

# 厚煤层切顶卸压沿空掘巷技术研究与应用

刘建华

中煤华晋集团晋城能源有限公司, 中国·山西 晋城 048000

**摘要:** 为定量分析留小煤柱切顶卸压沿空掘巷的区段煤柱合理宽度, 通过理论分析了沿空掘巷的顶板断裂规律, 并分析了关键块 B 的赋存条件和特征参数, 基于此确定了切顶卸压技术方案, 随后利用数值计算分析了切顶前后由采动引起的侧向支承压力分布情况、巷道围岩变形情况、煤柱稳定性。结果表明: 在煤柱宽度 8m, 切顶条件下, 顶底板和两帮变形量较之切顶前减少了 32.0% 和 41.5%, 侧向支承压力峰值降低了 29.4%, 切顶可改善煤柱应力环境和巷道围岩变形情况, 采用不同煤柱宽度对比时, 其塑性破坏区域和垂直应力曲线均呈对数规律变化, 8m 煤柱宽度为拐点, 其煤柱塑性破坏区域占比 73.5%, 垂直应力峰值为 19.5MPa。综合表明, 在切顶条件下采用 10m 煤柱宽度可保证煤柱稳定性的同时, 巷道围岩应力环境和变形情况均大幅改善。

**关键词:** 小煤柱; 煤柱合理宽度; 切顶卸压; 沿空掘巷

## Research and Application of Roof Cutting and Pressure Relief Along Goaf Excavation Technology in Thick Coal Seams

Jianhua Liu

Zhongmei Huajin Group Jincheng Energy Co., Ltd., Jincheng, Shanxi, 048000, China

**Abstract:** In order to quantitatively analyze the reasonable width of coal pillars in the section where small coal pillars are left for roof cutting and pressure relief along the goaf, the fracture law of the roof of the goaf was theoretically analyzed, and the occurrence conditions and characteristic parameters of key block B were analyzed. Based on this, the roof cutting and pressure relief technology scheme was determined. Subsequently, numerical calculations were used to analyze the distribution of lateral support pressure caused by mining before and after roof cutting, the deformation of the surrounding rock of the roadway, and the stability of the coal pillar. The results showed that under the condition of a coal pillar width of 8m and roof cutting, the deformation of the roof, floor, and two sides decreased by 32.0% and 41.5% compared to before roof cutting, and the peak value of lateral support pressure decreased by 29.4%. Roof cutting can improve the stress environment of the coal pillar and the deformation of the surrounding rock of the roadway. When comparing different coal pillar widths, the plastic failure zone and vertical stress curve show logarithmic changes, with the 8m coal pillar width as the inflection point, the plastic failure area of the coal pillar accounts for 73.5%, and the peak vertical stress is 19.5MPa. Overall, it shows that using a 10m coal pillar width under cutting conditions can ensure the stability of the coal pillar while significantly improving the stress environment and deformation of the surrounding rock of the roadway.

**Keywords:** small coal pillar; reasonable width of coal pillar; cutting the roof to relieve pressure; along the open roadway

### 0 前言

沿空掘巷留小煤柱技术是目前井工开采中最为常用的高效开采技术之一, 其中煤柱宽度的确定对于沿空掘巷留小煤柱的成功应用和巷道围岩稳定性有着关键影响。切顶卸压技术可通过主动控制顶板岩层的断裂位置, 从而减小巷道和煤柱的围岩力学环境。而通过切顶卸压配合沿空掘巷可大幅降低巷道围岩应力的同时减小煤柱宽度, 达到提高回采率的效果。

目前国内外学者针对切顶条件下的煤柱宽度进行了大量研究, 陈立虎等<sup>[1]</sup>定量计算了坚硬顶板条件下的窄煤柱宽度和切顶关键参数, 并通过数值计算得出了 8m 煤柱宽度可保证稳定性的同时成本相对较低; 王恩等<sup>[2]</sup>针对破碎煤

体的大变形破坏问题, 得出了小煤柱沿空掘巷条件下的覆岩荷载主要由实体煤承担, 且峰值区域位于肩角处, 并通过支护注浆技术成功进行了小煤柱的应用; 李铭等<sup>[3]</sup>根据岩层垮落角理论确定了水力压裂的水平和垂直位置, 随后在现场进行了应用, 实验表明切顶后的地表下沉量大幅减小, 同时优化了煤柱的合理宽度。

