

# 湿法-转底炉协同处置烧结机头灰的工艺研究

余春松, 龚辉, 石宇航, 万奇林, 赵坤  
(江苏绿普资源利用开发有限公司, 江苏张家港 215628)

**[摘要]** 为了探讨湿法预处理与转底炉协同处理烧结机头灰工艺的可行性和处理效果,通过对烧结机头灰的物理化学性质进行分析,设计了水洗-转底炉协同处理工艺流程,分析湿法预处理工艺去除有害元素及转底炉处理的有效性,并研究该工艺对原有水洗系统及转底炉系统的影响。结果表明,水洗处理后富铁料(即水洗后的烧结机头灰)的平均Cl含量为1.81%,平均 $K_2O$ 含量为0.76%,平均 $Na_2O$ 含量为0.71%,平均水分含量为18.55%,Cl、K、Na平均去除率分别为93.13%、96.02%和83.10%,该工艺基本消除了高氯负荷对转底炉的负面影响。水洗系统与转底炉的主要产品、运行数据与之前相比并未受到影响,且满足各项标准的要求。上述结果说明“湿法水洗预处理+转底炉工艺”协同处理烧结机头灰工艺是一种可行的方法,具有良好的处理效果与环保效益。

**[关键词]** 烧结机头灰; 水洗预处理工艺; 转底炉工艺; 协同处理

**[中图分类号]** X756 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-2423(2025)05-0046-11

**DOI:**10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.05.008

## 0 引言

目前烧结机头灰的主要处理方式之一是返回烧结。然而,由于机头灰颗粒过细,难以有效吸附在烧结颗粒表面,会降低烧结过程中的透气性,进而影响烧结效果。部分未能成球的机头灰会再次被吸入除尘器,导致除尘器超负荷运行,引发结块、堵塞等问题,最终降低粉尘收集效率<sup>[1-2]</sup>。此外,烧结机头灰中的碱金属容易在烧结机底部的篦条间隙中冷凝并粘结,严重影响抽风效果,降低烧结矿的产量和质量。碱金属的循环富集还会导致烧结矿中钾(K)、钠(Na)含量超标,进而对高炉冶炼产生不利影响<sup>[3]</sup>。因此,为了实现对烧结机头灰的有效循环利用,必须首先脱除其中的碱金属。

转底炉直接还原工艺因其流程简短,常被用于

处理钢铁厂产生的冶金固废<sup>[4]</sup>。然而,关于转底炉协同处理烧结机头灰的研究报道较为少见,这主要与烧结机头灰的特性有关。烧结机头灰属于一般工业固废,但含有较高含量的碱金属和氯离子。这些成分在转底炉的高温处理过程中会带来显著的技术挑战,成为制约其应用的主要难点<sup>[5]</sup>。在高温环境下,氯离子与碱金属离子结合形成碱金属氯化物并发生气化,尤其是氯化钾(KCl)和氯化钠(NaCl),由于其沸点较低,容易从粉尘中挥发出来。随后,这些气态物质在烟道中冷却并重新凝固,产生烟道堵塞问题。因此,传统的转底炉工艺通常不会用于处理高氯粉尘<sup>[6]</sup>。

通过联合湿法预处理工艺,利用转底炉处理烧结机头灰,一方面通过提高湿法预处理工艺效率,在源头上降低烧结电除尘中的有害元素含量,使混合料中Cl等有害成分含量达标;另一方面,通过均质化处理,将多种冶金粉尘混合均匀稀释有害元素,降低某一粉尘超标的Cl含量在混合料中的占比,可减少转底炉炉膛的影响,极大地拓展了转底炉处置冶金尘泥的种类范围,不仅减少占地、节约存储成本,而且提高了铁回收率,减少有害元素富集,降低烧结工序与高炉冶炼流程的负荷。

因此,本文利用“湿法预处理工艺+转底炉工艺”处理烧结机头灰,分析湿法预处理工艺去除有害元素及转底炉处理的有效性,并研究其对于原有水洗系统及转底炉系统的影响。

**[收稿日期]** 2025-02-25

**[作者简介]** 余春松(1997—),男,河南信阳人,工程硕士,主要从事工业固废资源化工作。

**[引用格式]** 余春松,龚辉,石宇航,等.湿法-转底炉协同处置烧结机头灰的工艺研究[J].绿色矿冶,2025,41(5):46-56.

YU Chunsong, GONG Hui, SHI Yuhang, et al. Research on collaborative treatment of sintering dust with water wash and rotary bottom furnace[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025,41(5):46-56.

## 1 试验

### 1.1 原料

原料为江苏沙钢集团提供的烧结机头灰。

表1 原料的主要化学成分

元素	Cl	Fe	Zn	Ca	Mg	K	Na	Al	Si	S	P
烧结机头灰	26.35	17.25	0.52	4.00	0.50	19.10	4.20	0.50	0.75	1.35	0.02
高炉布袋灰	4.30	29.20	2.40	3.20	0.20	0.70	0.90	3.60	5.90	0.80	0.07

从表1中可以看出,与高炉布袋灰相比,烧结机头灰的Cl含量较高,是高炉布袋灰的6倍左右,过高含量的Cl元素进入转底炉工序将危害转底炉的稳定生产运行。针对电除尘灰的高氯特性,在利用转底炉工艺处理烧结机头灰时,需先进行“水洗处理”,在源头上降低富铁料中有害元素含量。

### 1.2 试验方案

#### 1.2.1 湿法预处理工艺

##### 1.2.1.1 工艺流程

湿法预处理工艺主要通过浸出、固液分离、净化及蒸发结晶几个步骤处理烧结机头灰。

1) 浸出:将烧结机头灰卸入溶解池中,与水按一定比例混合并进行溶解和搅拌,时间为40~60 min。溶解池采用全封闭结构,防止扬尘扩散。

2) 固液分离:将烧结机头灰浆液输送至板框压滤机进行固液分离,得到含水率为20%~25%的滤渣。滤渣转运至转底炉原料车间进行后续处理。

3) 净化:将滤液池中的滤液输送至净化搅拌池,依次加入净化剂(如 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NaOH}$ 和 $\text{Na}_2\text{S}$ )并搅拌。随后通过板框压滤机进行固液分离,得到净化液和滤渣。净化液被收集到净化液池中,供下一工序使用。

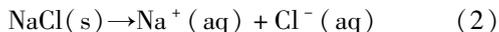
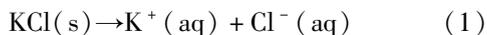
4) 蒸发结晶:将净化后的液体送入全钛三效蒸发器,通过蒸汽加热进行蒸发浓缩。最终得到水分含量低于2%的固体产物,其主要成分为氯化钾。

##### 1.2.1.2 关键反应路径机理

1) 浸出阶段:选择性溶解可溶盐及杂质离子。

烧结机头灰中Cl、K、Na元素主要以可溶性氯化物(KCl、NaCl)形式存在,而Fe、Ca、Mg、Al、Zn等元素以氧化物或氯化物形式混合。浸出包括主成分氯化物的溶解和杂质金属的溶解。

