

煤炭资源四元开发模式创新与实践

张吉雄^{1,2}, 张 强², 周 楠², 李 猛², 巨 峰¹

(1. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要:我国煤炭开采技术经历了多次革新, 煤炭生产集约化、现代化水平持续提升。为实现新时代能源高质量发展, 煤炭资源低碳化开发和清洁化利用势在必行。提出了契合能源高质量发展的煤炭资源四元开发模式, 即在井下构建井巷掘进(掘)、煤炭开采(采)、煤矸分选(选)及固废充填(充)四元一体的统筹开发体系, 形成了井下掘-采-选-充协调生产系统布局。建立了四元开发理论与技术框架, 在理论方面, 包含矿井四元开发系统布局方法、充填开采岩层控制理论、四元开发受限空间分选方法和四元开发固废性能调控机制等关键科学问题; 在技术方面, 包含开拓准备、高效采充、高效分选和充填材料制配等关键技术。给出了煤炭资源四元开发工程设计方法, 从系统布局、围岩控制、井下分选、材料性能调控等方面阐述了四元开发模式的理论与方法创新。同时, 系统梳理了井巷掘进、煤炭开采、煤矸分选及固废充填等四元紧密关联的核心技术。典型工程实践案例验证了四元开发模式在减排降耗、弱化开采扰动强度和提高资源采出率等方面成效显著。四元开发模式破解了资源开发与环境保护之间的矛盾, 是我国煤炭资源绿色低碳开发的重要路径, 未来将与矿山新能源开发等需求相结合, 进一步拓展其理论与技术体系。

关键词: 四元模式; 煤矸分选; 充填开采; 绿色开采; 低碳开发

中图分类号: TD821 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)04-2020-17

Innovation and practice of quadrilateral development model for coal resources

ZHANG Jixiong^{1,2}, ZHANG Qiang², ZHOU Nan², LI Meng², JU Feng¹

(1. State Key Laboratory for Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: China's coal mining technology has undergone many innovations, with continuous improvements in the intensification and modernization levels of coal production. To achieve high-quality energy development in the new era, low-carbon development and clean utilization of coal resources are imperative. This paper proposes a quaternary development model of coal resources aligned with high-quality energy development, namely constructing an integrated underground development system comprising roadway layout (excavation), coal mining (mining), coal gangue separation (selection), and solid waste backfilling (backfilling). This creates a coordinated production system layout of underground excavation-mining-selection-backfilling. A theoretical and technical framework for the quaternary development model is established. Theoretical aspects encompass key scientific issues such as mine quaternary development system layout methods, rock strata control theory for backfill mining, separation methods under constrained spatial conditions of quaternary development, and performance regulation mechanisms for solid waste in the quaternary development. Technological aspects include critical

收稿日期: 2025-02-10 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2025.0208

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3904300); 国家自然科学基金重点资助项目(52130402); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B21016)

作者简介: 张吉雄(1974—), 男, 宁夏中卫人, 教授, 博士生导师。E-mail: 2011@cumt.edu.cn

通讯作者: 张 强(1986—), 男, 湖北宣恩人, 教授, 博士生导师。E-mail: leafkky@163.com

引用格式: 张吉雄, 张强, 周楠, 等. 煤炭资源四元开发模式创新与实践[J]. 煤炭学报, 2025, 50(4): 2020-2036.

ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Innovation and practice of quadrilateral development model for coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(4): 2020-2036.



移动阅读

development technologies such as preparatory excavation, efficient mining-backfilling, high-efficiency separation, and preparation and deployment of backfilling materials. An engineering design method for the quaternary development of coal resources is presented, elaborating on the theoretical and methodological innovations of the quaternary development model from the perspectives of system layout, surrounding rock control, underground separation, and material performance regulation. Additionally, core technologies closely associated with the quaternary framework, including roadway layout, coal mining, coal gangue separation, and solid waste backfilling, are systematically reviewed. Typical engineering practice cases validate the significant advantages of the quaternary development model in emission reduction, energy conservation, mitigation of mining disturbances, and improved resource recovery rates. The quaternary development model effectively resolves the contradiction between resource exploitation and environmental protection, representing an important path for the green and low-carbon development of China's coal resources. In the future, it will integrate with the demands of new energy development in mines, further expanding its theoretical and technological systems.

Key words: quadrilateral model; coal gangue separation; backfilling mining; green mining; low carbon development

0 引言

煤炭作为我国主体能源,在我国能源体系中承担着能源安全保障及推动社会发展的重要使命^[1-3]。2024年,我国全年一次能源生产总量49.8亿t标准煤,其中原煤产量高达47.8亿t;能源消费总量为59.6亿t标准煤,其中煤炭消费占比53.2%^[4]。当前,我国已进入高质量发展的新阶段,着力形成煤炭智能、安全、高效、绿色生产方式,力争2030年实现碳达峰、2060年实现碳中和^[5]。在“双碳”目标下,煤炭资源开采面临生态环境保护、降碳减排等诸多压力,需加快转变开发利用方式,深入推进煤炭资源开发模式的创新。

煤炭资源开发模式随着煤层赋存条件、技术水平、市场需求、安全与环保意识转变而不断变革,传统地下开采正由长壁、柱式模式向绿色开采模式发展,其中充填开采已经发展成为煤炭资源绿色开发的核心技术,在提高煤炭采出率、减少煤基固废排放、控制地表沉陷等方面具有显著优势。然而,当前绿色开发模式以现有煤矿生产布局为基础,鲜有将矿井开拓、准备、回采布局与煤炭资源开采、分选及固废处置和岩层控制等高度融合,致使煤炭开采、煤矸分选、充填技术的结合仍存在诸多技术瓶颈,如生产系统集约度不够、充填开采效率和充填材料强度不足等问题。因此,深入研究煤炭资源的安全高效开采、煤矸石的井下高效分选以及充填材料的性能优化,对于推动煤炭行业的绿色转型与可持续发展具有重要意义^[6-9]。

基于此,笔者所在团队长期致力于煤炭资源绿色开采与环境保护方面的技术研发与应用推广工作,在煤矸分选与充填技术研发方面,先后经历了掘巷充填、掘-采-充、掘-采-选-充和掘-采-选-充拓展研究时期。1997年,研究矸石排放环境影响问题及井下处理方法,初步探索了矸石井下处置技术,即掘巷充填技

术时期^[10-11];2005年,首次在新汶翟镇煤矿研发综合机械化矸石充填采煤技术并进行了工程示范,2008年,团队首篇博士论文《矸石直接充填综采岩层移动控制及其应用》研究完成^[12],2010年出版首部煤矿原矸充填学术专著《综合机械化固体废物充填采煤方法与技术》^[13],2012年获国家技术发明二等奖,至此构建出充填采煤技术框架,进入掘-采-充时期^[14];2015年构建了采选充一体化集成系统,并建立现场工程示范;2017年获国家自然科学基金杰出青年科学基金资助,形成深部煤炭采选充绿色化开采技术体系^[15-17],2018年获批准深地专项国家重点研发计划项目,并于2021年通过验收,自此创立采选充理论与技术体系^[18-20],进入掘-采-选-充时期;2022年出版学术专著《深部煤炭资源采选充+X绿色化开采方法》;2023年获批准循环经济国家重点研发计划项目,并在谢和平院士提出的负碳充填技术^[21]架构指导下,开展了相关装备及工艺研究,初步形成煤炭资源开发全新模式,即进入掘-采-选-充拓展研究时期。

笔者在上述研究的基础上,系统提出煤炭资源四元开发模式,明确了四元开发模式的概念、内涵与技术框架,阐述了煤炭四元开发在理论、技术、装备及工艺方面的创新。新巨龙煤矿与义桥煤矿的工程实践证明煤炭四元开发技术具有显著的优势,为未来四元开发技术的拓展提供了借鉴。

1 煤炭资源四元开发全新模式

煤炭资源开发模式的演进是为了适应新时代发展的要求,实现矿山生态环境的源头保护。下文将从概念内涵、理论技术体系、工程设计方法3个层面系统阐述四元开发模式。

1.1 四元开发的概念与内涵

四元开发高度协同了矿井井巷布局、煤炭资源回

采与分选、岩层移动与地表沉陷控制、固废绿色处置,体现了煤矿全生命周期绿色开发,与一元、二元、三元开发模式一脉相承、层层递进。

一元开发模式,指巷采出煤,即运用人力捡煤或者简单爆破手段掘巷出煤,未匹配完整的井下通风与开采系统,如图 1a 所示。该模式煤炭资源采出率低、开采效率低、安全性差,是探索煤炭开采方式的初始阶段,为手工掘煤的一元开发时期。一元开发模式作为煤炭开采的初始阶段,其关键难题在于难以突破人工开采的物理极限,缺乏系统化开采设计,未建立基本的开采理论与方法体系。

二元开发模式,指井巷掘进+煤炭开采,即布置完整的井巷系统和煤炭开采系统进行煤炭开采,煤炭资源开发考虑了安全性,进行有规划设计的开采,如图 1b 所示。该模式开采效率和安全性显著提升。井巷布置完全满足开拓、准备及回采需求。回采工艺包括炮采、普采、综采等。该模式面临关键科学问题是采动空间围岩稳定性控制机理,需要解决开采技术及装备与复杂地质条件相适应等方面的技术难题。

三元开发模式,指井巷掘进+煤炭开采+固废充填,即将充填技术融合到二元模式中,在传统井巷布置的基础上,增设与充填相关的井巷掘进工程,包括井上下充填材料制备运输系统,井下矸石储运汇集系统等,如图 1c 所示。充填技术包含固体充填、膏体充填、高水充填、长壁逐巷胶结充填等。该模式将煤炭资源开采与环境保护统筹考虑,但需解决采充时空协同、采充装备及工

