

煤矿负碳高效充填开采理论与技术构想

谢和平^{1,2}, 张吉雄^{1,3}, 高峰¹, 李百宜¹, 李存宝^{1,2}, 谢亚辰⁴, 周楠³

(1. 中国矿业大学-深圳大学-四川大学 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. 深圳大学 深地科学与绿色能源研究院, 广东 深圳 518060; 3. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 4. 多伦多大学 土木工程系 多伦多 M5S1A1)

摘要: 矿山安全高效绿色低碳开采是永恒的主题, 近零冲击地压、近零生态损害以及低碳、零碳、负碳的绿色开采将成为保障我国能源安全供应与绿色低碳发展的新要求。充填开采是实现这一要求的必然途径。然而, 现有充填开采原理与技术装备体系难以突破高产高效、低碳开采的技术瓶颈, 对充填材料及充填模式进行变革已势在必行。针对“千米深井资源开发和千万吨产能矿井充填(两个一千)”与“近零生态损害和近零冲击地压(两个近零)”的煤炭绿色低碳开采战略目标, 提出了负碳高效充填开采技术全新构想, 系统阐述了负碳高效充填开采的定义与科学内涵, 提出和建立了由CO₂、矸石与快速胶结物混合而成的负碳高孔隙充填材料结构CGIF(CO₂ Ganguer Inorganic Framework)拓扑构型与强度理论以及CGIF混合物充填体固碳理论、快速黏凝胶结材料反应动力学理论、矿区充填开采防治冲击地压等负碳高效充填理论构想; 提出了矸石快速高效胶结高孔隙充填材料制备技术、快速黏凝胶结材料绿色高效制备技术、CGIF充填体负碳高效充填开采技术、多面并采高效充填开采技术与工艺、全周期立体高效充填开采防冲技术等关键技术体系。在此基础上, 明确了煤矿负碳高效充填开采“基础研究—技术攻关—工程示范”的“三阶段”发展规划, 构建了煤矿负碳高效充填开采理论与技术体系构想; 评估了煤矿负碳高效充填CO₂封存能力, 可望实现煤炭负碳开采、低碳利用的煤炭开发利用全过程自身实现碳中和的新格局。

关键词: 负碳充填; 高孔隙材料; CGIF 充填体; 固碳理论; 防冲技术

中图分类号: TD823.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)01-0036-11

Theory and technical conception of carbon-negative and high-efficient backfill mining in coal mines

XIE Heping^{1,2}, ZHANG Jixiong^{1,3}, GAO Feng¹, LI Baiyi¹, LI Cunbao^{1,2}, XIE Yachen⁴, ZHOU Nan³

(1. State Key Laboratory for Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology - Shenzhen University - Sichuan University, Xuzhou 221116, China; 2. Institute of Deep Earth Sciences and Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Department of Civil & Mineral Engineering, University of Toronto, Toronto M5S1A1, Canada)

Abstract: Safe, high-efficient, green and low-carbon mining is an eternal theme of coal mines. Near zero rock burst, near zero ecological damage and low-carbon, zero-carbon and carbon-negative green mining will become new requirements to ensure China's energy security supply and green low-carbon development. Backfill mining is the inevitable way to achieve these requirements. However, the existing theories, technologies, and methods of backfill mining are difficult to overcome the technical bottlenecks of high yield, high efficiency, and low-carbon mining, and it is imperative to reform the filling

收稿日期: 2023-09-03 修回日期: 2023-10-31 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1091

作者简介: 谢和平(1956—), 男, 湖南双峰人, 中国工程院院士。Tel: 028-85406002, E-mail: xiehp@scu.edu.cn

通讯作者: 张吉雄(1974—), 男, 宁夏中卫人, 教授。Tel: 0516-83590096, E-mail: 2011@cumt.edu.cn

引用格式: 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.



移动阅读

materials and filling modes. In view of the strategic goal of low-carbon coal mining of “kilometer deep mine resource development and ten-million-ton productivity mine filling (two thousands)” and “near zero ecological damage and near zero rock burst (two near zeros)”. The definition and concept of carbon-negative & high-efficient backfill mining in coal mines has been systematically expounded, and the theoretical development for carbon-negative & high-efficient backfill mining in coal mines has been proposed, including the topological configuration and strength theory of CGIF (CO₂ Gangue Innovative Framework) for high porosity filling materials structure, the carbon sequestration theory of CGIF mixture filling body, the reaction kinetics theory of fast adhesive gel bonding material, and the prevention and control of rock burst by filling mining in mining area. The key technical systems have been proposed, such as the preparation technology of gangue fast and efficient cementation high porosity filling material, the green and efficient preparation technology of fast and efficient cementation gel binding material, the negative carbon efficient filling mining technology of CGIF backfill, the negative carbon efficient filling mining technology, the technology of multi-face mining, and the full cycle three-dimensional efficient filling mining and rock burst prevention technology. On this basis, the “three stage” development plan of “basic research, technical research, and engineering demonstration” for carbon-negative & high-efficient backfill mining in coal mines has been clarified, and a theoretical and technical system for carbon-negative & high-efficient backfill mining in coal mines has been constructed. The CO₂ storage capacity with carbon-negative & high-efficient backfill mining in coal mines has been evaluated. It is expected to achieve a new pattern of carbon neutrality in the entire process of coal development and utilization through carbon-negative mining and low-carbon utilization.

Key words: carbon negative backfill; high porosity material; CGIF filling body; carbon sequestration theory; anti-burst technology

矿山安全高效绿色低碳开采是永恒的主题, 当前仍面临一系列挑战^[1-2]。2023年7月, 习近平总书记在全国生态环境保护大会上强调“生态文明建设是关系中华民族永续发展的根本大计”, 并指出“我国生态环境保护结构性、根源性、趋势性压力尚未根本缓解。必须以更高站位、更宽视野、更大力度来谋划和推进新征程生态环境保护工作, 要加强科技支撑, 推进绿色低碳科技自立自强”。同时, 习近平总书记系统部署了全面推进美丽中国建设的战略任务和重大举措, 指出“坚持把绿色低碳发展作为解决生态环境问题的治本之策”。因此, 为保障能源稳定供应, 推进煤炭资源绿色低碳发展, 破解煤矿安全高效绿色低碳开采的现实难题, 必须要有煤炭低碳高效开采新思维, 构建煤炭低碳高效开采新原理, 推进煤炭低碳高效开采新技术创新, 实现煤炭资源从传统利用方式向低碳高效开发的根本转变。

煤炭资源从地下岩层中大量开采剥离必然导致岩层失稳而引发地质及环境灾害^[3-5], 世界上还没有一个神奇的理论能够实现现在地下煤炭资源被挖空后, 维持上覆岩层不变形、不破断、不垮塌与不发生冲击地压^[6-9]。充填开采技术在地表沉陷控制、生态环境保护、矿山固废处置与利用等方面具有显著的技术优势, 能够从煤炭资源开采源头上解决地表沉陷、地下水流失、瓦斯排放、土地占用损害等难题^[10-13]。历经 20 余年产学研用联合攻关, 我国充填开采技术历经了 5 代

