

李福佳, 刘艳章, 秦绍兵, 等. 基于加权隶属度矩阵的岩体质量优化分级及支护研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(2):023025.

LI Fujia, LIU Yanzhang, QIN Shaobing, et al. Research on rock mass quality optimization classification and support based on weighted membership matrix[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(2):023025.

基于加权隶属度矩阵的岩体质量 优化分级及支护研究

李福佳¹, 刘艳章^{1,2}, 秦绍兵³, 于佳兴¹, 张迪¹, 叶涛¹

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081; 2. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081; 3. 中钢集团武汉安全环保研究院有限公司, 湖北 武汉 430081)

摘要: 巷道围岩质量分级是巷道围岩稳定性分析、合理支护设计与施工的基础。提高分级结果的准确性, 是提升支护效果和巷道围岩稳定性的关键途径。以RMR法为基础, 以某一测点的分级因素指标值为例, 构建RMR法各分级指标的隶属度矩阵, 再结合熵值法确定分级指标的权重, 得到加权隶属度矩阵, 构造优化后的评分公式, 进行指标优化评分和围岩质量分级, 然后根据围岩质量分级结果及松动圈监测结果设计支护参数, 利用FLAC^{3D}进行模拟计算, 以巷道围岩塑性区体积和顶底板收敛量为评价指标, 研究优化前后的支护效果。研究结果表明: 经过优化后的指标评分和围岩等级更加准确, 巷道支护参数设计更加合理, 数值模拟结果显示其能有效地提升围岩的稳定性, 并将优化后的支护设计参数应用于工程, 取得了良好的效果。研究成果可有效解决巷道围岩分级因素指标值位于分级边界或分级跨度大的问题, 为矿山岩体质量分级与支护设计提供参考。

关键词: 隶属度; 熵值法; 岩体质量分级; 围岩稳定性; 巷道支护

中图分类号: TD32

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2024)02-3025-10

Research on rock mass quality optimization classification and support based on weighted membership matrix

LI Fujia¹, LIU Yanzhang^{1,2}, QIN Shaobing³, YU Jiaxing¹, ZHANG Di¹, YE Tao¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan 430081, China; 3. Sinosteel Corporation Wuhan Safety and Environmental Protection Research Institute, Wuhan 430081, China)

Abstract: The quality classification of roadway surrounding rock is the basis of stability analysis of roadway surrounding rock and reasonable support design and construction. Therefore, improving the accuracy of classification results is the key way to improve the supporting effect and the stability of roadway surrounding rock. Based on the RMR method, this paper takes the index value of the classification factor of a certain measurement point as an example, constructs the membership matrix of each classification factor of the RMR method, combines the entropy method to determine the weight of the classification factor, obtains the weighted membership matrix, con-

收稿日期: 2023-11-06

修回日期: 2023-11-27

责任编辑: 施红霞

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42072300)

作者简介: 李福佳(1999—), 男, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要从事矿山岩石力学方面的研究工作。E-mail: 18164126860@163.com

通信作者: 刘艳章(1969—), 男, 湖北汉川人, 教授, 博士, 主要从事矿山岩石力学、矿山测试技术等方面的研究工作。E-mail: liuyan Zhang@163.com

structs the optimized scoring formula, and carries out the index optimization scoring and surrounding rock quality classification. Then the supporting parameters are designed according to the surrounding rock quality classification results and the monitoring results of the loose ring. FLAC^{3D} is used for simulation calculation, and the supporting effect before and after optimization is studied with the plastic zone volume and convergence of the roof and floor of the surrounding rock as evaluation indexes. The research results show that the optimized index score and surrounding rock grade are more accurate, the designed roadway supporting parameters are more reasonable, and the numerical simulation results show that the stability of surrounding rock can be effectively improved, and the optimized supporting design parameters are applied to the project, and good results are achieved. The research results effectively solve the problem that the classification factor index value of roadway surrounding rock is located at the classification boundary or the classification span is large, and provide a reference for the quality classification and support design of mine rock mass.

Key words: membership degree; entropy evaluation method; rock mass quality classification; stability of surrounding rock; roadway support

地下矿山开采过程中, 巷道围岩的稳定性^[1-3]十分重要, 巷道支护^[4-6]有助于提升巷道围岩的稳定性, 对巷道围岩质量进行精准分级, 是合理有效地设计支护施工方案的基础。因此, 提升巷道岩体质量分级的准确性对指导矿山安全设计与生产具有重要意义。

目前, 岩体质量分级系统主要有: RMR岩体质量分级法^[7-9]、Q系统岩体质量分级法^[10]以及BQ岩体质量分级法^[11]。国内外诸多学者对岩体质量分级方法的改进及优化进行了大量研究^[12-15], 如, 通过模糊隶属度解决隧道围岩等级模糊不确定性问题^[16]; 改进CSMR法, 引入修正系数, 对露采矿山边坡岩体质量分级更加合理^[17]; 以BQ值围岩分级方法为基础, 并以此构建了基于BQ值修正的岩溶围岩分级方法^[18]; 考虑采动影响下, 构建采动影响巷道围岩质量分级指标体系, 反映开采扰动对巷道围岩质量的影响^[19]; 结合高原山岭地质特点, 将隧道地温指标纳入评价体系, 以国标BQ法为主要优化对象, 提出高原山岭隧道分区段围岩分级优化^[20]。也有不少学者通过主观赋权法, 对岩体质量分级进行优化, 比如层次分析法^[21-24], 专家咨询法等, 但是这些方法具有较大的主观随意性, 对质量评价的准确性有一定的影响, 且对RMR法岩体质量分级优化方法的研究较少。

鉴于目前岩体质量分级方法存在上述局限性, 笔者重点研究以RMR法分级指标为基础, 构建RMR法各分级因素的隶属度矩阵, 结合熵值法, 得到客观加权隶属度矩阵, 构造评分公式, 对岩体质

量优化评分, 根据优化结果设计支护参数, 并通过数值模拟和工程检验验证了方法的可行性。

1 工程概况

以金山店铁矿为工程背景, 该矿采用无底柱分段崩落法进行开采, 生产活动主要在进路中进行, 进路巷道围岩质量和支护工程与矿山安全生产密切相关。目前, 该矿开采出矿主要在东区-410 m水平与西区-425 m水平, 进路间距为16 m, 410 m水平以下的分段高度改为15 m, 进路巷道断面设计尺寸为高3.6 m、宽3.8 m, 在该矿山进路巷道选取4个测点进行现场调查。

2 基于RMR法的岩体质量优化分级

岩体质量是反映岩体的工程特性和稳定性的重要指标。国际上广泛应用的岩体质量分级方法主要有RMR法、Q系统法、BQ法等3种, RMR岩体质量分级法的主要优点为采用指标累加法, 避免了因某一指标因素异常导致整个分级结果失真的可能性, 能够较为准确地反映岩体整体性状, 对岩体结构和岩质的定性表示非常清晰。其评定的指标多样化, 并且总体指标计算方便。因此, 笔者采用RMR法对金山店铁矿地下质量调查点选取的岩体进行岩体质量分级。

RMR法包括岩石强度(A_1)、岩体质量指标RQD(A_2)、结构面间距(A_3)、结构面状况(A_4)、地下水状况(A_5)及不连续结构面方向修正系数(A_6)等6个指标^[25], 通过6个指标评分值之和确定RMR值,

即 $RMR=A_1+A_2+A_3+A_4+A_5+A_6$ 。RMR法岩体质量分级标准见表1。

表1 RMR法岩体质量分级标准
Table 1 Rock mass quality classification standards for
rmr method

RMR值	100~81	80~61	60~41	40~21	20
围岩级别	I	II	III	IV	V
质量描述	很好	好	一般	较差	很差

2.1 RMR法指标评分

(1)岩石强度指标(A_1)

岩石强度指标通过点荷载强度、单轴抗压强度试验确定, 参照岩石强度指标评分表进行评分。

(2)岩体质量指标RQD(A_2)

通过单位体积节理数 J_v 与岩体质量指标RQD的对应关系确定岩体质量指标RQD, 计算公式为

$$RQD = 115 - 3.3J_v \tag{1}$$

式中, J_v 为岩体单位体积节理数, 条/ m^3 , 计算公式为

$$J_v = \sum_{i=1}^n S_i + S_0 \tag{2}$$

式中, i 为区域内结构面组数; S_i 为第 i 组结构面($i=1, 2, \dots, n$)沿法向每米测线内的节理条数; S_0 为每

立方米岩体非成组节理条数。

参照岩体质量指标RQD表进行评分。

(3)结构面间距(A_3)

结构面间距指同一组结构面法线方向上两相邻结构面的平均距离, 参照结构面间距评分表进行评分。

(4)结构面状况(A_4)

结构面状况反映了结构面间隙填充、结构面的粗糙程度、长度、张开度及风化程度等特征, 参照结构面状况评分表进行评分。

(5)地下水状况(A_5)

观察距巷道壁10 m范围内地下水的总体情况, 参照地下水条件每10 m的进水量评分表进行评分。

(6)不连续结构面方向修正系数(A_6)

根据不连续结构面的性质特征, 并参照不连续结构面方向修正系数评分表进行评分。

2.2 RMR法分级结果

各测点RMR法分级指标值及分级结果见表2, RMR法分级因素等级评价标准见表3。通过RMR分级法, 可以看出金山店铁矿东区调查区域岩体质量等级基本为III级, 部分区域岩体质量等级为IV级。

表2 金山店铁矿巷道各测点分级因素指标值及RMR分级结果
Table 2 Classification factor index values and rmr classification results of various measurement points
in the tunnel of Jinshandian Iron Mine

测点编号	单轴抗压强度/MPa	结构面间距/m	RQD值/%	结构面长度/m	地下水状况	不连续结构面走向	RMR评分	RMR等级
1号	76.75	0.13	77.33	0.91	潮湿(45)	不利(35)	42	III
2号	79.76	0.17	82.67	0.51	潮湿(45)	一般(50)	55	III
3号	45.83	0.17	67.50	0.74	潮湿(50)	不利(35)	38	IV
4号	64.95	0.08	55.33	0.74	潮湿(50)	不利(35)	45	III

表3 RMR法分级因素等级评价标准
Table 3 RMR method grading factor level standard values

级别	影响因素					
	单轴抗压强度/MPa	结构面间距/m	RQD值/%	结构面长度/m	地下水状况/($L \cdot \min^{-1}$)	不连续结构面走向
I	500~250	4.00~2.00	100~90	0~1	0	非常有利
II	250~100	2.00~0.60	90~75	1~3	0~10	有利
III	100~50	0.60~0.20	75~50	3~10	10~25	一般
IV	50~25	0.20~0.06	50~25	10~20	20~125	不利
V	25~0	0.06~0	25~0	40~20	250~125	非常不利

2.3 巷道围岩分级指标隶属度构建

由于1号测点的不同因素指标值相对居中, 且围岩等级为III, 更具代表性, 故以1号测点为例, 根

据表3的RMR法分级因素等级标准值, 建立巷道围岩分级指标在不同分级下的隶属度。

(1)道围岩分级指标隶属度函数

RMR法共有5个定量分级指标: 单轴抗压强度、结构面间距、RQD值、结构面长度和地下水状况。

通过隶属度公式计算不同分级指标的隶属度, 构建巷道围岩分级指标隶属度矩阵 $H=(h_{ij})_{s \times n}$ 。其中, i 表示巷道围岩质量分级第 i 个因素($i=1, 2, \dots, s$); j 表示巷道围岩质量第 j 个等级($j=1, 2, \dots, n$); h_{ij} 表示 j 等级下的 i 分级指标标准隶属度。由于RMR法综合5个分级指标的指标值, 将岩体质量分为5个等级。因此, $s=5, n=5$ 。

定量指标的数据分布特征具有正态型的特点, 因此采用正态型分布函数计算因素的隶属度, 不同等级 j 下分级指标 i 隶属度计算公式为

$$A(x_i)_j = e^{-\left(\frac{x_i - a_j}{\sigma}\right)^2} \quad (3)$$

$$\sigma = R_j / 1.66 \quad (4)$$

式中, x_i 为第 i 个分级指标的指标值($i=1, 2, 3, 4, 5$); a_j 为分级指标分级标准的中间值; σ 为分级指标的标准差; R_j 为各分级指标分级标准上下限的差值。

(2) 巷道围岩分级指标隶属度矩阵

通过现场观测以及室内试验等方式, 获得巷道围岩质量分级指标的测量值, 结合上述定量因素的计算公式, 构建巷道围岩质量分级指标 i 在等级 j 下的隶属度矩阵 A 。

$$A = (A_{ij})_{s \times n} = (A(x_i)_j)_{s \times n} \quad (5)$$

式中, A_{ij} 为等级 j 下的分级指标 i 的隶属度。

根据分级指标的指标值得到巷道围岩分级指标隶属度矩阵 A 。

$$A^T = \begin{pmatrix} 0.020 & 0.307 & 0.997 & 0.001 & 0 \\ 0.003 & 0.146 & 0.285 & 1.000 & 0 \\ 0 & 0.721 & 0.379 & 0.001 & 0 \\ 0.978 & 0.175 & 0.113 & 0.002 & 0.002 \\ 0 & 0 & 0 & 0.833 & 0.029 \end{pmatrix}$$

2.4 熵值法分级指标权重确定

巷道围岩质量分级的各指标具有开放性, 因异地、异时而变性。为尽量避免计算过程中人为因素的影响, 采用熵值法确定巷道围岩质量分级指标的权重, 确定分级指标对围岩质量分级结果的贡献度。RMR法中 i 个分级指标的赋权方法如下。

分级指标 i 的熵值 E_i 为

$$E_i = -\left(\ln s \sum_{j=1}^s h_{ij} \ln h_{ij}\right)^{-1} \quad (6)$$

分级指标 i 的权重 w_i 为

$$w_i = (1 - E_i) / \left(s - \sum_{i=1}^s E_i\right) \quad (7)$$

各分级指标权重为

$$w = (0.155, 0.176, 0.254, 0.199, 0.216)$$

其中, $0 \leq w_i \leq 1, s=5$, 且 $\sum_{i=1}^s E_i = 1$, 将权重 w_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$)与巷道围岩分级指标隶属度矩阵 A 中的每行数据相乘, 得到分级指标加权隶属度矩阵 P 。

$$P = (p_{ij})_{s \times n} = (w_i A_{ij})_{s \times n} \quad (8)$$

式中, p_{ij} 为等级 j 下的分级指标 i 加权隶属度。

则加权隶属度矩阵 P 为

$$P^T = \begin{pmatrix} 0.003 & 0.048 & 0.155 & 0 & 0 \\ 0.001 & 0.026 & 0.050 & 0.176 & 0 \\ 0 & 0.183 & 0.096 & 0 & 0 \\ 0.195 & 0.035 & 0.022 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.180 & 0.006 \end{pmatrix}$$

然后构造分级指标优化评分公式, 对不同指标进行优化评分。

$$W_i = \sum_{j=1}^s \frac{p_{ij}}{\sum_{i=1}^s p_{ij}} w_j \quad (9)$$

式中, W_i 为不同分级指标优化后的评分; w_j 为不同分级指标下对应等级的评分值。

2.5 岩体质量优化评分及分级结果

通过计算可知, 优化评分分级后, 各分级指标的评分值更加准确, 岩体质量等级变为IV级, 结果见表4。

表4 测点岩体质量分级优化前后评分及分级结果

Table 4 Scoring and grading results of rock mass quality grading optimization at measurement points before and after optimization

优化前后	岩石强度 指标(A_1)	结构面 间距(A_3)	岩体质量 指标(A_2)	结构面 状况(A_4)	地下水 状况(A_5)	不连续结构面方向 修正系数(A_6)	RMR值	等级
优化前	7	8	17	15	7	-12	42	III
优化后	8.3	9.1	15.6	13.5	3.9	-12	38.4	IV

3 基于岩体质量优化分级的支护方案设计

金山店铁矿地下巷道现有的支护方式为联络道及进路采用的锚网喷支护形式。由于锚网喷中核心的支护方式为锚杆, 笔者主要针对锚网喷支护中的锚杆参数进行优化, 其他支护参数保持不变。

由2.5节可知, 通过优化前后的RMR法对1号测点围岩进行评分分级, 等级分别为III, IV级, RMR值分别为42, 38.4。因此, 对RMR为38.4值下的IV级围岩进行锚杆参数优化。

3.1 锚杆参数的确定

3.1.1 巷道围岩松动圈监测

在进行锚杆支护时, 锚杆的锚固长度必须超过巷道围岩松动圈的厚度, 才能发挥锚杆的锚固效应, 因此可以通过测点监测开挖后巷道围岩的松动圈范围。

对测点1进行围岩松动圈监测, 布置松动圈监测点, 共选取7个代表性位置进行钻孔测试, 钻孔编号及相对位置如图1所示, 1号测点位于-410 m水平30号进路距离进口6.7 m。

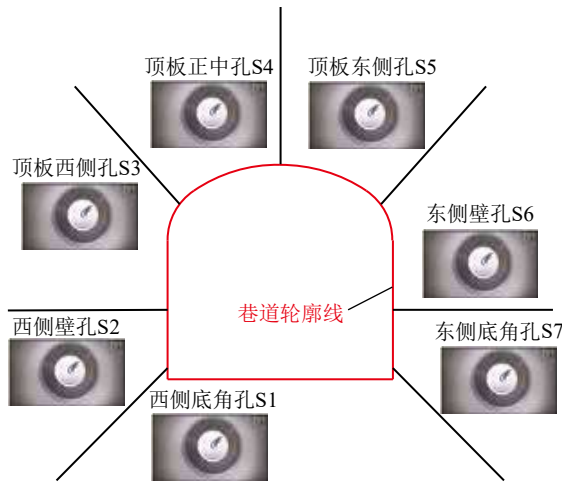


图1 1号测点实际钻孔布置

Fig. 1 Actual drilling layout of No.1 measurement point

对钻孔柱状图的分析, 绘制出1号测点处的巷道围岩松动圈大致范围, 如图2所示。

由图2可知, 通过对7个测点范围总结与计算, 围岩松动圈范围最大的为巷道东侧壁, 约为2.19 m, 最小的为巷道西侧底角, 约为1.30 m, 松动圈平均深度为1.77 m。因此, 锚杆长度需大于2.19 m。

3.1.2 锚杆参数理论设计

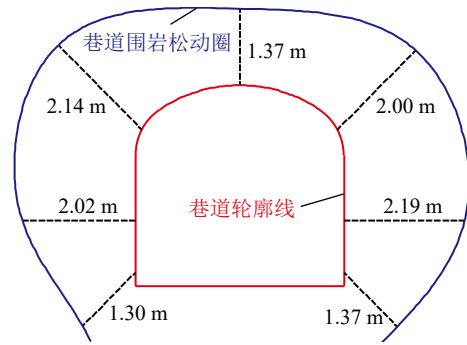


图2 1号测点处巷道围岩松动圈范围

Fig. 2 Scope of loose zone in surrounding rock of tunnel at No. 1 measurement point

(1) 锚杆长度的确定

锚杆参数优化的计算过程主要参考赵兴东^[26]的《井巷工程》, 锚杆长度按端头锚固方式和全程锚固方式可进行如下计算。

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (10)$$

式中, L_1 为外露长度, 一般取0.15 m; L_2 为有效长度, m; L_3 为锚杆锚固段长度, 一般端锚时取0.3~0.4 m, 由拉拔试验确定。

(2) 锚杆有效长度的确定

锚杆外露长度 L_1 与锚杆锚固长度 L_3 是确定的, 关键是确定锚杆的有效长度 L_2 。 L_2 一般不小于松动破碎区高度, 计算公式为

$$h_i = \frac{(100 - \text{RMR})B}{100} \quad (11)$$

式中, h_i 为巷道围岩松动破碎区高度, m; RMR为岩体质量分级总评分值; B 为巷道的跨度, m。

金山店铁矿支护后的巷道跨度 B 为3.60 m, 根据式(11)计算得到 $h_i = 2.22$ m, 结合松动圈测试情况, 结合经验取 h_i 为2.2 m, 锚杆有效长度 L_2 的长度一般不小于松动破碎区高度 h_i , 取 $L_2 = 2.2$ m; 锚杆外露长度主要取决于锚杆类型及锚固方式, 一般取 $L_1 = 0.15$ m。

当围岩松软时锚杆锚固段长度 L_3 应加大。结合金山店铁矿实际围岩质量情况, 取 $L_3 = 0.3$ m。

根据式(10), 计算得到锚杆的理论长度 $L = 2.65$ m。一般理论计算数值偏大, 根据现场实际及施工方便, 取锚杆长度2.5 m进行支护。

(3) 锚杆间排距的确定

根据每根锚杆悬吊的岩石质量确定, 即锚杆悬吊的岩石质量等于锚杆的锚固力。通常锚杆按等距排列, 计算公式为

$$a = S_c = S_1 = \sqrt{\frac{Q}{K\gamma L_2}} \tag{12}$$

式中, S_c , S_1 分别为锚杆的间、排距; K 为锚杆安全系数, 一般取1.5~2; γ 为岩石的容重; Q 为锚固力。

锚杆的长度一般为1.5~3.0 m, 锚杆间距不宜大于锚杆长度的1/2。

参考该矿的相关资料, 根据现场试验, 矽卡岩地段平均锚固力大于 60 kN, 因此设计锚固力 $Q=70$ kN, 在采用无底柱分段崩落采矿法的矿山中, 锚杆主要在进路巷道中起支护作用, 进路巷道内岩石的主要成分为矽卡岩, 其容重为26.3 kN/m³。根据式(12), 计算得到锚杆的间距排距为0.78 m, 实际取0.7 m。

3.2 优化前后的支护方案

根据3.1节巷道锚杆长度、间排距的计算结果, 将优化后的方案与原支护方案进行对比, 见表5。

表5 优化前后方案对比
Table 5 Comparison of plans before and after optimization

支护方案	位置	锚杆长度/m	锚杆间距/m	锚杆排距/m	喷射混凝土厚度/mm
原支护方案	顶部	2.0	1.0	1.0	80
	紧邻顶	2.0	1.0	1.0	80
	帮部及起拱	2.0	1.0	1.0	80
优化后方案	顶部	2.5	0.7	0.7	100
	紧邻顶	2.5	0.7	0.7	100
	帮部及起拱	2.5	0.7	0.7	100

4 数值模拟分析

通过数值模拟软件对现场支护方案及优化后方案的支护情况进行分析, 对2种支护参数下巷道的塑性区范围及巷道顶底板收敛量等进行对比研究, 验证优化方案的可行性。

4.1 数值模拟方案

采用FLAC^{3D}软件, 通过Rhino建立巷道围岩三维模型, 如图3所示。为减小边界条件对计算模型的影响, 计算采用的模型尺寸为开挖区域的5倍左右, 因此计算模型尺寸为40 m×20 m×40 m, 优化前后的巷道支护断面如图4~5所示。

根据已有的工程资料及力学试验结果, 确定矽卡岩围岩力学参数见表6, 锚杆的力学参数见表7, 喷射混凝土力学参数见表8。

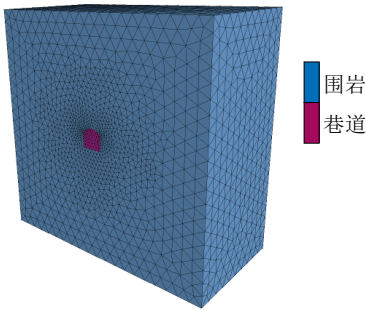


图3 巷道围岩三维模型

Fig. 3 Three dimensional model of tunnel surrounding rock

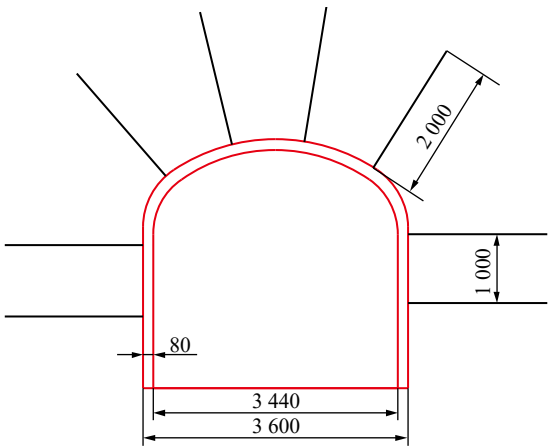


图4 原支护方案断面尺寸

Fig. 4 Cross section dimensions of the original support scheme

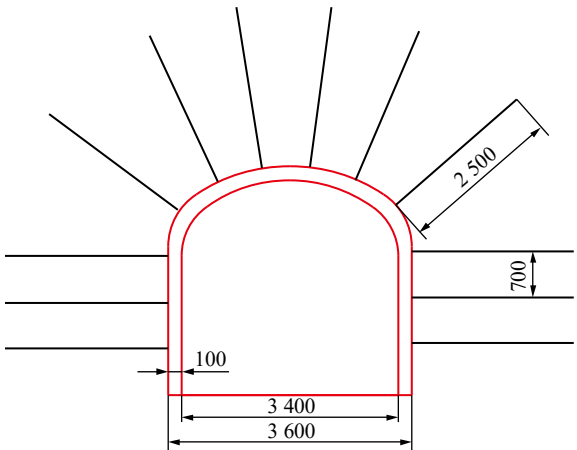


图5 优化后支护方案断面尺寸

Fig. 5 Section size of optimized support scheme

表6 矽卡岩力学参数

Table 6 Mechanical parameters of siliceous rocks

岩性	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	密度/(kg·m ⁻³)
矽卡岩	21	0.5	0.3	1.5	33	2650

表7 注浆锚杆力学参数

Table 7 Mechanical parameters of grouting anchor rods

截面 积/ 10^{-4}m^2	抗拉 强度/kN	弹性 模量/GPa	水泥浆 刚度/MPa	水泥浆 黏力/MPa
2.54	95	20	17.5	6

表8 混凝土加钢网材料等效力学参数

Table 8 Equivalent mechanical parameters of concrete with steel mesh material

弹性模量/GPa	泊松比 μ	抗压强度/MPa
1 059	0.28	15.40

4.2 模拟结果及分析

模型四周边界施加水平位移约束，底部边界固定约束，顶部施加原岩应力12 MPa，体现为应力边界条件。由于巷道围岩塑性区体积的大小能更直观准确地反映巷道围岩整体的变形情况，从而评估巷道的稳定性。因此，笔者着重从巷道塑性区体积来分析支护效果的优劣。3种不同支护状态下的巷道位移和塑性区云图如图6~8所示，锚杆与喷射混凝土层应力与节点位移图如图9所示，不同方案下支护效果见表9。

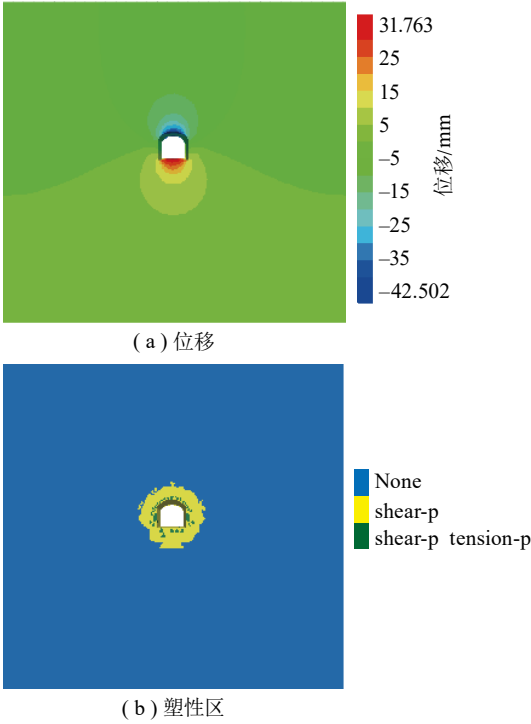


图6 未支护状态下巷道位移和塑性区云图
Fig. 6 Cloud map of tunnel displacement and plastic zone in unsupported state

由图6~9及表10可知:

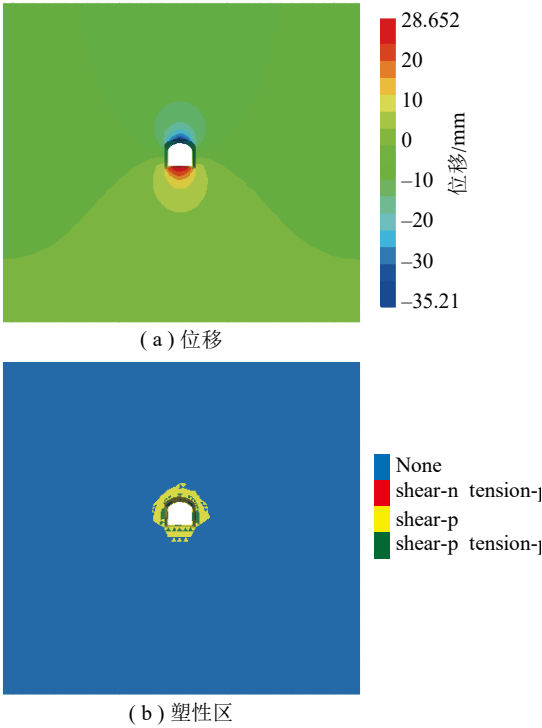


图7 原支护巷道位移和塑性区云图
Fig. 7 Cloud map of displacement and plastic zone of the original support roadway

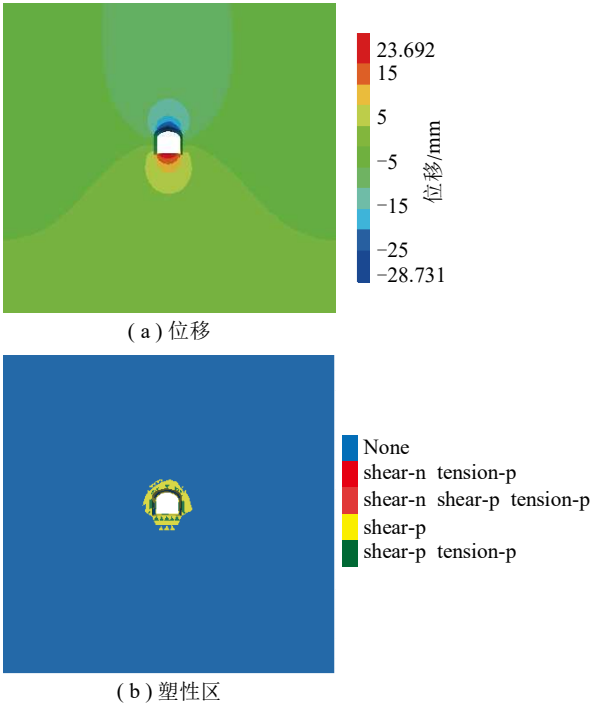


图8 优化后巷道位移和塑性区云图
Fig. 8 Cloud map of optimized tunnel displacement and plastic zone

(1)未支护状态下的巷道顶板沉降量最大值约为42.50 mm，底板突起量最大值约为31.76 mm；巷道塑性区分布在巷道周围呈现圆形，达1.5 m，塑性

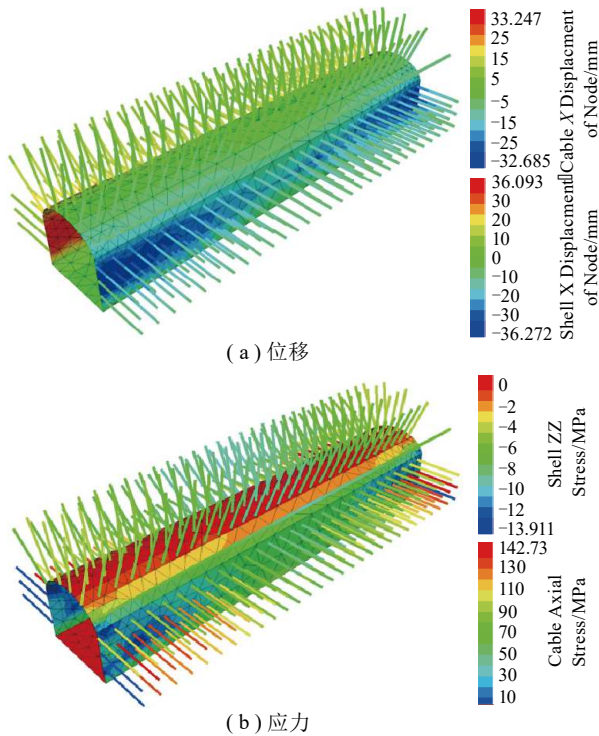


图9 优化后锚杆与喷射混凝土层应力与节点位移
Fig. 9 Stress and node displacement diagram of optimized anchor rods and sprayed concrete layers

表9 不同方案的支护效果
Table 9 Comparison of support effects under different schemes

方案	围岩塑性区体积/m ³	顶板沉降量/mm	底板突起量/mm
未支护	256.4	42.5	31.8
原有支护	205.2	35.2	28.7
优化支护	167	28.7	23.7

区的破坏状态大部分为剪切破坏, 少部分为拉伸破坏, 总体积达256.4 m³, 破坏范围较广, 需要及时支护。

(2) 原支护状态下, 巷道的顶板沉降量最大值为35.21 mm, 底板突起量最大值约为28.65 mm, 巷道的塑性区范围相对缩小, 总体积达到了205.2 m³, 减少了19.97%。

(3) 经过优化分级后的支护状态下的巷道顶板沉降量最大值约为28.73 mm, 底板突起量最大值约为23.69 mm, 巷道塑性区范围明显缩小, 塑性区体积仅为167.0 m³, 减少了34.7%, 支护效果显著, 有效地提升了巷道围岩的稳定性。

(4) 优化后的锚杆所承受最大应力值约为142.73 MPa, 未达到屈服荷载, 混凝土层所受最大压应力约为13.91 MPa也未超过最大抗压强度, 即

支护方案安全有效。

5 结论

(1) 在RMR法岩体质量分级的基础上, 以金山店铁矿东区-410 m水平采场某巷道围岩测点的分级因素指标值构建了RMR法不同分级指标的隶属度矩阵, 结合熵值法, 构造了加权隶属度矩阵。建立了分级指标优化评分公式对指标因素重新评分, 提升了指标评分值和围岩质量分级结果的准确性。

(2) 根据优化评分后的岩体质量分级结果, 结合松动圈监测结果, 设计支护参数及方案, 采用数值模拟的方法, 对优化前后的支护方案进行模拟, 以巷道围岩塑性区体积和巷道顶底板收敛量为指标, 优化后的效果良好, 有效控制了围岩的变形和提升了围岩的稳定性, 现场应用效果良好。

(3) 基于RMR法岩体质量优化分级较好地解决了部分巷道围岩质量分级因素的评分等级跳跃引起综合评分值波动, 或者部分分级结果处于等级边界附近导致等级评判模糊不准确的问题, 该方法适用性强, 能较好地满足工程应用的需要, 可为矿山安全生产与支护设计提供参考。

参考文献(References):

- [1] 侯朝炯. 深部巷道围岩控制的有效途径[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 467–473.
HOU Chaojiong. Effective approach for surrounding rock control in deep roadway[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 467–473.
- [2] 朱万成, 董航宇, 刘溪鸽, 等. 金属矿山多矿柱承载与失稳破坏研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(4): 043037.
ZHU Wancheng, DONG Hangyu, LIU Xige, et al. Review of bearing and instability of multi-pillar in metal mines[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(4): 043037.
- [3] 杜君武, 黄庆享. 浅埋煤层群不同煤柱错距覆岩结构演化规律及煤柱稳定性分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(1): 013018.
DU Junwu, HUANG Qingxiang. Overburden structure evolution and coal pillar stability analysis with different offset distance of coal pillars in shallow multi-seam[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(1): 013018.
- [4] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分

- 析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 649–664.
- KANG Hongpu, WANG Jinhua, LIN Jian. Case studies of rock bolting in coal mine roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 649–664.
- [5] 岳中文, 王大乐, 王贯东, 等. 煤巷掘进临时支护技术与装备研究进展及发展路径[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(5): 053047.
- YUE Zhongwen, WANG Dale, WANG Guandong, et al. Research progress and development path of temporary support technology and equipment for coal mine roadway excavation[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(5): 053047.
- [6] 姚强岭, 朱贵伟, 郑闯凯, 等. 厚煤层沿空巷道主动式超前支护技术与实践[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(1): 013531.
- YAO Qiangling, ZHU Guiwei, ZHENG Chuangkai, et al. Active advanced support technology and practice of thick coal seam along goaf roadway[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(1): 013531.
- [7] SHENG D J, YU J, TAN F, et al. Rock mass quality classification based on deep learning: A feasibility study for stacked autoencoders[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(7):1749–1758.
- [8] 蔡斌, 喻勇, 吴晓铭. 《工程岩体分级标准》与Q分类法、RMR分类法的关系及变形参数估算[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(S1):1677–1679.
- CAI Bin, YU Yong, WU Xiaoming. Relationship among national code, Q system and RMR in rockmass classification and evaluation of deformation parameter[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(S1):1677–1679.
- [9] 许宏发, 陈锋, 王斌, 等. 岩体分级BQ与RMR的关系及其力学参数估计[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1):195–198.
- XU Hongfa, CHEN Feng, WANG Bin, et al. Relationship between RMR and BQ for rock mass classification and estimation of its mechanical parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1):195–198.
- [10] 王志龙, 王巍浩, 刘大刚, 等. 基于挪威法Q系统的隧道新型支护系统研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(3):31–39.
- WANG Zhilong, WANG Weihao, LIU Dagang, et al. Study on new tunnel support system based on Norwegian method Q system[J]. Modern Tunneling Technology, 2022, 59(3):31–39.
- [11] WU A Q, ZHAO W, ZHANG Y H, et al. A detailed study of the CHN-BQ rock mass classification method and its correlations with RMR and Q system and Hoek-Brown criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 162:105290.
- [12] 郭爱清, 汪斌. 基于岩体质量指标BQ的岩质边坡工程岩体分级方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4):699–706.
- WU Aiqing, WANG Bin. Engineering rock mass classification method based on rock mass quality index BQ for rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4):699–706.
- [13] LIU J, DAI G, GONG W M. Joint frequency in the rock mass rating 2014 classification system based on field P-wave propagation velocity tests: a new rating method[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39:4697–4708.
- [14] LIU Z X, DANG W G. Rock quality classification and stability evaluation of undersea deposit based on M-IRMR[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2014, 40: 95–101.
- [15] ZHANG Q, HUANG X B, ZHU H H, et al. Quantitative assessments of the correlations between rock mass rating (RMR) and geological strength index (GSI)[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2019, 83:73–81.
- [16] 张琦, 朱合华, 黄贤斌, 等. 基于Mamdani模糊推理的山岭隧道围岩RMR14分级[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11):2116–2124.
- ZHANG Qi, ZHU Hehua, HUANG Xianbin, et al. A new rock mass rating method based on Mamdani fuzzy inference for rock tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11):2116–2124.
- [17] 曹平, 刘帝旭. 改进CSMR法在露采矿山边坡中的应用[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8):1544–1548.
- CAO Ping, LIU Dixu. Application of improved CSMR method to opencast mining slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8):1544–1548.
- [18] 吴敏, 黄智, 刘大刚. 基于BQ值修正的岩溶隧道围岩分级方法研究与应用[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(6):1–5.
- WU Min, HUANG Zhi, LIU Dagang. Research and application of surrounding rock classification method of karst tunnel based on BQ value correction[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6):1–5.
- [19] 葛伟杰, 刘艳章, 秦绍兵, 等. 考虑采动影响的ACI-RMR法矿山巷道围岩质量分级研究[J]. 有色金属工程, 2023, 13(9):121–129.
- GE Weijie, LIU Yanzhang, QIN Shaobing, et al. Quality classification for roadway surrounding rock by ACI-RMR method considering the influence of mining[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(9):121–129.
- [20] 李曙光, 申艳军, 谢江胜, 等. 高原山岭隧道围岩分级方法适宜性评价及初步优化思路[J]. 铁道建筑技术, 2023(8):33–35, 58.
- LI Shuguang, SHEN Yanjun, XIE Jiangsheng, et al. Suit-

- ability evaluation and preliminary optimization of surrounding rock classification method for plateau mountain tunnel[J]. *Railway Construction Technology*, 2023(8):33–35, 58.
- [21] 任家苇, 左宇军, 林健云, 等. 基于改进未确知测度的含软弱夹层巷道围岩稳定性评价[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(4):39–43, 47.
REN Jiawei, ZUO Yujun, LIN Jianyun, et al. Stability evaluation for surrounding rock of roadway with weak intercalation based on improved unascertained measure theory[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023, 43(4):39–43, 47.
- [22] 王佳慧, 高迪, 陈江峰. 基于层次分析法的煤层顶板稳定性评价[J]. *煤炭技术*, 2022, 41(8):20–23.
WANG Jiahui, GAO Di, CHEN Jiangfeng. Evaluation of coal seam roof stability based on analytic hierarchy process[J]. *Coal Technology*, 2022, 41(8):20–23.
- [23] 郝鹏程, 王金锁. 基于模糊综合评判的岩体质量分级研究[J]. *建材技术与应用*, 2023(3):1–6.
XI Pengcheng, WANG Jinsuo. Study of rock masses classification based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Research & Application of Building Materials*, 2023(3):1–6.
- [24] 游淳淋, 黄明清, 丘浩禹. 基于多元数据归一化处理的破碎岩体质量分级[J]. *中国矿业*, 2022, 31(8):158–164.
YOU Chunlin, HUANG Mingqing, QIU Haoyu. Quality classification of broken rock mass based on normalization of multivariate data[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(8):158–164.
- [25] 宋彦辉, 冯满, 巨广宏. 一种改进的岩体质量分级方法 RMRKv[J]. *西北水电*, 2022(6):39–44.
SONG Yanhui, FENG Man, JU Guanghong. An improved rock mass rating method RMRKv[J]. *Northwest Hydropower*, 2022(6):39–44.
- [26] 赵兴东. 井巷工程[M]. 北京:冶金工业出版社, 2014:174–176.