

尾矿高值化利用

“双碳”战略下我国煤矸石的综合利用技术研究进展

何占伟¹, 何帅¹, 王贵帅¹, 李世豪¹, 陈广玉¹, 高忙忙¹, 李会标²

1. 宁夏大学 材料与新能源学院, 宁夏 银川 750021;
2. 彭阳县鑫卓能源科技发展有限公司, 宁夏 固原 756500

中图分类号: TD849.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)06-0001-14
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.06.001

摘要 在“双碳”战略背景下,我国持续推进产业和能源结构的升级,倡导绿色、环保和低碳发展。我国煤矸石的大量堆积,导致了严重的资源浪费,还可能引发一系列的环境问题。煤矸石的有效处理与资源化利用成为煤炭行业亟待解决的任务。系统综述了煤矸石在金属提取、材料制备、燃烧利用和生态修复等领域的研究进展。煤矸石可提取铝、铁及“三稀”等金属元素,但在提取过程中易产生大量的废酸和废渣,引起潜在的环境污染风险;煤矸石不仅可以制备混凝土和水泥等传统建筑材料,还能制备多孔陶瓷、沸石等高附加值新型材料;共燃技术的应用有助于提高煤矸石的热能利用效率,降低温室气体排放;作为土壤改良剂,煤矸石在生态修复中展现出良好前景,但需注意重金属离子可能引发的二次污染风险。基于当前煤矸石处理中的问题与挑战,探讨了煤矸石利用未来高质量发展的路径,建议通过多种利用方式相结合,推动煤矸石高效资源化利用,实现经济、环境与社会效益的协调发展。

关键词 煤矸石;综合利用;金属提取;材料制备;燃烧利用;生态修复

1 引言

近年来,随着国家“双碳”战略目标的深入实施,清洁能源领域取得了显著进展^[1-3]。尽管煤炭在我国一次能源消费结构中的比例逐年递减,但仍维持在50%以上的高位,凸显出煤炭在当前能源体系中不可替代的主导地位,其结构性调整是一个长期且复杂的过程^[4]。据数据分析,自2016年以来,我国煤炭产量持续攀升,而作为煤炭开采和洗选过程中产生的主要固体废物——煤矸石,其产生量亦呈现出逐年增加的态势^[5](图1)。具体而言,2023年我国煤矸石排放量高达8.29亿t,累积堆存量更是突破了70亿t大关,使之成为增量与排放量最大的工业固体废物。煤矸石中含有丰富的矿物成分和有机质,具备较高的资源化利用潜力。然而,大量煤矸石的长期堆积,不仅占用了宝贵的土地资源(累计形成超过2600座矸石山),还对环境和生态系统带来了多重威胁。煤矸石长期受到地表水和地下水的浸泡,可能导致镉(Cd)、铅(Pb)、汞(Hg)、铜(Cu)和锌(Zn)等重金属离子浸出,污染周边生态系统,并通过生物积累危害人类健康^[4-7]。此外,露天堆放的煤矸石在风化过程中会释放大量粉

尘颗粒及烟尘杂质,其自燃现象则进一步产生大量有害气体,如CO、CO₂、SO₂等,不仅严重降低空气质量,还可能通过呼吸作用对人类和动植物的呼吸系统造成损害。这些环境问题的累积效应显著破坏系统的稳定性,同时对煤炭产业的低碳转型与高值化发展形成了巨大阻碍。

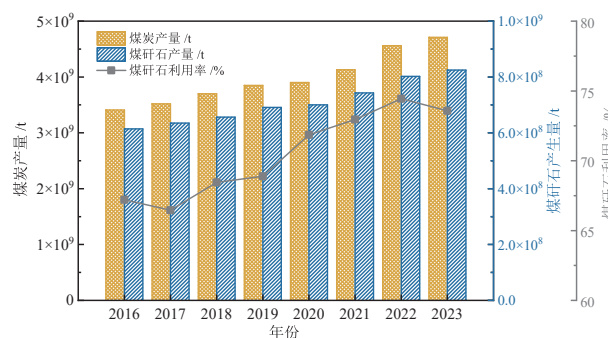


图1 我国2016—2023年煤炭产量、煤矸石产生量及综合利用率

Fig. 1 Coal production, coal gangue production and comprehensive utilization rate from 2016 to 2023

1998年我国发布了《煤矸石综合利用管理办法》以引导煤矸石的综合利用,并于2014年进行了修订。2018年工业和信息化部发布了《工业固体废物资源综

收稿日期: 2024-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52404420); 甘肃省青年科技基金项目(23JRRA817)

作者简介: 何占伟(1989—),男,甘肃张掖人,副教授,硕士生导师,主要从事固废资源化利用, E-mail: hezhanwei@nxu.edu.cn。

合利用评价管理暂行办法》《国家工业固体废物资源综合利用产品目录》两项重要文件,明确将煤矸石列为六类工业固体废物^[8]。这标志着煤矸石综合利用标准的提升,也对其高效处理与资源化提出了更高要求,并进一步推动了相关领域的迫切需求。图 2 显示,自 2018 年以来,标题中含“煤矸石或 Gangue”的期刊论文数量逐年上升,这与相关政策的颁布和煤矸石产生量的逐年上升密切相关。煤矸石利用研究主要集中在金属提取、材料制备、燃烧利用、生态修复等领域。目前,我国煤矸石利用率已达到 70% 以上,但相较于美国和欧洲等发达地区的 90% 仍有差距^[9]。因此,探索更高效的煤矸石处理手段与资源化策略将是推动煤炭行业可持续发展的重要方向。

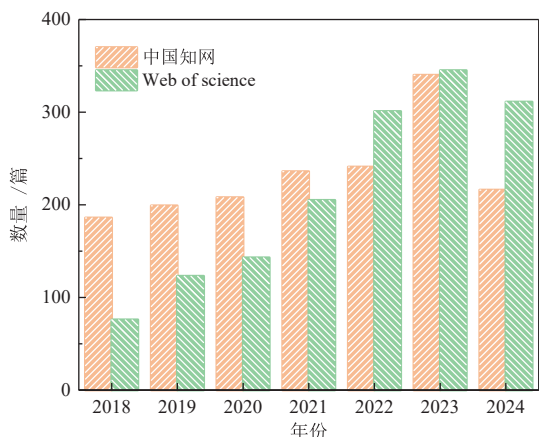


图 2 与煤矸石相关的期刊论文发表情况
Fig. 2 Number and field of publication of journal articles on the topic of "gangue" (a—number; b—way of comprehensive utilization of coal gangue)

2 我国煤矸石特性

煤矸石作为一种与煤炭共生的炭质岩石,特征在于其高灰分含量与低发热量,广泛分布于我国多个省份,尤其富集于煤炭资源充沛的山西、内蒙古、陕西、新疆及宁夏等地^[10-11]。由于煤矸石在煤层中的位置与含碳比例不同而外观颜色各异,常见灰色、灰褐色和黑色。煤矸石特有的多孔构造源自于其形成历程中矿物颗粒间形成的空隙及其自身固有的内部微孔,孔隙

率为 10%~25%,赋予了煤矸石显著的吸水性(吸水率 6%~12%)与相对较低的密度(密度为 1.8~2.6 g/cm³)^[11]。

煤矸石的化学成分因煤炭开采区位、成矿时代及地质背景的不同而展现出鲜明的地域特色,详见表 1。由表 1 可知,各地煤矸石中的主要化学成分类型大致相同,但其含量差异显著,其中 SiO₂ 含量最高,为 40%~70%; Al₂O₃ 含量次之,为 4%~35%; Fe₂O₃ 含量则为 1%~17%,三者合计占比超过 75%。依据氧化物含量的差异,我国煤矸石可被细分为黏土质煤矸石(SiO₂ 40%~70%、Al₂O₃ 15%~30%)、砂岩质煤矸石(SiO₂>70%)、铝质煤矸石(Al₂O₃>40%)和钙质煤矸石(CaO>30%)四大类^[12]。除上述无机矿物成分外,还富含一些金属元素(锂、镓和稀土等)和炭质泥岩等有机矿物。煤矸石中碳元素是构成有机质的主要成分,在煤矸石燃烧过程中起着关键的热源作用。我国各地区煤矸石的含碳量和热值存在显著差异,据此,煤矸石可被划分为四大类:低含碳量煤矸石、中含碳量煤矸石、较高含碳量煤矸石和高含碳量煤矸石(含碳量高于 20%),其中高含碳量煤矸石的发热量高达 12.55 MJ/kg^[13],具备一定的燃烧性能。

煤矸石中的矿物主要来自煤系母岩的造岩矿物,通常分为原生矿物和次生矿物两类。其中,次生矿物是煤矸石中最重要、最有活力且影响最大的部分,决定着煤矸石的多种性质,如可塑性、膨胀性和强度等。从整体来看,煤矸石的成分构成较为复杂^[20],以硅酸盐矿物为主,其中石英含量一般占 20%~40%,高岭石占 15%~45%,伊利石占 0~45%,这三种主要矿物的含量之和通常占 45%~90%,其次还含有少量的云母、方解石及铁矿物等。煤矸石中除矿物成分外,还含有一定量的炭质成分、有机物,这些炭质成分影响煤矸石的热值和自燃特性。对于自燃煤矸石而言,还会生成具有较高火山灰活性的非晶相玻璃质和无定形物,并伴有少量的莫来石。这些特性充分展现了煤矸石矿物组成的多样性与复杂性。

3 煤矸石综合利用途径

煤矸石作为一种储量丰富、分布广泛的工业固体废物,有巨大的综合利用潜力,但其特有的物理化学

表 1 我国不同地区煤矸石的化学成分

Table 1 Chemical composition of coal gangue in different regions of China

地区	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	烧失量	参考文献
山西	46.1	30.9	3.1	1.2	0.5	—	1.3	1.1	15.3	[14]
陕西	55.24	11.17	17.36	1.69	1.52	0.48	0.67	—	—	[15]
内蒙古	46.35	37.62	0.53	0.33	0.09	0.03	0.08	0.98	—	[16]
新疆	70.25	4.68	1.01	1.22	1.10	—	—	2.86	18.2	[17]
宁夏	60.63	23.49	5.29	0.51	2.57	2.27	2.66	—	9.72	[18]
贵州	44.02	31.98	0.75	0.32	0.62	1.90	3.55	5.20	—	[19]

性质带来了处理上的挑战。随着我国对资源循环利用和环境保护要求的日益增强,煤矸石的综合利用已成为推动煤炭行业绿色转型、实现可持续发展的重要途径。

3.1 金属提取

煤矸石中的金属元素种类丰富,主要包括铝(Al)、铁(Fe)、锂(Li)、镓(Ga)以及稀土元素(RE)等^[21],采用适当的技术手段从中提取这些金属元素已成为可能^[22]。

