烧结机头灰处置技术对比与研究进展

冯哲愚[1]，王 磊[2]，刘彦廷[1]，魏进超[1]，贺颖捷[1]，杨本涛[1]
(1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 安钢集团综合利用开发公司，河南 安阳 455004)

摘要： 烧结机头灰的产量大，且含有丰富的钾资源，但成分复杂，碱金属氯盐含量高，是典型的钢铁行业高盐固废。目前国内钢铁厂主要采用直接返烧结的方式处理烧结机头灰，但该方法会导致设备腐蚀、成品矿品位降低等问题。文章以对烧结机头灰处置技术的工业应用和研究方向提出建议为目的，总结现阶段的火法和湿法处置技术，对比不同类型的技术优缺点，分析各技术的研究进展与方向。通过对比火法和湿法处置技术发现：火法处置技术的工艺流程短，操作简单，成本较低；湿法可在实现固废无害化的同时通过废水预处理和资源化手段回收盐产品，更适合现行环保要求和固废物相特征。此外，在总结烧结机头灰的特征与现阶段处置技术的特点后，展望了未来烧结机头灰处置技术的研究方向。

关键词： 烧结机头灰；火法处置技术；湿法处置技术；资源化
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)05－0024－09
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.05.067

Comparison and research progress of disposal technologies of sintering machine head ash

FENG Zheyu[1], WANG Lei[2], LIU Yantin[1], WEI Jinchao[1], HE Yingjie[1], YANG Bentao[1]
(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China;
2. Angang Group Comprehensive Utilization Development Company, Anyang 455004, Henan, China)

Abstract: The sintering machine head ash has large output, abundant potassium resources, complex composition, and high alkali metal chloride salt content, which is a typical high-salt solid waste in the iron and steel industry. At present, domestic steel and iron works mainly use direct return sintering to treat sintering machine head ash, but this method will lead to equipment corrosion and reduced finished ore grade. Aiming at making suggestions on the industrial application and research direction of sintering ash disposal technology, the current fire and wet disposal technologies are summarized, the advantages and disadvantages of different types of technologies are compared, and the research progress and direction of each technology is analyzed. By comparing the fire and wet disposal technology, it is found that the fire disposal technology has a short process flow, simple operation and low cost; The wet disposal technology can recover salt products through wastewater pretreatment and resource utilization while realizing the harmlessness of solid waste, which is more suitable for the current environmental protection requirements and the characteristics of solid waste phase. After summarizing the characteristics of sintering machine head ash and the current disposal technology, the research direction of sintering machine head ash disposal technology in the future is prospected.

Key words: sintering machine head ash; fire disposal technology; wet disposal technology; resource

钢铁是我国工业生产的核心原材料，其生产过程会产生大量尘泥，其中烧结机头灰(以下简称烧结灰)较为典型。烧结灰是矿石在烧结过程中，采用电除尘器从烧结烟气中捕集到的粉尘，其产

收稿日期： 2023－04－12；**修回日期：** 2023－05－09
基金项目： 高新技术产业科技创新引领计划(2020GK4095)；2021 年湖湘青年科技创新人才(2021RC3132)
作者简介： 冯哲愚(1994—)，男，工程师，从事固废与废水资源化方面的研究。
通信作者： 杨本涛(1989—)，男，博士，高级工程师，从事工业三废治理及资源化研究。

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

生量为烧结矿产量的 1%～2%。经统计，我国每年产生的烧结灰高达 1 500 万吨。不同烧结灰的主要化学成分如表 1 所示。

表 1　不同烧结灰的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of different sintering ash　%

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

由表 1 可知，烧结灰含有一定量的铁，具有回收的价值，但同时含有较高的碱金属，且含铅、锌、铜等重金属。由于烧结灰中碱金属质量分数高，如果简单的将其配入烧结混合料返烧结工艺，将会导致设备腐蚀、结瘤，以及使钾、钠、氯等元素在系统中富集，同时会造成成品矿品位下降等问题，所以当前主要采取外运处置。

随着《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》的施行，明确要求需要对工业固体废物加以利用，对暂时不利用或者不能利用的采取无害化处置措施。考虑到烧结灰中含大量的钾、铁资源和一些有价金属，急需找到一种适合烧结机头灰资源化处置的新思路。

