

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1527

断层破碎带突水突泥演化特征试验研究

张庆艳^{1,2}, 陈卫忠^{1,3}, 袁敬强¹, 刘 奇^{1,2}, 荣 驰^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘 要: 为了研究富水断层破碎带隧道突水突泥灾害演化机制, 自行研制了一套可考虑质量迁移及地应力状态的大型室内突水突泥试验系统。利用该装置开展了不同水压加载方式、不同破碎带介质参数等条件的断层破碎带突水突泥灾害演化过程模拟试验。结果表明: (1) 断层破碎带突水突泥灾害演化是渗流-侵蚀强耦合过程, 在水压作用下, 破碎带介质中的细颗粒首先发生迁移, 导致充填介质孔隙结构增加, 进而加速细颗粒流失, 促使涌水率不断增长, 随着细颗粒不断迁移流失, 水流流态由层流转换为紊流, 最终诱发突水突泥灾害; (2) 破碎带介质初始孔隙率和施加水压越大越易诱发突水突泥, 介质渗流演化特征越明显, 渗流场参量如渗透率、孔隙率、雷诺数增加越快, 且渗流场参量演化曲线出现突增现象; (3) 梯度水压加载模式下断层破碎带介质较恒定水压加载条件下突水突泥演化特征更明显, 介质发生突水突泥的临界水压更小。在此基础上, 基于涌水率-时间 ($Q-t$)、水力梯度-涌水率 ($i-Q$) 关系的流态转换分析和基于渗透率-水力梯度 ($k-i$) 关系的渗透性演化特征, 建立了断层破碎带渗透演化特征概化模型。该研究结果对于断层破碎带突水突泥灾害演化机制与防治措施具有一定的理论指导价值。

关 键 词: 断层破碎带; 试验研究; 突水突泥; 渗透演化特征

中图分类号: TU456

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2020)06-1911-13

Experimental study on evolution characteristics of water and mud inrush in fault fractured zone

ZHANG Qing-yan^{1,2}, CHEN Wei-zhong^{1,3}, YUAN Jing-qiang¹, LIU-Qi^{1,2}, RONG Chi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract: To investigate the mechanism of water and mud inrush in water-rich fault fracture zone, a large-scale indoor water and mud inrush test system considering mass transfer and crustal stress state is developed. The simulation test of water and mud inrush disaster evolution process in fault fracture zone under different hydraulic loading modes and medium parameters of fracture zone are carried out by using the device. Some findings are as follows. 1) Evolution of water and mud inrush disaster in fault fractured zones is a strong coupling process of seepage and erosion. Fine particles in the filling of fracture zones first migrate under the water pressure. With the continuous migration and loss of fine particles, the flow pattern changes from laminar flow to turbulent flow, which eventually leads to water and mud inrush disaster. 2) The larger initial porosity of filling in fractured zone and the higher of applied water pressure will induce the water inrush more easily. As a result, the evolution characteristics of seepage exhibit more obvious in the test, the increase of seepage field parameters such as permeability, porosity and Reynolds number are much faster, and the seepage field parameter evolution curves suddenly increase. 3) The evolution characteristics of water and mud inrush are more obvious under gradient loading than under constant water pressure loading condition, and the critical water pressure of water and mud inrush from filling is smaller. A generalized model of permeability evolution characteristics of fault is established with analysis of fluid state conversion on the relationship between water inflow rate and time ($Q-t$), the relationship between hydraulic gradient and water inflow rate ($i-Q$), and the evolution characteristics of permeability on the relationship between permeability and hydraulic

收稿日期: 2019-09-04

修回日期: 2019-11-25

基金项目: 湖北省创新群体研究项目 (No.2018CFA012); 国家自然科学基金面上基金项目 (No.51879258)。

This work was supported by the Research Project on Innovation Groups in Hubei Province (2018CFA012) and the General Program of National Natural Science Foundation of China (51879258).

第一作者简介: 张庆艳, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事隧道突水突泥灾害方面的研究工作。E-mail: zhangqingyan1990@126.com

通讯作者: 袁敬强, 男, 1985 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事隧道突水突泥灾害与注浆机制方面的研究工作。E-mail: jqyuan@whrsm.ac.cn

gradient ($k-i$). The results provide guidance for evolution mechanism and prevention measures of water and mud inrush disaster in fault fractured zone.

Keywords: fault fracture zone; experimental study; water and mud inrush; characteristics of seepage evolution

1 引言

断层破碎带岩土体完整性差, 结构松散破碎, 隧道等地下工程穿越富水断层破碎带时, 在地下水及施工扰动等作用下, 断层破碎带内岩土体容易发生崩解、泥化, 进而形成导水通道, 处置不当经常诱发突水突泥灾害, 造成重大生命财产损失, 因此, 断层破碎带突水突泥灾害防治一直是地下工程研究的热点与难点^[1]。总结国内外大量断层破碎带突水突泥灾害事故案例发现^[2-10], 高渗透压、开挖扰动、围岩阻渗能力弱是导致断层破碎带突水突泥灾害发生的 3 个主要因素。

国内外学者通过室内和现场试验、理论分析、数值仿真等方法系统开展了突水突泥灾变机制研究, 取得了丰富的理论认识和工程经验, 有效地指导了地下工程的突水突泥灾害的科学预判与防治。李晓昭等^[11]提出断层带会成为地下空间开挖变形和应力传播的“屏障”, 造成断层带与开挖空间之间应力和应变强烈积聚, 断裂带内产生指向开挖空间的较大回弹位移, 从而导致断层带内张性裂隙的产生和地下水的渗入。武强等^[12]阐述了断层滞后型突水的弱化机制和主要控制因素, 提出煤层底板断裂构造突水时间弱化效应。Shi 等^[13]从矿山压力角度出发, 分析了断层在采空区的位置及要素与突水的关系, 认为断层面倾向采空区边界时容易发生突水。Jeon 等^[14]采用模型试验研究了断层、软弱面存在和注浆等对隧道围岩稳定性的影响, 在断层和软弱面存在的位置, 隧道围岩的位移变化和剪切变形明显增大。Ma 等^[15]通过试验研究了不同初始孔隙率、颗粒级配和渗流压力情况下, 颗粒状砂岩试样中细颗粒的运移规律, 研究结果表明, 细颗粒的运移对突水过程中试样渗透性和孔隙率的增加有至关重要的作用。李利平等^[16]利用大比尺三轴应力-渗流耦合试验系统研究了充填介质在赋存条件下的渗流、力学特性及其破坏机制。李廷春等^[17]揭示断层破碎带突水的本质原因, 即开挖扰动引起力学、渗流平衡破坏, 进而导致围岩的应力状态重新分布, 并引发地下水能量的释放。姚邦华^[18]在研究含陷落柱煤层底板突水过程时, 考虑了破碎岩体的变质量渗流行为, 分析了渗透过程中破碎岩石质量流失率的影响因素, 得到不同粒径、应力、含沙量下质量流失率、孔隙率和渗透率的时间历程曲线。王路珍等^[19]

利用变质量破碎岩体渗流试验系统, 对破碎岩体非 Darcy 渗流特性进行了试验, 并对破碎泥岩在渗流过程中质量流失率、孔隙率、渗透率等参数的时变规律进行了研究。张蕊^[20]设计了断层突水突泥模型装置, 研究了不同水压力、不同断层宽度、不同介质组成条件下断层突水过程中颗粒的启动运移、突变和稳定演化规律。Chang 等^[21]利用调控试样外部应力来模拟不同应力状态下试样内部颗粒侵蚀规律, 研究了坝体内部侵蚀失稳机理, 得到坝体渗透失稳演化过程的临界水力梯度。

隧道开挖穿越断层破碎带发生突水突泥灾害受破碎带内高渗透压和破碎带阻渗能力影响, 在两者的共同作用下, 破碎带内被动水流侵蚀的颗粒存在一个发展演化的过程, 伴随着介质内流态由层流转换成紊流, 最终诱发突水突泥灾害。因此, 破碎带渗透压大小和介质的阻渗能力强弱是判断断层破碎带是否存在突水突泥风险的重要指标。针对上述已有研究中存在的模型试验边界条件单一, 应力控制系统和水压控制相互影响, 水压加载方式与实际工程防突体内梯度水压变化的不匹配等问题, 本文研制了一套可考虑颗粒迁移及地应力状态的大型室内突水突泥试验系统。应用该系统分别在恒定水压和梯度水压两种加载条件下对不同孔隙率下断层破碎带介质开展了突水突泥演化特性试验, 对试验过程变量进行了系统分析讨论, 并对照分析两种水压加载方式下涌水率、颗粒流失量、渗透率、孔隙率和雷诺数的演化关系, 最后通过涌水率-时间 ($Q-t$)、水力梯度-涌水率 ($i-Q$) 流态转换分析和渗透率-水力梯度 ($k-i$) 渗透性演化规律讨论了高渗透压作用下断层破碎带渗透演化特征。

2 试验方案

2.1 试验系统

为了模拟富水断层破碎带充填介质在一定水压条件下发生突水突泥灾害的过程, 自主设计了如图 1 所示的可考虑质量迁移及地应力状态的大型室内突水突泥试验系统^[22]。该试验系统主要包含加载系统、渗流系统和泥水收集系统 3 部分。

(1) 加载系统: 加载系统主要由 1 个气驱加压泵、3 个驱动转化器、3 个稳压器组成。采用气驱加压泵施加相应的围压、水压和轴压, 压力量程在

10 MPa 以内。因为本次加载压力在 1 MPa 以内，所以配置了 3 个稳压器，对压力进行精准控制。

(2) 渗流系统：渗流系统由 $\phi 15\text{ cm}\times 30\text{ cm}$ 三轴室、试样桶、渗流管、透水板等组成。

(3) 泥水收集系统：泥水收集系统主要由漏斗、烧杯、筛网、烘箱和电子秤等组成。

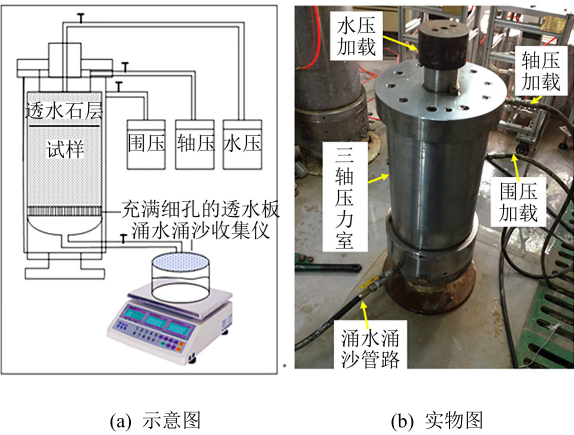


图 1 试验系统
Fig.1 Experimental system

2.2 试验材料制备

试验材料取自陕西引红济石调水工程引水隧洞 F1 断层破碎带，F1 断层倾向 9°、倾角 64°，与引水隧洞轴线夹角约 22°，在隧洞开挖过程中揭示断层宽度 70 m，区域断层的分支和次生断层 300 余条，隧洞施工过程中发生较大突泥涌水 7 次、造成了严重的经济财产损失，延误工期达 3 a。F1 断层破碎带岩性为破碎岩和糜棱岩，状态微胶结，破碎结构，内部泥质和岩屑填充。

对破碎带取样样品进行颗粒级配分析，颗粒级配曲线如图 2 所示，对粒径分布曲线分析后认为该处断层破碎带岩土体主要由岩块骨架和细粒颗粒混合充填而成。因此，本次试验中断层破碎带充填材料选取石灰岩作为骨架，以黏土细粒作为细粒颗粒

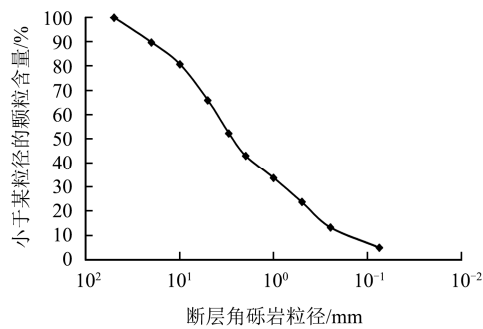


图 2 断层角砾岩粒径分布曲线
Fig.2 Particle size distribution curve of fault breccia

充填物，并按照 F1 断层角砾岩粒径分布比例配制而成。

2.3 试验方案设计

实际地下工程中，外部水压是造成富水断层破碎带突水突泥灾变的动力源，因此，用恒定水压加载方式来模拟外部水压情况。此外，随着隧道开挖掌子面不断靠近富水断层破碎带，防突体承受的水力梯度不断增大，因此，为考虑隧道开挖后防突体与富水断层破碎带之间的时空关系，采取对充填介质施加梯度水压的水压加载方式进行试验研究。

综上所述，利用该系统通过施加围压 0.4 MPa、轴压 0.5 MPa 来模拟断层所处的应力状态。此外，通过施加 3 组恒定水压边界条件，即 0.4、0.7、1.0 MPa，来模拟断层破碎带外部水压的变化情况。通过前期低水压时每 0.02 MPa 为一个单位水压梯度，加载至 0.1 MPa 后每 0.1 MPa 为一个单位水压梯度，最终加载至 1 MPa 的梯度水压加载方式来模拟隧道开挖造成的断层破碎带内部水压动态变化过程。

为研究断层破碎带不同阻渗能力对介质试验渗透演化过程的影响规律，试验采用每组水压下设置介质初始孔隙率为 0.35、0.30、0.25。试样直径为 150 mm，高度为 200 mm，为了让水压均匀，故在试样桶上部用透水石来填充。具体试验方案见表 1。

表 1 试验方案
Table 1 Experiment scheme

试验 编号	恒定水压 / MPa	梯度水压 / MPa	初始孔隙率
1	0.4	—	0.25
2	0.7	—	0.25
3	1.0	—	0.25
4	0.4	—	0.30
5	0.7	—	0.30
6	1.0	—	0.30
7	0.4	—	0.35
8	0.7	—	0.35
9	1.0	—	0.35
10	—	0, 0.02, 0.04, ..., 0.1, 0.2, 0.3, ..., 1	0.25
11	—	0, 0.02, 0.04, ..., 0.1, 0.2, 0.3, ..., 1	0.30
12	—	0, 0.02, 0.04, ..., 0.1, 0.2, 0.3, ..., 1	0.35

2.4 试验流程

(1) 试样准备阶段：将取自现场岩土样筛分成不同粒径范围，粒径分布曲线如图 2 所示。试验试样颗粒配比选取 6 组粒径，分别为 0~0.075、0.075~0.5、0.5~1、1~3、3~5、5~20 mm，如图 3 所示。然后按照各组粒径质量占比进行称量、分层捣实放入试样桶，试样与桶壁接触面涂抹凡士林，层与层之间刨毛处理。添加透水石后对试样加水饱和。

