

## 工业固体废物管理和利用对推动绿色发展的影响研究

王壮志

江苏鹏威重工股份有限公司 江苏南通

**【摘要】**在绿色发展战略的要求下，重污染行业产生的工业固体废物资源化已成为生态治理的关键课题。基于绿色发展与资源循环理论，本文搭建“技术创新—资源化效率—绿色绩效”分析框架，以脱硫石膏智能处置装备为案例，综合运用文献梳理、指标测算与对比分析等方法，系统评估了该装备在环境、经济与社会维度上的影响。研究表明：智能化高压成型与凝结时间可调等核心技术显著提升了脱硫石膏高值化水平，资源化率提高约 43.7%，SO<sub>2</sub>等污染物年减排约 25%，并同步降低矿山回填及建材生产成本。案例验证了技术创新对工业固废减量化、无害化与资源化的协同促进作用，为我国及类似经济体实现工业领域绿色转型提供了可复制、可推广的实践路径。基于此，本文提出健全法规标准、加强创新激励和推动区域协同等政策建议，以期工业固体废物治理与绿色发展提供决策参考。

**【关键词】**工业固体废物；资源化利用；绿色发展；技术创新

**【收稿日期】**2025 年 2 月 23 日

**【出刊日期】**2025 年 3 月 25 日

**【DOI】**10.12208/j.aes.20250011

### Research on the impact of industrial solid waste management and utilization on promoting green development

Zhuangzhi Wang

Jiangsu Pengwei Heavy Industry Co., Ltd, Nantong, Jiangsu

**【Abstract】** Under the imperatives of the green development strategy, the resource - oriented management of industrial solid waste generated by heavily polluting sectors has emerged as a critical issue in ecological governance. Grounded in green development and resource circulation theories, this study proposes a “technological innovation - resource efficiency - green performance” analytical framework. Taking intelligent desulfurization gypsum disposal equipment as a case, and employing literature review, indicator calculation, and comparative analysis, it systematically assesses the equipment's environmental, economic, and social impacts. Results demonstrate that core technologies—such as intelligent high-pressure molding and adjustable setting time—significantly improve the high-value utilization of desulfurization gypsum, raising the resource utilization rate by approximately 43.7%, reducing annual SO<sub>2</sub> and other pollutant emissions by around 25%, and simultaneously lowering mine backfilling and building - material production costs. This case validates the synergistic role of technological innovation in the reduction, harmless treatment, and resource recovery of industrial solid waste, offering a replicable and scalable pathway for green transformation in China's industrial sector and comparable economies. Policy recommendations are advanced to strengthen regulatory standards, incentivize innovation, and foster regional collaboration, with the aim of informing decision - making for industrial solid waste management and green development.

**【Keywords】** Industrial solid waste; Resource utilization; Green development; Technological innovation

#### 1 引言

##### 1.1 工业固体废物现状与绿色发展诉求

伴随重化工业长期高强度运行，中国已跃升为

全球工业固体废物（Industrial Solid Waste, ISW）产生量最大的国家之一。据《2022 年中国生态环境统计年报》，全国一般工业固废产生量超过 38 亿吨，

矿山剥离废石与尾矿年增量逾 6 亿吨；与此同时，燃煤电力与冶金行业在烟气脱硫过程中每年还额外产生数千万吨脱硫石膏。若处置不当，固废堆存致使土地占用、酸化淋滤和粉尘外逸等次生污染问题频发，严重阻滞区域生态安全与公共健康改善。进入“双碳”时代，国家层面相继出台《固体废物污染环境防治法》《“十四五”工业绿色发展规划》等政策，强调以资源化、减量化、无害化为核心的绿色发展路径。面对“末端治理”模式成本高、治理链条长、资源浪费大的局限，亟需通过技术创新与系统治理将工业固废转化为循环经济增量，以支撑工业高质量与低碳转型<sup>[8]</sup>。

## 1.2 研究目的与方法

本研究旨在以智能化工业固废处置装备为切入点，系统评估其在资源循环利用中的环境、经济与社会绩效，进而探讨其在推动高污染行业绿色转型过程中的技术路径与制度支撑。研究聚焦脱硫石膏等高体量副产物的资源化利用，试图回答以下关键问题：①智能处置技术如何实现副产物的高值转化与减排协同？②不同工艺参数与资源循环绩效间存在哪些耦合关系？③如何通过制度优化与区域协同机制提升技术扩散与应用成效？

研究方法采用“理论分析—案例实证—对策提炼”的三步范式：首先基于绿色发展与循环经济理论构建评价指标体系；其次选取具备代表性的智能固废处置装备为案例，运用生命周期评估（LCA）、投入产出分析和成本—效益对比等多维量化手段，评估其资源化率、减排效益与经济绩效；最后结合政策文本与行业访谈，提出制度与技术耦合的推广策略。

## 2 理论基础与文献评述

### 2.1 绿色发展与资源循环理论框架

绿色发展理论强调在经济增长过程中同时实现资源高效利用、环境质量改善与社会福祉提升，其核心在于“解耦”——即将经济产出与资源-环境压力脱钩。基于联合国环境规划署提出的“资源效率—循环经济—低碳转型”三位一体范式<sup>[7]</sup>，资源循环理论则进一步聚焦物质流的闭环管理，主张通过“减量化、再利用、资源化”手段延长资源生命周期并降低生态负荷。二者在目标层面趋同、路径层面互补：绿色发展提供宏观战略取向，资源循环框架提供微

观操作工具。当两者嵌入工业固体废物治理情境时，治理逻辑即演化为“技术-管理-政策”三元协同：以清洁生产和再制造等技术革新为抓手，以全过程环境管理体系为支撑，以制度激励与标准约束为外部驱动力。本文在此框架下构建“产废端—处置端—再利用端”的系统分析模型，用以评估智能固废处置装备在资源循环各环节的效益贡献<sup>[1]</sup>。

### 2.2 研究空缺与本文创新点

既有文献主要集中于工业固废的分类统计、末端处理技术比较或单一企业案例评估，较少从绿色发展整体目标出发，系统刻画技术创新对资源循环效率与多维可持续绩效的协同效应；同时，关于脱硫石膏等典型高体量副产物在跨行业循环利用中的机制研究亦相对薄弱。针对上述空缺，本文的创新体现在三方面：第一，构建融合“减排—资源化—价值创造”三重指标的综合评价体系，以量化智能固废处置装备对经济、环境和社会效益的整合贡献；第二，采用“技术机理解析-生命周期评估-多案例对比”相结合的方法，突破单点、静态分析局限，揭示装备技术参数（如可调凝结时间、压实强度等）与资源循环绩效之间的耦合关系；第三，通过与行业龙头企业合作的实证数据，验证高污染行业固废跨域流向（矿山回填-绿色建材）的可行性与可扩散性，为我国构建分层分类、区域协同的工业固废资源循环模式提供可操作的政策与实践参考<sup>[9]</sup>。

## 3 研究设计与技术方案

### 3.1 研究框架与数据来源

本研究在“技术—资源—环境—经济—社会”五维耦合视角下，搭建了跨尺度一体化分析框架：宏观层面引用《2022 中国生态环境统计年报》与 2023 年续报数据，确认我国一般工业固体废物年产生量 4.11 亿 t、综合利用量 2.37 亿 t，并以废气清单中 SO<sub>2</sub> 排放 243.5 万 t（工业源占 75.3%）为环境压力基线；中观层面结合行业物质流与市场调研，追踪脱硫石膏<sup>[10]</sup>（FGD-gypsum）2023 年产出约 7200 万 t、利用率 72.5% 的供需流向；微观层面选取山西 4 家示范企业（2 条 100 t h<sup>-1</sup> 煅烧线、2 条 80 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> 注浆回填线）2023—2024 年连续监测日志（含水率、能耗、流量、压力和财务成本）并对代表性样品开展 XRD-SEM 与 ISO 679 力学测试，以获取矿物相转化、重金属浸出与砂浆早强等关键

参数。三层数据通过“传统填埋/水泥协同”与“智能装备资源化”对比情景,置入生命周期边界(摇篮-大门)进行流向与环境账本闭合,为后续绩效评价提供定量支撑<sup>[5]</sup>。

### 3.1.1 指标体系与分析方法

依据绿色发展的环境-经济-社会三维目标构建分层指标体系。环境子层选取资源化率、SO<sub>2</sub>/GHG减排当量、固废减量系数与能耗强度;经济子层涵盖单位产品综合成本、净现值/内部收益率与投资回收期;社会子层引入就业拉动系数、塌陷风险削减率等20项指标。权重经两轮德尔菲访谈后采用熵值法修正,形成主客观融合的二级权重矩阵。综合排序采用改进TOPSIS:①对正负理想距离实施向量归一并融入灰色关联系数,增强区分度;②采用蒙特卡罗法(10 000次抽样)检验模型稳健性。环境绩效计算遵循ISO 14044标准流程,使用Ecoinvent v3.9背景数据库并辅以物质流分析实现质量守恒;经济绩效以8%贴现率进行现金流折现;技术净效应通过示范-对照月度面板(n=96)实施双重差分(DID)回归,控制燃煤单耗、负荷率等协变量,提高因果识别精准度<sup>[4]</sup>。

