

# 工业固废资源化与碳封存协同技术

钟元媛

四川川环源科技有限公司

DOI:10.12238/eep.v8i4.2652

**[摘要]** 工业固废资源化利用与碳封存技术的协同发展为解决环境污染和气候变化提供了创新路径。通过对钢渣、粉煤灰、赤泥等典型工业固废的矿物组成分析,发现其含有30–50%的硅酸盐和10–25%的碱性氧化物,具备显著的CO<sub>2</sub>矿化封存潜力。协同技术将固废预处理活化,碳化反应与产物分离相结合,在60–80℃条件下实现固废资源化利用率80%以上,CO<sub>2</sub>固定效率超过70%。示范工程应用表明,该技术可产生经济价值300–500元/吨固废,碳固定成本降至50–80元/吨CO<sub>2</sub>,综合减排效果达0.3–0.5吨CO<sub>2</sub>当量/吨固废。协同技术为传统工业绿色转型和碳中和目标实现提供了技术支撑。

**[关键词]** 工业固废; 资源化利用; 碳封存; 矿化固定; 协同技术

中图分类号: F287.2 文献标识码: A

Synergistic technology for industrial solid waste resource utilization and carbon sequestration

Yuanyuan Zhong

Sichuan Chuanyuan Technology Co., LTD

**[Abstract]** The coordinated development of industrial solid waste resource utilization and carbon sequestration technologies provides an innovative path for addressing environmental pollution and climate change. Through the analysis of the mineral composition of typical industrial solid wastes such as steel slag, fly ash and red mud, it was found that they contain 30–50% silicates and 10–25% basic oxides, and have significant potential for CO<sub>2</sub> mineralization and storage. The collaborative technology combines the pre-treatment activation of solid waste, carbonization reaction and product separation, achieving a resource utilization rate of over 80% for solid waste and a CO<sub>2</sub> fixation efficiency exceeding 70% under conditions of 60–80℃. The demonstration project application shows that this technology can generate solid waste with an economic value of 300–500 yuan per ton, reduce the carbon fixed cost to 50–80 yuan per ton of CO<sub>2</sub>, and achieve a comprehensive emission reduction effect of 0.3–0.5 tons of CO<sub>2</sub> equivalent per ton of solid waste. Collaborative technologies provide technical support for the green transformation of traditional industries and the realization of carbon neutrality goals.

**[Key words]** Industrial solid waste Resource utilization Carbon sequestration Mineralization fixation Collaborative technology

我国工业固废年产生量超过35亿吨,累计堆存量达600亿吨,对生态环境造成严重压力。同时,碳减排任务艰巨,需要创新技术实现碳中和目标,传统固废处理主要依赖填埋,资源化利用率仅为55%,而单纯碳封存技术成本高达100–200元/吨CO<sub>2</sub>,经济可行性差。工业固废资源化与碳封存协同技术基于“以废治废”理念,利用固废中硅酸盐、氧化钙等活性组分与CO<sub>2</sub>发生矿化反应,既实现固废高值化利用,又达到稳定碳固定效果。该技术将环境负担转化为资源优势,形成协同增效,为构建循环经济体系和应对气候变化提供了重要技术途径。

## 1 工业固废资源化与碳封存协同技术原理

### 1.1 协同技术的理论基础与必要性

当前我国工业固废年产生量超过35亿吨,其中钢渣、粉煤灰、赤泥等大宗固废累计堆存量已达600亿吨,不仅占用土地资源约200万亩,还对周边土壤和地下水造成严重污染,传统的填埋处置方式资源化利用率仅为55%,而单纯的碳封存技术成本高达100–200元/吨CO<sub>2</sub>,经济可行性差。工业固废资源化与碳封存协同技术基于“变废为宝,以废治废”的循环经济理念,通过将固废中的硅酸盐、氧化钙等碱性矿物与CO<sub>2</sub>进行矿化反应,实现固废处理与碳减排的双重目标。该协同技术不仅能将碳封存成本降低至50–80元/吨CO<sub>2</sub>,还能产生具有经济价值的建材产品,形成“1+1>2”的协同增效,为解决环境污染与气候变化问题提供了创新路径。

