

沿空留巷采空侧支护体-堆积体协同承载机理

辛亚军^{1,2}, 田孟含¹, 姬红英³, 张东营⁴, 高忠国⁴, 任金武⁵, 赵康⁶

- (1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454000; 3. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454000; 4. 黔西金城煤业有限公司, 贵州 毕节 551700; 5. 河南能源化工集团 永华能源有限公司, 河南 洛阳 471000; 6. 永贵能源开发有限责任公司 新田煤矿, 贵州 毕节 551500)

摘要: 沿空留巷以提高煤炭采出率、实现工作面Y型通风与采掘接替平衡而得到广泛应用, 而巷旁支护体在采空区内塌落矸石侧向推挤作用下极易失稳。通过对沿空留巷采空侧支护体侧向受力失稳分析, 提出了沿空留巷支护体采空侧充填堆积体概念, 建立了沿空留巷采空侧支护体-堆积体稳定性模型, 分析了支护体-堆积体稳定性影响因素, 探讨了不同参数条件下堆积体强度特征, 开展了堆积体力学特性试验, 最后进行了沿空留巷采空侧支护体-堆积体协同承载工业性试验。结果表明: 沿空留巷支护体侧向失稳是沿空留巷围岩失稳诱发点, 沿空留巷采空侧支护体失稳主要表现为支护体整体移动失稳与弯曲变形失稳; 采空侧支护体失稳与采空区内塌落矸石侧向力的大小、方向与作用位置密切相关, 在沿空留巷支护体采空侧充填一定强度堆积体利于支护体稳定; 采用理论模型计算得到沿空留巷巷旁堆积体宽、高分别为1 433.3和1 708.1 mm (考虑安全选取为1.5和1.7 m), 实际堆积体抗拉强度为0.121 3 MPa (现场不小于0.15 MPa); 同矸石级配粒径下, 水泥质量分数与堆积体强度呈近线性关系, 水泥质量分数增加到10%后强度增幅趋缓, 整体峰值应变呈先增后减趋势; 同水泥质量分数下, 随矸石级配粒径增加, 堆积体强度呈先增加后减小趋势, 级配粒径 ≤ 8 mm时强度最大, 整体峰值应变表现为增—减—增形态; 最优堆积体为级配粒径 ≤ 8 mm、水泥质量分数10%的P8C10堆积体; 采用设计支护体-堆积体围岩控制方案后, 顶板未出现明显下沉, 支护体侧向变形平均控制在25 mm以内, 巷道围岩稳定。

关键词: 沿空留巷; 侧向失稳; 支护体-堆积体; 协同力学模型; 参数确定; 稳定性

中图分类号: TD 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)03-0595-14

Collaborative bearing mechanism of support body-accumulation body along gob for gob-side retention gateway

XIN Yajun^{1,2}, TIAN Menghan¹, JI Hongying³, ZHANG Dongying⁴,
GAO Zhongguo⁴, REN Jinwu⁵, ZHAO Kang⁶

- (1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization, Jiaozuo, Henan 454000, China; 3. School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 4. Qianxi County Jinpo Coal Industry Co., Ltd., Bijie, Guizhou 551700, China;

收稿日期: 2024-10-30 **修回日期:** 2025-03-01 **DOI:** 10.13247/j.cnki.jcmt.20240493

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374091, 51174078); 贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2021]一般350)

通信作者: 姬红英(1977—), 女, 河南省焦作市人, 副教授, 硕士生导师, 工学博士, 从事地质工程方面的研究。

E-mail: jihy@hpu.edu.cn **Tel:** 15838951103

引用格式: 辛亚军, 田孟含, 姬红英, 等. 沿空留巷采空侧支护体-堆积体协同承载机理[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(3): 595-608.

XIN Yajun, TIAN Menghan, JI Hongying, et al. Collaborative bearing mechanism of support body-accumulation body along gob for gob-side retention gateway[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(3): 595-608.

5. Yonghua Energy Co., Ltd., Henan Energy and Chemical Industry Group, Luoyang, Henan 471000, China; 6. Xintian Coal Mine, Yonggui Energy Development Co., Ltd., Bijie, Guizhou 551500, China)

Abstract: Gob-side retention gateway is widely used to improve coal mining rate and to achieve Y ventilation in working face and mining-driving balance, and the support body inside gateway fails easily in lateral pushing action of the falling gangue in the gob. Based on the instability analysis of support body subjected to the lateral force in gob-side retention gateway, the concept of gob-side filling accumulation body along the gob in gateway was proposed, the stability model of the gob-side support body-accumulation body in retention gateway was established, the influencing factors of support body - accumulation body stability were analyzed, the characteristics of accumulation body strength under different parameters were discussed, the mechanical tests of the accumulation body were carried out, and the industrial test of support body - accumulation body collaborative bearing was carried out along gob in gob-side retention gateway. The results show that the lateral instability of the support body is the inducing point of the surrounding rock instability in gob-side retention gateway, and the instability of the support body inside gob-side retention gateway mainly manifests as the whole movement instability and the bending deformation instability. The instability of the support body along the gob inside retention gateway are closely related to the magnitude, direction and position of the lateral force generated by the gob caving gangue. The accumulation body with certain strength along the gob in the retention gateway is conducive to the stability of the support body. The width and the height of the accumulation body inside gob-side retention gateway are 1 433.3 and 1 708.1 mm respectively (1.5 and 1.7 m for safety consideration) by theoretical model calculation, and the actual tensile strength of the accumulation body is 0.121 3 MPa (no less than 0.15 MPa on site). In the same gangue particle-size grading, the relationship between cement content and the strength of accumulation body is nearly linear, and the strength increases slowly as the cement content more than 10%, and the overall peak strain increases firstly and then decreases. In the same cement content, the strength of the accumulation body increases firstly and then decreases with the increase of the gangue particle-size grading, and the strength is achieved the largest in the gangue particle-size grading less than 8 mm, and the overall peak strain shows the trend of increase-decrease-increase. The accumulation body P8C10 with particle-size grading less than 8 mm and cement content 10% is the optimal one. After adopting the surrounding rock control scheme of support body-accumulation body, the roof sink is not obvious, the average lateral deformation of the support body is controlled within 25 mm, and the surrounding rock of the retention gateway is stable.

Key words: gob-side retention gateway; lateral instability; support body-accumulation body; collaborative mechanics model; parameter determination; stability

沿空留巷作为我国煤炭行业发展的重要技术,以少掘巷道、提高煤炭采出率而得到广泛应用。随着我国煤炭资源开采向深部转移的常态化,深部地层以应力水平高、围岩软弱等复杂条件导致顶板大面积破碎塌落,使得沿空留巷支护体在大面积采空区顶板塌落矸石下产生侧向受力弯曲(或移动)失稳,严重影响矿山安全开采与沿空留巷效果。将井下掘进矸石破碎后加入胶结材料形成低强度堆积体,在沿空留巷采空侧支护体旁进

行堆积承载,以控制采空区塌落矸石对巷旁支护体的侧向挤压,将利于支护体侧向稳定,进而促进沿空留巷围岩稳定。

近年来,我国学者对沿空留巷围岩稳定性控制做了大量工作^[1-3],在沿空留巷顶板结构稳定性方面,文献[4]认为切顶能有效消除基本顶采空侧悬臂梁对留巷结构的挤压破坏;文献[5]明确了切顶留巷顶板破断特征,揭示了顶板“短砌体-铰接”结构形成机理;文献[6]通过建立综放沿空留巷支

护结构分析模型,得到了支护结构可靠度计算公式;文献[7]研究认为切顶可转移沿空留巷顶板压力和减弱采空侧支护体承载力.考虑到沿空留巷围岩应力环境和结构特点,文献[8]阐述了沿空留巷不均承载特征;文献[9]认为回采空间顶板回转和向外侧移动对沿空留巷整体结构变形起控制作用.显然,采空侧支护体稳定性是沿空留巷顶板稳定的基础,对采空侧支护体的研究早期集中在采用高水型材料充填控制^[10-11],主要考虑充填支护体对顶板的承载能力,文献[12-14]先后揭示了沿空留巷顶板下沉规律,建立了沿空留巷支护体力学模型,提出了采空区矸石与支护体协同让压支护机制;文献[15-16]相继建立了巷旁充填体加固力学模型,这一时期通过支护体承载控制顶板思想得到重视.但随着围岩应力环境升高与岩性塑性特征呈现,采空区内塌落矸石体向巷内挤压严重,造成采空侧支护体出现侧向受压弯曲(或整体移动)失稳,文献[17]得出夯实机构夯实充填体传递侧压是导致沿空留巷支护体失稳和变形的主要因素;文献[18]得到了薄分层软顶沿空留巷采空侧支护体受力不均围岩失稳主要原因.显然,沿空留巷支护体侧向失稳已成为深部沿空留巷顶板失稳的灾变因子,文献[19]在沿空留巷采空侧钢管混凝土支柱基础上提出支柱采空侧矸石袋墙思想,但这需要矸石装袋成墙抵抗钢管混凝土支柱侧向受力.应当看到,确定沿空留巷支护体侧向受力机理与开发支护体侧向受力堆积材料至关重要,采用矸石堆积方式附带浇筑水泥浆液形成低强度堆积体是一种全新控制侧方式,开发煤矸石基低强度堆积体不但成本低,而且能高效处置矿山固废,响应煤炭绿色开采需要^[20-21],这也促进了沿空留巷支护体稳定性由单一承载向多维承载研究的转变.

本文突破沿空留巷支护体单一垂向控顶思路,瞄准支护体侧向受力稳控焦点,尝试性提出沿空留巷充填堆积体概念,建立支护体-堆积体协同承载力学模型,研制低强度、低成本矸石基堆积体充填材料,确定沿空留巷采空侧支护体-堆积体围岩控制方案.研究结果可为沿空留巷支护体稳定性控制提供参考.

1 支护体侧向失稳分析

1.1 沿空留巷支护体基本形式

沿空留巷在矿山以提高煤炭采出率与少掘一条巷道等显著优点得到广泛应用,但巷道采空侧

支护体形式随围岩控制难度增加而趋于复杂,呈U型钢腿→料石体→柔模体等方式转变,虽然一定程度上控制了顶板压力,但这些支护体(U型钢腿→料石体→柔模体,下同)侧向失稳越发突出,进而导致围岩体稳定性下降,而支护体侧向失稳与支护体强度、受力条件等密切相关.

1.2 支护体侧向失稳模式

沿空留巷切顶卸压一方面使得基本顶在采空侧形成悬臂梁结构,缓解采空区顶板压力;另一方面切落矸石将向无约束留巷内挤压支护体.显然,如果塌落矸石向巷内挤压严重,支护体侧向弯曲(或整体移动)极易发生,沿空留巷支护体受侧向力失稳主要表现为2种方式(图1).

1) 支护体整体移动失稳

沿空留巷采空侧支护体强度较高,垂直载荷相对较小,在较大侧向推力作用下,侧向摩擦力(支护体与顶底板间侧向移动摩擦力)小于侧向推力,使得支护体整体向巷道内移动而产生失稳,称为整体移动失稳,也称摩擦失稳.

2) 支护体弯曲变形失稳

沿空留巷采空侧支护体具有较大侧向摩擦力,阻止支护体整体水平移动,侧向推力产生力矩大于支护体摩擦力矩与内力矩之和,造成支护体弯曲失稳,称为弯曲变形失稳,也称力矩失稳.



(a) 支护体移动失稳

(b) 支护体变形失稳

图1 沿空留巷采空侧支护体失稳

Fig. 1 Support body instability along gob in gob-side retention gateway

2 支护体-堆积体承载模型构建

2.1 侧向堆积体稳定机理

沿空留巷采空侧支护体垂向支护强度一般能满足支撑要求,但由于煤层开采厚度提高与基岩垮落后采空侧近三角形空区形成,在采空侧关键块回转下沉稳定过程中,支护体受到上方塌落矸石传递侧向挤压力造成支护体移动失稳,或由于支护体上方塌落矸石推力产生较大力矩引起支护体变形失稳(图2a,图中 F 为塌落矸石挤压力).

沿空留巷采空侧顶板塌落后呈斜体分布,受力点多数集中在支护体上段附近,在支护体下侧

形成三角形空区,在三角形空区采用低强度胶结矸石体充填,顶板压力通过低强度充填体向下传递,支护体侧向受力区下移,力矩减小,堆积矸石体承载,此充填体称为采空侧堆积体.采空侧堆积体主要采用掘进矸石-胶结料混合堆积于(或高于)支护体采空侧三角形空区,将支护体上部侧向推力向下部转移,同时,堆积体具有一定强度承载,且与底板产生摩擦力,2种作用共同促进支护体侧

向稳定.合理堆积体参数(强度、高度、宽度等)将削弱支护体侧向推力,降低支护体成本,利于巷道围岩稳定(图 2b).

显然,支护体稳定性与堆积体参数密切相关,在确定堆积体几何尺寸时,应考虑堆积体是否完全占满原始三角形空区,充分使支护体上部侧向推力转移到下部区域.

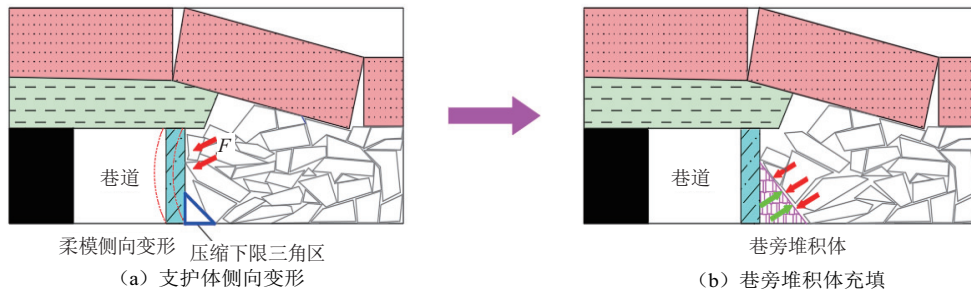


图 2 沿空留巷支护体侧向失稳与堆积体充填稳定

Fig. 2 Lateral instability of support body and stability of accumulation filling body along gob-side gateway

2.2 支护体-堆积体力学模型构建

沿空留巷采空侧布设支护体后基本顶为悬臂梁结构,采空区内悬臂梁在高应力作用下塌落失稳,向巷道侧支护体方向移动,形成支护体侧向力源,此力源通过塌落矸石以挤压形式传递,基于顶板破断形态与直接顶厚度、强度等参数差异,力源方向以侧向不同角度作用于支护体.

考虑到堆积体几何尺寸下限,即能够满足充填原始三角形空区,使支护体上部侧向受力转移到下部堆积体,支护体-堆积体在受到基本顶垂直方向与塌落矸石侧向应力作用,在垂直方向压力不使支护体压缩失稳条件下,考虑支护体-堆积体侧向稳定性,依据沿空巷道大小结构原理^[22-23],以采空侧支护体受力为中心向周边结构延伸,巷旁堆积体、基本顶(关键块)、采空侧塌落矸石(切落矸石)为受力对象,建立沿空留巷支护体-堆积体稳定性力学模型如图 3 所示(图中, P_0 为顶板上覆岩层载荷集度, P_v 为堆积体侧斜面法向总应力, h_1 为支护体宽度, h_2 为堆积体下部宽度, f_1 为支护体与顶板间水平摩擦力, f_2 为支护体与底板间水平摩擦力, f_3 为堆积体与底板间水平摩擦力, H_a 为巷道高度, H_1 为堆积体高度, b 为支护体-堆积体宽度, R_{T1} 为支护体抗拉强度, R_{T2} 为堆积体抗拉强度).

考虑到采空区上方关键块载荷传递到采空区下矸石内部能量积聚与耗散,堆积体靠近支护体布设,为便于求解分析^[24],支护体-堆积体巷道轴

向长度设为 $b=1$ m.

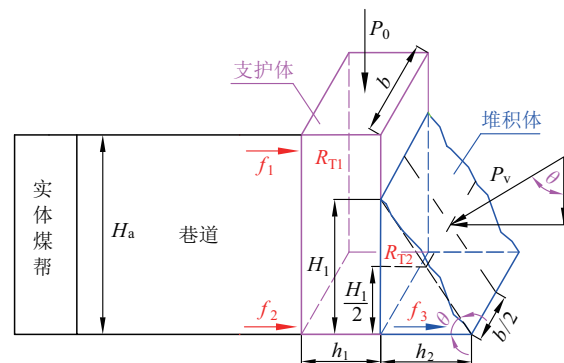


图 3 采空侧支护体-堆积体稳定性模型

Fig. 3 Stability model of support body-accumulation body along gob-side

作用在堆积体侧斜面法向总应力 P_v 为

$$P_v = P_{v1} + P_{v2}, \quad (1)$$

$$P_{v1} = \delta_1 P_0, \quad (2)$$

$$P_0 = \gamma(H-h), \quad (3)$$

$$P_{v2} = \delta_2 \gamma h, \quad (4)$$

式中: P_{v1} 为基本顶上覆岩层传递载荷集度,MPa; P_{v2} 为直接顶塌落岩层传递载荷集度,MPa; δ_1 为关键块所受压力传递到矸石在堆积体侧斜面的法向强度衰减系数,0~1; γ 为堆积体的斜侧面塌落碎块矸石体积力,一般取 0.025 MN/m^3 ; H 为巷道埋深,m; h 为直接顶(或切落顶板)高度,m; δ_2 为塌落矸石自重压力在堆积体侧斜面的法向强度衰减系数,0~1.

