

## 碱金属对转底炉处理含锌、铁尘泥工艺影响的研究进展

堵伟桐<sup>1</sup>, 张 杰<sup>1</sup>, 居殿春<sup>1</sup>, 郑传波<sup>1</sup>, 毛 瑞<sup>2</sup>, 王 飞<sup>2</sup>, 陈 卓<sup>1,2</sup>

(1. 江苏科技大学 冶金工程学院, 江苏 张家港 215600; 2. 江苏省(沙钢)钢铁研究院, 江苏 张家港 215625)

**摘要:** 碱金属元素的存在加剧了转底炉设备管道系统的堵塞风险以及炉衬结构的腐蚀程度, 不仅威胁到生产流程的持续稳定性, 还影响转底炉最终产品的品质。本文系统剖析了碱金属的来源构成及其物理化学特性, 深入探讨了碱金属在转底炉内的迁移转化行为和其与设备内壁发生黏结反应的内在机制, 并从入炉原料预处理策略、设备工艺优化设计、产物回收与处理等多维度综合考虑, 归纳并提出了一系列旨在有效减轻碱金属危害的实用措施, 以期转底炉工艺的优化升级与稳定运行提供科学依据与实践指导。

**关键词:** 转底炉; 含锌、铁尘泥; 碱金属; 资源循环利用

中图分类号: TF56; TF813; X757

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)01-0012-09

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.01.002

## Research progress on effect of alkali metals on process of processing zinc-iron-bearing dust in rotary hearth furnace

DU Weitong<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>, JU Dianchun<sup>1</sup>, ZHENG Chuanbo<sup>1</sup>, MAO Rui<sup>2</sup>,  
WANG Fei<sup>2</sup>, CHEN Zhuo<sup>1,2</sup>

(1. School of Metallurgy Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, Jiangsu, China; 2. Institute of Research of Iron & Steel of Jiangsu Province Shasteel, Zhangjiagang 215625, Jiangsu, China)

**Abstract:** The presence of alkali metal elements exacerbates the blockage risk of the piping system of the rotary hearth furnace equipment and the corrosion degree of the furnace lining structure, which not only threatens the continuous stability of the production process, but also affects the quality of the final product of the rotary hearth furnace. In this paper, the source composition and physicochemical properties of alkali metals are systematically analyzed. The migration and transformation behavior of alkali metals in the rotary hearth furnace and the internal mechanism of the bonding reaction between alkali metals and the inner wall of the equipment are deeply discussed; the pretreatment strategy of raw materials in the furnace, the optimization design of equipment process, and the recycling and treatment of products are multi-dimensionally and comprehensively considered, and a series of practical measures to effectively reduce the hazards of alkali metals are summarized and proposed, in order to provide scientific basis and practical guidance for the optimization, upgrading and stable operation of rotary hearth furnace process.

**Key words:** rotary hearth furnace; zinc-iron-bearing dust; alkali metals; resource recycling

自“双碳”目标提出以来, 我国冶金工业不断完善绿色低碳技术创新体系, 对含锌、铁尘泥的

资源化处理已成为各大钢厂企业践行循环经济理念、实现可持续发展的关键一环<sup>[1]</sup>。转底炉工艺

收稿日期: 2024-04-23; 修回日期: 2024-05-08

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52204345); 江苏省自然科学基金面上基金资助项目(BK20241829); 镇江市科技计划资助项目(SH2024097)

作者简介: 堵伟桐(1990—), 男, 博士, 讲师, 硕士研究生导师, 从事转底炉生产工艺优化研究。

通信作者: 陈 卓(1992—), 女, 博士, 讲师, 硕士研究生导师, 从事冶金二次资源综合利用研究。

是中国处置钢铁行业含铁锌固废的有效方式之一, 通过高温还原反应将尘泥中的铁、锌等有价金属元素进行高效回收, 转化为金属化球团以及富含 ZnO 的二次粉尘等高价值资源<sup>[2]</sup>。然而, 碱金属 (如钠、钾等) 的存在将干扰还原反应的顺利进行, 更有可能引发炉内结瘤、堵塞等一系列生产问题<sup>[3-4]</sup>, 严重制约了转底炉工艺的稳定性及经济性。因此, 在推进转底炉工艺的持续进步与创新过程中, 如何兼顾金属回收率的高效保持与碱金属影响的有效控制及降低, 问题的解决策略构成了该工艺未来发展与优化的核心所在。

为了全面掌控碱金属在转底炉处理含锌、铁尘泥工艺中所产生的影响, 本文系统分析了碱金属的主要来源和物化特性, 探讨了碱金属对转底炉工艺效率和稳定性的影响机制, 提出将湿法浸出、烟道系统优化、分级结晶法等技术应用于转底炉处理工艺作为降低碱金属危害的重要研究方向, 为进一步优化转底炉工艺, 实现含锌、铁尘泥的资源化利用, 避免有价金属元素浪费提供有效的理论基础。

## 1 碱金属的来源

冶金尘泥中的碱金属主要来源于矿物造块、高炉炼铁、转炉炼钢工序中的烧结矿、球团矿、焦炭和煤粉等原料, 经过高温反应后赋存于高炉布袋灰、烧结机机头灰、电炉粉尘等冶金尘泥

中<sup>[5]</sup>, 其主要成分见表 1。其中, 高炉布袋灰和烧结机机头灰中的碱金属氯化物, 主要来源于烧结过程为改善烧结矿低温还原粉化性能喷洒的 CaCl<sub>2</sub> 溶液与碱金属发生的高温反应; 转炉污泥中的碱金属氯化物主要来源于吹炼过程中所加入的含氯造渣剂; 电炉熔炼过程中所使用的废钢中的碱金属氯化物则在高温下挥发进入转炉除尘灰、电炉除尘灰等尘泥中<sup>[6-7]</sup>。

