

# 倾斜煤层上顺槽沿空留巷顶板抽冒机理研究

吴少旭, 范文哲

核工业北京地质研究院, 北京  
Email: wushaoxu@briug.cn, fanwenzhe@briug.cn

收稿日期: 2021年3月17日; 录用日期: 2021年4月18日; 发布日期: 2021年4月27日

## 摘要

为了研究倾斜煤层上顺槽沿空留巷顶板的抽冒机理, 本文结合长城三矿的生产地质条件, 采用理论分析, 研究了充填体上方直接顶极限平衡区的宽度, 进而确定了煤层倾角是影响倾斜煤层上顺槽沿空留巷充填体上方直接顶稳定性的重要因素。再通过UDEC数值模拟软件, 研究了充填体上方直接顶的变形、切向位移量、损伤程度、离层量等参数与煤层倾角的关联, 为倾斜煤层中沿空留巷的应用及安全生产提供了理论基础。结果表明: 直接顶变形量、切向位移量、损伤程度和离层量会随着煤层倾角的变大而变大, 且顶板切向位移量和离层量的分布情况也会随之变化。

## 关键词

倾斜煤层, 沿空留巷, 充填体顶板, 稳定性影响因素, 顶板抽冒机理

# Research on Mechanism of Roof Caving in Gob-Side Entry Retaining in Upper Roadway within Inclined Coal Seam

Shaoxu Wu, Wenzhe Fan

Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing  
Email: wushaoxu@briug.cn, fanwenzhe@briug.cn

Received: Mar. 17<sup>th</sup>, 2021; accepted: Apr. 18<sup>th</sup>, 2021; published: Apr. 27<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In order to study the mechanism of roof caving in gob-side entry retaining in upper roadway within inclined coal seam, combined with the production geological conditions of Changcheng No.3 Mine, the width of limit equilibrium area of direct roof above backfill is studied by theoretical analysis,

and then it is determined that the dip angle of coal seam is the main factor affecting the stability of direct roof above backfill of gob side entry retaining in coal seam. Then, through UDEC numerical simulation software, the relationship between deformation, tangential displacement, damage degree, layer separation of the direct roof above backfill and coal seam dip angle is studied, which provides a theoretical basis for the application of gob-side entry retaining in inclined coal seam. Result shows that the deformation, tangential displacement, damage degree and separation amount of direct roof will rise with the increase of coal seam dip angle, and the distribution of tangential displacement and separation amount of direct roof will also change.

## Keywords

Inclined Coal Seam, Gob-Side Entry Retaining, Direct Roof above Backfill, Stability Factor, Roof Caving Law

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

沿空留巷技术是煤矿生产技术的一次重大飞跃。沿空留巷可以完全消除区段煤柱, 提高资源采出率, 降低巷道支护难度, 减少巷道掘进量, 缓解采掘接替矛盾, 取消孤岛工作面, 缩短搬家时间, 技术优势和经济效益显著。长期以来, 国内外不少学者对沿空留巷进行了大量的研究, 极大地促进了沿空留巷技术的推广应用[1] [2] [3]。

然而理论和实践表明, 影响沿空留巷稳定性的因素很多, 尤其是倾斜煤层沿空留巷, 随着煤层倾角增加, 由于重力沿层位法线方向的分量减小, 顶板的垂直下沉量将逐渐变小, 而顶板切向位移量将逐渐变大。另外, 由于倾角增加, 采空区顶板冒落的矸石不一定能在原地留住, 很可能沿着底板滑移, 从而改变了上覆岩层的运动规律, 进而发生抽冒现象。根据对不同倾角的冒落带和导水裂隙带观测, 也可以证明岩层移动是不均匀的, 尤其是在急倾斜煤层, 基本上改变了原来的规律性。因此若要实现倾斜煤层沿空留巷, 必须研究倾斜煤层中沿空留巷顶板的稳定性影响因素及抽冒机理[4] [5] [6]。

与近水平煤层不同的是, 在倾斜煤层中, 沿空留巷分为两种形式, 一种为上巷沿空留巷, 一种为下巷沿空留巷, 如图 1 所示。这两种布置情况下, 严空巷道顶板的受力及运动都不同。一般情况下, 在下顺槽进行充填体的留设会更容易成功, 充填体上方顶板也更加稳定。

