

张春华,刘浩杰,胡威,等.切顶留巷围岩卸压特性及支护效果[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(1):1-7.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250330

ZHANG Chunhua,LIU Haojie,HU Wei,et al.Pressure relief characteristics and support effect of surrounding rock for roof-cutting retained roadway[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2026, 45(1): 1-7. DOI: 10.11956/j. issn. 1008-0562.20250330

## 切顶留巷围岩卸压特性及支护效果

张春华<sup>1,2</sup>, 刘浩杰<sup>1</sup>, 胡威<sup>3</sup>, 李师<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院,辽宁葫芦岛 125105;2. 辽宁工程技术大学矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室,辽宁葫芦岛 125105;3. 宽甸满族自治县应急管理事务服务中心,辽宁丹东 118200)

**摘要:** 为深入探究切顶卸压关键技术参数和留巷效果,以东荣二矿 1803 工作面回风巷聚能爆破切顶留巷为工程背景,确定留巷切顶高度和爆破钻孔深度,分析切顶后巷道围岩应力和位移变化,优化爆破切顶钻孔偏角。研究表明:1803 工作面留巷切顶合理高度为 6.0 m,爆破切顶钻孔的合理深度为 6.5 m;切顶后留巷道顶板垂直应力降低幅度可达 30%,垂直位移减小幅度可达 33%,切顶钻孔偏向采空区 15°时卸压效果最佳;现场爆破切顶钻孔的间距为 0.6 m,隔孔起爆,并增设“U”型钢可缩立柱-单体液压支柱-粉煤灰袋补强支护体系。留巷监测数据显示,顶底板移近量平均为 385 mm,两帮移近量平均为 245 mm,巷旁支架压力维持在 37~40 MPa,切顶留巷围岩变形稳定,留巷效果良好。

**关键词:** 切顶留巷;围岩变形;聚能爆破;卸压特性;巷道支护

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2026)01-0001-07

## Pressure relief characteristics and support effect of surrounding rock for roof-cutting retained roadway

ZHANG Chunhua<sup>1,2</sup>, LIU Haojie<sup>1</sup>, HU Wei<sup>3</sup>, LI Shi<sup>1</sup>

(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. Key Laboratory of Mine Thermodynamic disasters and Control of Ministry of Education, Liaoning

Technical University, Huludao 125105, China;3. Kuandian Manchu Autonomous County Emergency

Management Service Center, Dandong 118200, China)

**Abstract:** To investigate the key technical parameters roof-cutting pressure relief of the cut and the effect of retained roadway, this study conducted in-depth research by taking Dongrong No.2 Coal Mine as the engineering background, and implemented an experimental project of roof-cutting and roadway retaining by using shaped charge blasting in the return air roadway of the 1803 working face. The height of roof cutting for roadway retaining and the depth of blasting boreholes were calculated and determined, the stress and displacement changes of the surrounding rock in the roadway after roof cutting were simulated and analyzed, and the deviation angle of the blasting boreholes for roof cutting was optimized, meanwhile, the effect of retaining roadway was investigated on site. Research results show that the reasonable height of roof cutting for roadway retaining in 1803 working face is 6.0 m, and the reasonable depth of blasting boreholes for roof cutting is 6.5 m. After roof cutting, the vertical stress on the roof of the retained roadway decreases by up to 30%, and the vertical displacement decreases by up to 33%. It is found that the pressure relief effect is best when the roof cutting boreholes are inclined towards the goaf by 15°. The spacing between blasting boreholes on site is 0.6 m, with hole-separating detonation implemented, and a reinforced support system consisting of U-shaped steel retractable pillars-single hydraulic props-fly ash bags was added implemented. The monitoring data of roadway retaining shows that the average approaching displacement of the roof and floor is 385 mm, and the average approaching displacement of the two sides of the roadway is 245 mm.

收稿日期:2025-07-29

修回日期:2025-09-12

接受日期:2025-09-19

责任编辑:焦丽

基金项目:国家自然科学基金项目(52374204)

作者简介:张春华(1980-),男,山东菏泽人,博士,教授,主要从事煤矿瓦斯防治方面的研究。E-mail: zch9820@163.com

The pressure of the roadway side supports is maintained at 37–40 MPa, and the deformation of the surrounding rock in the roof cutting roadway is stable, indicating favorable roadway retention performance.

