

锦屏 II 级水电站深部大理岩板裂化破坏 试验研究及其对 TBM 开挖的影响

吴世勇¹, 龚秋明², 王 鹤¹, 侯哲生³, 余祺锐²

(1. 二滩水电开发有限责任公司, 四川 成都 610051; 2. 北京工业大学 城市防灾与减灾教育部重点实验室, 北京 100124;
3. 烟台大学 土木工程学院, 山东 烟台 264005)

摘要: 针对锦屏 II 级水电站 TBM 引水洞及排水洞深部大理岩发生的剧烈板裂化岩爆与非剧烈板裂化片帮 2 种板裂化破坏现象, 通过采集该工程区深部大理岩岩样, 采用真三轴岩爆试验设备, 对其在不同高应力作用下的板裂化破坏现象进行室内试验。通过对试验过程中发生的各种现象的全面描述和试验结果的分析表明, 试验中岩样发生的板裂化破坏现象与 TBM 开挖隧道围岩的板裂化破坏具有很好的吻合性, 未来围岩的主要破坏方式将以板裂化片帮与岩爆为主。围岩板裂化破坏将影响 TBM 开挖运行, 分别探讨掌子面与洞壁板裂化破坏对 TBM 开挖的影响。

关键词: 岩石力学; 锦屏 II 级水电站; 大理岩; 板裂化; 隧洞; TBM

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)06 - 1089 - 07

EXPERIMENTAL STUDY OF SLABBING FAILURE FOR DEEP-BURIED MARBLE AT JINPING II HYDROPOWER STATION AND ITS INFLUENCES ON TBM EXCAVATION

WU Shiyong¹, GONG Qiuming², WANG Ge¹, HOU Zhesheng³, SHE Qirui²

(1. Ertan Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610051, China; 2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China)

Abstract: During the tunnel boring machine(TBM) excavation, two types of slabbing failures in these deep-buried marble tunnels are discussed. One is violent slabbing rock burst and the other is non-violent slabbing and spalling. In order to study the slabbing failure, true triaxial experiments for modeling the rock burst at different in-situ stresses are carried out. Results show that all of the specimens appeared slabbing. The phenomena observed in the experiments are very similar to that at the tunnel site in Jinping II hydropower station. The experiment explains basically the tunnel face and tunnel side rock failure phenomena at present, and also displays the main failure types during the TBM excavation in the future. The influence of the slabbing failure at tunnel face and tunnel side on TBM excavation is analyzed and discussed.

Key words: rock mechanics; Jinping II hydropower station; marble; slabbing; tunnel; tunnel boring machine(TBM)

1 引言

锦屏二级水电站位于雅砻江下游河段锦屏大河

湾锦屏山内, 电站通过在锦屏山内开挖引水隧道截弯取直雅砻江引水发电。水电站装机容量 4 800 MW, 大型深埋隧洞群由 4 条引水隧洞、2 条辅助洞及 1 条施工排水洞组成, 隧洞群总长约 118 km,

收稿日期: 2010 - 02 - 25; **修回日期:** 2010 - 03 - 25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878009)

作者简介: 吴世勇(1965 -), 男, 博士, 1987 年毕业于清华大学水利工程系水力机械专业, 现任教授级高级工程师, 主要从事水电工程方面的研究工作。E-mail: wushiyong@ehdc.com.cn

其中3条采用TBM开挖。4条引水隧洞钻爆法和TBM施工开挖洞径分别为13.0和12.4 m, 隧道洞线平均长度约为16.7 m, 隧道最大埋深达2 525 m, 具有埋深大、洞线长、洞径大的特点, 是锦屏二级水电站枢纽最重要的组成部分^[1]。水电站于2007年1月开工建设, 计划于2014年工程竣工。1[#]及3[#]引水隧洞东段采用隧道掘进机(TBM)进行施工, 其余洞段采用钻爆法施工^[2]。另外, 与4条引水隧洞平行的还有2条交通洞和1条排水洞, 交通洞已经贯通, 排水洞正在采用TBM进行开挖。

