

厚硬顶板切顶留巷最优参数及围岩稳定性分析

Optimal Parameters and Surrounding Rock Stability Analysis for Roof Cutting and Entry Retaining with Thick Hard Roof

陶宏斌(盘州市能源局, 贵州 盘州 553536)

摘要:为确定厚硬顶板切顶留巷最优技术参数,选取5 m、10 m、15 m切顶高度和0°、10°、15°、20°切顶角度,通过理论分析和3DEC数值模拟,对厚硬顶板切顶成巷形态和围岩稳定性进行研究。研究表明:切顶后巷道顶板形成“短臂梁”结构,当切顶高度和切顶角度一定时,切落顶板对巷道顶板“短臂梁”支撑力越大,其顶板所需的支护力F则越小,因此在切顶成巷时,应尽量使切落顶板充分接顶;随切顶高度增大,巷道实煤体一侧水平位移值随之增大,垂直位移随之减小,而巷道低位顶板水平位移几乎均为0;对厚硬顶板切顶成巷时需保持倾斜切缝,而随着切顶角度增大,巷道顶板垂直位移和实煤体一侧水平位移随之增大。基于此,综合确定10 m切顶高度、10°~15°切顶角度的最优切顶参数。

关键词:厚硬顶板;沿空留巷;切顶参数;数值模拟

中图分类号:TD322 文献标志码:A 文章编号:1672-609X(2023)01-0060-07

Abstract:In order to determine the optimal technical parameters of roof cutting and entry retaining with thick hard roof, the cutting heights of 5 m, 10 m and 15 m and the cutting angles of 0°, 10°, 15° and 20° were selected. Through theoretical analysis and 3DEC numerical simulation, the shape of the roadway formed by the thick hard roof and the stability of the surrounding rock are studied. The results show that the roadway roof forms a “short arm beam” structure after roof cutting. When the roof cutting height and the roof cutting angle are constant, the greater the supporting force of the cut roof on the “short arm beam” of the roadway roof, the smaller the supporting force F required by the roof. Therefore, when cutting the roof into the roadway, try to make the cut roof fully connect to the roof; With the increase of the roof cutting height, the horizontal displacement value of the solid coal body side of the roadway increases and the vertical displacement decreases, while the horizontal displacement of the low roof of the roadway is almost zero; When the thick hard roof is cut into the roadway, it is necessary to maintain the inclined cutting seam. With the increase of the roof cutting angle, the vertical displacement of the roadway roof and the horizontal displacement of the solid coal body side increase. Based on this, the optimal roof cutting parameters with a roof cutting height of 10 m and a roof cutting angle of 10° to 15° were comprehensively determined.

Key words:thick and hard roof; gob-side entry retaining; roof cutting parameters; numerical simulation

1 前言

沿空留巷技术自20世纪50年代提出,众多学者对此深入研究^[1-4]。其中针对坚硬顶板工作面,目前主流的留巷方式为切顶卸压沿空留巷^[5],即在工作面前方提前采用爆破或水力压裂等技术手段,将回采巷道靠近采空区一侧的顶板切断,阻止应力传递,待工作面回采后,采空区顶板受自重影响沿切缝滑落自然

成巷^[6-7]。何满潮院士等^[8-9]基于“短臂梁理论”提出切顶卸压无煤柱开采技术方案,取得成功应用。并进一步深入研究得出深部高应力复合破碎顶板切顶留巷关键参数。郭金刚等^[10]采用理论分析、数值模拟、物理相似模拟等手段获得厚硬基本顶切顶卸压巷道围岩应力及位移分布,并基于此确定最优切顶方案。郭志彪等^[11]针对薄煤层进行切顶成巷关键参数研究,确定了薄煤层沿空留巷切顶角度和切顶厚度的计算公式。郑立军等^[12]运用理论分析和数值模拟方法,获得了大埋深、高应力、坚硬顶板等条件下的巷道顶板预裂爆破切顶高度。娄庆楠等^[13]针对切顶留巷中极易出现的煤帮破碎等现象,提出高强度固帮切顶

[作者简介] 陶宏斌(1988—),男,工程师,从事煤矿采掘技术管理相关工作。

[引用格式] 陶宏斌.厚硬顶板切顶留巷最优参数及围岩稳定性分析[J].中国矿山工程,2023,52(1):

