

煤巷内预设混凝土墙成巷及围岩控制技术*

石晋松¹, 莫春虎², 郭忠平²

(1. 山西亚美大宁能源有限公司, 山西 晋城市 048000;
2. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛市 266590)

摘要:为了解决矿井瓦斯排放问题和提高煤炭资源回采率,以大宁煤矿309综采工作面回风巷与瓦斯巷巷间煤柱留设问题为工程背景,提出煤巷内预设混凝土墙成巷技术,并分析其施工工艺,即在布置回风巷时,将巷道按宽面掘进,并用锚杆(索)进行永久支护,滞后掘进工作面50 m,在巷道内浇筑混凝土墙,将巷道隔离成双巷。随着工作面回采,顶板沿切顶线垮落形成沿空巷道,利用混凝土墙置换巷间煤柱实现无煤柱开采。通过理论计算对隔离墙稳定性进行分析,得出1.6 m宽度墙体满足支护安全要求,根据设计的巷道支护参数进行了数值模拟分析,最终确定巷道采用“隔离墙+锚杆+锚索+钢筋梁+锚网”联合支护方案,此项技术可为类似矿井实施巷内预设混凝土墙技术提供参考。

关键词:隔离墙;巷道掘进;巷道支护;无煤柱开采;数值模拟
中图分类号:TD822;TD353 **文献标识码:**A
文章编号:1005-2763(2023)09-0113-06

0 引言

煤层工作面在掘进和回采过程中,瓦斯从工作面落煤、采空区以及巷道两帮涌出,导致采煤工作面上隅角出现瓦斯超限现象。为了解决瓦斯排放问题,需在回风巷旁布置瓦斯排放巷,形成双巷布置系统。

众多学者对双巷布置巷间煤柱尺寸和应力分布与变形特征进行了深入研究,余学义、白文勇等^[1-2]对双巷布置巷间煤柱经历掘进和采动过程中的应力分布和变化规律进行了研究,确定了大采高双巷布置工作面合理巷间煤柱的宽度;王琦等^[3]利用极限平衡理论、数值模拟和工程实践方法确定了厚煤层综放双巷工作面的巷间煤柱宽度,并给出了最大临界尺寸、最小临界尺寸的定义,指出巷间窄煤柱宽度应小于最大临界尺寸;谭凯等^[4]研究了巷道失稳原

因和巷间煤柱的合理宽度,并在现场成功进行了煤柱优化试验,改善了双巷布置的巷道失稳问题。

混凝土隔离墙置换煤柱技术既能提高煤炭资源回采率,又可以避免井下煤柱的应力集中,解决煤柱瓦斯涌出问题,具有较高的经济效益和安全性能。马立强等^[5]提出巷内预置充填带无煤柱开采技术,克服了传统巷间留设煤柱护巷的弊端,实现了厚煤层无煤柱开采;张保东等^[6]提出了高瓦斯矿井宽面掘进一次成双巷无煤柱开采技术,并在安顺煤矿9106工作面成功地进行了开采实践,解决了高瓦斯矿井瓦斯专排巷和回风巷巷间煤柱的留设问题;李红雷、房帅等^[7-8]提出了双巷掘进柔模混凝土无煤柱开采技术,设计出双巷掘进施工方案、柔模混凝土隔离墙构筑方案、聚能预裂爆破切顶卸压护巷方案,并在唐安煤矿和岳城煤矿进行现场实践,实现了区段无煤柱开采,具有良好的经济效益和应用前景。

上述研究对双巷布置巷间煤柱尺寸作了比较深入的分析,设计出了合理预置充填体的施工方案。但针对双巷布置工作面巷道利用混凝土墙置换煤柱以及围岩控制技术缺乏进一步的研究。本文以大宁煤矿309综采工作面为研究背景,分析煤巷内预设混凝土隔离墙施工工艺,在保证隔离墙稳定的前提下,设计出对应的围岩控制技术,以解决瓦斯排放问题,实现无煤柱开采,为类似矿井施工混凝土隔离墙技术提供参考。