隧道沿线地层主要由三迭系中统和上统的大理岩、灰岩、结晶灰岩、砂岩、板岩及绿片岩组成^[3]。大理岩、灰岩及结晶灰岩占全洞线长约93%, 这些岩层沿隧道轴线的层厚变化大, 从薄层到巨厚层均有分布, 同一种岩性形成多种结构的岩体。由于高地应力作用, 在锦屏二级辅助洞施工中发生了由弱到强的多类型岩爆^[4], 目前的排水洞、引水洞施工也都发生了多次强度不一的岩爆。从隧洞工程围岩的主要破坏方式看, 主要为板裂化破坏, 包括剧烈的板裂化岩爆与非剧烈的板裂化片帮。

岩爆是发生在隧洞表面且伴随着能量剧烈释放的岩石突然破裂和抛出现象^[5]。P. F. Kaiser^[6]把岩爆分为3种, 即断层滑动型岩爆、矿柱破坏型岩爆与应变型岩爆, 锦屏二级隧洞中发生的岩爆主要属应变岩爆。应变岩爆是在高应力条件下一定体积洞壁岩石的剧烈破坏现象; 谷明成等^[7]通过对秦岭隧道发生的岩爆研究, 指出岩爆的形成、发生经历了张性劈裂、破裂成块和岩块弹射3个变形破坏阶段; 何满潮等^[8]通过试验研究指出岩爆发生过程可分为垂直板裂化、垂直板屈曲变形及岩爆破坏。何满潮等^[8]与谷明成等^[7]的观点基本一致, 都说明在岩爆发生之前, 围岩存在板裂化过程; M. S. Diederichs^[9]指出片帮或围岩板裂化是在压力作用下明显的张性破裂过程, 是高地应力作用下结晶岩石开挖过程中洞壁占据主导地位的岩石损伤和破坏过程。板裂化可以是剧烈的, 也可以是非剧烈的, 在某些情况下也可能是与时间有关的一个缓慢过程。围岩板裂化破坏(张拉破坏)可以发生在真正的岩爆或应变爆裂之前。正是平行薄岩板的变形造成的不稳定(即屈曲失稳), 才导致了应变爆裂中能量的突然释放, 形成岩爆。岩爆伴随着围岩的板裂化过程与扩容。

目前针对岩爆的室内试验主要有由轴向应变控制三轴试验^[8, 10, 11]和由何满潮等^[8]设计的块状岩石

真三轴岩爆试验。三轴试验能较好地模拟隧洞洞壁应力集中的过程及由此导致的岩爆。而块状岩石真三轴岩爆试验能完整反映岩爆时的应力状态而受到专家的肯定^[4]。本文针对锦屏二级水电站深部大理岩, 采用真三轴岩爆试验对粗晶大理岩与细晶大理岩的板裂化破坏特性进行了室内真三轴岩爆板裂化模拟试验, 并分析了不同板裂化破坏对TBM开挖的影响。

2 隧洞内板裂化破坏现象

TBM开挖的引水隧洞及排水洞在掌子面及隧道洞壁发生了多次的板裂化岩爆及板裂化片帮现象, 下面分别以一些详细记录说明。

2.1 洞壁板裂化岩爆破坏现象

2009年2月4日于排水洞K12+454处发生了一次剧烈岩爆, 如图1所示, 破坏呈典型的板裂化现象, 最大爆坑深度为2.2 m。该处岩石为三叠统岩塘组灰色~灰白色粗晶大理岩, 厚层状, 新鲜, 岩体完整, 基本无节理裂隙发育, 岩体干燥无渗水。



图1 排水洞洞壁板裂化岩爆现象

Fig.1 Phenomenon of rock burst in drainage tunnel

2.2 洞壁板裂化的片帮破坏现象

图2为排水洞K10+716~721 m处洞壁围岩非剧烈板裂化片帮破坏现象的实拍照片。最大破坏深度0.5~0.6 m。岩板最大厚度约10 cm, 最小约0.5 cm, 平均厚度3~6 cm。此处岩石类型为灰白色白山组大理岩, 岩体完整, 干燥。

