

煤巷内预设混凝土墙成巷合理宽度研究

Research on Reasonable Width of Prefabricated Concrete Wall in Coal Tunnel

李 宁, 孙钦亮(山东恒驰矿业装备科技有限公司, 山东 泰安 271202)

摘要:为解决高瓦斯矿井宽巷布置所引起的煤体浪费和瓦斯排放问题,本文提出了构筑混凝土墙成巷的技术方案,通过数值模拟的方法分析了不同宽度混凝土墙成巷的围岩应力分布规律,研究了柔模泵注技术构筑混凝土墙的材料配比,揭示了混凝土墙成巷的最优高度,结合实际情况优化了混凝土墙成巷技术。结果表明当混凝土墙体宽度为1.6 m时,隔离墙体应力集中程度最小,具有较好的承载能力,且在采动影响下不易发生塑性破坏而失稳。柔模泵注技术构筑混凝土墙和支护技术的联合应用能够有效维持围岩变形,为巷道围岩稳定性维护提供了理论依据。

关键词:混凝土隔离墙;巷道掘进;数值模拟;高瓦斯矿井

中图分类号: TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)05-0076-07

Abstract: The layout of wide alleys in mines can cause waste of working face resources. To solve the problems of coal waste and gas emissions caused by the layout of wide tunnels in high gas mines, this article proposes a technical solution for constructing concrete walls into tunnels. By using numerical simulation methods, the stress distribution law of surrounding rock in different widths of concrete wall tunnels was analyzed, and the material ratio for constructing concrete walls using flexible formwork pumping technology was studied. The optimal height of concrete wall tunnels was revealed, and the concrete wall tunnel technology was optimized based on actual situations. The results indicate that when the width of the concrete wall is 1.6 m, the stress concentration of the isolation wall is the smallest, it has good bearing capacity, and is less prone to plastic failure and instability under the influence of mining. The combined application of flexible formwork pumping technology to construct concrete walls and support technology can effectively maintain the deformation of surrounding rocks. This study has achieved pillar free mining in high gas mines, providing a certain theoretical basis and phenomenon basis for maintaining the stability of tunnel surrounding rock.

Key words: concrete isolation wall; tunnel excavation; numerical simulation; high gas mine

1 前言

高瓦斯矿井在工作面掘进和回采过程中,会从工作面、巷道和相邻采空区涌出瓦斯,导致工作面瓦斯超标,影响安全生产^[1-2]。为了保证工作面煤层开采的安全生产,提出了井下留设煤柱,这就造成了地下煤炭资源的浪费。因此,需要对高瓦斯矿井的无煤柱开采技术进行研究优化。

近年来,一些学者针对地下无煤柱开采进行了一系列研究。马立强^[3]提出了巷内充填无煤柱开采技术,将巷旁充填改造为巷内充填,使充填体受原巷内支护保护,保证了巷道的稳定,并成功应用于厚

煤层综放工作面,实现了厚煤层无煤柱开采。何满潮^[4]基于切顶短臂梁理论,分析了无煤柱切顶自成巷技术原理,提出切顶卸压无煤柱自成巷技术及工艺,有效隔断采空区与近距离煤层开采的连接,改善了巷道围岩应力环境,实现巷道稳定,为无煤柱开采提供新理论与技术。西安科技大学研究团队^[5]开发出柔模混凝土墙式充填支护技术,并研发出专用施工装备,在全国多个矿业集团得到广泛应用。为解决该问题,一些专家提出双巷布置系统,即在回风巷旁布置瓦斯抽排巷,通过混凝土隔离墙置换煤柱技术既能提高煤炭资源回收率,避免井下煤柱的应力集中,又可以解决煤柱瓦斯涌出问题,具有较高的经济效益和安全性能^[6-9]。上述研究为无煤柱开采技术的应用与发展提供了依据。

依据前人研究,对亚美煤矿的无煤柱开采技术方案进行实际应用和改进。亚美煤矿属于高瓦斯矿井,目前正在回采的工作面采用一次采全高全部垮

[作者简介] 李宁(1989—),男,山东泰安人,工程师,从事充填开采成套装备技术研发与应用研究。

[引用格式] 李宁,孙钦亮.煤巷内预设混凝土墙成巷合理宽度研究[J].中国矿山工程,2023,52(5):76-82.

