# 基于XGBoost的采场岩巷按需支护智评优化设计系统及工程应用*

林景尚

(安徽庐江龙桥矿业股份有限公司, 安徽 庐江县 231551)

**摘要**:为避免出现好岩过强支护而差岩欠强支护现象,基于XGBoost算法结合巷道安全系数,开发了龙桥铁矿按需支护智评优化设计系统。采用影响龙桥铁矿巷道稳定性的7项按需锚网支护指标和5项按需素喷支护指标作为主要输入值,以60个巷道实际数据为例,进行按需优化支护设计和效果评价。结果表明:在-370.0 m水平试算处围岩等级较好,安全系数较大,可不采取支护措施;在-382.5 m水平和-395.0 m水平试算处围岩等级略差,安全系数略低,需采用素喷支护形式;在-407.5 m水平和-420.0 m水平试算处围岩等级均为3级以上,围岩性质较差,均需要采取锚网支护形式。按需支护智评优化设计系统为龙桥铁矿提供了实时的岩体质量评估和支护方案优化,有效提高了巷道的安全性,显著节省了支护成本。

**关键词**:XGBoost模型;安全系数;岩巷;效果评价;按需支护

**中图分类号**:TD353 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)06-0138-08

**Intelligent Evaluation and Optimization Design System of On-Demand Support of Stope Rock Roadways Based on XGBoost and Its Engineering Applications**

*LIN Jingshang*

(Anhui Lujiang Longqiao Mining Co., Ltd., Lujiang County, Anhui 231551, China)

**Abstract**: In order to avoid the phenomenon that the good rock is over-supported and the poor rock is under-supported, based on the XGBoost algorithm combined with the roadway safety factor, an intelligent evaluation and optimization design system of on-demand support in Longqiao Iron Mine was developed. 7 on-demand anchor mesh support indexes and 5 on-demand plain spray support indexes affecting the stability of roadway in Longqiao Iron Mine were used as the main input values. 60 sets of practical roadway data were selected as examples to carry out the on-demand optimization support design and effectiveness evaluation. The results show that at the level of -370.0 m, the surrounding rock grade is better, the safety factor is larger, and the support measures are not needed. At the level of -382.5 m and -395.0 m, the surrounding rock grade is slightly worse, the safety factor is slightly lower, and the plain spray support form is required. At the level of -407.5 m and -420.0 m, the surrounding rock grade is above the third grade, and the surrounding rock properties are poor, so it is necessary to adopt the form of anchor mesh support. The intelligent evaluation and optimization design system of on-demand support provides real-time rock mass quality evaluation and support scheme optimization for Longqiao Iron Mine, which has effectively improved the safety of roadway and significantly saved the support cost.

**Key words**: XGBoost model, Safety factor, Rock roadway, Effectiveness evaluation, On-demand support

## 0 引言

矿岩采动会引起岩体的变形和塌陷,进一步加剧岩体的破坏程度。随着时间的推移,岩体的整体强度不断下降,岩体内部的应力集中现象逐渐加剧,使得岩体更加脆弱和不稳定,从而造成岩石裂隙的发育。矿岩采动是一个岩体逐渐发生变形和破坏的动态过程。由于高强度排采和频繁扰动,岩体中的断裂构造逐渐破碎,岩体质量等级不断降低,造成矿山开采工程的岩体性质恶化[1-5]。岩体裂隙的过度发育对工程安全构成了巨大的潜在风险,特别是对于矿房帮的大型露天开采活动,极易导致采场片帮、顶板坍塌,甚至频发地压灾害[6-9]。因此,加强巷道和硐室周边岩体的支护,消除片帮、冒顶等安全隐

