

文章编号: 1674—8247(2023)02—0075—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.02.015

锦屏水电站辅助洞岩爆特征及防控技术研究

宿春亮

(中铁建雄安投资发展有限公司, 河北 保定 071000)

摘要:随着我国隧道建设规模和建设速度不断提升,隧道修建的深度、长度及地质条件复杂程度也随之增加,高地应力岩爆是隧道安全施工面临的重大隐患,合理的岩爆防控技术是保证隧道安全快速穿越岩爆段的关键所在。本文依托锦屏水电站辅助洞工程,通过文献调研和统计分析等方法,研究了岩爆发生的时间和空间特征,分析了现场岩爆段施工分级防控措施,介绍了锦屏辅助洞岩爆治理的成功经验。研究成果可为同类工程的施工提供技术资料和经验借鉴。

关键词:隧道工程;高地应力;岩爆特征;岩爆防控

中图分类号: U455.4 文献标识码: A

A Study on Rock Burst Characteristics and Prevention and Control Technology of Auxiliary Tunnel of Jinping Hydropower Station

SU Chunliang

(China Railway Construction Xiongan Investment Development Co., Ltd., Baoding 071000, China)

Abstract: With the continuous improvement of the scale and speed of construction of tunnels in China, the depth, length, and complexity of geological conditions of tunnel construction also increase. High geostress rockburst is a major hidden danger in the safe construction of tunnels. Reasonable rockburst prevention and control technology is the key to ensuring the safe and rapid tunneling in rockburst sections. With the auxiliary tunnel work of Jinping Hydropower Station as a case for study, this paper studied the temporal and spatial characteristics of rock burst through literature investigation and statistical analysis, analyzed the hierarchical prevention and control measures of tunneling in rock burst section and introduced the success of rock burst control in Jinping auxiliary tunnel. The conclusions can provide technical data and references for similar projects.

Key words: tunneling; high geostress; rock burst characteristics; rock burst prevention and control

岩爆是发生在完整脆硬性岩体中的一种复杂动力现象,是岩体在很大初始应力条件下,随着隧道开挖,岩体受力状态发生改变出现自由面,岩体中累积的应变能在一定条件下突然释放,岩石爆裂并从岩壁上分离迸射的过程。岩爆对隧道建设中工程 and 人员安全有着极大威胁。

目前,许多学者对不同类型隧道的岩爆特征及防控技术进行了研究。白国峰^[1]针对拉林铁路巴玉隧道岩爆段不良地质情况,研究了不同等级岩爆的发生特征和动态施工与防护技术;胡恒千^[2]依托引汉济渭秦岭隧洞5号洞主洞段,探究了岩爆的时空分布特征;梁伟章等^[3]对深部硬岩矿山岩爆风险防控技术进

收稿日期:2023-03-06

作者简介:宿春亮(1971-),男,高级工程师。

引文格式:宿春亮. 锦屏水电站辅助洞岩爆特征及防控技术研究[J]. 高速铁路技术,2023,14(2):75-80.

SU Chunliang. A Study on Rock Burst Characteristics and Prevention and Control Technology of Auxiliary Tunnel of Jinping Hydropower Station[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2):75-80.

展进行了研究,提出了多角度岩爆风险防控总体思路;陈浩哲^[4]通过理论模型和数值模拟分析了岩爆的时间滞后性机理;杜立杰等^[5-9]研究了岩爆的特征和发生的时空规律;宋章等^[10]对我国西南地区铁路高地应力岩爆的时间特征进行了总结;张镜剑等^[11-13]研究了不同岩爆等级的防控技术。

上述研究结合不同工程对岩爆发生的机理、时空分布特征、防控技术等进行了针对性研究和介绍。为丰富不同类型隧道岩爆防控技术,本文依托锦屏水电站辅助洞工程,对岩爆发生特征和分级防控技术进行研究,以期为同类型工程和研究提供经验借鉴和技术支撑。

1 工程概况

锦屏辅助洞纵坡采用“人”字坡布置,由互相平行的A、B两条隧道组成,是锦屏一级、二级电站交通洞,是二级电站4条引水洞的科学实验洞和超前导洞。A线隧道长17 485 m,成洞断面宽5.5 m,净高4.5 m。B线隧道长17 504 m,成洞断面宽6.0 m,净高5.0 m。

