

“双碳”目标下煤炭绿色低碳发展新思路

王双明^{1,4}, 刘浪², 朱梦博², 申艳军³, 师庆民⁴, 孙强⁴, 方治余², 阮仕山², 何伟²,
杨潘², 王建友⁵

(1. 西安科技大学煤炭绿色开采地质研究院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 4. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 5. 西安弗尔绿创矿业科技有限责任公司, 陕西 西安 710024)

摘要: 在“双碳”目标背景与当前技术条件下, “煤”“废”“碳”构成了煤炭的“不可能三角”, 严重制约着煤炭行业的绿色低碳可持续发展。秉持“以废治废”“从哪里来到哪里去”的原则, 着眼“煤”的减损化开采、“废”的功能化利用、“碳”的低碳化处置三维视角, 探索“煤”“废”“碳”协同发展路径, 为破解煤炭“不可能三角”和推动煤炭绿色低碳发展提供全方位解决方案。具体包括: ① 阐明了“煤”的减损化开采科学内涵, 明确了生态脆弱区含(隔)水层空间组合特征、采煤减损技术应用下的覆岩移动规律和覆岩采动损伤下的地表变形规律等减损化开采科学问题, 提出了面间煤柱“掘-充-留”一体化、窄条带式充填开采和综采架后充填开采等减损化开采技术; ② 阐明了“废”的功能化利用科学内涵, 明确了固废功能化利用的科学问题, 包括镁-煤基固废原材料改性方法与机理、多元固废协同作用机制、全固废充填材料性能调控理论3个方面, 形成了以固废原材料改性、固废基胶凝材料研发、全固废充填材料制备为核心的固废功能化利用关键技术体系; ③ 阐明了“碳”的低碳化处置科学内涵, 提出了“碳”的低碳化处置科学实践框架和实施路径, 厘清了在“碳”的低碳化处置过程中关于矿化材料制备、封存空间构筑、CO₂封存机理与调控、CO₂封存长期环境效应和储库稳定性等方面的科学问题, 明确了碎胀空间CO₂封存、煤矿CO₂固碳充填等关键技术, 形成了利用煤矿采空区实现CO₂低碳封存的新模式。立足煤炭绿色低碳可持续发展, 协同推进“煤”的减损化开采、“废”的功能化利用与“碳”的低碳化处置, 对推动煤炭行业“双碳”目标实现具有重要意义。

关键词: 绿色低碳; 减损化开采; 功能化利用; 低碳化处置

中图分类号: TD801 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)01-0152-20

New way for green and low-carbon development of coal industry under the target of “dual-carbon”

WANG Shuangming^{1,4}, LIU Lang², ZHU Mengbo², SHEN Yanjun³, SHI Qingmin⁴, SUN Qiang⁴, FANG Zhiyu²,
RUAN Shishan², HE Wei², YANG Pan², WANG Jianyou⁵

(1. Geological Research Institute for Coal Green Mining, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. College of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 4. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 5. Xi'an Fill Green-innovation Mining Technology Co., Ltd., Xi'an 710024, China)

Abstract: Under the background of “dual-carbon” goal and current technological conditions, coal, waste and carbon con-

收稿日期: 2023-12-14 修回日期: 2024-01-02 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1690

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42330808, 52222404, 52074212)

作者简介: 王双明(1955—), 男, 陕西岐山人, 中国工程院院士。Tel: 029-85587131, E-mail: sxmtwsm@163.com

通讯作者: 刘浪(1985—), 男, 陕西靖边人, 教授, 博士生导师。Tel: 029-85583143, E-mail: liulang@xust.edu.cn

引用格式: 王双明, 刘浪, 朱梦博, 等. “双碳”目标下煤炭绿色低碳发展新思路[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 152–171.

WANG Shuangming, LIU Lang, ZHU Mengbo, et al. New way for green and low-carbon development of coal industry under the target of “dual-carbon” [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 152–171.



移动阅读

stitute an impossible triangle in the coal industry which severely constrains its green, low-carbon, and sustainable development. Adhering to the principles of treating waste with waste and returning the waste to where it comes from, with a focus on the three-dimensional perspectives of damage reduction in coal mining, the functional utilization of mining waste, and low-carbon disposal of carbon in mining industry, this paper explores a synergistic development path for coal, waste and carbon. It provides a comprehensive solution to unravel the impossible triangle and promote the overall green, low-carbon development of coal industry. The specific contributions of this work include: ① Clarifying the scientific connotation of damage reduction in coal mining, the spatial combination characteristics of aquifers in the ecologically fragile areas, the movement patterns of overlying strata under the application of coal mining damage reduction techniques, and the surface deformation patterns resulting from overlying strata damage; proposing the original technologies of drilling-backfilling-retention for section pillar extraction, narrow strip mining with backfill, and backfilling behind fully-mechanized longwall face aiming to address the challenges posed by damage reduction mining; ② Interpreting the scientific connotation of functional utilization for mining waste; clarifying the scientific issues related to the modification methods and mechanisms of magnesium-coal-based solid waste material, the mechanisms of synergistic interactions among diverse solid wastes, and the properties control of total solid waste backfilling materials. These efforts have led to the establishment of a key technological system for the functional utilization of solid waste, with a core focus on the modification of solid waste raw materials, the development of solid waste-based cementitious materials, and the preparation of solid waste based backfilling materials; ③ Elucidating the scientific connotation of low-carbon disposal of carbon with a scientific practical framework and implementation pathway; clarifying some scientific issues related to mineralization material preparation, storage space construction, CO_2 storage and control mechanisms, the long-term environmental effects of CO_2 storage, and reservoir stability in the low-carbon disposal process of carbon. The scientific issues related to mineralization material preparation, seal space key technologies such as fractured space CO_2 storage and CO_2 sequestration through coal mine carbon solidification are explicitly defined which results in a new model for achieving a low-carbon CO_2 storage in coal mine goaf. Based on the green, low-carbon and sustainable development of coal industry, it is of great significance to collaboratively promote the damage reduction in coal mining, the functional utilization of mining waste, and the low-carbon disposal of carbon. This coordinated effort plays a crucial role in advancing the realization of the dual-carbon goal in the coal industry.

Key words: green and low-carbon; damage-reducing mining; functional utilization; low-carbon disposal

我国能源资源具有“缺油、少气、相对富煤”的禀赋特点。据自然资源部2023年发布的《全国矿产资源储量统计表》显示^[1]，煤炭资源储量占我国主要能源矿产储量的91.2%，在全世界煤炭储量排名中仅次于美国、俄罗斯、澳大利亚^[2]。结合非化石能源的可靠替代进程，我国“煤为主体”的基本国情短时期不会改变，且近年来消费需求总量仍呈增长趋势，预计到2030年碳达峰时煤炭在能源消费结构中的占比仍高于43%^[3]。因此，高质量发挥煤炭在“双碳”目标进程中的能源主体地位和兜底保障作用至关重要。

近10 a间，我国煤炭工业战略重心加速西移，煤炭主产区向晋、陕、蒙、新等中西部地区集中趋势逐渐加大。2022年，4省区原煤产量占全国煤炭总产量的81%。然而，中西部煤炭资源开发与利用过程仍普遍面临着诸多亟待攻克的技术难题。如：受现有煤炭开采工艺制约，在开采过程中存在大量煤炭被遗留井下。目前，我国大型矿区煤炭采出率均值为30%~

40%，低采出率造成了大量资源浪费^[4]。据统计，我国矿井遗煤资源量高达400亿t^[5]，其中“三下”压煤量尤其大，采用充填开采方法置换边角煤、压覆煤炭等，提高矿井采出率尤为紧迫。此外，煤炭采洗过程中形成大量矸石等固废，而矿区煤基固废占用土地空间、存在自燃风险、破坏生态环境和排放温室气体，已成为制约煤炭行业绿色低碳发展的突出问题^[6-7]。高效处理矿业固废是现阶段中西部煤炭企业面临的共性难题^[8-9]。同时，中西部处于干旱-半干旱地区，生态环境脆弱，煤层采动导致覆岩损伤乃至导通含水层，诱发矿井突水、生态水位下降，进而引起土地荒漠化和生态受损，煤炭开采与生态保护矛盾问题尖锐^[10-12]。据此，谢和平等^[13]提出了煤炭资源“科学开采”和“科学产能”的概念和内涵。提出在地质与生态环境相协调前提下最大限度地获取煤炭资源，同时用安全、高效、环境友好的方法将煤炭资源最大限度采出；葛世荣^[14]提出地下煤炭化学开采新思路（即地下气化、地

下热解和生物溶解),并梳理了煤炭化学开采技术架构、工艺系统和关键技术,为提高煤炭采出率提供了全新思路;范立民等^[15]提出开采区域评价方法和采煤方法等保水采煤途径,旨在探索西部生态脆弱矿区煤炭开采与生态环境保护协同发展解决方案;袁亮^[16]提出煤炭精准开采概念和发展路径,提出将不同地质条件的煤炭开采扰动影响、致灾因素、开采引发生态环境破坏等问题予以统筹考虑。谢和平等^[13]提出了煤炭开发利用一体化、矿井建设与地下空间利用一体化、煤基多元清洁能源协同开发及煤炭洁净低碳高效利用四大理念,为煤炭全产业链技术革命擘画了战略蓝图。

“双碳”目标是构建人类命运共同体的庄严承诺,也是实现“美丽中国”的生态文明建设的重要环节。而煤炭作为典型的高碳能源,在“双碳”目标实现进程中面临着双重考验,即:既要承担能源供应兜底作用,也要适应绿色低碳发展大势推动自我革命。党的二十大报告指出,要立足我国能源资源禀赋,坚持先立后破,有计划分步骤实施碳达峰行动。2021年我国CO₂排放量超过100亿t,其中约80%来自煤炭利用过程中的排放^[17]。因此,探索煤基CO₂封存新方法,已成为新时代煤炭工业可持续发展面临的重大课题。据此,武强等^[18]建议构建灵活清洁煤电+二氧化碳捕集、利用与封存和风光+调节两大能源供给模式,以形成

“三足鼎立、双模驱动”的新型能源结构体系;桑树勋等^[19]认为推动CO₂捕集利用与封存技术、生态地质与碳增汇技术、煤层中甲烷减排与资源化开发利用技术、化石能源低碳化开发利用地质技术、矿化固碳地质技术是实现煤炭源头减碳的重点技术工作;刘浪等^[20]提出基于功能性充填的CO₂储库构筑与封存方法学术构想,探索“功能性充填材料制备→功能性充填与CO₂封存储库构筑→CO₂物理与化学协同封存→CO₂封存安全及环境风险评价”的封存新途径;又提出了协同解决CO₂封存与矿山固废消纳问题解决思路,将大宗固废处置、固废高值化利用、CO₂封存、采空区利用有机结合,提出了CO₂固碳充填理念。笔者团队^[21]探索了煤炭浅层开采扰动空间实现CO₂大规模、低成本地下封存可行性,明确了CO₂地下高效封存的必备条件,为实现CO₂浅层采空区大规模、低成本提供了实现路径。同时,建议加大煤炭减损开采与生态碳汇、深部煤层与煤炭采空区CO₂地质封存和煤矿区新能源协同开发利用技术攻关力度,用技术创新支撑“双碳”目标背景下我国煤炭工业的发展。

综上所述,在保障能源安全供应的前提下推进煤炭绿色低碳转型,是实现我国煤炭工业高质量发展的重大科学命题^[22]。因此,需系统解决煤炭开发与利用

过程中资源浪费、生态损害、固废处置和碳排放等问题,探索“煤”“废”“碳”的开发与处置的协同性实现路径,寻求煤炭资源高效回收、固废规模化处置、采空区再利用与CO₂封存的有机结合,将煤炭开发与利用产生的固废和CO₂回归地下,实现“变害为利”“从哪来到哪去”的绿色低碳发展目标。立足于“煤”的减损化开采、“废”的功能化利用、“碳”的低碳化处置的三维视角,为化解煤炭资源开发利用痼疾提供全方位解决方案。据此,笔者立足于“煤”-“废”-“碳”协同化绿色低碳处置思路,系统阐述3者绿色低碳化发展的科学内涵、科学问题和关键技术,以期为“双碳”目标背景下煤炭工业可持续发展提供借鉴思路。

1 总体思路与实施路径

煤炭工业承担着我国能源供应安全兜底保障的重要使命,而立足于我国推进能源新战略和实现“双碳”目标现实需求,绿色低碳化已成为新时代煤炭工业高质量发展必须面对和破解的重大技术难题。但煤炭绿色低碳发展进程中仍面临着诸多痛点:①存在煤炭损失、地质损伤与环境损害(“煤”的问题);②产生大宗煤基固废(“废”的问题);③排放巨量CO₂(“碳”的问题)。“煤”“废”“碳”构成了煤炭发展的“不可能三角”,也是煤炭绿色可持续发展的瓶颈所在。因此,突破煤炭高效回收、减少对地质与环境损伤、固废规模化处置、低成本CO₂封存等技术瓶颈,探索“煤”-“废”-“碳”协同发展新模式,是煤炭工业可持续发展的必由之路。据此,笔者团队建议:以煤炭减损化开采应对“煤”的问题、以固废功能化利用应对“废”的问题、以CO₂低碳化处置应对“碳”的问题,最终形成“煤”-“废”-“碳”协同发展新模式(图1)。