鉴于目前烧结灰的资源化处置技术，根据原理的差异，主要有火法和湿法两种处理方法。火法的主要思路是通过高温分离回收铁，其他杂质元素脱除；湿法则是将灰中污染物和盐分浸出至液相，使烧结灰脱氯碱后返回烧结工序，浸出液经预处理后可以进行资源化处理和零排放。文章对两种技术分别进行调研，并对其原理、优缺点、应用情况或应用潜力进行了总结与归纳，并结合相关研究对其后续处理技术进行了展望。

1　火法处理技术

火法主要指利用高温窑炉进行处置的方法，包括转底炉、回转窑、转炉、氯化焙烧等。

1.1　转底炉法

转底炉在国外应用较多，其原理是将矿粉和黏结剂、还原剂等混料造球后在转底炉进行旋转高温加热，还原并分离钾、钠、铅、锌等氧化物，在回收有价金属的同时也得到脱除碱金属后的铁矿。国外转底炉工艺主要为 Fastmet、Inmetco、DryIron 和 ITmk3 等[1]，转底炉在国内的应用较晚，马钢在 2009 年首次应用转底炉后[2]，日照、莱芜、沙钢、宝钢等相继建成了转底炉生产线。

由于转底炉主要用于处置含锌量高的钢铁冶金尘泥[3]，国内外研究重点在于如何提高锌的挥发率、金属化率及热能利用率。如：刘颖等[4]通过建立冶金粉末球团过程一维非稳态数学模型研究转底炉的还原过程，发现影响产品金属化率的因素按重要程度排序为炉膛温度、球团直径、反应时间和碳氧比；郑占一等[5]对转底炉的流场、温度场和还原反应进行数值模拟，对球团在炉膛中的运动与加热过程进行了解析，为提高产品金属化率提供了理论模型；宝钢湛江对转底炉进行功能分区，合理设计，采用温度、气氛及流场的分段控制技术提高产品金属化率，球团金属化率为 70%～92%[6]。

根据转底炉的原理及烧结灰物料的特征，推断典型的转底炉处理固废时的工艺原理如图 1 所示。

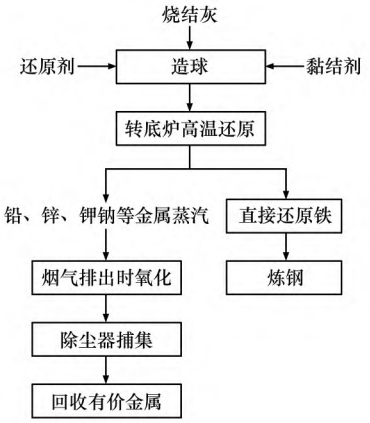


图 1　转底炉处理烧结灰工艺原理

Fig. 1　Process principle of sintering ash treatment in rotary hearth furnace

由图 1 可知，由于氯碱金属为易挥发物质，采用转底炉在处理烧结灰时，可以将氯碱金属分

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

离，使氯碱金属进入烟气管道，实现烧结灰的无害化处置。对于采用转底炉处理高碱金属烧结灰的报道较少，毕学工等[7]和谢剑波等[8]利用内配碳技术，研究了向轧钢皮中加入23%~27%二电场除尘灰对其脱锌率的影响，结果表明，一、二电场除尘灰的加入对脱锌率影响不大。李博等[9]与刘平等[10]分别报道了莱芜钢铁公司、上海宝钢采用转底炉处置烧结灰的实际案例，介绍了设备的基本情况、含锌尘泥的脱锌率等工艺参数和生产的金属化球团品位，但是对其运行效果及影响未进行深入分析。

目前，加入到转底炉中的烧结灰主要是一、二电场的，其含氯碱金属较低。当处置高氯的三、四电场烧结灰时，会存在大量的氯离子进入到烟气管道的情况，容易对管道产生腐蚀。此外，由于烧结灰中存在粒度细的颗粒，造球时不易吸附至球体表面，当加入到转底炉时，未成球的灰会被抽到除尘器，进而导致除尘器堵塞。

1.2 回转窑法

回转窑法与转底炉法的反应原理相近，主要是设备不同，且比转底炉法更加经济实惠。回转窑的应用领域较广泛，在无害化、减量化、资源化焚烧处置危废方面有一定应用。由于投资、运行成本较低及应用较广，在我国钢铁厂越来越受到重视。目前，国内应用比较成功的有南钢、山西建邦、山西立恒、永锋钢铁、山钢、日钢、莱钢和包钢等，脱锌率在80%~95%，产品次氧化锌平均品位在40%~60%[3]。回转窑最具代表性的工艺为德国Waelz kiln工艺，美国和日本相继在此基础上开发了HRD、IRRS和HTR工艺，此外还有SPM法和威尔兹法也在国外被广泛应用[11]。