1.1 地质概况

锦屏辅助洞埋深多在1 500~2 500 m之间,最大埋深2 525 m左右,穿越锦屏山主体分水岭,沿线地层岩性种类多样、断裂构造较为发育。锦屏隧道轴线和锦屏山脊线近乎正交,沿线山体高耸陡峭,高地应力岩爆是本工程主要地质灾害之一。

隧道围岩以Ⅱ类和Ⅲ类为主,Ⅱ~Ⅲ类围岩占比90%以上,Ⅳ类~Ⅴ类围岩仅占7%~8%,岩石抗压强度为50~114 MPa,属中等硬度岩性,围岩完整性好,坚硬程度高,成洞条件较好,但也存在岩爆隐患。

线路区未通过区域性大断层,沿线以构造断层为主且宽度相对较小。围岩均由三迭系(T)地层组成,岩性以碳酸盐岩及少量砂岩、板岩、绿泥石片岩为主,其中碳酸盐岩类岩石在整个洞线上约占91%,碳酸盐岩中除泥质灰岩外,大多为厚层状,岩石较新鲜完整,岩爆风险高。

1.2 施工概况

隧道开挖施工分有轨运输和无轨运输两阶段进行,前1 500 m采用人工钻爆法,1 500 m后转换为有轨运输体系。掌子面采用三臂凿岩台车钻孔,喷混凝土采用湿喷工艺。

2 岩爆发生特征及成因分析

岩爆的等级不同,其表现形式及时空效应也存在差异。随着隧道开挖,地应力平衡破坏,储存于围岩

中的能量将迅速释放,迸射出的岩块将对作业人员安全和施工安全带来极大威胁,处治不当带来的后果不堪设想。因此如何安全有效防控岩爆是隧道等地下工程施工中常遇问题。为此,本文以锦屏水电站辅助洞工程为依托工程,对辅助洞施工过程中遇到的岩爆进行分析,介绍不同等级岩爆发生的特征,为有效防控岩爆提供依据。

2.1 岩爆发生地质特征

依托隧道埋深为1 000~2 500 m,埋深在1 500~2 500 m隧段占比为73.1%,对施工期间岩爆次数及发生隧段埋深进行统计,如图1所示。隧洞施工期间轻微岩爆共发生10余次,中等岩爆发生6次,强烈岩爆发生5次。中等~强烈岩爆发生隧段主要以T_{2y5}灰白色大理岩和T_{2y5}灰白色块状中晶大理岩为主,表明岩爆在T_{2y5}大理岩中较为发育。由图1可知,轻微岩爆主要发生在隧道埋深1 000~1 500 m,中等岩爆主要发生在埋深1 500~2 500 m;强烈岩爆主要发在隧道埋深2 000~2 500 m。强烈岩爆附近隧段常伴随轻微及中等岩爆发生,故部分轻微岩爆发生隧段隧道埋深在1 500~2 500 m之间,表明岩爆强度随着隧道埋深增大而增加。

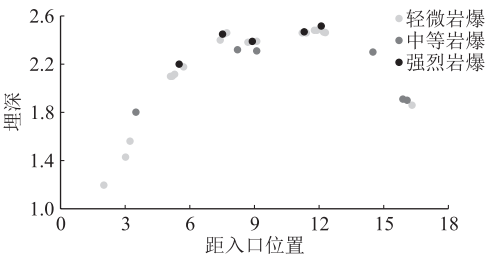


图1 岩爆分布图(km)

通过现场测试,获得中等及强烈岩爆段隧道平均岩石物理性质参数如表1所示。由表1可知,岩爆发生段围岩岩体强度高且完整。

表1 岩石物理性质参数表

物理参数	参数值
密度/g·cm ⁻³	2.82
纵波波速/m·s ⁻¹	5 800
波速比	1.66
动态杨氏模量/GPa	92
垂直地应力/MPa	38.02
单轴抗压强度(干)/MPa	110

通过地勘得到隧址区地下水发育情况,隧址区岩爆段地下水发育一般,现场揭露岩石较为干燥,结合前述因素,存在岩爆风险。

综合上述分析,锦屏辅助洞岩爆发生隧段埋深

大、地应力高、围岩坚硬完整、地下水较不发育,表明岩爆发生具有以下地质特性:

①地质构造活动造成初始地应力较高,岩体应变能储量大。

②围岩情况完好,岩体完整或较完整,围岩裂隙极少,围岩坚硬。

③隧址区埋深大。

④地下水较不发育,岩体较干燥。

2.2 岩爆发生表象特征

统计分析岩爆发生物理特性,有助于洞内作业人员快速预判并辨识洞内岩爆发生位置和强度,以便隧道快速安全施工,保证人员和设备安全。结合现场实际情况,岩爆发生具有以下表象特征:

(1) 轻微岩爆

轻微岩爆岩石脱离母体,呈现松脱等现象,岩块块径不一,2~50 cm 间不等,岩块多呈不规则中厚边薄的片状,脱落面多与岩壁平行。岩爆发生前征兆较小,发生时多伴随间断的噼啪声或撕裂声,声响微弱,对施工进度和人员安全威胁小。

(2) 中等岩爆

中等岩爆岩石蓄力弹射,有极大几率向洞内净空弹射,岩壁部分位置有明显岩石松落剥离现象,岩块块径多在 50 cm~1 m 之间。岩爆发生多伴随持续的清脆炸裂声,随时间推移向深处发展的趋势明显,对施工进度和人员设备有一定威胁。

(3) 强烈岩爆

强烈岩爆岩石急速蓄力并向洞内净空弹射,反应剧烈,围岩变形严重地段有小范围塌方。岩块块径不一,块径 1~2 m 以上相对较多,甚至更大,重量最高可达 1 t,岩块呈多块状或板状。岩爆发生时多伴随强烈的爆破声,声响巨大,具有强延续性,并迅速向围岩深部扩展,严重影响施工进度,威胁人员和设备安全。

3 岩爆发生时间空间效应

3.1 岩爆发生时间效应

为合理有效预防岩爆发生,降低岩爆发生危害,结合现场实际情况岩爆发生的时间效应和空间效应进行分析。

对现场岩爆发生时间情况进行统计,如图 2 所示。由图 2 可知,岩爆发生时段随着开挖面暴露时间增加而推迟,岩爆多发时间是掌子面开挖后 2~4 h,部分发生在 4~12 h,部分发生在 12 h 内,少数情况发生在开挖 1~2 月后,极个别部位发生在开挖一年后。图 2 表明开挖后 2~4 h 为岩爆高发时段,4~12 h 为岩爆

发生衰减时段。

由现场观测情况可知,岩爆发生持续时间随着岩爆等级和岩爆程度增加呈现递增趋势,短则几分钟,长则持续数日。随着岩爆的发生,岩爆由轻微噼啪声逐步发展为巨大放炮声响。

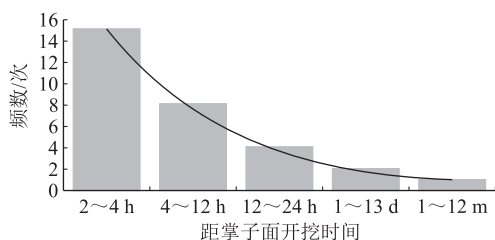
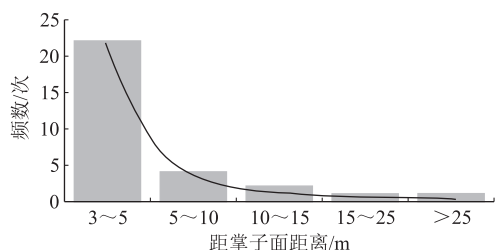


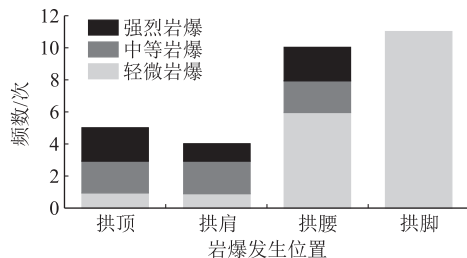
图2 岩爆发生时间效应图

3.2 岩爆发生空间效应

对现场岩爆发生空间位置进行统计,如图 3(a)所示。由图 3(a)可知,岩爆多发频次随着距掌子面距离增加而减小,主要发生在距掌子面 3~5 m 位置,即隧道 1 倍洞径隧段内;部分发生在距掌子面 5~10 m 位置(2 倍洞径隧段);少数发生在距掌子面 >10 m 位置。掌子面 3~10 m 为高发隧段,距掌子面大于 10 m 处为低发区段,岩爆多发生在开挖裸露的新掌子面附近,个别离新开挖掌子面较远。



(a) 岩爆发生距掌子面距离



(b) 岩爆发生洞周位置

图3 岩爆发生空间效应图

由图 3(b)可知,锦屏辅助洞岩爆发生位置主要在拱脚和拱腰,其中轻微岩爆主要发生在拱脚至拱腰位置,中等和强烈岩爆主要发生在拱腰至拱顶位置,在底部较少发生岩爆。此外,锦屏辅助洞岩爆多发地段还出现在横通道与主洞相交处、断面不规则处及二次扩挖段。随着岩爆等级和强度的增加,同一位置反

