



煤电化基地大宗固废“三化”协同利用基础与技术

杨科 何淑欣 何祥 初茉 周伟 袁宁 陈登红 龚鹏 张元春

引用本文:

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. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0129>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

新疆煤基固体废弃物处置与资源化利用研究

Prospectsof 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>

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

Mining technology and practice of full-solid waste cemented backfilling in narrow strip of extra-thick coal seam under buildings
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 83–92 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0188>

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>

煤矿固体废弃物流态化浆体充填技术

Fluidization slurry backfilling technology of coal mine solid waste
煤炭科学技术. 2021, 49(3): 83–91 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.010>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

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.

煤电化基地大宗固废“三化”协同利用基础与技术

杨科^{1,2},何淑欣¹,何祥¹,初茉³,周伟⁴,袁宁³,陈登红^{1,2},龚鹏⁵,张元春⁶

(1. 安徽理工大学矿业工程学院,安徽淮南 232001; 2. 合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室),安徽合肥 230031; 3. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083; 4. 安徽理工大学材料科学与工程学院,安徽淮南 232001; 5. 中国矿业大学力学与土木工程学院,江苏徐州 221116; 6. 安徽理工大学化工与爆破学院,安徽淮南 232001)

摘要:我国 14 个大型煤炭基地及 89 个大宗固体废弃物综合利用示范基地建设,标志着矿区大宗固废利用已被纳入全国战略发展布局。长期以来煤炭资源高强度的开发与利用,造成矿区浅埋煤层资源临近枯竭,煤电化基地大规模固废堆积及地表沉陷,已成为制约矿区绿色低碳、高质量发展的难题。大宗煤基固废协同利用与绿色充填是解放“三下一上”压煤,延长矿井服务年限,实现固废无害化、资源化、规模化“三化”利用的有效途径。基于产煤大省山西省、“华东能源粮仓”安徽两淮基地及宁东能源化工基地的煤基固废种类和产量,详细阐述了以煤矸石、粉煤灰、炉底渣、气化渣和脱硫石膏等为主要材料的煤基固废通过重金属吸附解吸和络合钝化技术实现无害化处置,列举煤基固废分类应用于低热值煤基固废发电、制备建筑材料如水泥、砖瓦等资源化利用途径,对比分析煤基固废采煤沉陷区复垦回填及井下充填规模化利用途径,突出煤基固废井下充填的优越性。基于煤电化基地深部煤炭资源,提出绿色充填开采理论与关键技术,包括深部煤矸石源头减量与采选充协同技术、充填材料高效制备与深部井下输送技术及煤基固废充填材料深部多场耦合机理,探究多源煤基固废从源头、过程到终端的深部充填开采全过程的技术原理与方法,以解决矿区深部井下充填的技术难题。根据宁东基地任家庄煤矿、山西省霍尔辛赫煤矿及淮北矿区地质条件和充填目的,分别提出超前钻孔注充低位充填方案、关键层非典型特征条件下多离层梯级注浆方案和煤基固废协同利用关键技术,综合矿山固废处置与利用、深部煤炭资源开发利用、地表沉陷控制、生态环境保护等优势,形成煤电化基地大宗固废协同利用与绿色开采模式,为煤炭开采高质量化和环境低损伤化提供参考。

关键词:煤电化基地;煤基固废;协同利用;深部开采;源头减量;采选充一体化

中图分类号: TD823 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2024)04-0069-14

Foundation and technology of coordinated utilization of bulk solid waste ‘Three modernizations’ in coal power base

YANG Ke^{1,2}, HE Shuxin¹, HE Xiang¹, CHU Mo³, ZHOU Wei⁴, YUAN Ning³,
CHEN Denghong^{1,2}, GONG Peng⁵, ZHANG Yuanchun⁶

(1. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230031, China; 3. School of Chemistry and Environment Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 5. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 6. School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

收稿日期: 2024-01-08 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.12438/cst.2024-0129

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(52130402); 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1904304); 合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室)资助项目(21KZS217)

作者简介: 杨科(1979—),男,四川叙永人,教授,博士生导师,博士。E-mail: yksp2003@163.com

Abstract: The construction of 14 large-scale coal bases and 89 demonstration bases for the comprehensive utilization of bulk solid waste in China marks that the utilization of bulk solid waste in mining areas has been incorporated into the national strategic development layout. The long-term high-intensity development and utilization of coal resources has caused the near depletion of shallow-buried coal seam resources in mining areas, and the large-scale solid waste accumulation and surface subsidence of coal power and chemical bases has become a problem restricting the green, low-carbon and high-quality development of mining areas. Co-operative utilization of bulk coal-based solid waste and green filling is an effective way to liberate the “three down and one up” pressed coal, extend the service life of mines, and realize the harmless, resourceful, and large-scale “three” utilization of solid waste. Based on the types and production of coal-based solid waste in Shanxi Province, the “East China Energy Granary” Anhui Lianghuai Base and Ningdong Energy and Chemical Base, it elaborates in detail the harmless disposal of coal-based solid waste through heavy metal adsorption and desorption and complexation passivation technology with coal gangue, fly ash, furnace slag, gasification slag and desulphurization gypsum as the main materials, listing the classification and application of coal-based solid waste, and the application of coal gangue, fly ash, furnace slag, gasification slag and desulphurization gypsum as the main materials. List the ways of resource utilization of coal-based solid waste classified and applied to low calorific value coal-based solid waste for power generation, preparation of building materials such as cement, bricks and tiles, etc. Comparatively analyze the ways of reclamation and backfilling of coal mining subsidence area and downhole filling and large-scale utilization of coal-based solid waste, highlighting the superiority of downhole filling of coal-based solid waste. Based on the deep coal resources of coal electrification bases, the theory and key technologies of green filling mining are proposed, including the synergistic technology of deep coal gangue source reduction and mining and filling, the technology of efficient preparation and deep underground transportation of filling materials, and the deep multi-field coupling mechanism of coal-based solid waste filling materials, and the technological principles and methods of the whole process of deep filling mining of multi-source coal-based solid waste from the source, process to the end are investigated to solve the technical problems of deep underground filling of mining areas. The technical problems of filling are solved. According to the geological conditions and filling purposes of Renjiazhuang Coal Mine in Ningdong Base, Huoerxinhe Coal Mine in Shanxi Province and Huaibei Mining Area, the key technologies of low-level filling by overdrilling, multi-separation layer stepped grouting under the conditions of atypical characteristics of key layers and synergistic utilization of coal-based solid wastes have been proposed, which comprehensively combine the advantages of disposal and utilization of solid wastes from mines, development and utilization of deep coal resources, control of subsidence of the ground surface, and ecological environment protection, and form a comprehensive plan for the disposal and utilization of bulk solid wastes from coal power and chemical bases. Coal power and chemical base bulk solid waste synergistic utilization and green mining mode, providing reference for high quality coal mining and low damage to the environment.

Key words: coal power base; coal-based solid waste; collaborative utilization; deep mining; source reduction; mining, dressing and backfilling integrated

0 引 言

基于我国“相对富煤、贫油、少气”的能源禀赋特征,习近平总书记在党的二十大报告中强调“深入推进能源革命,加强煤炭清洁高效利用”,煤炭作为我国主体能源,仍将是我国国民经济发展的主要支撑^[1-2]。两淮、宁东及山西省晋北、晋中、晋东基地等煤电化基地作为我国亿t级煤电基地的同时,也是全国大宗固体废弃物综合利用示范基地之一,长期的高强度开采,导致大规模开采沉陷区形成,浅埋煤层资源临近枯竭,固废综合利用率低以及生态环境破坏,制约着矿区生态经济社会的快速发展,资源化低损伤绿色开采需求日益显著^[3-4]。在“绿水青山就是金山银山”的生态发展理念下,早日实现煤电化基地大宗固废协同利用及深部煤炭资源充填开采已成为煤电化基地乃至国家能源与生态安全的重大课题。

针对大宗煤基固废的综合处置利用,国内外已经研发了包括发电^[5]、铺路^[6]、生产建筑材料^[7-8]、生

产化工原料^[9-10]、土地回填复垦^[11]及应用于农业生产^[12]等方面的地面处理方法,以及煤基固废井下充填处理方法^[13-14]。煤矿井下充填开采作为一种绿色开采方式,承担处理固体废弃物和控制采煤沉陷的双重功能,是解决深部煤炭资源开采的主要技术选择,近年来得到广泛的研究与应用^[15-19]。目前我国井下充填开采已基本形成了以固体充填^[20]、膏体充填^[21-22]、高水充填^[23]和离层注浆^[24]等为主体的技术体系和应用模式,并探索普适性拓展型固体改性充填采煤技术^[25]、智能分选充填技术^[26]及负碳高效充填开采^[27]等理论。

目前,宁东能源化工基地、两淮基地及山西省的煤基固废综合利用分别体现了无害化、资源化和规模化的“三化”特征,并且较为全面地涵盖了分别以处置煤基固废、保护生态环境和解放压煤资源为目的的充填开采方式。同时,其他省份如新疆、内蒙古等地区的煤基固废处置利用已有学者进行了较为详细和深入的研究^[28-31],故未加以阐述。因此,针对两

淮基地、宁东基地及山西省晋北、晋中、晋东基地等煤电化基地固废种类产量、综合利用量,详细阐述了煤基固废通过重金属吸附解吸和络合钝化技术实现无害化处置,依次列举煤基固废分类应用于低热值煤基固废发电、制备建筑材料如水泥、砖瓦等资源利用途径,对比分析了煤基固废采煤沉陷区复垦回填及井下充填规模化利用途径,突出煤基固废井下充填的优越性。基于煤电化基地深部煤炭资源,提出绿色充填开采理论与关键技术,包括深部煤矸石源头减量与采选充协同技术、充填材料高效制备与深部井下输送技术及煤基固废充填材料深部多场耦合机理,探究多源煤基固废从源头、过程到终端的深部充填开采全过程的技术原理与方法,以解决矿区深部井下充填的技术难题,综合矿山固废处置与利用、地表沉陷控制、生态环境保护等优势,形成适用于煤电化基地的大宗固废协同利用与绿色开采模式,促进煤矿开采高质量化、环境低损伤化、绿色低碳化发展。

