

# 软弱复合顶板下沿空留巷工作面采动应力演化与覆岩破坏规律研究

DOI:10.32629/jpm.v7i6.8939

张小飞

中煤华晋集团韩咀煤业有限公司

**[摘要]** 针对软弱复合顶板下沿空留巷工作面采动应力复杂、覆岩破坏剧烈等问题,以韩咀煤矿 32205 综放工作面为背景,采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟,研究了应力分布及覆岩塑性破坏演化规律。结果表明:软弱复合顶板显著改变应力传递路径,沿空留巷侧应力峰值(21.5MPa)低于实体煤侧(24.2MPa),但影响范围更大;超前支承压力峰值位于煤壁前方 8~12m,峰值 32.6MPa,初次来压步距约 52m;覆岩最大塑性破坏高度达 53m,破坏速度呈“先快后稳”趋势。研究为类似条件沿空留巷支护设计提供了理论依据。

**[关键词]** 软弱复合顶板;沿空留巷;采动应力;覆岩破坏;数值模拟

## Research on the Evolution of Mining Stress and Rock Failure Patterns in Working Faces Under Soft Composite Roof Edges with Retained Goes

Zhang Xiaofei

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

**[Abstract]** Addressing challenges such as complex stress distribution and severe rock failure at working faces under soft composite roof edges with retained goes, this study employed FLAC<sup>3D</sup> numerical simulation on the 32205 fully mechanized mining face at Hanju Coal Mine to investigate stress distribution patterns and plastic failure mechanisms of overlying rocks. Results demonstrate that the soft composite roof significantly alters stress propagation paths: the peak stress along the go-side edge (21.5 MPa) is lower than that on the solid coal side (24.2 MPa), yet affects a broader area; the peak support pressure occurs 8 - 12 m ahead of the coal face at 32.6 MPa, with an initial pressure advance distance of approximately 52 m; maximum plastic failure height reaches 53 m, exhibiting a "initial rapid followed by steady" failure rate trend. This research provides a theoretical foundation for supporting design of similar go-side retaining systems.

**[Key words]** weak composite roof; underground roadway along the cavity; mining-induced stress; rock failure; numerical simulation

### 引言

随着浅部资源枯竭,深部开采围岩控制问题日益突出<sup>[1-2]</sup>。沿空留巷技术可实现无煤柱开采、提高资源回收率<sup>[3-4]</sup>。但当顶板为软弱复合顶板(直接顶为厚层泥岩、节理发育、自稳能力

差)时,沿空留巷围岩常出现顶板破碎、离层严重、大变形等难题<sup>[5-6]</sup>。现有研究多针对单一条件,对“软弱复合顶板+沿空留巷”双重复杂条件下的采动应力演化与覆岩破坏规律缺乏系统认识。本文以 32205 工作面为背景,采用 FLAC<sup>3D</sup> 模拟,揭示

软弱复合顶板对采动应力分布与覆岩破坏的调控机制，为类似条件安全开采提供理论依据。

## 1 矿井概况

韩咀煤矿 32205 综放工作面采用沿空留巷布置，可采走向长 1100m，倾斜长 300m。2#煤层厚度 6.39~7.82m，平均 6.88m，采高 3.2m，放煤厚度 3.68m，倾角 0°~13°。工作面埋深约 480m，最大主应力 19~24MPa，侧压系数 1.2。

软弱复合顶板特征：直接顶为深灰色泥岩，厚 1.83~3m（平均 2.43m），节理发育、自稳差；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。原支护下沿空留巷两帮移近量最大 420mm，底鼓 180mm。

## 2 数值模拟方案

采用 FLAC<sup>3D</sup> 建立三维模型，尺寸 250m×350m×100m。上边界施加 12.5MPa 垂直应力（埋深 480m），侧压系数 1.2。采用摩尔-库仑本构，直接顶泥岩采用应变软化模型。岩层参数见表 1。模拟步骤：①沿空留巷施工及充填体形成；②掘进两顺槽；③分步回采（20、40、52、80、100、120、140m）。

表 1 煤与岩石的力学参数

| 煤层层         | 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 软弱复合顶板下沿空留巷工作面应力分布特征

### 3.1 初始应力环境

沿空留巷施工后，沿空留巷侧向支承压力峰值位于距巷帮 8~10m，峰值 21.5MPa；实体煤侧峰值位于距煤壁 12~15m，峰值 24.2MPa。软弱复合顶板导致应力传递能力减弱，两侧峰值位置均比常规顶板前移 2~3m。直接顶泥岩已出现塑性区，深度 1.5~2.0m。

### 3.2 超前支承压力演化

推进 20m 时，超前支承压力峰值 17.8MPa（前方 5m）；40m 时升至 24.5MPa（前方 7m）；52m 时急剧增至 32.6MPa（前方 9m），老顶初次断裂，来压明显。软弱复合顶板下初次来压步距约 52m，比常规顶板缩短 3~8m。

推进 80m 后，沿空留巷侧超前支承压力峰值 30.2MPa（前方 10m），实体煤侧 32.6MPa（前方 9m）。实体煤侧应力集中程度更高，但沿空留巷侧高应力影响范围更大（约 45m vs 38m），表明软弱顶板下留巷围岩受采动影响更持久。

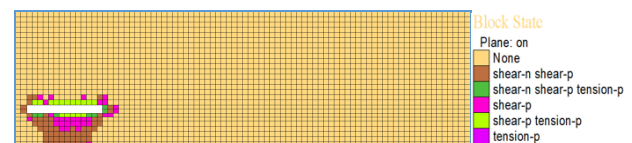
### 3.3 沿空留巷围岩应力演化

超前 30m 时，沿空留巷侧巷帮应力峰值 19.5MPa，实体煤侧 24.8MPa。滞后 30m 后，留巷进入卸压区，应力降至 12MPa 以下，但软弱顶板已塑性破坏，难以自稳。巷旁充填体在滞后 40m 时承受压力，内部应力峰值 18.5MPa，局部塑性区但整体稳定。

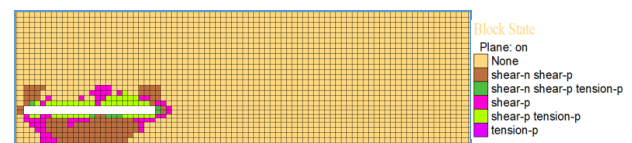
## 4 覆岩破坏规律分析

### 4.1 回采过程中覆岩破坏演化

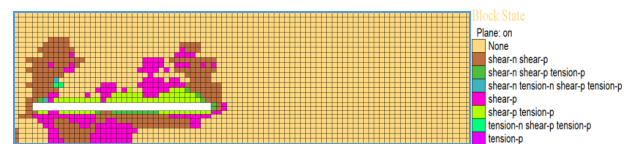
32205 工作面回采过程中，软弱复合顶板导致覆岩塑性破坏表现出“早期快速发展、后期趋于稳定”的特征。图 1 展示了不同推进距离下的覆岩破坏形态。



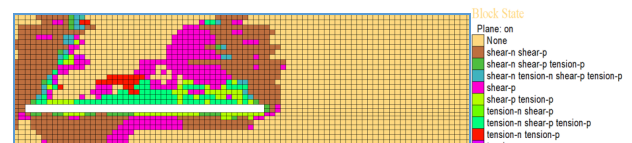
(a) 工作面推进 20m 时顶板破坏情况



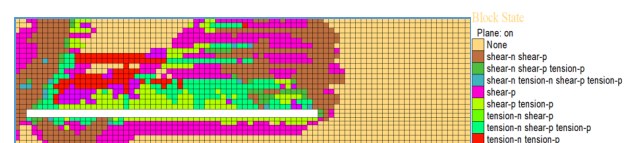
(b) 工作面推进 40m 时顶板破坏情况



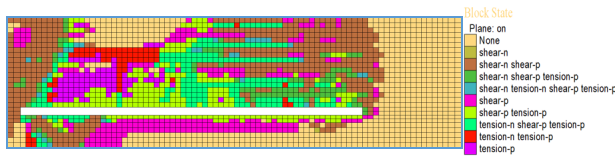
(c) 工作面推进 52m 时顶板破坏情况



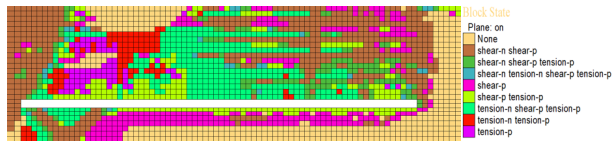
(d) 工作面推进 80m 时顶板破坏情况



(e) 工作面推进 100m 时顶板破坏情况



(f) 工作面推进 120m 时顶板破坏情况



(g) 工作面推进 140m 时顶板破坏情况

图1 工作面不同推进距离下的覆岩破坏形态

(a) 推进 20 m 时：直接顶泥岩出现离层和拉伸破坏，塑性破坏高度约 5m。

(b) 推进 40 m 时：直接顶完全垮落，破坏高度扩展至 10m，老顶底部出现拉伸破坏。

(c) 推进 52 m 时：老顶初次断裂，塑性破坏高度急剧增至 25m，工作面来压。

(d) 推进 80 m 时：破坏高度发育至 36m，出现多层离层。

(e) 推进 100 m 时：破坏高度达 46m。

(f) 推进 120 m 时：破坏高度稳定在 51m，沿空留巷侧局部达 53m，呈“马鞍形”。

(g) 推进 140 m 时：最大塑性破坏高度约 53m，裂隙带贯通。

#### 4.3 破坏机制分析

机制可归纳为：①直接顶泥岩强度低、节理发育，快速进入塑性并离层，失去对老顶的有效支撑，导致老顶暴露极限跨距减小，初次来压提前（约 52m）；②泥岩碎胀系数大（1.3~1.4），充填采空区改变上覆岩层运动边界，促使裂隙带向更高位置发展，最大破坏高度 53m；③沿空留巷侧巷旁充填体刚度小于实体煤，应力向实体煤侧转移，但软弱顶板横向传递能力弱，使得留巷侧顶板离层范围更大；④软弱顶板早期破坏释放部分能量，但也加速了老顶周期性破断，周期来压步距较短（约 10~15m）。

## 5 结论

(1) 软弱复合顶板导致侧向支承压力峰值位置前移 2~3m，沿空留巷侧应力峰值（21.5MPa）低于实体煤侧（24.2MPa），但留巷侧高应力影响范围更大（45m vs 38m）。

(2) 工作面超前支承压力峰值位于煤壁前方 8~12m，峰值 32.6MPa，初次来压步距约 52m，比常规顶板缩短 3~8m。覆岩最大塑性破坏高度达 53m，破坏速度呈“先快后稳”趋势。

(3) 软弱复合顶板下沿空留巷围岩控制应重点关注：①提高直接顶泥岩的早期支护强度，防止离层扩展；②巷旁充填

体需具备足够早期承载能力；③建议采用“高预紧力长锚索+钢筋网+喷浆”联合支护，控制推进速度不超过 4m/d。

## [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] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [3] 丁向勇, 马振宇, 王燕妮. 迎采动沿空掘巷围岩控制技术方案的[J]. 矿产勘查, 2022, 13(06): 813-818.
- [4] 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.
- [5] 郑元明. 大断面极软弱厚顶板巷道锚杆支护技术[J]. 煤炭科技, 2011, (04): 82-84.
- [6] 郑文翔, 褚占福, 郭帅, 等. 复合顶板巷道围岩控制技术研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44(09): 1-7.
- [7] 康红普. 煤矿巷道锚杆支护技术现状与发展趋势[C]//中国水利水电地基与基础工程专业委员会, 中国岩石力学与工程学会锚固与注浆分会. 地基基础工程与锚固注浆技术: 2009 年地基基础工程与锚固注浆技术研讨会论文集. 煤炭科学研究总院开采设计研究分院, 2009: 165-172.
- [8] 张农, 韩昌良, 阚甲广, 等. 沿空留巷围岩控制理论与实践[J]. 煤炭学报, 2014, 39(08): 1635-1641.
- [9] 柏建彪, 刘家豪, 田志军, 等. 我国沿空留巷底鼓机理及控制技术研究进展与展望[J/OL]. 煤炭学报, 1-21[2026-04-19].
- [10] 郑建伟, 鞠文君, 吕大钊, 等. 顶板条带弱化防治中央大巷冲击地压机制及实践[J]. 煤炭学报, 2023, 48(03): 1169-1178.
- [11] 杨峰, 王连国, 贺安民, 等. 复合顶板的破坏机理与锚杆支护技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, (03): 286-289.
- [12] 仲崇岩, 吴永东, 刘鹏, 等. 软弱泥岩顶板回采巷道变形特征及控制技术[J]. 煤炭技术, 2026, 45(03): 44-51.
- [13] 窦林名, 周坤友, 宋士康, 等. 煤矿冲击矿压机理、监测预警及防控技术研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(04): 917-932.
- 作者简介：张小飞，1984 年 03 月 02 日，汉族，山西长治人，研究方向：煤矿开采技术。