

# 复合顶板中厚煤层切顶卸压留巷无煤柱开采技术

何东升,刘旦龙,张 洋

(河南能源化工集团永城煤业公司 城郊煤矿,河南 永城 476600)

**摘 要:**为实现切顶卸压留巷无煤柱开采,合理设计了恒阻大变形锚索支护参数,以城郊煤矿中厚煤层 21304 工作面复合顶板为工程背景,采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟分析了预裂爆破切顶高度、切缝角度对留巷围岩应力、位移的影响,通过现场试验确定了切缝施工单孔定向爆破半径及装药结构,并分别对恒阻锚索受力、顶板离层、支柱压力与活柱下缩量、巷道侧向应力等进行了跟踪监测研究。研究结果表明:切顶卸压留巷无煤柱开采需准确确定巷道围岩变形的关键部位,以及恒阻大变形锚索支护工艺,合理切顶高度为 8 m、合理切缝角度为 15°;试验中采用单孔切缝定向爆破半径及装药结构,实施效果良好;经对恒阻锚索受力、顶板离层、支柱压力与活柱下缩量、巷道侧向应力等进行了跟踪监测,巷道留巷整体效果好。

**关键词:**切顶卸压;留巷;预裂切顶;恒阻锚索

**中图分类号:**TD323

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-2336(2018)09-0126-07



## Non-pillar mining technology of medium thick seam with roof cutting and pressure released retained gateway and complex roof

HE Dongsheng, LIU Danlong, ZHANG Yang

(Chengjiao Mine, Yongcheng Coal Company, Hennan Energy and Chemical Industry Group, Yongcheng 476600, China)

**Abstract:** In order to realize a non pillar mining with a roof cutting and pressure released retained gateway, the support parameters of the constant resistance and high deformation anchor was rationally designed. With the medium thick seam of No. 21304 coal mining face with the complex roof in Chengjiao Mine as the engineering background, a FLAC<sup>3D</sup> numerical simulation was applied to analyze the pre-fractured roof cutting height and cutting angle affected to the stress and displacement of the surrounding rock along the retained gateway. the directional blasting radius and charging structure of the single borehole drilled with the slotting were determined by the site test. A tracing and monitoring study was conducted on the constant resistance anchor stressed, roof bedding, support pressure and cylinder yielding, gateway lateral stress and others individually. The study results showed that the non pillar mining with the roof cutting and pressure released retained gateway in Chengjiao Mine determined the key location of the surrounding rock deformation along the gateway and designed the support technique of the constant resistance and high deformation anchor. The rational roof cutting height was 8 m and the rational cutting angle was 15°. In the site test, the direction blasting radius and changing structure of the slotting single borehole were applied and the implemented effect was excellent. The tracing monitoring was conducted on the constant resistance anchor stressed, roof bedding, support pressure and cylinder yielding, gateway lateral stress and others and the whole effect of the retained gateway was good.

**Key words:** roof cutting and pressure released; retained gateway; pre-fracturing and roof cutting; constant resistance anchor

## 0 引 言

沿空留巷是指工作面回采时,在沿采空区边缘维护原回采巷道,不留设护巷煤柱,采用一定手段将

上一区段工作面上平巷维护保留,作为下一区段工作面回采的下平巷<sup>[1-4]</sup>。随煤矿开采技术进步与巷道支护理论发展,围绕沿空留巷支护技术开展了一系列理论研究,如:大变形恒阻式锚杆支护、沿空切

收稿日期:2018-04-15;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.09.020

作者简介:何东升(1973—),男,河北吴桥人,高级工程师。E-mail:liudanlong@yeah.net

引用格式:何东升,刘旦龙,张 洋. 复合顶板中厚煤层切顶卸压留巷无煤柱开采技术[J]. 煤炭科学技术,2018,46(9):126-132.

HE Dongsheng LIU Danlong ZHANG Yang. Non-pillar mining technology of medium thick seam with roof cutting and pressure released retained gateway and complex roof [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 126-132.

顶留巷支护,并得到了大范围推广应用<sup>[5-7]</sup>。当前普遍应用的巷旁充填沿空留巷技术基本上实现了无煤柱开采,提高了煤炭资源采出率<sup>[8-10]</sup>,但由于采用充填体支护留巷,未能改变煤层上覆岩层的力学结构形式,现场实践表明,邻近工作面煤体上方存在明显应力集中现象,巷道受到来自上一工作面采空区的压力及下一工作面回采时顶板来压影响,给沿空巷道的维护带来极大困难,且容易引发冲击地压等灾害,制约了矿井安全高效生产。沿空留巷的巷旁充填体大多为刚性材料,不具备“大变形”特性,在顶板变形过程中无法达到同步变形,顶板变形能量未被释放,填充材料易被压垮,导致沿空巷道失稳。

许多学者在此领域做了许多的研究,何满潮等<sup>[11]</sup>就针对浅埋薄煤层沿空留巷在工作面回采后垮落带内顶板不易垮落、沿空巷道动压显现剧烈的关键问题,对浅埋深、薄煤层、破碎顶板条件下的切顶留巷技术开展研究,在禾草沟二号煤矿 1105 工作面回风巷进行现场应用,取得较好的应用效果;魏锦周<sup>[12]</sup>以盖州煤业 9102 回风巷为例,基于切顶短壁理论分析,结合巷道围岩特性,设计切顶卸压留巷恒阻锚索深度及切顶缝角度设计角度,以现场监测巷道位围岩与工作面推进距离的变化关系来描述巷道稳定性变化规律,并对压力分区进行判断,切顶留巷新技术能有效控制巷道围岩;杨汉宏等<sup>[13]</sup>选取具有典型意义的神东矿区哈拉沟煤矿 12201 工作面,提出了现场采用恒阻锚索进行加强支护,应用预裂爆破技术切缝、采用液压单体加工字钢进行架后挡矸等一系列试验设计方案,切顶留巷道成形较好,顶板较为稳定;高玉兵等<sup>[14]</sup>为解决厚煤层切顶卸压留巷碎石帮控制难题,对厚煤层切顶留巷碎石帮变形机制和控制技术进行深入研究,设计制造波式多阻护帮结构,现场拉拔试验表明该结构性能满足支护要求,不仅解决了厚煤层切顶留巷碎石帮难控问题,且经济效益显著。迟宝锁等<sup>[15]</sup>针对大采高较厚煤层在切顶留巷技术现场实施过程中,常遭受矿压显现剧烈、巷道变形严重,给留巷的顶板支护带来的难题,采用恒阻大变形锚索作为巷道顶板的关键支护设备,为国内厚煤层切顶留巷技术提供了借鉴;薛二龙等<sup>[16]</sup>利用现场 PU 监测系统,对恒阻大变形锚索受力变化规律、顶板离层变化规律、滞后单体支柱支承压力及活柱下缩量变化规律、支柱撤出后巷道围岩位移等状况进行监测,对浅埋、含煤复合顶板切

顶卸压留巷的矿压显现规律进行研究。

切顶卸压留巷无煤柱开采技术将顶板按设计位置切落,切断了顶板的应力传递,使回采巷道留巷,作为下一工作面巷道,减小采掘比,变传统“一面两巷”采掘方式为“一面一巷”。切顶卸压留巷无煤柱开采技术优点显著:①无须留设护巷煤柱或充填高强度材料支护巷道,成本降低,操作简单;②实现了无煤柱开采,避免了留设煤柱造成的资源浪费,提高了资源回收率;③简化了工作面端头维护工作量,降低了工人劳动强度,能取得显著的社会效益和经济效益;④切顶卸压后形成的留巷处于卸压区,有效解除了高应力环境的威胁<sup>[17-20]</sup>。笔者将结合城郊煤矿 21304 工作面复合顶中厚煤层地质生产条件,根据巷道矿压显现规律,合理设计恒阻大变形锚索支护参数与预裂切顶参数,为实现切顶卸压留巷无煤柱开采技术在深部复合顶中厚煤层成功应用提供科学依据。

## 1 工作面概况

城郊煤矿 21304 综采面为十三采区首采面,工作面斜长 180 m,可连续推进与沿空留巷长度 1 300 m,煤层厚度 2.6~4.3 m,平均 3.1 m,煤层较稳定。煤层埋深大,埋深 835~915 m,煤层倾角 1°~7°,平均 3°。煤层直接顶为泥岩,厚度 2.7~3.0 m,平均 2.85 m;基本顶由平均厚度 3.76 m 的细粒砂岩和均厚为 5.23 m 的粉砂岩组成。工作面巷道布置如图 1 所示。



图 1 21304 工作面巷道布置

Fig.1 Layout of roadway in No.21304 mining face

## 2 切顶卸压沿空留巷技术

### 2.1 恒阻大变形锚索

传统锚索伸率低,不能适应地下工程围岩大变形,当工作面采用切顶卸压无煤柱开采技术后,下一工作面沿空侧巷道需要承受 3 次影响:①预裂爆破产生的应力波影响;②工作面推过后采场上覆岩层应力传递的影响;③下一工作面开采时超前应力的

影响。采用恒阻大变形锚索能够很好的解决巷道 3 次受力的影响。城郊煤矿 21304 工作面顶板为复合顶板,具有埋深大、应力高、围岩变形量大等特点,恒阻大变形锚索不仅能承受围岩的大变形,同时可吸收围岩释放的膨胀能及其他非线性能量。因此,在进行巷道支护设计时,确定 21304 工作面轨道巷围岩变形的关键部位为切缝侧,因此在靠近切缝侧补打恒阻大变形锚索。共设计 2 排恒阻锚索:①补强恒阻锚索沿顶板铅垂方向布置,靠近回采侧恒阻锚索排距 700 mm,与切缝孔间距 300 mm;②离回采侧较远的恒阻锚索排距 1 400 mm,与原锚索间隔布置。靠近回采侧恒阻锚索使用槽钢连接。恒阻大变形锚索直径为 21.8 mm,长度 10 000 mm,恒阻器直径为 65 mm,恒阻值为  $330 \pm 20$  kN,恒阻器长度为 500 mm。恒阻锚索预紧力均为 280 kN。靠近回采侧恒阻大变形锚索相邻 3 根用槽钢连接,恒阻大变形锚索预制托盘大小为  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。恒阻锚索支护断面如图 2 所示。

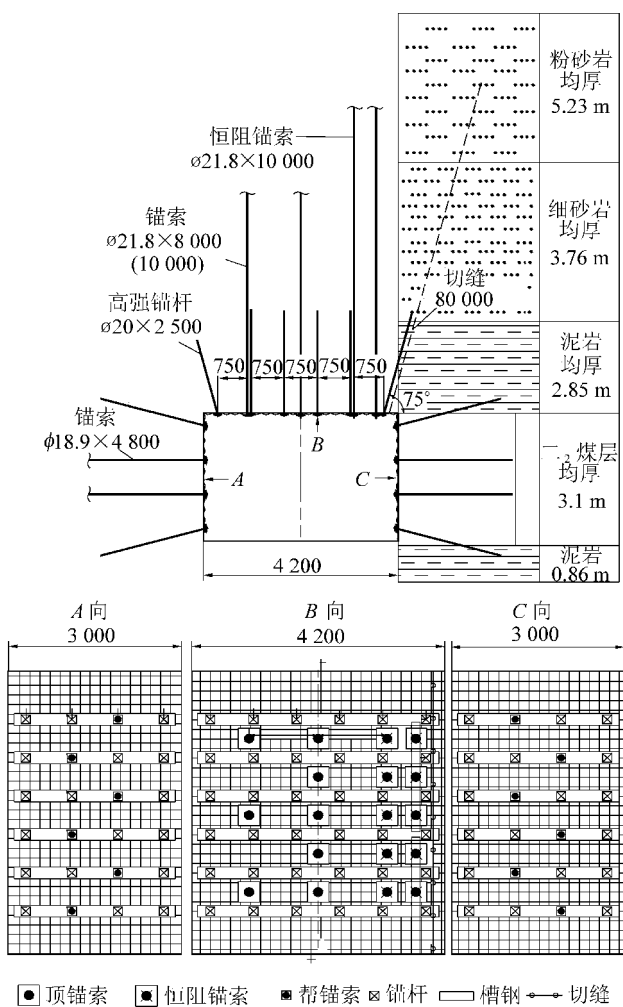


图 2 恒阻锚索支护断面

Fig.2 Cross-section of constant resistance anchorage cable

## 2.2 预裂切顶参数设计

影响切顶卸压沿空留巷定向爆破效果的因素很多,结合理论分析及工程实践,确定复合顶中厚煤层切顶卸压沿空留巷关键参数包括:切顶高度、切缝角度、单孔定向爆破半径及装药结构。根据城郊煤矿 21304 工作面工程地质条件,利用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件建立计算模型对复合顶中厚煤层切顶卸压沿空留巷关键参数进行分析。模型尺寸为:长×宽×高 = 200 m×350 m×85 m。

### 2.2.1 切顶高度

切顶高度是指通过定向聚能爆破技术对煤层顶板实施定向切缝后,从巷道顶板平面到切缝向上发育的最大垂直距离。为了研究切顶高度对矿压显现的影响规律,运用 FLAC<sup>3D</sup> 建立计算模型,分别模拟切顶高度为 6、8、10 m 时围岩的应力、位移分布特征,得出计算结果如图 3 所示。

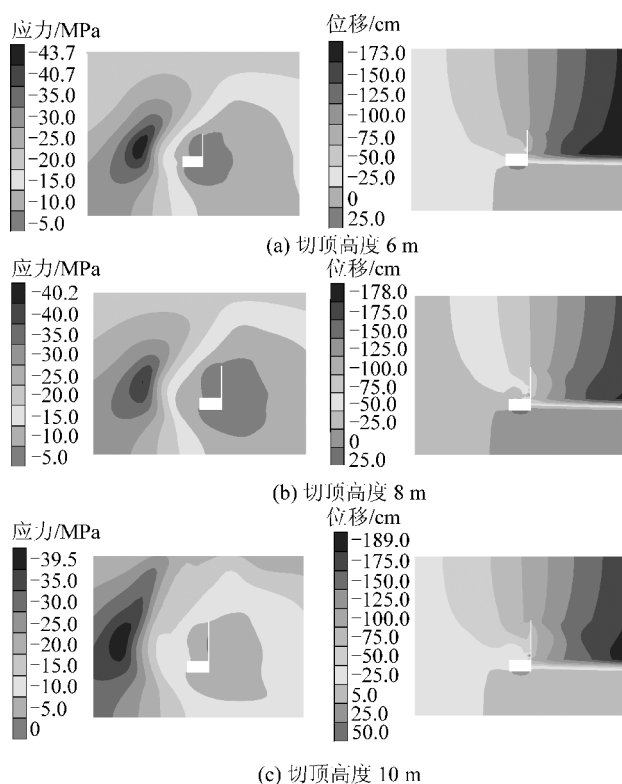


图 3 不同切顶高度时切缝垂直应力和垂直位移分布

Fig.3 Vertical stress and vertical displacement distribution within varies slit depth

对比图 3 可知:

1) 切顶高度对卸压效果具有较显著的影响,切顶高度为 6、8、10 m 时,巷道实体煤帮内部应力集中区距巷帮对应为 8、10、11 m,表明切顶高度越大,应力集中区距离巷帮越远,对巷道维护越有利。但当



切顶高度达到一定程度后,继续增加切顶高度对应力集中区位置影响不甚明显,并且切顶高度越大,施工难度越大、装药量越多,进行方案设计时应综合考虑现场实际情况选择最优参数。

2) 切顶高度为 6、8、10 m 时,实体煤帮内部应力集中峰值分别为 43.7、40.2、39.5 MPa,巷道顶板垂直位移最大值分别为 500、250、200 mm,表明切顶高度越大,应力集中峰值越小,巷道顶板垂直位移越小,表明切顶卸压能够有效控制顶板围岩变形,保证巷道稳定。切顶高度为 8、10 m 时,巷道顶板垂直位移相差不大。

3) 综合对比可知,切顶高度为 8 m 时,集中应力较小,应力集中区距巷道较远,有利于巷道围岩稳定,巷道垂直位移在合理范围内,因此确定合理切顶高度为 8 m。

2.2.2 切缝角度

巷道切顶后,采空区上方岩体受自重应力作用下沉,会与巷道顶板发生不同程度的相互作用,导致巷道顶板变形较大。为解决该问题,现场实践表明切缝向采空区侧偏转一定角度会有利于顶板垮落并减小其对巷道顶板的影响。采用 FLAC<sup>3D</sup> 建立计算模型,分别模拟切顶角度为 0°、15°、25° 时围岩的应力、位移分布特征,计算结果如图 4 所示。

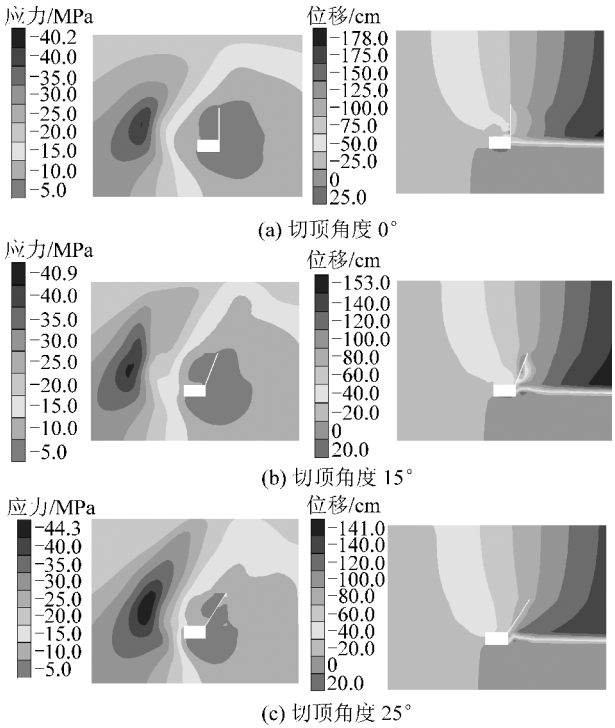


图 4 不同切顶角度时切缝垂直应力和垂直位移分布

Fig.4 Vertical stress and vertical displacement distribution with varies slit degree

对比图 4 可知:

1) 切顶角度为 0° 时,采空区顶板垂直位移较小,采空区顶板垮落不彻底,采空区范围内垂直应力仍然较高;切顶角度为 15°、25° 时,采空区顶板垂直位移较大,采空区存在较大范围的低应力区,表明一定的切缝角度有利于采空区顶板垮落,从而达到利用垮落岩体充填采空区、支承上部岩层的目的。

2) 切顶角度为 0°、15°、25° 时,实体煤帮内部应力集中区距煤帮分别为 10、10、7 m,实体煤帮内部垂直应力最大值分别为 40.2、40.9、44.3 MPa,巷道顶板垂直位移最大值分别为 250、290、450 mm。表明增大切顶角度,应力集中峰值、巷道顶板垂直位移随之增大。切顶角度为 0°、15° 时,垂直应力最大值变化不大。

3) 综合对比可知,切顶角度为 15° 时,利于采空区矸石垮落,集中应力较小,应力集中区距巷道较远,有利于巷道围岩稳定,因此确定合理切顶角度为 15°。

2.2.3 单孔定向爆破半径及装药结构

考虑到单孔定向爆破半径及装药结构参数效果受地质条件、炮眼直径、孔深、炸药性能、聚能管性能等多方面因素影响,可根据现场工程试验来确定合理的单孔装药量及爆破孔孔间距。首先根据前期顶板窥视结果进行单孔试验,确定单孔最佳装药量及最佳空气柱的长度;随后进行连孔试验确定两相邻孔的最佳间距;最后进行单次起爆个数试验,确定一次最佳起爆爆破孔的个数。结果表明,最佳装药量(卷)为 4+3+1+0,孔间距为 600 mm,最佳封泥长度为 2 m,装药量与装药结构如图 5 所示

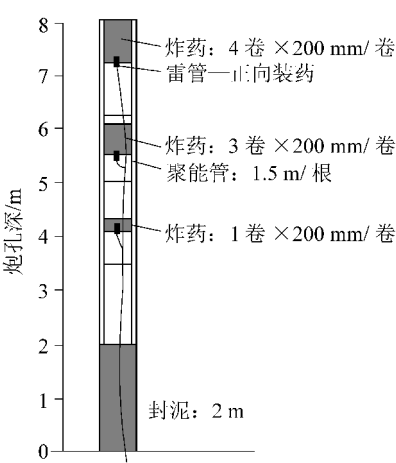


图 5 双向聚能爆破装药量及装药结构示意图

Fig.5 Explosive charge and charge structure for bidirectional concentrated energy blasting

### 2.2.4 现场探测分析

爆破后采用 CXK6 矿用本安型钻孔成像仪对爆破过的钻孔进行窥视探测,实时直观地观测到钻孔内的各种结构构造及裂缝,将整个钻孔进行成像并展开成平面图和三维柱状图有助于生动直观地再现孔内裂缝并进行定量分析。爆破钻孔窥视图如图 7 所示,由统计结果可知,爆破后切缝孔的平均裂缝率达到了 86%。

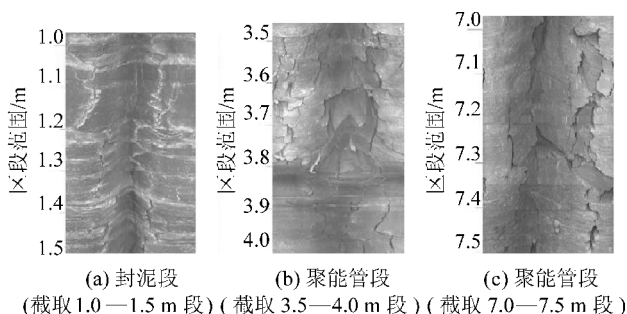


图 6 爆破后孔内裂缝情况

Fig.6 Cracks in the hole after blasting

### 2.4 切顶卸压留巷支护设计

根据切顶卸压沿空留巷留巷原理进行了设计,具体步骤:①首采面上下平巷施工;②下平巷工作面侧加固锚索及顶板预裂爆破钻孔施工;③远程实时监测系统布设;④工作面回采;⑤下平巷顶板预裂爆破定向切缝;⑥基本顶来压,断裂下沉,留巷。为防止采空区矸石涌入巷道,确保留巷内围岩的稳定,21304 工作面轨道巷沿空留巷巷旁及巷内采用以下设计方案:

1) 巷旁支护。为防止周期来压时顶板垮落岩石冲入巷道,工作面支架后内采用由可缩性 29U 型钢+菱形网+钢筋网进行支护,如图 8 所示。可缩性 29U 型钢间距 500 mm,要求 U 型钢架设成一条直线以保证巷帮的直线型。钢筋网与 U 型钢用铁丝捆扎在一块,钢筋网尺寸为 1 000 mm×2 000 mm,钢筋网与采空区矸石之间布置一层菱形网,菱形网与顶网搭接,搭接长度不小于 400 mm。

2) 巷内支护。为确保顶板垮落运动期间巷道的稳定,端头支架后 0~240 m 范围内,采用“液压抬棚+ $\pi$  型梁+单体支柱”进行巷内支护,如图 8 所示。液压抬棚长度 4 m,工作阻力 3 200 kN,连续布置,液压抬棚顶端使用高强度皮带垫设用以保护顶板支护。使用 3.8 m 的  $\pi$  型梁垂直于巷道走向架设在单体液压支柱顶部,以一梁两柱的方式布置,棚距 600 mm,巷道顶板破碎区域及断层带加密支护。滞后工

作面 240 m 以后范围,对液压抬棚和单体支柱回撤后循环使用。

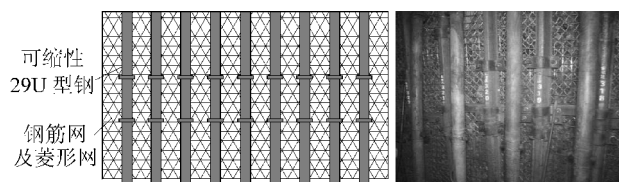


图 7 巷旁挡矸支护断面图及现场情况

Fig.7 Roadside retaining wall and site condition

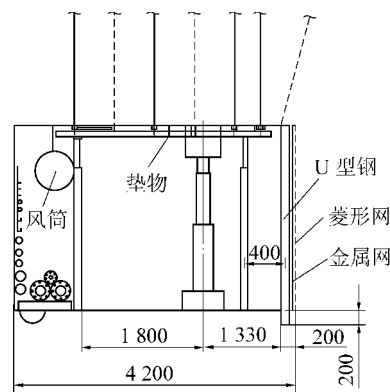


图 8 巷内支护断面

Fig.8 Cross-section diagram of support within roadway

## 3 应用效果分析

为评价留巷支护试验效果,对留巷过程的矿压监测包括巷道表面位移观测,巷道顶板离层监测、锚杆锚索受力监测、工作面支架压力监测等进行了监测分析。

1) 恒阻锚索受力。4 号锚索测力计(距 21304 工作面开切眼 60 m)受力变化如图 9 所示,表明工作面的推进对锚索受力产生影响范围一般 40 m 左右,5 个受力监测点的恒阻锚索最大拉力为 319.6~359.3 kN,考虑到一定的监测数据误差,恒阻锚索可能已达到恒阻状态。

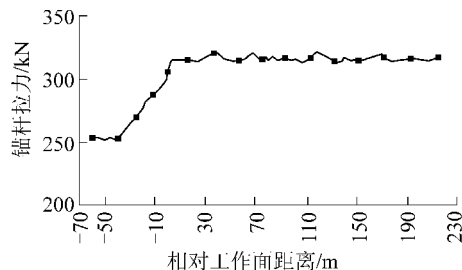


图 9 4 号锚索应力值变化曲线

Fig.9 Curve of No.4 anchor cable stress value

2) 顶板离层。工作面的推进对巷道顶板离层

产生影响,一般处于超前 50 m 范围之内。7 号离层检测仪(距开切眼 150 m)顶板离层量变化如图 10 所示,在超前工作面 35~46 m 时巷道顶板开始产生离层,滞后工作面距离大于 320 m 后,巷道顶板离层才趋于稳定。

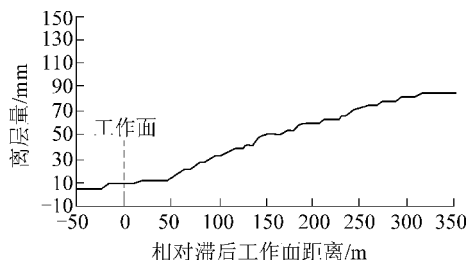


图 10 7 号顶板离层值变化曲线

Fig.10 Change curve of No.7 roof separation value

3) 支柱压力与活柱下缩量。留巷段内 1 号仪表(距开切眼 20 m)活柱累计下缩量与工作面距离关系如图 12 所示,即当滞后工作面距离大于 315 m 后,活柱下缩量才趋于稳定,活柱下缩量监测点的活柱下缩量最大值为 288 mm。

4) 巷道侧向应力。巷道 1 号监测点侧向压力如图 12 所示,表明滞后工作面 247 m 趋于稳定,稳定后平均 0.75 MPa。

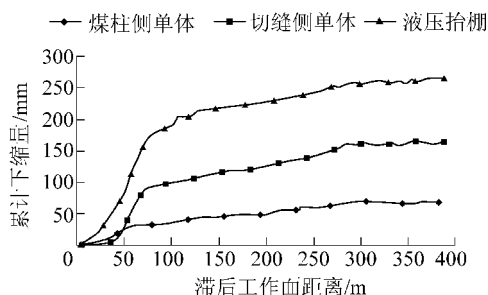


图 11 活柱累计下缩量与工作面距离关系

Fig.11 Relationships between accumulative shrinkage and mining face in retaining roadway section

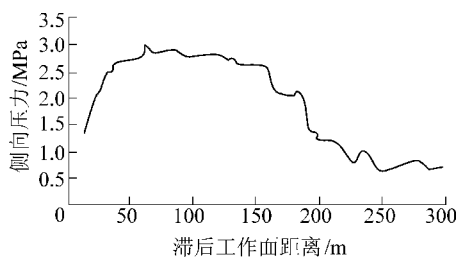


图 12 1 号监测点侧向压力变化曲线

Fig.12 Change curve of lateral pressure value of No.1 monitoring point

5) 巷道整体效果。21304 工作面留巷后挡

矸侧与留巷整体效果如图 13 所示。

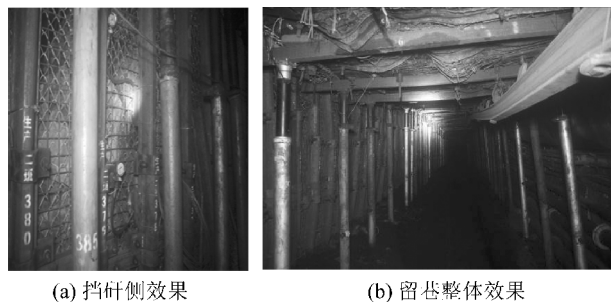


图 13 留巷效果

Fig.13 Overall effect of gob-side retained entry

由图 13 可见,按设计切顶参数进行现场试验后切顶效果明显,超前工作面定向爆破之后,顺利的切断了 21304 工作面采空区顶板与轨道巷顶板之间的联系,采空区填充效果良好,巷道围岩变形得到有效的控制,实现了切顶卸压留巷技术的成功试验。

## 4 结 论

1) 根据城郊煤矿大深度复合顶中厚煤层地质生产条件,确定了切顶卸压留巷无煤柱开采巷道围岩变形的关键部位,设计了恒阻大变形锚索支护参数。

2) 利用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件建立计算模型对复合顶中厚煤层切顶卸压沿空留巷关键参数进行了模拟分析,确定了合理切顶高度为 8 m、合理切缝角度为 15°。通过现场试验确定了切缝施工单孔定向爆破半径及装药结构,钻孔窥视探测表明现场实施效果良好。

3) 根据 21304 工作面轨顺留巷条件进行了切顶卸压留巷方案设计。现场分别对恒阻锚索受力、顶板离层、支柱压力与活柱下缩量、巷道侧向应力等进行了跟踪监测,巷道留巷整体效果好,表明切顶卸压留巷技术在深部复合顶中厚煤层得到了成功试验。

## 参考文献(References):

- [1] 柏建彪,周华强,侯朝炯,等.沿空留巷巷旁支护技术的发展[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):183-186.  
BAI Jianbiao,ZHOU Huaqiang,HOU Zhaojiong,et al.Development of support technology beside roadway in goaf-side entry retaining for next sublevel[J].Journal of China University of Mining and Technology,2004,33(2):183-186.
- [2] 张 农,韩昌良,阚甲广,等.沿空留巷围岩控制理论与实践[J].煤炭学报,2014,39(8):1635-1641.  
ZHANG Nong,HAN Changliang,KAN Jiaguang,et al.Theory and practice of surround rock control for pillar gob-side entry retaining

- [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1635-1641.
- [3] 陆士良. 无煤柱巷道矿压显现与受力分析[J]. 煤炭学报, 1981, 18(4): 29-37.
- LU Shiliang. Analysis of rock pressure and stress of non pillar roadway [J]. Journal of China Coal Society, 1981, 18(4): 29-37.
- [4] 钱鸣高, 许家林, 缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 343-347.
- QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green technique in coal mining [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2003, 32(4): 343-347.
- [5] 何满潮, 郭志彪, 恒阻大变形锚杆力学特性及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1297-1308.
- HE Manchao, GUO Zhibiao. Mechanical properties and engineering application of anchor bolt with constant resistance and large deformation [J]. Chinese Journal of rock mechanics and engineering, 2014, 33(7): 1297-1308.
- [6] 张国锋, 何满潮, 俞学平, 等. 白皎矿保护层沿空切顶成巷无煤柱开采技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(4): 511-516.
- ZHANG Guofeng, HE Manchao, YU Xueping, *et al.* Protective layer gob roof cutting into lane without coal pillar mining technology in Baijiao Coal Mine [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(4): 511-516.
- [7] 宋润权, 谢家鹏. 切顶卸压技术在工作面及沿空巷道维护中的应用[J]. 煤炭科技, 2012(3): 52-54.
- SONG Runquan, XIE Jiapeng. Application of cutting and pressure relief technology in maintenance of working face and roadway along goaf [J]. Coal Technology Magazine, 2012(3): 52-54.
- [8] 王巨光, 王刚. 切顶卸压沿空留巷技术探讨[J]. 煤炭工程, 2012(1): 24-26.
- WANG Juguang, WANG Gang. Discussion on the technology of cutting down and pressure unloading along Goaf Technology [J]. Coal Engineering, 2012(1): 24-26.
- [9] 郭志彪, 王将, 曹天培, 等. 薄煤层切顶卸压留巷关键参数研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5): 879-885.
- GUO Zhibiao, WANG Jiang, CAO Tianpei, *et al.* Study on the key parameters of automatic entry and unloading of thin coal bed cutting and pressure unloading [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(5): 879-885.
- [10] 孙晓明, 刘鑫, 梁广峰, 等. 薄煤层切顶卸压沿空留巷关键参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1449-1456.
- SUN Xiaoming, LIU Xin, LIANG Guangfeng, *et al.* Study on key parameters of thin coal bed cutting and pressure relief along goaf [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1449-1456.
- [11] 何满潮, 郭鹏飞, 王炯, 等. 禾二矿浅埋破碎顶板切顶留巷试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 391-398.
- HE Manchao, GUO Pengfei, WANG Jiong, *et al.* Experimental study on gob-side entry formed by roof cut of broken roof at shallow depth of Hecaogou No. 2 Coalmine [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 391-398.
- [12] 魏锦周. 浅埋中厚煤层沿空切顶留巷的稳定性分析[J]. 煤炭与化工, 2018, 41(3): 61-63.
- WEI Jinzhou. Stable analysis of gob-side cutting roof roadway of shallowburied coal seam [J]. Coal and Chemical Industry, 2018, 41(3): 61-63.
- [13] 杨汉宏, 薛二龙. 浅埋深条件下切顶卸压留巷技术研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(1): 31-33, 37.
- YANG Hanhong, XUE Erlong. Experimental research on gob-side entry forming with roof cutting pressure releasing under shallow depth [J]. Coal Engineering, 2017, 49(1): 31-33, 37.
- [14] 高玉兵, 杨军, 何满潮, 等. 厚煤层无煤柱切顶留巷碎石帮变形机制及控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2492-2502.
- GAO Yubing, YANG Jun, HE Manchao, *et al.* Mechanism and control techniques for gangue rib deformations in gob-side entry retaining formed by roof fracturing in thick coal seams [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2017, 36(10): 2492-2502.
- [15] 迟宝锁, 周开放, 何满潮, 等. 大采高工作面切顶留巷支护参数优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(8): 128-133.
- CHI Baosuo, ZHOU Kaifang, HE Manchao, *et al.* Optimization research on supporting parameters of roof cutting entry retaining with large miningheight face [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(8): 128-133.
- [16] 薛二龙, 马忠辉, 罗文, 等. 浅埋复合顶板沿空切顶卸压留巷矿压规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(S1): 34-38.
- XUE Erlong, MA Zhonghui, LUO Wen, *et al.* Study on mine pressure behavior of gob-side entry automatically by roof cutting-pressure relief with shallow depth and compound roof [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(S1): 34-38.
- [17] 郭鹏飞, 张国锋, 陶志刚. 坚硬软弱复合顶板切顶卸压沿空留巷爆破技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(10): 120-123.
- GUO Pengfei, ZHANG Guofeng, TAO Zhigang. Blasting technology for cutting and unloading of hard soft composite roof along goaf [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(10): 120-123.
- [18] 毛怀勇. 唐山沟煤矿切顶卸压沿空留巷无煤柱开采技术[J]. 煤炭工程, 2016, 48(8): 12-14.
- MAO Huaiyong. Tangshan gully coal mine, cutting and pressure unloading along goaf without coal pillar mining technology [J]. Coal Engineering, 2016, 48(8): 12-14.
- [19] 李智斐. 煤矿工作面轨道巷切顶留巷技术应用研究[J]. 能源与环保, 2017, 39(6): 30-34.
- LI Zhifei. Research on the technology and application of cutting roof and alley in coal mine working face [J]. Energy and Environmental Protection, 2017, 39(6): 30-34.
- [20] 李明. 爆破切顶与联合支护技术在沿空留巷中的应用研究[J]. 能源与环保, 2017, 39(6): 137-144.
- LI Ming. Research on the application of blasting cutting and joint support technology in the alley along the gob [J]. Energy and Environmental Protection, 2017, 39(6): 137-144.