

“矿山充填开采与环境保护”专栏

# 煤基固废充填开采技术研究进展与展望

张吉雄<sup>1,2</sup>, 张 强<sup>1,2</sup>, 周 楠<sup>1,2</sup>, 李 猛<sup>3</sup>, 黄 鹏<sup>1,2</sup>, 李百宜<sup>4</sup>

(1.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116; 2.中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室,江苏 徐州 221116; 3.煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221116; 4.中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

**摘 要:**煤基固废充填开采技术符合煤炭绿色智能开采和洁净高效低碳利用行业主要攻关方向及新发展理念要求,是促进煤炭开采高质量化、环境低损伤化、绿色低碳化发展的研究重点与热点。笔者在总结煤基固废充填开采技术研发背景与发展历程的基础上,系统性介绍了煤基固废充填开采技术体系的研究现状,经过 20 余年产学研用联合攻关,历经 5 代技术的研发创新,已基本形成体系的典型固废充填技术包括综合机械化固体充填、膏体充填、长壁逐巷胶结充填、覆岩隔离注浆充填、井下采选充+X,为“三下”开采、条带煤柱回收、岩层移动与地表变形控制、煤基固废井下处置提供了较全面的技术途径;煤基固废充填开采充填材料本构模型、关键岩层控制及地表变形控制等理论研究也取得了较大进展,基本构建成充填开采岩层控制理论体系;面临产业智能化升级、深部资源开采、煤基固废规模化处置与资源化利用等重点发展趋势,煤基固废充填开采技术的主要发展方向包括但不限于煤基固废高效智能充填、井下嗣后注浆充填处置、深部充填采热、煤基固废充填井下碳封存、煤基固废绿色功能材料井下利用等。现有研究现状及发展趋势综合表明:煤基固废充填开采技术是实现煤炭资源绿色智能高效开采的重要代表性途径。

**关键词:**煤基固废;充填开采;采选充;岩层控制;绿色开采

中图分类号:TD823.7 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2022)12-4167-15

## Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology

ZHANG Jixiong<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiang<sup>1,2</sup>, ZHOU Nan<sup>1,2</sup>, LI Meng<sup>3</sup>, HUANG Peng<sup>1,2</sup>, LI Baiyi<sup>4</sup>

(1.School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Ministry of Education's Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Coal-based solid waste backfilling mining technology is in line with the main research direction and new development concept requirements of green and intelligent coal mining and clean, efficient and low-carbon utilization. It is the research focus and hot spot to promote the development of high quality and quantitative coal mining, low environmental damage, and green and low-carbon operation. On the basis of summarizing the research and development background and development history of coal-based solid waste backfill mining technology, the research status of coal-based

收稿日期:2022-07-14 修回日期:2022-09-09 责任编辑:郭晓伟 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2022.1053

基金项目:国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(51725403);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: zjxiong@163.com

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

引用格式:张吉雄,张强,周楠,等.煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J].煤炭学报,2022,47(12):4167-4181.

ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4167-4181.



移动阅读

solid waste backfill mining technology system is systematically presented. After more than 20 years of industry-university-research-use joint research, it has successively experienced five generations of technology research and development innovation. The typical solid waste backfilling technologies, that have basically formed a system including comprehensive mechanized solid backfilling, paste backfilling, long-wall and roadway-by-roadway cemented backfilling, overlying rock isolation grouting backfilling, and “underground mining-separating-backfilling and X”, provide a more comprehensive solution for “coal mining under buildings, waters-bodies and railways”, strip coal recovery, and coal-based solid waste underground disposal. Significant progress has also been made in theoretical research on the constitutive model of backfill materials, key rock formation control and surface deformation control in coal-based solid waste backfill mining, and a theoretical system for backfill mining rock formation control has been basically constructed. With the development trends of intelligent upgrading, large-scale disposal and resource utilization of coal-based solid waste, the main development directions of coal-based solid waste backfilling and mining technology include but are not limited to the efficient and intelligent backfilling of coal-based solid waste, underground grouting backfilling and disposal, deep backfilling heat mining, coal-based solid waste backfilling underground carbon sequestration, coal-based solid waste green functional materials underground utilization, etc. The existing research status and development trend comprehensively show that the coal-based solid waste backfilling mining technology is an important representative way to realize a green, intelligent and efficient mining of coal resources.

**Key words:** coal-based solid waste; backfilling mining; mining-separating-backfilling; ground control; green mining

富煤贫油少气是我国的能源禀赋特征,决定了我国以煤炭为主的能源结构,煤炭为国民经济发展提供了重要的基础。以 2021 年度为例,全国原煤产量达 41.3 亿 t,创历史新高,煤炭消费量占能源消费总量 56%,预计到 2025 年煤炭仍占我国能源消费的 50% 左右,煤炭作为我国主体能源,仍将是我国国民经济发展的重要支撑<sup>[1]</sup>。习近平总书记在党的十九大报告中强调“推进资源全面节约和循环利用”,2021-09-13 在考察国家能源集团榆林化工有限公司时的重要讲话,进一步明确了“煤炭作为我国主体能源”的地位<sup>[2]</sup>;2022 年全国两会上,全国政协委员围绕煤炭产业提出:建立煤矿弹性产能与弹性生产机制、“双碳”目标下加强我国煤炭兜底保障能力建设<sup>[3]</sup>。2022-03-17 国家能源局印发的《2022 年能源工作指导意见》指出,要夯实能源供应保障基础,加快能源绿色低碳转型,增强能源供应链弹性和韧性<sup>[4]</sup>。“碳达峰、碳中和”背景下煤炭在保障国家能源安全中的地位和作用进一步明确,煤炭开采面临能源安全保供、生态环境保护、降碳减排等诸多压力,煤炭绿色低碳发展势在必行。

党的十九届四中全会提出“实行最严格的生态环境保护制度,全面建立资源高效利用制度”<sup>[5]</sup>，“十四五”规划和远景目标提出要“加强大宗固体废物综合利用”、“全面提高资源利用效率”<sup>[6]</sup>。国家发展和改革委员会先后印发《关于“十四五”大宗固体废物综合利用的指导意见》《关于开展大宗固体废物综合利用示范的通知》，指出在煤炭行业推广“煤

矸石井下充填+地面回填”，促进矸石减量；建立“梯级回收+生态修复+封存保护”体系，推动绿色矿山建设<sup>[7-9]</sup>。2022-04-02 国家能源局、科学技术部发布关于印发《“十四五”能源领域科技创新规划》的通知，明确提出集中攻关固体废弃物充填采煤技术，开展矿区典型大宗固废资源化利用示范<sup>[10]</sup>；2022-06-10 生态环境部等 7 部门印发《减污降碳协同增效实施方案》推进固废污染防治协同控制，推动煤矸石、粉煤灰、尾矿、冶炼渣等工业固废资源利用或替代建材生产原料，到 2025 年新增大宗固废综合利用率达到 60%，存量大宗固废有序减少<sup>[11]</sup>。由此可以看出，煤基固废处置已成为制约煤炭绿色高效开采的关键环节。

煤基固废充填开采技术是实现绿色低碳开采的重要代表性技术，在地表沉陷控制、生态环境保护、矿山固废处置与利用、绿色低碳减排等方面最优显著的技术优势。煤基固废充填开采技术实现煤炭安全开采的同时从源头上解决了地表沉陷、地下水流失、瓦斯排放、土地占用损害等难题，同时也减少了运输、提升等工序，节能降碳效益十分显著。煤基固废充填开采技术符合煤炭绿色智能开采和洁净高效低碳利用行业主要攻关方向及新发展理念要求，顺应“碳达峰、碳中和”战略，有利于促进煤炭开采高质量化、环境低损伤化、绿色低碳化发展。

笔者系统阐述以综合机械化固体充填为代表的煤基固废充填开采技术研究进展，总结煤基固废充填开采技术研发背景与发展历程，介绍煤基固废充填开采

技术体系的研究现状及煤基固废充填开采岩层控制理论的最新研究进展,进一步阐述煤基固废固体高效智能充填、井下嗣后注浆充填处置、深部充填采热、煤基固废充填井下碳封存等煤基固废充填开采技术的主要发展方向,研究旨在促进煤炭绿色智能低碳高效开采。

## 1 煤基固废充填开采技术研发背景与发展历程

### 1.1 研发背景

煤炭开采伴随的环境保护等问题一直持续存在。一方面,随着煤矿开采强度的提高,煤炭资源分布不均导致我国多数煤矿面临可采资源枯竭、“三下”压煤储量相对丰富的窘境,尤其是东部矿区;另一方面,煤炭开采造成大量矸石堆积在地面,既占用良田,又造成环境污染。同时,煤炭开采造成岩层移动破坏,引起瓦斯与水的运移,导致煤矿瓦斯事故与井下突水事故时有发生;造成地下水流失,使地下水位大幅度下降,导致矿区水源枯竭、地表植被破坏;使地表发生较大沉降,耕地、建筑设施等受到较为严重的损坏;其次,随着浅层煤炭资源的不断开采,矿井开采深度的不断增加,矿山压力显现、冲击矿压等动力灾害发生的频率增加、强度增大,严重危及矿井的安全生产;再者,煤矸石、粉煤灰等煤基固废的排放及处置问题越来越严峻,目前煤基固废的综合利用率不到 53.1%。