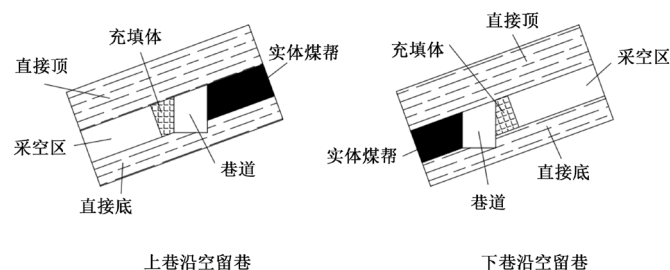


Figure 1. Gob-side entry retaining in upper lane and down lane

图 1. 上巷沿空留巷与下巷沿空留巷示意图

但是有时候, 在实际开采过程中, 考虑到采场整体采掘交替顺序的安排, 无法进行下顺槽沿空留巷,

就需要在上顺槽进行充填体的留设, 而这一部分的研究目前还比较欠缺, 所以本文主要就在上顺槽沿空留巷充填体的情况进行讨论。

## 2. 工程概况

本文基于长城三矿 9# 煤层的工程地质背景, 研究倾斜煤层中沿空留巷顶板的稳定性影响因素。长城三矿主开采煤层之一的 9# 煤, 煤厚平均 4.0 m, 煤层埋深平均 690 m, 研究区域所在巷道平均倾角约为 25° 左右, 最大达到 30°。9# 煤直接顶为灰岩, 深灰色, 层状构造, 含方解石充填物, 厚度 5 m 左右, 坚硬, 单轴抗拉强度约为 3.3 MPa; 基本顶为泥质粉砂岩, 粉砂质结构为主, 块状构造, 岩层较完整, 厚度约为 6 m。9# 煤直接底岩性以粉砂岩为主, 灰褐色, 粉砂质结构, 厚度约 3 m。

## 3. 充填体上方直接顶抽冒机理

在倾斜煤层上顺槽进行沿空留巷时, 老顶回转下沉量增大, 对充填体上部的直接顶挤压加剧, 并且由于自重作用, 直接顶易发生滑落、冒落, 导致充填体不接顶而失败, 这就是抽冒现象[7] [8] [9]。对充填体上方直接顶进行简化受力分析可以发现, 该项板区域主要受力为上覆岩层作用于岩层法向的分力  $F_1$ , 上覆岩层作用于岩层切向的分力  $F_2$ , 岩体自重  $G$  及上下表面摩擦力作用, 如图 2 所示, 由于在地应力作用下, 充填体对于上方顶板支撑力的影响较小, 所以其中忽略了充填体对上方直接顶的支撑作用[10] [11] [12]。随着老顶岩块在回转变形后逐渐达到稳定, 充填体上方顶板会在一定宽度内形成极限平衡区。极限平衡区内会出现次生裂隙, 从而影响充填体上方顶板的稳定性, 进而导致抽冒发生。因此, 为了研究倾斜煤层上顺槽沿空留巷充填体上方直接顶稳定性的影响因素, 需要确定极限平衡区的宽度。

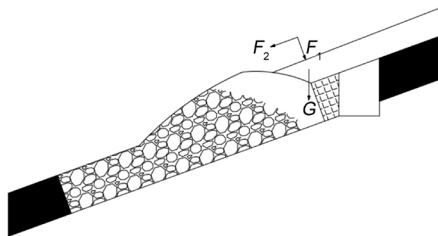


Figure 2. Stress analysis of direct roof above the backfill  
图 2. 充填体上方直接顶受力分析

## 4. 充填体上方直接顶极限平衡区宽度

为了研究倾斜煤层上顺槽沿空留巷充填体上方顶板极限平衡区的宽度, 根据该项板区域的受力特征及边界约束条件, 建立力学模型, 如图 3 所示[13] [14]。

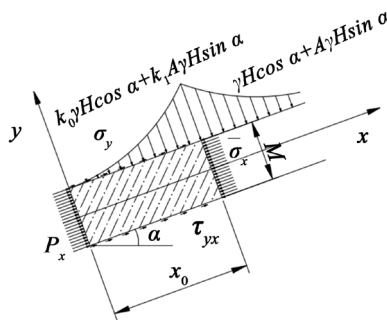


Figure 3. Width calculation of Limit equilibrium area in direct roof above the backfill  
图 3. 充填体上方顶板极限平衡区宽度计算

图2中,  $x_0$  为充填体上方直接顶极限平衡区宽度;  $\gamma$  为上覆岩层平均密度;  $H$  为煤层采深;  $\alpha$  为煤层倾角;  $M$  为直接顶厚度;  $P_x$  为直接顶沿  $x$  方向的约束力;  $\bar{\sigma}_x$  为  $x = x_0$  处在直接顶沿  $x$  方向应力的平均值。

### 4.1. 基本假设

1) 倾斜煤层沿空留巷充填体上方直接顶与其顶底板界面上的正应力  $\sigma_y$  与剪应力  $\tau_{xy}$  之间满足应力极限平衡的基本方程:

$$\tau_{xy} = -(\sigma_y \tan \varphi_0 + c_0) \tag{1}$$

式中:  $c_0$ 、 $\varphi_0$  分别为充填体上方直接顶与其顶底板交界面的内聚力和内摩擦角, 其值小于直接顶岩体的内聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ 。

