

煤气化灰渣规模化分质梯级利用与 高效处置技术研究

张吉雄^{1,2}, 顾晓薇³, 周楠², 于广锁⁴, 郝南京⁵, 肖耀猛⁶

- (1. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 4. 华东理工大学 洁净煤技术研究所, 上海 200237; 5. 西安交通大学 化学工程与技术学院, 陕西 西安 710049; 6. 兖矿能源集团股份有限公司, 山东 邹城 273500)

摘要: 煤气化灰渣的规模化利用与处置是我国煤化工行业面临的主要挑战之一, 严重制约着煤气化产业与环境保护的协调发展。现有的煤气化灰渣循环掺烧、高值化利用和建材化技术存在成本高、利用规模小等问题, 目前的充填技术主要处置煤矸石、粉煤灰等煤基固废材料, 缺乏对煤气化灰渣充填材料的相关实践。本文综述了煤气化灰渣的利用现状与存在的问题, 突破了煤气化灰渣规模化利用与处置中的技术瓶颈, 系统阐述了煤气化灰渣规模化分质梯级利用技术的内涵及关键科学与技术问题, 提出了煤气化灰渣铝硅结构分质活化与协同调控机理、富碳灰渣高温气化反应机理及活性强化机制、低碳灰渣全固废胶凝材料的多动力源活化与水化机理以及采动空间多场耦合时空演化与充填控制机理等理论研究方向, 分析了煤气化灰渣自维持脱碳铝硅预富集、煤气化灰渣高值化材料微化工制备、富碳灰渣无辅助燃料常压气化工工艺、低碳灰渣全固废胶凝材料低碳制备以及煤基固废全周期立体绿色智能充填等技术的研究难点。论文研究创新了煤气化灰渣的利用模式, 构建了煤气化灰渣综合利用与处置技术体系, 引领了我国煤化工固废资源化利用的新方向, 具有广阔的应用前景, 有力推动了煤气化灰渣的循环利用与煤化工产业的绿色发展。

关键词: 煤气化灰渣; 梯级利用; 分质活化; 固废处置

中图分类号: P 618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)03-0471-14

Research on the technology for large-scale and hierarchical utilization of coal gasification slag

ZHANG Jixiong^{1,2}, GU Xiaowei³, ZHOU Nan², YU Guangsu⁴,
HAO Nanjing⁵, XIAO Yaomeng⁶

- (1. State Key Laboratory for Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining of Ministry of Education, School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China; 4. Institute of Clean Coal Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai

收稿日期: 2024-12-16 修回日期: 2025-03-24 DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.20240595

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3904300); 国家自然科学基金重点项目(52130402)

通信作者: 周楠(1988—), 男, 安徽省砀山县人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事充填开采与灾害防控理论方面的研究。

E-mail: 5724@cumt.edu.cn Tel: 13813458656

引用格式: 张吉雄, 顾晓薇, 周楠, 等. 煤气化灰渣规模化分质梯级利用与高效处置技术研究[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(3): 471-484.

ZHANG Jixiong, GU Xiaowei, ZHOU Nan, et al. Research on the technology for large-scale and hierarchical utilization of coal gasification slag[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(3): 471-484.

200237, China; 5. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China; 6. Yankuang Energy Group Co., Ltd., Zoucheng, Shandong 273500, China)

Abstract: The large-scale utilization and disposal of coal gasification slag (CGS) constitute major challenges for China's coal chemical industry, which significantly restrains the coordinated development of coal gasification technology and environmental protection. Existing CGS utilization technologies, including cyclic co-combustion, value-added applications, and construction material conversion, face issues such as high costs and limited implementation scale. Current backfill technologies primarily handle coal gangue and fly ash, with limited practical application specifically for CGS-based backfill materials. This paper reviews the current utilization status and existing challenges, while breaking through the technical bottlenecks in its large-scale application and disposal. Besides, the concept and key technical issues associated with the hierarchical and differentiated large-scale utilization of CGS are systematically addressed, including the mechanisms of structural activation and synergistic regulation of aluminosilicates, the gasification reaction of carbon-rich CGS in high-temperature and the corresponding enhancement mechanisms, the multi-dynamic activation and hydration mechanisms of low-carbon CGS, and spatiotemporal evolution of the mined-out space as well as the controlling mechanisms of strata movement with backfilling body subjected to Multiphysics loading. Moreover, this study also analyzes the key challenges in the development of self-sustained decarbonization and aluminosilicate pre-enrichment of CGS, micro-chemical fabrication of high-value materials, non-auxiliary fuel atmospheric pressure gasification of carbon-rich CGS, environment-friendly production of cementitious materials with low-carbon CGS, and fully integrated green intelligent backfilling with coal-based solid wastes. The study innovates CGS utilization technology, enhances the technical framework for comprehensive utilization and disposal of CGS, and pioneers a new direction for resource recovery of solid waste in China's coal chemical industry. It holds broad application prospects and contributes to the recycling of CGS, which will foster the green development of the coal chemical industry.

Key words: coal gasification slag; hierarchical utilization; differentiated activation; solid waste disposal

煤气化技术是实现煤炭清洁高效利用的重要手段,是现代煤化工产业的核心技术^[1-2]。然而,煤气化过程中会排放大量煤气化灰渣,当前年排放量已超过 5000 万 t,但其利用率不足 31.6%^[3-4]。这些煤气化灰渣主要通过地面堆积和填埋方式进行处理,导致煤化工园区环境污染和生态破坏^[5-6],已成为制约我国煤化工行业可持续发展的主要问题之一。

煤气化灰渣的脱水处理是其资源化利用的前提,水分脱除工艺的选取受其成分组成、粒度分布、矿物结构等基本理化性质的影响^[7-8],目前对煤气化灰渣的脱水处理方式主要包括絮凝剂脱水、真空脱水、机械挤压脱水、离心脱水、气流床蒸发脱水及多种协同脱水方式^[9-10]。煤气化灰渣的利用和处置方式主要包括循环掺烧利用^[11-12]、高值化利用^[13-14]、建材化利用^[15-16]和充填处置^[17-18]等。

近年来,针对煤气化灰渣的循环掺烧、高值化和建材化利用的理论和技术研究逐渐增多,这些方法显著提高了煤气化灰渣的活化效果,并研发出了高附加值、具有优异性能的产品。在煤气化灰渣炭-灰分离技术方面,基于视密度差异的煤气化灰渣炭-灰分离技术和湍流涡调控的煤气化灰渣炭-灰浮选分离强化技术被提出,分选综合效率可达到 70%以上^[19-20];在煤气化灰渣全组分分质技术方面,通过机械活化、酸碱改性等方法可制备 P 型沸石/碳复合材料、碳硅复合材料、铝、硅酸钠溶液、发泡陶瓷、活性炭等多种材料,实现了铝、硅、碳等资源的高效回收利用,解决了多种元素互相夹杂、难以分离的难题,实现了煤气化灰渣的多组分利用^[21-23]。然而,这些技术面临着高成本和小规模应用的问题^[24-25]。充填处置技术能够大规模消纳煤气化灰渣,缓解大规模处置难题,但目前充填材料

大多采用煤矸石、粉煤灰等固废,煤气化灰渣作为充填材料的应用尚未得到充分验证^[26-27]。因此,如何实现煤气化灰渣的规模化高效利用,已成为煤化工行业实现安全、高效、绿色低碳发展的迫切需求。

本文提出了煤气化灰渣规模化分质梯级利用技术,系统阐述了该技术的内涵,并重点讨论了煤气化灰渣的关键科学与技术问题。主要包括:煤气化灰渣铝硅结构的分质活化与协同调控机理、富碳灰渣的高温气化反应机理及活性强化机制、低碳灰渣全固废胶凝材料的多动力源活化与水化机理、采动空间的多场耦合时空演化与充填控制机理等科学问题;以及煤气化灰渣自维持脱碳铝硅预富集技术、煤气化灰渣高值化材料微化工制备技术、富碳灰渣无辅助燃料常压气化工艺、低碳灰渣全固废胶凝材料低碳制备技术、煤基固废全周期立体绿色智能充填技术等关键技术问题。通过深入探讨这些技术的理论与实践问题,为我国煤气化灰渣的高效利用与处置提供理论和技术指导。

