

石泉煤矿 30112 轨道巷沿空掘巷围岩控制技术研究

王建强¹ 姜 勃¹ 王锦明² 周丁丁²

1. 华电煤业集团工程技术有限公司 陕西 榆林 719000

2. 山西石泉煤业有限责任公司 山西 长治 046000

摘要: 沿空掘巷围岩应力环境复杂多变, 这为巷道后续维护带来了显著难度与挑战。本文以石泉煤矿30112轨道巷沿空掘巷为工程背景, 基于内外应力场理论分析了30112轨道巷区段保护煤柱受力情况, 并结合极限平衡理论计算出保护煤柱留设宽度范围为8.4 ~ 11.2m。在此基础上, 建立了不同煤柱宽度的沿空掘巷数值计算模型, 通过对比分析不同宽度下区段煤柱垂直应力及塑性区分布特征, 最终确定出区段煤柱最佳留设宽度为10m。同时, 针对性地提出了煤柱侧“锚索+锚杆+锚网+钢筋梯梁”的强化联合支护方案。现场应用结果表明, 巷道支护完成40d后围岩变形趋于稳定, 煤柱侧顶板、煤柱侧巷帮最大变形量分别为75mm、65mm, 整体变形量处于较低水平, 有效保证了沿空掘巷围岩的整体稳定性。研究成果可为其他类似地质条件下的沿空巷道围岩控制提供较好的示范作用。

关键词: 沿空掘巷; 保护煤柱; 数值模拟; 现场实测; 联合支护

0 引言

近年来, 随着采煤技术的飞速发展, 埋藏条件较优的煤炭资源已逐渐枯竭。沿空掘巷作为绿色开采技术体系中的关键技术, 凭借其对煤炭资源的高效回收优势, 在井工煤矿开采中应用日益广泛且成效显著。然而, 该技术在现场实践过程中仍面临应力集中、巷道变形量大等突出难题^[1]。

针对上述问题, 诸多学者开展了一系列相关研究: 柏建彪等^[2]通过数值计算研究了锚杆支护强度与煤柱宽度之间的关系。侯朝炯等根据深部围岩的受力特征, 提出了“顶板压裂+底板爆破+围岩钻孔”的综合应力改善围岩控制技术。陆银龙等建立了特厚煤层沿空掘巷“双力源”结构模型, 提出了沿空掘巷围岩“远场弱化-近场强化”协同控制策略。唐东旭等针对大埋深沿空掘巷围岩变形大、难控制的问题, 分析了窄煤柱及实体煤内垂直应力及弹

性能密度的分布演化规律。孙利辉等通过研究沿空掘巷内外应力场传递演化规律, 确定了沿空掘巷内应力场分布范围, 有效提高了煤炭资源采出率。

综合上述研究进展可知, 众多专家学者已针对沿空掘巷开展了大量系统性研究并取得丰硕成果。在此基础上, 本文以石泉煤矿30112轨道巷沿空掘巷支护工程为研究背景, 采用理论分析、数值计算与现场实测相结合的研究方法, 对沿空掘巷关键技术进行深入探究。研究成果可为其他类似地质条件的沿空巷道围岩控制提供较好的示范作用^[3]。

1 工程概况

石泉煤矿主要开采煤层为3#煤层, 平均埋深350m; 煤层厚度5.4 ~ 6.1m, 平均5.75m; 煤层倾角5° ~ 15°; 煤层赋存较稳定, 顶底板岩性见表1。目前, 现场正在沿30110采空区掘进30112轨道巷, 二者位置关系如图1所示。

表1 3#煤层顶底板情况

顶板名称	岩石名称	平均厚度 (m)	岩性特征
老顶	泥岩	2.50	深灰色至灰黑色, 块状。
	粉砂岩	4.50	灰色, 粉砂状结构, 含植物化石碎片, 夹细砂岩薄层。
直接顶	细粒砂岩	7.90	灰色, 厚层状, 细粒砂状结构, 与下伏煤层明显接触。
直接底	泥岩	10.45	灰黑色, 平坦状断口, 局部含砂质泥岩薄层。
老底	粉砂岩	22.50	灰色, 中厚层状, 水平层理, 局部夹泥岩, 砂质泥岩薄层。

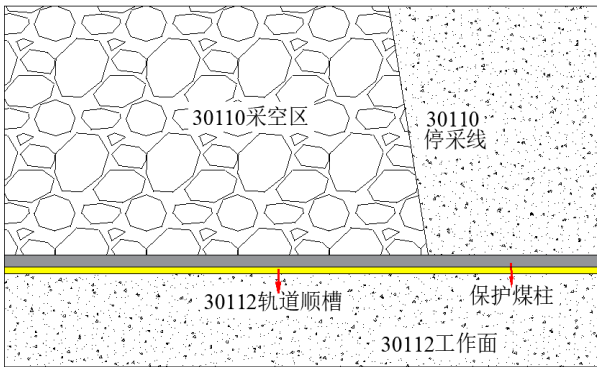


图1 30112轨道巷位置示意

2 区段保护煤柱受力分析

2.1 老顶破断位置与区段煤柱宽度

随着工作面回采, 30110采空区上方的岩层破断垮落在30112工作面端头形成砌体梁结构, 关键块C位于30110工作面采空区正上方, 关键块B位于30110工作面采空区边缘和煤柱上方, 关键块A位于煤柱上方, 随着本工作面侧向支承压力的释放和临近工作面采空区顶板趋于稳定, 最终顶板关键块A、B和C间在铰接作用下形成承载结构(如图2所示)。以破断线为界, 可以将支承压力的分布分为两个部分, 即外应力场 D_1 和内应力场 D_2 。

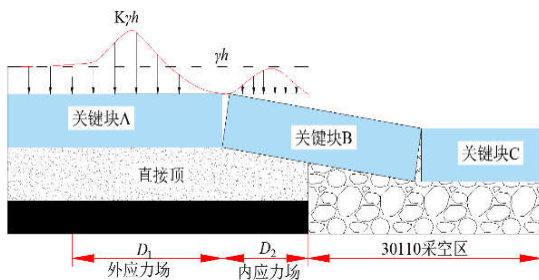


图2 30112轨道巷顶板破断模型

为保证区段煤柱的承载能力, “内应力场”宽度与巷道宽度、煤柱宽度之间的关系有如下关系:

$$D_2 \geq L_1 + L_2 \quad (1)$$

其中, 内应力场宽度范围满足下式:

$$D_2 = \frac{6\gamma_2 LHS}{Gy} \quad (2)$$

式中: L_1 为巷道宽度, m; L_2 为留设煤柱宽度, m; γ_2 为基本顶容重, kN/m^3 ; L 为工作面走向长度, m; H 为基本顶厚度, m; y 为煤体的压缩量, m; S 为基本顶初次来压步距, m; G 为顶板破断线附近煤体刚度, N/m 。

将相关参数带入式(2)可得 $D_2 = 16.7\text{m}$, 巷道宽度 $L_1 = 5.5\text{m}$, 因此, 煤柱宽度 L_2 最大值为 11.2m 。

2.2 极限平衡理论与区段煤柱关系

受30110工作面回采影响, 区段煤柱在一定范围内存

在损伤, 因此要保证区段煤柱存在稳定区域维持巷道稳定。根据极限平衡理论, 区段煤柱宽度还应满足:

$$X = X_1 + X_2 + X_3 \quad (3)$$

式中: X_1 为上区段工作面回采后形成的塑性区宽度, m, 其值按式(4)计算; X_2 为锚杆长度, 取 2.4m ; X_3 为区段煤柱的安全系数, 按 $0.2(X_1 + X_2)$ 计算。

即 X_1 计算式为:

$$X_1 \geq \frac{\varepsilon M}{2 \tan \phi} \ln \frac{K\gamma h + C \cot \phi}{P/\varepsilon + C \cot \phi} \quad (4)$$

式中: M 为煤层采高; ε 为侧压系数; ϕ 为煤层内摩擦角; C 为煤柱与顶底板交界处的黏聚力; K 为集中应力系数; γ 为上覆岩层平均容重; h 为巷道埋深; P 为煤柱采空区一侧的支护阻力。

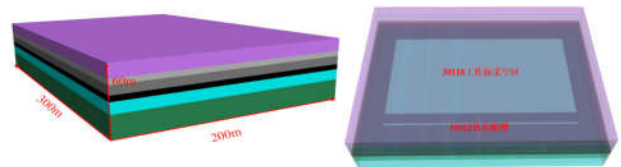
将上述参数代入式(4)计算可得: $X_1 = 4.6\text{m}$, $X_3 = 1.4\text{m}$, X 最小宽度为 8.4m 。

综合考虑, 30112轨道巷沿空掘巷区段煤柱宽度范围为 $8.4 \sim 11.2\text{m}$ 。

3 区段煤柱合理宽度数值模拟分析

3.1 模型建立及模拟方案

使用FLAC^{3D}模拟软件按照30112轨道巷的实际情况建立数值模型, 模型尺寸为长×宽×高 = $300 \times 200 \times 60\text{m}$ (如图3所示), 在模型上部边界施加覆岩层等效载荷并进行约束。分别模拟区段煤柱宽度为 9m 、 10m 、 11m 时的应力分布及塑性破坏特征。



(a) 模型尺寸

(b) 模型平面

图3 FLAC^{3D}数值模型示意

3.2 不同宽度区段煤柱数值模拟

区段煤柱宽度为 9m 时, 存在较大范围应力集中且大范围的塑性破坏, 此时区段煤柱破坏比较严重, 不利于巷道的稳定; 区段煤柱宽度为 10m 、 11m 时, 区段煤柱在一定范围内存在应力集中、塑性破坏减弱, 可较好发挥锚杆、锚索的支护作用保持巷道稳定。区段煤柱留设 10m 时可更多地回收资源, 故确定区段煤柱留设宽度为 10m 。