1 煤电化基地与固体废弃物概况

1.1 煤电化基地概况

山西省是我国第一产煤大省,作为重要的能源供应基地,具有资源储量大、分布广、品种全、质量优等特点,煤田面积覆盖 6.2 万 km²,占国土面积的 40.4%,2 000 m 以浅煤炭预测资源储量 6 652 亿 t;探明保有资源储量 2 674.3 亿 t,约占全国的 1/4,形成

晋北动力煤综合基地,晋中炼焦煤综合基地和晋东无烟煤综合基地三大煤炭生产基地^[32](图 1)。

两淮煤电基地是国家 14 个大型煤炭基地之一,位于安徽省。省内煤炭资源主要集中在两淮基地,保有资源量 341.3 亿 t,占全省资源量的 99% 以上,包括淮南、淮北 2 个矿区。其中淮北矿区位于安徽省西北部,地跨淮北、宿州、阜阳和亳州 4 市,总面积 12 350 km²,包括濉萧、宿州、临涣、涡阳 4 个矿区;淮南矿区面积约 3 200 km²,煤炭资源主要集中分布在潘集区和凤台县,覆盖新集、潘谢、定远三大煤田。两淮矿区作为我国战略性煤炭生产基地,长期以来为安徽工业、经济发展提供能源保障,截至 2020 年底,淮北矿业、淮河能源、皖北煤电、中煤新集四大煤炭企业所属的生产矿井 38 处,核定生产能力 12 466 万 t/年,占全省产能的 98.2%,其中单井平均规模达 328 万 t/年,居全国前列,支撑了长三角经济快速发展,被誉为“华东能源粮仓”^[33-34]。

宁东能源化工基地位于宁夏回族自治区中东部,规划区总面积 3 484 km²,煤炭资源探明储量 331 亿 t,占宁夏的 85%,远景预测储量 1 394 亿 t。截至 2021 年底,宁东基地煤炭生产能力达到 9 675 万 t,煤化工生产能力达到 2 600 万 t 以上,成为全国最大的煤制油、煤基烯烃生产加工基地。2020 年被工业和信息化部评定为国家新型工业化产业示范基地,对其他煤电化基地产业发展具有指导意义^[35]。

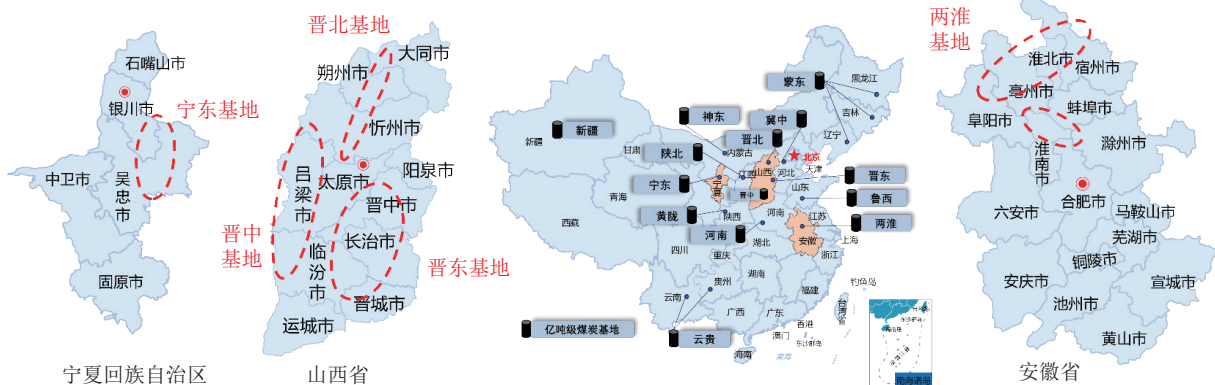


图 1 我国 14 个亿 t 煤炭基地及典型煤电化基地区域分布

Fig.1 Regional distribution of 14 billion tons coal bases and typical mining areas in China

1.2 煤基固废种类和产量

国家发改委和工信部于 2019 年和 2021 年先后批准共 89 个大宗固体废弃物综合利用示范基地,标志着矿区大宗固废利用已被纳入全国战略发展布局。

“十三五”期间,我国一般工业固体废弃物年产生量均在 35 亿 t 以上,综合利用率维持在 52%~

57%,整体呈先下降后上升的趋势(图 2)。其中山西省和安徽省一般工业固体废弃物年产生量在 2019 年达到顶峰后开始下降,山西省作为我国产煤大省,其一般工业固体废弃物年产生量均在 2.8 亿 t 以上,安徽省在 1.2 亿 t 以上,宁夏回族自治区一般工业固体废弃物年产生量相比较少,但呈稳步增长。同时,安徽省一般工业固体废弃物综合利用率维持在较高

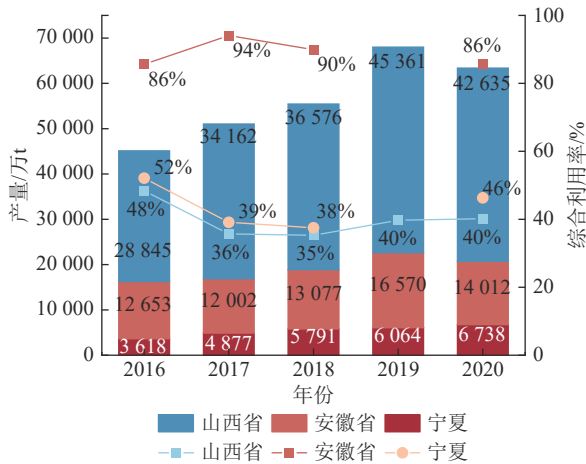


图2 典型煤电化基地省份“十三五”期间一般工业固体废弃物年产量及综合利用率

Fig.2 Annual output and comprehensive utilization rate of general industrial solid waste in typical mining provinces during the 13th Five-Year Plan period

水平,而山西省及宁夏回族自治区的煤基固废综合利用率偏低,且总体呈下降趋势^[36-39]。

从固废种类来看,宁东基地煤基固废产生量(2022年)前5位分别为粉煤灰 786 万 t、气化渣 784 万 t、煤矸石 735 万 t、炉底渣 238 万 t、脱硫石膏 172 万 t,在一般工业固体废弃物中占比分别为 27.1%、27.0%、25.3%、8.2% 和 5.9%(图 3),除气化渣之外,其余固废的综合利用率均高于 60%。

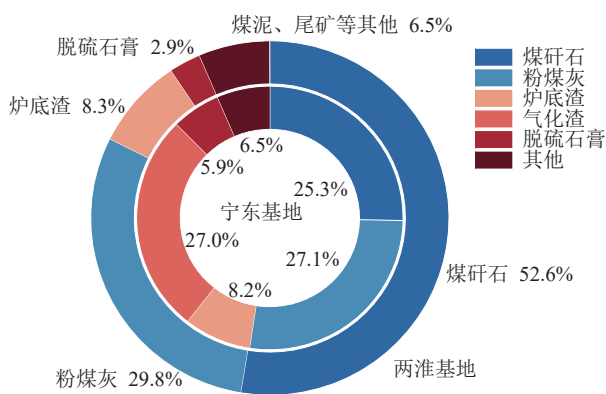


图3 2022年宁东基地和两淮基地煤基固废产量占比
Fig.3 Proportion of coal-based solid waste production in Ningdong Base and Huainan and Huaibei Base in 2022

两淮基地煤基固废产生量前4位分别为煤矸石 2 340 万 t、粉煤灰 1 325 万 t、炉底渣 370 万 t、脱硫石膏 130 万 t(图 4a),在一般工业固体废弃物中占比分别为 52.6%、29.8%、8.3% 和 2.9%,两淮基地炉底渣材料利用方式单一,大部分炉底渣仅用于水泥工业生产,建筑材料生产多以煤矸石和粉煤灰为主,因此除炉底渣外,其余固废的综合利用率均高于 90%。

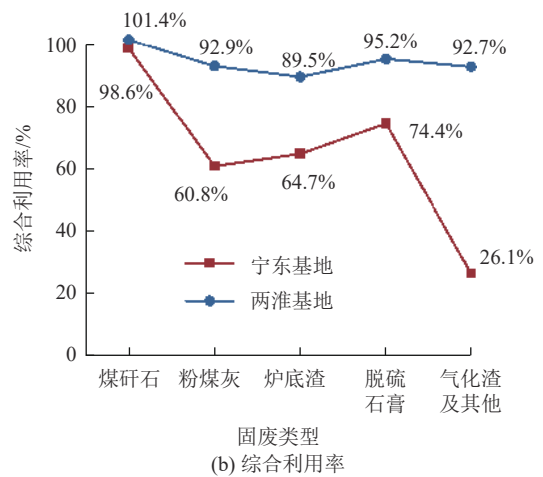
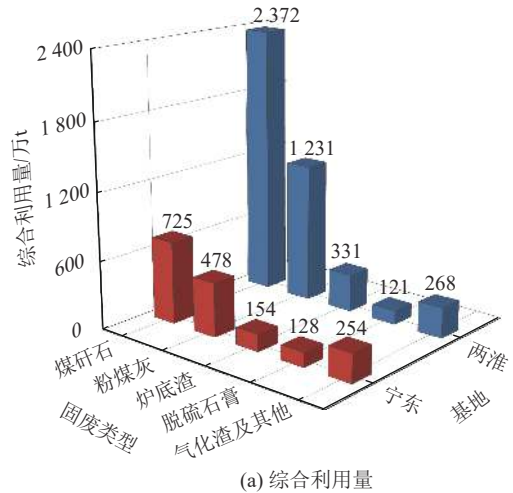