## 1.2 典型工业固废的协同潜力分析

钢渣含有30–50%的硅酸二钙，硅酸三钙和10–25%的游离氧化钙，理论碳封存容量可达200–350kgCO<sub>2</sub>/t。粉煤灰中硅铝酸盐含量达60–80%，虽然活性相对较低，但经预处理活化后碳封存潜力可达80–150kgCO<sub>2</sub>/t，赤泥富含氧化钙，氧化镁等碱性组分，总含量可达15–25%，碳封存容量约为150–250kgCO<sub>2</sub>/t，这些固废的共同特点是含有大量能够与CO<sub>2</sub>发生化学反应的碱性矿物，且反应产物碳酸钙，碳酸镁等具有良好的胶凝性能。不同固废的活性指数差异明显，钢渣活性指数可达85–95%，粉煤灰为60–75%，赤泥为70–80%，通过对不同固废进行筛选和配比优化，可构建最佳的协同体系，据估算，仅利用我国年产钢渣1.2亿吨和粉煤灰6亿吨，就可实现CO<sub>2</sub>封存量约0.8–1.5亿吨，相当于减少标准煤燃烧3000–5700万吨。

## 1.3 固废-CO<sub>2</sub>协同反应机理

固废-CO<sub>2</sub>协同反应是一个复杂的多相反应过程，主要包括CO<sub>2</sub>溶解，矿物溶解，离子传输和碳酸盐沉淀四个阶段。首先，CO<sub>2</sub>溶于水形成碳酸，电离产生H<sup>+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>离子，溶液pH降至3–5，随后，酸性环境促使固废中的硅酸钙等矿物发生溶解，释放Ca<sup>2+</sup>，Mg<sup>2+</sup>等阳离子，反应温度通常控制在50–90℃，当溶液中Ca<sup>2+</sup>浓度达到过饱和状态时，开始沉淀形成CaCO<sub>3</sub>，同时消耗大量CO<sub>2</sub>，整个反应过程遵循溶解-沉淀机制，反应速率受温度，压力，pH值和颗粒粒径等因素控制<sup>[1]</sup>。在最优条件下，钢渣的碳化转化率可达70–85%，反应时间2–6小时，协同反应不仅实现了CO<sub>2</sub>的矿化固定，还改善了原料的胶凝活性，形成的碳化产物抗压强度可达20–40MPa，满足建材应用要求。

## 2 协同技术工艺体系与关键技术

### 2.1 协同反应工艺设计

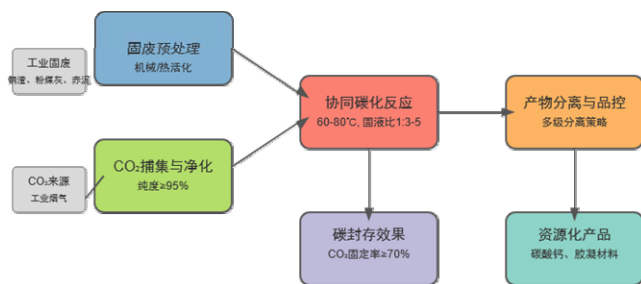


图1 工业固废资源化与碳封存协同技术流程

协同反应工艺设计是实现工业固废资源化与碳封存高效结合的核心环节。工艺流程主要包括：(1) 固废预处理：将钢渣，粉煤灰等原料破碎至0.1–0.5mm，提高比表面积至2000–4000m<sup>2</sup>/kg，通过机械活化或热活化增强反应活性；(2) CO<sub>2</sub>捕集与净化：从工业烟气中分离提纯CO<sub>2</sub>，纯度达到95%以上，压力控制在0.5–2.0MPa；(3) 协同碳化反应：在搅拌反应器中进行固-液-气三相反应，固液比1:3–5，反应温度60–80℃，CO<sub>2</sub>流量50–100L/min。为提高反应均匀性，反应器采用多层桨叶搅拌系统，搅拌功率密度控制在2–5kW/m<sup>3</sup>，反应时间2–6小时，pH值维持在8–10范围内，确保碳化产物结晶完整，整个工艺设计充分考虑了物料配比，反应