成巷方法解决巷道大变形等工程问题。王方田等^[14]针对切顶卸压沿空留巷工作面超前段围岩变形严重及支护困难问题,提出锚索强化技术,实现围岩稳定性控制。苏超等^[15]对深井临空巷道覆岩结构及运移规律进行理论和数值模拟研究,得出深井临空高应力巷道切顶卸压机理。

上述研究成果较好地丰富了沿空留巷无煤柱开采技术体系,但我国各个矿区开采条件均有所不同,尤其针对较厚坚硬顶板条件下切顶沿空留巷技术参数对成巷形态及围岩稳定性影响的研究较少。本文在上述的研究基础上,以某矿厚硬顶板工程背景,采用数值模拟研究不同切顶高度和切顶角度下的巷道成巷形态以及围岩位移分布特征,进而为该矿工程实际中的最优切顶方案提供技术支持,同时也为同类型地质条件下的切顶留巷工程应用提供可借鉴的研究成果。

2 工程背景

某矿所采煤层为4⁻²号煤,煤层均厚3.11 m,倾角0°~3°属近水平煤层,埋深212.32 m,工作面倾斜长度为180 m,采煤方法为综合机械化采煤法,采空区采用全部垮落法进行管理。无伪顶和直接顶,基本顶均厚30.59 m,主要为细粒砂岩,直接底均厚4 m,主要为粉砂岩,基本底均厚20 m,主要为细粒砂岩。工作面胶运巷(净宽×净高=5 m×3.11 m)预采用沿空留巷施工工艺,以后该巷道作为下一工作面的回风巷使用,具体如图1所示。顶板预采用锚网索支护,底板采用混凝土硬化,其中顶板拟采取的支护方案为φ20 mm×2 100 mm II级螺纹钢锚杆支护,间排距均为1 000 mm×1 000 mm以及φ18.9 mm×7 300 mm的锚索支护,间排距2 000 mm。为防止切顶后采空区矸石滑入巷道,巷道采空区侧预设置巷帮挡杆支护。

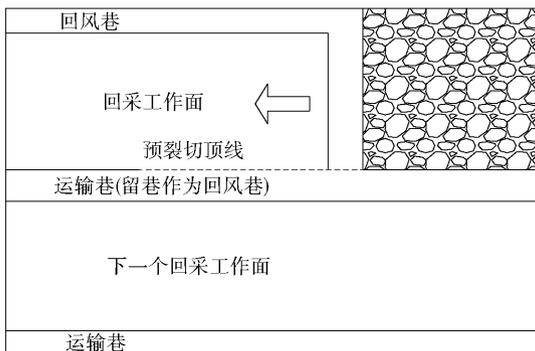


图1 工作面胶运巷切顶留巷示意图

3 厚硬顶板切顶留巷顶板受力分析

采用切顶卸压的方式进行沿空留巷,切落顶板及矸石会冒落充填采空区,上位顶板在采空区矸石和煤体的支撑作用下保持稳定,通过对巷道围岩进行受力分析,建立切顶沿空留巷围岩结构力学模型,力学模型如图2所示。

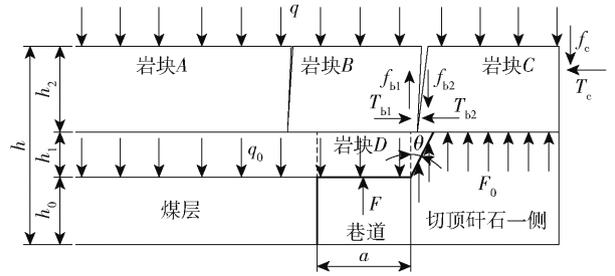


图2 切顶留巷结构力学模型

图中, h 、 h_0 、 h_1 和 h_2 分别为一定的煤岩层总厚度、煤层厚度、切顶高度和未切落顶板厚度; T_{b1} 、 T_{b2} 、 T_c 、 f_{b1} 、 f_{b2} 和 f_c 分别为未切落顶板岩块之间的水平推力、摩擦力,且各力在结构平衡状态下相互抵消; F 为巷道内支护力; F_0 为切顶垮落矸石对顶板平均支撑力集度; q_0 为切落 h_1 高度顶板后留巷部分平均重量; q 为未切落顶板及上覆岩层平均载荷; θ 为切顶角度; a 为留巷宽度。

根据切顶留巷结构力学模型可以得知,当在一定的煤岩层总厚度 h 下时,煤层厚度 h_0 确定,首先需要保证切顶高度 h_1 垮落后能够较好地充满采空区, h_1 满足式(1):

$$h_1 \geq \frac{h_0}{K-1} \quad (1)$$

式中, K 为碎胀系数。

采用静力学方法对切顶后巷道低位顶板岩块 D 受力分析,存在: $q(a+h_1 \tan \theta) + q_0 \left(a + \frac{h_1 \tan \theta}{2} \right) = F_0 h_1 \tan \theta + F$,化简可得巷道支护力 F 为

$$F = h_1 \tan \theta \left(\frac{1}{2} q_0 + q - F_0 \right) + a(q + q_0) \quad (2)$$

由式(2)可以得知:当切顶高度和切顶角度一定时,切落矸石对顶板支撑力 $F_0 h_1 \tan \theta$ 越大,巷道顶板所需的支护力 F 越小。因此切顶成巷时,尽量保障切落矸石充分接顶,对顶板具有较好支撑作用。

此外,在设计巷道顶板切顶参数时,当切顶高度和切顶角度越大时由于巷道低位顶板“短臂梁”自重越大,因此保证巷道顶板受力稳定所需的支护力

F 越大。切顶高度和切顶角度参数的合理选取直接关系到回采巷道围岩稳定性。

4 坚硬顶板沿空留巷不同切顶参数数值模拟

根据切顶卸压沿空留巷的现有技术,当切顶顶板涉及伪顶、直接顶时,由于其岩层强度低能够较好地提前垮落,因此基本顶切落后下沉空间及高度会相对较小,其最优切顶角度多为 $15^\circ \sim 20^\circ$; 结合本文当无直接顶的切顶留巷,坚硬顶板切断难以提前垮落,因此需设计合理的切顶角度,使得顶板既能够顺利垮落又能够与未切落顶板相互铰接形成稳定结构,避免切落顶板造成的工作面冲击来压,并保障巷道围岩稳定性。因此巷道切顶角度 θ 应大于 0° , 本文分别选择 $0^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 。根据式(1)需满足切顶高度大于 h_1 , 结合本文煤层厚度 h_0 选取切顶高度分别为 5 m、10 m、15 m。基于此,通过上述不同数值模拟方案,进一步观测不同切顶高度和切顶角度下基本顶跨落形态以及巷道围岩位移分布特征。

4.1 3DEC 数值模型的构建

建立如图 3 所示的 3DEC 数值模型,其总尺寸为 $240\text{ m} \times 5\text{ m} \times 64\text{ m}$, 模型 x 方向为 240 m, 其中工

作面长度 180 m, 两侧各 30 m 边界煤柱; y 方向, 受计算机运算能力限制, 仅选取 5 m; z 方向为煤层及顶底板总厚度, 约 64 m。此外巷道断面尺寸为 $5\text{ m} \times 3\text{ m}$, 切顶处采用 JSET 命令建立不同切顶方案下(切顶角度: $0^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$; 切顶高度: 5 m、10 m、15 m)的大尺度节理来预制切缝, 且将该节理各力学参数均调为 0。固定模型底部和四周即限制水平位移和速度均为 0, 顶部为自由边界其上部的岩层荷载用 5.75 MPa 的均布荷载代替。模型采用 BLOCK 的几何实体, 块体本构模型选用 Cons 2 弹/塑性, 服从摩尔库伦破坏, 节理本构模型选用 Jcons 2 库伦滑移破坏下区域接触弹/塑性。煤岩层力学参数见表 1。

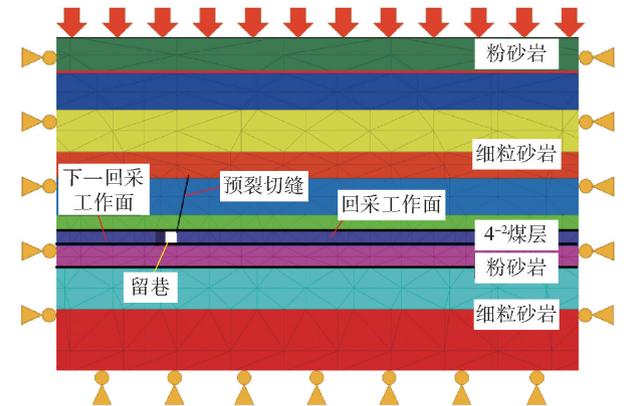


图 3 3DEC 数值计算模型

表 1 煤岩体力学参数

岩石名称	块体密度/ $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/ $(^\circ)$
粉砂岩	2 540	6.85	5.47	3.86	5.20	40
细粒砂岩	2 600	5.27	4.69	3.35	4.38	39
4-2 号煤	1 350	3.95	2.20	1.04	0.5	30
粉砂岩	2 540	6.85	5.47	3.86	5.20	40
细粒砂岩	2 600	5.27	4.69	3.35	4.38	39

