

爆破扰动下TBM隧洞时滞型岩爆特征及影响机制研究

全永威, 王 军, 熊永润, 姚志宾, 张 宇, 胡 磊

A study of the characteristics and influence mechanism of time delayed rockburst in a TBM tunnel under the blasting disturbance

QUAN Yongwei, WANG Jun, XIONG Yongrun, YAO Zhibin, ZHANG Yu, and HU Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202042>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深埋高地应力隧道勘察期岩爆烈度概率分级预测

Probabilistic classification prediction of rockburst intensity in a deep buried high geo-stress rock tunnel during engineering investigation

刘威军, 范俊奇, 李天斌, 郭鹏, 曾鹏, 巨广宏 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 114-123

隧道施工期岩爆危险性评价的属性识别模型及工程应用

Attribute recognition model of fatalness assessment of rockburst in tunnel construction and its application

何怡帆, 李天斌, 曹海洋 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 102-111

基于岩爆危险性评价的川藏铁路某深埋硬岩隧道线路方案比选研究

Route selection of deep-lying and hard rock tunnel in the Sichuan-Tibet Railway based on rock burst risk assessment

陈仕阔, 李涵睿, 周航, 陈兴强, 刘彤 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 81-90

花岗岩循环爆破振动衰减规律与损伤演化机理试验

An experiment of attenuation law of vibration and evolution mechanism of damage of granite under cyclic blasting

钟靖涛, 王志亮, 田诺成 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 101-101

岩体结构对岩质滑坡运动过程和堆积特征的影响研究

A Study of the influence of rock mass structure on the propagation processes and deposit characteristics of rockslides

张恩铭, 程谦恭, 林棋文, 谢宇, 王玉峰, 姚志勇, 孙先锋 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 125-135

渗流作用下黄土含水率变化特征及对隧道工程的影响

Characteristics of moisture content variation of loess under seepage and its influence on tunnel engineering

张晓宇, 毕焕军, 曹峰, 夏万云 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 41-47



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202042

全永威, 王军, 熊永润, 等. 爆破扰动下 TBM 隧洞时滞型岩爆特征及影响机制研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 94-103.
QUAN Yongwei, WANG Jun, XIONG Yongrun, *et al.* A study of the characteristics and influence mechanism of time delayed rockburst in a TBM tunnel under the blasting disturbance[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 94-103.

爆破扰动下 TBM 隧洞时滞型岩爆特征及影响机制研究

全永威¹, 王 军¹, 熊永润^{2,3}, 姚志宾^{2,3}, 张 宇^{2,3}, 胡 磊^{2,3}

(1. 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 东北大学资源与土木工程学院, 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 3. 辽宁省深部工程与智能技术重点实验室(东北大学), 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 时滞型岩爆的发生通常具有很强的随机性, 会对施工安全造成巨大的威胁, 而开挖扰动、爆破扰动等均会对潜在时滞型岩爆区产生不同程度的影响。依托某隧道掘进机(TBM)引水隧洞, 采用理论分析和对比分析法研究了拆机洞爆破开挖期间 K54+000—K54+700 段发生的 5 次时滞型岩爆, 发现: (1) 强烈岩爆和中等岩爆区位于缓倾断层附近, 围岩发育短小隐节理和含充填的细密节理, 轻微岩爆距断层远或位于正断层附近, 除含充填的细密节理外, 均至少发育 1 条含充填物的倾向 SW 的陡倾结构面; (2) TBM 法开挖隧洞时滞型岩爆滞后爆破时间更长, 滞后工作面距离更远, 且爆破对 TBM 隧洞的扰动作用相对较小; (3) 爆破扰动使得潜在时滞型岩爆区围岩失稳变得容易, 从而加速了时滞型岩爆的进程。研究成果可为 TBM 隧洞时滞型岩爆的预警与防控提供参考。

关键词: 爆破扰动; 时滞型岩爆; 岩爆特征; 影响机制; TBM

中图分类号: U452.1⁺1; U459.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)01-0094-10

A study of the characteristics and influence mechanism of time delayed rockburst in a TBM tunnel under the blasting disturbance

QUAN Yongwei¹, WANG Jun¹, XIONG Yongrun^{2,3}, YAO Zhibin^{2,3}, ZHANG Yu^{2,3}, HU Lei^{2,3}

(1. Xinjiang Erqisi River Basin Development and Construction Administration, Urumqi, Xinjiang 830000, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China; 3. Key Laboratory of Liaoning Province on Deep Engineering and Intelligent Technology (Northeastern University), Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: The occurrence of time delayed rockburst usually has strong randomness and will pose a great threat to construction safety. Excavation disturbance and blasting disturbance will have impact of varying degrees on the potential time delayed rockburst area. It is of great significance to carry out studies of the characteristics and mechanism of time delayed rockburst in a TBM tunnel under the blasting disturbance. Based on a TBM headrace tunnel, five time delayed rockburst occurred in K54+000—K54+700 section during demolition tunnel blasting

收稿日期: 2022-02-04; 修订日期: 2022-05-25

投稿网址: www.swdzedz.com

第一作者: 全永威(1980-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水利工程建设管理方面的研究。E-mail: 89219636@qq.com

通讯作者: 胡磊(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩爆机理、监测、预警与防控方面的研究。E-mail: hulei@mail.neu.edu.cn

excavation are studied by using theoretical analysis and comparative analysis method. The results show that (1) strong and medium rockburst areas are located near gentle dip faults. Short and small concealed joints and fine joints with filling are developed in surrounding rocks. The slight rockburst is far from the fault or near the normal fault. Except for the fine joints with filling, at least one steep structural plane with filling tendency and dipping in SW direction is developed. (2) The time delayed rockburst of the TBM tunnel has longer delay blasting time and longer lag working face distance, and the disturbance effect of blasting on the TBM tunnel is relatively small. (3) Blasting disturbance makes it easy for the surrounding rock instability in the potential time delayed rockburst area, which accelerates the process of time delayed rockburst. The research results can provide a useful reference for the early warning and prevention of time delayed rockburst in TBM tunnels.