1 煤气化灰渣利用与处置的必要性

1.1 煤气化灰渣的产量与处置现状

当前,我国现代煤化工项目主要布局在 14 个大型煤炭基地和 9 个大型煤电基地^[28],其中新疆、陕西、宁夏、山西、内蒙古、河南等省份的煤炭深加工发展较快,培育了多个煤炭深加工产业集聚区,如宁东能源化工基地、鄂尔多斯能源化工基地和榆林能源化工基地等。随着现代煤化工产业基地化格局的逐步形成,我国煤气化灰渣年排放逐年增多,但利用率较低^[29]。目前,煤气化灰渣的主要处置方式依然以堆存和填埋为主,堆存量逐年增长,不仅占用了大量土地资源,还导致了水体和土壤的污染,严重制约了煤化工产业的绿色可持续发展^[30-31]。

1.2 煤气化灰渣的组成与复杂性

煤气化灰渣是煤或煤焦在高温条件下,通入氧气、水蒸气或氢气等气化剂进行化学反应后,煤中的矿物质和其他无机成分经破裂、团聚、熔融等过程与未参与反应的煤或煤焦结合形成的固体废物^[32]。煤气化灰渣可分为粗渣和细渣两类,其中粗渣由气化炉排渣口产生,占比 60%~80%,细渣主要由合成气除尘装置生成,占比 20%~40%^[33]。粗渣的含碳量和含水率较低,通常为 10%和 20%左右,而细渣的含碳量和含水率较高,分别为 20%

~35%和 50%~65%。煤气化灰渣的化学成分与煤气化工艺相关,主要包括 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO 和 C 等,总含量通常超过 80%^[34]。细渣中矿物质的主要成分为石英和莫来石,而粗渣则除石英、方解石、莫来石、斜长石等矿物外,还含有玻璃相和无定形残碳,其含量可达 90%以上^[35]。此外,煤气化灰渣中的碳灰结合方式较为复杂,现有研究发现,碳和灰之间的结合形式包括碳灰互相融合、灰填充在多孔碳中、碳附着于灰等^[36]。

煤气化过程中,铬(Cd)、铅(Pb)等有毒金属元素会通过气态挥发、颗粒吸附及熔融态富集等途径迁移至灰渣^[37-38],导致煤气化灰渣具有较高潜在危害性,被归类为 I 类工业固体废弃物^[39]。因此,在资源化利用过程中,须特别注意对重金属污染的控制。

1.3 煤气化灰渣利用与处置率低

当前,煤气化灰渣的处置与利用主要包括高值化利用、残碳燃烧利用、土壤和水体修复、建材化利用等^[40-42]方向(见图 1)。

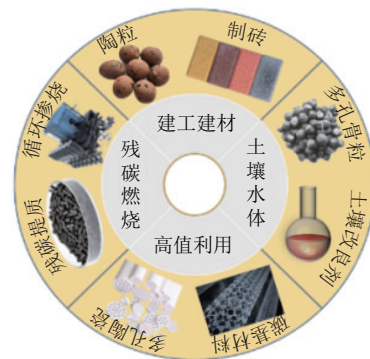


图 1 煤气化灰渣地面处置利用方式

Fig. 1 Ground disposal and utilization of CGS

其中,煤气化灰渣用于制备高值化材料(如碳基材料和多孔陶瓷等),面临着研发工艺复杂、运输费用高、煤气化灰渣品质要求高等技术瓶颈,限制了其高效利用的实现^[43];残碳燃烧利用方面主要包括残碳提质和循环燃烧,目前面临残碳含量低和碳灰结合方式复杂等问题^[44];建材化利用主要用来制备陶粒和制砖,目前普遍存在灰渣活性较低且消耗量有限等问题,无法实现集中连续利用^[45]。另一方面,煤气化灰渣的充填处置技术仍处于研发阶段,尚未实现大规模应用,尽管地下空间储量丰富,这为煤气化灰渣的处置提供了潜在解决方案,符合国家“十四五”期间推动绿色发展的远景目标,但煤气化灰渣作为充填材料存在重金属析出并污染地下环境等风险,其地下空间

利用的安全性仍需得到验证。

1.4 国家政策导向

随着煤化工固废利用和处置问题的日益严峻,国家自“十三五”以来已相继出台了一系列法规和政策,推动了煤化工行业及其相关行业的绿色低碳发展.例如,2020年第十三届全国人民代表大会常务委员会第十七次会议审议通过了修订后的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》,明确指出国家鼓励采用先进工艺进行固体废弃物的综合利用;2021年国家发展改革委联合其他九部门发布了《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》,提出13项重点任务,明确要求推动煤基固废的绿色、高效、高质、高值利用;2023年,国家发展改革委等六部门联合发布了《关于推动现代煤化工产业健康发展的通知》,指出要加强煤炭清洁高效利用,推动现代煤化工产业高端化、多元化、低碳化发展.表1列出了我国煤化工及相关行业的一些重要法规和政策.

表1 我国煤化工及其相关行业部分相关法规政策
Table 1 Relevant regulations and policies for coal chemical and its related industries in China

颁布时间	名称	相关内容
2023	《关于推动现代煤化工产业健康发展的通知》	强化煤炭清洁高效利用,推动煤化工产业的高端化、多元化、低碳化发展
2022	《现代煤化工行业节能降碳改造升级实施指南》	推动能源系统优化、固废综合利用等,提升工艺绿色化水平
2021	《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》	加快固废综合利用技术研发,推进煤基固废资源化利用
2020	《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》	鼓励采用先进工艺对煤基固废进行综合利用
2017	《现代煤化工产业创新发展布局方案》	提出建设煤化工示范区,推动产业技术升级

2 煤气化灰渣规模化分质梯级利用与高效处置技术

2.1 煤气化灰渣规模化分质梯级利用与高效处置总体思路

为解决煤气化灰渣大规模、无害化处置的难题,本文提出了“煤气化灰渣规模化分质梯级利用与高效处置技术”.这一技术通过分级分类,获得不同碳含量的煤气化灰渣(富碳灰渣、灰渣滤饼、

低碳灰渣),并针对不同类型灰渣进行分质梯级利用(见图2).具体思路包括:

灰渣滤饼:通过高温预热脱碳,转化为低碳灰渣.

富碳灰渣:通过二次气化循环利用,进一步降低其碳含量.

低碳灰渣:进行分质活化,用于制备高附加值材料,或者通过多动力源激发技术,生产低碳胶凝材料.

煤气化灰渣:制备煤基固废充填材料,实现煤基固废全周期立体绿色智能充填.

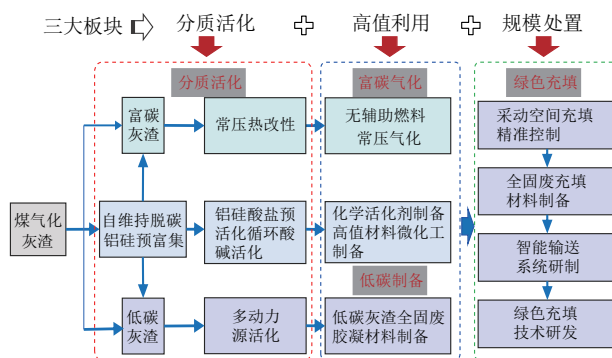


图2 煤气化灰渣梯级利用总体研究思路

Fig. 2 Schematic diagram for cascade utilization of CGS

2.2 灰渣分质活化

灰渣分质活化是利用螺旋分离器、筛分机、浮选机等物理分选设备对煤气化灰渣中的碳灰进行分离,分别获得富碳灰渣(碳含量 $\geq 80\%$)、灰渣滤饼(碳含量 $5\% \sim 80\%$)和低碳灰渣(碳含量 $\leq 5\%$).其中,富碳灰渣可再次进行煤气化利用,灰渣滤饼需进行预热脱碳才能进行利用,低碳灰渣中铝硅酸盐等矿物含量较高可进行高值化和建材化利用^[46].