要从根本上解决煤炭资源开采与生态环境保护、矿区可持续发展等问题,实现煤炭资源绿色开采及科学采矿的理念,必须从根本上改变源头开采方法。充填开采技术正是基于从源头解决上述所述的各类工程问题而研发,并逐渐完善发展。

笔者所在团队紧密结合行业需求、国家政策导向及科技发展的趋势,针对我国煤炭资源的发展趋势、生态环境保护理念、煤矿绿色智能化演化方向,历经 20 余年产学研用联合攻关,历经 5 代技术的研发创新,由最初的抛矸充填技术、到综合机械化矸石充填采煤技术<sup>[12-13]</sup>等矸石井下处理充填技术,以至高效绿色化的采充技术、采选充一体化技术<sup>[14-15]</sup>、采选充+X 绿色化开采体系<sup>[16]</sup>,到最终形成现代绿色化的煤基固废充填开采技术体系。在此期间,制定综合机械化固体充填采煤技术要求国家标准 1 项<sup>[17]</sup>,能源行业标准 8 项<sup>[18-25]</sup>,于 2015 年出版专著《固体密实充填采煤方法与实践》;2018 年基于煤矸分选与井下就地充填的研究主题获批国家重点研发计划深地资源勘查开采重点专项立项,并于 2021 年经科技部验收通过;2021 年基于煤基固废规模化处置与利用主

题获批国家自然科学基金重点项目立项支持。2022 年,我国多个研究团队与矿山企业联合攻关,在冀中能源股份有限公司邢东矿建成全国首个固体智能充填采煤工作面<sup>[26-27]</sup>,实现了煤基固废充填开采技术的进一步升级。

### 1.2 发展历程

以团队研发固体充填开采、长壁胶结充填开采历程为例,阐述具体发展历程如下:

第 1 代,2002—2008 年,该阶段主要针对煤矸石大量地表排放带来的十分严重的安全与环境问题,研发目标为矸石减排,研发了巷道及普采工作面的抛矸充填开采技术,并成功应用于山东许厂煤矿、山东泉沟煤矿、河北邢台矿、山东兴隆庄煤矿等。

第 2 代,2008—2012 年,充填技术已不能满足采煤工作面高生产效率的要求,该阶段研发目标转变为开发高效绿色化的采充技术。主要研发了综合机械化固体充填开采技术、长壁逐巷胶结充填技术等,在安徽五沟煤矿、河南平煤十二矿、山东杨庄煤矿、山东花园煤矿、山东济三煤矿、内蒙古公格营子矿等矿井建立了与现代化采煤系统相匹配的采充系统,并进行了工程实践,有效推动了充填开采技术的发展。

第 3 代,2012—2016 年,深部开采势在必行,尤其在东部资源枯竭型矿区更加严重,该阶段研发目标为煤矿充填开采面临的深部开采及煤基固废处置等问题。结合矸石井下分选及就地充填的工程需求,采选充一体化在综合机械化充填采煤技术快速发展的基础上从蓝图变成了现实,研发了采选充一体化系统、分选与充填一体化工程设计方法,并成功应用于我国河北唐山煤矿、山东翟镇煤矿等,实现了矸石零排放和岩层移动地表沉陷有效控制的目标。

第 4 代,2016—2020 年,采选充一体化技术不断延伸至提高煤炭资源采出率的无煤柱沿空留巷、无保护层高瓦斯低渗透煤层的煤与瓦斯开采、坚硬顶板灾害防控和水资源保护性开采等新的工程需求,初步构建了低生态环境损害的采选充+X 绿色化开采体系,在我国山东新巨龙煤矿、河南平煤十二矿等矿井成功应用了采选充+留、采选充+抽等采选充+X 技术。

第 5 代,2021 年以来,智能高效以及功能性充填成为该阶段的主要研发目标,充填开采技术自身智能升级,以及作为成熟的技术拓展用于地热与煤炭资源协同开采、储能、储热及二氧化碳封存等为典型代表的功能性充填方向,也即拓展至矿山采热、CO<sub>2</sub>地质封存等技术领域,并进行了井下充填采热的工程设计等。

煤基固废充填开采技术发展历程如图 1 所示。

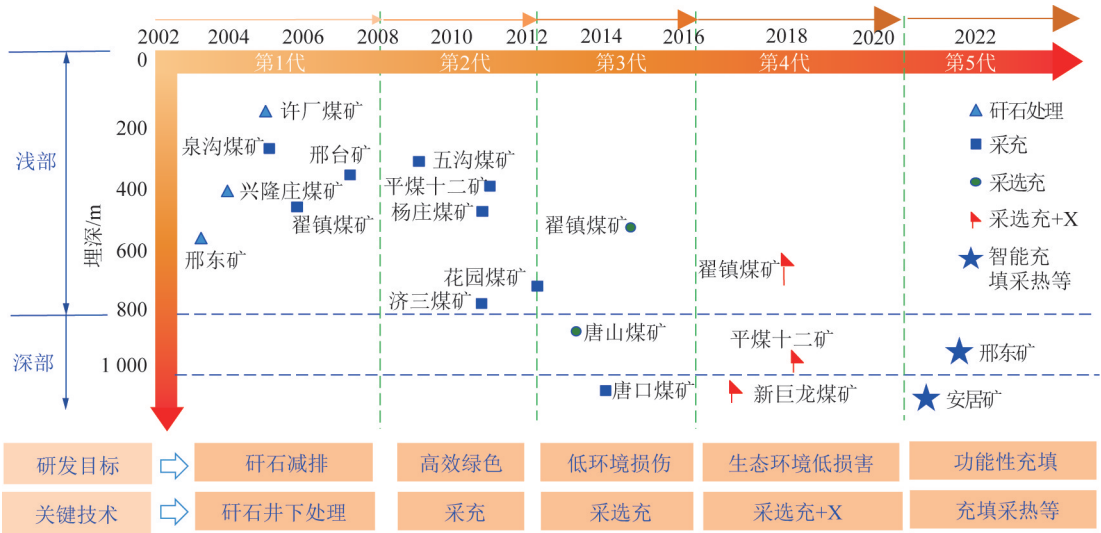


图 1 煤基固废充填开采技术发展历程

Fig.1 Development history of coal based solid wastebacfilling mining technology

## 2 煤基固废充填开采技术体系现状

具体阐述综合机械化固体充填、综合机械化膏体充填、长壁逐巷胶结充填、覆岩隔离注浆充填及井下采选充+X 等已基本形成体系的典型固废充填技术发展现状。

### 2.1 综合机械化固体充填技术

经历 20 余年研发创新,综合机械化固体充填技术已经形成了较为成熟的生产系统布置方法、充填装备及采充工艺,技术原理如图 2 所示。

综合机械化固体充填开采的生产系统布置方法包括全采全充、全采局充等;充填装备主要包括充填采煤液压支架、多孔底卸式输送机及转载机等<sup>[28-30]</sup>,

其中充填采煤液压支架从立柱数目、铰接形式、四连杆类型、夯实机构类型等方面前后经历了近 10 代结构更新与改进,多孔底卸式输送机也经历了 SGB620/40(改),SGZ630/132,SGZ730/132 \* 2,SGBC730/250,SGZC800/200 等多种机型改进,输送能力逐步提升、结构形式更加紧凑合理;充填材料主要以矸石、粉煤灰等固体废弃物为主,通过固体物料连续输送系统投放输送至井下,再经过带式输送机运输至充填采煤工作面,借助多孔底卸式输送机、充填采煤液压支架等设备实现采空区充填与夯实<sup>[31-32]</sup>;常采用“采一充一”工序,充填采煤液压支架的夯实机构可实现不同角度夯实充填物料,以达到散体材料密实充填的效果<sup>[32]</sup>。