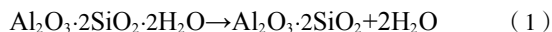
3.1.1 铝提取

煤矸石中铝元素主要以 Al_2O_3 形式存在,例如内蒙古地区煤矸石中 Al_2O_3 含量可达 35%,因此可作为铝土矿的替代资源^[16]。目前,从煤矸石中提取 Al 元素主要采用的方法包括碱熔法和酸浸法^[23]。碱熔法是将煤矸石和碱性物质混合,并在高温下进行焙烧然后浸出,以实现煤矸石中 Al 元素的分离^[24]。然而,该方法的烧结温度高、除杂难度大,同时伴随大量难以有效再利用的废渣产生,进而引发环境污染问题,故而在大规模工业化应用上遭遇较大阻碍^[22]。相对而言,酸浸法作为一种高效的煤矸石 Al 元素提取技术,依赖于酸性溶液的选择性溶解能力,将 Al 元素转化为可溶性铝盐溶液,同时 Si 元素以非晶态 SiO_2 的形式留在残渣中,实现了 Si 和 Al 的有效分离^[25]。在实践过程中, H_2SO_4 与 HCl 因其良好的溶解性和选择性而被广泛用作溶出剂^[2],然而,选用不同类型的酸会导致生成的铝盐种类产生差异,并且影响浸出液中杂质元素的构成,进而形成不同的工艺路径。

具体而言, H_2SO_4 作为溶出剂时^[26-27],将煤矸石中的 Al 元素转化为 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 溶液,经过固液分离、除杂、碳分及煅烧等工艺后得到 Al_2O_3 , Al 元素赋存状态经历从煤矸石中的 $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ 转化为浸出液中的 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$,再到 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 NaAlO_2 两种中间产物,并最终转化为 Al_2O_3 。当选用 HCl 作为溶出剂时^[28-29],煤矸石中的 Al 元素被转化为 AlCl_3 溶液。然而,此溶液中往往含有 FeCl_3 和 MgCl_2 等杂质。需经除杂、浓缩、低温加热、碱溶、再次酸化和煅烧等步骤, Al 元素经一系列化学反应最终转化为 Al_2O_3 ,具体变化过程为 $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\rightarrow\text{AlCl}_3\rightarrow\text{Al}_2\text{O}_3\rightarrow\text{NaAlO}_2\rightarrow\text{Al}(\text{OH})_3\rightarrow\text{Al}_2\text{O}_3$ 。

鉴于原料活性对酸浸提取效率的关键影响,对煤矸石进行预处理以提升其活性显得尤为关键,预处理过程主要包括机械活化与焙烧活化两种方式^[30-32]。其中,焙烧活化通过将煤矸石置于 600~900 °C 高温下,有效地脱除了高岭石中的结合水,并将其转化为活性更高的偏高岭石^[33](式 1),但需警惕温度超过 1 000 °C 时,偏高岭石向活性较低的莫来石转变的风险^[34]。为

优化焙烧过程,可添加适量 Na_2CO_3 与煤矸石中的矿物反应^[35],生成霞石,以此增强煤矸石的化学活性,提高 Al_2O_3 在酸性溶液中的溶解度。武丹宇等^[36]通过采用碳酸钠焙烧活化—硫酸浸出法进行了煤矸石中 Al_2O_3 提取的研究,结果表明,添加 Na_2CO_3 可显著提高 Al_2O_3 的浸出率,当焙烧温度为 800 °C、 Na_2CO_3 掺量为 25% 时, Al_2O_3 的浸出率可以达到 87%。



目前,从煤矸石中提取 Al 元素的主要方法包括碱熔法和酸浸法,各有优缺点。碱熔法借鉴了成熟的铝土矿提取工艺,技术成熟度较高,研究体系也较为完善,但其对 Al/Si 比要求高,因此在处理低 Al/Si 比的煤矸石时,仍需进一步改进工艺并解决废渣管理问题。酸浸法对 Al/Si 比要求不高,适应性强,提取率较高且操作简单,但设备腐蚀严重,废酸难以处理,容易引发二次污染。酸浸法在工业上尚无成功应用,距离工业化尚有较大距离,未来需进一步进行系统性和工艺优化。无论采用何种方法,环保性均应作为重点,特别是在废酸和废渣处理方面加强研究,以推进煤矸石中铝提取技术的工业化进程。

3.1.2 铁提取

作为次要金属元素的 Fe,在煤矸石中主要以氧化物或硫化物的形式存在,可通过还原焙烧—磁选和酸浸等方法进行回收。Yuan 等^[37]探索了煤矸石与铝土矿共同焙烧以回收 Fe 和 Al 的可能性,结果表明,煤矸石掺量为 40%、焙烧温度设定为 750 °C 且焙烧时间达到 50 min 的条件下,通过焙烧—磁选工艺可以获得品位 55.09% 的铁精矿,其回收率也达到了 82.73%。王健璋等^[38]采用预加热—碳热还原—磁选法对煤矸石中 Fe 的回收进行了研究,煤矸石在空气中、1 000 °C 下预氧化 1 h,然后在氮气气氛下以 1 100 °C 碳热还原 1.5 h, C/O 摩尔比为 2,再进行磁选,煤矸石中的铁回收率可达 71.3%。

此外,张又中等^[39]采用热活化—酸浸法,实现了煤矸石中 Fe 和 Al 的同步回收,研究表明,在 H_2SO_4 浓度为 3 mol/L、液固比为 6 mL/g、酸浸温度为 100 °C、酸浸时间为 3 h 的最佳条件下, Fe^{3+} 和 Al^{3+} 的浸出率分别达到 64.01% 和 35.69%。李浩林等^[40]探讨了采用低温中和—加压酸浸工艺对煤矸石中铁和铝提取的最优工艺条件,氧化铁和氧化铝的浸出率分别高达 98.37% 和 95.77%,得到的提取液中 Fe 和 Al 的浓度分别为 57.95 g/L 和 62.20 g/L。

然而,不同地区煤矸石的含铁量相差较大,铁含量低至 1%,高至 17%,单独作为提铁资源,性价比较低,目前相关研究较多的是与其他废渣共同处置。

3.1.3 “三稀”金属提取

煤矸石中还含有一些重要的“三稀”战略金属

元素,如 Li、Ga、RE 元素等^[41-42]。其中, Li 元素主要以铝硅酸盐形式赋存于煤矸石之中, Ga 元素在煤矸石中分布较为均匀,而 RE 可能以独立的稀土矿物存在,如磷酸盐型和氟碳酸盐型稀土矿物,这些矿物可能嵌布于铝硅酸盐矿物中。这些元素的富集程度与煤矸石的粒径和密度密切相关。Li 和 Ga 元素主要分布在 +0.125 mm 粒级或密度分别约为 2.4 g/cm³ 和 2.2 g/cm³ 的组分中,富集倍数分别为 1.06~1.16 和 1.03~1.04;稀土元素则趋向于富集在 -0.075 mm 粒级中,富集倍数为 1.17。然而,由于煤矸石中 Li、Ga、RE 的平均含量分别仅为 437.43 μg/g、43.02 μg/g 和 97.13 μg/g^[43],直接回收这些元素的成本较高。因此,针对煤矸石中 Li 和 Ga 的赋存特性,研究者开展了预富集分选研究^[42-43]。Fang 等通过二次浮选工艺,使 Li 和 Ga 在分选产品中的富集倍数分别达到 1.02 和 1.21^[44]。张磊等人^[43]提出一种重选—焙烧预处理方法,使 Li 和 Ga 的含量分别从 437.43 μg/g 和 43.02 μg/g 提升至 557.01 μg/g 和 53.52 μg/g。利用 X 射线荧光传感器识别含量高于或等于阈值的物质或采用浮选等技术手段,实现了这些元素的有效富集,显著提升了其含量,为后续的高效回收与利用奠定了坚实基础。

Chen 等^[45]采用直接酸浸法处理准格尔煤矸石, Li 的浸出率仅为 5.76%;但经过焙烧预处理后, Li 的浸出率显著提高至 92.74%,表明焙烧—浸出法在煤矸石提取“三稀”金属方面具有良好的应用效果。张磊等人^[43]采用焙烧—盐酸浸出工艺处理煤矸石,在 400 °C 下焙烧 20 min 后,使用 2 mol/L 盐酸溶液于 60 °C 下浸出 4 h,使 Li、Ga 和 RE 的浸出率分别达到 94.32%、56.08% 和 72.86%。此外,对经过重选—焙烧预处理富集后的煤矸石进行酸浸^[43], Li 和 Ga 的浸出率分别为 92.45% 和 62.41%, Ga 的回收率有所提升。成俊伟等^[46]在煤矸石中添加 Na₂CO₃ 进行高温焙烧,随后使用 6 mol/L 的 HCl 溶液于 80 °C 下浸出 4 h, Li 的浸出率为 79%,浸出液中 Li 的质量浓度为 11.946 mg/L。邵爽等人^[47]采用 550 °C 焙烧活化煤矸石 30 min,再在 150 °C 下用 HNO₃ 溶液浸出 2 h, Al、Li 和 Ga 的浸出率分别为 95.2%、80.5% 和 56.4%。

然而,在浸出过程中, Fe³⁺ 和 Ti²⁺ 的水解可能导致多种元素发生共沉淀,从而降低微量金属的浸出效率^[44]。基于此,研究者们开展了煤矸石中含铁物质的分离,以减少 Fe 对后续浸出的干扰,并同时实现 Li 和 Ga 元素的富集。孙逢帅等^[48]采用高梯度磁选技术,在 1 T 的磁场强度下将含铁煤矸石中的黄铁矿分离,结果显示尾矿中的 Li 和 Ga 含量分别从 146.37 μg/g 和 25.04 μg/g 提高至 210.63 μg/g 和 31.88 μg/g,分别富集了 1.45 倍和 1.27 倍。Wang 等^[49]则采用 (NH₄)₂SO₄ 焙烧法,将煤矸石中的含铁物质转化为水溶性 Fe₂(SO₄)₃,漂洗去除后,含铁总量降至 0.08%。为了克