**Keywords:** roof-cutting and retained roadway; surrounding rock deformation; shaped charge blasting; pressure relief characteristics; roadway support

## 0 引言

工作面沿空留巷无煤柱开采可有效提高煤炭资源采出率,相关技术在煤矿开采领域已逐步得到应用。针对无煤柱开采技术,何满潮院士建立了“切顶短壁梁”理论,以此为基础,提出切顶卸压自动成巷无煤柱开采技术——长壁开采“110工法”<sup>[1]</sup>,该方法在国内煤矿应用广泛。

在切顶留巷理论技术方面,何满潮院士团队结合切顶留巷工程背景模拟分析大煤柱、小煤柱和无煤柱开采方式下工作面应力分布特征,发现无煤柱开采时无超前掘进巷道,不存在掘巷引起的应力集中,工作面前方支承应力和采空区侧向的应力峰值均较低<sup>[2]</sup>。在此基础上,该团队系统研究了中厚煤层复合顶板切顶卸压自动成巷工作面矿压显现特征,成功实现厚煤层快速回采、切顶卸压与无煤柱自成巷围岩协同控制,破解了浅埋薄煤层破碎顶板切顶卸压自动成巷技术难题<sup>[3-5]</sup>。

学者围绕切顶卸压沿空留巷技术开展了多维度研究。杨军等<sup>[6]</sup>通过切顶护帮支架和恒阻大变形锚索支护法,促使基本顶在有利位置断裂,优化了切顶效果。姜鹏飞等<sup>[7]</sup>通过FLAC<sup>3D</sup>软件分析了沿空留巷围岩应力和变形特征,发现直接顶应力变化速率大于基本顶,围岩变形受二次采动影响较大。谢文兵等<sup>[8]</sup>针对综放沿空留巷围岩控制难题,分析了沿空留巷顶板断裂位置和围岩应力演化规律,提出合理充填方式和充填体强度可保证良好的留巷效果。ZHANG等<sup>[9]</sup>分析了切顶前后巷道顶板应力和变形特征,发现采用爆破切顶后巷道围岩所受垂直应力及围岩变形均明显小于未切顶巷道。马新根等<sup>[10]</sup>将留巷划分为煤体支撑区、动压承载区和成巷稳定区,分别建立力学模型,提出控制措施。

在沿空留巷爆破切顶与巷道支护方面,何东升等<sup>[11]</sup>明确了预裂爆破切顶高度、切缝角度对留巷围岩应力和位移的影响规律。高魁等<sup>[12]</sup>分析了深孔爆破强制放顶卸压机理。杨战标等<sup>[13]</sup>通过试验研究了沿空留巷定向爆破技术,确定了合理的爆破、装药参数。张盛等<sup>[14]</sup>通过井下隔孔方式爆破试验,

获得了合理的预裂爆破参数。田海光<sup>[15]</sup>模拟验证了高水材料作为巷旁支护填充体的可行性。衡多等<sup>[16]</sup>模拟了沿空留巷混凝土充填体的短距离泵送技术。曹其嘉等<sup>[17]</sup>通过试验论证了沿空留巷巷旁充填材料的强度,认为水灰比在临界值时的充填体强度最大。

考虑到各矿区地质开采条件的复杂性,实际留巷的切顶与支护参数需要根据现场条件试验确定。因此,根据东荣二矿沿空留巷无煤柱开采技术需求,以1803工作面为工程背景,通过理论计算和数值模拟分析切顶卸压对围岩的控制效果,结合现场爆破切顶和支护试验,探索适合煤矿切顶留巷工艺的技术参数。

## 1 工作面工程概况

东荣二矿1803工作面位于南四采区,北邻南四轨道上山,南邻F33逆断层,东邻1802工作面未采区,西邻1804工作面采空区;上部为17层采空区,层间距为15~17 m。工作面开采18<sup>#</sup>煤层,平均煤厚为1.75 m,工作面走向长为579 m,倾向长为154 m,煤层倾角为14°~18°,平均倾角为15°。18<sup>#</sup>煤层无伪顶和直接顶,老顶为4.32 m厚的灰黑色粉砂岩,泥质胶结。1803工作面的地质柱状图见图1,顶底板煤岩物理参数见表1。








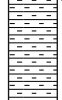
柱状	层厚/m	岩石名称	岩性描述
	1.50	细砂岩	灰白,顶部夹0.10 m含砾粗砂,下夹有0.25 m灰白色中砂岩,细砂灰色,致密夹少量黏土岩层,含植物化石夹煤线,具缓波状层理。
	3.61	17层煤	黑色,半亮型以镜亮煤为主,具条带状结构。
	10.61	粉细砂岩互层	黑色深灰色,较致密脆硬,具黑灰相间,粉细砂条带状结构,含大量植物化石印痕,具水平层理缓波状层理。
	0.21	18层煤(上)	黑褐色,以亮煤为主,镜亮煤次之。
	0.65	粉细砂岩互层	灰黑-深灰色,具粉细相间条带状结构,含植物化石,具水平层理。
	4.32	粉砂岩	深灰-灰色,较致密含植物化石,泥质胶结。
	2.08	18层煤	黑色,半亮型以镜亮煤为主,暗煤次之,具条带状结构。中下部夹0.1~0.2 m灰白色粉砂岩。
	8.70	泥岩	灰黑色,炭质胶结较脆硬,含植物化石茎叶印痕,具参差断不显层理。