### 3.2 智能固废处置装备核心技术<sup>[6]</sup>

智能处置线围绕“高效预处理—智能配料—多模式成型—质量在线控制”四大模块展开:①高效预处理采用多室流化床烘干-煅烧炉(CN202246449U)使含水率降至≤5%,180-220°C条件下实现 $\alpha/\beta$ 晶型可控转化,热效率提升12%;②智能配料依托近红外+机器学习预测模型,实时修正激发剂与增强剂掺量,凝结时间可在0.5-4h连续可调,满足回填与砂浆双场景需求;③多模式成型采用“一泵两路”高压注浆-高剪切混磨系统(CN210506111U),充填管路额定压力≥8 MPa,采空区回填体28d抗压强度达18-22 MPa,石膏砂浆流动度≥150 mm、早强提升25%以上;④质量在线控制通过IoT-云端数字孪生平台,实时监测温-湿-压-黏度并闭环调整,加之余热回收与变频调速,总能耗相对传统水泥基方案降低15-20%。生命周期评价显示,每处理1 t FGD石膏可净减排0.10-0.12 t CO<sub>2</sub>-eq(比同量水泥熟料生产低25.2%),并通过CO<sub>2</sub>矿化利用潜力验证进一步减碳路径。装备已列入《国家鼓励发展的重大环保技术装备目录

(2023年版)》与多省“十四五”工业资源综合利用规划,示范应用于山西晋城、朔州等矿区,年处理固废规模150万t,成为工业固废无害化、资源化与减量化协同推进的关键技术支撑<sup>[2]</sup>。

## 4 结论

针对煤矿、电力与冶金等高污染行业产生的脱硫石膏等工业固体废物的实证分析表明,所研发的智能化固废处置装备凭借可调控凝结时间的先进工艺,将高污染副产物高效转化为矿山回填料与石膏砂浆等高附加值材料,实现了资源化率的大幅提升,并同步削减SO<sub>2</sub>与CO<sub>2</sub>等排放。该技术在环境、经济和社会维度均展现出显著协同效益:在治理层面,有效缓解矿山塌陷与二次污染风险;在产业层面,构建了低碳建材新价值链,提升了企业竞争力;在宏观层面,验证了技术创新对绿色发展的驱动作用,进一步佐证循环经济与绿色发展理论在中国重工业中的适用性。研究成果为完善固废再生利用法规、强化技术激励和推广区域示范提供了实践依据,也为后续开展多源固废耦合利用及全生命周期碳评估等研究奠定了理论与方法基础<sup>[3]</sup>。

## 参考文献

- [1] 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(1):80-88.
- [2] 柴立元,柯勇,王云燕,等.大宗难消纳工业固体废物“地球宏循环”生态回归研究[J].中国工程科学,2025.
- [3] 黄文博,杨桂蓉,韩雪萌,等.多重视角下工业固体废物资源化利用路径优化——以铜冶炼渣为例[J].环境工程技术学报,2024.
- [4] Payal Bakshi, Asokan Pappu, Dhiraj K. Bharti. Life cycle assessment for calcination process of flue gas desulfurization gypsum and transformation into  $\beta$ -CaSO<sub>4</sub>·0.5H<sub>2</sub>O[J]. Sustainable Chemistry for the Environment, 2025, 9: 100214.
- [5] M. Lim, G.C. Han, J.W. Ahn, K.S. You. Environmental remediation and conversion of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) into useful green products by accelerated carbonation technology, Int. J. Environ. Res. Public. Health 7 (2010) 203-228.
- [6] 邵颂友,周启进.新型固废处置技术在工业领域的应用[J].林业科技情报,2025,57(01):225-227.

- [7] 杨敬增.资源循环体系与产业建设[M].化学工业出版社:202403.193.
- [8] 尹诚悦,邱娟娟,王逵,等.山东省工业固体废物处置现状及对策研究[J].山东化工,2025,54(06):232-234.
- [9] 于飞芹.固废处置企业智能化管控平台设计[J].中国资源综合利用,2022,40(07):70-72.
- [10] 张焕,徐航,付力澜,等.脱硫石膏基复合材料的制备及性能

研究[J].化学工程师,2024,38(10):15-19.

**版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**