

韩咀煤业综放工作面小煤柱宽度确定及支护设计

李现磊

中煤华晋集团韩咀煤业有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i9.9043

[摘要] 为减少煤炭资源浪费，提高煤炭回收率，并确保巷道围岩稳定，以中煤华晋集团韩咀煤业有限公司 32205 综放工作面为工程背景，开展护巷煤柱宽度的优化设计研究。综合运用理论计算法与 FLAC^{3D} 数值模拟法，分析了不同宽度煤柱下围岩塑性区分布与应力演化规律。结果表明，当煤柱宽度为 3m 时，内部塑性区完全贯通，承载能力丧失；宽度为 5m 时，弹性核区约 1.5m；宽度增至 7m 和 10m 时，弹性核区分别扩大至 4m 和 7m。综合考虑锚杆（索）锚固需求与围岩控制效果，确定最优煤柱宽度为 6m。在此基础上，提出了锚网索联合支护方案，现场监测显示，巷道顶底板最大移近量为 175.1mm，两帮最大移近量为 203.5mm，围岩变形得到有效控制。研究成果可为类似地质条件下综放工作面沿空掘巷煤柱留设提供参考。

[关键词] 综放工作面；小煤柱宽度；沿空掘巷；数值模拟；联合支护

Determination of Small Coal Pillar Width and Support Design for Fully Mechanized Mining Faces at Hanju Coal Mine

Li Xianlei

Zhongmei Huajin Group Hanju Coal Industry Co., Ltd.

[Abstract] To reduce coal resource waste, improve coal recovery rates, and ensure the stability of the surrounding rock in roadways, this study conducts an optimized design investigation on the width of coal pillars for roadway support, using the 32205 fully mechanized caving face of Hanju Coal Industry Co., Ltd., China Coal Huajin Group, as the engineering case. By integrating theoretical calculations with FLAC^{3D} numerical simulations, this study analyzes the distribution of plastic zones in the surrounding rock and the evolution of stress under coal pillar widths of varying sizes. The results indicate that when the coal pillar width is 3 m, the internal plastic zone becomes fully continuous, leading to a loss of load-bearing capacity; at a width of 5 m, the elastic core zone measures approximately 1.5 m; when the width increases to 7 m and 10 m, the elastic core zones expand to 4 m and 7 m, respectively. By comprehensively considering the anchoring requirements of bolts (or cables) and the control performance of the surrounding rock, the optimal coal pillar width was determined to be 6 m. Based on this finding, a combined support scheme utilizing bolts, mesh, and cables was proposed. Field monitoring results demonstrate that the maximum approach displacement of the roadway roof and floor is 175.1

mm, and the maximum approach displacement of both side walls is 203.5 mm, indicating that the deformation of the surrounding rock has been effectively controlled. This research provides a valuable reference for the design of coal pillar layouts in along-wayway mining operations under similar geological conditions.

[Key words] fully mechanized caving face; small coal pillar width; along-wayway mining; numerical simulation; combined support

1 引言

煤炭资源的高效回收是矿井可持续发展的核心。在综采（放）工作面，传统宽煤柱护巷方式导致大量煤炭资源滞留于煤柱中，降低了采区回采率^[1-3]。近年来，大量研究表明，合理缩减护巷煤柱宽度不仅可提高资源回收率，还能通过优化围岩应力分布改善巷道维护状况^[4,5]。科学合理的小煤柱宽度需综合考虑煤层赋存条件、围岩力学性质、开采扰动及支护方式等因素^[6]。

韩咀煤业有限公司主采 2 号煤层，为高瓦斯、自燃倾向性煤层，煤层厚度大、埋深较深，工作面采用综采放顶煤工艺。目前，工作面顺槽之间多采用 26m 宽的大煤柱，造成严重的资源浪费，且巷道变形控制效果并不理想。因此，如何在确保安全开采的前提下，确定合理的护巷煤柱宽度，并设计匹配的支护方案，成为本研究的核心目标。

本文以 32205 综放工作面为工程背景，采用极限平衡理论

计算与 FLAC^{3D} 数值模拟相结合的方法，对沿空掘巷小煤柱宽度进行优化，并提出锚网索联合支护设计，通过现场监测验证其有效性，以期类似条件工作面提供技术借鉴。

2 工作面概况

32205 综放工作面位于二盘区北部，北临 F1 断层，南临二盘区三条大巷，东临 32203 主运巷。工作面走向长度 1158m，倾向长度约 176m，采用综采放顶煤工艺，采高 3.0m，放煤高度约 3.88m，平均煤厚 6.88m。为减少资源损失，拟在 32205 工作面运输顺槽与相邻的 32203 工作面采空区之间留设小煤柱，进行沿空掘巷。

工作面主采 2 号煤层，直接顶为深灰色泥岩，平均厚度 2.43m，单轴抗压强度较低；老顶为 K8 中细砂岩，平均厚度 5.57m；直接底为泥岩或细粒砂岩，平均厚度 3.29m。煤层平均倾向约 5°，埋深约 400~484m。具体岩层力学参数见表 1。

表 1 32205 工作面顶底板岩层力学参数

岩性	厚度/m	弹性模量/GPa	内摩擦角/°	粘聚力/MPa	抗拉强度/MPa	密度/kg·m ⁻³
中细砂岩（K8）	5.57	12.5	38.0	8.5	3.2	2600
泥岩（直接顶）	2.43	4.2	32.0	4.0	1.0	2450
2 号煤层	6.88	2.8	28.0	1.8	0.6	1400
泥岩/细砂岩（底）	3.29	5.5	30.0	4.5	1.5	2500

3 小煤柱宽度理论计算

沿空掘巷护巷煤柱的合理宽度应使煤柱处于弹性承载状态，既能隔离采空区，又能保持自身稳定。根据极限平衡理论，煤柱宽度 B 可表示为：

$$B=x_1+x_2+x_3 \quad (1)$$

式中： x_1 ——上区段开采在煤柱中产生的塑性区宽度，m； x_2 ——锚杆锚入煤柱的有效深度，取 2.3m； x_3 ——安全系数，取 0.2（ x_1+x_2 ）。

塑性区宽度 x_1 按下式计算：

$$x_1 = \frac{mA}{2 \tan \phi_0} \ln \left[\frac{k \gamma H + \frac{C_0}{\tan \phi_0}}{\frac{C_0}{\tan \phi_0} + \frac{P_0}{A}} \right] \quad (2)$$

式中： m ——采高（取 3.0m）； A ——侧压系数， $A=\mu/(1$

$-\mu)$ ，泊松比 μ 取 0.25，得 $A=0.33$ ； ϕ_0 ——煤体内摩擦角，取 28°； C_0 ——煤体粘聚力，取 1.8MPa； H ——巷道埋深，取 442m（平均值）； k ——应力集中系数，取 2.0； γ ——岩层平均容重，取 25kN/m³； P_0 ——支护阻力，取 0。

代入计算得： $x_1 \approx 2.9m$ ， $x_2=2.3m$ ， $x_3=0.2 \times (2.9+2.3)=1.04m$ ，则理论煤柱宽度 $B \approx 2.9+2.3+1.04=6.24m$ 。因此，理论计算建议煤柱宽度约为 6.0~6.5m。

4 数值模拟分析

为验证理论计算结果并直观对比不同煤柱宽度下围岩塑性区发育特征，采用 FLAC^{3D} 建立数值模型。模型尺寸为 200m×150m×100m，模拟巷道断面为矩形（宽 5.6m×高 3.6m），煤柱宽度分别取 3m、5m、7m、10m。模型采用 Mohr-Coulomb

准则, 边界条件为上覆岩层等效载荷施加(约 11MPa), 侧压系数 1.2。模拟开挖顺序为先开挖上区段工作面, 再掘进下区段巷道。具体见图 1。

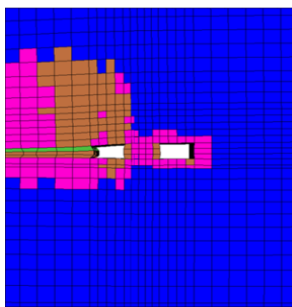


图 1-1 3m 煤柱塑性破坏区

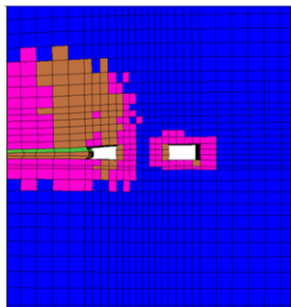


图 1-2 5m 煤柱塑性破坏区

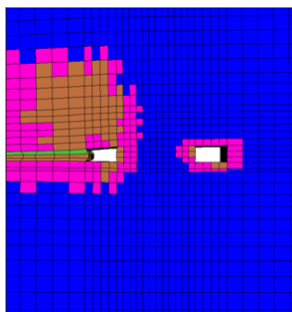


图 1-3 7m 煤柱塑性破坏区

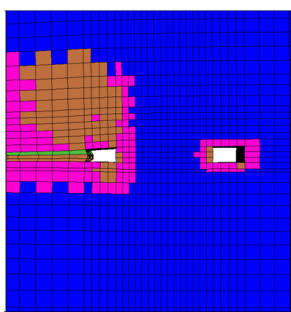


图 1-4 10m 煤柱塑性破坏区

图 1 差异煤柱宽度下的塑性破坏示意

不同煤柱宽度下的塑性区分布模拟结果表明:

