

典型有色冶金渣余热回收技术研究进展

左宗良^{1,2}, 刘晓楠¹, 鄢丰顺¹, 张庆建¹, 焦礼静^{2,3}, 闫文^{2,3}, 李沛霖⁴, 张志永⁴

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 钢铁工业环境保护全国重点实验室, 北京 100088; 3. 中冶节能环保有限责任公司, 北京 100088; 4. 中冶东方工程技术有限公司, 山东 青岛 266555)

摘要: 有色金属火法冶炼产生的铜渣、镍铁渣、铅渣等有色冶金渣虽对环境造成危害, 但仍具有余热回收与有价金属回收等价值。本文系统梳理了三类渣料的物理化学共性与特性, 综述了这些渣料余热回收技术的研究进展, 按物理法、化学法分类, 剖析了技术原理、优化方向及应用瓶颈, 明确物理法以粒化-换热协同为核心、化学法侧重余热-资源协同的技术特征, 揭示了融合二者的梯级回收系统是未来主流的发展方向。本文构建的“核心渣种-技术类别-具体工艺”技术体系, 系统对比了三类渣料的物性差异与技术适配性, 提出的跨渣种通用技术开发等方向, 可为有色冶金渣余热回收技术的工业化升级与绿色发展提供理论参考和技术支撑。

关键词: 有色冶金渣; 余热回收; 铜渣; 镍铁渣; 铅渣; 粒化

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.002

中图分类号: TF811; TF09 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)04-0013-11

我国是全球最大的有色金属生产与消费国之一, 铜、镍、铅等关键有色金属在现代工业、新能源、电子信息等领域发挥着不可替代的作用^[1]。然而, 有色金属火法冶炼过程中会伴随产生大量冶炼废渣。据统计, 每生产1 t粗铜约产生2.2 t铜渣^[2-3], 每生产1 t镍约产生6~16 t镍渣^[4]。我国铜渣累计堆存量已达1.2亿吨, 镍渣累计堆存量亦超千万吨。铅渣是火法炼铅的主要危险固体废物, 产生于鼓风炉、底吹炉等核心工艺设备。其成分以Fe、CaO、Zn、Pb氧化物为主, 并含As、Cr等有害元素, 环境风险突出。有色冶金渣质地坚硬、熔融态出渣温度超1 000 ℃, 兼具余热回收与有价金属回收潜力, 是行业固废协同处置的关键对象。这些有色冶金渣多属于危险固体废物, 长期堆存不仅占用大量土地资源, 还可能因As、Pb、Cr等有毒有害元素的淋溶和渗透, 对土壤、地下水环境造成严重污染。

与此同时, 有色冶金渣蕴含着丰富的资源与能源价值: 一方面, 渣中含有Cu、Ni、Fe、Zn、Pb等多种有价金属, 其含量往往高于天然矿石的工业开采品位; 另一方面, 熔融态冶金渣在出渣时具有巨大的余热回收潜力^[3]。当前, 我国有色金属冶炼的能源利用率仍有较大提升空间。在“双碳”政策与能

源结构转型背景下, 开展有色冶金渣的特性研究与余热回收利用, 既是解决渣料污染问题、实现固体废物减量与无害化的迫切需求, 也是提高能源利用效率、提升资源综合利用水平、推动行业绿色可持续发展的关键路径。

当前, 国内外对不同有色冶金渣物理化学特性的系统梳理与对比分析尚不充分, 且物理法和化学法的融合应用研究处于探索阶段, 尚未形成跨渣种的通用技术体系与梯级回收框架, 难以满足行业工业化升级的实际需求。基于此, 本文系统梳理铜渣、镍铁渣、铅渣三类典型有色冶金渣的物理化学共性与特性, 明确各种渣种成分、产出工艺对余热回收技术的适配性要求。重点综述三类渣料的余热回收技术研究进展, 深入分析不同技术的核心原理、工艺优化方向、技术优势与应用瓶颈, 并总结各技术的研究热点与发展趋势。

本文的创新之处体现在三方面: 一是构建了“核心渣种-技术类别-具体工艺”的有色冶金渣余热回收技术体系, 系统对比了铜渣、镍铁渣、铅渣的物性差异与技术适配性, 弥补了现有研究缺乏跨渣种系统分析的不足; 二是理清了物理法(粒化-换热协同)与化学法(余热-资源协同)的技术特征与

收稿日期: 2026-03-03; 修订日期: 2026-04-22

基金项目: 钢铁工业环境保护全国重点实验室开放课题; 青岛西海岸新区2024年度科技项目; 山东省高等学校优秀青年创新团队项目

作者简介: 左宗良(1990—), 男, 山东潍坊人, 博士, 副教授, 研究方向: 冶金渣余热回收, E-mail: zuozongliangneu@163.com; 通信作者:

张庆建, 教授, E-mail: zqjianli@163.com

融合逻辑,明确了不同技术的优化方向与应用边界,为技术选型提供了清晰的理论依据;三是提出了跨渣种通用技术开发、化学法协同回收深化、系统集成与智能化、工业化示范和标准建立的未来研究方向,为有色冶金渣余热回收技术的工业化升级与绿色发展构建了完整的研究框架。

1 有色冶金渣热回收技术研究的意义

1.1 提高能源利用效率，助力“双碳”目标实现

有色金属冶炼属于能源密集型行业,熔融态有色冶金渣蕴含巨大的显热资源。铜渣出渣温度1 200~1 300 ℃,每吨铜渣含热量约1.13 GJ;镍铁渣、铅渣等熔融态渣料出渣温度亦普遍高于1 000 ℃,余热资源总量可观^[46]。当前我国有色金属冶炼行业能源利用率较低,大量熔融渣的余热未被充分回收,直接冷却导致能源浪费。通过热回收技术将渣料余热转化为蒸汽、热水等可用能源,用于发电、精矿干燥、厂区采暖等,可显著降低行业对一次能源的消耗,减少二氧化碳等温室气体排放,为实现“双碳”目标提供有力支撑。

1.2 降低环境污染风险，推动固体废物无害化处理

传统有色冶金渣处理多采用水淬急冷或自然冷却后堆存的方式，不仅浪费余热，还存在诸多环境隐患：水淬过程可能产生含重金属的废水，自然冷却后的渣料长期堆存易发生风化、淋溶，导致As、Pb等有毒有害元素进入土壤和地下水，污染周边生态环境。热回收过程可同步实现渣料的降温 and 固化，如：干式粒化热回收技术在回收余热的同时，可将熔融渣转化为稳定性更强的固态颗粒，减少有害元素迁移风险；部分热回收工艺还可协同去除渣中S、Zn等杂质，为后续渣料的无害化处置和资源化利用奠定基础，实现“能源回收-污染控制”双重目标。

