

伍琦,朱永建,任恒.倾斜煤层厚层坚硬顶板条件下沿空留巷关键参数[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(4):1-11.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.04.001

WU Q, ZHU Y J, REN H. On Key Parameter of Gob-side Entry Retaining Under the Condition of Inclined Thick Layer and Hard Roof [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(4): 1-11. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.04.001

倾斜煤层厚层坚硬顶板条件下 沿空留巷关键参数

伍琦¹, 朱永建^{1,2,3*}, 任恒¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

3. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为了确定倾斜煤层厚层坚硬顶板条件下的合理预裂爆破切顶卸压参数, 通过理论计算和数值模拟, 在切顶预裂爆破深度为 4.0, 5.0, 5.5, 6.0, 8.0 m 及切顶角度为 0°, 5°, 10°, 15°, 20° 时, 对巷道顶板的垂直应力分布和巷道顶板垂直位移进行分析. 试验结果表明: 考虑经济成本, 最优切缝深度为 5.5 m; 当预裂切顶角度为 10° 时, 能有效切落采空区侧顶板, 并且巷内围岩压力的卸压效果较为明显; 根据聚能管直径确定切顶卸压爆破孔直径为 55 mm, 根据理论计算和数值模拟确定切顶卸压爆破孔间距为 600 mm. 将所得结果应用于柏林煤矿-2446(K26)综采工作面, 可以保证该综采工作面的安全高效开采.

关键词: 倾斜煤层; 坚硬顶板; 沿空留巷; 切顶卸压; 关键参数

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2023)04-0001-11

On Key Parameter of Gob-side Entry Retaining Under the Condition of Inclined Thick Layer and Hard Roof

WU Qi¹, ZHU Yongjian^{1,2,3}, REN Heng¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to determine the reasonable pre-splitting blasting parameters of top-cutting and pressure-relieving, this paper through theoretical calculation and numerical simulation, indicates that the vertical stress distribution and the vertical displacement of the roadway roof are 4.0, 5.0, 5.5, 6.0, 8.0 m and the top cutting angles are 0°, 5°, 10°, 15° and 20°, respectively. It concludes that the optimal joint depth is 5.5 m considering certain economic cost. When the pre-crack top cutting angle is 10°, it can effectively cut off the side roof of the goaf, and the pressure relief effect of the surrounding rock pressure in the lane is more obvious. The blasting diameter is 55 mm, and the blasting hole is 600 mm according to theoretical calculation and numerical simulation. The above-mentioned research results are applied to the fully mechanized mining face of Bolin Coal

收稿日期: 2022-07-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52274119; 52174110); 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30273)

* 通信作者, E-mail: yjzhu@hnust.edu.cn

Mine -2446 (K26), ensuring the safe and efficient mining of the fully mechanized mining face.

Keywords: inclined coal seam; hard roof; gob-side entry retaining; top cut pressure relief; key parameters

传统的长壁开采方法中,1个回采工作面需掘进2条回采巷道并留设1个区段保护煤柱,上覆岩层回转变形导致煤柱处的应力集中,极易出现围岩大变形、支护构件破断失效等现象,严重危害安全生产.同时,留设的煤柱无法采出,造成资源浪费^[1-4].因此,无煤柱沿空留巷开采技术逐渐成为煤矿向绿色、高效方向转型的重要方向.

为此,何满潮等^[5]提出切顶卸压无煤柱自成巷开采技术,通过顶板定向预裂切缝,切断采空区与巷道顶板间的矿山压力传递,采空区顶板岩层在自重及矿山压力的作用下垮落,形成矸石巷帮,从而实现切顶卸压的自动成巷.很多学者对切顶卸压无煤柱自成巷技术进行了大量研究,在近水平或坚硬顶板工作面都有大量的成功案例^[6-13],但缺少对倾斜厚层坚硬顶板这种复杂地质条件进行沿空留巷的研究.不同于普通沿空留巷,倾斜厚层坚硬顶板沿空留巷围岩的应力分布更为复杂.由于顶板坚硬,冒落性差,巷旁支护体内部将出现应力集中现象.如果采空区的侧顶板不及时进行放顶,将导致坚硬顶板大面积来压,严重危害矿井的安全生产^[14-16].同时,倾斜厚层坚硬顶板沿空留巷的受力不同于普通沿空留巷,普通的沿空留巷理论与技术已经不适用了.

为了解决倾斜厚层坚硬顶板切顶卸压留巷的技术问题,本文以柏林煤矿-2446(K26)综采工作面为背景,对倾斜厚层坚硬顶板条件下切顶卸压技术的关键参数进行优化,通过理论计算得出切顶卸压关键参数的理论范围,然后基于理论范围设计不同切顶参数的方案,采用数值模拟对不同切顶参数的围岩应力特征和围岩位移特征进行分析,确定最优切顶卸压参数.

1 工程概况

-2446(K26)南段工作面为-200 m水平-244采区南翼第三区段的综采工作面,南起-2446(K26)开切眼,上为-2446(K26)风巷南段,下止-2446(K26)机巷.工作面南北走向长473 m,平均倾斜长约194 m,面积约81 145 m².该工作面井下标高为-78.3~-183.0 m,地面标高+435~+545 m.工作面夹矸1层,厚度约0.12 m,煤层硬度系数为1.0~1.4,平均煤厚1.44 m.-2446(K26)综采工作面平均倾角28°,顶板岩层厚度8.72 m,硬度系数7~8,属于倾斜厚层坚硬顶板工作面.-2446(K26)综采工作面岩层柱状图如图1所示.