图4 2022年宁东基地和两淮基地煤基固废综合利用量
Fig.4 Comprehensive utilization of coal-based solid waste in Ningdong base and Lianghuai base in 2022

比较 2 个典型煤电化基地可以发现,宁东基地的气化渣产量远高于两淮基地气化渣产量,但其综合利用率却只有 11.99%,且两淮基地的煤基固废综合利用率总体比宁东基地高。截至 2020 年末,淮南市共有 64 家主要大宗固废综合利用企业,煤矸石、粉煤灰等大宗固废利用产业正逐步向标准化、规模化、高端化发展,一般工业固体废物基本得到妥善利用处置。

2 煤电化基地大宗固废“三化”协同利用方式

在“双碳”目标下,煤基固废的处置目标可概括为无害化、资源化和规模化。目前,煤电化基地大宗固体废弃物可通过重金属吸附解吸和络合钝化等技术实现无害化,资源化处置利用主要以发电、建筑材料高品质利用如水泥、砖瓦制备等方式为主,通过开采沉陷区回填复垦及井下绿色充填等途径实现煤基固废的大规模处置,如图 5 所示。但仍存在产业发展层次技术水平较低,资源优势尚未变成经济优势

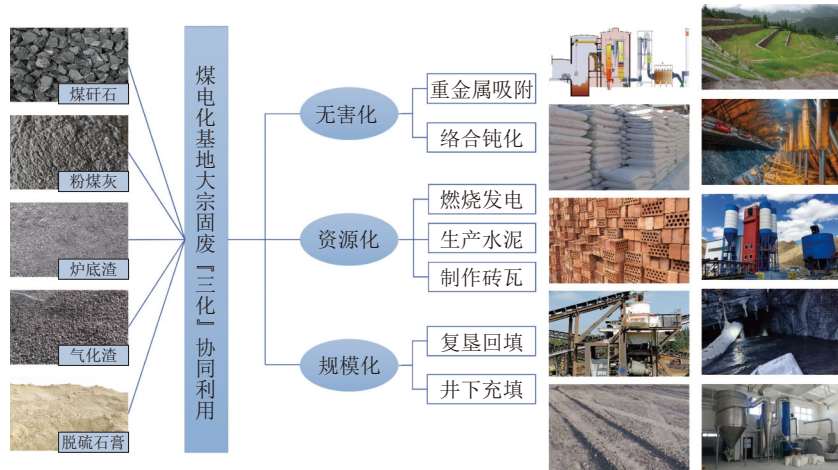


图 5 煤电化基地大宗固废“三化”协同利用主要途径

Fig.5 Coal-based solid waste resource utilization main pathway

的问题,同时,新产品、新技术、新装备、新工艺的推广应用不足,煤矸石历史堆存量,难以及时妥善利用处置,消纳历史堆存的任务艰巨。综合两淮基地煤基固废高综合利用率的优势,研究煤电化基地固体废弃物“三化”利用新技术,从根本上实现煤电化基地固废高效利用和绿色可持续采矿。

2.1 煤基固废无害化利用

为消除煤基固废中重金属富集及毒害物质释放超标等风险,开展以煤基固废重金属吸附解吸和络合钝化为主的技术研发。首先采用粒径分级、物相分析等测试手段分析气化渣和腐植酸的基础物化性质,解析重金属赋存形态和浸出特性,然后开展腐植酸(HA)对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附性能和 HA-Pb, HA-Cd 体系中 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 脱附性能的研究,为腐植酸类用于重金属吸附奠定基础。最后基于酸碱度的适应性调控优化沸石-腐植酸协同吸附体系,研究复合体系吸附性能的提升机理,保证其在复杂条件下作用的稳定性。另外还可采用不同钝化剂对重金属离子进行络合钝化,分析在不同酸碱度和水环境下对重金属络合钝化的行为、规律、机理,优选重金属络合钝化的材料和方法。通过加强上述 2 种方式协同配合,最终形成固化率超 80% 的气化渣内重金属高效吸附-钝化关键技术,制备环境友好型充填材料,为无害化绿色充填奠定基础。技术原理如图 6 所示。

为进一步提高煤基固废重金属吸附-钝化的经济性,通过井下环境模拟试验,强化材料对特定重金属络合钝化的稳定性和环境适应性,提高重金属非稳态向稳态转化效率。同时利用煤基固废的多孔结构来研发成本低廉的吸附材料,扩宽吸附材料来源,提升重金属吸附效益。以重金属质量分数和浸出量

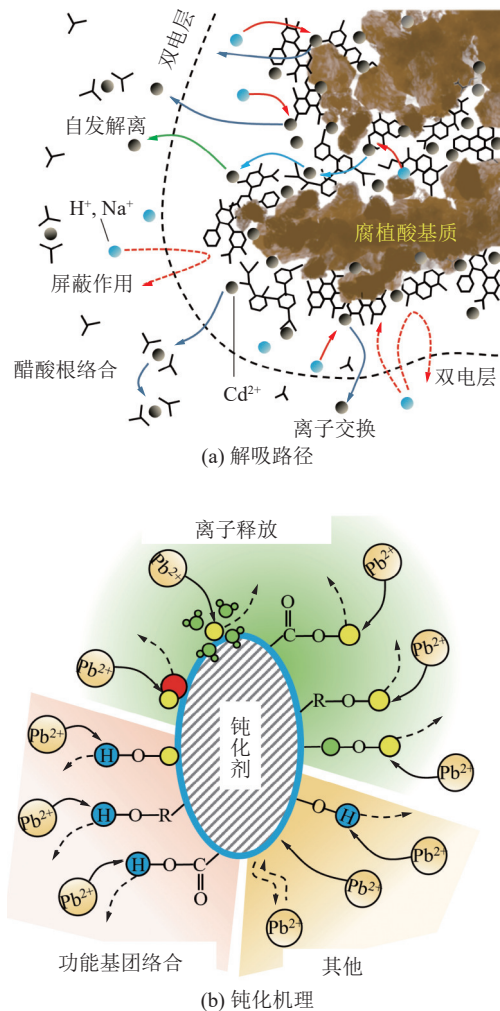


图 6 重金属吸附-钝化技术原理示意^[13]

Fig.6 Technical principle of heavy metal adsorption and passivation technology

均符合国标 GB15618—2018 和 GB18599—2020 的煤矸石为例,通过研磨、钝化、添加外加剂以及改性、养护和煅烧等方法,将粉体煤矸石制备成高通孔率、

高比表面积的多孔材料,充填于井下以发挥其与矿井水、重金属的耦合吸附效应;经过处理后的粉体矸石自身重金属浸出能力已远小于其吸附性能,吸附的杂质又可对自身重金属形成包裹和屏障,堵塞浸出通道,使矸石吸附材料内的重金属赋存更稳固,进一步保障吸附材料的长期安全可靠[13]。

2.2 煤基固废资源化利用

2.2.1 煤基固废用于发电

从20世纪70年代以来,利用低热值煤基固废发电已经成为煤炭产业生态文明建设的重要举措,破碎后的煤矸石颗粒在炉内进行多次循环反复的充分燃烧和反应,产生的热量可用于发电,其灰渣可用于生产建筑材料。一般根据煤矸石的含碳量,可将煤矸石分为低碳煤矸石($C_c \leq 4.0\%$)、中碳煤矸石($4.0\% < C_c \leq 6.0\%$)、中高碳煤矸石($6.0\% < C_c \leq 20.0\%$)和高碳煤矸石($C_c > 20.0\%$)^[40],对于高碳煤矸石可直接用作锅炉的燃料,而 C_c 小于20%的煤矸石则需掺入一定比例高含碳量和高发热量的煤泥、中煤等才能送入锅炉作为燃料进行发电利用。目前,沸腾炉及循环流化床锅炉燃烧技术主要以煤矸石、煤泥等为燃料,其技术已趋于成熟^[41],两淮基地顾桥煤矿作为循环经济试点单位已于2011年建成顾桥煤矸石电厂,以矸石、煤泥、低热值煤为原料,利用低热值煤基固废发电技术,年消耗洗矸及低热值煤约130万t/a,煤泥约20万t/a,在消纳煤矸石等固体废弃物的同时,发电量1604540万kWh,实现矿区及周边关联产业的热电供应自给自足,节省了优质煤资源。但其在应用过程中,发热量较低,灰分高且硬度较大,导致锅炉磨损严重、飞灰及锅炉渣处理困难、烟尘检测与控制技术难度高等一系列环保问题。同时,随着洗煤工艺升级及运输距离等制约因素,使其年处理量十分有限,随之产生大量的粉煤灰仍是亟需解决的难题。

2.2.2 煤基固废用于建筑材料制备

以国家和行业标准为基础,顺应资源环境保护及建筑节能标准的需求,利用中高碳煤矸石和粉煤灰替代黏土等原料生产水泥、砖瓦等高品质建筑材料,同时充分利用其残余热值节省燃料,对推动新型建筑材料的发展具有重要意义。

煤矸石和粉煤灰作为一种天然黏土质材料,在水泥工业生产中可代替黏土原料制备普通硅酸盐水泥、少熟料或无熟料水泥等。两淮基地煤矸石和粉煤灰的主要矿物成分为石英和黏土矿物(图7),主要

