



煤矿开采多层位立体空间煤基固废充填方法及应用

杨科 于祥 何祥 赵新元 方珏静 魏祯 何淑欣

引用本文:

杨科, 于祥, 何祥, 等. 煤矿开采多层位立体空间煤基固废充填方法及应用[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 46–64.

YANG Ke, YU Xiang, HE Xiang. Method and application of coal-based solid waste filling in multi-layer three-dimensional space of coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 46–64.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0567>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤电化基地大宗固废“三化”协同利用基础与技术

Foundation and technology of coordinated utilization of bulk solid waste ‘Three modernizations’ in coal power base

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 69–82 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0129>

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

Mining technology and practice of full-solid waste cemented backfilling in narrow strip of extra-thick coal seam under buildings

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 83–92 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0188>

新疆煤基固体废弃物处置与资源化利用研究

Prospect of resource utilization and disposal of coal-based solid wastes in Xinjiang

煤炭科学技术. 2021, 49(1): 319–330 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.030>

含钙镁煤基固废CO₂矿化封存及其产物性能研究进展

Research progress on CO₂ mineralization of coal-based solid waste containing calcium and magnesium and its product performance

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 301–315 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0902>

煤基固废矿化封存CO₂技术研究进展

Research progress of CO₂ storage technology by mineralization of coal-based solid waste

煤炭科学技术. 2024, 52(2): 309–328 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0988>

煤基固废充填料浆长距离输送悬浮态稳定性研究

Study on suspension state stability of coal-based solid waste filling slurry of long-distance pipeline transportation

煤炭科学技术. 2025, 53(2): 444–456 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0104>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

杨科,于祥,何祥,等.煤矿开采多层位立体空间煤基固废充填方法及应用[J].煤炭科学技术,2025,53(6):46–64.
YANG Ke, YU Xiang, HE Xiang, *et al.* Method and application of coal-based solid waste filling in multi-layer three-dimensional space of coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 46–64.

煤矿开采多层位立体空间煤基固废充填方法及应用

杨科^{1,2},于祥^{1,2},何祥^{1,2},赵新元^{1,2},方珏静^{1,2},魏祯³,何淑欣^{1,2}

(1. 安徽理工大学 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室,安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 矿业工程学院,安徽 淮南 232001;
3. 兰州工业学院 土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要: 矿山煤基固废资源化利用是破解“安全—技术—经济—环境”融合发展的主攻方向,也是煤炭行业高质量绿色发展的关键。煤基固废井下充填开采在实现减损开采、固废处置、资源置换和生态保护等方面具有显著的技术独创性优势,已成为资源化、规模化和绿色化处置煤基固废的关键路径之一。但现有的充填开采技术存在对覆岩控制效果有限、缺乏多种充填方式间的联动效应对煤基固废的综合利用率偏低等问题。因此,通过概述我国典型煤基固废的资源化利用现状和存在问题,从经济、技术、环境、政策和空间 5 个维度阐明了煤基固废充填开采的可行性。基于此,提出了煤矿开采多层位立体空间煤基固废充填方法,系统阐述了该方法的内涵和整体思路,主要包括高位充填、原位充填和低位充填。结合层次分析法初步建立了具有 15 项评价指标的多层位立体空间煤基固废充填方法评价体系。煤矿开采多层位立体空间煤基固废充填方法的规模化应用主要存在充填材料高效精准制备机理、充填料浆管道输送特性、充填空间结构演化规律和充填材料—充填空间交互作用不明等 4 项关键技术难题。围绕以上关键技术难题,主要开展煤基固废充填材料成浆机理、充填材料精准制备技术框架、充填料浆流场稳态控制、充填料浆管道输送关键参数、充填空间空隙结构演化、充填材料扩散/承载特性、充填材料—围岩系统协同作用机制和充填材料—环境多场耦合机制 8 项研究内容。根据宁夏煤业任家庄煤矿、山西省霍尔辛赫煤矿的开采技术、充填工艺及地质条件,分别针对性提出低位垮落带注浆充填和高位离层区注浆充填方法,实现了矿区煤基固废的安全绿色处置,有效控制了地表沉陷与变形,形成了良好的区域型示范效应。多层位立体空间煤基固废充填方法创新了煤矿井下煤基固废规模化处置的新模式,完善了绿色充填开采技术体系,实现了煤矿采动覆岩全空间协同控制与固废资源化技术跃升,可推动煤炭企业由“环境代价型”向“生态增值型”的根本转变。

关键词: 多层位立体空间;煤基固废;充填开采;固废处置;评价体系

中图分类号: TD823.7

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)06-0046-19

Method and application of coal-based solid waste filling in multi-layer three-dimensional space of coal mining

YANG Ke^{1,2}, YU Xiang^{1,2}, HE Xiang^{1,2}, ZHAO Xinyuan^{1,2}, FANG Juejing^{1,2}, WEI Zhen³, HE Shuxin^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Deep Coal Safety Mining and Environmental Protection, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. School of Civil Engineering, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The resource utilization of coal-based solid waste in mines is the main direction to solve the integrated development of 'safety-

收稿日期: 2025-04-24

策划编辑: 常琛

责任编辑: 王晓珍

DOI: 10.12438/cst.2025-0567

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目 (52130402); 国家自然科学基金青年基金资助项目 (52404106); 甘肃省青年博士支持项目 (2024QB-103); 甘肃省青年科技基金资助项目 (24JRRA1012)

作者简介: 杨科(1979—),男,四川叙永人,教授,博士生导师,博士。E-mail: yksp2003@163.com

通讯作者: 于祥(1996—),男,安徽阜阳人,博士研究生。E-mail: Xiangyu_aust@163.com

technology-economy-environment', and it is also the key to the high-quality green development of the coal industry. Underground filling mining of coal-based solid waste has obvious technical originality advantages in loss reduction mining, solid waste disposal, resource replacement and ecological protection, and has become one of the key paths for resource, scale and green disposal of coal-based solid waste. However, the existing filling mining technology has problems such as limited control effect on overlying strata, lack of linkage effect between multiple filling methods, and low comprehensive utilization rate of coal-based solid waste. Therefore, by summarizing the current situation and existing problems of resource utilization of typical coal-based solid waste in China, the feasibility of coal-based solid waste filling mining is clarified from five dimensions of economy, technology, environment, policy and space. Based on this, the coal-based solid waste filling method in multi-layer three-dimensional space of coal mining was proposed. The connotation and overall idea of this method were systematically expounded, including high-level filling, in-situ filling and low-level filling. Based on the Analytic Hierarchy Process (AHP), an evaluation system of coal-based solid waste filling with 15 evaluation indexes was established. The large-scale application of multi-level three-dimensional space coal based solid waste filling method in coal mining mainly faces 4 key technical challenges, including efficient and accurate preparation of filling materials, pipeline transportation characteristics of filling slurry, evolution law of filling spatial structure and interaction between filling material-space. Focusing on the above key technical challenges, 8 research contents were mainly carried out, including the slurry formation mechanism of coal-based solid waste filling materials, the technical framework of precise preparation of filling materials, the steady-state control mechanism of filling slurry flow field, the key parameters of filling slurry pipeline transportation, the evolution of filling space void structure, the diffusion/bearing characteristics of filling materials, the synergistic mechanism of filling materials-surrounding rock and the multi-field coupling mechanism of filling materials-environment. Based on the mining technology, filling process, and geological conditions of Renjiazhuang Coal Mine in Ningxia Coal Industry and Horxinhe Coal Mine in Shanxi Province, the grouting filling methods in low-level caving zone and high-level separation zone were proposed respectively, which realized the safe and green disposal of coal base solid waste in mining area, effectively controlled the surface subsidence and deformation, and established a good regional demonstration effect. The multi-layer three-dimensional space coal-based solid waste filling method has innovated the new mode of large-scale disposal of coal-based solid waste in underground coal mines, improved the green filling mining technology system, and realized the coordinated control of the whole space of coal mining overburden rock and the leap of solid waste recycling technology, which can promote the fundamental transformation of coal enterprises from "environmental cost type" to "ecological value-added type".

Key words: multi-layer three-dimensional space; coal-based solid waste; filling mining; solid waste disposal; evaluation system

0 引 言

煤炭作为我国能源供给的“压舱石”和“稳定器”,为国民经济和社会稳定的长期发展提供了可靠的能源安全保障^[1-2]。以 2023 年为例,我国原煤产量达到创历史的 47.1 亿 t,煤炭消费量占能源消费总量的比例为 55.3%,预计到 2030 年煤炭在我国一次能源结构中的比例仍将占据 45% 以上^[3-4]。然而,煤炭在开采、分选、加工和利用的庞大产业链中产生了大量的煤矸石、粉煤灰等煤基固废,累计排放超数百亿吨,并以每年 18 亿 t 的速度增加,对其处置方式以地表堆积填埋为主^[5-7]。在严守生态保护红线的前提下,实现煤基固废的规模化处置已成为制约煤炭绿色高效开采的关键矛盾之一。

针对煤基固废处置的相关政策法规及指导性文件为高质量发展背景下煤炭企业的清洁绿色高效开采提出明确的任务和要求。党的十八大以来,生态文明建设被历史性地纳入国家发展规划^[8]。国务院办公厅在 2018 年颁发的《“无废城市”建设试点工作方案》中指出要建立健全标准体系,持续推荐大宗工

业固废的源头减量和资源利用^[9]。2020 年新修订的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》指出产废企业要采取科学、清洁的技术手段,促进固体废弃物综合利用和减少产出^[10]。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》提出要“坚持绿水青山就是金山银山”的发展理念,加强大宗固体废弃物的综合利用和循环利用^[11]。国家发展和改革委员会 2021 年印发的《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》指出要创新大宗固废综合利用模式和机制,到 2025 年新增大宗固废综合利用率达到 60% 以上^[12]。国家发展和改革委员会 2024 年印发《关于加强煤炭清洁高效利用的意见》,指出到 2030 年要基本建成煤炭清洁高效利用体系^[13]。由此可见,煤炭资源的清洁高效利用与煤基固废无害化处置已成为煤炭及其伴生企业亟待解决的焦点问题。

煤基固废井下充填开采在实现地表沉陷控制的同时兼顾固废处置利用和生态环境保护,已成为规模化处置煤基固废的重要途径,近些年在我国得到广泛应用^[14-15]。目前,我国形成了以固体充填^[16-17]、

膏体充填^[18-19]、高水充填^[20-21]、离层注浆^[22-23]和井下采选充一体化^[24-25]为主的技术体系和应用模式。但是传统的充填采矿方法通常针对某一单一的目标充填空间(如采空区、垮落带和离层区等),而在复杂地质高强度开采背景下,单一的充填方式往往存在以下局限性:①充填开采对覆岩的控制范围有限,如离层注浆难以对垮落带和采空区控制,垮落带注浆难以有效控制高位离层区,膏体或固体充填对高位覆岩移动的控制效果较弱等;②各种充填方法间的协同联动效应不足,难以同时控制采空区围岩稳定性、顶板垮落和地表沉陷,导致充填控制效果具有局部性;③充填效率相对较低,如采用膏体或胶结充填式,由于充填材料凝结时间的限值,存在采充周期较长等问题;④煤基固废的综合利用率仍然偏低^[26-27],不同层位的充填材料难以形成优化配置,造成充填材料浪费或性能冗余。因此,如何充分利用采动引起的覆岩空间,提高煤基固废处置效率和地表沉陷与覆岩移动的控制效果,俨然成为井下绿色开采与负碳固废的重要发展方向。

鉴于上述分析,笔者提出煤矿开采多层位立体空间煤基固废充填方法,详细阐述多层位立体空间煤基固废充填方法的内涵,基于层次分析法初步建立多层位立体空间煤基固废充填方法评价体系,从充填材料的精准制备、料浆的管输特性、充填空间结构演化规律及充填材料-环境交互作用4个角度阐明多层位立体空间充填的关键技术难题,主要包括煤基固废充填材料成浆机理、充填材料精准制备技术框架、充填料浆流场稳态控制、充填料浆管道输送关键参数、充填空间空隙结构演化、充填材料扩散/承载特性、充填材料-围岩系统协同作用机制和充填材料-环境多场耦合机制8项研究内容,以期为我国煤基固废的安全、高效、绿色处置提供技术和理论指导。

