钢铁尘泥有价元素提取技术现状与展望

寇鑫林，张玉柱，田铁磊，龙 跃，靳鑫玉，杨佳毅
（华北理工大学 a. 冶金与能源学院；b. 河北省现代冶金技术重点实验室，河北 唐山 063009）

摘要：钢铁尘泥作为一种钢铁冶炼过程中产量巨大的副产品，受到人们越来越多的关注。如何减少钢铁尘泥对环境的污染，从其复杂组分中高效回收铁、锌、铅等有价元素，实现钢铁尘泥综合利用，是各种钢铁尘泥处理工艺的目标。钢铁企业通常使用焙烧、磁选、浸出等工艺回收钢铁尘泥中的有价元素。本文从不同类型的回收工艺出发，以提高回收率和经济效益为目的，重点论述有价元素的提取技术，为钢铁尘泥的处理提供帮助，并提出火法与湿法联合新工艺。结果表明：无论是湿法还是火法，单一工艺回收钢铁尘泥有价元素均存在局限性与缺陷；火法与湿法联合工艺既避免了湿法过程中存在的问题，又填补了火法中的不足，在解决有价元素选择性分离和协同资源化利用方面具有较大优势。

关键词：钢铁尘泥；有价元素；回收；新工艺
中图分类号：TF09；X757 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)06－0008－08
doi：10.13403/j.sjqt.2022.06.079

Current status and prospect of valuable element extraction technology of steel dust sludge

KOU Xinlin, ZHANG Yuzhu, TIAN Tielei, LONG Yue, JIN Xinyu, YANG Jiayi
(*North China University of Science and Technology a. School of Metallurgy and Energy; b. Key Laboratory of Modern Metallurgical Technology of Hebei Province, Tangshan* 063009, *Hebei, China*)

Abstract: As a large-tonnage by-product during the steel smelting process, the steel dust sludge has attracted more and more attention. How to reduce the pollution of steel dust sludge to the environment, efficiently recover valuable elements such as iron, zinc and lead from its complex components, and realize the comprehensive utilization of steel dust sludge are the goals of various steel dust sludge treatment processes. Iron and steel enterprises usually use roasting, magnetic separation, leaching and other processes to recover valuable elements from steel dust sludge. In this paper, different types of recovery processes are started with to improve the recovery rate and economic benefits, the extraction technology of valuable elements is discussed, which provides assistance for the treatment of steel dust sludge, and a new process combining fire and wet method is proposed. The results show that, whether it is wet method or fire method, the recovery of valuable elements of steel dust sludge in a single process has limitations and defects. The combined process of fire method and wet method not only avoids the problems in the wet method process, but also fills the shortcomings in the fire method, and has great advantages in solving the selective separation and collaborative resource utilization of valuable elements.

Key words: steel dust sludge; valuable elements; recovery; new process

收稿日期：2022－07－18；**修回日期**：2022－08－24
基金项目：国家自然科学基金重点资助项目(U20A20271)；河北省自然科学基金资助项目(E2020209184)；河北省教育厅资助项目(ZD2021084)；唐山市重点研发计划项目(20150217C)
作者简介：寇鑫林(1998—)，男，硕士研究生，从事冶金节能及资源综合利用方面的研究。
通信作者：张玉柱(1956—)，男，博士生导师，教授，从事冶金节能及资源综合利用方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

我国钢铁生产工艺以高炉—转炉长流程为主，产污环节多、能耗高，尤其是钢铁尘泥的产生量较大，约占粗钢产量的 10%[1]，2021 年粗钢产量达到了 10.35 亿吨，而钢铁尘泥产生量约为 1.033 亿吨。因此，冶金粉尘资源化处理已成为钢铁行业亟待解决的问题，也给生态环境和钢铁行业的绿色发展带来了巨大的挑战[2]。

钢铁尘泥是一种重要的二次资源，含有铁、碳、锌、钾、钠等多种有价金属，是宝贵的有价资源。但当前只有少量尘泥在钢铁企业内返回烧结进行内部循环，大部分尘泥由于钾、钠、锌及氯质量分数高等原因只能在厂内堆积，破坏周边生态环境，污染地下水源和土壤。因此，钢铁尘泥的环境风险和潜在价值使其日益受到社会的广泛关注。