1.3 挖掘经济价值潜力，提升行业综合效益

有色冶金渣热回收的经济效益体现在两个方面：一是能源回收收益。如某硫铁矿制酸装置通过回收烟气余热，年新增收益达160万元。铜渣余热回收若实现产业化，每吨渣回收的热量相当于34 kg标准煤，大规模应用可显著降低企业能源成本。二

是资源回收收益。热回收过程中形成的固态渣料,其矿相结构更利于后续有价金属的提取。如,缓冷后的铜渣通过磨浮工艺可获得品位23%~25%、回收率88%~92%的铜精矿^[7-8];转底炉热回收工艺在回收余热的同时,还可实现铜渣提铁脱锌,获得Fe含量65%以上的磁性矿粉和粗锌粉尘,提升资源综合利用效率。此外,热回收减少了渣料堆存占地面积,降低了土地占用成本和环保处置费用,进一步提升了企业的综合经济效益。

图1构建了完整的有色冶金渣余热回收技术体系,是当前典型有色冶金渣热回收技术分类。重点渣料包括铜渣、镍铁渣、铅渣三类;技术路径划分为物理法与化学法两大类。物理法具体工艺包括粒化与热回收单元,化学法则包括生物质热解等协

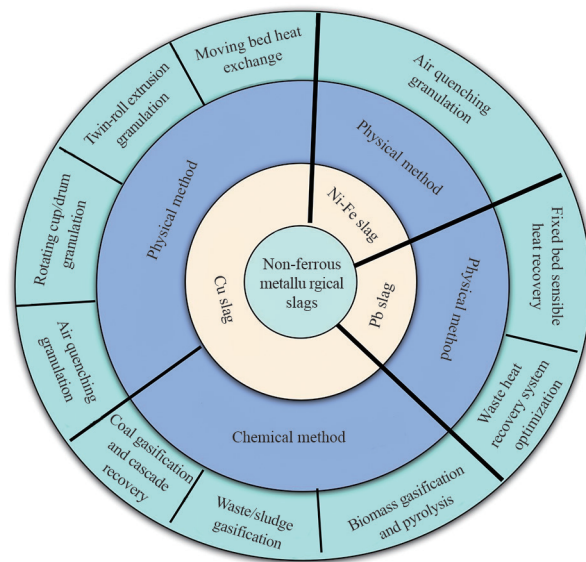


图1 当前典型有色冶金渣热回收技术分类
Fig. 1 Classification of current typical heat recovery technologies for non-ferrous metallurgical slag

同工艺。

该体系既体现了“渣种特性适配技术选择”的针对性,明确了物理法(规模化显热回收)与化学法(高附加值资源协同)的互补分工,也隐含了多技术融合的发展趋势,全面呈现了当前有色冶金渣余热回收的技术布局与逻辑脉络。

图1采用“核心渣种-技术类别-具体工艺”的圈层架构,系统呈现了铜渣、镍铁渣、铅渣三类典型有色冶金渣的热回收技术体系;当前热回收的对

象主要为铜渣(Cu slag)、镍铁渣(Ni-Fe slag)、铅渣(Pb slag)三类有色冶金渣;物理法包含粒化单元(转杯/转筒粒化、对辊挤压粒化、风淬粒化)与热回收单元(移动床换热、固定床显热回收),是当前工业中应用较为成熟的技术路径;化学法以“余热-资源协同回收”为核心,涵盖生物质热解、垃圾/污泥气化、煤气化等工艺,通过吸热反应将渣体余热转化为高附加值产品的化学能。

2 铜渣热回收技术研究进展

2.1 铜渣的物理化学性质

铜渣作为铜火法冶炼过程的主要副产物,其物理化学性质由冶炼原料和熔炼工艺参数(如温度、炉型、溶剂类型)等因素共同决定,主要体现在化学成分、物相组成、物理特性及黏温特性等方面,这些性质直接影响铜渣余热回收效率与有价金属提取效果。

2.1.1 铜渣产出工艺环节

铜渣主要产生于铜火法冶炼的核心工艺环节,具体对应各类火法冶炼炉窑的熔炼与吹炼过程。其中,闪速熔炼工艺中,铜精矿在闪速熔炼炉内完成氧化熔炼,产生冰铜与液态铜渣;转炉吹炼工艺(如P-S转炉、特尼恩特转炉)中,冰铜经吹炼生成粗铜时,会伴随产出二次铜渣。此外,在密闭鼓风炉、诺兰达炉、三菱炉、艾萨炉等其他火法冶炼设备的熔炼过程中,也会同步产出大量铜渣,这些铜渣均为对应冶炼环节的主要副产物。

2.1.2 铜渣的化学成分

铜渣的化学成分以Fe、Si的氧化物为主,同

时含有Cu、Co、Ni、Zn、Pb等有色金属氧化物及少量S、As等有害元素^[8-11]。不同冶炼方法产出的铜渣成分存在显著差异(见表1)^[4]。其中,铁氧化物(FeO, Fe₃O₄)总含量可达30%~65%,是铜渣中占比最高的组分,部分铜渣中Fe含量甚至高于低品位铁矿石;SiO₂含量为16%~38%,是构成铜渣硅酸盐相的核心成分;Cu含量为0.17%~4.6%,且随冶炼工艺不同波动较大,其中特尼恩特转炉产出的铜渣残铜含量最高,闪速熔炼渣残铜含量最低。此外,铜渣中还含有少量CaO(0.5%~19%)、MgO(0.2%~7.0%)、Al₂O₃(0.2%~12%)等氧化物,以及S(0.2%~7.9%)、As、Zn等杂质元素,其中S、As等元素的存在会增加铜渣处理过程中的环保风险。

2.1.3 铜渣的物理性质

铜渣的物理性质呈现显著的高温特性与结构特征,主要包括密度、硬度、熔点、黏度及物相组成等。

密度与硬度方面。铜渣的真密度为2 800~3 800 kg/m³,堆积密度为2 307~2 595 kg/m³,莫氏硬度可达6~7,属于致密坚硬的固体废弃物,其耐磨性能优于普通建筑用砂,可作为喷砂除锈材料使用。

