Key Processes and Industrialization Path of Co-disposal and High-value Utilization of Metallurgical Solid Waste

Guangze Wei

University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning, 114051, China

Abstract

The metallurgical industry serves as a critical foundational raw material sector, generating hundreds of millions of tons of solid waste annually. This includes blast furnace slag, steel slag, dust removal ash, and iron oxide scale from steelmaking processes, as well as red mud, copper slag, lead-zinc slag, and anode mud from non-ferrous metallurgy operations. These metallurgical solid wastes are rich in iron, aluminum, calcium, silicon, carbon, and various valuable metal elements, possessing significant resource utilization potential. Transitioning from "end-of-pipe disposal" to "resource recovery" through integrated co-processing and high-value utilization has become a pivotal strategy for green and low-carbon development in the metallurgical industry. This study systematically categorizes major types and characteristics of metallurgical solid waste, analyzes key technologies for co-processing and value enhancement, and explores viable industrialization pathways with safeguard mechanisms, aiming to provide theoretical foundations and practical references for sustainable resource utilization of metallurgical waste.

Keywords

Metallurgical solid waste; Co-processing; High-value utilization; Resource recycling

冶金固废协同处置与高值化利用关键工艺及产业化路径探讨

魏光泽

辽宁科技大学，中国 · 辽宁 鞍山 114051

摘　要

冶金工业是重要的基础原材料工业，每年产生数以亿吨计的固体废弃物，包括钢铁冶金过程中的高炉渣、钢渣、除尘灰、轧钢氧化铁皮，以及有色冶金过程中的赤泥、铜渣、铅锌渣、阳极泥等。与此同时，冶金固废中富含铁、铝、钙、硅、碳及多种有价金属元素，具有极高的资源化利用价值。推动冶金固废由“末端处置”向“资源化利用”转变，实现协同处置与高值化利用的有机结合，已成为冶金行业绿色低碳发展的重要路径。本文系统梳理了冶金固废的主要类型与特征，分析了协同处置与高值化利用的关键工艺技术，探讨了产业化发展的可行路径与保障机制，以期为冶金固废资源化利用提供理论支撑与实践参考。

关键词

冶金固废；协同处置；高值化利用；资源循环

1 引言

传统的单一固废处置模式往往存在效率低、成本高、产品附加值低等问题，难以实现经济效益与环境效益的统一。近年来，协同处置与高值化利用逐渐成为行业共识。协同处置强调将冶金固废与其他行业固废进行配伍，利用冶金炉窑的高温环境实现无害化处置与资源回收；高值化利用则着眼于开发高附加值产品，将固废从“低值填埋”转向“高值转化”。本文聚焦冶金固废协同处置与高值化利用两大主线，系统分析关键工艺技术，探讨产业化路径，以期为冶金行业固废资源化利用提供系统性解决方案。

【作者简介】魏光泽（2005—），男，中国山东潍坊人，在读本科，从事冶金工程研究。

2 冶金固废协同处置与高值化利用关键工艺

2.1 冶金炉窑协同处置固废技术

2.1.1 高炉协同处置技术

高炉是典型的逆流式高温反应器，炉身温度可达两千摄氏度以上，还原性气氛强，具备协同处置特定固废的潜力。高炉协同处置的主要对象包括废塑料与废轮胎、含铁尘泥以及含碳固废。废塑料和废轮胎经破碎后与煤粉混合喷入高炉风口，在高温下分解气化，替代部分焦炭和煤粉，实现能源回收，同时废轮胎中的锌等元素可被还原回收。含铁量较高的除尘灰、氧化铁皮等压制成块后加入高炉或烧结工序，可实现铁素资源循环利用。利用高炉对碳的高效利用特性，还可以协同处置部分含碳工业固废。高炉协同处置的关键在于控制有害元素的富集循环，如锌、铅、碱金属等对高炉操作

的不利影响，需建立有害元素平衡模型，严格控制入炉负荷。

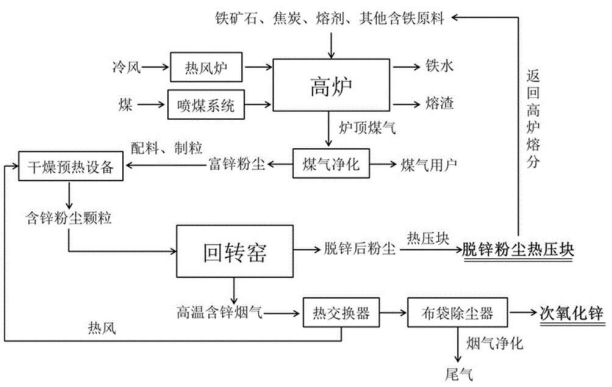

图 1 高炉协同处置技术

2.1.2 转炉协同处置技术

转炉炼钢过程熔池温度高、搅拌强烈，具备处理部分危废与固废的能力。废油泥、废油漆桶可作为冷却剂加入转炉，在高温下彻底分解有机污染物，金属铁熔入钢水，无机物进入渣相。废轮胎、废塑料则可替代部分废钢作为冷却剂，同时回收能源。转炉协同处置需关注对钢水质量的影响，严格控制有害杂质含量。

2.1.3 电炉协同处置技术

电弧炉以废钢为主要原料，熔池温度高，可协同处置含锌、铅尘泥及废油泥，部分企业已开展电炉协同处置含锌除尘灰的工业实践，利用电炉高温还原环境，使锌还原挥发并在收尘系统中富集回收，实现铁渣与锌的分离。

2.1.4 回转窑与熔融炉协同处置技术

回转窑和熔融炉是处理复杂固废的常用设备。利用回转窑处理钢铁冶炼除尘灰，通过还原焙烧，将锌、铅等挥发回收，得到富锌烟尘和还原铁产物。熔融炉如等离子炉、电弧熔融炉可用于处理含重金属的危险废物，实现玻璃化固化，消除环境风险。

2.2 多源固废协同配伍技术

协同处置的核心在于配伍，即根据固废的成分特性，通过合理配比，形成互补效应，优化处理效果。成分互补可将高钙固废与高硅固废配伍，调节渣系碱度，改善熔融性能，或将高热值固废与低热值固废搭配，维持炉内热平衡。污染物协同控制方面，可利用固废中的碱性成分如钢渣、赤泥吸收酸性气体，利用含碳固废还原重金属，抑制其挥发逸散。资源协同回收方面，通过多源固废协同处理，可实现多种有价元素的同步回收，例如将含铁尘泥与含锌废渣协同处理，可同时回收铁、锌资源。配伍技术的实施需要建立完善的固废成分数据库，并结合热力学模拟与工艺试验，确定最优配比方案。

2.3 协同处置中的污染物控制

协同处置过程可能产生烟气、飞灰、炉渣等二次污染物，必须采取有效控制措施。烟气净化可采用“急冷、活性炭喷射、布袋除尘、湿法脱酸”等组合工艺，去除烟气中的二噁英、重金属、酸性气体。协同处置危废产生的飞灰可能含有高浓度重金属，需按危险废物管理，经稳定化或固化后安全填埋或进一步提取有价金属。协同处置产生的炉渣若满足浸出毒性标准，可用于建材生产，否则需进行无害化处理 [1]。

3 高值化利用关键工艺

3.1 钢铁冶金固废高值化利用

3.1.1 矿渣超细粉

粒化高炉矿渣经粉磨至比表面积四百至六百平方米每千克，制成矿渣微粉，可等量替代水泥熟料百分之三十至五十，显著降低水泥生产过程的碳排放。矿渣微粉具有早期强度低、后期强度高、水化热低、抗硫酸盐侵蚀性能好等优点，是高性能混凝土的关键掺合料。近年来，超细矿渣粉的开发进一步拓展了应用领域，其比表面积超过七百平方米每千克，可用于制备高强度、高耐久性混凝土，产品附加值显著提升。

3.1.2 钢渣梯级利用

钢渣因游离氧化钙问题限制了其在建材领域的应用，但通过预处理与改质，可实现梯级利用。采用热焖法处理钢渣，可使游离氧化钙快速消解，提高体积稳定性，经陈化处理后钢渣可用作道路基层材料、工程回填材料。通过多级磁选，可回收钢渣中的金属铁，尾渣铁含量可降至百分之二以下，为进一步利用创造条件。将预处理后的钢渣粉磨至一定细度，与矿渣微粉、粉煤灰等复合，可制备复合矿物掺合料，钢渣微粉的活性虽低于矿渣，但通过机械活化与化学活化可显著提升。利用钢渣中的碱性氧化物与二氧化碳反应生成碳酸盐，既实现钢渣稳定化，又可封存二氧化碳，碳化钢渣可用于制备轻质骨料、砌块等建材产品。

3.1.3 除尘灰提锌提铁

钢铁除尘灰尤其是高炉布袋灰、转炉除尘灰中锌含量可达百分之五至二十，具备回收价值。回转窑还原挥发法将除尘灰与焦粉混合，在回转窑中还原焙烧，锌还原挥发后氧化富集于烟尘中，得到锌品位百分之四十至六十的次氧化锌产品，尾渣铁含量可达百分之五十以上，可作为炼铁原料。转底炉直接还原法将除尘灰与含碳物料造球后，在转底炉中高温还原，锌挥发回收，金属化球团作为高炉或转炉原料，该技术具有处理量大、还原效率高等优点，已在多个钢铁企业应用。对于锌品位较高的除尘灰，可采用酸浸或碱浸工艺提取锌，实现高纯锌产品的制备。

3.2 有色冶金固废高值化利用

3.2.1 赤泥综合利用

赤泥的综合利用是世界性难题，近年来多种高值化利用路径取得进展。采用还原焙烧—磁选工艺可从赤泥中提取铁，生产铁精矿，采用酸浸—萃取—电积工艺可提取钪、钛、稀土等稀散金属。将赤泥与粉煤灰、矿渣等配伍，可制备烧结砖、陶粒、发泡陶瓷等建筑材料，赤泥的碱性需通过酸化、

碳化等方式调节。利用赤泥的高碱性与吸附性能，可处理酸性矿山废水、固定重金属离子。经改性的赤泥还可作为公路路基填料，实现大规模消纳。

3.2.2 铜渣高效利用

铜渣铁含量高，但主要以铁橄榄石形式存在，难以直接磁选回收。深度还原—磁选工艺在还原剂作用下，将铁橄榄石中的铁还原为金属铁，再通过磁选分离，获得高品位铁精矿。铜渣与石英、石灰石等配料后，经熔融、结晶可制备微晶玻璃板材，具有高强度、高耐磨性，可用作建筑装饰材料。铜渣硬度高，还可用于制备耐磨地坪材料、喷砂磨料等。

3.2.3 阳极泥稀贵金属提取

阳极泥中金、银、铂、钯等贵金属含量远高于原生矿石，是重要的稀贵金属二次资源。主流工艺为预处理、浸出、分离提纯。预处理采用焙烧或酸洗脱除铜、铅、硒等杂质。贵金属提取采用氰化浸出、王水溶解、氯化挥发等方法提取金、银，通过萃取、置换、精炼等工序分离提纯铂族金属。硒、碲等稀散元素在预处理过程中富集，通过焙烧、碱浸、电解等工艺回收。

3.3 冶金固废制备绿色建材

建材行业是消纳冶金固废的主要领域，高值化建材产品的开发正从传统的水泥混合材、混凝土骨料向高性能、多功能方向拓展。以钢渣、赤泥、尾矿等为主要原料，经高温发泡可制成轻质保温板材，兼具保温隔热与装饰功能。利用冶金渣的高钙高硅特性，可制备高性能微晶玻璃板材，应用于高档建筑装饰。将冶金固废粉体与胶凝材料复合，可开发适用于3D打印的建筑砂浆，拓展固废利用新场景。利用矿渣、钢渣、赤泥等制备高混合材掺量的低碳水泥，可降低水泥工业碳足迹[2]。

4 产业化路径探讨

4.1 产业模式创新

4.1.1 园区化集聚发展

依托大型冶金企业或工业园区，建设固废资源化利用基地，集中处理周边冶金及关联产业固废，在园区内形成“冶金生产—固废处置—资源化产品—回用于生产”的闭环循环链条，降低物流成本，提高资源利用效率。

4.1.2 跨产业协同共生

推动冶金企业与建材、化工、环保等产业构建共生网络，例如钢铁企业将矿渣微粉供应至水泥企业，将高炉煤气供应至化工企业生产甲醇，电解铝企业将赤泥供应至建材企业生产陶粒，通过产业协同实现资源梯级利用与环境负荷分摊。

4.1.3 第三方治理模式

引入专业环保企业以市场化方式承接冶金固废处置与资源化业务，专业化运营可提升技术水平、降低处置成本，同时使冶金企业聚焦主业，政府可通过特许经营、绿色采购等方式支持第三方治理企业成长。

4.2 经济性分析

冶金固废高值化利用项目的经济性受多种因素影响。投资成本主要包括厂房建设、设备购置、环保设施等，转底炉、回转窑等大型处理设施投资较高，但规模效益显著。运行成本包括原料、燃料、药剂、能耗、人工、维护等费用，高能耗是制约部分工艺经济性的关键因素。产品收益取决于产品种类、质量与市场价格，提取稀贵金属、生产高附加值建材的项目收益较好，而低端建材产品面临市场竞争激烈、利润空间有限的问题。政策补贴方面，资源综合利用税收优惠、绿色金融支持、碳交易收益等政策红利可显著改善项目经济性。

总体来看，冶金固废高值化利用项目的盈利能力与技术水平、产品定位、市场规模密切相关，应优先选择技术成熟、产品附加值高、市场需求稳定的方向进行产业化推广[3]。

4.3 标准体系建设

健全的标准体系是产业化发展的基础保障。当前冶金固废利用领域标准缺失、指标不统一的问题较为突出，需加快构建涵盖分类与表征、产品标准、环保标准、技术规范等方面的标准体系。统一冶金固废的分类方法、取样制样规范、成分测试标准，针对矿渣微粉、钢渣粉、赤泥基建材、提取金属产品等制定明确的质量指标与检测方法，规定固废处理过程污染物排放限值和资源化产品的环境安全性要求，明确协同处置与高值化利用工艺的设计、运行、维护要求，都是标准体系建设的重要内容[4]。

5 结语

冶金固废协同处置与高值化利用是实现冶金行业绿色低碳循环发展的重要途径。冶金固废种类繁多、成分复杂，兼具资源属性与环境属性。协同处置利用冶金炉窑的高温优势，可同时处理多源固废，实现能源回收与有害物质无害化；高值化利用着眼于开发矿渣微粉、钢渣梯级利用产品、稀贵金属提取、绿色建材等高附加值产品，提升资源利用效益。

参考文献

[1] 王啟胜,张浩浩,赵波,等. 含铁含碳冶金固体废物转底炉热还原协同处置[J].烧结球团,2024,49(04):93-100+113.

[2] 濮广强.生物质协同处置多源冶金固废的基础研究[D].江苏科技大学,2024.

[3] 潘却易,王晓佳,沈德魁,等. 钢铁冶炼高炉协同处置冶金尘泥固废的冷态流动数值模拟研究[J].能源科技,2023,21(02):88-92.

[4] 叶恒棣,李谦,魏进超,等. 钢铁炉窑协同处置冶金及市政难处理固废技术路线[J].钢铁,2021,56(11):141-147.