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,计划在下一工作面实施煤巷内预设隔离墙成巷技术。合理的混凝土墙宽度决定了巷道长期作业的安全性以及后续维护工作的难易程度^[10-12]。本文按照亚美煤矿的实际情况,构建了煤岩的数值模型,通过数值模拟的手段揭示了煤巷内预设不同宽度混凝土墙成巷的围岩应力和塑性区分布。采用柔模泵注混凝土墙技术对亚美煤矿的隔离墙进行构建,并对混凝土墙的配比进行优化研究。最终,根据模拟结果提出合理的支护方案进行了现场应用。本研究的技术方案不仅解决了亚美煤矿的煤柱回收问题,减少了地下煤炭资源的浪费;而且巷道在开拓期间能够进行瓦斯通风,极大的缩短了矿井高瓦斯地处理时间。该技术对无煤柱开采技术的完善和发展具有重要意义。

2 数值模拟

2.1 模拟方案

依据工程实际情况,确定模型的基本参数为煤

层埋深 347 m,煤层平均厚度 4.0 m,煤层平均倾角 5°。本文数值模拟的煤岩层模型计算范围为煤层稳定底板到煤层上方共计 45 m 的顶板岩层。模型尺寸长宽高为 120 m × 60 m × 45 m,具体如图 1 所示,根据煤层埋深在模型上边界施加垂直应力 8 MPa,由于煤层埋深较浅,巷道周围无较大的水平构造,因此本次模拟计算侧压系数取 0.5,模型底部施加的最大水平主应力为 4.062 5 MPa。混凝土墙体宽度分别为 1.0 m、1.2 m、1.4 m、1.6 m、1.8 m、2.0 m。煤岩体的物理力学参数见表 1。

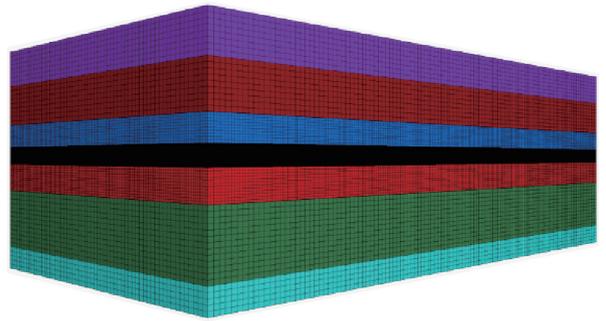


图 1 数值模型示意图

表 1 煤岩体物理力学参数

岩层	厚度/m	密度/kg·m ⁻³	剪切模量/MPa	体积模量/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
高位顶板	8.0	2 650	10.35	54.64	15.03	43.6	10.28
基本顶	7.0	2 760	16.01	68.52	14.17	46.9	8.28
直接顶	10.5	2 650	8.46	57.89	9.86	33.8	3.23
3 煤	4.0	1 450	5.23	23.33	3.27	34.6	1.3
混凝土墙		2 500	12.85	15	12.9	43	15
直接底	6.0	2 700	8.93	46.33	14.17	33.8	8.28
基本底	7.0	2 760	15.38	87.62	15.03	43.6	10.28

2.2 模拟结果分析

为研究采动影响对混凝土墙支护结构的影响特征,则对采动条件下巷道围岩的应力分布状态和塑性区分布进行分析。通过模拟结果的对比,得到混凝土墙的最优宽度。图 2 所示为采动影响下不同宽度垂直应力云图。

由图 2 的数值模拟结果可知,不同宽度混凝土墙在采动影响下的垂直应力依次经历了陡增期,稳定期和延伸期。充填体附近的围岩应力状态由刚开始的应力梯度逐渐向应力均化转变。

随着混凝土墙宽度的不断增长,充填体的垂直应力展现出先减小后增大的趋势,并且充填体宽度

的增加会推动其应力向周围岩体的扩散。说明充填体宽度的增强会促进其与周围岩体结构的相互融合。

在采动过程中,巷内左端围岩的应力梯度的变化强烈。其在充填体附近形成明显的异化响应区。该区结构会在短期内发生迅速的能量聚集并受到周围岩体的约束,其会在采动扰动的作用下发生一定的能量释放和失稳。随着充填体宽度的增强,附近区域的应力状态也会随之发生改变。在宽度较小时,附近区域围岩的应力梯度集中,围岩结构的应力集中较强,但随着宽度的进一步增大,附近区域围岩的应力发生减弱。充填体宽度达到 1.6 m 时,附近

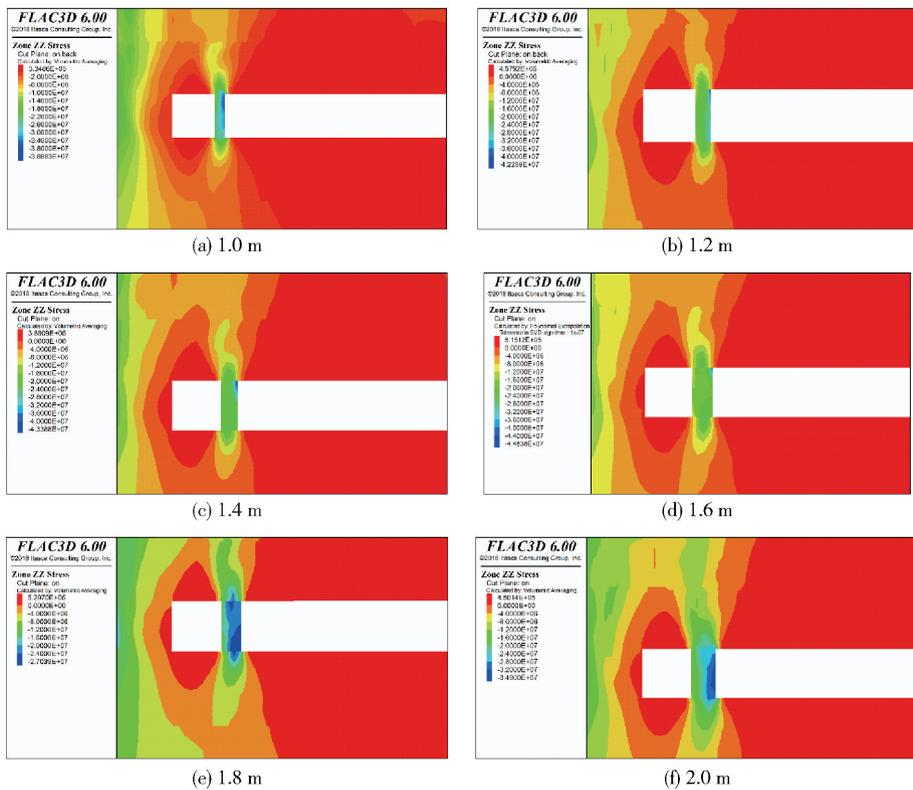


图2 采动影响下不同宽度混凝土墙垂直应力云图

区域的集中应力最大。说明充填体宽度会对周围结构的整体承力性造成影响,宽度的变化会使得周围结构的承力异化。

为了得到充填体承力结构的宽度最优解,则对上述模拟结果进一步处理。将所输出的数据绘制得到不同尺寸的混凝土墙尺寸的垂直应力分布曲线,具体如图3所示。

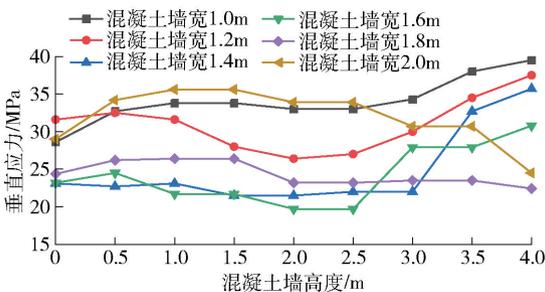


图3 不同尺寸混凝土墙垂直应力变化曲线

分析图3可以看出,工作面回采后墙体内的最大垂直应力均发生在墙体右侧。随着混凝土墙体高度的增大,其垂直应力基本呈现出先增强后减弱的趋势。当混凝土墙体高度为2m时,各宽度混凝土墙所对应的垂直应力均出现减弱的趋势。但在不同宽度的混凝土墙中,高度变化所造成的应力减弱效

应不同。当墙体的宽度为1.0~1.4m时,墙体的垂直应力随宽度的增加而逐渐减弱,墙体的垂直应力变化幅度明显。当墙体的宽度为1.4m和1.6m时,两种墙体的垂直应力基本一致,曲线的整体趋势较为平稳。当留设墙体的宽度为1.8~2.0m时,墙体的垂直应力随宽度的增加而逐渐增大。依据上述分析可知,宽度为1.4~1.8m的墙体垂直应力曲线较为平稳,该范围内墙体不同高度所对应的垂直应力均较小。

