

# 软弱复合顶板下迎采巷道煤柱宽度优化及围岩控制研究

刘睿

中煤华晋集团韩咀煤业有限公司

DOI : 10.32629/jpm.v7i5.8888

**[摘要]** 针对软弱复合顶板下迎采扰动巷道围岩控制难题,以韩咀矿 32205 工作面为背景,采用 FLAC<sup>3</sup> D 模拟 8m、10m 及 15m 三种煤柱宽度,从应力和弹性应变能双维度分析全周期演化规律。结果表明:10m 煤柱应力与能量集中程度最高(峰值 32.6MPa, 178.6kJ/m<sup>3</sup>),冲击风险最大;15m 次之(28.5MPa, 152.3kJ/m<sup>3</sup>);8m 煤柱呈“屈服承载”特性(峰值 24.5MPa, 108.3kJ/m<sup>3</sup>, 滞后降至 15.1MPa、38.7kJ/m<sup>3</sup>),安全性最佳。结合软弱顶板特点,提出以 8m 窄煤柱为基础的协同支护方案。研究结果为类似条件迎采巷道煤柱留设与支护设计提供了理论依据。

**[关键词]** 软弱复合顶板;迎采巷道;煤柱宽度;能量演化;围岩控制

## Research on Optimization of Coal Pillar Width and Surrounding Rock Control in Mining Roadways Under Soft Composite Roofes

Liu Rui

Hanju Coal Industry Co., Ltd., Zhongmei Huajin Group

**[Abstract]** Addressing the challenges of surrounding rock control in mining roadways under soft composite roofs, this study was conducted at the 32205 working face of Hanju Mine. Using FLAC<sup>3</sup> D software, three coal pillar widths (8 m, 10 m, and 15 m) were simulated to analyze full-cycle evolution patterns from both stress and elastic strain energy perspectives. Results indicate: 10 m pillars exhibit the highest stress and energy concentration (peak values: 32.6 MPa, 178.6 kJ/m<sup>3</sup>), posing the greatest impact risk; 15 m pillars follow closely (28.5 MPa, 152.3 kJ/m<sup>3</sup>); while 8 m pillars demonstrate "yield-bearing" characteristics (peak values: 24.5 MPa, 108.3 kJ/m<sup>3</sup>, gradually decreasing to 15.1 MPa and 38.7 kJ/m<sup>3</sup>), offering optimal safety performance. Based on these findings and the specific properties of soft roofs, a collaborative support system employing 8 m narrow pillars is recommended. The study provides a theoretical foundation for coal pillar configuration and support design in similar mining roadways.

**[Key words]** weak composite roof; mining access roadway; coal pillar width; energy evolution; rock mass control

### 1 引言

深部开采特有的“三高一扰动”环境使巷道围岩控制面临严峻挑战<sup>[1]</sup>。厚煤层综放开采中,为最大限度回收资源并缓解采掘接替紧张,采用小煤柱护巷及“迎采对掘”(一侧工作面回采同时相邻巷道掘进)的布置方式日益普遍<sup>[2-3]</sup>。然而,深部高应力与采动扰动的叠加效应,常导致沿空巷道出现剧烈变形、顶板破碎、支护体失效等灾害<sup>[4]</sup>。

区段煤柱宽度是决定迎采巷道稳定性的核心参数。合理宽度既能有效隔绝采空区,又能承受上覆岩层载荷并转移高应力;过宽浪费资源,过窄导致失稳<sup>[5]</sup>。国内外学者对此进行了

大量研究<sup>[6-8]</sup>,但存在以下不足:第一,多数研究针对完整顶板,对软弱复合顶板(直接顶为厚层泥岩、节理发育、自稳能力差)下迎采巷道的煤柱宽度效应关注不足,软弱顶板会显著改变应力传递路径和破坏模式;第二,评价指标多集中于应力场,缺乏从能量学角度量化围岩积聚与释放潜能,难以揭示冲击地压的内在动力机制;第三,对迎采全过程(掘进、迎采交汇、滞后)的系统性动态模拟不足。

