



煤基固废规模化绿色低碳利用研究进展与创新路径

刘浪 朱梦博 王双明 杨潘 于博 阮仕山 杨军军 解耿

引用本文：

刘浪, 朱梦博, 王双明, 等. 煤基固废规模化绿色低碳利用研究进展与创新路径[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 82–103.
LIU Lang, ZHU Mengbo, WANG Shuangming. Research progress and innovative pathways for the large-scaled green and low-carbon utilization of coal-based solid wastes[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 82–103.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0429>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤电化基地大宗固废“三化”协同利用基础与技术

Foundation and technology of coordinated utilization of bulk solid waste ‘Three modernizations’ in coal power base
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 69–82 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0129>

煤基灰/渣的大宗固废资源化利用现状及发展趋势

Resource utilization status and development trend of bulk solid waste of coal-based ash/slag
煤炭科学技术. 2024, 52(6): 238–252 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1102>

含钙镁煤基固废CO₂矿化封存及其产物性能研究进展

Research progress on CO₂ mineralization of coal-based solid waste containing calcium and magnesium and its product performance
煤炭科学技术. 2024, 52(5): 301–315 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0902>

煤基固废矿化封存CO₂技术研究进展

Research progress of CO₂ storage technology by mineralization of coal-based solid waste
煤炭科学技术. 2024, 52(2): 309–328 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0988>

煤基固废充填料浆长距离输送悬浮态稳定性研究

Study on suspension state stability of coal-based solid waste filling slurry of long-distance pipeline transportation
煤炭科学技术. 2025, 53(2): 444–456 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0104>

新疆煤基固体废弃物处置与资源化利用研究

Prospects of resource utilization and disposal of coal-based solid wastes in Xinjiang
煤炭科学技术. 2021, 49(1): 319–330 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.030>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

刘浪, 朱梦博, 王双明, 等. 煤基固废规模化绿色低碳利用研究进展与创新路径[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 82-103.

LIU Lang, ZHU Mengbo, WANG Shuangming, et al. Research progress and innovative pathways for the large-scaled green and low-carbon utilization of coal-based solid wastes[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 82-103.

煤基固废规模化绿色低碳利用研究进展与创新路径

刘浪¹, 朱梦博¹, 王双明^{2,3}, 杨潘¹, 于博¹, 阮仕山¹, 杨军军¹, 解耿¹

(1. 西安科技大学 能源与矿业工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 煤炭绿色开采地质研究院, 陕西 西安 710054; 3. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 煤炭的开采与加工为我国提供了可靠的能源保障和关键的化工原料, 有力地推动了工业的快速发展和社会的进步。然而, 这一过程也产生了巨量的煤基固废。煤基固废不仅占用了大量土地资源, 还对环境造成了不同程度的污染, 尤其是在长期堆存过程中, 可能释放有害气体、重金属及其他有毒物质, 威胁水源、空气和土壤安全。如何高效且规模化地利用煤基固废, 成为当前实现资源循环利用、减少环境污染的关键技术挑战。通过分析煤基固废的产生、分类、特性及其环境影响, 对现有煤基固废进行了重新归类, 系统总结了其在矿山充填、建筑材料及生态修复等领域的成熟规模化利用模式, 提出了煤基固废绿色低碳利用的创新路径。研究表明: ① 煤基固废可归类为变性和原性煤基固废两大类, 其中变性煤基固废具有开发胶凝材料和固碳功能材料的潜力, 而原性煤基固废则具备天然砂石骨料和土壤材料的特性; ② 当前, 煤基固废的主要规模化利用模式包括矿山充填(如胶凝材料、膏体充填和注浆充填)、建筑材料(如水泥辅料、筑路材料和预制件)、生态修复(如坍陷区回填、荒地复垦和土壤改良)和资源提取利用(炭质组分、铝、硫和稀有元素); ③ 提出了煤基固废分级分质全组分利用的新技术, 通过提取高价值组分并将剩余组分用于采空区充填, 实现其最大化资源利用; ④ 探讨了煤基固废改性协同处置高盐废水、改性充填协同储库构筑及功能性储库协同封存危险固废的创新技术。上述研究旨在提高大宗煤基固废的资源利用效率, 推动煤炭产业绿色转型, 为煤炭资源的可持续发展提供新路径。

关键词: 变性煤基固废; 原性煤基固废; 绿色低碳; 规模化利用

中图分类号: TD801 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)06-0082-22

Research progress and innovative pathways for the large-scaled green and low-carbon utilization of coal-based solid wastes

LIU Lang¹, ZHU Mengbo¹, WANG Shuangming^{2,3}, YANG Pan¹, YU Bo¹, RUAN Shishan¹,
YANG Junjun¹, XIE Geng¹

(1. College of Energy and Mining Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Geological Research Institute for Coal Green Mining, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Coal mining and processing have provided China with reliable energy security and essential chemical raw materials, significantly driving industrial development and social progress. However, this process has also resulted in the production of large amounts of coal-based solid waste. These wastes not only occupy vast land resources but also cause varying degrees of environmental pollution, especially during long-term storage, when they may release harmful gases, heavy metals, and other toxic substances, posing a threat to water, air, and

收稿日期: 2025-03-28 策划编辑: 朱恩光 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.12438/cst.2025-0429

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询资助项目(2024-XZ-24); 国家自然科学基金资助项目(52378264); 陕西省重点研发计划——“两链”融合重点专项资助项目(2023-LL-QY-07)

作者简介: 刘浪(1985—), 男, 陕西靖边人, 教授, 博士。E-mail: liulang@xust.edu.cn

通讯作者: 朱梦博(1991—), 男, 湖北浠水人, 副教授, 博士。E-mail: mbzhu@xust.edu.cn

soil safety. Therefore, efficiently and large-scale utilization of coal-based solid waste has become a key technical challenge in achieving resource recycling and reducing environmental pollution. Based on an analysis of the generation, classification, characteristics, and environmental impacts of coal-based solid waste, this paper reclassifies existing coal-based solid waste and systematically summarizes its mature large-scale utilization models in areas such as mine backfilling, construction materials, and ecological restoration. It also proposes innovative pathways for the green and low-carbon utilization of coal-based solid waste. The study shows that: ① Coal-based solid waste can be classified into two categories: denatured and original coal-based solid waste, with denatured coal-based solid waste having the potential to develop cementing materials and carbon sequestration functions, while original coal-based solid waste possesses the characteristics of natural aggregates and soil materials; ② Currently, the main large-scale utilization models of coal-based solid waste include mine backfilling (such as cementing materials, paste backfilling, and grout backfilling), construction materials (such as cement supplementary materials, road materials, and precast components), ecological restoration (such as filling of subsidence areas, reclamation of wastelands, and soil improvement), and resource extraction and utilization (carbonaceous components, aluminium, sulfur and rare elements); ③ A new technology for graded, quality-specific, and full-component utilization of coal-based solid waste is proposed, which extracts high-value components and uses the remaining components for backfilling of mined-out areas, maximizing resource utilization; ④ Innovative technologies for modifying and co-disposing of high-salinity wastewater, modifying backfill for co-constructing storage facilities, and co-sequestering hazardous solid waste in functional storage are discussed. This research aims to improve the resource utilization efficiency of bulk coal-based solid waste, promote the green transformation of the coal industry, and provide new pathways for the sustainable development of coal resources.

Key words: denatured coal-based solid waste; original coal-based solid waste; green and low-carbon; large-scale utilization

0 引言

煤炭是我国的主体能源和重要的化工原材料,在今后中长期内,煤炭仍是我国能源安全和产业链供应链安全的基石^[1,2]。然而煤炭在开发利用全过程中,不可避免产生大量煤基固废,包括煤炭开采及分选环节产生的煤矸石和煤泥,燃烧利用、转化过程中产生的粉煤灰、燃煤炉渣、煤气化渣等^[3]。据不完全统计,2024年我国煤基固废产生量约18亿t。煤基固废具有污染环境和再生利用的双重特性,如何对多源煤基固废进行规模化利用,避免污染环境,是煤炭绿色低碳发展的重要内涵之一^[4]。

煤基固废的环境污染属性体现在多个方面,包括土壤、水和空气污染^[5]。部分区域的煤矸石、煤泥存在部分类型的重金属元素超标和含硫矿物,地表堆存雨水淋滤和氧化作用过程中,含有重金属元素和硫元素的污水向土壤入渗或汇入地表水系,造成土壤和水的污染^[6]。而煤经过燃烧或转化后形成的煤基固废,如粉煤灰、燃煤炉渣和煤气化渣等,重金属等元素一般进一步得到富集,钙、镁矿物可形成CaO和MgO等,同时部分种类的煤化工渣中还可能残存有机物,这类煤基固废在地面堆场排放过程中在雨水淋滤作用下,可以造成土壤和地表水的重金属、碱性和有机物污染^[7-8]。在气体污染方面,煤基固废的运输、堆放、处理过程中普遍存在严重的扬尘问题^[9],同时残炭和含硫矿物发生氧化作用,如矸石山普遍存在的自燃问题,生成自燃排放CO、CO₂、

H₂S、SO₂、NO_x等有害气体^[10]。除了环境污染问题之外,煤基固废地表堆存还会带来安全隐患,煤基固废的大量长期地表堆存造成自燃、滑坡、坍塌、泥石流等安全隐患,对周边人员生活、健康、财产和安全生产构成严重威胁^[11-12]。2005年,平煤四矿矸石山发生自燃崩塌事故,造成8人死亡、122人受伤,周边大量农田和建筑物被毁^[13];2018年,河曲县丁家沟村某矸石填埋场发生CO、H₂S中毒事故,造成6人死亡。煤基固废地面堆存已对区域生态环境及安全带来严重影响。

煤基固废再生利用属性同样体现在多个方面^[14-15]。从元素组成来讲,煤基固废除了含有Si、Ca、Mg、Al、C等主要元素之外,还含有Fe、Li和稀有元素,部分区域的煤基固废中的某些元素甚至达到工业矿石品位^[16]。煤矸石、煤泥中还含有一定量的N、P、K等植物营养元素。从矿物组成来讲,煤矸石中富含有机碳、高岭土、石英、钾长石等矿物,煤气化渣、粉煤灰和燃煤炉渣中含有大量活性SiO₂和Al₂O₃,不同矿物组分经分选后可用于替代某些工业原材料。根据不同类型及区域的煤基固废物理化学特性差异,煤基固废具备能源、矿产、建材和功能材料等利用潜力^[17]。

针对煤基固废资源化利用问题,国家已出台了系列法律法规、政策性指导意见等。中央层面,党的二十大提出“推进各类资源节约集约利用,加快构建废弃物循环利用体系”。《关于全面推进美丽中国建设的意见》要求协同推进降碳、减污、扩绿、增长,维

护国家生态安全。《关于加快构建废弃物循环利用体系的意见》规划,到2025年粉煤灰、煤矸石等大宗固体废弃物年利用量达到40亿t,新增大宗固体废弃物综合利用率将达到60%。《节能降碳中央预算内投资专项管理办法》,明确支持煤矸石、粉煤灰等综合利用,助力碳达峰碳中和目标实现。规模化利用煤基固废已成为我国煤炭行业绿色低碳发展亟待解决的问题。

综上所述,发展多源煤基固废规模化绿色低碳利用技术,健全煤炭绿色低碳开发利用体系,已成为我国绿色低碳转型发展的重大需求,对我国减污降碳、保障能源与大宗原材料稳定供给具有重要意义。本研究首先总结分析了煤基固废特性及环境影响相关研究进展,梳理了现阶段煤基固废规模化绿色低碳利用模式,包括矿井充填、建材制备、生态修复治理和资源提取4种主要方式,并结合当前研究热点,研究了煤基固废绿色低碳利用战略方向与发展路径,包括煤基固废分级分质全组分利用、改性充填协同采空区利用和煤基固废与煤化高盐水/结晶盐协同处置等3个发展方向。

1 我国煤基固废特征

1.1 煤基固废分类

1.1.1 单一类型煤基固废分类方法

1)煤矸石。煤矸石是煤炭开采、分选中产生的固废,主要是煤矿巷道掘进过程中,煤层顶板、底板和夹层岩石被开采出来,以及煤层夹矸层无法分选出来的岩石,还包括原煤分选加工过程中,筛选生产

出的低热值、高灰分的煤矸石等,共占煤炭产量的10%~20%。

2013年,《煤矸石分类》(GB/T29162—2012)从煤矸石资源化再利用的角度,对煤矸石分类方法进行了规范。煤矸石可根据全硫含量、灰分产率、灰成分和铝硅比进行分类,见表1。煤矸石还可以按照岩性差异分类^[18],主要岩性类型包括泥岩和粉砂质泥岩^[19]、粉砂岩、砂岩、碳酸岩和铝质岩等,不同岩性煤矸石物理化学性质差异较大,同时资源化利用方式也不尽相同。此外,煤矸石还可以分为矸石山和采掘新产生矸石^[20],矸石山堆存时间长,其中的炭质组分和含硫矿物发生氧化反应,泥岩等已风化/泥化,矸石结构呈现破碎状和泥状^[21]。采掘新矸石尚未发生风化/泥化,结构上更完整,堆置体内部空隙更多^[22]。

2)煤泥。煤泥主要是选煤厂浮选分离的细粒残渣、煤水混合浆液固液分离后产生的固体残渣以及矿井排水时所掺杂的煤粉,其不同的产生途径所排放的煤泥理化性质、资源潜力也存在差异。通过对煤泥的粒度大小可分为粗煤泥和细煤泥,两者粒径一般以0.5mm为界限。按照灰分含量可分为低灰分煤泥和高灰分煤泥,前者灰分含量一般10%~20%,后者灰分通常大于40%。此外,煤泥还可以按照含水率差异进行分类^[23]。煤泥分类见表2。