1 煤基固废规模化处置势在必行

1.1 煤基固废综合利用现状

我国煤基固废的综合利用现状整体上呈现出“四多四少”的特点^[28]。图1统计了2018—2023年我国煤矸石和粉煤灰2种典型煤基固废的产量及综合利用率。由图1可知,2018—2023年我国煤矸石和粉煤灰产量逐年递增,2023年煤矸石和粉煤灰的产量分别达8.29亿和8.7亿t,综合利用率分别达73.6%和76.9%^[29-30]。据不完全统计,我国煤矸石和

粉煤灰的累计堆存量分别超过60亿和30亿t^[31-32]。如此体量的煤基固废排放至地表引发了水资源破坏、大气污染等环境问题,严重制约着矿区环境低损伤化和绿色低碳化发展^[33]。

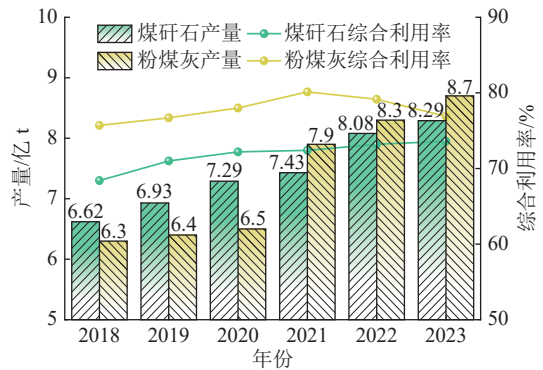


图1 2018—2023年我国典型煤基固废产量及综合利用率
Fig.1 Typical coal-based solid waste production and comprehensive utilization rate in China from 2018 to 2023

针对煤基固废的资源化综合利用,目前主要可分为资源化、无害化和规模化3类^[34],如图2所示。资源化利用主要包括燃烧发电^[35-36]和生产建筑材料^[37-38]等;无害化利用主要包括生产催化剂载体^[39-40]、吸附材料^[41-42]和提取有价值元素^[43-44]等;规模化利用主要包括土地复垦^[45-46]、路基材料^[47-48]和充填开采^[49-50]等。但是煤基固废资源化与无害化利用方式存在研发工艺复杂、运输费用高且对煤基固废的品质要求较高等问题,制约着煤基固废的高效清洁利用效率^[51]。因此,煤基固废的规模化处置利用势在必行。



图2 煤基固废综合利用

Fig.2 Comprehensive utilization of coal-based solid waste

1.2 煤基固废井下充填可行性

煤基固废在经济、技术、环境、政策和井下可利用空间方面均具有充填可行性(图 3)。在经济方面,煤基固废来源广、存量多、成本低廉,将煤基固废充填至井下,能够大幅度减少煤基固废运输和处理费用;充填开采在释放“三下”压煤方面具有显著的优势,能够提高煤炭资源的回采率,提升矿井的经济效益;国家和地方政府针对煤基固废的资源化利用提供资金补贴、税收优惠等政策支持,进一步降低了矿井的充填成本。在技术方面,充填开采在国内外已经得到广泛应用,形成了完善且成熟的技术体系;自动化、模块化、集成化和智能化充填设备的研发与应用进一步提高了充填的效率和精度;充填工艺的升级与优化,使得充填与开采协同进行、互不干扰,提高了矿井的生产效率。在环境方面,充填开采将煤矸石、粉煤灰等煤基固废充填至煤矿井下空间,既能够减少地表固废的堆积与排放,释放土地资源,降低

环境污染,又能够有效控制地表沉陷,减少对农田、建筑物、水体等的破坏。在政策方面,国家和地方政府相继出台了一系列政策法规鼓励煤炭企业对煤基固废进行资源化利用与井下绿色充填开采;相关技术标准与规范的实施进一步为煤矿充填开采提供了技术指导与理论支撑。在井下可利用空间方面,煤矿开采后形成的采空区、离层区和垮落带等为充填开采提供了大量的可利用空间。预计到 2030 年,我国煤矿采空区体积将达到 241.11 亿 m^3 ^[52],若能利用该体积的 2%,则所有矿井年排放矸石可实现全部井下处置,若能够利用该体积的 15%,则可实现现有堆存矸石的全部井下处置^[2]。由以上分析可知,煤基固废充填开采无疑是一种最高效、现实的固废规模化处置方法。

2 多层位立体空间煤基固废充填方法

2.1 多层位立体空间充填的内涵

工作面开采参数和地质采矿条件直接影响着覆岩空间的发育形态和层位,覆岩空间的发育形态和层位又直接影响着充填工艺布置和充填材料的形态与配比。为了提高充填开采在不同地质条件下的可行性,笔者通过梳理国内外充填开采理论与技术,结合采场覆岩“横三区、竖三带”的结构特征,提出了煤矿开采多层位立体空间煤基固废充填方法,如图 4 所示。煤矿开采多层位立体空间煤基固废充填方法是指基于充填空间在煤层及以上岩层中的时空层位而构建出高位充填、原位充填和低位充填的技术集成模式,形成多层位立体空间充填布局方式。高位充填是指在煤矿开采覆岩垮落过程中,对关键层下方形成的高位离层空间进行充填,充填空间位于裂隙带上方和关键层下方,通过填充离层空间抑制关键层破断,从而控制地表沉陷。原位充填是指在煤层开采后、直接顶垮落前,立即对采空区进行充

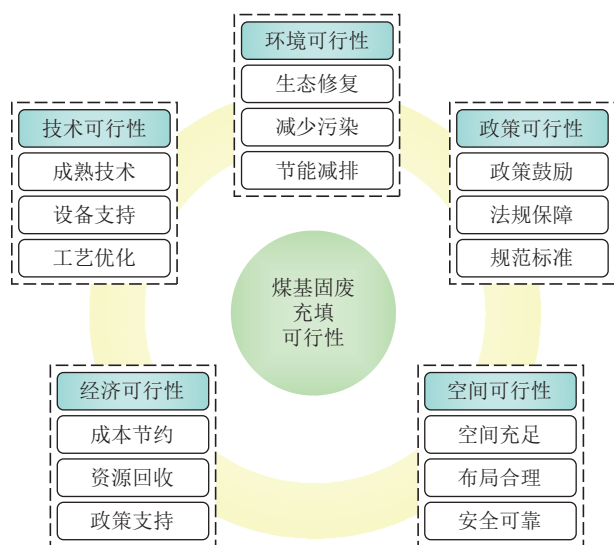


图 3 煤基固废充填开采可行性

Fig.3 Feasibility of coal-based solid waste filling mining

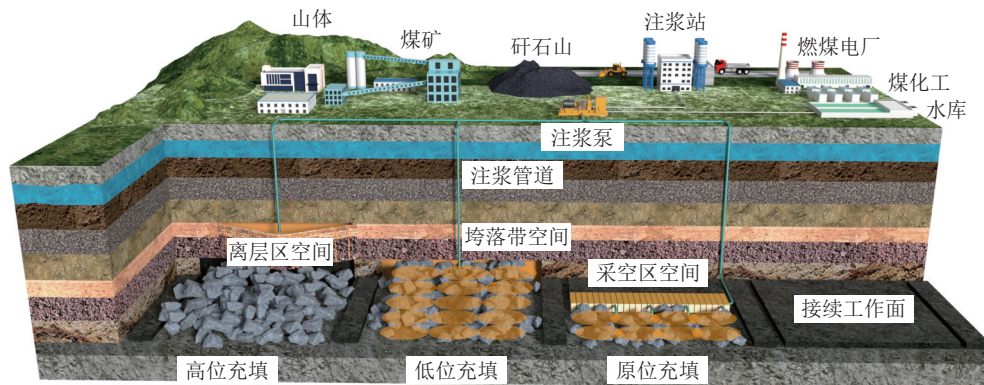


图 4 多层位立体空间煤基固废充填方法

Fig.4 coal-based solid waste filling method in multi-layer three-dimensional space

填,通过充填材料(固体、膏体等)直接置换出煤体以维持顶板稳定。低位充填是指在破碎顶板垮落后,对垮落矸石与上覆坚硬岩层间的欠接顶空间进行充填,通过充填材料胶结垮落带松散矸石,以控制顶板的进一步垮落。

2.2 多层位立体空间充填整体思路

多层位立体空间煤基固废充填方法可根据不同的充填空间需求,有针对性地选择充填方式,选择适宜的充填材料形态,充填材料形态主要可分为流体(浆体或膏体)和固体。以浆体充填为例,多层位立体空间煤基固废注浆充填是将破碎后的煤矸石和粉煤灰等煤基固废按照一定的粒径级配制成一定浓度的充填料浆,利用充填泵泵送或自流的方式通过输送管道等设备将充填料浆输送至煤层开采时形成的高位、原位和低位空间,实现煤基固废井下高效处置的技术。

如图 5 所示,多层位立体空间煤基固废注浆充

填技术主要包括实验测试系统、破碎筛分系统、料浆制备系统、浆体输送系统和管道监测系统。首先根据工作面开采参数、地质采矿条件、矿区固废种类及来源对充填工艺布置和充填材料形态的选择进行研判。实验室测试系统主要对煤基固废的理化性质、充填材料的强度、流动性、流变性等进行测试;破碎筛分系统主要将大颗粒煤基固废经一级破碎、二级破碎、球磨等工序破碎筛分成符合粒径级配要求的细颗粒;料浆制备系统主要将破碎后的细颗粒煤基固废与胶凝材料、水等混合搅拌制备成一定浓度的充填料浆;料浆输送系统主要将制备完成的充填料浆利用充填泵泵送或自流的方式通过管道输送至井下充填靶向区(高位、原位和低位空间);管道监测系统主要对料浆输送过程中浆体流速、注浆进度及可能发生的管道堵塞或设备故障等进行智能监测、反馈和调整。以上五大系统协同运行、互不干扰,共同实现煤基固废井下安全、高效、绿色和低碳处置。

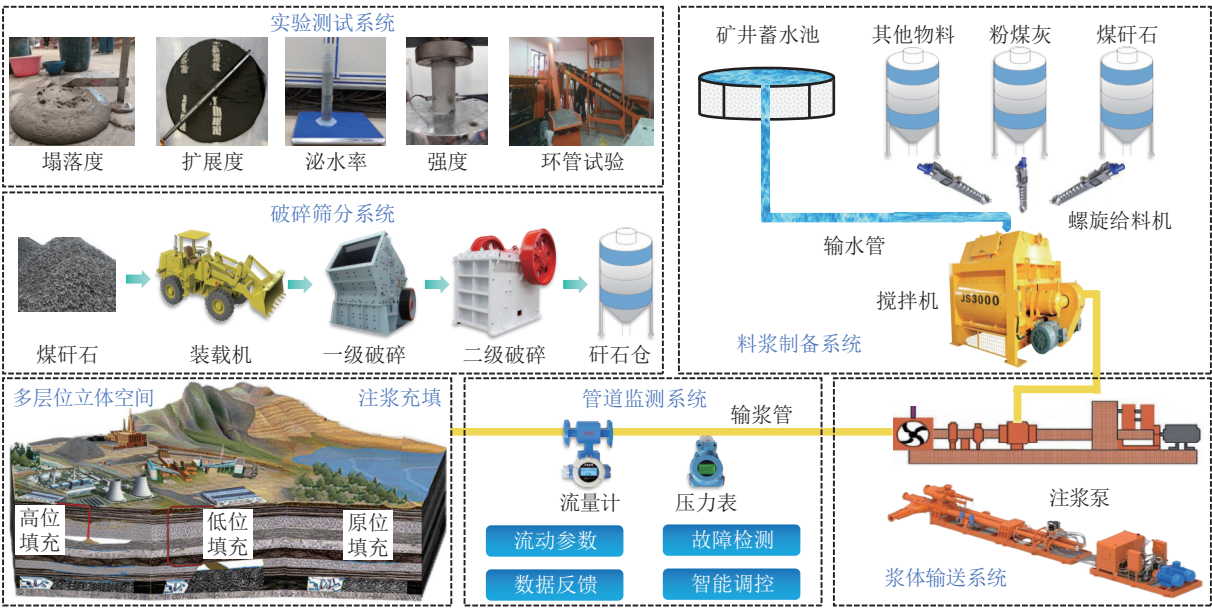


图 5 多层位立体空间煤基固废注浆充填整体思路

Fig.5 Overall idea of coal-based solid waste grouting filling in multi-layer three-dimensional space