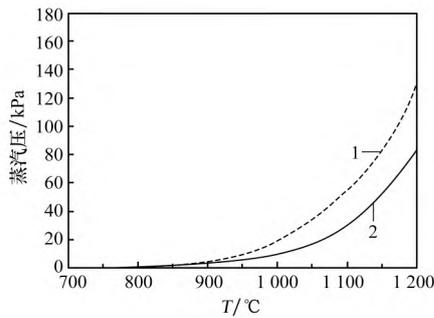
## 2 碱金属在转底炉中的物化特性

碱金属以氯化物、氧化物和碳酸盐等形式存在于含锌、铁尘泥中, 其含量随含碳球团配比的不同而有较大差异<sup>[27]</sup>。研究发现, 碱金属氯化物主要来源于烧结机机头灰及高炉布袋灰, 且在转底炉反应温度范围内, 碱金属氯化物的热力学性质稳定, 不与其它氧化物反应<sup>[28]</sup>; 而电炉粉尘中的碱金属则多以 Na<sub>2</sub>O 以及 K<sub>2</sub>O 形式存在, 质量分数较低, 分别占电炉粉尘的 1.92% ~ 2.68% 和 1.45% ~ 3.75%, 且熔点较低, 400 °C 时会分解产生 Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 以及金属 Na、K 蒸汽, 其中金属蒸汽会进入烟气并重新氧化成 K<sub>2</sub>O 及 Na<sub>2</sub>O, 或与烟气中 CO<sub>2</sub> 结合生成碳酸盐<sup>[29]</sup>。碱金属氯化物主要包括 KCl 和 NaCl, 二者的熔点分别为 773 °C 和 801 °C, 蒸汽压较高, 随温度的变化如图 1 所示, 因此碱金属氯化物在转底炉工艺中的还原温度段易于挥发析出<sup>[30]</sup>。

表 1 常见钢铁企业典型工序产生的冶金尘泥主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of common metallurgical sludge produced by typical processes in iron and steel enterprises

常见尘泥种类	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	ZnO	C	MgO	PbO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%
高炉布袋灰 <sup>[8-9]</sup>	19.00 ~	2.76 ~	2.88 ~	0.70 ~	0.73 ~	6.96 ~	12.40 ~	0.83 ~	0.21 ~	1.30 ~	
	83.00	14.50	8.79	14.30	1.10	21.80	34.0	1.26	2.06	3.05	
烧结机机头灰 <sup>[10-12]</sup>	12.00 ~	3.13 ~	10.00 ~	9.00 ~	0.23 ~	0.04 ~	—	0.43 ~	0.53 ~	0.81 ~	
	52.00	12.30	38.30	21.0	7.46	0.23		7.82	19.61	3.86	
电炉粉尘 <sup>[13-17]</sup>	21.00 ~	2.01 ~	—	0.75 ~	0.78 ~	6.44 ~	1.30 ~	1.21 ~	—	—	
	74.62	5.30		1.03	2.44	17.02	2.90	2.75	0.36	0.57	
转炉污泥 <sup>[18-20]</sup>	17.05 ~	1.53 ~	—	—	—	—	—	—	—	—	
	39.31	2.00	0.09	0.26	0.41	1.33 ~	3.20 ~	1.61 ~	—	0.32 ~	
高炉重力灰 <sup>[21-23]</sup>	38.97 ~	8.96 ~	—	—	—	—	—	—	—	—	
	70.18	11.77	0.22	0.85	0.31	0.22 ~	3.80 ~	1.05 ~	0.11 ~	2.65 ~	
OG 泥 <sup>[24-26]</sup>	61.60	1.90 ~	—	—	—	—	—	—	—	—	
		5.96		0.23	0.12	0.06 ~	1.60 ~	1.88 ~	—	0.12 ~	
						0.18	2.50	5.17		0.22	



$$1-\lg P_{\text{KCl}} = -10\,710(T+273)^{-1} - 3.01\lg(T+273) + 18.91$$

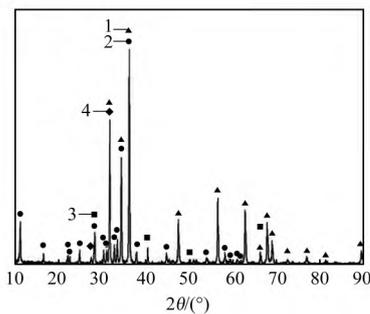
$$(T=771 \sim 1\,437\text{ }^{\circ}\text{C}); 2-\lg P_{\text{NaCl}} = -11\,530(T+273)^{-1} -$$

$$3.481\lg(T+273) + 20.77(T=801 \sim 1\,465\text{ }^{\circ}\text{C}).$$

图 1 NaCl 与 KCl 在不同温度下的蒸汽压变化

Fig. 1 Vapor pressure variation of NaCl and KCl at different temperatures

在转底炉直接还原过程中碱金属氯化物反应行为方面，目前已有较多研究工作开展。王静松等<sup>[31]</sup>、PAN 等<sup>[32]</sup>利用管式炉模拟转底炉进行含碳球团还原试验，并对工业换热系统管道中的转底炉二次粉尘进行了 XRF、XRD、SEM-EDS 测定，发现烟尘中钾、钠元素主要以 NaCl、KCl 形式存在，锌主要以 ZnO 形式存在(图 2)，其分布与沉积位置及时间有关，占烟尘总量的 80%，同时烟尘中还有少量含锌复杂化合物  $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2\text{H}_2\text{O}$ 。

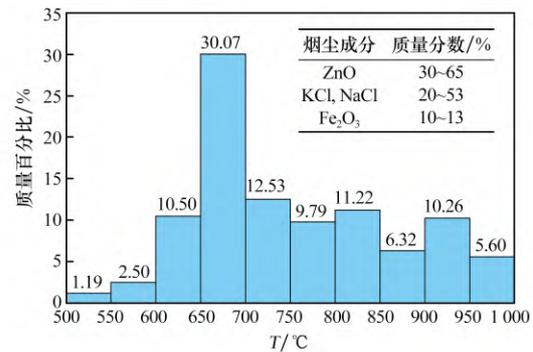


1—ZnO; 2— $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2\text{H}_2\text{O}$ ; 3—KCl; 4—NaCl。

