doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 007
李鹏翔, 李华方, 张伟, 等. Neelum-Jhelum水电站TBM引水隧洞岩爆特征及防治研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(6): 64-74.
Li Pengxiang, Li Huafang, Zhang Wei, et al. Rockburst characteristics and prevention-control for TBM diversion tunnel of Neelum-Jhelum hydropower station[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2026, 78(6): 64-74.

Neelum-Jhelum水电站TBM引水隧洞岩爆特征及防治研究

李鹏翔[1,2], 李华方[2], 张　伟[3], 肖亚勋[4]
(1. 菏泽学院 城市建设学院, 山东 菏泽 274015;
2. 湖北海震科创技术有限公司, 武汉 430073;
3. 莱州市瑞海矿业有限公司, 山东 烟台 261441;
4. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘　要: 巴基斯坦Neelum-Jhelum水电站引水隧洞地质条件极为特殊, 在TBM掘进过程中砂岩、粉砂岩地层交替出现呈互层“三明治”状, 两引水隧洞在掘进期间发生数百次岩爆之多, 其中不乏极强岩爆。引入高精度微震监测系统进行了长期的微震监测岩爆预警和岩爆观测(累积监测793 d, 监测总长达到6 852 m)。本文基于大量现场岩爆实录与海量微震监测数据, 分析了岩爆的时空分布特征、埋深效应、岩性影响规律, 以及不同隧洞间距条件下的岩爆发生特征, 探究了微震监测技术应用于N-J水电站引水隧洞岩爆预警的可行性。结果表明: 两条隧洞97%的岩爆发生于掌子面前后18 m范围内, 约2倍洞径区间内; 96%的岩爆发生在TBM掘进作业过程或停机后1 h以内, 岩爆以即时型岩爆为主; 隧洞岩爆风险与埋深不存在单调线性正相关关系; 岩性对岩爆发育具有显著控制作用, 百米砂岩(硬岩)岩爆频次为22. 4, 百米粉砂岩(较软岩)岩爆频次仅为2. 7, 泥岩段未发生岩爆; 平行隧洞间距由33 m增大至55. 48 m后, 岩爆发生频次与破坏等级显著下降; 微震监测信息对围岩地层变化及岩爆风险演化具备良好敏感性, 基于微震监测的岩爆预警效果显著, 该技术适用于复杂互层地层条件下的岩爆监测与预警。本研究成果可为揭示同类复杂地层中岩爆发育特征、灾变机理以及制定岩爆防控措施提供工程参考。

关键词: 交互地层; 微震监测; TBM; 岩爆特征; 岩爆防治
中图分类号: TD421　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0064-11

Rockburst characteristics and prevention-control for TBM diversion tunnel of Neelum-Jhelum hydropower station

Li Pengxiang[1,2], Li Huafang[2], Zhang Wei[3], Xiao Yaxun[4]
(1. College of Urban Construction, Heze University, Heze 274015, Shandong, China;
2. Hubei Seaquake Technology Co., Ltd., Wuhan 430073, China;
3. Laizhou Ruihai Mining Co., Ltd., Laizhou 261441, Shandong, China;
4. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The diversion tunnels of the Neelum-Jhelum Hydropower Project in Pakistan are characterized by complex and special geological conditions. Sandstone and siltstone alternately occur along the TBM excavation alignment, forming a typical "sandwich" type of soft-hard interbedded strata. Hundreds of rockburst events, including multiple intense rockbursts,

收稿日期: 2026-09-09
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52509157)
作者简介: 李鹏翔, 博士, 副教授, 主要从事深部工程岩体稳定性监测与灾害防治工作。
通信作者: 李华方, 工程师, 主要从事微震设备研发、工程项目管理方面的工作。

were encountered during the excavation of the two parallel diversion tunnels. A high-precision microseismic monitoring system was deployed for long-term in-situ monitoring, rockburst observation and risk early warning, with a total monitoring period of 793 days and a monitored tunnel length of 6 852 m. Based on abundant on-site rockburst records and massive microseismic time-series data, this study systematically analyzes the spatial-temporal distribution of rockbursts, burial depth effect, lithological control law, and rockburst characteristics under different spacing of parallel tunnels, and discusses the engineering feasibility of microseismic monitoring for rockburst early warning in the diversion tunnels of the N-J Hydropower Project. The results show that 97% of rockbursts occurred within 18 m (approximately twice the tunnel diameter) ahead of and behind the tunnel face; 96% of rockbursts took place during TBM excavation or within 1 h after excavation shutdown, and rockbursts are dominated by immediate rockbursts. There is no simple one-to-one correlation between rockburst risk and burial depth. Lithology exerts a remarkable controlling effect on rockburst development: the rockburst frequency per hundred meters of sandstone (hard rock) is 22.4, while that of siltstone (relatively soft rock) is only 2.7, and no rockburst occurred in mudstone sections. When the spacing between parallel tunnels was increased from 33 m to 55.48 m, both the occurrence frequency and damage intensity of rockbursts decreased significantly. Microseismic signals exhibit good sensitivity to variations in surrounding rock strata and the evolution of rockburst risk. The microseismic-based rockburst early warning achieves remarkable performance, and this technology is applicable to rockburst monitoring and early warning in complex interbedded strata. The findings of this study can provide engineering references for revealing rockburst characteristics and catastrophe mechanisms and developing rockburst prevention and control measures in similar complex strata.

Key words: interactive strata; microseismic monitoring; TBM; rockburst characteristics; rockburst mitigation

随着社会和经济的快速发展，越来越多的矿山、水利水电、交通、核废料处置及国防等领域的相关地下工程逐步向深部转移，岩体赋存的地质条件变的更加复杂、地应力变得越来越高，开挖(开采)诱发的岩爆灾害日趋严重[1-3]。我国重大深埋工程多集中于西部高原地区，尤其是青藏高原区域。该区域受多期次区域构造运动影响，地质条件极为复杂，突出表现为地层结构多变、软硬岩层交替分布等特征。以在建川藏铁路为例，工程需“穿七江过八山”，沿线地形起伏剧烈，包含大量深埋软硬交互地层隧洞段，岩爆已成为制约其隧洞建设的核心灾害之一[4-6]。

软硬交互地层是浅部和深部地下工程常常遇到的不良地质，相较于单一岩性地层，非均质性、各项异性更为显著，开挖诱发的灾害更为突出，引起了国内外学者的广泛关注。尚彦军等[7]对相似材料软硬交互岩石进行了常规三轴压缩实验，研究了不同软硬厚度比试样的应力-应变特征、裂纹变形扩展规律等力学性质。周辉等[8]制作了类层状复合岩石试样，开展了不同围压下的三轴压缩试验，研究了围压对复合岩体变形破坏特征的影响。蒋毅[9]、黄峰等[10]、丁恩理等[11]对不同软硬层厚比、不同倾角的相似材料软硬复合岩石试样开展了常规三轴压缩试验，研究了复合岩石的强度、变形和破坏形式。史林肯等[12]以兰州水源地建设工程为背景，建立了上软下硬复合地层TBM开挖物理模型，获得了隧洞开挖过程复合地层应变演化规律，并分析了隧洞围岩的宏观破裂形态，发现软岩变形破坏较为严重，在岩层界面出现“变形不协调”现象。程建龙等[13]为探明TBM与软硬复合地层围岩的相互作用机制，对软硬互层TBM隧洞4种不同工况进行数值模拟，重点分析了软硬岩层的变形特征及TBM卡机风险。综合来看，现有研究多集中于软硬地层或岩石破坏的试验与数值模拟层面，且多数针对非岩爆破坏场景；目前针对现场软硬交互地层隧洞岩爆的相关研究较为有限，尤其关于全断面隧洞掘进机(TBM)开挖工况下隧洞岩爆的研究更是鲜有报道。需强调的是，TBM已在深埋长大隧洞工程中得到广泛应用，相关研究的缺失制约了工程实践中的岩爆防控工作。