巷道高度 H_a 以考虑安全高度计,采空侧塌落矸石挤压堆积体等效受力面积 S 为

$$S = \frac{H_a}{\sin \theta}, \quad (5)$$

式中 θ 为堆积体受力方向与垂直方向夹角, ($^\circ$).

堆积体高度 H_1 为

$$H_1 = h_2 \tan \theta. \quad (6)$$

巷旁堆积体采空侧塌落矸石产生的水平推力 F_x 为

$$F_x = P_v S \sin \theta. \quad (7)$$

将式(1)~(5)代入式(7),可以得到塌落矸石水平推力:

$$F_x = \gamma [\delta_1 (H - h) + \delta_2 h] H_a. \quad (8)$$

堆积体采空侧塌落矸石产生垂直载荷 F_y 为

$$F_y = P_v S \cos \theta. \quad (9)$$

将式(1)~(5)代入式(9),可以得到塌落矸石产生的垂直载荷:

$$F_y = \gamma [\delta_1 (H - h) + \delta_2 h] H_a \cot \theta. \quad (10)$$

考虑前述分析中支护体-堆积体 2 种失稳模式,这里简化支护体-堆积体承载力学模型如图 4 所示(图中 M_{e1} 为支护体力矩, M_{e2} 为堆积体力矩).

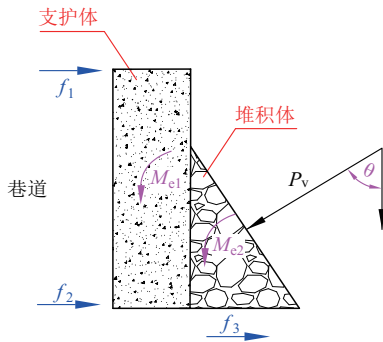


图 4 采空侧支护体-堆积体受力分析
Fig. 4 Force analysis of the support body-accumulation body along gob-side

1) 摩擦平衡条件

采空侧支护体与顶、底板受到的摩擦力 (f_1 , f_2), 堆积体与底板受到的摩擦力 (f_3) 分别为

$$f_1 = \mu_1 \gamma H h_1, \quad (11)$$

$$f_2 = \mu_1 \gamma (H + H_a) h_1, \quad (12)$$

$$f_3 = \mu_2 \cdot \gamma \left\{ \frac{h_2^2 \tan \theta}{2} + [\delta_1 (H - h) + \delta_2 h] H_a \cot \theta \right\}, \quad (13)$$

式中: μ_1 为支护体与巷道顶底板间的摩擦系数; μ_2 为堆积体与巷道底板间的摩擦系数.

要保证沿空留巷采空侧支护体-堆积体不发生水平摩擦滑动失稳, 则有:

$$f_1 + f_2 + f_3 \geq F_x. \quad (14)$$

联立式(8)、式(11)~(14), 则可得:

$$\begin{aligned} & \mu_1 (2H + H_a) h_1 + \\ & \mu_2 \left\{ \frac{h_2^2 \tan \theta}{2} + [\delta_1 (H - h) + \delta_2 h] H_a \cot \theta \right\} \\ & \geq [\delta_1 (H - h) + \delta_2 h] H_a. \end{aligned} \quad (15)$$

为求解堆积体几何尺寸, 将式(15)简化为以堆积体宽度 (h_2) 表示的方程式, 即:

$$A + D h_2^2 + B \geq C, \quad (16)$$

式中:

$$A = 2\mu_1 (2H + H_a) h_1,$$

$$B = 2\mu_2 [\delta_1 (H - h) + \delta_2 h] H_a \cot \theta,$$

$$C = 2H_a [\delta_1 (H - h) + \delta_2 h],$$

$$D = \mu_2 \tan \theta.$$

对式(16)进行求解, 将求解结果代入式(6), 则可得堆积体宽度 (h_2) 与高度 (H_1) 的表达式:

$$h_2 \geq \sqrt{\frac{C - A - B}{D}}, \quad (17)$$

$$H_1 \geq \sqrt{\frac{C - A - B}{D}} \tan \theta. \quad (18)$$

当式(15)与式(16)成立时, 支护体-堆积体不发生滑动摩擦失稳. 否则, 发生滑动摩擦失稳.

在现场应用中应考虑到堆积体宽度增加时可以增大摩擦力, 能够更进一步有效控制支护体的稳定. 当然, 堆积体高度会受到堆积角度影响, 实际中为保证采空区移动岩层侧向推力受力点对支护体-堆积体下移效果, 在塌落矸石传递载荷于堆积体条件下, 以不增加堆积体高度为宜(图 5, 图中 a 为底板堆积体与塌落矸石体间距).

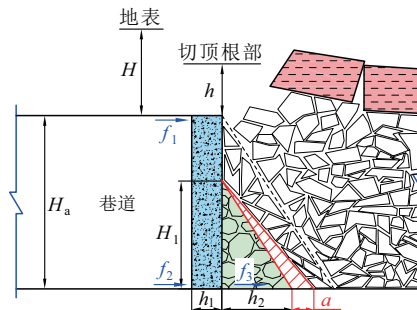


图 5 采空侧堆积体宽度扩展
Fig. 5 Width expand of accumulation along gob-side

2) 力矩平衡条件

在满足支护体-堆积体不发生滑动摩擦失稳条件下, 如果支护体-堆积体强度 (以极限抗拉强度计) 不满足要求, 就会发生折弯变形破坏失稳. 因此, 在支护体-堆积体不发生滑动摩擦失稳条件下, 以支护体-堆积体与底板接触处为固定点, 支护体与顶板摩擦力产生力矩 M_1 为

$$M_1 = \mu_1 k \gamma H h_1 H_a, \quad (19)$$

式中 k 为岩层压力传递到支护体衰减系数, 取 $0 \sim 1$ 。

采空侧塌落矸石与上覆岩层产生的水平力矩 M_2 为

$$M_2 = \gamma [\delta_1(H-h) + \delta_2 h] H_a \frac{H_1}{2}. \quad (20)$$

支护体产生内力矩 M_{e1} [25] 为

$$M_{e1} = \frac{R_{T1} h_1^2}{6}. \quad (21)$$

按照现场实际情况, 堆积体充填后成三角形分布, 以堆积体受力水平推力最小截面 ($h_2/2$) 计, 则堆积体产生内力矩 M_{e2} 为

$$M_{e2} = \frac{R_{T2} h_2^2}{24}. \quad (22)$$

支护体-堆积体不发生滑动摩擦失稳条件下, 则有支护体-堆积体力矩平衡方程为

$$M_1 + M_{e1} + M_{e2} \geq M_2. \quad (23)$$

在支护体强度即定条件下, 将式(19)~(22)代入式(23), 则可得巷旁支护体-堆积体力矩平衡基本条件:

$$\mu_1 k \gamma H h_1 H_a + \frac{R_{T1} h_1^2}{6} + \frac{R_{T2} h_2^2}{24} \geq \gamma [\delta_1(H-h) + \delta_2 h] H_a \frac{H_1}{2}. \quad (24)$$

将式(6)代入式(24), 同时进行简化, 则可得支护体-堆积体力矩平衡方程:

$$M + \frac{R_{T1} h_1^2}{6} + \frac{R_{T2} h_2^2}{24} \geq N, \quad (25)$$

式中: $M = \mu_1 k \gamma H h_1 H_a$,

$$N = \gamma [\delta_1(H-h) + \delta_2 h] H_a \frac{h_2 \tan \theta}{2}.$$

对式(25)进行求解, 则可得堆积体强度取值:

$$R_{T2} \geq \frac{24 \left(N - M - \frac{R_{T1} h_1^2}{6} \right)}{h_2^2}. \quad (26)$$

显然, 在即定堆积体几何尺寸与支护体强度、尺寸条件下, 堆积体的抗拉强度决定了支护体-堆积体的稳定性。

2.3 参数确定及影响因素分析

1) 堆积体参数选取

新田煤矿 1904 工作面运输巷在 1904 工作面回采后作为沿空留巷使用, 1904 工作面顶板软弱破碎、随采随落, 沿空留巷支护体受采空区塌落矸石挤压作用侧向变形严重。考虑采用(柔性模具)支护体-堆积体方案, 煤层顶板埋深 $H = 390$ m, 巷

道高度 $H_a = 3.34$ m, 支护体宽度 $h_1 = 1.0$ m (原宽度 1.2 m, 考虑降低成本与堆积体砌筑要求取值 1.0 m), 切顶高度 $h = 10.8$ m, 岩层体积力 γ 取 0.025 MN/m³, 摩擦系数 $\mu_1 = 0.28, \mu_2 = 0.35$, 下部堆积体坡度 $\theta = 50^\circ$, 原支护体极限抗弯强度 $R_{T1} = 2.4$ MPa, 将采空侧堆积体侧斜面法应力传递系数分别取 $\delta_1 = 0.23, \delta_2 = 0.55$, 上部岩层压力传递到支护体衰减系数 $k = 0.68$ 。将上述选取参数数据代入式(15)~式(18)得: 堆积体宽度 $h_2 = 1433.3$ mm, 堆积体高度 $H_1 = 1708.1$ mm。现场考虑到富余系数与围岩稳定, 选取参数堆积体宽度 $h_2 = 1.5$ m、高度 $H_1 = 1.7$ m。

将选取堆积体参数 h_2, H_1 及相关参数代入式(24)~式(26)得堆积体极限抗拉强度 $R_{T2} = 0.1213$ MPa, 考虑工程安全, 取富余系数 1.2 计, 实际沿空留巷采空侧堆积体强度取值以 0.15 MPa 下限为宜。

2) 堆积体影响因素

为进一步分析切顶高度与支护体强度对沿空留巷堆积体强度的影响, 这里以 1904 工作面沿空留巷支护体-堆积体力学模型基本参数及堆积体参数 $h_2 = 1.5$ m, $H_1 = 1.7$ m 分析切顶高度与支护体强度对堆积体强度的影响, 如图 6 所示。

由图 6a 可以看出, 沿空留巷切顶高度与堆积体强度呈正相关性, 线性关系式为

$$R_{T2} = -2.4951 + 0.2423h. \quad (27)$$

显然, 切顶高度越大, 需要堆积体的强度越大, 考虑到不同切顶高度及采空区充填的影响, 以 1904 工作面运输巷沿空留巷超前切顶为例, 岩石碎胀系数为 1.25~1.30, 取 1.27 计, 则切顶高度 $h = 12.8$ m 即可充填满采空区, 将 $h = 12.8$ m 代入式(27)可得最大堆积体抗拉强度为 0.61 MPa, 进而得到最佳采空侧堆积体抗拉强度范围参数为 0.15~0.61 MPa。

由图 6b 可以看出, 沿空留巷支护体抗拉强度与堆积体抗拉强度呈负相关性, 其线性关系表达式为

$$R_{T2} = 4.3881 - 1.7778R_{T1}. \quad (28)$$

可以看出, 支护体强度越大, 需要的堆积体强度越小, 由于堆积体强度受到切顶高度的影响, 这里以式(27)得到的合理最大堆积体抗拉强度 $R_{T2} = 0.61$ MPa 为例, 代入式(28)可得最小合理支护抗拉体强度为 $R_{T1} = 2.13$ MPa, 进而得到最佳支护体抗拉强度范围为 2.13~2.40 MPa。

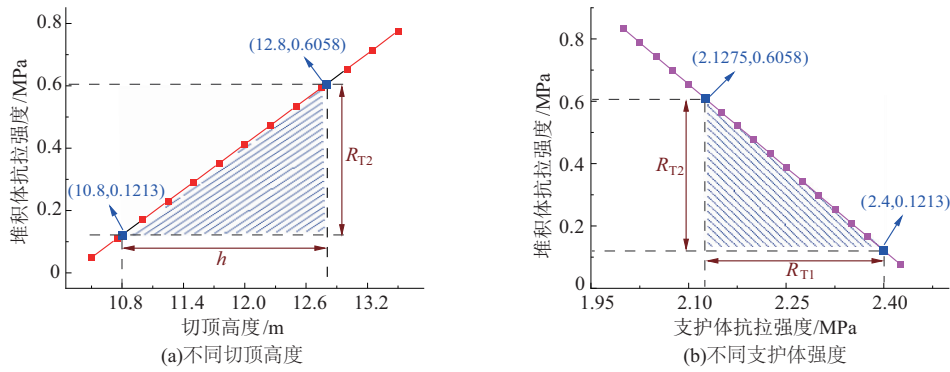


图 6 各参数对堆积体强度影响

Fig. 6 Effect of the parameters on the strength of accumulation body

3 堆积体力学特性分析

3.1 试件制备

1) 试验材料

试验材料为 P. O 42.5 水泥、矿山井下矸石 (经研磨鉴定其主要成分为 SiO_2)、河沙, 拌合水为自来水。

2) 试件制作

由于堆积体强度相对较低, 主要依靠堆积抵挡侧向推力, 在理论模型构建中堆积体强度是重要参数, 这里分析不同矸石基堆积体力学特性. 将煤矿井下矸石按粒径 (d) 筛分为 ≤ 4 mm, ≤ 6 mm, ≤ 8 mm, ≤ 10 mm 骨料, 矸石级配粒径质量分布如图 7 所示。

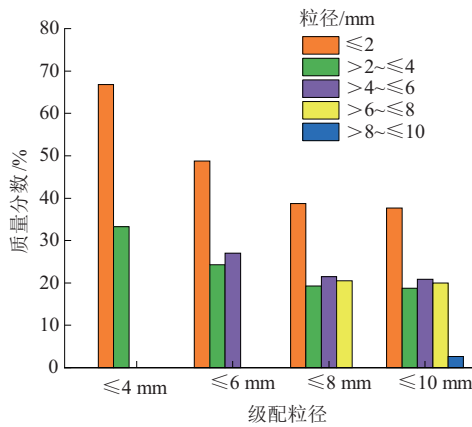


图 7 不同矸石级配粒径质量分布

Fig. 7 Mass distribution of gangue with various particle size

矸石级配粒径 ≤ 4 mm, ≤ 6 mm, ≤ 8 mm, ≤ 10 mm 下矸石细料 (≤ 2 mm) 质量分数为 66.76%, 48.75%, 38.73% 和 37.7%, 将筛选后 4 种矸石级配粒径骨料分别与质量分数为 10% 河沙、不同质量分数 (6%, 8%, 10%, 12%) 的 P. O 42.5 水泥进行配比混合, 采用正交试验设计法, 共设计 16 组规格为 100 mm \times 100 mm \times 100 mm 的正方体试件, 堆积体试

件在室温、湿度适宜的条件下养护 24 h 脱模, 试件每组 3 个, 合计共 48 个堆积体试件, 试件分组编号及预制堆积体试件基本参数如表 1 所示。

表 1 堆积体试件基本参数

Table 1 Basic parameters of specimens for accumulation body

| 试件编号 | 最大粒径/ mm | 水泥质量 分数/% | 河砂质量 分数/% |
|--------|-------------|--------------|--------------|
| P4C6 | 4 | 6 | 10 |
| P4C8 | 4 | 8 | 10 |
| P4C10 | 4 | 10 | 10 |
| P4C12 | 4 | 12 | 10 |
| P6C6 | 6 | 6 | 10 |
| P6C8 | 6 | 8 | 10 |
| P6C10 | 6 | 10 | 10 |
| P6C12 | 6 | 12 | 10 |
| P8C6 | 8 | 6 | 10 |
| P8C8 | 8 | 8 | 10 |
| P8C10 | 8 | 10 | 10 |
| P8C12 | 8 | 12 | 10 |
| P10C6 | 10 | 6 | 10 |
| P10C8 | 10 | 8 | 10 |
| P10C10 | 10 | 10 | 10 |
| P10C12 | 10 | 12 | 10 |

注: P 表示粒径, C 表示水泥质量分数. 例如 P6C10 代表粒径 ≤ 6 mm, 水泥质量分数 10% 的试件。

3.2 试验方法

本次试验制作 16 组共 48 块堆积体试件, 在刚性试验机上进行单轴压缩试验, 采用位移加载方式, 加载速率设定为 0.33 mm/s, 测试堆积体试件 10 d 抗压强度 (实际 28 d 抗压强度的 80% 计算), 考虑堆积体抗拉强度较低, 试验中抗拉强度按 1/10 折合取值^[26]. 试验过程中试件应力变化与轴向位移由 test 软件自动采集, 试验结束后 test 软件自动处理数据生成曲线图. 正方形堆积体试件强度根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能

试验方法标准》换算成标准试件强度进行取值获取^[27].

3.3 试验结果分析

1) 水泥质量分数与强度、峰值应变关系

对于水泥质量分数与峰值强度、峰值应变关系如图 8 与图 9 所示.

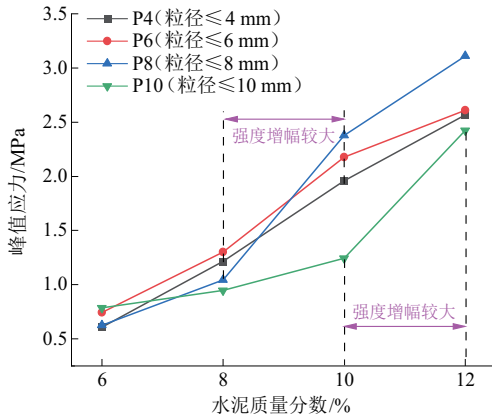


图 8 水泥质量分数与峰值强度关系

Fig. 8 Relationship between cement content and peak strength

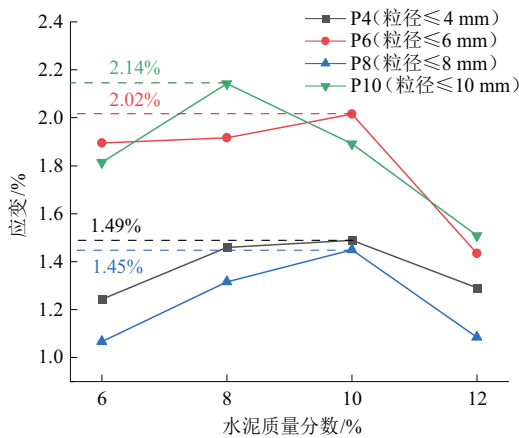


图 9 水泥质量分数与峰值应变关系

Fig. 9 Relationship between cement content and peak strain

在相同水泥质量分数梯度下, P4, P6, P8 组试件在水泥质量分数从 8% 增加到 10% 时, 均值强度增长最大, 分别达到 1.96, 2.18 与 2.38 MPa, 对应增幅分别为 61.36%, 67.18%, 127.53%; 水泥质量分数由 10% 增加到 12% 时, 3 组试件均值强度分别达到 2.57, 2.61 与 3.11 MPa, 增幅分别为 31.08%, 19.85%, 30.73%, 增幅略有下降. 对于 P10 组, 堆积体试件水泥质量分数由 10% 增加到 12% 时强度达到最大, 达到 2.42 MPa, 增幅为 94.45%. 考虑到经济成本与沿空留巷堆积体特性要求, 堆积体适宜水泥质量分数为 10%.

对于水泥质量分数与峰值应变, 同级配粒径

试件均值应变随水泥质量分数增加均表现出先增大后降低趋势, P4, P6, P8 组试件下降转折点在在水泥质量分数 10% 处, 峰值应变分别为 1.49%, 2.02% 与 1.45%, 而 P10 组转折点出现在在水泥质量分数 8% 处, 峰值应变为 2.14%. 水泥质量分数 10%、级配粒径 ≤ 8mm 时, 堆积体峰值应变最小, 这也验证了实际工程选择水泥质量分数 10% 堆积体的合理性.

2) 级配粒径与强度、峰值应变关系

级配粒径与堆积体均值强度、峰值应变关系如图 10 与图 11 所示.

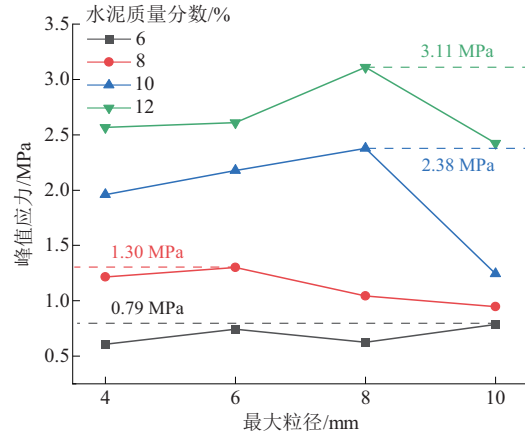


图 10 级配粒径与峰值强度关系

Fig. 10 Relationship between particle-size grading and peak strength

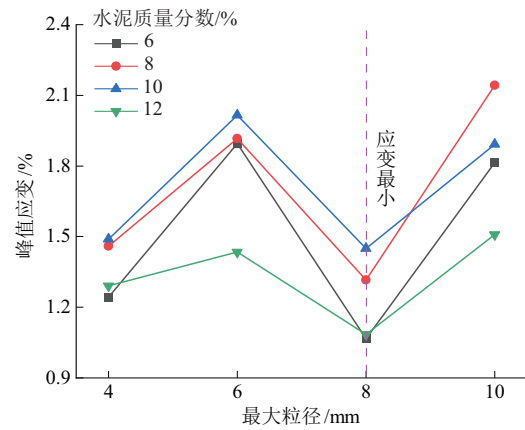


图 11 级配粒径与峰值应变关系

Fig. 11 Relationship between particle-size grading and peak strain

随着级配粒径增大, 堆积体强度总体呈先升高后降低趋势. 对于水泥质量分数 6%, 8% 条件下, 级配粒径在 6 mm 后强度开始衰减, 而水泥质量分数在 10%, 12% 条件下, 级配粒径在 8 mm 后开始衰减. 同一水泥质量分数, 最大级配粒径从 4 mm 增加到 6 mm 时, 堆积体强度变化不大, 而增加到 8 mm 时, 强度变化增大, 水泥质量分数为

10%与12%时强度达到最大值(分别为2.38,3.11 MPa). 显然, 适宜级配粒径为 ≤ 8 mm.

对于级配粒径与堆积体峰值应变, 水泥质量分数12%时, 随着级配粒径增大, 堆积体峰值应变变化最小; 水泥质量分数6%时, 随着级配粒径增大, 堆积体峰值应变变化最大, 对于不同水泥质量分数堆积体来说, 随着级配粒径增大, 峰值应变呈增加—减小—增加趋势. 而同一水泥质量分数下各组试件在级配粒径 ≤ 8 mm时峰值应变最小, 这也印证了实际工程中选择级配粒径 ≤ 8 mm的正确性.

4 工程应用分析

4.1 工程概况

1904 综采工作面位于一采区中部, 是新田煤矿一采区 9[#] 煤层第三个工作面, 按照倾向长壁式布置, 可采倾向推进长度 725 m, 走向工作面长 141 m. 9[#] 煤层厚度为 3.0~3.8 m, 平均厚度为 3.45 m, 地面标高 +1 349~+1 419 m, 巷道标高 +914~+920 m(顶板). 直接顶为 5.17~9.19 m(平均 6.51 m) 粉砂质泥岩, 基本顶为 4.21 m 细砂岩, 直接底为 2.56~3.54 m(平均 3.08 m) 粉砂质

泥岩, 基本底为 9.76 m 泥灰岩、粉砂岩. 1904 工作面采用“Y”型通风方式, 1904 工作面运输巷(沿空留巷后)、1904 工作面轨道巷进风, 1404 工作面底抽巷回风. 1904 工作面运输巷掘进断面为矩形, 考虑沿空留巷需要设计净宽 5 500 mm、净高 3 340 mm, 采用“锚网索+W 钢带”联合支护, 特殊地段采用单体支柱加强支护.

1904 工作面运输巷掘进支护基本措施: 顶板锚索采用 $\varnothing 21.6$ mm \times 8200 mm 钢绞线支护, 间排距为 1200 mm \times 1600 mm, 顶板锚杆采用 $\varnothing 20$ mm \times 2500 mm 高强锚杆(屈服强度 700 MPa 以上), 间排距为 800 mm \times 800 mm. 回采帮用 $\varnothing 20$ mm \times 2500 mm 玻璃钢锚杆支护, 非回采帮用 $\varnothing 20$ mm \times 2500 mm 高强锚杆支护, 间排距为 850 mm \times 800 mm. 锚索托盘规格为 250 mm \times 250 mm \times 20 mm 钢板或长度 500 mm 的 11[#] 矿用工字钢, 锚杆托盘规格为 150 mm \times 150 mm \times 8 mm. 钢筋网(1000 mm \times 2000 mm)使用 $\varnothing 6.5$ mm 钢筋焊接制成, 网片规格为 100 mm \times 100 mm, W 钢带规格为 4600 mm \times 250 mm \times 5 mm.

1904 工作面运输巷道掘进基本支护方案如图 12 所示.

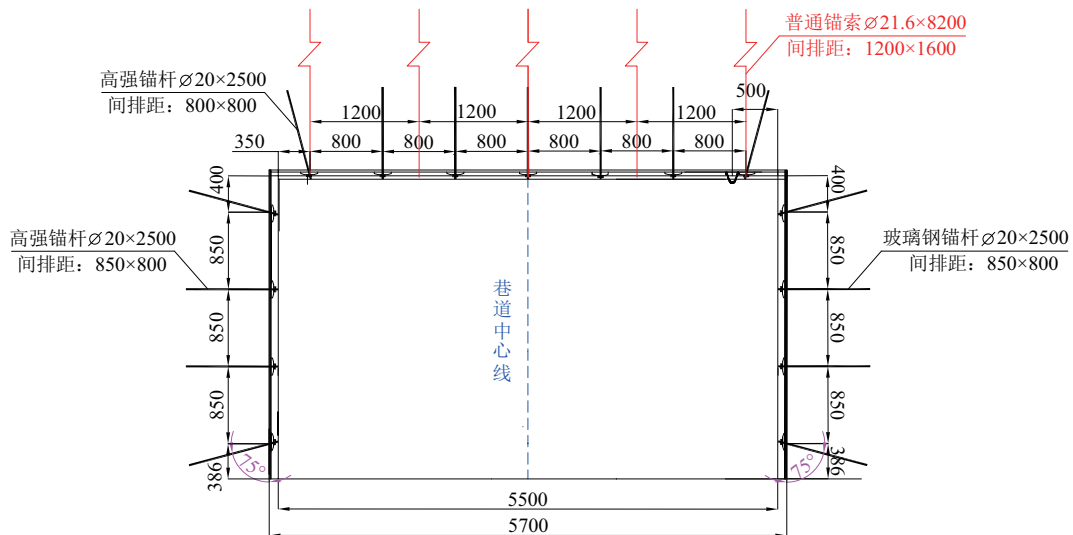


图 12 1904 运输巷掘进断面支护方案(单位:mm)

Fig. 12 Support scheme of the excavation section on gateway 1904

4.2 留巷方案设计

沿空留巷段方案设计主要依据切顶卸压→超前支护→支护体控顶-堆积体控侧的原则进行.

1) 超前段切顶与爆破

超前切顶孔径 48 mm, 孔深 11 m(依据模型计算与柱状图分析), 孔口位于回采帮 200 mm, 孔间距 600 mm, 钻孔垂直顶板偏向回采区 10°. 主要爆破基本顶, 减缓支护体承载压力与增加采空区充

填, 充填效果通过切顶与爆破参数改进, 爆破预裂切缝参数为聚能管 3 节, 每节 0.9 m, 钻孔内采用聚能管辅助装药, 装药量 2 700 g, 从上向下装药为: 0~<0.9 m(3 卷药), 0.9~<1.5 m(水炮泥), 1.5~<2.4 m(3 卷药), 2.4~<3.0 m(水泡泥), 3.0~<3.9 m(3 卷药), 3.9~<7.5 m(水炮泥), 7.5~11 m 用黏土炮泥封实.

2) 超前与留巷段支护

在工作面前方巷道超前段补打注浆锚索支护,注浆锚索规格为 $\varnothing 21.6 \text{ mm} \times 8300 \text{ mm}$,注浆锚索间排距 $1800 \text{ mm} \times 1600 \text{ mm}$,采空侧补打 $\varnothing 21.6 \text{ mm} \times 4200 \text{ mm}$ 锚索配 U29/U36 钢梁封口,锚索排距 1600 mm . 考虑留巷不同段顶板结构与受力分布不同,留巷段采用单体柱紧跟柔模支护体架设 4 排走向抬棚,过动压区拆除单体支柱.

3)采空侧柔模体浇筑

采用柔模混凝土袋进行充填,充填宽度由 1.2 m 减小到 1.0 m ,充填高度为 3.5 m ,长度为 2.4 m ,柔模混凝土采用原配比抗拉强度 2.4 MPa . 柔模混凝土袋子采用对拉锚杆+钢筋网进行加固,对拉锚杆规格为 $\varnothing 20 \text{ mm} \times 1300 \text{ mm}$,间排距为

$600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$,钢筋网规格为 $1000 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$,搭接宽度 100 mm ,绑扎间距 200 mm (对角绑扎).

4)堆积体充填控制

通过力学模型参数计算与试验堆积体强度试验分析,考虑到 1904 工作面顶板软弱破碎与支护体侧向受力较大情况,采用 P8C10 堆积体(抗拉强度 10 d 大于 0.15 MPa)对柔模支护体外侧堆积充填,以减少塌落矸石对柔模支护体的影响,考虑到理论计算参数(堆积体高度 1.708 m 、宽度 1.433 m 及强度要求)、富余系数与注浆要求,现场堆积体堆积参数选取为高度 1.7 m ,宽度 1.5 m .

具体沿空留巷围岩控制方案如图 13 所示.

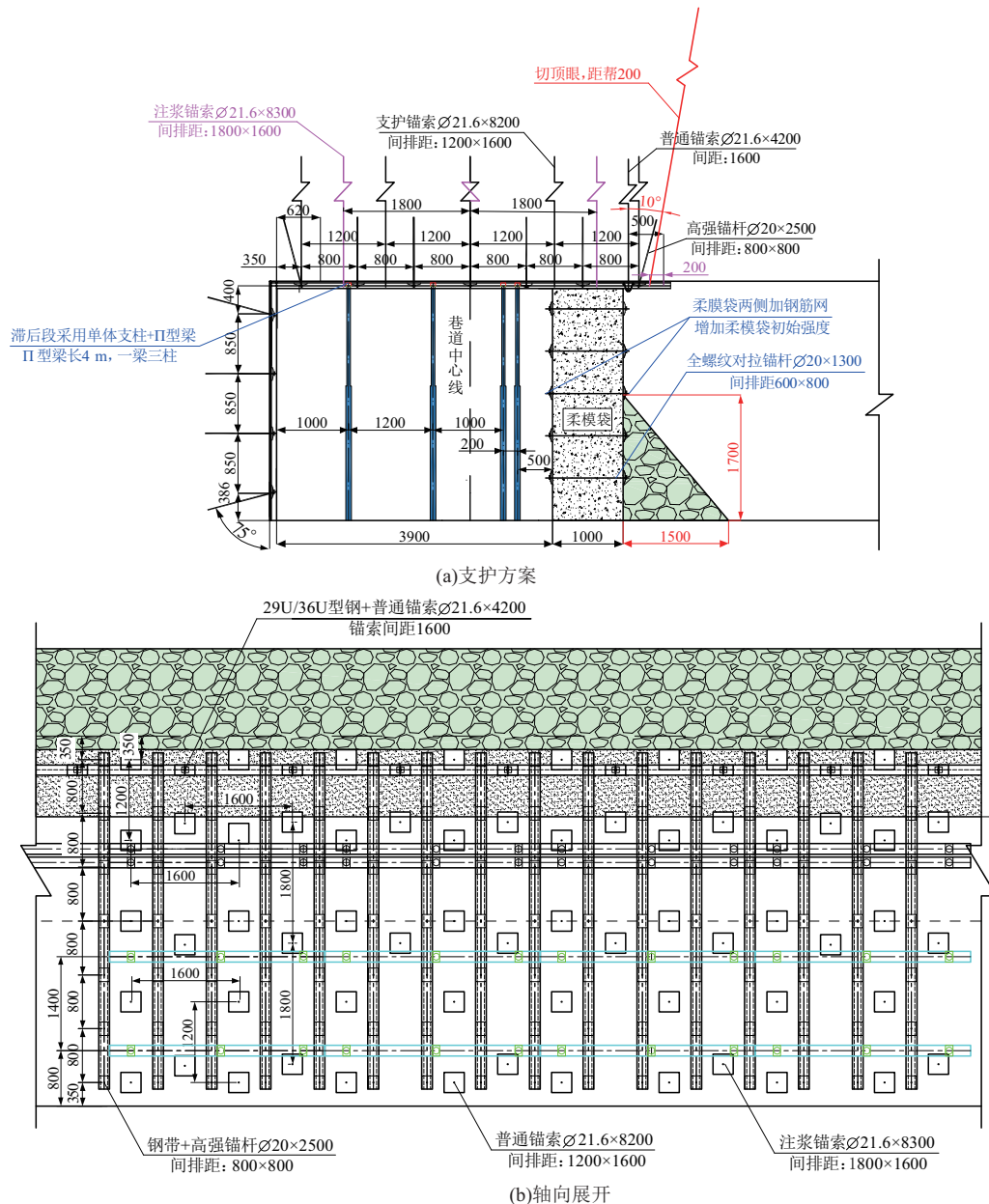


图 13 1904 工作面沿空留巷支护方案(单位:mm)

Fig. 13 Support scheme for gob-side retention gateway in working face 1904

4.3 支护体-堆积体施工工艺

1) 支护体施工工艺

巷旁支护体充填时,紧跟回采工作面进行,端头液压支架前移后,距离柔模支护体不足 2.4 m 时,及时在采空侧施工 2~3 根木点柱支撑顶板,木点柱间距 800 mm(视现场情况而定,当顶板压力大时可选用单体支柱)。端头液压支架距离柔模袋位置长度超过 2.4 m 时,必须及时施工柔模支护体。柔模袋及对拉锚杆安装完成后,启动远距离输送泵充填膏体混凝土,采用带压充填,充填压力不小于 2 MPa。前一个支护体充填完成,紧接着支设下一个柔模袋,循环形成连续柔模支护体,每 2 个柔模袋之间预留浆液管(充填管)空间。

2) 堆积体施工工艺

沿空留巷采空侧支护体-堆积体施工工艺如图 14 所示。

巷旁堆积体充填紧跟留巷支护体进行,在柔模支护体采空侧按设计参数挂设菱形金属网片,铺设风筒布,避免浆液流失到采空区深部,以便形成堆积体充填空间。柔模支护体充填后,在采空侧弧形三角板下,将巷道中破碎矸石堆积采空侧三角区,在其上方进行滞后支护体膏体(选用适宜 6~8 mm 堆积混合体)堆积充填,基础堆积体高度满足时,2 个柔模支护体间预留堆积体浇筑口,采用输送管注浆(可用输送支护体管内剩余浆液进行注浆)浇筑堆积体,反复循环形成巷旁连续堆

积体。

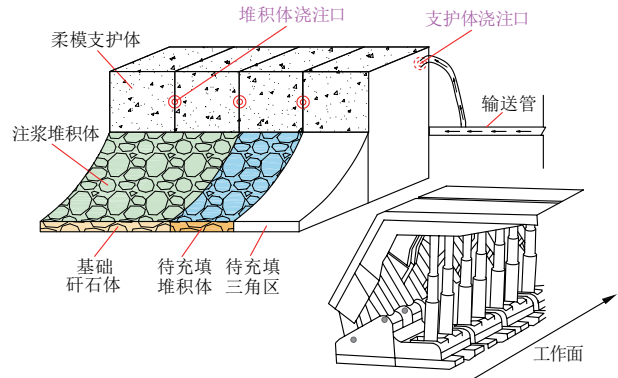


图 14 支护体-堆积体施工工艺

Fig. 14 Construction technology on support body-accumulation body

4.4 应用效果

1) 监测点布置

1904 工作面运输巷沿空留巷试验段共 120 m,起点距工作面开切眼 280 m,试验段内布置 2 个监测点,对沿空留巷采空侧柔模支护体侧向变形及围岩变形数据进行监测,测点 1 距工作面开切眼 330 m,测点 2 与测点 1 间隔 50 m 布置,试验段监测周期为 80 d。主要观测沿空留巷试验段支护体采空侧进行堆积体充填后支护体与巷道围岩变形情况。

沿空留巷试验段具体位置及监测点布置如图 15 所示。

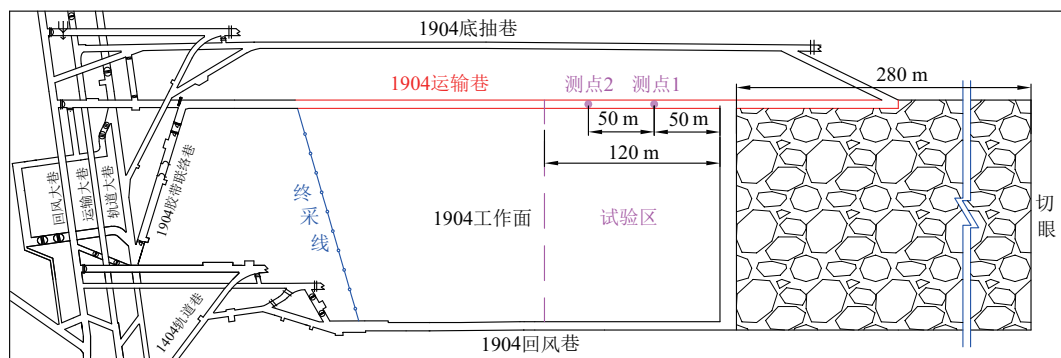


图 15 沿空留巷监测站点布置

Fig. 15 Monitoring point layout of gob-side retention gateway

2) 监测数据分析

沿空留巷试验段监测数据如图 16 所示。随着工作面不断推进,支护体变形呈现明显阶段性。两测点 80 d 支护体分别变形了 23.2、25.9 mm,平均变形 24.55 mm,1~18 d 支护体变形量相对较快,分别占总变形量的 82.76%、83.01%,18 d 之后支护体变形速度趋于稳定(图 16a)。测点 1 与测点 2 巷道顶板距工作面 160 m 的最终下沉量分别为

328 与 311 mm,平均移近 319.5 mm(图 16b);测点 1 与测点 2 顶板最终离层值分别为 61 和 68 mm,平均离层 64.5 mm(图 16c)。

可以看出,采用低强度矸石对支护体外侧充填形成堆积体后,围岩变形受控,有效改善了巷旁支护体受力状态,提高了沿空留巷围岩稳定性。

3) 宏观效果评价

沿空留巷早期无堆积体与后期试验段采用堆

积体控制效果对比如图 17 所示. 从沿空留巷段宏观观测来看, 在留巷早期采动影响区虽有密集单体支柱支护, 支护体仍然有整体移动趋势, 主要是受到采动支承压力的影响. 留巷后期过采动影响区

后支护体侧向变形与破裂较小, 支护体-堆积体协同承载稳定性好, 留巷断面成形规矩, 支护效果稳定.

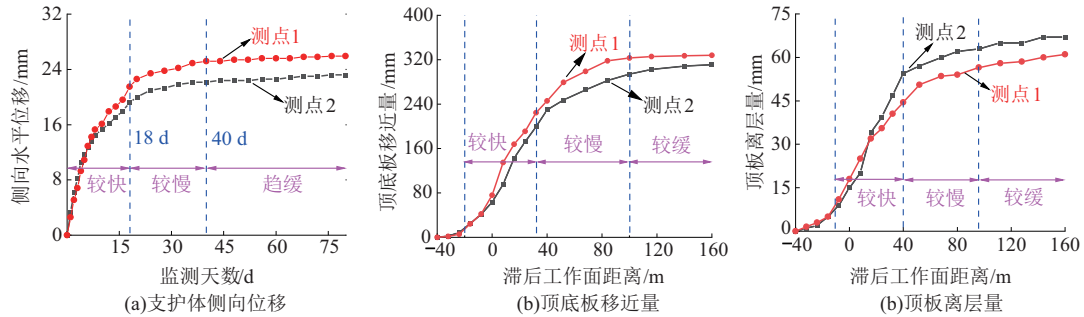


图 16 沿空留巷监测数据分析

Fig. 16 Analysis of monitoring data of gob-side retention gateway

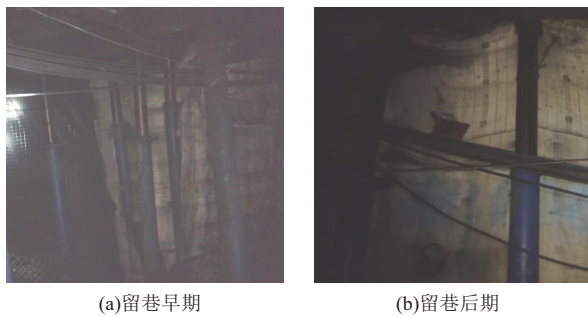


图 17 沿空留巷支护效果

Fig. 17 Support effect of the gob-side retention gateway

5 结 论

1) 沿空留巷支护体侧向失稳是沿空留巷围岩失稳诱发点, 支护体失稳主要表现为支护体整体移动失稳与支护体弯曲变形失稳.

2) 巷旁支护体稳定性与塌落矸石产生侧向推力大小、方向及作用位置相关, 建立了支护体-堆积体摩擦平衡方程与力矩平衡方程.

3) 计算巷旁堆积体宽、高分别为 1 433.3 和 1 708.1 mm (考虑安全取为 1.5 和 1.7 m), 实际抗拉强度为 0.121 3 MPa (现场不小于 0.15 MPa).

4) 最优堆积体为级配粒径 ≤ 8 mm、水泥质量分数 10% 的 P8C10 堆积体, 此堆积体 10 d 单轴抗压强度为 2.38 MPa, 抗拉强度满足要求.

5) 采用设计支护体-堆积体围岩控制方案后, 顶板未出现明显下沉, 支护体侧向变形平均控制在 25 mm 以内, 巷道围岩稳定.

参考文献:

[1] 何满潮, 陈上元, 郭志彪, 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.

HE Manchao, CHEN Shangyuan, GUO Zhibiao, et al. Control of surrounding rock structure for gob-side entry retaining by cutting roof to release pressure and its engineering application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(5): 959-969.

[2] 王东攀, 杨鸿智, 袁伟茗, 等. 厚煤层综放沿空留巷“支-卸”协同围岩控制技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(4): 32-42.

WANG Dongpan, YANG Hongzhi, YUAN Weiming, et al. A "support and pressure relief" ground control technology for double-used roadway with fully-mechanized caving method in thick coal seam[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(4): 32-42.

[3] 贾后省, 王林, 彭博, 等. 弱黏结复合顶板沿空留巷分级“控顶-卸压”机理与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6): 1191-1202.

JIA Housheng, WANG Lin, PENG Bo, et al. Mechanism and application of classification "roof control-pressure relief" of gob-side entry retained with weakly caking compound roof[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6): 1191-1202.

[4] 侯公羽, 胡涛, 李子祥, 等. 切顶高度对巷旁支护沿空留巷稳定性的影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(5): 924-931.

HOU Gongyu, HU Tao, LI Zixiang, et al. Effect of cutting roof height on the stability of gob-side retaining roadway with roadside support[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(5): 924-931.

[5] 赵萌焯, 黄庆亨, 朱磊, 等. 无煤柱切顶沿空留巷顶

- 板“短砌体-铰接”结构及支撑阻力研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(增1): 84-93.
- ZHAO Mengye, HUANG Qingxiang, ZHU Lei, et al. Research on roof structure and support resistance of gob-side entry retaining with roof cutting and non-pillar mining[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(Sup 1): 84-93.
- [6] 朱川曲, 张道兵, 施式亮, 等. 综放沿空留巷支护结构的可靠性分析[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 141-144.
- ZHU Chuanqu, ZHANG Daobing, SHI Shiliang, et al. Reliability analysis on support structure of gob-side entry retaining in fully mechanized caving face [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 141-144.
- [7] 黄志增, 高晓进, 袁伟茗, 等. 深孔预裂爆破沿空留巷技术及顶板应力分布规律[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(增2): 88-96.
- HUANG Zhizeng, GAO Xiaojin, YUAN Weiming, et al. Stress distribution of cutting roof with deep bore-hole blasting for gob-side entry retaining technology [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(Sup 2): 88-96.
- [8] 张自政, 柏建彪, 陈勇, 等. 沿空留巷不均衡承载特征探讨与应用分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2665-2673.
- ZHANG Zizheng, BAI Jianbiao, CHEN Yong, et al. Investigation and application analysis of unbalanced bearing characteristics of gob-side entry retaining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2665-2673.
- [9] 杨鸿智, 鞠文君, 王东攀, 等. 综放工作面沿空留巷“错动”变形破坏机制及其控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2): 224-231.
- YANG Hongzhi, JU Wenjun, WANG Dongpan, et al. The “relative movement” deformation mechanism and control technique of gob-side entry retaining in top-coal caving mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2): 224-231.
- [10] 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, 33(3): 23-26.
- ZHANG Dongsheng, MIAO Xiexing, FENG Guangming, et al. Stability control of packing body for gob-side entry retaining in fully-mechanized coalfaces with top-coal caving[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 33(3): 23-26.
- [11] 马立强, 张东升. 综放巷内充填沿空留巷工业试验[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(6): 54-58.
- MA Liqiang, ZHANG Dongsheng. Industrial test of road-in packing for gob-side entry retaining in fully-mechanized with top-coal caving[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(6): 54-58.
- [12] 张东升, 马立强, 缪协兴, 等. 综放沿空留巷围岩变形影响因素的分析[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(1): 1-6.
- ZHANG Dongsheng, MA Liqiang, MIAO Xiexing, et al. Factor analysis on deformation of gob-side entry retaining with entry-in packing in top-coal caving mining face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(1): 1-6.
- [13] 王俊峰, 王恩, 陈冬冬, 等. 窄柔模墙体沿空留巷围岩偏应力演化与控制[J]. 煤炭学报, 2021, 46(4): 1220-1231.
- WANG Junfeng, WANG En, CHEN Dongdong, et al. Evolution of deviatoric stress and control of surrounding rock at gob-side entry retaining with narrow flexible-formwork wall [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(4): 1220-1231.
- [14] 李鹏, 朱永建, 王平, 等. 大倾角厚层坚固顶板巷旁支护体合理宽度及让压尺度研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(11): 4494-4503.
- LI Peng, ZHU Yongjian, WANG Ping, et al. Study on reasonable width and yield scale of roadway side support with strong roof and thick seam with large dip angle[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(11): 4494-4503.
- [15] 陈勇, 杨玉贵, 闫帅, 等. 沿空留巷巷旁充填体对拉锚杆加固机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6): 1129-1134.
- CHEN Yong, YANG Yugui, YAN Shuai, et al. Study on reinforcement mechanism of filling body in gob-side entry retaining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(6): 1129-1134.
- [16] 郭海军, 杜怀龙. 厚煤层沿空留巷柔模混凝土充填体合理宽度确定[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(增2): 105-112.
- GUO Haijun, DU Huailong. Research and application of flexible formwork concrete gob-side entry retaining technology in thick coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(Sup 2): 105-112.
- [17] 张吉雄, 姜海强, 缪协兴, 等. 密实充填采煤沿空留巷巷旁支护体合理宽度研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(2): 159-164.
- ZHANG Jixiong, JIANG Haiqiang, MIAO Xiexing, et al. The rational width of the support body of gob-side entry in fully mechanized backfill mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30

- (2):159-164.
- [18] 辛亚军,杨俊鹏,陈祖国,等.薄分层软顶间隔柔模承载解析与快速留巷技术[J].采矿与安全工程学报,2023,40(6):1161-1176.
XIN Yajun, YANG Junpeng, CHEN Zuguo, et al. The rapid gateway-retention technology and load analysis of spaced flexible concrete prop for weak thin-layered roof[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(6):1161-1176.
- [19] 黄万朋,高延法,文志杰,等.钢管混凝土支柱巷旁支护沿空留巷技术研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(4):604-611.
HUANG Wanpeng, GAO Yanfa, WEN Zhijie, et al. Technology of gob-side entry retaining using concrete-filled steel tubular column roadside supporting [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(4):604-611.
- [20] 龚鹏,马占国,和泽欣,等.矸石充填工作面沿空留巷围岩结构演化机理[J].采矿与安全工程学报,2023,40(4):764-773.
GONG Peng, MA Zhanguo, HE Zexin, et al. Structural evolution mechanism of surrounding rock of gob side entry retaining in backfilling mining face [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(4):764-773.
- [21] 崔春阳,李春元,王美美,等.富孔贫胶固废充填材料双组分破坏试验及强度模型[J].煤炭科学技术,2023,51(9):77-87.
CUI Chunyang, LI Chunyuan, WANG Meimei, et al. Failure test and strength model of high-porous low-cementitious waste backfilling material[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9):77-87.
- [22] 侯朝炯,李学华.综放沿空掘巷围岩大、小结构的稳定性原理[J].煤炭学报,2001,26(1):1-7.
HOU Chaojiong, LI Xuehua. Stability principle of large and small structure of surrounding rock in gob-side entry driving with fully-mechanized caving [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(1):1-7.
- [23] 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,2000:27-59.
LI Xuehua. Research on the stability of large and small structures of surrounding rock in fully mechanized caving gateway along gob[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2000:27-59.
- [24] 李石林,冯涛,朱卓慧.“煤体-支柱(架)-胶结体”联合作用下顶板超静定梁模型[J].煤炭学报,2013,38(10):1735-1741.
LI Shilin, FENG Tao, ZHU Zhuohui. Mechanical model of statically indeterminate beam of roof under the combined action of coal body, pillar (support) and cemented fill[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10):1735-1741.
- [25] 钱鸣高,石平五,许家林.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010:76-84.
QIAN Minggao, SHI Pingwu, XU Jialin. Mine pressure and rock strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010:76-84.
- [26] 陈萌,刘立新,彭少民.预拌混凝土各龄期抗拉和抗压强度换算关系试验研究[J].建筑结构,2010,40(2):109-111.
CHEN Meng, LIU Lixin, PENG Shaomin. Experimental study on relationships between tensile strength and compressive strength of ready-mixed concrete at different age [J]. Building Structure, 2010, 40(2):109-111.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土物理力学性能试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

(责任编辑 宋爽)