

文章编号: 1004-4051(2023)11-0144-08

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20220676

沿空掘巷煤柱合理宽度及薄喷密闭技术研究

李 慧, 石 昆

(陕西建新煤化有限责任公司, 陕西 延安 716000)

摘 要: 针对综放开采煤柱护巷效果不佳、围岩变形量大、采空区侧瓦斯溢出等问题,以建新煤矿 4209 工作面回风巷为工程背景,根据极限平衡理论计算出煤柱的合理宽度为 7.8~9.0 m,并利用 FLAC^{3D} 软件探究不同煤柱宽度下的巷道围岩塑性区发育规律、应力分布特征、变形情况,综合分析得出煤柱最佳宽度为 9 m。基于模拟结果及薄喷密闭原理,结合现场实际条件,设计了巷道支护及薄喷密闭方案。实践结果表明:采用 9 m 煤柱和薄喷密闭技术后,4209 工作面回风巷整体围岩变形量较小,且瓦斯浓度明显降低,满足工作面安全高效生产的需求。

关键词: 综放开采; 沿空掘巷; 煤柱宽度; 围岩控制; 薄喷密闭技术

中图分类号: TD322 文献标识码: A

Study on reasonable width of coal pillar of roadway driven along goaf and thin jet sealing technology

LI Hui, SHI Kun

(Shaanxi Jianxin Coal Chemical Co., Ltd., Yan'an 716000, China)

Abstract: In view of the poor effect of coal pillar roadway protection in fully mechanized top coal caving mining, large deformation of surrounding rock and gas overflow at the side of goaf, taking the return air roadway of 4209 working face of Jianxin Coal Mine as the engineering background, the reasonable width of coal pillar is 7.8-9.0 m calculated according to the limit equilibrium theory. The FLAC^{3D} software is used to explore the development law, stress distribution characteristics and deformation of the surrounding rock plastic zone of the roadway under different pillar widths, and the comprehensive analysis show that the optimal width of the coal pillar is 9 m. Based on the simulation results and thin jet sealing principle, combined with the actual conditions on site, the roadway support and thin jet sealing scheme are designed. The practical results show that after the 9 m coal pillar and thin jet sealing technology are adopted, the overall surrounding rock deformation of 4209 working face of return air roadway is small, and the gas concentration is significantly reduced, meeting the safe and efficient production requirements of the working face.

Keywords: fully mechanized top coal caving mining; roadway driven along goaf; width of coal pillar; surrounding rock control; thin jet sealing technology

近年来,煤炭资源开采逐步转入深部开采,深部围岩处于“三高一扰动”的复杂环境中,工作面回采巷道更容易出现失稳破坏。目前,除了高强度支护

技术外,沿空掘巷利用矿压转移原理避免巷道长期处于高矿压影响也是一种有效的解决手段^[1-3]。

沿空掘巷成功的关键是合理选择煤柱宽度,煤

收稿日期: 2022-09-02 责任编辑: 聂虹

第一作者简介: 李慧(1991—),男,汉族,陕西延长人,中级工程师,主要研究方向为煤矿开采技术, E-mail: 317533960@qq.com.

引用格式: 李慧,石昆. 沿空掘巷煤柱合理宽度及薄喷密闭技术研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(11): 144-151.

LI Hui, SHI Kun. Study on reasonable width of coal pillar of roadway driven along goaf and thin jet sealing technology[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(11): 144-151.

柱宽度是影响煤柱稳定性和巷道维护的主要因素。煤柱宽度偏大, 容易造成煤炭资源浪费, 而且当煤柱尺寸超过合理宽度时, 可能会处于采空区侧压峰值范围内, 当煤柱单位面积所承受载荷超过其承载范围, 会引起巷道变形等严重问题^[4-5]。为避免煤柱处于应力峰值范围内, 一般通过分析基本顶断裂位置, 将巷道布置于煤层靠采空区的应力降低区中, 从而保证巷道围岩的稳定性。煤柱尺寸偏小时, 受采空区侧压影响, 巷道一侧煤柱容易出现压酥、压垮现象, 煤体进入塑性状态, 导致巷道掘进过程中, 支护体无法有效锚固, 支护结构无法与巷道围岩形成新承载结构, 围岩控制效果较差^[6-7]。但是在矿井实际生产过程中, 确定沿空掘巷煤柱的宽度常采用经验法, 仍存在安全隐患。

为进一步确定科学合理的煤柱宽度, 不少学者通过理论推导、数值模拟等手段进行探究。其中, 煤柱合理宽度理论计算方法较多, 如应力极限平衡理论、两区约束理论和弹性地基理论等^[8]。崔建军^[9]通过分析深部巷道顶板失稳变形机理, 指出影响巷道稳定的基础因素, 在现场应用强帮为主、顶帮协调的高预应力围岩控制技术, 效果良好; 姜鹏飞^[10]利用多种方法分析得出麻黄梁煤矿原岩、采动、支护应力场分布特征, 以及二次采动影响下发生扩容变形, 明晰了采掘过程中巷道应力、位移时空演化关系。常用于煤柱合理宽度验证的数值模拟软件有 FLAC、GDEM 等, 王德超等^[11]、谷长宛等^[12]通过 FLAC 模拟软件与相似模拟相互验证的方法对煤柱合理宽度以及支护体受力情况进行了研究; 杨虎等^[13]通过 GDEM 软件对厚煤层留窄煤柱沿空掘巷技术进行了研究。