国内外学者对单一岩性地层隧洞岩爆开展了大量深入研究，在岩爆发生机理、预警技术及防治措施等方面取得了丰硕成果，但由于软硬交互地层的地质结构较单一岩性地层更为复杂，具有独特的特殊性，目前学界及工程界对该类地层中岩爆的发生特征、风险防控机制认识仍不够充分，给现场岩爆防控工作带来诸多困难。鉴于此，本文以笔者深度参与的N-J水电站引水隧洞为研究对象，初步探究了深埋软硬交互地层TBM隧洞的岩爆发生特征、预警与防控。研究成果可为软硬交互地层及其他复杂地质条件下TBM开挖隧洞岩爆风险的科学管控提供理论参考与工程借鉴。

1 N-J水电站引水隧洞工程概况及微震监测布置

1.1 引水隧洞工程及地质概况

尼鲁姆-杰卢姆(Neelum-Jhelum)水电站(以下简称“N-J水电站”)位于巴基斯坦东北部克什米尔地区的穆扎法拉巴德市境内。该水电站装机容量为969 MW,是巴基斯坦目前最大的水电站,水电站的建成对于电力匮乏的巴基斯坦意义重大,也因此被形象地誉为巴基斯坦的“三峡工程”。该水电站是高水头、径流式、引水水电站,工作水头420 m。引水隧洞单侧轴线方位角为N38°E,全长28.6 km,分为2段,分别为双线洞和单线洞布置,从大坝附近的A1支洞到A3支洞之间引水隧洞为双洞平行布置,长约15.1 km,其余洞段为单线洞布置[4]。

考虑到隧洞穿越的山体埋深较大(隧洞最大埋深1 890 m,平均埋深1 400 m),单条隧洞开挖断面较大,容易产生高应力导致的稳定性问题,因此设计两条隧洞平行布置。两条隧洞均布置2个掌子面相向掘进,形成2条隧洞4个工作面的工作布局。在掘进初期,4个工作面均采用传统的钻爆法掘进,然而由于工期紧张,钻爆法掘进速率慢,且在如此高的山体中开挖竖井或者开凿辅助洞形成多个掌子面比较困难。因此,引入了2台德国海瑞克公司生产的同型号开敞式TBM进行两条引水隧洞的开挖工作,刀盘直径为8.53 m,单台额定总功率为5 093.5 kW。两条TBM隧洞的开挖直径和纵坡度分别为8.53 m和0.65%。TBM696隧洞掘进长度为10.4 km,TBM697隧洞掘进长度为9.9 km。

两台TBM均分为3个班次进行生产组织——两班生产、半班生产半班检修的工作制度。TBM掘进时间为12:00至次日08:00,检修时间为08:00~14:00。隧洞开挖毛断面直径8.53 m,TBM具有一定的扩挖能力,采用锚喷配合TH梁和网片支护。按支护施工时序以及支护方式沿隧洞轴线的分布特征,可将隧洞划分为4个支护分区,如图1所示。其中Ⅰ区为TBM L1区,主要开展顶拱锚网初步支护作业;Ⅱ区为TBM L2区,实施隧洞两帮喷射混凝土支护;Ⅲ区开展顶拱喷射混凝土支护;Ⅳ区为仰拱模板支护区,各分区支护完成后共同构成隧洞永久支护体系。

N-J水电工程位于喜马拉雅西部区域,巴基斯坦北部的帕米尔高原,该区域处于印度洋板块与亚欧板块边界碰撞型地震构造带,是世界上地震活动较为活跃、构造应力较为强烈的地域之一。工程区的地质单元主要是穆里组molassic沉积岩,其地质年代主要是古新世至始新世中期,穆里地层表现为较强的挤压,以紧密的褶皱为表现形式,在引水隧洞掘进期间和厂房开挖过程中揭露的岩层呈现砂岩、粉砂岩、泥岩交互出现的现象,为典型的穆里上组地层[4]。

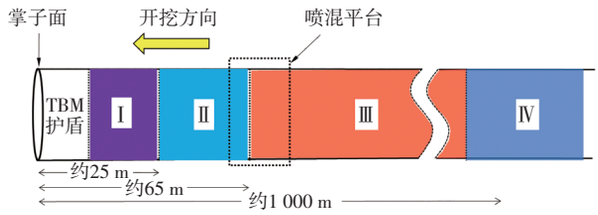


图1 N-J水电站引水隧洞(TBM掘进)不同的支护区域

Fig. 1 Sketch of support in different zones

在TBM掘进期间隧洞内砂岩、粉砂岩交互出现,泥岩零星分布于其中,呈现特殊的“三明治”地层,三种岩性的岩性分界面与隧洞洞轴线多呈70°~90°的夹角,与洞轴线几乎垂直,如图2所示。砂岩质地坚硬呈青灰色,岩层厚度2~70 m,多数在5~30 m;粉砂岩属于较坚硬岩石呈红褐色,岩层厚度0.5~200 m,多数在1~40 m;泥岩强度较低呈深褐色,零星分布,岩层厚度一般小于2 m。砂岩和粉砂岩完整岩石的力学基本参数如表1所示。砂岩与粉砂岩虽然都属于硬岩但砂岩和粉砂岩的坚硬程度有明显差异,粉砂岩的单轴抗压强度约为砂岩单轴

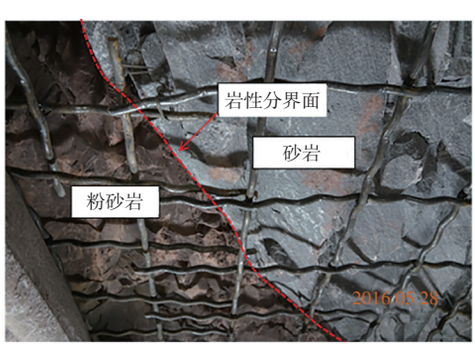


图2 N-J水电站引水隧洞软硬交互地层[4]

Fig. 2 Soft and hard interbeded layer in headrace tunnels of N-J hydropower station[4]

表1 N-J水电站引水隧洞砂岩、粉砂岩完整岩石力学参数

Table 1 Intact rock properties of sandstone and siltstone in headrace tunnels of N-J hydropower station

岩性	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
砂岩	150~184	7.9~10.6	30.72~57.84	0.21~0.27
粉砂岩	75~102	6.9~8.6	22.87~40.62	0.25~0.30

