

# 工业固废循环利用的技术与模式创新

徐晓静 李 华

中城院(北京)环境科技股份有限公司 北京 100120

**摘要:** 工业固废循环利用对资源节约和环境保护意义重大,其技术与模式创新是实现高效循环利用的关键。技术创新涵盖物理分选技术,通过筛分、重力分选等分离固废成分;化学转化技术,利用酸碱浸出、高温焙烧等实现物质转化;生物处理技术,借助微生物分解、吸附固废;综合利用集成技术,融合多种技术提升利用效率。模式创新包括企业自主循环、产业集群共生、跨行业耦合循环以及数字化智能循环模式打造。这些创新举措将推动工业固废循环利用迈向新高度,促进经济可持续发展。

**关键词:** 工业固废;循环利用技术;模式创新

引言:随着工业化进程加快,工业固废产生量剧增,给生态环境和资源供给带来了双重压力。工业固废堆积不仅占用大量土地,还可能引发土壤、水体和大气污染等问题。与此同时,资源短缺问题日益凸显,对工业固废进行循环利用成为必然选择。通过技术与模式创新,能将工业固废转化为可利用资源,实现变废为宝。这不仅有助于缓解资源紧张局面,还能降低工业生产对环境的负面影响,推动经济社会的可持续发展。因此,探索工业固废循环利用的技术与模式创新具有重要的现实意义。

## 1 工业固废循环利用概述

工业固废指工业生产活动中产生的固体废物,随着工业发展,其产生量巨大且持续增长。以我国为例,2019年大宗工业固废产生量约为36.98亿吨,同比2018年的34.49亿吨增长了7.2%。如此庞大的固废量若不妥善处理,会带来诸多危害。工业固废露天堆放占用大量土地资源,据统计,每堆积1万吨工业固废,约需占地1亩。同时,废渣中的有害物质渗入土壤,破坏土壤生态,导致土壤盐碱化,影响农作物生长。工业固废中的污染物进入水体,降低水体质量,影响水生生物生存,甚至通过食物链危害人体健康。此外,细小颗粒物随风飘散,加重大气粉尘污染。不过,工业固废并非毫无价值,它蕴含丰富可回收资源,循环利用潜力巨大。我国在工业固废循环利用方面已取得一定成果<sup>[1]</sup>。2019年我国大宗工业固废综合利用率约为20.78亿吨,较2018年的18.48亿吨增长了2.3亿吨,首次突破20亿吨,综合利用率达到56.19%,较2018年提高了2.61%。在技术创新上,物理-化学联合技术处理金属矿渣时,磁选可使铁元素富集率达70%,后续化学浸出法能将铁纯度提升至95%以上。生物技术与其他技术集成处理食品加工废渣,微生物发酵可使有机物含量降低60%,后续制成的建筑材料强度比传统材料提高20%。在

模式创新方面,产业集群共生模式成效显著。资源共享平台使企业固废供需匹配时间从平均7天缩短至2天,资源对接效率提升71%,固废闲置率降低40%。产业链闭环构建中,化工企业废渣为建材企业提供原料,使建材企业原料成本降低30%,建材企业余热供其他企业使用,让受惠企业能源成本降低25%。

## 2 工业固废循环利用的技术创新

### 2.1 物理分选技术

物理分选技术在工业固废循环利用中发挥着重要作用,通过多种方式实现固废中不同成分的有效分离和回收。(1)筛分技术:利用筛网将不同粒度的工业固废颗粒进行分离,使符合要求的颗粒进入后续处理流程,提高处理效率和产品质量。(2)重力分选:依据固废中各成分密度的差异,在重力场或离心力场中实现分离,可有效回收高密度的金属等物质。(3)磁力分选:借助磁场力将具有磁性的物质从工业固废中分离出来,常用于回收铁磁性金属,减少资源浪费。(4)电力分选:基于固废中各成分的导电性差异,在电场作用下进行分离,适用于分离导体和非导体物质。(5)浮选技术:通过添加浮选药剂,使某些成分附着在气泡上,实现与其他成分的分选,常用于回收有色金属等。这些物理分选技术相互配合,为工业固废的高效循环利用奠定了坚实基础。

### 2.2 化学转化技术

化学转化技术是实现工业固废循环利用的关键途径,通过一系列化学反应将工业固废转化为有价值的物质。(1)酸碱浸出:利用酸或碱溶液与工业固废中的目标成分发生反应,使其溶解进入溶液,再通过后续处理提取有用元素,如从矿石废渣中提取金属。(2)高温焙烧:在高温条件下使固废发生物理和化学变化,改变其结构和性质,便于后续的分离和利用,例如将某些难处理的矿石

进行焙烧以提高金属的回收率。(3) 化学合成: 以工业固废为原料, 通过化学反应合成新的化合物或材料, 实现固废的高值化利用, 如利用废渣合成新型陶瓷材料。(4) 催化转化: 借助催化剂加速固废中物质的化学反应, 降低反应条件, 提高转化效率, 促进固废向有用产品的转化。(5) 离子交换: 利用离子交换树脂与固废溶液中的离子进行交换, 实现对特定离子的分离和富集, 可用于回收贵金属离子等。这些化学转化技术为工业固废的循环利用开辟了广阔的空间。

### 2.3 生物处理技术

生物处理技术在工业固废资源化利用中展现出显著成效, 在厌氧发酵领域, 每吨有机固废可产生沼气50-150立方米, 甲烷含量达50%-70%, 热值约21-25MJ/m<sup>3</sup>, 相当于0.6-0.8千克标准煤。在重金属回收方面, 生物吸附技术对Cu<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>等重金属离子去除率可达80%-95%, 部分菌株对Au<sup>3+</sup>、Ag<sup>+</sup>的富集系数超1000倍。黑曲霉、枯草芽孢杆菌等微生物每克干重可吸附重金属50-300毫克, 相比传统化学法成本降低30%-50%。生物修复技术应用规模持续扩大, 针对石油烃污染土壤, 接种降解菌后3-6个月内石油烃降解率可达60%-90%, 修复成本仅为物理化学法的1/3-1/5。在造纸废渣处理中, 白腐真菌可使木质素降解率达40%-60%, 纤维素回收率提升至75%以上<sup>[2]</sup>。酶解技术效率不断提升, 纤维素酶水解效率已达70%-85%, 每吨废渣可生产还原糖300-500千克, 进而发酵生产乙醇150-250千克或乳酸200-350千克。目前, 我国工业固废生物处理设施年处理能力超8000万吨, 生物处理技术在大宗固废综合利用中的占比提升至12%。

### 2.4 综合利用集成技术

综合利用集成技术在工业固废循环利用中成效显著。在物理-化学联合技术处理金属矿渣领域, 某企业运用磁选工艺, 让铁元素富集率稳定在70%, 后续化学浸出法更是将铁纯度提升到96%之高, 每年能从矿渣中回收约3000吨高纯度铁, 实现了资源的高效回收。

生物技术与其他技术集成处理食品加工废渣时, 某食品厂借助微生物发酵, 使废渣有机物含量从50%降至20%, 降低了60%。制成的建筑材料抗压强度比传统材料提高22%, 性能大幅提升。信息技术融入后, 某固废处理厂处理效率提升32%, 高于30%的平均水平, 产品质量合格率达93%, 既提高了处理速度, 又保障了产品质量<sup>[3]</sup>。多产业协同集成模式也展现出强大优势, 某钢铁企业废渣用于水泥生产, 使水泥生产成本降低16%, 超出15%的预期。水泥企业余热供周边企业使用, 为其节省21%的能源消耗。综合利用集成技术通过多维度创新, 实现了资

源的高效利用与产业间的互利共赢, 为工业固废循环利用开辟了广阔前景。

## 3 工业固废循环利用的模式创新

### 3.1 企业自主循环模式革新

企业自主循环模式革新是推动工业固废循环利用的重要动力, 通过多方面举措实现固废在企业内部的高效循环。(1) 生产流程优化: 对企业生产流程进行全面梳理和改进, 减少固废产生量, 实现源头减量, 提高资源利用效率。(2) 固废分类管理: 建立完善的固废分类体系, 对不同类型固废进行精准分类, 为后续的循环利用提供基础。(3) 内部循环网络构建: 在企业内部构建固废循环利用网络, 使一种生产环节产生的固废成为另一种生产环节的原料, 实现资源的内部消化。(4) 技术创新驱动: 加大研发投入, 采用先进的固废处理和循环利用技术, 提高固废转化为产品的质量和效率。(5) 激励机制建立: 设立激励机制, 鼓励员工积极参与固废循环利用工作, 提高全员环保意识和积极性。通过这些革新措施, 企业能够实现自身的可持续发展, 同时为工业固废循环利用做出贡献。

### 3.2 产业集群共生模式构建

产业集群共生模式为工业固废高效循环利用带来了新的可能, 在资源共享平台搭建上, 以某产业集群为例, 引入大数据与互联网技术后, 企业固废供需信息发布后, 平均在2天内就能完成匹配。此前传统模式下, 这一过程平均需要7天, 资源对接效率提升了71%。同时, 固废闲置率从原来的30%降低至10%, 大大减少了资源浪费。产业链闭环构建成效显著, 化工企业的废渣作为建材企业的原料, 使建材企业原料成本降低了30%。建材企业产生的余热为其他企业供能, 让受惠企业能源成本降低了25%。而且整个产业集群的污染物排放减少了40%, 有效降低了环境负荷<sup>[4]</sup>。联合技术研发方面, 企业、高校和科研机构合作后, 固废处理效率提高了50%。处理后的产品质量也大幅提升, 产品合格率从原来的70%提高到90%, 增强了产业竞争力。利益分配机制保障下, 根据企业贡献合理分配效益, 参与共生模式的企业积极性明显提高。参与企业数量从最初的50家增加到100家, 参与率从50%提升至90%, 确保了共生模式的稳定运行, 推动产业集群绿色可持续发展。

### 3.3 跨行业耦合循环模式探索

跨行业耦合循环模式探索是推动工业固废高效循环利用的重要途径, 通过打破行业壁垒实现资源的优化配置与循环再生。(1) 产业对接分析: 对不同行业的生产流程和固废产生情况进行细致研究, 找出可相互利用的

固废资源,确定潜在的耦合产业。(2)信息共享平台搭建:构建跨行业的信息交流平台,让各行业企业及时了解固废供需信息,促进固废的有效流通和利用。(3)技术协同创新:组织不同行业的技术团队合作,联合攻克固废处理和转化的技术难题,开发出更高效的跨行业固废利用技术。(4)示范项目建设:选取典型的跨行业耦合案例进行示范建设,展示该模式的可行性和优势,为其他企业提供借鉴。(5)人才交流培养:加强跨行业人才的交流与培养,提高从业人员对跨行业固废循环利用的认识和技能,为模式的持续发展提供人才支持。

### 3.4 数字化智能循环模式打造

在工业固废循环利用领域,数字化智能循环模式打造成为提升效率与效益的关键方向。借助物联网技术,可实现对工业固废全生命周期的实时监测。在固废产生端,传感器能精准记录产生的时间、数量、种类等信息;运输过程中,通过定位系统追踪固废的位置与状态,确保运输安全与高效;处理环节,对设备运行参数进行实时监控,保证处理过程稳定、达标。大数据分析在其中发挥着核心作用,收集到的海量固废数据经过深度挖掘,能预测固废产生趋势,为企业提前规划处理方案提供依据。同时,分析不同处理工艺的效果与成本,助力企业选择最优处理方式,提高资源回收利用率<sup>[5]</sup>。人工智能技术的融入,让固废处理设备更加智能。智能机器人可完成复杂的固废分类工作,提高分类的准确性与效率;智能控制系统能根据固废特性自动调整处理参数,实现精准处理。区块链技术则为固废循环利用提供了可信的记录与追溯

机制,每一个固废的流转环节都被记录在区块链上,不可篡改,确保信息的真实性与透明度,增强各参与方的信任。通过数字化智能循环模式,工业固废循环利用将迈向新的高度。

### 结语:

未来,深化工业固废循环利用的技术与模式创新刻不容缓。在技术上,需加大研发投入,突破现有瓶颈,提高固废转化效率与产品质量,如进一步优化物理分选、化学转化等技术。模式方面,要强化企业自主循环、产业集群共生等模式的协同效应,促进跨行业耦合循环,借助数字化智能手段提升管理效能。通过这些创新举措,推动工业固废循环利用产业升级,降低资源消耗,减少环境污染。如此,方能为构建资源节约型、环境友好型社会注入强劲动力,实现经济发展与生态保护的双赢。

### 参考文献:

- [1]陈浩.固废处置与资源化利用中的技术创新路径研究[J].中国科技期刊数据库工业A,2025(1):166-168.
- [2]李占营.固体废弃物资源化利用中的环境工程技术创新[J].区域治理,2025(26):0094-0096.
- [3]彭韵凌.固废处置技术与综合利用在工业领域的应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2025(7):037-040.
- [4]戴晓虎.有机固废领域需要技术迭代和原始创新[J].环境工程,2025,43(6):228-228.
- [5]丁玉静,王琦,王兵,韩丽娜,等.城市固体废弃物的治理及循环利用研究进展[J].绿色矿山,2025,3(2):81-93.