

煤矸石规模化处置及高附加值利用现状与展望^{*}

宋伟^{1,2}, 刘成勇^{1,2}, 杨军军^{3,4}, 王若帆^{3,4}, 张新福^{1,2}, 刘东升⁵

(1. 中煤能源研究院有限责任公司, 陕西 西安 710054;
2. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710054;
3. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054;
4. 西安科技大学 矿山功能性充填技术研究中心, 陕西 西安 710054;
5. 麻黄梁煤矿 陕西 榆林市 719000)

摘要: 煤矸石产量存量大、利用率低、污染严重, 依据煤矸石物理化学性质开展大规模综合利用刻不容缓。与传统堆存、填埋的处理方式不同, 通过煤矸石采空区离层区充填、改良土壤、复垦耕地等大规模无害化消纳途径, 简述了含有铝等有价元素、含有高岭土矿物成分、氮磷钾等有益元素含量高且有害重金属含量低的煤矸石分别用于生产铝盐化工品、高岭土、农业肥料的方法, 回顾了将煤矸石作为路基和建材的综合利用途径, 分析了目前已有技术中存在的煤矸石处理不彻底、存在二次污染等问题。提出了要建立“多阶梯、分层分级”的高附加值利用产业链, 将制备农业肥料的残渣用于改良土壤、复垦耕地, 焙烧制高岭土中的固废用于低标准的建材或路基, 多层次利用将煤矸石“吃干抹净”, 将煤矸石从高附加值利用延伸至矿山充填, 实现煤矸石高附加值的大规模消纳。

关键词: 煤矸石; 充填开采; 综合利用; 分层分级; 高附加值

中图分类号: TD849^{+.5} **文献标识码:** A

文章编号: 1005-2763(2024)11-0268-15

0 引言

富煤少油缺气的能源现状决定了需要开采大量煤炭资源来保障国家能源安全^[1]。煤矸石与煤炭是伴生关系, 开采 1 t 原煤产生 0.15~0.2 t 煤矸石^[2], 截止目前煤矸石总排量达 70 亿 t 以上, 并以 7 亿~7.5 亿 t/a 增加, 仅 2021 年一年排量达 7.43 亿 t^[3-4], 随着开采技术的发展, 煤矸石排放量也在逐年增加, 目前

已探明中国煤炭保有量为 2 070.12 亿 t, 同时将会产生大量煤矸石^[5-8]。煤矸石是一种含碳量少、热值低、较为坚硬, 且与煤炭伴生的黑色岩石^[9], 含碳量为 20%~30%, 含水率为 20%~25%^[10-11], 根据矿物成分可划分为黏土岩类、砂石岩类、碳酸盐类、铝质岩类等^[12-14]。从产生方式可划分为矿井、巷道建设和煤炭开采过程中的掘进煤矸石、选煤产生的选煤矸石(洗选矸石)和自然矸石 3 大类^[15-17], 由于生产条件和施工工艺的差异, 各类煤矸石在煤矸石总排量中的占比也有差异, 一般掘进煤矸石占比小于选煤矸石^[18]。

煤矸石难以利用传统的处理方式就近堆放或者坑道填埋。随着排量的增多, 煤矸石大量堆存形成煤矸石山, 存在巨大安全隐患, 煤矸石长期露天堆放会氧化发生自燃^[19], 雨水冲刷煤矸石会将有害重金属元素浸入土壤, 造成空气、水土的严重污染, 以及矸石山容易出现塌方、滑坡等地质灾害, 严重威胁周边居民的生命安全^[20-21]。而坑道填埋前期投入资金量大, 且坑道标准较高, 小型煤场无法实施, 只能临时堆放。国家颁布的《关于进一步加强煤炭资源开发环境影响评价管理的通知》(环环评〔2020〕63 号)已明确禁止建设永久性煤矸石堆场, 只能建设时间不得超过 3 年的临时堆场, 禁止使用坑道填埋的煤矸石处理方法。《中华人民共和国固体废物污染

* 收稿日期: 2023-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52304101, 52222404, 52074212); 中国博士后科学基金项目(2023MD734215); 西安科技大学科研启动基金项目(2050122041); 陕西省哲学社会科学重大理论与现实问题研究年度一般项目(2021ND0135); 陕西省重点研发计划项目(2024CY2-GJHX-36); 西安市科协青年人才托举计划项目(959202413070)

作者简介: 宋伟(1970—), 男, 陕西宜川人, 教授级高级工程师, 主要从事煤炭开采设计、矿山固废处置、矿井充填等方面的研究。E-mail: 445906794@qq.com

通信作者: 王若帆(1992—), 男, 山西曲沃人, 博士, 副教授, 主要从事矿山固废资源化利用、矿井充填开采、岩土力学与本构模型等方面的研究。E-mail: ruofan.wang@xust.edu.cn

环境防治法》和《关于严惩弄虚作假提高环评质量的意见》(环环评〔2020〕48号)表明了国家对偷排乱排企业的零容忍,寻找煤矸石新的消纳途径迫在眉睫。

国家在煤矸石治理上刚柔并济^[22],2021年国家发展与改革委员会(又称国家发改委)在《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用指导意见》(发改环资〔2021〕381号)中鼓励发展资源利用新技术,大力支持煤矸石综合利用,加快大宗固废利用基地的建设,提高煤矸石的利用率,结合当地实际情况出台相关政策,为煤矸石综合利用事业的发展保驾护航。目前已经开拓了多种煤矸石利用方式,如煤矸石充填^[23-24]、回填沙地坑地复垦耕地^[25-26]、建造煤矸石人工热储^[27]、煤矸石制备高岭土堇青石-莫来石等^[28]、用煤矸石生产水泥混凝土等建材^[29]、生产高效混凝土铝化物进行化工利用^[30]、制备煤矸石基聚合物^[31]等。同时国家经济贸易委员会和科学技术部制定的《煤矸石综合利用技术政策要点》(国经贸资源〔1999〕1005号)对煤矸石复垦以及充填矿井采空区、作为土壤改良剂生产化肥、生产建筑材料以及制品、提取其中有益组分制取高价化工产品的煤矸石资源化利用方式进行了相关规划。

本文从煤矸石采空区离层区充填、煤矸石改良土壤、复垦耕地3种大规模消纳煤矸石的利用方式进行论述,结合已有技术讲解煤矸石提取铝盐系列化工产品、制备高岭土、生产农业肥料、用作路基建材等高附加值利用途径,阐明现有工艺所存在的问题以及改良措施,展望未来煤矸石大规模、高价值的利用途径,为煤矸石利用产业发展提供参考意见。

1 煤矸石的理化性质

煤矸石的利用率低是造成我国煤矸石储量逐渐递增的主要原因,历年煤矸石排量与利用率统计结果如图1所示。煤矸石是由多种矿物岩组成的混合物,主要成分以黏土和石英为主,包括高岭土、伊利

石、石英、水云母等^[32-35],所处矿区不同,其中的矿物含量也会有所差异,从而造成煤矸石的物理性质在一定范围内存在波动^[4,11],见表1。物理性质的变化并不绝对,如煤矸石的可塑性与破碎程度相关,破碎程度越高,煤矸石的可塑性越高^[4]。开采时地层越深、存放风化时间越短,煤矸石的表观密度越大、硬度越大、吸水率越低,反之不同^[36-37]。

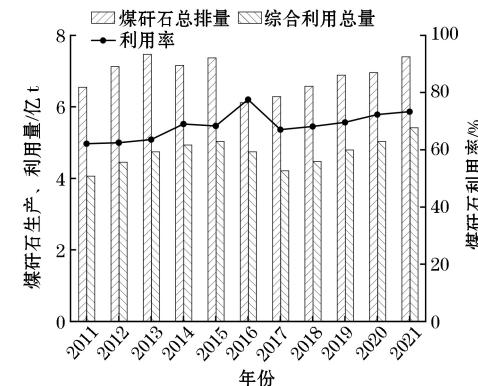


图1 2011—2021年我国煤矸石产量数据统计

Fig.1 Statistics of coal gangue production in China from 2011 to 2021

表1 煤矸石的物理性质

Table 1 Physical properties of coal gangue

硬度	耐火度/℃	密度/(g·cm⁻³)	黏度/(Pa·s)	塑性指数
2~3(多页岩)	1 250~1 350	1.5~2.5	1.1	2.5~3.5
4~5(多砂岩)				

煤矸石含有多种元素,如主要元素Al、Si、C,常量元素Fe、Ca、K、Mg、Ti等,微量的贵金属元素Sc、Co、V,以及稀有元素Ni、B、Be等,各元素大多以无机物的形式存在,主要为SiO₂和Al₂O₃,相比较下Fe₂O₃、CaO、Na₂O、MgO、K₂O等无机物的含量较少^[38],不同矿区煤矸石的主要化学成分含量见表2。煤矸石中煤含量越高,有机物的含量也会相应地增加,主要包括煤炭、硫、氧、氮等^[39]。

表2 不同矿区煤矸石的主要化学成分含量

Table 2 Chemical composition content of coal gangue in different mining areas

矿区	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	%
陕西神木大柳塔煤矿 ^[40]	56.46	23.65	1.86	14.04	0.18	1.20	0.93	—	
鄂尔多斯补连塔煤矿 ^[40]	47.35	15.79	4.68	1.06	—	0.93	—	0.79	
陕西铜川矿区 ^[41]	7.29	1.40	0.49	40.60	0.07	8.69	0.17	0.05	
山西太原西山煤矿 ^[42]	61.05	21.10	7.30	2.31	—	1.95	—	0.80	
新疆昌吉五彩湾煤矿 ^[43]	70.25	4.68	1.01	1.22	—	1.10	—	—	
重庆酉阳矿区 ^[44]	66.71	11.62	6.27	3.57	0.48	1.97	2.57	—	