化学成分 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等,煤矸石岩石类型主要为泥岩、粉砂岩、砂岩、黏土岩等沉积岩,为水泥工业生产提供了低成本原料。

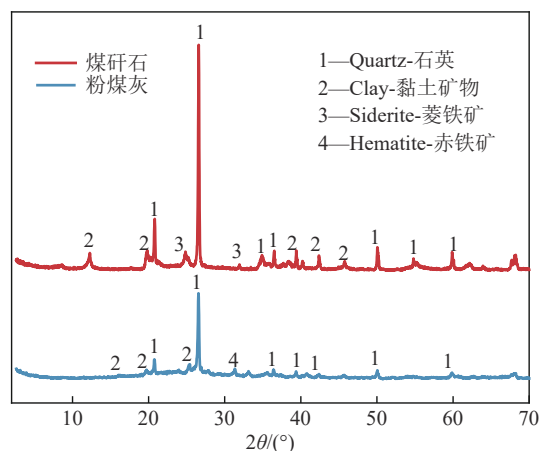


图7 两淮基地煤矸石与粉煤灰矿物成分

Fig.7 Mineral composition of coal gangue and fly ash in Huainan and Huaibei Mining Area

生产普通硅酸盐水泥的过程主要是将石灰石、煤矸石、铁粉等原料经过破碎、磨细和混匀制成生料,在 $1400 \sim 1450\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温下煅烧成熟料,熟料再经破碎后与石膏或其他混合材料一起磨细成为水泥。在生产过程中,煤矸石和粉煤灰主要是作为硅铝质原料提供生产水泥熟料所需的 SiO_2 和 Al_2O_3 。在生产少熟料或无熟料水泥时,无须生料磨细和熟料煅烧,直接将活性材料和石灰、石膏等按比例混合磨细即可。经煅烧的粉煤灰和煤矸石可形成活性 SiO_2 和 Al_2O_3 ,具有火山灰活性,可用作水泥混合材料。目前,两淮基地水泥企业结合区域煤电基地产业特点,综合利用了煤矸石、粉煤灰、脱硫石膏、炉底渣等各类废弃物,在煤基固废生产水泥方面进行了积极探索。例如,淮北相淮水泥有限公司建设的水泥粉磨厂,对临涣中利发电有限公司产生的40万t粉煤灰、40万t废渣开展综合利用,在年产水泥200万t的同时,折合利用煤矸石达70余万t,进一步降低了矿区固体废弃物的排放总量,增加了可观的经济和环保效益^[42]。但生产水泥对于煤矸石成分含量的要求较高,要求煤矸石含硫量不能过高,否则会影响水泥生产,且生产工艺较为复杂,并且受限于运输成本等问题,因此在某些煤电基地尚无法形成规模化的煤基固废水泥厂,对于煤基固废的处理作用有限。

煤矸石、粉煤灰中含有较高的黏土岩、灰质岩黏土质等矿物成分,在替代黏土原料进行生产烧结砖的同时还可以充分利用自身热值进行焙烧。以煤矸石为原料烧结制砖时,以 $C_c < 13\%$ 、热值 $< 1674\text{ kJ}$ 的

煤矸石最为适宜,其生产工艺过程可分为原料选择、原料处理、成型、干燥和焙烧5个环节。以粉煤灰为原料制砖时,主要是以粉煤灰和石灰为原料,添加适量石膏和骨料压制成型后经蒸汽养护进行制砖。利用煤矸石-粉煤灰制砖时,煤矸石具有较高的塑性指标,而粉煤灰能够很好地改善煤矸石的烧结性能。免烧砖则无须进行高温煅烧,是利用煤矸石和粉煤灰,添加水泥、生石灰、集料和外加剂等材料,经过搅拌、成型、养护制作而成。现阶段,两淮基地综合利用煤矸石、粉煤灰等煤基固废生产当前社会所需的节能型多孔砖、空心砖及砌砖等,以淮南市为例,以煤基固废为主要原料生产的砖瓦等新型墙体材料年生产能力折合标准砖约22亿块,年节约标准煤 1.14×10^5 t,使用煤矸石 2.20×10^6 t,节约因矸石堆存占地和取代黏土损毁土地 66 hm^2 ,保护耕地,节约黏土资源的同时消纳大规模历史固废堆存,实现变废为宝,减少环境污染,形成利废、节能、保护土地和绿色环保的工业产品,具有良好的经济效益和社会效益^[43]。但对煤基固废要求较高,工艺复杂,同样由于运输成本及用户需求问题,只能在一定范围和程度上消耗煤基固废,处理量较小。

综上以煤基固废为原料进行发电及建筑材料制备等应用对煤基固废的资源化利用有重要意义,但由于生产工艺较为复杂,技术条件尚未成熟,故对煤基固废理化性质的限制较多,造成其消耗量有限,不能从根本上解决大宗煤基固废的处置问题。

2.3 煤基固废规模化利用

2.3.1 煤基固废用于土地复垦回填

两淮基地从20世纪中期建矿以来,随着常年大规模煤矿开采扰动,上覆岩层破断、地表沉陷、植被损伤、生态退化等影响接踵而至,使得矿区出现大规模的采煤沉陷区,与城市发展建设必然的规模扩张性构成了鲜明的冲突关系,关于用地紧张的限制性矛盾持续加剧。据统计,至2022年底,仅两淮基地开采沉陷区面积已累积增至约 575.87 km^2 ,约有111.3万居民受此影响,其中仅淮南市耕性良好的土地占总沉陷面积的82%,覆盖乡镇30余个,涉及搬迁村落370多座,每年新增采煤沉陷区面积约为 7.3 km^2 。因此,修复煤炭资源开采沉陷区,实现破损土地的再利用,成为了各矿区乃至我国中东部地区矿业城市扩张建设用地、推进城市现代化建设的重要任务^[44]。利用煤基固废等材料对开采沉陷区土地进行综合整治,既能处理煤矸石等废弃物地表堆积占地,又可以使因采煤沉陷的土地得以恢复利用。

一般用于复垦回填的煤矸石以砂岩、石灰岩为主,特别是自燃后具有一定活性的煤矸石,其中的Si、Al、Ca等氧化物在一定水分与温度条件下发生水化反应,生成水化铝酸钙和水化硅酸钙等,还生成部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 CaCO_3 结晶,能够有效提高煤矸石颗粒之间的黏结力,是一种优质的工程填筑材料。煤基固废开采沉陷区回填复垦的主要过程是将沉陷区表层 $50 \sim 100 \text{ cm}$ 的熟土掀起,然后填充煤矸石等煤基固废,经过反复碾压至设计标高,作为耕地则将熟土重新覆盖于煤基固废表面,对于表层已经风化成土的煤矸石可不需要覆土,直接进行植树或开垦农田即可。两淮基地目前已成功应用煤基固废开采沉陷区回填复垦技术,以张集矿、新庄孜矿、潘一矿三个煤矸石充填土地复垦工程为例,治理开采沉陷区总面积 76.8 hm^2 ,复垦地用作绿化、种树、耕作,农作物长势良好,且通过3年“覆土材料环境因素监测”,表明煤矸石复垦地土壤相关元素含量符合国家二级土壤环境质量标准。虽然采煤塌陷区生态修复是降低地表沉降损害,减缓植被生态系统恶化的重要方式,但从治理“源头”来看,以覆岩变形控制为核心的减损开采才是塌陷区治理的根本途径,实现真正“采修兼顾”。

2.3.2 煤基固废用作井下充填材料

煤基固废井下充填是直接大规模利用固废的有效途径之一,同时也是控制覆岩变形下沉的根本途径。截至2022年,两淮矿区、宁东能源基地及山西省典型矿区采用及拟采用充填开采的矿井见表1^[16-17]。

调查数据表明,两淮、宁东及山西省典型煤电化基地采用及拟采用充填开采的矿井有24座左右,分布不均匀,主要集中在华东和华中地区,山西省及安徽两淮基地充填矿井较多,宁东基地充填矿井较少。山西省及宁东基地以大型煤矿为主,煤炭与煤矸石的产量较大,所以常采用采空区原位充填方式对其进行充填开采,一是从源头减少上覆岩层下沉变形,保护地表建筑物,解放压煤资源,实现减损开采;二是可以利用采空区处置煤矸石等大宗固体废物废弃物。两淮基地的充填矿井主要集中在淮北矿区,自2009年覆岩隔离注浆绿色充填技术在淮北刘店煤矿成功应用以来,淮北矿业集团通过覆岩隔层注浆充填、超高水材料充填、膏体充填等方式,在临涣、祁南、袁二、刘店等煤矿的12个压煤采区进行了推广应用,成功将地表沉降控制在 0.3 m 以下,实现采煤不塌陷。淮南矿区煤基固废综合利用多为开采沉陷区回填复垦,对工作面进行充填开采作业的矿井较少。