(2) 应力边界施加: 待试样饱和后, 启动气驱加压泵、驱动转换器对试样添加指定围压、水压、轴压。



图3 断层充填介质试验制备材料
Fig.3 Test material for fault filling

(3) 突水突泥灾害演化试验: 随着压力水的不断渗透, 断层破碎带岩土体颗粒随着水流一起流出。

(4) 数据采集: 试验过程中每 1 min 采集一次数据。在排水管处采用纱网过滤收集流失的颗粒, 同时收集称量相应的涌水。

(5) 试验后处理: 试验后对设备进行清理养护, 并开展后续试验。处理涌水量、颗粒流失量、孔隙率、渗透率和雷诺数等试验数据, 并讨论分析其渗透演化规律。

2.5 试验数据处理

试验中每隔 Δt 收集流出的颗粒, 烘干后称出质量 $\Delta m_1, \Delta m_2, \dots, \Delta m_m, \dots, \Delta m_n$, 可得到各段时间段内试验的流失质量为

$$m_m = \Delta m_1 + \Delta m_2 + \dots + \Delta m_m \quad (1)$$

试验过程中任一时间段内试样孔隙率变化 $\Delta\phi$ 与相应的流失质量 Δm_m 存在如下关系:

$$\Delta\phi = \frac{\Delta m_m}{\pi a^2 h_i \rho_s} \quad (2)$$

式中: a 为试样半径; ρ_s 为颗粒实密度; h_i 为颗粒迁移后导致的实时试样高度, 为了计算 h_i , 假定颗粒均近似从底部开始迁移, 得到 h_i 为

$$h_i = h_0 - \frac{1}{\pi a^2 \rho_s} (\Delta m_1 + \Delta m_2 + \dots + \Delta m_i) \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

则各时间下的孔隙率 ϕ_m 计算式为

$$\phi_m = \phi_0 + \frac{1}{\pi a^2 \rho_s} (\Delta m_1 + \Delta m_2 + \dots + \Delta m_i) \quad (4)$$

3 试验结果与分析

3.1 恒定水压加载条件试验结果与分析

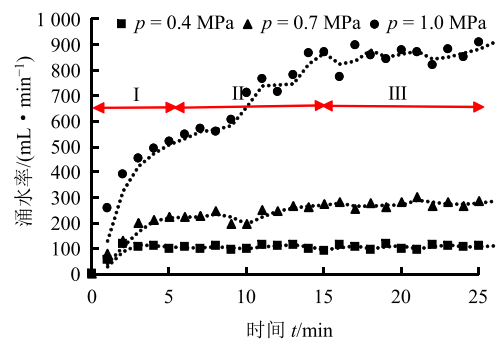
3.1.1 涌水率变化规律

图 4(a)、4(b)、4(c) 分别为初始孔隙率 $\phi_0 = 0.35$ 、

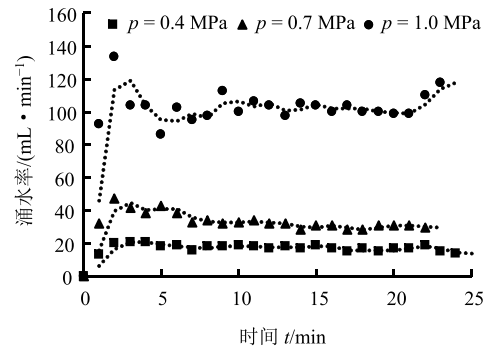
0.30、0.25 的试样在恒定外水压 $p = 0.4, 0.7, 1.0$ MPa 时涌水率随着时间演化曲线。可以看出:

(1) 相同孔隙率时, 外部水压越大涌水率越大。1.0 MPa 水压力下, 充填介质涌水率显著高于 0.7、0.4 MPa 水压条件下, 分别为 3~5 倍、5~9 倍, 说明外部水压力是断层破碎带介质发生突水突泥灾害事故的动力源。

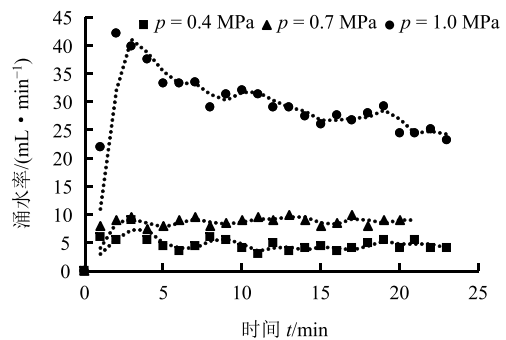
(2) 同一水压下, 初始孔隙率越大, 涌水率越大。1 MPa 水压时, 初始孔隙率 0.35 时充填介质最大涌水率分别为初始孔隙率 0.30、0.25 的 9 倍、25 倍, 这说明富水断层充填介质越松散, 越易发生突水涌泥灾害。



(a) $\phi_0 = 0.35$



(b) $\phi_0 = 0.30$



(c) $\phi_0 = 0.25$

图4 涌水率演化曲线

Fig.4 Evolution curves of water inflow rate

(3) 初始孔隙率为 0.35、恒定水压力为 1.0 MPa

时, 试验过程中泥水收集照片如图 5 所示。涌水水量逐渐增加, 水质经历清澈(I)—浑浊(II)—清澈(III) 3 个阶段: I阶段涌水率快速增加, 3 min 内涌水率达到 400 mL/min, 后趋于稳定; II阶段涌水率在高渗透压下出现急速增加现象, 涌水率由 500 mL/min 急速增加至 900 mL/min; III阶段涌水率趋于稳定, 维持在 900 mL/min 上下波动。相较于其他条件下的涌水率曲线, 可以发现, 其涌水率数值在 10 min 时间点出现突增现象, 水质较浑浊, 涌水率曲线呈现快速增长, 最大涌水率达 905 mL/min。

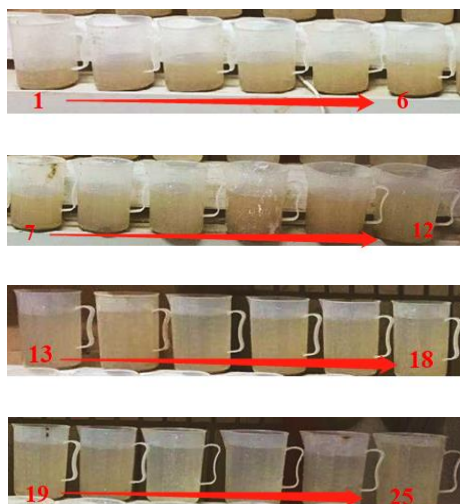


图 5 试验过程泥水收集照片

Fig.5 Pictures of mud collected during experiment

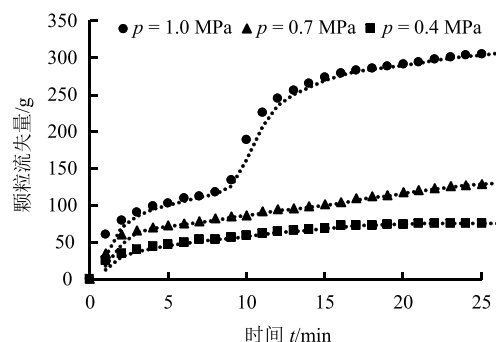
3.1.2 颗粒流失量变化规律

图 6(a)、6(b)、6(c)分别为初始孔隙率 $\varphi_0 = 0.35$ 、0.30、0.25 的试样在恒定水压力 $p = 0.4$ 、0.7、1.0 MPa 时颗粒流失量随着时间演化曲线。可以看出:

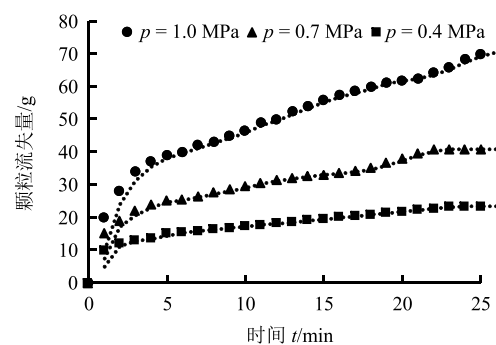
(1) 低水压时, 颗粒流失量先快速增加, 再缓慢增加; 高压时, 演化中期出现阶段性的快速增大; 颗粒流失量在演化初期(阶段I, 0~3 min)快速增加, 这是由于在渗流初期, 破碎带内松散颗粒在围压作用下快速被挤压流失; 初始孔隙率 0.35、水压 1 MPa 条件下, 在 10 min 时, 颗粒流失量突增现象(II阶段, 3~15 min), 并持续 2~3 min, 说明充填介质在高水压作用下, 随着细颗粒的不断迁移流出, 导致充填介质的孔隙结构逐渐增加, 进而引起了粗颗粒流失。随着涌水率趋于稳定, 突水通道逐渐形成, 颗粒流失量渐渐衰减(阶段III, 15~25 min)。

(2) 相同初始孔隙率下, 颗粒流失量随着时间逐渐增加, 且外水压力越大, 颗粒流失量增加越快,

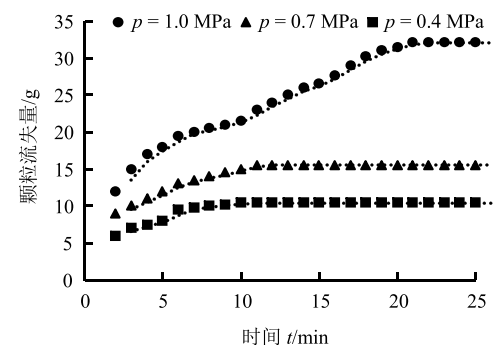
说明外水压力越大, 充填介质内细颗粒越易被水流剥离骨架, 变为可动颗粒, 随着水流流出充填介质。



(a) $\varphi_0 = 0.35$



(b) $\varphi_0 = 0.30$



(c) $\varphi_0 = 0.25$

图 6 颗粒流失量演化曲线

Fig.6 Evolution curves of particle loss

(3) 同一水压下, 孔隙率越大, 颗粒流失量增长越快, 反映出地层越松散, 富水状态下可动颗粒越多, 在外水压驱动下, 快速流出充填介质。

3.1.3 不同水压力下的渗流特征

(1) 孔隙率演化

孔隙率采用式(4)计算所得, 孔隙率演化曲线如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 不同初始孔隙率下, 试验中

孔隙率随时间演化相差较大。当初始孔隙率为 0.35 时, 孔隙率增长速率明显高于初始孔隙率为 0.30、0.25 时。同一初始孔隙率条件下, 外水压力是孔隙率演化快慢的决定性因素, 水压越大, 孔隙率增长越显著。因此, 实际工程中通过注浆等方式增加地层强度, 降低地层的孔隙率, 同时施加排水泄压可以有效的降低地层突水突泥风险。

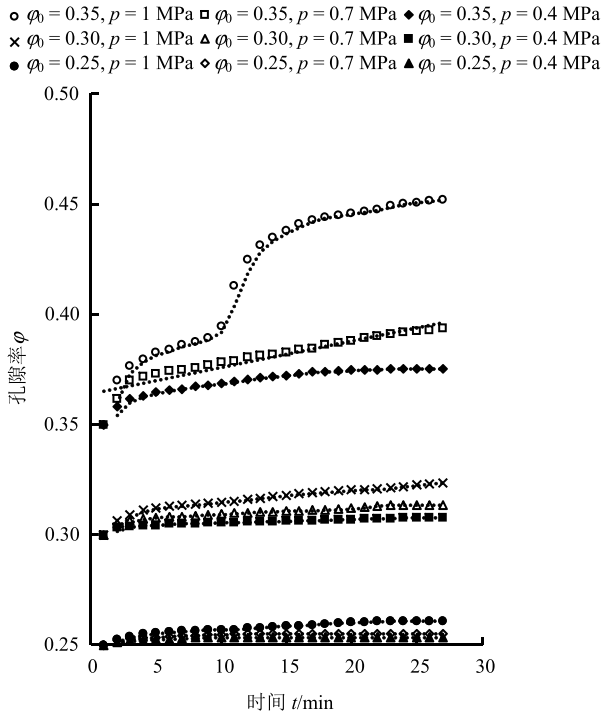


图 7 孔隙率演化曲线
Fig.7 Evolution curves of porosity

(2) 渗透率演化

随着细颗粒的剥离、迁移、流失, 孔隙率、渗透率、雷诺数会相应增大, 当渗透率增大到一定程度时, 水的流态会发生改变。一般情况下, 流态采用雷诺数 Re 判定^[23]。

$$Re = \frac{\rho_f v d_p}{\mu \phi} \quad (5)$$

式中: d_p 为占质量 10% 的界限粒径; v 为水的渗流速度; μ 为水的动力黏度; ρ_f 为水的密度; ϕ 为试样孔隙率。

研究表明, 当雷诺数较小 ($Re \leq 10$) 时, 流态主要为层流或者以层流为主的过渡流, 此时渗流即服从达西定律, 即

$$v = -\frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho_f g \nabla z) \quad (6)$$

式中: k 为试样的渗透率; ∇ 为哈密顿算子; z 为重

力方向; g 为重力加速度。

由于试样尺寸较小, 忽略其重力作用, 且试样中渗流可近似为一维度渗流, 则有

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (7)$$

渗流速度可由涌水率 Q 计算, 即

$$v = \frac{Q}{\pi a^2} \quad (8)$$

假定试样中压力梯度均匀分布, 即

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{p}{h_i} \quad (9)$$

则根据式 (7) ~ (9), 得到渗透率为

$$k = \frac{Q \mu h_i}{\pi a^2 p} \quad (10)$$

当雷诺数 $Re > 10$ 时, 渗流进入紊流状态, 此时渗流方程可采用 Forchheimer 型非达西渗流方程^[24], 即

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\mu}{k} v + \rho_f \beta v^2 \quad (11)$$

式中: β 为非达西渗流惯性系数。

考虑到渗流随时间连续变化, 则 t_i 时刻的渗透率 k_i 可近似于 $t_i - t_{i+1}$ 时间内渗透率的平均值, 故根据二次多项式方法则可得到非达西流态下的渗透率 k_i :

$$k_i = \frac{\mu v_i v_{i+1} (v_{i+1} - v_i)}{(v_{i+1}^2 h_i - v_i^2 h_{i+1}) p} h_i h_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

从图 8 可以看出, 充填介质渗透率随着时间的增长而增长, 且外水压越大增长越快; 渗透率在演化初始阶段, 由于围压作用充填介质快速被挤出, 导致演化初期孔隙率出现快速增长, 演化后期, 渗透率变化趋势和用渗透率时变曲线吻合; 水压力为 1 MPa, 初始孔隙率为 0.35 条件下, 渗透率由初始 $5 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 到试验末期增大为 $100 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, 增大 20 倍, 变化较为显著, 其他情况下, 渗透率增大在 3~8 倍区间内。