煤柱合理宽度的确定一般可以保证巷道不出现较大变形失稳, 但在工作面回采过程中, 煤柱中仍不可避免地会出现贯通裂隙, 出现裂隙后, 煤柱无法彻底隔绝采空区, 瓦斯等有毒气体容易溢出, 而薄喷密闭技术利用喷涂装备将薄喷材料喷涂至围岩表面进行护表, 薄喷材料填堵裂隙, 对于防止瓦斯溢出作用明显。张少波等^[14]阐述了薄喷技术替代喷射混凝土及锚网支护的可能性; 李学彬等^[15]研发了高强度聚合物喷层材料, 可有效封闭弱胶结软弱围岩, 维护巷道稳定; 张农等^[16]通过研究喷涂柔膜材料性能、作用机理以及施工工艺并在现场应用, 该技术对于围岩表面护表, 抑制瓦斯溢出效果明显。研究根据极限平衡理论计算合理煤柱宽度范围, 利用 FLAC^{3D} 模拟方法确定合理煤柱宽度, 基于模拟结果及薄喷密闭原理, 设计了巷道支护及薄喷密闭方案, 并在现场进行应用验证。

1 工程概况

建新煤矿 4209 工作面位于 42 盘区西翼, 工作面呈西南-东北方向布置, 其西界为 4207 工作面, 已经完成回采, 煤层平均厚度 7.2 m; 煤层含夹矸 1~3 层, 单层厚度 0.2~1.4 m, 平均厚度 0.6 m; 煤层中上部夹矸的岩性以炭质泥岩和砂质泥岩为主, 中下部少量为粉砂质泥岩, 综合柱状图如图 1 所示。

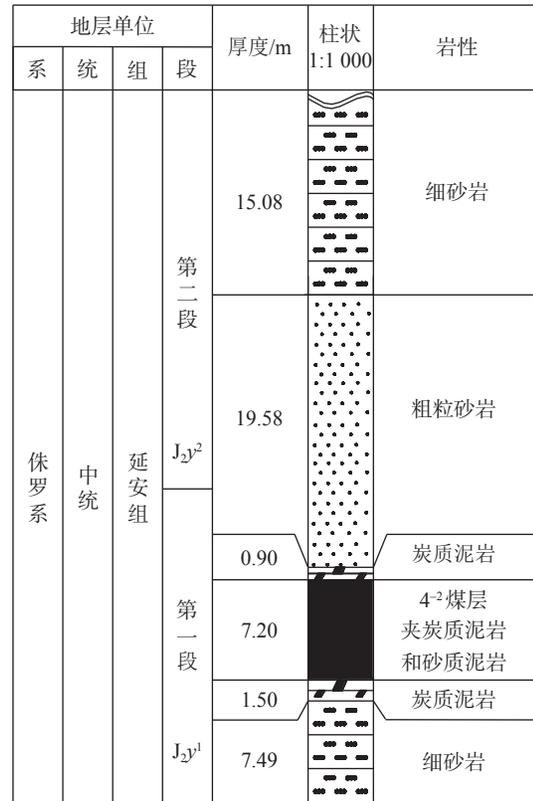


图 1 综合柱状图

Fig. 1 Comprehensive histogram

根据煤层赋存条件及建新煤矿现有的设备, 采用综放开采, 全部垮落法管理顶板。工作面采放工艺流程为: 采煤机机尾端头斜切进刀(割机尾三角煤)→向机头方向正常割煤→移架→采煤机由机头向机尾装煤→推前部输送机→放顶煤→拉后部输送机→采煤机机尾端头斜切进刀→正规循环。

由于生产需要, 在回采工作面一侧掘进顺槽巷道形成 U 型工作面, 需要留设煤柱开采。但是煤层较厚, 矿压较大, 巷道容易产生较大变形, 同时该矿为高瓦斯矿井, 瓦斯浓度较高, 煤层发火期较短。如果采空侧隔离煤柱出现裂隙, 向采空区漏风, 很可能诱发自燃。41 盘区曾采用 35 m 宽度煤柱, 相邻工作面靠近上区段的顺槽底鼓变形相当严重, 导致后期巷道的维护费用远远高于掘进费用。后期试验采用 15 m 宽度煤柱仍不能正常进行回采, 维修费用较高,

也曾有多次冒顶等危险。因此,采用沿空掘巷时煤柱必须满足支撑上覆岩体和密闭采空区要求。

2 理论分析

2.1 煤柱留设原则

沿空巷道开挖过程中留设煤柱,围岩应力场被破坏后重新分布,在覆岩载荷以及动压影响下,煤柱两侧一定范围内出现塑性破坏区域。若煤柱的留设宽度过小,可能会产生较大变形,承载能力降低,其自身稳定性也将难以维持。煤柱留设原则为:①巷道处于上一工作面采空区支承压分布较小的区域;②煤柱合理宽度是满足巷道围岩稳定又避免煤炭资

源浪费;③受采掘影响,煤柱两侧形成塑性区,煤柱内需要一定宽度的弹性核区;④满足隔离煤柱要求,防止采空区漏风和隔离有毒有害气体。

2.2 煤柱合理宽度计算

建立煤柱塑性区计算模型,如图 2 所示,根据煤柱极限平衡理论,煤柱留设合理宽度计算见式(1)。

$$L_{\text{柱}} \geq L_1 + L_2 + L_3 \quad (1)$$

式中: L_1 为 4207 工作面采动过程中对煤柱的塑性影响区; L_2 为锚杆锚固的有效长度,取 2 m; L_3 为煤柱弹性核区宽度,按 30%~50%(L_1+L_2)取值。

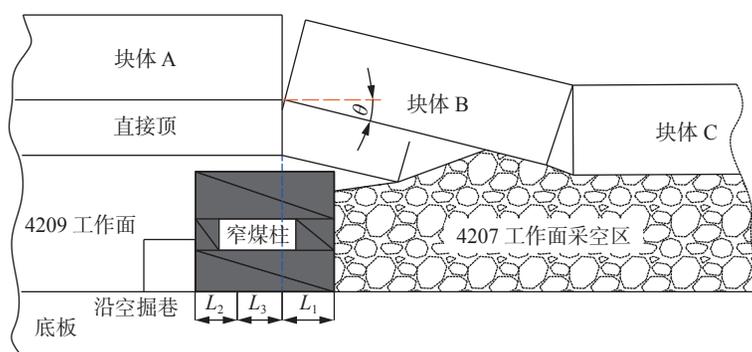


图 2 煤柱塑性区模型

Fig. 2 Plastic zone model of coal pillar

其中, L_1 与工作面回采过程中基本顶关键三角块的断裂位置有关,断裂位置可由式(2)求得。

$$L_1 = \frac{hA}{2 \tan \varphi_0} \ln \left[\frac{k\gamma H + \frac{C_0}{\tan \varphi_0}}{\frac{C_0}{\tan \varphi_0} + \frac{P_1}{A}} \right] \quad (2)$$

式中: h 为工作面采高, m; A 为侧压系数; φ_0 为煤体的内摩擦角, ($^\circ$); C_0 为煤体内聚力, MPa; k 为应力集中系数; γ 为上覆岩层平均容重, MN/m³; H 为煤层埋深, m; P_1 为煤柱在采空侧帮的支护阻力, MPa。

将 4207 工作面参数代入式(2),得 $h=7.2$ m; $A=0.25$; $\varphi_0=26^\circ$; $C_0=1.02$ MPa; $k=1.2$; $\gamma=0.025$ MN/m³; $H=775$ m; $P_1=0.2$ MPa。计算得 $L_1=4$ m。将结果代入式(1)可得煤柱合理宽度为 7.8~9.0 m。

3 煤柱合理尺寸数值模拟分析

3.1 建立模型

采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件探究合理的煤柱宽度,根据 4207 工作面、4209 工作面实际地质条件及理论计算结果,确定了 4 种模拟方案,煤柱宽度分别为 5 m、7 m、9 m 和 11 m,分析不同煤柱宽度下的巷道围岩及煤柱的稳定性。

根据工作面基本情况,利用 MIDAS 软件建立尺寸为 130 m×60 m×52.3 m(长×宽×高)的模型导入 FLAC^{3D}

软件,根据煤层埋深计算覆岩载荷为 14.02 MPa,通过垂直应力形式施加至模型顶部。对网格进行局部加密,建立的煤柱模型如图 3 所示,相关力学参数见表 1。

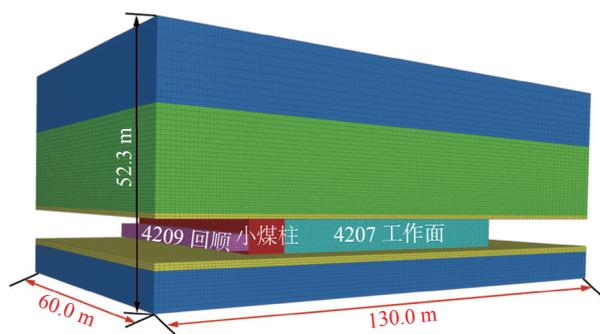


图 3 煤柱模型

Fig. 3 Model of coal pillar

3.2 模拟结果分析

3.2.1 煤柱内应力分布特征

不同宽度煤柱的垂直应力分布情况如图 4 所示。由图 4 可知,在煤柱宽度增加的过程中,煤柱内部的垂直应力集中区域逐渐扩大,煤柱稳定性也逐渐提高。当煤柱宽度为 5 m 时,应力峰值为 31.6 MPa,且应力集中范围相对较小,煤柱已完全破坏,承载力较

