

Research and Application of Key Technologies for Stability Control of Surrounding Rock in Narrow Coal Pillars Excavated Roadways in Close range Coal Seam Groups

Lvhuan Zhou

Jiangsu Mining Engineering Group Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu, 221000, China

Abstract

In order to improve the recovery rate of mine resources, narrow coal pillar technology is adopted in the setting of protective coal pillars in tunnels. This paper studies the instability mechanism and deformation influencing factors of the surrounding rock during narrow coal pillar excavation, as well as the stress situation of different sections of the roadway, and formulates roadway support plans in different zones. We have adopted technologies such as energy gathering blasting for roof cutting and pressure relief, full anchor cable ladder support for the roof, four high active support, active and passive collaborative strengthening support, collaborative control of support and pressure relief combination, and grouting reinforcement control for the surrounding rock interval of the tunnel, which have enhanced the strength of the tunnel surrounding rock support, achieved good stability control effect of the tunnel surrounding rock, and promoted the safe and efficient development of the mine.

Keywords

Narrow coal pillar; Stability control of surrounding rock; Four high initiative; Collaborative strengthening; Collaborative regulation; Grouting reinforcement

近距离煤层群窄煤柱沿空巷围岩控制技术研究与应用

周吕欢

江苏省矿业工程集团有限公司, 中国·江苏·徐州 221000

摘要

为了提高矿井资源回收率,在巷道保护煤柱留设方面采用窄煤柱工艺。本文通过研究窄煤柱沿空掘巷巷道围岩失稳机理、围岩变形影响因素,不同区段巷道受力情况,分区制定巷道支护方案。采用聚能爆破切顶卸压、顶板全锚索梯次支护、四高主动支护、主被动协同加强支护、支护卸压组合协同调控、巷道围岩间隔注浆加固控制等技术,增强了巷道围岩支护强度,取得了良好的巷道围岩稳定控制效果,促进了矿井安全高效发展。

关键词

窄煤柱; 围岩稳定控制; 四高主动; 协同加强; 协同调控; 注浆加固

1 引言

相邻采煤工作面间常留设一定宽度的保护煤柱,其宽度影响着巷道围岩的稳定性、煤炭资源回收率。煤柱尺寸宽度不是越宽或越窄就越好,过宽煤柱虽对巷道维护有利,但会造成煤炭资源巨大浪费,研究最优煤柱尺寸,对实现经济最优,具有重要意义^[1]。

张掖市山丹县花草滩煤矿为低瓦斯、中等水文地质条件矿井。主要开采煤层为煤₁、煤₂,煤₁均厚1.8m,煤₂均厚6.5m,含矸率较高,两煤层间距平均6.5m。开采煤₁时,最初设计工作面保护煤柱宽度为20.4m,后进行了窄煤柱优

化,煤柱宽度变为6m。窄煤柱沿空掘巷虽提高了资源回收率,但给巷道围岩稳定控制带来了挑战。

2 窄煤柱沿空掘巷围岩失稳机理分析

2.1 基于压力拱理论巷道失稳分析

巷道开挖会使围岩应力重新分布,巷道顶部往往会出现拉应力。此应力超过岩石的抗拉强度,则顶部岩石破坏失去平衡向下逐渐坍塌,坍塌到一定程度后,不再继续,岩体进入新的力学平衡状态,形成新的平衡界面形似一个拱形,我们称这个自然平衡拱为压力拱或坍塌拱。根据普氏理论及侧压的影响,建立计算模型,推导出垮落拱高计算公式如下^[2]。

$$b_1 = l + \frac{a_2}{\sqrt{\lambda}} - 2b \quad (1.1)$$

式中, $l = \frac{atg\theta + b(\lambda + tg^2\theta)}{\lambda}$; $a_2 = \sqrt{a^2 + b^2}$ 。

【作者简介】周吕欢(1987-),男,中国安徽滁州人,硕士,工程师,从事煤矿安全及技术管理研究。

b_1 为拱高, 根据极限平衡理论, 塌落角 $\theta = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$ 。

