

文章编号: 1000-7598 (2011) 09-2778-07

典型留巷顶板条件下巷旁充填体支护阻力分析

阚甲广^{1,2}, 张 农^{1,2}, 李宝玉^{1,2}, 司光耀^{1,2}

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;
2. 淮南矿业(集团)有限责任公司, 深部煤炭开采与环境保护国家重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 将工程实践中接触到的留巷顶板分为厚层直接顶、薄层直接顶和无直接顶 3 种类型, 利用叠加连续层板模型, 考虑巷帮煤体承载作用和导致顶板垮落诱因, 得出了 3 种顶板条件下的巷旁支护阻力计算公式。研究表明, 巷帮煤体、充填区域顶板承载性能的提高有助于降低巷旁充填体支护阻力。随直接顶厚度的减小, 充填体支护阻力反而增大。基本顶层位不同, 顶板垮落诱因不同。厚层直接顶时, 顶板垮落为自重引起; 薄层直接顶时, 顶板垮落为基本顶上位岩层作用所致。

关 键 词: 沿空留巷; 顶板结构; 巷旁充填体; 支护阻力

中图分类号: TD 322

文献标识码: A

Analysis of supporting resistance of backfilling wall for gob-side entry retaining under typical roof conditions

KAN Jia-guang^{1,2}, ZHANG Nong^{1,2}, LI Bao-yu^{1,2}, SI Guang-yao^{1,2}

(1. School of Mining, State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
2. State Key Laboratory of Deep Coal Mining & Environment Protection, Huainan Mining Industry(Group) Co., Ltd., Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: The common field gob-side entry retaining roofs are divided into three types, i.e. thick immediate roof, thin immediate roof and without immediate roof. Through utilizing the continuous laminate model and considering the factors of the support effect of the coal side in the roadway, the incentives of roof caving, etc., the calculation formulas of roadside support resistance under three kinds of roof conditions are obtained. According to the formulas, the increase bearing ability of coal side and the roof of filling areas benefit to decrease the support resistance of filling body beside roadways. With the decrease of the thickness of immediate roof, the support resistance of filling body increase. The roof collapse's incentives would vary from different layers of immediate roof. Gravity causes the thick immediate roof's collapses; and on the other hand, the movement of upper rock layers causes the thin immediate roof's collapses.

Key words: gob-side entry retaining; roof structure; backfilling wall; support resistance

1 引 言

沿空留巷是一类特殊的回采巷道, 受上覆岩层活动全过程强烈的影响^[1], 特别是滞后采动压力影响时间长、附加采动应力集中系数大、围岩破坏范围大、巷道难以稳定。前苏联学者 B. 胡托尔诺依将采场矿压悬梁模型推广到沿空留巷的研究中, 得到计算巷旁支护切断直接顶的工作阻力计算式^[2], 英国学者 Smart^[3]提出了顶板倾斜力学模型(roof beam tilt theory), 吴健^[4]提出沿空留巷支护系统最终承受的是冒落带岩块的静压以及巷道变形大小由裂隙带活动和稳定过程决定, 孙恒虎^[5]采用条带载荷法和塑性极限分析法来确定沿空留巷巷旁支护阻力, 同时还提出了巷旁支护体的后期阻力的计算方法。张东升、马立强^[6]根据岩层控制的关键层理论, 建立巷内充填原位沿空留巷围岩结构力学模型。已有研究对沿空留巷巷旁支护阻力计算进行了诸多探索^[7-13], 但结合不同顶板条件, 对沿空留巷顶板活动规律的共性与区别研究尚不够深入, 制约着沿空留巷技术的发展与应用。

沿空留巷矿压显现取决于煤层开采条件和顶板条件, 煤层赋存条件的不同必然导致沿空留巷围岩

收稿日期: 2011-03-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助(No. 2011CB201200); 江苏高校优势学科建设工程资助项目、中央高校基本科研业务费专项资金(No. 2010QNA29); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室(中国矿业大学)自主研究课题(No. SKLCRSM09X03)。

第一作者简介: 阚甲广, 男, 1983 年生, 博士, 主要从事巷道围岩控制研究及教学工作。E-mail: jgkan@126.com

活动规律各异, 本文在对典型留巷顶板赋存条件分析归类的基础上, 对不同顶板条件下沿空留巷充填体支护阻力进行了分析计算。

2 沿空留巷支护结构分析

2.1 沿空留巷支护结构的概念及特征

沿空留巷的稳定不仅取决于巷道外部的力学环境, 还与巷道支护结构的适应性相关。相对于沿空留巷上覆岩体的结构而言, 由巷旁充填墙体、巷道周围锚杆组合支护与围岩形成的承载结构称为留巷支护结构。

