

孤岛工作面沿空掘巷围岩控制技术在煤矿的实践与应用

邴 峰

国家能源集团蒙西煤化股份有限公司棋盘井煤矿，内蒙古 鄂尔多斯

收稿日期：2022年3月1日；录用日期：2022年4月4日；发布日期：2022年4月11日

摘 要

本论文通过对棋盘井煤矿I020908工作面回风顺槽孤岛工作面沿空掘巷的支护条件、施工工艺的认真分析；实验测试了9#煤及顶板岩石的煤岩物理力学参数；数值模拟了I020908工作面采场及回风顺槽沿空掘巷巷道应力分布规律，结合现场调研和理论分析，确定了棋盘井煤矿I020908工作面回风顺槽沿空掘巷合理巷道煤柱宽度；同时，提出了棋盘井煤矿I020908工作面回风顺槽锚网索(梁)喷联合支护技术，并进行了现场实施；基本掌握了采用锚网索(梁)喷联合支护下的煤巷变形的基本规律，为矿井的安全生产提供了技术支撑和科学依据。

关键词

孤岛工作面，沿空掘巷，围岩控制技术，实践与应用

Practice and Application of Surrounding Rock Control Technology in Gob Driving in Isolated Island Working Face in Coal Mines

Feng Qie

Qipanjing Coal Mine, Mengxi Coal Chemical Co. Ltd., National Energy Group, Ordos Inner Mongolia

Received: Mar. 1st, 2022; accepted: Apr. 4th, 2022; published: Apr. 11th, 2022

Abstract

This paper carefully analyzes the support conditions and construction technology of the gob-side roadway in the I020908 working face of Qipanjing Coal Mine, and the physical and mechanical pa-

rameters of coal and rock of 9# coal and roof rock are tested; Numerical simulation of the stress distribution law of the I020908 working face stope and the gob-side roadway with return air, combined with on-site investigation and theoretical analysis, the reasonable coal pillar width of the roadway with the return air along the gob of the I020908 working face in Qipanjing Coal Mine is determined. At the same time, it puts forward the combined support technology of anchor-net-cable (beam)-spray joint support technology along the return air groove of Qipanjing Coal Mine I020908 working face, and carries out on-site implementation; The basic law of roadway deformation provides technical support and scientific basis for mine safety production.

Keywords

Island Face, Gob-Side Entry, Surrounding Rock Control Technology, Practice and Application

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

孤岛工作面是指准备回采的工作面周围均为采空区或者工作面顺槽两侧均为采空区的工作面，在这种工作面内进行的采煤工作称为孤岛工作面采煤[1]。孤岛工作面不同方向支撑压力的迭加，是孤岛工作面开采中的一个重要特点，两巷及两端头煤体受采动及相邻采空区残余应力双重影响，巷道围岩松动圈较大，压力显现更为明显，围岩变形速度较大变形严重[2]。采动过程中工作面两巷围岩会处于流变状态，并且受到高应力作用而加剧变形，严重威胁人员出入和机械设备的正常运转；一定条件下，采场顶板覆岩结构失稳会对工作面支架造成冲击载荷，形成大面积片帮，严重时会造成支架压死，设备损坏，挤出的煤体会封堵工作面出口，同时导致瓦斯涌出量增加等工程灾害[3]。另外，回采速度对围岩变形的影响较大，推进度越快，工作面底鼓和两帮移近量越小；推进度越慢，工作面底鼓和两帮移近量越大[4]。针对这种情况，国内许多科研院所展开了技术攻关，收到了良好的效果[5]。例如，中国矿业大学的白宇在其论文《寺家庄矿孤岛工作面沿空掘巷围岩控制技术研究》中运用理论分析、FLAC 数值模拟分析、现场工业性试验等方法，分析了工作面上覆岩层结构形成过程及结构模型，沿空掘巷窄煤柱宽度，掘进及回采期间应力分布，变形破坏特征及塑性区演化规律，揭示了锚杆锚索支护作用机理，研究得到沿空掘巷围岩控制技术，收到了良好的应用效果[6]。中国矿业大学的廖鹏在其论文《东庞矿孤岛工作面沿空掘巷围岩控制技术研究》中对孤岛工作面在回采期间存在的危害进行了认真地分析研究，并以东庞矿 21215 孤岛工作面轨道巷为工程背景，通过理论分析，并结合数值模拟对比验证，现场工业试验实测等方式，分析研究了孤岛工作面沿空掘巷的巷道围岩变形规律和煤柱内的应力分布规律，合理煤柱宽度的确定和巷道围岩支护参数的优化，收到了非常好的应用效果[7]。河南新郑煤电有限责任公司的何小军在其论文《三软煤层孤岛工作面沿空巷道围岩控制技术研究》中针对新郑煤电公司某矿 21101 工作面沿空掘巷机巷在三软煤层中布置时原有煤柱不能满足生产需要的实际情况，通过沿空掘巷上覆岩体大小结构模型分析了沿空巷道围岩控制原理，理论计算结合数值模拟重新确定的煤柱留设宽度，确保了矿井的安全生产[8]。扬州工业职业技术学院的徐军在其论文《孤岛工作面沿空掘巷围岩控制技术实践》中针对王庄煤矿孤岛工作面窄煤柱沿空掘巷围岩破坏严重的问题，采用现场地质调研、矿山压力监测的方法，分析了此类条件下围岩变形破坏特征，发现顶板和煤柱帮是围岩控制的关键，并针对性地提出“注浆 + 锚网索 +

局部加强支护”的控制技术，一举扭转了围岩破坏严重支护困难的问题，保障了工作面安全生产[9]。综上所述，国内孤岛工作面技术研究方面取得了可喜成绩，收到了不俗的研究效果。但是针对受采空区积水长期浸泡影响，导致采煤工作面区段煤柱自身强度降低，破碎区范围明显扩大，再考虑到回风顺槽掘进过程中巷道的稳定性，及孤岛工作面回采过程中强烈的采场动压对安全生产的影响，在这种背景情况孤岛工作面沿空掘巷围岩控制技术的研究相对较少。本论文正是针对这个问题，以国家能源集团蒙西煤化股份有限公司棋盘井煤矿 I020908 孤岛工作面为研究对象，对孤岛工作面沿空掘巷围岩控制技术展开了系统地研究，为工作面安全、高效回采提供技术支撑和科学依据。

2. 矿井及工作面概况

国家能源集团蒙西煤化股份有限公司棋盘井煤矿(以下简称“棋盘井煤矿”)位于内蒙古自治区鄂尔多斯市鄂托克旗棋盘井镇。该矿含可采煤层 6 层,其中 9[#]和 16[#]煤层为全区可采煤层。区内煤层平均倾角 5°,属低瓦斯矿井。工作面采用倾斜长壁仰斜综合机械化采煤法,全部垮落法管理顶板,工作面为后退式回采。

棋盘井煤矿 I020908 工作面是 9[#]煤 II 盘区最后一个工作面,可采储量为 143 万吨。该工作面南邻 I020901 工作面采空区,北邻 I020905 工作面采空区,属于孤岛工作面。I020901 工作面自 2012 年 5 月回采结束,I020901 工作面采空区共积水 17.1 万 m³,水头高度约为+875 m。

3. 分析问题

由于受采空区积水长期浸泡影响,导致 I020908 工作面区段煤柱自身强度降低,破碎区范围明显扩大,考虑到 I020908 回风顺槽掘进过程中巷道的稳定性,及孤岛工作面回采过程中强烈的采场动压对安全生产的影响,需对巷道进行专项支护设计、确定 I020908 回风顺槽煤柱宽度,并针对此类工作面回采巷道支护问题展开技术研究。

针对棋盘井煤矿 I020908 工作面回风顺槽实际支护条件,通过对棋盘井煤矿 I020908 工作面回风顺槽的支护条件、施工工艺进行了多次实地考察;实验测试了 9[#]煤及顶板岩石的煤岩物理力学参数;数值模拟了 I020908 工作面采场及回风顺槽沿空掘巷巷道应力分布规律,结合现场调研和理论分析,确定了棋盘井煤矿 I020908 工作面回风顺槽沿空掘巷合理巷道煤柱宽度;同时,提出了棋盘井煤矿 I020908 工作面回风顺槽锚网索(梁)喷联合支护技术,并进行了现场实施;对 I020908 工作面回风顺槽掘进期间进行了矿压观测,基本掌握了采用锚网索(梁)喷联合支护下的煤巷变形的基本规律,为矿井的安全生产提供了技术支撑和科学依据。

4. I020908 回风顺槽煤柱应力数值模拟及煤柱尺寸的确定

4.1. 数值模型建立

若施加在岩体内的载荷达到极限强度,则岩体就会产生破坏变形,在其塑性流动过程中岩体内的残余强度会伴随着变形的增大而逐步减小[10][11]。因此本文的数值模拟的本构模型采用了摩尔-库仑模型来判断岩体破坏[12]。

依据棋盘井煤矿 I020908 工作面煤岩样本的实验室测试参数,及其下山保护煤柱煤岩力学参数,具体数值见表 1 所示:

为了研究不同宽度煤柱支护效果,最终确定窄煤柱宽度,建立采场平面应变模型,分别对煤柱宽度为 6 m~15 m 共 10 个方案开挖,分析比较不同煤柱宽度下沿空掘巷围岩垂直应力分布规律和巷道围岩变形规律。

Table 1. Coal and rock mechanical parameters
表 1. 煤岩力学参数

| 岩性 | 体积模量(GPa) | 剪切模量(GPa) | 内聚力(MPa) | 内摩擦角(°) | 抗拉强度(MPa) |
|-------|-----------|-----------|----------|---------|-----------|
| 细砂岩 | 7.6 | 4.53 | 5.2 | 42 | 3.3 |
| 泥岩 | 2.1 | 1.26 | 1.7 | 32 | 1.7 |
| 细砂岩 | 9.2 | 5.23 | 5.2 | 42 | 3.3 |
| 中砂岩 | 8.5 | 3.16 | 4.5 | 42 | 2.6 |
| 砂质泥岩 | 3.5 | 1.15 | 2.16 | 38 | 1.8 |
| 9#煤层 | 1.42 | 0.75 | 1.02 | 20 | 1.5 |
| 细砂岩 | 7.8 | 4.27 | 4.2 | 30 | 3.3 |
| 粉砂岩 | 4.5 | 2.25 | 2.16 | 25 | 2.3 |
| 泥岩 | 2.4 | 1.23 | 1.8 | 24 | 1.8 |
| 9#煤层 | 1.65 | 0.82 | 1.13 | 22 | 1.4 |
| 泥岩 | 3.2 | 1.12 | 1.84 | 25 | 1.7 |
| 细砂岩 | 8.9 | 5.23 | 5.2 | 32 | 2.9 |
| 16#煤层 | 1.29 | 0.69 | 1.16 | 19 | 1.3 |
| 泥岩 | 4.1 | 1.26 | 1.7 | 30 | 1.7 |
| 底板岩层 | 9.4 | 3.23 | 4.2 | 42 | 3.3 |

基于水侵蚀的开采条件，模型地层设置、岩性参数、初始应力状态与围岩弱化的三维模型相同。在此，不考虑工作面推进对煤柱载荷的影响，基于采用平面应变边界条件，建立模型如图 1 所示。整个模型尺寸为 400 m × 341 m × 1 m，模型中下界面、前后界面和左右界面进行位移、速度边界约束，上边界施加垂直应力 5.51 MPa。

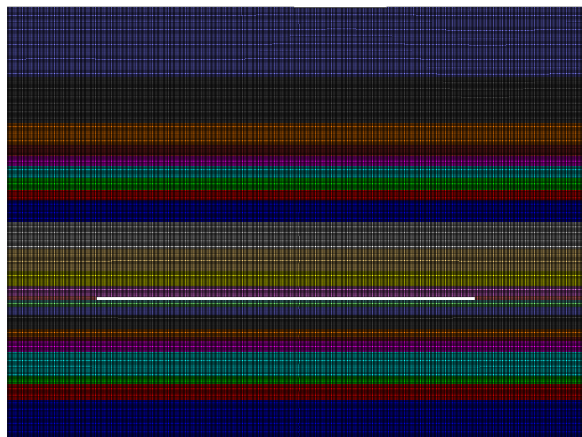


Figure 1. Schematic diagram of the model
图 1. 模型示意图

由于初始应力场是分析开采空间围岩应力重新分布的基础，为了较真实地进行工程模拟仿真，在正确的初始应力分析结果的基础上进行动力计算，就必须保证模拟开采前已存在的初始地应力场的可靠性。

根据现场实际地质条件，初始应力场主要是由岩、土体在自重作用下生成的。因此模拟煤层的垂直初始应力，按其上覆岩层重量计算，因所建模型煤层上覆岩层为 260 m，因此在模型上部施加 6.5 MPa 的垂直载荷，模拟上覆松散层自重，模型四周和底部为固定约束。水平初始应力采用 Initial 命令在设置初始应力时，为了得到不同位置上的 Z 方向和 X(Y)方向变化应力分布，采用初始值 σ_0 和 g_0 梯度值的方法得以实现，这两个值一般通过两个确定位置的应力值反算得到，方程如式 1 所示。

$$\begin{cases} \sigma_{z1} = \sigma_0 + g_0 h_1 \\ \sigma_{z2} = \sigma_0 + g_0 h_2 \end{cases} \quad (1)$$

已知模型上表面的垂直应力 σ_{z1} 为 -6.5 MPa，底部的垂直应力 σ_{z2} 为 -11 MPa，模型高度 h_1 为 400 m，模型底面高度 h_2 为 0 m，梯度值 g_0 为 0.0375 MPa。

4.2. 应力场分布与煤柱宽度的关系

不同煤柱宽度对应的煤柱内垂直应力分布如图 2 所示，煤柱内应力峰值与沿空掘巷煤柱宽度关系如图 3 所示。

由图 2，图 3 分析可知，沿空掘巷不同煤柱宽度煤柱内应力分布有如下特征：

1) 不同宽度煤柱垂直应力变化规律。煤柱宽度由 6 m 增大到 15 m 时，窄煤柱内垂直应力分布曲线形状形似三角形，煤柱内应力峰值区基本处于煤柱中央区域。

2) 不同宽度煤柱垂直应力峰值变化规律。随着煤柱宽度的增大，煤柱内垂直应力峰值近似线性增大。煤柱宽度为 6 m~11 m 时，煤柱内垂直应力低于原岩应力；煤柱宽度为 12 m 时，煤柱内应力峰值大小与原岩应力水平持平；煤柱宽度为 12 m~15 m 时，煤柱内垂直应力高于原岩应力。

因此，从煤柱内应力场分布规律考虑，煤柱合理宽度应在 6 m~12 m 范围。

4.3. I020908 回风顺槽沿空掘巷合理煤柱宽度

综合窄煤柱宽度的设计原则、现场调研、理论计算和数值分析，窄煤柱宽度为 6 m~9 m 时，巷道布置在应力降低区，受力条件较好，增大煤柱宽度对减小巷道围岩变形量效果明显，也有利于现场掘进、支护施工，但降低煤炭资源回收率，且对掘进运输不利。因此，在采取加强巷道支护措施的情况下，仍按 6 m 煤柱施工。

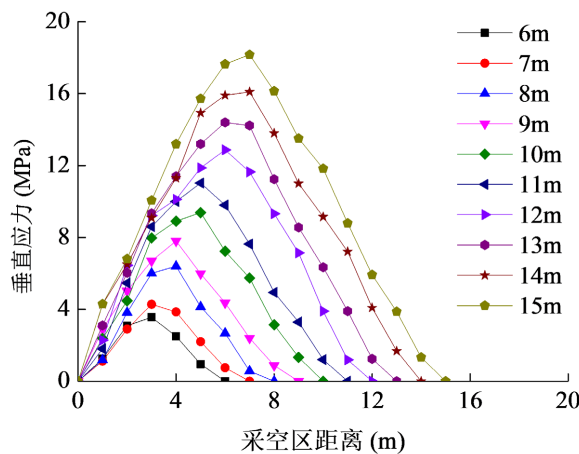


Figure 2. Vertical stress distribution in coal pillars with different widths

图 2. 不同宽度煤柱内垂直应力分布

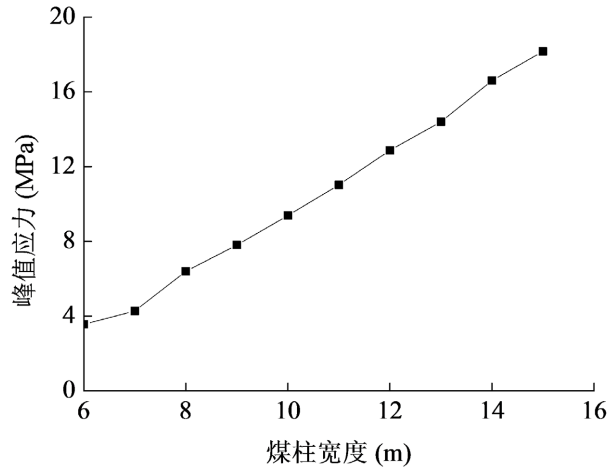
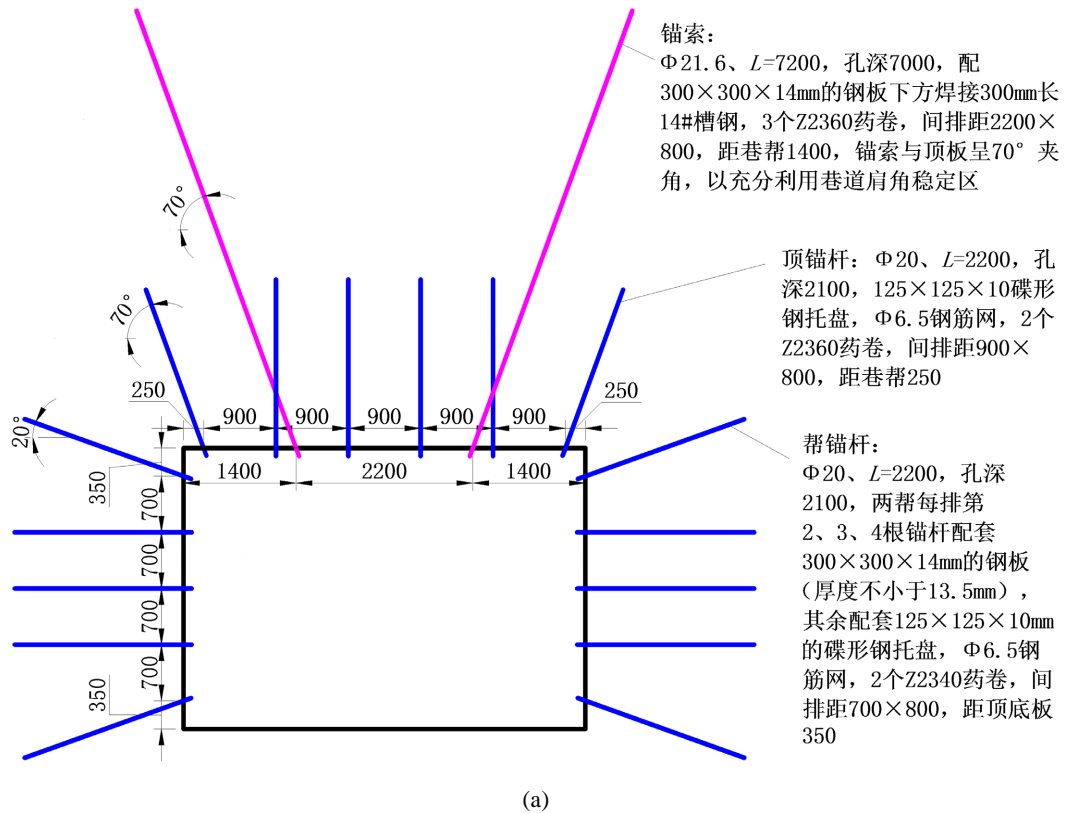


Figure 3. The relationship between the peak stress of the coal pillar and the width of the coal pillar
图3. 煤柱应力峰值与煤柱宽度关系曲线

5. I020908 回风顺槽支护参数优化

棋盘井煤矿 I020908 回风顺槽掘进工作面采用锚网索(梁)喷联合支护优化设计是可行的。对原支护方案进行优化后，正常情况采用锚网索喷联合支护，具体方案为：煤柱帮采用锚杆 + 钢筋网 + 喷射混凝土支护；实体煤帮采用锚杆 + 钢筋网支护；顶板采用锚杆 + 钢筋网 + 锚索 + 喷射混凝土支护。支护优化设计如图4所示。



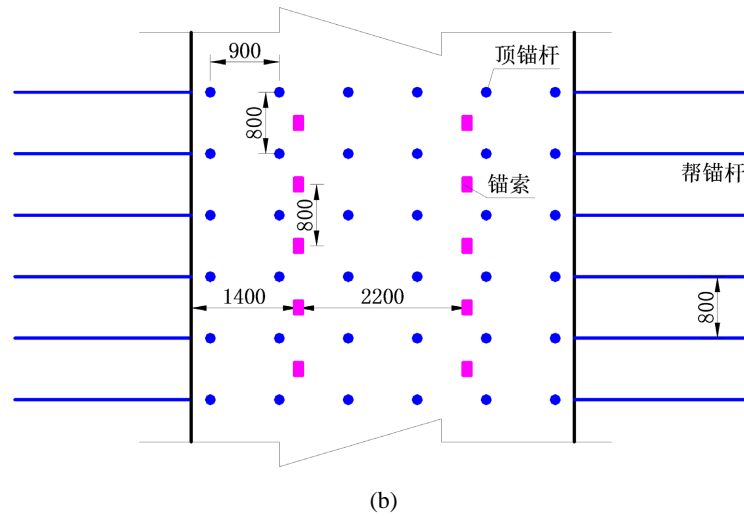


Figure 4. (a) Sectional drawing of permanent support; (b) Optimization design of permanent support (unit: mm)

图 4. (a) 永久支护断面图; (b) 永久支护优化设计图(单位: mm)

施工注意事项:

- 1) 锚网与锚网的搭接长度控制在 100 ± 10 mm;
- 2) 锚网顶板、两帮须贴紧, 其空顶、空帮 $\leq 150 \times 150$ mm²; 在遇断层或因顶板局部跨落处, 须保证锚网全部贴顶、贴帮;
- 3) 锚杆外露长度 ≤ 100 mm, 包括钢筋梯子梁、托盘、螺母、垫圈、控制件;
- 4) 锚杆的间排距误差 ± 50 mm;
- 5) 锚杆角度偏差不得大于 5° , 尤其是打设两帮顶锚杆和底脚锚杆(即第 1 和第 5 根锚杆)时, 确保锚杆深入顶、底板;
- 6) 锚杆必须配套使用调心球和减摩尼龙垫圈;
- 7) 顶板锚杆采用未过期的 Z2360 药卷 2 只, 帮锚杆采用未过期的 Z2340 药卷 2 只, 严禁使用破损药卷或者将药卷切成多节使用;
- 8) 锚杆机将锚杆顶入眼底时(未顶入眼底时不得搅拌), 采用锚杆机快速搅拌 20 ± 5 s, 确保充分搅拌, 严禁断速搅拌;
- 9) 锚杆搅拌完成后, 风钻或锚杆钻机停滞 1 分钟, 再紧固托盘, 严防松动, 期间不得卸下钻机;
- 10) 遇巷道超高或超宽时, 超过锚杆间距的 50% (超高 350 mm, 超宽 400 mm)时, 必须进行补网增设锚杆。

6. 效果分析

- 1) 掘进期间巷道的维护工作量减少了 40%, 个别地段甚至不进行维护;
- 2) 磕手碰脚事故下降了 90%, 杜绝了冒顶等事故发生, 较大程度地提高煤矿的安全生产;
- 3) 提高了矿井的人均出煤绩效;
- 4) 有利于沿空掘巷技术在该煤层中的应用;
- 5) 采用优化后的支护方案后, 新增利润额 768.30 万元, 经济效益显著;
- 6) 该支护技术可以同类煤层条件下推广应用。

7. 结论

基于棋盘井煤矿 I020908 工作面孤岛工作面沿空掘巷围岩控制技术研究和设计参数优化得出如下结论:

1) 棋盘井煤矿 I020908 工作面孤岛工作面沿空掘巷围岩控制技术是比较切实可行的, 能够指导工作面安全高效地回采;

2) 通过对棋盘井煤矿 I020908 工作面孤岛工作面煤柱应力演化规律的数值模拟, 综合窄煤柱宽度的设计原则、现场调研、理论计算和数值分析, 窄煤柱宽度为 6 m~9 m 时, 巷道布置在应力降低区, 受力条件较好, 增大煤柱宽度对减小巷道围岩变形量效果明显, 并结合现场观测法确定的煤柱尺寸 6 m 是符合生产实际;

3) 棋盘井煤矿 I020908 回风顺槽掘进工作面采用锚网索(梁)喷联合支护优化设计后, 煤柱帮采用锚杆 + 钢筋网 + 喷射混凝土支护; 实体煤帮采用锚杆 + 钢筋网支护; 顶板采用锚杆 + 钢筋网 + 锚索 + 喷射混凝土支护支护效果非常明显, 顶板离层率减少了 60%, 达到了安全高效生产的目的;

4) 棋盘井煤矿 I020908 工作面孤岛工作面沿空掘巷围岩控制技术研究具有重要的理论和现实意义。

参考文献

- [1] Su, X.G., Li, Y.B. and Yang, Y.K. (2011) A Research into Extra-Thick Compound Mudstone Roof Roadway Failure Mechanism and Security Control. *Procedia Engineering*, **26**, 516-523. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2200>
- [2] 李胜, 周利峰, 罗明坤, 等. 煤层群下行开采煤柱应力传递规律[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, 34(6): 661-667.
- [3] 姜耀东, 李波. 近距离煤层开采下位煤层巷道布置及支护技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.
- [4] 原鸿鹄. 采空区煤壁下矿压分布规律及巷道稳定性控制研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [5] 康官先, 孔宪法, 康天合, 等. 采空区下极近距离煤层回采巷道合理位置的研究[J]. 煤矿安全, 2013, 44(5): 210-213.
- [6] 白宇. 寺家庄矿孤岛工作面沿空掘巷围岩控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [7] 廖鹏. 东庞矿孤岛工作面沿空掘巷围岩控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [8] 何小军. 三软煤层孤岛工作面沿空巷道围岩控制技术研究[J]. 能源技术与管理, 2014, 39(4): 69-71.
- [9] 徐军. 孤岛工作面沿空掘巷围岩控制技术实践[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(2): 91-94.
- [10] 李斌. 近距离煤层回采巷道布置方式研究[J]. 煤炭工程, 2012(z2): 27-29.
- [11] 郑新旺. 距离煤层采空区下底板破坏特征及影响分析[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2011.
- [12] 雷焱云. 近距离煤层外错式巷道失稳及其支护优化研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(S1): 42-46.