地层	层厚/m	柱状1:200	层号	岩石名称	岩性描述
T ₁ zh	77.01		1	粉砂质泥岩	灰绿色,局部为紫红、灰色粉砂质泥岩,夹薄层泥质粉砂岩及粉砂岩,局部含植物化石碎片,具鲕状结构,并深206.17 m,含瓣鳃化石
	$\frac{4.94 \sim 6.04}{5.04}$		2	泥质粉砂岩	灰色粉砂质泥岩,其下夹1.90 m褐灰色粉砂质泥岩及粉砂岩
T ₃ Xj ⁷⁻³	$\frac{1.24 \sim 3.23}{2.24}$		3	细粒砂岩	灰色,顶部微带绿灰色粉砂岩,具水平层理、水平微波状层理,含菱铁质包体
	$\frac{4.07 \sim 4.98}{4.63}$		4	粉砂岩	灰色粉砂岩,下部1.55 m为细粒砂岩,含泥质包体、菱铁质包体
	$\frac{7.38 \sim 18.57}{7.38}$		5	粉砂质泥岩	灰色粉砂质泥岩夹泥质粉砂岩,上部含锥叶蕨、似托第蕨、似果穗等植物化石
	$\frac{0.92 \sim 9.4}{7.48}$		6	粉砂岩	灰色粉砂岩,下部1.55 m为细粒砂岩,含泥质包体、菱铁质包体
	$\frac{1.12 \sim 1.43}{1.24}$		7	细粒砂岩	灰色,顶部微带绿灰色粉砂岩,具水平层理、水平微波状层理,含菱铁质包体
	1.44		8	26煤	K26煤层:黑色、半亮型,煤厚结构式0.22(0.12)1.10,上分层夹矸为炭质泥岩,下分层为粉砂质泥岩
	$\frac{1.3 \sim 2.85}{1.96}$		9	砂质泥岩	深灰色粉砂质泥岩,含苏铁杉、似木贼化石,显水平波状层理,上部含炭化植物化石碎片
T ₃ Xj ⁷⁻²	$\frac{2.89 \sim 5.86}{3.99}$		10	粉砂岩	灰色粉砂岩,中上部夹0.98 m泥质粉砂岩,显缓波状层理,上部含炭化植物化石碎片

图1 -2446(K26)综采工作面岩层

2 切顶卸压的必要性

厚层坚硬顶板不易垮落,采空区顶板呈悬而不垮的状态.在初次来压和周期来压的作用下,极易引发冲击地压,不利于沿空留巷围岩结构的稳定性.对于倾斜煤层采空区而言,采空区上部区域顶板岩层的垮落优先于下部区域顶板岩层,采空区上部顶板岩层垮落的矸石在倾斜方向上向下运动充填下部采空区,下部顶板岩层的垮落不充分,致使采空区下部的充填压实强度高于采空区上部,因此,需要对顶板进行超前预裂爆破,保证顶板充分垮落.切顶卸压主要通过超前切顶段对顶板进行预裂爆破,在周期来压的作用下使采空区侧顶板沿切顶预裂线垮落.因此,采用数值模拟对切顶前后的垂直应力进行分析,模拟计算模型所采用的预裂切缝深度为4 m,切顶角度为 0° ,巷道围岩的应力分布如图2所示.

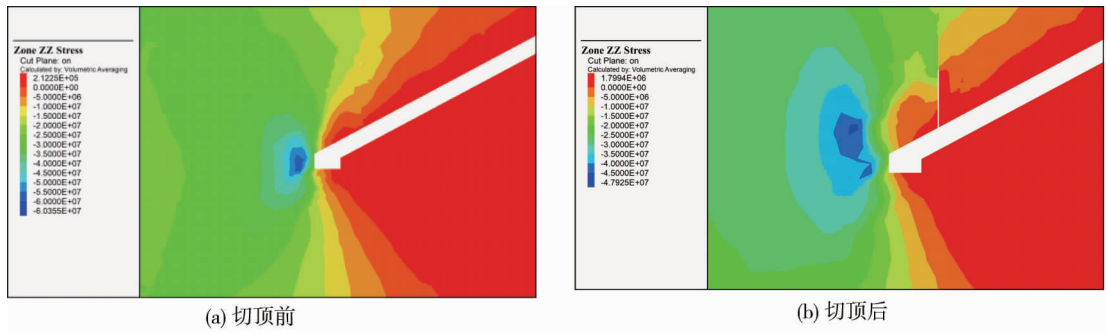


图2 切顶前后应力分布对比

由图2可知:顶板预裂切缝深度4 m时,在留巷左侧实体煤帮处产生应力集中区,应力集中峰值为52.9 MPa.而在巷道顶板产生了一定的卸压区,卸压区应力为1.98 MPa,对比切顶前有明显降低,因此,有必要对采空区的侧顶板进行切顶卸压.

切顶卸压对巷道顶板岩层进行定向预裂爆破,当工作面回采后,顶板岩层可以及时垮落并充满采空区,在挡矸支护结构的作用下自动形成新的巷帮,以采空区顶板垮落矸石取代充填体.因此,切顶卸压的关键技术参数主要为预裂爆破切顶高度、切顶角度和爆破孔间距^[16-17].合理的爆破孔间距可以确保顶板在预裂爆破后能形成相互贯通的切顶预裂面,同时又能减小预裂爆破对留巷岩体的损伤,合理的切顶高度和切顶角度可以确保采空区顶板岩层及时垮落并充满采空区,使采空区顶板作用在巷内的压力减小,最终达到切顶卸压的目的.因此,选用切顶高度、切顶角度和爆破孔间距作为关键参数进行分析.

3 切顶卸压关键参数理论分析

3.1 切顶高度

切顶高度 $H_{切}$ 是指钻孔切缝的最大垂直高度.切顶高度 $H_{切}$ 与切缝深度 $H_{缝}$ 之间的关系如图3所示,计算公式为

$$H_{切} = H_{缝} \cos \alpha \quad (1)$$

式中: α 为切顶角度.

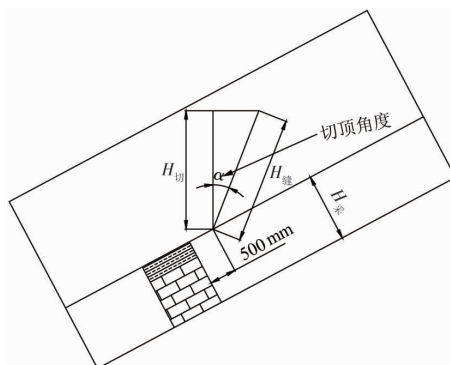


图3 切顶高度

合理的切顶高度要保证采空区侧顶板沿预裂切缝充分冒落.因此,切顶高度应尽可能大于采空区冒落带高度 $H_{冒}$,即 $H_{切} \geq H_{冒}$.根据何满潮等^[16]的计算公式,可知切缝深度的计算公式为

$$H_{缝} \geq H_{采} / (K_p - 1). \quad (2)$$

式中: $H_{采}$ 为采高; K_p 为岩石碎胀系数,一般为1.3~1.5.

由-2446(K26)综采工作面的现场实测可知,采高为1.7 m,岩石碎胀系数取1.3,代入式(2)中求得切缝深度至少为5.7 m.