留巷支护结构由巷道顶板锚固结构、底板无锚岩体结构、实体煤帮锚固结构和充填墙体组成。大量的工程实践表明, 留巷支护结构的变形和破坏存在明显的非均衡现象, 在留巷支护结构的破坏过程中, 相对薄弱的部分将对留巷支护结构的稳定起到关键作用。在沿空留巷条件下, 由于留巷支护结构中各部分受工作面采动影响时变形破坏的程度不同、锚杆加固效果存在差异、应力环境各不相同。留巷支护结构的稳定性取决于各组成结构的稳定性及各结构间的相互影响关系。

留巷围岩稳定性与采场侧向顶板结构的位态有很大关系, 采场侧向顶板结构稳定时, 传递到留巷支护结构的应力是一定的, 留巷结构容易保持稳定; 采场侧向顶板回转或下沉时, 将造成留巷支护结构的强烈动压影响和大变形, 留巷支护结构不易稳定。留巷支护结构客观上受采场侧向岩体赋存条件、结构特征及二次应力分布等因素制约, 具有显著的不均衡性。

2.2 沿空留巷支护结构稳定性的关键因素分析

留巷支护结构的变形与破坏呈现非均匀的特点, 并可能因某一部分发生显著变形破坏而导致留巷支护结构整体失稳。根据沿空留巷的特点和对采场侧向顶板结构的分析, 认为影响留巷结构稳定的关键因素主要有以下几点^[14]:

(1) 留巷顶板的承载性能

留巷顶板包括3部分, 即巷内顶板、充填区域顶板和实体煤顶板, 每部分顶板均对留巷支护结构的稳定性有重要影响。充填区域顶板的承载性能很重要。如果顶板比较破碎, 漏冒严重, 充填体不能将支撑阻力传递给直接顶, 将导致老顶回转下沉量加大, 因而造成巷道顶板和巷道煤帮严重破坏, 则沿空留巷难以成功。

(2) 充填体的承载性能

充填体作为支护结构的一个重要组成部分, 是巷道围岩稳定性的关键之一。充填体承载性能应与煤体、顶底板承载能力相协调。若充填体强度不足, 则易在强烈的滞后采动应力作用下发生变形破坏, 从而使巷道顶板的承载作用降低, 进而导致顶板向充填体侧采空区下沉破坏, 造成留巷支护结构破坏。若充填体强度、刚度较大, 则巷道顶板可能沿充填体内侧切顶, 同样造成顶板下沉严重, 围岩结构失稳。充填体刚度非常高时, 充填体将上覆岩层垂直应力全部转移到巷道底板, 从而将导致严重底鼓。

因此, 合理的充填体强度和宽度应与留巷支护结构其他部分相协调。合理的充填体尺寸和强度, 将有助于关键块体尽快稳定, 并能适应其回转下沉。

(3) 实体煤帮的承载能力

实体煤帮的变形破坏程度明显大于充填墙体, 而且对实体煤帮最为不利的是, 因工作面采动而产生的垂直应力明显地向巷道实体煤帮深部和充填墙体上集中, 且以实体煤帮最为明显。当实体煤帮产生过大变形时, 将会造成顶板的倾斜下沉和底板的严重鼓起。

虽然实体煤帮完整性较好, 但其应力集中程度是最大的, 在掘巷稳定期间, 煤帮的变形主要由浅部围岩的变形破坏引起; 采动应力调整期间, 帮部煤体垂直应力的集中系数较大, 导致深部围岩也发生大范围变形。

(4) 底板的无约束处理

沿空留巷的底板一般为强度较低的软弱岩体, 巷道掘进期间, 巷道的围岩应力相对较低, 底板一般能保持稳定。采动影响时期, 上覆岩体将引起巷道围岩应力的上升, 增大的垂直应力作用在实体煤帮、充填体上, 并传递到底板岩层中。而底板通常处于自由约束状态, 底板岩层极易发生鼓起, 并导致浅部围岩中的应力卸载并向着较深部围岩转移。