表1 典型矿区充填矿井汇总

Table 1 Summary of filling mines in Huainan and Huaibei Mining Area

煤矿	产能/(Mt·a ⁻¹)	充填材料	充填方式	地理位置
刘东煤矿	0.45	膏体	采空区原位充填	安徽淮北
界沟煤矿	1.4	膏体	离层注浆充填	安徽淮北
杨庄煤矿	2.1	固体	采空区原位充填	安徽淮北
五沟煤矿	0.9	固体	采空区原位充填	安徽淮北
刘店煤矿	1.5	膏体	离层注浆充填	安徽淮北
海孜煤矿	1.2	膏体	离层注浆充填	安徽淮北
杨柳煤矿	1.8	浆体	离层注浆充填	安徽淮北
袁二煤矿	1.5	浆体	离层注浆充填	安徽亳州
祁南煤矿	2.6	浆体	离层注浆充填	安徽宿州
桃园煤矿	1.8	浆体	离层注浆充填	安徽宿州
临涣煤矿	2.6	浆体	离层注浆充填	安徽淮北
谢桥煤矿	9.6	膏体	采空区原位充填	安徽阜阳
新元煤矿	2.7	固体	采空区原位充填	山西寿阳
霍尔辛赫	4.0	浆体	离层注浆充填	山西长治
鸿福煤矿	0.6	膏体	采空区原位充填	山西太原
古书院煤矿	3.3	膏体	离层注浆充填	山西晋城
南阳坡煤矿	1.2	固体	采空区原位充填	山西大同
东曲煤矿	3.6	固体	采空区原位充填	山西古交
新阳煤矿	3.2	膏体	采空区原位充填	山西孝义
华晟荣煤矿	1.8	固体	采空区原位充填	山西长治
高河矿	6.0	膏体	采空区原位充填	山西潞安
红石湾矿	0.6	固体	采空区原位充填	宁夏灵武
任家庄矿	3.6	浆体	采空区原位充填	宁夏灵武
银星一井	4.0	固体	采空区原位充填	宁夏银川

以煤炭开采、煤化工、煤电力产业中产生的煤矸石、粉煤灰、炉底渣、脱硫石膏、气化渣等固体废弃物为主要原料,通过级配调节、配比优化等方式,将具备吸附、胶凝、骨料和细骨料等功能的多源煤基固废配制成充填材料,使其具有安全、经济和技术的可行性。利用煤基固废作为井下充填材料的研究路线如图8所示。首先通过X射线扫描(XRD)、扫描电镜(SEM)、激光粒度分析仪和溶液浸提等技术手段,研究煤基固废充填材料化学及矿物成分、表面形貌、粒径分布以及酸碱度等性质,测试分析评估其用于地下空间充填的安全可行性。其次,以煤基固废为充填原料,根据其材料性质可分为固体充填、膏体充填和浆体充填等,当选用固体充填时,结合充填材料力学强度、堆积特性、密实特性、变形效果等性能为参考,择优选择密实程度高、压缩应变小的粒径级配;当选用膏体和浆体充填时,除了充填体基础力学性质,还需考虑其塌落度、扩展度、泌水率、凝结时间等流动性指标和屈服应力、黏度系数等流变性指标,优选综合性能优异的原料配比。

根据 GB18599—2020《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》,煤矸石、粉煤灰、炉底渣和脱硫石膏等可以作为原料制备绿色环保型充填材料,可以有效控制矿区固废堆存量,实现大宗煤基固废的规模化利用,减少污染及采空区自燃现象,从源头解决覆岩下沉变形、地表生态环境损害问题,实现近零冲击地压、近零生态损害以及低碳、零碳、负碳的

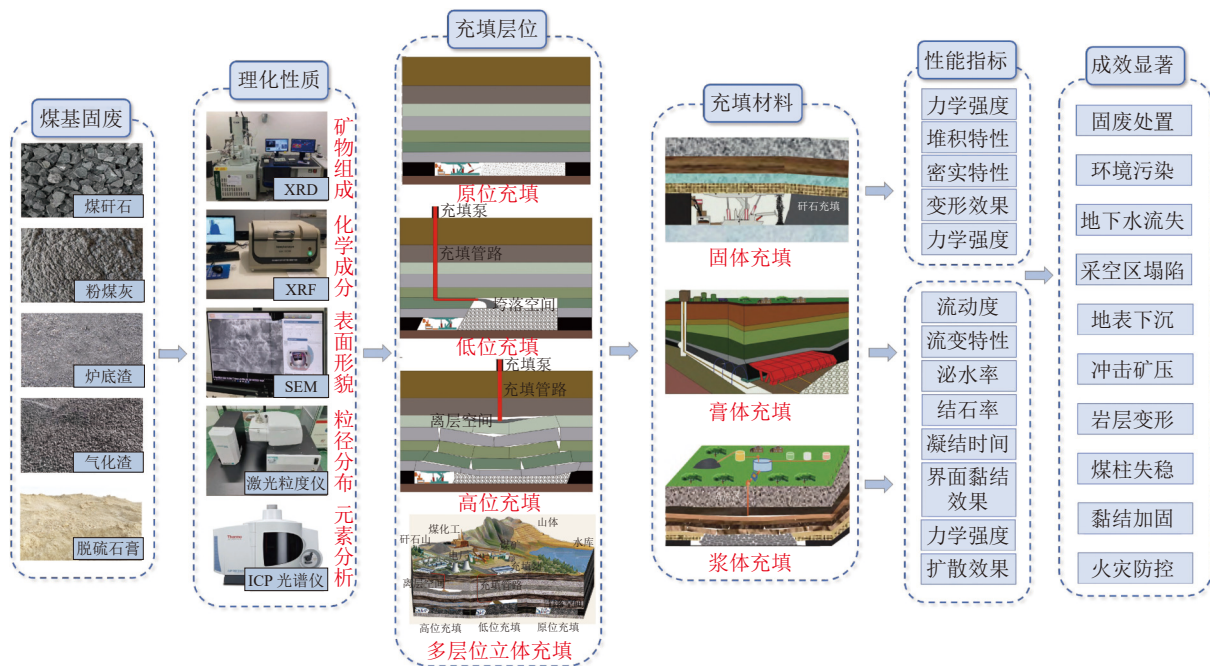


图8 煤基固废充填材料性能研究路线

Fig.8 Performance research route of coal-based solid waste filling material

绿色开采,保障我国能源安全供应与绿色低碳发展。

3 深部充填绿色开采理论与关键技术

随着浅部煤炭资源的日渐枯竭,使得煤炭开采深度逐渐增加。据安徽省煤炭资源潜力评价,两淮地区预测潜在煤炭资源 319.6 亿 t,预测深度至 2 000 m,其中 1 000 m 以浅预测资源量占预测总量的 4.1%,1 000~1 500 m 预测资源量占预测总量的 33.2%,浅部资源占比较低,可采煤层少,深部煤炭资源逐渐成为两淮基地煤炭开采主力军^[45-46]。因此,基于深部煤炭资源开采面临着高地应力、高地温、高渗透压以及强烈开采扰动等环境挑战及两淮基地煤层地质开采条件,提出深部充填绿色开采理论与关键技术^[47],探究煤基固废从源头、过程到终端的深部充填开采全过程的技术原理与方法,以解决矿区深部井下充填的技术难题。

3.1 深部煤矸石源头减量与采选充协同开采技术

在深部充填开采过程中,煤矿生产开采系统布局复杂,产矸率的增加会导致矿井提升效率降低,同时,煤矸石井上分选和地表堆积引起的地表塌陷及生态环境破坏等问题也已成为严重制约深部煤炭高效开采与煤电化基地环境协调发展的重要因素^[48]。因此“矸石不升井”的源头减量精准开采与采选充协

同技术势在必行。

首先采用智能精准探测技术获取精确地质数据,构建数字化透明化精细化三维煤层地质和开采模型,指导煤矿开掘、回采巷道布置优化和工作面开采参数调整,实现采掘工作面源头减量精准开采。其次,在采掘过程中,基于多种感应技术识别多种矿物在颜色、结构、粒度和形状等方面的差异,通过构建 X 射线透射煤矸精准识别与光电智能分选系统,实现井下煤矸识别智能分选^[49-50]。最后,通过矸石破碎与回填的采充一体化布局,将分选后的煤炭通过主井提升,矸石充填至采空区和部分废弃巷道,其中充填系统与开采系统需要相互匹配,考虑煤矸分选能力、井下矸石充填需求量和煤炭开采量等制约因素,实现产矸量和充填量的动态平衡。根据矿井的地质条件和充填目标,充填工作面可采用的充填方法有全采全充、全采局充、局采局充和局采全充。该技术有效地提高了煤质和主井提升效率,降低固体废弃物排放和煤炭开采过程中的碳耗。煤矸石源头减量精准开采与采选充协同技术框架如图 9 所示。

3.2 充填材料高效制备与深部井下输送技术

充填材料制备与井下输送系统的高效稳定运行是充填效率与质量的重要保障。根据输送充填材料固体、膏体及浆体的状态,可分为副立井或副斜井及

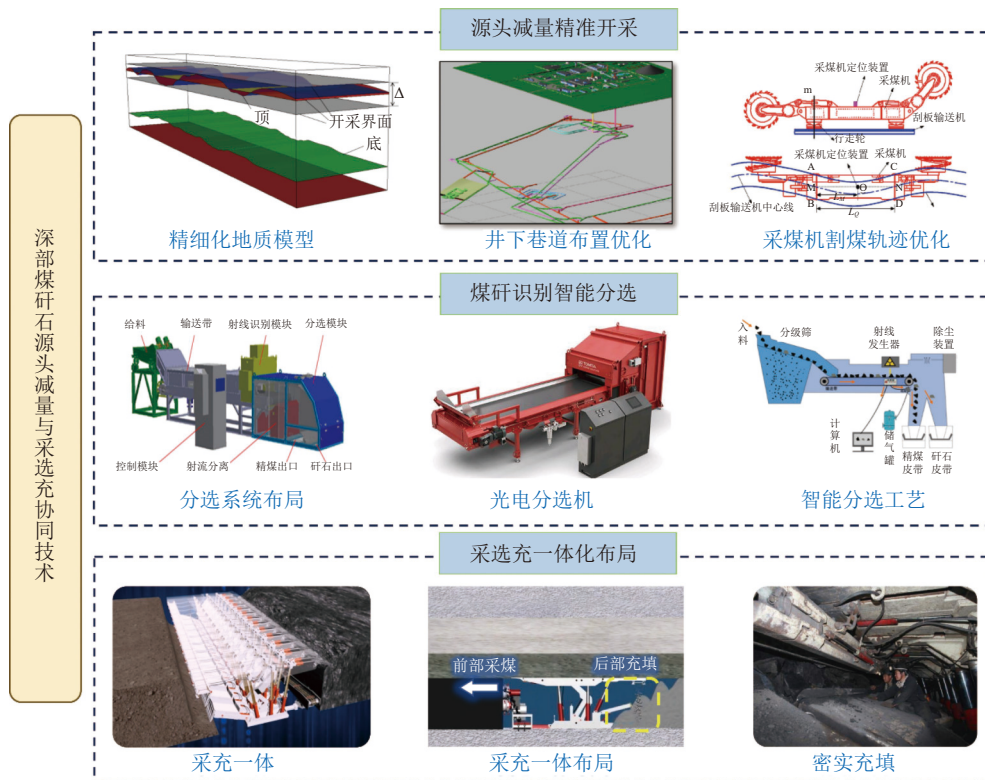


图 9 煤矸石源头减量与采选充协同技术

Fig.9 Synergistic technology of coal gangue source reduction and mining and filling