3 多层位立体空间充填方法评价体系

基于对国内充填矿井开采技术、充填工艺和地质条件等的统计分析,采用层次分析法归纳总结出 15 个评价指标:充填材料性能、充填效率、适应能力、成本投入、产出效益、投资收益、材料来源、资源节约、固废处置、顶板控制、围岩控制、灾害控制、地表沉陷控制、生态修复和环境污染控制。对各项指标进行归类集成,形成了技术性能、经济效益、资源利用、安全性能和环境减损 5 类指标属性。其中,充

填材料性能、充填效率和适应能力属于技术性能指标,成本投入、产出效益和投资收益属于经济效益指标,材料来源、资源节约和固废处置属于资源利用指标,顶板控制、围岩控制和灾害控制属于安全性能指标,地表沉陷控制、生态修复和环境污染控制属于环境减损指标,建立的多层位立体空间煤基固废充填方法评价体系如图 6 所示。

综合离层注浆充填、垮落带注浆充填、膏体充填和固体充填等充填方式的技术特点,基于多层位立体空间充填方法评价体系,对高位充填、原位充填和

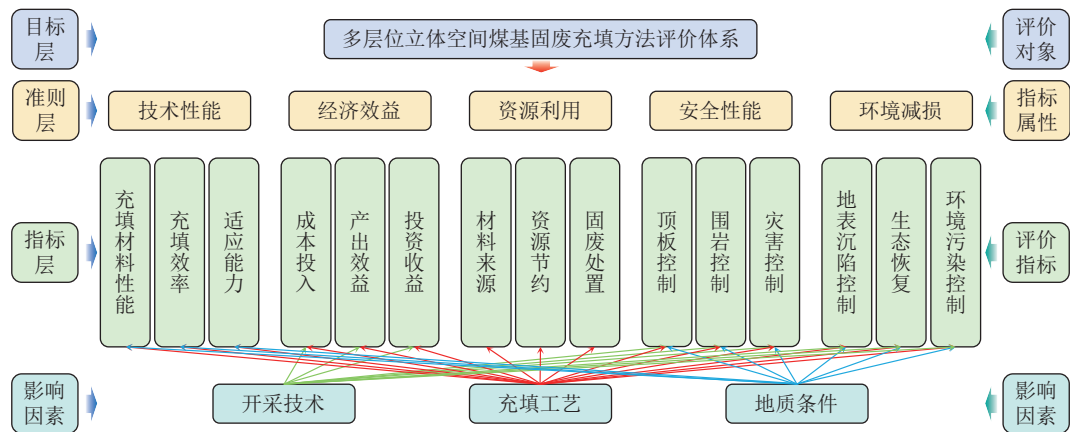


图 6 多层位立体空间充填方法评价体系
Fig.6 Evaluation system of multi-layer three-dimensional space filling method

低位充填的评价指标进行对比分析,见表 1。总的来说,高位充填对材料的流动性能要求较高,但是其充填效率相对较高,生态效益和地表沉陷控制效果显著,适用于首采煤层或离层空间充分发育的工况条件。原位充填对材料的承载性能和稳定性能要求较高,充填效率相对较低,但是其资源回收效果和经济效益显著,适用于直接顶坚硬且完整的工况条件。

低位充填对材料的流动性能和泌水性能要求较高,但是其充填效率相对较高,灾害控制和顶板控制效果显著,适用于直接顶破碎、随采随落和灾害风险高的工况。煤矿现场施工过程中,可根据具体的矿井地质条件、开采技术和充填工艺等,选择合适的充填方式或组合方式,以实现安全、经济、高效和减损的充填开采目标。

表 1 多层位立体空间充填评价指标的对比分析
Table 1 Comparative analysis of evaluation indexes for multi-layer three-dimensional space filling

指标属性	评价指标	高位充填	原位充填	低位充填
技术性能	充填材料性能	流动性要求高	承载性与稳定性要求高	流动性与泌水性要求高
	充填效率	较高	较低	较高
	适应能力	首采煤层或离层空间发育	直接顶坚硬且完整	直接顶破碎、随采随落
经济效益	成本投入	中等	较高	中等
	产出效益	生态效益显著	经济效益显著	灾害控制效益显著
	投资收益	周期较长	周期较短	周期适中
资源利用	材料来源	较广	较广	有限
	资源节约	减少地表沉陷、保护土地资源	提高资源回收率	减少采空区灾害
	固废处置	较好	较好	有限
安全性能	顶板控制	关键层控制较好	最佳	较好
	围岩控制	较好、受离层空间限制	最佳	较好
	灾害控制	有效控制采空区灾害	有效控制采空区灾害	有效解决破碎顶板灾害
环境减损	地表沉陷控制	最佳	较好	一般(处置固废为主)
	生态修复	最佳	较好	一般
	环境污染控制	较好	较好	一般

4 多层位立体空间充填关键科学问题

多层位立体空间充填是一种复杂的工程技术,它的关键科学问题主要包括充填材料的精制备、料浆的管输特性、充填空间结构演化规律及充填材

料-环境交互作用,如图 7 所示。
解决这些问题需要多学科交叉合作,结合实验研究、数值模拟和现场试验等手段,为多层位立体空间充填方法的推广应用提供理论支撑和技术保障。

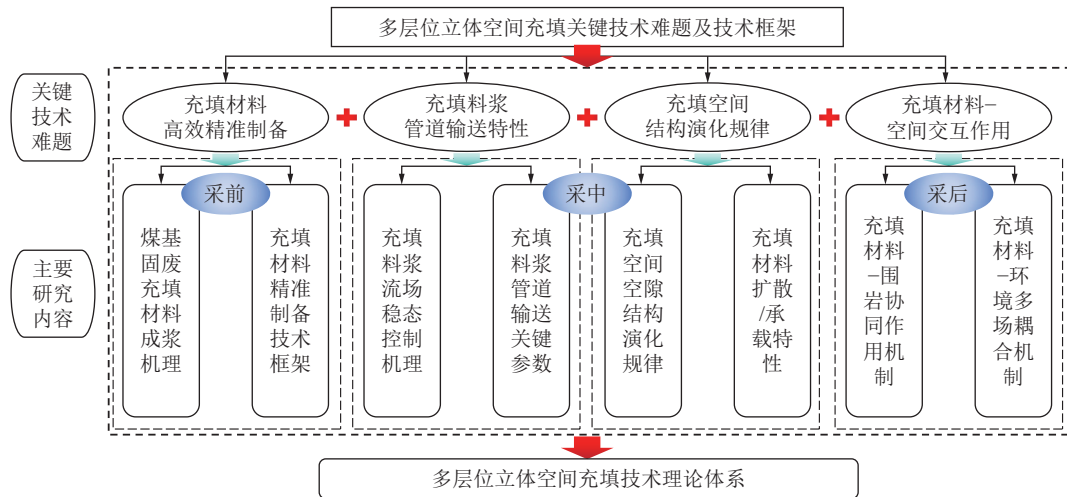


图 7 多层位立体空间充填技术框架

Fig.7 Multi-layer three-dimensional space filling technology framework

4.1 充填材料高效精准制备

4.1.1 煤基固废充填材料成浆机理

探明煤基固废充填材料成浆机理对于制备出流动性好、适应性强和稳定性高的充填材料至关重要。煤基固废充填材料成浆机理是一个多组分、多过程的物理与化学反应体系,主要包括煤基固废的混合、搅拌、溶解、反应、悬浮和成浆过程。根据反应方式的不同,将煤基固废充填材料成浆机理分为物理反应阶段和化学反应阶段。

1)第 1 阶段,物理反应过程:混合、搅拌和溶解。

如图 8 所示,煤基固废(如煤矸石、粉煤灰)与液体介质混合搅拌主要存在 4 种状态:①粉煤灰等可溶性物质溶于水发生水化反应,增大浆体的浓度和密度;②粉煤灰等细颗粒汇聚形成团聚体,被水膜包裹随搅拌介质运移;③粉煤灰等细颗粒包裹煤矸石颗粒,与煤矸石颗粒形成似细胞的“核-质-膜”结构;④各种颗粒之间产生相互作用力在液体介质间形成稳定、分散的悬浮液结构。在搅拌过程中,这种团聚体或“核-质-膜”在液桥力作用下不断吸附悬浮在周围的细颗粒,随着被吸附的颗粒逐渐增多,团聚体

或“核-质-膜”结构的体积分数不断增大,直至达到临界状态。随后,在剪切和对流的作用下,这种团聚体或“核-质-膜”结构发生破裂,导致细观结构的等效直径逐渐减小,最终混合后的充填物料变为均质的浆体状态^[53]。

除此之外,粉煤灰颗粒粒径较小,比表面积较大,煤矸石在破碎过程中也会形成大量的细颗粒,这些细颗粒与液体介质混合后,会激发其表面的物理化学反应和各种细颗粒间的相互作用,促进浆体中絮网结构的形成。在微观结构方面,粉煤灰主要为表面光滑的似滚珠轴承状球形微珠,提高了充填浆体的流动性。在颗粒的体积方面,粉煤灰和细颗粒煤矸石填补了粗颗粒之间的孔隙,降低了充填料浆的孔隙率,提高了充填料浆的容重^[54]。

2)第 2 阶段,化学反应过程:反应、悬浮和成浆。

在物质成分方面,煤矸石和粉煤灰的主要活性成分为 Al_2O_3 和 SiO_2 ,粉煤灰、水泥和细颗粒煤矸石在液体介质中可发生一系列的水化反应,如水泥水化反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,粉煤灰或细颗粒煤矸石中的 Al_2O_3 、 SiO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 二次水化反应生成水化铝酸钙和水化硅酸钙。当充填料浆的质量浓度达到一定

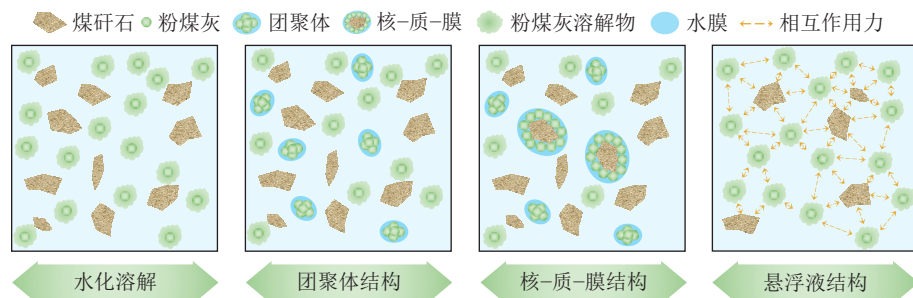


图 8 煤基固废物理成浆机理示意

Fig.8 Schematic diagram of physical slurring mechanism of coal-based solid waste

程度后,在液体介质中生成大量的絮网结构。粗颗粒煤矸石在含有絮网结构的充填料浆中自由沉降,随着溶液中细颗粒的质量分数增大,絮网结构在粗颗粒煤矸石外部形成了一层包裹层,减缓了粗颗粒煤矸石的沉降速度,提高了所有颗粒的浮力。当充填料浆的质量浓度达到临界值时,各种颗粒的重力与浮力基本达到平衡,充填料浆将转化为稳定均质的浆体溶液。

