

# 某高地应力高原深埋隧道岩爆预测

傅鹤林<sup>1</sup> 曹桂乾<sup>1\*</sup> 胡凯巽<sup>1</sup> 常小兵<sup>1</sup> 李鲇<sup>2</sup> 李均<sup>3</sup>

1. 中南大学土木工程学院 湖南长沙 410075

2. 华东交通大学土木建筑学院 江西南昌 330013

3. 中交第二公路工程局有限公司 陕西西安 710061

**摘要:** 高地应力深埋隧道开挖建设过程中面临严重的岩爆灾害风险, 准确预测岩爆等级和分布是岩爆防控的关键。依托某在建高原深埋超长隧道, 采用数值反演等手段分析隧址区地应力场分布特征, 结合花岗岩压缩试验和声发射监测, 探究隧道深埋花岗岩的力学特性、破坏特征和能量演化规律, 提出  $W_{hp}$  判据开展隧道岩爆预测。结果表明: 隧址区构造应力方向为 NNE~NEE, 最大水平主应力方向为 N42°~54°E, 三向主应力整体呈  $\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$  的规律, 隧道轴线最大主应力值超 50 MPa; 不同压缩条件下, 深埋花岗岩展现出应变型岩爆、板裂屈曲型岩爆等不同破坏形式, 并表现出高强度、高储能、高脆性特点, 具备强烈岩爆发生的岩性条件; 岩爆发生前声发射活动存在平静期, 岩石趋近失稳破坏时声发射振铃计数和能量突然激增,  $b$  值急剧下降, 可视作岩爆发生的前兆特征; 提出同时反映岩爆可能性和危害性的  $W_{hp}$  判据, 通过既有岩爆案例验证了其准确性和适用性, 预测准确率超 90%; 在此基础上开展隧道岩爆预测, 发现隧道 1#斜井工区的多个正线段落存在中等岩爆和强烈岩爆风险, 现场施工时需进行严加防控。研究成果为高原深埋隧道岩爆预测及防控提供了参考。

**关键词:** 高原深埋隧道; 地应力场; 声发射; 花岗岩; 岩爆预测

中图分类号: U25

收稿日期: 2025-9-12

## Rockburst Prediction of Deeply Buried Tunnel Under High In-situ Stress in Plateau Region

Fu Helin<sup>1</sup>, Cao Guiqian<sup>1\*</sup>, Hu Kaixun<sup>1</sup>, Chang Xiaobing<sup>1</sup>, Li Jie<sup>2</sup>, Li Jun<sup>3</sup>

1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China

2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China

3. CCCC Second Highway Engineering Bureau Co., Ltd, Xi'an 710061, China

**Abstract:** Deeply buried tunnels in high in-situ stress environments are exposed to severe rockburst hazards during excavation, and accurate prediction of rockburst grade and distribution is crucial for effective rockburst prevention and control. Taking an under-construction ultra-long deeply buried plateau tunnel as the engineering background, numerical inversion and other methods were employed to analyze the in-situ stress field distribution in the tunnel site area. Combined with granite compression tests and acoustic emission (AE) monitoring, the mechanical behavior, failure characteristics, and energy evolution of deeply buried granite are examined, and  $W_{hp}$  criterion is proposed for tunnel rockburst prediction. The results indicate that the tectonic stress orientation in the tunnel area ranges from NNE to NEE, with the maximum horizontal principal stress oriented N42°–54°E. The three principal

基金项目: 中国交通建设集团有限公司“揭榜挂帅”科技攻关项目(No.X0011007-JSFW-2024-0001); 国家自然科学基金(No.52478424)。

作者简介: 傅鹤林(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地下工程灾害防治研究, ORCID: 0000-0002-7967-0896. E-mail: fu.h.l@csu.edu.cn

\*通信作者: 曹桂乾(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事地下工程灾害防治研究, ORCID: 0009-0008-7890-9667. E-mail: guiqiancao@csu.edu.cn

stresses generally follow the relationship  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ , and the maximum principal stress along the tunnel axis exceeds 50 MPa. Under different compression conditions, the deeply buried granite exhibits various failure modes, including strain rockburst and slab buckling rockburst, and is characterized by high strength, high energy storage capacity, and pronounced brittleness, providing favorable lithological conditions for strong rockburst. AE activity shows a distinct quiescent period prior to rockburst; as the rock approaches instability and failure, AE ringing counts and energy increase abruptly, while the  $b$ -value drops sharply, which can be regarded as precursory indicators of impending rockburst. A  $W_{hp}$  criterion that simultaneously reflects both the likelihood and potential severity of rockburst is proposed and validated against documented rockburst cases, yielding a prediction accuracy exceeding 90%. On this basis, rockburst prediction is carried out for the tunnel, revealing moderate and strong rockburst risks in several mainline sections within the No. 1 inclined shaft construction area, where stringent prevention and control measures are required during excavation. The findings provide a useful reference for rockburst prediction and mitigation in deeply buried tunnels in plateau regions.

**Keywords:** plateau deeply buried tunnel; in-situ stress field; acoustic emission; granite; rockburst prediction

## 引言

为满足人民日益增长的美好生活需求和国家战略发展需要,越来越多的深埋隧道工程向中西部高原山区发展,其沿线复杂的工程地质条件给隧道施工建设带来极大的挑战(田四明等, 2021; He *et al.* 2021; Zhao *et al.*, 2025)。受深部复杂地质环境影响,深埋隧道围岩失稳灾变问题凸显,如高地应力条件下,岩爆灾害严重影响施工安全和工程进度(陈湘生等, 2024)。以 CZ 铁路为例,其沿线地形地貌剧烈起伏,地层岩性复杂多变,深大活动断裂分布广泛,内外地质作用活跃,多场环境耦合作用强烈,具有高海拔、高地应力、高地震烈度等特点。受极端复杂的地质环境及强烈的工程扰动影响,CZ 铁路深埋隧道建设过程中岩爆灾害突出,严重威胁生命财产安全,给施工建设带来极大挑战(赵勇等, 2021; 郭长宝等, 2021)。

岩爆的发生与地应力和围岩岩性密切相关(冯夏庭等, 2019; 严健等, 2019; Zhang *et al.*, 2025)。高地应力环境是造成深埋隧道岩爆灾害的关键因素之一,明晰隧址区地应力分布特征对岩爆预测和防控至关重要(Ma *et al.*, 2015; Xiao *et al.*, 2023; 曹伟等, 2024)。目前常用的隧址区地应力测量方法主要有水压致裂法(Liu *et al.*, 2023)、应力解除法(齐消寒和张东明, 2018)等,现场实测虽然能够较为准确地测得当前钻孔的地应力大小和方向,但仅能反映局部应力情况,且在隧道全线范围内密集开展地应力钻孔测试工作显然不现实,故很难体现出隧址区地应力场的宏观规律。张宁等(2022)结合现代构造应力场应力分区和实测地应力数据,分析了青藏高原东南区域的地应力场分布规律和方向特征。陈贤丰等(2024)采用三维数值反演技术分析西南地区某特

长深埋隧道的地应力场分布规律,获取了隧道的轴向地应力特征。Fu *et al.*(2023)通过分析区域构造特征,建立了精细化三维数值模型,并采用支持向量回归分析确定了中国西南区域某深埋岩爆隧道的地应力场,在此基础上划分了隧道岩爆易发区段和相应等级。综上所述,地应力反演已成为研究地应力场分布特征的重要手段,但精细化的三维数值模型、准确的反演分析方法和边界条件仍是需要关注的问题。

围岩的物理力学特性同样是影响岩爆发生的一个重要因素,深埋隧道硬质岩区段往往是岩爆的高风险易发区域。岩爆是围岩内部裂隙在高应力作用下迅速发育、扩展、贯通,最终导致外部围岩脱离母体并发生弹射的现象,此过程伴随着声发射现象(Liu *et al.*, 2025)。声发射技术被广泛用于岩石损伤破坏过程的监测分析,以探究岩爆发生的内在机制和前兆特征。张国凯等(2017)分析了单轴压缩下花岗岩裂纹扩展不同阶段的声发射演化及波形传播特征,对花岗岩岩爆过程的声发射事件时空及幅值演化分布规律进行了讨论。祁浩等(2024)发现花岗岩岩爆过程中,声发射振铃计数多重分形谱形态随应力增加呈“宽-窄-宽”和先降后增的变化趋势。赵菲等(2024)、马永安等(2025)均采用声发射对岩爆过程进行监测和分析。此外,目前的岩爆判据较多,主要包括强度指标、能量指标、脆性指标和刚度指标等(Gong *et al.*, 2020),但不同隧道的工程地质情况不同,各岩爆判据的适用性也存在差异,更适用的岩爆判据是准确预测隧道岩爆等级和分布的关键。

某在建高原深埋超长隧道存在极高的岩爆灾害风险,部分段落面临强烈岩爆威胁,严重影响现场施工安全和工期进度。本文结合地质构造情况和三

维精细化建模，反演分析高原深埋隧道所在区域的地应力场分布特征，并采用声发射监测分析深埋花岗岩试样压缩破坏过程的力学特性、破坏特征和能量演化规律，在此基础上提出  $W_{hp}$  岩爆判据并开展隧道岩爆预测，以期在现场岩爆防控提供参考。

## 1 工程地质条件

### 1.1 地质背景

本文依托西部高原某超长深埋铁路隧道展开研究，该隧道走行于藏南三江流域念青唐古拉山东段高山峡谷地区，其特殊的构造特征使隧址区成为构造运动极活跃、构造形迹极丰富、构造序列极复杂的地区之一。受亚欧板块和印度洋板块挤压造山运动影响，全区域仍作整体抬升、斜掀和差异性的上升运动，形成了隧址区的高原地形。晚新生代以来，印度板块向北推挤导致该地区活动块体向南东方向挤出，继存和形成了一系列活动强烈的大型走滑、逆冲型断裂带，如怒江断裂带。隧址区受板块运动和断裂相互作用的影响，区内构造运动强烈且复杂，构造变形具有多层次、多机制、多尺度的特点，对隧址区域地应力场特征产生了重要影响。如图 1 和图 2 所示。隧址区内地形地貌受地质构造与岩性的控制，山脉总体走向与构造迹线基本一致，总体走向为南东向。隧址区海拔 3 400~5 400 m，相对高差约 2 000 m，隧道洞身穿越十多条高山峡谷，地形起伏较大。

### 1.2 工程概况

该超长深埋铁路隧道全长超 29 km，最大埋深约 1 600 m。隧道洞身涉及地层岩性主要为石炭-二叠系来姑组板岩夹变砂岩 ( $C_2P_{1l}^{Sl+mSs}$ )，二叠系上统西马组板岩夹变砂岩夹灰岩 ( $P_3x^{Sl+mSs+Ls}$ )，燕山期二长花岗岩 ( $\eta\gamma_5^3$ )、花岗闪长岩 ( $\gamma\delta_5^3$ )、闪长玢岩岩脉 ( $\delta\mu_5^3$ ) 等，隧道沿线断裂发育，隧道洞身及辅助坑道共通过 6 条区域断裂及 2 条支断层，并通过 1 处向斜，如图 3 所示，断层情况详见表 1。由于该隧

道里程较长，且围岩条件各异，综合考虑工期进度、施工条件和工程造价等因素，将该隧道划分为两个区段进行施工，分别为 DK1 012+572~DK1 027+727 区段和 DK1 027+727~DK1 041+665 区段。本文主要聚焦于隧道 1# 斜井工区的正线区段展开研究，即 DK1 027+727~DK1 035+310 区段，该区段采用钻爆法进行施工，洞身以燕山期花岗岩为主，整体呈 III 级围岩，一半以上的施工段落埋深在 1 400 m 左右，在高地应力作用下存在较大的岩爆灾害风险，是该隧道施工的重点管控区域。

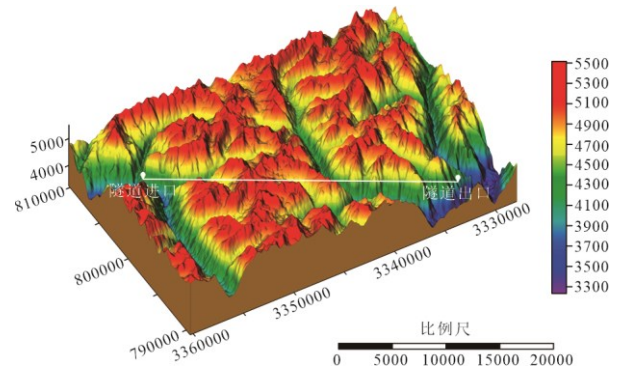


图 1 真三维地形下隧道走向情况

Fig. 1 Tunnel alignment in a true three-dimensional terrain

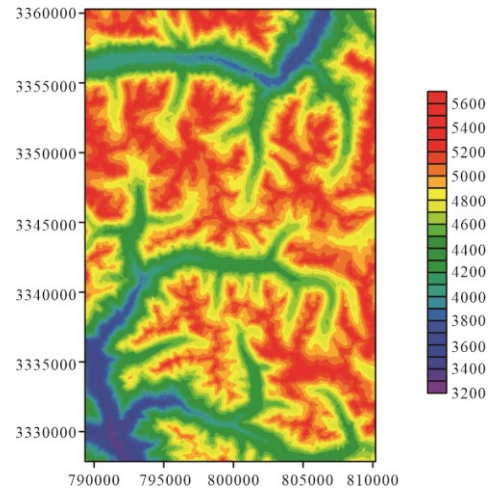


图 2 隧址区等高线地形图

Fig. 2 Contour map of the tunnel site area

表 1 隧道正线通过断裂构造情况

Table 1 Description of the tunnel's mainline passing through fault structures

断层编号	断层性质	断层产状	断层破碎带宽/m	与洞身相交里程	断层物质	与隧道交角
F1	正断层	N58W/84N	60	DK1 012+850~DK1 012+910	断层角砾、少量断层泥	62°
F2	逆断层	N48W/72S	60	DK1 015+750~DK1 015+810	断层角砾	76°
F3	逆断层	N36W/30N	120	DK1 017+280~DK1 017+480	断层角砾	90°
F4	压扭性断裂	N38W/68N	60~260	DK1 027+930~DK1 028+170	断层角砾	85°
f5-1	逆断层	N53W/55S	80~150	DK1 030+580~DK1 030+720	压碎岩、断层角砾	80°
F5	压扭性断裂	N28W/75S	100~200	DK1 035+735~DK1 035+945	压碎岩、断层角砾	68°
f6-1	逆断层	N50W/70N	20~500	DK1 038+010~DK1 038+390	断层角砾、透镜状岩块	90°
F6	逆断层	N39W/73N	50~200	DK1 040+075~DK1 040+275	断层角砾、透镜状岩块	78°

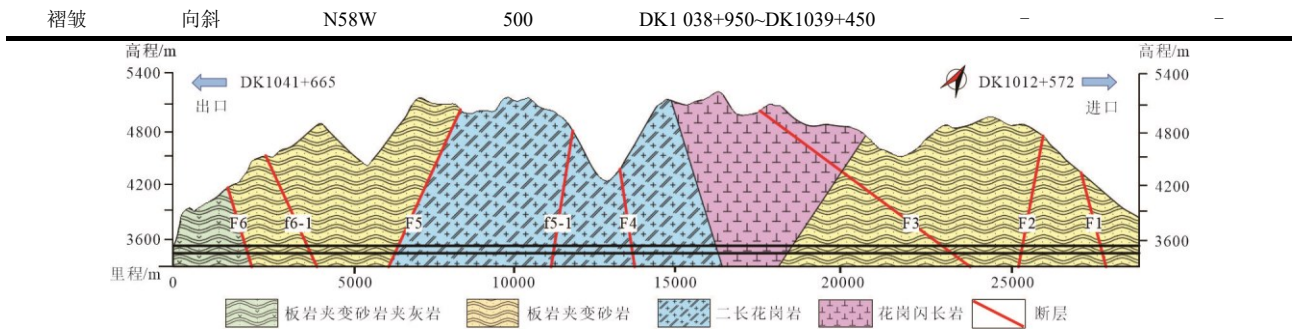


图3 隧道纵面段地质情况

Fig. 3 Geological profile of the tunnel longitudinal section

## 2. 地应力场分布特征

本文基于 Helmholtz Center Potsdam 收集汇编的全球构造应力分布图(Heidbach *et al.*, 2018), 对隧道所在区域 (60°E~115°E, 16°N~38°N) 进行绘制, 如图 4 所示。隧址区域现代构造应力场以水平作用为主, 构造应力类型以走滑为主。现今水平最大主应力走向以青藏高原为中心呈辐射状分布, 整体方向为 NNE~SSW, 总体趋势表现为西高东低。从图 4 可以看出, 在青藏高原北部、东部地区, 构造应力

场的最大主应力方向从 NNE~SSW 变化至 NNW~SSE。在青藏高原南部地区, 地壳上部的现代构造应力表现为近 EW 方向拉张的正应力状态。在帕米尔地区, 现代构造应力场的最大主应力方向为近 NS, 应力类型以挤压为主。受印度板块向北推挤、碰撞影响, 隧道所在的青藏高原东南区域最大水平主应力方向表现为 NNE~SSW 或 NEE~SWW, 应力类型以逆断层压应力和走滑剪切应力为主, 区域大量分布有走滑断层和逆冲断层。

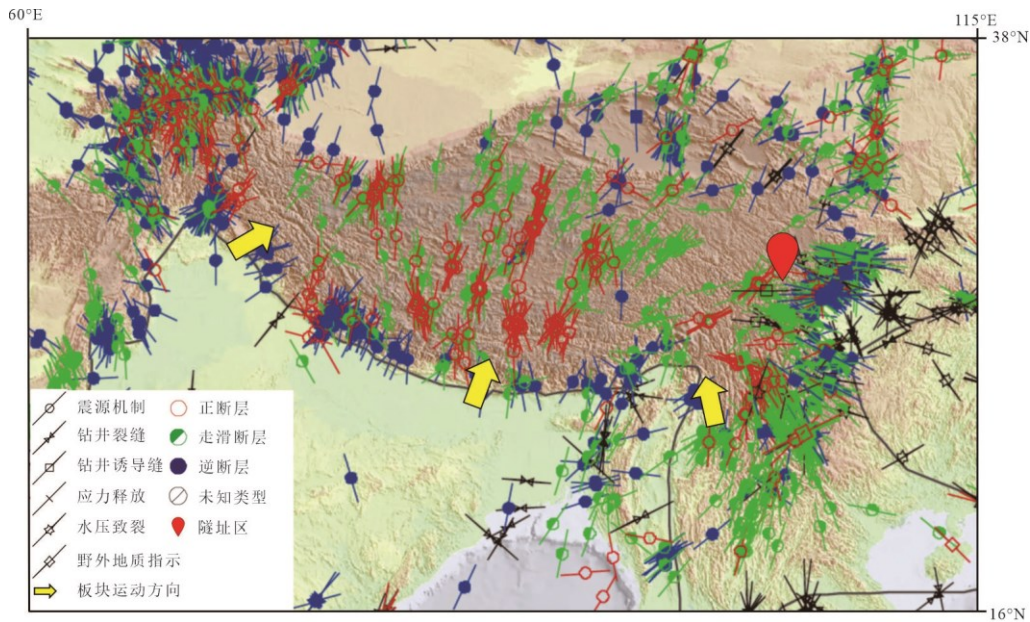


图4 最大水平主应力  $\sigma_H$  分布图 (World Stress Map 2016)

Fig. 4 Distribution map of the maximum horizontal principal stress  $\sigma_H$  (World Stress Map 2016)

隧址区地应力场反演分析流程如图 5 所示。主要步骤如下:

(1) 依据工程地勘报告, 结合 DEM 数据, 采用有限元软件建立研究区域可反映真实地表特征的三维精细化数值模型, 断层分布和围岩参数参考地质勘察资料进行设置, 如图 6 所示。模型长 30 km, 宽 5 km, 地表自由面的高度为各点的海拔高程, 海拔最高点 5 350 m, 网格划分中采用混合网格生成器

生成模型单元, 单元尺寸为 0.2 km。模型中节点总数 48 215, 单元数 75 836。

(2) 综合考虑水压致裂法的测试原理和地质力学分析结果, 明确影响隧址区初始地应力场所形成的边界条件。由于水压致裂法假设地层三向主应力之一为自重应力, 另外两个为水平主应力。故仅选取沿 X 轴方向的挤压构造运动、沿 Y 轴方向的挤压构造运动、水平面内的剪切构造运动和自重应力作

为模拟岩层自重和构造力作用的基本因素。即在 X 轴和 Y 轴方向分别施加梯形荷载，在模型侧面施加位移边界，模型底面施加位移约束，同时根据围岩的实测重度，施加自重重力场。

(3) 采用 MIDAS GTS NX 软件计算不同边界条件下已知测点的应力值，并采用多元逐步线性回归与最小二乘法相结合的方法构建计算应力值与实测应力数据之间的回归方程，建立反演回归模型。地应力回归计算值的多元线性回归方程如式(1)所示(张强勇等, 2015)。

$$\sigma_{jk} = \sum_{i=1}^n \beta_i \sigma_{jk}^i \quad (1)$$

式中： $\sigma_{jk}$  为第  $k$  点的第  $j$  个应力的回归计算值； $\beta_i$  为各因素对应的待定回归系数； $\sigma_{jk}^i$  为第  $k$  个测点在第  $i$  个边界荷载作用下计算得到的第  $j$  个应力分量。

当有  $m$  个地应力实测值时，最小二乘法的残差平方和如式(2)所示。

$$S_c = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \left( \sum_{i=1}^n \beta_i \sigma_{jk}^i - \sigma_{jk}^* \right)^2 \quad (2)$$

式中： $\sigma_{jk}^*$  为第  $k$  个测点第  $j$  个应力分量的实测值。

为使残差平方和  $S_c$  最小，则需满足式(3)。

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^1)^2 & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^1 \sigma_{jk}^2 & \dots & \dots & \dots \\ & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^2)^2 & \dots & \dots & \dots \\ & & \ddots & & \dots \\ \text{对称} & & & & \dots \\ & & & & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^n)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^1 \sigma_{jk}^* \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^2 \sigma_{jk}^* \\ \vdots \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^n \sigma_{jk}^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据上式求得  $\beta_i$  后，将其分别乘以地应力场有限元计算结果，再利用叠加原理，便得到最终反演的地应力场。

(4) 通过多重共线性检验、逐步筛选和误差检验，剔除人为或环境因素造成的异常测试数据，增加模型回归精度。

通过上述流程，隧址区的初始地应力场回归方程见式(4)。

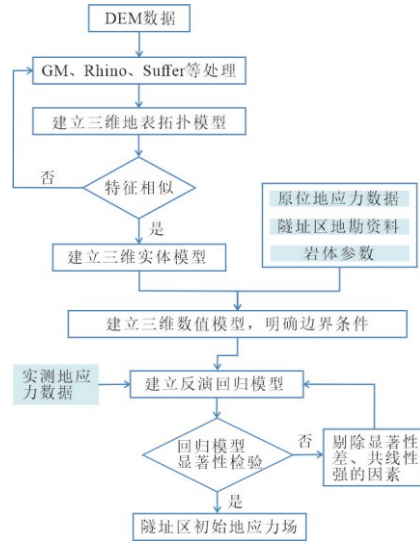


图5 隧址区地应力场反演分析流程

Fig. 5 Inversion analysis process of in-situ stress field in the tunnel site area

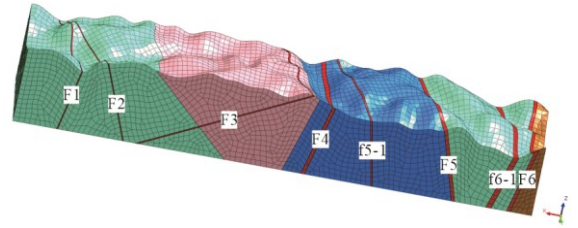


图6 隧址区三维精细化数值模型

Fig. 6 Three dimensional refined numerical model of tunnel area

$$\begin{aligned} \sigma_k = & -3.2493\sigma_{k1} - 6.1124\sigma_{k2} \\ & + 0.8324\sigma_{k3} + 2.3369\sigma_{k4} \\ & - 25.5982\sigma_{k5} + 21.7162\sigma_{k6} + 0.9283 \end{aligned} \quad (4)$$

结合有限元数值模拟，绘制隧址区地应力场分布情况如图 7 所示。隧址区构造应力方向为 NNE~NEE，三向主应力值随着深度的增加而增大，整体上呈现  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$  的规律。隧址区初始地应力场最大水平主应力占据主导地位，最大水平主应力方向为 N42°~54°E，钻孔实测最大水平主应力范

围为 4.23~40.82 MPa，反演得到的最大水平主应力值为 6.21~48.63 MPa。埋深较小时，最大主应力为水平主应力，反映了较强的现今水平构造应力作用；主应力值随隧道埋深加大而逐渐增加，且隧道穿越区域的地势变化较大，在沟谷出现较为明显的应力集中现象，部分区域受地形、岩体性质等因素影响表现为局部应力场。隧道轴线最大主应力值范围约 22.3 ~ 57.3 MPa，主应力最大值出现在里程 DK1033+500 附近，最小主应力为 8.23~21.8 MPa，中间主应力为 12.6~25.0 MPa。

此外，再次采用水压致裂法在施工现场测试地应力，测得埋深 1 400 m 的隧道 DK1 032+070 处最大水平应力为 43~45 MPa，最小水平应力为 30 MPa 左右，竖向应力约 36 MPa。根据裂缝方向的测定，求得最大水平主应力方位分别为 N58°E。此处地应力反演结果分别为最大水平主应力 45.79 MPa，最小水平主应力 26.35 MPa，竖向应力 36.18 MPa，最大水平主应力方向主要为 N53°E，地应力反演结果与实测结果基本相符。

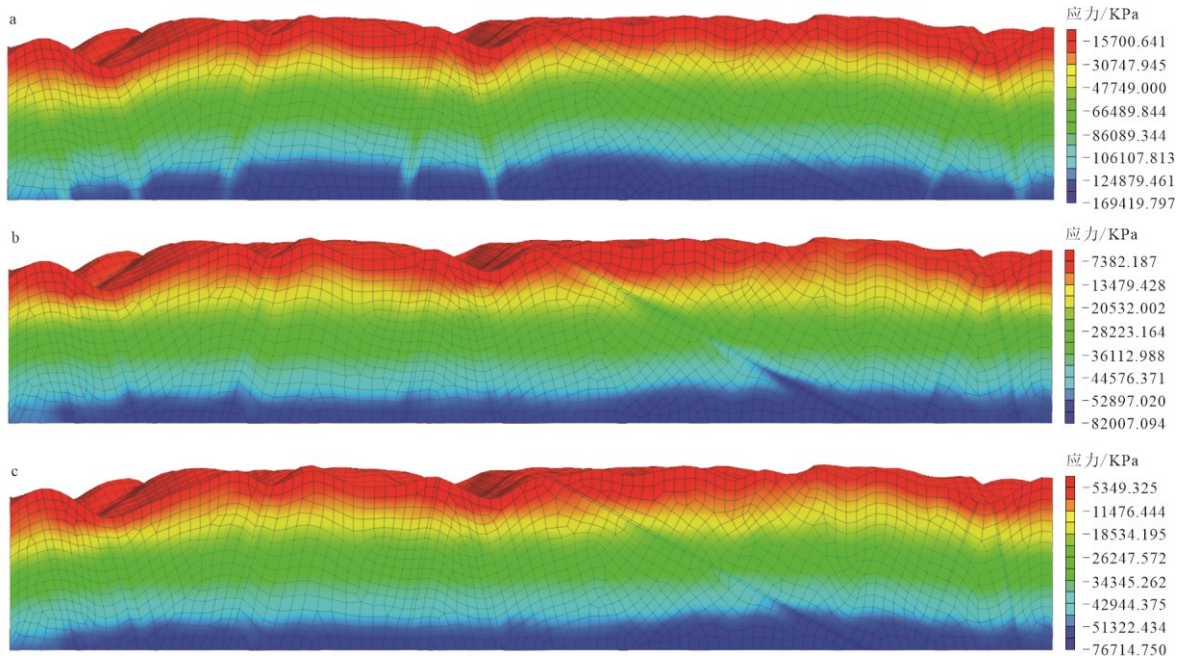


图 7 隧道纵断面主应力分布云图

Fig. 7 Cloud map of principal stress distribution in the longitudinal section of the tunnel

a.最大主应力  $\sigma_1$ ; b.中间主应力  $\sigma_2$ ; c.最小主应力  $\sigma_3$

### 3 隧道深埋花岗岩特性研究

为探究该隧道岩爆与围岩性质之间的关系，本文对取自隧道现场的花岗岩试样开展室内压缩试验和声发射监测，模拟隧道围岩的典型岩爆情形，分析深埋花岗岩试样在不同压缩条件下的力学特性、破坏特征和能量演化规律，探究隧道岩爆发生的前兆特征与内在因素。

#### 3.1 试件制备与试验设备

本文所用岩石试样均按照国际岩石力学学会相关标准，在隧道 DK1 032 附近埋深 1 400 m 处现场钻孔取芯获得，在剔除存在明显裂隙等异常岩芯后，将其加工打磨成直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱体，为避免加载过程中由于不均匀接触造成的应力集中，试样两端磨平误差小于 0.02 mm，上下断面平行且垂直于试样中轴线，角度偏差小于 0.25°，保证

试样尺寸误差、平整度及端面垂直度均满足要求。试样照片及矿物组成如图 8 所示。

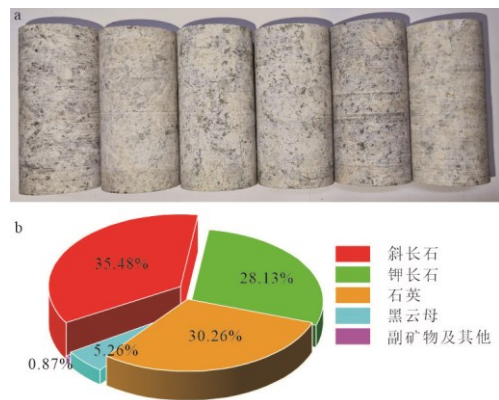


图 8 隧道岩样及矿物组成

Fig. 8 Rock sample of the tunnel and mineral composition

a.隧道深埋硬质花岗岩试样; b.花岗岩矿物组成

岩石单轴压缩及单轴增幅循环加卸载试验采用 WHY-3000Z 微机控制压力试验机进行, 三轴压缩试验则采用 TAW-2000 型岩石三轴试验机开展, 如图 9 所示。试验开始前, 对岩样预施加 1 kN 的荷载以稳定试样, 然后以 0.1 mm/min 的速率加载至试样完全破坏, 获得岩样的应力-应变曲线。此外, 采用 DSB-8B 型全信息声发射信号采集系统对整个压缩过程进行声发射监测, 采样信号范围为 $\pm 10$  V, 前置放大器的增益幅度为 40 dB, 噪声信号过滤门阀阈值设为 100 mV。参考陈娜等(2022)的声发射布设方案, 在本文试验过程中, 声发射监测采用 2 个探头在试样 1/3 处进行对称布置; 为减少声发射信号的衰减, 在单轴压缩和单轴增幅循环加卸载试验中, 传感器通过信号转换器与岩样连接, 传感器和信号转换器之间涂抹耦合剂; 三轴试验时, 由于试验设备空间限制, 故将传感器的检测面抹上一层耦合剂紧贴在试件表面, 并用胶带进行固定。



图 9 试验仪器

Fig. 9 Testing equipment

a. 单轴压缩声发射试验系统; b. 三轴压缩声发射试验系统

### 3.2 单轴压缩条件下深埋花岗岩力学性能及声发射特征

隧址区深埋硬质岩在单轴压缩条件下的应力-应变曲线如图 10 所示。由图 10 可知, 花岗岩的单轴抗压强度约 110 MPa, 加载至破坏过程大致经历了三个时期: 压密及弹性发展期 (I)、颗粒弹射及表层剥落期 (II) 以及失稳破坏及爆裂崩解期 (III)。初始加载期, 岩石主要以弹性变形为主, 内部微裂隙 (孔) 被逐渐压密, 并没有明显的破坏出现, 声

发射事件数较少, 呈平静期。随着轴向荷载的不断增大, 岩石表面逐渐出现颗粒弹射现象, 且弹射的颗粒粒径逐渐变大, 之后岩石表面有贯通裂纹产生, 并伴随片状岩块剥落, 这意味着岩石内部裂纹在不断发育、扩展、贯通, 应变速率逐渐加快; 该时期 (II) 声发射活动明显, 振铃计数开始密集出现, 但数值不大, 此时岩石尚未发生崩裂破坏。随着轴向荷载逼近花岗岩的峰值应力, 岩石裂隙快速贯通, 内部结构发生破坏, 岩石出现明显的贯通裂纹或宏观断裂面, 之后岩石发生突然性爆裂和碎裂, 大量岩块和颗粒向周围高速弹射, 并伴有较大的清脆爆裂声, 岩石失稳破坏并产生岩爆现象。岩样表面出现明显的 V 型爆坑, 爆块以块状和片状为主, 并夹杂着大量的细小颗粒和粉末状碎片, 这是岩石在峰值强度下发生张剪破坏造成的。如图 11 所示, 破坏后的试样呈现出斜向剪切裂纹 (倾角约  $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ) 与轴向劈裂裂纹共生现象, 反映了花岗岩在单轴应力下的典型脆性特征。达到应力峰值后, 岩石失稳破坏并发生爆裂崩解, 声发射活动强烈, 振铃计数迅速密集增加, 岩石发生岩爆破坏时的最大振铃计数为 30 808。

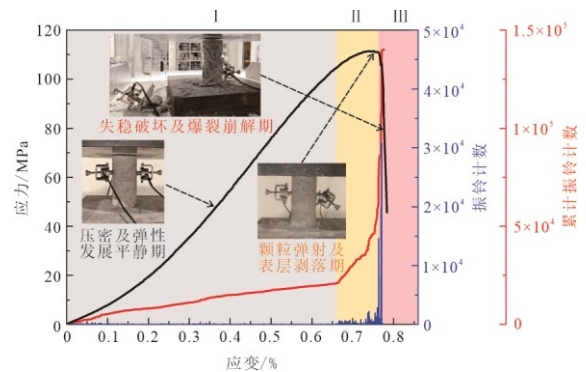


图 10 花岗岩单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 10 Uniaxial compression stress-strain curve for granite diorite



图 11 花岗岩单轴压缩破坏情况

Fig. 11 Failure behavior of granite diorite under uniaxial

compression

### 3.3 单轴增幅循环加卸载条件下深埋花岗岩力学性能及声发射特征

隧道施工过程中, 掌子面附近岩体往往会经历多次加载和卸载过程, 在室内试验中, 循环加卸载试验能够近似反映岩石的这种工程状态。单轴增幅循环加卸载条件下花岗岩的应力-应变曲线及声发射振铃计数变化情况如图 12 所示。从图 12 可以看出, 单轴增幅循环加卸载条件下, 花岗岩同样经历了压密及弹性发展(I)、颗粒弹射及表层剥落(II)和失稳破坏及爆裂崩解(III)三个时期。与单轴压缩相比, 单轴增幅循环加卸载作用下, 岩石的轴向应变明显增加, 但峰值应力与单轴压缩条件下并没有明显的变化。此外, 每轮加卸载过程中, 上一阶段卸载曲线与下一阶段的加载曲线会形成滞回环, 即曼辛效应。滞回环面积随逐级加载应力的增大而增大, 且滞回环逐渐向前发展, 即棘轮效应, 且该效应始终存在, 说明岩石变形过程中塑性变形与弹性变形始终存在。值得注意的是, 单轴增幅循环加卸载条件下, 岩石不仅存在 V 型爆坑, 还出现了劈裂成板现象, 即发生了板裂屈曲型岩爆。这与隧道实际施工过程中的岩爆多为应变型岩爆和板裂屈曲型岩爆相对应。

从声发射振铃计数来看, 压密及弹性变形发展阶段, 岩石的声发射信号较为薄弱, 但当下一阶段加载过程中应力接近上一阶段的峰值应力时, 振铃计数会出现一个小的峰值, 此时可视为凯塞点, 在图 12 中用垂直虚线进行表示。此外, 在岩石破坏的前一个阶段, 峰值应力加载时振铃计数出现了较为明显的突增, 说明岩石此时出现了较为明显的损伤, 表现为裂纹和表层岩石的部分破坏。岩石破坏时, 声发射振铃计数突然激增, 最大值为 35 696。

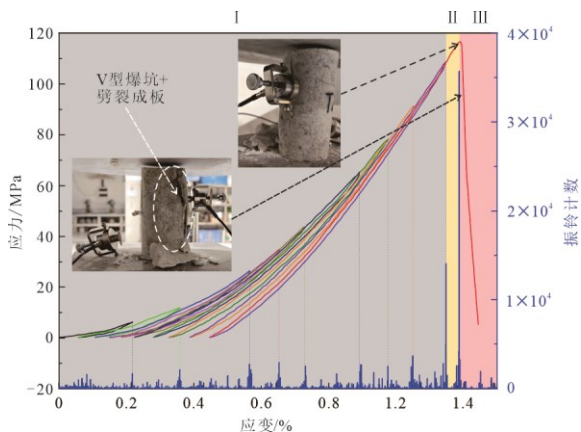


图 12 花岗岩单轴增幅循环加卸载应力-应变曲线

Fig. 12 Stress-strain curve for granite under uniaxial increasing-amplitude cyclic loading

### 3.4 三轴压缩条件下深埋花岗岩力学性能及声发射特征

根据第 2 节地应力反演分析可知, 围岩试样取样处最大主应力约 45 MPa, 为模拟场区的实际地应力分布, 本次三轴试验设定围压为 45 MPa。试样应力-应变曲线如图 13 所示。在高围压条件下, 花岗岩的应力-应变曲线、物理特征和力学行为发生了显著变化。岩石三轴抗压强度为 279.24 MPa, 较单轴压缩条件下的极限强度提高了约 150%。从应力-应变曲线来看, 三轴压缩时花岗岩主要经历了应力加载阶段(I, 即压密与弹性发展期)、应力保持阶段(II, 即裂纹发展贯通期)和失稳破坏阶段(III, 即峰后变形期)。与单轴加载不同的是, 在高围压条件下, 破坏前岩石的应变增加, 岩石变形阶段延长, 此时岩石内部裂纹不断萌生、发育和贯通, 应力保持阶段后期宏观裂纹出现, 形式以剪切破坏和局部劈裂为主。应力加载阶段岩样基本为弹性变形, 声发射活动较少, 仅有少量振铃计数产生, 能量较小。但在逼近峰值应力时, 应力-应变曲线出现了短暂的锯齿状波动, 声发射振铃计数和能量也出现一个小峰值, 表明此时有明显的裂缝产生, 但在高围压条件下, 岩石并未立即发生失稳, 仍能够在峰值应力条件下维持岩石的承载能力。随后的应力保持期, 声发射活动密集出现, 但数值较小。随着岩石发生失稳破坏, 声发射振铃计数和能量突发性剧烈增长, 岩石破坏瞬间出现最大振铃计数为 11 481, 此时声发射能量也达到最大值 24 315。而由于围压约束的存在, 岩石并没有发生明显的岩爆特征, 但已经失稳破坏, 相较于单轴压缩岩石破坏时, 声发射振铃计数明显减小。

综上, 单轴压缩和三轴压缩条件下, 声发射振铃计数和能量均随着荷载的持续增加呈阶段性变化, 并在岩爆发生前呈现一个声发射平静期。岩石趋近失稳破坏时, 声发射振铃计数和能量密集式剧烈增加, 可作为岩爆预警的前兆信息之一。

### 3.5 能量释放与岩爆

岩爆发生伴随着能量的释放与转化。参考刘鹏飞等(2021)、温树杰等(2024)以及张亮等(2025)的相关研究, 能量可按式(5)至式(7)进行计算。

$$U = U^d + U^c \quad (5)$$

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (6)$$

$$U^e = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (7)$$

式中： $U$ 为总输入能； $U^e$ 为弹性应变能； $U^d$ 为耗散

能； $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 分别为最大主应力、中间主应力和最小主应力； $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$ 分别为三个主应力方向的应变； $\mu$ 为泊松比； $E$ 为弹性模量。

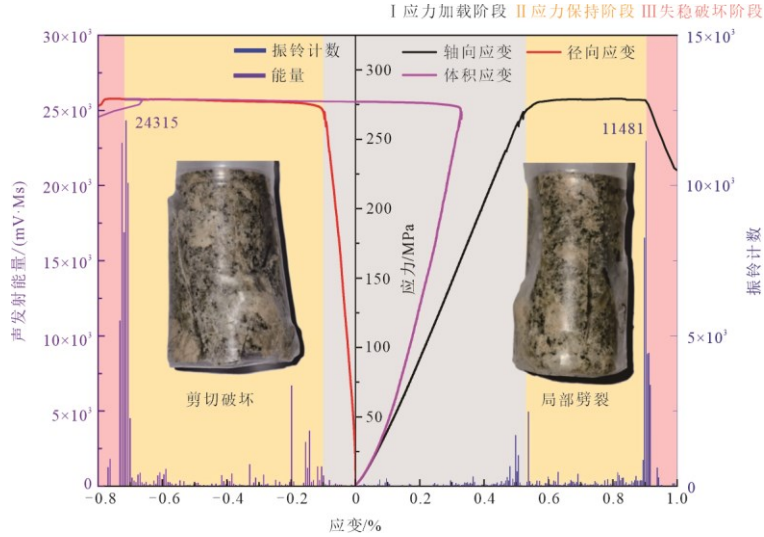


图 13 45MPa 围压花岗岩三轴压缩应力-应变曲线

Fig. 13 Triaxial compression stress-strain curve for granite diorite under 45 MPa confining pressure

深埋花岗岩在受压破坏过程中的能量演化特征如图 14 所示。可以看出，不管是单轴压缩还是三轴压缩，破坏前岩石内部都储存了较多的弹性能，弹性能最大占比超 90%。对于单轴压缩试验，如图 14(a) 所示，弹性变形发展阶段（I），岩石内部储存的弹性能随着轴向荷载的增加而增加，而耗散能始终处于较低的水平；进入颗粒弹射及表层剥落期（II）后，耗散能逐渐增加，而弹性应变能增长速率减缓；进入岩石失稳破坏及爆裂崩解期（III）时，在高应力状态下，岩石内部储存的弹性应变能突然释放，耗散能迅速增加，表现为岩块颗粒的抛掷和弹射，即发生岩爆破坏，此时岩石储存的弹性应变能转化为爆块的动能，大量石块颗粒崩出，岩爆强烈。岩爆发生前，岩石内部储存的弹性应变能最大值为  $0.3114 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由图 14(b)可知，在 45 MPa 围压下，花岗岩的能量演化特征与单轴压缩时存在显著不同。主要表现在：（1）三轴加载条件下，达到峰值应力前，岩石内部储存的弹性应变能更多，最大值为  $0.7412 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ，是单轴压缩时的 2.38 倍；（2）试样进入应力保持阶段（II）后，岩石储存的弹性应变能基本维持不变，但耗散能持续快速增加，能量主要以裂纹持续萌生、发育、扩展、贯通的形式耗散，但由于高围压的存在，岩石并没有发生失稳破坏。随后，岩石进入破坏阶段，大量弹性应变能急剧释放，岩石发生失稳破坏。

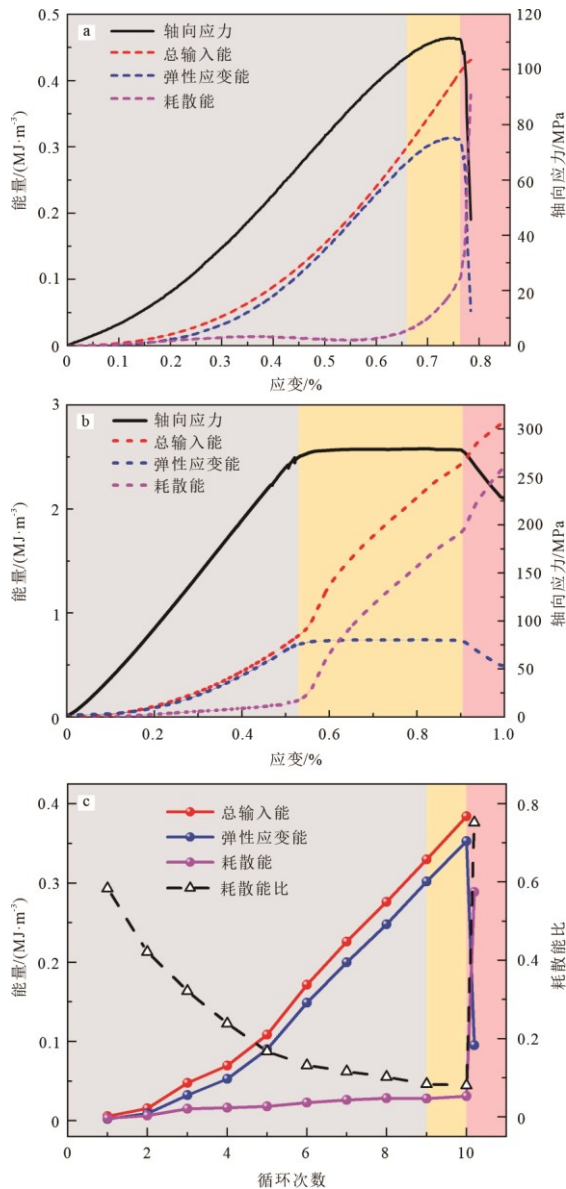


图 14 不同压缩条件下花岗岩能量演化曲线

Fig. 14 Energy evolution curves of granite diorite under different compression conditions

a. 单轴压缩花岗岩能量演化; b. 45MPa 围压下花岗岩能量演化; c. 单轴循环加卸载条件下花岗岩能量演化

图 14(c) 展现了单轴循环加卸载条件下花岗岩的能量演化情况, 可以看出弹性能变化和总输入能的变化规律极为相似, 均随着循环次数的增加而增大; 而耗散能占比在早期压密阶段较大, 这是由于岩石内部存在先天微裂纹, 初次加载破坏了其原有的结构平衡, 在压密阶段之后, 岩石状态变得稳定, 耗散能占比均保持在较低水平, 当岩石发生破坏时, 裂缝快速发展贯通, 并出现爆裂崩解现象, 耗散能又迅速增大。单轴增幅循环加卸载过程中, 加载仪器输入的能量大部分以弹性能的形式储存在岩石内

部, 耗散能占比很小, 直到岩石发生破坏时, 岩石所储存的弹性能突然释放, 产生明显的岩爆现象。

对比单轴压缩和 45 MPa 围压三轴压缩试验结果可以发现, 深埋花岗岩在三轴应力状态下具有较高的承载能力, 而单轴加载时其轴向峰值应力较 45 MPa 围压条件下降了约 60%, 岩石的承载能力下降。此外, 由三轴应力状态转换为单轴应力状态时, 岩石的弹性应变能储存能力下降约 58%。深埋隧道开挖前, 围岩处于三向应力状态, 隧洞开挖后围岩迅速进行应力重分布, 开挖轮廓线附近部分围岩处于径向卸载且切向加载状态, 径向应力接近于 0, 即近似处于单轴加载状态(翁磊等, 2016; 阿比尔的等, 2021)。隧道开挖轮廓线附近部分围岩经历了从三轴应力状态至单轴应力加载的过程。但由于开挖前岩石在三轴应力状态下储存的弹性应变能较大, 开挖后(即单轴应力状态)岩石的承载能力又陡然下降, 此时围岩容易发生破坏。因此, 隧道钻爆法施工后, 洞壁围岩在迅速增加的切向应力作用下, 部分围岩会将内部储存的大量弹性能以动能的形式突然释放, 岩爆发生。这也为岩爆大多发生在隧道掌子面开挖后不久, 且常发生在开挖轮廓线附近(如拱顶、拱腰等)做出了解释。

此外, 根据单轴增幅循环加卸载试验结果, 取第 8 次加卸载数据(即荷载达到单轴抗压强度的 80%)可计算深埋花岗岩的弹性应变能指数  $W_{et}$  和变形脆性系数  $K_u$  分别为 8.76 和 10.74。参考式(8)和式(9)的划分标准, 弹性应变能指数越大, 表明岩石在破坏前储存弹性应变能的能力越强, 储存的能量越多, 岩爆发生时的烈度也就越高; 变形脆性系数越大, 表明岩石的脆性越强, 发生岩爆的风险越大。根据计算结果, 隧道深埋花岗岩表现出强烈岩爆发生的内在条件, 但最终岩爆发生与否还取决于内、外因素的共同影响。

$$\begin{cases} W_{et} < 2 & \text{(无岩爆)} \\ 2 \leq W_{et} < 5 & \text{(低岩爆风险)} \\ W_{et} \geq 5 & \text{(高岩爆风险)} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} K_u < 2 & \text{(无岩爆)} \\ 2 \leq K_u < 6 & \text{(轻微岩爆)} \\ 6 \leq K_u < 9 & \text{(中等岩爆)} \\ K_u \geq 9 & \text{(强烈岩爆)} \end{cases} \quad (9)$$

### 3.6 声发射 $b$ 值演化规律

声发射事件可视为一种微震活动, 因此可以采

用地震学中的震级-频率参数  $b$  进行分析,以分析岩石变形及破坏过程的力学行为。在声发射监测中,通常采用声发射振幅  $A_{dB}/20$  来等效代替地震震级  $M$ ,因此,地震活动震级与频度的关系式可改写为:

$$\lg N = a - b \left( \frac{A_{dB}}{20} \right) \quad (10)$$

式中:  $M$  表示震级;  $A_{dB}$  代表声发射的振幅 (dB);  $N$  表示振幅大于  $A_{dB}$  的声发射事件;  $a, b$  为常数。

声发射特征参数  $b$  值的大小既能反应物体内部微观结构的不均匀性,也可体现物体内部的应力水平(Mogi, 1962; 吴小平, 1990)。在压缩试验中,声发射  $b$  值的大小和变化趋势与试样内部的裂隙尺度及其发展变化趋势相关,声发射特征参数  $b$  值较大时,小尺度微破裂占主导地位;  $b$  值较小时,则大尺度宏观破裂占主导地位。不同压缩条件下花岗岩声发射  $b$  值演化情况如图 15 所示,可以发现,单轴压缩、单轴循环加卸载及三轴压缩条件下,  $b$  值均表现出明显的阶段特征,即在加载初期  $b$  值有所下降,这是加载初期岩石内部初始微裂隙(孔)被不断压密导致的;然后随着应力的增加而不断增加,表明岩石内部的微裂纹在不断积累;当岩石发生失稳破坏时,  $b$  值迅速下降至较小的水平,宏观破坏面产生。对于单轴压缩(图 15(a)),岩爆发生后,声发射  $b$  值下降了超 26.6%;三轴压缩(图 15(b))岩石破坏前后,声发射  $b$  值由 1.639 下降至 1.292,下降了约 21.2%;单轴增幅循环加卸载(图 15(c))则在第 9 次加卸载过程中出现了短暂下降,对比岩石破坏现象发现这很可能是岩石发生板裂破坏的体现;在最后加载时,声发射  $b$  值迅速下降至 1.386,较最大值下降了约 25%。由此可见,加载后期岩石趋近失稳破坏时,声发射  $b$  值短时间内发生 20% 以上的显著下降,可视为岩石即将发生失稳破坏的一个前兆信号,这一特征可为高原深埋隧道岩爆监测和预警提供参考。

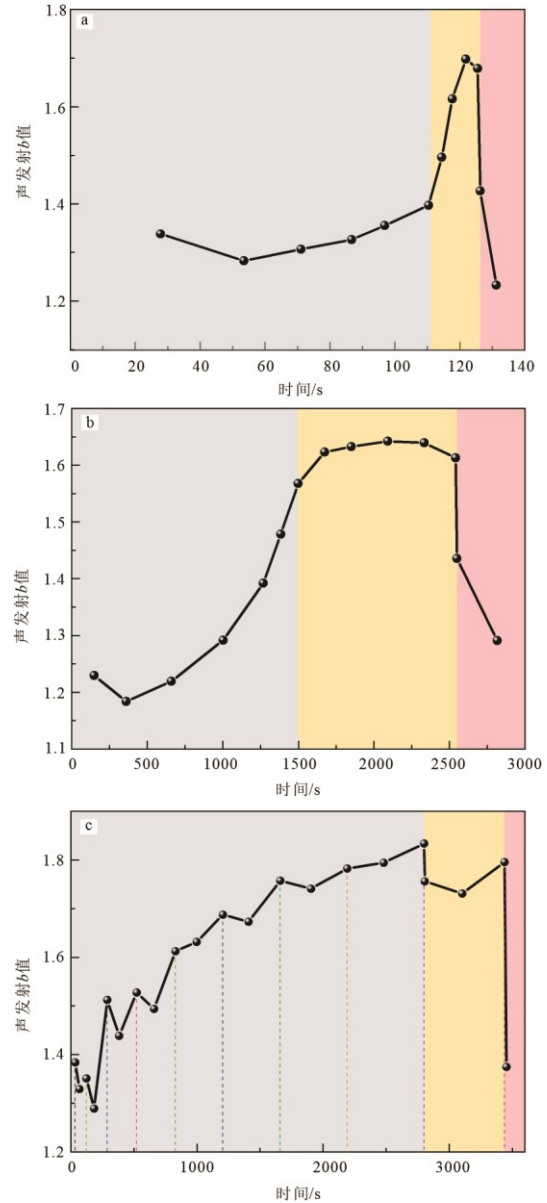


图 15 不同压缩条件下花岗岩声发射  $b$  值演化特征  
Fig. 15 Evolution characteristics of the acoustic emission  $b$ -value under different compression conditions

a.单轴压缩; b.45MPa 围压三轴压缩; c.单轴增幅循环加卸载

## 4 隧道岩爆段落预测

### 4.1 岩爆判据及适用性

隧道开挖后,部分围岩近似处于单轴加载状态,其越接近单轴抗压强度,则越容易发生岩爆,因此切向应力与岩石单轴抗压强度的比值可以反映岩爆发生概率。此外,岩石破坏时所释放的能量大小则反映了岩爆危害程度,岩爆前岩石储存的弹性应变能越多,岩爆越强烈。因此,结合前文研究结果,提出  $W_{hp}$  岩爆判据以更好地反映岩爆发生的可能性和危害性。 $W_{hp}$  表达式如式(11)所示:

$$W_{hp} = U_{max}^e \frac{\sigma_{\theta max}}{R_c} \quad (11)$$

式中： $U_{max}^e$  为岩爆发生前岩石储存的最大弹性应变能， $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ； $\sigma_{\theta max}$  为隧道的最大切应力， $\text{MPa}$ ； $R_c$  为岩石的单轴抗压强度， $\text{MPa}$ 。

由于岩爆发生前弹性能  $U^e$  的变化趋势和总输入能  $U$  基本保持一致，所以弹性能  $U^e$  可表达为：

$$U^e = kU = k \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \quad (12)$$

式中： $k$  为弹性能比； $U$  可由岩石的应力-应变曲线获得。

此外，对于花岗岩等硬岩， $\sigma$  可表达为：

$$\sigma = f(\varepsilon) = \left(1 - \frac{1}{1 + e^{a-r(\varepsilon-\varepsilon_0)}}\right) E_0 (\varepsilon - \varepsilon_0) \quad (13)$$

式中： $a$ 、 $r$  为拟合参数； $E_0$  为应力-应变曲线在弹性阶段的切线模量； $\varepsilon_0$  为弹性阶段切向模量在应变轴的截距。这些参数均可通过试验获得。

$W_{hp}$  可表征围岩的岩爆潜势，体现岩爆的触发与释能机制： $\sigma_{\theta max}/R_c$  可视作岩体达到失稳破坏的触发条件，反映岩爆发生的可能性；而  $U_{max}^e$  则表征岩爆

发生可释放的能量规模，决定岩爆的强烈程度。当  $\sigma_{\theta max}/R_c$  偏高但储能不足时，围岩更可能表现为渐进破坏，如软岩大变形；当围岩储能较高但  $\sigma_{\theta max}/R_c$  不足以触发岩体失稳时，也难以产生岩爆。因此， $W_{hp}$  可避免单一指标导致的误判，更符合深埋隧道岩爆的触发机制。此外， $k$  值可根据岩石失稳破坏（即岩爆发生）前弹性能与输入能的比值进行计算。不同加载条件下花岗岩弹性能比的变化情况如图 16 所示，可以发现，不同压缩条件下，花岗岩在破坏前的弹性能占比较为稳定。因此，对于该隧道，花岗岩的  $k$  值推荐范围为 0.90~0.95。对于即时型岩爆，隧道开挖后洞壁围岩转变为切向加载而径向卸载的近似单轴应力状态，故以单轴压缩或单轴循环加卸载条件下的能量进行计算即可。

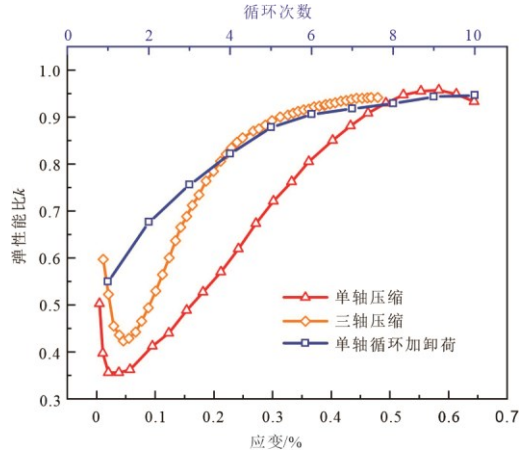


图 16 不同加载条件下的  $k$  值变化情况

Fig. 16 Variation of  $k$ -values under different loading conditions

将隧道简化为圆形断面，见图 17，由弹性力学可知，极坐标下隧道开挖后洞壁处围岩的切向应力如式(15)所示：

$$\sigma_{\theta} = (\sigma_z + \sigma_x) + 2(\sigma_z - \sigma_x) \cos 2\theta \quad (14)$$

式中： $\sigma_x$  为水平应力； $\sigma_z$  为竖向应力； $\theta$  为洞壁围岩单元体与隧道轴线水平方向的夹角。

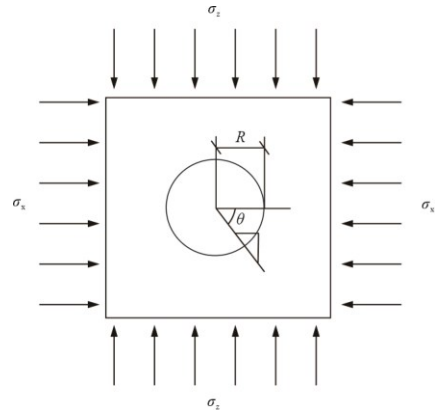


图 17 隧道环向应力  $\sigma_{\theta}$  示意图

Fig. 17 Schematic diagram of tunnel circumferential stress  $\sigma_{\theta}$

结合位于同一地区且工程特性相似的桑珠岭隧道和巴玉隧道实际岩爆案例对  $W_{hp}$  判据的适用性进行验证，岩爆数据来源于韩侃等(2020)、张钧博(2021)、刘夕奇(2021)和周航等(2022)的相关研究。其中，桑珠岭隧道全长约 16 455 m，最大埋深 1 347 m，岩性以花岗岩等硬质岩为主；巴玉隧道全长 13 073 m，隧址区地层以花岗岩、闪长岩等坚硬岩石为主，地质构造复杂，最大埋深 2 080 m。由于其高地应力条件及脆性硬质岩为主的围岩条件，这两条隧道岩爆灾害频发。

如图 18 所示，桑珠岭隧道岩爆等级与  $W_{hp}$  值基本呈对应关系，这在一定程度上验证了  $W_{hp}$  判据的

合理性。此外，如何划分不同岩爆等级之间的判断阈值是一个重要问题，本文通过最小损失函数法来确定相邻两类岩爆等级之间的最优分割点。以求轻微岩爆与中等岩爆之间的阈值为例，设 I 类为无岩爆与轻微岩爆，样本数为  $n_1$ ，II 类为中等岩爆与强烈岩爆内，其样本数设为  $n_2$ 。I 类样本的标签设为 -1，II 类样本的标签设为 1。设  $W_{hp}=t$  为估计两类样本类别的超平面，超平面左侧样本归为 I 类，右侧为 II 类，若样本类别被预测正确，则该样本损失值为 0，若错误，则计算损失值。当  $W_{hp}$  超平面使样本总体的损失值最小时，即为不同岩爆等级之间的  $W_{hp}$  阈值，有：

$$F = \min_t \sum_{j=1}^N \max \{0, -(x_i - t) y_i\} \quad (15)$$

式中： $x_i$  为第  $i$  个样本的  $W_{hp}$  值； $y_i$  为样本标签。

损失函数  $F$  与  $W_{hp}$  超平面的关系见图 18，其各自的最优阈值分别为  $0.024 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ， $0.045 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $0.095 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

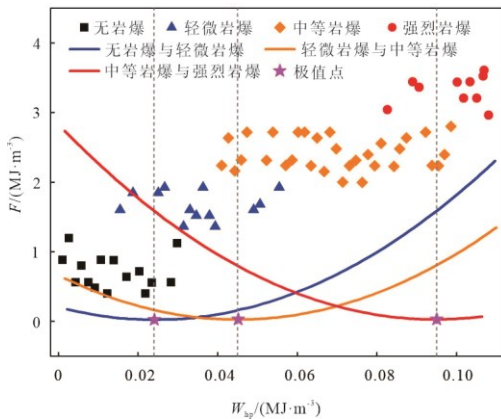


图 18 桑珠岭隧道各岩爆案例损失函数随各相邻岩爆等级间  $W_{hp}$  超平面变化曲线

Fig. 18 Variation of the loss function with respect to  $W_{hp}$  hyperplane between adjacent rockburst grades for each rockburst case in the Sangzhuling Tunnel

此外，基于巴玉隧道实际岩爆案例，并结合 Russense 判据、Hoek 判据和徐林生判据的评估结果，对  $W_{hp}$  判据进行验证，如图 19 所示。结果表明， $W_{hp}$  判据具有更好的适用性，预测准确率较高。

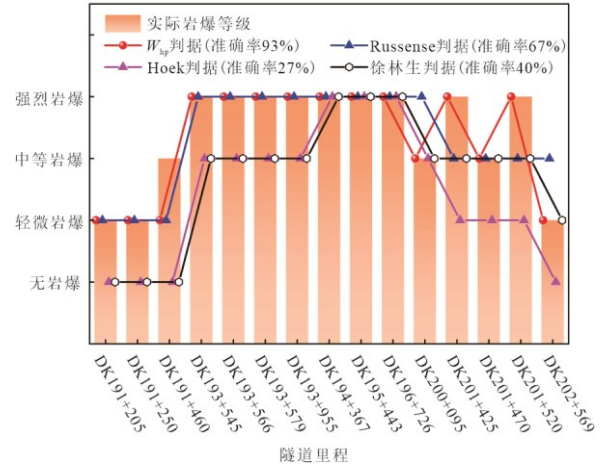


图 19 巴玉隧道各岩爆判据评价结果与实际岩爆等级对比

Fig. 19 Comparison between evaluation results of various rockburst criteria and actual rockburst grades in the Bayu Tunnel

#### Tunnel

#### 4.2 隧道岩爆段落预测

结合地勘资料、岩石试验结果和地应力分布特征，采用  $W_{hp}$  判据对隧道 1#斜井工区的正线岩爆段落分布和岩爆等级进行预测，为现场岩爆灾害防控提供依据和参考。其中隧道轴线的水平应力和竖向应力可由第 2 节地应力反演结果进行获取，围岩的抗压强度及最大弹性模量参考第 3 节内容，并由多次试验取平均值获得。本文基于隧道地应力场反演和岩石试验结果，计算隧道岩爆段落的  $W_{hp}$  值，部分现场岩爆案例计算结果如表 2 所示。

表 2 部分现场岩爆案例计算结果

Table 2 Calculation results of some on-site rockburst cases

隧道里程	$k$ 值	$\sigma_{0max}/R_c$	$W_{hp}$ 值	$W_{hp}$ 判据	实际岩爆等级
DK1031+323	0.91	0.47	0.049	轻微岩爆	轻微岩爆
DK1031+451	0.92	0.66	0.052	轻微岩爆	轻微岩爆
DK1031+727	0.90	0.64	0.081	中等岩爆	中等岩爆
DK1031+810	0.92	0.68	0.076	中等岩爆	中等岩爆
DK1032+249	0.92	0.78	0.068	中等岩爆	中等岩爆
DK1032+314	0.91	0.69	0.085	中等岩爆	中等岩爆
DK1032+466	0.92	0.83	0.095	中等岩爆	中等岩爆
DK1031+989	0.92	0.65	0.106	强烈岩爆	中等岩爆
DK1032+024	0.93	0.71	0.126	强烈岩爆	强烈岩爆
DK1032+037	0.93	0.70	0.116	强烈岩爆	强烈岩爆

与现场已开挖段的既有岩爆情况进行对应，提出适用于本文依托隧道现场施工的  $W_{hp}$  岩爆判据，如式(16)所示：

$$\begin{cases} W_{hp} < 0.029 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} & (\text{无岩爆}) \\ 0.029 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \leq W_{hp} < 0.052 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} & (\text{轻微岩爆}) \\ 0.052 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \leq W_{hp} < 0.106 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} & (\text{中等岩爆}) \\ 0.106 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \leq W_{hp} & (\text{强烈岩爆}) \end{cases} \quad (16)$$

取  $k$  值为 0.92, 隧道正线花岗岩段落岩爆等级预测结果如图 20 所示, 值得注意的是, 岩爆一般发生在高地应力硬质岩区段, 对于地应力较低 (小于 10MPa) 或围岩条件较差的区段, 本文以无岩爆情况进行处理, 但这些段落仍有可能存在零星岩爆, 只是岩爆发生的概率较低。由图 20 可知, 隧道 DK1 030+867 至 DK1 034+717 段落存在中等及以上岩爆风险, 其中 DK1 031+147 至 DK1 032+367 段落及 DK1 032+867 至 DK1 034+067 段落存在强烈岩爆风险。此外, 若不考虑施工方法等因素的影响, 以花岗岩为主的 DK1 025+968 至 DK1 027+367 段落也存在中等以上岩爆风险。

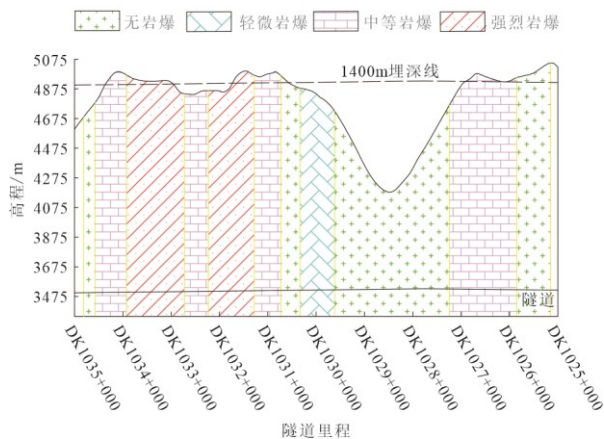


图 20 隧道花岗岩段落岩爆等级预测结果

Fig. 20 Prediction results of rockburst level in tunnel granite sections

由于该隧道正在施工, 根据目前揭露的情况, 该隧道 DK1 032 附近岩爆频发, 以中等岩爆为主, 并出现多次强烈岩爆现象, 如图 21 所示。隧道清渣过程中掌子面拱顶区域发生强烈岩爆灾害, 岩爆发生较为突然, 存在闷雷般响声, 爆块方量上百方, 爆块以板状和片状为主, 岩爆危害性极大。



图 21 隧道 DK1 032 附近强烈岩爆

Fig. 21 Strong rockburst near tunnel DK1 032

因此, 在岩爆段施工过程中必须采取有效的防控措施, 以减轻岩爆危害。针对中等以上岩爆段落, 在综合设计院等相关单位的建议以及现场施工经验和可行性分析后, 隧道现场施工过程中主要采取以下措施对岩爆进行综合防控:

(1) 超前应力释放。根据不同岩爆等级, 施打不同长度和密度的超前应力释放孔, 应力释放孔主要布置于 1:30、4:30、7:30、10:30 这 4 个区域, 孔深 3~8 m。应力释放孔钻孔完成后, 向孔内注入高压水, 加快应力释放、软化围岩。针对强烈岩爆段落, 必要时施作密集深孔爆破并循环卸压, 降低掌子面前方的应力集中, 减少岩爆危害。

(2) 构建柔性支护系统。根据不同岩爆等级, 合理选用“钢筋网+钢拱架”、“高韧性消能防护网+钢拱架”、“钢丝绳网+双绞六边形网+钢拱架”等组合支护结构, 并配合涨壳式预应力锚杆和高性能钢纤维喷射混凝土, 确保围岩支护的稳定性和可靠性。

(3) 合理控制循环进尺。根据岩爆等级, 合理控制循环进尺, 遵循轻微及中等岩爆循环进尺不大于 3 m, 强烈岩爆不大于 2 m 的原则开挖, 减少大临空面的应力集中, 降低岩爆发生风险。

(4) 加强光面爆破效果。采用聚能水压控制爆破技术, 综合利用聚能管的环切作用、水袋的传力和降尘作用使爆破能量均衡释放, 进一步提升开挖轮廓的圆顺度和平整度, 降低岩爆发生的机率。

(5) 强化岩爆监测预警。将岩爆微震监测预警工作纳入关键工序管理, 积极协同超前地质预报单位开展微震监测工作, 及时做好相关交底, 提前精准预判掌子面前方岩爆情况, 为现场施工作业提供

科学指导。

(6) 全工序机械化施工。岩爆段全面推行全工序机械化施工, 大力推广使用自行式防岩爆装药台车和凿岩台车加装挂篮的方式进行机械化装药作业, 有效减少掌子面施工作业人员数量, 降低安全风险、提高施工效率。

值得注意的是, 岩爆的发生受围岩岩性、地应力特征、岩体结构、断层发育情况、施工方法、岩爆防控方法及支护措施等多种因素的影响。现场施工过程中的岩爆等级、发生概率等仍需根据监测数据、实际围岩情况、地应力特征以及临近施工段岩爆情况等条件, 结合施工方法和支护措施, 开展进一步研判。

## 5 结论

本文依托某高原深埋超长铁路隧道, 采用区域地质分析、数值反演等方法, 分析了隧址区地应力场分布特征, 探究了深埋花岗岩的力学特性、破坏特征、能量演化规律, 并提出  $W_{hp}$  判据开展隧道岩爆预测, 以为高原深埋隧道岩爆预测和防控提供参考。主要结论如下:

(1) 隧址区构造应力方向为 NNE~NEE, 三向主应力量值随着深度的增加而增大, 整体上呈  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$  的规律。隧址区初始地应力场最大水平主应力占据主导地位, 最大水平主应力方向为  $N42^\circ \sim 54^\circ E$ , 隧道轴线最大主应力值范围约 22.3~57.3 MPa, 最小主应力 8.23~21.8 MPa, 中间主应力 12.6~25.0 MPa。

(2) 不同压缩条件下, 深埋花岗岩展现出应变型岩爆、板裂屈曲型岩爆的相关特征, 与现场主要岩爆破坏形式相对应。岩爆发生前声发射活动存在平静期; 岩石趋近失稳破坏时, 声发射振铃计数和能量呈密集式剧烈增加趋势, 声发射  $b$  值迅速减小 20% 以上。声发射平静期以及振铃计数、声发射能量的突然激增和  $b$  值的急剧下降可视为岩爆即将发生的前兆特征, 为高原深埋隧道岩爆监测和预警提供参考。

(3) 隧道深埋花岗岩在不同压缩条件下的力学行为和能量演化存在差异。极限应力状态下, 相较于 45 MPa 围压三轴加载, 岩石在单轴压缩时的承载能力和弹性应变能储存能力均显著降低; 单轴增幅循环加卸载作用下, 岩石表现出明显的曼辛效应和棘轮效应。不同压缩条件下, 花岗岩在破坏前的弹性能占比均处于较高水平, 弹性能占比是反应岩爆强度和危害性的重要指标。隧道深埋花岗岩弹性应

变能指数  $W_{et}$  和变形脆性系数  $K_u$  分别为 8.76 和 10.74, 展现出强烈岩爆发生的内在条件。

(4) 提出可同时反映岩爆可能性和危害性的  $W_{hp}$  判据, 基于巴玉隧道实际岩爆案例, 表明该判据具有良好的准确性和适用性, 预测准确率超 90%; 在此基础上开展隧道岩爆预测, 发现隧道 1#斜井工区的多个正线段落存在中等岩爆和强烈岩爆风险, 可采取超前应力释放、构建柔性支护系统、合理控制循环进尺、加强光面爆破效果、强化岩爆监测预警、全工序机械化施工等措施进行隧道岩爆防控, 以降低岩爆灾害风险, 保障施工安全与工期进度。

需要说明的是, 本研究的试验工作依托隧道 1#斜井工区埋深 1400m 左右的花岗岩试样展开, 由于试验数量有限, 研究结论主要适用于本工程花岗岩隧道段落或相似地质条件的隧道段落。考虑到岩性差异及不同埋深条件等因素, 对于其他区域或其他隧道的推广应用, 仍需积累更大规模的数据库, 并基于现场实际情况, 开展更多试验测试, 结合岩石力学特性和现场数据对本文所提判据进行修正和优化, 进一步校验本文结论的适用性与可靠性。

## 参考文献 (References)

- 田四明, 王伟, 巩江峰, 2021. 中国铁路隧道发展与展望(含截至 2020 年底中国铁路隧道统计数据). 隧道建设(中英文), 41(02): 308-325.
- Tian, S. M., Wang, W., Gong, J. F., 2021. Development and prospect of railway tunnels in China (including statistics of railway tunnels in China by the end of 2020). *Tunnel Construction*, 41(02): 308-325(in Chinese with English abstract).
- He, S. Y., Lai, J. X., Zhong, Y. J., et al., 2021. Damage behaviors, prediction methods and prevention methods of rockburst in 13 deep traffic tunnels in China. *Engineering Failure Analysis*, 121: 105178. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105178>
- Zhao, Y., Du, Y. L., Yan, Q. X., 2025. Challenges, Progress, and Prospects of Ultra-Long Deep Tunnels in the Extremely Complex Environment of the Qinghai-Xizang Plateau. *Engineering*, 44: 162-183. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.05.020>
- 陈湘生, 全昭熹, 陈一凡, 等, 2024. 极端环境隧道建造面临的主要问题及发展趋势. 隧道建设(中英文), 44(03): 401-432.
- Chen, X. S., Quan, Z. X., Chen, Y. F., et al., 2024. Primary challenges and developmental trends of tunnel construction in extreme environments. *Tunnel Construction*, 44(3):

- 401-432(in Chinese with English abstract).
- 赵勇,石少帅,田四明,等,2021.川藏铁路雅安至林芝段隧道建造面临的主要工程技术难题与对策建议.隧道建设(中英文),41(07):1079-1090.
- Zhao, Y., Shi, S. S., Tian, S. M., et al., 2021. Technical difficulties and countermeasure suggestions in tunnel construction of Ya'an-Linzhi section of Sichuan-Tibet railway. *Tunnel Construction*, 41(7): 1079-1090(in Chinese with English abstract).
- 郭长宝,吴瑞安,蒋良文,等,2021.川藏铁路雅安—林芝段典型地质灾害与工程地质问题.现代地质, 35(01):1-17.
- Guo, C. B., Wu, R. A., Jiang, L. W., et al., 2021. Typical geohazards and engineering geological problems along the Ya'an-Linzhi section of the Sichuan-Tibet Railway, China. *Geoscience*, 35(1): 1-17(in Chinese with English abstract).
- 冯夏庭,肖亚勋,丰光亮,等,2019.岩爆孕育过程研究[J].岩石力学与工程学报,38(04):649-673.
- Feng, X. T., Xiao, Y. X., Feng, G. L., et al., 2019. Study on the development process of rockbursts. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 38(04): 649-673(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Meng, K., Fan, X. M., et al., 2025. Advancements in Laboratory Studies of Layered Rock Masses for Deep Engineering: Insights and Future Perspectives. *Journal of Earth Science*, 36(3): 1334-1340. <https://doi.org/10.1007/s12583-025-2032-1>
- 严健,何川,汪波,等,2019.雅鲁藏布江缝合带深埋长大隧道群岩爆孕育及特征.岩石力学与工程学报,38(04):769-781.
- Yan, J., He, C., Wang, B., et al., 2019. Inoculation and characters of rockbursts in extra-long and deep-lying tunnels located on Yarlung Zangbo suture. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 38(04): 769-781(in Chinese with English abstract).
- Xiao, P., Li, D. Y., Zhao, G. Y., et al., 2023. Characteristics and mechanism of rockburst at five deep gold mines in Jiaodong Peninsula of China. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 171: 105574. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105574>
- Ma, T. H., Tang, C. A., Tang, L. X., et al., 2015. Rockburst characteristics and microseismic monitoring of deep-buried tunnels for Jinping II Hydropower Station. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49: 345-368. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.04.016>
- 曹伟,李均,薛成,等,2024.基于多元线性回归的深部复杂地应力场反演分析.铁道勘察,50(06):41-49.
- Cao, W., Li, J., Xue, C., et al., 2024. Inversion analysis of deep complex in-situ stress field based on multiple linear regression. *Railway Investigation and Surveying*, 50(06): 41-49(in Chinese with English abstract).
- 柳禄湧,李凯舟,王能伟,等,2023.山东招远水旺庄金矿深部地应力特征及其岩爆倾向性分析.地质力学学报,2023,29(03):417-429.
- Liu, L. Y., Li, K. Z., Wang, N. W., et al., 2023. In-situ stress characteristics and rockburst tendency of surrounding rocks in the Shuiwangzhuang gold deposit, Zhaoyuan, Shandong province. *Journal of Geomechanics*, 29(03): 417-429(in Chinese with English abstract).
- 齐消寒,张东明,2018.空心包体应力解除法与声发射法在岩爆危害隧道地应力测定中的对比应用.现代隧道技术,55(01):216-223.
- Qi, X. H., Zhang, D. M., 2018. Contrast and application of the hollow inclusion stress relief method and acoustic emission method to the in-situ stress measurement in tunnels with rockburst hazards. *Modern Tunnelling Technology*, 55(01): 216-223(in Chinese with English abstract).
- 张宁,兰恒星,李郎平,等,2022.青藏高原东南缘实测地应力特征及意义分析.工程地质学报,30(03):696-707.
- Zhang, N., Lan, H. X., Li, L. P., et al., 2022. Characteristics and implications of in-situ stresses in southeastern Tibetan Plateau. *Journal of Engineering Geology*, 30(3): 696-707. (in Chinese with English abstract).
- 陈贤丰,李德武,刘金松,2024.特长深埋隧道岩爆倾向性预测与影响因素研究.防灾减灾工程学报,44(05):1184-1192.
- Chen, X. F., Li, D. W., Liu, J. S., 2024. Prediction of rockburst tendency and study of influencing factors in extra-long deep-buried tunnels. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(05): 1184-1192(in Chinese with English abstract).
- Fu, H. L., Li, J., Li, G. L., et al., 2023. Determination of In Situ Stress by Inversion in a Superlong Tunnel Site Based on the Variation Law of Stress - A Case Study. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 27(6): 2637-2653. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-0415-3>
- Liu, C. Y., Pan, C., Zhao, G. M., et al., 2025. Experimental study on the failure mechanism of roadway surrounding rock under true triaxial loading: Insights from acoustic emission (AE) characteristics. *Measurement*, 246:116727. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.116727>

- 张国凯,李海波,夏祥,等,2017.单轴加载条件下花岗岩声发射及波传播特性研究.岩石力学与工程学报,36(5):1133-1144.
- Zhang, G. K., Li, H. B., Xia, X., et al., 2017. Experiment study on acoustic emission and wave propagation in granite under uniaxial compression. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36(5): 1133-1144(in Chinese with English abstract).
- 祁浩,李春晓,李长祺,2024.基于多重分形理论的花岗岩岩爆试验声发射信号特征研究.采矿与安全工程学报,41(05):934-945.
- Qi, H., Li, C. X., Li, C. Q., 2024. Study on the characteristics of acoustic emission signals of granite under rockburst based on multifractal theory. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 41(05): 934-945(in Chinese with English abstract).
- 赵菲,孟世卓,刘冬桥,等,2024.基于声发射信号特征的花岗岩岩爆破坏前兆信息研究.岩石力学与工程学报,43(11):2669-2686.
- Zhao, F., Meng, S. Z., Liu, D. Q., et al., 2024. Failure precursor of granite rockburst based on acoustic emission signal characteristics. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 43(11): 2669-2686(in Chinese with English abstract).
- 马永安,于崇,李海波,等,2025.花岗岩破裂过程力学特性与能量耗散试验研究.岩石力学与工程学报,44(05):1313-1325.
- Ma, Y. A., Yu, C., Li, H. B., et al., 2025. Experimental study on the mechanical properties and energy dissipation of granite during the fracturing process. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 44(05): 1313-1325(in Chinese with English abstract).
- Gong, F. Q., Wang, Y. L., Luo, S., 2020. Rockburst proneness criteria for rock materials: Review and new insights. *Journal of Central South University*, 27(10): 2793-2821. <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4511-y>
- Heidbach, O., Rajabi, M., Cui, X. F., et al., 2018. The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744: 484-498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
- 张强勇,向文,于秀勇,等,2015.双江口水电站地下厂房区初始地应力场反演分析.土木工程学报,48(08):86-95.
- Zhang, Q. Y., Xiang, W., Yu, X. Y., et al., 2015. Back analysis of initial geostress field for underground powerhouse zone of Shuangjiangkou hydropower station. *China Civil Engineering Journal*, 48(08):86-95(in Chinese with English abstract).
- 陈娜,李平,韩华超,等,2022.片理结构软岩变形破坏声发射特征.武汉大学学报(工学版),55(06):539-544.
- Chen, N., Li, P., Han, H. C., et al., 2022. Acoustic emission characteristics of soft rock with schistose structure during deformation failure. *Engineering Journal of Wuhan University*, 55(06):539-544(in Chinese with English abstract).
- 刘鹏飞,范俊奇,郭佳奇,等,2021.三轴应力下花岗岩加载破坏的能量演化和损伤特征.高压物理学报,35(02):44-53.
- Liu, P. F., Fan, J. Q., Guo, J. Q., et al., 2021. Damage and energy evolution characteristics of granite under triaxial stress [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2021, 35(02): 44-53(in Chinese with English abstract).
- 温树杰,朱杰,王雷,等,2024.不同卸荷水平下饱和红砂岩三轴压缩破坏及能量演化特征.铁道科学与工程学报,21(09):3696-3705.
- Wen, S. J., Zhu, J., Wang, L., et al., 2024. Characteristics of triaxial compression damage and energy evolution of saturated red sandstone under different unloading levels. *Journal of Railway Science and Engineering*, 21(09): 3696-3705(in Chinese with English abstract).
- 张亮,王桂林,任建喜,等,2025.干湿循环下节理砂岩三轴压缩损伤破坏能量演化机制.地球科学,50(01):269-285.
- Zhang, L., Wang, G. L., Ren, J. X., et al., 2025. Damage failure energy evolution mechanism of jointed sandstone treaded with dry-wet cycling action under triaxial compression. *Earth Science*, 50(01): 269-285(in Chinese with English abstract).
- 翁磊,李夕兵,周子龙,等,2016.屈曲型岩爆的发生机制及其时效性研究.采矿与安全工程学报,33(01):172-178.
- Weng, L., Li, X. B., Zhou, Z. L., et al., 2016. Occurrence mechanism and time-dependency effect of buckling rock burst. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 33(01): 172-178(in Chinese with English abstract).
- 阿比尔的,向钰周,郑颖人,等,2021.隧洞围岩在超载和卸载状态下的破坏模式.工程科学与技术,53(05):53-61.
- Abi, E. D., Xiang, Y. Z., Zheng, Y. R., et al., 2021. Failure mode of surrounding rock of tunnel under overloading and unloading conditions. *Advanced Engineering Sciences*, 53(5): 53-61(in Chinese with English abstract).
- Mogi, K., 1962. Study of elastic shocks caused by the fracture

- of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, (40): 125-173.
- 吴小平,1990. b 值物理机制的再探讨. *西北地震学报*, (3): 1-13.
- Wu, X. P., 1990. A reapproaching on physical mechanism of b value. *Northwestern Seismological Journal*, (3): 1-13(in Chinese with English abstract).
- 吴枋胤,何川,汪波,等,2021. 基于应力判据法的拉林铁路岩爆烈度分级. *西南交通大学学报*, 56(04): 792-803.
- Wu, F. Y., He, C., Wang, B., et al., 2021. Rock burst intensity classification of Lhasa-Linzhi railway based on stress criterion. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 56(4): 792-803(in Chinese with English abstract).
- 韩侃,杨文斌,陈贤丰,等,2020. 巴玉隧道施工中岩爆风险动态管控措施. *铁道建筑*, 60(06): 65-68.
- Han, K., Yang, W. B., Chen, X. F., et al., 2020. Dynamic management control measures of rockburst risk in Bayu tunnel construction. *Railway Engineering*, 60(06): 65-68(in Chinese with English abstract).
- 张钧博,2021. 拉萨至林芝铁路隧道岩爆烈度分级与应力强度判据标准研究. 成都:西南交通大学.
- Zhang, J. B., 2021. Research on classification of rockburst intensity and criterion of stress intensity for Lasa to Linzhi railway tunnel. Southwest Jiaotong University, Chengdu(in Chinese).
- 刘夕奇,2021. 梯度应力与气液复合加载岩爆模型试验与岩爆判据研究. 武汉:武汉理工大学.
- Liu, X. Q., 2021. Experimental study of rockburst under gradient and gas-liquid loading and criterion to predict rockburst. Wuhan University of Technology, Wuhan(in Chinese).
- 周航,廖昕,陈仕阔,等,2022. 基于组合赋权和未确知测度的深埋隧道岩爆危险性评价——以川藏交通廊道桑珠岭隧道为例. *地球科学*, 47(06): 2130-2148.
- Zhou, H., Liao, X., Chen, S. K., et al., 2022. Rockburst risk assessment of deep lying tunnels based on combination weight and unascertained measure theory: a case study of Sangzhuling tunnel on Sichuan-Tibet traffic corridor. *Earth Science*, 47(6): 2130-2148(in Chinese with English abstract).