抗压强度的一半，砂岩相对于粉砂岩属于硬岩，粉砂岩属于相对软岩，N-J水电站引水隧洞为典型的软硬交互地层。

N-J水电站引水隧洞TBM掘进区段埋深890～1 890 m，平均埋深1 250 m，最大埋深1 890 m，埋深基本呈现沿TBM掘进方向增高趋势。现场实测最大主应力为108 MPa(TBM697隧洞桩号CH 10+881处)，方向近水平，工程区为典型的构造活动强烈的高地应力区。N-J水电站引水隧洞TBM掘进段具有埋深大、地应力高、洞线长、洞径大等特点，在两条TBM隧洞掘进过程中不同等级岩爆发生数百次，给现场施工人员和机械设备造成了严重威胁。

1.2　微震监测布置概况

根据国际岩石力学学会(ISRM)所建议的微震监测方法[14]和N-J水电站开敞式TBM施工的特点，两隧洞的微震传感器布置采用如图3所示的方案进行布置。每个隧洞布置8个传感器，其中，6个单向速度型传感器、2个三向速度型传感器，传感器频率均为10～2 000 Hz，敏感度为100 V·m^{-1}·s。传感器安装在事先打好的钻孔内，孔深3.5 m，分三个断面进行布置，断面之间相距40 m，第一排传感器距掌子面10～30 m。掌子面每向前推进40 m，回收最后一排传感器重新布置到距掌子面10～30 m处，如此往复，传感器随着掌子面推进实时逐次移动，以确保更好的获得掌子面附近岩体破裂微震信息。

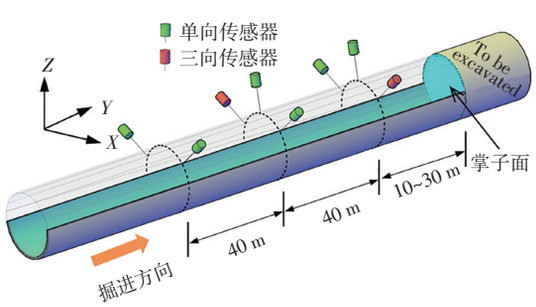


图3　N-J水电站引水隧洞微震传感器布置示意图

Fig. 3　Sketch of MS sensor layout in headrace tunnels of N-J hydropower station

波速校正依托现场隧道地震层析成像系统(Tunnel Seismic Tomography，TST)采集的小炮记录，反演P波、S波速度。TST约每10～15日施作一次，对波速模型进行动态校正，以提高微震事件定位精度。

在N-J水电站引水隧洞微震监测中，为了降低监测成本和提高微震传感器的利用效率，应用了自主研发的传感器可回收装置。在隧洞中进行微震监测不同于在地下厂房等洞室中进行微震监测。洞室施工是在一定空间范围内进行施工，布置传感器时一般是采用永久固定式布置方式，所需微震传感器数量有限。而对于线性隧洞而言，如微震传感器采用永久固定式方式布置，需要大量的微震传感器，因为传感器必须随着掌子面的移动而移动才能获得掌子面附近的微震数据。该传感器回收装置不但保证了监测质量，而且还便于安装操作。采集后的微震数据经过滤波处理后，采用人工进行微震数据分析，以此获取TBM掘进过程中微震事件发生的时间、位置、破裂尺度及能量释放等信息，以此为基础推断岩体内部应力状态、岩体损伤情况等。

2　TBM引水隧洞岩爆发生特征

2.1　岩爆发生的“时空”特征

2.1.1　岩爆相对于掌子面的分布特征

微震监测期间，N-J水电站两条引水隧洞共计发生岩爆490次，图4为两引水隧洞微震监测段岩爆发生位置相对于掌子面的分布图。从图4可以看出，97%的岩爆发生在掌子面18 m范围内，约为2倍洞径范围内。加拿大Mine-By试验隧洞微震监测表明，隧洞应力调整主要集中在掌子面后方约2倍洞径范围内[15]，同时三维有限元和三向光弹试验研究结果表明，隧洞应力调整区域大约位于掌子面前方1倍洞径至掌子面后方2倍洞径[16]。因此N-J水电站引水隧洞岩爆的发生主要受隧洞开挖卸荷影响。岩爆大多发生于TBM护盾及其外侧12 m内，对应掌子面后方0～18 m；其中护盾段(护盾长度 6 m)内发生的岩爆占总岩爆数量的64.9%。由图1施工工艺可见，L1区为初次支护区，区内布置大量贵重设备且作业人员密集，一旦发生岩爆，极易造成人员伤亡与设备损毁，严重威胁TBM安全掘进。

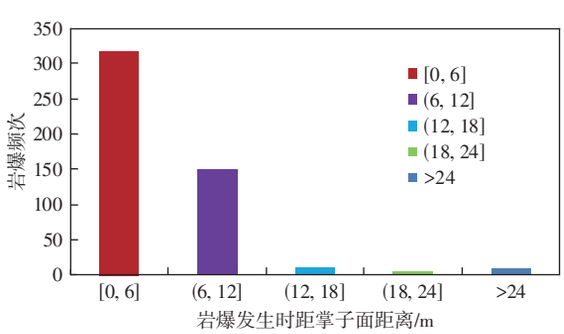


图4　N-J水电站引水隧洞岩爆相对于掌子面的分布规律

Fig. 4　Distribution law of rockburst relative to the working face in headrace tunnels of N-J hydropower station

根据N-J水电站两引水隧洞的岩爆记录和现场施工日志信息，共统计出有详细时间记录的岩爆案例共计465例，分析发现96%的岩爆发生在TBM掘进期间和停机1 h之内。TBM开机期间和停机1 h内为L1区人员活动密集时间段，因此，N-J水电站引水隧洞的岩爆灾害具有较大危害性。

岩爆的孕育发生与围岩应力调整密切相关，岩体开挖卸荷导致应力重分布，引起局部围岩应力集中，随着原生和新生裂纹不断扩展、贯通岩体承载能力不断下降，当下降至某一临界值时，岩体发生破坏失稳，储存在岩体内剩余的弹性能突然释放，从而发生岩爆。众所周知，TBM掘进时开挖边界上的地应力是一个缓慢的准静态卸载过程，TBM开挖对围岩体扰动较小、应力重分布影响范围小、应力调整至新的平衡用时较短(相比于钻爆法)。因此TBM掘进的隧洞岩爆多在开挖期间或开挖停机较短时间内。

冯夏庭等根据岩爆发生时机和相对于掌子面的空间范围，将岩爆划分为即时型岩爆和时滞型岩爆[2]，在开挖扰动区域内发生的岩爆定义为即时型岩爆；时滞型岩爆是指在隧洞开挖卸荷应力调整达到平衡后，由外界其它扰动(比如放炮)作用下引起的岩爆。按照上述分类方法，N-J水电站引水隧洞的岩爆类型几乎都属于即时型岩爆。

2.1.2 岩爆在不同埋深的分布特征

高应力是岩爆发生的重要外界条件，只有应力足够高，有岩爆倾向的岩石才会发生岩爆，应力越高，岩爆风险也就越高，当岩体所处环境应力较低时，岩体积蓄的弹性能较少，岩石破坏多表现为静态破坏，不会发生岩爆等动力型灾害。在不考虑构造应力的条件下，地应力一般与地下工程埋深呈正相关关系，埋深越大，地应力越高。理论上埋深大的区域，岩爆风险越高。