图 2 转底炉换热系统中粉尘的物相组成

Fig. 2 Phase composition of dust in a rotary hearth furnace heat exchange system

为探寻不同温度段沉积粉尘的物化特征，陈振红<sup>[33]</sup>利用高温电阻炉开展烟气沉积试验，发现所收集烟尘的主要物相为 NaCl、KCl、ZnO，且不同温度段沉积的粉尘颜色和沉积量均有一定的区别，沉积量如图 3 所示，沉积现象在 600 °C 到 750 °C 时加剧，烟尘沉积严重的温度段与碱金属氯化物的熔点重合，有烟道结圈、堵塞的趋势。



1—ZnO; 2— $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2\text{H}_2\text{O}$ ; 3—KCl; 4—NaCl。

图 3 不同温度段烟尘沉积量

Fig. 3 Deposition amount of dust at different temperature ranges

### 3 碱金属氯化物对烟气沉积的影响

碱金属氯化物的物化性质会影响转底炉内沉积物质量分布，基于此研究其在转底炉内的反应机理对于解决烟尘沉积等危害具有重要意义。何欣隆<sup>[34]</sup>利用熔化温度测试仪考察 KCl、NaCl 对混合料熔点的影响，发现 KCl、NaCl 在 700 ~ 900 °C 范围内会以熔融状态存在，促进 ZnO 与混合料中的铁氧化物反应，从而生成  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ，降低物料的整体熔点，加速黏结物的形成。李岩等<sup>[35]</sup>、杨代伟<sup>[36]</sup>对不同含量的 KCl、NaCl 与 PbO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 ZnO 的高温反应规律进行了工业试验研究，发现高温烟气中的碱金属在穿过换热管道时，会随着温度的降低产生液固转变，从而与烟气中的 Fe、Zn、Pb 等颗粒结合，在管壁上黏结；烟气中的 ZnO 会与 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 反应生成固相  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ，产生可吸纳更多固体颗粒的宏观多孔结构，多孔区域中的 KCl 固化并凝聚更多的固体颗粒填充多孔结构，同时形成未完全填充的平坦区域和过渡区域，黏结物形成机理如图 4 所示。因此，转底炉内黏结物中的 KCl 与 NaCl 是主要的凝聚相， $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  是次要的凝聚相；烟气中的 Zn 单质会与液态的 KCl 生成  $\text{ZnCl}_2$ ，渗入初始黏结物中，形成更为致密的黏结结构。

何环宇、宋泽宇等<sup>[37-39]</sup>参照不同冶金粉尘中的碱金属氯化物含量范围，制备了含锌混合料，进行碱金属氯化物添加 KCl 与 NaCl 质量分数 (1.43%、0.79%)、(2.85%、1.58%)、(4.28%、

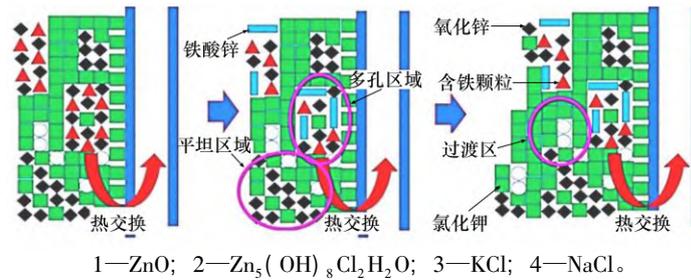


图 4 黏结物形成机理示意<sup>[35]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of adhesive formation mechanism<sup>[35]</sup>

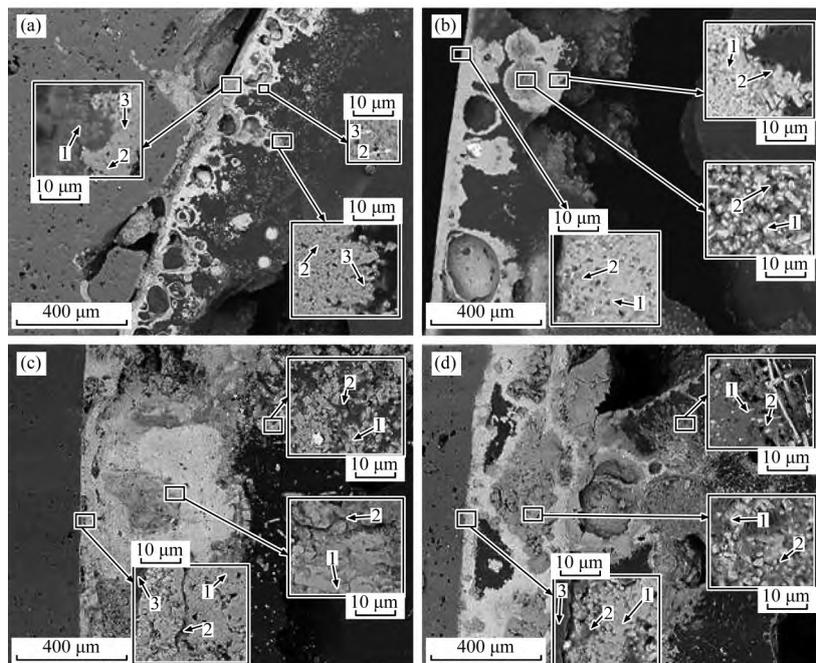
2.37%) 及未添加碱金属氯化物的四组高温还原试验, 发现富集区的烟尘沉积物主要由碱金属氯化物和氧化锌组成, 微观形貌如图 5 所示。图 5 中, 富集区中的沉积物具有十分明显的分层现象, 贴近管壁的内层沉积物主要成分为以 KCl 为主的碱金属氯化物, ZnO 颗粒紧挨着碱金属氯化物层生长, 形成氧化锌 - 碱金属氯化物相; 外层沉积物中 ZnO 颗粒比例明显高于内层, 呈现出明显的晶体结构, 碱金属氯化物 - 氧化锌相存在于 ZnO 颗粒间, 且随着碱金属添加量上升, 沉积物厚度明显增加, 氧化锌颗粒粒径变大, 发生更大规模的融合现象, 形成了更多的氧化锌 - 碱金属氯化物复合相, 分层现象更加明显, 沉积物结构变得更

