

# 冶金固废提锌技术的发展现状与展望

陈琛<sup>1</sup> 倪书权<sup>1</sup> 李加旺<sup>1</sup> 史光<sup>1</sup> 李永军<sup>2</sup> 索延帅<sup>2</sup>

(1. 中冶京诚工程技术有限公司 环保与暖通工程技术所, 北京 100176;

2. 中冶京诚工程技术有限公司 炼铁所, 北京 100176)

**[摘要]** 传统的固废直接送往铁前工艺循环, 灰泥中的锌被直接引入高炉, 不仅影响运行炉况, 还会富集导致设备损坏和综合生产效率下降。因此, 探索有效的提锌工艺, 减少锌在高炉中的富集, 对于提高钢铁生产的经济性和环保性具有重要意义。本文基于钢铁冶金灰泥提锌的化学反应和动力学、热力学特征, 系统分析了包括回转窑法、转底炉法及多级浸出法等主要提锌工艺的特点及其适用性。现有传统工艺虽然具有一定的技术优势, 但在实际应用中仍存在能耗高、操作复杂和环境影响大的问题, 因而提出了优化反应器设计、引入预处理技术和智能化控制系统以及多工艺集成的改进措施, 以提高综合效率。未来的冶金灰泥提锌技术将向更高效、环保和智能化的方向发展, 推动钢铁行业的可持续发展。

**[关键词]** 湿法浸出; 高炉灰泥; 转炉灰泥; 固废提锌; 反应器设计; 循环经济; 机器视觉; 绿色金融

**[中图分类号]** X756; TF813; TP18; F831 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)05-0015-10

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.05.003

## 0 前言

随着钢铁工业规模的不断扩大, 冶金固废的产生量与日俱增, 循环利用成为了钢铁企业固废处理的重要课题。钢铁冶金固废的循环利用在美日及西欧国家实现较好的发展<sup>[1]</sup>, 但我国钢铁生产过程中每年产生的数千万吨钢铁冶金灰泥<sup>[2]</sup>却无法做到产业化、无害化循环利用。传统处理流程将灰泥直接送往铁前工艺循环, 虽然流程简单、投资少, 但是以 ESG 指标评判, 存在综合能耗高、不环保的问题, 且灰泥中的锌被直接引入高炉, 不

仅影响运行炉况, 还会富集导致设备损坏和综合生产效率下降。因此, 探索有效的提锌工艺, 减少锌在高炉中的富集, 对于提高钢铁生产的经济性和环保性具有重要意义<sup>[3]</sup>。本文系统总结冶金固废提锌技术的发展历程与现状, 通过分析不同提锌工艺的反应机理, 揭示其实际应用中的优势和不足, 并重点介绍新型提锌反应器的设计原理及其在工艺集成中的应用, 以期对未来提锌技术的优化和创新提供参考。

## 1 冶金灰泥直接循环的危害

固废资源化价值被认识, 钢铁企业最先寻求在既有冶炼工序中实现冶金灰泥中铁资源的循环利用。如图 1 所示, 高炉、转炉灰泥<sup>[4]</sup>、电炉灰作为烧结原料循环回收铁元素的同时, 尘泥中的锌元素不断引入“烧结-高炉-瓦斯灰泥-烧结”的炉外锌循环体系中。由于高炉冶炼的特殊热场和流场特征, 锌元素在高炉中循环从而产生了富集, 最终导致炉内锌负荷超标。

尘泥中的碱金属和重金属锌、铅元素均通过参与炉内循环对冶炼产生负面影响。表 1 总结了锌负荷超标现象引起的负面影响和解决方案。

**[收稿日期]** 2024-05-29

**[作者简介]** 陈琛(1986—)男, 高级工程师, 注册动力工程师, 注册化学工程师, 注册投资咨询师, 主要从事冶金“三废”循环经济的基础研究与工艺开发、冶金领域人工智能应用算法的研究工作。

**[引用格式]** 陈琛, 倪书权, 李加旺, 等. 冶金固废提锌技术的发展现状与展望[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(5): 15-24.

CHEN Chen, NI Shuquan, LI Jiawan, et al. Development status and prospect of zinc recovery technology from metallurgical solid waste [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(5): 15-24.

表 1 高炉炉况与锌富集现象分析

高炉	炉内反应及炉体结构的负面反馈	锌负荷/ ( $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ )	烧结矿锌含量/ ( $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ )(总锌 输入占比/%)	瓦斯灰泥锌含量/ ( $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ )(总锌 支出占比/%)	解决方案
邯郸钢铁 1000 $\text{m}^3$ 高炉 <sup>[5]</sup>	锌负荷周期性增加后,出现炉况周期性失常,具体表现为炉墙黏结,炉衬侵蚀加速,风口二套变形上翘,炉墙上涨严重,风口大套断裂	0.255	0.205 (80.58)	0.127 (73.43)	监控烧结矿锌浓度
新余钢铁 11 号高炉 <sup>[6]</sup>	锌负荷增加伴随了高炉炉墙结厚、燃耗上升、炉中心气流减弱等现象	1.516	0.65 (77.27)	无检测记录	监控烧结矿锌浓度,降低炉外锌输入
凌源钢铁 5 号高炉 <sup>[7]</sup>	高炉灰锌富集后,出现了高炉风口中套变形、严重漏煤气,炉墙上涨,风口大套断裂,炉体上部静压波动大、煤气流二次分布不合理等现象	2.29	1.011 (44.15)	1.226 (74.94)	监控烧结矿锌浓度
萍乡安源钢铁有限公司 1080 $\text{m}^3$ 高炉 <sup>[8]</sup>	炉身结厚结瘤、炸瘤频次与锌负荷表现出正相关	2.62	1.053 (40.1)	1.053 (62)	监控烧结矿锌浓度,加强锌排出
方大九钢 2 号高炉 <sup>[9]</sup>	高锌负荷时,炉身中部结厚,空料面需要休风爆破处理	2.59	无检测记录	无检测记录	监控烧结矿锌浓度