艺的高效配合、大宗煤基固废高效处置等关键技术难题,以及充填控制岩层移动与地表沉陷等科学问题。

四元开发模式,指井巷掘进+煤炭开采+煤矸分选+固废充填,即通过变革开采系统布局,将煤矸井下分选技术融合到三元模式中,形成井巷掘进、煤炭开采、煤矸分选及固废充填四位一体的煤炭资源四元开发系统布局,如图 1d 所示。该模式针对我国煤炭资源开发过程中持续存在的固废排放和灾害防控等突出问题而提出,变革传统“煤炭井下开采、煤矸地面分选、固废地面排放及岩层垮落”模式为“煤炭井下开采、煤矸井下分选、固废井下充填处置及岩层稳定控制”新模式,四元开发模式是绿色开采理念的深化与进阶,为煤基固废处置、灾害防控、双碳战略目标实现提供原创性技术途径。其中,煤矸井下分选技术主要有重力分选、干法分选和智能分选等。该模式是在三元模式开发的基础上增设井下分选系统,井下分选系统主要包括用于布置煤矸分选、破碎、运输等设备的大型分选硐室群。该模式的科学问题包括深部受限空间煤矸精确分选、大断面硐室群稳定性控制、井下采选充高效协同作业方法等。

1.2 四元开发的理论与技术框架体系

设计四元开发的理论与技术框架如下:

在理论方面,四元开发模式需综合考虑矿井生产的多个关键环节,通过优化巷硐布局、控制岩层移动、高效分选煤矸和调控固废性能,包括矿井四元开发系统布局方法、充填开采岩层移动控制机理、四元开发

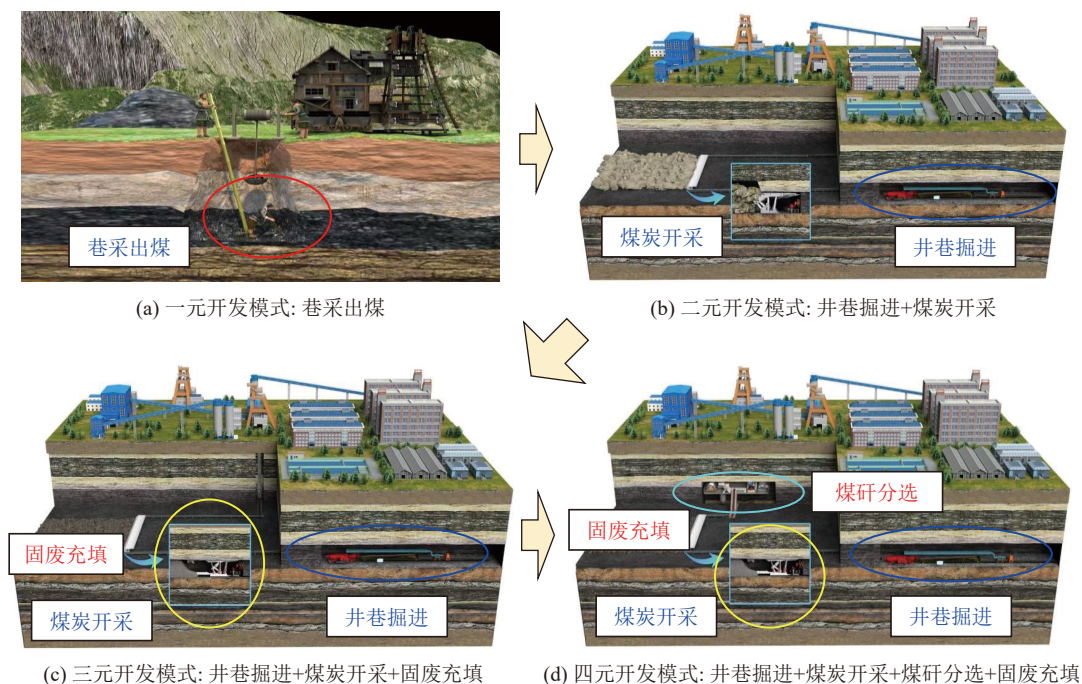


图 1 四元开发模式演化历程

Fig.1 Evolutionary history of quadrilateral development model

受限空间精确分选原理和四元开发固废性能调控机制等基础理论与方法。

在技术方面,四元开发技术包括开拓准备、高效采充、高效分选和充填材料制配4个方面的相关技术。开拓准备方面包含固废返井运输、井下储汇等技术,确保充填材料的有效输送与储存;高效采充方面包含

固体智能充填、长壁逐巷充填等技术;高效分选方面包含大型硐室群稳控、紧凑模块化分选设备等创新技术;充填材料制配方面包含材料性能调控、绿色低碳制备、大流量连续输送等技术。

煤炭资源四元开发模式理论与技术框架如图2所示。

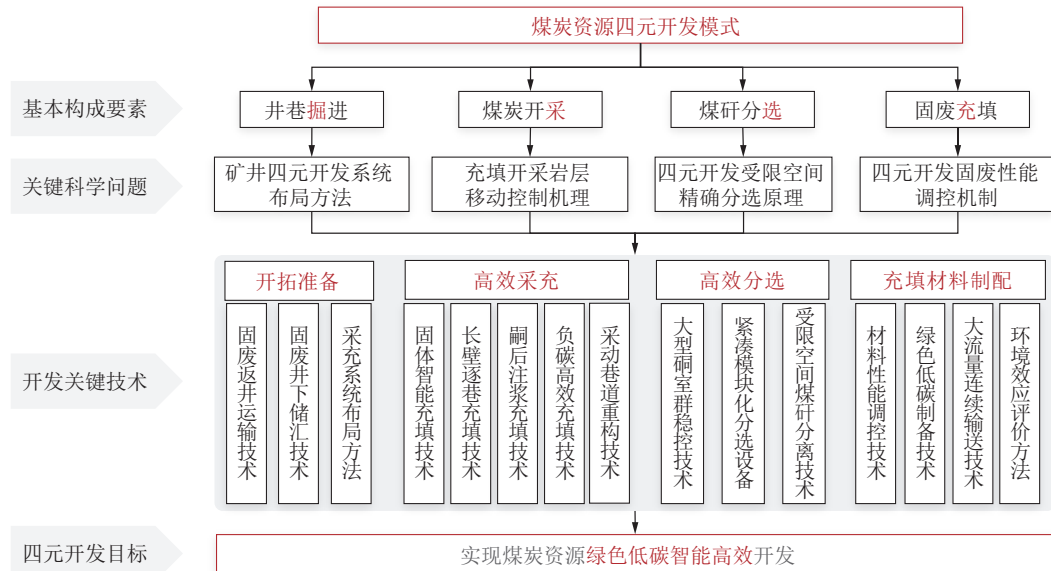


图2 四元开发模式理论与技术框架

Fig.2 Theory and technical framework of quadrilateral development model

1.3 四元开发模式的工程设计方法

基于四元开发模式内涵,围绕井巷掘进、煤炭开采、煤矸分选和固废充填4个核心环节构建四元开发模式的工程设计方法。

四元开发工程设计方法是基于新建矿井,综合考虑资源采出率、系统布局集成度、开采效率和矿区环境保护等方面而提出的。相比以往煤矿设计,从煤炭资源储量统计到井巷开拓准备、回采系统与工艺设计,再到煤矸分选与固废处置,分别在开拓方面考虑了充填材料运输通道与分选硐室空间布局和储运方式等,在回采与分选方面全面考虑了井下分选系统和固废充填与开采协同。

在建设初期,根据四元模式技术需求统筹考虑巷道布局,以集约、高效、低碳、智能为设计导向,形成完备的服务于四元的开拓系统。开采环节以采煤为核心,基于矿井生产能力,确定工作面关键技术参数,结合煤岩力学特性与顶底板条件,优选采场配套设备。煤矸分选环节以大断面硐室围岩控制与分选技术为核心,分选后的煤矸石经井下储运、输送至充填区域,实现井下矸石就地处理。固废充填环节作为终端,将井上下固废充填至采空区,减少地面堆存与污染,同时结合岩层控制理论,确保充填后岩层稳定。

四元开发模式的工程设计方法如图3所示。

2 煤炭四元开发的理论方法创新

兼顾绿色、低碳、智能及高效开采目标的四元开发模式矿井与传统二元、三元开发矿井具有明显区别。在系统布局方面,综合考虑掘-采-选-充4个关键环节进行设计,形成了矿井四元开发系统布局方法;在岩层控制方面,以充填为核心,考虑地表、关键岩层、基本顶、直接顶的运动从而构建了四元开发岩层充填控制理论,为四元开发矿井岩层控制提供理论支撑;在固废性能调控方面,面向不同工程需求,建立了不同调控指标体系及方法,为四元开发固废性能调控提供依据;在受限空间分选方面,结合硐室结构特征和失稳机理,形成了四元开发受限空间分选相关基础理论,以指导四元开发受限空间分选方法。

2.1 矿井系统布局原理

井巷布置服务于煤炭开采、煤矸分选及固废充填,采煤空间与充填空间的位置随采掘接替动态变化,而分选空间的位置则相对固定。因此,矿井四元开发系统的布局方法,主要以煤炭开采-煤矸分选-固废充填三元之间空间布局的互馈联动规律为主体,并协同考虑煤矸物流高效协调运输,综合布局四元开发系统。

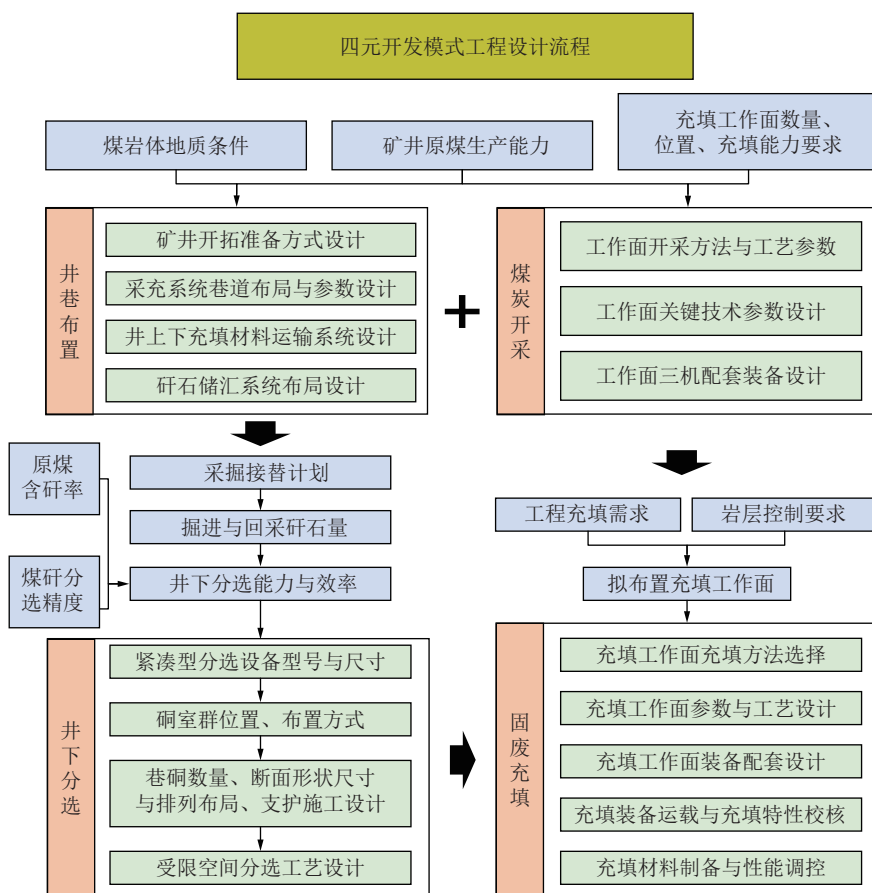


图3 四元开发模式工程设计方法

Fig.3 Engineering design methodology of quadrilateral development model

采煤空间布局主要涉及采煤工作面数量、位置、开采方法、布置参数与工艺参数等;分选空间布局涵盖分选硐室群空间位置、布置方式及内部巷硐的数量、尺寸与排列布局等;充填空间布局则主要包括充填工作面数量、位置、充填方法、布置参数与工艺参数等;井巷掘进主要包括投料井、矸石储运、注浆钻孔、注浆管路布置的位置与节点参数等。

煤炭资源安全高效绿色开采是四元开发矿井的核心任务,一般情况下,采煤空间布局是规划设计采—选—充空间布局时需优先考虑的环节,四元开发系统的布局需要以“以采定充”为主;但在面临地表沉陷控制、灾害防控等工程需求时,为实现岩层移动与围岩应力控制目标,需要以“以充定采”为主。基于“以采定充”和“以充定采”2类限定条件,明确采煤—分选—充填空间优化布局原则^[22-27],提出矿井四元开发系统布局的科学决策方法,具体如图4所示。

2.2 充填开采岩层移动控制机理

基于煤炭资源四元开发模式与内涵,针对不同的四元开发技术形成了较为完善的四元开发岩层充填控制基础理论。提出了“等价采高”“充实率”等基本概念^[28-29],构建了煤基固废充填材料本构模型^[30-34],形

成了涵盖充填采场矿压控制、充填精准控制关键岩层、充填开采地表变形预计的四元开发岩层控制理论体系,包括关键岩层控制、基本顶控制、煤柱蠕变模型、充填再造关键层及煤体—支架—充填体协同控制等理论,如图5所示。

2.3 分选硐室变形控制机理

井下分选硐室具有大断面、小宽高比的结构特征且集中布置,面临高地应力、循环振动载荷、振动波等复杂受力环境,硐室群长期稳定性控制难。在深部复杂应力环境分选硐室群围岩连锁失稳机理、深部硐室围岩高强吸能协同抗能支护理论^[35-36]等研究基础上,提出了四元开发受限空间分选方法设计流程,如图6所示。

第一步,硐室空间失稳判别:基于深部煤矿硐室地质力学等效分类方法,给出不同断面尺寸的硐室群围岩破坏失稳力学模型及判据;第二步,分选方法选择:依据煤岩性质及分选要求的不同,优选不同的分选方法,结合第一步的分析,初步设计硐室群布置布局形式,如井下新型跳汰+水介质旋流器全粒级分选;第三步,分选装备的模块式设计及紧凑化布置:给出硐室尺寸下限,优化巷道硐室尺寸;第四步,硐室布局

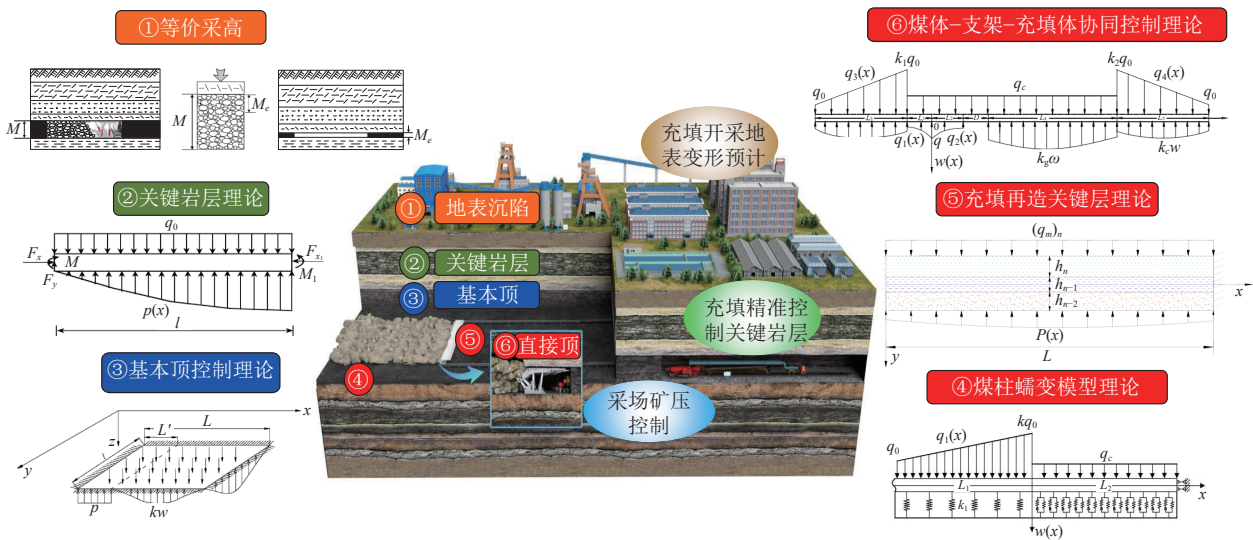


图 5 四元开发岩层充填控制理论

Fig.5 The theory of surrounding rock backfilling control in quadrilateral development model