以1.4~1.8m墙体宽度为研究重点,结合图2、图3对该范围内充填体与围岩的垂直应力云图进行综合分析。由于煤层厚度为4m,则此处取与该厚度相近的混凝土高度进行分析。在三种宽度墙体种,1.4m宽的墙体垂直应力较大,垂直应力达到了34MPa。而宽度为1.6m和1.8m的墙体垂直应力相差较小,基本维持在25~30MPa。对比图2垂直应力云图可知,墙体宽度为1.4和1.6m所对应的墙体周围应力较为均衡,两种墙体应力集中程度较低。而当墙体宽度为1.8m时,墙体周围应力的差异性较大,应力集中程度明显。综合上述分析,墙体宽度为1.6m时所对应的承力较

小,且结构的应力集中程度较低,结构的整体稳定性较强。而当墙体宽度为1.4和1.8 m时,混凝土墙所对应的应力效应较强,结构易发生损伤破坏。则基于充填体的应力特征,得到充填体的最优宽度为1.6 m。

随后,为了进一步分析充填体宽度对围岩结构应力响应的影响特征,对围岩的塑性区分布进行研究,塑性区分布如图4所示。由图4可以看出,墙体塑性区面积随着墙体宽度的增加而增加,但范围变化不大。周围岩体的塑性区变化主要发生在巷道的

顶板,远端顶板的塑性区较弱,随着墙体宽度的增长,巷道顶板的塑性区与左端岩体的塑性区不断进行交替变化。墙体受力破坏基本区域基本发生在巷道顶底板附近,以剪切破坏为主,同时伴有部分区域的张拉破坏。通过对墙体塑性破坏进行分析,墙体宽度在1.0~1.4 m时,墙体内部破坏形式较为复杂,既发生了剪切破坏,又发生了张拉破坏,墙体宽度为1.6 m时只发了剪切破坏,当墙体宽度为1.8~2.0 m时,塑性区破坏范围增加,同时出现了不同的破坏形式。

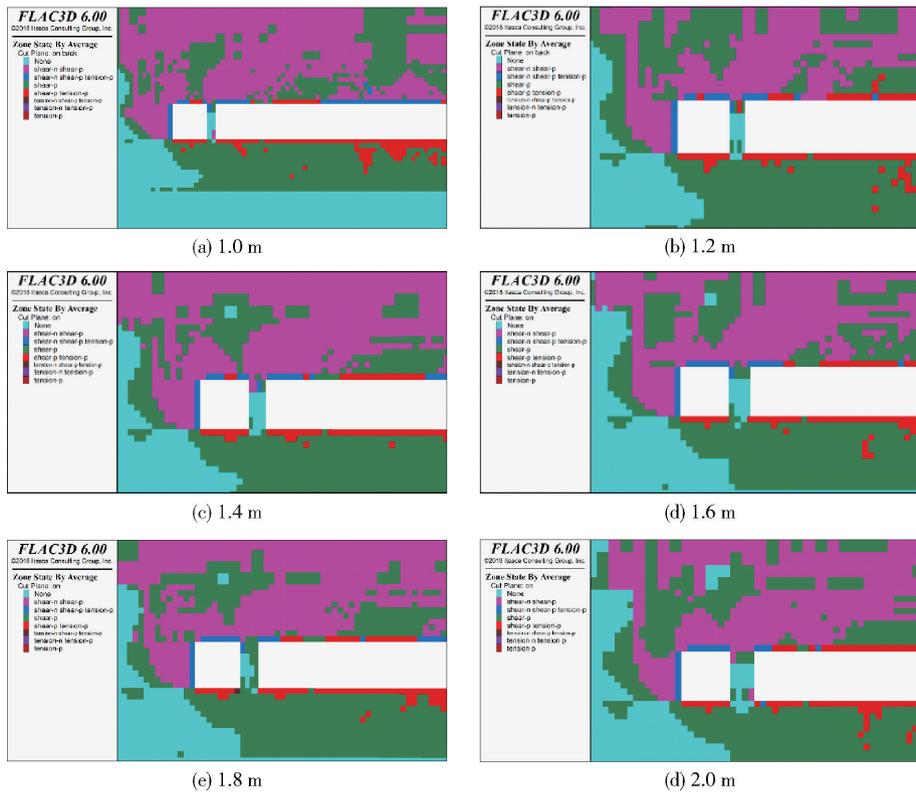


图4 采动影响下不同混凝土墙宽度塑性区分布图

通过上述模拟结果的分析对比,得出采动影响下混凝土墙承力的最优宽度。当混凝土墙体宽度为1.6 m时,隔离墙体应力集中程度最小,具有较好的承载能力,并且在采动影响下不易发生塑性破坏而失稳,巷道周围岩体的承载力特性也较为稳定。因此判断出合理的隔离墙体宽度为1.6 m。

3 柔模泵注混凝土墙技术及材料配比

柔模泵注混凝土主要是采用泵送方式将矿用高性能混凝土注入柔性模板内,利用柔性模板透水不透浆的特性和泵压使混凝土接顶,主动支撑顶板。这就要求混凝土必须具有很大的流动性,同时又不

能对削弱其设计强度,这使得柔模泵注混凝土与普通的混凝土设计有所不同。该技术要求在保证流动性的同时也要加大水泥的用量,还要求混凝土输送阶段不产生离析、不沁水,混凝土硬化后要求有良好的稳定性,要达到工程要求的力学和变形性能^[13]。因此,浇筑隔离墙混凝土要满足密实、快硬、早强、高强等要求。主要材料为水泥、砂、粉煤灰和石子,与其他混凝土相比,柔模浇筑混凝土材料需要满足以下要求。

(1) 含砂率较大,通常为混凝土总量的45%~50%。

(2) 骨料的粒径应符合输送管径和柔模厚度,

通常最大粒径在 20 mm 以下。

(3) 混凝土水灰比取 0.5 ~ 0.6 为宜。

(4) 混凝土坍落度宜为 180 ~ 200 mm。

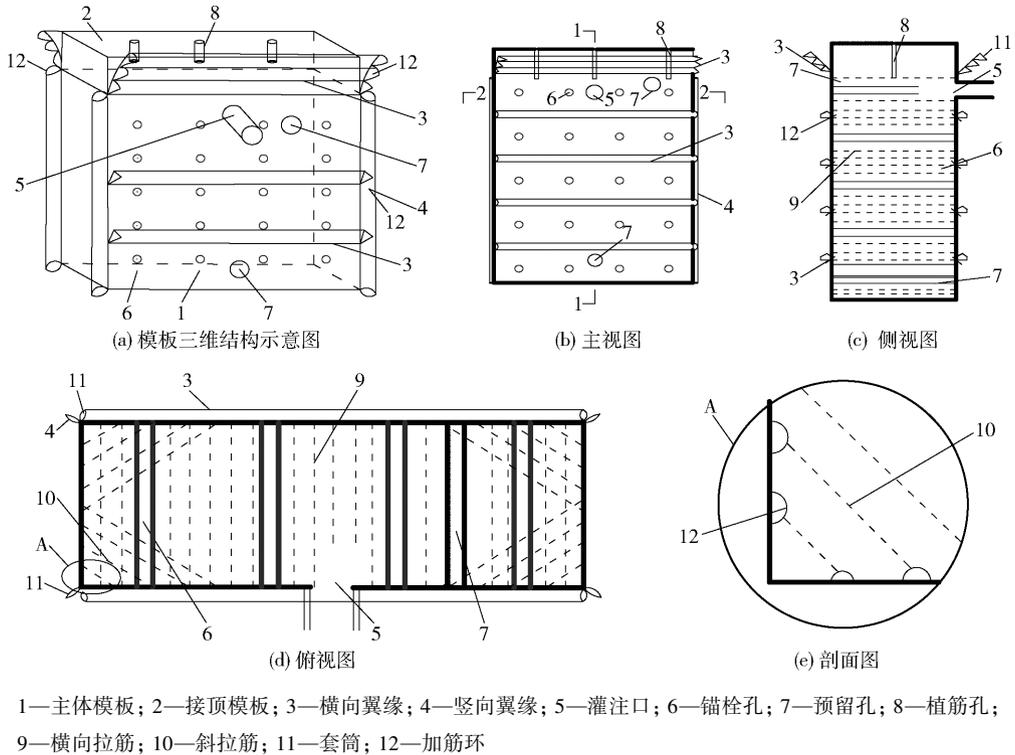
结合上述要求,对 1 m³ 混凝土配比进行试验设计。依据多次试验结果,柔模混凝土的配比见表 2。经试验测定,该混凝土坍落度大于 180 mm,扩展度大于 450 mm,满足要求。

表 2 1 m³ 混凝土配比

材料	水泥	砂子	碎石	专用外加剂	水
质量/kg	500	750	850	1	300

柔模泵注混凝土结构是以三维纺织纤维柔性材料缝制,内部的承力结构为模内充填体,采用矿用高性能混凝土作为模内充填体。随后,采用双拉锚栓

对轴向力产生的横向变形进行约束。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。为了灌注方便,其上还需设有灌注口和固定装置。通过上述支撑结构的构建,柔模泵注混凝土结构在实际应用中能够具有结构简单、轻质高强、施工方便等特性,并且该结构可应用于矿山隔离墙砌筑工艺中。因此,针对本文所采取的无煤柱开采技术,对混凝土墙的规格进行设计。本次设计柔性模板尺寸为:长 3.0 m,宽 1.6 m,高 4.0 m。每个柔性模板接顶模板上设置 3 个植筋孔,孔间距 1 000 mm。设置 5 排锚栓孔,每排布置 4 个锚栓孔,锚栓孔间排距为 750 mm × 750 mm。柔性模板结构示意图如图 5 所示。



1—主体模板; 2—接顶模板; 3—横向翼缘; 4—竖向翼缘; 5—灌注口; 6—锚栓孔; 7—预留孔; 8—植筋孔; 9—横向拉筋; 10—斜拉筋; 11—套筒; 12—加筋环

图 5 三维柔性模板示意图

4 工程应用

在布置下区段工作面回风巷时,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留设联络巷,并及时用挡风装置将联络巷密封。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。