管道等运输方式^[51],以管道运输为例,其充填材料高效制备与深部井下输送技术框架如图10所示。充填体在深部“三高一扰动”条件下,起到支撑围岩、传递应力、控制岩爆、隔绝地热等多重作用,因此对充填材料要求更加严格。在进行井下充填之前需先进行实验室试验,评价煤基固废充填材料在深部煤炭资源开采环境下其理化性质、力学性质、流动性、流变性及管道输送特性等安全可行性^[52]。现场地面充填材料制备系统主要包括矸石破碎筛分子系统及搅拌配比子系统,涵盖矸石上料、一级破碎、二级破碎、称量配料以及搅拌制浆等流程;深部井下输送主要包括泵送和管道监测子系统及充填工作面子系统,涵盖输送动力、管路布置及智能监测等模板。深部

充填开采对井下大流量物料输送带来新的挑战。充填料浆在垂直管道输送过程中,由于高差较大,导致充填料浆流速大,对管道产生较高的压力和严重的冲击磨损,且由于充填管道管径不匹配及空气柱等因素,使充填管路垂直段与水平段相连接部位承受压力过大,容易造成管道破裂或爆裂等事故。综合考虑地应力作用的充填管道壁厚设计准则,研究深井多相多场耦合输送,对管道垂直段完善满管流输送技术^[53],解决系统减压问题。同时,引入全过程智能监管平台,实现料浆制备与输送过程的智能化、连续化和高效化,并对注浆进度、环境变化及可能发生的设备故障实时进行反馈与调整,确保设备运行、浆液制备、管道输送、注浆充填的安全高效运行。

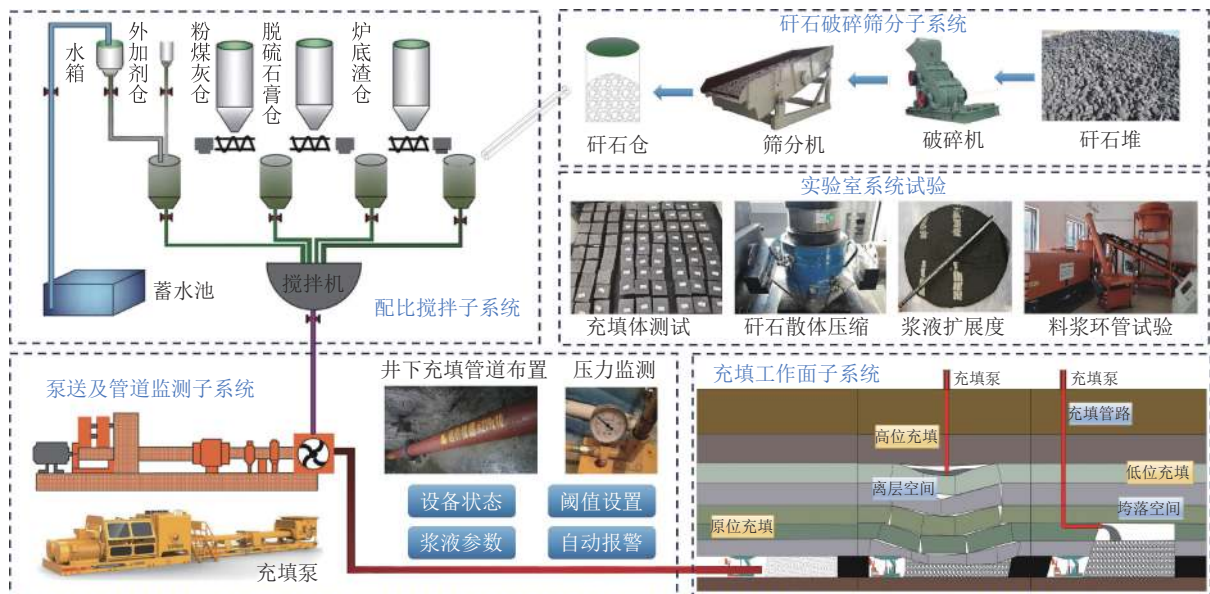


图10 充填材料高效制备与深部井下输送技术

Fig.10 Efficient preparation of filling materials and deep underground transportation technology

3.3 煤基固废充填材料深部多场耦合机理

深部充填开采时充填材料处于“三高一扰动”即高地应力、高地温、高渗透压以及强烈开采扰动的多场耦合环境^[54]。在地应力条件下,煤基固废充填体产生较大变形,采场矿压显现显著,导致顶板下沉量较大^[55],煤基固废颗粒间接摩擦转化为热能,导水裂隙带发育,瓦斯、CO₂、SO₂等气体分子和水分子发生渗流。在深部高地温条件下,充填体内部微裂隙、孔隙扩展发育,充填材料本身强度降低,被充分压实后导致覆岩下沉空间持续增大,产生较大的变形。在高渗透压条件下,覆岩导水裂隙带急剧发育,孔隙渗流通道发生改变,孔隙压力在渗流作用下重新分布,孔隙水流、水压不断增大,影响岩体及充填体的力学特性,进一步引起岩层变形。同时,煤基固

废中的CO₂、SO₂和煤层中的瓦斯等气体分子以及岩体和充填体中的水分子等在孔隙渗流通道中游离和流动,促进化学元素析出、渗透、吸附、聚集和交换等交互作用,形成煤基固废碳疏地下封存效果及化学场、渗流场等耦合效应,如图11所示。

4 煤基固废充填示范工程

煤基固废充填开采方法既可以处理煤矸石等大宗固体废弃物,控制地表沉降,又可以主动保护生态环境。因此,在不同矿区和煤炭企业,由于充填开采目的不同,采用不同的充填开采方式。

任家庄煤矿作为宁东基地煤基固废绿色充填试验矿井,针对大宗煤基固废无害化处置、规模化利用困难及采煤与充填难以高效协同等问题,选用煤矸

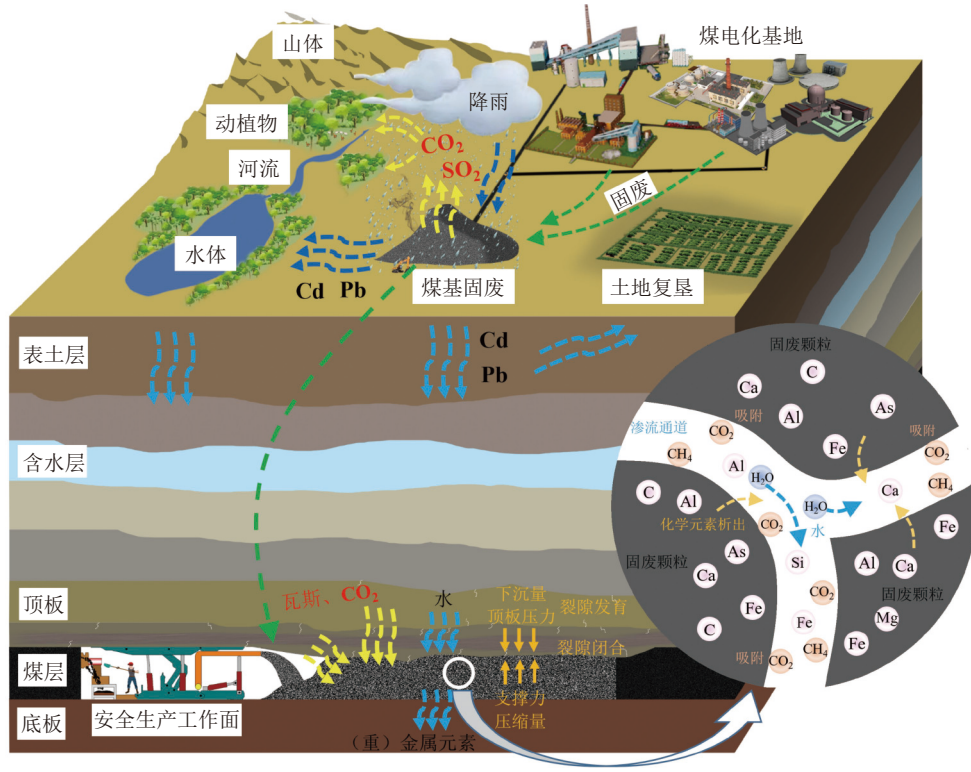


图 11 煤基固废充填材料井下多场耦合^[13]

Fig.11 Underground multi-field coupling of coal-based solid waste filling materials^[13]