由式 1.1 可知: 巷道跨度越大, 跨落拱越高, 需支护强度就越大, 一旦支护强度不足, 巷道就会失稳。

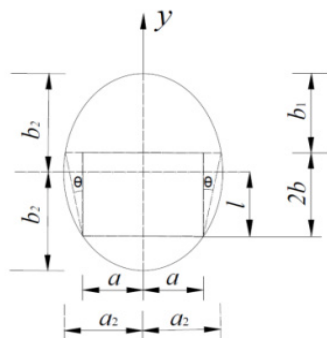


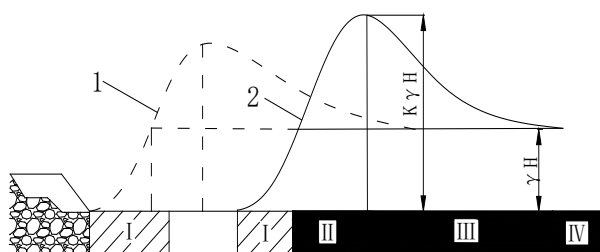
图 1 拱线与巷道位置图

2.2 构造应力造成围岩失稳分析

地质构造作用会产生构造应力, 按空间分布分为三个轴向方向, 即水平方向的水平构造应力, 垂直方向的垂直构造应力。层状特征比较突出的煤层巷道开掘后, 围岩应力重新分布, 垂直应力会向两帮转移, 水平应力则向顶底板转移。在水平与垂直应力的相互转换叠加作用下, 巷道周边围岩出现的集中应力, 引起顶板离层下沉、底板鼓起及两帮外移^[3-4]。随围岩变形变大, 锚杆支护失效, 巷道就会失稳。

2.3 窄煤柱沿空掘巷围岩应力分布规律

对巷道围岩应力受力分析, 垂直应力在煤柱、实体煤帮、顶板上呈基本一致性。水平应力存在明显差异, 沿小煤柱宽度方向, 应力分布具有明显区域性, 靠近采空区侧, 依次划分为破裂区、塑性区和弹性区^[3-4], 如图 2 所示。破裂区的应力承载能力最小。当煤体发生变形破坏时, 巷道顶板的承载能力随之降低, 顶板一般会向煤柱侧采空区旋转、向下沉降和向巷道内移近。



1- 掘巷前应力分布; 2- 掘巷后应力分布

I—破裂区; II—塑性区; III—弹性应力升高区; IV—原岩应力区

图 2 窄煤柱护巷的煤帮应力重新分布图

掘巷前, 实体煤帮的应力分布状态为图中曲线 1, 小煤柱区域一般刚好处于残余支撑压力峰值下。巷道形成后, 小煤柱受力破坏而卸载, 朝巷道内的强烈位移; 靠近巷道的煤体区域因卸压衍变为破碎区与塑性区, 煤体向巷道方向位移明显, 实体煤帮内部为承受高压的弹性应力升高区, 更深处

又恢复到原岩应力状态, 应力分布最终如图中曲线 2 所示。掘巷稳定后, 水平及垂直应力不同程度的都会减小; 工作面采动时, 煤柱帮水平应力增加明显, 实体煤帮的破坏随垂直应力的增加向较深部煤体中发育^[5-8]。

2.4 窄煤柱沿空掘巷围岩变形规律

窄煤柱沿空巷道围岩变形破坏特点如下^[9]:

(1) 受多次采动矿压影响, 巷道围岩变形量大, 顶板移近量小于巷道两帮变形量, 刚性支护难, 围岩控制以护为主, 以支为辅。

(2) 在移动性支承压力和多次采动矿影响下, 巷道变形与工作面顶板来压规律相关, 具一定的周期性发展, 随工作面周期来压步距, 巷道就会出现一次剧烈受力变形。

(3) 掘进期间, 沿空煤柱变形量大于实体煤侧; 回采期间则恰恰相反。

3 窄煤柱沿空掘巷围岩变形影响因素

3.1 煤层围岩物理本身力学性质影响

煤层及其围岩越坚硬, 对应的其单轴抗拉、抗压、抗剪强度就越大, 巷道围岩发生变形量, 随时间增长相对较小, 一旦巷道变形超过受力极限, 瞬间将会产生剧烈破坏, 释放出大量能量, 导致冲击危害。坚硬围岩发生变形破坏后, 巷道修护难度、成本、强度相对较大;

对于软岩巷道变形主要表现为随时间产生蠕变破坏, 巷道围岩变形量较大, 煤层及其围岩越是松软, 巷道越易变形破坏, 巷道支护就越困难。

3.2 煤层赋存影响

煤层赋存影响主要包括煤层厚度、倾角、埋深、顶底板岩性等。

煤层硬度、厚度对工作面的超前应力分布影响很大。煤层硬度增大、厚度减小, 超前工作面的煤体支撑压力集聚弹性大, 巷道围岩易发生变形破坏; 煤层越厚, 围岩松动破坏范围越大, 巷道越易发生变形破坏;

煤层倾角影响巷道的布置及断面。水平煤层的巷道往往呈矩形、半圆拱形, 在空间结构上、围岩应力分布具有对称性; 倾角煤层巷道布置往往呈梯形, 其在空间结构、围岩应力分布具有非对称性, 煤层倾角越大, 巷道围岩应力分布非对称性就越明显, 围岩四周受力越不均匀, 巷道在某一侧支承压力的存在应力叠加, 产生非对称性变形破坏^[10-11]。

煤层埋藏越深, 地应力强度就越大, 巷道开挖以及回采过程中就易发生冲击地压危害; 煤层不同的顶底板岩性组合会造成巷道围岩力学响应差异。

3.3 地应力及地质构造影响

地应力在采场空间分布的不均匀, 会使得煤柱在空间结构上发生不同方向的变形破坏; 地应力强度越大, 煤柱受力剧烈, 越易发生变形破坏。

煤层中的断层、褶皱等构造, 裂隙带、夹矸层的分布,

水文地质条件对巷道布置及围岩支护具有重要影响；

(1) 断层附近往往会形成一定区域的破碎带，断层破碎带对围岩变形具有一定的放大效应，会增大围岩支护与控制难度。

(2) 煤层褶皱起伏，在褶皱构造翼部往往会产生应力集中现象，此区域布置巷道，巷道变形破坏几率将增大。

(3) 煤层中裂隙、夹矸层的发育，影响着煤层整体稳定性。裂隙、夹矸层越是发育，巷道围岩（煤）体越松散、不稳定，受采动动压影响，增大巷道围岩稳定控制难度。

(4) 煤层中裂隙水对围岩结构存在一定程度的软化作用，不利于巷道围岩稳定控制；在水—岩耦合作用下，往往会劣化巷道支护强度，从而降低围岩支护效果。

3.4 煤柱尺寸的影响

合理的煤柱宽度不仅满足煤柱自身的稳定性，还有利于回采巷道的稳定。过窄煤柱可能无法承受上覆岩层的压力，导致失稳；过宽煤柱则会浪费煤炭资源，并可能引发其他地质灾害。煤柱高宽比与应力分布是研究分析影响煤柱的力学性质重要参数。一般来说，高宽比较大的煤柱，其内部应力分布更均匀，塑性区倾向于沿高度方向扩展相对较小；高宽比较小的煤柱，其内部应力分布不均匀，容易导致局部应力集中，煤柱塑性区更倾向于沿宽度方向扩展。这种扩展方向的不同，会影响煤柱的整体稳定性。

煤柱形态不同在应力分布、稳定性、承载能力上有着本质的区别。矩形煤柱的应力分布较为均匀，稳定性较好，承载能力较强，适用于煤层厚度较均匀的矿井。而梯形煤柱的应力分布较为复杂，稳定性较差，承载能力较弱，但能够更好地适应煤层厚度的变化，适用于地质条件复杂的矿井。

3.5 巷道断面尺寸影响

巷道断面形状对于保证巷道的稳定性和安全性至关重要。常见巷道断面包括直墙拱形、矩形和梯形，各自在应力分布、顶板稳定性等方面表现出不同特性。直墙拱形断面的拱顶、拱脚和直墙底的应力分布规律较为明确，直墙段是结构最易受损部位；矩形断面的应力分布相对均匀，但在角部容易产生应力集中现象，可能会导致结构的局部破坏，顶板稳定性相对较差，尤其是在荷载较大时，容易出现顶板下沉或塌陷的现象；梯形断面的应力分布介于直墙拱形和矩形之间，因其顶部较窄，底部较宽，能够在一定程度上散荷载，减少应力集中，顶板稳定性较好，尤其是在矢跨比较大的情况下，能够有效抵抗顶板下沉和塌陷。

相同围岩条件下，三种断面形状的巷道围岩稳定性从大到小为直墙拱形、梯形、矩形断面；此外，同一形状巷道断面尺寸跨度大小不同，其力学效应也会存在较大差异，巷道跨度越大，其巷道围岩稳定性就越差。

3.6 采动矿压叠加影响

采空区煤柱侧沿空掘巷，巷道的围岩应力会产生时空叠加效应。上个工作面掘进及回采过程，对周围围岩产生第一次采动矿压影响；沿空掘巷时，产生二次扰动；本工作面回采时，对工作面超前段巷道产生第三次扰动。在这种多次采动矿压影响下，巷道围岩结构稳定性降低，围岩变形加剧。沿空掘巷时，巷道围岩时刻处于动、静载荷的耦合作用下，巷道围岩损伤会逐渐累积，围岩松动范围逐步扩大，最终可导致巷道失稳破坏。

重复采动矿压对近距离煤层群沿空掘巷影响更为明显，上层煤层开采后在采空区正下方会出现应力降低区，为沿空掘巷提供了有利条件，在上层煤层残留煤柱下方一定范围内会出现应力集中，下分层煤层开采巷道布置在上层煤层残留煤柱下方时，在上覆煤层工作面采动矿压、本煤层临近工作面采动矿压双重影响下，下分层煤层巷道围岩变形加剧，巷道失稳几率大大增加^[12-13]。

4 窄煤柱沿空掘巷围岩控制技术研究

4.1 巷道围岩顶板控制思路

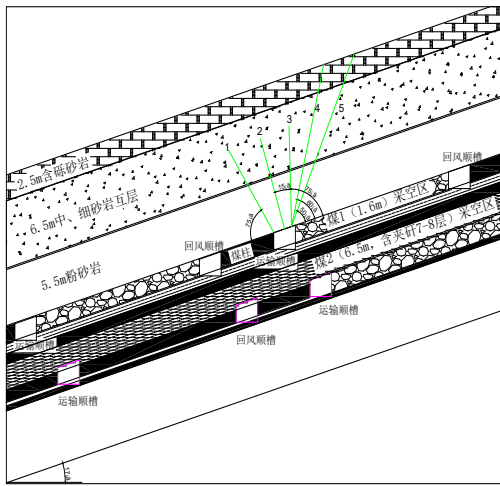
从减少采动矿压应力传递、增强巷道围岩稳定性和提高支护体系锚固性着手分析。在减少采动矿压应力传递上，设计超前预裂顶板；在增强巷道围岩稳定性上，研发多支护控制系统，应用全锚索梯次支护技术。在提高巷道支护体系锚固性上，采用高强度、高预应力、高刚度、高锚固的新型“四高”长锚索关键支护技术，改善围岩顶板受力状态，提高巷道顶板承载力和稳定性^[14-15]。

4.2 顺槽走向聚能爆破切顶卸压技术

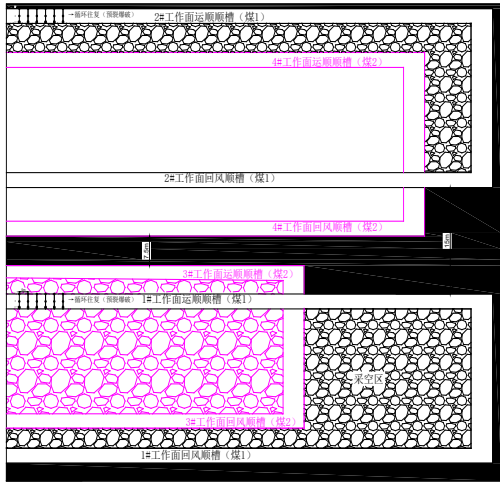
通过在预定位置装药爆破来实现裂顶，聚能爆破所产生的冲击波可以切断采空区顶板、停采线煤柱顶板之间的联系，阻止采动引起超前支承压力的传递，减少工作面来压时对煤柱侧巷道的影 响，打断上覆基本顶岩梁形成悬臂梁结构，从而实现卸压作用。

方案设计：根据工作面地质条件、走向长度、钻孔在岩层位置、爆破影响半径、间距及卸压高度等情况，沿工作面顺槽走向，在工作面超前支架外 10m 处巷道内，布置一组扇形穿层钻孔，孔底至煤层上方砂岩老顶垂高 12m，确保能预裂砂岩老顶；与垂直方向夹角分别为 75°、90°、15°、60°、50°，共计 5 个孔。具体实施见图 3。

卸压前，第一次巷道开挖产生应力集中与第二次采动超前支承应力相互重合叠加，巷道两帮应力集中厉害；爆破卸压顶板后，切断了超前支承应力的传播，大幅减小超前支承应力影响范围，减缓了巷道周边应力集中，有利下个工作面煤柱巷道的稳定控制。



a-预裂剖面图 (Pre splitting section diagram)



b-预裂平面图 (Pre splitting plan)

图3 聚能爆破切顶卸压

4.3 巷道顶板全锚索梯次支护技术

巷道顶板仅使用一种支护方式，不能形成稳定的承载区，不能较好的控制顶板离层现象，因此，研究采用二阶段梯次支护方式。

一阶支护：于顶板浅部范围，通过短锚索的应力叠加，以预紧力作用及钢带等支护构件，建立长效主动基础支护体系，构建有效压应力区，控制巷道顶板垮落破坏，抑制围岩裂隙向深部进一步碎胀发育。

二阶支护：利用长锚索的高预紧力、高锚固性特点，在较稳定的深部煤层中形成次承载区。二阶支护是通过锚固到围岩深部，增强节理、煤层内的粘聚力和摩擦力，达到抑制顶板内各个岩层的离层和滑移目的，并与一阶支护串联，形成更完整的支护体系，提高了围岩顶板稳定性、安全性。

4.4 工作面巷道分区支护技术

4.4.1 巷道分区划分

根据工作面巷道所处的位置以及应力环境不同，划分不同区域，分别进行支护设计；近距离煤层开采时，一般情况，巷道可划分三个区域，详细见图4：

近距离倾斜煤层外错式巷道（蓝色区域）：该区域巷道应力情况简单，围岩扰动小，巷道开挖后，围岩变形较小，巷道成型完整，可划为易支护段；

近距离煤层沿空巷道（黄色区域）：该区域巷道受到临近工作面回采的影响，巷道在掘巷前围岩受到了一定程度的扰动，可划分为中等难度支护段；

近距离煤层煤柱下沿空巷道（红色区域）：该区域巷道受到临近工作面回采扰动以及上层区段煤柱的阴历叠加影响，应力情况复杂、围岩遭受扰动大，围岩破碎、巷道成型差，故将该段划分为难支护段。

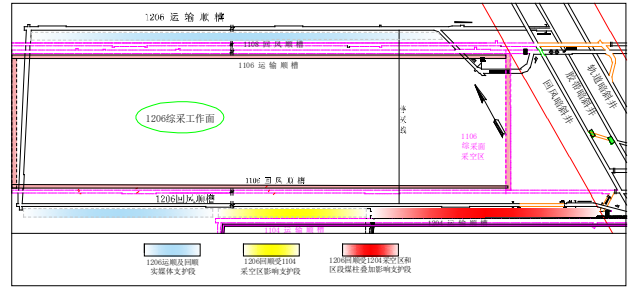


图4 近距离煤层巷道分区支护示意图

4.4.2 近距离煤层外错式巷道：顶板全锚索四高主动支护技术

采用锚网索梁联合支护顶板。顶板全锚索支护，锚索规格为 $\phi 17.8 \times 5300\text{mm}$ 的钢绞线，每排 5 根，间、排距： $900 \times 850\text{mm}$ ；加强锚索规格为 $\phi 21.8 \times 7300\text{mm}$ 。“3-0-3”形式布置，间、排距 $1500\text{mm} \times 1600\text{mm}$ ；巷道高帮支护采用 4 根左旋无纵筋螺纹钢锚杆配合梯子梁支护，巷道低帮支护采用 3 根左旋无纵筋螺纹钢锚杆配合梯子梁支护，锚杆规格： $\phi 20 \times 2200\text{mm}$ ，间排距： $900 \times 850\text{mm}$ ；肩窝锚杆偏向顶板 30° 打设，两帮底角锚杆偏向底板 20° 打设。