(3) 雷诺数

当雷诺数达到临界值时, 水的流态发生变化, 即由达西线性流转变为非线性流态。

由图 9 可以看出, 雷诺数随着时间的增长而增加, 同一初始孔隙率时, 外水压力越大, 雷诺数增

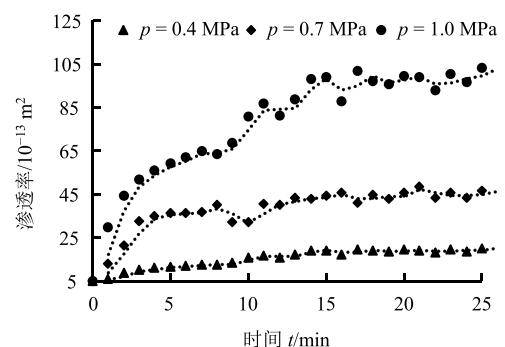
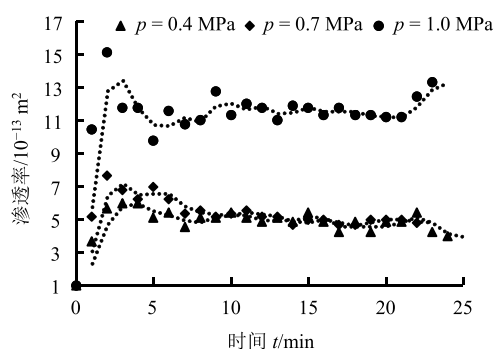
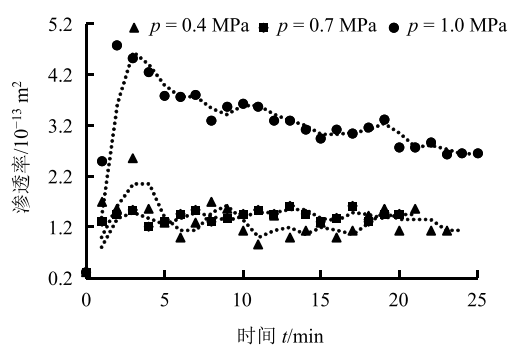
(a) $\phi_0 = 0.35$ (b) $\phi_0 = 0.30$ (c) $\phi_0 = 0.25$

图8 渗透率演化曲线

Fig.8 Evolution curves of permeability

长越快, 初始阶段, 介质孔隙率较小, 渗流速度较低, 颗粒迁移较慢, 此时渗流处于线性达西流 (雷诺数低于 10), 当颗粒流失到一定程度, 地层孔隙率、渗透率明显增大, 导致渗流状态由线性达西流态转变为非达西流, 此时渗透演化进入非线性流态阶段; 同一外水压时, 初始孔隙率越大, 雷诺数增长越快。在水压力为 1 MPa、初始孔隙率为 0.35 条件下 (见图 9(a)), Re 由 4.5 快速增加到 10 以上, 说明此时介质内部渗流由层流转变为紊流, 可动颗粒大量流出后, 充填体内孔隙连通且形成明显的优势渗流通道, 水流流动呈管道流, 导致水直接从通道流出而形成突水灾害。

3.2 梯度水压加载结果与分析

利用该试验装置对比开展了不同水力梯度 i 及介质不同初始孔隙率 ϕ 下的突水突泥模型试验, 试验结果如图 10 所示。

随着水力梯度的增大, 涌水率、颗粒流失量、

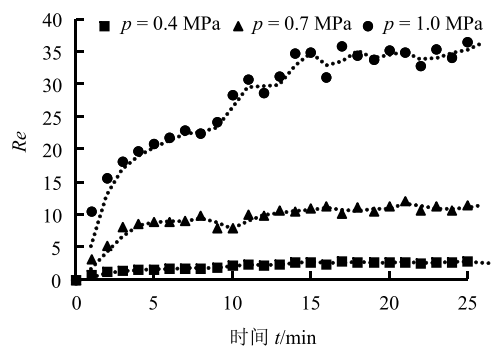
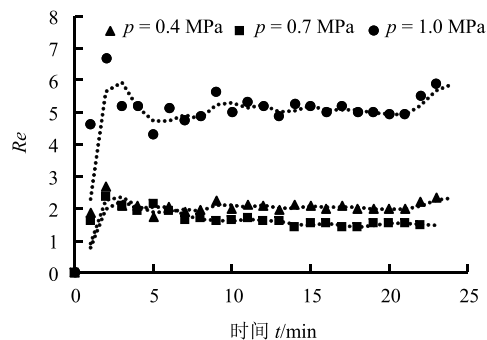
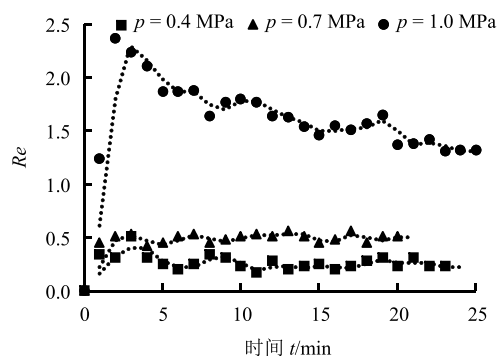
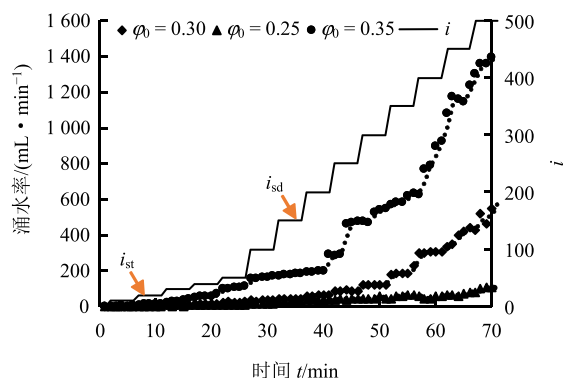
(a) $\phi_0 = 0.35$ (b) $\phi_0 = 0.30$ (c) $\phi_0 = 0.25$

图9 雷诺数演化曲线

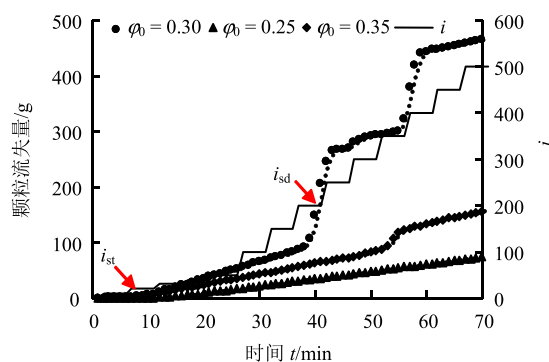
Fig.9 Evolution curves of Reynolds number

孔隙率、 Re 和渗透率逐渐增大。初始孔隙率越大, 涌水率、颗粒流失量、孔隙率、 Re 和渗透率随着时间增长越快。梯度加载条件下, 试验各变量时变曲线存在突变临界点, 且依据涌水率、颗粒流失量和 Re 等参数渗透演化突变点可以判定充填介质渗流状态, 进一步可判定充填介质的突水突泥临界水压力。