两引水隧洞微震监测期间岩爆发生规律与埋深的关系如图5所示。从图5可以看出，岩爆频次并不随埋深增大呈单调线性增长趋势，局部区段虽可出现岩爆频次随埋深增加而升高的现象，但总体而言岩爆风险与隧洞埋深不存在简单的一一对应关系。如从图5(a)中可以看出，在微震监测初期，TBM696隧洞桩号CH 9+700至CH 8+400岩爆频次较高，此区段埋深为1 300～1 580 m，为TBM696微震监测区域最小埋深洞段。在隧洞埋深最大洞段即桩号CH 7+800至CH 7+000，岩爆频次显著低于最小埋深洞段(桩号CH 9+700～CH 8+400)。

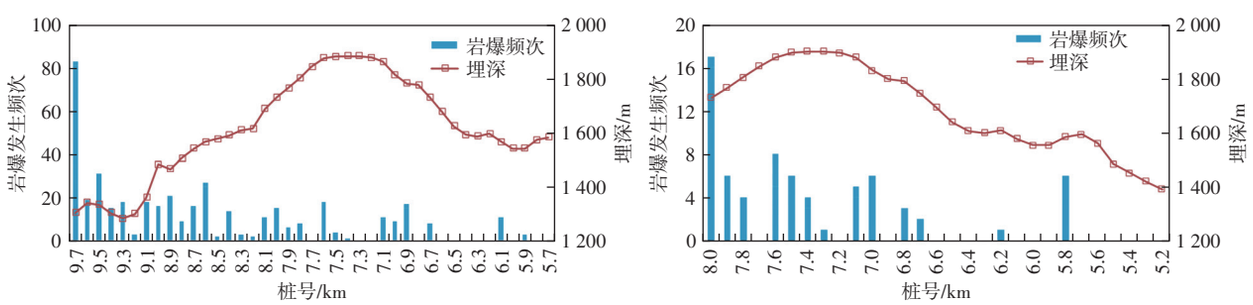


图5 N-J水电站引水隧洞岩爆发生频次与埋深的关系

Fig. 5 Rockburst distributions along the tunnel axis and with overburden in headrace tunnels

对比图5(a)与图5(b)可见，在两条隧洞埋深重合区段，岩爆的发生位置与事件频次存在明显差异。究其原因，N-J水电站两条TBM隧洞虽空间邻近，但受局部岩性分布、岩体地质结构差异及TBM开挖速率等因素耦合影响，围岩应力演化与岩体储能特征有所区别。Feng等[17]针对N-J水电站双TBM隧洞的岩爆差异性开展了研究，相关分析详见该文献。

许多学者研究了隧洞埋深对岩爆风险的影响，大部分研究结果表明，随着埋深的增加，深部岩体发生岩爆频次和等级会有所升高。但部分现场岩爆实测记录表明在埋深较浅处也会发生岩爆，如秦岭隧洞在深埋50 m处就发生了岩爆现象[18]，又如瑞典Forsmark水电站在距地表仅5～10 m深处的围岩中就发生了岩爆[19]，因此，岩爆与埋深又并不都呈现一一对应的关系。分析其原因是埋深本身不是岩爆风险的控制因素，岩爆风险的大小主要受地应力大小同时又受到其它因素的影响(如施工工法、开挖支护条件、地质条件等)。当某工程地应力受自重应力控制时，岩爆风险可能与隧洞埋深之间存在对应关系。当地应力受构造应力控制时，岩爆风险与隧洞埋深可能不再存在对应关系。

N-J水电站工程地处印度洋板块与亚欧板块边界碰撞型地震构造带，引水隧洞实测最大主应力高达108 MPa，方向近水平，为典型的高构造应力区。因此，N-J水电站引水隧洞岩爆风险与埋深不存在单调线性正相关关系。

2.2　岩爆在不同岩性的发生特征

N-J水电站引水隧洞呈现特殊的软硬交互地层，砂岩、粉砂在TBM掘进过程中交互出现，泥岩零星分布其中。图6为N-J水电站引水隧洞不同岩性的岩爆频次分布规律。从图6可以看出，岩爆多发生在砂岩中，达到364次，平均每百米岩爆频次为22.4；粉砂岩次之，岩爆共计发生126次，平均每百米岩爆频次为2.7；在泥岩中未观测到岩爆发生。图7为不同岩性中岩爆等级分布规律，从图7可以看出，砂岩中中等及以上岩爆发生频次大于粉砂岩中中等及以上岩爆发生频次。

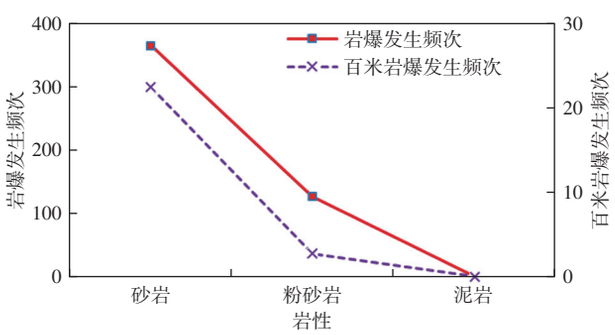


图6　N-J水电站引水隧洞不同岩性的岩爆发生频次和百米岩层岩爆发生频次

Fig. 6　Rockburst frequency and number of rockburst per 100 m in different lithology in headrace tunnels of N-J hydropower station

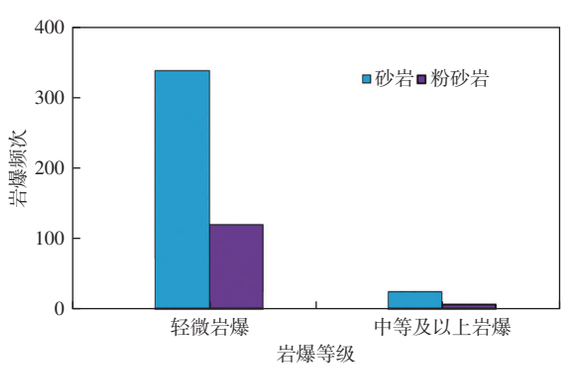


图7　N-J水电站引水隧洞不同岩性的岩爆等级分布

Fig. 7　Distribution of rockburst intensity in different lithology in headrace tunnels of N-J hydropower station

综上，N-J水电站软硬交互地层引水隧洞不同岩性的岩爆风险表现出明显差异，岩性对岩爆有较大影响，具有明显的岩性效应。砂岩中的岩爆发生频次和等级高于粉砂岩中的岩爆发生频次和等级，泥岩中未发生岩爆。

