

### 煤矸石在绿色矿山建设中的规模化利用技术研究进展

史全林 龙力华 杨前 王少辉 谢大伟

引用本文:

史全林, 龙力华, 杨前, 等. 煤矸石在绿色矿山建设中的规模化利用技术研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 113–125.

SHI Quanlin, LONG Lihua, YANG Qian, et al. Advances in research on technologies for large-scale coal gangue utilization for green mine construction[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(3): 113–125.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.09.0590>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 煤矸石固废无害化处置与资源化综合利用现状与展望

Status and prospect of harmless disposal and resource comprehensive utilization of solid waste of coal gangue  
煤田地质与勘探. 2022, 50(10): 54–66 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.11.0614>

##### 煤系固废基绿色充填材料制备及其性能研究

Preparation of coal-series solid-waste-based green filling materials and their performance  
煤田地质与勘探. 2022, 50(12): 75–84 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.05.0384>

##### 煤基固废与高盐废水“固液协同”充填处置关键技术

A key technology for synergistic backfilling of coal-based solid waste and high-salinity wastewater  
煤田地质与勘探. 2025, 53(1): 163–173 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.25.01.0032>

##### 煤系固废协同固化盐渍土的力学特征与机理研究

Mechanical properties and mechanism of co-curing saline soil with coal solid waste  
煤田地质与勘探. 2023, 51(3): 85–94 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.05.0382>

##### 格宾网加筋煤矸石界面剪切特性及路堤边坡稳定性研究

Interfacial shear behavior of gabion reinforced coal gangue and stability of embankment slope  
煤田地质与勘探. 2021, 49(6): 186–192, 199 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.022>

##### 煤矿区碳排放的确认和低碳绿色发展途径研究

Confirmation of carbon emissions in coal mining areas and research on low-carbon green development path  
煤田地质与勘探. 2021, 49(5): 63–69 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.007>



史全林, 龙力华, 杨前, 等. 煤矸石在绿色矿山建设中的规模化利用技术研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 113-125. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.09.0590

SHI Quanlin, LONG Lihua, YANG Qian, et al. Advances in research on technologies for large-scale coal gangue utilization for green mine construction[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(3): 113-125. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.09.0590

移动阅读

# 煤矸石在绿色矿山建设中的规模化利用技术研究进展

史全林<sup>1,2</sup>, 龙力华<sup>1,2</sup>, 杨 前<sup>3</sup>, 王少辉<sup>3</sup>, 谢大伟<sup>4</sup>

(1. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏徐州 221116; 2. 中国矿业大学 煤矿灾害防控全国重点实验室, 江苏徐州 221116; 3. 平顶山天安煤业股份有限公司朝川矿, 河南汝州 467522;  
4. 平顶山天安煤业股份有限公司六矿, 河南平顶山 467091)

**摘要:** 【背景】我国煤矸石固废产量大、堆存量持续增加, 长期堆放会造成土地资源的浪费且污染矿区环境。利用煤矸石制备高附加值化工产品、提取有用元素等固废处理方式, 存在消纳能力不足等问题, 难以满足大宗固废规模化处置利用和绿色矿山建设要求。【进展】煤矸石在矿区复垦、井下充填等领域综合利用, 是实现其规模化处置利用的重要发展方向。系统总结了煤矸石的物理化学特性及其资源属性, 并分析了煤矸石长期堆放对矿区大气、土壤、水体等影响; 以绿色矿山建设为出发点, 重点介绍了煤矸石作为塌陷区复垦、地聚物注浆、固体充填、膏体充填及似膏体充填等材料的固废规模化处置与利用技术的原理、发展及应用效果。发现煤矸石复垦材料能够改善土壤性质、促进植物生长, 但存在短期内重金属迁移污染环境等问题; 煤矸石作为地聚物注浆材料实现了煤矸石重金属物质的有效固化, 降低了重金属元素释放对环境的危害; 煤矸石固体充填技术具有煤矸石处理工艺简便、辅助材料使用少的优势, 但面临充填效果不均匀、污染地下水等挑战; 归纳了煤矸石膏体充填材料、似膏体充填材料的原料配方及流动性优势, 分析了材料的微观水化机理与流动特性, 为矿井充填开采提供了关键技术支撑。最后提出目前煤矸石存在活性难以充分激发并利用、应用缺乏前期分类预处理、井下充填注浆利用成本高以及规模化利用缺乏激励性政策支持等问题。

**【展望】**为进一步推动煤矸石在矿区的安全高效、风险可控及规模化利用, 未来将重点围绕煤矸石低成本复合活化方法、煤矸石固废利用过程环境友好性评估、煤矸石矿化封存 CO<sub>2</sub> 与负碳利用等开展研究, 为煤矸石“绿色-高效-高值”综合利用路径发展提供思路, 提高煤矸石的规模化利用和风险防范能力, 促进固废利用与绿色矿山建设的协同发展。

**关 键 词:** 绿色矿山; 煤矸石; 固废利用; 复垦; 充填; 活化; 负碳

**中图分类号:** TD167; X75    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1001-1986(2025)03-0113-13

## Advances in research on technologies for large-scale coal gangue utilization for green mine construction

SHI Quanlin<sup>1,2</sup>, LONG Lihua<sup>1,2</sup>, YANG Qian<sup>3</sup>, WANG Shaohui<sup>3</sup>, XIE Dawei<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;  
2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;  
3. Chaochuan Mine of Pingdingshan Tian'an Coal Mining Co., Ltd., Ruzhou 467522, China; 4. Sixth Mine of Pingdingshan Tian'an Coal Mining Co., Ltd., Pingdingshan 467091, China)

**Abstract:** [Background] The coal gangue, a solid waste, features high production and a continuous increase in the amount piled in China. The long-term piling up of coal gangue will cause the waste of land resources and environmental pollution in mining areas. Various methods for utilizing coal gangue, such as preparing high-value-added chemical

收稿日期: 2024-09-17; 接收日期: 2025-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52004278); 江苏省科协青年科技人才托举工程项目(JSTJ-2023-XH002)

第一作者: 史全林, 1992 年生, 男, 山西运城人, 博士, 副教授, 硕士生导师。E-mail: [sq2020@cumt.edu.cn](mailto:sq2020@cumt.edu.cn)

© Editorial Office of *Coal Geology & Exploration*. OA under CC BY-NC-ND

products and extracting useful elements, suffer a limited consumption capacity, failing to meet the requirements of large-scale disposal and utilization of solid wastes and green mine construction. **[Advances]** The comprehensive utilization of coal gangue for mining area reclamation and underground backfilling represents a critical direction for its large-scale disposal and utilization. This study systematically summarizes the physicochemical properties and resource attributes of coal gangue and analyzes the impacts of its long-term piling up on the atmosphere, soils, and water in mining areas. From the perspective of green mine construction, this study highlights the principles, advances, and application effects of technologies for large-scale disposal and utilization of coal gangue. These technologies include the utilization of coal gangue as materials for the reclamation of collapse areas, geopolymer grouting materials, solid filling materials, paste filling materials, and paste-like filling materials. The results reveal that when used as materials for reclamation, coal gangue can improve soil properties and promote plant growth, yet it poses challenges of short-term heavy metal migration and environmental contamination. When used as geopolymer grouting materials, coal gangue can effectively immobilize heavy metals within it, suppressing their release and reducing their damage to the environment. The solid backfilling technology tailored to coal gangue enjoys advantages including simple coal gangue processing technique and minimal consumption of auxiliary materials. However, this technology faces challenges like uneven filling and groundwater contamination. Furthermore, this study summarizes the composition and flowability advantages of coal gangue when used as paste and paste-like filling materials and analyzes its microscopic hydration mechanisms and flow properties, providing key technical support for backfill mining of mines. Finally, this study points out some issues concerning the utilization of coal gangue, including challenges in the full stimulation and utilization of the activity of coal gangue, the absence of classification and pretreatment in the early stage, high cost of utilization as underground backfilling and grouting materials, and a lack of incentive policies for large-scale utilization. **[Prospects]** To promote the large-scale utilization of coal gangue in mining areas in a safe, efficient, and risk-controllable manner, future research will focus on the cost-effective composite activation methods, environmental friendliness assessment of utilization processes,  $\text{CO}_2$  mineralization and sequestration, and carbon-negative utilization of coal gangue. These efforts will provide insights for the comprehensive utilization of coal gangue following the "green-efficient-high value" roadmap, expand the large-scale utilization of coal gangue, and enhance the risk prevention abilities in this regard, thus promoting the synergetic development of solid waste utilization and green mine construction.