根据表 1,以烧结为起点的炉外锌循环导致炉内锌富集,锌富集导致炉内锌负荷超标,炉内锌负荷超标造成高炉炉况异常、需要频繁检修并最终导致炼铁生产效率下降。

由图 1 可知,锌的主要输入项为烧结工序,主要输出项为高炉煤气尘泥。为了解决炉内锌富集,需要减少锌输入(控制烧结矿输入锌)。以图 1 分析长流程冶金物质流的锌循环:烧结矿和废钢是整个大循环的一次“锌源”,经过高炉特殊温度场环境,锌蒸气发生多孔结构的吸附<sup>[10]</sup>形成炉内锌富集;同时,由于特殊的粉尘粒度<sup>[11]</sup>及炉内温度场环境,瓦斯灰泥是炉内锌排出的主要途径;应用高炉、转炉、电炉除尘尘泥作为烧结原料循环回收铁元素,导致高炉煤气、转炉煤气的灰泥及电炉灰中的锌元素成为炼铁工艺二次“锌源”,间接助推了炉内锌富集。

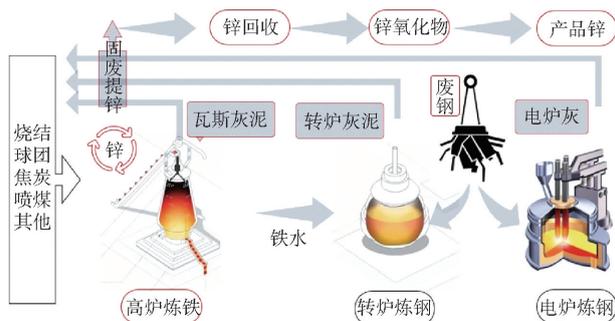


图 1 基于锌铁分离的冶金固废提锌流程图

高炉/转炉煤气携带的灰泥既是炉内循环锌排

出的终点,也是作为炉外循环起点的烧结工序的最大“锌源”。因此,要解决高炉锌富集应该首先着眼于切断以煤气尘泥为起点的炉外锌循环,但由于不能直接舍弃煤气尘泥中高比例的铁元素,所以基于铁/锌分离理念的铁/锌回收技术极具环境意义和经济价值,既实现了铁回收和锌回收,也切断了主要的二次“锌源”输入。

## 2 固废提锌技术的历史发展和现状

### 2.1 冶金灰泥提锌的化学物理过程

烧结矿、高炉灰泥、转炉灰泥和电炉灰中锌元素的理化形态<sup>[12]</sup>见表 2。

由表 2 可知,固废中锌通常以氧化物、硫化物和硅酸盐等多种化合物形式存在,且均为化学高价态氧化物和不溶性盐类。因此,提锌工艺涉及的目标化学反应是从化学反应数据库中筛选出将锌的高价态化合物氧化还原或将锌的不溶性盐类转化为可溶性盐类。

锌的高价态氧化还原反应<sup>[13]</sup>见表 3,锌的不溶性盐类的固-液相离子反应<sup>[13]</sup>见表 4。

在表 3 中 7 个气-固、固-固氧化还原微观基元反应的反应热/动力学分析结果表明,其中有 3 个反应为吸热反应,因而在反应器设计中要考虑能量的持续输入,从而在反应热/动力学范畴内推进反应加速向右进行。同理,所有的反应都发生了固相进入气相和气相体积增大的现象,因此在不影响反应速

表2 烧结矿、高炉尘泥、转炉灰和电炉灰中锌的理化形态

锌源	金属吸附态	硫化物	氧化物	硅酸盐	氯化物	其他矿物晶相
烧结矿	锌金属以吸附态存在于烧结矿的表面和孔隙表面	闪锌矿 (ZnS)	锌尖晶石 (ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) 或氧化锌 (ZnO)	与烧结矿中的硅酸盐矿物结合,形成含锌硅酸盐 (ZnSiO <sub>3</sub> )	氯化锌 (ZnCl <sub>2</sub> )	在烧结过程中形成的其他矿物相,如铁酸锌
高炉灰泥	锌金属以吸附态存在于高炉灰的表面和孔隙表面	硫化锌 (ZnS)	氧化锌 (ZnO)	较少见	氯化锌 (ZnCl <sub>2</sub> )	较少见
转炉灰泥	锌金属以吸附态存在于转炉灰的表面和孔隙表面	较少见	较少见	较少见	氯化锌 (ZnCl <sub>2</sub> )	较少见
电炉灰	锌金属以吸附态存在于电炉灰的表面和孔隙表面	较少见	氧化锌 (ZnO)	与电炉灰中的硅酸盐矿物结合	较少见	较少见

表3 锌化合物的气-固、固-固氧化还原反应<sup>[13]</sup>

序号	微观基元反应	反应标准吉布斯能/(kJ·mol <sup>-1</sup> )	反应能量和动量描述
1	[C] + ZnO = Zn + CO(g) ↑	$\Delta G^\theta = 19.4 + 0.1678T$	吸热反应,气相体积增大,固相进入气相
2	CO + ZnO = Zn + CO <sub>2</sub> (g) ↑	$\Delta G^\theta = -35.5 + 0.1581T$	放热反应,气相体积增大,固相进入气相
3	[C] + ZnO·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = Zn + 2Fe + 4CO(g) ↑	$\Delta G^\theta = 401.6 + 0.7008T$	吸热反应,气相体积增大,固相进入气相
4	2CO + ZnO·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = Zn + 2FeO + 2CO <sub>2</sub> (g) ↑	$\Delta G^\theta = -111.0 + 0.4002T$	放热反应,气相体积增大,固相进入气相
5	[C] + ZnSiO <sub>3</sub> = Zn + SiO <sub>2</sub> + CO(g) ↑	$\Delta G^\theta = 28.2 + 0.1726T$	吸热反应,气相体积增大,固相进入气相
6	CO + ZnSiO <sub>3</sub> = Zn + SiO <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> (g) ↑	$\Delta G^\theta = -26.7 + 0.163T$	放热反应,气相体积增大,固相进入气相
7	ZnS + O <sub>2</sub> = Zn + SO <sub>2</sub> (g) ↑	$\Delta G^\theta = -206.0 + 0.1209T$	放热反应,气相体积增大,固相进入气相

表4 锌化合物的固-液离子反应<sup>[13]</sup>

序号	微观基元反应	反应标准吉布斯能/(kJ·mol <sup>-1</sup> )	反应能量和动量描述
1	ZnO + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = ZnSO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	$\Delta G^\theta = -79600 + 113.1T$	放热反应,固相进入液相
2	ZnSiO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = ZnSO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	$\Delta G^\theta = -17100 + 15.4T$	放热反应,固相进入液相
3	ZnO + 2HCl = ZnCl <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	$\Delta G^\theta = -132300 + 104.6T$	放热反应,固相进入液相
4	ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> + 2HCl = ZnCl <sub>2</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O	$\Delta G^\theta = -220400 + 100.4T$	放热反应,固相进入液相
5	ZnO + 2NaOH = Na <sub>2</sub> ZnO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	$\Delta G^\theta = -157300 + 12.3T$	放热反应,固相进入液相
6	ZnO + 2NH <sub>4</sub> Cl = Zn(NH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Cl + H <sub>2</sub> O	$\Delta G^\theta = -148200 + 75.3T$	放热反应,固相进入液相

率的情况下,应及时移出气相反应产物,以促使反应持续向右进行,从而提高产物收率。

由表4可知,6个固-液离子反应均为放热反应,因而在不降低反应速度的前提下,这些反应均无需额外热量输入来提高产物收率。在反应过程中出现了固相质量进入液相的净增加,因此,进行加压处理可以加速反应向右进行。

综合表2~表4,可以明确提锌技术需针对不同锌形态选择合适的化学反应路径,同时考虑反应热力学和动力学特性,以优化反应器提锌速率和收锌效率,从而为设计提锌反应工业反应器提供可靠理论指导。

## 2.2 基于提锌反应的工业反应器设计

基于反应物和产物的始终态分析和基元反应的反应热动力学分析,冶金灰泥的提锌技术演化出火法熔炼(气-固、固-固氧化还原反应)和湿法浸出(固-液离子反应)两种工艺以及两者相结合的联合工艺。

### 2.2.1 回转窑

1923年德国化学工程师 Krupp Grusonwerk 根据直接还原法设计出回转窑反应器(Waelz Kiln,简称 Waelz),实现了贫锌矿提锌<sup>[14]</sup>。Waelz(图2)因其提锌率较高和原料适应性强的优势而被广泛应用于锌的回收。

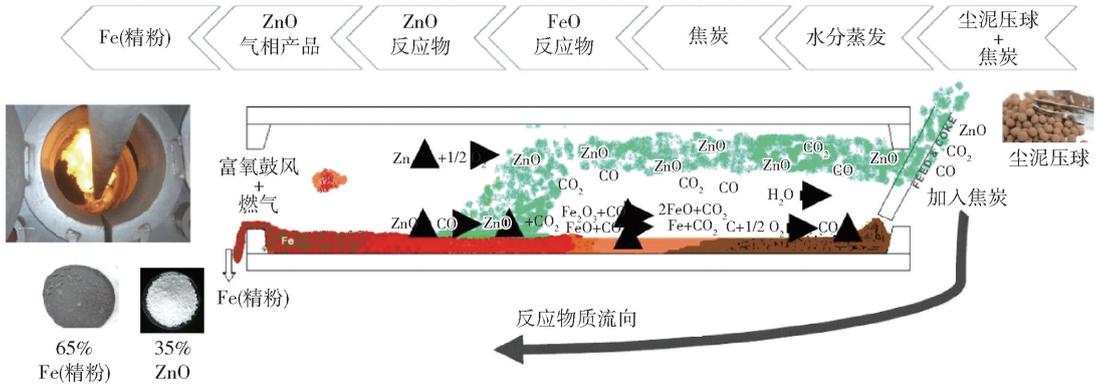


图2 回转窑反应器的设计原理

Waelz 工艺之所以被广泛应用,得益于结合了锌的固-固、气-固反应的特点进行反应器结构设计和反应操作。首先,Waelz 是一种用于处理锌含量 > 16%的富锌固废的移动床反应器,其满足了表3所列反应的特点,采用了外源燃气作为能量热源驱动反应加速向右侧进行。其次,Waelz 倾角导流的结构设计可加速气固分离,从而进一步驱动反应向右进行,同时也利用了锌金属沸点较低、高温易挥发的特性,在高温下通过还原反应使粉尘中的锌挥发并随着反应尾气被带出。在锌蒸气的带出过程中,烟气中的过量空气与锌氧化反应使其颗粒物长大,从而利于后续的集尘系统再富集和回收氧化锌。第三,Waelz 的不断旋转翻料可以有效提高反应收率,同时也利于锌金属的挥发,加速产物分离。第四,Waelz 中的操作温度始终高于锌沸点,可以使锌金属始终为气相,避免锌在回转窑内发生沉降和再富集。

### 2.2.2 转底炉

20 世纪 60 年代,美国 Midland Ross 公司以轧钢

工序的环形加热炉为原型开发出一种煤基直接还原移动床反应器<sup>[15]</sup>,并命名为转底炉反应器(Rotary Hearth Furnace, 简称 RHF)。由于 RHF 的结构特点相比 Waelz 更符合表3中反应的特性,能够处理锌含量更低的原料(锌含量 5% 的尘泥),锌回收率也更高,可达 95%。RHF(图3)的结构特点为:首先,RHF 采用多级分段送热风,能够实现更精确的温度控制,这对于锌的挥发和还原至关重要,其结构设计允许更好的热效率和温度一致性,可以确保锌有效挥发;同时多级送风可以更好地控制和维持炉内还原性气氛,促进锌的还原和挥发,同时抑制锌在炉内提前氧化富集。其次,相比 Waelz 的物料翻转,RHF 采用床层物料移动方案,使得反应物始终可以处于逆流状态,一方面利于反应向右进行,另一方面有助于提高锌的挥发效率。

### 2.2.3 连续搅拌釜

20 世纪初,美国 Palmerton 锌厂首次引入了银冶炼用到的酸浸反应器<sup>[16]</sup>,实现了适应富锌精矿冶炼的稀硫酸酸浸炼锌技术的规模化应用。该湿法炼

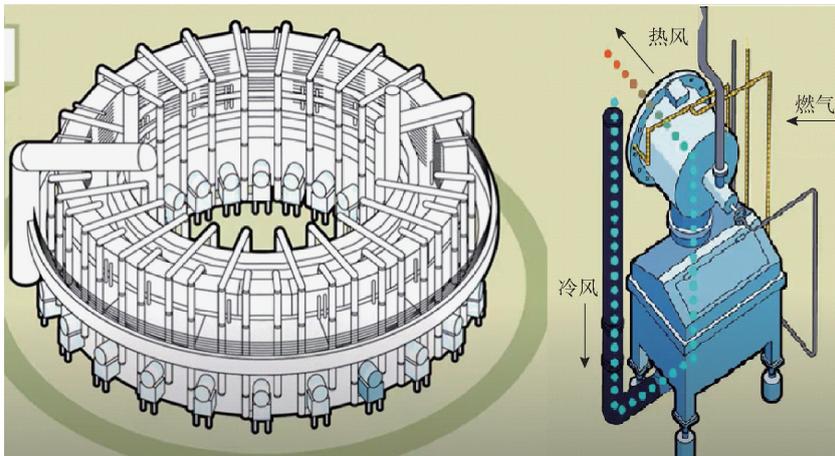


图3 转底炉反应器的设计原理

锌工艺的核心设备是化工领域的全混流固-液离子反应器(也称连续搅拌釜,简称CSTR)(图4)。

多级CSTR的结构满足了锌盐的分级浸出,定量化调整反应物停留时间,从而实现更精确的物料液固比和浸出反应温度控制,以提高锌盐中锌离子的溶解浸出率。多级CSTR的搅拌频率和搅拌强度可以提高固体颗粒与浸出剂的接触效率,防止颗粒沉降,对于锌含量中等( $>8\%$ )的固废具有较好的浸出效果。此外,通过pH值和反应压力的实时监测控制,CSTR也能进一步提高反应效率。

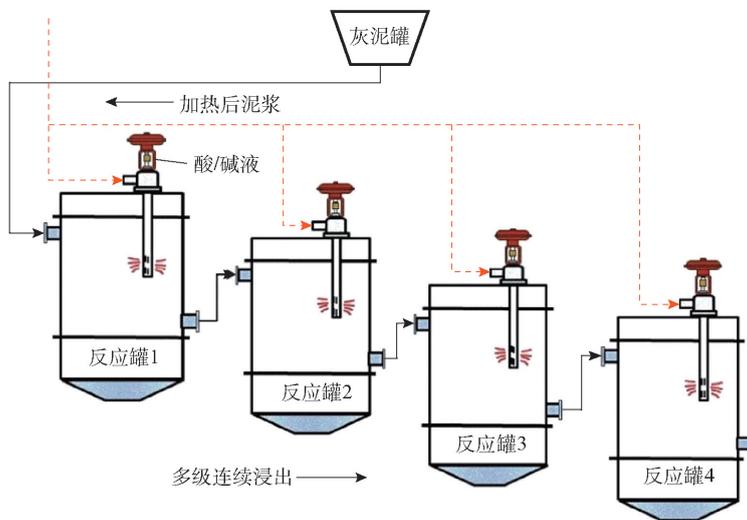


图4 多级浸出全混流反应器的设计原理图

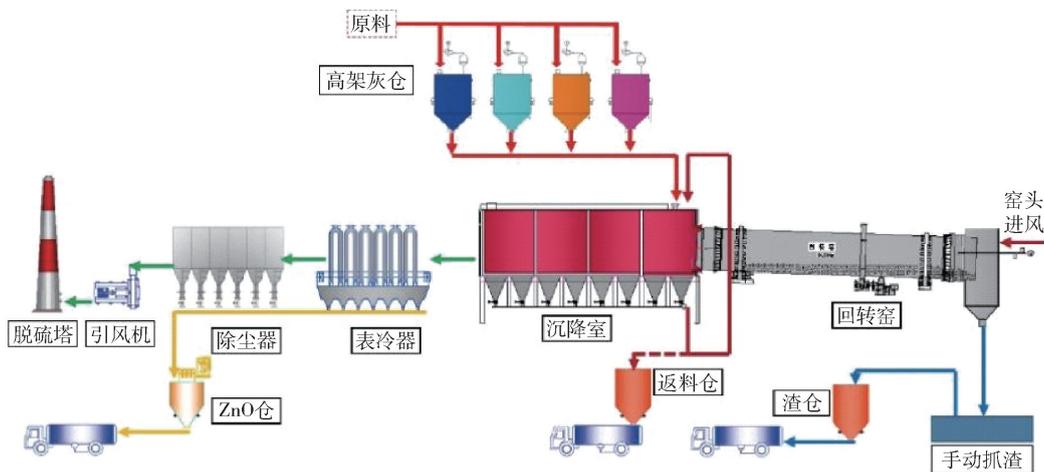


图5 基于Waelz回转窑反应器的火法提锌工艺流程图

火法-湿法联合提锌工艺(图7)则引入了液相离子浸出技术,从而提高了提锌工艺的综合回收效率。此外,火法工艺和以火法-湿法联合工艺产出氧化锌粉末,而浸出联合电沉积的湿法提锌工艺产出金属锌,这表明不同理化过程和终端产品指导系统集成。