沿空掘巷留小煤柱技术的成功应用是由地质条件和切顶关键参数的匹配性来决定的, 因此, 需针对地质条件进行定量分析, 论文以某矿工作面为背景, 通过分析切顶条件下, 不同煤柱宽度的煤柱应力和巷道围岩变形量, 确定区段保护煤柱的合理宽度, 为工作面高效开采提供理论依据。

## 1 工程背景

韩咀煤业主采煤层为 2 号煤层，煤层平均厚度 5.7m，平均倾角 3°~5°，属于近水平厚煤层，埋深平均为 300m，井田内断层较发育，未发现褶曲，本区内地层为宽缓背斜构造，煤层厚度大，结构复杂，局部煤层顶板受火成岩侵蚀，岩性为煌斑岩，部分煤层受挤压变得非常疏松，在开采时应加强煤层顶板管理。本区水文地质情况简单，相对上覆岩层含水性较弱。

32103 工作面是 2 号煤层，采用放顶煤开采方法，布置有回风顺槽、运输顺槽和开切眼四条回采巷道，其中回风顺槽为沿空掘巷巷道，掘进宽度 4.5m，掘进高度 3.5m，矩形断面，沿工作面底板掘进，采用锚网索联合支护。工作面东临井田边界，西临北回风大巷，南邻 32101 采空区，北临 F1 断层。其采掘平面图如图 1 所示，工作面顶底板情况见表 1。

目前 32101 工作面已开采完成，为提高资源采出率，选择采用切顶卸压技术来降低围岩应力，并基于此定量对比分析 32105 工作面区段保护煤柱的合理宽度，为促进高效绿色开采提供思路。

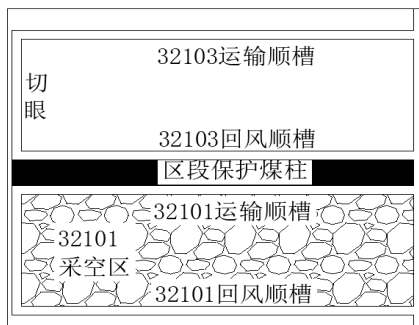


图 1 32103 工作面采掘平面图

表 1 32103 工作面顶底板情况

顶板名称	岩石名称	厚度 /m	岩性特征
老顶	粗砂岩	18.52~28.04	灰白色中粗粒砂岩，局部有火成岩侵入，岩性为煌斑岩
直接顶	高岭质泥岩	4.43~10.10	浅灰色，局部受火成岩侵蚀变为煌斑岩
直接底	砂质泥岩	1.95~3.25	灰黑色，平坦状断口，含植物茎秆化石
老底	高岭岩	3.35~12.15	浅灰色，含炭质

## 2 沿空掘巷覆岩运移规律

### 2.1 沿空掘巷顶板断裂规律

沿空掘巷覆岩运移特征主要是随着顶板断裂的形式而变化的。随着工作面回采作业，基本顶在采空区范围内的裸露面积逐渐加大，在这一点达到其最大断裂强度，此时基本顶发生梁式破断，其中部岩层垮落，而端部岩层由于煤柱的

存在，形成短悬臂梁结构，该结构沿着巷道轴向方向形成断裂线，与短悬臂梁截面连接形成“O-X”型断裂<sup>[4]</sup>。随着工作面的继续推进，顶板岩层周期性垮落，其两侧悬臂结构数量持续增加，成为引起煤柱内垂直应力增高的关键因素之一。基本顶断裂规律示意图如图 2 所示。

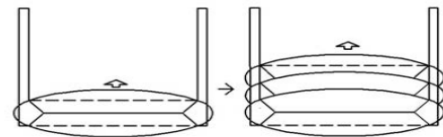


图 2 巷道侧向垂直应力峰值变化规律

沿空掘巷覆岩运移特征在工作面采掘作业不同阶段时也具有重大变化，将顶板结构视为薄板结构讨论。则当沿空巷道在掘进期间时的顶板结构示意图如图 3 所示，侧向工作面回采过后，其顶板短悬臂梁结构的存在，其顶板断裂线位于采空区内，即顶板处于三边固支，一边简支的状态，块体 A 的存在将巷道覆岩载荷由基本顶向实体煤深部传递，同时，采空侧的坚硬顶板在触矸后，其宽度范围内的覆岩载荷作用至该岩层上，导致块体长度减小，其铰接力传递对巷道的影响也有所降低，使得巷道掘进期间的围岩应力有所降低。



图 3 沿空巷道掘进期间顶板结构示意图

当沿空巷道在回采期间时，其顶板结构示意图如图 4 所示，在爆破切顶作用下，顶板结构转为两边固支，两边简支状态，此时由于工作面回采的影响，导致顶板在采空区内垮落，在工作面前方则出现不同程度的回转下沉或者断裂，而位于巷道上方的弧形三角块体在经受两次回采影响下以煤柱为中心，断裂形成关键块 B 和关键块 C、C<sub>1</sub>，此时两侧工作面未形成有效支撑，覆岩载荷主要由巷道围岩承担，此时巷道内围岩变形量急剧加大。

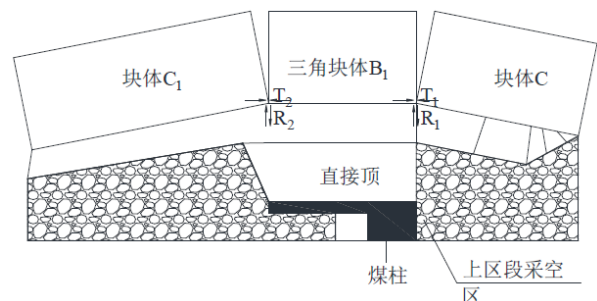


图 4 沿空巷道回采期间顶板结构示意图

## 2.2 基本顶关键断裂参数

影响沿空掘巷覆岩结构稳定性的因素较多，包括煤层厚度、岩层强度、岩性等，其中最关键的就是基本顶岩层断裂后形成的关键块 B 的稳定性，而在讨论沿空掘巷小煤柱宽度及其稳定性时，主要针对关键块 B 的赋存参数进行分析，包括基本顶周期来压步距  $L_1$ ，基本顶横向断裂跨度  $L_2$ 、基本顶层厚  $h$ ，基本顶断裂线横向距离  $L_0$ ，其沿空掘巷关键块平面示意图如图 5 所示。

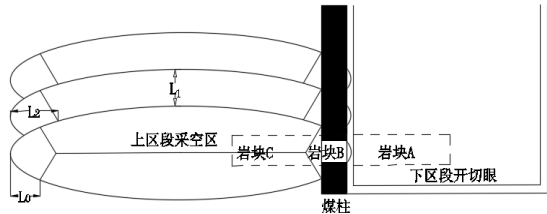


图 5 沿空掘巷关键块平面示意图

### 2.2.1 周期来压步距

基本顶随着回采工作面的周期性垮落代表着顶板“X-O”断裂时其关键块沿巷道轴向的跨度，可由下式进行计算<sup>[5]</sup>。

$$L_1 = h \sqrt{\frac{R_t}{3q}} \quad (1)$$

式中， $L_1$  为周期来压步距，m； $h$  为基本顶层厚， $R_t$  为抗拉强度，MPa； $q$  为单位面积内的覆岩载荷，kN。

根据地质条件可知，基本顶层厚为 21.5m，抗拉强度为 4.7MPa，覆岩载荷取 258kN，得周期来压步距为 6m。

### 2.2.2 基本顶横向断裂跨度

基本顶在断裂后，在直接顶短悬臂结构的作用下，形成了关键块 B，其横向跨度  $L_2$  可由下式进行计算<sup>[5]</sup>。

$$L_2 = \frac{2L_1}{5} \sqrt{\left[10 \frac{L_1}{S}\right]^2 + 10} - 10 \frac{L_1}{S} \quad (2)$$

式中， $L_2$  为基本顶横向断裂跨度，m； $S$  为工作面长度，m。

该矿 32103 工作面长度为 230m，周期来压步距 6m，则基本顶横向断裂跨度为 11.8m。

### 2.2.3 基本顶断裂线横向距离

基本顶断裂线的横向距离可由下式计算<sup>[5]</sup>。

$$L_0 = \frac{MA}{2 \tan \varphi} \ln \left( \frac{K\gamma H + \frac{C_0}{\tan \varphi}}{\frac{C_0}{\tan \varphi} + \frac{P_s}{A}} \right) \quad (3)$$