低碳灰渣进行高值化材料制备过程中需进行铝硅分质,由于煤气化灰渣中的铝硅元素主要富集于玻璃相、石英、铝硅酸盐等矿物中,需采用化学分离技术进行分质,包括酸碱浸渍、水热合成、焙烧等过程,获得水玻璃(Na_2SiO_3 为主要成分)、聚合氯化铝(AlCl_3)、多孔吸附碳(C)等高附加值产品,可用作胶凝材料激发剂、絮凝剂和吸附剂等方向^[47].此外,在该处理过程中,煤气化灰渣中的铬(Cd)、铅(Pb)等有毒重金属元素会浸出到酸碱溶液中,利用高吸附材料对酸碱溶液中的重金属进行吸附,实现重金属元素的有效控制^[48].

2.3 富碳灰渣气化

富碳灰渣气化是采用气化设备对分级得到的

富碳灰渣再次进行气化,由于富碳灰渣中的碳已经经历了一次气化过程,碳的气化活性有所降低,因此,需要对富碳灰渣进行改性或者选用气化效率更高的工艺或设备来提升其气化效率。

2.4 低碳灰渣活化

低碳灰渣活化是采用机械、化学、热力等激发技术对低碳灰渣进行活化改性^[49-50],利用活化的低碳灰渣制备矿物掺合料、水泥混凝土胶凝材料、全固废胶凝材料等。

2.5 绿色高效处置

绿色规模充填是利用煤气化灰渣制备充填材料,研发高工作性、力学性能的充填材料,研发长距离大流量充填材料的输送设备、研发煤矿开采全周期立体充填技术及全固废路基高效构筑技术,构建全固废胶凝材料协同煤基固废绿色智能充填理论与技术体系。

3 煤气化灰渣规模化分质梯级利用与高效处置技术难点与研究关键

3.1 煤气化灰渣规模化分质梯级利用与高效处置技术难点

实现煤气化灰渣规模化分质梯级利用目标,需要突破以下4个主要技术难点:

1) 铝硅活性不足及高值化利用工艺复杂

煤气化灰渣具有高杂质、高碳含量以及铝硅活性不足的特点^[51],其残碳颗粒与无机组分混杂嵌布,制约了铝硅酸盐的活化和分质利用。如何实现铝硅预富集并改善铝硅材料的孔结构和通道是实现分质活化的首要难点。

2) 高值化利用技术工业化难题

现有煤气化灰渣高值化利用技术工艺复杂、工业规模化难度较高。开发工艺简单、操作性强、生产稳定且易放大的微化工制备技术是实现高值化利用的核心难点。

3) 低碳灰渣胶凝材料制备技术限制

由于低碳灰渣的原料性质不稳定、活性较低且粒度分布不均^[52],现有胶凝材料制备技术难以满足大掺量、低碳化的生产需求。研发工业化和模块化建造特征的低碳生产工艺是开发低碳灰渣全固废胶凝材料的关键挑战。

4) 充填处置时空干涉与系统优化

现有煤矿充填技术存在系统布局单一、固废充填与煤炭开采之间时空干涉等问题^[53-54]。如何实现煤基固废全周期立体绿色智能充填,解决复杂的地下空间充填需求,是一项重要研究难点。

3.2 煤气化灰渣规模化分质梯级利用与高效处置技术关键

围绕上述难点,煤气化灰渣规模化分质梯级利用技术研究需要解决以下4个关键科学问题和5个关键技术问题,如图3所示。

围绕灰渣分质活化,开展煤气化灰渣脱水处理技术、分级分质利用技术方法、铝硅酸盐预富集与活化技术、高值化材料微化工制备装备与工艺以及毒害组分迁移分布规律等研究工作。其关键科学问题为煤气化灰渣铝硅结构分质活化与协同调控机理,其关键技术问题为煤气化灰渣自维持脱碳铝硅预富集技术、煤气化灰渣高值化材料微化工制备技术。

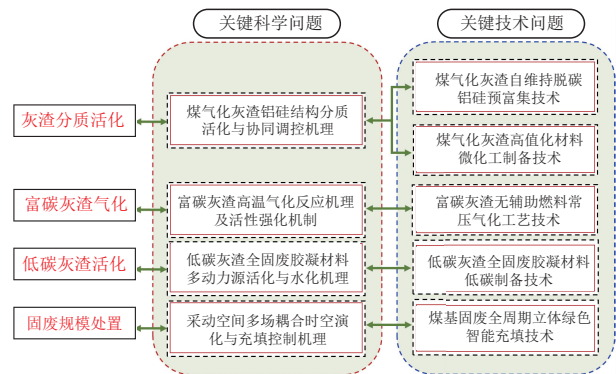


图3 煤气化灰渣规模化分质梯级利用关键问题

Fig. 3 Key problems of subsequent space gangue grouting filling

围绕富碳灰渣气化,开展富碳灰渣结构特性及气化反应机理、富碳灰渣结构调控及黏结成型、高长径比纯氧连续常压气化装备以及富碳型渣纯氧连续常压气化工工艺等研究工作。其关键科学问题为富碳灰渣高温气化反应机理及活性强化机制,关键技术问题为富碳灰渣无辅助燃料常压气化工工艺。

围绕低碳灰渣活化,开展低碳灰渣多动力源活化改性技术、全固废胶凝材料水化反应与性能调控机理、全固废协同强化胶凝材料低碳制备工艺以及低碳灰渣全固废胶凝材料长期服役性能等研究工作。其关键科学问题为低碳灰渣全固废胶凝材料多动力源活化与水化机理,关键技术问题为低碳灰渣全固废胶凝材料低碳制备技术。

围绕固废规模处置,开展采动空间多场时空演化与充填控制机理、全固废胶凝材料协同煤基固废充填材料、煤基固废全周期立体绿色智能充填技术以及低碳灰渣全固废胶凝材料路基充填技术等研究工作,其关键科学问题为采动空间多场

耦合时空演化与充填控制机理,关键技术问题为煤基固废全周期立体绿色智能充填技术。

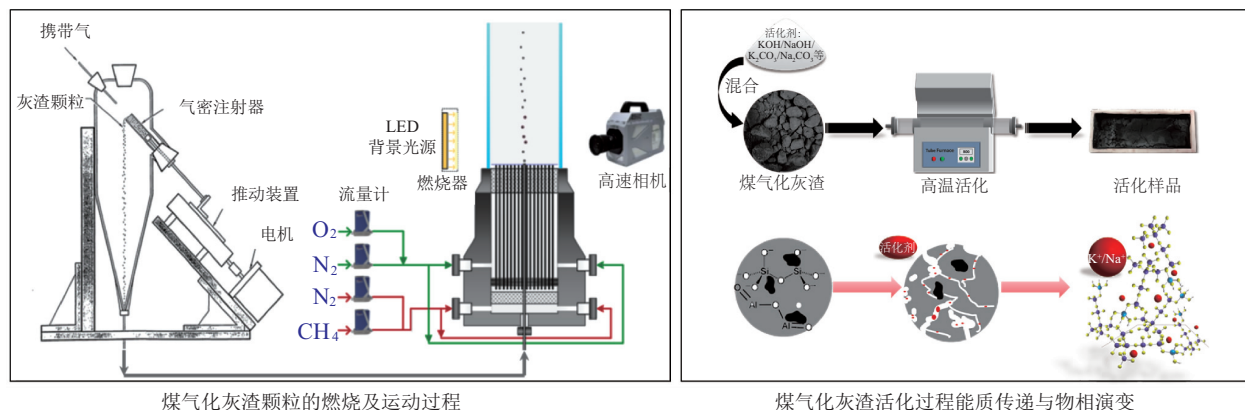
4 煤气化灰渣规模化分质梯级利用与高效处置的关键科学问题

4.1 煤气化灰渣铝硅结构分质活化与协同调控机理

煤气化灰渣的化学组成复杂,铝硅晶相结构稳定,其碳和铝硅含量直接影响灰渣的资源化应用方向。然而,碳灰在煤气化灰渣中通常以复杂的结合形式存在,而铝硅则以玻璃体、石英、铝硅酸盐等矿物形式为主,碳灰与铝硅成分的混合状态严重制约了煤气化灰渣的元素分离和高效利用。因此,研究煤气化灰渣铝硅结构的分质活化与协同调控机理至关重要(见图 4)。