研发创新^[14], 已基本形成体系的典型充填技术包括综合机械化固体充填技术^[15]、膏体充填技术^[16]、长壁逐巷胶结充填技术^[17]、覆岩隔离注浆充填技术^[18-19]、井下采选充+X 技术^[20]、功能充填开采技术^[21-23]。然而, 这些充填开采方法广泛应用于我国各大矿区, 工程实施效果良好的同时也在实践中暴露了一些发展的阻力与难处, 例如充填影响煤炭生产效率、大规模充填所需矸石量不足、充填作业成本高等问题, 面临着不能实现“低碳、零碳、负碳”的绿色发展要求等严峻挑战。因此, 为实现从源头消除冲击地压灾害和地表生态损害, 以近零生态损害以及低碳、零碳、负碳的绿色开采为最终目标, 必须着力于创新现有的充填开采原理与技术。

基于此, 笔者认为, 充填开采是实现千米深井和千万吨产能矿井高效开采(两个一千), 同时保障“近零生态损害和近零冲击地压”(两个近零), 以及低碳、零碳、负碳绿色开采(一个负碳)的唯一根本途径, 并能实现生态薄弱区煤炭资源解放、冲击危险地区煤炭资源解放的目标(两个解放)。提出“近零生态损害和近零冲击地压”的负碳高效充填开采全新技术构想, 实现井下矸石快速高效高孔隙充填与 CO₂ 大规模封存, 提高充填开采效率与效益, 推进煤炭绿色低碳高效开采, 破解传统充填开采方法理论与技术瓶颈, 明晰实现“两个一千、两个近零、一个负碳、两个解放(生态薄弱区煤炭资源解放、冲击危险地区煤炭资源

解放)”的技术路线和战略目标,构建“近零生态损害、近零冲击地压及负碳煤炭开采”的矿山充填全新技术体系。笔者提出了负碳高效充填开采理论与技术研究总体框架,提出和建立了由 CO₂、矽石与快速胶结物混合而成的负碳高孔隙充填材料结构 CGIF (CO₂ Ganguer Inorganic Framework),并对高孔隙充填材料结构拓扑构型与强度理论、CGIF 混合物充填体固碳理论、快速黏凝胶结材料反应动力学理论、矿区充填开采防治冲击地压理论、矽石快速高效胶结高孔隙充填材料制备技术、快速黏凝胶结材料绿色高效制备技术、CGIF 充填体负碳高效充填开采技术、多工作面并采高效充填开采技术与工艺、全周期立体高效充填开采防冲技术进行了概述,明确了负碳高效充填开采的战略路线与最终目标。

1 负碳高效充填开采的定义和构想

负碳高效充填开采是指利用高孔隙率、高力学强度、高储碳能力的新型充填材料,在井下将 CO₂、矽石与快速胶结材料混合,构建 CGIF 混合结构物充填材料并将其充入采空区,形成全新的矽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形成 CO₂ 封存体,以此构建全新的“煤矿负碳高效充填开采构想”。

“煤矿负碳高效充填开采构想”的实现对充填材料的孔隙度、力学性能、储碳能力提出了新要求。Science 期刊 2020 年报道的金属有机框架材料 (MOFs) 以其高孔隙等特性,实现了作为吸附剂对清洁燃料气体的高密度储能^[24]。其构建方法为负碳高效充填材料的高孔隙度要求提供了研发思路。因此,基于金属有机框架 (MOF) 的网络方法,笔者提出利用矽石构建高孔隙率、可调孔隙结构的高孔隙充填材料的构想 (图 1),具体特征为结构功能稳定、环境影响较低、力学性能与储碳性能优异。

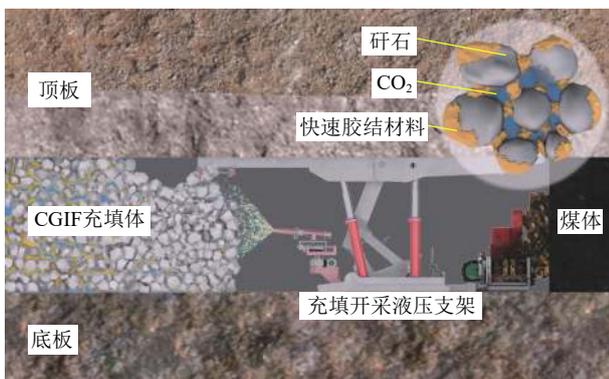


图 1 负碳高效充填开采技术

Fig.1 Carbon negative and efficient backfill mining technology

同时,为实现高效负碳目标,进一步设计架后落料联合喷射的充填工艺以实现 CGIF 的采空区内高效混合、凝固,实现对顶板的及时有效支撑。如图 2 所示,首先,通过支架后顶梁悬挂的多孔底卸式输送机将高孔隙充填材料填充入采空区,同时启动架后喷射装置,将 CO₂ 及快速胶结材料喷射在高孔隙充填材料上以实现快速充填,并利用高孔隙充填材料的孔道结构与化学性质吸附 CO₂,同时喷洒密封剂形成 CGIF 混合物充填体。相较于传统充填开采,负碳高效充填开采技术通过研发高孔隙充填材料与快速胶结材料,取消充填夯实工艺,降低了充填矽石用量,缩短了充填材料固化时间,提高了充填工艺速度。

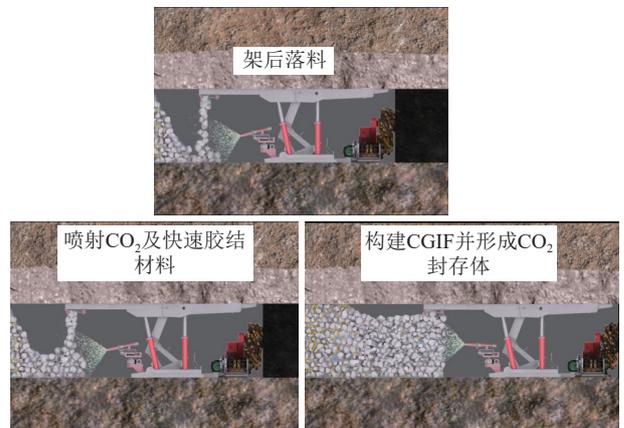


图 2 负碳高效充填工艺

Fig.2 Carbon negative and efficient backfill mining process

在“煤矿负碳高效充填开采构想”指导下,进一步结合几何学、力学原理建立矿区充填开采防冲设计方法,构建“近零生态损害和近零冲击地压”的负碳高效充填开采技术体系,以期实现“两个一千、两个近零、一个负碳、两个解放”的战略目标,改变目前矿区单工作面产能低、冲击危险性大、生态破坏严重、污染物排放量高等一系列问题,实现煤炭资源负碳防冲高效开采理念与模式的改革,可望在全球率先形成“煤炭负碳开采、低碳利用”的煤炭开发利用全新技术体系,构建“自身就实现碳中和”煤炭开发的新格局。

