

改性冶金渣应用于污水净化处理的研究进展

孟 刚¹, 崔嘉程¹, 左宗良¹, 张开潜¹, 罗思义¹, 邱玉坤², 闫运书²
(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 青岛松灵电力环保设备有限公司, 山东 青岛 266520)

摘要: 改性冶金渣的资源化利用是处理冶金工业固体废弃物的重要途径,并展现出显著的应用潜力。本文系统介绍了通过物理与化学手段提升原状冶金渣吸附与催化性能的冶金渣改性研究进展,并着重分析了改性冶金渣在处理有机污染物和无机污染物(如重金属、磷酸盐)的作用机制与效能。结果表明,改性后的冶金渣基于多孔结构、丰富的活性位点及表面化学特性,可高效去除水中污染物,实现“以废治废”的环保目标。该技术兼具成本低、稳定性高和二次污染风险低等优点,为水处理行业绿色转型与资源循环利用提供了技术路径和解决方案。未来可进一步优化改性工艺,并探索改性冶金渣对多种污染物的协同去除机制。

关键词: 有色金属冶金; 改性; 冶金渣; 吸附; 污水处理

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.010

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)04-0080-07

随着全球工业化进程的加速,水污染问题日益严峻。工业废水、农业面源污染及城市生活污水中普遍存在重金属(如 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Cu^{2+})、有机污染物(如苯胺、染料、多环芳烃)以及氮磷营养盐,各类污染物特性见表1^[1]。污染物种类繁多且危害极大,既威胁水生生态系统的稳定性,又通过食物链富集对人类健康构成潜在威胁。在这一背景下,开发低成本、高效且环境友好的新型水处理材料成为环境工程领域的迫切需求。

表1 污水中污染物的分类及毒性

Table 1 Classification and toxicity of pollutants in sewage

分类	成分	特性
有机污染物	烃类	C_6H_6 、 C_7H_8 、 C_{10}H_8 等
	酚类	$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ 等
	有机农药	$\text{C}_{14}\text{H}_9\text{Cl}_5$ 等
无机污染物	重金属	Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 等
	氰化物	NaCN
	氮磷化合物	NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 、 NO_3^-

冶金渣是钢铁、有色金属冶炼过程中产生的主要固体废弃物,全球年产量逾10亿吨,其中我国占比超过30%^[2]。例如铜渣,其来源主要集中于高温火法冶炼环节,即熔炼和吹炼阶段。熔炼过程渣量

最大,主要用于去除矿石中的大量脉石;吹炼渣则含有较多铜,常被返回熔炼系统以回收有价金属。整个流程通过火法冶炼和电解精炼方法,最终将铜精矿提纯为高纯度的精炼铜^[3-4]。冶金渣的化学组成(富含 CaO 、 SiO_2 、 FeO 、 Al_2O_3 等)和多孔结构使其具有天然的吸附与离子交换能力。

改性冶金渣是指通过物理、化学或热处理等方法,进行人工处理后的冶金渣(高炉矿渣、钢渣、有色金属冶炼渣等)。冶金渣改性,旨在针对性地改变其物理性质、化学组成或矿物结构,以提升性能、稳定有害成分或开发新应用途径,从而实现冶金渣的高附加值资源化利用。

在污水处理方面,改性冶金渣以其低成本、高效能的特点成为理想的水处理剂。其多孔结构与丰富的表面活性位点使其可通过吸附、沉淀、离子交换等多机制协同作用,深度去除重金属及磷等无机污染物,且稳定性强、二次污染风险低。在固废资源化方面,该技术可将冶金渣从“废弃物”提升为“功能性产品”,实现高附加值利用,符合循环经济与碳中和目标。因此,该技术的研发与应用,不仅为经济高效的污水处理提供了技术方案,也为冶金固废的绿色循环利用提供了可行性路径,实现了

收稿日期: 2025-10-17; 修订日期: 2026-01-09

基金项目: 工业流体节能与污染控制教育部重点实验室开放课题(CK-2024-0034)

作者简介: 孟刚(2001—),男,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向: 铜渣余热利用及资源综合利用, E-mail: menggang433x@163.com;

通信作者: 左宗良,副教授, E-mail: zuozongliangneu@163.com

环境效益与经济效益的统一。研究表明,未经处理的冶金渣对水中重金属的吸附容量为50~200 mg/g,但其效果受限于比表面积低、活性位点不足及选择性差等问题。为此,改性冶金渣的研究受到广泛关注^[2]。本文综述了通过改性手段提升冶金渣吸附与催化性能的研究进展,系统分析了改性冶金渣在处理有机污染物和无机污染物(如重金属、磷酸盐)方面的作用机制与效能。

1 研究现状

改性冶金渣处理污水的研究现状如图1所示。冶金渣作为冶金工业副产品,经物理或化学改性后,可通过吸附、催化降解及化学沉淀等机制高效去除水中有机物(如染料、抗生素)和无机污染物(如重金属、磷酸盐)。改性冶金渣具备多孔结构并富含活性成分,符合“以废治废”的经济性和环保性^[5-6]。其多孔结构可吸附有机污染物;活性成分(如铁氧化物、钙基化合物)可催化分解有机污染物,同时通过调节pH、离子交换及沉淀反应可固定重金

属,抑制水体富营养化。

尽管改性冶金渣在污水处理领域展现出“以废治废”的应用潜力,但其从实验室走向大规模工程应用仍面临着一系列严峻挑战。首先,冶金渣成分复杂且不稳定,导致改性工艺难以标准化,其吸附容量和污染物去除选择性往往不及商业药剂,并且净化机理复杂,长期有效性有待验证。其次,改性产品在污水环境中可能存在重金属二次浸出风险,若管控不当,将造成“治污反致污”的严重后果,同时投加改性冶金渣易引起水体pH值波动。最后,应用与推广面临壁垒:目前缺乏统一的产品标准、应用规范和明确的政策支持,使得其经济可行性与传统方法相比优势不明显,同时公众对“废渣”的接受度低,“邻避效应”也阻碍了其实际工程应用。因此,通过技术创新攻克安全与效能难关,并构建完善的标准与政策体系,是该项技术成功落地的关键。展望未来,改性冶金渣污水处理技术将朝着精准化、安全化与资源化的方向发展。

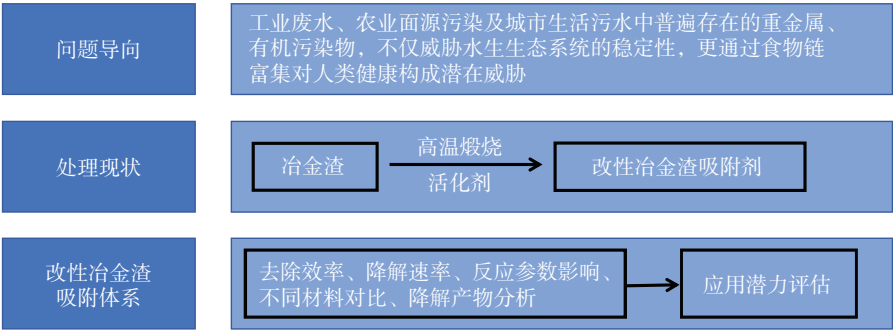


图1 改性冶金渣处理污水研究

Fig. 1 Research on modified metallurgical slag for wastewater treatment

2 冶金渣的产生及其应用潜力

冶金渣是金属在冶炼过程中必然产生的副产品。本研究主要针对铜渣和钢渣进行分析。

2.1 铜渣

铜渣是铜火法冶炼过程中的副产物。在高温熔炼环节(温度高于1 200 ℃),铜精矿(主要为CuFeS₂)与熔剂(主要为SiO₂)发生化学反应,铁等杂质元素被氧化后(FeO)与SiO₂结合,生成以铁硅酸盐为主的熔融炉渣。由于密度差异,熔体在炉内自然分层:密度较小的硅酸盐熔体(即铜渣)浮于上层,而密度

较大的铜钼Cu₂S-FeS熔体(富含铜的硫化物相)则沉于炉底。随后,上层的熔融铜渣被单独排出,通常采用水淬方式急速冷却,形成颗粒化、玻璃体含量高的固体渣。在众多冶金渣中,铜渣是具有代表性的一种。铜渣主要来源于火法炼铜的造钼熔炼和钼吹炼两个阶段,其产生过程如图2所示。

铜渣富含铁,主要以铁橄榄石的矿物形态存在,因此铜渣的密度大、硬度较高、耐磨性好。同时,铜渣中常残留少量铜、钴、金、银等贵金属,具备回收价值,但也可能含有有害重金属,若处理

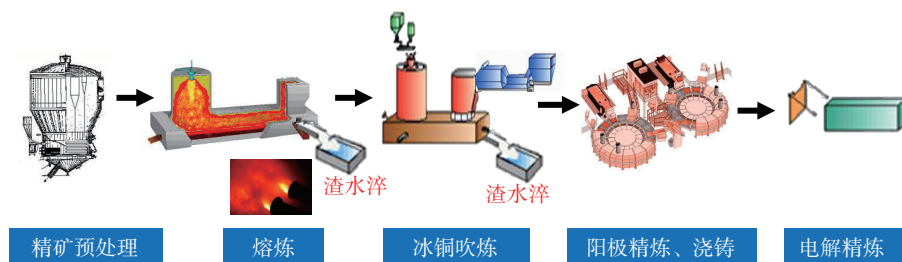


图2 铜渣的产生

Fig. 2 Production of copper slag^[3]

不当会带来环境风险。所以,对铜渣的处理通常是“先回收,再利用”。先通过贫化处理或选矿方法回收其中的有价金属,再将剩余的尾渣进行资源化利用。铜渣不仅含有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_3O_4 及其他有价金属,还具有表面多孔、比表面积大等特性,具备一定的吸附和催化性能,在废水处理方面展现出潜在应用价值^[7-9]。铜渣本身对一些重金属离子、氟离子及有机污染物具有吸附特性,可代替传统水处理药剂。陆艳等^[10]以铜渣为原料,在 NaOH 和工业水玻璃活化条件下制备了铜渣铁基类沸石地质聚合物($\text{F}_3\text{O}_4\text{@GM}$),并将其用于3种重金属离子 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 的吸附,发现该聚合物对废水中重金属离子吸附性较传统吸附剂有明显提升。此外,铜渣中含有 Si 、 Mn 、 Fe 、 P 等元素,能够提高土壤活性和维持植物生长,可用于土壤修复。

2.2 钢 渣

钢渣在将铁水炼成钢的工艺过程中产生,主要来自转炉和电炉。钢渣的成分非常复杂,其核心问题在于体积安定性不良,可能导致用其建设的道路鼓起或建材制品开裂。这是由于钢渣中含有未完全反应的游离氧化钙和游离氧化镁,这些成分在遇水后会缓慢水化并膨胀。因此,钢渣在利用前必须经过陈化或快速稳定化处理,使其性质稳定。钢渣的利用途径通常以道路工程为主,经过稳定化处理后,其坚硬特性使其可成为优良的道路基层和垫层材料。另外,钢渣也可作为烧结配料或酸性土壤改良剂使用^[11-12]。需要强调的是,钢渣的首要处理步骤是通过磁选回收其中夹杂的废钢。

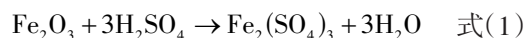
3 冶金渣改性

冶金渣通常富含活性金属组分,并具有优异的过硫酸盐活化能力。但值得注意的是,其表面沉积

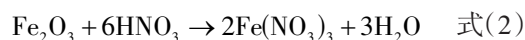
的钙氧化物和硅氧化物会显著抑制催化效能。为提升其催化性能,研究人员开发了多种改性技术,主要包括酸处理法以及还原法等。这些方法可通过对冶金渣进行表面改性,改变其表面特性和化学组成,优化孔隙结构并增强活性位点,进而提升其催化活性^[13-17]。同时,该过程还可实现固废资源化。

3.1 酸改性

Lei等^[18]采用高能球磨法,将含钛高炉渣与硫酸混合球磨,干燥后在 $400\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 煅烧,制备硫酸改性含钛高炉渣,反应机制见式(1)。与未改性的含钛高炉渣相比,改性后材料的紫外吸收能力增强,吸收带边向可见光区域拓展,带隙能降低,有利于光催化反应。



An等^[19]以赤泥和花生壳为原料,用硝酸改性后在 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 共热解,制备酸改性赤泥负载花生壳生物炭催化剂,反应机制见式(2)。制备的催化剂具有多孔结构,赤泥均匀负载在花生壳生物炭的内外表面,比表面积显著增加, Fe 含量达 18.35% ,表面含氧官能团和铁氧化物的存在有利于催化反应。



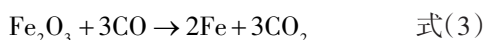
上述研究表明:酸法改性后的材料具有良好的催化活性、稳定性和实用性。酸改性是提升冶金渣催化性能的有效方法,可作为冶金固废资源化利用和环境污染治理的可行技术路径。

3.2 还原改性

冶金渣还原改性催化剂的作用机理是通过化学还原(如碳热、氢气还原)将处理对象中的金属氧化物(Fe 、 Cu 等)转化为活性组分。该技术可用于废水处理、费托合成或脱硝等领域。其核心优势是低成本、固废资源化;缺点是活性稳定性差,存在杂质

干扰等问题。改性后催化剂性能接近商业产品,是绿色化学与循环经济的典型应用。

Wang等^[20]通过共水热碳化法对钢渣进行还原改性,不仅保留了自身活性铁物种(Fe^{2+})的还原位点,还通过引入生物质衍生官能团增强了吸附能力,实现了对 $\text{Hg}(\text{II})$ 和 $\text{Cr}(\text{VI})$ 的高效去除,反应机制见式(3)、式(4)。共水热碳化法既解决了钢渣固废的资源化问题,又为重金属废水处理提供了低成本、高稳定性的吸附材料,具有较强的实际应用价值。



3.3 酸改性与还原改性对比分析

酸改性与还原改性作为提升冶金渣催化性能的两大关键技术路径,其核心目标与作用机制各有侧重。酸改性的核心在于活化与重构,通过酸处理溶解惰性组分或生成新活性相,优化材料的微观结构与表面性质,如增大比表面积、引入官能团并增强光响应性,其作用类似于为催化剂提供优异的载体。而还原改性的精髓则在于还原与赋活,通过化学还原将金属氧化物转化为低价态金属或单质,直接创造强还原性的活性位点,显著提升催化活性。在应用上,酸改性产物在光催化等领域展现出普适性优势,而还原改性则在重金属还原、费托合成等特定反应中独具价值。两者均体现了冶金固废高附加值资源化的潜力,为绿色催化与环境污染治理提供了低成本、高效率的技术方案。

4 改性冶金渣在污水治理中的应用

4.1 治理有机化合物

改性冶金渣处理污水有机物的优势在于其具有成本低、吸附/催化活性高及资源化利用充分等特性,可有效降解或吸附染料、酚类等难降解有机物。张连科等^[21]以盐酸改性水淬渣处理含苯胺废水,以萘乙二胺偶氮分光光度法测定苯胺浓度,在静态条件下开展了吸附试验。结果表明,在筛分粒径为0.15 mm(100目)、振荡时间为60 min、投加量为0.5 g、pH值为3时,处理效果最佳。同时进行了吸附平衡试验,为冶金渣应用于污水净化处理提供了理论与实践参考。Wang等^[22]采用酸改性、碱改性和热改性法对钢渣进行改性,并分析了改性后钢渣

的表面结构和化学组成变化。结果表明:酸改性钢渣对溶解性有机物的去除效果最佳,可使生活污水化学需氧量显著下降,其高比表面积和孔径有利于有机物进入孔隙被吸附;热改性钢渣因表面孔隙塌陷,主要吸附低分子量有机物,出水化学需氧量降至58 mg/L。程敏^[23]通过选择性去除钢渣表面的硅酸钙等碱性成分,降低钢渣碱度,增加比表面积,暴露更多含铁活性位点,实现了钢渣改性。研究发现:渣中Fe、Mn等过渡金属以游离态或氧化物形式存在,可激活氧化剂(H_2O_2 、过硫酸盐)产生自由基($\cdot\text{OH}$, $\text{SO}_4^{\cdot-}$),高效降解有机物, H_2O_2 激发途径如图3所示。改性钢渣对农药、抗生素、疏水性有机物等多种污染物的去除率普遍在70%~90%,优于未改性钢渣及传统Fenton体系。

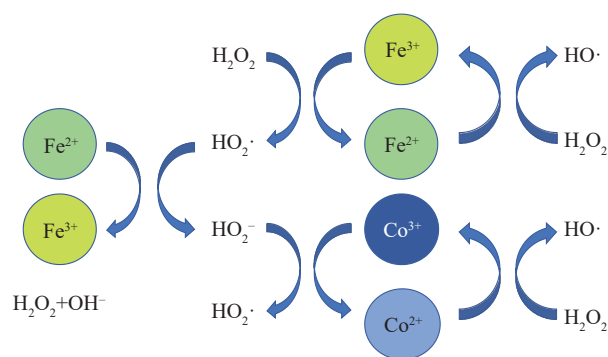


图3 H_2O_2 激发途径

Fig. 3 H_2O_2 activation pathways^[23]

4.2 治理无机化合物

改性冶金渣处理污水无机物的优势在于其有多孔结构及丰富的表面活性位点,可高效吸附或固化重金属离子(如铅、镉、铬)和磷酸盐等无机污染物,兼具化学沉淀与离子交换作用,处理稳定性强且成本低廉^[24]。Morteza等^[25]利用改性电弧炉渣处理含 Ni^{2+} 和 Zn^{2+} 的工业废水,发现改性电弧炉渣对工业废水中的 Ni^{2+} 和 Zn^{2+} 具有高效去除效果。Duan等^[26]在探究改性钢渣处理含 $\text{Cd}(\text{II})$ 酸性污水的性能时,通过将钢渣与氢氧化铝混合并高温处理,制备改性钢渣,发现改性后钢渣的比表面积、孔隙体积增加, Al_2O_3 含量上升。Wang等^[27]以废弃钢渣为原料,辅以秸秆生物炭、坚果壳生物炭和生化腐植酸等生物质材料,制备了改性材料。通过研究不同吸附条件对溶液中 Pb^{2+} 吸附容量的影响,为土壤和水中重金

属吸附固定提供了新材料与新方法。冉帆^[28]以供热炉渣和流化床炉渣为填料,经物理、化学、微生物改性后,用以处理生活污水。结果表明:物理改性提高了比表面积和污染物去除率;化学改性改变了炉渣结构,提高了总氮、总磷去除率。Vu等^[29]利用钢渣从污水处理出水中去除残留磷。结果表明,钢渣粒径越小,除磷效率越高。并且发现初始pH对除磷效率影响呈两段式,其中溶液体积负载增加,除磷效果提升。该研究还通过多种表征手段证实了钢渣表面在吸附前后的变化,为钢渣在污水处理中的应用提供了理论依据。Yun等^[30]围绕改性钢渣(MSS)和钢渣(SS)对污水中磷的处理性能展开研究,以1 073 K高温热解1 h对转炉钢渣进行改性。研究还通过等温吸附实验,发现改性钢渣的最大吸附容量相比未改性时增加了34%。Shi等^[31]用氯化镁对钢渣进行化学浸渍改性制备吸附剂,并用于污水中氨氮和磷的同步去除。通过探究钢渣投加量、溶液pH、初始溶液浓度和反应时间等因素对同步脱氮除磷的影响,发现改性钢渣吸附性能显著提升。

改性冶金渣在治理污水无机化合物方面展现出显著优势,其核心在于能通过物理、化学及生物改性,显著提升材料的吸附、沉淀和离子交换能力,从而高效去除重金属离子(如 Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+})和营养盐(如磷、氨氮)。首先,改性手段优化了材料物化性质:如通过高温热解、与氢氧化铝或生物炭复合,可增加比表面积与孔隙体积,为污染物提供更多吸附位点,增强表面反应活性。其次,改性材料对污染物的去除机制具有多样性和协同效应:一方面,多孔结构可实现对重金属离子的物理吸附与固化;另一方面,表面活性组分(如金属氧化物)可通过化学沉淀(如磷酸盐形成沉淀)、络合作用及离子交换实现深度净化。综上可知,改性冶金渣以其低成本、高效能和高稳定性的特性,为污水无机化合物的治理提供了可靠的技术路径,充分发挥了“以废治废”的环保价值。

5 结 论

改性冶金渣在污水净化处理领域展现出显著的应用价值,其通过物理、化学及生物改性手段实现性能提升的科学机理主要体现在三个方面:首先,

改性过程优化了冶金渣的表面特性,通过酸处理或还原法等方法增加了比表面积和活性位点密度;其次,改性后的冶金渣表现出优异的污染物去除能力,对有机污染物的去除主要通过吸附和催化降解双重机制,对无机污染物的去除则依靠离子交换和化学沉淀作用;最后,该技术可实现“以废治废”的循环经济模式,既能解决冶金固废处置难题,又可降低水处理成本。研究表明,改性冶金渣在处理多种污染物时均表现出良好的性能,如对染料类有机物的高效降解和对重金属离子的稳定固定。

未来围绕材料改性、应用机制、工程应用三个核心方向展开研究,推动改性冶金渣技术成为兼具环境效益和经济效益的污水处理解决方案,将使改性冶金渣在污水处理领域展现出更广阔的发展前景。首先,在材料改性技术方面,重点开发多尺度协同改性技术,通过精准调控冶金渣的晶体结构和表面特性,提升其去除污染物的效率;其次,在应用机制研究方面,深化对重金属-有机物协同去除、氮磷同步回收等复杂污染体系的机理探索;最后,在工程化应用层面,着力解决规模化制备、反应器优化和智能控制等关键技术问题。未来研究还需重点关注产物的安全处置和全生命周期评估,为实现“以废治废”的可持续发展目标提供科学支撑。

参考文献:

- [1] Zhong W Z, Hao W C, Liang S H, et al. Catalytic ozonation of polyethylene glycol in aqueous solution by copper slag: efficiency, active substances and mechanisms [J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 59: 104958.
- [2] 李星阳, 张秀秀, 刘宏文, 等. 冶金渣活化过硫酸盐降解有机废水的研究进展 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(9): 37-45.
- [3] 李明冬, 饶剑, 刘星, 等. 铜冶炼渣综合利用现状与展望 [J]. 中国矿业, 2025, 34(4): 251-261.
- [4] 王科, 刘红召, 王威, 等. 铜渣中铁资源综合回收及利用研究现状 [J]. 中国有色冶金, 2025, 54(2): 25-35.
- [5] 王翠翠, 万荣惠, 王六生, 等. 改性黄磷水淬渣的制备及其对含砷(Ⅲ)废水吸附性能的研究 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(9): 2980-2985.
- [6] 周许林. 冶金固废综合利用技术开发与工程示范[Z/OL]. 武汉: 武汉钢铁, 2013.

- [7] 姚艺佳, 柯璇, 刘硕, 等. 铜冶炼渣资源化处理及综合利用研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2025, 16(5): 689-698.
- [8] 赵红梅, 杨大锦, 张候文. 净化渣资源化综合利用工艺研究[J]. 世界有色金属, 2024(3): 122-126.
- [9] 余伟奇. 铜渣资源化利用研究现状及展望[J]. 铜业工程, 2023(4): 173-179.
- [10] 陆艳, 罗中秋, 周新涛, 等. 铜渣铁基类沸石地质聚合物吸附 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 性能及机理[J]. 精细化工, 2023, 40(12): 2739-2751.
- [11] 黄勇, 李斯宁. 国外工业固废资源化利用探析[J]. 交通建设与管理, 2025(4): 30-33.
- [12] 丛玉丽. 钢渣矿化资源化利用技术进展与应用[J/OL]. 矿产综合利用, [2025-10-17]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1251.TD.20250527.1404.002>.
- [13] Yang L Y, Yang M M, Xu P, et al. Characteristics of nitrate removal from aqueous solution by modified steel slag[J]. Water, 2017, 9(10): 757.
- [14] Yu Y H, Du C M, Fan S L, et al. Acid-leaching separation of phosphorus from the BOF slag modified with Al_2O_3 [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(5): 108394.
- [15] Jiang P G, Liu J S, Xiao Y Y, et al. Recovery of iron from copper slag via modified roasting in $CO-CO_2$ mixed gas and magnetic separation[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2020, 27(7): 796-806.
- [16] Rao L, Dong Y C, Gui M C, et al. Growth, stratification, and liberation of phosphorus-rich C_2S in modified BOF steel slag[J]. Materials, 2020, 13(1): 203.
- [17] Wang G F, Xiang J, Liang G C, et al. Application of common industrial solid waste in water treatment: a review[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(52): 111766-111801.
- [18] Lei X F, Xue X X. Preparation, characterization and photocatalytic activity of sulfuric acid-modified titanium-bearing blast furnace slag[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(12): 2294-2298.
- [19] An Q, Tang M, Deng S M, et al. Methyl orange degradation with peroxydisulfate activated with the synergistic effect of the acid-modified red mud and biochar catalyst[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2023, 48(7): 8819-8834.
- [20] Wang H B, Duan R, Zhou X Q, et al. Efficient removal of mercury and chromium from wastewater via biochar fabricated with steel slag: performance and mechanisms[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 10: 961907.
- [21] 张连科, 贾飞虎, 陈莉荣. 盐酸改性水淬渣对苯胺废水吸附的研究[J]. 人民黄河, 2011, 33(2): 69-70, 74.
- [22] Wang S N, Yao S J, Du K, et al. The mechanisms of conventional pollutants adsorption by modified granular steel slag[J]. Environmental Engineering Research, 2021, 26(1): 190358.
- [23] 程敏. 基于钢渣资源化利用的类Fenton反应去除有机污染物的机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [24] Chowdhury S R. Recycled smelter slags for in situ and ex situ water and wastewater treatment—current knowledge and opportunities[J]. Processes, 2023, 11(3): 783.
- [25] Changalvaei M, Nilforoushan M R, Arabmarkadeh A, et al. Removal of Ni and Zn heavy metal ions from industrial waste waters using modified slag of electric arc furnace[J]. Materials Research Express, 2021, 8(5): 055506.
- [26] Duan J M, Su B. Removal characteristics of $Cd(II)$ from acidic aqueous solution by modified steel-making slag[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 246: 160-167.
- [27] Wang A, Wu M L, Li Z Y, et al. Utilizing different types of biomass materials to modify steel slag for the preparation of composite materials used in the adsorption and solidification of Pb in solutions and soil[J]. Science of the Total Environment, 2024, 914: 170023.
- [28] 冉帆. 炉渣性质及其污水处理效果的应用研究[D]. 天津: 天津城建大学, 2014.
- [29] Vu M T, Nguyen L N, Abu Hasan Johir M, et al. Phosphorus removal from aqueous solution by steel making slag: mechanisms and performance optimisation[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 284: 124753.
- [30] Yun Y P, Zhou X Q, Li Z F, et al. Comparative research on phosphorus removal by pilot-scale vertical flow constructed wetlands using steel slag and modified steel slag as substrates[J]. Water Science and Technology, 2015, 71(7): 996-1003.
- [31] Shi C H, Gao M C, Huang X Y, et al. Preparation of magnesium-modified steel slag and its adsorption performance for simultaneous removal of nitrogen and phosphorus from water[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 702: 135068.

Progress in the Application of Modified Metallurgical Slag in Wastewater Purification Treatment

Meng Gang¹, Cui Jiacheng¹, Zuo Zongliang¹, Zhang Kaiqian¹, Luo Siyi¹, Qiu Yukun², Yan Yunshu²

(1. *School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;*

2. *Qingdao Songling Power Environmental Equipment Co., Ltd., Qingdao 266520, China*)

Abstract: Resource utilization of modified metallurgical slag, as an important solution for solid waste disposal in metallurgical industry, shows significant potential for application in wastewater purification and treatment. This paper reviewed research progress on enhancing adsorption and catalytic properties of modified metallurgical slag through physical and chemical modification methods, and systematically analyzed the treatment mechanism and efficiency in treating organic pollutants (e.g., aniline, dyes) and inorganic pollutants (e.g., heavy metals, phosphates). The study showed that the modified metallurgical slag can efficiently remove pollutants from water by virtue of its porous structure, abundant active sites and surface chemical properties, realizing the environmental protection goal of 'treating waste with waste'. The technology had advantages such as low cost, high stability and low risk of secondary pollution, providing an innovative solution for the green transformation of water treatment industry and resource recycling. In the future, it is necessary to further optimize the modification process and to explore strategies for synergistic management of multiple pollutants.

Key words: non-ferrous metallurgy; modified; metallurgical slag; adsorption; sewage treatment

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.010

引文格式: 孟刚, 崔嘉程, 左宗良, 张开潜, 罗思义, 邱玉坤, 闫运书. 改性冶金渣应用于污水净化处理的研究进展[J]. 铜业工程, 2026(4): 80-86.

Meng Gang, Cui Jiacheng, Zuo Zongliang, Zhang Kaiqian, Luo Siyi, Qiu Yukun, Yan Yunshu. Progress in the application of modified metallurgical slag in wastewater purification treatment [J]. Copper Engineering, 2026(4): 80-86.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc