

# 复杂条件下巷道支护效果的评价

袁超<sup>1\*</sup>, 尹红球<sup>2</sup>, 范磊<sup>1</sup>, 谭文慧<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南煤业集团 嘉禾矿业有限公司, 湖南 郴州 424500)

**摘要:** 基于可拓学理论, 以实际工程资料为背景, 通过数学建模, 建立了复杂条件下巷道围岩支护效果评价体系, 对初步选取的四种巷道支护方案的支护效果进行了综合性评价。研究表明: (1) 基于可拓学理论对复杂条件下巷道围岩支护效果进行评价时, 评价指标的选取密切关系到最终的评价结果, 建立科学的评价指标体系, 需依据实际工程背景合理确定指标权重, 才能充分保证最终评价结果的可靠性; (2) 复杂条件下巷道围岩变形以非对称性居多, 在设计该类巷道的支护形式时, 综合考虑围岩变形的非对称性, 采用非对称式支护, 不仅能够满足安全生产需要, 还能有效节约支护成本; (3) 对于受构造应力和开采扰动影响较大的巷道, 应当着重考虑围岩塑性区的发展情况, 并将塑性区范围作为巷道支护方式和支护结构选取的重要依据之一。

**关键词:** 复杂条件; 巷道; 支护效果; 评价

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2020)02-0022-10

## Evaluation and Analysis of Supporting Effect of Roadway in Complex Conditions

Yuan Chao<sup>1</sup>, Yin Hongqiu<sup>2</sup>, Fan Lei<sup>1</sup>, Tan Wenhui<sup>1</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Jiahe Mining Co., Ltd., Hunan Coal Industry Group, Chenzhou 424500, China)

**Abstract:** Based on the theory of extenics, this paper, taking actual engineering data as the background and through mathematical modeling, establishes a support effect evaluation system for roadway surrounding rocks under complex conditions. The support effects of the four support schemes selected initially are comprehensively evaluated. Results show that firstly, when evaluating the support effect of roadway surrounding rock under complex conditions based on extenics theory, the selection of evaluation indicators are closely related to the final evaluation result. A scientific and systematic establishment of an evaluation index system, and reasonable determination of index weights based on the actual engineering background can ensure the reliability of the final evaluation results. Secondly, under complicated conditions, the deformation of the surrounding rock of the roadway is mostly asymmetric. In designing the support form of this kind of roadway, the asymmetry of surrounding rock deformation is comprehensively considered. Adopting asymmetric support can not only meet the needs of production safety, but also effectively save support costs. Lastly, for roadways that are greatly affected by tectonic stress and mining disturbance, the development of the surrounding rock plastic zone should be considered. The range of plastic area is taken as one of the important foundations for the selection of roadway support method and support structure.

**Keywords:** complex conditions; roadway; support effect; evaluation

随着煤炭资源开采向深部推进,地质和力学环境越发复杂.在高应力的作用下,深部巷道围岩呈现出

非连续、非协调大变形、大范围失稳破坏等一系列工程响应,深部巷道围岩控制已成为采矿界的世界性难题。目前,国内外专家学者对复杂条件下的巷道围岩支护技术开展了大量的研究,取得了重要成果。展亚太等<sup>[1]</sup>通过数值模拟和现场试验等手段,从构造应力大小和围岩松动范围等方面研究了褶曲构造对巷道围岩的影响,发现在一定程度的动力扰动下,巷道向斜段煤壁前方应力集中现象明显,变形和破坏程度最大,更易发生动压灾害。赵国栋<sup>[2]</sup>研究了动压巷道的矿压显现特征,提出采用主动支护+被动支护+围岩改性相结合的动压巷道围岩控制技术,巷道支护体结构和强度在整体上得到调整,通过现场试验取得了较好的支护效果。赵志强等<sup>[3]</sup>基于弹性力学理论模型,研究了圆形巷道围岩的破坏特征,认为巷道围岩塑性区具有圆形、椭圆形和蝶形3种基本形态,并给出了各形态的界定标准,探讨了与蝶形塑性区理论相关的实际工程领域问题。谢生荣等<sup>[4]</sup>研究了沿空掘巷围岩的偏应力和塑性区的分布规律,发现随着采高的增加,煤柱内偏应力峰值逐渐减小,而围岩塑性区逐渐增大,实体煤内偏应力峰值带和巷道围岩塑性区均向右上侧逐步扩展。陈登红等<sup>[5]</sup>通过现场试验,对淮南矿区7个深部矿井的地应力数据进行分析,研究了巷道最优布置方位与最大水平主应力方向的夹角 $\beta$ 在不同侧压力系数影响下的取值变化,发现从 $0^\circ$ 增加到 $12^\circ$ ,巷道帮、顶应力差值对巷道围岩变形的影响程度大幅降低。张淑坤等<sup>[6]</sup>研究了局部结构面影响下的巷道围岩力学特性,发现随着结构面倾角趋于 $60^\circ$ ,岩石试件的力学性质(强度、刚度以及试件的稳定性)受结构面弱化区的影响越大。高云峰等<sup>[7]</sup>研究了缓倾斜煤层软岩巷道的非对称变形和破坏规律,提出采用锚(索)网等多种支护结构的巷道联合支护技术,利用锚杆(索)将浅部破碎围岩与深部坚硬围岩相连接,在巷道顶板形成拱结构,同时配合锚网支护,保持巷道的稳定。王卫军等<sup>[8]</sup>采用Kastner等相关理论,研究了深部高应力巷道的围岩变形规律,认为在深部巷道的支护过程中,存在目前支护水平所无法控制的围岩“给定变形”,提出了考虑预留变形的新型支护技术。韦四江等<sup>[9]</sup>发现巷道在穿越断裂区域时会频繁出现难以控制的现象,通过现场试验和数值模拟等手段,研究了穿越断层破碎带巷道的围岩应力场、位移场以及塑性区分布规律,提出了采用主动支护与被动支护相联合的支护技术。鲁岩<sup>[10]</sup>研究了在构造应力影响下巷道布置位置的选择,发现巷道轴向与最大构造应力方向夹角 $\alpha$ 越大,围岩的破碎程度越大,当夹角 $\alpha=0^\circ$ 时,巷道受构造应力的影响最小,当夹角 $\alpha=90^\circ$ 时,巷道稳定性最差。李光等<sup>[11]</sup>采用数值模拟和现场试验,对金川矿区深部巷道采用的“双层网锚喷+U型钢拱架”联合支护方案进行了评价和参数优化。赵通等<sup>[12]</sup>研究了松软破碎巷道的变形和破坏规律,发现复杂的力学环境与巷道围岩自身力学性质是该巷道围岩控制的主要影响因素,并在巷道围岩耦合支理论的基础上,对原支护方案进行了参数优化,取得了较好的支护效果。伍中建等<sup>[13]</sup>以实际工程为背景,通过数值模拟的方式,监测4种工况下巷道围岩顶板下沉量、底臃量、两帮移近量、两帮变形范围、顶板变形范围和底板变形范围等6个变量,通过数据分析,直接采用模糊词语“好”和“不好”作为支护效果的最终评语。王伟<sup>[14]</sup>基于围岩均匀、连续和各向同性的假设,提出了围岩支护强度系数概念,通过反映围岩抵抗变形压力的能力评价锚杆的支护效果。李强<sup>[15]</sup>基于模糊评价理论,从巷道理深、煤层强度、直接顶厚度与采高的比值、岩体完整性系数、顶板强度、底板强度以及护巷煤柱宽度等7个因素,采用模糊综合评价法对不同情况下的巷道支护效果进行评价。

上述研究成果侧重于对地质构造、开采扰动影响下巷道围岩变形和破坏特征的研究,并提出了针对性的巷道支护方案,对于复杂条件下巷道围岩控制技术的发展具有重要意义,但是研究成果没有涉及复杂条件下巷道围岩支护效果的评价与分析,评价体系不够完善,评价方法较为简单,评价结果十分模糊。科学、系统的支护效果评价方法对于选择和优化复杂条件下巷道围岩支护方式意义重大,本文以可拓学理论为基础,提出了复杂条件下巷道围岩支护效果的评价方法,成功应用于工程实践,为科学比选支护方案提供理论参考。

## 1 可拓学评价理论

### 1.1 可拓学理论

可拓学理论最初应用于管理、检测和人工智能等领域,目前在矿山领域已经得到了广泛的推广与应

用<sup>[16]</sup>.可拓学将事物  $N$ , 特征  $C$  及特征量值  $V$  组成有序三元组, 记作:  $(N, C, V)$ .

### 1.2 评价模型的建立

#### 1.2.1 模型建立

根据评价对象的隶属关系建立评价体系, 其中设有评价类别  $x$  个, 评价类别 1, 评价类别 2,  $\dots$ , 评价类别  $x$  分别包含评价指标  $s, q, \dots, l$  个, 评价体系共含有评价指标  $n$  个, 如图 1.

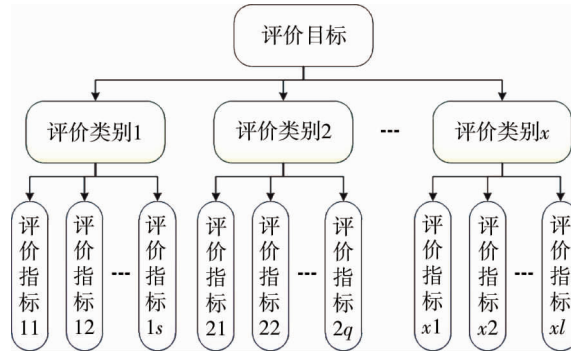


图 1 层次分析法指标体系

#### 1.2.2 可拓学评价过程

##### 1) 指标权重的获取

评价指标权重的确定方法有很多, 本文选择较为常用的层次分析法 (AHP) 确定评价体系的指标权重, 具体流程: 建立评价指标体系, 通过计算判断矩阵  $D$ , 获得各项指标权重, 得到指标权重矩阵  $M = (M_1, M_2, \dots, M_n)$ , 进而计算判断矩阵  $D$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$ , 最后, 通过式(1)检验 CR 值的大小, 进行矩阵  $D$  的一致性检验<sup>[17]</sup>.

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{1}$$

式中: CR 为一致性检验系数; CI 为一致性指标; RI 为平均随机一致性指标.

##### 2) 经典域与节域的确定

根据可拓学评价理论, 评价指标的经典域与节域可表示为式(2)和式(3).

$$R_{0t} = [N, C_j, V_{0tj}] = \begin{bmatrix} N & C_1 & \langle a_{0t1}, b_{0t1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{0t2}, b_{0t2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{0tn}, b_{0tn} \rangle \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中:  $R_{0t}$  为经典域物元;  $C_j (j=1, 2, \dots, n)$  为决定事物  $N$  的评价指标;  $V_{0tj}$  为经典域物元的评价指标  $C_j$  在第  $t (t=1, 2, \dots, g)$  个评价等级的取值;  $\langle a_{0tj}, b_{0tj} \rangle$  为  $V_{0tj}$  所取的量值范围;  $a_{0tj}$  为取值范围的最小值;  $b_{0tj}$  为取值范围的最大值.

$$R_p = [N, C_j, V_{pj}] = \begin{bmatrix} N & C_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中:  $R_p$  为节域物元;  $V_{pj}$  为节域物元的评价指标  $C_j (j=1, 2, \dots, n)$  在全体等级下的取值;  $\langle a_{pj}, b_{pj} \rangle$  为  $V_{pj}$  所取的量值范围;  $a_{pj}$  为取值范围的最小值;  $b_{pj}$  为取值范围的最大值; .

##### 3) 确定待评价物元

待评价物元  $R_{ij} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$  由式(4)确定. 对待评事物  $N_i$  的评价指标  $C_j$  进行评分, 所得量值(实际评分)记为  $V_{ij}$ .

$$R_{ij} = [N_i, C_j, V_{ij}] = \begin{bmatrix} N_i & C_1 & V_{i1} \\ & C_2 & V_{i2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{in} \end{bmatrix}. \tag{4}$$

4) 关联度计算

待评事物  $N_i (i=1,2,\dots,m)$  的第  $j$  个指标  $C_j (j=1,2,\dots,n)$  关于评价等级  $t (t=1,2,\dots,g)$  的关联度函数表达式为

$$k_i(V_{ij}) = \begin{cases} \frac{\rho[V_{ij}(t), V_{0ij}]}{\rho[V_{ij}(t), V_{pj}] - \rho[V_{ij}(t), V_{0ij}]}, \rho[V_{ij}(t), V_{pj}] \neq \rho[V_{ij}(t), V_{0ij}]; \\ -\rho[V_{ij}(t), V_{0ij}] - 1, \rho[V_{ij}(t), V_{pj}] = \rho[V_{ij}(t), V_{0ij}]. \end{cases} \tag{5}$$

式中: 
$$\begin{cases} \rho[V_{ij}(t), V_{0ij}] = \left| V_{ij} - \frac{1}{2}(b_{0ij} + a_{0ij}) \right| - \frac{1}{2}(b_{0ij} - a_{0ij}); \\ \rho[V_{ij}(t), V_{pj}] = \left| V_{ij} - \frac{1}{2}(b_{pj} + a_{pj}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pj} - a_{pj}). \end{cases}$$

将所有计算所得的关联度用矩阵形式进行记录,因此关联度矩阵  $K$  为

$$K = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & \cdots & r_{g1} \\ r_{12} & r_{22} & \cdots & r_{g2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{1n} & r_{2n} & \cdots & r_{gn} \end{bmatrix}. \tag{6}$$

5) 评价等级的确定

$$B = MK = (M_1, M_2, \dots, M_n) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & \cdots & r_{g1} \\ r_{12} & r_{22} & \cdots & r_{g2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{1n} & r_{2n} & \cdots & r_{gn} \end{bmatrix} = (B_1, B_2, \dots, B_g). \tag{7}$$

评价等级的确定采用最大值法,即:若  $\max(B) = B_t$ , 则待评事物  $N_i$  的评价等级为  $t$ .

## 2 巷道支护效果的评价模型

### 2.1 评价指标的选取

评价指标的选取影响最终的评价结果,而在前人的研究成果中,多以巷道围岩变形量作为支护效果评价的唯一依据,评价体系缺乏,评价方法简单,评价结果模糊,无法科学全面地反映巷道实际的支护效果.本文基于全面性、科学性等原则选取评价类别 3 个,分别为工程经济性,围岩稳定性,支护安全性,其中,围岩稳定性和支护安全性均包含 3 个评价指标,指标体系具体见表 1.

表 1 评价指标体系

评价类别	评价指标
工程经济性	/
围岩稳定性	顶板下沉变化率
	底鼓变化率
	两帮内移变化率
支护安全性	围岩应力集中程度
	锚杆利用率
	塑性区范围变化率

### 2.1.1 工程经济性

工程经济性是巷道支护效果评价的一个重要方面,通过分析支护方案所需总成本来评价支护方案的合理性,即在不同支护方案中选取一种支护方案的成本作为参照,各支护方案的成本与参照方案的成本之比.相对支护成本率越大说明对应支护方案的支护成本越大,支护方案的工程经济性越低,支护效果越差.

### 2.1.2 围岩稳定性

围岩稳定性是评价支护方案支护效果最重要的指标,直接影响被支护巷道能否正常使用.本文通过比较支护与未支护两种条件下顶板、底板以及两帮区域围岩变形量比值的大小来反映各支护方案的支护效果,比值越大表明方案的支护效果越差,反之则越好.

### 2.1.3 支护安全性

支护安全性是通过分析支护方案的围岩应力集中程度、锚杆利用率和塑性区范围变化率来评价支护巷道围岩的安全状态.围岩应力集中程度为支护后巷道附近最大主应力与原岩应力之比;锚杆利用率为支护过程中锚杆轴力与锚杆抗拉强度之比;塑性区范围变化率为支护与未支护两种条件下围岩塑性区面积之比.其中,围岩应力集中程度和塑性区范围变化率的值越大,表明巷道的安全性越差,存在的安全风险相对越大,而锚杆利用率的值越大则表明该方案中锚杆的利用较为充分,造成的支护浪费较少.

## 2.2 指标权重的确定

在学习和了解前人在巷道支护效果评价方面研究结果的基础上,运用层次分析法确定复杂条件下巷道围岩支护效果的评价体系,即多个(> 6)专家或学者独立且客观地对每一个评价指标权重进行评分,并代入层次分析法计算公式获得最终的指标权重值,计算过程在此从略,计算结果见表2.

表2 指标权重

评价类别	权重	评价指标	指标权重	综合权重
工程经济性	0.179	-	-	0.179 0
围岩稳定性	0.523	顶板下沉变化率	0.422	0.220 7
		底鼓变化率	0.271	0.141 7
		两帮内移变化率	0.307	0.160 6
支护安全性	0.298	围岩应力集中程度	0.352	0.104 9
		锚杆利用率	0.263	0.078 4
		塑性区范围变化率	0.385	0.114 7

因此,综合权重矩阵  $M = (0.179\ 0, 0.220\ 7, 0.141\ 7, 0.160\ 6, 0.104\ 9, 0.078\ 4, 0.114\ 7)$ .

## 2.3 评价等级的确定

物元可拓评价等级的确定为评价结果的得出提供了重要参考.本文依据实际工程概况,将巷道围岩卸压效果评价结果共划分成5个评价等级,按照巷道卸压效果由差到好依次为I级、II级、III级、IV级和V级,各等级所对应的等级含义和取值范围见表3.

表3 评价等级指标取值范围表

评分取值范围	评价等级				
	I 很差	II 较差	III 一般	IV 较好	V 好
工程经济性	1.75~1.50	1.50~1.25	1.25~1.00	1.00~0.75	0.75~0.50
顶板下沉变化率	1.00~0.80	0.80~0.60	0.60~0.40	0.40~0.20	0.20~0.00
底鼓变化率	1.00~0.80	0.80~0.60	0.60~0.40	0.40~0.20	0.20~0.00
两帮内移变化率	1.00~0.80	0.80~0.60	0.60~0.40	0.40~0.20	0.20~0.00
围岩应力集中程度	6.00~5.00	5.00~4.00	4.00~3.00	3.00~2.00	2.00~1.00
锚杆利用率	0.00~0.20	0.20~0.40	0.40~0.60	0.60~0.80	0.80~1.00
塑性区范围变化率	1.00~0.80	0.80~0.60	0.60~0.40	0.40~0.20	0.20~0.00

根据式(8)对表3进行无量纲处理,处理结果见表4.

$$q'_t = \begin{cases} \frac{q_t - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} & (\text{越大越好的因素}); \\ \frac{q_{\max} - q_t}{q_{\max} - q_{\min}} & (\text{越小越好的因素}). \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $q_t$  ( $t=1,2,\dots,g$ ) 为某评价指标的评价标准值;  $q'_t$  为无量纲后某评价指标的评价标准值;  $q_{\max}$  为某评价指标的最大评价标准值;  $q_{\min}$  为某评价指标的最小评价标准值.

表 4 无量纲化处理的评价等级指标取值范围表

评分取值范围	评价等级				
	I 很差	II 较差	III 一般	IV 较好	V 好
工程经济性	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
顶板下沉变化率	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
底鼓变化率	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
两帮内移变化率	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
围岩应力集中程度	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
锚杆利用率	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
塑性区范围变化率	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0

### 3 工程应用

以可拓学理论为基础,建立了复杂条件下巷道围岩支护效果的评价模型.以实际工程为背景,通过数值模拟获得不同支护方案下围岩应力、变形和塑性区,锚杆轴力以及支护工程量等原始数据,将这些数据代入评价模型,获得不同支护方案下巷道围岩支护效果的评价等级.这是可拓学理论在巷道支护实践中的一次重要应用,对指导复杂条件下巷道围岩支护和方案比选提供了方法参考.

#### 3.1 工程背景

湖南省煤业集团嘉禾矿业公司浦溪井 2152 底板巷沿 V 煤底板掘进,巷道距 V 煤垂直距离约 27 m,巷道平面位置见图 2. V 煤层平均厚度为 2.1 m,老顶为中粒砂岩,直接顶为粉砂岩,直接底为泥质粉砂岩,老底为砂质泥岩,2152 工作面顶底板岩层信息见图 3.

2152 底板巷断面为直墙半圆拱形,断面净尺寸为 2 600 mm×2 700 mm,原支护采用锚网喷支护形式.由于巷道围岩属于低强度的泥质粉砂岩、砂质泥岩,加上工作面采动的影响,顶底均存在较大的变形,两帮破坏十分严重.

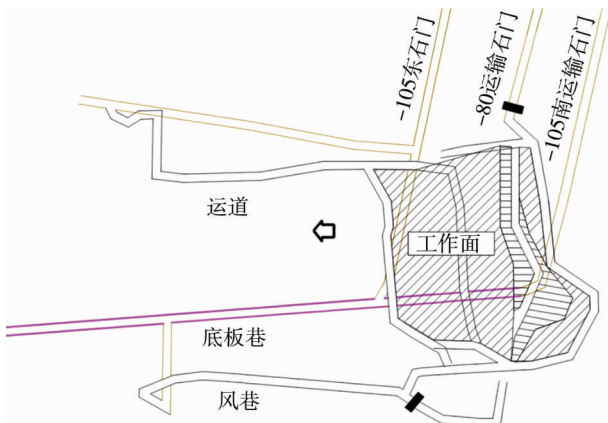


图 2 2152 底板巷平面位置

层厚/m	柱状图	岩石名称	岩性描述
28.50		中粒砂岩	灰白色, 成份石英为主
8.60		粉砂岩	深灰-灰白色, 较疏松
1.45		V 煤	黑色, 弱金属光泽
0.96		砂质泥岩	灰黑色, 含粉砂质
0.22		细砂岩	深灰色, 薄层状
27.87		砂质泥岩	深灰色, 薄层状

图 3 2152 工作面顶底板煤层柱状图

2152 底板巷埋深并不大,但是巷道变形和破坏却十分严重,尤其在巷道两帮区域,变形剧烈,经过多次的巷道返修,巷道变形仍无法得到有效控制.图 4 和图 5 为巷道返修后围岩破坏情况.



图4 返修后两帮出现严重内挤和垮塌



图5 返修后锚杆托盘与顶板严重分离

针对巷道所处的地质和生产环境进行分析,具体如下:

#### (一)围岩性质

根据巷道岩样的X射线衍射结果,2152底板巷围岩的矿物成分主要为菱铁矿、石英、云母、高岭石等,其中菱铁矿的含量最高,达到总矿物含量的51.34%,其次是石英和云母,分别为15.82%和15.38%。菱铁矿与云母常呈片状或层状赋存,在风化或外部压力作用下极易破碎。还有9.52%比例的高岭石,在湿润条件下具有较强的黏着性和膨胀性。底板巷的围岩总体上较为破碎,且含有部分吸水膨胀矿物,是导致巷道出现大变形、围岩控制困难的重要原因。

#### (二)地质构造

浦溪井田位于袁家向斜北段偏南,为一波状起伏的复式向斜,褶曲幅度约为30~50 m。褶曲是由岩层水平挤压形成,褶皱所在位置岩体的水平应力常常较同层位其他区域岩体大,导致褶皱及附近区域内围岩的侧压力系数发生突变。其中,在背斜顶部区域围岩的水平应力增加最为明显。因此,处于构造应力影响范围内的2152底板巷出现了巷帮区域破坏格外严重,即使经过多次的巷道返修,巷帮区域仍然变形不止。

#### (三)开采扰动

地质构造对巷道变形的影响属于地质因素,而开采扰动则属于人为因素。受开采活动影响,工作面以及采空区附近岩体的应力会重新分布,处于开采扰动区域内的其他巷道也会受到不同程度的扰动,导致巷道围岩应力场发生旋转,出现严重片帮、蝶叶型冒顶等现象,严重时会导致整条巷道坍塌,无法使用。2152底板巷位于V煤层下方,垂直距离约27 m,V煤层的正常开采活动对2152底板巷产生了一定的影响,导致巷道出现较大的变形和破坏。

#### (四)支护措施

支护技术是巷道围岩控制体系的重要组成部分,采用合适的支护措施对于有效控制围岩变形和稳定意义重大。2152底板巷采用锚网喷作为主要的支护方式,普通螺纹钢锚杆直径18 mm,长1.5 m。通过现场勘查,发现锚杆并未出现断裂现象,而是随着围岩整体移动,经过返修扩帮后,可以清楚看见初次支护锚杆的托盘与巷道间产生明显的间隙。因此,可以确定巷道原始支护方式不能有效适应该巷道,锚杆的锚固基础可能没有安装于稳定岩层中,应当采用更加有效的支护方案控制围岩。

### 3.2 评价与分析

#### 3.2.1 数值模型的建立

模型采用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件进行计算,模拟尺寸为70 m×70 m×30 m(宽×高×深),直墙半圆拱巷道位于模型的中部偏下区域,巷道尺寸为2 600 mm×2 700 mm(宽×高)。模型自上而下共划分为中粒砂岩、粉砂岩、煤、砂质泥岩四层,其中粉砂岩与煤层在模型中部向上拱起形成背斜,数值模拟模型见图6,数值模拟基本参数见表5。

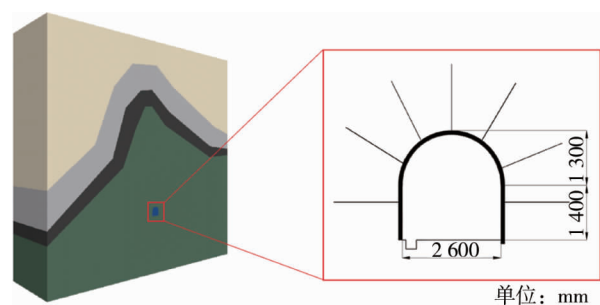


图6 数值模拟模型

表 5 数值模拟基本参数

名称	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	岩体密度/(kg/m <sup>3</sup> )	内摩擦角/(°)	粘聚力/MPa
中粒砂岩	2.10	1.32	2 750	32	3.50
粉砂岩	3.20	2.70	2 650	30	2.30
煤	0.27	0.16	2 235	22	0.75
砂岩泥岩	0.90	0.01	2 600	25	2.95

3.2.2 支护方案的确定

根据实际工程情况,本文选取 4 种不同的支护方案进行对比研究.方案一为巷道原始支护形式,采用全断面锚杆支护形式;方案二和方案三中均采用锚杆-锚索联合支护形式,其中方案二除安装锚杆外,在顶板额外布置锚索 3 根,两底脚分别布置倾斜锚索 1 根,方案三在巷道顶板和两帮均布置了不同数量锚索;方案四采用全断面锚索支护形式.具体方案如图 7.

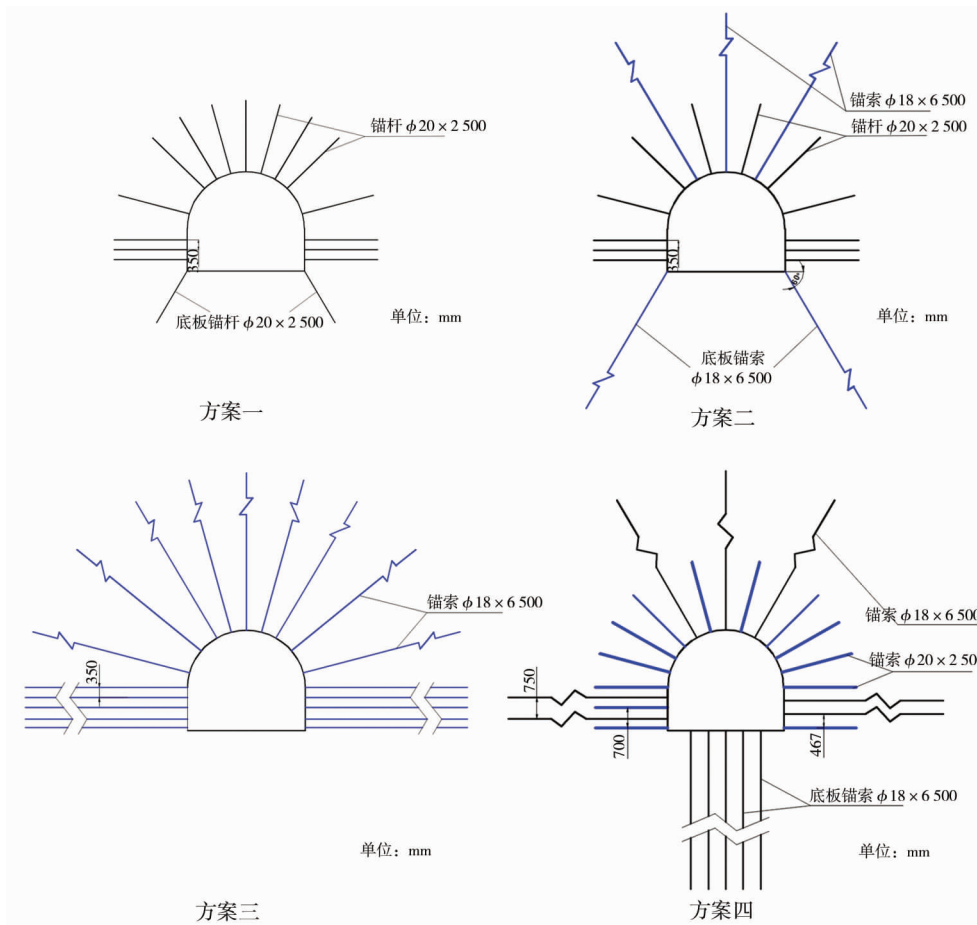


图 7 支护方案

3.2.3 评价结果与分析

本文利用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件以实际工程为背景建立巷道模型,对初步选择的 4 种巷道支护方案进行数值计算,时刻监测巷道围岩位移、应力、塑性区以及锚杆应力,并记录整理得表 6.

表 6 原始数据

支护方案	锚杆(索) 数量/根	顶板下 沉量/m	底鼓 量/m	两帮内 移量/m	围岩最大主 应力/MPa	锚杆最大轴 应力/MPa	塑性区 面积/m <sup>2</sup>
无支护		0.254	0.272	0.797	3.20	/	15.991 7
方案一	17	0.093	0.214	0.613	7.86	11.99	7.029 1
方案二	17	0.081	0.205	0.589	7.56	13.83	6.953 4
方案三	19	0.064	0.192	0.313	4.58	15.28	7.562 4
方案四	25	0.095	0.014	0.365	6.11	15.45	4.513 0



对原始数据进行无量纲化处理,结果见表7.

表7 无量纲化处理的原始数据

支护方案	锚杆(索) 数量/根	顶板下 沉量/m	底鼓 量/m	两帮内 移量/m	围岩最大主 应力/MPa	锚杆最大轴 应力/MPa	塑性区 面积/m <sup>2</sup>
方案一	0.600 0	0.633 9	0.213 2	0.230 9	0.708 8	0.399 7	0.560 5
方案二	0.600 0	0.681 1	0.246 3	0.261 0	0.727 5	0.461 0	0.565 2
方案三	0.505 9	0.748 0	0.294 1	0.607 3	0.913 8	0.509 3	0.527 1
方案四	0.223 5	0.626 0	0.948 5	0.542 0	0.818 1	0.515 0	0.717 8

根据可拓学的计算公式,对4种支护方式下巷道的原始数据进行处理.以方案一为例,将方案一无量纲化后的原始数据代入式(5)和式(6),得到方案一各评价指标对于支护效果的隶属度,见表8.

表8 方案一各评价指标对于支护效果的隶属度

评价等级	锚杆(索) 数量/根	顶板下 沉量/m	底鼓 量/m	两帮内 移量/m	围岩最大主 应力/MPa	锚杆最大轴 应力/MPa	塑性区 面积/m <sup>2</sup>
I	-0.50	-0.54	-0.06	-0.12	-0.64	-0.33	-0.45
II	-0.33	-0.39	0.07	0.15	-0.51	0.00	-0.27
III	-0.50	-0.08	-0.47	-0.42	-0.27	0.00	0.20
IV	-0.67	0.17	-0.64	-0.62	0.46	-0.33	-0.08
V	-0.33	-0.31	-0.73	-0.71	-0.24	-0.50	-0.35

再根据式(7),得到方案一最终的评价等级和各评价等级的隶属度,有

$$B = MK = (B_1, B_2, \dots, B_g) = (-0.3809, -0.1960, -0.2482, -0.2599, -0.4515)$$

同理,重复上述过程,得到其他3种支护方案的评价结果,并汇总得表9.

表9 各支护方案的评价结果

	I	II	III	IV	V	评价等级
方案一	-0.3809	-0.1960	-0.2482	-0.2599	-0.4515	II
方案二	-0.4249	-0.1793	-0.2341	-0.1927	-0.4214	II
方案三	-0.1828	-0.3179	-0.0479	-0.2262	-0.5771	III
方案四	-0.2332	-0.3785	-0.2279	-0.1810	-0.2659	IV

根据支护效果评价模型对数值计算后的4种支护方案进行评价,得出4种方案的最终评价等级依次为II,II,III和IV,因此,支护方案四为本次工程运用中的最佳巷道支护方案,能够在保证巷道稳定的基础上开展安全生产.方案四在充分考虑到2152底板巷围岩塑性区较大的情况下,采用全断面锚索支护取代原本的全断面锚杆支护,有效保证了锚索锚固基础的稳定,能够在复杂条件影响下为生产巷道提高持续高阻,保证巷道稳定.此外,根据围岩变形的非对称性在巷道两帮实施非对称支护,在满足支护要求的同时节省了支护成本.

与方案四相比,方案一所采用的全断面锚杆支护没有满足巷道的支护需要,由于锚杆长度较短,锚杆杆体全部位于塑性区围岩中,围岩与锚杆整体向巷道空间内移,锚杆支护效果差;方案一与方案二在底鼓管理上均采用底脚倾斜锚杆(索)支护,该支护方式安装简单,但是仍无法有效改善巷道底鼓现象;此外,方案三在底板管理上未采用相应的支护措施,因此底鼓现象也较为明显.

## 4 结论

1)在对复杂条件下巷道围岩支护效果开展评价工作时,仅通过分析围岩变形数据是远远不够的,应从工程经济性、围岩稳定性以及支护安全性等多个层面对复杂条件下巷道围岩支护效果进行科学、全面评价.

2)对比本实例的4种巷道支护方案,复杂条件下巷道围岩变形以非对称性居多,在设计该类巷道的支护形式时,综合考虑围岩变形的非对称性,采用非对称式支护,不仅能够满足安全生产需要,还能有效地节约支护成本。

3)对于受构造应力和开采扰动影响较大的巷道,应当着重考虑围岩塑性区的发展情况,并将塑性区的范围作为巷道支护方式、支护结构选取的重要依据之一。

#### 参考文献:

- [1] 展亚太,王金安,李飞,等.褶曲构造对煤巷围岩破裂范围及动压影响分析[J].煤矿安全,2018,49(9):257-261.
- [2] 赵国栋.矿井深部强动压巷道综合控制技术[J].煤炭科学技术,2018,46(s2):98-102.
- [3] 赵志强,马念杰,刘洪涛,等.巷道蝶形破坏理论及其应用前景[J].中国矿业大学学报,2018,47(5):969-978.
- [4] 谢生荣,潘浩.深部沿空掘巷围岩偏应力演化与控制[J].中国矿业,2018,27(8):98-102.
- [5] 陈登红,华心祝.地应力对深部回采巷道布置方向的影响分析[J].地下空间与工程学报,2018,14(4):1122-1129.
- [6] 张淑坤,王树达,王来贵,等.结构面局部弱化影响下巷道围岩稳定性研究[J].中国安全科学学报,2018,28(7):116-121.
- [7] 高云峰.缓倾斜煤层软岩巷道变形规律及围岩控制研究[J].矿业安全与环保,2017,44(4):53-56.
- [8] 王卫军,袁超,余伟健,等.深部大变形巷道围岩稳定性控制方法研究[J].煤炭学报,2016,41(12):2921-2931.
- [9] 韦四江,南华,徐耀辉.连续断裂区域巷道失稳机理及控制技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(4):39-44.
- [10] 鲁岩.构造应力场影响下的巷道围岩稳定性原理及其控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2008.
- [11] 李光,马凤山,刘港,等.金川矿区深部巷道支护效果评价及参数优化研究[J].黄金科学技术,2018,26(5):605-614.
- [12] 赵通,弓培林.基于耦合支理论破碎软岩巷道支护及其评价[J].煤矿安全,2014,45(2):184-187.
- [13] 伍中建,汤国禹,朱新民,等.深部高应力软弱围岩支护方案评价及优化[J].矿业工程研究,2011,26(2):1-7.
- [14] 王伟.巷道围岩稳定性分析及锚杆支护效果评价研究[D].西安:西安科技大学,2016.
- [15] 李强.基于模糊综合评价的回采巷道支护参数设计[J].煤矿现代化,2019(3):156-158.
- [16] 王新民,康虔,秦健春,等.层次分析法-可拓学模型在岩质边坡稳定性安全评价中的应用[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(6):2455-2462.
- [17] 秦忠诚,李谭,陈光波,等.基于SPA-CW的冲击地压评价模型[J].矿业研究与开发,2018,38(8):18-22.