4.1.2 充填材料精准制备技术框架

煤基固废充填材料的精准制备是充填料浆在多层位立体空间中长距离管道稳定输送的前提,而实现煤基固废充填材料的精准制备应首先对充填工艺的选择进行研判。基于对矿井地质采矿条件的分析、充填工艺水平的调研、充填原材料种类和来源的判定,以及经济效益和环境风险的评价,结合多层位立体空间充填工艺研选评价指标体系,确定适用于该矿井的充填开采方式和充填原材料。对充填原材料的理化性质(粒径分布、微观形貌、矿物与化学成分、重金属含量、酸碱性及毒害性等)进行测试,为探明充填材料形成机理提供基础依据。对于煤矸石类大颗粒材料,需经过粗碎、细碎和球磨等过程破碎研磨成一定粒径的细颗粒后方能与粉煤灰等按照一定的级配制备充填材料。对于采用固体(改性)充填的方式,基于对固体充填材料的侧限压缩试验,综合考虑岩性、粒径级配、加载速率和轴向压力等因素对充填

材料承载、堆积、压实、变形特性和空隙结构的影响规律,探究多因素耦合作用下固体充填材料力学特性的演变规律。对于采用流体(浆体、膏体)充填的方式,基于充填材料的优化配比设计,将煤矸石、粉煤灰等煤基固废与液体介质按照一定的配比、粒径和浓度制备成充填料浆,分析其流动性(塌落度、扩展度、泌水率、沉降率和凝结时间等)、流变性(屈服应力、黏度系数等)和强度(龄期强度,抗压、抗拉和抗剪强度等)等性能的演化规律,最终确定适宜于本矿井充填开采的充填材料配比。采用 X 射线衍射(XRD)、微观电镜扫描(SEM)、核磁共振波谱(NMR)、计算机电子扫描(CT)等技术手段测定最优配比下充填材料的界面特征、水化反应机理及产物、微观形貌、矿物成分、孔隙率和孔径分布等,以确保优选出的充填材料方案在实际应用过程中的稳定性、耐久性和安全性。

实验室开展充填材料优化配比的最终目的是为现场的工业性充填作业提供基础依据,优选的充填材料是否可行还需要工业性实践进行验证。采用半工业环管试验和现场实践对充填材料的性能、围岩控制效果、环境保护效果和经济增值效益进行评价,基于评价效果将实验室试验和现场实践进行验证、互馈和优化,最终形成一套适用于多层位立体空间充填的煤基固废充填材料精准制备技术方案,其技术框架如图 9 所示。

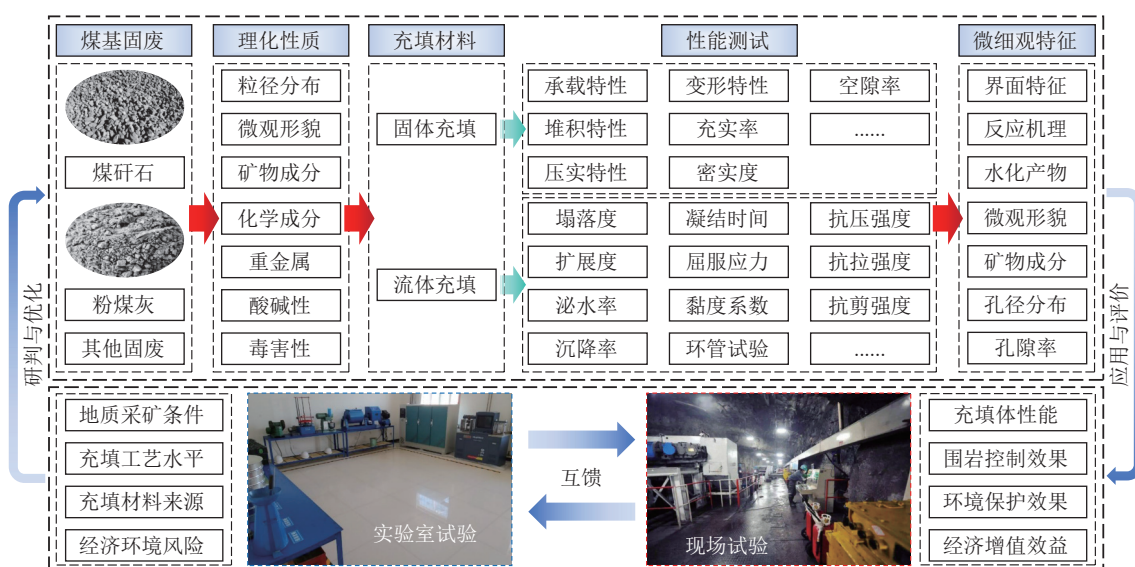


图 9 煤基固废充填材料精准制备技术框架

Fig.9 Technical framework for precise preparation of coal-based solid waste filling materials

4.2 充填料浆管道输送特性

4.2.1 充填料浆流场稳态控制机理

充填料浆流场稳定性是确保充填料浆长距离管

道输送的关键,旨在确保充填料浆在输送和充填的过程中保持稳定的流动状态,从而提高煤矿充填的效率和质量。充填料浆稳定性控制的核心在于调控

料浆的浓度、流速和压力等参数。根据充填料浆在管道内流速和流变的不同,通过 3 个沉积边界(临界沉积边界、过渡沉积边界和层流沉积边界)将浆体的流动分为稳定湍流(区域 I)、不稳定湍流(区域 II)、不稳定层流(区域 III)和稳定层流(区域 IV)4 种类型(图 10)^[55]。在稳定湍流中,颗粒受湍流涡流阻力的作用而悬浮在流场中;在不稳定湍流中,涡流阻力难以保证颗粒的悬浮,造成颗粒在管道底部的沉积;在不稳定层流中,湍流的涡旋力被涡流阻力消耗,难以维持颗粒在流场内的悬浮;在稳定层流中,场应力主导了管道流动的未剪切核心区域,并支撑着颗粒的流动,同时壁面的剪切应力推动沉积在管壁的颗粒移动。由此可见,保持浆体流动的稳定性需保持浆体在管道内处于稳定层流的状态,使充填料浆中的颗粒尽可能随流场流动,减少颗粒在管道的沉积。

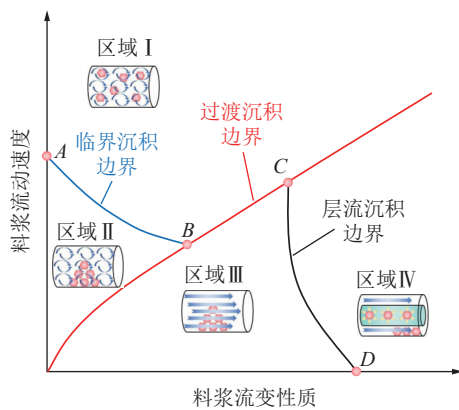


图 10 充填料浆流场稳定性控制

Fig.10 Stability control of filling slurry flow field

煤基固废充填料浆属于非牛顿流体^[56-57],为揭示充填料浆中颗粒沉降的本质,LI 等^[58]建立了煤基固废充填料浆的固体颗粒沉降模型并提出临界不沉粒径(图 11)。建立的固体颗粒沉降模型将充填料浆

中小于临界不沉粒径的颗粒群(细煤矸石颗粒、粉煤灰颗粒和水泥颗粒等)和水的混合物视作“固液二相载体悬浮液”载体,而将大于临界不沉粒径的粗颗粒(粗煤矸石颗粒)视为载运物。当充填料浆中粗颗粒粒径小于临界不沉粒径时,充填料浆中无颗粒沉降现象,料浆整体呈悬浮状态;当充填料浆中粗颗粒粒径大于临界不沉粒径时,充填料浆中的粗颗粒会产生沉降,同时由于颗粒群的粒径不同,导致积聚在充填管道底部的颗粒群出现分层分选现象,这种现象也是充填管道发生堵管爆管的原因之一。

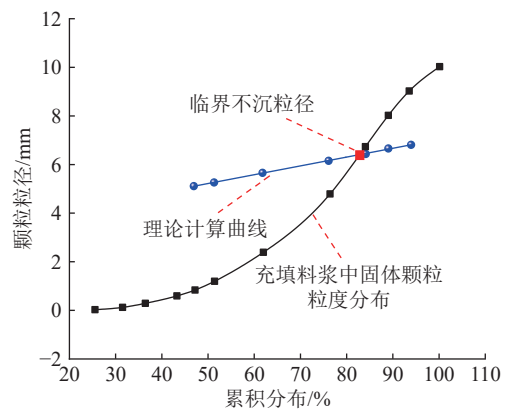


图 11 临界不沉粒径的确定

Fig.11 Determination of critical non-settling particle diameter

4.2.2 充填料浆管道输送关键参数

研究充填料浆的管输特性对于提升矿井充填效率、保障矿井安全生产和降低运营成本具有重要意义。充填料浆的管输特性受多种因素的影响,如图 12 所示。料浆性质参数是研究充填料浆管输特性的基础,主要包括固体浓度、黏度、颗粒级配、密度和屈服应力等,这些参数直接影响充填料浆的流动性、流变性和管道输送阻力等。料浆的浓度过高会增大黏度,增大浆体的流动阻力,而颗粒级配的不均匀则可能引发颗粒沉降或管道堵塞等问题。管道系统参数

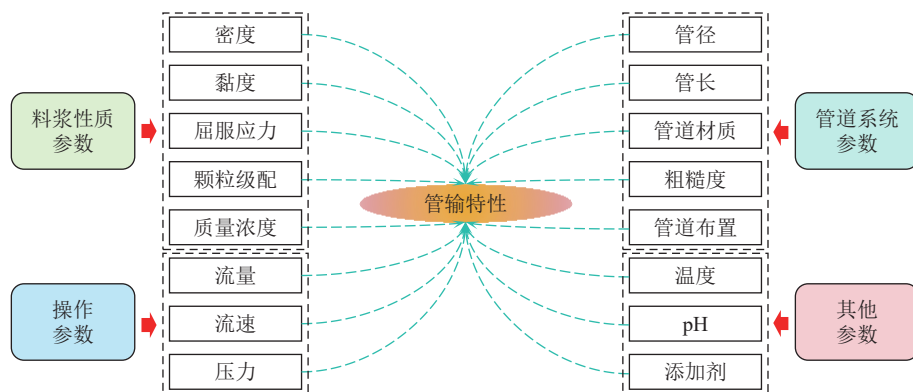


图 12 管输特性影响因素分析

Fig.12 Analysis of influencing factors of pipeline transport characteristics

直接影响充填料浆的管输特性,主要包括管径、管道材质、管道布置、管道长度及壁面粗糙度等。管径过小会增大浆体的流速与压力损失,管道的耐磨性、耐腐蚀性与管道材质直接相关,壁面粗糙度过大会增大浆体的流动阻力,改变浆体的流速分布,使得管道局部区域出现高剪切应力,增加管道的磨损程度。操作参数是管输特性的核心调控因素,主要包括流速、流量和压力等。如过高的流速可能会增加管道的磨损程度,而过低的流速则可能引发颗粒沉降堵塞管道。除此之外,温度、酸碱度和添加剂等外在因素也会间接影响管输特性。温度的增加会降低充填料浆黏度和能耗,使充填料浆具有更好的流动性。过高或过低的 pH 值可能导致充填料浆发生沉淀、絮凝或溶解等现象,影响充填料浆的稳定性,同时 pH

值过高或过低也会腐蚀充填管道,降低管道的使用寿命等。通过系统研究这些关键参数及其相互作用,可以优化充填料浆管道输送工艺,提高输送效率,降低能耗,并确保系统的安全性和经济性。

4.3 充填空间结构演化规律

4.3.1 充填空间空隙结构演化规律

多层位立体空间充填的目标空间为煤层开采后在煤层及其上覆岩层中形成的采空区空间、离层区空间和垮落带空间,如图 13 所示。为了能够有效控制地表损伤程度,应将采动引起的损伤空间存储在覆岩的各分区中^[59],煤基固废充填至井下可起到“等效置换”覆岩分区空间的作用。因此,准确计算充填空间的体积对于充分消纳固废、提高充填效果和控制在地表沉降至关重要。

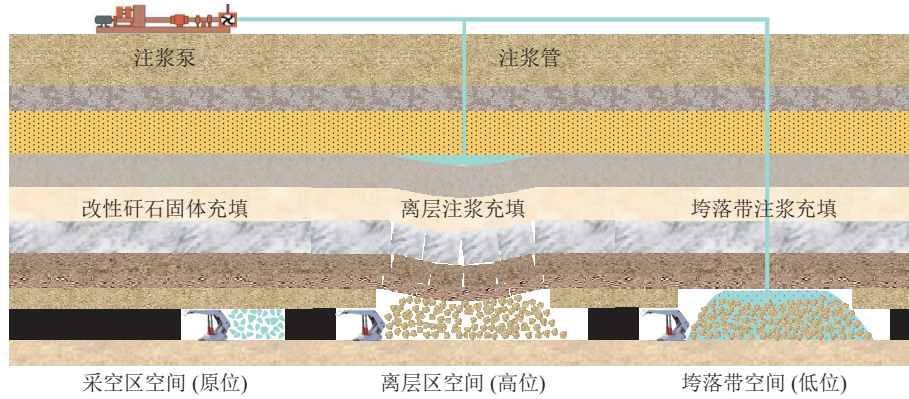


图 13 多层位立体充填空间结构

Fig.13 Multi layer three-dimensional filling space structure

对于高位离层区空间体积,可采用薄板弹性力学理论计算,如图 14a 所示,将采场上覆岩层中发育的各离层间隙量视为该离层上下位岩层间的挠度差,即

$$\Delta W = W_x - W_s \quad (1)$$

基于前人研究^[60]可知,离层区开度在工作面走向和倾向中心位置处达到最大,最大离层区间隙量为

$$\Delta W_{\max} = \frac{a^4}{\pi^4 \left[3 + 3\left(\frac{a}{b}\right)^4 + 2\left(\frac{a}{b}\right)^2 \right]} \left(\frac{q_x}{D_x} - \frac{q_s}{D_s} \right) \quad (2)$$

则该离层区空间的体积为

$$V_l = \iint_{\Omega} \Delta W dx dy = \frac{1}{4} \nabla W_{\max} ab \quad (3)$$

式中: W_s 、 W_x 分别为离层区上位板、下位板的挠度; q_s 、 q_x 分别为离层区上位板、下位板的横向均布载荷; D_s 、 D_x 分别为离层区上位板、下位板的抗弯刚度; a 、

b 分别为板的长和宽。

由式 (3) 可知,上覆岩层离层区空间体积计算的关键即确定离层区空间最大离层量和尺寸。采场上覆岩岩层中的最大离层量可通过数值模拟获得,若该离层上位岩层厚度大且坚硬,对离层上覆岩层的弯曲变形起控制作用时,最大离层量亦可近似取该离层发育位置处岩层最大下沉量,即有 $\Delta W_{\max} \approx \eta m$ (其中, η 、 m 分别为下沉系数和煤层采厚)。

对于低位垮落带空隙空间体积,假设垮落带成梯形体分布^[61],如图 14b 所示,则垮落带空间的体积可表示为

$$V_k = \frac{H_k [L_a L_b + l_a l_b + (L_a + l_a)(L_b + l_b)]}{6} \quad (4)$$

根据垮落带岩体的碎胀性可得,垮落带空间体积为

$$V_{km} = \frac{H_k [L_a L_b + l_a l_b + (L_a + l_a)(L_b + l_b)]}{6} n_m \quad (5)$$

式中: H_k 为垮落带高度, $H_k = \frac{m}{(K_p - 1) \cos \theta}$; K_p 为垮

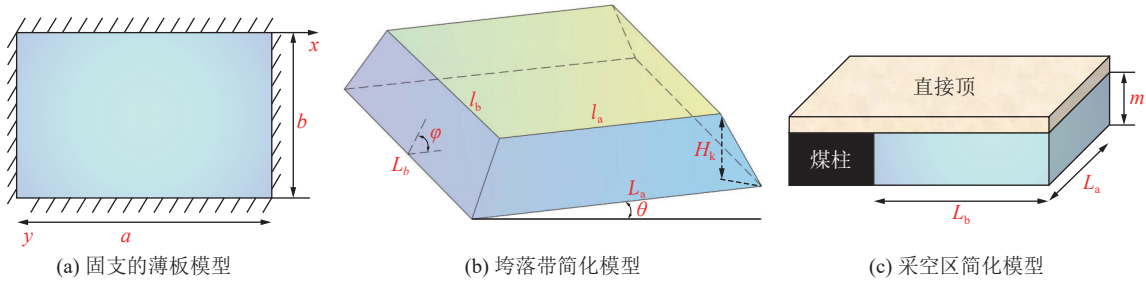


图 14 多层位立体空间简化模型

Fig.14 Simplified model of multi-layer three-dimensional space

落带破碎岩体的碎胀系数; θ 为煤层倾角; L_a 、 L_b 分别为工作面的倾向长度和走向长度; l_a 、 l_b 分别为垮落带顶面沿倾向和走向的长度, $l_a = L_a - 2H_k \cot \varphi$, $l_b = L_b - 2H_k \cot \varphi$; φ 为岩层破断角; n_m 为垮落带破碎岩体自由堆积状态下的总空隙率, $n_m = 1 - \frac{1}{K_p} + S_0$; S_0 为煤层顶板岩层的原始空隙率。

对于原位采空区空间, 采用膏体或固体充填的方式, 与煤层开采同步进行, 充填材料可直接控制直接顶, 使其不发生破断垮落。因此, 原位采空区空间体积即为采出煤层体积, 如图 14c 所示。故采空区的体积可以表示为

$$V_c = mL_a L_b \quad (6)$$

在实际的注浆充填过程中, 充填空间的结构演化是一个复杂的动态过程, 总体上可分为以下 4 个阶段。① 浆液扩散阶段: 浆液以高压或自流的方式注入充填空间, 向充填空间内的裂隙或空隙空间进行扩散, 初步形成充填网络。② 凝结固化阶段: 扩散后的浆液开始凝结固化, 逐渐形成具有一定强度的充填体, 充填体与围岩相互作用, 组成充填体-围岩的协同承载系统。③ 应力重新分布阶段: 充填体强度形成后, 由煤层开采引起的采场围岩应力变化将再次重新分布, 可能会在局部位置形成应力集中或释放引起围岩变化或破坏。④ 长期稳定阶段: 应力重新分布后, 充填体-围岩组成的协同承载系统在上覆岩层载荷的作用下可能发生蠕变、收缩或化学变化。除此之外, 井下环境因素(如地下水、温度、湿度等)亦可能影响充填体的长期性能, 需通过监测评估充填体的长期稳定性。

4.3.2 充填材料扩散/承载特性

在明晰多层位立体充填空隙空间结构演化的基础上, 优化充填工艺布局, 针对性地选择充填材料的形态, 可有效提升充填效率和充填效果, 保证多层位立体充填空隙空间结构的稳定性和安全性。若充填材料为流体, 则研究关键在于充填材料在空隙空间内的扩散特性。若充填材料为固态, 则研究关键在

于充填材料在空隙空间内的承载压缩特性。以高位离层注浆、低位垮落带注浆和原位固体改性充填为例揭示充填材料的扩散或承载特性。

1) 高位离层注浆充填

受工作面开采尺寸的影响, 离层空间并不是开放式空间, 具有边界限制。因此, 根据浆液在离层空间内流动是否受限, 可将浆液的扩散过程分为无边界扩散阶段和受限边界扩散阶段, 如图 15a 所示。

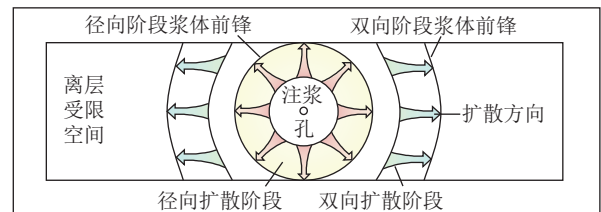
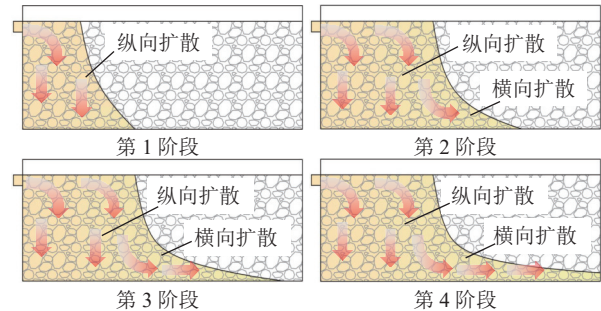
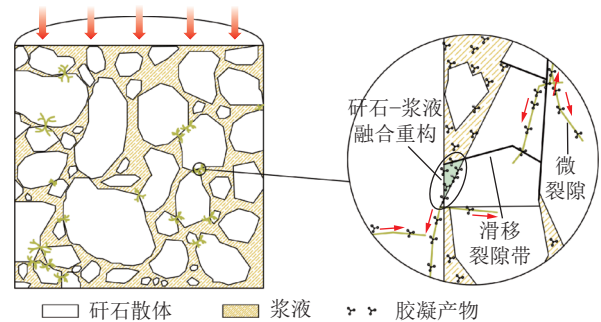
(a) 高位注浆充填浆液扩散规律^[62](b) 低位注浆充填浆液扩散规律^[63](c) 固体改性原位充填固结特征^[64]

图 15 煤基固废充填材料扩散固结特性

Fig.15 Diffusion consolidation characteristics of coal-based solid waste filling materials

① 无边界扩散阶段指浆液扩散初期不受离层空间边界的限制,能够相对自由地扩散。浆液的扩散路径主要由裂隙网络的连通性和几何形状决定,优先选择阻力较小的路径,形成分支状或网络状的扩散模式。由于边界未形成限制且裂隙分布具有非均质性,因此该阶段具有扩散速度快和浆液分布不均匀的特点。② 受限边界扩散阶段指浆液扩散进入中后期,离层空间边界开始限制浆液的扩散,浆液由自由流动转变为受限流动。随着注浆泵提供的初始动能逐渐消耗以及固体颗粒沉积,浆液流动性降低,扩散速度减慢,分布趋于均匀。这 2 个阶段共同描述了浆液在离层空间内从自由扩散到受限扩散的动态过程。

2) 低位垮落带注浆充填

浆液在垮落带破碎岩体内的扩散是一个复杂、隐蔽的过程,整体上呈现出先纵向扩散后横向扩散的规律,如图 15b 所示。根据浆液在垮落带破碎岩体内的扩散特点将浆液的扩散过程分为 4 个阶段:① 第 1 阶段,浆液从注浆孔流出,在破碎矸石表面形成椭圆形覆盖区,并向底部下渗,形成纵向扩散通道。② 第 2 阶段,浆液到达破碎矸石底部后开始横向扩散,并形成一定地流动坡度,同时由下向上充填空隙,上部覆盖区逐渐扩大,扩散范围显著增大。③ 第 3 阶段,上部覆盖区趋于稳定,顶部浆液扩散速度逐渐放缓,底部浆液继续横向扩散至破碎矸石边界。④ 第 4 阶段,底部浆液接触边界后,开始沿边界向上抬升,浆液高度上升,液面坡度保持稳定。

3) 原位固体改性充填

加浆改性固体充填是一种创新的充填工艺,其充填材料是矸石集料与胶凝浆液的集合体,具有空间分布不均质的特性,如图 15c 所示,其承载压缩特征包括 3 个过程。① 矸石啮合过程。外界压力使矸石重新排列,体积收缩,间隙被挤压密实,矸石间相互啮合并形成骨架结构,挤压作用下部分矸石棱角破碎,少数矸石形成滑移裂隙。② 黏结补强过程。胶凝浆液在外界压力和毛细作用下渗透到矸石孔隙或空隙中,与破碎矸石进行融合重构,增大破碎矸石界面间的摩擦力和充填体内部的黏聚力,使充填体与矸石结构保持完整并具备一定承载能力。③ 胶结固化过程。胶凝材料水化反应生成的胶凝产物将矸石骨架牢固连接,随着养护龄期增加,胶凝产物持续填充破碎矸石内部孔隙与空隙,改善整体结构的密实程度,显著提高充填体强度和性能。

4.4 充填材料-充填空间交互作用

4.4.1 充填材料-围岩协同作用机制

煤炭开采打破了围岩原始应力场、位移场和裂隙场的平衡状态,使得围岩应力发生重新分布,导致围岩失稳破坏进而引起覆岩变形与地表下沉。充填材料填充至井下充填空间与围岩组成协同承载系统,为围岩提供主动支撑,减少围岩应力集中的同时抑制其进一步变形和破坏。充填材料与围岩的界面性能、充填材料的力学性能、环境因素及时间效应等都会影响充填材料-围岩系统的稳定性,如图 16 所示。图中, F_1 为垂直向下的合力; F_2 为水平挤压合力; F_3 为垂直向上的合力; F 为合力。因素 A 为质量分数;因素 B 为粉煤灰与煤矸石的质量比;因素 E 为脱硫石膏与煤矸石的质量比; S_1 为充填体的初期高度; S_2 为充填体的蠕变变形; S_3 为充填体的最终高度。充填材料与围岩的界面性能决定了两者之间的应力传递和变形协调能力。界面的结合强度、摩擦因数和接触紧密程度直接影响充填材料对围岩的支撑效果,良好的界面结合效果使充填材料能够有效分担围岩的应力。充填材料的力学性能对围岩的应力分布和变形特征亦有显著的影响。强度决定了充填材料的承载能力,刚度决定了充填材料的变形协调能力,高强度和高刚度的充填材料能够提供较强的支撑作用,显著改善围岩的应力状态。环境因素(如温度、湿度和化学腐蚀等)会影响充填材料的水化反应和内部结构的演变过程。温度的升高会促进充填材料的水化反应速率,但是过高的温度会引起充填材料内部出现“热损伤”^[67]。湿度的升高不仅会促进充填材料的水化反应速率还会提高其含水率,过高的含水率会导致充填材料内部出现物理、化学和结构损伤^[5]。化学腐蚀会抑制充填材料界面过渡区的水化产物产生与积聚,破坏充填材料结构与颗粒间结合,降低充填材料的承载能力^[68]。充填材料-围岩系统的协同作用还需要综合考虑时间效应的影响,长期荷载作用下充填材料会发生疲劳损伤和蠕变变形,围岩在充填体的支撑下也可能发生应力松弛和变形调整。

4.4.2 充填材料-环境多场耦合机制

充填材料除了与围岩发生多场耦合作用外,与井下环境还存在渗流场、化学场等耦合问题。煤基固废中含有 Ni、Pb、Cd、Cr 和 As 等多种重金属^[69],这些重金属在充填开采过程中随充填材料填充至井下空间。在充填材料的自身泌水或顶板下沉引起的压力泌水作用下,部分重金属会随泌水组分扩散至井下空间。充填材料在相态转变过程中,内部重金

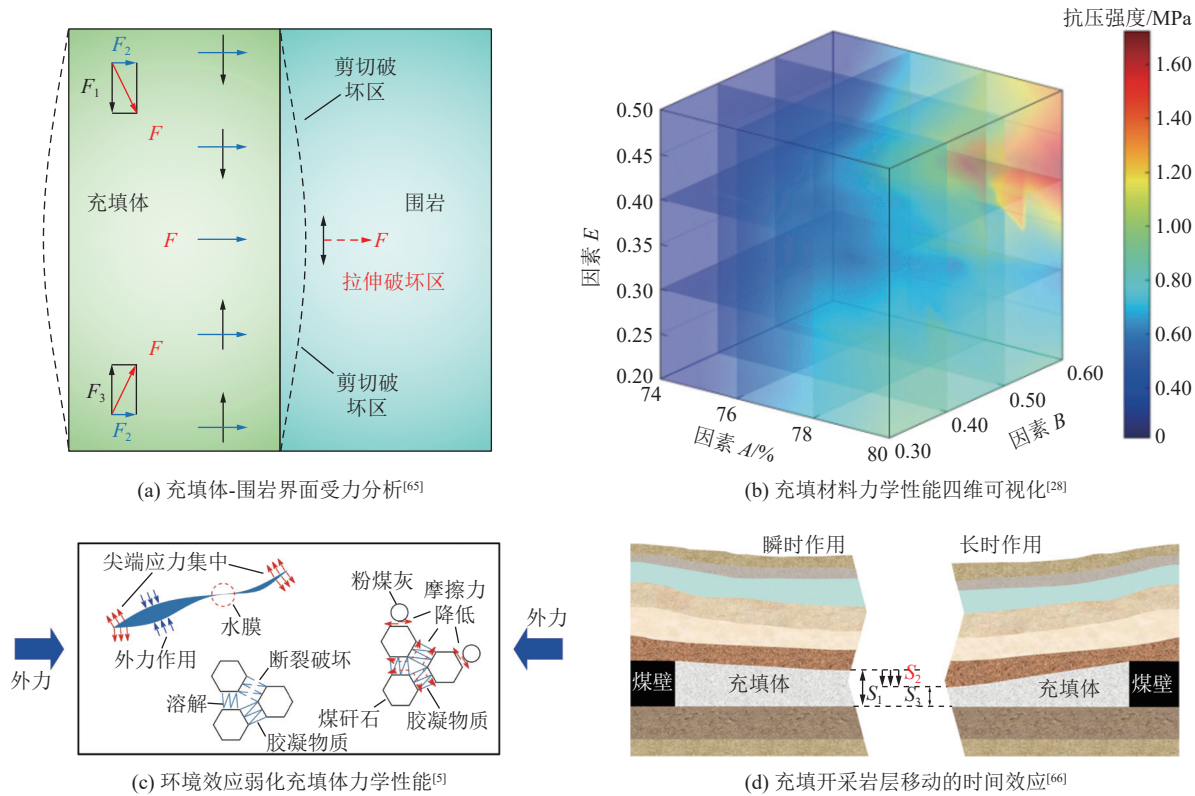


图 16 充填材料与围岩系统稳定性的影响因素

Fig.16 Factors affecting the stability of filling materials and surrounding rock system

属会在物理包裹、化学固定、吸附作用和酸性环境作用下固化在充填材料的内部^[70]。但在长期荷载、化学腐蚀、地下水侵蚀与冲刷等作用下,充填材料的内部结构会发生劣化,导致少量重金属在劣化过程中析出。在泌水扩散和结构劣化过程中析出的重金属会随地下水、老空水的流动渗透进围岩内部,在围岩内部形成重金属聚集效应。除此之外,固化后的充填材料为多孔结构,为井下气相(如瓦斯)和液相(如地下水)介质的流动提供了天然通道,使得气体和液体能够通过材料内部的孔隙网络顺畅流动。同时,多孔结构增大了充填材料的比表面积,增强了其吸附能力,使得充填材料中的矿物组分及元素可与渗流通道中的气相和液相介质发生析出、渗入、吸附、聚集和交换等耦合作用,这种物理场、化学场和渗流场的耦合作用形成了煤基固废中碳硫组分的地下封存效果,如图 17 所示。此外,尽管材料具有多孔特性,但其固化后仍具备较高的机械强度和较强的稳定性,能够承受井下复杂的地质条件和压力变化,为煤矿安全生产和高效开采提供了重要保障。

5 多层位立体充填示范工程

5.1 任家庄煤矿低位注浆充填

基于研究团队承担的国家重点研发计划课题

“多源煤基固废协同利用与绿色充填关键技术”,以宁夏煤业任家庄煤矿 110904 工作面为试验工作面开展充填示范作业。根据对宁东能源化工基地(宁东矿区)典型煤基固废理化性质的分析,结合充填材料高效精准制备技术,以煤矸石、粉煤灰、气化渣、炉底渣和脱硫石膏 5 种煤基固废制备充填材料,最终研发出一种煤基固废掺量 > 90%、煤基固废中气化渣掺量 > 10%、28 d 强度大于 2 MPa、初凝时间介于 4~6 h、终凝时间介于 8~12 h 的煤基固废绿色充填材料,以备充填现场采用。试验工作面的平均埋深 400 m,平均煤厚 6.66 m,平均倾角 13°,走向长度和倾向长度分别为 1 192 和 292 m,伪顶为厚 1.25~1.75 m 的石灰岩,直接顶为厚 7.36~9.04 m 的泥岩,基本顶为厚 8.62~11.16 m 的粉砂岩,直接底为厚 4.51~5.71 m 的粉砂岩。根据邻近工作面的开采经验,试验工作面伪顶和直接顶在开采过程中随采随落,采空区垮落矸石与上覆坚硬顶板之间存在适宜充填的较大空隙,且现场采用多点位移计对该充填空间进行了验证。根据建立的多层位立体空间充填方法评价体系,决定在试验工作面开展低位垮落带注浆充填作业。通过计算得出试验工作面的垮落带高度为 10.97~17.24 m,结合工作面的钻孔地质资料,选择位于工作面上方 22.49~30.19 m 的细粒