* **收稿日期**:2024-07-26

**基金项目**:深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室开放基金重点项目(SKLMRDPC22KF02)

**作者简介**:林景尚(1987—),男,福建泉州人,工程师,主要从事矿山采掘和通风方面的研究工作。E-mail:515672192@qq.com

患,对于矿山安全生产意义重大。

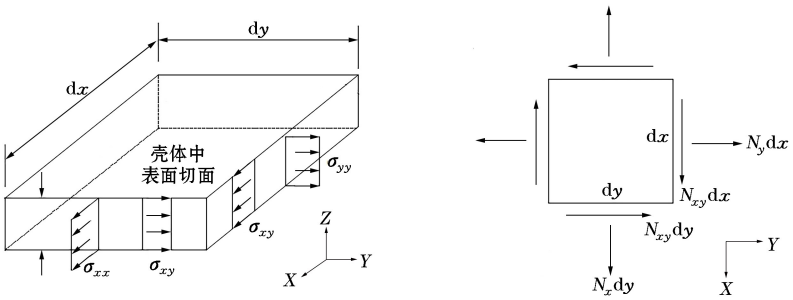
黄成林等[10]对复杂工程地质条件下的梧桐举铁矿进行了详细的工程地质勘察,根据岩体地质力学分级方法将矿区围岩等级划分为四级,提出了相应的支护方案,并将其应用于矿区不同施工段,取得了较好支护的效果。孟庆彬等[11]针对和睦山铁矿特定的工程地质条件,对巷道围岩等级进行划分,利用 FLAC3D 数值模拟软件揭示了不同支护形式对围岩位移影响的时间规律,提出了不同围岩类型的合理支护形式和参数。张毅等[12]通过锚杆轴力的测试试验,提出在浅层断裂岩体中,应根据岩体工程质量采用长短结合的锚杆支护方式,实现了围岩的稳定性控制,取得了良好的支护效果。张长锁[13]应用松动圈支护理论,优化了破碎岩体支护设计的参数,推荐采用锚网喷支护,并通过工程实践证明,锚网喷适用于破碎岩体,支护效果得到了较大的改善。秦绍龙等[14]综合考虑了现场工程地质调查结果与矿区岩体质量等级等多方面因素,总结了巷道失稳的破坏类型,提出了"树脂锚杆+金属网+喷射混凝土+长锚索"联合支护方式,有效维持了围岩稳定性。

矿山巷道支护对于维持岩巷稳定性具有积极作用。目前,巷道支护设计一般参照公路隧道和铁路隧道支护规范,或基于设计者的相关工程经验进行矿山巷道支护设计。因矿山巷道服务年限短等特点,常出现巷道支护设计过于保守,造成支护成本过高,导致许多矿山难以承担,由此又造成本应支护而未支护或欠支护现象普遍存在。因此,本研究基于 XGBoost 模型和巷道支护安全系数,开发了采场岩巷按需支护智评优化设计系统。在巷道支护效果评价和优化设计的基础上,实现按需支护,避免出现好岩过强支护或差岩欠强支护现象,对于矿山科学管理、优化设计、降低安全风险和生产成本具有重要意义。

## 1 巷道支护安全系数与 XGBoost 模型

### 1.1 巷道支护安全系数

巷道开挖后支护主要承受弯矩和轴力,因而支护主要呈弯曲抗压状态,为保证支护材料稳定性,内部应力需控制在极限强度以内[15]。在数值模拟中直接调用支护内部应力,取开挖截面水平方向为坐标面横轴,垂直方向为坐标面纵轴,壳型单元应力张量如图 1 所示。为保证支护结构稳定性,通过控制支护内部应力保证支护结构整体安全性的方法[16-17],计算最小安全系数,为工程施工提供依据,以便提前对支护薄弱处进行处理。




(a) 应力方向　　(b) 应力计算

**图 1　壳型单元应力张量**

**Fig.1　Stress tensor of shell element**

通过内部应力与极限强度的比值计算开挖截面各点的安全系数,其计算公式为:

$$F_s=[\sigma]/\sigma \tag{1}$$

式中:$F_s$为安全系数;$[\sigma]$为内部应力;$\sigma$ 为极限强度。

### 1.2 XGBoost 模型

XGBoost 模型是一种集成学习算法,其基于梯度提升原理,通过依次训练一系列弱分类器(通常是决策树),每个分类器的训练都是在前一个分类器的残差上进行,最终将这些弱分类器组合成一个性能更加强大的集成分类器[18-20]。XGBoost 算法通过在损失函数中加入正则项,与普通梯度提升法相比,在模型训练过程中正则化项的引入,可用于控制模型的复杂度,从而防止算法训练时过拟合。此外,XGBoost 模型对损失函数进行了二阶泰勒展开,不仅能够更准确地估计目标函数的形状,还能更有效地指导模型参数的更新,提高了模型在训练过程中的收敛速度和泛化能力,进一步提升了预测的精度和效率。

XGBoost 算法的目标函数为:

$$o=\sum_{i=1}^{n} l(y_i,\hat{y}_i)+\sum_{k=1}^{K}\Omega(f_k) \tag{2}$$

式中:$o$ 为损失函数;$n$ 为训练样本总数;$l(y_i,\hat{y}_i^t)$ 为样本的训练误差,$y_i$ 和 $\hat{y}_i$ 分别为样本 $i$ 的实际值和

预测值;$K$ 为树的总数量;$\Omega(f_k)$ 为正则化项,用于控制叶子节点个数,防止过拟合。

当迭代至第 $t$ 轮时,XGBoost 算法的目标函数为:

$$o^t = \sum_{i=1}^{n} l(y_i, \hat{y}_i^{t-1} + f_t(x_i)) + \Omega(f_t) + c \quad (3)$$

式中:$\hat{y}_i^{t-1}$ 为 $t-1$ 轮迭代中的预测值;$f_t(x_i)$ 为第 $t$ 轮迭代中树模型的预测值;$c$ 为前 $t-1$ 次迭代的常量之和。

对公式(3)进行二阶泰勒展开,则目标函数为:

$$o^t \approx \sum_{i=1}^{n} \left[ g_i f_t(x_i) + \frac{1}{2} h_i f_t^2(x_i) \right] + \Omega(f_t) \quad (4)$$

式中:$g_i$ 为样本 $i$ 的一阶梯度;$h_i$ 为样本 $i$ 的二阶梯度。

对目标函数$o^t$ 的权重$\omega_j$ 求偏导,则叶子节点的最优权重$\omega_j^*$ 和函数的最优目标函数 $o$ 为:

$$\begin{cases} w_j^* = -\dfrac{\sum_{i \in I_j} g_i}{\sum_{i \in I_j} h_i + \lambda} \\ o = -\dfrac{1}{2} \sum_{j=1}^{T} \dfrac{\left(\sum_{i \in I_j} g_i\right)^2}{\sum_{i \in I_j} h_i + \lambda} + \gamma T \end{cases} \quad (5)$$

式中:$I_j$ 为属于第 $j$ 个叶子节点的样本集合;$\gamma$ 为正侧化参数;$T$ 为树的叶子节点数。

XGBoost 算法在选择最优分裂点时,采用了特征并行的方法,选择增益最大的特征值作为最佳分裂点。在选择子树分裂点时,增益函数 $G$ 为:

$$G = \frac{1}{2} \left[ \frac{\left(\sum_{i \in I_L} g_i\right)^2}{\sum_{i \in I_L} h_i + \lambda} + \frac{\left(\sum_{i \in I_R} g_i\right)^2}{\sum_{i \in I_R} h_i + \lambda} - \frac{\left(\sum_{i \in I} g_i\right)^2}{\sum_{i \in I} h_i + \lambda} \right] - \alpha \quad (6)$$

式中:$I_L$ 为左子树分裂点总集合;$I_R$ 为右子树分裂点总集合;$I$ 为父节点样本集合;$\alpha$ 为加入新叶子节点引入的复杂度代价。

XGBoost 算法有 3 个指标可对特征进行重要性排序,分别为:某个特征在所有树中被用作分割样本的特征次数 $w$,其若被使用的次数越多,说明该特征越重要;特征平均增益值 $G$,表示特征对模型预测的贡献,平均增益值越高意味着该特征对模型的贡献越大;特征平均覆盖率 $C$,表示在训练模型时,对该特征进行的平均覆盖次数,覆盖次数越多代表该特征在训练中越重要,其计算公式为:

$$w = |X| \quad (7)$$

$$G = \frac{\sum G_x}{w} \quad (8)$$

$$C = \frac{\sum C_x}{w} \quad (9)$$

式中:$X$ 为分类到每个叶子节点的集合;$G_x$ 为每个节点的增益;$C_x$ 为每个节点上的样本数目。

本文对这 3 个指标进行综合分析,以便更全面地评估每个特征对 XGBoost 模型的重要性,从而为特征选择和模型优化提供支持。

## 2 按需支护智评优化设计系统

一般矿山采场巷道的服务年限较短,常出现巷道过支护以及应支护而未支护或欠支护的普遍现象。因此,本文以安徽省庐江县龙桥铁矿为例,采用 XGBoost 算法,结合巷道安全系数,借助 Python 软件,开发了按需支护智评优化设计系统。该系统可用于巷道快速优化支护设计与支护效果评价。

### 2.1 评价指标建立

巷道支护设计及效果评价受到诸多因素的影响,结合龙桥铁矿的生产实际情况,对岩体等级、二次应力大小及方向、岩石移动变形程度、开采扰动岩体响应特征、围岩破碎程度、开采扰动程度、岩体结构面条件、岩石坚硬程度、地下水条件、支护方式、产状有利性、充填物等 40 多项指标进行了筛选,确定采场岩巷支护设计和效果评价的多源指标。按需支护锚网支护指标为:岩体等级($A_1$)、埋深($A_2$)、巷道跨度($A_3$)、锚杆间距($A_4$)、锚杆长度($A_5$)、兜网间距($A_6$)和安全系数($A_7$),具体样本数据见表 1。素喷支护指标为:岩体等级($B_1$)、埋深($B_2$)、巷道跨度($B_3$)、水泥型号($B_4$)、支护厚度($B_5$)和安全系数($B_6$),具体样本数据见表 2。

**表 1 按需锚网支护样本库数据**

**Table 1 Datas of on-demand anchor mesh support sample library**

| 序号 | $A_1$ | $A_2$/m | $A_3$/m | $A_4$/m | $A_5$/m | $A_6$/cm | $A_7$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3.1 | 500 | 3.8 | 2.2 | 2 | 15 | 8.989 |
| 2 | 3.2 | 500 | 3.8 | 2.2 | 2 | 15 | 5.873 |
| 3 | 3.3 | 500 | 3.8 | 2.2 | 2 | 15 | 3.927 |
| 4 | 3.4 | 500 | 3.8 | 2.2 | 2 | 15 | 2.695 |
| 5 | 3.4 | 500 | 3.8 | 2.2 | 2 | 15 | 2.695 |
| | | | | …… | | | |
| 59 | 4.9 | 500 | 3.8 | 1.2 | 2 | 15 | 1.025 |
| 60 | 5.0 | 500 | 3.8 | 1.2 | 2 | 15 | 1.003 |

表 2 按需素喷支护样本库数据

Table 2 Datas of on-demand plain spray support sample library

| 序号 | $B_1$ | $B_2$/m | $B_3$/m | $B_4$ | $B_5$/mm | $B_6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.00 | 500 | 3.8 | 32.5 | 0 | 5.810 0 |
| 2 | 1.50 | 500 | 3.8 | 32.5 | 0 | 2.844 0 |
| 3 | 1.80 | 500 | 3.8 | 32.5 | 0 | 2.069 2 |
| 4 | 2.00 | 500 | 3.8 | 32.5 | 0 | 1.724 5 |
| 5 | 1.25 | 500 | 3.8 | 32.5 | 0 | 3.918 0 |
| | | | …… | | | |
| 59 | 3.50 | 500 | 3.8 | 32.5 | 80 | 5.365 9 |
| 60 | 4.00 | 500 | 3.8 | 32.5 | 80 | 5.279 4 |

## 2.2 系统功能介绍

在 Python 软件的基础上,基于表 1 和表 2 两个数据集,将 $A_1 \sim A_6$ 作为特征值,$A_7$ 作为标签值,$B_1 \sim B_5$ 作为特征值,$B_6$ 作为标签值,采用 XGBoost 算法进行训练以预测未知参数的安全系数,并开发了龙桥铁矿按需支护智评优化设计系统,其初始页面如图 2 所示。其中,按需支护岩体等级模块有设计配置、素喷支护、锚网支护 3 个选项,如图 2 红色虚框所示(颜色标识见电子版)。

在按需支护设计之前,需要进行断面试算,输入三心拱断面的巷宽、巷高、拱高以及断面底板中心点的坐标,调用 XGBoost 模型进行断面的安全系数试算,其试算结果及支护方案建议和 CAD 图纸明细栏配置如图 3 所示。

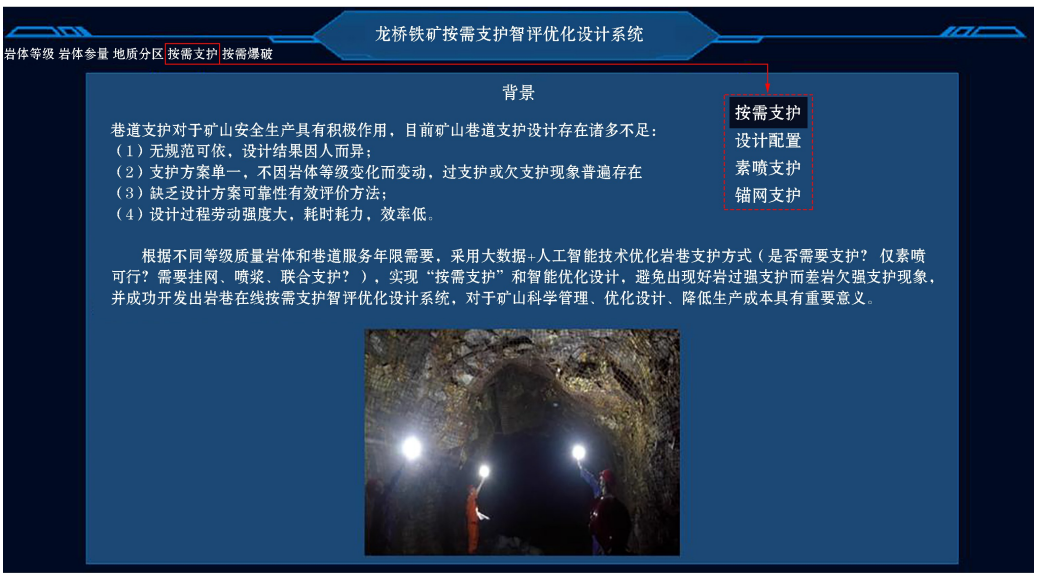



图 2 龙桥铁矿按需支护智评优化设计系统

Fig.2 Intelligent evaluation and optimization design system of on-demand support in Longqiao Iron Mine




图 3 设置配置页面

Fig.3 Setting configuration page

在断面试算的基础上,素喷支护功能区中,输入素喷支护的水泥型号、喷层厚度、水泥与砂的比例等参数,依据断面试算的三心拱断面参数,系统自动设计出素喷支护设计效果图,并相应计算出巷道断面面积,依据距离幂次反比法计算该处的岩体等级与等级可信度,根据原有素喷支护数据库,通过XGBoost模型计算该处巷道的安全系数,依据安全系数判据给出相应的支护方案评价,如图4所示。

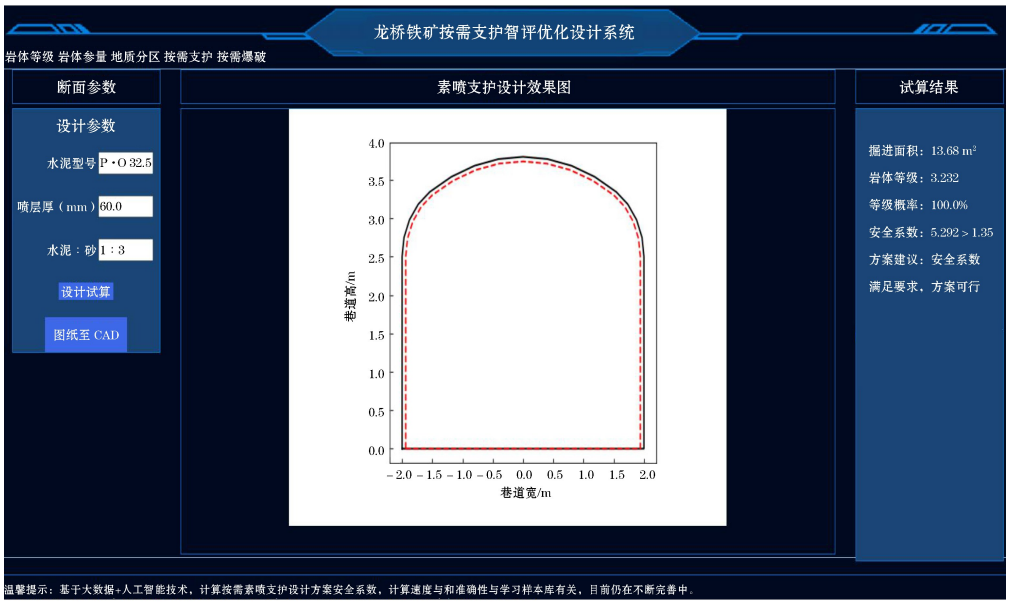



**图4 素喷支护设计**

**Fig.4 Design of plain spray support**

在锚网支护页面,输入锚网支护的锚杆间距、锚杆排距、锚杆长度、锚杆重量、兜网长度、兜网宽度、兜网架厚、兜网间距、兜网底距等9个参数,系统自动设计出锚网支护设计的效果图,依据距离幂次反比法计算该处的岩体等级与等级可信度,根据原有锚网支护数据库,通过XGBoos模型计算该处巷道的安全系数,依据安全系数判据给出相应的支护方案评价,如图5所示。

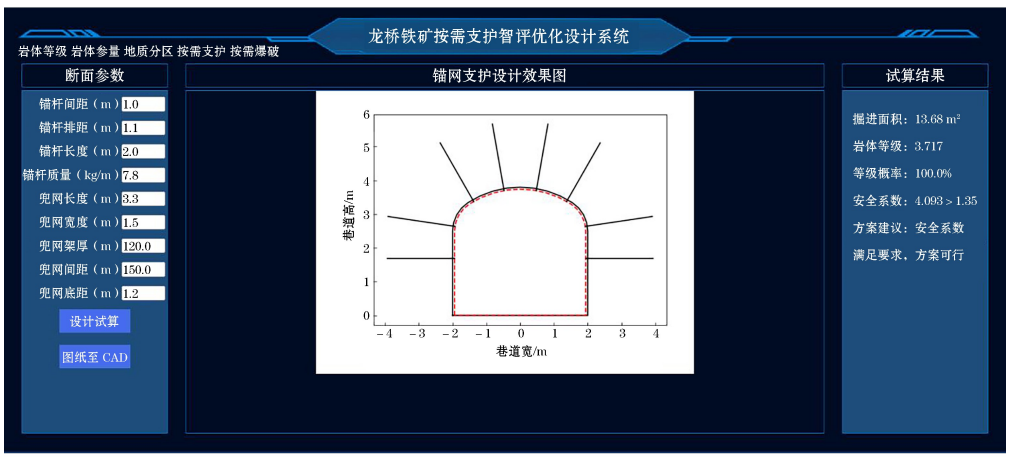



**图5 锚网支护设计**

**Fig.5 Design anchor mesh support**

## 2.3 应用实例分析

基于按需支护智评优化设计系统,对龙桥铁矿现场-370.0 m、-382.5 m、-395.0 m、-407.5 m、-420.0 m等5个水平进行了支护效果评价和优化设计,在断面参数输入位置处,输入三心拱断面巷道的几何尺寸,其巷宽为4 m、墙高为2.5 m、拱高为1.3 m,系统会自动计算出该处的围岩等级和安全系数,并给出优化后的支护方案,如图6所示。




（a）－370.0 m 水平断面试算




（b）－382.5 m 水平断面试算




（c）－395.0 m 水平断面试算




（d）－407.5 m 水平断面试算




（e）－420.0 m 水平断面试算

**图 6　各水平设计配置**

**Fig.6　Design configuration of each level**

由图 6 可知，在－370.0 m 水平试算处围岩等级较好，安全系数较大，可不采取支护措施；在－382.5 m 水平和－395.0 m 水平试算处围岩等级略差，安全系数略低，需采用巷道素喷支护形式；在－407.5 m 水平和－420.0 m 水平试算处围岩等级均为 3 级以上，围岩性质较差，均需要采取锚网支护形式。

通过按需支护智评优化设计系统，对－382.5 m 水平和－407.5 m 水平的方案进行支护设计与可行性分析，分别如图 7 和图 8 所示。对于－382.5 m 水平来说，设置水泥型号为 P・O 32.5、喷层厚度为 20 mm、水泥：砂为 1：3，采用 XGBoost 模型计算该处巷道的安全系数为 3.094，满足巷道安全性要求，方案可行。对于－407.5 m 水平来说，设计锚杆

间距为 1.0 m、锚杆排距为 1.1 m、锚杆长度设计为 2 m、锚杆重量为 7.8 kg/m、兜网长度为 3.3 m、兜网宽度为 1.5 m、兜网架厚为 120 mm、兜网间距为 150 mm、兜网底距为 1.2 m，采用 XGBoost 模型计算该处巷道的安全系数为 2.57，满足巷道安全性要求，方案可行。

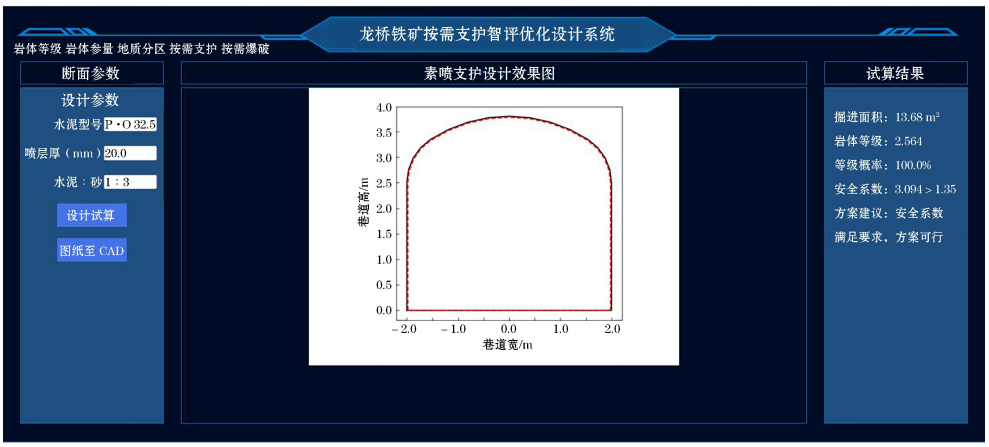



**图 7 −382.5 m 水平素喷支护设计**

**Fig.7 Design of plain spray support at −382.5 m level**

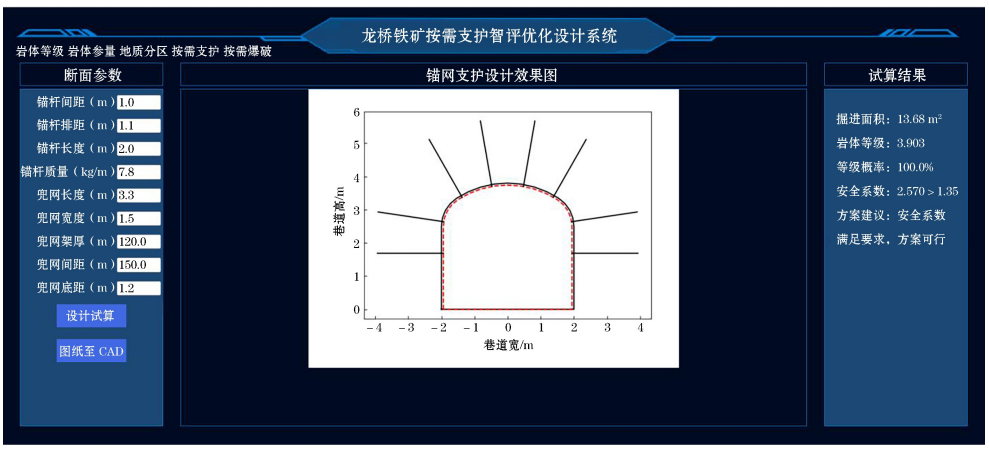



**图 8 −407.5 m 水平锚网支护设计**

**Fig.8 Design of anchor mesh support at −407.5 m level**

通过按需支护智评优化设计系统实现了对不同水平的安全性评价及快速支护设计，可见该系统是一个科学、高效、可靠的巷道支护设计工具，通过综合运用大数据＋人工智能技术，提供实时的岩体质量评估和支护方案优化，有效提高了巷道的安全性，显著节省了支护成本。

## 3 结论

基于 XGBoost 模型和巷道支护安全系数，借助 Python 软件，开发了龙桥铁矿按需支护智评优化设计系统，该系统用于巷道快速优化支护设计与效果评价。得出的主要结论如下。

(1) 采用影响龙桥铁矿巷道稳定性的 7 项按需锚网支护指标和 5 项按需素喷支护指标作为主要输入值，以 60 个巷道实际数据为例，进行按需优化支护设计和效果评价。

(2) 基于该系统对现场−370.0 m、−382.5 m、−395.0 m、−407.5 m、−420.0 m 等 5 个水平进行支护评价和优化设计。在−370.0 m 水平试算处围岩等级较好，安全系数较大，可不采取支护措施；在−382.5 m 水平和−395.0 m 水平试算处围岩等级略差，安全系数也略低，需要采用素喷支护形式；在−407.5 m 水平和−420.0 m 水平试算处围岩等级均为 3 级以上，围岩性质较差，需要采取锚网支护形式。

(3) 该系统不仅评价了采场巷道围岩等级，还对巷道结构、岩体稳定性等关键因素进行综合评估，以确定最佳支护设计方案。与传统支护设计方法相比，该系统能够更精准地评估巷道的安全性和稳定性，快速优化支护设计，有效提高了采场巷道围岩的安全性，显著节省了支护成本。

**参考文献(References):**


[1] SERYAKOV V M, KRASNOVSKY A A. Stress state of support system in temporary roadway in unstable rock mass [J]. Journal of Mining Science,2022,58:911-919.

[2] TANG Zhi, ZUO Wenbo, GAO Ke, et al. Factors influencing the anti-impact performance of a "roadway rock support" system [J]. Frontiers in Earth Science, 2023,11:1117140.

[3] MARINOS V, GORICKI A, MALANDRAKIS E. Determining the principles of tunnel support based on the engineering geological behaviour types: example of a tunnel in tectonically disturbed heterogeneous rock in Serbia[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2019, 78(4):2887-2902.

[4] 雷涛,康普林,叶海旺,等.柱状药包爆破过程中应力波叠加与岩体裂隙分布的方向效应研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(2):399-411.
LEI Tao, KANG Pulin, YE Haiwang, et al. Study on the direction effect of stress wave superposition and fracture distribution in rock mass during cylindrical charge blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024,43(2):399-411.

[5] 孙钱程,刘越,王庆文,等.硬岩开挖诱发扰动应力旋转规律及其对岩体破裂的影响[J].岩土力学,2023,44(11):3128-3140.
SUN Qiancheng, LIU Yue, WANG Qingwen, et al. Law of disturbed stress rotation induced by hard rock excavation and its influence on rock fracture [J]. Rock and Soil Mechanics,2023,44(11):3128-3140.

[6] WANG Fuyu, ZHANG Jiafan, LIU Yang, et al. Penetration mechanism of grouting by using the cement-based slurry with time-dependent viscosity[J]. Archive of Applied Mechanics,2024,94:695-717.

[7] RONG Hai, PAN Liting, LI Xiaoyan, et al. Analysis on influence factors of roadway instability in high-stress, steeply inclined extra-thick coal seam[J]. Advances in Civil Engineering,2021(2):4676685

[8] 徐超,王凯,郭琳,等.采动覆岩裂隙与渗流分形演化规律及工程应用[J].岩石力学与工程学报,2022,41(12):2389-2403.
XU Chao, WANG Kai, GUO Lin, et al. Fractal evolution law of overlying rock fracture and seepage caused by mining and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(12):2389-2403.

[9] 吴沛沛,钟志彬,余雷,等.川中红层岩体结构裂隙发育特征及多尺度分析[J].科学技术与工程,2022,22(5):2024-2031.
WU Peipei, ZHONG Zhibin, YU Lei, et al. Fracture development characteristic and multi-scale analysis of red bed rock mass in Central Sichuan[J]. Science Technology and Engineering,2022,22(5):2024-2031.

[10] 黄成林,陈清运,唐洪湘.梧桐沟铁矿复杂地质地段巷道支护工程实践[J].矿冶工程,2016,36(3):14-16.
HUANG Chenglin, CHEN Qingyun, TANG Hongxiang. Engineering practice of roadway support in complex geological section of Wutong Iron Ore Mine[J]. Mining and Metallurgy Engineering,2016,36(3):14-16.

[11] 孟庆彬,钱唯,韩立军,等.软弱矿体中巷道围岩稳定控制技术及应用[J].采矿与安全工程学报,2019,36(5):906-915.
MENG Qingbin, QIAN Wei, HAN Lijun, et al. Stability control technology of roadway surrounding rock in soft ore body and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2019,36(5):906-915.

[12] 张毅,明世祥,王跃.浅层破碎岩体巷道全长锚固稳定性控制[J].矿业研究与开发,2015,35(2):79-83.
ZHANG Yi, MING Shixiang, WANG Yue. Stability control of full-length anchorage upon roadways in shallow broken rock mass[J]. Mining Research and Development,2015,35 (2):79-83.

[13] 张长锁.某铁矿破碎岩体巷道支护参数优化设计[J].中国矿业,2021,30(增刊 1):296-300.
ZHANG Changsuo. Optimization design of roadway support parameters for broken rock in an iron mine[J]. China Mining Magazine,2021,30(Suppl.1):296-300.

[14] 秦绍龙,单迪,赵兴东,等.梅山铁矿破碎区稳定性分析及支护研究[J].金属矿山,2023(2):9-14.
QIN Shaolong, SHAN Di, ZHAO Xingdong, et al. Stability analysis and support research of fracture area in Meishan Iron Mine[J]. Metal Mine,2023(2):9-14.

[15] 王树明,冯友良.高应力大断面巷道围岩注浆加固机理及其应用[J].中国矿业,2024,33(4):209-216.
WANG Shuming, FENG Youliang. Mechanism and application of grouting reinforcement on surrounding rock of roadway with high stress and large section[J]. China Mining Magazine,2024,33(4):209-216.

[16] 袁海平,叶晨旭,王文辉.不同等级岩巷力学参数赋值与素喷支护效果评价[J].金属矿山,2022(3):51-56.
YUAN Haiping, YE Chenxu, WANG Wenhui. Mechanical parameter assignment and plain shotcrete support effect evaluation of different grade rock roadway[J]. Metal Mine, 2022(3):51-56.

[17] 陈宁青.基于围岩等级的巷道锚网支护效果评价研究[J].矿业研究与开发,2023,43(7):67-73.
CHEN Ningqing. Study on the support effect of anchor mesh in roadway based on grades of surrounding rock[J]. Mining Research and Development,2023,43(7):67-73.

[18] 赵煜东,许卫晓,李静,等.基于 XGBoost 模型集成学习的 RC 框架结构地震响应预测方法[J].青岛理工大学学报,2024,45(2):76-83.
ZHAO Yudong, XU Weixiao, LI Jing, et al. Seismic response prediction method of RC frame structure based on XGBoost model of ensemble learning[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2024,45(2):76-83.

[19] 董益,李宁.基于贝叶斯优化 XGBoost 模型的岩爆等级短期预测研究[J].现代矿业,2024,40(3):48-52.
DONG Yi, LI Ning. Short-term rock burst grade prediction based on Bayesian optimized XGBoost model[J]. Modern Mining,2024,40(3):48-52.

[20] 曹文康,徐哈宁,肖慧,等.基于贝叶斯优化 XGBoost 的多元输入模型对滑坡位移预测效果研究[J].测绘工程,2024,33(2):49-55.
CAO Wenkang, XU Ha'ning, XIAO Hui, et al. Study on the effect of Bayesian optimization XGBoost-based multi-input model on landslide displacement prediction [J]. Engineering of Surveying and Mapping,2024,33(2):49-55.