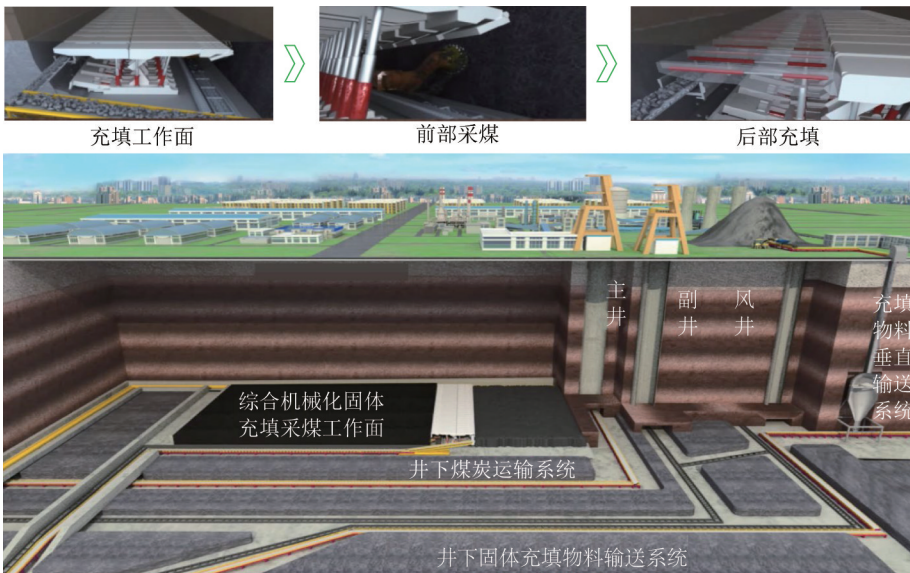


图 2 综合机械化固体充填技术原理

Fig.2 Solid backfill principle in fully-mechanized coal mining

综合机械化固体充填技术通常适用的采矿地质条件:顶板坚硬且完整、煤层厚度 2~5 m,煤层倾角为近水平或者缓倾斜;其充填系统能力为 100 万~150 万 t/a。

综合机械化固体充填技术经历了最初的原矸回填、致密充填防止地表沉陷到规模化处置煤基固废达到矿山生态环境低损害开采的内涵转变过程,该技术不仅用于解放“三下”压煤资源,同时也可从开采源头降低对环境的损害<sup>[33]</sup>。

基于智能化开采<sup>[34]</sup>、智慧矿山建设等发展趋势,综合机械化固体充填技术下一步研究重点:超大功率及智能化充填装备、采充完全自主平行作业工艺、大采长大采高放顶煤充填技术、以充填体为储热储能材料等的功能性充填、匹配千万吨超大井型煤基固废的高效处置技术等。

## 2.2 综合机械化膏体充填技术

综合机械化膏体充填技术<sup>[35-36]</sup>是将煤矸石、粉煤灰等固废制备成胶结性或非胶结性膏状浆液,利用充填泵或自溜通过管路输送到井下充填采空区,以膏体充填体为主要支撑结构控制岩层移动<sup>[37]</sup>、地表沉陷、保护矿区生态环境的开采方法,其技术原理及系统布置如图 3 所示。

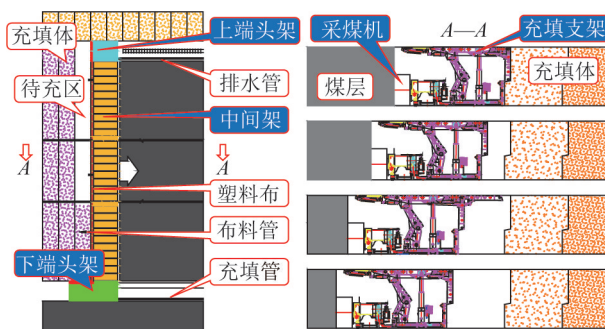


图 3 综合机械化膏体充填原理与系统布置

Fig.3 Comprehensive mechanized paste backfilling principle and system layout

综合机械化膏体充填采用整体式充填采煤液压支架,先进行采煤,采煤之后对液压支架后方采空区进行膏体充填,待膏体充填料浆凝固之后再进行下一循环的采煤作业,同时对采空区后方的膏体充填体利用塑料布进行隔离,每一个循环形成独立的充填区,然后再进行膏体充填作业。

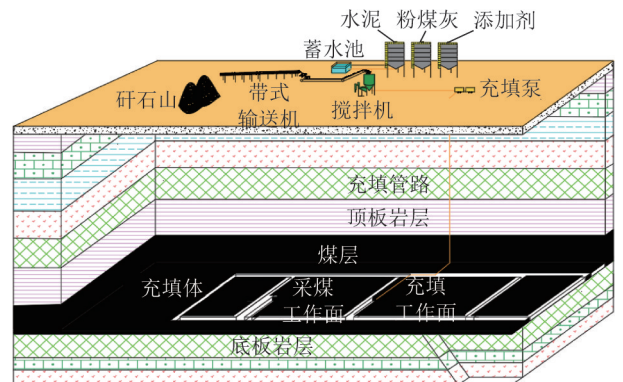
从我国第 1 个膏体充填示范矿井太平煤矿试验起,综合机械化膏体充填技术作为控制岩层移动及地表沉陷的新途径在我国开始推广应用,充实率可达 90%以上,适用范围广,对矿井生产系统影响较小,可以有效处理粉煤灰、煤矸石等固废,保护环境,减少地下水流失等。近年来,通过对膏体充填开采的围岩运

移破坏规律、地表沉陷影响因素及支架-围岩-充填体关系等深入系统的研究,研发了膏体充填支架等多种关键设备,促进了膏体充填技术在我国煤矿的广泛应用和发展。

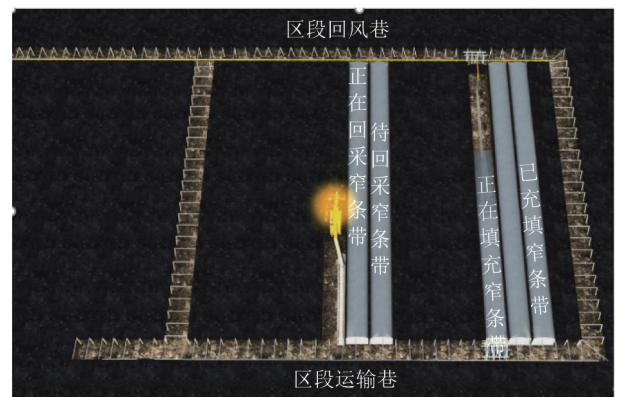
综合机械化膏体充填技术下一步研究重点:研制高效智能采煤与充填快速隔离膏体充填液压支架;开发高强度、快速凝固的新型膏体充填材料;创新采煤与充填快速隔离新工艺;发展基于降温、应力感知等功能性充填材料的功能性充填新方法等。

## 2.3 长壁逐巷胶结充填技术

长壁逐巷胶结充填技术<sup>[38]</sup>是利用长壁采煤法的生产系统,采用综掘机或连采机等破煤,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,利用胶结材料充填联络巷的充填开采技术。为了保证煤炭安全高效开采,在充填联络巷同时掘进另外一条联络巷,实现工作面“掘巷出煤、巷内充填、采充并行”循环作业工序,其技术原理与系统布置如图 4 所示。



(a) 长壁逐巷胶结充填采煤技术原理



(b) 长壁逐巷胶结充填采煤技术系统布置

图 4 长壁逐巷胶结充填采煤技术原理与系统布置

Fig.4 Principle and system layout of longwall roadway by roadway cemented backfilling mining technology

长壁逐巷胶结充填技术起源于国家“十二五”科技支撑计划课题“采掘充采机械化胶结充填采煤关键技术与装备”,成功解决了示范矿井公格营子煤矿含水层下特厚煤层开采难题,因该技术具有生产系统

简单、工作面布置灵活、充实率高等优点,膏体凝固时间与开采时间协调、膏体充填与煤炭开采空间协调,采充时空分离,可以连续出煤,在边角煤开采、遗留煤柱回收、保水开采、特厚煤层开采等方面得到了广泛应用。在推广应用与发展过程中,该项技术也被称为连采连充技术<sup>[39-41]</sup>。

采煤装备主要为综掘机、连采机、掘锚一体机等,运输设备主要为带式输送机、刮板输送机、梭车等,采运装备协同作业保障了充填开采效率,其中基于掘锚一体技术、掘进导航、远程集控等技术的智能快掘关键技术的发展,有效地支撑了长壁逐巷胶结充填效率的提升。

长壁逐巷胶结充填技术是近年来煤矿应用较为广泛的绿色充填采煤技术,其系统布置、采运工艺装备等方面发展迅速。基于不同的煤层赋存条件,工作面系统布置形式有单层逐巷,适用于特厚煤层的分层逐巷及遗留煤柱的旺格维利法开采等。

基于智慧矿山建设的需求及智能快掘技术的发展,长壁逐巷胶结充填技术下一步研究重点:物料调度、自动计量给料及搅拌过程可视化的充填材料智能制备系统开发;煤矸石等煤基固废充填材料远距离连续高效输送技术与装备创新;研发基于掘锚一体技术、掘进导航、远程集控等技术的智能快掘技术等,以期提升长壁逐巷胶结充填效率及智能化水平。

## 2.4 覆岩隔离注浆充填技术

覆岩隔离注浆充填技术<sup>[42-44]</sup>是利用岩层移动过程中关键岩层下方形成的离层空隙,从地面布置钻孔将煤基固废料浆通过充填泵注入离层空间,从而减缓上覆岩层移动变形,达到处置矸石与控制地表的双重目标,其技术原理如图 5 所示。