沿空留巷的围岩变形实测结果表明, 在巷道顶底板的相对移近量中, 底鼓约占到顶底板移近量的60%~70%左右。因此, 控制底鼓是保持留巷结构稳定的又一重要问题。

3 沿空留巷顶板条件分类

已有研究表明^[1-5], 顶板条件、煤层条件不同时, 沿空留巷的矿压显现差异很大。在不同的顶板和开采煤层条件下, 充填墙体的构筑及承受的载荷也有相当大的差异, 因而只有在顶板分类的基础上研究充填体巷旁支护阻力才能反映问题的实质。

本文根据直接顶厚度和采高的比值^[15-17]将工程实践中接触到的几种典型顶板条件分为 3 种类型, 分别为厚层直接顶、薄层直接顶、无直接顶。

厚层直接顶: 当直接顶厚度较大, 且直接顶岩性基本为 I~III 类顶板易垮落的岩层, 回柱或移架后顶板能及时垮落, 充满采空区。顶板垮落后冒落矸石随远离工作面被逐渐压实, 使上部未冒落岩石在不同程度上重新得到支撑, 这种顶板条件称为厚层直接顶。

薄层直接顶: 直接顶厚度大于采高的 0.3 倍, 但小于采高的 3~5 倍, 垮落后不能充满采空区, 当采空区冒落矸石不能完全充满采空区时, 上覆岩层大部分呈悬空状态, 采空区上覆未垮落岩层的重量将通过梁或板的形式传递到采空区周围煤体、煤柱或充填体上。这种顶板条件称为薄层直接顶。

无直接顶: 此种条件下直接顶过薄或无直接顶, 基本顶不能随移架而垮落, 即在坚硬顶板条件下, 基本顶呈悬臂梁结构, 破断时将形成强烈的来压显现。

4 巷旁充填体支护阻力

4.1 支护阻力计算方法简介

考虑到不同顶板条件对沿空留巷支护阻力的影响, 需针对不同顶板条件下充填体支护阻力展开研究。

叠加连续层板模型, 各层板之间允许离层、错动, 每一层板都可看成是独立的连续板结构, 板与板之间以分布载荷联系起来, 更接近于实际。

为便于求解, 首先对叠 layers 板载荷进行分割, 在各层板上选取一条沿空留巷载荷最大的单位宽度条带作为计算单元。在选取的条带上标出沿空留巷支护力的大小及作用位置, 构成支护-围岩相互作用的力学计算模型^[5]。

应用块体力学平衡法, 研究巷内充填体支护阻力。图 1(a) 为四边支撑的沿空留巷顶板结构模型, 顶板初次垮落循环过程中的主动垮落属于此种模型; 图 1(c) 为三边支撑、一边自由的沿空留巷顶板结构模型, 顶板周期垮落循环过程中的主动和被动垮落都属于此种模型。对以上两种模型, 取一沿空留巷载荷最大的单位宽度板条为计算单元, 在此计算单元上标出巷内充填体支护力的大小及作用位置, 构成力学模型, 所取板条如图 1(b) 和 1(d) 所示。无论三边支撑, 或者是四边支撑, 所取板条形式一样, 因此, 把两者统一为一种力学模型, 如图 1(e)

所示。假设顶板均布载荷为 q , 按条带分割到 $ABCD$ 板条上的载荷只在 AB 和 CD 两段上。沿空留巷支护阻力用巷内充填体支护集中载荷 P 表示^[5-7]。

岩层破断时, 破断处的极限弯矩均为 M_{P1} , 如图 1(e) 所示。按顶板能沿充填体边缘破断的最大支护阻力计算。根据顶板条件分类, 分厚层直接顶、薄层直接顶、无直接顶 3 种顶板条件开展研究。