3)粉煤灰。粉煤灰主要来源于燃煤电厂锅炉燃烧、循环流化床锅炉燃烧、工业锅炉燃烧产生的残留物,在煤粉在燃烧时,煤中矿物熔融后随烟气上升,经静电除尘或布袋除尘捕获的飞灰等。由于煤质、燃烧工艺、收集措施不同,粉煤灰在矿物组成、化学

表1 煤矸石分类方法

Table 1 Classification methods of coal gangue

按全硫含量分		按灰分分类		按灰成分分类		按铝硅比分级	
类别名称	全硫含量(C_{ts})/%	类别名称	灰分A/%	类别名称	钙镁质量分数	类别名称	铝硅比
低硫煤矸石	$C_{\text{ts}} \leq 1.0$	低灰煤矸石	$A \leq 70.0$	钙镁型煤矸石	$w(\text{CaO})+w(\text{MgO}) > 10$	低级铝硅比煤矸石	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{SiO}_2) \leq 0.30$
中硫煤矸石	$1.0 < C_{\text{ts}} \leq 3.0$	中灰煤矸石	$70.0 < A \leq 85.0$	铝硅型煤矸石	$w(\text{CaO})+w(\text{MgO}) \leq 10$	中级铝硅比煤矸石	$0.30 < w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{SiO}_2) \leq 0.50$
中高硫煤矸石	$3.0 < C_{\text{ts}} \leq 6.0$	高灰煤矸石	$A > 85.0$			高级铝硅比煤矸石	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{SiO}_2) > 0.50$
高硫煤矸石	$C_{\text{ts}} > 6.0$						

表2 煤泥分类方法

Table 2 Classification of coal slime

按照来源分类	按粒径大小分类			按灰分分类	
	类别名称	粒径d/mm	类别名称	灰分A/%	
浮选尾煤	粗煤泥	$d > 0.5$	低灰煤泥	$20 < A \leq 32$	
煤水混合物煤泥	细煤泥	$0.074 < d < 0.5$	中灰煤泥	$32 < A \leq 55$	
矿井排水夹带的煤泥	微细粒煤泥	$d < 0.074$	高灰煤泥	$A > 55$	

成分和微观形貌上具有一定差异,形成了不同的粉煤灰分类方法(表3)。根据炉型不同,粉煤灰可以分为煤粉炉粉煤灰(PC灰)和循环流化床粉煤灰(CFB灰)。PC灰是优质煤粉在煤粉炉(炉温1200~1600℃)中产生,主要矿物为石英和莫来石,目前广泛应用于建材生产^[24]。CFB灰劣质煤(灰分≥30%)和煤矸石等在循环流化床锅炉燃烧产生,具有疏松多孔、细度低、比表面积大等特点^[25],主要矿物为石英、硬石膏、赤铁矿、石灰和碳酸钙^[26]。CFB灰受高硫、高钙、高烧失量等特性限制,资源化利用较少^[27]。

根据煤种不同,粉煤灰可以分为无烟煤、烟煤、次烟煤和褐煤粉煤灰。与之相关,按照氧化钙含量的差异将粉煤灰分为C类和F类,C类粉煤灰是次烟煤或褐煤燃烧产生的高钙粉煤灰, $w(\text{CaO}) > 10\%$; F类粉煤灰是由烟煤或无烟煤燃烧产生的低钙粉煤灰, $w(\text{CaO}) < 10\%$ 。此外,粉煤灰还可以按照粒径、pH和钙/硫比和建材应用条件进行分类^[28],如《粉煤灰混凝土应用技术规范》依据细度、需水比、烧失量、含水量、 SO_3 含量、 $f\text{-CaO}$ 及安定性的不同,将拌制砂浆和混凝土用粉煤灰分为I~III级^[29]。

表3 粉煤灰分类方法

Table 3 Classification of fly ash

按炉型分类		按燃煤品种分类		按钙含量分类		按粒径分类		按pH值分类	
类别名称	类别名称	类别名称	类别名称	CaO质量分数/%	类别名称	最大粒径/mm	类别名称	pH值范围	
煤粉炉粉煤灰(PC灰)	无烟煤粉煤灰	高钙粉煤灰(C类)		>10	I级粉煤灰	0.08	酸性灰	1.2~7	
循环流化床粉煤灰(CFB灰)	烟煤粉煤灰	低钙粉煤灰(F类)		<10	II级粉煤灰	0.15	弱碱性灰	8~9	
	次烟煤粉煤灰				III级粉煤灰	0.30	强碱性灰	11~13	
	褐煤粉煤灰				IV级粉煤灰	0.60			

4)煤气化渣。现代煤化工是煤炭清洁高效利用的重要途径,目前我国布署了内蒙古鄂尔多斯、陕西榆林、宁夏宁东和新疆准东四大煤化工基地^[30],“十四五”期间我国煤化工产业发展目标转化2.2亿t原煤。煤气化渣是将煤在高温、高压及缺氧条件下与气化剂反应,转化为合成气工业过程中煤炭中的无机成分溶解冷却,所形成的固态残渣,主要成分包括未反应炭、矿物质和少量有机物。

煤气化渣按照粒径及排出位置不同可以分为细渣和粗渣,根据煤气化工艺、原煤及研究目的不同,具体粒径划分标准有所差异,但相比粗渣,细渣残炭含量高、石墨化程度低、比表面积大^[31]。按照化学成分不同^[32],煤气化渣可以分为硅质渣、铝质渣、钙

质渣、铁质渣和碳质渣等类型。按照矿物组分差异,煤气化渣可以分为硅铝酸盐、氧化铁、碳酸钙等^[33]。煤气化渣还可以按照物理性质差异进行分类,包括孔隙率、比表面积和密度等。此外,按照资源化利用适用性不同,煤气化渣还可以分为建筑材料、土壤改良与环境修复、化工原料与催化剂载体、能源回收与再利用以及高附加值材料制备等领域用渣^[34]。煤气化渣分类见表4。

5)燃煤炉渣。燃煤炉渣是煤燃烧过程中煤中无机矿物在高温状态下时发生物理化学变化形成的固体废弃物,并在重力作用下汇聚在炉底,最终形成炉渣,有块状、颗粒状和粉末状3种类型,主要成分为氧化物、硅酸盐、氧化钙等。相比煤矸石、煤泥、粉

表4 煤气化渣分类方法

Table 4 Classification of coal gasification slag

按粒径/排出位置分类		按化学成分分类		按孔隙结构分类		按比表面积分类		按密度分类	
类别名称	排出方式	类别名称	特点	类别名称	特点	类别名称	特点	类别名称	特点
煤气化 细渣	由气化炉 底部排渣 锁斗排出	硅质渣	SiO_2 含量高	多孔 结构渣	孔隙丰富, 比表面 积高	高比表 面积渣	粒径小、 孔隙丰富, 吸附强	高密度渣	结构致密, 力学强 度高
煤气化 粗渣	气化炉顶 部由粗煤 气携出	铝质渣	Al_2O_3 含量高	少孔 结构渣	孔隙较少, 结构相 对致密	低比表 面积渣	比表面 积较小	低密度渣	孔隙率高, 轻质成 分多
		钙质渣	CaO含量高,以化合物为主						
		铁质渣	Fe_2O_3 含量高,游离态、结合态						
		碳质渣	粗渣残炭量5%~30% 细渣残炭量30%~50%						

煤灰和煤气化渣,燃煤炉渣产生量偏小,尤其是煤粉工业锅炉只产生粉煤灰,而不产生炉渣。燃煤炉渣相关研究也偏少,包括物理化学特性、分类和资源化利用等。可以参照粉煤灰、煤气化渣等分类方法,对燃煤炉渣进行分类。

1.1.2 原性与变性煤基固废分类方法

我国是煤炭开采与利用大国,煤炭工业体系全面,不同环节产生的煤基固废种类多、产生量大。由1.1.1节论述可知,目前煤基固废分类方法研究主要是对单一类型的固废按照物理化学性质或用途差异进行分类。

在前述单一类型煤基固废分类方法的基础上,笔者从煤炭开发利用层面上将多源煤基固废分为原性煤基固废和变性煤基固废两大类。从物质组分来讲,煤基固废主要是原煤中炭质组分之外的杂质组分。根据杂质组分是否发生复杂的物理化学变化及固废产生阶段,煤基固废可分为原性和变性煤基固废两大类,基于煤基固废理化性质的全资源化开发,是实现煤基固废绿色低碳利用的重要途径。原性煤基固废是在煤炭生产阶段(开采、分选)产生的煤矸石、煤泥,以煤层中的炭质岩为主,加少量顶底板混入岩块,是炭质、泥岩和砂岩等多种混合物,具备按煤/土/砂/石分质利用的天然条件。变性煤基固废是在煤炭利用阶段,煤经过高温燃烧或转化产生的粉煤灰、燃煤炉渣、煤气化渣等,富含铝硅基化合物,火山灰活性显著,具备开发胶凝、固碳等功能性材料的基础条件。

1.2 煤基固废存量与增量

1.2.1 原性煤基固废存量与增量

据不完全统计,我国原性煤基固废累积堆存量超90亿t,且仍以每年约10亿t增长(图1),以堆存处置为主,综合利用率低。其中,煤矸石山2600多座,累积堆存量超70亿t,且仍以每年约8亿t持续增长。煤泥多与煤矸石混合堆存,累计堆存量约20亿t,且仍以每年超过2亿t持续增长。

1.2.2 变性煤基固废存量与增量

据不完全统计,我国变性煤基固废累积堆存量超43亿t,且仍以每年约9亿t增长(图2),资源化利用率低,地面堆存占用大量土地资源。其中,粉煤灰累积堆存量超40亿t,且仍以每年8亿~9亿t持续增长。煤气化渣累积堆存量超3亿t,且仍以每年超6000万t持续增长。

1.3 煤基固废物理特性

研究煤基固废物理特性对其资源化利用具有重

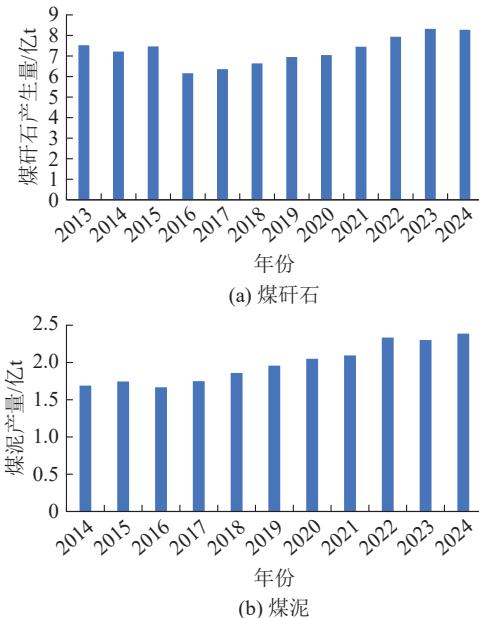


图1 原性煤基固废存量与增量
Fig.1 Stock and increment of original coal-based solid wastes

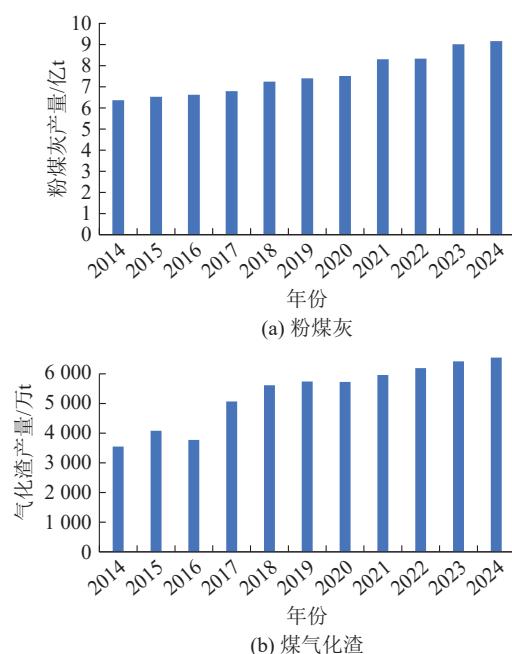


图2 变性煤基固废存量与增量
Fig.2 Stock and increment of denatured coal-based solid wastes

要指导意义。由于不同类型的煤基固废在物理特性上存在差异,因此其资源化利用途径也各有侧重。

1.3.1 原性煤基固废物理特性

1)煤矸石。煤矸石物理特性是其优选资源化利用方式、工程系统设计、设备选型的关键依据。煤矸石关键物理特性包括:含水率、力学特性、粒径、密度、坚固性系数、磁性、电性外观等。①含水率。掌握煤矸石在不同条件下的含水率变化规律,对于研