通过与原有煤柱护巷对比可知,宽巷掘进方案取消了区段护巷煤柱,可多采出煤炭资源 3.02 万 t。

虽然两种方案的实际效益相差不大,但宽巷掘进方案购买的设备可以多次使用,既能保证正常的矿井采掘接续,降低矿井生产的不均衡性,也有利于防治瓦斯通风;而原有方案容易造成矿井采掘接续紧张,不利于治理高瓦斯矿井。从整体上看,宽巷掘进具有更好的综合效益。

具体工艺过程如下:

第一步:按设计先掘胶带运输巷,巷宽 7 600 mm,巷高 4 000 mm,并进行永久支护。

第二步:顶板条件较差时,距巷道右帮 3.5 m 位置打设两排“单体液压支柱+铰接顶梁”做临时加强支护,滞后工作不超过 20 m。滞后掘进设备 50 m

以上浇筑钢筋混凝土条形基础,基础宽度 2 000 mm,基础埋置深度 600 mm。

第三步:钢筋混凝土条形基础能够充分承载后,在其上浇筑柔模混凝土隔离墙,宽度 1 600 mm,与左煤帮间隙 2 000 m。每隔 80 ~ 100 m 连续墙预留 1.6 m 宽的横贯,浇筑隔离墙后运输巷宽度变为 4 000 mm。在混凝土隔离墙充分承载后,撤除“单体液压支柱+铰接顶梁”。

第四步:在混凝土隔离墙浇筑完成后扩巷,扩巷宽度 2 000 mm,高度 4 000 mm,形成下一个工作面的辅助运输巷,并进行永久支护。工业流程如图 6 所示。

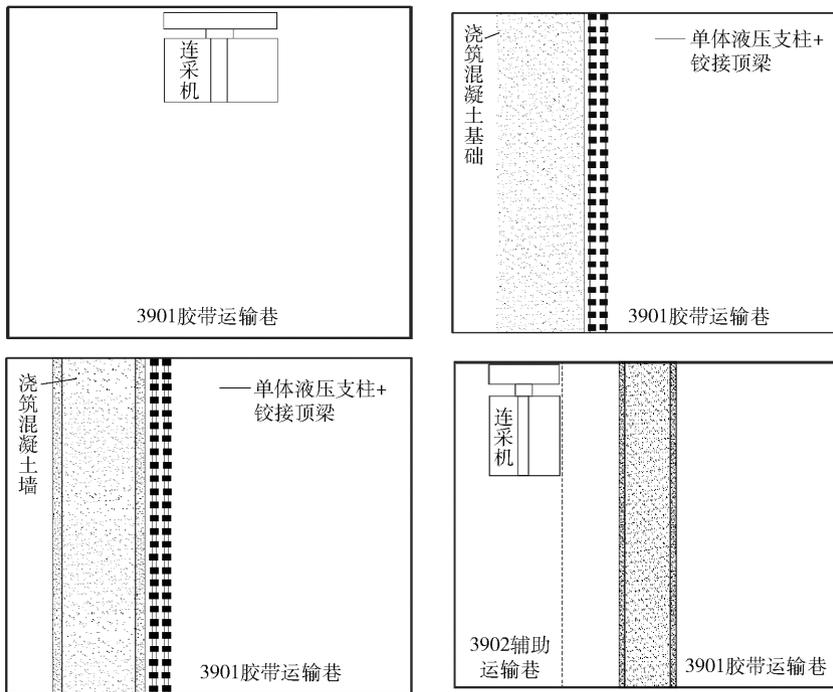


图 6 煤巷内预设混凝土墙工业流程图

当巷道跨度(宽度)大于或等于 5.5 m,侧压力系数 ≤ 1 ;或者跨度大于或等于 5 m,侧压力系数 > 1 时,巷道定义为大跨度巷道。因此大跨度巷道的宽度临界值是 5.5 m,当巷道宽度超过临界值,顶板就会出现挠曲变形增大,出现离层,围岩强度显著降低,巷道变形破坏加重,导致巷道支护困难。这就致使此处采用一次成巷的锚索网联合支护形式无法有效控制围岩变形,则需要对巷道支护参数进行一定的优化。根据对数值模拟结果进行分析,对巷道支护参数进行分析。初步确定巷道支护采用“隔离墙+锚杆+锚索+钢筋梁+锚网”的多位一体联合支

护形式,巷道支护设计如图 7 所示。该支护方式的应用,能够有效维持巷道围岩的稳定变形。

5 结论

针对高瓦斯矿井瓦斯排放问题和双巷布置系统煤柱尺寸较大造成的资源浪费,本文以亚美煤矿为工程背景,通过数值模拟分析了设置不同宽度的隔离墙成巷对围岩应力和塑性区的影响,主要得到一些结论。

(1)工作面回采后墙体最大垂直应力均发生在墙体右侧,且随混凝土墙体宽度的增大,墙体垂直应力峰值呈现出先增大后减少的趋势。

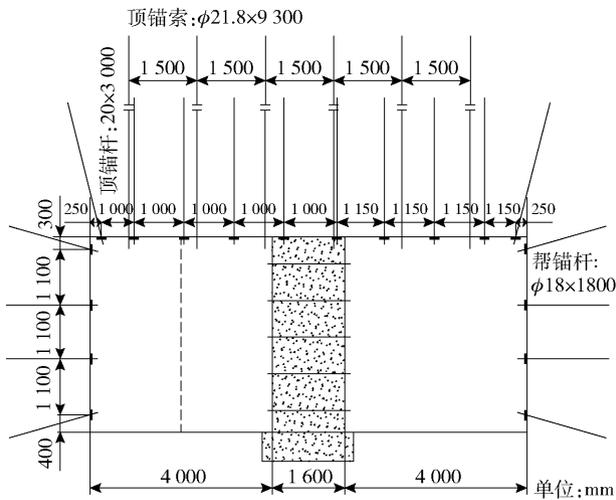


图7 巷道支护设计图

(2)当留设煤柱小于1.6 m时,墙体内部的垂直应力较大,当墙体宽度为1.8~2.0 m时,墙体内部的垂直应力逐渐减少,但变化幅度较少。

(3)墙体塑性区面积随着墙体宽度的增加而增加,但范围变化不大,墙体受力破坏基本区域基本发生在巷道顶底板附近,以剪切破坏为主,同时伴有部分区域的张拉破坏。

(4)当混凝土墙体宽度为1.6 m时,隔离墙体应力集中程度最小,具有较好的承载能力,且在采动影响下不易发生塑性破坏而失稳,因此合理的隔离墙体宽度为1.6 m。

(5)由于混凝土墙需要满足密实、快硬、早强、高强等要求,采用柔模泵注构筑混凝土墙体,确定了材料的配比,并在此基础上进行了现场应用。

[参考文献]

[1] 康红普, 张晓, 王东攀, 等. 无煤柱开采围岩控制技术及应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 16-44.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 何满潮, 高玉兵, 杨军, 等. 厚煤层快速回采切顶卸压无煤柱自成巷工程试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 254-264.
- [5] 宋小伟. 柔模混凝土沿空留巷技术在常村矿的应用[J]. 煤, 2022, 28(1): 22-23, 57.
- [6] 王红胜, 张东升, 马立强. 预置矸石充填带置换小煤柱的无煤柱开采技术[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(4): 1-5+78.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 郭海军, 杜怀龙. 厚煤层沿空留巷柔模混凝土充填体合理宽度确定[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S2): 105-112.
- [11] 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.
- [12] 崔荣峰, 王彦军. 2206工作面柔模泵注混凝土沿空留巷技术应用[J]. 山东煤炭科技, 2020, 38(12): 43-44+47+50.
- [13] 梁翔菲. 柔模泵注混凝土在厚煤层沿空留巷中的应用[J]. 能源技术与管理, 2019, 44(6): 95-97.