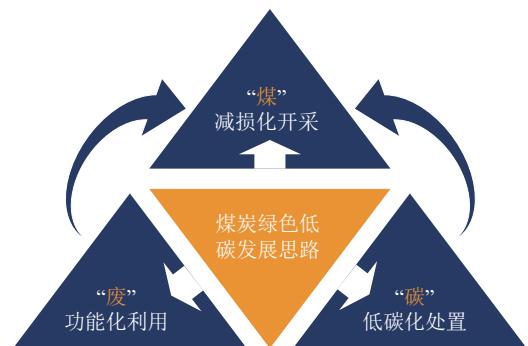


图1 “煤”-“废”-“碳”协同发展总体思路

Fig.1 Overall idea of coal-waste-carbon collaborative development

“煤”“废”“碳”均源于煤炭资源开发与利用,贯穿煤炭的开采、运输、加工、利用的全生命周期。因此,立足于“煤”-“废”-“碳”协同化发展,需基于系

统论和联系论观点,探索3者互为整体、耦合制约的内在关系。具体而言,①开采形成的煤炭资源是产生煤基固废和CO₂的原始母体,而开采形成的大量采空区又为后续固废处置与CO₂封存提供了物理空间;②煤炭在开采与加工过程产生的煤基固废,可为制备充填材料与CO₂矿化材料提供物质基础;同时利用制备的CO₂充填材料置于井下,又可提高煤炭采出率,为实现“煤”的减损化开采提供了解决方案;③对煤炭利用过程中产生的CO₂实现回收,需选择适宜的固碳材料,而多孔疏松的煤基固废是潜在的理想选择之一;同时,煤炭开采形成的浅层采空区在满足气密条件下,通过构建功能性充填空间可实现CO₂地下封存,为实现大规模、低成本碳封存提供了可能。

基于上述分析,笔者尝试构建“煤”-“废”-“碳”协同发展实施路径(图2):①“功能化”利用:采出的煤炭在开发利用过程中产生的煤矸石、煤电固废,可分别作为井下固废充填的骨料、胶凝材料,解决了井下充填用料难题;而通过对固废充填材料改性处理,

将煤电及煤化工行业排放的CO₂固定于充填材料中形成固碳充填材料,可实现充填-固碳一体化,解决地表固废处置的“功能化”利用问题;②“低碳化”处置:在井下对适宜CO₂封存的采空区进行改造利用,构筑形成大量的采空区功能性空间;同时,探索CO₂物理与化学协同封存方式,评估功能性充填体围限的碎裂岩体、气化煤灰及热解半焦等封存载体封存能力与安全性,实现空区重构与碎胀空间再利用,解决井下空间与碳封存的“低碳化”处置问题;③“减损化”开采:探索“三下”压煤等重点遗煤回收技术难题,减少煤炭损失;探索井下开采工艺与降低岩层移动的联动新技术,减少地质损伤;优化开采步距与空间配置方案,推进区段煤柱与大巷合理化设计,发展地表/地下水位与采动导水裂隙带的阻断技术,控制生态水位不变动,最大限度降低对地表脆弱生态系统的干扰,减少环境损害。解决煤炭开采过程中的“减损化”开采问题。最终通过对“煤”-“废”-“碳”协同化处理方案,将为煤炭的绿色低碳转型提供了系统化解决方案。

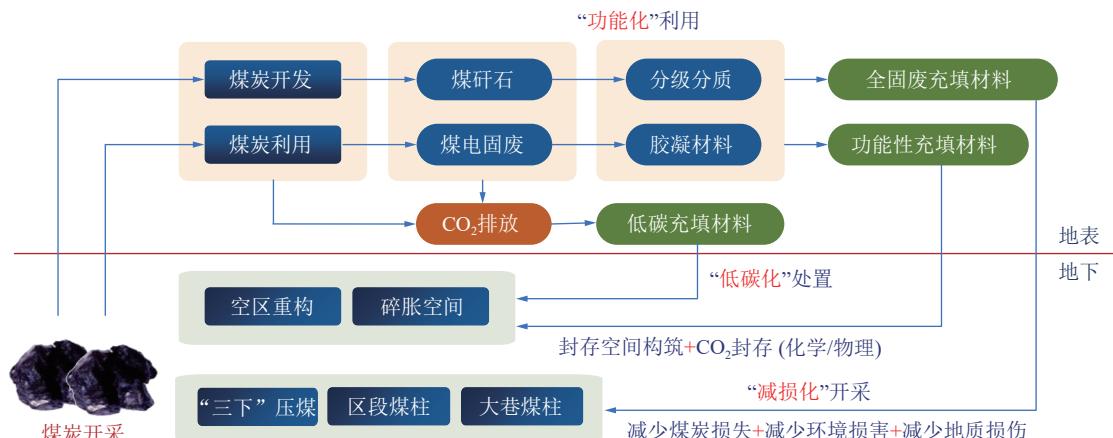


图2 “煤”-“废”-“碳”协同发展实施路径

Fig.2 Implementation path of coal-waste-carbon collaborative development

2 “煤”的减损化开采

2.1 “煤”的减损化开采科学内涵

“煤”的减损化开采是在充分认识煤层覆岩结构及开采分区基础上,运用以充填开采为核心的减损技术组合,实现减少煤炭损失、减少地质损伤和减少环境损害的目的(图3),从而确保煤矿区资源、经济、环境效益最大化。

“煤”的减损化开采科学内涵主要体现在:通过精细地质探查厘清覆岩-煤-水空间组合,揭示科学运用充填减损开采技术下的采动覆岩变化规律,提出资源减损与地质环境减损相协调的地质判据和开采分区,形成以充填技术为核心的减损工艺组合方案。从而

最大限度采出地下煤炭资源,减少遗煤量,并削弱对生态水位和地表生态的损害。

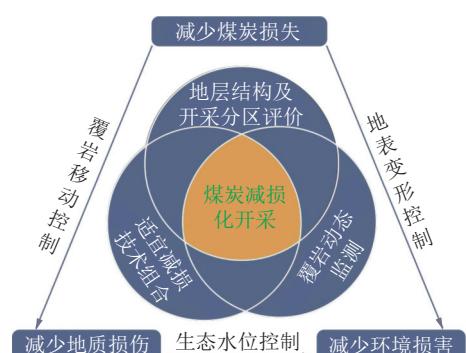


图3 煤炭减损化开采内涵

Fig.3 Connotation of damage-reducing coal mining

2.2 “煤”的减损化开采科学问题

“煤”的减损化开采是以“减少煤炭损失、减少地质损伤和减少环境损害”为目标的技术思路,要求采煤工艺与减损组合技术相互匹配协调,并对地质环境影响可控,充分考虑地质基础和多场耦合条件下的采动覆岩移动损伤和地表变形,确保资源回采与生态效益最大化。其关键科学问题包括:矿区含(隔)水层空间组合特征、采煤减损技术应用下的覆岩移动规律和覆岩采动损伤下的地表变形规律,最终建立采煤减损技术应用下隔水岩组稳定与地表变形可控的地质量化判据(图4)。

(1) 矿区含(隔)水层空间组合特征。

地表生态环境对地下水位具有极强的依赖性,浅埋煤层开采容易通过破坏隔水岩组造成地下水位迅速下降^[23-25]或隔水层之上的潜水含水层消失,甚至对相邻区域潜水流场造成扰动^[26-27]。笔者基于陕北榆神府矿区综合分析确定了合理安全的生态水位埋深为1.5~5.0 m^[28]。煤层采动造成地下水位下降到安全阈值以外,不能对土壤储水量进行有效补给,草本植物、深根系灌木等依次会因缺水而逐渐死亡,造成生态环境破坏^[29-30]。因此,充分认识矿区含(隔)水层空间组合特征是保障煤炭减损化开采的地质基础。

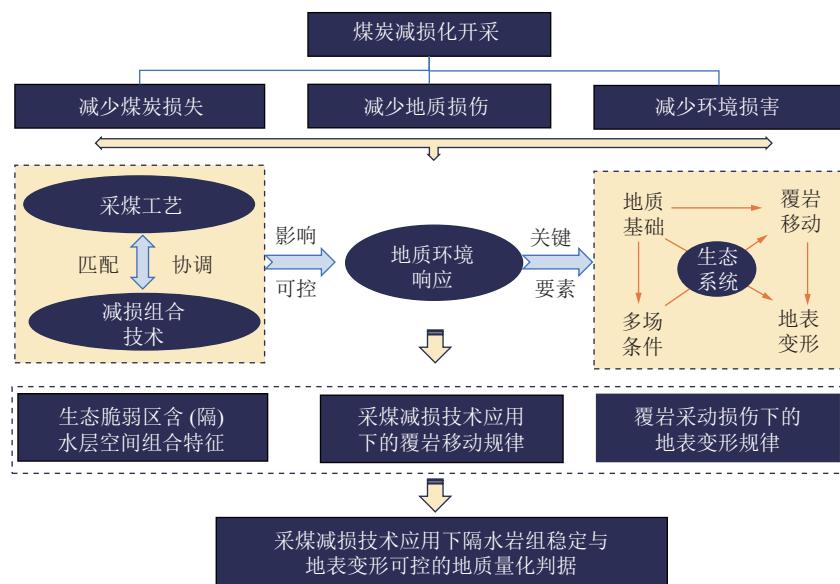


图4 煤炭减损化开采的科学问题

Fig.4 Scientific issues in damage-reducing coal mining

立足陕北地区含(隔)水层空间组合,可将其划分为4种类型^[31]:孤立含水盆地型煤-水组合、无黏土隔水层含水盆地型煤-水组合、隔水层连续分布的含水盆地型煤-水组合、烧变岩型煤-水组合。其中孤立型含水盆地规模小,隔水岩组发生破坏会在短时间内造成整个盆地迅速疏干;无黏土隔水层含水盆地由于含水层分布面积广且无土层隔水层,覆岩损伤易造成区域性水位下降,甚至影响河川径流和流域生态;隔水层连续分布的含水盆地大面积分布含水层和土层隔水层,尽管采煤过程会造成覆岩损伤和地表变形,但由于土层隔水层的保护作用使地下水位不会明显下降;烧变岩型煤-水组合则需防范采动过程中烧变岩水体及其补给区水位下降。

控制生态水位是减少煤炭开采过程中环境损害的核心,范立民等^[32]对1994年、2015年榆神矿区长期采动条件下泉点分布进行对比,泉数量由2 580处

减少到376处,衰减率达84%;泉流量由4 997.059 L/s下降到966.392 L/s,衰减率达76%,泉点锐减区域与煤矿开采强度最大区域重叠,含隔水层结构破坏和侧向补给截断是泉点大量衰减的主要原因。因此,厘清不同采煤区的煤-水组合特点,因地制宜的提出减损技术,是实现煤炭资源最大限度开采的必要条件

(2) 采煤减损技术应用下的覆岩移动规律。

煤层采动引起覆岩移动破坏,并形成垮落带、裂隙带和弯曲下沉带,产生纵向和横向层间导水裂隙。从而不可避免造成地下流场和应力场发生扰动,极易诱发突水、溃砂等事故^[33-34]。导水裂隙带高度受开采方法、采厚、埋深、覆岩结构、工作面几何参数、时间及断层影响的规律^[35]。有实测数据显示软弱顶板时导水裂隙带高度为8~12倍采高,中硬岩层为12~18倍采高,坚硬岩层为18~28倍采高^[31]。导水裂隙带高度总体随开采厚度呈分布函数增长,随采深呈幂函

数增长关系^[36]。钱鸣高院士^[37]提出破坏岩块相互咬合限制,呈现“砌体梁”结构发生下沉变形,且覆岩结构中存在关键层(主关键层和亚关键层)。当主关键层位于7~10倍采高以内,导水裂隙带贯穿基岩;反之,导水裂隙带高度仅到达关键层底部^[38]。笔者基于保护西部生态脆弱区生态水位,提出确保隔水层稳定的地质判据^[39]:

$$H \geq H_l + H_{lx} + (3 \sim 5)M \quad (1)$$

其中, H 为隔水层厚度, m; H_l 为上行裂隙带侵入隔水层高度, m; H_{lx} 为下行裂隙带侵入隔水层高度, m; M 为采高, m。上行裂隙带系前述导水裂隙带,下行裂隙带系隔水层下沉产生的自上而下的张裂隙^[40],即隔水层的稳定性是由上行裂隙带和下行裂隙带导通条件决定的(图 5)。

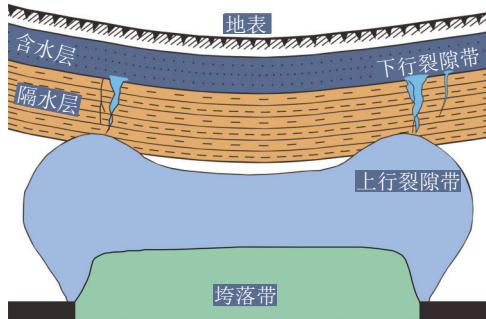


图 5 覆岩隔水层采动损害条件

Fig.5 Mining damage conditions of overburden aquiclude

减损组合技术的应用改变煤炭开采过程中的围岩应力场、变形场和流体场演变尚缺乏深入探讨,科学认识不同减损工艺技术下的覆岩移动和导水裂隙带发育规律,并提出隔水层稳定的地质判识量化依据,是基于减损技术实现煤炭资源最大限度开采的关键之一。其核心是在充分认识覆岩关键层、含隔水层组合特点基础上,基于覆岩移动理论建立与资源回收和环境效益最大化相协调的减损技术组合,分析分析减损技术实施下的导水裂隙带高度及其演化过程,判识隔水岩组安全稳定性等级,从而确保上覆含水层水位处于合理安全阈值以内。