本文以 32205 工作面为背景,融合应力与能量双指标,揭示不同宽度煤柱在迎采全过程中的应力-能量动态演化规律,优化煤柱宽度并提出针对性支护方案。

## 2 工程概况

韩咀煤矿主采 2#煤层，32203 工作面正在回采，相邻的 32205 综放工作面正在掘进巷道。32205 工作面可采走向长 1100m，倾斜长 300m。2#煤厚度 6.39~7.82m（平均 6.88m），属厚煤层，采用综采放顶煤工艺。煤层倾角 0°~13°（平均 8°），为近水平至缓倾斜煤层。直接顶为深灰色泥岩，厚 1.83~3m（平均 2.43m），岩性软弱、节理发育、自稳能力差，属典型破碎顶板；老顶为 K8 中细砂岩，厚 2.73~8.4m（平均 6.88m）；直接底为泥岩（平均 3.29m），遇水易软化；老底为粉砂岩（平均 4.43m）。工作面埋深约 480m，地应力实测最大主应力 18~22MPa，侧压系数 1.1~1.3。

表1 煤与岩石的力学参数

煤岩层	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	粘聚力/MPa	体积模量/GPa	剪切模量/GPa
K8 中粒砂岩（老顶）	2.54	1.89	36.35	1.72	10.85	8.14
泥岩（直接顶底）	2.56	1.27	26.58	1.83	6.08	3.47
2#煤	1.35	0.63	41.17	2.54	1.40	0.54
粉砂岩（老底）	2.57	1.56	35.37	1.68	6.25	3.56

### 3.2 能量概念

从能量角度分析岩石破坏是揭示深部工程失稳机理的有效途径。假设岩体单元在外力作用下发生变形，且该过程与外界无热交换，则外力功输入的总能量 U 满足能量守恒：

$$U = U_d + U_e \quad (1)$$

式中：U<sub>d</sub> 为单元耗散能，主要用于内部损伤和塑性变形；U<sub>e</sub> 为单元储存的可释放弹性应变能，是发生突发性破坏（如冲击地压）的内在动力来源。U<sub>e</sub> 可根据弹性理论由主应力计算：

$$U_e = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (2)$$

式中：σ<sub>1</sub>，σ<sub>2</sub>，σ<sub>3</sub> 分别为第一、第二、第三主应力 (MPa)，E 为弹性模量 (MPa)，μ 为泊松比。

原采用 8m 煤柱，但在迎采影响期间暴露严重问题：顶板破碎、两帮移近量大、底鼓明显，常规锚网索支护难以有效控制，多次返修。分析认为软弱复合顶板是支护失效的关键因素，亟需优化煤柱宽度并设计匹配支护方案。

## 3 数值模拟方案

### 3.1 模型建立

采用 FLAC<sup>3D</sup> 建立三维模型，尺寸 200m×250m×100m。上边界施加 12.5MPa 垂直应力（埋深 480m，平均密度 2600kg/m<sup>3</sup>），底部固定垂直位移，四周边界固定水平位移，侧压系数 1.2。采用摩尔-库仑本构模型，直接顶泥岩采用应变软化模型。岩层力学参数通过室内试验及工程类比确定，见表 1。

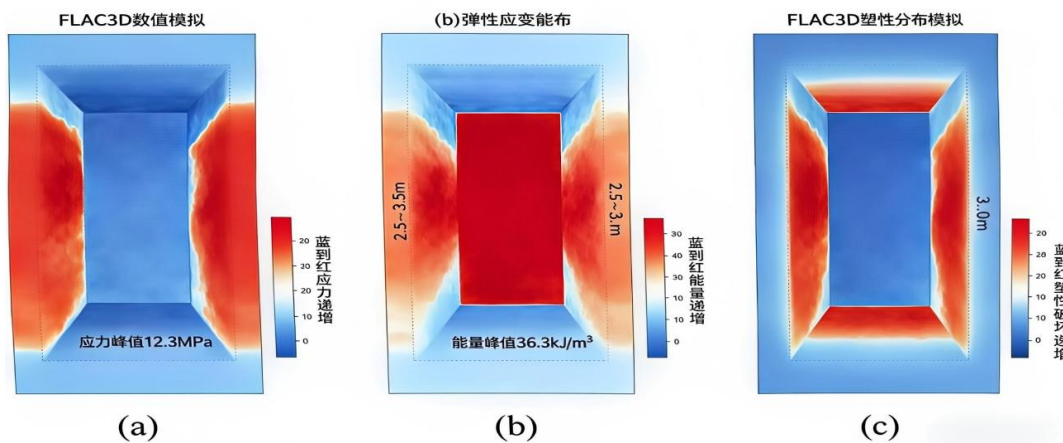
则模型中第 i 个单元体的总弹性应变能 W 为：

$$W = U_{ei} V_{ei} \quad (3)$$

式中：U<sub>ei</sub> 为第 i 个单元体的弹性应变能密度 (kJ/m<sup>3</sup>)；V<sub>ei</sub> 为第 i 个单元体的体积 (m<sup>3</sup>)。

### 3.3 初始掘进阶段围岩响应特征

首先模拟 32205 辅运顺槽掘进完成后的围岩状态（图 1）。结果显示：应力场中巷道顶底板出现卸压区，应力向两帮深部转移，峰值约 12.3MPa；能量场中高弹性应变能集中于两帮 2.5~3.5m 范围，峰值约 36.3kJ/m<sup>3</sup>；塑性区两帮深度约 3.0m，顶板受软弱泥岩影响破坏深度约 2.0m，呈“门”字形，验证了软弱顶板自稳能力差的特征。



垂直应力分布云图

弹性应变能密度分布云图

塑性区分布图

图1 巷道掘进期间应力、能量、塑性区分布云图

## 4 迎采对掘全周期煤柱应力-能量演化规律

### 4.1 模拟方案

为确定最优煤柱宽度，模拟并对比了 8m、10m 和 15m 三种宽度方案。8m 代表窄煤柱，10m 代表中等宽度，15m 代表较宽

煤柱。模拟过程完整再现“32203 工作面开始回采 → 32205 辅运顺槽掘进 → 掘进与回采迎头相遇（迎采交汇）→ 工作面继续推进至超过掘进迎头（滞后阶段）”的全生命周期。如图 2 所示。

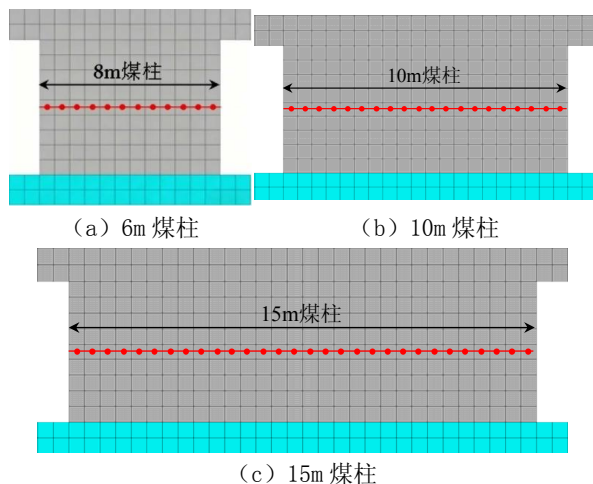


图2 不同方案测线布置

#### 4.2 应力场演化规律

当煤柱宽度为 8m 时, 应力呈“先升后降”单峰模式。超前 40m 峰值 18.2MPa; 迎采交汇时升至 24.5MPa; 滞后 20m 降至 15.1MPa, 滞后 60m 后稳定在 14~15MPa, 煤柱进入屈服稳定状态, 能够有效承载但未发生剧烈应力集中。

当煤柱宽度为 10m 时, 应力持续攀升, 未出现下降。超前 40m 18.3MPa; 交汇 23.8MPa; 滞后 60m 急剧增至 32.6MPa (较掘进后增加 78%), 曲线呈尖锐“单峰”, 峰值位于煤柱中部。表明 10m 煤柱恰好处于支承压力峰值区, 承受极大压缩载荷, 长期高应力状态易失稳。

当煤柱宽度为 15m 时, 应力呈“双峰”演化。交汇时 24.1MPa; 滞后 60m 采空区侧峰值 28.5MPa, 巷道侧 21.2MPa, 比 10m 峰值降低 12.6%, 但巷道仍处于应力升高区, 稳定性受采动影响。

#### 4.3 能量场演化规律

能量演化与应力场具有高度一致性, 但能更直接地反映破坏风险。

8m 煤柱时: 能量“先升后降”。超前 40m 46.5kJ/m<sup>3</sup>; 交汇 108.3kJ/m<sup>3</sup>; 滞后 20m 降至 52.6kJ/m<sup>3</sup>, 60m 进一步降至 38.7kJ/m<sup>3</sup> (低于掘进后水平)。能量集中于距巷帮 2~3m 范围, 未形成大范围高能聚集区, 储能水平低, 冲击危险性小。

10m 煤柱时: 能量持续累积, 呈“能量陷阱”。超前 40m 46.5kJ/m<sup>3</sup>; 交汇 112.4kJ/m<sup>3</sup>; 滞后 60m 急剧攀升至 178.6kJ/m<sup>3</sup> (增加 290%), 高能区覆盖煤柱大部分区域。如此高的能量聚集意味着任何微小扰动都可能触发能量突然释放, 导致煤爆或小型冲击地压, 风险极高。

15m 煤柱时: 能量“双峰”分布。滞后 60m 采空区侧峰值 152.3kJ/m<sup>3</sup>, 巷道侧 98.5kJ/m<sup>3</sup>, 比 10m 降低 14.7%, 但仍处于较高水平, 巷道围岩储存了较多弹性能。

#### 4.4 煤柱宽度效应综合分析

8m 煤柱 (屈服煤柱): 主动让压, 使高应力和高能量向深部转移, 煤柱进入屈服状态但仍保持完整性, 巷道处于低应力区, 安全度高。10m 煤柱 (危险煤柱): 恰好位于支承压力峰值区, 应力与能量聚集程度最高, 煤柱处于“强压-储能”状

态, 冲击失稳风险显著, 安全性最差。15m 煤柱 (高应力煤柱): 能够部分缓解应力集中, 但巷道仍处于应力升高区, 能量水平较高, 且造成资源浪费, 安全性介于两者之间。因此, 8m 为最优煤柱宽度, 其“屈服承载”特性完美适应深部软弱顶板的让压需求。

### 5 结论

(1) 揭示了 8m、10m、15m 三种煤柱宽度下围岩应力与能量的全周期演化规律。10m 煤柱最危险 (峰值应力 32.6MPa, 能量 178.6kJ/m<sup>3</sup>), 15m 次之 (28.5MPa, 152.3kJ/m<sup>3</sup>), 8m 最佳 (峰值 24.5MPa, 108.3kJ/m<sup>3</sup>; 滞后阶段降至 15.1MPa, 38.7kJ/m<sup>3</sup>)。

(2) 基于应力-能量双指标的安全性排序: 8m > 15m > 10m。确定 8m 为最优煤柱宽度, 此时煤柱呈“屈服承载”状态, 能够有效转移高应力和释放弹性能, 避免强烈能量聚集。

(3) 针对 8m 煤柱及软弱复合顶板条件, 建议采用“高预紧力锚杆索+及时封闭+底角控制”协同支护方案。模拟验证表明, 该方案可显著减小围岩变形 (顶板下沉量降低 72.8%, 两帮移近量降低 75.3%), 控制塑性区扩展, 保障巷道长期稳定。

#### [参考文献]

- [1]谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究及探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.
  - [2]丁向勇, 马振宇, 王燕妮. 迎采动沿空掘巷围岩控制技术解决方案研究[J]. 矿产勘查, 2022, 13(06): 813-818.
  - [3]丁晨, 刘龙河. 沿空掘巷窄煤柱稳定性影响因素分析及工程应用研究[J]. 煤, 2025, 34(04): 64-69.
  - [4]徐旻. 厚煤层综放工作面沿空掘巷窄煤柱合理尺寸分析[J]. 煤, 2024, 33(05): 97-101.
  - [5]于洋, 王襄禹, 薛广哲, 等. 迎采动工作面沿空掘巷动态分段围岩控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(7): 43-46+50.
  - [6]陈定超, 王襄禹, 吴帅, 等. 柔模混凝土墙沿空留巷围岩稳定机理及控制技术研究 (英文) [J]. Journal of Central South University, 2023, 30(9): 2966-2982.
  - [7]陈定超, 王襄禹, 赵祥岍, 等. 构造应力影响下大断面巷道围岩灾变机理及稳定控制研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(3): 15-19+25.
  - [8]郑文翔, 庄志鹏, 郭帅, 等. 大采高大断面迎采沿空巷道窄煤柱宽度研究[J]. 太原理工大学学报, 2023, 54(3): 466-472.
  - [9]仇奎凯, 刘景飞, 何欣. 迎采动掘进巷道留设合理煤柱宽度研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(4): 44-47.
  - [10]郝长胜, 赵冉, 朱欣鹏. 迎采动面沿空掘巷窄煤柱合理宽度研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(7): 1-3.
- 作者简介: 刘睿, 1990年10月27日, 汉族, 山西岚县人, 研究方向: 采矿工程。