

坚硬顶板沿空留巷充填体加固技术研究

Study on Reinforcement Technology of Filling Body for Retaining Roadways Along the Gob with Hard Roof

曹其嘉¹, 穆 驰¹, 陈 勇², 韦 钊¹

(1. 陕西能源职业技术学院 煤炭与化工产业学院, 咸阳 712000; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 徐州 221116)

摘 要: 针对坚硬顶板沿空留巷充填体易出现鼓包、失稳等问题, 以凌志达煤矿 15209 工作面为工程背景, 采用数值模拟和充填体加固力学模型理论计算方法, 分析留巷充填体稳定性和变形特征, 提出了爆破预裂坚硬顶板条件下充填体“框架+预应力对拉锚杆”复合加固结构。结果表明: 在坚硬顶板回转动载影响下, 充填体内部出现贯穿充填体倾斜方向裂隙, 存在剪切和拉伸两种破坏形式, 在采空区侧顶部和留巷侧底部出现明显的外鼓, 完整性遭到破坏, 极易发生失稳; 加固构件在充填体两侧施加预应力, 侧向约束由自由面状态转变为受力约束面状态, 其刚度和强度提高, 剪切和拉伸破坏塑性区范围分别减小 76% 和 43%, 外侧无鼓包、内部大裂隙明显减少, 能够充分利用充填体自身稳性, 减小充填体的滑动和相对位移。工程实践中, 充填体横向和纵向变形量分别为 170 和 200 mm, 保持较高的峰后强度, 承载效果较好, 可为相关工程提供参考。

关键词: 爆破预裂; 坚硬顶板; 充填体; 承载加固

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 03-0101-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.019

CAO Qijia¹, MU Chi¹, CHEN Yong², WEI Zhao¹

(1. College of Coal and Chemical Industry, Shaanxi Energy Institute, Xianyang 712000, China;

2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Aiming at the problems of bulge and instability of filling body in gob side entry retaining with hard roof, taking 15209 working face of lingzhida coal mine as the engineering background, the stability and deformation characteristics of filling body in gob side entry retaining were analyzed by using numerical simulation and theoretical calculation method of filling body reinforcement mechanical model, and the composite reinforcement structure of "frame and prestressed split bolt" of filling body under the condition of blasting and presplitting hard roof was proposed. The research results show that: under the influence of rotating dynamic load of hard roof, cracks penetrating the inclined direction of the filling body appear in the filling body, and there are two failure forms of shear and tension. Obvious bulge appears at the top of goaf side and the bottom of retained roadway side, and the integrity is damaged, which is very prone to instability; The reinforcement component applies prestress on both sides of the filling body, and the lateral constraint changes from the free surface state to the stress constraint surface state. Its stiffness and strength are improved, and the range of shear and tensile failure plastic zone is reduced by 76% and 43%

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助 (52174135); 陕西省教育厅一般专项科研计划项目资助 (23JK0378; 23JK0380); 陕西省教育厅服务地方专项产业化培育项目资助 (23JC024)。

作者简介: 曹其嘉 (1990—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 煤矿巷道围岩控制。

收稿日期: 2024-12-22

研究与应用

respectively. There is no bulge on the outside and the internal large crack is significantly reduced, which can make full use of the stability of the filling body and reduce the sliding and relative displacement of the filling body. In engineering practice, the lateral and longitudinal deformation of the filling body are 170 mm and 200 mm respectively, maintaining high post peak strength and good bearing effect, which can provide reference for related projects.

Key words: blasting presplitting; hard roof; backfill body; bearing reinforcement

0 引言

沿空留巷巷旁支护体的稳定性是沿空留巷成功的关键,通常采用高水材料、高水灰渣材料及膏体等充填材料进行巷旁充填,以形成具有足够强度的充填体^[1-2]。

工程技术人员和学者对软弱的直接顶或上覆坚硬顶板厚度不大的工作面沿空留巷巷旁充填体结构和稳定性方面进行了分析,并取得多项成果。罗明坤等^[3]提出留巷采用“组合”式巷旁柔模支护形式并确定了最佳“组合墙”支护参数;李小鹏等^[4]分析了三软厚煤层大跨度超前切顶沿空留巷充填体稳定性,确定了充填体墙尺寸;韩俊效等^[5]针对突出煤层大采高工作面提出采用阶段式巷旁充填沿空留巷,确定了阶段长度和充填体宽度;袁奇^[6]分析了巷旁支护体结构及特点并提出钢管混凝土墩柱式留巷巷旁支护结构;何明伟^[7]采用数值模拟方法分析复用巷道侧砦墙应力演化规律,并对比了水力压裂前后巷道围岩变形、液压支架压力变化;杨庚群等^[8]采用正交试验确定矸石混凝土巷旁充填体材料最佳配比和巷旁充填体合理宽度;石占山等^[9-10]分析柔模砦墙沿空留巷和留煤柱开采时巷道围岩裂隙率、裂隙类型、垮落范围和垮落角的差异;Zhu等^[11-12]分析了坚硬顶板切顶巷道围岩塑性区发育和支护体受载的特征,提出了分区域和分阶段的切顶巷道围岩动态控制方案;方宁等^[13]分析了巷旁支护体在不同阶段的变形和受力,确定支护体合理宽度;王晓卿^[14]根据厚层坚硬顶板不同预裂角度和预裂高度条件下留巷围岩应力与支柱顶面压缩量规律合理布置预裂钻孔位置;李刚等^[15]分析顶板采空区侧两次破断规律,确定巷旁模砦墙支护阻力和安全系数计算方法。

综上,针对坚硬顶板沿空留巷,在采空区侧留巷上方区域形成大面积悬顶不垮落,巷旁充填体在较长的悬臂梁回转下沉影响下,极易发生失稳,以

致影响留巷稳定。目前针对沿空留巷充填体尺寸、受力、变形特征等已有诸多研究,而对巷旁充填体加固技术研究相对较少。因此,采用数值模拟和理论计算方式,分析坚硬顶板条件下巷旁充填体变形特征,提出爆破预裂坚硬顶板与充填体“框架+预应力对拉锚杆”复合加固结构,研究成果在凌志达煤矿沿空留巷进行工业性验证。

1 试验巷道地质条件

凌志达煤矿 15209 工作面埋深 400 m,位于凌志达井田二采区,工作面上方顶板岩层为灰岩、砂岩,属于坚硬岩层顶板,具有厚度大、强度高、完整性好、节理裂隙少等特点。煤层平均厚 4.2 m,平均倾角 4°。工作面回风顺槽巷断面为 5 m×4 m,长度 1 890 m,工作面推过后在回风顺槽进行沿空留巷布置,煤层顶底板综合柱状图如图 1 所示。

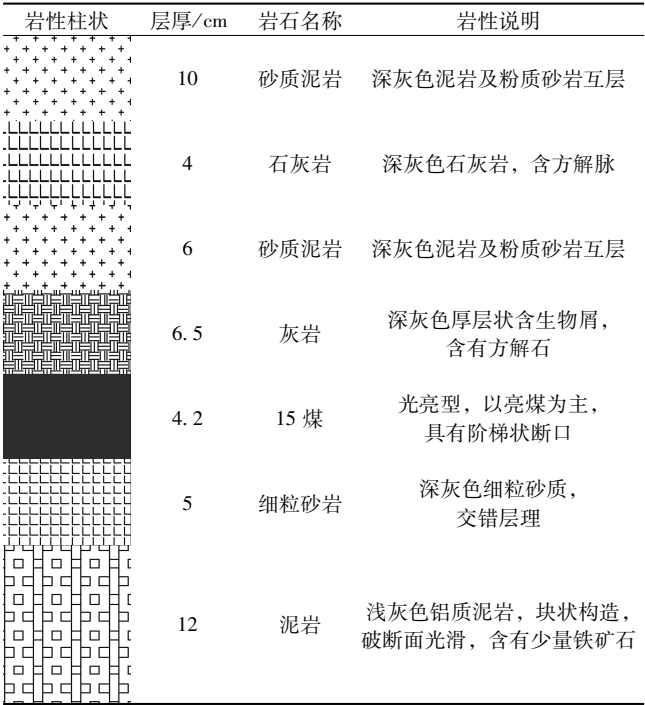


图 1 煤层顶底板岩性综合柱状图
Fig. 1 Comprehensive lithologic columnar section of coal seam roof and floor

2 坚硬顶板留巷充填体变形特征

2.1 数值模型建立

利用 UDEC6.0 数值计算软件模拟凌志达煤矿 15209 工作面坚硬顶板沿空留巷充填体变形特征，建立数值模型如图 2 所示。模型工作面轨道巷断面尺寸为 5 000 mm（宽）×4 000 mm（高），巷旁充填体尺寸为 2 000 mm（宽）×4 000 mm（高）。模型为平面应变模型，左右边界为滑动铰接，下部为固定铰接，留巷围岩、充填体、采空区矸石采用 Trigon 命令进行划分，其中留巷围岩和充填体采用三角形网格划分，采空区矸石采用六边形划分，其它围岩采用 Voronoi 网格划分方法，提高模型计算精度。模拟中各岩层及节理对应物理力学参数见表 1。

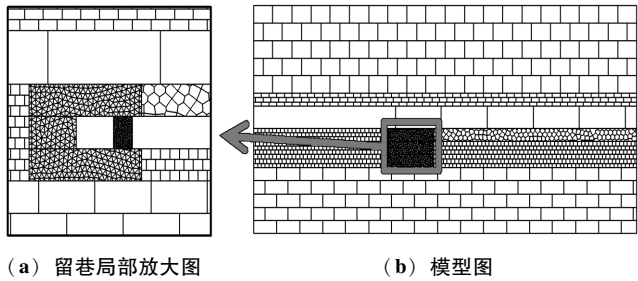


图 2 数值模型图
Fig. 2 Numerical model diagram

表 1 各岩层及节理物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of each rock layer and joint							
岩层	密度 /(kg/m ³)	弹性模量 /GPa	泊松比 /GPa	抗拉强度 /GPa	内聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa
上覆岩层 2	2 500	1.78	54.4	21.8	1.8	21	1.12
上覆岩层 1	2 550	1.21	7.1	2.9	1.4	18	0.90
直接顶	2 500	1.78	54.4	21.8	1.8	21	1.12
基本顶	2 550	10.04	19.7	7.9	4.8	19	2.62
煤层	1 400	0.51	25.5	10.2	0.8	14	0.52
直接底	2 550	10.04	19.7	7.9	4.8	19	2.62
基本底	2 500	1.78	54.4	21.8	1.8	21	1.12

2.2 充填体变形分析

随着工作面的推进，由于坚硬顶板抗拉强度高、刚度大，在采空区侧大面积悬顶不垮落，形成长悬臂结构，如图 3（a）所示。由于充填体上方基本顶以实煤体为基点回转下沉，由几何关系可知充填体纵向变形量在采空区侧大于巷道侧，进而导致充填体在采空区侧横向变形量大于巷道侧，充填体向采空区倾斜。巷旁充填体在上覆坚硬顶板回转动载的影响下，内部出现贯穿充填体倾斜方向裂隙，完整

性遭到破坏，同时两侧自由面裂隙产生、发育及贯通，甚至在采空区侧顶部和留巷侧底部都出现明显的外鼓，极易发生失稳，如图 3（b）所示。

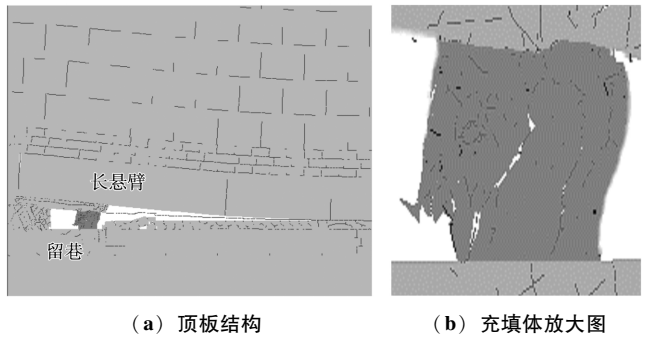


图 3 受载后留巷围岩变形图
Fig. 3 Deformation diagram of surrounding rock gob-side entry retaining after being loaded

如图 4 所示，充填体中存在剪切和拉伸两种破坏形式。以拉伸破坏为主的塑性区主要集中在充填体留巷侧上部三角区域，数量达 144 个；以剪切破坏为主的塑性区主要集中在充填体采空区侧上部区域，数量为 106 个。

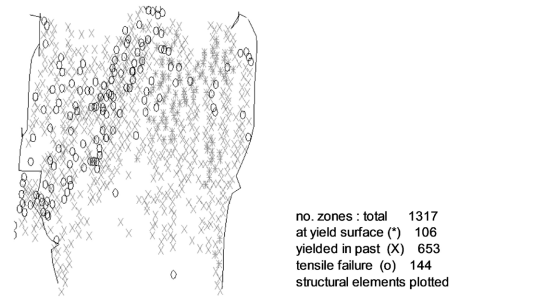


图 4 充填体内塑性区分布图
Fig. 4 Distribution of plastic zone inside the filling body

由此可见，坚硬厚层顶板条件下，充填体结构极易发生变形破坏，承载能力大大降低，进而引起巷道顶板下沉量增大，断面急剧缩小，威胁安全生产。

3 留巷充填体复合承载加固结构

根据坚硬顶板沿空留巷充填体变形和承载特点，采取爆破预裂隙切顶卸压技术，在工作面后方充填之前进行打眼放炮预裂隙，炸药在厚硬岩体中爆炸时，外部靠近自由面的岩体会被抛掷出，形成爆破漏斗，炮孔底部以及向炮孔深处扩展的裂纹起到松动作用，防止坚硬顶板悬顶面积过大，顶板在切顶线处断裂，既减少了充填体上覆载荷又垮落充填采空区支撑上覆顶板。在顶板预裂条件下，提出充填

研究与应用

体“框架+预应力对拉锚杆”复合加固结构,采用对拉锚杆预先植入充填袋内,充填袋两侧面配合钢筋网+梯子梁+托盘,构成充填体框架,待充填体达到预期强度时对锚杆施加预紧力,形成充填体“框架+预应力对拉锚杆”复合加固结构及力学模型如图5所示。

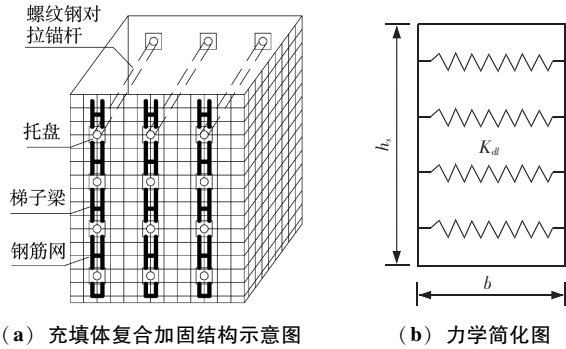


图5 留巷充填体框架+预应力对拉锚杆复合加固结构
Fig.5 Composite reinforcement structure of filling body frame and prestressed tension anchor rod

充填体中预应力对拉锚杆简化为弹性元件,单根对拉锚杆刚度 κ_{dl} 为:

$$\kappa_{dl} = \frac{\pi E_{dl} d^2}{4b} \quad (1)$$

式中: E_{dl} 为单根预应力对拉锚杆弹性模量, GPa; d 为预应力对拉锚杆直径, m; b 为充填体宽度, m。

充填体变形模量的增加值 ΔE_d :

$$\Delta E_d = \frac{n\pi E_{dl} d^2}{4h_s} \quad (2)$$

每排预应力对拉锚杆通过梯子梁并联,每排预应力对拉锚杆等效总刚度 κ_d 为:

$$\kappa_d = \frac{n\pi E_{dl} d^2}{4b} = \frac{\Delta E_d h_s}{b} \quad (3)$$

式中: n 为每排预应力对拉锚杆数量, 根; h_s 为充填体高度, m。

根据充填体横向变形量和预应力对拉锚杆排距,计算得到加固构件为充填体提供的侧向压力 σ_3 :

$$\sigma_3 = \frac{\Delta E_d \Delta_d}{h_s \Delta_p} = \frac{n\pi E_{dl} d^2 \Delta_d}{4h_s^2 \Delta_p} \quad (4)$$

式中: Δ_p 对拉锚杆排距, m; Δ_d 为充填体横向变形量, m。

由材料极限平衡条件可得到充填体的抗压强度 σ_1 :

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 2C \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \\ &= \frac{n\pi E_{dl} d^2 \Delta_d (1 + \sin \varphi)}{4h_s^2 \Delta_p (1 - \sin \varphi)} + 2c \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: c 为充填体粘聚力, MPa; φ 为充填体摩擦角。

通过理论分析可知,框架预应力对拉锚杆的应用,改变了充填体的力学性能和受力状态,提高了弹性模量和刚度,框架在预应力锚杆作用下受到水平力,充填体侧向面受到框架预应力对拉锚杆反作用,侧向约束由自由面 ($\sigma_3 = 0$) 转变为受力约束面 ($\sigma_3 > 0$) 状态,提高了充填体抗压强度 σ_1 和承载能力,能够充分利用充填体自身稳性,减小充填体的滑动和相对位移,并且框架预应力对拉锚杆的支护强度随着充填体外鼓变形的增大而增大,其承载性能又受到对拉锚杆数量和间排距大小的影响。可知,充填体“框架+预应力对拉锚杆”复合加固结构是一种“主动”支护结构,减小变形滑动的同时提高了巷旁充填体的支护阻力。

4 工程应用

4.1 15209 工作面轨道巷支护及施工方案

针对凌志达煤矿 15209 工作面坚硬厚层顶板沿空留巷充填体变形量大问题,15209 工作面轨道巷沿空留巷顶板采用“螺纹钢金属锚杆+锚索”支护,巷旁充填区域顶板在支架后方采用锚杆加固,实煤帮采用“锚杆+钢带+金属菱形网”联合支护,巷旁充填体采用高水充填材料,材料水灰比为 1.5:1,充填体采用四根对拉锚杆+梯子梁+金属菱形网复合加固,对拉锚杆型号为 $\phi 22.0 \text{ mm} \times 2100 \text{ mm}$ 的两端滚丝螺纹钢,间排距为 $1000 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$,配套高强度托盘和螺母,梯子梁型号为 $\phi 14 \text{ mm}$,竖向放置,金属网孔尺寸不大于 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,充填体宽度为 2000 mm ,留巷后巷道宽度为 5000 mm ,支护方案如图6所示。

在留巷巷旁充填之前,在充填体外采空区侧距离 500 mm 处布置炮眼进行顶板预裂,炮孔深 8000 mm 、孔径 48 mm 、间距 1000 mm 。炮孔倾角应满足良好的爆破效果,利于顶板垮落,便于施工,炮孔向采空区侧倾角 75° 。在液压支架后方充填区域补打锚杆加

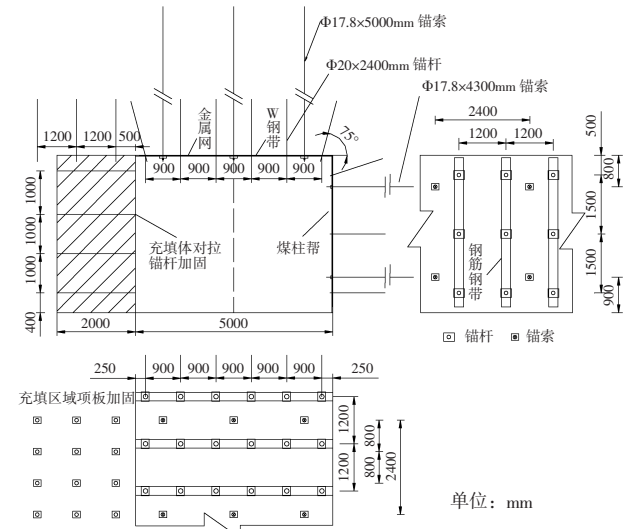
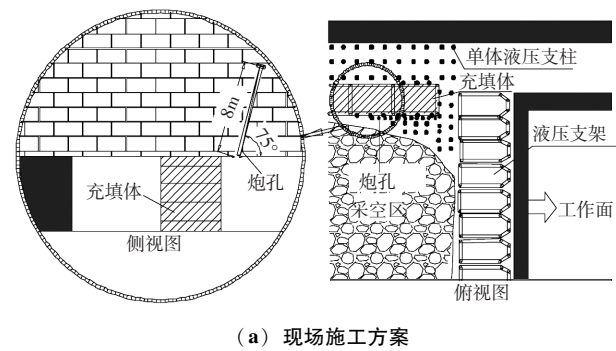


图6 15209工作面轨道巷支护示意图

Fig. 6 Schematic diagram of track roadway support for 15209 working face

固、清理底板浮煤、选定巷旁充填体位置，随后在填体框架两侧挂设钢筋网，悬吊充填袋后于袋内横穿预应力对拉锚杆，固定钢筋梯子梁，将框架端部钢筋网合口封闭，同时充填体框架周围安设单体液压支柱以防止充填体凝固前发生倾倒，最后进行注浆充填。现场施工方案如图7所示。



(a) 现场施工方案



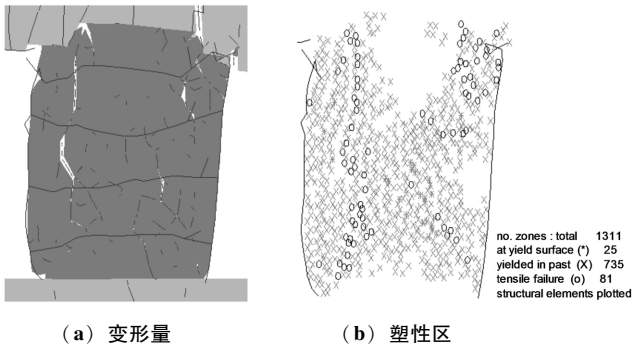
(b) “框架+预应力对拉锚杆”复合加固结构施工

图7 现场施工方案及现场图

Fig. 7 On site construction plan and on-site drawings

4.2 充填体加固结构数值模拟分析

采用爆破预裂坚硬顶板和巷旁充填体复合承载加固技术，待15209工作面后方围岩稳定后，充填体外侧没有出现鼓包，内部没有出现较大裂隙，仅在靠近留巷侧充填体内出现一条宽度不大、未贯穿的竖向裂隙，完整性较好，如图8(a)所示，充填体在复合承载结构下可以有效减小两侧横向位移量和倾斜角度，有利于稳定。充填体破坏形式包括剪切和拉伸破坏两种形式，拉伸破坏塑性区主要集中在充填体靠近留巷侧竖向裂隙处和采空区侧上部顶角位置，数量为81个，与无加固下相比减少43%；在充填体采空区侧中下部出现少量剪切破坏，数量为25个，与无加固下相比减少76%，如图8(b)所示。可见充填体在“框架+预应力对拉锚杆”复合承载结构下，其刚度和强度提高，剪切和拉伸破坏塑性区范围较小，完整性较好，承载性能增加，和理论研究一致。充填体分担了留巷实煤体侧载荷，减小实煤体的塑性区范围，有利于上覆基本顶载荷的传递。



(a) 变形量

(b) 塑性区

图8 加固充填体变形和塑性区分布图

Fig. 8 Deformation and plastic zone distribution of reinforced backfill body

4.3 现场效果实测分析

在15209工作面回采后方，监测加固充填体横向和纵向变形量随工作面推进的变化，如图9所示。爆破预裂切顶后，由于坚硬顶板的回转下沉，充填体受载发生变形，最大纵向变形量和横向变形量分别为200和170 mm，充填体变形较小，可见充填体在对拉锚杆+梯子梁+金属菱形网加固作用下，完整性较好，没有发生鼓包、倾倒等现象。

在充填体和坚硬顶板之间布置液压枕，监测充填体中部载荷随工作面位置变化情况，如图10所示。坚硬顶板在实煤体侧发生破断伴随回转下沉，充填

研究与应用

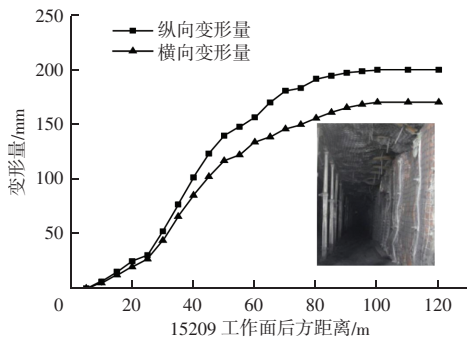


图9 加固充填体变形曲线图
Fig.9 Deformation curve of reinforced backfill body

体载荷明显增高，最大值为 10.7 MPa，由于坚硬顶板预先通过爆破预裂切顶，顶板未出现二次破断和来压现象，顶板稳定后载荷为 7.3 MPa。充填体在复合承载加固结构下，承载效果较好，能够保持较高的峰后强度，有利于留巷的稳定。

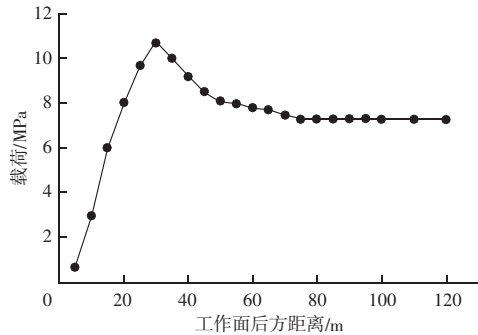


图10 巷旁充填体载荷随工作面推进变化曲线
Fig.10 Variation curve of roadside backfill body load with working face advance

5 结论

以凌志达煤矿 15209 工作面为工程背景，通过数值模拟和充填体加固力学模型理论计算方法，分析留巷充填体稳定性和变形特征，主要结论如下：

(1) 坚硬顶板大面积悬顶不垮落，充填体出现倾斜方向裂隙，两侧自由面裂隙发育及贯通，出现明显的外鼓，极易发生失稳，提出了爆破预裂坚硬顶板条件下充填体“框架 + 预应力对拉锚杆”承载加固结构。

(2) 建立充填体加固力学模型，支护构件加固充填体，提高了其强度和刚度，剪切和拉伸破坏塑性区范围分别减小 76% 和 43%，外侧无鼓包、内部大裂隙明显减少。

(3) 凌志达煤矿 15209 工作面爆破预裂坚硬顶板留巷实践表明，充填体最大纵向变形和横向变形量分别为 200 和 170 mm，稳定后载荷为 7.3 MPa，变形较小，能够保持较高的峰后强度。可见，在复合承载加固结构下充填体维护效果较好。

参 考 文 献

[1] 张自政, 柏建彪, 王襄禹, 等. 我国沿空留巷围岩控制技术研究与展望 [J]. 煤炭学报, 2023, 48 (11): 3979-4000.

[2] 曹其嘉, 陈勇, 韦钊. 浅孔爆破切顶卸压在厚硬顶板沿空留巷中的应用研究 [J]. 中国矿业, 2023, 32 (7): 146-151.

[3] 罗明坤, 黄宁, 张永军, 等. 高瓦斯矿井沿空留巷巷旁“组合”充填墙体技术研究 [J]. 煤炭技术, 2021, 40 (6): 18-22.

[4] 李小鹏, 申骏超, 姜彦军, 等. 三软厚煤层超前切顶沿空留巷充填墙稳定性与尺寸优化研究 [J]. 煤炭工程, 2021, 53 (1): 12-18.

[5] 韩俊效, 马晋民, 石晋松, 等. 大宁煤矿阶段式高水材料充填沿空留巷技术应用研究 [J]. 煤炭工程, 2020, 52 (4): 6-11.

[6] 袁奇. 钢管混凝土墩柱巷旁支护结构与承载性能研究及应用 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.

[7] 何明伟. 沿空留巷工作面复用巷道大面积悬顶水力压裂治理研究 [J]. 中国煤炭, 2024, 50 (增刊1): 111-119.

[8] 杨庚群, 王军, 孙永康, 等. 矽石混凝土巷旁充填体材料及合理宽度研究 [J]. 煤矿安全, 2024, 55 (11): 166-175.

[9] 石占山, 范永君, 李刚, 等. 柔模砌墙沿空留巷工作面覆岩垮落结构及裂隙演化规律 [J/OL]. 重庆大学学报, 1-11 [2025-05-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.n.20240816.1743.002.html>.

[10] 迟国铭, 周海丰, 石占山, 等. 大柳塔 52606 工作面沿空留巷围岩走向非均匀破坏机制研究 [J]. 煤炭工程, 2024, 56 (1): 49-56.

[11] ZHU H Z, XU L WEN Z J. Ground pressure behavior and instability mechanism of gob-side entry retaining with hard roof cutting [J]. Journal of Central South University, 2024, 31 (7): 2488-2512.

[12] ZHU H Z, XU L WEN Z J, et al. Ground stability of gob-side entry by roof cutting in relation to mining stages: A case study [J]. Journal of Central South University, 2023, 30 (12): 4097-4121.

[13] 方宁, 陈勇, 刘会强, 等. 遗留煤柱下方迎工作面回采巷道围岩控制技术研究 [J]. 能源技术与管理, 2023, 48 (3): 1-4.

[14] 王晓卿. 沿空留巷超前预裂卸压机理及预裂钻孔布置原则 [J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41 (6): 1125-1133.

[15] 李刚, 刘航, 迟国铭, 等. 大柳塔煤矿沿空留巷柔模砌墙支护阻力核定及失稳判据研究 [J]. 工矿自动化, 2025, 51 (1): 145-155.