“煤矿负碳高效充填开采构想”围绕矿山安全、高效、绿色、低碳开采的重大战略需求,面向深部与西部矿井,将颠覆性地实现煤炭负碳开采,突破常规充填开采影响煤炭生产效率的瓶颈。针对冲击地压治理与高效低碳开采面临的技术难题,以“充填材料结构表征—充填材料服役性能—充填材料固碳机理—矿井多工作面并采与充填防冲的设计原理—煤矿负碳高效充填开采防冲监测与评价—工程示范”为主线,深入研究高孔隙充填材料结构拓扑构型与强度理论、CGIF 混合物充填体固碳理论、快速黏凝胶结材料反

应动力学理论、矿区充填开采防治冲击地压理论, 在突破关键理论的基础上, 研发矽石快速高效胶结高孔隙充填材料制备技术、快速黏凝胶结材料绿色高效制备技术、CGIF 充填体负碳高效充填开采技术、多工

作面并采高效充填开采技术、全周期立体高效充填开采防冲技术等关键技术, 最终形成通用性的煤矿负碳高效充填开采理论与技术体系。总体研究理论与技术框架如图 3 所示。

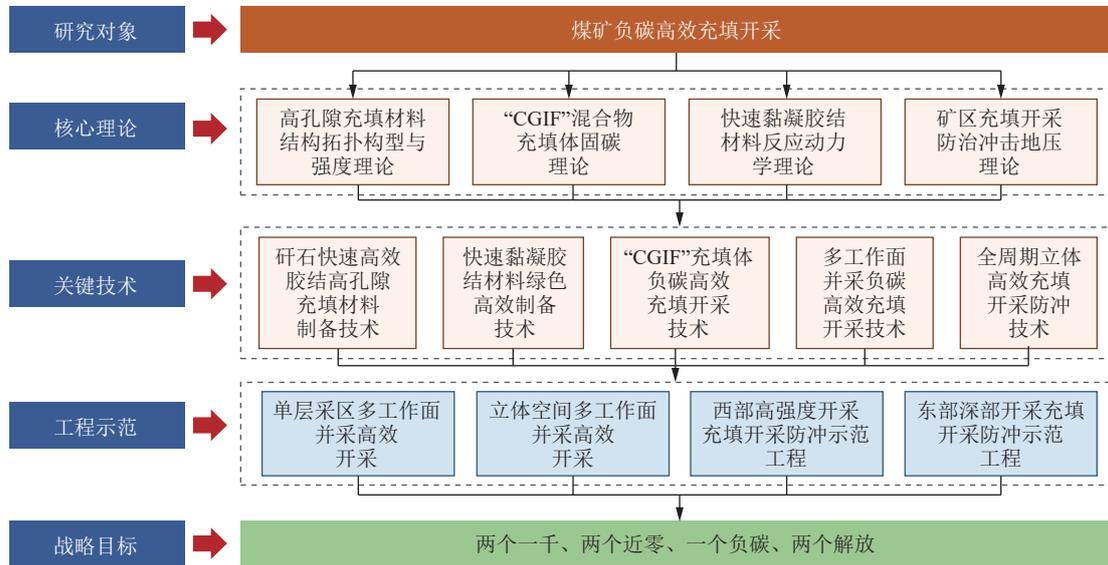


图 3 负碳高效充填开采理论与技术研究框架

Fig.3 Theoretical and technical research framework for carbon negative and efficient backfill mining

2 负碳高效充填开采的理论框架

2.1 负碳高孔隙充填材料结构拓扑构型与强度理论

负碳高效充填开采技术采用的关键材料是矽石快速高效胶结高孔隙充填体。其通过改变充填材料宏观结构, 将传统矽石密实充填体转变为高孔隙充填体的思路进行研制。

该材料具有孔隙和孔径可控、形状稳定、力学性能优异等特点, 且其内部的大量孔隙空间使材料具备可设计性, 并可根据不同充填场景进行优化设计, 实现多功能集成。同时因其具备大量孔隙的特点而破解大规模充填材料不足的难题。

然而, 由于充填体结构与性能受复杂多变的井下环境影响^[25-28], 其设计必须考虑工作状态下的性能要求, 如果高孔隙充填结构失效, 则会造成严重的煤矿安全事故, 但目前没有井下高孔隙充填体的结构表征与力学性能相关的理论, 导致材料结构与力学性能缺乏定量关联。因此, 构建高孔隙充填材料结构拓扑构型与强度理论尤为关键。

明确材料的几何结构数学模型与强度特性是构建高孔隙充填体结构拓扑构型与强度理论的核心。因此, 需采用复杂系统科学方法, 精确描述复杂结构力学系统中的应力、位移和变形, 建立材料非线性变形数学模型, 通过分形几何方法定量表征三维高孔隙

材料几何拓扑结构, 深入研究新型高孔隙度矽石-胶体复合材料结构与强度的定量关联, 以期揭示井下渗流-应力-化学多场耦合环境下高孔隙充填体结构损伤机理, 提出高孔隙充填体的长期稳定性控制方法, 进而实现充填材料低密度、高孔隙率框架式承载目标。

2.2 CGIF 混合物充填体固碳理论

为实现充填体的低密度、高孔隙特性而提出 CGIF 混合物充填体制备技术。CGIF 混合物充填体通过混合常态或超临界 CO₂、矽石、快速高效胶结材料进行制备。如图 4 所示, CGIF 混合物充填体既能快速高孔隙充填, 又能大规模固化 CO₂, 其中的 CO₂ 还能起到一定的支撑承压作用, 形成可实现负碳高效充填开采的全新技术路径。

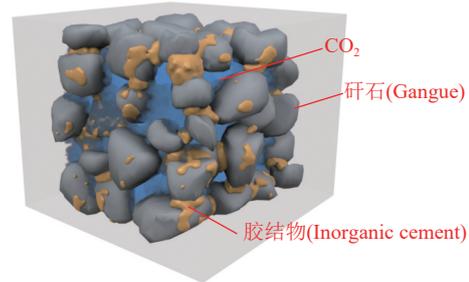


图 4 CO₂ 与矽石及快速胶结剂混合物充填体 CGIF 示意
Fig.4 Schematic diagram of the filling body “CGIF” with a mixture of CO₂, gangue, and rapid binder

CGIF 混合物充填体固碳机制及稳定性的研究路径为深入探究 CGIF 的内生机制及演变规律,建立固碳能力计算方法,揭示 CGIF 高孔隙固碳程度与内膨胀机理,利用热力学与动力学理论研究多相矿化反应过程中二氧化碳迁移规律与矿化作用机理,建立 CGIF 混合物充填体本构模型,探索其结构强度与体积变形机制,明确其在井下充填环境下的力学性能与长期稳定性,构建 CGIF 混合物充填体矿化反应全过程的 CO₂ 净排放模型,提出充填体负碳性能评估方法。

理论上,开采 1 t 原煤将产生 0.74 m³ 采空区,当 CGIF 混合物充填体孔隙率分别为 50%、60%、70% 时,根据其孔隙体积与 CO₂ 液体密度,估算超临界 CO₂ 固化量分别为 0.34、0.41、0.48 t,同时充填材料矸石用量分别减少了 0.67、0.80、0.93 t。因此,按每年原煤采出量为 40 亿~45 亿 t,进一步估算得出每年采空区 CGIF 混合物充填体负碳量为 13.6 亿~21.6 亿 t,每年充填材料矸石用量减少了 26.8 亿~41.9 亿 t。CGIF 混合物充填体封存 CO₂ 的同时破解了大规模充填开采所需矸石量严重不足的难题,同时,可望在全球率先创造煤炭负碳开采、低碳利用新格局,实现煤炭开发利用全过程自身碳中和的目标。

2.3 快速黏凝胶结材料反应动力学理论

负碳高效充填开采中的快速黏凝胶结材料通过胶结作用,将散体矸石黏结后形成具有承载能力的结构,胶结材料具有黏结强度高、固化速度快、固结强度大的特点。胶结材料水化反应机理解释了胶凝颗粒固结硬化现象^[29],然而,基于高效胶结、快速膨胀、快速固化的快速黏凝胶结材料的反应调控机制尚不清晰。因此,需要根据胶凝作用机理,构建快速黏凝胶结材料反应动力学理论,最终实现快速黏凝胶结材料的制备与性能优化。

快速黏凝胶结材料反应动力学理论的研究路径为考虑胶凝颗粒粘过程中的动态停滞、相分离、渗流和干扰的动力学现象^[30-31],研究固废材料胶凝性能活化与反应原理,提出胶凝颗粒接触的物理化学模型,建立固化时间与固结强度的计算方法,探索胶凝材料分子网络框架结构,构建快速黏凝胶结材料的反应调控方法,包括水化反应的宏观调控机制与反应颗粒动力学研究,最终实现粘结强度高、固化速度快、固结强度大的胶凝材料研发,进而破解矿山充填影响开采速度的难题。

2.4 矿区充填开采防治冲击地压理论

现有充填开采技术难以为矿区充填开采防治冲击地压提供足够的理论支撑^[32-33],存在关键层与冲击地压关联机制、充填控稳力学原理与防冲设计准则等

科学问题尚未解决,亟需建立煤矿大区域长历时充填开采防冲的力学原理和设计准则,实现矿区充填开采防冲的精准可靠设计(图 5)。

建立全区域长历时矿区覆岩结构的几何与力学模型,以煤矿生产寿命为时间历程摸清整个矿区多采区、多工作面、大规模开采条件下岩层-充填体应力转移与能量分布积聚特征,定量表征岩层-充填体能量源集聚、耗散与释放规律^[34],解析充填体抑制能量演化致灾过程。深入研究矿区多工作面大规模并采下岩层结构的变形模式^[35],理论描述矿区充填开采下岩层变形、断裂与滑移失稳特征,量化计算充填开采防冲所需的岩层允许有限变形,阐明大规模充填开采下岩层破断的临界力学条件,揭示岩层变形破断的失稳类型与准则。

构建适应于不同矿区开采条件的充填体结构形式体系,建立基于充填体几何结构与力学强度相匹配的岩层控稳理论,形成矿区大规模结构性充填开采的充填体几何与力学参数优化设计方法,以达到岩层控稳的材料最少用量和防冲最佳效果。基于岩层变形和能量灾变理论,评估矿区大规模充填开采中岩层的变形量和失稳风险,提出充填开采顺序、开采速度、开采规模的确定方法,结合岩层控稳理论和充填体结构优化算法,提出岩层控稳参数,得出充填体强度、刚度和结构几何参数条件,最终建立矿区充填开采防冲设计准则。

3 负碳高效充填开采的关键技术体系构想

3.1 矸石快速高效胶结高孔隙充填材料制备技术

矸石快速高效胶结高孔隙充填材料制备技术是实现负碳高效充填开采的关键基础,其核心是高孔隙充填材料的设计流程与制备工艺(图 6)。

不同充填环境对充填体的强度要求不同,因此需要通过分析充填材料赋存及工作状态,确定高孔隙充填体的强度与相应孔隙率大小,并据此构建高孔隙充填材料结构。该技术的研究内容包括研究散体矸石堆积、黏结形成高孔隙结构的制备方法,采用 Talbol 级配理论对矸石骨料颗粒级配进行评价,并利用分形理论确定的孔隙结构优化配比,通过响应面法对矸石快速高效胶结高孔隙充填体开展强度性能试验,采用 XRD(X 射线衍射)、SEM-EDS(电镜扫描+能谱分析)、MIP(压汞法)等多种材料分析手段开展微观界面结构基础研究,并据此优化高孔隙充填材料配比与孔隙结构,进一步将实验室得到的最优配比与孔隙结构的高孔隙充填材料应用于工业试验,研究现场矸石落料速度、胶结材料喷浆速度及二者协调关系,分析孔径调控效果,优化高孔隙充填材料制备工艺与研发

