

DOI: 10.11779/CJGE201405023

大采高沿空留巷巷旁复合承载结构的稳定性分析

韩昌良¹, 张农^{1,2*}, 李桂臣¹, 李宝玉¹, 吴海^{1,2}

(1. 中国矿业大学矿业工程学院深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221008;
2. 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: 针对大采高沿空留巷的顶板运动特征, 提出了巷旁复合承载结构的概念, 通过力学分析, 揭示了巷旁结构的稳定机理。研究表明: 顶板压力由顶板、墙体和底板共同承担, 从而形成“顶—墙—底”复合承载结构; 区分不同阶段墙体强度与顶板运动的作用关系, 认为初期强度应大于顶板载荷, 后期应能适应顶板变形, 使墙体强度与顶板运动保持动态协调; 大采高时顶板向墙体施加更大的水平力, 要确保墙体水平滑移因子小于接触面摩擦系数以实现抗滑自稳; 墙体内侧应力不能高于顶底板强度, 以免顶底板被切断, 外侧应力不能高于墙体强度, 以免墙体被压裂, 降低墙宽和巷宽可减小墙体载荷, 据此得出了墙体和巷道宽度的确定方法。结合4.2 m大采高沿空留巷案例给出了工程验证, 采用膏体混凝土充填时, 满足巷旁结构稳定条件的巷道宽度为3 m, 墙体宽度为4 m, 实测结果表明了结论的合理性。

关键词: 大采高; 沿空留巷; 复合承载结构; 水平滑移因子; 稳定机理

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)05-0969-08

作者简介: 韩昌良(1985-), 男, 江苏睢宁人, 博士, 讲师, 主要研究方向为巷道围岩控制。E-mail: 13641532955@126.com。

Stability analysis of compound bearing structure of gob-side entry retaining with large mining height

HAN Chang-liang¹, ZHANG Nong^{1,2}, LI Gui-chen¹, LI Bao-yu¹, WU Hai^{1,2}

(1. School of Mines, Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education, China University of Mining & Technology,

Xuzhou 221008, China; 2. Hunan Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology,
Xiangtan 411201, China)

Abstract: The concept of roadside compound structure is proposed through the analysis of roof movement of gob-side entry retaining under large mining height, and the stability mechanism is revealed by mechanical calculation. The results indicate that the roof load is born by a compound bearing structure composed of “roof-wall-floor”. The action relations of staged wall strength and roof movement are distinguished, the initial strength should be larger than the roof load, and the final strength should adapt to the roof deformation, so that the wall strength and roof movement can maintain a dynamic coordination. The roofs impose higher horizontal force on the wall under large mining height, thus the horizontal sliding factor should be less than the friction coefficient on the contact surface of wall and rock to realize self-stabilization. The inboard stress cannot be higher than the strength of roof and floor in order to avoid the strata being cut off, and the outboard stress cannot be higher than the strength of wall in order to avoid the wall being broken. Decreasing the widths of entry and wall can reduce the stress of wall, based on which the determination methods for the widths of entry and backfill body are proposed. A field test with 4.2 m mining height, whose entry and backfill width is designed to be 3 m and 4 m respectively, is conducted to demonstrate the effectiveness of the proposed method. The results verify the reasonableness of the conclusions.

Key words: large mining height; gob-side entry retaining; compound bearing structure; horizontal sliding factor; stability mechanism

0 引言

巷旁充填体主要起支撑顶板和封闭采空区的作用^[1], 是沿空留巷的核心问题^[2-3], 而支撑承载性能往往决定沿空留巷的最终效果, 一直是国内外学者的研究热点^[4-5]。已有的研究多倾向于将巷旁支撑体视为矿

山压力的独立承载体, 因而巷旁支撑向宽墙体高强度

基金项目: “长江学者和创新团队发展计划”创新团队项目(IRT1084); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110095110013); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX10B_147Z)

收稿日期: 2013-04-18

*通讯作者

方向发展。但研究表明, 在采高较小, 直接顶较厚的条件下, 宽高比为 0.23 的窄充填体也能够满足承载要求^[6]。说明巷旁墙体的稳定性不仅取决于墙体本身, 还与岩层赋存条件等因素有关。事实上巷旁载荷由顶板、支撑体及底板共同承担, 应充分考虑墙体所处的围岩环境, 合理确定墙体位置和尺寸, 忽视赋存条件而一味提高支撑体的强度和宽度往往难以充分发挥其承载能力, 甚至不利于巷道顶底板的维护。采高超过 3.5 m 的大采高工作面侧向端部矿压显现更趋强烈^[7-8], 由于顶板关键块回转下沉量大, 更易导致支撑体的倾斜、移动、变形和破裂^[9], 支撑体必须同时满足垂向承载和横向抗滑的要求, 有关的理论与技术研究还不能满足工程实践的需要^[10-12]。

本文针对大采高采场的顶板运动特征, 提出巷旁复合承载结构的概念, 考虑采高、留巷宽度、顶板断裂结构以及岩体承载性能等多种因素, 剖析了沿空留巷关键参数之间的相互制约关系, 对巷旁支撑体的稳定性机理及控制对策开展研究, 结合 4.2 m 大采高条件给出了工程验证。

1 巷旁复合承载结构的概念与特征

采空区侧向顶板的断裂旋转下沉是巷旁支撑体的主要应力来源^[13]。载荷通过岩层传递, 最终由顶板、支撑体和底板共同承担, 从而形成“顶—墙—底”复合承载结构, 如图 1 所示。承载结构具有以下特征:

(1) 结构由“顶—墙—底”组成, 三者共同承载, 采动期间顶底板强度持续弱化, 墙体充填后一段时间内强度却不断增长。此时, 若顶底板岩层强度较低, 支撑体强度过高, 则会导致顶底板沿支撑体内侧切断; 若顶底板岩层强度高, 支撑体强度较低, 则采动活动在岩层中不断蓄积的能量最终会引发墙体的大变形乃至破裂。

(2) 留巷后期结构具有“给定变形”的特点。老顶岩层在采空区侧向破断后形成 I、II、III 3 个相互咬合的块体, 块体 II 的回转下沉对墙体的施载作用最为关键。根据关键层理论, 老顶断裂后将带动上覆数个岩层同期破断, 直接顶和充填体无法控制这种剧烈下沉, 只能被动承受块体 II 的“给定变形”^[14]。巷旁承载结构必须有足够的刚度以免破坏。

(3) 侧向顶板旋转下沉的过程中, 墙体会承受不断增大的水平推力。大采高条件下块体 II 的旋转角度明显增加, 并对墙体形成较大的水平推力, 处理不当, 会导致墙体滑移、倾倒。墙体与顶底岩层接触面的摩擦力大于水平推力时才可使墙体在水平方向上自稳。摩擦力与接触面的法向应力成正比, 但法向应力过高

时又易造成顶底板或墙体切落破坏。因而, 如何同时保证复合承载结构的垂向合理承载和水平抗滑自稳也是大采高留巷的关键。

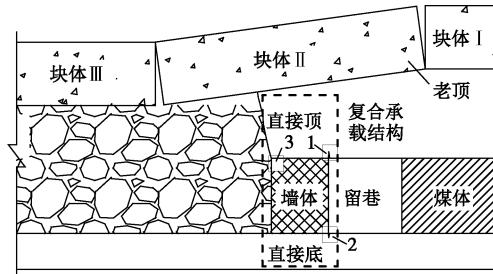


图 1 巷旁墙体复合承载结构

Fig. 1 Compound bearing structure of backfill beside entry

2 巷旁复合承载结构的力学分析

2.1 力学模型

根据沿空留巷顶板运动特征可知, 老顶关键块在破断旋转过程中, 下位岩体处于给定变形状态, 由此建立力学模型如图 2 所示。以老顶侧向断裂旋转基点为坐标原点 O 建立直角坐标系。图 2 中 a 为墙宽, b 为巷宽, x_0 为老顶旋转基点到煤帮的水平距离, θ 为关键块的旋转角度, l 为老顶关键块长度, Δh 为老顶最大下沉量; h , h_1 , m , h_2 分别为老顶、直接顶、煤层和直接底的厚度。由于巷旁支撑体多为似膏体或高水材料泵入模板固结形成, 材料的自流平之后会出现空顶现象, 用 δ 表示空顶距。

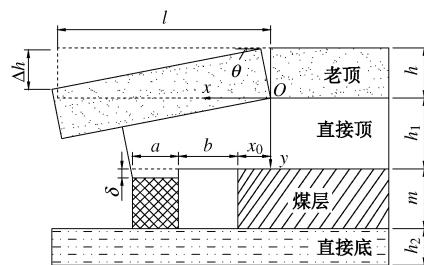


图 2 沿空留巷力学模型

Fig. 2 Mechanical model of gob-side entry retaining

2.2 顶板断裂位置与墙体载荷

老顶断裂基点至沿空留巷煤帮的水平距离 x_0 为^[15]

$$x_0 = \frac{\lambda m}{2 \tan \varphi_0} \ln \left[\frac{k \gamma H + \frac{c_0}{\tan \varphi_0}}{\frac{c_0}{\tan \varphi_0} + \frac{p_x}{\lambda}} \right], \quad (1)$$

式中, λ 为侧压系数, φ_0 , c_0 为煤层与顶底板岩层交界面的内摩擦角和黏聚力, k 为应力集中系数, γ 为覆岩的平均重度, H 为煤层埋深, p_x 为煤帮的支护强度。

关键块体的长度 l 为^[16]

$$l = l' \left(-\frac{l'}{S} + \sqrt{\frac{l'^2}{S^2} + \frac{3}{2}} \right), \quad (2)$$

式中, S 为工作面长度, l' 为周期来压步距, 通过实测或由下式确定:

$$l' = h \sqrt{\frac{R_t}{3q}}, \quad (3)$$

式中, R_t , q 分别为老顶岩层的抗拉强度和载荷。

首先分析留巷初期顶板载荷。根据采场矿压理论的研究, 墙体最大需承担墙体、巷道以及煤帮弱承载区的直接顶重量, 顶板压力相当于 $n= (4 \sim 8)$ 倍采高的重量, 因此有

$$\sigma_1 = \frac{(a+b+x_0)nym}{a}. \quad (4)$$

充填墙体强度的发展需要一定的时间。式(4)适用于留巷初期老顶断裂前, 因而 σ_1 应按初期强度计算; γ 为直接顶的体积力。

然后考虑留巷后期老顶载荷及给定变形。老顶关键块破断后旋转下沉, 直至充分触研后停止, 不同位置的顶板给定变形量 S_x 为

$$S_x = \frac{[m - (K-1)h_1]x}{l}, \quad (5)$$

式中, K 为直接顶碎胀系数, x 为距老顶断裂基点的水平距离。

用 σ_x 表示下位岩体距老顶断裂基点不同水平距离上的压应力, 则老顶下位岩体的压缩变形量 Δh_x 为

$$\Delta h_x = \frac{\sigma_x m}{E} + \frac{\sigma_x h_1}{E_1} + \frac{\sigma_x h_2}{E_2} + \delta, \quad (6)$$

式中, E , E_1 和 E_2 分别表示巷旁支撑体、直接顶和直接底的弹性模量。

下位岩体不能阻止老顶的给定变形, 所以有 $S_x = \Delta h_x$, 结合式(5)、(6) 可得

$$\sigma_x = \frac{[m - (K-1)h_1]x - l\delta}{l \left(\frac{m}{E} + \frac{h_1}{E_1} + \frac{h_2}{E_2} \right)}. \quad (7)$$

现有技术条件下支撑体强度容易满足式(4)的要求, 而从式(7)可知后期对强度要求较高。注意到 σ_x 与 x 成正比关系, 因而通过降低墙体和巷道的宽度可以缓解墙体的压力。

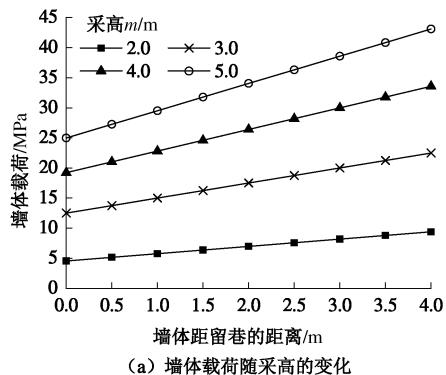
2.3 采高与直接顶对墙体载荷的影响

由式(7)分析采高与直接顶厚度对支撑体承载的影响, 取 x_0 为 2.0 m, l 为 18.0 m, b 为 4.0 m, 支撑体弹性模量为 300 MPa, 直接顶与直接底的弹性模量为 200 MPa, K 为 1.3, 空顶距 δ 为 0.1 m。

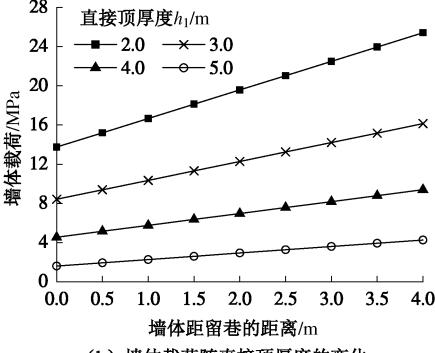
(1) 直接顶厚度 h_1 为 4 m, 直接底 h_2 厚度为 2 m

的条件下, 当采高 m 由 2 m 增加至 5 m 时, 支撑体的承载曲线如图 3(a) 所示。承载特征: ①采空区侧墙体的载荷大于巷道侧; ②墙体载荷与采高呈正比关系, 采高增加时墙体载荷明显增大, 但增加的幅度不断降低。显然, 当采高增大时, 老顶的给定变形量随之增大, 引发了更高的支撑载荷。

(2) 采高 m 为 2 m 的条件下, 直接顶厚度 h_1 由 2 m 增加至 5 m 时, 支撑体的承载曲线如图 3(b) 所示。墙体承载与直接顶厚度呈反比关系, 直接顶厚度增大时墙体承载明显降低, 但降低的幅度不断减小。可见, 直接顶不仅是老顶块体 II 的垫层, 也是墙体承载的缓冲层, 较厚的直接顶利于留巷围岩结构的稳定。



(a) 墙体载荷随采高的变化



(b) 墙体载荷随直接顶厚度的变化

图 3 墙体载荷曲线

Fig. 3 Load curves of backfill wall

2.4 充填墙体抗水平滑移能力分析

如图 4 所示, 在侧向推力作用下, 支撑体与顶底板岩层接触面上产生摩擦阻力, 当侧向推力大于摩擦力时, 支撑体发生滑移失稳。考虑到侧向悬臂形成的三角空间, 采空区矸石的挤压力 F_g 可忽略不计。

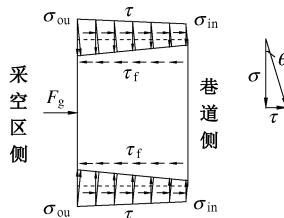


图 4 充填体抗水平滑移性能分析

Fig. 4 Anti-sliding ability of backfill body

充填体水平方向上稳定性判据为侧向推力 F 不大于岩层接触面上的摩擦力 f 。根据 Patton 剪胀公式^[17], 表面摩擦应力 τ_f 与正应力 σ 有如下关系:

$$\tau_f = \mu\sigma , \quad (8)$$

式中, μ 为充填体与顶底岩层间的摩擦系数。

老顶侧向块体施加的水平应力 τ 以及垂向应力 σ 为总应力的分量, 因而有

$$\tau = \sigma \tan \theta , \quad (9)$$

于是水平方向上稳定性判据可写成

$$\frac{m - (K - 1)h_1}{l} \leq \mu , \quad (10)$$

满足式(10)则可保证支撑体水平方向的稳定。

将式(10)的左边部分定义为支撑体水平滑移因子 ψ , 即

$$\psi = \frac{m - (K - 1)h_1}{l} , \quad (11)$$

取块体 II 的长度 l 为 18 m, 考察不同条件下 ψ 与摩擦系数 μ 的关系, 如图 5 所示。充填体与顶底岩层间的摩擦系数一般为 0.5~0.8, 这里取 0.5。由图 5 可知: ①采高 5 m 以下时, 支撑体水平滑移因子在 0.5 以下, 能够满足式(10)的稳定条件; ②采高超过 5 m 且直接顶厚度在 3 m 以下时, 水平滑移因子才会超过 0.5, 引发墙体的水平滑移。

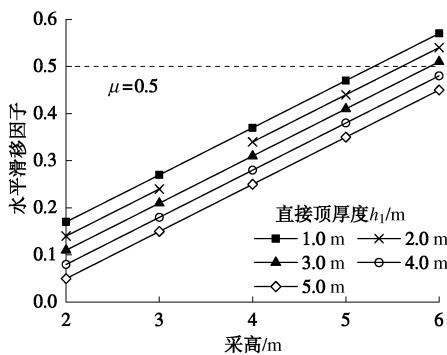


图 5 支撑体水平滑移因子

Fig. 5 Horizontal sliding factor of backfill body

可见, 采高 2~5 m 时, 虽然采高的增加会给支撑体带来更大的水平推力, 但支撑体上受到的法向应力也会有显著提高, 接触面摩擦力也随之增大, 仍有足够的抗水平滑移能力。当采高超过 5 m 时, 水平滑移因子增大至失稳值, 应采取措施提高充填体与顶底岩层间的摩擦系数保证稳定。

3 沿空留巷与墙体参数的确定

3.1 沿空留巷的合理宽度

根据式(7)得到巷旁支撑体内侧的应力 σ_{in} 为

$$\sigma_{in} = \frac{[m - (K - 1)h_1](x_0 + b) - l\delta}{l\left(\frac{m}{E} + \frac{h_1}{E_1} + \frac{h_2}{E_2}\right)} . \quad (12)$$

墙体内侧应力高于顶底板强度时会将岩层切断, 因而要求巷旁支撑体内侧顶板应力小于直接顶和直接底岩体的强度 (R_r , R_f) 的小者 R_m , 即

$$\sigma_{in} \leq R_m = \min[R_r, R_f] . \quad (13)$$

结合式(12)、(13), 可得到强度为 R_b 的巷旁支撑体和巷道宽度的取值上限为

$$b \leq \frac{\left[R_m\left(\frac{m}{E} + \frac{h_1}{E_1} + \frac{h_2}{E_2}\right) + \delta\right]l}{m - (K - 1)h_1} - x_0 . \quad (14)$$

巷道宽度的下限可依据生产中对断面的需求而定, 设计中要考虑预留变形量, 这里不做探讨。

直接顶与直接底岩体的最小强度 R_m 分别取 18, 20, 22 MPa, 直接顶厚度 h_1 为 3 m, 其余参数同前, 在采高由 2.5 m 增加至 5 m 时, 由式(14)考察直接顶免遭巷旁支撑体切断的最大许可留巷宽度, 如图 6 所示。由图 6 可以看出: ①最大许可留巷宽度与采高呈现负指数关系; ②最大许可留巷宽度随 R_m 的提高而增加。因此, 增大留巷跨度应从两方面着手: 降低采高或增加顶底板的承载强度。

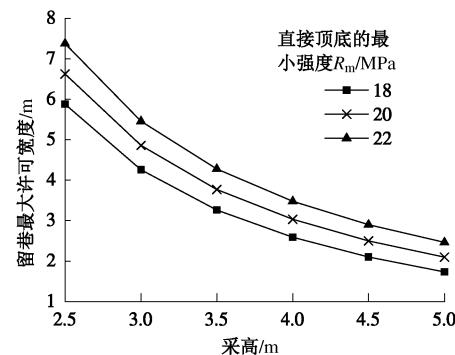


图 6 最大许可留巷宽度

Fig. 6 Maximum allowable width of entry retaining

3.2 支撑体的合理宽度

由式(4)可得到巷旁支撑体宽度的下限为

$$a \geq \frac{(b + x_0)n\gamma m}{\sigma_1 - n\gamma m} , \quad (15)$$

根据式(7)得到巷旁支撑体外侧的应力 σ_{ou} 为

$$\sigma_{ou} = \frac{[m - (K - 1)h_1](x_0 + a + b) - l\delta}{l\left(\frac{m}{E} + \frac{h_1}{E_1} + \frac{h_2}{E_2}\right)} . \quad (16)$$