应围绕煤气化灰渣脱水处理技术、分级分质利用技术方法、煤气化灰渣铝硅酸盐预富集与活化技术、煤气化灰渣高值化材料微化工制备装备与工艺、煤气化灰渣毒害组分迁移分布规律等进行研究,获取典型煤气化灰渣物理化学特征,根据

煤气化灰渣矿物结构、粒度分布和矿物组成,优化其水分脱除工艺;解析碳灰赋存结构特性,建立煤气化灰渣物理、化学分级分质工艺,形成灰渣分级分质利用技术;通过外热式预热脱碳转窑炉对煤气化灰渣进行燃烧脱碳研究,开发煤气化灰渣自维持脱碳铝硅预富集与预活化技术;通过酸碱交替浸出法对燃烧后灰渣进行处理,分解其中的铝硅酸盐矿物,形成煤气化灰渣铝硅酸盐循环浸出技术。该技术利用酸浸提取铝离子、碱浸提取硅酸根离子,实现硅、铝等元素的高效回收,并通过中和反应再生废液中的酸碱试剂,实现活化剂的循环利用;阐明煤气化灰渣制备化学活化剂等高值化材料调控机制,进行煤气化灰渣高值化材料微化工制备装备设计优化和规模化开发,建立煤气化灰渣高值化材料微化工制备装备工艺流程;研究煤气化灰渣分级分质利用及铝硅活化转化过程中毒害组分的赋存特性,进行毒害组分的环境毒理分析以及生态影响评价,基于灰渣毒害组分赋存与迁移特性,开发有机污染组分的热法脱除技术,对毒害组分进行有效固化与控制。



煤气化灰渣颗粒的燃烧及运动过程

煤气化灰渣活化过程能质传递与物相演变

图 4 煤气化灰渣颗粒燃烧及活化机理^[55]

Fig. 4 Particle combustion and activation mechanism of CGS

4.2 富碳灰渣高温气化反应机理及活性强化机制

富碳灰渣气化反应特性是影响气化装置效率及稳定性的主控因子,由于富碳灰渣中的碳已经历了一次气化过程,其活性有所降低,需要对富碳灰渣进行活化改性,强化其气化性能。

针对富碳灰渣高温气化反应机理及活性强化机制,主要围绕富碳灰渣结构特性及气化反应机理、富碳灰渣结构调控及黏结成型、高长径比纯氧连续常压气化装备、碳型渣纯氧连续常压气化工工艺等进行研究。解析富碳灰渣中碳灰组成及结合方式,探究富碳灰渣高温气化规律及气体释放行为特征,阐明富碳灰渣结构特性与气化反应活性

的内在关联,揭示富碳灰渣碳灰结合方式及气化反应机理,其中按照碳灰结合方式可分为嵌入模式、离散模式、交联模式和键合模式,如图 5 所示(图中 M 代表 AAEMs,下标 ads 代表吸附态,AAEMs 为碱和碱土金属,RC 代表富碳灰渣,RC20CML 代表负载 AAEMs 后的富碳灰渣);通过温和预氧化等预处理方法对富碳灰渣结构进行调控,提高富碳灰渣的反应活性,探究不同黏结剂类型及成型粒径对成型富碳灰渣气化反应特性的影响,建立基于结构参数的富碳灰渣气化反应动力学模型,形成富碳灰渣黏结成型及改性方法;建立耦合传质传热影响的工业尺度气化炉综合模型,设计优化气化装备整体结构与局部关键构件,

研发适用于成型富碳灰渣气化的高长径比纯氧连续常压气化装备。

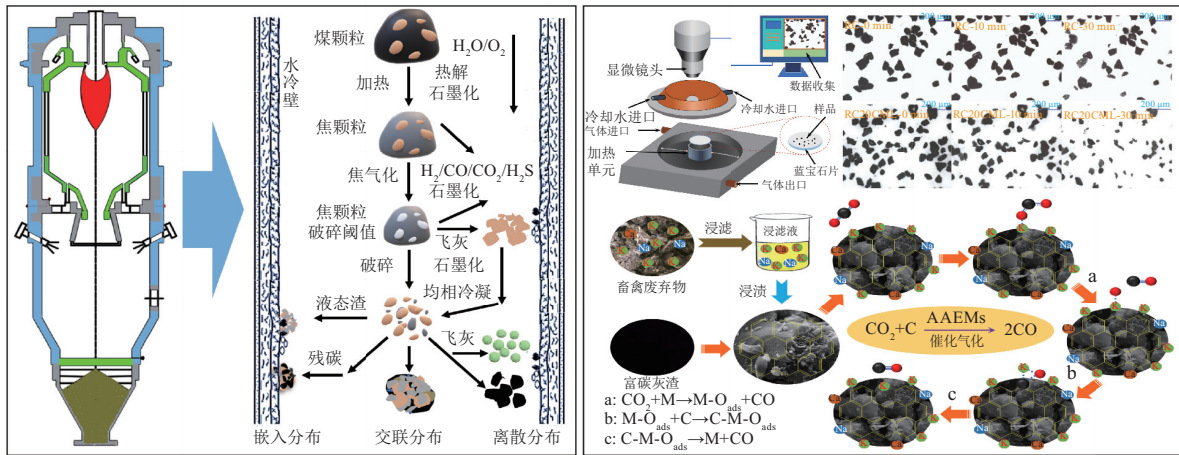


图 5 富碳灰渣碳灰结合方式及气化反应机理^[30]

Fig. 5 Combining mode of carbon-ash and gasification reaction mechanism of rich-carbon CGS

4.3 低碳灰渣全固废胶凝材料多动力源活化与水化机理

低碳灰渣用于建材的关键是利用其中的铝硅酸盐矿物,其中具有反应特性的铝硅酸盐矿物主要以玻璃体形式存在,但其玻璃体活性较低,尤其在低碳灰渣掺量较高时(掺量 $\geq 30\%$),复合胶凝材料的工作性和力学性能会显著下降,因此,亟需研究低碳灰渣全固废胶凝材料多动力源活化与水化机理。

针对低碳灰渣全固废胶凝材料多动力源活化与水化机理(见图 6,图中 CGS 为低碳灰渣;GGBS 为粒化高炉矿渣;CS 为电石渣;DA 为钠基脱硫

灰;U-相为单硫酸盐相,化学式为 $4\text{CaO} \cdot 0.9\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.1\text{SO}_3 \cdot 0.5\text{Na}_2\text{O} \cdot 16\text{H}_2\text{O}$;C-(A)-S-H 为水化硅(铝)酸钙凝胶;D10C10 代表钠基脱硫灰与电石渣的比例为 1 : 1;D12C8 代表钠基脱硫灰与电石渣的比例为 3 : 2;D14C6 代表钠基脱硫灰与电石渣的比例为 7 : 3,胶凝材料中钠基脱硫灰和电石渣的总掺量合计为 20%,剩余部分为 40%的低碳灰渣和 40%粒化高炉矿渣),主要围绕低碳灰渣多动力源活化改性技术、全固废胶凝材料水化反应与性能调控机理、全固废协同强化胶凝材料低碳制备工艺、低碳灰渣全固废胶凝材料长期服役性能等进行研究。