Keywords: blasting disturbance; time delayed rockburst; rockburst characteristics; influence mechanism; tunnel boring machine

开挖诱发的岩爆灾害以其突发性、破坏性和不确定性,给工程设计、施工及灾害防控带来巨大困难和挑战^[1-4]。为更好描述和区分不同岩爆现象,冯夏庭等^[5]根据岩爆发生时间与施工时间和空间的关系,将岩爆分为即时型岩爆^[6]、时滞型岩爆^[7]和间歇型岩爆^[8]。其中,时滞型岩爆是指开挖卸荷且应力调整平衡后,外界扰动作用下发生的岩爆。“时空滞后性”是时滞型岩爆的普遍规律和内在本质^[9],这种特性会对施工人员及设备造成巨大威胁,因此迫切需要对其发生特征及影响机制开展相关研究。

陈炳瑞等^[7]以锦屏 II 级水电站钻爆法引水隧洞和排水洞施工期间发生的时滞型岩爆为研究对象,分析总结了时滞型岩爆的发生特征,并系统研究了其孕育规律与机制,同时指出诱发时滞型岩爆的外界扰动发生的时间是影响时滞型岩爆发生时间的关键因素之一。国内外许多学者针对爆破扰动与岩爆之间的关系开展了深入研究。李夕兵等^[10]、宫凤强等^[11]认为扰动作用可以起到诱发围岩破坏的作用。赵周能^[12]分析了爆破扰动下钻爆法隧洞时滞型岩爆的发生规律,认为频繁的爆破扰动会导致围岩产生累积性损伤,造成岩体力学性质的不断劣化,最终诱发时滞型岩爆。对于此类爆破等应力扰动波诱发的岩爆,何满潮等^[13]研究了不同应力状态下扰动波频率和波幅与岩爆诱发的关系。苏国韶等^[14]通过开展低频周期扰动荷载与静载联合作用下岩爆过程的真三轴试验,指出在扰动荷载的作用下,试样出现弹性应变能小幅度突增且弹性应变能极限存储能力快速下降的“双向背离效应”,使得岩爆现象更容易发生。以上研究主要基于钻爆法隧洞分析了爆破扰动的发生时间、频率、幅值等对时滞型岩爆孕育过程的影响,在隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)隧洞方面的研究相对较少。

钻爆法和 TBM 法两种开挖方式下的时滞型岩爆的发生特征及机理也有区别。在爆破扰动作用下岩石破裂形式会发生转化,剪切事件显著增多^[1]。Zhang 等^[15]认为采用钻爆法的隧洞后期会受到来自工作面的爆炸应力波产生的多次扰动,更容易发生时滞型岩爆。而采用 TBM 开挖时,洞壁完整性好,承载力高,使得围岩应力集中区域更临近洞壁^[16]。若消除后期爆炸应力波对围岩的扰动作用,由于钻爆法爆破开挖过程中围岩开裂过程耗散了较多能量,其发生时滞型岩爆的风险低于 TBM 法^[17]。

鉴于上述研究,开挖扰动和爆破扰动会对潜在时滞型岩爆区围岩造成显著的影响,但不同开挖方式下时滞型岩爆的发生特征及影响机制仍待进一步研究。本文通过对比分析某 TBM 法开挖主隧洞在钻爆法开挖拆机洞施工期间发生的 5 次时滞型岩爆,总结时滞型岩爆的时空特征和破坏特征,分析爆破扰动、岩爆区地质条件、即时型岩爆情况和支护等因素对时滞型岩爆的影响机制,以期对时滞型岩爆的预警与防控提供有益参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

某引水隧洞 K54+000—K54+993 段平均埋深约为 467 m,主要采用 TBM 开挖,断面为圆形,直径 7.0 m。待 TBM 开挖贯通后,在 K54+975—K54+993 段 TBM 开挖隧洞的基础上进行扩挖,进而形成拆机洞。拆机洞采用微差爆破和光面爆破技术进行开挖,炮孔深 3.5 m,沿洞轴线布置,拆机洞断面为城门洞型,爆破一次成型,断面尺寸为 9.3 m×10.5 m(宽×高),全长 18 m。拆机洞纵断面图及横断面图如图 1 所示。