复持续发生岩爆的现象相对更频繁,给施工带来极大阻碍。此外,锦屏辅助洞岩爆多发生在无水或低含水量围岩段,部分富水段一旦开挖面无水,仍发生岩爆,对工程进度及施工安全产生较大影响。

4 岩爆成因分析及防控

结合岩爆特征、岩爆时空效应及不同级别岩爆危害程度不同等特点,分析岩爆成因并对岩爆段围岩进行分级防控,在保证施工安全的前提下,节约施工成本。

4.1 岩爆成因分析

结合第3.1节和第4章研究内容,分析岩爆成因如下:

(1) 埋深因素

由3.1节可知,岩爆发生需满足高埋深条件,这是因为随着埋深增加地应力表现为增大趋势,且地应力方向随之改变。根据相关文献[14],多数情况下埋深小于1 000 m,主应力以水平方向为主导,反之主应力以垂直方向为主,地应力变化导致岩爆发生强度和频率随埋深增大。由3.1节及图1可知,锦屏辅助洞中等~强烈岩爆发生隧段平均垂直地应力为38.02 MPa,各级岩爆发生均在埋深大于1 000 m处。随着埋深增加,岩爆发生强度增加,且高强度岩爆伴随频发低强度岩爆,即岩爆频率随之增加,这也验证岩爆发生风险随埋深增加而增大。

(2) 围岩岩石特性因素

锦屏辅助洞整体围岩以Ⅱ级、Ⅲ级围岩为主,岩爆发生隧段岩体裂隙不发育,完整性较好,岩石单轴饱和抗压强度平均为110 MPa。岩石强度高,坚硬程度良好,地下富水条件一般,部分相对富水段由于表面干燥易发生岩爆,这与李忠华^[15]的研究一致,表明围岩完整程度和坚硬程度越良好,围岩越干燥,岩石质地轻脆,岩爆发生的几率会更大。由于此类围岩弹性能量指数较大,在原始地应力大的条件下,积聚在岩体中的弹性能量较大,受力不均部位易形成应力集中,开挖卸荷后出现自由面。当围岩应力集中部位突破其极限强度,积聚的弹性能量会急速释放,为岩石向未约束端(隧道净空方向)弹射出提供动力,从而形成岩爆。

(3) 开挖方式因素

当应力集中部位应力达到一定值将会发生岩爆,一般认为圆形隧道受力均匀,应力集中点相对较少,而其他断面形式存在明显应力集中部位,即岩爆发生风险相对较高。此外,隧道成形后表面越顺滑,岩爆

发生概率越低。

(4) 施工管理因素

岩爆高发范围大致在距掌子面1倍洞径附近,应力越大越易形成岩爆。当遇到岩爆段,由于施工管理不到位,一次开挖量较大,导致一次应力释放大,易发生岩爆。

4.2 岩爆分级防控

在勘察设计阶段,应尽可能避免隧道穿越岩爆易发地段,优化隧址线路,同时为避免应力集中,应尽可能保证隧道轴线与最大主应力方向平行,最终达到减少岩爆发生频次、降低岩爆强度的目的。

施工阶段,针对不同等级岩爆实行分级防控。其中,轻微岩爆以改善围岩物理力学性能为目标。通过喷雾洒水降低围岩表面温度,减缓围岩应力释放速度,软化围岩,降低岩爆几率;在原支护设计基础上,根据岩爆影响程度可适当增加支护强度。

中等岩爆以改善围岩应力条件为目标。在清除作业空间危石后,通过采用超前钻孔应力释放或者超前应力释放爆破,其钻孔长度大于等于2倍爆破进尺,辅以高压喷水软化围岩。为防止喷混变形开裂增加其柔韧性,增加喷混变形承受能力、减弱岩爆危害,可采用喷射纤维混凝土进行防护,同时加强支护,通过挂设钢筋网片防止落石。根据岩爆影响程度,必要时可采用连接筋将系统锚杆连接,以增强支护强度和刚度。

强烈岩爆以强支护防护为目标。为防止岩爆产生松散岩块坠落,需先清除危石并喷射纤维混凝土填补并粘结小块危石,以保证工作面安全作业环境,同时防止岩爆继续发展导致的喷层开裂。径向打设系统锚杆,释放应力同时继续增强支护,锚杆间采用钢筋连接,限制围岩变形,适当加强支护措施。根据岩爆影响程度和范围,必要时打设超前膨胀锚杆对掌子面进行加固,限制掌子面岩石弹射,同时采用预应力锚杆,结合钢筋网、钢支撑等支护措施协同支护,保证围岩稳定及施工安全。

针对岩爆反复频繁发生情况,可采用光面爆破技术合理布设爆破点位及装药量以优化爆破工艺,保证爆破质量,使爆破后围岩圆顺,降低岩爆发生几率。

5 工程案例分析

5.1 岩爆发生概况

2006年6月30日19点30分在B洞掌子面,出渣过程中BK13+443~BK13+423段左右拱壁发生了中等~强烈岩爆,岩性为灰白色大理岩,岩爆发生

过程伴随中等~剧烈声响,其中掌子面左侧比较严重,大块岩石崩落,如图4所示。仅部分锚杆悬挂于岩壁,围岩发生变形,致使出渣停滞,掘进过程中锚喷支护系统基本被岩爆完全破坏。



图4 岩爆情况图

5.2 岩爆防控措施

针对发生的中等岩爆,首先对拱顶部位危石进行处理。采取喷射高压水进行排险,采用 $\phi 22, L=3.0\text{ m}$ 锚杆,挂网喷射15 cm厚钢纤维混凝土支护。

处理中等岩爆期间BK13+425左拱顶处发生了1次中等岩爆,加深了岩爆危害,故在采取喷射高压水进行排险基础上,将锚杆由原来的 $\phi 22, L=3.0\text{ m}$ 调整为 $\phi 32, L=4.5\text{ m}$,挂网片并继续喷射15 cm钢纤维混凝土支护,支护过程中仍有小块岩石间断的剥落。

随后BK13+408~BK13+404左边墙发生强烈岩爆,在清除部分危石后,通过喷射纤维混凝土填补并粘结小块危石,径向采用6 m长系统锚杆支护,锚杆尾端垫板使用螺丝扣拧紧,优先选择砂浆锚杆,相邻锚杆之间采用 $\phi 22$ 钢筋连接,岩壁挂设 $\phi 10$ 钢筋网片。

本次岩爆从发生到处理完毕历时8天,隧道最终安全通过。

6 结束语

隧道高地应力岩爆问题是威胁工程安全的隐患之一。本文通过统计分析等方法,研究总结了锦屏辅助洞岩爆发生特征及分级防控岩爆事故的成功经验,主要结论如下:

(1) 轻微、中等和强烈岩爆分别主要发生在埋深1 000~1 500 m、1 500~2 500 m和2 000~2 500 m之间。

(2) 随着岩爆等级增加,岩爆表象特征更加明显迅速。

(3) 岩爆高发时段在距掌子面开挖2~4 h,距掌子面距离2倍洞径以内。

(4) 针对各级岩爆可通过分级防控,采用网喷护顶-多向应力释放-韧性支护措施-高强系统支护体系进行综合治理。

参考文献:

- [1] 白国峰. 高原高应力隧道岩爆段施工与防护技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2021(4): 106-110.
BAI Guofeng. Study on Construction and Protection Technology of Rock Burst Section of High Stress Tunnel in Plateau [J]. Railway Construction Technology, 2021(4): 106-110.
- [2] 胡恒千. 引汉济渭秦岭隧洞5号洞主洞段岩爆时空分布特征研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(7): 98-102.
HU Hengqian. Study on Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Rock Burst in the Main Section of No. 5 Tunnel of Qinling Tunnel from Han to Wei [J]. Railway Construction Technology, 2020(7): 98-102.
- [3] 梁伟章, 赵国彦. 深部硬岩矿山岩爆风险防控技术研究进展[J]. 岩土力学, 2022, 43(S2): 454-468.
LIANG Weizhang, ZHAO Guoyan. Research Progress of Rock Burst Risk Prevention and Control Technology in Deep Hard Rock Mines [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S2): 454-468.
- [4] 陈浩哲, 邵珠山, 朱意明, 等. 深埋隧洞岩爆时间滞后性机理研究[J]. 应用力学学报, 2022, 39(1): 19-25.
CHEN Haozhe, SHAO Zhushan, ZHU Yiming, et al. The Mechanism of Time-delayed Rockburst for Deep Tunnel [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(1): 19-25.
- [5] 杜立杰, 洪开荣, 王佳兴, 等. 深埋隧道TBM施工岩爆特征规律与防控技术[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(1): 1-15.
DU Lijie, HONG Kairong, WANG Jiaying, et al. Rockburst Characteristics and Prevention and Control Technologies for Tunnel Boring Machine Construction of Deep-buried Tunnels [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(1): 1-15.
- [6] 曹强, 贾海波, 廖卓. 锦屏辅助洞岩爆特征及防治措施研究[J]. 隧道建设, 2009, 29(5): 510-512, 578.
CAO Qiang, JIA Haibo, LIAO Zhuo. Case Study on Characteristics and Prevention and Control Measures of Rock Bursts in Jinping Auxiliary Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2009, 29(5): 510-512, 578.
- [7] 李建高, 唐泽林. 深埋隧道岩爆特征分析与综合防治技术——以成兰铁路平安隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(12): 1781-1790.
LI Jianguo, TANG Zelin. Analysis of Rockburst Characteristics of Deep-buried Tunnel and Comprehensive Control Technology: a Case Study of Ping'an Tunnel on Chengdu-Lanzhou Railway [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(12): 1781-1790.
- [8] 巩江峰, 田四明, 杨治刚. 我国高地应力区隧道岩爆研究现状及分析[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(5): 95-99, 105.
GONG Jiangfeng, TIAN Siming, YANG Zhigang. Research Status and Analysis of Tunnel Rock Burst in High Geo-stress Area in China [J].