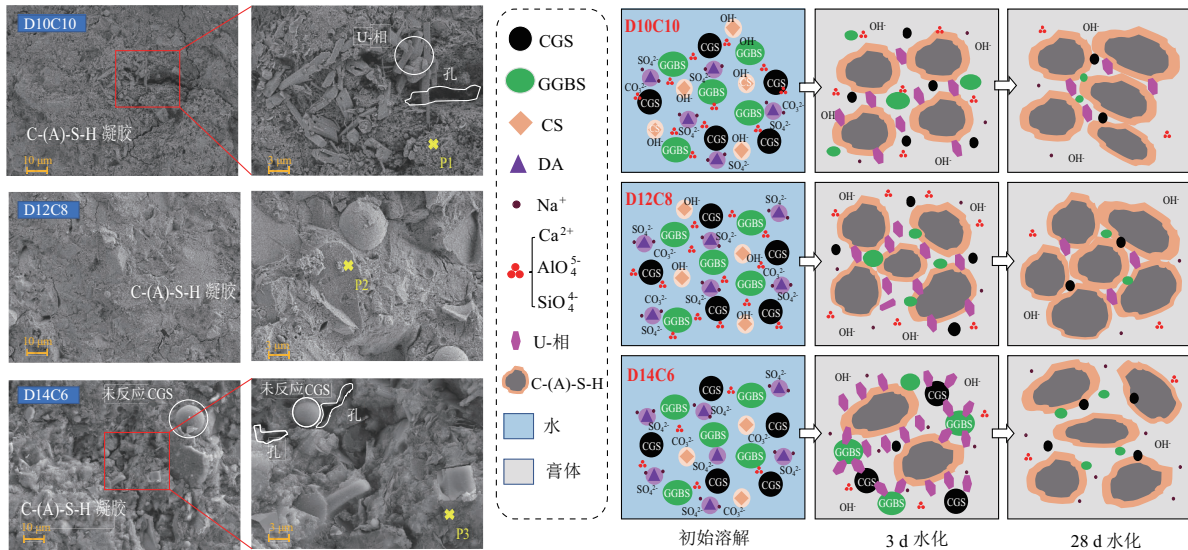


图 6 低碳灰渣活化与水化机理^[56]

Fig. 6 Activation and hydration mechanisms of low-carbon CGS

研究低碳灰渣多动力源耦合活化机理,开发相应的低碳灰渣多动力源耦合活化技术,实现低碳灰渣的活化改性;探讨固废胶凝材料的水化反

应与性能调控机理,揭示低碳灰渣基全固废胶凝材料的协同水化机理,实现材料性能的动态调控;基于水化反应与性能调控机理,构建低碳灰渣全

固废胶凝材料研发配比设计参数库,优化其低碳生产制备工艺;研究低碳灰渣全固废胶凝材料的长期服役性能,分析其长期服役行为,明晰结构损伤过程,揭示其性能多尺度演化规律.

4.4 采动空间多场耦合时空演化与充填控制机理

由于煤矿采动空间具有复杂多变性,且煤气化灰渣充填材料对采动空间变形的效果尚不明确,因此,需要研究采动空间多场耦合时空演化与充填控制机理.

针对采动空间多场耦合时空演化与充填控制机理,主要围绕采动空间多场时空演化与充填控制机理、全固废胶凝材料协同煤基固废充填材料、煤基固废全周期立体绿色智能充填技术、低碳灰

渣全固废胶凝材料路基充填技术等进行研究. 研究采动空间结构特征及多场时空演化规律,揭示煤基固废充填精准控制采动空间变形机理,实现其岩层稳定(见图 7);构建多功能全固废充填材料性能指标及其测评方法,研发低碳灰渣多功能全固废充填材料,揭示其长期稳定性能;建立采前一采中一采后全周期立体时空协同充填系统布局方法,提出全周期立体绿色智能高效充填工艺,研制长距离大流量非均质充填材料智能输送系统装备,形成煤基固废全周期立体绿色智能充填技术;揭示全固废胶凝材料路基稳定性控制机理,开发全固废胶凝路基充填材料自移式制备输送系统,提出预制充填模板-分级泵注式路基构筑工艺,形成低碳灰渣全固废胶凝材料路基充填技术.

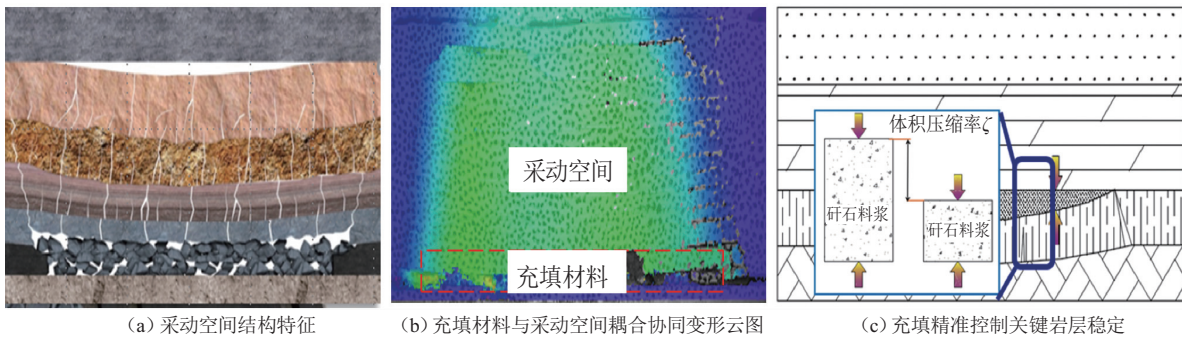


图 7 采动空间特征及充填控制机理^[54]

Fig. 7 Characteristics of mining space and backfilling control mechanism

5 煤气化灰渣规模化分质梯级利用与高效处置的关键技术问题

5.1 煤气化灰渣自维持脱碳铝硅预富集技术

煤气化灰渣具有高杂、高碳和铝硅活性不足的特点,且残碳颗粒与无机组分互相混杂嵌布,不利于铝硅酸盐活化分质利用^[55]. 因此,研发煤气化

灰渣自维持脱碳铝硅预富集技术具有重要意义.

采用物料高温预热技术实现灰渣的稳定着火和高效燃尽,最大化利用余热烟气和燃烧后灰渣显热的梯级能量,通过再循环烟气和燃烧精准控制炉膛稳燃,实现铝硅预富集,改善铝硅材料孔结构通道,构建煤气化灰渣自维持脱碳铝硅预富集及高温预活化技术(见图 8).

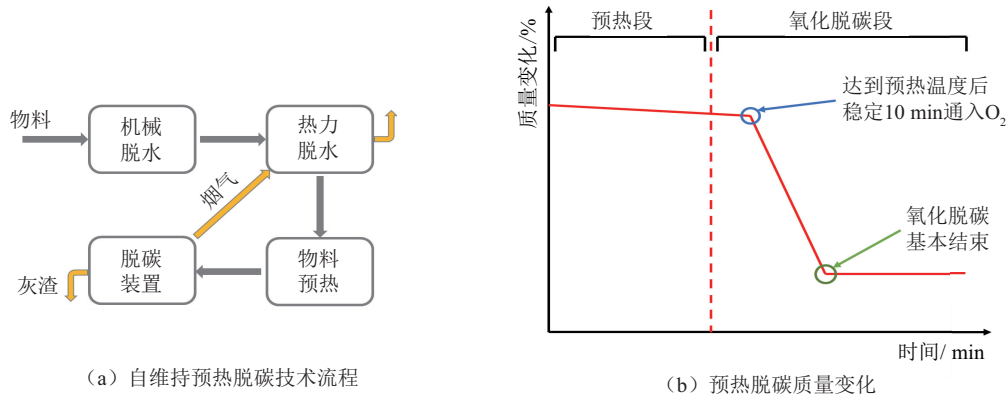


图 8 煤气化渣自维持预脱碳流程及质量变化

Fig. 8 Flow chart and mass change of self sustaining pre-decarbonization for CGS

5.2 煤气化灰渣高值化材料微化工制备技术

现有煤气化灰渣高值化利用技术存在工艺复杂、工业规模化难等问题,开发工艺简单、操作性强、生产性能稳定、易放大的微化工制备技术是实现煤气化灰渣高值化利用的关键.

微化工技术具有反应传质传热效率高、反应

易于控制、无放大研发周期及成本等优点被广泛应用.基于连续流微化工工艺的高值化新途径,制定微尺度作用力调控、集成化放大的规模化可控制备技术措施,建立设备结构、混合尺度与材料尺寸之间的定量关系,构建煤气化灰渣高值化材料微化工制备技术(见图 9).