4.2 不同切顶高度下成巷形态及围岩位移分布特征

1) 不同切顶高度下成巷形态分析

如图 4 所示, 针对煤层上方 30.59 m 的细粒砂岩, 分别模拟切顶角度 10° , 切顶高度为 5 m、10 m 和 15 m 时巷道的形成状态和顶板垮落特征。

当切顶高度为 5 m 时, 被切落的顶板垮落状态较差, 其中仅有约 3 m 厚的顶板垮落, 且垮落不够充分, 与巷道顶板形成一定的铰接状态, 成巷效果较差, 切顶一侧巷帮存在空帮现象, 不利于巷道稳定; 当切顶高度为 10 m 时, 被切落的顶板垮落状态较

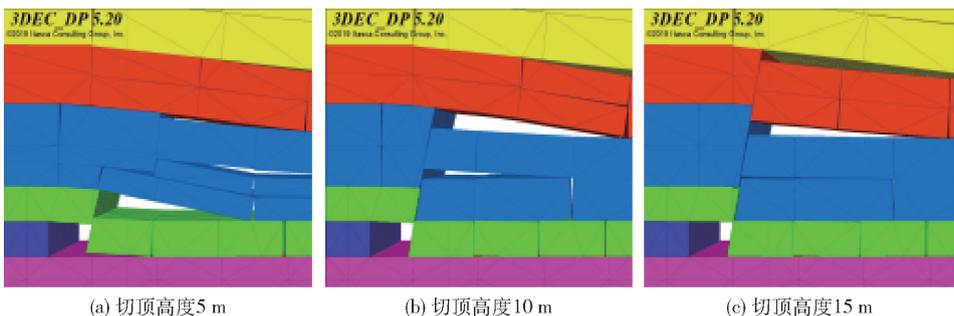


图 4 不同切顶高度下成巷形态

好,其中仅有上位约 3.5 m 厚的顶板未完全垮落,与巷道顶板形成铰接结构,而下位约 6.5 m 厚的顶板完全垮落,较好地充填采空区,形成有效的切顶一侧巷帮,同时切落顶板形成的巷帮对巷道顶板短臂岩梁起一定倾斜支撑作用;当切顶高度为 15 m 时,被切落的顶板垮落状态同切顶高度 10 m 时一样较好,能够形成有效的切顶一侧巷帮,但巷道切顶一侧出现局部顶

板破碎现象,此外存在上位约 5 m 厚的顶板未完全垮落,与巷道顶板形成铰接结构,而下位约 10 m 厚的顶板完全垮落,若未完全垮落顶板铰接结构失稳,会产生较切顶高度 10 m 时更大的冲击来压。

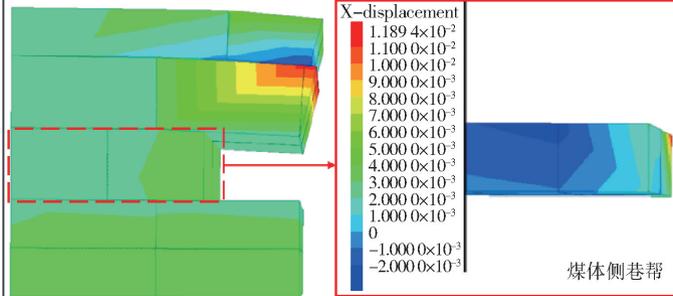
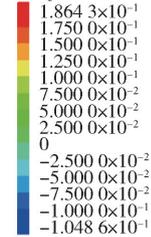
2) 不同切顶高度巷道围岩位移分布

如图 5 所示,分别模拟切顶角度 10°,当切顶高度分别为 5 m、10 m 和 15 m 时,巷道实煤体一侧最

3DEC_DP 5.20

@2019Itasca Consulting Group, Inc.
Step 318732

X-displacement

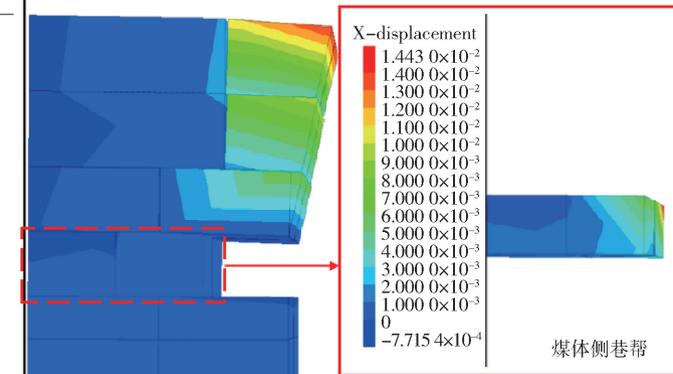
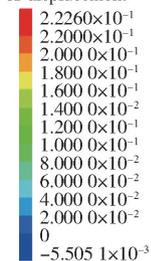