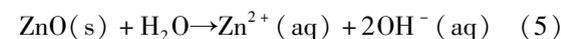
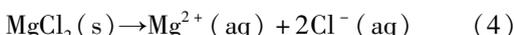
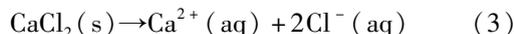
主成分氯化物的溶解见式(1)~(2)。



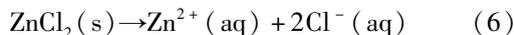
将烧结机头灰进行干燥、磨粉处理,并通过X射线荧光光谱(XRF)测定其主要化学成分,并与原湿法预处理系统处理的高炉布袋灰对比,结果见表1。

90%以上的KCl和NaCl溶解,进入液相。

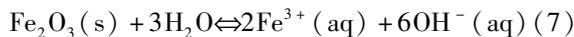
2) 杂质金属的溶解包括Ca、Mg氯化物(如 $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{MgCl}_2$ )、ZnO或 $\text{ZnCl}_2$ 、Fe、Al氧化物的溶解。



在 $\text{pH} \approx 7$ 时,Zn部分溶解。

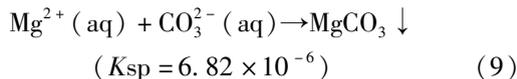
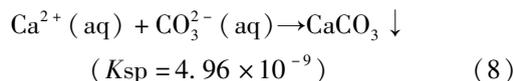


Fe、Al氧化物在中性水中溶解度极低(如 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),仅微量溶解。

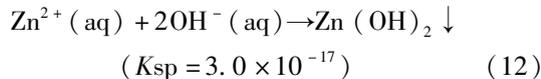
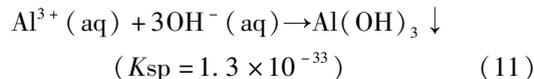
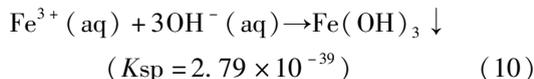


2) 净化阶段:分步沉淀去除杂质离子。

① $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 的作用是优先沉淀 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 。滤液中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 浓度较高,加入 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 优先生成碳酸盐沉淀,防止后续蒸发结晶时 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 形成结垢(如 $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ )。

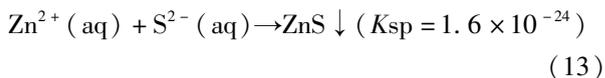


② $\text{NaOH}$ 的作用:调节pH至碱性,沉淀 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 。加入 $\text{NaOH}$ 后,pH升至10~12,溶解的微量 $\text{Fe}^{3+}$ (来自 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、 $\text{Al}^{3+}$ 及残留 $\text{Zn}^{2+}$ 生成氢氧化物沉淀。



③ $\text{Na}_2\text{S}$ 的作用:深度去除 $\text{Zn}^{2+}$ 及其他微量重金属。加入 $\text{Na}_2\text{S}$ 后, $\text{S}^{2-}$ 与 $\text{Zn}^{2+}$ 生成低溶度积硫化物,确保重金属达标。若原料含其他重金属(如Pb、

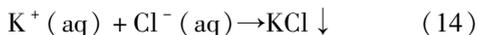
Cd), 反应类似, 但本例中 Zn 为主要去除对象。



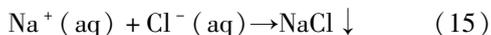
3) 蒸发结晶阶段: KCl 与 NaCl 的分离。

净化液中主要含  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 。利用溶解度差异实现分离。

KCl 优先结晶。因 KCl 溶解度随温度变化较小 ( $0^\circ\text{C}$  时溶解度  $28.1 \text{ g}/100 \text{ g H}_2\text{O}$ ;  $100^\circ\text{C}$  时溶解度  $56.7 \text{ g}/100 \text{ g H}_2\text{O}$ ), 所以 KCl 蒸发浓缩时优先析出。



NaCl 随后析出。NaCl 溶解度大且随温度升高显著增加 ( $0^\circ\text{C}$  时溶解度  $35.7 \text{ g}/100 \text{ g H}_2\text{O}$ ;  $100^\circ\text{C}$  时溶解度  $39.12 \text{ g}/100 \text{ g H}_2\text{O}$ ), NaCl 因溶解度较高仍保留在母液中, 母液循环还可提高 NaCl 的纯度。



### 1.2.2 转底炉协同处置工艺

转底炉工艺是利用球团里的固体还原剂将高炉布袋灰、炼钢尘泥、富铁料中的氧化铁还原, 去除或提取主要有害元素 (如 Zn 等), 有效减轻有害元素富集, 实现固废资源高效的回收利用<sup>[7-8]</sup>。将水洗脱氯后的高炉布袋灰、炼钢污泥和富铁料等冶金尘泥, 辅以粘结剂按动态确定的比例进行充分混合, 混合物料中碳和氧的摩尔质量比为 1:1, 含水量为 11.5% ~ 13.5%, 混合后物料具有良好的压球、焙烧性能。

烧结机头灰通过卡车封闭运输至水洗车间, 分别进入一次浸出槽 (池) 和二次浸出槽 (池), 然后经过固液分离设备得到富铁料。富铁料经过一系列预处理和配料再进入转底炉进行处理与处置, 工艺流程如图 1 所示。

为深入了解转底炉处理烧结机头灰的效果, 试验监测了近 6 个月转底炉处理富铁料后的 DRI 产品性能、实际运行工况等数据, 以长期的数据跟踪验证处置烧结机头灰的可行性。

## 1.3 检测方法

### 1.3.1 抗压强度

使用型号为 ZQYC-10C 的球团抗压强度测定仪, 按照《高炉和直接还原用铁球团矿 抗压强度的测定》(GB/T 14201—2018) 进行操作。为了确保结果的准确性, 需对同一球团样品进行 3 次重复测量, 并最终取 3 次结果的平均值作为最终抗压强度值。

### 1.3.2 水分

使用 LXT-500 型水分测定仪进行样品水分测

试。首先确保仪器处于“置零”状态, 取适量样品 (约 5 g) 放入称量盘中均匀铺设。待重量稳定后, 点击“测试”按钮, 仪器开始工作。为获得准确结果, 取 3 次测量结果的平均值作为最终水分含量 (要求富铁料水分  $\leq 22\%$ )。

### 1.3.3 成球率 (粉化率)

称取一定重量 ( $M_1$ ) 的压球后样品, 将其均匀铺在 7 mm 的筛网上, 使用自动摇筛机充分分离样品, 称取筛下物进行称重 ( $M_2$ ), 根据式 (16) 计算成球率; 取一定重量 ( $m_1$ ) 的转底炉还原成品, 将其均匀铺在 3 mm 的筛网上, 使用自动摇筛机充分分离样品, 称取筛下物进行称重 ( $m_2$ ), 按照式 (17) 计算粉化率。

$$\text{成球率} = \left(1 - \frac{M_2}{M_1}\right) \times 100\% \quad (16)$$

$$\text{粉化率} = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (17)$$

### 1.3.4 X 射线荧光光谱仪 (XRF)

采用型号为 ARLAdvantX Intellipower TM3600 的 XRF 光谱仪分析各样品的化学组成及其含量。XRF 的工作参数为: 铑靶, 铑靶端窗 X 光管 4 kW, 相对误差  $< 0.05\%$ 。要求富铁料  $\text{Cl} \leq 3.0\%$ 、富铁料  $\text{K}_2\text{O} \leq 3\%$ 、富铁料  $\text{Na}_2\text{O} \leq 1\%$ 。

### 1.3.5 X 射线衍射仪 (XRD)

利用 XRD 仪器 (Bruker D8 Advance) 进行物相分析。测试条件为: 钴靶, 工作电压为 20 ~ 60 kV, 扫描角度  $2\theta = 5^\circ \sim 90^\circ$ , 扫描速度为  $6^\circ/\text{min}$ , 室温条件。

## 2 结果与讨论

### 2.1 烧结机头灰湿法预处理工艺

烧结机头灰经水洗、搅拌、固液分离后, 得到产品为富铁料。为了解烧结机头灰的实际处理效果, 以及对原有湿法预处理工艺的影响, 研究了烧结电除尘水洗后的关键参数变化及处理效果, 并分析烧结机头灰的处理对原高炉布袋灰水洗处理系统的影响 (高炉布袋灰  $\text{Cl} \leq 1\%$ 、高炉布袋灰水分  $\leq 20\%$ ), 以及判断混合料  $\text{Cl}$  含量是否满足转底炉入炉标准 ( $\text{Cl} \leq 0.5\%$ )。

#### 2.1.1 水洗处理效果

试验采用了 2022 年 12 月 23 日 ~ 2023 年 6 月 30 日近半年的数据。烧结机头灰处理后元素变化如图 2 所示。图 2 (a) 显示水洗处理后的烧结电除

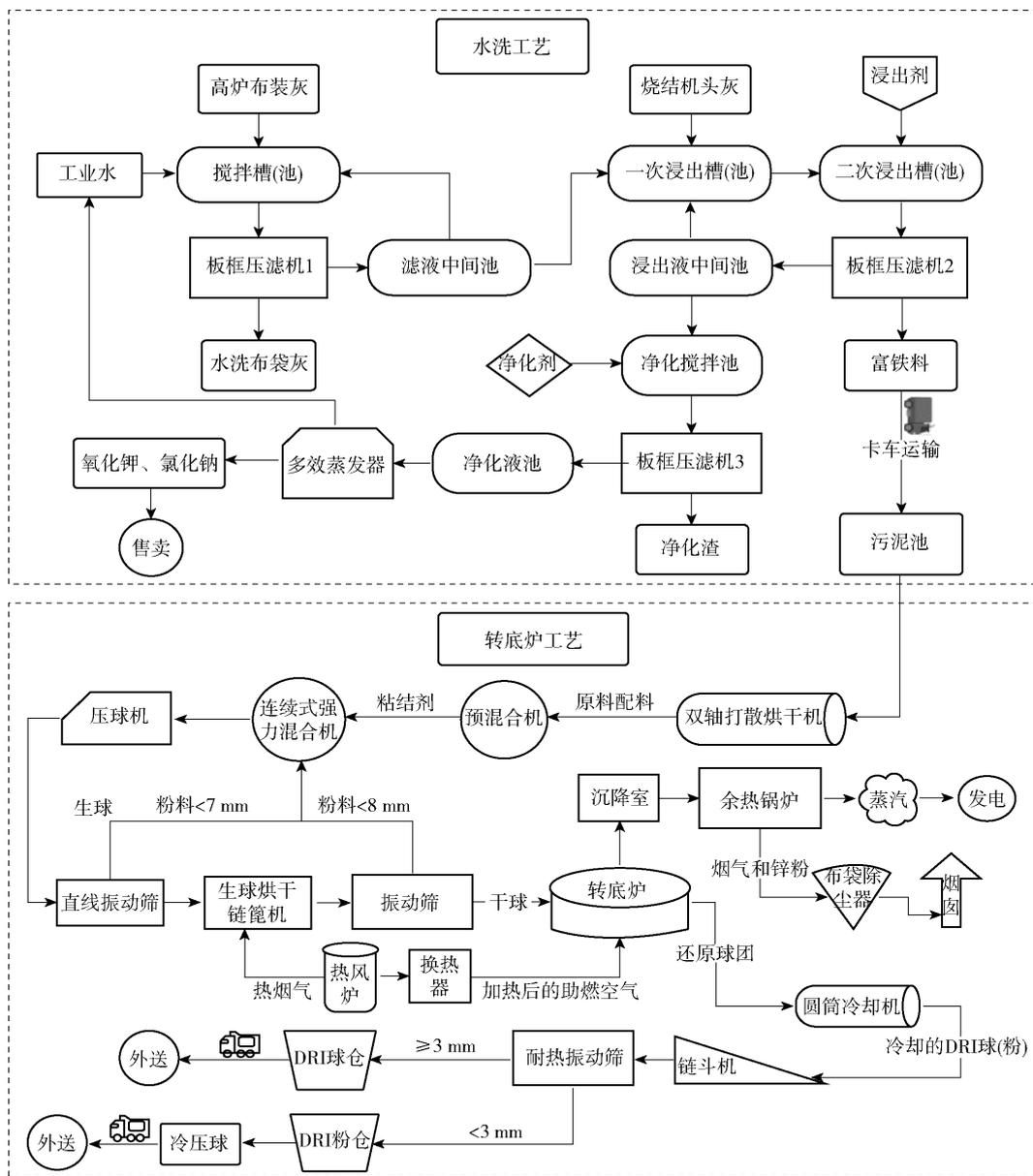


图1 水洗+转底炉协调处理烧结机头灰工艺流程

尘(即富铁料)的Cl含量波动较小,基本维持在1.10%~2.38%;与Cl含量相似,富铁料水分同样波动较小,在13.46~21.67%之间波动,这说明湿法预处理工艺运行稳定。图2(b)中显示富铁料残留的K、Na的含量存在一定波动,分别主要在0.4%~1.1%、0.4%~1.0%,二者相差不大,这与用量及处理量波动相关。

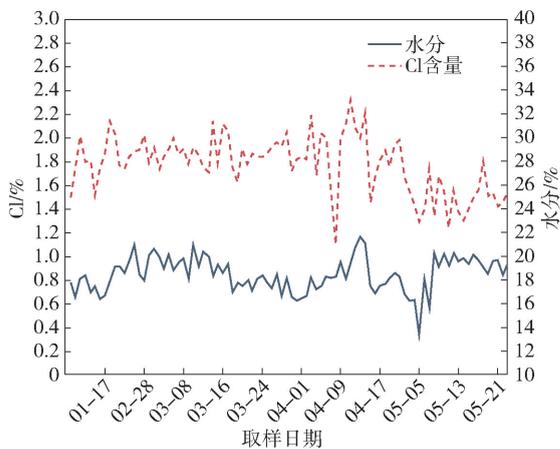
烧结机头灰水洗处理后关键参数汇总见表2。根据表2,水洗前的烧结机头灰的平均Cl含量为26.35%,经过湿法预处理工艺处理后,富铁料(即水洗后的烧结机头灰)的平均Cl含量为1.81%,K<sub>2</sub>O的平均含量为0.76%,Na<sub>2</sub>O的平均含量为

