

基于能量准则的深埋长隧洞岩爆评价及 数值模拟分析

赵 晖, 张浩然

(中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610)

摘要: 在深埋隧洞施工过程中, 岩爆是主要面临的工程地质问题之一。准确判别岩爆发生的可能性以及岩爆级别, 对工程建设具有举足轻重的意义, 也给勘察带来了较大的挑战。当前, 水利工程勘察过程中, 行业规范在判别隧洞岩爆时, 仅考量强度应力比这一因素。为深入评价某深埋引水隧洞的岩爆问题, 本研究基于勘察资料与实测地应力成果, 运用基于能量准则的线弹性能判据 ($W_e=40\sim 100\text{ kJ/m}^3$) 对隧洞岩爆等级进行初步预测。结果显示围岩弹性能密度为 41.5 kJ/m^3 , 属中等岩爆风险。在此基础上, 采用有限差分法构建三维地质力学模型, 反演地应力场并模拟开挖卸荷过程, 揭示弹性能聚集区主要分布于隧洞两侧边墙, 数值模拟结果与能量准则判据相互验证, 证实中等岩爆风险的空间分布特征, 并运用能量-运动学耦合模型对围岩发生岩爆岩体弹射的速度和距离进行了定量预测, 为动态支护设计提供依据, 对其他水利工程深埋长隧洞勘察的岩爆预测工作具有参考与借鉴价值。

关键词: 深埋引水隧洞; 地应力; 岩爆评价; 能量准则; 数值模拟

中图分类号: TV554 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)03-0055-08

Rockburst assessment and numerical simulation of deep-buried long tunnel based on energy criterion

ZHAO Hui, ZHANG Haoran

(China Water Resources Pearl River Planning, Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510610, China)

Abstract: Rockburst is one of the major engineering geological problems faced by the construction process of deep-buried tunnels. Accurately determining the possibility of rockburst occurrence and the rockburst level is of vital significance for engineering construction, and it also poses a great challenge to the geological investigation. At present, during the geological investigation of water conservancy projects, only the strength-stress ratio is taken into consideration when determine the rockburst in tunnels using the industry standards. To thoroughly assess the rockburst potential in a deep-buried diversion tunnel, this study first applied the linear elastic energy criterion ($W_e=40\sim 100\text{ kJ/m}^3$) based on survey data and measured in-situ stress results to preliminarily predict the rockburst level. The results indicated an elastic energy density of 45 kJ/m^3 in the surrounding rock, corresponding to a moderate rockburst risk. Subsequently, a three-dimensional geomechanical model was established using the finite difference method to invert the in-situ stress field and simulate the excavation-induced unloading process. It is revealed that elastic energy concentration zones were primarily distributed along the tunnel sidewalls. The numerical results mutually validated the energy criterion predictions, both confirm the spatial characteristics of moderate rockburst risk, and moreover the velocity and distance of the rock mass ejection during rockburst in the surrounding rocks are quantitatively predicted, which provide a basis for dynamic support design, and proposed reference value to the rockburst prediction of the deep-buried long tunnels investigation in the other water conservancy projects.

Key words: deep-buried diversion tunnel; in-situ stress; rockburst assessment; energy criterion; numerical simulation

收稿日期: 2025-02-12; 修回日期: 2025-03-18 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.03.007

第一作者: 赵晖, 男, 汉族, 1986年生, 高级工程师, 岩土工程专业, 硕士, 主要从事水利水电工程地质与水文地质勘察与研究, 广东省广州市天河区天寿路沾益直街19号中水珠江设计大厦211室, 527916566@qq.com。

引用格式: 赵晖, 张浩然. 基于能量准则的深埋长隧洞岩爆评价及数值模拟分析[J]. 钻探工程, 2025, 52(3): 55-62.

ZHAO Hui, ZHANG Haoran. Rockburst assessment and numerical simulation of deep-buried long tunnel based on energy criterion[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3): 55-62.

0 引言

深埋长隧洞岩爆评价及防控是水工隧洞勘察的核心技术难题。随着我国西部高应力区水利工程的密集建设,深埋隧洞施工中岩体储能-卸荷诱发的动力灾变问题日益突出^[1-2]。岩爆作为高地应力区隧洞开挖的典型动力灾害,其能量释放过程具有突发性、连锁性特征,严重威胁施工安全。《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487—2008)^[3]虽建立了基于强度应力比的岩爆判别体系,但工程实践中常因缺乏实测地应力数据,采用经验公式或数值反演推算围岩应力场,导致岩爆预测存在显著不确定性。