2 煤矸石规模化处置

由于煤矸石山和坑道填埋的传统处理方式不可行,为解决煤矸石处置问题,并响应国家保护环境可持续发展的政策要求,进行煤矸石大规模无害化利用,主要途径有煤矸石采空区与离层区充填、改良土壤、复垦耕地等。

2.1 煤矸石采空区与离层区充填

根据充填材料的制备位置,将充填技术划分为两种,一种是煤矸石不升井的井下一体化充填开采技术,另一种是将地表制备的充填材料运送至采空区充填。两种方式均有成本低、矸石消耗量大、适用范围广^[45-46]等优势,且在山东新汶矿业集团、平顶山煤业集团、徐州矿务集团等多个大型矿业集团投入工业生产使用^[47-48],充填材料制备位置如图2所示。两种充填方式都有矸石筛选、充填材料运输、采空区充填3个环节,一般依据矸石与煤炭的力学性质差异实现筛选^[49],充填材料运输时大倾角巷道可采用轨道车等方式运输^[50]。充填时根据充填材料不同又分为水砂充填、矸石充填、膏体

充填以及高水充填^[51-53],将制备的充填材料通过管道、钻孔或巷道输送至采空区、离层区完成充填^[54],从而减缓地表塌陷,降低煤炭开采对地面建筑的损害。此外,王超超^[55]探究了覆岩隔离注浆充填的浆液泌水渗流规律,建立了浆液泌水渗流的出水量预计方法,为确保生产安全和注浆充填效果提供了理论基础。充填工艺划分依据不同,其标准也有差异^[50,56],不同划分依据下,充填工艺的分类及优缺点见表3。

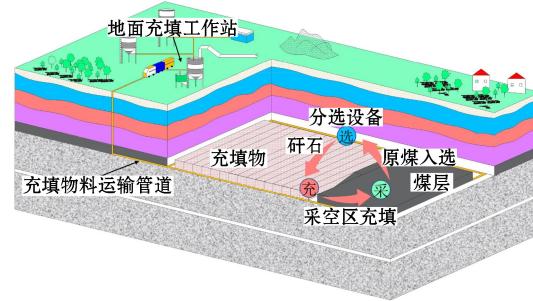


图2 充填材料制备位置示意

Fig.2 Schematic diagram of filling material preparation location

表3 煤矸石充填工艺分类

Table 3 Classification of filling process of coal gangue

划分依据	具体分类	优点	缺点
充填位置不同	巷道充填	巷道充填设备少、工艺简单	矸石处理量少
	工作面充填	矸石处理量大	工作面充填系统复杂、工序多需要大量设备用于矸石分选充填系统
充填量划分	全面充填	充填量大、范围与煤炭开采基本相同	充填工作面大、充填难度大
	局部充填	充填工作量小、灵活性大	充填工艺复杂、充填技术要求高
充填动力划分 ^[53]	风力填充	运输简单、充填能力大、适应性强	需将矸石破碎、消耗输送管道 ^[57]
	自溜充填	节约运输动力、降低充填成本	适用范围小
	机械填充	工作原理简单、使用范围广	充填质量差
	水力填充	易于输送系统的机械化与自动化、利于通风防尘	加重井下排水负担、材料加工制备工艺复杂

煤矸石进行采空区充填时可大规模消耗矸石,较少压占土地,并降低煤炭开采造成地表沉降问题,优化工作面应力场,改善开采环境,缓解工作面围岩压力,解放“三下”压煤,提高煤炭回采率^[58-59]。郭亚奔等^[60]研究了煤柱和充填体联合控制地表变形的规律,将煤柱-充填体置换规律进行了较为细致的定量分析,形成初步的数值标准,为井下煤柱开采提供参考依据。常见的工艺流程为:矸石筛选运输→制备充填材料→充填采煤技术→置换采煤→完成绿色开采^[47]。

充填工艺不断改良和创新,使矸石充填进入高速发展时代,李钱坤等^[61]设计了专用于充矸的设

备,使矸石不用升井并被及时利用,实现了采煤与充填工作互不干扰。刘斌^[62]研究发现山西某煤矿采用矸石充填开采后,矸石利用率提升到了85%,煤场矸石的处理费用降低。煤矸石作为充填骨料,可掺入炉渣、尾岩、废石等制备成料浆,实现协同处置固废^[63-64],因地制宜地进行充填。山东某煤矿的矸石充填中充填巷道需设置为俯式充填,增强充填密实度,降低对地表的影响^[65-66]。古文哲等^[67]采用理论分析、模拟试验与工业分析相结合的方法,对注浆中初始流淌、垂直涌流和水平扩散3个阶段进行分析,验证了井下矸石浆体充填的可行性。

采用煤矸石充填、制备充填材料等已被广泛研

究,但不同的充填条件所需的充填工艺和技术有所不同,必须确保充填体的可靠性,因地制宜地对不同区域进行充填。同时随着充填技术的快速发展,也应考虑将煤矸石大规模充填作为煤矸石的兜底处置方法,实现煤矸石由废变宝资源化利用。

2.2 煤矸石改良土壤

煤炭是白垩纪等时期的植被在地壳运动中经过长期复杂的物理化学反应转化生成的一种固体可燃物,其伴生生物煤矸石则是该时期供植被生长的优质土壤,将其加工后用于土壤改良,不仅能大规模消纳煤矸石,还可以修复已经被破坏的土壤养分环境^[68]。

煤矿露天开采以及煤矸石排放后不进行生态修复,会造成矿区土壤水分和养分流失、土壤贫瘠化等灾害^[69]。利用煤矸石进行土壤改良,可以丰富土壤养分,激发土壤活性,增加土壤中的空隙度,提高土壤透气性、疏松土质,使土壤更有利于植被的生根,改良效果如图3所示。

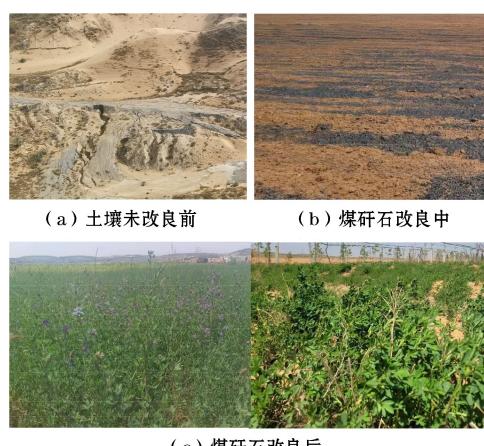


图3 煤矸石改良土壤效果^[64]

Fig.3 Soil improvement effect of coal gangue^[64]

根据当地土壤理化性质,针对性地用煤矸石改良土壤。孙红福等^[70]针对传统的三步连续提取法中的硫化物成分增多以及和空白样品混合不均匀的弊端,提出了更加精准的煤矸石产酸潜力测定方法,为评价不同煤矸石的产酸潜力提供依据。王琼^[71]将高硫煤矸石用于苏打盐化土改良,降低了土壤的pH和土壤碱化度,改善了土壤环境。马柳^[72]用煤矸石、粉煤灰、秸秆、土壤以42.9%、7.1%、10%、40%的比例复配改良土壤,种植生菜且长势优异,因此可以进行大规模的土壤修复。利用煤矸石制备土壤改良剂,有增加土壤空隙、提高肥力、丰富微生物

群落结构等优势,有助于植被生长。但也存在诸多问题,不同地区煤矸石的理化性质、结构、重金属含量等都存在着巨大差异,导致该方法适用范围有限,需要针对矿区分别研究是造成目前煤矸石改良土壤相关研究较少的主要原因^[73-74]。

煤矸石作为改良剂必须因地制宜,对缺乏氮、磷、钾的土壤,引入微生物加快改良剂中煤矸石的养分释放;将硫含量较高的煤矸石进行分级分质去硫,用于改良碱性土地^[75-76]。目前煤矸石进行土壤改良仍处于试验阶段,没有大规模投产,对于煤矸石中重金属等有害物质处理的研究较少,且已有的处理方式成本高、效益低,亟需寻求更加廉价高效的方法处理有害物质,为煤矸石改良土壤提供有力支撑。

2.3 煤矸石复垦耕地

土地复垦是指将人为或自然灾害造成的土壤退化,通过工程整治后恢复生态系统,并对其加以利用的过程,主要采用填埋、剥离、覆土等修复措施^[77]。我国土地复垦率较低,20世纪80年代以前,土地复垦全凭企业自觉;20世纪90年代,我国颁布了《中华人民共和国矿产资源法》等法律法规,才使土地复垦有迹可循;直至目前,土地复垦制度仍需不断完善,确保制度切实可行^[78-79]。

矿山土地复垦已取得许多成果,常克章^[80]总结得出王台铺矿在塌陷区回填复垦中共计消纳 1.2×10^6 t煤矸石、炉渣等固废,覆土造田 7×10^4 m²,其中小麦每种植 1×10^4 m²可产4 500 kg,既解决了固废排放问题,又改善了生态环境。王旭峰等^[81]确定了“300 cm 煤矸石+50 cm 黄土”的覆土填沟工艺,保温、阻燃等效果良好,为覆土填沟增添新工艺。焦赫等^[26]发现复垦后土壤中菌群的多样性和丰富性远低于正常土壤,主要原因是土壤的pH、含水量、有机碳等理化性质发生了变化,并探明了土地复垦的研究方向。邱俊杰^[82]分析认为煤矸石空隙、容重大造成其持水性较差,复垦后保水持水性低于土壤,可以掺入吸水、保水性更好的粉煤灰优化复垦后土地的保水性,以确保复垦后土壤的透水性和透气性。翟文^[83]提出煤矸石复垦土壤重金属迁移控制方法以及复垦效果评估模型,对煤矸石土壤复垦效果进行了量化评价,建议对已复垦土地设立土壤监测平台,定期监测形成数据汇总,分析土壤结构稳定性;监测复垦土地中重金属等有害物质含量,避免其浸出造成土壤二次污染,并因地制宜,制定适合的矿区生态修复治理方案,推动绿色生态建设。

3 煤矸石高附加值利用

3.1 煤矸石制备高附加值化工产品

铝盐系列化工品是现代工艺发展不可或缺的一部分,利用煤矸石所制备的硫酸铝水在处理、合成其他铝盐等领域有着广泛的应用^[84],聚合氯化铝被用作水质混凝处理的混凝剂^[85],氧化铝、氢氧化铝则被应用于电子产品的生产等领域^[86-87]。但我国可生产 Al_2O_3 和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的铝土资源匮乏,寻找新的铝土资源迫在眉睫,而煤矸石含有大量的铝元素,可用来代替铝土矿制备 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 Al_2O_3 等铝盐系化工品^[88]。提取铝盐时,先将煤矸石中结构和化学反应较差、铝矿物含量高的高岭石($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)等铝硅酸矿物成分激活转化为化学反应活性高的组分,再根据制取工艺选择酸法或碱法浸出其中的铝化物,采用蒸发结晶、盐析结晶和反应结晶等分离方法将铝盐从溶液中结晶析出。

自 20 世纪 90 年代以来,我国开始重视煤矸石高值化利用,加深煤矸石化学利用。张蕾等^[89]针对硫酸法提取煤矸石中的 Al_2O_3 进行研究,发现浸出时间、固液比、硫酸浓度以及助溶剂与样品的比值都会对 Al_2O_3 的浸出率产生影响,选择合适的提取工艺才能提高 Al_2O_3 的产率。孔德顺^[90]以六盘水市的高铁型煤矸石为例,发现其中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 的含量之间呈线性负相关关系,平均含量值之和为 35.26%,向体系中加入 CaF_2 、 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 的提取率提高,再将其制备为聚合氯化铝铁和聚硅酸氯化铝铁加以利用,探明了煤矸石化工后残渣废液处理新途径。郭昭华^[91]研发出了将高热值煤矸石经 CFB 燃烧后所得的粉煤灰通过“一步酸溶法”提取 Al_2O_3 的工艺,拓宽了 Al_2O_3 制取途径。谷婕、赛华征等^[92-93]通过浸渍法制备高附加值的气凝胶等材料,

充分利用煤矸石中的 Al、Si 等元素。杨利霞等^[94]利用酸浸法制备 $\text{Al}(\text{OH})_3$,即将高温活化后的煤矸石用盐酸溶解形成 AlCl_3 溶液,再加入碱性溶液后得到 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 沉淀,控制其固液比、反应温度、反应时间、盐酸浓度等条件从而达到提高浸出率的目的。马艳然等^[95]用煤矸石经过酸化分离浓缩后的部分溶液结晶得到氯化铝,另一部分溶液进行碱化中和,制备成高效絮凝剂—聚合氯化铝(PAC)。

铝盐化工产品是对煤矸石高附加值利用的主要途径之一,通过煅烧、破碎、浸出来实现,成本较高,多数技术只停留在实验室阶段。虽然利用煤矸石提取铝系化合物可以节约铝矿来源成本,但成本较高不利于企业规模化使用,应以简易的工艺流程为研究方向。同时提取过铝盐化工品后的矸石残渣,已经过多重加工,物理状态已基本满足制备建筑材料或矿山充填的标准,用其制备建材或充填材料可减少加工工艺,降低成本。

3.2 煤矸石制备高岭土

我国的煤矸石以煤系高岭土为主,储量丰富且分布广泛,主要成分包括高岭石、伊利石以及石英等矿物^[96],薛敏等^[97]利用煤系高岭土(煤矸石)与 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 共沉淀,制备出煤系高岭土/ Fe_3O_4 材料,其吸附性能好且易于分离回收,是优异的新型吸附材料。也可用煤系高岭土制备高岭土,高岭土在橡胶、造纸^[98]、防火耐火材料、塑料等各行业被广泛使用,与现代工艺发展息息相关^[99]。随着制取工艺的优化,研发出了粗细磨一体煅烧制备高岭土技术和设备,所制备的高岭土在吸附性、化学稳定性、细度、粒径分布等方面都有了大幅提升,但粗磨、细磨、煅烧 3 项技术依然是限制煤矸石制备高岭土工艺发展的核心因素^[100-101]。煤矸石制备高岭土煅烧工艺流程如图 4 所示。

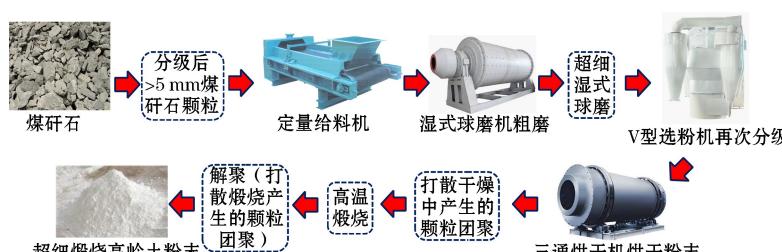


图 4 煤矸石制备高岭土煅烧工艺流程

Fig.4 Calcination process flow of coal gangue preparation of kaolin

目前已有大量提高制备高岭土的工艺研究,以准格尔煤矿为例,煤矸石制备工艺从煅烧温度、保温

时间、原料细度和球磨工艺 4 个方面进行优化,发现 1 050 °C 下煅烧 3 h 磨细后可得到白度为 90.12%、

平均粒度为 $2.8\text{ }\mu\text{m}$ 的精细高岭土,其中煅烧温度、保温时间不当会降低高岭土活性,在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下煅烧 10 min 煤系高岭土可快速制备偏高岭土^[102-103]。宋欢等^[104]发现,原矿→破碎粉碎→超细粉碎→筛分→磁选→干燥→煅烧的工艺流程将准格尔煤矿露天煤矸石所制备高岭土的白度由75.25%提高到了95.06%,使其达到了高品质煅烧高岭土的标准,确定了主要通过控制煅烧时的提温速度、煅烧温度时间、保温时长来提升高岭土质量。

将煤矸石加工成高岭土可缓解国内高岭土矿短缺的问题,现有工艺已较为成熟,但对所剩残渣的处理并不完备。利用煤矸石制备高岭土的基本核心工艺为煅烧,通过制备高岭土后的煤矸石中会含有大

量的氧化钙等氧化产物,将其用于制备建材、路基等方面,不仅在材料成分上可以满足需求,而且在制备高岭土中已经过破碎磨粉磁选等工艺,再次利用也可降低加工成本。为此,将制备高岭土所剩煤矸石残渣作为建材或路基具有较好的前景。

3.3 煤矸石制备农业肥料

可将煤矸石中的有机物和B、Zn、Cu等植物生长所需的微量元素加工为农业肥料,但煤矸石中可被植物直接吸收利用的养分较少,需进一步加工后才能使用^[105-107]。现有加工原理和工艺分为煤矸石有机复合肥和煤矸石微生物肥料两种^[108-109],制备工艺流程如图5所示,应依据煤矸石的成分选择相应的制备工艺。



图5 煤矸石制备农业肥料工艺流程

Fig.5 Process flow of coal gangue preparation of agricultural

将富含P、K等元素的其他固废作为外加剂,与煤矸石混合作为制备微生物固氮、解磷、解钾肥料的载体,将其中不能被直接吸收的N、P、K等微量元素转化为易于吸收的有效磷、碱解氮、速效钾。微生物肥料的制备原理是利用特定细菌的新陈代谢将煤矸石降解为可被植物直接吸收利用的状态^[110-111]。常用的降解微生物为硅酸盐细菌和巨大芽孢杆菌^[112-113]。王应兰等^[114]探究了藤黄微球菌对煤矸石的降解作用,并将其与巨大芽孢杆菌进行对比,发现藤黄微球菌对制备固氮、解磷、解钾肥料的效果更佳,拓宽了制备微生物肥料的菌种。

制备农业肥料成本低、工艺简单,所制肥料可以丰富微量元素的含量、增强土壤固氮能力,亦可疏松土壤、增大土壤空隙率、加强透气性。同时利用煤矸石制备农业肥料过程中必然会产生不满足农业肥料标准的残次品等残渣,但经过微生物的代谢作用也产生了大量速效磷、速效钾、碱解氮以及有机质等营

养元素,将其用于改良土壤和土地复垦,更易于植被、微生物生存,达到更好的土壤生态环境修复效果。

3.4 煤矸石制备路基、建筑材料

煤矸石由各类岩石混合而成,排量大,性能稳定,不易发生反应,是一种优秀的工程建筑材料,将其作为路基压实,可减少常规材料的使用,并且使用煤矸石不会产生空洞,能够保障道路安全^[115-116],煤矸石路基断面示意如图6所示。

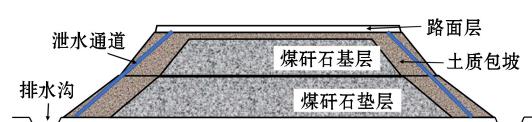


图6 煤矸石路基断面示意^[117]

Fig.6 Coal gangue subgrade section schematic^[117]

煤矸石经破碎、筛分、热处理后可作为粗骨料加入混凝土或制备砖石等建材,制备工艺流程如图7

所示。陈琦琦等^[118]以“粉煤灰：水泥：煤矸石：砂子：石子=1:1.1:1.55:3:3.56”配合出经济成本低、效果优异的C35煤矸石基地聚物混凝土，供低标准的工程建筑使用，降低了经济成本。魏明星等^[119]预制的煤矸石混凝土砌块的强度随水灰比的增大而快速减小，随钢纤维产量的增加先增大后减小，随煤矸石颗粒的增大而逐渐减小，初步确定了各掺量下混凝土强度的变化规律。查文华等^[120]发现温度越高，混凝土劣化越严重，添加玄武岩纤维与活化煤矸石粗集料可缓解该问题。

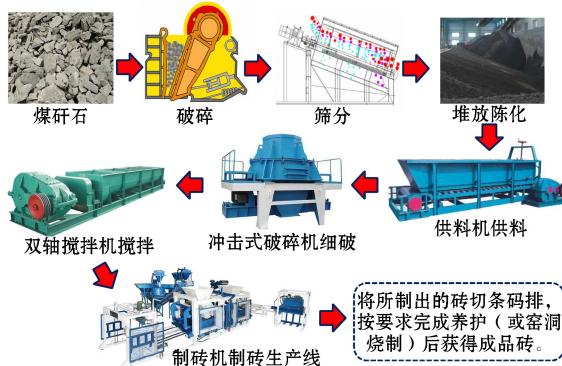


图 7 煤矸石烧结制砖工艺流程

Fig.7 Process flow of coal gangue sintering brick

煤矸石在路基填埋的相关研究中，董建勋等^[121]提出了煤矸石路基填筑压实工艺，所建造的路基在压缩性、稳定性方面均优于传统路基材料。将煤矸石制备成路基材料进行碾压时的碾压方式、施工方式、施工流程都会对路基的稳定性产生相应的影响，碾压方式采用分阶段多层级碾压，碾压时每一层都会有部分煤矸石破碎，从而对上一级压实过的煤矸石颗粒间的缝隙进一步填补密实，通常先采用静力碾压，后振动碾压，压实速度首次慢速碾压，随着碾压次数的增加逐次加快，从而确保了煤矸石路基的施工质量^[122-123]。煤矸石不仅可用于公路路基建设，还可以用于铁路路基建设，但煤矸石还含有少量水分，搅拌时可加入适量石灰等吸水材料，吸收煤矸石中的水分，避免煤矸石吸水膨胀，影响路基后期的整体强度，确保路基安全^[124]。煤矸石粒径不均匀也会影响路基安全，必须破碎后才能使用，路基完成压实后，测量整体稳定性，喷水养护3~5 d再建设路面。煤矸石制备建筑材料，使用页岩与煤矸石混合后制备的砖强度比传统烧制砖提高5.5 MPa^[125]。赵亚兵等^[126]以煤矸石为骨料，水泥为黏结剂，通过调整工艺参数制备出不同性能的透水砖。

吴红等^[127]依据66%细度0.14 mm的活化煤矸石、8%矿渣、10%水泥、2%外加剂、14%沙子在100 °C下养护12 h，可以制备出满足国家标准的免烧砖。利用煤矸石代替黏土制备水泥，通过机械激发、热激发^[128]、化学激发^[129]以及复合激发多种方式降低矸石中C等有机物含量，除去石英等杂质，激发煤矸石的火山灰活性才能将其用于制备水泥^[130]，关虓等^[131]用微波活化使煤矸石结构疏松多孔，降低胶砂流动度后用作水泥基材料，拓宽了煤矸石水泥基材料的应用方式。

不同地区的煤矸石集料的理化性质差异较大，其压碎指标、吸水率、矿物组成、表观密度等都密切影响着煤矸石所制备混凝土的强度^[132]。而目前煤矸石骨料力学性能差，所制备混凝土劈裂强度不达标，只能用于简单且要求低的施工区域，针对煤矸石混凝土的耐久性和力学性能优化是当前研究的重难点，部分煤矸石中含有放射性元素，需要进一步加工去除。目前煤矸石筑基修路、制备建材随意性大，缺乏统一的管理标准，针对煤矸石中有害物质没有明确的处理规范，产品质量标准大多数是依靠工厂自觉，为此，国家和当地政府应尽快列举出相应的法律法规和政策标准，并严格执行，以加强煤矸石高质量利用。

4 结论与展望

(1) 煤矸石是煤炭行业发展的“绊脚石”，依据煤矸石物理化学性质针对性地利用，将其变废为宝，大规模解决煤矸石处置问题，创造一定的经济价值，推动煤炭行业的绿色高质量发展。

(2) 将煤矸石充填于矿山采空区、离层区等区域，为兜底煤矸石处置方法。现已建立了较为完备的矿山充填体系，按照充填材料种类可将充填技术划分为水砂充填、矸石充填、高水充填以及膏体充填等，以应对不同的井下环境。充填材料的制备不仅可以使用煤矸石，还可以使用制备高岭土、建筑材料、路基等材料后所剩余的残渣，也可将高附加值利用后剩余的煤矸石残渣作为充填材料再次利用。

(3) 养分含量高(富含有机质、氮磷钾等)的煤矸石用于沙地、盐碱地的土壤改良和矿山、坑地的土地复垦。利用煤矸石中含有的有机质、氮磷钾等养分对贫瘠的土壤进行改良，精确产酸测定的煤矸石调整盐碱地，恢复土壤生态，探明煤矸石等固废配后基质的空隙率、养分、pH等物理化学成分，并将

其用于土壤改良和土地复垦。但煤矸石成分差异大,部分煤矸石中的重金属含量较高,导致煤矸石改良土壤和土壤复垦仅处于小规模示范阶段,不能大规模使用。为此可以采用吸附、化学反应或生物代谢等方法将其中难以提取的重金属固化稳定,并对煤矸石改良或复垦后的土地进行土壤环境监测,从生物多样性、土壤结构、重金属析出迁移等多方面监测土壤生态环境,避免二次污染。

(4) 附加值较高的煤矸石依据其特性利用后,所余残渣二次加工再处置。当前已有众多煤矸石高价值加工方法:铝含量较高的煤矸石制备铝盐化工品;煤系高岭土研磨煅烧制备高岭土;高养分煤矸石通过生物反应制备农业肥料;硬度较高、重金属含量低且无放射性的煤矸石制备混凝土等建筑材料或作为路基使用。但目前煤矸石高附加值利用技术单一,会产生大量的残渣废液,极易造成二次污染。应建立多阶梯、多层次的煤矸石利用路线,废液集中处理,对各环节产生的固废再利用,主要方法有:提取过铝元素的残渣可用于制备建筑材料;制备高岭土选余的煤矸石再用于制备建筑材料和用于建造路基;制备农业肥料剩余残渣用于改良土壤和土地复垦。

(5) 煤矸石空间分布不平衡,造成北部、西北部与东部、西南部利用技术发展不平衡,应成立固废利用平台,实现国内技术共享、技术同步,推进整体煤矸石综合利用技术的发展,拓宽煤矸石利用技术覆盖范围,延长煤矸石利用产业链,做到煤矸石分层分级的阶梯式利用,实现煤矸石大规模高附加值的利用,提高煤矸石利用市场经济活力,吸引其他行业的经济投资,形成“技术推动产业更新,产业更新促使技术迭代发展”的良性循环。

参考文献(References):

- [1] 武强,涂坤,曾一凡,等.打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J].煤炭学报,2019,44(6):1625-1636.
WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan, et al. Discussion on the main problems and countermeasures for building an upgrade version of main energy (coal) industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1625-1636.
- [2] 关杰,李英顺.煤矸石综合利用现状及前景[J].环境与可持续发展,2008(1):34-36.
GUAN Jie, LI Yingshun. Current situation and prospect of comprehensive utilization of coal gangue[J]. Environment and Sustainable Development, 2008(1): 34-36.
- [3] 刘辉,陈菲.煤矸石用作混凝土骨料的可行性分析[J].陕西煤炭,2020,39(2):60-63+91.
LIU Hui, CHEN Fei. Feasibility analysis of coal gangue used as concrete aggregate[J]. Shaanxi Coal, 2020, 39(2): 60-63+91.
- [4] 李静,温鹏飞,何振嘉.煤矸石的危害性及综合利用的研究进展[J].煤矿机械,2017,38(11):128-130.
LI Jing, WEN Pengfei, HE Zhenjia. Research progress harmfulness and comprehensive utilization of coal gangue [J]. Coal Mine Machinery, 2017, 38(11): 128-130.
- [5] 王鹏涛.煤矸石综合利用的现状及存在的问题研究[J].科学技术创新,2019(16):182-183.
WANG Pengtao. Research on the status quo and existing problems of comprehensive utilization of coal gangue[J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(16): 182-183.
- [6] 邱景平,李小庆,孙晓刚,等.煤矸石资源化利用现状与进展[J].有色金属(矿山部分),2014,66(1):47-50.
QIU Jingping, LI Xiaoqing, SUN Xiaogang, et al. Status and progress in the utilization of coal gangue resources[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2014, 66(1): 47-50.
- [7] 陈文敏,傅丛,丁华.我国典型矿区石炭一二叠纪煤炭资源分布与煤质特征[J].煤质技术,2022,37(1):14-24.
CHEN Wenmin, FU Cong, DING Hua. Distribution and coal quality characteristics of carboniferous permian coal resources in China's typical mining areas[J]. Coal Quality Technology, 2022, 37(1): 14-24.
- [8] 李军,乔中鹏,刘治中,等.煤炭资源开发管理现状分析及对策建议[J].中国煤炭,2023,49(9):1-6.
LI Jun, QIAO Zhongpeng, LIU Zhizhong, et al. Current situation analysis and proposed countermeasures of coal resource development and management[J]. China Coal, 2023, 49(9): 1-6.
- [9] 罗娇瀛.浅析煤矸石综合利用[J].黑龙江科技信息,2016(17):83.
LUO Jiaoying. Analysis of comprehensive utilization of coal gangue [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2016(17): 83.
- [10] 郭伟.煤矸石资源化的研究进展[J].中国矿业,2007(7):85-87.
GUO Wei. Research progress of coal gangue resource utilization[J]. China Mining Magazine, 2007(7): 85-87.
- [11] 孙春宝,张金山,董红娟,等.煤矸石及其国内外综合利用[J].煤炭技术,2016,35(3):286-288.
SUN Chunbao, ZHANG Jinshan, DONG Hongjuan, et al. Coal gangue and its comprehensive utilization at home and abroad[J]. Coal Technology, 2016, 35(3): 286-288.
- [12] 李启辉.煤矸石的性质及综合利用研究进展[J].应用化工,2023,52(5):1576-1581.
LI Qihui. Research progress on properties and comprehensive utilization of coal gangue [J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(5): 1576-1581.
- [13] 杨依民,孔德顺.煤矸石及其资源化利用研究进展[J].云南化工,2020,47(4):45-46+49.

- YANG Yimin, KONG Deshun. Research progress on coal gangue and its resource utilization [J]. Yunnan Chemical Technology, 2020, 47(4): 45-46+49.
- [14] 周闯,单松.煤矸石的危害性与资源化利用技术研究[J].内蒙古环境科学,2008(4):32-35.
- ZHOU Chuang, SHAN Song. The harms of gangue and research of resourceful use technology [J]. Inner Mongolia Environmental Sciences, 2008(4):32-35.
- [15] 雷增民,潘宝峰,张景君,等.国内煤矸石综合利用现状[J].西部探矿工程,2013,25(9):71-74.
- LEI Zengmin, PAN Baofeng, ZHANG Jingjun, et al. The domestic status of comprehensive utilization of coal gangue [J]. West-China Exploration Engineering, 2013, 25 (9): 71-74.
- [16] 李超,许瑞霞,王丽萍,等.煤矸石综合利用研究进展[J].应用化工,2021,50(增刊1):209-214+231.
- LI Chao, XU Ruixia, WANG Liping, et al. Research progress on development and utilization of coal gangue [J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(Sup.1): 209-214+231.
- [17] 王世林,牛文静,张攀,等.煤矸石的研究现状与应用[J].江西化工,2019(5):69-71.
- WANG Shilin, NIU Wenjing, ZHANG Pan, et al. Research status and application of coal gangue [J]. Jiangxi Chemical Industry, 2019(5):69-71.
- [18] 杨旭鸿,黄斌,舒建成,等.国内煤矸石的资源化利用现状及展望[J].云南化工,2011,38(2):37-40.
- YANG Xuhong, HUANG Bin, SHU Jiancheng, et al. Research advance on resource utilization of coal gangue [J]. Yunnan Chemical Technology, 2011, 38(2):37-40.
- [19] 张跃辉,张永波,全嘉敏,等.基于热管的自燃煤矸石山温度变化规律研究[J].矿业研究与开发,2023,43(7):152-157.
- ZHANG Yuehui, ZHANG Yongbo, TONG Jiamin, et al. Study on temperature change law of spontaneous combustible coal gangue hills based on heat pipe [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(7): 152-157.
- [20] 李勇,常莹,姜平.煤矸石资源利用概述[J].大观周刊,2011(16):166.
- LI Yong, CHANG Ying, JIANG Ping. Overview of utilization of coal gangue resources [J]. Grand View Weekly, 2011(16):166.
- [21] 郭晔.煤矸石的治理综合利用分析[J].资源节约与环保,2018(12):134.
- GUO Ye. Analysis of treatment and comprehensive utilization of coal gangue [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2018(12):134.
- [22] 马淑杰.新征程下大宗固废综合利用产业发展研究[J].中国矿业,2023,32(6):10-18.
- MA Shujie. Research on the development of comprehensive utilization industry of bulk solid waste in the new journey [J]. China Mining Magazine, 2023, 32(6):10-18.
- [23] 杨琼,马帅帅,梁艳,等.煤矸石胶结充填体强度与细观结构的高温损伤效应[J].矿业研究与开发,2023,43(6):39-44.
- YANG Qiong, MA Shuaishuai, LIANG Yan, et al. High-temperature damage effect on strength and microstructure of coal gangue cemented filling body [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(6): 39-44.
- [24] 冯忆颖.胶结充填材料 k-Hilfer-Prabhakar 变分数阶蠕变模型及其数值方法[D].徐州:中国矿业大学,2022.
- FENG Yiying. K-hilfer prabhakar variable order fractional creep model and its numerical method for cemented backfill materials [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [25] 赵占辉,高松峰,鲁春阳,等.一种改良矿区复垦土壤的长效方法:202210189826.1[P].2022-06-17.
- ZHAO Zhanhui, GAO Songfeng, LU Chunyang, et al. A long-term method for improving reclaimed soil in mining area:202210189826.1[P].2022-06-17.
- [26] 焦赫,李新举.煤矸石充填复垦土壤细菌群落变化[J].煤炭学报,2021,46(10):3332-3341.
- JIAO He, LI Xinju. Variation in the soil bacterial community of reclaimed land filled with coal gangue [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10):3332-3341.
- [27] 周雪雨,郭亮亮,张永波.煤矸石人工热储的建造及自燃热能潜力分析[J].矿业安全与环保,2023,50(3):129-135.
- ZHOU Xueyu, GUO Liangliang, ZHANG Yongbo. Construction of coal gangue artificial thermal storage and analysis of spontaneous combustion thermal energy potential [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50 (3): 129-135.
- [28] 杨彦龙,马爱琼,高云琴,等.以煤矸石为原料制备堇青石-莫来石复合材料[J].非金属矿,2022,45(4):5-9.
- YANG Yanlong, MA Aiqiong, GAO Yunqin, et al. Preparation of cordierite-mullite composites using coal gangue as materials [J]. Non-Metallic Mines, 2022, 45 (4): 5-9.
- [29] LI Y F, LIU S H, GUAN X M. Multitechnique investigation of concrete with coal gangue [J]. Construction and Building Materials, 2021, 301:124114.
- [30] 刘丁仪,王冰玉,李姝霖,等.固废基无机高分子混凝剂研究进展及改进途径[J].化工进展,2021,40(10):5660-5669.
- LIU Dingyi, WANG Bingyu, LI Shulin, et al. Progress and improvement of inorganic polymer coagulant based on solid waste [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(10):5660-5669.
- [31] 方屹,杨浪,饶峰,等.煤矸石的地质聚合反应资源化利用研究进展[J].矿业研究与开发,2023,43(12):206-213.
- FANG Yi, YANG Lang, RAO Feng, et al. Research progress on resource utilization of coal gangue by geological polymerization reaction [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(12): 206-213.
- [32] 林漫亚.煤矸石的综合利用[J].上海建材,2018(2):29-31.
- LIN Manya. The integrated utilization of the coal gangue [J]. Shanghai Building Materials, 2018(2):29-31.

