

# 大柳塔煤矿综采工作面压架冒顶机理研究

徐敬民<sup>1</sup> 朱卫兵<sup>1</sup> 鞠金峰<sup>2,3</sup>

(1. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008; 3. 矿山互联网应用技术国家地方联合工程实验室 江苏 徐州 221008)

**摘要:**针对大柳塔煤矿52304综采工作面在回撤阶段发生的压架冒顶事故,采用现场实测、数值模拟和理论分析对事故的原因和防治对策进行研究。研究结果表明:因受特殊回撤工艺的影响,沿垂直于工作面方向布置的调节巷导致煤体应力集中系数过大,引发工作面与调节巷交叉处发生大面积片帮,最终因端面距超过临界值引发端面冒顶。同时破断块体因失去啮合力而大幅回转切落导致压架,并进一步恶化顶板状况,造成52304工作面在支架支撑力足够的情况下仍发生严重压架冒顶事故。由此确定了相应的防治对策,通过采用加强调节巷围岩的支护、优化回撤巷道的布置和选择非来压时期挂网等措施来预防事故的发生,并得到了52303工作面安全回撤的验证。

**关键词:**压架冒顶;回撤通道;煤壁片帮;端面距;调节巷

中图分类号:TD323 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2016)08-0109-07

## Study on mechanism of powered support jammed and roof falling in fully-mechanized coal mining face in Daliuta Mine

Xu Jingmin<sup>1</sup> Zhu Weibing<sup>1</sup> Ju Jingfeng<sup>2,3</sup>

(1. MOE Key Lab of Deep Coal Resources Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;  
2. Research Center of Internet of Things (Perception Mine), China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;  
3. State and Province United Engineering Lab of Mine Internet Applied Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** According to the powered support jammed and roof falling accidents occurred in the face equipment remove stage of No. 52304 fully-mechanized coal mining face in Daliuta Mine, a site measurement, numerical simulation and theoretical analysis were applied to study on accident causes and the prevention and control countermeasures. The study results showed that due to the influences by the special remove technique, the adjustment gateway set along the perpendicular to the coal mining face direction would cause the coal stress concentration coefficient too high, and would cause large area spalling occurred at the cross section between the coal mining face and the adjustment gateway and finally due to the face front distance over the critical value would cause the roof falling at the face front area. Meanwhile due to the meshing force lost, the broken rock blocks would highly rotate and cause the powered support jammed. Thus the roof condition would be further worse and under the support resistance insufficient of the powered support in No. 52304 coal mining face, serious powered support jammed and roof falling accidents occurred still. Therefore the relevant prevention and control countermeasures were proposed, the enhanced surrounding rock support in the adjustment gateway, the optimized layout of the face equipment remove gateway, the mesh pavement selected at the strata not pressurized period and other measures were applied to the prevent and control of the accident occurrence. The equipment safety remove from No. 52303 coal mining face was verified.

**Key words:** powered support jammed and roof falling; recovery gateway; rib spalling; face front distance; adjustment gateway

收稿日期:2016-03-12; 责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.est.2016.08.019

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB227900)

作者简介:徐敬民(1992—),男,河南永城人,硕士研究生。通讯作者:朱卫兵,副教授,博士, Tel: 13685125270, E-mail: zweibing@163.com

引用格式:徐敬民,朱卫兵,鞠金峰.大柳塔煤矿综采工作面压架冒顶机理研究[J].煤炭科学技术,2016,44(8):109-115.

Xu Jingmin, Zhu Weibing, Ju Jingfeng. Study on mechanism of powered support jammed and roof falling in fully-mechanized coal mining face in Daliuta Mine [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 109-115.

## 0 引言

神东矿区因煤层埋藏浅、赋存条件简单、煤质优良,已建成数十个千万吨矿井,但在一些特殊地质和高强度开采条件下仍发生压架冒顶等强矿压事故<sup>[1-2]</sup>,对矿井的安全生产造成严重威胁。许多学者针对神东矿区不同特殊开采条件下的压架冒顶机理进行了系统而全面地研究<sup>[3]</sup>,得出了极具有实用价值的规律和结论,有力地指导了神东矿区的安全开采。归纳总结发现,目前有关神东矿区压架冒顶的研究类型主要集中在厚风积沙复合单一关键层条件<sup>[4-6]</sup>、过沟谷地形上坡段条件<sup>[8-9]</sup>、采出上覆集中煤柱或房采煤柱条件<sup>[10-13]</sup>,这3类特定条件是神东矿区发生压架冒顶频率最高、影响最广和程度最为严重的开采条件。