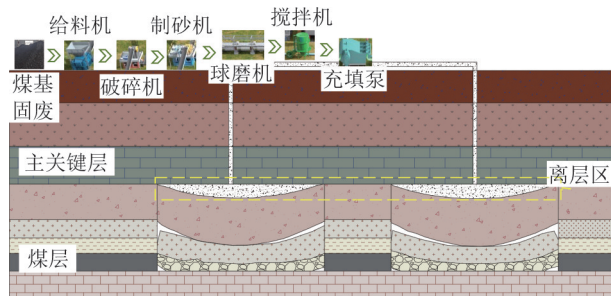


图 5 覆岩隔离注浆充填技术思路

Fig.5 Overlying rock isolation slurry filling technology idea

煤基固废充填材料高效制备与输送是覆岩隔离注浆充填技术成功实施的关键,其制备工艺包括煤基固废破碎、称量配料以及搅拌制浆等;输送工艺包括输送动力、管路布置以及注浆工艺等。煤基固废高效

制备所需的关键设备主要包括振动给料机、带式输送机、颚式破碎机、对辊制砂机、配料机、球磨机、搅拌机<sup>[45]</sup>,煤基固废料浆高效输送的关键设备则主要包括工业泵、输送管道等。通过煤基固废充填材料制备输送管控平台的实时监测与智能调控,确保设备运行、浆液制备、管道输送、注浆充填协调进行。

覆岩隔离注浆充填技术具有地面注浆与井下采煤同步实施、相互干扰小的突出优势,适用于开采区域具有一定基岩厚度的煤层。

结合绿色矿山建设的发展趋势,覆岩隔离注浆充填技术下一步研究重点:覆岩离层空间精准探测技术、煤基固废智能制备与输送集控系统、长距离煤基固废料浆稳定输送技术、覆岩隔离注浆固废处置与岩层控制监控技术等。

## 2.5 井下采选充+X 技术

采选充+X<sup>[16]</sup>技术由本团队研发提出,采选充指实现少矸开采、煤矸分选与矸石充填一体化,其中煤矸分选可在浅槽重介、动筛跳汰、TDS 光电等分选技术中优选;矸石充填可在固体、膏体、胶结等充填技术中优选;而 X 既可以是一种具体技术或工艺,如:充填面的沿空留巷、工作面降温、防尘等;也可以是一种基于采选充技术实现的目标,如动力灾害防治、围岩变形控制、地表沉陷减小、煤柱失稳控制等;还可以是对采选充整体或部分系统智能化程度的提高,如紧凑型模块化分选、智能化充填等。X 为技术或工艺时,则采选充+X 可具体表达为:采选充+留、采选充+抽等;X 为希望实现的目标时,则采选充+X 可具体表达为:采选充+控、采选充+保、采选充+防等;X 为系统智能化程度提高时,则采选充+X 可具体表达为:精准高效智能化采选充。

目前已形成采选充+控、采选充+留、采选充+抽、采选充+防、采选充+保等多种形式的采选充+X 技术,在井下进行煤炭开采、煤矸分选、矸石就地充填的同时,一并实现与工程需求所对应的地表沉陷控制、坚硬顶板控制、采场矿压控制、生态环境保护、资源高效回收、伴生资源共采、顶板灾害防治、隔水岩层控制、矿区固废处理及矿井产能提升等多重目标。井下采选充+X 生产系统示意如图 6 所示。

采选充+X 的技术优势主要体现为:① 完全实现矸石零排放;② 选择性控制岩层位态;③ 采选充+X 技术形式多样;④ 可实现多重目标的科学组合;⑤ 形成井下高度集约的生产模式。

采选充+X 技术在深部矿井开采、优质煤炭产能提升、综合回收率提高、煤基固废规模化处置、灾害防控等方面具有显著的技术优势。

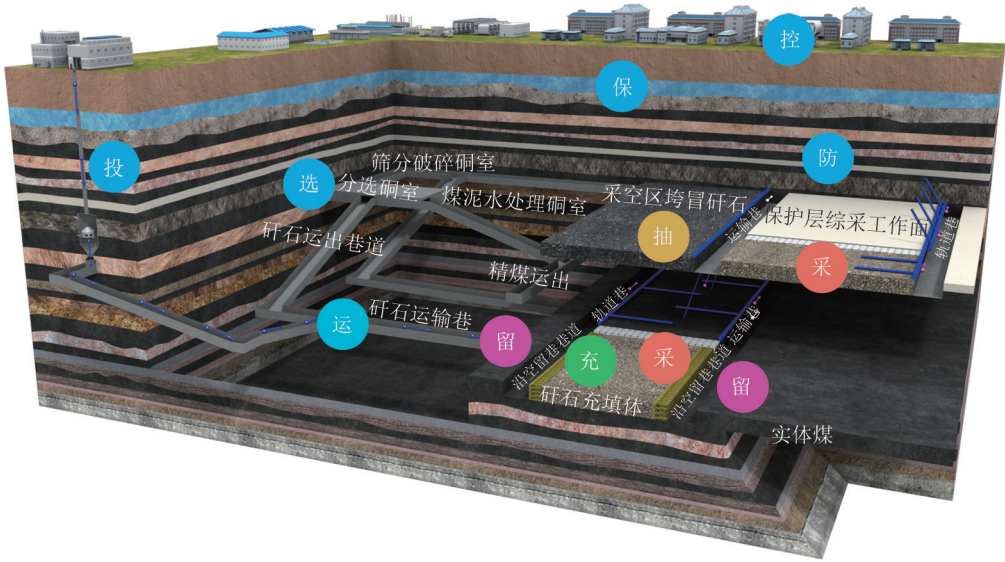


图 6 井下采选充+X 生产系统示意

Fig.6 Schematic diagram of Production system in mining-dressing-backfilling and X technology

采选充+X 技术下一步研究重点:原创性少矸化开采技术研发;X 技术的拓展;超大断面分选硐室快速施工与稳定性控制;分选下限及分选能力的提升;高效充填技术研发及采选充+X 一体化系统的集成智能控制等。

### 3 煤基固废充填开采岩层控制理论进展

从充填材料压缩特性及本构模型、充填开采关键岩层控制理论、充填开采地表变形控制理论 3 个方面阐述煤基固废充填开采岩层控制理论进展。

#### 3.1 充填材料压缩特性及本构模型

当充填材料被充填入采空区后,其将在上覆岩层压力作用下逐渐被压缩,并在上覆岩层压力稳定后,

进一步发生蠕变压缩变形,最终成为支撑上覆岩层的主要承载体。因此,充填材料压缩特性是决定充填工作面充填效果的关键所在。目前针对充填材料压缩特性,主要采用自主研发的全尺寸充填材料压缩特性测试装置,包括压实钢筒、双向加载试验系统及压实系统模拟实验平台等,如图 7 所示,测试得到了充填材料瞬时与蠕变压缩特性<sup>[46-47]</sup>,建立了充填材料岩性、粒径级配、侧向应力与侧压次数等主控因素与压缩变形的关系,揭示了充填材料压缩变形演化机理。

同时,本构模型是描述充填材料压缩特性的数学表达式,直接反映充填材料压缩过程中的应力-应变关系,建立充填材料本构模型变得尤为重要。



图 7 全尺寸充填材料压缩特性测试装置

Fig.7 Full-scale testing device of compression properties of backfilling materials

目前针对充填材料本构模型,主要建立了应力作用下充填材料 PTH 本构模型、Poynting-Thomson 本构模型和 NMK 本构模型<sup>[48-49]</sup>,以及水物理化学作用下充填材料改进的 H-P-C Burgers 本构模型<sup>[50]</sup>,而后两者兼顾考虑了应力与水化学溶液对充填材料压缩

特性的影响,引入水化学损伤变量,表征了充填材料压缩力学参数随水化学损伤的演变规律,建立的 NMK 本构模型与改进的 H-P-C Burgers 本构模型如图 8 所示(其中, $E_e$ 为 Maxwell 模型中弹性体的弹性模量; $\eta_v^\alpha$ 为 Maxwell 模型中 Abel 黏壶的黏性系数;

$\varepsilon_v(t)$  为 Maxwell 模型中 Abel 黏壶的应变;  $\varepsilon_e(t)$  为 Maxwell 模型中弹性体的应变;  $\varepsilon_{ev}(t)$  为 Kelvin 模型的应变;  $\eta_{ev}^\beta$  为 Kelvin 模型中 Abel 黏壶的黏性系数;  $E_{ev}$  为 Kelvin 模型中弹性体的弹性模量;  $\alpha, \beta$  为分数阶数值;  $\sigma$  为模型的总应力;  $E_H$  为 Hooke 体的弹性模量;  $\varepsilon_H$  为 Hooke 体的应变;  $\varepsilon_N$  为 Newton 体的应变;  $\eta_N(D)$  为 Newton 体的黏性系数;  $E_{HN}(D)$  为 Kelvin 模型中 Hooke 体的弹性模量;  $\eta_{HN}(D)$  为 Kelvin 模型中 Newton 体的黏性系数;  $\varepsilon_{HN}$  为 Kelvin 模型的应变;  $\varepsilon_{H-P-C}$  为 H-P-C 化学损伤体的应变)。

