

# 充填开采超前段主动支护替代被动支护技术与应用

肖 鹏<sup>1,2</sup>,于海洋<sup>3</sup>,王 东<sup>4</sup>,赵显江<sup>5</sup>,李长青<sup>3</sup>,赵宝相<sup>6</sup>,文志杰<sup>1,2</sup>

(1.山东科技大学 能源与矿业工程学院,山东 青岛 266590;

2.山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地,山东 青岛 266590;

3.山东能源集团鲁西矿业有限公司,山东 郓城 274700;

4.枣庄市自然资源和规划局,山东 枣庄 277600;

5.枣庄矿业集团有限公司岱庄煤矿,山东 枣庄 277600;

6.内蒙古上海庙矿业有限责任公司,内蒙古 鄂尔多斯 016299)

**摘要:**超前主动支护在围岩稳定性控制和生产管理等诸多方面有明显优势。以岱庄煤矿 31322 充填工作面为研究背景,借助矿压监测手段确定超前段围岩运移和应力演化特征,基于工作面应力场的分布规律,提出“充填面主动支护替代被动支护”理念,采用 Fillzone 模块模拟不同跨度充填对工作面超前段的影响,确定超前锚杆索主动支护方案在完全充填开采条件下的可行性;通过构建充填面人工支护体与围岩结构的力学模型,校验了回采巷道原支护强度,并针对不同回采巷道超前段进行差异性优化。试验结果表明,超前主动支护技术可节约成本 60.6%,可为类似充填开采超前段主动支护优化提供借鉴。

**关键词:**充填工作面;力学模型;超前主动支护;差异性优化

中图分类号:TD353

文献标志码:A

## Technology and application of active support replacing passive support in advance section of backfill mining

XIAO Peng<sup>1,2</sup>, YU Haiyang<sup>3</sup>, WANG Dong<sup>4</sup>, ZHAO Xianjiang<sup>5</sup>,

LI Changqing<sup>3</sup>, ZHAO Baoxiang<sup>6</sup>, WEN Zhijie<sup>1,2</sup>

(1.College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2.State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

3.Shandong Energy Group Luxi Minging Co. Ltd, Yuncheng, Shandong 274700, China;

4.Zaozhuang Natural Resources and Planning Bureau, Zaozhuang, Shandong 277600, China;

5.Daizhuang Coal Mine of Zaozhuang Mining Group Co. Ltd, Zaozhuang, Shandong 277600, China;

6.Inner Mongolia Shanghaimiao Mining Co. Ltd, Ordos, Inner Mongolia 016299, China)

**Abstract:** Advance active support has obvious advantages in surrounding rock stability control and production management. With the 31322 filling face of Daizhuang Coal Mine as the research background, the migration and stress evolution characteristics of surrounding rock in the advance section were determined by means of mine pressure monitoring. Based on the distribution law of the stress field of working face, the concept of “replacing the passive support

收稿日期:2021-09-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51974174);山东省自然科学基金项目(ZR2018MEE001);山东省优秀青年科学基金项目(ZR2019YQ26)

作者简介:肖 鹏(1995—),男,江西赣州人,硕士研究生,主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究。

文志杰(1982—),男,山东平度人,教授,博士,主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究,本文通信作者。

E-mail:wenzhijie@sdust.edu.cn

of filling face with active support” was proposed. Fillzone module was used to simulate the influence of filling with different spans on the advance section of working face. The feasibility of advance anchor cable active support scheme under the condition of full filling mining was determined. By constructing the mechanical model of the artificial support body and surrounding rock structure of backfill surface, the original support strength of mining roadway was verified, and the difference optimization was carried out for different advance sections of mining roadway. The experimental results show that the advance active support technology can save 60.6% of the cost compared with the passive support, and can provide reference for the optimization of the advance active support in similar filling mining.

**Key words:** packing face; mechanical model; advanced active support; differential optimization

在煤炭开采领域,充填开采正逐步被践行采用<sup>[1]</sup>。目前在锚杆索主动支护研究方面取得了不少成果。姜福兴等<sup>[2]</sup>借助蠕变塑化模型,解析了三维蠕变的推导式,为灾变巷道主动支护提供了新的理论依据;康红普等<sup>[3]</sup>先后开发出高韧性钢绞线等多种抗冲构件,提出“三主动”围岩控制方式;何满潮等<sup>[4-5]</sup>在留巷支护方面积累了丰富的现场经验,恒阻钢绞线的研发为采动留巷提供了可能。主动支护的应用提高了采动巷道的稳定性。针对充填体覆岩运动与围岩控制,左建平等<sup>[6]</sup>通过研究充填区覆岩移动变形曲率,提出基于评价体系的覆岩曲率特征,得出覆岩曲率  $K$  的验证方程式;Li 等<sup>[7]</sup>基于薄板理论,研究了覆岩破断的临界点,得出充填区覆岩运动规律。

在回采巷道超前支护方面也有不少学者开展了相关研究。综采面巷道系统受采动及多种支承压力影响,需要对回采巷道超前段进行主动支护<sup>[8-9]</sup>。龙景奎等<sup>[10]</sup>通过研究回采巷道超前主动控制的影响因素,提出采用锚索梁协同超前支护技术,有效提高了围岩的稳定性;姚强岭等<sup>[11]</sup>通过构建围岩控制力学模型,计算超前段围岩强度,提出“注浆+锚索”主动控制技术,为回采巷道超前段智能化开采提供参考;高明仕等<sup>[12]</sup>通过分析吸能准则理论,提出掏裂式卸能技术,结合主动加固技术有效控制了巷道弱结构的稳定性。

《煤矿安全规程(2016)》要求回采巷道超前段须加强支护,传统被动超前支护存在反复挪移支撑巷道顶板的过程,使覆岩裂隙的扩展加剧,不利于原构建支护系统的稳定。采用超前锚索主动支护可发挥锚杆索自身主动支护的优势,而针对充填开采情况下超前支护的方式与合理的参数控制鲜有研究。因此本研究基于岱庄煤矿 31322 充填工作面,借助矿压观测确定超前段围岩运移和应力演化特征,基于工作面应力场的分布规律,提出“主动支护替代被动支护”思路,通过研究不同跨度充填对超前段的影响,确定超前锚杆索主动支护方案在完全充填开采条件下的可行性。

## 1 工程实例

### 1.1 工程概况

山东岱庄煤矿 31322 充填工作面开采山西组 3<sub>上</sub> 煤层,埋深 -230 m,该采区“三下”压煤量大,采用充填法替代垮落法处理采空区,且运用留巷技术将 31322 工作面运输巷道保留作为下一个工作面的回采巷道。3<sub>上</sub> 煤层赋存稳定,煤层厚度为 3.4 m,煤层倾向 4°。顶板多为炭质泥岩和中粒砂岩,地质构造简单。采用 KOS25100HP 型膏体充填泵进行泵送充填,充填循环步距 3.0 m。31322 工作面巷道及切眼呈不规则形状布置,利用原 31305 西运输巷道作为工作面运输巷道,全长平距 516 m,材外巷与上一个采空区间隔 40 m,布置如图 1。

### 1.2 原巷道支护状况

采用 DW28-250/100 单体支柱配合一字梁铰接顶梁超前 20 m 进行支护。采用单体支柱护顶时,支护面积较小,在推采过程中需要反复挪移,劳动量大,而且存在反复支撑巷道顶板的过程,加剧了覆岩裂隙的扩

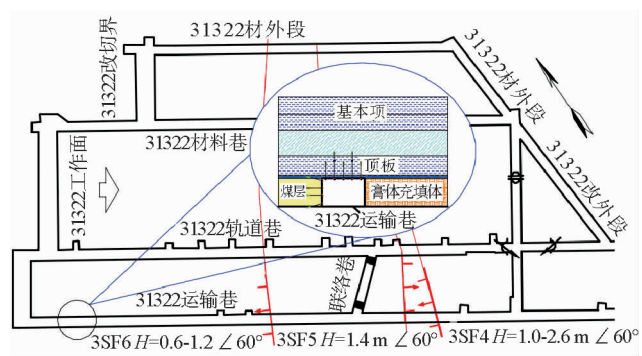


图 1 巷道布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of routing arrangement

展,不利于原支护系统构建的稳定锚固层,也降低了充填开采效率<sup>[13]</sup>,被动支护布置见图2。针对上述问题,开展充填工作面超前段锚杆索支护替代单体支柱支护技术研究,对充填开采超前段进行主动支护优化,有利于充填生产效能的提升。

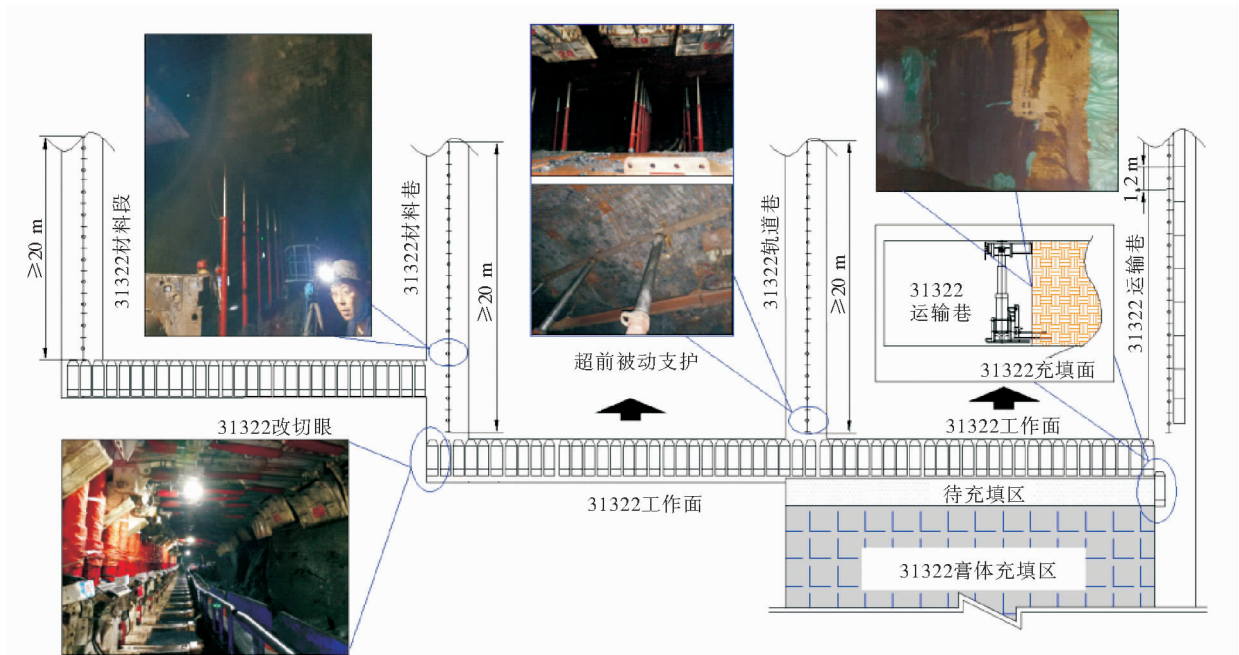


图2 31322 充填工作面超前被动支护布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of advance passive support layout in 31322 filling working face