2.3　岩爆在不同隧洞间距下的发生特征

目前很少有工程案例在现场通过增加隧洞间距来防控岩爆风险，笔者基于N-J水电站这一特有的工程案例分析了软硬交互地层下隧洞间距增加对不同岩性岩爆风险的影响。

N-J水电站两条引水隧洞初始洞间距为33 m，“5·31”极强岩爆发生后为了防止两隧洞的交互影响再次诱发较高等级岩爆，两隧洞间距逐步扩大至55.48 m。由于TBM696隧洞掘进机严重损坏及岩爆区域周边围岩破坏严重，短期内无法恢复生产掘进，设计TBM697隧洞以转弯半径 r=5003.9 m进行偏离原隧洞洞轴线进而远离TBM696隧洞。TBM697隧洞间距变化起点为桩号CH 9+000(当TBM697隧洞开始转弯增加两隧洞间距时已向前掘进了近600 m)，在桩号CH 8+300结束，随后两引水隧洞再次呈平行布置，两隧洞空间位置及几何关系如图8所示。在这个过程中隧洞间距增加了22.48 m，TBM697隧洞实际掘进700.57 m。选取滞后隧洞TBM696三段区间进行研究不同隧洞间距对岩爆风险的影响，如图8所示。选取的三段区间范围分别为：变隧洞间距前(原隧洞间距，33 m)区间范围为CH 9+700～CH 9+000；变隧洞间距中区间范围为CH 9+000～CH 8+300；变隧洞间距后(新隧洞间距，55.48 m)区间范围为CH 8+300～CH 7+600，每段区间长度均为700 m。在变隧洞间距前区域(区段A)内共计发生188次岩爆其中强列岩爆2次，中等岩爆5次，轻微岩爆181次；在变隧洞间距区域(区段B)内无强烈岩爆发生，中等岩爆发生5次，轻微岩爆发生104次岩；在变隧洞间距后区域(区段C)内共计发生42次岩爆，其中轻微岩爆41次，仅发生一次中等岩爆。三个区段的岩爆发生频次、掘进情况和埋深参数见表2。

从以上的三个区域的岩爆情况以及表2的信息可以看出，虽然隧洞埋深从区段A到区段C逐渐增加，掘进速率逐渐增加(每个区段长度均为700 m，区段A用时122 d、区段B用时83 d、区段C用时62 d)，岩爆频次和等级依然呈现下降趋势。一般来说埋深越大、掘进速率越快岩爆风险越高，但以上三个区域的岩爆发生频次和等级呈现下降趋势。出现该演化趋势的原因可解释为：在CH8+300～CH7+600洞

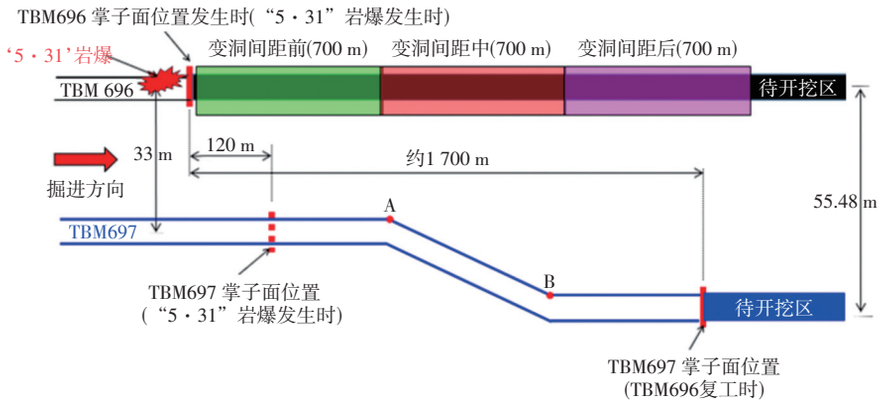


图8　N-J水电站TBM696隧洞“5・31”极强岩爆发生时及TBM696隧洞复工时掌子面与TBM697掌子面时空相对关系

Fig. 8　The relative position of working faces between TBM696 and TBM967 of N-J hydropower station when the “5・31” extremely intense rockburst occurred and TBM696 resumed tunneling

表2　三个区段内岩爆发生频次、掘进情况和埋深信息

Table 2　Rockburst, excavation and buried depth information in three sections

区段	起止桩号	岩爆频次	开始掘进日期	结束掘进日期	开挖时间/d	埋深/m
变隧洞间距前	CH 9+700～CH 9+000	188	2016年1月20日	2016年5月20日	122	1 303～1 428
变隧洞间距中	CH 9+000～CH 8+300	101	2016年5月21日	2016年8月11日	83	1 428～1 609
变隧洞间距后	CH 8+300～CH 7+600	49	2016年8月11日	2016年10月11日	62	1 609～1 895

段，虽然埋深与TBM 掘进速率均有所增大，但优化后的隧洞间距显著削弱了双洞开挖产生的应力叠加效应；该措施带来的围岩应力降低效果，超过了埋深增加、掘进速率提升所诱发的风险增量，最终表现为该区段岩爆发生频次与破坏等级同步下降。

图9为两隧洞间距增加过程中(区段B)TBM696掘进揭露的工程地质和微震事件时空分布图。从图9可以看出，该区域工程地质条件为砂岩、粉砂岩互层，泥岩零星分布其中，区段B掘进过程中，微震球体颜色由鲜亮逐步变暗(球体的尺寸与颜色表征微震释放能量，单事件释放能量越高，球体越大、颜色越鲜亮)，微震事件数量同步变化，表明区域岩爆风险呈下降趋势。

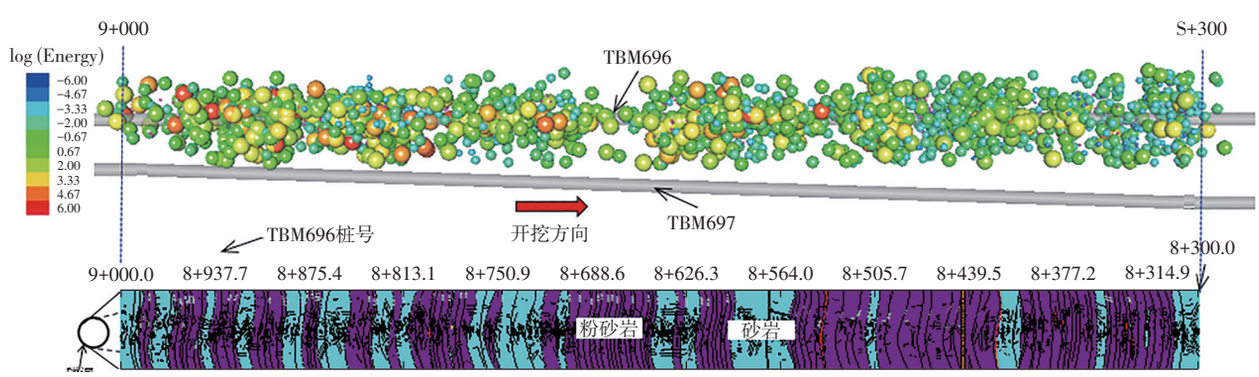


图9　隧洞间距变化过程中微震事件空间分布及工程地质展布图[20]

Fig. 9　Spatial distributions of the microseismic events and geological conditions encountered in tunnel TBM 696 as the tunnel spacing was changed[20]