依据建立的充填材料本构模型,实现了充填材料压缩变形的准确预计,并可分析得到充填材料压缩过程中的非线性变形、应变硬化等特征,同时,将本构模型二次开发后内嵌入 FLAC<sup>3D</sup> 等数值软件,从而可为

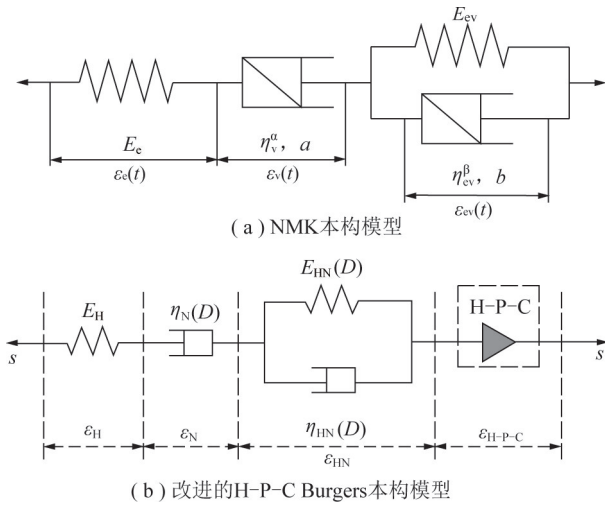


图 8 部分充填材料本构模型示意

Fig.8 Partial constitutive model of backfilling materials

充填开采采场矿压、岩层移动控制及地表沉陷预计提供理论基础。

随着煤炭开采条件日益严峻(地应力、渗透压、地温及开采扰动等),采空区充填体所处的环境更加复杂,通常受到应力场、渗流场、化学场及温度场等多场耦合作用,在多场耦合作用下充填材料压缩过程将呈现出更加复杂的力学特征,因此,下一步亟需研发充填材料多场耦合试验系统,研究多场耦合作用下充填材料压缩变形特性,构建多场耦合作用下充填材料压缩本构模型,以实现深部围岩环境影响下充填材料承载性能调控。

### 3.2 充填开采关键岩层控制理论

随着充填开采技术的发展,已形成了较为完善的充填开采岩层运动控制理论。在固体充填开采岩层移动预计方面,主要有等价采高模型<sup>[51]</sup>等;在研究关键岩层弯曲变形规律方面,主要有关键层控制理论<sup>[52]</sup>等;在分析基本顶运动规律及判定其是否发生破断,主要以基本顶弹性地基理论为主<sup>[53]</sup>等;在研究充填材料、支架、煤体与顶板相互作用关系方面,主要以煤体-支架-充填体“三位一体”协同控顶理论为主<sup>[54]</sup>等;在分析充填体流变特征下顶板时效变形特征方面,主要以充填体-顶板动态响应理论为主<sup>[55]</sup>等。具体各个充填开采岩层控制理论如图 9 所示。

随着深部充填开采、覆岩离层注浆充填、隔水关键层下充填等技术发展,充填开采关键岩层控制理论下一步研究重点:深部充填开采岩层运动理论,不同采矿地质条件岩层运动精准控制理论、充填材料多场耦合条件下关键岩层的时效变形理论模型、充填开采隔水关键层理论模型等。

主要理论	力学模型	研究内容
等价采高		充填开采岩层运动特征; 充填开采地表沉陷规律
关键层理论		充填开采关键层弯曲变形特征
基本顶控制理论		充填开采基本顶弯曲变形特征; 基本顶破断临界条件
煤体-支架-充填体协同控制理论		充填开采煤体-支架-充填体协同控顶特征; 顶板破断临界条件
充填体-顶板动态响应理论		充填开采顶板时效变形规律; 顶板动态响应特征

图 9 充填开采岩层控制理论

Fig.9 Rock formation control theory in backfill mining

### 3.3 充填开采地表变形控制理论

充填开采能够显著减小地表变形,但不同充填效果对地表变形的控制程度不同,需要建立充填开采地表变形的预计模型,形成充填开采地表变形控制理论。目前对于充填开采地表变形控制,主要建立了基于充填开采等价采高<sup>[56]</sup>的概率积分法、充填开采地表变形连续介质力学法<sup>[57]</sup>,实现了对充填开采地表变形的准确预计及控制。

基于充填开采等价采高的概率积分法是将充填开采工作面实际采高减去采空区固体充填体压实后的高度视为等价采高,在等价采高确定后,根据充填开采覆岩移动变形基本特征,分析得到下沉系数、水平移动系数、主要影响角正切、拐点偏移距和主要影响传播角等预计参数,最后利用概率积分法预计得到充填开采地表变形情况。

充填开采地表变形连续介质力学法是以连续介质力学理论为基础,建立充填开采地表移动的力学模型,主要将岩层视为梁模型、层合板模型,如图 10 所示(其中, $z$  为岩层内任意水平; $\delta_0$  为边界角; $H_1$  为梁距离地表深度; $H_0$  为煤层埋深; $L$  为 1/2 工作面长度; $q_0$  为上覆岩层载荷; $S_1, S_k, S_n$  分别为第 1,  $k, n$  层岩层厚度),推导出梁或板的挠度方程,进而分析得到充填开采地表变形情况。

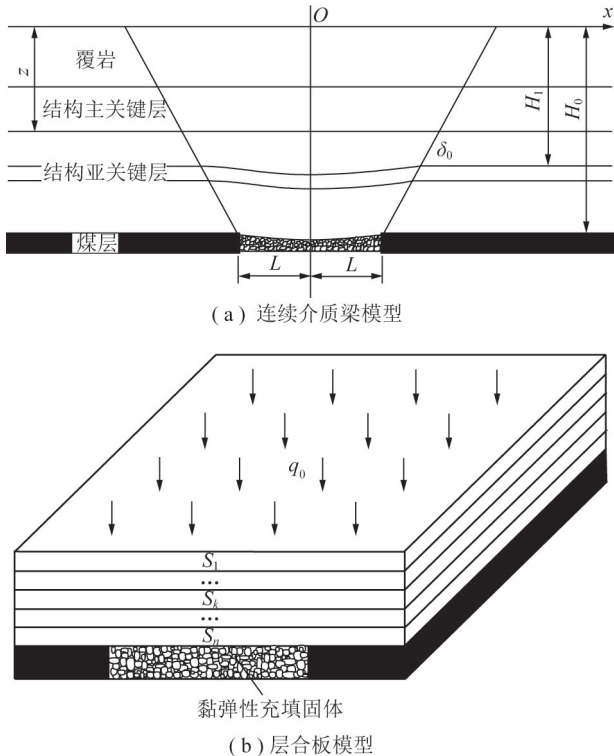


图 10 充填开采地表变形连续介质力学模型  
Fig.10 Mechanical model of surface deformation continuum for backfill mining

### 4 煤基固废充填开采技术发展方向

基于煤基固废充填开采技术体系现状中 5 项具体充填技术的研究重点,结合充填开采岩层控制理论,鉴于充填技术利用井下采动空间、处置煤基固废、充填材料多源利用途径等显著技术特征,在产业智能化升级、煤基固废规模化处置与资源化利用、深部开采、“双碳”战略等新的需求与形势下,煤基固废充填开采技术也需进一步在方法、装备及工艺方面进行升级,以及在碳封存、功能性充填等方面发挥更加积极的作用。

#### 4.1 煤基固废固体智能高效充填采煤技术

我国煤基固废处置需求日益旺盛,且行业智能化建设进程推进的如火如荼,对充填开采的固废处理能力、回采工效、单工作面产能等提出了新的要求,尤其针对西部大型矿井煤炭开采速度快、矸石排放量巨大、矿区生态环境脆弱、地表保护等级要求低、密实充填开采方法产能不足等新的工程背景与需求,充填开采的智能高效升级尤为迫切。

煤基固废固体充填采煤技术实现智能化,其主要技术思路是基于设备的智能特性,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,实现矿井生产高效化、采充系统集成化、设备运行自动化、生产工艺自主化、劳动组织少人化、岩层控制精准化、固废处置规模化的智能充填开采技术<sup>[26]</sup>,其技术思路如图 11 所示。

该技术符合我国能源产业数字化智能化升级重大需求,也是解决传统充填矿井效率与效益较低的重要途径。目前固体充填技术的智能化属于初级阶段,为实现煤基固废固体智能充填采煤技术升级优化,需要从智能充填自驱工艺设计、充填装备工况感知方法、机构位态自主识别方法、采充平行联动衔接机制、智能充填成套装备与系统研发等方面进行研究,为煤基固废充填开采技术智能化升级换代提供理论与技术指导。

