



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.03.030

于洋,刁心宏,赵秀绍,等.深部岩体隧洞岩爆灾害影响因素分析[J].南水北调与水利科技,2017,15(3):183-189. YU Yang, DIAO Xir hong, ZHAO Xir shao, et al. Analysis of influence factor associated with rock bursts in deep, hard rock tunnels[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 183-189. (in Chinese)

深部岩体隧洞岩爆灾害影响因素分析

于洋,刁心宏,赵秀绍,朱陈

(华东交通大学 土木建筑学院岩土工程研究所,南昌 330013)

摘要:深部岩体隧洞施工过程中频发的岩爆灾害时常会造成大量的人员伤亡以及巨大的财产损失。基于某水电站4条引水隧洞开挖过程中的大量的岩爆实例,以数值运算为主要研究手段,从能量的角度出发对影响岩爆灾害发生的关键性因素进行了研究,结果表明:相同长度的隧洞开挖过程中随着单循环开挖步长的增大,微震能量释放值不断增大,岩爆的发生频次具有增加的趋势;当开挖速度控制在合理范围内时,围岩稳定性可以得到有效控制,当其突破到临界状态以上时,岩爆的发生频次具有显著增加的特征;在一定埋深范围内随着埋深的增加,岩爆发生的频率、强度具有明显增加的趋势;上述研究结果可以为高地应力条件下地下隧洞开挖过程中岩爆的预测与防治提供合理的科学依据。

关键词:水电站;引水隧道;岩爆;数值模拟;微震能量

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)03-0183-07

Analysis of influence factor associated with rockbursts in deep, hard rock tunnels

YU Yang, DIAO Xir hong, ZHAO Xir shao, ZHU Chen

(College of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Rockbursts in tunnels can be a significant hazard. Based on a large amount of micro seismic information and hundreds of rockbursts that occurred in four deep headrace tunnels at a hydropower station in Sichuan province, China, we combined numerical calculation with micro seismic monitoring in order to study the evolution processes of rockbursts. The achieved results are as follows: the excavation scheme, speed, and buried depth can affect the stability of the surrounding rocks in deep, hard rock tunnels during construction. As the excavation step length, speed, and buried depth increase, the micro seismic energy rises, and so do the frequency and intensity of rockbursts. The results can provide reasonable and scientific basis for prediction and prevention of rockbursts during underground tunnel excavation under high geostress.

Key words: hydropower station; headrace tunnel; rockburst; numerical calculation; micro seismic energy

在高地应力条件下,开挖卸荷作用可引起脆性岩体内部集聚的弹性应变能突然猛烈释放,导致岩石爆裂并弹射出来,从而造成岩爆现象的发生,时常会造成大量的人员伤亡以及巨大的财产损失。

数值计算分析是岩爆灾害特征研究的重要手段:齐庆新^[1]采用数值计算手段对冲击地压与岩爆

现象进行对比分析,指出它们的异同,在此基础上建议对“冲击地压”、“岩爆”和“矿震”这3个术语区别使用;周瑞忠^[2]根据岩爆过程中的静力平衡、强度破坏和断裂破坏三者的区别与联系,通过对发生岩爆的掘进面上两种计算模型的断裂力学研究,确定出判别岩爆发生的力学机理和临界条件,从而对岩爆

收稿日期:2016-04-12 修回日期:2016-05-27 网络出版时间:2017-05-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170506.1117.011.html>

基金项目:国家自然科学基金项目(51509092);江西省教育厅科研项目(150518)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51509092); Research Project of Jiangxi Provincial Department of Education(150518)

作者简介:于洋(1982),男,黑龙江人,讲师,博士,主要从事深部岩体力学方面的研究。E-mail: lukeryuyang@163.com

发生的总体规律作了定量解释;郭长宝^[3]根据大瑞铁路高黎贡山深埋隧道,采用 ANSYS 软件模拟了在现今构造地应力场中,在褶皱和走滑断层等不同构造部位的岩体中进行隧道开挖所引起的应力重分布特征,对在复杂地质构造地区挤压和剪切构造环境下深埋隧道的岩爆特征进行了深入分析和研究,并就可能发生岩爆的部位和岩爆强度进行了预测。

