



铁矿石烧结机机头灰处置与综合利用技术现状 与发展趋势

李晨曦^{1,2}, 刘文斌^{1,2}, 李 凯², 李 康¹, 马瑞新^{1,3}

(1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2. 河北远大中正生物科技有限公司, 河北 石家庄 507000; 3. 高端金属特种熔炼北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 机头灰是钢铁冶金烧结工序产生的一种固体废弃物,其中含有大量的碱金属、氯和一定的铅锌等重金属元素。如果直接返回烧结配料会降低烧结矿质量,从而降低高炉的技术经济指标。本文从机头灰的基础物化性能出发,综述了机头灰中有价元素综合利用技术现状,结合机头灰处理的最新技术分析了各工艺的优缺点和适用范围,指出机头灰综合利用中存在的问题以及相关处理技术的发展趋势,期望通过对机头灰综合利用的系统分析为钢铁企业资源综合利用提供有益的参考和借鉴,促进机头灰中有价元素的高值化资源化利用,实现钢铁生产的绿色发展。

关键词: 机头灰; 处置方法; 综合利用; 提取工艺

中图分类号: X757

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)01-0001-11

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.01.001

Status quo and development trend of iron ore head ash disposal and comprehensive utilization technology

LI Chenxi^{1,2}, LIU Wenbin^{1,2}, LI Kai², LI Kang¹, MA Ruixin^{1,3}

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Hebei Yuanda Zhongzheng Bio-tech Co., Ltd. Shjiazhuang 507000, Hebei, China; 3. Beijing Key Laboratory of High-end Metal Special Smelting, Beijing 100083, China)

Abstract: Head ash is a kind of solid waste produced by the sintering process of iron and steel metallurgy, which contains a large amount of heavy metal elements such as alkali metals, chlorine and a certain amount of lead and zinc. If the sintering ingredients are returned directly, the quality of the sinter will be reduced and the technical and economic specifications of the blast furnace will be reduced. Based on the basic physical and chemical properties of head ash, the current status of the comprehensive utilization technology of valuable elements in the head ash is reviewed, the advantages and disadvantages of each process and the scope of application combined with the latest technology of head ash treatment are analyzed, the existing problems, and development trends in the comprehensive utilization of the head ash are pointed out, expecting to provide a useful reference for the comprehensive utilization of resources in iron and steel enterprises through the systematic analysis of the comprehensive utilization of the head ash to promote the high-value resource utilization of valuable elements in the head ash and realize the green development of steel production.

Key words: head ash; disposal methods; comprehensive utilization; extraction process

收稿日期: 2024-04-15; 修回日期: 2024-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11220343; U11220275)

作者简介: 李晨曦(1995—),女,博士研究生,从事有色金属冶金、纯化与分离方面的研究。

通信作者: 马瑞新(1967—),男,教授,从事有色金属冶金、纯化与分离、钙钛矿太阳能电池方面的研究。

钢铁工业作为支撑国民经济稳健发展的基石,其生产过程中不可避免地产生了大量固体废弃物。在这些废弃物中,烧结机机头灰因其独特的生产过程与成分特性,成为了钢铁工业固废管理中的重要一环^[1]。烧结机机头灰作为铁矿石烧结过程中烟气经电除尘器捕捉的细小颗粒物,根据除尘器的配置级别(如四级电除尘器),可细分为 1[#]灰至 4[#]灰。其中,1[#]灰与 2[#]灰因铁含量高、粒度适宜,通常被直接回用于烧结配料;而 3[#]灰与 4[#]灰则因铁含量相对较低,且富含钾、钠等碱金属及氯元素,其直接回用会对烧结过程及高炉炼铁产生不利影响,故多采取开路处置方式^[2]。

然而,随着钢铁产量的持续增长,烧结机机头灰的产生量亦随之攀升。据国家统计局最新数据显示,2023 年中国粗钢产量已突破 10.19 亿 t 大关。按照钢铁企业除尘灰产生总量约占钢产量 10‰ 的比例估算,全年产生的除尘灰总量超过 1 000 万 t^[3]。如此庞大的废弃物质,若不能得到妥善处理与资源化利用,不仅会对环境造成严重负担,更是对资源的一种极大浪费。尤其是在全球资源日益紧张、环保要求日益严格的背景下,探索高效、经济的烧结机头灰处置与综合利用技术,已成为钢铁行业转型升级、绿色发展的关键所在。

因此,本文从机头灰的基础物化性能出发,综述了机头灰中有价元素综合利用技术现状,结合机头灰处理的最新技术分析了各工艺的优缺点和适用范围,指出机头灰综合利用中存在的问题以及相关处理技术的发展趋势,期望通过对机头灰综合利用的系统分析为钢铁企业资源综合利用

提供有益的参考和借鉴,促进机头灰中有价元素的高值化资源化利用,实现钢铁生产的绿色发展。

1 机头灰基础物化性能

1.1 粒度分布

不同电场收集的机头灰粒度及粒度分布呈现明显的差异性,结果如图 1 所示^[4]。其中 1[#]灰、2[#]灰和 3[#]灰的平均粒径分别为 $1\ 750 \times 10^{-4}$ 、 $1\ 320 \times 10^{-4}$ 、 8.2×10^{-4} mm(3[#]利用酒精分散未发生团聚)。由图 1 可知,机头灰的粒度随电场级数的增加而变小。

1.2 电阻率

段毅等^[5]研究了不同电场机头灰原灰及经过水浸以后的固体电阻率,结果如图 2 所示。由图 2 分析可知:1[#]、2[#]机头灰电阻率差距不大,小于 $10\ \text{k}\Omega \cdot \text{cm}$,且水洗前后电阻率变化很小;3[#]、4[#]机头灰的原灰电阻率则提高了一个数量级,但是水洗后的电阻率与 1[#]、2[#]灰处于相同的数量级。机头灰电阻率的大幅升高带来的直接后果是导致电除尘器的捕集效率更低,其主要归因于包裹在表面的不导电的 KCl、NaCl^[6-7]。

1.3 化学成分与物相

机头灰是由铁矿石和烧结助剂在烧结条件下挥发进入气相,其成分随着所用矿石产地、杂质含量的不同而变;不同企业烧结工艺和烧结设备的差异也会引起机头灰成分的微小变化。同时随着生产的持续进行,不同工段产生的烟尘不断返回作为配料也会引起机头灰化学成分的变化。表 1 为不同电场机头灰的典型成分(A~E为不同电场

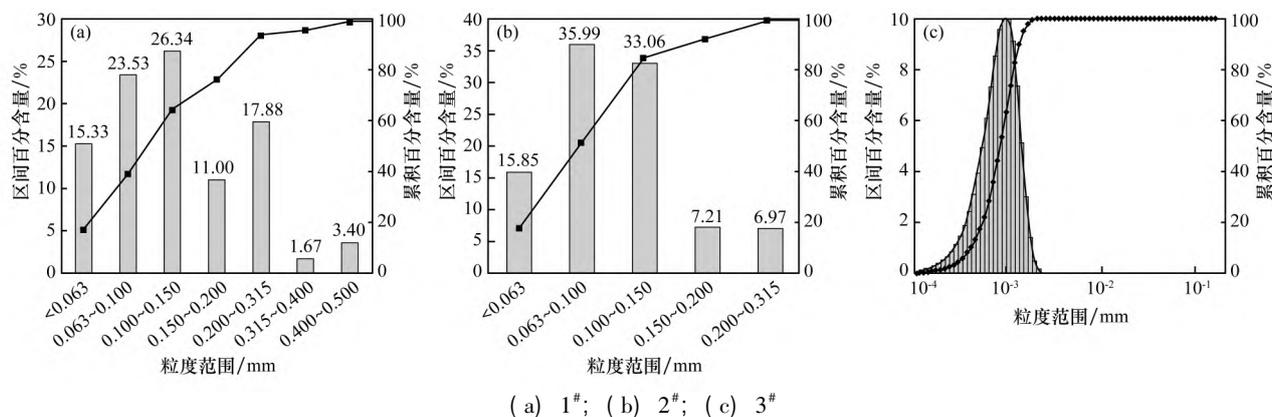
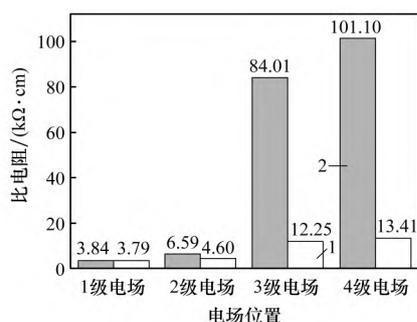


图 1 1[#]、2[#]、3[#]机头灰粒度分布^[4]

Fig. 1 Size distribution of 1[#], 2[#] and 3[#] head ash



1—一次水洗灰; 2—原始灰。

图2 电场(1#~4#)原始灰及水洗灰样比电阻^[5]

Fig. 2 Specific resistance of different electric field (1#~4#) original ash and ash sample after washing

表1 不同电场(1#~4#)机头灰主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions of ash from different electric field (1#~4#) %

机头灰编号	Fe	K	Na	Pb	Zn	Cu	Ca	Cl
A	41.93	8.28	3.05	0.36	0.02	0.11	8.63	10.02
B	28.96	13.83	3.05	0.90	0.04	0.28	8.42	15.34
C	25.18	18.46	8.29	1.42	0.28	0.15	4.91	25.18
D	9.44	33.34	7.89	0.93	0.20	0.25	2.00	40.56
E	7.26	24.41	9.97	1.99	0.38	0.20	2.10	31.03

机头灰)。由表1可见,机头灰中钾、钠、氯质量分数很高,有些氯质量分数已突破40%^[8]。

此外,物相分析表明,机头灰中的铁主要存在形式为 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 ,钾钠主要以 KCl 、 NaCl 形式存在,同时存在 CaCl_2 、 MgCl_2 等氯化物^[9]。

2 机头灰的处理技术现状

机头灰因原料、烧结工艺与设备的差异使得其化学组成有所差异。目前,其处理方法主要有湿法冶金法、火法冶金法和湿法-火法联合冶金法^[10-11]。

2.1 湿法

湿法冶金技术处理机头灰主要是利用酸、碱、盐等试剂在较低温度下提取机头灰中有价元素的技术。

2.1.1 中性水浸

中性水浸是利用机头灰中钠、钾氯化物易溶于水的特性,将机头灰进行浸洗使其中易溶组分进入水相而与不溶的组分进行分离。

郭占成等^[12]在室温下用自来水并加入适量的福美钠(SDD),在液固比为2:1~1:1的条件下浸出,实现95%~99.5%的钠、钾浸出率,滤渣经干燥返回烧结配料。浸出液加热浓缩至原体积的3/5~4/5后缓慢冷却,分步结晶析出 KCl 和 NaCl ,纯度达95%~98%;母液返回浸出。PENG等^[13]通过对浸出液比电导率的在线监测,证明 KCl 浸出符合溶解模型,5 min内即可达到平衡, K^+ 浸出率>95%。钱峰^[14]用水洗浸出、固液分离、蒸发结晶和分步结晶法提取 KCl ,纯度达90%以上;秦立浩等^[15]用浸出法,使 K 、 Na 的脱除率达到99%以上,而且从3#、4#电场机头灰中得到了质量分数为10%以上的铅精矿。

刘宪等^[16]在浸出过程中加入硫酸和表面活性剂以提高灰的亲水性,发现加入灰质量分数为2%的硫酸和2‰的十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)可以有效改善机头灰的亲水性。

LIU等^[17]提出了一种通过水浸-沉淀法从烧结机机头灰中回收 KCl 和 PbO 的方法。其中水浸过程是将 KCl 、 NaCl 从烧结粉尘中浸出,同时利用氧化铅在高浓度氯化物溶液中溶解度较高的性质使铅以 $(\text{PbCl}_6)^{2-}$ 络离子的形式进入溶液,然后在沉淀过程则以氢氧化铅的形式从浸出液中沉淀出来。在最佳条件下, KCl 和铅的回收率可分别达到90%和85%以上。

QIAO等^[18]从节能的角度出发采用溶剂置换结晶法研究了 KCl - NaCl - H_2O - $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 四元体系中 KCl 和 NaCl 的平衡性质,建立了四元体系的金字塔相图,得到溶剂结晶过程的相平衡并确定了饱和体系的最小有机溶剂量和临界结晶组成。在最佳条件下, KCl 纯度和总回收率分别达到93.8%和75.8%。

TANG等^[10]研究了机头灰及处理产物的矿物学特性,发现含铅物相是羟基氯化铅,同时大部分的颗粒都被氯化钾包覆。采用润湿球磨法加速烧结机静电除尘灰在水中分散性能,将 KCl 浸出到溶液中;以硫化钠为转化剂将铅转化成 PbS 再浮选分离,得到品位为40.82%、 Ag 品位为0.96 kg/t的铅银精矿以及 Fe 品位为60.89%的铁精矿, Pb 、 Ag 和 Fe 的回收率分别达89.57%、

87.85% 和 88.58%。

中性水浸提取 KCl 工艺简单易行且无废水排放。它不仅有效地弥补了中国钾资源的短缺,还避免了碱金属对钢铁流程的影响。目前已有较多应用,如天津、包头、南京、日照和莱芜等钢厂均投建了水洗机头灰提盐的项目,在当今钾价格低迷的行情下,水洗提钾流程利润微薄。水浸渣则根据其它有价元素含量高低选择直接返回烧结配料或者进一步回收。

2.1.2 碱性浸出

碱性浸出是将机头灰在 NaOH 或者氨水的溶液中浸出,利用高 pH 值溶液或氨水与锌、铅反应生成可溶性锌酸根、铅酸根实现有价元素提取。对碱/氨浸后的溶液进行后续处理,如沉淀、萃取、结晶等回收有价元素。

QIN 等^[19]采用氨浸-溶剂萃取法从机头灰中回收铅、锌。最佳条件下,铅、锌的回收率分别达到 95% 和 90% 以上。吴滨等^[20]则开发了机头灰氨水浸出提取银、铜、锌的工艺,在 50 °C × 2 h、氨水浓度为 10%、液固比为 10:1 的条件下,使银、铜、锌的浸出率分别达到 98.5%、99.2% 和 99.6%。

毛磊等^[21]用 6 mol/L 的 NaOH 溶液浸出机头灰中的锌,室温下锌的浸出率为 63%。DUTRA 等^[22]在 90 °C 下经过 4 h 浸出,将锌的回收率提高到 74%。ZHANG 等^[23]用相同浓度 NaOH 加入 10 g/L 的蔗糖后锌的总浸出率提高到 89.7%。

2.1.3 酸性浸出

酸性浸出是利用酸与机头灰中的部分成分发生反应将其溶解实现相分离的方法。采用酸浸液进行沉淀、结晶或萃取分离有价元素。

张俱栋^[24]用酸性硫脲溶液浸出机头灰的银,在酸浸过程中引入超声后银的浸出率为 94.7%。CHANG 等^[25]采用硫脲作为浸出剂研究了超声对银浸出率的影响,结果表明在最佳条件下施加超声前后银的浸出率分别为 89% 和 95%。王晨宇^[26]采用盐酸-氯化铵盐体系浸出机头灰中铅、银,在 pH=3.0、80 °C × 2 h、 $[Cl^-]=6$ mol/L、液固比为 10:1 的条件下铅和银的浸出率均大于 95%。

张湘鹤等^[27]对机头灰生产 KCl、K₂SO₄ 以及

回收铁、锌、铅等有价元素的相关工艺路线进行了总结,提出了通过水洗提钾/钠,再与铁矿混合还原焙烧后经磁选提铁、酸碱浸出提锌、铅、银等有价金属的资源回收路线。

JIANG 等^[28]将经过 (HF、HCl、HNO₃ 和 H₂SO₄) 酸浸以后的机头灰酸浸渣作为催化剂载体,然后负载上不同金属氧化物制备成氨法脱硝催化剂。结果表明:经过 HF 预处理和 CeO₂ 改性的催化剂的脱硝效率升高。当用质量分数为 10% 的 CeO₂ 改性时,280 °C 时的 NO_x 转化率达到 76.4%;进一步用 ZrO₂ 改性得到 0.25-Ce10-PSDCHF/ZrO₂ 催化剂在 280 °C 时 NO_x 转化率达到 85%。

2.2 火法

火法处理机头灰是利用高温窑炉实现机头灰中有价元素相分离的方法,包括回转窑、转底炉、球团法、氯化焙烧及试验研究的协同转化法。

2.2.1 回转窑法

回转窑法是将机头灰与焦粉等燃料按比例混匀后在 1 100 ~ 1 300 °C 高温下实现 Zn、Pb、In 等有价元素还原挥发分离最终形成次氧化锌,固相窑渣直接返钢铁生产烧结、电炉系统或磁选回收金属铁,尾渣外售作水泥、环保砖原料等的方法^[29-31]。

回转窑法适合处理锌、铅含量较高的除尘灰。机头灰中大部分钾、钠、氟、氯随锌、铅蒸汽一起进入气相然后与通入的空气中的氧反应生成次氧化锌。一般入窑原料氯质量分数 < 3%,否则易造成收尘滤袋堵塞、次氧化锌/铁料氯含量偏高。回转窑所得次氧化锌是锌冶金原料,过高的氯含量会造成锌电积过程中惰性阳极溶解,不仅缩短了惰性阳极寿命而且会降低阴极电锌的产品等级。

回转窑法的优势在于对入窑原料适应性强,但是也存在窑头结圈、窑尾堵塞及能耗高且锌的回收率不太高等问题。其中锌回收率主要取决于入窑原料的含锌率:当原料中锌质量分数 < 3%,锌回收率约为 80%;原料中锌质量分数 > 8% 时,锌回收率大于 90%。沈维民等^[32]将钢厂粉料先行干法压制成球团并改单一窑头进风为窑头、窑身多级进风措施缓解了回转窑结圈问题。

国内山西立恒、永锋钢铁、日钢、包钢、八

钢等较为成功地实现了回转窑处理机头灰^[9]。山东永锋临港提铁减锌回转窑项目中,得到质量分数35%以上的次氧化锌,窑渣中含锌0.3%~0.6%,全铁质量分数为60%以上。改造后的湖南诚钰环保回转窑项目,提高了10%~20%的生产规模且金属转化率高达88%^[32]。詹若宁等^[33]采用9%的无烟煤作为还原剂,在还原温度为1200℃、还原时间为100min条件下,脱锌率为99.5%,脱铅率为90.2%,在扩大试验中,当还原温度提高到1500℃,同样时间内脱锌率为99.8%,脱铅率为99.2%。

2.2.2 转底炉法

与回转窑处理粉料不同的是转底炉法要将除尘灰、碳粉等燃料和黏结剂混合均匀并制成团块或球团,干燥后放入转底炉内,炉内温度高达1200~1400℃,使高温烟气在物体的上方逆向流动,在高温还原段,团块内的氧化锌、氧化铅等被还原锌、铅进入烟气富集回收。转底炉工艺具体可分为Inmetco、Fastmet、DryIron和ITmk等^[34]。因KCl、NaCl沸点较低,机头灰中的钾钠也会随铅锌一起进入次氧化锌,所得金属化球团则进入电炉炼钢^[35]。

刘颖^[36]用数学模型研究各因素对转底炉金属转化率的影响,发现炉膛温度影响最大,其它影响因素依次为球团直径、时间及碳氧比。魏秀泉等^[37]用转底炉研究了不同条件下,铁的还原率、金属化率以及脱锌、脱铅率,发现在1300℃下还原时间大于18min时,反应接近最终平衡,金属化率大于80%,铅锌几乎完全脱除。

转底炉工艺已在马钢、莱钢、日照钢铁、沙钢、宝钢等企业实现工业化^[38]。宝钢湛江对转底炉进行分区优化,对各阶段进行温度、流场和气氛控制以提高金属转化率,获得70%~92%球团金属化率^[39]。金永龙等^[40]用相同的炉料研究压球-转底炉及造球-转底炉两种工艺条件发现压球-转底炉成本高于造球-转底炉,但造球成球强度高且粉化率低,压球/造球-转底炉工艺的脱锌率均超过85%,金属化率超过70%。

2.2.3 协同转化法

WANG等^[41]用生物质发电产生的生物废炭和

烧结机机头灰通过协同转化法直接生产还原铁和合成气,研究了反应热力学、生物炭转化和机头灰的还原行为。生物炭气化和机头灰在还原温度为1000℃、还原时间为60min、C/Fe的物质的量之比为1.2条件下相互耦合并彼此促进:对于生物炭转化,添加的机头灰加深了废生物炭中挥发物的热解而生成更多的CH₄,并提供更多的氧原子来气化固定碳中的碳原子,生成了更多的CO。与生物炭单独热解相比,添加机头灰后转化产物中CO和CH₄产量分别增加了633.8%和41.5%。作者认为机头灰辅助生物炭转化过程就是铁晶粒的生成、聚集和长大,包括金属铁的生成,也是机头灰中铁氧化物的还原过程,也就是铁颗粒的产生、聚集和生长并形成曲棒和复合絮凝金属铁,最终形成较大的块状颗粒的过程。在最佳条件下获得了金属化率达92.4%的直接还原铁,能够满足电弧炉炼钢的要求,为机头灰处置提供了一种新的尝试。关于机头灰中碱金属元素、氯以及铅锌等元素的走向与分布及其对电弧炉炼钢过程的影响尚需要进一步明确。

2.2.4 氯化焙烧法

氯化焙烧是基于金属氯化物熔沸点较低的特性而在较低温度下使原料中的有价成分转化为气相或凝聚相的氯化物,利用不同氯化物的沸点差异实现分离富集^[8]。

龙海林等^[42]用机头灰自身含有的氯化物(KCl、NaCl、CaCl₂)作氯化剂对烧结灰进行氯化焙烧,发现氯化剂与各元素发生氯化反应强弱的顺序为CaCl₂>NaCl>KCl,在焙烧温度为1423K、焙烧时间为60min、空气流速为400L/h和质量分数为4%的CaCl添加量的条件下,铅、银、铜的氯化挥发率分别为99.48%、98.41%和86.88%,实现了有价金属高效分离。LIU等^[43]提出了一种通过磁选和氯化焙烧从烧结粉尘中回收铅的方法,铅的回收率达到90%以上。该方法包括两个主要步骤:磁选和氯化焙烧。磁选过程能够有效地将铁和其他磁性杂质与铅分离,而氯化焙烧则将铅转化为氯化铅。这种方法由于二次污染较严重,不适合常规机头灰的处置,但是对于高铅含量的机头灰具有一定的优势。

2.2.5 球团法

球团法是将机头灰、活性炭与适量的黏结剂混合,通过造粒机将混合物制成球状,然后进一步进行高温处理以深度脱除铅锌,同时脱除部分金属化的钾、钠、铁。所得球团具有较高的体积密度和强度,可用于高炉炼铁或短流程电炉炼钢^[44-45]。

居天华^[46]研究表明,黏结剂对解决球团粉化和增加强度有较大的影响,大于 6% 的 CO_3^{2-} 添加量时可解决球团粉化问题。张建良等^[47]采用配煤压球焙烧法,在焙烧温度为 1 200 °C、焙烧时间为 35 min、添加 10% 煤粉条件下,实现了 99.76% 的脱锌率。张学婕等^[48]用有机黏结剂制备冷压球团,降低了成本同时球团性能未发生明显变化。谢剑波等^[49]利用机头灰制备低锌高性能金属球团,随活性炭量的增加,金属球团耐压强度呈现先增加后降低的趋势,当活性炭添加量为 3% 时耐压性最高。毕学工等^[50]以机头灰、潞安煤、轧钢皮、膨润土及有机黏结剂制备球团矿,在碳与氧物质的量之比为 0.8、焙烧温度为 1 325 °C、焙烧时间为 10 min 条件下,得到 91% 的脱锌率、86.3% 的还原度、80% 的金属化率以及抗压强度达 2 105 N 的金属球团矿。CHUN 等^[51]开发了一种利用含锌粉尘制备预还原炼铁料的球团-金属化烧结工艺,在生产效率为 0.471 t/(m²·h)、转鼓指数为 81.31% 的条件下,得到预还原烧结产物铁质量分数为 60.53%、金属化率为 45.23%、锌和铅脱除率分别达 92.78% 和 96.37% 的金属化球团。ZHAO 等^[52]将收尘灰与铁矿石一起预还原以脱除锌、钾、钠,发现:随着粉尘含量的增加,Zn 去除率和铁的金属化率逐渐提高,当粉尘质量分数为 30% 时,Zn 去除率和铁金属化率分别达到 97.57% 和 87.14%;当粉尘质量分数为 25% 时,K 和 Na 的去除率最高分别能达到 83.57% 和 94.78%。随着还原时间和温度的增加,三种元素的去除率和金属化率逐渐提高。当高炉粉尘质量分数为 20% 的型煤在 1 200 °C 还原 20 min 时,锌、钾、钠的去除率分别达到 95.66%、79.97% 和 91.49%,金属化率达到 84.77%。

2.3 湿法-火法联合

火法处理是在高温下,利用粉尘中的碳或外

加含碳物作为还原剂将部分金属氧化物还原并回收有价元素。优点是反应速度快,资源利用率高;缺点是能耗、成本较高,当机头灰中铅锌等重金属含量低时经济性差。湿法是利用各种试剂浸出分离锌、铅、银等物质。优点是产品质量高,分离彻底;缺点是流程较长、容易产生二次污染且高盐溶液对设备腐蚀严重。火法-湿法联合工艺是结合火法和湿法各自优点实现机头灰中有价元素的综合利用。

张静等^[53]采用“水浸-酸浸-中和-焙烧”的湿法-火法联用工艺处理新疆八一钢铁厂的烧结机头灰。在固液比为 1:4、100 °C × 10 min 两级水浸,钾、钠回收率分别为 97.7% 和 100%;用 6 mol/L 盐酸,液固比为 8:1、109 °C 对水浸后的固体进行酸浸,除尘灰的分解率超过 92%;通过中和沉淀-焙烧处理,将铁转化为可返炉回用的铁精矿。刘宪等^[54]采用“浮选-磁选-氯化浸提-沉淀-焙烧”工艺对机头灰中有价元素进行综合利用。郑志豪^[55]利用低温碱性焙烧-碱浸出法回收锌,经过 350 °C 焙烧 1 h 和 5 mol/L 氢氧化钠在 90 °C 浸出 3 h,脱锌率达到 97.25%。

3 存在的问题与发展趋势

机头灰是一种冶金固废,其处置技术随着环保压力的逐渐增加而愈发引人关注。因不同企业原料来源的差异而应用的火法处理、湿法处理以及火法-湿法联合处理工艺,使得粉尘中碳、钾、钠、铁、铅、锌、银等金属元素的综合利用程度日趋完善,同时有部分企业也开展了从机头灰中提取碘、溴等非金属元素的研究及产业化。

火法工艺的优势在于处理能力大、效率高,但是高氯、高碱金属的机头灰直接进入火法流程会产生严重的设备腐蚀问题;湿法工艺能够生产我国需要大量进口的钾盐产品,但是湿法工艺的流程长、环节多、工艺控制要求较高,为了解决氯离子的腐蚀而全部采用钛质设备以后,投资增幅较大,同时湿法工艺中为了除杂净化而产生的二次污染也是在流程选择时需要重点关注的问题之一;火法-湿法联合工艺能够发挥各自的优势,但是也会产生流程进一步复杂化、投资更加庞大

等问题。

在环保要求日益趋紧的当下, 确定机头灰中有价元素的种类与含量、有害物质的特性与含量, 综合考虑投资规模、有价元素的经济价值、有害物质的后处理与无害化成本、现有场地/资源等条件, 才能获得与待处理机头灰最匹配的处置方案。

机头灰中一般都会含有少量的铊元素。铊是一种稀散元素, 但是有极高的毒性。随着环保意识的逐渐增强, 铊及铊的化合物在现代工业中的使用越来越小。朱焯等^[1]对某地三家钢铁机头灰的危险特性进行了检测, 其中铅、镉、铊的质量浓度见表 2。由表 2 可见: 铊在机头灰中的质量浓度为 31.5 ~ 520.0 mg/L。在机头灰综合利用过程中, 应重视铊的富集与分布及其对环境的潜在毒性。

表 2 烧结机机头灰危险特性检测初筛结果^[1]

Table 2 Results of preliminary screening for the dangerous characteristics of ash of sintering machine head ash

不同成分浸出毒性/ (mg·L ⁻¹)		不同成分毒性物质含量/ (mg·kg ⁻¹)		
镉	铅	铅	镉	铊
0 ~ 14.9	0 ~ 3.24	(3.0 ~ 42.6) × 10 ³	32.7 ~ 577.0	31.5 ~ 520.0

二噁英是指含有 2 个或 1 个氧键连结 2 个苯环的含氯有机化合物, 包含 210 种化合物, 是一种在工业上无用的副产物。ZHOU 等^[56]对机头灰中多氯二苯并对二噁英(PCDD)、二苯并呋喃(PCDF)和二噁英类多氯联苯(dl-PCB)的质量浓度在烧结罐炉排中进行了测试。结果表明: 在烧结矿中 PCDD 的质量浓度高于 PCDF, 而在灰尘样品中 PCDD 的质量浓度低于 PCDF。尽管烧结矿和粉尘样品中的 PCDD/F 质量浓度不同, 但非邻位 PCB 的质量浓度高于单邻位 PCB。统计分析显示, 低氯化 PCDD/F 同系物与高氯化 PCDD/F 同系物之间存在显著相关性, 非邻位 PCB 之间也存在较强相关性。机头灰资源化利用过程中, 微量二噁英在流程及产品中的分布、对环境的潜在二次危害也是亟需关注的一个问题。

作者多年关注机头灰中有价元素的综合利用, 研究发现机头灰中还含有两种重要的稀有元素——铷和铯。铷铯在航天航空、石油化工、核

能、医学等领域有着广泛的应用。TANG 等^[57]采用“水浸-萃取-反萃”法提取烧结机头灰的铷, 得到纯度为 99.5% 的氯化铷, 总铷的提取率为 58.26%。李建等^[58]采用溶剂萃取法对机头灰水浸液以 *t*-ABMBP 为萃取剂进行了铷铯分离。笔者所在课题组对机头灰水浸液提取 KCl、NaCl 后的高盐循环母液进行了萃取铷铯的研究, 发现高盐环境下萃取过程极易发生乳化现象^[59]。据此, 课题组开发了一种新型共沉淀技术, 实现了高盐溶液中的铷铯高效分离^[59-60]。

4 结 论

机头灰的综合利用既涉及到有价元素的高效利用, 还与环保息息相关, 相关研究和产业化工艺都在不断优化之中。

(1) 湿法流程、火法流程和湿法-火法联合流程各有优势, 应该根据机头灰中有价元素种类及含量的差异进行选择。

(2) 机头灰中的铅、镉、铊等环境有害元素及其在综合利用流程中的元素平衡与开路问题, 既与流程选择有关也与经济性密切相关。

(3) 二噁英类似物在机头灰中的存在形式、潜在的环境危害应该引起足够的重视。

(4) 铷、铯元素在机头灰中虽然含量不高, 但以可溶性氯化物形式存在而不断富集。机头灰水浸液或循环母液中铷铯的提取技术尚处于起步阶段, 研发适合机头灰原料特点的铷铯绿色、低成本提取技术将成为未来机头灰高值化利用的新趋势。

参考文献:

- [1] 朱焯, 周妍, 肖弘远, 等. 湖南省典型钢铁冶炼企业烧结机头灰危险特性研究[J]. 现代矿业, 2023, 39(2): 27-29.
ZHU Ye, ZHOU Yan, XIAO Hongyuan, et al. Study on hazard characteristics of sintering machine head ash in typical iron and steel smelting enterprises in Hunan Province[J]. Modern Mining, 2023, 39(2): 27-29.
- [2] 马怀营, 裴元东, 潘文, 等. 烧结机头除尘灰特性及资源化利用进展[J]. 中国冶金, 2018, 28(6): 5-8.
MA Huaiying, PEI Yuandong, PAN Wen, et al.

- Characteristics and recycling progress of dust in sintering machine head [J]. *China Metallurgy*, 2018, 28 (6) : 5 - 8.
- [3] 伍颖,姚俊,彭波. 浅议钢铁冶金除尘灰的处理工艺[J]. *低碳世界*, 2019, 9(12) : 30 - 31.
- WU Ying, YAO Jun, PENG Bo. Discussion on the treatment technology of dust removal in iron and steel metallurgy [J]. *Low Carbon World*, 2019, 9(12) : 30 - 31.
- [4] 付本全,黄建阳,吴英,等. 烧结机头除尘灰理化性能及磁性特征分析[J]. *武汉科技大学学报*, 2014, 37(4) : 254 - 257.
- FU Benquan, HUANG Jianyang, WU Ying, et al. Physicochemical properties and magnetic characteristics of electrical precipitator dust on the head of sintering machine [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2014, 37(4) : 254 - 257.
- [5] 段毅,包向军,徐俊超,等. 不同级数烧结电场除尘灰的理化特性分析[J]. *烧结球团*, 2022, 47(2) : 96 - 100.
- DUAN Yi, BAO Xiangjun, XU Junchao, et al. Analysis on physicochemical properties of sintered electric field fly ash with different stages [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2022, 47(2) : 96 - 100.
- [6] 黎在时. 电除尘器的选型安装与运行管理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- LI Zaishi. Selection, installation and operation management of electrostatic precipitator [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [7] 居鹤鸣. 南京钢铁烧结厂 4[#]、5[#]烧结机机头电除尘器除尘灰自燃原因分析及解决过程[J]. *冶金管理*, 2021(9) : 61 - 62.
- JU Heming. Cause analysis and solution of spontaneous combustion of dust from electrostatic precipitator at the head of sintering machine 4[#] and 5[#] in Nanjing Iron and Steel Sintering Plant [J]. *China Steel Focus*, 2021(9) : 61 - 62.
- [8] 冯哲愚,王磊,刘彦廷,等. 烧结机头灰处置技术对比与研究进展[J]. *烧结球团*, 2023, 48(5) : 24 - 32.
- FENG Zheyu, WANG Lei, LIU Yanting, et al. Comparison and research progress of disposal technologies of sintering machine head ash [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2023, 48(5) : 24 - 32.
- [9] 于恒,黄细聪,李科,等. 钢铁企业除尘灰综合利用现状与展望[J]. *矿产保护与利用*, 2021, 41(4) : 164 - 171.
- YU Heng, HUANG Xicong, LI Ke, et al. Present situation and prospect of comprehensive utilization of precipitator dust in iron and steel enterprises [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2021, 41(4) : 164 - 171.
- [10] TANG Honghu, SUN Wei, HAN Haisheng. A novel method for comprehensive utilization of sintering dust [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015(12) : 4192 - 4200.
- [11] EI-HUSSINY N A, SHALABI M E H. Effect of recycling blast furnace flue dust as pellets on the sintering performance [J]. *Science of Sintering*, 2010, 42 (3) : 269 - 281.
- [12] 郭占成,彭翠,张福利,等. 利用钢铁企业烧结电除尘灰生产氯化钾的方法: CN2008101012693 [P]. 2008 - 03 - 03.
- GUO Zhancheng, PENG Cui, ZHANG Fuli, et al. Method of producing potassium chloride by sintering electric dust ash of iron and steel enterprise: CN2008101012693 [P]. 2008 - 03 - 03.
- [13] PENG C, Guo Z, Zhang F. Existing state of potassium chloride in agglomerated sintering dust and its water leaching kinetics [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(8) : 1847 - 1854.
- [14] 钱峰. 烧结机头电粉尘的回收利用[J]. *钢铁*, 2015, 50(12) : 67 - 71.
- QIAN Feng. Recovery and utilization of electric dust of sintering machine head [J]. *Iron and Steel*, 2015, 50(12) : 67 - 71.
- [15] 秦立浩, 墙蕾, 阳红辉, 等. 烧结机头电除尘灰的分级利用[J]. *钢铁研究学报*, 2020, 32(9) : 802 - 808.
- QIN Lihao, Qiang Qiang, YANG Honghui, et al. Classification and utilization of electric dust removal ash of sintering machine head [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2020, 32(9) : 802 - 808.
- [16] 刘宪, 蒋新民, 杨余, 等. 烧结机头电除尘灰中钾的脱除及利用其制备硫酸钾[J]. *金属材料与冶金工程*, 2011, 39(3) : 40 - 45.
- LIU Xian, JIANG Xinmin, YANG Yu, et al. Removal of potassium and preparation of potassium sulfate from sintering EAF dust [J]. *Metal Materials and Metallurgy Engineering*, 2011, 39(3) : 40 - 45.

- [17] LIU X ,QIAN F ,ZHANG M ,et al. Recovery of potassium chloride and lead oxide from sintering dust by water leaching and precipitation[J]. *Journal of Cleaner Production* 2021 279:123688.
- [18] QIAO Z Q ,YANG Y Q ,YANG T ,et al. Separation and recovery of potassium chloride from sintering filtrated dust of ferrous metallurgy by solvent crystallization and the phase equilibrium of quaternary solution system[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering* ,2023 , 11(6) :111432.
- [19] QIN L ,ZHANG M ,ZHANG Y ,et al. Recovery of lead and zinc from sintering dust by water leaching and solvent extraction[J]. *Separation and Purification Technology* 2020 235:116 -184.
- [20] 吴滨 ,吕先贺 ,叶鹏 ,等 . 烧结机头电除尘灰中银、铜、锌等有价值元素的回收 . 湖南有色金属学院学报 , 2019 29(6) :1 -8.
WU Bin ,LÜ Xianhe ,YE Peng ,et al. Recovery of silver , copper ,zinc and other valuable elements from electric dust ash of sintering machine head[J]. *Journal of Hunan Nonferrous Metals Institute* 2019 29(6) :1 -8.
- [21] 毛磊 ,杨宝滋 ,朱小涛 ,等 . 从瓦斯灰中碱浸锌及其动力学研究[J]. *湿法冶金* 2014 33(6) :429 -432.
MAO Lei ,YANG Baozi ,ZHU Xiaotao ,et al. Leaching and leaching kinetics of zinc from blast furnace dust with sodium hydroxide [J]. *Hydrometallurgy of China* ,2014 , 33(6) :429 -432.
- [22] DUTRA A J B ,PAIVA P R P ,TAVARES L M. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust[J]. *Minerals Engineering* 2006 19(5) :478 -485.
- [23] ZHANG D C ,LING H B ,YANG T Z ,et al. Selective leaching of zinc from electric arc furnace dust by a hydrothermal reduction method in a sodium hydroxide system [J]. *Journal of Cleaner Production* ,2019 ,224: 536 -544.
- [24] 张佃栋 . 超声辅助酸性硫脲浸出烧结灰中银的工艺研究[D]. 昆明:昆明理工大学 2016.
ZHANG Naidong. Study on ultrasonic-assisted acidic thiourea leaching of silver from sintered ash[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology 2016.
- [25] CHANG J ,ZHANG E D ,ZHANG L B ,et al. A comparison of ultrasound-augmented and conventional leaching of silver from sintering dust using acidic thiourea [J]. *Ultrasonics Sonochemistry* 2017 34:222 -231.
- [26] 王晨宇 . 从钢铁冶炼尘泥中选择性浸出铅、银、锌的研究[D]. 昆明:昆明理工大学 2020.
WANG Chenyu. Study on selective leaching of lead ,silver and zinc from iron and steel smelting dust and mud[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology , 2020.
- [27] 张湘鹤 ,吕先贺 ,叶鹏 ,等 . 烧结机头烟灰资源化利用的研究进展[J]. *武汉工程大学学报* ,2019 41(1) : 35 -39.
ZHANG Xianghe ,LÜ Xianhe ,YE Peng ,et al. Progress in resources utilization of sintering dust[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology* 2019 41(1) :35 -39.
- [28] JIANG D Z ,WANG Y R ,ZHOU Y ,et al. Performance of sintering dust-modified metal oxides catalyst in SCR-NH₃ technique [J]. *Research on Chemical Intermediates* , 2023 49(6) :2299 -2319.
- [29] 杨春善 ,任明欣 . 日照钢铁固废尘泥处理实践 [J]. *钢铁* 2019 54(4) :83 -91.
YANG Chunshan ,REN Mingxin. Practice of waste dust mud treatment in Rizhao Steel [J]. *Iron & Steel* ,2019 , 54(4) :83 -91.
- [30] 王会刚 ,吴龙 ,邱桂博 ,等 . 冶金含钾除尘灰中钾资源提取现状综述 [J]. *环境工程* ,2024 42(1) :119 -125.
WANG Huigang ,WU Long ,QIU Guibo ,et al. Review on extraction of potassium from metallurgical dust-containing potassium [J]. *Environmental Engineering* 2024 42(1) :119 -125.
- [31] STROMEIER G ,BONESTELL J E. Steelworks residues and the Waelz Kiln treatment of electric arc furnace dust [J]. *Iron and Steel Engineer* ,1996 73(4) :87 -90.
- [32] 沈维民 ,叶恒棣 ,张志波 ,等 . 钢铁工业含锌尘泥回转窑处置技术的应用进展 [J]. *烧结球团* 2024 49(1) : 11 -17.
SHEN Weimin ,YE Hengdi ,ZHANG Zhibo , et al. Progress in application of disposal technology for zinc-containing dust sludge rotary kiln in iron and steel industry [J]. *Sintering and Pelletizing* ,2024 49(1) : 11 -17.
- [33] 詹若宁 ,郭正启 ,朱德庆 ,等 . 基于回转窑煤基直接还原法的含锌渣尘协同处置 [J]. *钢铁研究学报* 2023 , 35(2) :219 -231.
ZHAN Ruoning ,GUO Zhengqi ,ZHU Deqing ,et al. Co-

- disposal of zinc-containing slag and dust based on coal-based rotary kiln direct reduction method [J]. *Journal of Iron and Steel Research* 2023 35(2): 219–231.
- [34] 王贤君. 转底炉处理冶金含锌尘泥的理论分析及实验研究[D]. 重庆: 重庆大学 2012.
WANG Xianjun. Theoretical analysis and experimental research of RHF treatment on metallurgical zinc-bearing wastes [D]. Chongqing: Chongqing University 2012.
- [35] 霍天玺, 焦玉莉, 侯莉萍. 转底炉直接还原处理含锌尘泥的设计特点[J]. *河北冶金* 2013(6): 40–42.
HUO Tianxi, JIAO Yuli, HOU Liping. Design characteristics of rotary hearth furnace to treat zinc-bearing dust and sludge with directly reduction [J]. *Hebei Metallurgy* 2013(6): 40–42.
- [36] 刘颖. 转底炉内冶金粉尘含碳球团直接还原过程数学模型研究[D]. 北京: 北京科技大学 2015.
LIU Ying. Mathematical model of investigation of direct reduction of carbon-containing pellets made of metallurgical dust in a rotary hearth furnace [D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2015.
- [37] 魏秀泉, 马腾飞, 余雪峰. 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.
- [38] 刘自民, 烧磊, 桂满城, 等. 马钢钢铁冶炼尘泥综合利用研究与实践[J]. *中国冶金* 2018 28(9): 71–76.
LIU Zimin, RAO Lei, GUI Mancheng, et al. Research and practice on comprehensive utilization of dust and mud in Masteel Iron and steel smelting [J]. *China Metallurgy*, 2018 28(9): 71–76.
- [39] 刘长正. 转底炉处理冶金固废的节能研究与应用[J]. *中国资源综合利用* 2022 40(6): 180–184.
LIU Changzheng. Research and application on energy saving of metallurgical solid waste treatment in rotary hearth furnace [J]. *China Resources Comprehensive Utilization* 2022 40(6): 180–184.
- [40] 金永龙, 孙宇佳, 王倩. 转底炉处置含锌固废的工业试验及生产实践[J]. *河北冶金* 2022(5): 61–64.
JIN Yonglong, SUN Yujia, WANG Qian. Industrial tests and actual products of zinc-containing solid waste treatment by rotary hearth furnace [J]. *Hebei Metallurgy*, 2022(5): 61–64.
- [41] WANG L, YANG Y B, OU Y, et al. Synergistic conversion of iron ore sintering dust and waste biochar to produce direct reduction iron and syngas: Gasification, reduction behavior and thermodynamic analysis [J]. *Journal of Cleaner Production* 2024 434: 139996.
- [42] 龙海林. 氯化焙烧挥发烧结灰中有价元素的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学 2021.
LONG Hailin. Study on valuable elements in volatile sintering ash by chlorination roasting [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology 2021.
- [43] LIU X, HUANG X, QIU G, et al. Recovery of lead from sintering dust by magnetic separation and chlorination roasting [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 1310–1316.
- [44] 刘裕信. 金属化球团矿生产工艺的完善[J]. *炼铁技术通讯*, 1994(6): 16–17.
LIU Yvxin. Perfection of metallized pellet production process [J]. *Ironmaking Technical Newsletter*, 1994(6): 16–17.
- [45] 彭志坚. 团矿概论[M]. 武汉: 武汉科技大学出版社 2005: 207–209.
PENG Zhijian. Introduction to briquettes [M]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology Press, 2005: 207–209.
- [46] 居天华. 提高转炉除尘灰冷压球团强度的黏结剂研究[D]. 沈阳: 东北大学 2014.
JU Tianhua. Research on improving the converter dust cold-press pellet's strength of binder. Shenyang: Northeastern University 2014.
- [47] 张建良, 闫永芳, 徐萌, 等. 高炉含锌粉尘的脱锌处理[J]. *钢铁* 2006 41(10): 78–81.
ZHANG Jianliang, YAN Yongfang, XU Meng, et al. Research on removal of Zn from blast furnace dust [J]. *Iron & Steel* 2006 41(10): 78–81.
- [48] 张学婕, 丁学勇, 刘金生, 等. 新型有机黏结剂 HC 用于制备冷压球团的研究[J]. *材料与冶金学报* 2021, 20(1): 57–63.
ZHANG Xuejie, DING Xueyong, LIU Jinsheng, et al. Study on preparation of cold-press pellets using new style organic binder HC [J]. *Journal of Materials and Metallurgy* 2021 20(1): 57–63.
- [49] 谢剑波, 周建安, 王亚雨, 等. 烧结电除尘灰球团制备及脱锌探索[J]. *钢铁钒钛* 2017 38(1): 91–94.
XIE Jianbo, ZHOU Jian'an, WANG Yayu, et al.

- Exploration of preparation and dezincification percentage of metallic pellets from sintering electric remove dust [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium* ,2017 ,38(1) : 91 - 94.
- [50] 毕学工,王亚雨,谢登高,等. 烧结电除尘灰内配碳球团的试验研究[J]. *烧结球团* ,2017 ,42(1) : 38 - 44.
BI Xuegong , WANG Yayu , XIE Denggao , et al. Experimental study on production of carbon-blended pellets with using sinter ESP dusts [J]. *Sintering and Pelletizing* ,2017 ,42(1) : 38 - 44.
- [51] CHUN T J ,ZHU D Q. New process of pellets-metallized sintering process(PMSP) to treat zinc-bearing dust from iron and steel company [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B* ,2015 ,46(1) : 1 - 4.
- [52] ZHAO G Q ,LI R Y ,XING X D ,et al. Removal behavior of Zn and alkalis from blast furnace dust in pre-reduction sinter process [J]. *Green Processing and Synthesis* , 2023 ,12(1) : 2023 - 2045.
- [53] 张静,薛彦辉,李伟杰,等. 烧结机头灰化学浸出试验研究[J]. *烧结球团* ,2020 ,45(1) : 77 - 81.
ZHANG Jing ,XUE Yanhui ,LI Weijie ,et al. Experimental study on chemical leaching of dust at sintering machine feed end [J]. *Sintering and Pelletizing* ,2020 ,45(1) : 77 - 81.
- [54] 刘宪,杨运泉,蒋新民. 从烧结灰中回收氯化铅及制备一氧化铅的方法: CN101723439A [P]. 2010 - 06 - 09.
LIU Xian ,YANG Yunquan ,JIANG Xinmin. Method for recovering lead chloride from sintering ash and preparing lead monoxide: CN101723439A [P]. 2010 - 06 - 09.
- [55] 郑自豪. 含锌转炉尘泥资源化利用的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
ZHENG Zihao. Study on the resource utilization of converter dust containing zinc. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.
- [56] ZHOU X T ,STREZOV V ,EVANS T ,et al. Formation and distribution of dioxins in agglomerated products and emitted dust during iron ore sintering [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering* , 2023 , 11(3) : 109665.
- [57] TANG H H ,ZHAO L H ,SUN W ,et al. Extraction of rubidium from respirable sintering dust [J]. *Hydrometallurgy* ,2018 ,175: 144 - 149.
- [58] 李建,张绘,齐涛,等. 一种从钢铁烟尘和/或挥发尘中提取铷和铯的方法: CN201810929480. 8 [P]. 2020 - 02 - 25.
LI Jian ,ZHANG Hui ,QI Tao ,et al. A method for extracting rubidium and cesium from steel soot and/or volatile dust: CN201810929480. 8 [P]. 2020 - 02 - 25.
- [59] LI K ,YIN Z ,DONG J ,et al. Separation of Cs⁺ from Rb⁺ and Cs⁺ co-existing solution by Cs₃Bi₂I₉ precipitation to produce CsI [J]. *Chemical Engineering Research and Design* ,2023 ,197: 372 - 379.
- [60] LI K ,XIE J J ,SHI Z N ,et al. Cheap and easily separate Cs(I) and Rb(I) from high selty-solution by forming RbCs-MgHCF [J]. *Journal of Cleaner Production* ,2023 , 425: 0959 - 6526.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国-知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。