(3) 覆岩采动损伤下的地表变形规律。

煤炭资源与环境效应最大化要求采煤工艺与减损组合技术相互协调,传统浅埋煤层的采煤工艺直接导致地表移动变形^[41],笔者调查总结神木北部矿区地表移动变形特征包括塌陷坑、塌陷槽、裂缝、塌陷盆地、黄土崩塌和黄土崩滑^[39],且不同工作面位置、地面坡向所对应的地表裂缝发育特征及程度存在显著差别^[42-43]。

地表移动变形通过改变土壤理化性质造成生态植被损害^[44]。采煤沉陷区地裂缝造成土壤含水量下降,且裂缝密度和宽度越大、土壤水分损失量越大^[45],从而使土壤中砂性颗粒增多^[46],土壤密度、毛管孔隙度等发生动态变化^[47],加速了土壤侵蚀、氮和磷流失、土壤总碳下降^[48-50]。叶璐等^[51]通过调查鄂尔多斯盆地北部采煤塌陷区,发现植物种类减少了31.03%~44.83%,植株密度下降了58.62%~68.00%、物种丰富度下降了17.43%~27.00%,优势种和植物群落多样性发生显著变化。

基于减损组合技术置换煤柱和“三下”压煤以减少煤炭资源损失,面临地质损伤和地表变形联动的新规律、新问题,精准探查地表变形特点及其对生态系统的影响,研究新规律下的地表生态自修复能力和人工修复条件,是提高煤炭采出率的关键地质保障技术。

2.3 “煤”的减损化充填开采关键技术

“煤”的减损化开采的核心之一是充填开采,充填开采的关键则是将性质稳定的充填材料输送至采空区置换资源并减少地质和环境损害。鉴于井工开采区段煤柱、边角煤和“三下”压煤等或多或少存在煤炭丢失问题,笔者分别提出了回收区段煤柱的“掘-充-留”一体化方法、回收边角煤及小范围压煤的窄条带式充填开采方法和回收大范围压覆煤炭的架后充填开采方法,以期为煤炭减损化开采提供技术支撑。

此外,除了上述以置换不可采煤炭为目的的充填开采方法之外,近年来随着我国对环境保护要求的逐步提高,我国科研技术人员提出了系列以处置巨量煤矸石为目的的矸石注浆充填方法与技术。

2.3.1 区段煤柱“掘-充-留”一体化技术

井工煤矿普遍采用长壁综采法采煤,其突出优势是安全高效,工作面布置形式多为“一面两巷”(进风巷和回风巷各1条),陕北等地的“大采长、长走向、大储量”工作面布置形式为“一面三巷”(1条进风巷、2条回风巷),相邻工作面之间留设15~40 m的煤柱,用于隔绝相邻采空区和支撑顶板载荷,区段煤柱一般都无法回收,相当于丢失综采工作面5%~20%的煤炭资源。长壁综采的优化方向是减少或不留设区段煤柱,同时提高回采巷道掘进效率,为此提出了区段煤柱“掘-充-留”一体化技术。

如图 6 所示,区段煤柱“掘-充-留”一体化技术的核心是前进式掘进超大断面巷道,使用煤矸石膏体充填材料在超大断面巷道中部构筑充填带,同步沿两侧煤壁留设回采巷道。区段煤柱“掘-充-留”一体化技术的主要研究内容包括:宽巷掘进与充填留巷协同

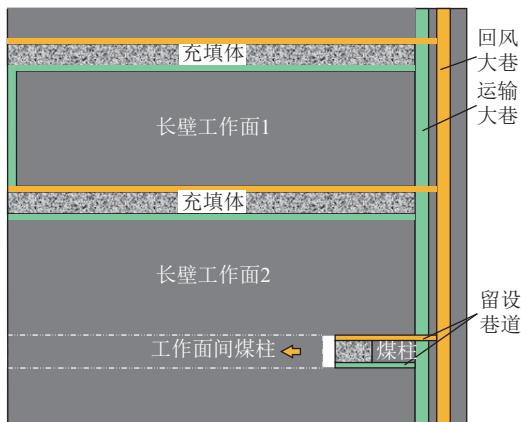


图 6 面间煤柱“掘-充-留”一体化技术原理
Fig.6 Technical principle of interface coal pillar excavation-charging-retaining integration

方法与装备,速凝功能性充填材料制备理论与技术,架后全域一次性充填与密实接顶方法,宽巷掘进通风优化及充填留巷防灭火,扰动区矿山压力显现规律及调控方法,覆岩移动及损伤协同控制理论与技术。

区段煤柱“掘-充-留”一体化技术的突出优势可以归纳为 3 个方面:① 实现无煤柱开采,大幅度提高煤炭资源回收率;② 以矿井研石产量计算大断面巷道掘进宽度和中部充填宽度,实现中部充填区对矿井采掘研石的完全处置;③ 掘进工作面为全风压通风,避免了长距离独头通风,同时一次留设 2 条巷道,掘进效率高。

2.3.2 短壁连采连充

短壁连采连充是采用连采机以掘巷的方式进行采煤,目前逐步应用于“三下”采煤、保水开采、边角煤(煤柱)回收等。窄条带工作面长度一般 50~120 m,宽度一般 6~8 m。短壁连采连充技术显著延长了我国地方与乡镇煤矿的服务年限,提高了采出率^[52]。此外,笔者团队针对区段煤柱回收问题,在短壁连采连充研究的基础上,提出了短-长壁工作面充填无煤柱开采方法^[53]。

合理的充填体强度可以平衡顶板安全性与充填成本。以陕北保水充填开采矿井为工程背景,笔者团队研究提出了短壁连采连充的 1 倍基准、2 倍基准和 3 倍基准 3 种工艺类型,为条带煤柱安全高效置换开采提供了保障。图 7 为麻黄梁煤矿三倍基准短壁连采连充工艺,垂直切眼方向将工作面煤层每 32 m 划分为一组,每组均分为 4 个条带,条带宽度 8 m,分 4 个循环进行短壁连采连充开采^[54]。3 倍基准工艺下,第 4 轮充填体承载较小,可弱充填,充填成本较单倍基准降低 20%~25%。

接顶充填质量直接影响覆岩及地表的保护效果

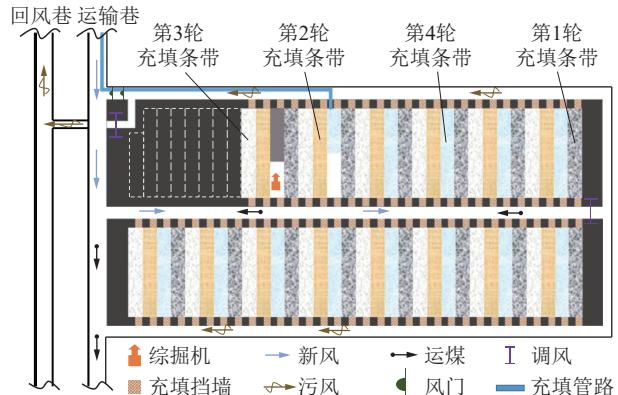


图 7 3 倍基准短壁连采连充开采工艺
Fig.7 Three-times short-wall continuous mining and backfilling technology

和安全开采^[55]。对此,确定了条带巷顶多通道分布式导气管的接顶方法,研制了排水/气-补浆一体化充填管,如图 8 所示,提高了充填接顶率。

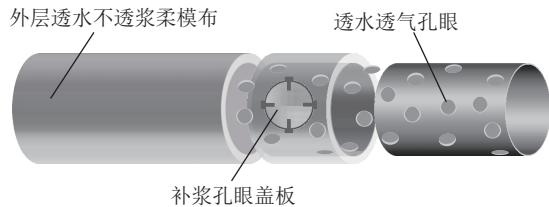


图 8 排水/气-补浆多功能充填管
Fig.8 Multi-functional backfilling pipe for drainage/gas and slurry replenishing

2.3.3 综采架后充填开采

现阶段,我国千万吨级矿井井田面积达到了 100 km²,大井田地表普遍存在大量压覆体,不可避免地压覆大范围煤炭资源。如延长石油集团魏墙煤矿,井田勘探报告(2010 年 6 月)数据显示,3、4 号煤层探明的(331)+控制的(332)+推断的(333)内蕴经济资源量 433.88 Mt,而压覆的 3、4 号煤层 3 类资源量高达 111.67 Mt,占井田资源量的 25.7%。压覆区煤炭资源的安全高效开采事关矿井的服务年限、经济效益和资源高效回收。

短壁连采连充生产能力一般 30 万~60 万 t/a,不能匹配大型矿井大范围压煤区的产能要求,同时现行政策对矿井的采掘工作面数量有严格限制。因此,短壁连采连充难以有效解决大井田的大范围压煤问题。综采架后充填开采技术兼具了综采的安全高效和充填对采空区的安全处置优势,是回收大范围“三下”压覆煤炭和保水采煤的重要方法。

如图 9 所示,综采架后充填是基于长壁工作面布置形式,采用充填液压支架支护,每推进一个充填步距,沿充填支架后体做隔离,在工作面后方搭建充填

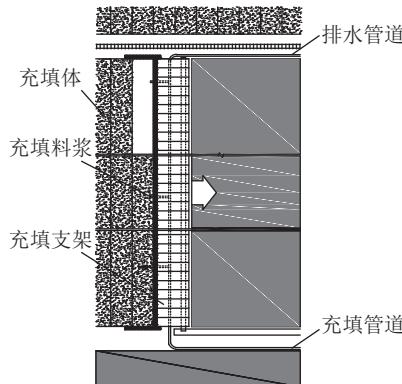


图 9 综采架后充填采煤工作面平面

Fig.9 Plan of backfilling coal face after fully mechanized mining
空间, 使用胶结膏体充填材料注满充填空间, 充填材料养护至设计早期强度后, 采煤机向前推采, 充填支架前移, 达到充填步距后再进行下一步距充填。

充填体养护至设计强度后, 充填支架才能向前移动, 支撑采煤机前向采煤。然而目前采煤机割煤速率远高于充填体养护速率, 充填体早期强度低是制约架后充填开采效率的关键所在。针对这一问题, 笔者团队研制了弗尔早强剂, 以 14% P.O 425 水泥、30% 粉煤灰、56% 风积沙为原材料制备质量分数 78% 的充填材料, 加入不同比例(相对水泥)的弗尔早强剂, 不同养护龄期下充填材料强度如图 10 所示, 加入弗尔早强剂后试样 3 d 抗压强度增幅为 85%~320%、7 d 抗压强度增幅为 44%~156%、28 d 抗压强度增幅为 48%~65%。

2.3.4 煤矸石注浆充填技术

现阶段, 受采煤工作面数量限制、产能任务和煤矸石处置要求等因素影响, 越来越多的大型矿井采用矸石注浆充填技术处置煤矸石, 同时减缓地面沉陷,

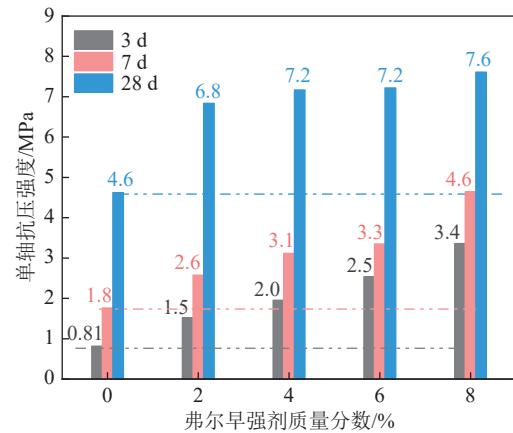


图 10 早强型充填材料

Fig.10 Early strength backfilling material

如陕北地区的曹家滩煤矿、小保当煤矿和张家峁煤矿等。煤矸石注浆充填的主要工艺流程包括以下几个步骤: ① 破碎, 采用破碎机或球磨机等设备将煤矸石破碎至一定粒径级配下; ② 破碎后的煤矸石粉与水进行均匀搅拌, 制备不离析、低泌水的煤矸石浆体材料; ③ 泵送, 采用充填泵将煤矸石浆体材料沿管道和钻孔输送至注浆充填区。

如图 11 所示, 根据充填空间位置不同, 煤矸石注浆充填技术可以分为采空区注浆和离层注浆, 根据注浆钻孔空间位置不同可以分为地面高位注浆充填、巷道邻位注浆充填^[56-59]。

结合当前有关于煤矸石注浆充填工程示范应用情况, 煤矸石注浆充填技术下一步研究重点: 采空区精细探测与可充空间分析技术, 煤矸石浆体材料长距离可靠输送技术, 输送管道结垢堵塞实时监测预警技术。

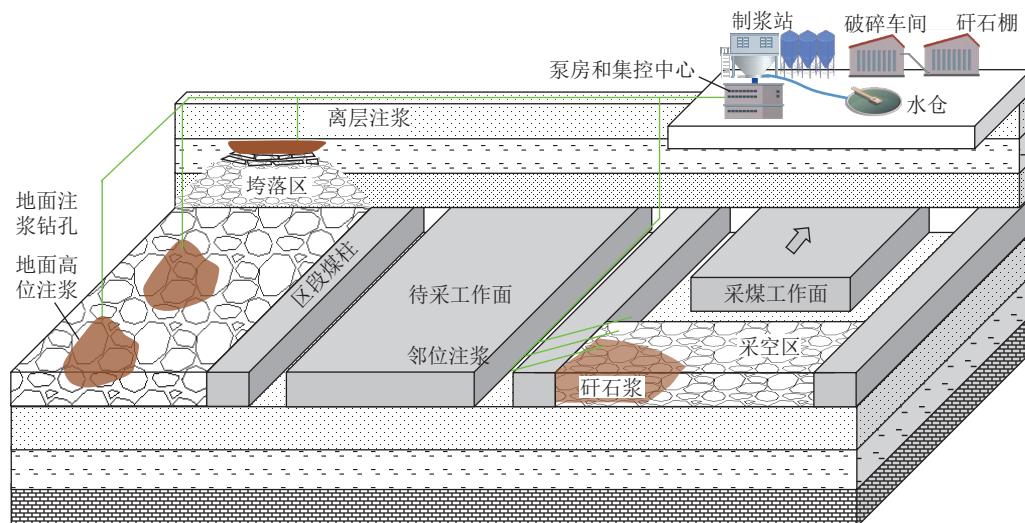


图 11 煤矸石浆体充填技术

Fig.11 Coal gangue slurry backfilling technology

3 “废”的功能化利用

3.1 “废”的功能化利用科学内涵

“废”的功能化利用是在明晰多元煤基固废基础物理化学特性的基础上,进行固废材料改性,使其满足安全、环境、稳定等性能要求,再基于固废协同处置理论制备固废基胶凝材料,胶结煤矸石、气化渣等固废骨料制备全固废充填材料,实现大宗固废的规模化、无害化、功能化利用,为煤的绿色低碳利用提供保障。

“废”的功能化利用科学内涵主要体现在:通过原材料测试明晰固废基础物化特性,确定固废改性优化的方向、方法,揭示固废改性机理,建立煤基固废协同水化反应动力学模型,形成固废分级分质利用、制备全固废充填材料的工艺组合方案。从而一方面最大规模地处置地面排放的固废,保护地面生态环境,同时控制固废充填对井下地质环境的影响。

3.2 “废”的功能化利用科学问题

“废”的功能化利用是以“固废原材料改性→煤基固废协同处置→煤矿全固废充填”为技术思路,使煤基固废具备煤矿充填所需的安全性、环境性、流动性、水化活性、经济性等特性,在充分考虑井下地质环境保护的前提下,最大化消纳地面固废,实现井上、下环境的双向优化和充填矿井及固废企业的可持续发展。其关键科学问题在图12中体现,包括:煤基固废原材料改性方法与机理、多元固废协同作用机理、全固废充填材料性能调控理论,最终形成基于改性煤基固废协同处置的煤矿全固废充填处置模式。

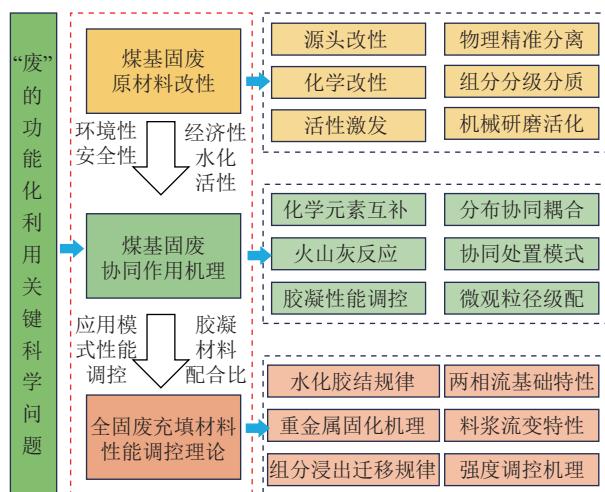


图 12 “废”的功能化利用科学问题

Fig.12 Scientific essence of functional utilization of solid

(1) 煤基固废原材料的改性基础。

煤基固废功能化利用的前提是使其具备稳定的

性能和良好的环境相容性。然而,目前煤基固废种类繁多,品质低劣,且受上游工艺及生产条件影响,性质波动大,从而严重影响固废基产品的稳定性,极大地限制了固废的规模化、产业化利用。因此,为了解决该问题则引出了固废改性的概念,顾名思义,改性是通过改善固废的特性使其具备功能化利用的基础。

明确固废改性的必要性后,必须分析固废的功能目标以评估固废能否进行改性,这是实现煤基固废能功能化利用的前提。然而,固废是复杂的混合体,往往具备多元的回收途径,目前最大的难点在于建立固废的功能性目标和物质基础的关联关系,以实现固废的最高效率和最高价值利用。因此,必须充分认识煤基固废的基础特性,基于特性分别进行物理和化学水平的分质分级,揭示各类各级固废的功能化目标和缺陷,明确基于何种用途进行何种特性的改良以建立固废的改性基础。

例如,表征部分煤基固废发现其含有一定的活性成分,具有优异的物理性能,可用于研发胶凝材料以实现高值化利用。然而,目前高值化利用过程中仍存在以下问题:①固废自身活性低。例如,冶炼镁渣活性源于 $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ 的水化,但镁渣中该相含量较低;分级脱碳的煤气化渣中含有活性玻璃体组分,但该组分含量少且需要强碱激发。②固废稳定性差。例如,固废品质与其原料特性和工艺密切相关,性能波动较大;冶炼镁渣具有膨胀性,且 f-CaO 、 f-MgO 含量波动大,影响基体安定性。③其他特殊问题。例如,粉煤灰遇水释放氨气,对井下安全造成一定威胁;部分重金属易富集于煤基固废中,重金属迁移污染土壤、水体等,威胁生态环境安全。此外,受固废自身缺陷影响,煤基固废的功能化利用总是难以兼顾性能、效率和规模,这与实现“无废化”建设愿景相悖。因此,煤基固废功能化利用还需拔丁抽楔,对各类固废进行针对性源头改性,稳定品质、提高水化活性、脱除有害组分,使其具备可功能化利用的基础条件。

未来,基于煤基固废不同特性拓展其功能化利用方式,必然会出现固废潜在新问题和新缺陷,厘清问题、缺陷的来源和发生机制,探究改性方式对煤基固废性质改良的效果和规律,形成配套的煤基固废改性方案,是促进其功能化利用的前提,也是保证目标功能稳定的关键保障。

(2) 多元固废协同作用机制。

协同作用一词的经典定义将其描述为2个或多个因素之间的相互作用,使它们的综合效应大于其单个效应的总和^[60]。协同作用理论常用于固废资源化利用和胶凝材料研发领域,多元固废协同作用是提高

固废利用率的有效途径,通过深入了解不同类型固废的相互作用机理,可以更好地实现固体废弃物的资源循环利用,具有较好的经济和环境效益,是实现区域固废一体化处置的有效途径。通常来讲,多元固废的协同作用,是以优异的和易性和力学特性为目标,通过化学和物理协同为实现路径,最终以提高水化反应产物含量和基质密实度为表现形式。

多元固废的化学协同作用主要针对多元固废胶凝材料,其协同作用机理涉及固体废弃物的物化特性和它们之间的相互作用机制^[61]。化学协同作用是不同固废原料中化学元素互补引起的,主要由Ca、Si、Al、S等化学元素间的协同反应而产生。基于此,研究人员往往选择化学成分互补的工业固废作为生产多元固废胶凝材料的原料,例如:碱基固废(改性镁渣、电石渣等)、硅铝质固废(炉渣、矿渣和粉煤灰等)与硫酸盐类固废(脱硫石膏)相互间的协同作用,利用上述固废中Ca、Si、Al、S等化学元素间的互补原理,实现碱基固废活化铝硅质固废,并使其与硫酸盐类固废发生协同反应,从而实现多种反应途径相互促进反应产物生成的增效作用。

多元固废的物理协同则需要统筹考虑,主要针对整个多元固废复合体系(如:多元固废充填材料、多元固废注浆材料等),通常利用物理协同作用使多元固废复合体系具有更高的堆积密度,通过增加其密实程度来提高复合体系的和易性和力学特性。当下多元固废复合体系的级配优化已然成为研究热点^[62-63],Fuller和Bolomy等理想级配理论被广泛应用,通过统筹考虑胶凝材料和骨料的粒径级配,利用人为控制固废骨料级配来实现多元固废复合体系的理想粒径级配,从而优化多元固废复合体系的目标性能。此外,为解决人为控制骨料级配成本高、费时费力等问题,多元固废骨料被复合应用的工程案例已不胜枚举,通过多元固废骨料级配互补,可实现多元固废复合体系的物理协同作用^[64-65]。

(3) 全固废充填材料性能调控理论。

煤矿充填过程中,全固废充填材料必须具备良好的流动性、力学性能和环境稳定性,但流动性、力学性能在一定程度相互制约,需要深入研究材料水化胶结、物质迁移等化学机理和微观颗粒级配、浆体流变学等物理机理,为制备满足多约束条件下的全固废充填材料提供理论支撑。

全固废充填材料的流动性直接决定了泵送及自流的可靠性,流动性差必将导致堵管事故频发。全固废充填材料流动性主要受原材料理化特征、配合比、

质量浓度、充填倍线、充填泵等因素的影响。如煤矸石做骨料时,破碎设备及矸石岩性差异会使得矸石颗粒中粉料占比存在显著差异,同时泥岩具有遇水泥化的特性,当粉料、泥岩占比比较高时,需要降低充填材料的质量浓度,以维持全固废充填材料的流动性。榆林麻黄梁煤矿需要从外运煤矸石进行充填,当煤矸石泥岩组分小于10%时,充填材料质量分数可控制在79%,当矸石中泥岩较大于30%时,料浆质量分数需降至74%。此外,粉煤灰对全固废充填材料的泵送具备一定的润滑作用,主要源于粉煤灰的“滚珠效应”,掺加10%~30%粉煤灰可显著提高料浆的流动性^[66]。如鄂尔多斯察哈素煤矿矸石泥岩组分少、矸石颗粒大(-15 mm),添加20%~30%的粉煤灰,在保证流动性的前提下,料浆质量分数可高达81%。总的来说,全固废充填材料的塌落度为255 mm和屈服应力为200 Pa是矿用充填料浆可泵性的最低要求^[66-68]。

全固废充填材料的力学性能是其能否安全支撑上覆岩层的重要指标,其力学性能主要受骨料的级配效应、胶凝材料的掺量和水化程度等因素的影响。其中,研究学者针对尾砂基充填材料展开研究,骨料的Talbot级配系数与其动态峰值抗压强度的关系近似为二次函数,级配系数为0.5时,尾砂基充填材料具备最优的力学性能和微观结构^[69]。此外,胶凝材料的水化反应是充填材料力学性能形成的基础,水化产物数量与胶凝材料的掺量呈正相关,大量水化产物对其微观孔隙进行充填,提高了充填材料的微观致密程度,这对其力学性能的发展具有促进作用^[70]。

全固废充填材料的环境问题主要是重金属元素浸出及迁移。部分学者对煤基固废的毒性浸出展开了研究,煤矸石和煤气化渣中Pb和Cd元素具有一定的浸出风险,且煤气化渣的浸出风险大于煤矸石,这也证实了地面堆放或填埋处置是存在较大的环境风险^[71]。此外,固废基充填材料的毒性浸出相关研究表明:水化产物可以通过化学键和物理吸附/封存等方式实现重金属元素的固化^[72-73],Mg²⁺和Ca²⁺形成的层状氢氧化物可以固定大量的重金属元素,从而降低重金属元素的浸出浓度^[74]。改性镁渣基胶凝材料具备强大的重金属固结能力,胶结多源煤基固废制备全固废充填材料可实现绿色、低碳和低成本充填。

3.3 “废”的功能化利用关键技术

3.3.1 煤基固废的改性技术

大量煤基固废自身缺陷难以克服,导致区域内煤基固废的减量化、无害化与资源化处置产业发展阻力重重。如何解决固废自身问题使其具备功能化利用

条件以扩大固废的无害化处理规模,成为了当前研究的关键。通过实施煤基固废改性技术,对各类固废进行改性,消除缺陷,提升性能,是实现“废的功能化利用关键技术”的前提,是拓展固废其他功能化利用的基础。

改性方式按照改性环节可分为源头改性和后端改性。源头改性是通过调整上游工艺,生产条件或配套专用改性技术改善下游固废性质,使其具备应用潜力。源头改性同样包含物理方法和化学方法,笔者团队^[68]在炼镁原料中加入化学优化剂来抑制 Ca_2SiO_4 的晶型转变,最终通过提高冶炼镁渣中 $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ 的含量从而大幅提高其水化活性,这是源头改性的代表技术。