**Keywords:** green mine; coal gangue; solid waste utilization; reclamation; filling; activation; carbon-negative

煤炭是我国重要的基础能源和工业原料,是推动国民经济发展的重要动力<sup>[1-2]</sup>。煤矿开采过程中会产生大量煤矸石,占煤炭产量的 15%~20%<sup>[3]</sup>。根据工业固废网的数据,我国每年排放煤矸石 6.14~8.48 亿 t,但综合利用率不足 80%(图 1)。据不完全统计,目前约有

45 亿 t 煤矸石被堆放于露天环境中,堆积形成的矸石山数量超过 2 600 座,占压土地面积超过 120  $\text{km}^2$ <sup>[4-5]</sup>。大量露天堆存的煤矸石不仅占用大量耕地,极易发生崩塌、自燃和滑坡等灾害,还会污染生态环境<sup>[6-7]</sup>。



图 1 2013—2023 年我国煤矸石综合利用情况  
Fig.1 Comprehensive utilization of coal gangue from 2013 to 2023

近年来,国家大力推动绿色矿山建设,要求矿井通过科学规划、环境保护和资源节约等方式,最大限度地减少采矿活动对环境的影响。2017 年,国土资源部等六部门联合印发了《关于加快建设绿色矿山的实施意

见》,明确了煤炭行业绿色矿山建设的要求,提出要“鼓励矸石不出井,逐步消灭已有的矸石山,减少土地占用,降低环境污染”,并强调“对煤矸石等固体废物要分类处理,实现合理利用,做到物尽其用、吃干榨尽”。为提

高煤矸石的综合利用率,加强对煤矸石综合利用的管理,我国陆续出台了一系列政策与规定,如《煤矸石综合利用管理办法(2014修订版)》、GB/T 29163—2012《煤矸石利用技术导则》和《中华人民共和国土地复垦条例》等。这些政策明确提出了煤矸石规模化利用途径、模式和综合利用率等相关要求,对于实现煤矸石资源化和无害化利用、促进绿色矿山建设具有重要意义。在煤矸石实际处置与利用过程中,需要考虑其成分复杂、堆存量巨大、存放时间及自燃程度各异等客观事实,应充分遵循“技术可行性、实施经济性以及产品实用性”的原则。

目前,煤矸石利用方向包括发电、制备建材、高附加值化工产品、提取有用矿物元素以及矿山充填应用等<sup>[8]</sup>。由于煤矸石固废的产量巨大,仅靠煤矸石产品化等方式不足以改变其堆存量持续增加的趋势。作为煤炭开采过程中的副产品,将煤矸石大宗固废用于井下充填、矿山环境修复等领域,如煤矸石作为矿区塌陷区回

填复垦原料,利用煤矸石制备地聚物注浆材料,将煤矸石破碎后用于采空区充填等,是实现大规模处置与高效利用的重要途径。基于此,本团队系统梳理煤矸石的典型特征,总结煤矸石在绿色矿山建设过程中的综合利用现状,分析目前利用过程存在问题,展望煤矸石在矿区规模化处置利用的发展方向,为推动我国煤矸石固废的综合利用提供思路。

## 1 煤矸石的典型特征

### 1.1 物理性质

由于不同地区煤矸石的成分复杂,物理化学特性各异,国内外目前尚无一个完整和统一的分类方法。当前,我国提出了三级分类命名法,根据煤矸石的来源、组分、特征等不同进行分类,并制定了GB/T 29162—2012《煤矸石分类》标准,为煤矸石分类提供依据,具体分类方法见表1。

表1 煤矸石分类方法  
Table 1 Classification methods of coal gangue

分类方法	分类指标	煤矸石分类			
三级分类命名法	矸类(产出名称)	洗矸、煤巷矸、岩巷矸、手选矸、剥离矸			
	矸族(实用名称)	铝型、黏型、硅型、高热、中热、高硫			
	矸岩(岩石名称)	黏土岩、砂岩、钙质岩、铝质岩等			
GB/T 29162—2012 《煤矸石分类》	全硫质量分数S <sub>t,d</sub> /%	低硫(≤1.0)	中硫(>1.0~3.0)	中高硫(>3.0~6.0)	高硫(>6.0)
	灰分产率A <sub>d</sub> /%	低灰(≤70.0)	中灰(>70.0~85.0)	高灰(>85.0)	
	灰成分钙镁质量分数w(CaO+MgO)/%	钙镁型(>10)		铝硅型(≤10)	
	铝硅质量比m(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/m(SiO <sub>2</sub> )	低级(≤0.30)	中级(>0.30~0.50)	高级(>0.50)	

煤矸石的颜色随着煤矸石在煤层中分布位置与碳含量的变化而不同,煤矸石多为灰色、黑色或灰褐色,越接近煤层的煤矸石,由于含碳量高,其颜色越黑;自燃或热活化后因有机质挥发呈灰白色、白色或黄白色,取决于铁氧化物含量,风化后呈浅灰色。由于煤矸石结构松散且其中含有可燃的炭物质,自燃或球磨后形成较多孔隙。煤矸石的硬度100~150 HV(维氏硬度),抗压强度取决于风化程度,范围从300到4 700 Pa,风化程度越高,煤矸石力学性质越差。煤矸石的密度介于2 100~2 900 kg/m<sup>3</sup>,堆积密度为1 200~1 800 kg/m<sup>3</sup>,自燃煤矸石堆积密度为900~1 300 kg/m<sup>3</sup>。煤矸石的吸水率通常为2.0%~6.0%,自燃煤矸石吸水率为3.0%~11.6%<sup>[9-10]</sup>。煤矸石的吸水率对煤矸石的综合利用影响很大,当吸水率较高时,煤矸石混凝土抗冻性较差,制备相同工作性能煤矸石混凝土的需水量将增加。

### 1.2 化学和矿物组成

表2为典型煤矸石化学成分的质量分数范围<sup>[10-11]</sup>。

煤矸石由无机矿物质、少量有机物(碳、氢、氧、氮、硫等)以及微量稀有元素(如钒、铀、钛、铍等)组成。

表2 煤矸石的化学成分  
Table 2 Chemical composition of coal gangue

化学成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	烧失量
质量分数/%	40~65	15~50	1~7	1~4	2~9	1.0~2.5	<1	2~17

根据煤矸石的主要矿物特征,可以分为黏土岩、砂岩和铝质岩<sup>[12]</sup>。黏土岩类主要由黏土矿物(高岭石、伊利石、蒙脱石、绿泥石)组成,煤矸石的黏土矿物经过煅烧,可以与石灰组合成活性混合材料,活性大小取决于黏土矿物的含量;砂岩类由碎屑矿物(石英、白云母、长石)和胶结物组成;铝质岩类含有高铝矿物(一水软铝石、三水铝石、一水硬铝石),黏土矿物含量次之,此外还含有石英、白云石、方解石、玉髓、褐铁矿等矿物<sup>[13]</sup>。

煤矸石含有的无机矿物质由数十种元素构成,主要以氧化物的形式存在,一般以SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为主,同时

还含有  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_3$ <sup>[14]</sup>。此外, 煤矸石通常还含有一定量的可燃物, 因此具有资源化利用的潜力。煤矸石的长期堆放等不当处理不仅导致了可回收资源的浪费, 也不符合国家政策要求, 不利于绿色矿山的高效建设。因此, 迫切需要加强对煤矸石资源化利用技术的研究与推广, 提升其经济价值, 降低对环境的不良影响, 实现煤矸石固废的资源化利用。

## 2 煤矸石长期堆存对绿色矿山建设的影响

绿色矿山的核心理念是以可持续发展为导向, 致力于实现资源的高效利用和经济效益的最大化, 同时高度重视环境保护, 严格控制污染排放、减少能源消耗, 并降低碳足迹<sup>[15-16]</sup>。然而, 煤矸石的长期堆存极易造成土壤、大气、水体环境污染等问题, 给绿色矿山建设带来诸多挑战。

### 2.1 污染矿区大气环境

堆放的煤矸石在风的作用下极易形成粉尘, 影响空气质量, 对周边矿区居民的呼吸道健康造成严重影响, 长期暴露可能导致哮喘和慢性支气管炎等呼吸系统疾病<sup>[17]</sup>。此外, 煤矸石长期堆存还会发生氧化自燃, 释放大量有毒有害气体, 如一氧化碳( $\text{CO}$ )、二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、二氧化硫( $\text{SO}_2$ )和氮氧化物( $\text{NO}_x$ )等<sup>[18-19]</sup>, 如图 2 所示。煤矸石自燃释放的二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )等有害气体扩散到空中, 与水蒸气反应生成硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )、硝酸( $\text{HNO}_3$ )等酸性物质, 最终可能形成酸雨<sup>[20]</sup>。

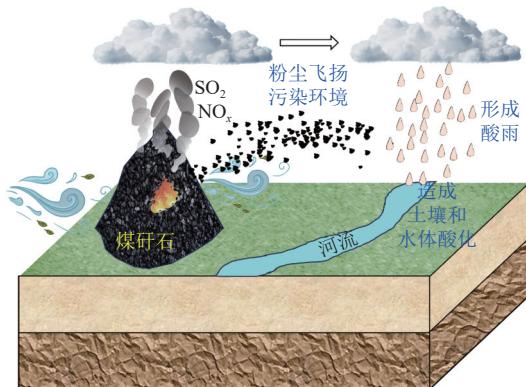


图 2 煤矸石堆放污染矿区大气环境

Fig.2 Contamination of coal gangue piles to atmospheric environment in mining areas

### 2.2 污染矿区土壤环境

煤矸石的长期堆积会侵占大量耕地、林地、居民用地等, 而且煤矸石含有的铅、镉、汞、砷等重金属元素以及部分有毒有机化合物, 通过渗透或风化进入土壤造成土壤污染, 如图 3 所示; 煤矸石释放的重金属元素, 具有较高迁移性, 以皮肤接触和呼吸接触的方式危害人体健康<sup>[21]</sup>。此外, 煤矸石堆积形成的酸雨会导致土壤酸

化, 影响植物根系对养分的吸收, 还会对土壤微生物群落的结构和功能产生负面影响, 长期积累会导致土壤生态系统失衡<sup>[22]</sup>。

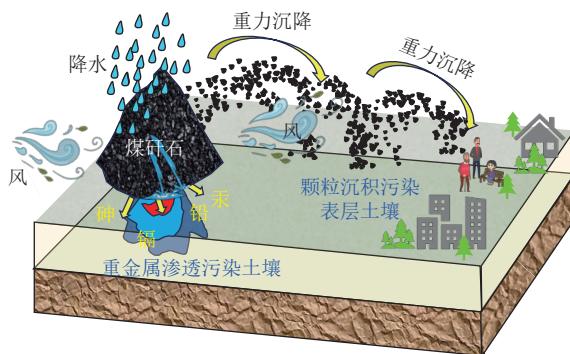


图 3 煤矸石堆放释放重金属元素污染土壤

Fig.3 Contamination to soils due to heavy metal release from coal gangue piles in mining areas

### 2.3 污染矿区水体环境

煤矸石堆在降雨、地表径流的冲刷作用下, 其中含有的铅、砷、汞、镉等大量有毒有害重金属元素, 会随水流进入河流和地下水。如图 4 所示, 煤矸石释放的重金属元素会严重威胁水体环境, 尤其深层地下水污染往往难以恢复, 对植物、动物以及人类造成持续威胁<sup>[23-24]</sup>。此外, 煤矸石在降水影响下会渗出含有大量酸性盐类水解产物的水流, 通过地表水流入河流、湖泊等水体, 显著降低水体 pH, 导致水体酸化, 对水生生物的生存和繁衍产生极大危害, 最终破坏水生生态系统。

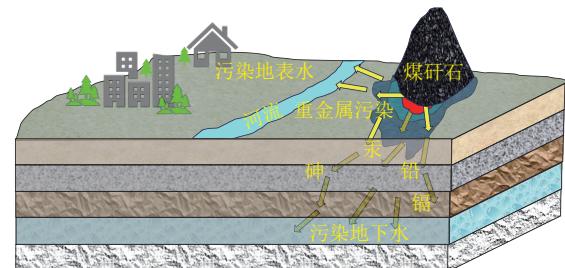


图 4 煤矸石堆放污染水体环境

Fig.4 Contamination of coal gangue piles to water environment in mining areas

## 3 煤矸石在绿色矿山建设中的应用

采取科学的煤矸石资源化利用与环境治理措施, 是加快绿色矿山建设的重要途径。目前, 煤矸石在矿区的资源化再利用途径主要包括塌陷区复垦、地聚物注浆、固体充填、膏体充填以及似膏体充填等。

### 3.1 塌陷区复垦材料

煤矸石作为一种重要的资源, 广泛应用于土壤改良和废弃矿区的生态修复<sup>[25-29]</sup>。与传统的粉煤灰复垦材料相比, 煤矸石具有较好的力学性能和生态修复效果。

表3总结了近年来煤矸石作为塌陷区复垦材料的主要研究进展。煤矸石在土壤改良的应用呈现出双重特性:一方面,煤矸石通过与土壤、玉米秸秆、粉煤灰及保水剂等联合使用,可以通过物质互补效应改善土壤化学性质,促进植物生长<sup>[30]</sup>;另一方面,环境风险评估表明,煤矸石含有的锰元素会对生态系统构成中等风险<sup>[31]</sup>,而其他重金属的迁移浓度变化显示整体污染影响较小<sup>[32]</sup>。值得注意的是,长期监测数据印证了煤矸石基复垦材料的生态恢复潜力,经过煤矸石回填修复的土壤,10 a后

的土壤质量参数已接近未受损状态<sup>[33]</sup>;进一步研究发现,引入丛枝菌根真菌等生物强化手段,可协同提升植被生长速率和土壤结构稳定性<sup>[34]</sup>。综合现有研究可以发现,虽然煤矸石回填复垦存在特定重金属(如锰)的潜在风险,但通过材料复合利用与生物修复技术的综合应用,能够有效改善土壤功能并增强植物抗逆性<sup>[35]</sup>。已有研究评估了煤矸石在塌陷区复垦应用中的潜在环境问题,从长期来看对环境的影响较小,但短期内煤矸石的重金属污染风险仍需进一步评估并寻求解决方案。

表3 煤矸石作为塌陷区复垦材料研究进展

Table 3 Advances in research on the utilization of coal gangue for reclamation of collapse areas

文献	研究对象	研究内容	研究结果
[30]	煤矸石、玉米秸秆、粉煤灰、保水剂	优化煤矸石与添加剂对种植基质的影响	最佳配方: 煤矸石与土壤1:1、玉米秸秆50 g/kg、粉煤灰37 g/kg、保水剂1 g/kg, 显著提高植物生长和土壤化学性质
[31]	煤矸石	分析煤矸石回填土壤中的6种重金属的分布、迁移性及生态风险	Cu、Pb、Zn浓度增加, Mn对生态威胁中等, 其他重金属风险低
[32]	煤矸石	研究煤矸石作为回填材料在煤矿塌陷区的应用及其对环境污染风险的影响	模拟了煤矸石回填区域重金属在土壤中的迁移规律, 重金属浓度均未超过限值, 表明煤矸石回填塌陷区环境污染风险可控
[33]	煤矸石	研究煤矸石回填土地的土壤质量恢复, 分析重建土壤的质量变量及相互关系	10 a后土壤变量恢复, 但关联性增强, 土壤更脆弱; 复垦3~10 a后增加有机肥, 或采用其他间接方法来提升土壤养分措施, 有助于改善土壤质地
[34]	丛枝菌根真菌、白蜡、煤矸石土壤	研究菌根真菌在煤矸石山土地复垦中的生态效果	菌根真菌促进植株生长、物种多样性、土壤改良, 增强抗旱和抗病能力, 显著改善生态环境

综上,煤矸石作为塌陷区复垦材料前景广阔,具有生态恢复潜力、沉降控制和经济性好等优点,主要适用于矿区塌陷区回填、土地复垦等方面。然而,煤矸石作为复垦材料利用仍面临污染物迁移与释放、材料配比优化、长期稳定性评估以及成本控制等技术难点。因此,未来应重点研究煤矸石作为复垦材料资源化利用的可持续性,探索更加绿色、环保的复垦材料配方和修复方法。

### 3.2 地聚物注浆材料

煤矸石制备地聚物是通过将煤矸石与碱性溶液进行反应,形成具有三维网状结构的新型无机胶凝材料<sup>[36]</sup>。根据自身硅氧的比例分为3种类型,地聚物可分为PS型( $-Si-O-Al-$ )、PSS型( $-Si-O-Al-O-Si-$ )和PSDS型( $-Si-O-Al-O-Si-O-Si-$ )<sup>[36]</sup>。地聚物材料可用于去除煤矸石中的重金属,其活化和重金属固化/稳定化过程通常按以下顺序进行:原料与碱溶液反应后作为前驱体溶解,在此期间发生离子复合和置换;材料的凝胶化发生在溶解的后期,形成C—A—S—H和N—A—S—H凝胶,凝胶通过连续结晶不断凝固和增强,最终形成晶体<sup>[37]</sup>。 $Pb^{2+}$ 在碱活化凝胶晶体结构中用 $Si-O$ 和 $Al-O$ 进行化学稳定,从而降低了重金属元素释放到环境中的风险<sup>[38-40]</sup>。

由于地聚物注浆材料的优异性能,引起国内外学者

的广泛关注<sup>[41-46]</sup>,表4总结了近年来煤矸石制备地聚物注浆材料的主要研究进展。近年来,水玻璃、粉煤灰和脱硫石膏等材料被用来进一步优化地聚物的流动性和抗压强度<sup>[41]</sup>;同时,聚丙烯纤维的加入也在提高机械性能方面取得了积极进展<sup>[42]</sup>。此外,煤矸石与高炉矿渣粉的协同利用可以提升地聚物材料的综合性能<sup>[43-44]</sup>。例如,郭凌志等<sup>[41]</sup>研究了不同外加剂对地聚物性能的影响,表明水泥掺量显著影响地聚物的凝结时间和强度,而水玻璃掺量则主要影响浆液的流动性。此外,煤矸石地聚物的固化涉及复杂的化学反应过程,近年来的研究更多关注微观结构和反应机理对材料性能的影响。已有研究表明,煤矸石与氢氧化钠反应形成的地聚物网络结构显著提高了材料的强度和稳定性<sup>[45-46]</sup>,而界面机理研究则揭示了界面效应对材料性能的潜在影响<sup>[42]</sup>。

综上,国内外学者在煤矸石地聚物注浆材料的配比和性能提升等方面取得了丰富的成果。煤矸石地聚物注浆材料具有环保、节能等优势,灌注之后能够提高矿山开采过程中的地质稳定性,主要适用于具有完整研磨系统的矿区,以便充分机械研磨活化处理煤矸石,添加其他助剂后制备得到高强度的地聚物注浆材料。然而,目前仍存在配比优化复杂、性能波动较大和活性激发条件苛刻等不足,如何实现煤矸石地聚物注浆材料的稳定性提升和性能的精确控制仍是亟待解决的问题。

表 4 煤矸石作为地聚物注浆材料研究进展  
Table 4 Advances in research on the utilization of coal gangue as geopolymer grouting materials