## 2 现场矿压观测及其数据分析

### 2.1 矿压观测内容及方案

为了掌握充填开采超前支撑压力分布规律,在主动支护替代被动支护设计前先对 31322 充填工作面回采巷道进行矿压观测,为实施超前主动支护提供数据支持。通过 GYM400 锚杆索应力传感器进行受力监测,沿 31322 运输巷道推进方向布置 3 个间距 5 m 的观测站;通过 GYW300 围岩移动传感器进行离层监测,沿推进方向顶板中心线布置 4 个间距 5 m 的观测站,深基点固定在顶板 5 m 处,浅基点布设在顶板孔深 1.0、1.5、2.0 和 2.5 m 处;通过 DWJ-5 多点位移计监测围压不同深度变形情况,在顶板离层指示仪同一断面非工作面侧布置孔深 5 m 的多点位移计。

通过手动激光测距仪监测回采巷道顶底板移近量、两帮移近量,从超前 31322 工作面 35 m 开始监测,依次沿走向布置 3 组间距 10 m 的十字测点站;通过 GYW25 围岩应力传感器监测 31322 工作面采动应力变化情况,依次间隔 2 m 布置 5 台钻孔应力计,孔深分别为 1、3、5、7 和 9 m。

### 2.2 矿压实测分析

运用 CMPSES 分析软件对井下矿压监测设备进行数据采集,同时结合井下人工采集数据进行分析。

#### 1) 锚杆索受力分析

超前工作面前方 35、40 和 45 m 依次布置锚杆索测站,综合 31322 运输巷道锚杆索应力曲线(图 3)来看:顶板锚索和帮部锚杆受力情况有所不同,锚索直接锚固到基本顶岩层中,相比于煤帮锚杆应力计受力变化更加敏感;1<sup>#</sup> 锚索应力最大增长为 5 MPa,工作面推采到距离 1<sup>#</sup> 测站 0 m 附近受到充填支架支撑影响,骤减到 30 MPa,2<sup>#</sup> 测站在 2021 年 1 月 3 日前维持在初始锚索预紧力范围,压力无显著变化;3<sup>#</sup> 测站超前工

作面约 3、15 和 26 m 时,锚索压力数值变化在 2 MPa 内,超前采动影响细微。采用大于 90% 的充填率的充填工序与设备,使顶板下移空间尽可能缩小,有效限制了顶板的进一步破坏。

2) 帮部钻孔应力计

综合 31322 运输巷道钻孔应力计曲线(图 4)分析:钻孔应力计 1#~10# 布置于 31322 运输巷道非工作面侧。1# 测点为浅部布置,超前 10 m 处增加了 0.62 MPa,工作面推采至 4# 和 5# 测点时,数据稳定,仅发生 1 MPa 应力变化;2#、3#、6# 和 7# 等应力值维持在 2021 年 1 月 17 日初始打压阶段,无显著数值变化。1#~10# 应力变化均小于 10 MPa,侧向支撑压力影响非常小,超前影响范围有限。11# 和 12# 布置在充填体中,钻孔应力计安装在高温充填体中,外加管路密封性受环境温度影响较大,11# 和 12# 的监测数据存在较大误差,不参与充填体围岩应力环境的数据分析。