通过上述的对比分析可以看出N-J水电站引水隧洞原隧洞间距下岩爆风险较高，增加隧洞间距后岩爆风险显著降低。

通过以上岩爆发生特征可知，N-J水电站引水隧洞区域构造应力是控制本区高地应力赋存的根本性因素，区域构造作用造就局部高应力集中，即便埋深相对较小的洞段仍可赋存高水平地应力，因此埋深仅反映自重应力水平，不直接决定岩爆风险，二者不存在单调线性正相关关系。隧洞间距主要通过双洞开挖的应力叠加效应改变围岩扰动应力场：当两隧洞距离较近时，先行隧洞开挖产生的二次应力场会与后行隧洞开挖扰动应力相互叠加，进一步放大围岩应力集

中程度，提升岩爆发生概率；增大隧洞间距能够弱化双洞之间的应力叠加作用，降低围岩扰动应力峰值，进而抑制岩爆灾害的发生。岩性与岩体结构则决定岩体储能与脆性破坏潜力，软硬互层地层中，不同岩性单元力学性质差异显著，层间结构面易造成应力局部集中，同时软硬岩组合的岩体具备较强弹性能储存条件，在开挖扰动下更易发生脆性弹射破坏，为岩爆孕育提供内在物质基础。综上，N-J水电站TBM隧洞岩爆灾害是构造应力、埋深、双洞开挖扰动、岩性与岩体结构多因素耦合作用的结果；构造应力提供岩爆发生的应力基础，岩性与岩体结构决定岩体自身的岩爆倾向性，隧洞间距等开挖布置条件调控围岩扰动应力大小，埋深仅作为自重应力的表征指标，对岩爆风险的控制作用弱于构造应力与岩体地质条件。

3　N-J水电站TBM隧洞岩爆风险防控

3.1　微震与岩爆活动的相关性分析

大量研究结果表明微震活动与岩爆活动密切相关，微震活动对岩爆敏感是基于微震监测岩爆预警的基础。如，赵周能等[21]通过大量微震监测数据和岩爆实录研究了锦屏Ⅱ级大理岩隧洞微震活动区域与岩爆发生区域的关系，结果表明，微震事件和岩爆呈现区域性集结特点，且岩爆发生在微震丛集区域，为该隧洞岩爆预警提供了支持。Liu等[22]研究了引汉济渭引水隧洞298次不同等级岩爆与微震活动的关系，提出了预警岩爆发生时刻、位置、等级的方法，对岩爆风险管理起到了积极效果。以上研究多是针对单一岩层隧洞，在交互地层条件下岩爆与微震活动是否具有相关性。

图10为N-J水电站引水隧洞TBM696隧洞2016年10月份岩层揭露情况(共掘进296 m，起止桩号为：CH 7+811～CH 7+515)。从图10可以看出，TBM在掘进过程中砂岩、粉砂岩交替出现。图11为TBM掘进期间每日微震事件数和能量变化趋势。对比图10和图11可以看出，当TBM掘进砂岩时，微震事件数较多、微震释放能较高，微震活动性较高，当在粉砂岩掘进时微震事件数和微震释放能均较低，微震活动性较低，具有明显的岩性效应。从微震事件及能量时空分布来看，如图12所示，微震事件在砂岩中或岩性交界面附近聚集，在粉砂岩中多呈离散分布状态。微震事件越集中、能量越高说明该处围岩内部损伤劣化越严重，岩体发生岩爆风险较高。

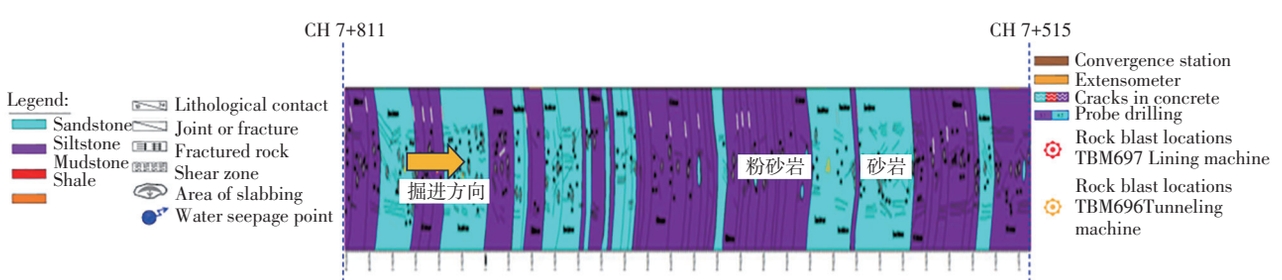


图10　TBM696隧洞岩层揭露状况(2016年10月份)

Fig. 10　Rock stratum exposure of TBM696 tunnel(October 2016)

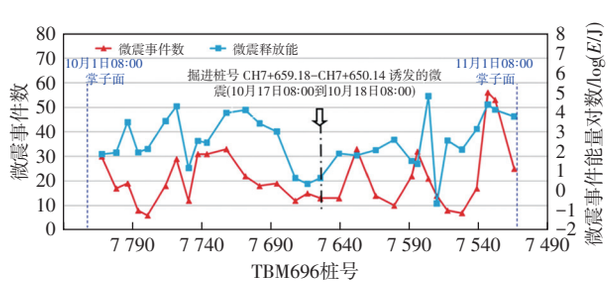


图11　TBM696隧洞微震信息演化规律(2016年10月份)

Fig. 11　Evolution law of microseismic information of TBM696 tunnel(October 2016)

综上，不难看出交互地层下微震活动较强区域意味着岩爆高风险区域，在此地质条件下微震活动与岩爆活动密切相关，微震信息对岩爆风险敏感。因此，微震监测可用于此特殊地质条件下的岩爆风险监测预警。

3.2　基于微震监测信息的岩爆的风险评估方法与效果

冯夏庭院士团队在基于微震监测岩爆预测预警方面做了一系列研究工作，提出了基于微震信息的岩爆定量预警方法，该方法在锦屏二级水电站地下隧洞群[23]、西南某铁路隧洞等重大工程中取得了成功应用[24-25]，目前该方法已写入《水电工程岩爆风险评估技术规范》[26]，详细的岩爆定量预警方法可参见以上研究成果。

岩爆预警结果以日报的形式发送给业主、监理、施工方和其它有关单位，每日上午8点准时发布对两

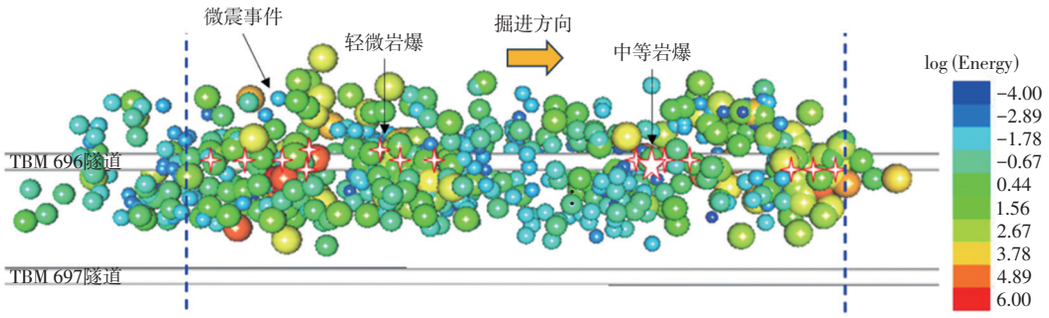


图 12　TBM696 隧洞微震事件时空演化图(2016 年 10 月份)

Fig. 12　Spatial-temporal evolution lay of microseismic events of TBM696 Tunnel (October 2016)

引水隧洞预警日报，以便施工及管理人员做出参考，防控岩爆风险。每月进行一次月度总结并以月报的形式总结岩爆预警效果，动态总结岩爆和微震规律。现场岩爆预测预警效果良好，各等级岩爆风险的预警准确率均达到 80% 以上。本文所指预警吻合，是预警区域内预测岩爆等级与实际发生的岩爆等级保持一致。岩爆微震监测预警的核心目的是提前识别岩爆风险，指导现场主动防控，进而规避岩爆灾害。部分预警发布后，现场及时实施调控措施，最终成功避免岩爆发生。需要说明的是，在预警准确率统计过程中，因预警后采取防控措施处置而未发生岩爆的样本不纳入准确率计算，该类案例既不判定为预警成功，也不判定为预警失败。

图 13 为 TBM696 隧洞 2016 年 11 月、12 月的基于微震监测的岩爆预警结果与实际岩爆情况对比图[27]。从图 13 可以看出，微震事件聚集区域和微震释放能较高区域，岩爆发生的频次和等级较高，岩爆高风险区域与微震较活跃区域具有较高的一致性，现场岩爆预测预警效果良好。采用微震监测后，有力指导了施工建设指导了岩爆防控，两 TBM 隧洞自微震开始监测直至隧洞贯通的整个施工过程中未发生由岩爆造成的严重后果，最大限度地降低了岩爆灾害带来的施工人员伤亡、设备损坏和经济损失，确保该洞段的顺利贯通，确保了施工工期。

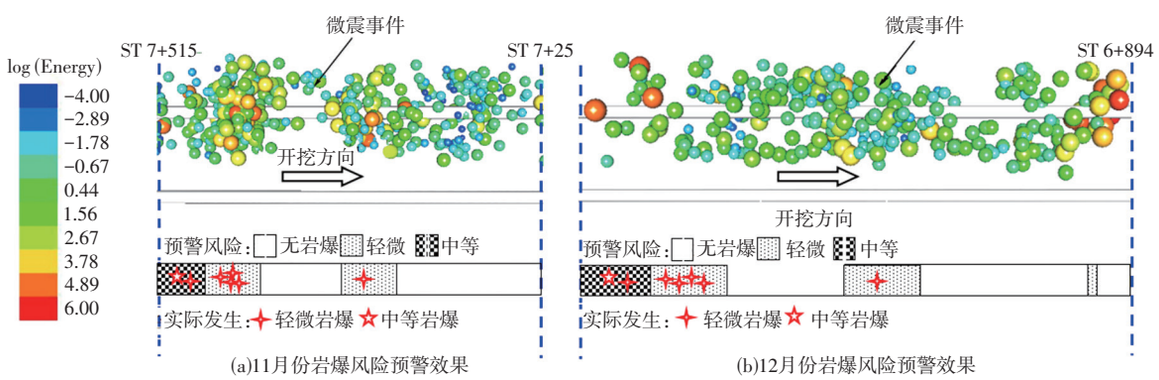


图 13　TBM696 隧洞 2016 年 11 月、12 月份岩爆预警效果图[27]

Fig. 13　The comparation between rockburst warning and actual results of TBM696 tunnel in November and December 2016[27]

3.3　岩爆预警与调控案例

2016 年 8 月 10 日，TBM696 隧洞掘进至桩号 CH 8+309 处，该区域岩性及地质揭露情况如图 14 所示，微震监测系统在此区域运转良好，根据岩爆定量微震预警方法，获取岩爆风险预警区域内用于微震岩爆预警的六个参数，即当日微震事件数、当日微震释放能、当日微震视应力、累积微震事件数、累积微震释放能、累积微震视体积，预警区域如图 15 所示。采用岩爆定量预警方法[25]可知，该区域内发生强烈岩爆的概率为 15.4%、发生中等岩爆的概率为

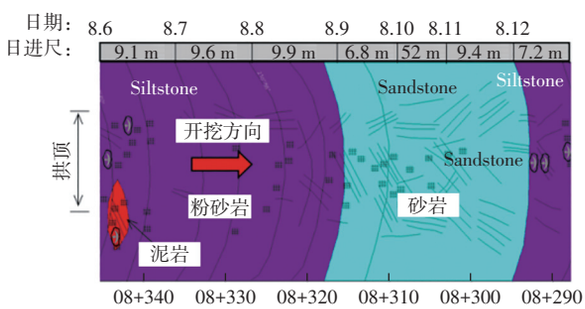


图 14　岩爆风险调控区域岩性及地质揭露信息[27]

Fig. 14　Lithology and geological information of rockburst risk control area[27]

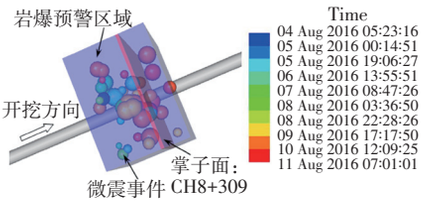
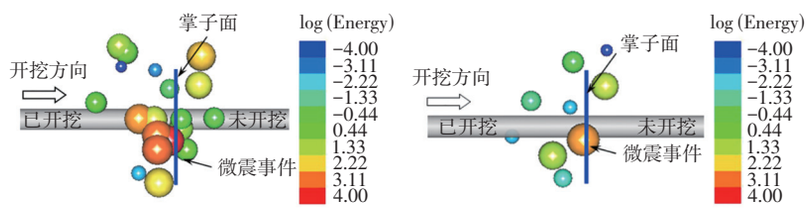


图15　岩爆风险预警区域内微震事件时空分布

Fig. 15　Temporal and spatial distribution of microseismic events in rockburst warning area

56.8%，发生轻微岩爆的概率为17.7%，无岩爆的概率为10.1%，这意味着岩爆风险预警区域内存在中等岩爆风险[27]。

岩爆风险预警后，施工方实施缩短进尺组合水平卸压孔调控措施后(进尺由6.8 m缩短至5.2 m；施工4个水平卸压孔)，岩爆风险预警区域内微震事件数由10日的19个降低至11日的9个、微震释放能由10日的2.39×10^4 J降低至11日的1.21×10^3 J，微震活动性明显降低，调控前后预警区域内微震事件空间分布如图16所示。由于调控措施实施得当，降低了岩爆风险，8月11日掘进过程中未发生岩爆，达到了较好的岩爆防控效果。



(a)调控前当日(10日)微震事件活动空间分布　　(b)调控后当日(11日)微震事件活动空间分布

图16　实施缩短进尺组合水平卸压孔前后当日微震事件活动空间分布

Fig. 16　Spatial distributions of intraday microseismic events before and after the implementation of reducing footage combined horizontal relief holes

4　结论

本文基于大量现场岩爆实录与海量微震监测数据，分析了岩爆的时空分布特征、埋深效应、岩性影响规律，以及不同隧洞间距条件下的岩爆发生特征，探究了微震监测技术应用于N—J水电站引水隧洞岩爆预警的可行性，总结了现场工程应用成效，得到的主要结论如下：

1) 两引水隧洞97%的岩爆发生在掌子面18 m范围内，约为2倍洞径范围内。96%的岩爆发生在TBM掘进期间和停机1 h之内，几乎所有岩爆均属于即时型岩爆。

2) 两引水隧洞岩爆发生频次与埋深不存在单调线性正相关关系，该现象与工程区地应力场以构造应力占主导密切相关。

3) 岩性对岩爆发育具有显著控制作用。百米砂岩(硬岩)岩爆频次为22.4，百米粉砂岩(较软岩)岩爆频次为2.7，泥岩中未发生岩爆。砂岩内中等及以上等级岩爆的频次显著高于粉砂岩，约为后者的6倍。

4) 两平行隧洞间距由原来的33 m扩大至55.48 m，显著降低了岩爆的发生频次和等级。

5) 微震监测数据对地层及岩爆风险敏感，微震监测岩爆预警取得了显著的应用效果、微震监测可用于复杂地质条件下岩爆监测、预警。研究成果为类似工程提供了参考。

参　考　文　献

[1] Ortlepp W D, Stacey T R. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(1): 59-65.