服酸浸法对煤矸石处理时酸耗大、设备腐蚀严重的问题,研究者们提出了以铵盐替代酸的铵盐焙烧法。铵盐因熔点较低,不仅减少了酸的使用,还能避免高温焙烧活化,具有环保和节能的优势。Qin 等^[50]采用铵盐进行循环焙烧再浸出,煤矸石中 Al、Li 和 Ga 的浸出率分别为 62.74%、86.56% 和 46.18%,同时抑制了 Pb 的浸出。Chen 等^[51]则对磨矿—热活化后的煤矸石采用 0.2 mol/L 的 (NH₄)₂SO₄ 溶液 (pH=4.0) 浸出, Li 的浸出率为 44.82%, Al 几乎不溶,实现了对锂的选择性浸出;当 pH 降至 1.0 时,锂的浸出率增至 84.76%。此外,单一焙烧剂的选择性浸出效果有限,因此有人进一步探索了复合铵盐焙烧工艺, Qin 等^[52]通过 400 °C 的低温联合焙烧—水浸法,以 NH₄Cl 和 (NH₄)₂SO₄ 复合焙烧处理煤矸石,显著提升了 Al 和 Li 的溶解度,其浸出率分别达到 56.35% 和 80.83%。

综上所述,煤矸石中含有 Li、Ga 和 RE 等“三稀”金属元素,这些元素多赋存于铝硅酸盐或稀土矿物中,其富集程度与煤矸石的粒径和密度密切相关,为分选和富集提供了基础。这些元素的提取主要通过焙烧—浸出法,具体包括焙烧—酸浸法和铵盐焙烧—浸出法。焙烧—酸浸法能显著提升 Li 和 Ga 的浸出率,工艺较为成熟,但酸耗大、设备腐蚀严重,同时产生的废酸难以处理,带来环保方面的挑战。相比之下,铵盐焙烧—浸出法以铵盐替代酸,由于铵盐熔点较低,有助于降低焙烧温度,从而节能并减少酸耗,同时在 Li 和 Al 的选择性浸出方面效果突出。此外,铵盐处理后还可进行回收,进一步体现了其环保和节能的优势。然而,单一铵盐的效果有限,而复合铵盐焙烧可显著提高 Al 和 Li 的浸出率,但仍需进一步优化工艺以实现稳定、高效的应用。

总体而言,这些技术的开发与应用将有助于提升煤矸石资源的综合利用价值,并减少对传统矿石资源的依赖。

3.2 材料制备

近年来,煤矸石因其丰富的矿物成分与独特的物理性能,在材料制备领域展现出了巨大潜力,特别是建筑材料与高值化材料的制备。在建筑材料方面,煤矸石可作为制备混凝土、砖块及水泥等的原料,不仅显著减少固废堆积带来的环境负担,还促进了资源的循环利用与可持续发展^[53-54],为煤矸石的有效减量与资源化利用提供了新途径^[55]。在高值化材料领域,煤矸石可用于制备多孔陶瓷和沸石分子筛等高性能新型材料,极大地提升了其经济价值。

3.2.1 建筑材料

(1) 混凝土骨料

混凝土是全球应用最为广泛的建筑材料之一,其

中骨料约占其体积的 70%。而煤矸石具有一定的硬度, 经破碎筛分后可用作粗骨料, 有效解决了粗骨料的供应问题^[56]。不同地区煤矸石粗骨料与天然粗骨料的基本性能对比如表 2 所示^[57]。结果显示, 煤矸石颗粒的压碎指标和针片状颗粒含量均符合规范 GB 14685—2011 中 II 类指标要求, 具备作为骨料的应用潜力。然而, 煤矸石的密度和强度相对较低, 主要归因于其多孔结构, 这也导致其吸水率较高^[58]。因此, 在高强度混凝土中的应用受到一定限制, 但在低强度混凝土中具有较好的适用性^[59]。当煤矸石粗骨料以一定比例部分取代天然粗骨料制备 C40 强度等级以下的混凝土时, 若取代率在 50% 以下, 不仅能使混凝土的结构更加密实, 而且还能在一定程度上提升其强度^[60]。随着替代率的进一步提升, 混凝土的强度呈现出逐渐降低的趋势; 当替代率达到 100% 时, 抗压强度约下降 15%~20%^[61], 但总体影响仍然保持在相对有限的范围内。此外, 通过对煤矸石进行适当的改性处理, 改性后的煤矸石粗骨料可提升混凝土的密实度、抗压强度和耐久性^[62-63]。Yang 等^[64]通过将煤矸石骨料煅烧 10 min, 水泥基材料的综合强度和抗弯强度分别提高了 69.2% 和 95.3%。Dong 等^[65]的研究表明, 煤矸石骨料的细度模量越小, 其活性指数越高; 细度模量从 3.4 降至 1.9 时, 砂浆的 3 d 抗压强度和抗折强度分别提高了 35% 和 65%, 并表现出明显的早强特性。曹梦媛等^[66]通过表面改性处理, 改性处理后的煤矸石骨料混凝土抗冻融循环次数从 150 次提升至 200 次, 强度损失显著减少, 幅度最高可达 51.72%, 相对动弹性模量提升 8.33%~22.92%, 耐久性明显改善。

这些研究都表明, 煤矸石作为混凝土骨料具有一定的可行性, 尤其在适当处理方法和配比条件下可有效应用于工程实践中。

(2) 砖

除了在混凝土骨料中的广泛应用外, 煤矸石在烧结砖的制备中也展现出良好优势。由于煤矸石中含有一定比例的 C, 在砖坯焙烧过程中, 这部分 C 燃烧会释放大热量。这种内燃特性能够为烧结砖的干燥和焙烧提供必要的热源。因此, 利用煤矸石制备烧结砖不仅实现了其资源化利用, 还大幅减少了对外部煤炭燃料的需求。刘灏等人^[67]在页岩砖原料中掺入

30% 煤矸石粉末, 制得的烧结页岩砖经泛霜和石灰爆裂耐久性试验后, 符合 GB 5101—2003 标准。Xu 等^[68]则创新性地以煤矸石为唯一原料烧结制备烧结砖, 在 1 200 ℃ 下烧结的砖块性能最佳, 吸水率低至 3.65%, 抗压强度高达 45.61 MPa。同时, 该砖块的放射性及浸出毒性均符合相关标准, 表明以煤矸石制备烧结砖对环境具有安全性。

尽管以煤矸石为单一原料的烧结砖已展现出优异性能, 但为进一步优化材料特性并实现多种固废的协同处理, 研究者们还探索了煤矸石与其他工业固废联合用于制砖的方法, 这些固废包括铁尾矿、粉煤灰、炉渣和污泥等。郝负洪等^[69]在煤矸石、铁尾矿和页岩的质量比为 7 : 8 : 5、温度 850 ℃ 下焙烧 7 h, 烧结砖的抗压强度最高提升 3 MPa, 而吸水率最大降低了 6 百分点。丁海萍等^[70]以煤矸石、粉煤灰和炉渣为混合原料制备了烧结透水砖, 表明随着煤矸石掺量的增加, 砖块的抗压强度有所提升, 能够有效替代天然黏土。金彪等人^[71]以 $m(\text{煤矸石}) : m(\text{污泥}) : m(\text{页岩}) = 1 : 4 : 5$ 为原料, 模压成型后的砖坯在 1 050 ℃ 下烧结 6 h, 制备得到的烧结砖强度可达到 MU15 等级。

(3) 水泥

煤矸石富含 Si、Al 和 Fe 元素, 其矿物成分(如高岭土和伊利石)与水泥原料的矿物成分相似, 能够满足水泥熟料的组成要求。此外, 经过煅烧活化后, 煤矸石具有较高的火山灰活性, 因此可以用于水泥制备中, 不仅有效提升水泥性能, 还能减少碳排放^[72]。煤矸石的掺入能够加速水泥熟料的水化进程, 且随着掺量的增加和其活性提高, 对水泥性能的改善愈加显著^[73]。在水化早期, 煤矸石主要通过物理“稀释”效应促进水泥熟料的反应; 而在水化的中后期, 活化后的煤矸石则通过其化学活性, 与体系中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应, 进一步促进水泥熟料的水化, 增强水泥的整体力学性能。

近年来, 由煅烧黏土、石灰石粉和熟料组成的水泥因其低碳环保特性, 已成为水泥研究领域的热点^[74]。经过热处理活化后的煤矸石, 其火山灰活性得到显著增强, 成为煅烧黏土的理想替代品^[75-76]。顾炳伟等^[77]对我国 14 种不同产地煤矸石的火山灰活性进行了研究, 发现其活性及最佳活化温度与地质年代及成岩作用密切相关。刘宇轩等^[78]通过掺入 20% 的煅烧煤矸石

表 2 不同地区煤矸石粗骨料与天然粗骨料的基本性能
Table 2 Basic properties of coal gangue coarse aggregate and natural coarse aggregate in different regions

粗骨料	颗粒尺寸/mm	堆积密度/(kg·m ⁻³)	表观密度/(kg·m ⁻³)	压碎指标/%	针片状颗粒含量/%
天然粗骨料	5.0~31.5	1 490	2 700	10	3
榆神矿区-N矿	5.0~31.5	1 200	2 250	18	3
榆神矿区-S矿	5.0~31.5	1 060	2 020	20	4
榆神矿区-Y矿	5.0~31.5	1 360	2 560	12	4
阜新清河门矿	5.0~31.5	1 075	2 497	—	—

制备复合水泥, 28 d 砂浆强度可达 46 MPa, 而当掺量增加至 30% 时, 强度下降约 8 MPa。陈杰等人^[79]的研究表明, 当水灰比为 0.35 时, 自制煤矸石基低碳 LC³-45 水泥的 28 d 抗压强度可达 53.5 MPa, 且表现出良好的抗氯离子渗透性能。此外, 活化煤矸石中的氧化铝与石灰石反应生成的碳铝酸盐, 有助于增加水化产物的体积, 提升水泥的抗化学侵蚀能力和耐久性。

相比于稀缺的天然黏土资源, 煤矸石储量丰富, 能够作为新型低碳水泥的理想原料, 既降低了原料成本, 也减少了工业废物的堆积, 从而推动建筑行业的绿色和可持续发展。

3.2.2 新型材料

煤矸石的多孔结构及其丰富的矿物成分为高值化材料的制备奠定了良好的基础。这些高值化材料主要包括多孔陶瓷、水泥基多孔材料以及沸石等。基于绿色环保和可持续发展的需求, 煤矸石在多孔材料制备中的研究愈发受到关注^[80]。