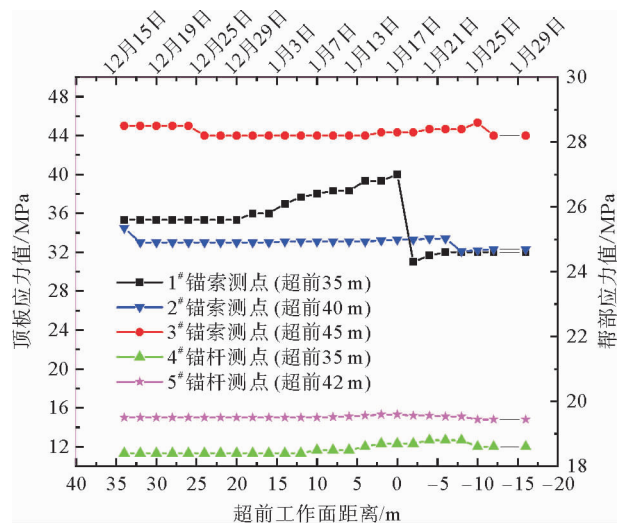


图 3 锚杆索受力监测曲线图

Fig. 3 Stress monitoring curve of anchor cable

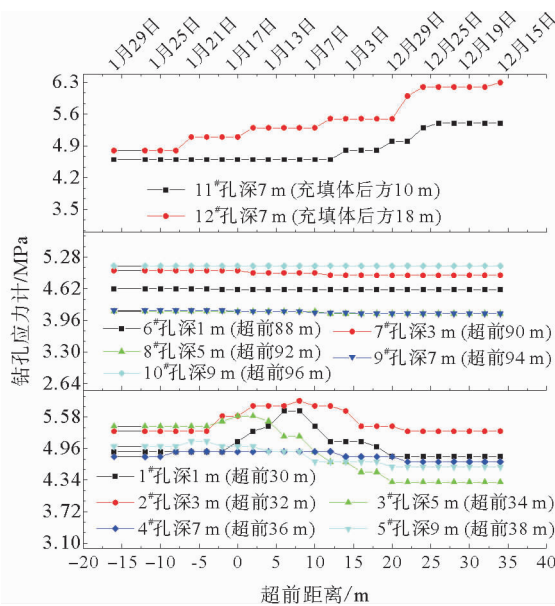


图 4 帮部钻孔应力计监测曲线图

Fig. 4 Monitoring curve of borehole stress meter on the side

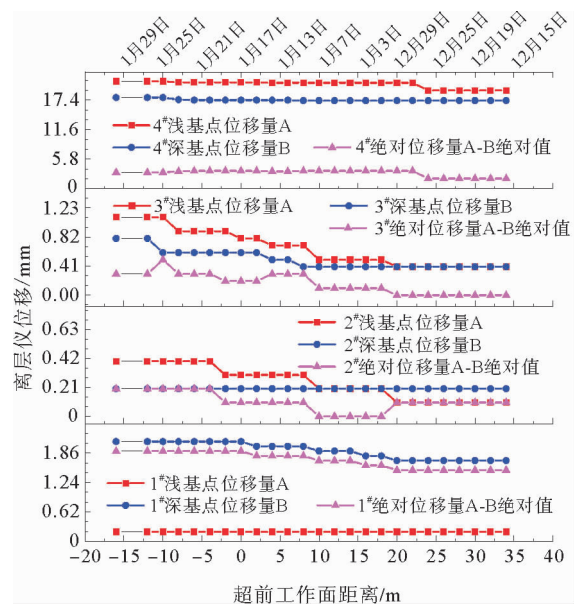


图 5 顶板离层仪监测曲线图

Fig. 5 Monitoring curve of roof separator

3) 离层与表面围岩监测

浅、深基点在超前 0~18 m 发生多次细微变化,深基点位移较浅基点明显,但整体位移量极小。2# 测点顶板 1.5~5 m 内岩层共有 1.8 mm 位移,可以忽略不计。3# 测点超前于工作面 10 m 处顶板深基点出现 0.3 mm 的位移,浅基点稳定,截止工作面推采到测点位置时,顶板 2~5 m 岩层内保持 0.3 mm 位移量,顶板非常完整。4# 测点顶板深浅基点共发生 2.9 mm 位移,位移量较小,后续数值趋于稳定。手动激光测距仪数据显示巷道表面受工作面采动影响有限,巷道未发生变形破坏。



### 3 数值计算模型

#### 3.1 模型构建

为分析膏体充填控制覆岩运移效果,从覆岩位移情况和工作面前方应力演化两方面模拟工作面推采过程。以岱庄煤矿 31322 膏体充填工作面为地质背景,运用内置 Extrusion 构建 Group 分组模块,边界尺寸 100 m,模型尺寸(长×宽×高)为 540 m×500 m×320 m,31322 工作面尺寸(工作面倾向长度×走向长度)为 110 m×330 m。模型煤层顶板施加等效于上覆岩层 278 m 自重的均布载荷  $\sigma_z$  为 8.8 MPa,四周约束水平方向自由度,底边固定垂直位移。其中: X 轴为工作面推进方向, Y 轴为工作面轴向方向, Z 轴为铅垂方向,参数见表 1。

31322 工作面 FLAC<sup>3D</sup> 模型采用六面体单元划分网格,为突出研究重点,3<sub>上</sub> 煤层处网格加密,其余部分网格逐渐加大,共建立计算单元 724 436 个,计算节点 886 471 个。通过 Fish 语言的 Loop 循环,按 3.0 m 充填步距构建 Strainsoftening 与 Fillzone 充填环境。第一步构建 3<sub>上</sub> 煤层和顶底板岩层模型,并进行应力平衡计算;第二步以岱庄煤矿实际巷道布置参数,开掘 31322 工作面巷道;第三步充填法开采 31322 工作面,研究膏体充填工作面推采过程覆岩应力变化情况。其中充填步距为 3.0 m,膏体材料强度大于 40 MPa,并且维持充填体的长期稳定<sup>[14-15]</sup>,模型图见图 6。

#### 3.2 模拟分析

31322 工作面巷道系统贯通后进行平衡计算,未推采时运输巷道与轨道巷道间隔 30 m,材外两切眼宽度分别为 58 和 32 m。最大应力主要集中在工作面前方与端头煤体上,竖直应力分布峰值为 9.4 MPa,与实际埋深 278 m 的应力载荷相差 7.95%,模拟的应力环境较为接近;最大剪应力云图以巷道轴方向呈半圆拱布置,巷道开挖表面剪应力最小为 0.63 MPa,在 3<sub>上</sub> 煤层与顶底板类泥岩集中分布。