煤柱宽度 3m: 塑性区完全贯通煤柱, 煤柱整体处于破坏状态, 失去承载能力, 巷道围岩变形严重。煤柱宽度 5m: 煤柱内部出现约 1.5m 宽的弹性核区, 但核区宽度不足, 锚杆锚固段可能进入塑性区, 锚固效果较差。煤柱宽度 7m: 弹性核区宽度约 4m, 能够有效锚固, 煤柱整体稳定性较好。煤柱宽度 10m: 弹性核区宽度约 7m, 煤柱稳定但资源浪费较大, 经济性不佳。

综合考虑围岩控制效果与资源回收率, 弹性核区宽度应满足锚杆(索)有效锚固长度(顶锚杆锚固段约 1.2m, 锚索锚固段约 2m)。因此, 煤柱宽度不应小于 6m。结合理论计算, 确定最优煤柱宽度为 6m。

5 支护设计及效果分析

5.1 支护方案

基于 6m 小煤柱条件, 设计锚网索联合支护方案: 顶板锚杆: $\Phi 22 \times 2400\text{mm}$ 左旋无纵筋高强螺纹钢锚杆, 间排距 $850 \times 900\text{mm}$, 每排 7 根, 预紧力 $320\text{N} \cdot \text{m}$ 。帮锚杆: $\Phi 20 \times 2000\text{mm}$ 左旋无纵筋高强螺纹钢锚杆, 间排距为 $1000 \times 900\text{mm}$, 预紧力 $280\text{N} \cdot \text{m}$ 。锚索: $\Phi 21.6 \times 8300\text{mm}$ 钢绞线, 采用“3-0-3”布置, 间排距为 $1500 \times 1800\text{mm}$, 预应力 250kN 。其他: 配合 $\Phi 6\text{mm}$ 钢

筋网(顶)和菱形铁丝网(帮)、钢筋梯子梁。

5.2 矿压监测效果

为验证支护效果, 在 32205 工作面运输顺槽(6m 小煤柱段)设置综合测站进行表面位移监测。结果表明: 巷道顶底板累计移近量最大为 175.1mm , 最大移近速度 9.7mm/d , 稳定后移近速度降至 1.09mm/d 。两帮累计移近量最大为 203.5mm , 最大移近速度 14.8mm/d , 稳定后移近速度 1.45mm/d 。所有变形量均控制在安全范围内, 未出现明显片帮、冒顶现象, 表明 6m 小煤柱配合锚网索联合支护能够有效控制围岩变形, 保证巷道稳定。

6 结论

(1) 基于极限平衡理论计算, 得到 32205 综放工作面沿空掘巷护巷煤柱的理论宽度为 6.24m 。

(2) FLAC^{3D} 数值模拟对比了 3m、5m、7m、10m 四种煤柱宽度下的塑性区分布, 确定煤柱宽度不宜小于 6m, 此时煤柱内部弹性核区能够满足锚杆(索)的有效锚固需求。

(3) 现场监测表明, 6m 小煤柱条件下采用锚网索联合支护, 巷道顶底板及两帮移近量分别控制在 175.1mm 和 203.5mm 以内, 围岩控制效果良好, 实现了资源回收与巷道稳定的双重目标。

[参考文献]

- [1]周楠, 姚依南, 宋卫剑, 等. 煤矿矸石处理技术现状与展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 136-146.
 - [2]于雷, 闫少宏. 特厚煤层综放开采顶板岩层控制基本原理[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 31-37.
 - [3]张科学, 姜耀东, 张正斌, 等. 大煤柱内沿空掘巷窄煤柱合理宽度的确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 255-262.
 - [4]何文瑞, 何富连, 陈冬冬, 等. 坚硬厚基本顶特厚煤层综放沿空掘巷煤柱宽度与围岩控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2): 349-358.
 - [5]刘建勋. 煤矿掘进巷道支护安全检查及预防[J]. 矿业装备, 2020(5): 106-107.
 - [6]柏建彪, 侯朝炯. 沿空掘巷窄煤柱稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 932-935.
- 作者简介: 李现磊, 1990年5月16日, 汉族, 河北邢台人, 研究方向: 采矿工程。