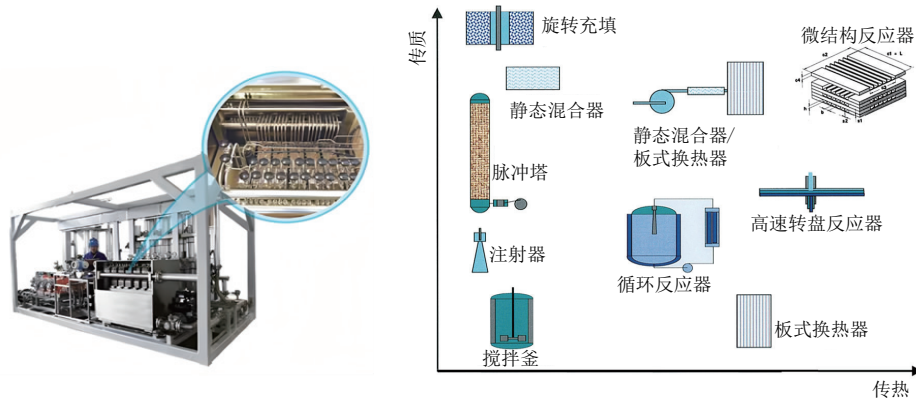


图 9 微化工设备及其传质传热特点

Fig. 9 Micro chemical equipment and its mass and heat transfer characteristics

5.3 富碳灰渣无辅助燃料常压气化工艺技术

富碳灰渣因石墨化程度高、粒径小且气化反应性差,其高效气化成为一项技术难题.相比传统流化床和气流床工艺,固定床气化工艺因停留时间长、转化率高,更适用于富碳灰渣的处理^[57].

通过设计高长径比纯氧连续常压气化装备,优化装备的整体结构及关键部件,开发富碳灰渣的黏结成型技术提高反应效率,探讨气化装置运行的最佳参数形成规模化工艺技术方案(见图 10).通过装备和工艺的联合优化,研发富碳灰渣无辅助燃料常压气化工艺技术,实现富碳灰渣的高效、稳定气化.

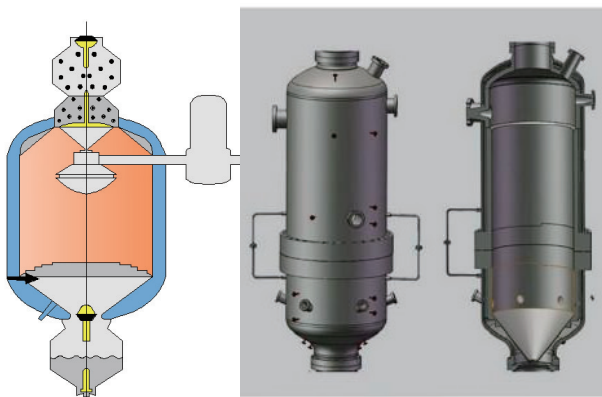


图 10 气化工艺装备

Fig. 10 Equipment for gasification

5.4 低碳灰渣全固废胶凝材料低碳制备技术

低碳灰渣的原料性质不稳定、活性低、粒度分布不均^[52],现有制备技术难以满足大掺量、低碳化

生产需求.因此,需要开发高效、低能耗的低碳制备技术.

主要通过建立原料配比模型和激发剂选型适配方法,开发具有工业化和模块化建造特征的前驱体免煅烧生产工艺及低能耗立式辊压磨技术,通过各工序之间的联动调节与参数控制优化制备流程.实现低碳灰渣全固废胶凝材料的低碳制备及大规模工业化应用(见图 11).

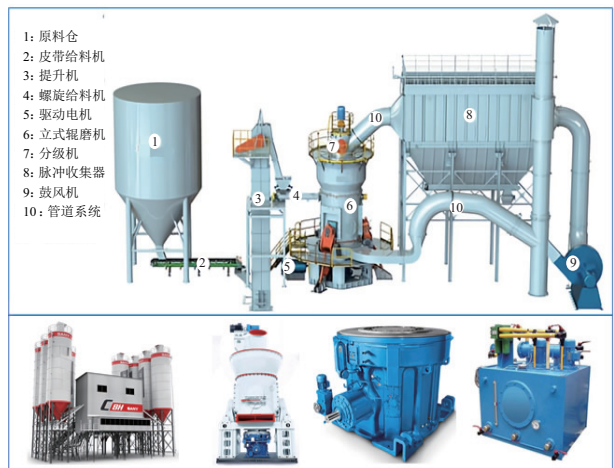


图 11 多动力源活化改性设备

Fig. 11 Multi-power source activation modification equipments

5.5 煤基固废全周期立体绿色智能充填技术

现有煤矿充填技术受限于系统布局单一、固废充填与煤炭开采之间的时空干涉,难以满足现代化采矿需求.针对这些问题,提出煤基固废全周期立体绿色智能充填技术.

主要通过建立采前一采中一采后全周期立体时空协同充填系统布局方式(见图 12),提出充填层位、时机与采煤工作面的时空干涉关系,设计高效充填工艺,研发长距离大流量非均质充填材料的高效输送方法,开发基于实时监测、自主反馈和智能配料的充填材料制备输送控制系统.构建绿色、智能、高效的煤矿充填理论与技术体系,推动煤气化灰渣资源化利用.

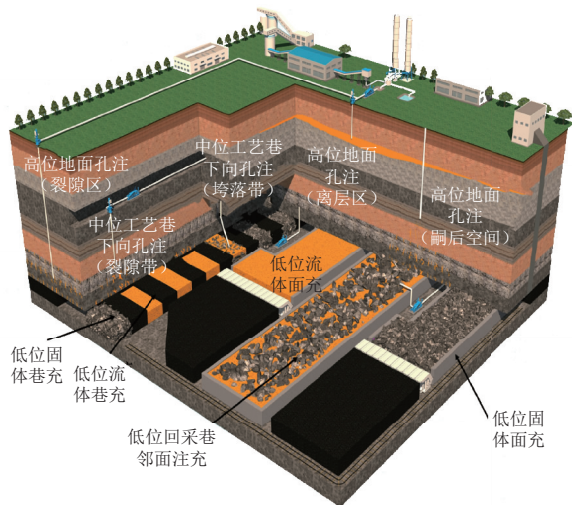


图 12 全周期绿色立体智能充填系统^[54]

Fig. 12 Full-cycle green three-dimensional intelligent backfilling system

6 主要结论

本文围绕煤气化灰渣高效利用与处置的技术难题,提出了煤气化灰渣规模化分质梯级利用技术,在铝硅分质活化与毒害组分控制、富碳灰渣无辅助燃料常压高效气化改性、低碳灰渣大掺量全固废胶凝材料低碳制备以及全固废胶凝材料与煤基固废绿色智能充填等方面取得了重要突破.通过实现煤气化灰渣的分质活化与规模化梯级利用,本文在促进煤化工园区生态环境保护和资源循环利用方面达成了多重目标,主要结论如下:

1)创新了煤气化灰渣规模化分质梯级利用的新模式,系统阐述了煤气化灰渣规模化分质梯级利用技术的内涵,明确了该技术的核心难点与研究关键,为煤气化灰渣的高效利用提供了系统化解决方案.

2)提炼了煤气化灰渣规模化分质梯级利用的关键科学问题,深入分析了煤气化灰渣利用过程中涉及的科学机制,包括铝硅结构分质活化与协同调控机理、富碳灰渣高温气化反应及活性强化机制、低碳灰渣全固废胶凝材料的多动力源活化

与水化机理以及采动空间多场耦合时空演化与充填控制机理,为相关研究提供了理论支持.

3)提出并解析了煤气化灰渣规模化分质梯级利用的关键技术问题,重点分析了煤气化灰渣自维持脱碳铝硅预富集技术、煤气化灰渣高值化材料微化工制备技术、富碳灰渣无辅助燃料常压气化工艺技术、低碳灰渣全固废胶凝材料低碳制备技术、以及煤基固废全周期立体绿色智能充填技术的技术难点,明确了技术开发方向和突破路径.

本研究为煤气化灰渣的高效利用和绿色处置提供了创新性的理论支撑与技术路径,对于推动煤化工固废的资源化利用和产业绿色发展具有重要意义.