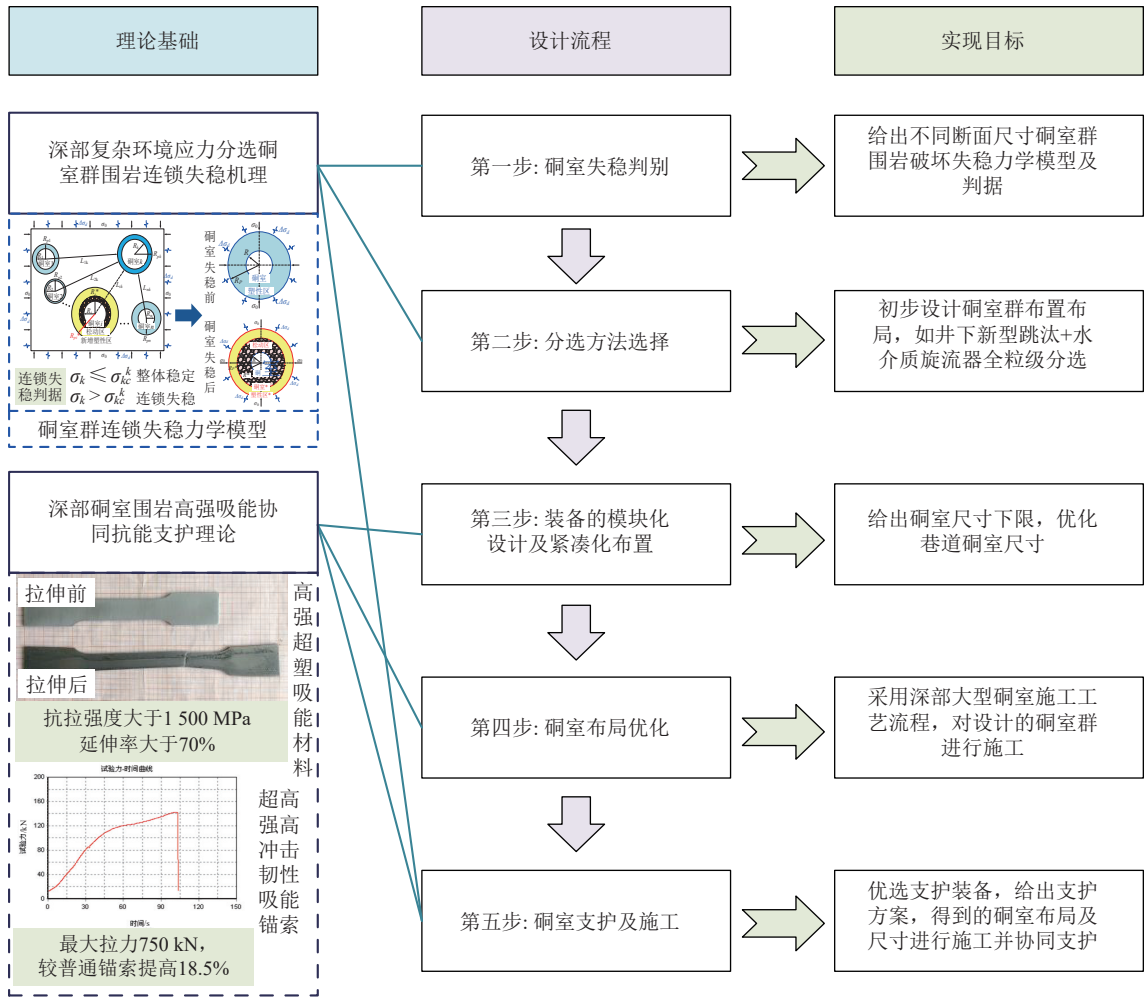


图 6 四元开发受限空间分选方法设计流程

Fig.6 Sorting method in restricted spaces of quadrilateral development

效开采、固废规模化处置及地表沉陷控制等方面工程需求, 充填材料性能需根据具体工程需求进行调控, 以实现煤炭资源四元开发固废处置、灾害防控及环境

保护等多重目标。充填材料种类分为固体、胶结体等, 主要性能包括输送、力学及污染物固化等。充填材料输送性能指标包括泌水率、扩展度、黏

度及屈服应力等,调控方法包括优化骨料含量与质量浓度、降低速凝剂掺量等,调控后能实现充填材料定点定量定时输送;充填材料力学性能指标包括压缩变形、压实度、孔隙率及抗压强度等,调控方法包括优化充填材料粒径级配、增加添加剂及胶结料掺量,调控后能实现采场矿压及岩层移动精准控制;充填材料污染物固化性能指标包括充填材料渗透率、污染物种类、释放量及释放速度等,调控方法包括机械、微生物等活化改性固废、增加胶结料掺量等,调控后能实现充填材料污染物释放控制及井下环境有效保护。在实际工程应用过程中,需结合工程需求统筹协调各性能之间关系,调控得到输送、力学及污染物固化等性能的最佳参数。

3 煤炭四元开发的技术创新

基于四元模式开发理论,建设新型矿井需要综合考虑四元开发关键技术,因地制宜合理布置掘、采、选、充四元协调的开采系统。煤炭四元开发关键技术包括开拓准备、高效采充、井下分选、充填材料制配等方面。

3.1 开拓准备

按照四元开发模式建设矿井时,需要预先设计适配四元开采技术所需的井巷系统,由此需应用相关开拓准备技术。在开拓设计环节,以固废处置为核心,主要考虑固废返井系统、固废井下储汇系统、采充系统布局等方面,主要应用的相关技术包括固废返井运输技术、固废井下储汇技术、采充系统布局方法等。

3.1.1 固废返井运输技术

固体废弃物返井输送技术是指将煤矸石、粉煤灰、矿渣等煤基固废经投料井输送至井下储料仓。固废返井运输技术针对充填材料可分为2类:固体充填材料返井输送技术和充填料浆返井输送技术。

固体充填材料主要通过投料井^[37-38]实现返井,投料井主要由投料孔和储料仓组成,主要设备包括投料管、缓冲装置、给料装置、重力秤、雷达物位计、空气炮以及PLC控制器等,可实现投料量智能监测与控制、储料仓自动清理、满仓自动报警等功能。

充填料浆返井输送技术是指在地面配料仓将骨料与水混合制备成料浆后,通过充填泵与充填管路等设备输送至井下充填区域。

3.1.2 固废井下储汇技术

固废井下储汇技术是指将固废在井下进行临时储存、汇集及运输的相关技术。通常与固废返井运输技术联合使用,如图7所示。根据矿井系统布置条件和分选、煤矸分离及充填的不同组合需求,按多源固

废充填材料在井下运输所经历的空间顺序,固废井下储汇包含硐室储汇模式、大巷储汇模式和采区储汇模式等不同类型。不同井下储汇模式的生产系统衔接复杂程度、煤矸运距等有显著差异。

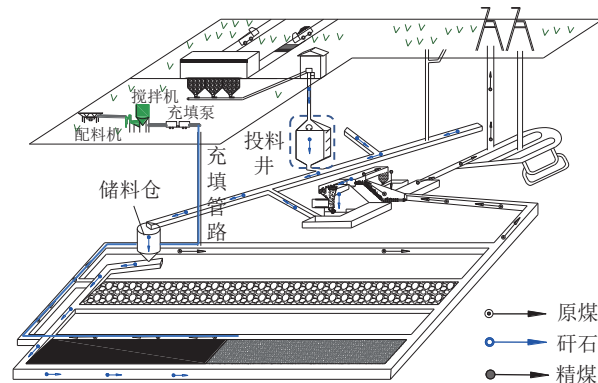


图7 固废返井及井下储汇技术示意

Fig.7 Schematic diagram of solid waste returning to shaft and underground storage and collection technology

3.1.3 采充系统布局方法

采充一体化生产系统将采煤、充填材料运输与井下充填有机结合,在井下完成“采、充”循环。其中充填材料的井上下储运关系在上述章节已经介绍,本节主要介绍工作面充填系统的布局方式,可分为4类^[18]:全采全充法、全采局充法、局采局充法、局采全充法。

1) 全采全充法。将区段内圈定的煤炭资源全部采出,所形成的采空区进行全部充填的开采方法。区段煤柱经过采充行为后,全部由充填体取代。全采全充的开采系统布局是在区段内逐个布置相同的采充工作面,采煤与充填交替进行,采完即充,直至完成区段内煤炭资源的开采与采空区的充填,如图8中a所示。

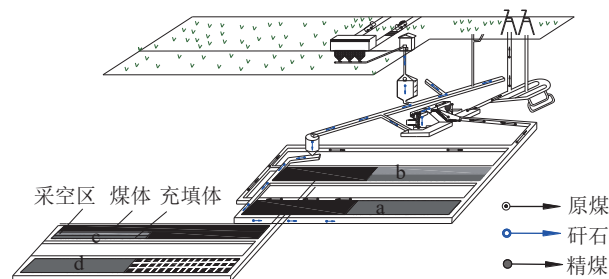


图8 采充系统布局

Fig.8 Layout diagram of mining and charging system

2) 全采局充法。将区段内煤炭资源全部采出,形成的采空区进行局部充填的开采方法。区段煤柱经过采充行为后,由垮落的采空区与局部的充填体取代。根据局部充填实现方式的不同,可分为横向全采局充和纵向全采局充2种形式,其中横向全采局充的开采

系统布局形式又分为分段式全采局充和同面型全采局充两种形式,如图 8 中 b 所示。以异面型全采局充的布局形式为例,其综采工作面与充填工作面在开采块段内交替布置,综采工作面采用垮落法管理顶板,充填工作面采用充填法管理顶板,综采工作面与充填工作面交替进行,直至完成开采块段所有煤炭资源的开采与对应采空区的充填。

3) 局采局充法。将开采块段内煤炭资源局部采出,留设一定数量的煤柱,形成的采空区进行非密实局部充填的开采方法。开采块段煤体经采充行为后,由遗留的煤柱、垮落的采空区及非密实充填体取代。典型的局采局充系统布置如图 8 中 c 所示。局采局充的布局形式是在开采块段内交替布置充填工作面,并在每 2 个充填工作面之间留设煤柱,开采块段煤炭资源开采完毕后由煤柱和非密实充填体组成,充填工作面采用非密实充填法管理顶板。

4) 局采全充法。对区段遗留的煤炭进行回采,对所有采空区进行全部充填的开采方法。区段煤体经

过二次采充行为后,全部由充填体取代。局采全充的开采系统布置形式是在已经有过开采行为(如遗留煤体)的开采块段内逐个布置相同的充填工作面,2 次采煤与充填交替进行,采完即充,直至完成开采块段所有遗留煤炭资源的开采与全部采空区的密实充填,如图 8 中 d 所示。

3.2 高效采充技术

煤炭开采和固废充填作为四元模式中关键的 2 个环节,高效的采充技术直接影响煤炭开采效率和岩层控制效果,主要包括固体智能充填技术、长壁逐巷充填技术、嗣后注浆充填技术、负碳高效充填技术和采动巷道重构技术。

3.2.1 固体智能充填技术

固体智能充填技术在传统机械固体充填采煤技术的基础上利用多种传感器和智能控制系统,实现智能感知工艺参数、自主调整机构状态、自动执行充填工序、自行判断充填效果及实时可视充填场所,如图 9 所示。

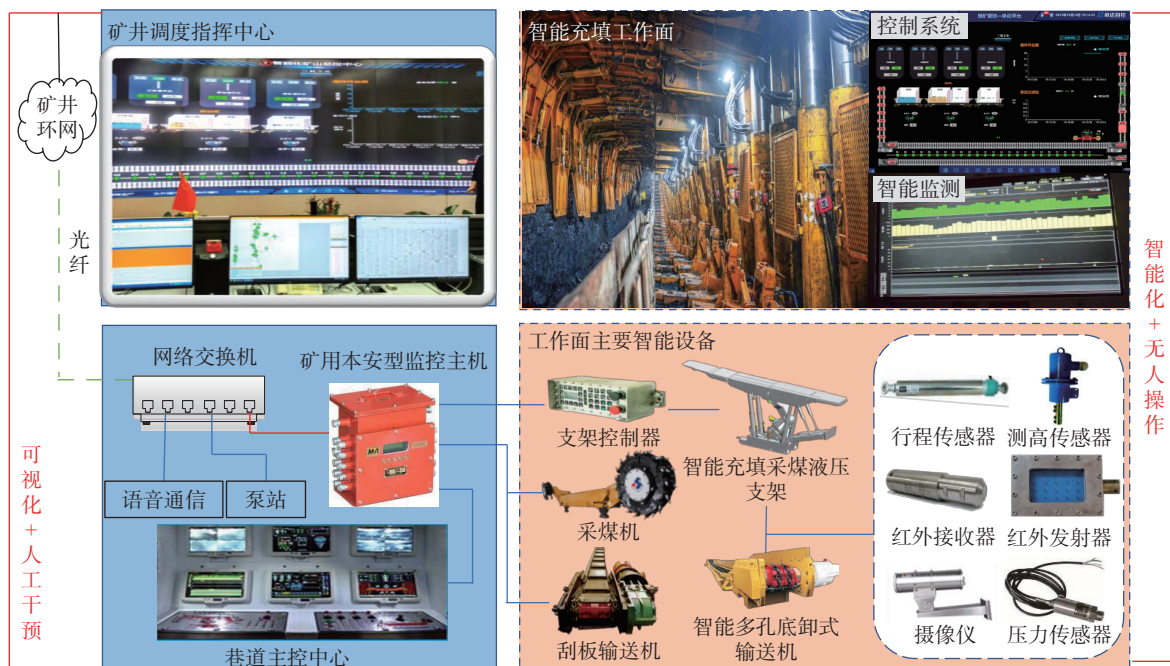


图 9 固体智能充填技术示意

Fig.9 Principle of solid intelligent backfilling mining method

在装备方面,固体智能充填技术主要依赖智能化多孔底卸式刮板输送机和固体充填采煤液压支架,通过在设备上加装行程传感器、压力传感器和电液控制系统,实现装备自主感知充填状态和自动完成卸料、夯实等关键工序^[39-43],以及关键充填装备的机器人化技术升级^[44],实现无人自动充填。

在工艺方面,固体智能充填技术通过对采煤机、刮板输送机和夯实机构的协同调度,形成从采煤到充

填的自动化流程,包括充填参数的实时感知、干涉状态的智能识别、位态调整的动态执行,以及采充工序的高效衔接,从而大幅提高了采煤与充填作业的效率。

3.2.2 长壁逐巷充填技术

长壁逐巷胶结充填技术是利用长壁采煤法的生产系统,采用连续采煤机或综掘机破煤,通过施工运输平巷和回风平巷之间的联络巷进行煤炭开采,在采

煤的同时进行煤基固废胶结材料的充填,实现工作面“掘巷出煤、巷内充填、采充并行”循环作业^[45],如图10所示。

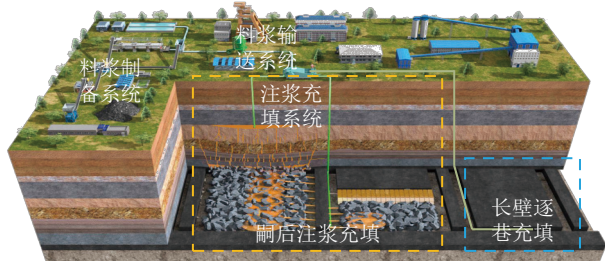


图10 长壁逐巷充填与嗣后空间注浆充填技术示意

Fig.10 Schematic diagram of longwall roadway-by-roadway filling and post-space grouting backfilling technology

长壁逐巷胶结充填技术的具体工艺流程包括掘巷出煤与巷内充填工艺。掘巷出煤工艺是通过综掘机或采煤机在区段运输平巷与回风平巷之间掘进联络巷完成采煤作业,掘巷完成后对该联络巷进行充填,同时间隔一定距离掘进下一条联络巷,以实现采煤与充填的交替循环作业,直至整个工作面采掘完毕。巷内充填工艺则包括多次充填操作,支巷开采与充填有序进行,当完成一轮充填开采后,下一轮充填开采需要充填体达到设计强度后进行,以确保充填体的密实度与稳定性。

3.2.3 嗣后注浆充填技术

嗣后注浆充填技术是一种将料浆注入嗣后空间的充填方法^[46],料浆主要由破碎后的矸石按照一定粒径级配添加胶结剂和水制备而成,通过充填泵与输送管路等设备,输送至嗣后空间;嗣后空间主要指采空区、离层区、裂隙带等非压实空间,如上节图10所示。

嗣后注浆充填技术的工艺流程主要包括料浆制备、输送及注浆三大环节。在布局设计上,根据料浆来源和嗣后空间分布优化制备及输送系统位置,注浆钻孔布置及时机控制通过精确分析嗣后空间的空隙演化规律与浆体流动扩散特性进行优化。与传统充填方法相比,嗣后注浆充填技术显著提高了矸石充填效率,降低了对采煤生产工序的干扰,并能够充分利用采动空间。

3.2.4 负碳高效充填技术

负碳高效充填技术是将 CO_2 、矸石与快速胶结材料混合进行井下充填的技术。通过构建由 CO_2 、矸石与快速胶结物混合而成的负碳高孔隙充填材料并将其充入采空区,形成全新的矸石快速高效胶结高孔隙混合物负碳充填体,在实现快速高孔隙充填的同时封存 CO_2 ^[9]。

充填工艺采用创新的“架后落料联合喷射”技术,即在采空区内实现充填材料的高效混合与快速凝固,同时利用充填体的孔隙结构吸附并固定 CO_2 ,从而构建负碳高效的采充体系,如图11所示。在材料研发方面,充填体的孔隙率和强度通过复杂系统建模与实验室优化,既提高了充填效率,也降低了充填材料需求量,确保了长时间内结构稳定性。

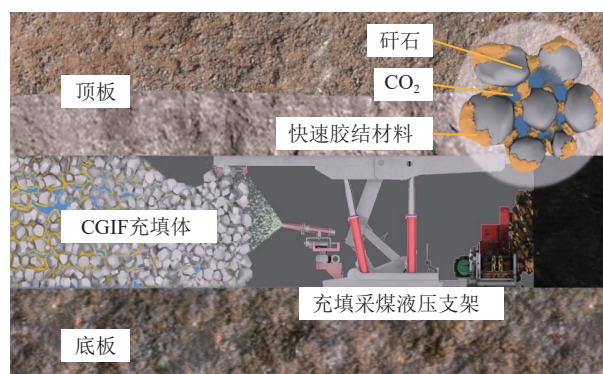


图11 负碳高效充填开采技术

Fig.11 Negative-carbon high-efficiency backfilling mining technology

3.2.5 采动巷道重构技术

采动巷道重构技术^[47-48]利用充填体构筑采空区巷旁支护结构,保留下的巷道可供相邻工作面重复利用。其技术原理是利用矸石、高强速凝材料等充填材料,在采空区边缘形成具有一定承载力、密闭性和适应顶板沉降能力的高塑性巷旁支护体,以支撑上覆岩层,隔离采空区瓦斯等有害气体。

采动巷道重构技术可实现井下采煤-充填-留巷(重构)并行作业的时空衔接,取消了留设煤柱,提高了煤炭资源采出率,巷内支护通常采用锚杆锚索支护、单体液压支柱等增强顶板稳定性,同时通过分段施工或超前支护技术控制围岩变形。

3.3 高效分选技术

在四元模式逐渐丰富的同时,煤矿生产系统工艺工序增多,因此,高效分选作为承上启下的系统,要求其技术具备高效性。煤矸井下分选技术主要有重力分选、干法分选和智能分选等,为了形成井下采选充生产系统布局,适配高效分选的相关技术主要包含大型硐室群稳控技术、紧凑模块化分选设备、受限空间煤矸分离工艺。

3.3.1 大型硐室群稳控技术

大型硐室群在深部高应力、冲击动载和分选循环震动载荷等复杂作用力下易发生连锁失稳,因此研发硐室群稳定性控制技术^[49],包括围岩变形破裂演化规律分析、抗动载吸能锚固支护设计等。

1) 硐室围岩破坏特征与锚固结构受力分析。通过数值模拟发现随着扰动次数的增加、动载强度增大和动载源距离减小,硐室围岩的变形响应逐渐增大。室内试验揭示了动载作用下超大断面“品”字形硐室围岩破坏特征,硐室群围岩变形不断增大,呈现顶板大于帮部的特征;锚固结构受力呈阶段式增加,相邻侧锚固结构受力明显大于非邻侧,且受动载源位置影响明显。通过数值模拟发现随着扰动次数的增加、动载强度增大和动载源距离减小,硐室围岩的变形响应逐渐增大。室内试验揭示了动载作用下超大断面“品”字形硐室围岩破坏特征,硐室群围岩变形不断增大,呈现顶板大于帮部的特征;锚固结构受力呈阶段式增加,相邻侧锚固结构受力明显大于非邻侧,且受动载源位置影响明显。

2) 抗动载吸能锚固支护设计。为维护硐室群围岩稳定性,基于围岩锚固承载结构损伤演化模型,设计出抗动载吸能阻尼锚索和锚固支护方法,提出了高强吸能协同“抗能”支护理论^[50],研制出新型高强超塑吸能支护材料及高冲击韧性支护装备,支护材料的强度大于 1 500 MPa,延伸率大于 70%,可显著增强围岩的抗冲击能力,降低硐室群围岩失稳风险。

3.3.2 紧凑模块化分选设备

出于高效分选的考虑,原煤在井下分选可以大幅提高采选充效率。在保证井下硐室稳定的情况下,在有限的井下空间内实现分选就需要布置紧凑模块化分选设备。如地面常规跳汰机高度超限无法应用于井下,因此需要设计新型分选设备。适用于井下的紧凑模块化分选设备包括紧凑型井下多频跳汰机、水介质分级分选旋流器等设备。

为实现井下大规模分选需求,采用双侧进风跳汰技术改进跳汰分选机,通过改进增加了跳汰机处理能力,改善了跳汰机单机性能,同时采用机械动能输送

排料方式大幅降低机体高度,不受跳汰面积的限制,整机高度控制可在 5.0 m 以内,紧凑型跳汰机长宽高尺寸为 4.1 m×4.6 m×4.9 m。通过开展工业性试验并进行单机性能检测,单机处理原煤能力达 650 t/h 以上,处理 8~100 mm 粒度级原煤,矸中含煤质量分数为 2% 左右,矸石排出率大于 90%^[51]。

通过对进料口等多个结构参数进行计算选型,选择合适的脱水振动筛、离心脱水机、渣浆泵和搅拌器等,可以满足设备结构紧凑、节省空间的工程需求。紧凑型井下多频跳汰机结构如图 12 所示。

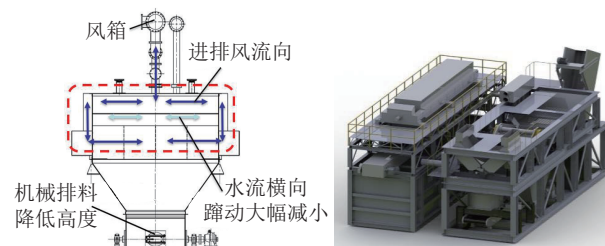


图 12 紧凑型井下多频跳汰机

Fig. 12 Compact underground multi-frequency jig

3.3.3 受限空间煤矸分离工艺

井下受限空间煤矸分离工艺是一种专为井下复杂受限空间设计的模块化分选技术。该工艺融合了跳汰分选、细粒煤水介质旋流器分选和煤泥水井下巷道式大型高效斜管沉降等多种分选技术,如图 13 所示。涵盖了原煤筛分、分选、浓缩等多个环节,主要工艺流程包含原煤筛分与破碎、粗粒级跳汰分选、细粒煤水介质旋流器分选、煤泥水浓缩与沉降、智能控制与排料调节等过程。整个分选过程由智能控制系统进行调节,该系统根据煤质变化和分选效果的实时反馈,调整设备的工作参数(如跳汰机的振动频率、水流速率等),以优化分选效果^[52]。智能排料系统还能够自动控制排料口,确保煤矸分选的精度和稳定性。

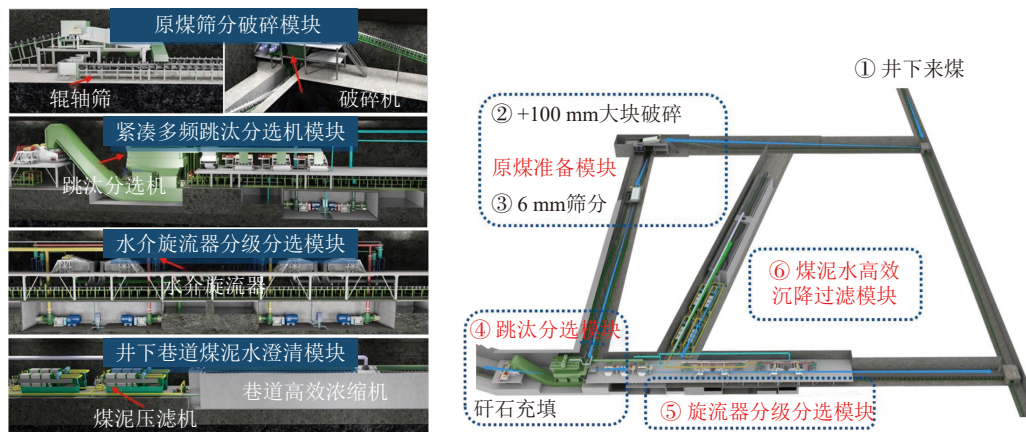


图 13 井下全粒级水介质模块化选煤工艺系统

Fig. 13 Underground modular coal washing process system with full particle size water medium

3.4 充填材料配制技术

在不同类型的充填开采技术中, 充填材料的最主要作用都是作为承载结构分担岩层应力。充填材料的相关技术包含材料性能调控技术、绿色低碳制备技术、大流量连续输送技术和环境改性评价方法。

3.4.1 材料性能调控技术

材料性能调控技术是为了适应高效充填要求而调节充填材料流变性能和力学性能的方法。因采用充填开采技术不同, 充填材料类型不同, 应用目标有所差异, 充填材料性能调控指标也各不相同。

在长壁逐巷充填和嗣后注浆充填等技术中, 充填材料一般是膏体或者料浆形态, 通过长距离输送到充填作业区域, 凝固后的充填体需要具备足够的强度才能承载上覆岩层。因此, 这种胶结充填材料需要保证在输送过程中的流变性能以及凝固之后的力学性能^[53]。在固体充填开采技术中, 充填材料一般是固体

形态, 主要依靠夯实作用达到密实状态, 从而支撑上覆岩层, 其力学性能是调控目标。充填材料的性能调控技术如图14所示。

胶结充填材料的流变性能调控技术主要指调控充填中细骨料和胶结料的配比, 通过材料的屈服应力和黏度来描述流变性能, 使用坍塌度、扩展度来反映胶结充填材料的和易性、流动性、可泵性和流变性能; 胶结充填材料的力学性能调控技术主要指调控充填中粗骨料和胶结料的配比, 制样之后经过不同温度、湿度、时间等条件下的养护, 然后通过单轴抗压强度或三轴抗压强度来描述力学性能。

固体充填材料的力学性能调控技术主要指调控骨料级配、夯实强度等, 必要时可添加材料来辅助矸石堆体成型, 另外还可以通过微观结构分析表征堆体材料的接触状态, 从细观尺度和宏观尺度全方位研究充填材料的力学性能。

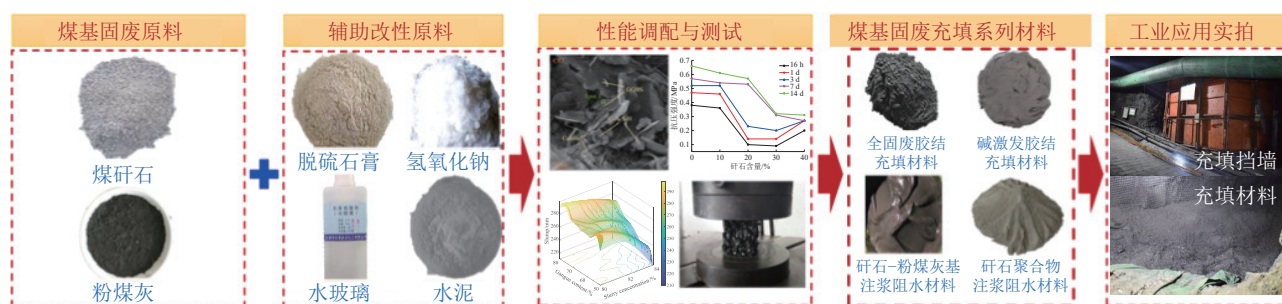


图14 充填材料性能调控技术

Fig.14 Backfill material performance regulation technology

3.4.2 绿色低碳制备技术

绿色低碳制备技术是指将煤基固废进行多级破碎、多源储集和混合搅拌等工艺而制备出达到目标性能的充填材料, 该技术主要包括骨料破碎系统、原料储集系统和多源材料混合系统, 如图15所示。

制备工艺为: 根据充填要求确定最佳配比, 将多源充填材料储集在不同的储料仓中, 进行固体充填时,

将骨料运输到井下充填区域; 进行胶结充填时, 配料并加水搅拌, 然后输送到充填区域。在工程应用中, 根据充填材料来源、充填规模、井下空间等因素确定四元模式的系统布局。

3.4.3 大流量连续输送技术

大流量连续输送技术是指为适应大规模充填需求而搭配的能够不间断输送大量充填材料的技术。

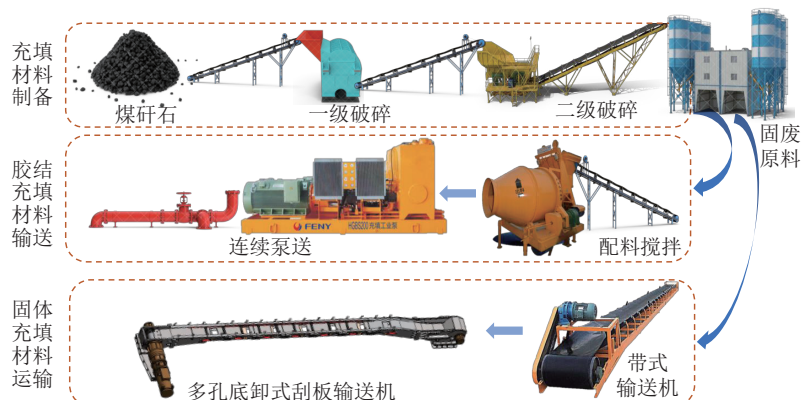


图15 充填材料制备与输送系统

Fig.15 Backfill material preparation and transportation system

该技术主要包含输送系统、计量系统和调控系统,计量系统能够实时反应充填材料的输送规模,调控系统能够在输送系统堵塞时施以调整。

对于胶结充填材料而言,输送系统包含充填泵和管路布置;计量系统指输送管路中的料浆流量监测模块,实时监测注浆管道出口压力与终端压力之间的压力差;调控系统指智能管控平台,当监测到压力差超出阈值后,及时反馈调控细骨料配比及料浆质量分数。

对于固体充填而言,输送系统包含地面运输、投料井和井下运输等过程,计量系统主要指输送带监测煤基固废的输送流量,调控系统对输送进度和设备故障进行实时调整,实现固体充填材料的连续高效输送。

3.4.4 环境效应评价方法

矸石中通常含有铅和镉等重金属元素,这些重金属在充填材料中可能发生浸出并迁移,造成地下水污染^[54]。环境效应评价方法是指选取充填体中重金属元素为评价因子,评估采空区充填体对地下水环境的影响程度。

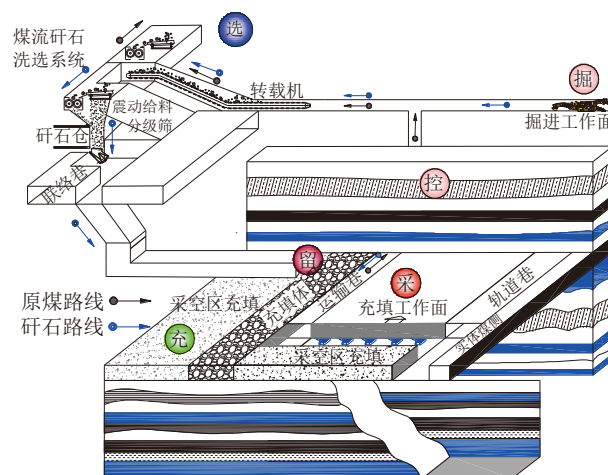
对于井下充填体重金属元素的风险评估,应首先测试重金属元素的含量,采用 Hakanson 预计其潜在生态风险;在此基础上,确定充填体重金属元素类型,进行浸出试验,分析充填体重金属元素的浸出能力;模拟分析工程环境中充填体重金属元素的迁移;结合井下充填量与渗入矿井水量计算重金属元素的污染范围,预测其对地下水环境产生潜在污染的风险性。

4 煤炭四元开发模式工程实践

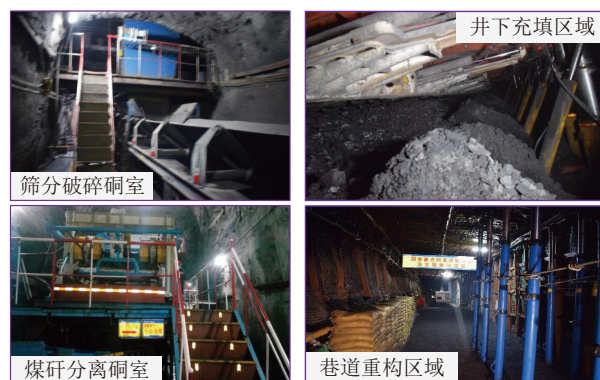
目前,煤炭资源四元开发模式已在新巨龙煤矿、义桥煤矿等十余个矿井进行了工程示范,针对各矿井实际需求与工况条件,应用不同四元开发关键技术,解决了千米深井安全高效开采、建(构)筑物下压煤解放等难题。

4.1 新巨龙煤矿千米深井四元开发工程实践

新巨龙煤矿生产能力为 600 万 t/a,矿井浅部资源已开采殆尽,深部开拓延深工程量大,采掘矸石产量大、提升难,同时导致采掘接替紧张,且随采深增加矿压显现逐渐加剧,巷道支护愈发困难。基于此,新巨龙煤矿采用千米深井四元开发模式,如图 16 所示。将原煤在井下分选,采掘与井下分选矸石就地充填,并实施了采动巷道重构技术。其中井巷掘进主要新增了井下分选硐室、矸石仓及矸石运输巷等;煤炭开采方法为综合机械化采煤;煤矸分选方法为井下新型



(a) 新巨龙千米深井四元开发生产系统示意



(b) 新巨龙千米深井四元开发模式现场实拍

图 16 新巨龙煤矿四元开发工程实践

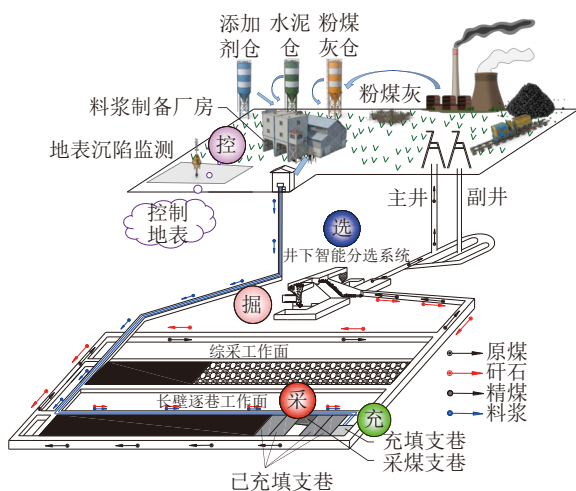
Fig.16 Practice of four-element development mode in Xinjulong Coal Mine

跳汰+水介质旋流器全粒级水介质分选;固废充填方法为架后矸石固体充填。

新巨龙千米深井四元开发模式工程实践中,井下煤矸分选系统单系统原煤分选能力达 400 万 t/a,有效分选粒度达 0.25 mm;应用工作面在研究期间充采质量比为 1.25;实施千米深井四元开发模式后提高了矿井优质煤炭提升能力,生产工作面超前应力集中显著降低,超前支承应力集中系数仅为 1.03,地表变形均控制在 I 级采动影响范围内,采区采出率 87%,为深部矿井灾害防治提供了全新思路与良好示范。

4.2 义桥煤矿压煤解放四元开发工程实践

义桥煤矿生产能力 80 万 t/a,煤层平均厚度 3.2 m,建(构)筑物下压煤可采储量为 323.7 万 t,为解放大量压煤资源同时实现矸石处置,保护地表环境、弱化生态损伤,义桥煤矿采用了压煤解放四元开发模式,如图 17 所示。利用综掘机进行长壁逐巷采煤,原煤进入井下智能干选系统分选,归集分选与掘进等多源矸石运输到支巷进行长壁逐巷胶结充填,其中井巷掘进主要增加分选硐室、矸石仓及注浆钻



(a) 义桥煤矿压煤解放四元开发生产系统示意



(b) 义桥煤矿压煤解放四元开发模式现场实拍

图 17 义桥煤矿四元开发工程实践

Fig.17 Practice of four-element development mode in Yiqiao Coal Mine

孔等;煤炭开采方法为综掘机长壁逐巷采煤,煤矸分选方法为井下智能干选,充填方法为长壁逐巷胶结充填。

义桥煤矿压煤解放四元开发模式工程实践中,井下智能干选系统处理能力达 170 t/h,分选粒径范围为 40~350 mm。四元开发模式运行后地表最大下沉值仅为 11.0 mm,井下分选与掘进矸石可全部充填处置,取得了显著经济、社会与环境效益。

5 结 论

1) 创新性提出了煤炭资源四元开发模式的概念,阐述了煤炭资源四元开发模式的内涵、理论与技术框架体系及工程设计方法。

2) 在传统煤炭资源开发模式基础上,结合矿井不同工程需要,构建了煤炭资源四元开发模式的基础理论与方法,包括系统布局方法、围岩充填控制理论、受限空间分选方法以及固废性能调控机制。

3) 煤炭四元开发技术涵盖井巷掘进、高效采充、高效分选和充填材料制配等方面。其中井巷掘进包括固废返井运输、固废井下储汇和采充系统布局方法等技术;高效采充包括固体智能充填、长壁逐巷充填、嗣后注浆充填、负碳高效充填和采动巷道重构等技术;

高效分选包括大型硐室群稳控、紧凑模块化分选设备和受限空间煤矸分离等技术;充填材料制配主要包括材料性能调控、绿色低碳制备、大流量连续输送和环境污染防控等技术。

4) 煤炭资源四元开发模式已在多个矿井进行了工程示范,新巨龙煤矿、义桥煤矿 2 个典型工程案例验证了四元开发模式在围岩控制、解放压煤和环境保护等方面的显著技术优势与工程示范效应。分别解决了千米深井安全高效开采、建(构)筑物下压煤解放等难题。

5) 煤矿煤炭资源四元开发模式未来发展空间与应用潜力巨大,其发展方向包括但不限于深部空间构建与储能技术、化石能源+新能源协同开发、煤炭井下原位化工转化利用等。

参考文献(References):

- [1] 康红普,李全生,张玉军,等.我国煤矿绿色开采与生态修复技术发展现状及展望[J].绿色矿山,2023(1):1-24.
KANG Hongpu, LI Quansheng, ZHANG Yujun, et al. Development status and prospect of greenmining and ecological restoration technology of coal mines in China[J]. Journal of Green Mine, 2023(1): 1-24.
- [2] 王国法,任怀伟,富佳兴.煤矿智能化建设高质量发展难题与路径[J].煤炭科学技术,2025,53(1):1-18.
WANG Guofa, REN Huaiwei, FU Jiaxing. Problems and paths of high-quality development of intelligent construction in coal mines[J]. China Industrial Economics, 2025, 53(1): 1-18.
- [3] 谢和平,任世华,谢亚辰,等.碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J].煤炭学报,2021,46(7):2197-2211.
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197-2211.
- [4] 国家统计局.中华人民共和国2024年国民经济和社会发展统计公报[N].人民日报,2025-02-28(10).
- [5] 刘峰,郭林峰,张建明,等.煤炭工业数字智能绿色三化协同模式与新质生产力建设路径[J].煤炭学报,2024,49(1):1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHANG Jianming, et al. Synergistic mode of digitalization-intelligentization-greeniation of the coal industry and its path of building new coal productivity[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 1-15.
- [6] 刘峰,曹文君,张建明,等.我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J].煤炭学报,2021,46(1):1-15.
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1-15.
- [7] 张吉雄,汪集暘,周楠,等.深部矿山地热与煤炭资源协同开发技术体系研究[J].工程科学学报,2022,44(10):1682-1693.
ZHANG Jixiong, WANG Jiyang, ZHOU Nan, et al. Collaborative mining system of geothermal energy and coal resources in deep

- mines[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(10): 1682–1693.
- [8] 张波, 薛攀源, 刘浪, 等. 深部充填矿井的矿床-地热协同开采方法探索[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(9): 2824–2837.
- ZHANG Bo, XUE Panyuan, LIU Lang, et al. Exploration on the method of ore deposit-geothermal energy synergetic mining in deep backfill mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(9): 2824–2837.
- [9] 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.
- [10] 张东升, 张吉雄, 徐金海. 预掘巷过断层及其矸石井下处理技术[J]. *中国矿业大学学报*, 2004, 33(2): 178–182.
- ZHANG Dongsheng, ZHANG Jixiong, XU Jinhai. Pre-driven roadway in fault and underground disposal of associated waste[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, 33(2): 178–182.
- [11] 张吉雄, 缪协兴. 煤矿矸石井下处理的研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2006, 35(2): 197–200.
- ZHANG Jixiong, MIAO Xiexing. Underground disposal of waste in coal mine[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2006, 35(2): 197–200.
- [12] 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.
- [13] 缪协兴, 张吉雄, 郭广礼. 综合机械化固体充填采煤方法与技术研究[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(1): 1–6.
- MIAO Xiexing, ZHANG Jixiong, GUO Guangli. Study on waste-filling method and technology in fully-mechanized coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(1): 1–6.
- [14] 缪协兴, 巨峰, 黄艳利, 等. 充填采煤理论与技术的新进展及展望[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(3): 391–399, 429.
- MIAO Xiexing, JU Feng, HUANG Yanli, et al. New development and prospect of backfilling mining theory and technology[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(3): 391–399, 429.
- [15] 张吉雄, 缪协兴, 张强, 等. “采选抽充采”集成型煤与瓦斯绿色共采技术研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(7): 1683–1693.
- ZHANG Jixiong, MIAO Xiexing, ZHANG Qiang, et al. Integrated coal and gas simultaneous mining technology: Mining-dressing-gas draining-backfilling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(7): 1683–1693.
- [16] 张强, 张吉雄, 王佳奇, 等. 充填开采临界充实率理论研究与工程实践[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(12): 3081–3088.
- ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, WANG Jiaqi, et al. Theoretical research and its engineering practice on critical backfill ratio in backfill mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(12): 3081–3088.
- [17] 李猛, 张吉雄, 黄艳利, 等. 基于固体充填材料压实特性的充实率设计研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(6): 1110–1115.
- LI Meng, ZHANG Jixiong, HUANG Yanli, et al. Research on compression ratio design based on compaction properties of solid backfill materials[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(6): 1110–1115.
- [18] 张吉雄, 巨峰, 李猛, 等. 煤矿矸石井下分选协同原位充填开采方法[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 131–140.
- ZHANG Jixiong, JU Feng, LI Meng, et al. Method of coal gangue separation and coordinated in situ backfill mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 131–140.
- [19] 张吉雄, 鞠杨, 张强, 等. 矿山生态环境低损害开采体系与方法[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2019, 1(2): 56–68.
- ZHANG Jixiong, JU Yang, ZHANG Qiang, et al. Low ecological environment damage technology and method in coal mines[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2019, 1(2): 56–68.
- [20] 张吉雄, 张强, 巨峰, 等. 煤矿“采选充+X”绿色化开采技术体系与工程实践[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(1): 64–73.
- ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, JU Feng, et al. Practice and technique of green mining with integration of mining, dressing, backfilling and X in coal resources[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 64–73.
- [21] ZHANG J X, LI B Y, XIE Y C, et al. Carbon negative backfill mining in coal mines for carbon neutralization: Chemical carbon fixation performances with mineralized gangue[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2025, 186: 106016.
- [22] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(3): 547–556.
- XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(3): 547–556.
- [23] 何琪. 煤矿井下采选充采一体化关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- HE Qi. Research on key technologies of integration of underground mining, dressing, filling and mining in coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [24] 孙传尧, 宋振国. 地下采选一体化系统的研究及应用概况[J]. *矿冶*, 2017, 26(1): 1–6.
- SUN Chuanyao, SONG Zhenguo. Development and application outline of integrated underground mining-processing system[J]. *Mining and Metallurgy*, 2017, 26(1): 1–6.
- [25] 梁和平. 充填开采与井下原煤分选一体化技术[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(8): 35–37, 41.
- LIANG Heping. Integrated technology of backfill mining and raw coal separation in underground mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(8): 35–37, 41.
- [26] 袁永, 朱成, 王文苗, 等. 深部煤矿井下采煤-充填空间优化布局方法[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(2): 286–299.
- YUAN Yong, ZHU Cheng, WANG Wenmiao, et al. Optimal layout methods of underground mining-backfilling space in deep mine[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(2): 286–299.
- [27] 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.
- [28] 缪协兴, 张吉雄. 矽石充填采煤中的矿压显现规律分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2007, 24(4): 379–382.
- MIAO Xiexing, ZHANG Jixiong. Analysis of strata behavior in the process of coal mining by gangue backfilling[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2007, 24(4): 379–382.
- [29] 张吉雄. 矽石直接充填综采岩层移动控制及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
- ZHANG Jixiong. Study on movement control and application of fully mechanized mining strata directly filled with gangue[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.
- [30] 黄艳利. 固体密实充填采煤的矿压控制理论与应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- HUANG Yanli. Study on theory and application of ground pressure control in solid dense filling coal mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [31] 张强. 固体充填体与液压支架协同控顶机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- ZHANG Qiang. Roof control mechanism by coordination with backfilled body and backfill support in solid backfill mining technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [32] ZHANG J X, ZHANG Q, SUN Q, et al. Surface subsidence control theory and application to backfill coal mining technology[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(2): 1439–1448.
- [33] 孙强. 充填开采再造隔水关键层机理及方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- SUN Qiang. Mechanism and method of key aquiclude strata reconstruction by backfill mining technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [34] 安百富. 固体密实充填回收房式煤柱围岩稳定性控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- AN Baifu. Controlling mechanism of surround rock stability in recovering room mining standing pillars by consolidated solid backfilling mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [35] 谭云亮, 范德源, 刘学生, 等. 煤矿超大断面硐室判别方法及其工程特征[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(1): 23–31.
- TAN Yunliang, FAN Deyuan, LIU Xuesheng, et al. Discrimination method and engineering characteristics of super largesection chamber in coal mine[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(1): 23–31.
- [36] 刘学生, 范德源, 谭云亮, 等. 深部动载作用下超大断面硐室群锚固围岩破坏失稳机制研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(12): 3407–3418.
- LU Xuesheng, FAN Deyuan, TAN Yunliang, et al. Failure and instability mechanism of anchored surrounding rock for deepchamber group with super-large section under dynamic disturbances[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(12): 3407–3418.
- [37] 巨峰. 固体充填采煤物料垂直输送技术开发与工程应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- JU Feng. Development and engineering applications of solid materials vertical transportation system in backfill coal mining technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [38] 巨峰, 张吉雄, 安百富. 充填采煤固体物料垂直投料井施工工艺研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(1): 38–43.
- JU Feng, ZHANG Jixiong, AN Baifu. Key construction technology of vertical feeding bore hole for solid materials in backfilling coal mining[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2012, 29(1): 38–43.
- [39] 张强, 王云搏, 张吉雄, 等. 煤矿固体智能充填开采方法研究[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2546–2556.
- ZHANG Qiang, WANG Yunbo, ZHANG Jixiong, et al. Research on intelligent solid backfilling mining method in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2546–2556.
- [40] 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.
- [41] 张强, 张吉雄, 宗庭成, 等. 超长柔性悬挂固体充填刮板输送机异常工况表征及自主调控方法[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(4): 2141–2151.
- ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, ZONG Tingcheng, et al. Characterization and autonomous control method of abnormal working conditions of super-long flexible suspended solid backfilling scraper conveyor[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(4): 2141–2151.
- [42] 张强, 崔鹏飞, 张吉雄, 等. 固体智能充填关键装备工况位态表征及自主识别调控方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4237–4249.
- ZHANG Qiang, CUI Pengfei, ZHANG Jixiong, et al. Condition state characterization and self-identification control method of key equipment for intelligent solid backfilling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4237–4249.
- [43] 张强, 刘勇, 张吉雄, 等. 固体智能充填自主夯实过程机构干涉影响因素与调控方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1043–1054.
- ZHANG Qiang, LIU Yong, ZHANG Jixiong, et al. Influencing factors and control method of mechanism interference in autonomous compaction process of intelligent solid backfilling technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1043–1054.
- [44] 张强, 张吉雄, 宗庭成, 等. 煤矿固体智能充填支护机器人及其关键技术[J]. *煤炭学报*, 2025, 50(2): 1376–1392.
- ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, ZONG Tingcheng, et al. Intelligent solid backfilling support robot in coal mine and its key technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2025, 50(2): 1376–1392.
- [45] 孙凯, 曹鑫, 武中亚, 等. 长壁逐巷胶结充填采充工艺协调优化设计方法[J]. *矿业研究与开发*, 2019, 39(6): 11–16.
- SUN Kai, CAO Xin, WU Zhongya, et al. A design method for coordinated optimization for mining and filling process of longwall-roadway with cemented backfilling technology[J]. *Mining Research and Development*, 2019, 39(6): 11–16.
- [46] 张吉雄, 周楠, 高峰, 等. 煤矿开采嗣后空间矽石注浆充填方法[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.
- [47] 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.
- ZHANG Zizheng, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Review and development of surrounding rock control technology for gob-side entry retaining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 3979–4000.
- [48] 王平, 曾梓龙, 孙广京, 等. 深井矸石充填工作面沿空留巷围岩控制原理与技术[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 68–76.
- WANG Ping, ZENG Zilong, SUN Guangjing, et al. Principle and technology of surrounding rock control for gob-side entry retaining in deep mine gangue backfilling face[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 68–76.
- [49] 谭云亮, 范德源, 刘学生, 等. 煤矿深部超大断面硐室群围岩连锁失稳控制研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 180–199.
- TAN Yunliang, FAN Deyuan, LIU Xuesheng, et al. Research progress on chain instability control of surrounding rock for super-large section chamber group in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 180–199.
- [50] 康红普. 煤炭开采与岩层控制的空间尺度分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(2): 5–30.
- KANG Hongpu. Spatial scale analysis on coal mining and strata control technologies[J]. Journal of Mining And Strata Control Engineering, 2020, 2(2): 5–30.
- [51] 张吉雄, 屠世浩, 曹亦俊, 等. 煤矿井下煤矸智能分选与充填技术及工程应用[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 417–430.
- ZHANG Jixiong, TU Shihao, CAO Yijun, et al. Coal gangue intelligent separation and backfilling technology and its engineering application in underground coal mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 417–430.
- [52] 张吉雄, 屠世浩, 曹亦俊, 等. 深部煤矿井下智能化分选及就地充填技术研究进展[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 1–10.
- ZHANG Jixiong, TU Shihao, CAO Yijun, et al. Research progress of technologies for intelligent separation and in situ backfill in deep coal mines in China[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(1): 1–10.
- [53] 邓雪杰. 特厚煤层上向分层长壁逐巷胶结充填开采覆岩移动控制机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- DENG Xuejie. Ground control mechanism of mining extra-thick coal seam using upward slicing longwall roadway cemented backfilling technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [54] 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.