2) 由于原岩水平应力沿倾斜煤层倾向的应力分力较大, 因此考虑原岩水平应力的大小。在  $x = x_1$  处,  $\sigma_y = k_0 \gamma H \cos \alpha + k_1 A \gamma H \sin \alpha$ ,  $\sigma_x = k_0 \gamma H \sin \alpha - k_1 A \gamma H \cos \alpha$ , 其中,  $A$  为侧压系数,  $k_0$ 、 $k_1$  分别为采动引起的垂直方向和水平方向的应力集中系数。

3) 不考虑岩体体积力的影响, 充填体上方直接顶应力分布关于  $x$  轴对称。

4) 相比于地应力, 充填体对上方直接顶的支撑力较小, 故忽略充填体的支撑力作用。

### 4.2. 方程求解

通过求解应力平衡方程(1), 得到充填体上方直接顶极限平衡区宽度  $x_0$  为:

$$x_0 = \frac{MA}{2 \tan \varphi_0} \ln \left[ \frac{k_0 \gamma H \cos \alpha + k_1 A \gamma H \sin \alpha + \frac{c_0}{\tan \varphi_0}}{\frac{c_0}{\tan \varphi_0} + \frac{P_x}{A} + (k_0 + k_1) \gamma H \cos \alpha + \left(k_1 A - \frac{k_0}{A}\right) \gamma H \sin \alpha} \right] \tag{2}$$

由式(2)可以发现, 充填体上方直接顶极限平衡区的宽度取决于  $\alpha$ 、 $c_0$ 、 $\varphi_0$ 、 $P_x$  等参数, 其中,  $\alpha$  为煤层倾角,  $c_0$ 、 $\varphi_0$ 、 $P_x$  等与岩体力学性质有关, 因此煤层倾角是影响充填体上方直接顶稳定性的重要因素。

## 5. 充填体上方直接顶稳定性影响因素数值模拟分析

### 5.1. UDEC 模型建立与参数计算

根据沿空留巷结构特征, 采用 UDEC 建立如图所示的数值计算模型。本文采用平面应变模型, 模型的左右边界为滑动支撑, 底部为固定支撑[15] [16]。巷道宽 5 m, 中心高度 4 m, 巷旁充填体上部宽 2.5 m, 下部宽 2 m, 高 3 m。模型采用摩尔库伦(Mohr-Coulomb)屈服准则, 并使用泰森多边形 Voronoi 网格对直接顶岩层进行节理划分, 如图 4 所示。

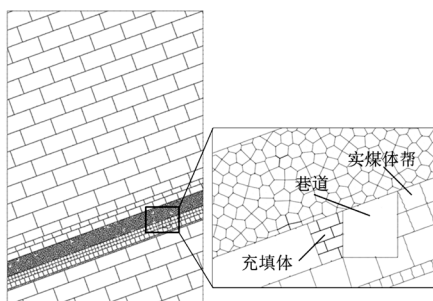


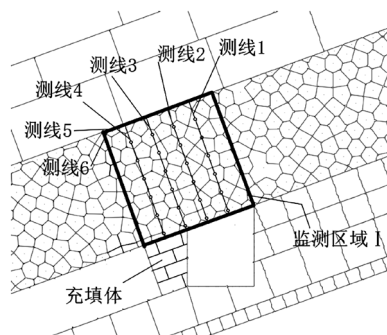
Figure 4. Numerical simulation and partial enlargement  
图 4. 数值模拟图及局部放大图

岩体力学参数的选取是岩石力学的基础。室内采用单轴压缩和巴西劈裂测试得到岩石块体参数并进行修正, 岩体参数的校正结果如表 1 所示。岩体的抗拉强度  $\sigma_m$  为抗压强度的 1/10。

**Table 1.** Physical and mechanical parameters of coal and rock layers  
**表 1.** 煤岩层物理力学参数

煤岩层	单元块体			节理参数				
	密度 /kg/m <sup>3</sup>	弹性模量 /GPa	泊松比	法向刚度 /Mpa	切向刚度 /Mpa	内聚力 /Mpa	内摩擦角 /°	抗拉强度 /Mpa
砂岩	2550	5.83	0.28	337	67.5	4.2	32	1.97
灰岩	2100	3.4	0.26	166.4	33.3	2.7	21	1.23
煤	1400	0.86	0.25	160	32	1.5	15	0.52
细砂岩	2600	14.8	0.28	757	151	11.7	35	5.55