参考文献:

- [1] 吴昊东,邵丰华,吕鹏,等.气流床煤气化细渣结构、性质与其粒度分布关系研究[J].燃料化学学报,2022,50(5):513-522.
WU Haodong, SHAO Fenghua, LYU Peng, et al. Study on the relationship between structure, properties and size distribution of fine slag from entrained flow gasification[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2022, 50(5): 513-522.
- [2] 宋维健,宋国良,齐晓宾,等.准东高钠煤气化过程中Na的迁移转化规律[J].煤炭学报,2016,41(2):490-496.
SONG Weijian, SONG Guoliang, QI Xiaobin, et al. Sodium transformation law of Zhundong coal during gasification[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 490-496.
- [3] 李梦杰,李鹏,范桂侠.煤气化渣的高值化利用研究进展[J].煤化工,2023,51(1):47-53.
LI Mengjie, LI Peng, FAN Guixia. Research progress on high value utilization of coal gasification slag[J]. Coal Chemical Industry, 2023, 51(1): 47-53.
- [4] 武立波,宋牧原,谢鑫,等.中国煤气化渣建筑材料资源化利用现状综述[J].科学技术与工程,2021,21(16):6565-6574.
WU Libo, SONG Muyuan, XIE Xin, et al. A Review on resource utilization of coal gasification slag as building materials in China[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(16): 6565-6574.
- [5] 何绪文,崔炜,王春荣,等.气化炉渣的重金属浸出特性及化学形态分析[J].化工环保,2014,34(5):499-502.
HE Xuwen, CUI Wei, WANG Chunrong, et al. Analysis on leaching characteristics and chemical speciation of heavy metals in gasification slag[J]. Environ-

- mental Protection of Chemical Industry, 2014, 34(5): 499-502.
- [6] 张凯, 杨佳俊, 白璐, 等. 中国西北某煤化工区土壤中重金属污染特征及其源解析[J]. 矿业科学学报, 2017, 2(2): 191-198.
ZHANG Kai, YANG Jiajun, BAI Lu, et al. The characteristics and source apportionment of heavy metal pollution in the soil at a coal chemical industry area in northwest China[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, 2(2): 191-198.
- [7] 周安宁, 高影, 李振, 等. 煤气化灰渣组成结构及分选加工研究进展[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(4): 575-584.
ZHOU Anning, GAO Ying, LI Zhen, et al. Composition structure and separation processing of ash and slag during coal gasification[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(4): 575-584.
- [8] 王学斌, 于伟, 张韬, 等. 基于粒度分级的煤气化细渣特性分析及利用研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(3): 61-69.
WANG Xuebin, YU Wei, ZHANG Tao, et al. Characteristic analysis and utilization of coal gasification fine slag based on particle size classification [J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(3): 61-69.
- [9] 郭凡辉. 气流床煤气化细渣水分赋存及脱水能量作用机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
GUO Fanhui. Research on water occurrence modes and dewatering energy mechanism of entrained-flow coal gasification fine slag [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [10] GUO F, CHEN L, LI Y, et al. Review on the attribute cognition and carbon-ash-water separation of coal gasification fine slag[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 320: 124121.
- [11] 付春龙, 王松江, 李国智. 煤气化细渣燃烧技术研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(增1): 516-523.
FU Chunlong, WANG Songjiang, LI Guozhi. Research progress on combustion technology of coal gasification fine slag[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(Sup 1): 516-523.
- [12] 史兆臣, 王贵山, 王学斌, 等. 煤气化细渣预热脱碳工艺燃烧特性研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(4): 105-110.
SHI Zhachen, WANG Guishan, WANG Xuebin, et al. Study on combustion characteristics of preheating decarburization process for fine slag in coal gasification[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(4): 105-110.
- [13] 徐啟斌, 牛香力, 陈婷婷, 等. 煤气化渣合成 4A 分子筛及其吸附性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(6): 2251-2261.
XU Qibin, NIU Xiangli, CHEN Tingting, et al. Preparation of 4A molecular sieve from coal gasification slag and its adsorption performance[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(6): 2251-2261.
- [14] 李宇, 王建敏, 张弦, 等. 高附加值煤气化渣基材料开发研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(23): 94-105.
LI Yu, WANG Jianmin, ZHANG Xian, et al. Research progress on the development of high-value-added materials by using coal gasification slag[J]. Materials Reports, 2023, 37(23): 94-105.
- [15] 张明, 房奎圳, 王栋民, 等. 掺改性煤气化渣水泥新拌浆体与减水剂相容性研究[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(6): 737-745.
ZHANG Ming, FANG Kuizhen, WANG Dongmin, et al. Study on compatibility of fresh cement paste mixed with modified coal gasification slag and superplasticizer [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(6): 737-745.
- [16] 许云龙, 周长俊, 刘晓敏, 等. 路用煤气化渣混凝土的制备与微观结构[J]. 煤炭学报, 2024, 49(增1): 424-433.
XU Yunlong, ZHOU Changjun, LIU Xiaomin, et al. Preparation and microstructure of coal gasification slag concrete for road construction [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(Sup 1): 424-433.
- [17] 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.
- [18] 刘娟红, 许鹏玉, 周昱程, 等. 改性煤气化渣用于矿山充填的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(8): 2528-2535.
LIU Juanhong, XU Pengyu, ZHOU Yucheng, et al. Experimental study on modified coal gasification slag used for mine filling[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(8): 2528-2535.
- [19] 李慧泽, 董连平, 鲍卫仁, 等. 基于视密度的煤气化渣水介质旋流炭-灰分离[J]. 化工进展, 2021, 40(3): 1344-1353.
LI Huize, DONG Lianping, BAO Weiren, et al. Carbon-ash separation of coal gasification slag in swirl-

- ling water based on apparent density [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(3): 1344-1353.
- [20] 闫小康, 苏子旭, 王利军, 等. 基于湍流涡调控的煤气化渣炭-灰浮选分离过程强化[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1318-1328.
YAN Xiaokang, SU Zixu, WANG Lijun, et al. Process intensification on flotation separation of carbon and ash from coal gasification slag using turbulent eddy regulation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1318-1328.
- [21] WU Y, XUE K, MA Q, et al. Removal of hazardous crystal violet dye by low-cost P-type zeolite/carbon composite obtained from in situ conversion of coal gasification fine slag[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2021, 312:110742.
- [22] 何 军. 煤气化细渣残碳基材料的制备及吸波性能研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
HE Jun. Preparation and electromagnetic wave absorption properties of residual carbon-based materials from coal gasification fine slag [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2021.
- [23] 王 栋, 姚 彬, 张国辉, 等. 煤气化灰渣资源化利用技术的研究现状[J]. *应用化工*, 2024, 53(8): 1967-1970.
WANG Dong, YAO Bin, ZHANG Guohui, et al. Research status of coal gasification ash utilization technology [J]. *Applied Chemical Industry*, 2024, 53(8): 1967-1970.
- [24] 宁永安, 段一航, 高宁博, 等. 煤气化渣组分回收与利用技术研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(增1): 14-19.
NING Yongan, DUAN Yihang, GAO Ningbo, et al. Progress of component recycling and utilization technology of coal gasification slag[J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(Sup 1): 14-19.
- [25] 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 Jiaobo, SUN Zhigang, et al. Research progress on comprehensive utilization of coal gasification slag [J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(1): 184-193.
- [26] 张吉雄, 巨 峰, 李 猛, 等. 煤矿矸石井下分选协同原位充填开采方法[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 131-140.
ZHANG Jixiong, JU Feng, LI Meng, et al. Method of coal gangue separation and coordinated in-situ backfill mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 131-140.
- [27] 霍彬彬, 张吉雄, 周 楠, 等. 十二烷基硫酸钠对碱激发煤气化渣充填料浆封存 CO₂ 及流变性能的影响[J]. *采矿与安全工程学报*, 2024, 41(6): 1279-1288.
HUO Binbin, ZHANG Jixiong, ZHOU Nan, et al. Effect of sodium dodecyl sulfate on the CO₂ sequestration and rheological properties of alkali-activated coal gasification slag backfill pastes [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2024, 41(6): 1279-1288.
- [28] 高海洋, 梁 龙, 靳开宇, 等. 煤气化渣资源化利用综述[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(8): 192-208.
GAO Haiyang, LIANG Long, JIN Kaiyu, et al. A review on the resource utilization of gasification slag [J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(8): 192-208.
- [29] 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 prospects of gasification slag resource utilization [J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(6): 11-21.
- [30] 丁子涵, 马 丽, 吴俊杰, 等. 煤气化渣制备功能微纳材料研究进展[J]. *工程科学学报*, 2024, 46(9): 1671-1684.
DING Zihan, MA Li, WU Junjie, et al. Research progress on the preparation of functional micro/nano materials from coal gasification slag [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(9): 1671-1684.
- [31] 杨进进, 樊盼盼, 樊晓婷, 等. 煤气化细渣碳灰分离技术研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(7): 51-64.
YANG Jinjin, FAN Panpan, FAN Xiaoting, et al. Research progress on carbon-ash separation technology of fine residue from coal gasification [J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(7): 51-64.
- [32] 张丽宏, 金要茹, 程芳琴. 煤气化渣资源化利用[J]. *化工进展*, 2023, 42(8): 4447-4457.
ZHANG Lihong, JIN Yaoru, CHENG Fangqin. Resource utilization of gasification slag [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(8): 4447-4457.
- [33] 张瑞梅, 刘定桦, 何 浩, 等. 煤气化细渣综合利用与碳灰分离技术现状[J]. *煤炭工程*, 2023, 55(5): 175-182.
ZHANG Ruimei, LIU Dinghua, HE Hao, et al. Current status of comprehensive utilization of fine residue from coal gasification and carbon ash separation

