

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201908002

隧道施工期岩爆危险性评价的属性识别模型 及工程应用

何怡帆, 李天斌, 曹海洋

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 隧道地质条件复杂, 岩爆灾害频发, 造成严重经济损失及人员伤亡, 为工程施工带来极大困难。为分析隧道施工期岩爆风险和为施工安全提供依据, 以属性数学理论为基础, 建立了 8 参数岩爆危险性属性评价模型。通过对隧道岩爆案例的系统整理与分析, 总结岩爆主要影响因素, 考虑隧道施工现场指标获取的难易程度, 改进了岩爆传统评价指标, 选取了围岩岩性、岩体强度、围岩完整性、地应力大小、地下水状况、隧道埋深、隧道断面大小及现场施工情况 8 个易于获取的指标, 然后构建了岩爆危险性评价的属性识别模型; 同时考虑主观因素和客观因素, 采用层次分析法(AHP)和概率统计法结合的综合赋权法对各指标因素进行权重分析; 将建立的岩爆危险性属性识别模型应用于雅康高速公路二郎山隧道, 结果表明: 评价结果与实际开挖结果总体吻合较好, 验证了该方法在岩爆危险性评价中的可行性与合理性。该研究成果为隧道施工岩爆灾害危险性评价提供了一种有效的途径, 对预防隧道岩爆灾害发生、减少施工损失具有重大的意义。

关键词: 隧道施工; 岩爆; 危险性评价; 属性识别; 综合赋权法

中图分类号: TU457; U456.3*3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)02-0102-10

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

HE Yifan, LI Tianbin, CAO Haiyang

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of
Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Geological conditions of tunnels are complex, and the rockburst disaster is frequent, causing serious economic losses and casualties, which bring great difficulties to the construction of projects. In order to analyze the rockburst risk of tunnel construction and provide a basis for construction safety, an 8-parameter rockburst hazard evaluation model is established on the basis of the attribute mathematics theory. Through the systematic collection and analysis of the cases of tunnel rockburst, the main influencing factors of rockburst are summarized. Considering the ease of obtaining the index of the tunnel construction site, the traditional evaluation index of rock explosion is improved, and 8 easy-to-obtain indicators are selected: rock nature, rock strength, rock integrity, ground stress size, groundwater condition, tunnel depth, tunnel section size and site construction. The property identification model of the rock explosion risk assessment is constructed. The subjective and objective factors are taken into account, and the combined empowerment method of analytic hierarchy process(AHP) and probability statistics is used to analyze the weighting of the indicator factors. The established rock explosion risk attribute identification model is applied to the Yakang Expressway's Erlangshan

收稿日期: 2019-08-12; 修订日期: 2019-09-09

基金项目: 交通运输部建设科技项目(2015318J29040)

第一作者: 何怡帆(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事岩土工程研究。E-mail: hyf0107@qq.com

通讯作者: 李天斌(1964-), 男, 博士, 教授, 从事地质工程、岩土工程和隧道工程领域教学和科研工作。E-mail: ltb@cdu.edu.cn

tunnel, the results show that the evaluation results are in general good agreement with the actual excavation results, the feasibility and rationality of the method in the rock explosion risk evaluation is verified. The research results provide an effective way for the risk assessment of tunnel construction rock explosion disaster, which are of great significance to prevent the occurrence of tunnel rock explosion disaster and reduce the construction loss.

Keywords: tunnel construction; rockburst; fatalness assessment; attribute recognition; comprehensive weighting method

随着我国交通基础设施建设的快速发展,公路隧道规模发展迅速,但不少隧道工程地质条件复杂、施工环境恶劣、施工难度大,极易发生岩爆灾害,对施工人员安全造成较大威胁。因此,开展隧道施工岩爆危险性评估,可减少施工过程中人员伤亡,降低经济损失,具有重大的意义。

目前,国内外学者对岩爆危险性评价方法做了大量的研究。王迎超等^[1]从影响岩爆因素方面进行考虑,基于功效系数法,选取了评价因子 σ_0/σ_c 、 σ_c/σ_1 、 W_{et} 和 I_s ,建立了一种新的岩爆烈度分级预测模型。邓小鹏等^[2]采用水压致裂法对宝塔山隧道地应力进行测试,并根据所得地应力资料及地应力场数值模拟对岩爆进行预测评价。吴凌峰等^[3]考虑工程中岩爆特点,选取 σ_0/σ_c 、 σ_c/σ_1 和 W_{et} ,采用 Bayes 理论对地下工程岩爆进行了危险性预测与评估。郭生茂等^[4]基于传统的物元可拓分析模型,选取 3 个主要影响岩爆发生的因素 σ_1/σ_c 、 σ_c/σ_1 和 W_{et} ,建立了岩爆危险性等级评价的熵权物元可拓模型。尹彬等^[5]结合物元理论与变权理论,建立了岩爆危险性评价的变权物元模型,采用变权理论来确定各评价指标的权重,减少了评价的主观性。李天斌等^[6]提出了岩爆综合集成预测的学术思路,并建立了包括地质综合分析预测法等 5 种方法为一体的综合集成方法体系。张晓燕^[7]采用层次分析法确定岩爆危险性指标因素的权重,基于模糊综合评价法,建立了岩爆危险性预测的三级模糊综合关系评价模型,并用实例验证了该方法的可行性和实用性。CAI W 等^[8]和 ZHANG M W 等^[9]将地下微震监测运用于预测岩爆危险性,提高了地质灾害预防的针对性。YU J C 等^[10]提出了一种基于权重反分析的岩爆等级预测方法,并验证了该方法的可行性与有效性。邢军等^[11]通过对地质条件进行分析,采用数值模拟、岩体弹性应变能和地应力场综合分析,对圭嘎拉隧道进行岩爆预测,并提出相应岩爆等级措施建议。

上述理论与方法对岩爆危险性评价均作出了重大贡献,但普遍存在评价指标难以确定、各因素指标权重

确定不够客观、评价结果受主观因素影响较大等问题,且各种方法存在自身局限性,还不能完全有效指导隧道施工。

属性识别理论是一种基于属性集和属性测度理论的综合评价方法^[12-14]。该方法指标因素的取值是一个区间,对隧道工程复杂的地质环境有较强适应性。目前,该方法已成功应用于岩土工程部分领域,如李术才等^[15]、许振浩等^[16]和周宗青等^[17]应用该方法对岩溶隧道涌突水进行风险评价,文畅平等^[18-20]对隧道瓦斯危险性、岩土边坡稳定性和岩爆烈度分级方面做了评价。

本文基于属性识别理论建立了岩爆危险性识别模型,改进了评价指标,将层次分析法(AHP)和概率统计法结合对指标因素权重进行分析,结合主、客观赋权法的优点,构成综合赋权法,使权重取值更具科学性,评价结果更为准确。将建立的岩爆危险性识别模型应用于雅康高速二郎山隧道,取得良好的效果,可为岩爆危险性评价与灾害防治提供一定参考。

1 属性识别理论概述

设评价对象空间的集合为 X ,评价对象 $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 有 m 个评价特征指标 $I_j (j = 1, 2, \dots, m)$,指标 I_j 的指标值 x_{ij} 具有 $k (k = 1, 2, \dots, p)$ 个级别属性 C_k ,其大小用单评价指标属性测度 μ_{ijk} 表示。

1.1 单指标属性测度

单评价指标的等级划分如表 1。

表 1 单指标等级划分
Table 1 Grade subdivision of a single index

指标	等级				
	C_1	C_2	...	C_{p-1}	C_p
I_1	$a_{10} \sim a_{11}$	$a_{11} \sim a_{12}$...	$a_{1p-2} \sim a_{1p-1}$	$> (<) a_{1p-1}$
I_2	$a_{20} \sim a_{21}$	$a_{21} \sim a_{22}$...	$a_{2p-2} \sim a_{2p-1}$	$> (<) a_{2p-1}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
I_m	$a_{m0} \sim a_{m1}$	$a_{m1} \sim a_{m2}$...	$a_{mp-2} \sim a_{mp-1}$	$> (<) a_{mp-1}$

表 1 中, a_{jk} 满足 $a_{j0} < a_{j1} < \dots < a_{jk}$, 或 $a_{j0} > a_{j1} > \dots$

$> a_{jk}$,在此假定 $a_{j0} < a_{j1} < \dots < a_{jk}$ 。令:

$$b_{jk} = \frac{a_{jk-1} + a_{jk}}{2} \quad (1)$$

$$d_j = \min\{a_{jk} - b_{jk}\} \quad (2)$$

参考文献[12-14]建立属性测度函数的方法,建立单评价指标属性测度函数 μ_{ijk} 如下:

$$\mu_{ij1} = \begin{cases} 1 & x_{ij} < a_{j1} - d_j \\ \frac{a_{j1} + d_j - x_{ij}}{2d_j} & a_{j1} - d_j \leq x_{ij} \leq a_{j1} + d_j \\ 0 & x_{ij} > a_{j1} + d_j \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{ijk} = \begin{cases} 0 & x_{ij} < a_{jk-1} - d_j \\ \frac{x_{ij} - a_{jk-1} + d_j}{2d_j} & a_{jk-1} - d_j \leq x_{ij} \leq a_{jk-1} + d_j \\ 1 & a_{jk-1} + d_j < x_{ij} < a_{jk} - d_j \\ \frac{a_{jk} + d_j - x_{ij}}{2d_j} & a_{jk} - d_j \leq x_{ij} \leq a_{jk} + d_j \\ 0 & x_{ij} > a_{jk} + d_j \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{ijp} = \begin{cases} 0 & x_{ij} < a_{jp-1} - d_j \\ \frac{x_{ij} - a_{jp-1} + d_j}{2d_j} & a_{jp-1} - d_j \leq x_{ij} \leq a_{jp-1} + d_j \\ 1 & x_{ij} > a_{jp-1} + d_j \end{cases} \quad (5)$$

式中: $j=1,2,\dots,m;k=2,3,\dots,p-1$ 。

1.2 多指标综合属性测度

综合属性测度按下式计算:

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m (w_j \mu_{ijk}) \quad (6)$$

式中: w_j ——指标 I_j 的权重, $w_j \geq 0$ 且 $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ 。

1.3 属性识别分析

属性识别分析是根据综合属性测度 μ_{ik} ,采用置信度准则对评价对象 x_i 进行评估。

置信度准则表述为:在有序评价集 (C_1, C_2, \dots, C_p) 中,满足 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$,或 $C_1 < C_2 < \dots < C_p$, λ 为置信度,取值范围 $0.5 \leq \lambda \leq 1.0$ 。满足以下条件:

当 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$ 时,

$$k = \min\left\{k: \sum_{l=1}^k \mu_{il} \geq \lambda, 1 \leq k \leq p\right\} \quad (7)$$

当 $C_1 < C_2 < \dots < C_p$ 时,

$$k = p - \min\left\{k: \sum_{l=0}^{k-1} \mu_{ip-l} \geq \lambda, 1 \leq k \leq p\right\} \quad (8)$$

则认为 x_i 属于 C_k 级别或 C_k 类。

2 岩爆危险性属性识别模型

基于属性识别模型,隧道岩爆危险性评价流程如图1所示。

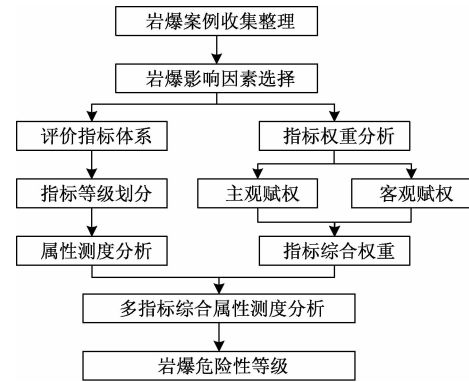


图1 岩爆危险性属性评价流程

Fig.1 Flow chart of the attribute evaluation of rockburst

2.1 属性评价指标体系

长期以来在岩爆致灾因子的研究中发现,岩爆的发生取决于围岩岩性、地应力、地质构造、隧道埋深和施工状况等因素^[21-25]。从导致岩爆发生的内因和外因分析来看,其内因主要是岩体自身性质,外因主要为外界施工状况。在前人研究基础上,通过对秦岭隧道、雅砻江锦屏二级水电站勘探平洞及A辅洞、秦岭隧道、都汶高速福堂隧道和二郎山隧道等1283处岩爆断面实例资料的整理与分析(部分典型岩爆调查实录见表2),参照传统量化指标(σ_0/σ_c 、 σ_c/σ_1 和 W_{et}),并且考虑评价指标获取的难易程度,最终选取围岩岩性、岩体强度、围岩完整性、地应力大小、地下水状况、隧道埋深、隧道断面大小以及现场施工情况8个易于获取的指标对隧道施工岩爆进行危险性评估。

2.1.1 围岩岩性 I_1

根据经验,通常在高强度、高完整性和高储能的岩体中易发生岩爆。对于闪长岩、花岗岩等火成岩,岩爆发生的概率较大,其次是沉积岩、变质岩,最后是非岩质类。

2.1.2 岩体强度 I_2

一般来说,岩体强度越大,岩质越坚硬,岩体越易存储应变能,发生岩爆的可能性越大。图2列出了统计岩爆发生频率与岩体强度的对应关系。按岩体强度大小划分为软岩(<15 MPa)、较软岩(15~27 MPa)、较坚硬岩(27~36 MPa)和坚硬岩(>36 MPa)。

2.1.3 围岩完整性 I_3

完整岩体储存弹性应变能的能力相对较强,一般

来说,岩体越完整,则产生岩爆现象的可能性就越大,因此岩体完整性是影响岩爆产生的重要指标。本文用岩体体积节理数 J_v 表示围岩完整性情况,划分为以下

几类:破碎 (>20 条/ m^3)、较破碎 ($10 \sim 20$ 条/ m^3)、较完整 ($3 \sim 10$ 条/ m^3) 和完整 (<3 条/ m^3)。隧道围岩完整性与岩爆发生频率关系如图 3 所示。

表 2 部分典型岩爆调查实录
Table 2 Some typical rockburst investigation cases

地点	掌子面里程	围岩岩性	埋深/m	围岩特征简述	地应力/MPa	断面大小	岩爆部位	岩爆等级
福堂隧道 A6 标右洞	ZK77 + K19 + 530	花岗岩	400 ~ 500	坚硬,较破碎,清脆,干燥	10 ~ 12	两车道	右拱肩及拱顶	I 级
	ZK77 + K19 + 610	花岗岩	400 ~ 500	坚硬,较完整,较清脆,渗滴水	10 ~ 12	两车道	右拱肩及拱顶	I 级
	ZK77 + K20 + 405	花岗岩	400 ~ 500	坚硬,较完整,清脆,干燥	15 ~ 18	两车道	右拱肩	II 级
	ZK77 + K20 + 425	花岗岩	400 ~ 500	坚硬,完整,清脆,干燥	15 ~ 18	两车道	右拱肩	II 级
	ZK77 + K20 + 455	花岗岩	400 ~ 500	坚硬,完整,清脆,干燥	15 ~ 18	两车道	右边墙	II 级
	ZK77 + K20 + 520	花岗岩夹辉绿岩	400 ~ 500	坚硬,较完整,清脆,干燥	15 ~ 18	两车道	右边墙及拱肩	I ~ II 级
秦岭隧道 II 线进口	ZK77 + DYK64 + 525	混合片麻岩	50 ~ 100	坚硬,完整,清脆,干燥	10 ~ 15	两车道	右拱部	II 级
	ZK77 + DYK65 + 715	混合片麻岩	200 ~ 300	坚硬,完整,清脆,干燥	10 ~ 15	两车道	齐头拱部	II 级
	ZK76 + DYK69 + 146	混合片麻岩	100 ~ 200	坚硬,完整,清脆,干燥	20 ~ 25	两车道	拱顶	III 级
	ZK77 + DYK69 + 280	混合片麻岩	100 ~ 200	坚硬,完整,清脆,干燥	25 ~ 30	两车道	拱顶	III 级
	ZK77 + DYK72 + 090	混合片麻岩	800 ~ 900	较坚硬,完整,清脆,干燥	25 ~ 30	两车道	左拱、两侧边墙	III 级
	ZK76 + DYK72 + 220	混合片麻岩	800 ~ 900	较坚硬,完整,清脆,干燥	30 ~ 40	两车道	左拱、两侧边墙	III 级
二郎山隧道 C2 标左线	ZK77 + 764	闪长岩	900 ~ 1 000	坚硬,较破碎,清脆,干燥	20 ~ 25	两车道	拱顶、右拱腰	II 级
	ZK76 + 583.2	花岗岩	>1 000	坚硬,较破碎,清脆,干燥	25 ~ 28	两车道	拱顶、左右拱腰	I 级
	ZK76 + 338	花岗岩	>1 000	坚硬,较破碎,清脆,干燥	25 ~ 28	两车道	拱顶、右拱腰	I 级
	ZK76 + 116	花岗岩	>1 000	坚硬,较完整,清脆,干燥	25 ~ 28	两车道	拱顶、左拱腰	II 级
	ZK75 + 222	花岗岩	>1 000	坚硬,较破碎,清脆,干燥	23 ~ 25	两车道	拱顶、右拱腰	II 级
	ZK75 + 201	花岗岩	>1 000	坚硬,较破碎,清脆,干燥	23 ~ 25	两车道	拱顶、左、右拱腰	II 级
锦屏二级水电站勘探平洞	ZK77 + K0 + 489	砂岩	<500	较坚硬,较完整,较清脆,干燥	13 ~ 15	单车道	两拱肩	I 级
	ZK77 + K0 + 586	砂岩	600 ~ 700	较坚硬,较完整,较清脆,干燥	13 ~ 15	单车道	下游壁及拱肩	I ~ II 级
	ZK77 + K0 + 634	灰白色大理岩	700 ~ 800	坚硬,完整,清脆,干燥	20 ~ 25	单车道	下游壁	I 级
	ZK77 + K0 + 910	砂岩	800 ~ 1 200	较坚硬,较完整,较清脆,干燥	20 ~ 25	单车道	下游拱肩	I 级
	ZK77 + K1 + 151	灰黑色大理岩	1 200 ~ 1 400	坚硬,完整,清脆,干燥	25 ~ 30	单车道	下游壁及拱肩	I 级
	ZK77 + K1 + 561	灰黑色大理岩	1 400 ~ 1 800	坚硬,完整,清脆,干燥	30 ~ 40	单车道	上游壁及拱肩	I ~ II 级
	ZK77 + K1 + 801	条带状大理岩	1 400 ~ 1 800	坚硬,较完整,清脆,干燥	30 ~ 40	单车道	上游拱肩	I 级
ZK77 + K1 + 814	条带状大理岩	1 400 ~ 1 800	坚硬,较完整,清脆,干燥	30 ~ 40	单车道	下游壁及拱肩	I ~ II 级	

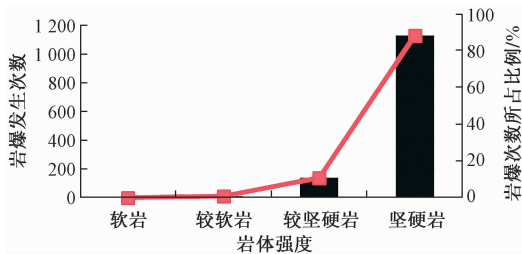


图 2 岩体强度与岩爆发生频率

Fig. 2 Relationship between the rock strength and the frequency of rockburst

2.1.4 地应力大小 I_4

目前,普遍认为地应力越大,岩爆越容易发生。按地应力大小分为低地应力 ($0 \sim 10$ MPa)、中等地应力 ($10 \sim 20$ MPa)、高地应力 ($20 \sim 40$ MPa) 和极高地应力 (>40 MPa)。图 4 统计了地应力大小与岩爆发生频

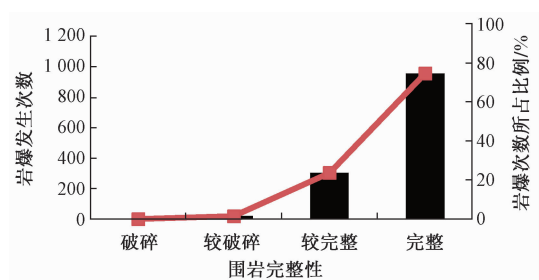


图 3 围岩完整性与岩爆发生频率

Fig. 3 Relationship between the integrity of surrounding rock and the frequency of rockburst

率关系。

2.1.5 地下水状况 I_5

从大量的工程实例中可以发现,发生岩爆的岩体一般是干燥的,含水量很低。因为地下水较丰富的区

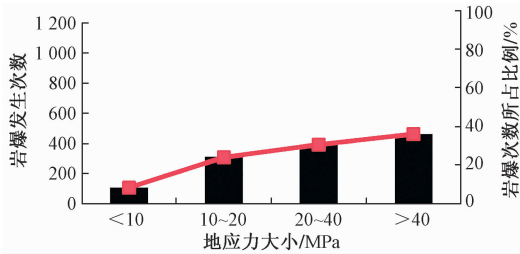


图4 地应力大小与岩爆发生频率

Fig.4 Relationship between the ground stress and the frequency of rockburst

域,将会软化围岩。而且含水量高的岩石,节理裂隙发育,大大降低了岩石的强度和完整性。图5统计了地下水状况与岩爆发生频率关系。

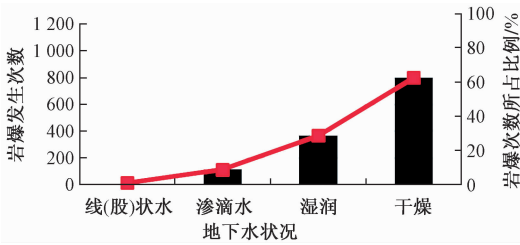


图5 地下水状况与岩爆发生频率

Fig.5 Relationship between the groundwater conditions and the frequency of rockburst

2.1.6 隧道埋深 I_6

隧道埋深与岩爆发生有较大的关联,随着隧道埋深的增加,岩爆发生的概率也随之增加。按隧道埋深分类,埋深在 $0 \sim 3H_q$ 为浅埋隧道 (H_q 是隧道最大洞径), $3H_q \sim 500$ m 为深埋隧道, $500 \sim 1000$ m 为超深埋隧道, > 1000 m 为特深隧道。图6统计了隧道埋深与岩爆发生频率关系。

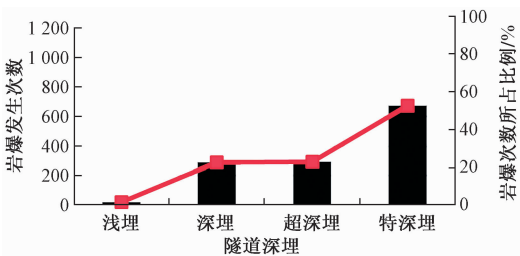


图6 隧道埋深与岩爆发生频率

Fig.6 Relationship between the buried depth of tunnel and the frequency of rockburst

2.1.7 隧道断面面积 I_7

隧道设计断面跨度越大,也会增加岩爆发生的概率。近年来,由于交通量的增加,单洞3车道、4车道

隧道逐渐增多。因断面较大,施工工序、爆破扰动增多,容易形成不规则断面导致应力集中,进而有较大的岩爆风险。按隧道断面面积分为小断面隧道 ($< 10 \text{ m}^2$)、中等断面隧道 ($10 \sim 50 \text{ m}^2$)、大断面隧道 ($50 \sim 100 \text{ m}^2$) 和特大断面隧道 ($> 100 \text{ m}^2$)。图7统计了隧道断面面积与岩爆发生频率关系。

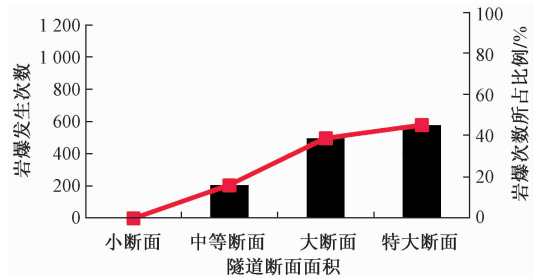


图7 隧道断面面积与岩爆发生频率

Fig.7 Relationship between the cross-sectional area of tunnel and the frequency of rockburst

2.1.8 现场施工情况 I_8

隧道现场施工情况对岩爆发生有很大的影响,施工中衬砌支护时机、支护质量、超前地质预报和监控量测都是影响岩爆发生的因素。(1)支护时机。在隧道开挖前后,对其掌子面和围岩进行及时准确的支护,可改变洞室周边的应力状态,防止岩爆的发生。(2)支护质量。包括超前辅助支护、喷射混凝土、锚杆、钢筋网、钢拱架等,可提高围岩的承载力,降低围岩弹性应变能的储存能力。若支护质量差,支护参数不合理等,则会增加岩爆风险。(3)爆破效果、超前地质预报和监控量测。爆破效果好能减少对围岩的扰动,有利于降低岩爆风险。开挖前进行超前地质预报和现场监控量测,预测前方围岩的地质情况,将信息结果及时反馈给施工方以便采取施工措施,对于降低岩爆风险至关重要。

根据支护时机、超前辅助支护、喷射混凝土、锚杆、钢筋网、钢拱架、爆破效果、超前地质预报和监控量测9个因素,将现场施工情况划分为较好、一般、较差、极差四个等级。以上9个因素全部满足要求,等级为良好;以上因素有7~8个满足要求,等级为一般;以上因素有5~6个满足要求,等级为较差;以上因素少于5个满足要求,等级为极差。

2.2 危险性分级标准

将岩爆危险性分为微危险性或无危险性、低危险性、中等危险性和高危险性4个等级。因此,属性 C_k ($k=1,2,3,4$) 的含义分别为: $C_1 = \{$ 微危险性或无危

险性}, C₂ = {低危险性}, C₃ = {中等危险性}, C₄ = {高危险性}。

根据以上对各评价指标的分析,并结合相关文献^[6-7,25-26],确定评价指标分级标准如表 3 所示。

2.3 属性测度函数

基于隧道施工岩爆危险性评价分级标准(表 3),按照公式(3)、(4)和(5),建立单评价指标属性测度函数,如表 4 所示。其中 I₁、I₅、I₈ 为定性指标,不需要构建单评价指标属性测度函数,属性测度用 0 或 1 表示。

表 3 岩爆危险性评价指标和分级标准

Table 3 Indices and criteria for the risk assessment of rockburst

评价指标	危险性等级			
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
岩性 I ₁	非岩质	变质岩	沉积岩	火成岩
岩体强度 I ₂ /MPa	< 15	15 ~ 27	27 ~ 36	> 36
围岩完整性 I ₃ (条/m ³)	> 20	10 ~ 20	3 ~ 10	< 3
地应力大小 I ₄ /MPa	0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 40	> 40
地下水状况 I ₅	线状雨状出水	渗滴水	湿润	干燥
隧道埋深 I ₆ /m	0 ~ 3H _q	3H _q ~ 500	500 ~ 1 000	> 1 000
隧道断面大小 I ₇ /m ²	< 10	10 ~ 50	50 ~ 100	> 100
现场施工状况 I ₈	较好	一般	较差	极差

表 4 岩爆单评价指标属性测度

Table 4 Single attribute mathematical functions of rockburst

μ_{ij1}	μ_{ij2}	μ_{ij3}	μ_{ij4}
$\mu_{i21} = \begin{cases} 1 & x_{ij} < 10.5 \\ \frac{19.5 - x_{ij}}{9} & 10.5 \leq x_{ij} \leq 19.5 \\ 0 & x_{ij} > 19.5 \end{cases}$	$\mu_{i22} = \begin{cases} 0 & x_{ij} < 10.5 \\ \frac{x_{ij} - 10.5}{9} & 10.5 \leq x_{ij} \leq 19.5 \\ 1 & 19.5 < x_{ij} < 22.5 \\ \frac{31.5 - x_{ij}}{9} & 22.5 \leq x_{ij} \leq 31.5 \\ 0 & x_{ij} > 31.5 \end{cases}$	$\mu_{i23} = \begin{cases} 0 & x_{ij} < 22.5 \\ \frac{x_{ij} - 22.5}{9} & 22.5 \leq x_{ij} \leq 31.5 \\ \frac{40.5 - x_{ij}}{9} & 31.5 < x_{ij} \leq 40.5 \\ 0 & x_{ij} > 40.5 \end{cases}$	$\mu_{i24} = \begin{cases} 0 & x_{ij} < 31.5 \\ \frac{x_{ij} - 31.5}{9} & 31.5 \leq x_{ij} \leq 40.5 \\ 1 & x_{ij} > 40.5 \end{cases}$
$\mu_{i31} = \begin{cases} 1 & x_{ij} > 21.5 \\ \frac{x_{ij} - 18.5}{3} & 18.5 \leq x_{ij} \leq 21.5 \\ 0 & x_{ij} < 18.5 \end{cases}$	$\mu_{i32} = \begin{cases} 0 & x_{ij} > 21.5 \\ \frac{21.5 - x_{ij}}{3} & 18.5 \leq x_{ij} \leq 21.5 \\ 1 & 11.5 < x_{ij} < 18.5 \\ \frac{x_{ij} - 8.5}{3} & 8.5 \leq x_{ij} \leq 11.5 \\ 0 & x_{ij} < 8.5 \end{cases}$	$\mu_{i33} = \begin{cases} 0 & x_{ij} > 11.5 \\ \frac{11.5 - x_{ij}}{3} & 8.5 \leq x_{ij} \leq 11.5 \\ 1 & 4.5 < x_{ij} < 8.5 \\ \frac{x_{ij} - 1.5}{3} & 1.5 \leq x_{ij} \leq 4.5 \\ 0 & x_{ij} < 1.5 \end{cases}$	$\mu_{i34} = \begin{cases} 0 & x_{ij} > 4.5 \\ \frac{4.5 - x_{ij}}{3} & 1.5 \leq x_{ij} \leq 4.5 \\ 1 & x_{ij} < 1.5 \end{cases}$
$\mu_{i41} = \begin{cases} 1 & x_{ij} < 5 \\ \frac{15 - x_{ij}}{10} & 5 \leq x_{ij} \leq 15 \\ 0 & x_{ij} > 15 \end{cases}$	$\mu_{i42} = \begin{cases} 0 & x_{ij} < 5 \\ \frac{x_{ij} - 5}{10} & 5 \leq x_{ij} \leq 15 \\ \frac{25 - x_{ij}}{10} & 15 < x_{ij} \leq 25 \\ 0 & x_{ij} > 25 \end{cases}$	$\mu_{i43} = \begin{cases} 0 & x_{ij} < 15 \\ \frac{x_{ij} - 15}{10} & 15 \leq x_{ij} \leq 25 \\ 1 & 25 < x_{ij} < 35 \\ \frac{45 - x_{ij}}{10} & 35 \leq x_{ij} \leq 45 \\ 0 & x_{ij} > 45 \end{cases}$	$\mu_{i44} = \begin{cases} 0 & x_{ij} < 35 \\ \frac{x_{ij} - 35}{10} & 35 \leq x_{ij} \leq 45 \\ 1 & x_{ij} > 45 \end{cases}$
$\mu_{i61} = \begin{cases} 1 & x_{ij} < 25 \\ \frac{75 - x_{ij}}{500} & 25 \leq x_{ij} \leq 75 \\ 0 & x_{ij} > 75 \end{cases}$	$\mu_{i62} = \begin{cases} 0 & x_{ij} < 25 \\ \frac{x_{ij} - 25}{500} & 25 \leq x_{ij} \leq 75 \\ 1 & 75 < x_{ij} < 475 \\ \frac{525 - x_{ij}}{500} & 475 \leq x_{ij} \leq 525 \\ 0 & x_{ij} > 525 \end{cases}$	$\mu_{i63} = \begin{cases} 0 & x_{ij} < 475 \\ \frac{x_{ij} - 475}{500} & 475 \leq x_{ij} \leq 525 \\ 1 & 525 < x_{ij} < 975 \\ \frac{1025 - x_{ij}}{500} & 975 \leq x_{ij} \leq 1025 \\ 0 & x_{ij} > 1025 \end{cases}$	$\mu_{i64} = \begin{cases} 0 & x_{ij} < 975 \\ \frac{x_{ij} - 975}{500} & 975 \leq x_{ij} \leq 1025 \\ 1 & x_{ij} > 1025 \end{cases}$
$\mu_{i71} = \begin{cases} 1 & x_{ij} < 5 \\ \frac{15 - x_{ij}}{10} & 5 \leq x_{ij} \leq 15 \\ 0 & x_{ij} > 15 \end{cases}$	$\mu_{i72} = \begin{cases} 0 & x_{ij} < 5 \\ \frac{x_{ij} - 5}{10} & 5 \leq x_{ij} \leq 15 \\ 1 & 15 < x_{ij} < 45 \\ \frac{55 - x_{ij}}{10} & 45 \leq x_{ij} \leq 55 \\ 0 & x_{ij} > 55 \end{cases}$	$\mu_{i73} = \begin{cases} 0 & x_{ij} < 45 \\ \frac{x_{ij} - 45}{10} & 45 \leq x_{ij} \leq 55 \\ 1 & 55 < x_{ij} < 95 \\ \frac{105 - x_{ij}}{10} & 95 \leq x_{ij} \leq 105 \\ 0 & x_{ij} > 105 \end{cases}$	$\mu_{i74} = \begin{cases} 0 & x_{ij} < 95 \\ \frac{x_{ij} - 95}{10} & 95 \leq x_{ij} \leq 105 \\ 1 & x_{ij} > 105 \end{cases}$

2.4 指标权重分析

在进行岩爆危险性评价时,指标权重的分配反映

了该指标对岩爆发生的影响程度。目前,对指标权重确定多采用层次分析法(AHP)或者直接采用均值法。

AHP法为主观赋权法,评价结果受专家知识水平、个人经验和个人偏好的影响,具有不确定性,均值法则更加过于片面。基于此,参考相关文献^[17,27],本文将AHP法和概率统计法结合,融合主观赋权法和客观赋权法的优点,并引入权值分配系数,组成了最终的综合赋权法:

$$w_j = \beta_1 w_{j1} + \beta_2 w_{j2} \tag{9}$$

$$\beta_1 + \beta_2 = 1 \tag{10}$$

式中: w_j ——指标 I_j 的权重;

w_{j1} ——为采用AHP法得到的主权重;

w_{j2} ——为采用概率统计法得到的客观权重;

β_1, β_2 ——主观权重和客观权重的分配系数,由专家根据现场情况决定,本文取0.5。

(1) AHP法-主权重

AHP法是专家对各指标之间的重要程度做出评价,然后将其客观量化后建立判断矩阵,进而计算得出权值分配。采用Saaty^[28]建议的1~9标度方法建立判断矩阵,然后用方根法计算各指标因素的权向量近似值 $w'_{j1} = \sqrt[m]{a_{11}a_{12}\cdots a_{1m}}$,再进行归一化处理 $w_{j1} = \frac{w'_{j1}}{\sum_{k=1}^m w'_{k1}}$,从而得到各指标权重。

构造得到的评估模型判断矩阵如表5所示。

表5 判断矩阵

Table 5 Judgment matrix

指标	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	w_{j1}
I_1	1	1/2	1/2	1/3	1	1	2	1/3	0.075
I_2	2	1	1	1/2	2	1	3	1/2	0.124
I_3	2	1	1	1/2	1	2	3	1/3	0.117
I_4	3	2	2	1	5	4	5	1	0.261
I_5	1	1/2	1	1/5	1	1	2	1/4	0.074
I_6	1	1	1/2	1/4	1	1	2	1/2	0.083
I_7	1/2	1/3	1/3	1/5	1/2	1/2	1	1/2	0.047
I_8	3	2	3	1	4	2	2	1	0.219

最大特征根: $\lambda_{max} = 8.275$

一致性指标: $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = 0.039$

随机一致性比率: $CR = \frac{CI}{RI} = 0.028 < 0.1$ (RI 为随机一致性指标,查表^[29]取值1.41),因此,符合一致性要求。

如表5所示,计算得到指标的权重为:围岩岩性 $w_{11} = 0.075$,岩体强度 $w_{21} = 0.124$,围岩完整性 $w_{31} = 0.117$,地应力大小 $w_{41} = 0.261$,地下水状况 $w_{51} = 0.074$,隧道埋深 $w_{61} = 0.083$,断面大小 $w_{71} = 0.047$,现

场施工情况 $w_{81} = 0.219$ 。

(2) 概率统计法-客观权重

通过对多个隧道岩爆实例资料的整理与分析,采用概率统计法分别统计了每次岩爆发生时各因素数据,并分析各指标因素对岩爆发生的影响,统计其发生概率。然后进行归一化处理,最终得出隧道施工中各因素对岩爆的影响概率,如图8所示。

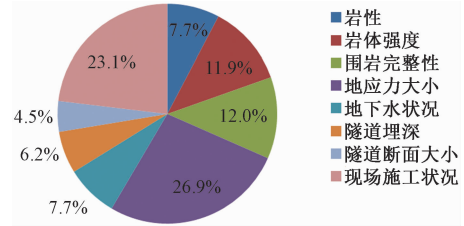


图8 评价指标对岩爆影响概率

Fig. 8 Contribution probability of evaluation indicators to rockburst

根据指标因素对岩爆的影响概率,对各因素进行权重分配,得出客观权重为: $w_{12} = 0.079, w_{22} = 0.115, w_{32} = 0.124, w_{42} = 0.277, w_{52} = 0.079, w_{62} = 0.040, w_{72} = 0.042, w_{82} = 0.244$ 。

(3) 综合权重

根据式(9)、式(10)计算得到的综合权重为: $w_1 = 0.077, w_2 = 0.119, w_3 = 0.120, w_4 = 0.269, w_5 = 0.077, w_6 = 0.062, w_7 = 0.045, w_8 = 0.231$ 。结果显示:地应力对岩爆的影响最大,其次是现场施工状况、岩体强度、围岩完整性,最后是围岩岩性、地下水状况、隧道埋深和隧道断面大小。

2.5 属性识别分析

根据施工现场隧道里程段相关资料和数据,以及表4中给出的岩爆单指标属性测度函数,计算单指标属性测度值,然后根据式(6)计算综合属性测度,最后进行属性识别。其中评价里程段长度根据隧道实际围岩地质环境变化和施工进度来确定。

3 工程实例及应用

3.1 工程概况

雅康高速公路二郎山隧道主洞全长13.4 km,最大埋深1500 m。隧道位于构造剥蚀高中山区,地面切割强烈,山势陡峻。隧道雅安段以三叠系、泥盆系、志留系和奥陶系的板岩、灰岩、粉砂岩等沉积岩为主;隧道康定段以花岗岩、安山岩、闪长岩等岩浆岩为主。隧道地处龙门山NE向构造带西南端,向东过渡为峨眉山断块区的大相岭菱形地块,西北侧为甘孜—阿坝印

支褶皱带,共穿越 13 条断裂构造,其中 7 条为区域断裂。根据隧道区域应力场模拟结果和现场实测地应力结果,二郎山隧道最大主应力值较高,最高达 45 MPa。

3.2 单指标属性测度及综合属性测度

以二郎山隧道右线 K74 + 294 ~ K74 + 264 为例进行岩爆危险性评价。根据现场调查结果,分别测量统计该段里程的岩体体积节理数、岩性、围岩回弹值、地应力大小、隧道埋深、地下水、断面面积以及现场施工情况。

根据表 4 中各岩爆指标测度函数,分别计算出各指标测度值并填入表 6。

表 6 属性测度计算表

Table 6 Calculation of attribute measurement

评价指标	实测指标值	单评价指标属性测度			
		μ_{j1}	μ_{j2}	μ_{j3}	μ_{j4}
I_1	火成岩	0	0	0	1
I_2	28	0	0.39	0.61	0
I_3	13	0	1	0	0
I_4	21	0	0.4	0.6	0
I_5	渗滴水	0	1	0	0
I_6	1 028	0	0	0	1
I_7	78	0	0	1	0
I_8	一般	0	1	0	0
综合属性测度		0	0.563	0.279	0.158

3.3 属性识别分析

按置信度准则进行属性识别,置信度 λ 一般取值 0.6 ~ 0.7^[8],参考相关文献置信度 λ 取值^[13-16],本文取值 0.6,则公式(7)可表示为:

$$k = \min \left\{ k: \sum_{i=1}^4 \mu_i \geq 0.65, 1 \leq k \leq 4 \right\} \quad (11)$$

由上式确定属性识别结果,0 + 0.563 < 0.6, 0 + 0.563 + 0.279 > 0.6,故隧道 K74 + 294 ~ K74 + 264 段综合属性指标测度为 C_3 级,即中等危险性。

3.4 开挖验证

隧道开挖到 K74 + 274,出现岩爆声响,具体表现为闷响后,持续约 20 min 零星爆裂声。岩爆过程中,掌子面、拱顶及拱腰位置随闷响剥落,最终剥落深度约 0.8 m。在 K74 + 280 ~ K74 + 274 段已完成的初期支护表面拱顶位置处出现大面积的初支开裂情况,并有钢拱架局部变形现象,判断为中等岩爆。

按照以上方法,对二郎山隧道进行隧道施工岩爆危险性评价,部分评价结果见表 7。实际开挖情况与评价结果总体吻合较好,说明应用属性数学模型评价岩爆危险性是一种可行的方法,但二郎山隧道部分地段的评价结果其危险性比实际岩爆稍高。

表 7 综合属性测度及评价结果

Table 7 Synthetic attribute measurement and assessment results

里程桩号	综合属性测度				实际情况	本文方法
	C_1	C_2	C_3	C_4		
K74 + 218 ~ K74 + 188	0.219	0.411	0.212	0.158	无岩爆	低危险
K74 + 447 ~ K74 + 417	0	0.452	0.465	0.083	轻微岩爆	中等危险
K74 + 477 ~ K75 + 447	0	0.410	0.411	0.179	轻微岩爆	中等危险
K75 + 350 ~ K75 + 320	0.238	0.379	0.308	0.075	无岩爆	低危险
K76 + 430 ~ K76 + 410	0	0.369	0.556	0.075	中等岩爆	中等危险
K76 + 460 ~ K76 + 430	0	0.219	0.376	0.405	强烈岩爆	高危险

4 结论与建议

(1) 基于属性数学理论建立了隧道施工岩爆危险性属性识别模型。通过大量岩爆案例收集与整理分析,综合考虑隧道地质条件和现场施工情况,改进了评价指标,为岩爆危险性评估提供了一种新方法,在工程实践中具有较好的可操作性和实用性。

(2) 采用层次分析法(AHP)和概率统计法,确定各评价指标权重。综合了主观评价法和客观评价法,使各指标权重分布贴合实际、更具科学性。结果表明,在 8 个指标因素中,岩爆发生的主控因素是地应力,其次是现场施工状况、岩体强度和围岩完整性,最后是围岩岩性、地下水状况、隧道埋深和隧道断面大小。

(3) 应用建立的岩爆危险性属性识别模型,对雅康高速公路二郎山隧道岩爆危险性进行评估,评价结果与实际开挖情况总体吻合,验证了该方法的可行性和合理性。

(4) 本文中仅对隧道施工期的岩爆危险性评价指标及方法进行了研究。由于隧道环境复杂,岩爆影响因素多变,建议加强隧道资料整理与分析,针对不同隧道,岩爆评价指标的确定、分级标准和评价指标权重分配仍需继续研究和讨论,建议针对岩爆危险性评价的属性识别模型作进一步的探讨。

参考文献 (References):

[1] 王迎超,尚岳全,孙红月,等. 基于功效系数法的岩爆烈度分级预测研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 529 - 534. [WANG Y C, SHANG Y Q, SUN H Y, et al. Study of prediction of rockburst intensity based on efficacy coefficient method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 529 - 534. (in Chinese)]

[2] 邓小鹏,相建华. 宝塔山特长隧道地应力场研究及岩爆预测[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40

- (1): 83-88. [DENG X P, XIANG J H. A study of the geostress field of the surrounding rocks of the Baota mountain tunnel and rock burst forecast [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(1): 83-88. (in Chinese)]
- [3] 吴凌峰, 兰乾玉, 吴凤山, 等. 基于贝叶斯判别法的工程岩爆危险评估与预测[J]. 施工技术, 2014, 43(增刊1): 105-109. [WU L F, LAN Q Y, WU F S, et al. Risk assessment and prediction on rockburst based on Bayes discriminance [J]. Construction Technology, 2014, 43(Sup 1): 105-109. (in Chinese)]
- [4] 郭生茂, 刘涛, 赵丽军, 等. 熵权物元可拓模型在岩爆危险性等级评价中的应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2015, 67(4): 89-93. [GUO S M, LIU T, ZHAO L J, et al. Application of entropy-weight and matter-element extension model in evaluation of rock burst risk level[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2015, 67(4): 89-93. (in Chinese)]
- [5] 尹彬, 陆卫东, 贾宝山, 等. 岩爆危险性评价的变权物元可拓模型[J]. 金属矿山, 2017(5): 54-59. [YIN B, LU W D, JIA B S, et al. Variable weight coupled matter-element extension evaluation of rock-burst risk[J]. Metal Mine, 2017(5): 54-59. (in Chinese)]
- [6] 李天斌, 孟陆波, 王兰生. 高地应力隧道稳定性及岩爆、大变形灾害防治[M]. 北京: 科学出版社, 2016. [LI T B, MENG L B, WANG L S. Stability of high-stress tunnels and prevention of large-scale rockburst disasters [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)]
- [7] 张晓燕. 基于模糊综合评价的岩爆危险性预测[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2017. ZHANG X Y. Study on risk forecast of rock burst based on fuzzy comprehensive evaluation [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2017. (in Chinese)
- [8] CAI W, DOU L M, ZHANG M, et al. A fuzzy comprehensive evaluation methodology for rock burst forecasting using microseismic monitoring [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 80: 232-245.
- [9] ZHANG M W, LIU S D, SHIMADA H. Regional hazard prediction of rock bursts using microseismic energy attenuation tomography in deep mining [J]. Natural Hazards, 2018, 93(3): 1359-1378.
- [10] YU J C, LIU S G, GAO L. Rock burst classification prediction method based on weight inverse analysis cloud model [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 283: 012023.
- [11] 邢军, 王建斌, 蒋蕾, 等. 圭嘎拉高速公路隧道地应力特征及岩爆预测[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 170-178. [XING J, WANG J B, JIANG L, et al. In-situ stress characteristics and rock burst prediction of the Guigala Expressway tunnel [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(2): 170-178. (in Chinese)]
- [12] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(1): 12-20. [CHENG Q S. Attribute recognition theoretical model with application [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis, 1997, 33(1): 12-20. (in Chinese)]
- [13] 程乾生. 属性集和属性综合评价系统[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(9): 1-8, 42. [CHENG Q S. Attribute sets and attribute synthetic assessment system [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1997, 17(9): 1-8. (in Chinese)]
- [14] 程乾生. 质量评价的属性数学模型和模糊数学模型[J]. 数理统计与管理, 1997, 16(6): 18-23. [CHENG Q S. Attribute mathematical model and fuzzy mathematical model for quality assessment [J]. Application of Statistics and Management, 1997, 16(6): 18-23. (in Chinese)]
- [15] 李术才, 周宗青, 李利平, 等. 岩溶隧道突水风险评价理论与方法及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1858-1867. [LI S C, ZHOU Z Q, LI L P, et al. Risk evaluation theory and method of water inrush in Karst tunnels and its applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1858-1867. (in Chinese)]
- [16] 许振浩, 李术才, 李利平, 等. 基于层次分析法的岩溶隧道突水突泥风险评估[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1757-1766. [XU Z H, LI S C, LI L P, et al. Risk assessment of water or mud inrush of Karst tunnels based on analytic hierarchy process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1757-1766. (in Chinese)]
- [17] 周宗青, 李术才, 李利平, 等. 岩溶隧道突涌水危险性评价的属性识别模型及其工程应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 818-826. [ZHOU Z Q, LI S C, LI L P, et al. Attribute recognition model of fatalness assessment of water inrush in Karst tunnels and its application [J]. Rock and Soil Mechanics,

- 2013, 34(3): 818 – 826. (in Chinese)]
- [18] 文畅平. 隧道瓦斯突出危险性评价的属性识别模型与实例[J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1322 – 1328. [WEN C P. Attribute recognition model and its application of fatalness assessment of gas burst in tunnel[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1322 – 1328. (in Chinese)]
- [19] 文畅平, 杨果林. 基于属性数学理论的岩土边坡地震稳定性评价[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(5): 8 – 14. [WEN C P, YANG G L. The seismic stability evaluation of the rock and soil slope based on the attribute mathematical theory [J]. China Railway Science, 2010, 31(5): 8 – 14. (in Chinese)]
- [20] 文畅平. 属性综合评价系统在岩爆发生和烈度分级中的应用[J]. 工程力学, 2008, 25(6): 153 – 158. [WEN C P. Application of attribute synthetic evaluation system in prediction of possibility and classification of rockburst [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(6): 153 – 158. (in Chinese)]
- [21] 于洋, 刁心宏, 赵秀绍, 等. 深部岩体隧洞岩爆灾害影响因素分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 183 – 189. [YU Y, DIAO X H, ZHAO X S, et al. Analysis of influence factor associated with rockbursts in deep, hard rock tunnels [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 183 – 189. (in Chinese)]
- [22] 张春生, 刘宁, 褚卫江, 等. 锦屏二级深埋隧洞构造型岩爆诱发机制与案例解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2242 – 2250. [ZHANG C S, LIU N, CHU W J, et al. Inducement mechanism and case analysis of tectonic rockburst in Jinping ii deep buried tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2242 – 2250. (in Chinese)]
- [23] 何川, 汪波, 吴德兴. 苍岭隧道岩爆特征与影响因素的相关性及防治措施研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(2): 25 – 28. [HE C, WANG B, WU D X. Research of relativity between rockburst character and influence factor and prevention measure in Cangling tunnel [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(2): 25 – 28. (in Chinese)]
- [24] 王庆武, 巨能攀, 杜玲丽, 等. 深埋长大隧道岩爆预测与工程防治研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 88 – 94. [WANG Q W, JU N P, DU L L, et al. Research on rockburst prediction and engineering measures of long and deep-lying tunnels [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 88 – 94. (in Chinese)]
- [25] 曹海洋. 高地应力隧道施工岩爆风险评估方法与应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016. [CAO H Y. Research on the method and application of rock burst risk assessment in the construction of high ground stress tunnels [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese)]
- [26] 徐琛, 刘晓丽, 王恩志, 等. 基于组合权重-理想点法的应变型岩爆五因素预测分级[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2245 – 2252. [XU C, LIU X L, WANG E Z, et al. Prediction and classification of strain mode rockburst based on five-factor criterion and combined weight-ideal point method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2245 – 2252. (in Chinese)]
- [27] 侯东赛, 张霄, 王磊. 基于综合赋权-TOPSIS法隧道突涌水风险评价及应用[J]. 隧道建设, 2017, 37(6): 691 – 699. [HOU D S, ZHANG X, WANG L. Risk evaluation of tunnel water inrush based on comprehensive weighting-TOPSIS method and its application [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(6): 691 – 699. (in Chinese)]
- [28] SAATY T L. How to make a decision: The analytic hierarchy process [J]. European Journal of Operational Research, 1990, 48(1): 9 – 26.
- [29] 刘莹昕, 刘飒, 王威尧. 层次分析法的权重计算及其应用[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2014, 26(5): 372 – 375. [LIU Y X, LIU S, WANG W Y. Computation of weight in AHP and its application [J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2014, 26(5): 372 – 375. (in Chinese)]

编辑: 张明霞