3.2 切顶角度

切顶角度是指切顶高度和切缝深度之间的夹角.合理的切顶角度可以更好地保证采空区侧顶板的切落,减小切顶面间的摩擦阻力.在切顶角度的选择上,以是否能将采空区侧顶板有效切落作为判别标准.如果切顶角度较小,顶板垮落需要克服更大的剪切力,且预裂爆破有可能对切顶附近的锚杆(索)支护产生扰动破坏,从而影响沿空留巷的效果.如果切顶角度太小,现场很难进行施工,一般不少于 10° .如果切顶角度过大,采空区侧顶板的悬臂梁长度将增大,进而导致巷旁支护体和实体煤帮的支护阻力增大,同时采空区的充填效果也将变差,留巷顶板易出现较大的回转下沉变形,不利于沿空留巷围岩结构的控制.顶板切顶破断后,切顶岩块的受力关系如图4所示.

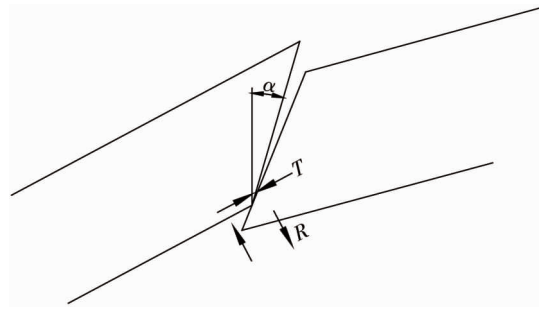


图4 切顶岩块受力关系

由陈上元等^[17]对切顶角度的推导可知,岩块发生滑落失稳的条件为

$$(T \cos \alpha - R \sin \alpha) \tan \varphi_1 \leq R \cos \alpha + T \sin \alpha. \quad (3)$$

式中: T 为岩块沿倾斜方向上受到的推力; R 为岩块受到的剪切力; φ_1 为岩块的内摩擦角.

将式(3)化简后,可得

$$T \sin(\varphi_1 - \alpha) \leq R \cos(\varphi_1 - \alpha). \quad (4)$$

即

$$\frac{R}{T} \geq \tan(\varphi_1 - \alpha). \quad (5)$$

可得

$$\alpha \geq \varphi_1 - \arctan \frac{R}{T}; \quad (6)$$

$$T = \frac{q_2 L^2}{2(h_m - \Delta S)}; \quad (7)$$

$$R = q_2 L. \quad (8)$$

式中: q_2 为顶板集中载荷; L 为顶板岩块的长度; h_m 为顶板岩层厚度; ΔS 为岩块下沉量.

最终推导得到

$$\alpha \geq \varphi_1 - \arctan \frac{2(h_m - \Delta S)}{L}. \quad (9)$$

将现场数据 $\varphi_1 = 25^\circ$, $L = 52$ m, $\Delta S = 1.7$ m, $h_m = 8.72$ m代入式(9)中,计算得出 $\alpha \geq 9.9^\circ$.为了现场施工方便,切顶角度至少取 10° .

3.3 爆破孔间距

对于爆破孔间距的设计,要依据现场的地质条件和预裂爆破技术确定最佳的爆破孔间距.合理的爆破孔间距应满足2个爆破孔间产生的损伤深度之和大于爆破孔间距,根据何满潮等^[16]的推导可知,双向聚能爆破孔间距应满足以下条件:

$$d_1 \leq 2r_b \left[1 + \left(\frac{\lambda p_b}{(1 - D_0) \sigma_t + p} \right) \frac{1}{\delta} \right]. \quad (10)$$

式中: d_1 为炮孔中心距; r_b 为炮孔半径; λ 为侧压系数, $\lambda = \mu / (1 - \mu)$, μ 为泊松比; p 为原岩应力; p_b 为炮孔壁冲击波峰值压力; D_0 为岩体初始损伤参数; σ_t 为岩石抗拉强度; δ 为爆破应力波衰减系数, $\delta = 2 - \mu / (1 - \mu)$.

根据聚能管直径确定切顶卸压爆破孔直径为55 mm,即 $r_b = 27.5$ mm,将 $\mu = 0.35$, $p = 15$ MPa, $p_b = 1\ 300$ MPa, $D_0 = 0.55$, $\sigma_t = 1.3$ MPa代入式(10)中,计算得出 $d_1 \leq 1\ 745$ mm.结合该工作面的实际地质工程条件,确定最终切顶卸压爆破孔间距为600 mm.

4 预裂爆破切顶关键参数数值分析

为了在FLAC^{3D}数值模拟软件中实现预裂切缝效果,采用Rhino犀牛建模软件在采空区侧顶板距巷旁支护体500 mm处预留一条宽50 mm的切缝来表征超前预裂爆破后采空区侧顶板形成的贯通预裂面.

为了确定合理的切顶高度,研究不同切顶高度的切顶卸压效果.以理论计算值为基准,采用控制变量法以切顶角度 0° 不变,切缝深度为4.0、5.0、5.5、6.0、8.0 m进行数值模拟.通过垂直应力分布和垂直位移分布,对比分析采空区侧顶板的应力变化和顶板垮落情况,确定最优切顶高度.在分析切顶角度时,以最优切顶高度为固定切顶高度,以理论切顶角度 10° 为基准,设计5种切顶角度方案,分别为 0° 、 5° 、 10° 、 15° 、 20° ,对比不同切顶角度围岩应力变化及采空区侧顶板的垮落情况,确定最优切顶角度.在分析爆破孔间距时,以最优切顶高度和切顶角度为固定的高度和角度,以理论爆破孔间距为基准,设计4种爆破孔间距方案,分别为500、550、600、650 mm,对比不同爆破孔间距时的围岩应力变化,确定最优的爆破孔间距.切顶方案示意图如图5所示.

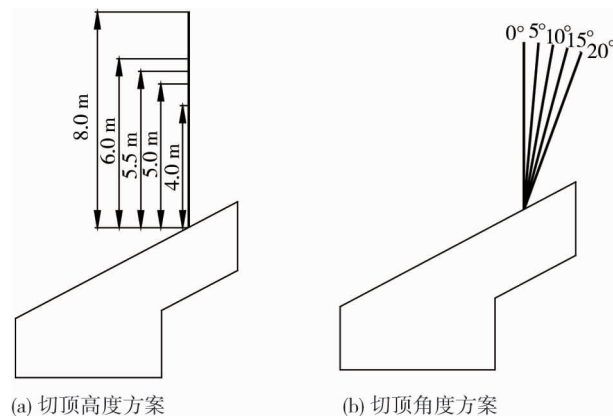


图5 切顶方案

为了确定合理的切顶高度和切顶角度,通过对比不同切顶高度或不同切顶角度下巷道顶板的垂直应力和巷道顶板的垂直位移来表征切顶卸压效果的优劣.综合2项指标和巷道使用要求,确定最优切顶参数.