- technology [J]. *Coal Engineering*, 2023, 55 (5): 175-182.
- [34] 冯向港,王海燕,葛奋飞,等.煤气化渣高值化利用的研究进展及应用展望[J].*洁净煤技术*,2023,29(11):122-132.
FENG Xianggang, WANG Haiyan, GE Fenfei, et al. Research progress and application prospects of high-value utilization of gasification slag [J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(11): 122-132.
- [35] LYU B, DENG X W, JIAO F S, et al. Enrichment and utilization of residual carbon from coal gasification slag: A review [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 171: 859-873.
- [36] 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(增2): 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(Sup 2): 103-111.
- [37] GUO Q, HUO B B, YU K P, et al. Using acetic acid as a preconditioner to optimize rheology of alkali-activated coal gasification slag based backfill pastes [J]. *Minerals Engineering*, 2024, 218: 109040.
- [38] 陈博文,熊卓,赵永椿,等.重金属在煤气化过程中迁移规律及在气化渣中浸出行为和固化处理综述[J].*洁净煤技术*,2023,29(7):173-188.
CHEN Bowen, XIONG Zhuo, ZHAO Yongchun, et al. Migration pattern and solidification treatment technology of heavy metals in coal gasification slag: A review [J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(7): 173-188.
- [39] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. GB/T 39198—2020,一般固体废物分类与代码[S].北京,2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. GB/T 39198—2020, Classification and code of general solid waste [S]. Beijing, 2020.
- [40] REN L, WU Y J, GONG Y, et al. Experimental and kinetic studies on steam gasification of oxidized carbon-rich fraction from coal gasification fine slag [J]. *Energy*, 2024: 133711.
- [41] XIE G, SUO Y L, LIU L, et al. Pore characteristics of sulfate-activated coal gasification slag cement paste backfill for mining [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30 (54): 114920-114935.
- [42] YANG P, SUO Y L, LIU L, et al. Study on the curing mechanism of cemented backfill materials prepared from sodium sulfate modified coal gasification slag [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 62: 105318.
- [43] 东赫,解强,唐跃刚,等.气流床煤粉气化过程有害微量元素迁移转化的模拟研究[J].*中国矿业大学学报*,2018,47(2):400-407.
DONG He, XIE Qiang, TANG Yuegang, et al. Simulation study of migration of hazardous trace elements in coal during gasification in entrained-flow gasifier [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(2): 400-407.
- [44] 石旭,初莱,董建飞,等.气流床气化细渣中碳-灰的结合形态及其解离特性[J].*中国矿业大学学报*,2023,52(3):576-584.
SHI Xu, CHU Mo, DONG Jianfei, et al. Combined morphology and dissociation characteristics of carbon-ash in fine slag of entrained flow gasification [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(3): 576-584.
- [45] GAO Y, ZHANG J F, TU Y A, et al. Synthesis of hierarchical porous silica aerogel for CO₂ adsorption using decarbonized coal gasification fine slag [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2024: 113399.
- [46] WU C, LU H, BAI J, et al. Reduction behavior and growth kinetics of metallic iron in slag bath of BGL coal gasifier [J]. *Fuel*, 2023, 342: 127795.
- [47] 杨科,方珏静,张吉雄,等.加浆改性固体充填材料承载压缩特性与固结机制[J].*中国矿业大学学报*,2024,53(3):456-468.
YANG Ke, FANG Juejing, ZHANG Jixiong, et al. Bearing and compressive characteristics and consolidation mechanism of slurry modified solid filling materials [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(3): 456-468.
- [48] 廖昌建,王晶,金平,等.煤气化渣理化特性及其所含重金属迁移规律综述[J].*煤炭科学技术*,2025,53(2):426-443.
LIAO Changjian, WANG Jing, JIN Ping, et al. Review of physical and chemical characteristics and heavy metal migration rules of coal gasification slag [J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53 (2): 426-443.
- [49] 霍彬彬,张亚梅,王栋民,等.甲酸干法化学改性钢渣粉及其浆体性能研究[J].*矿业科学学报*,2022,7(5):522-528.
HUO Binbin, ZHANG Yamei, WANG Dongmin, et al. Investigating the performance of dry chemically modified steel slag powder and pastes by formic acid

- [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(5): 522-528.
- [50] XIANG J C, QIU J P, ZHAO Y Q, et al. Rheology, mechanical properties, and hydration of synergistically activated coal gasification slag with three typical solid wastes[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2024, 147: 105418.
- [51] LI Z Z, ZHANG Y Y, ZHAO H Y, et al. Structure characteristics and composition of hydration products of coal gasification slag mixed cement and lime[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 213: 265-274.
- [52] CHEN C S, SHENOY S, PAN Y H, et al. Mechanical activation of coal gasification slag for one-part geopolymer synthesis by alkali fusion and component additive method[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134585.
- [53] 张吉雄, 屠世浩, 曹亦俊, 等. 煤矿井下煤矸智能分选与充填技术及工程应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(3): 417-430.
- ZHANG Jixiong, TU Shihao, CAO Yijun, et al. Coal gangue intelligent separation and backfilling technology and its engineering application in underground coal mine[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(3): 417-430.
- [54] 张吉雄, 周楠, 高峰, 等. 煤矿开采嗣后空间矸石注浆充填方法[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 150-162.
- ZHANG Jixiong, ZHOU Nan, GAO Feng, et al. Method of gangue grouting filling in subsequent space of coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 150-162.
- [55] ZHAO Y Q, GU X W, XU X C. Physical-chemical performance of coal gasification slag with calcination activation utilized as supplementary cementitious material[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 451: 138776.
- [56] HU Z H, GU X W, LI Z J, et al. A novel solid waste activator for coal gasification slag-based geopolymers: Sodium-based desulfurization ash and carbide slag[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 470: 140655.
- [57] 陈智超, 侯建, 田晓东. 低温活化温度对煤气化细灰基活性炭理化性质及电化学性能影响[J/OL]. *煤炭学报*, 1-7 [2024-11-30]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0614>.
- CHEN Zhichao, HOU Jian, TIAN Xiaodong. Effect of low temperature activation temperature on physicochemical properties and electrochemical properties of coal gasification fine ash based activated carbon[J]. *Journal of China Coal Society*, 1-7 [2024-11-30]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0614>.

(责任编辑 宋爽 全腾)