### 2.3 基于锌反应器的各种工艺集成和路线选择

基于上述理化过程和反应器分析,可以总结出反应器是工艺集成的核心,理化过程决定了工艺流程的集成路线。因此,基于Waelz、RHF和CSTR分别开发出的提锌工艺流程,均以最大限度提高反应器效率为核心目标,以加速理化过程为技术路线。如图5、图6所示,以直接还原法为核心的火法提锌工艺集成,均以提高气相提锌收率为目标,利用烟气降温、沉降及过滤方式来富集锌及锌的氧化物。

随着提锌工艺的成熟,钢铁企业结合自身发展特点以及灰泥特点选择了不同的集成工艺。不同于有色行业中湿法冶金80%的市场占有率,黑色冶金行业对提锌工艺的选择显现出鲜明的行业特点(表5)。

由表5可知,多数钢铁企业为了规模化生产,主

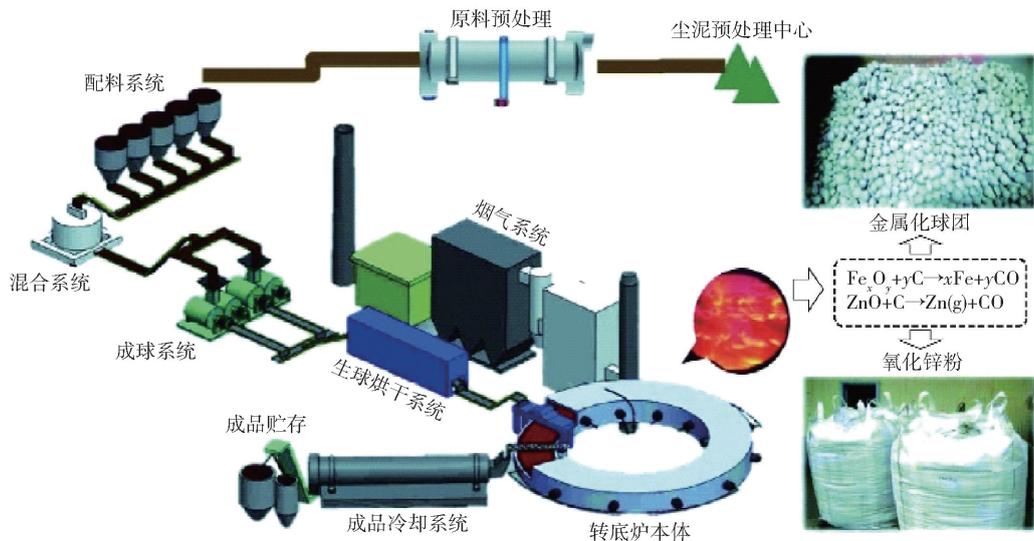


图6 基于转底炉反应器的火法提锌工艺流程

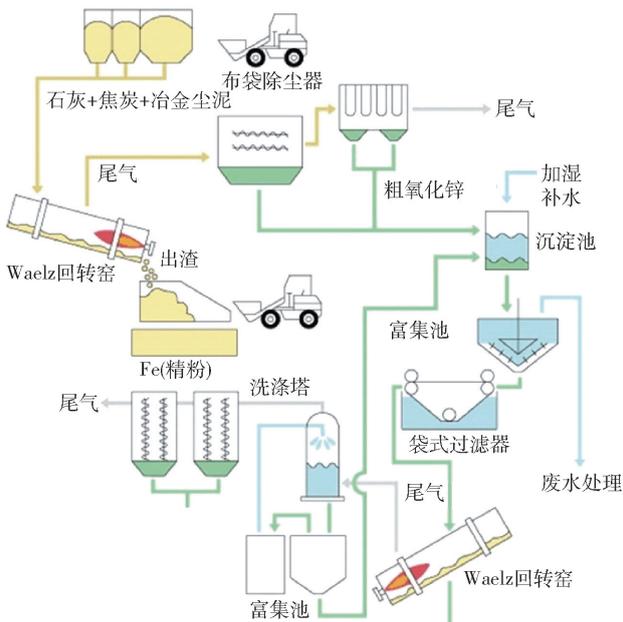


图7 基于全混流反应器和回转窑反应器联合提锌工艺流程

要采用火法工艺同时解决钢铁灰泥的锌、铁分离及锌回收,只有少数企业探索湿法浸出结合电沉积的直接提锌工艺;日本和加拿大钢铁企业采用运营成本较高但终端产品为锌金属的火法湿法联合提锌工艺(图7)。综上,提锌工艺的选择通常以提锌率以及运营成本作为评价指标。

### 3 提锌新技术、新工艺

#### 3.1 新型提锌反应器的开发

最新的提锌技术发展方向见表6。从表6可以看出,无论湿法提锌还是火法提锌,都根据反应特点

从加强传质角度来提高反应效率。

#### 3.2 锌富集预处理技术和联合工艺的引入

提锌工艺中灰泥的预处理技术除了传统锌冶金的磁选和重选之外,还可以从提高反应器效率的方向考虑。在火法工艺中,灰泥中的水分蒸发会大幅降低反应器温度。从表3所列的锌回收化学反应来看,部分吸热反应与水分蒸发吸热处于竞争劣势状态,导致反应无法充分进行。因此,可引入烘干预处理作为火法工艺前置工序。同理,无论转底炉还是回转窑,都是固-固反应,其反应接触面始终无法达到沸腾床或者气-固反应的单位质量接触面积,过细的尘泥容易被压实反而降低了反应接触面积。因此,压块和造球预处理被引入火法工艺前置工序,用以提高物料的热传导效率和还原气氛的接触面积,并防止过细的粉尘直接被引风机吸出从而提高反应效率。

湿法工艺的能耗低,但无论酸浸还是碱浸,都需要消耗大量外源反应物,因此可从降低外源反应物消耗角度来考虑选用预处理技术。可采用水力螺旋流分离预富集含锌尘泥,或采用废酸代替强酸(表5中攀钢的工艺开发方向),或者采用回转窑焙烧前置预富集技术得到ZnO(图6联合工艺)。