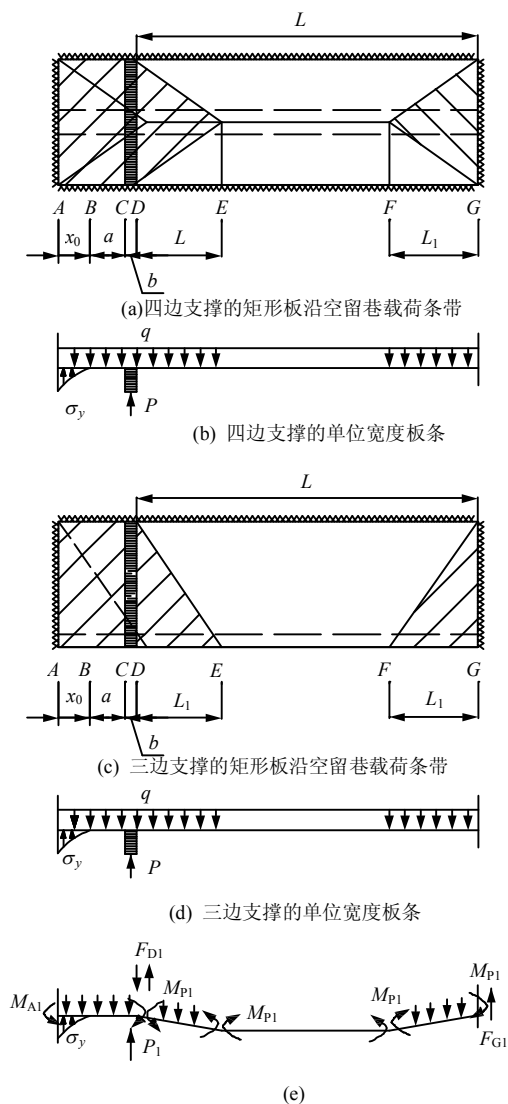


图 1 沿空留巷支护阻力计算模型 (第 1 层)
Fig.1 Calculation model of support resistance for gob-side entry retaining (first layer)

4.2 厚层直接顶充填体支护阻力计算

当顶板为厚层直接顶时, 工作面回采后直接顶垮冒并能充满采空区, 用平衡法对图 1(e) 中各段求解, 在初始阶段, 岩层下沉变形很小, 层内应力引起的弯矩忽略不计, 只考虑岩层自重。

(1) 第 1 层情况

如图 1(e)所示。分层以地质分层为标准。由于巷道周边煤体受到采掘影响,在支承压力的作用下,可能发生松动甚至破坏。因此,巷道周边煤壁不适合作为沿空留巷顶板的支承点,应将巷帮煤体的松动区与塑性区的交界处作为沿空留巷顶板的固支点或简支点。

图中 σ_y 、 x_0 分别为应力极限平衡区的支承应力及宽度,可用式 (1)、(2) 计算^[18-19]。

应力极限平衡区的支承应力为

$$\sigma_y = \left(\frac{C_0}{\tan \varphi_0} + \frac{P_x}{A} \right) \exp \frac{2 \tan \varphi_0}{MA} x - \frac{C_0}{\tan \varphi_0} \quad (1)$$

应力极限平衡区的宽度为

$$x_0 = \frac{MA}{2 \tan \varphi_0} \ln \frac{k\gamma H + \frac{C_0}{\tan \varphi_0}}{\frac{C_0}{\tan \varphi_0} + \frac{P_x}{A}} \quad (2)$$

式中: C_0 为煤层与顶底板岩层交界面的黏聚力; φ_0 为煤层与顶底板岩层交界面的内摩擦角($^\circ$); P_x 为煤帮的支护强度(N); A 为侧压系数; γ 为上覆岩层的平均重度(N/m^3); K 为应力集中系数; H 为开采深度(m)。

第1层情况

DE 段:

$$\sum F_y = 0 \quad F_{D1} - q_1 L_1 = 0$$

$$\text{则} \quad F_{D1} - \gamma_1 h_1 L_1 \quad (3)$$

$$\sum M = 0 \quad 2M_{p1} - q_1 L_1^2 / 2 = 0 \quad (4)$$

AD 段:

$$\sum M = 0$$

$$M_{A1} - M_{p1} - \frac{1}{2} q_1 (a+b+x_0)^2 - F_{D1} (a+b+x_0) + P_1 \left(a + \frac{b}{2} + x_0 \right) + \int_0^{x_0} \sigma_y (x_0 - x) dx = 0 \quad (5)$$

在极限条件下, $M_{A1} = M_{p1}$, 带入式 (5), 联立 (3)~(5) 得:

$$P_1 \left(a + \frac{b}{2} + x_0 \right) = \frac{1}{2} \gamma_1 h_1 (a+b+x_0)^2 + \gamma_1 h_1 (a+b+x_0) L_1 - \int_0^{x_0} \sigma_y (x_0 - x) dx \quad (6)$$

