



考虑岩体性质空间变异的岩爆倾向性概率评估

刘加柱 高永涛 吴顺川 吴忠广 李光全 李在利

Probability evaluation of rockburst tendency considering the spatial variation in rock mass properties

LIU Jiazhu, GAO Yongtao, WU Shunchuan, WU Zhongguang, LI Guangquan, LI Zaili

引用本文:

刘加柱, 高永涛, 吴顺川, 吴忠广, 李光全, 李在利. 考虑岩体性质空间变异的岩爆倾向性概率评估[J]. 工程科学学报, 2024, 46(1): 1–10. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2023.04.18.001

LIU Jiazhu, GAO Yongtao, WU Shunchuan, WU Zhongguang, LI Guangquan, LI Zaili. Probability evaluation of rockburst tendency considering the spatial variation in rock mass properties[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(1): 1–10. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2023.04.18.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.04.18.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

层理倾角对受载千枚岩能量演化及岩爆倾向性影响

Effect of bedding dip on energy evolution and rockburst tendency of loaded phyllite

工程科学学报. 2019, 41(10): 1258 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.09.18.003>

循环荷载下花岗岩应力门槛值的细观能量演化及岩爆倾向性

Meso–energy evolution and rock burst proneness of the stress thresholds of granite under triaxial cyclic loading and unloading test

工程科学学报. 2019, 41(7): 864 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.07.004>

一种光敏树脂结构的力学性能

Mechanical properties of a photosensitive resin structure

工程科学学报. 2019, 41(4): 512 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.04.012>

岩爆结构面强度的弱化特征

Strength weakening characteristic of rock burst structural planes

工程科学学报. 2018, 40(3): 269 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.03.002>

金属层合板板形翘曲变形行为

Warpage deformation behavior of metal laminates

工程科学学报. 2021, 43(3): 409 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.01.03.001>

THMC多场耦合作用下岩石力学实验与数值模拟研究进展

Research review of rock mechanics experiment and numerical simulation under THMC multi–field coupling

工程科学学报. 2021, 43(1): 47 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.07.29.005>

考虑岩体性质空间变异的岩爆倾向性概率评估

刘加柱¹⁾, 高永涛¹⁾, 吴顺川^{1,2)✉}, 吴忠广³⁾, 李光全⁴⁾, 李在利⁴⁾

1) 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083 2) 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093 3) 交通运输部科学研究院标准与计量研究中心, 北京 100029 4) 玉溪矿业有限公司, 玉溪 653100

✉通信作者, E-mail: wushunchuan@163.com

摘 要 为了探究更为符合工程实际的岩爆倾向性评判方法, 对岩爆倾向性及其不确定性问题进行了研究. 首先, 建立改进的黏结强度弱化-摩擦强度强化模型, 结合能量指标实现岩爆倾向性分析; 依托埋深超千米的大红山铜矿工程, 将点估计-有限元分析应用于岩爆倾向性评判, 构建分析模型; 进一步求得岩爆倾向性的概率模型, 并得到直观的概率分布情况. 结果表明: 所用本构及指标可较好地进行了岩爆倾向性分析, 考虑参数变异性后, 95% 置信度的岩爆深度与现场记录深度吻合度较高, 岩爆角度范围也基本吻合, 比仅取定值更为准确, 验证了所作不确定性分析的可行性与正确性. 不同统计指标符合不同的分布函数, 岩爆深度、范围角及完全能量释放值的最优分布分别为 Normal 分布、Gamma 分布及 Lognormal 分布. 基于深度及范围角指示, 以 80%、40%、20% 为界限, 可将倾向性概率划分为极大、大、中、小四个等级区间, 岩爆区域的概率分布图可以更为直观合理地判断出岩爆破坏的区域和概率. 研究结果对岩爆支护及风险评估具有参考意义.

关键词 巷道; 岩爆预测; 点估计法; 有限元; 弹性释放能

分类号 TD-05

Probability evaluation of rockburst tendency considering the spatial variation in rock mass properties

LIU Jiazhu¹⁾, GAO Yongtao¹⁾, WU Shunchuan^{1,2)✉}, WU Zhongguang³⁾, LI Guangquan⁴⁾, LI Zaili⁴⁾

1) Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

3) Research Center for Standards and Metrology, China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China

4) Yuxi Mining Co., Ltd., Yuxi 653100, China

✉Corresponding author, E-mail: wushunchuan@163.com

ABSTRACT Rockburst disasters pose an increasing threat to the construction safety of deep-buried engineering; thus, rockburst prediction is crucial for ensuring construction safety. However, due to the spatial variation in mechanical properties of rock mass, the actual results of rockburst prediction remain uncertain to some extent. In this study, rockburst tendency and its probability were studied to explore a more suitable evaluation method for rockburst tendency in engineering practice. First, an improved cohesion weakening-friction strengthening model was developed considering the dynamic change of rock dilatancy strength, and the rockburst tendency analysis was combined with the energy index. The point estimation-finite element analysis method was used to analyze rockburst tendency based on the Dahongshan copper mine project buried at a depth greater than 1,000 m. A finite element model was constructed, in which initial cohesion, residual cohesion, residual friction angle, viscous plastic strain critical value, critical value of

收稿日期: 2023-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51934003); 云南省创新团队项目 (202105AE160023)

cohesion plastic strain, and critical value of friction angle plastic strain were used as input variables, and rockburst depth, range, and local energy release value were used as output variables. The specific methods and steps of problem analysis were also elucidated. Furthermore, the probability model of rockburst failure was obtained, and the probability density function and cumulative distribution function were obtained. The probability distribution of the rockburst area was obtained by meshing the failure elements and weight combinations of different scheme results. The research results revealed that the constitutive model and index can better represent the rockburst damage compared with other methods. After considering the variability of rock mass parameters, the depth of rockburst with 95% confidence is consistent with the depth recorded in the field, and the angle range also agrees, which is more accurate than only the fixed value, thus verifying the feasibility and correctness of the uncertainty analysis. The data predicts the unspecified range and local energy release value. Moreover, different statistical indicators conform to different distribution functions. Normal, gamma, and lognormal distributions are optimal for rockburst depth, angle, and local energy release value, respectively. Thus, based on the analysis indication of depth and range, with 80%, 40%, and 20% as the limits, the probability of tendency can be divided into maximum, large, medium, or small, respectively. The probability distribution map of the rockburst area can more intuitively determine the area and probability of rockburst damage. The research results are significant for rockburst support and risk assessment.

KEY WORDS roadway; rockburst prediction; point estimation method; finite element; elastic release energy

随着越来越多的矿山、水电站等工程进入深部施工,岩爆灾害问题愈加突出,成为人员安全及设备安全的重要威胁^[1-2]。由于岩爆灾害的突发性、危害性、机理复杂性等特征,正确的判定与预测岩爆已成为近些年来岩石力学领域的研究热点问题^[3],也是提前规避与降低灾害损失、确保安全生产所面临的必须要解决的问题,然而想要准确地判定与预测岩爆却又是非常困难的。

岩爆预测方法大概可分为三类:指标判据法、现场监测预报法及多因素综合预测法^[4]。诸多学者进行了大量的研究, Brown 与 Hoke^[5]、以及 Russe^[6]根据洞室的最大切向应力与岩石的单轴抗压强度,提出了岩爆指标判据。陶振宇^[7]结合工程案例,从最大主应力角度提出了相关判据。陈卫忠等^[8]从岩石力学试验出发,提出了基于能量原理的岩爆判据。谷明成等^[9]在统计隧道围岩应力及围岩参数后,提出了基于秦岭隧道的综合判据。吴顺川等^[10]、田睿等^[11]、以及谭文侃等^[12]利用神经网络、云模型等机器学习方法对岩爆进行预测。近些年来,数值模拟被越来越多地应用于岩爆预测分析,主要是使用能量及应力/强度指标进行分析。苏国韶等^[13]、Weng 等^[14]基于数值模拟,使用能量释放指标对岩爆进行分析预测。Diederichs^[15]将结合损伤起始和剥落极限的脆性-屈服准则后准则应用于三维非线性有限元分析,预测了深埋隧道的岩爆倾向性沿隧道轴向的情况。已有研究基本都是在工程范围内大致确立岩爆发生的可能性,选用合适的本构模型及指示指标是岩爆预测工程应用的难点与关键。

在岩土工程领域,涉及大量的不确定性因素,

比如破坏机理、岩体性质、力学模型和几何尺寸等,许多事故隐患正是来源于不确定性或误差^[16]。由于岩土材料参数的空间变异性,问题的分析结果也会出现一定的变化,不确定性因素会影响到岩爆预测的结果,因此,开展岩土参数的不确定性研究对提高岩爆预测精度具有重要意义。

本文考虑岩体性质的空间变异性特点,提出了将点估计与有限元相结合对岩爆倾向性进行概率评估的方法。首先建立改进黏结强度弱化-摩擦强度强化(CWFS)模型,使用完全能量释放指标进行岩爆范围确定。在此基础上,将点估计法与有限元法相结合应用于岩爆问题分析,建立点估计分析模型及岩爆判定概率模型,研究岩土参数不确定性对岩爆统计特征的影响规律。最后,建立岩爆破坏区域的概率分布图,直观合理地分析相关概率情况。

1 岩爆倾向性概率分析原理及实现

1.1 改进脆性本构模型

目前用于分析岩石破坏的 Mohr-Coulomb、Drucker-Prager 等模型不能很好的反映出硬脆围岩的破坏,基于 Mohr-Coulomb 强度准则, Hajiabdolm-ajid^[17-19]提出了与塑性应变相关的 CWFS 模型,用来描述脆性岩石加卸载破坏过程中各强度组分与塑性应变之间的关系,表达式为:

$$f(\sigma) = f(c, \bar{\epsilon}^p) + f(\sigma_n, \bar{\epsilon}^p) \tan \varphi \quad (1)$$

其中, $f(\sigma)$ 为剪切强度, MPa; $f(c, \bar{\epsilon}^p)$ 为黏结强度分量, MPa, c 为黏聚力, MPa; $f(\sigma_n, \bar{\epsilon}^p) \tan \varphi$ 为摩擦强度分量, MPa, σ_n 为岩体破坏面上的正应力, MPa, φ 为内摩擦角, (°); $\bar{\epsilon}^p$ 为等效塑性应变^[20]。

在脆性破坏初期,黏结强度分量占主导地位,发生的主要变化是黏聚力损失,当黏结强度分量显著降低、损伤积累较多时,摩擦强度被逐步充分调动,黏结强度与摩擦强度非同步发挥作用,具体的强度特征描述如图1所示,其中 c_i 为初始黏聚力, c_r 为残余黏聚力, ε_c^p 与 ε_f^p 为达到残余黏聚力与残余摩擦角时的塑性应变。

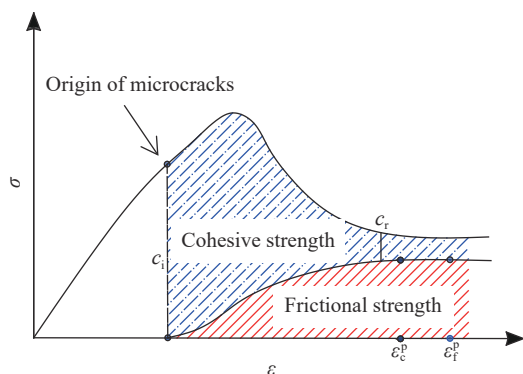


图1 CWFS模型中强度特征描述

Fig.1 Description of strength characteristics in the CWFS model

在CWFS本构模型中,考虑到了黏结强度组分与摩擦强度组分的影响,但却未考虑岩石剪胀带来的影响.岩石剪胀是岩土材料峰后扩容的重要力学表现行为,对相关岩土材料问题的分析具有重要影响,但在目前的理论及与数值表达中,常被忽略或简化为常数.研究表明^[21-23],恒定剪胀角不能如实表达出岩石的非线性体积变化行为,围压及塑性变形影响岩石扩容,剪胀行为对于岩石的脆性破坏范围有着显著影响.因此,若想要更加准确地描述硬脆围岩破坏特征,还需考虑剪胀角的动态变化,建立起综合考虑黏结强度、摩擦强度及岩石剪胀等影响因素的适用于硬脆围岩的本构模型,从而才能够更加准确地表征岩爆破坏行为.结合塑性力学理论,本研究使用剪胀角模型表示中

粒径凝灰岩的剪胀角数值^[24],即采用非线性拟合方式建立同时考虑围压与塑性剪切参数的模型:

$$\psi = ab[\exp(-b\gamma_p) - \exp(-c\gamma_p)]/(c-b) \quad (2)$$

其中, ψ 为剪胀角,°; σ_3 为围压,MPa; γ_p 为塑性剪切应变; a 、 b 、 c 为与围压有关的拟合参数.

FLAC3D软件允许用户开发新的本构模型,基于硬脆围岩强度特征规律,将剪胀随围压及塑性参数变化等功能嵌入到本构模型中,创建黏聚力、摩擦角、剪胀角动态变化本构模型,得到改进脆性本构模型^[21],并将其首次应用于岩爆倾向性概率问题研究.