文献	研究对象	研究内容	研究结果
[41]	煤矸石、水泥、粉煤灰、水玻璃等	通过响应面法优化煤基固废地聚物注浆材料的配比, 分析凝结时间、抗压强度、抗渗性能等指标	浆体凝结时间48 min, 3 d抗压强度2.81 MPa, 28 d抗压强度6.37 MPa, 4次循环注浆后, 注浆终压达到6.9 MPa
[42]	煤矸石、粉煤灰、矿渣、聚丙烯纤维等	加入氢氧化钠和聚丙烯纤维提升注浆材料的力学性能, 改善抗裂和延展性	当氢氧化钠掺量为3%, 纤维长度为9 mm、掺量为5%时, 28 d抗压强度达9.34 MPa, 增强了界面结合力
[43]	煤矸石、高炉矿渣粉、氢氧化钠、硅酸钠、熟石灰等	采用煅烧煤矸石与高炉矿渣、熟石灰混合, 通过提高钙含量制备得到高强度地聚物	熟石灰掺量2.5%时, 试件的3、28和60 d抗压强度较未加熟石灰试件分别提高了47.85%、43.93%和42.43%
[44]	煤矸石、硅酸钠、氢氧化钠、炉渣等	研究不同碱性激发剂对煤矸石-矿渣-粉煤灰地聚物注浆材料的影响, 分析其抗压强度、微观结构及反应产物	抗压强度随着硅酸钠含量的增加逐渐降低, 90 d时抗压强度逐渐恢复
[45]	煤矸石、水玻璃、氢氧化钠等	研究机械和热激活方法对煤矸石反应性的影响, 以及热激活煤矸石在改性硅酸钠碱溶液中的地质聚合性能	不同热活化条件下, 试样的抗压强度存在差异, 800 °C下热活化的试样抗压强度为17.85 MPa, 较700 °C和900 °C下分别提高66%和110%
[46]	煤矸石、粉煤灰、氢氧化钙、氢氧化钠等	研究钙含量对煤矸石和粉煤灰地聚物的影响, 并优化煤矸石和粉煤灰地聚物的配比	当煤矸石掺量为30%时, 28 d抗压强度为22 MPa; 碱活化剂和氢氧化钙显著改善了注浆材料的微观结构, 提升了强度

### 3.3 固体充填材料

固体充填开采技术利用煤矸石充填采空区, 以控制岩层移动和矿压显现, 是实现“三下”压煤安全高效开采以及生态脆弱矿区煤炭开采的重要手段。采用矸石固体密实充填时, 通常下沉系数大于0.2, 充填增加的采煤成本低于50元/t<sup>[47]</sup>。固体充填开采技术的原理如图5所示, 固体回填料的运输路线如下: 煤矸石堆放(地表)→进料竖井→缓冲仓(地下)→采空区(红色路线)<sup>[48]</sup>。

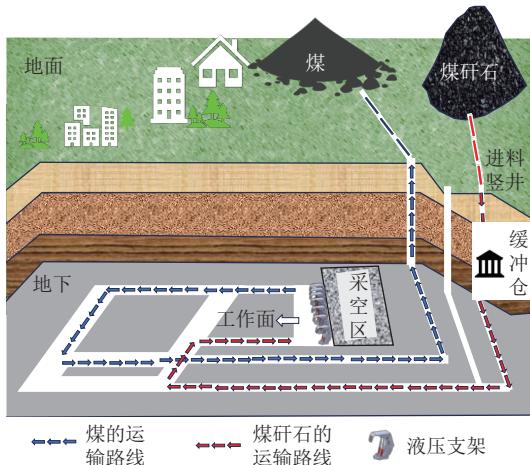


图 5 煤矸石固体充填原理

Fig.5 Schematic diagram of solid filling using coal gangue

为高效利用煤矸石, 国内外学者围绕煤矸石固体充填材料开展了系统性研究<sup>[49-54]</sup>, 表5总结了煤矸石作为固体充填材料的主要研究进展。煤矸石与粉煤灰、黄土等材料的协同作用研究表明, 复配体系既能保持煤矸石的骨料特性, 又可利用辅料的黏接作用形成稳定充填结构<sup>[49]</sup>。在此基础上, 优化材料配比被证实是提升充填体抗压强度和长期稳定性的关键<sup>[50]</sup>。针对充填施工

过程, Ju Feng等<sup>[51]</sup>通过建立运动控制方程, 明确了煤矸石颗粒在输送管道内的输送规律; 进一步研究发现, 煤矸石颗粒的破碎与力链的形成有助于载荷传递, 增强了充填体的力学性能<sup>[52-54]</sup>。然而, 固体充填技术带来的环境风险仍需引起重视, 特别是在井下高压和酸性工况下, 煤矸石中重金属元素易释放, 存在污染含水层的潜在风险<sup>[55-56]</sup>。

综上, 近年来国内外学者在煤矸石固体充填材料的性能提升、机理分析等方面取得了较多成果。煤矸石固体充填可以减少辅助原料的使用量, 同时具备预处理工艺简便等特点, 主要适用于具有坚硬且完整顶板、煤层倾角较小且厚度2~5 m的矿区, 同时需要配备相应的充填采煤液压支架、多孔底卸式输送机及转载机等设备。煤矸石固体充填材料应用目前仍面临充填效果不均匀、充填效率低等挑战, 如何协同提升固体充填的效果及效率仍是亟待解决的问题。

### 3.4 膏体充填材料

膏体充填技术是将煤矸石等固体废弃物加工成膏状物, 通过泵送管道输送至井下填充采空区, 因充填效果显著而被广泛关注<sup>[57-64]</sup>。膏体充填材料通常由骨料、胶凝材料、矿物掺合料、外加剂和水混合而成, 其质量分数一般超过75%。固化后膏体能达到一定的强度。从工艺流程来看, 膏体充填主要包括以下几个步骤: 煤矸石的破碎、材料的配比与混合、通过管道的抽水及充填到工作面等<sup>[65]</sup>。煤矸石膏体充填的工艺流程如图6所示。

表6总结了膏体充填材料的主要研究进展, 国内外学者通过正交试验、均匀设计及响应曲面法等方法, 逐步完善了材料配方体系。研究表明, 煤矸石、水泥与粉煤

表 5 煤矸石作为固体充填材料研究进展  
Table 5 Advances in research on the utilization of coal gangue as solid filling materials

文献	研究对象	研究内容及方法	研究结果
[49]	煤矸石、粉煤灰、黄土	研究煤矸石、粉煤灰、黄土比例对充填体强度与密实度的影响	优化材料配比后, 1 d强度从0.144 MPa增至0.417~1.233 MPa, 3 d为0.191~1.200 MPa, 7 d为0.195~1.640 MPa, 提升了抗压强度与稳定性
[50]	煤矸石、矿粉、石膏研究低成本胶凝材料(矿粉、石膏、水泥熟料)在硅酸盐熟料	煤矿固体充填中的应用	最优配比下, 充填体的7、28 d抗压强度分别为3.48和5.11 MPa, 成本优势明显, 且充填效率提高
[51]	圆柱体模型(煤矸石)	研究煤矸石下落过程中运动特性与抗风能力	进料能力增大, 空气阻力逐步增大, 煤矸石下落速度逐渐减缓
[52]	松散矸石	使用PFC <sup>3D</sup> 数值模拟, 研究试样尺寸对松散矸石力学性能的影响	煤矸石颗粒增大, 松散矸石的压缩应力-应变曲线趋于双曲线型, 侧压系数先增大后减小, 并且较大尺寸试样的承载能力更强、变形更小
[53]	煤矸石	用PFC模拟4种不同粒径等级的煤矸石回填材料的压缩变形, 分析粒径对压缩变形和颗粒破碎的影响	当粒径较小时, 孔隙率较低, 破碎颗粒填充孔隙; 粒径较大时, 孔隙率较高, 破碎颗粒无法完全填充孔隙; 合理的粒度比例增强了回填材料的变形能力, 减少压缩变形
[54]	煤矸石	采用PFC <sup>3D</sup> 颗粒流数值模拟研究煤矸石充填体在循环载荷下的力学特性	累积变形分为快速增长和逐步稳定2个阶段, 每次加载应力上限为2 MPa; 颗粒破碎对变形和力学特性有显著影响

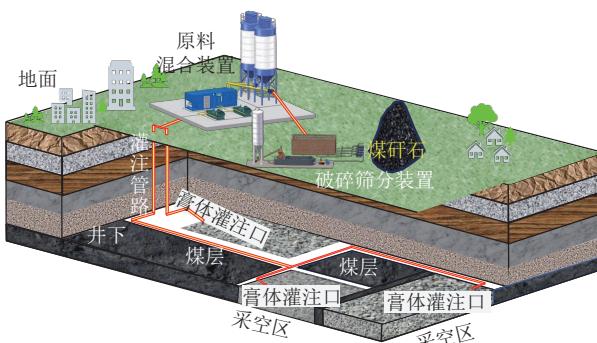


图 6 煤矸石膏体充填工艺流程

Fig.6 Schematic diagram of paste filling using coal gangue

灰的质量配比直接影响膏体流变特性与力学性能<sup>[57-58]</sup>。此外, 适量掺入外加剂(如早强剂氯化钠)可提升早期抗压强度, 但过量添加会导致性能衰减<sup>[59]</sup>。陈瑞毅<sup>[60]</sup>研究了煤基固废膏体充填材料的综合性能, 获得了材料的损伤演化模型, 并探讨了水泥掺量对充填效果的影响; 同时, 研究表明煤矸石膏体材料的成本约为25元/t, 有助于降低井下充填成本。膏体材料微观形成机理研究表明, 膏体通过二次水化反应生成大量C-S-H凝胶, 显著提升了膏体材料的力学强度<sup>[61]</sup>, 而材料配比的变化会直接影响抗压强度、弹性模量及破坏模式等宏观性能<sup>[62]</sup>。此外, Zhang Xinguo等<sup>[63]</sup>研究了膏体材料在管道输送过程中的流动性, 并提出了技术改进措施。在环境安全性评估方面, 现有研究证明煤矸石膏体充填能够有效固化重金属元素, 对地下水环境没有明显危害<sup>[64]</sup>。

综上, 近年来国内外学者在煤矸石膏体充填材料的配比优化、机理分析以及外加剂应用等方面取得了显著进展。煤矸石膏体材料具有良好的流动性和自密实性, 能够避免离析等问题, 均匀填充采空区, 具有应用范围广、适用性好、对矿井生产系统影响较小等特点。目前, 该技术仍面临外加剂复合效应不明确、充填流动性

调控困难, 以及充填后强度和长期稳定性等技术挑战。如何提高煤矸石膏体充填材料的长期稳定性, 并有效控制充填流动性等问题, 在未来的研究中亟待解决。

### 3.5 似膏体充填材料

似膏体充填材料是由胶凝材料、活化煤矸石、粉煤灰和水按一定比例制成的充填料浆。由于其在井下不需或仅需微量脱水, 可以最大程度地支撑围岩和上覆岩层, 从而抑制地表下沉, 因此被广泛关注<sup>[66-76]</sup>。

表 7 总结了煤矸石作为似膏体充填材料的主要研究进展, 国内外学者主要围绕性能优化、流动特性及形成机理等方面开展研究。研究表明, 优化调整似膏体充填材料的煤矸石掺量, 可显著提升抗压强度与流动性<sup>[66-68]</sup>; 顾清恒<sup>[69]</sup>基于BPNN算法建立配比优化模型, 显著提升了材料的综合性能。在流变特性研究中, 发现颗粒浓度与粒径分布是影响似膏体材料流动性的关键因素<sup>[70]</sup>; 数值模拟与流体力学理论研究表明, 优化材料配比可有效降低管路的输送阻力, 显著提高充填效率<sup>[71-72]</sup>。在成本效益方面, 曹小刚<sup>[73]</sup>分析得到似膏体充填材料成本为34~57元/t, 利用该技术可以充分回收“三下”(建筑物下、铁路下和水体下)煤炭资源, 提高矿山经济效益和可持续发展水平。在材料形成机理方面, 姚志全等<sup>[74]</sup>探讨了减水剂的作用机理, 表明减水剂能够显著改善流变性能和强度; 崔增娣<sup>[75]</sup>、王莹莹<sup>[76]</sup>等揭示了煤矸石在似膏体充填材料中的反应过程, 发现煤矸石在煅烧和热蚀变处理后, 其胶结料的抗压强度显著提升。煤矸石经煅烧处理可激发活性, 促进水化反应生成致密胶结体, 显著增大抗压强度<sup>[75-76]</sup>。尽管煤矸石作为似膏体充填材料的研究已取得诸多进展, 但仍存在一些不足之处。首先, 尚未充分开展煤矸石似膏体材料在长时间使用后的强度衰退、耐腐蚀性和抗老化性的评估; 其次, 已有

表 6 煤矸石作为膏体充填材料研究进展  
Table 6 Advances in research on the utilization of coal gangue as paste filling materials

文献	研究对象	研究内容	研究结果
[57]	煤矸石、粉煤灰、水泥	研究固体废弃物膏体充填料浆的工作特性和强度特性, 分析粉煤灰、水泥、细研率及质量分数对膏体的影响	最优配比为粉煤灰360 kg/m <sup>3</sup> , 水泥170 kg/m <sup>3</sup> , 细研率40%, 质量分数82%。3 d抗压强度2.9 MPa, 7 d强度6.32 MPa, 28 d强度14.9 MPa
[58]	煤矸石、粉煤灰、水泥	研究大粒径粗骨料(15~25 mm)对膏体性能的影响, 分析坍落度、凝结时间、强度等随粗骨料比例的变化规律	粉煤灰掺量多时, 电阻率相对较大, 28 d抗压强度为3.95 MPa, 揭示了不同水泥掺量下凝结时间与强度变化规律
[59]	煤矸石、粉煤灰、氯化钠	研究氯化钠对膏体材料水化过程的影响作用	氯化钠掺入显著提高了膏体的抗压强度和弹性模量, 28 d强度为1 008.25 kPa
[60]	煤矸石、粉煤灰、气化渣	研究充填材料的最优配比和材料损伤演化模型, 分析水泥掺量对材料充填效果的影响	最优配比条件下充填材料的初终凝时间分别为5.65和11.73 h, 抗压强度为2.32 MPa, 抗拉强度为0.13 MPa, 28 d损伤值为0.41, 该膏体材料成本为25.76元/t
[61]	煤矸石、水泥	研究了表面浆料处理方法对煤矸石浆料的优化, 通过SEM和EDS分析微观结构变化, 优化混合比设计	揭示了煤矸石与水泥混合后的微观结构变化, 孔隙率降至2.62%, 水泥水化产物形成复杂钙矾石骨架, 分形维数显著增加
[62]	煤矸石、粉煤灰、水泥	研究煤矸石级配和粉煤灰比例对材料力学性能的影响	配比优化后, 28 d抗压强度提升至3.30 MPa, 弹性模量增至0.44 GPa, 改善了膏体的力学性能
[63]	煤矸石、粉煤灰、水泥	研究膏体材料的力学性能, 制备不同配比的煤矸石-粉煤灰充填混合物, 并进行了抗压强度与流动性等试验	优化配比后, 膏体的抗压强度和泌水率得到改善, 早期强度0.13 MPa, 后期强度2.47 MPa
[64]	煤矸石	研究煤矿膏体充填对地下水环境的影响	煤矸石和粉煤灰配制的膏体充填对重金属元素有固化作用, 重金属浸出毒性值低于原材料, 符合地下水III类水指标

表 7 煤矸石作为似膏体充填材料研究进展  
Table 7 Advances in research on the utilization of coal gangue as paste-like filling materials

文献	研究对象	研究内容	研究结果
[66]	陶化煤矸石、新鲜煤矸石、粉煤灰、复合减水剂	研究煤矸石似膏体自流充填特性, 分析抗压强度、坍落度等参数	陶化煤矸石提高了充填体的强度, 7 d时强度提升30%, 改善了材料的抗压强度、坍落度
[67]	煤矸石、粉煤灰、水泥	研究适用于孙村煤矿的似膏体料浆, 以解决煤矸石排放与矿山安全问题	配比优化后抗压强度得到显著提升, 流变性能(坍落度、稠度)也有所改善, 粗粒新鲜煤矸石提高了流动性, 材料强度明显增强
[68]	煤矸石、粉煤灰、PL	开展煤矸石似膏体快速充填试验, 分析了充填强度和凝膏体胶结料、速凝剂结时间, 确定最佳配比	浆体凝结时间小于6 h, 28 d抗压强度达到1.05 MPa, 适应不同施工需求
[69]	煤矸石、粉煤灰、水泥、氯化物、河砂	建立BP网络模型, 探讨了似膏体充填材料各组分对性能的影响, 并优化配比	BPNN算法优化后的配比显著改善了分层度和塌落度, 长期抗压强度可达15.8 MPa
[70]	煤矸石、粉煤灰、水泥	测试不同浓度和颗粒粒径下煤矸石似膏体料浆的流变参数, 模拟管道输送过程	料浆浓度为78%时, 浆体流动特性良好, 沉降明显减少
[71]	煤矸石、粉煤灰、水泥	分析煤矸石似膏体充填料浆在管道自流输送过程中的运动和沉降规律, 利用Fluent软件模拟料浆的输送过程	煤矸石浆体在管道输送过程中能够保持良好的悬浮状态, 有效克服输送阻力
[72]	煤矸石、粉煤灰、水泥	通过Fluent模拟和流体力学理论计算方法, 分析似膏体料浆管路输送特性	模拟结果表明, 料浆具有良好的输送特性, 符合工程应用标准
[73]	煤矸石、粉煤灰、水泥、钢渣	探讨材料的力学性能和胶结机理, 设计了似膏体充填工艺流程及制备与输送系统	利用新型骨料、煤矸石和钢渣分别制备似膏体材料, 其最大允许充填倍数分别为5.06、4.01和4.63, 材料成本为34~57元/t
[74]	煤矸石、粉煤灰、水泥、木钙	研究减水剂对煤矸石似膏体充填料浆流变性能的影响, 分析减水剂对料浆坍落度、坍落扩散度和稠度的作用	材料的流变性、强度等得到优化, 坍落度为28.5 cm, 坍落扩散度63.0 cm; 减水剂对强度提升起到了关键作用
[75]	煤矸石、粉煤灰、矿渣、熟料、石膏	研究煤矸石凝石似膏体充填材料性能, 分析煤矸石物相组成与热力学特性	3、7和28 d抗压强度分别为21.3、38.0和49.5 MPa
[76]	煤矸石、水泥熟料、粉煤灰	通过对煤矸石煅烧激发其活性, 采用复合热液蚀变方法确定最佳活化参数	优化配比显著提高了抗压强度, 7和28 d抗压强度分别为35.5和49.6 MPa

研究未深入研究外加剂(如减水剂、早强剂、成岩剂等)的复合效应和长期作用机理; 此外, 当前研究主要聚焦于似膏体充填材料单一性能的优化, 缺乏多维度的综合优化, 特别是在流变性、力学性能和施工性等方面综合评估涉及较少。此外, 似膏体材料在采空区的充填应

用可能会对矿区水资源产生潜在污染风险<sup>[77]</sup>, 需进一步寻求解决方案。

综上, 煤矸石似膏体充填材料不仅具备一般水力充填料浆流动性好、易输送等优点, 而且又具备膏体材料的高浓度、少脱水、高充填强度等优势。与膏体充填材

料相比,似膏体材料的泵送性能更为优异,适用于输送距离远、充填覆盖面积大的矿区。目前,煤矸石似膏体充填材料仍面临活性激发条件较为苛刻、潜在污染风险,以及复合效应和长期作用机理研究尚不充分等问题。因此,如何有效激发煤矸石活性以提升似膏体材料的力学性能、控制潜在污染风险等问题,在未来的研究中亟待解决。

## 4 煤矸石资源化利用存在的问题与展望

### 4.1 规模化利用面临的问题

尽管我国在绿色矿山建设领域对煤矸石资源化利用方面取得了显著成效,但仍存在一些亟待解决的问题。

#### 1) 活性难以充分激发并利用

未经活化处理的煤矸石具有稳定的(晶体)化学结构,火山灰活性较低。为此,需要采用一定的物理化学改性方法,如热活化、机械活化、化学活化和微波活化等,来改变煤矸石的化学组成和内部结构,以激发其潜在的火山灰特性。然而,现有的煤矸石活性改性方法和技术存在工艺复杂、能耗高以及改性效率低等问题,且目前仍处于实验室理论和基础研究层面,与现场大规模应用存在较大差距。

因此,亟需提出高效激发煤矸石活性的新方法和技术,以充分释放其潜在的火山灰效应,增强充填材料的力学强度和稳定性。

#### 2) 缺乏前期分类预处理

不同矿区的煤矸石成分及性质差异显著。目前,煤矸石在矿山领域的利用主要是将不同种类和性质的煤矸石混合作为原料制备复垦材料、充填材料等。由于缺乏有效的分类预处理,难以发挥煤矸石作为功能材料的潜力,导致其性能不稳定,从而影响应用效果。如果能够对不同类型的煤矸石进行有效的分类预处理,有助于提高其利用效率和资源化利用水平。

因此,通过对煤矸石进行准确分类,包括成分、颗粒大小和含硫量等特征,可以针对性地选择合适的处理方法和技术路线。

#### 3) 井下充填利用成本高

我国煤矿开采多为地下开采,易导致地表沉降、耕地损毁以及建筑设备损坏等问题。充填开采技术作为一种生态保护性开采方法,能够有效解决“三下”压煤等资源开采难题,不仅可以提高煤炭资源的回收率,还能降低对生态环境的破坏。然而,与传统采煤工艺相比,使用煤矸石作为原料进行充填或注浆利用,导致工艺与系统复杂化,同时煤矸石的预处理和充填等过程也增加了采煤的成本。

因此,降低煤矸石基充填材料的成本、简化充填工

艺系统、提高煤矸石的充填效率,有助于激励企业推广煤矸石充填开采技术。

#### 4) 缺少激励性政策支持

财政部和税务总局发布了《关于延续对充填开采置换出来的煤炭减征资源税优惠政策》的通知,明确要求对充填开采置换出来的煤炭减征 50% 资源税(2023 年 9 月 1 日至 2027 年 12 月 31 日)。然而,由于煤矸石的处置与利用成本相对较高,目前政府部门出台的相关政策仍面临激励水平低、扶持力度小等问题,企业在规模化利用煤矸石固废时常遇到投入与产出不对等的困境。

因此,各级政府需进一步完善政策措施,制定针对性的税收、补贴等优惠政策,鼓励更多矿山企业参与煤矸石的规模化利用项目。

### 4.2 绿色资源化利用研究展望

为了进一步推动煤矸石在矿山建设领域的绿色、高效、高值利用,未来应重点围绕以下 3 个方面开展研究。

#### 1) 煤矸石低成本复合活化方法

单一的物理机械研磨、热活化、酸碱改性等方法存在煤矸石活化效率低、成本高等问题。为此,亟需开发低成本、高效率、环境友好的复合活化方法。研发高效低能耗的机械破碎、研磨等方法增加煤矸石比表面积,破坏稳定的晶体结构,同时辅以低温煅烧、微波加热等方法热解去除有机质、活化硅铝酸盐组分;并利用工业废酸/碱、生物质材料等替代传统的化学试剂活化煤矸石,降低原料的使用成本。在此基础上,通过实验室研究与机器学习相结合的方法,确定物理研磨-加热活化-化学激发协同作用的最优条件。

#### 2) 煤矸石利用过程环境友好性评估

煤矸石在塌陷区复垦、井下注浆及充填等利用过程中,由于水浸泡和水淋等作用可能导致重金属元素逐渐释放与迁移。为了消除煤矸石资源化利用造成的环境污染,需要评估煤矸石固废的有机物质、无机物质、重金属等化学成分的含量水平,研究煤矸石在地热、地下水淋等条件下有害物质的浸出和迁移等潜在风险;利用湿热循环等加速老化实验,分析煤矸石资源化利用后的环境行为,构建煤矸石对地下水与岩层等区域的污染程度预测模型,有助于长期评估煤矸石利用过程中的环境风险。

#### 3) 煤矸石矿化封存 CO<sub>2</sub> 与负碳利用

煤矸石具有丰富的孔隙结构,且含有 CaO、MgO 等成分,具备矿化封存烟气 CO<sub>2</sub> 的潜能。因此,需要研究不同温度、压力、pH 等条件下煤矸石中 CaO、MgO 等碱性矿物与 CO<sub>2</sub> 的反应特性,以及煤矸石孔隙结构对 CO<sub>2</sub> 的吸附特性;探究煤矸石矿化 CO<sub>2</sub> 反应过程的

强化方法,分析负碳产物在采空区注浆防灭火、注浆充填等方面的作用效果,评估负碳产物在地下采空区封存的地质风险和环境影响;利用生命周期评价(LCA)方法分析煤矸石与 CO<sub>2</sub> 反应及产物利用的全过程环境效应,分析煤矸石收集、处理、产物应用等全周期的负碳贡献。

## 5 结语

在国家“双碳”背景下,煤矸石大宗固废的资源化利用是煤炭绿色开采与绿色矿山建设的重要发展方向。当前,煤矸石在矿区的资源化利用取得了显著进展,主要利用途径包括土地复垦材料、地聚物注浆材料、固体充填材料、膏体充填材料以及似膏体充填材料等,为大规模处置与消纳煤矸石提供了重要的技术路径。然而,目前仍存在煤矸石活性难以充分激发并利用、缺乏前期分类预处理、井下充填利用成本高、缺少激励性政策支持等问题。基于现有研究成果,未来还应围绕煤矸石低成本复合活化方法、煤矸石固废利用过程环境友好性评估、煤矸石矿化封存 CO<sub>2</sub> 与负碳利用等方向开展重点技术攻关,为煤矸石在矿区的“绿色-高效-高值”综合利用提供关键技术支撑,进一步推动煤矸石的安全高效处置与资源化利用,助力绿色矿山建设。

## 利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

## 参考文献(References)

- [1] 徐燕飞, 陈永春, 李静, 等. 煤电基地 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 遥感监测及时空特征分析[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(6): 79–90.  
XU Yanfei, CHEN Yongchun, LI Jing, et al. Remote sensing monitoring and spatiotemporal characteristics of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentrations in coal–electricity production bases[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(6): 79–90.
- [2] LIU Yin, WEN Hu, CHEN Changming, et al. Research status and development trend of coal spontaneous combustion fire and prevention technology in China: A review[J]. *ACS Omega*, 2024, 9(20): 21727–21750.
- [3] 李华焜, 郑刘根, 陈永春, 等. 基于 CT 扫描的重构土壤孔隙结构及其对水盐运移影响[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(4): 120–127.  
LI Huakun, ZHENG Liugen, CHEN Yongchun, et al. Exploring the pore structure of reconstructed soils and its effects on water and salt transport based on CT scanning[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(4): 120–127.
- [4] CAO Yachuan, ZHOU Chuncui, GAO Feiyue, et al. Lithium recovery from typical coal-based solid wastes: Critical technologies, challenges, and prospects[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 498: 155121.
- [5] 朱琦, 胡振琪, 叶春, 等. 基于化学–微生物法的煤矸石山酸化污染原位控制技术研究进展[J]. 中国矿业, 2023, 32(1): 52–59.  
ZHU Qi, HU Zhenqi, YE Chun, et al. Research progress of in situ control technology for acidification pollution of coal gangue pile based on chemical–microbial method[J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(1): 52–59.
- [6] WANG Haiyan, TAN Bo, ZHANG Xuedong. Research on the technology of detection and risk assessment of fire areas in gangue hills[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(31): 38776–38787.
- [7] PAN Rongkun, ZHENG Ligang, JIA H, et al. The environmental pollution and control of coal gangue spontaneous combustion in mining[J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 20(8): 3555–3562.
- [8] 李振, 雪佳, 朱张磊, 等. 煤矸石综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(6): 165–178.  
LI Zhen, XUE Jia, ZHU Zhanglei, et al. Research progress on comprehensive utilization of coal gangue[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2021, 41(6): 165–178.
- [9] 王艳, 左震, 文波, 等. 煤矸石粗集料理化性质和形状特征对混凝土强度的影响[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(5): 554–564.  
WANG Yan, ZUO Zhen, WEN Bo, et al. Influence of physico-chemical properties and shape characteristics of coal gangue coarse aggregate on concrete strength[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(5): 554–564.
- [10] 姚苏琴, 查文华, 刘新权, 等. 莆田废弃煤矸石理化特性及热活化性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(7): 2280–2287.  
YAO Suqin, ZHA Wenhua, LIU Xinquan, et al. Physicochemical and thermal activation properties of waste coal gangue in Pingxiang mining area[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(7): 2280–2287.
- [11] 包宏亮. 山西西铭矿煤矸石基础性质及资源化利用研究[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(10): 121–124.  
BAO Hongliang. Study on coal gangue fundamental natures and reutilization in Ximing coalmine, Shanxi[J]. *Coal Geology of China*, 2021, 33(10): 121–124.
- [12] MA Hongqiang, WU Chao. Feasibility and performance evaluation of cementitious material mixed with coal gangue solid waste[M]//QI Chongchong, BENSON C H. Managing mining and minerals processing wastes. Amsterdam: Elsevier, 2023: 99–130.
- [13] 庄红峰. 制砖物料中黏土矿物成分含量对烧结砖的影响[J]. 砖瓦, 2020(2): 46–49.  
ZHUANG Hongfeng. Effect of clay mineral content in brick making materials on fired brick[J]. *Brick–Tile*, 2020(2): 46–49.
- [14] 贾建慧, 马宁, 董阳, 等. 煤矸石综合利用研究进展[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(增刊 1): 36–45.  
JIA Jianhui, MA Ning, DONG Yang, et al. Review on the comprehensive utilization of coal gangue[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(Sup.1): 36–45.
- [15] 胡振琪, 肖武. 关于煤炭工业绿色发展战略的若干思考: 基于生态修复视角[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 35–42.  
HU Zhenqi, XIAO Wu. Some thoughts on green development strategy of coal industry: From aspects of ecological restoration[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(4): 35–42.

- [16] 王金满, 杨曼, 刘彪, 等. 绿色矿山建设碳源/汇与减排增汇研究进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1597–1610.  
WANG Jinman, YANG Man, LIU Biao, et al. Carbon sources/sinks and emission reduction and sink enhancement in green mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(3): 1597–1610.
- [17] 刘萍, 晏飞. 煤矸石对环境的危害及其综合治理[J]. 中国矿业, 2008, 17(8): 49–51.  
LIU Ping, YAN Fei. Coal rock harmful to the environment and comprehensive management[J]. *China Mining Magazine*, 2008, 17(8): 49–51.
- [18] 于水军, 余明高, 段玉龙, 等. 自燃煤矸石山爆炸的热力学模拟[J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 945–949.  
YU Shuijun, YU Minggao, DUAN Yulong, et al. Thermodynamic simulation of explosion of self-combustion gangue heap[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(9): 945–949.
- [19] 刘迪. 煤矸石的环境危害及综合利用研究[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(3): 60–62.  
LIU Di. Research on environmental effect and comprehensive utilization of coal-waste rocks[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2006, 22(3): 60–62.
- [20] LI Yuanyuan, CAO Yingjia, RUAN Mengying, et al. Mechanism and in situ prevention of oxidation in coal gangue piles: A review aiming to reduce acid pollution[J]. *Sustainability*, 2024, 16(16): 7208.
- [21] DONG Yingbo, LU Huan, LIN Hai. Comprehensive study on the spatial distribution of heavy metals and their environmental risks in high-sulfur coal gangue dumps in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, 136: 486–497.
- [22] 秦建良. 煤矸石的危害及综合利用现状[J]. 广州化工, 2015, 43(4): 25–27.  
QIN Jianliang. The harm of coal gangue and the present situation of comprehensive utilization[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2015, 43(4): 25–27.
- [23] 雷建红. 煤矸石的污染危害与综合利用分析[J]. 能源与节能, 2017(4): 90–91.  
LEI Jianhong. Analysis of pollution hazards and comprehensive utilization of coal gangue[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2017(4): 90–91.
- [24] GAO Huadong, HUANG Yanli, LI Wei, et al. Explanation of heavy metal pollution in coal mines of China from the perspective of coal gangue geochemical characteristics[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(46): 65363–65373.
- [25] 孔涛, 张开, 黄丽华, 等. 菌剂混施对各粒径矸石性质及苜蓿生长的影响[J]. 煤炭学报, 2023, 48(增刊1): 241–251.  
KONG Tao, ZHANG Kai, HUANG Lihua, et al. Effects of mixed application of microbial agents on growth and substrate properties of alfalfa in coal gangue matrix with different particle sizes[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(Sup.1): 241–251.
- [26] 周昊, 郭娇娇, 何绪文, 等. 煤矿区固废改良土壤对植物生长的影响[J]. 煤炭技术, 2018, 37(3): 23–25.  
ZHOU Hao, GUO Jiaojiao, HE Xuwen, et al. Research on impact of coal solid waste improved soil on plant growth[J]. *Coal Technology*, 2018, 37(3): 23–25.
- [27] ZHANG Kun, XU Liangji, HUANG Guodong, et al. Coupled variations of soil temperature and moisture in reclaimed fields filled with coal gangue of different grain size distributions[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(4): 2248–2259.
- [28] 郭友红, 李树志, 鲁叶江. 塌陷区矸石充填复垦耕地覆土厚度的研究[J]. 矿山测量, 2008, 36(2): 59–61.  
GUO Youhong, LI Shuzhi, LU Yejiang. Research on depth of the covering layer on reclaimed cultivated land backfilled with coal refuse in subsidence area[J]. *Mine Surveying*, 2008, 36(2): 59–61.
- [29] 胡振琪, 康惊涛, 魏秀菊, 等. 煤基混合物对复垦土壤的改良及苜蓿增产效果[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 120–124.  
HU Zhenqi, KANG Jingtao, WEI Xiuju, et al. Experimental research on improvement of reclaimed soil properties and plant production based on different ratios of coal-based mixed materials[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(11): 120–124.
- [30] DU Tao, WANG Dongmei, BAI Yujie, et al. Optimizing the formulation of coal gangue planting substrate using wastes: The sustainability of coal mine ecological restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 143: 105669.
- [31] TANG Quan, LI Liyuan, ZHANG Song, et al. Characterization of heavy metals in coal gangue-reclaimed soils from a coal mining area[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, 186: 1–11.
- [32] 冯印成, 赵康, 田向勤, 等. 煤矸石回填塌陷区重金属淋溶迁移时空规律研究[J/OL]. 中国环境科学, 2024: 1–12 [2025-02-27]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20241104.002>.  
FENG Yincheng, ZHAO Kang, TIAN Xiangqin, et al. Research on spatiotemporal patterns of heavy metal leaching and migration in coal gangue backfill subsidence area[J/OL]. *China Environmental Science*, 2024: 1–12 [2025-02-27]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20241104.002>.
- [33] LI Fang, LI Xinju, HOU Le, et al. A long-term study on the soil reconstruction process of reclaimed land by coal gangue filling[J]. *CATENA*, 2020, 195: 104874.
- [34] 毕银丽, 吴王燕, 刘银平. 丛枝菌根在煤矸石山土地复垦中的应用[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3738–3743.  
BI Yinli, WU Wangyan, LIU Yiping. Application of arbuscular mycorrhizas in land reclamation of coal spoil heaps[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3738–3743.
- [35] 刘帆俞, 宋慧平, 吴海滨, 等. 煤矸石土壤化利用与土壤改良剂研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(6): 14–26.  
LIU Fanyu, SONG Huiping, WU Haibin, et al. Research progress on the utilization of coal gangue for soil remediation and as soil amendment agents[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2023, 43(6): 14–26.
- [36] HAN Ruicong, GUO Xiaoning, GUAN Junfeng, et al. Activation mechanism of coal gangue and its impact on the properties of geopolymers: A review[J]. *Polymers*, 2022, 14(18): 3861.
- [37] QIAN Lanping, XU Lingyu, ALREFAEI Y, et al. Artificial alkali-activated aggregates developed from wastes and by-products: A state-of-the-art review[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 177: 105971.
- [38] GUAN Xiao, CHEN Jixi, ZHU Mengyu, et al. Performance of microwave-activated coal gangue powder as auxiliary cementitious material[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021,

- 14: 2799–2811.
- [39] LIU Yi, YAN Chunjie, ZHANG Zuhua, et al. A comparative study on fly ash, geopolymers and faujasite block for Pb removal from aqueous solution[J]. *Fuel*, 2016, 185: 181–189.
- [40] ZHANG Benfeng, YANG Kang, ZHANG Kai, et al. Migration transformation, prevention, and control of typical heavy metal lead in coal gangue: A review[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2023, 10(1): 85.
- [41] 郭凌杰, 周梅, 王丽娟, 等. 煤基固废地聚物注浆材料的制备及性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(10): 1092–1100.
- GUO Lingzhi, ZHOU Mei, WANG Lijuan, et al. Preparation and properties of coal-based solid waste geopolymers grouting materials[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(10): 1092–1100.
- [42] PANG Shuai, ZHANG Xiangdong, ZHU Kaixin, et al. Study on mechanical properties and micro characterization of fibre reinforced ecological cementitious coal gangue materials[J]. *Polymers*, 2023, 15(3): 700.
- [43] HUANG Guodong, JI Yongsheng, LI Jun, et al. Improving strength of calcinated coal gangue geopolymers mortars via increasing calcium content[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 166: 760–768.
- [44] GUO Lingzhi, LIU Juanhong, ZHOU Mei, et al. Effect of an alkali activators on the compressive strength and reaction mechanism of coal gangue–slag–fly ash geopolymers grouting materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 426: 136012.
- [45] ZHANG Weiqing, DONG Chaowei, HUANG Peng, et al. Experimental study on the characteristics of activated coal gangue and coal gangue–based geopolymers[J]. *Energies*, 2020, 13(10): 2504.
- [46] WANG Qingping, ZHU Longtao, LU Chunyang, et al. Investigation on the effect of calcium on the properties of geopolymers prepared from uncalcined coal gangue[J]. *Polymers*, 2023, 15(5): 1241.
- [47] 徐法奎. 我国煤矿充填开采现状及发展前景[J]. *煤矿开采*, 2012, 17(4): 6–7.
- XU Fakui. Current status of stowing mining and its development prospect in China[J]. *Coal Mining Technology*, 2012, 17(4): 6–7.
- [48] LI Junmeng, HUANG Yanli, CHEN Zhongwei, et al. Characterizations of macroscopic deformation and particle crushing of crushed gangue particle material under cyclic loading: In solid backfilling coal mining[J]. *Powder Technology*, 2019, 343: 159–169.
- [49] 刘建功, 王英. 固体充填材料比例特征及应力特性研究[J]. *中国煤炭*, 2017, 43(5): 38–42.
- LIU Jiangong, WANG Ying. Research on ratio characteristics and stress properties of solid filling materials[J]. *China Coal*, 2017, 43(5): 38–42.
- [50] 闫善飞, 史艳楠, 王翰秋, 等. 固体充填胶凝材料试验研究与应用[J]. *煤炭工程*, 2022, 54(3): 143–147.
- YAN Shanfei, SHI Yannan, WANG Hanqiu, et al. Experimental research and application of solid filling cementitious materials[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(3): 143–147.
- [51] JU Feng, LI Baiyi, GUO Shuai, et al. Dynamic characteristics of gangues during vertical feeding in solid backfill mining: A case study of the Wugou Coal Mine in China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(20): 1389.
- [52] 孔国强, 宋天奇, 李俊孟. 松散矸石压缩特性的尺寸效应数值模拟[J]. *煤炭技术*, 2017, 36(7): 69–71.
- KONG Guoqiang, SONG Tianqi, LI Junmeng. Size effect of compression feature of loose gangue by numerical simulation[J]. *Coal Technology*, 2017, 36(7): 69–71.
- [53] LI Meng, LI Ailing, ZHANG Jixiong, et al. Effects of particle sizes on compressive deformation and particle breakage of gangue used for coal mine goaf backfill[J]. *Powder Technology*, 2020, 360: 493–502.
- [54] 何泽全, 巨峰, 肖猛, 等. 煤矸石充填材料在循环载荷作用下的细观变形特征分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(5): 1002–1010.
- HE Zequan, JU Feng, XIAO Meng, et al. Characterization of meso-deformation of gangue backfilling materials under cyclic loading[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(5): 1002–1010.
- [55] 李晓彤. 水–力耦合淋溶作用下煤矸石重金属析出释放规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- LI Xiaotong. Characterization of heavy metal releasing from coal gangue under water–force coupled leaching[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [56] 张云, 刘永孜, 来兴平, 等. 基于导水裂隙扩展–重金属离子迁移的短壁块段式充填保水采煤机理研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 155–172.
- ZHANG Yun, LIU Yongzi, LAI Xingping, et al. Mechanism of short-wall block backfill water-preserved mining based on water-conducting fractures development–heavy metal ions migration[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 155–172.
- [57] 刘文生, 张燕凤, 张贺然. 膏体充填材料的工作特性及强度特性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(4): 1116–1120.
- LIU Wensheng, ZHANG Yanfeng, ZHANG Heran. Study on the working and strength characteristics of paste filling material[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(4): 1116–1120.
- [58] 刘音, 李金平, 路遥, 等. 煤矸石大粒径粗骨料比例对充填膏体性能影响的试验研究[J]. *煤矿开采*, 2016, 21(5): 1–3.
- LIU Yin, LI Jinping, LU Yao, et al. Experimental studying of coal gangue large particle size coarse aggregate ratio to filling paste property[J]. *Coal Mining Technology*, 2016, 21(5): 1–3.
- [59] CHEN Shaojie, DU Zhaowen, ZHANG Zhen, et al. Effects of chloride on the early mechanical properties and microstructure of gangue–cemented paste backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 235: 117504.
- [60] 陈瑞毅. 煤基固废膏体充填材料力学特性实验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- CHEN Ruiyi. Experimental study on mechanical properties of coal based solid waste paste filling material[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022.
- [61] SUN Qi, WEI Xueda, WEN Zhijie. Preparation and strength formation mechanism of surface paste disposal materials in coal mine collapse pits[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 17: 1221–1231.
- [62] ZHANG Leiming, LAI Xingping, PAN Jiliang, et al. Experimental investigation on the mixture optimization and failure mechan-

- ism of cemented backfill with coal gangue and fly ash[J]. *Powder Technology*, 2024, 440: 119751.
- [63] ZHANG Xinguo, LIN Jia, LIU Jinxiao, et al. Investigation of hydraulic-mechanical properties of paste backfill containing coal gangue-fly ash and its application in an underground coal mine[J]. *Energies*, 2017, 10(9): 1309.
- [64] 牛丽菊, 郑帅亮. 煤矿膏体充填对地下水环境影响研究[J]. 煤, 2024, 33(3): 100-104.
- [65] ZHANG Feng, LIU Jinxiao, NI Haiming, et al. Development of coal mine filling paste with certain early strength and its flow characteristics[J]. *Geofluids*, 2021, 2021(1): 6699426.
- [66] 王新民, 龚正国, 张传恕, 等. 似膏体自流充填工艺在孙村煤矿的应用[J]. *矿业研究与开发*, 2008, 28(2): 10-13.  
WANG Xinmin, GONG Zhengguo, ZHANG Chuanshu, et al. Application of gravity-flowed paste-like slurry filling technology in Suncun Coal Mine[J]. *Mining Research and Development*, 2008, 28(2): 10-13.
- [67] 王新民, 曹刚, 龚正国. 煤矸石作充填骨料的似膏体料浆流动性试验研究[J]. 矿业快报, 2008, 24(1): 20-23.  
WANG Xinmin, CAO Gang, GONG Zhengguo. Experimental research on flow performance of paste-like slurry with gangue as filling aggregate[J]. *Express Information of Mining Industry*, 2008, 24(1): 20-23.
- [68] 刘晓玲, 王新民, 吴鹏. 煤矸石似膏体快速充填试验研究[J]. 金属矿山, 2011(6): 6-8.  
LIU Xiaoling, WANG Xinmin, WU Peng. Experimental research of rapid filling with paste-like coal gangue[J]. *Metal Mine*, 2011(6): 6-8.
- [69] 顾清恒. 似膏体充填材料配比的BP网络优化方法[J]. 金属矿山, 2016(3): 40-43.  
GU Qingheng. Mixing proportion of paste-like filling material based on back-propagation neural network[J]. *Metal Mine*, 2016(3): 40-43.
- [70] 郝宇鑫, 黄玉诚, 李育松, 等. 砾石似膏体充填料浆临界流速影响因素研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(4): 128-133.  
HAO Yuxin, HUANG Yucheng, LI Yusong, et al. Influencing factors of critical flow rate of gangue paste-like filler slurry[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(4): 128-133.
- [71] 张钦礼, 谢盛青, 郑晶晶, 等. 充填料浆沉降规律研究及输送可行性分析[J]. *重庆大学学报*, 2011, 34(1): 105-109.  
ZHANG Qinli, XIE Shengqing, ZHENG Jingjing, et al. Sedimentation law research and transportation feasibility study of backfilling slurry[J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(1): 105-109.
- [72] 赵卫强, 吕艳奎, 黄玉诚. 似膏体料浆管输中浆击分析与计算研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(8): 96-98.  
ZHAO Weiqiang, LYU Yankui, HUANG Yucheng. Analysis and calculation of slurry water-hammer in paste-like slurry pipeline transport[J]. *Coal Engineering*, 2015, 47(8): 96-98.
- [73] 曹小刚. 新型骨料似膏体胶结充填技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.  
CAO Xiaogang. Study on new aggregate paste-like backfilling technology[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [74] 姚志全, 张钦礼, 王新民. 减水剂在似膏体胶结充填中的应用[J]. 煤矿安全, 2009, 40(1): 43-45.
- [75] 崔增娣, 孙恒虎. 煤矸石凝石似膏体充填材料的制备及其性能[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 896-899.  
CUI Zengdi, SUN Henghu. The preparation and properties of coal gangue based sialite paste-like backfill material[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(6): 896-899.
- [76] 王莹莹, 谢光天, 李泽荃. 煤矸石质似膏体充填胶结料的研制及水化机理研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(12): 141-144.  
WANG Yingying, XIE Guangtian, LI Zequan. Research on coal gangue paste-like filling materials and its hydration mechanism[J]. *Coal Engineering*, 2017, 49(12): 141-144.
- [77] 张云, 刘永孜, 曹胜根, 等. 短壁块段式充填采煤矸石充填材料重金属离子“下行”迁移规律及控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2): 284-294.  
ZHANG Yun, LIU Yongzi, CAO Shenggen, et al. Study on the migration law and control of heavy metal ions “downward” in gangue backfill materials in short-wall block backfill mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(2): 284-294.

(责任编辑 周建军)