

中文引用格式:倪苏黔,徐颖,杨荣周,等. 基于可拓-层次分析模型的工程爆破效果评价及试验验证[J]. 中国安全科学学报,2024,34(12):129-139.

英文引用格式:NI Suqian, XU Ying, YANG Rongzhou, et al. Effect evaluation and experimental validation of engineering blasting based on extension-analytic hierarchy process model [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(12):129-139.

基于可拓-层次分析模型的工程爆破效果评价及 试验验证*

倪苏黔¹, 徐颖^{**1,2}教授, 杨荣周¹讲师, 姚象洋³, 远彦威⁴, 丁进甫¹

(1 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2 省部共建深部煤矿采动响应与灾害防控
国家重点实验室, 安徽 淮南 232001; 3 中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为和设计
重点实验室, 安徽 合肥 230026; 4 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

中图分类号: X932

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.12.0509

基金项目: 国家自然科学基金资助(52074009, 52274071); 国家重点研发计划项目(2021YFB3401504)。

【摘要】 为确保爆破下穿高速公路期间车辆正常通行及隧道既有支护结构安全, 提出基于可拓-层次分析(AHP)模型的工程爆破效果评价方法。首先, 建立爆破效果评级标准及指标体系, 将该模型应用至某引水工程评价中; 其次, 采用 AHP 法确定评价指标权重, 并计算得到爆破评级综合关联度; 最后, 开展声波探测试验、爆破冲击波试验及爆破地震波试验, 综合验证爆破效果评级结果。结果表明: 通过可拓-AHP 模型计算出综合关联度 $Q_{j(X-M)}$, 隧道掘进爆破效果评定为 $Q_{\max} = -0.017$, 评价等级为爆破效果良好。隧洞围岩松动圈范围较小且分布均匀, 围岩稳定性的影响范围为 0.5~0.6 m, 爆炸能量没有造成岩石破裂带向内进一步延伸迹象。爆破地震波在不同波频下的能量衰减趋势不同, 但衰减速度在整体上具有高频成分能量大于低频成分能量表现; 在同通道下, 随着爆源与测点距离的增大, 整体振动波形变窄, 具有主频先增后减、主频域往低频方向移动表现。爆破冲击波超压峰值衰减特征满足 $P_s = \alpha t^{-\gamma}$, 且随着爆源距的增大, 爆破冲击波超压衰减系数呈递增趋势, 布测范围属于冲击波衰减区, 隧洞口处及施工外区的冲击波峰值超压趋于收敛。

【关键词】 可拓-层次分析(AHP)模型; 爆破效果评价; 声波探测; 爆破冲击波;
爆破地震波

Effect evaluation and experimental validation of engineering blasting based on extension-analytic hierarchy process model

NI Suqian¹, XU Ying^{1,2}, YANG Rongzhou¹, YAO Xiangyang³, YUAN Yanwei⁴, DING Jinfu¹

(1 School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2 State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Huainan Anhui 232001, China; 3 CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230026, China; 4 School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

* 文章编号: 1003-3033(2024)12-0129-11; 收稿日期: 2024-07-17; 修稿日期: 2024-09-12

** 通信作者: 徐颖(1965—), 男, 安徽泗县人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程爆破等方面的研究。E-mail: yxu@ aust. edu. cn。

Abstract: In order to ensure the normal passage of vehicles and the safety of the existing tunnel support structure during the blasting through the highway, the evaluation method of engineering blasting effect based on extension-AHP model was proposed. Firstly, by means of investigation and analysis, the blasting effect rating standard and index system were established, and the model was applied to the evaluation of a water diversion project. Secondly, AHP was used to determine the weights of evaluation indexes, and the combined relevance degree of blasting rating was calculated. Finally, the results of the blasting effect rating were verified by acoustic detection test, blasting shock wave test and blasting seismic wave test. The study shows that the combined relevance degree $Q_{j(x-m)}$ is calculated by extension-AHP model. The blasting effect of the tunnel boring is $Q_{\max} = -0.017$, and the evaluation grade is a good blasting effect. The surrounding rock loose circle of the tunnel is relatively small and evenly distributed. The influence range of the surrounding rock stability is about 0.5-0.6 m. The blasting energy does not cause the rock rupture zone to further extend the signs of the inward. The energy attenuation trend of blasting seismic waves is different under different wave frequencies. However, the attenuation rate is greater than that of low-frequency component energy in the overall performance of high-frequency component energy. In the same channel, with the increase of the distance between the blasting source and the measurement points, the overall vibration waveform becomes narrower. The main frequency increases first and then decreases, and the main frequency domain moves to the low-frequency direction. The overpressure peak attenuation characteristic of blasting shock wave meets $P_s = \alpha l^{-\gamma}$. With the increase in the distance from the blasting source, blasting shock wave overpressure attenuation coefficient is an increasing trend. The measurement range belongs to the shock wave attenuation zone. The shock wave overpressure peak of the tunnel entrance and the construction outside tend to converge.

Keywords: extension-analytic hierarchy process (AHP) model; blasting effect evaluation; acoustic detection; blasting shock wave; blasting seismic wave

0 引言

爆破施工技术在城市地下空间建设、公民建拆除及交通运输等领域有着广泛的应用。我国在地下空间建设等领域,采用钻爆法掘进的隧道总量占比较大,爆破环境的未知性和复杂性影响爆破掘进效率,开展爆破工程的破岩效果评估研究已成为一个不可回避的长期课题^[1-2]。

在安全爆破问题的评估研究中,主要采用熵值赋权法^[3]、模糊数学层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)^[4-6]等建立风险评估模型。自可拓集合和不相容问题被提出以来,可拓学理论逐渐在隧道^[7]、桥梁^[8]等安全施工领域得以运用。现阶段可拓学的研究以边坡加固工程的稳定性评价^[9]、巷道衬砌支护的参数优化^[10]及岩体质量分级^[11]为主。其中,边坡加固工程稳定性评价中的非确定性研究以国外理论为主,如支持向量机、蒙特卡罗法等;巷道衬砌支护结构有关病害方面的评价方法较为单一;岩体质量分级在辨别方法和智能算法理论

的问题上,也存在评价系统模糊性缺乏考虑和综合权重确定方法单一这2个方面的局限。在以上几类问题的研究中,国内发展起来的可拓学理论取得一定应用成果,但在隧道工程爆破效果方面还鲜有研究。

鉴于此,笔者拟提出基于可拓-AHP模型的工程爆破效果评价方法,建立爆破效果评级标准及指标体系,采用AHP确定指标权重,基于可拓-AHP模型计算得到综合关联度,并通过声波探测试验、爆破冲击波试验及爆破地震波试验进一步证实该模型对工程应用的有效性及其评价结果的科学性,以期对竖井、隧道等地下工程的掘进爆破评价,以及维护既有支护结构安全,提供理论参考与实践指导。

1 构建可拓-AHP理论模型

1.1 可拓学理论

可拓学是一种以定性与定量角度对解决不相容问题开展研究的理论方法^[12],其引入物元并进行可拓变换运算,物元由事物、特征和量值这3个基本要

素组成。

首先,通过可拓变换方法计算经典域物元、节域物元和待评物元;其次,基于极差法,无量纲化处理单位不统一的评价指标^[13];最后,建立关联函数及关联度,确定研究对象评价级别。

1.2 可拓-AHP 模型

将 AHP 引入可拓学中的数学评价模型,构建可拓-AHP 模型,如图 1 所示。

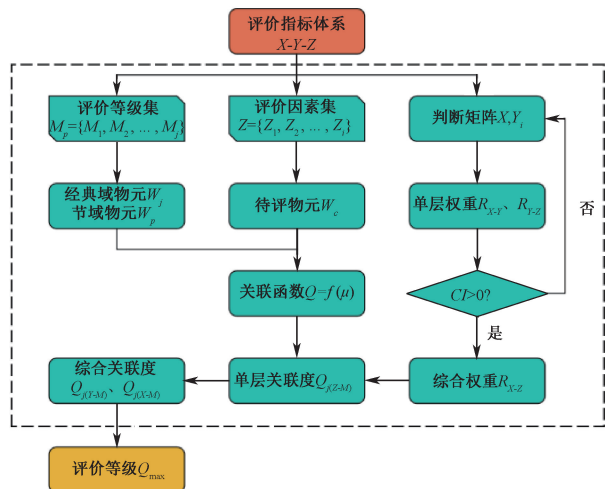


图 1 可拓-AHP 模型

Fig. 1 Extension-AHP model

2 爆破效果评级标准及指标体系

2.1 建立爆破效果评价体系

基于现场调研分析,采用 AHP 将某引水隧洞掘进的爆破效果评估问题分解成目标层 X、准则层 Y、指标层 Z 这 3 个评价层级,并提出隧道掘进的爆破效果评价因素集 Z,形成引水隧洞掘进爆破评价体系,如图 2 所示。

2.2 爆破效果评级标准

依据隧道掘进经验及《爆破安全规程》(GB6722—2023),辨识并划分爆破效果级别标准,将爆破施工效果分为优 M_1 、良好 M_2 、普通 M_3 、较差 M_4 、差 M_5 共 5 个等级,爆破效果评级集 $M_p = \{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5\}$ 。基于实际工况,确定掘进爆破效果的评价指标量值区间及实际量值,对其无量纲化^[3]处理后,经爆破行业专家研讨,并结合工程分级方法^[14],得到爆破效果评级标准划分,见表 1。

3 案例分析

3.1 工程概况

以山茶隧洞爆破为例,该隧洞下穿 G15 沈海高速公路 64 m 左右(图 3),周边紧邻民建、山体公墓等。

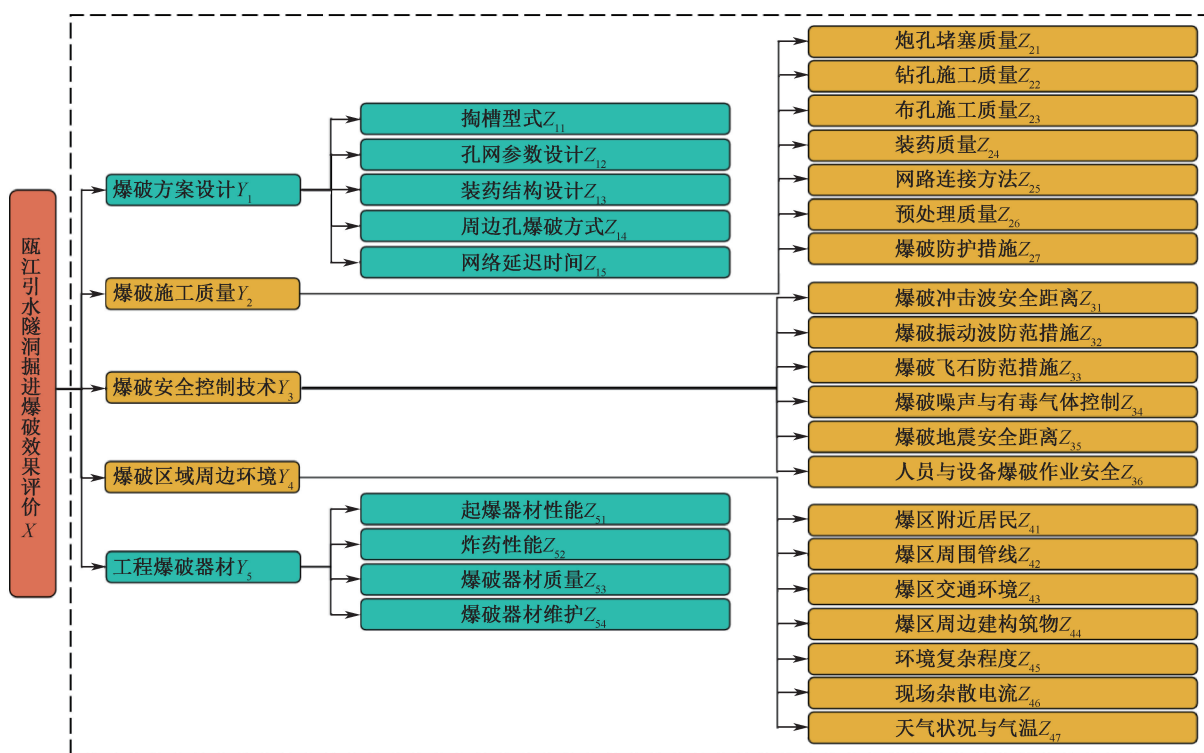


图 2 引水隧洞掘进爆破评价体系

Fig. 2 Evaluation system for blasting of diversion tunnel excavation

表 1 评级标准划分

Table 1 Standard of evaluation grade

评级		M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	实际量值
Y_1	Z_{11}	[1,0.61]	(0.61,0.38]	(0.38,0.25]	(0.25,0.17]	(0.17,0]	0.404
	Z_{12}	[1,0.88]	(0.88,0.70]	(0.70,0.53]	(0.53,0.32]	(0.32,0]	0.663
	Z_{13}	[1,0.86]	(0.86,0.71]	(0.71,0.57]	(0.57,0.34]	(0.34,0]	0.523
	Z_{14}	[1,0.89]	(0.89,0.68]	(0.68,0.47]	(0.47,0.29]	(0.29,0]	0.503
	Z_{15}	[1,0.71]	(0.71,0.42]	(0.42,0.29]	(0.29,0.20]	(0.20,0]	0.393
Y_2	Z_{21}	[1,0.79]	(0.79,0.53]	(0.53,0.26]	(0.26,0.08]	(0.08,0]	0.204
	Z_{22}	[1,0.78]	(0.78,0.46]	(0.46,0.18]	(0.18,0.08]	(0.08,0]	0.383
	Z_{23}	[1,0.59]	(0.59,0.27]	(0.27,0.15]	(0.15,0.07]	(0.07,0]	0.445
	Z_{24}	[1,0.84]	(0.84,0.62]	(0.62,0.45]	(0.45,0.24]	(0.24,0]	0.397
	Z_{25}	[1,0.63]	(0.63,0.42]	(0.42,0.21]	(0.21,0.10]	(0.10,0]	0.295
	Z_{26}	[1,0.90]	(0.90,0.69]	(0.69,0.51]	(0.51,0.31]	(0.31,0]	0.527
	Z_{27}	[1,0.65]	(0.65,0.34]	(0.34,0.13]	(0.13,0.05]	(0.05,0]	0.544
Y_3	Z_{31}	[1,0.63]	(0.63,0.32]	(0.32,0.16]	(0.16,0.07]	(0.07,0]	0.274
	Z_{32}	[1,0.72]	(0.72,0.50]	(0.50,0.28]	(0.28,0.09]	(0.09,0]	0.109
	Z_{33}	[1,0.82]	(0.82,0.56]	(0.56,0.29]	(0.29,0.11]	(0.11,0]	0.545
	Z_{34}	[1,0.77]	(0.77,0.43]	(0.43,0.24]	(0.24,0.08]	(0.08,0]	0.130
	Z_{35}	[1,0.88]	(0.88,0.67]	(0.67,0.39]	(0.39,0.16]	(0.16,0]	0.805
	Z_{36}	[1,0.86]	(0.86,0.64]	(0.64,0.40]	(0.40,0.18]	(0.18,0]	0.717
Y_4	Z_{41}	[1,0.88]	(0.88,0.67]	(0.67,0.46]	(0.46,0.29]	(0.29,0]	0.642
	Z_{42}	[1,0.86]	(0.86,0.61]	(0.61,0.49]	(0.49,0.29]	(0.29,0]	0.738
	Z_{43}	[1,0.61]	(0.61,0.33]	(0.33,0.16]	(0.16,0.06]	(0.06,0]	0.439
	Z_{44}	[1,0.82]	(0.82,0.54]	(0.54,0.38]	(0.38,0.21]	(0.21,0]	0.255
	Z_{45}	[1,0.71]	(0.71,0.40]	(0.40,0.29]	(0.29,0.18]	(0.18,0]	0.417
	Z_{46}	[1,0.67]	(0.67,0.46]	(0.46,0.33]	(0.33,0.19]	(0.19,0]	0.343
	Z_{47}	[1,0.92]	(0.92,0.69]	(0.69,0.46]	(0.46,0.20]	(0.20,0]	0.531
Y_5	Z_{51}	[1,0.76]	(0.76,0.48]	(0.48,0.29]	(0.29,0.07]	(0.07,0]	0.471
	Z_{52}	[1,0.60]	(0.60,0.28]	(0.28,0.15]	(0.15,0.05]	(0.05,0]	0.099
	Z_{53}	[1,0.67]	(0.67,0.46]	(0.46,0.25]	(0.25,0.08]	(0.08,0]	0.455
	Z_{54}	[1,0.68]	(0.68,0.36]	(0.36,0.17]	(0.17,0.06]	(0.06,0]	0.187

隧洞混凝土衬砌段不同的围岩类别采取不同的支护方式, II类围岩一次喷护后洞径为 5.5 m×5.25 m (宽×高), III—V类围岩衬后洞径为 4.6 m×4.8 m (宽×高), 钢衬段采用 Q345R 钢, 钢管内径 5.0 m, 钢管外包 C25 混凝土。以少量装药、密布布孔为原则的短进尺、全断面引水隧洞掘进爆破。

3.2 物元的建立

根据计算得到评价等级 W_j 、评级集合 W_p 及引水隧洞掘进爆破效果 W_c :



图 3 山茶隧洞周边环境

Fig. 3 Surrounding environment of Shancha Tunnel

$$W_j = \begin{bmatrix} M_p \\ Z_{11} \\ Z_{12} \\ \vdots \\ Z_{53} \\ Z_{54} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ < 0.61, 1 > & < 0.38, 0.61 > & < 0.25, 0.38 > & < 0.17, 0.25 > & < 0, 0.17 > \\ < 0.88, 1 > & < 0.70, 0.88 > & < 0.53, 0.70 > & < 0.32, 0.53 > & < 0, 0.32 > \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ < 0.67, 1 > & < 0.46, 0.67 > & < 0.25, 0.46 > & < 0.08, 0.25 > & < 0, 0.08 > \\ < 0.68, 1 > & < 0.36, 0.68 > & < 0.17, 0.36 > & < 0.06, 0.17 > & < 0, 0.06 > \end{bmatrix}$$

$$W_p = \begin{bmatrix} M_p & Z_{11} & < 0, 1 > \\ & Z_{12} & < 0, 1 > \\ & \vdots & \vdots \\ & Z_{53} & < 0, 1 > \\ & Z_{54} & < 0, 1 > \end{bmatrix}; W_c = \begin{bmatrix} M_c & Z_{11} & 0.40 \\ & Z_{12} & 0.66 \\ & \vdots & \vdots \\ & Z_{53} & 0.45 \\ & Z_{54} & 0.19 \end{bmatrix}$$

3.3 确定权重

基于 AHP 的 1~9 标度,比较判断多层次爆破效果评价指标,给出其判断矩阵 X 、 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 和 Y_5 如下:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 2 & 4 & 2 \\ 3 & 1 & 3 & 4 & 7 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 1 & 1/3 \\ 1/4 & 1/4 & 1 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 1/7 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_1 = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 3 & 5 & 2 \\ 1/4 & 1 & 1/5 & 1/2 & 1/3 \\ 1/3 & 5 & 1 & 3 & 1 \\ 1/5 & 2 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 1/2 & 3 & 1 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 3 & 2 & 1/2 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 2 & 1 & 1/3 & 3 & 4 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 1/3 & 3 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 1 & 1/4 & 3 & 3 \\ 2 & 3 & 3 & 4 & 1 & 3 & 6 \\ 1/2 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/4 & 1 & 1/3 & 1/6 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_3 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 2 & 4 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1/4 & 2 & 1/2 & 4 \\ 1/2 & 4 & 1 & 8 & 2 & 5 \\ 1/4 & 1/2 & 1/8 & 1 & 1/7 & 1 \\ 1 & 2 & 1/2 & 7 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 1/4 & 1/5 & 1 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_4 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 6 & 5 & 4 & 5 & 7 \\ 1/3 & 1 & 4 & 3 & 2 & 1/2 & 2 \\ 1/6 & 1/4 & 1 & 1/2 & 1/5 & 1/4 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 2 & 1 & 1/3 & 1 & 5 \\ 1/4 & 1/2 & 5 & 3 & 1 & 1 & 7 \\ 1/5 & 2 & 4 & 1 & 1 & 1 & 6 \\ 1/7 & 1/2 & 1/3 & 1/5 & 1/7 & 1/6 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_5 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 7 \\ 1/2 & 1 & 1/3 & 4 \\ 1/3 & 3 & 1 & 5 \\ 1/7 & 1/4 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}$$

对以上判断矩阵作一致性检验,得到单层指标权重 R 、最大特征值 λ_{max} 、一致性指标 (Consistency Index, CI) 及一致性比例 (Consistency Ratio, CR), 见表 2。

表 2 一致性检验结果

Table 2 Consistency checking result

判断矩阵	单层指标权重 R	λ_{max}	CI	CR
X	$R_{X-Y} = (0.209, 0.076, 0.491, 0.089, 0.136)^T$	5.376	0.094	0.084
Y_1	$R_{Y_1-Z} = (0.088, 0.013, 0.046, 0.018, 0.044)^T$	5.167	0.042	0.037
Y_2	$R_{Y_2-Z} = (0.080, 0.086, 0.054, 0.055, 0.157, 0.034, 0.024)^T$	7.659	0.110	0.081
Y_3	$R_{Y_3-Z} = (0.041, 0.014, 0.040, 0.006, 0.028, 0.007)^T$	6.451	0.090	0.072
Y_4	$R_{Y_4-Z} = (0.030, 0.011, 0.003, 0.006, 0.011, 0.011, 0.002)^T$	7.744	0.124	0.091
Y_5	$R_{Y_5-Z} = (0.043, 0.015, 0.026, 0.005)^T$	4.234	0.078	0.088

由表2可知:各判断矩阵的CR均小于0.1,符合一致性要求,得到综合权重 $R_{X-Z} = (0.088, 0.013, 0.046, 0.018, 0.044, 0.080, 0.086, 0.054, 0.055, 0.157, 0.034, 0.024, 0.041, 0.014, 0.040, 0.006, 0.028, 0.007, 0.030, 0.011, 0.003, 0.006, 0.011, 0.011, 0.002, 0.043, 0.015, 0.026, 0.005)^T$ 。

表3 单层指标-等级关联度 $Q_{j(Z-M)}$ Table 3 Single layer index -grade correlation degree $Q_{j(Z-M)}$

评价指标	R_{X-Z}	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	隶属级别	评级
Z_{11}	0.088	-0.338	0.104	-0.039	-0.205	-0.282	M_2	良好
Z_{12}	0.013	-0.247	-0.053	0.218	-0.283	-0.504	M_3	普通
Z_{13}	0.046	-0.392	-0.263	-0.082	0.204	-0.277	M_4	较差
Z_{14}	0.018	-0.435	-0.260	0.157	-0.062	-0.300	M_3	普通
Z_{15}	0.044	-0.446	-0.064	0.208	-0.145	-0.241	M_3	普通
Z_{21}	0.080	-0.742	-0.615	-0.215	0.311	-0.135	M_4	较差
Z_{22}	0.086	-0.509	-0.167	0.275	-0.248	-0.329	M_3	普通
Z_{23}	0.054	-0.246	0.453	-0.240	-0.347	-0.403	M_2	良好
Z_{24}	0.055	-0.527	-0.360	-0.118	0.252	-0.207	M_4	较差
Z_{25}	0.157	-0.532	-0.298	0.405	-0.108	-0.217	M_3	普通
Z_{26}	0.034	-0.414	-0.236	0.094	-0.035	-0.314	M_3	普通
Z_{27}	0.024	-0.163	0.342	-0.309	-0.476	-0.520	M_2	良好
Z_{31}	0.041	-0.565	-0.144	0.288	-0.136	-0.219	M_3	普通
Z_{32}	0.014	-0.849	-0.782	-0.611	0.100	-0.021	M_4	较差
Z_{33}	0.040	-0.335	-0.027	0.056	-0.359	-0.489	M_3	普通
Z_{34}	0.006	-0.831	-0.698	-0.458	0.313	-0.054	M_4	较差
Z_{35}	0.028	-0.085	0.357	-0.409	-0.680	-0.768	M_2	良好
Z_{36}	0.007	-0.166	0.350	-0.214	-0.528	-0.655	M_2	良好
Z_{41}	0.030	-0.270	-0.042	0.133	-0.337	-0.496	M_3	普通
Z_{42}	0.011	-0.142	0.488	-0.328	-0.486	-0.631	M_2	良好
Z_{43}	0.003	-0.280	0.389	-0.163	-0.332	-0.403	M_2	良好
Z_{44}	0.006	-0.689	-0.528	-0.329	0.265	-0.057	M_4	较差
Z_{45}	0.011	-0.413	0.055	-0.028	-0.179	-0.289	M_2	良好
Z_{46}	0.011	-0.488	-0.254	0.100	-0.019	-0.189	M_3	普通
Z_{47}	0.002	-0.423	-0.230	0.309	-0.131	-0.414	M_3	普通
Z_{51}	0.043	-0.380	-0.019	0.047	-0.255	-0.431	M_3	普通
Z_{52}	0.015	-0.835	-0.646	-0.340	0.490	-0.052	M_4	较差
Z_{53}	0.026	-0.321	-0.011	0.024	-0.273	-0.408	M_3	普通
Z_{54}	0.005	-0.725	-0.481	0.089	-0.020	-0.135	M_3	普通

3.5 计算综合关联度

根据表3,计算Y、X指标对评价级别 M_j 的 $Q_{j(Y-M)}$ 及 $Q_{j(X-M)}$:

$$Q_{j(Y-M)} = R_{X-Z} \cdot Q_{j(Z-M)} =$$

$$\begin{bmatrix} -0.078 & -0.011 & 0.008 & -0.020 & -0.060 \\ -0.247 & -0.106 & 0.046 & -0.031 & -0.129 \\ -0.057 & -0.010 & -0.010 & -0.039 & -0.055 \\ -0.025 & -0.001 & -0.001 & -0.017 & -0.029 \\ -0.041 & -0.013 & -0.002 & -0.011 & -0.031 \end{bmatrix}$$

$$Q_{j(X-M)} = R_{X-Y} \cdot Q_{j(Y-M)} =$$

$$[-0.071 \quad -0.017 \quad -0.019 \quad -0.029 \quad -0.056]$$

至此得出爆破评级综合关联度,如图4所示。

3.4 单层关联度 $Q_{j(Z-M)}$ 计算

单层指标-等级关联度 $Q_{j(Z-M)}$ 是Z层评价指标对评价级别 M_j 的单层关联度,关联函数计算结果见表3。为便于计算 $Q_{j(Y-M)}$ 和 $Q_{j(X-M)}$,将表2计算得到的综合权重 R_{X-Z} 一并列入。

基于最大关联度原则确定X层最大关联度 $Q_{\max} = Q_2 = -0.017$,这说明该引水隧洞掘进爆破效果和评级级别 M_2 关联程度最大,因此,可拓-AHP模型的隧洞掘进爆破效果评价为良好。

4 爆破效果评价结果验证

4.1 验证试验方案

爆破效果对爆破工程生产效率有着直接的影响,提出“一模三验证”工程爆破效果评价方法,如图5所示。

4.1.1 围岩声波探测试验

基于围岩损伤松动圈理论^[15],爆后围岩应力分

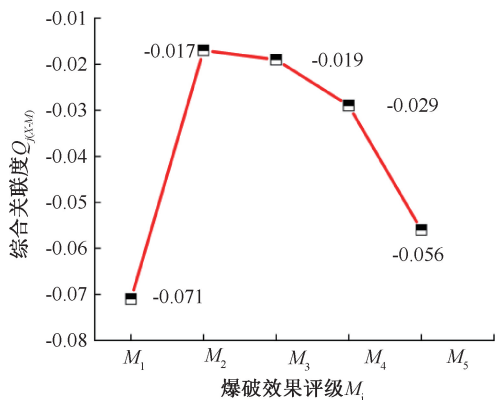


图 4 爆破评级综合关联度

Fig. 4 Combined relevance degree of blasting ratings

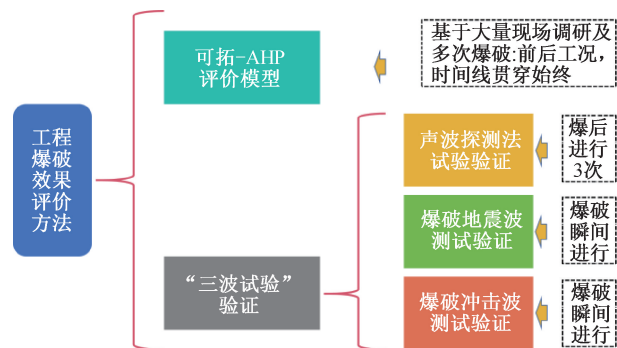


图 5 “一模三验证”工程爆破效果评价方法

Fig. 5 "One model and three verifications" tunnel blasting effect evaluation method

布如图 6 所示。 σ 为应力, a 为掘进半径, r 为任意点

到隧洞轴线的距离, c 为最大支撑压力处半径, σ_r 、 σ_θ 、 σ_0 分别为径向应力、环向应力和初始地应力。

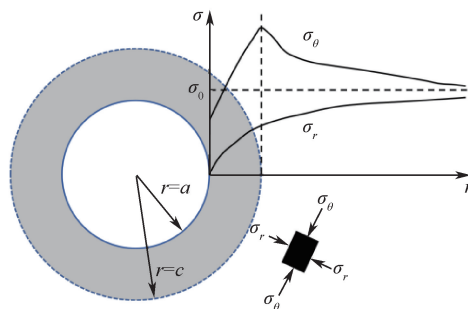


图 6 爆破掘进后围岩应力分布

Fig. 6 Stress distribution of surrounding rock after blasting

采用声波探测法对 3 次掘进爆破状态下的围岩进行声波精细化探测, 结果见表 4。一次爆破后两侧待测孔距隧洞掘进工作面为 13 m, 二次爆破后其距离为 16 m, 即单次全断面爆破进尺约为 3 m。由于钻爆作业平台长度在进深 8~9 m, 考虑预留施工作业和现场试验的可操作空间, 首爆前在距掘进隧洞工作面 10 m 处的两侧围岩各布置 2 个测孔, 其中, 两侧各 1 个备用孔以防止围岩喷浆加固施工造成的封堵, 孔深 2 000 mm, 孔径 42 mm。单次测试试验中, 每次读数后以 10 mm 为递进深度, 测得 20 个波速值, 现场试验如图 7 所示。

表 4 声波探测法孔深-周期参数

Table 4 Hole depth-period parameters of acoustic sounding method

孔深/m	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
周期/次	首爆前、一次爆破、二次爆破																			

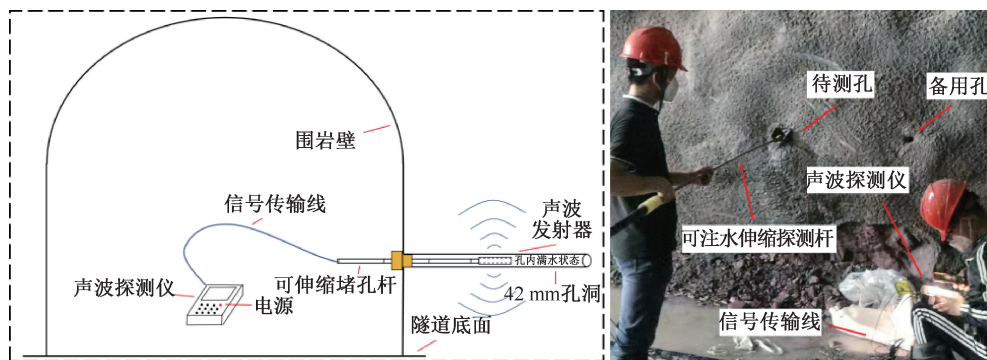


图 7 声波探测现场试验

Fig. 7 On site testing of sound wave detection

4.1.2 爆破地震波测试试验

安全振速是良好爆破效果的佐证。在隧道爆破工作面上方约 20 m 处高速公路面上, 布置爆破地震

波监测点, 如图 8 所示。于爆源正上方设置测点 N_1 , 距离 3 m 处设置测点 N_2 , 距离 N_1 测点 10 m 处设置测点 N_3 。

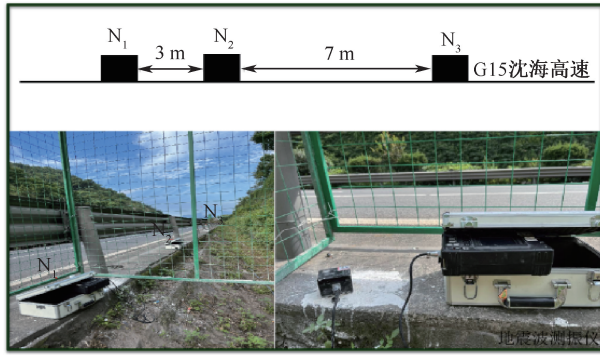


图8 地震波监测点布置

Fig. 8 Layout of seismic wave monitoring points

4.1.3 爆破冲击波测试试验

现场测试设备主要采用传感器和采集仪,并通过电缆将传感器、采集仪和电源连接形成测试验证系统,动态采集隧道掘进爆破冲击波,爆破冲击波现场试验布置如图9所示。

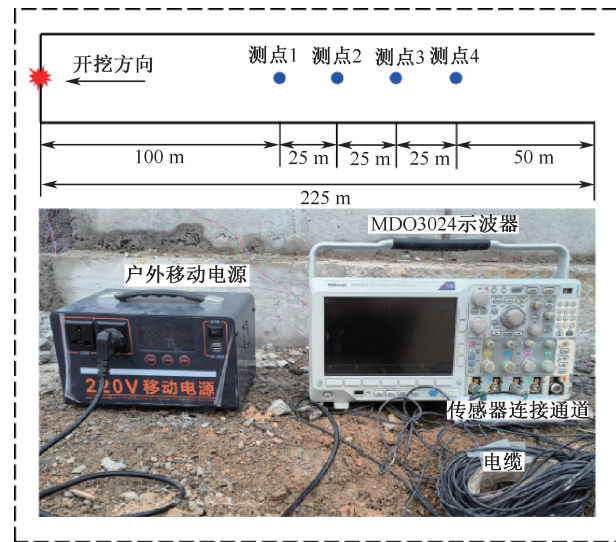


图9 爆破冲击波现场试验布置

Fig. 9 Layout of site testing for blasting shock waves

4.2 试验结果分析

4.2.1 围岩声波分析

测得围岩声波波速随孔深变化特征,如图10所示。

由图10可知:在孔深约0.5m处时,隧洞左侧围岩的声波波速出现较大变化,波速上升趋势明显,表明全断面开挖爆破对该岩体损伤存在一定影响,且围岩稳定性的影响范围0.5~0.6m。在钻爆法施工后,及时进行初期喷浆支护使得围岩受到一定的保护,二次爆破后岩石破裂带没有向更深处进一步延伸。

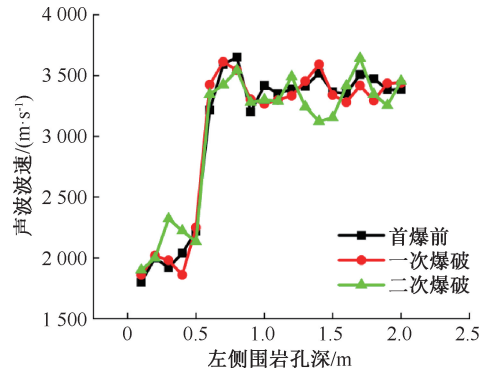


图10 隧洞左侧围岩孔深-声波波速曲线

Fig. 10 Tunnel surrounding rock depth-acoustic wave velocity curve

隧洞右侧围岩(图11)在一次爆破后,声波波速有小幅下降,岩石破裂带稍有向内延伸趋势,且孔内伴有少量震落的碎石,对围岩稳定性存在影响。而相较于一次爆破后,二次爆破后所测得的声波波速下降幅度较小,表明岩石破裂带无明显向内延伸趋势,且孔内基本没有碎石崩落。

综合爆破掘进对两侧围岩的声波波速影响分析,首爆前,一次探测时距工作面10m,此时爆炸能量对该测孔周围岩体仍有破坏,而在一次爆破后,工作面进尺3m,在相当药量下的爆炸能量已不足以对该测孔周围岩石形成更大程度的损伤破坏,加之初期喷浆支护的作用,该处隧洞围岩的稳定性得到进一步巩固,同时,两侧围岩的声波探测特征验证了可拓-AHP模型评价结果。

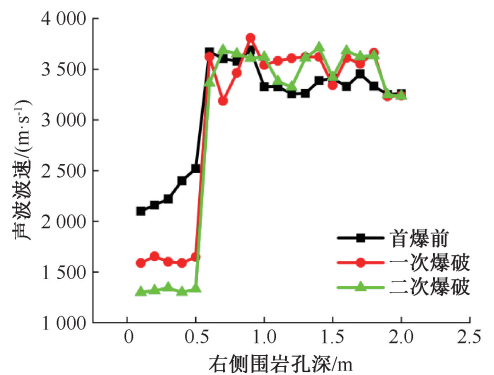


图11 隧洞右侧围岩孔深-声波波速曲线

Fig. 11 Tunnel surrounding rock depth-acoustic wave velocity curve

4.2.2 爆破地震波分析

通过隧道上方高速公路布测点 N_1 、 N_2 、 N_3 ,测得隧洞爆破地震波频谱如图12所示。

由地震波频谱反馈爆破振动波主要参数见表5。

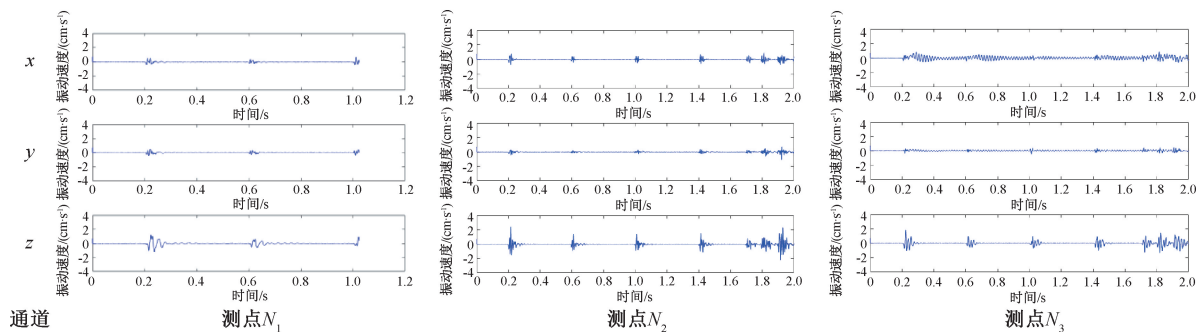


图 12 隧洞爆破地震波频谱

Fig. 12 Tunnel blasting seismic wave frequency

表 5 地震波主要参数

Table 5 Main parameters of seismic wave

测点	通道	最大振速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	主振频率/Hz	持续时间/s
N_1	x	0.697	42.725	0.819
	y	0.518	32.959	0.819
	z	-1.245	35.4	0.819
N_2	x	0.954	104.37	1.843
	y	-1.912	62.866	1.843
	z	4.122	108.643	1.843
N_3	x	1.479	59.204	1.843
	y	0.732	61.646	1.842
	z	-4.097	61.646	1.842

爆破地震波的传播过程伴随着能量的产生与衰减。结合表 5 与图 12 可知:不同波频下爆破能量的衰减趋势不同,整体上表现出高频成分能量衰减速度大于低频成分能量衰减速度的特征。同时可以发现,随着爆源与测点 N_1 、 N_2 和 N_3 距离的增大,通道 x、y 和 z 均表现出主频先增后减、主频域往低频方向移动的特征,且整体上波形变窄。

需要说明的是,地震波振幅在岩石中的衰减程度受岩体温压、岩石内部成分与结构、流体性质及其饱和度等因素影响。与通常爆破地震波主频降低规律有所不同,试验中,通道 x、y 和 z 均表现出主频先增后减的特征,由此基本可以判定,该地层中存在突变地质层,且在测点 N_1 、 N_2 和 N_3 范围内的突变地质层保持地层均质性。这证明爆破地震波在传播过程中呈衰减态势,且现场周边环境无异常现象发生,从地震波角度进一步表明隧洞掘进良好的爆破效果。

4.2.3 爆破冲击波分析

基于凹陷地形隧道工况,提出采用进口段大直径空孔掏槽爆破和近区遮挡冲击波综合防控技术。

爆破冲击波综合防控技术如图 13 所示。大直径掏槽空孔下移有助于压顶,能够较合理地分配起爆网路炸药能量,避免能量集中作用。加强炮孔封堵有助于耗散冲击波能量,提高炸药能量对岩石的破碎效率。隧洞口处的竹筴缓冲结构使爆破冲击波传播方向分散,并有效吸收冲击波能量,进而衰减冲击波强度。

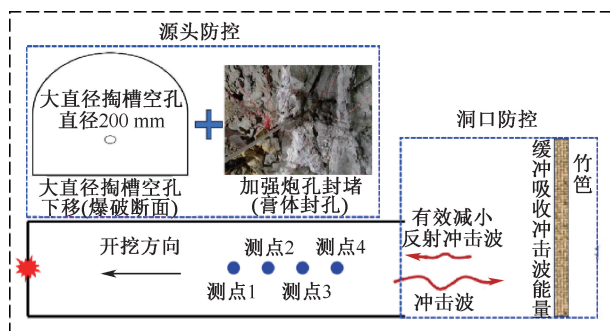
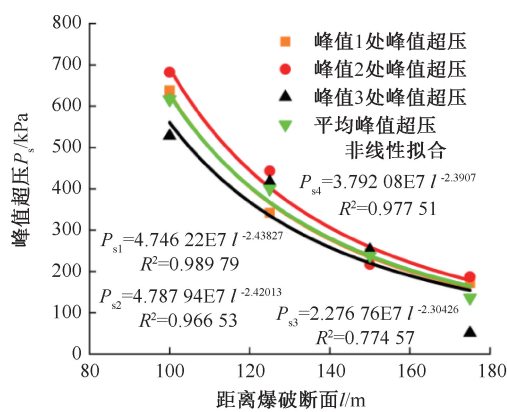


图 13 爆破冲击波综合防控技术

Fig. 13 Blasting shock wave comprehensive prevention and control technology

经测得隧洞掘进爆破冲击波超压拟合与衰减系数如图 14 所示。

由图 14 可知:冲击波超压峰值的衰减特征满足



(a) 峰值超压非线性拟合

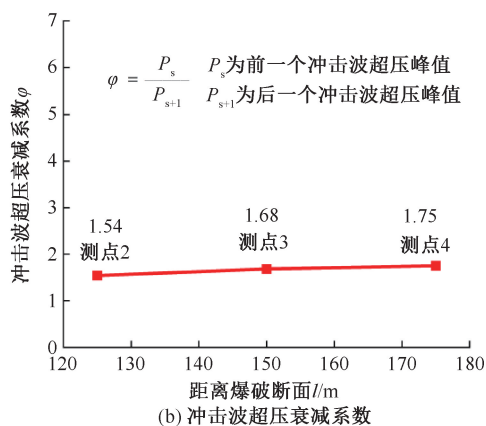


图 14 爆破冲击波超压拟合与衰减系数

Fig. 14 Blast shock wave overpressure fitting and attenuation coefficients

幂函数 $P_s = \alpha l^{-\gamma}$, 冲击波超压峰值的衰减指数 γ 在 [2.30, 2.44] 范围内。由相邻测点求出的冲击波超压衰减系数随着爆源距的增大呈递增趋势, 说明爆破冲击波试验的布测范围属于冲击波衰减区, 且随着爆源距的增加, 冲击波衰减系数很可能在隧洞口处达到极值。

由此可基本判定, 爆破冲击波在隧洞口处及施工外区的峰值超压是趋于收敛的, 这表明采用充分有效的冲击波综合防控技术, 该隧洞掘进施工在可控范围内达到良好的爆破效果。

5 结论

1) 基于可拓学理论并引入 AHP, 建立用以解

决隧道爆破效果复杂问题决策的可拓-AHP 评价模型, 该模型能够较真实地将爆破掘进过程中存在的不确定性问题以量化值体现出来。通过模型计算综合关联度 $Q_{j(X-M)}$ 确定隧道爆破效果, 评级为爆破效果良好。

2) 基于围岩损伤松动圈理论, 从声波波速与孔深的关系推断隧道围岩松动圈范围较小且分布均匀, 围岩稳定性的影响范围为 0.5~0.6 m。在二次爆破相当药量下的爆炸能量没有造成岩石破裂带向内进一步延伸, 同时, 喷浆支护也使岩体稳定性得到巩固加强, 声波探测法证明, 该模型评价结果的具有一定的科学性。

3) 爆破地震波的传播过程伴有爆炸能的产生与衰减, 不同波频下爆破能量的衰减趋势不同, 但整体上表现出高频成分能量衰减速度大于低频成分能量衰减速度特征; 随着爆源与测点距离的增大, 同一通道下整体波形变窄, 表现出主频先增后减、主频域往低频方向移动的特征。

4) 提出进口段大直径空孔掏槽爆破和近区遮挡冲击波综合防控技术, 该技术可有效分散爆破冲击波传播方向、吸收冲击波能量及衰减冲击波强度。爆破冲击波超压峰值的衰减特征满足 $P_s = \alpha l^{-\gamma}$, 衰减指数在 2.30~2.44。爆破冲击波超压衰减系数随着爆源距的增大呈递增趋势, 布测范围属于冲击波衰减区, 隧洞口处及施工外区的冲击波峰值超压趋于收敛。

参考文献

- [1] 徐颖, 袁璞. 爆炸荷载下深部围岩分区破裂模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增2): 3844-3851.
XU Ying, YUAN Pu. Model test of zonal disintegration in deep rock under blasting load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3844-3851.
- [2] 汪旭光, 吴春平. 智能爆破的产生背景及新思维[J]. 金属矿山, 2022(7): 2-6.
WANG Xuguang, WU Chunping. The background and new thinking of intelligent blasting [J]. Metal Mine, 2022(7): 2-6.
- [3] 沈世伟, 许君臣, 代树林, 等. 基于熵值赋权法的节理岩体隧道爆破质量可拓学评价[J]. 土木工程学报, 2013, 46(12): 118-126.
SHEN Shiwei, XU Junchen, DAI Shulin, et al. Entropy evaluation of joint rock tunnel blasting quality based on entropy weighting method [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(12): 118-126.
- [4] 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 Zhenhao, LI Shucai, LI Liping, 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.
- [5] 赵万强, 路军富, 汤印, 等. 铁路隧道底鼓风险等级划分方法及控制措施研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(4):

178-187,212.

ZHAO Wanqiang, LU Junfu, TANG Yin, et al. Study on risk level classification method and control measures for railway tunnel floor heave [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2023, 60(4): 178-187,212.

- [6] GORAI A K. Sensitivity analysis of GIS-based fuzzy-AHP model for prediction of slope failure susceptibility index [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2022, 50(4): 715-733.
- [7] CHEN Hongyu, YANG Sai, FENG Zongbao, et al. Safety evaluation of buildings adjacent to shield construction in karst areas: an improved extension cloud approach [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 124: DOI: 10.1016/j.engappai.2023.106386.
- [8] LI Qingfu, ZHOU Jianpeng, FENG Jinghe. Safety risk assessment of highway bridge construction based on cloud entropy power method [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2022, 12(17): DOI:10.3390/app12178692.
- [9] 杜岩, 白云飞, 张晓勇, 等. 基于多种风险因素的矸石山边坡风险评价[J]. *工程力学*, 2022, 39(10): 249-256.
- DU Yan, BAI Yunfei, ZHANG Xiaoyong, et al. Multiple risk factors risk assessment of coal gangue slope considering [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(10): 249-256.
- [10] 安永林, 李佳豪, 赵丹, 等. 可拓法评估运营隧道衬砌结构健康实例[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(2): 422-428.
- AN Yonglin, LI Jiahao, ZHAO Dan, et al. Comprehensive extension assessment on tunnel structure health [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(2): 422-428.
- [11] 陈祥, 孙进忠, 张杰坤, 等. 岩爆的判别指标和分级标准及可拓综合判别方法[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(9): 82-88.
- CHEN Xiang, SUN Jinzhong, ZHANG Jiekun, et al. Judgment indexes and classification criteria of rock burst with the extension judgment method [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(9): 82-88.
- [12] 王述红, 王斐笠, 高红岩, 等. 基于可拓理论的边坡地震稳定性评价方法研究[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(增2): 132-137.
- WANG Shuhong, WANG Feili, GAO Hongyan, et al. Evaluation method of seismic slope stability based on extension theory [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(S2): 132-137.
- [13] 梁桂兰, 徐卫亚, 谈小龙. 基于熵权的可拓理论在岩体质量评价中的应用[J]. *岩土力学*, 2010, 31(2): 535-540.
- LIANG Guilan, XU Weiya, TAN Xiaolong. Application of extension theory based on entropy weight to rock quality evaluation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(2): 535-540.
- [14] 张永刚, 王永红, 王梦恕. 渤海湾海底隧道工程施工风险评估与控制分析[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(增1): 414-418.
- ZHANG Yonggang, WANG Yonghong, WANG Mengshu. Risk assessment of construction for Bohai bay subsea tunnel [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(S1): 414-418.
- [15] 钱蓉, 邓树新, 王明洋, 等. 深部工程围岩松动圈范围确定及变形破坏机理[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2023, 51(6): 839-845.
- QIAN Rong, DENG Shuxin, WANG Mingyang, et al. Range determination and deformation failure mechanism of loosening zone of surrounding rock in deep engineering [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2023, 51(6): 839-845.

作者简介: 倪苏黔 (1996—),男,江苏南通人,博士研究生,主要研究方向为岩土工程爆破、岩-机相互作用。E-mail:nisuqian@qq.com。