2.3 掌子面板裂化破坏现象

图3为引水隧洞盐塘大理岩(T_{2y}^5)掌子面的板裂化照片, 主要是沿层面拉开(见图3(b))或是顺层面的多条拉裂隙(见图3(a))。图4为排水洞白山组大理岩(T_{2b})掌子面板裂化现象与掌子面中部高地应力作用下的拉裂破坏。



(a) 片帮现象



(b) 片帮破坏掉落岩板

图 2 排水洞洞壁板裂化片帮破坏现象

Fig.2 Phenomena of spalling in drainage tunnel



(a) 1#隧洞(K15+472.286)



(b) 3#隧洞(K15+701.700)

图 3 掌子面板裂化现象

Fig.3 Phenomena of spalling in tunnel faces



图 4 排水洞(K10+669.800)掌子面中部拉裂隙及板裂

Fig.4 Slabbing phenomenon and tensile fracture in the middle of the tunnel face of the drainage tunnel(K10+669.800)

3 板裂化破坏的室内试验

3.1 真三轴岩爆试验设备简介

岩爆过程模拟试验于中国矿业大学深部岩石力学实验室完成。岩爆试验系统由真三轴试验主机、液压控制和数据采集 3 个子系统组成。设备最大加载能力 450 kN。数据采集包括力、变形、声发射、数字图像及高速摄影。该试验系统可以实现三向六面独立加载、单面突然卸载的功能^[6]。

3.2 试样原始信息及试验方案

为了模拟不同高地应力组合作用下岩体板裂化以及岩爆现象,本次共制作完成试验样品 4 件,岩块的取样点及岩性描述见表 1。相应于大块岩石相同部位取样进行的岩石单轴抗压强度及抗拉强度试验结果见表 2。加工完成的大块岩爆试样的尺寸与密度测量结果见表 3。

表 1 岩块的取样点及岩性描述

Table 1 Sampling points and describing of rock

编号	岩组	取样位置	颜色	完整性
JP_RB_3	T _{2y} ^{S-2}	排水洞(K12+934.380)	灰白粗晶	完整
JP_RB_4	T _{2b}	Zk14(0~2)	灰白色花斑	完整
JP_RB_5	T _{2b}	Zk14(0~2)	灰白色花斑	完整
JP_RB_6	T _{2b}	Zk14(0~2)	灰白色花斑	完整

表 2 岩石的物理力学性质

Table 2 Physico-mechanical properties of rock samples

岩组	密度 /(g · cm ⁻³)	单轴抗压 强度/MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
T _{2y} ^{S-2}	2.70	57.99	5.92	57.0	0.26
T _{2b}	2.82	122.71	9.53	50.7	0.35

表3 试样尺寸及密度

Table 3 Dimensions and densities of rock specimens

编号	尺寸/(mm×mm×mm)	密度/(g·cm ⁻³)
JP_RB_3	150.01×60.00×29.92	2.70
JP_RB_4	99.91×40.01×20.00	2.82
JP_RB_5	99.95×40.08×20.00	2.82
JP_RB_6	99.83×39.97×19.97	2.82

中水顾问集团华东勘测设计研究院对锦屏二级水电站辅助洞沿洞线方向的地应力水平进行了测试及拟合研究^[12], 图5为其研究成果, 给出了沿洞轴方向不同位置处的初始地应力, 其中X方向应力为平行于隧洞轴向且水平的应力, Y方向应力为垂直于隧洞轴向且水平的应力, Z方向应力为竖向应力。