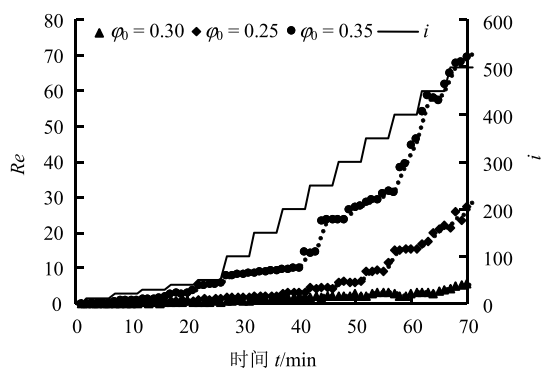
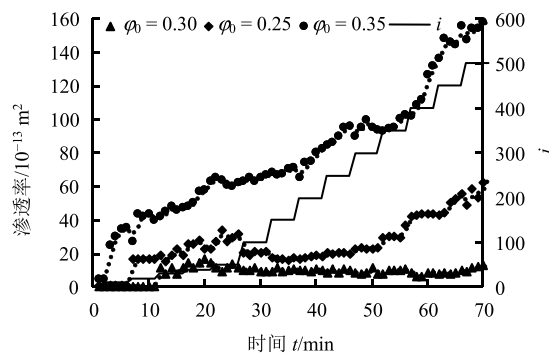
水力梯度小于等于 10 时, 涌水率、颗粒流失量 (去除前 3 min 内因围压的施加挤出的颗粒)、渗透参量变化范围很小, 且雷诺数小于 10。说明在此水



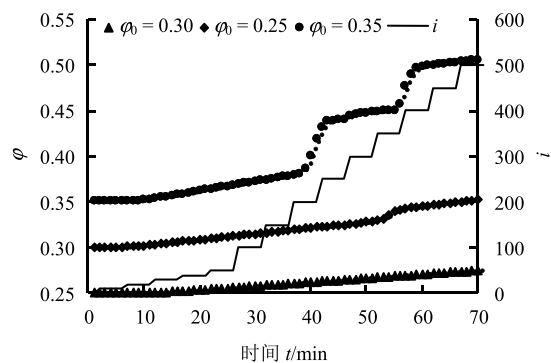
(a) 涌水率



(b) 颗粒流失量

(c) 雷诺数 Re 

(d) 渗透率



(e) 孔隙率

图 10 梯度水压加载条件下各参量时变曲线
Fig.10 Time-varying curves of parameters under gradient hydraulic loading

力梯度下, 介质内部未发生水力侵蚀, 细颗粒未发生启动, 颗粒启动临界水力梯度称之为颗粒启动水力梯度^[25-27], 用 i_{st} 表示。

当流速较小时, 由于渗流流动中黏滞力占主导, 随着压力梯度增大, 充填介质涌水率也相应增大, 但增速较缓。当压力梯度达到一定值时, 充填体内流速较大, 渗流流动中惯性力逐渐占主导, 涌水量时变曲线开始过度为非线性阶段。这个节点就是断层破碎带渗透演化由达西流转变为非达西流的临界点。在该水力梯度临界点, 充填介质涌水率、颗粒流失量、渗透率、孔隙率、 Re 开始急速增加, 说明在此水力梯度时, 断层破碎带颗粒水流快速侵蚀剥离流失, 渗流由层流转换成紊流流态。此时临界水力梯度称之为流态转换水力梯度, 用 i_{sd} 表示。不同初始孔隙率下对应不同 i_{sd} , 初始孔隙率越大, i_{sd} 越小。

因此, 依据梯度水压加载时颗粒流失量演化曲线可以确定颗粒起动的临界水压力, 依据梯度水压加载时涌水速率演化曲线可以确定断层破碎带渗流流态转换临界水压力, 从而可以判定断层破碎带突水突泥演化临界点, 应当不仅考察 Re 的大小, 还应该考虑临界点的涌水率和颗粒流失量, 还应依据梯度水压加载时涌水率演化曲线可以确定渗流流态转变的临界水压力。

3.3 两种水压加载方式下破碎带突水突泥演化特征对比分析

由表 2 可以看出: 梯度加载水压条件下最大涌水率、颗粒流失量、渗透率、 Re 和孔隙率明显大于恒定水压条件。0.4、0.7、1.0 MPa 水压时, 梯度水压加载最大涌水率分别是恒定水压加载的 1.6、2.2、1.8 倍, 梯度水压加载最大颗粒流失量是恒定水压加

表 2 两种水压加载条件下变量对比
Table 2 Comparison of variables under two hydraulic loading conditions

p/MPa	加载方式	涌水率/ $(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	颗粒流失量/g	渗透率/ 10^{-13} m^2	雷诺数 Re	孔隙率		
						$\phi = 0.35$	$\phi = 0.30$	$\phi = 0.25$
0.4	恒定水压	110	76	20	2.6	0.375	0.308	0.253
	梯度水压	201	90	75	10.0	0.386	0.320	0.261
0.7	恒定水压	286	131	40	15.0	0.394	0.314	0.255
	梯度水压	635	278	100	31.0	0.449	0.341	0.268
1.0	恒定水压	905	307	100	36.0	0.452	0.324	0.261
	梯度水压	1 426	467	161	71.0	0.506	0.353	0.276

载的 1.5、2.1、1.2 倍，梯度水压加载最大渗透率是恒定水压加载的 1.6、2.5、3.7 倍，梯度水压加载最大 Re 是恒定水压加载的 1.97、2.1、3.8 倍。初始孔隙率为 0.35，1.0、0.7、0.4 MPa 水压时，梯度水压加载条件下最大孔隙较恒定水压最大孔隙率提升 15%、13%、3%；初始孔隙率为 0.30，1.0、0.7、0.4 MPa 水压时，梯度水压加载条件下最大孔隙较恒定水压最大孔隙率提升 10%、9%、4%；初始孔隙率为 0.25，1.0、0.7、0.4 MPa 水压时，梯度水压加载条件下最大孔隙较恒定水压最大孔隙率提升 6%、5%、3%。

通过对比两种加载方式下的试验结果发现，梯度加载模式下断层破碎带介质较恒定水压加载条件下突水突泥演化特征更明显，介质发突水突泥的临界水压更小。主要表现在梯度加载方式下，涌水率、颗粒流失量和渗透参量较恒定加载下有显著增加。说明开挖导致防突体内水力梯度逐渐变大进一步加剧防突体发生突水突泥风险。防突体内渗透演化由层流转换为紊流时，梯度水压加载条件下的水压力显著小于恒定水压条件下，说明开挖导致的防突体内水力梯度的增大，弱化了防突体内阻水阻泥的能力，所以传统意义上的恒定水压加载条件下得到的防突体突水突泥临界水压小于实际断层突水突泥的临界水压值。

4 高渗透压作用下断层破碎带渗透演化特征

4.1 基于 $Q-t$ 、 $i-Q$ 关系的流态转换分析

在高渗透压作用下断层破碎带渗透性将随水压力的变化而不断改变。外水压力是隧道过断层破碎带发生突水的动力条件，高水头压力作用下含水水体具有较大的运动势能，可加速破碎带渗透破坏突水突泥过程。

对试验涌水率数据进行分析，并据此进一步揭

示断层破碎带介质在高渗透压作用下的流态转换规律。

4.1.1 基于 $Q-t$ 关系的流态转换分析

$Q-t$ 关系（见图 11）可以直观显现断层破碎带突水突泥演化过程，因此，基于 $Q-t$ 关系进行流态转换分析有利于理解富水断层破碎带突水突泥过程。

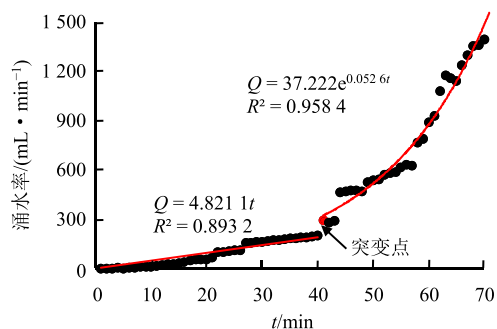


图 11 $Q-t$ 关系曲线
Fig.11 Relationship curves of $Q-t$

由图 11 可以看出， $Q-t$ 关系曲线具有明显的分段特征，主要可以分为以下两段：

阶段I：层流阶段，即达西流阶段。该渗流阶段主要发生在高压渗透演化试验的前期，涌水率随着水压的增大而不断增大，此阶段涌水率与时间表现出明显的线性关系， $Q-t$ 曲线表现为用过原点的直线，二者之间的关系可表示为

$$Q = \alpha t (0 < i < i_{sd}) \quad (13)$$

式中： α 为比例系数； i_{sd} 为临界水力梯度。

阶段II：紊流阶段，即非达西流阶段。该渗流阶段主要发生在高压渗透演化试验的后期，涌水率随着水压的增大而快速增大，此阶段涌水率与时间表现出明显的非线性关系， $Q-t$ 曲线表现为指数曲线，二者之间的关系可表示为

$$Q = \beta e^{\gamma} (i_{sd} \leq i) \quad (14)$$

式中: β 、 γ 为比例系数; i_{sd} 为临界水力梯度。

突变点 (Q_{sd} 、 i_{sd}) 前的线性关系以及突变点后的非线性关系。其中突变点 (Q_{sd} 、 i_{sd}) 为一重要特征点。当 $0 < i < i_{sd}$ 时, 此时断层破碎带内的渗流为达西流, 此时断层破碎带的渗透性较小、阻水能力较强; 当 $i_{sd} \leq i$ 时, 断层破碎带内颗粒快速迁移流失, 渗流形态转变为非达西流, 之后渗流通道逐渐形成, 破碎带内渗透性增加、阻水能力降低。

由此, 高渗透压作用下断层破碎带内渗流的流态转换数学模型可表示为

$$Q = \begin{cases} \alpha i (0 < i < i_{sd}) \\ \beta e^{\gamma} (i_{sd} \leq i) \end{cases} \quad (15)$$

4.1.2 基于 i - Q 关系的流态转换分析

i - Q 关系 (见图 12) 可以反映断层破碎带突水突泥演化过程中临界水力梯度, 因此, 基于 i - Q 关系的流态转换分析有利于深刻认识高渗透压对富水断层破碎带突水突泥演化的关键作用。

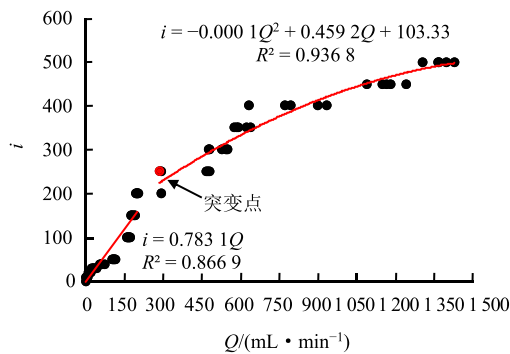


图 12 i - Q 关系曲线
Fig.12 Relationship curve of i - Q

由图 12 可以看出, i - Q 关系曲线具有明显的分段特征, 主要可以分为以下两段:

阶段I: 层流阶段, 即达西流阶段。该渗流阶段主要发生在高压渗透演化试验的前期, 涌水率随着水压的增大而不断增大, 此阶段涌水率与时间表现出明显的线性关系, i - Q 曲线表现为用过原点的直线, 二者之间的关系可表示为

$$i = \delta Q (0 < i < i_{sd}) \quad (16)$$

式中: δ 为比例系数。

阶段II: 紊流阶段, 即非达西流阶段。该渗流阶段主要发生在高压渗透演化试验的后期, 涌水率随着水压的增大而快速增大, 此阶段涌水率与 i 表

现为明显的非线性关系, 二者之间的关系可表示为

$$i = \varepsilon (Q - Q_{sd})^{\eta} + i_{sd} (i_{sd} \leq i) \quad (17)$$

式中: ε 、 η 为比例系数; Q_{sd} 为突变点涌水率。

突变点 (Q_{sd} 、 i_{sd}) 前 Q - i 曲线为线性, 突变点后 Q - i 曲线为非线性。其中突变点 (Q_{sd} 、 i_{sd}) 为一重要特征点。当 $0 < i < i_{sd}$ 时, 此时断层破碎带内的渗流为达西流, 断层破碎带的渗透性较小、阻水能力较强; 当 $i_{sd} < i$ 时, 断层破碎带内颗粒快速迁移流失, 渗流形态转变为非达西流, 之后渗流通道逐渐形成, 破碎带内渗透性增加、阻水能力降低。

由此, 高渗透压作用下断层破碎带内渗流的流态转换数学模型可表示为

$$i = \begin{cases} \delta Q (0 < i < i_{sd}) \\ \varepsilon (Q - Q_{sd})^{\eta} + i_{sd} (i_{sd} \leq i) \end{cases} \quad (18)$$

4.2 高渗透压作用下断层破碎带渗透性演化特征

渗透率能够衡量断层破碎带的阻渗能力, 对试验渗透率数据进行分析, 并据此进一步揭示断层破碎带介质在高渗透压作用下的渗透性演化特征。

由图 13 可以看出, k - i 关系曲线具有明显的分段特征, 主要可以分为以下 3 段:

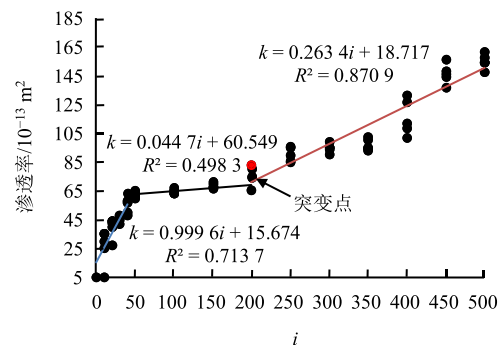


图 13 k - i 关系曲线
Fig.13 Relationship curve of k - i

阶段I: 围压作用下破碎带渗透性增加阶段。此阶段渗透性在较短时间内快速增加, 由于隧道开挖形成临空面, 破碎带内松散颗粒在围压作用下快速被挤压流失, 破碎带介质内渗透率在较短时间内迅速增大, 此阶段破碎带渗透率随水压呈现出线性增长关系。

$$k_1 = a_1 i + k_0 (0 < i < i_{st}) \quad (19)$$

阶段II: 低水压下破碎带初始阻渗阶段。此阶段渗透性随时间缓慢增加, 渗透率-水力梯度近似

于平行 X 轴的直线。

$$k_{II} = a_{II}i + b_{II} (i_{st} < i < i_{sd}) \quad (20)$$

阶段III: 高水压下破碎带渗透性突变阶段。此阶段破碎带在高水压作用下破碎带渗透性发生显著变化, 表现出随着水压的增加而迅速增大。此阶段破碎带渗透率随水压呈现出线性增长关系。此阶段碎带渗流状态由层流阶段转换为紊流阶段。

$$k_{III} = a_{III}i + b_{III} (i_{sd} < i) \quad (21)$$

基于以上分析, 提出断层破碎带高渗压下渗透性演化的概化模型, 其中 (k_I, i_{st}) 和 (k_{II}, i_{sd}) 为 2 个重要特征点, 断层破碎带高渗压下渗透性演化过程可以分为围压作用下破碎带渗透性增加阶段、低水压下破碎带初始阻渗阶段和高水压下破碎带渗透性突变阶段。因此, 高渗透压下破碎带内渗透特性演化概化模型可表示为

$$\left. \begin{aligned} k_I &= a_I i + k_0 (0 < i < i_{st}) \\ k_{II} &= a_{II} i + b_{II} (i_{st} < i < i_{sd}) \\ k_{III} &= a_{III} i + b_{III} (i_{sd} < i) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

5 结 论

利用自主研发的可考虑质量迁移及地应力状态的大型室内突水突泥试验系统, 对高渗透压、开挖扰动、介质阻渗能力强弱 3 个影响隧道开挖过断层破碎带突水突泥的因素, 分别采用恒定水压加载、梯度水压加载和设置介质不同初始孔隙率的方式来模拟富水断层破碎带隧道突水突泥灾害演化机制。试验主要结论如下:

(1) 断层破碎带突水突泥灾害演化是渗流-侵蚀强耦合过程, 在高渗透压作用下, 破碎带介质中的细颗粒首先发生迁移, 导致充填介质孔隙结构发生变化, 进而加速细颗粒流失, 导致涌水率不断增长, 随着细颗粒不断迁移流失, 伴随着水流流态由层流转换为紊流, 最终诱发突水突泥灾害。

(2) 渗透压越大, 初始孔隙率越大, 则涌水率、颗粒流失量和渗透参量增加越快, 突水突泥演化特征越明显。

(3) 梯度加载模式下断层破碎带介质较恒定水压加载条件下突水突泥演化特征更明显, 且存在临界水力梯度 i_{sd} 促使充填介质渗流状态发生转换。

(4) 基于 $Q-t$ 、 $i-Q$ 关系的流态转换分析和基于 $k-i$ 关系的渗透性演化特征建立了断层破碎带渗透演化特征概化模型, 揭示断层破碎带介质在高渗透

压作用下的流态转换规律。

参 考 文 献

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945-1956.
QIAN Qi-hu. Challenges faced by underground projects Construction safety and countermeasures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(10): 1945-1956.
- [2] 李术才, 许振浩, 黄鑫, 等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判别、孕灾模式与典型案例分[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1043-1069.
LI Shu-cai, XU Zhen-hao, 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): 1043-1069.
- [3] 罗雄文. 深长隧道突水突泥致灾构造及其致灾模式研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2014.
LUO Xiong-wen. Study on disastrous structures and models of water-burst and mud-burst in deep and long tunnel[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2014.
- [4] 徐大成. 雁门关隧道破碎带突泥处理施工技术[J]. 铁道建筑, 2014(11): 72-74.
XU Da-cheng. Construction technology of mud inrush in fracture zone in Yanmenguan tunnel[J]. **Railway Engineering**, 2014(11): 72-74.
- [5] 汶文钊. 精伊霍铁路北天山隧道高压富水段断层施工技术[J]. 铁道标准设计, 2009(6): 90-92.
WEN Wen-zhao. Construction technology in high pressure and water-rich section of the fault in Beitianshan tunnel Jinghe-Yili-Huoguo railway[J]. **Railway Standard Design**, 2009(6): 90-92.
- [6] 李生杰, 谢永利, 朱小明. 高速公路乌鞘岭隧道穿越 F4 断层破碎带涌水塌方工程对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3602-3609.
LI Sheng-jie, XIE Yong-li, ZHU Xiao-ming. Research on countermeasure of water gushing with collapse in process of Wushaoling highway tunnel crossing F4 fault fracture zone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and**

- Engineering**, 2013, 32(Suppl.2): 3602-3609.
- [7] 张民庆, 黄鸿健, 殷怀连, 等. 宜万铁路别岩槽隧道 F3 断层突发性涌水治理[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(2): 67-69.
- ZHANG Min-qing, HUANG Hong-jian, YIN Huai-lian, et al. Water outburst treatment at fault F3 in Bieyancao tunnel on Yiwan railway[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2006, 43(2): 67-69.
- [8] 张慧玲, 范圣明. 隧道断层涌泥整治技术研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(1): 186-190.
- ZHANG Hui-ling, FAN Sheng-ming. Research on the treatment of tunnel mud bursting at a fault zone[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2017, 54(1): 186-190.
- [9] 张志强, 何本国, 王志杰, 等. 富水断层隧道高位排水工法及其作用效果研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3359-3366.
- ZHANG Zhi-qiang, HE Ben-guo, WANG Zhi-jie, et al. Study of method and effect of high-position drainage of tunnel in water-rich fault[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(11): 3359-3366.
- [10] 李森森. 岭脚隧道断层破碎带涌水突泥地质灾害处治技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- LI Sen-sen. The technical research of geological hazards treatment on water and mud burst in Lingjiao tunnel fault fracture zone[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [11] 李晓昭, 罗国煜, 陈忠胜. 地下工程突水的断裂变形活化导水机制[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 695-700.
- LI Xiao-zhao, LUO Guo-yu, CHEN Zhong-sheng. The mechanism of deformation and water conduction of fault due to excavation in water inrush in underground engineering[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(6): 695-700.
- [12] 武强, 刘金涛, 钟亚平, 等. 开滦赵各庄矿断裂滞后突水数值仿真模拟[J]. 煤炭学报, 2002, 27(5): 511-516.
- WU Qiang, LIU Jin-tao, ZHONG Ya-ping, et al. The numerical simulations of water-bursting time-effect for faults in Zhaogezhuang Coal Mine, Kailuan, China[J]. **Journal of China Coal Society**, 2002, 27(5): 511-516.
- [13] SHI L Q, SINGH R N. Study of mine water inrush from floor strata through faults[J]. **Mine Water and the Environment**, 2001, 20(3): 140-147.
- [14] JEON S, KIM J, SEO Y, et al. Effect of a fault and weak plane on the stability of a tunnel in rock—a scaled model test and numerical analysis[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(3): 486-491.
- [15] MA D, REZANIA M, YU H S, et al. Variation of hydraulic properties of granular sandstones during water inrush: effect of small particle migration[J]. **Engineering Geology**, 2017, 217: 61-70.
- [16] 李利平, 柳尚, 李术才, 等. 应力-渗流耦合三轴渗透试验系统研制及其在充填介质渗透特性试验中的应用[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 3053-3061.
- LI Li-ping, LIU Shang, LI Shu-cai, et al. Development of testing system for coupled seepage and triaxial stress measurements and its application to permeability characteristic test on filling medium[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(10): 3053-3061.
- [17] 李廷春, 吕连, 段会玲, 等. 深埋隧道穿越富水破碎带围岩突水机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(10): 3469-3476.
- LI Ting-chun, LÜ Lian, DUAN Hui-ling, et al. Water burst mechanism of deep buried tunnel passing through weak water-rich zone[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2016, 47(10): 3469-3476.
- [18] 姚邦华. 破碎岩体变质量流固耦合动力学理论及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- YAO Bang-hua. Theory and application of fluid-solid coupling dynamics with variable mass for fractured rock mass[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [19] 王路珍, 陈占清, 孔海陵, 等. 加载历程对配径碎煤渗透特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1325-1330.
- WANG Lu-zhen, CHEN Zhan-qing, KONG Hai-ling, et al. Experimental study of impact of loading history on permeability characteristics of broken coal with different grain size gradations[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(5): 1325-1330.