式中: M_{p1} 为岩层极限弯矩; M_{A1} 为岩层抗弯弯矩; F_{D1} 为 D 点岩层破断块产生的向下剪力; P_1 为切顶

阻力(N); q_1 为岩层自重集度(N/m^2); γ_1 为岩层重度(N/m^3); h_1 为岩层厚度(m); a 为巷道维护宽度(m); x_0 为煤体松散区宽度(m); L_1 为岩层破断特征尺寸(m); b 为充填体宽度(m)。

由式 (6) 可知, 充填体支护切顶阻力与岩层破断特征尺寸 L_1 、巷道宽度 a 、充填体宽度 b 、应力极限平衡区宽度 x_0 、岩层厚度 h_1 成线性关系, 也就是说, 第一层是主动垮落时, 垮落顶板的长度越大、岩层越厚、巷道维护尺寸越大, 要求充填体支护的切顶阻力越大。

与岩层破断特征尺寸 L_1 与工作面顶板来压步距和工作面长度有关。来压步距较大, 即接近工作面长度时, L_1 取 0.5 倍来压步距; 来压步距较小, 且远小于工作面长度时, 取 L_1 等于来压步距^[5]。

第1层的切顶阻力主要由充填体等人工支护提供, 而第2层以上的岩层所需的切顶阻力由人工支护和已垮岩层残留边界共同作用。

(2) 第2层情况

第2层的情况如图2所示。

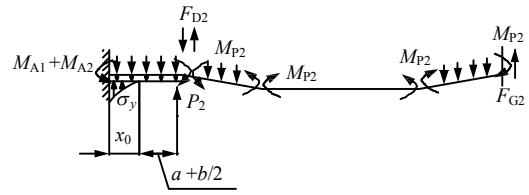


图2 沿空留巷支护阻力计算模型(第2层)

Fig.2 Calculation model of support resistance for gob-side entry retaining (second layer)

DE 段:

$$\sum F_y = 0 \quad F_{D2} = q_2 L_2 = \gamma_2 h_2 L_2 \quad (7)$$

$$\sum M = 0$$

$$M_{A1} + M_{A2} + P_2 \left(a + \frac{b}{2} + x_0 \right) - M_{p2} - \frac{1}{2} \gamma_2 h_2 (a+b+x_0 + \Delta a_1)^2 - \frac{1}{2} \gamma_1 h_1 (a+b+x_0)^2 - F_{D2} (a+b+x_0 + \Delta a_1) - F_{D1} (a+b+x_0) + \int_0^{x_0} \sigma_y (x_0 - x) dx = 0 \quad (8)$$

式中: $\Delta a_1 = h_1 \tan a_1$, a_1 为岩层破断角。

F_{D1} 、 F_{D2} 分别为第1层、第2层岩层切顶后, 在 D 点处已垮落岩层对残留边界的剪力。

式 (8) 可写成:

$$\begin{aligned}
P_2 \left(a + \frac{b}{2} + x_0 \right) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \gamma_i h_i \left(a + b + x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j \right)^2 + \\
&\sum_{i=1}^2 F_{Di} \left(a + b + x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j \right) + \\
&M_{p2} - \sum_{i=1}^2 M_{Ai} - \int_0^{x_0} \sigma_y (x_0 - x) dx
\end{aligned} \quad (9)$$

同理, 第 m 层, 切顶阻力计算式为

$$\begin{aligned}
P_m \left(a + \frac{b}{2} + x_0 \right) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \gamma_i h_i \left(a + b + x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j \right)^2 + \\
&\sum_{i=1}^m F_{Di} \left(a + b + x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j \right) + \\
&M_{pm} - \sum_{i=1}^m M_{Ai} - \int_0^{x_0} \sigma_y (x_0 - x) dx
\end{aligned} \quad (10)$$

式 (10) 为厚层直接顶时, 沿空留巷巷旁支护切顶阻力的计算通式。由上式可知:

式 (10) 中等号右边第 1 项为残留边界自重引起的弯矩; 第 2 项为破断线处受垮断岩层的剪力作用所产生的总弯矩; 第 3 项是第 m 层岩层的极限弯矩; 第 4 项是 $1 \sim m$ 层岩层在 D 点的总抗弯弯矩。前 3 项产生的围岩载荷由充填体支护阻力平衡, 第 4、5 项为围岩的自承能力, 能够帮助充填体承载, 从而形成沿空留巷支护结构。工业性试验中应及时充填、提高充填区域顶板承载能力、采用巷内辅助加强支护等措施, 提高围岩的自承能力。

充填区域顶板采用锚杆锚索加强支护, 锚杆锚索能将顶板岩层锚固起来, 使得巷道围岩的自我承载能力 M_{Ai} 大大提高。在生产中, 巷旁充填一般滞后工作面进行, 若在充填区域顶板没有进行锚杆锚索超前加强支护, 将造成顶板过早破碎、垮冒, 顶板的抗弯能力大大降低, 导致围岩变形大。充填区域顶板加固可超前工作面安装施工, 这样就避免了其他巷旁支护方式滞后支护的缺点, 从而保证充填前巷道顶板的完整性, 使留巷后巷道顶板边界及时处于固支状态, 提高围岩的自我承载能力。

4.3 薄层直接顶充填体支护阻力计算

当顶板为薄层直接顶时, 此时老顶 (关键层) 以下岩层为主动垮落, 用平衡法对图 1(e) 中各段求解, 只考虑岩层自重作用。若关键层以下共有 m_1 层岩层, 支护切顶阻力计算公式为:

$$\begin{aligned}
P_{m_1} \left(a + \frac{b}{2} + x_0 \right) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m_1} \gamma_i h_i \left(a + b + x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j \right)^2 + \\
&\sum_{i=1}^{m_1} F_{Di} \left(a + b + x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j \right) + \\
&M_{pm_1} - \sum_{i=1}^{m_1} M_{Ai} - \int_0^{x_0} \sigma_y (x_0 - x) dx
\end{aligned} \quad (11)$$

关键层在其自重和上覆岩层外载荷共同作用下发生垮落, 即发生被动垮落。其力学计算模型与图 2 相似。为便于分析, 设第 i 层岩层自重为 γh_i , 外载荷为 q_i 。

若共有 $m-m_1$ 层岩层随关键层同时垮落, 则支护阻力为

$$\begin{aligned}
P_m \left(a + \frac{b}{2} + x_0 \right) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m_1} \gamma_i h_i \left(a + b + x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j \right)^2 + \\
&\sum_{i=1}^{m_1} \gamma_i h_i \left(a + b + x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j \right) L_i - \sum_{i=1}^{m_1} M_{Ai} - \\
&\int_0^{x_0} \sigma_y (x_0 - x) dx + \frac{1}{2} \sum_{i=m_1+1}^m [(\gamma h_i + q_i)(a + b + x_0 + \\
&\sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j)^2] + \sum_{i=m_1+1}^m [(\gamma h_i + q_i)(a + b + x_0 + \\
&\sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j) L_i] + M_{pm} - \sum_{i=m_1+1}^m M_{Ai}
\end{aligned} \quad (12)$$

式 (12) 可改写为

$$\begin{aligned}
P_m \left(a + \frac{b}{2} + x_0 \right) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \gamma_i h_i (a + b + x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j)^2 + \\
&\sum_{i=1}^m \gamma_i h_i (a + b + x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j) L_i + \frac{1}{2} \sum_{i=m_1+1}^m q_i (a + b + \\
&x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j)^2 + \sum_{i=m_1+1}^m [q_i (a + b + x_0 + \\
&\sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j) L_i + M_{pi}] - \sum_{i=1}^m M_{Ai} - \int_0^{x_0} \sigma_y (x_0 - x) dx
\end{aligned} \quad (13)$$

岩层被动垮落所需的支护切顶阻力明显比主动垮落大。被动垮落时, $M_{pi} = (\gamma_1 h_1 + q_1) L_i^2 / 4$, 则 $q_1 = 4M_{pi} / L_i^2 - \gamma h_i$, 代入式 (12) 得:

$$\begin{aligned}
P_m \left(a + \frac{b}{2} + x_0 \right) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \gamma_i h_i (a + b + x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j)^2 + \\
&\sum_{i=1}^m \gamma_i h_i (a + b + x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j) L_i + 2 \sum_{i=m_1+1}^m M_{pi} (a + b + \\
&x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j)^2 / L_i^2 - \frac{1}{2} \sum_{i=m_1+1}^m \gamma_i h_i (a + b + x_0 + \\
&\sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j)^2 + \sum_{i=m_1+1}^m [4M_{pi} (a + b + x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j) / \\
&L_i - \gamma_i h_i (a + b + x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j) L_i + M_{pi}] - \\
&\sum_{i=1}^m M_{Ai} - \int_0^{x_0} \sigma_y (x_0 - x) dx
\end{aligned} \quad (14)$$

可见, 被动垮落时, L_i 越大则 P_{mi} 越小。 M_{pi} 越大, P_{mi} 越大, 这说明围岩的抗弯能力越大, 要求支护的切顶阻力越大。由此证明, 岩层的被动垮落与主动垮落的矿压规律显然不同。在生产实践中, 为了减小巷道支护阻力, 如果顶板发生主动垮落, 应尽量减小顶板垮落步距 L_i ; 如果是被动垮落, 则应尽可能加大 L_i 。

4.4 无直接顶充填体支护阻力计算

当顶板无直接顶时, 即直接顶极薄或坚硬老顶 (关键层) 直覆, 老顶在其自重和上覆岩层外载荷共同作用下发生垮落, 即发生被动垮落。其力学计算模型与图 2 相似。为便于分析, 设第 i 层岩层自重为 γh_i , 外载荷为 q_i 。

若共有 m 层岩层首先随关键层同时垮落, 则支护阻力为

$$\begin{aligned}
P_m \left(a + \frac{b}{2} + x_0 \right) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m [(\gamma h_i + q_i)(a + b + x_0 + \\
&\sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j)^2 + \sum_{i=1}^m [(\gamma h_i + q_i)(a + b + x_0 + \\
&\sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j) L_i] + M_{pm} - \sum_{i=1}^m M_{Ai} - \int_0^{x_0} \sigma_y (x_0 - x) dx
\end{aligned} \quad (15)$$

岩层被动垮落所需的支护切顶阻力明显比主动垮落大。被动垮落时, $M_{pi} = (\gamma_1 h_i + q_i) L_i^2 / 4$, 则 $q_i = 4M_{pi} / L_i^2 - \gamma h_i$, 代入式(15)得:

$$\begin{aligned}
P_m \left(a + \frac{b}{2} + x_0 \right) &= \sum_{i=1}^m [2M_{pi} (a + b + x_0 + \\
&\sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j)^2 / L_i^2 + 4M_{pi} (a + b + x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j) / \\
&L_i] + M_{pm} - \sum_{i=1}^m M_{Ai} - \int_0^{x_0} \sigma_y (x_0 - x) dx
\end{aligned}$$

比较式 (13) 与 (15) 可以得知, 薄层直接顶充填体支护阻力与无直接顶的区别在于外载荷 q_i 的大小不同。无论是薄层直接顶还是无直接顶时, 外载荷均为关键层之上的岩层载荷, 而薄层直接顶时, 关键层下方赋存有小于 3~5 倍采高的直接顶; 而无直接顶时, 关键层直覆在煤层上, 这就导致了薄层直接顶与无直接顶时充填体支护阻力的不同。计算表明, 无直接顶时, 充填体支护阻力要求更大, 才能在充填体外侧切顶; 现场实践也表明, 顶板为坚硬岩层时, 应采取措施破坏顶板完整性, 保证充填体尽早切顶。

5 算 例

某工作面埋深为 780 m, 煤层厚为 3.4 m, 顶板向上依次为 1.82 m 厚炭质泥岩、0.45 m 煤线、1.7 m 泥岩和 18.56 m 砂岩。巷道宽为 5.0 m, 充填体宽为 2.2 m。工作面周期来压步距 20 m, 垮落角 α 为 11° , 岩石抗拉强度为 8 MPa, 煤层与顶底板岩层交界面的黏聚力 c_0 为 0.3 MPa, 煤层与顶底板岩层交界面的内摩擦角 φ_0 为 79° , 煤帮的支护强度 P_x 为 0.038 7 MPa, 应力极限平衡区的宽度 X_0 为 5.0 m, 侧压系数为 0.4, 应力集中系数取 2。

根据上述分析结果, 巷旁支护合理的支护阻力采用式 (13) 进行计算, 最终计算得到充填墙体支护阻力为 5.33 MPa。得出巷旁支护阻力后, 结合充填材料的力学性能, 即可确定巷旁支护体的宽度、充填量等参数, 从而有效实施沿空留巷。

6 结 论

(1) 分析了采场侧向顶板结构的稳定性, 提出了留巷支护结构的概念, 研究了侧向顶板关键块体的特征参数与影响留巷支护结构稳定的关键因素。认为侧向顶板结构在本工作面回采后能保持稳定, 通过巷内顶板、充填体、实体煤帮、充填区域顶板的协调承载可控制留巷支护结构的稳定。