加致密。

#### 4 降低碱金属危害的调控措施

##### 4.1 原料入炉前碱金属氯化物控制措施

为了消除碱金属对转底炉工艺的危害, 部分学者针对原料入炉前碱金属含量调控措施进行了相关研究。周和敏等<sup>[40]</sup>对转底炉工艺流程进行了优化改进, 在球团入炉前增设高温烘干阶段, 从而通过入炉球团预处理的方式降低碱金属入炉含量; 郭秀键<sup>[8]</sup>和苏航等<sup>[41]</sup>研究了水洗预处理对碱金属脱除率的影响, 发现相较于浸出时间、浸出温度和搅拌速度等条件, 液固比对碱金属脱除率影响最大, 当液固比大于 2 时, 高炉布袋灰中



(KCl, NaCl) 质量分数/%: (a) 未添加; (b) (1.43, 0.79); (c) (2.85, 1.58); (d) (4.28, 2.37)

1—ZnO; 2—碱金属氯化物 - 氧化锌复合相; 3—碱金属氯化物。

图 5 烟尘富集区中碱金属氯化物形貌<sup>[37]</sup>

Fig. 5 Morphology of alkali metal chlorides in soot-rich areas<sup>[37]</sup>

的碱金属可脱除 95% 以上,且进一步对原料循环洗涤后脱除率变化不大。YU 等<sup>[42]</sup>、吴龙等<sup>[43]</sup>、彭亚环等<sup>[44]</sup>在湿法工艺的基础上采用结晶法对冶金尘泥中的碱金属分离提取,对富含碱金属的浸出液进行浓缩结晶处理,其中 KCl 的脱除率高达 99.99%,可获得工业级别的 KCl 以及其他混合盐,工艺流程如图 6 所示。

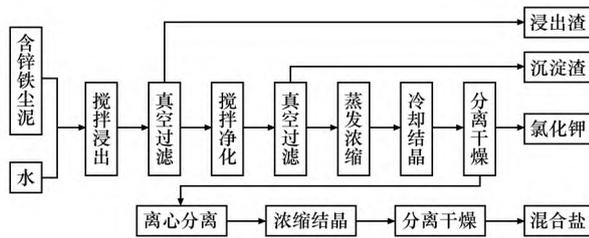


图 6 结晶法生产 KCl 工艺流程

Fig. 6 Process flow of KCl production by crystallization method

高温烘干预处理工艺可以有效控制入炉球团中碱金属的含量,降低碱金属对转底炉工艺的危害,但如果需要完全脱除碱金属,会相应增加大量的能耗。湿法工艺在控制原料入炉前碱金属氯化物含量方面具有很好的应用前景,碱金属脱除率可达 95% 以上,结合结晶法可以有效回收湿法浸出废液中的 NaCl、KCl,实现碱金属的回收利用,适用于处理高含量碱金属的冶金尘泥,为解决碱金属对转底炉工艺的危害提供新的思路。

#### 4.2 烟气系统优化措施

针对碱金属黏结沉积导致炉内设备堵塞的问题,秦洁等<sup>[45]</sup>利用了 NaCl、KCl 的熔点特性,通过调控烟气温度将碱金属析出区域控制在辐射室水冷壁区域,有效避免了碱金属在烟道管壁沉积。杨春善等<sup>[46]</sup>设计了烟气出口降尘室,通过降低烟气流速使烟气中碱金属等大颗粒在重力作用下提前沉降。施一新等<sup>[47]</sup>、吴道洪等<sup>[48]</sup>、曹朝真等<sup>[49]</sup>等通过控制烟气温度和流场,在烟尘易黏结区通过急速降温和通风等措施来减缓和避免烟尘的沉积。武绍井等<sup>[50]</sup>则针对碱金属的高黏结性特点以及实际工业需求,对余热锅炉采取防积灰措施、清灰措施以及防腐蚀措施,包括整体采用悬吊式结构以及设置辐射沉降室,使锅炉作业率提高 10%。姚海威等<sup>[51]</sup>对转底炉内高温锌蒸汽再氧化过程进行工业试验,掌握了气氛及温度对 ZnO、

KCl、NaCl 颗粒大小及形态的影响规律,并结合转底炉烟气处理系统的特点,确定了合理的烟道出入口热工控制温度,可有效避免碱金属与 ZnO 的沉积问题。王鹏<sup>[52]</sup>、吕宁<sup>[53]</sup>、陈长景等<sup>[54]</sup>也探究了采用声波、机械、激光等高效清除碱金属沉积物措施,并获得了较理想的清灰效果。

#### 4.3 转底炉粉尘水浸脱除碱金属措施

碱金属在高温还原后与氧化锌一同进入转底炉二次粉尘中。为获得高品位的氧化锌产品,需要对二次粉尘中的碱金属进行分离处理。王静松等<sup>[31]</sup>通过水洗、酸溶等工序实现了粉尘中碱金属的分离提取,制备出 KCl 和 NaCl 以及  $ZnSO_4 \cdot H_2O$  等产品,工艺流程如图 7 所示。曾晖等<sup>[55]</sup>将富含碱金属的转底炉粉尘进行水浸处理后对浸出液进行净化、萃取和反萃处理,提取出高品位的锌产品,并将萃余液通过结晶法处理,获得高价值的 KCl、NaCl 产品。

在部分还原后的二次粉尘中,锌除以 ZnO 形式存在外,还和碱金属高温反应下产生的  $ZnCl_2$  形式存在,此时  $ZnCl_2$  易溶于水,水浸后生成  $Zn^{2+}$  离子。唐茜<sup>[56]</sup>针对这种情况对二次粉尘水浸液加入 NaOH 及  $NaCO_3$  作为沉淀剂,将 Zn 沉淀反应后提取,再对富含碱金属的浸出液进行蒸发结晶,最终制得富锌渣、KCl 晶体和 NaCl 晶体,实现了粉尘中锌、钾、钠元素的循环利用。LIANG 等<sup>[57]</sup>对含锌粉尘进行水浸处理,锌浸出率达到 90% 以上,水浸后钾、钠等碱金属元素被完全脱除,对  $Zn^{2+}$  的提取工艺进一步优化,通过加入 KOH 与浸出液中的 Zn 生成  $Zn(OH)_2$  沉淀,加热条件下可得到平均粒径  $12.4 \mu m$  质量分数为 98.5% 的高品位 ZnO 粉。

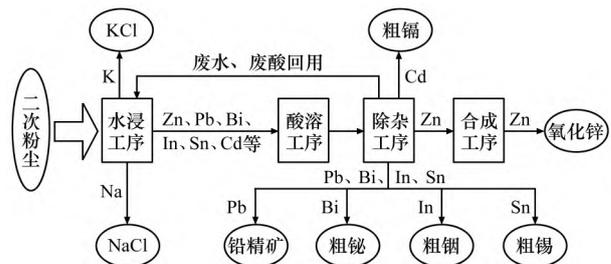


图 7 转底炉二次粉尘的湿法处理工艺

Fig. 7 Wet treatment process of secondary dust in rotary hearth furnace

## 5 结论与展望

碱金属(主要为钠和钾)在高温下有显著的迁移和挥发特性,易于在转底炉内沉积形成黏结物,进而引发设备内结瘤、烟气系统堵塞等问题,对生产效率和工艺稳定性构成威胁。本文通过对碱金属来源、迁移行为及其危害机制全面分析,总结了目前在碱金属抑制和控制方面的关键措施,包括原料预处理、烟气系统优化及二次粉尘资源化利用等手段。结合当前研究进展与工艺优化需求,未来可从以下几个方面推进碱金属控制和回收工艺的发展。

(1) 针对入炉前原料中的碱金属成分,借鉴钢渣锌铁分离工艺中的酸碱浸出及物理分离方法,进一步优化湿法浸出、高温烘干等预处理技术,严格调控入炉碱金属含量,实现资源的高效回收。

(2) 针对碱金属的熔点低和易于沉积的特性,通过优化烟气流场和温度梯度,减少碱金属沉积量,并采用如激光除尘、声波清灰等新型除尘技术,减轻碱金属沉积对设备的影响。

(3) 针对二次粉尘中有较高回收价值的碱金属和锌等元素,通过引入离子液体萃取法和分级结晶等绿色分离技术,形成闭环的资源循环利用链条,提升工艺的环境友好性。

### 参考文献:

- [1] 张寿荣,张卫东. 中国钢铁企业固体废弃物资源化处理模式和发展方向[J]. 钢铁, 2017, 52(4): 1-6.  
ZHANG Shourong, ZHANG Weidong. Solid waste resources treatment mode and development tendency of iron and steel enterprises in China [J]. Iron & Steel, 2017, 52(4): 1-6.
- [2] 王子宏,阮志勇,墙蕾,等. 钢厂含锌尘泥锌铁火法分离研究[J]. 烧结球团, 2021, 46(5): 86-92.  
WANG Zihong, RUAN Zhiyong, QIANG Qiang, et al. Research on pyrometallurgical separation zinc and iron from zinc-bearing dust in steel plant [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(5): 86-92.
- [3] 孙超. 高炉碱金属危害防治及炉渣排碱方法研究[J]. 化工管理, 2024(7): 62-65.  
SUN Chao. A study on hazard mitigation of alkali metals in blast furnace and alkaline drainage from slag [J]. Chemical Enterprise Management, 2024(7): 62-65.
- [4] 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.
- [5] 田玮,岳昌盛,彭霖. 钢铁冶金尘泥的产生及处置利用技术分析[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(3): 105-110.  
TIAN Wei, YUE Changsheng, PENG Ben. Analysis of the characteristics and disposal technology of metallurgical dust [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(3): 105-110.
- [6] 胡鹏,何木光,张小龙. 攀钢钒钛烧结矿喷洒氯元素减量试验研究[J]. 烧结球团, 2021, 46(4): 31-36.  
HU Peng, HE Muguang, ZHANG Xiaolong. Experimental research on reduction of chlorine sprayed in V-Ti sinter of Pangang [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(4): 31-36.
- [7] 叶恒棣,颜旭,魏进超,等. 多源含铁固废的元素赋存形态及其对处置技术路线的影响[J]. 烧结球团, 2022, 47(5): 59-68.  
YE Hengdi, YAN Xu, WEI Jinchao, et al. Mode of occurrence of elements in multi-source iron-containing solid waste and its influence on disposal technical route [J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(5): 59-68.
- [8] 郭秀键. 高炉布袋灰水洗脱氯及滤液净化试验研究[J]. 四川冶金, 2021, 43(6): 9-13.  
GUO Xiujian. Experimental study on chloride removal from BF bad dust by washing and purification of its filtrate [J]. Sichuan Metallurgy, 2021, 43(6): 9-13.
- [9] 何璇,黄润,李博,等. 真空碳热还原含锌粉尘制备锌热力学模拟研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2022, 39(2): 119-124.  
HE Xuan, HUANG Run, LI Bo, et al. Thermodynamic simulation of preparation of zinc by vacuum carbothermic reduction of zinc-containing dust [J]. Journal of Guizhou University( Natural Sciences), 2022, 39(2): 119-124.
- [10] 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.
- [11] 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. Classified utilization of sintering EAF dust[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(9): 802-808.
- [12] 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.  
Fen 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.
- [13] 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 zinc-containing electric arc furnace [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(11): 45-52.
- [14] 李洋, 张建良, 袁骧, 等. 电炉粉尘锌元素回收利用基础分析[J]. 中国冶金, 2018, 28(11): 16-24.  
LI Yang, ZHANG Jianliang, YUAN Xiang, et al. Basic analysis on recovery and utilization of zinc in EAF dust [J]. China Metallurgy, 2018, 28(11): 16-24.
- [15] 杨莹, 汪鑫, 许继芳, 等. 含锌电炉粉尘配碳选择性还原的实验研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(4): 106-109.  
YANG Ying, WANG Xin, XU Jifang, et al. Experimental study on the selective reduction of zinc-bearing electric arc furnace dust with carbon[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(4): 106-109.
- [16] 贺凌宇, 丁希楼, 向媛媛, 等. 用硫酸从电炉粉尘中浸出锌、铁试验研究[J]. 湿法冶金, 2022, 41(6): 502-508.  
HE Lingyu, DING Xilou, XIANG Yuanyuan, et al. Leaching of zinc and iron from electric furnace dust with sulfuric acid[J]. Hydrometallurgy of China, 2022, 41(6): 502-508.
- [17] 余水, 毛瑞, 王飞, 等. 高碱度电炉粉尘碳热还原动力学及反应机制[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(2): 256-264.  
YU Shui, MAO Rui, WANG Fei, et al. Kinetics and reduction mechanism of high-basicity electric arc furnace dust by carbothermal reduction [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2024, 36(2): 256-264.
- [18] WU S C, SUN T C, KOU J, et al. Green and efficient recovery of poly metals from converter sludge through reduction roasting and preparation of backfill from tailings [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 479: 147582.
- [19] 王飞, 毛瑞, 茅沈栋. 转底炉对转炉污泥的处理[J]. 钢铁, 2019, 54(12): 111-116.  
WANG Fei, MAO Rui, MAO Shendong. Utilization of converter sludge by rotary hearth furnace [J]. Iron & Steel, 2019, 54(12): 111-116.
- [20] 唐岚, 甘万贵. 冶金尘泥制备金属化球团成型试验研究[J]. 烧结球团, 2013, 38(1): 46-49.  
TANG Lan, GAN Wangui. Experimental study on producing and shaping metallized pellet with metallurgical dust and sludge [J]. Sintering and Pelletizing, 2013, 38(1): 46-49.
- [21] 刘纲, 干勇, 李士琦, 等. 高炉含锌粉尘还原性影响因素分析[J]. 中国冶金, 2019, 29(10): 20-25.  
LIU Gang, GAN Yong, LI Shiqi, et al. Analysis of reducing factors of zinc-bearing blast furnace dust [J]. China Metallurgy, 2019, 29(10): 20-25.
- [22] 黄文亮. 冶金含铁尘泥压球试验研究[J]. 中国钢铁业, 2022(3): 48-51.  
HUANG Wenliang. Experimental study on ball pressing of metallurgical iron-bearing dust and mud [J]. China Steel, 2022(3): 48-51.
- [23] 毛瑞, 张建良, 刘征建, 等. 钢铁厂含铁尘泥球团自还原实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 790-795.  
MAO Rui, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Experimental studies on self-reduction for the pellets made of iron-contained dust and sludge from a steel enterprise [J]. Journal of Northeastern University( Natural Science), 2015, 36(6): 790-795.
- [24] 汪勇, 郑君, 宋燕. 含铁尘泥回收柔性处理工艺流程探讨[J]. 冶金设备, 2023(5): 92-96.  
WANG Yong, ZHENG Jun, SONG Yan. Discussion on flexible treatment process flow for recycling ferric dust and sludge [J]. Metallurgical Equipmen, 2023(5): 92-96.
- [25] 伍强, 刘梦茹, 沈海峰, 等. 转炉 OG 泥资源化利用研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(7): 21-26.  
WU Qiang, LIU Mengru, SHEN Haifeng, et al. Research progress on resource utilization of sludge from oxygen-gas

- (OG) converter [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2023 52(7): 21–26.
- [26] 刘胜涛,王凯,朱利. 首秦资源类固废综合回收利用实践[J]. *中国冶金* 2018 28(11): 73–78.  
LIU Shengtao, WANG Kai, ZHU Li. Practice on comprehensive recycling of solid waste resources in Shouqin Company [J]. *China Metallurgy* 2018 28(11): 73–78.
- [27] 盛伟虎,杨春善,郑磊,等. 转底炉工艺原理及生产实践[J]. *山东冶金* 2022 44(4): 32–35.  
SHENG Weihu, YANG Chunshan, ZHENG Lei, et al. Process principle and production practice of rotary hearth furnace [J]. *Shandong Metallurgy* 2022 44(4): 32–35.
- [28] 杨金坤,魏红兵,苏明跃. 含铁物料固体废物工艺溯源及成分特征综述[J]. *中国口岸科学技术*, 2023, 5(12): 4–13.  
YANG Jinkun, WEI Hongbing, SU Mingyue. Process traceability and composition characteristics of solid waste containing ferrous materials [J]. *China Port Science and Technology* 2023 5(12): 4–13.
- [29] 盛伟虎,杨春善,申飞,等. 日照钢铁回转窑处理钢铁厂除尘灰生产实践[J]. *山西冶金* 2022 45(7): 89–92.  
SHENG Weihu, YANG Chunshan, SHEN Fei, et al. Production practice of dust removal in steel plant treated by rotary kiln of Rizhao Steel [J]. *Shanxi Metallurgy*, 2022 45(7): 89–92.
- [30] 王佳,孙泽,路贵民,等. 碱金属氯化物二元熔盐密度的分子动力学模拟研究[J]. *华东理工大学学报(自然科学版)* 2016 42(6): 771–781.  
WANG Jia, SUN Ze, LU Guimin, et al. Molecular dynamics simulation for the densities of molten binary alkali metal chlorides [J]. *Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition)* 2016 42(6): 771–781.
- [31] 王静松,杨慧贤,余雪峰,等. 转底炉处理冶金粉尘工艺的锌钾钠脱除及烟气形成[J]. *重庆大学学报*, 2011 34(3): 82–88.  
WANG Jingsong, YANG Huixian, SHE Xuefeng, et al. Study on mechanism of Zn, K, Na removal and flue gas formation in RHF direct reduction treat metallurgical dust process [J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(3): 82–88.
- [32] PAN Y Z, SHE X F, WANG J S, et al. Study of the deposition formation mechanism in the heat exchanger system of RHF [J]. *Metals* 2019 9(4): 443.
- [33] 陈振红. 直接还原法处理含锌冶金尘泥烟气的沉积特性研究[D]. 武汉: 武汉科技大学 2016.  
CHEN Zhenhong. Research on the Sediment of flus gas in direct reduction treated by zinc-bearing metallurgical dust [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology 2016.
- [34] 何欣隆. 转炉干法除尘系统蒸发冷却器壁高强度结垢物形成机理研究[D]. 重庆: 重庆大学 2019.  
HE Xinlong. Study on formation mechanism of high strength nodule in evaporative cooler wall of converter dry dust removal system [D]. Chongqing: Chongqing University 2019.
- [35] 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.  
LI Yan, ZHAO Zhijian, FENG Huaixuan, et al. Technology of treating zinc-containing dust and mud in iron and steel plant by rotary hearth furnace [J]. *Sintering and Pelletizing* 2022 47(6): 106–115.
- [36] 杨代伟. 冶金粉尘及其K、Na、Zn对铁矿烧结影响机理研究[D]. 武汉: 武汉科技大学 2022.  
YANG Daiwei. Study on the influence mechanism of the metallurgical dust and its of K, Na, Zn on iron ore sintering [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology 2022.
- [37] 何环宇,宋泽宇,侯巍巍. 碱金属氯化物对转底炉含锌烟气沉积的影响[J]. *钢铁* 2018 53(5): 91–95.  
HE Huanyu, SONG Zeyu, HOU Weiwei. Effect of alkali chloride on sediment of zinc-bearing flus gas from rotary hearth furnace [J]. *Iron & Steel* 2018 53(5): 91–95.
- [38] 宋泽宇. 碱金属氯化物对直接还原法处理含锌尘泥影响的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学 2018.  
SONG Zeyu. Study on the effect of alkali metal chloride to the treatment of zinc containing dust by direct reduction [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology 2018.
- [39] 何环宇,陈振红,崔一芳,等. 含锌冶金尘泥还原烟气沉积特性[J]. *钢铁* 2015 50(12): 80–84.  
HE Huanyu, CHEN Zhenhong, CUI Yifang, et al. Sediment of flus gas in direct reduction treated by zinc-bearing metallurgical dust [J]. *Iron & Steel*, 2015, 50(12): 80–84.
- [40] 周和敏,王海风,高建军,等. 一种转底炉处理固废的

- 方法: CN108611458B [P]. 2020 - 03 - 20.
- ZHOU Hemin ,WANG Haifeng ,GAO Jiangjun ,et al. A method for treating solid waste using a rotary hearth furnace: CN108611458B [P]. 2020 - 03 - 20.
- [41] 苏航 ,毛瑞 ,王飞 ,等 . 高炉布袋灰湿法浸出脱氯迁移规律及动力学研究 [J]. 烧结球团 2022 47( 6) : 99 - 105.
- SU Hang ,MAO Rui ,WANG Fei ,et al. Research on migration law and dynamics of dechlorination in wet leaching of blast furnace bag dust [J]. Sintering and Pelletizing 2022 47( 6) : 99 - 105.
- [42] 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.
- [43] 吴龙 ,郝以党 ,岳昌盛 ,等 . 钢铁企业含铁尘泥资源化利用工艺及其选择 [J]. 环境工程 ,2016 ,34( 12) : 113 - 117.
- WU Long ,HAO Yidang ,YUE Changsheng , et al. Resource utilization technologies and their selection of mud containing iron from iron and steel enterprises [J]. Environmental Engineering 2016 34( 12) : 113 - 117.
- [44] 彭亚环 ,李卫国 ,林培芳 . 韶钢冶金尘泥资源化利用新技术的开发及应用 [J]. 南方金属 2022( 5) : 35 - 37.
- PENG Yahuan ,LI Weiguo ,LING Peifang. Development and application of new technology for resource utilization of metallurgical dust and mud in SGIS [J]. Southern Metals 2022( 5) : 35 - 37.
- [45] 秦洁 ,刘功国 ,吴秋廷 ,等 . 转底炉高温烟气余热回收利用分析研究 [J]. 矿冶 2011 20( 4) : 86 - 90.
- QIN Jie ,LIU Gongguo ,WU Qiuting ,et al. Study on recovery of high temperature waste gas of rotary hearth furnace [J]. Mining and Metallurgy ,2011 20( 4) : 86 - 90.
- [46] 杨春善 ,高古忠 . 转底炉烟气系统堵塞、腐蚀及防腐探索 [J]. 中国冶金 2019 29( 9) : 82 - 87.
- YANG Chunshan ,GAO Guzhong. Exploration on blockage , corrosion and antisepsis of rotary hearth furnace flue system [J]. China Metallurgy 2019 29( 9) : 82 - 87.
- [47] 施一新 ,殷惠民 ,周顺成 ,等 . 冶金固废处理转底炉烟气系统防堵装置: CN202511639U [P]. 2012 - 10 - 31.
- SHI Yixin ,YIN Huimin ,ZHOU Shuncheng ,et al. Device for preventing blockage in the flue gas system of a rotary hearth furnace for metallurgical solid waste treatment: CN202511639U [P]. 2012 - 10 - 31.
- [48] 吴道洪 ,刘俭 ,殷惠民 ,等 . 冶金固废处理转底炉烟气系统防堵方法: CN102628652B [P]. 2014 - 06 - 25.
- WU Daohong ,LIU Jian ,YIN Huimin ,et al. Method for preventing blockage in the flue gas system of a rotary hearth furnace for metallurgical solid waste treatment: CN102628652B [P]. 2014 - 06 - 25.
- [49] 曹朝真 ,张福明 ,毛庆武 ,等 . 一种转底炉处理冶金含锌尘泥工艺烟气系统防黏结方法: CN103983120B [P]. 2016 - 01 - 06.
- CAO Chaozhen ,ZHANG Fuming ,MAO Qingwu ,et al. Method for preventing adhesion in the flue gas system of a rotary hearth furnace for treating zinc-bearing metallurgical dust: CN103983120B [P]. 2016 - 01 - 06.
- [50] 武绍井 ,李承武 ,蒲洪权 . 钢铁企业处理固废用转底炉余热锅炉设计要点 [J]. 工业锅炉 2022( 5) : 17 - 21.
- WU Shaojing ,LI Chengwu ,PU Hongquan. Key points of design for heat-recovery boiler of rotary hearth furnace for solid waste treatment in iron and steel enterprises [J]. Industrial Boilers 2022( 5) : 17 - 21.
- [51] 姚海威 ,毛瑞 ,王飞 ,等 . 一种适用于高碱度原料的转底炉烟道系统控制方法: CN117758005A [P]. 2024 - 03 - 26.
- YAO Haiwei ,MAO Rui ,WANG Fei ,et al. Method for controlling the flue gas system of a rotary hearth furnace suitable for high-alkalinity materials: CN117758005A [P]. 2024 - 03 - 26.
- [52] 王鹏 . 烟气余热回收换热器中粉尘沉积特性分析 [J]. 中国粉体技术 2014 20( 3) : 16 - 20.
- WANG Peng. Analysis on dust deposition in heat exchanger of flue gas waste heat recovery [J]. China Powder Science and Technology 2014 20( 3) : 16 - 20.
- [53] 吕宁 . 钢铁厂含锌尘泥固废处理余热锅炉清灰方式分析 [J]. 现代冶金 2013( 5) : 51 - 53.
- LÜ Ning. Analysis on cleaning method of waste heat boiler for solid waste treatment of zinc-containing dust and mud in iron and steel plant [J]. Modern Metallurgy , 2013( 5) : 51 - 53.
- [54] 陈长景 ,张兰芳 . 转底炉余热锅炉设计探讨 [J]. 工业锅炉 2014( 6) : 37 - 39.

( 下转第 44 页)

- 56(3):371-381.
- [2] YOUNG R. Dynamic mathematical model of sintering process [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 1977, 4(5): 321-328.
- [3] YOSHINAGA M, KUBO T. Approximate simulation model for sintering process [J]. *Sumitomo Search*, 1978, 29(20): 1-14.
- [4] CUMMING M J, THURLBY J A. Developments in modelling and simulation of iron ore sintering [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 1990, 17(4): 245-254.
- [5] 张安煜, 陈贺, 王东, 等. 生物质部分替代焦粉的烧结过程温度场模拟仿真 [J]. *烧结球团*, 2019, 44(4): 13-17.  
ZHANG Anyu, CHEN He, WANG Dong, et al. Simulation of temperature field in sintering process of substituting part of coke breeze with biomass [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2019, 44(4): 13-17.
- [6] YANG Won, RYU Changhook, CHOI Sangmin. Unsteady one-dimensional model for a bed combustion of solid fuels [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2004, 218(8): 589-598.
- [7] 张小辉. 基于燃料分层分布的烟气循环烧结工艺仿真与优化 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.  
ZHANG Xiaohui. Simulation and optimization of flue gas circulation sintering process based on fuel layered distribution [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [8] 张玉柱, 艾立群. 钢铁冶金过程的数学解析与模拟 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.  
ZHANG Yuzhu, AI Liqun. *Mathematical analysis and simulation of steel metallurgical processes* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997.
- [9] 王淦. 废气循环烧结质热传输过程数值模拟及其应用 [D]. 北京: 北京科技大学, 2017.  
WANG Gan. *Mathematical modeling of the heat and mass transfer in flue gas recirculation sintering and its application* [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [10] RAMOS M V, KASAI E, KANO J, et al. Numerical simulation model of the iron ore sintering process directly describing the agglomeration phenomenon of granules in the packed bed [J]. *ISIJ International*, 2000, 40(5): 448-454.
- [11] SHEA J. Perry's chemical engineer's handbook-7th edition [Book Review] [J]. *Electrical Insulation Magazine IEEE*, 2000, 16(3): 34-35.
- [12] 郑坤灿, 温治, 王占胜, 等. 前沿领域综述——多孔介质强制对流换热研究进展 [J]. *物理学报*, 2012, 60(1): 014401.  
ZHENG Kuncan, WEN Zhi, WANG Zhansheng, et al. A review of cutting-edge fields——research progress on forced convection heat transfer in porous media [J]. *Acta Phys. Sin*, 2012, 60(1): 014401.
- 
- (上接第 20 页)
- CHEN Changjing, ZHANG Lanfang. The discussion on design of the heat recovery boiler of rotary hearth furnace [J]. *Industrial Boiler*, 2014(6): 37-39.
- [55] 曾晖, 薛庆国, 张毅, 等. 一种利用转底炉二次粉尘提取锌、钾、钠的方法: CN102808087B [P]. 2015-04-22.  
ZENG Hui, XUE Qingguo, ZHANG Yi, et al. A method for extracting zinc, potassium and sodium in RHF second dust: CN102808087B [P]. 2015-04-22.
- [56] 唐茜. 转底炉二次粉尘中有价元素提取工艺的实验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.  
TANG Xi. *Experimental study on extraction process of valuable elements in RHF second dust* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [57] LIANG S, LIANG X P, TANG Q. Treatment of secondary dust produced in rotary hearth furnace through alkali leaching and evaporation-crystallization processes [J]. *Processes*, 2020, 8(4): 396.