

# 考虑动水压力的裂隙岩体裂纹扩展机理研究及应用

罗 声, 许 模, 康小兵

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

**摘要:** 利用断裂力学理论, 在考虑动水压力作用的基础上, 研究了裂隙岩体中张开裂纹在受到垂直于裂纹长度方向的应力为拉应力时继续扩展的条件及考虑动水压力的裂隙岩体裂纹扩展机理在裂隙岩体隧道突水(泥)的应用。结果表明: 动水压力会改变裂纹尖端应力强度因子, 它能促使裂纹尖端附近的应力达到起裂临界值, 从而导致裂纹继续扩展。在裂隙岩体隧道中, 动水压力一方面加大裂纹尖端应力强度因子, 使裂隙继续扩展; 另一方面动水压力的冲刷作用导致隧道的水文地质条件不断恶化, 裂隙内充填介质产生渗透变形或者整体冲出后进入隧道, 造成隧道涌突水(泥)。

**关键词:** 动水压力; 突水; 水力劈裂; 裂纹扩展

中图分类号: TU452 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)04-0726-03

## Research on crack expanding mechanism of fractured rock tunnel with hydrodynamic pressure

LUO Sheng, XU Mo, KANG Xiaobing

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,  
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Based on the theory of fracture mechanics and the effects of hydrodynamic pressure on the fractured rock, the conditions that open crack in the fractured rock continues to expand when it bears the tensile stress which is perpendicular to the length direction of the crack, and the application of crack expanding mechanism in tunnel water gushing(mud) of fractured rock were investigated in this paper. The results showed that: the hydrodynamic pressure changes the stress intensity factor at the crack tip by increasing the stress near crack tip to reach the critical value of crack initiation, thereby causing crack expand. In the fractured rock tunnel, hydrodynamic water pressure can not only increase the stress intensity factor at the crack tip to expand crack, but also deteriorate the hydrogeological conditions in the tunnel due to its erosion action, and seepage deformation of the filling medium in fracture occurs or filling medium can be washed away to cause tunnel water gushing(mud).

**Key words:** hydrodynamic pressure; water gushing; hydraulic split; crack expanding

随着经济的发展和科技的进步, 隧道工程逐渐由短里程、浅埋深隧道扩展到长里程、深埋隧道。埋深越大, 里程越长, 遭遇高渗透水压的可能性越大, 因此隧道突水的风险加大。国内外发生隧道突水的事件屡见不鲜。2007年8月5日凌晨1时左右, 位于318国道巴东县野三关镇苦桃溪境内的宜万铁路野三关隧道发生突水事故, 突水水量约4万~5万 $m^3/h$ , 水中伴有大量泥沙涌出, 造成隧道内52名施工人员被困。2008年4月11日, 被评定为“水魔”的宜万铁路马鹿箐隧道再次发生突水事故, 10多万 $m^3$ 的瞬间涌水当场造成一人死亡、四人失踪。毛珙1号隧道, 2008年3月份后隧道左右线相继进入到连续的特大涌水段, 左右线合计共发生

典型涌水32次, 涌(突)水总长度达1200余m, 其中最大涌水压力4MPa, 最大日涌水量30000 $m^3/d$ <sup>[2]</sup>。在国外, 日本东海道干线旧丹那隧道(长7.84km), 开工后曾遇6次大的突水, 泥屑突出7000 $m^3$ , 水压高达1.4~4.2MPa, 突水量最大达1344 $m^3/min$ , 造成严重伤亡, 贯通后总涌水量达145152 $m^3/d$ , 致使工期达16a之久<sup>[3]</sup>。黎巴嫩阿尔瓦水电站引水隧洞, 穿越断层时突水量达7125 $m^3/s$ 。美国San Jacinto输水隧道, 施工中遇到4条大断层、20余条小裂隙(受NW向的San Jacinto断层控制), 断层突水量达7125 $m^3/s$ <sup>[4]</sup>。

裂隙岩体隧道突水的影响因素很多, 比如地层岩性、地

收稿日期: 2014-10-17 修回日期: 2015-04-28 网络出版时间: 2015-07-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150723.1123.007.html>

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41202213); 四川省教育厅自然科学自筹一般项目(12ZB188); 成都理工大学青年基金资助项目(2011QJ23)

作者简介: 罗 声(1980-), 女, 四川内江人, 博士研究生, 主要从事水文地质与工程地质方面的研究。E-mail: 1847044883@qq.com

质构造、水文地质条件等,其中地下水的力学作用极其显著。裂隙水流对裂隙壁的力学作用包括静水压力和动水压力,黄润秋等<sup>[5]</sup>探讨静水压力的水力劈裂作用,朱珍德等<sup>[6]</sup>运用断裂力学理论推导出含裂隙静水压力岩体的初始开裂强度公式。作者在前人的基础上,考虑到裂隙岩体中可能存在的较大动水压力作用,采用断裂力学理论,分析裂隙岩体隧道突水机理。

## 1 动水压力概述

动水压力是在地下水水头差的作用下,地下水沿着岩体裂隙运动产生阻力,为克服阻力而产生的对裂隙壁及裂隙内充填物质的作用力<sup>[7]</sup>。动水压力的形成需要存在水头差且裂隙必须是张开的。动水压力的大小主要取决于地下水水头差和裂隙隙宽。柴军瑞等<sup>[8]</sup>推导出单一光滑平直裂隙、充填裂隙、水流和充填物一起流动3种情况下裂隙内动水压力计算公式,分别为

$$t_w = \rho g b J / 2 \quad (1)$$

$$t_w = \rho g n b J / 2 \quad (2)$$

$$t_w = \rho_f g b J / 2 \quad (3)$$

式中: $b$ 为裂隙隙宽; $J = -\frac{\partial H}{\partial x}$ 为沿裂隙方向的水力梯度; $\rho_f$ 为高密度流体的密度; $\rho$ 为水的密度; $n$ 为充填物质的孔隙率。

## 2 考虑动水压力的裂隙岩体隧道突水的断裂力学分析

### 2.1 推导含动水压力作用下的裂纹扩展条件

以一无限大平板中间一椭圆型裂纹,裂纹长轴长度为 $2a$ ,短轴长度为 $b$ ,所受外力作用见图1,裂纹长轴与最大主应力的夹角为 $\alpha$ <sup>[9]</sup>。

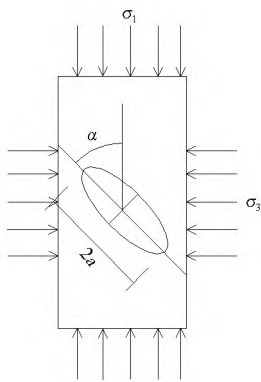


图1 含裂纹的岩体模型

Fig. 1 Rock mass model with crack

当裂隙张开时,且垂直于裂隙长度方向的应力为拉应力时,仅存在作用于裂隙壁的法向应力,不存在作用于裂隙壁岩体的剪应力,只存在裂隙中水流产生的切向应力,因此裂隙壁的法向应力如式(4)所示:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\alpha - P_j \quad (4)$$

$$\tau_n = P_d \quad (5)$$

式中: $\sigma_n$ 为作用于裂隙壁的法向应力; $\tau_n$ 为作用于裂隙壁的切向应力; $\sigma_1$ 为最大主应力; $\sigma_3$ 为最小主应力; $P_j$ 为裂隙中

的渗透静水压力; $P_d$ 为裂隙中的渗透动水压力,其中压应力为正、拉应力为负。

当裂隙张开,且垂直于裂隙长度方向的应力为拉应力时,裂隙扩展形式符合断裂力学中的 $\tilde{N}-\tilde{\delta}$ 型复合裂纹形式,其断裂判据可以采用工程上应用的近似断裂判据,如式(6)所示:

$$K_{\tilde{N}} + K_{\tilde{\delta}} = K_{\tilde{N}_c} \quad (6)$$

根据断裂力学理论, $\tilde{N}$ 型裂纹尖端应力强度因子为

$$K_{\tilde{N}} = -\sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

$\tilde{\delta}$ 型裂纹尖端应力强度因子为

$$K_{\tilde{\delta}} = \tau_n \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

将式(4)、式(5)、式(7)、式(8)代入式(6),得到裂纹扩展临界状态时不同方向裂纹上的渗透动水压力与主应力以及渗透静水压力的关系,如式(9)所示:

$$P_d = \frac{K_{\tilde{N}_c}}{\sqrt{\pi a}} + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\alpha - P_j \quad (9)$$

由以上各式可以得出以下几个方面的结果。

(1) 动水压力可以改变 $\tilde{\delta}$ 型裂纹尖端应力强度因子,它随着动水压力的增大而增加,能促使裂纹尖端附近的应力达到起裂的临界值,从而导致裂纹扩展,使裂纹的张开度增加,裂纹渗透能力增强,这说明动水压力增加了作用于裂隙壁的切向力。

(2) 当 $0 \leq \alpha < 90^\circ$ 时,在地应力、裂纹长度及静水压力一定时, $P_d$ 随着 $\alpha$ 的增大而减小,即最大主应力与裂纹长轴方向的夹角越大,造成裂隙扩展的临界动水压力越小。

(3) 裂纹宽度、长度以及沿裂隙方向的水力渗透梯度均是裂纹起裂的影响因素。裂纹宽度越大,裂纹长度越长,沿裂隙方向的水力渗透梯度越大,裂隙扩展更易发生。

算例分析:选取如下一组数据,裂隙长1.0 m,最大主应力值10.20 MPa,最小主应力值-1.39 MPa, $K_{\tilde{N}_c}$ 为14.80 MN/m<sup>3/2</sup>,取渗透静水压力 $P_j = 5$  MPa,可以做出 $\alpha$ 与渗透动水压力 $P_d$ (MPa)的关系图,见图2。

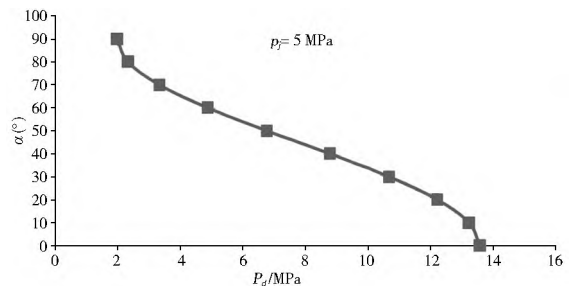


图2  $\alpha$ 与动水压力 $P_d$ 的关系

Fig. 2 Relationship between  $\alpha$  and hydrodynamic pressure  $P_d$

从图2可以看到,在其他条件一定时,随着 $\alpha$ 角的增大,致使裂纹扩展的动水压力值越小。

### 2.2 考虑动水压力的裂纹扩展方向

存在动水压力的裂纹形式属于 $\tilde{N}-\tilde{\delta}$ 复合型裂纹。实验研究表明,复合型裂纹一般并不按原裂纹线方向扩展,而是沿着与裂纹线某一角度的方向扩展<sup>[10-13]</sup>。根据断裂力学的最大周向拉应力理论,得出 $\tilde{N}-\tilde{\delta}$ 复合型裂纹的起裂角,如式(10)<sup>[8]</sup>所示:

$$K_{\delta} \sin \theta_0 + K_0 (3 \cos \theta_0 - 1) = 0 \quad (10)$$

将式(4)、式(5)、式(7)、式(8)代入式(10), 得到

$$P_d = \left[ \frac{\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha - P_j}{3 \cos \theta_0 - 1} \right] \sin \theta_0 \quad (11)$$

由式(1)、式(2)、式(3)和式(11)可以得出如下结论。

起裂角  $\theta_0$  与动水压力有关。同时, 起裂角  $\theta_0$  的大小与裂纹的宽度, 沿裂隙方向的水力渗透梯度有关, 但是与裂纹的长度无关; 起裂角  $\theta_0$  与材料本身特性无关。动水压力和静水压力对于起裂角的大小贡献具有一致性。

## 2.3 考虑动水压力的裂隙岩体裂纹扩展机理应用

### 2.3.1 隧道涌突水(泥)机理

动水压力在一般情况下比较小, 可以忽略不计。但是在强降雨作用或者水库泄洪等条件下, 动水压力就不能忽视。强降雨或者水库泄洪, 会给裂隙岩体带来很大的水头差, 动水压力正是随着水头差的出现而存在的<sup>[1+19]</sup>。

通常情况下, 隧道开挖过程中, 天然岩体都会被扰动, 在围岩附近会增加许多新的裂纹, 加上天然岩体中本身存在的诸多断层、节理面、裂隙等, 在隧道围岩及周围形成了错综复杂的裂隙网络, 这些纵横交织的裂隙网络便是地下水的渗流通道, 尤其是在岩体破碎-较破碎的区域。大气降雨通常成为地下水的补给来源, 尤其在雨季, 地下水具有水压大, 流量大, 突发性强等特点。大气降雨通过松散沉积物直接下渗进入裂隙破碎带中, 当裂隙中充填角砾和松散泥质充填体且泥质含量较低时, 裂隙破碎带自身导水性好, 动水压力一方面加大裂纹尖端应力强度因子, 使裂隙继续扩展, 扩展方向偏离原裂纹线方向, 致使新的微裂纹产生; 另一方面动水压力的冲刷作用导致了裂隙内充填介质的流失, 在地下水存在不间断补给的情况下, 涌水量和动水压力会越来越大, 这必将引起裂隙内充填介质的流失加剧, 裂缝宽度增加以及新的裂纹的不断产生, 由此隧道的水文地质条件不断恶化, 最终导致裂隙内充填介质产生渗透变形或者整体被冲出后导入隧道, 造成隧道涌突水(泥)灾害。

### 2.3.2 实例分析

西南地区某隧道最大埋深约 440 m。隧道穿越地层岩性主要包括砂岩、页岩、砾岩、白云岩、灰岩等。纵张裂隙带和横张裂隙带极其发育。该隧道在施工阶段和衬砌阶段均发生过多次涌突水造成的衬砌破裂。在涌突水发生区域, 存在陡倾裂缝, 裂缝内充填砾石、砂粒、黏粒等物质, 裂缝具有中等透水性。在降雨后, 高水压力将裂隙内的充填物质夹杂水一起被冲出, 裂隙渗流通道更加顺畅, 当充分地下水补给条件下, 涌水量增大且动水压力随之增加, 裂缝宽度逐渐加宽, 新裂纹不断产生, 这些因素又促使水具有更加畅通的通道, 如此反复作用, 导致涌突水发生, 严重的地方衬砌出现破裂, 与文章研究的考虑动水压力条件下裂隙岩体破裂导致突水完全吻合。

## 3 结论

(1) 存在动水压力作用下的裂纹扩展属于  $\tilde{N}$ - $\tilde{0}$  型复合裂纹。动水压力能够增大  $\tilde{0}$  型裂纹尖端应力强度因子, 促使裂纹尖端附近的应力达到起裂的临界值, 导致裂纹扩展。

(2) 在地应力、裂纹长度及静水压力一定的情况下, 最大主应力与裂纹长轴方向的夹角越大, 造成裂隙扩展的临界动水压力越小。

(3) 起裂角  $\theta_0$  与动水压力有关。

(4) 动水压力一方面加大裂纹尖端应力强度因子, 使裂隙继续扩展; 另一方面动水压力的冲刷作用导致隧道的水文地质条件不断恶化, 裂隙内充填介质产生渗透变形或者整体冲出后进入隧道, 造成隧道涌突水(泥)。

### 参考文献(References):

- [1] 马晓辉. 地质水文学基础分析毛坝 1 号隧道大型涌(突)水带形成机制及综合治理方针[J]. 四川建材, 2010, 4(36): 139-141. (MA Xiaohui. Based on the analysis of geological hydrology maoba the 1st tunnel large surge(sudden) formation mechanisms and integrated water management policy[J]. Sichuan Building Materials, 2010, 4(36): 139-141. (in Chinese))
- [2] 刘招伟, 何满潮, 王树仁. 圆梁山隧道岩溶突水机理及防治对策研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 228-232, 246. (LIU Zhaowei, HE Manchao, WANG Shuren. Yuanliangshan tunnel karst water inrush mechanism and prevention countermeasures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(2): 228-232, 246. (in Chinese))
- [3] 王建秀, 朱合华, 叶为民. 隧道涌水量的预测及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1150-1153. (WANG Jianxiu, ZHU Heshua, YE Weimin. Forward and inverse analyses of water flow into tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1150-1153. (in Chinese))
- [4] 蒋建平, 高广运, 李晓昭, 等. 隧道工程突水机制及对策[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 76-82. (JIANG Jianping, GAO Guangyun, LI Xiaozhao, et al. Mechanism and countermeasures of water bursting in railroad tunnel engineering[J]. China Railway Science, 2006, 27(5): 76-82. (in Chinese))
- [5] 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 Runqiu, WANG Xianeng, CHEN Longsheng. Hydrosplitting off analysis on underground water in deep lying tunnels and its effect on water gushing out[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 573-576. (in Chinese))
- [6] 朱珍德, 胡定. 裂隙水压力对岩体强度的影响[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 64-67. (ZHU Zhen de, HU Ding. The effect of interstitial water pressure on rock mass strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 64-67. (in Chinese))
- [7] 仵彦卿. 岩土水力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (WU Yanqing. Water and Soil Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [8] 柴军瑞, 仵彦卿, 袁继国. 裂隙水流对裂隙壁的双重力学效应[J]. 工程勘察, 2002(5): 20-26. (CHAI Junrui, WU Yanqing, YUAN Jiguo. Double mechanical effects of fracture flow to crack walls[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2002(5): 20-26. (in Chinese))
- [9] 黄作宾. 断裂力学基础[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1991. (HUANG Zuobin. Basis of Fracture Mechanics[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1991. (in Chinese))

(下转第 741 页)

- [7] 杨帆,麻凤海.急倾斜煤层采动覆岩移动模式及其应用[M].北京:科学出版社,2007.(YANG Fan, MA Feng hai. Steep Seam Mining Strata Movement Mode and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [8] 汪吉林,吴圣林,丁陈建,等.复杂地貌多煤层采空区的稳定性评价[J].煤炭学报,2009,34(4):36-41.[WANG Ji lin, WU Sheng lin, DING Chen jian, et al. Stability evaluation of mine goaf with multi coal seams and complex landform[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4): 36-41. (in Chinese)]
- [9] 孙国权,李娟,胡杏保.基于FLAC3D程序的采空区稳定性分析[J].金属矿山,2007(2):29-32.(SUN Guo quan, LI Juan, HU Xir Bao. FLAC3D-based Stability Analysis of Mined Out Area[J]. Metal Mine, 2007(2): 29-32. (in Chinese))
- [10] 张成良,杨绪祥,李风,等.大型采空区下持续开采空区稳定性研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(8):117-120.[ZHANG Cheng liang, YANG Xu xiang, LI Feng, et al. Stability study on mined out area with continuous mining under the large scale mined out area [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(8): 117-120. (in Chinese)]
- [11] 张绍国,王新民,姚建,等.采空区稳定性的非线性分析[J].地下空间与工程学报,2005,1(6):908-911.(ZHANG Shaoguo, WANG Xirmin, YAO Jian, et al. Nonlinear analysis of stability of goaf areas in an underground mine[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 908-911. (in Chinese))
- [12] 罗周全,鹿浩,刘晓明,等.基于CMS实测的采空区群稳定性数值模拟方法[J].化工矿物与加工,2008,37(1):18-21.(LUO Zhouquan, LU Hao, LIU Xiaoming, et al. Numerical simulation method for mined out area group stability based on Cavity Monitoring System[J]. Industrial Minerals and Processing, 2008, 37(1): 18-21. (in Chinese))
- [13] 丁陈建,汪吉林.神经网络法的采空区地基稳定性评价[J].采矿与安全工程学报,2009,26(2):208-211.(DING Chenjian, WANG JiLin. Using artificial neural network to assess the stability of goaf foundation[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2009, 26(2): 208-211. (in Chinese))
- [14] 李长洪,程岩.基于3DEC的采空区稳定性分析[J].金属矿山,2012(4):144-147,159.(LI Chang Hong, CHENG Yan. Stability analysis on the mined out areas Using 3DEC[J]. Metal Mine, 2012(4): 144-147+ 159. (in Chinese))
- [15] 工程地质手册编委会.工程地质手册(第4版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.(The editorial board of Engineering Geology Manual. Engineering geology Handbook (Fourth Edition)[M]. Beijing: Chinese Architecture Industry Press, 2007. (in Chinese))
- [16] JTG/T D31-03-2011 采空区公路设计与施工技术细则[S].(JTG/T D31-03-2011 Guidelines for Design and Construction of Highway Engineering in the Mined-Out Area[S]. (in Chinese))

(上接第728页)

- [10] 许振浩,李术才,李利平,等.一种典型的岩溶隧道衬砌压裂突水灾害成因与防治[J].岩石力学与工程学报,2011,30(7):1396-1404.(XU Zhenhao, LI Shucai, LI Liping, et al. Cause, disaster prevention and controlling of a typical kind of water inrush and lining fracturing in karst tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1396-1404. (in Chinese))
- [11] 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 Xiaozhao, ZHANG Guoyong, LUO Guoyu. Barrier effects caused by fault on excavating induced stress & edformation and mechanism of resulting groundwater inrush[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 220-224. (in Chinese))
- [12] 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 Zongli, ZHANG Hongchao, REN Qingwen. 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. (in Chinese))
- [13] 杨会军,王梦恕.深埋长大隧道渗流数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2006,25(3):511-519.(YANG Huijun, WANG Mengshu. Numerical simulation of deep tunnel seepage growth [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 511-519. (in Chinese))
- [14] 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 Yilei, LI Xiaohong, ZHAO Yu. et al. Analysis of forming reason of mud breakout in Tongyu tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 920-923. (in Chinese))
- [15] 姜云,王兰生.深埋长大公路隧道高地应力岩爆和岩溶涌突水问题及对策[J].岩石力学与工程学报,2002,21(9):1319-1323.(JIANG Yun, WANG Lansheng. Problems of high stress rock burst and water outburst and countermeasures in deep and long tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1319-1323. (in Chinese))
- [16] 崔芳,高永涛,吴顺川.长大隧道涌水中水岩相互作用机理研究[J].金属矿山,2011(1):12-14,30.(CUI Fang, GAO Yongtao, WU Shunchuan. Research on interaction mechanism of water and rock in water inflow of long and large tunnel[J]. Metal Mine, 2011, (1): 12-14, 30. (in Chinese))