1.2 能量释放规律与岩爆指标

巷道施工期间的能量释放主要发生在邻近掌子面施工时,设临近掌子面循环的开挖岩体体积为 V ,围岩释放能量为 W_r ,能量释放率为ERR,则

$$W_r = \frac{1}{2} \int_{s_m} u_j T_j ds \quad (3)$$

$$ERR = W_r/V \quad (4)$$

其中, s_m 为当前开挖循环步开挖后露出表面积, m^2 ; u_j 为开挖后周边围岩位移, m ; T_j 为开挖前表面节点力, N .

储存在岩体内的应变能是岩爆发生的主要能量来源^[25].地下工程施工过程中,能量发生聚集,当积聚的能量超过岩体储能极限时,岩体局部失稳破坏,发生能量瞬间释放.因此,局部能量释放大小对于评估岩爆风险具有重要意义,所谓局部能量释放率值,即岩体单元破坏前后的能量释放差值.记录岩体表征单元破坏前后的能量密度值,取其差值为局部能量释放率^[13].在此基础上,使用改进脆性模型,每5个计算步读取一次数据,数值单元出现两种不同的能量密度变化形式,如图2所示.将该过程的能量释放值称为完全能量释放

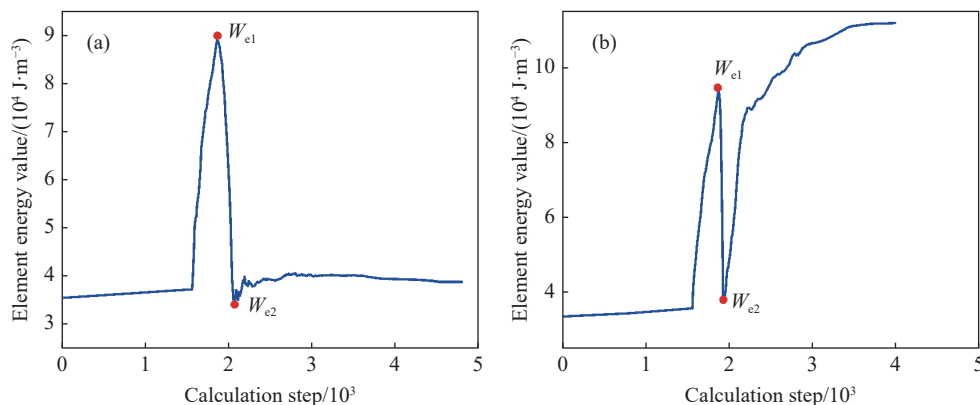


图2 破坏单元体能量变化形式. (a) 形式一; (b) 形式二

Fig.2 Energy variation form of failure element: (a) form one; (b) form two

密度(Full energy release density, FERD)

$$\text{FERD}_k = W_{e1} - W_{e2} \quad (5)$$

其中, FERD_k 表示第 k 个单元的完全能量释放率, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$; W_{e1} 表示初次能量积聚时的极大值, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$; W_{e2} 表示能量释放后的极小值, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$. 其中,

$$W_{e1} = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) \quad (6)$$

$$W_{e2} = \frac{1}{2}(\sigma_1' \varepsilon_1' + \sigma_2' \varepsilon_2' + \sigma_3' \varepsilon_3') \quad (7)$$

其中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 表示单元破坏前出现极大应变能时对应的主应力(MPa)与主应变; σ_1' 、 σ_2' 、 σ_3' 、 ε_1' 、 ε_2' 、 ε_3' 表示单元破坏后出现极小应变能时对应的主应力(MPa)与主应变.

能量密度指标能够考虑不同复杂应力路径对能量释放规律的影响,可反映岩体能量的转移及释放耗散等复杂过程. 本研究使用基于局部能量释放规律的完全能量释放密度来进行岩爆破坏指示.

1.3 点估计研究方案

点估计法是在 Rosenblueth^[26] 提出的统计矩概念基础上发展而来的一种参数估计方法,其主要思想是:在不知分布函数情况下,不考虑变化形态,根据抽取样本构造统计量,以此来估计总体未知参数. 后来该方法被改进后应用于岩土领域,主要用于进行参数的不确定性问题处理上^[27-30].

本研究考虑将点估计法应用于岩爆问题分析,假设存在状态函数,表示为:

$$Y = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (8)$$

其中, $x_1 \sim x_n$ 为内摩擦角、黏聚力等岩体的物理力学参数随机变量,会符合一些分布形态,比如常见的高斯分布; Y 为岩爆的特征指标,比如深度、范围等. 对于各随机变量,考虑岩体参数的变化,求得随机变量的一阶原点矩与二阶中心矩,只在密度函数的参数区间($x_{\min}$, $x_{\max}$)上对称地取两个点 x^- 、 x^+ , 即均值 μ_x 左右一个标准差 σ_x 处. 对于 n 个随机变量,则会有 2^n 种参数组合,可求得 2^n 组 Y 值结果,即 2^n 组岩爆区域分布:

$$\begin{cases} Y_1 = F(x_1^-, x_2^-, x_3^-, \dots, x_n^-) \\ Y_2 = F(x_1^+, x_2^-, x_3^-, \dots, x_n^-) \\ Y_3 = F(x_1^-, x_2^+, x_3^-, \dots, x_n^-) \\ \dots \\ Y_{2^n} = F(x_1^+, x_2^+, x_3^+, \dots, x_n^+) \end{cases} \quad (9)$$

进而求得随机变量 Y 的一阶矩、二阶矩及对应的点估计值,并得到反映 Y 分布形态的变异系

数等统计参数^[30].

1.4 概率模型分析

变量的分布形式是未知的,为了分析变量的概率分布特征,首先选用不同的分布形式对变量进行估计. 然后,使用 Kolmogorov-Smirnov 检验(以下简称 K-S 检验)来检验分布拟合. K-S 检验是常用的分布拟合检验方法,不仅能对单个总体是否服从分布进行检验,还能对不同分布是否存在显著差异进行检验. 本文使用 Matlab 里的 kstest 函数进行 K-S 检验^[31],根据样本的经验分布函数 $F_n(x)$ 和指定的分布函数 $G(x)$ 构造检验统计量 D_n :

$$D_n = \max(|F_n(x) - G(x)|) \quad (10)$$

当检验统计量大于指定的临界值时,可认为数据符合指定分布. 对于计算指定的置信度,当样本容量大于 20 时,通过近似方法求临界值,本文在检验时的置信度取默认值 0.05. 如果数据服从多个概率分布形式,则按照 D_n 数值的大小进行排序并取最优者.

基于点估计-有限元分析,得到不同计算方案下岩爆区域的分布图,进一步求得岩爆深度的概率分布图.

2 工程实例

2.1 工程背景

大红山铜矿位于云南省新平县戛洒镇与新化乡交界处,作为中国九大铜矿区之一,是以含黄铜矿、磁铁矿为主的中厚缓倾斜大型矿床. 目前,该矿已进入埋深超过 1000 m 的深地开采阶段,高地应力现象显现. 其中,在 -20 m 中段采准干线,埋深约为 1010 m 地段出现了岩爆破坏,巷道一角呈现典型的 V 字型破坏,如图 3 所示,破坏深度为 0.5 m. 巷道宽(L)为 4.25 m,高(H)为 3.65 m,所在地层岩性为凝灰岩,中等粒径硬岩,属曼岗河组第三岩性段. 在图示破坏点附近钻取岩芯以获取岩石物理力学参数,并在现场采用空心包体应变法(三轴地应力计)进行地应力测量,得到最大主应力 σ_1 为 40 MPa,中间主应力 σ_2 为 26 MPa,最小主应力 σ_3 为 21 MPa.

2.2 数值模型及参数

使用 FLAC3D 软件进行模拟计算. 参照试验隧道的实际情况构建模型,将其看作平面应变问题进行处理,构建数值模型如图 4 所示,其中,模型 x 、 z 向各取 45 m. 为便于研究分析,不考虑主应力的角度倾斜,将 σ_1 与 σ_2 分别看作水平向应力

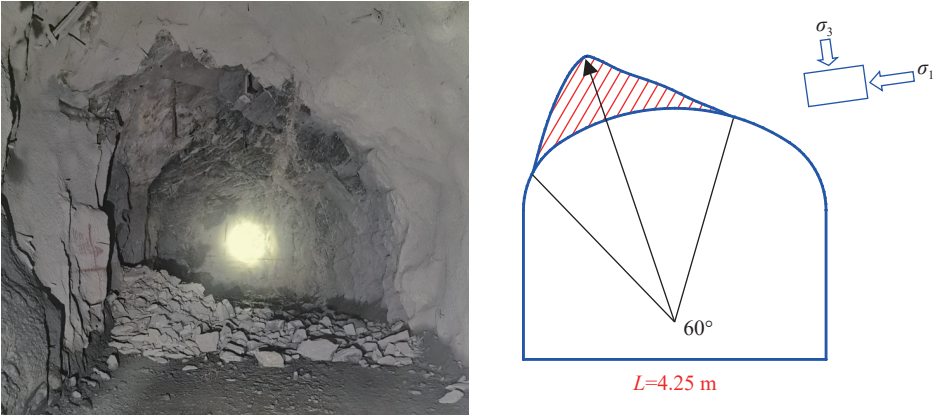


图3 大红山巷道及破坏示意图
Fig.3 Dahongshan roadway and failure diagram

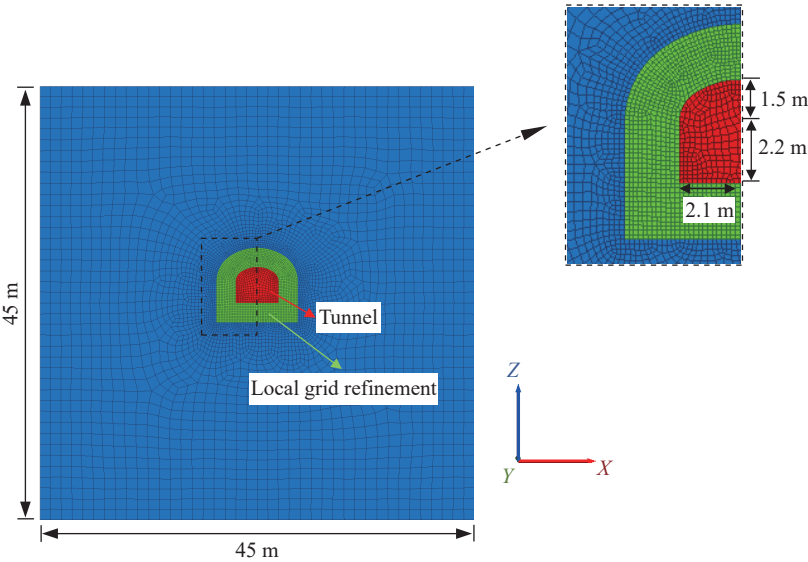


图4 隧道数值模型
Fig.4 Tunnel numerical model

与沿隧道轴向的应力, σ_3 为垂直应力. 使用改进CWFS本构模型进行计算, 现场的凝灰岩物理力学参数如表1所示, 本构模型参数如表2所示.

2.3 研究方案
在研究岩爆内在机理及岩爆预测时, 岩体的物理力学参数被认为是影响岩爆产生的主要因素

表1 凝灰岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of tuff

σ_{ci}/MPa	σ_{ti}/MPa	m_i	GSI	$\varphi/(^\circ)$	c/MPa	m_b, s	σ_{cm}/MPa	σ_{tm}/MPa	E/GPa	ν
105	8.3	12.63	64	42	34	2.49, 0.01	11.4	0.45	0.45	0.28

Notes: σ_{ci} is uniaxial compressive strength of rock; σ_{ti} is tensile strength of rock; m_i, m_b, s are Hoek–Brown constants; GSI is geological strength index; φ is friction angle; c is cohesion; σ_{cm} is uniaxial compressive strength of rock mass; σ_{tm} is tensile strength of rock mass; E is elastic modulus; ν is poisson's ratio.

表2 模型参数取值

Table 2 Model parameter value

Constitutive model	Cohesion/MPa		Critical plastic strain of cohesion	Friction angle/($^\circ$)		Critical plastic strain of friction angle	Dilation angle
	Initial	Residual		Initial	Residual		
Improved CWFS	34	10	0.002	0	42	0.005	Dynamic change

之一, 因此, 将岩体参数的不确定分析纳入考虑范畴, 建立理论分析模型. 将影响岩爆破破坏表现的主要岩体参数^[21, 32]纳入分析范围: 初始黏聚力 c_i 、残余黏聚力 c_r 、残余摩擦角 φ_r 、黏聚力塑性应变临界值 ε_c 及摩擦角塑性应变临界值 ε_f . 由于初始摩擦强度很低, 取作 0, 变动范围小, 不予以考虑.

考虑非均质性等因素的影响, 岩体参数存在很大的不确定性, 根据相关的现场调研及理论研究^[17, 33-35], 案例中岩体的具体点估计参数指标值如表 3 所示.

表 3 点估计参数值

Table 3 Parameter values of the point estimation method

Statistical value	c_i/MPa	c_r/MPa	$\varphi_r/(\text{^\circ})$	$\varepsilon_c/10^{-4}$	$\varepsilon_f/10^{-4}$
Mean value	34.0	10.2	42.0	20	50
Standard deviation	4.59	1.38	1.22	3	5

根据点估计原理, 共有 5 个岩体参数随机变量, 则总计有 32 个组合方案, 分别对各方案进行计算, 求得关于局部能量的分布云图, 得到关于岩爆深度、范围及完全能量释放密度的数据, 进而求

得相应的一阶原点矩、二阶中心矩和变异系数等统计数值.

基于上述研究基础, 本研究中关于岩爆不确定性分析的流程如图 5 所示, 共分为 4 个步骤: (1) 确定岩体参数, 得到组合方案. 首先确定影响岩爆分析的主要影响参数, 这里共取 5 个基本参数随机变量, 根据点估计法, 共得到 2^5 即 32 种参数组合. (2) 计算预处理. 借助于 C++ 语言及 VS2010 软件创建编写相应的岩石剪胀函数动态链接库, 最终得到集剪胀变化及动黏聚力与摩擦角的本构模型, 并通过编写 FISH 程序在软件中实现局部能量计算的功能. (3) 有限元数值计算. 在考虑局部能量、改进脆性本构模型后, 使用 FLAC3D 软件分别对 32 组方案进行计算, 求得以完全能量密度为指示的岩爆模拟结果. (4) 求解统计指标及分布概率. 基于局部能量指标, 求得岩爆区域与完全能量释放值; 然后基于点估计法, 求得岩爆深度、范围角及能量的统计特征; 最后对出现岩爆破坏的单元进行网格化, 对所有方案结果进行权重组合, 得到岩爆概率分布图.

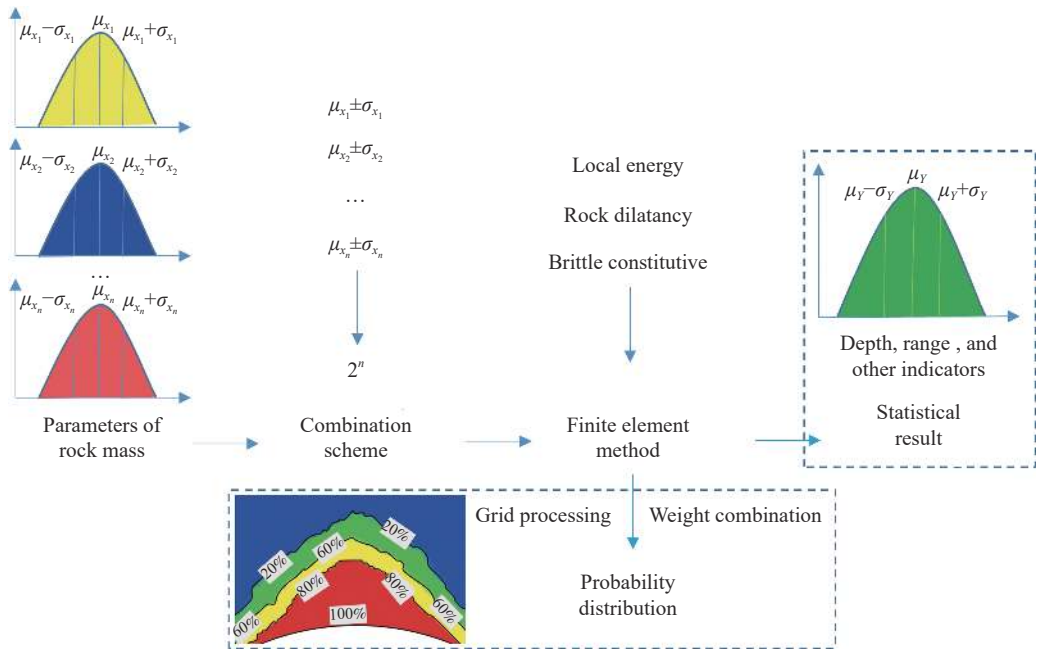


图 5 岩爆不确定性分析计算流程

Fig.5 Calculation process of rockburst uncertainty analysis

3 分析与讨论

3.1 岩爆倾向性分析

基于改进 CWFS 得到的计算结果如图 6 所示. 分析可知: 最大剪应变在拱顶及拱底位置出现应力集中, 但是范围要远大于岩爆区域. 在隧道四周的

不同位置均出现了塑性区, 且深度不等, 其中拱顶深度为 0.40 m. 弹性能量在拱顶及拱脚位置出现能量集中, 其集中位置与剪应变的相一致. 使用完全能量释放率指标时圈定的岩爆发生区域比较明确, 主要在拱顶位置, 深度为 0.53 m、范围角为 57° , 与现场的岩爆破坏基本对应.

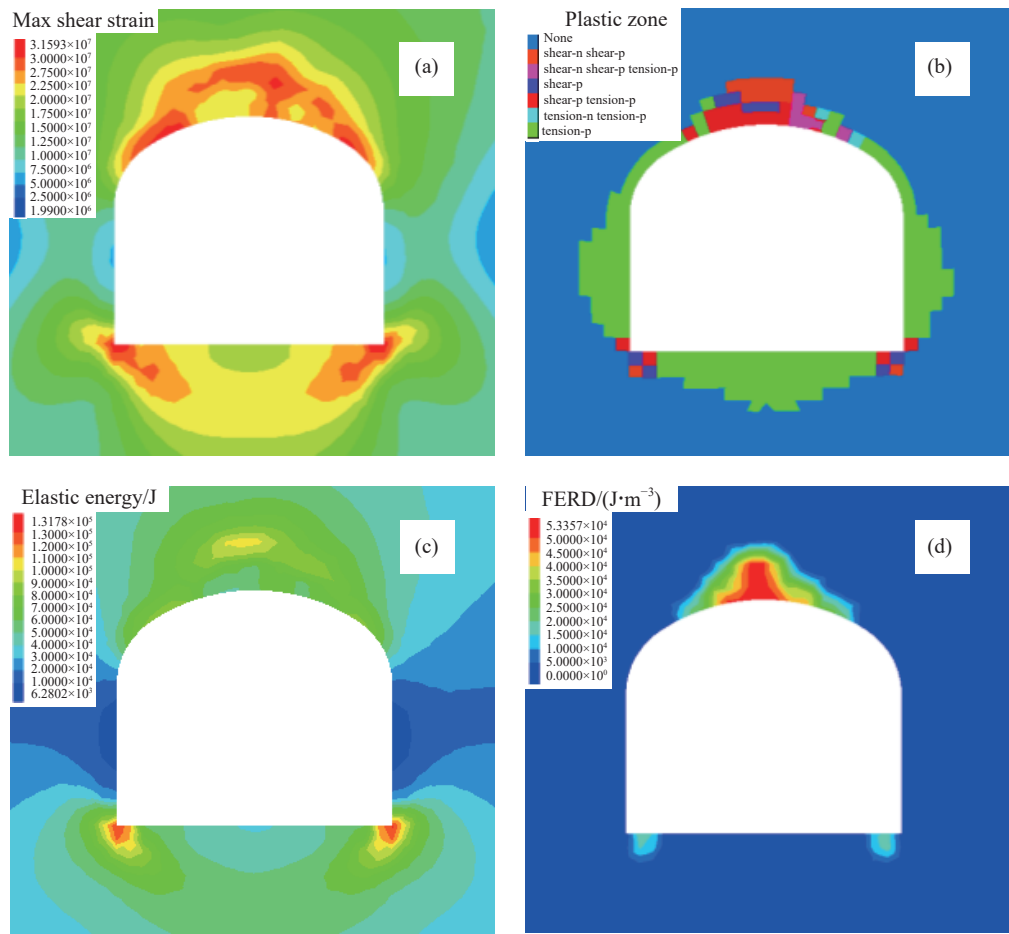


图6 模型模拟结果. (a) 最大剪应变; (b) 塑性区; (c) 弹性能量; (d) 完全能量释放率

Fig.6 Simulation results: (a) max shear strain; (b) plastic zone; (c) elastic energy; (d) full energy release density

总体来看,最大剪应变及弹性能量指标可以大概地指示出应力及能量集中位置,但是区域过大且较为模糊,塑性区区域遍布了隧道周边.使用基于改进模型及完全能量释放率指标时,可以较为准确对岩爆倾向性进行评判.

3.2 倾向性不确定性评估

根据点估计方法进行计算,变量的概率统计值如表4所示.使用几个比较常用的分布形式进

行估计,分别为正态分布(Normal)、对数正态分布(Lognormal)、伽马分布(Gamma)及威布尔分布(Weibull).其中,岩爆深度的四种概率分布与经验分布的对比如图7所示,其他几个变量的结果类似,不再罗列.统计变量对应的K-S检验结果如表5所示.

通过分析可知,岩爆深度的最优分布是Normal分布,岩爆范围的最优分布是Gamma分布,完全能量释放值的最优分布是Lognormal分布.根据点估计方案及概率密度分析,岩爆深度最小值为0.18 m,最大值为1.05 m,变化幅度达到0.87 m.深度标准差为0.18 m,变异系数为0.30,离散程度比较高.若按照爆坑深度进行岩爆烈度划分的话,出现的岩爆主要为轻微—中等烈度.岩爆范围角也有相应变动,最小值为25°,最大值为95°,变异系数为0.28,离散程度相对小一些.关于完全能量释放值,均值为 $6.02 \times 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$,最小值为 $1.22 \times 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$,最大值为 $8.65 \times 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$,有比较大的波动.

根据现场观测记录,岩爆破坏尺寸大小不等,沿巷道连续几公里均发生了破坏,岩爆破坏深度

表4 三个变量的概率统计值

Table 4 Probability statistics for three variables			
Statistical value	Depth/m	Angle/(°)	FERD/(J·m ⁻³)
Mean value	0.61	58.03	6.02×10^4
Standard deviation	0.18	16.42	1.22×10^4
Coefficient of variation	0.30	0.28	0.20
Variation range	[0.18, 1.05]	[25, 95]	[1.22×10^4 , 8.65×10^4]
Mean value and standard deviation (Lognormal)	-0.525, 0.346	4.017, 0.315	1.778, 0.209
Shape parameter and scale parameter (Gamma)	9.986, 0.062	11.505, 5.044	24.473, 0.247
Shape parameter and Scale parameter (Weibull)	0.688, 3.779	64.014, 3.990	6.534, 5.549

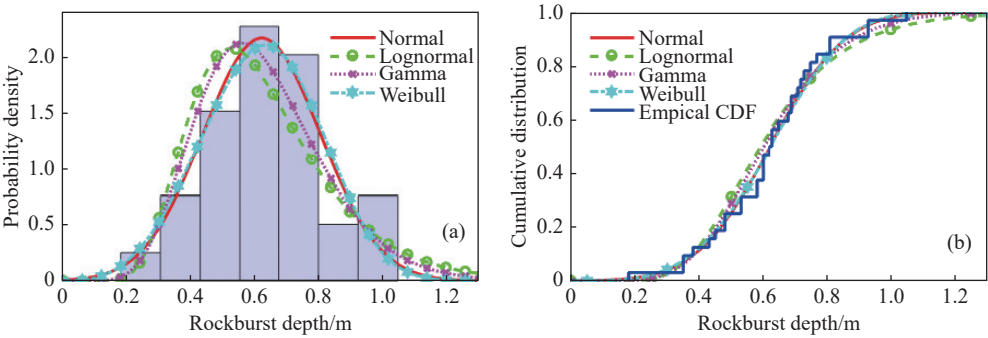


图 7 岩爆深度的四种概率密度及概率分布对比图. (a) 频率直方图与概率密度图; (b) 累积分布图

Fig.7 Comparison of four probability densities and probability distributions of rockburst depth: (a) frequency histogram and probability density diagram; (b) cumulative probability distribution diagram

表 5 K-S 检验统计结果

Table 5 Statistical results of the K-S test

Distribution function	Depth			Angle			FERD		
	D_n	Sorting of D_n	Result	D_n	Sorting of D_n	Result	D_n	Sorting of D_n	Result
Normal	0.061	1	Accept	0.084	2	Refuse	0.087	1	Refuse
Lognormal	0.102	3	Refuse	0.090	3	Refuse	0.065	2	Accept
Gamma	0.079	2	Accept	0.071	1	Accept	0.068	3	Accept
Weibull	0.541	4	Refuse	0.135	4	Refuse	0.469	4	Refuse

Note: Test threshold is 0.084.

变化范围为 0.1 ~ 0.8 m, 而非仅为固定值. 图 8 为岩爆破坏深度不等的部分现场图片, 其中, 图 8 (a) 中巷道表面出现较浅的岩体破坏, 破裂深度约为 0.1 ~ 0.3 m, 图 8(b) 为破坏深度较大的区域, 破坏深度在 0.5 ~ 0.8m 范围. 本研究中, 通过考虑参数的不确定性, 所得岩爆深度的结果为 0.18 ~ 1.05 m, 其中, 95% 置信度的岩爆深度区间为 0.25 ~ 0.97 m, 基本符合现场情况, 相较于固定值 (0.5 m) 描述, 所得结果可更加准确地反映现场情况. 综合来看, 参数不确定性对岩爆深度、范围及能量释放均有较大影响, 其中对岩爆深度的影响最为显著. 通过点估计-有限元分析, 可得到更加符合实际的岩爆破坏情况.