0.71%,水分的平均含量为18.55%,均与中位数接近,且满足转底炉正常生产规定的含量要求(Cl≤3.0%、K<sub>2</sub>O≤3%、Na<sub>2</sub>O≤1%、水分≤22%)。Cl、K、Na的平均去除率分别为93.13%、96.02%和83.10%。

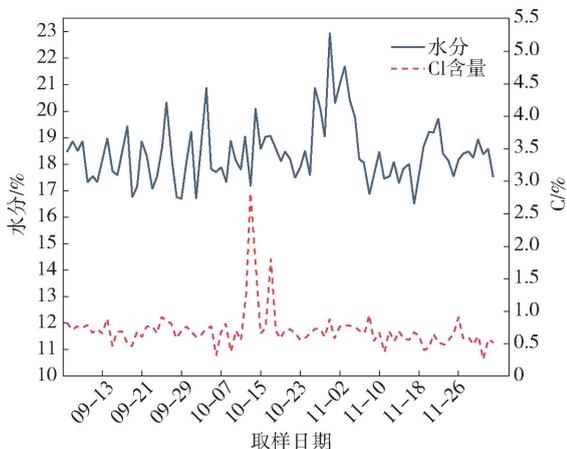
### 2.1.2 处理烧结机头灰对原水洗系统的影响

原有水洗系统是针对高炉布袋灰设置的湿法预处理工艺,而烧结机头灰的成分与高炉布袋灰差异较大,因此需确定烧结机头灰是否会影响高炉布袋灰的水洗效果。

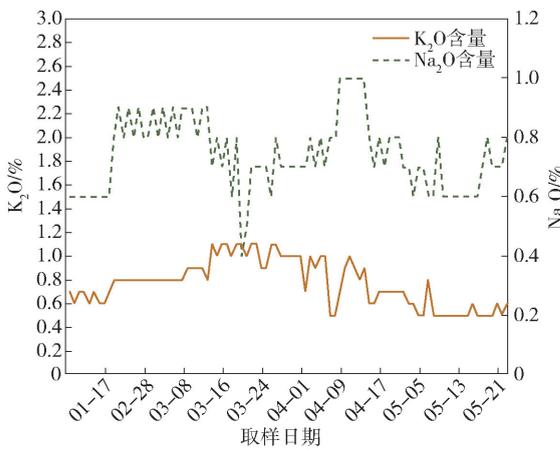
图3、图4分别为湿法预处理工艺处理烧结机头灰前(2022.9.1~2022.12.4)与湿法预处理工艺



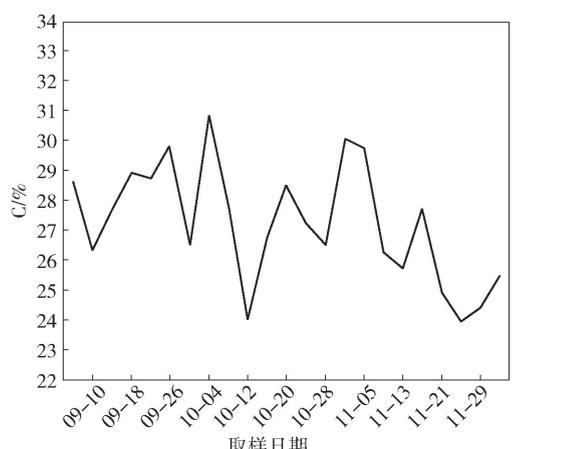
(a) Cl含量和水分变化



(a) 水分和Cl含量变化



(b) K、Na含量变化



(b) C含量变化

图2 烧结机头灰水洗处理后关键参数变化

表2 烧结机头灰水洗处理后关键参数

关键参数	水分/%	Cl 含量/%	K 含量/%	Na 含量/%
平均值	18.55	1.81	0.76	0.71
标准差	1.38	0.28	0.19	0.13
中位数	18.58	1.83	0.80	0.70
最小值	13.46	1.10	0.40	0.40
最大值	21.67	2.38	1.10	1.00
平均去除率	—	93.13	96.02	83.10

图3 水洗系统处理烧结机头灰前水洗高炉布袋灰关键参数变化(2022.9.1~2022.12.4)

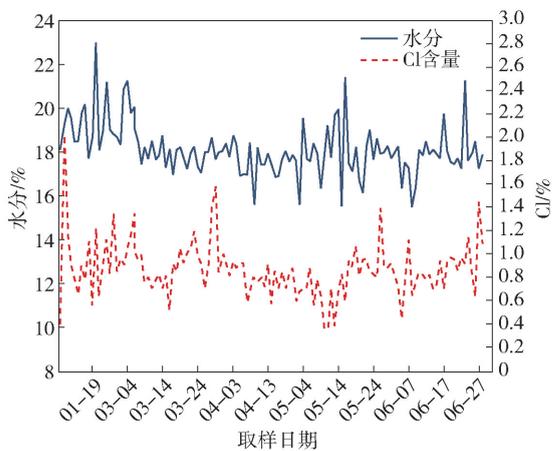
理工艺不会影响高炉布袋灰中的C含量,但考虑到C含量是高炉布袋灰的一个非常关键的参数<sup>[9]</sup>,为保证试验严谨,将其也列入烧结机头灰的影响分析范围。转底炉处理的高炉布袋灰为来自不同高炉的混合物,各高炉工况不同,其C含量也各不相同。从图3(b)中可以看到,高炉布袋灰的C成分波动较大,但整体而言,高炉布袋灰C含量处于23.9%~30.87%。

处理烧结机头灰后(2022.12.23~2023.6.30)水洗高炉布袋灰的关键参数(Cl、水分和C)变化情况。

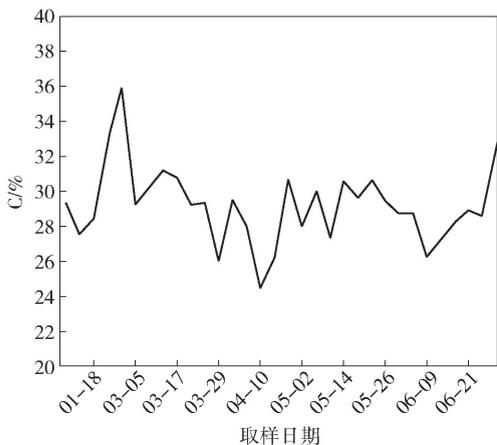
由图3(a)可知,这3个月工况较为稳定,高炉布袋灰水洗后Cl含量除偶尔出现异常高于1.0%外,基本维持在0.2%~1.0%,说明水洗控制效果良好。2022.9.1~2022.12.4之间水洗前高炉布袋灰的平均Cl含量为4.10%,水洗Cl去除率为82.93%;受处理量及工艺条件影响,高炉布袋灰水分波动较大,最高可达22.97%,但主要波动在17.0%~19.0%。一般而言,正常运行的湿法预处

从图4(a)可知,处理烧结机头灰后,整体上来说这6个月水洗高炉布袋灰工况较为稳定,在二、三月份,Cl含量集中多次出现异常高于1.0%,原因在于湿法预处理工艺调整升级,运行不稳定;水分仍波动较大,为16%~20%,与之前相比并无异常。从图4(b)可知,处理烧结机头灰后,高炉布袋灰含碳量受客观条件影响,与水分变化类似,其波动较为明显,主要为27%~31%。

处理烧结机头灰前、后水洗高炉布袋灰关键参



(a) 水分和Cl含量变化



(b) C含量变化

图4 处理烧结机头灰后水洗高炉布袋灰关键参数变化(2022.12.23~2023.6.31)

数统计分析见表3。由表3可知,处理前后Cl含量主要波动范围分别为0.26%~2.82%、0.36%~2.02%,平均Cl含量分别为0.70%、0.87%,Cl的

去除率分别为82.93%、81.18%;处理前、后水分最小值分别为16.48%、15.49%,最大值分别为22.97%、23.05%,但二者平均值几乎一样,分别为18.43%、18.13%;处理前后平均C含量的波动区间分别为23.9%~30.87%、24.48%~35.93%,平均值为27.24%、29.22%。

上述数据说明烧结机头灰水洗处理对原有高炉布袋灰湿法预处理工艺的处理效果几乎无影响,处理后的高炉布袋灰仍能较好地满足转底炉工艺标准的要求(高炉布袋灰Cl≤1%、高炉布袋灰水分≤20%)。

表3 处理烧结机头灰前、后水洗高炉布袋灰关键参数

关键参数	水分/%		Cl含量/%		C含量/%	
	处理前	处理后	处理前	处理后	处理前	处理后
平均值	18.43	18.13	0.70	0.87	27.24	29.22
标准差	1.16	1.20	0.31	0.24	1.96	2.16
中位数	18.25	17.99	0.67	0.85	27.24	29.28
最小值	16.48	15.49	0.26	0.36	23.9	24.48
最大值	22.97	23.05	2.82	2.02	30.87	35.93

### 2.1.3 水洗车间能耗

水洗车间能耗包括了生产耗电、工业新水、蒸汽、氮气等,考虑到水洗车间能耗与水洗车间的处理量呈正相关关系,为方便对比处理烧结机头灰前后的能耗变化,利用标煤系数将各类能耗数据换算成吨标煤消耗量(表4),并辅以水洗处理量计算吨耗,结果如图5所示。

表4 不同能源介质的标煤系数

介质	电耗/ kW·h	高炉煤气/ m <sup>3</sup>	转炉煤气/ m <sup>3</sup>	氮气/ m <sup>3</sup>	工业水/ t	除盐水/ t	氮气/ m <sup>3</sup>	氧气/ m <sup>3</sup>	蒸汽/ t
标煤系数	0.1229	0.1127	0.205	0.0169	0.0717	0.5106	0.0169	0.4	-104

图5中对比了水洗车间2022.1~2022.6与2023.1~2023.6(即处理烧结机头灰前、后)相同时间段的能耗数据(tce)。从图5中可以看出,除了4月外,其余月份的水洗吨耗相差不大。4月是转底炉计划检修,作为预处理的水洗车间也受到了较大影响。经数据统计,2022.1~2022.6年平均水洗吨耗为35.04 tce,2023.1~2023.6年平均水洗吨耗为35.40 tce,两年同一时间段的平均水洗吨耗几乎一致,这在一定程度上说明处理烧结机头灰对水洗能耗影响不大。

## 2.2 转底炉协同处置烧结机头灰工艺

水洗后达标的烧结机头灰(即富铁料)进入转底炉污泥池,水洗消除了高氯负荷对转底炉的负面影响。为研究转底炉均质化处理的有效性以及处置烧结机头灰对转底炉运行情况、主要产品质量等方面的影响,对转底炉产品性能(DRI产品)、转底炉运行数据、富铁料成分及处理量进行了统计分析。

### 2.2.1 均质化处理有效性

目前转底炉主要处理的尘泥包括水洗后布袋灰和炼钢污泥,两者与富铁料的主要化学成分见表5。

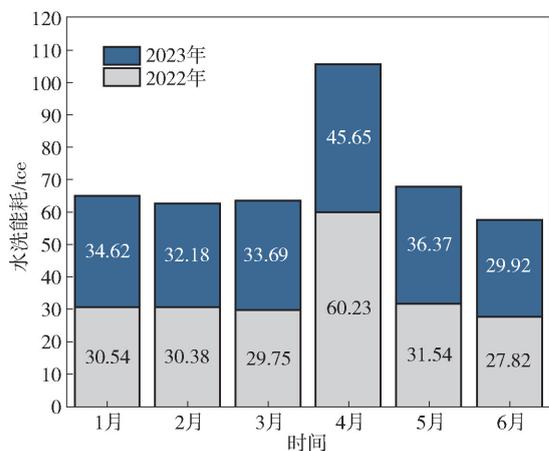


图5 水洗车间处理烧结机头灰前、后能耗对比 (1—6月)

表5 原料的重要化学成分

类别	水分	TFe	Cl	Zn	S	C
水洗布袋灰	12.22 ~ 23.05	27.70 ~ 36.15	0.39 ~ 2.82	2.8 ~ 4.31	0.71 ~ 0.95	23.39 ~ 35.93
炼钢污泥	3.12 ~ 6.36	55.45 ~ 65.03	0.08 ~ 0.21	0.61 ~ 2.50	0.12 ~ 0.21	9.12 ~ 2.02
富铁料	15.27 ~ 21.72	31.46 ~ 43.54	1.09 ~ 2.30	0.52 ~ 1.90	0.76 ~ 2.11	4.86 ~ 12.05
混合料	12.00 ~ 14.00	44.54 ~ 51.38	0.28 ~ 1.04	0.98 ~ 2.68	0.21 ~ 0.43	7.10 ~ 11.53

表6 转底炉年度实际处理量

原料	2021年累计	2022年累计
高炉布袋灰	53 012	53 181
炼钢污泥	103 150	109 374
富铁料	55	1 051

## 2.2.2 主要产品性能

为分析烧结机头灰对转底炉产品性能的影响,统计了转底炉处理烧结机头灰前近3个月(2022.9.1—2022.12.4),以及处理烧结机头灰后近7个月(2022.12.23—2022.6.30)的产品性能,对转底炉主要产品——DRI球的性能进行了追踪分析。

图6和图7分别为掺富铁料前、后DRI球的性能变化,包括DRI球成球率、DRI球抗压强度、DRI球金属化率、DRI球残锌率。

从图6、图7可知,DRI球抗压强度在2 000 ~ 6 000 N范围波动,变化较大;DRI球成球率波动微小,成球率基本全部在98%以上,表明DRI球成球率方面表现较为稳定、良好。对于DRI球中两项关键的化学元素指标Zn和TFe,一般而言,残锌率(Zn)越低越好,而总铁含量(TFe)越高越好<sup>[11]</sup>。受原料成分波动及实际生产工况影响,DRI球总铁(TFe)的含量存在一定的波动现象,范围在60% ~

从表5可知,①富铁料的TFe含量与高炉布袋灰类似,但是有价元素Zn含量偏低,同时富铁料中作为还原剂的C含量远低于水洗布袋灰;②富铁料TFe含量低于炼钢污泥;③富铁料中有害元素Cl含量较高。

此外,表6给出了高炉布袋灰、炼钢污泥及富铁料近两年(2021年、2022年)的实际处理量。从表6中可以看出,2021年及2022年转底炉的处理量变化不大,处理的大部分工业固废为炼钢污泥和高炉布袋灰,富铁料的处理量远低于二者。因此,可通过均质化处理,将多种冶金粉尘混合均匀稀释有害元素,使超标的富铁料Cl、S含量在混合料中降低。该处理方式属于物理方法,不需要添加其他化学试剂,对环境友好,处理成本较低<sup>[10]</sup>。

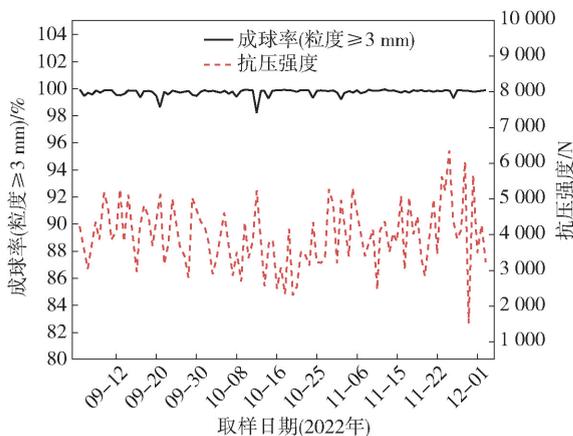
67%,但脱锌效果良好,DRI残锌率(Zn)基本处于相对较低的水平,基本小于控制标准要求的0.6%,总体脱锌率最高可达95%,相比于使用单独转底炉工艺脱锌效果更好<sup>[12]</sup>。金属化率的高低影响着后续资源化利用工艺(返回炼铁、炼钢)。与TFe含量类似,金属化率同样存在波动较大的现象,范围在40% ~ 80%。

掺入富铁料前、后的DRI球性能数据统计见表7。从表7可知,转底炉处理富铁料前后,DRI球的抗压强度、TFe、金属化率、ZnO含量、成球率均变化不大,可以判断出DRI球性能未受到富铁料的影响。处理富铁料后DRI球的抗压强度平均为3 839.71 N,TFe平均为65.83%,金属化率平均为69.46%,ZnO平均为0.29%,成球率平均为99.76%。

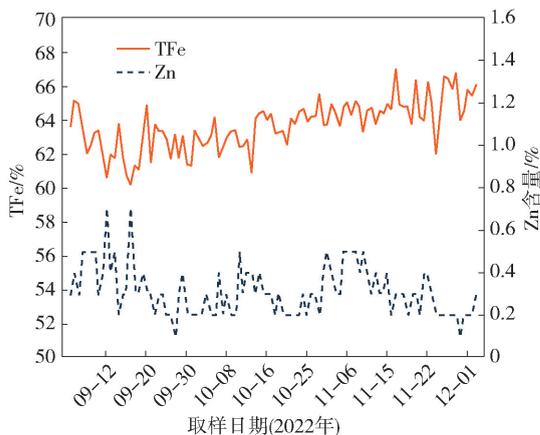
## 2.2.3 转底炉运行数据

### 2.2.3.1 压球成球率及出炉粉化率

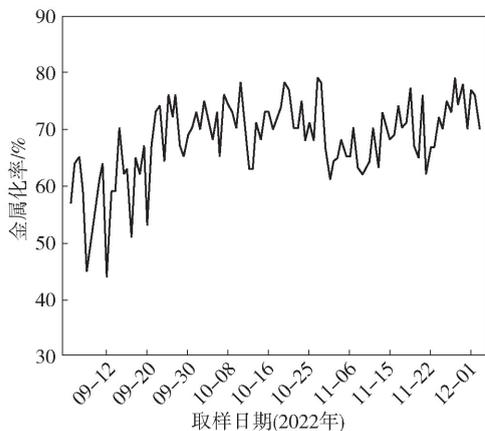
掺入富铁料前、后压球工序成球率及出炉粉化率变化如图8和表8所示。从图8、表8可知,成球率分布并不集中,压球工序的成球率基本维持在60% ~ 75%,出炉粉化率基本维持在15% ~ 35%。整体而言,掺入富铁料前、后成球率与粉化率的波动不大。



(a) DRI球成球率、DRI球抗压强度



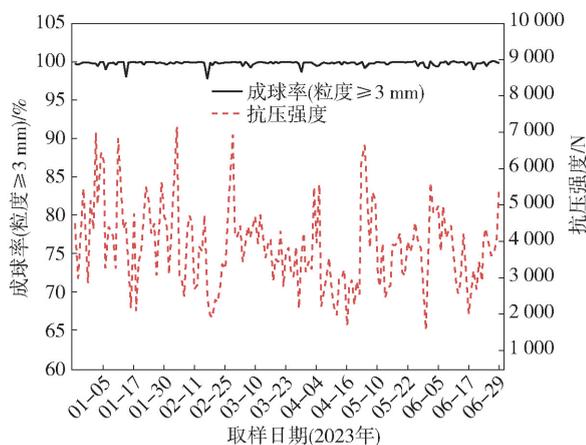
(b) 全铁含量和Zn含量



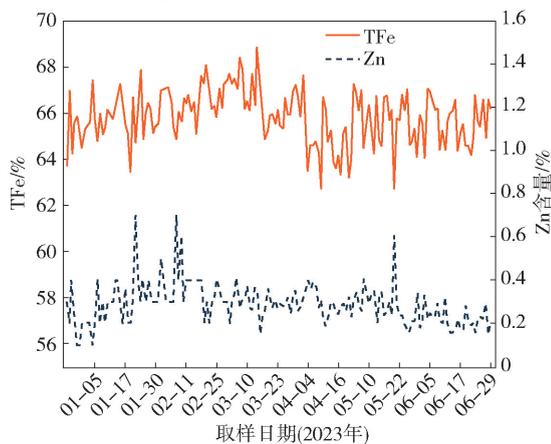
(c) 金属化率

图6 掺入富铁料前DRI球性能变化情况

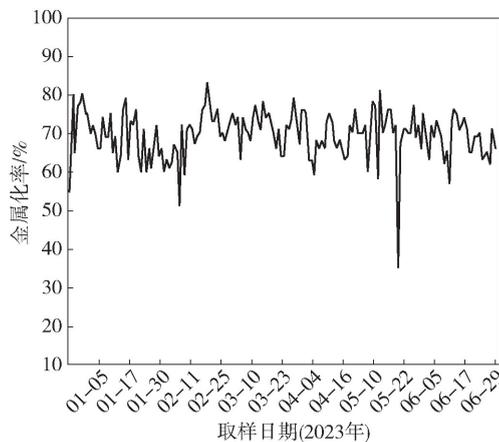
从表8数据统计可知,转底炉处理富铁料前、后,压球成球率及出炉粉化率相差不大,甚至掺入富铁料后成球率、粉化率表现出增高趋势。掺入富铁料后压球成球率最小值为59.43%,最大值为76.07%,平均值为71.42%,标准差为2.33%,数据波动较小;出炉粉化率平均值为22.11%,最小值为14.32%,最大值为36.59%,标准差为3.45%。



(a) DRI球成球率、DRI球抗压强度



(b) 全铁含量和Zn含量



(c) 金属化率

图7 掺入富铁料后DRI球性能变化情况

### 2.2.3.2 余热锅炉压差

一般来说,余热锅炉中的压差与Cl含量呈正相关,当原料氯含量增加时,烟气中的氯浓度也会增加,进而导致锅炉内部的压差增加<sup>[13]</sup>。烧结机头灰中的Cl含量过高,因此需要分析余热锅炉的压差变化。

图9为掺入富铁料前、后余热锅炉压差变化情

表7 掺入富铁料前、后 DRI 球性能参数

性能指标	粒度 $\geq 3$ mm/%		抗压强度/N		TFe/%		Zn/%		金属化率/%	
	掺入前	掺入后	掺入前	掺入后	掺入前	掺入后	掺入前	掺入后	掺入前	掺入后
平均值	99.73	99.76	3 947.87	3 839.71	63.71	65.83	0.31	0.29	68.1	69.46
标准差	0.24	0.22	882.95	1 117.4	1.46	1.14	0.12	0.09	6.94	6.08
中位数	99.82	99.83	3 900	3 868.5	63.79	65.94	0.30	0.29	70.00	70.00
众数	99.86	99.88	4 339	2 885	63.37	65.60	0.30	0.30	70.00	70.00
最小值	98.20	98.45	1 503	1 536	60.20	62.70	0.10	0.10	44.00	35.00
最大值	99.93	99.95	6 319	7 130	67.05	68.82	0.70	0.70	79.00	83.00

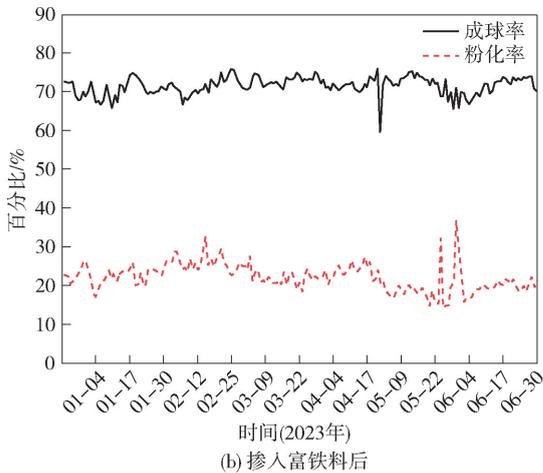
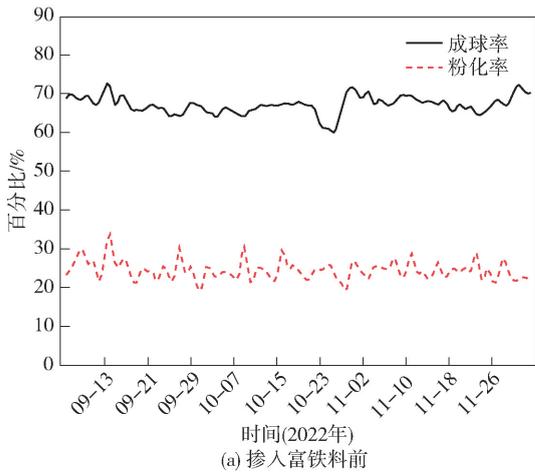


图8 掺入富铁料前、后压球工序成球率及出炉粉化率变化情况

表8 掺入富铁料前、后压球成球率及出炉粉化率

性能指标	压球成球率/%		出炉粉化率/%	
	掺入前	掺入后	掺入前	掺入后
平均值	67.11	71.42	24.47	22.11
标准差	2.27	2.33	2.46	3.45
中位数	67.19	71.84	24.15	21.8
最小值	60.57	59.43	19.72	14.32
最大值	72.2	76.07	33.72	36.59

况。从图9(a)中可以看到,掺入富铁料前,除检修停机及激波清灰导致余热锅炉压差急剧减小外,余热锅炉压差变化幅度处于正常范围,波动并不剧烈。整体上来看,余热锅炉压差最小值为19.01 Pa(检修停机),最大值为335.37 Pa,平均值为177.27 Pa。从图9(b)可知,掺入富铁料后,余热锅炉压差变化幅度仍处于正常范围,压差变化也相对平缓,余热锅炉压差最小值为83.33 Pa,最大值为244.94 Pa,主要集中于120~140 Pa,处于正常压差50~220 Pa范围内。

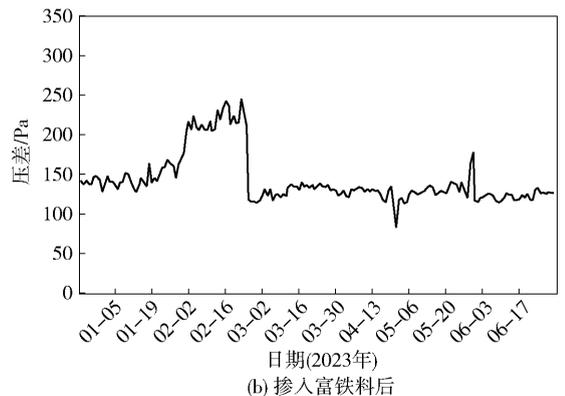
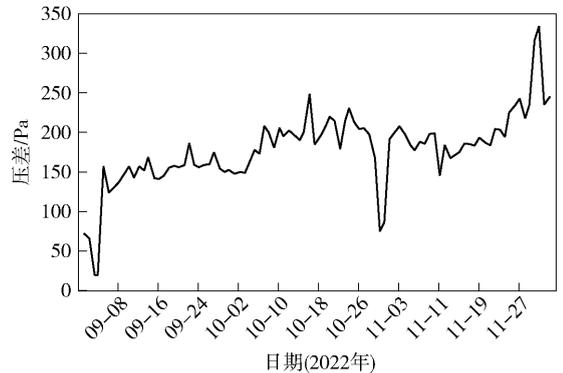


图9 掺入富铁料前、后余热锅炉压差变化情况

### 2.2.3.3 转底炉能耗

通过对比转底炉2022年1—6月与2023年1—

6月的能耗数据,以判断转底炉处理烧结机头灰后的能耗是否存在异常。能源消耗包括生产耗电、高炉煤气、转炉煤气、氮气、清水、除盐水、蒸汽回收、氧气等多个方面,考虑到转底炉能耗与冶金尘泥处理量呈现正相关,为方便对比处理富铁料前后的能耗变化,利用标煤系数将各类能耗数据换算成吨标煤消耗量(表4),并辅以DRI产品产量计算吨耗,转底炉吨耗结果如图10所示。