- [33] 郭伟.煤矸石的活性激发及活性评价方法的探讨[D].南京:南京工业大学,2005.
GUO Wei. Research on coal gangue activation and its activity evaluation method[D]. Nanjing: Nanjing Technology University, 2005.
- [34] 贾敏.煤矸石综合利用研究进展[J].矿产保护与利用,2019,39(4):46-52.
JIA Min. The current situation research on comprehensive utilization of coal gangue[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(4): 46-52.
- [35] 张雁,杨晓蕴,康雪成,等.煤矸石试样的X-衍射图谱分析及试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(2):266-273.
ZHANG Yan, YANG Xiaoyun, KANG Xuecheng, et al. Analysis and experimental study on X-diffraction pattern of coal gangues[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(2): 266-273.
- [36] 邱继生,周云仙,关虓,等.不同地质条件及地层下煤矸石理化性质的试验研究[J].科学技术与工程,2019,19(21):123-128.
QIU Jisheng, ZHOU Yunxian, GUAN Xiao, et al. Experimental study on physicochemical property of coal gangue under different geological conditions and stratas[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(21): 123-128.
- [37] 黄方意,徐江.煤矸石风化试验研究及风化对煤矸石地基的影响[J].四川建筑,2004(1):61-62.
HUANG Fangyi, XU Jiang. Experimental research on the weathering of coal gangue and its influence on the foundation of coal gangue[J]. Sichuan Architecture, 2004(1): 61-62.
- [38] 霍晨磊,何亚波,孟子浩.煤矸石资源化利用技术综述[J].山西焦煤科技,2011,35(1):47-49+52.
HUO Chenlei, HE Yabo, MENG Zihao. Summary of gangue resource utilization technology [J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology, 2011, 35(1): 47-49+52.
- [39] 吴松,李修好,胡新,等.基于不同煤矸石的成分分析及堆存区地下水污染特征研究[J].环境科技,2019,32(3):28-33.
WU Song, LI Xiuhao, HU Xin, et al. Different coal gangue elements composition and groundwater pollution characteristics in natural storage area [J]. Environmental Science and Technology, 2019, 32(3): 28-33.
- [40] 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.
- [41] 孙志华,刘开平,汪敏强,等.铜川自燃煤矸石特征研究[J].煤炭学报,2013,38(增刊1):136-141.
SUN Zhihua, LIU Kaiping, WANG Minqiang, et al. Properties of spontaneous combustion coal gangue from Tongchuan[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(Sup. 1): 136-141.
- [42] 王坚,邢莉燕,姬慧,等.自燃煤矸石胶结料混凝土的研究[J].煤炭科学技术,2007(3):77-79.
WANG Jian, XING Liyan, JI Hui, et al. Research on concrete blinded with spontaneous combusted coal refuse[J]. Coal Science and Technology, 2007(3): 77-79.
- [43] 黄艳利,王文峰,卞正富.新疆煤基固体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.
- [44] 张健,李有光,钱觉时.自燃煤矸石作水泥混合材的试验研究[J].粉煤灰综合利用,2010(1):26-28.
ZHANG Jian, LI Youguang, QIAN Jueshi. Experimental study on self-combusted gangue used as cement admixture [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2010(1): 26-28.
- [45] 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.
- [46] 梁衍森,刘文永,卢前明,等.煤矿低成本充填开采技术研究[J].煤炭技术,2016,35(5):22-24.
HUAI Yansen, LIU Wenyong, LU Qianming, et al. Technology study of coal mine filling on low-cost control[J]. Coal Technology, 2016, 35(5): 22-24.
- [47] 刘元明,丁瑞,田伟,等.煤矿矸石井下充填置换煤技术的研究与应用[J].煤炭加工与综合利用,2009(5):50-52.
LIU Yuanming, DING Rui, TIAN Wei, et al. Research and application of coal gangue filling and replacement technology in underground mine[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2009(5): 50-52.
- [48] 张明磊,高少辉,刘伟涛.固体废弃物采空区充填前景浅析[J].科技创新与应用,2013(21):122-123.
ZHANG Minglei, GAO Shaohui, LIU Weitao. Analysis on the prospect of solid waste gob filling [J]. Technology Innovation and Application, 2013(21): 122-123.
- [49] 祖珂.煤矿矸石井下分离和充填技术探讨[J].煤炭加工与综合利用,2014(7):66-68.
ZU Ke. Discussion on separation and filling technology of coal gangue in underground [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2014(7): 66-68.
- [50] 杨长俊.关于煤矸石回填工艺技术的研究和思考[J].矿业安全与环保,2022,49(1):104-108.
YANG Changjun. Research and thinking about coal gangue backfilling technology[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(1): 104-108.
- [51] 刘浪,方治余,张波,等.矿山充填技术的演进历程与基本类别[J].金属矿山,2021(3):1-10.
LIU Lang, FANG Zhiyu, ZHANG Bo, et al. Development history and basic categories of mine backfill technology[J]. Metal Mine, 2021(3): 1-10.

- [52] 黄云峰,朱涛.我国煤矿绿色充填开采技术应用与展望[J].中国矿业,2021,30(增刊1):5-8+23.
HUANG Yunfeng, ZHU Tao. Application and prospect of green filling mining technology in coal mine in China[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(Sup.1): 5-8+23.
- [53] 吴少康,张俊文,徐佑林,等.煤矿高水充填材料物理力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.
- [54] 张伟龙,刘刚.煤矸石资源化利用技术研究新进展[J].陕西煤炭,2022,41(5):149-152.
ZHANG Weilong, LIU Gang. New progress in research on resource utilization technology of coal gangue[J]. Shaanxi Coal, 2022, 41(5): 149-152.
- [55] 王超超.覆岩隔离注浆充填浆液泌出水渗流规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.
WANG Chaochao. Study on seepage law of isolated overburden grout injection slurry bleeding water [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [56] 张国桥,周朋朋,张立欣.煤矸石回填采空区的工艺方法及建议[J].煤炭加工与综合利用,2009(4):45-47.
ZHANG Guoqiao, ZHOU Pengpeng, ZHANG Lixin. Technical method and suggestion of coal gangue backfilling gob[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2009 (4):45-47.
- [57] 周长龙.回风平硐保护煤柱综采风力充填技术研究[D].青岛:山东科技大学,2019.
ZHOU Changlong. Wind power filling in fully mechanized mining of coal pillar protected by return air adit technical study[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019.
- [58] 耿晓兵.利用煤矸石回填煤矿采空区[J].中国科技信息,2018(22):42+44.
GENG Xiaobing. Using coal gangue to backfill mined-out area of coal mine [J]. China Science and Technology Information, 2018(22):42+44.
- [59] 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.
- [60] 郭亚奔,张晓,史久林,等.煤柱-充填体联合控制地表变形规律研究[J].中国矿业,2022,31(12):138-145.
GUO Yabén, ZHANG Xiao, SHI Jiulin, et al. Study on surface deformation law of coal pillar-filling combined control[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(12): 138-145.
- [61] 李钱坤,张忠,华兴斌.综采矸石充填技术在翟镇煤矿的应用[J].山东煤炭科技,2008(6):24-25.
LI Qiankun, ZHANG Zhong, HUA Xingbin. Application of fully mechanized mining gangue filling technology in Zhai Zhen Coal Mine[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2008(6): 24-25.
- [62] 刘斌.东曲煤矿充填开采工艺技术应用探讨[J].江西煤炭科技,2021(2):58-60.
LIU Bin. Discussion on application of filling mining technology in Dongqu colliery[J]. Jiangxi Coal Science & Technology, 2021(2): 58-60.
- [63] 汪华莉,何文贵,周凯.水泥复合充填材料抗硫酸盐侵蚀性能研究[J].矿业研究与开发,2023,43(11):39-44.
WANG Huali, HE Wengui, ZHOU Kai. Study on the sulfate erosion resistance of cement composite filling materials[J]. Mining Research and Development, 2023, 43 (11):39-44.
- [64] ZHAO Y, ZHAO G Y, XU L, et al. Mechanical property evolution model of cemented tailings-rock backfill considering strengthening and weakening effects [J]. Construction and Building Materials, 2023, 377:131081.
- [65] 石念光,吴秀祥,郭忠平.崖头煤矿矸石井下回填技术应用研究[J].山东煤炭科技,2007(5):44-45.
SHI Nianguang, WU Xiuxiang, GUO Zhongping. Research on application of backfilling technology for gangue in Yatou Coal Mine[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2007 (5):44-45.
- [66] 杜金龙,潘树仁,刘长友,等.面向绿色矿山的注浆关键技术与工程示范[J].矿业科学学报,2023,8(3):293-307.
DU Jinlong, PAN Shuren, LIU Changyou, et al. Key grouting technology and engineering demonstration for green mines[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(3):293-307.
- [67] 古文哲,杨宝贵,朱磊,等.矸石浆体充填空间特征研究与工程实践[J].矿业科学学报,2023,8(3):409-418.
GU Wenzhe, YANG Baogui, ZHU Lei, et al. Study on spatial characteristics of gangue slurry filling mining and engineering practice [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(3):409-418.
- [68] 敖双龙.浅谈煤炭资源的成因及性质[J].中国新技术新产品,2011(16):196.
AO Shuanglong. On the origin and nature of coal resources [J]. New Technology & New Products of China, 2011 (16):196.
- [69] 王佟,刘峰,赵欣,等.生态地质层理论及其在矿山环境治理修复中的应用[J].煤炭学报,2022,47(10):3759-3773.
WANG Tong, LIU Feng, ZHAO Xin, et al. Theory of ecological geological layer and its application in mine environment remediation[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3759-3773.
- [70] 孙红福,阴祥诚,孙朗,等.煤矸石精确产酸潜力评价方法对比研究[J].矿业科学学报,2024,9(1):13-21.

- SUN Hongfu, YIN Xiangcheng, SUN Lang, et al. Comparative study on evaluation methods of accurate acid production potential of coal gangue[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(1): 13-21.
- [71] 王琼.高硫煤矸石对苏打盐化土改良效果的研究[D].太原:山西大学,2017.
- WANG Qiong. Improving effects of high-sulfur coal gangue on soda-saline soil[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2017.
- [72] 马柳.以煤矸石为基质的生菜种植土壤改良配比研究[D].沈阳:辽宁大学,2021.
- MA Liu. Study on the ratio of soil improvement for lettuce planting with coal gangue as substrate [D]. Shenyang: Liaoning University, 2021.
- [73] 张晓薇,詹强.矿区退化土地土壤改良剂的研制[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2010,29(增刊1):147-148.
- ZHANG Xiaowei, ZHAN Qiang. Study of soil improver for abandoned land in mining area[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2010, 29 (Sup.1): 147-148.
- [74] 武冬梅,张建红,洪坚平,等.施肥对煤矸石风化物微生物活性的影响[J].水土保持学报,2000(3):100-103.
- WU Dongmei, ZHANG Jianhong, HONG Jianping, et al. Effect of applying chemical fertilizers and sludge on micro-organisms activities of gangue weathering matter [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000(3): 100-103.
- [75] 孙海容,赵爱东.利用高硫煤矸石改良土壤的探讨[J].煤炭加工与综合利用,1999(3):16-18+3.
- SUN Hairong, ZHAO Aidong. Discussion on the soil improvement using high sulfur coal refuse [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 1999(3): 16-18 + 3.
- [76] 关禹.煤矸石的肥效及重金属活性钝化的研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2015.
- GUAN Yu. The study on fertilizer efficiency and passivation on heavy metals activated of coal gangue [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2015.
- [77] 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 reclaimed mined land [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2499-2515.
- [78] 高丽强,李柏源,常毅,等.中国土地复垦制度演进历程及完善对策[J].现代农业科技,2012(5):389-391.
- GAO Liqiang, LI Baiyuan, CHANG Yi, et al. Evolution of China's land reclamation system and countermeasures [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2012 (5): 389-391.
- [79] 卞正富.我国煤矿区土地复垦与生态重建研究[J].资源·产业,2005(2):18-24.
- BIAN Zhengfu. Research on the recultivation and ecological reconstruction in coal mining area in China[J]. Resources & Industries, 2005(2): 18-24.
- [80] 常克章.塌陷区回填煤矸石复垦[J].煤矿环境保护,2000 (6):58-59.
- CHANG Kezhang. Reclamation of coal gangue by backfilling in subsidence area[J]. Coal Mine Environmental Protection, 2000(6): 58-59.
- [81] 王旭峰,张云峰,刘峰,等.煤矸石覆土填沟关键工艺参数确定与应用[J].矿业研究与开发,2023,43(5):69-75.
- WANG Xufeng, ZHANG Yunfeng, LIU Feng, et al. Determination and application of key process parameters of soil covering and ditch filling by coal gangue[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(5): 69-75.
- [82] 邱俊杰.煤矸石-粉煤灰混合充填复垦土壤水气运移特征研究[D].合肥:安徽大学,2021.
- QIU Junjie. Study on the characteristics of water and gas migration in the reclamation land by coal gangue and fly ash mixed filling[D]. Hefei: Anhui University, 2021.
- [83] 翟文.西部生态脆弱矿区开采沉陷区矸石充填复垦重金属析出迁移控制及复垦评价[D].徐州:中国矿业大学,2022.
- ZHAI Wen. Heavy metal precipitation migration control and reclamation evaluation of gangue filling and reclamation in mining sinkhole areas in western ecologically fragile mining areas [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [84] 崔树军,张庆甫,张建云,等.煤矸石中提取铝的工艺探讨[J].非金属矿,2010,33(3):25-27.
- CUI Shujun, ZHANG Qingfu, ZHANG Jianyun, et al. Method for extract and recover Al from coal gangue[J]. Non-Metallic Mines, 2010, 33(3): 25-27.
- [85] 吴海滨,薛芳斌,郭彦霞,等.煤矸石制备聚合氯化铝工艺[J].洁净煤技术,2018,24(4):141-145.
- WU Haibin, XUE Fangbin, GUO Yanxia, et al. Technology of the preparation of polyaluminium chloride from coal gangue[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(4): 141-145.
- [86] 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 Yi'nan, SONG Weijian, et al. Present situation and prospect of coal gangue treatment technology [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(1): 136-146.
- [87] 王晓蕾,刘正武,程俊杰.煤矸石资源化利用新技术研究进展[J/OL].矿产综合利用:1-7[2023-11-20].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20231113.1023.002.html>.
- WANG Xiaolei, LIU Zhengwu, CHENG Junjie. Research progress of new technology of coal gangue resource utilization [J/OL]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources: 1-7 [2023-11-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20231113.1023.002.html>.
- [88] 刘小波,傅勇坚,肖秋国.煤矸石-石灰石-纯碱烧结过程研究[J].环境科学学报,1999(2):100-103.

- [88] LIU Xiaobo, FU Yongjian, XIAO Qiuguo. Sintering process of coal refuse-lime stone-soda ash[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1999(2):100-103.
- [89] 张蕾,李瑜.硫酸法从煤矸石中提取 Al_2O_3 的实验研究[J].煤炭工程,2011(9):109-111+114.
- ZHANG Lei, LI Yu. Experiment study on Al_2O_3 extracted from coal rejects with sulfuric acid method [J]. Coal Engineering, 2011(9):109-111+114.
- [90] 孔德顺.高铁型煤矸石提取铝铁制备混凝土及滤渣资源化利用研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.
- KONG Deshun. Study on extraction of aluminum and iron ions from high iron content coal gangue to prepare coagulants and filter residue resource utilization [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [91] 郭昭华.粉煤灰“一步酸溶法”提取氧化铝工艺技术及工业化发展研究[J].煤炭工程,2015,47(7):5-8.
- GUO Zhaohua. Study and industrialization development of one-step acid dissolution technology for alumina extraction from fly ash[J]. Coal Engineering, 2015,47(7):5-8.
- [92] 谷婕.煤矸石中硅铝元素的提取及其高值化利用[D].包头:内蒙古科技大学,2022.
- GU Jie. Extraction and high value utilization of Si and Al elements from coal gangue [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2022.
- [93] 赛华征,康仕琛,付蕊,等.以煤矸石与琼脂糖复合制备的气凝胶微球及其制备方法:202110619085.1[P].2021-08-27.
- SAI Huazheng, KANG Shichen, FU Rui, et al. The aerogel microspheres prepared by the combination of coal gangue and agarose and a preparation method:202110619085.1[P]. 2021-08-27.
- [94] 杨利霞,张永峰,林婧.酸浸法从高铝煤矸石中提取氧化铝的研究[J].煤炭加工与综合利用,2009(5):46-49.
- YANG Lixia, ZHANG Yongfeng, LIN Jing. Study on extraction of alumina from high alumina coal gangue by acid leaching[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2009(5):46-49.
- [95] 马艳然,于伯蕖,鲁秀国.从煤矸石中制备聚合氯化铝及应用研究[J].化学世界,2004(2):63-65.
- MA Yanran, YU Boqu, LU Xiuguo. Study on the preparation of polyaluminum chloride from coal gangue[J]. Chemical World, 2004(2):63-65.
- [96] 刘晓文,胡岳华,黄圣生,等.高岭土的化学成分与表面电性研究[J].矿物学报,2001(3):443-447.
- LIU Xiaowen, HU Yuehua, HUANG Shengsheng, et al. Chemical composition and surface property of kaolins[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2001(3):443-447.
- [97] 薛敏,姚素玲,董宪妹,等.煤系高岭土磁性吸附材料的制备及对Pb(II)吸附研究[J].矿业研究与开发,2022,42(10):148-154.
- XUE Min, YAO Sulind, DONG Xianshu, et al. Preparation of coal-based Kaolinite magnetic adsorption materials and their adsorptions on Pb (II) [J]. Mining Research and Development, 2022,42(10):148-154.
- [98] 姚淑华,宋守志,张志华.综合利用煤矸石促进亚铵法制浆造纸的发展[J].矿业研究与开发,2003(6):59-62.
- YAO Shuhua, SONG Shouzhi, ZHANG Zhihua. Comprehensively utilizing coal gangue to promote the development of ammonium sulfite pulping process in papermaking industry [J]. Mining Research and Development, 2003(6):59-62.
- [99] 方艳梅,张大力,李凯琦.煤系高岭岩深加工工艺技术问题浅析[J].非金属矿,2002(增刊1):50-51.
- FANG Yanmei, ZHANG Dali, LI Kaiqi. Technical analysis of deep processing technology of coal measures Kaolinite [J]. Non-Metallic Mines, 2002(Sup.1):50-51.
- [100] 沈王庆.反应条件对煤系高岭土脱硅率的影响[J].矿业研究与开发,2005(6):50-52.
- SHEN Wangqing. Effects of reactive conditions on the desilication ratio of coal-series Kaolinite[J]. Mining Research and Development, 2005(6):50-52.
- [101] 刘松柏.高岭岩型煤矸石新一代制备超细煅烧高岭土技术和装备[J].中国非金属矿工业导刊,2022(1):78-79+68.
- LIU Songbai. New generation technology and equipment for preparing ultrafine calcined Kaolin from Kaolinite coal gangue[J]. China Non-metallic Minerals Industry, 2022(1): 78-79+68.
- [102] 王磊,酒少武,成思萌,等.快速煅烧条件对煤系偏高岭土性能的影响[J].材料科学与工程学报,2022,40(5):791-795+822.
- WANG Lei, JIU Shaowu, CHENG Simeng, et al. The effect of rapid calcination conditions on the properties of coal-series metakaolin[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2022,40(5):791-795+822.
- [103] 王相,李金洪,准格尔露天矿煤矸石制备精细煅烧高岭土的实验研究[J].硅酸盐通报,2011,30(6):1249-1253.
- WANG Xiang, LI Jinhong. Research on preparation of fine calcined Kaolin by gangue in junger opencast mine [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2011, 30 (6): 1249-1253.
- [104] 宋欢,刘利波,徐宏祥.准格尔露天矿高品质煅烧高岭土分选工艺研究[J].煤炭加工与综合利用,2021(11):81-85+91.
- SONG Huan, LI Libo, XU Hongxiang. Research on separation processing of high-quality calcined kaolin in Zhungeer Open-pit Mine [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2021(11):81-85+91.
- [105] WANG Tong, WANG Ying, WANG Jun. Research on potential fertilization of coal gangue in the Weibei coalfield, China[J]. Acta Geologica Sinica - English Edition, 2008, 82 (3): 717-721.
- [106] 田怡然,张晓然,刘俊峰,等.煤矸石作为环境材料资源化再利用研究进展[J].科技导报,2020,38(22):104-113.
- TIAN Yiran, ZHANG Xiaoran, LIU Junfeng, et al. The coal gangue reused as environmental materials[J]. Science & Technology Review, 2020,38(22):104-113.

- [107] 盛定红,张景宁,李小军,等.煤矸石肥料的制备及应用研究[J].应用化工,2023,52(3):960-963+967.
SHENG Dinghong, ZHANG Jingning, LI Xiaojun, et al. Study on preparation and application of coal gangue fertilizer [J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(3): 960-963+967.
- [108] 任晓玲,周蕙昕,高明,等.煤矸石肥料的研究进展[J].中国煤炭,2021,47(1):103-109.
REN Xiaoling, ZHOU Huixin, GAO Ming, et al. Research progress of coal gangue fertilizer [J]. China Coal, 2021, 47 (1): 103-109.
- [109] 张庆玲.利用煤矸石研制有机矿物肥料的尝试[J].煤矿环境保护,1996(1):24-26.
ZHANG Qingling. An attempt to develop organic mineral fertilizer from coal gangue [J]. Coal Mine Environmental Protection, 1996(1): 24-26.
- [110] 樊金拴.煤矸石对环境的危害与开发利用研究[J].资源开发与市场,2008(1):56-59.
FAN Jinshuan. Present situation of researching on environmental effect and comprehensive utilization of gangue [J]. Resource Development & Market, 2008(1): 56-59.
- [111] 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.
- [112] 程蓉,廖祥文,舒荣波,等.利用硅酸盐细菌制备煤矸石矿物肥料[J].矿产综合利用,2017(6):115-118.
CHENG Rong, LIAO Xiangwen, SHU Rongbo, et al. Study on the preparation of gangue mineral fertilizers by silicate-dissolving bacterial strains [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(6): 115-118.
- [113] 袁向芬,谢承卫.利用巨大芽孢杆菌制备高硫煤矸石肥料[J].环境工程学报,2015,9(2):946-950.
YUAN Xiangfen, XIE Chengwei. Preparation of high-sulfur coal gangue fertilizer by bacillus megaterium [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(2): 946-950.
- [114] 王应兰,姜雄,吉俐,等.基于高效解磷菌的煤矸石肥料制备及其应用潜力分析[J].浙江农业学报,2020,32(11):2035-2041.
WANG Yinglan, JIANG Xiong, JI Li, et al. Preparation of coal gangue fertilizer based on high-efficiency phosphate solubilizing bacteria and its application potential [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(11): 2035-2041.
- [115] 刘春荣,宋宏伟,董斌.煤矸石用于路基填筑的探讨[J].中国矿业大学学报,2001(3):80-83.
LIU Chunrong, SONG Hongwei, DONG Bin. Study on utilization of waste as roadbed materials [J]. China University of Mining and Technology, 2001(3): 80-83.
- [116] 常贺.淮北煤矸石在高等级公路路基中的应用研究[D].西安:长安大学,2015.
CHANG He. Application of Huabei coal gangue in highway subgrade [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [117] 邬俊,高文华,张宗堂,等.煤矸石路基填料强度与变形特性研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(4):885-891.
WU Jun, GAO Wenhua, ZHANG Zongtang, et al. Study on strength and deformation characteristics of coal gangue subgrade filling [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(4): 885-891.
- [118] 陈琦琦,张大明,任凤玉,干粉激发煤矸石基地聚物混凝土配合比优化研究[J].矿业研究与开发,2022,42(8):125-129.
CHEN Qiqi, ZHANG Daming, REN Fengyu. Study on mix proportion optimization of dry-powder activated coal gangue based geopolymers concrete [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(8): 125-129.
- [119] 魏明星,朱永建,任恒,等.煤矸石集料混凝土材料配比优化[J].矿业工程研究,2022,37(4):65-71.
WEI Mingxing, ZHU Yongjian, REN Heng, et al. The optimization of the material ratio of coal gangue aggregate concrete [J]. Mineral Engineering Research, 2022, 37(4): 65-71.
- [120] 查文华,钱育冬,姚苏琴,等.温度对玄武岩纤维煤矸石混凝土性能劣化研究[J].矿业研究与开发,2023,43(7):33-41.
ZHA Wenhua, QIAN Yudong, YAO Suqin, et al. Study on the performance deterioration of basalt fiber coal gangue concrete by temperature [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(7): 33-41.
- [121] 董建勋,徐玉晓,姜利.煤矸石在依七高速公路路基工程中的应用研究[J].黑龙江交通科技,2020,43(11):1-3.
DONG Jianxun, XU Yuxiao, JIANG Li. The application of coal gangue in YIQI highway subgrade engineering research [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2020, 43(11): 1-3.
- [122] 史芳.煤矸石材料填筑路基施工研究[J].四川水泥,2017(11):73-74.
SHI Fang. Study on construction of subgrade filled with coal gangue materials [J]. Sichuan Cement, 2017(11): 73-74.
- [123] 余文华,吴军福,丁泽强.煤矸石在公路工程中的应用试验研究[J].安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2005(1):48-51.
YU Wenhua, WU Junfu, DING Zeqiang. Application coal gangue in road construction [J]. Journal of Anhui Institute of Building Technology (Natural Science Edition), 2005 (1): 48-51.
- [124] LI L H, LONG G C, BAI C N, et al. Utilization of coal gangue aggregate for railway roadbed construction in practice [J]. Sustainability, 2020, 12(11):4583.
- [125] WU J, BAI G L, WANG P, et al. Mechanical properties of a new type of block made from shale and coal gangue [J]. Construction and Building Materials, 2018, 190: 796-804.
- [126] 赵亚兵,张新朋,吴楠,等.环保免烧结煤矸石透水砖的制备方法及其透水性能[J].硅酸盐通报,2014,33(12):3255-3260+3271.
ZHAO Yabing, ZHANG Xinpeng, WU Nan, et al. Water permeable property of uncalcined brick prepared with coal gangue [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33 (12): 3255-3260+3271.

- [127] 吴红,卢香宇,罗忠竞,等.活化煤矸石免烧砖制备及机理分析[J].非金属矿,2018,41(1):30-33.
WU Hong, LU Xiangyu, LUO Zhongjing, et al. Preparation and mechanism analysis of activated coal gangue unburned bricks [J]. Non-Metallic Mines, 2018, 41(1): 30-33.
- [128] YANG Q B, LYU M X, LUO Y B. Effects of surface-activated coal gangue aggregates on properties of cement-based materials [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2013, 28(6): 1118-1121.
- [129] ZHANG Y, LING T C. Reactivity activation of waste coal gangue and its impact on the properties of cement-based materials: a review [J]. Construction and Building Materials, 2020, 234: 117424.
- [130] 刘朋.粒状煤矸石的活化及其在水泥基材料中的应用研究[D].合肥:安徽建筑大学,2019.
- LIU Peng. Activation of granular coal gangue and its application in cement-based materials [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2019.
- [131] 关虓,陈霁溪,朱梦宇,等.微波活化煤矸石对水泥基材料的性能影响[J].材料导报,2023,37(4):95-101.
GUAN Xiao, CHEN Jixi, ZHU Mengyu, et al. Effect of microwave activated coal gangue on properties of cement-based materials[J]. Materials Reports, 2023, 37(4): 95-101.
- [132] 王艳,左震,文波,等.煤矸石粗集料理化性质和形状特征对混凝土强度的影响[J].矿业科学学报,2022,7(5):554-564.
WANG Yan, ZUO Zhen, WEN Bo, et al. Influence of physicochemical properties and shape characteristics of coal gangue coarse aggregate on concrete strength[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(5): 554-564.

Present Situation and Prospect of Large-Scale Disposal and High Value-Added Utilization of Coal Gangue

SONG Wei^{1,2}, LIU Chengyong^{1,2}, YANG Junjun^{3,4,5}, WANG Ruofan^{3,4,5}, ZHANG Xinfu^{1,2}, ZHAO Dongsheng⁵
 (1.China Coal Energy Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shannxi 710054, China;
 2.China Coal Xi'an Design Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shannxi 710054, China;
 3.College of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology,
 Xi'an, Shannxi 710054, China; 4.Mine Functional Backfill Technology Research Center,
 Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shannxi 710054, China;
 5.Mahuangliang Coal Mine, Yulin, Shannxi 719000, China)

Abstract: Coal gangue has large production stock, low utilization rate and serious pollution. It is urgent to carry out large-scale comprehensive utilization according to the physical and chemical properties of coal gangue. The large-scale harmless consumption methods were summarized, such as separation zone filling, soil improvement and reclamation of cultivated land in the coal gangue goaf. The methods of respectively using coal gangue containing valuable elements such as aluminum, kaolin mineral composition, high contents of beneficial elements such as nitrogen, phosphorus and potassium, as well as low contents of harmful heavy metals to produce aluminum salt chemical products, kaolin and agricultural fertilizer were briefly described. The comprehensive utilization of coal gangue as roadbed and building materials was reviewed, and the problems of incomplete treatment of coal gangue and secondary pollution in the existing technology were analyzed. It is proposed to establish a high value-added utilization industry chain of “multi-step, hierarchical and classification”. The residues of agricultural fertilizers can be used for soil improvement and reclamation of cultivated land. The solid waste in calcined kaolin can be used for low-standard building materials or roadbeds. The multi-level utilization of coal gangue extends coal gangue from high value-added utilization to mine filling, and realizes large-scale consumption of coal gangue with high added value.

Key words: Coal gangue, Filling mining, Comprehensive utilization, Hierarchical and classification, High added value