3.3 深度及范围角概率分析

为得到概率分布图, 需对岩爆区域进行相应转化处理: 首先, 对于发生岩爆的区域, 将单元数值记为 100%, 对于未发生岩爆的区域, 将单元数值记为 0; 然后, 把得到的岩爆转化结果进行网格化操作, 利用网格化算法对每个方案进行处理; 最后, 对所得结果进行权重组合, 得到最终的概率分布函数及概率分布图. 岩爆深度及范围角的概率分布图如图 9 所示, 其中, 不同颜色代表不同概率值, 红色代表概率大于 80%, 黄色代表概率为 40% ~ 80%, 绿色代表概率为 20% ~ 40%, 蓝色代表概率小于 20%. 分析可知:

(1) 不同变动参数组合下会产生不同的岩爆破

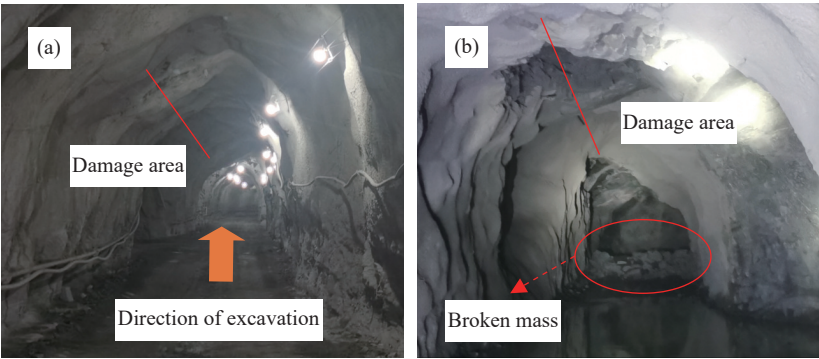


图 8 深度不等的岩爆破坏现场图. (a) 较浅破坏; (b) 较深破坏

Fig.8 Rockburst sites with varying damage depths: (a) shallow damage; (b) relatively deep damage

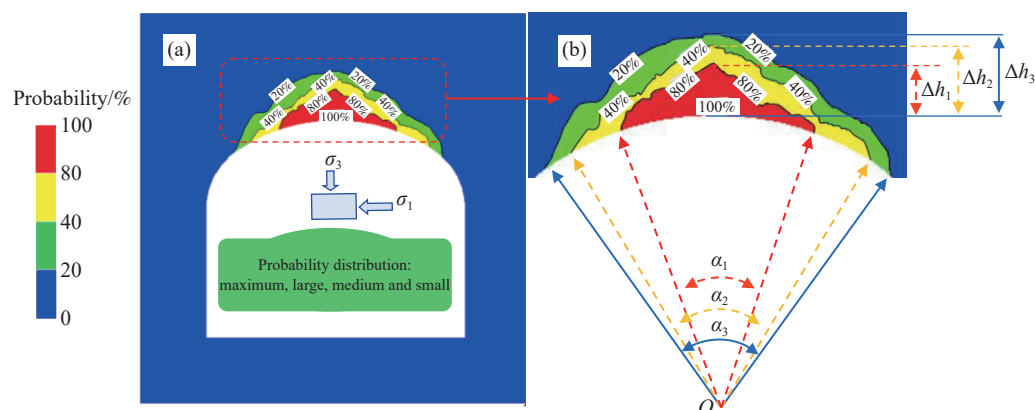


图9 岩爆指标概率分布图。(a) 概率分布图; (b) 概率分布局部放大图

Fig.9 Probability distribution diagram of rockburst index: (a) probability distribution diagram; (b) local magnification of probability distribution

坏区域,从分布图中可直观地看到岩爆区域的概率分布,以80%、40%、20%界限,将概率划分为极大、大、中、小四个概率区间,从而更为方便地描述岩爆区域概率问题。图中 Δh_1 、 Δh_2 、 Δh_3 分别为极大概率、大概率及中概率岩爆区域的深度, α_1 、 α_2 、 α_3 分别为相应区域的范围角。

(2) 由概率分布图可看出,岩爆区域极大概率(>80%)会达到0.4~0.5 m及30°~40°范围,大概率(80%~40%)可达0.5~0.7 m、40°~60°范围,少数情况(<20%)会达到大于0.8 m及大于70°的范围。

(3) 通过岩爆区域概率分布图可以更为直观地对岩爆区域的概率进行表示,更为准确地把握岩爆破坏范围变化,对岩爆风险评估及确立支护措施具有重要指导意义。

4 结论

本文基于改进脆性本构模型及能量释放规律,对岩爆倾向性进行分析,考虑岩体性质的变异特征,探究了岩爆倾向性的不确定变化规律,得到结论如下:

(1) 将考虑剪胀随围压及塑性参数变化的脆性本构模型与完全应变能释放指标相结合,可以较好地对比岩爆倾向性进行分析。

(2) 对岩爆预测的不确定问题进行研究,使用点估计研究方案得到岩爆统计指标的分布特征,以矿山实例为依托,验证了本文所提方法的可行性,点估计-有限元法可以较好地拓展应用到岩爆预测的不确定性问题处理上。

(3) 将岩爆概率划分为极大、大、中、小四个等级区间,会有极大概率(>80%)会达到0.4~0.5 m及30°~40°范围,大概率(80%~40%)可达0.5~0.7 m、40°~60°范围,少数情况(<20%)会达到大于0.8 m及大于70°的范围。

(4) 通过概率分析得到岩爆破坏的概率分布图,能够更为直观地观测到岩爆破坏区域的概率分布,从而更为准确地把握岩爆破坏范围,可为风险评估及岩爆支护提供指导,具有一定的工程指导意义。

参 考 文 献

- [1] Feng X T, Zhang X W, Kong R, et al. A novel mogi type true triaxial testing apparatus and its use to obtain complete stress-strain curves of hard rocks. *Rock Mech Rock Eng*, 2016, 49(5): 1649
- [2] Jiang R C, Dai F, Liu Y, et al. Fast marching method for microseismic source location in cavern-containing rockmass: Performance analysis and engineering application. *Engineering*, 2021, 7(7): 1023
- [3] Yang B B, He M M, Zhang Z Q, et al. A new criterion of strain rockburst in consideration of the plastic zone of tunnel surrounding rock. *Rock Mech Rock Eng*, 2022, 55(3): 1777
- [4] Zhou Z M. *Big Data Analysis Model Based on Rockburst Monitoring* [Dissertation]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016
(周子楦. 基于岩爆监测的大数据分析模型[学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2016)
- [5] Brown E T, Hoke E. *Underground Excavation in Rock*. London: CRC Press, 1980
- [6] Russense B F. *Analyses of Rockburst in Tunnels in Valley Sides* [Dissertation]. Trondheim: Norwegian Institute of Technology, 1974
- [7] Tao Z Y. Rockburst in high geostress area and its discrimination. *Yangtze River*, 1987, 18(5): 25
(陶振宇. 高地应力区的岩爆及其判别. *人民长江*, 1987, 18(5): 25)
- [8] Chen W Z, Lu S P, Guo X H, et al. Research on unloading confining pressure tests and rockburst criterion based on energy theory. *Chin J Rock Mech Eng*, 2009, 28(8): 1530
(陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 等. 基于能量原理的卸围压试验与岩爆判据研究. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(8): 1530)

- [9] Gu M C, He F L, Chen C Z. Study on rockburst in Qingling tunnel. *Chin J Rock Mech Eng*, 2002, 21(9): 1324
(谷明成, 何发亮, 陈成宗. 秦岭隧道岩爆的研究. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(9): 1324)
- [10] Wu S C, Zhang C X, Cheng Z Q. Prediction of intensity classification of rockburst based on PCA-PNN principle. *J China Coal Soc*, 2019, 44(9): 2767
(吴顺川, 张晨曦, 成子桥. 基于 PCA-PNN 原理的岩爆烈度分级预测方法. *煤炭学报*, 2019, 44(9): 2767)
- [11] Tian R, Meng H D, Chen S J, et al. Prediction model of rockburst intensity classification based on RF-AHP-Cloud model. *China Saf Sci J*, 2020, 30(7): 166
(田睿, 孟海东, 陈世江, 等. RF-AHP-云模型下岩爆烈度分级预测模型. *中国安全科学学报*, 2020, 30(7): 166)
- [12] Tan W K, Ye Y C, Hu N Y, et al. Severe rock burst prediction based on the combination of LOF and improved SMOTE algorithm. *Chin J Rock Mech Eng*, 2021, 40(6): 1186
(谭文侃, 叶义成, 胡南燕, 等. LOF 与改进 SMOTE 算法组合的强烈岩爆预测. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(6): 1186)
- [13] Su G S, Feng X T, Jiang Q, et al. Study on new index of local energy release rate for stability analysis and optimal design of underground rockmass engineering with high geostress. *Chin J Rock Mech Eng*, 2006, 25(12): 2453
(苏国韶, 冯夏庭, 江权, 等. 高地应力下地下工程稳定性分析与优化的局部能量释放率新指标研究. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(12): 2453)
- [14] Weng L, Huang L Q, Taheri A, et al. Rockburst characteristics and numerical simulation based on a strain energy density index: A case study of a roadway in Linglong gold mine, China. *Tunn Undergr Space Technol*, 2017, 69: 223
- [15] Diederichs M S. Early assessment of dynamic rupture hazard for rockburst risk management in deep tunnel projects. *J S Afr Inst Min Metall*, 2018, 118(3): 193
- [16] Wu Z G. *Research on Risk Assessment Method for Hard Rock Catastrophe in Deep Tunnels* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021
(吴忠广. 深埋隧道硬岩灾变风险评估方法研究 [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2021)
- [17] Hajiabdomajid V R. *Mobilization of Strength in Brittle Failure of Rock* [Dissertation]. Kingston: Queen's University, 2001
- [18] Hajiabdomajid V, Kaiser P K, Martin C D. Modelling brittle failure of rock. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2002, 39(6): 731
- [19] Hajiabdomajid V, Kaiser P. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling. *Tun Undergr Space Technol*, 2003, 18(1): 35
- [20] Vermeer P A, De Borst R. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock. *Heron*, 1984, 29(3): 1984
- [21] Zhao X G. *Rock Dilatancy Angle Model and Its Application in Underground Engineering* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2009
(赵星光. 岩石剪胀角模型及其在地下工程中的应用 [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2009)
- [22] Li J P, Gao L, Mu H S. Dilatancy characteristics of sandstone and its function of dilatancy angle under high confining pressure and unloading conditions. *Rock Soil Mech*, 2019, 40(6): 2119
(李建朋, 高岭, 母焕胜. 高应力卸荷条件下砂岩扩容特征及其剪胀角函数. *岩土力学*, 2019, 40(6): 2119)
- [23] Liang M C, Miao S J, Cai M F, et al. A damage constitutive model of rock with consideration of dilatation and postpeak shape of the stress-strain curve. *Chin J Rock Mech Eng*, 2021, 40(12): 2392
(梁明纯, 苗胜军, 蔡美峰, 等. 考虑剪胀特性和峰后形态的岩石损伤本构模型. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(12): 2392)
- [24] Zhao X G, Cai M, Cai M F. A rock dilation angle model and its verification. *Chin J Rock Mech Eng*, 2010, 29(5): 970
(赵星光, 蔡明, 蔡美峰. 岩石剪胀角模型与验证. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(5): 970)
- [25] Xie H P, Peng R D, Ju Y, et al. On energy analysis of rock failure. *Chin J Rock Mech Eng*, 2005, 24(15): 2603
(谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(15): 2603)
- [26] Rosenbluth E. Point estimates for probability moments. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1975, 72(10): 3812
- [27] Christian J T, Baecher G B. Point-estimate method as numerical quadrature. *J Geotech Geoenviron Eng*, 1999, 125(9): 779
- [28] Schweiger H F, Peschl G M. Reliability analysis in geotechnics with the random set finite element method. *Comput Geotech*, 2005, 32(6): 422
- [29] Valley B, Kaiser P, Duff D. Consideration of uncertainty in modelling the behaviour of underground excavations // *Proceedings of the Fifth International Seminar on Deep and High Stress Mining*. Perth, 2010: 6
- [30] Xiao S, Wu S C, Gao Y T, et al. Jointed rock slope stability evaluation based on PEM-JFEM method. *Chin J Eng*, 2015, 37(7): 844
(肖术, 吴顺川, 高永涛, 等. 基于 PEM-JFEM 方法的节理岩质边坡稳定性评价. *工程科学学报*, 2015, 37(7): 844)
- [31] He Z F. *MATLAB Probability and Mathematical Statistics Analysis*. 2nd Ed. Beijing: China Machine Press, 2012
(何正风. MATLAB 概率与数理统计分析. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2012)
- [32] Wu C, Zhang P. Analysis of numerical simulation methods for excavation failure zone of deep underground opening in hard rocks with high geostress. *Hydrogeol Eng Geol*, 2012, 39(6): 35
(吴成, 张平. 高地应力硬岩洞室开挖破坏区数值模拟方法探讨. *水文地质工程地质*, 2012, 39(6): 35)
- [33] Cai M, Kaiser P K, Uno H, et al. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2004, 41(1): 3
- [34] Rafiei Renani H, Cai M. Forty-year review of the hoek-brown failure criterion for jointed rock masses. *Rock Mech Rock Eng*, 2022, 55(1): 439
- [35] Miao S J, Yang Z J, Long C, et al. Equivalent plastic parameters optimization research on CWFS failure criterion model of brittle hard rock. *Chin J Rock Mech Eng*, 2013, 32(S1): 2600
(苗胜军, 杨志军, 龙超, 等. 脆性硬岩 CWFS 强度准则模型等效塑性参数优化研究. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(S1): 2600)