(1) 多孔陶瓷

煤矸石中 Al_2O_3 和 SiO_2 的高含量, 为生产高性能硅铝酸盐陶瓷提供了得天独厚的条件。所制备出的煤矸石基多孔陶瓷具有熔点高、密度相对较低、强度高、耐腐蚀等优点^[81]。通过对比不同制备方法下的产品性能(如表 3 所示), 我们发现制备工艺对多孔材料的孔隙率和力学性能有着显著影响^[82]。具体而言, 增孔法虽能赋予陶瓷较高的抗压强度, 但孔隙率相对受限; 而泡沫注凝法则能制备出孔径较大(50~300 μm)、孔隙率高达 75% 以上的陶瓷, 但抗压强度较低, 仅为 2.5 MPa; 此外, 简单喷雾法可成功制备多孔陶瓷微球^[83], 随着焙烧温度从 800℃ 升至 1 000℃, 物相由高岭石转变为莫来石, 这一转变对亚甲基蓝的吸附及去除效率产生了显著影响。因此, 选择合适的制备方法和调整工艺参数, 可有效调控煤矸石基多孔材料的性能, 从而有利于其在工程中的应用。

(2) 沸石

沸石作为一种典型的多孔材料, 凭借均匀的纳米级孔道结构、优异的比表面积以及出色的热稳定性, 广泛应用于吸附剂、离子交换剂及催化领域^[84]。煤矸石的化学成分及多孔结构特征, 为其成为制备沸石的

理想前驱体提供了可能。然而, 煤矸石中的杂质成分可能对硅、铝的反应活性产生不利影响^[85], 因此在沸石制备前, 需对煤矸石进行如煅烧、酸处理等预处理, 以净化其成分并提升反应活性。Deng 等人通过水热法^[86], 利用预处理后的煤矸石成功制备了 Fe-NaX 沸石, 在反应温度 110℃、NaOH 与预处理煤矸石质量比为 1.5、Si/Al 摩尔比为 2.0 的条件下, 所得沸石材料在 Pb 和 Cd 污染土壤的修复中表现出色, 取得了显著效果。

(3) 复合光催化剂

光催化剂在降解有机污染物的过程中, 由于颗粒较小、表面能高, 容易发生团聚, 导致光催化性能下降, 同时使用后的回收过程也较为困难, 甚至可能引发二次污染。为解决上述问题, 固载化技术被认为是一种有效方法。通常, 活性炭和碳纳米管因其发达的孔隙结构和较大的比表面积而被广泛用作光催化剂的载体。然而, 经过适当的改性处理, 煤矸石的物化特性与活性炭和碳纳米管类似, 表现出优异的吸附性能和成本优势, 使其成为一种新型、低廉且环保的光催化剂载体材料。高平强等^[87]采用水热法制备了煤矸石负载型二氧化钛(TiO_2 /煤矸石), 并用于处理含酚废水。研究表明, 当催化剂投加量为 2 g/L、反应时间为 60 min、反应温度为 20℃、苯酚质量浓度为 100 mg/L、初始 pH 值为 5.0 时, 苯酚的去除率达到 59%。此外, 唐双等人^[88]以煤矸石为载体制备了 BiVO_4 /煤矸石复合光催化剂, 在煤矸石负载量为 20%、初始 pH 值为 7.0、催化剂投加量为 1.5 g/L、目标污染物初始浓度为 10 mg/L 的条件下, 该复合光催化剂在 540 min 内对黄药的降解率高达 93%, 处理后的黄药废水达到了排放标准。这些研究表明, 煤矸石在适当改性后, 凭借其独特的孔隙结构、优良的吸附性能以及较低的成本, 成为光催化剂载体的理想选择, 不仅实现了废物的高值化利用, 还在污染物降解领域展现出广阔的应用前景。

3.2.3 小结

煤矸石因其丰富的矿物成分和物理特性, 在材料制备中展现出良好的应用前景。经过破碎和改性处理后, 煤矸石可作为低强度混凝土的骨料, 并已在小规模上替代天然骨料。制砖方面, 煤矸石与其他固废结合后制成的烧结砖, 具备良好的抗压和耐久性能, 吸水率低, 满足环保要求和节省能源, 并已在工业化生产中得到广泛应用。作为水泥原料, 煤矸石富含 Si 和 Al 等元素, 经过活化处理后具备较高的火山灰活性, 不仅能提升水泥的力学性能, 还可减少碳排放, 但对工艺和设备要求较高, 因此尚未实现大规模应用。在高值化材料方面, 煤矸石用于制备多孔陶瓷、沸石材料和光催化剂, 适用于过滤、催化和降解等领域, 但

表 3 不同方法制备的煤矸石基多孔陶瓷性能

Table 3 Properties of coal gangue based porous ceramics prepared by different methods

合成方法	产物	烧结温度 /℃	孔隙率 /%	抗压强度 /MPa
泡沫注凝法	莫来石	1 400~1 500	76.8~78.5	2.5~5.2
增孔法	莫来石	1 300~1 350	57.5~51.4	55.6~69.9
有机海绵浸渍法	堇青石	1 200	78.78	3.33
简单喷雾法	高岭石/莫来石	800~1 000	—	—

其杂质可能影响反应活性,目前仍处于研究和小范围应用阶段。总体而言,煤矸石在建筑材料领域已部分实现工业化,而高值化材料的开发仍需进一步研究和优化,以推动大规模应用。

3.3 燃烧利用

尽管煤矸石热值低于优质煤炭,但通过采用具备优异传热传质性能和燃料适应性的循环流化床(CFB)技术^[89],仍能实现其向电能的有效转化。此外,CFB发电技术凭借其超低的 NO_x 排放特性,也彰显了其作为低碳排放技术的独特优势。然而,在利用高含碳量煤矸石进行发电的过程中,存在的效率低下和环境污染问题不容忽视,这些问题已成为制约煤矸石进行燃烧处理时大规模消纳的关键因素^[90]。

在煤矸石发电领域,相关企业和学者始终致力于探索更为高效且环保的利用方式。针对煤矸石单独燃烧时存在的效率瓶颈,混合燃烧技术应运而生^[91-92]。该技术通过将煤矸石与煤进行混合,不仅能够有效挖掘煤矸石中的热能潜力,还能借助煤的掺混提升整体燃料的燃烧稳定性和效率。2024年贵州省六盘水市的大湾低热值煤电项目采用中煤、煤泥与煤矸石混合燃料,每年可消纳大量煤矸石,为煤矸石发电提供了有力支撑。然而,关于煤矸石理想共燃比以及CFB发电技术的优化研究仍显薄弱。针对这一现状,Xu等^[93]采用生命周期评价方法,研究结果表明,随着煤矸石在混合燃料中占比的增加,温室气体的排放量呈现上升趋势;当煤矸石和煤质掺量分别为34%和50%时,能源效率也达到了最高的35.5%,这一发现为优化煤矸石与煤的混合燃烧提供了科学依据。

此外,煤矸石与生物质共燃处置也是煤矸石高效清洁利用的一种可行替代方案^[94-96]。生物质具有低氮、低硫的特性,有助于降低共燃处置过程中大气污染物的排放。同时,生物质中的高挥发物与低灰分含量特性为其提供了稳定的燃烧性能,能够改善CFB的热性能。周宇等人^[94]的研究结果显示,在较高的燃烧温度及较大的生物质掺量条件下,生物质的引入能够显著提升煤矸石颗粒的燃烧性能,随着生物质添加量的逐步增加,煤矸石颗粒的内部着火温度逐渐降低,而燃尽时间则显著延长。另外,富氧燃烧煤矸石和生物质是实现煤矸石高效清洁利用和减少二氧化碳排放的一种技术。因此,Zhang等重点研究了氧浓度对富氧燃烧过程中煤矸石与生物质相互作用的影响^[95],其结果表明,生物质的加入可以提高煤矸石的富氧燃烧反应性,且氧浓度对煤矸石与生物质的相互作用具有显著影响,为富氧燃烧技术电厂中煤矸石与生物质共燃处置的应用提供有益参考。

煤矸石作为一种含碳固废,具备一定的燃烧潜力,尤其是高含碳煤矸石。然而,由于其热值相对较低,

单独燃烧时效率较低,并且伴随一定的污染问题,限制了煤矸石的大规模燃烧利用。尽管循环流化床技术可部分提升煤矸石的燃烧效率,但实现全面利用仍存在一定挑战。为此,混合燃烧技术应运而生,通过将煤矸石与煤混合,提高了整体燃烧稳定性和效率,现已在部分工业发电项目中得到应用。同时,煤矸石与生物质的共燃技术也因生物质的低硫和低氮特性,显著减少了污染物的排放。研究表明,适当的生物质掺混比例及优化的氧浓度条件可进一步提升燃烧性能和反应性,延长燃尽时间。这些技术为煤矸石的高效清洁利用提供了可行方案,但未来仍需进一步优化共燃比例和工艺参数,以提高能效与环保效益。

3.4 生态修复

3.4.1 地下充填

煤炭开采不仅导致煤矸石的大量堆积,还诱发地表沉降及水土流失等环境问题^[97-98]。堆积的煤矸石易自燃、酸化,并可能引发重金属渗漏^[99],污染土壤和水源,对矿区的生态平衡构成了严峻挑战。经过数十年的探索与实践,我国逐渐形成了多种煤矸石在生态修复中的应用技术,主要包括地下充填和土壤改良与生态恢复。其中,地下充填技术包括固体充填、膏体充填、注浆充填以及流态化充填等^[100-102]。这些技术不仅实现了煤矸石的低成本和大规模处理,还有效减轻了地表覆盖层沉降对矿区水资源造成的潜在危害。然而,随着煤炭开采向更深层推进,传统的充填技术在使用过程中逐渐显露出其局限性^[101]。

3.4.2 土壤改良

近年来煤矸石的土壤化利用及其作为土壤改良剂的研究逐渐增多。由于煤矸石的矿物成分与天然土壤相似,其改良潜力和生态修复效果在实践中得到了一定验证^[103],主要利用方式包括直接覆盖、与其他基质混配使用和改性处理后使用等。

在土壤改良中,煤矸石的直接覆盖是一种简便而有效的方式。煤矸石中富含氧化铝、二氧化硅和氧化铁等矿物成分,这些成分在改良土壤结构、提高土壤肥力方面具有潜力^[104-106]。例如,将煤矸石颗粒覆盖在农田或退化土壤表面,可以有效提高土壤疏松度,缓解土壤板结问题^[104],促进植物快速生长,使植株更加健壮,产量可提高约13%。此外,利用煤矸石修复东北黑土区的侵蚀沟^[105],复垦后的土壤在容重和酸性等方面均有所改善。因此,煤矸石直接覆盖不仅起到保湿和保温作用,还能改善土壤结构,从而提升作物的产量和质量。然而,单一使用煤矸石也存在一定局限性^[107]。由于其粒径较大、孔隙率低,水分虽易渗透但不易蒸发,且修复后的土壤也可能表现出肥力不足的