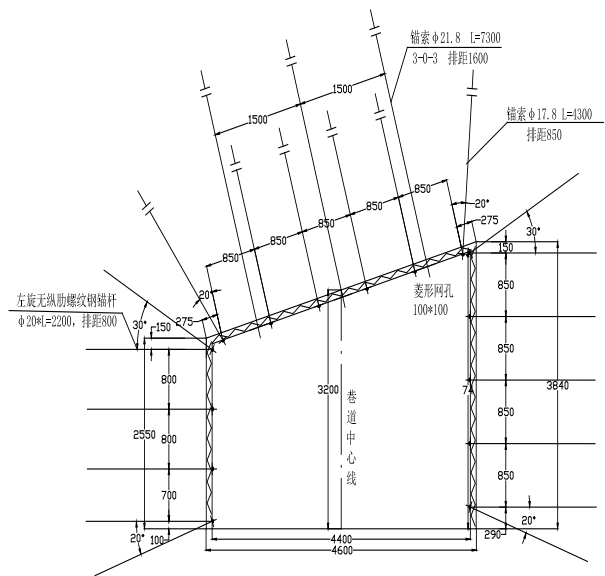


图5 煤层外错式巷道：顶板全锚索四高主动支护

5 结语

为确保窄煤柱沿空掘巷巷道围岩稳定,本文从近距离煤层巷道空间结构演化、窄煤柱巷道围岩变形影响因素分析,根据巷道所处不同应力环境,对巷道进行区段划分,分区制定支护方案。采取聚能爆破切顶卸压、顶板全锚索梯次支护、顶板全锚索四高主动支护、主被动协同加强支护、支护卸压组合协同调控、巷道围岩间隔注浆加固控制等技术,增强了巷道围岩支护强度,取得了良好的巷道围岩稳定控制效果,降低了巷道修护成本,促进了矿井安全高效发展。

参考文献

- [1] 杨吉平.沿空掘巷合理窄煤柱宽度确定与围岩控制技术[J].辽宁工程技术大学学报, 2013, 32(1): 2-3.
- [2] 杨皓博,李仕牧,王帅等.基于压力拱理论破碎围岩巷道结构失稳研究[J].中国煤炭, 2019,45(4): 61-65.
- [3] 钱鸣高,石平五.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社, 2003.
- [4] 杜计平,孟宪瑞.采矿学[M].徐州:中国矿业大学出版社, 2008.
- [5] 柏建彪.沿空掘巷围岩控制[M].徐州:中国矿业大学出版社, 2006.
- [6] 柏建彪,王卫军,侯朝炯等.综放沿空掘巷围岩控制机理及支护技术研究[J].煤炭学报, 200025(5): 478-481.
- [7] 侯朝炯,李雪华.综放沿空掘巷围岩大、小结构的稳定性原理[J].煤炭学报, 2001(1): 1-7.
- [8] 郑西贵,姚志刚,张农.掘采全过程沿空掘巷小煤柱应力分布研究[J].采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 459-465.
- [9] 李建军.沿空掘巷窄煤柱应力及围岩变形规律研究[J].煤炭技术, 2019(11): 6-7.
- [10] 张向阳,杨科.不同煤层倾角变化对锚杆支护回采巷道围岩受力特征物理模拟研究[J].煤矿开采, 2014, 19(02): 58-62.
- [11] 梁东民,池小楼.工作面推进速度对顶板覆岩活动的影响[J].煤矿安全, 2018(9): 276-279.
- [12] 姜耀东,李波.近距离煤层开采下位煤层巷道布置及支护技术研究[D]:[硕士学位论文].北京:中国矿业大学, 2012.
- [13] 陈志维,张彦董.窄煤柱沿空掘巷围岩稳定协同控制技术研究与应用[J].矿业安全与环保, 2023(1): 11-13.
- [14] 祝江鸿,杨建辉,叶良.轻放工作面巷道顶板全锚索支护技术[J].煤炭科学技术, 2007, 35(11): 31-35.
- [15] 谢和平.矿山岩体力学及工程研究进展和展望[J].中国工程科学, 200(3): 31-38.