针对深埋隧洞岩爆判别的关键科学问题,近年来学者开展了系列研究。郭建强等^[4]提出基于弹性应变能的岩爆分级模型,实现了能量积聚与岩爆强度的定量关联;魏英华等^[5]通过 Hoek-Brown 准则重构隧洞应力场,建立了脆性破坏区与岩爆易发区的空间对应关系;宫凤强等^[6]构建了矿山深部开采时岩爆发生及分级预测的距离判别分析模型;尚彦军等^[7]依据最大切向应力、岩石抗拉强度以及岩体完整性指数等因素,对岩爆趋势与强度展开分析预测。这些成果虽拓展了岩爆预测维度,但对能量释放动态过程及致灾效应的定量描述仍显不足。本研究聚焦环北部湾广东水资源配置工程深埋隧洞,基于实测地应力数据构建三维地质力学模型,重点解决以下问题:(1)高地应力隧洞岩爆发生的可能性与烈度分级;(2)岩爆弹射速度与距离的定量预测。研究成果可为深埋长隧洞勘察中的岩爆风险精准识别与动态防控提供关键技术支撑。

1 工程概况

环北部湾广东水资源配置工程某深埋隧洞位于粤西云开大山,埋深 >600 m的隧洞长约12.5 km,本

段隧洞展布方向为NE52°—NW38°,最大埋深约888 m,开挖洞径约10 m。为评价隧洞的岩爆问题,以某段埋深约为800 m的引水隧洞为研究对象。

2 工程地质条件

2.1 基本地质条件

该段隧洞埋深约800 m,地层岩性主要为中一晚元古代地层云开岩群第三岩组(Pt₂₋₃Y³)云母石英片岩夹变质石英砂岩以及白垩纪侵入岩($\eta\gamma K_2^{2c}$),本段围岩类别以Ⅲ类为主,围岩岩性主要为花岗斑岩,以微风化为主,坚硬。岩体较完整—完整,围岩以整体结构、块状结构为主。结构面多较不发育,以 $\angle 70^\circ \sim 90^\circ$ 裂隙为主,部分可见钙质薄膜。岩体微透水,隧洞施工时地下水活动轻微,多呈潮湿-滴水状。工程地质剖面见图1,岩体物理力学参数见表1,支护方案见图2。

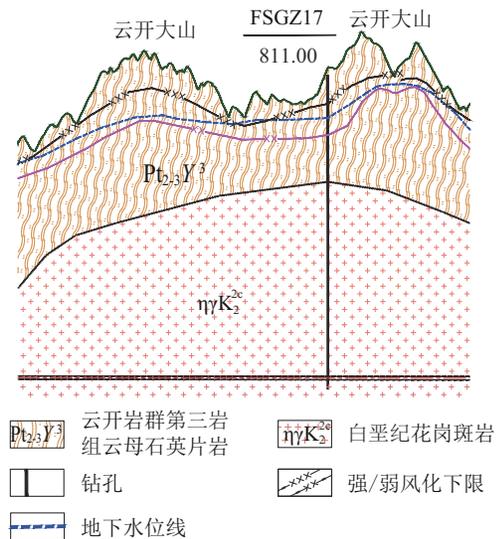


图1 云开大山隧洞工程地质剖面
Fig.1 Engineering geological section of Yunkai Mountain Tunnel

表1 岩体物理力学参数

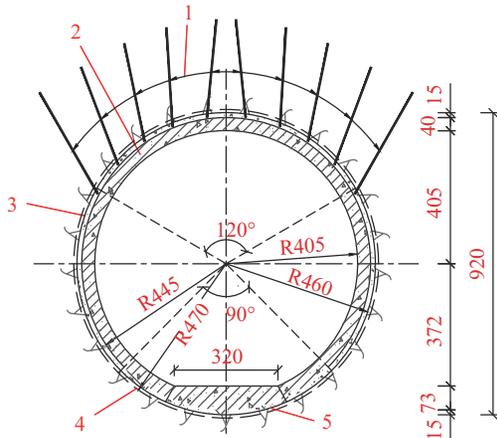
Table 1 Physical mechanical parameters of rock mass

地层代号	岩石名称	天然密度/ (g·cm ⁻³)	天然吸水 率/%	抗压强度/MPa		软化系数	弹性模量/ GPa	泊松比
				饱和	烘干			
Pt ₂₋₃ Y ³	(弱风化)云母石英片岩	2.73	0.24	51	70	0.73	47.2	0.32
Pt ₂₋₃ Y ³	(微风化)云母石英片岩	2.73	0.21	60	84	0.71	66.0	0.30
$\eta\gamma K_2^{2c}$	(微风化)花岗斑岩	2.59	0.10	69	103	0.74	57.4	0.30

2.2 地应力测试

地下洞室围岩发生岩爆的能量主要是由围岩

的地应力场引起的,因此准确确定岩体地应力方向和大小是研究岩爆的基础。



- 1—顶拱120°范围 $\text{O}25@1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ 砂浆(或药卷)锚杆长3m
- 2—C35钢筋砼厚40cm
- 3—顶拱270°挂网 $\text{O}8@15\text{cm}\times 15\text{cm}$ 边顶拱270°喷聚丙烯粗纤维C25砼厚15cm
- 4—开挖轮廓线(含预留变形量)
- 5—全断面H150@90cm钢拱架, 钢筋排: 纵向钢筋 $\text{O}22@5\sim 15\text{cm}$

图 2 云开大山隧洞岩爆段典型支护方案
Fig.2 Typical support scheme for rockburst sections of Yunkai Mountain Tunnel

为了确定地应力场,本工程勘察过程中,选取代表性的 FSGZ17 孔进行了地应力测定,该钻孔位置隧洞埋深 780 m,接近隧洞最大埋深 800 m;穿过的微风化花岗岩与隧洞围岩具有相同岩性特征;钻孔声波速度测井结果显示本段完整性系数为

0.61~0.82,属较完整—完整,满足水压致裂法实施条件;该孔附近地层相对稳定,可代表附近的地应力主方向的典型区域。试验主要采用广泛应用于水利水电、交通、矿山等地下工程的地应力测量的水压致裂法。地应力测试选段的主要原则为:选择钻孔岩心和孔壁比较完整的孔段进行测试,并以隧洞高程附近作为主要试验区间,并对其中具有代表性的测段进行压裂缝方向印模。地应力测试结果见表 2。

数据经过处理,本隧洞段地应力规律如下:

$$\sigma_H = 0.0258H + 2.5 \quad (1)$$

$$\sigma_h = 0.0221H + 0.13 \quad (2)$$

$$\sigma_v = 0.0265H - 0.02 \quad (3)$$

式中: σ_H 、 σ_h 、 σ_v ——分别为最大、最小水平主应力及垂直应力,MPa; H ——深度,m。

FSGZ17 孔(孔深>800 m)的最大水平主应力在 540 m 附近已基本达到高地应力(>20 MPa),该段线路整体属深埋段,山体浑厚、有利于山体内部应力的稳定;且上部为云开岩群盖层、中下部为较均一的白垩纪侵入岩,因此最大水平主应力 σ_H 与最大水平主应力方向的侧压系数 λ_H 自上而下的规律性也较好。

结合工程经验及上述地应力实测结果表明,隧

表 2 FSGZ17 孔水压致裂应力测试计算结果

Table 2 Test and calculation results of hydraulic fracturing stress in Borehole FSGZ17

序号	岩性	孔深/m	岩石抗拉强度 σ_t /MPa	最大水平主应力 σ_H /MPa	最小水平主应力 σ_h /MPa	垂直应力 σ_v /MPa	最大水平主应力方向的侧压系数 λ_H	最大水平主应力方向
1	微片岩、云	256.2	0.6	6.6	5.3	6.8	1.0	
2	母石英片岩	280.5	0.6	9.0	6.4	7.4	1.2	
3		324.3	1.4	10.2	7.9	8.6	1.2	
4		356.6	0.7	9.4	6.9	9.4	1.0	
5		400.4	1.8	12.3	10.2	10.6	1.2	
6		430.3	0.8	13.6	10.5	11.4	1.2	
7		501.6	4.5	11.2	8.6	13.3	0.8	N15°W
8		550.7	0.8	21.1	14.2	14.6	1.4	
9	花岗斑岩	580.9	4.5	17.4	12.2	15.4	1.1	
10		630.5	5.6	20.5	14.8	16.7	1.2	
11		665.7	3.0	19.2	15.9	17.6	1.1	N23°W
12		702.6	1.3	18.7	14.6	18.6	1.0	
13		735.7	0.8	23.6	16.5	19.5	1.2	
14		760.0	3.0	20.8	15.9	20.1	1.0	
15		796.7	4.5	25.6	18.4	21.1	1.2	N35°W

洞地应力场分布较为均匀,岩心形态未见饼状岩心(见图3)、地质构造背景未见活动性断裂,地应力状态主要受构造应力或自重应力控制,属高地应力—中等地应力过渡地带。最大水平主应力一般较自重应力大,但不同深埋洞段的地应力变化规律不一。在测区范围内,水平应力占主导地位,说明测区的水平构造运动起主要的控制作用。

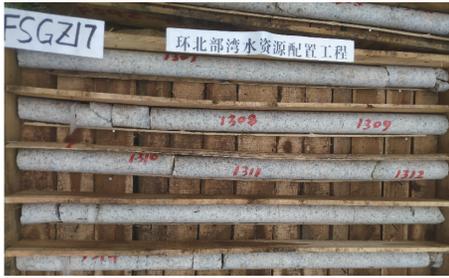


图3 地应力测试钻孔隧洞段代表性岩心照片

Fig.3 Representative core samples from the in-situ stress test borehole in the tunnel section

根据勘察成果,本隧洞段围岩岩体饱和单轴抗压强度 $R_c=69$ MPa, $\sigma_m=25.6$ MPa, $R_c/\sigma_m=2.69$, 依据《引调水线路工程地质勘察规范》(SL629—2014)^[8],属于高地应力地区。

3 隧洞岩爆评价研究

3.1 根据能量准则的岩爆评价

有关学者的研究成果表明^[9-10],隧洞围岩所聚集的线弹性能按下式计算:

$$W_e = R_b^2 / (2E_s) \quad (4)$$

式中: R_b ——单轴抗压强度,MPa; E_s ——卸载切线弹性模量,MPa。

根据弹性能的大小,将岩爆划分为4个等级,见表3^[11]。

勘察成果显示,隧洞围岩饱和单轴抗压强度平均值 $R_b=69$ MPa,弹性模量 $E_s=57.4$ GPa,根据式

表3 线弹性能岩爆等级判别

Table 3 Discrimination of rockburst grade based on linear elastic energy

岩爆等级	线弹性能 $W_e/(KJ \cdot m^{-3})$
弱岩爆(I)	$W_e < 40$
中等岩爆(II)	$40 \leq W_e < 100$
强岩爆(III)	$100 \leq W_e < 200$
极强岩爆(IV)	$W_e \geq 200$

(4)计算得到隧洞围岩岩石线弹性能 $W_e=41.5$ kJ/m³,该隧洞属于II级岩爆岩石,有中等岩爆趋向。

3.2 根据岩石脆性准则的岩爆评价

根据相关研究成果^[12],岩石脆性系数亦可对岩爆进行预测评价,岩石的脆性系数计算公式如下:

$$B = R_b / R_t \quad (5)$$

式中: R_b 、 R_t ——分别为岩石单轴抗压强度和单轴抗拉强度,MPa。

脆性系数评价标准如表4所示。

表4 岩石脆性系数岩爆等级判别

Table 4 Discrimination of rockburst grade based on rock brittleness coefficient

岩爆等级	脆性系数 B
强岩爆	$B < 14.5$
中等岩爆	$14.5 \leq B \leq 26.7$
弱岩爆	$26.7 < B \leq 40$
无岩爆	$B > 40$

根据勘察成果,经过计算得到岩石脆性系数如表5所示。可见,本段隧洞岩石脆性系数多介于14.5~26.7之间,属于中等岩爆;少部分脆性系数 < 14.5,属于中等—强岩爆岩石。总体上,按照岩石脆性准则判断,隧洞围岩具有中等岩爆趋向。

表5 隧洞岩石脆性系数计算

Table 5 Calculation of brittleness coefficient of tunnel rock

深度/m	抗拉强度/MPa	脆性系数 B	岩爆等级
256.2	0.6	115.0	无
280.5	0.6	115.0	无
324.3	1.4	49.3	无
356.6	0.7	98.6	无
400.4	1.8	38.3	弱
430.3	0.8	86.3	无
501.6	4.5	15.3	中等
550.7	0.8	86.3	无
580.9	4.5	15.3	中等
630.5	5.6	12.3	强
665.7	3.0	23.0	中等
702.6	1.3	53.1	无
735.7	0.8	86.3	无
760.0	3.0	23.0	中等
796.7	4.5	15.3	中等

3.3 数值模拟

3.3.1 模型建立

为研究隧洞开挖前原始地应力场和开挖扰动后的应力重分布场及能量聚集规律,本研究利用有限差分法进行数值模拟,所用模拟软件为 FLAC3D,根据隧洞分布深度,模型尺寸的长、宽、高均为 400 m,见图 4,模型埋深 600~1000 m,隧洞开挖直径为 10 m,为 TBM 开挖,近似圆形,隧洞的圆点定为模型的中心原点。其中 Y 轴方向为隧洞的展布方向,Z 轴为垂直地面方向,模型共划分 220000 个单元,222301 个节点,分为 suidong 和 weiyang 两个组,计算本构模型选择摩尔-库伦强度准则理论。

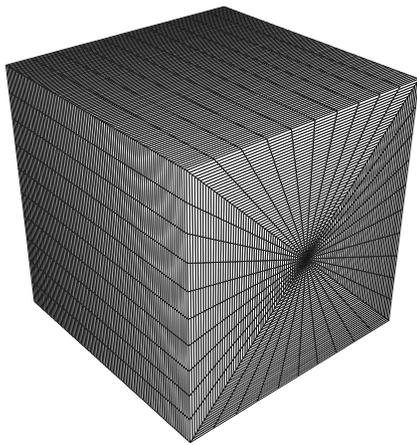


图 4 计算模型

Fig.4 Computational model

根据本工程勘察成果,结合工程的实际条件,岩石数值模拟计算参数见表 6 所示。

根据研究成果,岩石弹性能的计算公式^[11]为:

$$W_e = (1/2) \times (\sigma_1 \epsilon_1 + \sigma_2 \epsilon_2 + \sigma_3 \epsilon_3) \quad (6)$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——分别为岩体单元内的主应力; $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ ——分别为岩体单元内的主应变。

本次模拟首先在钻孔实测地应力成果的基础上,对所需模型范围内的地应力场进行反演,模拟出整个区域的地应力分布,然后再模拟分析隧洞开挖后整个区域的弹性能分布和聚集情况,进而分析岩爆发生的可能性及预测岩爆等级。

3.3.2 数值模拟结果分析

3.3.2.1 隧洞地应力反演

通过计算反演分析,工程区的垂直应力场、水平应力场分布规律见图 5~9,通过反演分析,隧洞部位垂直应力为 20.0~20.2 MPa,隧洞水平 X 方向主应力范围值为 23.2~23.6 MPa, Y 方向主应力值为 17.8~18.0 MPa。地应力分布规律总体上是随深度的增加而增加,隧洞处地应力以水平应力为主。

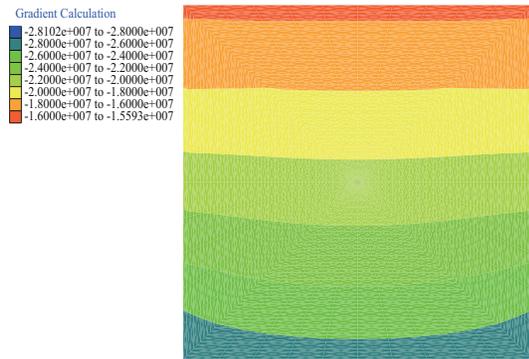


图 5 隧洞围岩垂直应力云图

Fig.5 Cloud map of vertical stress of the tunnel surrounding rocks

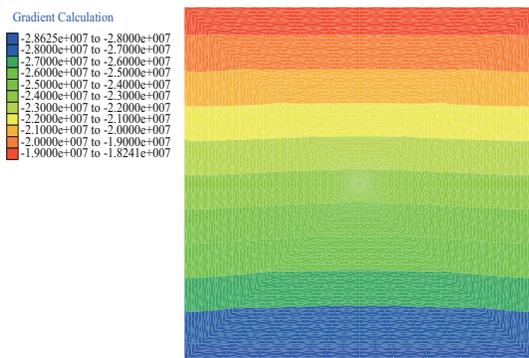


图 6 隧洞围岩水平应力云图

Fig.6 Cloud map of horizontal stress of the tunnel surrounding rocks

3.3.2.2 隧洞线弹性能岩爆分析

计算模型范围内的弹性能分布规律见图 10,根据结果可知,隧洞工程区的弹性能的聚集自地面向下逐渐增大的。分析过程中对隧洞中心点(埋深

表 6 岩体数值模拟力学计算参数

Table 6 Mechanical calculation parameters for numerical simulation of rock mass

岩性	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
花岗岩	2590	57.4	0.3	47.8	22.1	1.74	51	2.67

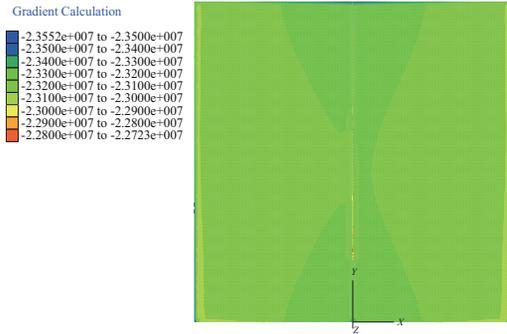


图7 隧洞中心水平切面水平应力(SXX)云图
Fig.7 Cloud map of SXX stress at tunnel center horizontal plane

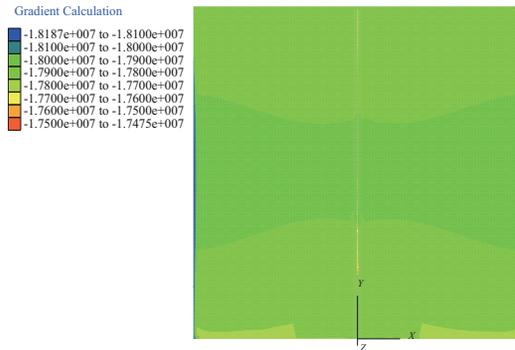


图8 隧洞中心水平切面水平应力(SYY)云图
Fig.8 Cloud map of SYY stress at tunnel center horizontal plane

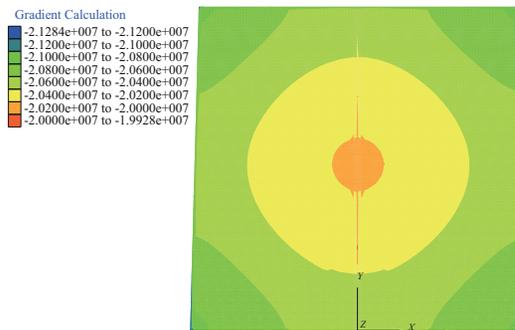


图9 隧洞中心水平切面垂直应力(SZZ)云图
Fig.9 Cloud map of SZZ stress at tunnel center horizontal plane

800 m)水平面进行切片分析该平面的弹性能,结果见图 11,根据模拟结果,隧洞平面聚集的弹性能约为 45~46 kJ/m³,根据表 4 判别其值介于 40~100 kJ/m³之间,具备中等岩爆发生的可能性。从隧洞围岩的变形云图(图 12)上看出,隧洞围岩变形最大的部位为两侧边墙,位移量达 12.7~15.3 mm,是拱顶变形的 2.1~2.4 倍。这一现象与水平构造应力的

主导作用密切相关:根据地应力测试数据(参表 2),埋深 800 m 处侧压力系数 $\lambda_H = \sigma_H / \sigma_v = 1.2$ (测点 15),符合 Hoek-Brown 准则定义的水平应力主导型地应力场^[13]。根据弹性力学厚壁筒理论^[14](式 7),当 $\lambda_H > 1$ 时,边墙切向应力集中系数可达:

$$\sigma_\theta = \sigma_H(1 + r_o^2/r_i^2) - \sigma_v \quad (7)$$

式中: r_o ——洞径; r_i ——计算点半径。

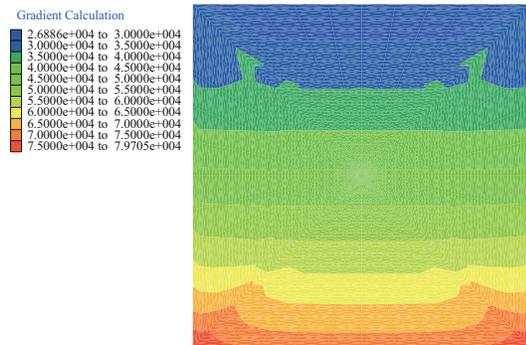


图 10 隧洞围岩线弹性能云图
Fig.10 Cloud map of linear elastic energy of the tunnel surrounding rocks

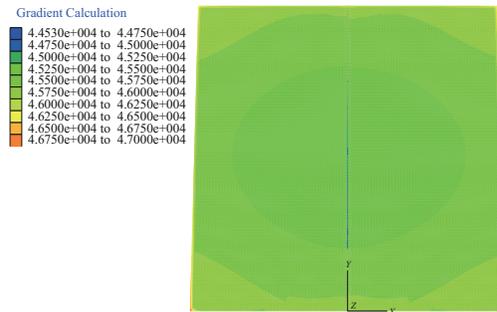


图 11 隧洞中心水平切面线弹性能云图
Fig.11 Cloud map of linear elastic energy at tunnel center horizontal plane

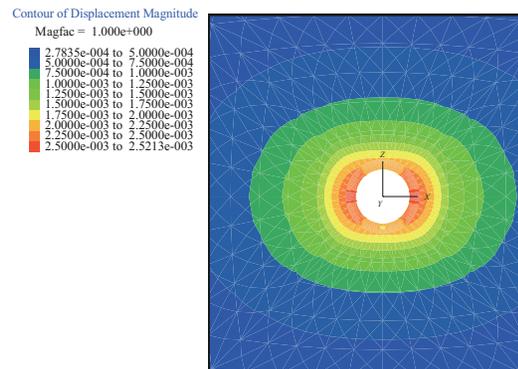


图 12 隧洞开挖变形云图
Fig.12 Cloud map of displacement magnitude for tunnel excavation

代入本工程参数($r_o=5\text{ m}$, $r_i=5.5\text{ m}$)计算得 $\sigma_o=2.8\sigma_{H1}$,显著高于拱顶的 $1.6\sigma_v$ 。这一应力分布特征导致边墙弹性能密度达到 $45\sim 46\text{ kJ/m}^3$ (参见图9),逼近储能岩体的临界阈值($40\sim 100\text{ kJ/m}^3$)。

综合分析上述研究成果,岩爆冲击破坏的发生需同时满足以下条件:

(1)能量临界条件:弹性能密度 $W_e\geq 40\text{ kJ/m}^3$ (Ⅱ级岩爆阈值),本工程 $W_e=45\sim 46\text{ kJ/m}^3$;(2)应力路径条件:侧压力系数 $\lambda_{H1}=\sigma_{H1}/\sigma_v\geq 1.2$ (表2测点15),导致边墙切向应力集中系数 $\sigma_o\geq 2.8$ (式7);(3)岩体结构条件:发育陡倾角裂隙($\angle 70^\circ\sim 90^\circ$,图1),形成潜在剪切滑移面;(4)开挖扰动条件:TBM开挖引发瞬时卸荷,应力重分布速率达 0.35 MPa/s ^[14-16]。

当上述条件协同作用时,储能岩体沿结构面发生脆性破裂,释放动能引发冲击破坏^[17]。

3.4 岩爆弹射参数预测

3.4.1 预测模型

基于FLAC3D计算的弹性能分布(参见图11),运用能量-运动学耦合模型进行预测,选取 $W_e>40\text{ kJ/m}^3$ 区域作为潜在弹射源。假设岩爆释放动能 E_k 与储能岩体体积 V 满足:

$$E_k = \int_v W_e dV \approx W_e V \quad (8)$$

式中: $W_e=45\text{ kJ/m}^3$ (平均弹性能密度,取自图11云图统计值); $V=2.1\text{ m}^3$ (高能区体积,通过云图像素分析法获取);

计算得 $E_k=94.5\text{ kJ}$ 。根据动能定理,弹射初速度 V 可表示为:

$$V = \sqrt{2E_k/m} \quad (9)$$

取典型岩块尺寸 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.3\text{ m}$ (根据地层片理间距确定),岩体密度为 2590 kg/m^3 ,得质量 $m=194.25\text{ kg}$ 。代入计算:

$$V = \sqrt{2 \times 94.5 \times 10^3 / 194.25} \approx 31.2\text{ m/s}$$

3.4.2 弹射距离修正计算

考虑片理结构面对运动轨迹的影响(见图13),采用Barton空气阻力修正模型^[18]:

$$S_c = S_o \times [1 - 0.12 \ln(\rho_a C_d A / m)] \quad (10)$$

式中: S_c ——修正值, S_o ——理论值。参数取值如下:弹射角度 $\theta=75^\circ$ (据2.1节 $\angle 70^\circ\sim 90^\circ$ 裂隙取中值);空气密度 $\rho_a=1.29\text{ kg/m}^3$;阻力系数 $C_d=1.05$;

迎风面积 $A=0.5\text{ m}\times 0.3\text{ m}=0.15\text{ m}^2$ 。

计算得修正后最大弹距: $S_{\max}\approx 7.8\text{ m}$ 。

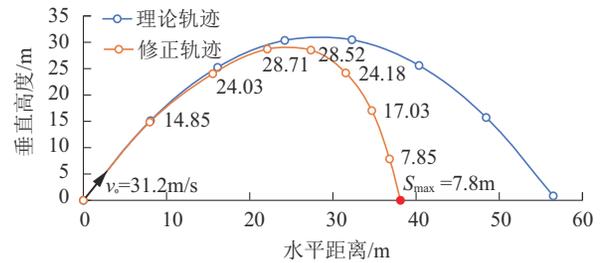


图13 岩爆弹射运动轨迹模拟

Fig.13 Simulated projectile motion trajectories of rockburst

4 结论

(1)根据实测地应力数据反演结果,云开大山隧洞场地的地应力以水平应力为主。总体上是随着深度的增加而增大。

(2)综合线弹性能准则与岩石脆性准则分析,云开大山隧洞围岩具备中等岩爆风险:线弹性能密度 $W_e=41.5\text{ kJ/m}^3$,处于Ⅱ级岩爆阈值区间;岩石脆性系数 $B=14.5\sim 26.7$,符合中等岩爆判别标准。二者共同验证了中等岩爆风险的空间一致性。

(3)数值模拟表明,云开大山隧洞边墙部位同时满足岩爆破坏的四类条件:弹性能密度 $W_e\geq 40\text{ kJ/m}^3$,侧压力系数 $\lambda_{H1}\geq 1.2$ (水平应力主导),发育陡倾角结构面($\angle > 70^\circ$),开挖卸荷速率 $> 0.3\text{ MPa/s}$ 。是岩爆破坏风险区,需采取超前应力释放与动态支护措施。

参考文献(References):

- [1] 朱爱山,周慧鹏,李勇. TBM法用于金属矿山深部开拓巷道的风险分析及应对措施[J]. 钻探工程, 2021, 48(7): 110-114.
ZHU Aishan, ZHOU Huipeng, LI Yong. Risks and solutions of the TBM method used in deep roadway boring for metal mines [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7): 110-114.
- [2] 孙刚,朱泳,赵敏,等. 基于水平钻探的地形变观测平硐勘察方法研究[J]. 钻探工程, 2022, 51(2): 154-160.
SUN Gang, ZHU Yong, ZHAO Min, et al. Research on investigation method of terrain change observation adits based on horizontal drilling [J]. Drilling Engineering, 2022, 51(2): 154-160.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水利水电工程地质勘察规范: GB50487-2008[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. Code for engineering geological investigation of water resources and hydropower: GB50487-2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2009.

- [4] 郭建强,刘新荣.强度准则与岩爆判据统一的研究[J].岩石力学与工程学报,2018(S1):3340-3352.
GUO Jianqiang, LIU Xinrong. Study on the uniformity between strength criterion and rockburst criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018(S1):3340-3352.
- [5] 魏英华,柳飞.高地应力隧道岩爆机理数值模拟分析[J].现代隧道技术,2020,57(6):46-54.
WEI Yinghua, LIU Fei. Numerical simulation analysis of the rockburst mechanism in the tunnel with high geostress[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020,57(6):46-54.
- [6] 宫凤强,李夕兵.岩爆发生和烈度分级预测的距离判别方法及应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):1012-1018.
GONG Fengqiang, LI Xibing. A distance discriminant analysis method for prediction of possibility and classification of rockburst and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(5):1012-1018.
- [7] 尚彦军,张镜剑,傅冰骏.应变型岩爆三要素分析及岩爆势表达[J].岩石力学与工程学报,2013,32(8):1520-1527.
SHANG Yanjun, ZHANG Jingjian, FU Bingjun. Analyses of three parameters for strain mode rockburst and expression of rockburst potential[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(8):1520-1527.
- [8] 中华人民共和国水利部.引调水线路工程地质勘察规范:SL629-2014[S].北京:中国水利水电出版社,2014.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for engineering geological investigation of water diversion route: SL629-2014[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2014.
- [9] 乔春生,田治友.冬瓜山铜矿床岩爆发生可能性研究[J].岩石力学与工程学报,1998,17(S1):917-921.
QIAO Chunsheng, TIAN Zhiyou. Possibility of rock burst occurrence in Dongguashan Copper Deposit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998,17(S1):917-921.
- [10] 蔡美峰,王金安,王双红.玲珑金矿深部开采岩体能量分析与岩爆综合预测[J].岩石力学与工程学报,2001,20(1):38-42.
CAI Meifeng, WANG Jinan, WANG Shuanghong. Analysis on energy distribution and prediction of rock burst during deep mining excavation in Linglong Gold Mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001,20(1):38-42.
- [11] 蔡美峰,冀东,郭奇峰.基于地应力现场实测与开采扰动能量积聚理论的岩爆预测研究[J].岩石力学与工程学报,2013(10):1973-1980.
CAI Meifeng, JI Dong, GUO Qifeng. Study of rockburst prediction based on in-situ stress measurement and theory of energy accumulation caused by mining disturbance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013(10):1973-1980.
- [12] Kwasniewski M, Wang J A. 3-D numerical modeling and study of mine tremors associated with coal mining in the vicinity of major faults[J]. Publs. Inst. Geophys. Polacad. SC, 1999, M-22(310):351-364.
- [13] Hoek E, Brown E T. Underground Excavations in Rock[M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980.
- [14] Feng X T. Rockburst: Mechanisms, Monitoring, Warning and Mitigation[M]. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [15] Guo P P, Gong X N, Wang Y X, et al. Minimum cover depth estimation for underwater shield tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021,115:104027.
- [16] Li S, Liu H, Cai M. In-situ monitoring and numerical analysis of stress redistribution induced by TBM excavation in high-stress rock masses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020,53(3):1235-1255.
- [17] Hudyma M, Cai M. Evaluation and mitigation of rockburst hazards [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020,99:103341.
- [18] Barton N. Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy[M]. London: Crc Press, 2013.

(编辑 王文)