石、粉煤灰、脱硫石膏、气化渣和炉底渣等作为充填材料，采用超前钻孔注充低位充填方式进行注浆充填。经试验，研发出煤基固废绿色充填材料 1 种，其中煤基固废掺量>90%，气化渣在充填材料中的产量>10%，充填材料强度>2 MPa，初凝时间为 4~6 h，终凝时间为 8~12 h，重金属固化率>95%，设计在工作面两巷依次向采空区冒落空间钻孔，工作面正常回采，在采空区顶板垮落后开始注浆充填，待工作面到注浆孔位置时停止，然后开始下一孔注浆充填，依次循环进行。目前，任家庄煤矿相继完成充填车间搅拌机透气孔、配料车间配料系统、给配料车间，三仓配料仓下料口、配料皮带防跑偏等改造项目 12 项，充填站已突破设计充填能力，单班充填固废量达到 1 086 t，自投运半年以来，累计充填固废 15 330.28 t，形成煤矸石源头减量成套技术 1 项，煤矸石减量 3 万 t，形成多源煤基固废用于矿井绿色充填成套技术 1 套，消纳煤矸石、粉煤灰、气化渣、脱硫石膏、炉底渣等煤基固废 30 万 t，产业链接煤基固废利用率大于 90%，实现矸石、气化渣等废弃物的有效利用，进一步开拓了“固废全利用”的治理途径，推进矿井绿色发展，更为宁东煤电化基地生态高质量发展提供了保障。

山西省霍尔辛赫煤矿位于山西省长治市长子县，是山西焦煤动力煤保供矿井之一，肩负着艰巨的能

源保供任务。然而，该煤矿距长子县县城较近，“三下”煤炭资源量占比约 50%，严重制约着矿井的资源开采和可持续发展。为控制采空塌陷、消耗粉煤灰固废、解放压煤资源和不影响工作面正常回采等，针对不同水灰比的粉煤灰料浆开展多组流动性和强度试验，获得可泵送和初终凝性能较好的配比制备充填料浆，采用关键层非典型特征条件下多离层梯级注浆方法进行注浆充填，基于采动边界离层注充浆液筑坝封堵技术及关键层非典型条件下“采-注”协同工艺实现煤柱安全回收，提高资源回采率，应用矿井开采解放压煤 165.54 万 t，同时消纳煤矸石 38 万 t，粉煤灰 107 万 t，有效处置矿井废水 84.6 万 t，霍尔辛赫模式被推广应用成为一条煤炭安全绿色高效开采的新途径。

淮北矿区采用煤基固废协同利用关键技术，实现煤基固废处置及生态环境保护需求。首先测定淮北矿区煤基固废理化性质、重金属含量和浸出毒性，通过煤基固废协同利用过程中资源消耗、能源消耗、环境析出等方面全程解析，构建基于淮北矿区煤基固废协同利用过程的资源环境属性解析评价模型，为改善资源消耗和环境影响状况提供依据。其次，通过试验设计及配比优化，制备适应性广、实用性强的多源煤基固废新型绿色注充复合材料；探究煤基固废井下绿色注充环境协同效应，研究不同煤基固

废配比及胶凝材料活化特性对有害成分固化作用效果,评价不同煤基固废配合比对井下待充填区域围岩环境影响规律,为实现制备不高于本体值的绿色注充规模化利用的目标提供技术储备。

5 结论与展望

1)我国大型煤炭生产基地,以煤矸石、粉煤灰、炉底渣、气化渣和脱硫石膏为主的煤基固废历史堆存及产量大,大部分煤炭基地综合利用率不高。山西省煤基固废产量大,宁东基地气化渣产量突出,且山西省煤炭基地和宁东基地综合利用率较低,总体呈下降趋势。安徽两淮基地煤基固废除炉底渣外,其余固废的综合利用率均高于90%,可为其他矿区煤基固废协同利用提供参考。

2)提出煤电化基地大宗固废无害化、资源化、规模化协同利用方式,详细阐述了煤基固废通过重金属吸附解吸和络合钝化等技术实现无害化利用,依次列举了低热值煤基固废发电、制备建筑材料如水泥、砖瓦等煤基固废资源化利用方式,对比分析了煤基固废采煤沉陷区复垦回填及井下充填规模化利用途径,突出煤基固废井下充填的优越性,即实现大宗煤基固废的规模化利用,减少污染及采空区自燃现象,从源头解决覆岩下沉变形、地表生态环境损害问题,实现近零冲击地压、近零生态损害以及低碳、零碳、负碳的绿色开采。

3)针对开采深度逐年增大的现状,提出深部煤炭资源的绿色充填开采理论与关键技术,包括深部煤矸石源头减量与采选充协同技术、充填材料高效制备与深部井下输送技术及煤基固废充填材料深部多场耦合机理,探究煤基固废从源头、过程到终端的深部充填开采全过程的技术原理与方法,以解决矿区深部井下充填的技术难题。并根据宁东基地任家庄煤矿、山西省霍尔辛赫煤矿及淮北矿区地质条件和充填目的,分别提出超前钻孔注充低位充填方案、关键层非典型特征条件下多离层梯级注浆方案和煤基固废协同利用关键技术,现场的成功应用,为煤基固废井下充填开采提供示范与经验。

未来,还需逐步搭建多源煤基固废物理化学性质、资源环境属性、空间地理分布的大数据管理应用平台,形成煤基固废多层次开发利用模式,建立煤基固废理化特征与资源化利用方法的适配模型,开发基于煤基固废的新型环保材料,制备由CO₂、矸石与快速胶结物混合而成的负碳高孔隙充填材料,优化煤炭开采与多源煤基固废充填处置的协同工艺,集

成井下规模化固废充填处置成套技术,拓展煤基固废资源化道路,为煤基固废的无害化、资源化、规模化“三化”协同利用提供依据。

参考文献(References):

- [1] 王双明, 申艳军, 宋世杰, 等. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2599-2612.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shijie, *et al.* Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2599-2612.
- [2] 袁亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 11-22.
YUAN Liang. Theory and technology considerations on high-quality development of coal main energy security in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 11-22.
- [3] 李全生. 井工煤矿减损开采理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 988-1002.
LI Quansheng. Reduction theory and technical system of underground coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 988-1002.
- [4] 奚弦, 桑树勋, 刘世奇. 煤矿区固废矿化固定封存CO₂与减污降碳协同处置利用的研究进展[J/OL]. 煤炭学报, 1-16[2024-04-16]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1075>.
XI Xian, SANG Shuxun, LIU Shiqi. Progress in research of CO₂ fixation and sequestration by coal mine solid waste mineralization and co-disposal of pollution and carbon reduction[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1-16[2024-04-16]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1075>.
- [5] 周楠, 姚依南, 宋卫剑, 等. 煤矿矸石处理技术现状与展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 136-146.
ZHOU Nan, YAO Yinan, SONG Weijian, *et al.* Present situation and prospect of coal gangue treatment technology[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(1): 136-146.
- [6] LIU Shuai, JIAO Jin, YU Huayang, *et al.* Promotional effect of shaped coal gangue composite phase change agents doping in asphalt on pavement properties[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411134447.
- [7] 孟凡会, 张敬浩, 杜娟, 等. 煤基固废制泡沫陶瓷的发泡工艺研究及应用进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(1): 155-165.
MENG Fanhui, ZHANG Jinghao, DU Juan, *et al.* Research and application progress of foaming technology of foam ceramics made from coal-based solid waste[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(1): 155-165.
- [8] 王晓丽, 林忠财. 固废基低钙固碳水泥熟料组成设计及烧成过程[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(11): 1115-1120.
WANG Xiaoli, LIN Zhongcai. Composition design and sintering process of solid waste-based low-calcium carbon-fixing cement clinker[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(11): 1115-1120.
- [9] 李会泉, 胡应燕, 李少鹏, 等. 煤基固废循环利用技术与产品链构建[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 456-464.
LI Huiquan, HU Yingyan, LI Shaopeng, *et al.* Recycling and product chain of coal-based solid waste[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 456-464.
- [10] 苏博文, 史公初, 廖亚龙, 等. 工业固体废弃物制备二氧化硅功能材料的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(3): 3026-3032.
SU Bowen, SHI Gongchu, LIAO Yalong, *et al.* Research pro-