外侧应力高于墙体强度时会将其压裂, 因而巷旁支撑体外侧所受应力不能大于墙体的强度 R_b , 即

$$\sigma_{ou} \leq R_b . \quad (17)$$

结合式(16)、(17)可得到强度为 R_b 的巷旁支撑体和

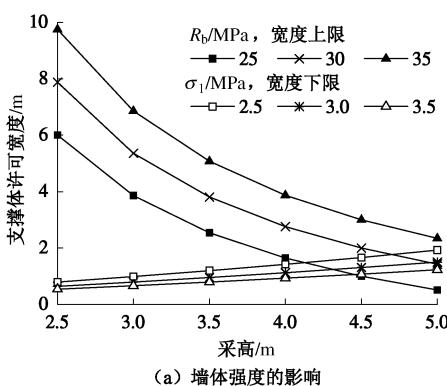
巷道宽度的取值上限为

$$a \leq \left[R_b \left(\frac{m}{E} + \frac{h_1}{E_1} + \frac{h_2}{E_2} \right) + \delta \right] l - (x_0 + b) \quad (18)$$

(1) 由式(15)可知支撑体宽度下限受采高、巷宽及其初期强度的影响; 由式(18)可知, 支撑体宽度受其自身强度以及巷道尺寸的影响。直接顶厚度 h_1 取 3 m, 巷宽 b 取 2.5 m, 充填体初期强度 σ_1 取强度 R_b 的 1/10, 其余参数同前, 得到在自身强度的影响下, 支撑体宽度的上下限, 如图 7(a) 所示。得出如下规律: ①支撑体宽度上限与采高成反比, 与自身强度成正比; ②宽度下限与采高成正比, 与材料的初期强度成反比; ③当采高超过 4.2~4.5 m 时, 出现下限大于上限的现象。这些表明, 当采高增大时支撑体需承担更高的顶板压力, 因而需要较大的宽度, 同时采高增大带来更大的给定变形量, 墙宽过大时会因承受过大的给定变形而破坏, 因而墙体的宽度应在上下限内合理取值; 但当采高超过 4.2~4.5 m 时, 会出现如下问题: 一方面留巷初期需要足够宽的墙体以保证支撑住顶板, 另一方面留巷后期墙体又不能过宽以避免因较大给定变形而破坏, 墙宽的上下限出现矛盾。这种情况下研发一种初期强度高、后期可缩量大的特种材料是必要的。事实上目前尚没有这种采高下留巷成功的案例。

(2) 支撑体强度取 30 MPa, 其余参数同前, 支撑体宽度的上下限受巷道宽度的影响情况如图 7(b) 所示。①支撑体宽度上限与巷宽成反比, 下限与巷宽成正比; ②当采高超过 4.5 m 时, 出现宽度上限大于下限的情况, 原因同前。

可见, 在一定的顶板条件下, 墙体宽度取决于支撑体的初期强度、最终强度、采高和巷道宽度, 这些参数确定后墙体宽度的上下限也就确定。降低支撑体宽度的措施主要有降低采高, 提高初期强度, 减小巷道的跨度。



(a) 墙体强度的影响

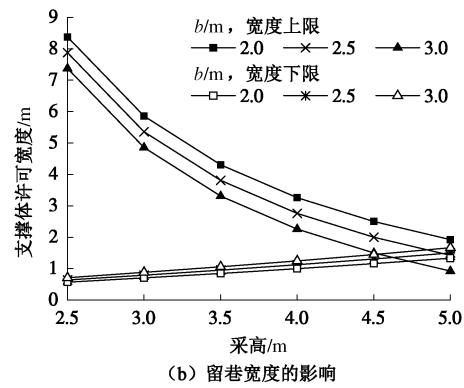


图 7 最大充填体宽度曲线

Fig. 7 Maximum allowable width of backfill body

4 巷旁复合结构的稳定对策

通过以上分析, 得出大采高沿空留巷巷旁支撑结构的稳定性条件: 强度协调一致; 垂向刚度匹配; 水平抗滑自稳。

(1) 强度协调一致。①留巷初期墙体强度大于顶板载荷, 初期的具体时间以周期来压为依据。按照目前的开采技术水平, 工作面推进 1~3 d, 顶板便出现 1 次周期来压, 因而应以充填体的 1 d 强度计算。②留巷后期, 充填体受顶板压缩而变形, 强度持续增长, 在最终“给定变形”状态下, 墙体不能被压坏, 即最高强度能够适应顶板变形。

(2) 垂向刚度匹配。①墙体的垂向承载和变形能力要与顶底板岩层相匹配, 形成协调的复合承载结构。顶板垮落后, 直接顶和直接底分别为单侧约束和双侧约束状态, 而墙体两侧分别为采空区和巷道, 为双侧自由状态, 墙体发生变形破坏的可能性远大于顶底板, 因而需要墙体有足够的强度和刚度使之与围岩结构匹配。②墙体内侧承受的载荷不能高过顶底板岩层的强度, 避免切断内侧岩层(图 1 中位置 1, 2)。③墙体外侧强度不能低于最大顶板压力(图 1 中位置 3), 避免被压坏。墙体外侧的给定变形量大于内侧, 因而只要保证外侧不受破坏, 内侧必然不受破坏。

(3) 水平抗滑自稳。大采高条件下老顶关键块体 II 的旋转角度较大, 给墙体施加的水平推力较高, 墙体需要具备足够的抵抗水平滑移的能力。这就要求水平滑移因子小于充填体与顶底板接触面的摩擦系数。

相应的控制对策分成两种: ①改变岩层运动状态。如降低采高可减小关键块 II 的旋转角和给定变形量, 从而缓解巷旁压力; 对老顶实施预裂爆破, 相当于增加直接顶的厚度, 也可缓解巷旁压力。②合理选择墙体位置和宽度以及巷道的宽度。根据胡克定律, 墙体的载荷由关键块体 II 的给定变形量决定。当墙体位置

和宽度确定后，承受的给定变形及载荷也就确定。为了减小给定变形量、缓解巷旁压力，可以将墙体的位置向巷内平移、降低留巷宽度。具体可根据稳定性条件并结合式(14)、(15)、(18)确定宽度的合理取值范围。

5 工程案例

5.1 生产地质条件

沙曲矿24207工作面平均采高4.2 m，工作面平均埋深520 m，倾向长度220 m，走向长度1548 m。回采过程中对运输巷实施沿空留巷。煤层顶底板条件如图8所示。

柱状	层厚/m	岩性	岩性描述
	1.04	煤层	#2煤层，半亮型煤，粉末状。
	1.75	碳质泥岩	黑色含碳泥岩，含植物化石碎片。
	1.61	细砂岩	灰色，以石英为主，次为长石。
	4.50	中砂岩	灰白色，厚层状，以石英为主。
	0.50	砂质泥岩	灰黑色，含植物化石碎片。
	0.59	粉砂岩	深灰色，薄层状，脉状层理。
	5.50	砂质泥岩	灰黑色，上部有菱铁矿，局部含砂。
	4.20	开采煤层	半光亮型，玻璃光泽，内生裂隙发育。
	1.10	中砂岩	灰色中砂岩，可见大量白云母碎片。
	2.50	粉砂岩	黑色粉砂岩，有植物化石碎片。

图8 工作面地质柱状图

Fig. 8 Geologic column of working face

待留巷道断面尺寸为宽×高=4.0 m×3.8 m，主要采取锚杆支护形式。①掘进期间：两帮每排4根Φ16×2000 mm圆钢锚杆；顶板每排6根Φ20×2400 mm左旋螺纹钢锚杆搭配W型钢带支护；顶板每两排锚杆之间实施Φ17.8×6300 mm锚索强化支护，锚索形成“1-2-1”布置。掘进影响期巷道断面收缩率10%~17%。②留巷前对关键部位强化支护：非回采帮每排采用5根Φ20×2000 mm螺纹钢锚杆压W5钢带施工，顶板采用Φ22×6300 mm锚索强化为“4-3-4-3”形式。帮顶锚杆间排距皆为0.8 m。

5.2 留巷参数的确定

煤层直接顶厚度为6.59 m，强度为18 MPa，碎胀系数为1.3，直接底厚度1.1 m，强度为22 MPa；老顶断裂基点至留巷煤帮的水平距离为2.0 m，工作面回采中实测周期来压步距平均19.5 m；巷旁充填采用膏体混凝土材料，混凝土1 d强度不小于2 MPa，终强可达20 MPa以上，充填料浆流平固结后空顶距为0.1 m。结合式(10)计算得到该条件下墙体水平滑移因子为0.12，小于摩擦系数，满足抗水平滑移的要求。

结合式(4)、(15)得到保证墙体初期承载不大于其初期支撑能力的巷道与墙体宽度如图9(a)所示，计算中n=8，γ=25000 N/m³。由图9可得到巷道和墙

体宽度的取值范围，如墙宽为4 m时巷宽可取2~3 m。

结合式(12)、(14)、(16)、(18)得到保证墙体后期承载不大于其最大承载能力的巷道与墙体宽度如图9(b)所示。由图易知巷道和墙体宽度的取值范围，如墙宽4 m时，巷宽可取2~3 m。

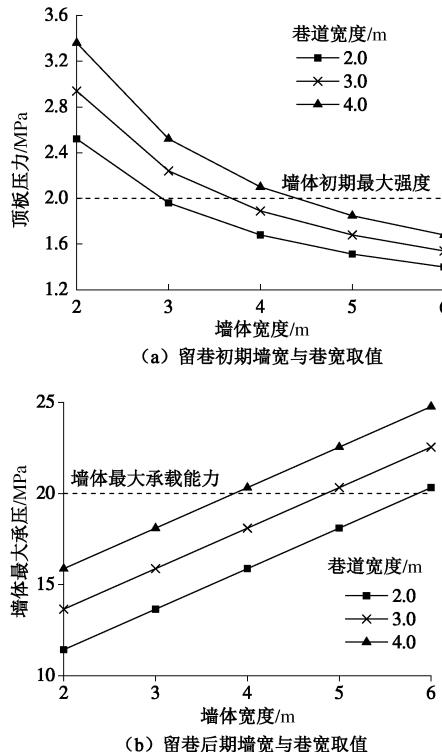


图9 沿空留巷与墙体的宽度取值范围

Fig. 9 Value ranges for width of entry and backfill body

综合以上可知，当墙宽为2 m时，无论巷道宽度如何取值，都要求墙体的初期强度达到2.52 MPa以上，而充填体的初期强度只有2 MPa，不能满足强度条件，因而不可取；墙宽为3 m时，巷宽可取2 m；墙宽为4 m时，巷宽可取2~3 m；墙宽为5 m时，巷宽可取2 m。同样，在留巷后期，当墙宽为4 m时，巷宽可取2~3 m，而不能取4 m，因为此时要求的墙体强度超过了20 MPa的最高强度。结合工程需求，留巷在使用中要求通风断面不小于8 m²，因此最终确定巷道宽度3 m、墙体宽度4 m；巷道原始宽度为4 m，留巷时需将墙体向巷内平移1 m充填，如图10所示。

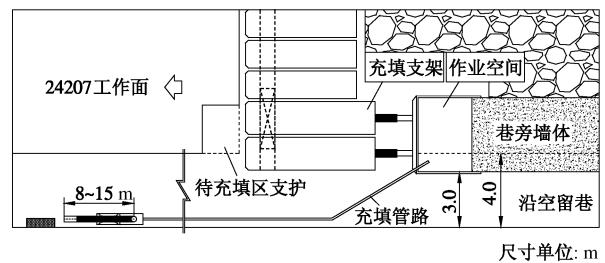


图10 沿空留巷示意图

Fig. 10 Schematic diagram of gob-side entry retaining

5.3 留巷效果实测

沿空留巷围岩变形稳定后顶板整体向采空区倾斜6°左右, 验证了采场侧向顶板给定变形的合理性。巷道变形稳定后墙体内外侧直接顶及直接底未发生切断, 墙体本身未发生破坏或向巷内滑移的情况, “顶—墙—底”结构保持了整体稳定, 未出现宏观破裂现象。巷旁复合承载结构的有效形成, 促进了沿空留巷围岩的稳定, 实现了对变形的限制。回采留巷后顶板压力与充填体强度逐渐增加, 在其发展期内, 巷道变形逐渐增加, 而专用混凝土“早强、高强”特性使墙体强度与顶板压力保持了动态协调关系。巷道各部位最大变形量如图11所示。两帮最大变形量为665 mm, 顶底最大变形量为597 mm, 变形稳定后留巷断面尺寸平均8.0 m²以上, 保证了通风等使用需求。

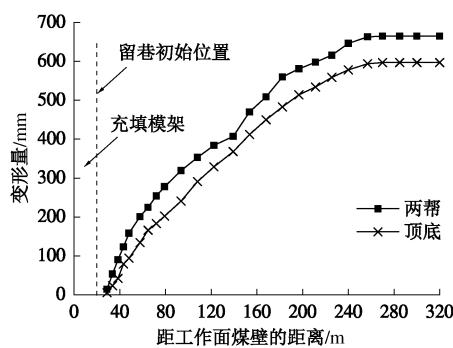


图11 24207沿空留巷变形曲线

Fig. 11 Deformation curves of 24207 entry retaining

6 结 论

(1) 采空区侧向顶板的断裂旋转是巷旁支撑体的主要应力源, 载荷由直接顶、支撑体和直接底共同承担, 形成“顶—墙—底”复合承载结构, 结构的稳定需要满足3个条件: 强度协调一致; 垂向刚度匹配; 水平抗滑自稳。

(2) 充填墙体强度的发展需要一定时间, 应区分不同阶段墙体强度与顶板运动的协调性, 墙体的初期强度要大于顶板载荷, 最终强度应能够适应顶板的给定变形; 墙体承压与采高、巷宽和墙宽成正比, 与直接顶厚度成反比。

(3) 墙体能否在水平方向上抗滑自稳, 取决于水平滑移因子与接触面摩擦系数的关系, 前者小于后者时可实现自稳, 而大于后者时则滑移失稳; 墙体的抗滑自稳能力随着采高的增加而降低。

(4) 墙体内侧应力不能高于顶底板强度, 以免顶底板被切断, 外侧应力不能高于墙体强度, 以免墙体被压裂, 降低墙宽和巷宽可减小墙体载荷, 据此得出了墙体和巷道宽度的确定方法。

(5) 研究成果得到了4.2 m大采高沿空留巷的工程验证: 在沙曲矿24207工作面顶底板岩层赋存条件下, 采用混凝土充填留巷时, 确定合理的宽度取值为巷宽3 m, 墙宽4 m, 巷道变形结束后围岩保持稳定, 断面满足了使用要求。

参 考 文 献:

- [1] 孙恒虎, 赵炳利. 沿空留巷的理论与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993. (SUN Heng-hu, ZHAO Bing-li. Theory and practice of gob-side entry retaining[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993. (in Chinese))
- [2] 徐金海, 付宝杰, 周保精. 沿空留巷充填体的流变特性分析[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(5): 585 - 589. (XU Jin-hai, FU Bao-jie, ZHOU Bao-jing. Back fill rheological properties for gob-side entry retaining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(5): 585 - 589. (in Chinese))
- [3] ZHANG Nong, YUAN Liang, HAN Chang-liang, et al. Stability and deformation of surrounding rock in pillarless gob-side entry retaining[J]. Safety Science, 2012, 50(4): 593 - 599.
- [4] 张东升, 缪协兴, 冯光明, 等. 综放沿空留巷充填体稳定性控制[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(3): 232 - 235. (ZHANG Dong-sheng, MIAO Xie-xing, FENG Guang-ming, et al. Stability control of packing body for gob-side entry retaining in fully-mechanized coal faces with top-coal caving[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(3): 232 - 235. (in Chinese))
- [5] 王金安, 韦文兵, 冯锦艳. 综放沿空异形煤柱留巷系统力学场演化规律[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(4): 317 - 323. (WANG Jin-an, WEI Wen-bing, FENG Jin-yan. Stress evolution of an irregular pillar protected roadway system remained along goaf in fully mechanized top-coal caving mining field[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(4): 317 - 323. (in Chinese))
- [6] 周保精, 徐金海, 倪海敏. 小宽高比充填体沿空留巷稳定性研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(增刊): 33 - 37. (ZHOU Bao-jing, XU Jin-hai, NI Hai-min. The small aspect ratio backfill gob-side entry retaining stability[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S0): 33 - 37. (in Chinese))
- [7] 弓培林. 大采高采场围岩控制理论及应用研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006. (GONG Pei-lin. Surrounding rock control theory and application study of the coal face with greater mining height[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2006. (in Chinese))

- [8] 胡国伟, 靳钟铭. 大采高综采工作面矿压观测及其显现规律研究[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(2): 127 - 130. (HU Guo-wei, JIN Zhong-ming. Practice of pressure law and study on the strata behavior regularity of large mining height fully-mechanized face[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(2): 127 - 130. (in Chinese))
- [9] 付玉平, 宋选民, 邢平伟, 等. 大采高采场顶板断裂关键块稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1027 - 1031. (FU Yu-ping, SONG Xuan-min, XING Ping-wei, et al. Stability analysis on main roof key block in large mining height workface[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1027-1031. (in Chinese))
- [10] 王学启, 胡仁山, 孙立亚. 大采高沿空留巷巷旁充填试验研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 1997, 14(3): 153 - 155. (WANG Xue-qi, HU Ren-shan, SUN Li-ya. Experimental research on backfill of gob-side entry retaining with large mining height[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1997, 14(3): 153 - 155. (in Chinese))
- [11] 刘益成, 孙立亚. 大采高工作面沿空留巷巷旁充填支护实践[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(3): 19 - 20. (LIU Yi-cheng, SUN Li-ya. Test of backfill support in gob-side entry retaining at fully mechanized face with large mining height[J]. Coal Science and Technology, 2000, 28(3): 19 - 20. (in Chinese))
- [12] 李增田, 李树军. 大采高工作面下巷沿空留巷实践[J]. 煤炭技术, 2003, 22(1): 30 - 31. (LI Zeng-tian, LI Shu-jun. Practice of gob-side entry retaining at working face with large mining height[J]. Coal Technology, 2003, 22(1): 30 - 31. (in Chinese))
- [13] 韩昌良, 张 农, 钱德雨, 等. 大采高沿空留巷顶板安全控制及跨高比优化分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 348 - 354. (HAN Chang-liang, ZHANG Nong, QIAN De-yu, et al. Optimization analysis of span-depth ratio for roof safety control in gob-side entry retaining under large mining height[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 348 - 354. (in Chinese))
- [14] 韩昌良, 张 农, 李桂臣, 等. 覆岩分次垮落时留巷顶板离层形成机制[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(6): 893 - 899. (HAN Chang-liang, ZHANG Nong, LI Gui-chen, et al. Bed Separation Mechanism under Sequential Roof Collapse Condition in a Gob-side Entry Retaining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(6): 893 - 899. (in Chinese))
- [15] 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. (LI Ying-fu, HUA Xin-zhu, CAI Rui-chun. Mechanics analysis on the stability of key block in the gob-side entry retaining and engineering application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(3): 357 - 364. (in Chinese))
- [16] 李学华. 综放沿空掘巷围岩稳定性控制原理与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008. (LI Xue-hua. Control theory and technology of surrounding rock stability for gob-side entry driving in fully mechanized caving mining[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008. (in Chinese))
- [17] 夏才初, 孙宗頤. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002. (XIA Cai-chu, SUN Zong-qi. Joint mechanics of engineering rock mass[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002. (in Chinese))