Durrheim 等^[4]率先在南非通过微震实时监测过程中获得的微震信息,对深部矿山开采过程中岩爆的发生展开了研究;我国的多个金属矿山、煤矿开采过程中,同样对微震监测技术进行了运用了,对开采活动诱发的岩体破坏、岩爆、冲击地压等灾害的孕育及发生进行了分析与研究。研究结果均表明,岩爆发生前,微震活动性及能量释放在时间、空间上均有一个迅速增加的过程^[5-12]。

目前,运用数值计算与微震监测相结合的手段对于深埋线性隧洞开挖岩爆灾害影响因素方面的研究却鲜有报道。本文以某水电站埋深隧洞的开挖过程为工程背景,基于数值计算结合现场微震监测数据及现场岩爆发生情况对开挖方案、开挖速度及埋深条件等影响隧洞开挖过程中围岩稳定性的重要因素进行了研究与分析,其结果可以为深部岩体地下隧洞工程施工过程中岩爆风险的控制提供合理的科学依据。

1 工程概述

某水电站深埋隧洞主要由图 1 所示的 5 条相互平行的隧洞组成,分别为:1 号-4 号引水隧洞直径

为 13 m,上断面为圆形,下断面为马蹄形;施工排水洞 P 号直径为 8 m,断面为圆形。隧洞平均长度约为 17.3 km,埋深超过 1 500 m 的洞段占总长度的 80% 左右,其中最大埋深为 2 525 m,隧洞围岩主要为 0、0 类大理岩,岩石坚硬完整致密,单轴抗压强度 55~114 MPa,弹性模量为 25~40 GPa,变形模量为 8~16 GPa,围岩具有较强的自承载能力,成洞条件良好^[13]。

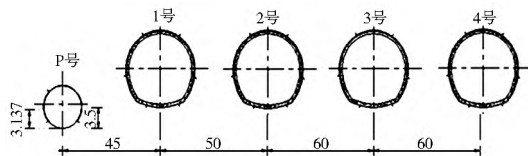


图 1 某水电站深埋隧洞布置

Fig. 1 The layout of the deep tunnels at a Hydropower Station

本论文主要针对该水电站 1 号-4 号引水隧洞施工过程开展研究,隧洞开挖方式为钻爆法,分上下两台阶进行开挖(每天爆破 1~2 次,每次爆破进尺 2.5~3 m)。上述隧洞施工期间发生大量不同等级的岩爆(典型岩爆案例见图 2(a),图 2(b),图 2(c)),对施工的安全及工程进度造成了很大的影响。岩爆主要以轻微岩爆为主,岩爆发生区占隧洞总长的 11.43%;中等岩爆次之,岩爆发生区占隧洞总长的 4.42%;强烈岩爆相对较少,岩爆发生区分别占隧洞总长的 1.46%;极强岩爆相对较少,岩爆发生区分别占隧洞总长的 0.16%;纵观整个引水隧洞的开挖过程,其发生各等级岩爆的累计长度达 8 km 以上,其中,发生轻微-中等岩爆的区域累计长度达到 6 km、强烈为 2 km、极强为 0.4 km。

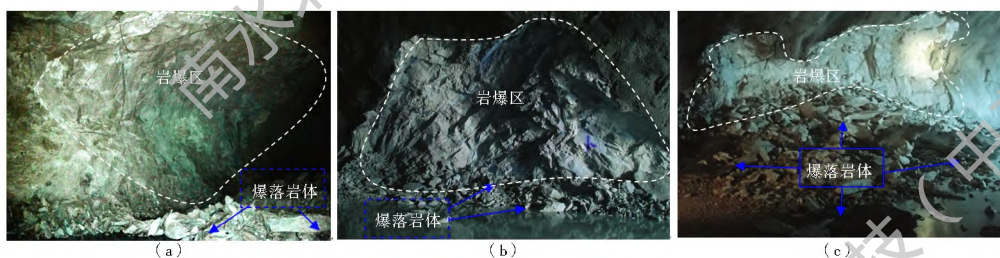


图 2 某水电站典型岩爆的发生情况

Fig. 2 The rockbursts during Hydropower Station excavation

2 深埋隧洞开挖过程中岩爆的影响因素

2.1 开挖方案及速度的影响

根据该水电站 2 号引水隧洞 K10+230 至 K10+260 开挖段建立数值计算模型,该开挖段垂直埋置深度为 2 525 m,地处高地应力区。本次数值计算本构模型采用一种弹脆塑性本构模型——黏聚力弱化摩擦强化模型(CWFS),它在针对高地应力下