现象。因此,在实践中,煤矸石的直接覆盖效果并不稳定,仍需与其他改良方法配合使用,以优化土壤修复效果。

为克服煤矸石单独覆盖的不足,将煤矸石与其他基质混合使用成为一种新的改良策略。例如,以煤矸石与白云岩砂作为混合基质,黑麦草的地上部生物量和叶绿素含量均出现显著的增加,这种混合基质明显减少了煤矸石基质中重金属淋溶迁移对水环境质量的影响^[108]。范秋运等^[109]研究了煤矸石与粉煤灰混合基质对植物生长的影响,添加粉煤灰一方面降低煤矸石基质的密度和砂粒含量,增加基质的保水性,另一方面增加植株生物量和氮磷含量,从而促进植物的生长,建议添加量为 30%~50%。还可将煤矸石与黄土或壤土混合覆盖,可以有效缓解煤矸石堆积导致的酸化问题^[110],并减少土壤侵蚀^[111]、提升土壤的保水性和稳定性^[112]。此外,煤矸石具有容重较大,且含有一定营养成分的特性,可与有机物质混配,作为育苗基质。邵玉飞等^[113]使用煤矸石和草炭进行水稻育苗,根部生物量较大,有利于植株的生长,煤矸石可部分替代草炭作为基质。李娜等人^[114]采用玉米秸秆和煤矸石为原料替代泥炭,开展水稻育苗生长实验,在一定配比下,水稻壮苗指数最高,叶片叶绿素含量最大,水稻生长状况良好。

除此之外,煤矸石与微生物的混配也在土壤改良中取得了较好的效果^[115],其作用机制在于利用菌体代谢煤矸石中的养分,产生多糖等代谢产物。这些多糖一方面会附着在煤矸石表面,逐渐形成生物膜,另一方面则通过促进矿物分解,转化为作物需要的离子,成为土壤中的有效养分。如丛枝菌根真菌(AMF)等土壤微生物能够与煤矸石相互作用,为植物提供额外的氮、磷、钾等营养元素,增强植物对不良环境的适应能力^[116]。接种了菌根真菌的煤矸石基质可以促进植物对矿物养分的吸收,使植物根系生长更加旺盛,耐旱和抗病能力显著提高。此外,菌根真菌在煤矸石基质中的生长可以增加土壤的团粒结构,提升土壤的稳定性和肥力^[117]。因此,煤矸石和微生物联合用于生态修复,特别适用于土壤贫瘠、结构不良的矿区土壤。微生物联合修复作为微生物改性的一种增强策略,涵盖了多种微生物共同修复以及微生物与植物共同修复等方法^[118]。当多种微生物共同作用时,其种类的多样性能够产生丰富的代谢产物,促进代谢过程中的功能分工,减少完成特定代谢所需的能量,从而加速养分的积累和修复过程^[119]。这种方法不仅有助于弥补早期修复阶段因不利条件造成的微生物损失,还能增强单一微生物所带来的改性效果。通过微生物联合修复技术,修复效率得以提高,同时修复成本也得到了有效降低。

为进一步提升煤矸石在生态修复中的应用效果,

研究人员还尝试对煤矸石进行物理或化学改性处理,以便在土壤改良中更好地发挥其作用。例如,通过化学活化方法,可以将煤矸石中的腐殖酸等有效成分提取出来,用于制备土壤肥料^[120]。这些腐殖酸不仅能促进植物根系的生长,还能帮助作物抵抗干旱和养分缺乏。通过活化处理^[121],煤矸石能够转化为缓释肥料,为植物提供长期的营养供应。煤矸石还可以与氮、磷、钾等肥料成分结合使用^[122-123],制成复合肥料,进一步提升其肥效和土壤改良效果。这种改性煤矸石肥料在田间应用中显示出较好的增产效果。

此外,也可以利用煤矸石的多孔结构,与水泥、淀粉等黏结剂混合^[124],制备出具有良好保水性和透气性的多孔材料。它的应用能够改善土壤的物理结构,减少土壤流失,提高矿区植被的生长速度。煤矸石基多孔材料不仅在矿区修复中展示出理想效果,还可以替代部分天然土壤用于城市绿化和农业生产。由于其结构中含有丰富的矿物成分,煤矸石基多孔材料还具有良好的缓释特性,可以为植物提供长效的养分供应。

煤矸石在生态修复的应用中,需注意重金属元素可能带来的环境污染风险。在煤矸石的组成中,Pb、Cd、As、Hg 等重金属元素虽含量较低,但在修复过程中可能逐步释放到土壤和水体中,导致二次污染,甚至威胁人类健康。因此,其环境影响不容忽视。Zhang 等^[125]揭示了煤矸石充填体中重金属对采空区水资源的污染机理,并提出了相应的防治技术,包括煤矸石表面凝固、煤矸石粒度控制、底板注浆密封等措施。通过这些技术手段,可显著降低煤矸石中的重金属迁移风险,有效控制其潜在的环境危害。

3.4.3 小结

煤矸石在生态修复领域展现出应用潜力,如地下充填和土壤改良等。地下充填技术不仅能够有效消纳煤矸石,还能缓解地表沉陷带来的水土流失风险,目前已在国内部分矿区实现应用。然而,随着采矿深度的增加,传统充填技术在效率和适用性方面面临挑战。在土壤改良方面,煤矸石因富含与天然土壤相似的矿物成分,被用于直接覆盖、基质混配和微生物协同修复等多种方式,能有效改善土壤结构、增加肥力,并促进植物生长。这些技术在农业及矿区复垦上均展示出广阔的应用前景。然而,煤矸石中所含的重金属元素在修复过程中可能迁移至环境中,从而带来污染风险。因此,未来在实际应用时,需要加强重金属控制技术,以确保煤矸石生态修复的可持续性和安全性。

4 结论与展望

随着我国煤炭产业结构的不断调整和环保政策的日益严格,煤矸石的综合利用显得尤为重要。本文

综述了煤矸石在金属提取、材料制备、燃烧利用和生态修复等领域的应用,重点探讨了其丰富的成分组成和多孔结构等特性所发挥的关键作用。近年来,随着技术的进步和环保意识的增强,煤矸石的利用率逐年上升。这种综合利用不仅有效减少了煤矸石对环境的负面影响,也为煤炭行业的绿色转型提供了重要支持。

(1)在金属提取领域,煤矸石作为金属资源的潜在来源,能够提取 Al、Fe、Li、Ga 及稀土等金属元素,有助于缓解传统矿山的开采压力,推动资源的可持续利用。尽管现有提取技术和工艺已有一定进展,但仍需进一步优化。未来应聚焦多金属元素的协同处理技术,推动绿色、高效的同步浸出与回收工艺的发展。通过构建完善的金属回收体系,从而进一步提升煤矸石资源的综合利用效率,减少对传统矿石资源的依赖。

(2)在材料制备方面,煤矸石不仅可以制备传统建筑材料(如混凝土、砖和水泥等),实现煤矸石的大规模消纳,还可以制备多孔材料等高附加值新型材料,极大提高煤矸石的价值。目前,煤矸石在建筑材料领域的应用已有一定进展,但高值化应用仍需进一步的研究与技术优化,以推动其大规模应用。

(3)在燃烧利用方面,混合燃烧技术的应用充分挖掘了煤矸石的热能潜力,尤其是与生物质的共燃研究,展示了其在低碳发电中的可行性。在“双碳”战略背景下,这种共燃方式有助于降低温室气体排放,减少企业的碳足迹,并优化其碳排放指标。

(4)在生态修复方面,煤矸石通过地下充填和土壤修复技术实现了环境治理与资源的高效利用。地下充填技术有效减少了煤矸石的堆积,缓解了地表沉降和水土流失问题,但随着采矿深度增加,面临一定局限。煤矸石在土壤修复中通过直接覆盖、基质混配和微生物协同修复等,改善了土壤结构,提升了肥力,并促进了植物的生长。尽管其在矿区复垦和农业应用中展现出广泛的前景,但煤矸石中的重金属元素仍可能引发环境污染风险。因此,亟需加强对重金属的控制技术研发与应用,确保煤矸石在生态修复中的可持续性安全性。

综上所述,煤矸石的综合利用仍面临诸多挑战,在持续推进技术更新的基础上,还应探索多种利用方式的梯度结合,以实现煤矸石的全资源利用。此外,建立多方协同机制,促进政府、企业与科研机构之间的紧密合作,将有助于形成更加完善的煤矸石综合利用产业链。通过这些努力,煤矸石的资源化利用将推动经济、社会与环境的可持续发展。

参考文献:

- [1] 黄晟,王静宇,郭沛,等.碳中和目标下能源结构优化的近期策略与远期展望[J].化工进展,2022,41(11):5695-5708.
- [2] XU G Y, ZANG L M, SCHWARZ P, et al. Achieving China's carbon neutrality goal by economic growth rate adjustment and low-carbon energy structure[J]. Energy Policy, 2023, 183: 113717.
- [3] REN H B, WU Q, HE W G, et al. Research on regional low-carbon development path based on LEAP model: Taking the Lin-gang special area as an example[J]. Energy Reports, 2022, 8: 327-335.
- [4] 李雅迪.我国煤矸石综合利用现状与展望[J].煤炭经济研究,2024,44(4):127-133.
- LI Y D. Current situation and prospects of coal gangue's comprehensive utilization[J]. Coal Economic Research, 2024, 44(4): 127-133.
- [5] ZHENG Q W, ZHOU Y, LIU X, et al. Environmental hazards and comprehensive utilization of solid waste coal gangue[J]. Progress in Natural Science-Materials International, 2024, 34(2): 223-239.
- [6] XIE S R, PAN H, LEI W G, et al. Technology and engineering test of filling goaf with coal gangue slurry[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 20536.
- [7] 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 Z, XUE J, ZHU Z L, et al. Research progress on comprehensive utilization of coal gangue[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(6): 165-178.
- [8] 潘硕,胡雨晴,王海燕,等.煤矸石综合利用技术现状与标准体系研究[J].中国矿业,2024,33(7):89-98.
- PAN S, HU Y Q, WANG H Y, et al. Research on comprehensive utilization technology and standard system of coal gangue[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(7): 89-98.
- [9] 吴长亮.煤矸石协同多源固废多级利用制备功能性透水混凝土的试验研究[D].济南:山东大学,2023.
- WU C L. Experimental study on preparation of functional pervious concrete via multi-stage utilization of coal gangue together with multi-source solid wastes[D]. Ji'nan: Shandong University, 2023.
- [10] 邓友生,董晨辉,吴阿龙,等.我国煤矸石山综合治理现状及零碳治理探索[J].煤矿安全,2024,55(10):120-128.
- DENG Y S, DONG C H, WU A L, et al. Comprehensive treatment status and zero carbon treatment exploration of coal gangue hill in China[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(10): 120-128.
- [11] JIAO Y W, QIAO J Q, JIA R J, et al. The influence of carbon imperfections on the physicochemical characteristics of coal gangue aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2023, 409: 133965.
- [12] 崔昕茹,霍雪萍,周炳杰,等.我国煤矸石空间分布特征与分级分质利用路径[J/OL].环境科学,1-14[2024-10-28].<https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202401269>.
- CUI X R, HUO X P, ZHOU B J, et al. Spatial distribution characteristics and graded utilization path of coal gangue in China[J/OL]. Environmental Science, 1-14[2024-10-28]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202401269>.
- [13] 贾建慧,马宁,董阳,等.煤矸石综合利用研究进展[J].洁净煤技术,2024,30(S1):36-45.
- JIA J H, MA N, DONG Y, et al. Review on the comprehensive utilization of coal gangue[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(S1): 36-45.
- [14] 赵龙毅,翟慧兵,张建伟,等.山西煤矸石中铝元素矿物赋存形态及酸浸溶出规律[J/OL].煤炭科学技术,1-11[2024-10-28].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240513.0843.004.html>.

