

煤电一体化固废综合利用项目处置技术研究

白波

大唐陕西府谷煤电有限责任公司 陕西榆林 719405

摘要: 煤电一体化是煤炭开采、洗选加工与燃煤发电紧密结合的产业模式,其核心是通过产业链协同提升能源利用效率。但该模式会集中产生煤矸石、粉煤灰、脱硫石膏等多种固体废弃物(以下简称“固废”),若处置不当不仅占用土地资源,还可能引发土壤、水体和大气污染。依据国家发展改革委等十部委于2021年3月18日联合下发发改环资〔2021〕381号《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》已明确要求推进大宗固废综合利用绿色发展。因此开展固废综合利用处置技术研究,既是实现“减污降碳”的关键路径,也是推动煤电行业绿色转型、构建循环经济的重要支撑。

关键词: 煤电一体化;固废综合利用;项目处置技术;研究

一、煤电一体化固废的种类与特性

煤电一体化项目的固废产生贯穿煤炭开采、洗选到电力生产的全流程,不同固废的成分和特性差异显著,决定了其处置技术的多样性。

1. 煤矸石

产生环节:煤炭开采(井工开采的顶底板岩石、煤层中的夹矸)和洗选加工(分选后排出的低热值矸石);主要成分:以 SiO_2 (40%–60%)、 Al_2O_3 (15%–30%)为主,含少量 Fe_2O_3 、 CaO 及未燃尽碳(热值通常为800–1500 kcal/kg);特性:硬度高、透水性差,长期堆积易发生自燃(释放 SO_2 、 CO 等有害气体),且矸石淋溶水可能含重金属离子。

2. 粉煤灰

产生环节:燃煤电厂煤粉在锅炉中燃烧后,从烟气中收集的细灰(包括电除尘灰、袋式除尘灰);主要成分:取决于煤种和燃烧条件,以 SiO_2 (40%–60%)、 Al_2O_3 (20%–30%)、 Fe_2O_3 (5%–15%)为主;按钙含量可分为低钙灰($\text{CaO}<5\%$)和高钙灰($\text{CaO}>10\%$);特性:粒度细(通常1–100 μm)、比表面积大,具有潜在活性(可与水或碱反应生成胶凝物质),但部分粉煤灰含重金属(如 Hg 、 Pb)或未燃尽碳(影响利用性能)。

3. 脱硫石膏

产生环节:燃煤电厂烟气脱硫(主流为石灰石–石膏法)过程中生成的副产物;主要成分:以二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)为主,纯度可达90%以上,但可能含少量杂质(如氯离子、飞灰、重金属);特性:呈粉末状,易吸湿结块,具有胶凝性(煅烧后可转化为半水石膏或

无水石膏,用于建材生产)。

4. 其他固废

还包括电厂废水处理产生的污泥(含重金属、有机物)、锅炉底渣(炉渣,可视为粗颗粒粉煤灰)等,产量相对较少,但处置需满足环保要求。

二、典型固废处置技术及应用

针对煤电一体化固废的特性,目前已形成“减量化、资源化、无害化”为主导的处置技术体系,核心是通过“燃料化、建材化、土地利用、高值化提取”等路径实现资源循环。

(一) 煤矸石处置技术

煤矸石是产量最大的固废(约占煤电一体化固废总量的40%–50%),其处置技术需兼顾“消纳量”和“经济性”。煤矸石含一定碳量(5%–20%),可作为低热值燃料回收能量。

1. 循环流化床燃烧

采用循环流化床锅炉(CFB)燃烧煤矸石(热值需 ≥ 1200 kcal/kg),适用于规模较小的自备电厂或供热站,同时可协同处理部分污泥(污泥中的有机物补充热值)。优势是燃烧效率高(可达85%以上),且炉内可脱硫(添加石灰石),减少污染物排放;缺点是需预处理(破碎至粒径 $\leq 10\text{mm}$),且灰渣需二次处置。与煤混烧:将低硫煤矸石(硫分 $<1.5\%$)与原煤按1:5–1:10比例混合,送入煤粉炉燃烧,适用于大型电厂,但需控制掺混比例(避免影响燃烧稳定性)。

2. 建材化利用

利用其硅铝成分制备建筑材料,消纳量大且附加值

较高：制烧结砖：煤矸石（占原料60%–80%）与黏土、页岩混合，经成型、烧结（1000–1100℃）制成承重砖或非承重砖，砖体强度可达MU10以上。优势是无需额外燃料（煤矸石自身热值提供烧结热量），成本低；需注意控制烧结温度（避免砖体开裂）。水泥混合材：将煤矸石破碎后煅烧（600–800℃）活化，作为水泥混合材（掺量10%–20%），替代部分熟料，降低水泥生产成本。但需控制活性（通过抗压强度比检测，需 $\geq 70\%$ ）。

3. 土地利用与生态修复

采矿区填充：将煤矸石破碎至粒径 $\leq 50\text{mm}$ 后，用于填充煤矿采空区或塌陷区，减少地表沉降。填充后需压实（压实度 $\geq 90\%$ ），并覆盖土壤层（厚度 $\geq 50\text{cm}$ ）用于植被恢复。复垦造地：对堆积的矸石山进行平整、覆土（土壤厚度 $\geq 30\text{cm}$ ），种植耐贫瘠植物（如沙棘、紫花苜蓿），适用于矿区生态修复。需提前检测矸石淋溶水的重金属含量（如Pb、Cr需 $\leq 0.1\text{mg/L}$ ），避免污染土壤。高值化提取：针对高铝煤矸石（ Al_2O_3 含量 $\geq 30\%$ ），可通过酸法/碱法提取氧化铝：碱法（拜耳法改良）：煤矸石煅烧（800–900℃）脱除结晶水后，与NaOH溶液反应（200–250℃），溶出铝酸钠，再结晶析出 Al_2O_3 。优势是工艺成熟，适用于高铝低硅矸石；缺点是能耗高（煅烧+高温反应），且硅渣需二次处理。

（二）粉煤灰处置技术

粉煤灰是煤电一体化中利用最成熟的固废之一，其利用技术已形成“低端量大化+高端高附加值”的格局。

1. 建材领域（主流方向）

（1）混凝土掺合料：低钙粉煤灰（ $\text{CaO} < 5\%$ ）作为混凝土活性掺合料（掺量20%–40%），可改善混凝土和易性、降低水化热（减少裂缝），同时替代水泥熟料（1吨粉煤灰可替代0.8吨熟料）。需控制细度（ $45\ \mu\text{m}$ 筛余 $\leq 15\%$ ）和烧失量（ $\leq 5\%$ ），避免影响强度。

（2）蒸压加气混凝土：粉煤灰（占原料70%–80%）与水泥、石灰、铝粉混合，经蒸压养护（180–200℃）生成轻质砌块（容重 $\leq 600\text{kg/m}^3$ ），适用于非承重墙体。优势是原料成本低，且产品保温性能优异；需注意铝粉发泡效率（受粉煤灰活性影响）。

2. 环保与生态修复

（1）废水处理吸附剂：粉煤灰经改性（如酸浸、微波活化）后，其多孔结构可吸附废水中的重金属（ Pb^{2+} 、 Cr^{6+} ）、有机物（染料、酚类），吸附容量可达50–100mg/g，适用于煤矿矿井水或电厂废水预处理。

（2）土壤改良剂：粉煤灰中的钙、硅元素可调节酸

性土壤pH值（提升0.5–1.0个单位），同时补充植物所需的微量元素（如铁、镁），适用于矿区复垦土壤改良（掺量 $\leq 5\%$ ，避免重金属超标）。

3. 高值化提取

提取空心微珠：粉煤灰中的空心微珠（占比5%–15%）具有轻质、耐高温特性，可通过风选或浮选分离，用于制备保温材料、涂料添加剂（单价可达2000–5000元/吨）。

（三）脱硫石膏处置技术

脱硫石膏纯度高（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \geq 90\%$ ），成分与天然石膏接近，是优质的石膏资源替代物，建材化利用是现阶段核心路径。

1. 水泥缓凝剂

脱硫石膏经干燥（含水率 $\leq 5\%$ ）后直接替代天然石膏（掺量3%–5%），调节水泥凝结时间（延长至3–6小时）。需控制氯离子含量（ $\leq 0.06\%$ ），避免腐蚀钢筋。

2. 纸面石膏板

脱硫石膏煅烧（150–180℃）生成半水石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ），与水混合制成石膏浆，铺覆于护面纸间成型，适用于室内隔墙。优势是原料成本仅为天然石膏的60%–70%，且产品强度（抗折强度 $\geq 2.5\text{MPa}$ ）达标。

3. 农业与生态利用

盐碱地改良方面，脱硫石膏中的 Ca^{2+} 可置换盐碱地中的 Na^+ （降低土壤碱化度），同时补充硫元素（提升作物产量），每亩施用量2–5吨，适用于西北干旱盐碱区；土壤修复方面对重金属污染土壤（如 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} ），脱硫石膏可通过离子交换降低重金属生物有效性（降低浸出率30%–50%）；化工产品制备硫酸铵生产方面，脱硫石膏与 NH_3 、 CO_2 反应生成 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ （肥料）和 CaCO_3 （可回用至脱硫系统），实现“石膏–肥料–脱硫剂”闭环，适用于有化肥需求的农业产区。

（四）其他固废处置技术

1. 电厂污泥

经板框压滤脱水（含水率 $\leq 60\%$ ）后，与煤矸石、煤粉混合（掺量 $\leq 10\%$ ）送入循环流化床燃烧（有机物分解，重金属固化于灰渣）；或采用水泥固化（掺量20%–30%）后安全填埋（浸出毒性需符合《危险废物填埋污染控制标准》）。

2. 锅炉底渣

作为粗骨料用于路基填充（替代碎石），或破碎后与粉煤灰混合制砖（提升砖体强度）。

三、现有技术的挑战与瓶颈

尽管煤电一体化固废利用技术已取得显著进展，但在实际应用中仍面临多重限制：

1. 成分波动影响稳定性

固废成分受煤种、燃烧工况、脱硫工艺影响显著（如粉煤灰CaO含量可能波动5%–20%），导致下游产品质量不稳定（如混凝土强度偏差），需频繁调整工艺参数（增加成本）。

2. 经济性制约规模化

高值化技术（如粉煤灰提取微珠、脱硫石膏制高端石膏）设备投资大（单条生产线投资超千万元），且市场需求有限；而低端利用（如填埋、简单堆存）虽成本低，但不符合环保要求。

3. 区域供需匹配失衡

煤电一体化项目多位于煤炭主产区（如晋陕蒙），而建材需求集中在东部沿海，固废运输成本（100公里运费约20–30元/吨）可能抵消利用收益，导致“产地过剩、销地短缺”。

四、技术创新方向与发展趋势

未来煤电一体化固废综合利用需以“协同化、高值化、低碳化”为核心，推动技术突破与产业链整合。

1. 多固废协同利用技术

利用煤矸石（骨料）、粉煤灰（活性掺合料）、脱硫石膏（胶凝材料）的成分互补性，开发“协同制备新型墙体材料”技术：如三者按3:5:2比例混合，经蒸压养护制成轻质复合墙板（抗压强度 $\geq 5\text{MPa}$ ，导热系数 $\leq 0.15\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ），固废综合利用率可达90%以上，且成本较传统材料降低15%–20%。

2. 智能化与精准调控

引入在线检测技术（如X射线荧光光谱仪）实时监测固废成分（精度 $\pm 0.5\%$ ），结合AI算法动态调整工艺参数（如混凝土掺合料配比、石膏煅烧温度），确保产品质量稳定性（偏差率 $\leq 3\%$ ）。

结束语

煤电一体化固废综合利用对地区的经济发展能产生多维度的积极影响，通过政策驱动、技术突破、产业链整合，将工业固废转化为经济增长新动能。一是直接创造经济价值。例如“煤电固废—环保建材”，转化为高附加值建材；用于煤矿巷道充填、水泥掺合料、混凝土

骨料，既解决煤矿采空区治理问题，又避免了灰场占地和扬尘污染，实现“煤电—煤矿”固废互济；生态修复联动，利用粉煤灰改良盐碱地，实现固废消纳与生态修复双赢。二是企业成本大幅降低，固废资源化替代传统填埋和外运，显著节约企业运营成本。三是就业与产业集群效应凸显，就业岗位持续增加。固废综合利用产业直接创造就业机会，产业集群加速形成，推动产业集群发展。依托煤电企业，形成“煤电—固废—建材”产业链闭环，提升区域经济协同效应。四是产业链延伸与跨行业协同，固废资源化链条完善。煤电固废通过技术转化形成多元化产品。跨行业资源互济，煤电企业与煤矿、化工企业建立固废互供网络。政策驱动与投资促进，政策红利释放，技术创新与投资联动，政策引导企业加大技术研发投入，提升区域综合利用率。

环境效益反哺经济发展，生态修复与经济收益双赢。固废综合利用与生态修复结合，创造额外经济价值。榆能横山项目通过技术创新减少污染，提升区域环保形象，吸引绿色投资；神木恒稳项目采用“零污染零排放”工艺，生产高强轻骨料用于建筑工程，同时修复矿区生态环境。区域形象提升与招商引资，例如榆林市通过固废综合利用示范项目，打造绿色能源基地品牌。康博环保项目作为区域固废处理枢纽，吸引周边企业固废调剂，提升区域整体资源利用效率；赵石畔煤电项目通过跨区域协同利用，将固废消纳与盐碱地改良结合，实现生态与经济效益联动。

参考文献

- [1] 蔡瑞春, 柳俊, 聂新辉. 我国煤炭清洁高效利用发展路径研究[J]. 煤炭经济研究, 2024, 44(12): 100–105.
- [2] 彭广民, 陈利永, 郭瑞来. 基于“循环经济+源网荷储一体化”的碳达峰碳中和创新商业模式[C]// 中国企业改革与发展研究会, 中国企业改革50人论坛. 中国企业改革发展优秀成果2023(第七届)下卷. 华润电力(贺州)有限公司, 2024: 5–11.
- [3] 刘维福, 王智欣, 田建林. 基于循环利用视角的大型煤矿煤电一体化模式研究[J]. 煤炭经济研究, 2023, 43(12): 56–60.
- [4] 周国鹏, 赵春阳, 康俊杰, 等. 面向源网荷储一体化的能源服务典型发展模式[J]. 广东电力, 2022, 35(07): 23–31.