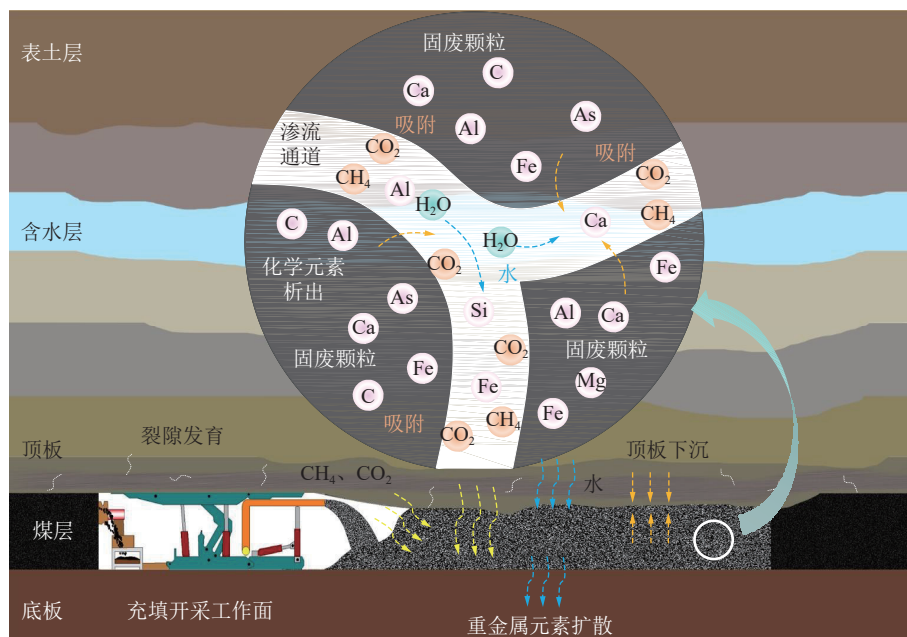


图 17 充填材料与环境的多场耦合机制

Fig.17 Multi-field coupling mechanism between filling materials and environment

砂岩作为注浆巷道布置层位,如图 18a 所示。试验工作面充填作业的成功实施,实现了年消纳煤基固废 30 万 t 的预期目标,为矿井创造了数千万元的经

济效益,有效缓解了宁东矿区煤基固废产量大、储量多和消纳少的问题,为类似工程地质条件的矿井提供了技术和经验指导。

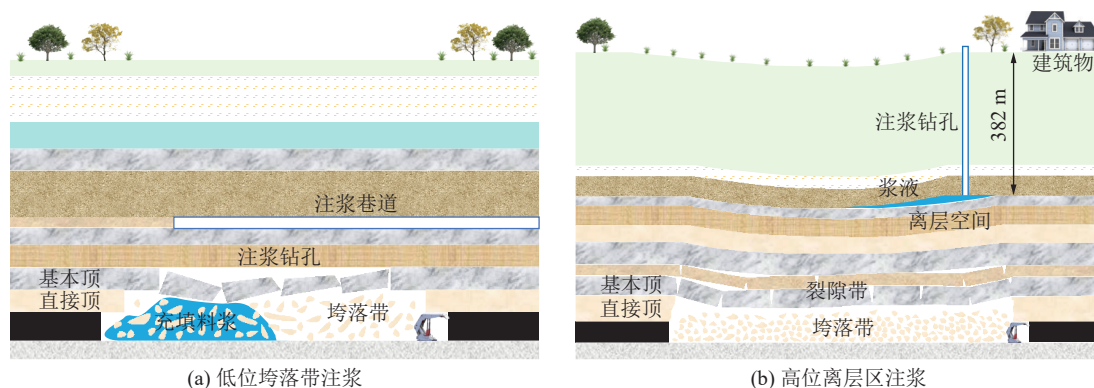


图 18 多层位立体充填示范工程

Fig.18 Demonstration project of multi-layer three-dimensional filling

5.2 霍尔辛赫煤矿高位注浆

为有效释放地面焦化厂压煤量同时保护建筑物,以山西省霍尔辛赫煤矿 3501 工作面为试验工作面开展充填示范作业。试验工作面的平均埋深为 530 m,平均煤厚为 5.6 m,煤层倾角为 $1^{\circ} \sim 12^{\circ}$,工作面的走向长度为 588 m,倾向长度为 246 m。基于建立的多层位立体空间充填方法评价体系,该示范项目以保护地表建筑物和释放“三下”压煤为目标,决定在试验工作面开展高位离层注浆充填作业。基于关键层理论,并结合实测法获得的试验工作面导水裂隙带高度 (76.72 m) 和为防止浆液渗漏而留设的

隔离带高度 (5 倍采高),确定了高位离层注浆的层位位于埋深为 382 m 的中粒砂岩层,如图 18b 所示。该试验工作面高位离层注浆充填项目的成功实施,在煤柱保护区内共回采 283 m,提高了资源回采率 (80% ~ 90%),释放压煤量 47.54 万 t,累计注浆量 62.4 万 m^3 ,消纳粉煤灰 48.5 万 t,经济效益累计达 4 亿元。同时试验工作面对的水平变形、倾斜、曲率和下沉值均满足《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》中规定的对于建构筑物 I 级损坏等级的要求,有效地控制了地表沉陷,保护了地表建筑物的安全。

6 结 论

1) 提出了煤矿开采多层位立体空间煤基固废充填方法, 阐述了多层位立体空间充填技术的内涵, 主要包括高位充填、原位充填和低位充填, 该技术的整体思路包括实验测试系统、破碎筛分系统、料浆制备系统、浆体输送系统和管道监测系统, 各系统协同运行、互不干扰, 共同实现煤基固废井下安全、高效、绿色、低碳处置。

2) 基于技术性能、经济效益、资源利用、安全性和环境减损 5 类指标属性, 充填材料性能、充填效率、适应能力、成本投入、产出效益、投资收益、材料来源、资源节约、固废处置、顶板控制、围岩控制、灾害控制、地表沉陷控制、生态修复和环境污染控制 15 项评价指标, 初步建立了多层位立体空间煤基固废充填方法的评价体系。

3) 提炼了充填材料高效精准制备、充填料浆管道输送特性、充填空间结构演化规律和充填材料-充填空间交互作用 4 项关键科学问题。围绕以上关键科学问题, 主要开展煤基固废充填材料成浆机理、充填材料精准制备技术框架、充填料浆流场稳态控制、充填料浆管道输送关键参数、充填空间空隙结构演化、充填材料扩散/承载特性、充填材料-围岩系统协同作用机制和充填材料-环境多场耦合机制 8 项研究内容。

4) 建成了 2 项多层位立体充填示范工程, 给出了任家庄煤矿低位垮落带注浆充填设计和霍尔辛赫煤矿高位离层注浆充填设计, 任家庄煤矿以煤矸石、粉煤灰、气化渣、炉底渣和脱硫石膏 5 种煤基固废制备出多种流动性和初终凝性能良好的充填材料, 实现了年消纳煤基固废 30 万 t 的预期目标; 霍尔辛赫煤矿释放压煤量 47.54 万 t, 累计注浆量 62.4 万 m³, 消纳粉煤灰 48.5 万 t, 地表下沉值满足《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》中规定的对于构筑物 I 级损坏等级的要求, 有效地控制了地表沉陷, 保护了地表建筑物的安全。

参考文献(References):

- [1] 胡振琪, 赵艳玲, 毛臻. 煤矸石规模化生态利用原理与关键技术[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 978-987.
HU Zhenqi, ZHAO Yanling, MAO Zhen. Principles and key technologies for the large-scale ecological utilization of coal gangue[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 978-987.
- [2] 张吉雄, 周楠, 高峰, 等. 煤矿开采嗣后空间矸石注浆充填方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 150-162.
ZHANG Jixiong, ZHOU Nan, GAO Feng, et al. Method of gangue grouting filling in subsequent space of coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 150-162.
- [3] 朱磊, 古文哲, 宋天奇, 等. 采空区煤矸石浆体充填技术研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 143-154.
ZHU Lei, GU Wenzhe, SONG Tianqi, et al. Research progress and prospect of coal gangue slurry backfilling technology in goaf[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 143-154.
- [4] 杨科, 赵新元, 何祥, 等. 多源煤基固废绿色充填基础理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4201-4216.
YANG Ke, ZHAO Xinyuan, HE Xiang, et al. Basic theory and key technology of multi-source coal-based solid waste for green backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4201-4216.
- [5] 杨科, 于祥, 何祥, 等. 不同含水状态矸石胶结充填体能量演化与损伤特性研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(1): 26-42.
YANG Ke, YU Xiang, HE Xiang, et al. Energy evolution and damage characteristics of gangue cemented backfill in different water content states[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(1): 26-42.
- [6] 朱磊, 古文哲, 袁超峰, 等. 煤矸石浆体充填技术应用与展望[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 93-104.
ZHU Lei, GU Wenzhe, YUAN Chaofeng, et al. Application and prospect of coal gangue slurry filling technology[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 93-104.
- [7] 董书宁, 于树江, 董兴玲, 等. 煤基固废与高盐废水“固液协同”充填处置关键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(1): 163-173.
DONG Shuning, YU Shujiang, DONG Xingling, et al. A key technology for synergistic backfilling of coal-based solid waste and high-salinity wastewater[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(1): 163-173.
- [8] 赵康, 伍俊, 马超, 等. 我国煤矿固、液、气“三废”地质封存研究现状与生态环境协同发展的关系[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2785-2798.
ZHAO Kang, WU Jun, MA Chao, et al. Relationship between the current status of research on geological storage of solid, liquid and gas wastes in coal mines and the coordinated development of the ecological environment in China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2785-2798.
- [9] 中华人民共和国中央人民政府. “无废城市”建设试点工作方案 [EB/OL]. [2019-01-21]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2019-01/21/content_5359620.htm.
- [10] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国固体废物污染环境防治法 [EB/OL]. [2020-04-30]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-04/30/content_5507561.htm.
- [11] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [EB/OL]. [2021-03-13]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [12] 国家发展和改革委员会. 关于“十四五”大宗固体废弃物综合利

- 用的指导意见(发改环资〔2021〕381号)[EB/OL]. [2021-03-18]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-03/25/content_5595566.htm.
- [13] 国家发展改革委. 关于加强煤炭清洁高效利用的意见(发改运行〔2024〕1345号)[EB/OL]. [2024-09-29]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202409/t20240929_1393429.html.
- [14] 刘建功, 李新旺, 何团. 我国煤矿充填开采应用现状与发展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 141-150.
- LIU Jiangong, LI Xinwang, HE Tuan. Application status and prospect of backfill mining in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 141-150.
- [15] YU X, YANG K, HE X, et al. Research progress on multi-source coal-based solid waste (MCSW) resource utilization and backfill mining basic theory: A systematic literature review[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, 195: 106670.
- [16] 刘建功, 赵家巍, 刘扬, 等. 煤矿矿区普适性拓展型固体改性充填采煤技术与装备[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 380-399.
- LIU Jiangong, ZHAO Jiawei, LIU Yang, et al. General-purpose expansion type solid modification backfilling mining technology and equipment for coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 380-399.
- [17] 张强, 杨康, 曹津铭, 等. 视频 AI 算法分析的煤矿固体智能充填开采方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 163-173.
- ZHANG Qiang, YANG Kang, CAO Jinming, et al. Solid intelligent backfill coal mining method with video ai algorithm analysis in coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(11): 163-173.
- [18] 陈登红, 李超, 张治国. 宁东矿区气化渣基膏体充填材料性能优化研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 41-50.
- CHEN Denghong, LI Chao, ZHANG Zhiguo. Study on performance optimization of gasification slag based paste filling materials in Ningdong mining area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12): 41-50.
- [19] 李亚娇, 罗阳, 王铁, 等. 粉煤灰基充填膏体制备过程中氨气释放的超声强化特性[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3063-3073.
- LI Yajiao, LUO Yang, WANG Tie, et al. Ultrasonic strengthening characteristics of ammonia release during the preparation of fly ash based filling paste[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3063-3073.
- [20] 吴少康, 张俊文, 徐佑林, 等. 煤矿高水充填材料物理力学特性研究及工程应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(4): 754-763.
- WU Shaokang, ZHANG Junwen, XU Youlin, et al. Research and engineering application on physical and mechanical properties of coal mine high water filling materials[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(4): 754-763.
- [21] 王雨利, 路会娟, 杨宇杰. 氟石膏对高水充填材料性能的影响[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 42-51.
- WANG Yuli, LU Huijuan, YANG Yujie. The effect of fluorogypsum on the properties of high-water filling materials[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(6): 42-51.
- [22] 韩磊, 杨科, 王天君, 等. 采动覆岩离层注浆地表沉陷“四区”控制模型及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 23-35.
- HAN Lei, YANG Ke, WANG Tianjun, et al. “Four Zones” control model and application for surface subsidence of bed separation grouting mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(8): 23-35.
- [23] 郭文兵, 李龙翔, 杨伟强, 等. 覆岩离层注浆层位判定及隔浆层稳定性研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 264-280.
- GUO Wenbing, LI Longxiang, YANG Weiqiang, et al. Determination of grouting layer and stability analysis of slurry-resisting overburden in separation grouting[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 264-280.
- [24] 屠世浩, 郝定溢, 苗凯军, 等. 深部采选充一体化矿井复杂系统协同开采[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 431-441.
- TU Shihao, HAO Dingyi, MIAO Kaijun, et al. Research of synergistic mining for mining, dressing and backfilling integrated deep mines with complicated systems[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 431-441.
- [25] 张昊, 张强, 左小, 等. 生态环境保护性的采选充系统设计及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 548-557.
- ZHANG Hao, ZHANG Qiang, ZUO Xiao, et al. Design and application of mining-separating-backfilling system for mining ecological and environmental protection[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 548-557.
- [26] 董霁红, 王立兵, 冯晓彤, 等. 黄河流域煤炭-煤电-煤化工场地特征精准智能识别方法及应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 1011-1024.
- DONG Jihong, WANG Libing, FENG Xiaotong, et al. Precise intelligent recognition method and application of coal-power-chemical industry sites characteristics in Yellow River Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1011-1024.
- [27] 奚弦, 桑树勋, 刘世奇. 煤矿区固废矿化固定封存 CO₂ 与减污降碳协同处置利用的研究进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(8): 3619-3634.
- XI Xian, SANG Shuxun, LIU Shiqi. Progress in research of CO₂ fixation and sequestration by coal mine solid waste mineralization and co-disposal of pollution and carbon reduction[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8): 3619-3634.
- [28] 杨科, 张继强, 何祥, 等. 多源煤基固废胶结充填体力学及变形破坏特征试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(6): 102-114.
- YANG Ke, ZHANG Jiqiang, HE Xiang, et al. Experimental study on the mechanics and deformation failure characteristics of multi-source coal-based solid waste cemented backfill[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(6): 102-114.
- [29] 徐玮. 煤矸石基分子筛的制备、改性及晶型调控研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.