- gress on functional materials preparation of silica from industrial solid waste[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(3): 3026–3032.
- [11] 郭振忠, 高强, 李恩全, 等. 矸石回填复垦技术在许厂煤矿土地治理中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(S1): 62–64.
GUO Zhenzhong, GAO Qiang, LI Enquan, *et al.* Application of gangue backfilling and reclamation technology in land management of Xuchang coal mine[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(S1): 62–64.
- [12] 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.
- [13] 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 technical of multi-source coal-based solid waste for green backfilling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4201–4216.
- [14] 周林邦, 孙星海, 刘泽, 等. 大掺量粉煤灰基矿井充填材料的制备、工作性与微观结构研究[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(12): 4536–4548.
ZHOU Linbang, SUN Xinghai, LIU Ze, *et al.* Study on preparation, working performance microstructure of coal mine filling material with large amount of fly ash[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(12): 4536–4548.
- [15] 胡炳南, 刘鹏亮, 崔锋, 等. 我国充填采煤技术回顾及发展现状[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(9): 39–47.
HU Bingnan, LIU Pengliang, CUI Feng, *et al.* Review and development status of backfill coal mining technology in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(9): 39–47.
- [16] 刘建功, 李新旺, 何团. 我国煤矿充填开采应用现状与发展[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 141–150.
LIU Jianguo, LI Xinwang, HE Tuan. Application status and prospect of backfill mining in Chinese coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 141–150.
- [17] 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.
- [18] 郭文兵, 马志宝, 白二虎. 我国煤矿“三下一上”采煤技术现状与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(9): 16–26.
GUO Wenbing, MA Zhibao, BAI Erhu. Current status and prospect of coal mining technology under buildings, water bodies and railways, and above confined water in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(9): 16–26.
- [19] 朱磊, 古文哲, 袁超峰, 等. 煤矸石浆体充填技术应用与展望[J/OL]. *煤炭科学技术*, 1–16[2024-04-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240401.1023.004.html>.
ZHU Lei, GU Wenzhe, YUAN Chaofeng, *et al.* Application and prospect of coal gangue slurry filling technology[J/OL]. *Coal Science and Technology*, 1–16[2024-04-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240401.1023.004.html>.
- [20] 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): 15.
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): 15.
- [21] 孙希奎. “三下”采煤膏体充填开采技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(1): 218–224.
SUN Xikui. Research on paste backfilling mining technology of coal mining under buildings, water bodies and railways[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 218–224.
- [22] YANG Ke, ZHAO Xinyuan, WEI Zhen, *et al.* Development overview of paste backfill technology in China’s coal mines: a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021.
- [23] 吴少康, 张俊文, 徐佑林, 等. 煤矿高水充填材料物理学特性研究及工程应用[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(4): 754–763.
WU Shaokang, ZHANG Junwen, XU Youlin, *et al.* Research and engineering application on physical and mechanical properties of coal mine high water filling materials[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(4): 754–763.
- [24] 许家林. 煤矿绿色开采 20 年研究及进展[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(9): 1–15.
XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(9): 1–15.
- [25] 刘建功, 赵家巍, 刘扬, 等. 煤矿矿区普适性拓展型固体改性充填采煤技术与装备[J/OL]. *煤炭学报*, 1–19[2024-04-04].
LIU Jianguo, ZHAO Jiawei, LIU Yang, *et al.* Development status and prospect of universal technology of extended solid modification filling mining in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 1–19[2024-04-04].
- [26] 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/OL]. *煤炭科学技术*, 1–14[2024-04-04].
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*, 1–14[2024-04-04].
- [27] 谢和平, 张吉雄, 高峰, 等. 煤矿负碳高效充填开采理论与技术构想[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 36–46.
XIE Heping, ZHANG Jixiong, GAO Feng, *et al.* Theory and technical conception of carbon negative and efficient backfill mining in coal mines[J/OL]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 36–46.
- [28] 黄艳利, 王文峰, 卞正富. 新疆煤基固废废弃物处置与资源化利用研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(1): 319–330.
HUANG Yanli, WANG Wenfeng, BIAN Zhengfu. Prospects of resource utilization and disposal of coal-based solid wastes in Xinjiang[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 319–330.
- [29] 郭洋楠, 李能考, 何瑞敏. 神东矿区煤矸石综合利用研究[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(6): 144–147.
GUO Yangnan, LI Nengkao, HE Ruimin. Study on comprehensive utilization of coal refuse in Shendong Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(6): 144–147.
- [30] 李强, 艾锋, 王玺, 等. 煤基固废协同矿山土壤生态修复的理论解析与实践探索: 以陕西榆林市为例[J]. *西北地质*, 2023, 56(3): 70–77.
LI Qiang, AI Feng, WANG Xi, *et al.* Theoretical analysis and practical exploration on ecological restoration of mines with multi-source solid wastes: example from Yulin City, Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 70–77.
- [31] 刘小铭, 艾锋, 李强, 等. 陕北侏罗纪煤田煤矸石的特性与研究进展[J]. *陕西煤炭*, 2024, 43(03): 53–58.

- LIU Xiaoming, AI Feng, LI Qiang, *et al.* Characteristics of coal gangue of Jurassic coal field in Northern Shaanxi[J]. *Shaanxi Coal*, 2024, 43(03): 53–58.
- [32] 山西省发展和改革委员会, 山西省煤炭工业厅. 山西省“十三五”煤炭工业发展规划 [EB/OL]. (2017-05-22) [2024-04-16]. https://www.shanxi.gov.cn/zfxgk/zfxgkzl/fdzdgnr/ghxx/201705/t20170522_6446345.shtml
- [33] 安徽省发展和改革委员会. 安徽省煤炭工业发展“十四五”规划 [EB/OL]. (2022-03-31) [2024-04-16]. https://www.ah.gov.cn/group6/M00/05/A0/wKg8BmKMSNCADp_RAAVaZzPnqrs940.pdf
- [34] [34] 淮南市自然资源和规划局. 淮南市矿产资源总体规划 (2021–2025年) [EB/OL]. (2023-11-17) [2024-04-16]. https://zrzyj.huainan.gov.cn/group1/M00/18/E4/rB406mVcJhKAMeWFAAW_CIUeHps634.pdf
- [35] 宁夏回族自治区人民政府. 宁东能源化工基地“十四五”发展规划 [E/OL]. [1-11-25]. https://www.nx.gov.cn/zwgk/qzfwj/202112/t20211207_3207682.html
- [36] 山西省统计局. 山西省 2016–2020 统计年鉴 [EB/OL]. (2017–2021) [2024-04-16]. <https://tjj.shanxi.gov.cn/sxsj-show/yearData>
- [37] 宁夏回族自治区统计局. 宁夏 2016–2020 统计年鉴 [EB/OL]. (2017–2021) [2024-04-16]. <https://nxdata.com.cn/publish.htm?m=getMorePublish&bc=A01&cn=G01>
- [38] 安徽省统计局. 安徽省 2016–2020 统计年鉴 [EB/OL]. (2017–2021) [2024-04-16]. <http://tjj.ah.gov.cn/ssah/qwfbjd/tjnj/index.html>
- [39] 淮南市生态环境局. 淮南市“十四五”危险废物工业固体废物污染环境防治规划 [EB/OL]. (2022-05-17) [2024-04-16]. <https://www.huainan.gov.cn/public/6596035/1259151959.html>
- [40] 王小云, 牛艳霞. 煤矸石研究综述: 分类、危害及综合利用[J]. *化工矿物与加工*, 2023, 52(11): 18–25.
WANG Xiaoyun, NIU Yanxia. Review of research on coal gangue with its classification, hazards and comprehensive utilization[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2023, 52(11): 18–25.
- [41] 王玉涛. 煤矸石固废无害化处置与资源化综合利用现状与展望[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(10): 54–66.
WANG Yutao. Status and prospect of harmless disposal and resource comprehensive utilization of solid waste of coal gangue[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(10): 54–66.
- [42] 淮北市经济和信息化局. 淮北工业产业基本情况 [E/OL]. [2021-08-13]. <https://jxj.huabei.gov.cn/jxsj/cyfz/56770181.html>
- [43] 刘衢州, 张林林. 淮南矿区煤矸石综合利用的调研分析[J]. *生物化工*, 2021, 7(6): 135–137, 141.
LIU Quzhou, ZHANG Linlin. Investigation and analysis on comprehensive utilization of coal gangue in Huainan Mining Area[J]. *Biological Chemical Engineering*, 2021, 7(6): 135–137, 141.
- [44] 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.
- [45] 刘春, 俞显忠. 安徽省煤炭资源可利用性和保障程度分析[J]. *中国煤炭*, 2023, 49(6): 1–6.
LIU Chun, YU Xianzhong. Analysis of the availability and guarantee degree of coal resources in Anhui[J]. *China Coal*, 2023, 49(6): 1–6.
- [46] 陈登红, 华心祝, 李寒旭, 等. 安徽省煤炭产业发展概况及未来发展趋向[J]. *安徽科技*, 2020, (10): 36–38.
- CHEN Denghong, HUA Xinzhu, LI Hanxu, *et al.* The development situation and future development trend of coal industry in Anhui Province. *Anhui Science & Technology*, 2020, (10): 36–38.
- [47] 张吉雄, 张强, 巨峰, 等. 深部煤炭资源采选充绿色化开采理论与技术[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 377–389.
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, JU Feng, *et al.* Theory and technique of greening mining integrating mining, separating and backfilling in deep coal resources[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 377–389.
- [48] 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 back filling technology and its engineering application in underground coal mine[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(3): 417–430.
- [49] 张吉雄, 张强, 巨峰, 等. 煤矿“采选充+X”绿色化开采技术体系与工程实践[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(1): 64–73.
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, JU Feng, *et al.* Practice and technique of green mining with integration of mining, dressing, backfilling and X in coal resources[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 64–73.
- [50] 屠世浩, 郝定溢, 苗凯军, 等. 深部采选充一体化矿井复杂系统协同开采[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(3): 431–441.
TU Shihao, HAO Dingyi, MIAO Kaijun, *et al.* Research on synergetic mining for mining, dressing and backfilling integrated deep mines with complicated systems[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(3): 431–441.
- [51] 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.
- [52] 徐文彬, 陈伟, 张亚伦, 等. 深部充填开采矸石-粉煤灰料浆流变特性研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(3): 85–93.
XU Wenbin, CHEN Wei, ZHANG Yalun, *et al.* Research on rheological characteristics of gangue-fly ash slurry in deep filling mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(3): 85–93.
- [53] 王小林, 郭进平, 吴爱祥, 等. 基于骨料运移的高浓度充填管道磨损机制 [J/OL]. *中国有色金属学报*: 1–15 [2024-01-04]
WANG Xiaolin, GUO Jinping, WU Aixiang, *et al.* Wear mechanism of high-concentration filling pipeline based on aggregate migration [J/OL]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1–15 [2024-01-04].
- [54] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究及探索[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(11): 2161–2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(11): 2161–2178.
- [55] 李猛, 张吉雄, 黄鹏, 等. 深部矸石充填采场顶板下沉控制因素及影响规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(2): 227–238.
LI Meng, ZHANG Jixiong, HUANG Peng, *et al.* Control factors of stope roof subsidence in deep gangue back filling mining and its influences law[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(2): 227–238.