石破碎系统设计及矸石浆体合理浓度设计具有重要意义。如煤矸石充填等工程中,必须严格控制破碎系统煤矸石入料含水率,含水率过高,不仅严重降低破碎效率,导致破碎后的矸石粒径级配与设计粒径级配存在较大差异,还会堵塞振动筛、下料斗等装置。②力学特性。煤矸石中的泥岩组分强度低,容易遇水泥化,未经分质的煤矸石用作砂石骨料容易造成混凝土材料流动性差、强度低,无法达到煤矿井下巷道喷浆、混凝土底板等工程要求。为此,煤矸石用作混凝土砂石骨料前一般测定压碎值,泥岩、砂岩、灰岩型煤矸石压碎值一般分别为20%~35%、15%~25%和8%~13%。③物理分选特性。煤矸石全组分资源化利用的前提是煤矸石不同组分的识别与分选,分选对象主要为残煤、单一岩性矸石,识别分选技术主要包括:传统分选技术(跳汰、重介质、斜槽、摇床、风力)和新型分选技术(图像识别和伽马射线识别)^[35-36],涉及的主要物理特性包括粒径、密度、硬度、磁性、电性外观等^[37-38]。

2)煤泥。煤泥最常用的物理指标为含水率、粒径级配、黏度(流动性)、密度孔隙和硬度脆性,以上物理性质对煤泥资源化利用有重要影响。①粒度分布。煤泥大部分颗粒粒径小于1 mm,0.075 mm以下的微粒一般占比70%~90%。粒径分布主要受矿物组分、采洗工艺影响。较细的粒度,接触面积大,有利于提高燃烧效率,但容易团聚和扬尘。②含水率。高含水率增加了储运难度,增加加工过程中的烘干或其他预处理工艺的成本和能耗,并影响后续加工工艺的稳定性和效果。含水率不同,煤泥的脱水工

艺存在差异,主要有圆盘真空过滤机脱水、折带式过滤机脱水、压滤机脱水。③黏性与流动性。煤泥中的黏土矿物、煤粉颗粒细小,比表面积大,颗粒吸附水分子形成黏性水膜,使煤泥表现出较大的黏性。在储存方面,高黏煤泥易堆积在一起,难以清理和转运;在输送方面,高黏煤泥会堵塞管道或输送带;在加工方面,高黏煤泥会影响煤泥的均匀混合和化学反应的进行。

1.3.2 变性煤基固废物物理特性

粉煤灰、煤气化渣和燃煤炉渣均属于变性煤基固废,均由煤炭在高温作用下产生的固废,三者在物理性质方面存在诸多相似特性。

从工程应用的角度来讲,变性煤基固废常用物理特性指标有密度和堆积密度、粒度与细度、比表面积与孔隙率、颜色、需水量比、坚固性系数、磨耗性等。其中,密度和堆积密度对料仓及储料仓设计的重要依据;粒径级配与细度、比表面积等相关,变性煤基固废粒径越小,活性成分与水化产物的接触面积越大,反应能力越强。

不同于粉煤灰和燃煤炉渣,煤气化渣为湿排废渣,含水率可高达50%~60%,脱水是煤气化渣处置工艺流程的重要环节,含水率指标是确定工艺方案与设备选型的关键物理指标。

1.4 煤基固废化学特性

1.4.1 物质组成

高温历程使原性煤基固废和变性煤基固废在化学成分和矿物组分上产生了巨大差异(表5),需要进一步分析,具体如下:

表5 原性与变性煤基固废对比
Table 5 Comparison of original and denatured coal-based solid wastes

类别	固废名称	来源	细分亚类	产生情况	主要特征	主要元素	主要组分
原性煤基固废	煤矸石	煤炭开采/分选	掘进矸石	常温分选	炭质、泥质和砂质页岩的混合物,低发热值,含炭20%~30%	Al、Si、Fe、Ca、Li、Ga	炭质、 Al_2O_3 、 SiO_2
			开采矸石				
			分选矸石				
变性煤基固废	煤泥	煤炭分选	炼焦煤浮选尾煤	水中分选	粒度细,黏性大,含水量高	Al、Si、Fe、Ca、Li、Ga	炭质、 Al_2O_3 、 SiO_2
			动力煤浮选尾煤				
变性煤基固废	粉煤灰	电厂/锅炉	未细分	>1 200 ℃,急冷	微球状,比表面积大,高水化活性	Al、Si、Fe、Ca、Li、Ga	玻璃相、莫来石/刚玉、铁质微珠
			细渣				
			粗渣				
变性煤基固废	煤气化渣	气化炉	煤渣	1 300~1 500 ℃	气化炉顶部由粗煤气携出 气化炉底部排出的含水渣	C、Al、Si、Fe、Ca、Li、Ga	炭质一般>30%,玻璃相组分10%~30%
变性煤基固废	炉底渣	电厂/锅炉	煤渣		排出温度高,需粉碎并冷却后再排放到灰库	Al、Si、Fe、Ca	Al_2O_3 、 SiO_2 、 FeO 、 CaO

1)原性煤基固废。原性煤基固废富含有机碳、高岭土、石英、钾长石等矿物组分,主要化学成分是

SiO_2 、 Al_2O_3 、C,及数量不等的 FeS 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 、 SO_3 、 Li_2O 和稀有元素(镓、

钒、钛、钴)等。煤矸石、煤泥还广泛应用于生态复垦、修复和改良,相关化学评价指标包括:N、P、K、腐植酸和有机质等元素及成分。腐植酸和有机质可作为优质肥料,氮、磷、钾则是植物生长不可缺少的元素。原性煤基固废地表堆存过程中,其中的C、S等组分会与氧气发生氧化反应,释放有害气体和有机物。

2)变性煤基固废。经燃烧、热解、气化,煤中稀有元素、重金属元素等在变性煤基固废中得到富集, SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 等通常转变为活性硅酸盐矿物。粉煤灰等变性煤基固废中富集铝、锗、镓、锂、稀土等战略性矿产资源,提取实现资源化利用,支撑保障国家矿产资源安全。如内蒙古胜利煤田、伊敏煤田富含航空航天战略资源金属锗,内蒙古准格尔煤田、大青山煤田、山西沁水煤田和四川盆地渝东南煤田富含大量国家稀缺的铝、镓、锂等战略矿产资源^[39-40]。

1.4.2 水化活性

煤中的 SiO_2 和 Al_2O_3 等在高温作用下,转变为非晶相,这些组分在碱性环境下发生水化反应,生成水化凝胶C-S-H、C-A-S-H、C-A-H和钙矾石AFt^[41]。水化反应产物能够填充混凝土中的孔隙和裂缝,提高混凝土的密实度和强度,从而提高力学强度。变性煤基固废应用于矿井胶结充填、水泥辅料、预制品均是利用其水化反应活性。相比 C_3A 、 C_3S 、 C_2S 、 C_4AF 等硅酸盐矿物,变性煤基固废中的 SiO_2 和 Al_2O_3 发生火山灰反应速度慢,水化放热低,总体呈现出早期强度低、后期强度高的规律。

1.4.3 酸碱性

煤基固废的pH可以在很大程度上影响其环境影响、生态效应以及工业应用,特别是水环境的影响至关重要。如果煤基固废具有过高或过低的pH值,可能导致土壤污染、水体污染以及对周围植被和生物产生负面影响。原性煤基固废pH一般6~9,近中性。变性煤基固废一般含 CaO 和 MgO ,拌和料浆过程中, CaO 和 MgO 水化分别生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,pH值升至11~13。因此,变性煤基固废在资源化利用过程中,需考虑碱性污染问题。

2 煤基固废环境影响

原性和变性煤基固废中含有大量的污染物。原性煤基固废方面,煤矸石中存在 Hg 、 Cr 、 Cu 、 Sb 、 Zn 、 Cd 、 As 、 Ni 和 Se 等重金属元素和16种多环芳烃等^[42-45]。风化煤矸石中16种多环芳烃分布模式与

新鲜煤矸石相似,风化煤矸石中16种多环芳烃的浓度高于新鲜煤矸石,这可能由于煤矸石中的大分子经过风化过程被分解成更多小分子,使多环芳烃更容易被提取^[46]。而变性煤基固废经过高温过程,其中的污染物会发生复杂的迁移演化,而对于不同的重金属,其迁移程度不同。总体而言,挥发性较高的重金属在经过高温过程中挥发或与变性煤基固废中其他成分反应生成挥发性较高的化合物,随着烟气冷却而附着在变性煤基固废表面^[47]。综上,原性、变性煤基固废中污染物不容忽视,并且其含量差异较大。随着环境污染问题日益突出,煤基固废中污染物质在土壤、水体和大气中的迁移过程引起了学者的广泛关注。

2.1 占用土地与土壤污染

如图3所示,煤基固废中的重金属元素在酸性条件下通过地表水长期浸出释放出来,最终影响周围土壤^[48]。其中,Pb、Cr和Ni以证明对儿童致癌的风险^[49-50]。煤矿开采和煤基固废地表堆存所造成的土壤污染遍布全国各地。例如,某煤电基地的煤矸石场、粉煤灰场和脱硫石膏场的周边土壤中Cr和Mn的含量超过土壤环境背景值^[51]。多环芳烃具有致畸、致突变的效应,同时具有神经毒性,使人体的内分泌系统发生改变。土壤通常被认为是环境中多环芳烃的主要汇集区^[52]。与其他区域土壤相比,煤矿区域的表层土壤成分更为复杂。已有大量研究表明煤矿区周围土壤受到多环芳烃的污染^[53]。综上所述,煤基固废中污染物对土壤造成的污染不容忽视。

2.2 水资源污染

煤基固废在地表堆存的过程中通过接触相邻环境、雨雪淋溶和浸泡等方式,其中污染物质被浸出,进而对地表水和地下水环境造成一定程度的不利影响^[54-56]。例如煤矸石中含有大量的硫元素和重金属元素,其在长期的雨水淋溶作用下,极易形成煤矸石山酸性废水。其废水的色度、酸度均严重超标,会对矿区附近水泵、管道和轨道等设备造成腐蚀或损坏^[57]。此外,煤矸石山酸性废水中重金属含量较高,其排放到周边环境中,会造成土壤退化、水体酸度下降和水生动植物的死亡^[58]。浸出试验已经被广泛应用于研究煤基固废重金属离子释放和迁移规律^[59]。研究表明,煤基固废的粒径、浸出液的pH和风化程度对重金属浸出有显著影响。而煤基固废在实际的工程应用中暴露在更为复杂的环境要素中。如图3所示,在煤矸石充填到地下采矿空间后,矿井水从含

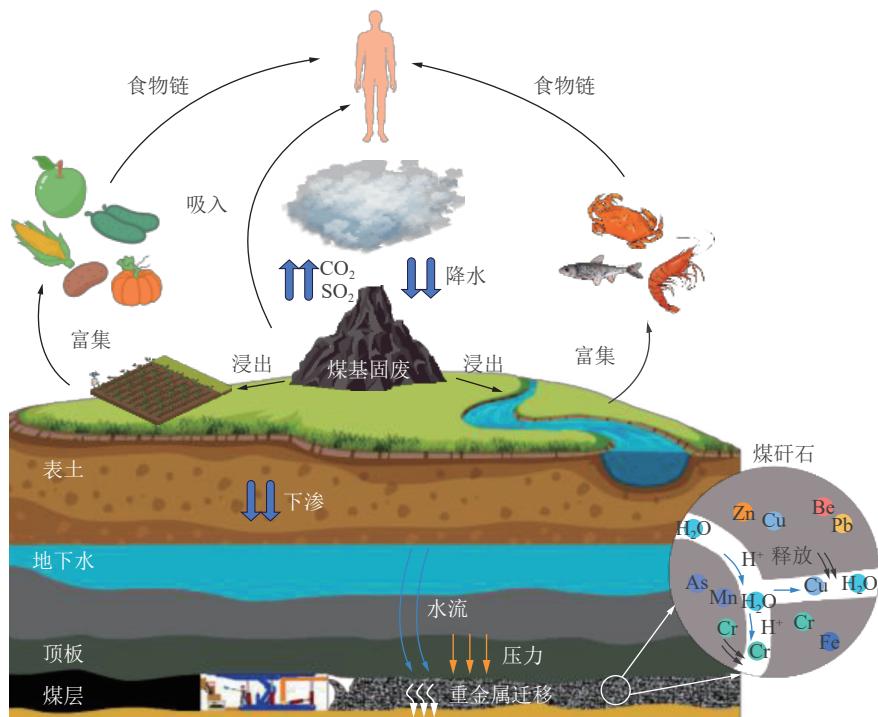
图 3 煤基固废地表堆存的环境影响^[48]

Fig.3 Impact of multi-source coal-based solid waste stockpiling on surface environment

水层渗入采空区。为煤矸石创造了一个动态的可渗透环境。同时,在上覆岩层的压力作用下,煤矸石中的堆积密度、粒度分布和颗粒损伤形态发生变化,这影响了煤矸石之间间隙中矿井水的流动状态从而影响重金属的释放速度,威胁环境和生态健康^[59]。

2.3 大气污染与碳排放

煤基固废不仅占用了大量的土地资源,而且在其储存和处理的过程常常会释放出很多有害气体^[60]。以煤矸石为例,在将其应用在建筑材料生产时,通常需要在 600~1 000 °C 下煅烧,以排除黏土矿物中的碳和结合水。煅烧过程中产生的气态污染物包括二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)和挥发性重金属(As、Cd、Cu、Ni、Se、Sn 和 Zn)等,其引起的各种环境问题并对人体健康构成相当大的威胁^[61]。NO_x 排放主要归因于煤矸石中氮元素的氧化。已有研究结果表明,煤矸石中氮元素的转化率随着温度的升高而增加。由于煤矸石中硫含量较高,在煅烧过程中也会产生大量的 SO₂,造成大气污染^[62]。此外,粉煤灰的扩散能力显著,可以通过空气传播。细小的粉煤灰颗粒很容易被风携带,导致其中的有毒成分的长距离扩散。粉煤灰通常包含高浓度的有害元素,例如 Pb、As 和 Cd,吸入后会导致呼吸系统问题、心脑血管疾病、免疫力减弱和肺癌风险的增加^[52]。

此外,煤基固废中普遍存在残炭,在其处理和利用过程中需要谨慎处理碳效应^[63]。以煤矸石为例,

煤矸石在一定条件下可以自燃,向大气中排放大量 CO₂,这会加剧空气污染^[64],探索煤基固废规模化绿色低碳利用等创新技术迫在眉睫。

3 煤基固废规模化绿色低碳利用模式

3.1 矿井充填领域

煤基固废在矿井充填领域的规模化利用是一种环保和资源综合利用的技术,能够有效实现“煤-废-碳”协同发展,实现煤炭减损化开采,固废高值低碳化应用,达到工业生产与环境协调持续发展。从煤基固废充填材料的角度出发,固废矿井充填利用的关键技术要素包括全固废胶凝材料研发、充填材料配比设计以及基于功能需求的不同应用场景,上述要素决定了充填的应用模式。一般基于煤基固废的矿井充填应用模式如图 4 所示。

3.1.1 全固废胶凝材料

煤炭工业基地具有十分完善的工业体系,生产过程中排放大量的原性固废(如煤矸石、污泥)和变性固废(粉煤灰、煤气化渣、燃煤炉渣等)。原性固废伴随资源开采时产生,变性固废则是在资源利用过程中副产。因此,一般原性煤基固废具有产量大的特点,变性煤基固废则具有种类多、波动大、潜在价值高等特点。

部分变性固废具有潜在的胶凝活性,但是难以直接利用,一般需要将固废进行分选或改性处理后,

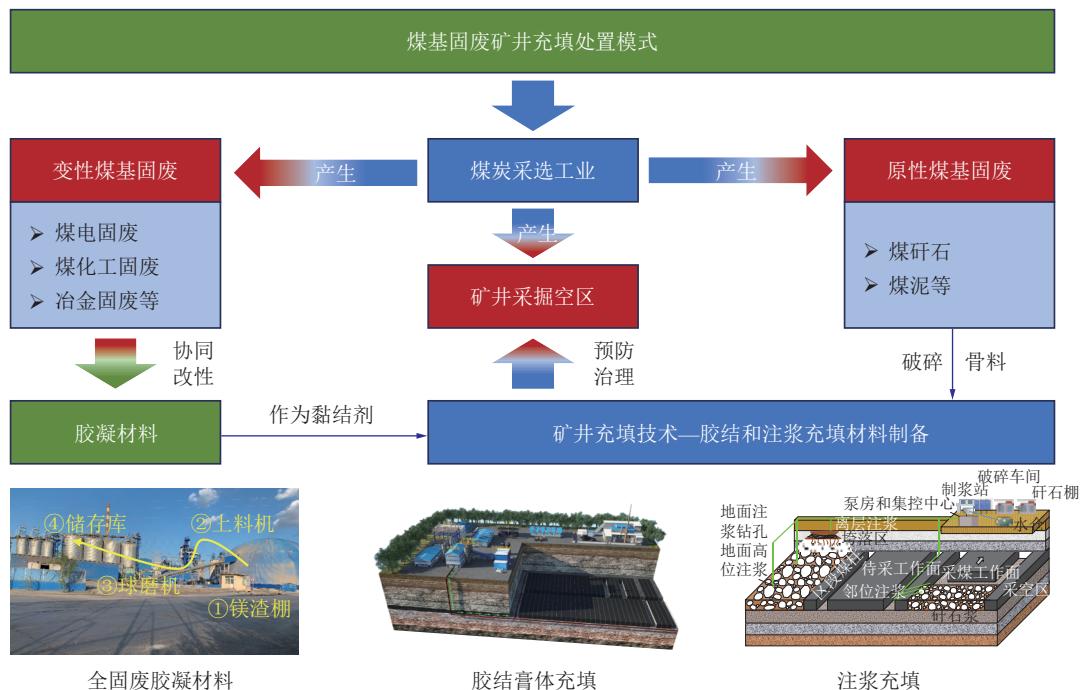


图4 煤基固废矿井充填处置模式
Fig.4 Backfilling of coal-based solid wastes

再进行二次开发利用。王双明和刘浪等^[1]提出基于“废”的功能化利用关键技术,以固废改性提供物质基础,依据多元固废的协同作用机制,开发了一种性能稳定的全固废矿用胶凝材料。其本质是利用固废基盐碱改性粉煤灰、燃煤炉渣和煤气化渣等具有潜在胶凝活性的煤基固废,开发水硬性胶凝材料。

3.1.2 全固废膏体充填

全固废胶结充填是将煤矸石、全固废胶凝材料混合制备成质量分数为70%~80%的膏体材料,利用充填泵或自溜通过管路输送到井下充填采空区中。自然固化形成具有强度的稳定支撑结构,控制岩层移动、地表沉陷、消纳固废。一般用于沉降风险较高的大空间采空区。

胶结膏体充填适用于不同的充填工艺,目前常见的有短壁连采连充和综采架后充填开采^[1,4]。短壁连采连充是采用连续采煤机以掘巷的方式进行采煤,同时充填掘巷采空区。综采架后充填基于长壁工作面布置,采用充填支架支护,每推进一个充填步距,在工作面后方沿充填支架后体做隔离,形成充填空间。充满并达到设计早期强度后,采煤机向前推采。

胶结膏体充填施工较为简单,成本较低,但对充填材料的配比和质量控制要求较高,此外需要根据工艺需求动态调整性能指标。目前,团队以改性镁渣协同变性煤基固废为胶凝材料,破碎煤矸石为骨料进行了建筑物下特厚煤层全固废连采连充开采实

践^[65],为国内“三下”压煤的开采及全固废充填提供了经验。

3.1.3 全固废注浆充填

全固废注浆充填是对胶结膏体充填应用场景的补充,其适用于地质条件复杂、裂隙较多的矿井,能够有效渗透狭小空洞和裂缝。注浆充填材料是将破碎煤矸石等固废、少量或零添加全固废胶凝材料和水混合形成流动性较好的料浆,浓度远低于胶结充填。通过高压注入采空区或裂隙中,料浆固化后形成坚固的充填体。注浆充填根据功能又分为离层注浆充填和采空区注浆充填;根据注浆钻孔空间位置可分为地面高位注浆、巷道邻位注浆和低位灌浆充填^[1]。离层注浆充填是基于关键层理论,通过向关键层下方的采动裂隙或空间高压注入浆体材料,形成压实承载机构,对关键层形成支撑,防止其断裂,进而控制覆岩变形,实现地表减沉的目的^[66]。采空区注浆一般直接将料浆直接充入垮落采空区破碎岩体中,减小地表沉陷并处理固废。此外,部分注浆充填还兼具防治水、灭火等功能。

浆体充填的充注工艺较为成熟,全固废浆体充填技术的关键在于精准制浆。精准制浆技术是指通过破碎、筛分和固废复配等技术手段获得需求粒级,而后通过定量控制实现特定全固废浆体浓度的精准制备^[67]。王比比等^[68]采用粉煤灰离层注浆技术后地表下沉系数减少到0.15~0.17,减沉率75.8%~

79.3%。

3.2 建材制备领域

近年来,随着环保要求的日益提高和资源循环利用理念的普及,煤基固废在建筑材料领域的绿色

低碳规模化利用逐渐成为研究热点^[69]。煤基固废通过一系列物理、化学和机械加工工艺,转化为高性能的建筑材料,如水泥辅料、筑路材料、预制件等^[70-72],如图5所示。

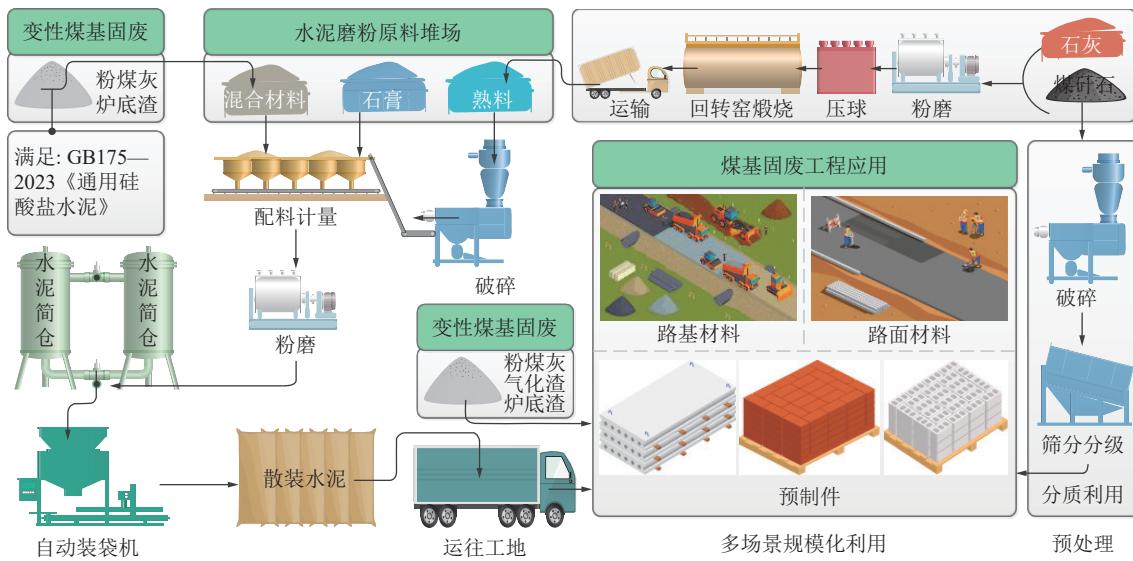


图5 煤基固废建材规模化处置模式

Fig.5 Large scale disposal mode of coal-based solid waste building materials

3.2.1 煤基固废水泥辅料

煤基固废在水泥辅料中的应用主要包括熟料煅烧和外掺料2个方面。煤矸石常作为硅铝质原料替代黏土参与水泥熟料的煅烧过程,能够促进硅酸三钙、硅酸二钙和铝酸三钙等矿物的生成,同时有效降低熟料煅烧过程中的热能消耗,从而减少水泥生产的整体成本^[73-74]。粉煤灰、炉渣等变性煤基固废含有大量的无定型硅铝酸盐玻璃相,其化学成分与水泥相近,具有潜在的胶凝活性,常被用作水泥的混合材料,替代部分水泥熟料,降低生产成本的同时也降低水泥生产中的能耗和二氧化碳排放^[75]。此外,变性煤基固废添加还能改善水泥的性能,如提高水泥的强度、耐久性、抗冻性和流动性。这主要是源于煤基固废中的二氧化硅、铝等成分有助于形成硅铝酸盐水化产物,从而增强水泥的性能。尽管如此,煤基固废在水泥辅料中的应用仍面临一些挑战。例如,粉煤灰中的有害物质(如:残炭和重金属等)可能会影响水泥的性能,因此需要严格控制其品质。

3.2.2 煤基固废筑路

煤基固废在筑路工程中的应用主要体现在路基填料和路面材料2个方面。粉煤灰、煤气化渣等因其良好的工程性能,如低吸水性、高稳定性等,常被用作路基填料。研究表明,煤基固废可以有效提高路基的承载能力和稳定性,减少路基沉降。煤矸石

则常被用作路面材料,经过破碎和筛分处理后,可以作为骨料添加到混凝土中,制备出性能优良的道路混凝土^[76]。煤基固废混凝土具有轻质、高强度等特点,适用于各种道路工程。尽管煤基固废在筑路中有较大应用潜力,但也面临一些争议和技术挑战,一方面,煤基固废的使用可能引起环境污染问题,尤其是其中所含的重金属成分可能通过渗滤作用进入地下水。另一方面,由于煤基固废的粒度和矿物组成差异较大,如何保证其在不同地质条件下的稳定性和一致性,仍需要进一步解决。

3.2.3 煤基固废建筑预制件

煤基固废在预制件中的应用主要体现在发泡陶瓷和混凝土制品2个方面。发泡陶瓷是一种新型无机建筑材料,具有轻质、不燃、保温、隔热、防水防潮等特性。煤矸石和煤气化渣等可以作为发泡陶瓷的主要原料,制备出性能优良的发泡陶瓷制品^[72]。煤基固废还可以用于生产各种预制件,如砖、板、梁等,具高耐久性和抗冻性等特点,适用于各种建筑结构。然而,煤基固废的强度和密度相对较低,因此在实际应用中需要对其进行适当的预处理,这也一定程度上限制了煤基固废的规模化应用。

综上所述,煤基固废在建筑材料领域的规模化利用具有重要意义。通过将其应用于水泥辅料、筑路和预制件等方面,不仅可以减少对自然资源的依

赖,还能降低建筑材料的生产成本,提高工程质量
和安全性。然而,煤基固废成分复杂,不同地区煤
基固废的成分和性质存在较大差异,因此需要针对
不同种类的煤基固废开发相应的资源化利用
技术。



图 6 煤基固废用于生态修复与治理^[77]
Fig.6 Ecological restoration of coal-based solid wastes^[77]

3.3.1 塌陷区回填

塌陷区是指在煤矿开采活动后,煤层开采后造成地下空洞,并未进行充填工作,随着时间延长以及开采程度增大,进而造成的地表出现下沉的现象,同时塌陷区极易出现滑坡、泥石流等地质灾害^[78-80]。塌陷区坑道填埋后,还有助于恢复土地的使用价值,促进生态环境的可持续发展。

利用煤矸石、粉煤灰、脱硫石膏等固废进行回填,可以实现对该区域的地势地貌进行人为干预,使其底层具有保水、透气以及养分富集的优势,为后续土地利用,打下坚实的基础。而现阶段对塌陷区坑道回填依据其后续用途,分为了不同的回填工艺,其中包括但不限于:农业用地回填,注重煤基固废的养分以及重金属含量,针对煤矸石、粉煤灰等养分含量较高的固废,进行加工使其养分富集,增加回填区域的有机质、养分等含量,提高区域土壤肥力,逐步恢复土地的农业利用价值^[81];建设用地回填,选用质量高性质稳定的煤基固废作为回填材料,采用强夯法、桩基法等方法分层回填,提高煤基固废回填后地基的稳定性和承载能力。同时设置防渗层和排水系统,

3.3 生态修复领域

煤矸石、煤泥含有腐植酸等有机物和N、P、K、B、Zn、Cu等植物生长的微量元素,可用于制备土壤改良剂、透气保水材料、农肥等用于生态修复的材料^[77](图6),还能促进生态循环^[1,69]。

以防止地下水渗透和积水对地基造成损害。

3.3.2 盐碱地/沙化地改造

土地改造是指对发生退化的土壤进行整治恢复并加以利用的过程^[82-84]。而土地改造中土壤结构以及生态修复环节极为重要^[85]。现阶段土地改造中常采用客土覆盖的方式,但该方法易引发取土地生态破坏、改变覆土区土壤结构等诸多问题,且成本较高。而利用煤基固废进行改造可避免此类问题,采用土层重构的方法改造^[86],采用煤矸石、煤气化渣、粉煤灰等煤基固废构建保水层,高养分的煤矸石、粉煤灰、脱硫石膏以及炉渣等固废作为改造后土壤养分来源,通过改善改造后土壤理化性质以及养分结构,促进区域生态恢复^[87]。与此同时煤基固废中还含有一定的重金属^[88],在使用中不可避免地会出现析出等问题,对于改造的土地应定期检测,确保不会有重金属污染的二次危害。

3.3.3 制备农肥与土壤改良

随着农业过度开发、不合理耕作及过度使用化肥农药,导致土壤品质当前正面临下降问题,亟需土壤改良^[89]。而利用煤矸石、粉煤灰等煤基固废中的

养分进行土壤改良已经取得一定的效果,煤基固废中含有有机质、矿物质和微量元素,可增强土壤的肥力,促进植物的生长和发育^[90]。而粉煤灰等固废的多孔结构则能增加土壤的孔隙度和降低土壤的容重,提高土壤的保水性和通气性^[91]。利用煤气化渣制备土壤调理剂对贫瘠化地具有一定效果^[92];在土壤改良过程中加入脱硫石膏可以降低土壤的pH和碱度,改良盐碱地,同时其富含钙和硫等元素,能促进植被生长^[93]。并且可以利用煤基固废与其他动物粪便,以及微生物菌剂等协同制备高养分的农业肥料用于土壤改良^[94-96]而现阶段将煤基固废用于土壤改良方面已经取得一定成果,但仍存在重金属隐患、加工成本高等难题,还需聚焦于开发低成本、高效且能安全处理有害物质的途径,为利用煤基固废进行生态修复提供创新性新技术。

3.4 资源提取领域

煤基固废除了含有 Si、Ca、Mg、Al、C、O 等主要元素之外,还含有 Fe、S、Li 和稀有元素(镓、钒、钛、钴),部分区域的煤基固废中的某些元素达到工业矿石品位,可用作矿产资源,如图 7 所示。

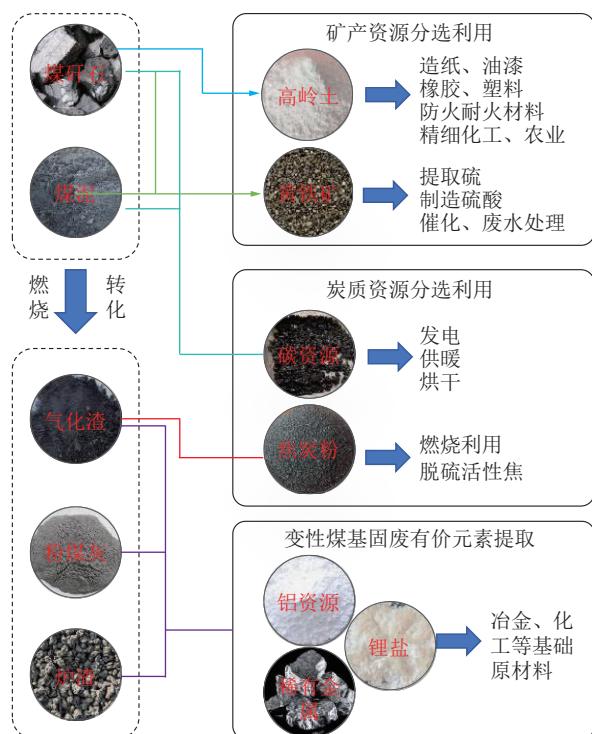


图 7 煤基固废资源提取利用

Fig.7 Resources extraction and utilization from coal-based solid wastes

3.4.1 炭质资源利用

煤矸石、煤泥和煤气化渣中炭质组分占比高,采用分选技术提取高炭组分,可用作炭质资源。炭含

量大于 20% 的高炭煤矸石可直接用作锅炉的燃料,而炭含量小于 20% 的煤矸石则需掺入一定比例高含炭量和高发热量的煤泥、中煤等才能进行燃烧发电利用^[97]。我国每年产生可用于发电的煤矸石、煤泥、洗中煤等低热值煤资源 3 亿 t 以上,劣质煤能源资源利用需求迫切。当前,我国劣质煤综合利用电厂超 400 个,建成了世界参数最高、机组容量最大、最先进的超超临界循环流化床发电机组,包括陕西彬长、贵州盘南的 2×660 MW 超超临界循环流化床锅炉低热值煤发电,其中后者每年可消纳 360 万 t 的煤矸石和煤泥。受煤气化炭质组分转化效率限制,煤气化渣仍含有较高比例的炭质组分,尤其是细渣。有研究显示,煤气化渣 0.250~0.125 mm 粒级含量较高,产率为 32.36%,灰分为 23.96%,固定炭较高,具有综合回收利用价值。不同于煤矸石分选出的炭质组分,煤气化渣炭质组分经历了高温作用,具有焦炭粉的特性^[98]。因此,由煤气化渣分选的炭质组分,可用于制备活性焦等产品。炭质资源利用完后,形成大量分选后的原性煤基固废或掺烧、气化后的变性煤基固废,因此还需配合其他利用方式,实现煤基固废的完全利用。

3.4.2 有价元素提取

原性煤基固废中微量元素含量一般偏低,但随着提取技术的不断进步,从中提取稀土等关键矿产具有一定的潜在价值,有望为稀土资源的供应提供补充。当原性煤基固废中铁、铝、铜、锌等元素含量较高时,采用焙烧、浮选、浸出、萃取、沉淀等工艺可进行提取^[99]。煤炭在燃烧或转化过程中,微量元素在变性煤基固废中会得到富集,如粉煤灰等变性煤基固废中富集铝、锗、镓、锂、稀土等战略性矿产资源,提取实现资源化利用,可以支撑保障国家矿产资源安全。内蒙古胜利煤田、伊敏煤田富含金属锗(航空航天战略资源),内蒙古准格尔煤田、大青山煤田、山西沁水煤田和四川盆地渝东南煤田富含大量国家稀缺的镓、锂等战略矿产资源。如山西的部分企业采用酸浸法从粉煤灰中提取氧化铝、锂盐,提高了粉煤灰的附加值。同炭质资源利用一样,煤基固废用于提取资源后,还会副产大量的固废,且这一类固废更难处置,这也是制约煤基固废资源提取利用的瓶颈之一。

3.4.3 高岭土分选

中国是高岭土资源大国,探明储量为31亿t,其中煤系高岭土16.7亿t,占总储量的50%以上。煤系高岭土主要分布在我国内蒙古准格尔、乌海和包头,陕西神府、渭北,山西大同和平朔,山东兗州、淄

博,河北唐山,江苏徐州。为推动煤系高岭土产业发展,山西省2022年发布了《关于支持煤系高岭土材料产业高质量发展的意见》。煤系高岭土矿物成分主要由高岭石、埃洛石、水云母、伊利石、蒙脱石以及石英、长石等矿物组成。高岭土应用范围广,在造纸、油漆、橡胶、塑料、防火耐火材料等各行业广泛使用关系着现代工艺的发展,随着制取工艺的优化,

制备的高岭土在吸附性、化学稳定性、细度、粒径分布等性能大幅提升,已经研发了规模化粗细磨一体煅烧制高岭土技术和装备,但粗磨、细磨、煅烧3项技术依旧限制煤矸石制高岭土工艺发展的核心因素。

在以上论述的基础上,总结了煤基固废规模化利用主要途径、评价指标和相关标准,见表6。

表6 煤基固废规模化利用主要途径、评价指标和相关标准

Table 6 Main approaches, evaluation indicators and relevant standards for the large-scale utilization of coal-based solid wastes

途径	细类	适用固废	主要评价指标	部分标准依据
矿井充填领域	胶结充填	CG, CS, FA	有机质含量、水溶性盐总量、pH值、重金属、污染性有机物、炭含量、泥质含量、含水率、粒径等	GB 18599 NB/T 11432
	充填固废胶凝材料	CGS, FA, FS		
	注浆充填	CG, CS, FA, FS		
建材制备领域	水泥辅材	FA, FS	细度、需水量比、烧失量、含水率、 $w(\text{SO}_3)$ 、 $w(\text{f-CaO})$ 、 $w(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 、密度、安定性、强度活性指数、铵离子含量、压碎值、强度、粒径、泥质含量、放射性等	GB/T 1596 GBT 27974 DB 13/T 5527 JC/T 525 GB/T 29162 GB/T 29163 GB/T 42350
	制备混凝土	CG, FA		
	混凝土预制建材	CG, FA, CGS, FS		
	矸石路基材料	CG		
	陶瓷砖、陶粒等	CG, FA, FS		
生态修复领域	矿区回填	CS, FA, CGS	有机质含量、水溶性盐总量、pH值、重金属等	GB 18599
	盐碱地改良	CG, CS, CGS, FS		
	风沙地改良	CG, CS, FA, CGS		
资源提取领域	肥料	CG, CS	灰分、有机质含量、污染物含量	GB/T 29163
	碳质资源	CG, CS, CGS	炭含量、基低位发热量、灰分、硫分、水分	GB/T 29162 GB/T 29163 GB/T 39201
	提取铝、镓等	CG, FA, FS	Al_2O_3 含量、铝硅比、附水	
	提取硫精矿	CG, CS	黄铁矿含量	
	提取高岭土	CG, CS	高岭土质量分数	
	提取锂盐	FA, FS	Li含量	—

注: CG, CS, FA, CGS, FS分别指代煤矸石、煤泥、粉煤灰、煤气化渣、燃煤炉渣。

4 煤基固废规模化绿色低碳利用创新路径

4.1 煤基固废分级分质全组分利用

由1.1节我国煤基固废特征分析可知,原性煤基固废受地质条件、分选工艺等因素影响,变性煤基固废受煤种、燃烧炉型、气化工艺等因素差异,导致多源煤基固废组分类型多,物理化学差异大。现阶段,原性煤基固废资源化利用以矿井充填、掺烧发电与取热、地面复垦与平整、路基垫材等为主,总体以粗放式利用为主,变性煤基固废以胶凝材料、水泥辅料、预制建材为主。然后,根据不同原性、变性煤基固废资源属性特点,其具有作为能源资源、矿产资源、建筑材料、功能材料4大利用途径。能源资源:高炭煤矸石、煤泥、煤气化细渣,用于掺烧发电、供暖、烘干等。矿产资源:铝、锗、镓、铁及稀有金属元素,可用作大宗矿产资源。建筑材料:煤基固废用作砂石骨

料、胶凝材料、预制件。功能材料:载冷、蓄热、储能、储碳等。

煤基固废规模化利用技术需要多途径资源化利用方式,实现大宗化、零排放、全组分、高值化利用。提高煤基固废资源属性认识,开发分级分质关键技术与装备,是实现多途径、规模化、高值化利用煤基固废的关键所在。如煤气化渣按照粒径进行分选可以得到精煤、玻璃体等组分,分别可用于掺烧发电/供热和胶凝材料原材料。再如煤矸石,基于对煤矸石材料特性以及资源化利用工艺的分析,建立“多阶梯、分层分级”的煤矸石高附加值利用产业链,拓宽煤矸石综合利用途径。具体来讲,按照岩性等物理化学性质差异,煤矸石可以分选为煤、砂、石和土,进而用于能源、建材、矿产资源、生态等途径的应用,如图8和图9所示。