- ZHAO L Y, ZHAI H B, ZHANG J W, et al. Mineral occurrence and acid leaching characteristic of aluminum for coal gangue in Shanxi[J/OL]. *Coal Science and Technology*, 1–11[2024–10–28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240513.0843.004.html>.
- [15] 胡恬, 张琨. 陕西澄合矿区煤矸石绿化基质研究[J]. *西安科技大学学报*, 2022, 42(4): 709–715.
- HU T, ZHANG K. Research on greening substrates of coal gangue in Chenghe mining area of Shaanxi province[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2022, 42(4): 709–715.
- [16] 曾鹏, 谢海云, 晋艳玲, 等. 我国煤矸石的特性及其提取氧化铝研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2022, 42(6): 21–29.
- ZENG P, XIE H Y, JIN Y L, et al. A review on characteristics and alumina extraction of coal gangue in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(6): 21–29.
- [17] 祁星鑫, 王晓军, 黎艳, 等. 新疆主要煤区煤矸石的特征研究及其利用建议[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(7): 1197–1201.
- QI X X, WANG X J, LI Y, et al. Study on properties of the coal gangues from Xinjiang main coal mine regions and their utilization suggestions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(7): 1197–1201.
- [18] 柴德亮, 白建光, 海连富, 等. 宁东地区煤矸石特征研究[J]. *科技创新与应用*, 2023, 13(21): 105–107+112.
- CHAI D L, BAI J G, HAI L F, et al. Study on characteristics of coal gangue in Ningdong area[J]. *Technology Innovation and Application*, 2023, 13(21): 105–107+112.
- [19] 晏祥政, 李先海, 王贤晨, 等. 煤矸石粉掺和料对水泥胶砂试块性能影响研究[J]. *非金属矿*, 2023, 46(3): 1–5.
- YAN X Z, LI X H, WANG X C, et al. Study on the effect of coal gangue powder admixture on properties of cement mortar test block[J]. *Non-Metallic Mines*, 2023, 46(3): 1–5.
- [20] ZHANG Y L, 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.
- [21] 张磊, 陈航超, 潘金禾, 等. 煤系锂和稀土的赋存特征与富集提取研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2023, 43(6): 1–13.
- ZHANG L, CHEN H C, PAN J H, et al. Research progress on occurrence characteristics, enrichment and extraction of coal-based lithium and rare earth[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2023, 43(6): 1–13.
- [22] 康超, 乔金鹏, 杨胜超, 等. 煤矸石中有价关键金属活化提取研究进展[J]. *化工学报*, 2023, 74(7): 2783–2799.
- KANG C, QIAO J P, YANG S C, et al. Research progress on activation extraction of valuable metals in coal gangue[J]. *CIESC Journal*, 2023, 74(7): 2783–2799.
- [23] 赵利军. 非铝土矿氧化铝提取与中国的粉煤灰资源[J]. *神华科技*, 2017, 15(4): 88–92.
- ZHAO L J. Non-bauxite alumina extraction and fly ash resources in China[J]. *Energy Science and Technology*, 2017, 15(4): 88–92.
- [24] CHEN J L, LU X W. Synthesis and characterization of zeolites NaA and NaX from coal gangue[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2018, 20(1): 489–495.
- [25] XIAO J, LI F C, ZHONG Q F, et al. Separation of aluminum and silica from coal gangue by elevated temperature acid leaching for the preparation of alumina and SiC[J]. *Hydrometallurgy*, 2015, 155: 118–124.
- [26] ZHAO J C, YU T, ZHANG H, et al. Study on extraction valuable metal elements by co-roasting coal gangue with coal gasification coarse slag[J]. *Molecules*, 2024, 29(1): 130.
- [27] SANGITA S, NAY N, PANDA C R. Extraction of aluminium as aluminium sulphate from thermal power plant fly ashes[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(9): 2082–2089.
- [28] ZHANG Y H, ZHAO X S, SHANG B Y, et al. Study on mechanism and kinetics of iron removal by chlorination roasting of coal gangue[J]. *Metallurgical Research and Technology*, 2024, 121(2): 216.
- [29] GUO Y X, LV H B, YANG X, et al. $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ recovery from the acid leaching liquor of coal gangue by using concentrated hydrochloric inpouring[J]. *Separation and Purification Technology*, 2015, 151: 177–183.
- [30] LIU X M, ZHANG N, SUN H H, et al. Effect of multiplex thermal activation on microstructure of red mud-coal gangue[J]. *Rare Materials and Engineering*, 2013, 42: 538–542.
- [31] HU Y S, HAN X Y, SUN Z Z, et al. Study on the reactivity activation of coal gangue for efficient utilization[J]. *Materials*, 2023, 16(18): 6321.
- [32] LI L X, ZHANG Y M, ZHANG Y F, et al. The thermal activation process of coal gangue selected from Zhungeer in China[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2016, 126(3): 1559–1566.
- [33] LI X N, WANG H Y, ZHOU Q S, et al. Efficient separation of silica and alumina in simulated CFB slag by reduction roasting-alkaline leaching process[J]. *Waste Management*, 2019, 87: 798–804.
- [34] CAO Z, CAO Y D, DONG H J, et al. Effect of calcination condition on the microstructure and pozzolanic activity of calcined coal gangue[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, 146: 23–28.
- [35] GUO Y X, YAN K Z, CUI L, et al. Effect of Na_2CO_3 additive on the activation of coal gangue for alumina extraction[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2014, 131: 51–57.
- [36] 武丹宇, 庄故章, 刘梅, 等. 碳酸钠焙烧活化-硫酸浸出提取煤矸石中氧化铝的研究[J]. *矿产保护与利用*, 2023, 43(6): 27–32.
- WU D Y, ZHUANG G Z, LIU M, et al. Study on Al_2O_3 leaching by H_2SO_4 after Na_2CO_3 roasting activation of coal gangue[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2023, 43(6): 27–32.
- [37] YUAN S, HUANG C, BAI Z, et al. A novel utilization of high-Fe bauxite through co-roasting with coal gangue to separate iron and aluminum minerals[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(7): 2166–2178.
- [38] 王健璋, 王明华, 宫振宇, 等. 预加热-碳热还原-磁选法提取煤矸石中的铁[J]. *材料研究与应用*, 2024, 18(4): 668–673.
- WANG J Z, WANG M H, GONG Z Y, et al. Extraction of iron from coal gangue by preheating, carbon thermal reduction and magnetic separation[J]. *Materials Research and Application*, 2024, 18(4): 668–673.
- [39] 张义中, 车敏, 刘义青, 等. 热活化-酸浸法提取煤矸石中铝和铁的实验研究[J/OL]. *能源环境保护*, 1–10[2024–11–28]. <https://doi.org/10.20078/j.eep.20240201>.
- ZHANG Y Z, CHE M, LIU Y Q, et al. Response surface optimization for extracting aluminium and iron from coal gangue[J/OL]. *Energy Environmental Protection*, 1–10[2024–11–28]. <https://doi.org/10.20078/j.eep.20240201>.
- [40] 李浩林, 曾德恢, 郑光亚, 等. 低温中和-加压酸浸提取煤矸石中铝铁[J]. *化工进展*, 2021, 40(7): 4011–4020.
- LI H L, ZENG D H, ZHENG G Y, et al. Extraction of aluminum and iron from coal gangue by low temperature neutralization-pressure acid leaching[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(7): 4011–4020.

- [41] ZHANG P P, HAN Z, JIA J M, et al. Occurrence and distribution of gallium, scandium, and rare earth elements in coal gangue collected from Junggar Basin, China[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2019, 39(7): 389–402.
- [42] RUDNIK E. Coal and coal by-products as unconventional lithium sources: A review of occurrence modes and hydrometallurgical strategies for metal recovery[J]. *Minerals*, 2024, 14(8): 849.
- [43] 张磊. 煤系锂、镓和稀土的洗选分布规律及焙烧浸出研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- ZHANG L. Study on washing distribution laws and roasting leaching of coal-based lithium, gallium and rare earth elements[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [44] FANG D, XIA Y C, LI Y G, et al. Separation and recovery of valuable carbon components and Li/Ga metals in coal gangue by using a flotation flowsheet[J]. *ACS Omega*, 2024, 9(12): 14336–14342.
- [45] CHEN H C, ZHANG L, PAN J H, et. Study on modes of occurrence and enhanced leaching of critical metals (lithium, niobium, and rare earth elements) in coal gangue[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(6): 108818.
- [46] 成俊伟. 煤矸石铝锂溶出和提取研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- CHENG J W. Study on dissolution and extraction of aluminum and lithium from coal gangue[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [47] 邵爽. 煤矸石热活化与硝酸浸出铝镓锂的基础研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- SHAO S. Basic research on thermal activation and HNO₃ leaching of coal gangue to extract Al/Ga/Li[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [48] 孙逢帅, 代世琦, 王磊, 等. 基于煤矸石中锂、镓元素赋存状态的高梯度磁选预富集试验[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(1): 154–162.
- SUN F S, DAI S Q, WANG L, et al. Pre-enrichment experiment of high gradient magnetic separation based on lithium and gallium elements in coal gangue[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(1): 154–162.
- [49] WANG X L, WU J M, MA Q S, et al. Iron conversion and ammonium salt calcination whitening process and mechanism of pre-calcined coal gangue[J]. *Chemical Engineering Science*, 2024, 287: 119802.
- [50] QIN Q Z, GENG H H, DENG J S, et al. Al and other critical metals co-extraction from coal gangue through delamination pretreatment and recycling strategies[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 477: 147036.
- [51] CHEN H C, ZHANG L, PAN J H, et al. Study on modes of occurrence and selective leaching of lithium in coal gangue via grinding-thermal activation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 482: 148941.
- [52] QIN Q Z, DENG J S, GENG H H, et al. An exploratory study on strategic metal recovery of coal gangue and sustainable utilization potential of recovery residue[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 340: 130765.
- [53] ZHANG W G, ZHOU H, HU Y Y, et al. Influence of curing temperature on the performance of calcined coal gangue-limestone blended cements[J]. 2024, 17(8): 1721.
- [54] WU H, CHEN C W, SONG W M, et al. High-capacity utilization of coal gangue as supplementary cementitious material, geopolymer, and aggregate: A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 435: 136857.
- [55] 马也, 张博杰, 杨秋宁. 不同煤矸石粗骨料替代率下混凝土的低温力学性能研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2023, 44(1): 25–30.
- MA Y, ZHANG B J, YANG Q N. Study on the low-temperature mechanical properties of concrete under different coarse aggregate replacement ratios of coal gangue[J]. *Journal of Ningxia University(Natural Science Edition)*, 2023, 44(1): 25–30.
- [56] HAO Y, GUO X N, YAO X H, et al. Using Chinese coal gangue as an ecological aggregate and its modification: A review[J]. *Materials*, 2022, 15(13): 4495.
- [57] 刘瀚卿, 白国良, 朱可凡, 等. 煤矸石混凝土抗折强度试验研究[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(4): 346–352+377.
- LIU H Q, BAI G L, ZHU K F, et al. Experimental study on flexural strength of coal gangue concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(4): 346–352+377.
- [58] YU L L, XIA J W, XIA Z, et al. Study on the mechanical behavior and micro-mechanism of concrete with coal gangue fine and coarse aggregate[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 338: 127626.
- [59] ZHOU M, DOU Y W, ZHANG Y Z, et al. Effects of the variety and content of coal gangue coarse aggregate on the mechanical properties of concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 220: 386–395.
- [60] 李少伟, 周梅, 张莉敏. 自燃煤矸石粗骨料特性及其对混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 334–340+380.
- LI S W, ZHOU M, ZHANG L M. Properties of spontaneous combustion coal gangue coarse aggregate and its influence on concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(2): 334–340+380.
- [61] GAO S, ZHANG S M, GUO L H. Application of coal gangue as a coarse aggregate in green concrete production: A review[J]. *Materials*, 2021, 14(22): 6803.
- [62] 宋强, 杨玉鑫, 许世鹏, 等. 煤矸石混凝土性能及提升研究进展[J/OL]. 煤炭科学技术, 1–19[2024–10–29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20241008.1748.005.html>.
- SONG Q, YANG Y X, XU S P, et al. Research progress in the performance and enhancement of coal gangue concrete[J/OL]. *Coal Science and Technology*, 1–19[2024–10–29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20241008.1748.005.html>.
- [63] 阎杰, 单豆豆, 王啸天, 等. 活化煤矸石粉对煤矸石粗骨料混凝土性能的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2024, 50(1): 139–145.
- YAN J, SHAN D D, WANG X T, et al. Influence of activated coal gangue powder on performance of coal gangue coarse aggregate concrete[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2024, 50(1): 139–145.
- [64] YANG Q B, LV 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 (Materials Science Edition)*, 2013, 28(6): 1118–1121.
- [65] DONG Z C, XIA J W, FAN C, et al. Activity of calcined coal gangue fine aggregate and its effect on the mechanical behavior of cement mortar[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 100: 63–69.
- [66] 曹梦媛. 改性煤矸石骨料混凝土抗冻性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- CAO M Y. Research on frost resistance of modified coal gangue aggregate concrete[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.
- [67] 刘灏, 李青, 黄秉章, 等. 煤矸石烧结页岩砖材的耐久性研究[J]. 材料导报, 2019, 33(S2): 229–232.
- LIU H, LI Q, HUANG B Z, et al. Study on durability of sintered shale brick from coal gangue[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(S2): 229–232.
- [68] XU H L, SONG W J, CAO W B, et al. Utilization of coal gangue for

- the production of brick[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2017, 19: 1270–1278.
- [69] 郝负洪, 王颀辉, 李京, 等. 利用煤矸石、铁尾矿制备固废烧结砖[J/OL]. 矿产综合利用, 1–10[2024–11–02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20231113.1037.006.html>.
- HAO Y H, WANG Y H, LI J, et al. Preparation of solid waste sintered brick from coal gangue and iron tailings[J/OL]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 1–10[2024–11–02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20231113.1037.006.html>.
- [70] 丁海萍, 侯泽健, 张怀宇. 以褐煤粉煤灰和煤矸石为原料制备透水砖的工艺研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(6): 72–75.
- DING H P, HOU Z J, ZHANG H Y. Study on preparation of permeable brick from lignite fly ash and coal gangue[J]. *New Building Materials*, 2019, 46(6): 72–75.
- [71] 金彪, 赵亮, 汪潇, 等. 利用煤矸石、页岩、污泥制备烧结砖的研究[J]. 非金属矿, 2021, 44(5): 39–41.
- JIN B, ZHAO L, WANG X, et al. Preparation of sintered brick with sludge, shale and gangue[J]. *Non-Metallic Mines*, 2021, 44(5): 39–41.
- [72] WANG L, MI S Y, ZHANG J F, et al. Synergistic performance of microwave-activated coal gangue with limestone in low-carbon cement[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 96: 110622.
- [73] FENG S X, WANG P M, LIU X P. Effect of gangue on hydration process of Portland cement[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2010, 38(9): 1682–1687.
- [74] NIU X J, LI Q B, HU Y, et al. Properties of cement-based materials incorporating nano-clay and calcined nano-clay: A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 284: 122820.
- [75] GONG C C, LI D X, WANG X J, et al. Activity and structure of calcined coal gangue[J]. 2007, 22(4): 749–753.
- [76] ZHAO Y P, ZHANG Z Z, JI Y S, et al. Experimental research on improving activity of calcinated coal gangue via increasing calcium content[J]. *Materials*, 2023, 16(7): 2705.
- [77] 顾炳伟, 王培铭. 不同产地煤矸石特征及其火山灰活性研究[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(12): 113–116+74.
- GU B W, WANG P M. Study on different coal rejects features and volcanic ash activity from different areas[J]. *Coal Science and Technology*, 2009, 37(12): 113–116+74.
- [78] 刘宇轩. 偏高岭土基煅烧煤矸石复合水泥的性能及水化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
- LIU Y X. The performance and hydration of cement composites with thermally activated kaolinitic coal gangue[D]. Changsha: Hu'nan University, 2022.
- [79] 陈杰. 新型煤矸石基低碳 LC3 胶凝材料的制备与水化机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- CHEN J. Research on preparation and hydration mechanism of new pattern coal gangue based LC3 cementitious material[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [80] ZHAO X, ZHANG Z X, LI W X, et al. Basic principle, progress, and prospects of coal gangue ceramic proppants[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2023, 20(5): 2681–2699.
- [81] WANG X D, XU H Y, ZHANG F J, et al. Preparation of porous cordierite ceramic with acid-leached coal gangue[J]. *Journal of The Korean Ceramic Society*, 2020, 57(4): 447–453.
- [82] LI X Y, SHAO J H, ZHENG J Q, et al. Fabrication and application of porous materials made from coal gangue: A review[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2023, 20(4): 2099–2124.
- [83] YAN S, PAN Y M, WANG L, et al. Synthesis of low-cost porous ceramic microspheres from waste gangue for dye adsorption[J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2018, 7(1): 30–40.
- [84] ZHOU H, ZHANG M S, SUN S F, et al. Synthesis of coal gangue-based mesoporous X zeolite with soft template and its adsorption methylene blue[J]. *Science of Advanced Materials*, 2021, 13(11): 2157–2166.
- [85] 吴国天, 徐海燕, 刘丽, 等. 煤矸石中杂质含量对堇青石多孔陶瓷烧结与性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(3): 670–676.
- WU G T, XU H Y, LIU L, et al. Effect of impurities in coal gangue on the sintering and properties of cordierite porous ceramic[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(3): 670–676.
- [86] DENG S W, YU J, HUANGFU Z X, et al. Iron-enhanced X-type zeolite made by coal gangue for Pb/Cd-contaminated soil remediation[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2024, 24(5): 2078–2087.
- [87] 高平强, 魏建雄, 陈嘉, 等. TiO₂/改性煤矸石复合光催化材料的制备及其去除水体中苯酚[J]. 矿产综合利用, 2021(6): 73–80.
- GAO P Q, WEI J X, CHEN J, et al. Preparation of TiO₂/coal gangue composite photocatalyst and its application in phenol removal from water[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(6): 73–80.
- [88] 唐双, 张雪乔, 蒋莉萍, 等. 煤矸石/BiVO₄复合光催化剂的制备及其对黄药废水的降解[J]. 复合材料学报, 2023, 40(12): 6703–6717.
- TANG S, ZHANG X Q, JIANG L P, et al. Preparation of coal gangue/BiVO₄ composite photocatalyst and its degradation of xanthate wastewater[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(12): 6703–6717.
- [89] HUANG Z, DENG L, CHE D F, et al. Development and technical progress in large-scale circulating fluidized bed boiler in China[J]. *Frontiers in Energy*, 2020, 14(4): 699–714.
- [90] ZHAO L Z, DU Y F, ZENG Y S, et al. Sulfur conversion of mixed coal and gangue during combustion in a CFB boiler[J]. *Energies*, 2020, 13(3): 553.
- [91] PENG H, WANG B F, LI W X, et al. Combustion characteristics and NO emissions during co-combustion of coal gangue and coal slime in O₂/CO₂ atmospheres[J]. *Journal of Thermal Science*, 2023, 32(1): 457–467.
- [92] LI Y Q, REN X F, ZHANG Y B, et al. Study on the thermal reaction characteristics and kinetics of coal and coal gangue coexisting spontaneous combustion[J]. *Energy*, 2024, 288: 129781.
- [93] XU Y H, WU H J, DONG Z F, et al. Life cycle energy use efficiency and greenhouse gas emissions of circulating fluidized bed coal-fired plant with coal gangue and coal co-combustion[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, 26(8): 20049–20071.
- [94] 周宇, 彭文国, 马清旺, 等. 煤矸石颗粒掺混刺梨果渣共燃烧特性[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(S1): 334–341.
- ZHOU Y, PENG W G, MA Q W, et al. Study on the co-combustion characteristics of coal gangue particles with Rosa roxburghii Tratt pomace[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(S1): 334–341.
- [95] ZHANG Y Y, ZHAO J T, MA Z B, et al. Effect of oxygen concentration on oxy-fuel combustion characteristic and interactions of coal gangue and pine sawdust[J]. *Waste Management*, 2019, 87: 288–294.
- [96] 李昊, 刘海玉, 乔晓磊, 等. 生物质与煤矸石(煤系高岭土)共燃行为及固定碱金属特性研究[J]. 动力工程学报, 2024, 44(5): 703–709.
- LI H, LIU H Y, QIAO X L, et al. Study on co-combustion behaviour of biomass with gangue (coal kaolin) and retention characteristics of alkali metals[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*,