式中， $L_0$  为塑性区宽度，m； $K$  为动压系数； $M$  为回采高度，m； $A$  为侧压系数； $\varphi$  为内摩擦角，°； $K$  为应力集中系数； $H$  为工作面埋深，m； $C_0$  为内聚力，MPa。

根据工作面地质参数，代入式 3 可得基本顶断裂线横向距离为 4.51m。

综上所述可知，沿空掘巷条件下其基本顶断裂横向跨度较大，对于覆岩载荷作用在巷道和煤柱上的范围相对有所增加，可采用爆破切顶技术减小基本顶横向断裂跨度，进一

步降低覆岩载荷的有效传递范围。

## 2.3 切顶卸压技术方案

爆破切顶卸压是通过炸药爆破产生的冲击力，在钻孔周围形成一定的环状破坏范围，通过钻孔布置使得该破碎范围相互贯通，从而在预定位置形成断裂面，在采掘引起的矿压作用下使得覆岩沿切顶线断裂，从而达到对顶板的主动控制。

根据 32103 工作面地质条件，选择顶板处理范围为基本顶岩层，即破碎高度为顶板上方 10.1~22.2m，装药段长度 12.1m，顶板上方 0.6~10.1m 高度的直接顶范围内为黄泥封孔段，防止冲孔现象的发生导致爆破效果降低。钻孔间距 2m，钻孔倾角为仰角 75°，钻孔直径 50mm，沿 81507 回风顺槽煤柱帮肩角处打设。炸药选择乳化炸药，爆速不低于 4200m/s，药卷直径 35mm，长度 300mm，每孔所需炸药 42 卷。切顶卸压技术方案如图 6 所示。

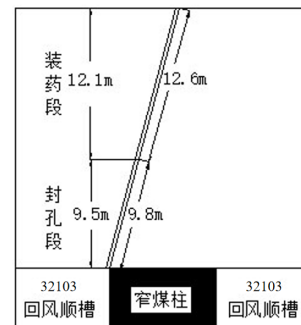


图 6 切顶卸压技术方案示意图

## 3 切顶前后侧向压力及煤柱合理宽度分析

### 3.1 数值计算模型

根据 32103 工作面地质参数，建立如图 7 所示数值计算模型，模型走向长度 300m，倾向长度 250m，高 80m，其中模型 Z 方向高度含已知岩性覆岩 33.36m，底板 2.76m，为消除边界影响，选择在已知岩性顶板之上添加 42.38m 覆岩，已知岩性底板下方添加 20m 下伏岩层，岩层参数取各岩层平均值，模型四周限制位移，工作面埋深 409m，顶板施加地应力 7.5MPa，模型 XZ 面建立有 2 个回采工作面，2 条回风顺槽和区段煤柱，顺槽宽度 4.5m，高度 3.5m，模型破坏采用摩尔库伦准则，网格采用局部加密方法，重点计算巷道周围。其顶底板岩层参数表见表 2。

表 2 顶底板岩层参数取值表

岩性分层	体积模量 / GPa	剪切模量 / GPa	抗拉强度 / MPa	内摩擦角 / °
覆岩	6.93	5.88	5.38	40
粗砂岩	5.55	3.88	4.68	43
高岭质泥岩	2.76	2.55	2.88	36
5 号煤	1.50	1.00	0.80	35
砂质泥岩	4.22	3.56	3.77	40
高岭岩	5.36	3.78	4.35	42
下伏岩层	3.55	2.98	3.01	39

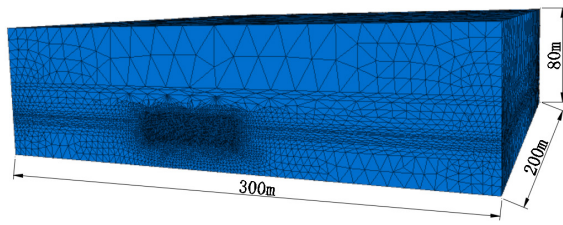


图 7 数值计算模型图

### 3.2 切顶前后的巷道围岩稳定性

为分析切顶前后的巷道和煤柱围岩应力分布规律，选择在 32103 回风顺槽肩角处以开挖方式模拟切缝，随后以煤柱 8m，32103 工作面一次回采完后计算至模型平衡，切顶前后各计算一次，并且在巷道高度的中点位置（XZ 面）布置一条测线，监测切顶前后的侧向支撑压力和巷道围岩变形情况，分别如图 8、图 9 所示。

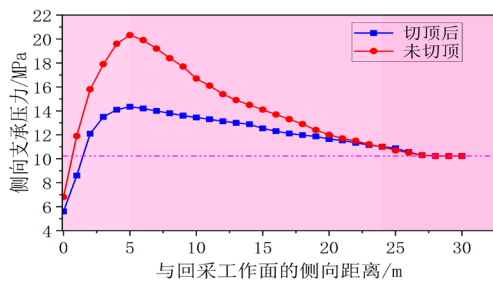


图 8 侧向支撑压力分布

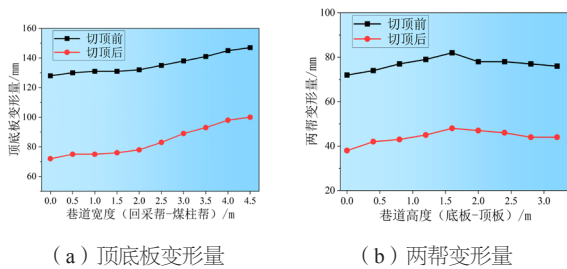


图 9 巷道围岩变形情况

根据图 8 可知，在切顶且工作面回采条件下，巷道高度中点处的侧向支撑压力分布是随着巷道侧向距离的加大呈先增加后减小的趋势，变化速率呈先急后缓，整体符合侧向支撑压力的分布规律。其中在距离回采工作面 4.9m 处垂直应力达到峰值，切顶前后分别为 14.35 和 20.33，应力集中系数为 1.40 和 1.99；在距离回采工作面 27m 处恢复至原岩应力，表明侧向支撑压力的影响范围为 27m 左右。同时切顶后较之切顶前的侧向支撑压力峰值降低了 29.4%，有效改善了回采扰动对巷道和煤柱的影响。

根据图 9 可知，巷道围岩变形量在切顶后大幅降低，其中顶底板和两帮变形量峰值的降幅分别为 32.0% 和 41.5%。顶底板变形量曲线整体呈回采侧低、煤柱侧高的趋势，其中回采帮侧峰值变形量在切顶前后分别为 128mm 和

72mm，煤柱帮侧则分别为 147mm 和 100mm，这是由于煤柱本身的强度对顶板岩层形成一定被动支撑力，使得煤柱帮侧下沉量相对较大；两帮变形量曲线整体呈中间高，两端低的趋势，其中峰值变形量在距离底板 1.6m 处，切顶前后分别为 82mm 和 48mm，同时可以看出，无论在切顶前后，巷道肩角处的变形量要高于底板位置，这表明围岩失稳现象主要以顶板下沉为主。

综合分析可知，切顶后的侧向支撑压力峰值作用点在煤柱范围内，巷道处基本处于较低应力阶段，同时对比巷道围岩变形量可知，切顶后较之切顶前巷道围岩稳定性得到了大幅改善。

### 3.3 切顶条件下的煤柱稳定性分析

为针对切顶条件下的合理区段煤柱宽度进行分析，选择煤柱宽度 6m、8m、10m、12m、14m 进行数值计算，工作面采用循环开挖，每开挖 8m 平衡一次模型，同时在煤柱高度的中点处布置一条测线，分别统计切顶条件下，工作面回采时的不同煤柱宽度的塑性区分布情况和垂直应力分布情况，分别如图 10、图 11 所示。

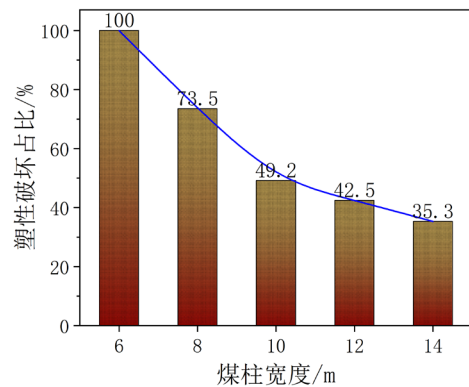


图 10 煤柱内的塑性破坏占比

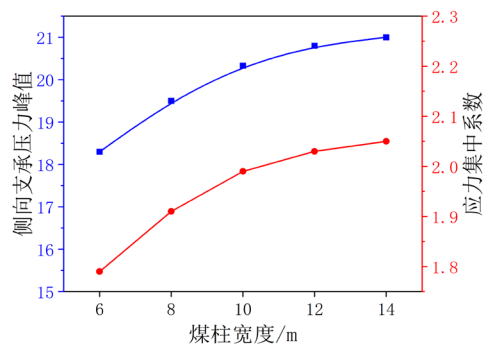


图 11 煤柱所受侧向支撑压力

根据图 10 可知，塑性破坏情况随着煤柱宽度的增加呈对数规律逐渐减少，其中当煤柱宽度 6m 时，煤柱全部发生破坏，煤柱无法形成有效支撑，当煤柱宽度为 14m 时，破坏区域占比为 35.3%，此时煤柱稳定性较好，可提供较好的支撑能力。当煤柱宽度为 8m 时，塑性破坏区域占比 73.5%，较之 6m 煤柱减少了 26.5%，较之 10m 煤柱增加了

24.3%，这表明 10m 煤柱宽度可在煤柱资源最大化开采的情况下，还能形成有效支撑，煤柱也能保持其稳定。

根据图 11 可知，煤柱所受侧向支承压力随着煤柱宽度的增加有所增加，整体呈对数规律分布，其中当煤柱宽度为 6m 时垂直应力峰值为 18.3MPa，应力集中系数 1.79，相对处于较低水平；当煤柱宽度为 14m 时垂直应力峰值为 21MPa，相对处于较高水平。

综合分析可知，不同煤柱宽度所受的垂直应力影响差距相对较小，当煤柱宽度 8m 时，垂直应力相对处于中间值，且煤柱塑性破坏区域占比较少且处于稳定状态。

## 4 结论

①根据顶板岩层的断裂规律得出了在巷道掘进和工作面回采期间，关键块 B 的赋存状态，并根据断裂参数在不同断裂状态下的赋存规律，定量得出了基本顶周期来压步距为 6m，基本顶横向断裂跨度为 11.8m，基本顶断裂线横向距离为 4.51m。

②确定了切顶方案：沿 32103 回风顺槽煤柱帮肩角处打设爆破钻孔，切顶角度为仰角 75°，顶板处理高度为 21.6m，装药段 12.1m，封孔段 9.5m，钻孔间距 2m。

③根据数值计算得出了切顶后较之切顶前侧向支承压

力峰值降幅为 29.4%，巷道围岩变形量减少了 32.0% 以上。

④通过对比不同煤柱宽度的数值计算结果，得出了当煤柱宽度为 8m 时，塑性破坏区域占比和所受侧向支承压力均相对较小，最终确定当 32103 和 32105 工作面之间的区段保护煤柱为 8m 时可保证巷道煤柱稳定的同时，巷道围岩变形量较小。

## 参考文献：

- [1] 陈立虎,王晓勇,霍一军,等.坚硬顶板深孔切顶卸压留窄煤柱护巷关键参数研究[J].煤炭工程,2023,55(6):13-19.
- [2] 王恩,谢生荣,陈冬冬,等.深部孤岛工作面留小煤柱掘巷围岩破坏机制与控制[J].煤炭科学技术,2023,51(11):41-50.
- [3] 李铭.综放面水力压裂切顶优化村庄保护煤柱宽度实践[J].煤,2023,32(8):95-98.
- [4] 浦海,黄耀光,陈荣华.采场顶板X-O型断裂形态力学分析[J].中国矿业大学学报,2011,40(6):835-840.
- [5] 李成海,柏建彪.沿空留巷关键块大跨距下充填体参数确定[J].煤炭工程,2018,50(11):38-42.

作者简介：刘建华（1988-），男，中国山西临县人，工程师。