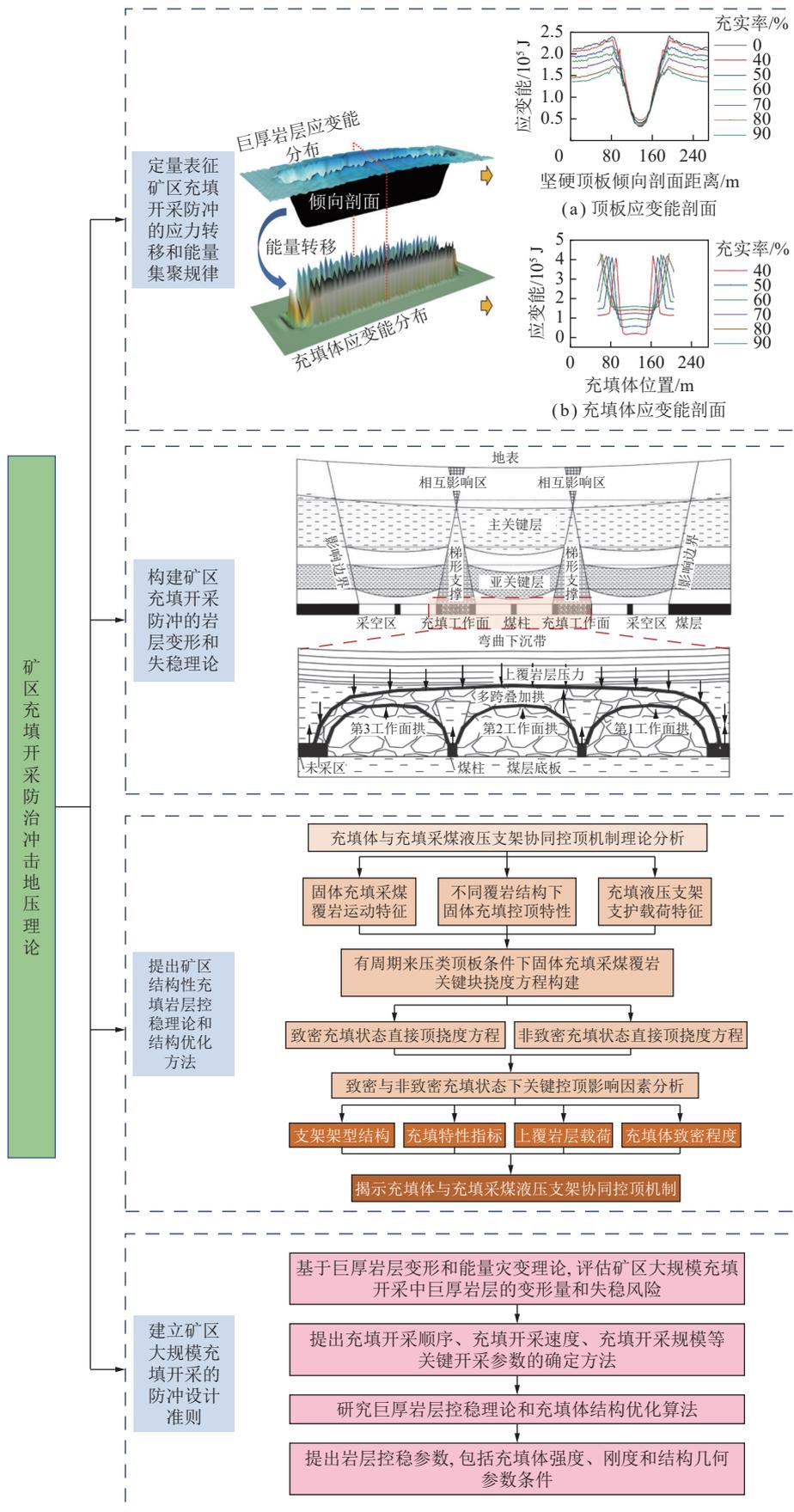


图 5 矿区充填开采防治冲击地压理论

Fig.5 Theory of impact pressure prevention and control in mine backfilling mining

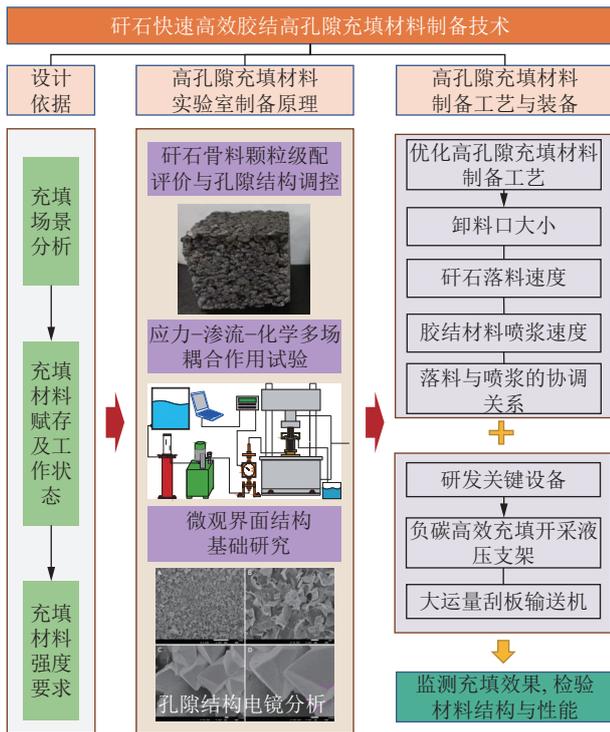


图6 矽石快速高效胶结高孔隙充填材料制备技术

Fig.6 Preparation technology of high-porosity filling material with rapid and efficient cementation of gangue

关键装备,监测充填后的工作面矿压显现与顶板变形情况,从而对高孔隙充填材料的结构与性能进行检验,与实验室制备环节共同构成先优化后验证的闭环流程,最终形成一套矽石快速高效胶结高孔隙充填材料制备技术体系。

3.2 快速黏凝胶结材料绿色高效制备技术

快速黏凝胶结材料绿色高效制备的原材料为煤矽石、粉煤灰、脱硫石膏、煤气化渣和炉底渣等煤基固废。快速黏凝胶结材料绿色高效制备技术主要流程为分析测试原材料的化学成分与矿物组成,测定潜在胶凝活性,利用机械激发、化学激发、热活化激发和物相重构等方法激发材料活性,将设计配比的原材料进行破碎、粉磨、高温煅烧、激发剂添加、均化等工艺,最终得到快速黏凝胶结材料。通过开展不同活性材料粉磨细度、激发剂种类与掺量的胶凝材料初终凝时间、抗压强度、抗折强度和耐久性等影响因素下的正交试验来优化胶结材料配比。同时,为加快水化反应速率,快速黏凝胶结材料制备过程中添加纳米晶体材料与有机交联剂,采用X射线衍射、热重-差热分析、傅里叶红外光谱分析等测试表征方法,测试分析水化产物与凝结时间,为胶结材料的快速粘凝特性提供理论依据,最终形成一套快速黏凝胶结材料的绿色高效制备方法(图7),实现开发黏结强度高、固化速度快、固结强度大的快速黏凝胶结材料的目标。

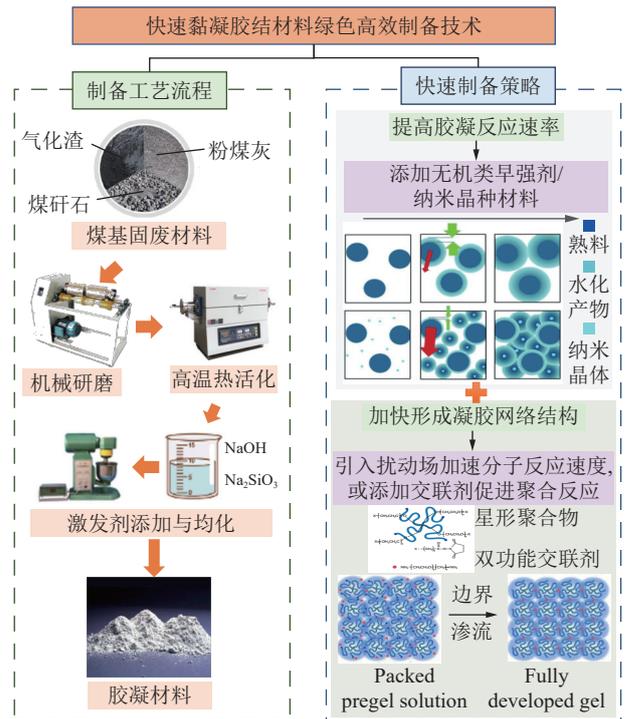


图7 快速黏凝胶结材料绿色高效制备技术

Fig.7 Green and efficient preparation technology of rapid cementing material

3.3 CGIF 充填体负碳高效充填开采技术

CGIF 充填体负碳高效充填开采技术是指利用CGIF 充填体对二氧化碳的物理-化学封存作用,建立成套充填开采系统与工艺,在充填开采作业的同时将捕集的 CO_2 封存至充填体中,在快速高孔隙充填过程中形成 CO_2 封存体,实现全新的负碳充填开采,打造负碳充填开采全新技术。如图8所示,CGIF 充填体负碳高效充填开采技术在地面制备快速黏凝胶结材料并捕集 CO_2 ,同时分别采用充填材料输送系统与注气管路将充填材料与 CO_2 输送至充填开采工作面完成负碳充填。其技术内涵主要包括CGIF 充填体制备与输送系统开发、CGIF 充填体负碳高效充填开采工艺设计、CGIF 充填体负碳高效充填开采装备研发、CGIF 充填封存二氧化碳全周期监测技术与负碳高效充填开采碳减排评估技术。该技术将突破充填开采材料不足、效率低、能耗大的技术瓶颈,解放生态薄弱区、冲击危险区煤炭资源,实现煤炭负碳开采的战略目标。

