

# 大埋深孤岛煤柱内巷道布置及支护技术研究

牛宗涛<sup>1</sup>, 郭俊<sup>2</sup>

(1. 焦作煤业(集团)有限责任公司 生产技术部, 河南 焦作 454002; 2. 焦作煤业(集团)有限责任公司 赵固二矿, 河南 新乡 454600)

**摘要:**为解决大埋深孤岛煤柱内巷道的合理布置及围岩控制问题,基于某矿实际地质条件,探讨了煤柱塑性区宽度、煤柱应力分布和老空水 3 种影响巷道布置的主导因素。通过数值模拟对比分析了 5 种巷道布置方案的优缺点,给出最佳巷道位置及围岩控制方案,并进行工业试验。研究表明:孤岛煤柱内应力整体呈拱形分布,煤柱中央垂直应力最大,集中系数达到 2.4,其中煤柱内 7~10 m 和 19~22 m 范围内垂直应力变化平缓;巷道布置的最佳位置是距下工作面采空区 8 m;根据孤岛煤柱内巷道围岩的应力分布特点,现场采用巷道帮部非对称支护方案,监测表明巷道满足安全生产需求。

**关键词:**孤岛煤柱;巷道布置;非对称支护;围岩控制

中图分类号:TD353 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2017)10-0054-06

## Study on roadway layout and support technique in deep isolated coal pillar

NIU Zongtao<sup>1</sup>, GUO Jun<sup>2</sup>

(1. Production and Technology, Jiaozuo Coal (Group) Company Limited, Jiaozuo 454002, China;

2. No. 2 Coal Mine of Zhaogu, Jiaozuo Coal (Group) Company Limited, Xinxiang 454600, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the reasonable layout of the roadway in the deep seams and the control of the surrounding rock, based on the actual geological conditions of a mine, width of coal pillar, distribution of coal pillar and water of old goaf are the three main factors influencing the layout of the roadway. The advantages and disadvantages of five roadway layout schemes are compared and analyzed by numerical simulation, and the optimum roadway location and surrounding rock control scheme are given, and industrial test is carried out. The results show that the internal stress of the isolated coal pillar is arch distributed, the central vertical stress of coal pillar is maximum, the concentration factor reaches 2.4. The vertical stress in the range of 7~10 m and 19~22 m in the coal pillar changes gently. The optimal location of the roadway layout is from the working face goaf area 8m; according to the stress distribution characteristics of the surrounding rock in the pillar of the isolated coal pillar, the asymmetric support scheme of the roadway working slop is adopted in the field, and the surrounding rock monitoring shows that the roadway meets the safety production requirements.

**Key words:** isolated coal pillar; roadway layout; asymmetric support; surrounding rock control

## 0 引言

在煤矿开采初期,由于一些不合理的采掘布置,导致后期需要在孤岛煤柱内沿煤柱走向布置巷道。经历多次采动干扰后,在多重集中应力叠加作用下,煤柱两侧出现一定宽度的塑性破坏区域<sup>[1-3]</sup>。相对于单侧沿空的巷道,孤岛煤柱破碎程度大、塑性范围广。在其内部布置巷道,若选取位置不当,有可能出

现巷道围岩失稳,对煤炭安全生产造成影响<sup>[4-6]</sup>。所以,研究在孤岛煤柱内巷道的合理位置布置及其围岩控制技术是很有必要的。

国内学者基于孤岛煤柱进行了大量研究,臧龙等<sup>[7]</sup>通过研究孤岛煤柱下破碎软岩巷道破坏变形特征,提出了全断面联合支护方案;张旭杰<sup>[8]</sup>研究了孤岛煤柱巷道高强预应力锚梁网支护技术;陈锋等<sup>[9]</sup>通过理论分析和现场观测验证了孤岛煤柱下

收稿日期:2016-08-08;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.10.009

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51704095)

作者简介:牛宗涛(1981—),男,河南镇平人,工程师,硕士。Tel:13783918795,E-mail:xxnygcb@163.com

引用格式:牛宗涛,郭俊.大埋深孤岛煤柱内巷道布置及其支护技术研究[J].煤炭科学技术,2017,45(10):54-59.

NIU Zongtao, GUO Jun. Study on roadway layout and support technique in deep isolated coal pillar[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10):54-59.

巷道布置方法的合理性;文献[10-11]分析了巷道复合顶板传递承载机制,探索了煤柱两侧塑性区分布和采掘扰动对巷道变形影响;于斌等<sup>[12]</sup>研究了大同矿区侏罗系煤层采空区煤柱的应力影响规律与煤层顶板的垮裂带范围,得出“煤柱-覆岩运动”联合作用机理。李文峰等<sup>[13]</sup>通过数值计算研究了孤岛煤柱下沿空掘巷底鼓机理,并提出巷道底板控制方案;刘音等<sup>[14]</sup>通过相似模拟对孤岛煤柱矸石膏体充填开采过程中支承压分布规律以及采场围岩相互关系进行了研究;温国惠等<sup>[15]</sup>研究了孤岛煤柱膏体充填开采覆岩运动规律;汪华君等<sup>[16]</sup>基于集中应力高危区域划分方法对下山孤岛煤柱安全开采过程中回采巷道布置方式进行了设计;文献[17-19]对孤岛煤柱内巷道合理掘巷位置进行研究。

然而,关于大理深孤岛煤柱内布置巷道的合理位置的研究还较少。因此,笔者采用理论分析、数值模拟以及现场观测的方法对孤岛煤柱内巷道布置位置及其支护技术进行探讨,并进行了工业试验。

## 1 工程概况

某煤矿设计生产能力 1.8 Mt/a,主采的二<sub>1</sub>煤层平均厚度 6.5 m,为近水平煤层,采用分层开采。由于早期矿井采掘布置不合理,导致 11021 工作面里段资源未采出。为采出这部分资源,需在 11011 工作面和 11021 工作面之间的 30 m 宽孤岛煤柱内布置一条巷道,用作 11021 工作面里段回采期间回风和运输。巷道断面尺寸 4.8 m×3.2 m,沿煤层顶板掘进,孤岛煤柱埋深 720 m,位置关系如图 1 所示。

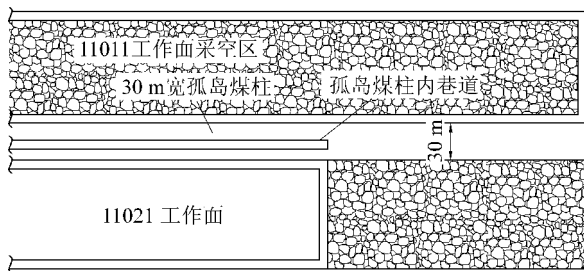


图 1 孤岛煤柱内巷道位置

Fig. 1 Location of roadway in isolated coal pillar

## 2 影响巷道布置的条件分析

为确定巷道的布置,主要分析 3 个方面影响因素:①煤柱的塑性破坏范围;②煤柱内部应力分布规律;③11011 工作面采空区老空水。

### 2.1 煤柱塑性范围

工作面回采之后顶板垮落造成应力的重新分布,在集中应力作用下,沿煤柱边缘向煤柱中心出现一定宽度的塑性区,这部分区域失去原有的承载能力。在煤柱的不同高度,塑性区宽度也不相同,一般分布规律为顶底部塑性区宽度小于中性面宽度。在较为理想的情况下吴立新等<sup>[20]</sup>应用小变形弹塑性理论中的摩尔-库仑准则推导出煤柱塑性区宽度为

$$Y = \frac{md}{2 \tan \varphi} \left\{ \ln \left[ \frac{C + \sigma_1 \tan \varphi}{C + (\sigma_x \tan \varphi / \beta)} \right]^\beta + \tan^2 \varphi \right\} \quad (1)$$

式中: $m$ 为开采高度; $d$ 为开采扰动因子,取 1.5~3.0; $C$ 为黏聚力; $\sigma_x$ 为煤壁的侧向约束应力; $\varphi$ 为内摩擦角; $\sigma_1$ 为煤柱极限强度; $\beta$ 为塑性区与核区界面处的侧压系数。

通过对该矿进行现场监测及室内试验,获得式(1)的基本参数如下: $m = 3.5$  m, $d = 1.5$ , $C = 0.8$  MPa, $\varphi = 20^\circ$ , $\sigma_x = 0.14$  MPa, $\sigma_1 = 10$  MPa, $\beta = 0.3$ ,将已知参数代入式(1),经计算可得煤柱的塑性区宽度为  $Y = 6.5$  m。

### 2.2 煤柱内部应力分布规律

煤层开采以后打破原岩应力场的平衡状态,引起应力的重新分布。根据矿井的生产地质条件,通过数值模拟计算出孤岛煤柱的垂直应力分布规律,如图 2 所示。

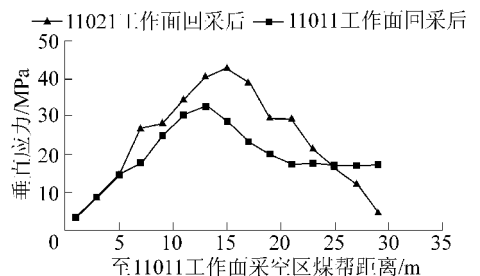


图 2 孤岛煤柱内垂直应力

Fig. 2 Vertical stress in isolated coal pillar

由工作面 11011 回采之后煤柱的应力分布规律可以得知,在距采空区煤帮 0~7 m 范围内垂直应力低于原岩应力 17.5 MPa,说明这部分煤柱出现塑性破坏,失去原有的承载能力。集中应力在距煤帮 13 m 左右时应力达到峰值为 32.6 MPa,应力集中系数为 1.8。在距煤帮 20 m 以外煤柱内垂直应力为原岩应力,说明未受采动影响。下工作面 11021 回采之后,孤岛煤柱内垂直应力整体呈拱形分布,煤柱中央位置处集中应力达到最大为 42.8 MPa,

应力集中系数为2.4。距11011采空区煤帮0~7 m和24~30 m范围内在两次开采扰动下已发生塑性破坏。在距11011采空区煤帮7~10 m和19~22 m范围内垂直应力变化平缓,应力集中程度较煤柱中央低且不在塑性破坏范围内,适合在两个范围内掘进巷道。

### 2.3 隔水煤柱的留设

考虑到上工作面11011老空水的威胁,孤岛煤柱内掘进的巷道要与11011工作面之间留设隔水煤柱,参考地质条件类似的老空水隔水煤柱留设情况,此煤柱有效隔水宽度要大于10 m。综上,巷道易布置在距11011采空区煤帮19~22 m的范围内,此范围不在塑性破坏区域之内,集中应力小于煤柱中央区域且变化平缓,掘进巷道之后围岩压力相对较小,维护相对容易。

## 3 巷道布置数值模拟分析

### 3.1 模型的建立及方案

根据现场生产地质条件,综合考虑模型开挖的尺寸效应等因素,采用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件建立模型,模型尺寸长×宽×高为450 m×450 m×110 m,模型采用摩尔-库仑屈服准则,顶边界为应力边界,底边界垂直位移固定,左右边界水平位移固定。煤岩力学参数见表1。

模型初始应力计算平衡后,首先开挖11011工作面,当围岩稳定之后再开挖11021工作面。在11021开挖结束围岩稳定之后,开挖孤岛煤柱内巷

道,巷道规格为宽×高为4.5 m×3.0 m,沿顶板掘进。分别以五种方案进行计算,即是距11021工作面采空区煤帮4、6、8、10、12 m。分别计算巷道两侧煤柱的塑性破坏范围、应力及其位移变化。其中定义巷道与11011工作面之间的煤柱为上煤柱,巷道与11021工作面之间的煤柱为下煤柱。

表1 煤岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of coal and rock

岩层	泊松比	弹性模量/GPa	内摩擦角/°	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
覆岩	0.23	25.0	31	8.0	1.3
二 <sub>1</sub> 煤	0.25	4.0	20	0.8	1.3
细粒砂岩	0.26	28.5	35	8.5	1.7
砂质泥岩	0.28	31.0	36	8.2	2.1
中粒砂岩	0.26	28.5	35	8.5	1.7
泥岩	0.24	26.0	32	8.5	1.4

### 3.2 计算结果分析

对5种巷道开挖方案进行计算,塑性破坏情况如图3所示,最大垂直应力与煤柱宽度关系如图4所示。由图3和图4可知当下煤柱宽度为4 m时,下煤柱完全发生剪切破坏,丧失自身承载能力,其最大垂直应力为3.32 MPa,远低于原岩应力,煤柱内裂隙发育,巷道开掘以后造成支护困难,巷道稳定性降低。上煤柱宽度为21.5 m,靠近11011采空区侧6 m左右范围内发生塑性破坏,靠近巷道侧15 m左右范围内煤柱未发生破坏且处于应力增高区,应力峰值达到38.38 MPa。

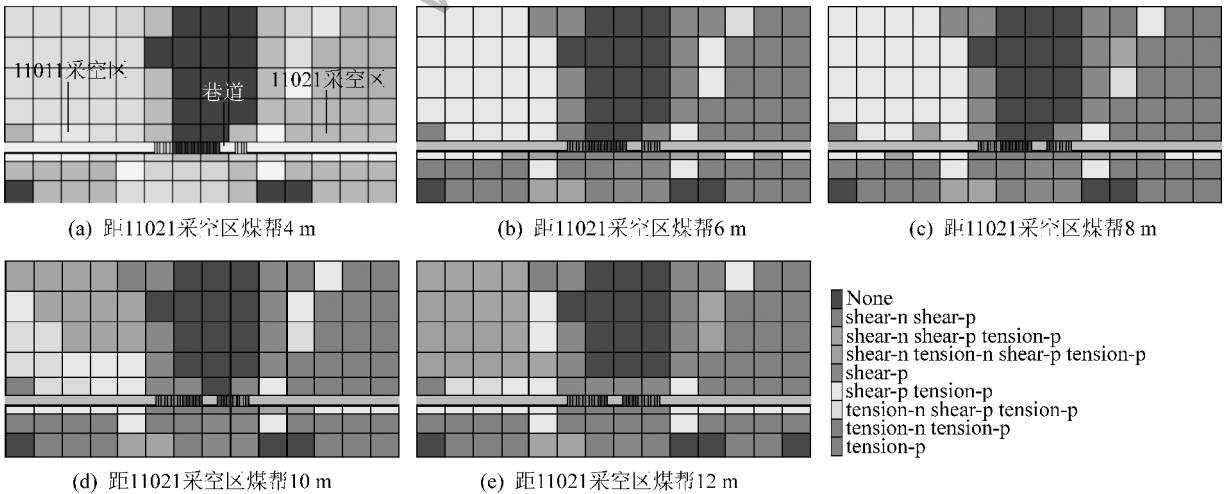


图3 各方案下煤柱塑性破坏情况

Fig. 3 Plastic failure condition of coal pillar in different schemes

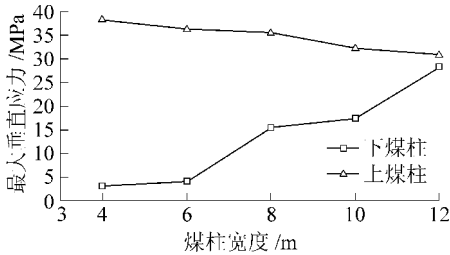


图4 最大垂直应力与煤柱宽度关系

Fig. 4 Relation between maximum vertical stress and width of coal pillar

当下煤柱宽度为6 m时,其仍是完全发生塑性破坏且应力峰值为4.18 MPa,表明下煤柱处在应力降低区,上煤柱应力峰值36.4 MPa,应力集中系数2.0,靠近巷道侧有13 m左右范围内煤柱未发生塑性破坏,可以起到对11011工作面老空水的隔绝作用。

当下煤柱的留设宽度为8 m时,其塑性破坏宽度为6 m左右且靠近采空区侧,此时煤柱内应力峰值为17.2 MPa,接近原岩应力,表明煤柱自身具备一定的承载能力。上煤柱靠近巷道侧有10 m左右范围内煤柱未发生塑性破坏,满足隔水煤柱要求。

当下煤柱的宽度为10 m或12 m时,上煤柱的有效隔水煤柱宽度不足10 m,不能满足隔绝老空水的要求,这两种方案不可取。综合分析,8 m下煤柱的留设既能满足煤柱承载能力的要求又能满足上煤柱隔水能力的要求,是合理的布置巷道位置。

## 4 孤岛煤柱内巷道支护方案

### 4.1 支护方案

在选取巷道合理布置位置的基础上,根据围岩状况制定出合理的支护方案。由于巷道两侧煤柱处于两种不同的应力区域,上煤柱处于应力增高区,下煤柱处于应力降低区,

并且巷道下帮2~3 m以外范围煤体发生塑性破坏,破碎程度高,若锚杆(索)锚固段打入此范围内则会造成锚固力不足,影响锚网支护效果。针对这种情况,制定出两帮非对称支护方案,为应对巷道上帮煤柱的高集中应力,采用 $\phi 17.8 \text{ mm} \times 4 \text{ 250 mm}$ 锚索进行加强支护;下帮采用 $\phi 20 \text{ mm} \times 2 \text{ 400 mm}$ 锚杆进行支护,保证锚固段在非破碎煤体内。具体支护方案如图5所示。

1) 顶板支护。顶板锚杆规格为 $\phi 20 \text{ mm} \times 2 \text{ 400 mm}$ ,间排距为 $800 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$ ,锚固长度不小于1 000 mm(两卷规格为2350型锚固剂),锚杆托盘

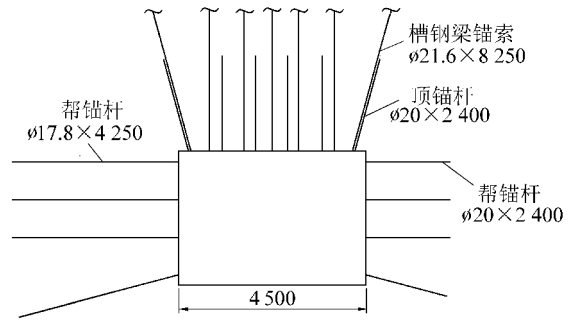


图5 支护方案

Fig. 5 Scheme of support

为 $10 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 托盘与长度4 160 mm钢筋梯配合使用,锚杆锚固力不低于150 kN,锚杆螺帽转矩不小于 $251 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

2) 顶板加强支护。槽钢梁锚索规格为 $\phi 21.6 \times 8 \text{ 250 mm}$ ,间排距为 $1 \text{ 300 mm} \times 1 \text{ 800 mm}$ 和 $1 \text{ 500 mm} \times 1 \text{ 800 mm}$ ,锚固长度不小于2 000(4卷规格为2350型锚固剂),托盘为16号槽钢梁与 $12 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 和 $12 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 钢板配合使用,16号槽钢梁长度为4 200 mm,锚索预紧力不低于300 kN。

3) 上帮支护。锚索规格为 $\phi 17.8 \text{ mm} \times 4 \text{ 250 mm}$ ,间排距为 $900 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$ ,锚固长度不小于1 500 mm(3卷规格为2350型锚固剂),托盘规格为长2 860 mm的钢筋梯与 $12 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 钢板配合使用,锚索预紧力不低于200 kN。

4) 下帮支护。锚杆规格为 $\phi 20 \text{ mm} \times 2 \text{ 400 mm}$ ,锚杆间排距为 $900 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$ ,锚固长度不小于1 000 mm(2卷规格为2350型锚固剂),锚杆托盘为 $10 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 托盘与长度为2 860 mm钢筋梯配合使用,锚杆锚固力不低于150 kN,锚杆螺帽转矩不小于 $251 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

5) 金属网片使用 $\phi 6 \text{ mm}$ 钢筋焊接,金属网片网幅 $1 \text{ 000 mm} \times 1 \text{ 900 mm}$ ,网片搭接100 mm,顶部网片搭接处四角绑扎,帮部网片搭接处对角绑扎。

### 4.2 巷道围岩监测

巷道掘进之后分别选取三个断面布置测站,采用“十字交叉法”监测巷道顶底板、两帮移近量,监测结果如图6所示,可知巷道顶底板移近量最大190 mm,两帮移近量最大270 mm;在巷道掘完10 d之后顶底板趋于稳定,30 d之后两帮也基本稳定。总体来看,巷道围岩变形在可控范围之内,说明巷道的布置位置选择及支护形式的合理性。

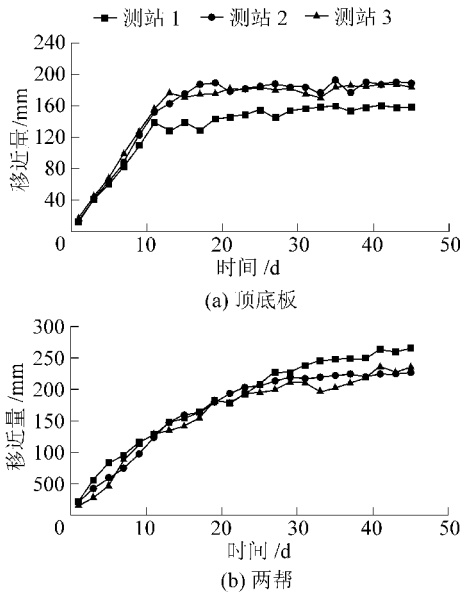


图6 巷道变形曲线

Fig. 6 Displacements cures of roadway

## 5 结 论

1) 影响大理深孤岛煤柱内巷道布置位置的因素主要有3种:即煤柱的塑性区、煤柱内的应力分布、上工作面老空水。理论计算煤柱的塑性破坏宽度为沿采空区边缘向煤柱内6.5 m左右,在煤柱两侧工作面回采完岩层稳定之后,煤柱内应力整体呈拱形分布,煤柱中央垂直应力最大,集中系数达到2.4,其中煤柱内7~10 m和19~22 m范围内垂直应力变化平缓。理论计算结果为选取合适的巷道位置提供依据。

2) 通过数值模拟得出,煤柱内巷道布置的最佳位置是距下工作面采空区8 m,此种情况下下煤柱具有一定的承载能力且上煤柱能够有效地隔绝上工作面的老空水,巷道所处的位置垂直应力变化平缓,有利于巷道顶板的控制。

3) 针对孤岛煤柱内巷道围岩的应力分布特点,制定出巷道帮部非对称支护方案。为应对巷道上帮煤柱的高集中应力,采用高预紧力锚索进行加强支护;下帮采用 $\phi 20 \text{ mm} \times 2\ 400 \text{ mm}$ 锚杆进行支护,保证锚固段在非破碎煤体内。现场监测结果表明巷道围岩稳定性满足安全生产需求。

### 参考文献 (References):

[1] 柏建彪.沿空掘巷围岩控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2006,13-35.

[2] 姚庆华.孤岛煤柱冲击地压危险性评价研究[D].青岛:山东

科技大学,2008:26-38.

[3] 温克珩.深井综放面沿空掘巷窄煤柱破坏规律及其控制机理研究[D].西安:西安科技大学能源学院,2009:1-2.

[4] 张 炜,张东升,陈建本,等.孤岛工作面窄煤柱沿空掘巷围岩变形控制[J].中国矿业大学学报,2014,43(1):36-42.

ZHANG Wei,ZHANG Dongsheng,CHEN Jianben,*et al.* Control of Surrounding Rock Deformation for gob-side entry driving in narrow coal pillar of island coalface [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2014,43(1):36-42.

[5] 郑西贵,姚志刚,张 农.掘采全过程沿空掘巷小煤柱应力分布研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(4):459-465.

ZHENG Xigui,YAO Zhigang,ZHANG Nong. Stress distribution of coal pillar with gob-side entry driving in the process of excavation & mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2012,29(4):459-465.

[6] 李 磊,柏建彪,王襄禹.综放沿空掘巷合理位置及控制技术[J].煤炭学报,2012,37(9):1564-1569.

LI Lei,BAI Jiabiao,WANG Xiangyu. Rational position and control technique of roadway driving along next goaf in fully mechanized top coal caving face [J]. Journal of China Coal Society,2012,37(9):1564-1569.

[7] 臧 龙,谢文兵,荆升国,等.孤岛煤柱下破碎软岩巷道支护技术研究[J].煤炭科学技术,2014,42(3):8-11.

ZANG Long,XIE Wenbing,JING Guosheng,*et al.* Study on support technology of broken soft rock roadway under isolated coal pillar [J]. Coal Science and Technology,2014,42(3):8-11.

[8] 张旭杰.孤岛煤柱巷道高强预拉力锚梁网支护技术[J].煤炭科学技术,2008,36(12):6-8.

ZHANG Xujie. High strength pre-tensioned bolt/beam/steel mesh support technology for gateway pillars in island seam [J]. Coal Science and Technology,2008,36(12):6-8.

[9] 陈 锋,张 明,逯雨兵.孤岛煤柱下巷道布置位置研究[J].煤矿安全,2016,47(4):68-71.

CHEN Feng,ZHANG Ming,LU Yubing. Study on layout of roadway position under island coal pillar [J]. Safety in Coal Mines,2016,47(4):68-71.

[10] 冯吉成,马念杰,赵志强,等.深井大采高工作面沿空掘巷窄煤柱宽度研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(4):580-586.

FENG Jicheng,MA Nianjie,ZHAO Zhiqiang,*et al.* Width of narrow coal pillar of roadway driving along goaf at large height mining face in deep mine [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2014,31(4):580-586.

[11] 刘金海,姜福兴,王乃国,等.深井特厚煤层综放工作面区段煤柱合理宽度研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(5):921-927.

LIU Jinhai,JIANG Fuxing,WANG Naiguo,*et al.* Research on reasonable width of segment pillar of fully mechanized caving face in extra-thick coal seam of deep shaft [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(5):921-927.

[12] 于 斌,刘长友,杨敬轩,等.大同矿区双系煤层开采煤柱影

- 响下的强矿压显现机理[J].煤炭学报, 2014, 39(1): 40-46.
- YU Bin, LIU Changyou, YANG Jingxuan, *et al.* Mechanism of strong pressure reveal under the influence of mining dual system of coal pillar in Datong mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 40-46.
- [13] 李文峰, 柏建彪, 伊西峰, 等. 孤岛煤柱下沿空掘巷底鼓机理及控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(4): 17-20.
- LI Wenfeng, BAI Jianbiao, YI Xifeng, *et al.* Study on floor heave mechanism and control technology for goaf-side gateway driving under coal pillars of seam island[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(4): 17-20.
- [14] 刘音, 李杨扬, 张培鹏, 等. 孤岛煤柱矸石膏体充填开采相似材料模拟[J]. 煤矿安全, 2013, 44(9): 74-77.
- LIU Yin, LI Yangyang, ZHANG Peipeng, *et al.* Similar material simulation study on isolated coal pillar gangue-paste backfill mining[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(9): 74-77.
- [15] 温国惠, 李秀山, 蒲志强, 等. 孤岛煤柱膏体充填开采覆岩运动规律研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2010, 29(4): 46-50.
- WEN Guohui, LI Xiushan, PU Zhiqiang, *et al.* Study on the law of overburden movement during isolated coal pillar mining with paste filling[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 29(4): 46-50.
- [16] 汪华君, 朱恒忠, 张继华. 大倾角下山孤岛煤柱安全开采实践[J]. 煤矿安全, 2014, 45(11): 129-132.
- WANG Huajun, ZHU Hengzhong, ZHANG Jihua. Safety mining practice of large inclination down-hill isolated coal pillar[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(11): 129-132.
- [17] 刘洪林, 孙郡庆. 厚煤层孤岛煤柱内合理掘进位置及支护技术研究[J]. 中国矿业, 2017, 26(4): 105-109.
- LIU Honglin, SUN Junqing. Study on the reasonable tunnelling position and supporting technology of the roadway in isolated coal pillar of thick coal seam[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(4): 105-109.
- [18] 苏新瑞. 煤柱内巷道布置及支护技术研究[J]. 煤矿开采, 2014, 19(6): 31-34.
- SU Xinrui. Technology of roadway layout and supporting in coal-pillar[J]. Coal Mining Technology, 2014, 19(6): 31-34.
- [19] 范育青. 孤岛煤柱内巷道合理布置与围岩控制技术研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(5): 11-14.
- FAN Yuqing. Study on reasonable roadway location and surrounding rock control in isolated coal pillar[J]. Coal Engineering, 2017, 49(5): 11-14.
- [20] 吴立新, 王金庄. 煤柱屈服区宽度计算及其影响因素分析[J]. 煤炭学报, 1995, 20(6): 625-630.
- WU Lixin, WANG Jinzhuang. Calculation of width of yielding zone of coal pillar and analysis of influencing factors[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(6): 625-630.
- rank coalbed methane in south Qinshui Basin, Shanxi Province[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016(4): 303-309.
- [17] 熊波, 张遂安, 李晓友, 等. 沁水盆地安泽区块3号煤层煤体结构及其控气作用[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(3): 40-45.
- XIONG Bo, ZHANG Suian, LI Xiaoyou, *et al.* Coal structure and gas controlling effect of seam No.3 in Anze block of Qinshui Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(3): 40-45.
- [18] 罗跃, 朱炎铭, 钟和清, 等. 开平煤田煤层气富集成藏及其控制因素[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(6): 100-104.
- LOU Yue, ZHU Yanming, ZHONG Heqing, *et al.* Enrichment deposit and control factors of coalbed methane in Kaiping Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(6): 100-104.

(上接第187页)

WANG Huaimeng, ZHU Yanming, LI Wu, *et al.* Two major geological control factors of occurrence characteristics of CBM[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1129-1134.

[14] DAVID P Creedy. Geological controls on the formation and distribution of gas in British coal measure strata[J]. International Journal of Coal Geology, 1988, 10(1): 1-31.

[15] BIBLER C J, MARSHALL J S, Pilcher. Status of world wide coal mine methane emissions and use RC[J]. Int J Coal Geol, 1998, 35: 283-310.

[16] 赵贤正, 杨延辉, 孙粉锦, 等. 沁水盆地南部高阶煤层气成藏规律与勘探开发技术[J]. 石油勘探与开发, 2016(4): 303-309.

ZHAO Xianzheng, YANG Yanhui, SUN Fenjin, *et al.* Enrichment mechanism and exploration and development technologies of high