硬岩脆性破坏区方面的模拟研究方面具有较好的效果^[14-15]。基于 1 m、3 m、6 m、10 m、15 m、30 m 为开挖方案,根据该水电站大理岩力学参数(表 1)以及 2 号引水隧洞 K10+230 至 K10+260 开挖段的初始地应力分布特征(表 2),对上述所选取洞段上台阶的开挖过程运用 FLAC3d 数值软件进行数值计算分析。不同开挖方案下围岩的塑性区范围见图 3、表 3。

表 1 某水电站大理岩力学参数

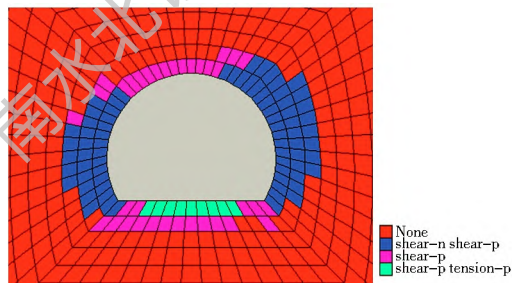
Tab. 1 Mechanical parameters of marble at the hydropower station

黏聚力峰值 /MPa	黏聚力残余值 /MPa	内摩擦角 /°	抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
15.6	7.4	35.8	70	32	0.2

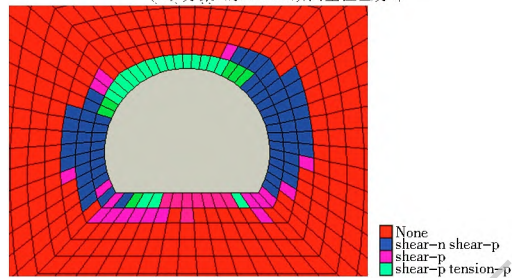
表 2 2号引水洞 K10+ 230 至 K10+ 260 开挖段地应力

Tab. 2 Crustal stress condition of K10+ 230~ K10+ 260 in the NO. 2 headrace tunnel

埋深/m	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
2 525	- 46.30	- 51.02	- 66.48	- 1.10	- 6.11	5.58



(a) 方案1的K2+330断面塑性区分布



(b) 方案6的K2+330断面塑性区分布

图 3 方案 1 与方案 6 的 K2+ 330 断面塑性区分布

Fig. 3 The rockbursts during hydropower station excavation

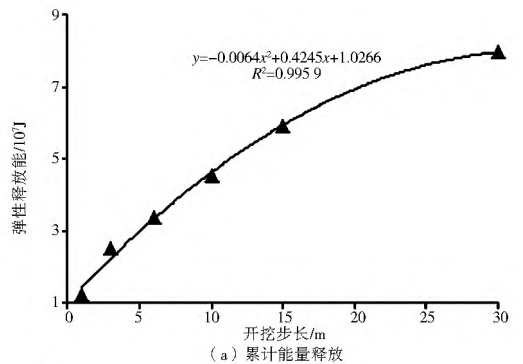
表 3 不同开挖方案设计及其累计塑性区体积计算结果

Tab. 3 Various excavation schemes and corresponding calculation results

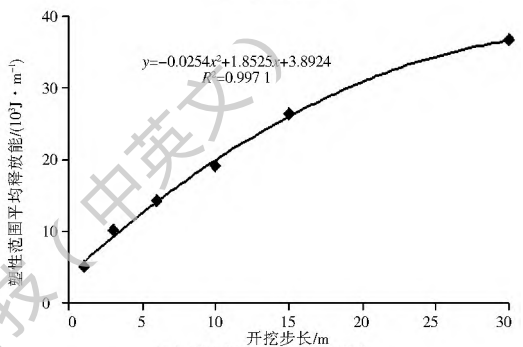
方案	开挖次数 × 开挖步长 / m	累计塑性区体积 / 10 ³ m ³
1	30 × 1	2.42
2	10 × 3	2.46
3	5 × 6	2.37
4	3 × 10	2.38
5	2 × 15	2.25
6	1 × 30	2.18

结合图 3 及表 3 可以看出,随着开挖步长的增加,累计塑性区体积随开挖步长的增加变化不大,主要分布在 $2.46 \times 10^3 \sim 2.18 \times 10^3 \text{ m}^3$ 的范围内。图 4 为不同开挖方案下的能量释放情况,从图 4(a),图 4(b)中可以看出对于相同长度的隧道来说,累计释放能以及塑性范围的平均释放能均随着开挖步长的增大呈增加的趋势,分别由方案 1 的 $1.23 \times 10^7 \text{ J}$

($5.08 \times 10^3 \text{ J/m}^3$) 不断增加为方案 6 的 $7.98 \times 10^7 \text{ J}$ ($36.61 \times 10^3 \text{ J/m}^3$),能量释放是评价围岩稳定性的重要参数^[16-17],能量释放越大岩爆发生的可能性就越大^[18-20]。综上所述,随着单次开挖步长的增加,围岩稳定性总体上呈逐渐降低的趋势。



(a) 累计能量释放



(b) 塑性范围内的平均释放能

图 4 能量释放与开挖步长之间的关系

Fig. 4 The relationship between the energy release and the excavation step length

运用南非 ISS 微震监测系统,对水电站 1 号-4 号引水隧洞的整个开挖过程进行了连续性实时监测,监测系统的构成及监测过程详见文献[7]所述。图 5 为上述 4 条隧洞施工过程中的三个典型开挖段(开挖速度分别为 4 m/d、10 m/d、16 m/d)施工过程中围岩岩体的微震活动性(图 5 中每一个圆球代表一个微破裂事件,其颜色表示破裂发生时所释放能量的 log 值)。结合图 5(a),图 5(b),图 5(c)可以看出,随着开挖速度的加快微震活动性及微震辐射能均具有明显增加的趋势。

基于上述特点,本研究对该水电站深埋隧洞工程施工过程中,不同开挖速度条件下的微震活动性及岩爆发生频次进行了全面的统计分析,其结果见图 6。从图 6 中可以看出,高地应力情况下的深埋隧洞开挖过程中微震活动性随着开挖速度的加快具有呈指数函数增加的趋势;与之相对应,其岩爆发生频次在开挖速度在 10 m/d 以内时(统计值分别为 4 m/d、6 m/d、8 m/d、10 m/d)时变化不大,而当开挖速度大于 10 m/d 时(统计值分别为 12 m/d、14

m/d、16 m/d) 岩爆发生频次迅速增加。综上所述, 针对深埋隧道岩体工程, 应该在采用“短进尺, 多循环”开挖方式的基础上, 合理的控制其开挖速度, 岩爆发生频率、强度均会有一定程度的降低。对于该水电站深埋隧洞工程来说, 每日最佳进尺为 10 m。

2.525 m 埋深条件下的初始地应力情况(考虑构造应力, 见表 4)。以 5 m 为开挖步长对长度为 30 m 的隧洞开挖过程进行计算分析, 对比分析不同开挖深度情况下围岩累计塑性区体积的计算结果见表 5。

表 4 不同埋深情况下地应力分布

Tab. 4 Stress conditions under different buried depths

M Pa						
埋深/m	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
500	-16.00	-17.82	-13.65	2.13	-2.84	2.25
800	-21.38	-23.20	-19.03	2.15	-4.12	1.95
1 000	-27.26	-32.92	-22.62	1.90	-6.28	1.10
1 100	-32.06	-37.21	-28.75	-1.43	-5.11	4.93
1 200	-35.11	-37.93	-26.96	0.77	-4.45	2.34
1 500	-31.58	-44.26	-39.16	2.61	-1.89	4.19
1 600	-38.89	-41.35	-42.15	-3.13	-4.32	5.85
1 700	-39.34	-42.05	-44.03	-3.18	-4.44	5.87
1 800	-40.59	-42.98	-46.62	-3.54	-5.54	2.52
1 900	-41.62	-44.97	-48.60	-3.35	-3.23	4.54
2 000	-41.35	-46.68	-49.39	-1.34	-2.80	3.73
2 200	-43.28	-50.50	-56.23	-2.29	-0.37	3.04
2 300	-46.42	-51.68	-61.48	-2.37	-0.64	3.45
2 525	-46.30	-51.02	-66.48	-1.10	-6.11	5.58

表 5 不同埋深情况下累计塑性区体积计算结果

Tab. 5 Various buried depths and corresponding calculation results

埋深/m	开挖次数×开挖步长/m	累计塑性区体积/10 ² m ³
500	6×5	8.03
800	6×5	13.1
1 000	6×5	16.46
1 100	6×5	21.56
1 200	6×5	20.65
1 500	6×5	24.49
1 600	6×5	24.19
1 700	6×5	24.17
1 800	6×5	23.65
1 900	6×5	23.49
2 000	6×5	22.60
2 200	6×5	23.60
2 300	6×5	25.40
2 525	6×5	25.94

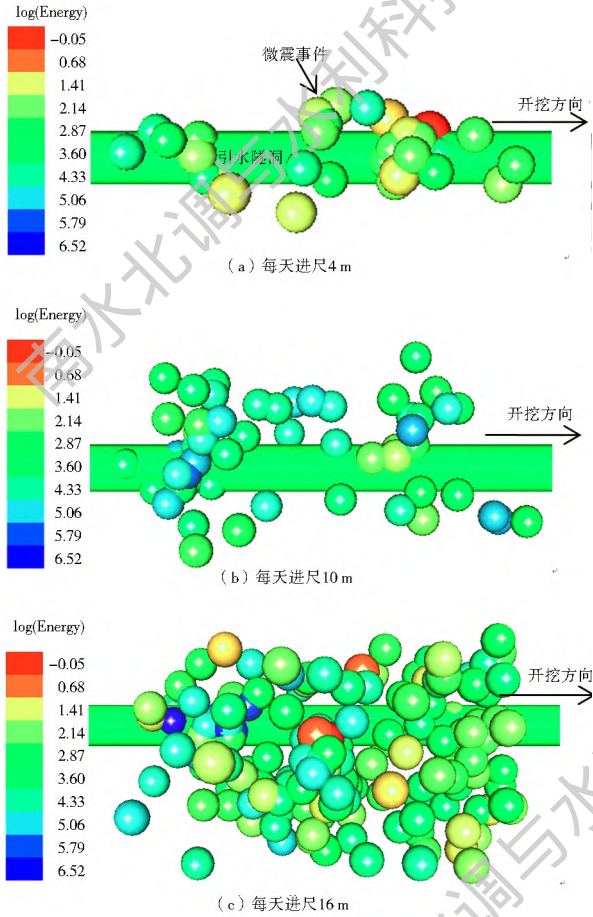


图 5 不同开挖速度下的微震活动性

Fig. 5 Spatial evolutions of micro seismic events under different excavation speeds

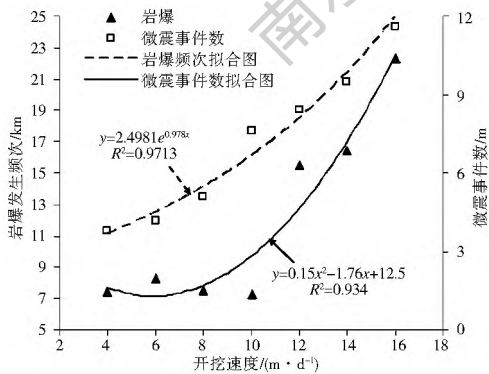


图 6 不同开挖速度下微震事件及岩爆发生情况

Fig. 6 Micro seismic events and occurrence of rockbursts under different excavation speeds

2.2 埋深的影响

受到围岩应力的影响, 隧洞在不同埋深条件下的开挖过程中, 破坏发生的程度以及能量释放均有所不同, 基于该水电站 1 号至 4 号引水隧洞 500~

从表 5 可以看出: 当隧道埋深在小于等于 1 500 m 的范围内, 累计塑性区体积具有随埋深的增大而显著增加的趋势(从 500 埋深条件下的 $8.03 \times 10^2 \text{ m}^3$ 增加到 1 500 埋深条件下的 $24.49 \times 10^2 \text{ m}^3$), 分析其原因在于随着隧洞埋深的增大, 隧洞开挖过程中的围岩应力不断增加, 形成应力集中现象就越明

显,促使隧洞开挖过程中的围岩岩体进入塑性状态的能力也就越强;当隧道埋深在大于 1 500 m 时,累计塑性区体积变化不明显(主要在 $2.49 \times 10^3 \sim 2.594 \times 10^3 \text{ m}^3$ 范围内上下浮动),分析其原因在于当隧洞埋深达到一定条件时,由于围岩压力拱的形成,即使其埋深进一步增加,围岩应力集中现象没有进一步发展,因此围岩岩体塑性范围体积变化差异性也相对不明显。

与之相对应,能量释放值同样随着隧洞埋深的增加表现出相似的特征(图 7)。隧洞开挖过程中的累计释放能及塑性范围的平均释放能分别由 500 m 埋深情况下的 $3.75 \times 10^6 \text{ J}$ ($4.67 \times 10^3 \text{ J/m}^3$) 增加到 1 500 m 埋深情况下的 $24.49 \times 10^6 \text{ J}$ ($12.79 \times 10^3 \text{ J/m}^3$);当隧道埋深大于 1 500 m 时,累计释放能及塑性范围的平均释放能变化相对稳定,增加趋势不明显。

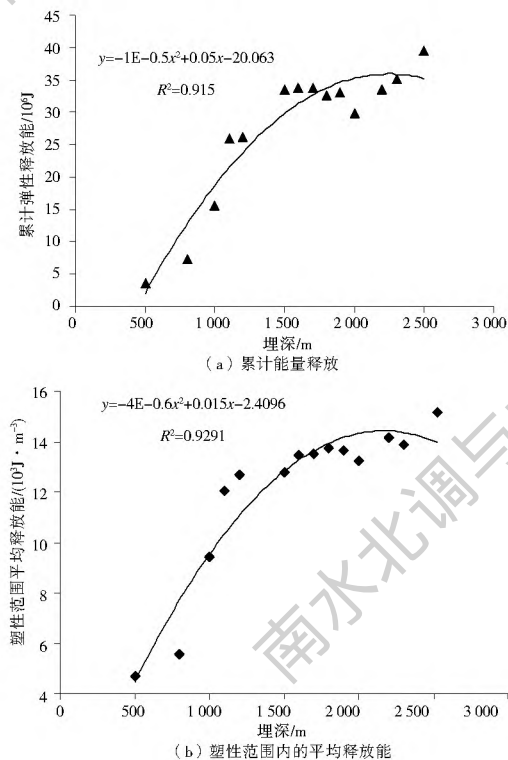


图 7 能量释放与埋深之间的关系

Fig. 7 Relationship between energy release and buried depth

综上所述,并结合前文中所述应力集中现象的影响,隧洞埋深与岩爆的发生情况应具有下列关系:当隧洞在 1 500 m 埋深范围内时,随着隧洞埋深的增加岩爆发生情况应具有明显增加的趋势;当隧洞埋深增加到一定限值以上时,其埋深对岩爆的影响相对减弱。本次研究记录了该水电站 1 号-4 号引水隧洞各等级岩爆共 300 余次,对不同埋深条件下的微震仪器所监测到的微破裂活动性(图 8)以及现场岩爆的发生情况(图 9)进行综合分析,其结果对上述观点进行了证实:(1) 500~2 000 m 埋深范围内的

微震活动性(每米范围内的 2 7 个上升到 11.2 个)及岩爆发生的频率、强度均随着埋深的增加表现出明显增强的趋势。(2) 埋深为 2 000~2 525 m 时,微震活动性(保持在每米范围内 11.5 个左右)及岩爆发生的频率、强度随着埋深的增加增加趋势不明显,表现出相对平稳的变化特征。数值计算所界定埋深影响阈值为 1 500 m,与微震监测及现场岩爆观测结果的 2 000 m 有所差异,分析其原因是由于数值计算无法模拟施工环境的复杂性以及其他因素(施工方案、结构面发育、地下水等)的影响所导致的。

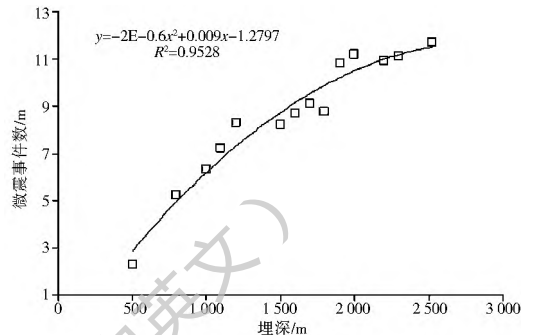


图 8 不同埋深情况下微震事件发生频率

Fig. 8 Relationship between frequency of microseismic events and buried depth

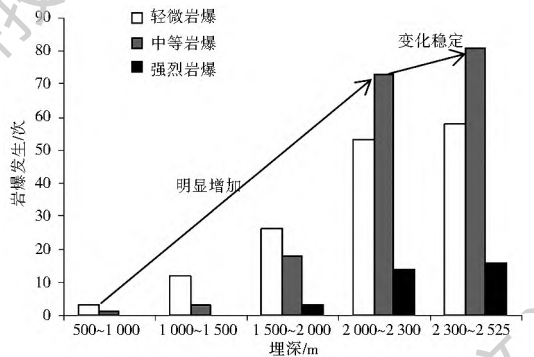


图 9 不同埋深情况下各等级岩爆发生情况

Fig. 9 Relationship between rockbursts and buried depth

开挖方案选择、开挖速度的确定及埋深条件是影响深部岩体隧洞围岩稳定性的重要因素,在深埋隧洞开挖过程中,随着开挖步长的增加、开挖速度的加快及隧洞埋深的增加岩爆灾害的发生频率具有不断增加的趋势。在具体施工过程中,要根据不同埋深情况下隧洞开挖段的应力情况选择与其相适的开挖方案、速度才能在保证施工过程安全开展的前提下,使得隧道工程可以快速、高效的顺利展开。

3 结论

本文基于数值计算及微震监测的方法,对某水电站深埋线性隧洞开挖过程中岩爆的发生进行了分析与研究,获得下列研究成果。

(1) 开挖方案、开挖速度、埋深情况是影响围岩

稳定性的重要因素; 相同长度的隧洞开挖过程中随着单循环开挖步长的增加, 能量释放值不断增大, 岩爆的发生频次具有增加的趋势。

(2) 当开挖速度控制在 10 m/d 的范围内时, 围岩稳定性可以得到有效控制; 随着开挖速度的增加, 当其突破到此临界状态以上时, 岩爆的发生频次具有显著增加的特征。

(3) 当隧洞在小于 1 500 m 的埋深范围内时, 随着埋深的增加, 单位长度隧洞开挖的累计塑性区体积、能量释放值以及微震活动性均不断增大, 同时岩爆发生的频率、强度同样具有明显增加的趋势; 当隧洞埋深增加到 2 000 m 以上时, 其埋深对岩爆的影响相对减弱。

致谢

本文中涉及的微震监测数据均来自于中科院武汉岩土所锦屏二级水电站微震监测项目部。在此衷心感谢中科院武汉岩土所冯夏庭研究员、陈炳瑞研究员、李邵军研究员、肖亚勋博士和丰光亮博士在研究过程中的辛苦努力和有意义的建议!

参考文献(References):

- [1] 齐庆新, 陈尚本, 王怀新, 等. 冲击地压、岩爆、矿震的关系及其数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1852-1858. (QI Qingxin, CHEN Shangben, WANG Huaxin, et al. Study on the relations among coal bump, rockburst and mining tremor with numerical simulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1852-1858. (in Chinese))
- [2] 周瑞忠. 岩爆发生的规律和断裂力学机理分析[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 111-117. (ZHOU Ruizhong. Regularity of rock burst and its analysis based on fracture mechanics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(6): 111-117. (in Chinese))
- [3] 郭长宝, 张永双, 孙东升, 等. 挤压和剪切构造环境下深埋隧道岩爆的对比研究[J]. 地质学报, 2011, 85(1): 66-77. (GUO Changbao, ZHANG Yongshuang, SUN Dongsheng, et al. Comparison study of rock bursts of deep buried tunnels in the shear and compression tectonic environments [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(1): 66-77. (in Chinese))
- [4] Durrheim R J, Haile A. Violent failure of a remnant in a deep South African gold mine [J]. Tectonophysics, 1998, 289(1): 105-116. DOI: 10.1016/S0040-1951(97)00310-7
- [5] Tang L Z, Xia K W. Seismological method for prediction of areal rockbursts in deep mine with seismic source mechanism and unstable failure theory [J]. Journal of Central South University of Technology, 2010(17): 947-953. DOI: 10.1007/s11771-010-0582-5
- [6] 陆菜平, 窦林名, 吴兴荣, 等. 煤岩冲击前兆微震频谱演变规律的试验与实证研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 519-525. (LU Cai ping, DOU Lin ming, WU Xing rong, et al. Experimental and empirical research on frequency-spectrum involvement rule of rock burst precursory microseismic signals of coal rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 519-525. (in Chinese))
- [7] 陈炳瑞, 冯夏庭, 曾雄辉, 等. 深埋隧洞 TBM 掘进微震实时监测与特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 275-283. (CHEN Bingrui, FENG Xiating, ZENG Xionghui, et al. Real time microseismic monitoring and its characteristic analysis during TBM tunneling in deep buried tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 275-283. (in Chinese))
- [8] Zhang C Q, Feng X T, Zhou H, et al. A top pilot tunnel preconditioning method for the prevention of extremely intense rockbursts in deep tunnels excavated by TBMs [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 31(3): 289-309. DOI: 10.1007/s00603-011-0199-5
- [9] Feng X T, Chen B R, & Li S J. Study on evolution process of rockbursts in deep tunnels [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 4(4): 289-295. DOI: 10.3724/SP.J.1235.2012.00289
- [10] Lyubushin A A. Seismic catastrophe in Japan on March 11, 2011: long term prediction on the basis of low-frequency microseisms [J]. Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics, 2011, 10, 9-35. DOI: 10.1134/S0001433811080056
- [11] 于洋, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 深埋隧洞不同开挖方式下即时型岩爆微震信息特征及能量分形研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2622-2628. (YU Yang, FENG Xiating, CHEN Bingrui, et al. Analysis of energy fractal and microseismic information characteristics about immediate rockbursts in deep tunnels with different excavation methods [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2622-2628. (in Chinese))
- [12] Cai M. Influence of stress path on tunnel excavation response numerical tool selection and modeling strategy [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 23(6): 618-628. DOI: 10.1016/j.tust.2007.11.005
- [13] 陈炳瑞, 冯夏庭, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 时滞型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 561-569. (CHEN Bingrui, FENG Xiating, MING Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts in deep tunnels: time delayed rockburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 561-569. (in Chinese))
- [14] Hajiabdolmajid V, Kaiser P K. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18(1): 35-48.
- [15] 苏国韶, 冯夏庭. 基于粒子群优化算法的高地应力条件下硬岩本构模型的参数辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3029-3034. (SU Guoshao, FENG Xiating. Parameter identification of constitutive model for hard rock under high geostress using particle swarm optimization algorithm [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3029-3034. (in Chinese))
- [16] Feng X T, Yu Y, Feng G L, Xiao Y X, Chen B R, Jiang Q.

- Fractal behaviour of the microseismic energy associated with immediate rockbursts in deep, hard rock tunnels [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 58: 98-107. DOI: 10.1016/j.tust.2015.10.002
- [17] Aki K. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress strain drop from the G wave spectrum [J]. Bulletin of Earthquake Research Institute, 1966, 44(12): 73-88.
- [18] Cook N G W, Hoek E, Pretorius J P G, et al. Rock mechanics applied to the study of rockbursts [J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1966, 66(10): 436-528.
- [19] 苏国韶, 冯夏庭等. 高地应力下地下工程稳定性分析与优化的局部能量释放率新指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2453-2460. (SU Guoshao, FENG Xiating, et al. Study on new index of local energy release rate for stability analysis and optimal design of underground rockmass engineering with high geostress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2453-2460. (in Chinese))
- [20] Chen B R, Feng X T, Li Q P. Rock burst intensity classification based on the radiated energy with damage intensity at Jinping II hydropower station, China [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(1): 289-303. DOI: 10.1007/s00603-013-0524-2
- [21] 郑恒斌, 黄仕平, 颜全胜, 等. 考虑压剪组合作用力的双粗糙表面接触模型[J]. 华南理工大学学报, 2013, 41(2): 101-128. (ZHENG Hengbin, HUANG Shiping, YAN Quansheng, et al. Contact model of two rough surfaces under combined compress shear load [J]. Journal of South China University of Technology, 2013, 41(2): 101-128. (in Chinese))
- [22] 王振领, 林拥军, 钱永久. 新老混凝土结合面抗剪性能试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5): 600-604. (WANG Zhenling, LIN Yongjun, QIAN Yongjiu. Experimental research on shear properties of new-to-old concrete interface [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(5): 600-604. (in Chinese))
- [23] 城市道路交通规划设计规范[M]. 北京: 中国计划出版社, 1995. (Specifications on urban road traffic planning and design [M]. Beijing: China Planning Press, 1995. (in Chinese))

(上接第 150 页)

- [18] 王晓军, 王琪. 含非对称摩擦平面运动刚体动力学 LCP 方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(11): 2023-2028. (WANG Xiaojun, WANG Qi. An LCP method for dynamics of planar motion rigid body with non symmetric friction [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(11): 2023-2028. (in Chinese))
- [19] 李翠华. 三维弹塑性和接触问题的非线性互补方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014. (LI Cuihua. Research on the nonlinear complementary method for 3D elastoplasticity problems and contact problems [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese))
- [20] Cao B Z, Zhang Y C, Yu H J, et al. Experiment and ANSYS finite element analysis on concrete filled thir walled steel tube joints [J]. Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, 2007, 24(2): F4.