#### 3.3 锌富集识别分析技术的引入和商业模式的发展

随着提锌工艺作为一项商业化技术不断被推广和再开发,为了提高商业运营效率,其他行业的各种成熟技术和在研技术不断被引入,形成多种工艺再集成。除了表6的反应器再研发和预处理技术的引

表5 钢铁尘泥提锌工艺流程和应用的比较

钢铁厂名称	主要原料	锌富集识别及预处理	原料锌富集程度/%	提锌技术和工艺	锌、铁产品回收的效果	不足之处
广西柳钢 <sup>[17]</sup>	高炉灰	未公开识别技术,压块与烘干预处理	>16	直接还原法(Waelz)	ZnO含量为70%左右的氧化锌	初期投资大,设备和工艺复杂
新余钢厂 <sup>[18]</sup>	高炉灰	未公开识别技术,压块与烘干预处理	>16	直接还原法(Waelz)	ZnO含量为70%左右的氧化锌	需要考虑加热气源的选择
马鞍山钢铁 <sup>[19]</sup>	高炉尘泥	未公开识别技术,烘干-混匀-造球8~20mm	>10	直接还原法(RHF)	粗锌和金属化球团分离售卖	金属化球团中仍含有较多的锌造成浪费
江苏沙钢 <sup>[20]</sup>	电炉灰	未公开识别技术,烘干-混匀-造球8~20mm	>10	直接还原法(RHF)	氧化锌粉品位大于60%	具体不足之处未提及
美国动力钢公司 <sup>[21]</sup>	电炉灰	AI视觉识别技术-水洗脱氯-烘干-混匀-造球	未明确	直接还原法(RHF-ITmk3)	粗锌回收率>93%	存在能耗高的问题
新日铁住金 <sup>[21]</sup>	高炉尘泥	化学抽检识别技术-重选预分离-混匀-造球	未明确	直接还原法(RHF-Fastmet)结合湿法工艺	脱锌率高达98%以上,70%金属化率的球团	具体不足之处未提及
四川攀钢 <sup>[22]</sup>	转炉尘泥	未公开识别技术,未明确预处理	>16	湿法-电沉积(酸液浸出结合置换)	直接获得较高品位的金属锌产品(>95%)	提钒灰特点导致比转炉灰回收的工艺复杂 <sup>[23]</sup>
加拿大Sheritt <sup>[24]</sup>	电炉灰	未明确	>6	联合提锌工艺	脱锌率高达97%	综合处理成本可能较高
德国蒂森克虏伯 <sup>[25]</sup>	高炉尘泥	荧光光谱仪识别-预分离冷固结球100~150mm	未明确	竖炉还原法(Oxycup)	较高水平	初期投资大,技术要求高
德国蒂森克虏伯 <sup>[26]</sup>	高炉尘泥	混匀-烧结-破碎	未明确	高炉还原法(DK-duisburg小高炉)	较高水平	初期投资大,技术要求高
俄罗斯MMK <sup>[27]</sup>	高炉尘泥	未公开识别技术,未明确预处理	未明确	熔融还原法(Romelt炉)	较高水平	Romelt操作复杂度比Fastmelt高
瑞典钢铁公司 <sup>[28]</sup>	高炉尘泥	荧光光谱仪识别-重选分离	未明确	熔融还原法(Plasmamelt)	较高水平	技术要求高,可能存在能耗问题

表6 钢铁尘泥提锌技术的新发展

研发机构	工艺名称	反应器名称	原理和功能
加拿大Sherritt Co. <sup>[24]</sup>	湿法浸出提锌	加压浸出反应器(Pressure Leach CSTR)	提高湿法提锌效率
德国KÜttner GmbH <sup>[25]</sup>	火法提锌	Oxycup竖炉反应器	通过气固强传质效应解决原料锌的中高富集问题
德国DK-duisburg <sup>[26]</sup>	火法提锌	DK小高炉反应器	利用小高炉改变炉内熔炼操作参数和投料,实现更高的炉内锌富集
奥地利Voestalpine Stahl GmbH <sup>[27]</sup>	Romelt工艺	非焦煤沸腾反应器	以非焦煤沸腾反应器为核心
意大利Tenaris Dalmine steel-work <sup>[28]</sup>	等离子提锌工艺	Plasma反应器	利用电弧激发气体分子产生高能量的激发态和高度不稳定的等离子体直接还原含锌尘泥,适应锌含量低至5%的冶金灰泥的锌还原再富集
卢森堡Paul Wurth S. A. <sup>[29]</sup>	PrimusR工艺	多膛炉反应器	利用超高温实现锌铁分离,通过湿法除氯实现锌回收
奥地利Montanuniversität Leoben <sup>[30]</sup>	Recodust工艺	闪蒸炉反应器	为开发钢铁尘泥气-固还原反应器提供思路方向
德国Richter and Knoche <sup>[31]</sup>	固废赤泥气固还原技术	金属载体反应器(Chem-Loop-Combustion)	

人,国外钢铁企业的提锌工艺还引入了如原子吸收光谱(AAS)和X射线荧光光谱(XRF)的锌富集识别技术。同时,随着采样数据集尤其是XRD和SEM数据集的逐渐建立<sup>[32]</sup>,一些研究者开始对数据集进行数据挖掘,以揭示微观显像与宏观表征之间的关系,实现了更低成本的识别分析。付莹雪等<sup>[33]</sup>研究显示,氧化锌是高炉瓦斯灰中锌元素的主要存在形式,且表现出粒度越小锌含量越高的规律。翟羽佳等<sup>[34]</sup>分析瓦斯灰中含碳物和金属氧化物的显微图像与含量相关的特征,实现了瓦斯灰显微图像的多目标识别。

以上瓦斯灰泥成分的定量特征与宏观外观

之间的映射关联揭示了锌富集导致的灰体颜色变化、质地差异等特征,为实现基于机器视觉分析奠定了算法库和数据集基础。这些基于化学成分-微观结构-宏观表征的三维海量复杂数据集的挖掘是无法通过传统的定向梯度直方图(Histogram of Oriented Gradients)实现的。因此,从支持向量机(SVM)到深度卷积神经网络(CNN),再到算力要求更高、结合了CNN和SVM的区域卷积神经网络(R-CNN)等人工智能技术不断被引入。基于化学成分-微观结构-宏观表征数据集实现锌富集识别和归类的人工智能算法训练架构如图8所示。

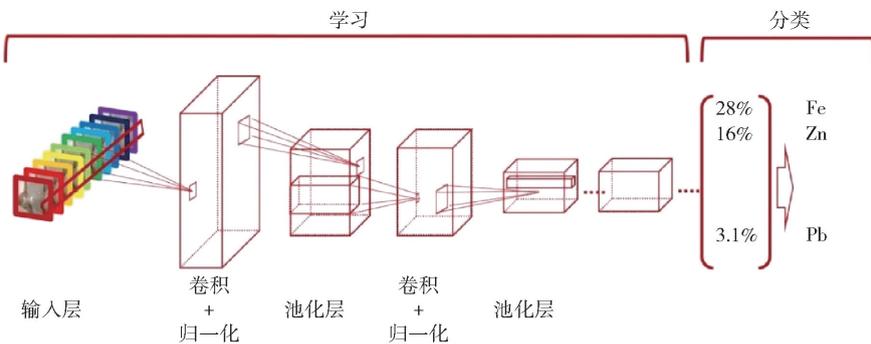


图8 基于CNN视觉识别算法的冶金灰泥锌富集识别训练架构

基于对瓦斯灰图像特征提取并通过交叉验证、正则化的算法模型具有泛化能力和普遍适用性。此外,如图8所示,图像特征经过归一化和正则化,能够提取理化性质接近的矿物的微细差异,从而为共生矿物(如铅锌共生)的分离策略提供可靠数据库。因此,基于固废再资源化的人工智能未来拥有很强的工业和商业应用前景。

## 4 总结与展望

### 4.1 总结

本文综述了当前钢铁冶金灰泥的提锌工艺,总结了各主要工艺的特点及其适用性。传统Waelz回转窑法、转底炉法和多级浸出法等工艺在技术上存在各自优点和局限性(如能耗高、操作复杂、环境影响大)。因此,提出了改进措施,包括优化反应器设计、引入智能化控制系统以及集成多种提锌工艺以提高综合效率等。此外,研究还探讨了锌与其他伴生金属的共生提取策略,指出这种综合回收方式和所依据的算法数据库在未来具有重要的工业应用前景。

### 4.2 展望

未来冶金灰泥提锌技术将朝着更加高效、环保和智能化的方向发展,以下几个方面将成为研究和应用的焦点。

1) 反应器设计优化。基于化学热力学和动力学的参数优化,设计出更加高效的反应器。

2) 智能化控制系统。基于机器学习技术的泛化应用<sup>[35-36]</sup>提高工艺稳定性和产品质量。

3) 多工艺集成。集成多种提锌工艺,实现资源的最大化利用和环境影响的最小化,特别是在锌与其他伴生金属共生提取方面。

4) 政策与市场导向。结合国家环保政策和ESG和绿色金融投资市场的需求,推动冶金灰泥提锌工艺的工业化应用,形成具有竞争力的商业模式。

综上所述,未来冶金灰泥提锌技术不仅将在技术上取得突破,而且在经济效益和环境保护方面实现双赢,推动钢铁行业的可持续发展。

### [参考文献]

- [1] World Steel Association. World steel statistics 2021 [R]. Brussels: World Steel Association, 2021.

- [2] 赵婷,张飞虎,赵立华,等. 钢铁企业含锌尘泥回转窑处置设计原理及工业实践[J]. 烧结球团, 2024, 49(2):115-122.
- [3] 蒋刘东,李萍萍,杜传明,等. 炼钢粉尘中锌分离和回收的研究进展[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(6):81-90.
- [4] 陈琛,倪书权,徐继法,等. 转炉烟气余热、化学能回收及超低排放技术综述与展望[C]//第十四届中国钢铁年会论文集-12. 冶金环保与资源利用. 中国五矿集团中冶京诚工程技术有限公司, 2023:7.
- [5] 赵贵希,刘其敏. 高炉碱负荷和锌负荷的来源透析及对策[J]. 中国冶金, 2014, 24(12):51-54.
- [6] 张武刚. 新钢高炉锌负荷现状及控制措施探讨[J]. 江西冶金, 2019, 39(3):28-32.
- [7] 刘海彬. 凌钢5号高炉碱金属和锌负荷分析[J]. 冶金信息导刊, 2018, 55(6):18-21.
- [8] 况百梁,沈学峰,何金龙,等. 萍安钢铁高炉的锌害及应对措施[J]. 炼铁, 2021, 40(5):36-40.
- [9] 李华兴. 九钢1 080 m<sup>3</sup>高炉高锌负荷冶炼实践[J/OL]//第十二届全国炼铁系统高峰论坛, 2020-11-27 <http://www.zglw.cn/m/view.php?aid=29310>.
- [10] 陈琛,董艳苹. 新型催化剂 MOFs 在低温还原脱硝以及吸附 VOCs 领域的应用[J]. 广东化工, 2018, 45(6):157-159.
- [11] 陈琛. 通过转炉灰粒径分析指导和评价目前主流一次除尘工艺[C]//中国金属学会. 2022年钢铁工业绿色低碳发展论坛暨全国冶金能源环保生产技术研讨会论文集. 中冶京诚工程技术有限公司, 2022:4.
- [12] 许海川,杨娟,齐渊洪,等. 钢厂尘泥的整体优化处理[J]. 中国冶金, 2009, 19(12):33-36.
- [13] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 北京:冶金出版社, 1990.
- [14] MATTHES J, WAIBEL P, KELLER H B, et al. Camera based identification and control of the Waelz process[C]//13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 2016.
- [15] 于建忠,鲁兴武. 转底炉直接还原焙烧处理锌浸出渣试验探索[J]. 中国有色冶金, 2019, 48(6):17-22.
- [16] Romchat Chairaksa-Fujimoto, Katsuya Maruyama, TAKAHIRO Miki, et al. The selective alkaline leaching of zinc oxide from electric arc furnace dust pre-treated with calcium oxide[J]. Hydrometallurgy, 2016, 159:120-125.
- [17] 张振逵. 柳钢高炉瓦斯灰(泥)综合回收利用研究[J]. 柳钢科技, 1995(2):35-45.
- [18] 葛新锋,何晓华,丁厚全,等. 高炉瓦斯灰泥铅锌铁综合利用磁化焙烧条件研究[J]. 现代矿业, 2020, 36(8):123-125.
- [19] 倪家麟,尤明. 马钢含锌尘泥脱锌转底炉成功点火烘炉[J]. 炼钢, 2009(3):15.
- [20] 沙钢转底炉项目科技成果达国际领先水平[J]. 烧结球团, 2017, 42(5):61.
- [21] SEN P K, ROY G G, KUMAR B. Exergy and CO<sub>2</sub> emission analysis of rotary hearth furnace-electric arc furnace routes of steelmaking[J]. International Journal of Exergy, 2021, 36(2/3/4).
- [22] 刘淑芬. 高炉瓦斯泥中锌综合回收新工艺研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.
- [23] CHEN C. Effect of dust agglomeration pretreatment of ESP on the ultra-low emission of primary flue gas from vanadium extraction converters [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2022, 51(6):91.
- [24] OZBERK E, JANKOLA WA, VECCHIARELLI M, et al. Commercial operations of the sherritt zinc pressure leach process[J]. Hydrometallurgy, 1995, 39(1):49-52.
- [25] LI Kejiang, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Comprehensive evaluation of oxycup process for steelmaking dust treatment based on calculation of mass balance and heat balance[J]. Journal of Iron and Steel Research(International), 2014(6):575-582.
- [26] HILLMANN C, SASSEN J K, 张友平. 高炉处理转炉含锌粉尘[J]. 世界钢铁, 2013, 13(5):8-9, 54.
- [27] VALAVIN V, ROMENETS V, POKHVISNEV Y, et al. Processing of zinc containing wastes with the liquid co-hase reduction romelt process [J]. Recycling of Metals and Engineered Materials, 2013(10):369-377.
- [28] MALFA E, SANTE L D, DONATO A D, et al. Full recovery of steelmaking waste streams in a dedicated plasma reactor[C]//The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, 2015.
- [29] ROTH J, FRIEDEN R, HANSMANN T, et al. Primus, a new process for recycling by-products and producing virgin iron[J]. Revue de Métallurgie, 2001, 98(11):987-996.
- [30] GEIER B, RAUPENSTRAUCH H, REITER W, et al. Processing of low zinc containing steel mill dusts with the recodust-process[C]//Proceedings of the 6th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking(II). Ed. Thermal Processing Technology, 2015:256-258.
- [31] 邓贵先,李孔斋,程显名,等. 赤泥作为氧载体用于甲烷化学链燃烧:反应与循环性能[J]. 高等学校化学学报, 2018, 39(2):327-336.
- [32] 陈琛,董艳苹. 化学气相沉积技术在中低温选择性还原脱硝催化剂和光电领域的应用[J]. 广东化工, 2019, 46(2):141-142.

- [33] 付莹雪. 高炉瓦斯灰锌铁分离的实验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021.
- [34] 翟羽佳. 瓦斯灰显微图像的多目标识别[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2019.
- [35] CHEN C. Application and analysis of deep learning in dynamic modeling for oxygen safety control in BOF metallurgy[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2023, 51(11): 91–96.
- [36] 陈琛, 倪书权, 郝景章, 等. 冶金企业人工智能的发展与应用综述[C]//中国金属学会. 第十四届中国钢铁年会论文集-14. 冶金自动化与智能化. 五矿集团中冶京诚工程技术有限公司, 2023: 7.

## Development Status and Prospect of Zinc Recovery Technology from Metallurgical Solid Waste

CHEN Chen<sup>1</sup>, NI Shuquan<sup>1</sup>, LI Jiawang<sup>1</sup>, SHI Guang<sup>1</sup>, LI Yongjun<sup>2</sup>, SUO Yanshuai<sup>2</sup>

(1. Environmental Engineering and HVAC Engineering, Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing 100176, China;

2. Ironmaking Engineering, Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing 100176, China)

**Abstract:** The traditional solid waste is directly sent to the process cycle, and the zinc in the lime mud is directly introduced into the blast furnace, which not only affects the operation of the furnace, but also leads to the damage of the equipment and the decrease of the comprehensive production efficiency. Therefore, it is of great significance to explore effective zinc extraction process and reduce the enrichment of zinc in blast furnace for improving the economy and environmental protection of iron and steel production. Based on the chemical reaction, kinetics and thermodynamic characteristics of zinc extraction from iron and steel metallurgical lime mud, this paper systematically analyzed the characteristics and applicability of main zinc extraction processes including rotary kiln method, rotary hearth furnace method and multi-stage leaching method. Although the existing traditional process has certain technical advantages, there are still some problems in practical application, such as high energy consumption, complex operation and great environmental impact. Therefore, the improvement measures of optimizing reactor design, introducing pretreatment technology and intelligent control system and multi-process integration were put forward to improve the comprehensive efficiency. In the future, the technology of zinc extraction from metallurgical lime mud will develop in a more efficient, environmentally friendly and intelligent direction, and promote the sustainable development of the steel industry.

**Key words:** leaching process; blast furnace lime mud; converter ash mud; zinc recovery from solid waste; reactor design; circular economy; machine vision; green finance