Railway Standard Design, 2022, 66(5): 95 – 99, 105.

[9] 洪开荣. 超长深埋高地应力TBM隧道修建关键技术[J]. 铁道学报, 2022, 44(3): 1 – 23.

HONG Kairong. Key Technology for Construction of Ultra-long and Deep-buried TBM Tunnels with High Geostress [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(3): 1 – 23.

[10] 宋章,魏永幸,王朋,等. 复杂艰险山区地质灾害特征及减灾选线研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(5): 8 – 12.

SONG Zhang, WEI Yongxing, WANG Peng, et al. Research on Geological Disaster Characteristics and Location for Disaster Reduction in Complex and Dangerous Mountainous Areas [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5): 8 – 12.

[11] 汪珂. 深埋隧道岩爆预测及防治技术现状综述[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 212 – 224.

WANG Ke. Summary of Rock Burst Prediction and Prevention Technology in Deep-buried Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 212 – 224.

[12] 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): 2034 – 2042.

ZHANG Jingjian, FU Bingjun. Rockburst and Its Criteria and Control [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2034 – 2042.

[13] 冯欢欢,洪开荣,杨延栋,等. 极端复杂地质条件下TBM隧道施工关键技术研究及应用[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(1): 42 – 54.

FENG Huanhuan, HONG Kairong, YANG Yandong, et al. Research and Application of Key Construction Technologies for TBM-driven Tunnels under Extreme Complex Geological Conditions [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(1): 42 – 54.

[14] 涂齐亮,闫苏涛,钟传江,等. 隧道岩爆预测及防治施工技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2019(4): 83 – 86.

TU Qiliang, YAN Sutaο, ZHONG Chuanjiang, et al. Research on Rock Burst Prediction and Prevention Technology in Tunnel [J]. Railway Construction Technology, 2019(4): 83 – 86.

[15] 李忠华,张永利,孙可明. 大台井深部岩巷岩爆发生机理与预防措施研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(S2): 630 – 632.

LI Zhonghua, ZHANG Yongli, SUN Keming. A Study of Mechanism and Prevention of Rockbursts in Deep Galleries of Datai Coal Mine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S2): 630 – 632.



(上接第63页)

XIE Kaizhong, LIU Zhenwei, GE Bingzhou, et al. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, et al. Stress-Strain Test of Manufactured Sand Concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(12): 3823 – 3831.

[17] 蒋正武,潘峰,吴建林,等. 机制砂参数对混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土世界, 2011(8): 66 – 70.

JIANG Zhengwu, PAN Feng, WU Jianlin, et al. Study on the Influence of Machine-made Sand Parameters on Concrete Performance [J]. China Concrete, 2011(8): 66 – 70.

[18] 赵井辉,刘福胜,周广发,等. 废弃矿物掺合料水工混凝土抗碳化性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(12): 91 – 94.

ZHAO Jinghui, LIU Fusheng, ZHOU Guangfa, et al. Experimental Study on Carbonation Resistance of Hydraulic Concrete Adding Waste Mineral Admixtures [J]. China Concrete and Cement Products, 2014(12): 91 – 94.