4.1 切顶高度数值模拟

模拟计算模型所采用的预裂切缝深度分别为4.0、5.0、5.5、6.0、8.0 m,切顶角度均取 0° ,不同预裂切缝深度巷道围岩的垂直应力分布和垂直位移分布的计算结果如图6和图7所示.

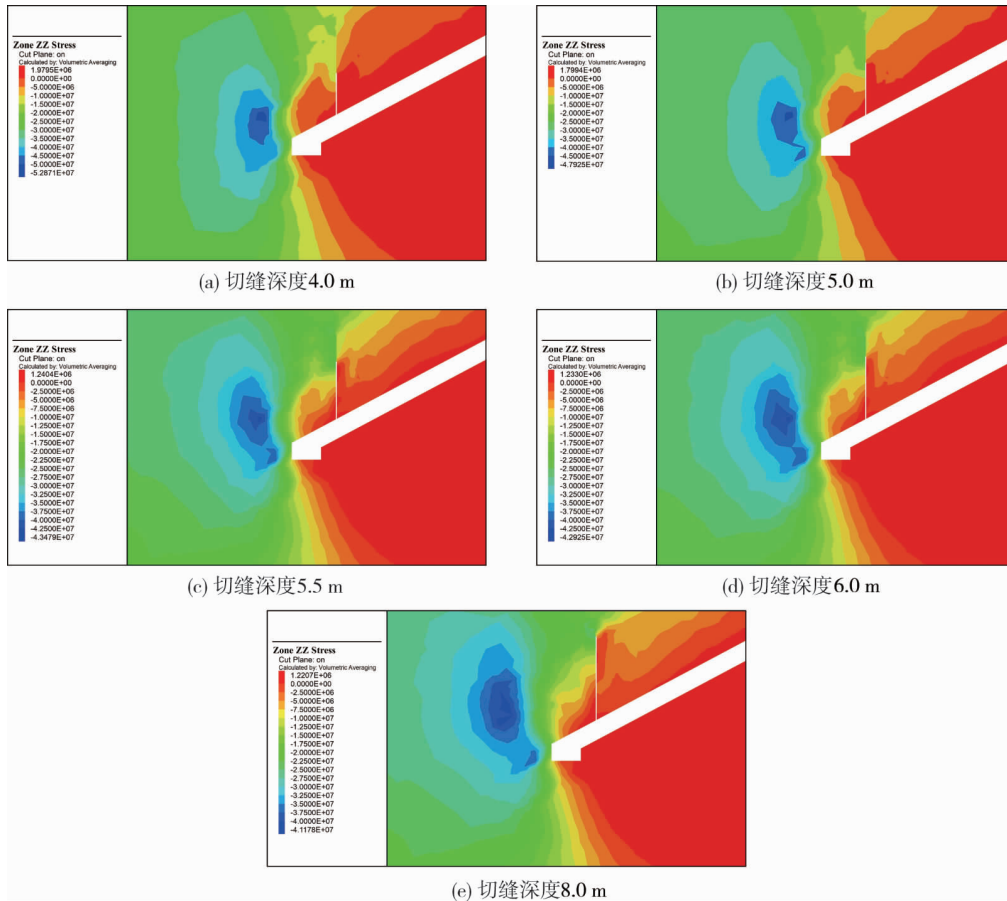


图6 不同预裂切缝深度的垂直应力分布

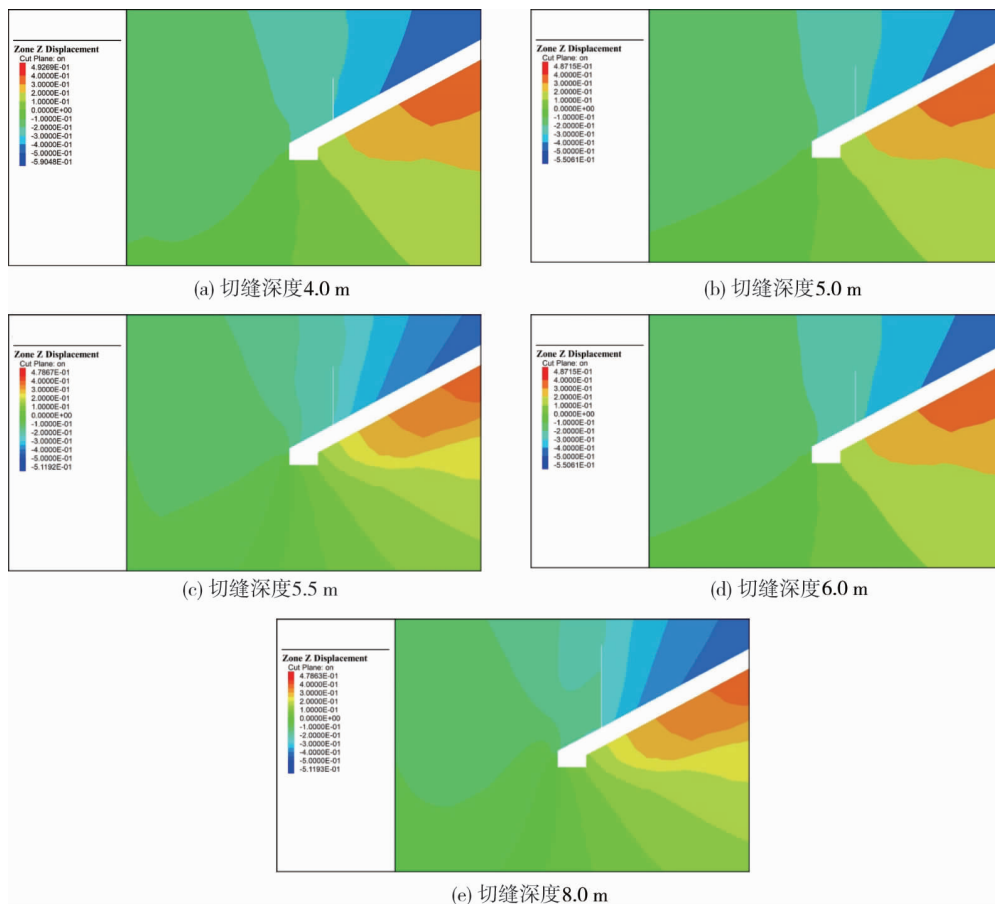


图7 不同预裂切缝深度的垂直位移分布

由图6可知:顶板预裂切缝深度为4.0 m时,留巷左侧实体煤帮处产生应力集中区,应力集中峰值为52.9 MPa,而在巷道顶板产生了一定的卸压区,卸压区应力为1.98 MPa;顶板预裂切缝深度为5.0 m时,留巷左侧应力集中峰值为47.9 MPa,较4.0 m切缝深度降低了9.5%,巷道顶板卸压区应力为1.80 MPa,较4.0 m切缝深度降低了9.1%;顶板预裂切缝深度为5.5 m时,留巷左侧应力集中峰值为43.5 MPa,较4.0 m切缝深度降低了17.8%,巷道顶板卸压区处应力为1.24 MPa,较4.0 m切缝深度降低了37.4%;顶板预裂切缝深度为6.0 m时,留巷左侧应力集中峰值为42.9 MPa,较4.0 m切缝深度降低了18.9%,巷道顶板卸压区处应力为1.23 MPa,较4.0 m切缝深度降低了37.9%,对比5.5 m预裂切缝深度无明显变化;顶板预裂切缝深度为8.0 m时,留巷左侧应力集中峰值为41.2 MPa,较4.0 m切缝深度降低了22.1%,巷道顶板卸压区处应力为1.22 MPa,较4.0 m切缝深度降低了38.4%,对比5.5 m预裂切缝深度无明显变化。

由图7可知:顶板预裂切缝深度为4.0 m时,巷道顶板下沉量为251 mm,顶板下沉量能够满足巷道使用要求;顶板预裂切缝深度为5.0 m时,巷道顶板下沉量为222 mm,较4.0 m切缝深度减少了11.6%;顶板预裂切缝深度为5.5 m时,巷道顶板下沉量为201 mm,较4.0 m切缝深度减少了19.9%;顶板预裂切缝深度为6.0 m时,巷道顶板下沉量为198 mm,较4.0 m切缝深度减少了21.1%;顶板预裂切缝深度为8.0 m时,巷道顶板下沉量为195 mm,较4.0 m切缝深度减少了22.3%。

可以看出,当预裂切缝深度为4.0,5.0 m时,巷内围岩的卸压效果不明显,无法有效切落顶板,依旧对沿空留巷顶板有着较大的影响。当预裂切缝深度为5.5,6.0,8.0 m时,能完全切落采空区侧顶板,并且巷内围岩压力的卸压效果较为明显。由于预裂切缝深度5.5 m完全能满足切顶卸压的效果,同时考虑经济成本,因此最优切缝深度为5.5 m。

4.2 切顶角度数值模拟

模拟计算模型所采用的预裂切顶角度分别为 0° , 5° , 10° , 15° , 20° ,切缝深度均取最佳结果5.5 m,不同预裂切顶角度巷道围岩的垂直应力分布和垂直位移分布如图8和图9所示。

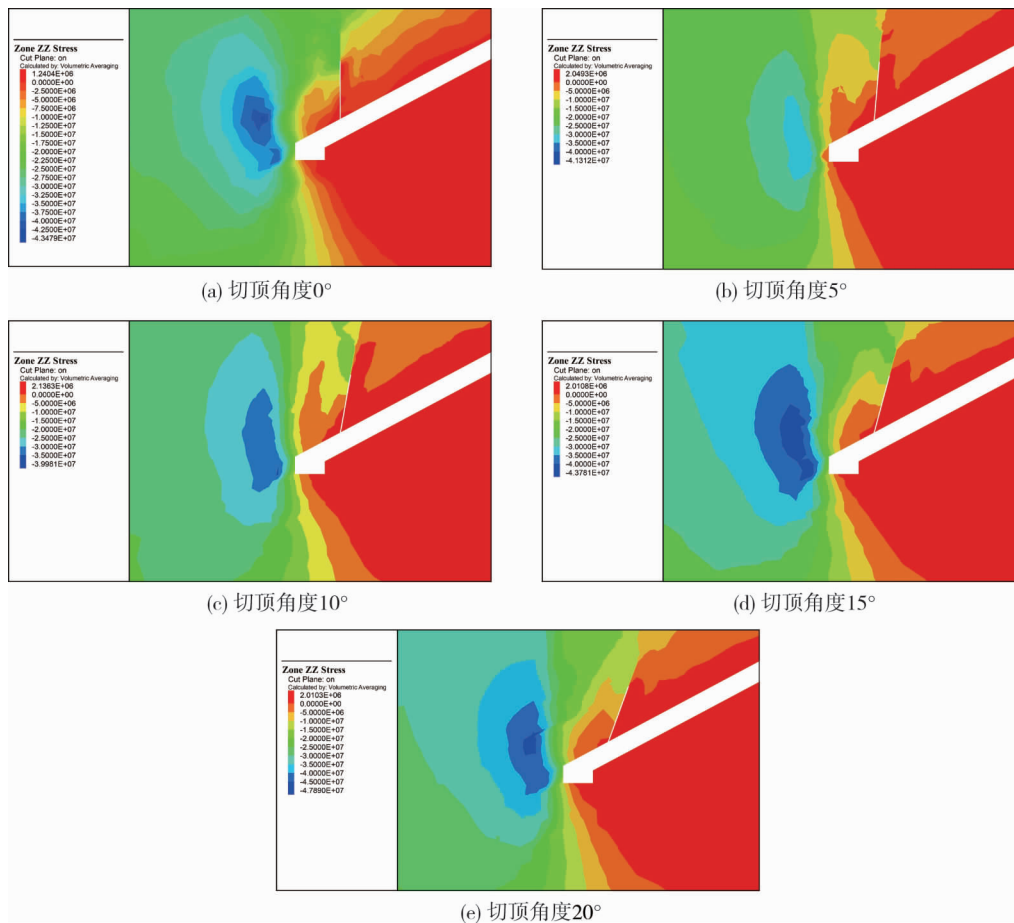


图8 不同预裂切顶角度的垂直应力分布

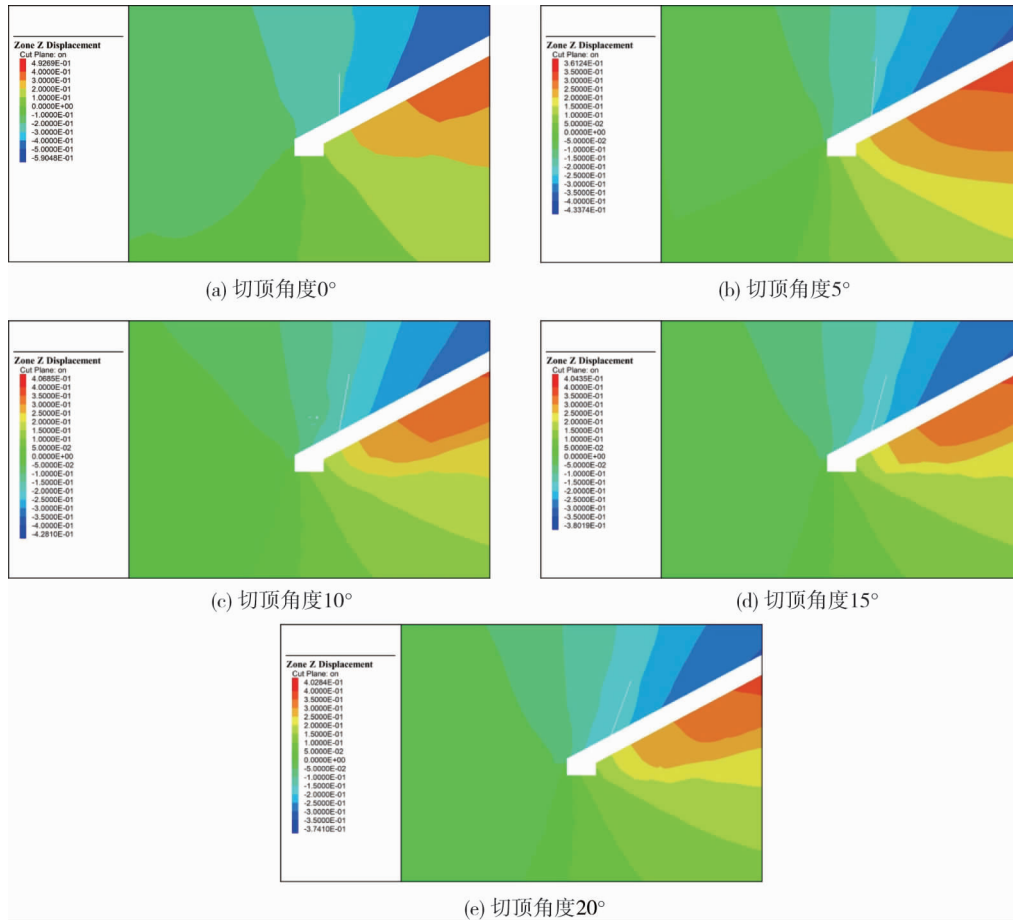


图9 不同预裂切顶角度的垂直位移分布

由图8可知:顶板预裂切顶角度 0° 时,留巷左侧实体煤帮处产生应力集中区,应力集中区的范围较大,应力集中峰值为43.5 MPa;顶板预裂切顶角度 5° 时,留巷左侧应力集中峰值为41.3 MPa,较 0° 切顶角度降低了5.1%;顶板预裂切顶角度 10° 时,留巷左侧应力集中峰值为40 MPa,较 0° 切顶角度降低了8.0%;顶板预裂切顶角度 15° 时,留巷左侧应力集中峰值为43.8 MPa,较 0° 切顶角度增加了0.7%;顶板预裂切顶角度 20° 时,留巷左侧应力集中峰值为47.9 MPa,较 0° 切顶角度增加了10.1%。

由图9可知:顶板预裂切顶角度 0° 时,巷道顶板下沉量为205 mm;顶板预裂切顶角度 5° 时,巷道顶板下沉量为198 mm,较 0° 切顶角度减少了3.4%;顶板预裂切顶角度 10° 时,巷道顶板下沉量为151 mm,较 0° 切顶角度减少了26.3%;顶板预裂切顶角度 15° 时,巷道顶板下沉量为153 mm,较 0° 切顶角度减少了25.4%,较 10° 切顶角度无明显变化;顶板预裂切顶角度 20° 时,巷道顶板下沉量为155 mm,较 0° 切顶角度减少了24.4%,较 10° 切顶角度无明显变化。

可以看出,当预裂切顶角度为 0° 和 5° 时,仍无法有效切断留巷顶板间的应力传递,巷内围岩的卸压效果也不明显,留巷顶板依旧向采空区侧回转下沉.当预裂切顶角度为 10° 时,能有效切落采空区侧顶板,并且巷内围岩压力的卸压效果较为明显.但当预裂切顶角度达到 15° 和 20° 时,由于增加了留巷顶板采空区侧的长度,反而导致留巷应力集中升高.因此,在切缝深度为5.5 m时,最优切顶角度为 10° 。

4.3 爆破孔间距数值模拟

模拟计算模型所采用的爆破孔间距分别为650, 600, 550, 500 mm,切缝深度和角度均取上述最佳结果5.5 m, 10° ,不同预裂切顶角度巷道围岩的垂直应力分布如图10所示。

由图10可知:爆破孔间距为650 mm时,在留巷左侧实体煤帮处产生应力集中区,应力集中区的范围较大,应力集中峰值为94.32 MPa;爆破孔间距为600 mm时,留巷左侧应力集中峰值为43.40 MPa,较650 mm间距降低了53.99%;爆破孔间距为550 mm时,留巷左侧应力集中峰值为43.37 MPa,较650 mm间距降低了54.02%;爆破孔间距为500 mm时,留巷左侧应力集中峰值为43.35 MPa,较650 mm间距降低了54.04%。

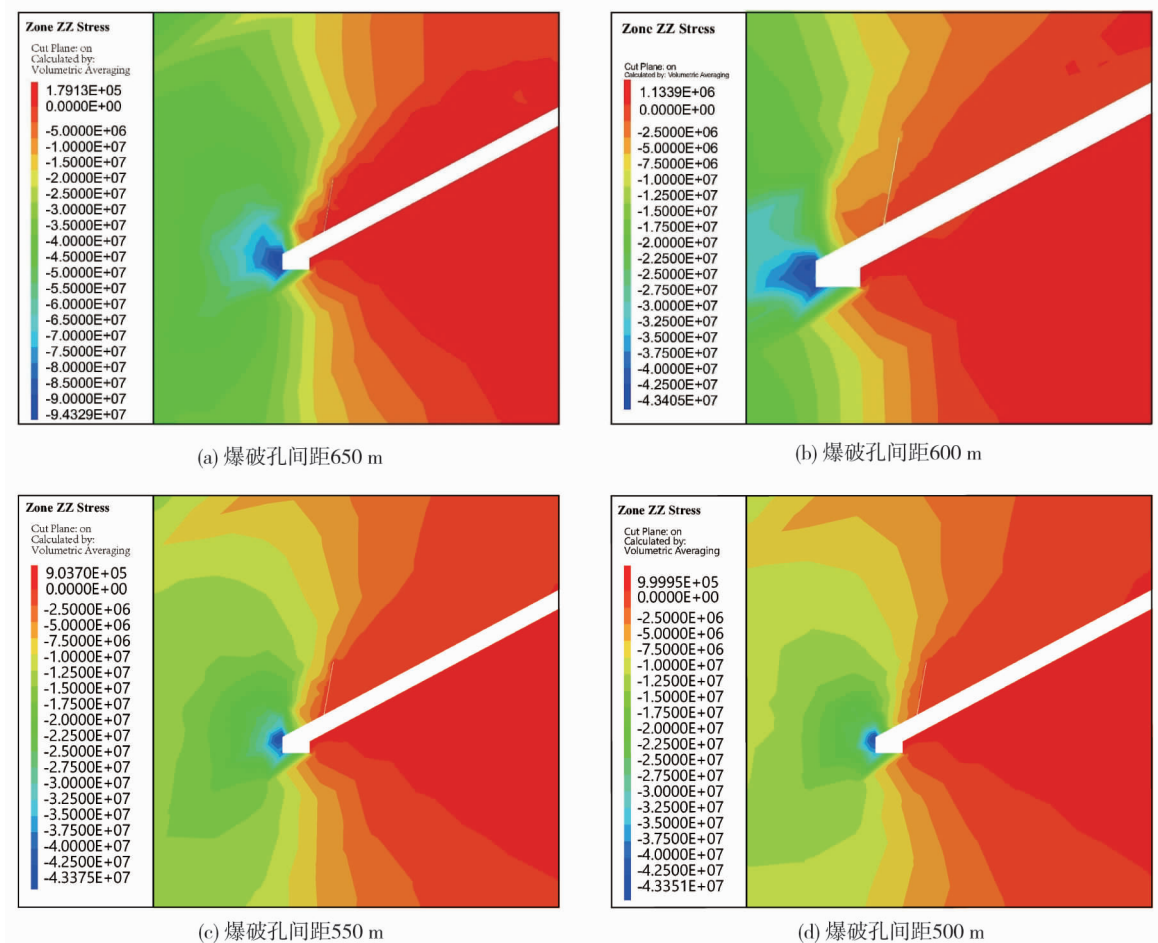


图 10 不同爆破孔间距的垂直应力分布

可以看出,当爆破孔间距为 650 mm 时,无法有效切断留巷顶板间的应力传递,巷内围岩的卸压效果也不明显.当爆破孔间距为 600,550,500 mm 时,能有效切落采空区侧顶板,并且巷内围岩压力的卸压效果较为明显.由于爆破孔间距为 600 mm 完全能满足切顶卸压的效果,同时考虑经济成本,因此,最优爆破孔间距为 600 mm.

5 工程应用

5.1 切顶卸压技术方案

根据对切顶卸压关键参数的研究,可知切顶高度为 5.5 m,切顶角度为 10°,爆破孔间距为 600 mm,切顶卸压炮孔布置在采空区侧距砌块墙顶部的上边缘 0.5 m 的顶板上.在破除超前切顶段煤壁时,每一段切顶段长度为 5~10 m,切顶段宽度为从底板至煤体至少 2.5 m,同时配合单体液压支柱进行支护,排距 1 m.超前切顶如图 11 所示.

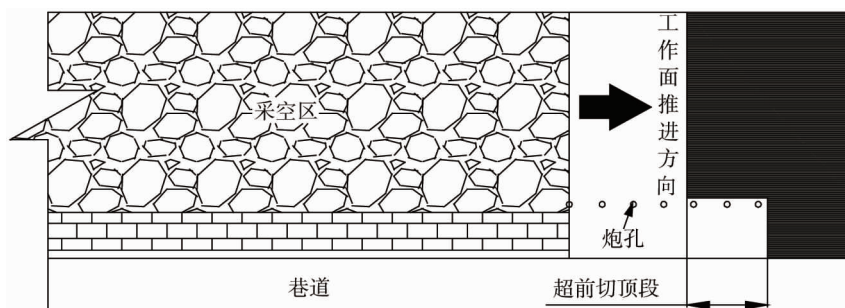


图 11 超前切顶

聚能管为内径 35 mm, 外径 40 mm, 长度 1 800 mm 的 PVC 管. 根据所选聚能管直径确定切顶卸压炮孔施工直径为 55 mm. 炮孔装药系数取 0.3, 即每孔装药量长度不少于 1.65 m, 每条炸药的长度为 0.22 m, 质量为 0.3 kg, 每孔装 8.5 条炸药, 若工作面顶板岩性发生变化, 可根据现场实际情况对炮孔装药量进行适当调整.

5.2 效果监测

5.2.1 现场监测点布置

为了表征沿空留巷的成功与否和进一步研究沿空留巷的围岩变形规律, 在 -2446(K26) 综采工作面上每隔 100 m 设置一个变形监测点, 主要对沿空留巷顶底板移近量进行现场监测. 沿空留巷沿走向长度为 497 m, 共设 4 个监测点. 监测点的布置如图 12 所示.

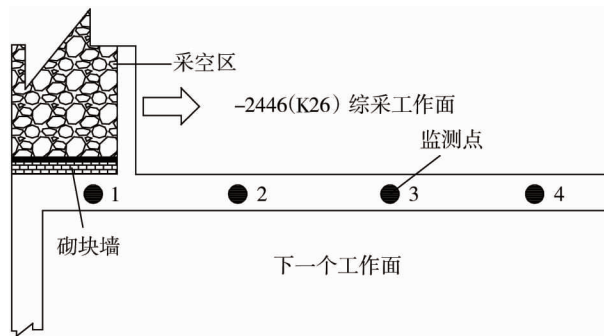


图 12 -2446(K26)综采工作面监测点布置

5.2.2 支护效果

在工作面回采过程中, 每隔 10 d 对各个监测点进行一次观测, 并做好顶底板移近量的记录工作. 本次主要对沿空留巷一次采动阶段、留巷稳定阶段和二次采动阶段 3 个阶段进行现场监测. 4 个监测点测得各个阶段的顶底板移近量如图 13 所示.

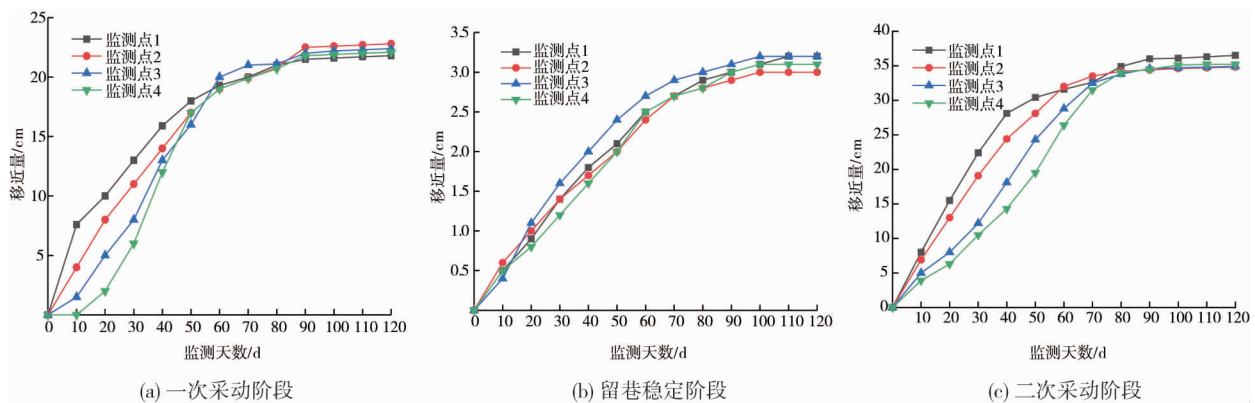


图 13 沿空留巷各个阶段顶底板移近量

由图 13 可知: 在沿空留巷一次采动阶段, 随着回采工作面的推进, 留巷顶底板的移近量逐渐增大, 在三个月后逐渐趋于稳定, 且越靠近回采工作面, 顶底板会提前发生变形. 监测点 1~4 的最大移近量分别为 218, 228, 224, 221 mm, 满足沿空留巷的安全生产需求. 在留巷稳定阶段, 监测点 1~4 的最大移近量分别为 32, 30, 32, 31 mm, 留巷顶底板移近量小, 仍保持着沿空留巷围岩的稳定性. 在二次采动阶段, 监测点 1~4 的最大移近量分别为 364, 348, 349, 352 mm. 3 个阶段监测点 1~4 的累计最大移近量分别达到 614, 606, 605, 604 mm. 虽然沿空留巷顶底板的累计移近量较大, 但二次回采过后, 沿空留巷即废弃不再使用. 因此, 仍能保证沿空留巷的正常使用, 证明了倾斜厚层坚硬顶板沿空留巷关键技术的可行性.

6 结论

1) 根据柏林煤矿 -2446(K26) 综采工作面的地质情况, 通过数值模拟的切顶前后巷道围岩应力情况

分析,确定有必要对采空区侧顶板进行切顶卸压。

2) 根据柏林煤矿-2446(K26)综采工作面的工程概况及设计的方案,结合数值模拟结果,同时考虑经济成本,确定最优切缝深度为5.5 m,最优切顶角度为 10° 。切顶方法采用双向聚能张拉预裂爆破技术进行超前预裂,爆破预裂孔间距为600 mm。

3) 将设计方案进行工程应用,对沿空留巷3个阶段进行现场监测。通过对各个阶段沿空留巷顶底板移近量的分析可知:顶底板移近量在合理范围之内,能满足沿空留巷的正常使用,证明了倾斜厚层坚硬顶板切顶卸压留巷关键参数的可行性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] WANG Q, JIANG B, PAN R, et al. Failure mechanism of surrounding rock with high stress and confined concrete support system [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 102: 89-100.
- [3] 窦林名,何焯,张卫东.孤岛工作面冲击矿压危险及其控制[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1866-1869.
- [4] 王琦,张朋,蒋振华,等.深部高强锚注切顶自成巷方法与验证[J].煤炭学报,2021,46(2):382-397.
- [5] 何满潮,宋振骥,王安,等.长壁开采切顶短臂梁理论及其110工法:第三次矿业科学技术变革[J].煤炭科技,2017(1):1-9.
- [6] 王亚军,何满潮,杨军,等.无煤柱自成巷“短臂梁”结构特征及变形计算分析[J].中国矿业大学学报,2019,48(4):718-726.
- [7] 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.
- [8] 文志杰,蒋宇静,宋振骥,等.沿空留巷围岩结构灾变系统及控制力学模型研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2011,26(3):12-16.
- [9] 孙晓冬,黄志增,郑建伟,等.复采工作面无煤柱开采技术[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(3):1-6.
- [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.
- [11] TAO Z G, SONG Z G, HE M C, et al. Principles of the roof cut short-arm beam mining method (110 method) and its mining-induced stress distribution [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28(3): 391-396.
- [12] WANG Q, HE M C, YANG J, et al. Study of a no-pillar mining technique with automatically formed gob-side entry retaining for longwall mining in coal mines [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 110: 1-8.
- [13] 朱珍,何满潮,王琦,等.柠条塔煤矿自动成巷无煤柱开采新方法[J].中国矿业大学学报,2019,48(1):46-53.
- [14] 何满潮,郭鹏飞,王炯.破碎顶板切顶留巷采空区顶板垮落特征试验研究[J].煤炭科技,2017(3):1-7.
- [15] 杨百顺,谢洪,凌志迁.深井开采沿空留巷顶板锚杆强化控制技术研究[J].中国安全生产科学技术,2010,6(4):50-55.
- [16] 何满潮,马资敏,郭志飏,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.
- [17] 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.