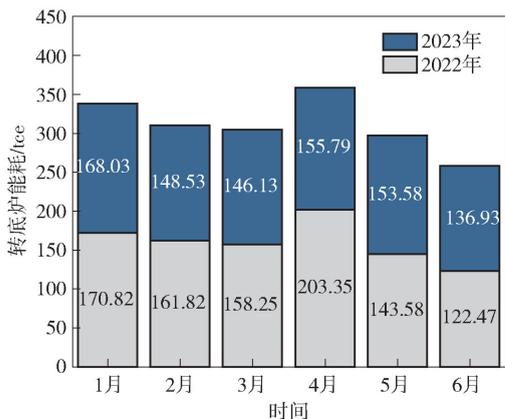


图10 转底炉车间处理烧结机头灰前后能耗对比 (1—6月)

从图10中可以看出,除4月计划检修造成影响外,2022年与2023年每月的能源吨耗差距不大。经数据统计,2022.1~2022.6年转底炉平均能耗为160.04 tce,2023.1~2023.6年转底炉平均能耗为151.49 tce,两年同一时间段的平均能源吨耗相差不大,甚至处理烧结机头灰后2023年1~6月平均能耗更低,这说明处理烧结机头灰对转底炉能耗影响不大。

## 3 工艺优势

### 3.1 金属元素提取率高

烧结机头灰中存在大量有价金属,如Fe等。王玮等<sup>[14]</sup>利用浮选-重选联合工艺处理烧结机头灰,得到了全铁(TFe)含量 $\geq 60\%$ 的铁精矿;喻荣高<sup>[15]</sup>采用“弱磁-强磁”梯度磁选的方法处理烧结机头灰,得到了铁品位 $\geq 55\%$ 的铁精矿。“湿法预处理+转底炉工艺”处理烧结电除尘灰,得到的DRI球金属化率(全铁)最高可达83%,平均为69.46%,显著高于其他工艺水平。

### 3.2 碱金属元素脱除率高

转底炉运行过程中,过量的Cl、Na、K离子会腐蚀烟道,并造成堵塞等问题,传统的转底炉技术处理

烧结机头灰存在局限性<sup>[16]</sup>。采用“湿法预处理+转底炉工艺”处理烧结机头灰,不仅可以回收K、Na等碱金属元素(Cl、K、Na的平均回收率分别为93.13%、96.02%和83.10%),且不影响转底炉正常运行。

## 4 结论

1)采用湿法预处理工艺处理烧结机头灰可获得较好的处理效果。水洗处理后富铁料(即水洗后的烧结机头灰)的平均Cl含量为1.81%, $K_2O$ 的平均含量为0.76%, $Na_2O$ 的平均含量为0.71%,平均水分含量为18.55%,满足转底炉正常生产规定的含量要求。

2)转底炉处理富铁料后,DRI球抗压强度平均为3 839.71 N,TFE平均为65.83%,金属化率平均为69.46%,ZnO平均为0.29%,成球率平均为99.76%,满足DRI球转场规定的一级品要求。

3)掺入富铁料后压球工序成球率平均为71.42%,出炉DRI粉化率平均为22.11%,效果甚至高于处理富铁料前(67.11%、24.47%),满足质量控制参数标准要求;余热锅炉压差平均值为143.13 Pa,主要集中于120~140 Pa,处于正常压差50~220 Pa范围内;2022.1~2022.6年掺入富铁料前平均水洗吨耗为35.04 tce,2023.1~2023.6年掺入富铁料后平均水洗吨耗为35.40 tce,两年同一时间段的平均水洗吨耗几乎一致。

4)“湿法预处理+转底炉工艺”协同处理烧结机头灰,对原有水洗预处理系统及转底炉系统的主要产品、运行数据未产生影响,相比于其他传统处理工艺,该组合工艺具备较好的可行性与有效性。

### [参考文献]

- [1] 唐卫军,张德国,武国平,等. 烧结机头电除尘灰资源化利用技术[J]. 现代矿业, 2017,33(9): 188-191.
- [2] 叶威,徐尧,吴方耀. 烧结机头电除尘灰资源化利用研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2023,41(6): 116-118.
- [3] 马怀营,裴元东,潘文,等. 烧结机头电除尘灰特性及资源化利用进展[J]. 中国冶金, 2018,28(6): 5-8.
- [4] 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.
- [5] 秦立浩,墙蓄,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.

- [6] 朱烨,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.
- [7] 李岩,赵志坚,冯怀萱,等. 转底炉处理钢铁厂含锌尘泥工艺技术[J]. 烧结球团, 2022, 47(6): 106-115.
- [8] 吴佩佩. 转底炉直接还原锌浸出渣试验研究[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(3): 50-55.
- [9] 杨涛,雷杰,任晓健,等. 转底炉用含碳球团制备及生产工艺优化[J]. 钢铁, 2023, 58(4): 157-166.
- [10] 董子平,郝言正. “双碳”背景下资源枯竭型城市工业固体废物污染防治研究:以白银市为例[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(2): 73-76, 84.
- [11] 吴卫国,宋言. 铜铅锌冶炼固废协同处理及有价金属综合回收[J]. 绿色矿冶, 2023, 39(1): 47-52.
- [12] 田仕友,罗磊. 二次锌资源综合利用的转底炉工艺[J]. 河北冶金, 2025(1): 82-86.
- [13] 曹华. 转底炉烟尘特性对余热锅炉设计的影响[D]. 南京:东南大学, 2019.
- [14] 王玮,孟令和. 除尘灰综合利用技术的开发与应用[J]. 中国资源综合利用, 2011, 29(2): 23-26.
- [15] 喻荣高. 涟钢烧结除尘灰资源化利用关键技术研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2011.
- [16] 堵伟桐,张杰,居殿春,等. 碱金属对转底炉处理含锌、铁尘泥工艺影响的研究进展[J]. 烧结球团, 2025, 50(1): 12-20, 44.

## Research on Collaborative Treatment of Sintering Dust with Water Wash and Rotary Bottom Furnace

YU Chunsong, GONG Hui, SHI Yuhang, WAN Qilin, ZHAO Kun

(Jiangsu Lupu Resources Utilization and Development Co., Ltd., Zhangjiagang 215628, China)

**Abstract:** The purpose of this paper is to explore the feasibility and treatment effect of the process of wet pretreatment and rotary hearth furnace collaborative treatment of sintering ash. Through the analysis of the physical and chemical properties of sintering machine head ash, the process flow of washing-rotary hearth furnace collaborative treatment was designed. The effectiveness of “wet pretreatment process” to remove harmful elements and rotary hearth furnace treatment was analyzed, and its influence on the original washing system and rotary hearth furnace system was studied. The results show that the average content of Cl, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O and water in the iron-rich material after washing treatment is 1.80%, 0.75%, 0.7% and 18.55%, respectively. The average removal rates of Cl, K and Na are 93.13%, 96.02% and 83.10%, respectively, which basically eliminates the negative effect of high chlorine load on the rotary hearth furnace. The main products and operation data of the washing workshop and rotary hearth furnace are not affected compared with the previous ones, and meet the requirements of various standards. The “water washing pretreatment + rotary hearth furnace process” synergistic treatment of sintering ash process is a feasible method, which has good treatment effect and environmental protection benefits.

**Key words:** sintering dust; water washing pretreatment; rotary bottom furnace; co-processing treatment