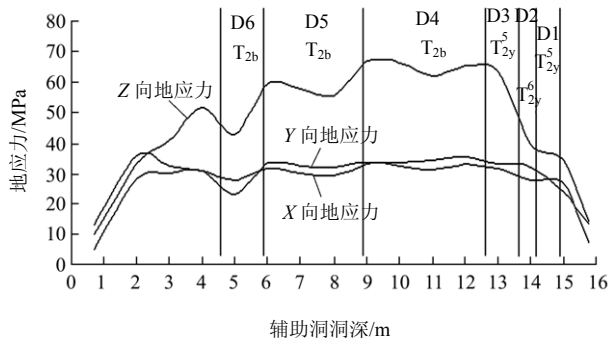


图5 沿隧洞洞线地应力变化

Fig.5 Initial in-situ stress along the tunnel alignment

根据以上初始地应力资料, 通过计算模拟分析综合确定各试样岩爆试验加载方案见表4。首先将试样加载到初始地应力水平, 然后通过卸载与隧洞轴向垂直的水平应力来模拟隧洞开挖, 再逐渐加载竖向应力模拟开挖后的应力集中, 直至试样完全破坏。根据岩组分布范围及地应力回归曲线, 在图5

表4 岩爆试验加载方案

Table 4 Procedures of loading for rock specimens

MPa

试样编号	加载				卸载 σ_h				卸载 σ_h 后再加载 σ_v			
	σ_v	σ_H	σ_h	加载要求	σ_v	σ_H	σ_h	加载要求	σ_v	σ_H	σ_h	加载要求
JP_RB_3	56	34	32		56	34	0		56~112	34	0	
JP_RB_4	64	34	32	每级4 MPa, 间隔5 min	64	34	0	保持30 min	64~128	34	0	σ_v 每级加4 MPa, 间隔10 min
JP_RB_5	58	30	32		58	30	0		58~116	30	0	
JP_RB_6	50	30	28		50	30	0		50~100	30	0	

注: (1) σ_v 为竖向应力, σ_H 为平行隧道轴向且水平的应力, σ_h 为垂直隧道轴向且水平的应力; (2) 该表为试验前最初设计方案, 在试验中有些许调整。

中取 D3, D4, D5, D6 四个区段, 与岩爆试样 JP_RB_3, JP_RB_4, JP_RB_5, JP_RB_6 依次对应。

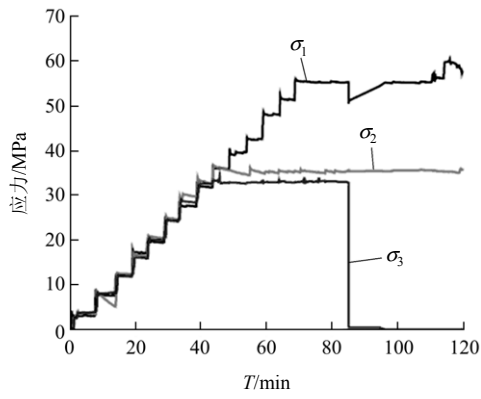
3.3 试验过程

试验中记录了试样加载过程、试样变形过程、试验过程中声发射事件及能量损耗, 也记录了岩爆过程中听到的声音, 对岩爆过程进行全程拍摄。图6为试样 JP_RB_3, JP_RB_6 加载全过程曲线。JP_RB_3 大理岩在 σ_3 卸载后中上部及右下角处各产生一斜向裂纹, 第一次竖向集中加载后约 6 min 时声发射信号变化较快, 之后伴随一声闷响, 试样中上部出现一条横向断裂, 沿该横向断裂上部发生向外剥离, 试样破坏。在卸载时, 声发射事件增多, 有一定的能量释放。试样破坏后的侧面裂纹主要为竖向劈裂裂纹, 夹杂些许较小的剪切裂纹, 主要为板裂化破坏。

