



短壁胶结充填开采房式遗留煤柱采场结构稳定性控制研究

张云 张龙 来兴平 曹胜根 杨彦斌 刘永孜 詹睿 白立丞 叶昊

引用本文:

张云, 张龙, 来兴平, 等. 短壁胶结充填开采房式遗留煤柱采场结构稳定性控制研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 357–372.

ZHANG Yun, ZHANG Long, LAI Xingping. Study on stability control of stope structural in short-wall cemented backfill mining for recovery of room-and-pillar residual coal[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 357–372.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0275>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于元胞自动机的房式煤柱稳定性研究

Reasoning research on stability of room coal pillar based on cellular automata

煤炭科学技术. 2021, 49(8): 60–66 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9dce3eb1-ccfd-4e9a-bd51-175346a634bd>

煤层群开采遗留煤柱效应及跨掘巷道围岩控制研究

Study on effect of residual coal pillar in coal seam group mining and surrounding rock control of cross-excavation roadway

煤炭科学技术. 2022, 50(9): 1–9 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f3bf0d28-b4e1-4b45-98a3-e22a15270846>

一种基于弹性理论的大采高区段煤柱合理尺寸计算方法

A calculation method of reasonable size of coal pillar in large mining height section based on elastic theory

煤炭科学技术. 2023, 51(3): 37–51 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0590>

房柱式采空区影响下露天端帮煤开采安全控制技术

Safety control technology of open-pit end wall coal mining under influence of room pillar gob

煤炭科学技术. 2020, 48(8): 76–81 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/25300e86-4af6-42f6-be01-a6f989bdfa0a>

上覆遗留区段煤柱对下伏煤层开采的扰动影响研究

Study on disturbing influence of overlying remaining coal pillars on underlying coal seam mining

煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9a1740d2-5a23-4e99-a696-41d5dfc59e5c>

工作面过上覆遗留煤柱致灾机理及超前区域防治技术研究

Disaster mechanism during passing of working face under overlying remnant coal pillar and advanced regional prevention technology

煤炭科学技术. 2023, 51(9): 46–54 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1373>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张云,张龙,来兴平,等.短壁胶结充填开采房式遗留煤柱采场结构稳定性控制研究[J].煤炭科学技术,2025,53(6):357-372.

ZHANG Yun, ZHANG Long, LAI Xingping, *et al.* Study on stability control of stope structural in short-wall cemented backfill mining for recovery of room-and-pillar residual coal[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 357-372.

短壁胶结充填开采房式遗留煤柱采场结构稳定性控制研究

张云¹,张龙¹,来兴平¹,曹胜根²,杨彦斌³,刘永孜¹,詹睿¹,白立丞¹,叶昊¹

(1. 西安科技大学 能源与矿业工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 中煤能源研究院有限责任公司, 陕西 西安 710054)

摘要:房式开采遗留煤柱资源的呆滞和矿山固体废弃物的排放严重制约着我国煤炭行业的绿色低碳转型升级。为此,以陕北矿区板定梁煤矿为工程背景,提出了一种“时序协同-煤柱置换”的短壁胶结充填采煤回收煤柱的工艺。首先基于极限强度理论,对房式开采遗留煤柱回收的安全应力进行核算;其次采用数值模拟研究自然垮落法管理顶板回收遗留煤柱过程中的失稳特征及顶板破断对采场稳定性的影响,建立短壁胶结充填采场力学模型,求解出确保直接顶不发生破断的临界充填体强度;最终开展力学试验分析胶结充填体的力学特性、破坏特征及微观特征,并结合实际工程提出了一套完整的短壁胶结充填采煤设计方法。结果表明:板定梁煤矿遗留煤柱安全应力值为11.78 MPa,具备安全回收的条件;基于自然垮落法管理顶板回收遗留煤柱的应力、塑性区分布特征及顶板破断分析,发现在回收过程中可能会引发“多米诺”链式失稳效应,并伴随有顶板大面积破断;并进一步提出短壁胶结充填采煤技术置换遗留煤柱,计算得到采场直接顶不发生垮落的临界充填体强度为8.97 MPa;基于此,获取充填材料中煤矸石:粉煤灰:水泥:水的最优配比为3:3:1:1,该配比下矸石颗粒级配较优越,水化产物致密填充骨料间隙,有效减少了孔隙率,显著提升力学性能,可满足板定梁煤矿安全回收煤柱需求;并对试验回收区域的短壁胶结充填采煤工作面生产系统和关键参数进行了可行性设计,并提出确保充填效果的控制措施。研究成果为我国煤炭行业“资源回收-生态保护-固废利用”一体化绿色低碳转型发展提供了可复制的工程范式。

关键词:短壁胶结充填采煤;煤柱稳定性;弹性地基梁;房式开采;遗留煤柱

中图分类号:TD823.7

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2025)06-0357-16

Study on stability control of stope structural in short-wall cemented backfill mining for recovery of room-and-pillar residual coal

ZHANG Yun¹, ZHANG Long¹, LAI Xingping¹, CAO Shenggen², YANG Yanbin³, LIU Yongzi¹, ZHAN Rui¹, BAI Licheng¹, YE Hao¹

(1. College of Energy and Mining Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 3. China Coal Energy Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: The stagnation of residual coal pillars from room-and-pillar mining and the discharge of mine solid waste have severely constrained the green and low-carbon transformation of China's coal industry. To address these challenges, the Bandingliang Coal Mine in northern Shaanxi as the engineering case study, a novel "time-sequence coordinated pillar replacement" short-wall cemented backfill mining technique was proposed. First, the safe stress for the recovery of residual coal pillars from room-and-pillar mining was calculated based on the limit strength theory. Secondly, numerical simulation was used to study the instability characteristics of the natural collapse method for managing the recovery of residual coal pillars and the impact of roof failure on the stability of the mining area. A mechanical model for

收稿日期:2025-03-04

策划编辑:常琛

责任编辑:李雅楠

DOI: 10.12438/cst.2025-0275

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52474148, 52274143)

作者简介:张云(1990—),男,陕西铜川人,副教授,博士。E-mail: zhangyun@xust.edu.cn

the short-wall cemented backfill stope was established, and the critical strength of the backfill material was solved to ensure that the direct roof would not fail. Finally, mechanical tests were performed to analyze the mechanical properties, failure characteristics, and microstructural features of the cemented backfill, and a complete design method for short-wall cemented backfill mining was proposed based on the actual engineering. The results indicated that the safe stress value for the residual coal pillar in Bandingliang Coal Mine was 11.78 MPa, which met the conditions for safe recovery. Based on the stress, plastic zone distribution characteristics, and roof failure analysis during the recovery of residual coal pillars using the natural caving method, It was discovered that the recycling process may trigger a “domino” chain reaction, accompanied by large-scale roof failure. Furthermore, the short-wall cemented backfill mining technique was proposed to replace the residual coal pillars, and the critical backfill strength required to prevent roof collapse was calculated to be 8.97 MPa. Based on this, the optimal mix ratio of coal gangue : fly ash : cement : water in the backfill material was determined as 3 : 3 : 1 : 1. This mix ratio provided superior gangue particle grading, and the hydration products densely filled the gaps between aggregates, effectively reducing porosity and significantly improving mechanical performance, thus meeting the safe recovery requirements for coal pillars in Bandingliang Coal Mine. Feasibility designs for the short-wall cemented backfill mining production system and key parameters in the experimental recovery area were proposed, along with control measures to ensure the effectiveness of the backfill. The research results provided a replicable engineering paradigm for the “resource recovery-ecological protection-solid waste utilization” integrated green and low-carbon transformation and development of the coal industry in China.

Key words: short-wall cemented backfill mining; stability of coal pillars; beams on elastic foundations; room-and-pillar mining; residual coal pillars

0 引 言

煤炭作为我国的主体能源,长期以来在国家经济发展中发挥着至关重要的作用^[1-2]。随着国家“双碳”战略的深入推进,国务院 2024 年印发的《2024—2025 年节能降碳行动方案》,提出以提高资源利用效率为目标,鼓励矿山固体废弃物综合利用,推动矿山固废的绿色低碳利用^[3-5]。然而,受早期技术设备限制,陕北地区普遍采用房式采煤法,导致了大量煤炭资源浪费^[6]。据统计,仅陕北地区遗留煤柱总量接近 20 亿 t,由于遗留煤柱长期承载而导致其稳定性的下降,进而覆岩结构发生破坏,增加了矿震和地表沉陷的风险,严重威胁了矿区安全和周边环境^[7-8]。与此同时,煤炭资源的大规模开采、燃煤发电和煤化工产业的快速发展,加剧了矿井煤炭资源的枯竭,同时也伴随着大量煤基固体废弃物的产生,固体废弃物的堆放不仅占用宝贵土地资源,还释放有害物质,造成空气、水体和土壤的污染^[9-11]。针对以上问题,笔者提出了“时序协同-煤柱置换”的短壁胶结充填开采方法,将矸石与粉煤灰等固体废弃物混合搅拌充入采空区,待其凝结后,对遗留煤柱进行安全回收。该技术以回采资源为核心、固废处理为协同,胶结充填在保障煤柱稳定性的同时,显著提高了煤炭采出率并实现固体废弃物的资源化利用,不仅延长了矿井服务年限,更通过“以废换煤”模式促进了矿区生态环境修复与安全生产的协同发展^[12-14],为推动矿井绿色低碳发展提供理论依据。

目前,针对遗留煤柱回收与煤基固废充填开采

方面,相关专家学者展开了大量的研究。其中,针对遗留煤柱回收方面,冯国瑞等^[15-17]从链式失稳的源头出发,提出遗留煤柱群的最弱失稳致灾模式,形成遗留煤柱群链式失稳的关键柱理论。曹胜根等^[18-21]运用突变理论分析煤柱的失稳机理,模拟煤柱与采场变形破坏的动态演化过程,通过现场钻探的手段验证理论计算结果的准确性。安百富等^[22-25]以房式煤柱采场为背景,采用理论分析对充填体-煤柱共同支撑下的围岩力学结构进行研究,并建立煤柱稳定性的评价公式。针对煤基固废充填开采方面,张吉雄等^[26-29]总结矸石直接充填采煤的技术框架,系统地介绍综采矸石充填技术、普采矸石充填技术和掘巷充填技术的充填开采系统布置、关键设备及充填开采工艺;邵小平等^[30-32]提出应用风积沙似膏体充填条带置换开采技术,计算出条带工作面合理的采宽及留宽,大幅提高煤炭采出率。李永亮等^[33-37]研发并形成完善的连采连充式胶结充填采煤成套技术,通过现场试验结果,可有效控制岩层移动、高效置换遗留煤炭资源。综上所述,尽管相关学者在遗留煤柱安全回收与煤基固废充填开采领域取得了诸多研究成果,但针对短壁胶结充填开采房式遗留煤柱方面研究甚少。因此,亟需对短壁胶结充填采煤法回收遗留煤柱及采场结构演化及稳定性展开进一步的研究。

首先,笔者以陕北地区板定梁煤矿为工程背景,基于极限强度理论与从属面积法确立煤柱可回收性判据;其次,研究了自然垮落法管理顶板回收遗留煤柱过程中采场的应力分布、塑性区发育情况及顶板