(2) 将工程实践中接触到的典型顶板分为厚层直接顶、薄层直接顶和无直接顶 3 种类型。

(3) 利用叠加连续层板模型, 考虑巷帮煤体承载作用和导致顶板垮落诱因, 得出了 3 种顶板条件下的巷旁支护阻力计算公式。巷帮煤体、充填区域顶板承载性能的提高有助于降低巷旁充填体支护阻力。随直接顶厚度的减小, 充填体支护阻力反而增大。充填墙体支护阻力计算为确定巷旁支护体的宽

度、充填量等参数提供了依据。

参 考 文 献

- [1] 陆士良. 无煤柱护巷的矿压显现[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1982.
- [2] WILLIAMS D C. Packing technology[J]. **Mining Technology**, 1988, (3): 73—76.
- [3] SMART B G D, DAVIES D O. Application of the roof-strata-tilt approach to pack design in an arch-shaped roadway[J]. **Mining Engineering**, 1982, 144(9): 91—187.
- [4] 吴健, 孙恒虎. 巷旁支护载荷和变形设计[J]. 矿山压力与顶板管理, 1986, (2): 2—11.
WU Jian, SUN Heng-hu. Deformation design and supporting resistance of backfilling wall for gob-side entry retaining [J]. **Ground Pressure and Strata Control**, 1986, (2): 2—11.
- [5] 孙恒虎. 沿空留巷顶板活动机理与支护围岩关系新研究[D]. 北京: 中国矿业大学北京研究生院, 1988.
- [6] 马立强, 张东升, 陈涛, 等. 巷内充填原位沿空留巷充填体支护阻力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 544—550.
MA Li-qiang, ZHANG Dong-sheng, CHEN Tao, et al. Study on packing body supporting resistance of enter-in packing for in-situ gob-side entry retaining in fully-mechanized top-coal caving mining face[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(3): 544—550.
- [7] 华心祝, 马俊枫, 许庭教. 锚杆支护巷道巷旁锚索加强支护沿空留巷围岩控制机理研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2107—2112.
HUA Xin-zhu, MA Jun-feng, XU Ting-jiao. Study on controlling mechanism of surrounding rocks of gob-side entry with combination of roadside reinforced cable supporting and roadway bolt supporting, and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(12): 2107—2112.
- [8] 李晋平. 综放沿空留巷技术及其在潞安矿区的应用[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2005.
- [9] 涂敏. 沿空留巷顶板运动与巷旁支护阻力研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 1999, 18(4): 347—351.
TU Min. Study on roof movement and roadway-side supporting resistance of remained roadway[J]. **Journal of Liaoning Technical University**, 1999, 18(4): 347—351.
- [10] 李化敏. 沿空留巷顶板岩层控制设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 651—654.
LI Hua-min. Control design of roof rocks for gob-side entry[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(5): 651—654.
- [11] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [12] 朱德仁. 长壁工作面老顶的破断规律及其应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1987.
- [13] 李学华. 综放沿空掘巷围岩大小结构稳定性的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2000.
- [14] 阚甲广. 典型顶板条件沿空留巷围岩结构分析及控制技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- [15] 史元伟, 康立军, 李全生. 缓倾斜煤层回采工作面顶板分类修订方案的研究[J]. 煤炭科学技术, 1995, 23(4): 31—34.
SHI Yuan-wei, KANG Li-jun, LI Quan-sheng. Study on revision proposal of coal face roof classification for gently inclined seam[J]. **Coal Science and Technology**, 1995, 23(4): 31—34.
- [16] 司荣军. 综放面顶板(顶煤)分类及应用研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2004.
- [17] 弓培林. 大采高采场围岩控制理论及应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2006.
- [18] 侯朝炯, 马念杰. 煤层巷道两帮煤体应力和极限平衡区的探讨[J]. 煤炭学报, 1989, 14(4): 21—29.
HOU Chao-jiong, MA Nian-jie. Stress in in-seam roadway sides and limit equilibrium zone [J]. **Journal of China Coal Society**, 1989, 14(4): 21—29.
- [19] 张农, 李学华, 高明仕. 迎采动工作面沿空掘巷预拉力支护及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2100—2105.
ZHANG Nong, LI Xue-hua, GAO Ming-shi. Pretensioned support of roadway driven along next gob

and heading adajacent advancing coal face and its
application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and**

Engineering, 2004, 23(12): 2100—2105.