目前，钢铁尘泥处理技术主要有物理法、湿法和火法。物理法主要是返回烧结工序，但由于碱金属、锌及铅等有价元素的循环富集，导致尘泥量用量较少。湿法和火法是处理尘泥的主流工艺，但由于不同环节产生的尘泥成分差异较大，给处理工艺带来一定难度，如：湿法工艺处理有价元素较低尘泥时，有价元素浸出率较低；而火法处理尘泥温度较高，不利于碳中和、碳达峰。在此背景下，本文对当前火法与湿法工艺回收尘泥有价元素进行介绍，分析其优点与面临的挑战，并提出火法富集和湿法提取的联合新工艺，旨在为钢铁尘泥二次利用提供借鉴与参考。

1　钢铁尘泥有价金属的回收利用

1.1　锌的回收利用

锌是当今社会的一种重要金属元素，主要采用焙烧—浸出—电积的方法从硫化矿物中提取。随着资源的不断开发，初级资源将很快无法满足需求，急需一种资源替代硫化矿物。在钢铁生产中，1 t 冶炼废钢产生 15～25 kg 的粉尘，其中锌质量分数为 15%～40%[3]，具备回收价值。因而钢铁尘泥可以作为一种提取锌的资源替代硫化矿物，不仅可实现钢铁尘泥的资源化利用，还可以缓解矿产资源短缺的现状。所以，如何有效地从含锌粉尘中回收锌是近年来研究的重点。

1.1.1　火法

目前，火法冶金提取含锌冶金粉尘中锌的技术应用较多。Waelz 工艺作为最古老的处理含锌粉尘的方法之一，其通过对混合焦炭的粉尘在回转窑中加热还原，分离获取粉尘中的锌。此工艺虽然应用广泛，但也有较为明显的缺点，如热效率较低，回收锌质量分数低的粉尘经济效益不高。转底炉工艺在处理含锌粉尘方面也是使用居多，其工艺简单，适合处理多种含锌尘泥，且在处理过程中不会产生多余铁粉，避免影响含锌产物的质量。但上述工艺都是以粗 ZnO 形式回收，产品质量较差，本文重点研究直接回收锌产品的工艺，如：吕伟等[4]研究在还原性气氛下添加 CaO，利用 CaO 不断与铁氧化物结合，促进 $Fe_{0.85-x}Zn_xO$ 转化为 FeO 和锌的释放，从而达到锌铁分离的目的。研究结果显示，当焙烧温度达到 900 ℃，在添加 CaO 后调整 CO 体积分数到 50% 时，锌的挥发率达到 80% 以上。在 CO 还原体系下 CaO 和含锌矿相的反应机理如图 1 所示。此工艺虽然降低了高温能耗，但在回收效率上并不高，CO 体积分数出现偏差会使试验结果产生较大差异，而且试验过程中其它物质和外部环境均会对试验反应造成影响。

目前火法脱锌基本通过高温来达到目的，然而在新兴的技术里面，有一种快速微波碳热还原法的脱锌工艺可以在较低的温度下将锌脱离出来。使用微波加热与传统加热方法有着根本区别，因为微波能量是一种非电离形式的电磁辐射，频率范围为 300 MHz 至 300 GHz[5-6]，可以深入样品。它加热速率高、加工反应快，能够大大减少脱锌工作的能耗。因此，它可以通过微波加热使 ZnO 还原和 $ZnFe_2O_4$ 分解来达到锌的脱离[7]。微波加热 $ZnFe_2O_4$ 的分解速度比常规加热快，在使用 700 W 微波功率持续加热 12 min 时，锌的还原度几乎达到 99%。

但就目前来看微波法还处于发展阶段，获取有价元素的比例并不比火法与湿法有过多提

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

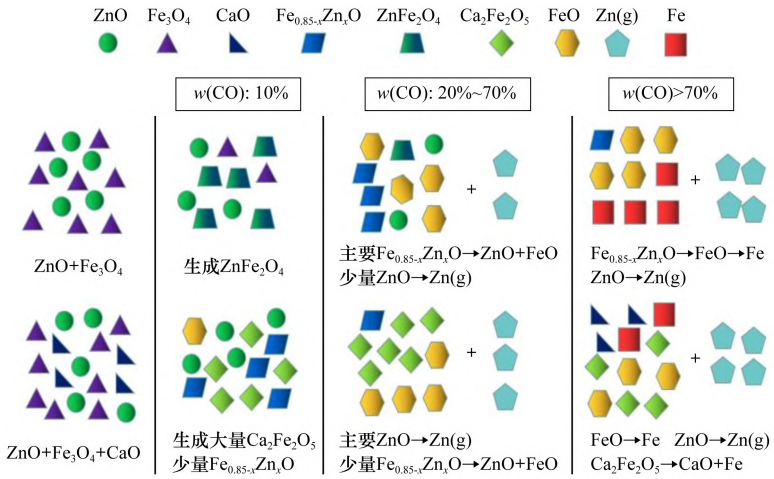


图 1 在 CO 还原体系下 CaO 和含锌矿相的反应机理

Fig. 1 Reaction mechanism of CaO and zinc-bearing ore phases in CO reduction system

升，而且在设备成本与维护上也会投入大量资金，在未解决低成本、高产出等问题之前，很难脱离实验室应用于工厂。不过微波法在能耗和加热速率与效率上还是有着突出表现，在未来具有非常大的发展前景。

1.1.2 *湿法*

对于处理钢铁尘泥中锌的工艺，虽然火法冶金应用得比较广泛，但它在环境和经济方面存在问题。其高温加热过程中产生的气体对空气污染严重，另外火法冶金在处理过程中要用碳作为还原剂，需要达到较高的还原温度，商业价值不高[8-10]。

与火法冶金相比，湿法工艺从钢铁尘泥中回收锌的优点是能耗低。在回收流程中，可以使用酸性或者碱性介质浸出 ZnO，利用常规硫酸浸出虽然试剂成本较低，但在高回收量的情况下会带入大量杂质，从而产生提纯等一系列问题。碱液浸出能实现锌的选择性提取，可以避免此种情况发生。马爱元等[11]采用在 NH_3-H_2O体系中加入 CH_3COONH_4 来处理含锌高炉粉尘，锌离子可以与羧酸根阴离子结合形成锌络合物，促进了氧化锌的分解和锌的提取。研究结果显示，当总氨浓度为 5 mol/L、搅拌速度为 300 r/min、[NH_3]与[NH_4^+]的物质的量比为 1∶1、固液比为 1∶4、浸出温度为 45 ℃时，锌的浸出率可达 77.79%。此工艺成本低，较为环保。

虽然氨水体系加入醋酸铵络合剂工艺成功提高了锌的浸出率，但值得注意的是，在电弧炉粉尘中浸出渣的含锌相为 $ZnFe_2O_4$，这种物质很难溶解于酸性或碱性溶液中。为了更好地达到浸出锌的目的，TAKAHIRO 等[12]先在 900 ℃的反应温度下添加 CaO 将粉尘中的 $ZnFe_2O_4$ 转化为 ZnO 和 $Ca_2Fe_2O_5$，再利用 NH_4Cl 溶液对锌铁的选择性浸出，从而实现锌的提取。研究结果表明：在温度为 70 ℃、NH_4Cl 浓度为 2 mol/L、固液比为 1∶300、保持时间为 2 h 的条件下，可以更有效地回收锌。此工艺使用了火法和湿法相配合，在低能耗条件下实现锌元素的高比例回收，但处理时间会随着处理规模增大而增加，降低了回收速率，而且钙溶解会影响锌的提取，增加后续操作步骤。虽然增加碱液的 pH 值可以提高锌回收，但也会给回收系统带来其它问题。

1.2 铅的回收利用

铅具有良好的延展性和耐腐蚀性，因此铅合金和化合物广泛用于电池、机械制造和其他行业[13]。这些行业的发展增加了全世界对铅的需求。考虑到原生铅矿的短缺，人们把目光移向了可以回收铅的二次资源，其中就包括钢铁冶炼产生的粉尘，其铅质量分数为 9%~25%[14]，回收能带来巨大的经济效益。

1.2.1 *火法*

火法回收铅的传统工艺有 QSL 熔炼、顶吹

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

熔炼和碳热还原等，但这些技术都是用来处理铅质量分数高的粉尘，对于铅质量分数低的粉尘再使用这些技术就不具备经济价值了。为了能够在铅质量分数较低的粉尘中回收铅，龙海林等[15]采用氯化焙烧处理烧结粉尘，根据氯化焙烧过程中金属氯化物通常比相应的金属及其氧化物更容易挥发的特点，使金属从杂质中分离出来。结果表明，用 $CaCl_2$ 作氯化剂，在焙烧温度为 1 373 K、保温时间为 60 min 的条件下，铅挥发率达到98.69%。烧结粉尘焙烧过程中 $PbCl_2$ 析出的反应流程如图 2 所示。从资源综合利用和环境保护两方面来看，该工艺不仅有效地回收了粉尘中的铅，也减少了未经处理粉尘的排放。不过与传统火法相似的是，氯化焙烧同样会产生较大的能耗。

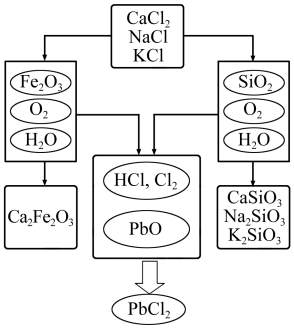


图 2　烧结粉尘在焙烧过程中 $PbCl_2$ 析出的反应流程

Fig. 2　Reaction flow of lead chloride precipitation from sintering dust during roasting

1.2.2　湿法

目前，在研究从烧结电除尘灰中回收铅的湿法工艺里，不管是强碱浸出还是有机酸浸出，它们都有着浸出成本高的问题，浸出的后续处理也比较麻烦。因此，如何在低成本的情况下保证浸出的效果和减少副产品成为研究重点。高岩等[16]在控制温度的条件下往烧结电除尘灰中加入盐酸和 NH_4Cl，在盐酸体系中加入适量 NH_4Cl 可以增大 H^+ 活度，进而促进金属氧化物的反应，达到低酸浓度下铅的浸出。通过研究测得，当 NH_4Cl 浓度为 2 mol/L、盐酸浓度为 1.5 mol/L、浸出时间为 30 min、温度为 70 ℃、固体颗粒物质量浓度为 0.25 g/mL 时，铅的浸出率提升到98%并趋于稳定。烧结电除尘灰浸出 $PbCl_2$ 的反应流程如图 3 所示。此工艺对实验试剂的纯度要求较高，试剂消耗量大，浸渣未得到有效回收，不适用于工厂大规模生产。而且溶液酸碱度不易控制，若出现偏差可能会导致其它金属元素的浸出。

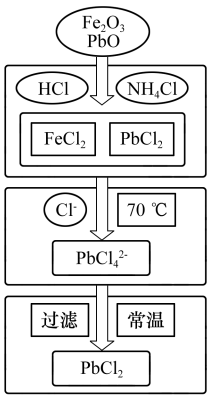


图 3　烧结电除尘灰浸出 $PbCl_2$ 的反应流程

Fig. 3　Reaction process of leaching lead chloride from sintering electro-precipitating dust

1.3　铟的回收利用

铟是一种重要的多用途战略金属，在工业领域具有较高应用价值[17]，随着新兴电子产业的发展，铟行业前景广阔，但也面临资源短缺的挑战，全球铟储量仅为 1.6 万吨[18]，至今仍未发现可替代铟的材料。为了满足工业生产中不断增长的需求，不能仅仅把目光放在高品位含铟物料上，还要重视那些复杂难处理的贫铟物料。含铟冶炼废渣是一类组成复杂、品位低的冶炼废料，主要来自于铅、锌等有色金属硫化矿的冶炼过程，该过程会产生大量的含铟渣和烟尘。原生铟的主要供应来源是在冶炼废渣中提取，一般情况下锌精矿的铟质量分数在 0.008% 左右，冶炼时 80% 的铟入渣，通过回收料的供应来看，可回收铟的数量十分可观[19]。目前在含铟废渣中回收铟的主流工艺为湿法冶金。

在工业生产中，回收铟的常规方法为浸出、萃取和电解，但是回收时铟的损耗较大，导致成本增加。而且在炼锌烟尘中铟的成分复杂，回收难度大。因此，优化浸出工艺对于回收铟元素至关重要。通过实验检测出铅锌冶炼粉尘中含锡量的增加会导致铟浸出率降低，这主要

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

是因为粉尘中部分铟以 $In_2O_3 \cdot xSnO_2$ 形式存在，而 $In_2O_3 \cdot xSnO_2$ 化学性质非常稳定，难以被硫酸浸出，当粉尘中锡质量分数升高，$In_2O_3 \cdot xSnO_2$ 的占比也会随之升高，从而减少了铟的浸出。为了解决这个问题，汪秋雨等[20]提出了一种氯化浸出铅锌冶炼粉尘中铟的回收工艺。在盐酸条件下，$NaClO_3$ 能溶解的 $In_2O_3 \cdot xSnO_2$，从而提升铟的浸出率。该工艺流程主要包括中性浸尘、氯化浸出、萃取还原等步骤。试验研究结果显示最佳工艺参数为 $NaClO_3$ 质量浓度为 20 g/L、盐酸质量浓度为 48 g/L、浸出温度为 80 ℃、硫酸质量浓度为 225 g/L、浸出时间为 3.0 h、液固比为 5∶1。在此种条件下氯化浸出，铟浸出率稳定达到 90% 以上，铟的平均浸出率达到 92.7%。粗铟浸出的工艺流程如图 4 所示。此工艺弥补了硫酸浸出的不足，提高了铟浸出率，但是也存在针对性强，不足以应对复杂尘泥、氯气挥发影响设备生产周期等缺点。

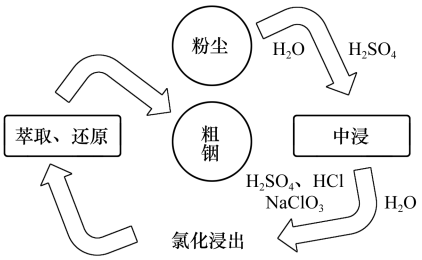


图 4 粗铟浸出的工艺流程

Fig. 4 Leaching process of crude indium

1.4 钾的回收利用

中国农业规模位居世界前列，农业的生产离不开钾肥。但中国自产的钾产品无法供应农业生产中巨大的消耗，导致我国每年至少从加拿大、澳大利亚等国家进口 600 万吨的钾产品[21]。同时，我国可溶性钾矿石不足，寻找一种潜在的钾资源，能为我国农业提供大量的钾肥资源。

钾、钠这些元素都属于碱金属，粉尘堆积使得碱金属重量分数在 10% 以上[21]，这不仅会堵塞电除尘器的系统管道，而且会降低烧结过程的效率，破坏高炉的平稳性和稳定性，给炼铁过程带来一些不利影响。所以为了资源利用，同时保障钢铁正常生产，脱离粉尘中的钾元素势在必行。

在国内，回收氯化钾的操作工艺复杂，流程控制也较为不便，而国外冶金中铁矿石铁品位高，含有的碱金属杂质较少，所以相较于其它有价元素，回收钾元素的研究报道较少。钾元素在电弧炉粉尘中主要以高锰酸钾（$K_2Mn_4O_8$，不溶）和硫酸钾/亚硫酸盐（可溶）的形式存在。钟一伟等[22]采用水浸结晶的方法回收电弧炉粉尘中的可溶性钾盐。在浸出过程中，钾质量分数高的电弧炉粉尘与水接触，粉尘中的可溶性物质（主要是硫酸钾）溶于水，而不溶性物质高锰酸钾也被硫化物还原。研究结果表明，钾的回收率达到 88.2%。K^+ 的主要分离反应如图 5 所示。水浸结晶法减少了钠、钾等元素的重复使用，保证了电弧炉的正常运行，并且其低浓度酸性溶液可以循环利用，降低环境污染。但考虑到成本和经济效益，该工艺显然不适用于低质量分数钾的钢铁尘泥。

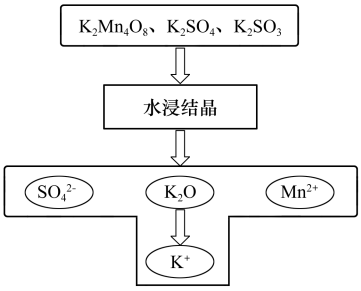


图 5 电弧炉粉尘中 K^+ 的主要分离反应

Fig. 5 Main separation reactions of K^+ in EAF dust

不管是通过浸出悬浮、净化结晶析出氯化钾，还是浮选、重选萃取氯化钾，其提取率都取决于烧结粉尘中碱金属的质量分数。为了寻找从烧结粉尘中分离低质量分数氯化钾的可能性，以及提高氯化钾结晶的回收率和其纯度，余耀伟等[21]在研究过程中发现，氯化钾可以通过水溶液中的多孔通道扩散，从而达到分离提纯的目的。研究工艺流程为水浸、固液分离、提纯、真空蒸发和冷却结晶。试验结果表明，当固液比为 1∶3、浸出时间为 40 min、浸出温度为 80 ℃时，氯化钾的浸出率达 99.99%。当溶液失重为 97.5% 时，氯化钾产品的蒸发量达到 97.96%，晶体中氯化钾的纯度可达 75.15%。此

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

工艺浸出能力强、效率高，减少了碱金属的循环富集，增强了高炉的稳定性，但同时也存在除杂操作复杂、浸渣无法回收利用等问题。

1.5　铁的回收利用

钢铁企业生产的铁是高炉冶炼的主要产品，减少铁损失有助于企业发展。在钢铁冶炼中产生的除尘灰都有很高质量分数的铁，比如高炉除尘灰的铁质量分数为 20%～40%，转炉除尘灰的铁质量分数在 50% 以上。它们具备可回收和经济效益高等特点，回收其中的铁元素是钢铁可持续发展的重要环节。

由于除尘灰铁质量分数高，回收铁的工艺一般采取较为简便的返回烧结法，此工艺流程短、技术要求低，普遍适用于中小型企业。不过随着该类除尘灰大量应用于生产，其弊端也暴露明显，如循环聚集的有害元素不仅影响烧结碱度、降低回收品质，也会腐蚀炉腔内壁，恶化烧结料层透气性，降低产量。基于钢铁尘泥中矿物间的磁性差异，研究人员利用磁选技术分离矿物实现铁的回收。赵瑞超等[23]对包钢高炉灰进行矿物学分析，研究出弱磁选—强磁选工艺，该工艺在弱磁选感应强度为 0.12 T 的条件下，可以获得回收率达 70% 以上的铁精矿。针对磁选技术，许多研究者通过资源协同作业进一步优化工艺，提高铁资源回收。崔石岩等[24]为了实现高炉灰与赤泥的综合回收，利用赤泥为原料、高炉灰为还原剂，研究出高炉灰与赤泥共还原—磁选工艺来回收铁资源。此工艺在 1 200 ℃、60 min 的条件下，能得到品位较高的直接还原铁，且铁回收率为 92.14%。高恩霞等[25]研究铜渣与高炉灰共还原—磁选工艺，通过加入氟化钙，提升还原铁的品位和回收率，在 1 250 ℃、60 min 的还原条件下，铁品位和回收率均能到 90% 以上。

1.6　钠的回收利用

高炉炼铁所需的炉料会掺杂一些有害元素，钠是其中之一。吴镇君[26]使用电感耦合等离子体发射光谱法测得高炉灰中钠的质量分数为 0.5%，钠的存在既影响了炉料品质，也损害了高炉内衬。为减少损失，从高炉中分离钠势在必行，同时分离得到的钠产品也具备经济价值。作为碱性物的碳酸钠是很好的化工产品，氯化钠也可以作为产品外销。

钠的火法回收通常伴随在回收锌、铅工艺中，这在降低资源浪费的同时也节省了生产投入。魏秀泉等[27]研究碳氧比和温度对氯化钠脱除率的影响，当粉尘碳氧比为 1.0，在 1 300 ℃条件下还原 18 min 时，氯化钠的脱除率为 90% 以上。湿法分离高炉灰中的钠一般使用水洗工艺，利用钠溶于水的特性，将高炉灰与水充分搅拌，再使用滤机对其进行固液分离，过滤出的滤液经过蒸发结晶获取氯化钠。

2　火法－湿法联合处理新工艺

钢铁企业在回收粉尘时，单纯使用火法或湿法均不利于钢铁尘泥的全量化、资源化利用。若仅使用火法回收工艺，回收到的有价元素成分单一，另外当钢铁尘泥中含有的有价元素质量分数较低时，经济效益不高。湿法冶金主要用于回收铅、铟和铋等有价金属，但该工艺存在流程多、浸出率低、成本高的问题。因此，如何在高效回收多种有价金属的同时，既可以避免钢铁尘泥中有价金属的浪费，又能产生可观的经济效益，是钢铁行业面对的首要问题。鉴于当前钢铁尘泥处理工艺存在的问题，本文提出了火法－湿法联合处理新工艺，更加全面地解决回收中遇到的问题，实现钢铁粉尘中有价元素的高效回收。

不同来源的钢铁尘泥，诸如烧结除尘灰、高炉污泥、电弧炉粉尘等，它们的矿物学成分和有价金属质量分数不同，单独处理某种尘泥的火法与湿法联合工艺不能成为适用所有尘泥的固定回收流程。本文所述新工艺的前期工作是将富含不同有价金属的钢铁尘泥，按照一定比例搭配并送入回转窑焙烧，将具有高质量分数氯离子的烧结除尘灰和较高氧化钙质量分数的转炉污泥充当辅料，减少后续的物料添加。目前钢铁企业使用的联合工艺基本是火法富集－湿法分离的处理方法，其在火法阶段采用 1 200 ℃左右温度焙烧，收集烧结出的富含有价

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

元素的烟气。这个过程虽然能处理绝大多数的有价元素，但高温焙烧造成能量损耗，不利于长期发展。新工艺改进之处是在火法处理阶段向回转窑中加入钙质碱性剂，深度分解铁锌氧化物，进一步促进有价元素还原，降低还原温度。火法处理的物料可以返回烧结，而产生的烟气则经冷却后进入下一个环节。在湿法阶段，使用盐酸作为浸液处理烟尘，将浸液经过脱锌处理获得硫酸锌，在低酸浸出后使用过滤带将剩余溶液进行固液分离，得到铅、铟等有价金属，而溶液中的钾、钠等有价元素可以通过蒸发结晶的方式提取。火法 - 湿法联合工艺流程如图 6 所示。

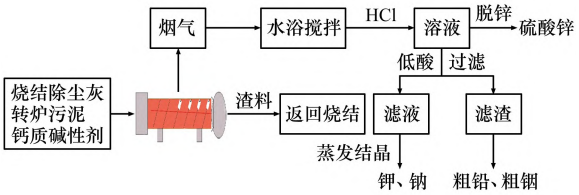


图 6 火法 - 湿法联合工艺流程

Fig. 6 Pyrogenic process-wet process combined process flow

该工艺回收成本低、回收率高，资源清洁回收利用的同时，还避免了单一元素回收利用造成其它元素的损失。火法与湿法联合处理相较于单一回收工艺，在回收有价元素中的效果表现得尤为突出。

3 结 论

（1）钢铁企业在生产过程中会出现大量尘泥，它们分布于生产的各个工序中，通过回收可以将其重新利用。合理的回收方式既可以避免资源的浪费，同时又能保障环境不被污染，提高经济效益。

（2）尘泥中含有多种有价元素，如锌、铅、铟等，这些元素是粉尘可以资源化再利用的关键。提取它们的主流方法为火法冶金和湿法冶金，火法冶金通过不同材料配比和焙烧温度的变化来达到提取有价元素的目的，而湿法冶金则使用酸浸或者碱浸，从而实现有价元素的析出。在目前的研究中，不管是火法还是湿法都有各自的优点，但也有不足之处，均需要进一步完善。

（3）鉴于当前刚铁尘泥处理工艺存在的问题，本文提出了火法 - 湿法联合处理新工艺，该工艺不仅弥补了火法冶金中有价元素回收率低、回收种类少等问题，还避免了湿法冶金中浸出率低、除杂步骤繁琐，最大程度回收粉尘中的有价金属，提升经济效益。火法 - 湿法联合处理工艺会是未来处理钢铁尘泥的有效途径之一。

参考文献：

[1] 张建良，李洋，袁骧，等. 中国钢铁企业尘泥处理现状及展望[J]. 钢铁，2018，53(6)：1 - 10.
ZHANG Jianliang，LI Yang，YUAN Xiang，et al. Present situation and prospect of dust treatment in Chinese iron and steel enterprises[J]. Iron & Steel，2018，53(6)：1 - 10.

[2] ZHOU D D，CHENG S S，WANG Y S，et al. The production of large blast furnaces during 2016 and future development of ironmaking in China[J]. Ironmaking & Steelmaking，2017，44(10)：714 - 720.

[3] GUÉZENNEC A G，HUBER J C，PATISSON F，et al. Dust formation in Electric Arc Furnace：Birth of the particles[J]. Powder Technology，2005，157：2 - 11.

[4] LÜ W，GAN M，FAN X H，et al. Mechanism of calcium oxide promoting the separation of zinc and iron in metallurgical dust under reducing atmosphere[J]. Journal of Materials Research and Technology，2019，8(6)：5745 - 5752.

[5] ROUSSY G，PEARCE J A. Foundations and industrial applications of microwave and radio frequency fields：physical and chemical processes[C]//International Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipments. New York：West Sussex，Chichester：John Wiley and Sons Ltd，2002.

[6] HAQUE K E. Microwave energy for mineral treatment processes：a brief review[J]. International Journal of Mineral Processing，1999，57(1)：1 - 24.

[7] OMRAN M，FABRITIUS T，HEIKKINEN E P，et al. Dielectric properties and carbothermic reduction of zinc oxide and zinc ferrite by microwave heating[J]. Royal Society Open Science，2017，4(9)：170710 - 170725.

[8] CHAIRAKSA-FUJIMOTO R，MARUYAMA K，MIKI T，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.

[9] PICKLES C A. Thermodynamic analysis of the selective carbo-

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

thermic reduction of electric arc furnace dust[J]. Journal Hazardous Materials,2008,150:265 – 278.

[10] PICKLES C A. Thermodynamic analysis of the separation of zinc and lead from electric arc furnace dust by selective reduction with metallic iron [J]. Separation and Purification Technology,2008,59:115 – 128.

[11] MA A Y,ZHENG X M,ZHANG L B,et al. Clean recycling of zinc from blast furnace dust with ammonium acetate as complexing agents[J]. Separation Science and Technology,2018,53(9):1327 – 1341.

[12] TAKAHIRO M,ROMCHAT C F,KATSUYA M,et al. Hydrometallurgical extraction of zinc from CaO treated EAF dust in ammonium chloride solution[J]. Journal of Hazardous Materials,2016,302:90 – 96.

[13] LI Y,YANG S,TASKINEN P,et al. Novel recycling process for lead-acid battery paste without SO_2 generation-reaction mechanism and industrial pilot campaign[J]. Journal of Cleaner Production,2019,217:162 – 171.

[14] CHEN S M,CHENG D K,LI Y H,et al. Study of comprehensive recovery of high-contents as Waltz zinc oxide[J]. Nonferrous Mining and Metallurgy,2001,17(5):29 – 31.

[15] LONG H L,LI H Y,MA P C,et al. Effectiveness of thermal treatment on Pb recovery and Cl removal from sintering dust [J]. Journal of Hazardous Materials,2020,403:123595 – 123605.

[16] 高岩,温耀儒,陈士强,等. 从烧结电除尘灰中氯化浸出铅[J]. 湿法冶金,2021,40(5):390 – 393.
GAO Yan,WEN Yaoru,CHEN Shiqiang,et al. Chloride-leaching of lead from sintered dust[J]. Hydrometallurgy of China,2021,40(5):390 – 393.

[17] ROCCHETTI L,AMATO A,BEOLCHINI F. Recovery of indium from liquid crystal displays[J]. Journal of Cleaner Production,2016,116:299 – 305.

[18] HE Y X,MA E,XU Z M. Recycling indium from waste liquid crystal display panel by vacuum carbon-reduction[J]. Journal of Hazardous Materials,2014,268:185 – 190.

[19] 饶兵,戴惠新,高利坤. 冶炼废渣中铟回收技术进展[J]. 化工进展,2016,35(12):4042 – 4051.
RAO Bing,DAI Huixin,GAO Likun. Metallurgical progress of recovery indium from smelt residues[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2016,35(12):4042 – 4051.

[20] 汪秋雨,曾建华,吴仁都,等. 铅锌冶炼烟灰中铟回收工艺研究[J/OL]. 中国有色冶金:1 – 5[2022 – 11 – 03]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5066.tf.20211231.1652.020.html.
WANG Qiuyu,ZENG Jianhua,WU Rendu,et al. A study of indium recovery from lead and zinc smelting dust[J/OL]. China Nonferrous Metallurgy:1 – 5[2022 – 11 – 03]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5066.tf.20211231.1652.020.html.

[21] YU Y W,WANG Z M,WEI H,et al. Separation and recovery of potassium chloride from sinter dust of a steel plant[J]. Ironmaking & Steelmaking,2019,46(2):193 – 198.

[22] ZHONG Y,QIU X,GAO J,et al. Recovery of soluble potassium from electric arc furnace dust of manganese alloy production: Characterization and water leaching kinetics[J]. ISIJ International,2017,58(1):194 – 200.

[23] 赵瑞超,张邦文,李保卫. 从高炉瓦斯灰回收铁的试验研究[J]. 金属矿山,2010(11):169 – 173.
ZHAO Ruichao,ZHANG Bangwen,LI Baowei. Experim en ts on recovering iron from blast-furnace gas ash[J]. Metal Mine,2010(11):169 – 173.

[24] 崔石岩,张明慧,孙永峰,等. 高炉灰与赤泥共还原 – 磁选回收铁的试验研究[J]. 金属矿山,2020(3):102 – 107.
CUI Shiyan,ZHANG Minghui,SUN Yongfeng,et al. Research on recovery of iron from blast-furnace ash and bayer red mud by co-reduction followed by magnetic separation[J]. Metal Mine,2020(3):102 – 107.

[25] 高恩霞,王宁,蒋曼,等. 铜渣与高炉灰共还原 – 磁选回收铁的试验[J]. 有色金属:冶炼部分,2022(2):27 – 33.
GAO Enxia,WANG Ning,JIANG Man,et al. Recovery of iron from copper slag and blast furnace ash by co-reduction and magnetic separation[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy),2022(2):27 – 33.

[26] 吴镇君. 电感耦合等离子体发射光谱法测定烧结矿和除尘灰中氧化钾·氧化钠·锌含量[J]. 金属世界,2021(5):93 – 96.
WU Zhenjun. Determination of K_2O,Na_2O,Zn in sinter and dedusting dust by inductively coupled plasma emission spectrometry[J]. Metal World,2021(5):93 – 96.

[27] 魏秀泉,马腾飞,佘雪峰. 含锌尘泥中锌铅及碱金属脱除研究[J]. 冶金能源,2019,38(1):54 – 58.
WEI Xiuquan,MA Tengfei,SHE Xuefeng. Removal of zinc,lead and alkali metals from zinc-bearing dust[J]. Energy for Metallurgical Industry,2019,38(1):54 – 58.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net