熔点特性方面。典型铜渣的熔化温度受化学成分影响较大,变形温度约1 187 ℃(1 460 K),软化温度约1 199 ℃(1 472 K),流动温度约1 209 ℃(1 482 K),实际粒化与还原过程需在1 209 ℃以上进行,以保证其熔融态流动性^[3]。

物相组成方面。铜渣的主要物相为铁橄榄石(2FeO·SiO₂)和磁铁矿(Fe₃O₄)。此外还含有少量CaSiO₃、Al₂O₃等次要相及CuS、CuO等含铜物相。铁

表1 不同铜冶炼方法产出铜渣的主要化学成分

Table 1 Main chemical components of copper slag produced by different copper smelting methods(%, mass fraction) ^[8-12]								
铜冶炼方法	FeO	Fe ₃ O ₄	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	S	Cu
转炉(P-S converter)	48~65	12~29	16~28	1~2	0~2	5~10	1.5~7.0	1.1~2.9
密闭鼓风炉	33~42	3~10	31~39	6~19	0.8~7.0	4~12	0.2~0.45	0.35~2.4
诺兰达法	42~52	19~29	22~25	0.5~1	1.0~1.5	0.5	5.2~7.9	3.4
瓦纽科夫法	48~52	8	22~25	1.1~2.4	1.2~1.6	1.2~4.5	0.55~0.65	2.53
三菱法	51~58	—	30~35	5~8	—	2~6	0.55~0.65	2.14
艾萨法(ISASMELT)	40~45	7.5	31~34	2.3	2	0.2	2.8	1
Inco 闪速熔炼	48~52	10.8	33	1.73	1.61	4.72	1.1	0.9
闪速熔炼	38~54	12~15	28~38	5~15	1~3	2~12	0.46~0.79	0.17~0.33
特尼恩特转炉	48~55	20	26.5	9.3	7	0.8	0.8	4.6

注:“—”表示该方法下对应成分未检测或含量极低。

橄榄石呈致密的四面体结构,难以直接分离,而磁铁矿具有反式尖晶石结构,还原性较强,是铜渣中优先被还原的含铁物相。

黏温特性方面。铜渣的黏度随温度升高而显著降低,在1 327 °C以上时黏度可维持在0.3 Pa·s以下,满足粒化与熔融还原的流动性要求;碱度(CaO/SiO₂)对黏度影响显著,随着碱度增加,黏度先降低后升高,在碱度为1.0时达到最低值,过量CaO会以固相形式存在于熔渣中,反而影响流动性^[3,13]。

热学性质方面。铜渣的比热容约为1.1 kJ/(kg·K),焓值为1 250~1 800 kJ/kg,熔化热为420 kJ/kg,高温铜渣(1 300 °C以上)的显热占冶金过程总余热的30%,具备巨大的余热回收潜力^[14]。

2.1.4 熔池熔炼(三连炉法)铜渣特性

熔池熔炼(三连炉法)是铜冶炼领域的先进工艺,应用日益广泛,其产出铜渣成分稳定,FeO含量45%~55%、SiO₂含量28%~35%,残铜量控制在0.8%~1.5%,S含量0.3%~0.8%,Fe₃O₄占比低于15%。该渣流动温度为1 107~1 147 °C,在1 400 °C时为熔融态,黏度为0.2~0.4 Pa·s,真密度3 200~3 600 kg/m³,比热容1.15~1.2 kJ/(kg·K),每吨渣含显热约1.05~1.18 GJ,且物相晶粒细小均匀,粒化与换热适配性显著优于传统铜渣。

2.2 铜渣余热回收方法

图2为铜渣热回收技术工艺研究历程,该图以时间轴为脉络,呈现了铜渣热回收技术从单一物理粒化向“物理-化学协同、实验室-工业化应用”演进的全过程:

1984—1987年(早期探索阶段)^[15-17]:以物理粒化技术为核心,联合试验开展转筒粒化研究。北京矿冶研究总院开发的对辊挤压粒化工艺,为铜渣的规模化冷却与初步余热回收提供了基础技术方案。

2009年(技术拓展阶段)^[18-20]:昆明理工大学首次探索化学法路径,实现了铜渣余热与化学资源回收的协同尝试,提升了热回收技术的附加值。

2016—2024年(多技术融合阶段)^[2-3, 21-24]:东北大学开发离心粒化技术,青岛理工大学、东北大学探索“离心粒化+化学法”的融合工艺,江西理工大学^[25]开展风淬破碎研究,并逐步推进移动床换热等高效热回收单元的模拟与试验。

2024—2026年(技术深化拓展阶段):青岛理工大学、昆明理工大学^[26]完善移动床换热系统,赤峰白银物流有限公司^[27]提出“还原-粒化-热回收”工艺。

基于此,本文系统梳理有色冶金渣的特性,重

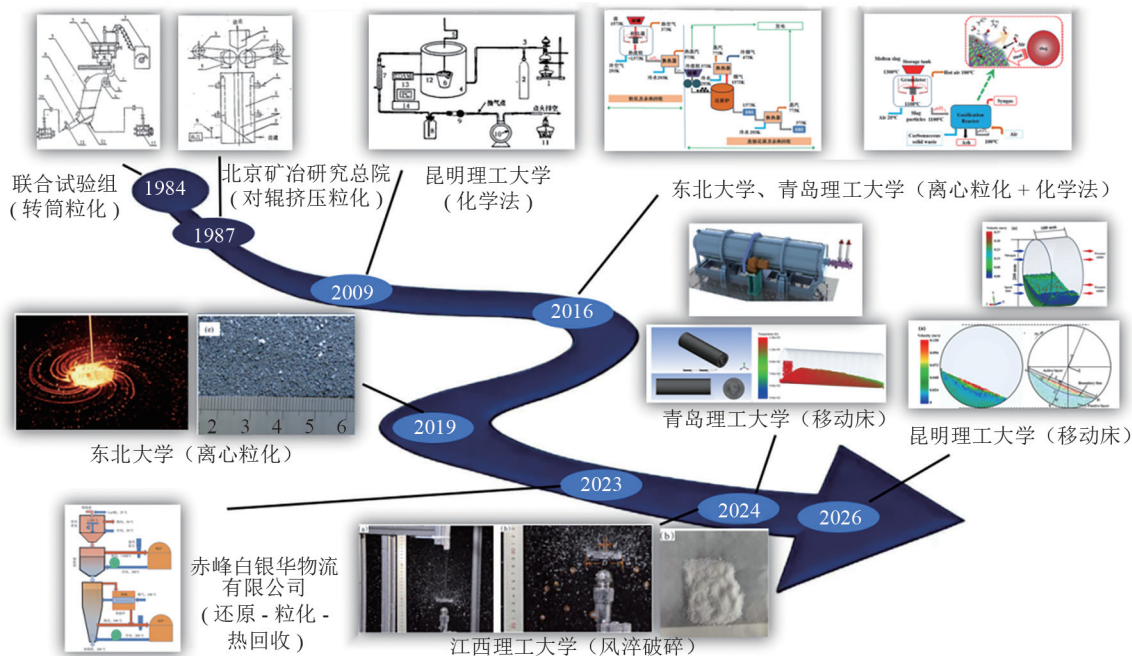


图2 铜渣热回收技术研发历程

Fig. 2 Research development process of copper slag heat recovery technology

点综述铜渣、镍铁渣、铅渣的余热回收技术研究进展,为后续回收技术研发与工程应用提供理论基础。

铜渣余热回收技术可分为物理法与化学法两大类:物理法通过粒化-换热协同实现显热回收,工艺成熟、稳定性强;化学法借助吸热化学反应实现余热与资源的协同回收,能效与附加值更高。

2.2.1 物理法余热回收

物理法的核心思路是通过造粒技术将高温液态铜渣转化为分散性良好的固态颗粒,再通过气固对流、辐射等方式回收显热,最终获得可用热能与性能稳定的渣料产品。目前,研究热点集中于风淬、转杯/转筒、双辊挤压等粒化技术的工艺优化,以及颗粒流换热特性的精准调控,具体进展如下:

1) 风淬造粒技术。作为主流物理法技术,风淬造粒通过高速气流冲击熔融铜渣实现粒化,其核心优化方向为气流方式与工艺参数的匹配。尹一鸣等^[28]通过液态石蜡模拟实验对比侧吹与底吹方式,发现底吹法可使粉态颗粒(0~0.5 mm)占比降低3%,中间颗粒(0.5~2 mm)占比提升8%,颗粒均匀性与球形度更优。数值模拟验证表明,100 m/s的气流速度可实现稳定液膜破碎,减小熔体与气体出口直径比,进一步细化液滴。戴鹏飞等^[24]研究工质黏度影响时发现,液态石蜡(模拟高黏度铜渣)粒化后粒径分布最窄,有利于后续换热。凝固模拟结果证明,1 082 °C、2 mm铜渣液滴在27 °C空气中经1.62 s可完全凝固,气流速度提升与粒径减小均能显著缩短凝固时间。黎显俊等^[29]进一步提出“底吹风淬+堆积冷却”一体化系统,气体用量仅为侧吹法的40%,造粒率达95.6%,0.5 mm粒径颗粒堆积换热效率最优,为工业化系统设计提供了完整技术方案。

2) 转杯/转筒粒化技术。适用于大规模连续处理铜渣,其核心优势是处理量大、运行稳定。史彦辉等^[27]提出“转杯粒化+颗粒流储换热+气基还原”协同工艺,通过添加1% CaO调控铜渣黏度,在600~2 000 r/min转速下获得1.5~2.5 mm的均匀颗粒,余热回收率达77.5%,发电95 kWh。同时,每吨铜渣可回收海绵铁431 kg。周经^[15]对炼铜电炉渣的转筒粒化试验表明:熔体落点偏角16°~20°、转速60~100 r/min时,高铁渣粒化效果最优,<2.5 mm渣粒占比达

56.9%;热回收分两阶段进行,一次换热可获得200~240 °C的热风,65%以上热量需通过二次换热回收,排渣温度>950 °C时可避免渣粒重黏。熔池熔炼(三连炉法)铜渣因黏度低、成分稳定,适配转杯粒化+移动床换热协同工艺,转杯转速800~1 500 r/min时可获得1.2~2.0 mm的均匀颗粒,热回收效率达82%~88%,最终渣温90~130 °C,能耗较传统铜渣风淬降低15%~20%;化学法可耦合煤气化+直接还原系统,利用渣体高温驱动吸热反应,烟效率63%~67%,同步回收TFe≥68%的海绵铁与(CO+H₂)体积分数≥85%的合成气,实现余热-资源协同回收。

3) 双辊挤压粒化技术。适用于低温、高黏度铜渣,核心难题为黏辊与连续排渣。牛中生^[17]针对鼓风炉铜渣的试验表明:挤压厚度<0.28 mm时,<2 mm渣粒占比达65.6%;通过辊内冷水冷却+外部喷水雾防黏,以及结合缝道式振动斜床排渣,可实现稳定运行,渣粒在高0.8 m的换热室内可完全凝固。

4) 移动床换热技术。昆明理工大学胡建航等^[26,30]通过CFD-DEM模拟研究了铜渣不同粒度颗粒在移动床中的动态换热特性。阎新志等^[31]采用CFD模拟研究颗粒塔换热时发现:260 °C冷却空气穿过1.5~3 mm铜渣时,气流速度从4 m/s增至10 m/s,换热量线性提升至 7.0×10^7 W,但压降从0.3 MPa升至2.1 MPa,需在换热效率与能耗之间平衡;颗粒塔的冷却前沿分界面随气流速度上移,为换热区高度设计提供了量化依据。

表2系统对比了有色冶金渣余热回收领域5种主流物理法的核心性能指标。主流物理法包括风淬粒化、转杯/转筒粒化、双辊挤压粒化、移动床换热及固定床显热回收技术;性能指标包括热回收效率、最终渣温、主流粒径分布、能耗情况、投资特点及核心适配渣种。表2数据均来源于工业化试验或模拟验证的典型工况。由表2可知:风淬粒化效率最优;热回收效率区间为60%~95.6%;最终渣温范围为80~180 °C,双辊挤压粒化渣温相对较高;粒径分布因工艺差异呈现0.5~5 mm的不同范围,适配不同换热需求;能耗与投资按“风淬粒化>转杯/转筒粒化~移动床换热>固定床显热回收>双辊挤压粒化”依次递减;适配渣种则结合铜渣、镍铁渣、铅渣的物

表2 不同物理法的关键指标对比

Table 2 Comparison of key indicators of different physical methods

物理法技术	热回收效率/%	最终渣温/℃	主流粒径分布/mm	能耗/投资特点	核心适配渣种
风淬粒化	70~95.6	80~150	0.5~3	能耗中高, 投资中高	铜渣、镍铁渣
转杯/转筒粒化	70~85	90~160	1.5~2.5	能耗中等, 投资中等	铜渣、铅渣
双辊挤压粒化	60~70	120~180	<2	能耗低, 投资低	高黏度铜渣
移动床换热	70~80	100~150	1.5~3	能耗中等, 投资中等	铜渣
固定床换热	75~85	90~140	2~5	能耗低, 投资中低	铅渣、铜渣

性差异,明确了各技术的针对性应用场景。

2.2.2 化学余热回收

化学法通过匹配吸热化学反应的温度,将铜渣余热转化为化学能(如可燃气体、还原产物等),实现“余热回收-资源利用”协同,解决了物理法余热品位低、焓损失大的问题。当前研究主要分为生物质协同转化、垃圾/污泥气化、煤气化三大方向。

1) 生物质气化与热解。以生物质为还原剂或热解原料,利用铜渣余热驱动反应,同步回收Fe、Cu等有价值金属与生物质能。Zuo等^[32-34]用热重分析表明,松木锯末还原铜渣效果最优,生物质/渣质量比为2:1时还原率达80.6%,CaO添加比例为0.3:1时可提升反应效率,反应符合收缩核模型。同时发现铜渣作为热载体可提升生物质热解气产量与H₂产率,生物质/铜渣质量比为1:1时热解气低位热值最高,铜渣可促进主反应与烃类裂解,但无法降低反应活化能。李娟琴等^[20, 35]开展了铜渣催化木屑水蒸气气化实验。结果表明,1 000℃煅烧5 h的铜渣催化效果最优,906℃、铜渣/生物质质量比1.63时气化效率达92.85%,铜渣温度降低130~240℃,余热利用率为18.49%~22.63%。

2) 垃圾/污泥气化。“以废治废”,即利用铜渣余热驱动城市生活垃圾、污泥等有机废物气化^[22, 36]。赖坤等^[18]以1 200~1 350℃铜渣为热载体,在水蒸气载气下实现生活垃圾气化,铜渣中MgO、CaO及Cu元素可催化焦油裂解,提升CO、H₂等可燃组分含量。900℃时反应速率最快,瞬时产气量峰值最高。Zuo等^[23]对比铜渣与镍渣对污泥气化的催化效果发现:镍渣因CaO含量高,转化率优于铜渣(7.8%),提升了11.8%;煅烧改性可增强铜渣催化活性,转化率进一步提升14.5%。据此提出了铜渣氧化处理、镍渣避免氧化的差异化方案。

3) 煤气化与梯级回收。通过煤气化吸热反应回收余热,同步制备高价值合成气。Zuo等^[37-38]提出热回收-直接还原(TER-DR)系统,引入CO₂重整CH₄反应(高焓值吸热反应),使系统焓效率从物理法的57.3%提升至61.3%,每吨铜渣可额外产出67.3 m³ CO和H₂。在梯级回收方面,Zuo等^[21]设计了“高温气化/煅烧-中低温热解”梯级系统,焓效率达66.6%~70.1%,显著优于传统水淬法(20.7%)与重力床物理法(52.2%)。其中气化-热解(G-P)系统能效最高,强化热解系统可提升热解气H₂含量至84.9%。此外,铜渣还可经羧基介导路径催化水煤气变换反应,Fe₂O₃活性组分可优化中间体吸附强度,实现余热回收与制氢的协同。添加CaO可进一步提升煤气化H₂比例,C:S:CaO=1:1:2时总失重率最高,形成的铁基多孔结构可强化传质过程^[37]。

3 镍铁渣热回收技术研究进展

3.1 镍铁渣的物理化学性质

3.1.1 产出工艺环节

镍铁渣的产出核心对应火法炼镍及镍铁合金冶炼的关键工艺环节:一是火法炼镍的造钎熔炼环节,镍精矿在熔炼炉内与熔剂反应,生成含镍冰铜和液态镍渣;二是冰铜吹炼环节,吹炼过程中冰铜中的Fe、S等杂质被氧化,形成二次镍渣;三是矿热炉冶炼镍铁合金工艺,镍铁矿在矿热炉内经还原熔炼生成镍铁合金时,矿物中的Fe、Si等元素形成镍铁渣排出,这是镍铁渣最主要的产出来源之一。

3.1.2 镍铁渣的化学成分

镍铁渣属于FeO-SiO₂-CaO(MgO)三元渣系,化学成分以FeO和SiO₂为核心,伴有少量CaO、MgO、Al₂O₃等氧化物^[4]。渣中含Fe量较高,主要以铁橄榄石(Fe₂SiO₄)形式存在,是最主要的矿物相;同时含

有Ni、Cu、Co等有价值金属，但含量较低，多以硫化物或氧化物形式分散于渣相之中，回收难度较大。

3.1.3 镍铁渣物理性质

镍铁渣外观多呈黑色或深褐色，表面无明显金属光泽，质地坚硬且脆，易碎难磨，其真密度通常在 $3.0\sim 4.0\text{ t/m}^3$ 之间(参考同类冶炼渣特性推导)。熔融态镍铁渣出渣温度较高，冷却后易形成玻璃体或结晶态混合结构，渣体稳定性较强，但因成分复杂，直接利用难度较大。

镍铁渣产出量巨大。据统计，每生产1 t镍约排放6~16 t镍渣^[39]，目前国内累计堆存量已达上千万吨。其核心特征为渣排量大、有价值金属回收效益低，大量堆存不仅占用土地资源，有害元素迁移还可能对周边环境造成潜在污染，同时导致Ni、Fe等宝贵资源的浪费。

3.2 镍铁渣余热回收方法

当前镍铁渣余热回收以物理法为主，化学法研究则尚处于起步阶段。物理法的核心技术为风淬粒化热回收，研究重点集中于技术可行性验证、工艺参数优化及工业化潜力分析。其核心逻辑与铜渣风淬一致，但因镍铁渣黏度更高、成分波动更大，需针对性优化装置与参数。

张杰等^[39]通过分析123件中国专利，明确风淬粒化是镍铁渣物理法回收的核心方向，其技术方案主要由渣沟、风淬装置、余热回收装置、除尘装置组成。高温镍铁渣经渣沟导入后，被高压空气流击碎冷却为固态颗粒，热气流进入余热锅炉转化为蒸汽(发电/供暖)，除尘装置控制粉尘。研究指出，当前技术重点为气流参数(风速、风压)与渣流参数(流量、温度)的匹配优化，核心挑战是解决高黏度镍铁渣的黏结问题，但与黏结问题相关专利仅5项，表明该技术仍处于探索阶段，需产学研协同推进工业化试验。

黎显俊等^[40]通过实验与模拟，为风淬工艺优化提供了理论支撑。实验采用液态石蜡模拟高黏度镍铁渣，对比了侧吹与底吹方式，发现底吹法可在较低风压下实现完全粒化，造粒过程更稳定。关键参数优化结果显示，100 m/s的气体流速可将熔渣流股稳定冲击为液膜并破碎为均匀液滴，减小熔体出口与气体出口直径比可避免大尺寸液团形成。在数值

模拟方面，采用ANSYS软件结合VOF多相流、凝固熔化及DO辐射模型，模拟1 082 ℃、2 mm镍铁渣液滴冷凝过程，发现熔渣迎风面在0.05 s内即可形成固相坯壳，1.62 s后完全凝固，迎风面换热效率高于背风面。参数敏感性分析表明，气流速度越大、液滴粒径越小，凝固时间越短(15 m/s较5 m/s气流下的凝固时间缩短28%，1 mm粒径的液滴凝固时间仅为3 mm液滴的17%)。模型与实验验证偏差较小，可精准预测工业级系统换热效果。

综合来看，镍铁渣风淬粒化技术的未来发展方向明确。一是优化风淬装置结构，提升对不同黏度镍铁渣的适配性；二是强化粒化与余热回收系统的协同匹配，进一步提高余热利用率；三是完善除尘、降噪等配套环保设施，提升技术的环境友好性。目前该技术已形成初步技术方案，但仍需通过工业化试验验证稳定性与经济性。

4 铅渣余热回收技术研究进展

铅渣余热回收以物理法为核心，兼顾系统层面能量流-物质流优化，结合装置设计与系统建模提升回收经济性和稳定性，当前研究聚焦于显热回收装置开发、SKS炼铅法系统优化两大方向。

4.1 铅渣的物理化学性质

4.1.1 产出工艺环节

铅渣主要产生于铅冶炼的全流程核心工艺环节，覆盖多种炉型的熔炼与处理过程。一是鼓风炉还原熔炼环节，铅精矿与熔剂在鼓风炉内反应，铅氧化物被还原为粗铅，杂质元素形成炉渣排出；二是底吹炉氧化熔炼环节，底吹炉处理铅精矿或二次铅原料时，生成粗铅和氧化铅渣；三是烟化炉烟化提锌环节，鼓风炉铅渣或底吹炉铅渣在烟化炉内被还原，锌等低沸点元素经挥发回收，同时产生烟化炉铅渣；四是反射炉熔炼及浮渣处理环节，反射炉熔炼铅精矿、窑炉处理冶炼浮渣时，均会伴随铅渣产出。

4.1.2 化学成分

铅渣(铅熔炼渣)来源于鼓风炉、底吹炉、烟化炉、反射炉及浮渣处理窑炉等铅冶炼关键设备，化学成分复杂且波动范围较大，主要由多种氧化物及它们相互结合形成的化合物、固溶体、共晶混合物

组成,同时含有少量硫化物、氟化物等。渣中含有Pb、Zn、Cr、As等具有回收价值的元素,核心成分及波动范围为:Fe 17%~31%、CaO 10%~25%、Zn 3%~20%、Pb 0.5%~5%、 Al_2O_3 3%~7%、MgO 1%~5%^[41-43]。不同原料及冶炼工艺导致铅渣成分存在差异,但上述主要成分均处于该波动区间内。

4.1.3 物理性质

铅渣外观多为深灰色或黑褐色,表面致密且质地坚硬,部分铅渣因含硫化物而呈现微弱金属光泽,真密度为3.5~4.5 t/m³,脆性较强,磨矿难度中等。熔融态铅渣出渣温度较高,冷却过程中易形成多相复合结构,其中的Pb、Zn等元素多以难溶化合物形式嵌布于渣相,难以直接解离回收。

铅渣具有产量大、成分复杂、有价金属含量偏低、处理困难等显著特点。危险固体废物长期堆存不仅占用大量土地,还可能因As、Pb等有毒有害元素的淋溶和渗透,对土壤、地下水环境造成严重污染,同时导致Pb、Zn等资源流失,因此其无害化处理与资源化利用需求迫切。

4.1.4 三联炉炼铅的铅渣特性

三联炉炼铅是铅冶炼熔池熔炼技术的典型代表,其产出铅渣成分稳定性优于单一炉型铅渣,Fe含量20%~28%、CaO含量15%~22%、Zn含量5%~12%、Pb含量1.2%~3.0%,As、Cr等有害元素总含量 $\leq 0.8\%$,碱度(CaO/SiO_2)1.2~1.5。该渣熔融态出渣温度为1 150~1 250 °C,1 200 °C时黏度为0.3~0.5 Pa·s,真密度为3 600~4 000 kg/m³,显热密度为1.0~1.1 GJ/t,冷却后呈玻璃体结构,脆性强,热稳定性良好,有害元素淋溶风险低。

4.2 铅渣余热回收方法

铅渣余热回收以物理法为核心,同时注重系统层面的能量流-物质流优化,通过装置设计与系统建模,提升余热回收的经济性与稳定性。当前研究主要分为显热回收装置开发、水口山(SKS)炼铅法系统优化两大方向。

4.2.1 固定床物理法显热回收装置设计与数值模拟

针对传统水淬法浪费余热、污染环境的问题,刘云昊^[40]以某铅冶炼氧化炉铅渣为研究对象,通过实验测试与数值模拟,系统探究铅渣凝固换热规律并设计一体化显热回收装置。研究采用X射线衍射

(XRD)、热重-差示扫描量热联用技术(TG-DSC)表征铅渣物性,结合离散坐标(DO)辐射模型、凝固/熔化模型模拟凝固过程,通过多孔介质模型分析固定床换热特性,同时建立汽化冷却烟道模型研究烟气协同换热。结果表明,铅渣凝固速度呈先快后慢趋势,辐射换热占比随温度降低逐渐下降。设计的“熔渣进料-输送-凝固冷却-二次回收”装置中,固定床鼓风量增加可显著提升换热效率,汽化冷却烟道辐射换热量占比超80%。该方案可避免热力型NO_x产生,400 t/d规模项目年节约标准煤929.78 t,内部收益率达23.67%,为铅渣工业化余热回收提供了装置设计与参数优化依据。三联炉炼铅的铅渣适配该固定床+汽化冷却烟道一体化显热回收装置,渣料以2~4 mm颗粒堆积换热,鼓风速度为6~8 m/s时热回收效率达80%~85%,最终渣温为100~130 °C。且该渣玻璃体结构利于有价金属选择性浸出,可同步回收Zn(浸出率 $\geq 85\%$)、Pb(浸出率 $\geq 78\%$),浸出渣可作为建筑骨料资源化利用,实现余热回收-有价金属提取-固废处置三重协同。

4.2.2 SKS炼铅法余热回收系统优化

针对SKS炼铅法能耗偏高问题,王洪才等^[42-43]从物质流与能量流耦合视角,系统分析铅渣余热回收的节能潜力,提出了针对性优化路径。在系统分析阶段,构建物质流与能量流模型,通过“基准物流图”对比实际生产偏差,发现底吹炉、烟化炉余热蒸汽及高铅渣显热未充分利用是主要节能瓶颈,系统节能潜力达117.42 kgce/t;在物质流优化方面,增大外加物质流、减小循环与排放物流可降低能耗,底吹炉产铅占比每提高1%,吨铅能耗降低22.74 kgce。

在此基础上,王洪才等^[43]进一步构建物质流-能量流耦合模型,以最小吨铅能耗为目标函数,量化不同余热回收路径的节能效果。结果表明:底吹炉余热蒸汽自用可降低吨铅能耗36.35 kgce;烟化炉余热回收可降低47.97 kgce;液态铅渣显热传递至鼓风炉可降低33.10 kgce。三类余热回收合计节能潜力与前期分析一致。该耦合模型明确了各余热回收路径的优先级,解决了“何处节、节多少”的核心问题,为SKS炼铅法企业的余热回收系统升级提供了精准的理论支撑与优化方向。

5 总结与展望

5.1 研究总结

本文系统综述了铜渣、镍铁渣、铅渣三类典型有色冶金渣的物理化学性质与余热回收技术研究进展,得出以下核心结论:

1)有色冶金渣共性特征为产出量大、蕴含高品位余热与有价金属。特性差异体现在成分与物性差异:铜渣Fe、SiO₂含量高,含铜量0.17%~4.6%;镍铁渣以FeO-SiO₂-CaO(MgO)三元体系为主,黏度较高;铅渣成分波动大,含Pb、Zn等元素,属危险废物,需针对性设计回收技术。

2)余热回收技术以物理法与化学法为核心。物理法成熟度高,铜渣风淬、转杯粒化技术已形成工业化方案,而镍铁渣风淬技术尚处于探索阶段,铅渣则侧重一体化装置设计;化学法能效与附加值更高,铜渣生物质协同、煤气化梯级回收已取得突破,镍铁渣、铅渣化学法研究较少。

3)三类渣料回收技术各有侧重。铜渣技术路径最丰富,物理-化学融合系统是发展重点;镍铁渣需突破高黏度渣粒化黏结问题;铅渣需结合危险废物特性,实现余热回收与无害化协同。

5.2 未来研究方向

结合当前研究瓶颈与行业需求,未来可从以下方向突破:

1)跨渣种通用技术开发。针对不同渣料物性差异,研发自适应调节的粒化装置,提升技术兼容性;开发高效换热材料与结构,降低换热过程能耗与压降。

2)化学法协同回收深化。拓展镍铁渣、铅渣化学法研究,开发适配其成分的吸热反应体系;强化“余热-资源-环保”协同,提升有毒有害元素固化/去除效率。

3)系统集成与智能化。构建多单元耦合的梯级回收系统,优化能量与物质流匹配;引入数值模拟与智能监测,实现工艺参数实时调控,提升系统稳定性与经济性。

4)工业化示范与标准建立。推进中试与工业化示范项目,积累实际运行数据;建立渣料余热回收的技术标准与评价体系,规范行业发展。

参考文献:

- [1] 官智超,周灿,邹舟,等.中国铜冶炼行业数字化转型挑战与关键技术[J].铜业工程,2025(4): 1-10.
- [2] Zuo Z L, Feng Y, Dong X J, et al. Advances in recovery of valuable metals and waste heat from copper slag [J]. Fuel Processing Technology, 2022, 235: 107361.
- [3] 左宗良.粒化铜渣余热回收及碳基直接还原的应用基础研究[D].沈阳:东北大学,2019.
- [4] 赵成,朱军,王正民,等.重要有色金属冶炼废渣的特征及处理技术[J].矿产综合利用,2019,40(6): 1-6.
- [5] 赖祥生,黄红军.铜渣资源化利用技术现状[J].金属矿山,2017(11): 205-208.
- [6] 姜平国,吴朋飞,胡晓军,等.铜渣综合利用研究现状及其新技术的提出[J].中国矿业,2016,25(2): 76-79.
- [7] 朱祖泽,贺家齐.现代铜冶金学[M].北京:科学出版社,2003.
- [8] 王琛,田庆华,王亲猛,等.铜渣有价金属综合回收研究进展[J].金属材料与冶金工程,2014,42(6): 50-56.
- [9] 许并社,李明照.铜冶炼工艺[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [10] 王华,李磊.铜渣中有价金属回收的应用基础研究[M].北京:科学出版社,2013.
- [11] 郭秀键,倪晓明,马丁,等.铜渣处理与综合利用[J].有色冶金设计与研究,2017,38(2): 23-26.
- [12] Tian H Y, Guo Z Q, Pan J, et al. Comprehensive review on metallurgical recycling and cleaning of copper slag [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 168: 105366.
- [13] 张林楠.铜渣中有价组分的选择性析出研究[D].沈阳:东北大学,2005.
- [14] Gorai B, Jana R K, Premchand. Characteristics and utilisation of copper slag—a review [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2003, 39(4): 299-313.
- [15] 云南冶炼厂,昆明冶金设计研究院,昆明冶金所联合试验组.电炉炼铜炉渣余热回收的研究[J].冶金能源,1984,3(5): 29-31.
- [16] 周经.炼铜电炉渣余热回收试验[J].有色金属(冶炼部分),1985(3): 22-27.
- [17] 牛中生.炼铜炉渣粒化回收余热[J].有色金属(冶炼部分),1987(1): 18-21.
- [18] 赖坤,何屏,袁永功,等.高温铜渣气化城市生活垃圾试验研究[J].资源开发与市场,2009,25(6): 492-494.

- [19] 赵鲁梅, 胡建杭, 王华, 等. 预煅烧铜渣对生物质催化热解动力学的影响[J]. 过程工程学报, 2010, 10(4): 726-731.
- [20] 李娟琴, 胡建杭, 王华, 等. 高温铜渣催化木屑水蒸气气化的实验研究[J]. 过程工程学报, 2012, 12(5): 876-881.
- [21] Zuo Z L, Yu Q B, Xie H Q, et al. Thermodynamic analysis on molten slag waste heat cascade recovery method (MS-WHCR)[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 134(3): 2171-2181.
- [22] Zuo Z L, Feng Y, Dong X J, et al. Energy absorption characteristics and kinetics of carbonaceous solid waste gasification with copper slag as heat carrier[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(46): 20076-20086.
- [23] Zuo Z L, Jing T, Wang J M, et al. Sludge gasification using iron bearing metallurgical slag as heat carrier: characteristics and kinetics[J]. Energies, 2022, 15(23): 9223.
- [24] Zuo Z L, Feng Y, Yang H Q, et al. Exploring the use of modified copper slag by copper concentrate in chemical chain gasification: oxygen absorption and release kinetics[J]. Energy, 2025, 332: 137071.
- [25] 戴鹏飞, 张斌, 黎显俊, 等. 高温铜渣风淬造粒实验研究及铜渣液滴冷凝过程的数值模拟[J]. 有色金属科学与工程, 2024, 15(5): 650-659.
- [26] Ma C W, Hu J H, Wang H, et al. CFD-DEM investigation of the flow and heat transfer characteristic of copper slag and biomass particles in a coupled waste heat utilization system[J]. Powder Technology, 2026, 469: 121713.
- [27] 史彦辉, 武海军, 杨国强, 等. 粒化—气基直接还原回收铜渣余热和有价值金属[J]. 矿冶, 2023, 32(4): 83-87.
- [28] 尹一鸣, 黎显俊, 张斌, 等. 风淬造粒实验研究及铜渣底吹风淬过程多相流动数值模拟[J]. 有色金属科学与工程, 2025, 16(5): 669-678.
- [29] 黎显俊, 张斌, 尹一鸣, 等. 铜冶炼过程熔渣余热回收系统研究[C]//第十二届中国金属学会青年学术年会暨首届“碳中和”冶金青年科学家沙龙论文集(二). 赣州: 江西理工大学, 2024.
- [30] Ma Y L, Cao W B, Zhang F X, et al. Numerical study on the waste heat recovery from multi-sized copper slag particles by the moving bed[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2025, 47(1): 5733-5754.
- [31] 阎新志, 杨国强, 武海军, 等. 高温铜渣颗粒流换热 CFD 模拟研究[J]. 矿冶, 2023, 32(6): 82-87.
- [32] Zuo Z L, Yu Q B, Wei M Q, et al. Thermogravimetric study of the reduction of copper slag by biomass[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 126(2): 481-491.
- [33] 左宗良. 生物质热解及生物质还原铜渣的实验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [34] Zuo Z L, Yu Q B, Xie H Q, et al. Thermogravimetric analysis of the biomass pyrolysis with copper slag as heat carrier[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, 129(2): 1233-1241.
- [35] 李娟琴, 胡建杭, 王华, 等. 利用高温铜渣余热进行生物质水蒸气气化的热力学分析[J]. 材料导报, 2013, 27(4): 154-158, 162.
- [36] Zuo Z L, Luo S Y, Liu S H, et al. Thermokinetics of mass-loss behavior on direct reduction of copper slag by waste plastic char[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 405: 126671.
- [37] Yang H Q, Dong X J, Zuo Z L, et al. The effect of CaO on coal gasification reaction with high-temperature copper slag as catalyst[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2023, 45(3): 9450-9464.
- [38] Zuo Z L, Yu Q B, Liu S H, et al. Thermodynamic analysis of thermal energy recovery and direct reduction (TER-DR) system for molten copper slag[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 131(2): 1691-1698.
- [39] 张杰, 薛曼龄, 刘猛. 镍铁渣处理及利用技术研究的专利分析[J]. 冶金设备, 2019(2): 56-59.
- [40] 黎显俊. 镍铁熔渣余热回收过程中风淬粒化实验及数值模拟研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2025.
- [41] 刘云昊. 工业炉窑炉渣及烟气余热回收技术研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2024.
- [42] 王洪才. 基于SKS炼铅法能耗系统的分析研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [43] 王洪才, 时章明, 陈通, 等. 水口山炼铅法生产企业物质流与能量流耦合模型的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2011(10): 9-12.

Research Progress in Waste Heat Recovery Technologies for Typical Non-Ferrous Metallurgical Slags

Zuo Zongliang^{1,2}, Liu Xiaonan¹, Yan Fengshun¹, Zhang Qingjian¹, Jiao Lijing^{2,3}, Lü Wen^{2,3}, Li Peilin⁴, Zhang Zhiyong⁴

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2. State Key Laboratory of Iron and Steel Industry Environmental Protection, Beijing 100088, China; 3. Zhongye Energy Conservation and Environment Protection Co., Ltd., Beijing 100088, China; 4. Zhongye Dongfang Engineering Technology Co., Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: Non-ferrous metallurgical slags generated during pyrometallurgical smelting of non-ferrous metals cause environmental pollution as a stockpile, but slags also have enormous potentials for waste heat recovery and valuable metal recycling. This paper systematically synthesized common and specific physicochemical characteristics of non-ferrous metallurgical slags. It focused on research progress, core principles, process optimization directions, technical advantages, and application bottlenecks of waste heat recovery technologies for three typical slags (copper slag, ferronickel slag, and lead slag), which were classified into physical methods and chemical methods, and summarized research hotspots and development trends of each technology. Physical methods were centered on synergistic technology of granulation and heat exchange, while chemical methods focused on synergistic recovery of waste heat and resources. Cascaded recovery system integrating the two is the main development direction in the future. This paper provided theoretical reference and technical support for industrial upgrading and green development of waste heat recovery technologies for non-ferrous metallurgical slags.

Key words: non-ferrous metallurgical slag; waste heat recovery; copper slag; ferronickel slag; lead slag; granulation

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.002

引文格式: 左宗良, 刘晓楠, 鄢丰顺, 张庆建, 焦礼静, 闫文, 李沛霖, 张志永. 典型有色冶金渣余热回收技术研究进展[J]. 铜业工程, 2026(4): 13-23.

Zuo Zongliang, Liu Xiaonan, Yan Fengshun, Zhang Qingjian, Jiao Lijing, Lü Wen, Li Peilin, Zhang Zhiyong. Research progress in waste heat recovery technologies for typical non-ferrous metallurgical slags[J]. Copper Engineering, 2026(4): 13-23.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc