

# 巷道帮锚索加强支护技术应用

孙家凯

贵州盘江精煤股份有限公司金佳矿

DOI：10.32629/jpm.v7i7.8997

**[摘 要]** 针对西南地区某矿某工作面运输顺槽在深部软岩条件下顶板下沉与两帮变形严重的工程难题，本文以 3 号煤层软岩巷道为研究对象，采用 FLAC<sup>3</sup>D 数值模拟方法，对比分析了原支护方案与帮锚索加强支护方案的围岩变形及应力分布特征。模拟结果表明：采用帮锚索加强支护后，顶板下沉量由 674.67 mm 降至 81.11 mm，降幅 87.98%；底鼓量由 91.22 mm 降至 32.43 mm，降幅 64.45%；左帮收缩量减少 452.96 mm（降幅 88%），右帮收缩量减少 450.79 mm（降幅 87.92%）。同时，两帮最大垂直应力由 16.43 MPa 提升至 17.10 MPa，顶底板最大水平应力由 22.89 MPa 提升至 23.49 MPa，应力集中范围明显缩小，围岩整体稳定性显著增强。研究证实，帮锚索加强支护能够充分调动残余煤体强度，有效控制软岩巷道的大变形破坏，为类似地质条件下的巷道支护优化提供了可靠的理论依据与工程参考。

**[关键词]** 支护设计；数值模拟；FLAC3D

## Application of Tunnel Side Anchor Cable Reinforced Support Technology

Sun Jiakai

Guizhou Panjiang Fine Coal Co., Ltd.

**[Abstract]** To address the engineering challenge posed by severe roof subsidence and significant side wall deformation in the transport roadway at a specific working face in a mine located in Southwest China under deep soft-rock conditions, this study takes the soft-rock tunnel in the No.3 coal seam as the research object. Using the FLAC<sup>3</sup>D numerical simulation method, this paper conducts a comparative analysis of the surrounding rock deformation and stress distribution characteristics between the original support scheme and the side anchor cable reinforced support scheme. The simulation results indicate that after implementing the side anchor cable reinforced support, the roof subsidence decreased from 674.67 mm to 81.11 mm, representing a reduction of 87.98%; the floor bulging decreased from 91.22 mm to 32.43 mm, representing a reduction of 64.45%; the left-side wall contraction decreased by 452.96 mm (a reduction of 88%), and the right-side wall contraction decreased by 450.79 mm (a reduction of 87.92%). Simultaneously, the maximum vertical stress on both sides increased from 16.43 MPa to 17.10 MPa, and the maximum horizontal stress on both the roof and floor increased from 22.89 MPa to 23.49 MPa; the stress concentration zone was significantly reduced, and the overall stability of the surrounding rock was markedly enhanced. This study confirms that side anchor cable reinforced support can fully utilize the strength of the residual coal mass and effectively control major deformation and failure in soft-rock tunnels, thereby providing a reliable theoretical basis and engineering reference for optimizing tunnel support in similar geological conditions.

**[Key words]** support design; numerical simulation; FLAC3D

### 1.引言

西南地区某矿某工作面运输顺槽埋深约 520 m，直接顶为泥岩，直接底为砂质泥岩，属于典型的深部软岩巷道。这类地质条件下，围岩强度低、节理裂隙发育，受采动应力与邻近采

空区侧向支撑压力的叠加影响，巷道开挖后围岩变形剧烈，顶板下沉、两帮收缩和底鼓现象尤为突出，严重威胁矿井安全生产。该工作面采用走向长壁后退式综采放顶煤工艺，共设 6 条巷道，巷道分布复杂，且受西部采区措施巷采空区与东部 540

皮带大巷的侧向压力共同作用，超前区域压力极大，原有支护方案虽采用螺纹钢锚杆与锚索联合支护，但因未充分考虑软岩的流变特性和应力叠加效应，未能有效遏制围岩的持续大变形，导致巷道返修频繁，不仅增加成本，更制约了工作面的正常接续与高效回采。

针对上述问题，国内外学者在软岩巷道支护方面开展了大量研究，提出了高预紧力锚杆、锚注加固、桁架锚索等多项技术，但在本矿特定地质条件下，如何经济有效地强化帮部支护、改善整体受力状态，仍是亟待解决的关键课题。帮部作为巷道承载结构的重要部分，其稳定性直接影响顶底板变形程度。若仅加强顶板支护而忽视帮部控制，则帮部煤体过早破坏将削弱对顶板的侧向支撑，加剧顶板离层与下沉。因此，本文提出在原有支护基础上增设帮锚索加强支护方案，通过“2-1-2”非等强梯次布置方式，旨在将锚索锚固于深部稳定岩层，调动帮部深部煤岩体残余强度，形成顶-帮协同承载体系。为此，本文基于实际地质条件，运用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件建立三维模

型，系统对比原有支护与帮锚索加强支护两种方案下的围岩垂直位移、水平位移、垂直应力及水平应力分布特征，定量评价加强支护效果，以期为该矿及类似深部软岩巷道的支护优化提供科学决策依据和工程实践指导。

## 2. 工程概况

西南地区某矿某工作面布置紧凑，东部 540 皮带大巷，北部回采工作面，西部采区措施巷，南部设计工作面，开采衔接较为紧密且与未来矿井开采关系密切。该工作面埋深约 520m，主要开采 3 号煤层，煤层总厚度为 6.41m，采高为 3.3m，顶煤平均厚度为 3.11m，采用走向长壁、后退式综合机械化低位放顶煤一次采全高全部垮落采煤法，采用端部割三角煤斜切进刀，进刀距离 45m。该工作面采用“Y 型+高抽巷”通风及巷道布置模式，共设 6 条巷道，其中运输顺槽、进风巷一（沿空留巷复用）、进风巷二、辅助运输巷为进风通道，尾巷为回风通道，巷道分布情况复杂且属于软岩巷道。具体工作面煤层及顶底板情况见表 1。

表格 1 工作面煤层及顶底板情况表

| 围岩名称 | 岩性   | 厚度                           | 岩性描述                                              |
|------|------|------------------------------|---------------------------------------------------|
| 老顶   | 中粒砂岩 | 18.40~18.84                  | 灰色中厚煤层状，长石石英为主，含白云母，层面黑色，见煤粉，水平层理。                |
|      |      | 18.62                        |                                                   |
| 直接顶  | 泥岩   | 1.65~3.59                    | 黑色，块状，层面见丰富的植物化石及煤粉，断口平坦，中厚层状，泥质结构，中夹煤线，有明显的植物化石。 |
|      | 煤    | 2.75 (0.15) 1.75 (0.20) 1.56 |                                                   |
| 直接底  | 砂质泥岩 | 0.54~1.80                    | 黑色，块状，具滑面，断口不平。                                   |
|      |      | 1.17                         |                                                   |
| 老底   | 粉砂岩  | 0.76~1.2                     | 灰黑色，块状，层面见白云母碎片，粉粒结构，钙质胶结，中夹薄煤层，有植物化石。            |
|      |      | 0.98                         |                                                   |

## 3. 支护方案设计

西南地区某矿某工作面受西部采区措施巷采空区和东部 540 皮带大巷侧向支承压力影响，巷道两帮变形严重。当该工作面低位放顶煤综采工作面回采时，本工作面超前支承压力以及邻近采空区侧向支承压力的叠加影响，变形破坏更为严重，影响矿井安全高效生产。为此拟对西南地区某矿某工作面进行巷道的帮部锚索加强支护，减少工作面巷道两帮变形程度和减小综采工作面超前区域压力，促进煤矿安全生产。

方案一：顶锚杆选用  $\Phi 22.00 \times 2400\text{mm}$  的螺纹钢，间排距设定为  $900 \times 800\text{mm}$ ；顶锚索采用  $\Phi 22.00 \times 9300\text{mm}$  的螺纹钢，锚索采用 2-3-2 布置。帮锚杆选用  $\Phi 22 \times 2000\text{mm}$  的螺纹钢，间排距为  $900 \times 1000\text{mm}$ 。

方案二：顶锚杆选用  $\Phi 22.00 \times 2400\text{mm}$  的螺纹钢，间排距设定为  $900 \times 800\text{mm}$ ；顶锚索采用  $\Phi 22.00 \times 9300\text{mm}$  的螺纹钢，锚索采用 2-3-2 布置。帮锚杆规格和间排距与方案一相同，帮锚索采用  $\Phi 22.00 \times 5000\text{mm}$  的螺纹钢，间排距为  $900 \times 800\text{mm}$ ，按照“2-1-2”方式布置。

## 4. 软岩巷道帮部锚索加强支护效果分析

### 4.1. 建立模型

根据该工作面地质条件和顶底板岩层情况，运用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件构建数值模型，模拟上覆岩层自重应力边界与初始地应力条件。模型长 66m，宽 50m，高 100m，共划分 180,000

个单元，189,771 个节点；模型前后、左右限制水平移动，底部为固定边界，上部为自由边界并施加 11.5MPa 均布荷载，重力加速度设置为  $10\text{m/s}^2$ ，初始应力条件为水平应力 15.6MPa、垂直应力 13MPa，侧压系数 1.2。具体模型示意图见图 1。

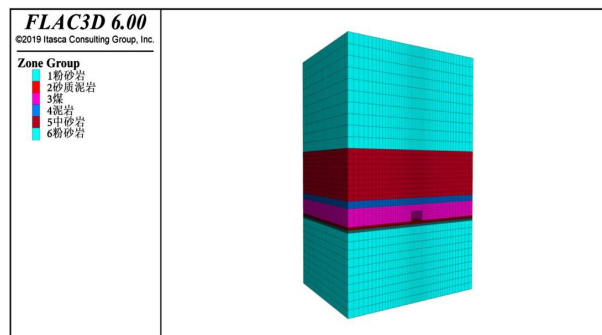


图 1 数值模拟计算

### 4.2. 模拟方案

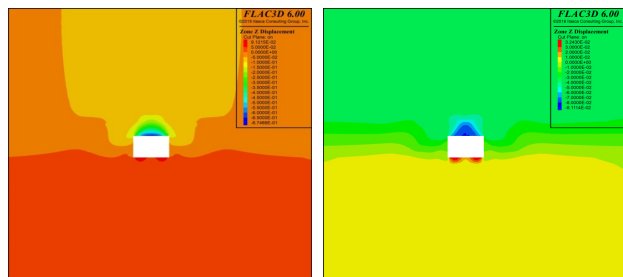
为有效控制该工作面进风巷围岩变形情况，在原支护方式的基础上进行帮锚索加强支护。为了解帮锚索加强支护的效果，根据现实地质情况结合数值模拟软件对两种支护方式进行数值模拟分析。

### 4.3. 模拟结果分析

#### 4.3.1. 垂直位移对比分析

图 2 为两种支护方式的垂直位移云图，在原支护方式下顶

板下沉 674.67mm, 底鼓 91.22mm; 帮锚索加强支护方式下顶板下沉 81.11mm, 底鼓 32.43mm, 两种支护方式顶板与底鼓变形状况均呈现对称分布。通过对比可以发现, 顶板下沉量减少了 593.56mm, 减少了 87.98%; 底鼓减少了 58.79mm, 减少了 64.45%。帮部加强支护后, 充分发挥其对顶板的支撑作用, 减弱了顶板离层破坏, 保障了巷道的整体稳定。在原支护方式下巷道顶板和底板变形严重, 在经过帮锚索加强支护后, 巷道顶板和底板变形情况得到了巨大改善, 帮锚索加强支护对于控制巷道顶板和底板变形有显著效果。

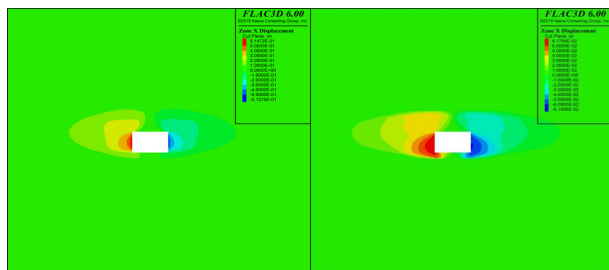


(a) 方案一 (b) 方案二

图2 两种支护条件下围岩垂直位移图

#### 4.3.2. 水平位移对比分析

图3为两种支护方式的水平位移云图, 在原支护方式下左帮收缩 514.72mm, 右帮收缩 512.75mm; 帮锚索加强支护方式下左帮收缩 61.76mm, 右帮收缩 61.96mm。通过对比发现, 左帮收缩量减少了 452.96mm, 收缩了 88%, 右帮收缩量减少了 450.79mm, 收缩了 87.92%。两种支护方式两帮变形都呈现对称分布。由此可见在帮锚索加强支护后, 帮部煤体结构得到了稳定, 调动了残余煤体强度, 发挥其支承作用, 有效控制了帮部变形。



(a) 方案一 (b) 方案二

图3 两种支护条件下围岩水平位移图

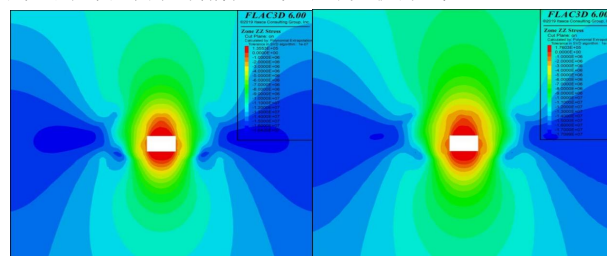
#### 4.3.3. 垂直应力对比分析

图4是两种支护方式的垂直应力分布图, 在原支护方式下两帮最大垂直应力为 16.43MPa, 在帮锚索加强支护方式下两帮最大垂直应力为 17.10MPa, 通过对比可以发现两种支护方式的垂直应力都呈现对称分布, 并且垂直应力集中区都在两帮深处, 在最大垂直应力区帮锚索加强支护方式收缩范围小于原支护方式, 巷道附近垂直应力呈现递减规律, 这说明在两帮深处由锚杆和锚索共同发挥支护作用, 帮锚索加强支护方式充分调动煤体残余强度, 由此可见帮锚索加强支护方式对于两帮的控制效果明显优于原支护方式。

#### 4.3.4. 水平应力对比分析

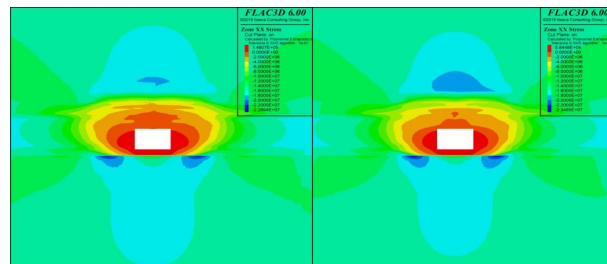
图5是两种支护方式的水平应力分布图, 在原支护方式下顶底板最大水平应力为 22.89MPa, 帮锚索加强支护方式下顶底

板最大水平应力为 23.49MPa。通过对比分析可以发现两种支护方式水平应力都呈现对称分布, 并且应力集中区均在巷道下方两角附近。帮锚索加强支护方式的应力控制范围明显小于原支护方式, 底板区域没有明显变化, 这是因为针对于该巷道的支护并没有考虑底板, 通过以上分析可以发现非等强支护方式在两帮的水平应力控制情况上优于原支护方式。



(a) 方案一 (b) 方案二

图4 两种支护条件下围岩垂直应力图



(a) 方案一 (b) 方案二

图5 两种支护条件下围岩水平应力图

## 5. 结论

本文通过 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟, 系统对比了原有支护方案与帮锚索加强支护方案在深部软岩巷道中的控制效果。模拟结果充分表明, 帮锚索加强支护显著降低了顶板下沉、底鼓及两帮收缩量, 降幅均超过 60%, 其中顶板下沉降幅达 87.98%, 两帮收缩降幅约 88%。同时, 该支护方式使帮部最大垂直应力和顶底板最大水平应力有所提升, 应力集中范围收窄, 表明锚索与锚杆共同作用可有效调动深部煤体强度, 优化围岩受力状态, 从而遏制变形恶性发展。本研究验证了帮锚索加强支护在该矿软岩巷道中的适用性和优越性, 为工程现场支护参数调整提供了量化依据。后续工作中, 可结合现场矿压监测数据进行反馈修正, 并进一步探索锚索预应力优化及注浆加固的联合应用, 以形成更为完善的深部软岩巷道综合控制技术体系。

## [参考文献]

- [1] 乔斌. 杜儿坪矿软岩巷道底鼓机理研究与控制技术[J]. 江西煤炭科技, 2026, (3): 72-74+78.
- [2] 李飞飞. 深部高应力软岩巷道围岩变形机理及控制技术研究[J]. 煤炭技术, 2026, 45(8): 22-28.
- [3] 吴向斌, 闻海坡, 马世福, 等. 极软岩高构造应力巷道大变形机理及刚性支护实践[J]. 煤炭技术, 2026, 45(8): 1-6.
- [4] 周晓鹏, 郭清虎, 房博. 深部软岩巷道底鼓原因分析及综合治理技术[J]. 煤炭技术, 2026, 45(8): 93-97.
- [5] 陈其中, 涂家瑜, 赵福坤, 等. 临近断层布置的软岩巷道围岩综合控制技术研究[J]. 煤, 2026, 35(7): 4-8.