该洞段岩性主要为石炭纪凝灰岩,总体呈灰黑

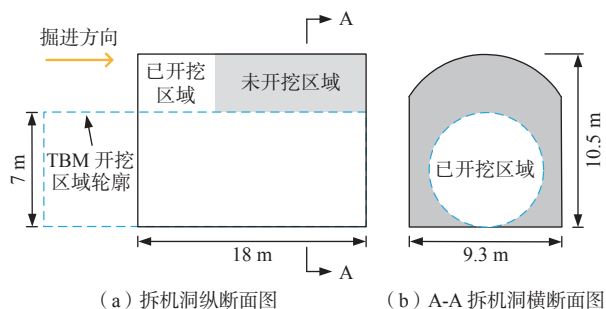


图 1 拆机洞纵断面图及横断面图

Fig. 1 Vertical section and cross section of the machine removal tunnel

色,质地坚硬,饱和单轴抗压强度 80~105 MPa。根据勘察阶段实测地应力结果,最大水平主应力(σ_H)、最小水平主应力(σ_h)与垂直应力(σ_v)间的关系为 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$,其中 σ_H 为 12~17 MPa, σ_v 为 10~14 MPa, σ_h 为 6~11 MPa。原岩应力场中水平应力占主导地位,最大水平主应力与隧洞轴线夹角 $34^\circ \sim 79^\circ$,三向主应力与隧洞的空间关系如图 2 所示。受围岩岩性及地应力的影响,该洞段开挖期间,轻微岩爆频发,部分区域甚至

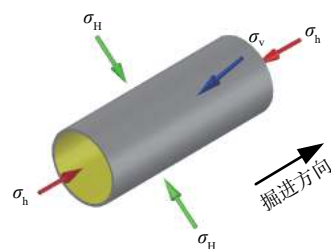


图 2 地应力与隧洞的空间关系

Fig. 2 Spatial relationship between in-situ stress and tunnel

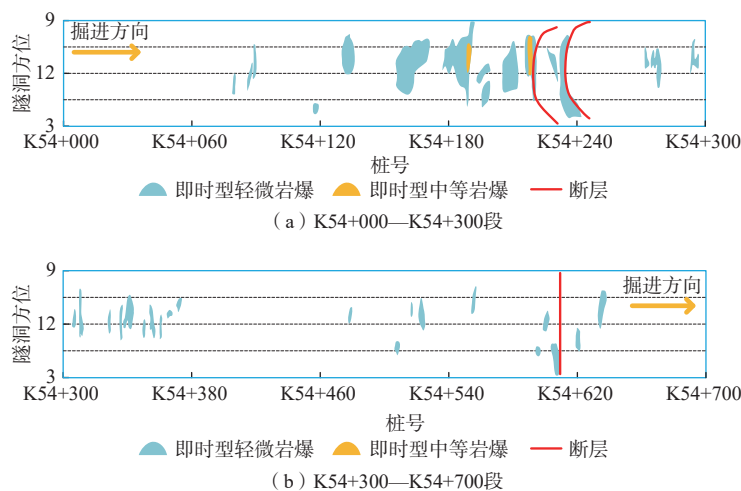


图 3 K54+000—K54+700 段即时型岩爆分布示意图

Fig. 3 Distribution diagram of the immediate rockburst in K54+000—K54+700 section

1.2 地质概况

如图 4(a)所示, K54+228—K54+250 区域发育 2 条近平行断层,产状分别为 $NW358^\circ \angle 27^\circ$ 和 $NW358^\circ \angle 21^\circ$,断层宽 3~16 cm,局部宽 20~40 cm,断层带内为角砾岩、挤压片岩及碎裂岩,断面较平直光滑,附着断层泥薄膜,表现出强烈的挤压破碎特征,该断层对围岩的影响相对较大。如图 4(b)所示, K54+608—K54+608.5 区域发育一条小型断层,产状为 $NE48^\circ \angle 90^\circ$ 。该断层垂直于洞轴线,属于正断层,断层带宽 5~10 cm,局部

有中等岩爆发生,绝大部分岩爆为即时型岩爆,在未出护盾时就已经发生, K54+000—K54+700 段即时型岩爆分布情况如图 3 所示。图 3 中隧洞方位指面向掌子面,参考时钟的刻度将隧洞断面划分为 12 个方位,用以区分隧洞各部位,并将其作为空间展布图的纵坐标。从图 3(a)可以看出,该洞段开挖时,岩爆以轻微岩爆为主,主要发生在断层下盘附近区域,且爆坑范围较大;从图 3(b)可以看出, K54+300—K54+700 段在断层附近及其余区域均有轻微岩爆发生。

宽 10~13 cm,断层带内为角砾岩、挤压碎裂岩,断面较平直粗糙,该断层对围岩的影响相对较小。

K54+000—K54+700 段整体较完整,局部受地质构造影响较为破碎。其中, K54+000—K54+220 段主要发育 1 组节理,产状 $NW278^\circ \sim 348^\circ \angle 40^\circ \sim 65^\circ$,少量倾向 NE,与洞轴线夹角 $35^\circ \sim 40^\circ$,多微张,充填灰白色钙质薄膜及灰黑色岩屑,节理面平直粗糙,节理延伸长度 3~9 m,发育间距一般 0.5~5 m,局部发育间距 0.1~0.3 m。K54+220—K54+264 段主要发育 2 组节理:

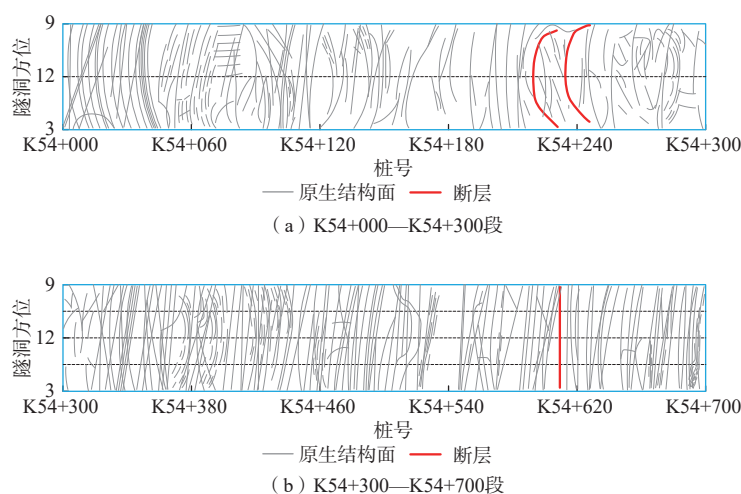


图 4 K54+000—K54+700 段地质展布图

Fig. 4 Geological distribution of K54+000—K54+700 section

①NW343°~358°∠35°~55°, 张开度 0.5~5 mm, 充填灰绿色岩屑及灰白色钙质薄膜, 节理面多平直粗糙, 延伸长度一般 1~2 m, 发育间距 0.1~0.5 m; ②NE58°∠85°, 微张, 充填灰白色钙质细脉, 节理面平直粗糙, 延伸长度一般 1~3 m, 间距 0.3~1.0 m。K54+264—K54+700 段主要发育 2 组节理: ①NW275°~340°∠20°~60°, 与洞轴线夹角 43°~22°, 张开度 1~2 mm, 局部充填白色钙膜及铁锈色斑, 节理面平直粗糙, 延伸长度 6~10 m, 间距 0.6~1.8 m; ②NE45°~85°∠50°~80°, 与洞轴线夹角 87°~53°, 多闭合, 无充填, 节理面平直粗糙, 一般以数条成组平行发育, 组间距 5~8 m, 组内间距 0.5~1.2 m。

1.3 支护条件

K54+000—K54+700 段围岩初期支护概况如图 5 所示。结合图 3 和图 4 可以发现, 当揭露围岩完整性较好或仅有轻微岩爆发生时, 初期支护措施以随机砂浆锚杆与钢筋网片为主; 当轻微岩爆次数较多且范围较大时, 初期支护措施以系统砂浆锚杆与钢筋网片为主, 如 K54+180—K54+228 区域; 当揭露围岩完整性较差, 有中等岩爆或结构型塌方破坏时, 采用 HW125 型钢拱架与钢筋排加强支护, 如 K54+228—K54+245 区域。此外, 当经过 TBM 喷混区时, 现场再根据实际情况对围岩施作混凝土喷层以加强支护。

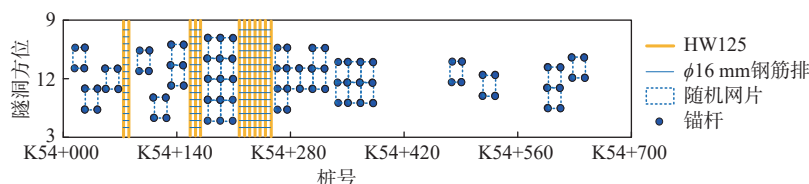


图 5 K54+000—K54+700 段围岩初期支护概况

Fig. 5 Overview of the initial support of surrounding rock in K54+000—K54+700 section

2 时滞型岩爆特征

2.1 时滞型岩爆概况

拆机洞于 2021 年 10 月 7 日、10 月 15 日分别进行了爆破开挖, 2 次爆破期间并没有时滞型岩爆发生, 第 2 次爆破后 7 d, 即 10 月 22 日, 于 K54+200—K54+213 区域发生了岩爆 I。此后直至 11 月 17 日, K54+000—K54+700 段累计发生了 5 次时滞型岩爆, 其沿洞轴线的分布情况如图 6 所示。

按照发生时间的先后顺序, 将时滞型岩爆分别命名为岩爆 I—岩爆 V。其中 K54+200—K54+213 区

域, 8 点半—9 点半方位和 10 点—3 点钟方位均有岩爆发生, 爆坑相邻且岩爆发生时间接近, 为便于分析, 将其合并划分为岩爆 I。依据《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487—2008)^[18]中规定的指标划分上述时滞型岩爆等级后, 该洞段累计发生 3 次轻微岩爆, 分别为岩爆 II、岩爆 IV 和岩爆 V; 累计发生 1 次中等岩爆和 1 次强烈岩爆, 分别为岩爆 III 和岩爆 I。各时滞型岩爆的发生信息, 包括发生时间、发生位置、爆坑形态、结构面信息、岩爆前支护措施等, 见表 1, 表中“工作面”是指第 2 次爆破开挖时的工作面, 桩号为 K54+982。