回转窑法是将烧结灰按一定配比与焦炭或无烟煤混合造球，然后加入回转窑加热还原铅、锌等氧化物的技术，主要用于处理含锌尘泥，其工艺原理如图2所示。

由于烧结灰中含有Ca等碱金属，而其熔点一般较低，在焙烧过程中稍高温度就会产生大量液相，加剧固体物料之间的黏结，使回转窑内的固体颗粒黏结在一起，并附着在回转窑内部，从而导致结圈。除此之外，由于烧结灰中含氯量较高，

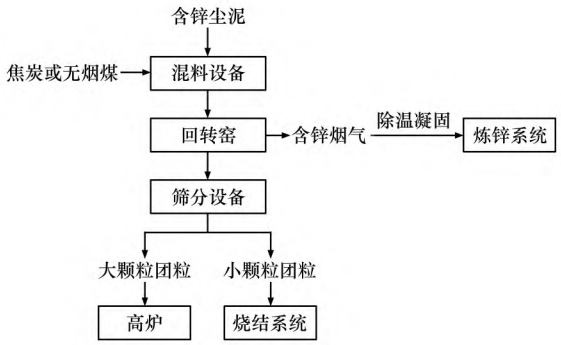


图2 回转窑工艺原理

Fig. 2 Process principle of rotary kiln

在使用回转窑处理过程中，会造成窑体的腐蚀。为了降低氯化物的影响，陈怀俊等[12]报道了采用回转窑熔融法处理垃圾飞灰时，需要经水洗、酸洗、干燥等预处理进行脱氯。

1.3 转炉法

由于转炉炼钢过程中需要加入冷却剂和化渣剂，因此有学者提出采用压块技术将固废造球，然后再返回到转炉中，替代部分铁矿石和用作造渣剂[13]，压块分为热压和冷压法，由于冷压法设备简单，投资低，能耗低，相比高能源消耗的热压法更具优势，冷压造球返回转炉炼钢的工艺原理如图3所示。

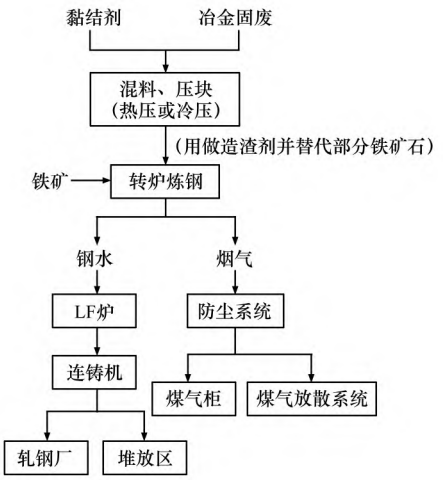


图3 压块造球返回转炉炼钢工艺原理

Fig. 3 Process principle of returning to converter steelmaking by pressing and pelletizing

洪建国等[14]介绍了梅钢以转炉除尘灰和铁泥为原料，通过开发配套的结合剂，实现成功制备成冷压球，用于炼钢冷却剂，实现粉尘的消纳。马勇等[15]介绍了鞍钢将十余种冶金固废制备成铁

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

碳复合球团，并系统的评估了其对转炉工序的影响，结果表明除尘灰的利用不仅不影响冶炼指标，还可以降低冶炼成本。当处理冷压除尘灰时，其核心是选择较优的黏结剂，防止粉料的逃逸。如：居天华[13]采用无消解配加专用黏结剂的方法提高了压块球团的强度；张学婕等[14]采用有机黏结剂代替膨润土制备冷压球团，在保证冷压球团性能的同时，还降低了运行成本。但该方法应用于高氯烧结灰处理时，会导致烟气中氯离子浓度增加。而由于转炉煤气经过管道进入气柜后，煤气温度会逐渐降低并在金属表面发生结露现象，产生大量冷凝水，烟气中氯离子太多会使冷凝水变强酸，造成腐蚀。

1.4　氯化焙烧法

氯化焙烧的原理是使固废中的金属或金属氧化物与氯反应，在高温下形成气态氯化物，利用不同氯化物的沸点差异分离、富集、提取回收金属，工艺原理如图 4 所示。该工艺主要应用于黄铁矿烧渣(高钛渣)、贫镍矿、红土矿、贫锡矿、复杂金矿及贫铋矿，焙烧过程可在多膛炉、竖炉、回转窑或沸腾炉中进行。

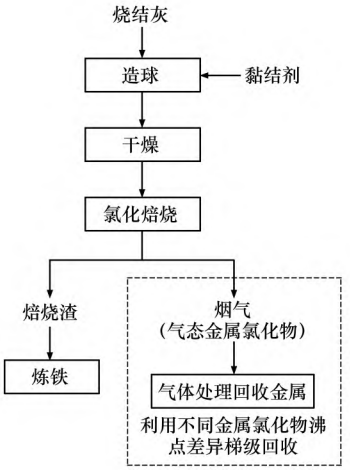


图 4　氯化焙烧工艺原理

Fig. 4　Principle of chlorination roasting process

氯化焙烧的关键在于需要充足且合适的氯化剂，常见的氯化剂有 NH_4Cl、NaCl、KCl、Cl_2、HCl 等。此外，氯化焙烧工艺也可以回收有价金属，LIU 等[17]采用氯化焙烧工艺回收铜；刘洪晓等[18]采用“制球—干燥—氯化焙烧”的工艺提取了金和银。根据烧结灰的物质组成特征，龙海林等[19]利用烧结灰自身的氯化物作为氯化剂，通过氯化焙烧烧结灰的试验研究实现了有价金属的高效挥发，铅、银、铜的挥发率分别为 99.48%、98.41% 和 86.88%，不能被氯化的碱金属部分转化为硅酸盐，部分挥发，有效降低了渣中的 K、Na、Cl 元素，使焙烧渣可以返回烧结工序进行再利用。氯化焙烧法与烧结灰本身的物质特征较为契合，有望成为新的烧结灰火法处置的开发方向。

1.5　火法处置技术比较

火法处置技术的工艺流程较短，操作较简单，成本也较低，可以处置大量的钢铁行业固废，目前主要有转底炉法、回转窑法、转炉法和氯化焙烧法，其各方法对比见表 2。

表 2　火法处置技术对比

Table 2　Comparison of fire disposal technologies

工艺	转底炉法	回转窑法	转炉法	氯化焙烧法
原理	将灰和黏结剂、还原剂等混料造球后在转底炉进行旋转高温加热还原铁矿	将灰按一定配比与焦炭或无烟煤混合造球，加入回转窑加热还原铅、锌等氧化物	将灰和黏结剂混料后采用压块技术造球或造块，和铁矿一起进入转炉炼钢	利用不同氯化物的沸点差异分离金属
优点	工艺简单，燃料利用率高	投资与运行成本低	经济性较好	与烧结灰物质特性契合
缺点	设备维护成本高，处理高氯固废易产生设备腐蚀和堵塞	生产效率波动大，处理高氯固废易产生设备腐蚀和结圈	处理高氯固废易产生腐蚀	焙烧炉在高温高氯环境下易腐蚀
应用情况	宝钢湛江钢铁、莱芜钢铁、日照钢铁等	永锋钢铁、日照钢铁、莱芜钢铁等	鞍钢	国内金矿、铜矿等矿场应用

由表 2 可知，转底炉法、回转窑法和转炉法工艺较成熟，应用也较广泛，均可以通过较为简单的工艺处理大量钢铁固废，但由于烧结灰高氯的特征，直接采用上述方法处置会导致设备产生

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

腐蚀等问题，需要先对烧结灰进行预处理。氯化焙烧法的原理与烧结灰的物相特征契合，有独特的优势和良好的应用潜力，目前处于实验阶段，有望成为新的技术开发方向。

2 湿法处置技术

由以上分析可知，火法处置烧结除尘灰，其主要影响为氯的腐蚀和逸散。考虑到钾钠氯盐的水溶性较好，可通过湿法对其处理，降低钾钠氯盐等可溶性物质对火法系统的影响，同时还能回收烧结灰中大量的钾资源。根据浸出体系的不同，湿法处置技术主要分为水洗浸出、酸浸出和碱浸出3种。

2.1 水洗浸出技术

水洗浸出即用工业水与烧结灰混合调浆，浸出灰中的氯盐及其他杂质后得到污泥和高盐废水，污泥可返回烧结工序或外运处置，高盐废水经预处理后去除悬浮物、重金属离子、硬度等污染物后得到含有高浓度钾钠盐的废水，通过蒸发分盐的工艺回收钾钠盐。水洗烧结灰的工艺于2008年由郭占成教授团队首次提出[20]，历经十余年的发展和进步，已有较多应用，国内天津、包头、南京、日照和莱芜等地方钢厂均投建了水洗烧结灰提盐的项目，主要工艺路线如图5所示。

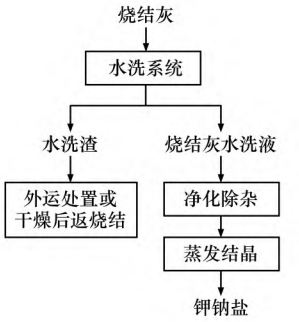


图5 水洗浸出技术处置烧结灰的工艺原理

Fig. 5 Process principle of water washing technology for treating sintering ash

水洗浸出技术的研究主要围绕提高钾盐浸出率、副产品经济价值和系统运行的稳定性展开。刘宪等[21]通过在水洗浆液中加入硫酸和十六烷基溴化铵进一步提高了灰中K的浸出率，浸出液经过除杂、脱色、硫酸铵复分解后回收了工业级硫酸钾、农用硫酸钾和氯化钾铵复合肥。林勇[22]通过工业试验，采用K_2CO_3对烧结灰水洗液除杂，在去除水洗液硬度的同时得到了高钾盐浓度的水洗液，之后用强制循环蒸发结晶器(MVR-FC)回收KCl，得到了纯度为91.65%的KCl，回收了高品质钾盐。张国亮等[23]针对水洗工业项目中的原有MVR蒸发结晶工艺出盐不稳定，杂质成分富集导致设备堵塞、结疤的问题，将结晶器进行改造，把FC正循环改为逆循环，增加了高温料液灭晶过程，提高了晶体的传质和生长速度，解决了结疤的问题，通过两步离心分离出NaCl和KCl，解决了细小晶体富集的问题。蒋新民等[24]将烧结灰洗脱滤液经通入CO_2气体除杂和活性炭吸附脱色、硫酸铵复分解后蒸发制备出了符合农用硫酸钾合格品标准的K_2SO_4产品。此外，叶恒棣等[25]基于高盐固废与废水的特征，提出了采用高盐废水协同洗灰的方案，并在安阳钢厂进行了应用，实现了以废治废。

2.2 酸性浸出技术

酸性浸出技术是在水洗的基础上，进一步的采用酸性浸出剂把烧结灰中有价金属浸出至液相后，再利用电积、净化、煅烧等一系列的手段回收。目前的研究主要围绕有价金属浸出和回收提取展开。张佴栋[26]以酸性硫脲溶液作为浸出剂，在酸洗烧结灰的过程中引入超声强化浸出效果，提取出了烧结灰中94.7%的银。高岩等[27]和王晨宇[28]分别采用盐酸－氯化铵盐体系浸出烧结灰进行试验研究，前者考察了不同工艺参数对铅的浸出效果的影响，在低酸浓度条件下最高获得了98.6%的浸出率；后者研究了铅、银等元素选择性分离的浸出行为，利用铅和银与氯离子形成络合物易溶解的特点对浸出液中的铅和银进行了分离提取，论证了低酸浓度下采用配位浸出的方法可简单高效地提取铅和银。

虽然烧结灰中有大量的有价元素，如银、铅等，采用酸性能实现浸出，但同时会造成其他重金属的溶出，如铊、铜等，会增加废酸回收有价金属的难度。

2.3 碱性浸出技术

碱性浸出技术主要是采用氢氧化钠或氨盐溶液作为浸出剂处理固废，以提取有回收价值的金

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

属，但碱性浸出主要常用于提取锌。毛磊等[29]用 6 mol/L 的氢氧化钠浸出锌，得出浸出过程受扩散与化学反应混合控制的结论，取得了 63% 的锌浸出率。ZHANG 等[30]采用氢氧化钠作为浸出剂，引入蔗糖($C_6H_{12}O_6$)作为还原剂将灰中的锌以铁酸锌的形式浸出，锌的浸出率达到 89%。朱应旭等[31]利用碳酸铵使铵根离子与锌络合配位而浸出与铁分离，最终 Cl、K、Na 的脱除率可达 97%、96%、92%，而渣量经氨浸后减少了 50%，并取得了 78% 的锌浸出率，同时实现了固废的脱盐和锌的浸出，并减少了需要外运处置的渣量。姜涛等[32]研究发现 Cd、Pb 等重金属阳离子与铵结合形成配合物，消耗浸出剂，导致需要的浸出时间延长，于是采用氨水 – 碳酸氢铵溶液的浸出体系在较优工艺条件下取得了 95.7% 的锌浸出率。由于烧结灰中含锌量较低，因此采用碱性浸出烧结灰的研究和报道较少。

2.4　湿法处置技术比较

湿法处置技术主要分为水洗浸出、酸性浸出、碱性浸出 3 种，可以实现固废无害化与有价元素的资源化，其对比见表 3。

表 3　湿法处置技术对比

Table 3　Comparison of wet treatment technologies

项目	水洗浸出	酸性浸出	碱性浸出
原理	将灰与水混合搅拌，使水溶性好的氯盐、硫酸盐等由固相迁移至液相后，将高盐废水资源化	在水洗的基础上，进一步采用酸性浸出剂深度浸提、分离有价金属后将其回收	采用氢氧化钠或氨盐等碱性溶液在水洗的基础上进一步浸出锌等有回收价值的金属
优点	工艺简单，脱氯率高	可在使固废脱氯的同时高效分离回收有价金属	可以获得很高的锌浸出率
缺点	工艺流程长，过程控制要求高	处置烧结灰时会促进铊、铜等重金属的溶出，增加回收有价金属的难度和废水的处理负荷	烧结灰中含锌量较低，回收价值相对不高
应用情况	天津钢铁、包头钢铁、南京钢铁、日照钢铁、莱芜钢铁、安阳钢铁等	河北等地有所应用	尚处于研究阶段

由表 3 可知，水洗浸出技术是目前主流的烧结灰湿法处置技术，其工艺较为简单，可以使烧结灰深度脱氯完成无害化处理，并将产生的高盐废水资源化，但工艺流程较长，对废水的预处理要求较高。酸性与碱性浸出技术根据其浸出剂的不同，均能在无害化处置烧结灰的同时深度浸出和提取相应金属，但尚处于小范围应用与研究阶段。

3　火法与湿法处置技术的比较

火法处置可以有效分离烧结灰中的有价金属和铁，当灰中铅、锌、铜等金属含量较高时，可以通过火法将这些金属高效回收，有着工艺流程短，操作简单，经济成本较低的优势；但我国大部分烧结灰中含铅、锌、铜的量不高，在火法处理过程中，大量碱金属和氯离子的富集易造成设备腐蚀、成品矿品位降低等问题。

湿法处置技术可以将易溶于水的碱金属氯盐浸出至液相，使烧结灰充分脱盐脱氯，让其可以返回烧结工序，同时将浸出废水进行除硬除重等预处理后，采用蒸发结晶等成熟工艺回收钾钠盐等副产品。湿法处理可以在无害化处置烧结灰的同时回收烧结灰中大量的钾资源，但工艺流程较长，对废水的预处理程度要求高，蒸发结晶系统需合理地进行设计和精确的过程控制以避免设备堵塞和腐蚀的同时确保盐产品质量，总得来说对过程控制的要求较高。以及湿法处理后的废渣主要采用返烧结处理，烧结灰中的污染物会在系统中发生富集。

综上可知，火法与湿法各有其优劣势，但在目前的环保要求和烧结灰具有高碱氯金属的背景下，湿法处置技术更适合响应环保要求和提高经

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

济性。未来，采用湿法预处理脱氯脱碱，然后再采用火法富集的方式，可能会成为重点发展方向。

4 结论与展望

综上所述，国内的烧结灰处置技术以传统的火法利用为主，在湿法处置技术方面的研究进展较好，特别是与废水治理相结合的水洗浸出回收钾钠盐，水洗后的烧结灰返烧结的技术体系具有优秀的经济性，并实现了以废治废，在国内已有相关应用。烧结灰处置技术未来的发展方向主要有以下两点。

(1) 氯化焙烧可以有效解决氯离子富集问题并利用不同金属氯化物沸点差异进行金属的梯级回收，但还需要进一步研究完善形成应用性强的成套技术。

(2) 湿法处置技术使烧结灰脱氯脱碱后再用火法富集铁矿的技术经济性好，工艺路线中各环节技术的发展较为成熟，工艺简单，是未来烧结灰处置技术的重要发展方向。但因对各工艺流程的控制要求高，需要完善相应技术，增强对复杂污染物的适应性，以实现低成本高再利用率的烧结灰资源化。

参考文献:

[1] 杜续恩,王再义,王俊山,等. 转底炉工艺技术存在的问题与发展建议[J]. 冶金丛刊,2013(2):42-44.
DU Xuen,WANG Zaiyi,WANG Junshan,et al. Problems and development suggestions of rotary hearth furnace technology [J]. Metallurgical Series,2013(2):42-44.

[2] 刘自民,饶磊,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 iron and steel smelting dust and sludge at Masteel [J]. China Metallurgy,2018,28(9):71-76.

[3] 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. Current situation and prospect of comprehensive utilization of dust removal in iron and steel enterprises [J]. Mineral protection and utilization,2021,41(4):164-171.

[4] 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. Study on mathematical model of direct reduction process of metallurgical dust containing carbon pellet in rotary hearth furnace [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2015.

[5] 郑占一,齐凤升,刘中秋,等. 转底炉内冶金粉尘还原过程数值模拟[J]. 材料与冶金学报,2021,20(2):85-91;96.
ZHENG Zhanyi, QI Fengsheng, LIU Zhongqiu, et al. Numerical simulation of metallurgical dust reduction process in rotary hearth furnace [J]. Journal of Materials and Metallurgy,2021,20(2):85-91;96.

[6] 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. Energy saving research and application of rotary hearth furnace for metallurgical solid waste treatment [J]. China Comprehensive Utilization of Resources,202,40(6):180-184.

[7] 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 carbon pellet in sintered electric dust ash [J]. Sintering and pelletizing,2017,42(1):38-44.

[8] 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 Jianan,WANG Yayu,et al. Preparation and dezincing of sintered electrodust ash pellet [J]. Iron & Steel Vanadium and Titanium,2017,38(1):91-94.

[9] 李博,毛艳丽,王博蔚,等. 转底炉技术及其在含铁尘泥处理中的应用[J]. 鞍钢技术,2017(6):8-12.
LI Bo, MAO Yanli, WANG Bowei, et al. Rotary hearth furnace technology and its application in the treatment of iron-bearing dust and sludge [J]. Ansteel Technology,2017(6):8-12.

[10] 刘平,曹克. 钢铁厂含锌含铁尘泥资源化利用途径探讨[J]. 世界钢铁,2013,13(4):20-26.
LIU Ping,CAO Ke. Discussion on resource utilization of zinc and iron containing dust and sludge in iron and steel plant [J]. World Iron and Steel,2013,13(4):20-26.

[11] 尚海霞,李海铭,魏汝飞,等. 钢铁尘泥的利用技术现状及展望[J]. 钢铁,2019,54(3):9-17.
SHANG Haixia, LI Haiming, WEI Rufei, et al. Current

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

situation and prospect of steel dust and sludge utilization technology [J]. Iron and Steel,2019,54(3):9 – 17.

[12] 陈怀俊,牛芳,王乃继,等. 垃圾焚烧飞灰高温热处理技术研究进展 [J]. 煤质技术,2021,36(5):1 – 14.
CHEN Huaijun,NIU Fang,WANG Naiji,et al. Research progress on high temperature heat treatment technology of waste incineration fly ash [J]. Coal Quality Technology,2021,36(5):1 – 14.

[13] 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 binder to improve the strength of cold press pellet of converter dust removal [D]. Shenyang: Northeastern University,2014.

[14] 洪建国,郑沪武,陈章等. 炼钢转炉 LT 法除尘灰冷压球技术开发与应用 [C]//2015 耐火材料综合学术年会(第十三届全国不定形耐火材料学术会议和 2015 耐火原料学术交流会)论文集(3). 洛阳: 耐火材料杂志社,2015:148 – 149.
HONG Jianguo,ZHENG Huwu,CHEN Zhang,et al. Development and application of LT dust removal and cold pressing ball technology in steelmaking converter [C]// Proceedings of 2015 Comprehensive Academic Conference on Refractories(13th National Academic Conference on Amorphous Refractories and 2015 Academic Exchange on Refractories)(3). Luoyang: Refractory Magazine,2015:148 – 149.

[15] 马勇,耿继双,朱晓雷,等. 含铁尘泥在转炉中的利用 [J]. 辽宁科技大学学报,2013,36(1):20 – 25.
MA Yong,GENG Jishuang,ZHU Xiaolei,et al. Utilization of iron-bearing dust and sludge in converter [J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning,2013,36(1):20 – 25.

[16] 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. New organic adhesives HC for preparation of cold-press pellets research [J]. Journal of Materials and Metallurgy,2021,20(1):57 – 63.

[17] LIU Jian,WEN Shuming,CHEN Yu,et al. Process optimization and reaction mechanism of removing copper from an Fe-rich pyrite cinder using chlorination roasting [J]. Journal of Iron and Steel Research International,2013,20(8):20 – 26.

[18] 刘洪晓,王为振,杨兴庆,等. 氰化尾渣氯化焙烧工艺研究 [J]. 矿冶,2016,25(1):75 – 77.
LIU Hongxiao,WANG Weizhen,YANG Xingqing,et al. Research on chlorination roasting technology of cyanide tailings [J]. Mining and Metallurgy,2016,25(1):75 – 77.

[19] 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 chlorinated roasting volatilized sintering ash [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2021.

[20] 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: 2008101012693 [P]. 2008 – 03 – 03.
GUO Zhancheng,PENG Cui,ZHANG Fuli,et al. Method of producing potassium chloride from sintered electric dust dust of iron and steel enterprises: 2008101012693 [P]. 2008 – 03 – 03.

[21] 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;57.
LIU Xian,JIANG Xinmin,YANG Yu,et al. Removal of potassium from electric dust dust of sintering head and preparation of potassium sulfate from it [J]. Metal materials and Metallurgy Engineering,2011,39(3):40 – 45;57.

[22] 林勇. 炼铁除尘灰与炼钢污泥的综合利用 [D]. 西安: 西安建筑科技大学,2018.
LIN Yong. Comprehensive utilization of iron making dust and steel making sludge [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2018.

[23] 张国亮,练礼财,朱延臣,等. 飞灰水洗高盐废水结晶工艺改进探索性研究 [J]. 水泥,2016(1):16 – 18.
ZHANG Guoliang, LIAN Licai, ZHU Yanchen, et al. Research on the improvement of crystallization process of fly ash washed high-salt wastewater [J]. Cement, 2016(1):16 – 18.

[24] 蒋新民. 钢铁厂烧结机头电除尘灰综合利用 [D]. 湘潭: 湘潭大学,2010.
JIANG Xinmin. Comprehensive utilization of electric dust from sintering machine head in steel plant [D]. Xiangtan: Xiangtan University,2010.

[25] 叶恒棣,颜旭,杨本涛,等. 一种高盐固废灰与钢铁厂酸性废水协同处理的方法及处理系统:

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

202210499585.0 [P]. 2022 - 05 - 09.
YE Hengdi, YAN Xu, YANG Bentao, et al. A method and system for co-treatment of high salt solid waste ash and acid wastewater from iron and steel works: 202210499585.0 [P]. 2022 - 05 - 09.

[26] 张佴栋. 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 Erdong. Study on ultrasonic assisted acid thiourea leaching of silver from sintered ash [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.

[27] 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. Leaching of lead by chlorination from sintered electrodusting ash [J]. Hydrometallurgy, 2021, 40(5): 390 - 393.

[28] 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 Chen Yu. Study on selective leaching of lead, silver and zinc from iron and steel smelting sludge [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.

[29] 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. Study on alkaline leaching of zinc from gas ash and its kinetics [J]. Hydrometallurgy, 2014, 33(6): 429 - 432.

[30] ZHANG Duchao, LING Hongbin, YANG Tianzu, 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.

[31] 朱应旭, 李兴彬, 邓志敢, 等. 含锌电炉烟尘氨浸预处理研究 [J]. 有色金属工程, 2019, 9(11): 45 - 52.
ZHU Yingxu, LI Xingbin, DENG Zhigan, et al. Study on ammonia leaching pretreatment of electric furnace fume containing zinc [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(11): 45 - 52.

[32] JIANG Tao, MENG Feiyu, GAO Wei, et al. Leaching behavior of zinc from crude zinc oxide dust in ammonia leaching [J]. Journal of Central South University, 2021, 28(9): 2711 - 2723.

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