根据理论分析可知, 煤层倾角是影响沿空留巷顶板稳定性的重要因素。为了煤层倾角对沿空留巷顶板稳定性的影响规律, 本文使用 UDEC 建立不同数值模型进行分析, 模型的主要参数为: 煤层厚 4 m, 沿空留巷宽 5 m, 高 4 m, 巷旁充填体上部宽 2.5 m, 下部宽 2 m, 高 4 m, 直接顶厚 5 m, 基本顶厚 6 m, 直接底厚 3 m, 煤层倾角分别为 15°、25°、35°和 45°。为了提高数值模拟结果的可信度, 煤层直接顶岩体的抗拉强度分别设为 2 MPa、3 MPa 和 4 MPa。为监测充填体上方顶板的损伤程度, 使用 Fish 语言监测区域 I 内的裂隙总长度、剪切裂隙长度和数量及张拉裂隙长度和数量, 并在该区域内布置 4 条测线, 每条测线上布置 5 个测点, 测量充填体上方岩体沿切向方向的位移。在老顶的下边界处布置测线 5, 在直接顶的上边界布置测线 6, 每条测线上布置 6 个测点, 通过这两条测线测量直接顶与老顶之间的离层量。具体布置方案如图 5 所示。



**Figure 5.** Fracture monitoring area and line layout  
**图 5.** 裂隙监测区域与测线布置图

## 5.2. 数值模拟结果

根据数值模拟结果, 可编制表 2。

**Table 2.** Roof stability under different geological conditions  
**表 2.** 不同地质条件下顶板抽冒发生情况

顶板抗拉强度	2 MPa	3 MPa	4 MPa
煤层倾角 15°	否	否	否
煤层倾角 25°	否	否	否
煤层倾角 35°	是	否	否
煤层倾角 45°	是	是	否

发生抽冒现象的顶板垮落图与裂隙分布图如图 6 所示。

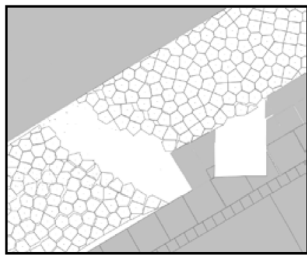
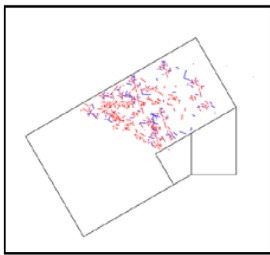
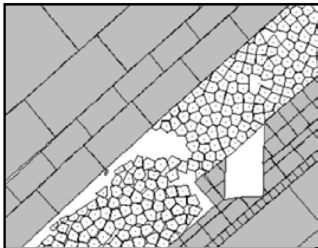
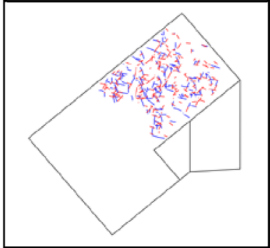
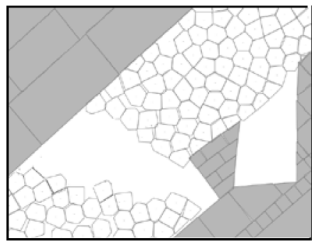
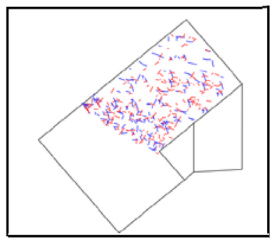
地质条件	顶板内垮落图	裂隙分布图	备注
煤层倾角 35°、顶板 抗拉强度 2MPa			充填体上部直接顶区域有大量张拉裂隙与剪切裂隙, 所以该直接顶区域处于不稳定状态, 后期极有可能发生抽冒。
煤层倾角 45°、顶板 抗拉强度 2MPa			巷道上部直接顶区域有大量张拉裂隙与剪切裂隙, 可以判定该直接顶区域处于极不稳定状态, 抽冒现象严重, 未来垮落区域将进一步扩大, 甚至会导致充填体的倒塌, 进而使留巷失败。
煤层倾角 45°、顶板 抗拉强度 3MPa			充填体上部直接顶区域有大量张拉裂隙与剪切裂隙, 所以该直接顶区域处于不稳定状态, 后期极有可能发生抽冒。

Figure 6. Roof caving and fracture distribution under different geological conditions

图 6. 不同地质条件下顶板垮落与裂隙分布情况

### 5.3. 煤层倾角对沿空留巷顶板稳定性的影响

通过对比顶板抗拉强度一定时, 不同煤层倾角下, 充填体上方直接顶沿层位切向位移量、顶板破坏程度及直接顶与老顶间的离层量, 分析煤层倾角对沿空留巷充填体上方顶板稳定性的影响及抽冒发生规律。

#### 5.3.1. 充填体上方顶板切向位移量

取测线 1-4 上所有测点数据的平均值来表示在不同煤层倾角下直接顶切向滑移的距离, 如图 7。

由图 7 可知, 随着煤层倾角从 15°增加到 45°, 当顶板抗拉强度为 2 MPa 时, 直接顶切向滑移距离从 18.4 mm 增加到 39 mm; 当顶板抗拉强度为 3 MPa 时, 直接顶切向滑移距离从 10.65 mm 增加到 36.55 mm; 当顶板抗拉强度为 4 MPa 时, 直接顶切向滑移距离从 11.15 mm 增加到 33.1 mm。说明煤层倾角越大, 直接顶切向滑移距离越长, 且直接顶切向滑移量大概为线性增长, 不同顶板抗拉强度下增长率大致相同。