破断分析,创新性地提出了“时序协同-煤柱置换”的短壁充填开采工艺;再次,根据煤柱回收后采场结构演化形态,建立短壁胶结充填采煤力学模型,推导求解出确保直接顶不发生破断的临界充填体强度,并对计算数据进行曲线拟合;最终,开展胶结充填材料力学特性试验,系统分析充填体力学特性,并结合实际矿井短壁胶结充填采煤工作面进行工程设计,提出充填效果控制措施。研究成果对提高煤炭采出率、矿区生态环境保护及固体废弃物处理具有重要借鉴意义。

1 工程概况及房式开采遗留煤柱回收安全应力分析

1.1 工程概况

板定梁煤矿地处陕北黄土高原北端榆林市大柳塔镇,位于毛乌素沙漠东南缘,地貌单元属黄土梁峁沟壑区。该井田面积 1.41 km²,可采储量 492 万 t,主采 5⁻² 煤,待回收试验工作面煤层平均埋深 103.48 m,平均厚度 4 m,平均倾角为 1°,每年产生矸石约 1.3 万 t。在房式开采期间,采出率仅为 53.5%,遗留了大约 228 万 t 的优质煤炭资源。待回收试验工作面长约 809 m,宽约 476 m,留设煤柱尺寸为 8 m×8 m,煤柱呈等间距平行分布,煤房宽 7 m,为提高资源利用率,延长矿井服务年限,对该区域遗留煤柱进行回收。通过钻孔获取岩样,并利用物理力学试验,得到各煤岩体的物理力学参数见表 1。

1.2 房式开采遗留煤柱回收安全应力核算

受房式采煤法影响,煤柱的形态会发生显著变化,进而导致其内部应力重新分布。遗留煤柱作为支撑结构,承担上覆岩层的荷载。因此,为了准确计算出煤柱所承受的荷载,采用从属面积法对其计算分析^[38]。计算式为

$$\sigma = \frac{\gamma H(w+v)^2}{w^2} \tag{1}$$

其中,σ 为煤柱承受的荷载,MPa;γ 为覆岩容重,kg/m³;H 为煤层埋深,m;w 为煤柱宽度,m;v 为煤房宽度,m。将相关数据代入 Obert-Duvall、Bieniawski-Hairton、Holland 及 Salamon-Munro 4 种煤柱强度理论公式及从属面积法公式,计算得到遗留煤柱的极限强度及煤柱承受载荷。具体计算结果见表 2。

极限强度理论认为:如果作用载荷达到煤柱的极限强度时,煤柱的承载能力降低到 0,煤柱就会被破坏。计算式为

表 1 各个岩层物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of rock strata

岩层	厚度/ m	密度ρ/ (kg·m ⁻³)	抗拉 强度 σ _t /MPa	抗压 强度 σ _c /MPa	弹性 模量 E/GPa	内摩 擦角 φ/(°)	黏聚力 c/MPa	泊松 比μ
黄土	23.1	1.8	0.6	3.8	0.79	15	0.8	0.32
砂质泥岩	3.8	2.3	1.4	24.6	10.1	19	1.9	0.24
粉砂岩	20.3	2.8	7.9	44.1	29.0	39	1.5	0.33
砂质泥岩	3.5	2.4	1.2	22.3	9.7	18	1.7	0.25
粉砂岩	5.3	2.6	6.3	42.1	25.0	28	1.4	0.29
细砂岩	3.7	2.3	6.7	37.2	22.1	25	1.3	0.31
中粒砂岩	5.8	2.4	6.2	31.2	26.1	26	1.5	0.28
细砂岩	6.7	2.6	6.4	35.8	22.2	24	1.3	0.30
砂质泥岩	8.4	2.5	1.3	25.1	9.8	19	1.8	0.22
细砂岩	3.9	2.4	6.9	34.5	22.9	27	1.4	0.26
中粒砂岩	5.2	2.7	6.8	34.1	26.4	28	1.6	0.25
细砂岩	4.2	2.5	6.6	36.7	22.6	27	1.2	0.28
粉砂岩	4.5	2.6	7.8	44.6	26.6	28	1.7	0.31
细砂岩	1.7	2.6	6.1	37.6	23.2	26	1.5	0.29
粉砂岩	4.6	2.7	5.7	43.1	28.8	22.1	1.4	0.28
煤层	4.0	1.4	2.5	22.6	14.1	18.1	1.2	0.33
粉砂岩	6.2	2.6	5.3	43.6	24.5	29.9	1.5	0.25
中粒砂岩	6.8	2.5	6.5	32.3	26.2	27	1.6	0.29

表 2 房式开采遗留煤柱极限强度公式
Table 2 Ultimate strength formula of residual coal pillars in room-and-pillar mining

相关理论	房式开采遗留煤柱强度公式	煤柱承受 载荷/MPa	极限强度/ MPa
Obert-Duvall	$\sigma_p = \sigma_c \left(0.778 + 0.222 \frac{w}{h} \right)$		27.62
Bieniawski-Hairton	$\sigma_p = \sigma_c \left(0.64 + 0.36 \frac{w}{h} \right)^n$		30.73
Holland	$\sigma_p = \sigma_c \sqrt{\frac{w}{h}}$	8.79	31.96
Salamon-Munro	$\sigma_p = \sigma_c \frac{w^{0.46}}{h^{0.66}}$		23.56

注:w 为遗留煤柱宽度;h 为采高;n 为遗留煤柱的形态因子;σ_c 为煤柱的单轴抗压强度;当 $\frac{w}{h} < 5, n = 1$ 。

$$\sigma F \leq \sigma_p \tag{2}$$

式中:σ 为垂直作用于煤柱上的荷载,MPa;F 为安全系数;σ_p 为煤柱的极限强度,MPa。

2 自然垮落法管理顶板回收房式遗留煤柱破坏失稳机理分析

根据第一节应力核算结果,遗留煤柱具备安全回收的条件。因此,笔者将基于自然垮落法管理顶板,模拟回收遗留煤柱的全过程,并结合煤柱的安全

应力值, 深入分析煤柱群的应力分布、塑性区演化过程及顶板破断状况, 通过该分析, 为后续研究提供理论支持和实践指导。

2.1 自然垮落法管理顶板回收遗留煤柱数值模型的建立

为了研究自然垮落法管理顶板回收房式遗留煤柱稳定性状况, 以板定梁煤矿遗留煤柱工作面为研究对象建立数值模型。模型整体尺寸为 $272\text{ m} \times 212\text{ m} \times 95\text{ m}$, 模拟遗留煤柱的尺寸为 $8\text{ m} \times 8\text{ m} \times 4\text{ m}$, 煤房的尺寸为 $7\text{ m} \times 7\text{ m} \times 4\text{ m}$, 为简化模型, 将模型之上的泥岩、黄土等效为垂向应力施加在模型上表面, 等效应力约为 0.675 MPa 。模型两侧边界及模型下部边界均固定, 模型共划分为 $2\,496\,958$ 个单元, 包含 $430\,966$ 个节点。通过对自然垮落法管理顶板逐列回收煤柱的过程进行模拟研究, 分析采场煤柱的应力分布规律及塑性区扩展特性。自然垮落法管理顶板回收遗留煤柱计算模型如图 1 所示。

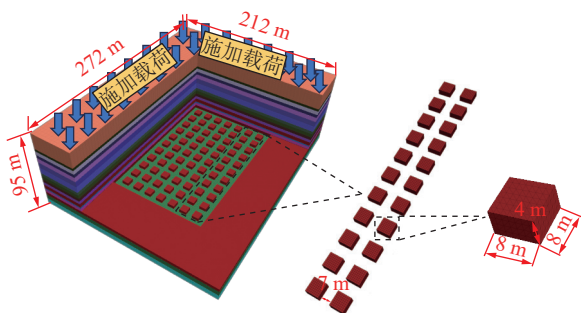


图 1 自然垮落法管理顶板回收遗留煤柱计算模型

Fig.1 Computational model for residual coal pillars recovery using controlled natural caving roof management

2.2 房式遗留煤柱回收过程中煤柱群稳定性分析

自然垮落法管理顶板回收煤柱过程中采场三维应力分布如图 2 所示。由图 2 可知, 第 1 列煤柱回收后, 邻近煤柱的应力峰值为 9.6 MPa , 未超过煤柱的安全应力值, 随着遗留煤柱回采工作继续进行, 完成第 2 列煤柱与第 3 列煤柱的回收后, 采场应力明显高于第 1 列煤柱回采后的应力, 邻近煤柱的应力峰值分别达到了 15.3 MPa 和 15.5 MPa , 超过了煤柱的安全应力值 11.78 MPa 。研究表明, 沿着采场推进方向, 待回收煤柱内部的应力表现出逐渐递减的趋势, 形成了明显的应力梯度, 此外, 随着推进距离的增加, 采动影响产生的应力集中效应逐渐显著, 不仅邻近采空区的煤柱内部应力值不断增加, 保护煤柱的支承压力也随之逐步增大, 严重威胁回采过程中煤柱的稳定性。

图 3 中展示的是自然垮落法管理顶板回收遗留煤柱回采 1 列、2 列、3 列的顶板应力曲线。通过分析不同回采列数下顶板应力的变化, 发现随着回采列数的增加, 顶板应力逐渐增加。回采至第 1 列时, 最大应力为 5.6 MPa , 表明在这一情况下由于工作面推进初期顶板悬露面积较小, 应力未显著集中, 顶板没有发生破断。而回采至第 2 列时, 顶板的最大应力达到 6.57 MPa , 此时, 顶板悬露范围扩大, 应力逐渐累积, 直接顶顶板局部超过抗拉强度, 进而发生破断。特别是回采至第 3 列时, 顶板应力达到了顶峰, 达到 10.3 MPa , 远远超过了直接顶的抗拉强度, 采场的悬顶面积不断扩大, 顶板发生大面积破断, 对采场的稳定性产生了极大的安全隐患。

由图 4 展示了自然垮落法管理顶板回收遗留煤柱过程中塑性区的发育情况。由图 4 可知, 第 1 列煤柱回收完毕后, 煤柱的塑性区尚处于初期阶段, 塑性破坏深度均控制在 3 m 以内, 破坏范围约为 38% , 尽管局部出现了轻微的塑性变形, 整体煤柱仍保持较为稳定的状态; 第 2 列回采完毕后, 煤柱的塑性区明显扩展, 特别是邻近采空区的煤柱上, 塑性区的发育更加显著, 部分区域的煤柱已进入明显的塑性破坏状态, 破坏范围增至 54% ; 当第 3 列回采完毕后, 煤柱的塑性区进一步扩大, 多个区域出现了明显的塑性破坏, 破坏范围上升至 69% 。随着推进距离的增加, 待回收煤柱的塑性破坏程度逐渐加剧, 破坏范围不断扩展, 保护煤柱也出现不同程度的破坏, 削弱了煤柱的稳定性, 进而可能引发“多米诺”链式失稳效应。自然垮落法管理顶板回收遗留煤柱破坏程度见表 3。

由自然垮落法管理顶板回收房式遗留煤柱采场应力与塑性区分布可以得到: 自然垮落法管理顶板回收遗留煤柱过程中, 煤柱外侧受到顶板侧向剪切力的剥削与侵蚀, 导致其内部的弹性核区面积不断缩减, 外侧的承载能力随之减弱, 应力向遗留煤柱更深处转移, 从而发生塑性屈服发生破坏。随着不充分采动向充分采动发展, 由于采动产生的应力不断叠加, 最终会达到煤柱的最大安全应力峰值, 进而造成邻近采场遗留煤柱的大幅度失稳破坏。如果某一遗留煤柱产生失稳破坏, 其承受的采场叠加应力会立即转移到附近遗留煤柱, 继续产生失稳破坏, 以此发展下去, 就会导致更多遗留煤柱发生失稳破坏, 这种“由点及面”触发一连串反应的破坏现象就像“多米诺”效应, 严重影响煤柱的稳定性和矿井的安全。

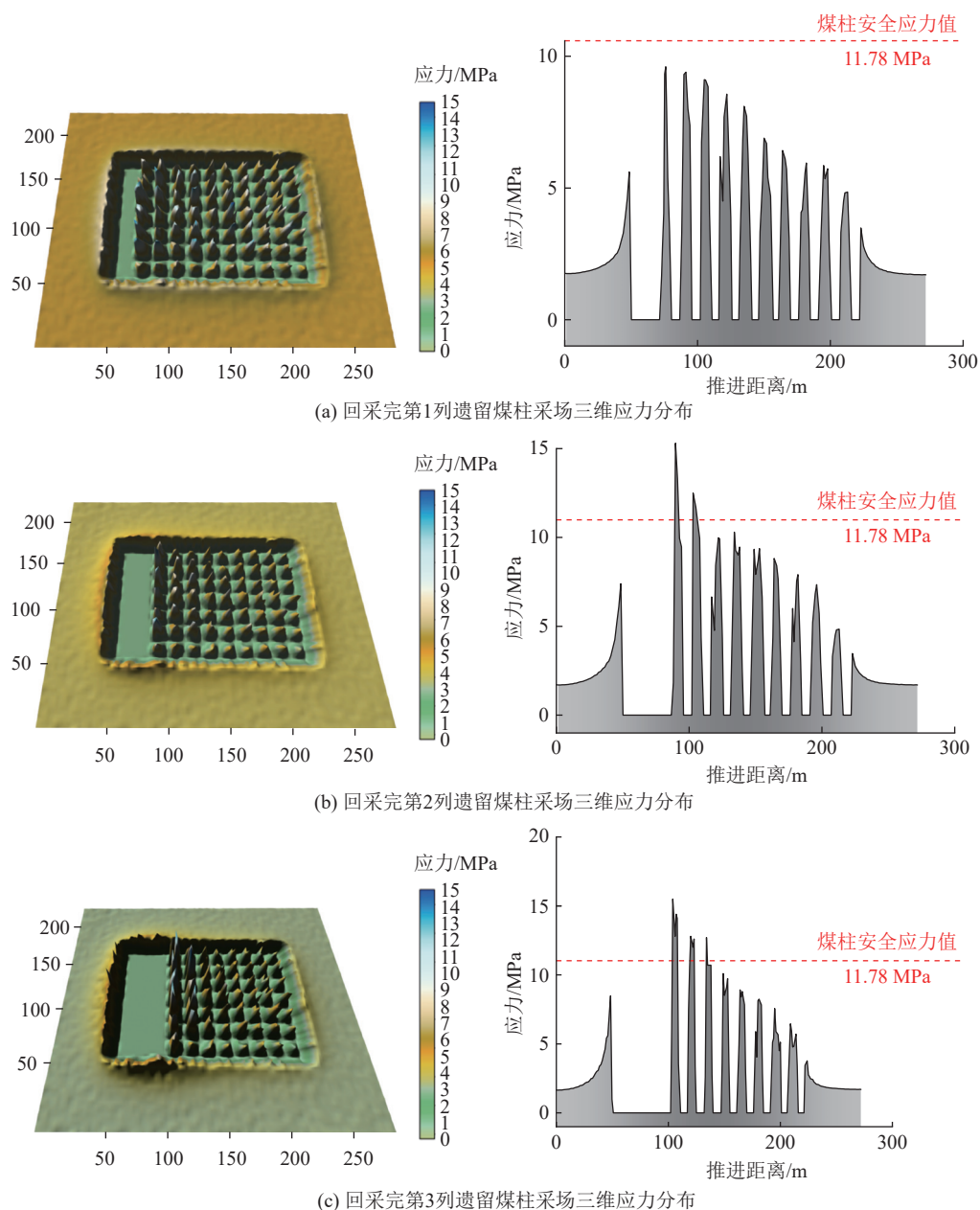


图2 自然垮落法管理顶板开采遗留煤柱采场三维应力分布

Fig.2 3D stress distribution map of Residual coal pillars in the stope under controlled natural caving roof management

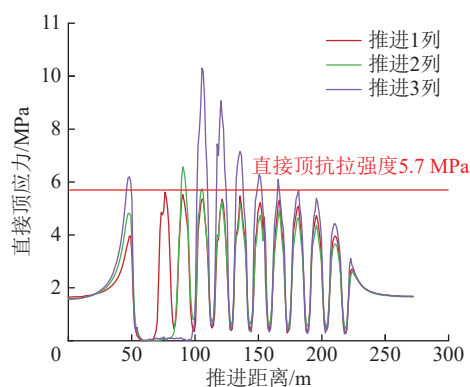


图3 自然垮落法管理顶板回收遗留煤柱顶板应力曲线

Fig.3 Roof stress curve under natural caving method for recovering residual coal pillars

3 短壁胶结充填采煤回收遗留煤柱方法

自然垮落法管理顶板回收遗留煤柱可能对采场稳定性构成严重威胁,存在引发“多米诺”链式失稳效应的风险^[39]。鉴于此,笔者提出了短壁胶结充填采煤回收遗留煤柱的方案。实现遗留煤柱的安全回收,同时有效提高采场的整体稳定性,为固废的有效处置提供了解决方案,推动绿色矿业的发展。

3.1 短壁胶结充填采煤技术原理

短壁胶结充填采煤方法主要针对于回收房式采煤法遗留的煤柱。该技术采用煤矸石、粉煤灰、水泥和自来水作为充填材料,结合地质资料特征选择合

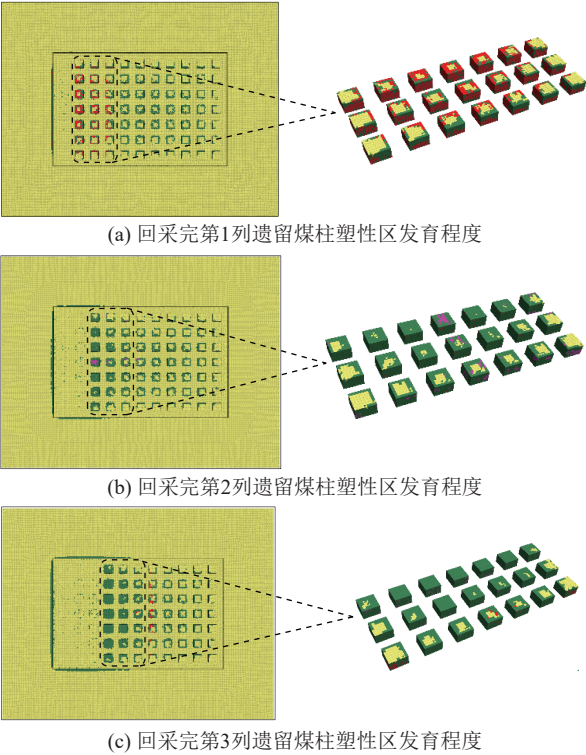


图 4 自然垮落法管理顶板回收遗留煤柱塑性区发育情况
Fig.4 Development of plastic zones in residual coal pillars during roof management and recovery via natural caving method

适配比,对遗留煤柱的煤房进行充填,待其具备承载能力后,随后逐列回收遗留煤柱,从而保证了充填与采煤工艺的连续性与时空独立性,实现了遗留煤柱资源的安全回收。短壁胶结充填采煤方法具有显著的经济、环境与安全效益,不仅扩大了矿井可采储量,延长了矿井服务年限,同时,通过“先充后采”提高回收煤柱时采场结构的稳定性,能够有效避免采空区

表 3 自然垮落法管理顶板回收遗留煤柱破坏程度
Table 3 Assessment of damage extent in residual coal pillars during roof management and recovery via natural caving method

序号	回采位置	安全应力/MPa	应力峰值/MPa	塑性区破坏范围/%
1	第1列		9.6	38
2	第2列	11.78	15.3	54
3	第3列		15.5	69

塌陷和地表沉降,减少矿山开采对周边生态环境的破坏,从而实现煤炭资源回收、地表沉降保护和固体废物处理的有效兼顾。

3.2 工作面布置及关键设备

短壁胶结充填采煤工作面在布置设计上,着重于资源的安全回收和采空区的稳定性。工作面沿前期房式采煤法的巷道布局,运输巷道与主运输大巷联通,确保回收的煤炭能够有效的运输至地面。回采工作面包含 11 行 7 列遗留煤柱,采用“先充后采”的回收工艺,在充填工作面煤房与煤柱之间的关键位置设置充填挡板,形成封闭的充填空间,有效防止充填材料外泄,确保充填作业精准高效,煤矸石、粉煤灰、水泥等材料配置而成的充填体经充填管路输送至工作面充填区域,待其凝固具有强度后,进行回采工作,回采时连续采煤机、转载机、可伸缩带式输送机及行走液压支架等设备配合开展作业,采用后退式开采方式逐列推进,单个煤柱按照既定次序回收,实现煤柱的安全回收,同时,在回采过程中,下一个工作面将进行充填作业,从而实现充填与采煤作业协调进行,为矿井的稳定运营提供了有力保障。短壁胶结充填采煤工作面布置如图 5 所示。

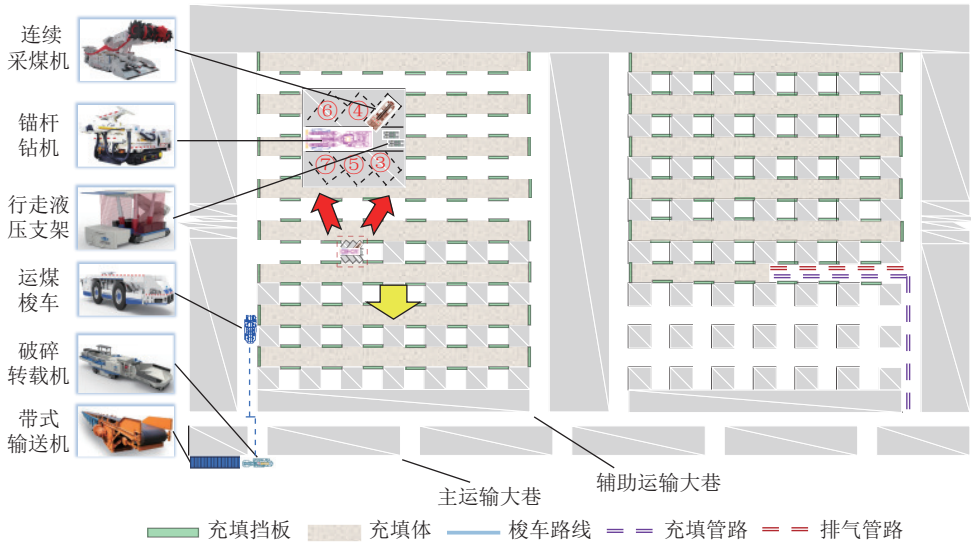


图 5 短壁胶结充填采煤工作面布置
Fig.5 Layout of shortwall cemented backfill mining face

3.3 短壁胶结充填采煤工艺

短壁胶结充填回收遗留煤柱工艺流程包括充填工艺与采煤工艺。

其中充填工艺为：充填前先确定充填区域，并在煤房与煤柱之间关键位置搭设充填挡墙，在充填区域顶板入口处布置长、短充填管道，并分别配备长、短排气管道，分别位于待充填支巷入口的 2/3 和 1/3 位置。充填料浆搅拌均匀后，通过管路运输的形式，从地面经过回风井、井下管路和采场管路运送至充填区域。整个充填过程分 3 次完成，充填高度分别为 1.5、1.5、1.0 m，每次充填前观察充填浆料凝结状况，间隔 2~3 d 再次充填，通过观察导气管是否有浆体溢出判断充填体是否达到顶板，待其达到终凝时间后，拆除靠近巷道两侧的挡板，充填体与煤柱内的充填挡板随着煤柱回收逐步拆除。充填区域布置如图 6 所示。

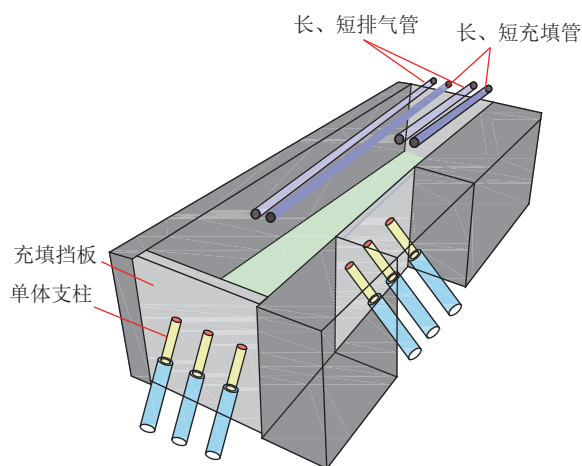


图 6 充填区域布置示意

Fig.6 Schematic diagram of backfill zone arrangement

其中采煤工艺为：待充填体凝结稳定后，在工作面端头布置 2 台端头液压支架，对端部顶板进行强化支护。遗留煤柱回采过程中，连续采煤机自上而下后退式对煤柱逐列进行回收，同时配备 2 台行走液压支架与连续采煤机协同工作，连续采煤机割煤后，锚杆钻车及时打钻支护。回收单个遗留煤柱时，连续采煤机在煤柱中央开掘 1 条支巷，宽度在 2.5~3.0 m，随后连续采煤机以“左右交替”的方式逐步回采，形成多个采硐，每个采硐的长为 2.5~3.0 m、宽为 1.5~2.0 m，2 台行走液压支架平行布置于采硐前方一定距离处，随连续采煤机移动，直至完成整个煤柱的回采。重复上述操作工序，直至完成整个采场的煤柱回收任务。单个煤柱采煤工艺如图 7

所示。

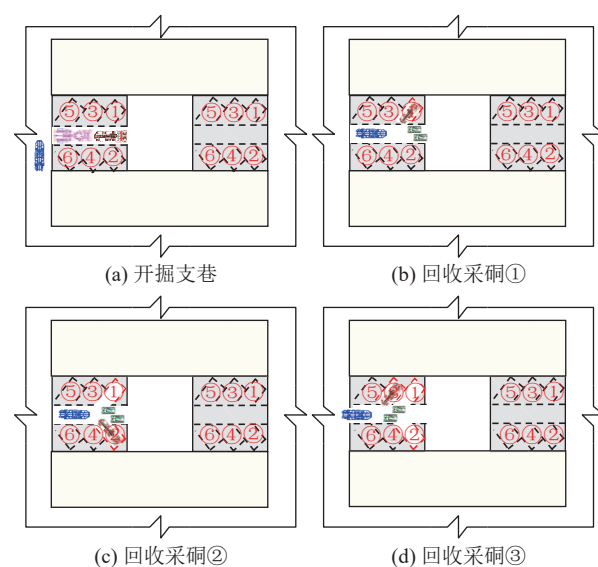


图 7 单个煤柱回采工艺示意

Fig.7 Schematic diagram of individual coal pillar recovery process

4 短壁胶结充填采煤回收遗留煤柱临界充填体强度分析

短壁胶结充填回收遗留煤柱后，采场覆岩结构将经历复杂的演化过程。针对回采后的采场覆岩特征，笔者提出并构建了短壁胶结充填采煤回收遗留煤柱的力学模型。通过该模型的分析，确定充填体强度参数与直接顶抗拉强度的动态匹配关系，确保煤柱的安全回收，实现“覆岩运动可控-充填体稳定”双重控制目标。

4.1 短壁胶结充填采煤回收遗留煤柱力学模型建立

针对短壁胶结充填采煤后采场覆岩结构演化特征和采煤工艺特殊性，为了保证作业空间的安全可靠，以直接顶为研究对象，将其岩梁上方载荷简化为均布载荷 q ，忽略侧向构造应力影响，下部充填体与煤柱简化为 Winkler 弹性地基。采场为对称结构，为了简化计算，选取模型的一半，以采场中部遗留煤柱采空区为模型的对称点，坐标原点 O 位于充填体与遗留煤柱采空区交界处，以位移函数为 y 轴，建立短壁胶结充填采煤回收遗留煤柱的力学模型。如图 8 所示， a 为边界保护煤柱长度； b 为充填体的长度； c 为采空区的长度； k_a 为煤体的弹性地基系数； k_b 为充填体的弹性地基系数。

4.2 顶板弯曲变形求解

基于弹性地基梁理论，将保护煤柱看做固支端，因此，整个力学模型的挠曲线微分方程为

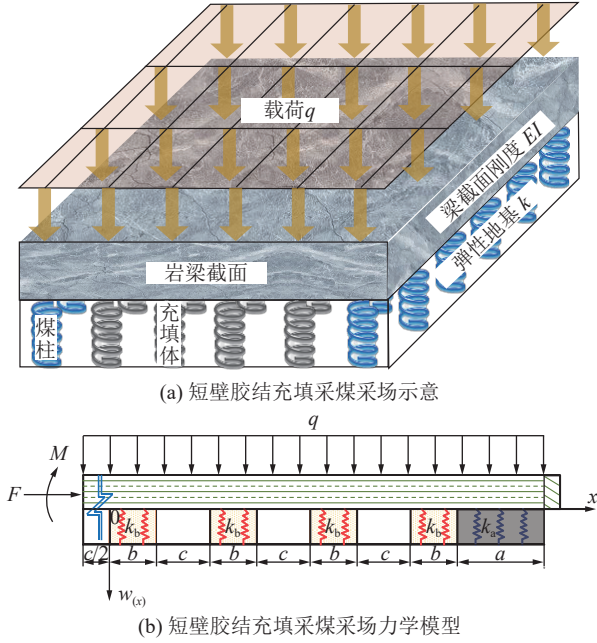


图 8 短壁胶结充填采煤回收遗留煤柱力学模型

Fig.8 Mechanical model of abandoned coal pillar recovery via shortwall cemented backfill mining

$$\begin{cases}
 \omega_{1(x)} = \frac{qx^4}{24EI} + \frac{A_1x^3}{6} + \frac{B_1x^2}{2} + C_1x + D_1, & (0 < x \leq 0.5c) \\
 \omega_{2(x)} = e^{\beta x}(A_2\cos \beta x + B_2\sin \beta x) + e^{-\beta x}(C_2\cos \beta x + D_2\sin \beta x) + \frac{q}{k_b}, & (0.5c < x \leq b+0.5c) \\
 \omega_{3(x)} = \frac{qx^4}{24EI} + \frac{A_3x^3}{6} + \frac{B_3x^2}{2} + C_3x + D_3, & (b+0.5c < x \leq b+1.5c) \\
 \omega_{4(x)} = e^{\beta x}(A_4\cos \beta x + B_4\sin \beta x) + e^{-\beta x}(C_4\cos \beta x + D_4\sin \beta x) + \frac{q}{k_b}, & (b+1.5c < x \leq 2b+1.5c) \\
 \omega_{5(x)} = \frac{qx^4}{24EI} + \frac{A_5x^3}{6} + \frac{B_5x^2}{2} + C_5x + D_5, & (2b+1.5c < x \leq 2b+2.5c) \\
 \omega_{6(x)} = e^{\beta x}(A_6\cos \beta x + B_6\sin \beta x) + e^{-\beta x}(C_6\cos \beta x + D_6\sin \beta x) + \frac{q}{k_b}, & (2b+2.5c < x \leq 3b+2.5c) \\
 \omega_{7(x)} = \frac{qx^4}{24EI} + \frac{A_7x^3}{6} + \frac{B_7x^2}{2} + C_7x + D_7, & (3b+2.5c < x \leq 3b+3.5c) \\
 \omega_{8(x)} = e^{\beta x}(A_8\cos \beta x + B_8\sin \beta x) + e^{-\beta x}(C_8\cos \beta x + D_8\sin \beta x) + \frac{q}{k_b}, & (3b+3.5c < x \leq 4b+3.5c) \\
 \omega_{9(x)} = e^{\alpha x}(A_9\cos \alpha x + B_9\sin \alpha x) + e^{-\alpha x}(C_9\cos \alpha x + D_9\sin \alpha x) + \frac{q}{k_a}, & (4b+3.5c < x \leq a+4b+3.5c)
 \end{cases} \quad (4)$$

根据弹性力学理论可知,弹性地基系数与弹性模量、煤岩层之间关系为

$$\begin{cases}
 k_a = \frac{E_a}{h_a} \\
 k_b = \frac{E_b}{h_b}
 \end{cases} \quad (5)$$

式中: k_a 为煤层弹性地基系数, N/m^3 ; E_a 为煤层弹性模量, GPa ; h_a 为采高, m ; k_b 为充填体弹性地基系数, N/m^3 ; E_b 为充填体弹性模量, GPa ; h_b 为充填体高度, m 。

连续性条件: 直接顶在保护煤柱、采空区和充填体的连接点处挠度 $\omega_{i(x)}$ 、弯矩 $M_{i(x)}$ 、转角 $\theta_{i(x)}$ 及剪力 $Q_{i(x)}$ 相等, 即:

$$\begin{cases}
 q = \frac{d^4\omega_{(x)}}{dx^4}EI, & (0 < x \leq 0.5c) \\
 q = k_b\omega_{(x)} + \frac{d^4\omega_{(x)}}{dx^4}EI, & (0.5c < x \leq b+0.5c) \\
 q = \frac{d^4\omega_{(x)}}{dx^4}EI, & (b+0.5c < x \leq b+1.5c) \\
 q = k_b\omega_{(x)} + \frac{d^4\omega_{(x)}}{dx^4}EI, & (b+1.5c < x \leq 2b+1.5c) \\
 q = \frac{d^4\omega_{(x)}}{dx^4}EI, & (2b+1.5c < x \leq 2b+2.5c) \\
 q = k_b\omega_{(x)} + \frac{d^4\omega_{(x)}}{dx^4}EI, & (2b+2.5c < x \leq 3b+2.5c) \\
 q = \frac{d^4\omega_{(x)}}{dx^4}EI, & (3b+2.5c < x \leq 3b+3.5c) \\
 q = k_b\omega_{(x)} + \frac{d^4\omega_{(x)}}{dx^4}EI, & (3b+3.5c < x \leq 4b+3.5c) \\
 q = k_a\omega_{(x)} + \frac{d^4\omega_{(x)}}{dx^4}EI, & (4b+3.5c < x \leq a+4b+3.5c)
 \end{cases} \quad (3)$$

式中: EI 为直接顶的抗弯刚度, $\text{N} \cdot \text{m}^2$; q 为上覆岩层均布载荷, MPa 。

取特征系数: $\alpha = \sqrt[4]{\frac{k_a}{4EI}}$, $\beta = \sqrt[4]{\frac{k_b}{4EI}}$, 求解得到该方程通解为

$$\begin{cases}
 \omega_{1(0.5c)} = \omega_{2(0.5c)} \\
 \theta_{1(0.5c)} = \theta_{2(0.5c)} \\
 M_{1(0.5c)} = M_{2(0.5c)} \\
 Q_{1(0.5c)} = Q_{2(0.5c)} \\
 \omega_{2(b+0.5c)} = \omega_{3(b+0.5c)} \\
 \theta_{2(b+0.5c)} = \theta_{3(b+0.5c)} \\
 M_{2(b+0.5c)} = M_{3(b+0.5c)} \\
 Q_{2(b+0.5c)} = Q_{3(b+0.5c)} \\
 \dots\dots \\
 \omega_{8(4b+3.5c)} = \omega_{9(4b+3.5c)} \\
 \theta_{8(4b+3.5c)} = \theta_{9(4b+3.5c)} \\
 M_{8(4b+3.5c)} = M_{9(4b+3.5c)} \\
 Q_{8(4b+3.5c)} = Q_{9(4b+3.5c)}
 \end{cases} \quad (6)$$

由于模型的结构和载荷对称,故岩梁挠度曲线和弯矩曲线对称分布,因此边界条件为

$$\begin{cases} \theta_{1(0)} = 0, & \omega_{9(a+4b+3.5c)} = 0 \\ Q_{1(0)} = 0, & M_{9(a+4b+3.5c)} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

岩层弯曲下沉方程 $\omega_{i(x)}$ 、弯矩方程 $M_{i(x)}$ 、转角方程 $\theta_{i(x)}$ 及剪力方程 $Q_{i(x)}$ 之间关系为

$$\begin{cases} \theta_{(x)} = \frac{d\omega_{(x)}}{dx} \\ M_{(x)} = -EI \frac{d^2\omega_{(x)}}{dx^2} \\ Q_{(x)} = -EI \frac{d^3\omega_{(x)}}{dx^3} \end{cases} \quad (8)$$

代入边界条件及连续性条件可求得待求参数 $A_1, B_1, C_1, D_1, A_2, B_2, C_2, \dots, A_9, B_9, C_9, D_9$,可求得岩层弯曲下沉方程 $\omega_{i(x)}$ 、弯矩方程 $M_{i(x)}$ 、转角方程 $\theta_{i(x)}$ 及剪力方程 $Q_{i(x)}$ 。

4.3 短壁胶结充填回收房式煤柱临界充填体强度计算

以板定梁煤矿短壁胶结充填采煤工作面为例,根据表1现场具体工程参数,对覆岩关键层位置进行判别,得到24.3 m粉砂岩为主关键层,直接顶厚度为4.6 m,抗拉强度为6.1 MPa,煤层厚度平均为4 m,煤层平均埋深为103.48 m。设计计算充填体强度为5、6、7、8、9、10 MPa时直接顶最大弯矩。以充填体强度为8 MPa为例,将相关参数带入短壁胶结充填采煤采场力学模型,各参数计算结果如下:

$$\begin{cases} A_1 = 0.000\ 022 \\ A_2 = 0.001\ 6 \\ A_3 = -0.000\ 064 \\ A_4 = 0.000\ 16 \\ A_5 = 5.0 \times 10^{-12} \end{cases} \begin{cases} B_1 = -0.000\ 017 \\ B_2 = 0.000\ 67 \\ B_3 = 0.000\ 27 \\ B_4 = -0.000\ 11 \\ B_5 = 1.8 \times 10^{-11} \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_1 = -0.000\ 18 \\ C_2 = 0.004\ 8 \\ C_3 = -0.000\ 74 \\ C_4 = -0.019 \\ C_5 = 0.006\ 0 \end{cases} \begin{cases} D_1 = 0.011 \\ D_2 = 0.001\ 2 \\ D_3 = 0.012 \\ D_4 = 0.023 \\ D_5 = -0.27 \end{cases}$$

根据矩形截面梁力学理论,可求得直接顶最大拉应力:

$$\sigma_{i(x)\max} = \left| \frac{6M_{i(x)\max}}{h^2} \right| \quad (9)$$

式中: $\sigma_{i(x)\max}$ 为直接顶的最大应力,MPa; $M_{i(x)\max}$ 为直接顶的最大弯矩,N/m。

假设直接顶岩梁的抗拉强度为 $[\sigma]$,取安全系数 $F_1=1.1$ 直接顶发生破断的条件为

$$\sigma_{i(x)\max} \leq \frac{[\sigma]}{F_1} \quad (10)$$

将上述参数带入直接顶的弯矩公式中,得到充

填体强度8 MPa时,直接顶最大拉应力为6.23 MPa,同理,当充填体强度分别为5、6、7、9、10 MPa,对应直接顶最大拉应力为9.07、8.47、7.13、5.83、4.82 MPa,通过非线性拟合得到直接顶最大拉应力与充填体强度的关系,如图9所示。发现充填体强度与顶板抗拉强度呈显著非线性负相关如式(11)所示,其中,拟合优度 $R^2=0.967\ 68$ 。

$$y = 40.445\ 05x^{-0.904\ 63} \quad (11)$$

式中: y 为直接顶拉应力,MPa; x 为充填体强度,MPa。

将直接顶抗拉强度代入式(10)得到直接顶安全许用抗拉强度为5.55 MPa,将其带入式(9)反演计算得到安全临界充填体强度为8.97 MPa,可以确保短壁胶结充填采煤技术回收遗留煤柱直接顶不垮落,确保回收安全可靠。

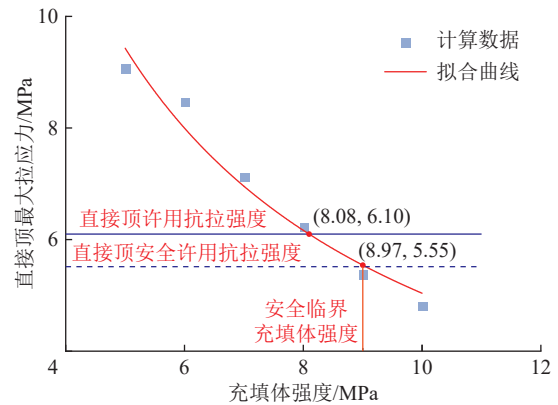


图9 直接顶拉应力与充填体强度拟合曲线图

Fig.9 Fitting curve between immediate roof tensile stress and backfill material strength

5 房式开采遗留煤柱胶结充填体力学特性分析

充填体作为煤柱置换开采的核心承载介质,其强度阈值对采场稳定性和煤柱回收的安全性至关重要。因此,笔者对充填体力学性能的系统分析,揭示其不同工作条件下的行为规律,为形成基于性能导向的充填材料优化设计准则提供理论依据。

5.1 试验试样制备

笔者以板定梁煤矿房式开采遗留煤柱胶结充填体为对象,选用煤矸石、粉煤灰、PO42.5水泥及自来水为原料,按表4粒径级配与表5胶固比(粉煤灰/矸石)进行配比设计。试样制备采用质量浓度80%的标准配浆工艺,浇筑成70.7 mm的标准正方体试件,脱模后置于标准养护箱(温度 20 ± 2 °C,湿度 $\geq 90\%$)

养护 28 d。设置 9 组试验, 每组制备 3 个试样, 以均值作为最终数据以消除偶然误差, 具体制备流程如图 10 所示。

表 4 不同粒径级配方案矸石体积占比情况

Table 4 Volumetric proportions of coal gangue under different particle size distribution schemes

级配方案	不同粒径分布矸石体积占比/%			
	0 ~ 5 mm	5 ~ 10 mm	10 ~ 15 mm	15 ~ 20 mm
A(细粒径)	70	30	—	—
B(中粒径)	—	50	50	—
C(粗粒径)	—	—	30	70

表 5 不同级配方案粉煤灰、水泥及矸石含量占比情况

Table 5 Content proportions of fly ash, cement, and coal gangue in different gradation designs

编号	级配方案	矸石含量/%	粉煤灰 : 水泥
1	A(细粒径)	25	2.0 : 1
2		30	3.0 : 1
3		35	4.0 : 1
4	B(中粒径)	25	2.0 : 1
5		30	3.0 : 1
6		35	4.0 : 1
7	C(粗粒径)	25	2.0 : 1
8		30	3.0 : 1
9		35	4.0 : 1

填体的力学响应特性, 如图 11 所示, 结果表明: 细粒径为主的充填体在矸石含量为 30% 时, 其最大抗压强度为 8.9 MPa, 对应垂向应变为 0.205, 弹性模量为 0.88 GPa, 该试样的裂纹分布较为均匀, 裂纹主要沿斜向扩展。中粒径为主的胶结充填体在相同矸石含量下, 其最大抗压强度为 9.4 MPa, 垂向应变为 0.187, 弹性模量为 0.99 GPa。此类型的试样表现出典型的压剪破坏模式, 裂纹沿颗粒边界扩展, 并贯穿试样的顶部和底部。相比细粒径和中粒径充填体, 粗粒径为主的胶结充填体在抗压性能上明显下降, 当矸石含量为 25% 时, 其峰值强度仅为 4.9 MPa, 垂向应变为 0.036, 弹性模量为 0.62 GPa。该试样主要表现为张拉劈裂破坏, 试样破坏后结构松散且裂纹较宽。

如图 12 所示, 通过 Gemini SEM 对破坏后的充填体试样观测, 细粒径充填体骨料松散, 水化反应不充分, 孔隙率高且弱边界显著; 中粒径充填体中, 小颗粒填充大颗粒孔隙, 胶凝材料紧密包裹矸石形成致密结构, 强度显著提升; 粗粒径充填体因颗粒间隙大, 加载时错动引发应力集中, 局部损伤明显。结果表明, 矸石粒径增大导致充填体结构稳定性降低, 力学响应呈现非单一趋势, 粒径与孔隙协同作用主导性能劣化。

综上所述, 根据 4.3 节的结果, 当充填体强度达到 8.97 MPa 时, 可以保证直接顶不发生垮落, 结合本章节研究结论, 在不考虑充填体尺寸的前提下, 选择抗压强度为 9.4 MPa, 煤矸石 : 粉煤灰 : 水泥 : 水质量比为 3 : 3 : 1 : 1 的中粒径为主的胶结充填体, 该配比下胶结充填体能够满足房式遗留煤柱回收后的充填材料强度要求, 确保工作面的稳定。

6 工程设计

基于陕北板定梁煤矿特殊地质赋存条件, 本章节系统设计并构建了短壁胶结充填煤柱回收工艺体系。对充填与回收工艺的关键环节及核心参数展开了系统性优化, 从材料选择、配比优化到施工工艺改进, 提出了一系列科学的技术措施, 以确保采煤过程的安全与高效。

6.1 短壁胶结充填开采遗留煤柱充填系统设计及关键参数优化

短壁胶结充填采煤回收遗留煤柱充填系统由地面制料系统、管路输送系统及配套辅助系统组成。地面制料系统包括矸石仓、粗破碎车间、细破碎车间、配料车间及制浆车间, 为了方便浆料输送至井下, 自

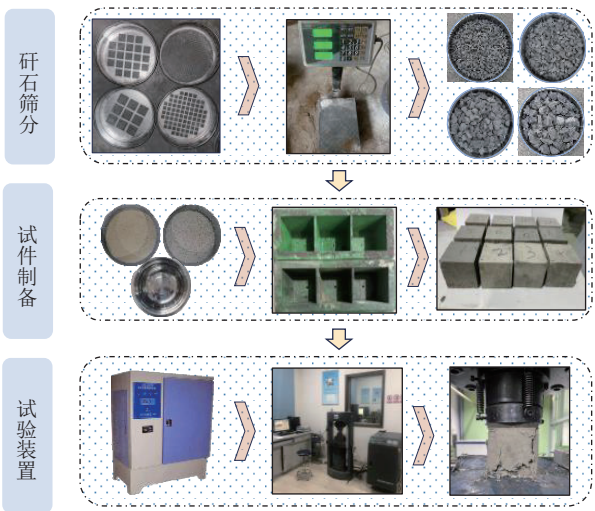


图 10 充填体试样制备与试验流程

Fig.10 Specimen preparation and experimental procedures for cemented backfill materials

5.2 不同粒径级配充填体单轴压缩力学特征分析

通过单轴抗压试验系统研究了不同粒径级配充

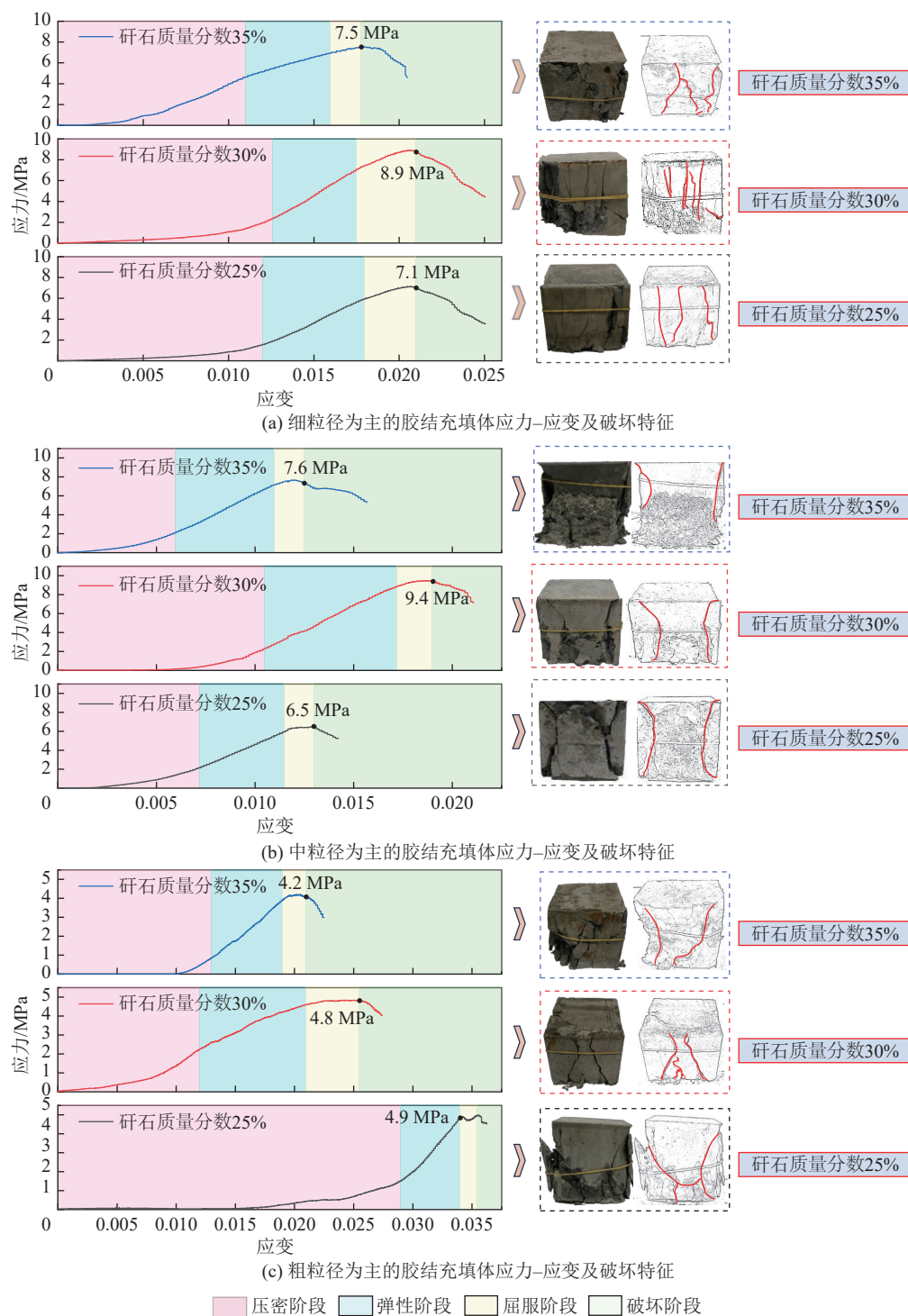


图 11 不同粒径级配胶结充填体应力-应变及破坏特征

Fig.11 Stress-strain behavior and failure characteristics of cemented backfill with different particle size gradations

西向东依次布置在工业广场南部。充填系统工业广场布置如图 13 所示。地面制料系统主要负责将原料加工成满足充填性能要求的混合材料。管路输送系统是将地面制备的充填体浆料通过回风井及输送管路将其送至充填工作面。配套辅助系统则为整个充填作业提供了全面的保障,涵盖供水、供电、除尘和实时控制关键功能。三大系统紧密衔接,形成了

功能完善、运转高效的充填体系,为短壁胶结充填采煤提供了坚实的技术保障。充填工艺流程如图 14 所示。

短壁胶结充填采煤工艺中,合理的设备选型与充填体配比对于充填系统的稳定性和经济性至关重要。根据试验工作面地质情况以及 4.3 节短壁胶结充填采煤临界充填体强度计算,为了保证充填采煤

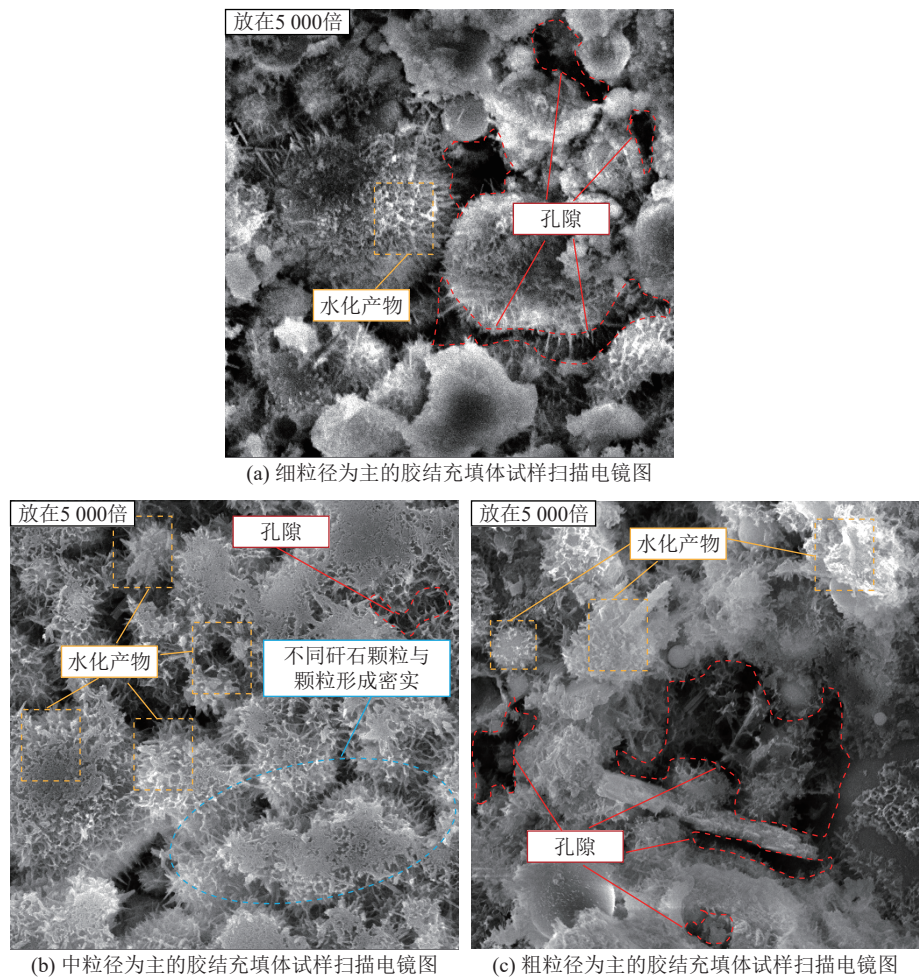


图 12 不同矸石级配胶结充填体微观特征

Fig.12 Microstructural characteristics of cemented backfill with varied gangue particle gradations

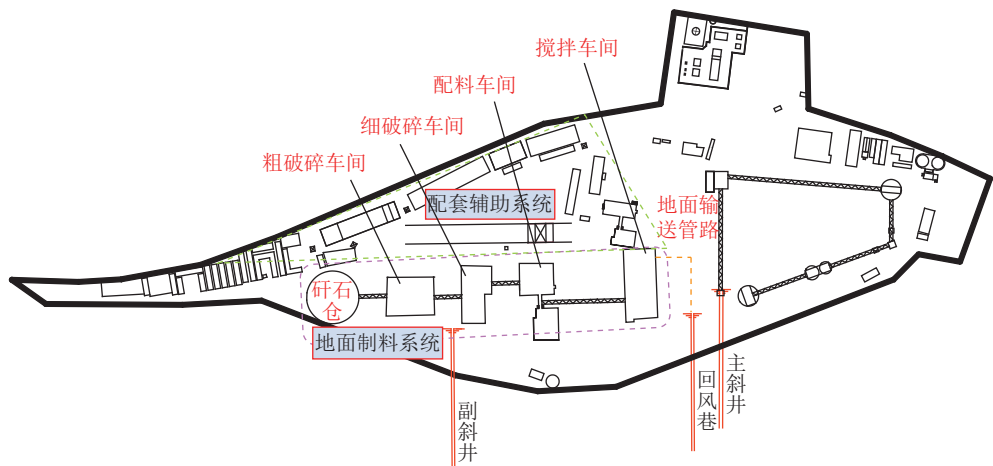


图 13 充填系统工业广场布置

Fig.13 Layout of backfill system in surface plant area

工作面在采煤过程中直接顶不发生破断,考虑一定的安全系数,胶结充填体强度不低于 8.97 MPa,为此,选择抗压强度为 9.4 MPa,煤矸石:粉煤灰:水泥:水质量比为 3:3:1:1 的中粒径为主的胶结充填体。与此同时,根据前文的研究,选择 JS3000 型双

轴搅拌机用于高效混合搅拌 P.O42.5 普通硅酸盐水泥、电厂粉煤灰及矸石骨料,具备 2 400 L 的出料容量和良好的搅拌均匀性;鄂式破碎机与对辊式破碎机共同完成粗料和细料的破碎加工,通过筛分确保充填骨料粒径为 5~15 mm;带式输送机负责将矸石

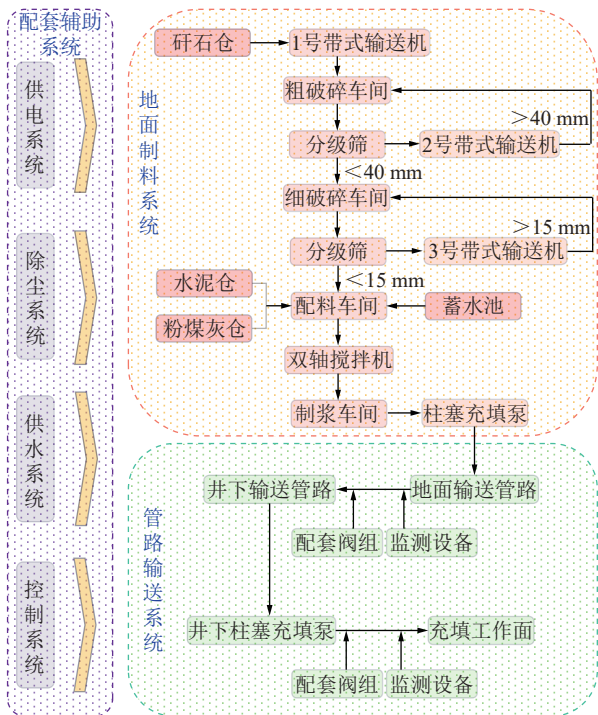


图 14 充填工艺流程

Fig.14 Backfill process flow diagram

运送至破碎车间, 输送能力高达 800 t/h; 高压柱塞泵则通过 12 ~ 25 m³/h 的流量和高达 25 MPa 的工作压

力将浆料注入井下充填区域, 确保浆体输送过程稳定可靠; 控制阀采用气动控制方式, 调节系统压力与流量, 防止输送过程中的堵塞和压力波动。这些设备相互配合, 保证短壁胶结充填系统运行稳定。各设备具体参数见表 6。

6.2 短壁胶结充填开采遗留煤柱采煤系统设计及关键参数优化

设计试验回采区域位于井田西南 201 工作面, 结合现场试验区域的地质情况以及短壁胶结充填采煤工艺, 工作面沿用前期房式采煤法的巷道布局, 运输巷道与主运输联通, 确保回收的煤炭能够有效地运输至地面。设计工作面包含 11 行 7 列煤柱, 煤柱尺寸为 8 m×8 m, 工作面按照“先充后采”的回收煤柱工艺, 充填后的工作面, 包含 11 列充填体, 尺寸为 98 m×7 m, 待充填体达到终凝时间 28 d 后, 对单个煤柱回收, 每个采硐约 3 m, 采硐与支巷①的夹角为 45°, 回收时连续采煤机采用斜切进刀的方式。试验工作面的具体布置情况, 运煤、运料的系统如图 15 所示。

运煤路线为: 201 工作面→运输平巷→盘区运输巷→主运输大巷→地面。

表 6 充填系统关键设备参数表
Table 6 Key equipment specifications for backfill system

设备名称	数量	型号	主要参数
双轴搅拌机	2	JS3000	出料容量: 2 400 L, 最大搅拌物料粒径: 120 mm
鄂式破碎机	2	PE-500×750	最大进料粒度: 425 mm, 出料粒度: 30 ~ 100 mm
对辊式破碎机	2	2PG-750×500	进料粒度: ≤40 mm, 出料粒度: 2 ~ 20 mm
带式输送机	1	B650	输送能力: 60 ~ 800 t/h, 输送速度: 0.5 ~ 1.25 m/s
高压柱塞泵	2	PZ-25	流量: 12 ~ 25 m ³ /h, 最大工作压力: 25 MPa
控制阀	2	Q640F	压力: 1.6 ~ 6.4 MPa, 控制方式: 气动控制

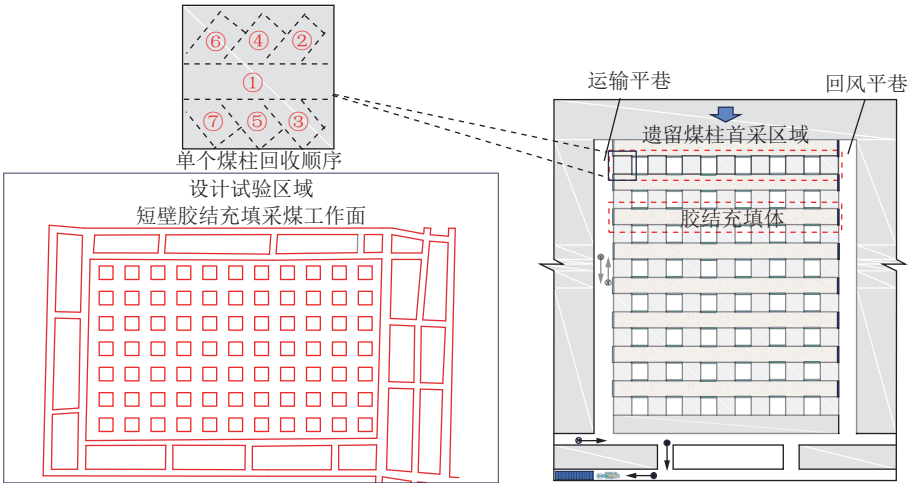


图 15 短壁胶结充填采煤回收遗留煤柱工作面布置

Fig.15 Face layout diagram for shortwall cemented backfill mining in abandoned coal pillar recovery

运料路线为：地面→辅助运输大巷→盘区运输巷→运输平巷→201 工作面。

在试验区域工作面回采过程中，为了提高工作效率并确保作业安全高效，结合短壁胶结充填采煤的工艺特点，对工作面所需的关键设备进行选取，设计采高为 4.0 m，选择 1 台型号为 Joy12CM12 的连续采煤机对遗留煤柱进行回收，保证采煤工作高效，为了提高回收过程中煤岩体的稳定性，选择 4 台支

护高度为 2.2 ~ 4.5 m 的 ZY12000/22/45 履带式液压支架及 ZQ1000A 型锚杆钻机共同对顶板进行加固支撑，结合连续采煤机生产能力，选择 2 辆运煤梭车、1 部胶带输送机及 1 台破碎转载机，以确保煤炭在工作面与输送系统间的高效衔接。以上设备形成了一套高效、安全、稳定的短壁胶结充填采煤装备系统，为回采遗留煤柱提供了有力的设备保障。各设备的具体参数见表 7。

表 7 工作面开采系统关键设备参数表
Table 7 Key Equipment Specifications for Coal Face Mining System

设备	数量	型号	主要参数
连续采煤机	1	Joy12 CM12	采高1.3 ~ 4.5 m，总功率850 kW，整机质量约85 t
履带式液压支架	4	ZY12000/22/45	支护高度2.2 ~ 4.5 m，支护力12 000 kN，履带速度1.2 km/h
锚杆钻机	1	ZQ1000A	钻孔深度30 m，钻孔直径42 ~ 76 mm
带式输送机	1	B650	输送能力400 t/h，输送速度2 m/s
破碎转载机	1	CCM600	处理能力250 t/h，进料口尺寸1 100 mm×800 mm
运煤梭车	2	ZD-16	装载能力16 t，工作速度0 ~ 8 km/h

6.3 充填效果控制措施

针对充填过程的关键环节及潜在影响因素，提出了充填效果控制措施，以全面提升充填作业的质量和可靠性，确保采煤工艺的安全高效运行。

1)设备维护：定期检查和维护充填管路，确保高压柱塞泵、管路减压阀和压力控制阀的正常运行，防止因管路堵塞或压力波动导致充填质量下降；

2)排气管道：为了保证充填接顶效果，将充填管路布置在充填空间最高处，并从最高处引出一根排气管用来排放胶结充填体排放的气体；

3)性能控制：通过添加适量的膨胀剂改善浆体的流动性、泌水性和充填密实性，避免充填体在运输和填充过程中出现离析或沉淀；

4)实时监控：利用传感器和监控系统对充填体压力、流速、流量和密度等参数进行实时监测，并通过控制系统调整输送速度和压力，确保充填作业的连续性和均匀性。

7 结 论

1)基于强度理论计算出煤柱安全应力值为 11.78 MPa，表明遗留煤柱具有安全回收的条件；数值模拟结果表明，采用自然垮落法管理顶板回收遗留煤柱时，随着推进距离的增加，邻近煤柱的应力峰值不断升高，逐渐超过煤柱安全应力值，揭示了自然垮落法管理顶板在连续回采过程中可能引发“多米诺”链式失稳效应。

2)创新性提出了短壁胶结充填采煤技术用于房式遗留煤柱的回收，通过构建短壁胶结充填采煤回收遗留煤柱采场结构演化后的力学模型，首次明确了充填体强度与直接顶稳定性的动态关系，推导出临界充填体强度为 8.97 MPa，将计算数据拟合表明，充填体强度与顶板抗拉强度呈显著非线性负相关，为采场结构稳定性控制提供了理论基础。

3)通过对胶结充填体力学特性、破坏特征及微观特征分析，中粒径矸石充填体煤矸石：粉煤灰：水泥：水质量比为 3：3：1：1，单轴抗压强度达 9.4 MPa 时，可以满足工程需求。在该配比下矸石颗粒级配优越，水化产物致密填充骨料间隙，有效减少了孔隙率，从而显著提升力学性能。

4)基于板定梁煤矿的短壁胶结充填与采煤系统设计，通过科学分析，对其关键参数进行优化，提出了充填效果的控制措施，为“资源回收-生态保护-固废利用”协同的绿色采矿模式提供了可复制的工程范例。

参考文献(References):

[1] 王双明, 刘浪, 赵玉娇, 等. “双碳”目标下赋煤区新能源开发: 未来煤矿转型升级新路径[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 59-79.
WANG Shuangming, LIU Lang, ZHAO Yujiao, et al. New energy exploitation in coal-endowed areas under the target of “double carbon”: A new path for transformation and upgrading of coal mines in the future[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1):

- 59-79.
- [2] 王国法,刘合,王丹丹,等.新形势下我国能源高质量发展与能源安全[J].中国科学院院刊,2023,38(1):23-37.
WANG Guofa, LIU He, WANG Dandan, et al. High-quality energy development and energy security under the new situation for China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 23-37.
- [3] 张吉雄,张强,周楠,等.煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J].煤炭学报,2022,47(12):4167-4181.
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4167-4181.
- [4] 钱鸣高.煤炭的科学开采[J].煤炭学报,2010,35(4):529-534.
QIAN Minggao. On sustainable coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 529-534.
- [5] 杨科,何淑欣,何祥,等.煤电化基地大宗固废“三化”协同利用基础与技术[J].煤炭科学技术,2024,52(4):69-82.
YANG Ke, HE Shuxin, HE Xiang, et al. Foundation and technology of coordinated utilization of bulk solid waste ‘Three modernizations’ in coal power base[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 69-82.
- [6] 冯国瑞,张玉江,戚庭野,等.中国遗煤开采现状及研究进展[J].煤炭学报,2020,45(1):151-159.
FENG Guorui, ZHANG Yujiang, QI Tingye, et al. Status and research progress for residual coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 151-159.
- [7] 胡振琪,理源源,李根生,等.碳中和目标下矿区土地复垦与生态修复的机遇与挑战[J].煤炭科学技术,2023,51(1):474-483.
HU Zhenqi, LI Yuanyuan, LI Gensheng, et al. Opportunities and Challenges of Land Reclamation and Ecological Restoration in Mining Areas under the Goal of Carbon Neutrality[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 474-483.
- [8] 郭广礼,李怀展,查剑锋,等.平原煤粮主产复合区煤矿开采和耕地保护协同发展研究现状及对策[J].煤炭科学技术,2023,51(1):416-426.
GUO Guangli, LI Huaizhan, ZHA Jianfeng, et al. Research status and countermeasures of coordinated development of coal mining and cultivated land protection in the plain coal-cropland overlapped areas[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 416-426.
- [9] 张云,刘永孜,曹胜根,等.短壁块段式充填采煤矸石充填材料重金属离子“下行”迁移规律及控制技术[J].采矿与安全工程学报,2023,40(2):284-294.
ZHANG Yun, LIU Yongzi, CAO Shenggen, et al. Study on the migration law and control of heavy metal ions “downward” in gangue backfill materials in short-wall block backfill mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2): 284-294.
- [10] MIAO Z K, WU J J, NIU Y J, et al. Development of a novel type hierarchical porous composite from coal gasification fine slag for CO₂ capture[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 435: 134909.
- [11] 张云,刘永孜,来兴平,等.基于导水裂隙扩展-重金属离子迁移的短壁块段式充填保水采煤机理研究[J].煤炭科学技术,2023,51(2):155-172.
ZHANG Yun, LIU Yongzi, LAI Xingping, et al. Mechanism of short-wall block backfill water-preserved mining based on water-conducting fractures development-heavy metal ions migration[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 155-172.
- [12] 谢和平,张吉雄,高峰,等.煤矿负碳高效充填开采理论与技术构想[J].煤炭学报,2024,49(1):36-46.
XIE Heping, ZHANG Jixiong, GAO Feng, et al. Theory and technical conception of carbon-negative and high-efficient backfill mining in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 36-46.
- [13] 张彦禄,王步康,张小峰,等.我国连续采煤机短壁机械化开采技术发展40a与展望[J].煤炭学报,2021,46(1):86-99.
ZHANG Yanlu, WANG Bukang, ZHANG Xiaofeng, et al. Forty years' development and future prospect on mechanized short-wall mining technology with continuous miner in China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 86-99.
- [14] 吴群英,胡俭,刘凯,等.浅埋多煤层群协调绿色开采关键技术研发与实践[J].煤炭科学技术,2024,52(9):19-30.
WU Qunying, HU Jian, LIU Kai, et al. Research and practice on key technologies for coordinated green mining of shallowly buried multi-coal seam groups[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 19-30.
- [15] 冯国瑞,白锦文,史旭东,等.遗留煤柱群链式失稳的关键柱理论及其应用展望[J].煤炭学报,2021,46(1):164-179.
FENG Guorui, BAI Jinwen, SHI Xudong, et al. Key pillar theory in the chain failure of residual coal pillars and its application prospect[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 164-179.
- [16] 冯国瑞,马俊彪,白锦文,等.关键柱旁双侧充填遗留煤柱链式失稳防控效果研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(5):945-956.
FENG Guorui, MA Junbiao, BAI Jinwen, et al. Study of the prevention and control effect of residual coal pillars' chain failure after key pillar-double side backfilling[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 945-956.
- [17] 李文,王东昊,李宏杰,等.煤矿采空区失稳灾害链式效应与链式类型研究[J].煤炭科学技术,2020,48(7):288-295.
LI Wen, WANG Donghao, LI Hongjie, et al. Study on chain effect and type of coal mine goafs instability disaster[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 288-295.
- [18] 曹胜根,曹洋,姜海军.块段式开采区段煤柱突变失稳机理研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(6):907-913.
CAO Shenggen, CAO Yang, JIANG Haijun. Research on catastrophe instability mechanism of section coal pillars in block mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(6): 907-913.
- [19] WANG X R, YANG T H, GUAN K, et al. Stability evaluation of multi-pillar and roof system based on instability theory[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(3): 1461-1480.
- [20] 张云,曹胜根,来兴平,等.短壁块段式采煤覆岩导水裂隙发育力学特性分析[J].煤炭学报,2020,45(S2):551-560.
ZHANG Yun, CAO Shenggen, LAI Xingping, et al. Mechanical

- characteristics analysis of water-conducting fracture development in overlying strata of short-wall block mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 551–560.
- [21] 张云, 曹胜根, 来兴平, 等. 短壁块段式充填采煤覆岩导水裂隙发育机理及控制研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(6): 1086–1092.
- ZHANG Yun, CAO Shenggen, LAI Xingping, et al. Study on the development mechanism and control of water-conducting fractures in short-wall block backfill mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(6): 1086–1092.
- [22] 安百富, 张吉雄, 李猛, 等. 充填回收房式煤柱采场煤柱稳定性分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(2): 238–243.
- AN Baifu, ZHANG Jixiong, LI Meng, et al. Stability of pillars in backfilling mining working face to recover room mining standing pillars[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(2): 238–243.
- [23] 朱德福, 屠世浩, 王方田, 等. 浅埋房式采空区煤柱群稳定性评价[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 390–397.
- ZHU Defu, TU Shihao, WANG Fangtian, et al. Stability evaluation on pillar system of room and pillar mining in goaf at shallow depth seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 390–397.
- [24] GHASEMI E, SHAHRIAR K. A new coal pillars design method in order to enhance safety of the retreat mining in room and pillar mines[J]. *Safety Science*, 2012, 50(3): 579–585.
- [25] DONOVAN J G, KARFAKIS M G. Design of backfilled thin-seam coal pillars using earth pressure theory[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2004, 22(4): 627–642.
- [26] 张吉雄, 缪协兴, 郭广礼. 矸石(固体废物)直接充填采煤技术发展现状[J]. *采矿与安全工程学报*, 2009, 26(4): 395–401.
- ZHANG Jixiong, MIAO Xiexing, GUO Guangli. Development status of backfilling technology using raw waste in coal mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2009, 26(4): 395–401.
- [27] 张强, 杨康, 张吉雄, 等. 固体充填开采直接顶位态控制机制及工程案例[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(1): 35–45.
- ZHANG Qiang, YANG Kang, ZHANG Jixiong, et al. Immediate roof control mechanism in backfill mining method and its engineering case[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(1): 35–45.
- [28] 郭宇鸣, 刘恒凤, 殷伟, 等. 充填与垮落协同开采覆岩层间滑移破坏规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(5): 92–103.
- GUO Yuming, LIU Hengfeng, YIN Wei, et al. Study on slip damage law between overburden layers of backfilling collaborate with caving fully-mechanized mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(5): 92–103.
- [29] WANG S S, YANG R S, LI Y L, et al. Single-factor analysis and interaction terms on the mechanical and microscopic properties of cemented aeolian sand backfill[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2023, 30(8): 1584–1595.
- [30] 邵小平, 陶叶青, 刘二帅, 等. 陕北浅埋煤层似膏体充填条带开采参数研究及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(7): 63–70.
- SHAO Xiaoping, TAO Yeqing, LIU Ershuai, et al. Study and application of paste-like filling mining parameters of shallow buried coal seam in Northern Shaanxi[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(7): 63–70.
- [31] ZHU X J, GUO G L, LIU H, et al. Experimental research on strata movement characteristics of backfill-strip mining using similar material modeling[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(4): 2151–2167.
- [32] LU Z G, JU W J, GAO F Q, et al. Numerical analysis on the factors affecting post-peak characteristics of coal under uniaxial compression[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2024, 11(1): 2.
- [33] 李永亮, 路彬, 杨仁树, 等. 煤矿连采连充式胶结充填采煤技术与典型工程案例[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1055–1071.
- LI Yongliang, LU Bin, YANG Renshu, et al. Cemented backfilling mining technology with continuous mining and continuous backfilling method for underground coal mine and typical engineering cases[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1055–1071.
- [34] 刘浪, 罗屹骁, 朱梦博, 等. 建筑物下特厚煤层镁渣基全固废连采连充开采技术与实践[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(4): 83–92.
- LIU Lang, LUO Yixiao, ZHU Mengbo, et al. Technology and Practice of Continuous Mining and Filling with Magnesium Slag-Based Solid Waste in Extra-Thick Coal Seams under Buildings[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(4): 83–92.
- [35] YANG Y B, LAI X P, ZHANG Y, et al. Strength deterioration and energy dissipation characteristics of cemented backfill with different gangue particle size distributions[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25: 5122–5135.
- [36] 李晓磊, 杜献杰, 冯国瑞, 等. 水泥-粉煤灰基矸石胶结充填体破坏特征及强度形成机制[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(5): 36–45.
- LI Xiaolei, DU Xianjie, FENG Guorui, et al. Failure characteristics and strength formation mechanism of cement-fly ash based cemented gangue backfill[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(5): 36–45.
- [37] JIN J X, QIN Z F, LÜ X L, et al. Rheology control of self-consolidating cement-tailings grout for the feasible use in coal gangue-filled backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 316: 125836.
- [38] 崔希民, 逯颖, 张兵. 基于载荷转移距离和有效宽度的煤柱稳定性评价方法[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(11): 2792–2798.
- CUI Ximin, LU Ying, ZHANG Bing. Pillar stability evaluation based on load transfer distance and pillar effective width[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(11): 2792–2798.
- [39] ZHANG J X, HUANG P, ZHANG Q, et al. Stability and control of room mining coal pillars: Taking room mining coal pillars of solid backfill recovery as an example[J]. *Journal of Central South University*, 2017, 24(5): 1121–1132.