- XU Wei. Research on the preparation, modification and crystal form regulation of coal gangue-based molecular sieves[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2024.
- [30] 王宇星. 粉煤灰提铝活化焙烧-浸出反应特性与机理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2024.
- WANG Yuxing. Study on characteristics and mechanism of activated roasting-leaching reaction for extracting aluminum from fly ash[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2024.
- [31] 王玉涛. 煤矸石固废无害化处置与资源化综合利用现状与展望[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(10): 54-66.
- WANG Yutao. Status and prospect of harmless disposal and resource comprehensive utilization of solid waste of coal gangue[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(10): 54-66.
- [32] 苗贺朝, 王海, 王晓东, 等. 粉煤灰基防渗注浆材料配比优选及其性能试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(9): 230-239.
- MIAO Hechao, WANG Hai, WANG Xiaodong, et al. Study on ratio optimization and performance test of fly ash-based impermeable grouting materials[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(9): 230-239.
- [33] 竹涛, 武新娟, 邢成, 等. 煤矸石资源化利用现状与进展[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(1): 380-390.
- ZHU Tao, WU Xinjuan, XING Cheng, et al. Current situation and progress of coal gangue resource utilization[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(1): 380-390.
- [34] 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.
- [35] 顾成进, 杨宝贵, 路绍杰, 等. 双碳背景下龙王沟煤矿新型绿色矿山建设[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(S1): 440-448.
- GU Chengjin, YANG Baogui, LU Shaojie, et al. Construction of new green mine in Longwanggou coal mine under the background of double carbon[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(S1): 440-448.
- [36] ZHANG H L, SHU Y X, YUE S L, et al. Preheating pyrolysis-char combustion characteristics and kinetic analysis of ultra-low calorific value coal gangue: Thermogravimetric study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 229: 120583.
- [37] 时雅倩, 关渝珊, 葛伟哲, 等. 粉煤灰建材化增值利用: 最新技术与未来展望[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(6): 2860-2875.
- SHI Yaqian, GUAN Yushan, GE Weizhe, et al. Value-added utilization of pulverized fuel ash as construction materials: State-of-the-art technologies and future prospects[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(6): 2860-2875.
- [38] BAI R, YAN C W, ZHANG J, et al. Microstructural characteristics of aluminosilicate minerals in cement clinker prepared from coal gangue, carbide slag, and desulfurization gypsum[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 451: 138861.
- [39] 陈宇良, 朱玲, 张绍松, 等. 粉煤灰陶粒混凝土三轴受压破坏机制及强度准则[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(8): 2196-2204.
- CHEN Yuliang, ZHU Ling, ZHANG Shaosong, et al. Failure mechanism and strength criterion of fly ash ceramsite concrete under triaxial compression[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(8): 2196-2204.
- [40] ZHONG M Y, MENG J, NING B K, et al. Preparation and alkali excitation mechanism of coal gangue-iron ore tailings non-sintering ceramsite[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 426: 136209.
- [41] 张国卿, 宋舒波, 王兴瑞, 等. 煤固废基分子筛的制备及其应用进展[J]. *化工进展*, 2024, 43(5): 2311-2323.
- ZHANG Guoqing, SONG Shubo, WANG Xingrui, et al. Recent advances in the synthesis and application of zeolites from coal-based solid wastes[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, 43(5): 2311-2323.
- [42] YAN K Z, ZHANG J Y, LIU D D, et al. Feasible synthesis of magnetic zeolite from red mud and coal gangue: Preparation, transformation and application[J]. *Powder Technology*, 2023, 423: 118495.
- [43] 康超, 乔金鹏, 杨胜超, 等. 煤矸石中有价关键金属活化提取研究进展[J]. *化工学报*, 2023, 74(7): 2783-2799.
- KANG Chao, QIAO Jinpeng, YANG Shengchao, et al. Research progress on activation extraction of valuable metals in coal gangue[J]. *CIESC Journal*, 2023, 74(7): 2783-2799.
- [44] QIN Q Z, GENG H H, DENG J S, et al. Al and other critical metals co-extraction from coal gangue through delamination pretreatment and recycling strategies[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 477: 147036.
- [45] 邹淑平, 赵锦生, 罗浩, 等. 煤基固废用于生态修复的技术进展与环境风险分析[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(S2): 769-776.
- ZOU Shuping, ZHAO Jinsheng, LUO Hao, et al. Utilization of coal-based solid waste in ecological restoration: Technological advances and risk analysis[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(S2): 769-776.
- [46] LU Z J, WANG H S, WANG Z X, et al. Critical steps in the restoration of coal mine soils: Microbial-accelerated soil reconstruction[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 368: 122200.
- [47] 邓友生, 姚志刚, 冯爱林, 等. 不同垫层下煤矸石桩网复合路基承载特性[J]. *岩土力学*, 2024, 45(7): 1895-1905.
- DENG Yousheng, YAO Zhigang, FENG Ailin, et al. Bearing characteristics of coal gangue pile-net composite embankment with different cushion layers[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(7): 1895-1905.
- [48] LUO Y F, ZHAO X C, ZHANG K. Coal gangue in asphalt pavement: A review of applications and performance influence[J].

- [Case Studies in Construction Materials](#), 2024, 20: e03282.
- [49] 古文哲, 朱磊, 刘治成, 等. 煤矿固体废弃物流态化浆体充填技术[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 83–91.
GU Wenzhe, ZHU Lei, LIU Zhicheng, et al. Fluidization slurry backfilling technology of coal mine solid waste[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(3): 83–91.
- [50] 于祥, 杨科, 何祥, 等. 饱和浸水过程矸石胶结充填体强度及损伤特征[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(2): 147–159.
YU Xiang, YANG Ke, HE Xiang, et al. Strength and damage characteristics of cemented gangue backfill during saturated immersion[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(2): 147–159.
- [51] 黄艳利, 王文峰, 卞正富. 新疆煤基固体废弃物处置与资源化利用研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 319–330.
HUANG Yanli, WANG Wenfeng, BIAN Zhengfu. Prospects of resource utilization and disposal of coal-based solid wastes in Xinjiang[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 319–330.
- [52] 谢和平, 高明忠, 刘见中, 等. 煤矿地下空间容量估算及开发利用研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1487–1503.
XIE Heping, GAO Mingzhong, LIU Jianzhong, et al. Research on exploitation and volume estimation of underground space in coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1487–1503.
- [53] 杨柳华, 高扬, 尹升华, 等. 基于 PVM 技术的充填膏体搅拌过程微观结构演化[J]. 煤炭学报, 2023, 48(S1): 325–333.
YANG Liuhua, GAO Yang, YIN Shenghua, et al. Microstructure evolution of filling paste during mixing based on PVM technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(S1): 325–333.
- [54] 王浩. 矸石粉煤灰充填料浆管道输送不稳定流及其影响研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
WANG Hao. Study on unsteady flow and influence of gangue-fly ash filling slurry transporting in pipeline[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2019.
- [55] WANG L M, CHENG L, YIN S H, et al. Multiphase slurry flow regimes and its pipeline transportation of underground backfill in metal mine: Mini review[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 402: 133014.
- [56] 吴爱祥, 李红, 程海勇. 屈服型非牛顿流体流型演化的几何判别[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(1): 1–9.
WU Aixiang, LI Hong, CHENG Haiyong. Ageometric method for flow pattern identification of yield stress fluids[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(1): 1–9.
- [57] 杨柳华, 李金仓, 焦华喆, 等. 引发全尾砂料浆触变特征的临界粒径研究[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(3): 970–983.
YANG Liuhua, LI Jincang, JIAO Huazhe, et al. Study on critical particle size of thixotropic characteristics of full tailings slurry[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2024, 34(3): 970–983.
- [58] 李全生. 井工煤矿减损开采理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 988–1002.
- LI Quansheng. Reduction theory and technical system of underground coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(2): 988–1002.
- [59] LI Q S. Reduction theory and technical system of underground coal mining[J]. *Journal of the China Coal Society*, 2024, 49(2): 988–1002.
- [60] 张鑫, 乔伟, 雷利剑, 等. 综放开采覆岩离层形成机理[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2): 342–349.
ZHANG Xin, QIAO Wei, LEI Lijian, et al. Formation mechanism of overburden bed separation in fully mechanized top-coal caving[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(S2): 342–349.
- [61] 孟召平, 师修昌, 刘珊珊, 等. 废弃煤矿采空区煤层气资源评价模型及应用[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 537–544.
MENG Zhaoping, SHI Xiuchang, LIU Shanshan, et al. Evaluation model of CBM resources in abandoned coal mine and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(3): 537–544.
- [62] 李建, 郑恺丹, 轩大洋, 等. 覆岩隔离注浆充填浆液无压阶段扩散规律实验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 78–86.
LI Jian, ZHENG Kaidan, XUAN Dayang, et al. Experimental study on diffusion law of grouting slurry in overburden isolation grouting in pressureless stage[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S1): 78–86.
- [63] HE X, WEI Z, YANG K, et al. Experimental study on the diffusion law of coal-based solid waste slurry with grouting filling in the gangue voids of the caving zone[J]. *ACS Omega*, 2024, 9(1): 264–275.
- [64] 杨科, 方珏静, 张吉雄, 等. 加浆改性固体充填材料承载压缩特性与固结机制[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(3): 456–468.
YANG Ke, FANG Juejing, ZHANG Jixiong, et al. Compression load-bearing characteristics and consolidation mechanism of grout-modified solid backfill materials[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(3): 456–468.
- [65] 崔博强, 白锦文, 冯国瑞, 等. 柱旁单侧充填煤充结构体的破坏响应特征与失稳机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(6): 2431–2446.
CUI Boqiang, BAI Jinwen, FENG Guorui, et al. Failure response characteristics and mechanism of coal-backfilling structures in single pillar-side backfilling[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(6): 2431–2446.
- [66] 黄鹏, 张吉雄, 郭宇鸣, 等. 深部矸石充填体黏弹性效应及顶板时效变形特征[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 489–497.
HUANG Peng, ZHANG Jixiong, GUO Yuming, et al. Viscoelastic effect of deep gangue backfill body and time-dependent deformation characteristics of roof in deep mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(3): 489–497.

- [67] 刘伟震, 郭忠平, 黄万朋, 等. 不同温度养护后胶结充填体三轴卸围压力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(11): 2268–2282.
- LIU Weizhen, GUO Zhongping, HUANG Wanpeng, et al. Experimental study on mechanical characteristics of cemented backfill under triaxial unloading confining pressure after cured at different temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(11): 2268–2282.
- [68] 杜兆文, 温卓越, 李帅乾, 等. 氯盐作用下膏体充填体力学特性及劣化机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(12): 2924–2939.
- DU Zhao wen, WEN Zhuoyue, LI Shuaiqian, et al. Study on the mechanical properties and degradation mechanism of backfill paste under the action of chloride salts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(12): 2924–2939.
- [69] 殷文文, 张理群, 丁丹, 等. 淮南潘一矿煤固废精细化学结构及重金属生态风险评价[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(12): 176–184.
- YIN Wenwen, ZHANG Liqun, DING Dan, et al. Coal-based solid waste from the Panyi Mine in the Huainan mining area: Fine-scale chemical structure and ecological risk assessment of heavy metals[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(12): 176–184.
- [70] 刘恒凤, 张吉雄, 周楠, 等. 矽石基胶结充填材料重金属浸出及其固化机制[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 523–531.
- LIU Hengfeng, ZHANG Jixiong, ZHOU Nan, et al. Study of the leaching and solidification mechanism of heavy metals from gangue-based cemented paste backfilling materials[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 523–531.