

文章编号:1001-7372(2018)10-0190-07

## 考虑质量迁移的全风化花岗岩隧道 突水突泥试验

刘金泉<sup>1,2</sup>, 陈卫忠<sup>3</sup>, 郑卫华<sup>4</sup>, 袁敬强<sup>3</sup>, 聂 闻<sup>2</sup>

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 中国科学院海西研究院 泉州装备制造研究所, 福建 泉州 362000; 3. 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; 4. 江西驱动交通科技有限公司, 江西 南昌 330000)

**摘要:**为研究全风化花岗岩隧道突水突泥变质量渗流特征及灾害演化机理,自行设计了一套可考虑质量迁移及三向应力状态的大型室内突水突泥试验系统。该试验系统主要由加载系统、渗流系统、泥水回收系统组成,具备模拟地层三向应力状态的特点,且设计的渗流系统能较好地模拟颗粒迁移特性。利用该装置系统开展不同水压力及围压下的突水突泥演化试验。结果表明:①全风化花岗岩隧道突水突泥灾害演化是渗流-侵蚀强耦合过程,岩体颗粒在水力作用下发生侵蚀流失,致使岩体孔隙、渗透率增长,进而再次加快颗粒迁移,促使涌水量不断增长;同时,随颗粒物不断迁移,水流流态可能由线性流向非线性流发生突变,最终诱发突水突泥灾害。即,颗粒迁移是突水突泥演化的内因,水流流态的转换是灾变的关键;②突水突泥灾变风险随水压力增加而增加,特别是当水压力达到0.6 MPa时,颗粒流失量达到总质量的11%,涌水量更达到395.84 mL·min<sup>-1</sup>,是低压力(0.4 MPa)条件下的4.3倍,且水流流态也由线性流向非线性流转变,表明存在临界水压力促使灾害发生;③突水突泥灾害演化随围压加大而逐步加快,尤其是对灾害演化的初始阶段,表征围压的增长显著加快灾害的初始演化速率并缩减灾害预防时间,因此在高围压环境下须重点监测初期的渗流侵蚀特性。

**关键词:**隧道工程;突水突泥;试验研究;全风化花岗岩;流失量

**中图分类号:**U457.2 **文献标志码:**A

## Test of Water and Mud Inrush in Completely Weathered Granite Tunnels Considering Variable Mass Properties

LIU Jin-quan<sup>1,2</sup>, CHEN Wei-zhong<sup>3</sup>, ZHEN Wei-hua<sup>4</sup>, YUAN Jing-qiang<sup>3</sup>, NIE Wen<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Haixi Institutes, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362000, Fujian, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China; 4. Jiangxi Driving Traffic Technology Co., Ltd, Nanchang 330000, Jiangxi, China)

**Abstract:** To study the variable-mass seepage properties and disaster mechanism of water and mud inrush in completely weathered granite tunnels, a testing system that can induce mass transfer and apply triaxial stress was designed. The testing system consisted of a load system, a permeability system, and a collection system of water and mud, which could simulate the three-

收稿日期:2018-05-19

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51809253);国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2013CB036006)

作者简介:刘金泉(1989-),男,江西上饶人,助理研究员,工学博士,E-mail:jinquanliu99@163.com。

dimensional stress of the stratum and particle transfer properties. Using this system, the effects of water pressure and confining pressure on water inrush evolution properties were investigated. The test results demonstrate three things. First, the evolution of water and mud inrush from completely weathered granite is a seepage-erosion coupled process. The mass particles transfer under the effect of water pressure, thus increasing the porosity and permeability of the stratum. This, in turn, further increases the water flow and particle transfer. Under the transfer of particles, the flow pattern may change from a Darcy to non-Darcy flow, which finally induces the disaster. The experiment shows that particle transfer is the internal cause of disaster, and the changeability of the flow pattern is the key reason for the disaster. Second, the evolution properties of water and mud inrush increase with increase in water pressure. When water pressure increases to 0.6 MPa, the transfer mass may be up to 11% of the sample mass, and the water inflow increases to  $395.84 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ , more than 4.3 times of that at 0.4 MPa, indicating that the critical value that induces the disaster was obtained. Third, the evolution of water and mud inrush, in general, increases with an increase in the confining pressure, particularly in the initial evolution stage, indicating that an increase in the confining pressure accelerates the initial evolution rate and decreases the prevention time. This suggests that monitoring of initial seepage-erosion properties should be addressed under the high confining pressure state.

**Key words:** tunnel engineering; water and mud inrush; test study; completely weathered granite; particle loss

## 0 引言

富水全风化花岗岩具有强度低,水稳性差,崩解性强等不良工程特性<sup>[1-2]</sup>,在施工扰动下,岩体颗粒极易崩解成流塑状而随水流失,隧道建设过程中常诱发严重的突水突泥灾害<sup>[3-6]</sup>,因此迫切需要掌握突水突泥灾害的演化机制。

为了分析突水机制,很多学者提出了突水系数法、下三带理论、关键层理论等简化方法<sup>[7-8]</sup>,有效指导煤层突水判断及预防,然而这些方法过于简化地质条件而不能精确预防突水发生。考虑到突水演化过程的渗流应力耦合特性,一些学者针对裂隙突水、岩溶突水提出了渗流-应力耦合模型和渗流-应力-损伤耦合模型<sup>[9-10]</sup>,这些模型通过关联渗透系数与岩体变形,或引用渗透跳跃系数来表征渗透系数突变,并嵌入至达西或者改进的达西方程中表征渗流规律。一定程度上,这些模型深化了突水演化过程的流态认识,并可考虑地层的水文地质特性,取得了较大进步。但深入分析,上述模型采用的依然是线性渗流方程,采用的等效方法依然与非线性渗流有较大区别。且由于没有考虑侵蚀特性,这些机理模型无法描述全风化花岗岩变质量突水特征。近期,Liu等<sup>[11-12]</sup>考虑到全风化花岗岩颗粒流失特性,根据高等渗流力学及溶质运移等理论建立可考虑侵蚀特性

与流态特性的耦合模型,可有效表征全风化花岗岩隧道突水突泥特性。然而,耦合方程的众多参数仍需进一步验证。

此外,大量研究表明,地层岩性、应力环境、开挖工艺均对隧道突水突泥演化有较大影响<sup>[13-17]</sup>:刘洪磊等<sup>[13]</sup>统计分析了煤矿突水案例,得到突水灾害在高水压环境下更易发生;Walsh<sup>[14]</sup>和 Ma 等<sup>[15]</sup>指出围压可能挤压土体,进而对土体液化产生影响。更多工程案例表明,突水突泥灾害的发生往往存在一些临界条件,如临界水压力、安全厚度等<sup>[16-17]</sup>。同时,这些临界值又受岩性、水力环境及开挖技术严重影响,均需根据相应的工程环境研究决定。

基于上述认识,笔者自行研制了可考虑质量迁移的突水突泥试验装置,并以此调研水压力、围压等应力因素对突水突泥演化特性的影响,探讨全风化花岗岩隧道突水突泥演化机理。

## 1 试验系统与过程

### 1.1 试验系统

为模拟土体在一定水压力和土压力条件下产生突水突泥现象,笔者自主设计了如图 1 所示的大三轴试验系统。该试验系统主要包括加载系统、渗流系统和泥水回收系统。

(1)加载系统:采用气驱加压泵施加相应的围

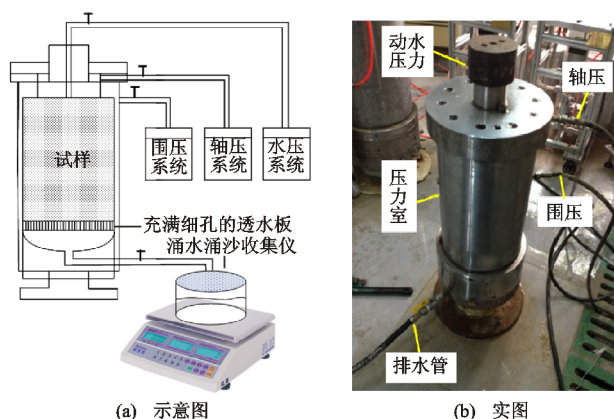


图 1 试验设备示意图及实图

Fig. 1 Figure of Water Inrush Device

压、轴压和水压,压力量程在 10 MPa 以上。

(2) 渗流系统: 渗流系统由渗透管路、透水板、试样缸筒和活塞组成。其中试样缸筒设有多种尺寸, 如内径为 150 mm, 最大试样高度 350 mm。活塞的设计可使土体颗粒自由迁移, 是实现全风化花岗岩渗流侵蚀质量迁移的关键部件。

(3) 泥水回收系统: 泥水回收系统主要由筛网、烧杯、烘箱和电子秤组成。筛网主要采用 400 目的细纱布, 保证能收集绝大部分迁移颗粒。

## 1.2 试验土样与方案

试验用全风化花岗岩土体试样取自广西岑溪—水汶高速公路均昌隧道工程现场, 隧道自 2013 年 9 月先后发生 4 次大型突水突泥灾害。隧址区地下水主要是松散岩类孔隙水与基岩裂隙水, 其中, 松散岩类孔隙水属潜水类型, 基岩裂隙水属潜水-承压水类型。复杂的水文地质条件使得灾害发生区域水压力为 0.4~1.5 MPa 不等, 试样基本物理性质指标见表 1, 具体工程背景见文献[6]和文献[12]。

表 1 全风化花岗岩基本物理性质

Table 1 Physical Properties of Completely Weathered Granite

干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	土样含 水率/%	孔隙 率	不同粒径(mm)颗粒所占比例/%			
			<0.005	0.005~0.075	0.075~2	>2
1.7	8	0.36	13.3	17.5	57.0	12.2

为了研究水压力及围压对突水演化的影响, 依托实际工程, 在保证孔隙率等因素一致时, 选取 3 组不同水压力方案进行试验研究, 即 0.2, 0.4, 0.6 MPa, 试样直径 100 mm, 高 200 mm; 围压同样采用 3 组方案, 即 0.5, 1.0, 1.5 MPa, 为了缩短试验周期, 围压试验采用直径 150 mm、高度 200 mm 的试样进行。具体试验方案见表 2。

表 2 试验方案

Table 2 Test Scheme

试验编号	水压/MPa	围压/MPa	初始孔隙率	试样质量/g
1	0.2	1.0	0.36	3 233
2	0.4			
3	0.6			
4	0.6	0.5	0.30	6 287
5		1.0		
6		1.5		

## 1.3 试验方法与步骤

试验过程中先按要求分层装样、饱和, 然后按照设定的方案施加应力条件并开展试验, 同时在出口处收集泥水涌出量, 泥水涌水量收集每 30 s 记录一次, 直至不再有颗粒流出后停止试验。

## 2 试验参数计算原理

### 2.1 流失质量的计算

试验中, 每隔一定时间  $\Delta t$  收集流失出的颗粒, 烘干后称出质量  $\Delta m_1, \Delta m_2, \dots, \Delta m_m, \dots, \Delta m_n$ , 可得到各时间段内试样的流失质量  $m_m$

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

### 2.2 孔隙度的计算

试验过程中任一段时间内试样孔隙率变化  $\Delta \varphi$  与相应的流失质量  $\Delta m_m$  存在如下关系

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

式中:  $a$  为试样半径;  $\rho_s$  为试样质量密度;  $h_i$  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  $\varphi_m$  计算式为

$$\varphi_m = \varphi_0 + \frac{1}{\pi a^2 h \rho_s} (\Delta m_1 + \Delta m_2 + \dots + \Delta m_m) \quad (4)$$

### 2.3 渗透性参量的计算

随着颗粒物迁移, 孔隙率、渗透率会相应增大, 当渗透率增大到一定程度时, 水的流态可能发生变化。流态采用如下雷诺数判断

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

式中:  $d_p$  为占质量 10% 的界限粒径;  $v$  为水的渗流速度;  $\mu$  为水的动力黏滞系数;  $\rho_f$  为水的密度;  $\varphi$  为试样孔隙率。

研究结果表明<sup>[18]</sup>, 当雷诺数较小 ( $Re \leq 10$ ) 时,

流态主要为层流或以层流为主的过渡流,此时渗流服从达西定律,即

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

(6)

式中: $k$  为试样的渗透率; $p$  为水压力; $\nabla$  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渗流,则有

$$v=-\frac{k}{\mu}\frac{\partial p}{\partial z}$$

(7)

渗流速度可由涌水流量  $Q$  计算,即

$$v=\frac{Q}{\pi a^2}$$

(8)

假定试样中压力梯度均匀分布,即

$$\frac{\partial p}{\partial z}=-\frac{p}{h_i}$$

(9)

则根据式(7)~(9),得到渗透率为

$$k=\frac{Quh_i}{\pi a^2 p}$$

(10)

当雷诺数  $Re>10$  时,流态进入紊流阶段,此时渗流方程可采用 Forchheimer 型非达西渗流方程<sup>[19]</sup>,即

$$-\frac{\partial p}{\partial z}=\frac{\mu}{k}v+\rho_i\beta v^2$$

(11)

式中: $\beta$  为非达西渗流惯性系数。

考虑到渗透率随时间连续变化,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  $k_i$

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

(12)

### 3 试验结果与分析

采用该试验装置开展了不同水压力  $p$  及围压  $p_c$  下的突水突泥模型试验,模型试验部分监测数据见表 3、4 和图 2、3。试验结果分析如下。

#### 3.1 水压力对突水演化特性的影响

##### 3.1.1 不同水压力下的颗粒流失量

由图 2(a)可以看出,流失量随时间逐步增长,且水压力越高,流失量增长越快。水压力为 0.2、0.4、0.6 MPa 的最终流失量分别为 54.84、190.42、354.22 g,分别达到试样总质量的 1.7%、4.2%、11.0%。水压力的增长增大了水力梯度,加快了渗流速度,进而增加了液体的侵蚀能力。当水压力达到一定程度时,液体的渗流速度超过颗粒物的起动条件,颗粒物则逐步发生迁移<sup>[5]</sup>。

表 3 不同水压力下的试验结果

Table 3 Test Results Under Different Water Pressures

变量	时间 $t/\text{min}$	$p=0.2\text{ MPa}$	$p=0.4\text{ MPa}$	$p=0.6\text{ MPa}$
流失量/ ( $\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$ )	10	17.4	34.9	25.50
	30	45.0	85.0	129.20
	$t_f$	54.8	190.4	354.20
涌水量 $Q$ / ( $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ )	10	49.6	57.5	49.60
	30	31.0	55.2	203.70
	$t_f$	47.9	91.9	395.80
雷诺数 $Re$	10	0.11	2.44	2.11
	30	0.07	2.34	8.65
	$t_f$	0.10	3.70	16.70
渗透率 $k/\text{m}^2$	10	$5.45\times10^{-12}$	$4.39\times10^{-12}$	$1.82\times10^{-12}$
	30	$6.35\times10^{-12}$	$4.65\times10^{-12}$	$1.21\times10^{-11}$
	$t_f$	$6.18\times10^{-12}$	$7.05\times10^{-12}$	$1.75\times10^{-11}$

注: $t_f$  为试验最终结束时间,下表同。

表 4 不同围压下的试验结果

Table 4 Test Results Under Different Confining Pressures

变量	时间 $t/\text{min}$	$p_c=0.5\text{ MPa}$	$p_c=1.0\text{ MPa}$	$p_c=1.5\text{ MPa}$
流失量/ ( $\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$ )	10	72.0	86.6	163.3
	30	154.2	276.2	292.7
	$t_f$	164.7	290.0	298.7
涌水量 $Q$ / ( $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ )	10	49.3	70.3	111.6
	30	91.3	71.0	96.7
	$t_f$	94.1	102.1	94.9
雷诺数 $Re$	10	0.10	2.98	4.74
	30	0.19	3.01	4.11
	$t_f$	0.20	4.30	4.00
渗透率 $k/\text{m}^2$	10	$3.49\times10^{-12}$	$4.97\times10^{-12}$	$7.89\times10^{-12}$
	30	$6.46\times10^{-12}$	$5.02\times10^{-12}$	$6.84\times10^{-12}$
	$t_f$	$6.66\times10^{-12}$	$7.18\times10^{-12}$	$6.71\times10^{-12}$

##### 3.1.2 不同水压力下的涌水量

颗粒物的迁移影响孔隙、渗透特性,进而影响涌水量的演化。由图 2(b)可以看出,水压力在 0.4 MPa 内时,涌水量几乎没有发展,整个过程呈线性状态,最大涌水量不足  $100\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。不同的是当水压力增至 0.6 MPa 时,涌水量曲线呈显著的非线性增长,最大涌水量达到  $395.84\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ,是 0.4 MPa 下的 4.3 倍以上。表明水压力提高至 0.6 MPa 时极大地增加了突水风险。

##### 3.1.3 不同水压力下的流态特性

结合式(5)可以得到不同水压力下的雷诺数时变曲线,见图 2(c)。从图 2(c)可知,当水压力  $p\leq 0.4\text{ MPa}$  时,雷诺数在整个演化阶段保持线性、低值(最大仅为 3.67),表明此时仍为达西流。当水压力增至 0.6 MPa 时,雷诺数在 28 min 内即超过临

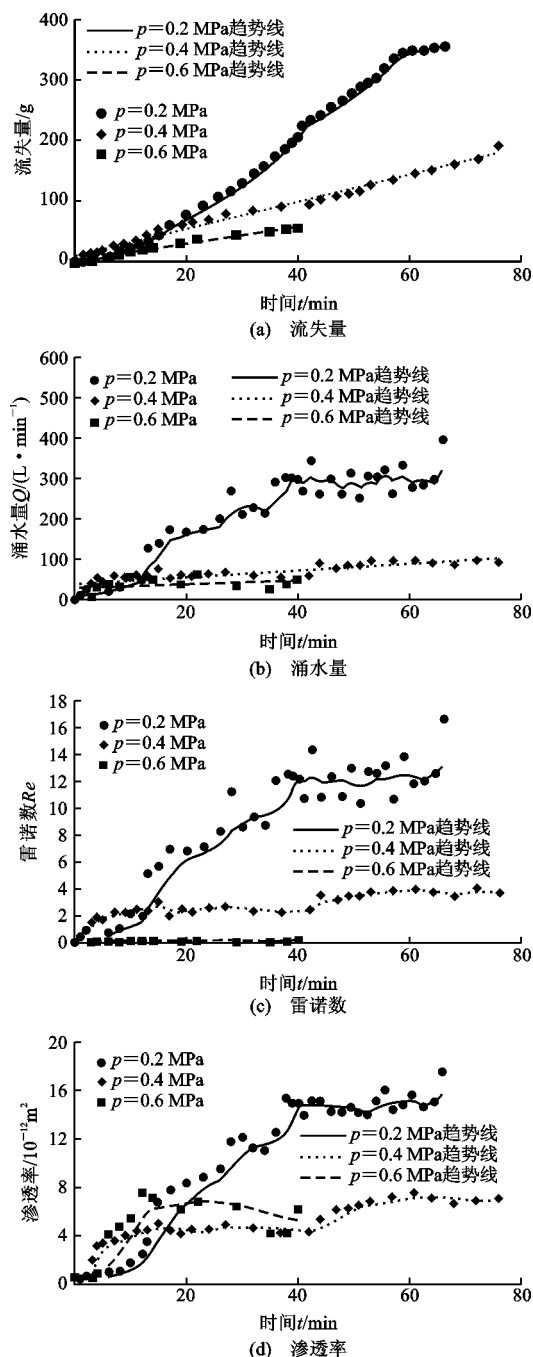


图2 不同水压力下各参量时变曲线

Fig. 2 Time Evolution of Various Variables Under Different Water Pressures

界值,表明流态经过近半小时演化,渗流特性已由达西流转为非达西流。流态的突变也表征突水风险大为增加。

### 3.1.4 不同水压力下的渗透特性

考虑流态特征的转变,并结合式(10)与式(12),可得到不同水压力下的渗透特性[图2(d)]。渗透率随时间的增长而增长,且水压力越高时增长越快,且最终的渗透率也越大。如水压力为0.2 MPa时,

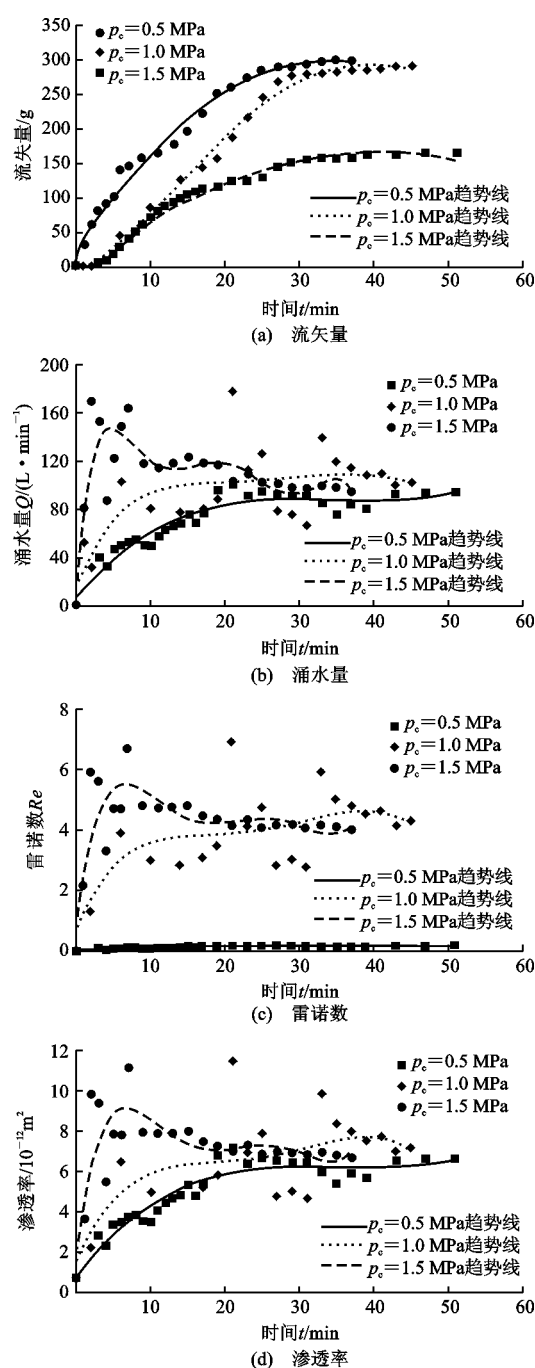


图3 不同围压下各参量时变曲线

Fig. 3 Time Evolution of Various Variables Under Different Confining Pressures

试样最终渗透率为  $6.18 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ,而水压力增至0.6 MPa时,最终渗透率达到  $1.75 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ ,是0.2 MPa时的2.8倍。

结合上述分析可以看出,颗粒物的迁移促使岩体孔隙率、渗透率及涌水量的增长,是导致突水演化的内在因素,水压力则是诱发突水的关键参数。并存在临界水压力促使颗粒物快速迁移,流态及渗透特性快速转换及增长。

### 3.2 围压对突水演化特性的影响

图 3(a)为不同围压下的流失量时变规律。由图 3(a)可以看出,不同围压下的流失量曲线均呈快速增长并最终至稳定的演化趋势,且在演化初期(0~5 min),流失量演化速率最大。围压为 0.5, 1.0, 1.5 MPa 的流失量分别为 164.7, 290.3, 298.7 g, 分别达到总质量的 2.7%、4.7%、4.8%。表明流失量随围压增大而呈增长趋势,尤其是初始阶段。其原因可能为:高围压对岩土体挤压,加快试样的屈服和液化,在变质量迁移条件下,加快岩土体向底部出口挤压、迁移。这亦是变质量特征突水与以往裂隙突水的显著区别。

图 3(b)为不同围压下的涌水量曲线,曲线呈初始增长和后期稳定两阶段分布。初始阶段,涌水量随颗粒物迁移而增长,当颗粒不再显著迁移,涌水量过渡至稳定阶段。同时,随围压增长,初始阶段(0~5 min)的演化速率也相应增大,不同的是最终涌水量相差不大。如围压为 0.5, 1.0, 1.5 MPa 的初始阶段涌水量分别为 47.1, 67.2, 112.1 mL·min<sup>-1</sup>, 而最终稳定涌水量分别为 94.1, 101.1, 94.9 mL·min<sup>-1</sup>。这表明,围压对涌水量的影响主要体现在初始演化速率上,而对最终涌水量影响有限。

同样,根据式(5)可得到不同围压下的雷诺数变化规律,如图 3(c)所示。对于试验围压,所有的雷诺数都保持低值、线性变化,远未达到临界值,表明本试验围压的变化并未改变流态特征,试验过程流态均为达西流。

由此,根据式(10)可得到渗透特性变化规律[图 3(d)]。可以看出,围压对渗透率的影响主要在初始的增长阶段,对最终值影响较小。

由上述分析可知:在低围压状态下,质量流失量、涌水量等参数增长很小;而在高围压下,流失量等关键参数有一定增长,尤其是初始演化阶段。表明围压增大大幅减小了初期预防时间,增大了隧道开挖突水风险。

## 4 结 语

(1)研制的试验装置能较真实地模拟全风化花岗岩突水突泥的演化过程,并可实时监测试样物理力学特性演化规律,是一种有效、可靠的试验研究工具。本装置与已有试验装置相比,具有可考虑轴压、围压的三向受力状态,以及变质量渗流特性的优势。

(2)颗粒流失是致使岩体渗透特性改变的关键,颗粒迁移促使岩体孔隙、渗透特性改变,进而影响突

水演化流态特征。

(3)应力状态对突水突泥渗流侵蚀演化特性影响显著。水压力越高,则流失量、涌水量、渗透率增长越快,突水突泥演化越快。存在临界水压力(0.6 MPa)促使突水风险大幅增加。同时,围压的增长主要影响灾害的初始演化阶段,致使隧道开挖突水预防时间显著减少,对最终演化影响有限。高围压环境须尤其关注初期开挖的灾害风险。

(4)全风化花岗岩隧道突水突泥不仅与应力状态相关,还与介质本身的属性及施工工艺等密切相关,后续须深入揭示灾害演化的关键影响因素,包括孔隙率、级配、施工扰动等,并建立灾害演化的渗流侵蚀耦合方程。

### 参考文献:

### References:

- [1] CERYAN S, TUDES S, CERYAN N. A New Quantitative Weathering Classification for Igneous Rocks [J]. *Environmental Geology*, 2008, 55 (6): 1319-1336.
- [2] SHIRLAW J N. Pressurised TBM Tunnelling in Mixed Face Conditions Resulting from Tropical Weathering of Igneous Rock [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 57: 225-240.
- [3] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(5): 1-65. Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's Tunnel Engineering Research: 2015[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28 (5): 1-65.
- [4] 刘新荣,石建勋,刘元锋,等. 隧道水灾害模型试验研究[J]. *中国公路学报*, 2013, 26(1): 121-126. LIU Xin-rong, SHI Jian-xun, LIU Yuan-feng, et al. Study on Tunnel Model Test of Water Disasters[J]. *Chinese Journal of Highway and Transport*, 2013, 26 (1): 121-126.
- [5] 刘金泉,杨典森,陈卫忠,等. 全风化花岗岩突水通道扩展的颗粒起动流速研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38 (4): 1179-1187. LIU Jin-quan, YANG Dian-sen, CHEN Wei-zhong, et al. Research on Particle Starting Velocity in the Expansion of Water Inrush Channel in Completely Weathered Granite [J]. *Rock & Soil Mechanics*, 2017, 38 (4): 1179-1187.
- [6] 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 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): 1041-1069.
- [7] 郭惟嘉, 刘杨贤. 底板突水系数概念及其应用[J]. 河北煤炭, 1989(2): 56-60.
- GUO Wei-jia, LIU Yang-xian. The Concept of Water-in-rush Coefficient and Its Application [J]. Journal of Hebei Coal, 1989 (2): 56-60.
- [8] 施龙青. 底板突水机理研究综述[J]. 山东科技大学学报, 2009, 28(3): 17-23.
- SHI Long-qing. Summary of Research on Water-in-rush from Seam Floor [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2009, 28 (3): 17-23.
- [9] WANG J A, PARK H D. Coal Mining Above a Confined Aquifer [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40: 537-551.
- [10] 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 and Mining Sciences, 2007, 44 (1): 87-97.
- [11] LIU J, CHEN W, YANG D, et al. Nonlinear Seepage-erosion Coupled Water Inrush Model for Completely Weathered Granite [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2017, 36 (4): 484-493.
- [12] LIU J, CHEN W, YUAN J, et al. Groundwater Control and Curtain Grouting for Tunnel Construction in Completely Weathered Granite [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77 (2): 515-531.
- [13] 刘洪磊, 杨天鸿, 于庆磊, 等. 范各庄矿 12 煤底板突水过程模拟分析[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(3): 27-31.
- LIU Hong-lei, YANG Tian-hong, YU Qing-lei, et al. Numerical Analysis on the Process of Water Inrush from the Floor of Seam 12 in Fangezhuang Coal Mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38 (3): 27-31.
- [14] WALSH J B. Effect of Pore Pressure and Confining Pressure on Fracture Permeability [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18 (5): 429-435.
- [15] MA D, MIAO X X, CHEN Z Q, et al. Experimental Investigation of Seepage Properties of Fractured Rocks Under Different Confining Pressures [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46 (5): 1135-1144.
- [16] GENG F, SALEH J H. Challenging the Emerging Narrative: Critical Examination of Coalmining Safety in China, and Recommendations for Tackling Mining Hazards [J]. Safety Science, 2015, 75: 36-48.
- [17] ZHANG K, ZHANG B, LIU J, et al. Experiment on Seepage Property and Sand Inrush Criterion for Granular Rock Mass [J]. Geofluids, 2017 (12): 1-10.
- [18] OERTEL H, ERHARD P, ETTLING D, et al. Prandtl-essentials of Fluid Mechanics [M]. 3rd ed. New York: Springer, 2009.
- [19] WHITAKER S. The Forchheimer Equation: A Theoretical Development [J]. Transport in Porous Media, 1996, 25 (1): 27-61.