1 巷内预设混凝土墙成巷技术

选用大宁煤矿现采3号煤层,煤层埋深为347 m,厚度为3.0~4.2 m,平均厚度为4.0 m,属厚煤层开采,煤层倾角为4°~6°,平均为5°,属于缓倾斜煤

* 收稿日期:2022-11-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51904166)。

作者简介:石晋松(1978—),男,山西晋城人,工程师,主要从事采矿方法与工艺研究,E-mail:397054051@qq.com。

层;伪顶为泥岩,平均厚度为 0.5 m;直接顶为砂质泥岩,平均厚度为 10.5 m;基本顶为粉砂岩,平均厚度为 8 m;伪底为砂质泥岩,平均厚度为 2 m;直接底为细砂岩,平均厚度为 6 m;基本底为泥岩,平均厚度为 7 m。矿井属高瓦斯矿井,煤层自燃等级为Ⅲ级,属不易自燃煤层。目前正在回采的 308 综采工作面采用一次采全高全部垮落综合机械化采煤法,掘进工作面采用双巷布置形式,巷间煤柱尺寸为 43.5 m,煤柱尺寸较大造成了极大的煤炭资源浪费。因此,计划在 309 综采工作面实施煤巷内预设隔离墙成巷技术。

1.1 施工工艺

在布置下一个综采工作面回风巷时,巷道按宽断面掘进,并进行永久支护,滞后掘进工作面一定距离后浇筑混凝土隔离墙并沿煤帮扩巷,将巷道隔离成回风巷和瓦斯巷,同时每隔一个周期来压步距留设联络巷,并及时用挡风装置将联络巷密封,工作面巷道布置如图 1 所示。巷道掘进过程中,新鲜风流由回风巷进入,再由瓦斯巷排出;当工作面回采时,将采空区联络巷打开,风流由进风巷流入,污风由回风巷排出,并在瓦斯巷设立独立配风系统,将采空区和邻近煤层的瓦斯由瓦斯巷排出,工作面回采完成后,将混凝土隔离墙做巷旁支护,并保留瓦斯巷为下一工作面服务,既解决瓦斯排放问题又实现了无煤柱开采。施工工艺如下:

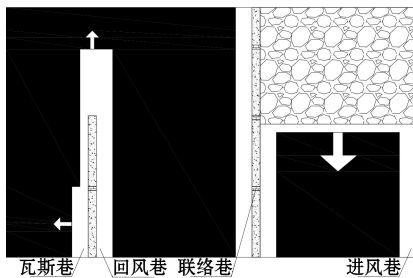


图 1 工作面巷道布置

(1) 在布置回风巷时,将巷道按宽面进行开掘,并用锚杆(索)进行永久支护(见图 2(a));

(2) 滞后掘进工作面 50 m,在巷道合理位置浇筑混凝土隔离墙,并扩巷形成回风巷和瓦斯巷(见图 2(b));

(3) 施工切顶线(见图 2(c));

(4) 工作面回采,顶板沿切顶线垮落,形成沿空巷道(见图 2(d))。

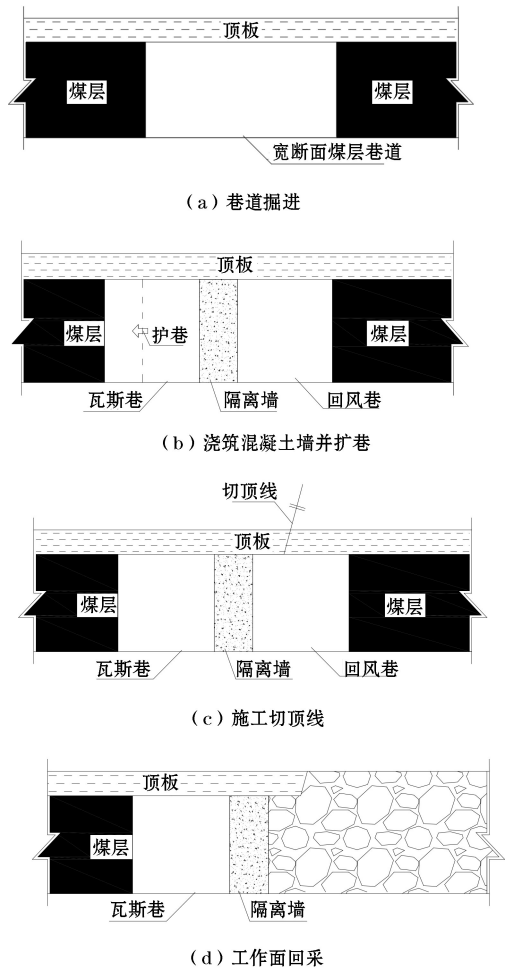


图 2 巷内预置混凝土隔离墙施工工艺

1.2 隔离墙设计

1.2.1 柔模泵注混凝土技术

柔模泵注混凝土结构的柔模是以三维纺织纤维柔性材料缝制而成,将矿用高性能混凝土浆泵注入柔模内,采用双拉锚栓约束柔模混凝土浆产生的横向变形,利用柔模透水不透浆特性和泵压使混凝土浆强制接顶,及时主动支撑顶板。柔模整体为封闭的三维纺织结构,内部设有横斜拉筋,外形与墙体相同,其上设有灌注口和固定装置。具有结构简单、轻质高强、施工方便等特性,可应用于矿山混凝土隔离墙快速砌筑工艺^[9]。

1.2.2 隔离墙尺寸分析

表征隔离墙稳定性和经济性的主要参数为宽高比,从墙体稳定性方面来说,随着宽度的增加,稳定性也随之提升,但过宽的墙体不仅增加了护巷成本,也降低了巷道利用率,经研究得出混凝土隔离墙体宽高比在 0.4~0.5^[10-13],在满足隔离墙稳定性的条件下使宽度尽可能小,以方便施工、节省时间、降低

成本等,本文针对该煤矿工程地质条件,设计隔离墙体高度为4 m,宽度为1.6 m。

1.2.3 隔离墙稳定性分析

(1) 墙体支护载荷计算。目前常用分离岩块法计算巷旁支护载荷^[14],如式(1)所示。

$$Q_k = \frac{8h \tan \alpha + 2(b + b_p + b_c)}{b_p} \times \frac{h(b + b_p + b_c) \gamma \cos \varphi}{b + 0.5b_p} \quad (1)$$

式中, Q_k 为墙体支护载荷,kN/m; b 为瓦斯巷宽度,取5 m; b_p 为隔离墙宽度,取1.6 m; b_c 为隔离墙体外侧悬顶距,取2 m; γ 为分离岩块容重,取25 kN/m³; h 为采高,取4 m; α 为直接顶跨落角,取25°; φ 为煤层倾角,取4°。将以上数据带入公式计算得出单位长度承受载荷 $Q_k=9798$ kN/m。

(2) 支护体承载能力计算。设计隔离墙高宽比为4/1.6=2.5,查询《混凝土结构设计规范》可知,构件的稳定系数 $k=0.98$ ^[15]。混凝土墙体承载能力计算如式(2)所示。

$$N_2 = k(f_c + 4\sigma_r)A_{cor} \quad (2)$$

锚栓约束力计算如公式(3)所示。

$$\sigma_r = \frac{\pi d^2 \cdot \sigma_b}{4\alpha_1 \cdot \alpha_2} \quad (3)$$

式中, N_2 为墙体承载能力,kN; k 为构件稳定系数,取0.98; f_c 为C30混凝土抗压设计强度,取14.5 N/mm²; σ_r 为锚栓套箍作用产生的约束力,MPa; A_{cor} 墙体截面面积,mm²; d 为锚栓直径,取22 mm; σ_b 为HRB500锚栓抗拉强度设计值,取435 N/mm²; α_1 、 α_2 分别为锚栓间距、排距,取 $\alpha_1=750$ mm, $\alpha_2=750$ mm。

将以上参数代入公式计算得锚栓的约束应力 $\sigma_r=0.294$ MPa,墙体承载能力 $N_2=24\ 580$ kN/m,大于墙体承受载荷 $Q_k=9798$ kN/m,理论计算安全系数为2.5。根据工程实践经验,当安全系数大于1.2时,巷旁支护强度满足要求^[16]。因此,设计的柔模混凝土隔离墙满足墙体稳定性和支护安全要求。

2 围岩控制技术

2.1 巷道支护参数设计

巷道支护形式及锚杆(索)支护参数对围岩稳定性有重要影响,巷道永久支护通过理论计算,结合现场地质条件,初步确定巷道支护采用“隔离墙+锚杆+锚索+钢筋梁+锚网”联合支护方案。

回风巷支护参数:顶板锚杆规格为 $\Phi 20$ mm \times 3000 mm,系高强左旋无纵肋螺纹钢锚杆,每排布置8根,间排距为1150 mm \times 1000 mm,每根锚杆使用2支锚固剂,锚固力大于130 kN,锚杆托盘规格为150 mm \times 150 mm \times 8 mm,锚杆外露长度为30 mm,施加预紧扭矩为300 N \cdot m;锚索规格为 $\Phi 21.8$ mm \times 9300 mm,系钢绞线锚索,每排布置6根,间排距为1500 mm \times 1000 mm,每根锚索使用3支锚固剂,锚固力大于300 kN,锚索外露长度为180 mm,施加预紧力大于200 kN。

瓦斯巷顶板支护参数:顶板锚杆规格为 $\Phi 20$ mm \times 3000 mm,系高强左旋无纵肋螺纹钢锚杆,每排布置5根,间排距为1000 mm \times 1000 mm,每根锚杆使用2支锚固剂,锚固力大于130 kN,锚杆外露长度为30 mm,施加预紧扭矩为300 N \cdot m;锚索规格为 $\Phi 21.8$ mm \times 9300 mm,系钢绞线锚索,每排布置3根,间排距为1500 mm \times 1000 mm,每根锚索使用3支锚固剂,锚固力大于300 kN,锚索外露长度为180 mm,施加预紧力大于200 kN。

钢筋梁由直径为 $\Phi 16$ mm、材质为Q235的圆钢焊接而成,具体规格为5孔的 $\Phi 16$ mm \times 4900 mm \times 80 mm钢筋梁,金属网为 $\Phi 3.5$ mm \times 6200 mm \times 1300 mm的菱形金属网片,网孔尺寸为60 mm \times 60 mm。巷道两帮支护参数:帮锚杆采用 $\Phi 18$ mm \times 1800 mm的玻璃钢锚杆,两帮各施工4根,间排距为1100 mm \times 1000 mm,每根锚杆安装1支锚固剂,锚固力为70 kN,锚杆外露长度为30 mm,预紧扭矩为40 N \cdot m,金属网规格为 $\Phi 3.5$ mm \times 6200 mm \times 1300 mm,系菱形金属网片,巷道支护设计如图3所示,具体支护参数见表1。

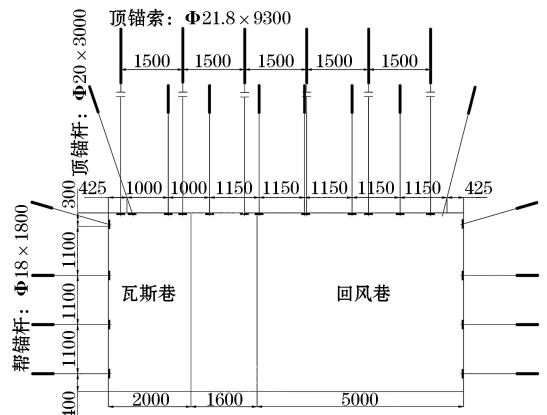


图3 巷道支护设计(单位:mm)

表 1 巷道支护参数

材料名称	直径/mm	长度/mm	间距/mm	排距/mm	预紧力/kN
顶锚杆	20	3000	1150/1000	1000	180
顶锚索	21.8	9300	1500	1000	300
帮锚杆	18	1800	1100	1000	75
钢筋梁	Q235 圆钢 $\Phi 16$ mm \times 4900 mm \times 80 mm 钢筋梁				
金属网	$\Phi 3.5$ mm \times 6200 mm \times 1300 mm 菱形金属网片				

2.2 巷道支护数值模拟

本文主要分析掘进工作面周围的应力分布、位移与破坏情况,不考虑水、瓦斯、温度及湿度的影响,为使模型尽量与现场情况接近,按照实测岩体力学参数建立模型,采用 FLAC3D 软件进行模拟分析,根据实际经验与采矿理论,将模型上边界设为自由边界,顶面施加垂直应力 8 MPa,侧压力系数取 1,模型侧边界约束水平位移,下边界约束垂直位移,模型尺寸长 \times 宽 \times 高为 80 m \times 15 m \times 50 m,共划分 172 640 个单元,预应力锚杆(索)采用 FLAC3D 软件内置 cable 结构单元命令进行模拟,计算参数见表 2 和表 3。

表 2 模型计算参数

岩层	密度/(kg/m ³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
粉砂岩	2460	6.67	4	9.7	10.2	32
砂质泥岩	2620	10.76	5.7	1.64	1.18	35
泥岩	2650	4.3	2.8	1.8	0.7	30
3 煤	1400	2.8	1.2	1.3	0.6	27
砂质泥岩	2620	10.76	5.7	1.31	1.18	35
细砂岩	2700	16.04	12.02	4.96	3.47	43
泥岩	2650	5.8	3.2	3.25	1.2	30
C30 混凝土	2500	15	12.85	15	12.9	45

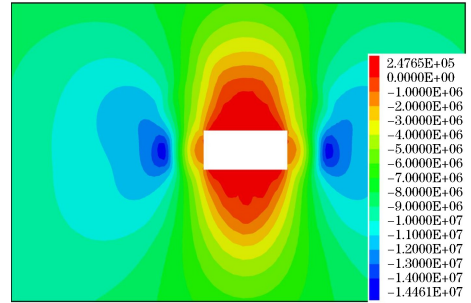
表 3 锚杆(索)参数

名称	弹性模量/GPa	黏结强度/(kN/m)	剪切刚度/(kN/m)	抗拉强度/MPa	预紧力/kN	锚固长度/mm
锚索	100	152	12000	1720	300	2000
顶锚杆	210	152	12000	630	180	1000
帮锚杆	75	78	6200	540	75	500

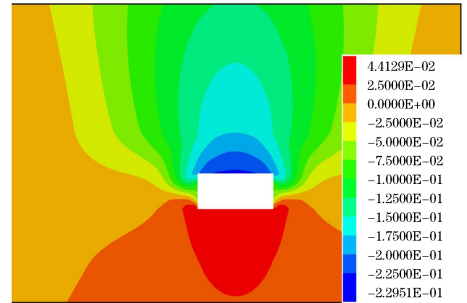
2.2.1 巷道无支护应力与位移变化规律

在未进行支护情况下对模型进行开挖求解,待模型再次达到平衡后,得出开挖巷道围岩应力和位移分布,如图 4 所示。由图 4 可知,由于巷道开挖,在初始地应力以及采动应力的双重作用之下,巷道顶底板和两帮产生弹塑性变形,顶底板出现应力降低现象,应力向围岩两帮传递,在距离巷道两帮 3 m

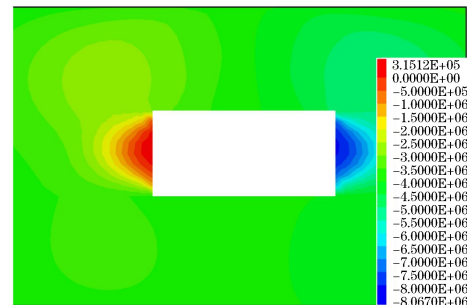
处垂直应力值达到最大,最大值为 14.16 MPa;大变形区位于巷道顶板 2 m 范围内,顶板最大下沉量为 22.9 cm,顶板受开挖扰动,距离达到 9 m,围岩两帮受开挖扰动范围为 1.8 m,最大变形量为 22.8 cm。通过模拟分析,得出设计的锚杆(锚索)可作用于开挖扰动区域后的稳定岩层中。



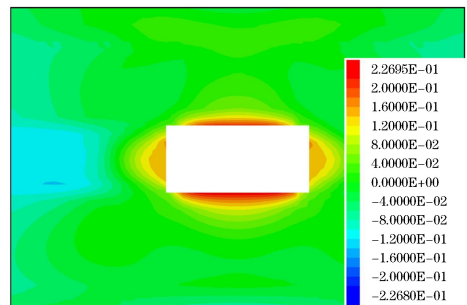
(a) 开挖垂直应力分布



(b) 开挖垂直位移分布



(c) 开挖水平应力分布

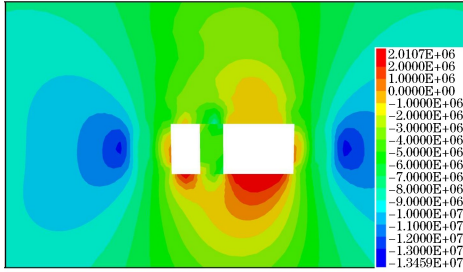


(d) 开挖水平位移分布

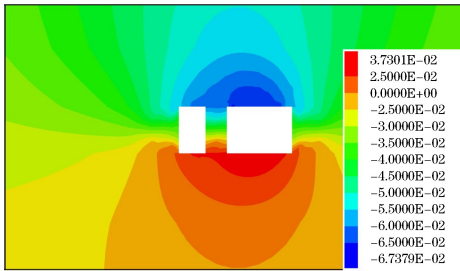
图 4 开挖应力及位移分布

2.2.2 巷道支护应力与位移变化规律

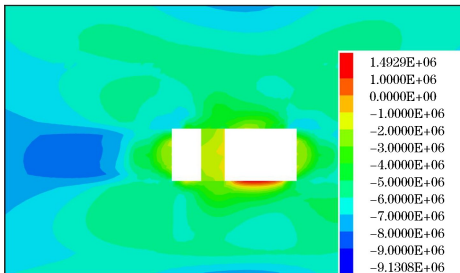
对巷道进行分步开挖,以柔性模板长为开挖长度,每次开挖 3 m,开挖完成后,根据表 1 和表 3 所设计的支护参数对模型施加锚杆、锚索支护,待模型支护求解完成后再根据表 2 参数施加隔离墙,最后对模型进行求解,得出支护后巷道围岩应力分布、位移变化规律如图 5 所示。



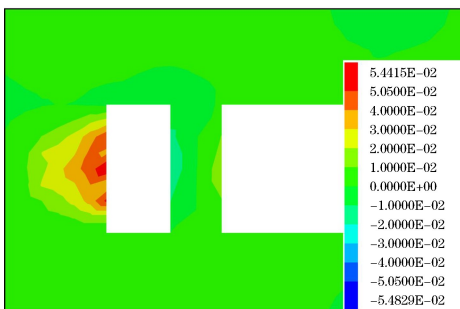
(a) 支护垂直应力分布



(b) 支护垂直位移分布



(c) 支护水平应力分布



(d) 支护水平位移分布

图 5 支护应力及位移分布

由图 5 可知,在瓦斯巷左顶角和回风巷右顶角出现水平应力集中区域,但分布较少;混凝土隔离墙

受力为:垂直压力约 6.0 MPa,水平压力约 1.5 MPa,符合理论计算结果。隔离墙右侧出现松动变形区,通过位移监测得出横向变形曲线如图 6 所示,其横向最大变形量仅为 27.4 mm。

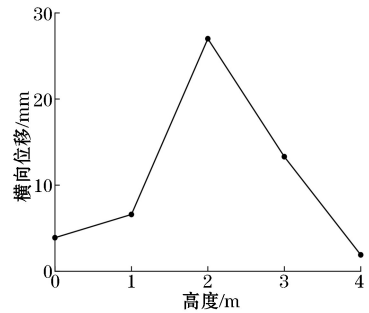


图 6 隔离墙横向位移

支护前后巷道周围应力分布、位移有明显变化,对于巷道顶板,由于“锚杆+锚索+隔离墙”支护作用,使顶板应力由二向应力状态变为三向应力状态,岩层受到加固作用,松动区范围明显减少,使顶板下沉量降低。分别在距离左侧煤壁 0.5 m、1.5 m、2.5 m、3 m、4 m、5 m、6 m、7 m 处对支护前和支护后顶板下沉量进行监测,监测结果如图 7 所示。由图 7 可知,支护后两条巷道出现非对称变形特点,瓦斯巷顶板移近量小于回风巷顶板移近量,相较于支护前,支护后整体位移减少了约 70%,支护效果明显。对于巷道两帮,支护后松动区范围显著减少,离锚杆越近,位移减少量越大,越接近于松动区,深部煤体仅有小部分位移较大,最大移近量为 53 mm。

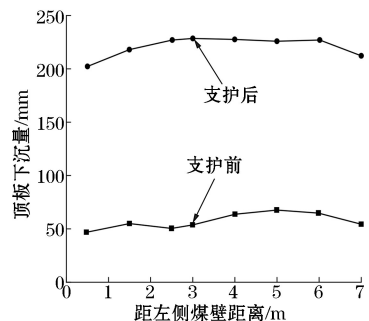


图 7 支护前后顶板下沉量

数值模拟结果表明,采用该支护方式后,巷道围岩完整、稳定,总变形量不大,能够满足安全生产的需要,最终确定巷道支护采用“隔离墙+锚杆+锚索+钢筋梁+锚网”联合支护。

3 结论

(1) 煤巷内预设混凝土墙成巷技术,采用混凝

土隔离墙置换双巷布置巷间煤柱方法,既能解决采煤工作面瓦斯排放问题,又能回采煤柱煤炭资源,实现了无煤柱开采。

(2) 此项技术不同于沿空掘巷,也不同于沿空留巷,而是沿煤层掘进宽面巷道,在巷道内浇筑混凝土隔离墙,将巷道隔离成双巷,掘进过程中可实现一进一回通风,回采过程中,可通过双巷通风解决采空区和邻近煤层瓦斯涌出问题,由于混凝土墙是提前浇筑好的,在工作面回采时,墙体强度能够承载上覆岩层运动所带来的压力,有效隔绝了采空区,减少了巷道维护成本。

(3) 隔离墙采用柔模泵注混凝土技术,通过支护载荷和承载能力计算,得出隔离墙宽度为 1.6 m 时,安全系数为 2.5,满足墙体稳定性和支护安全要求。

(4) 为了维持巷道的稳定,提出了“隔离墙+锚杆+锚索+钢筋梁+锚网”联合支护方案,设计出了具体的支护参数,通过模拟分析得出此支护方案可有效地控制巷道的变形与破坏。

参考文献(References):

- [1] 余学义,王琦,赵兵朝,等.大采高双巷布置工作面巷间煤柱合理宽度研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增刊1):3328-3336.
- [2] 白文勇,徐青云,李永明,等.大采高双巷掘进巷间煤柱合理宽度研究[J].煤矿安全,2019,50(10):212-215.

- [3] 王琦,樊运平,李刚,等.厚煤层综放双巷工作面巷间煤柱尺寸研究[J].岩土力学,2017,38(10):3009-3016.
- [4] 谭凯,孙中光,林引,等.双巷布置综采工作面煤柱合理宽度研究[J].煤炭工程,2017,49(3):8-10.
- [5] 马立强,张东升,王红胜,等.厚煤层巷内预置充填带无煤柱开采技术[J].岩石力学与工程学报,2010,29(4):674-680.
- [6] 张保东,张开智,刘辉,等.高瓦斯矿井宽面掘进一次成双巷无煤柱开采实践[J].煤矿安全,2012,43(6):125-128.
- [7] 李红雷,刘洋,雷平博.双巷掘进柔模混凝土无煤柱开采技术应用研究[J].煤炭工程,2021,53(12):7-12.
- [8] 房帅,刘洋,刘忠平.双巷掘进大断面巷道留巷中锚网索耦合及中隔墙支护技术应用与研究[J].煤,2021,30(4):35-38+49.
- [9] 李晓白,潘海兵,石景帅,等.6 m 大采高沿空留巷巷旁支护研究[J].煤炭工程,2019,51(5):78-81.
- [10] 贾牛骏,闫俊杰,仇永芳,等.柔模混凝土沿空留巷过陷落柱支护技术研究[J].煤炭工程,2019,51(7):40-43.
- [11] 韩振国.安居煤矿柔模混凝土沿空留巷技术应用研究[D].青岛:山东科技大学,2019.
- [12] 郝晓飞,郝兵元,谢益盛,等.中厚煤层沿空留巷巷旁柔模混凝土充填体合理宽度研究及应用[J].矿业安全与环保,2019,46(5):60-65.
- [13] 贾牛骏,闫俊杰,仇永芳,等.柔模混凝土沿空留巷过陷落柱支护技术研究[J].煤炭工程,2019,51(7):40-43.
- [14] 崔鹏飞.柔模混凝土巷旁支护技术在沿空掘巷的应用分析[J].能源与节能,2021(3):182-183+219.
- [15] 何东升,殷天明.中厚煤层柔模混凝土沿空留巷矿压规律与围岩控制技术[J].煤炭工程,2018,50(9):35-38.
- [16] 韦瑜.柔模泵注混凝土沿空留巷技术研究[J].煤矿现代化,2017(5):36-39.

Pre-Setting Concrete Wall in Coal Roadway and Surrounding Rock Control Technology

SHI Jinsong¹, MO Chunhu², GUO Zhongping²

(1. Shanxi Yamei Daning Energy Co., Ltd., Jincheng, Shanxi 048000, China;

2. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In order to solve the problem of mine gas emission and improve the coal resource recovery rate, the problem of leaving coal pillars between the return air lane and gas lane of 309 comprehensive mining working face of Daning Coal Mine as the engineering background, and the technology of pre-setting concrete wall in coal roadway to form a lane was proposed and its construction process was analyzed. When arranging the return air lane, the lane was excavated with a wide face and permanently supported by anchor rods (ropes), and the excavation of working face was delayed by 50 m. The concrete wall was poured in the roadway to isolate the roadway into two parts, and as the excavation of working face, the roof collapsed along the top cutting line to form a god-side entry. Using concrete walls to replace coal pillars between roadways to achieve pillarless mining. The stability of the concrete wall was analyzed through theoretical calculations, and the wall width of 1.6 m was calculated to meet the safety requirements for support. According to the designed roadway support parameters, the numerical simulation analysis was carried out, and the combined support scheme of “isolation wall + anchor bolt + anchor cable + reinforcement beam + anchor mesh” was finally determined for the roadway. This technology can provide a reference for similar mines to implement the technology of pre-setting concrete wall in the roadway.

Key words: Isolation wall, Roadway excavation, Roadway support, Pillarless mining, Numerical simulation