条件和设备配置的协同优化，确保资源化利用率达到80%以上，CO<sub>2</sub>固定效率超过70%，工业固废资源化与碳封存协同技术流程如图1所示。

### 2.2 协同反应强化技术

为提升协同反应效率，开发了多种强化技术手段。催化剂强化方面，添加0.5–2.0%的Ca(OH)<sub>2</sub>或NaOH可将反应速率提高2–3倍，碳化效率从60%提升至85%，物理场辅助技术包括：(1) 超声波强化（频率20–40kHz，功率200–500W）可加速离子传质，缩短反应时间30–50%；(2) 微波辅助加热（功率300–800W）实现快速升温，提高反应均匀性；(3) 机械搅拌优化（转速100–300rpm）增强气液传质效果<sup>[2]</sup>。表面活性剂的添加能够降低界面张力，提高CO<sub>2</sub>在溶液中的溶解度15–25%，促进气液两相传质，反应过程中引入间歇式CO<sub>2</sub>通入模式，通入5分钟停止2分钟，有利于离子扩散和反应均匀进行，传质传热协同强化遵循菲克定律：

$$J = -D(\partial C / \partial X)$$

通过智能控制系统实时监测温度，pH值，CO<sub>2</sub>浓度等关键参数，动态调节反应条件，确保协同反应在最佳状态下进行，整体反应效率提升40–60%。

### 2.3 产物协同分离与品质控制

协同反应产生的多元产物需要高效分离和品质控制技术。分离工艺采用多级分离策略：一级分离通过重力沉降去除大颗粒固体，分离效率达90%；二级分离利用旋流器分离细颗粒碳酸钙，回收率85–95%；三级分离采用膜过滤技术回收超细颗粒，过滤精度0.1–1.0μm。分离过程中采用pH调节技术，将溶液pH值控制在6–8范围内，有利于碳酸钙沉淀和固液分离，各级分离设备配置了在线浊度和粒度分析仪，实时监控分离效果，如表1所示，不同产物类型具有明显的粒径和纯度差异，需要采用相应的分离方法。

表1 协同反应产物分离技术参数

产物类型	粒径范围(μm)	纯度(%)	分离方法	回收率(%)
粗颗粒 CaCO <sub>3</sub>	50–200	85–90	重力沉降	90–95
细颗粒 CaCO <sub>3</sub>	5–50	90–95	旋流分离	85–90
超细CaCO <sub>3</sub>	0.1–5	95–98	膜过滤	80–85
胶凝材料	–	75–85	干燥研磨	95–98

分离后的产物经洗涤，干燥处理，去除杂质离子，含水率控制在1%以下，表面改性技术采用硅烷偶联剂或脂肪酸处理，改善产品分散性和相容性，品质控制通过在线检测系统监控产品的化学成分，粒度分布和晶体结构，确保碳酸钙产品纯度达95%以上，胶凝材料活性指数超过80%，满足建材行业标准要求。

### 2.4 工艺系统协同集成

工艺系统协同集成实现全流程的能量梯级利用和物料循环。能量集成方面：(1) 反应放热（15–25kJ/molCO<sub>2</sub>）用于预热进

料,降低外部加热需求20-30%;(2)余热回收系统回收反应器和干燥工段的废热,热效率提升至85%;(3)CO<sub>2</sub>循环利用,未反应的CO<sub>2</sub>经净化后返回系统,利用率达95%,物料协同循环包括:分离后的废水经处理后循环使用,减少新水消耗60%;未完全反应的固废返回预处理工段再利用,总体物料利用率超过90%<sup>[3]</sup>。系统配置了先进的DCS控制系统,实现生产过程的全自动化管理,关键参数控制精度达±2%,设备模块化设计便于维护和扩容,单个模块处理能力10-50万吨/年可调。多目标协同优化模型为:

$$\eta = \alpha_1 R + \alpha_2 C - \alpha_3 E$$

其中:R为资源化利用率,C为碳封存效率,E为能耗,通过参数优化实现系统效率比单一工艺提升45-65%。

### 3 工程应用效果与分析

#### 3.1 协同技术工程化应用实践

协同技术已在多个示范工程中成功应用,验证了其工程化可行性。河北某钢铁企业建设的年处理钢渣50万吨示范工程,采用直接碳化工工艺,CO<sub>2</sub>处理量达8万吨/年,碳化转化率稳定在75-80%,生产碳酸钙产品12万吨/年,胶凝材料35万吨/年,山西某电厂的粉煤灰协同处理项目,年处理粉煤灰100万吨,CO<sub>2</sub>固定量6万吨,资源化利用率达85%。工程运行表明,协同技术在大规模应用中能够保持稳定的协同效应,关键设备运行可靠性超过95%,自动化控制系统响应时间小于30秒,不同规模下的技术适用性分析显示,年处理量10万吨以上的装置经济效益最佳,投资回收期为6-8年,为协同技术的推广应用提供了重要实践依据。

#### 3.2 资源化与碳封存协同效益分析

协同技术在经济效益方面表现出显著优势。与传统固废填埋处理相比,协同技术可节省处置费用60-80元/吨,同时产生的碳酸钙产品售价800-1200元/吨,胶凝材料售价200-300元/吨,创造直接经济价值300-500元/吨固废<sup>[4]</sup>。碳封存方面,协同技术的碳固定成本为50-80元/吨CO<sub>2</sub>,远低于传统碳捕集与封存技术的100-200元/吨CO<sub>2</sub>,如表2所示,不同固废类型的协同效益存在明显差异,钢渣的综合效益最高。

表2 不同固废协同技术经济效益对比

固废类型	处理成本(元/吨)	产品收益(元/吨)	碳减排价值(元/吨)	综合效益(元/吨)
钢渣	45-60	280-420	60-90	295-450
粉煤灰	35-50	150-220	40-65	155-235
赤泥	55-75	200-300	55-80	200-305

规模效应分析表明,年处理量从10万吨增加到100万吨时,单位处理成本可降低40-50%,协同效益显著提升。

#### 3.3 协同技术环境影响与可持续性评价

全生命周期环境影响评估显示,协同技术具有显著的环境正效益。温室气体减排方面,每处理1吨钢渣可固定0.2-0.35吨CO<sub>2</sub>,相当于减少标准煤燃烧0.13-0.23吨;同时避免了传统填埋产生的甲烷等温室气体排放,综合减排效果达0.3-0.5吨CO<sub>2</sub>当量/吨固废,固废减量化效果明显,资源化利用率达80-90%,大幅减少了固废堆存占地和环境污染风险。生态环境质量改善体现在:减少固废堆场淋滤液对地下水的污染风险90%以上,降低周边大气颗粒物浓度15-25%,土壤重金属污染风险下降60-80%<sup>[5]</sup>。技术可持续性评价表明,协同技术符合循环经济发展要求,具备长期推广应用的潜力,为实现碳中和目标贡献重要力量。

### 4 结语

工业固废资源化与碳封存协同技术通过创新性地整合废物处理与碳减排,实现了环境治理的双重效益。技术基于固废矿物组分的碳化活性,构建了资源化利用与碳固定的协同机制,在工程应用中展现出良好的技术经济性和环境效益。协同技术不仅显著提升了固废资源化利用率,同时实现了稳定的碳封存效果,碳固定成本降至50-80元/吨CO<sub>2</sub>,为传统工业绿色转型提供了切实可行的解决方案。实践表明,该技术在减少固废堆存,降低温室气体排放,创造经济价值等方面具有显著优势,为实现碳中和目标和构建循环经济体系提供了重要技术支撑,具有广阔的推广应用前景。

#### [参考文献]

- [1]金友良,曾辉祥.资源价值流会计的拓展研究——都市圈工业固废资源化协同治理视角[J].会计研究,2025,(03):69-81.
- [2]金友良,魏逊,徐颖,等.都市圈工业固废资源化生态补偿模型及应用[J/OL].系统工程,1-24[2025-07-02].
- [3]廖滢,何妮,何春云,等.磷石膏协同多元固废处理及资源化利用研究进展[J].云南化工,2025,52(01):38-43.
- [4]张婷婷,周萧超,刘章韬,等.碳中和背景下我国固废资源化利用产业发展研究[J].中国工程科学,2024,26(01):80-88.
- [5]石磊,李会泉,陈少华,等.城市多源固废协同利用与区域绿色循环发展研究——以东莞海心沙国家资源循环利用示范基地为例[J].中国科学院院刊,2023,38(12):1804-1817.

#### 作者简介:

钟元媛(1994--),女,汉族,重庆人,本科,助理工程师,研究方向:工业固废资源化与碳封存协同技术。