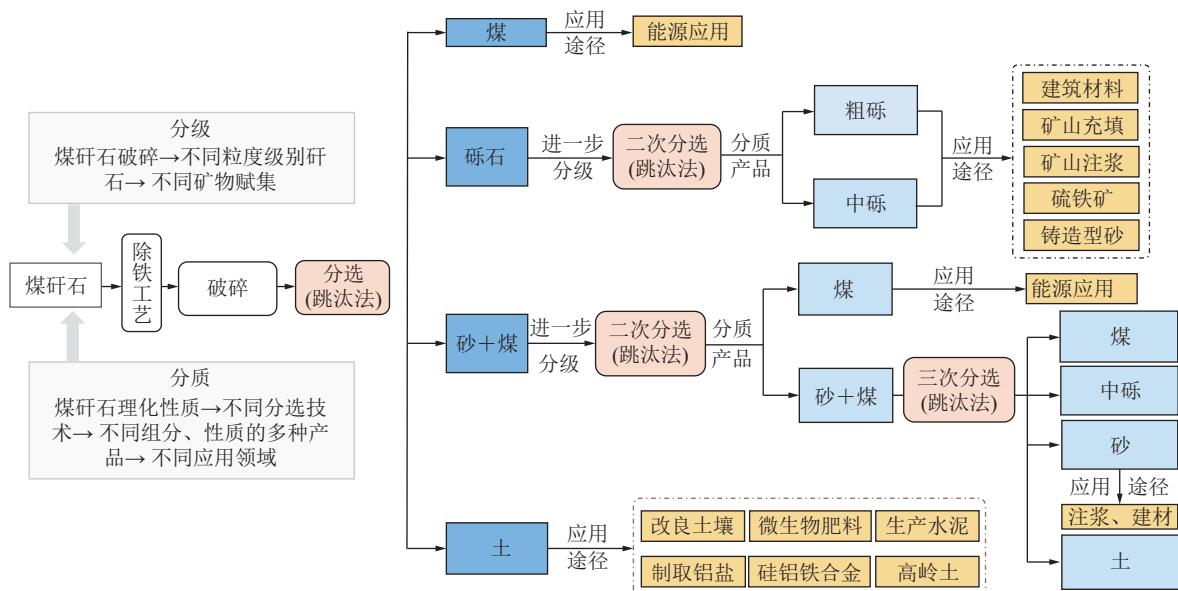


图 8 煤矸石分级分质全组分利用技术路径

Fig.8 Technical path for the utilization of all components of coal gangue

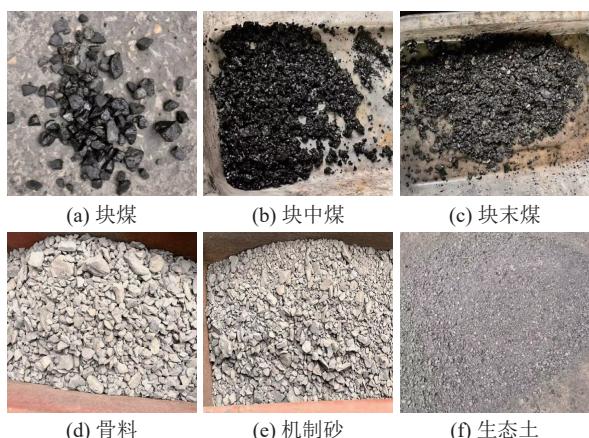


图 9 煤矸石分级分质产出“煤+砂+石+土”产品

Fig.9 Coal, sand, stone and soil originating from gangue classification

4.2 煤基固废改性充填协同采空区利用

充填采矿法在规模化处置煤基固废的同时,可防治采空区引起的地表沉陷和地下水流失,减少煤炭损失,提高煤炭采出率^[100]。充填采矿工艺和充填材料是影响充填技术应用的关键内容。为了提升充填采矿效能,降低充填成本,从采矿方法进行了大量研究和实践。改善充填材料性能,国内外专家学者对充填材料的类型、配比以及制备工艺进行了大量研究,有力推动了充填技术的发展。在规模化处置煤基固废的基础上,进一步降低充填成本,近年来包括笔者在内的研究人员先后提出了煤基固废改性充填协同采空区利用的技术设想,包括储能、载蓄冷和CO₂封存等^[101-103]。

现阶段,煤基固废改性充填协同采空区利用仍处于概念设计阶段,后续工程示范的开展还需要攻克系列问题,包括采煤与充填工艺的变革、功能性充填材料的开发、新型装备的研制、功能化利用工艺的设计与优化。以图10所示的煤基固废改性充填协同油气回收构筑为例:在采煤与充填工艺方面,需要改变传统的垮落采矿法,通过优化采掘时空顺序、改变破岩方式、采空区充填等方式,最大程度地减少采掘作业对围岩的损伤破坏,确保围岩的长期稳定性;在功能性充填材料方面,需要研制高力学强度、低渗透、高韧性的充填材料,确保储备的油气回收在充填体储库中不发生泄露,同时确保充填体在设计寿命期保持稳定性,不发生破坏,保障井下尤其储备的安全性和可靠性;在新型装备方面,需要根据储库充填体外

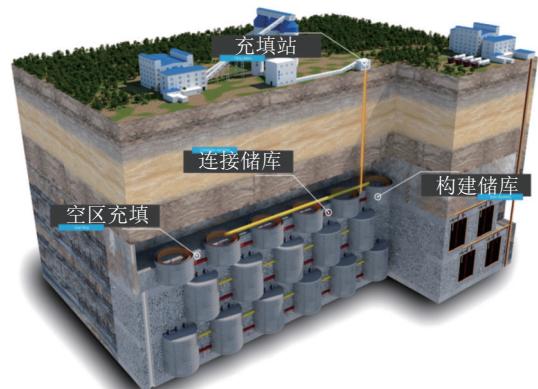
图 10 煤基固废改性充填协同储库构筑^[104]

Fig.10 Modified coal-based solid wastes backfilling collaborative storage construction

形研制自动化充填模具,开发储库安全监测装备等;在功能化利用工艺方面,需要设计与优化油气注入、抽取工艺等。

煤基固废改性充填协同采空区利用是以煤基固废改性充填为基础,融入采空区功能化利用理念,采用功能性充填材料,充填构筑采空区功能化利用储库(储集体),拓展井下储能、载蓄冷和CO₂封存,可有效缓解煤炭开采与利用带来的煤基固废地表排放、地表沉陷、CO₂排放等问题。

4.3 煤基固废与高盐水协同处置

工业高盐废水(IHSW)主要来源于煤气洗涤废水、循环水系统排水、除盐水系统排水、回用系统浓水等煤气净化相关工艺步骤^[105-106]。据统计,国内IHSW主要经过蒸发结晶处理,但仍存在直接排放现象,严重威胁着当地的生态环境和地下水资源赋存(IHSW的处置方式:60%为蒸发结晶、27%为直接排放、4%~8%为污水处理厂)^[107]。其中,杂盐的分离技术是IHSW蒸发结晶处置的瓶颈问题^[108]。ZHANG等^[109]研究表明,将IHSW作为燃料应用于单室微生物燃料电池,可实现IHSW的绿色处置和集发电、脱氮、除碳等功能于一体的绿色发电模式。ZHAO等^[110]研究表明,IHSW的微生物处理技术将是未来的发展方向,培养能够降解污染物和耐盐的微生物是这项技术发展的难题。目前,IHSW仍缺乏规模化、高效化和资源化的处置方式,对生态环境具有严重的潜在威胁。

采用常规理化-水样的检测方式对IHSW的基础特性进行表征,表7为IHSW的水质检测结果。其中,检测过程严格执行HJ 84—2016《水质—无机阴离子(F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、Br⁻、NO₂⁻、PO₄³⁻、SO₃²⁻、

SO₄²⁻)》、HJ 586—2010《水质、游离氯和总氯的测定(N,N-二乙基-1,4-苯二胺分光光度法)》和DZ/T 0064.9—1993《地下水水质检测方法》等国家标准。不难发现,IHSW是一种富含钠离子、钙离子、硫酸盐和氯离子的弱碱性工业废水,若直接排放将会导致土地盐碱化、河流富营养化等生态问题。因此,作者将IHSW作为镁-煤基全固废充填材料(MCBM)的液体复合激发剂,激发镁-煤基固废的潜在水化活性,实现IHSW的规模化、高效化和资源化处置。

表7 IHSW的水质特征
Table 7 Water quality characteristics of IHSW

项目	数值
溶解性总固体(TDS)/(mg·L ⁻¹)	8 750.69
ρ(钠离子)/(mg·L ⁻¹)	3 612.85
ρ(钙离子)/(mg·L ⁻¹)	462.95
ρ(硫酸根离子)/(mg·L ⁻¹)	4 514.43
ρ(总氯)/(mg·L ⁻¹)	4 456.12
pH值	8.86

由IHSW的水质检测结果可知,IHSW是一种富含钠离子、钙离子、硫酸盐和氯离子的弱碱性工业废水,对MCBM试样具备硫酸盐和氯盐的协同激发作用。一方面,IHSW中钠离子、钙离子、硫酸盐和氯离子可直接参与MCBM料浆的水化反应,对体系中水化产物的数量和类型均有促进作用。另一方面,胶凝材料颗粒内外渗透压随IHSW掺量的增加逐渐增大(阴阳离子的数量增多所致),有助于胶凝材料颗粒的溶解,对MCBM料浆的水化反应程度具有促进作用。图11为镁-煤渣协同处置IHSW的水化机理。

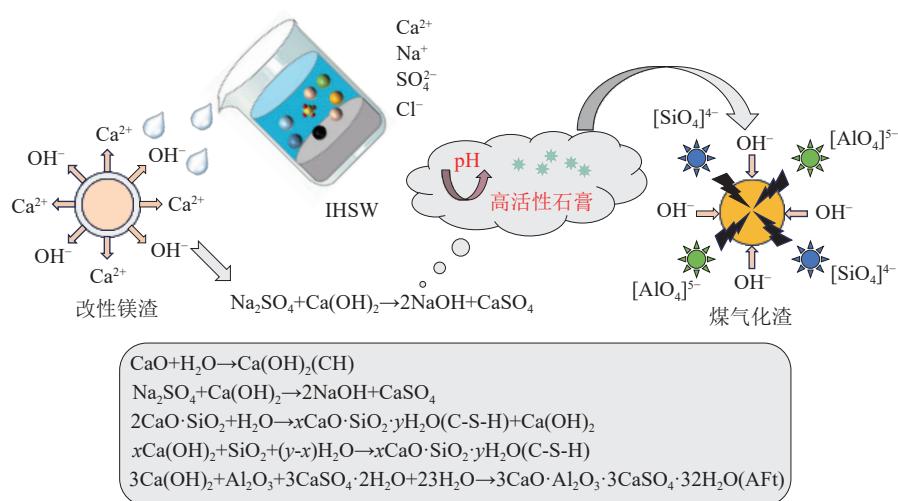


图11 镁-煤渣协同处置IHSW的水化机理
Fig.11 Hydration mechanism of IHSW treated with magnesium and cinder

通过相关试验测试手段(流动性测试、单轴抗压强度测试、微观结构测试和毒性浸出测试等),评价了镁-煤渣协同处置IHSW制备矿用充填材料是否符合煤矿充填技术要求。结果表明:①新鲜料浆的流变曲线与Herschel-Bulkley(H-B)模型高度吻合,流动性满足煤矿充填的泵送要求。其中,坍落度处于134~146mm,屈服应力处于25~37Pa。②IHSW掺量对试件的单轴抗压强度(UCS)具有显著促进作用,养护28d的UCS处于5~7MPa。③IHSW和煤基固废的毒性浸出严重超标(Ni、Pd和As等重金属元素)。然而,将其混合制备煤矿充填材料的过程中,水化产物可通过化学键和物理吸附/封存等方式,实现重金属元素的稳定固结。因此,创新了一种IHSW和多源煤基固废的绿色、高效和资源化处置方式。

5 结 论

1)基于煤基固废的分类与特性分析,将其划分为原性煤基固废和变性煤基固废两大类,并对其不同特性进行了深入探讨。原性煤基固废主要包括煤矸石、煤泥,这些废弃物通常在煤炭开采与分选阶段产生,可根据煤矸石、煤泥中的矿物成分和结构进行分级分质利用。变性煤基固废,如粉煤灰、煤气化渣等,主要来源于煤炭燃烧和气化过程,富含铝硅基化合物和火山灰活性,可用于生产胶凝材料、固碳材料等功能材料。不同原性和变性煤基固废的物化特性决定了其在工程系统中的不同应用潜力。

2)原性和变性煤基固废中含有重金属、有机物等污染物,其环境影响不可忽视。首先,煤基固废的地表堆存可导致土壤污染,污染物进入土壤后会恶化土壤质量、破坏生态结构,影响农作物生长,并通过食物链富集危害人体健康。其次,这些污染物还可能渗透至地表水和地下水,造成水体污染,严重威胁水生态系统,并可能影响居民饮用水安全。此外,煤基固废在堆存和处理过程中会释放SO₂、NO_x和CO₂等气体,加剧大气污染。

3)总结了4种煤基固废绿色低碳规模化利用的成熟模式。在充填领域,变性煤基固废通过协同改性技术研发全固废胶凝材料,并与原性煤基固废骨料制备了全固废膏体充填材料和注浆充填材料,实现了固废规模化处置和采空区治理。在建材领域,粉煤灰、炉渣和煤矸石等煤基固废,已成功应用于水泥生产、道路工程和预制品中,改善了工程材料性能。在生态修复领域,通过煤矸石、粉煤灰等材料,可以

有效实现坍陷区治理、荒地复垦和土壤改良,促进生态环境恢复。此外,煤基固废还可进行碳质资源利用、有价元素提取、高岭土分选。

4)提出了煤基固废资源化利用的多个创新技术与途径。通过分级分质利用,能够针对不同种类的煤基固废开发特定的资源化技术,最大化其利用价值。对煤气化渣进行粒径分选,可以获得精煤、玻璃体等资源,这些材料可用于发电和制备胶凝材料的原料;而煤矸石则可以通过多阶梯的资源化途径,应用于建材、冶金等领域,形成高附加值产业链。煤基固废改性充填协同采空区利用、煤基固废与高盐水协同处置等技术,展示了将废弃物与其他资源协同利用的创新性思路。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 葛世荣, 刘淑琴, 樊静丽, 等. 低碳化现代煤基能源开发关键技术体系[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 2949~2972.
GE Shirong, LIU Shuqin, FAN Jingli, et al. Key technologies for low-carbon modern coal-based energy [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 2949~2972.
- [3] 杨科, 赵新元, 何祥, 等. 多源煤基固废绿色充填基础理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4201~4216.
YANG Ke, ZHAO Xinyuan, HE Xiang, et al. Basic theory and key technology of multi-source coal-based solid waste for green backfilling [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4201~4216.
- [4] 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.
- [5] YU X, YANG K, HE X, et al. Research progress on multi-source coal-based solid waste (MCSW) resource utilization and backfill mining basic theory: A systematic literature review [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, 195: 106670.
- [6] ZHANG J Q, YANG K, HE X, et al. Research status of comprehensive utilization of coal-based solid waste (CSW) and key technologies of filling mining in China: A review [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 926: 171855.
- [7] 刘艳丽, 李强, 陈占飞, 等. 煤气化渣特性分析及综合利用研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(11): 251~257.

- LIU Yanli, LI Qiang, CHEN Zhanfei, et al. Research progress characteristics analysis and comprehensive utilization of coal gasification slag[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(11): 251–257.
- [8] 杨科, 魏祯, 赵新元, 等. 黄河流域煤电基地固废井下绿色充填开采理论与技术[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(S2): 925–935.
- YANG Ke, WEI Zhen, ZHAO Xinyuan, et al. Theory and technology of green filling of solid waste in underground mine at coal power base of Yellow River Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S2): 925–935.
- [9] 吴锦文, 邓小伟, 焦飞硕, 等. 煤基灰/渣的大宗固废资源化利用现状及发展趋势[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(6): 238–252.
- WU Jinwen, DENG Xiaowei, JIAO Feishuo, et al. Resource utilization status and development trend of bulk solid waste of coal-based ash/slag[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(6): 238–252.
- [10] 梁铁山, 张志杰. 自燃矸石山爆炸规律与诱发因素[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(1): 74–78.
- LIANG Tieshan, ZHANG Zhijie. Blasting law and inducing factors of self-combustion waste heap[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(1): 74–78.
- [11] 胡振琪, 赵艳玲, 毛缜. 煤矸石规模化生态利用原理与关键技术[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(2): 978–987.
- HU Zhenqi, ZHAO Yanling, MAO Zhen. Principles and key technologies for the large-scale ecological utilization of coal gangue[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(2): 978–987.
- [12] 杜岩, 白云飞, 张晓勇, 等. 基于多种风险因素的矸石山边坡风险评价[J]. *工程力学*, 2022, 39(10): 249–256.
- DU Yan, BAI Yunfei, ZHANG Xiaoyong, et al. Risk assessment of coal gangue slope considering multiple risk factors[J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(10): 249–256.
- [13] 邢永强, 冯进城, 荣晓伟. 河南平煤四矿煤矸石山自燃爆炸成因及防治分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2007, 18(2): 145–150.
- XING Yongqiang, FENG Jincheng, RONG Xiaowei. Discussion on causes of combustion and explosion and of coal gangue at the No. 4 mine of Pingdingshan Coal Mine and countermeasures[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2007, 18(2): 145–150.
- [14] 董发勤, 徐龙华, 彭同江, 等. 工业固体废物资源循环利用矿物学[J]. *地学前缘*, 2014, 21(5): 302–312.
- DONG Faqin, XU Longhua, PENG Tongjiang, et al. The mineralogy in the process of industrial solid wastes treatment and resource recycle[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(5): 302–312.
- [15] 董猛, 李江山, 陈新, 等. 煤系固废基绿色充填材料制备及其性能研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(12): 75–84.
- DONG Meng, LI Jiangshan, CHEN Xin, et al. Preparation of coal-series solid-waste-based green filling materials and their performance[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12): 75–84.
- [16] 程芳琴, 郭彦霞, 任强强, 等. “煤-电-化领域废弃物资源化利用技术”专题客座主编致读者[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(7): 3–4.
- CHENG Fangqin, GUO Yanxia, REN Qiangqiang, et al. Guest editor of the topic “Technology of waste Resource Utilization in coal-electric-chemical Field” addressed to readers[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(7): 3–4.
- [17] 崔昕茹, 霍雪萍, 周炳杰, 等. 我国煤矸石空间分布特征与分级分质利用路径[J]. *环境科学*, 2025, 46(4): 2281–2291.
- CUI Xinru, HUO Xueping, ZHOU Bingjie, et al. Spatial Distribution Characteristics and Graded Utilization Path of Coal Gangue in China[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(4): 2281–2291.
- [18] 张博超, 童辉, 龙雪颖, 等. 煤矸石固废高值化利用研究现状与进展[J/OL]. *洁净煤技术*, 1–15 [2023–5–25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.td.20230524.1257.002.html>.
- ZHANG Bochao, TONG Hui, LONG Xueying, et al. Research status and progress of high-value utilization of coal gangue solid waste[J/OL]. *Clean Coal Technology*, 1–15 [2023–5–25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.td.20230524.1257.002.html>.
- [19] 竹涛, 武新娟, 邢成, 等. 煤矸石资源化利用现状与进展[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(1): 380–390.
- ZHU Tao, WU Xinjuan, XING Cheng, et al. Current situation and progress of coal gangue resource utilization[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(1): 380–390.
- [20] 陈东, 曹坤. 准格尔矿区煤矸石综合利用新途径[J]. *中国煤炭*, 2017, 43(10): 132–136.
- CHEN Dong, CAO Kun. New method for coal gangue comprehensive utilization in Jungar mining area[J]. *China Coal*, 2017, 43(10): 132–136.
- [21] 严家平, 陈孝杨, 蔡毅, 等. 不同风化年限的淮南矿区煤矸石理化性质变化规律[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(3): 168–174.
- YAN Jiaping, CHEN Xiaoyang, CAI Yi, et al. Physicochemical property change regularities of coal gangue with different weathering ages in Huainan mining area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(3): 168–174.
- [22] LIU L, GE Z L, ZHOU Z, et al. Mineral composition, pore structure and mechanical properties of coal measure strata rocks: A case study of Pingdingshan Coalfield[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 952: 175944.
- [23] 王学霞, 于梅, 王烨敏, 等. 微细粒煤泥浮选分离强化方法及技术研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(8): 185–202.
- WANG Xuexia, YU Mei, WANG Yemin, et al. Research progress on methods and technologies for enhancing flotation separation of fine coal slime[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(8): 185–202.

- [24] 魏雅娟, 王群英, 李小江, 等. 粉煤灰和固硫灰填充天然橡胶的性能比较[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(8): 266–270.
- WEI Yajuan, WANG Qunying, LI Xiaojiang, et al. Comparison on performance of natural rubber reinforced by normal fly ash/circulating fluid bed ash[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(8): 266–270.
- [25] 何宏舟, 过伟丽. 循环流化床锅炉炉内脱硫灰渣的水化特性研究[J]. 煤炭转化, 2010, 33(3): 72–75.
- HE Hongzhou, GUO Weili. Study on the hydrating capacity of the desulfurization slag of cfb boiler[J]. Coal Conversion, 2010, 33(3): 72–75.
- [26] 李端乐, 王栋民, 任才富. 磨细循环流化床粉煤灰–石灰的水化特性[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(28): 11735–11739.
- LI Duanle, WANG Dongmin, REN Caifu. Hydration characteristics of grinding circulating fluidized bed fly ash-lime[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(28): 11735–11739.
- [27] ZHAO S L, DUAN Y F, LIU M, et al. Effects on enrichment characteristics of trace elements in fly ash by adding halide salts into the coal during CFB combustion[J]. Journal of the Energy Institute, 2018, 91(2): 214–221.
- [28] BHATT A, PRIYADARSHINI S, ACHARATH MOHANA-KRISHNAN A, et al. Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review[J]. Case Studies in Construction Materials, 2019, 11: e00263.
- [29] 王丽萍, 李超. 粉煤灰资源化技术开发与利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(4): 38–45.
- WANG Liping, LI Chao. Research progress on development and utilization of fly ash resource technology[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(4): 38–45.
- [30] 刘杨. 两部委关于印发《现代煤化工产业创新发展布局方案》的通知, 中国政府采购网 [EB/OL]. [2025-01-05]. https://www.gov.cn/xinwen/2017-03/27/content_5181130.htm.
- [31] 屈慧升, 索永录, 刘浪, 等. 改性煤气化渣基矿用充填材料制备与性能[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1958–1973.
- QU Huisheng, SUO Yonglu, LIU Lang, et al. Preparation and properties of modified coal gasification slag-based filling materials for mines[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1958–1973.
- [32] 曲江山, 张建波, 孙志刚, 等. 煤气化渣综合利用研究进展[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(1): 184–193.
- QU Jiangshan, ZHANG Jianbo, SUN Zhigang, et al. Research progress on comprehensive utilization of coal gasification slag[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(1): 184–193.
- [33] 范宁, 张逸群, 樊盼盼, 等. 煤气化渣特性分析及资源化利用研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(8): 145–154.
- FAN Ning, ZHANG Yiqun, FAN Panpan, et al. Research progress on characteristic analysis and resource utilization of coal gasification slag[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(8): 145–154.
- [34] 乔会, 左岳, 屈洁, 等. 煤气化渣残碳的分离及应用研究进展[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(S2): 103–111.
- QIAO Hui, ZUO Yue, QU Jie, et al. Reviews on separation and application of residual carbon from coal gasification slag[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(S2): 103–111.
- [35] ZHAO G Z, CHANG F Y, CHEN J X, et al. Research and prospect of underground intelligent coal gangue sorting technology: A review[J]. Minerals Engineering, 2024, 215: 108818.
- [36] 梁卫国, 郭凤岐, 于永军, 等. 煤矸石井下原位智能分选充填技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 12–27.
- LIANG Weiguo, GUO Fengqi, YU Yongjun, et al. Research progress on *in situ* intelligent sorting and filling technology of coal gangue underground[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 12–27.
- [37] 郭秀军. 煤矸石分选技术研究与应用[J]. 煤炭工程, 2017, 49(1): 74–76.
- GUO Xiujun. Research and application of coal gangue separation technology[J]. Coal Engineering, 2017, 49(1): 74–76.
- [38] 赵卫. 井下煤矸石分选系统可行性研究分析[J]. 煤, 2021, 30(2): 100–101.
- ZHAO Wei. Feasibility analysis of coal gangue separation system in coal mine[J]. Coal, 2021, 30(2): 100–101.
- [39] 曹庆一, 任文颖, 梁朝铭, 等. 中国煤中有害微量元素含量的空间分布[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(5): 13–22.
- CAO Qingyi, REN Wenying, LIANG Chaoming, et al. Spatial distribution of harmful trace elements in Chinese coals[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(5): 13–22.
- [40] 秦身钧, 徐飞, 崔莉, 等. 煤型战略关键微量元素的地球化学特征及资源化利用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3): 1–38.
- QIN Shenjun, XU Fei, CUI Li, et al. Geochemistry characteristics and resource utilization of strategically critical trace elements from coal-related resources[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(3): 1–38.
- [41] ZHU M B, XIE G, LIU L, 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.
- [42] NÁDUDVÁRI Á, KOZIELSKA B, ABRAMOWICZ A, et al. Heavy metal- and organic-matter pollution due to self-heating coal-waste dumps in the Upper Silesian Coal Basin (Poland) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 412: 125244.
- [43] YUAN Z J, SHI S H, WU X G, et al. Aliphatic and polycyclic aromatic compounds in coal and coal-based solid wastes: Relationship with coal-forming paleoenvironment and implications for environmental pollution[J]. Science of The Total Environment, 2024, 951: 175394.
- [44] LV Y, LIU L, YANG P, 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.

- [45] YAO C, SHEN Z J, WANG Y M, et al. Tracing and quantifying the source of heavy metals in agricultural soils in a coal gangue stacking area: Insights from isotope fingerprints and receptor models[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 863: 160882.
- [46] DU Z, HONG X P, YANG K, et al. Enrichment characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in coal gangue of the Huabei Coalfield, China[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2024, 36: 103769.
- [47] WANG Y F, TANG Y G, LIU S Q, et al. Behavior of trace elements and mineral transformations in the super-high organic sulfur Ganhe coal during gasification[J]. *Fuel Processing Technology*, 2018, 177: 140–151.
- [48] 邵龙义, 张亚星, 耿苏倩, 等. 煤矿固体废弃物理化特征及生态环境影响研究[J]. *矿业科学学报*, 2024, 9(5): 653–667.
- SHAO Longyi, ZHANG Yaxing, GENG Suqian, et al. Physico-chemical characteristics and environmental impact of coal mine solid waste[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 9(5): 653–667.
- [49] LU X W, WANG Z Z, CHEN Y R, et al. Source-specific probabilistic risk evaluation of potentially toxic metal(loid)s in fine dust of college campuses based on positive matrix factorization and Monte Carlo simulation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 347: 119056.
- [50] FENG F S, SUN J, DING L, et al. Migration patterns of heavy metals from solid waste stockpile soils by native plants for ecological restoration in arid and semi-arid regions of Northwest China[J]. *Environmental Research*, 2024, 251: 118607.
- [51] 陈秀端, 卢新卫. 城市道路灰尘中重金属和多环芳烃污染特征研究[J]. *环境保护科学*, 2021, 47(2): 161–166.
- CHEN Xiuduan, LU Xinwei. Pollution characteristics of heavy metals and PAHs in urban road dust[J]. *Environmental Protection Science*, 2021, 47(2): 161–166.
- [52] 花洁, 王健媛, 陈运帷, 等. 煤矿矿区土壤重金属及多环芳烃污染治理修复技术综述[J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14(1): 139–147.
- HUA Jie, WANG Jianyuan, CHEN Yunwei, et al. A review of heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbon pollution treatment and remediation technologies in coal mine soils[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(1): 139–147.
- [53] ZHAO X Y, YANG K, DINO G A, et al. Feasibility and challenges of multi-source coal-based solid waste (CSW) for underground backfilling – A case study[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 181: 8–25.
- [54] CHEN Y, FAN Y J, HUANG Y, et al. A comprehensive review of toxicity of coal fly ash and its leachate in the ecosystem[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, 269: 115905.
- [55] GUO F H, GUO Y, CHEN L Q, et al. Multitudinous components recovery, heavy metals evolution and environmental impact of coal gasification slag: A review[J]. *Chemosphere*, 2023, 338: 139473.
- [56] GUO Y W, LI X D, LI Q Z, et al. Environmental impact assessment of acidic coal gangue leaching solution on groundwater: A coal gangue pile in Shanxi, China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2024, 46(4): 120.
- [57] 徐晶晶, 张继伟, 崔树军, 等. 煤矸石山酸性废水污染控制技术研究进展[J]. *中国矿业*, 2017, 26(1): 43–48.
- XU Jingjing, ZHANG Jiwei, CUI Shujun, et al. Research progress in pollution control technologies of acidic wastewater from coal gangue[J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(1): 43–48.
- [58] KUMARI M, BHATTACHARYA T. A review on bioaccessibility and the associated health risks due to heavy metal pollution in coal mines: Content and trend analysis[J]. *Environmental Development*, 2023, 46: 100859.
- [59] LI J M, LI X T, HUANG Y L, et al. Dynamic leaching behaviors of heavy metals from recycled coal gangue aggregate under loading conditions during solid backfill mining[J]. *Environmental Pollution*, 2024, 362: 125028.
- [60] LI J Y, WANG J M. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 117946.
- [61] ZHAO Y C, ZHANG J Y, CHOU C L, et al. Trace element emissions from spontaneous combustion of gob piles in coal mines, Shanxi, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 73(1): 52–62.
- [62] GUO W K, CHEN B, LI G Y, et al. Ambient PM_{2.5} and related health impacts of spontaneous combustion of coal and coal gangue[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(9): 5763–5771.
- [63] HOU H M, SU L J, GUO D F, et al. Resource utilization of solid waste for the collaborative reduction of pollution and carbon emissions: Case study of fly ash[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 383: 135449.
- [64] ZHANG Y B, ZHANG Y T, SHI X Q, et al. Co-spontaneous combustion of coal and gangue: Thermal behavior, kinetic characteristics and interaction mechanism[J]. *Fuel*, 2022, 315: 123275.
- [65] 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与实践[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(4): 83–92.
- 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]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(4): 83–92.
- [66] 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 technology of overburden isolated grout injection[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4265–4277.

- [67] 朱磊, 古文哲, 宋天奇, 等. 采空区煤矸石浆体充填技术研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 143–154.
ZHU Lei, GU Wenzhe, SONG Tianqi, et al. Research progress and prospect of coal gangue slurry backfilling technology in goaf[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 143–154.
- [68] 王比比, 郭文兵, 郭明杰, 等. 村庄下孤岛工作面开采覆岩离层注浆减沉技术研究 [J/OL]. 煤炭学报, 1–12, [2024–11–25].<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0884>.
WANG Bibi, GUO Wenbing, GUO Mingjie, et al. Research on grouting subsidence reduction technology of overburden separation layer in isolated working face mining under village[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1–12, [2024–11–25].<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0884>.
- [69] 杨科, 何淑欣, 何祥, 等. 煤电化基地大宗固废“三化”协同利用基础与技术[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 69–82.
YANG Ke, HE Shuxin, HE Xiang, et al. Foundation and technology of coordinated utilization of bulk solid waste “Three modernizations” in coal power base[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 69–82.
- [70] YAN P F, MA Z G, LI H B, et al. Study on frost resistance and freeze-thaw damage deterioration mechanism of cement-stabilized pure coal-based solid waste as pavement base material[J]. Construction and Building Materials, 2024, 450: 138598.
- [71] ZHAO X, LI W X, ZHANG X R, et al. Low-temperature preparation of lightweight ceramic proppants using high-proportioned coal-based solid wastes[J]. Ceramics International, 2024, 50(11): 18117–18124.
- [72] LIU T Y, LIU J, YANG Q Z, et al. Sustainable use of coal gangue and other wastes in lightweight material: Physical-mechanical, environmental security and synergistic mechanisms[J]. Ceramics International, 2025, 51(2): 2244–2258.
- [73] 裴国华, 徐扬, 施正伦, 等. 煤矸石代替黏土生产水泥可行性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(5): 1003–1008.
QIU Guohua, XU Yang, SHI Zhenglun, et al. Feasibility analysis on utilization of coal gangue as clay for cement[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(5): 1003–1008.
- [74] 裴国华, 施正伦, 余春江, 等. 煤矸石代替黏土煅烧水泥熟料配方优化试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(1): 130.
QIU Guohua, SHI Zhenglun, YU Chunjiang, et al. Experimental research on utilization of coal gangue as clay for optimized formula on cement clinker calcination[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(1): 130.
- [75] 王培铭, 刘贤萍, 胡曙光, 等. 硅酸盐熟料-煤矸石/粉煤灰混合水泥水化模型研究[J]. 硅酸盐学报, 2007(S1): 180–186.
WANG Peiming, LIU Xianping, HU Shuguang, et al. Hydration models of Portland coal gangue cement and Portland fly ash cement[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007(S1): 180–186.
- [76] WU C L, JIANG W, ZHANG C, et al. Preparation of solid-waste-based pervious concrete for pavement: A two-stage utilization approach of coal gangue[J]. Construction and Building Materials, 2022, 319: 125962.
- [77] 刘晓霞. 为大自然“疗伤”宝日希勒创伤“初愈”[N/OL]. 内蒙古日报, 2014–09–18 [2022–08–10]. http://inews.nmgnews.com.cn/system/2014/09/18/011537722_01.shtml.
- [78] SUN W, WANG H J, HOU K P. Control of waste rock-tailings paste backfill for active mining subsidence areas[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 567–579.
- [79] 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 Shenmu subsidence mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 17–26.
- [80] GUO G L, FENG W K, ZHAO J F, et al. Subsidence control and farmland conservation by solid backfilling mining technology[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21: s665–s669.
- [81] LIU Z, LIU S J, GAO L N, et al. Long-term recovery of compacted reclaimed farmland soil in coal mining subsidence area[J]. Ecological Indicators, 2024, 168: 112758.
- [82] 张世文, 蔡慧珍, 张燕海, 等. 煤矿区土壤细菌群落结构及其对不同复垦模式的响应[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 338–349.
ZHANG Shiwen, CAI Huizhen, ZHANG Yanhai, et al. Soil bacterial community structure in coal mining area and its response to different reclamation patterns[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 338–349.
- [83] 孙纪杰, 李新举, 李海燕, 等. 煤矿塌陷区不同复垦材料土壤压实机理的研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2215–2220.
SUN Jijie, LI Xinju, LI Haiyan, et al. Soil composition mechanism research of different reclamation material in coal mining subsidence area[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12): 2215–2220.
- [84] 胡振琪, 理源源, 李根生, 等. 碳中和目标下矿区土地复垦与生态修复的机遇与挑战[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 474–483.
HU Zhenqi, LI Yuanyuan, LI Gensheng, et al. Opportunities and challenges of land reclamation and ecological restoration in mining areas under carbon neutral target[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 474–483.
- [85] 卞正富, 雷少刚, 金丹, 等. 矿区土地修复的几个基本问题[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 190–197.
BIAN Zhengfu, LEI Shaogang, JIN Dan, et al. Several basic scientific issues related to mined land remediation[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 190–197.
- [86] 胡振琪. 矿山复垦土壤重构的理论与方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2499–2515.
HU Zhenqi. Theory and method of soil reconstruction of re-

- claimed mined land[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2499–2515.
- [87] 郭文兵, 赵高博, 白二虎, 等. 中部矿粮复合区采煤沉陷及耕地损毁研究现状与展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 388–401.
- GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, BAI Erhu, et al. Research status and prospect on cultivated land damage at surface subsidence basin due to longwall mining in the central coal grain compound area[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 388–401.
- [88] 徐良骥, 李青青, 朱小美, 等. 煤矸石充填复垦重构土壤重金属含量高光谱反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(12): 3839–3844.
- XU Liangji, LI Qingqing, ZHU Xiaomei, et al. Hyperspectral inversion of heavy metal content in coal gangue filling reclamation land[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(12): 3839–3844.
- [89] LAL R, HALL G F, MILLER F P. Soil degradation: I. basic processes[J]. Land Degradation & Development, 1989, 1(1): 51–69.
- [90] 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.
- [91] JALA S, GOYAL D. Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production: A review[J]. Bioresource Technology, 2006, 97(9): 1136–1147.
- [92] ZHOU C Z, WANG J H, WANG Q, et al. Simultaneous adsorption of Cd and As by a novel coal gasification slag based composite: Characterization and application in soil remediation[J]. Science of The Total Environment, 2023, 882: 163374.
- [93] 李明珠, 张文超, 王淑娟, 等. 适宜脱硫石膏施用方式改良河套灌区盐碱土提高向日葵产量[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 89–95.
- LI Mingzhu, ZHANG Wenchao, WANG Shujuan, et al. Suitable application of flue gas desulphurized gypsum to improve the sunflower yield in saline-alkali soil in the Hetao irrigation areas of Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(6): 89–95.
- [94] SHEN W Y, FENG Z J, SONG H P, et al. Effects of solid waste-based soil conditioner and arbuscular mycorrhizal fungi on crop productivity and heavy metal distribution in foxtail millet (*Setaria italica*)[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 313: 114974.
- [95] 巩文辉, 朱晓波, 李望, 等. 煤矸石原生菌溶磷效果分析及产酸性能优化[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 449–460.
- GONG Wenhui, ZHU Xiaobo, LI Wang, et al. Analysis of phosphate dissolving effect and optimization of acid producing capacity of coal gangue protobacteria[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 449–460.
- [96] 秦琪焜, 方健梅, 王根柱, 等. 煤矸石与城市污泥混合制备植生基质的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 304–314.
- QIN Qikun, FANG Jianmei, WANG Genzhu, et al. Experimental study of planting substrate mixed with coal gangue and municipal sludge[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 304–314.
- [97] 朱菊芬, 李健, 闫龙, 等. 煤气化渣资源化利用研究进展及应用展望[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(6): 11–21.
- ZHU Jufen, LI Jian, YAN Long, et al. Research progress and application prospect of coal gasification slag resource utilization[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(6): 11–21.
- [98] 刘成龙, 谢宇充, 夏举佩, 等. 煤矸石中和渣酸化提取铝、钛实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(4): 966–972.
- LIU Chenglong, XIE Yuchong, XIA Jupei, et al. Study on extracting aluminum and titanium from neutral residues of coal gangue by acid leaching[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(4): 966–972.
- [99] 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.
- [100] 刘建功, 李新旺, 何团. 我国煤矿充填开采应用现状与发展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 141–150.
- LIU Jiangong, LI Xinwang, HE Tuan. Application status and prospect of backfill mining in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 141–150.
- [101] 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 conception of backfill carbon fixation in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 292–308.
- [102] 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. Underground 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.
- [103] 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.
- [104] 邱华富, 刘浪, 王美, 等. 金属矿采矿—充填—建库协同系统及充填储库结构[J]. 石油学报, 2018, 39(11): 1308–1316.
- QIU Huafu, LIU Lang, WANG Mei, et al. Mining-backfill-stor-

- age building synergetic system in metal mine and its backfill storage structure[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(11): 1308–1316.
- [105] HUANG L, WANG D L, HE C, et al. Industrial wastewater desalination under uncertainty in coal-chemical eco-industrial parks[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 145: 370–378.
- [106] LU K, LÜ Y, BAI Y X, et al. Experimental investigation and theoretical modeling on scale behaviors of high salinity wastewater in zero liquid discharge process of coal chemical industry[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2020, 28(4): 969–979.
- [107] SHI J X, HUANG W P, HAN H J, et al. Review on treatment technology of salt wastewater in coal chemical industry of China[J]. *Desalination*, 2020, 493: 114640.
- [108] XIE G, LIU L, SUO Y L, et al. Study on the green disposal of industrial high salt water and its performance as activator to prepare magnesium-coal based solid waste backfill material for mine[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 452: 141933.
- [109] ZHANG L F, WANG J Q, FU G K, et al. Simultaneous electricity generation and nitrogen and carbon removal in single-chamber microbial fuel cell for high-salinity wastewater treatment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 123203.
- [110] ZHAO Y Y, ZHUANG X M, AHMAD S, et al. Biotreatment of high-salinity wastewater: Current methods and future directions[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2020, 36(3): 37.