

文章编号: 1000-7598 (2010) 02-0523-06

# 岩溶地区隧道裂隙水突出力学机制研究

李利平, 李术才, 张庆松

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

**摘 要:** 岩溶地下水是诱发隧道发生突(涌)水地质灾害的主导因素之一, 岩溶裂隙水对隧道围岩的危害越来越成为岩溶地区隧道建设中的热点研究问题之一。基于目前岩溶裂隙水突出机制研究现状, 运用岩溶地质学、工程水力学和断裂力学相关理论分析岩溶地区隧道水岩相互作用机制, 探讨了水岩相互作用对岩溶地区隧道施工发生突(涌)水的影响, 揭示岩溶地区隧道裂隙水突出前后过程的力学机制。研究表明: 岩溶隧道裂隙水突出是裂隙岩体在岩溶水及水压的持续作用下受施工外力干扰发生劈裂的结果, 岩溶水和水压在裂隙岩体突水破坏过程中的力学作用主要体现在 4 个方面, 即突水蓄势期岩溶水对裂隙岩体的软化溶蚀作用、水压对裂隙岩体的劈裂作用, 突水失稳期水流的冲刷扩径作用、水压对突水量的动力控制作用。基于上述分析, 以断裂力学、弹塑性力学理论为基础, 提出岩溶隧道岩溶裂隙水突出的最小岩石防突厚度概念, 推导了其半解析表达式, 并为工程实例所验证, 其结果可为高风险岩溶地区隧道突水理论与防治措施提供参考。

**关 键 词:** 岩溶隧道; 裂隙水突出; 力学机制; 最小岩石防突厚度; 半解析解

中图分类号: U 451

文献标识码: A

## Study of mechanism of water inrush induced by hydraulic fracturing in karst tunnels

LI Li-ping, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song

(Research Centre of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** The karst groundwater is one of the most important and active master control factors inducing geohazards such as water outburst and mud gushing, it is of great significance in the evaluation, prediction and control of geohazards. The mechanism of water-rock interaction in karst tunnel has been studied by using theories of karst geology, engineering hydraulics and fracture mechanics, and the effects of such mechanism on water outburst and projecting mud soil during the construction of karst tunnel has been explored; the mechanical mechanism of water gushing process has been analyzed. The research results show that sustaining action of karst water and water pressure on fractured rock mass and the excavation effect lead to water outburst and mud gushing by the way of hydraulic fracture; the mechanical functions of the sustaining action is embodied in four aspects: the softening and scouring mechanical effect of water-rock on fractured rock mass, the hydraulic fracture damage effect of water pressure on fractured rock mass of preventing water, the expanding mechanical behavior of water flow on passageway and the dynamic controlling effect of water pressure on flowing yield. Accordingly, based on fracture mechanics and plastoelasticity, the concept of minimum safety waterproof thickness has been put forward; and the expression of semi-analytical solution has been given; it has been proved by a case study. The reference basis can be provided to study on theory of prevention and cure for the water gushing in the karst area.

**Key words:** karst tunnel; outburst of karst water; mechanical mechanism; minimum rock mass thickness; semi-analytical solution

## 1 引 言

我国岩溶不良地质发育分布广泛, 特别是西南地区岩溶极为发育, 随着西部大开发的进一步实施和国民经济的快速发展, 岩溶地区地下工程日益增多, 施工中经常遭遇岩溶裂隙水灾害的侵扰, 导致

地下岩溶突水涌泥、围岩失稳坍塌、支护结构变形开裂等等<sup>[1-9]</sup>, 不但危及人员安全、影响施工进度, 还对生态环境造成不良影响, 更甚者造成隧道废弃或改线移址。岩溶裂隙水突出的问题是岩溶隧道施工中常见的主要地质灾害, 深埋引水压力隧洞、水电站地下洞室围岩也可能发生裂隙岩体水力劈裂而

收稿日期: 2008-12-06

基金项目: 西部交通建设科技资助项目 (No. 2009318000008); 铁道部科技研究开发计划资助项目 (No. 2009G005-C); 国家自然科学基金 (No. 50874068); 山东省自然科学基金 (No. Y2008F22); 中国博士后科学基金面上资助项目 (No. 20090461235); 山东大学自主创新基金资助项目。  
第一作者简介: 李利平, 男, 1981 年生, 博士, 讲师, 主要从事地下工程灾害预测与控制方面的研究。E-mail: yuliyangfan@163.com

引发工程事故。

基于岩溶隧道突水问题,许多学者引入断裂力学、损伤力学以及数值、试验等方法来研究岩溶裂隙水突出的相关问题,取得了一系列成果。如唐红侠<sup>[10]</sup>分析了水力劈裂过程中岩体裂隙的形成机制以及岩体结构和渗透性发生的变化规律。L. Weijers等<sup>[11]</sup>利用 Biot 理论讨论了水力压裂的起裂、扩展和闭合过程。黄润秋等<sup>[12]</sup>则从断裂力学角度分析了深埋隧道高压水头作用下裂隙的扩展机制。杨天鸿等<sup>[13]</sup>对非均质岩体建立了渗流、应力和损伤耦合作用的数学模型。李宗利等<sup>[14]</sup>从断裂力学角度分析了岩石破裂水力劈裂机制,并推导了破坏模式临界水压计算公式。谢兴华等<sup>[15]</sup>引入损伤概念,研究了矿井底板的突水机制。詹美礼等<sup>[16]</sup>通过厚壁圆筒试验探讨了水力劈裂破坏条件,并提出了发生水力劈裂破坏的半经验理论关系。L. C. Murdoch 等<sup>[17-18]</sup>也进行了相似的试验研究,并得出一些有益的结论。

岩溶裂隙水突出是水岩长期相互作用并在施工外力干扰下引发岩体发生破裂突水的一种动力现象。已有研究结果大多侧重于岩溶水对裂隙岩体的劈裂作用,而忽视了突水前后水岩的相互作用机制。基于上述问题,本文将岩溶裂隙水突出划为蓄势阶段和失稳阶段,分析突水前水岩长期相互作用的力学机制,以及突水中岩溶水及水压对围岩和突水量的力学控制作用。

## 2 岩溶隧道裂隙水突出力学机制

岩溶的发育起始于水流对可溶岩原有狭小通道的溶蚀扩展,溶蚀下来的岩石成分通过水流循环不断被带走,水流通道被拓宽。在岩溶水压作用下岩体断续裂隙(空隙)发生扩展,连通率增大,从而改变了岩体的原始结构,渗透性的增加又反之加速了岩溶水的渗流,同时伴随侵蚀及泥化等作用。隧道岩体开挖破坏了原有的水力循环系统或静态水体的稳定,使突水成为可能。岩溶裂隙水突出实质就是裂隙岩体含水结构、水动力系统 and 围岩力学平衡状态因隧道开挖而发生急剧变化,存贮在地下水体的能量瞬间释放,并以流体的形式高速向隧道内运移的一种动力破坏现象。

### 2.1 岩溶裂隙水突出蓄势机制

#### 2.1.1 岩溶水对裂隙岩体的软化溶蚀作用

岩溶水对裂隙岩体具有软化和溶蚀的双重作用,导致突水结构面的萌生和岩体强度的降低,裂隙岩体发生劈裂具有一定的安全厚度,该厚度范围内岩体往往在突水前处于饱和水状态。水饱和岩石、

原始湿度岩石和干燥岩石的强度差别很大,水饱和岩石的强度最低,尤其是被岩溶水溶蚀严重的软弱岩石的强度受含水率的影响更大,某些软弱岩石浸水后甚至会迅速崩解而丧失强度。在岩溶水溶蚀的条件下,饱和水状态下岩石强度 $\sigma_w$ 与干燥岩石强度 $\sigma_0$ 可按如下关系推导:

$$\sigma_w = \eta k_w \sigma_0, \quad k_w < 1 \quad (1)$$

式中: $\eta$ 为安全厚度范围内岩石强度折减系数,取值大小与岩石溶蚀程度和突水面岩石湿度有关; $k_w$ 为岩石软化系数,其大小主要取决于岩石的岩性。

#### 2.1.2 岩溶水压对裂隙岩体的有效应力作用

岩溶地区的裂隙岩体中遍布孔隙、节理、裂隙等细观尺度和宏观尺度的最小型非连续面,岩溶发育段甚至存在更大规模的断层面和沉积层面,这些都是岩溶突水的潜在通道。岩溶水压对裂隙岩体的力学作用主要体现在其有效应力和软化作用上,由于这两个作用是有联系的,其综合的力学效应<sup>[19]</sup>可用下式表达:

$$\Delta\tau = \sigma(\tan\phi - \tan\phi_w) + P_w \tan\phi_w + (c - c_w) \quad (2)$$

式中: $\Delta\tau$ 为岩溶地下水引起裂隙岩体抗剪强度的降低值; $P_w$ 为岩溶水压力; $c$ 、 $\phi$ 分别为浸水前裂隙岩体的凝聚力和内摩擦角; $c_w$ 和 $\phi_w$ 分别为浸水后裂隙岩体的凝聚力和内摩擦角。对于隧道底板的岩溶承压水,由于开挖后底板岩层垂向卸压,岩溶水压 $P_w$ 对裂隙岩石强度的影响更加明显。

### 2.2 岩溶裂隙水突出失稳机制

岩溶裂隙水突出的实质是裂隙岩体在高水头压力作用下发生扩展,裂隙相互贯通后再进一步张开发生劈裂所致。隧道围岩破坏发生涌水后,岩溶水流对突水通道具有冲刷扩径作用,而岩溶水压的力学作用则主要体现在对裂纹的扩展动力作用和对突水量的动力控制作用上。

#### 2.2.1 岩溶水压对裂隙岩体的破坏作用

对于深埋岩溶隧道,岩溶水压对裂隙岩体的破坏作用是发生突水的主体机制,可采用图1计算模型来考虑平面穿透闭合单裂纹(断裂力学中裂隙称裂纹)的在岩溶水压作用下的断裂破坏模式及临界水压<sup>[14]</sup>。

##### (1) 拉剪断裂破坏突水

在含裂纹的岩体模型中,闭合裂纹受远场地应力 $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 的作用,裂纹与最大主应力 $\sigma_1$ 之间的夹角为 $\alpha$ ,裂纹内作用岩溶孔隙水压力 $P_w$ ,假定水压沿裂纹各个方向作用力相等,则裂纹面上的应力

状态为

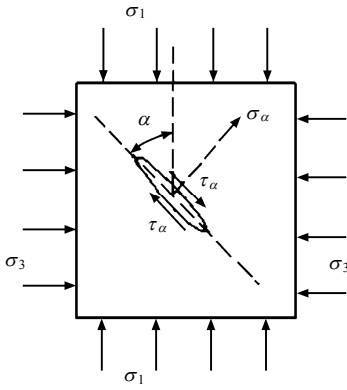


图1 裂隙岩体计算模型

Fig.1 Calculating model of fracture rock mass

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\alpha} &= -\left[ \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha - p_w \right] \\ \tau_{\alpha} &= -\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

当裂纹法向应力  $\sigma_n$  为拉应力时，裂隙岩体发生拉剪破坏的突水模式，属断裂力学中 I、II 型复合型裂纹问题，选用工程近似判据：

$$K_I + K_{II} = K_K \quad (4)$$

式中：  $K_K$  为 I 型断裂韧度值；  $K_I$  和  $K_{II}$  分别为 I 型和 II 型应力强度因子，计算式分别为

$$K_I = \sigma_{\alpha} \sqrt{\pi a}, K_{II} = \tau_{\alpha} \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

式中：  $a$  为裂纹半长。

将式 (5) 代入式 (4) 后，得

$$K_K = \sigma_{\alpha} \sqrt{\pi a} + \tau_{\alpha} \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

将式 (3)、(6) 合并，得岩溶裂隙岩体发生拉剪破坏的临界水头压力值  $P_L$ ：

$$\begin{aligned} P_L &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha + \\ &\quad \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \right| + \frac{K_K}{\sqrt{\pi a}} \end{aligned} \quad (7)$$

## (2) 压剪断裂破坏突水

当裂纹法向应力  $\sigma_n$  为压应力时，裂纹在压应力作用下将发生闭合压紧、剪切扩容的过程，闭合后的裂纹均匀接触并能传递正应力和剪应力，裂纹上的有效剪应力剪切破坏导致裂隙岩体发生压剪破坏突水，其表达式为

$$\tau' = |\tau_{\alpha}| - (\sigma_{\alpha} \tan \varphi + c) \quad (8)$$

式中：  $\varphi$  为裂纹面上的内摩擦角；  $c$  为裂纹面的凝聚力。

由于  $\sigma_n$  为压应力，其裂纹扩展属 II 型裂纹问题，其扩展判据为

$$K_{II} = K_{IIc} \quad (9)$$

式中：  $K_{IIc}$  为岩石压缩状态 II 型断裂韧度值。

将式 (3)、(8) 联合代入式 (5)，  $K_{II}$  表达式为

$$\begin{aligned} K_{II} &= \left[ -\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha + \left\{ \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha - P_w \right\} \tan \varphi \right] \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (10)$$

将式 (10) 代入式 (9) 中，得到裂隙岩体发生压剪破坏断裂突水的临界水头压力值  $P_V$ ：

$$\begin{aligned} P_V &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha - \\ &\quad \frac{1}{\tan \varphi} \left[ \frac{K_{IIc}}{\sqrt{\pi a}} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \right] \end{aligned} \quad (11)$$

## 2.2.2 水流对裂隙通道的冲刷扩径作用

当岩溶裂隙水压达到裂隙岩体断裂破坏突水的临界水头压力值后，裂纹扩展至形成稳定的突水通道，初始突水通道壁岩体受扩展影响分布有容易开裂的微裂纹，可采用如图 2 模型描述。

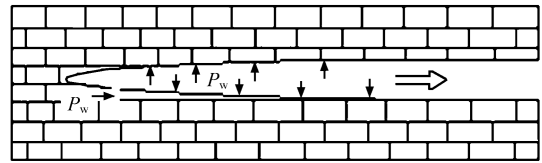


图2 水流冲刷扩径计算模型

Fig.2 Calculating model of passageway expanding by water flowing

假设裂纹扩展后突水通道按超薄长方体裂缝来处理，某一时刻裂缝长为  $l$ ，宽为  $d$ ，高为  $h$ ，突水量为  $q$ ，则突水孔中的水流速度  $v_r$  为

$$v_r = \frac{q}{ldh} \quad (12)$$

则作用在突水通道岩壁上的压力  $p_r$  为

$$p_r = p_w - \frac{r}{2g} v_r^2 \quad (13)$$

将式 (12) 代入式 (13), 得

$$p_r = p_w - \frac{\gamma q^2}{2gl^2 d^2 h^2} \quad (14)$$

式中:  $p_w$  为岩溶裂隙水作用在裂隙上的压力;  $\gamma$  为水的重力密度;  $g$  为重力加速度。

当岩溶水动储量补给充足时, 岩溶水压  $p_w$  始终与临界水头压力值一致, 即

$$p_w = p_L \text{ 或 } p_w = p_Y \quad (15)$$

将式 (15) 代入式 (14), 则得到两种断裂突水通道岩壁的压力, 如拉剪断裂破坏突水模式:

$$P_r = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha + \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \right| + \frac{K_\kappa}{\sqrt{\pi a}} - \frac{\gamma q^2}{2gl^2 d^2 h^2} \quad (16)$$

在上式中, 最后一项显然为正值, 故有  $p_r < p_w$ , 突水通道岩壁周围存在一组裂隙, 如图 2 所示, 则裂隙中的水为静态的, 且与突水通道中岩溶水  $p_w$  的动力水源相通。而突水通道岩壁上的水压为  $p_r$ , 则存在压力差:

$$\Delta p = p_w - p_r \quad (17)$$

当水流速度比较大时,  $\Delta p$  达到岩石的强度极限引起岩石断裂, 从而造成突水通道的扩大。

### 2.2.3 岩溶水压对突水量的动力控制作用

岩溶裂隙水突出后往往具有较高的静水头压力或动力储量, 水压能完全用于推动裂纹扩展和转化为水的动能, 则根据 Bernoulli 能量方程:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h' \quad (18)$$

式中:  $\Delta h'$  为沿程水头损失;  $z_1$ 、 $p_1$ 、 $v_1$  分别为突水面的标高、水压和水流速度, 则  $p_1 = p_w$ ,  $v_1 = 0$ ;  $z_2$ 、 $p_2$ 、 $v_2$  分别为突水口的标高、水压和水流速度, 则  $p_2 = 0$ 。假定  $z_1 = z_2$ , 则有:

$$v_2^2 = 2g \left( \frac{p_w}{\gamma} - \Delta h' \right) \quad (19)$$

将式 (15) 代入上式, 可求岩溶裂隙水突出的最大流速, 如拉剪断裂破坏突水模式的最大流速为

$$v_2^2 = 2g \left( \frac{\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha}{\gamma} + \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \right| + \frac{K_\kappa}{\sqrt{\pi a}} - \frac{\gamma q^2}{2gl^2 d^2 h^2} - \Delta h' \right) \quad (20)$$

显然, 岩溶裂隙水流动速度  $v_2$  随水压  $p_w$  的增大而增大。因此, 岩溶裂隙水水压  $p_w$  决定突水量  $q$  的大小, 对其具有动力控制作用。

## 3 最小岩石防突厚度

在隧道施工中, 岩溶裂隙水的高水头压力的主作用面与隧道突水临空面的岩体包括三部分过渡区, 即施工开挖引起的松弛厚度区、安全厚度区和裂隙带区。假设隧道开挖时, 掌子面前方存在高水头岩溶裂隙水, 设隧道最小岩石保护厚度为  $h_s$ , 掌子面的四周都紧密嵌入岩层之间, 可认为是固定的。将掌子面前方岩体视为厚度为  $h_s$ 、周边固定、由一系列裂缝组成无限长的复杂岩石巨型板, 如图 3 所示。

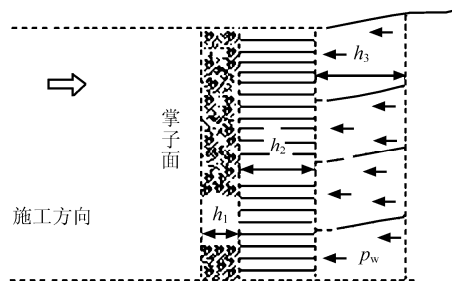


图3 最小岩石保护厚度计算示意图  
Fig.3 Calculating schematic diagram of minimal thickness for rock mass protection

施工开挖引起的松弛厚度  $h_1$  与安全厚度区  $h_2$  的存在增加了裂隙带区  $h_3$  裂纹扩展贯通发生水力劈裂所需的能量。随着开挖的进行, 松弛区逐渐向安全厚度区延伸, 在高水头作用下岩体发生水力劈裂的能量阈值越来越底。当隧道施工进入最小岩石保护厚度范围内, 岩体发生劈裂突水, 其计算公式如下:

$$h_s \geq h_1 + h_2 + h_3 \quad (21)$$

$h_1$  一般较小, 对于发生水力劈裂的围岩而言, 通常情况下介于 1~3 m, 可采用数值方法具体量化。安全厚度区  $h_2$  则可应用断裂力学理论求得

$$h_2 = \frac{1}{\pi} \left( \frac{k_{lc}}{1.12 p_w} \right)^2 \quad (22)$$

式中:  $k_{lc}$  为岩石的断裂韧度。

裂隙带区  $h_3$  的确定至关重要, 可采用物探和钻探的方法确定。在隧道施工中, 经常采用雷达手段探测裂隙, 并附以钻探验证, 必要时可采用钻孔窥测仪探明裂隙分布区域。由于岩体结构面的复杂性,

岩溶地区岩体不仅具有各种类型的结构面, 而且同一类型的结构面特征也不尽相同, 如岩体结构面的延展长度、充填胶结、张开度等等, 因此, 最小岩石保护厚度各区的取值应保证一定的安全系数。

## 4 涌水实例分析

实例引用文献[20]中的例子, 基于上述突水机制, 分别探讨其临界水压力的计算和最小安全厚度的确定方式。

### 4.1 临界水压力计算

根据文献资料, 该区隧道埋深 220~300 m, 水平应力  $\sigma_1 = 32 \text{ MPa}$ , 水平侧压力系数  $\lambda = 1.69$ ,  $\sigma_2 = 16 \text{ MPa}$ , 岩溶水压  $p_w = 2 \text{ MPa}$ ,  $\varphi = 25^\circ$ ,  $\alpha = 19^\circ \sim 37^\circ$ ,  $a = 0.6 \text{ m}$ , 将上述值代入式(7)和式(11)中分别求得发生 I 型和 II 型水力劈裂的临界水头压力值  $P_L = 9.39 \text{ MPa}$ ;  $P_Y = 1.99 \text{ MPa}$ 。

在隧道施工中多次发生辟裂涌水, 2006 年 6 月 24 日, B 段正洞 DK1 909+345.2 处拱脚钻孔喷射涌水, 右侧出水口喷距 5 m, 喷出物为中、细河沙; 8 月 15 日, PDK1+481.6 处拱顶附近岩石突然垮落, 黄色泥浆水向外涌出, 出口直径由最初的 20 cm 逐渐扩大为 70 cm×30 cm 的方孔, 体现了水流的冲刷扩径作用; 10 月 25 日, 正洞 DK1 909+611 处放炮后开始大量涌水涌泥, 现场实测涌水量共 22 500 m<sup>3</sup>, 涌泥量为 7 440 m<sup>3</sup>。

### 4.2 最小岩石保护厚度计算

根据式(21)、(22), 由于隧道埋深不大, 故可取  $h_1 = 2 \text{ m}$ 。基于一般物探结果取  $h_3 = 2 \text{ m}$ , 安全厚度区内岩石断裂韧度值取 II 型断裂韧度值, 即  $k_{lc} = \tau_\alpha \sqrt{\pi a} = -4.67(\text{MN} \cdot \text{m})^{-2/3}$ , 代入式(22)得

$$h_2 = \frac{1}{\pi} \left( \frac{k_{lc}}{1.12 p_w} \right)^2 = 1.38 \text{ m}$$

将  $h_1$ 、 $h_2$  和  $h_3$  代入式(21), 求得最小岩石保护厚度  $h_s \geq 5.38 \text{ m}$ 。

实例引用文献中, 基于施工经验, 笔者考虑 4 条因素来确定施工防突岩墙的安全厚度, 即钻爆对周围岩体的扰动深度、震动、开挖后围岩的松弛厚度、含水裂隙在高水压条件下的扩展作用、岩体地应力状态及量值, 最后确定安全厚度为 5~6 m, 与本文计算结果比较一致。

## 5 结 论

本文运用岩溶地质学、工程水力学以及断裂力学等相关理论知识, 系统分析了岩溶地区隧道裂隙突出水的力学机制, 并提出了最小岩石保护厚度概

念, 主要结论如下:

(1) 岩溶隧道裂隙突出水是裂隙岩体在岩溶水及水压持续作用下受施工外力干扰发生劈裂破坏所诱发的地质灾害, 具有明显的时空效应特征。

(2) 从力学角度分析, 岩溶隧道裂隙水突出过程可划分为突水蓄势阶段和突水失稳阶段。前者是水岩长期相互作用的结果, 后者是前者累积作用的瞬间释放形式。

(3) 岩溶裂隙水突出的蓄势力学机制表现为岩溶水对裂隙岩体的软化溶蚀作用和岩溶水压对裂隙岩体的有效应力作用; 裂隙水突出失稳机制则主要体现在岩溶水对裂隙岩体的拉剪或压剪破坏作用、岩溶水流对裂隙突水通道的冲刷扩径作用以及岩溶水压对突水量的动力控制作用。

(4) 岩溶裂隙水主作用面与突水临空面之间在施工开挖引起的围岩松弛区、安全厚度区和裂隙带区, 分区逐渐过渡, 从而构成最小岩石保护厚度区。基于此推导了隧道最小岩石保护厚度半解析表达式, 并通过实例验证了其准确性, 可为岩溶隧道安全施工所参考。

## 参 考 文 献

- [1] 刘招伟, 何满潮, 王树仁. 圆梁山隧道岩溶突水机制及防治对策研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 228—232.  
LIU Zhao-wei, HE Man-chao, WANG Shu-ren. Study of karst waterburst mechanism and prevention countermeasures in Yuanliangshan tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(2): 228—232.
- [2] 石新栋. 圆梁山隧道主要工程地质及施工对策[J]. 隧道建设, 2004, 25(4): 72—74.  
SHI Xin-dong. The main problems and countermeasures of engineering geology of Yuanliangshan tunnel[J]. **Tunnel Countruction**, 2004, 25(4): 72—74.
- [3] 顾义磊, 李晓红, 兆瑜, 等. 通渝隧道涌突泥成因分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 920—923.  
GU Yi-lei, LI Xiao-hong, ZHAO Yu, et al. Analysis of forming reason of mud breakout in Tong-Yu tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(6): 920—923.
- [4] 李晓昭, 张国永, 罗国煜. 地下工程中由控稳到控水的断裂屏障机制[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 220—224.  
LI Xiao-zhao, ZHANG Guo-yong, LUO Guo-yu. Barrier effects caused by fault on excavating-induced stress & deformation and mechanism of resulting groundwater

- inrush[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(2): 220—224.
- [5] SALIS M, DUCKSTEIN L. Mining under a limestone aquifer in southern Sardinia: a multiobjective approach[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 1983, 1(4): 357—374.
- [6] WU Q, WANG M, WU X. Investigations of groundwater bursting into mine seam floors from fault zones[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(4): 557—571.
- [7] 姜德义, 刘春, 张广洋, 等. 公路隧道全断面揭煤防突技术[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 906—909.
- JIANG De-yi, LIU Chun, ZHANG Guang-yang, et al. Technologies of whole cutting through coal seam and preventing collapse in highway tunnels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(6): 906—909.
- [8] WOLKERSDORFER C, BOWELL R. Contemporary reviews of mine water studies in Europe[J]. **Mine Water and the Environment**, 2004, 23: 161.
- [9] WANG J A, PARK H D. Coal mining above a confined aquifer[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(4): 537—551.
- [10] 唐红侠, 周志芳, 王文远. 水劈裂过程中岩体渗透性规律及机制分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1320—1322.
- TANG Hong-xia, ZHOU Zhi-fang, WANG Wen-yun. Permeability of rock and mechanism analysis during hydraulic fracturing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(8): 1320—1322.
- [11] WEIJERS L, PATER C J, HAGOORT J. A new mechanism for hydraulic initiation[C]//Rock Mechanics. Rotterdam: Balkema A A, 1996: 1253—1260.
- [12] 黄润秋, 王贤能, 陈龙生. 深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 573—576.
- HUANG Rui-qiu, WANG Xian-neng, CHEN Long-sheng. Hydraulic fracturing analysis in water-spouting process in deep-lying tunnels[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(5): 573—576.
- [13] 杨天鸿, 唐春安, 朱万成, 等. 岩石破裂过程渗流与应力耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 489—493.
- YANG Tian-hong, TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng, et al. Coupled analysis of seepage and stress in rock cracking process[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 489—493.
- [14] 李宗利, 张宏朝, 任青文, 等. 岩石裂纹水力劈裂分析与临界水压计算[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1216—1220.
- LI Zong-li, ZHANG Hong-chao, REN Qing-wen, et al. Analysis of hydraulic fracturing and calculation of critical internal water pressure of rock fracture[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1216—1220.
- [15] 谢兴华, 速宝玉, 高延法, 等. 矿井底板突水的水力劈裂研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 987—993.
- XIE Xing-hua, SU Bao-yu, GAO Yan-fa. Numerical study on water inrush above a confined aquifer in coal mining using hydro-fracturing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(6): 987—993.
- [16] 詹美礼, 岑建. 岩体水力劈裂机制圆筒模型试验及解析理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1173—1181.
- ZHAN Mei-li, CEN Jian. Experimental and analytical study on hydraulic fracturing of cylinder sample[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1173—1181.
- [17] MURDOCH L C, SLACK W W. Forms of hydraulic fractures in shallow fine-grained formations[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering**, 2002, 128(6): 479—487.
- [18] LI LIPING, LI SHUCAI, LI SHUCHEN, et al. experiment study on water-inrush mechanism of tunnels in karst area[C]//7th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines. New Jersey: Riton Press Inc., 2009: 1375—1380.
- [19] 王思敬. 中国岩石力学与工程世纪成就[M]. 南京: 河海大学出版社, 2004.
- [20] 干昆蓉, 杨毅, 李建设. 某隧道岩溶突水机制分析及安全岩墙厚度的确定[J]. 隧道建设, 2007, 27(3): 13—16.
- GAN Kui-rong, YANG Yi, LI Jian-she. Analysis on karstwater inflow mechanism and determination of thickness of safe rock walls: case study on a tunnel[J]. **Tunnel Construction**, 2007, 27(3): 13—16.