3.4 多工作面并采高效充填开采技术

针对千万吨矿井充填的战略目标,提出多工作面并采高效充填开采技术。该技术通过设计单层多工作面并采(图9)和立体空间多工作面并采(图10)的高效开采工艺并形成相应高效充填技术及装备体系,在提高工作面充填开采产能(100万~300万t/a)基

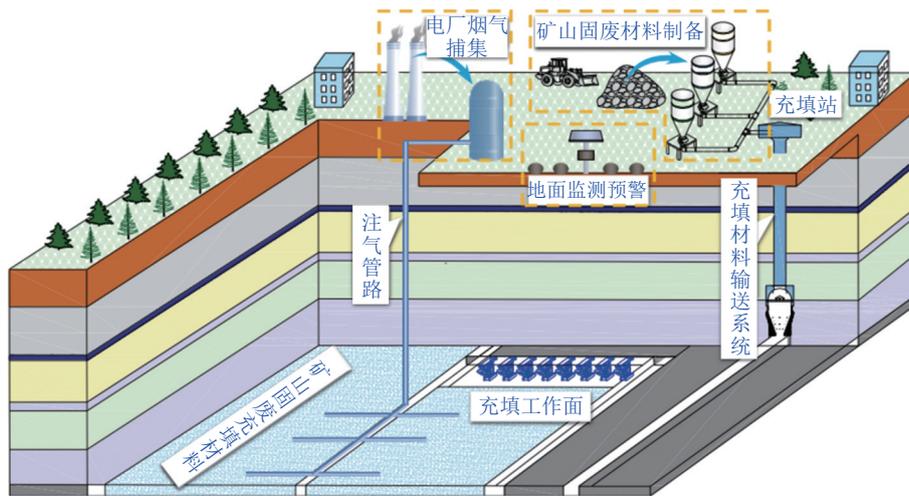


图 8 CGIF 充填体负碳高效充填开采技术

Fig.8 Carbon negative and efficient backfill mining with CGIF backfilling materials

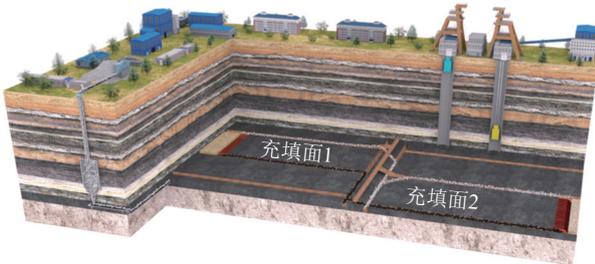


图 9 单层多工作面并采的高效开采方案示意

Fig.9 Schematic diagram of an efficient mining scheme for simultaneous mining of multiple working faces in one seam



图 10 立体空间多工作面并采的高效开采方案示意

Fig.10 Schematic diagram of efficient mining scheme for multi face mining in three-dimensional space

基础上, 通过多工作面并采实现千万吨级矿井高效充填开采的目标。

基于高效充填多工作面并采岩层控制原理, 该技术研究单层多工作面并采与立体空间多工作面并采的设计准则, 优化多工作面并采布局方式; 开发高效充填多工作面并采系统与工艺, 确定采充时空协调关系; 建立高效充填多工作面并采监测系统, 监测包括地表下沉、围岩变形、工作面矿压与环境影响在内的

多工作面充填效果, 优化充填参数。该技术的应用将突破充填开采影响煤炭生产效率的瓶颈, 可望实现千万吨级以上产能的矿山高效充填开采。

3.5 全周期立体高效充填开采防冲技术

基于矿区充填开采防治冲击地压原理, 研发全周期立体高效充填开采防冲技术, 实现采前-采中-采后的全周期区域防冲与高效充填, 解决治理冲击地压与解放矿井产能的难题。

全周期立体高效充填开采防冲技术针对矿区防冲要求, 构建采前(老采空区预充)-采中(立体协同充填)-采后(嗣后空间补充)的全周期充填模式(图 11), 形成区域煤炭开采与充填防冲时空协调方法。其中, 采前预充采用中位或高位充填跨落带与裂隙带, 节约充填工序并实现大范围的应力调整, 防止采前顶板岩层能量积聚; 采中充填基于防冲需求与采充协调原则, 采用低位、中位与高位协同立体充填, 避免应力集中与能量积聚; 采后补充采用高位地面孔注充嗣后空间, 提高充填体接顶效果, 强化矿区防冲能力。

基于区域防冲与高效充填需求匹配原则, 建立“低-中-高”多层次采动空间立体充填防冲协作方法, 创新立体充填开采系统布局方式; 进一步研究采动空间空隙时空演化规律与多方式协同充填时机的判定方法, 优化多方式协同高效充填工序路径, 开发工艺集约、充填开采互不干扰的充填体快速成型与采充协同工艺, 构建多源充填材料储存制备与输送布局方式, 研发采动空间充填材料的定点高效输送方法, 建立充填材料的高效智能制备工艺与系统; 最后, 研发包括充填材料高效智能制备与长距离大运力输送关键装备、适应智能开采工作面的工序自驱执行充填关键装备与多方式协同充填一体化智能管控系统在内的高效充填开采装备。

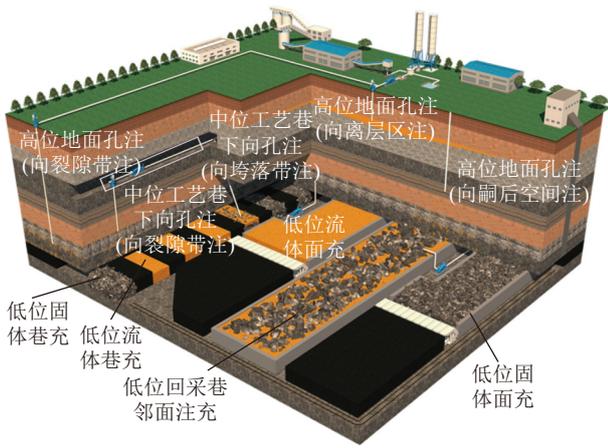


图 11 全周期立体充填开采模式

Fig.11 Full cycle three-dimensional filling mining mode

4 负碳高效充填开采的发展规划

根据现有的研究基础与可能的研究进程,笔者提出负碳高效充填开采构想的“基础研究—技术攻关—工程示范”三阶段发展规划(图12)。

2023—2025 年为第 1 阶段,本阶段围绕负碳高效充填开采的技术构想,研究高孔隙充填材料结构与功能的关联关系,明确材料成分与空间结构,得到材料

性能与服役性能演变规律;研究胶结材料快速胶凝方法,构建胶凝颗粒运动接触模型,揭示胶凝性能活化与反应机理;研究 CGIF 混合物充填体内生机制及演变规律,得到 CGIF 固碳能力与内膨胀机理、环境腐蚀下力学损伤机理;研究矿区充填开采防治冲击地压理论,得到矿区充填防冲力学原理与采区充填开采控制理论,形成负碳高效充填开采关键理论体系。

2025—2030 年为第 2 阶段,本阶段将根据负碳高效充填开采关键理论,实现矸石快速高效胶结高孔隙充填材料制备技术、快速黏凝胶结材料绿色高效制备技术、CGIF 充填体负碳高效充填开采技术、多工作面并采高效充填开采技术、全周期立体高效充填开采防冲技术的五大技术突破与装备研发,形成负碳高效充填开采技术。

2030—2035 年为第 3 阶段,本阶段将建成负碳高效充填开采、西部高强度开采充填开采防冲及东部深部开采充填开采防冲示范工程,研发负碳高效充填开采的监测技术装备,形成负碳高效充填开采的效果评价方法与技术规范标准。最终建立煤炭负碳高效充填开采技术体系,达到“两个一千、两个近零、一个负碳、两个解放”的战略目标,实现充填开采技术的革新。

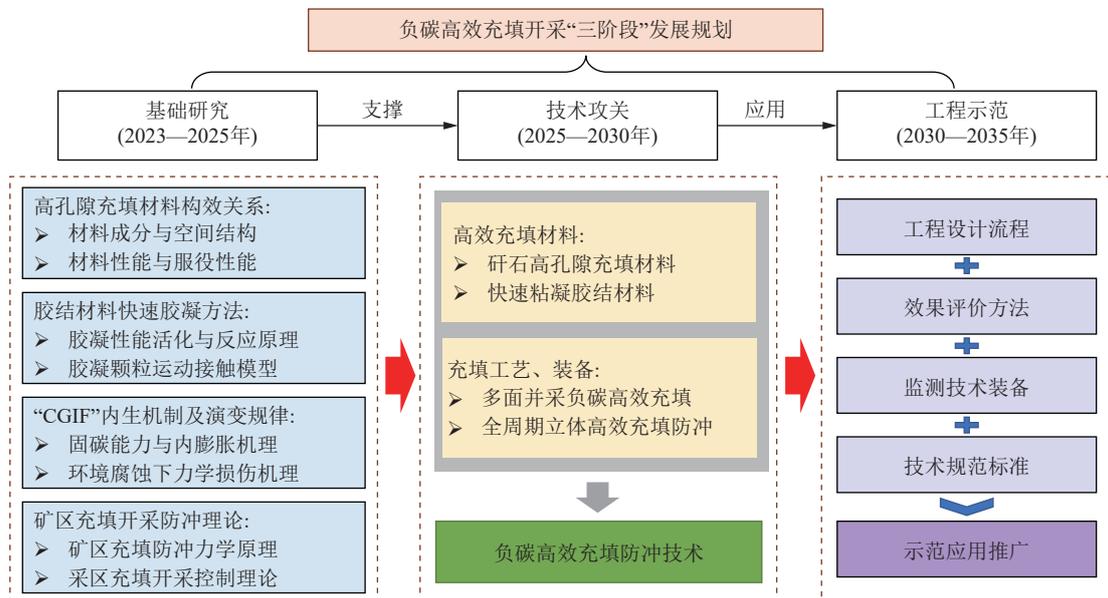


图 12 负碳高效充填开采“三阶段”发展规划

Fig.12 “Three stage” development plan for carbon negative and efficient backfill mining

负碳高效充填开采是绿色开采与灾害防治科学研究的重要内容,是国家能源安全开发及清洁利用的战略技术储备。在负碳高效充填开采理论研究与技术创新的不断探索中,必将把这一科学构想变为全面创新的、可大规模应用的开采技术体系。从而实现对煤炭资源的安全高效、绿色低碳开发。

5 结 语

根据现有煤炭生产布局,要实现深部与西部煤炭资源冲击地压灾害与生态环境损害的源头治理,就必须革新传统充填开采原理与技术。负碳高效充填开采作为一项全新技术,能够突破冲击地压灾害治理与矿井低碳排放的技术瓶颈,使充填材料像储气储能的

多孔金属材料一样以高孔隙结构及混合体内 CO_2 内压承载采动岩体, 同时又以矸石与胶结物形成的高孔隙固体构架来稳定储存 CO_2 , 最终实现“近零生态损害、近零冲击地压及负碳开采”的煤炭开发利用全过程。

为推动负碳高效充填开采技术的实现与工业应用, 提出了高孔隙充填材料结构拓扑构型与强度理论、CGIF 混合物充填体固碳理论、快速黏凝胶结材料反应动力学理论、矿区充填开采防治冲击地压理论等理论构想。在技术层面, 提出了矸石快速高效胶结高孔隙充填材料制备技术、快速黏凝胶结材料绿色高效制备技术、CGIF 充填体负碳高效充填开采技术、多工作面并采高效充填开采技术、全周期立体高效充填开采防冲技术等技术体系构想, 为建立负碳高效充填开采技术体系的工程实施与推广提供了路径参考。

笔者提出的基于 CO_2 、矸石与快速胶结剂混合物 CGIF 充填体的矿山负碳充填全新技术体系构想, 可望在全球率先打造形成“煤炭负碳开采、低碳利用”的煤炭开发利用全过程“自身就实现碳中和”的新格局。

参考文献(References):