煤基固废固体充填采煤技术实现高效化,还需解决大流量物料输送、超大型矿井井下物流协调运输、超大采高超长工作面以及高效采充协调作业等关键技术问题,研发大流量超耐磨垂直直料设备,开发投料运输智能流量监控系统,研发大功率高强耐磨充填设备,优化采充工艺等,为我国大型矿山矸石规模化处置提供理论与技术指导。

#### 4.2 煤基固废井下嗣后注浆充填处置技术

随着我国矿山固废处置与利用形势日趋严重,利

用煤层开采后上覆岩层产生非压实嗣后空间进行矸石井下处置展现出了良好前景。煤基固废井下嗣后注浆充填处置技术是将煤基固废材料破碎后按照一定粒径级配加水制成料浆,通过充填泵与充填管路等设备,输送至煤层开采后形成的嗣后空间

内,实现矸石井下规模化处置的技术,其技术思路如图 12 所示。其中嗣后空间是指煤层开采后围岩中形成空隙和裂隙空间的总称,包含垮落带、裂隙带以及离层区在内的非压实区域,具有分布广大、空间多等特点。



图 11 煤基固废固体智能充填采煤技术原理

Fig.11 Principle diagram of intelligent backfill mining technology for coal-based solid waste

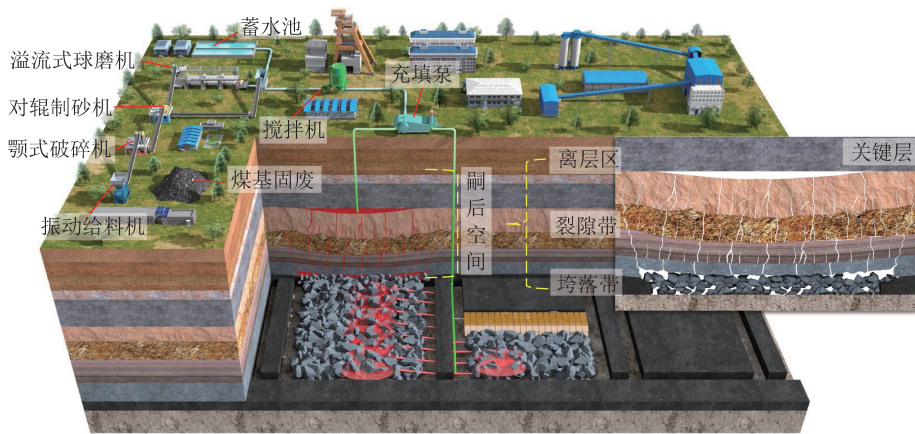


图 12 煤基固废井下固废注浆充填处置技术思路

Fig.12 Coal-based solid waste underground solid waste slurry filling and disposal technology idea

为实现井下嗣后空间煤基固废的注浆充填,需要从煤基固废注浆材料、料浆高效制备输送、注浆钻孔布局等关键工程参数设计、煤基固废注浆效果监控等方面进行研究,探讨非均质料浆流动性稳态控制机理、嗣后空间空隙结构特征及时空演化规律、嗣后空间料浆迁移扩散规律、嗣后空间注浆充填岩层控制机理等关键理论,研制毫米级注浆充填材料,研发料浆高效制备与输送、注浆钻孔布局及时效控制、注浆充填效果智能监控等关键技术,以期为我国矿山煤基固

废规模化处置提供理论与技术指导。

### 4.3 煤基固废深部充填采热技术

深部煤炭资源开采是保障我国能源稳定供给的主要途径,围岩温度随着开采深度的增加逐渐升高,大量的地热能从围岩中连续不断地迸发而出。因此,如何实现深部矿山地热能与煤炭资源协同开采,即在资源勘探、储量评估、开拓系统布置、开采方法选择及采后空间维护等方面,将深部地热与煤炭资源统筹规划与开发,从而达到地热与煤炭资源统筹开发利用的

目的,对于促进矿山转型升级、助力“双碳”目标的实现具有重要意义。

煤基固废深部充填采热技术是在充填材料控制岩层移动保障深部煤炭资源安全开采的基础上,充分开发充填材料的导热性能使其成为深部围岩中地热资源的高效传导介质,并利用布置在充填材料内部的热能提取系统实现深部地热资源的开发,其技术原理如图 13 所示。

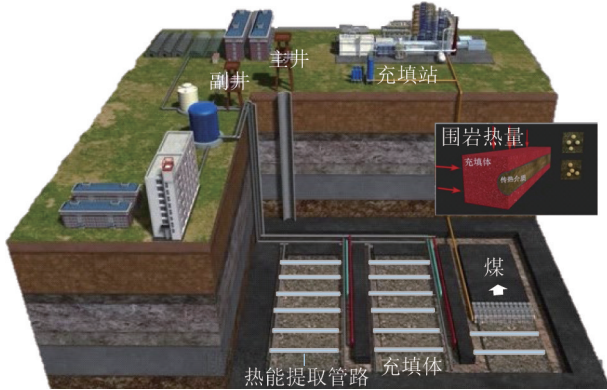


图 13 煤基固废深部充填采热技术原理示意

Fig.13 Schematic diagram of coal-based solid waste deep filling heat mining technology

深部矿山地热资源的高效提取是煤基固废深部充填采热技术的重要目标,因此需重点研究深部矿山地热源分布特征及补给规律,揭示热能提取管内取热介质-充填体-围岩热量传递与演化规律,研发高导

热性能的煤基固废充填材料,优化充填体内热能提取管路布局,进而形成煤基固废深部充填协同地热开发技术体系。基于深部资源开采热环境的现实境遇以及可再生清洁能源的开发需求,煤基固废深部充填采热技术作为深部煤炭资源与地热资源协同开发的新途径,是煤炭行业低碳化发展的有效路径,在国家“双碳”战略的时代背景下具有广阔的发展与应用前景。

#### 4.4 煤基固废充填井下碳封存技术

在我国大力支持矿山固废资源化利用和快速迈进双碳目标的战略背景下,以“改性煤基固废为固碳材料、利用采空区为封碳空间”理念而构建的煤基固废充填井下碳封存<sup>[58-59]</sup>技术,展现了大量处置固废材料、充分利用采空区空间、有效封存 CO<sub>2</sub> 等优点,具有良好发展及应用前景。煤基固废充填井下碳封存技术首先将煤基固废材料改性制备为具有高活性的固碳型充填材料,然后将固碳型充填材料充填入井下采空区,使其在采空区内与人为注入的高浓度 CO<sub>2</sub> 进行吸附、碳化等作用,最终完成井下碳封存目标,其技术思路如图 14 所示。充填入采空区的煤基固废固碳型充填材料在完成物理、化学固碳作用的同时,弱化了采矿活动对上覆岩层的扰动,保障了岩层的稳定性,为物理吸附和构造封闭 CO<sub>2</sub> 提供了空间和可行条件,增强了井下碳封存的安全性。

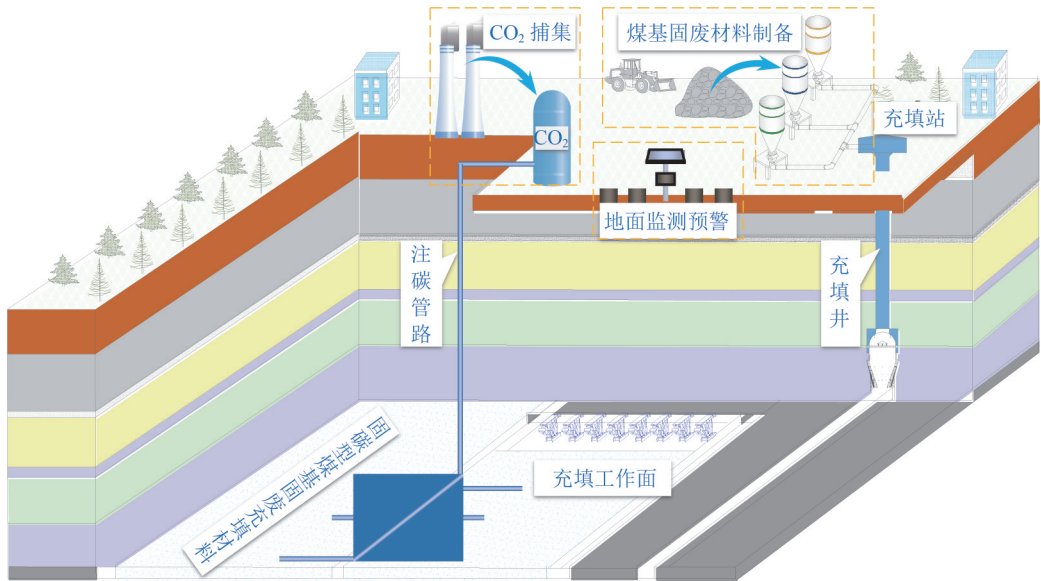


图 14 煤基固废充填井下碳封存工艺

Fig.14 Coal-based solid waste filling underground carbon sequestration process diagram