- 2024, 44(5): 703–709.
- [97] GUO Y M, ZHANG J X, LI M, et al. Preventing water inrush hazards in coal mines by coal gangue backfilling in gobs: Influences of the particle size and stress on seepage characteristics[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30: 104374–104387.
- [98] WANG C X, SHEN B T, CHEN J T, et al. Compression characteristics of filling gangue and simulation of mining with gangue backfilling: An experimental investigation[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2020, 20(6): 485–495.
- [99] 刘帆俞, 宋慧平, 吴海滨, 等. 煤矸石土壤化利用与土壤改良剂研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2023, 43(6): 14–26.
- LIU F Y, SONG H P, WU H B, et al. Research progress on the utilization of coal gangue for soil remediation and as soil amendment agents[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2023, 43(6): 14–26.
- [100] 朱磊, 古文哲, 袁超峰, 等. 煤矸石浆体充填技术应用与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(4): 93–104.
- ZHU L, GU W Z, YUAN C F, et al. Application and prospect of coal gangue slurry filling technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(4): 93–104.
- [101] LI L, HUANG Q X, ZUO X, et al. Study on the slurry diffusion law of fluidized filling gangue in the caving goaf of thick coal seam fully mechanized caving mining[J]. *Energies*, 2022, 15(21): 8164.
- [102] 刘亮平, 张凯, 杨彦生, 等. 神东矿区煤矸石无害化填埋注浆技术及应用[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(S1): 547–552.
- LIU L P, ZHANG K, YANG Y S, et al. Coal gangue harmless landfill grouting technology and application in Shendong mining area[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(S1): 547–552.
- [103] LIU X H, ZHANG J, LI Q, et al. Preparation of technosol based on coal gangue and its impact on plant growth in coal mining area[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 467: 142998.
- [104] 邢成江, 邢丽萍. 煤矸石覆盖农田好处多[J]. *山西农业*, 1994(9): 30.
- XING C J, XING L P. Covering farmland with coal gangue has many advantages[J]. *Shanxi Agriculture*, 1994(9): 30.
- [105] 王忠波, 张金博, 王斌, 等. 煤矸石填充对沟道导排水性能和土壤肥力及重金属污染的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(24): 289–297.
- WANG Z B, ZHANG J B, WANG B, et al. Effects of coal gangue filling on drainage performance, soil fertility and heavy metal pollution in erosion gully[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(24): 289–297.
- [106] 段永红, 赵景逵. 煤矸石山覆盖种植对植物根系的影响[J]. *煤矿环境保护*, 1999(1): 41–43.
- DUAN Y H, ZHAO J K. The influence of the covered planting on plant roots and reclamation measures on coal gob mountains[J]. *Energy Environmental Protection*, 1999(1): 41–43.
- [107] 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 L. Study on the ratio of soil improvement for lettuce planting with coal gangue as substrate[D]. Shenyang: Liaoning University, 2021.
- [108] 刘元生, 陈祖拥, 刘方, 等. 白云岩砂改良煤矸石基质对黑麦草生长及重金属淋溶影响[J]. *中国水土保持科学 (中英文)*, 2023, 21(5): 138–145.
- LIU Y S, CHEN Z Y, LIU F, et al. Effect of dolomite sand-improved coal gangue substrate on ryegrass growth and heavy metal leaching[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(5): 138–145.
- [109] 范秋运, 张超英, 耿玉清, 等. 添加粉煤灰对煤矸石基质性质和植物生长的影响[J]. *中国水土保持科学 (中英文)*, 2022, 20(5): 85–92.
- FAN Q Y, ZHANG C Y, GENG Y Q, et al. Effects of fly ash application on the properties of coal gangue matrix and plant growth[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(5): 85–92.
- [110] 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 Y. The study on fertilizer efficiency and passivation on heavy metals activated of coal gangue[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2015.
- [111] 王丽艳, 张成梁, 韩有志, 等. 煤矸石山不同植被恢复模式对土壤侵蚀和养分流失的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(2): 93–99+105.
- WANG L Y, ZHANG C L, HAN Y Z, et al. Effects of different vegetation restoration patterns in gangue pile on soil erosion and nutrient loss[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(2): 93–99+105.
- [112] 郭爱科. 煤矸石混合土壤水分入渗与蒸发特性试验及模拟研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
- GUO A K. Experimental and simulation study on water infiltration and evaporation characteristics of coal gangue mixed soil[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022.
- [113] 邵玉飞, 马建, 陈欣. 利用煤矸石制作水稻育苗基质的研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(6): 555–561.
- SHAO Y F, MA J, CHEN X. Rice seedling substrate produced by coal gangue[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(6): 555–561.
- [114] 李娜. 秸秆与煤矸石混配基质的育苗性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
- LI N. Study on the seedling performance of the mixture of straw and gangue[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.
- [115] 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 X L, ZHOU H X, GAO M, et al. Research progress of coal gangue fertilizer[J]. *China Coal*, 2021, 47(1): 103–109.
- [116] MOTESHAREZADEH B, AHMADIYAN E, ALIKHANI H A, et al. The use of coal gangue as a cultivation bed conditioner in forage maize inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2017, 48(11): 1266–1279.
- [117] GU T Y, MAO Y Y, CHEN C, et al. Diversity of arbuscular mycorrhiza fungi in rhizosphere soil and roots in vetiveriazanioides plantation chronosequence in coal gangue heaps[J]. *Symbiosis*, 2022, 86(1): 111–122.
- [118] BAID S, WANG Y W, YANG X, et al. Effects of long-term (10 years) remediation of Caragana on soil enzyme activities, heavy metals, microbial diversity and metabolic spectrum of coal gangue[J]. *Ecological Engineering*, 2022, 181: 106679.
- [119] LU Z J, WANG H S, WANG Z X, et al. Critical steps in the restoration of coal mine soils: Microbial-accelerated soil reconstruction[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 368: 122200.
- [120] 许旭旦. 黄腐酸 (FA) 研究的意义与成就[J]. *腐植酸*, 1996(1): 32–34.
- XU X D. Significance and achievements of fulvic acid (FA) research[J]. *Humic Acid*, 1996(1): 32–34.
- [121] 刘信平, 吴少尉, 张驰. 富硒煤矸石活化技术及煤矸石硒肥高效利用研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(8): 1526–1535.

- LIU X P, WU S W, ZHANG C. Study on activation technology of selenium-rich coal gangue and efficient utilization of selenium-enriched coal gangue fertilizer[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(8): 1526–1535.
- [122] FAN Y, JIA H Q, PINO V, et al. A Si-K-based amendment prepared by coal gangue and plant ash could improve the growth of maize plants in saline soils[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 24: 761–774.
- [123] LUO C, LI S H, REN P Y, et al. Enhancing the carbon content of coal gangue for composting through sludge amendment: A feasibility study[J]. *Environmental Pollution*, 2024, 348: 123439.
- [124] 苏迪. 煤矸石基人造土壤制备工艺及性能研究[D]. 太原: 山西大学, 2021.
- SU D. Study on preparation technology and properties of artificial soil based on coal gangue[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2021.
- [125] ZHANG Y, LIU Y Z, LIU J, et al. Control mechanism of the migration of heavy metal ions from gangue backfill bodies in mined-out areas[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10: 1090799.

Research and Progress of Comprehensive Utilization Technologies of China's Coal Gangue in the Context of Carbon Peaking and Carbon Neutrality

HE Zhanwei¹, HE Shuai¹, WANG Guishuai¹, LI Shihao¹, CHEN Guangyu¹, GAO Mangmang¹, LI Huibiao²

1. School of Materials and New Energy, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

2. Pengyang Xinzhuo Energy Technology Development Co., Ltd, Guyuan 756500, Ningxia, China

Abstract: In the context of carbon peaking and carbon neutrality, China is continuously promoting the upgrading of industrial and energy structures, advocating for green, environmentally friendly, and low-carbon development. The massive accumulation of coal gangue in our country has led to serious waste of resources and may trigger a series of environmental issues. The effective treatment and resource utilization of coal gangue have become urgent tasks for the coal industry. This paper systematically reviews the research progress of coal gangue in the fields of metal extraction, material preparation, combustion utilization, and ecological restoration. Coal gangue can recover metal elements such as aluminum, iron, and the "three rare" elements, but the recovery process is prone to produce a large amount of waste acid and slag, posing potential environmental pollution risks. In addition, coal gangue can not only serve as traditional building materials such as concrete aggregate, brick, and cement raw materials but can also be used to prepare high-value-added new materials such as porous ceramics and zeolites. The application of co-combustion technology helps to improve the thermal energy utilization efficiency of coal gangue and reduce greenhouse gas emissions. As a soil conditioner, coal gangue shows promising prospects in ecological restoration, but attention should be paid to the risk of secondary pollution caused by heavy metal ions. Based on the current problems and challenges in the treatment of coal gangue, this review systematically explores the path of future high-quality development of coal gangue, and proposes the use of a variety of utilization methods combined with the strategy to achieve the resourceful utilization of coal gangue, which in turn promotes the coordinated development of the economy, environment and social benefits.

Keywords: coal gangue; comprehensive utilization; metal extraction; material preparation; combustion utilization; ecological restoration

引用格式: 何占伟, 何帅, 王贵帅, 李世豪, 陈广玉, 高忙忙, 李会标. “双碳”战略下我国煤矸石的综合利用技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(6): 1–14.

HE Zhanwei, HE Shuai, WANG Guishuai, LI Shihao, CHEN Guangyu, GAO Mangmang, LI Huibiao. Research and progress of comprehensive utilization technologies of china's coal gangue in the context of carbon peaking and carbon neutrality[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2024, 44(6): 1–14.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn