疆宇[1,2],冯梅梅[1,2],陈占清[1,2],郁邦永[1],韩观胜[1]

(1.深部岩土力学与地下工程国家重点实验室(中国矿业大学),江苏 徐州 221116;
2.中国矿业大学 力学与土木工程学院,江苏 徐州 221116)

摘 要: 为研究溶蚀作用对破碎岩石渗透特性的影响,研制一种可测量质量流失条件下破碎岩石渗透特性的试验系统.在破碎泥岩的渗透试验中掺入岩盐模拟自然条件下存在的溶蚀现象,加速溶蚀过程.讨论溶蚀作用下破碎泥岩渗透特性的演化规律,分析溶蚀作用下渗透压力、岩盐质量和泥岩颗粒粒径对破碎泥岩渗透特性的影响.结果表明:溶蚀作用导致破碎岩石内易溶物质和细小颗粒的流失极易破坏岩样内部的孔隙结构和骨架结构,由此造成结构内部导水通道的扩大和渗透参数的突增.其渗透参数基本与渗透压力、岩盐质量和泥岩颗粒粒径呈正相关关系.且对于渗透压力较大、岩盐质量较高和泥岩颗粒粒径较大的岩样,由于溶蚀作用的存在容易发生更明显的导水通道扩大现象.此外,在岩样的渗流过程中,也存在由于颗粒迁移导致的导水通道堵塞造成的渗透参数逐渐减小的现象.

关键词: 渗流;破碎岩石;溶蚀;质量流失;颗粒迁移
中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)02-0117-09

Dissolution effects on the seepage property of broken mudstone

WU Jiangyu[1,2], FENG Meimei[1,2], CHEN Zhanqing[1,2], YU Bangyong[1], HAN Guansheng[1]

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering (China University of Mining & Technology), Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the effect of dissolution on the seepage property of broken rock, an experimental system for testing the seepage property of broken rock under the condition of mass loss was designed. The halite was added in the broken mudstone to simulate the dissolution phenomena in nature, which can accelerate the dissolution process. The evolution law of seepage property of broken mudstone under dissolution was discussed. The effects of seepage pressure, halite content, and particle size of mudstone on the permeability of broken mudstone under dissolution were analyzed. The results show that dissolution caused loss of soluble matters and fine particles in broken rock to damage the pore structure and framework structure inside that specimen easily, thereby resulting in the expansion of underground watercourse in structure and the sharp increase of permeability parameters. The permeability parameters were positively related to the seepage pressure, halite content, and particle size of mudstone. For the rock specimen with greater seepage pressure, higher halite content, and larger particle size of mudstone, the more obvious expansion of underground watercourse tended to occur due to dissolution. In addition, in the seepage process of rock specimens, the watercourse blockage caused by the particles migrations also occurred, which results in the gradual decrease of permeability parameters.

Keywords: seepage; broken rock; dissolution; mass loss; particle migration

泥质岩石广泛分布于中国华南、中南和西南地区[1],具有遇水易被泥化、受扰动易崩解破裂等特点[2-3],在诸多工程中表现出较差的工程行为[4].如在江西、湖南和湖北等泥质岩石山区修建公路、铁路及水坝等边坡工程中,其路堑边坡或高坝边坡在地表水和基岩裂隙水的作用下,极易发生失稳破坏[5-7].因此,付宏渊等[8]和曾铃等[9]研究了降雨入渗条件下软岩边坡结构内孔隙水压力分布的时效变化规律.在这些泥质岩石地区进行地下工程施工(如修建隧道和地下资源开采等),受构造、扰动及地下水等因素的影响[10-11],岩体裂隙充分发育导致岩体结构扩容变形乃至破坏或形成导水通道[12],引发塌方和突水等地质灾害,严重危害施工安全和工程稳定性[13].此外,Boldin 等[14]认为在泥质地层中进行隧道开挖时,难以确定施工期间观测到的结构变形和孔隙水压力测量值的真实性,造成工程相关参数的失效,严重影响施工工期和工程效益.

收稿日期: 2017-11-07
基金项目: 国家自然科学基金(51404266)
作者简介: 吴疆宇(1992—),男,博士研究生;
陈占清(1961—),男,教授,博士生导师
通信作者: 冯梅梅,fengmeimei@cumt.edu.cn

关于泥质岩石的物理力学特性，诸多学者对完整岩样进行了大量的试验研究，包括单、三轴[15]及蠕变[16-17]等条件下泥质岩石的强度特性、变形特性、微观结构演化、声发射和破坏特征等[18-22]，得到了一些有益的结论. 例如，Wasantha 等[23]通过常规三轴试验研究了孔隙水压对泥质砂岩强度参数的影响；刘新荣等[24]利用 SEM 电镜扫描揭示了干湿循环条件下泥质砂岩微观结构的演化，讨论了水对泥质岩石微观结构的劣化机制；此外，Baud 等[25]认为水的存在不仅劣化了泥质岩石的微观结构和力学特性，还改变了其宏观破坏特征. 事实上，多数泥质岩石极易吸水膨胀[26]、崩解碎裂[27]，形成破碎岩石[28]. 破碎岩石的力学特性与完整岩石差异较大，主要表现为渗透特性的巨大差异，因此，有必要对破碎岩石的渗透特性进行系统的研究.

对于破碎岩石的渗透实验，刘卫群等通过稳态渗流法研究了轴向应力与破碎岩石渗透系数的关系[37]；李顺才等[30-31]分析了破碎岩石的孔隙度、粒径、渗透压力和岩性等对破碎岩石渗透特性的影响机制；孔海陵等[32]讨论了 6 种不同粒径下破碎岩石的孔隙度与渗透率的关系；马丹等[33]利用 MTS815 岩石力学试验系统对承压破碎泥岩进行渗透试验，得到了破碎泥岩非 Darcy 流渗透参数与孔隙度的关系. 以上研究主要讨论质量守恒条件下破碎岩石的渗透特性，即在破碎岩样两端面加盖毛毡或滤布，防止岩土颗粒的流失，以此渗透参数作为岩土材料的基本参数. 然而这种方法并不适合表征存在质量流失的工程岩土体的，例如在泥质岩石地区，由于其岩石内亲水性黏土矿物及其他可溶物质随水溶蚀，造成细小颗粒迁移和岩土体质量流失，导致工程岩土体孔隙度增大和渗透特性增大，极易发生渗流失稳[34-36]. 因此，探讨溶蚀作用对破碎岩石渗透特性的影响对防治工程渗流灾害具有重要意义.

由于破碎岩石的溶蚀过程较缓慢，在正常情况下测试破碎岩石渗透性变化花费的试验时间过长，无法满足工程要求. 为此，提出了加速渗透试验的方法[37]，其中王路珍等通过增大渗透压力的途径实现了加速渗透试验，得到了水流形态转变前质量流失时间与岩石粒径、初始孔隙度、渗透压力的关系，建立了水流形态的转变条件，运用质量流失的观点解释了破碎泥岩渗流失稳机理[38]. 本文通过在破碎泥岩中掺入岩盐的途径实现溶蚀的加速[39-40]，设计合理的试验方案，得到了渗透压力、岩盐含量、颗粒粒径对破碎岩石渗透特性的影响，讨论了溶蚀作用对破碎泥岩渗透特性的影响.

1 试 验

1.1 试验系统

在文献[41]的基础上，研制了一套考虑质量流失的破碎岩石渗流试验系统，见图 1. 系统由 5 部分组成，分别为渗透压力加载及控制系统 A、轴向位移加载及控制系统 B、渗透系统 C、数据采集与分析系统 D 及渗透液回收系统 E.

渗透压力加载及控制系统 A，由双作用液压缸、油泵站和水泵组成，能够提供可调的、稳定的渗透压力，可模拟工程现场的水压力. 其主要原理是通过水泵给双作用液压缸充水，通过油泵站提供稳定的油压控制双作用液压缸提供稳定的渗透压力.

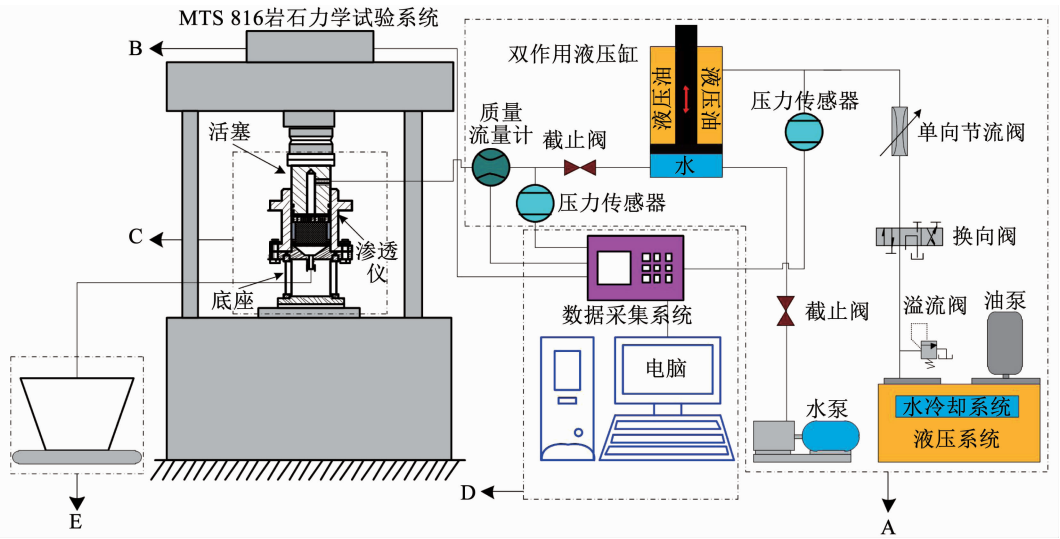

图 1 试验系统

Fig. 1 Experimental system

轴向位移加载及控制系统 B，由 MTS816 岩石力学试验系统构成，通过位移或力的控制方式向岩样施加载荷，控制破碎岩样的高度，进而计算出岩样的初始孔隙度，以模拟工程现场的破碎岩石孔隙度.

渗透系统 C，由渗透仪、透水板、活塞和底座等构成，具有开放性的优点，可以进行伴有质量流失的破碎岩石渗流试验.

数据采集与分析系统 D，由压力传感器、流量传感器和数据采集器等组成，可实时采集试验过程中的渗透压力和流量.

渗透液回收系统 E，由振动筛、细纱布和电子天平等组成，用于过滤水并收集迁移出的细小颗粒.

1.2　岩样制备

图 2 为泥岩岩样 X-ray diffraction（XRD）衍射频谱，可以看出，岩样内含有高岭石等强亲水性黏土矿物，高岭石与水分子结合导致体积膨胀变形（$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 + nH_2O \rightarrow Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 \cdot nH_2O$），造成该类岩石遇水易崩解破裂. 表 1 给出了泥岩的主要物理特性. 图 3 给出了岩盐的 XRD 衍射频谱，其天然密度为 2.06 g/cm^3.

表 1　泥岩物理特性

Tab. 1　Physical properties of mudstone

天然密度/（g·cm^{-3}）	干密度/（g·cm^{-3}）	饱和密度/（g·cm^{-3}）	孔隙度	饱和含水率/%	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	加载速率/（mm·s^{-1}）
2.43	2.40	2.48	0.08	3.23	38.97	5.63	0.002

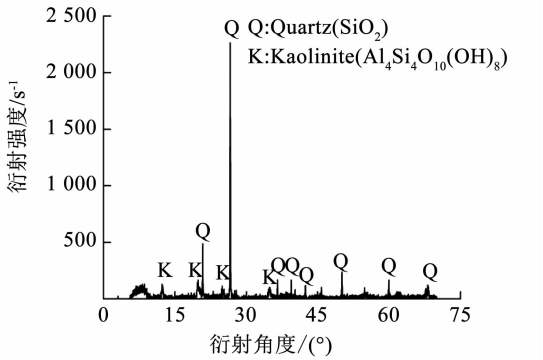

图 2　泥岩 XRD 频谱

Fig. 2　XRD spectrum of mudstone

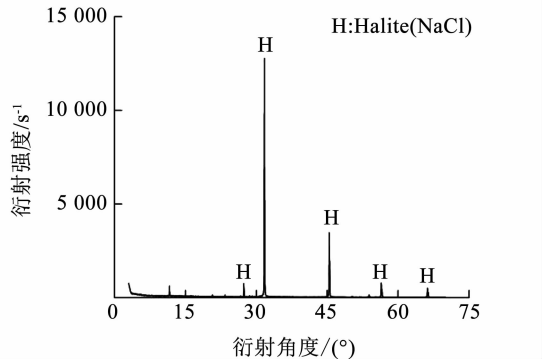

图 3　岩盐 XRD 频谱

Fig. 3　XRD spectrum of halite

为了消除颗粒的尺寸效应对试验结果造成的影响，美国材料与试验协会（ASTM）[42] 认为颗粒尺寸最大不得超过圆柱岩样的 1/3，而吴疆宇等[43] 建议将圆柱岩样尺寸设定为最大颗粒尺寸的 5 倍. 本次试验采用的最大颗粒粒径为 15 mm，渗透仪内径为 100 mm，故满足试验要求.

试验前先将泥岩破碎并筛分为粒径范围分别为 0 ~ 2.5，2.5 ~ 5.0，5.0 ~ 8.0，8.0 ~ 10.0，10.0 ~ 12.0 和 12.0 ~ 15.0 mm 的颗粒. 岩盐破碎并筛分为 0 ~ 1 mm 粒径颗粒.

1.3　试验方案

泥岩遇水膨胀、崩解破裂，导致岩体结构内所含易溶矿物和泥化的泥岩小颗粒随水流出. 在开采扰动、开挖扰动或交变荷载扰动等条件下，岩体裂隙结构进一步发育促使该易溶矿物和泥化的泥岩小颗粒等加速流失. 由于实验室内破碎岩石的溶蚀过程较缓慢，在正常情况下测试破碎岩石渗透性变化花费的试验时间过长. 因此，将破碎好的泥岩和岩盐混合均匀，再进行破碎岩石的渗透试验，加速破碎岩石渗透过程中的溶蚀作用. 最初岩盐颗粒遇水溶解转变为更小的岩盐颗粒，直至完全溶于水并流出结构. 这较好地体现了泥质岩石地区工程中实际存在的溶蚀作用对岩体渗透特性的影响.

将混合均匀的破碎岩石置于渗透仪中，记录散体堆积材料在渗透仪中的高度并计算其天然堆积状态下的孔隙度. 控制 MTS816 系统按 1 mm/min 的速率加载至岩样初始孔隙度达到 0.13 后保持此位移不变，此时岩盐质量为 50 g 的破碎岩样的密度为 2.10 g/cm^3，岩盐质量为 100 g 的破碎岩样的密度为 2.08 g/cm^3，岩盐质量为 150 g 的破碎岩样的密度为 2.07 g/cm^3，岩盐质量为 200 g 的破碎岩样的密度为 2.05 g/cm^3[44-46]. 对渗透系统进行调试，设定初始渗透压力后对破碎岩样进行渗透试验. 其中单个岩样所需泥岩颗粒总质量为 1 000 g，试验方案见表 2.

试验过程中，流量 Q 可由质量流量计直接获得，渗流速度 ν 可由流量 Q 计算得到，即

$$\nu = \frac{Q}{\pi a^2}, \tag{1}$$

式中：a 为渗透仪内半径，a = 50 mm.

表 2 试验方案

Tab. 2 Experimental program

岩样编号	渗透压力 p/MPa	岩盐质量 m/g	颗粒粒径 d/mm
1 – 1	0.2	100	5 ~ 8
1 – 2	0.5	100	5 ~ 8
1 – 3	0.8	100	5 ~ 8
1 – 4	1.2	100	5 ~ 8
2 – 1	0.2	50	5 ~ 8
2 – 2	0.2	100	5 ~ 8
2 – 3	0.2	150	5 ~ 8
2 – 4	0.2	200	5 ~ 8
3 – 1	0.5	100	2.5 ~ 5
3 – 2	0.5	100	5 ~ 8
3 – 3	0.5	100	8 ~ 10
3 – 4	0.5	100	10 ~ 12
3 – 5	0.5	100	12 ~ 15

2 试验结果与分析

为了探讨溶蚀作用对破碎泥岩渗透特性的影响，图 4 给出了破碎泥岩 1 ~ 3 岩样渗流全程流量时变和渗透压力时变的曲线. 在渗流初期 oa，流量达到极值，这是由于岩样的初始孔隙度较大为 0.13，且岩样内含有易溶的 0 ~ 1 mm 岩盐，岩盐随水溶蚀扩大岩样内导水通道，劣化破碎岩样内部孔隙结构，使流量进一步增大. 在渗流中期 ab，流量呈波动形态减小，这是由于岩样内导水通道扩大和水压冲刷作用使上层泥岩小颗粒逐渐迁移至岩样底部，堵塞岩样底部导水通道. 同时，与导水通道连通的岩盐不断溶出，造成流量的波动. 在此过程中，由于较大的冲刷水压与泥岩颗粒迁移的共同作用，使得原本闭合的孔隙得以贯通，处于闭合孔隙内的岩盐随水进一步溶出，再次扩大岩样内的导水通道，造成流量突增的现象，如图中点 I_1、I_2、I_3. 对于在长期强降雨和外载扰动条件下的边坡岩土体，这一过程造成岩土颗粒迁移、岩土体质量流失，必将加速工程岩土体的失稳破坏. 在渗流后期 bc，流量和渗透压力逐渐趋于稳定，岩样内岩盐已基本随水溶出，不存在溶蚀及颗粒迁移现象，破碎泥岩岩样内部存在较稳定的导水通道. 值得注意的是，在渗流初期 oa 及中期 ab，溶蚀作用造成岩样内部泥岩颗粒迁移、孔隙结构及导水通道的变化，使得点 I_1、I_2、I_3 的流量突增，而渗透压力突降，表明在破碎岩样内导水通道扩大瞬时，流量与渗透压力存在相关性.

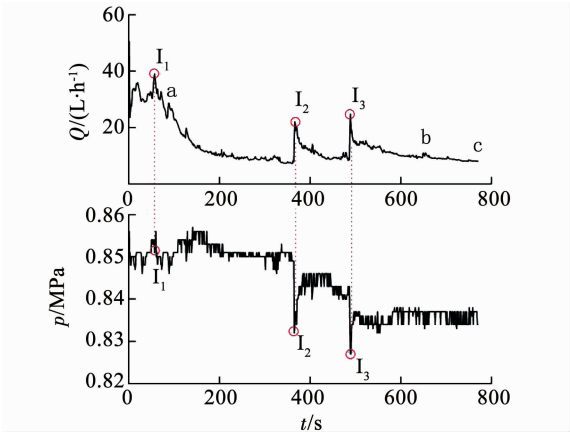

图 4 破碎泥岩 1 ~ 3 岩样渗流全程流量时变和渗透压力时变曲线

Fig. 4 Flow and hydraulic time varying curves of 1 – 3 broken mudstone specimens under seepage

2.1 渗透压力对破碎泥岩渗透特性的影响

图 5、6 给出了不同渗透压力下岩样的流量时变和水压时变曲线，可以看出：溶蚀作用对破碎泥岩渗透特性的影响在较高的渗透压力下表现得更为明显，岩样在初始渗透压力为 1.2 和 0.8 MPa 条件下，表征出明显的导水通道扩大现象，见图中 I 点，表明此时存在较多的岩盐随水溶出造成原本闭合的孔隙得以贯通. 相对应的参数表征体现在岩样的流量时变上，其中在初始渗透压力为 1.2 MPa 条件下，岩样于 t = 38 s 时流量迅速由 12.49 L/h 增大至 68.81 L/h，增大了 451%，此时相对应的渗透压力突降至 1.135 MPa. 在初始渗透压力为 0.8 MPa 条件下，岩样则在 t = 366 s 时流量由 7.23 L/h 突增至 22.1 L/h，增大了 206%，其由于溶蚀作用发生导水通道扩大的现象相对较晚于初始渗透压力为 0.8 MPa 下的岩样，且其流量突增百分比相对更小. 而对于渗透压力为 0.2 和 0.5 MPa 岩样则未发生明显的导水通道扩大现象，其流量时变及渗透压力时变曲线相对于初始渗透压力为 1.2 和 0.8 MPa 条件下的岩样更平缓，达到渗透稳定历时更短. 这是由于渗透压力较小，破碎泥岩闭合孔隙内的岩盐无法随水溶出，其内部不足以形成新的满足泥岩颗粒迁移的导水通道，故其较早达到渗流稳定.

需要指出的是，渗透压力不仅对破碎泥岩渗流初期 oa 及中期 ab 的溶蚀过程产生影响，也对其渗流后期 bc 的稳定阶段产生影响，结合图 5 和表 3 不同渗透压力岩样的渗透参数，不难发现：渗流初期 oa 的流量极值和渗流速度极值、渗流后期 bc 的流量稳定值和渗流速度稳定值与渗透压力均呈正相关关系. 其中渗透压力为 1.2 MPa 岩样的流量极值为 116.71 L/h，与渗透压力为 0.2，0.5 和 0.8 MPa 下

岩样相比分别增大了 275%，206% 和 131%；渗透压力为 1.2 MPa 岩样的流量稳定值为 11.45 L/h，与渗透压力为 0.2，0.5 和 0.8 MPa 下岩样相比分别增大了 856%，179% 和 42%.

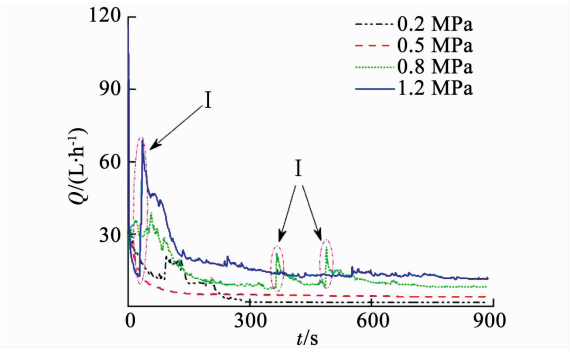

图 5　不同渗透压力岩样流量时变曲线

Fig. 5　Flow time varying curves of specimens with different seepage pressure

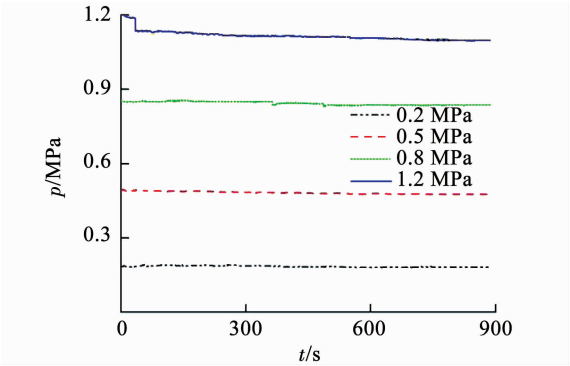

图 6　不同渗透压力岩样水压时变曲线

Fig. 6　Hydraulic time varying curves of specimens with different seepage pressure

表 3　不同渗透压力岩样渗透参数

Tab. 3　Permeability parameters of specimens with different seepage pressure

p/MPa	Q_{max}/(L·h^{-1})	v_{max}/(10^{-5} m·s^{-1})	Q_s/(L·h^{-1})	v_s/(10^{-5} m·s^{-1})
0.2	31.10	109.99	1.67	5.91
0.5	38.17	135.00	4.10	14.50
0.8	50.52	178.68	8.07	28.54
1.2	116.71	412.78	11.45	40.50

注：下标 max 表征极值，下标 s 表征稳定值

2.2　岩盐质量对破碎泥岩渗透特性的影响

图 7 给出了不同岩盐质量下岩样的流量时变曲线，可以看出，在溶蚀作用的影响下，岩盐质量为 100，150 和 200 g 的岩样均发生了导水通道扩大现象，但由于渗透压力较小，保持在 0.2 MPa 左右，该现象并不十分明显. 其中岩盐质量为 200 g 岩样由于岩盐质量较高，在较小渗透压力条件下，岩样达到渗透稳定历时最长. 在溶蚀作用和颗粒迁移的共同作用下，其在渗流后期仍表现出流量反复波动现象. 而岩盐质量为 50 g 岩样达到渗透稳定历时最短，且其在渗流过程中未发现明显的流量突增、水压突降的导水通道扩大现象. 需要解释的是：岩盐质量为 100 g 岩样在 t = 146 s 时发生了一次较其他岩样更明显的流量突增现象，流量由 11.18 L/h 突增至 21.38 L/h，增大了 91.23%. 这是由于岩样内某一较大的闭合孔隙在水压冲刷及颗粒迁移的相互作用下得以贯通，孔隙内岩盐随水溶出形成新的导水通道，造成破碎泥岩渗透特性突增.

另外，岩盐质量不仅对破碎泥岩渗流初期 oa 及中期 ab 的溶蚀过程产生影响，也对其渗流后期 bc 的稳定阶段产生影响，结合图 7 及表 4 不同岩盐质量岩样渗透参数不难发现：渗流初期 oa 的流量极值、渗流速度极值和渗流后期 bc 的流量稳定值、渗流速度稳定值与岩盐质量均呈正相关关系. 以渗流后期 bc 的渗流速度稳定值为例，岩盐质量为 200 g 岩样的渗流速度达到了 245.10 × 10^{-5} m/s，与岩盐质量为 50，100 和 150 g 岩样相比分别增大了 2 545%，414% 和 7%.

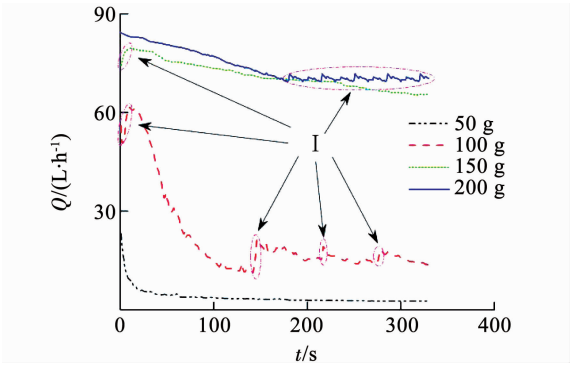

图 7　不同岩盐质量岩样流量时变曲线

Fig. 7　Flow time varying curves of specimens with different contents of halite

表 4　不同岩盐质量岩样渗透参数

Tab. 4　Permeability parameters of specimens with different contents of halite

m/g	Q_{max}/(L·h^{-1})	v_{max}/(10^{-5} m·s^{-1})	Q_s/(L·h^{-1})	v_s/(10^{-5} m·s^{-1})
50	23.14	81.84	2.66	9.30
100	61.58	217.79	13.69	39.54
150	79.56	281.39	65.52	231.09
200	84.18	297.73	70.37	245.10

2.3　颗粒粒径对破碎泥岩渗透特性的影响

图 8 给出了不同泥岩颗粒粒径岩样的流量时变曲线，可以看出，在溶蚀作用的影响下，泥岩颗粒粒径为 8 ~ 10，10 ~ 12 和 12 ~ 15 mm 的岩样均发生了

较明显的导水通道扩大现象，而 2.5 ~ 5，5 ~ 8 mm 岩样则未发生该现象. 结合表 5 不同泥岩颗粒粒径岩样渗透参数不难发现：岩样的渗透参数基本上随泥岩颗粒粒径的增大而增大，但 12 ~ 15 mm 岩样在渗流后期 *bc* 的流量反而比 8 ~ 10 和 10 ~ 12 mm 岩样小. 另外，10 ~ 12 mm 岩样在渗流中期 ab 的流量比 8 ~ 10 和 12 ~ 15 mm 岩样均小，但其在 $t = 693$ s 时流量由 10.28 L/h 突增至 58.84 L/h，增大了 472%，表明在岩盐溶蚀和颗粒迁移的共同影响下，存在一个较大的闭合孔隙得以贯通，孔隙内的岩盐随水溶出，进一步扩大岩样内的导水通道. 之后其流量明显大于 8 ~ 10 和 12 ~ 15 mm 岩样，表明破碎泥岩的渗透特性还与岩样内岩石颗粒的排列方式及孔隙结构（导水通道）等密切相关.

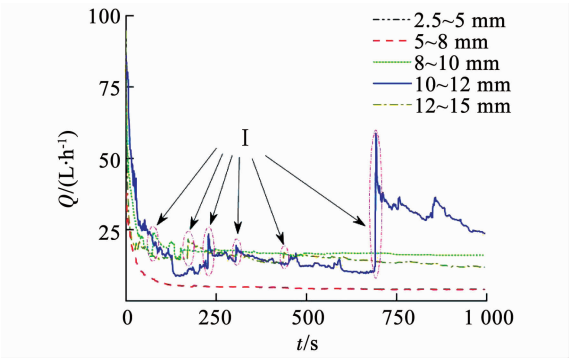

图 8 不同泥岩颗粒粒径岩样流量时变曲线

Fig. 8 Flow time varying curves of specimens with different particle sizes of mudstone particles

表 5 不同泥岩颗粒粒径岩样渗透参数

Tab. 8 Permeability parameters of specimens with different particle sizes of mudstone particles

d/mm	Q_{max}/(L·h^{-1})	v_{max}/(10^{-5} m·s^{-1})	Q_s/(L·h^{-1})	v_s/(10^{-5} m·s^{-1})
2.5 ~ 5	0.01	0.04	0.01	0.04
5 ~ 8	38.17	135.00	4.10	14.50
8 ~ 10	69.18	244.67	16.04	56.73
10 ~ 12	87.11	308.09	23.72	83.89
12 ~ 15	94.75	335.11	12.35	43.68

值得注意的是泥岩颗粒粒径为 2.5 ~ 5 mm 的岩样具有较好的隔水性能，其在整个渗流过程中没有发生溶蚀现象，流量和渗流速度始终保持在 0.01 L/h和 0.04×10^{-5} m/s 左右. 这是由于该岩样的泥岩颗粒粒径最小，颗粒总表面积最大，颗粒与水充分接触，泥岩颗粒膨胀导致岩样内孔隙封闭，降低了破碎泥岩的渗透性. 表明受外载扰动较小的压实破碎岩石，其内部孔隙较封闭，导水通道仍未形成，结构较稳定，岩石内易溶物质或细小颗粒较难随水溶出，因此，具有更低的渗透特性.

3 讨 论

通常采用 Darcy 流来描述岩土体的渗流行为，其可以较好地表征岩土体在压剪状态下孔隙度减小和渗透特性减小的工程行为. 然而在实际工程中，即使严格按照岩土工程安全设计标准进行施工，依然发生了许多工程灾害. 以边坡失稳为例，经过长时间的强降雨成为边坡失稳最常见也最频繁的诱因，通常将这种灾害发生的原因归结为不可预见的地质或自然条件. 刨除偷工减料、特大地震或战争爆发等因素的影响，难道在经过极其富有经验的岩土科技工作者详细的现场勘查及工程设计后，长时间的强降雨就能造成如此严重的工程灾害[47]？显然在其根源上必然存在着某种缺陷[48].

通常，对岩土材料进行渗透测试是基于质量守恒条件的，即在试样两端面加盖毛毡或滤布，防止岩土颗粒的流失，以此渗透特性作为岩土工程设计的基本参数. 显然，这种方法被扩大化地应用在存在质量流失条件下的工程中，其不能解释岩土体存在质量流失造成的孔隙度增大和渗透特性增大乃至强度减小的工程行为. 因此，探讨质量流失对岩土体渗透特性的影响，不论是在理论上还是在工程上均具有极其重要的意义.

图 9 给出了渗流初期 oa 阶段的渗流速度极值和渗流后期 *bc* 阶段的渗流速度稳定值与渗透压力的关系. 可以看出，渗流速度的稳定值与渗透压力呈线性关系，这是由于此时已达到渗流稳定状态，破碎岩体内部的导水通道形成稳定且不易改变，此时可以采用 Darcy 流来描述破碎岩体的渗流行为. 但是对于渗流速度的极值与渗透压力的关系，则呈现出明显的非线性变化，其较宜采用指数关系来描述. 且对于整个渗流过程，由于溶蚀作用的存在，导致破碎岩体内部质量流失、颗粒迁移和孔隙结构变化等，必然引起破碎岩体渗透特性的非线性变化[34]. 如图 10 所示，其存在由于溶蚀导致的导水通道扩大而造成的渗透参数突增的现象（见 I_i），也存在由于颗粒迁移导致的导水通道堵塞造成的渗透参数逐渐减小的现象. 因此，由 v_{max} 转变为 v_s 的过程必然也是非线性的，并且该过程是极其复杂的. 这里，本文试验在破碎岩样的底部放置了一块含孔径为 2 mm 的渗透板模拟外载扰动下导水裂隙带的边界条件[49]，随着时间的推移，该边界在外载扰动下将逐渐增大，将存在溶蚀作用造成破碎岩体渗透突水突泥、山体滑坡等灾害. 据此不难理解渗流失稳往往伴随着结构失稳，溶蚀作用导致岩土体内部易溶物质和细小颗粒

等的流失，造成工程岩土体孔隙度增大、渗透特性增大乃至强度降低，极大地破坏了其内部孔隙结构和骨架结构. 本文试验主要讨论溶蚀作用对破碎岩体渗透特性的影响，而针对溶蚀作用对破碎岩体突水突泥、边坡失稳破坏等灾害的影响必须建立在该基础和岩土体结构变化相耦合的基础上，这部分内容正是未来致力于破碎岩土体非线性渗流行为研究而应该攻克的难题.

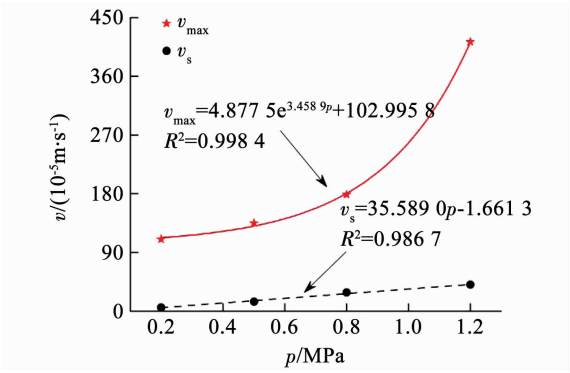

图 9　渗流速度与渗透压力的关系

Fig. 9　Relationship between seepage velocity and seepage pressure

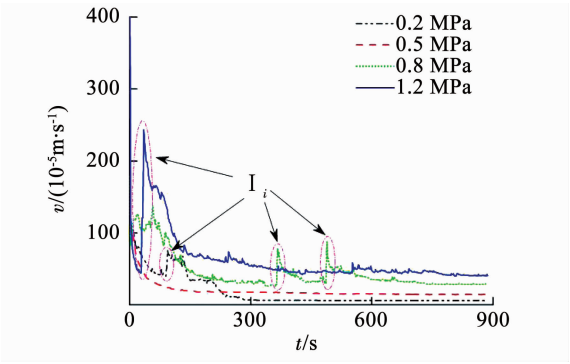

图 10　不同渗透压力岩样渗流速度时变曲线

Fig. 10　Seepage velocity time varying curves of specimens with different seepage pressure

4　结　论

1）溶蚀作用导致破碎岩石内易溶物质和细小颗粒的流失极易破坏岩样内部的孔隙结构和骨架结构，由此造成结构内部导水通道的扩大和渗透参数的突增.

2）岩样渗流初期的流量极值和渗流速度极值、渗流后期的流量稳定值和渗流速度稳定值与渗透压力和岩盐质量均呈正相关关系，渗透压力较大和岩盐质量较高的岩样由于溶蚀作用的存在发生了较明显的导水通道扩大现象.

3）在溶蚀作用的影响下，泥岩颗粒粒径为 8 ~ 10，10 ~ 12，12 ~ 15 mm 的岩样均发生了较明显的导水通道扩大现象，其改变了破碎泥岩岩样内岩石颗粒的排列方式及孔隙结构（导水通道）. 而泥岩颗粒粒径为 2.5 ~ 5 mm 的岩样，由于细小泥岩颗粒与水充分接触膨胀导致岩样内孔隙结构封闭，岩样内易溶物质和细小颗粒较难随水渗出，因此，表现出较低的渗透特性.

致谢　在试验过程中，中国矿业大学茅献彪教授和李玉寿高级工程师给予了诸多帮助，在此表示衷心的感谢.

参考文献

[1]ZHAO M H, ZOU X J, ZOU P X W. Disintegrationcharacteristics of red sandstone and its filling methods for highway roadbed and embankment[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(5): 404. DOI:10.1061/(ASCE)0899 - 1561(2007)19:5(404)

[2]杨建林，王来贵，李喜林，等. 露天矿泥岩路基双重改性研究[J]. 岩土工程学报，2015，37(8)：1469
YANG Jianlin, WANG Laigui, LI Xilin, et al. Double modification for mudstone roadbed of open pit mines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1469. DOI:10.11779/CJGE201508016

[3]柴肇云，张亚涛，张学尧，等. 泥岩耐崩解性与矿物组成相关性的试验研究[J]. 煤炭学报，2015，40(5)：1188
CHAI Zhaoyun, ZHANG Yatao, ZHANG Xuerao, et al. Experimental investigations on correlation with slake durability and mineral composition of mudstone[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 1188. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2014.0897

[4]杨建林，王来贵，李喜林，等. 遇水-风干循环作用下泥岩断裂的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报，2014，33(s2)：3606
YANG Jianlin, WANG Laigui, LI Linxi, et al. Research on micro-fracture mechanism mudstone after wet-dry cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(s2): 3606. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.027

[5]罗元华，伍法权，常中华. 三峡库区奉节县新城区 T_2b^3 泥质灰岩斜坡变形破坏模式的现象学研究[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24(12)：2029
LUO Yuanhua, WU Faquan, CHANG Zhonghua. Phenomenology research on deformation and failure modes of slopes composed of argillaceous limestone of the third number of Badong Group (T_2b^3) in new site of Fengjie County of Three Gorges Reservoir area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2029. DOI:10.3321/j.issn:1000 - 6915.2005.12.005

[6]陈仁朋，吴进，亓帅，等. 高铁路基粗颗粒土水力学参数测试方法研究[J]. 岩土力学，2015，36(12)：3365
CHEN Renpeng, WU Jin, QI Shuai, et al. A method for measuring hydraulic parameters of coarse-grained soils for high-speed railway subgrade[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3365. DOI:10.16285/j.rsm.2015.12.004

[7]郑宏，刘德富，罗先启. 基于变形分析的边坡潜在滑面的确定[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(5)：709
ZHENG Hong, LIU Defu, LUO Xianqi. Determination of potential slide line of slopes based on deformation analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 709. DOI:10.3321/j.issn:1000 - 6915.2004.05.001

[8]付宏渊, 曾铃, 王桂尧, 等. 降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2359
FU Hongyuan, ZENG Ling, WANG Guirao, et al. Stability analysis of soft rock slope under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2359. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2012.08.019

[9]曾铃, 付宏渊, 何忠明, 等. 饱和-非饱和渗流条件下降雨对粗粒土路堤边坡稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014(10): 3614
ZENG Ling, FU Hongyuan, HE Zhongming, et al. Impact of rainfall on stability of granular soil embankment slope considering saturated-unsaturated seepage[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014(10): 3614

[10]YANG T H, JIA P, SHI W H, et al. Seepage-stress coupled analysis on anisotropic characteristics of the fractured rock mass around roadway[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 43(7): 11. DOI:10.1016/j.tust.2014.03.005

[11]SWEETENHAM M G, MAXWELL R M, SANTI P M. Assessing the timing and magnitude of precipitation-induced seepage into tunnels bored through fracturedrock[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 65: 62. DOI:10.1016/j.tust.2017.02.003

[12]LI L C, YANG T H, LIANG Z Z, et al. Numerical investigation of groundwater outbursts near faults in underground coal mines[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 85(3): 276. DOI:10.1016/j.coal.2010.12.006

[13]YANG T H, LIU J,ZHU W C, et al. A coupled flow-stress-damage model for groundwater outbursts from an underlying aquifer into mining excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, 44(1): 87. DOI:10.1016/j.ijrmms.2006.04.012

[14]BOLDINI D, GRAZIANI A. Remarks on axisymmetric modelling of deep tunnels in argillaceous formations-II: Fissured argillites[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28(3): 80. DOI:10.1016/j.tust.2011.10.007

[15]YANG S Q, JING H W, WANG S Y. Experimental investigation on the strength, deformability, failure behavior and acoustic emission locations of red sandstone under triaxial compression[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2012, 45(4): 583. DOI:10.1007/s00603-011-0208-8

[16]YANG D S, CHEN L F, YANG S Q, et al. Experimental investigation of the creep and damage behavior of Linyi red sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2014, 72:164. DOI:10.1016/j.ijrmms.2014.09.001

[17]TIAN H M, CHEN W Z, YANG D S, et al. Experimental and numerical analysis of the time-dependent behaviour of argillaceous red sandstone under high in situ stress[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2015, 74(2): 567. DOI:10.1007/s10064-014-0647-z

[18]胡 斌, 蒋海飞, 胡新丽, 等. 紫红色泥岩剪切流变力学特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(s1): 2796
HU Bin, JIANG Haifei, HU Xinli, et al. Analysis of shear rheological mechanical properties of fuchsia mudstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(s1): 2796. DOI:10.3969/j.issn.1000-6915.2012.z1.026

[19]王传洋, 杨春和, 衡帅, 等. 压缩荷载下泥岩裂缝演化规律的CT试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1591
WANG Chuanyang, YANG Chunhe, HENG Shuai, et al. CT test for evolution of mudstone fractures under compressive load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1591. DOI:10.16285/j.rsm.2015.06.009

[20]曾铃, 付宏渊, 贺炜, 等. 三轴CT条件下预崩解炭质泥岩路堤填料的细观试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014(3): 925.
ZENG Ling, FU Hongyuan, HE Wei, et al. Micro mechanical analysis of pre-disintegrating carbonaceous mudstone for embankment filling material based on triaxial CT test[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2014(3): 925

[21]WASANTHA P L, RANJITH P G, SHAO S S. Energy monitoring and analysis during deformation of bedded-sandstone: Use of acoustic emission[J]. Ultrasonics, 2014, 54(1): 217. DOI:10.1016/j.ultras.2013.06.015

[22]田洪铭, 陈卫忠, 肖正龙, 等. 泥质粉砂岩高围压三轴压缩松弛试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1433. DOI:10.11779/CJGE201508011
TIAN Hongming, CHEN Weizhong, XIAO Zhenglong, et al. Triaxial stress relaxation properties of argillaceous siltstone under high confining pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1433. DOI: 10.11779/CJGE201508011

[23]WASANTHA P L P, RANJITH P G. Water-weakening behavior of Hawkesbury sandstone in brittle regime[J]. Engineering Geology, 2014, 178(8):91. DOI:10.1016/j.enggeo.2014.05.015

[24]刘新荣, 李栋梁, 张梁, 等. 干湿循环对泥质砂岩力学特性及其微细观结构影响研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1291
LIU Xinrong, LI Dongliang, ZHANG Liang, et al. Influence of wetting-drying cycles on mechanical properties and microstructure of shaly sandstone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(7): 1291. DOI:10.11779/CJGE201607017

[25]BAUD P, ZHU W, WONG T F. Failure mode and weakening effect of water on sandstone[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2000, 105(7): 16371. DOI:10.1029/2000JB900087

[26]何满潮, 周莉, 李德建, 等. 深井泥岩吸水特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1113
HE Manchao, ZHOU Li, LI Dejian, et al. Experimental research on hydrophilic characteristics of mudstone in deep well[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2008, 27(6): 1113. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2008.06.004

[27]马丽娜, 严松宏, 王起才, 等. 客运专线无碴轨道泥岩地基原位浸水膨胀变形试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1684
MA Lina, YAN Songhong, WANG Qicai, et al. In-situ tests on swelling deformation of mudstone foundation upon soaking under ballastless track of passenger railway line[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2015, 34(8): 1684. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.1205

[28]冯梅梅, 吴疆宇, 陈占清, 等. 连续级配饱和破碎岩石压实特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2195
FENG Meimei, WU Jiangyu, CHEN Zhanqing, et al. Experimental study on the compaction of saturated broken rock of continuous gradation[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2195. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0086

[29]LIU W Q, FEI X D, FANG J N. Rules for confidence intervals of permeability coefficients for water flow in over-broken rock mass[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(1): 29. DOI:10.1016/j.ijmst.2011.06.003

[30]李顺才，缪协兴，陈占清，等. 承压破碎岩石非 Darcy 渗流的渗透特性试验研究[J]. 工程力学，2008，25(4)：85
LI Shuncai，MIAO Xiexing，CHEN Zhanqing，et al. Experimental study on seepage properties of non-Darcy flow in confined broken rocks[J]. Engineering Mechanics，2008，25(4)：85

[31]李顺才，陈占清，缪协兴，等. 饱和破碎砂岩随时间变形-渗流特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报，2011，28(4)：542
LI Shuncai，CHEN Zhanqing，MIAO Xiexing，et al. Experimental study on the properties of time-dependent deformation-seepage in water-saturated broken sandstone[J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2011，28(4)：542. DOI:10.3969/j.issn.1673-3363.2011.04.008

[32]KONG H L，CHEN Z Q，WANG L Z，et al. Experimental study on permeability of crushed gangues during compaction[J]. International Journal of Mineral Processing，2013，124(6)：95. DOI:10.1016/j.minpro.2013.04.012

[33]MA D，BAI H B，CHEN Z Q，et al. Effect of particle mixture on seepage properties of crushed mudstones[J]. Transport in Porous Media，2015，108(2)：257. DOI:10.1007/s11242-015-0473-1

[34]杨天鸿，师文豪，李顺才，等. 破碎岩体非线性渗流突水机理研究现状及发展趋势[J]. 煤炭学报，2016，41(7)：1598
YANG Tianhong，SHI Wenhao，LI Shuncai，et al. State of the art and trends of water-inrush mechanism of nonlinear flow in fractured rock mass[J]. Journal of China Coal Society，2016，41(7)：1598. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0336

[35]杨天鸿，陈仕阔，朱万成，等. 矿井岩体破坏突水机制及非线性渗流模型初探[J]. 岩石力学与工程学报，2008，27(7)：1411
YANG Tianhong，CHEN Shikuo，ZHU Wancheng，et al. Water inrush mechanism in mines and nonlinear flow model for fracture rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2008，27(7)：1411. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2008.07.014

[36]郁邦永，陈占清，吴疆宇，等. 变质量胶结破碎岩石非 Darcy 流渗透特性试验研究[J]. 中国矿业大学学报，2017，46(2)：321
YU Bangyong，CHEN Zhanqing，WU Jiangyu，et al. Experimental study of non-Darcy flow seepage properties of cemented broken rocks with mass loss[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2017，46(2)：321

[37]王路珍，陈占清，孔海陵，等. 渗透压力和初始孔隙度对破碎泥岩变质量渗流影响的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报，2014，31(3)：462
WANG Luzhen，CHEN Zhanqing，KONG Hailing，et al. An experimental study of the influence of seepage pressure and initial porosity on variable mass seepage for broken mudstone[J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2014，31(3)：462

[38]王路珍. 变质量破碎泥岩渗透性的加速试验研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2014
WANG Luzhen. Accelerated experimental study on permeability for broken mudstone with mass loss[D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2014

[39]汤艳春，房敬年，周辉. 三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验研究[J]. 岩土力学，2012，33(6)：1601
TANG Yanchun，FANG Jingnian，ZHOU Hui. Experimental study of rock salt dissolving characteristics under triaxial stress[J]. Rock and Soil Mechanics，2012，33(6)：1601. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2012.06.001

[40]汤艳春，周辉，冯夏庭，等. 单轴压缩条件下岩盐应力-溶解耦合效应的细观力学试验分析[J]. 岩石力学与工程学报，2008，27(2)：294
TANG Yanchun，ZHOU Hui，FENG Xiating，et al. Analysis of mesomechanical test of rock salt considering coupled stress-dissolving effects under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2008，27(2)：294. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2008.02.010

[41]FENG M M，WU J Y，MA D，et al. Experimental investigation on the seepage property of saturated broken red sandstone of continuous gradation[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment，2017，76(4)：1. DOI:10.1007/s10064-017-1046-z

[42]American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard practice for making and curing concrete test specimens in the lab：Standard C192/C192M[S]. West Conshohocken：ASTM，2012

[43]吴疆宇，冯梅梅，郁邦永，等. 连续级配废石胶结充填体强度及变形特性试验研究[J]. 岩土力学，2017，38(1)：101
WU Jiangyu，FENG Meimei，YU Bangyong，et al. Experimental study of strength and deformation characteristics of cemented waste rock backfills with continuous gradation[J]. Rock and Soil Mechanics，2017，38(1)：101. DOI:10.16285/j.rsm.2017.01.013

[44]张振南，茅献彪，郭广礼. 松散岩块压实变形模量的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2003，22(4)：578
ZHANG Zhennan，MAO Xianbiao，GUO Guangli. Experimental study on deformational modulus of friable rock during compaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2003，22(4)：578. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2003.04.014

[45]张振南，茅献彪，葛修润. 松散岩块侧限压缩模量的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004，23(18)：3049
ZHANG Zhennan，MAO Xianbiao，GE Xiurun. Testing study on compressive modulus of loose rock blocks under confining constraint[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2004，23(18)：3049. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2004.18.003

[46]张振南，缪协兴，葛修润. 松散岩块压实破碎规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24(3)：451
ZHANG Zhennan，MIAO Xiexing，GE Xiurun. Testing study on compaction breakage of loose rock blocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2005，24(3)：451. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2005.03.014

[47]岳中琦，徐前. 现今斜坡工程安全设计理论的根本缺陷与灾难后果[J]. 岩土工程学报，2014，36(9)：1601
YUE Zhongqi，XU Qian. Fundamental drawbacks and disastrous consequences of current geotechnical safety design theories for slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2014，36(9)：1601. DOI:10.11779/CJGE201409005

[48]岳中琦. 全球岩土工程领域共同挑战性问题的土力学理论根源[J]. 岩土工程学报，2015，37(s2)：11
YUE Zhongqi. Challenging issues in global geotechnical profession caused by soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2015，37(s2)：11. DOI:10.11779/CJGE2015S2003

[49]张勃阳，白海波，张凯. 类陷落柱介质渗流突变机制试验研究[J]. 岩土力学，2016，37(3)：745
ZHANG Boyang，BAI Haibo，ZHANG Kai. Experimental research on seepage mutation mechanism of collapse column medium[J]. Rock and Soil Mechanics，2016，37(3)：745. DOI:10.16285/j.rsm.2016.03.017

（编辑　刘　彤）