近些年神东矿区综采工作面在回撤阶段陆续发生多起冒顶事故并受到一些学者的关注<sup>[14-19]</sup>,此类事故已经严重影响了工作面的正常回撤和安全生产,尤其是在大柳塔煤矿52304工作面回撤过程中发生的大面积压架冒顶事故<sup>[15-16]</sup>,导致工作面停机数天,对工作面安全快速回撤带来困难。罗文<sup>[15]</sup>主要从现场压架冒顶的处理技术进行阐述,提出了大柳塔52304工作面事故的具体解决方案;朱卫兵等<sup>[16]</sup>利用FLAC<sup>3D</sup>并结合理论分析得出了调节巷的适用埋深,但没有进一步提出冒顶和压架的机理和防治措施;鞠金峰等<sup>[17]</sup>从“悬臂梁”的运动来解释大采高端面冒顶的机理,即“悬臂梁”易发生失稳错动造成贯穿式的端面冒顶的发生,但研究内容无法解释为何52304工作面最为严重的冒顶事故发生在回撤阶段。综采工作面在回撤阶段因邻近巷道数量多、煤体应力集中系数大、挂网和调压工序复杂等因素不同于一般开采阶段,对顶板和煤壁支护质量要求极其严格,而这正是确保工作面众多重型设备安全撤离的必要前提,因此准确找出神东矿区综采工作面回撤阶段的安全隐患并对症下药尤为重要。基于上述分析,笔者结合数值模拟和理论分析,以大柳塔矿52304工作面的压架冒顶事故为案例,针对这一问题开展研究。

## 1 工作面基本条件与压架冒顶概况

52304工作面是大柳塔井5<sup>-2</sup>煤层三盘区的首采工作面,埋深150~268 m,煤层厚度6.6~7.3 m,平均6.94 m,煤层结构简单,煤层倾角1°~3°。工

作面煤层自开切眼至回撤通道为宽缓坡状构造,底板标高为+988.7—+1 018.1 m,最大相对高差为29.4 m,工作面在回撤阶段的埋深已超过250 m。52304工作面走向推进长度4 547.6 m,一次采全高、全部垮落法管理顶板。该工作面作为神东矿区5<sup>-2</sup>煤层首例采用7.0 m高支架特大采高工作面,设计采高7.0 m,采用ZY16800/32/70D型液压支架。为加快工作面搬家速度,52304工作面采用辅巷多通道快速回撤技术,其中回撤通道已预先掘出,为使工作面底板和回撤通道底板准确贯通,沿着垂直主回撤通道方向布置了6条长宽高分别为20.0 m×5.0 m×4.5 m的调节巷,回撤巷道布置如图1所示。

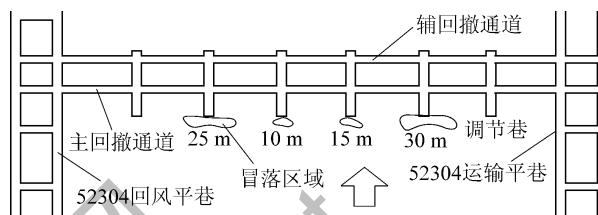


图1 工作面回撤巷道布置

Fig. 1 Layout of recovery roadway in working face

工作面在邻近回撤巷道之前,工作面推进约2 000 m内的矿压显现均较为正常,未出现活柱急剧下缩的压架现象,仅小范围内出现轻微的片帮,对正常的安全开采未造成影响,但在临近回撤阶段发生了严重的压架冒顶事故,冒落区域如图1所示,事故发生详细过程如下所述。

2013年3月6日,52304工作面在距回撤通道20 m处停采等压;7日推进至距离回撤通道17 m位置,工作面支架增阻较为明显。此时工作面平均采高5.9 m,整体顶板情况较好,决定停机挂网;8日下午,调节巷和煤壁交叉处出现大面积片帮,第39—108号支架活柱下缩量大,第86—88号支架活柱行程不足1 m,采煤机无法通过,调节巷附近煤体片帮和端面漏矸严重,如图2所示;3月9—10日,工作面各割煤1刀,现场爆破处理矸石,工作面正上方地表有微弱的新开裂缝;从11—13日,工作面冒顶严重,现场工作主要挑顶破矸,以使采煤机行走;15日开始在回撤通道向工作面打孔注马丽散材料加固;16—22日,工作面漏矸一直很严重,现场作业主要进行处理大块矸石,继续在回撤通道向工作面打孔注马丽散加固,并通过破顶割底增加支架支撑高度,便于采煤机通行。期间工作面仅推进至距回撤通道约7 m处,且须处理输送机和转载机故障;23日冒顶压架得以控制,夜班割煤4刀,工作面中部位置剩

余约6m,开始组织挂网、补网;24日重新开始组织生产,至25日工作面顺利推进至终采线。

## 2 工作面压架冒顶机理分析

## 2.1 煤体应力变化规律的数值模拟

工作面在接近回撤通道期间，除受超前支承压

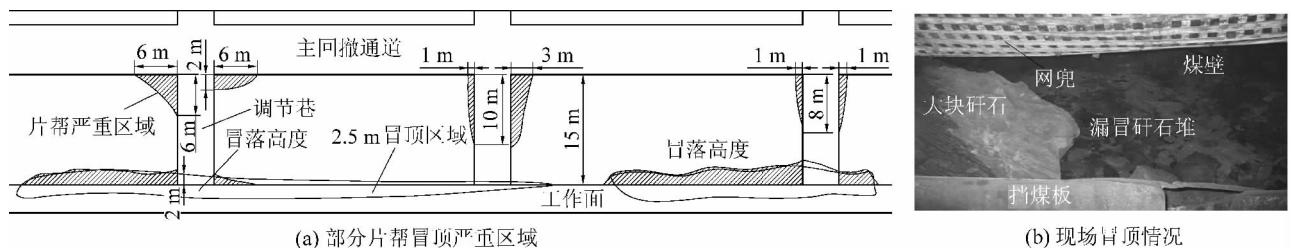


图 2 现场片帮冒顶情况

Fig. 2 Scene of accident damage

采用 FLAC<sup>3D</sup>对大柳塔矿 52304 工作面回撤阶段媒体应力变化规律进行模拟研究。模型中工作面距离回撤通道 200 m, 工作面宽度为 300 m, 煤层厚度为 7 m, 底板厚 20 m, 上覆岩层高度为 150 m, 在模型顶界面施加 2.5 MPa 的均布载荷用以模拟 250 m 埋深; 模型中岩层分布和力学参数均按照 52304 工作面煤岩地质条件和实测结果<sup>[20]</sup>, 见表 1。

表 1 数值模型中各岩层力学参数

**Table1** Mechanical parameters of each

### **stratum for numerical model**

岩性	体积 模量 /	剪切 模量 /	内摩 擦角 /	黏聚力 /	抗拉 强度 /	容重 /
	GPa	GPa	( °)	MPa	MPa	( kN · m <sup>-3</sup> )
风积沙	0.90	0.38	16	0.8	0.20	18.5
中砂岩	3.60	3.98	35	7.2	3.43	26.0
细砂岩	2.32	2.67	27	5.3	4.28	25.5
粉砂岩	1.80	2.03	27	4.3	2.05	23.0
泥岩	1.47	1.42	22	2.5	1.01	22.5
煤层	1.60	1.24	20	2.2	0.45	13.5

模型不考虑倾角问题，底面限制垂直移动，侧面限制水平移动。材料模型本构关系为弹塑性，强度服从 Mohr–Coulomb 强度准则。

由于重点工作面接近回撤通道期间媒体的应力变化,故将距离回撤通道 40 m 以外的煤层一次开挖完毕,待覆岩充分稳定后以 5 m 为步距进行开挖,在煤层顶界面设置水平剖面,工作面距离回撤通道 40、20、15 和 10 m 处对应调节巷之间的媒体上方垂直应力  $S_z$  如图 3 所示。

力的影响，还会受调节巷和回撤通道等巷道应力转移的叠加作用。52304 工作面在回撤阶段调节巷整体片帮极为严重，但最为严重的区域发生在回撤通道附近而不是工作面煤壁附近，这说明两者煤体的受力状态不同，因此有必要针对工作面推进过程中煤体的应力变化规律进行研究。

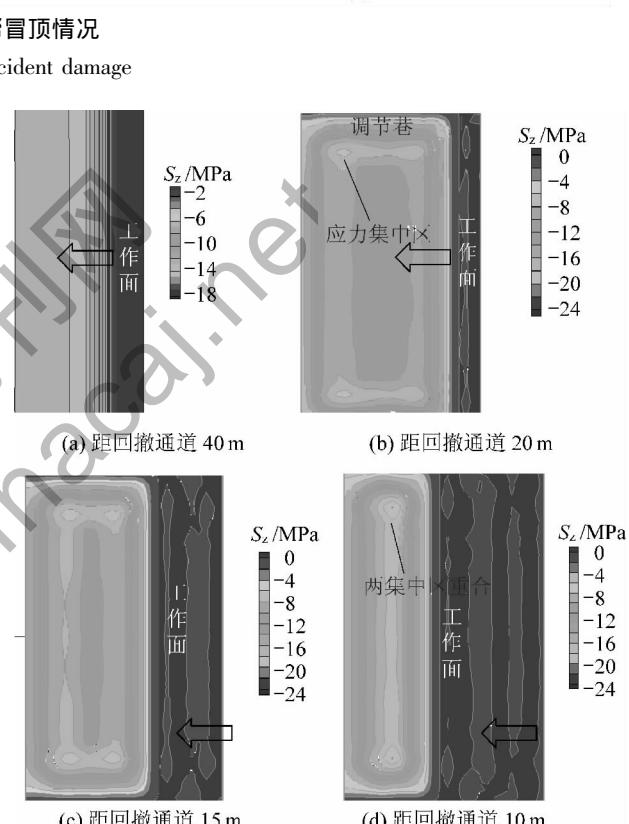


图 3 煤体垂直应力随工作面推进的变化

Fig. 3 Change of coal vertical stress in process of mining

由图3可知,由于工作面距离回撤通道40m处未进入调节巷,其前方煤体应力集中系数较小且应力分布均匀;当工作面推进至距回撤通道20m和15m处,工作面前方煤体在调节巷两端出现显著的应力集中现象,靠近回撤通道的边角处应力集中系数大于靠近工作面边角处,其中最大垂直应力达到了18MPa(应力集中系数为2.9),这极有可能使几乎处于单向受力状态的煤体达到了极限抗压强度而彻底失去承载能力,这就解释了为何大柳塔煤矿

52304工作面回撤阶段中在调节巷两端发生了大面积片帮,且靠近回撤通道侧片帮更加严重(图2),同时应力集中区域也是防治措施中应重点支护加固的位置;当工作面推进距回撤通道10 m处,调节巷两端应力集中处重合,最大应力值达到了22 MPa(应力集中系数为3.5),因此工作面距回撤通道10 m处为最危险的地方。模拟结果较好地解释了在大柳塔煤矿52304工作面事故中,从距回撤通道15 m到8 m期间工作面片帮和端面冒顶始终很严重(冒顶高度达到7 m),支架活柱下缩程度也最为严重(导致采煤机无法通行)。

## 2.2 工作面端面冒顶和压架机理分析

由事故过程和数值模拟分析可知,因应力集中系数过大,工作面在邻近回撤通道时首先在调节巷两端附近煤体出现大面积的片帮,继而出现端面冒顶,导致工作面部分支架活柱大幅下缩,端面冒顶进一步加剧。

工作面顶板的冒落与端面距、顶板破碎度等有直接关系,其中临界冒落高度H和临界端面距S可用如下公式表示<sup>[21]</sup>:

$$\begin{cases} H = 3d \\ S = 2(\sqrt{f^2 + \lambda} + f) H k \end{cases} \quad (1)$$

式中:d为破碎岩块平均块度;f为支架顶梁与直接顶之间的摩擦因数, $f = \tan(\alpha - \beta)$ ;α为直接顶与钢板之间的摩擦角,取arctan 0.3,β为支架顶梁倾角;λ为直接顶岩体在极限平衡状态下的侧压系数, $\lambda = \tan^2(\pi/4 - \varphi/2)$ ,φ为破碎岩体内摩擦角,一般取30°~50°;k为修正系数,取0.8~1.2。

在某一具体工作面中,当开采深度变化较小、无较大地质条件变化、开采工艺和推进速度保持不变时,上述所有参数均可视为定值,即保证工作面不发生冒落失控的端面距为一定值。根据对52304工作面现场冒落矸石的取样,确定直接顶破碎矸石平均块度约为0.3 m;因神东矿区均为近水平煤层,支架顶梁倾角视为0°,则f取0.3;神东矿区煤层直接顶破碎岩体内摩擦角取40°,则λ值为0.13;k取1。由上述参数可求得神东矿区工作面顶板临界冒落高度为0.9 m,临界端面距为1.39 m。

由数值模拟结果可知,当工作面进入调节巷时,煤体上方最大垂直应力达到了22 MPa,致使调节巷及其与工作面和回撤通道交叉处均出现严重的片帮,局部片帮深度达到6 m(图2a)。因此在大柳塔矿52304工作面发生深度超过2 m的大面积片帮

时,虽然顶板较为完整,但支架顶梁前端距离煤壁的距离已经远大于临界端面距1.39 m,又因回撤阶段需要停机挂网,使得顶板长期处于大范围无支护状态,客观上又增加了顶板的破碎度,由式(1)可知临界端面距会相应减小,因此发生了严重的冒顶事故,实测最大冒落高度达到了7 m,最大端面距达到了3 m,给工作面安全生产带来了严重的威胁。

冒顶事故发生时伴随着工作面中部支架活柱的大幅下缩,实测第50—90架的支撑高度仅为4.3 m,第38—109架支架活柱行程均约1.0 m,相比停机挂网时,活柱下缩量达到1.5 m,并已经导致采煤机无法通过。

众所周知,支架的支撑力决定上覆岩体结构的稳定性,一定情况下,若支架支撑力不足,覆岩结构关键块体极易发生大幅回转甚至滑落失稳,进而导致压架的发生,但工作面进入调节巷前期并未发生支架活柱大幅下缩的现象,由此可推断在正常开采情况下支架的工作阻力是足够的。如图4a所示,在工作面距离回撤通道较远处,上覆岩体结构可以保持稳定,因此工作面矿压显现较为正常。

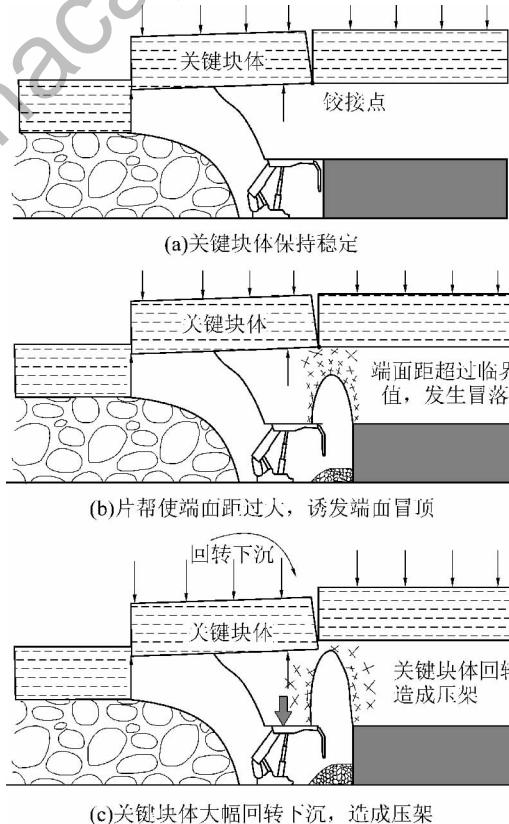


Fig. 4 Evolution process of support failure and roof fall

支架的支撑力通过直接顶进行传递进而控制覆岩结构的运动,当工作面端面冒顶高度达到一定程度时,直接顶破碎并导致承载力和刚度降低<sup>[22]</sup>。如图4b所示,此时直接顶在现有的几何尺寸和状态下无法对破断块体传递足够的支撑力,致使破断块体产生反向回转,当冒顶高度达到一定程度,煤体侧也将无法提供破断块体端部约束力,破断块体将会回转切落使支架活柱大幅下缩,同时又加剧了端面的冒顶情况,如图4c所示。加上此时工作面正进行挂网作业,减缓了工作面的推进速度,又增加了顶板的破碎程度,使压架冒顶情况愈加严重,形成恶性循环。因此52304工作面的压架冒顶事故是由于大面积片帮引起的冒顶、破断块体回转切落和支架活柱下缩三者耦合的结果。

### 3 工作面压架冒顶防治对策

多数情况下,工作面发生压架冒顶事故是由于支架支撑力不足而不能控制关键块体的运动,而在大柳塔矿52304工作面前期的开采情况来看,支架的支撑力可以控制亚关键层破断块体的运动,因此不能按照常规做法单纯从提高支架工作阻力来防止事故的发生<sup>[23]</sup>。52304工作面在回撤阶段发生的大面积压架冒顶事故,是一定情况下各项影响因素共同作用的必然结果,故应从压架发生的原因并结合覆岩运动规律来进行相应的预防,据此制定了以下防治对策。

1) 由数值模拟和现场实测结果可知,当工作面距离回撤通道20 m以内时,煤壁最容易发生片帮的位置在调节巷与工作面和主回撤通道交叉处,因此当工作面接近调节巷时,应加强对调节巷的支护,尤其是调节巷与工作面和主回撤通道交叉处。例如采用垛式支架对调节巷顶板进行控制、减小锚杆锚索之间的间隔、对危险的区域提前进行注浆加固<sup>[24]</sup>、采煤机落煤后应及时移架并支护煤壁、并适当加宽回撤通道间煤柱的尺寸,如图5所示。

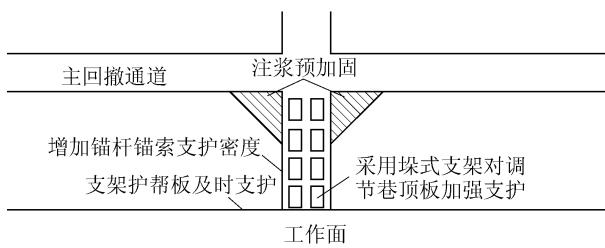


图5 重点支护加固位置

Fig. 5 Key position of support and reinforcement

2) 调节巷在此次事故中充当了诱因,因此在保证调节巷功能的前提下可适当减小调节巷的宽度,例如在不连沟煤矿F6210工作面中调节巷的宽度已减小到1.2 m<sup>[14]</sup>;文献[16]同时揭示了神东矿区调节巷的适用埋深,因此在现场应结合具体地质条件有选择性的布置调节巷,或者在保证巷道功能的前提下采用特殊材料对调节巷进行充填,必要时可以取消调节巷,此时可采用从回撤通道向工作面方向打水平钻孔并充填石灰进行标记,同时可结合高程测量等方法控制工作面底板标高,确保工作面的安全回撤。

3) 工作面回撤阶段与正常回采时期不同之处是需要提前10~20 m进行挂网,挂网会对顶板的管理带来不利。一方面是因为挂网期间需工作面停止推进数小时,此时对顶板的完整性要求较高,这就要求此时工作面应该位于非来压时期;另一方面网片需要借助支架二级护帮板把网片放置到顶板高度并用采用锚杆锚索固定,这样不仅会减弱支架对煤壁的侧向支护,还会进一步破坏顶板的完整性。因此在进行挂网作业时,应该选择非来压时期。具体实施时,应根据工作面前期开采时期的来压步距和来压持续长度等来压规律对挂网期间的矿压状况进行预计,必要情况时应选择提前挂网,后期再进行补网,确保工作面实现安全顺利贯通。

### 4 后续工作面开采实践

52303工作面是大柳塔煤矿5#煤层三盘区的第2个回采工作面,地质条件和开采情况与52304工作面相同。52303工作面回撤通道已经预先掘出,为避免出现52304工作面在回撤阶段发生的严重事故,52303工作面在预先掘出的调节巷尽头重新掘了新的主回撤通道(图6),以减小工作面前方煤体的应力集中系数,原主回撤通道和辅回撤通道均作为辅回撤通道使用。

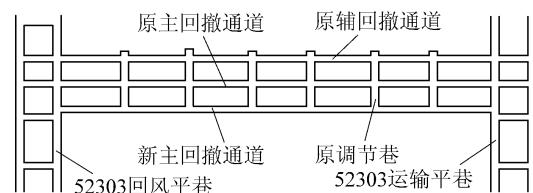


图6 52303工作面回撤通道布置

Fig. 6 Layout of recovery roadway in No. 52303 mining face

依据经验工作面一般会在距离回撤通道16 m处进行挂网,但根据52303工作面前期开采的周期

来压的规律预计回撤期间工作面会在距离回撤通道14~15 m处来压,挂网期间显然位于来压范围内,故否定了按照经验选取挂网位置的方案。根据工作面来压规律确定了在距离回撤阶段19 m处进行挂网作业,最终工作面在回撤期间未发生压架冒顶事故,得到了安全顺利贯通。

为避免再次发生压架冒顶事故,神东矿区后期布置工作面回撤巷道时均取消了调节巷的布置,增加了回撤通道间煤柱的宽度,选择非来压期间进行挂网作业,有针对性地提前对煤体注浆加固并加强了作业管理质量。后续多个工作面安全快速的回撤表明了防治对策的有效性,取得了显著的经济效益。

## 5 结 论

1) 大柳塔煤矿52304综采工作面在回撤阶段发生的大面积压架冒顶事故严重影响了工作面的顺利贯通,数值模拟和理论分析表明:调节巷的存在导致应力极值过大并使得工作面在与调节巷交叉处发生大面积片帮,引发了端面冒顶,同时支架支撑力难以有效传递至覆岩结构致使破断块体大幅回转切落造成压架事故,并加剧端面冒顶的程度,这是工作面发生严重压架冒顶事故的主要原因。

2) 根据工作面回撤阶段压架冒顶的机理并结合数值模拟确定了重点支护位置和防治措施,采用诸如加强对调节巷围岩的支护、优化回撤巷道的布局和合理的选择挂网位置等措施可有效防止工作面出现压架冒顶事故,并得到了52303工作面安全回撤的验证。

## 参考文献( References) :

- [1] 许家林,朱卫兵,鞠金峰.浅埋煤层开采压架类型[J].煤炭学报,2014,39(8):1625~1634.  
Xu Jialin ,Zhu Weibing ,Ju Jinfeng .Supports crushing types in the longwall mining of shallow seams [J].Journal of China Coal Society ,2014 ,39( 8) :1625~1634.
- [2] 陈苏社.特殊地质条件下综采工作面顶板控制技术[J].煤炭科学技术,2014,42(2):124~128.  
Chen Sushe.Roof control technology of fully-mechanized coal mining face under special geological conditions [J].Coal Science and Technology ,2014 ,42( 2) :124~128.
- [3] Wang Jinhua.Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines [J].International Journal of Coal Science & Technology ,2014 ,1( 3) :253~260.
- [4] 黄庆享.浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[J].岩石力学与工程学报,2002,21(8):1174~1177.

Huang Qingxiang.Ground pressure behavior and definition of shallow seams [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2002 ,21( 8) :1174~1177.

- [5] 侯忠杰.地表厚松散层浅埋煤层组合关键层的稳定性分析[J].煤炭学报,2000,25(2):127~131.  
Hou Zhongjie.Analysis of combinatorial key strata stability in shallow coal seam with thick loose bed [J].Journal of China Coal Society ,2000 ,25( 2) :127~131.
- [6] 石平五,侯忠杰.神府浅埋煤层顶板破断运动规律[J].西安矿业学院学报,1996,16(3):204~207.  
Shi Pingwu ,Hou Zhongjie.Law of roof breaking movement of shallow seams in Shenhua CMA [J].Journal of Xi'an Mining Institute ,1996 ,16( 3) :204~207.
- [7] 许家林,朱卫兵,王晓振,等.浅埋煤层覆岩关键层结构分类[J].煤炭学报,2009,34(7):865~870.  
Xu Jialin Zhu Weibing ,Wang Xiaozhen et al.Classification of key strata structure of overlying strata in shallow coal seam [J].Journal of China Coal Society ,2009 ,34( 7) :865~870.
- [8] 许家林,朱卫兵,王晓振,等.沟谷地形对浅埋煤层开采矿压显现的影响机理[J].煤炭学报,2012,37(2):79~85.  
Xu Jialin Zhu Weibing ,Wang Xiaozhen et al.Influencing mechanism of gully terrain on ground pressure behaviors in shallow seam longwall mining [J].Journal of China Coal Society ,2012 ,37( 2) :79~85.
- [9] 朱卫兵.浅埋近距离煤层重复采动关键层结构失稳机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2010.
- [10] 鞠金峰.浅埋近距离煤层出煤柱开采压架机理及防治研究[D].徐州:中国矿业大学,2013.
- [11] Ju Jinfeng ,Xu Jialin ,Zhu Weibing .Longwall chock sudden closure incident below coal pillar of adjacentupper mined coal seam under shallow cover in the Shendong Coal Field [J].International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences ,2015 ,77: 192~201.
- [12] 魏立科,张彬,付兴玉,等.房式采空区下特殊岩梁结构支架工作阻力分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(10):2142~2147.  
Wei Like Zhang Bin ,Fu Xingyu et al.Support resistance analysis for special roof structures under room mining goaf [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2015 ,34( 10) :2142~2147.
- [13] 解兴智.浅埋煤层房柱式采空区下长壁开采矿压显现特征[J].煤炭学报,2012,37(6):898~902.  
Xie Xingzhi.Study on the characteristics of strata behavior in shallow seam longwall mining under the room-and-pillar mining goaf [J].Journal of China Coal Society ,2012 ,37( 6) :898~902.
- [14] 万镇,吴士良.综采工作面回撤通道矿压观测研究[J].煤矿开采,2009,14(1):85~87.  
Wan Zhen ,Wu Shiliang.Observation of ground pressure in dismantling channel of fully-mechanized mining face [J].Coal mining Technology ,2009 ,14( 1) :85~87.
- [15] 罗文.浅埋大采高综采工作面未采压架冒顶处理技术[J].

- 煤炭科学技术 2013 A1( 9) : 122–142.
- Luo Wen. Handling technology of hydraulic powered support jammed and roof fall during terminal mining of fully-mechanized high cutting coal face with shallow seam [J]. Coal Science and Technology 2013 A1( 9) : 122–142.
- [16] 朱卫兵,任冬冬,陈梦.神东矿区回撤阶段调节巷适用的合理埋深研究 [J].采矿与安全工程学报,2015,32( 2) : 279–284.
- Zhu Weibing ,Ren Dongdong ,Chen Meng. Rational buried depth for regulating roadway application during coal face withdrawal in Shendong mining area [J]. Journal of Mining & Safety Engineering ,2015 ,32( 2) : 279–284.
- [17] 鞠金峰,许家林,朱卫兵.浅埋特大采高综采工作面关键层“悬臂梁”结构运动对端面冒顶的影响 [J].煤炭学报,2014 ,39( 7) : 1197–1204.
- Ju Jinfeng ,Xu Jialin Zhu Weibing. Influence of key strata cantilever structure motion on end-face fall in fully-mechanized face with super great mining height [J]. Journal of China Coal Society ,2014 ,39( 7) : 1197–1204.
- [18] 王兆会,孔德中,王闯等.浅埋高强度采场回撤阶段围岩破断机理及控制 [J].煤炭工程 2014 A6( 9) : 76–79.
- Wang Zhaohui ,Kong Dezhong ,Wang Chuang ,et al. Mechanism and control of surrounding rock breakdown at mining equipment withdrawn stage from high intensity coal mining face in shallow depth seam [J]. Coal Engineering 2014 A6( 9) : 76–79.
- [19] 徐敬民,叶坤强,沙猛猛等.特大采高综采工作面回撤阶段调节巷异常片帮机理研究 [J].中国煤炭 2016 A2( 1) : 31–34.
- Xu Jingmin ,Ye Kunqiang ,Sha Mengmeng ,et al. Study on mechanism of abnormal rib spalling in regulating roadway during last moving of fully mechanized face with super large mining height [J]. China Coal 2016 A2( 1) : 31–34.
- [20] 陈苏社.大柳塔煤矿 7.0 m 支架综采工作面顶板结构与矿压规律研究 [J].陕西煤炭 2015( 3) : 1–4 ,58.
- Chen Sushe. Study on roof structure and ground pressure law of fully mechanized mining face with 7.0 m high supports in Daliuta Coal Mine [J]. Shaanxi Coal 2015( 3) : 1–4 ,58.
- [21] 何富连,钱鸣高,尚多江等.综采工作面直接顶破碎岩体冒顶机理及其控制 [J].中国矿业大学学报,1994,23( 2) : 18–25.
- He Fulian ,Qian Minggao ,Shang Duojiang ,et al. The mechanism and control of cataclastic rock mass caving of immediate roof on fully mechanized coal face [J]. Journal of China University of Mining & Technology ,1994 ,23( 2) : 18–25.
- [22] 钱鸣高,石平五,许家林.矿山压力与岩层控制 [M].徐州:中国矿业大学出版社 2010: 121–175.
- Qian Minggao ,Shi Pingwu ,Xu Jialin .Shanxi Coal 2015( 3) : 54–57.
- Yang Ziquan ,Tang Hui. Research on laws of strata behaviors of fully-mechanized working face with large mining height [J]. Zhongzhou Coal ,2015( 3) : 54–57.
- [24] 刘建国.注浆加固在高应力软岩巷道修复中的应用研究 [J].中州煤炭 2016( 1) : 85–86 ,122.
- Liu Jianguo. Application research on grouting reinforcement in repair of soft-rock roadway with high stress [J]. Zhongzhou Coal ,2016( 1) : 85–86 ,122.
- ment 2015 ( 7) : 352–357.
- [15] Chen Kuikui ,Wang Xinyi. Analysis of the factors causing roof water inrush in coal seam mining with thin bedrock [J]. Chemical Engineering Transactions 2015 A6 ( 12) : 679–684.
- [16] Wang Qi ,Wang Xinyi ,Liu Xiaoman ,et al. Evaluation of Hydraulic Characteristics of the Normal Fault Based on Key Data [J]. The Open Fuels & Energy Science Journal 2015 8( 1) : 265–271.
- [17] Li Renzheng ,Wang Qi ,Wang Xinyi ,et al. Relationship analysis of the degree of fault complexity and the water irrigation rate based on fractal theory [J]. Mine Water and the Environment ,2015 ( 5) : 348–349.
- [18] 柴登榜.矿井地质工作手册:下册 [M].北京:煤炭工业出版社 ,1981.

## (上接第 38 页)

- detecting disastrous water-conducting geological structures along same layer [J]. Journal of China Coal Society 2010 ,35 ( 4) : 635–639.
- [12] 苏林,刘鑫明,刘懿.瞬变电磁法在煤矿富水区探测中的应用 [J].工程地球物理学报,2011,8( 1) : 6–9.
- Su Lin ,Liu Ximeng ,Liu Yi. Application of Prospecting Water-rich Area of Coal with TEM [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics 2011 ,8 ( 1) : 6–9.
- [13] 王心义,李世峰,许光泉.专门水文地质学 [M].徐州:中国矿业大学出版社 2011.
- [14] Qi Wang ,Xinyi Wang ,Quanlin Hou. Geothermal water at a coal mine: from risk to resource [J]. Mine Water and the Environ-