

# 钢渣处理技术与资源化利用研究进展

顾子涵<sup>1</sup>, 张佳晔<sup>2</sup>, 周娟<sup>1</sup>, 江飞飞<sup>1</sup>

1.南通理工学院, 江苏 南通 226000

2. 中国中建设计研究院有限公司辽宁分公司, 辽宁 沈阳 110000

DOI:10.61369/ME.2025010020

**摘要** : 钢渣是钢铁行业的主要二次产品, 具有量大、消耗高、浪费大、环境负效应等特点。本文系统介绍了国内外钢渣处理工艺发展现状, 简述了常见的工艺如物理法、化学法等, 总结归纳了国内外钢渣资源化利用的途径; 介绍了国内外的钢渣资源化利用途径和钢渣处理技术面临的困难和挑战, 结合双碳目标, 总结归纳了余热、碳化固碳、高值钢材料等钢渣资源化利用方向, 实现钢渣全价化资源化和零排放。

**关键词** : 钢渣; 钢渣处理; 资源化利用; 二次处理

## Research Progress on Steel Slag Processing Technology and Resource Utilization

Gu Zihan<sup>1</sup>, Zhang Jiaye<sup>2</sup>, Zhou Juan<sup>1</sup>, Jiang Feifei<sup>1</sup>

1.Nantong Institute of Technology, Nantong, Jiangsu 226000

2. China Construction Design&Research Institute Co., Ltd. Liaoning Branch, Shenyang, Liaoning 110000

**Abstract** : Steel slag is a major by-product of the steel industry, with high output, low utilization, and notable environmental impact. This paper reviews current domestic and international treatment methods, including physical and chemical processes, and summarizes key resource utilization approaches. It also discusses existing challenges and, in line with carbon neutrality goals, highlights promising directions such as waste heat recovery, carbonation, and high-value material development, aiming to achieve full utilization and zero discharge of steel slag.

**Keywords** : steel slag; slag treatment; resource utilization; secondary processing

## 引言

钢渣作为转炉、电炉炼钢的固体废物, 每炼1吨粗钢产出100–150千克钢渣, 全球每年钢渣产量已超过4亿吨, 但产量60%以上集中在我国, 年产量超过1.5亿吨, 利用率仅有30%左右, 而发达国家利用率高达90%以上<sup>[1]</sup>, 传统的堆存不仅占用空间, 而且重金属还会浸出造成土壤和水污染, 随着“双碳”目标的提出, 钢渣资源化利用是钢铁企业绿色化发展不可或缺的重要环节。

目前, 国外发达国家平均利用率达到90%以上, 美国利用49.7%的钢铁渣用作路面基层, 日本有43%被冶金循环利用消化; 国内的建材化和余热利用的成熟技术已经达到一个较高的水平, 但是热能利用率低于50%。本文通过综合分析钢渣的性能和特征以及在实际工程中的应用情况, 对已有研究内容进行梳理和提炼, 从处理工艺和利用途径两个角度进行总结与评述, 并针对存在的问题和技术瓶颈, 提出了今后研究的方向和重点。

## 一、钢渣的组成

郝帅等<sup>[1]</sup>通过对高碱度转炉 (BOF) 钢渣的系统表征, 揭示了其复杂的物相组成与微观结构特征: XRD与SEM-EDS分析 (图1) 表明, 该钢渣以硅酸二钙-磷酸钙 ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) 固溶体为主相, 并含有铁酸钙 ( $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ )、钙镁蔷薇辉石 ( $\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ ) 及钙铝黄长石 ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ) 等次要矿物相; 微

观形貌观察进一步显示, 深灰色不规则圆形硅酸二钙基体中嵌布着亮白色RO相 ( $\text{MgO-FeO-MnO}$ 固溶体, 以FeO为主) 及浅灰色钙铝黄长石 ( $\text{C}_2\text{A}_2\text{S}$ ) 颗粒, 且部分区域存在磷元素掺杂的  $\text{C}_2\text{S-C}_3\text{P}$ 固溶体。结合化学组成分析, 钢渣中CaO (40%–60%)、 $\text{SiO}_2$  (10%–20%)、 $\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3$  (5%–25%) 及MgO (5%–10%) 的含量比例直接决定其碱度特征 ( $\text{CaO/SiO}_2$ 比值), 其中高碱度钢渣 (>2.5) 因富含硅酸三钙 ( $\text{C}_3\text{S}$ ) 而表现出更优的胶凝活性<sup>[2–3]</sup>, 但

项目信息: 国家级大学生创新创业训练计划项目 (202412056010Z), 南通理工学院优秀本科毕业设计培育项目 (BS2026016)。

作者简介: 顾子涵 (2004.04–), 女, 本科生, 主要从事混凝土智能建造技术研究。

游离氧化钙 (f-CaO) 和氧化镁 (f-MgO) 的水化膨胀风险需通过陈化或碳化处理加以控制<sup>[4]</sup>。物理特性方面, 钢渣的高密度与磁性金属颗粒为其资源化利用提供了理论支撑, 而重金属元素 (如 Cr、V) 的潜在环境风险则需在农业改良及建材应用中予以重点关注<sup>[5-6]</sup>。上述特性共同奠定了钢渣在金属回收、胶凝材料及环境治理等领域跨学科研究的基础。

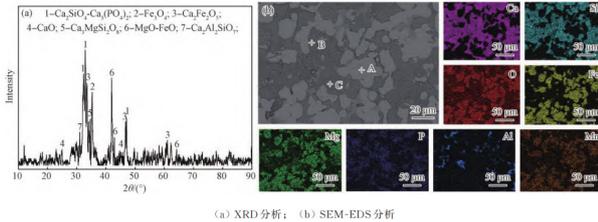


图1 转炉钢渣的物相和显微结构分析结果

## 二、钢渣处理技术

钢铁冶炼生产过程中产生的大量钢渣属于固体废物, 其产生量和复杂组分对环境、资源化的双重要求提出了挑战。物理法主要是对钢渣进行机破、筛分、粉磨等改善钢渣的颗粒、容重等, 如高温重结晶可有效降低了钢渣中 f-CaO 含量, 活性指数达到 96% 以上; 钢渣表面疏水可降低遇水膨胀, 10d 水浴膨胀率为 1.32%。化学法主要是组分调控与处理, 如钠盐激发剂可以促进 C-S-H 凝胶的形成, 使钢渣胶凝基料 28d 活性指数提升 22.4%; 改性钢渣对  $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  吸附率达到 99.88%, 主要为络合作用, 以多孔为主的物理吸附起辅助作用。

当前, 国内钢渣一次处理的主要方法有热闷法、热泼法、滚筒法、水淬法等, 存在钢渣利用率偏低、成本高、环保要求高等问题。为提升钢渣综合利用率需要开发新型钢渣处理方法。

### (一) 物理处理

#### 1. 磁选分离技术

磁选是利用铁磁选粉从钢渣中选出金属组分的工艺。为了回收转炉钢渣中的铁资源, Liu 等人<sup>[8]</sup>对干法磁选和湿法磁选进行了比较研究。研究结果显示 (如图 2), 干法磁选后所得精矿的全铁 (T.Fe) 和五氧化二磷 ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) 含量变化不大, 且存在严重的磁团聚现象, 表明其分选效果不佳。因此, 多级湿式弱磁选被证明是更适用于钢渣处理的磁选方法。在优化条件下, 该工艺可获得产率为 30.54%、全铁品位高达 54.10% 的钢渣精矿, 具备替代部分烧结矿并返回炼铁流程的潜力。

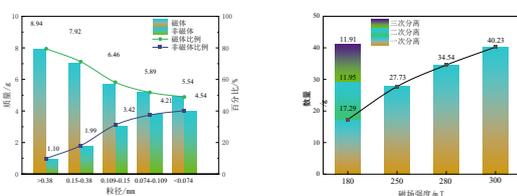


图2 粒径和磁场强度对磁选效果的影响

经试验验证: 处理工艺不同, 磁选的钢渣铁易于聚集沉淀, 磁选粉收率高但钢渣铁品位低; 钢渣辊压破碎-有压热闷渣磁选

粉收率低, 但是磁选粉铁品位高, 达到 37.12%; 钢渣辊压破碎-热泼渣磁选粉收率高, 达 37.60%, 且磁选粉收率高, 达 39.69%, 磁选粉尾渣可用于制取建材, 实现综合回收。

### 2. 机械粉磨技术

机械粉磨技术通过精细化破碎与表面活化处理来提升钢渣的资源化利用效能。时朝昆等<sup>[9]</sup>介绍了机械粉磨作为钢渣预处理的核心工艺, 指出采用立式辊磨机或球磨机进行高能研磨可有效破坏钢渣中  $\beta$ - $\text{C}_2\text{S}$  的晶格结构, 促进活性  $\text{SiO}_2$  和  $\text{CaO}$  的暴露, 其水化活性指数较未处理钢渣提升 40%~60%。郭文斌<sup>[11]</sup>进一步优化了粉磨装备参数, 通过分级研磨工艺结合助磨剂, 使钢渣粉体流动性与填充密度显著改善, 能耗降低约 20%。肖柏林<sup>[10]</sup>将机械粉磨与化学激发耦合, 制备的钢渣-矿渣基胶结剂在全尾砂充填中 28d 抗压强度达 3.8MPa, 满足矿山充填材料强度要求。早期研究已证实, 经机械粉磨的钢渣作为水泥混合材, 其胶砂流动度比 >95%, 28d 抗压强度比达 92%~105%, 主要归因于粉磨产生的微裂纹增强了水化反应接触面积。该技术通过粒径精细化控制与界面能调控技术, 不仅显著激活了钢渣中潜在的水化反应活性组分, 还系统构建了适用于多元化应用场景的基础原料体系, 为高性能建筑材料开发、土壤改良剂制备及环境治理功能材料研制提供了关键物质支撑。

### 3. 颗粒整形技术

时朝昆等<sup>[9]</sup>验证了颗粒整形对钢渣活性的影响, 发现经整形处理的钢渣比表面积可稳定在  $450\text{--}550\text{m}^2/\text{kg}$ , 其水化反应速率较未整形样品提升 30%, 主要归因于粒形改善后暴露的活性  $\text{CaO}$ - $\text{SiO}_2$  界面增加。郭文斌<sup>[11]</sup>提出采用立式冲击破碎机对钢渣进行选择破碎, 利用“石打石”工作原理实现颗粒棱角钝化, 使针片状颗粒含量从 35% 降至 8% 以下, 同时通过气流分级技术将粒径控制在  $0.075\text{--}4.75\text{mm}$  范围内, 满足高性能混凝土骨料级配要求。研究也指出, 颗粒整形可消除钢渣中游离氧化钙的富集区, 降低体积安定性不良风险, 其开发的“预破碎-整形-筛分”工艺使钢渣骨料膨胀率控制在 0.05% 以内。颗粒整形技术通过实施粒径级配调控与颗粒形貌优化策略, 有效强化了钢渣在高端建材制备、环境功能材料开发等多场景下的功能适配性。

### (二) 化学处理

#### 1. 草酸螯合改性

该方法在 AC-13C 型沥青混合料中应用效果显著, 性能优于石灰岩混合料。郝帅等<sup>[1]</sup>研究表明, 采用  $0.5\text{--}1.0\text{mol/L}$  草酸溶液对钢渣进行 24h 常温浸渍处理, 可选择性螯合重金属离子 (如  $\text{Cr}^{6+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ ), 通过羧基官能团与金属原子形成稳定五元环螯合物, 使重金属浸出浓度降低至标准限值以下。崔心宇等<sup>[2]</sup>进一步揭示了该技术的微观机制: 草酸处理可破坏钢渣表面致密层, 暴露内部活性  $\text{CaO}$ - $\text{SiO}_2$  网络, 同时生成的草酸钙沉淀填充孔隙, 使钢渣比表面积增加 15%~20%。草酸处理能在钢渣表面生成草酸钙保护层, 使浸水膨胀率从 3.2% 降至 1.69%, 沥青混合料体积膨胀率降至 0.4%。XRD 和 SEM 分析证实, 草酸钙覆盖层有效封堵了钢渣孔隙, 消除了游离  $\text{CaO}$  的不利影响。

## 2. 激发剂活化

复合激发剂可显著提升钢渣胶凝活性。利用 NaOH、水玻璃等碱性激发剂制备钢渣基胶凝材料，其28天抗压强度可达40MPa以上。邹敏等<sup>[4]</sup>研究表明，采用碱性激发剂（如 NaOH、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ）可有效解离钢渣中惰性硅酸盐相，其  $\text{OH}^-$  离子通过破坏 Si-O-Si 键网络，使活性  $\text{SiO}_2$  溶出量增加30%–45%，进而促进水化硅酸钙（C-S-H）凝胶生成。丛玉丽进一步验证了硫酸盐激发剂（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）的协同效应，其与钢渣中的 CaO 反应生成钙矾石（AFt）晶体，使28d抗压强度提升25%–35%。李华等<sup>[7]</sup>通过正交试验优化了复合激发剂配比，发现  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  质量比为2:1时，钢渣基胶凝材料3d强度达18.6MPa，归因于硅酸钠提供的  $\text{SiO}_3^{2-}$  离子促进了凝胶网络交联。该技术通过激发剂种类优化与活化工艺耦合，突破了钢渣活性低的技术瓶颈，为制备低碳胶凝材料提供了关键技术路径。

## 3. 碳酸化处理

钢渣碳酸化处理有两种方法，一种是直接碳酸化，主要指钢渣中的含 Ca 矿物直接与二氧化碳发生反应，当二氧化碳溶解与液体中生成  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ，进而促进钢渣中 Ca 元素的浸出，生成稳定的碳酸盐。另一种钢渣碳酸化为间接碳酸化，主要通过化学试剂将钢渣中的碱性金属元素浸出，目前研究的主要浸出剂有盐介质、碱介质、强酸和弱酸介质。

吴跃东等<sup>[5]</sup>研究表明，在  $\text{CO}_2$  浓度10%–20%、湿度60%–80%条件下对钢渣进行4–24h 碳酸化养护，可有效固化游离氧化钙（f-CaO），其碳化转化率达75%–85%，体积安定性不良风险降低90%以上。时朝昆等<sup>[9]</sup>提出分级碳化工艺，通过预碳化与主碳化两阶段处理，使钢渣骨料吸水率降低至3.2%，满足高性能混凝土耐久性要求。郭文斌<sup>[11]</sup>进一步揭示了该技术的微观机制： $\text{CO}_2$  与钢渣中的 CaO、MgO 发生矿化反应，生成方解石（ $\text{CaCO}_3$ ）和菱镁矿（ $\text{MgCO}_3$ ）晶体，填充孔隙结构使钢渣表观密度提升10%–15%，同时碳化层形成致密保护膜，抑制重金属浸出。

国内外专家学者对钢渣在各方面的利用进行了研究，通过预处理能够有效将钢渣利用在混凝土中。但是在碳酸化处理钢渣以

此提高钢渣稳定性方面，虽然有学者对其碳化处理进行了研究，但是如何提高碳酸化效率并准确计算固碳量还有待进一步探究，

## 三、钢渣资源化利用路径

钢渣资源化利用已形成多元化格局，主要通过农业改良与工业综合利用两条路径实现：卓琳等<sup>[12]</sup>采用陈化、酸浸及高温煅烧预处理技术，证实钢渣可有效钝化重金属（如 Cr、Pb）并释放 CaO、MgO 及硅酸盐成分，施用量5%–10%时能提升酸性土壤 pH 值0.8–1.2单位，其活性  $\text{SiO}_2$  作为硅肥可使水稻增产8%–15%；朱友益等则通过磁选–重选联合工艺回收金属铁，并开发钢渣粉磨至比表面积  $>400\text{m}^2/\text{kg}$  后作为水泥混合材，其水化活性使28d抗压强度达45MPa，同时利用碱激发法制备的多孔吸附剂对  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  吸附容量达30–50mg/g。两研究均强调梯级利用原则，推动钢渣向高值化、低碳化方向转化。

## 四、关键挑战与技术瓶颈

由于受原料和工艺条件等限制，目前钢渣处理分异变化较大； $\text{Cr}^{6+}$  等重金属在介质中迁移机理及其持续危害尚不明确，存在环境安全隐患；碱激发胶凝等高端技术成本高于普通水泥的原料处理及工艺等限制条件，不具备价格竞争优势，还需加强政策推动和生命周期评价；钢渣基质类产品环境安全评估制度不明朗，重金属浸出量、稳定氧化等参数尚无定论，不利于大规模推广。

## 五、结论

目前，钢渣处理利用由单一处理向多途径平行发展的方向，技术经济和环境风险控制问题仍然成为限制因素，未来应加强钢渣高值利用技术攻关，扩宽钢渣在新材料、环境治理方面的应用，实现“钢铁 + 建材 + 环保”跨界融合发展的循环绿色经济，支撑碳中和。

## 参考文献

- [1] 郝帅, 罗果萍, 柴轶凡, 等. 高炉渣高温调质对钢渣组成与结构的影响 [J]. 环境工程, 2023, 41 (S2): 633–639.
- [2] 崔心宇, 那贤昭. 钢渣资源化技术及展望 [J]. 中国冶金, 2024, 34 (10): 16–25.
- [3] 杨光, 杨志强, 石磊, 等. 钢渣资源化利用与实践 [J]. 冶金能源, 2024, 43(5): 37–40.
- [4] 邹敏, 沈玉, 刘娟红. 钢渣粉在水泥基材料中应用研究综述 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (09): 2964–2977.
- [5] 吴跃东, 彭霖, 吴龙, 等. 国内外钢渣处理与资源化利用技术发展现状综述 [J]. 环境工程, 2021, 39 (01): 161–165.
- [6] 莫立武, 刘朋, 徐茂淳. 钢渣碳化及其在建筑材料低碳制造中的应用 [J]. 建筑材料学报, 2024, 27 (12): 1122–1128.
- [7] 李华, 等. 钢渣基胶凝材料的性能调控与应用研究 [J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(3): 1–10.
- [8] Liu X, Wang D Z, Li Z W, et al. Efficient separation of iron elements from steel slag based on magnetic separation process. J Mater Res Technol, 2023, 23: 2362.
- [9] 时朝昆, 杨志强, 尹尤豪, 等. 梯级粉磨制备活性钢渣微粉实验研究 [J]. 金属材料与冶金工程, 2024, 52 (01): 50–54.
- [10] 肖柏林. 钢渣矿渣制备胶结剂及其在全尾砂胶结充填的应用 [D]. 北京科技大学, 2020.
- [11] 郭文斌, 刘志远, 王重君, 等. 转炉钢渣辊压破碎–有压热焖处理工艺的应用实践 [J]. 宽厚板, 2023, 29 (01): 17–21.
- [12] 卓琳, 李华, 史永林, 等. 钢渣资源的农业利用研究 [J]. 科技情报开发与经济, 2011, 21 (33): 149–150.