4 沿空掘巷支护方案及应用效果分析

4.1 支护方案设计

根据悬吊理论, 并采用工程类比法确定30112轨道巷采用“锚网+锚杆+锚索+钢筋梯梁”的支护方式。具体支护参数如下:

顶部锚杆：采用 $\Phi 22 \times 2400\text{mm}$ 左旋高强螺纹钢锚杆，锚杆间排距为 $800 \times 1000\text{mm}$ ，每排7根，采用钢筋梯连接，顶部网片采用菱形网。顶锚索规格： $\Phi 21.8 \times 9000\text{mm}$ ，锚索布置方式为“3-2-3”，锚索间排距 $1600 \times 1000\text{mm}$ 。

帮锚杆：采用 $\Phi 22 \times 2400\text{mm}$ 锚杆，间排距为 $750 \times$

1000mm ，每排7根，采用钢筋梯连接，金属菱形网护表。

沿空侧增加2根锚索，规格 $\Phi 21.8 \times 5300\text{mm}$ ，布置方式为“2-0-2”，锚索间排距 $1400 \times 2000\text{mm}$ 。上部锚索距顶板 1000mm 位置打设，下部锚索距上部锚索 1400mm 。

30112轨道巷沿空掘巷支护方案如图4所示。

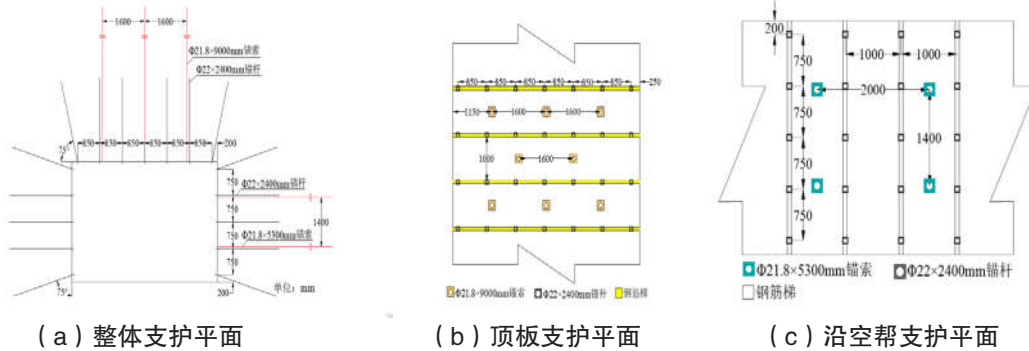


图4 30112轨道巷沿空掘巷支护方案示意

4.2 工程应用效果分析

4.2.1 测点布置

为观测30112轨道巷变形情况，沿空侧、实体煤侧顶板测点各距巷道中心线 1.5m ，沿空帮和实体煤帮测点位于距底板 2m 处，底板测点位于巷道中线，测量结果如图5所示。

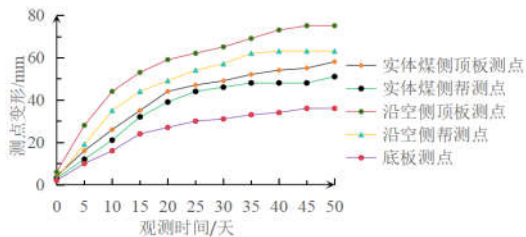


图5 巷道变形曲线图

4.2.2 实测结果分析

由图5分析可知，沿空侧顶板变形 75mm 、实体煤侧顶板变形 58mm ；沿空帮变形 65mm 、实体煤侧帮变形 63mm ；底板变形 36mm ；巷道整体变形量在合理范围内，能够满足现场生产需要。

5 结论

受侧向支承压力和采动影响，留设的区段煤柱发生塑性变形，根据内外应力场理论、极限平衡理论，计算得出30112轨道巷区段保护煤柱合理留设宽度为 $8.4 \sim 11.2\text{m}$ 。通过数值模拟分析可知，当区段煤柱留设宽度为 10m 时可较好发挥煤柱支护体的支撑作用，同时可最大限度地提高煤炭资源回收率。采用“锚网+锚杆+锚索+钢筋梯梁”的支护方式对30112轨道巷进行支护，巷道支护完成 40d 后围岩变形趋于稳定，煤柱侧顶板、沿空帮最大变形量分别为 75mm 、 65mm ，设计的支护方案可有效控制巷道变形，能够满足现场生产需要。

参考文献

- [1]陈云.坚硬顶板下沿空掘巷煤柱宽度及稳定控制研究[J].工矿自动化,2025,51(5):23-31+40.
- [2]柏建彪,侯朝炯,黄汉富.沿空掘巷窄煤柱稳定性数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(20):3475-3479.
- [3]陈定超,王襄禹,柏建彪,等.迎采工作面沿空掘巷围岩能量-应力全周期演化规律[J].煤炭科学技术,2025,53(4):162-175.