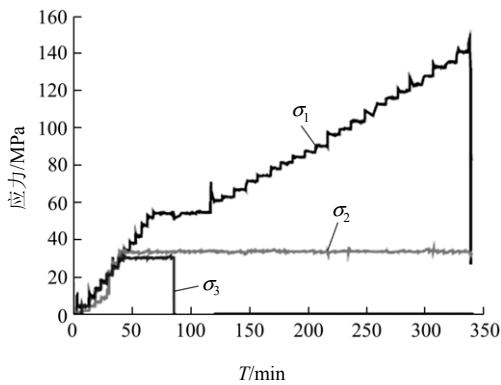
JP_RB_6 在 σ_3 卸载后发现试样右侧中部及左侧中下部出现竖向裂纹; 竖向荷载增至 54 MPa 时出现一次声响, 右上角产生小片状剥离; 增至 70 MPa 后在上次片状剥离的左侧又出现一条较小的裂纹; 增至 78 MPa 后右上角前 2 次产生的剥离弹出, 并伴随噼啪声响; 增至 146 MPa 后约 2 min 后出现声响, 随后伴随一声较大声响, 顶部发生弹射破坏。试样破坏后侧面裂纹主要为平行于最大主应力方向的张性破裂面。JP_RB_4, JP_RB_5 试块的试验过程与 JP_RB_6 相似, 均产生了强烈岩爆, 或多次小岩爆后发生强烈岩爆, 在岩爆之前均出现了板裂化。

3.4 试验结果

图7为各试样试验后的实拍照片。从照片可以看出, 各试样在均出现了明显的板裂化现象, 岩板(片)的分离面基本平行于最大主应力方向, 这些现象与 TBM 引水洞及排水洞围岩的实际破坏情况基本一致。



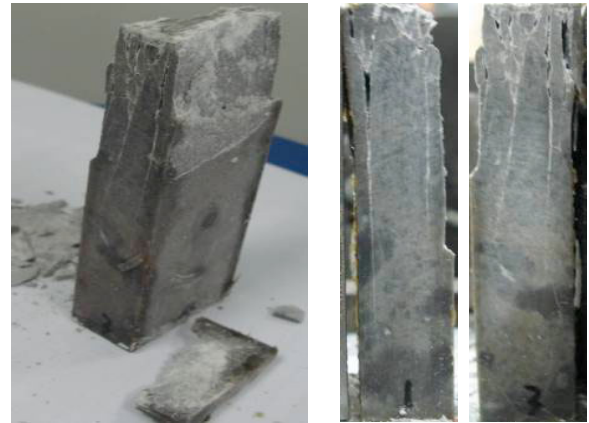
(a) JP_RB_3 应力路径曲线



(b) JP_RB_6 应力路径曲线

图 6 试样应力路径曲线

Fig.6 Stress path curves of rock specimens



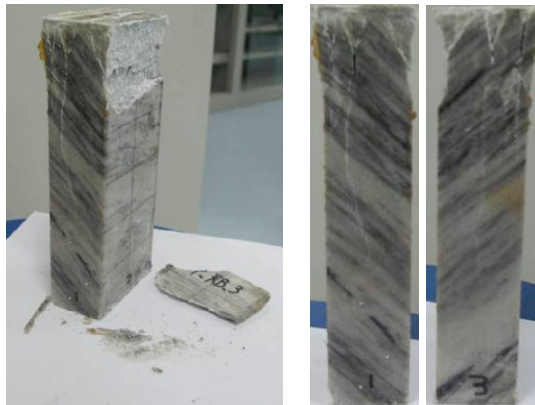
(c) JP_RB_5 大理岩岩样板裂化破坏



(d) JP_RB_6 大理岩岩样板裂化破坏

图 7 各试样破坏后的板裂化特征

Fig.7 Slabbing characteristics after specimens failure



(a) JP_RB_3 大理岩岩样板裂化破坏



(b) JP_RB_4 大理岩岩样板裂化破坏

表 5 为 4 块试样在发生最终破坏时的应力。在 4 块试样中, 属于盐塘组的粗晶大理岩 JP_RB_3 破坏时的最大竖向应力明显低于属于白山组的其他 3 块试样。其主要是盐塘组大理岩岩石强度较低, 不具备高储能条件, 这一试验结果初步说明在今后锦屏 II 级水电站引水隧洞的实际开挖过程中, 盐塘组粗晶大理岩的破坏方式以非剧烈的板裂化片帮破坏为主, 发生剧烈板裂化岩爆的可能性较小, 白山组大理岩发生剧烈岩爆的可能性大, 但都伴随板裂化破坏而发生。需要提及的是, 本次试验对盐塘组大理岩仅做了一块试样, 白山组大理岩也仅做了 3 块, 而岩爆的发生受到诸多因素的影响, 要从发生岩爆的应力来预测岩爆发生的情况还有待进一步的工作, 上述认识还需今后的实际情况来检验。另外上述试验发现试样基本是从端部破坏开始, 这与试验中存在端部效应有关。同时, 由于块体加载中允许

表5 岩爆试样最终破坏时的应力

Table 5 Stress conditions of samples at failure MPa

编号	σ_v	σ_{H1}	σ_{H2}
JP_RB_3	59.8	35.3	0
JP_RB_4	190.0	35.9	0
JP_RB_5	160.2	29.9	0
JP_RB_6	146.5	32.4	0

有一定的变形, 加载块的尺寸略小于岩样的尺寸, 在岩样顶有微小高度岩样仅受到竖向荷载作用, 导致了岩样顶部破坏更强。

4 板裂化对 TBM 开挖的影响

尽管在单块岩石的岩爆试验过程中, 对在多大应力条件下会发生片帮及岩爆都有详细记录, 但由于岩爆试验本身不能完全模拟隧洞开挖条件, 这些数据只作为参考, 但岩爆试验表现的现象与锦屏排水洞、引水洞所遇到的现象基本相同。脆性大理岩在高地应力作用下主要的破坏形式是片帮及岩爆, 都存在板裂化的过程。对于非剧烈的掌子面岩石板裂化, 从 TBM 破岩角度来看, 等于在掌子面前多形成了一组结构面, 有利于 TBM 破碎岩体, 这与 A. Myrvang 等^[13, 14]观察到的现象有相似之处。发生于洞壁的非剧烈板裂化破坏, 对开挖后洞壁的支持及清渣增加了难度。对于剧烈的岩爆, 由于掌子面垮塌, TBM 在掘进过程中主要不是在破岩, 而是对刀盘前垮塌的岩石进行清渣。TBM 的运行应该减少推力和每分钟转数, 放慢掘进速度, 尽量避免对掌子面岩石的剧烈振动, 减少掌子面进一步垮塌与岩爆再次发生对刀盘的损害, 保持缓慢掘进。岩爆对洞壁的破坏既影响支护, 又影响到 TBM 撑靴的换步与撑靴力的提供, 也给清渣工作带来困难。岩爆影响到 TBM 施工各个方面, 大大降低了 TBM 的施工速度。至关重要的是要尽可能地避免岩爆造成 TBM 卡机事故以及 TBM 刀盘破坏事故。

5 结 论

采用真三轴岩爆试验设备对大理岩进行了模拟开挖过程的室内试验。4 块试样在平行于最大应力

的方向均产生了明显的板裂化现象, 这一现象与锦屏二级水电站 TBM 施工隧洞掌子面及洞壁的破坏具有相当高的一致性, 表明在今后锦屏二级水电站排水洞或引水隧洞的 TBM 施工过程中, 围岩的破坏形式是以岩石板裂化破坏为主, 其中包括剧烈的板裂化岩爆与非剧烈的板裂化片帮。

板裂化破坏对 TBM 的影响主要体现在: (1) 非剧烈板裂化破坏的有利于 TBM 破碎岩体, 但给洞壁的支持及清渣增加了难度; (2) 剧烈板裂化岩爆要求 TBM 的运行应该减少推力和每分钟转数, 放慢掘进速度, 尽量避免对掌子面岩石的剧烈振动, 减少掌子面进一步垮塌与岩爆再次发生对刀盘的损害。岩爆既影响支护, 又影响到 TBM 撑靴的换步与撑靴力的提供, 也给清渣工作带来困难。但最关键的是要避免 TBM 卡机事故以及对刀盘破和主轴承的破坏。

参考文献(References):