为实现煤基固废充填井下碳封存目标,需重点研究煤基固废材料在不同改性手段下的固碳能力变化规律、揭示煤基固废材料固碳机制、研发具备优异固

碳能力的煤基固废材料、设计井下碳封存系统及工艺流程、探究碳地质封存作用影响 CO<sub>2</sub> 充填储层及围岩力学稳定性规律、揭示煤基固废充填储层 CO<sub>2</sub> 运

移规律、分析煤基固废充填井下碳封存潜力与环境效应。以期形成煤基固废充填材料井下碳封存理论与技术体系,为井下高效、巨量、安全碳封存目标的实现提供理论与技术依据,推动矿业发展的绿色低碳转型,助力行业实现“双碳”目标。

#### 4.5 煤基固废功能材料井下利用技术

矿井开采过程中需要利用混凝土等材料实现路基硬化、巷道支护,针对煤炭开采中可能存在的突水、自燃、粉尘等危害,还需要利用浆液、泡沫等材料实现有效防治,这些材料需求量大、成本高、输送距离远。利用煤基固废制备井下利用的功能材料,具有就地取材、经济合理、绿色环保等优势,具有广阔的发展与应用前景。以煤基固废为主要原材料,通过物理化学改性、配合使用添加剂研发功能材料,服务于矿井建设与安全开采的多元需求,是煤基固废材料发展的重要方向。矿用煤基固废功能材料如图 15 所示。

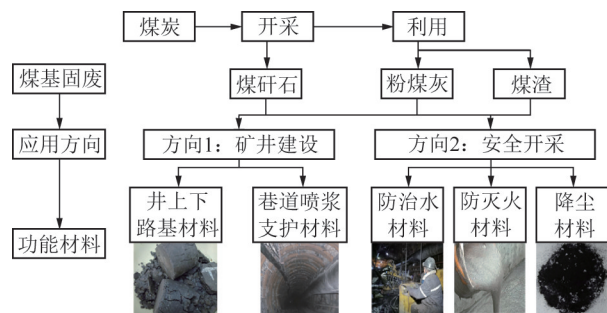


图 15 矿用煤基固废功能材料

Fig.15 Functional materials utilizing coal-based solid waste for mining applications

在矿井建设及开采过程中,可采用矸石作为骨料或粉体填料,研发用于井上下道路铺设的材料,为矿井筑路提供路面基层材料;采用矸石、粉煤灰,并添加玻璃纤维及其他材料等配制喷浆材料,可替代混凝土用于巷道表面喷浆支护。

利用矸石、粉煤灰、黏土水泥等研发配制速凝、防渗、易扩散的防水材料,可用于含水层注浆封堵或加固;利用矸石、粉煤灰,添加阻化剂等研发复合浆液或泡沫等防灭火材料,通过喷涂、灌浆等方式对煤体进行立体覆盖,使煤体与空气隔绝、减缓氧化反应,同时防止热量积聚、控制区域温度,从而防治煤炭自燃或者井下灭火;利用粉煤灰、表面活性剂经改性、复配得到润湿性强、稳定性高的泡沫溶胶材料,通过喷洒的方式与粉尘结合,实现良好的降尘、抑尘效果。

为实现煤基固废功能材料的绿色高效井下利用,需要围绕材料研发及性能优化、制备输送及利用、材料与环境交互作用、利用效果监控评价等方面开展研究,通过充分考虑应用场景的水文地质和工程条件,

明确材料的功能需求及性能指标关键参数,研究材料的功能化方法与形成机理,基于主控因子及影响规律提出材料工作性能的调控方法,发展材料连续高效制备、输送与利用的关键技术,分析材料与围岩、地下水等环境因素的交互作用及其控制机制,构建材料井下利用效果的监控与评价系统,以为煤基固废功能材料研发与井下利用提供理论与技术支撑。

## 5 结 论

(1)煤炭资源长时间内在国民经济中起压舱石、兜底及战略保障作用。煤基固废处置及煤基固废充填开采技术面临产业智能化升级、规模化处置煤基固废、深部开采、“双碳”战略及煤基固废资源化利用等全新的机遇与挑战,深入开展煤基固废充填开采中的理论与技术研究迫在眉睫。

(2)综合机械化固体充填、膏体充填、长壁逐巷胶结充填、覆岩隔离注浆充填及井下采选充+X 等充填技术已基本形成体系,为“三下”开采、条带煤柱回收、煤基固废井下处置提供了比较全面的技术途径;对应的充填开采岩层控制理论也已形成初步框架体系,但在深部充填开采岩层运动与地表变形控制理论,不同采矿地质条件岩层运动精准控制、充填材料多场耦合条件下关键岩层的时效变形理论模型、充填开采隔水关键层理论模型方面,还需继续深入研究。

(3)煤基固废充填开采技术的高效化、规模化、智能化,以及其作为基本方法在煤及伴生资源共采、碳封存等新领域中的拓展应用,是当前研究的重点与热点,主要发展方向包括但不限于:煤基固废固体高效智能充填、井下嗣后注浆充填处置、深部充填采热、煤基固废充填井下碳封存、煤基固废功能材料井下利用等关键技术,构建系统化的煤基固废充填开采理论与技术体系。

**致谢** 论文得到原山东新巨龙能源有限责任公司、开滦(集团)有限责任公司唐山矿业分公司、平顶山天安煤业股份有限公司十二矿、冀中能源股份有限公司邢东矿、济宁矿业集团有限公司安居煤矿等合作单位,以及参考文献所列全部作者的大力支持,在此一并表示感谢!

#### 参考文献 (References):

- [1] 中国煤炭工业协会. 2021 煤炭行业发展年度报告[R]. 北京:中国煤炭工业协会, 2021.
- [2] 习近平在陕西榆林考察时强调解放思想改革创新再接再厉谱写陕西高质量发展新篇章[J]. 思想政治工作研究, 2021(10): 9-10.  
XI Jinping emphasized emancipation of the mind, reform and innova-

- tion, and continued efforts to write a new chapter of high-quality development in Shaanxi during his inspection in Yulin, Shaanxi [J]. Research of Ideological and Political Work, 2021(10):9-10.
- [3] 北京市政协网. 姜耀东,王训练.同商共议,政协委员为国家能源资源安全与产业发展建言献策[EB/OL]. [http://www.bjzx.gov.cn/zxgz/zxdt/202203/t20220314\\_39803.html](http://www.bjzx.gov.cn/zxgz/zxdt/202203/t20220314_39803.html). 2022-03-14.
- [4] 国家能源局. 国家能源局关于印发《2020年能源工作指导意见》的通知[EB/OL]. [http://www.nea.gov.cn/2020-06/22/c\\_139158412.htm](http://www.nea.gov.cn/2020-06/22/c_139158412.htm). 2020-06-22.
- [5] 习近平. 关于《中共中央关于坚持和完善中国特色社会主义制度推进国家治理体系和治理能力现代化若干重大问题的决定》的说明[M].北京:人民出版社,2019.
- [6] 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]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm). 2021-03-13.
- [7] 国家发展改革委办公厅,工业和信息化部办公厅. 关于推进大宗固体废弃物综合利用产业集聚发展的通知[EB/OL]. [https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/zyzhly/201901/t20190116\\_1135529\\_ext.html](https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/zyzhly/201901/t20190116_1135529_ext.html). 2019-01-09.
- [8] 国家发展改革委. 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.
- [9] 国家发展改革委. 国家发展改革委办公厅关于开展大宗固体废弃物综合利用示范的通知;发改环资[2021]438号[EB/OL]. 2021-05-30.
- [10] 刘园园.“十四五”能源领域科技创新规划[N]. 科技日报, 2022-04-06(1).  
LIU Yuanyuan. “14th Five-year plan” scientific and technological innovation planning in energy field [N]. Science and Technology Daily, 2022-04-06(1).
- [11] 马晓敏.《减污降碳协同增效实施方案》印发[N]. 中国矿业报, 2022-06-21(001).  
MA Xiaomin. Implementation Plan of synergistic effect on pollution reduction and carbon reduction issued [N]. China Mining News, 2022-06-21(001).
- [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 and Safety Engineering, 2009, 26(4):395-401.
- [13] 缪协兴,张吉雄. 井下煤矸分离与综合机械化固体充填采煤技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8):1424-1433.  
MIAO Xiexing, ZHANG Jixiong. Underground coal waste separation and comprehensive mechanized solid filling mining technology [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 33(8)6:1424-1433.
- [14] 张吉雄,缪协兴,张强,等.“采选抽采”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.
- [15] 张吉雄,张强,巨峰,等. 深部煤炭资源采选充绿色化开采理论与技术[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2):377-389.  
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, JU Feng, et al. Theory and technique of greening mining integrating mining, separating and backfilling in deep coal [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2):377-389.
- [16] 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.
- [17] 中国煤炭工业协会. 综合机械化固体充填采煤技术要求; GB/T 39338—2020 [S]. 北京:中国标准化出版社, 2021.
- [18] 煤炭行业煤矿专用设备标准化技术委员会. 综合机械化固体充填采煤方法; NB/T 51002—2012 [S]. 北京:中国标准化出版社, 2012.
- [19] 煤炭行业煤矿专用设备标准化技术委员会. 采煤工作面固体抛投式充填方法; NB/T 51018—2014 [S]. 北京:中国标准化出版社, 2015.
- [20] 煤炭行业煤矿专用设备标准化技术委员会. 固体充填物料压实特性测试方法; NB/T 51019—2014 [S]. 北京:中国标准化出版社, 2015.
- [21] 煤炭行业煤矿专用设备标准化技术委员会. 煤矿用固体充填采煤液支架技术条件; NB/T 51020—2014 [S]. 北京:中国标准化出版社, 2015.
- [22] 煤炭行业煤矿专用设备标准化技术委员会. 履带行走式固体充填材料带式转载机技术条件; NB/T 51021—2014 [S]. 北京:中国标准化出版社, 2015.
- [23] 煤炭行业煤矿专用设备标准化技术委员会. 固体充填材料垂直投料管技术条件; NB/T 51022—2014 [S]. 北京:中国标准化出版社, 2015.
- [24] 煤炭行业煤矿专用设备标准化技术委员会. 固体充填材料自重投料系统技术要求; NB/T 51023—2014 [S]. 北京:中国标准化出版社, 2015.
- [25] 煤炭行业煤矿专用设备标准化技术委员会. 固体充填材料多孔底卸式刮板输送机技术条件; NB/T 51024—2014 [S]. 北京:中国标准化出版社, 2015.
- [26] 张强,王云博,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. Coal mine solid intelligent filling mining method research [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7):2546-2556.
- [27] 冀中能源集团. 冀中股份邢东矿“全矿井充填智能化生产模式及关键技术研究”项目通过专家鉴定达到国际领先水平[EB/OL]. [http://www.jznyjt.com/2022/ztl\\_0426/5786.html](http://www.jznyjt.com/2022/ztl_0426/5786.html). 2022-04-25.
- [28] 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 fully mechanized solid backfill mining [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(11):10-13, 27.
- [29] 刘建功,赵庆彪. 综合机械化充填采煤[J]. 煤炭学报, 2010, 35(9):1413-1418.  
LIU Jianguo, ZHAO Qingbiao. Comprehensive mechanized

- coal mining filling [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(9):1413-1418.
- [30] 缪协兴. 综合机械化固体充填采煤技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8):1247-1255.
- MIAO Xiexing. Progress of fully mechanized mining with solid backfilling technology [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8):1247-1255.
- [31] 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 Jianguo, LI Xinwang, HE Tuan. Coal mine in our country and filling application status and development [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1):141-150.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 周华强, 侯朝炯, 孙希奎, 等. 固体废物膏体充填不迁村采煤[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2):30-34, 53.
- ZHOU Huaqiang, HOU Chaojiong, SUN Xikui, et al. Solid waste paste filling for none-village-relocation coal mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2):30-34, 53.
- [36] 吴爱祥, 杨莹, 程海勇, 等. 中国膏体技术发展现状与趋势[J]. 工程科学学报, 2018, 40(5):517-525.
- WU Aixiang, YANG Ying, CHENG Haiyong, et al. Status and prospects of paste technology in China [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(5):517-525.
- [37] 常庆粮, 周华强, 柏建彪, 等. 膏体充填开采覆岩稳定性研究与实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2):279-282.
- CHANG Qingliang, ZHOU Huaqiang, BAI Jianbiao, et al. Stability study and practice of overlying strata with paste backfilling [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2):279-282.
- [38] 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. The research and application of longwall-roadway cemented backfilling mining technology in extra-thick coal seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(6):857-862.
- [39] 马立强, 王烁康, 余伊河, 等. 壁式连采连充保水采煤技术及实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(5):902-910, 987.
- MA Liqiang, WANG Shuokang, YU Yihe, et al. Technology and Practice of continuous mining and backfilling with wall system for water conservation [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(5):902-910, 987.
- [40] 李永亮, 路彬, 杨仁树, 等. 煤矿连采连充式胶结充填采煤技术与典型工程案例[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3):1055-1071.
- LI Yongliang, LU Bin, YANG Renshu, et al. Cemented backfilling mining technology with continuous mining and continuous backfilling method for underground coal mine and typical engineering cases [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3):1055-1071.
- [41] 林海, 杨仁树, 李永亮, 等. 短壁连采连充式胶结充填采煤技术应用研究[J]. 工程科学学报, 2022, 44(6):981-992.
- LIN Hai, YANG Renshu, LI Yongliang, et al. Application of short-wall continuous mining and continuous backfilling cemented-fill mining technology [J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(6):981-992.
- [42] 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.
- [43] 张亮, 许家林, 轩大洋, 等. 覆岩隔离注浆充填浆体压缩特性实验与应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(5):1117-1122.
- ZHANG Liang, XU Jialin, XUAN Dayang, et al. Experimental and applied research on compression properties of slurry used for isolated overburden grout injection [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5):1117-1122.
- [44] 许家林, 轩大洋, 朱卫兵, 等. 基于关键层控制的部分充填采煤技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(2):69-76.
- XU Jialin, XUAN Dayang, Weibing, et al. Partial backfilling coal mining technology based on key strata control [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(2):69-76.
- [45] 王超超, 许家林, 轩大洋. 覆岩隔离注浆充填地面输浆管路堵塞机理研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(10):2703-2708.
- WANG Chaochao, XU Jialin, XUAN Dayang. Blockage mechanism of ground transport pipeline for isolated overburden grout injection [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10):2703-2708.
- [46] 李猛. 矽石充填材料力学行为及控制岩层移动机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- LI Meng. Mechanical Behaviour of gangue backfill material and control mechanism of strata movement [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [47] LI Meng, ZHANG Jixiong, HUANG Peng, et al. Deformation behaviour of crushed waste rock under lateral cyclic loading [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(12):6665-6672.
- [48] LI Meng, ZHANG Jixiong, MENG Guohao, et al. Testing and modelling creep compression of waste rocks for backfill with different lithologies [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 125:104170.
- [49] 李猛, 张卫清, 李艾玲, 等. 矽石充填材料承载压缩变形时效性

- 试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 147-154.
- LI Meng, ZHANG Weiqing, LI Ailing, et al. Experimental study on time-dependent compressive deformation of gangue backfilling materials[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(1): 147-154.
- [50] 齐文跃. 煤矿井下矸石充填体环境效应试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- QI Wenyue. Experimental Study on environmental effects of gangue backfilled body in underground coal mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [51] 缪协兴, 黄艳利, 巨峰, 等. 密实充填采煤的岩层移动理论研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(6): 863-867.
- MIAO Xiexing, HUANG Yanli, JU Feng, et al. Strata movement theory of dense backfill mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(6): 863-867.
- [52] 张吉雄, 李剑, 安泰龙, 等. 矸石充填综采覆岩关键层变形特征研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 357-362.
- ZHANG Jixiong, LI Jian, AN Tailong, et al. Deformation characteristic of key stratum overburden by raw waste backfilling with fully mechanized coal mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 357-362.
- [53] 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. Ground control theory and application of solid dense backfill in coal mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [54] 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. Rock control mechanism by coordination with back-filled body and backfill support in solid backfill mining technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [55] HUANG Peng, ZHANG Jixiong, YAN Xingjie. Deformation response of roof in solid backfilling coal mining based on viscoelastic properties of waste gangue[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2021, 31(2): 279-289.
- [56] 王磊, 张鲜妮, 郭广礼, 等. 固体密实充填开采地表沉降预计模型研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1973-1978.
- WANG Lei, ZHANG Xianni, GUO Guangli, et al. Research on surface subsidence prediction model of coal mining with solid compacted backfilling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1973-1978.
- [57] GUO Guangli, ZHU Xiaojun, ZHA Jianfeng, et al. Subsidence prediction method based on equivalent mining height theory for solid backfilling mining[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(10): 3302-3308.
- [58] 鲁博文, 张立麒, 徐勇庆, 等. 碳捕集、利用与封存(CCUS)技术助力碳中和实现[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(S1): 30-34.
- LU Bowen, ZHANG Liqi, XU Yongqing, et al. Carbon capture, utilization and Storage (CCUS) technology helps to the realization of carbon neutralization[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2021, 47(S1): 30-34.
- [59] WANG P, MAO X, CHEN S E. CO<sub>2</sub> sequestration characteristics in the cementitious material based on gangue backfilling mining method[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(5): 721-729.