(a) 切顶高度 5 m

3DEC_DP 5.20

@2019Itasca Consulting Group, Inc.
Step 247625

X-displacement

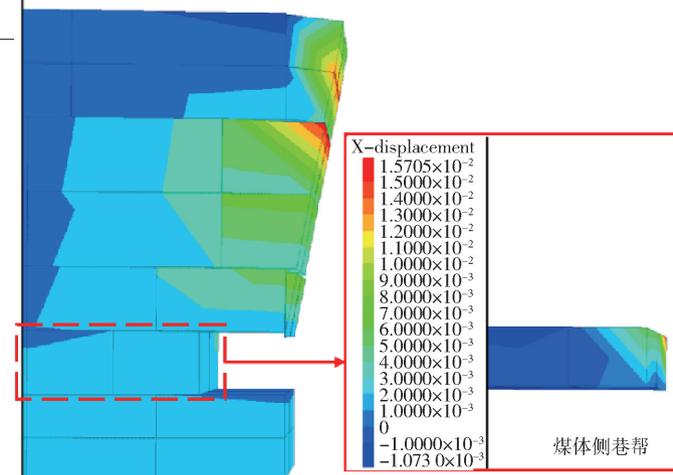
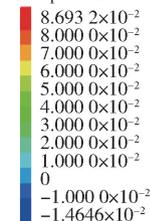


(b) 切顶高度 10 m

3DEC_DP 5.20

@2019Itasca Consulting Group, Inc.
Step 335115

X-displacement



(c) 切顶高度 15 m

图 5 不同切顶高度下巷道水平位移 (单位:m)

大水平位移分别为 0.011 89 m、0.014 43 m 和 0.015 71 m。可以表明随着切顶高度的增大,实煤体一侧巷帮水平位移值随之增大,巷道稳定性略差。同时,由于切落顶板对巷道低位顶板存在倾斜向上的支撑作用,因此不同切顶高度下巷道低位顶板水平位移均较小,几乎接近于 0;随着切顶高度增大,顶板切落对采空区充填高度较大,同时对巷道顶板存在倾斜向上支撑作用,因此最大水平位移分布位置随着切顶高度的增大向上位顶板转移。

如图 6 所示,分别模拟切顶角度 10°,当切顶高度分别为 5 m、10 m 和 15 m 时,巷道低位顶板垂直位移分别为 0.1 ~ 0.32 m、0.05 ~ 0.175 m 和 0.05 ~ 0.1 m,其中切顶高度为 15 m 时由于巷道切顶一侧存在顶板局部破碎,因此破碎位置最大垂直位移可达 0.275 m。上述结果可以表明,在不考虑顶板破碎的前提下,由于切落顶板对巷道顶板存在倾斜向上的支撑作用,因此随着切顶高度的增大,巷道顶板垂直位移减小,且最大垂直位移分布位置向巷道上位顶板转移。

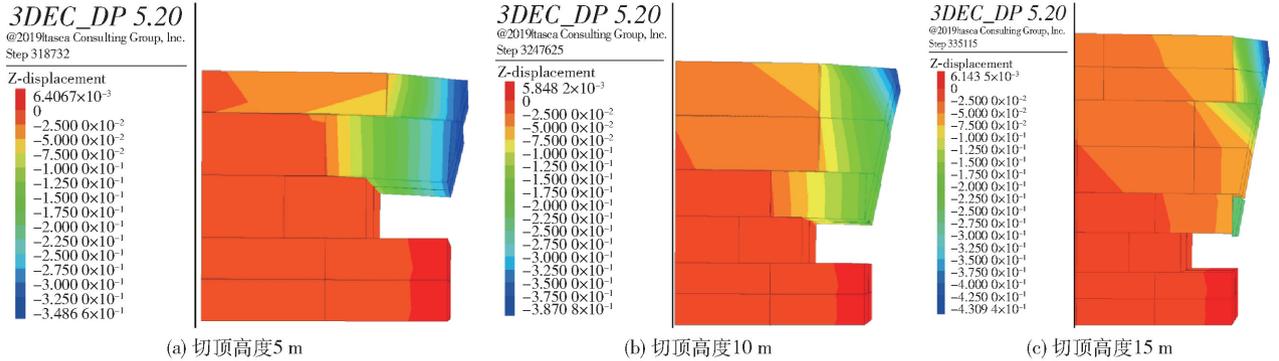


图 6 不同切顶高度下巷道垂直位移(单位:m)

4.3 不同切顶角度成巷形态及围岩位移分布特征

基于 4.2 节分析结果,将切顶高度固定为 10 m,切顶角度选取 0°、15°、20°,进一步探究不同切顶角度下的成巷形态和围岩位移分布特征。

1) 不同切顶角度成巷形态分析

图 7 以及图 4(b) 分别表示切顶高度 10 m,切顶角度为 0°、15°、20°、10°下的四种巷道的形成状态和顶板垮落特征模拟情况。

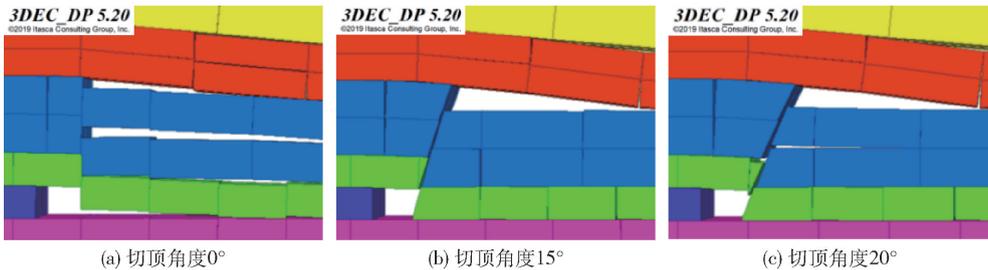


图 7 不同切顶角度下成巷形态

当切顶角度为 0°时,被切落顶板垮落状态较差,这是因为切缝右侧的顶板岩层与左侧的巷道上方的“短臂梁”摩擦较大,导致顶板垮落不够充分,出现空帮现象,并致使巷道顶板发生明显的回转变形,不利于巷道稳定;当切顶角度为 15°时,被切落的顶板顺利垮落,对巷道顶板“悬臂梁”具有很好的支撑作用,且成巷较为完整;当切顶角度为 20°时,顶板垮落顺利,但此时巷道顶板“短臂梁”自重加大,且在上覆岩层影响下,出现破碎,不利于巷道成巷稳定。因此综合得出,在巷道进行切顶后,切顶角度为 10°和 15°时,成巷形态较好,垮落矸石对上覆岩层以及巷道顶板均有良好的承载支撑效果。

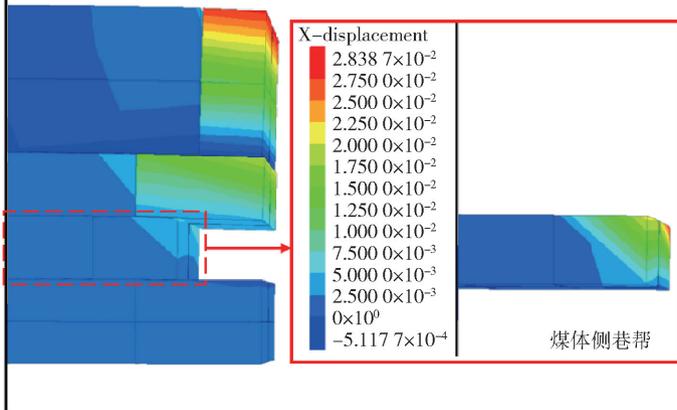
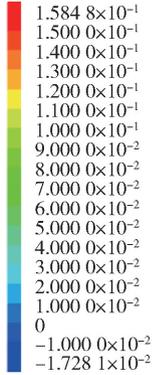
2) 不同切顶角度巷道围岩位移分布

如图 8 及图 5(b) 分别表示切顶高度 10 m,当切顶角度分别为 0°、15°、20°及 10°时,巷道实煤体一侧最大水平位移分别为 0.028 39 m、0.014 43 m、0.015 42 m 和 0.017 38 m。可以表明当切顶角度为 0°时,由于切落顶板与巷道顶板“悬臂梁”的较大回转变形,在巷道顶板较强剪切作用下,实煤体一侧水平位移较大;当顶板沿倾斜切割时,由于切落顶板对巷道顶板存在倾斜向上的支撑作用,“悬臂梁”回转变形较小,因此实煤体一侧水平位移较小,但当切顶角度较大时,受顶板自重影响,实煤体一侧水平位移略大,其巷道稳定性略差。

3DEC_DP 5.20

@2019Itasca Consulting Group, Inc.
Step 276462

X-displacement

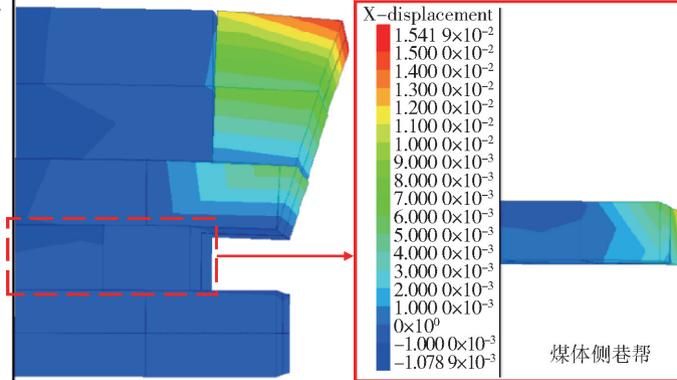
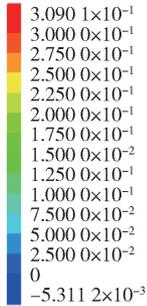


(a) 切顶角度0°

3DEC_DP 5.20

@2019Itasca Consulting Group, Inc.
Step 264158

X-displacement

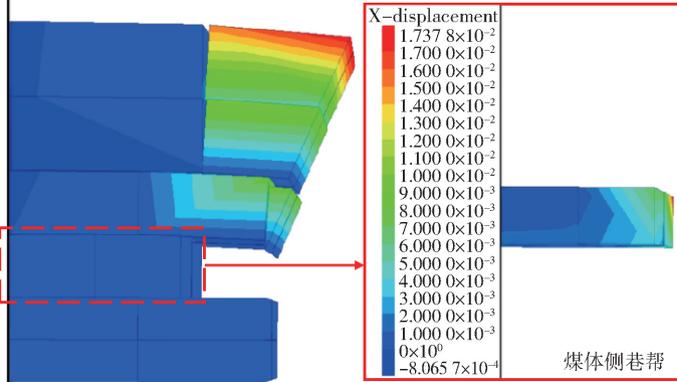
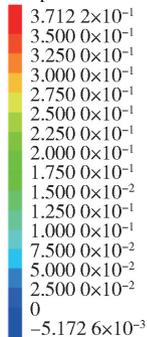


(b) 切顶角度15°

3DEC_DP 5.20

@2019Itasca Consulting Group, Inc.
Step 273213

X-displacement



(c) 切顶角度20°

图 8 不同切顶角度下巷道水平位移(单位:m)

如图 9 所示,当切顶角度分别为 0°、15°和 20°时,巷道低位顶板垂直位移分别为 0.04 ~ 0.17 m、0.1 ~ 0.25 m 和 0.1 ~ 0.4 m,随着切顶角度增大,巷道低位顶板垂直位移逐渐增大,其中切顶角度为 20°时,巷道顶板靠近切缝一侧出现局部破碎情况,

破碎位置的最大垂直位移达到 0.75 m。结合图 6 (b)综合分析巷道顶板受力情况,表明顶板自重对顶板产生绕巷道左侧的顺时针方向弯矩,在不考虑顶板破碎的前提下,随着切顶角度增大,巷道顶板的“短臂梁”结构水平长度增大,弯矩逐渐增大,在弯

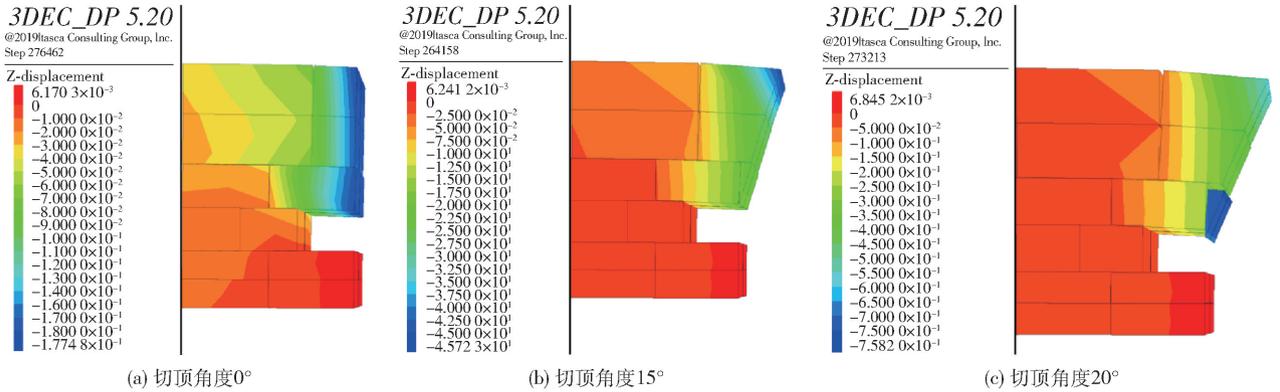


图9 不同切顶角度下巷道垂直位移(单位:m)

矩的作用下,使得“短臂梁”的垂直位移增大。同时,切顶角度越大,切落顶板对巷道顶板倾斜向上的支撑作用越小,因此随着切顶角度的增大,巷道顶板垂直位移增大,且最大垂直位移分布位置向巷道顶板右侧转移。

5 结论

(1)通过构建切顶沿空留巷围岩结构力学模型,分析得出当切顶高度和切顶角度一定时,切落矸石对顶板“短臂梁”支撑力越大,巷道顶板所需的支护力 F 越小。因此切顶成巷时,需要满足切落矸石充分接顶。同时,随着切顶高度和切顶角度增大,巷道低位顶板“短臂梁”自重增大,所需的巷道顶板支护力 F 也随之增大。

(2)巷道实煤体一侧随切顶高度增大,水平位移值随之增大而垂直位移随之减小;巷道上方未切落顶板随着切顶高度增大,较大水平位移和垂直位移分布位置均向上位顶板转移,且巷道低位顶板水平位移几乎均为0,从而确定10 m的切顶高度可以达到较好的成巷效果。

(3)对厚硬顶板切顶成巷需保持倾斜切缝,而随着切顶角度增大,由于巷道顶板“短臂梁”结构和上覆岩层的自重增大,其自重及回转变形共同作用在巷道实煤体一侧,因此巷道水平位移随之增大;同时,巷道顶板垂直位移同步增大,且最大垂直位移分布位置向巷道顶板切缝侧转移,当角度达到20°以上时巷道顶板出现严重破碎现象。因此,确定切顶角度为10°~15°可以实现较好的成巷效果。

[参考文献]

[1] 康红普,张晓,王东攀,等. 无煤柱开采围岩控制技术及应用[J]. 煤炭学报,2022,47(1):16-44.
[2] 赵小兵. 切顶卸压方案下围岩稳定性分析[J]. 煤炭技术,2022,41(4):59-62.

[3] 李明,李巍,张鹏. 超长工作面深孔预裂卸压沿空留巷技术研究[J]. 矿业研究与开发,2021,41(2):7-13.
[4] 熊钰,孔德中,吴桂义,等. 大倾角沿空留巷承载特性及控制研究[J]. 矿业研究与开发,2021,41(4):81-87.
[5] 李修冠,张向阳,张懿,等. 坚硬顶板特厚煤层初采初放卸压控制及回采率分析研究[J]. 矿业研究与开发,2022,42(6):20-28.
[6] 于光远,王炯,孙晗,等. 砌块充填沿空留巷底鼓大变形机理及综合控制技术[J]. 采矿与安全工程学报,2022,39(2):335-346.
[7] 李磊. 土城煤矿13165回风巷沿空留巷技术研究[D]. 贵阳:贵州大学,2021.
[8] 何满潮,陈上元,郭志飏,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.
[9] 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.
[10] 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.
[11] 郭志飏,王将,曹天培,等. 薄煤层切顶卸压自动成巷关键参数研究[J]. 中国矿业大学学报,2016,45(5):879-885.
[12] 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.
[13] 娄庆楠,郑洪运,赵爽,等. 高强度固帮切顶成巷方法研究[J]. 矿业研究与开发,2021,41(6):77-83.
[14] 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.
[15] 苏超,弓培林,康红普,等. 深井临空高应力巷道切顶卸压机理研究[J]. 采矿与安全工程学报,2020,37(6):1104-1113.