图1 1803工作面综合地质柱状图

Fig.1 comprehensive geological column of 1803 working face

表 1 顶底板煤岩石力学参数  
Tab.1 rock mechanical parameters of roof and floor

岩性	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
细砂岩	2 640	12.0	9.9	3.7	36
粉砂岩	2 530	9.5	6.2	4.2	35
18#煤	1 460	1.9	1.3	1.7	26
泥岩	2 580	11.2	9.0	3.2	34

1803 及邻近工作面巷道布置见图 2。进风巷和回风巷均沿煤层走向布置, 两巷道断面形状为梯形, 巷道净宽度为 3.8 m, 平均高度为 2.7 m。1803 工作面切顶留巷施工在其回风巷进行, 利用乳化炸药双向聚能管对顶板进行爆破, 实施超前预裂切顶作业。

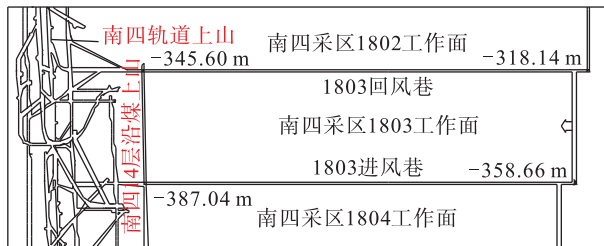


图 2 1803 工作面采掘工程平面示意

Fig.2 excavation engineering plan of 1803 working face

## 2 切顶卸压原理和切顶高度确定

### 2.1 切顶卸压原理

切顶卸压成巷原理示意图见图 3。

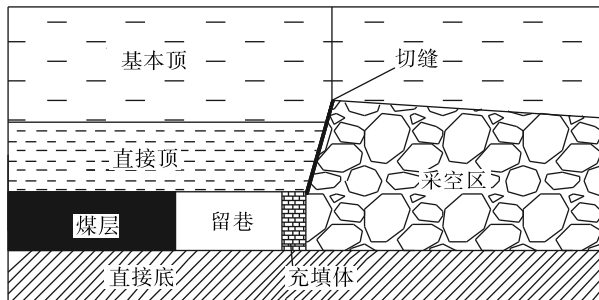


图 3 切顶卸压原理示意

Fig.3 schematic of roof-cutting pressure relief principle

切顶成巷是预先在留巷顶板布置恒阻大变形锚索, 在预留巷顶板的采空区侧通过爆破、水利化措施等手段形成切缝, 主动切断采空区顶板岩层与留巷顶板岩层的连接, 使留巷顶板形成短臂梁。在工作面回采后, 切缝范围内的采空区顶板在上覆岩层自重和工作面采动应力的共同作用下, 沿切缝碎裂面垮落, 在采空区形成碎胀矸石支撑体。留巷顶板覆岩的压力一部分由工作面侧煤体承担, 同时由于切顶面与留巷垂直方向呈一定角度, 采空区垮落矸石也承担一部分压力。切顶后

采空区侧顶板的受力结构由原来的长悬臂梁变为短悬臂梁, 有效减轻了留巷顶板的支护压力<sup>[18-20]</sup>。

### 2.2 切顶高度

切缝高度是影响切顶效果的重要参数, 切缝高度过大, 会增加钻孔施工难度, 切缝高度不足, 则导致采空区侧顶板垮落不充分, 达不到切顶卸压留巷效果。结合工程实际, 切顶高度<sup>[21-23]</sup>为

$$H_q = \frac{H_m - L_1 - L_2}{S - 1}, \quad (1)$$

式中:  $H_m$  为煤层厚度;  $L_1$  为底板鼓起量;  $L_2$  为顶板下沉量;  $S$  为岩石碎胀系数。

18#煤层最大厚度为 2.0 m, 不考虑顶底板移近量, 顶板无伪顶和直接顶, 老顶为粉砂岩, 碎胀系数取 1.35, 计算得切顶高度为 5.7 m, 实际确定切顶高度为 6.0 m。爆破孔深度  $H_c$  可按照经验公式计算。

$$H_c = \frac{H_q}{\cos \theta_1 \sin \theta_2} + 0.1, \quad (2)$$

式中:  $\theta_1$  为爆破孔与顶板垂直方向的夹角, 取 15°;  $\theta_2$  为爆破孔与巷道走向的夹角, 取 90°。

由式 (1)、式 (2) 计算得爆破孔深为 6.3 m, 综合考虑岩层的地质变化, 保证在矿压作用下顶板可以顺利垮落, 确定实际爆破孔深度为 6.5 m。

### 3 切顶卸压巷道围岩应力和位移

为优化 1803 工作面的切顶卸压参数, 基于工作面地质开采条件, 采用 MIDAS GTS NX 软件建立其二维数值模型, 见图 4, 对比分析切顶巷道围岩应力和位移的变化特性, 同时验证理论计算参数的合理性。

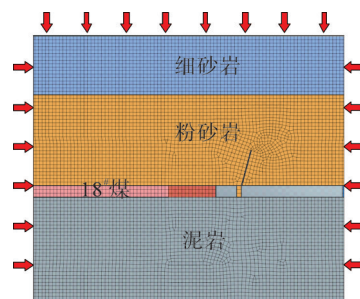


图 4 1803 工作面数值模型

Fig.4 numerical model of 1803 working face

建立长为 200 m, 高为 50 m 的工作面模拟模型, 采用 0.6 mm 的四面体单元对工作模型进行网格划分。材料本构模型与屈服准则均选用莫尔-库伦模型, 模型底部施加位移约束, 考虑工作面平均埋深 330 m, 在模型左右两侧施加水平载荷 5 MPa, 模型顶部施加垂直载荷 7 MPa。在留巷顶板下方 0.5 m 位置, 沿水平方向布置监测线, 监测线分别

向工作面煤帮侧和邻近采空区侧延伸 2.5 m 以获取巷道顶板围岩垂直应力和位移变化。

### 3.1 切顶卸压巷道顶板应力变化分析

1803 工作面回风巷未切顶和切顶后, 巷道围岩及填充体的应力分布见图 5, 巷道顶板垂直应力分布见图 6。

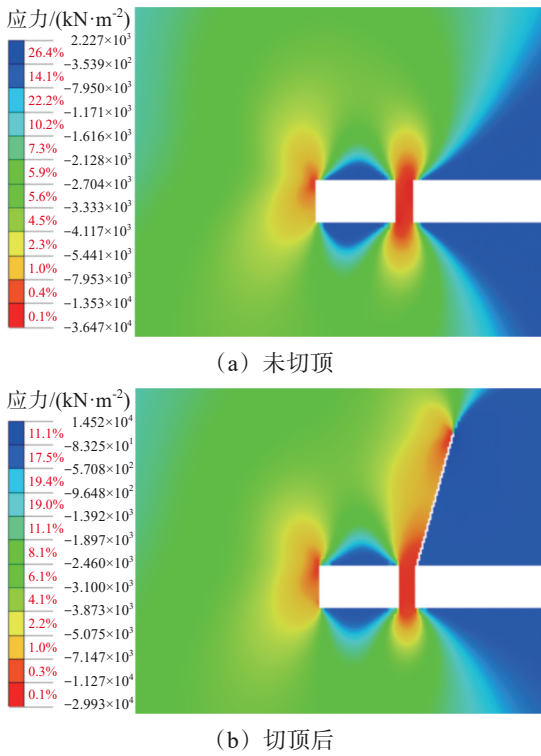


图 5 未切顶和切顶巷道围岩垂直应力分布

Fig.5 vertical stress distribution of surrounding rock in unroofed and roof-cutting roadways

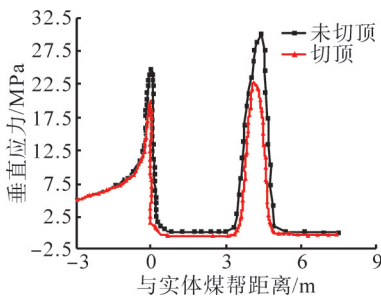


图 6 未切顶和切顶巷顶板垂直应力分布

Fig.6 vertical stress distribution of roadway roof under unroofed and roof-cutting conditions

由图 5、图 6 可知, 未切顶巷道实体煤帮侧的垂直应力峰值为 26.5 MPa, 采空区侧充填体的应力峰值为 30.0 MPa。切顶后巷道实体煤帮侧的应力峰值为 18.5 MPa, 相比未切顶时应力降低 30%, 采空区侧充填体的应力峰值为 21.5 MPa, 相比未切顶时降低 28.3%。切顶卸压后实体煤帮侧与采空区充填体应力峰值大幅下降, 巷道顶板

卸压效果明显。

### 3.2 切顶卸压巷道顶板位移变化分析

1803 工作面回风巷未切顶与切顶后巷道围岩及填充体的位移分布见图 7, 巷道顶板的垂直位移分布见图 8。

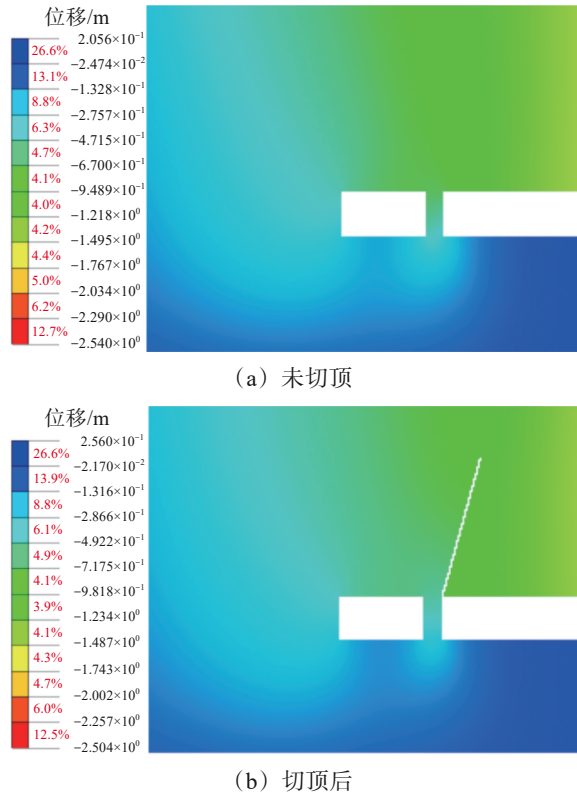


图 7 未切顶和切顶后巷道围岩垂直位移分布

Fig.7 vertical displacement distribution of roadway surrounding rock under unroofed and roof-cutting condition

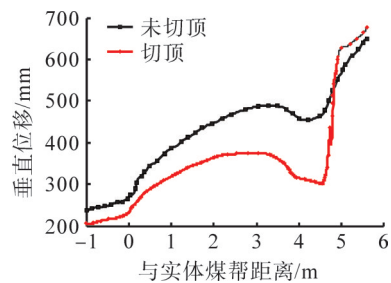


图 8 切顶和未切顶巷道顶板垂直位移分布

Fig.8 vertical displacement distribution of roadway roof under unroofed and roof-cutting conditions

由图 7、图 8 可知, 未切顶时实体煤帮侧垂直位移为 256 mm, 巷道顶板垂直位移最大为 493 mm, 采空区侧充填体垂直位移最大为 459 mm。切顶后, 实体煤帮侧垂直位移为 206 mm (降幅 19.5%), 巷道顶板垂直位移最大为 352 mm (降幅 28.6%), 采空区侧充填体垂直位移最大为 307 mm (降幅 33.1%)。

### 3.3 钻孔角度优化

设置模型的爆破切顶钻孔深度为 6.5 m、间距为 0.6 m, 钻孔偏角 (偏向采空区) 分别为 10°、15°、20°, 计算巷道围岩的垂直应力, 结果见表 2。当钻孔偏角为 15° 时, 巷道实体煤帮和采空区侧的垂直应力最小, 顶板垂直应力平均降低率最大, 为 29.2%, 卸压效果最显著, 因此确定最优钻孔偏角为 15°。

表 2 不同钻孔偏角的顶板垂直应力  
Tab.2 vertical stress of roof under different drilling deviation angles

钻孔角度/(°)	垂直应力/MPa		顶板应力降低率平均值/%
	实体煤帮侧	采空区侧	
10	20.1	23.8	25.5
15	18.5	21.5	29.2
20	19.8	22.9	24.4

## 4 工程实验

为检验上述切顶卸压留巷关键参数 (如切顶高度 6.5 m, 切顶角度 15°) 的适用性和有效性, 在东荣二矿的 1803 工作面回风巷开展爆破切顶工程作业, 实施补强支护, 同时对留巷围岩稳定性进行长期效果考察。

### 4.1 爆破切顶关键参数

#### (1) 聚能管和炸药

双向聚能管采用特制聚能阻燃防静电管材加工而成, 外径为 42 mm, 内径为 36 mm, 管长为

1 500 mm。聚能爆破采用三级煤矿乳化炸药, 药卷规格为  $\Phi 30 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ , 每根管装药 3 卷, 每孔使用 3 根聚能管, 爆破钻孔装药结构见图 9。

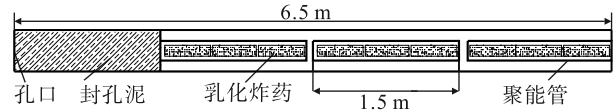


图 9 爆破孔装药结构

Fig.9 blasting hole charging structure

#### (2) 爆破孔布置

沿工作面推进方向, 超前工作面 20 m 以上, 依次打孔, 爆破孔直径 50 mm, 与铅垂方向夹角 15°, 偏向采空区, 孔深为 6.5 m, 孔距为 0.6 m, 孔口距下帮 500~700 mm。

#### (3) 封孔工艺和起爆方法

隔孔装药, 装药后封孔长度不小于 2.0 m, 采用炮泥、水泡泥封闭严实。依次采用导爆索进行爆破, 一次起爆 2~3 个爆破孔, 形成深度为 6.5 m 的切缝线。

### 4.2 切顶留巷支护方案

切顶过程和周期来压期间矿压会对留巷围岩稳定性造成一定影响。采空区覆岩垮落阶段, 矸石对挡矸支护产生冲击作用。因此, 需要在巷道原有支护基础上, 增设“U”型钢可缩立柱、单体液压支柱和粉煤灰丝袋填充等支护措施, 进行补强支护。随工作面推进, 按设计位置布置密集挡矸支护, 见图 10。

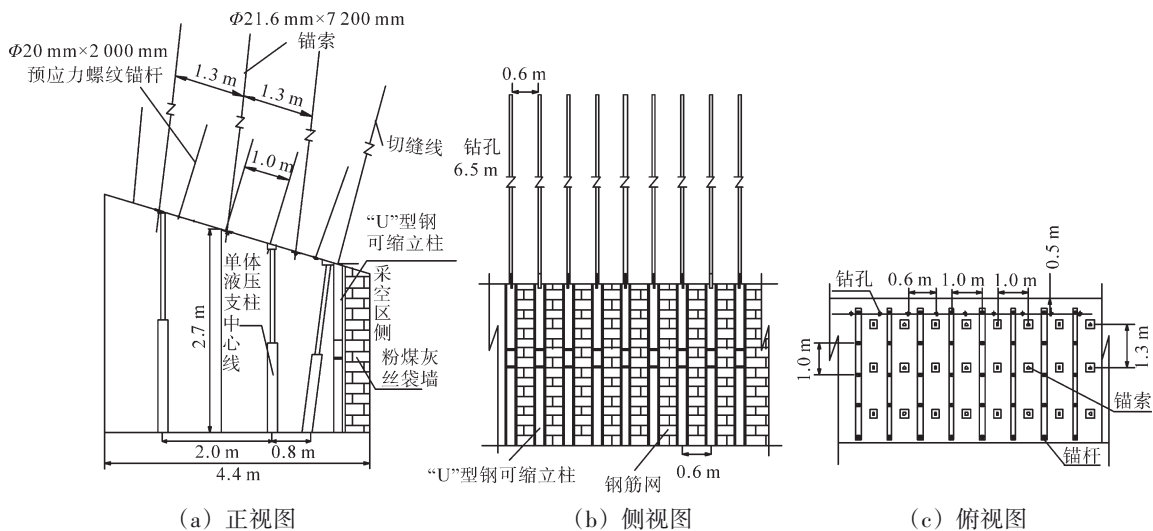


图 10 1803 工作面巷道支护及钻孔布置

Fig.10 roadway support and borehole layout of 1803 working face

采空区侧巷道顶板采用“锚-网-带”联合支护方式, 顶板采用 5 排  $\Phi 20 \text{ mm} \times 2.0 \text{ m}$  的长预应力螺纹钢锚杆联合“W”形钢带支护, 锚杆间排距为  $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ ; 设置 3 排 7.2 m 长锁绳锚索, 锚索间

排距为  $1.0 \text{ m} \times 1.3 \text{ m}$ , 与  $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$  铁托盘配合打设。巷道两帮采用“锚-皮带条-网”的联合支护方式, 上帮打设 3 排帮锚, 下帮打设 2 排帮锚, 间排距为  $1.2 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ , 全封闭挂网。

### 4.3 切顶留巷效果考察

在留巷段, 每间隔 30 m 布置一个测点, 共布置 8 个测点, 见图 11。在 1803 工作面回采期, 采用“十”字观测法观测顶底板及两帮移近量。为监测巷旁支架载荷, 每 10 部支架布置一条测线, 共布置 11 条测线, 分别布置在 2<sup>#</sup>、10<sup>#</sup>、20<sup>#</sup>、30<sup>#</sup>、40<sup>#</sup>、50<sup>#</sup>、60<sup>#</sup>、70<sup>#</sup>、80<sup>#</sup>、90<sup>#</sup>、100<sup>#</sup> 支架上。

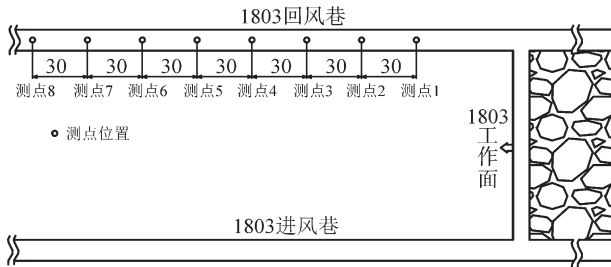


图 11 1803 工作面留巷监测点布置平面示意

Fig.11 layout plan of monitoring points for retained roadway in 1803 working face