[2] 李鹏翔，彭剑平，张博超，等. 一种新的岩爆等级评估指标及其在某超埋深矿井中的应用[J]. 金属矿山，2024，53(1)：191-196.
Li Pengxiang, Peng Jianping, Zhang Bochao, et al. A novel rockburst proneness criterion and its application in an over buried mine[J]. Metal Mine, 2024, 53(1): 191-196.

[3] Feng Xiating. Rockburst: mechanism, monitoring, warning and mitigation[M]. New York: Elsevier-Health Sciences Division, 2017.

[4] Li Pengxiang, Feng Xiating, Feng Guangliang, et al. Rockburst and microseismic characteristics around lithological interfaces under different excavation directions in deep tunnels[J]. Engineering Geology, 2019, 260: 105209. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105209.

[5] Lu Chunfang, Cai Chaoxun. Challenges and countermeasures for construction safety during the Sichuan-Tibet railway project[J]. Engineering, 2019, 5(5): 833-838.

[6] 蒋邦友. 深部复合地层隧洞TBM施工岩爆孕育及控制机理研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2017.
Jiang Bangyou. Evolution and control mechanism of rockburst induced by TBM excavation in deep mixed ground tunnel[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.

[7] 尚彦军，蒋毅，魏思宇，等. 不同厚度比复合地层人工制样三

轴压缩实验及数值模拟结果对比[J]. 新疆地质, 2021, 39(2): 312-318.
Shang Yanjun, Jiang Yi, Wei Siyu, et al. Comparison of tiaxial test and numerical simulation results of mixed ground with different thickness ratio[J]. Xinjiang Geology, 2021, 39(2): 312-318.

[8] 周辉, 宋明, 张传庆, 等. 水平层状复合岩体变形破坏特征的围压效应研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 465-473.
Zhou Hui, Song Ming, Zhang Chuanqing, et al. Effect of confining pressure on mechanical properties of horizontal layered composite rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 465-473.

[9] 蒋毅. 深部复合地层力学特性及其对TBM施工影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
Jiang Yi. Study on mechanical properties of deep composite strata and its influence on TBM construction[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.

[10] 黄锋, 周洋, 李天勇, 等. 软硬互层岩体力学特性及破坏形态的室内试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(增刊1): 230-238.
Huang Feng, Zhou Yang, Li Tianyong, et al. Laboratory experimental study on mechanical properties and failure modes of soft and hard interbedded rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 230-238.

[11] 丁恩理, 刘越, 吴继敏, 等. 软硬互层状类岩石试样力学特性的三轴试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊1): 39-46.
Ding Enli, Liu Yue, Wu Jimin, et al. Triaxial test study on the mechanical properties of soft-hard interbedded rocklike specimens[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S1): 39-46.

[12] 史林肯, 周辉, 宋明, 等. 深部复合地层TBM开挖扰动模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 1933-1943.
Shi Linken, Zhou Hui, Song Ming, et al. Physical experimental study on excavation disturbance of TBM in deep composite strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 1933-1943.

[13] 程建龙, 杨圣奇, 杜立坤, 等. 复合地层中双护盾TBM与围岩相互作用机制三维数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 511-523.
Cheng Jianlong, Yang Shengqi, Du Likun, et al. Three-dimensional numerical simulation study on interaction mechanism between double-shield TBM and surrounding rock in composite strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 511-523.

[14] Xiao Yaxun, Feng Xiating, Hudson J A, et al. ISRM suggested method for in situ microseismic monitoring of the fracturing process in rock masses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(1): 343-369.

[15] Martin C D. Seventeenth Canadian geotechnical colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(5): 698-725.

[16] 赵周能, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 深埋隧洞微震活动区与岩爆的相关性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 491-497.
Zhao Zhouneng, Feng Xiating, Chen Bingrui, et al. Study of relativity between rockburst and microseismic activity zone in deep tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 491-497.

[17] Feng Guangliang, Chen Bingrui, Jiang Quan, et al. Excavation-induced microseismicity and rockburst occurrence: similarities and differences between deep parallel tunnels with alternating soft-hard strata[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(2): 582-594.

[18] 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): 1324-1329.
Gu Mingcheng, He Faliang, Chen Chengzong. Study on rockburst in Qingling tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1324-1329.

[19] 王文星, 潘长良. 现场岩爆发生条件探讨[J]. 西部探矿工程, 2002, 14(1): 54-56.
Wang Wenxing, Pan Changliang. Conditions of in-situ rockburst[J]. West-China Exploration Engineering, 2002, 14(1): 54-56.

[20] Li Pengxiang, Chen Bingrui, Xiao Yaxun, et al. Rockburst and microseismic activity in a lagging tunnel as the spacing between twin TBM excavated tunnels changes: a case from the Neelum-Jhelum hydropower project[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 132: 104884. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104884.

[21] 赵周能, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 深埋隧洞微震活动区与岩爆的相关性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 491-497.
Zhao Zhouneng, Feng Xiating, Chen Bingrui, et al. Study of relativity between rockburst and microseismic activity zone in deep tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 491-497.

[22] Liu Fei, Tang Chunan, Zhang Yongjun, et al. Rockburst and microseismicity characteristics in the Qinling water conveyance tunnel of the Hanjiang-to-Weihe River Diversion Project[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 148: 104973. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104973.

[23] Feng Guangliang, Feng Xiating, Chen Bingrui, et al. A microseismic method for dynamic warning of rockburst development processes in tunnels[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(5): 2061-2076.

[24] 李桐, 冯夏庭, 王睿, 等. 深埋隧道岩爆位置偏转及其微震活动特征[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2847-2854.
Li Tong, Feng Xiating, Wang Rui, et al. Characteristics of rockburst location deflection and its microseismic activities in a deep tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7): 2847-2854.

[25] 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. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.104135.

[26] NB/T 10143—2019 水电工程岩爆风险评估技术规范[S].
NB/T 10143—2019 Rockburst risk assessment of hydropower projects[S].

[27] Li Pengxiang, Zhao Jinshuai, Bu Wankui, et al. Optimization of rockburst risk control measures for deeply buried TBM tunnels: a case study[J]. Buildings, 2023, 13(6): 1440. DOI: 10.3390/buildings13061440.