



# 倾斜煤层厚硬顶板切顶留巷关键参数优化研究

史卫平 李照迎 柳昌涛 吕艳伟 张浩然 杨涛

## 引用本文：

史卫平, 李照迎, 柳昌涛, 等. 倾斜煤层厚硬顶板切顶留巷关键参数优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 11–24.  
SHI Weiping, LI Zhaoying, LIU Changtao. Study on optimization of key parameters of thick hard roof cutting and retaining roadway in inclined coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 11–24.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-1627>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 中厚煤层切顶卸压无煤柱自成巷技术关键参数研究

Study on key parameters of self-formed roadway without coal pillar by roof cutting and pressure relief in medium and thick coal seam  
煤炭科学技术. 2022, 50(4): 117–123 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/741f9847-1745-4338-aa7a-fe7d9e8ab757>

#### 密集钻孔切顶卸压关键参数影响因素研究及应用

Research and application of influencing factors of key parameters of roof cutting and pressure relief by dense drilling  
煤炭科学技术. 2023, 51(12): 243–253 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0095>

#### 深井高应力切顶卸压沿空掘巷围岩控制技术

Surrounding rock control technology of gob-side entry driving in deep shaft with high stress roof cutting and pressure relief  
煤炭科学技术. 2020, 48(9): 173–179 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7f1e5bc1-b5b6-4d42-a6c1-9d46a6abe1aa>

#### 沿空留巷密集钻孔切顶机理及关键参数确定方法

Roof cutting mechanism of dense drilling in gob-side entry retaining and determination method of key parameters  
煤炭科学技术. 2024, 52(2): 23–33 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1760>

#### 复杂顶板条件下切顶留巷关键技术研究

Research on key technology of gob-side entry by roof cutting with complex roof condition  
煤炭科学技术. 2019(8) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/29ef830c-9a75-4a15-adae-6dede1923a87>

#### 塔山煤矿综采工作面切顶留巷技术

Technology of roof cutting and entry retaining in fully-mechanized working face of Tashan Coal Mine  
煤炭科学技术. 2019(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/85fa679a-ba9f-4600-8436-0e3d930e1aee>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

史卫平, 李照迎, 柳昌涛, 等. 倾斜煤层厚硬顶板切顶留巷关键参数优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 11–24.

SHI Weiping, LI Zhaoying, LIU Changtao, et al. Study on optimization of key parameters of thick hard roof cutting and retaining roadway in inclined coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 11–24.

## 倾斜煤层厚硬顶板切顶留巷关键参数优化研究

史卫平<sup>1</sup>, 李照迎<sup>1</sup>, 柳昌涛<sup>2</sup>, 吕艳伟<sup>2</sup>, 张浩然<sup>2</sup>, 杨 涛<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590;

3. 鄂托克前旗长城六号矿业有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 016200)

**摘要:** 为解决回采巷道倾斜厚硬顶板应力集中问题, 降低顶板覆岩突然垮落的冲击扰动风险及提高倾斜厚硬顶板切顶留巷围岩控制效果, 以长城六矿 1301N 运输巷切顶留巷为工程背景, 综合采用理论分析、数值模拟及现场监测的研究方法开展倾斜煤层厚硬顶板切顶留巷关键参数优化研究。首先, 基于岩石碎胀系数、砌体梁理论及现场地质资料, 推导计算了 1301N 运输巷切顶高度和切顶角度的理论最小值。其次, 为进一步验证并优化理论推导结果, 利用 PFC<sup>2D</sup> 数值软件建立了 1301N 工作面切顶留巷模型, 采用控制变量法分析了不同切顶高度和切顶角度下留巷顶板应力、位移及组构张量响应特征。分析结果表明: 切顶高度与卸压效果之间存在底数大于 1 的对数增长关系, 即随着切顶高度增加, 卸压效果逐渐增强但其增长幅度逐渐减小; 切顶角度与卸压效果之间存在“S”型增长关系, 即随着切顶高度增加, 卸压效果先增强后减弱。卸压参数与卸压效果之间的变化规律揭示了切顶高度选择存在最适值, 切顶角度选择存在最优解。综合理论分析、经济收益及数值模拟结果, 确定长城六矿 1301N 运输巷倾斜厚硬顶板切顶留巷过程中最适切顶高度为 13 m, 最优切顶角度为 10°。现场监测获得该切顶参数下围岩控制效果较好, 留巷围岩变形量较小, 可有效满足下一工作面开采需求, 验证了优化切顶参数的有效性, 为类似地质条件切顶留巷参数的选取提供理论依据和实践参考。

**关键词:** 沿空留巷; 切顶卸压; 倾斜煤层; 厚硬顶板; 切顶高度; 切顶角度

**中图分类号:** TD322    **文献标志码:** A    **文章编号:** 0253-2336(2024)05-0011-14

## Study on optimization of key parameters of thick hard roof cutting and retaining roadway in inclined coal seam

SHI Weiping<sup>1</sup>, LI Zhaoying<sup>1</sup>, LIU Changtao<sup>2</sup>, LYU Yanwei<sup>2</sup>, ZHANG Haoran<sup>2</sup>, YANG Tao<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. School of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Otog Qianqi Great Wall No.6 Mining Co., Ltd., Erdos 016200, China)

**Abstract:** To address stress concentration in mining roadways, particularly in the inclined, thick, and hard roof, and lessen the impact of sudden overlying strata collapse, a comprehensive study was conducted on the 1301N transport roadway in No.6 Great Wall Mine. The research utilized various methods such as theoretical analysis, numerical simulation, and field monitoring to optimize the key parameters of roof cutting and roadway retaining, leading to improved control of the surrounding rock and reduced risk of impact disturbance. Firstly, based on field geological data, the theoretical minimum roof-cutting height and angle of the 1301N transportation gateway were calculated using the coefficient of rock crushing and swelling and masonry beam theory. Furthermore, in order to confirm and enhance the accuracy of the theoretical findings, we utilized PFC<sup>2D</sup> numerical software to create a model of the roof-cutting retaining roadway situated in the No.1301N working face. By employing the control variable approach, we studied the response characteristics of roof stress, displacement,

收稿日期: 2023-11-06    责任编辑: 朱恩光    DOI: 10.12438/cst.2023-1627

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (52104136); 国家自然科学基金面上资助项目 (52274218)

作者简介: 史卫平(1984—), 女, 山东莒县人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: [swp1128@163.com](mailto:swp1128@163.com)

and surrounding rock fabric tensor of the retaining roadway at various roof-cutting heights and angles. The analysis results indicate a logarithmic relationship between cutting height and pressure relief effect. The effect increases with height, but growth amplitude decreases. There is an “S” growth relationship between the roof-cutting angle and the pressure relief effect. The pressure relief effect first increases and then decreases with the increase of the roof-cutting height. The change law between pressure relief parameters and pressure relief effect reveals that there is an optimal value for the selection of the roof-cutting height and an optimal solution for the selection of the roof-cutting angle. Based on the results of theoretical analysis and numerical simulation, it is determined that the most suitable roof-cutting height is 13 m, and the optimal roof-cutting angle is 10°. The field monitoring shows that the control effect of the surrounding rock under the roof-cutting parameters is good, and the deformation of the surrounding rock of the retaining roadway is small. It can effectively meet the mining demand of the next working face and verifies the effectiveness of optimizing the roof-cutting parameters. This provides a theoretical basis and practical reference for the selection of the parameters of roof cutting and retaining roadway under similar geological conditions.

**Key words:** gob-side entry retaining; roof cutting and pressure relief; inclined coal seams; thick and hard roof; roof-cutting height; roof-cutting angle

## 0 引言

沿空留巷是无煤柱护巷技术的一部分,相比于留煤柱护巷方式,可有效提高资源采出率,缓解接续紧张难题,经济效益优势明显<sup>[1]</sup>。同时,沿空留巷对于围岩稳定性要求更高,为保证巷道能够完整成巷,且满足下一工作面需求,往往需要切顶卸压处理。切顶卸压技术早在20世纪80年代就开始普及和应用,当采空区顶板较硬,冒落性较差或容易出现高应力集中,工人即采用切顶卸压措施解决此类安全隐患。为提高切顶卸压效果,诸多学者对切顶卸压关键参数进行了大量研究并取得丰硕成果<sup>[2-5]</sup>。

20世纪80—90年代,钱鸣高院士对岩层运移规律<sup>[6-7]</sup>进行了大量研究,提出了采场上覆岩层活动规律和支架-围岩系统控制为一体的砌体梁理论体系,其中砌体梁失稳条件“S-R”<sup>[8-9]</sup>为切顶卸压提供理论基础。此后,何满潮院士<sup>[10]</sup>基于覆岩运动规律研究,探究了沿空留巷顶板预裂卸压响应机制,并结合自设模型提出了巷旁支护阻力计算公式,丰富了切顶卸压沿空留巷围岩控制体系;此外,何满潮院士<sup>[11]</sup>进一步确定了深部中厚煤层沿空留巷切顶卸压关键参数,设计了新型的挡矸结构,拓宽了沿空留巷技术的应用范围。陈上元等<sup>[12-13]</sup>研究了深部沿空切顶巷道围岩应力演化规律及控制技术,再次拓宽了切顶卸压沿空留巷技术的适用范围,优化了深部复杂地质条件下的围岩控制对策;另一方面,陈上元等<sup>[14]</sup>基于岩石碎胀自承特性和围岩结构“S-R”稳定原理提出了水平煤层切顶高度和切顶角度的计算方法。刘红威<sup>[15]</sup>通过理论分析和数值模拟总结了切顶成巷无煤柱开采条件下采空区覆岩破坏与裂隙发育特征。

汤建泉等<sup>[16]</sup>结合工程实际,通过理论计算设计出了合理的切缝高度范围和角度范围,利用数值模

拟进一步优化了切缝高度和切缝角度,并通过现场试验得出合理钻孔间距,为相关工程实践提供依据。孙晓明等<sup>[17]</sup>通过理论分析,确定切顶高度、预裂切顶角度和爆破钻孔间距为切顶留巷关键参数。迟宝锁等<sup>[18]</sup>以恒阻大变形锚索为关键支护方式,对比了不同方案下的顶板下沉规律,确定了切顶留巷顶板有效支护参数。马资敏等<sup>[19]</sup>探究了大理深复杂地质条件下的切顶留巷技术,研究内容包括深部切顶留巷围岩在空间和时间上的变形规律及机理,并针对顶板不同运移阶段提出了相对应的围岩支护措施,有效保证了深部切顶留巷的完整性。袁超峰等<sup>[20]</sup>研究了薄直接顶大采高综采工作面的切顶留巷技术,其不仅分析了顶板未贯穿面拉应力与切顶参数之间的关系,而且总结出切顶参数对留巷围岩和支护体应力分布的影响规律,最终确定了此类工况下的合理切顶留巷参数。王炯针等<sup>[21]</sup>对塔山煤矿三采区采掘接替紧张问题,采用切顶留巷技术在该矿区进行切顶留巷试验研究,详细介绍了切顶留巷原理和工艺流程,为后续切顶留巷研究提供参考。李耀晖等<sup>[22]</sup>探究了不同切顶高度顶板岩梁的断裂及运移规律,对比分析了不同切顶高度顶板矿压显现特征,针对性的提出了集“高强切顶锚索补强支护、爆破预裂卸压、单体支柱支撑、插底插顶防失稳可缩U型钢+金属网挡矸”于一体的留巷综合支护措施。

随着沿空留巷切顶卸压技术的日趋成熟,技术适用范围不断扩展。张盛等<sup>[23]</sup>根据以往研究统计发现:切顶高度获取主要取决于岩体的碎胀系数,切顶角度选择往往要综合考虑施工难度和经济效益。王方田等<sup>[24]</sup>综合运用理论分析、数值模拟及现场监测等手段,针对留巷围岩控制问题提出了锚索强化技术,实现了工作面超前段围岩稳定性控制,优化了围岩控制措施。郑立军等<sup>[25]</sup>探究了大理深、高应力、

坚硬顶板等特殊地质条件下的综放工作面切顶卸压沿空留巷开采技术,指出可行的爆破技术和合理的切顶卸压高度在自成巷中的重要性。孙广建等<sup>[26]</sup>研究了高应力大松动圈下自成巷难题,确立了软弱厚泥岩顶板条件巷道力学变形机制,并基于此改善了此类地质条件切顶留巷参数。

综上所述,众多学者针对不同地质条件基于理论分析、数值模拟及现场监测等方法因地制宜确定出切顶留巷参数<sup>[27-28]</sup>。鉴于倾斜厚硬基本顶切顶留巷研究较少的现状,笔者基于理论分析、数值模拟和现场监测综合方法开展该特殊地质条件切顶留巷关键参数优化研究。根据岩石碎胀特性和岩梁失稳断裂条件,计算确定了倾斜煤层最低切顶高度和最小切顶角度;通过数值模拟对比分析了留巷上方应力集中特征、顶板下沉规律及组构张量响应特征,确定了倾斜厚硬基本顶的最优切顶高度和切顶角度,通过现场应用验证了相关参数的合理性,为类似条件切顶留巷参数的选取提供理论依据和实践参考。

## 1 倾斜岩层沿空留巷工程概况

### 1.1 现场地质概况

长城六矿1301N工作面位于一采区南翼,工作面距地表平均垂深380.3 m,工作面平均走向长度为889 m,平均倾斜长度为183 m。主采3煤,煤层平均厚度4.5 m,煤层倾角21°~25°,平均22°,工作面附近钻孔柱状如图1所示。

层厚/m	埋深/m	柱状 1:500	岩性及岩性描述
7.40	348.64		粉砂岩;灰色,粉砂状结构~粉细砂状结构,裂隙发育,泥质半充填
8.50	356.04		中粗砂岩;浅灰~灰白色,泥质胶结,正粒序,底部含砾,分选差,中下部含泥岩包体,夹煤条纹,薄层粉砂岩,层面含炭屑
12.00	364.54		粉砂岩、泥岩;灰白色,中细砂粒状结构,厚层状构造,主要成分为石英,层面白云母富集,含有泥质条带
3.76	376.54		炭质泥岩;深灰色,灰黑色,粉砂泥质结构,厚层状构造,主要成分为泥质物,粉砂占25%左右
4.50	380.30		3煤;黑色,玻璃光泽,褐黑色条痕,条带结构,成分:亮煤为主,次为暗煤,为半亮型煤
8.12	384.80		粉砂岩;砂岩,灰色、深灰色,含少量植物化石碎片,夹薄层细砂岩条带,局部有水平层状层理

图1 煤层及顶底板钻孔柱状图

Fig.1 Borehole histogram of coal seam and roof and floor

为缓解采掘接续紧张难题,计划在1301N运输巷采用沿空留巷技术,使该巷道作为下一工作面的

回风巷。煤层直接顶为炭质泥岩,强度较低,随采随垮;直接顶上方为强度较高的坚硬基本顶岩层,其岩性分别为粉砂岩、中粗砂岩和粉砂岩,层厚分别为12.00、8.50、7.40 m,其单轴矿压强度分别达53.30、40.92、53.30 MPa;煤层下方为粉砂岩,厚度8.12 m,各岩层相关参数见表1。

表1 煤层顶底板岩层参数

Table 1 Parameter of roof and floor strata in coal seam

岩层	岩性	层厚/m	抗压强度/MPa	内摩擦角/(°)	坚硬程度
基本顶3	粉砂岩	7.40	53.30	47	较坚硬
基本顶2	中粗砂岩	8.50	40.92	45	较坚硬
基本顶1	粉砂岩	12.00	53.30	47	较坚硬
直接顶	炭质泥岩	3.76	26.14	32	较软弱
3煤	半亮型煤	4.50	12.67	30	软、易碎
底板	粉砂岩	8.12	53.30	47	较坚硬

### 1.2 倾斜采空区覆岩垮落特征分析

1301N工作面未切顶前微震监测结果如图2所示。监测数据显示,微震事件在工作面采空区和区段平巷、两侧均有分布,但大能量事件多集中于运输巷外侧区域,即工作面下方的实体煤区域,确定该区域为上覆基本顶岩梁断裂区域。

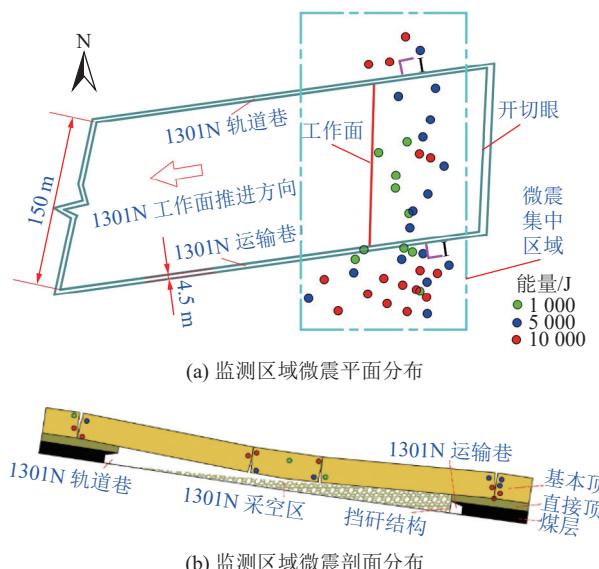


图2 切顶前工作面微震监测统计

Fig.2 Statistical chart of microseismic monitoring in working face before roof cutting

### 1.3 原有切顶参数下巷道变形规律分析

1301N工作面原始切顶参数为切顶高度10 m、切顶角度28°,如图3所示。回采过程中在留巷内布

置收敛计,监测工作面后方100 m至工作面前方200 m巷道变形规律。收敛计布置如图4所示,图中测点A、B监测巷道顶底板移近量,C、D监测巷道两帮移近量,收敛计在巷道走向方向间距为50 m。巷道60 d累计变形量如图5所示,图5中顶底板移近量和两帮移近量均为两测点平均值。

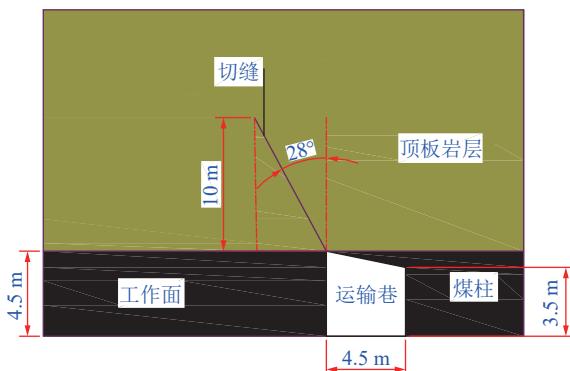


图3 原有切顶参数示意

Fig.3 Schematic diagram of original roof-cutting parameters

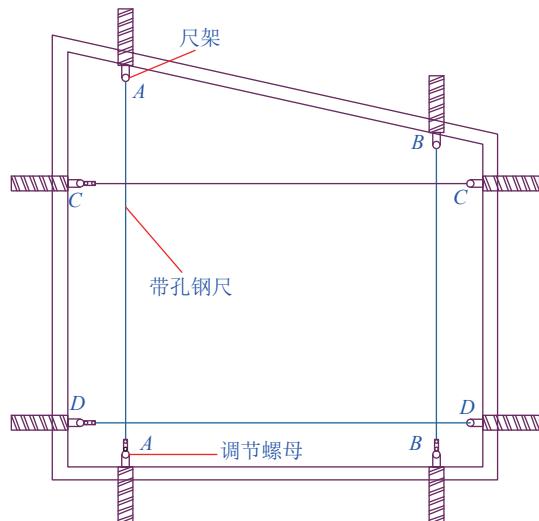


图4 巷道变形收敛计布置示意

Fig.4 Schematic diagram of layout of roadway deformation convergence meter

通过监测数据可知,区段平巷变形区域主要集中于工作面后70 m至工作面前100 m范围。可以看出,原始参数切顶留巷中,巷道变形量较大,监测范围内,其顶底板变形量和两帮移近量分别达886.9、745.9 mm,后续需要进一步返修采可保障留巷的稳定。鉴于此,为提高留巷的稳定性,在支护方式不变的前提下,有必要对该倾斜坚硬顶板岩层切顶卸压参数进行优化,提高留巷的稳定性,降低留巷变形量,为下一工作面回采工作顺利开展提供保障。

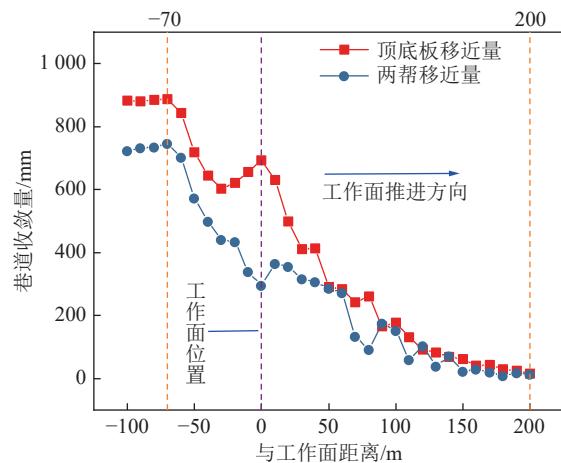


图5 原有切顶参数下区段平巷变形演化趋势  
Fig.5 Trend of deformation evolution of gateway under original roof-cutting parameters

## 2 倾斜岩层切顶参数理论分析

### 2.1 倾斜岩层切顶高度理论分析

为计算倾斜岩层切顶高度,建立覆岩岩体垮落力学模型,如图6所示。

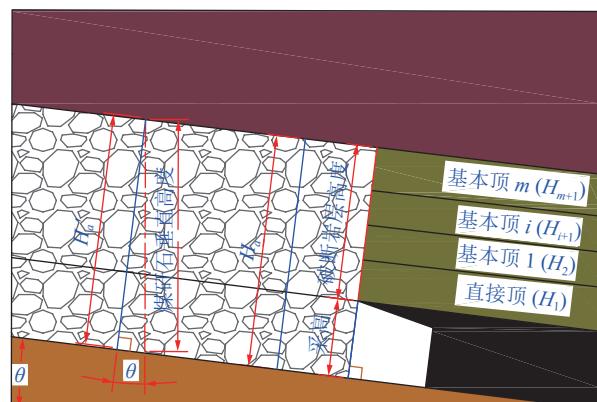


图6 煤矸石垂直高度、破断岩层高度及采高关系  
Fig.6 Relationship of vertical height of coal gangue, height of fractured rock, and mining height

假设切顶到基本顶 $m$ 层,则根据各岩层厚度确定采高及破断岩层厚度 $H_a$ 为

$$H_a = M + H_1 + H_2 + \dots + H_m + H_{m+1} \quad (1)$$

同时,由矸石的垮落高度和其碎胀系数可知,采高及破断岩层厚度 $H'_a$ 也可表示为

$$H'_a = (k_1 H_1 + k_2 H_2 + \dots + k_m H_m + k_{m+1} H_{m+1} + \Delta) \cos \theta \quad (2)$$

其中, $H_1, H_2, \dots, H_m, H_{m+1}$ 分别为直接顶和基本顶1、2、…、 $m$ 层岩层的平均厚度,m; $k_1, k_2, \dots, k_m, k_{m+1}$ 分别为直接顶和基本顶1、2、…、 $m$ 层岩层碎胀系数; $\theta$ 为煤层倾角; $\Delta$ 为垮落矸石与顶板间距,m;

越小, 垮落矸石与顶板接触越好。

当 $\Delta=0$ 时, 垮落岩层与顶板相接触, 其将对顶板产生支撑力, 有效缓解上覆岩层作用于留巷顶板的压力, 有利于留巷的维护。在保障 $\Delta=0$ 的前提下, 切顶高度越高, 其对顶板的支撑效果越好, 则最小的切顶高度即为 $\Delta=0$ 时的切顶高度。

当 $\Delta=0$ 时, 如图6所示,  $H_a=H'_a$ , 结合式(1)和式(2), 则

$$H_a = \frac{M}{K_p - 1} \quad (3)$$

其中,

$$K_p = \frac{k_1 H_1 + k_2 H_2 + \dots + k_m H_m}{H_1 + H_2 + \dots + H_m} \cos \theta \quad (4)$$

结合图1可知, 工作面直接顶为炭质泥岩, 岩层平均厚度为3.76 m, 现场实测确定该岩层碎胀系数为 $k_1=1.38$ 。基本顶1为粉砂岩, 现场测得其碎胀系数为 $k_2=1.35$ 。基本顶1岩层平均厚度为12 m, 工作面采高 $M=4.5$  m, 倾斜角度 $\theta$ 为22°, 将相关数据代入式(4)得:  $K_p \approx 1.26$ , 结合式(3)得,  $H_a=17.31$  m。假设切顶高度为 $h$ , 则 $h=H_a-M$ , 故1301N工作面最低切顶高度为12.81 m。

## 2.2 倾斜岩层切顶角度理论分析

为确定切顶角度, 建立倾斜岩梁断裂力学模型如图7a所示, 其中,  $P_1$ 为岩块B的自重应力, 岩梁倾斜角度为 $\theta$ , 截面ab既是受力分析面, 又是切缝面。根据钱鸣高院士研究结果<sup>[8-9]</sup>, 水平岩块破断面的力学条件为

$$\begin{cases} T = \frac{2P_1}{2i - \sin \theta_1} \\ R = \frac{4i - 3\sin \theta_1}{2(2i - \sin \theta_1)} P_1 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $T$ 为断面处两岩块间的法向推力, kN;  $R$ 为破断面处两岩块间的切向剪力, kN;  $i=h/l$ , 表示断裂度,  $h$ 、 $l$ 、 $\theta_1$ 分别为岩块B的厚度、长度及回转角度。

如图7b、图7c所示, 倾斜岩层与水平岩层受力正截面不同, 受倾斜角度影响切顶角度计算起始截面顺时针旋转。

假设切顶角度为 $\alpha$ , 则倾斜岩层的截面受力分析角度应为

$$\alpha' = \alpha + \theta \quad (6)$$

基于钱鸣高院士等相关研究成果, 切缝面岩块断裂滑落的极限条件<sup>[8, 14]</sup>为

$$(T \cos \alpha' - R \sin \alpha') \tan \varphi \leq R \cos \alpha' + T \sin \alpha' \quad (7)$$

式(5)、式(6)代入式(7)得:

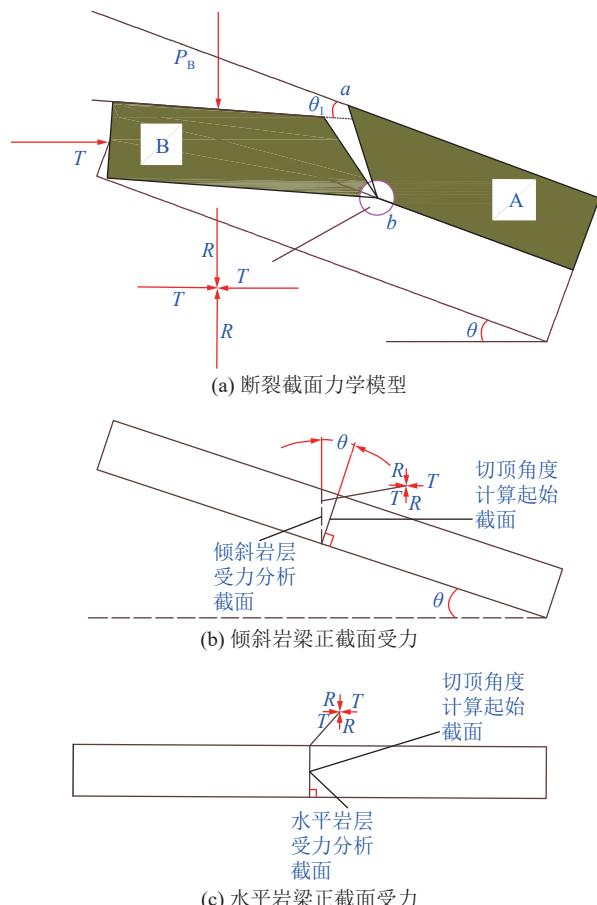


图7 倾斜岩块失稳分析力学模型

Fig.7 Mechanical model for instability analysis of inclined rock mass

$$\alpha' \geq \varphi - \arctan \left( i - \frac{3}{4} \sin \theta_1 \right) \quad (8)$$

式中:  $\theta$ 为岩层倾角;  $\theta_1$ 为岩块B的回转角度。实测获得现场周期来压步距为8.6 m, 则基本顶岩块断裂平均长度为8.6 m; 受岩层倾角影响,  $\theta_1$ 取值范围为0°~112°; 根据前文计算获得切顶高度 $h=12.81$  m。结合表1数据, 顶板平均内摩擦角取46.5°。将以上数据代入式(8), 计算获得 $\alpha$ 最小值为10.0°。

## 3 倾斜岩层切顶参数优化研究

通过上述理论分析, 确定1301N运输巷最低切顶高度和最小切顶角度。本节将根据1301N工作面地质条件, 结合理论分析结果, 模拟确定该特殊地质条件最优切顶高度和切顶角度。

### 3.1 模型建立与模拟方案设计

1) 数值模型的建立。根据1301N工作面煤岩层地质特征, 建立二维数值模型, 模型长×宽为280 m×150 m。为有效模拟煤岩层倾斜特征, 采用PFC软件内置命令划分倾斜岩层。1301N运输巷尺寸为4.5 m×3.5 m, 工作面开挖尺寸为150 m×4.5 m, 如图8所示。

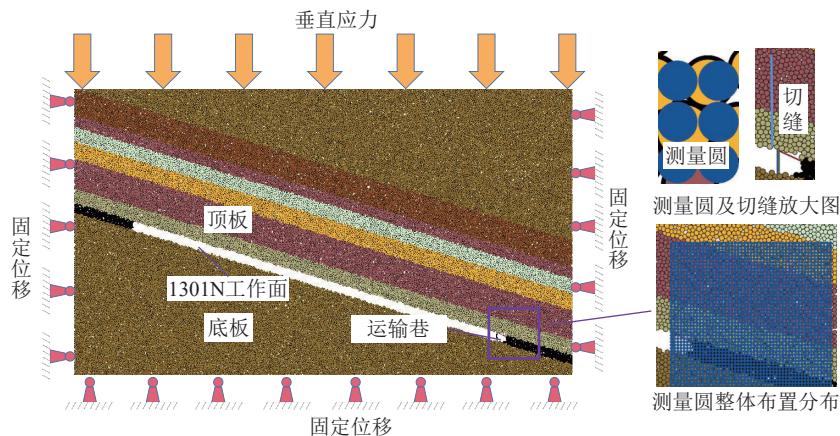


图 8 倾斜岩层数值模型  
Fig.8 Numerical model of inclined strata

模型上方为建立岩层施加补偿载荷。模型上边界施加垂直应力 5.75 MPa, 左右边界和下部边界施加位移约束。煤岩层采用 PB 模型, 切顶预制裂隙采用光滑节理模型, 切缝放大如图 8 所示。在巷道顶板范围使用 PFC 内置监测命令设置应力监测点, 因其测点形状为圆形, 故简称其为应力测量圆, 监测区域放大图如图 8 所示。

2) 模拟方案设计。为有效分析切顶高度和切顶角度对区段平巷顶板卸压效果的影响, 基于理论计算结果和相关研究<sup>[14,29]</sup>, 确定模拟参数选值和对比组数, 采用控制变量法, 建立切顶参数对照设计方案, 具体见表 2。具体内容为: 先固定切顶角度为 10°, 以切顶高度为变量, 设置 6 组对照试验, 各组的切顶高度分别为 0、9、11、13、15、18 m(1~6 组); 其次, 固定切顶高度值为第 1 组最优值, 以切顶角度为变量, 设置 5 组对照实验, 各组切顶角度分别为 0°、5°、10°、15°、20°(1~5 组)。

### 3.2 模型细观参数标定

根据 1301N 工作面地质资料, 利用 PFC 数值模拟软件, 采用线性模型和平行粘结模型分别建立高径比为 2:1 的标准煤岩试样单轴压缩和单轴拉伸数值模型。通过试错法得到与岩层试验参数相吻合的颗粒参数和界面参数, 图 9 为模拟获得的应力-应变曲线与试验参数对比图。

由巷道围岩宏观参数校核得到的数值模型细观颗粒参数和细观接触界面参数见表 2 和表 3。

### 3.3 切顶高度影响规律模拟分析

1) 切顶高度对顶板应力的影响规律分析。为分析切顶高度对顶板应力的影响规律, 取监测区域平均应力进行统计, 获得应力-时步曲线如图 10 所示。根据图中曲线分布特征, 其应力变化情况可划分为 3 个

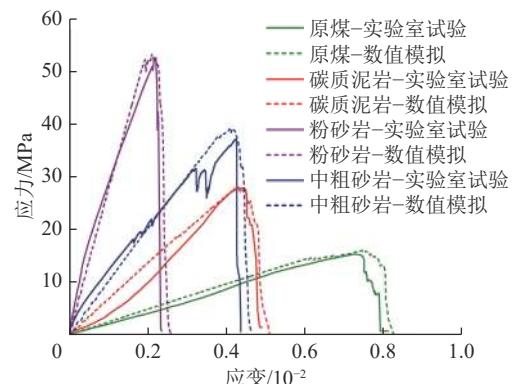


图 9 数值模拟与室内试验应力-应变校核  
Fig.9 Stress-strain check chart of numerical simulation and indoor test

阶段: 应力攀升阶段、应力下降阶段和应力稳定阶段。

切顶高度分别为 0、9、11、13、15、18 m 时, 围岩切顶稳定后顶板应力分别为 19.20、11.50、9.80、6.84、6.28、5.96 MPa, 切顶高度与顶板应力稳定值演化关系如图 11 所示。由此可见, ① 切顶高度越高, 顶板应力下降越明显, 卸压效果越好; ② 切顶高度达到某一高度后, 切顶高度对顶板卸压效果减小, 当切顶高度为 13、15、18 m 时, 应力动态稳定值较接近;

表 2 巷道围岩数值模型细观参数  
Table 2 Meso-particle parameters of the particle flow model of roadway surrounding rock

线性模型	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	法向切向刚度比	摩擦因数
粉砂岩	2 618	25.4	1.25	0.46
中粗砂岩	2 559	9.61	1.25	0.50
粉砂岩	2 618	25.4	1.25	0.46
碳质泥岩	2 650	6.58	1.25	0.30
煤层	1 376	2.12	1.25	0.40
粉砂岩	2 618	25.4	1.25	0.46

表3 巷道围岩数值模型细观接触界面参数

Table 3 Meso-interface contact parameters of particle flow model of roadway surrounding rock

平行黏结模型	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
粉砂岩	25.4	4.1	1.7	47
中粗砂岩	9.61	3.3	1.6	45
粉砂岩	25.4	4.1	1.7	47
碳质泥岩	6.58	2.5	1.3	32
煤层	2.12	1.3	0.6	30
粉砂岩	25.4	4.1	1.7	47

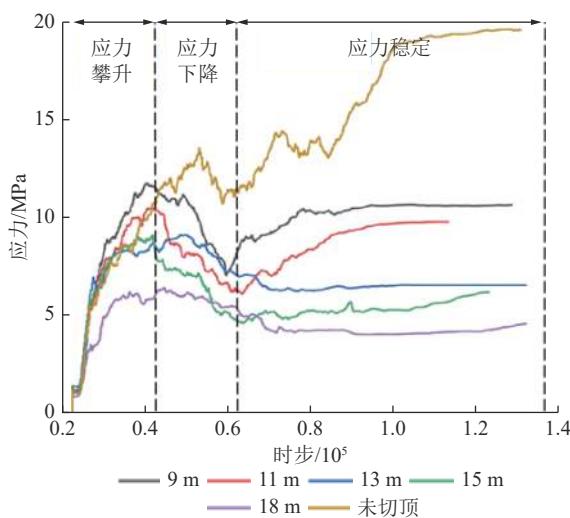


图10 顶板时步-应力演化规律

Fig.10 Time-step-stress evolution law diagram of roof

③未切顶模型顶板在应力各个监测时期均有增长阶段,其稳定值与各切顶后稳定值差距较大。因此,综合考虑切顶高度与顶板应力间关系及切顶性价比可得,该巷道切顶高度宜选13 m。

2) 切顶高度对顶板运移的影响规律分析。工作

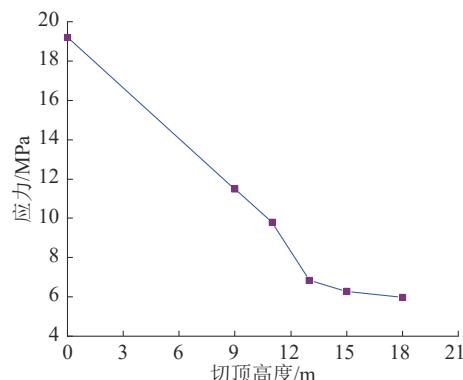


图11 切顶后顶板应力演化规律

Fig.11 Diagram of stress evolution of the roof after roof cutting

面推进后,各切顶高度下工作面上方覆岩垮落状态如图12所示。

可以看出,各模型覆岩垮落轮廓均呈梯形。观察梯形垮落云图可以看出,随着切顶高度增加,梯形底角和高度先增加后减小,梯形腰长先减小后增加。

基于云图尺寸代入面积计算公式可知,梯形面积先增加后减小,如图13所示。可以看出,在一定范围内,随着切顶高度增加,运输巷左上方岩层逐渐垮落且向采空区右下方移动,顶板上方覆岩减少,具体如图12a—图12d所示;当切顶高度超过某一高度时,尽管垮落图形两侧“台阶”轮廓逐渐平滑,但梯形倾角逐渐减小,垮落范围减少,切顶效果减弱,具体如图12d—图12f所示。综上所述,从覆岩垮落效果来看,切顶高度13 m时切顶效果最好。

3) 切顶高度对巷道顶板下沉的影响规律分析。为能直观反映不同切顶高度对巷道顶板下沉量的影响规律,取各切顶高度工作面倾向顶板下沉量进行对比分析,如图14所示,切顶后顶板最大下沉量统计见表4。

根据表4和图14可知:①在进风巷左帮左侧随

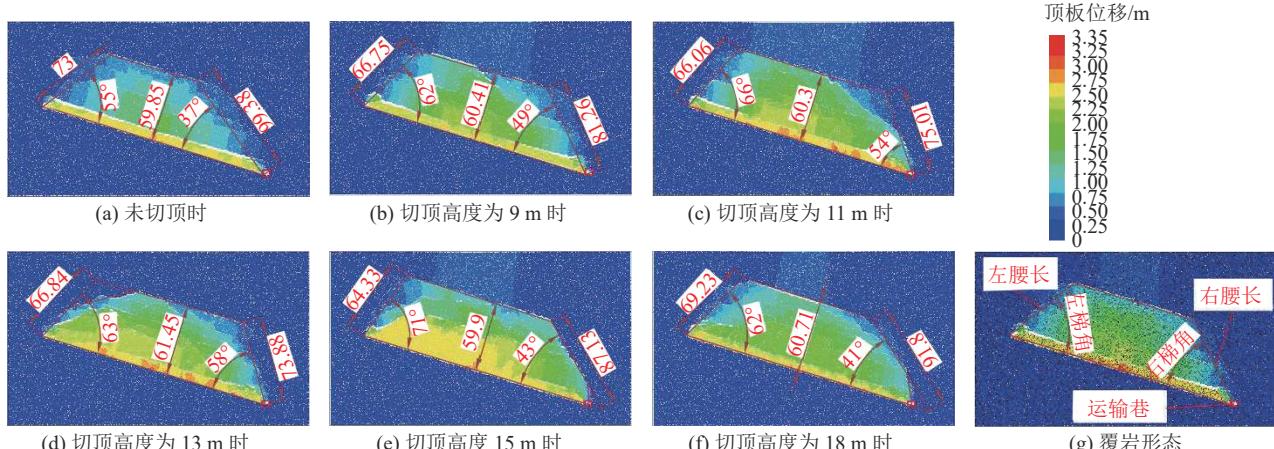


图12 不同切顶高度的覆岩位移

Fig.12 Displacement nephogram of overlying strata with different roof-cutting heights

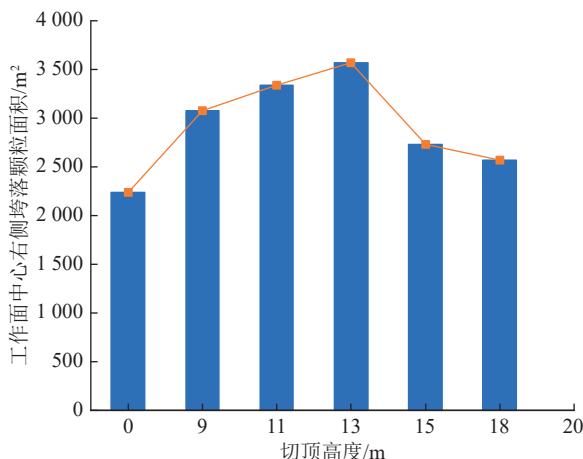


图 13 工作面中心线右侧垮落颗粒面积统计

Fig.13 Statistical histogram of caving particle area on right side of working face centerline

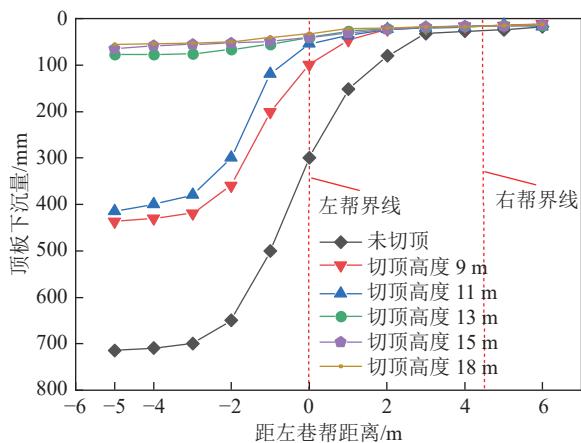


图 14 不同切顶高度顶板下沉规律

Fig.14 Curve of roof settlement with different roof-cutting heights

表 4 不同切顶高度下顶板最大下沉量统计

Table 4 Statistical of maximum subsidence of roof under different cutting heights

切顶高度/m	顶板最大下沉量/mm	切顶后位移改变量/mm	位移降低比例/%
0	712	0	0
9	425	287	40.3
11	408	304	42.7
13	85	627	88.1
15	84	628	88.2
18	80	632	88.8

着距离增加,巷道顶板下沉量先急剧增加后趋于平缓;随着切顶高度增加顶板下沉量曲线上移,整体顶底板收敛量减小。②在巷道左帮右侧,随着距离增加顶板下沉量减少;随着切顶高度增加,各测点顶板下沉量逐渐降低;超过一定高度后,各切顶高度下顶

板收敛量接近,当切顶高度为 13~18 m 时,顶板下沉量基本稳定在 100 mm 以内。

综合考虑切顶高度对留巷顶板应力和位移的影响规律,结合切顶实施难度,确定最优切顶高度为 13 m。

4) 切顶高度对围岩组构张量的影响规律分析。为有效描述围岩在不同切顶高度下形变特征,定量分析围岩细观力学各向异性变化,引入组构张量概念<sup>[27]</sup>。该量可以表征围岩组成介质的形变数值(偏应力数值)和形变方向(主应力方向)。

组构张量监测需要在监测区域布置数量足够多的测量圆,使其能够反映组构变化,且监测命令能够记录测点的偏应力数值和方向,进行统一表征。为实现这监测功能,基于 PFC 张量属性窗口 (UDtensor),改变测量圆形状特征,监测主应力方向,如图 15 中“十字”符号,其长轴方向为最大主应力方向,短轴方向为最小主应力方向;基于 Second Inv. of Deviatoric (偏应力张量第二不变量,  $J_2$ ) 窗口,监测偏应力数值<sup>[28]</sup>。图 15 中,十字颜色由蓝向红变化,表示为色阶上升,由红向蓝变化表示为色阶下降。

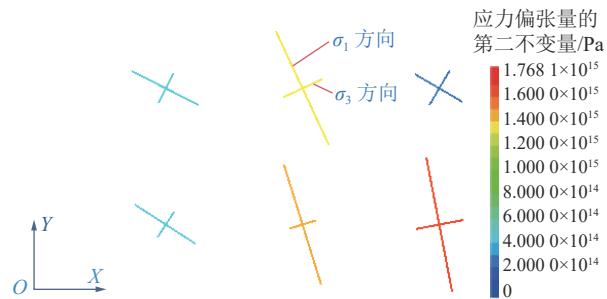


图 15 UDtensor 窗口“十字”测量圆特征

Fig.15 UDtensor window “cross” measuring circle feature map

各切顶高度的组构张量变化如图 16 所示。从图中可以看到,各组云图中存在相同特征和不同特征,其中,相同变化特征为:距离巷道自由边界越近,“十字”旋转幅度越大。且存在十字旋转方向分界线,分界线上方“十字”逆时针旋转,顶板右上肩区域岩层整体弯向巷道及采空区,顶板下沉趋势增加;分界线下方“十字”顺时针旋转,底板右下肩岩层整体弯向巷道及采空区,底板上鼓趋势增加。

不同变化特征为:①随着切顶高度增加时,围岩整体“十字”色阶逐步下降,黄色“十字”减少且其逐步向巷道右上方转移。此类现象表明:随着切顶高度增加,监测区域内偏应力普遍下降,应力集中区域向巷道右上方转移,弹性区域增加,即切顶高度增加能够有效遏制顶板下沉和底板上鼓趋势,改善围岩

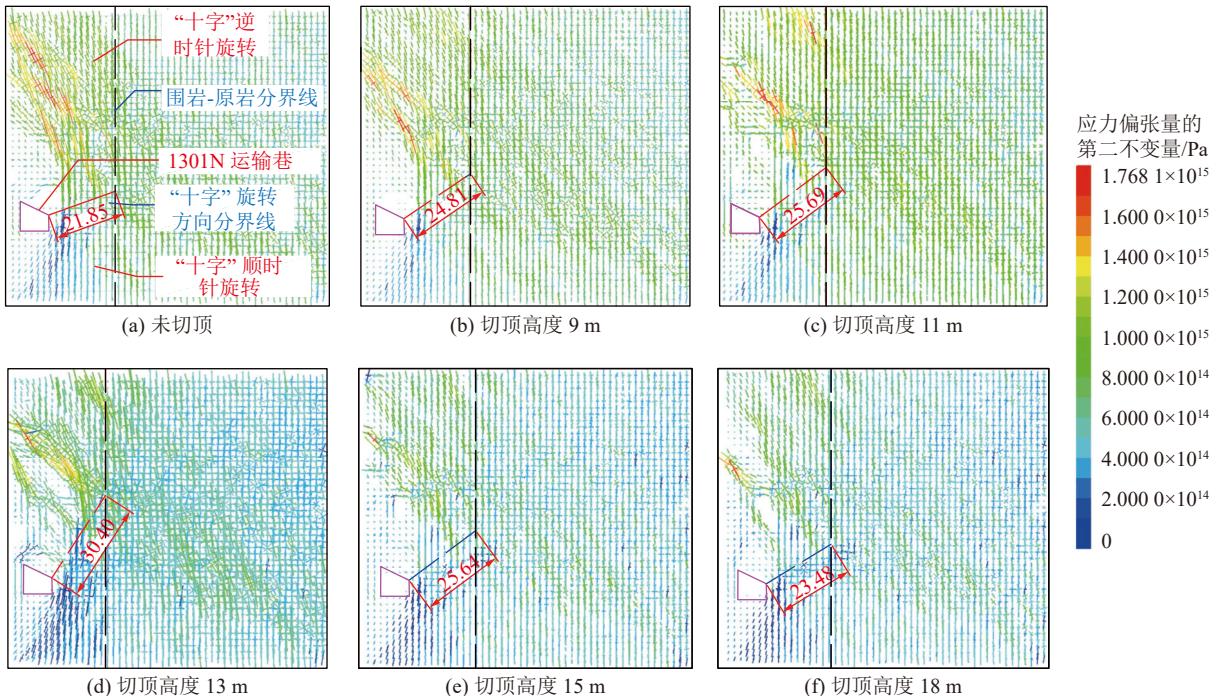


图 16 不同切顶高度巷道组构张量对比

Fig.16 Contrast diagram of the fabric tensor of the roadway with different roof-cutting heights

结构特性;②当切顶高度大于 13 m 时,围岩浅部“十字”可见数量减少,分界线长度缩短,“十字”色阶上升,表明切顶高度过高会导致围岩浅部应力回升。其主要原因为:当切顶高度超过关键层高度时,会破坏关键层的承重能力,致使浅部承担应力增加。当应力超过岩体强度时,会使浅部围岩失稳,从而导致“十字”数量减少。③此外,随着切顶高度增加,区段平巷左帮“十字”色阶上升,且其数量增加,表明切顶高度增加会导致左帮偏应力增加,致使左帮支护难度上升。④当切顶高度 0~13 m 时,“十字”数量及色阶变化明显,切顶高度增加对围岩改性作用突出;当切顶高度 13~18 m 时,“十字”变化有限,且其色阶略微上升,浅部偏应力增加,切顶高度增加对围岩改性作用减弱。

综上分析可知:在一定高度范围内,倾斜煤层切顶留巷过程中切顶高度越高,巷道浅部应力转移效果越好;但超过某一高度时,应力转移效果下降,围岩浅部受力增加。此外,切顶高度增加会导致左帮挡矸结构受力增加,左帮支护难度上升,故综合考虑围岩受力状况和支护难度,此区段平巷切顶高度宜选 13 m。

综合上述切顶高度模型分析可知:与未切顶相比,各切顶高度围岩力学响应特征均得以改善,且切顶高度与卸压效果之间存在底数大于 1 的对数增长关系。具体表现在:当变量切顶高度大于 0 时,随着

切顶高度增加,巷道顶板应力减小,顶板下沉量降低,工作面覆岩垮落更加充分、巷道围岩形变减小;同时,随着切顶高度增加,切顶卸压提升幅度逐渐减小。因此,切顶高度确定需要综合考虑支护难度、经济投入和卸压效果。根据模拟结果可知,1301N 的合理切顶高度为 13 m。

### 3.4 切顶角度影响规律模拟分析

切顶高度固定 13 m,选取切顶角度 0°、5°、10°、15° 和 20°,获得不同切顶角度下顶板应力、顶板下沉和组构张量分布特征对比如下。

1) 切顶角度对顶板应力的影响规律分析。为分析切顶角度对顶板应力的影响规律,取监测区域平均应力进行统计,获得应力-时步曲线如图 17 所示。此外,曲线关键节点应力统计见表 5。

可以看出,不同切顶角度下应力演化存在剧烈变化和动态稳定 2 个阶段。随着切顶角度增加,切顶后应力稳定值先减小后增加,分析这是因为随着切顶角度增加,切顶后侧向残余岩梁长度增加,对应载荷增加,传递至留巷顶板的应力增加。根据图表中数据可知,当切顶角度为 10° 时,顶板应力值最低,其发生失稳破坏的可能性最小。因此,从顶板应力变化特征来看,该区段巷道切顶角度宜选 10°。

2) 切顶角度对巷道顶板下沉的影响规律分析。为能直观反映不同切顶角度对巷道变形的影响规律,取各切顶角度工作面倾向顶板下沉量进行对比分析,

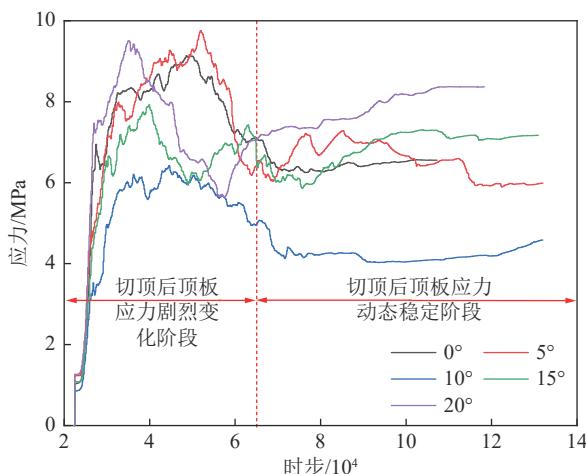


图 17 不同切顶角度时步-应力规律

Fig.17 Time-step-stress law diagram of different roof-cutting angles

表 5 各切顶角度下应力变化统计

Table 5 Statistics of change of total stress under each cutting top angle

切顶角度/(°)	峰值时步/ $10^3$	峰值应力/MPa	应力稳定值/MPa	切顶应力降低比例/%
0	50	8.50	6.84	0
5	58	9.79	6.12	10.5
10	45	6.37	4.93	27.9
15	40	7.85	7.12	-4.1
20	37	9.71	8.55	-25.0

具体如图 18 所示。切顶后顶板最大下沉量统计见表 6。

可以看出,当切顶角度为 0°时,巷道顶板的最大下沉量为 436.0 mm;当切顶角度为 5°时,巷道顶板的最大下沉量为 76.0 mm,与 0°相比减小 360.0 mm;当切顶角度为 10°时,巷道顶板的最大下沉量为

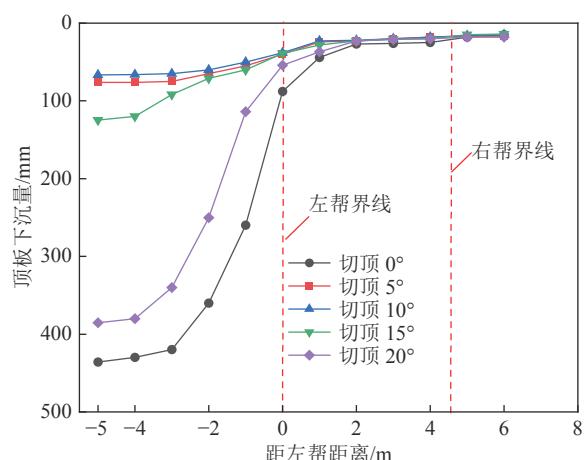


图 18 不同切顶角度顶板下沉规律

Fig.18 Roof subsidence law with different roof-cutting angles

66.5 mm,与 0°相比减少 369.5 mm;当切顶角度为 15°、20°时,巷道顶板的最大下沉量分别为 124.5、385.4 mm,与 0°相比分别减少 311.6、50.6 mm。

表 6 不同切顶角度下顶板最大下沉量统计

Table 6 Statistical of maximum roof subsidence under different roof cutting angles

对比设置	切顶角度/(°)	顶板最大下沉量/mm	位移改变量/mm	位移降低比例/%
基准	0	436.0	0	0
变化量	5	76.0	360.0	82.6
变化量	10	66.5	369.5	84.7
变化量	15	124.5	311.6	71.4
变化量	20	385.4	50.6	11.6

由此可见,在一定范围内,切顶角度增加可有效减少留巷顶板下沉量;但超过某一角度后,切顶角度增加会加快围岩劣化,增加留巷顶板的下沉量。综合考虑留巷要求和切顶效果,确定较优切顶角度为 10°。

3) 切顶角度对围岩组构张量的影响规律分析。为分析不同切顶角度下巷道围岩形变特征,此处同样采用组构张量进行对比分析。由图 19 可知:①合理切顶高度下,各切顶角度变化模型中“十字”色阶峰值远低于切顶分析模型。此现象表明,当切顶角度大于 0°时,能够进一步改善围岩受力状况。②当切顶角度 0°~10°时,随着切顶角度增加,监测区域内“十字”色阶逐渐下降,巷道围岩浅部“十字”数量增加;当切顶角度 10°~20°时,图 19c—19e 中“十字”特征变化趋势与前组相反,但变化幅度降低。此类现象表明:随着切顶角度增加,应力集中区域先由围岩浅部区域向深部区域转移,当超过 10°时应力集中区域再由围岩深部区域向浅部区域转移,即随着切顶角度增加,围岩浅部区域卸压效果先增加后减少,两者之间存在“S”型增长关系,故存在最优切顶各角度。根据本文模拟结果可知,1301N 运输巷最优切顶角度为 10°。

综合上述切顶角度模型分析可知:与切顶角度 0°相比,各切顶高度下巷道围岩力学响应特征均得以改善,且切顶角度与卸压效果之间存在“S”增长关系,即随着切顶高度增加,切顶卸压效果先增加后减小。具体表现在:随着切顶角度增加,巷道顶板应力先减小后增大,顶板下沉量先降低后增加,巷道形变先减小后增加。因此,倾斜切顶留巷过程中,存在最优切顶角度,根据本文模拟结果可知,1301N 的最优切顶角度为 10°。

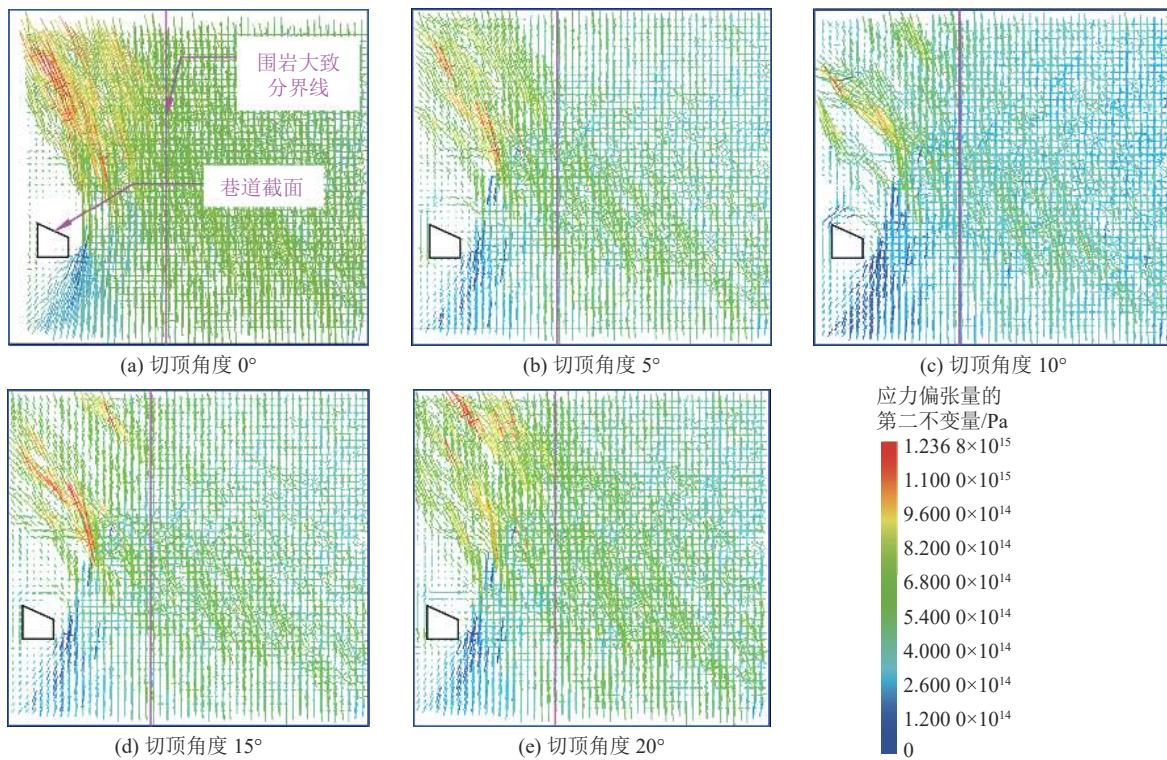


图 19 不同切顶角度巷道局部应力张量对比

Fig.19 Contrast diagram of local stress tensor in roadways with different roof-cutting angles

## 4 现场应用

### 4.1 巷道变形量监测对比分析

基于前述研究结果, 1301N 工作面运输巷留巷中优化后的切顶参数为切顶高度 13 m, 切顶角度 10°。基于前文巷道收敛量监测方案, 对新留巷区域进行监测分析, 变形监测结果如图 20a 所示, 优化切顶前后巷道收敛变形速率监测结果如图 20b、图 20c 所示。

可以看出, ① 优化切顶后, 区段平巷累计收敛量在监测范围内整体下降。其中, 工作面后方 60 m 处, 顶底板平均最大移近量为 190.0 mm, 与优化前相比, 减少了 697.0 mm; 两帮平均最大移近量为 140.1 mm,

与优化前相比, 减少了 605.8 mm。② 巷道轴向收敛量距离减少, 与优化前相比减少 110 m; ③ 切顶优化后, 同时间内巷道收敛变形速率普遍下降, 具体特征为: 优化切顶前, 留巷顶底板和两帮收敛变形速率变化范围分别为 0.73 ~ 19.13、1.97 ~ 15.97 mm/d; 优化切顶后, 留巷顶底板和两帮收敛变形速率变化范围分别为 0.13 ~ 9.45、0.47 ~ 8.77 mm/d。表明相同时段内采用新切顶参数巷道变形速率小, 围岩稳定性好。

### 4.2 顶板离层量监测

为检验参数优化后, 1301N 运输巷是否满足安全生产要求, 在巷道中部设置顶板离层仪, 共设

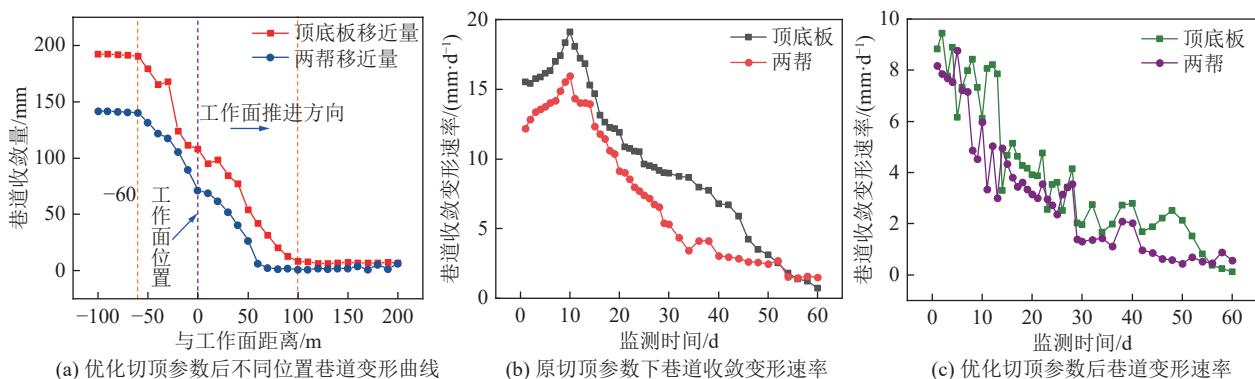


图 20 巷道收敛变形规律及变形速率对比

Fig.20 Comparison of convergence deformation law and deformation rate of roadway

置7组,每组间隔50 m。统计7 d监测数据,得到每日顶板层量平均变化量如图21所示。

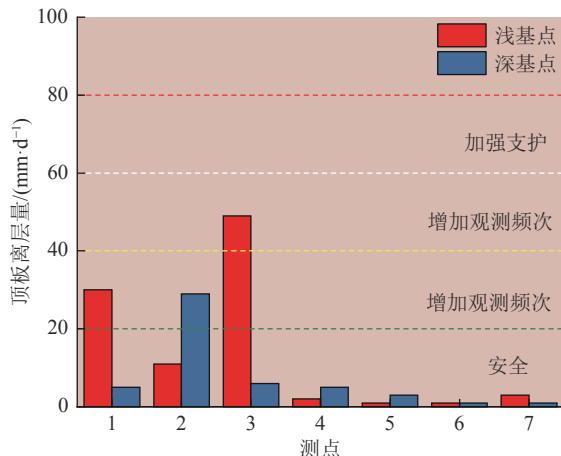


图21 1301N运输巷顶板离层量统计

Fig.21 Statistical histogram of roof separation in No.1301N transport roadway

根据图21所示,3号测点深基点顶板离层变化量最大,其值为45 mm/d,2号测点浅基点顶板离层变化量最大,其值为25 mm/d,两值均小于60 mm/d,且7组测点监测数据以低于20 mm/d为主。监测结果表明:1301N运输巷切顶留巷后绝大部分区域顶板量处于安全范围内,仅个别区域需增加监测频次。

#### 4.3 沿空留巷效果监测

将上述切顶参数设置应用于长城六矿1301N工作面运输巷巷,成功实现了倾斜煤层沿空留巷。现场巷道围岩变形可控,留巷效果较好。

综合现场监测结果,同等支护条件下,巷道两帮完整性较高,巷道顶板未发生明显下沉变形,未发生较为严重的单体支柱失稳和锚杆索受力崩坏现象。该切顶参数巷道可有效保证下一工作面回采工作的顺利开展。

### 5 结 论

1)结合现场岩层赋存条件,推导了倾斜岩层留巷切顶高度和切顶角度计算公式,结合现场地质条件,计算确定1301N运输巷切顶留巷最小切顶高度为12.81 m,最小切顶角度为10°。

2)不同切顶高度模拟对比表明,在一定切顶高度范围内,切顶卸压效果随切顶高度增加呈现底数大于1的对数型增长,其提升斜率逐渐减小。具体表现为,当切顶高度取0、9、11、13 m时,顶板应力、顶板下沉量及区段巷道围岩组构张量集中程度均随着切顶高度的增加逐渐降低,切顶卸压效果提升明

显;当切顶高度较高时,顶板应力及下沉量虽仍继续降低,但其变化幅度较小,切顶卸压效果提升不明显。此外,随着切顶高度增加,左帮垂直主应力逐渐增加,挡矸结构压剪受力增加,支护难度提高。故综合考虑经济效益和卸压效果,1301N留巷切顶高度取13 m较为合理。

3)根据巷道时步—应力曲线、顶板下沉量曲线及组构张量图可知,当切顶角度为0°、5°和10°时,巷道顶板的控制逐渐良好,巷道内围岩卸压效果逐渐提高;当切顶角度为15°和20°时,受切顶角度影响,切顶后巷道残留覆岩岩梁长度较大,致使顶板应力、下沉量、应力集中程度及主应力增加,进而导致顶板围岩劣化。综合考虑,1301N留巷切顶角度宜取10°。

4)切顶参数与卸压效果演变规律表明,倾斜煤层切顶留巷中切顶高度和角度选取理念不同。根据卸压护巷目的,切顶高度应综合卸压效果和切顶收益选取最适值,切顶角度最优值一般较小,可在技术允许范围内选取最佳值。

5)在巷道典型对比区域使用切顶角度10°、切顶高度13 m进行工业性试验,得到优化参数下留巷顶板下沉量更小且在可控范围之内、卸压效果更好。同时,根据优化前后参数变化特征可知,倾斜煤层卸压参数因其倾斜角度影响,切顶角度取值偏小,切顶高度取值偏高。

#### 参考文献(References):

- [1] 宋振骐,崔增娣,夏洪春,等.无煤柱矸石充填绿色安全高效开采模式及其工程理论基础研究[J].煤炭学报,2010,35(5):705-710.  
SONG Zhenqi, CUI Zengdi, XIA Hongchun, et al. The fundamental theoretical and engineering research on the green safe no coal pillar mining model by mainly using coal gangue backfill[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5): 705-710.
- [2] 李小鹏,刘少伟,付孟雄,等.密集钻孔切顶卸压关键参数影响因素研究及应用[J].煤炭科学技术,2013,51(12):243-253.  
LI Xiaopeng, LIU Shaowei, FU Mengxiong, et al. Research and application of influencing factors of key parameters of roof cutting and pressure relief by dense drilling[J]. Coal Science and Technology, 2013, 51(12): 243-253.
- [3] 何满潮,高玉兵,盖秋凯,等.无煤柱自成巷力学原理及其工法[J].煤炭科学技术,2023,51(1):19-30.  
HE Manchao, GAO Yubing, GAI Qiukai, et al. Mechanical principle and mining methods of automagical entry formation without coal pillars[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 19-30.
- [4] 华心祝,李琛,刘啸,等.再论我国沿空留巷技术发展现状及改进建议[J].煤炭科学技术,2023,51(1):128-145.  
HUA Xinzh, LI Chen, LIU Xiao, et al. Current situation of gob-side entry retaining and suggestions for its improvement in

- China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 128–145.
- [5] 柏建彪, 张自政, 王襄禹, 等. 高水材料充填沿空留巷应力控制与围岩强化机理及应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 16–28.  
BAI Jianbiao, ZHANG Zizheng, WANG Xiangyu, et al. Stress control and surrounding rock strengthening mechanism of gob-side entry retaining with high-water content material filling and its application[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 16–28.
- [6] 钱鸣高, 李鸿昌. 采场上覆岩层活动规律及其对矿山压力的影响[J]. 煤炭学报, 1982, 7(2): 1–12.  
QIAN Minggao, LI Hongchang. Law of overlying strata activity in the mining field and its influence on mine pressure[J]. Journal of China Coal Society, 1982, 7(2): 1–12.
- [7] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(3): 2–7.  
QIAN Minggao, LIAO Xiexing, XU Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3): 2–7.
- [8] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 采场“砌体梁”结构的关键块分析[J]. 煤炭学报, 1994, 19(6): 557–563.  
QIAN Minggao, LIAO Xiexing, HE Fulian. Analysis of the key-blocks of the “masonry beam” structure of the quarry[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6): 557–563.
- [9] 钱鸣高, 张顶立, 黎良杰, 等. 砌体梁的“S-R”稳定及其应用[J]. 矿山压力与顶板管理, 1994(3): 6–11, 80.  
QIAN Minggao, ZHANG Dingli, LI Liangjie, et al. The “S-R” stability of masonry beams and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 1994(3): 6–11, 80.
- [10] 何满潮, 陈上元, 郭志飚, 等. 切顶卸压沿空留巷围岩结构控制及其工程应用[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(5): 959–969.  
HE Manchao, CHEN Shanyuan, GUO Zhifiao, et al. Control of surrounding rock structure for gob-side entry retaining by cutting roof to release Pressure and its engineering application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(5): 959–969.
- [11] 何满潮, 马资敏, 郭志飚, 等. 深部中厚煤层切顶留巷关键技术参数研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 468–477.  
HE Manchao, MA Zimin, GUO Zhibiao, et al. Key parameters of the gob-side entry retaining formed by roof cutting and pressure release in deep medium-thickness coal seams[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 468–477.
- [12] 陈上元, 何满潮, 郭志飚, 等. 深部沿空切顶成巷围岩稳定性控制对策[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(5): 107–116.  
CHEN Shanyuan, HE Manchao, GUO Zhibiao, et al. Control countermeasures of surrounding rock in deep gob-side entry retaining by cutting roof[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(5): 107–116.
- [13] 陈上元, 何满潮, 王洪建, 等. 深井沿空切顶巷道围岩协同控制及应力演化规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(4): 660–669.  
CHEN Shanyuan, HE Manchao, WANG Hongjian, et al. Coordination control and stress evolution of surrounding rock of gob-side entry retaining cutting roof in deep mine [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(4): 660–669.
- [14] 陈上元, 赵菲, 王洪建, 等. 深部切顶沿空成巷关键参数研究及工程应用[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 332–342, 350.  
CHEN Shanyuan, ZHAO Fei, WANG Hongjian, et al. Determination of key parameters of gob-side entry retaining by cutting roof and its application to a deep mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 332–342, 350.
- [15] 刘红威, 赵阳升, REN Tingxain, 等. 切顶成巷条件下采空区覆岩破坏与裂隙发育特征[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(1): 77–89.  
LIU Hongwei, ZHAO Yangsheng, REN Tingxaing, et al. Characteristics of overburden failure and fracture development in gob of mining with gob-side entry formed by cutting roof[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(1): 77–89.
- [16] 汤建泉, 宋文军, 宋立兵, 等. 切顶卸压沿空留巷切缝设计与研究[J]. 煤矿安全, 2016, 47(9): 53–55, 59.  
TANG Jianquan, SONG Wenjun, SONG Libing, et al. Cutting seam design and study of gob-side entry retaining by roof cutting and pressure relief[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 47(9): 53–55, 59.
- [17] 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. Key parameters of gob-side entry retaining formed by roof cut and pressure releasing in thin coal seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1449–1456.
- [18] 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 mining height face[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(8): 128–133.
- [19] 马资敏, 郭志飚, 陈上元, 等. 深部中厚煤层切顶留巷围岩变形规律与控制研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(2): 112–118, 242.  
MA Zimin, GUO Zhibiao, CHEN Shanyuan, et al. Study on deformation law and control of surrounding rock in roof cutting gateway retained along goaf in deep medium thick seam[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 112–118, 242.
- [20] 袁超峰, 袁永, 朱成, 等. 薄直接顶大采高综采工作面切顶留巷合理参数研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1981–1990.  
YUAN Chaofeng, YUAN Yong, ZHU Cheng, et al. Reasonable parameters of roof cutting entry retaining in thin immediate roof and large mining height fully-mechanized face[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1981–1990.
- [21] 王炯, 刘雨兴, 马新根, 等. 塔山煤矿综采工作面切顶留巷技术[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(2): 27–34.  
WANG Jiong, LIU Yuxing, MA Xingen, et al. Technology of roof cutting and entry retaining in fully-mechanized working face of Tashan Coal Mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 27–34.
- [22] 郭金刚, 李耀晖, 石松豪, 等. 厚硬基本顶切顶卸压成巷及围岩控制技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2853–2864.

- GUO Jingang, LI Yaohui, SHI Songhao, et al. Self-forming roadway of roof cutting and surrounding rock control technology under thick and hard basic roof[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2853–2864.
- [23] 张盛, 王小良, 吴自强, 等. 切顶卸压沿空留巷爆破孔关键参数选择及留巷效果现状分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2019, 38(6): 1–9.
- ZHANG Sheng, WANG Xiaolang, WU Ziqiang, et al. Status analysis of the key parameters of blasting borehole and the retaining effect for gob-side entry retaining by the way of roof cutting and pressure releasing[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2019, 38(6): 1–9.
- [24] 王方田, 尚俊剑, 赵宾, 等. 切顶卸压沿空留巷围岩结构特征及锚索强化支护技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2296–2305.
- WANG Fangtian, SHANG Junjian, ZHAO Bin, et al. Surrounding rock structural characteristics and anchor-cable strengthened support technology of the gob-side entry retaining with roof cutting and pressure releasing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2296–2305.
- [25] 郑立军, 王文, 张广杰. 高应力综放工作面切顶卸压沿空留巷开采技术研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(6): 43–53.
- ZHENG Lijun, WANG Wen, ZHANG Guangjie. Study on the technology of gob-side entry retaining by roof cutting to release pressure in fully mechanized mining working face with high stress[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2021, 40(6): 43–53.
- [26] 孙广建, 张洋, 常晓亮, 等. 大松动圈围岩沿空留巷切顶卸压-恒阻补强分区支护技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(4): 43–55.
- SUN Guangjian, ZHANG Yang, CHANG Xiaoliang, et al. Technology of partition support by cutting-roof pressure relief and constant resistance reinforcement for double-used roadway with deep excavation-induced damage zone[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(4): 43–55.
- [27] MASANOBU Oda. Fabric tensor for discontinuous geological materials[J]. Soils and Foundations, 1982, 22(4): 96–108.
- [28] 吴顺川, 李利平, 张晓平. 岩石力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021.9.
- [29] 许旭辉, 何富连, 吕凯, 等. 厚层坚硬顶板切顶留巷合理切顶参数[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 3048–3059.
- XU Xuhui, HE Fulian, LYU Kai, et al. Research on reasonable cutting roof parameters of gob side entry retaining by roof cutting in thick and hard roof[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(8): 3048–3059.