

厚煤层沿空掘巷小煤柱合理宽度与支护技术

王涛*, 宋宇鹏, 李权

(山西煤炭运销集团 长治有限公司, 山西 长治 046000)

摘要:为提高煤炭资源回收率,缓解采掘衔接紧张,福达煤矿计划在 15204 工作面实施小煤柱开采.以该煤矿 15204 回风顺槽进行小煤柱沿空掘巷为背景,通过理论分析、数值模拟和现场实践的方法,对 15204 回风顺槽的煤柱留设和巷道支护开展技术研究.结合理论计算结果和 5 种不同宽度煤柱的塑性区及围岩应力分析,确定小煤柱宽度为 5 m,并设计小煤柱巷道的锚网索支护方案.现场应用表明,留设 5 m 宽的煤柱并进行合理支护后,掘进期间未发生明显变形,取得良好的支护效果,能够满足安全生产要求.研究结果可为类似条件下小煤柱沿空掘巷提供参考依据及技术借鉴.

关键词:沿空掘巷;厚煤层;小煤柱;巷道支护

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2023)01-0017-06

The Reasonable Small Pillar Width and Supporting Technology of Gob-side Entry Driving in Thick Coal Seam

WANG Tao, SONG Yupeng, LI Quan

(Changzhi Limited Company of Shanxi Coal Transportation and Marketing Group, Changzhi 046000, China)

Abstract: In order to improve the recovery rate of coal resources and alleviate the tension between mining and excavation, Fuda Coal Mine plans to implement small coal pillar mining in 15204 working face. Based on the background of small coal pillar gob-side entry driving in 15204 return airway of Fuda Coal Mine, this paper studies the coal pillar retention and roadway support of 15204 return airway through theoretical analysis, numerical simulation and field practice. Combined with the theoretical calculation results and the plastic zone and surrounding rock stress analysis of five width coal pillars, the width of small coal pillar is determined to be 5 m, and the bolt-mesh-cable support scheme of small coal pillar roadway is designed. The field application shows that there is no obvious deformation during the excavation period after setting a 5 m wide coal pillar and reasonable support, and a good support effect is achieved, which can meet the requirements of safe production. The research results can provide referential basis and technical reference for gob-side entry driving with small coal pillar under similar conditions.

Keywords: gob-side entry driving; thick coal seam; small coal pillar; roadway supporting

大煤柱护巷是我国煤矿开采常用的护巷方法.为保证工作面的安全生产,相邻工作面之间区段煤柱的宽度一般为 20~30 m,部分矿压显现剧烈的矿井煤柱宽度甚至达到 50~60 m,造成大量的煤炭资源浪费^[1].调查结果表明,大煤柱护巷造成的煤炭损失率高达 30%,在煤矿各项开采损失中居于首位^[2].近年来,绿色开采成为煤炭行业的发展方向,特别是在碳达峰、碳中和目标下,对煤炭绿色开采提出了更高的要求.因此,进行沿空掘巷技术研究,在减少煤炭损失的同时保障矿井的安全高效生产,对煤矿实现绿色开采具有重要意义.

国内很多学者对沿空掘巷理论和技术进行了研究^[3-5].王卫军等^[6]建立了采空区侧向煤体塑性区计算公式;王德超等^[7]通过现场实测与数值模拟确定了小煤柱合理留设宽度;赵学斌^[8]以凤凰山矿15号煤为研究对象,最后得出留设4~5 m煤柱宽度比较合理,锚索作为加强支护形式可有效保证巷道围岩稳定性;张希文等^[9]采用极限平衡理论和弹塑性力学相关原理对煤柱最小尺寸进行计算,并根据计算结果优化了坚硬顶板条件下小煤柱沿空掘巷支护参数.研究成果较多,但我国煤层赋存环境多变,有关研究通用性较差,特定地质条件还需进行针对性分析.本文以福达煤矿15204工作面回风顺槽小煤柱沿空掘巷为例,采用理论计算和数值模拟分析的方法,确定合理的小煤柱宽度,提出合适的巷道支护方案.通过现场应用,验证所留设煤柱宽度的可行性和支护方案的有效性,以期类似条件下小煤柱沿空掘巷工作提供参考.