监测结果显示, 回采期间留巷顶底板及两帮的变形以测点 5 最为显著, 其变形量见图 12。

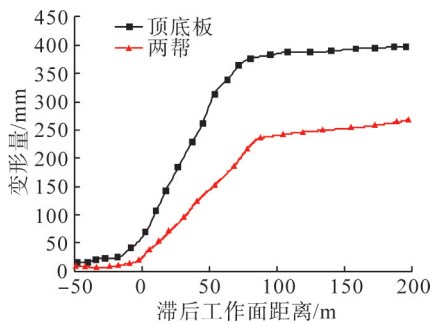


图 12 1803 工作面测点 5 的留巷变形监测曲线

Fig.12 deformation monitoring curve of measuring point 5 in 1803 working face

由图 12 可知, 在超前预裂阶段时, 巷道两帮及顶底板变形受预裂爆破的影响较弱, 位移均小于 20 mm。工作面开始回采后, 两帮和顶底板变形加剧, 由于采空区未完全垮落, 该阶段巷道变形速率增加, 顶底板移近量最大为 374 mm, 两帮收敛量最大为 235 mm。待采空区顶板垮落矸石逐渐压实后, 巷道形变速率趋于平稳, 整体进入相对稳定状态, 顶底板移近量平均稳定在 385 mm, 两帮收敛量平均稳定在 245 mm。巷旁支架最小高度为 1.4 m, 最大高度为 2.8 m, 初撑力为 31.5 MPa, 工作阻力为 36 MPa。在应力变化区域抽查 10 部巷旁支架, 待采空区矸石垮落压实、切顶侧矸石形成的巷帮相对稳定后, 留巷围岩应力进入稳定状态, 此时支架压力稳定维持在 37~40 MPa。

表 3 列出了未切顶和切顶条件下, 巷道围岩顶板垂直应力、顶底板移近量、两帮移近量和巷旁

支护应力关键参数指标。实施切顶卸压后, 巷道围岩应力和位移大幅降低, 保障了留巷的长期稳定性和复用性。

表 3 未切顶与切顶巷道围岩控制效果对比  
Tab.3 comparison of surrounding rock control effects between roof-cut roadway and uncut roadway

评价指标	顶板垂直	顶底板移近	两帮移近	巷旁支护
	应力/MPa	量/mm	量/mm	压力/MPa
未切顶巷道	28.3	493	275	45
切顶留巷	19.8	385	245	37~40
减小幅度	30%	22%	11%	>11%

## 5 结论

(1) 基于东荣二矿 1803 工作面地质开采条件和切顶卸压基本原理, 经理论计算确定了该工作面回风巷的切顶高度为 6 m, 采用爆破方法切顶时爆破孔的合理深度为 6.5 m。

(2) 根据数值模拟与对比分析可知, 切顶后巷道顶板垂直应力减幅可达 30%, 垂直位移降幅可达 33%, 当爆破切顶钻孔偏向采空区侧 15° 时切顶卸压效果最优。

(3) 东荣二矿 1803 工作面回风巷采用切顶卸压和协同支护措施后, 留巷顶底板移近量平均稳定在 385 mm, 两帮移近量平均稳定在 245 mm, 巷旁支架压力稳定在 37~40 MPa, 留巷效果良好。

### 参考文献(References):

- [1] 何满潮, 宋振骥, 王安, 等. 长壁开采切顶短壁梁理论及其 110 工法——第三次矿业科学技术变革[J]. 煤炭科技, 2017(1): 1-9, 13.  
HE Manchao, SONG Zhenqi, WANG An, et al. Theory of longwall mining by using roof cutting shortwall team and 110 method: the third mining science and technology reform[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2017(1): 1-9, 13.
- [2] 何满潮, 王亚军, 杨军, 等. 切顶卸压无煤柱自成巷开采与常规开采应力场分布特征对比分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 626-637.  
HE Manchao, WANG Yajun, YANG Jun, et al. Comparative analysis on stress field distributions in roof cutting non-pillar mining method and conventional mining method[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 626-637.
- [3] 何满潮, 马新根, 王炯, 等. 中厚煤层复合顶板切顶卸压自动成巷工作面矿压显现特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2425-2434.  
HE Manchao, MA Xingen, WANG Jiong, et al. Feature analysis of working face strata pressure with roof cutting pressure releasing in medium-thick seam and compound roof condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11): 2425-2434.
- [4] 何满潮, 高玉兵, 杨军, 等. 厚煤层快速回采切顶卸压无煤柱自成巷工程试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 254-264.  
HE Manchao, GAO Yubing, YANG Jun, et al. Engineering experimentation of gob-side entry retaining formed by roof cutting