对比 1-4 号测线, 分别取他们在同一煤层倾角不同顶板抗拉强度时所有对应测点的平均值, 可以得到在煤层倾角不同时, 充填体上方直接顶不同位置的切向位移量与到煤岩层分界面距离的关系及变化规律, 如图 8 所示。

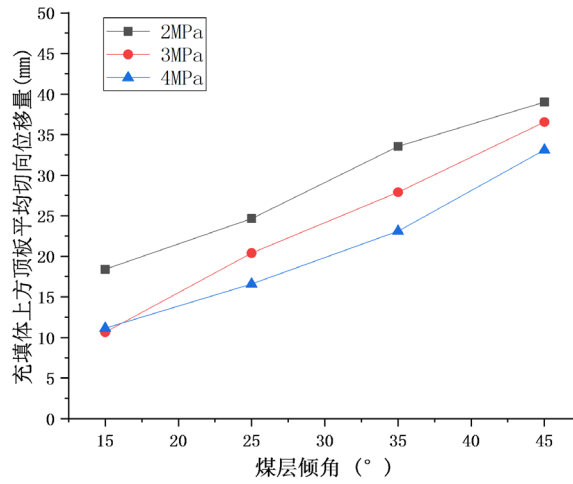


Figure 7. Average tangential displacement of the top rock above the filling body with the inclination angle of the coal seam  
图 7. 充填体上方顶板平均切向位移量随煤层倾角变化曲线

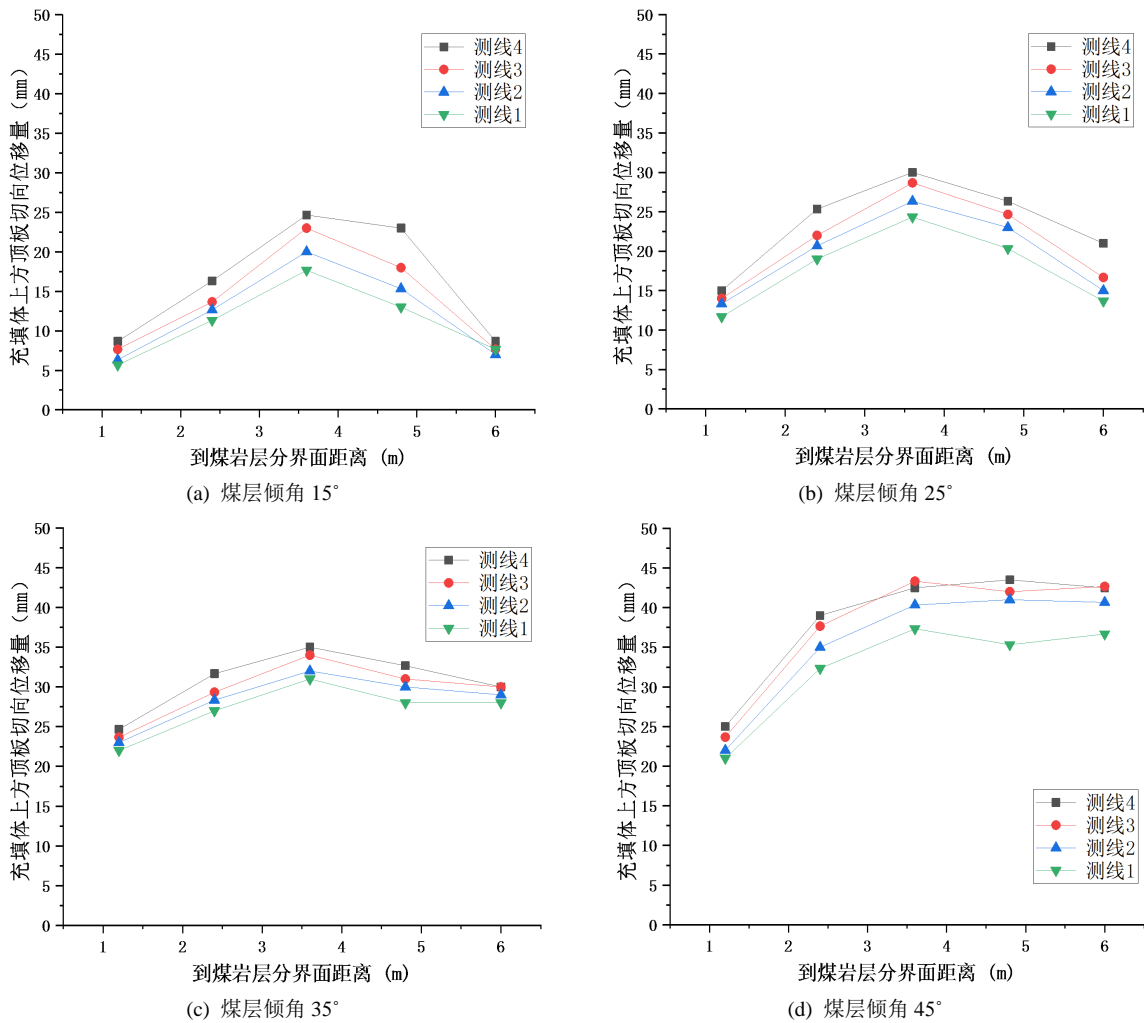


Figure 8. Relationship between tangential displacement at different positions of direct roof and divergence angles of different coal seams and interface distance to coal and rock layers  
图 8. 不同煤层倾角时直接顶不同位置的切向位移量与到煤岩层分界面距离的关系

由图 8 可知, 直接顶岩体沿切线方向产生滑移, 充填体上方顶板的切向位移量与其具体位置有关, 当煤层倾角为  $15^\circ$  时, 顶板底部切向位移量最大达到 9 mm, 中部切向位移量最大达到 20 mm, 顶部切向位移量最大达到 9 mm; 当煤层倾角为  $25^\circ$  时, 顶板底部切向位移量最大达到 15 mm, 中部切向位移量最大达到 30 mm, 顶部切向位移量最大达到 21 mm; 当煤层倾角为  $35^\circ$  时, 顶板底部切向位移量最大达到 25 mm, 中部切向位移量最大达到 34 mm, 顶部切向位移量最大达到 29 mm; 当煤层倾角为  $45^\circ$  时, 顶板底部切向位移量最大达到 39 mm, 中部切向位移量最大达到 43 mm, 顶部切向位移量最大达到 44 mm。可以发现, 当煤层倾角为  $15^\circ$  和  $25^\circ$  时, 直接顶中部滑移距离最大, 顶部与底部滑移距离较小, 而当煤层倾角增大时, 直接顶顶部岩体的滑移距离相对增大, 顶部切向滑移量与中部切向滑移量近似相同。这说明在煤层倾角较小时, 直接顶的顶部与底部会受到切线方向的约束力, 而当煤层倾角增大时, 顶部约束力逐渐变小。

### 5.3.2. 充填体上方顶板破坏程度

通过 Fish 语言监测充填体上方顶板区域的裂隙总长度、剪切裂隙长度和数量及张拉裂隙长度和数量, 并计算该区域的损伤因子, 监测区域见图 9, 可以得到顶板抗拉强度一定, 煤层倾角不同时充填体上方直接顶区域的损伤程度。

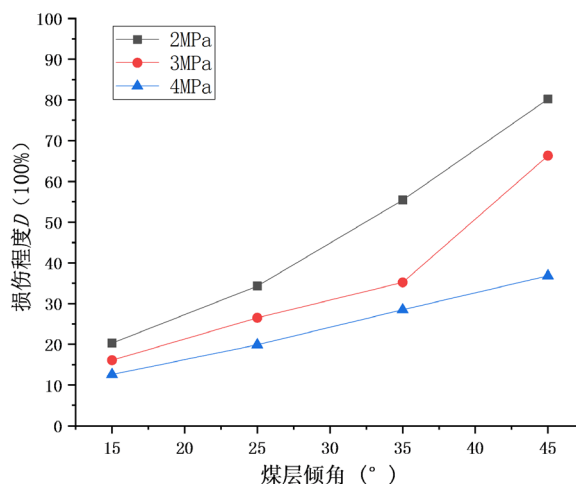


Figure 9. Direct roof damage degree with coal seam dip angle  
图 9. 直接顶破坏程度随煤层倾角变化曲线

由图 9 可知, 当顶板岩性一定时, 随着煤层倾角的增大, 直接顶的破坏程度逐渐增大, 当煤层倾角从  $15^\circ$  增加到  $45^\circ$  时, 充填体上方直接顶区域的破坏程度分别从 12.6%, 16.1%, 20.3% 增加到 36.8%, 56.3%, 80.2%。而且, 破坏程度的变化率也逐渐增大, 说明煤层倾角在很小时, 对直接顶稳定性的影响较小, 当煤层倾角较大时, 对直接顶稳定性的影响也随之变大。

