

# 工业固废资源化利用技术与环境效益

申 海

中联煤层气有限责任公司晋城分公司 山西 晋城 048200

**摘 要：**工业固废无序堆存与传统简易处置，易引发水土、大气污染及资源浪费问题，制约工业绿色发展。本文梳理工业固废的定义、分类及处置现状，系统阐述建材化、高值化提取、生态化利用及无害化配套四大主流资源化技术体系，从污染减排、资源节能、低碳生态多维度分析其环境效益，依托全生命周期评估印证资源化模式的优势，为工业固废循环利用与绿色产业发展提供参考。

**关键词：**工业固废；资源化利用技术；环境效益

引言：随着我国工业产业规模化发展，冶金渣、粉煤灰、尾矿等大宗工业固废产量持续攀升，传统填埋、堆存处置模式的生态弊端日益凸显，造成严重的生态污染与资源损耗。在双碳目标与绿色工业发展政策导向下，推进工业固废资源化利用成为行业发展重点。为明晰固废资源化技术价值与环境优势，本文全面梳理相关技术体系，量化分析综合环境效益，助力固废无害化、高值化、循环化落地应用。

## 1 工业固废资源化利用基础概述

### 1.1 工业固废定义与分类特征

(1) 核心定义：工业固废是工业生产、矿产加工、金属冶炼、化工制造等工业活动过程中伴随产生的固态与半固态废弃物料，是工业生产的主要副产物。工业固废具备明确的工业属性，与日常生活产生的生活垃圾、具有强腐蚀性和高毒性的危险固废存在本质区别。其本身不具备直接利用价值，若未经规范处置易造成资源浪费与生态污染，是工业绿色发展中重点管控与资源化利用的固体废弃物类型。(2) 主要分类：现阶段我国大宗工业固废主要包含冶金渣、粉煤灰、煤矸石、化工废渣、矿山尾矿等类别，各类固废的物质成分、物理特性、污染风险存在显著差异化特征。其中粉煤灰、煤矸石多产生于火电与煤炭开采行业，硅铝含量高、存量规模大；冶金渣、尾矿来源于冶金与矿山行业，残留有价金属组分；化工废渣多含有化学残留物质，污染属性相对突出，差异化的特征也决定了各类固废资源化利用方式的不同。

### 1.2 工业固废污染与处置现状

(1) 污染危害：目前大量工业固废长期露天无序堆存，引发多重生态环境问题。固废堆放会大面积占用土地资源，造成土地闲置浪费；经雨水冲刷淋溶后，有害物质渗入土层，引发土壤盐碱化、板结退化，同时污染

地下水水体，破坏水土生态系统。此外，露天堆放的固废易受风力作用产生扬尘，加剧区域大气污染，持续破坏厂区及周边生态环境，制约区域绿色发展。(2) 传统处置方式弊端：工业固废传统处置以露天堆存、简易填埋为主，存在明显的技术短板与环境隐患。此类处置方式固废消纳效率极低，无法有效消耗逐年增量的工业固废，存量堆积问题突出。同时，填埋、堆存模式稳定性较差，极易引发土壤、水体、大气二次污染，且完全浪费了固废中富含的矿物、金属、硅铝等可利用资源，无法实现资源循环利用，不符合工业可持续发展要求<sup>[1]</sup>。

### 1.3 固废资源化利用核心原则与政策依据

(1) 核心原则：工业固废资源化利用严格遵循减量化、无害化、资源化、高值化的核心发展原则。在处置利用过程中，优先从源头减少固废产生量，通过无害化处理消除污染风险，依托成熟技术实现固废资源再生利用，同时突破低值利用局限，推进高值化产品制备。全过程兼顾技术落地可行性、生态环境安全性与产业经济适用性，实现环保、资源、经济效益协同统一。(2) 政策依据：国内现阶段已形成完善的工业固废管控与资源化利用政策体系，围绕固废污染防治、综合循环利用、绿色低碳发展出台了一系列法律法规与行业规范。相关政策明确了工业固废减污降碳、循环利用的发展目标，规范了固废处置、再生利用、生态应用的行业标准，为工业固废资源化技术推广、产业规范化发展提供了坚实的政策支撑与制度保障。

## 2 工业固废主流资源化利用技术体系

### 2.1 大宗固废建材化利用技术

(1) 基础建材制备技术：该技术是当前工业固废资源化利用最成熟、应用最广泛的技术路径，主要以粉煤灰、钢渣、煤矸石、尾矿等大宗固废为核心原料，替代传统砂石、黏土、熟料等自然资源制备基础建材。整体

工艺流程涵盖固废筛选、烘干研磨、配比混合、固化成型、养护成型等环节,可规模化生产水泥掺合料、混凝土粗细骨料、环保透水砖、路基填充材料、墙体砌块等工程建材。该技术能够大幅降低传统建材生产的资源消耗与生产成本,固废消纳量大、适配性强,广泛应用于市政工程、建筑施工、道路建设等领域,是实现大宗固废批量消纳的核心方式。(2)新型建材研发技术:依托工业固废独特的矿物组分与物理特性,通过配方优化、高温烧结、改性活化等创新工艺,可研发制备高端环保新型建材,突破传统固废利用低值化局限。目前主流产品包括固废基陶粒、微晶玻璃、高强度透水材料、保温隔热板材等。相较于传统建材,此类新型建材具备强度高、渗透性好、耐腐蚀、环保无污染等优势,同时可最大化挖掘固废潜在价值,适配高端建筑、生态景观、海绵城市等高品质工程场景,兼具环保效益与市场价值<sup>[2]</sup>。

## 2.2 固废高值化提取利用技术

(1)有价金属提取技术:冶金废渣、矿山尾矿等固废中富含铁、铝、镁及多种稀有金属,具备极高的回收利用价值。现阶段行业主流采用湿法冶金、火法冶炼两大核心技术开展有价组分回收。湿法冶金通过浸出、萃取、沉淀、提纯等工艺,精准提取固废中的稀有金属,提纯精度高、资源回收率优;火法冶炼依托高温熔炼、还原反应,实现铁、铝等大宗金属的高效回收。该技术可有效盘活固废中的矿产资源,减少原生矿产开采,实现工业副产物的资源闭环利用<sup>[3]</sup>。(2)功能材料制备技术:多数工业固废富含丰富的硅铝组分、碳质组分,是制备高端功能材料的优质原料。通过活化改性、复合配比、高温成型等工艺,可将固废加工为高性能吸附材料、工业保温材料、催化反应材料等高附加值产品。其中吸附材料可用于工业污水、废气净化处理,保温材料广泛应用于工业设备与建筑保温领域,催化材料可适配化工生产反应场景。该技术彻底改变固废低端利用模式,大幅提升固废资源化经济效益。

## 2.3 固废生态化利用技术

(1)矿区生态修复技术:针对矿山开采遗留的塌陷区、废弃矿区、裸露边坡等生态破损区域,利用煤矸石、尾矿等稳定性较强的工业固废开展生态修复治理。主要用于矿区塌陷区回填、场地平整与废弃土地复垦,同时通过固废合理配比改良矿区板结、贫瘠的退化土壤,提升土壤透气性与肥力。该技术既能大规模消纳矿山固废,解决固废堆存污染问题,又能修复矿区破损生态,恢复土地利用功能,实现治废与生态修复双向赋能。(2)土壤改良与生态填料技术:工业固废经无害

化检测、稳定化处理后,可作为生态治理专用填料与土壤改良材料。其特殊的矿物结构能够有效改善盐碱地土壤酸碱度,缓解土壤盐碱化、板结问题,提升土壤保水保肥能力。同时可用于生态护坡加固、人工湿地基质填充、河道生态治理等场景,材料稳定性强、无二次污染,能够适配各类生态治理工程,助力区域生态环境提质升级<sup>[4]</sup>。

## 2.4 固废资源化预处理与无害化配套技术

(1)前端预处理技术:预处理是保障固废资源化利用效果的基础关键工序,核心包含分类、破碎、研磨、筛分、脱毒等标准化工艺。通过精准分类筛选不同类型固废,剔除杂质;再通过破碎研磨细化物料粒径,筛分得到符合生产标准的原料,同时针对含微量有害组分的固废开展脱毒预处理,优化固废原料品质,为后续建材制备、金属提取、生态利用等工序提供合格原料,保障资源化产品质量与工艺稳定性。(2)末端无害化技术:聚焦固废资源化全过程的二次污染防控,核心涵盖重金属固化、废气废水处理、扬尘防控等技术。通过固化稳定化工艺锁定固废中的重金属组分,防止重金属迁移扩散;对生产过程中产生的废气、废水进行收集净化、达标排放;同时通过喷淋、密闭作业等方式防控二次扬尘,全方位规避资源化利用过程中的环境风险,保障固废资源化利用全程无害化、绿色化。

## 3 工业固废资源化利用的环境效益分析

### 3.1 污染减排效益

(1)土壤与地下水污染减排:传统模式下工业固废长期露天堆存与简易填埋,会导致固废中残留的重金属、盐类及微量有害物质随雨水淋溶向下渗透,持续破坏土层结构与地下水环境,引发土壤板结、盐碱化、重金属富集等问题,造成土地功能退化、地下水水质超标。推行工业固废资源化利用,可从源头大幅减少固废堆存存量与新增堆存量,有效阻断污染物迁移扩散路径,降低土壤与地下水受污染的风险。同时,减少后续污染治理与生态修复的人力、物力及资金投入,减轻区域生态环境修复压力,实现土壤与地下水生态的长效保护。(2)大气污染减排:未规范化处置的工业固废,在露天堆放过程中受风力侵蚀易产生大量扬尘颗粒物,部分企业无序焚烧固废还会释放硫化物、氮氧化物、粉尘及有害烟气,加剧区域大气污染,影响空气质量与人居环境。固废资源化利用模式彻底摒弃露天堆放、随意焚烧的粗放处置方式,对各类工业固废进行集中规范化处理与再生利用,从源头削减扬尘、酸性气体等大气污染物排放,有效降低区域雾霾、空气污染发生概率,持续

改善厂区及周边区域的大气环境质量。

### 3.2 资源循环与节能效益

(1) 原生资源节约效益：工业生产与工程建设需要消耗大量砂石、水泥、金属矿产等原生自然资源，长期过度开采易引发山体破坏、植被损毁、水土流失等生态问题。粉煤灰、钢渣、尾矿、煤矸石等工业固废经过资源化处理后，可直接替代传统砂石、建材原料与金属矿产资源，广泛应用于建材生产、工程填筑、金属再生等领域。该利用方式有效减少原生矿产与建材资源的开采使用量，降低矿产开采强度，缓解自然资源枯竭压力，推动工业资源循环可持续发展。(2) 能源消耗节约效益：传统原生矿产开采、建材烧制、金属冶炼工序繁琐，开采、破碎、煅烧全过程能耗极高，是工业能源消耗的主要板块。与之相比，工业固废资源化再生利用以工业副产物为原料，无需开展矿山掘进、矿石开采等高能耗工序，且再生加工工艺流程更精简、反应条件更温和，整体生产能耗显著低于原生资源加工模式。持续推广固废资源化技术，能够有效降低工业生产领域的综合能耗水平，提升工业能源利用效率<sup>[5]</sup>。

### 3.3 低碳生态效益

(1) 碳排放削减效益：固废传统填埋处置过程中，有机物会在厌氧环境下分解产生大量甲烷等温室气体，温室效应远超二氧化碳，对大气温室效应影响显著。同时，传统建材生产、矿产冶炼环节会产生巨量工业碳排放。固废资源化利用可大幅减少固废填埋体量，降低甲烷温室气体排放，同时替代高碳原生生产工艺，削减建材、金属生产过程中的碳排放，有效降低工业领域碳排放量，为区域节能降碳、落实双碳发展目标提供重要支撑。(2) 生态修复增益效益：依托固废生态化利用技术，可将无害化处理后的煤矸石、尾矿等固废应用于矿区塌陷回填、土地复垦、受损场地治理等工程，有效修复矿山开采、工业生产遗留的破损生态场地。该模式不仅能够消化存量固废，还可改良退化土壤、恢复土地原有利用功能，提升区域土地资源利用率，修复地表植被生长环境，增强区域水土保持能力，全面提升工业区域

的生态稳定性与自然修复能力。

### 3.4 基于生命周期的综合效益评估

(1) 评估体系构建：为科学量化固废资源化的环境价值，需构建全生命周期综合效益评估体系。评估覆盖工业固废收集、预处理、再生加工、成品应用全流程，确立能耗消耗、污染物排放、资源循环利用率、碳减排量、生态修复成效等核心评估指标，规范指标统计口径与核算标准，形成系统化、科学化的评估框架，为效益量化分析提供数据支撑与理论依据。(2) 综合效益对比：通过横向对比传统填埋、露天堆存处置模式与资源化利用模式的全生命周期数据，可清晰凸显资源化技术的绿色优势。传统处置模式存在高污染、高能耗、高碳排放、资源浪费严重等问题，综合环境效益较差；而资源化利用模式实现了污染减排、节能降碳、资源循环与生态修复多重效益叠加，能够最大限度降低工业固废处置的环境负面影响，是适配绿色工业发展的最优处置模式。

### 结束语

综上，工业固废资源化利用各类技术可针对性解决固废污染与浪费难题，实现污染减排、资源节约、低碳降碳与生态修复多重效益。相较于传统处置方式，资源化模式兼顾环保、资源与经济价值，契合工业可持续发展理念与绿色低碳政策要求。未来需持续优化资源化技术工艺，完善配套无害化处置体系，推动固废高值化、规模化利用，助力工业领域绿色转型与生态环境长效提质。

### 参考文献

- [1] 万宇超, 崔锡舰. 工业园区固废资源化处理及综合利用技术[J]. 砖瓦, 2024, 13(8): 46-49.
- [2] 吴健, 费西凯, 李凯军, 等. 电镀厂工业园区含铬废水资源化深度处理研究[J]. 水利水电技术, 2023, 54(S1): 243-250.
- [3] 杨诚忠, 李嘉明. 工业固体废弃物资源化利用技术现状与发展趋势[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(3): 45-52.
- [4] 刘林, 邓先刚. 工业固废资源化技术创新及应用分析[J]. 资源科学, 2023, 45(7): 123-126.
- [5] 段生奇, 郑永东. 工业固废资源化项目经济效益评估方法研究[J]. 中国环境管理, 2021, 13(4): 67-74.