1 工程概况

福达煤矿位于山西省长治市武乡县,设计生产能力1 200 kt/a,开采15号煤层,平均埋深400 m,煤层平均厚度4.5 m,平均倾角11°.煤层结构简单,赋存稳定,含1层夹矸,平均厚度0.2 m.煤层顶底板以泥岩和砂岩为主,根据岩石物理力学试验结果,直接顶岩石单轴抗压强度33 MPa,老顶岩石单轴抗压强度80 MPa,煤层顶底板情况如表1所示.

表1 煤层顶底板情况

顶底板名称	岩石名称	厚度/m	岩性特征
基本顶	细粒砂岩	8.16	灰色,中厚层状,成分以石英为主,长石次之,含岩屑,水平纹理发育
直接顶	泥岩	0.95	深灰色,中厚层状,层理均匀,可见植物根部碎屑化石
煤层	15号煤	4.50	黑~灰黑色,亮煤为主,夹有镜煤条带和少量暗煤,含1层夹矸,夹矸为泥岩
直接底	泥岩	0.30	灰黑色,薄层状,见大量植物根部化石,均匀层理
	含铅泥岩	0.20	深灰色,中厚层状,均匀层理,见滑面,比重大
基本底	粉砂岩	3.05	灰色,中厚层状,均匀层理,见大量植物碎屑化石

15202工作面是福达煤矿二采区第2个工作面,南侧为二采区的3条下山巷道,北侧为井田边界,西侧为正在布置的15204工作面,东侧为15103工作面采空区,可采长度1 017 m,切眼长220 m,该工作面已于2021年6月回采结束.15204工作面位于15202工作面西侧,可采长度1 149 m,切眼长194 m.两个工作面均采用走向长壁综采大采高采煤法,采空区顶板管理方法为全部垮落法,工作面相对位置如图1所示.15204工作面回风顺槽临近15202工作面采空区布置,掘进断面尺寸5 m×4 m,为尽可能多地回收区段煤柱,计划布置成小煤柱沿空掘巷.

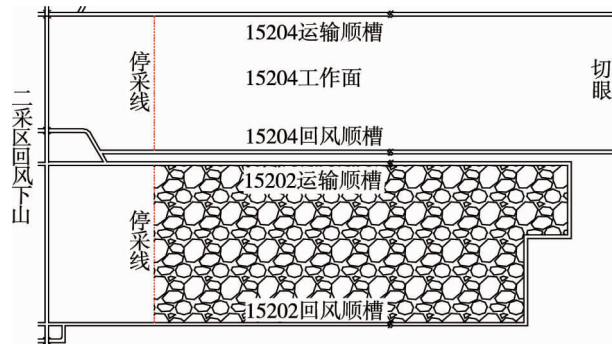


图1 15202和15204工作面相对位置

2 合理煤柱宽度研究

2.1 小煤柱宽度理论计算

回采工作面护巷小煤柱留设的基本原理就是把巷道布置在已采工作面采空区边缘的低应力区,但是考虑到回采巷道的支护问题和隔离采空区需要,煤柱尺寸也不能过小.在工作面回采过程中煤柱塑性区范

围不断增大,加速了煤柱的破坏,若不利用锚杆的锚固效果,无法形成有效承载结构,因此确定煤柱内部塑性区范围是进一步确定小煤柱宽度的关键.工作面开采后,根据 Mohr-Coulomb 准则和弹性力学的有关知识计算塑性区的宽度 X_1 为^[10]

$$X_1 = \frac{h\lambda}{2\tan\varphi} \ln \frac{K\gamma H + \frac{C}{\tan\varphi}}{\frac{C}{\tan\varphi}} \quad (1)$$

式中: h 为煤柱高度,取煤层平均高度 4.5 m; λ 为侧压系数,根据福达煤矿 15 号煤层的泊松比计算后取 0.3; K 为应力集中系数,根据已开采工作面的矿压观测资料取 2; γ 为上覆岩层平均容重,取 0.025 MN/m^3 ; H 为煤柱埋深,根据地测资料取 400 m; C 和 φ 为煤层黏聚力和内摩擦角,根据煤岩物理力学试验结果分别取 2.9 MPa 和 28° .

将以上参数值代入式(1),计算得福达煤矿 15 号煤层工作面回采后在煤柱内形成的塑性区宽度 X_1 为 1.95 m.