### 5.3.3. 直接顶与老顶之间的离层量

通过数值模拟结果可以测量得到不同地质条件下充填体上方直接顶与老顶之间的离层量, 并获得离层量变化与煤层倾角的关系, 如图 10 所示。

由图 10 可知, 随着煤层倾角从  $15^\circ$  增加到  $45^\circ$ , 充填体上方直接顶与老顶之间的最大离层量从 28.6 mm 减小到 12.3 mm, 说明随着煤层倾角的增大, 直接顶的自身重力在垂直方向的分力减小, 所以直接顶与老顶的离层量逐渐减小。而且由图 10 可以发现, 充填体上方直接顶与老顶之间出现最大离层量的位置偏向充填体处, 且煤层倾角越大, 这一特征越明显。值得注意的是, 图 10(c) 中, 顶板抗拉强度为 2 MPa 时,



充填体上方直接顶与老顶之间产生里层, 离层量为 4.9 mm, 图 10(d)中, 顶板抗拉强度为 2 MPa 与 3 MPa 时, 充填体上方直接顶与老顶之间产生里层, 离层量分别为 8.5 mm 与 6.2 mm, 且通过 5.2 节顶板垮落图与裂隙分布图发现, 在这三种地质条件下, 充填体上方顶板发生抽冒现象, 这说明, 发生抽冒现象时, 充填体上方顶板与老顶之间会发生离层现象, 从而导致该区域顶板失去力的传递作用。

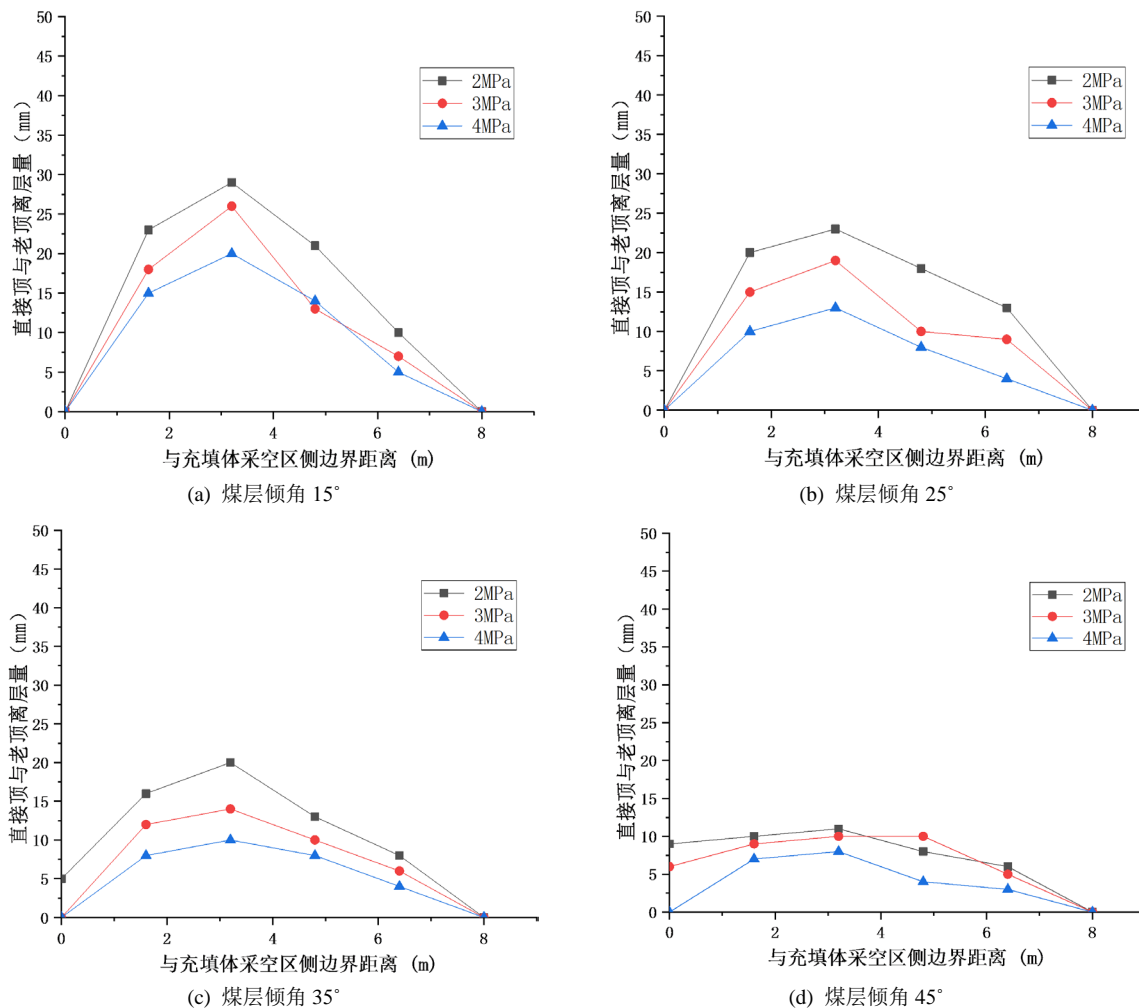


Figure 10. Relationship between direct top and old top separation and coal seam inclination

图 10. 直接顶与老顶离层量与煤层倾角的关系

## 6. 结论

通过开展煤层倾角对沿空留巷充填体上方直接顶稳定性影响的研究, 对于不同煤层倾角下沿空留巷充填体上方直接顶的破坏程度、切向位移距离、裂隙分布特征、直接顶与老顶的离层量及采空区上方顶板垮落区大小等进行了具体分析, 得出以下结论:

1) 在煤层倾角为 35°, 顶板抗拉强度为 2 MPa; 煤层倾角为 45°, 顶板抗拉强度为 2 MPa; 煤层倾角为 45°, 顶板抗拉强度为 3 MPa 时(共 3 种情况), 沿空留巷充填体上方直接顶会发生抽冒现象。

2) 值得特别注意的是在煤层倾角为 35°, 顶板抗拉强度为 2 MPa 和煤层倾角为 45°, 顶板抗拉强度为 3 MPa 这两种地质条件下, 抽冒现象并不会直接发生, 但是由裂隙分布图可知, 其充填体上方直接顶岩体中裂隙发育严重, 张拉裂隙与剪切裂隙混杂, 所以该直接顶区域处于不稳定状态, 其虽然暂未发生抽

冒现象,但是在未来受到下一工作面采动影响时,垮落区域将进一步扩大,从而导致充填体上方直接顶垮落,所以仍判定其顶板会发生抽冒现象。

3) 煤层倾角会对沿空留巷充填体上方直接顶岩体的切向滑移距离产生直接影响。煤层倾角越大,直接顶岩体切向滑移距离越长。而且煤层倾角较小时,直接顶的顶部与底部会受到切线方向的约束力,而当煤层倾角增大时,顶部约束力逐渐变小。因此,当煤层倾角较小时(15°和25°时),直接顶中部滑移距离最大,顶部与底部滑移距离较小,而当煤层倾角增大时(45°时),直接顶顶部岩体的滑移距离也相对增大,顶部切向滑移量与中部切向滑移量近似相同。

4) 煤层倾角会对沿空留巷充填体上方直接顶岩体的裂隙发育情况及破坏程度产生直接影响。煤层倾角越大,直接顶岩体裂隙发育越严重,破坏程度越大。

5) 煤层倾角会对沿空留巷充填体上方直接顶与老顶之间的离层量大小产生影响。煤层倾角越大,直接顶与老顶离层量越小。而且充填体上方直接顶与老顶之间出现最大离层量的位置偏向充填体处,煤层倾角越大,这一特征越明显。

## 参考文献

- [1] 康红普, 牛多龙, 张镇, 等. 深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1977-1987.
- [2] 孙恒虎, 吴健. 沿空留巷的矿压规律及岩层控制[J]. 煤炭学报, 1992(1): 15-24.
- [3] 房耀. 沿空留巷技术进展浅析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2018(11): 18-28.
- [4] 张宇宁. 大倾角中厚煤层沿空留巷理论及技术[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [5] 刘伟韬, 刘士亮. 大倾角中厚煤层上行开采沿空留巷技术[C]//中国力学大会. 2015 中国力学大会论文集. 2015: 273.
- [6] 李强, 张兆建. 大倾角大埋深中厚煤层上行开采沿空留巷技术[J]. 煤矿支护, 2015(1): 38-39, 16.
- [7] 曹树刚, 王勇, 邹德均, 等. 倾斜煤层沿空留巷力学模型分析[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(5): 143-150.
- [8] Qian, M.G. (1981) A Study of the Behavior of Overlying Strata in Longwall Mining and its Application to Strata Control. *Developments in Geotechnical Engineering*, 32, 13-17. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42086-2.50008-9>
- [9] 张东升, 缪协兴, 茅献彪. 综放沿空留巷顶板活动规律的模拟分析[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(3): 261-264.
- [10] 谢文兵. 综放沿空留巷围岩稳定性影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3058-3059.
- [11] 李迎富, 华心祝, 蔡瑞春. 沿空留巷关键块的稳定性力学分析及工程应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 357-364.
- [12] 李迎富, 华心祝. 沿空留巷上覆岩层关键块稳定性力学分析及巷旁充填体宽度确定[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1134-1140.
- [13] 何廷峻. 工作面端头悬顶在沿空巷道中破断位置的预测[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 28-31.
- [14] 阎海鹏, 王新华, 李国臻, 等. 急倾斜煤层护巷煤柱开采[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2010(4): 553-556.
- [15] 谢文兵, 陈晓祥, 郑百生. 采矿工程问题数值模拟研究与分析[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005.
- [16] 张培森, 阚忠辉, 王明辉, 等. 倾斜煤层综放沿空留巷围岩稳定性模拟研究[J]. 煤矿安全, 2016, 47(8): 37-40, 44.