表 1 煤岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal and rock mass

岩性	密度/(kg/m ³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
细粒砂岩	2 600	6.5	7.27	38.2	8.1	6.23
泥岩	1 400	2.0	2.18	30.5	2.0	1.61
粉砂岩	2 500	5.8	6.71	37.5	7.4	5.77
煤层	1 200	1.1	0.77	25.5	0.9	0.44
炭质泥岩	1 600	1.8	2.09	30.1	1.7	1.42

小;当煤柱宽度为 7 m 时,煤柱垂直应力分布形式为单峰曲线式,应力集中范围增大,其应力峰值为 37.2 MPa,应力集中区域即为弹性核区,该区域内煤柱承载力明显较大;当煤柱宽度增加至 9 m 时,煤柱内明显应力集中区域有两部分,垂直应力分布形式

呈双峰曲线式,其应力峰值为 36.1 MPa,应力集中范围也大幅增加,煤柱区域煤体完整性较好,仍具有较强的承载能力;当煤柱宽度继续增加至 11 m 时,煤柱内的应力也呈双峰曲线式分布,其应力峰值为 36.8 MPa,应力集中范围进一步增加,承载能力更强。

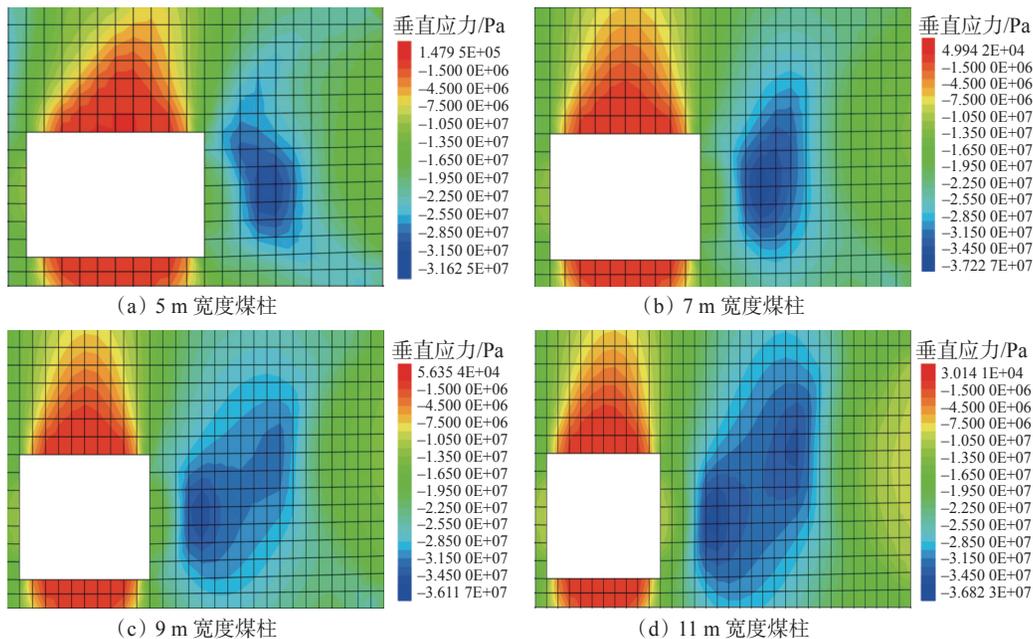


图 4 不同宽度煤柱内垂直应力分布特征

Fig. 4 Vertical stress distribution characteristics in coal pillars with different widths

3.2.2 煤柱内塑性区分布特征

不同煤柱宽度下煤柱内的塑性破坏区分布特征如图 5 所示。由图 5 可知,煤柱的破坏形式均为 X 型共轭破坏,随着煤柱宽度的增加,煤柱区域的弹性核区面积逐渐增大。煤柱宽度为 5 m 时,煤柱内塑性变形形成的裂隙已完全贯通,煤柱已无承载能力;煤柱宽度为 7 m 时,煤柱中部出现“细条型”弹性核区,宽度为 0.5 m,占煤柱宽度的 7%,煤柱内存在较小的残余强度支撑围岩;煤柱宽度增加至 9 m 时,煤柱内的弹性单元体数量大幅增加,弹性核区宽度为 3.5 m,占煤柱宽度的 39%,煤柱承载能力明显提高,有利于回风巷围岩稳定性控制;煤柱宽度继续增加至 11 m 时,煤柱内部的弹性核区宽度增加至 4 m,占煤柱宽度的

36%,煤柱承载能力较大。

3.2.3 巷道位移变化规律

提取不同煤柱宽度下巷道顶板下沉量随巷道宽度的变化情况绘制曲线,由于煤柱宽度 5 m 时顶板下沉量远大于煤柱宽度 7 m、9 m 和 11 m 顶板下沉量,为使图形更具自明性,绘制“双 y 轴图”,煤柱宽度 5 m 时对应纵坐标为右轴,煤柱宽度 7 m、9 m 和 11 m 时对应纵坐标为左轴,如图 6 所示。由图 6 可知,煤柱宽度由 5 m 增加至 9 m 时,巷道顶板的最大下沉量随着煤柱宽度的增加而逐渐减小;当煤柱宽度由 9 m 增加至 11 m 时,巷道顶板最大下沉量又出现增大,这是由于当煤柱宽度在 9 m 以内时,巷道整体均处于侧向支承应力降低区,而当煤柱宽度超过

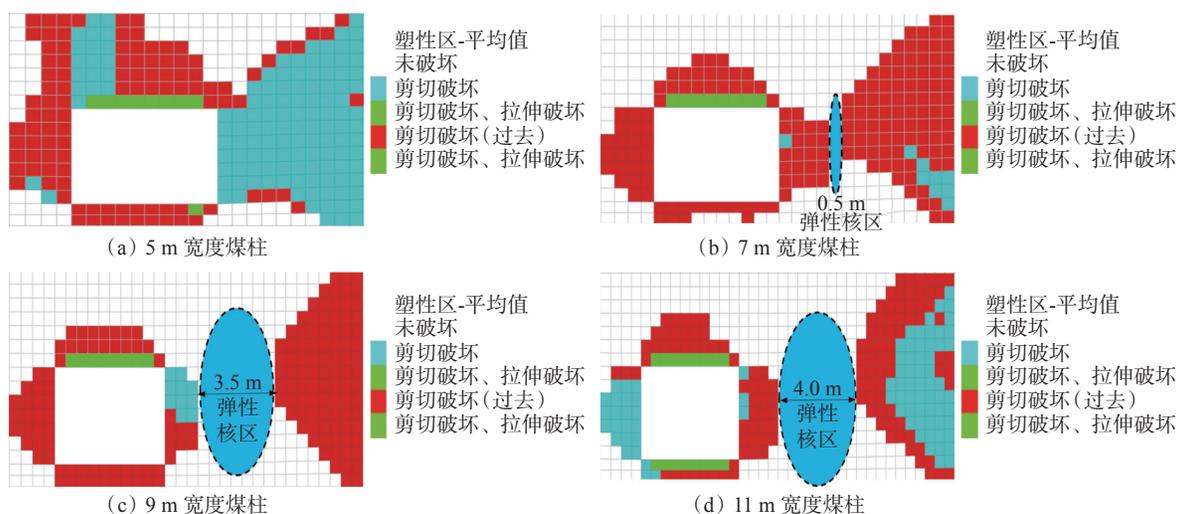


图 5 不同宽度煤柱内的塑性破坏区分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of plastic failure zone in coal pillar with different widths

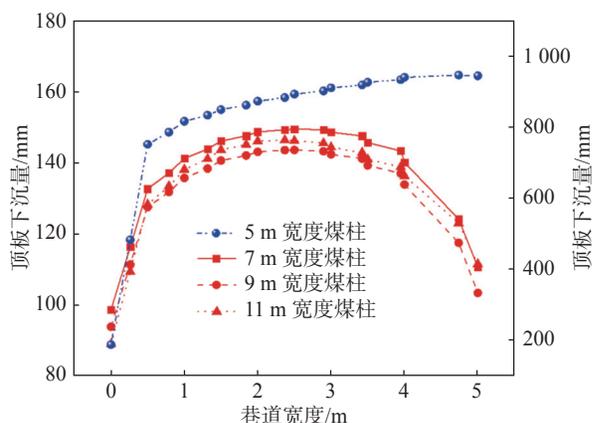


图 6 不同宽度煤柱巷道顶板下沉量

Fig. 6 Subsidence of roadway roof of coal pillar with different widths

9 m 时, 会使得巷道部分区域处于侧向支承应力增高区, 从而导致巷道顶板变形反而增加的现象。

当煤柱宽度为 5 m 时, 巷道顶板下沉量向采空区侧持续增大, 没有收敛的趋势, 其顶板最大下沉量为 943 mm, 变形剧烈, 巷道稳定性差; 煤柱宽度为 7 m、9 m、11 m 时的顶板下沉量呈拱形分布, 即巷道中部顶板变形较两边稍高, 表明此时巷道稳定性较好, 其顶板最大下沉量分别为 149 mm、143 mm 和 146 mm, 整体较为接近, 与 5 m 宽度煤柱相比, 巷道顶板下沉量明显变小, 巷道围岩相对稳定。

3.2.4 煤柱宽度确定

综合理论分析和数值模拟, 煤柱宽度从 5 m 增加至 11 m, 煤柱内部的垂直应力集中区域逐渐扩大, 弹性核区从无到有, 再到进一步扩大, 煤柱宽度 11 m 时核区宽度增加至 4 m; 煤柱宽度在 5~9 m 范围时, 随着煤柱宽度增加, 顶板位移量逐渐减小。综合对比 4 种宽度的煤柱情况: 5 m 宽度煤柱已全部破坏,

不具备承载能力, 且巷道顶板变形破坏严重; 7 m 宽度煤柱具有一定的弹性核区, 但面积较小, 承载能力较低; 煤柱宽度为 9 m、11 m 时的弹性核区面积较大, 煤柱内的应力呈双峰曲线式分布, 煤柱承载能力均较强, 但二者的弹性核区宽度、巷道顶板下沉量相差不大, 因此, 综合考虑煤炭资源节约以及安全生产, 确定煤柱最佳宽度为 9 m。

4 巷道围岩控制方案及效果

4.1 薄喷密闭技术原理

薄喷密闭技术主要涉及凝固速度快、厚度较薄、喷涂施工的衬层材料, 该材料在国外初步应用是作为一种表面密闭技术, 近年来随着薄喷材料的深入研究, 逐渐应用于煤矿、隧道等地下工程的表面防护、防开裂等方向。主要优势为具有良好黏结性, 可与围岩紧密黏结, 施工工艺简单, 具有良好的变形能力。其主要原理是利用专业设备将薄喷材料按照一定厚度喷涂至巷道表面, 凝固后形成柔性较强、稳定的保护层, 避免煤岩体因长期与空气接触被弱化, 有利于维持煤岩体的自身强度, 减缓围岩变形, 同时可适应后期煤柱受压变形, 封堵围岩裂隙, 避免形成采空区瓦斯溢出通道。

4.2 支护方案

依据模拟结果和现场条件确定 4209 工作面回风顺槽支护方案。巷道顶板使用 $\Phi 22$ mm-L2 500 mm 左旋螺纹钢锚杆, 铁托板采用 Q235 钢, 规格 150 mm×150 mm×8 mm; 锚索规格 $\Phi 21.8$ mm-L8 300 mm, 布置形式为 4-3-4, 间排距 1 400 mm×800 mm, 钢带采用 T140-L5 100/7 型钢带。帮部使用 $\Phi 22$ mm-L3 500 mm 左旋螺纹钢锚杆, 间排距 800 mm×800 mm, 矩形布置, 布置方案如图 7 所示。

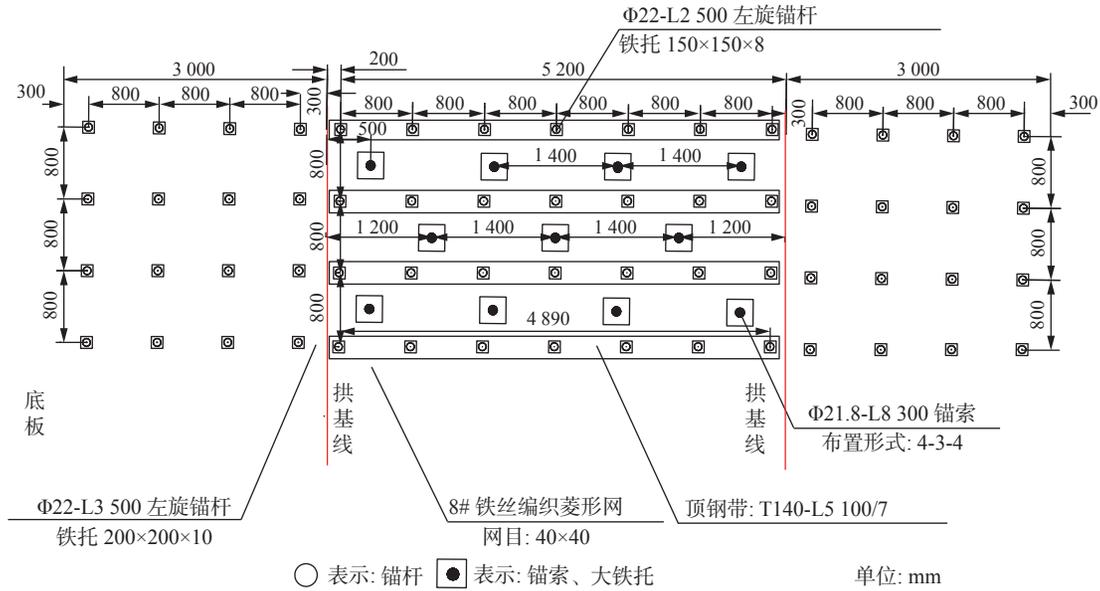


图 7 4209 工作面回风顺槽支护图
Fig. 7 Return airway support diagram of 4209 working face

4.3 薄喷密闭方案

根据实践经验以及现场条件, 确定喷涂厚度不小于 5 mm, 通过两次喷涂完成, 第一次喷涂厚度 3 mm 左右, 间隔 1 h 以上进行第二次复喷, 保证达到喷涂厚度要求。喷涂区域为巷道顶板和两帮, 通过快速喷涂施工, 要求喷射要均匀, 喷涂后巷道帮部要齐直。煤岩体表面薄喷密闭技术施工工艺流程如图 8 所示。

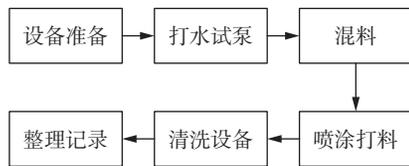


图 8 喷涂工艺流程
Fig. 8 Spraying process flow

4.4 应用效果分析

为验证 9 m 煤柱宽度留设的合理性, 在 4209 工作面回风顺槽掘进过程中布置测点, 通过十字布点法布置测点, 自巷道开口处每隔 200 m 布置一个测点, 共布置 7 个测点, 利用量程为 7 m 的卷尺进行人工测量, 巷道掘进完成初期变形量较大时每天进行一次观测, 等到巷道基本稳定时进行定期观测。监测沿空巷道围岩表面位移量结果如图 9 所示。由图 9 可知, 巷道顶底板及两帮移进量在 99 d 后逐渐趋于稳定, 顶底板各测点平均移近量为 280 mm, 最大移近量为 443 mm, 最大移近速率为 4.47 mm/d; 两帮各测点平均移近量为 216 mm, 最大移近量为 300 mm, 最大

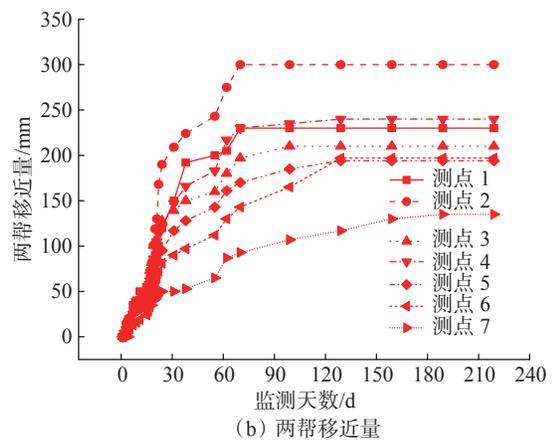
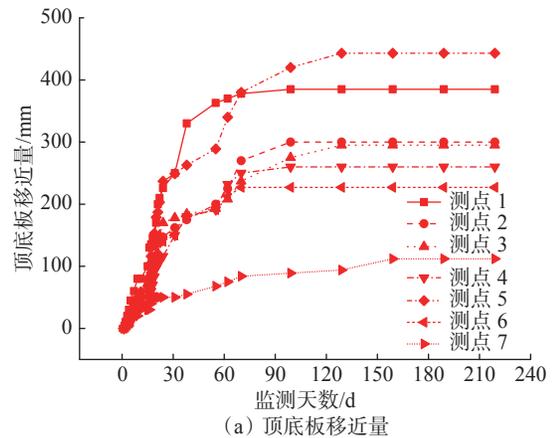


图 9 巷道围岩表面位移量
Fig. 9 Displacement of surrounding rock surface of roadway

移近速率为 3.03 mm/d。

根据《中国煤矿巷道围岩控制》中关于稳定巷道围岩的标准, 判定 4209 工作面回风顺槽围岩稳定性属于 I 类, 即属中等稳定巷道, 表明 4209 工作面留

设9 m宽度的煤柱合理可靠,可满足矿井安全生产。根据薄喷密闭方案在回风顺槽进行喷涂(图10),喷涂后巷道围岩完整性明显提高,利用瓦检仪对煤柱帮瓦斯浓度进行监测,喷涂后各测点瓦斯浓度明显降低,降幅在17%~37%,如图11所示,薄喷密闭技术对于防止瓦斯溢出效果良好,可进一步推广使用。

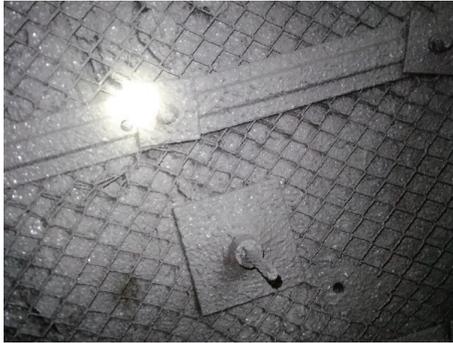


图10 薄喷技术现场应用

Fig. 10 Field application of thin jet sealing technology

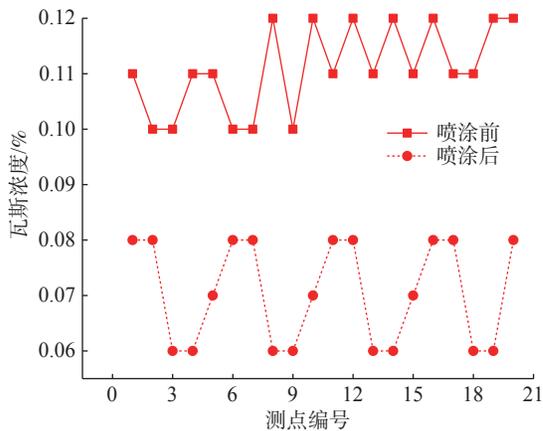


图11 煤柱帮瓦斯浓度

Fig. 11 Gas concentration of coal pillar wall

5 结论

1)根据极限平衡理论结合工作面地质条件,计算综放开采沿空掘巷合理煤柱宽度范围为7.8~9.0 m。

2)通过FLAC^{3D}数值模拟软件研究了不同煤柱宽度下的巷道顶板下沉量、垂直应力分布及塑性区变化特征,得出煤柱宽度为9 m时煤柱的稳定性较强,且巷道变形量较小,综合分析确定合理的煤柱宽度为9 m。

3)基于模拟结果及现场实际条件设计了巷道支护方案及薄喷方案,应用结果表明,巷道围岩整体变形量较小,且喷涂后巷道内瓦斯浓度明显降低,保证了工作面的安全高效生产。

参考文献(References):

[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.

用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 16-44.

KANG Hongpu, ZHANG Xiao, WANG Dongpan, et al. Strata control technology and applications of non-pillar coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 16-44.

[2] 付玉凯, 张镇, 王涛. 深部煤柱留巷“卸-支-注”协同控制原理及实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(5): 881-889.

FU Yukai, ZHANG Zhen, WANG Tao. Principle and experiment of “pressure relief-high strength support-injection” coordinated control in deep coal pillar roadway[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(5): 881-889.

[3] 张百胜, 王朋飞, 崔守清, 等. 大采高小煤柱沿空掘巷切顶卸压围岩控制技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2254-2267.

ZHANG Baisheng, WANG Pengfei, CUI Shouqing, et al. Mechanism and surrounding rock control of roadway driving along gob in shallow-buried, large mining height and small coal pillars by roof cutting[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2254-2267.

[4] 孟祥军, 赵鹏翔, 王绪友, 等. 倾斜厚煤层沿空掘巷窄煤柱留设尺寸及围岩控制技术研究[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(3): 413-422.

MENG Xiangjun, ZHAO Pengxiang, WANG Xuyou, et al. Reasonable width of narrow coal pillars and control technology of surrounding rock of gob-side entry in inclined thick coal seam[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(3): 413-422.

[5] 任建喜, 林海, 易归, 等. 浅埋综采工作面区段煤柱宽度优化[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(14): 5562-5568.

REN Jianxi, LIN Hai, YI Gui, et al. Optimization of coal pillar width in shallow-buried fully-mechanized coal face[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(14): 5562-5568.

[6] 谷拴成, 张志飞, 杨超凡, 等. 玉华煤矿综采工作面间煤柱合理尺寸研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(3): 81-87.

GU Shuancheng, ZHANG Zhifei, YANG Chaofan, et al. Study on the reasonable size of coal column in surface of fully mechanized mining in Yuhua Coal Mine[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(3): 81-87.

[7] 郭重托, 李杰, 柏建彪, 等. 特厚煤层综放开采沿空掘巷煤柱合理宽度研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(2): 19-24.

GUO Zhongtuo, LI Jie, BAI Jianbiao, et al. Reasonable coal pillar width of gob-side entry driving in fully mechanized top-coal caving of extra-thick coal seam[J]. Coal Engineering, 2022, 54(2): 19-24.

[8] 王建利. 浅埋薄基岩窄煤柱巷道上下覆岩层破断规律与稳定控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.

[9] 崔建军. 深部沿空掘巷变形破坏机理及控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(7): 12-17.

CUI Jianjun. Study on deformation and failure mechanism and control technology of deeply gob-side entry driving[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 12-17.

[10] 姜鹏飞. 深部特厚煤层对采对掘巷道围岩综合应力场演化研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(8): 26-36.

JIANG Pengfei. Research on evolution of integrated stress field of surrounding rock of mining while digging opposite roadway in deep and ultra-thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 26-36.

[11] 王德超, 李术才, 王琦, 等. 深部厚煤层综放沿空掘巷煤柱合理宽度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 539-548.

- WANG Dechao, LI Shucui, WANG Qi, et al. Experimental study of reasonable coal pillar width in fully mechanized top coal caving face of deep thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 539-548.
- [12] 谷长宛, 王波, 王军, 等. 基于胀锁式对穿锚索的沿空掘巷窄煤柱双向加固机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(4): 106-116.
GU Changwan, WANG Bo, WANG Jun, et al. Research on bidirectional-reinforcement mechanism of narrow coal pillar of gob-side entry driving based on inflatable lock-type anchor[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 106-116.
- [13] 杨虎, 蒲平武. 厚煤层留窄煤柱沿空掘巷技术研究及讨论[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(S2): 67-70.
YANG Hu, PU Pingwu. Research and discussion on roadway driving technology along gob with narrow coal pillar in thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(S2): 67-70.
- [14] 张少波, 吴建生, 魏群, 等. 煤矿薄喷技术的理论与实践[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(4): 1-7.
ZHANG Shaobo, WU Jiansheng, WEI Qun, et al. Theory and practices on thin spray-on technology of coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(4): 1-7.
- [15] 李学彬, 杨春满, 王波, 等. 西部弱胶结软岩巷道新型聚合物喷层支护研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 76-80.
LI Xuebin, YANG Chunman, WANG Bo, et al. Study on new polymer spraying support of mine roadway with weak cemented softrock in West China[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 76-80.
- [16] 张农, 魏群, 吴建生. 煤矿巷道喷涂柔膜技术及适用性[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 78-85.
ZHANG Nong, WEI Qun, WU Jiansheng. Spray-on membrane technology and its applicability in coal mine roadways[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 78-85.