- and pressure release in a thick-seam fast-extracted mining face[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(1): 254-264.
- [5] 何满潮, 郭鹏飞, 王炯, 等. 禾二矿浅埋破碎顶板切顶成巷试验研究[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.
- [6] 杨军, 王宏宇, 王亚军, 等. 切顶卸压无煤柱自成巷顶板断裂特征研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(6): 1137-1144.
- YANG Jun, WANG Hongyu, WANG Yajun, et al. Fracture characteristics of the roof in gob-side entry retaining with roof cutting and pressure release[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(6): 1137-1144.
- [7] 姜鹏飞, 张剑, 胡滨. 沿空留巷围岩受力变形特征及支护对策[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(1): 56-62.
- JIANG Pengfei, ZHANG Jian, HU Bin. Mechanical and deformation characteristics of gob-side entry retaining surrounding rock and support methods[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(1): 56-62.
- [8] 谢文兵, 笪建原, 冯光明. 综放沿空留巷围岩控制机理[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2004, 35(4): 657-661.
- XIE Wenbing, DA Jianyuan, FENG Guangming. Mechanism of controlling surrounding rock around gob-side entry retaining in top-coal caving mining face[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2004, 35(4): 657-661.
- [9] ZHANG Z Y, ZHANG N, SHIMADA H, et al. Optimization of hard roof structure over retained goaf-side gateroad by pre-split blasting technology[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 100: 330-337.
- [10] 马新根, 何满潮, 李先章, 等. 切顶卸压自动成巷覆岩变形机理及控制对策研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(3): 474-483.
- MA Xingen, HE Manchao, LI Xianzhang, et al. Deformation mechanism and control measures of overlying strata with gob-side entry retaining formed by roof cutting and pressure releasing[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(3): 474-483.
- [11] 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.
- [12] 高魁, 刘泽功, 刘健, 等. 深孔爆破在深井坚硬复合顶板沿空留巷强制放顶中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(8): 1588-1594.
- GAO Kui, LIU Zegong, LIU Jian, et al. Application of deep borehole blasting to gob-side entry retaining forced roof caving in hard and compound roof deep well[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(8): 1588-1594.
- [13] 杨战标, 赵万里, 丁坤朋, 等. 定向爆破技术在沿空留巷中的应用[J]. *煤炭工程*, 2020, 52(11): 52-56.
- YANG Zhanbiao, ZHAO Wanli, DING Kumpeng, et al. Application of directional blasting in gob-side entry retaining[J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(11): 52-56.
- [14] 张盛, 王小良, 赵文峰, 等. D型聚能爆破管在沿空留巷中应用研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(10): 175-182.
- ZHANG Sheng, WANG Xiaoliang, ZHAO Wenfeng, et al. Study on application of D-type energy gathering blasting tube on gob-side entry retaining[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(10): 175-182.
- [15] 田海光. 高水材料巷旁支护沿空留巷试验研究[J]. *煤炭技术*, 2017, 36(6): 105-107.
- TIAN Haiguang. Trial study on gob-side entry retaining with high-water material[J]. *Coal Technology*, 2017, 36(6): 105-107.
- [16] 衡多, 张九雨. 薄煤层下短距离泵送混凝土充填沿空留巷技术研究[J]. *煤炭工程*, 2018, 50(11): 10-13.
- HENG Duo, ZHANG Jiuyu. Research on short-distance pumped concrete used in gob-side entry retaining under thin coal seam[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(11): 10-13.
- [17] 曹其嘉, 陈勇, 郝胜鹏. 深部沿空留巷巷旁充填材料配比及工程应用[J]. *煤炭技术*, 2016, 35(8): 75-78.
- CAO Qijia, CHEN Yong, HAO Shengpeng. Prescription of roadside filling materials in deep gob-side entry retaining and engineering applications[J]. *Coal Technology*, 2016, 35(8): 75-78.
- [18] 张勇, 申付新, 孙晓明, 等. 三软煤层切顶成巷二次复用围岩应力及变形演化规律[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(2): 247-254.
- ZHANG Yong, SHEN Fuxin, SUN Xiaoming, et al. Stress and deformation law of surrounding rock in the second reuse of roadway formed by roof cutting in the "three soft" coal seam[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(2): 247-254.
- [19] LIU B M, CHEN D C, XU C T. Deep-hole blasting roof cutting technology for pressure relief in the final mining phase of the working face: a case study[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2025, 13: 1566968.
- [20] HUANG X W, GUO J, MIAO Y S, et al. A study on the roof-cutting and pressure releasing technology of roof blasting[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(17): 9968.
- [21] WANG C, YIN Z Q, MA Y K, et al. Optimization of hole spacing for cut-top blasting based on new hole-sealing technology[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1327074.
- [22] LI Y F, CHANG G F, HU D, et al. Application of pre-splitting blasting roof-cutting pressure relief technology for roadway protection under hard roof[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 25458.
- [23] 包龙生, 刘德罡, 齐阳, 等. 上覆采空区隧道注浆加固参数设计与应用[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2025, 44(4): 385-394.
- BAO Longsheng, LIU Degang, QI Yang, et al. Design and application of grouting reinforcement parameters for overlying goaf tunnel[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2025, 44(4): 385-394.