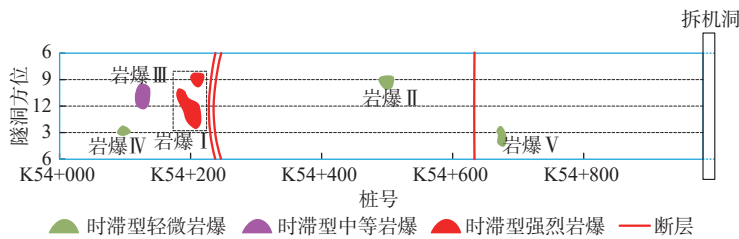


图 6 某引水隧洞时滞型岩爆分布示意图

Fig. 6 Distribution diagram of t time delayed rockburst in a diversion tunnel

表 1 时滞型岩爆发生信息统计

Table 1 Statistics of occurrence information of time delayed rockburst

岩爆	爆坑照片	描述
岩爆 I		发生时间: 2021年10月22日 发生位置: K54+200—K54+213(距工作面769.0 m) 岩爆等级: 强烈岩爆 爆坑形态: 长条深窝型 爆坑位置: 10点钟—2点钟方位 爆坑尺寸: 13 m×6 m×1.2 m(长×宽×深) 爆坑区域结构面: 石英脉+多条灰白色钙质充填细脉 岩爆前支护措施: 随机砂浆锚杆&钢筋网片&混凝土喷层
岩爆 II		发生时间: 2021年10月22日 发生位置: K54+550—K54+551.2(距工作面430.8 m) 岩爆等级: 轻微岩爆 爆坑形态: 浅窝型 爆坑位置: 9点钟—10点钟方位 爆坑尺寸: 1.2 m×1.5 m×0.1 m(长×宽×深) 爆坑区域结构面: 1条厚0.2~0.4 m的白色钙膜及铁锈色斑充填结构面+多条含钙膜充填的细小节理 岩爆前支护措施: 混凝土喷层
岩爆 III		发生时间: 2021年11月1日 发生位置: K54+128—K54+131.5(距工作面850.5 m) 岩爆等级: 中等岩爆 爆坑形态: 深窝型 爆坑位置: 9点钟—10点钟方位 爆坑尺寸: 3.5 m×7.5 m×0.5 m(长×宽×深) 爆坑区域结构面: 大量密集节理, 呈共轭相交, 伴有白色钙膜充填 岩爆前支护措施: 混凝土喷层
岩爆 IV		发生时间: 2021年11月2日 发生位置: K54+640—K54+642(距工作面340.0 m) 岩爆等级: 轻微岩爆 爆坑形态: 浅窝型, 结构面控制边界 爆坑位置: 2点半—4点钟方位 爆坑尺寸: 2.5 m×3.7 m×0.15 m(长×宽×深) 爆坑区域结构面: 1条含5~8 cm墨绿色充填结构面+细小节理密集, 伴有钙膜充填 岩爆前支护措施: 混凝土喷层
岩爆 V		发生时间: 2021年11月7日 发生位置: K54+116—K54+119.5(距工作面862.5 m) 岩爆等级: 轻微岩爆 爆坑形态: V型 爆坑位置: 2点钟—3点半方位 爆坑尺寸: 3.5 m×2.5 m×0.2 m(长×宽×深) 爆坑区域结构面: 2条含充填结构面, 厚2~10 cm 岩爆前支护措施: 混凝土喷层

2.2 岩爆发生时空特征

表 2 统计了 K54+000—K54+700 段 5 次时滞型岩爆滞后开挖与拆机洞最后 1 次爆破的天数及滞后工

作面的距离信息。从表 2 可以发现, 该洞段岩爆发生滞后开挖的平均天数超过 100 d, 滞后工作面平均距离超过 600 m, 体现出显著的时空滞后特征, 这一特征导

致 K54+000—K54+700 段时滞型岩爆的发生具有“随机性”, 现场施工过程中很难对时滞型岩爆施作针对性的防范措施, 故人员和设备常常面临时滞型岩爆的“突然袭击”。

表 2 时滞型岩爆滞后时间及空间信息
Table 2 Lag time and spatial information of time delayed rockburst

岩爆滞后时间及空间	岩爆 I	岩爆 II	岩爆 III	岩爆 IV	岩爆 V
岩爆滞后开挖的天数/d	105	81	110	88	117
岩爆滞后拆机洞第二次爆破的天数/d	7	7	17	18	23
岩爆滞后工作面的距离/m	769.0	430.8	850.5	340.0	862.5

在锦屏 II 级水电站引水隧洞钻爆段^[11]施工期间, 时滞型岩爆滞后工作面距离主要集中在 39~130 m 之间, 最远约 300 m, 滞后爆破时间均分布在 24 h 之内, 爆破后 4 h 是时滞型岩爆活动高发期。区别于上

述钻爆法开挖隧洞, K54+000—K54+700 段采用 TBM 法开挖, 该段时滞型岩爆区滞后工作面距离 334~857 m 之间, 滞后爆破时间均超过 7 d。由此可以发现, 钻爆法与 TBM 法开挖下时滞型岩爆的时空特征存在明显的差异, 爆破对 K54+000—K54+700 段围岩的扰动程度相对较小。

2.3 岩爆破坏特征

不同等级时滞型岩爆的断面位置及破坏范围存在明显差异。岩爆 I—岩爆 V 断面分布情况如图 7 所示。从图中可以看出, 岩爆 I 和岩爆 III 分别为强烈岩爆和中等岩爆, 其破坏深度较大, 爆坑从侧墙一直延伸至拱顶, 造成大范围锚网喷支护系统遭到破坏。岩爆 II、岩爆 IV 和岩爆 V 均为轻微岩爆, 爆坑通常形成于侧墙附近, 造成小范围混凝土喷层的破坏。

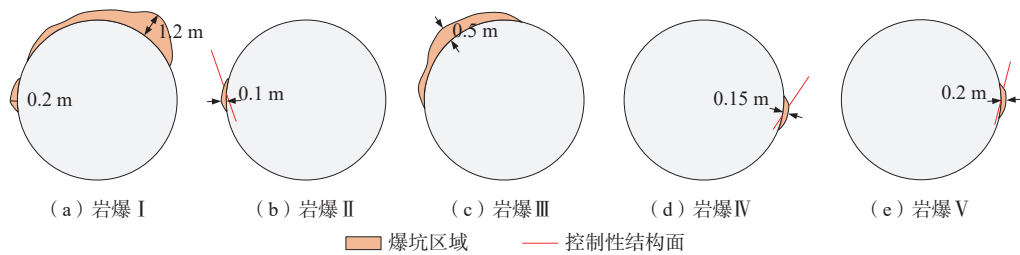


图 7 时滞型岩爆断面分布情况
Fig. 7 Section distribution of time delayed rockburst

结合表 1 和图 8, 强烈岩爆和中等岩爆区域多发育短小隐节理和含钙膜充填或铁锈色斑的细密节理, 无延伸长的结构面, 爆坑形态受节理影响较小, 整体呈长条深窝型或深窝型, 局部沿隐节理的破坏面出现

台阶状陡坎, 如图 8(a)所示。轻微岩爆区域除含钙膜充填的细密节理外, 均至少发育 1 条含充填物的倾向 SW 的陡倾结构面, 爆坑以结构面为边界或以结构面为中心向两边扩展, 整体呈现浅窝型, 如图 8(b)所示。



图 8 岩爆区域内的结构面
Fig. 8 Structural plane in rockburst area

由于时滞型岩爆区原生结构面较为发育, 当结构面延伸、扩展并贯通时, 爆落块体以薄楔形岩块、不规则岩片为主, 受多组结构面的共同影响其块度通常

较小。如图 9 所示, 岩爆 IV 区域发育 1 条墨绿色填充结构面和多组含钙膜充填的细小节理, 岩爆发生后爆落的块体以薄楔形岩块为主, 且具有一定的分选性^[19],

即爆堆中心以较大岩块堆积为主,向四周岩石块度逐渐变小。



图 9 岩爆 IV 爆堆
Fig. 9 Rockburst IV pile

3 时滞型岩爆影响机制

3.1 时滞型岩爆区应力环境

本文统计了时滞型岩爆爆坑深度与爆坑中心前后各 10 m 范围内累计即时型岩爆爆坑深度的关系,如图 10 所示,发生区域爆坑中心前后各 10 m 范围内累计即时型岩爆爆坑深度越大,时滞型岩爆爆坑深度也越大,反之亦然。围岩应力是影响岩爆的主要因素之一^[20],而上述规律的本质是围岩应力集中程度与岩爆风险间的关系。TBM 开挖卸荷后,岩体初始应力场调整造成环向应力集中,导致岩体内部能量不断聚集,当岩体中储存的可释放弹性应变能大于岩体储能极限时,就会导致岩爆发生。因此,若某区域即时型岩爆次数多、等级高、深度大,则表明该区域的应力集中程度也相对较高,可能导致该区域潜在更高的时滞型岩爆风险。

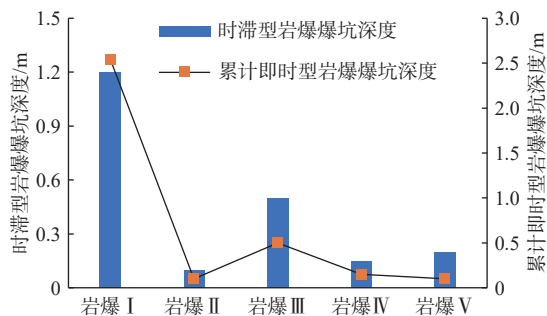


图 10 时滞型岩爆爆坑深度与爆坑中心前后各 10 m 范围内累计即时型岩爆爆坑深度的关系

Fig. 10 Relationship between the depth of time delayed rockburst pit and the cumulative depth of immediate rockburst pit within 10 m in front of and behind the rockburst pit center

3.2 时滞型岩爆发生的地质力学模式

结合表 1 和图 8, K54+000—K54+700 段时滞型岩

爆区通常围岩坚硬且完整性较好,但节理、夹层等原生结构面相对比较丰富,使得围岩具备一定储能能力的同时,也使其内部微裂隙更容易扩展贯通。从岩爆的地质力学模式^[21-23]出发,不同等级时滞型岩爆间的孕育过程存在明显差异。隧洞开挖后,在环向压应力和向临空面方向卸荷回弹的共同作用下,围岩不断产生平行于临空面的张拉裂纹,且沿结构面发生剪切破裂,并随时间推移逐渐向两端和内部扩展。当拉伸破裂上端穿切至结构面或与剪切破裂贯通时,此破裂端部变为自由端,在卸荷回弹和径向应力的共同作用下向临空面抛掷,如图 11(a)所示。该破坏模式易造成烈度较小的轻微岩爆,如岩爆 II、岩爆 IV 和岩爆 V。此外,若围岩体赋存一定数量的隐性结构面,则在围岩不断产生平行于临空面的张拉裂纹的过程中,岩体内的隐性结构面也同时沿结构面尖端扩展并发生剪切滑移,当其与张拉裂纹贯通、交切后,在岩体内易形成楔形块体,在卸荷回弹和径向应力的共同作用下向临空面抛掷弹射,如图 11(b)所示。该破坏模式易造成烈度较大的中等岩爆,甚至是强烈岩爆,如岩爆 I 和岩爆 III。

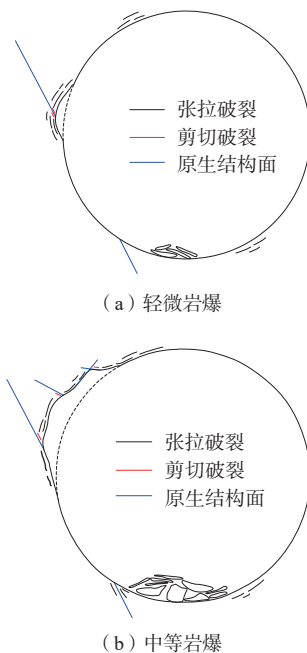


图 11 不同等级时滞型岩爆地质力学模式示意图

Fig. 11 Schematic diagram of geomechanical model of time delayed rockburst of different grades

3.3 拆机洞爆破扰动作用

钻爆法隧洞每一循环的开挖都需要进行装药爆破,故钻爆法隧洞围岩遭受的扰动更加频繁。结合 2.2 节中对不同开挖方式下时滞型岩爆时空特征的对

比,发现钻爆法隧洞时滞型岩爆滞后爆破时间更近,滞后工作面距离更短,根据爆破地震波衰减规律^[24],可知其受到的爆破扰动强度更高。因此,相对 TBM 隧洞而言,钻爆法隧洞开挖时受到爆破扰动强,导致原生结构面的扩展和次生结构面的大量产生,同时也释放了部分围岩应力,需要更频繁、更高强度的爆破扰动才能达到诱发时滞型岩爆条件,因此爆破扰动往往起到了控制性的作用^[25]。

鉴于上述结论,K54+000—K54+700 段时滞型岩爆区滞后最后一次(共 2 次)爆破时间超过 7 d,且爆心距超过了 300 m,故拆机洞爆破对时滞型岩爆区的扰动强度较小,且并未直接诱发时滞型岩爆,而是作用于时滞型岩爆的孕育过程,使其加速发生。

3.4 爆破扰动下时滞型岩爆影响机制

综合前文所述,K54+000—K54+700 段时滞型岩爆区域围岩均受到断层构造不同程度的影响,导致断层附近完整区域应力异常升高,且以构造应力为主。在这一应力环境中,围岩开挖后的应力集中程度相对大于其他区域,同时节理、夹层等原生结构面的存在使得岩体内部微裂隙更容易扩展贯通,导致隧洞开挖时即时型岩爆频发。此后,随着工作面的远离和时间的推移,围岩应力场不断进行调整后逐渐趋于稳定,同时现场也及时施作了支护措施,提高了围岩的整体强度和储能极限,因此,围岩暂时并没有发生进一步破坏。此过程中外界仍在持续对岩体做功,岩体内部裂纹按照不同的地质力学模式不断萌生、扩展,但总体仍处于较缓慢的状态。当拆机洞爆破开挖产生的爆炸应力波传播到该区域时,在其扰动下岩体内部新生裂纹数量增加,原有裂纹加速扩展,同时岩体中的软弱结构面强度参数不断弱化,使该区域发生破坏变得容易,从而加速围岩发生破坏的进程。当最终岩体内部损伤累积到临界值且支护强度不足时,即使没有外界扰动的发生,围岩仍然会发生失稳,进而突破支护体的束缚,引发时滞型岩爆。

4 结论

(1)受断层构造、岩体条件等影响,不同等级时滞型岩爆发生的时空特征及破坏特征均具有显著差异性。强烈岩爆和中等岩爆区域位于断层附近,应力集中程度相对较高,围岩发育短小隐节理和含钙膜充填或铁锈色斑的细密节理;轻微岩爆距断层远或位于正断层附近,应力集中程度相对较低,除含钙膜充填的细密节理外,均至少发育 1 条含充填物的倾向 SW 的

陡倾结构面。

(2)不同开挖方式下时滞型岩爆滞后工作面的距离、滞后爆破时间等特征存在明显差异,在频繁、高强度爆破扰动的影响下,钻爆法隧洞受爆破扰动的影响程度更大,且时滞型岩爆滞后爆破时间更近,滞后工作面距离更短。

(3)爆炸应力波的传播过程中,岩体中的软弱结构面也会吸收应力波传递的大部分能量,造成岩体内结构面强度参数不断弱化,使其发生破坏变得容易,从而加速了时滞型岩爆的进程。

参考文献 (References) :

- [1] 冯夏庭,陈炳瑞,张传庆.岩爆孕育过程的机制、预警与动态调控[M].北京:科学出版社,2013. [FENG Xiating, CHEN Bingrui, ZHANG Chuanqing. Mechanism, warning and dynamic control of rockburst development processes[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)]
- [2] 刘威军,范俊奇,李天斌,等.深埋高地应力隧道勘察期岩爆烈度概率分级预测[J].水文地质工程地质,2022,49(6):114-123. [LIU Weijun, FAN Junqi, LI Tianbin, et al. Probabilistic classification prediction of rockburst intensity in a deep buried high geo-stress rock tunnel during engineering investigation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 114 - 123. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 何怡帆,李天斌,曹海洋.隧道施工期岩爆危险性评价的属性识别模型及工程应用[J].水文地质工程地质,2020,47(2):102-111. [HE Yifan, LI Tianbin, CAO Haiyang. Attribute recognition model of fatallness assessment of rockburst in tunnel construction and its application[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 102 - 111. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 潘雪峰,乔粉剑.处于岩爆地层的隧道设计和施工方案研究[J].公路,2014,59(5):114-118. [PAN Xuefeng, QIAO Fenjian. Research on design and construction scheme for tunnel in rockfall stratum[J]. Highway, 2014, 59(5): 114 - 118. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 冯夏庭,肖亚勋,丰光亮,等.岩爆孕育过程研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):649-673. [FENG Xiating, XIAO Yaxun, FENG Guangliang, et al. Study on the development process of rockbursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 649 -

673. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 冯夏庭, 陈炳瑞, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 即时型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 433 - 444. [FENG Xiating, CHEN Bingrui, MING Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts in deep tunnels: Immediate rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 433 - 444. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 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 rockburst in deep tunnel: Time delayed rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 561 - 569. (in Chinese with English abstract)]
- [8] FENG Guangliang, FENG Xiating, XIAO Yaxun, et al. Characteristic microseismicity during the development process of intermittent rockburst in a deep railway tunnel[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 124: 104135.
- [9] 杨艳霜, 周辉, 张传庆, 等. 大理岩单轴压缩时滞性破坏的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2714 - 2720. [YANG Yanshuang, ZHOU Hui, ZHANG Chuanqing, et al. Experimental investigation on time-lag failure properties of marble under uniaxial compressive test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2714 - 2720. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李夕兵, 宫凤强. 基于动静组合加载力学试验的深部开采岩石力学研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 846 - 866. [LI Xibing, GONG Fengqiang. Research progress and prospect of deep mining rock mechanics based on coupled static-dynamic loading testing[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 846 - 866. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 宫凤强, 陆道辉, 李夕兵, 等. 动力扰动下预静载硬岩断裂的增韧和减韧效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1905 - 1915. [GONG Fengqiang, LU Daohui, LI Xibing, et al. Toughness increasing or decreasing effect of hard rock fracture with pre-static loading under dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1905 - 1915. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 赵周能. 基于微震信息的深埋隧洞岩爆孕育成因研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014. [ZHAO Zhouneng. Studies on preparation causes of rockburst in deep tunnel based on microseismic information[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 何满潮, 刘冬桥, 宫伟力, 等. 冲击岩爆试验系统研发及试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1729 - 1739. [HE Manchao, LIU Dongqiao, GONG Weili, et al. Development of a testing system for impact rockbursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1729 - 1739. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 苏国韶, 胡李华, 冯夏庭, 等. 低频周期扰动荷载与静载联合作用下岩爆过程的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1309 - 1322. [SU Guoshao, HU Lihua, FENG Xiating, et al. True triaxial experimental study of rockburst process under low frequency cyclic disturbance load combined with static load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1309 - 1322. (in Chinese with English abstract)]
- [15] ZHANG Shichao, MA Tianhui, TANG Chun'an, et al. Microseismic monitoring and experimental study on mechanism of delayed rockburst in deep-buried tunnels[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(6): 2771 - 2788.
- [16] 赵周能, 冯夏庭, 肖亚勋, 等. 不同开挖方式下深埋隧洞微震特性与岩爆风险分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 867 - 876. [ZHAO Zhouneng, FENG Xiating, XIAO Yaxun, et al. Microseismic characteristics and rockburst risk of deep tunnel constructed by different excavation methods[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 867 - 876. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 范勇, 卢文波, 王义昌, 等. 不同开挖方式下即时型和时滞型岩爆的孕育特征比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2): 3715 - 3723. [FAN Yong, LU Wenbo, WANG Yichang, et al. Comparison of evolution characteristics of immediate and time delayed rockbursts under different excavation methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup 2): 3715 - 3723. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 水利水电工程地质勘察规范: GB 50487—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of

- Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for engineering geological investigation of water resources and hydropower: GB 50487—2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2009. (in Chinese)]
- [19] 谭以安. 岩爆形成机理研究[J]. 水文地质工程地质, 1989, 16(1): 34 – 38. [TAN Yi'an. The mechanism research of rockburst[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1989, 16(1): 34 – 38. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 王庆武, 巨能攀, 杜玲丽, 等. 深埋长大隧道岩爆预测与工程防治研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 88 – 94. [WANG Qingwu, JU Nengpan, DU Lingli, et al. Research on rockburst prediction and engineering measures of long and deep-lying tunnels[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 88 – 94. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 李天斌, 孟陆波, 王兰生. 高地应力隧道稳定性及岩爆、大变形灾害防治[M]. 北京: 科学出版社, 2016. [LI Tianbin, MENG Lubo, WANG Lansheng. Stability of high ground stress tunnel and prevention of rockburst and large deformation[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)]
- [22] LI Tianbin, MA Chunchi, ZHU Minglei, et al. Geomechanical types and mechanical analyses of rockbursts[J]. *Engineering Geology*, 2017, 222: 72 – 83.
- [23] 王孝健, 苏生瑞, 施怡, 等. 高地应力环境下地下工程围岩变形破坏的地质力学模式分析[J]. 公路, 2014, 59(4): 244 – 250. [WANG Xiaojian, SU Shengrui, SHI Yi, et al. Mechanical model analysis of deformation and failure of surrounding rock of underground engineering under high geostress environment[J]. Highway, 2014, 59(4): 244 – 250. (in Chinese with English abstract)]
- [24] REZAEI NIYA S M, SELVADURAI A P S. Correlation of joint roughness coefficient and permeability of a fracture[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 113: 150 – 162.
- [25] 谢勇谋, 李天斌. 爆破对岩爆产生作用的初步探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 61 – 64. [XIE Yongmou, LI Tianbin. Primary discussion on blast's affection on rockburst[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(1): 61 – 64. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华
实习编辑: 刘真真