

# 破碎围岩巷道掘进联合支护技术适应性评价

秦建锟

中国平煤神马集团股份十一矿, 中国·河南 平顶山 467000

**摘要:** 为了解决破碎围岩巷道掘进过程中支护失效、围岩失稳等问题, 提高支护技术的匹配度, 进行联合支护技术适应性评价研究。通过分析破碎围岩地质特征和力学响应规律, 建立“地质条件、技术参数、支护效果”三维评价体系, 用层次分析法和模糊综合评价法结合的评价模型, 对锚网喷、锚索、U型钢棚联合支护等3种常见支护方案进行适应性评价。结果表明: 锚网喷+锚索+注浆联合支护技术在强风化破碎围岩中适应性最好, 支护阻力、围岩变形控制效果均满足工程要求; 评价体系可以有效地量化技术适应性等级, 为破碎围岩巷道支护方案的优化提供科学依据。

**关键词:** 破碎围岩; 巷道掘进; 联合支护; 适应性评价; 层次分析法

## Adaptability Evaluation of Joint Support Technology for Tunneling in Broken Rock Mass

Qin Jiankun

China Pingmei Shenma Group Co., Ltd. Mine No.11, China Henan Pingdingshan 467000

**Abstract:** To address support failure and surrounding rock instability during tunnel excavation in fractured rock formations and enhance the compatibility of support technologies, this study conducted an adaptive evaluation of combined support systems. By analyzing the geological characteristics and mechanical response patterns of fractured rock, a three-dimensional evaluation framework integrating "geological conditions, technical parameters, and support effectiveness" was established. Using a hybrid model combining Analytic Hierarchy Process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation, three common support schemes—anchor mesh spraying, anchor cables, and U-shaped steel canopy—were assessed. The results demonstrated that the anchor mesh spraying + anchor cables + grouting combined support system exhibited optimal adaptability in strongly weathered fractured rock, with both support resistance and rock deformation control meeting engineering requirements. The evaluation framework effectively quantifies technical adaptability levels, providing a scientific basis for optimizing support solutions in fractured rock tunneling.

**Keywords:** Rock crushing; Roadway excavation; Combined support; Adaptability evaluation; Analytic hierarchy process

## 0 引言

由于矿产资源开采深度越来越大, 破碎围岩巷道的占比也越来越大, 此类巷道围岩松散破碎、胶结性差, 在掘进过程中容易发生顶板坍塌、帮部鼓出等地质灾害, 严重威胁施工安全, 影响掘进效率。联合支护技术依靠多种支护形式共同作用, 达到围岩应力重新分布、控制变形的目的, 是破碎围岩巷道支护的主要发展方向。但是不同的联合支护技术的适用范围有较大差别, 如果盲目选用, 容易造成支护失效、增加工程成本。因此开展联合支护技术适应性评价, 确定不同的地质条件下最佳的支护方案, 对保证破碎围岩巷道掘进安全、提高工程经济性有重要的现实意义。本文根据破碎围岩地质特征, 建立适应性评价体系, 提出科学评价方法, 为支护技术选型提供理论依据。

## 1 破碎围岩巷道地质特征与支护难点

### 1.1 破碎围岩地质特征

破碎围岩指由于地质构造运动、风化作用等影响, 岩体完整性被严重破坏, 裂隙发育、块度不均的围岩类

型。根据岩体破碎程度可以分为弱破碎(岩体完整性系数0.4~0.6)、中破碎(0.2~0.4)、强破碎(<0.2)三个等级。从地质参数上看, 破碎围岩多伴有低抗压强度(一般<30MPa)、高孔隙率(15%~35%)、强透水性等特性, 部分地方有断层破碎带、节理密集带等不良地质构造。在应力环境方面, 深埋破碎围岩还要承受高地应力的作用, 容易引起围岩塑性流变。从现场调查数据来看, 超过80%的破碎围岩巷道失稳事故是由地质构造发育、岩体强度不够引起的。

### 1.2 破碎围岩巷道支护难点

破碎围岩巷道支护面临的主要问题有四个方面: 一是围岩承载能力差, 单一支护形式不能提供足够的支护阻力, 容易造成支护结构变形、破坏; 二是围岩变形量大、持续时间长, 破碎岩体在掘进扰动下会经历瞬时变形、蠕变等几个阶段, 对支护结构的长期稳定性要求很高; 三是支护时机难以控制, 过早支护容易受到围岩初期卸荷冲击, 过晚支护则会错过围岩稳定控制的最佳时机; 四是不良地质

条件干扰大,断层、裂隙水等因素会进一步加剧围岩破碎程度,降低支护效果。此外,各个区域破碎围岩地质条件千差万别,为支护方案选型造成困难。

## 2 破碎围岩巷道掘进联合支护技术体系

### 2.1 联合支护技术核心原理

联合支护技术的基本原理就是“协同承载、分级控制”,用各种支护形式的有机组合,充分发挥各种支护结构的作用,实现对破碎围岩全方位、多层次的支护。首先采用锚网喷等浅部支护封闭围岩表面,防止岩体风化剥落,传递围岩应力到深部支护结构,再用锚索、注浆等深部支护加固围岩深部岩体,提高围岩整体承载能力,对极破碎围岩增设棚式支护(U型钢棚、工字钢棚)兜底支护,保证支护系统安全<sup>[1]</sup>。联合支护技术依靠各个支护结构的时序协同和空间协同,使围岩应力得到合理的分布,从而有效地控制围岩变形。

### 2.2 常见联合支护技术类型及适用范围

结合工程实践,目前破碎围岩巷道掘进中应用较广泛的联合支护技术主要有以下3种:

#### 2.2.1 锚网喷+锚索联合支护

该技术以锚杆、锚索为核心承重结构,喷射混凝土和金属网构成表层防护体系。锚杆利用端部锚固和全长锚固作用来加固浅部破碎岩体,锚索深入到稳定岩层中,产生较大的拉拔力,限制围岩深部的变形;喷射混凝土可以及时封闭围岩<sup>[2]</sup>,防止岩体风化,同时与锚杆、金属网一起形成组合拱,提高浅部围岩的承载能力。该技术适合弱至中破碎围岩、无或者少量裂隙水的巷道支护,支护费用适中、施工效率高。

#### 2.2.2 锚网喷+锚索+注浆联合支护

在锚网喷+锚索联合支护的基础上,增加注浆支护。通过向破碎围岩裂隙中注入水泥浆、化学浆等注浆材料,胶结破碎岩体,提高围岩完整性及抗压强度,形成“支护-围岩”共同承载体系。该技术适合于中~强破碎围岩、裂隙发育但透水性较弱的巷道,尤其适合高地应力破碎围岩巷道,支护效果好,但是施工工序复杂,成本高。

#### 2.2.3 锚网喷+U型钢棚联合支护

以U型钢棚做主要承载结构,锚网喷做辅助支护。U型钢棚具有强度高、韧性好等特点,可以承受较大的围岩压力,适合于极破碎围岩、顶板易坍塌的巷道;锚网喷可以填充围岩和棚体之间的空隙,传递部分围岩应力,减小棚体局部受力集中。该技术施工难度小、支护强度大,但材料用量大、支护成本高,对围岩长期蠕变控制效果差<sup>[3]</sup>。

## 3 破碎围岩巷道联合支护技术适应性评价体系构建

### 3.1 评价指标选取原则

为保证适应性评价的科学性、合理性以及可操作性,

在选取评价指标时要遵循如下原则:一是针对性原则,评价指标要紧密结合破碎围岩地质特征和联合支护技术特点,能准确反映技术适应性的核心影响因素;二是系统性原则,指标体系要包含地质条件、技术参数、支护效果、经济性等各方面,全面评价技术适应性;三是可量化原则,尽量选择可以直接测量或者计算的指标,减少主观评价误差;四是实用性原则,指标获取难度适中,数据可以通过现场监测、室内试验等方式获取。

### 3.2 评价指标体系构建

按照上述原则构建三级评价指标体系,目标层为联合支护技术适应性等级;准则层为地质条件适应性、技术可行性、支护效果有效性、经济性四个维度;指标层共选取12个具体的指标,具体如下:

地质条件适应性准则层:该准则层反映联合支护技术与破碎围岩地质条件的匹配程度,选择岩体完整性系数、围岩抗压强度、地质构造发育程度<sup>[4]</sup>、裂隙水发育程度这4个指标。岩体完整性系数、围岩抗压强度直接决定围岩的承载能力,是判断支护技术适用范围的主要指标;地质构造发育程度、裂隙水发育程度反映不良地质条件对支护技术的干扰程度。

技术可行性准则层:该准则层评价联合支护技术在施工过程中是否可行,选择施工工序复杂度、施工设备适配性、施工人员技术要求3个指标。施工工序复杂度影响施工效率,施工设备适配性反映现有施工设备能否满足技术实施要求,施工人员技术要求关系到支护施工质量。

支护效果有效性准则层:该准则层是评价联合支护技术适应性的核心,选取围岩最大变形量、支护结构应力、围岩稳定性持续时间3个指标。围岩最大变形量要控制在工程允许范围内,支护结构应力要小于其极限承载应力,围岩稳定性持续时间要满足巷道服务年限的要求。

经济性准则层:该准则层反映联合支护技术的工程经济性,选择单位长度支护成本、后期维护成本这两项指标。单位长度支护成本可以体现技术的初始投入;后期维护成本可以反映技术的长期经济性,两者结合起来可以决定技术的经济可行性。

### 3.3 评价指标权重确定

用层次分析法(AHP)来确定各个评价指标的权重,具体步骤如下:一是建立层次结构模型,确定目标层、准则层、指标层之间的隶属关系;二是构造判断矩阵,邀请地质工程、采矿工程领域专家,用1~9标度法对同一层次指标的重要性进行两两比较,得到判断矩阵;三是一致性检验,计算判断矩阵的最大特征值和一致性指标CI,若 $CI < 0.1$ ,则判断矩阵满足一致性要求,否则需要调整判断矩阵;四是计算指标权重,用特征向量法求解判断矩阵的特征向量,归一化后得到各指标权重。

经计算, 准则层各指标权重分别为: 地质条件适应性 0.42、支护效果有效性 0.35、技术可行性 0.13、经济性 0.10; 指标层中岩体完整性系数 (0.15)、围岩抗压强度 (0.12)、围岩最大变形量 (0.11)、支护结构应力 (0.10) 等指标权重较高, 是影响联合支护技术适应性的主要指标。

### 3.4 评价等级划分

根据工程实际情况, 将联合支护技术的适应性分为四个等级: I级(优秀)、II级(良好)、III级(一般)、IV级(较差)。各个等级的评价标准如下: I级(优秀), 各项指标均符合工程要求, 地质条件匹配度高, 支护效果好, 技术可行, 经济性好; II级(良好), 核心指标符合工程要求, 次要指标有轻微偏差, 地质条件匹配度较高, 支护效果较好, 技术可行, 经济性较好; III级(一般), 核心指标基本符合工程要求, 部分次要指标不符合, 地质条件匹配度一般, 支护效果一般, 技术基本可行, 经济性一般; IV级(较差), 核心指标不符合工程要求, 地质条件匹配度低, 支护效果差, 技术不可行或经济性极差<sup>[5]</sup>。

## 4 联合支护技术适应性评价模型与实例分析

### 4.1 评价模型构建

用模糊综合评价法建立联合支护技术适应性评价模型, 根据层次分析法确定的指标权重来实现对支护技术适应性的量化评价。具体步骤如下: 一是确定评价因素集和评价等级集, 评价因素集为指标层 12 个指标, 评价等级集为 I ~ IV 级; 二是建立模糊关系矩阵, 通过专家打分和现场监测数据统计, 得到各个指标对于不同评价等级的隶属度; 三是模糊综合评价计算, 将指标权重向量与模糊关系矩阵进行矩阵乘法运算, 得到综合评价结果; 四是确定适应性等级, 根据最大隶属度原则, 由综合评价结果确定联合支护技术的适应性等级。

### 4.2 工程实例分析

#### 4.2.1 工程背景

煤矿 3201 回采巷道埋深为 650m, 巷道断面尺寸为 4.5m × 3.2m (宽和高), 用综掘工艺掘进。巷道穿越断层破碎带<sup>[6]</sup>, 围岩以砂质页岩为主, 岩体完整性系数 0.18 ~ 0.25, 围岩抗压强度 15 ~ 22MPa, 裂隙发育, 有少量裂隙水, 属于中 ~ 强破碎围岩。为了保证巷道掘进的安全, 选择了锚网喷和锚索联合支护方案 1、锚网喷和锚索加注浆联合支护方案 2、锚网喷和 U 型钢棚联合支护方案 3 三种技术方案, 用适应性评价来确定最佳方案。

#### 4.2.2 评价数据获取

通过现场地质勘察获得地质条件相关指标数据; 通过室内试验和施工方案论证获得技术可行性相关指标数据; 通过数值模拟和现场试点监测获得支护效果相关指标数据; 通过工程量统计和成本核算获得经济性相关指标数据。组织 5 位专家给各指标打分, 根据监测数据得到各个指标

的隶属度。

#### 4.2.3 评价结果与分析

将各个方案的指标数据代入模糊综合评价模型中, 计算出综合评价结果: 方案 1 (锚网喷 + 锚索联合支护) 的综合评价向量为 [0.25, 0.30, 0.35, 0.10], 最大隶属度对应的等级为 III 级 (一般); 方案 2 (锚网喷 + 锚索 + 注浆联合支护) 的综合评价向量为 [0.65, 0.25, 0.10, 0], 最大隶属度对应的等级为 I 级 (优秀); 方案 3 (锚网喷 + U 型钢棚联合支护) 的综合评价向量为 [0.15, 0.40, 0.30, 0.15], 最大隶属度对应的等级为 II 级 (良好)。

分析结果表明: 方案 2 在中到强破碎围岩条件下适应性最好, 注浆技术可以有效地胶结破碎岩体, 提高围岩完整性, 结合锚网喷和锚索的协同作用, 实现了对围岩变形的有效控制; 方案 3 虽然支护强度高, 但是经济性差, 对围岩长期稳定性控制效果不如方案 2; 方案 1 由于没有考虑注浆加固, 不能适应中到强破碎围岩条件, 支护效果一般。现场应用方案 2 后巷道围岩最大变形量控制在 80mm 以内, 支护结构应力稳定, 未出现支护失效现象, 证明评价结果的科学性、可靠性。

## 5 结语

研究表明, 破碎围岩由于岩体松散、承载能力差等特性, 支护难度大, 联合支护技术通过多结构协同作用成为此类巷道支护的有效解决方案; 本文构建的含 4 个准则层、12 项指标的适应性评价体系及层次分析 - 模糊综合评价模型可以科学量化支护技术适配程度, 其中锚网喷 + 锚索 + 注浆技术在中到强破碎围岩中适应性最好。未来可以拓展智能实时监测指标, 用机器学习算法优化评价模型, 开展长期适应性跟踪研究, 结合新型高性能注浆材料和智能支护设备, 全面提高破碎围岩巷道支护的智能化、可靠性水平。

### 参考文献:

- [1] 赵国凯. 掘进巷道破碎围岩支护技术研究[J]. 现代矿业, 2024,40(12):44-47.
- [2] 徐亚洲. 巷道掘进过断层破碎带围岩支护技术研究[J]. 矿业装备, 2024,(11):28-30.
- [3] 王旭满. 掘进巷道破碎围岩联合支护设计及应用[J]. 机械管理开发, 2024,39(08):281-282+285.
- [4] 阎志晋. 掘进巷道过断层破碎区联合支护技术[J]. 机械管理开发, 2024,39(08):302-303+306.
- [5] 王凤翔. 掘进巷道过断层破碎带联合支护技术研究[J]. 山西化工, 2024,44(05):197-198.
- [6] 池安发. 巷道掘进过断层围岩控制技术研究[J]. 矿业装备, 2024,(03):64-66.

作者简介: 秦建银 (1986.04-), 男, 汉族, 河南省宝丰, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 煤矿开采。