如图 7 所示,充填工作面推采到 32 m 时,工作面前方及两端头出现应力集中现象,超前应力峰值达 3.5 MPa,最大剪应力受开采影响呈弱化趋势,并在充填体区域弱化为 0.25 MPa;充填体前方位移峰值为 70 mm,巷道 X 轴最大位移 27 mm, Y 轴最大位移为 15 mm,这与现场矿压监测较为吻合。当充填工作面推采到 64 m 时,工作面倾向长度增加到 88 m,最大主应力集中在充采工作面巷道两端的煤体上,超前工作面 5 m 范围内剪应力出现峰值 4.5 MPa; Z 轴最大位移主要集中在充填体前方 8 m 范围内,31322 运输巷道垂直方向最大位移量为 55 mm,倾向和走向水平位移量均小于 25 mm。

推采到 96 和 128 m 时,最大剪应力主要集中于工作面前方和工作面两端头,应力峰值较推采至 32 m 处云图仅存在 5.6% 的差值。工作面长度从 88 m 增加到 128 m,较大的顶板位移量集中于充填体前段 10 m 范围。通过模拟不同的充填跨度研究了完全充填开采对超前段围岩力学环境的影响,确定超前锚杆索主动

表 1 31322 工作面煤顶底板岩样力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of rock samples of coal roof and floor at 31322 working face

岩性	密度 (/kg/m <sup>3</sup> )	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	内聚力 /MPa	抗拉强 度/MPa
上覆岩层	2 700	3.54	2.44	2.8	2.4
砂质泥岩	2 350	0.60	0.50	3.2	0.6
细砂岩	2 615	1.63	1.12	2.5	2.5
泥岩	2 200	0.60	0.50	2.6	0.5
3 <sub>上</sub> 煤	1 350	0.82	0.38	5.8	0.5
下覆岩层	2 750	2.45	1.96	2.3	2.1
充填体	1 800	0.63	0.52	6.5	1.3

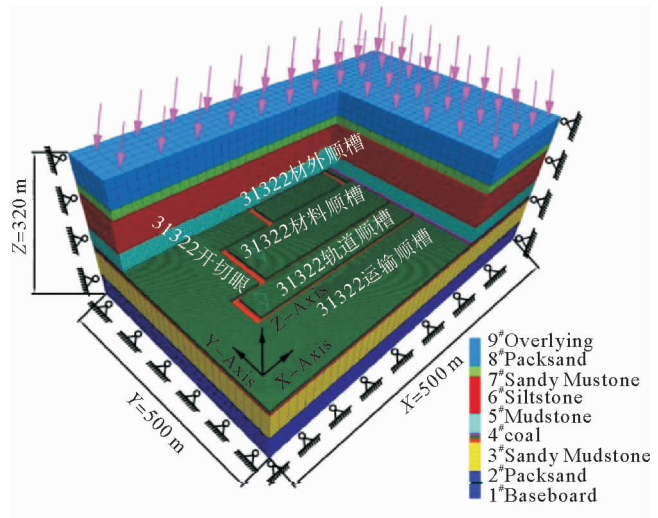


图 6 FLAC<sup>3D</sup> 数值模型示意

Fig. 6 FLAC<sup>3D</sup> numerical model

支护方案在完全充填开采条件下的可行性。最大剪应力集中于工作面前方和工作面端头煤体中,峰值应力间仅存在 5.6% 的差值;顶板运移明显集中于充填体前段 10 m 范围,随工作面推采跨度增加,运移量增加了 154%。

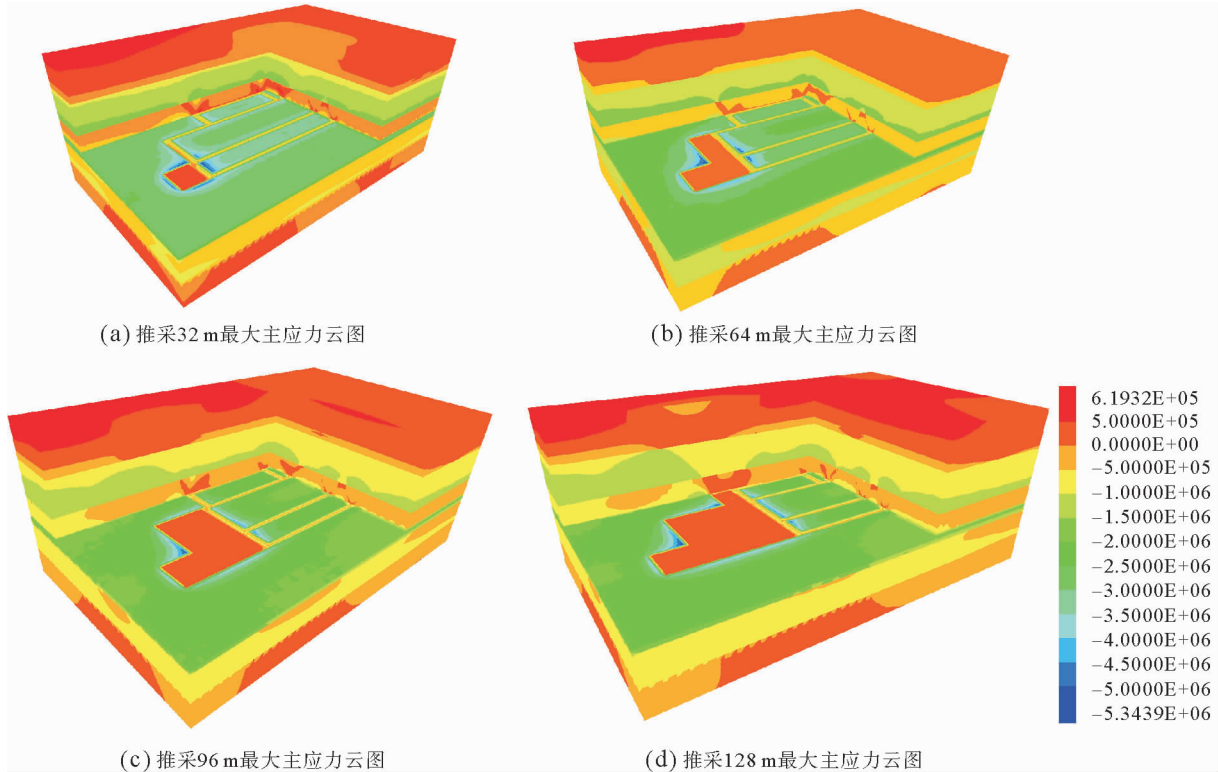


图7 工作面不同充填跨度模拟云图

Fig. 7 Simulated cloud images of different filling spans of working face

#### 4 理论计算

##### 1) 巷道支护力学模型

岱庄煤矿 31322 工作面采用超前锚杆索作为主体支护,高强锚索对巷道顶板施加轴向约束力,通过简化为一层顶板,形成稳定承载结构层,31322 工作面布置 4 条巷道,两相邻巷道最小间距为 30 m。充填面顶板所受载荷均来自顶板覆岩自重。可以简化为:

$$q = 1.1 \times KgH \times \frac{\rho_1 H_1 + \rho_2 H_2}{H_1 + H_2} \tag{1}$$

式中: $q$  为顶板所受均布载荷; $K$  为安全开采系数,取 4; $H$  为开采高度; $\rho_1$  为直接顶岩层密度; $H_1$  为直接顶岩层厚度; $\rho_2$  为基本顶岩层密度; $H_2$  为基本顶岩层厚度; $g$  为重力加速度。取最大值得  $q_{max} = 0.382$  MPa。考虑安全系数取 1.3 倍计算,则超前支护的合理支护强度为 0.497 MPa。

##### 2) 围岩支承力计算

构建充填工作面超前段人工支护体与围岩结构的力学模型,假定巷道一侧为实体煤,另一侧为煤柱,充填体强度远大于煤体强度。基于弹性理论,视巷道左右两帮均为实体煤,以岱庄煤矿运输巷道支护模型为例,如图 8。

31322 运输巷道以及 31322 轨道巷道相距最小为 30 m, 基于受力平衡关系, 煤层顶板在锚杆索支护约束下, 可简化为板梁结构, 如图 8 所示。 $a$  为巷道宽度,  $s$  为巷道实体帮宽度,  $b$  为巷道高度,  $b_1$  为力学模型顶板厚度,  $R_1$  和  $R_3$  为实体煤侧的支承力,  $R_2$  为人工支承力;  $w$  为岩梁挠度,  $q$  为  $3_{\perp}$  煤所受竖向覆岩荷载;  $\lambda$  为  $3_{\perp}$  煤顶板侧力系数。

根据力矩平衡关系:

$$q = R_1 + R_2 + R_3 \quad (2)$$

基本顶和直接顶的刚度大于  $3_{\perp}$  煤体的刚度, 巷道实体煤帮上边界施加给定变形, 下边界为固定边界, 巷道实体煤帮内边界和下边界为固定边界, 实体煤帮外边界支护阻力为  $P_3$ 。煤体沿巷道走向  $Z$  的跨度远大于沿  $X$ 、 $Y$  方向上的尺寸, 因此对于煤体采用平面应变问题计算方法<sup>[11]</sup>。

实体煤上垂直应力分布为:

$$\sigma_y = \frac{E}{1+\mu} \left[ \frac{\mu}{1-2\mu} \left( \frac{A_1}{sb} y + \frac{B_1}{sb} x - \frac{2B_1}{sb^2} y \right) - \frac{2B_1}{sb^2} xy + \frac{B_1}{sb} x \right], \quad (3)$$

则实体侧的支承力  $R_1$ :

$$R_1 = s \sigma_s = \frac{s(\sigma_y |_{x=0, y=b} + \sigma_y |_{x=s, y=b})}{2} \quad (4)$$

将巷道支护参数  $A_1$ 、 $B_1$  代入式(3)~(4), 则实体侧的支承力  $R_1$  为 0.064 MPa, 计算出 31322 运输巷道人工支承力  $R_2^{\text{运输巷道}}$  至少需要 0.368 MPa, 同理可以计算出  $R_2^{\text{轨道巷道}}$ 、 $R_2^{\text{材料巷道}}$  和  $R_2^{\text{材外巷道}}$  见表 2。

表 2 人工强度计算表

Tab. 2 Manual strength calculation

巷道名称	人工支承力 $R_2$ /MPa	支护密度/(根/m <sup>2</sup> )		支护强度/MPa		原支护强度 /MPa	补强/MPa
		锚杆	锚索	锚杆	锚索		
31322 运输巷道	0.369	1.01	0.20	0.171	0.100	0.271	0.098
31322 轨道巷道	0.368	1.20	0.24	0.204	0.200	0.324	0.045
31322 材料巷道	0.348	1.31	0.26	0.223	0.130	0.353	无需补强
31322 材外巷道	0.332	1.26	0.25	0.214	0.125	0.339	无需补强

### 3) 支护强度校验

31322 运输巷道顶板每排布置 5 根  $\Phi 20 \text{ mm} \times 2400 \text{ mm}$  锚杆, 间排距为  $1000 \text{ mm} \times 1100 \text{ mm}$ 。顶板每排布置 2 根 SKL18-1/1780 型长度为 7300 mm 的锚索, 间排距为  $2000 \text{ mm} \times 2200 \text{ mm}$ 。锚杆拉断载荷  $F_{\text{锚杆}}$  为 170 kN, 锚索拉断载荷  $F_{\text{锚索}}$  为 500 kN。则锚杆索支护密度

$$p = \frac{n}{a \times L_{\text{排}}} \quad (5)$$

式中:  $p$  为锚杆(索)支护密度;  $n$  为每排布置锚杆索根数;  $L_{\text{排}}$  为锚杆索布置排距。人工支护强度为锚杆和锚索支护强度之和, 将 31322 充填工作面四条巷道巷道尺寸和支护参数汇总得到各巷道人工支护强度表 2。

### 4) 巷道补强方案

为保证岱庄煤矿 31322 充填工作面巷道在多次采动后仍能保持安全稳定, 简化超前支护工序和劳动量, 决定采用超前主动支护替代单体支柱被动支护方案。运输巷道与轨道巷道采用排距 2200 mm, 每排

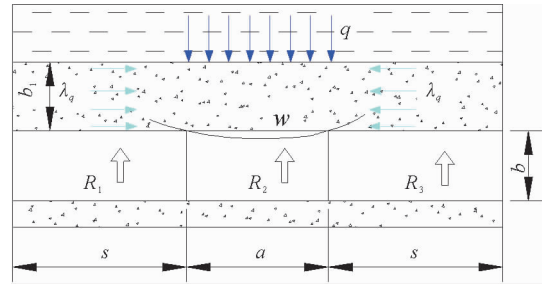


图 8 充填工作面超前巷道支护模型

Fig. 8 Advance grooving support model of filling working face

补打 3 根  $\Phi 20\text{ mm} \times 2\ 800\text{ mm}$  锚杆,两肩窝锚杆与顶板夹角为  $75^\circ$ ,高强钢方托盘配合 W 钢带补强支护,详见图 9。对于过断层段和节理段需缩小循环进度,加强支护段需延伸到正常顶板不小于 5 m。每排补打 3 根  $\Phi 17.8\text{ mm} \times 7\ 300\text{ mm}$  锚索,配合 3 孔 W 型钢带补强支护。

### 5 经济效益

“单体支柱+铰接顶梁”与“高强锚杆索+W 钢带”成本分析见表 3。通过支护成本分析,超前锚杆索支护费用比单体支柱支护少 60.6%。

### 6 结论

1) 基于矿压观测确定超前段围岩运移和应力演化特征,完全充填工作面超前段来压极小,工作面顶板中部有微小下移,超前段围岩窥视环境良好,应力场显示微弱,并提出了“主动支护替代被动支护”思路。

2) 利用 Fillzone 模块模拟不同的充填跨度,研究了完全充填开采对超前段围岩力学环境的影响,分析超前锚杆索主动支护方案在完全充填开采条件下的可行性。最大剪应力集中于工作面前方和工作面端头煤体中,峰值应力间仅存在 5.6%的差值;顶板运移明显集中于充填体前段 10 m 范围,随工作面推采跨度增加,运移量增加了 154%。

3) 根据构建的充填工作面超前段人工支护体与围岩结构力学模型,校验了回采巷道原支护强度,并针对不同回采巷道进行差异性优化,设计了充填开采超前段主动支护替代被动支护方案及关键参数。

4) 在 31322 工作面回采巷道开展超前主动支护替代被动支护试验,结果表明在满足安全充填回采的情况下,超前主动支护技术较被动支护可节约成本 60.6%,为类似充填开采工作面超前段主动支护优化提供借鉴。

#### 参考文献:

[1]屠世浩,郝定溢,李文龙,等.“采选充+X”一体化矿井选择性开采理论与技术体系构建[J].采矿与安全工程学报,2020,37(1):81-92.  
 TU Shihao,HAO Dingyi,LI Wenlong,et al.Construction of the theory and technology system of the selective mining in “mining,dressing,backfilling and X” integrated miner[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2020,37(1):81-92.  
 [2]姜福兴,冯宇,KOUAME K J A,等.高地应力特厚煤层“蠕变型”冲击研究[J].岩土工程学报,2015,37(10):1762-1768.  
 JIANG Fuxing,FENG Yu,KOUAME K J A,et al.Mechanism of creep-induced rock burst in extra-thick coal seam under high ground stress[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(10):1762-1768.  
 [3]康红普.我国煤矿巷道锚杆支护技术发展 60 年及展望[J].中国矿业大学学报,2016,45(6):1071-1081.  
 KANG Hongpu.Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China[J].Journal of China University of Mining & Technology,2016,45(6):1071-1081.  
 [4]何满潮,李晨,宫伟力,等.NPR 锚杆/索支护原理及大变形控制技术[J].岩石力学与工程学报,2016,35(8):1513-1529.  
 HE Manchao,LI Chen,GONG Weili,et al.Support principles of NPR bolts/cables and control techniques of large deformation[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(8):1513-1529.