- [1] 谢和平, 张吉雄. “近零生态损害和近零冲击地压”的负碳高效充填开采全新技术构想[C]//第二十二届全国科学采矿与矿压理论会议暨新疆煤炭产业科技创新发展研讨会报告. 新疆: 乌鲁木齐, 2023.
- [2] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向[J]. 工程科学与技术, 2016, 49(1): 1-8.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2016, 49(1): 1-8.
- [3] 康红普, 王国法, 姜鹏飞, 等. 煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1789-1800.
KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception of surrounding rock control and intelligent mining technology for kilometer deep mines in coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(7): 1789-1800.
- [4] 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, 22.
ZHANG Jixiong, TU Shihao, CAO Yijun, et al. Research progress on intelligent separation and in-situ filling technology in deep coal mines[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2020, 37(1): 1-10, 22.
- [5] 卞正富, 于昊辰, 雷少刚, 等. 黄河流域煤炭资源开发战略研判与生态修复策略思考[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1378-1391.
BIAN Zhengfu, YU Haochen, LEI Shaogang, et al. Coal resources development strategy and ecological restoration strategy in the Yellow River Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1378-1391.
- [6] 钱鸣高, 许家林. 煤炭开采与岩层运动[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 973-984.
QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 973-984.
- [7] 袁亮, 王恩元, 马衍坤, 等. 我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1825-1845.
YUAN Liang, WANG Enyuan, MA Yankun, et al. Research progress and technological challenges faced by coal and rock dynamic disasters in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 1825-1845.
- [8] 潘一山, 肖永惠, 罗浩, 等. 冲击地压矿井安全性研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1846-1860.
PAN Yishan, XIAO Yonghui, LUO Hao, et al. Study on safety of rockburst mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 1846-1860.
- [9] 窦林名, 何学秋, REN Ting, 等. 动静载叠加诱发煤岩瓦斯动力灾害原理及防治技术[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 48-59.
DOU Linming, HE Xueqiu, REN Ting, et al. The principle and prevention technology of coal and rock gas dynamic disaster induced by dynamic and static load superposition[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2018, 47(1): 48-59.
- [10] ZHANG Jixiong, LI Baiyi, ZHOU Nan, et al. Application of solid backfilling to reduce hard-roof caving and longwall coal face burst potential[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 88: 197-205.
- [11] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [12] 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 damage mining system and method for mine ecological environment[J]. *Journal of Mining and Rock Control Engineering*, 2019, 1(2): 56-68.
- [13] 李猛, 张吉雄, 邓雪杰, 等. 含水层下固体充填保水开采方法与应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 127-133.
LI Meng, ZHANG Jixiong, DENG Xuejie, et al. Solid filling water-preserved mining method and application under aquifer[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 127-133.
- [14] 闫浩, 张吉雄, 张升, 等. 散体充填材料压实力学特性的宏观研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 413-420.
YAN Hao, ZHANG Jixiong, ZHANG Sheng, et al. A macroscopic and microscopic study on the compaction mechanical properties of loose filling materials[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 413-420.
- [15] 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 prospects of coal based solid waste backfilling mining technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4167-4181.
- [16] 张吉雄, 周跃进, 黄艳利. 综合机械化固体充填采煤一体化技术

- [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(11): 10–13, 27.
ZHANG Jixiong, ZHOU Yuejin, HUANG Yanli. Integrated technology of comprehensive mechanized solid fill coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(11): 10–13, 27.
- [17] 常庆粮, 袁崇亮, 王永忠, 等. 膏体充填综采台阶煤壁稳定性半凸力学分析[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(1): 46–55.
CHANG Qingliang, YUAN Chongliang, WANG Yongzhong, et al. Semi-convex mechanical analysis on stability of step coal wall in fully mechanized mining with paste filling[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2022, 51(1): 46–55.
- [18] 邓雪杰, 张吉雄, 周楠, 等. 特厚煤层长壁巷式胶结充填开采技术研究与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(6): 857–862.
DENG Xuejie, ZHANG Jixiong, ZHOU Nan, et al. Research and application of long wall roadway cemented filling mining technology in extra thick coal seam[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(6): 857–862.
- [19] 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 for filling and grouting of gangue in the subsequent space of coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 150–162.
- [20] 许家林, 轩大洋, 朱卫兵, 等. 部分充填采煤技术的研究与实践[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1303–1312.
XU Jialin, XUAN Dayang, ZHU Weibing, et al. Study and application of coal mining with partial backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1303–1312.
- [21] 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.
- [22] 冯光明, 孙春东, 王成真, 等. 超高水材料采空区充填方法研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1963–1968.
FENG Guangming, SUN Chundong, WANG Chengzhen, et al. Research on goaf filling methods with super high-water material[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1963–1968.
- [23] 冯国瑞, 杜献杰, 郭育霞, 等. 结构充填开采基础理论与地下空间利用构想[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 74–84.
FENG Guorui, DU Xianjie, GUO Yuxia, et al. Basic theory of constructional backfill mining and the underground space utilization concept[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 74–84.
- [24] LI Baiyi, ZHANG Jixiong, YAN Hao, et al. Numerical investigation into the effects of geologic layering on energy performances of thermal energy storage in underground mines[J]. Geothermics, 2022, 102(6): 102403.
- [25] CHEN Zhijie, LI Penghao, ANDERSON Ryther, et al. Balancing volumetric and gravimetric uptake in highly porous materials for clean energy[J]. Science, 2020, 368: 297–303.
- [26] KNERELMAN E I, KAROZINA Yu A, SHUNINA I G, et al. Highly porous materials as potential components of natural gas storage systems: part 2 (a review)[J]. Petroleum Chemistry, 2022, 62(7): 677–713.
- [27] 杨蕊, 曹清华, 梅长彤, 等. 高孔隙率三维结构木材构建功能复合材料的研究进展[J]. 复合材料学报, 2020, 37(8): 1796–1804.
YANG Rui, CAO Qinghua, MEI Changtong, et al. Research progress in constructing functional composite materials from high porosity three-dimensional structured wood[J]. Journal of Composite Materials, 2020, 37(8): 1796–1804.
- [28] 赵泽敏, 高慧敏, 屈婷, 等. 多孔材料捕集烟道气中二氧化碳研究进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1715–1726.
ZHAO Zemin, GAO Huimin, QU Ting, et al. Research progress on porous materials for capturing carbon dioxide in flue gas[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1715–1726.
- [29] 孙强, 刘恒凤, 张吉雄, 等. 充填开采隔水关键层渗流稳定性力学模型及分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(2): 273–281.
SUN Qiang, LIU Hengfeng, ZHANG Jixiong, et al. Mechanical model and analysis of seepage stability in key aquiclude strata during backfill mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(2): 273–281.
- [30] 王子明, 王杰, 甘杰忠, 等. “水泥–速凝剂–水”系统的水化反应特征及凝结硬化机理研究现状[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3045–3054.
WANG Ziming, WANG Jie, GAN Jiezhong, et al. Research status on the hydration reaction characteristics and setting hardening mechanism of the “cement accelerator water” system[J]. Portland Bulletin, 2020, 39(10): 3045–3054.
- [31] SHANG Xiaoyu, ZHAN Baojian, LI Jiangshan, et al. Novel microcapsules for internal curing of high-performance cementitious system[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1–10.
- [32] JIANG Yujie, SETO Ryohei. Colloidal gelation with non-sticky particles[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 2773.
- [33] 周楠, 许健飞, 张吉雄, 等. 充填弱化坚硬覆岩冲击地压灾害机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(10): 2412–2426.
ZHOU Nan, XU Jianfei, ZHANG Jixiong, et al. Study on the disaster mechanism of rock burst in filling weakened hard overburden [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(10): 2412–2426.
- [34] CAO Jinrong, DOU, Linming, KONIETZKY Heinz, et al. Failure mechanism and control of the coal bursts triggered by mining-induced seismicity: A case study[J]. Environmental Earth Sciences, 2023, 82(7): 168.
- [35] GUO Yuming, ZHANG Jixiong, LI Meng, et al. Effects of loading stress and velocity on compression and particle breakage behaviour of waste rocks in backfill coal mining[J]. Applied Sciences, 2022, 12(21): 11175.