- [1] 吴世勇, 任旭华, 陈祥荣, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞围岩稳定性分析及支护设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3 777 - 3 782.(WU Shiyong, REN Xuhua, CHEN Xiangrong, et al. Stability analysis and supporting design of surrounding rocks of diversion tunnel for Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3 777 - 3 782.(in Chinese))
- [2] 吴世勇, 王 鹤, 徐劲松, 等. 锦屏二级水电站 TBM 选型及施工关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2 000 - 2 009.(WU Shiyong, WANG Ge, XU Jinsong, et al. Research on TBM type-selection and key construction technology for Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2 000 - 2 009.(in Chinese))
- [3] 任旭华, 李同春, 陈祥荣. 锦屏二级水电站深埋引水隧洞衬砌及围岩结构分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 16 - 19.(REN Xuhua, LI Tongchun, CHEN Xiangrong. Structural analysis of the liner and surrounding rocks of diversion tunnel in Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 16 - 19.(in Chinese))
- [4] 张镜剑, 傅冰骏. 岩爆及其判据和防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2 034 - 2 042.(Zhang Jingjian, FU Bingjun. Rockburst and its criteria and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2 034 - 2 042.(in Chinese))
- [5] DOWDING C H, ANDERSSON C A. Potential for rock bursting and

slabbing in deep caverns[J]. *Engineering Geology*, 1986, 22(3): 265 - 279.

[6] KAISER P F. Failure mechanisms and rock support aspects—the international consultation report for the key technology of safe and rapid construction for Jinping II Hydropower Station high overburden and long tunnels[R]. [S. l.]: [s. n.], 2009.

[7] 谷明成, 何发亮, 陈成宗. 秦岭隧道岩爆的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(9): 1 324 - 1 329.(GU Mingcheng, HE Faliang, CHEN Chengzong. Study of rockburst in Qingling tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(9): 1 324 - 1 329. (in Chinese))

[8] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(5): 865 - 876.(HE Manchao, MIAO Jinli, LI Dejian, et al. Experimental study of rockburst processes of granite specimen at great depth[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 865 - 876.(in Chinese))

[9] DIEDERICHS M S. The 2003 Canadian geotechnical colloquium: mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnel[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(9): 1 082 - 1 116.

[10] HUANG R Q, WANG X N, CHAN L S. Triaxial unloading test of rocks and its implication for rock burst[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2001, 60(1): 37 - 41.

[11] 张黎明, 王在泉, 贺俊征, 等. 卸荷条件下岩爆机制的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(增 1): 4 769 - 4 773.(ZHANG Liming, WANG Zaiquan, HE Junzheng, et al. Study of the experiment of rock burst under unloading condition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(Supp.1): 4 769 - 4 773.(in Chinese))

[12] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 锦屏二级水电站深埋引水隧洞工程地质条件和设计情况汇报——锦屏二级水电站深埋长隧洞安全快速施工关键技术国际咨询会[R]. [S. l.]: [s. n.], 2009.(East China Investigation and Design Institute, CHECC. Report of conditions of engineering geology and design for deep diversion tunnel in Jinping II hydropower station—The international consultation on the safety of deep tunnels at Jinping II hydropower station[R]. [S. l.]: [s. n.], 2009.(in Chinese))

[13] MYRVANG A, BLINDHEIM O T, JOHANSEN E D. Rock stress problems in bored tunnels[J]. *Norwegian Soil and Rock Engineering Association*, 1998, (11): 56 - 62.

[14] BONIFACE A. Tunnel boring machine performance in basalts of the Lesotho formation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2000, 15(1): 49 - 54.

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》将主要发表下列内容的文章:

- (1) 节理在不同接触状态下的渗流特性;
- (2) 向家坝水电站地下厂房缓倾角层状围岩稳定分析;
- (3) 微型单轴煤岩试验机的研制及试验研究;
- (4) 白鹤滩高拱坝坝趾锚固研究;
- (5) 构皮滩水电站高拱坝建基面卸荷岩体变形参数研究;
- (6) 基于块体理论赤平解析法的地下水封油库围岩稳定性分析;
- (7) 岩溶隧道围岩水力破坏机制研究;
- (8) 单裂隙花岗岩在应力 - 渗流 - 化学耦合作用下的试验研究;
- (9) 单裂隙高流速非达西渗流运动规律的试验研究。