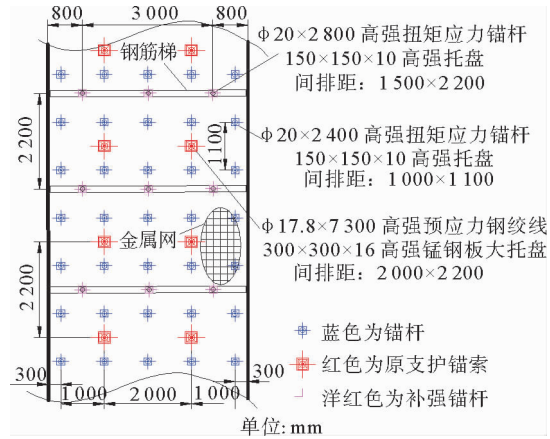


图 9 巷道补强支护示意图

Fig. 9 Schematic diagram of gateway reinforcement support

表 3 优化前后支护成本计算表

Tab. 3 Support cost calculation 元/m

支护方式	材料成本	人工成本	合计
被动支护	397.3	1 454.5	1 851.8
主动支护	427.3	301.2	728.5
采用主动支护技术后可节约:			1 123.3



- [5]何满潮,王亚军,杨军,等.切顶成巷工作面矿压分区特征及其影响因素分析[J].中国矿业大学学报,2018,47(6):1157-1165.  
HE Manchao,WANG Yajun,YANG Jun,et al.Zonal characteristics and its influence factors of working face pressure using roof cutting and pressure-relief mining method with no pillar and roadway formed automatically[J].Journal of China University of Mining & Technology,2018,47(6):1157-1165.
- [6]左建平,周钰博,刘光文,等.煤矿充填开采覆岩连续变形移动规律及曲率模型研究[J].岩土力学,2019,40(3):1097-1104.  
ZUO Jianping,ZHOU Yubo,LIU Guangwen,et al.Continuous deformation law and curvature model of rock strata in coal backfill mining[J].Rock and Soil Mechanics,2019,40(3):1097-1104.
- [7]LI M,ZHANG J X,LIU Z,et al.Mechanical analysis of roof stability under nonlinear compaction of solid backfill body[J].International Journal of Mining Science and Technology,2016,26(5):863-868.
- [8]柴令.深部综采面超前支护体-锚固围岩耦合机理与应用[D].徐州:中国矿业大学,2018.  
CHAI Ling.The coupling mechanism and application of advanced support-anchorage surrounding rock in fully mechanized coal face[D].Xuzhou:China University of Mining and Technology,2018.
- [9]任永强.布尔台矿综采超前支护技术对比研究与设计[J].煤炭技术,2017,36(5):28-30.  
REN Yongqiang.Research and design of advanced support technology in fully mechanized coal mining in Buertaicoal mine [J].Coal Technology,2017,36(5):28-30.
- [10]龙景奎,杨风才,何敏,等.深部回采巷道超前压力区锚索梁协同锚固试验研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(1):103-109.  
LONG Jingkui,YANG Fengcai,HE Min,et al.Experimental study on synergistic anchorage of cable and beam in the advanced pressure zone of deep mining roadways[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2021,38(1):103-109.
- [11]姚强岭,王焯辉,夏泽,等.煤矿长壁采煤主动式超前支护关键技术及应用[J].采矿与安全工程学报,2020,37(2):289-297.  
YAO Qiangling,WANG Xuanhui,XIA Ze,et al.Key technology and application of active forepoling for longwall coal mining in coal mine[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2020,37(2):289-297.
- [12]高明仕,贺永亮,陆菜平,等.巷道内强主动支护与弱结构卸压防冲协调机制[J].煤炭学报,2020,45(8):2749-2759.  
GAO Mingshi,HE Yongliang,LU Caiping,et al.Coordination mechanism of internal strong active support,soft structure pressure relief and anti-punching of roadway[J].Journal of China Coal Society,2020,45(8):2749-2759.
- [13]宋振骥,崔增娣,夏洪春,等.无煤柱矸石充填绿色安全高效开采模式及其工程理论基础研究[J].煤炭学报,2010,35(5):705-710.  
SONG Zhenqi,CUI Zengdi,XIA Hongchun,et al.The fundamental theoretical and engineering research on the green safe no coal pillar mining model by mainly using coal gangue backfill[J].Journal of China Coal Society,2010,35(5):705-710.
- [14]魏明尧,张守文.动力灾害过程中锚杆支护的极限承载能力数值模拟研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(4):37-45.  
WEI Mingyao,ZHANG Shouwen.Simulation study of maximum bolt supporting capacity during dynamic disaster[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2020,39(4):37-45.
- [15]HUANG Y L,LI J M,SONG T Q,et al.Analysis on filling ratio and shield supporting pressure for overburden movement control in coal mining with compacted backfilling[J].Energies,2017,10(1):31-54.

(责任编辑:吕海亮)