为避免固定和残余支承压力的影响,采用锚杆(索)对护巷煤柱进行支护,在高围岩应力的作用下,可能会使锚杆(索)的锚固范围处于煤柱的塑性破坏区内,致使锚固效果差,故锚杆长度 X_2 也是确定煤柱合理宽度所要考虑的因素^[11].考虑到影响煤柱稳定的其他因素,对煤柱附加一个安全宽度 X_3 ,以避免其他因素对煤柱的影响.综上所述,沿空巷道护巷小煤柱合理宽度 B 的计算式为^[12]

$$B = X_1 + X_2 + X_3 \quad (2)$$

式(2)中, X_1 取 1.95 m, X_2 取 2.40 m, X_3 一般取 $(X_1 + X_2)$ 的 0.15~0.40 倍.将以上参数值代入式(2),得出 B 的取值为 5.0~6.1 m.因此,福达煤矿 15204 工作面小煤柱合理留设宽度为 5.0~6.1 m.

2.2 小煤柱宽度模拟分析

根据福达煤矿 15202 和 15204 工作面的生产地质条件,通过前文计算得出的小煤柱合理留设宽度,选取煤柱宽度为 4,5,6,7,8 m 这 5 种方案进行模拟,分析这 5 种宽度条件下煤柱及巷道围岩塑性区变化和应力环境.塑性区分布如图 2 所示.

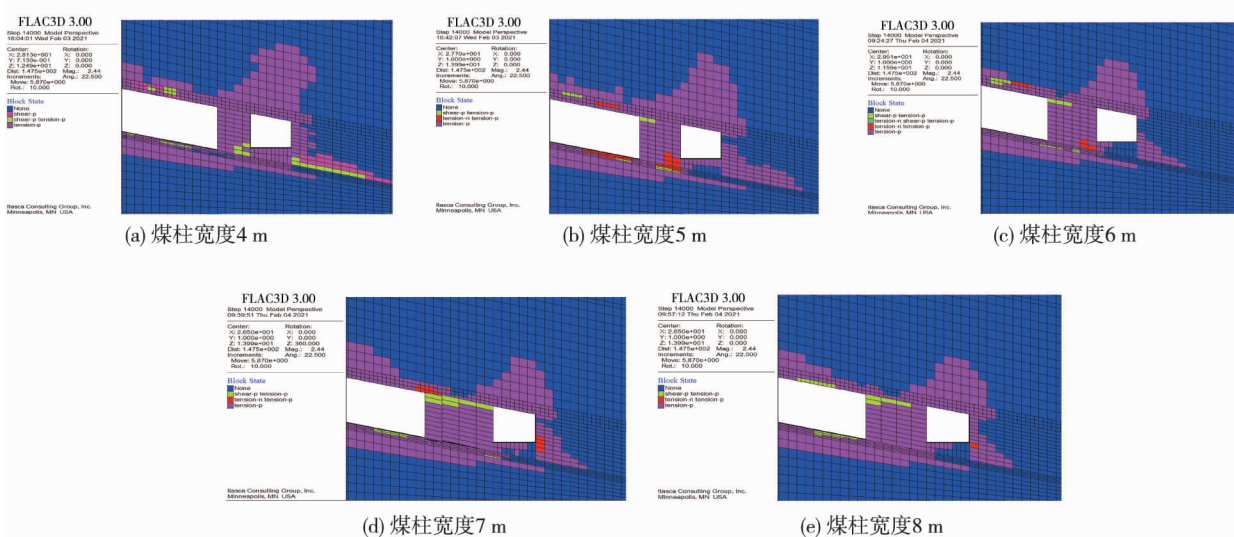


图 2 不同宽度条件下煤柱的塑性区分布

分析图 2 可知,随着煤柱宽度的增加,小煤柱虽然一直处于塑性区范围内,但巷道围岩塑性区破坏范围逐渐降低,表明宽度为 4~8 m 的小煤柱均处在塑性变形区,但煤柱宽度的增大能够在一定程度上降低沿空巷道围岩的塑性变形范围.

不同宽度条件下煤柱的垂直应力分布和水平应力分布如图 3 和图 4 所示.

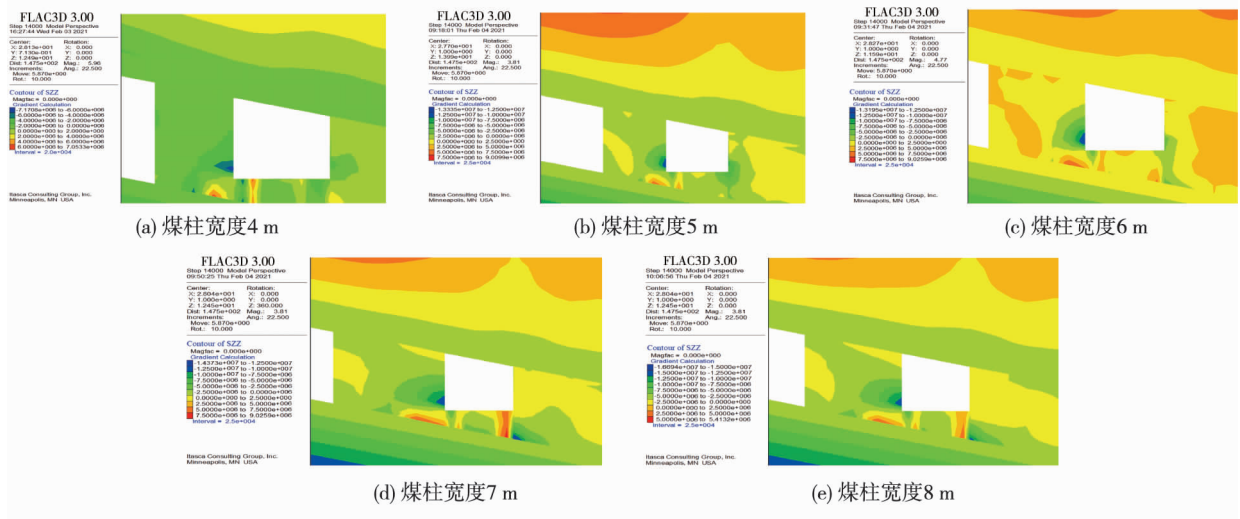


图3 不同宽度煤柱下的垂直应力分布

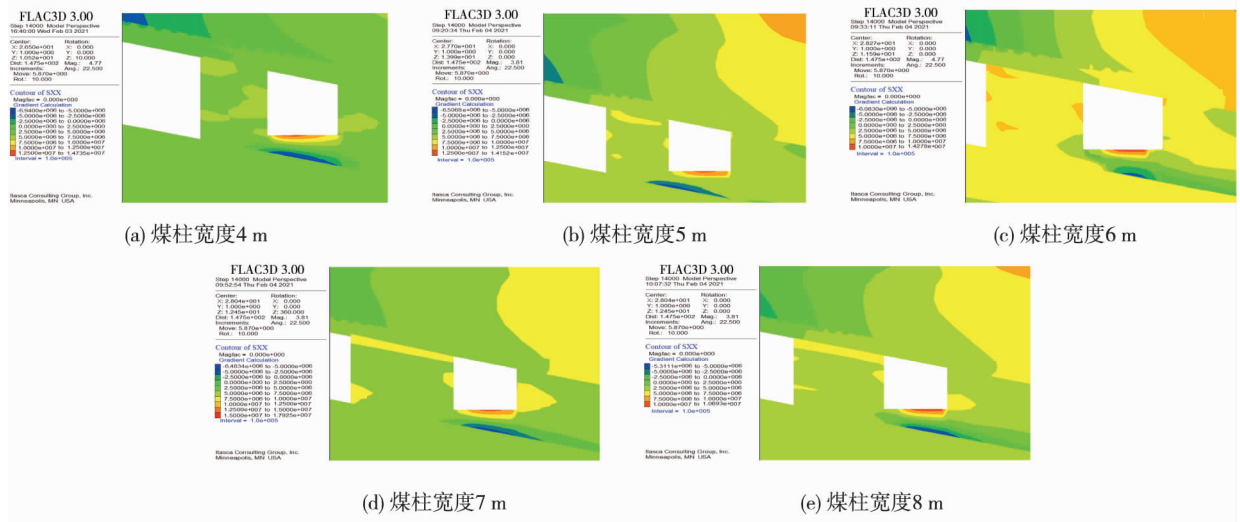


图4 不同宽度煤柱下的水平应力分布

分析不同宽度煤柱内的应力分布可知:巷道上帮以垂直应力为主,在煤柱帮的下部帮角位置出现明显的应力集中现象,集中程度随着煤柱宽度的增加逐渐增大,当煤柱宽度由4 m增加到8 m时,垂直应力峰值由7.2 MPa增长至16.7 MPa;巷道底板以水平压应力为主,且影响范围较大,煤柱宽度为7 m时底板水平应力达到17.9 MPa,煤柱宽度为8 m时水平应力最低,为10.7 MPa,其余宽度的煤柱水平应力在14 MPa左右.综合来看,煤柱宽度为5 m时,垂直应力峰值水平较低,煤柱帮影响程度较低,底板最大水平应力影响范围也较小,能够满足矿井安全生产要求.

综上所述,结合理论计算结果和塑性区变化情况,确定福达煤矿15204工作面小煤柱合理留设宽度为5 m.

3 巷道支护

3.1 巷道布置方式

15204回风顺槽计划掘进时,15202工作面仍在回采,为避开工作面回采时的动压影响,在15204切眼掘进完成后再反掘15204回风顺槽.2021年3月—5月巷道在实体煤中掘进,到6月份开始掘进小煤柱巷道时15202工作面已回采结束.巷道沿煤层顶板布置,断面为斜顶矩形,掘宽5 m,中心掘高4 m,掘进断面面积20 m²,净宽4.8 m,中心净高3.9 m,净断面积18.72 m²,采用锚杆+锚索+金属网+钢带联合支护.

3.2 支护方案设计

1) 顶板支护

采用 6 根 $\Phi 22\text{ mm} \times 2\ 400\text{ mm}$ 左旋无纵筋螺纹钢锚杆,间距 900 mm,排距 800 mm,顶板角锚杆距巷帮 250 mm;锚固剂采用 1 支 K2335 和 1 支 Z2360 树脂药卷,配合 150 mm \times 150 mm \times 12 mm 拱形高强度托盘,锚杆扭矩 400 N \cdot m;顶锚杆采用 H 钢带相连,长度 4 600 mm,宽度 90 mm,经纬金属网 5 000 mm \times 900 mm,由 10[#]铁丝制成.顶锚索选用 $\Phi 18.9\text{ mm} \times 8\ 300\text{ mm}$ 的 17 股预应力钢绞线,间距 2 200 mm,排距 1 600 mm,“2-1-2-1”式布置,沿巷道走向采用 W 钢带相连,长度 1 900 mm,宽度 280 mm,厚度 5 mm;每根锚索用 1 支 K2335 和 2 支 Z2360 树脂药卷锚固,300 mm \times 300 mm \times 14 mm 高强度托板及配套调心球垫,预紧力不小于 250 kN.

2) 两帮支护

采用 $\Phi 22\text{ mm} \times 2\ 400\text{ mm}$ 左旋无纵筋螺纹钢锚杆,煤柱帮每排 5 根,回采帮每排 4 根,间距 950 mm,排距 800 mm.采用 1 支 K2335 和 1 支 Z2360 树脂药卷锚固,锚杆扭矩 250 N \cdot m.煤柱帮上部第 1 根锚杆上斜 10 $^\circ$ 打设,其余帮锚杆垂直岩面打设.经纬金属网规格为 2 100 mm \times 900 mm 和 1 600 mm \times 900 mm,由 10[#]铁丝制成.

为提高小煤柱的稳定性,煤柱帮另外采用 3 根 $\Phi 18.9\text{ mm}$ 的锚索进行补强支护,第 1 根锚索距顶板 1 000 mm,上斜 50 $^\circ$ 布置,锚索长度为 6 300 mm,第 2 根锚索距顶板 2 500 mm,水平布置,锚索长度为 4 300 mm,第 3 根锚索距底板 900 mm,下斜 6 $^\circ$ 布置,锚索长度为 4 300 mm.帮锚索排距 1 600 mm,沿巷道走向用 W 钢带相连,钢带、托盘的规格与顶锚索相同,每根锚索用 1 支 K2335 和 2 支 Z2360 树脂药卷锚固,预紧力不小于 160 kN.15204 回风顺槽沿空掘巷支护如图 5 所示.

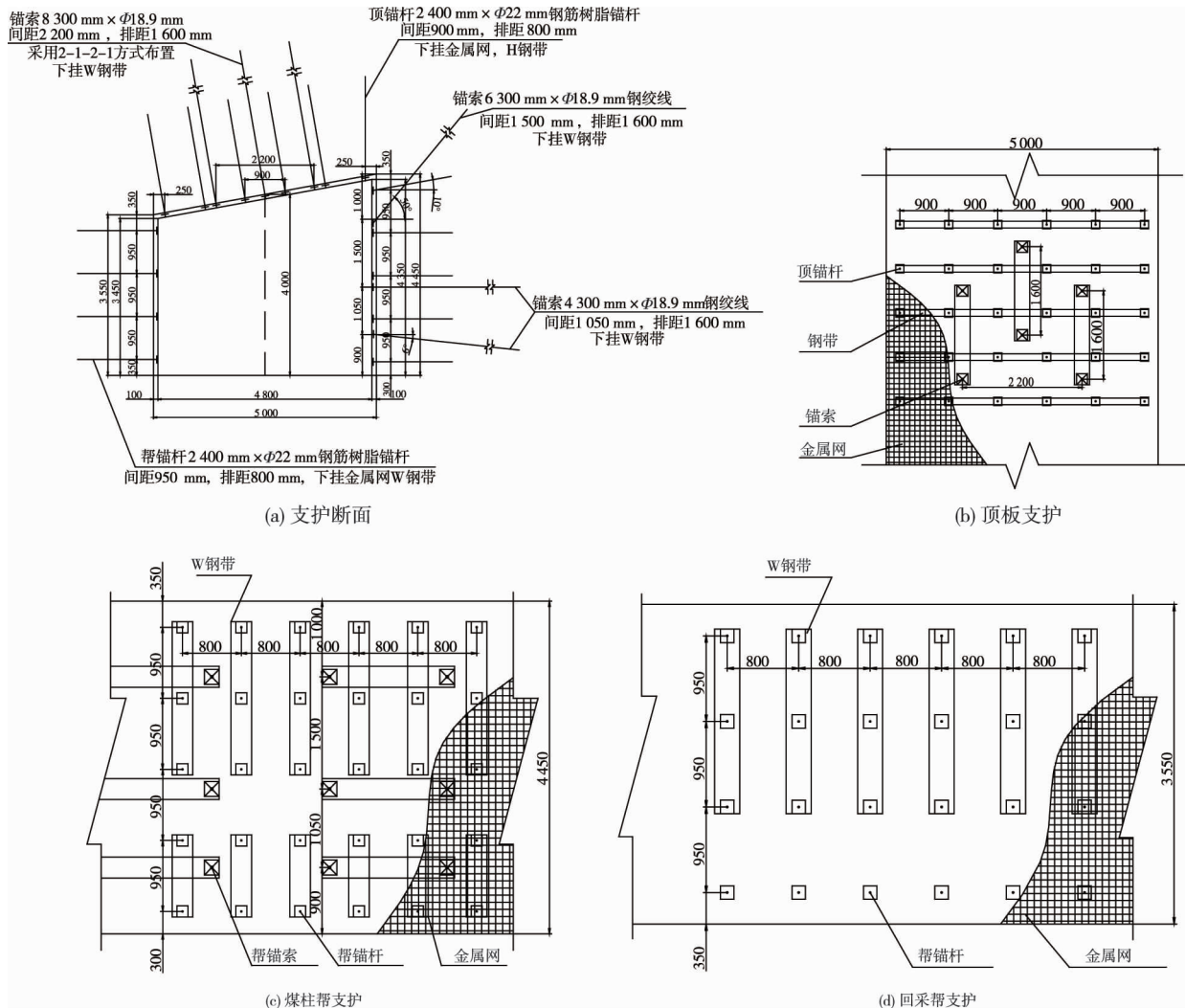


图 5 15204 回风顺槽支护方案(单位:mm)

3.3 煤柱破碎区注浆加固

由于留设的煤柱尺寸小且巷道压力大,存在破碎煤柱失稳后裂隙扩展导通 15202 工作面采空区的可能性,在巷道掘进期间,遇煤柱破碎区域需采取加固措施.具体方案:破碎煤柱进行常规支护后,在煤壁表

面喷射 50 mm 厚的 C20 水泥浆材料,喷浆凝固后形成止浆砣;在煤柱帮距底板 2 m 处(可根据破碎位置适当调整)垂直打设 1.5 m 深钻孔注水泥浆材料,钻孔间距 3 m,止浆砣可以有效避免浆液外渗并提高护表能力,水泥浆能够充填煤柱裂隙提高煤柱强度,从而防止小煤柱发生进一步的失稳破坏。

4 效果分析

4.1 矿压监测分析

为验证 5 m 宽小煤柱的可行性和支护方案的合理性,对福达煤矿 15204 回风顺槽进行掘进期间的矿压观测。巷道内每隔 50 m 安装 1 个 GUD300 型顶板离层仪监测顶板离层,安装深度为浅基点 2.3 m,深基点 9 m,并采用“十字布点法”设置巷道表面位移观测站,一共设置 26 个测站。观测结果表明,15204 回风顺槽掘进期间所有顶板离层仪的深基点和浅基点读数均为 0,说明顶板岩层的整体性较好,未发生顶板离层。巷道顶底板最大变形量为 83 mm,两帮最大变形量为 102 mm,而在实体煤中布置的 15204 运输顺槽掘进期间的顶底板和两帮最大变形量分别为 58 mm 和 66 mm,小煤柱巷道与实体煤巷道相比,顶底板和两帮最大变形量分别增加约 43% 和 55%,表明小煤柱巷道矿压显现更加剧烈,但是整体变形量不大,均在可控范围内。煤柱帮移近量为 75 mm,占两帮变形总量的 3/4,表明小煤柱承压明显,在两帮变形中处于主导地位。在此期间巷道维护状况良好,未出现锚杆锚索断裂失效、钢带和金属网变形撕裂、顶板坠包、巷帮鼓出等问题,说明福达煤矿在留设 5 m 小煤柱配合合理支护的情况下,巷道围岩稳定性得到了有效控制,取得了良好的工程效果。另外,由于 15204 工作面尚未回采,本文对回采期间的矿压显现不做分析。

4.2 经济效益分析

福达煤矿回采工作面之间正常留设的大煤柱宽度为 20 m,采用小煤柱沿空掘巷布置后,可多回收 15 m 宽的区段煤柱。15204 工作面可采长度 1 149 m,工作面采高 4.5 m,回采率 93%,15 号煤容重 1.39 t/m^3 ,可多回收煤炭资源约 10.03 万 t。若按照福达煤矿 2022 年 1 月份的吨煤价格 1 350 元计算,可增加产值约 1.35 亿元,经济效益十分显著。

5 结论

- 1) 福达煤矿 4.5 m 大采高工作面留设 5 m 宽的煤柱,经现场验证是安全可行的。
- 2) 基于 5 m 宽的小煤柱设计的支护方案是采用小煤柱侧锚杆与短锚索联合支护、顶板锚杆与长锚索联合支护、回采侧锚杆支护,对局部破碎煤柱喷浆封闭和注浆加固,实现了小煤柱巷道的稳定性控制。
- 3) 福达煤矿在 15204 工作面实现小煤柱开采,较 20 m 大煤柱开采方案多回收原煤 10.03 万 t,经济效益显著。该煤矿小煤柱开采方法可为其他厚煤层大采高工作面的小煤柱掘巷问题提供参考。

参考文献:

- [1] 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研究[J].煤炭学报,2021,46(7):2254-2267.
- [2] 孟海东,田睿,徐严军.迎采动沿空掘巷窄煤柱合理宽度的研究[J].煤炭工程,2017,49(9):36-39.
- [3] 薛福明.孤岛工作面覆岩结构及煤柱宽度研究[J].能源与节能,2021(4):52-54.
- [4] 赵雪琛,凌志达.煤矿 15207 工作面沿空掘巷煤柱合理宽度研究[J].能源与节能,2020(10):44-45.
- [5] 张睿智.窄煤柱沿空掘巷煤柱合理宽度研究[J].能源与节能,2016(3):44-45.
- [6] 王卫军,侯朝炯,李学华.老顶给定变形下综放沿空掘巷合理定位分析[J].湘潭矿业学院学报,2001,16(2):1-4.
- [7] 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.
- [8] 赵学斌.坚硬顶板沿空掘巷煤柱宽度及支护技术研究[J].煤炭与化工,2013,36(10):44-45.
- [9] 张希文,牛福龙.坚硬顶板条件下小煤柱沿空掘巷支护参数优化[J].同煤科技,2014(4):22-25.
- [10] 李建国,宋刚,郭宁,等.厚坚硬顶板条件下小煤柱沿空掘巷技术研究[J].能源与节能,2021(9):13-16.
- [11] 刘勇.沿空掘巷小煤柱护巷的理论分析及应用[J].煤矿现代化,2019(5):181-184.
- [12] 李林,顾伟,刘世超.中厚煤层综放开采窄小煤柱沿空掘巷技术[J].煤矿安全,2020,51(11):94-100.