后端改性是通过物理、化学等手段对已经排放的镁-煤基固废进行改性,使其具备利用的条件或进一步强化性能。后端改性一般可分为物理^[75-76]和化学^[77-79]方法,一般可根据功能化利用目标进行合理选择。物理改性包含物理精准分离和研磨活化等,其中,精准分离可以最大限度的提升固废的利用率和利用价值。笔者团队通过筛析法和重力法精准分选出煤气化粗渣中的高活性物质,然后进一步利用化学(硫酸盐、氯盐、碱等)激发剂侵蚀颗粒表面,加速内部活性物质溶解或破坏内部结构,实现了煤气化渣的改性^[80]。该类煤气化渣可用于高价值胶凝材料的开发,而分离的低/无活性物质则可被用作充填骨料或用作可燃碳回收等^[81]。由于各类激发剂均存在自身优势和不足,采用复合激发方式可以实现性能上的优势互补并弥补不足,具有更好的激发效果。复合激发既包含物理和化学层面的耦合,还包含多种化学激发剂的耦合。不论选择何种激发方式,在保证一定的激发效果同时,都要综合考虑各种激发方法的相互关联。除此之外,由于功能化目标不同,固废材料的改性或活化难度天差地别。例如,粉煤灰按照细度可分为I~Ⅲ级,按照氧化钙含量可分为C和F类,其中I、Ⅱ级或C类可直接利用,而Ⅲ级或F类粉煤灰在必须经过不同程度的改性或活化方可实现高值化利用^[76,82]。因此,对于不同的镁-煤基固废特性,选用合理的改性方式对实现其功能性利用至关重要。

3.3.2 固废基胶凝材料研制

煤炭减损化开采的核心之一是充填开采,充填开采的关键则是将性质稳定的充填材料输送至采空区置换资源并减少地质和环境损害。但是,当前充填开采总是面临成本过高的困扰,实际充填成本主要取决于胶凝材料的类型及用量,传统充填开采通常采用水泥作为胶凝材料,其成本约占充填成本的75%以上^[83]。此外,“高耗能”“高污染”一直是水泥行业的传统标

签,在“双碳”和“深入打好污染防治攻坚战”的相关目标背景下,水泥价格和充填成本还将不断上涨。因此,寻找新型低碳、环保、经济的胶凝材料替代水泥至关重要。

目前广泛采取的策略是,通过混合多种具有潜在活性或协同效应的固废作为水泥的替代品^[2-3]。而在煤矿开采、煤炭利用(煤电、煤化工等)以及一些高耗能的关联行业(冶炼行业等)中,都会伴生系列大宗固废(统称为煤基固废,包括煤矸石、粉煤灰、燃煤炉渣、脱硫石膏和煤气化渣等)。秉持“取自矿山用至矿山”和“以废治废”的理念,寻找技术有效、生产可行的煤基固废原材料,最大限度激发材料活性,是开发固废基胶凝材料的基础。

大量研究发现,具有潜在活性的固废材料在单一作用时其活性难以完全被激发^[82]。粉煤灰、燃煤炉渣和煤气化渣中都存在活性 SiO_2 和 Al_2O_3 等矿物,具备潜在的火山灰活性,但必须经过一定方式的活化后才能表现出来^[84]。因此,在基于镁-煤基固废改性技术的基础上,结合多元固废协同作用机制开发新型胶凝材料。综合地域因素和经济性考虑,采用机械研磨-碱性固废(周边关联行业固废:镁渣、电石渣等)-盐(脱硫石膏等)复合激发的方式。与此同时,在明确胶凝体中各组分的协同效应的基础上,进行胶凝材料配比优化。但是,不可忽略的是,全固废基胶凝材料的原料均为工业固废,上游生产原料、工艺等条件的改变即会影响下游固废的特性。此外,不同的配比或不同质量的固废原料会导致胶凝材料性能存在差异,尽管不同性能的胶凝材料可适用不同的应用环境,但是如何保证胶凝材料质量稳定或避免混淆等是保证下游安全应用的前提。因此,必须规范固废基胶凝材料的原料选取、生产、等级分类、储运等过程,并形成标准规范。

最终,形成了集“固废特性表征—材料改性和分级—胶凝材料开发和配比优化—工业生产及应用”的研发及生产规范路线,如图13所示。通过使用多种煤基固废制备的新型胶凝材料替代硅酸盐水泥用于矿山充填等领域,极大降低了矿山充填成本,还能推动多种工业固废资源化协同利用,实现生产过程接近零污染物排放,具有广阔的应用前景和社会效益。

3.3.3 全固废充填材料制备

在生态文明建设持续推进、高质量发展转型升级的时代背景下,固废处置与煤矿充填越来越受到社会各界的广泛关注,相关技术快速发展、产业日趋壮大。胶结膏体充填材料的组成包括3部分,胶凝材料、骨料和拌合水。传统的充填胶凝材料为水泥,上节所述

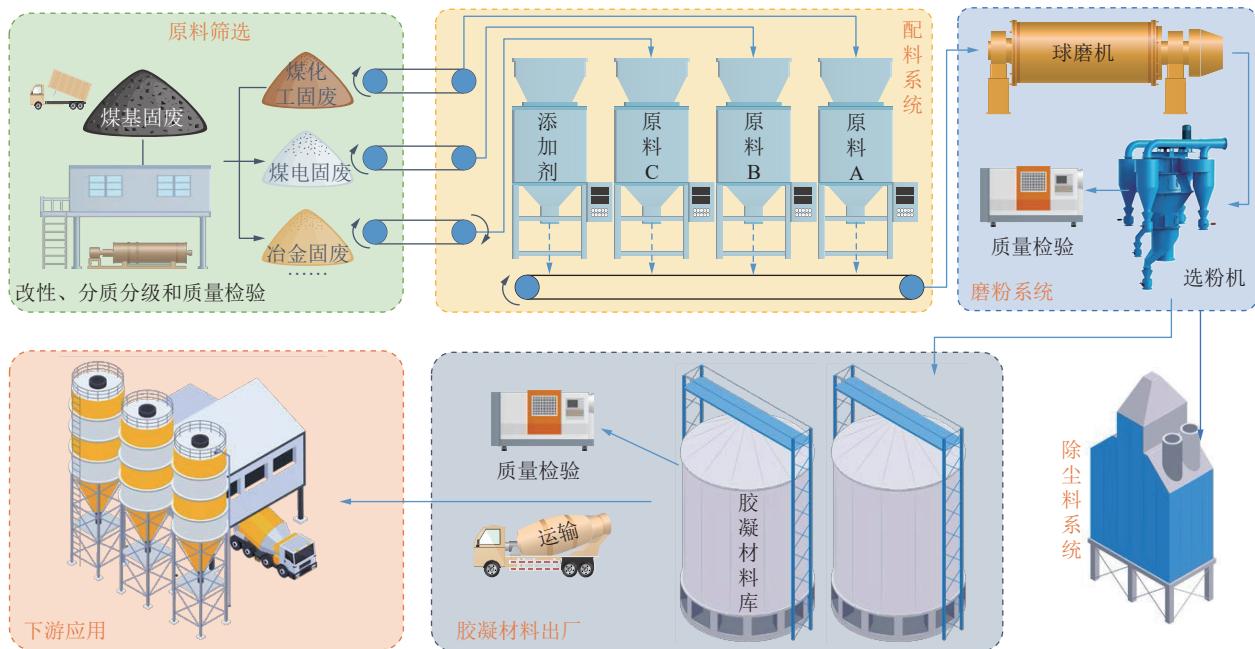


图 13 胶凝材料的研发及生产规范路线

Fig.13 Research, development and production specification routes of cementing materials

的固废基胶凝材料降低了充填成本^[68]。但是,只有少部分具有潜在活性的煤基固废经过分级筛选后可用于开发胶凝材料进行高值化利用,而剩余的低性能煤基固废堆存量较大且大多自身存在缺陷,品质波动大,难以规模化处理。

此外,部分矿区煤矿充填基础原材料不足。目前,煤矿充填大多采用煤矸石作为骨料,但是煤矸石产量占原煤产量的 10%~20%,部分有意愿实施充填开采的矿井面临充填原材料不足的困境。要实现煤矿充填开采技术的大规模推广,拓展充填骨料的来源。

针对上述关键问题,在大规模推广煤基全固废充填技术过程中,开发了以低品质煤基固废为骨料,性能可控、环境友好的全固废充填材料,形成了可消纳低品质固废的充填材料制备技术。此外,如何解决全固废充填料浆长距离运输难题,如何根据运输距离动态调整充填料浆流动性能,如何优化配比参数以满足不同采空区充填力学性能需求,如何制备满足环保要求的全固废充填材料,建立成套全固废充填理论与技术体系是解决上述问题的关键。

因此,以大宗煤基全固废充填材料成本和性能为优化目标,以充填料浆的流动性、充填材料的稳定性和环保性为约束条件,制备多种不同类型的全固废充填材料。系统研究各类煤基全固废充填材料的抗压强度、流动性和环境性能,并结合矿山充填理论给出各全固废充填材料对应的配比设计依据。最终建立全固废充填材料流动、力学和环境性能理论体系,明确固废特性、材料配比、环境条件和时间空间等因素对

充填材料性能的影响,形成相应的技术路径和工业化生产工艺,保障全固废充填技术落地转化,如图 14 所示。

笔者团队致力于利用改性镁煤渣基胶凝材料制备全固废充填材料的研究,图 15 显示了不同改性镁煤渣基胶凝材料含量对煤矸石全固废充填材料强度发展的影响。充填材料的强度随着胶凝材料的质量分数增加而增加,以 28 d 含 20% 的 FA 系列试样为例,胶凝材料添量分别为 18%、20%、22% 和 24% 的试样强度较胶凝材料添量为 16% 的试样强度分别增加了 1%(0.04 MPa)、35.8%(1.36 MPa)、43.8%(1.66 MPa) 和 88.7%(3.36 MPa)。

4 “碳”的低碳化处置

4.1 “碳”的低碳处置科学内涵

“碳”的低碳化处置 (Negative Carbon Disposal, NCD) 是在考虑地质条件和煤炭开发工艺的条件下,充分利用采空区形成的地下空间,通过充填可以矿化 CO_2 的固体废弃物 (如粉煤灰、气化渣、钢渣、赤泥等) 和废水 (高矿化度、难处理污染水或废水),以化学反应固化和物理吸附等方式将 CO_2 封存在采空区内,在采空区充填的同时实现 CO_2 的封存。

“碳”的低碳化处置科学内涵主要体现在:以煤炭开发过程采空区充填和 CO_2 封存为背景,采取理论研究、室内实验和工程实践相结合的方法,揭示采空区矿化充填和 CO_2 封存中物理、力学、化学、地质等基础科学问题,阐明低碳化处置的科学原理和地质适宜

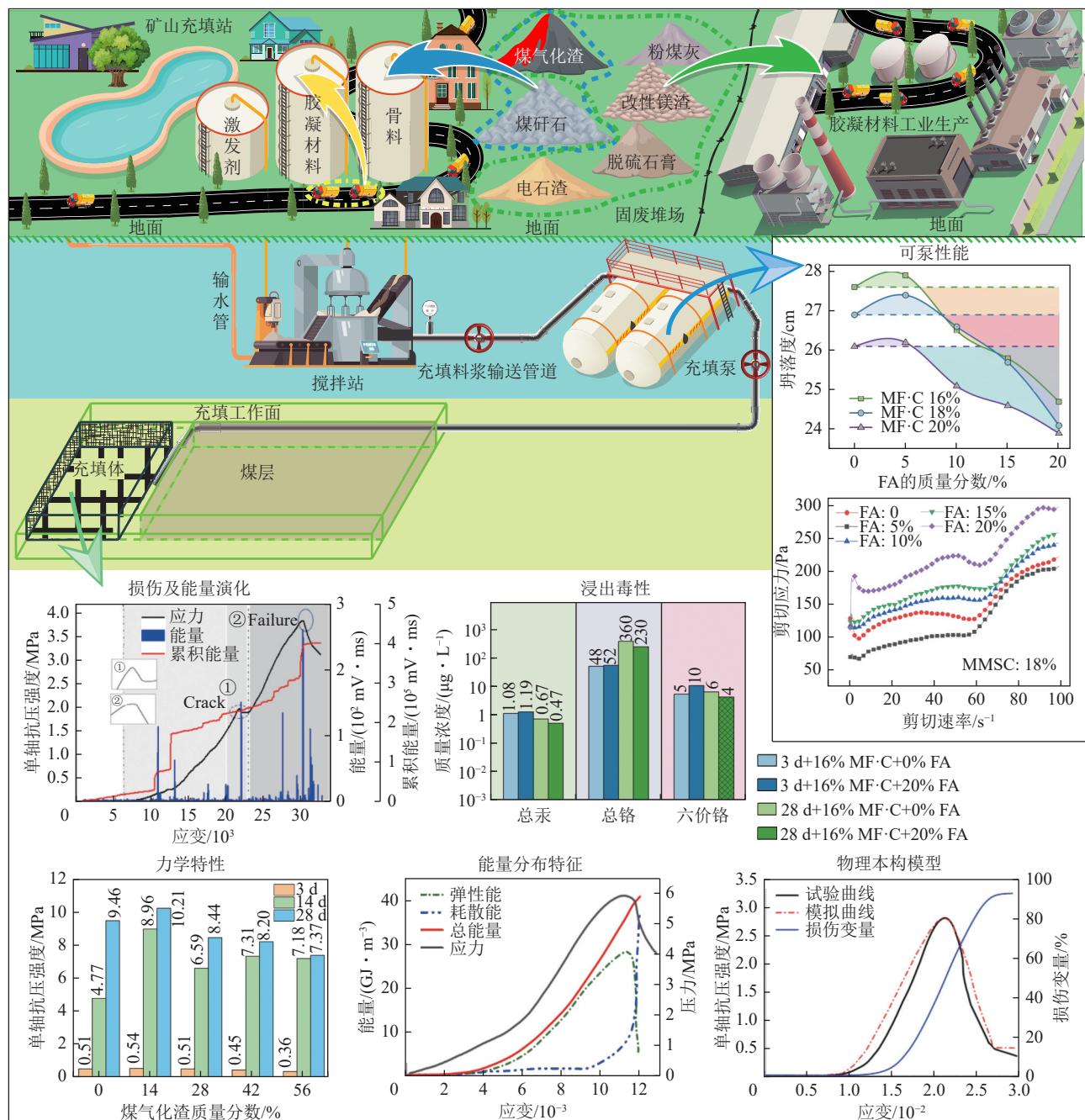


图 14 全固废充填材料制备及充填工艺

Fig.14 Preparation and filling process of solid waste filling materials

性,提出低碳化处置的科学实践框架和实施路径,构建包含经济、环境、地质等因素的低碳化处置综合评价模型,形成低碳化处置保障策略和实施方案,为煤矿采空区处置和低碳化利用提供基础理论支撑。

4.2 “碳”的低碳处置科学问题

“碳”的低碳化处置是基于“功能性充填的CO₂储库构筑与封存”学术构想,采用功能性充填技术在煤炭开采过程中同步构筑CO₂封存储库,用控制功能性充填材料的方式,以满足充填体强度、防渗等CO₂封存条件;用控制储库单元与储库群结构的方式,以

保障CO₂封存空间的稳定性与安全性;用高富含Ca/Mg固废矿化反应的方式,以确保CO₂安全封存;形成“功能性充填材料制备→功能性充填与CO₂封存储库构筑→CO₂物理与化学协同封存→CO₂封存安全及环境风险评价”的CO₂封存新模式,其涉及的科学问题如图16所示。

(1) CO₂矿化封存材料制备与封存储库构筑。

矿化封存材料是CO₂封存的重要载体,如何研发出低成本、高固碳、高性能的新型固废基CO₂矿化封存材料,并形成矿化材料制备技术与工艺方法是实现

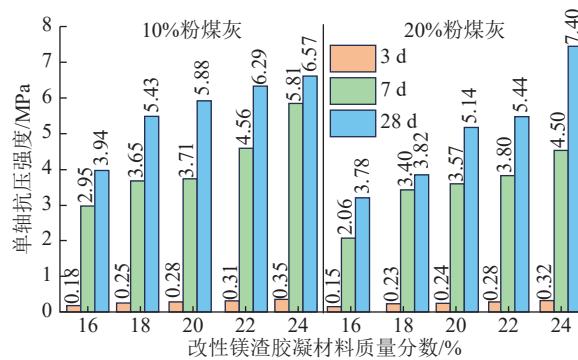


图 15 MF · C 胶结煤矸石全固废充填材料的单轴抗压强度
Fig.15 Uniaxial compressive strength of MF · C cemented coal gangue backfilling material

井下 CO_2 物理-化学封存的前提。首先, 研究矿化材料固碳效能随 CO_2 矿化反应的演化机理, 明晰不同碱基固废对 CO_2 化学封存的固碳特性, 建立 CO_2 矿化材料固碳效能评价方法, 形成碱基固废矿化反应的调

控技术, 从而最大程度地封存 CO_2 。其次, 建立 CO_2 矿化材料力学性能评价方法, 明晰骨料与矿化材料性能的匹配关系。最后, 以提高矿化材料力学性能为目标, 研究 CO_2 矿化体微观结构、硬度和孔隙率, 设计满足矿化材料流动性、可泵时间、抗压强度、环境性等多种性能指标的 CO_2 矿化材料配比, 该科学问题的突破可为煤矿 CO_2 矿化材料性能调控与配比设计提供关键依据。

封存储库是保障 CO_2 封存的重要结构, 研究储库材料力学性能、矿山压力和储库安全跨距间的约束关系, 建立储库安全跨距的计算模型; 构建井下 CO_2 封存泄漏扩散的数值仿真模型, 研究矿井风量、风速等因素对 CO_2 扩散稀释的影响规律, 结合矿井充填开采工艺工序、矿井安全要求和 CO_2 封存环境, 提出矿井充填开采-封存储库构筑一体化方法是实现 CO_2 安全封存的关键基础。

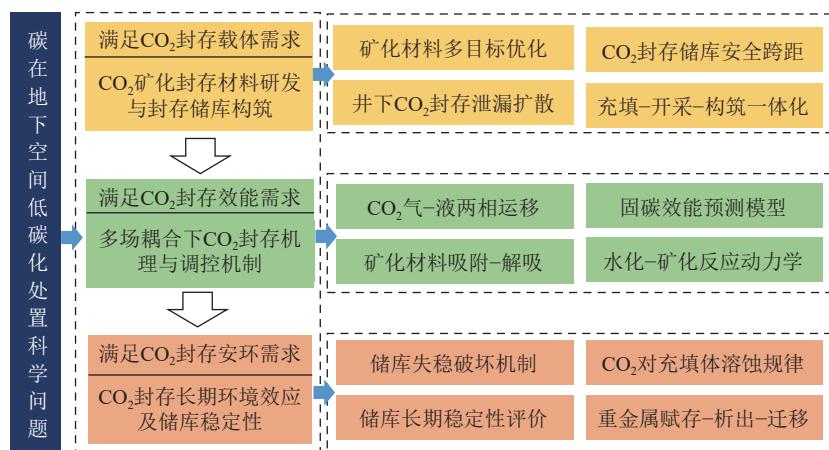


图 16 “碳”的低碳处置科学问题
Fig.16 Scientific issues of low-carbon disposal

(2) 多相-多场耦合下 CO_2 封存机理与调控机制。

为了实现 CO_2 充注流量和 CO_2 驱替效率协同最大化, 促进 CO_2 封存效能的提高, 首先需要研究 CO_2 驱替关键技术, 封存空间原始气体(空气)会占据物理封存空间, 降低 CO_2 浓度, 减小 CO_2 与矿化封存材料的接触面积, 影响 CO_2 封存量、封存速度、矿化度等, 最终降低 CO_2 的综合封存效能。其次需要研究多源-阱协同充注 CO_2 关键技术, 充注流量与稳定性、充注口数量与相对位置、不同阶段多源-阱协同充注的流量协同等均会影响 CO_2 气体在矿化封存材料孔隙和碎胀空间中的流动与扩散特性, 对 CO_2 有效驱替原始气体有显著影响。为保障 CO_2 封存效能, 应深入揭示 CO_2 扩散与运移规律, 明确 CO_2 在矿化材料孔隙中的扩散与迁移, 通过测定矿化材料的细观孔隙结构

特征, 建立渗流-应力-化学-温度多场耦合下 CO_2 气-液两相运移模型, 获知 CO_2 在矿化材料中的时空分布规律与运移机制; 由矿化材料细观孔隙及微观形貌特征, 建立矿化材料吸附-解析 CO_2 模型, 开展系列水化-矿化反应试验, 研究钙 CO_2 溶解-钙/镁离子浸出-碳酸盐生成的传质过程, 分析多相多场耦合下矿化材料水化-矿化反应动力学过程, 探索 CO_2 物理-化学协同封存机理; 引入表征矿化材料固碳性能的量化指标, 建立固碳效能预测半经验模型, 从矿化材料、封存条件、封存工艺等方面提出 CO_2 封存效能优化调控方法, 从而为矿化材料铺设、注入管布置、注入压力等封存参数提供指导。

(3) CO_2 封存长期环境效应及储库稳定性。

封存后的 CO_2 能否长期稳定地赋存于封存材料

及储库中是评价 CO_2 封存性能的重要依据。首先, 开展系列充填体耦合损伤演化特性试验, 研究多相(气-液-固)多场(渗流-应力-化学-温度)耦合作用下充填体流变-损伤-破坏时空演化过程, 建立充填体损伤本构模型和渗流模型; 建立煤矿功能性充填开采筑库物理相似模型与力学模型, 研究 CO_2 封存期周期性内压加-卸载作用下储库(群)结构变形与应力分布规律, 明晰 CO_2 储库(群)的损伤演化机理与失稳破坏机制, 提出储库(群)结构及封存工艺优化方法; 分析 CO_2 封存储库群稳定性、密封性、耐久性和可用性的基本要求, 建立适于矿山 CO_2 储库群长期稳定性的评价指标、评价准则及预测方法。其次, 开展矿井水- CO_2 -充填体-矿化体反应模拟实验, 研究长期封存状态下矿井水- CO_2 -充填体-矿化体间的相互作用, 分析封存期 CO_2 解析对充填体/矿化体溶蚀及 CO_2 运移的影响规律; 研究 CO_2 封存环境下矿化体中重金属元素析出-迁移机理, 分析矿化体-矿井水-充填体中重金属元素赋存形式及时空分布特征; 研究多相-多场耦合作用

下固碳矿化材料的长期环境效应, 提出 CO_2 封存储库长期环境效应评价方法及重金属元素析出-迁移控制方法。

4.3 “碳”的低碳处置关键技术

4.3.1 碎胀空间 CO_2 封存

煤层开采后上覆岩层垮落形成的碎胀空间为 CO_2 物理封存提供了巨大的物理空间^[21]。在综合评价盖层气密性与稳定性的基础上, 为避免封存区 CO_2 逸散至井下作业环境, 需要将封存区与井下作业空间隔绝开来, 基于提出的封存区回字形充填密封的技术路线, 即采用功能性充填的方法在封存区周围构筑回字形高强度、低渗透、充分接顶的功能性充填体。从而由顶部低渗透的盖层、功能性充填体和底板构成密闭的碎胀空间, 为 CO_2 物理封存提供空间基础。将低浓度的 CO_2 注入密闭的碎胀空间, 一部分 CO_2 气体游离在垮落岩石间的间隙中, 另一部分吸附与岩石表面或者岩石孔隙中, 实现 CO_2 物理封存, 具有较大的封存潜力。碎胀空间 CO_2 封存示意如图 17 所示。

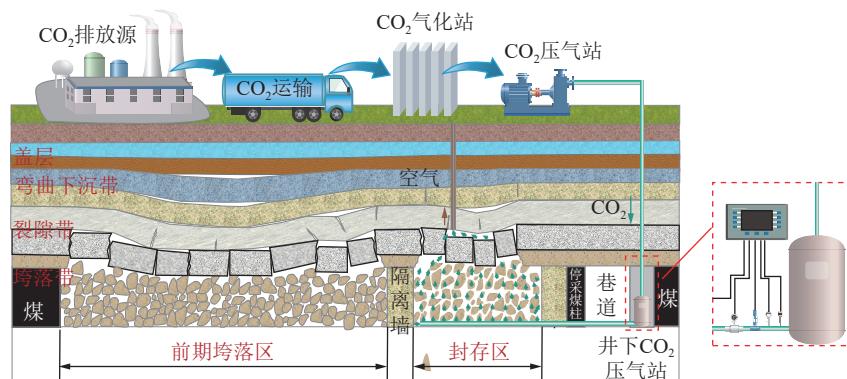


图 17 碎胀空间 CO_2 封存

Fig.17 CO_2 sequestration in fragmented space

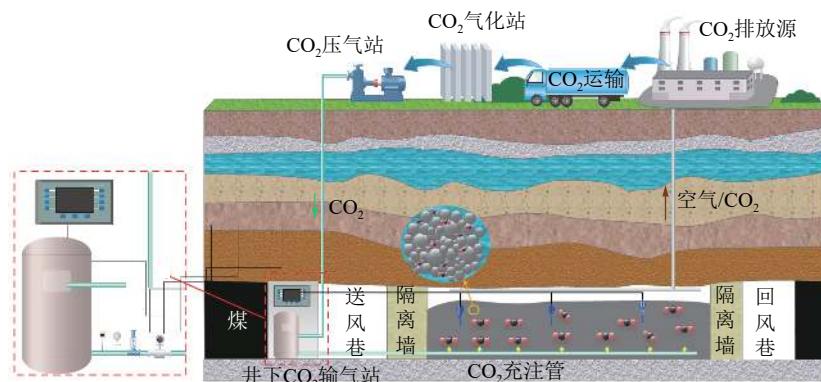
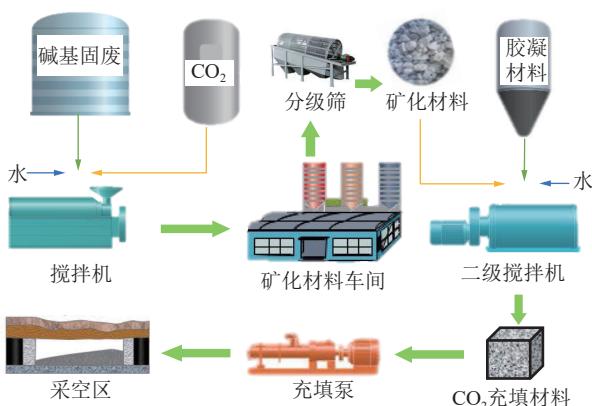
4.3.2 基于功能性充填的 CO_2 封存

基于功能性充填技术在开采的同时不断构筑出气密性好、稳定性高的 CO_2 封存空间^[20], 将 CO_2 矿化封存材料装填至封存空间, 通入低体积分数烟气 CO_2 , 与矿化材料发生矿化反应, 形成稳定的碳酸盐; 另外 CO_2 与隔离墙充填体内部的碱性物质与水化产物等同样发生碳化反应, 生成碳酸钙填充于充填体孔隙内部, 一方面可增强充填体强度; 另一方面可降低充填体的渗透率, 增强气密性^[85], 以上 2 方面实现 CO_2 化学封存。同时部分 CO_2 气体吸附于矿化材料表面或者孔隙中, 从而实现化学封存为主, 物理封存为辅的封存方式。值得一提的是矿化材料起到过滤器的作用, 将低浓度的烟气 CO_2 封存在空间中, 而不需要提纯 CO_2 , 大大降低了 CO_2 捕集与提纯成本。基于功能

性充填的 CO_2 封存示意如图 18 所示。

4.3.3 煤矿 CO_2 固碳充填

煤矿 CO_2 固碳充填的基本思路是利用碱基固废矿化后形成的固体颗粒用于充填骨料, 弥补骨料短缺的问题^[83,86], 并可实现一定的固碳。即将碱性固废与外添加剂、水和 CO_2 充分搅拌, 在外添加剂和水解作用下析出钙/镁离子, 碱基固废中钙/镁离子与 CO_2 发生矿化反应并在充填骨料颗粒表面形成坚硬的碳酸钙^[87]。通过控制矿化反应效能与碳化碱基固废颗粒粒径, 将碱基固废经过在高效矿化反应搅拌装备内矿化后的固体颗粒制备成固碳充填骨料, 与胶凝材料混合搅拌制备成满足充填流动性和力学性能要求的 CO_2 固碳充填料浆, 采用充填泵输送到煤矿采空区, 实现煤矿 CO_2 固碳充填。煤矿 CO_2 固碳充填工艺示意如图 19 所示。

图 18 基于功能性充填的 CO₂ 封存Fig.18 CO₂ sequestration based on functional backfill图 19 煤矿 CO₂ 固碳充填工艺示意Fig.19 Schematic diagram of CO₂ carbon sequestration backfill process in coal mines

5 结 论

(1) 煤炭减损化开采是以“减少煤炭损失、减少地质损伤和减少环境损害”为目标,在充分认识地层结构基础上,协调匹配采煤工艺与减损组合技术,建立采煤减损技术应用下隔水岩组稳定与地表变形可控的地质量化判据,论述了充填减损化开采关键技术体系,包括区段煤柱“掘-充-留”一体化技术、断壁连采连充、架后充填开采等关键技术,和煤矸石注浆充填技术,确保资源回收与生态效益最大化。

(2) 基于多元煤基固废基础理化特性,从矿山充填的角度论述了“废”的功能化利用的科学内涵和科学问题,提出了煤基固废源头改性方法、物理活化和化学激发制备固废基胶凝材料方法,综合制备固废基胶凝材料、胶结煤矸石、气化渣等固废骨料制备全固废充填材料,初步形成“煤基固废改性→全固废胶凝材料研制→全固废充填材料制备”技术路径和工业化生产工艺,为大宗煤基固废的规模化、无害化、功能化利用提供了新思路。

(3) 综合地质条件和煤炭开发工艺,提出了以化学

反应固化和物理吸附的方式封存 CO₂ 与矿井充填开采-封存储库构筑一体化方法。确定了固废基 CO₂ 矿化封存材料制备与储库构筑、多相-多场耦合下 CO₂ 封存机理与调控机制与 CO₂ 封存长期环境效应及储库稳定性等关键问题,提出了碎胀空间 CO₂ 封存、基于功能性充填的 CO₂ 封存以及煤矿 CO₂ 固碳充填等碳在地下空间的低碳处置关键技术,为 CO₂ 封存提供新的模式。

参考文献(References):

- [1] 自然资源部. 全国矿产资源储量统计表[Z]. 2023.
- [2] BP. BP 世界能源统计年鉴 2021[R]. KPMG, 2021.
- [3] 匡立春, 温声明, 李树新, 等. 低煤阶煤层气成藏机制与勘探突破——以吐哈—三塘湖盆地为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 33-42.
KUANG Lichun, WEN Shengming, LI Shuxin, et al. Accumulation mechanism and exploration breakthrough of low-rank CBM in the Tuha-Santanghu Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 33-42.
- [4] 袁亮, 张农, 阎甲广, 等. 我国绿色煤炭资源量概念、模型及预测[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 1-8.
YUAN Liang, ZHANG Nong, YAN Jianguang, et al. The concept, model and reserve forecast of green coal resources in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 1-8.
- [5] ZHANG Jixiong, SUN Qiang, ZHOU Nan, et al. Application of solid backfilling to reduce hard-roof caving and longwall coal face burst potential[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 9(10): 1-10.
- [6] 钱鸣高. 煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 529-534.
QIAN Minggao. On sustainable coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 529-534.
- [7] 奚弦, 桑树勋, 刘世奇. 煤矿区固废矿化固定封存 CO₂ 与减污降碳协同处置利用的研究进展[J/OL]. 煤炭学报: 1-16[2024-01-02]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1075>.
XI Xuan, SANG Shuxun, LIU Shiqi. Progress in research of CO₂ fixation and sequestration by coal mine solid waste mineralization and co-disposal of pollution and carbon reduction[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-16[2024-01-02]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1075>.

- [8] 刘浪,辛杰,张波,等.矿山功能性充填基础理论与应用探索[J].煤炭学报,2018,43(7): 1811–1820.
LIU Lang, XIN Jie, ZHANG Bo, et al. Basic theories and applied exploration of functional backfill in mines[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1811–1820.
- [9] 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.
- [10] 彭苏萍,毕银丽.黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J].煤炭学报,2020,45(4): 1211–1221.
PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River Basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211–1221.
- [11] 王双明,孙强,乔军伟,等.论煤炭绿色开采的地质保障[J].煤炭学报,2020,45(1): 8–15.
WANG Shuangming, SUN Qiang, QIAO Junwei, et al. Geological guarantee of coal green mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 8–15.
- [12] 毕银丽,彭苏萍,杜善周.西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向[J].煤炭学报,2021,46(5): 1355–1364.
BI Yinli, PENG Suping, DU Shanzhou. Technological difficulties and future directions of ecological reconstruction in open pit coal mine of the arid and semi-arid areas of Western China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1355–1364.
- [13] 谢和平,王金华,王国法,等.煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J].煤炭学报,2018,43(5): 1187–1197.
XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187–1197.
- [14] 葛世荣.深部煤炭化学开采技术[J].中国矿业大学学报,2017,46(4): 679–691.
GE Shirong. Chemical mining technology for deep coal resources[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(4): 679–691.
- [15] 范立民,马雄德,冀瑞君.西部生态脆弱矿区保水采煤研究与实践进展[J].煤炭学报,2015,40(8): 1711–1717.
FAN Limin, MA Xiongde, JI Ruijun. Progress in engineering practice of water-preserved coal mining in western eco-environment fragile area[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1711–1717.
- [16] 袁亮.我国煤炭资源高效回收及节能战略研究[J].中国矿业大学学报(社会科学版),2018,20(1): 3–12.
YUAN Liang. Strategies of high efficiency recovery and energy saving for coal resources in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology (Social Sciences), 2018, 20(1): 3–12.
- [17] BP. BP世界能源统计年鉴[R].第70版,2022.
- [18] 武强,涂坤,曾一凡.“双碳”目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考[J].科学通报,2023,68(15): 1884–1898.
- [19] 吴强,杜坤,曾一凡.中国能源战略形势下的碳达峰与碳中和目标[J].中国科学通报,2023,68(15): 1884–1898.
WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan. Research on China's energy strategic situation under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(15): 1884–1898.
- [20] 桑树勋,袁亮,刘世奇,等.碳中和地质技术及其煤炭低碳化应用前瞻[J].煤炭学报,2022,47(4): 1430–1451.
SANG Shuxun, YUAN Liang, LIU Shiqi, et al. Geological technology for carbon neutrality and its application prospect for low carbon coal exploitation and utilization[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1430–1451.
- [21] 刘浪,王双明,朱梦博,等.基于功能性充填的CO₂储库构筑与封存方法探索[J].煤炭学报,2022,47(3): 1072–1086.
LIU Lang, WANG Shuangming, ZHU Mengbo, et al. CO₂ storage-cavern construction and storage method based on functional backfill[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1072–1086.
- [22] 王双明,申艳军,孙强,等.“双碳”目标下煤炭开采扰动空间CO₂地下封存途径与技术难题探索[J].煤炭学报,2022,47(1): 45–60.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SUN Qiang, et al. Under-ground CO₂ storage and technical problems in coal mining area under the “dual carbon” target[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 45–60.
- [23] 谢克昌.面向2035年我国能源发展的思考与建议[J].中国工程科学,2022,24(6): 1–7.
XIE Kechang. China's energy development for 2035: Strategic thinking and suggestions[J]. Chinese Engineering Science, 2022, 24(6): 1–7.
- [24] 王双明,范立民,黄庆享,等.陕北生态脆弱矿区煤炭与地下水组合特征及保水开采[J].金属矿山,2009(S1): 697–702, 707.
WANG Shuangming, FAN Limin, HUANG Qingxiang, et al. Study on coal mining for protecting ecological water level in the ecological fragile mining area[J]. Metal Mine, 2009(S1): 697–702, 707.
- [25] 范立民.陕北地区采煤造成的地下水渗漏及其防治对策分析[J].矿业安全与环保,2007,34(5): 62–64.
FAN Limin. Analysis of groundwater leakage caused by coal mining in northern Shaanxi and its prevention and control measures[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2007, 34(5): 62–64.
- [26] 范立民,向茂西,彭捷,等.西部生态脆弱矿区地下水对高强度采煤的响应[J].煤炭学报,2016,41(11): 2672–2678.
FAN Limin, XIANG Maoxi, PENG Jie, et al. Groundwater response to intensive mining in ecologically fragile area[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2672–2678.
- [27] 冀瑞君,彭苏萍,范立民,等.神府矿区采煤对地下水循环的影响——以窟野河中下游流域为例[J].煤炭学报,2015,40(4): 938–943.
JI Ruijun, PENG Suping, FAN Limin, et al. Effect of coal exploitation on groundwater circulation in the Shenshu mine area: An example from middle and lower reaches of the Kuye River Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 938–943.
- [28] 代革联,薛小渊,牛超,等.煤炭开采对相邻区域生态潜水流场扰动特征[J].煤炭学报,2019,44(3): 701–708.
DAI Gelian, XUE Xiaoyuan, NIU Chao, et al. Disturbance characteristics of coal mining to the eco-phreatic flow field in adjacent regions[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 701–708.

- [28] 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱矿区含(隔)水层特征及保水开采分区研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 7–14.
WANG Shuangming, HUANG Qingxiang, FAN Limin, et al. Study on overburden aquiclude and water protection mining regionazation in the ecological fragile mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 7–14.
- [29] 王力, 卫三平, 王全九. 榆神府煤田开采对地下水和植被的影响[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1408–1414.
WANG Li, WEI Sanping, WANG Quanjiu. Effect of coal exploitation on ground water and vegetation in the Yushenfu Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1408–1414.
- [30] 马雄德, 范立民, 严戈, 等. 植被对矿区地下水位变化响应研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 44–49.
MA Xiongde, FAN Limin, YAN Ge, et al. Vegetation responses to groundwater level change in mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 44–49.
- [31] 邹友峰, 邓喀中, 马伟民. 矿山开采沉陷工程[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003, 14: 295–299.
- [32] 范立民, 向茂西, 彭捷, 等. 毛乌素沙漠与黄土高原接壤区泉的演化分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 207–218.
FAN Limin, XIANG Maoxi, PENG Jie, et al. Evolution analysis on springs in contiguous area of Maowusu Desert and Loess Plateau[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 207–218.
- [33] 韩宝平, 郑世书, 谢克俊, 等. 煤矿开采诱发的水文地质效应研究[J]. 中国矿业大学学报, 1994(3): 70–77.
HAN Baoping, ZHENG Shishu, XIE Kejun, et al. An Approach to the hydrogeologic effect induced by underground coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1994(3): 70–77.
- [34] 赵苏启, 武强, 尹尚先. 广东大兴煤矿特大突水事故机理分析[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 618–622.
ZHAO Suqi, WU Qiang, YIN Shangxian. Mechanism analysis of water in rush in Daxing coalmine[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 618–622.
- [35] 胡小娟, 李文平, 曹丁涛, 等. 综采导水裂隙带多因素影响指标研究与高度预计[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 613–620.
HU Xiaojuan, LI Wenping, CAO Dingtao, et al. Index of multiple factors and expected height of fully mechanized water flowing fractured zone[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 613–620.
- [36] 郭文兵, 娄高中. 覆岩破坏充分采动程度定义及判别方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 755–766.
GUO Wenbing, LOU Gaozhong. Definition and distinguishing method of critical mining degree of overburden failure[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 755–766.
- [37] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996(3): 2–7.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 1996(3): 2–7.
- [38] 许家林, 王晓振, 刘文涛, 等. 覆岩主关键层位置对导水裂隙带高度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 380–385.
XU Jialin, WANG Xiaozhen, LIU Wentao, et al. Effects of primary key stratum location on height of water flowing fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 380–385.
- [39] 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱区煤炭开发与生态水位保护[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [40] 黄庆享. 浅埋煤层保水开采岩层控制研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 50–55.
HUANG Qingxiang. Research on roof control of water conservation mining in shallow seam[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 50–55.
- [41] 许家林, 连国明, 朱卫兵, 等. 深部开采覆岩关键层对地表沉陷的影响[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 686–690.
XU Jialin, LIAN Guoming, ZHU Weibing, et al. Influence of the key strata in deep mining to mining subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 686–690.
- [42] 侯恩科, 冯栋, 谢晓深, 等. 浅埋煤层沟道采动裂缝发育特征及治理方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(4): 1297–1308.
HOU Enke, FENG Dong, XIE Xiaoshen, et al. Development characteristics and treatment methods of mining surface cracks in shallow-buried coal seam gully[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(4): 1297–1308.
- [43] 侯恩科, 谢晓深, 冯栋, 等. 浅埋煤层开采地面塌陷裂缝规律及防治方法[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 30–40.
HOU Enke, XIE Xiaoshen, FENG Dong, et al. Laws and prevention methods of ground cracks in shallow coal seam mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(12): 30–40.
- [44] 王双明, 杜华栋, 王生全. 神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 17–26.
WANG Shuangming, DU Huadong, WANG Shengquan. Analysis of damage process and mechanism for plant community and soil properties at northern Shennmu subsidence mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 17–26.
- [45] 张延旭, 毕银丽, 陈书琳, 等. 半干旱风沙区采煤后裂缝发育对土壤水分的影响[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(3): 11–14.
ZHANG Yanxu, BI Yinli, CHEN Shulin, et al. Effects of Subsidence fracture caused by coal-mining on soil moisture content in semi-arid windy desert area[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(3): 11–14.
- [46] 王强民, 董书宁, 王皓, 等. 西部风沙区采煤塌陷地裂缝影响下的土壤水分运移规律及调控方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1532–1540.
WANG Qiangmin, DONG Shuning, WANG Hao, et al. Influence of mining subsidence on soil water movement law and its regulation in blown-sand area of Western China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1532–1540.
- [47] 谢元贵, 车家壤, 孙文博, 等. 煤矿矿区不同采煤塌陷年限土壤物理性质对比研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 26–29.
XIE Yuangui, CHE Jiaxiang, SUN Wenbo, et al. Comparison study of mining subsidence years on soil physical properties of in mining area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(4): 26–29.
- [48] 孟庆俊. 采煤塌陷地氮磷流失规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学,

- 2010.
- MENG Qingjun. Study on the losses of nitrogen and phosphorus on coal mining subsidence land[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010.
- [49] 张雅馥, 王金满, 祝宇成. 黄土区采煤塌陷对土壤全氮和有机质含量空间变异性的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1676–1684.
- ZHANG Yafu, WANG Jinman, ZHU Yucheng. Effects of land subsidence caused by coal mining on the spatial variation of soil total nitrogen and organic matter concentrations in loess area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(6): 1676–1684.
- [50] 余健, 房莉, 方凤满, 等. 徐州高潜水位区采煤塌陷地及其复垦土壤碳变化[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2881–2892.
- YU Jian, FANG Li, FANG Fengman, et al. Change of carbon of reclamation soil in coal mining subsidence areas with high groundwater in Xuzhou[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2881–2892.
- [51] 叶瑶, 全占军, 肖能文, 等. 采煤塌陷对地表植物群落特征的影响[J]. 环境科学研究, 2015, 28(5): 736–744.
- YE Yao, QUAN Zhanjun, XIAO Nengwen, et al. Effects of land subsidence by mining on the plant community[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(5): 736–744.
- [52] 宋英明, 刘东升, 刘浪, 等. 建筑物下四阶段条带膏体充填开采技术与应用[J]. 煤炭工程, 2022, 54(8): 17–20.
- SONG Yingming, LIU Dongsheng, LIU Lang, et al. Four-stage strip mining technology with paste backfill under buildings[J]. Coal Engineering, 2022, 54(8): 17–20.
- [53] 朱梦博, 刘浪, 王双明, 等. 短-长壁工作面充填无煤柱开采方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(6): 1116–1124.
- ZHU Mengbo, LIU Lang, WANG Shuangming, et al. Short-and long-walls backfilling pillarless coal mining method[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(6): 1116–1124.
- [54] 刘浪, 罗屹骁, 朱梦博, 等. 建筑物下特厚煤层镁渣基全固废连采连充开采技术及实践[J/OL]. 煤炭科学技术: 1–11[2024–01–02]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2023-0188>.
- LIU Lang, LUO Yixiao, ZHU Mengbo, et al. Mining technology and practice of full-solid waste cemented backfilling in narrow strip of extra-thick coal seam under buildings[J/OL]. Coal Science and Technology: 1–11[2024–01–02]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2023-0188>.
- [55] 徐斌, 杨仁树, 李永亮, 等. 煤矿胶结充填开采覆岩移动三量关系及其控制原则[J]. 煤炭学报, 2022, 47(S1): 49–60.
- XU Bin, YANG Renshu, LI Yongliang, et al. Three quantity relation and control principle of overburden movement in cemented filling[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 49–60.
- [56] 张吉雄, 周楠, 高峰, 等. 煤矿开采嗣后空间研石注浆充填方法[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.
- [57] 轩大洋, 许家林, 王秉龙. 覆岩隔离注浆充填绿色开采技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4265–4277.
- XUAN Dayang, XU Jialin, WANG Binglong. Green mining technol-
- ogy of overburden isolated grout injection[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4265–4277.
- [58] 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 solidwaste for green backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4201–4216.
- [59] 谢伟, 连全东. 综放开采研石注浆充填技术的研究与应用[J]. 中国煤炭, 2023, 49(12): 116–124.
- XIE Wei, LIAN Quandong. Research and application of gangue grouting and filling technology in fully mechanized caving mining[J]. China Coal, 2023, 49(12): 116–124.
- [60] RADLINSKI M, OLEK J. Investigation into the synergistic effects in ternary cementitious systems containing portland cement, fly ash and silica fume[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(4): 451–459.
- [61] YANG Pan, LIU Lang, SUO Yulong, et al. Investigating the synergistic effects of magnesia-coal slag based solid waste cementitious materials and its basic characteristics as a backfill material[J]. *Science of The Total Environment*, 2023: 163209.
- [62] 吴疆宇, 冯梅梅, 郁邦永, 等. 连续级配废石胶结充填体强度及变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 101–108.
- WU Jiangyu, FENG Meimei, YU Bangyong, et al. Experimental study of strength and deformation characteristics of cemented waste rock backfills with continuous gradation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(1): 101–108.
- [63] 杨纪光. 某金矿合理级配尾砂膏体充填体强度研究与试验[J]. 有色金属 (矿山部分), 2019, 71(6): 82–88.
- YANG Jiguang. Reasonable gradation's tailings paste filling body strength in a gold mine[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2019, 71(6): 82–88.
- [64] 杨啸, 杨志强, 高谦, 等. 混合充填骨料胶结充填强度试验与最优配比决策研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 635–641.
- YANG Xiao, YANG Zhiqiang, GAO Qian, et al. Cemented filling strength test and optimal proportion decision of mixed filling aggregate[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S2): 635–641.
- [65] 吴凡, 杨志强, 高谦, 等. 高浓度混合骨料充填料浆管道输送特性试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(2): 369–375.
- WU Fan, YANG Zhipeng, GAO Qian, et al. Experimental study on pipeline transport characteristics of high-concentration mixed aggregate filling slurry[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2022, 57(2): 369–375.
- [66] LIU Lang, RUAN Shishan, QI Chongchong, et al. Co-disposal of magnesium slag and high-calcium fly ash as cementitious materials in backfill[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020: 123684.
- [67] ZHOU Keqing, GONG Kaili, ZHOU Qiangqian, et al. Estimating the feasibility of using industrial solid wastes as raw material for polyurethane composites with low fire hazards[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120606.
- [68] 刘浪, 阮仕山, 方治余, 等. 镁渣的改性及其在矿山充填领域的应用探索[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3833–3845.
- LIU Lang, RUAN Shishan, FANG Zhiyu, et al. Modification of

- magnesium slag and its application in the field of mine filling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(12): 3833–3845.
- [69] LYU Haoyan, CHEN Yanlong, PU Hai, et al. Dynamic properties and fragmentation mechanism of cemented tailings backfill with various particle size distributions of aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2023; 366.
- [70] YANG Pan, LIU Lang, SUO Yonglu, et al. Investigating the synergistic effects of magnesia-coal slag based solid waste cementitious materials and its basic characteristics as a backfill material[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 880: 163209.
- [71] LV Yin, LIU Lang, YANG Pan, et al. Study on leaching and curing mechanism of heavy metals in magnesium coal based backfill materials[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 177: 1393–1402.
- [72] LI Xiangguo, LV Yang, MA Boguo, et al. Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash in blended cement[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 32: 96–100.
- [73] LI Junfeng, CHEN Lei, WANG Jianlong. Solidification of radioactive wastes by cement-based materials[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2021: 141.
- [74] LI Bo, ZHANG Shizhe, LI Qiu, et al. Uptake of heavy metal ions in layered double hydroxides and applications in cementitious materials: Experimental evidence and first-principle study[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 222: 96–107.
- [75] 刘音, 刘洋, 周煜明, 等. 机械研磨时间对粗粉煤灰基充填胶凝材料性能的影响[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 221–225.
- LIU Yin, LIU Yang, ZHOU Yuming, et al. Mechanical grinding time affected to performances of reject fly ash-based backfill binding material[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(6): 221–225.
- [76] YAO Geng, LIU Qing, WANG Junxiang, et al. Effect of mechanical grinding on pozzolanic activity and hydration properties of siliceous gold ore tailings[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 217: 12–21.
- [77] 柯国军, 杨晓峰, 彭红, 等. 化学激发粉煤灰活性机理研究进展[J]. 煤炭学报, 2005, 30(3): 366–370.
- KE Guojun, YANG Xiaofeng, PENG Hong, et al. Progress of research on chemical activating mechanisms of fly ash[J]. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(3): 366–370.
- [78] 李辉, 诸葛丽君, 史诗, 等. NaOH 激发粉煤灰基胶凝材料的水化产物[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(2): 234–239.
- LI Hui, ZHUGE Lijun, SHI Shi, et al. Hydration products of fly ash based cementing material activated by NaOH[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2012, 40(2): 234–239.
- [79] DE VARGAS A S, DAL MOLIN D C C, MASUERO Â B, et al. Strength development of alkali-activated fly ash produced with combined NaOH and Ca(OH)₂ activators[J]. *Cem Concr Compos*, 2014, 53: 341–349.
- [80] YANG Pan, SUO Yonglu, LIU Lang, et al. Study on the curing mechanism of cemented backfill materials prepared from sodium sulfate modified coal gasification slag[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 62: 105318.
- [81] DAI Gaofeng, ZHENG Shijie, WANG Xuebin, et al. Combustibility analysis of high-carbon fine slags from an entrained flow gasifier[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 271: 111009.
- [82] 孙红娟, 曾丽, 彭同江. 粉煤灰高值化利用研究现状与进展[J]. 材料导报, 2021, 35: 3010–3015.
- SUN Hongjuan, ZENG Li, PENG Tongjiang. Research status and progress of high-value utilization of coal fly ash[J]. *Materials Reports*, 2021, 35: 3010–3015.
- [83] 张国胜, 杨晓炳, 郭斌, 等. 全尾砂充填采矿低成本充填胶凝材料研究与发展方向[J]. 金属矿山, 2020(7): 1–9.
- ZHANG Guosheng, YANG Xiaobing, GUO Bin, et al. Study and development direction of a new low cost filling cementitious material for mining with unclassified tailings filling method[J]. *Metal Mine*, 2020(7): 1–9.
- [84] ZHU Mengbo, XIE Geng, LIU Lang, et al. Strengthening mechanism of granulated blast-furnace slag on the uniaxial compressive strength of modified magnesium slag-based cemented backfilling material[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 174: 722–733.
- [85] FANG Zhiyu, LIU Lang, ZHANG Xiaoyan, et al. Carbonation curing of modified magnesium-coal based solid waste backfill material for CO₂ sequestration[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 180: 778–788.
- [86] 朱磊, 古文哲, 宋天奇, 等. 煤基固废矿化封存CO₂技术研究进展[J/OL]. 煤炭科学技术: 1–21[2024–01–02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231110.1748.002.html>.
- ZHU Lei, GU Wenzhe, SONG Tianqi, et al. Research progress of CO₂ storage technology by mineralization of coal-based solid waste[J/OL]. *Coal Science and Technology*: 1–21[2024–01–02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231110.1748.002.html>.
- [87] 刘浪, 方治余, 王双明, 等. 煤矿充填固碳理论基础与技术构想[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 292–308.
- LIU Lang, FANG Zhiyu, WANG Shuangming, et al. Theoretical basis and technical of carbon dioxide backfill in coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(2): 292–308.