



转底炉工艺锌残留解析及强化脱锌机理

陈铁军, 金路恒, 万军营, 郑锡瀚, 周仙霖, 刘佳文
(武汉科技大学 a. 资源与环境工程学院; b. 冶金矿产资源高效利用与造块
湖北省重点实验室 湖北 武汉 430081)

摘要: 转底炉处理含锌粉尘工艺存在高锌原料无法充分脱锌的问题。为此, 本文通过对现场金属化球团产品进行剖析, 探讨锌残留的原因; 研究外加气流对还原过程中锌和铁反应行为的影响, 具体探究 N_2 流速、CO 含量对金属化团块还原效果的影响。结果表明: 还原焙烧过程中生成的铁连晶和低熔点化合物堵塞了孔隙, 阻碍了锌的挥发, 使锌以 Zn 和 ZnO 的形式附着在铁连晶周围; 当氮气流速从 0 提高到 6 m/s 时, 脱锌率从 50.83% 增长至 93.19%, 金属化率从 74.69% 降低至 67.92%; 当 CO 体积分数从 0 增长到 40% 时, 脱锌率均维持在 90% 以上, 金属化率从 68.30% 增长到 85.77%, 说明还原性气流可以促进锌的挥发, 同时提高金属化率。气流强化脱锌机理分析表明, 在无气流条件下, 液相产生或者铁连晶长大阻碍了锌的挥发通道, 导致锌在团块内部富集, 而外加还原性气流能够提高锌挥发的速度, 促进锌的挥发过程。

关键词: 含锌粉尘; 脱锌; 转底炉; 直接还原; 冶金固废

中图分类号: TF046.6; X757

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)03-0132-09

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.03.050

Analysis of zinc residues in rotary hearth furnace process and enhanced dezincification mechanism

CHEN Tiejun, JIN Luheng, WAN Junying, ZHENG Xihan, ZHOU Xianlin, LIU Jiawen

(Wuhan University of Science and Technology a. School of Resources and Environmental Engineering; b. Hubei Province Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: There is a problem that high zinc raw materials cannot be fully dezincified in the process of rotary hearth furnace to treat zinc-containing dust, so the on-site metallized pellet products is analyzed to discuss the causes of zinc residue. The effects of applied airflow on the reaction behavior of zinc and iron during the reduction process are studied, and the effects of N_2 flow rate and CO content on the reduction effect of metallized agglomerates are investigated specifically. The results show that the ferrocrystals and low-melting compounds generated during the reductive roasting process block the pores and hinder the volatilization of zinc, so that the zinc attaches to the ferrocrystals in the form of Zn and ZnO. When the nitrogen velocity is increased from 0 to 6 m/s, the dezincification rate is increased from 50.83% to 93.19%, and the metallization rate is decreased from 74.69% to 67.92%. When the CO volume fraction is increased from 0 to 40%, the dezincification rate is remained above 90%, and the metallization rate is increased from 68.30% to 85.77%, indicating that the reducing airflow could promote the volatilization of zinc and improve the metallization rate. The analysis of the mechanism of airflow-enhanced dezincification show that the formation of liquid phase or the growth of iron crystals hinders the volatilization channel of zinc under the condition without airflow, resulting in the enrichment of zinc in

收稿日期: 2024-07-25; 修回日期: 2025-02-24

基金项目: 广西科技重大专项资助项目(桂科 AA24263047)

作者简介: 陈铁军(1973—), 男, 博士, 教授, 从事复杂铁矿分选、烧结球团、直接还原方面的研究。

通信作者: 万军营(1992—), 男, 博士, 讲师, 从事烧结球团及直接还原方面的研究。

the agglomerate, while the external reducing airflow could increase the rate of zinc volatilization and promote the volatilization process of zinc.

Key words: zinc-containing dust; dezincification; rotary hearth furnace; direct reduction; metallurgical solid waste

据统计,我国每年粗钢产量超10亿吨,每生产1t粗钢将产生80~120kg的冶金尘泥,其中,含锌粉尘占比为20%~30%,以此推算,每年产出含锌尘泥超2500万吨^[1]。含锌粉尘中含有大量铁、锌、碳等有价元素,具有较大的回收利用价值^[2-3]。钢铁企业大量使用废钢,使得各种除尘灰和污泥中锌的含量大幅提高^[4-6]。经过多年发展,转底炉处理含锌粉尘工艺已经较成熟,但转底炉只适用于处理中低含锌量的尘泥^[7]。在转炉工序添加废钢之后,部分钢铁厂的除尘灰中锌质量分数超过10%,电炉灰中锌质量分数更是超过20%^[8]。转底炉处理含锌尘泥,通常只能搭配低锌原料,使得混合物料中锌质量分数小于3%,这将给生产带来不便和相关经济损失^[9-10]。

针对此问题,张建良等^[11]通过能谱、差热及热重分析等手段证明还原焙烧脱除含锌粉尘中的锌具有可行性,在最佳工艺条件下脱锌率高达99.76%。胡晓军等^[12]研究了含锌粉尘中锌的主要赋存形式及还原过程的热力学行为,结果表明:含锌粉尘中锌的主要赋存形式为 $ZnFe_2O_4$, $ZnFe_2O_4$ 的还原遵 $ZnFe_2O_4-ZnO-Zn$ 的逐级还原过程,且还原温度越高,反应所需的CO体积浓度越低。WU等^[13]考查了转底炉中各段温度、还原性气氛、炉体转速等因素对脱锌效果的影响,结果表明:炉内温度和炉体转速对脱锌率的影响较为显著,当还原段温度降低100K时,脱锌率降低8.25%;当炉体转速由 $0.28^\circ/s$ 增大至 $0.37^\circ/s$ 时,脱锌率降低9.5%。陈子罗等^[14]研究了脱锌过程中含锌粉尘的物相转变过程及其微观结构变化,结果表明:锌的脱除具有良好的动力学条件,

在反应前期即可完成;金属铁产物首先在焦粒和粉尘颗粒的交界处形成,逐步向内扩张。以上研究表明:冶金尘泥中锌主要以 $ZnFe_2O_4$ 和 ZnO 的形式存在,其逐步被还原成锌单质,并被挥发脱除。但目前强化脱锌的手段主要侧重于脱锌的工艺参数和还原行为,对锌单质的挥发过程以及高锌原料中锌残留的原因和解决方法的研究并不充分;此外,强化脱锌还原的手段都采用增加内配碳、提高焙烧温度等方法,这进一步提高了生产成本。

为此,本文通过对现场以及实验室生产的金属化产品进行化学成分、物相组成及微观结构等分析,探究锌残留的原因,探讨外加还原性气流对金属化率和脱锌率的影响及其作用机制,为转底炉工艺脱锌技术的改善提供理论基础。

1 试验原料和方法

1.1 试验原料

试验所用3种含锌粉尘是某钢铁厂产生的高炉除尘灰(高炉出铁口除尘灰)、TRT灰(高炉瓦斯灰进入透平机组发电过程中收集的烟尘)和炼钢污泥,还原剂为CDQ粉(干熄焦),黏结剂为市售改性淀粉。3种含锌粉尘和还原剂的化学成分、粒度组成及物化特性检测如表1~3所示。

由表1可看出:含锌粉尘的TFe质量分数都较高,炼钢污泥和除尘灰都超过50%,具有较高的回收利用价值。高炉除尘灰和炼钢污泥的锌质量分数相对较高,分别达到了7.65%和5.72%,是提供锌的主要来源。TRT灰中C质量分数高达25.24%,可以替代部分还原剂,减少外配焦粉含

表1 原料的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of raw materials

原料名称	TFe	FeO	SiO ₂	CaO	C	Zn	S	P
高炉除尘灰	51.54	57.74	1.53	9.78	2.37	7.65	0.09	0.17
炼钢污泥	52.45	53.60	4.06	6.78	6.18	5.72	0.23	0.20
TRT灰	35.84	12.25	5.79	3.46	25.24	2.97	0.51	0.12
CDQ粉	1.48	1.81	7.22	3.17	85.10	0.03	1.39	0.12

表 2 原料粒度分布

Table 2 Particle size distribution of raw materials

粒度范围 1/mm	粒度范围 2/mm	粒级占比(质量分数) /%			
		高炉除尘灰	TRT 灰	炼钢污泥	CDQ 粉
	≤0.020	79.52	43.70		
≤0.045	(0.020-0.038]	3.80	11.16	1.59	1.19
	(0.038-0.045]	1.89	7.92		
(0.045-0.074]	—	5.37	14.36	33.65	7.31
	(0.074-0.104]			34.86	7.95
	(0.104-0.150]			12.38	9.56
	(0.150-0.208]			11.05	17.16
>0.074	(0.208-0.300]	9.42	22.86	0.06	0.23
	(0.300-0.850]			5.27	21.75
	(0.850-2.000]			0.76	11.81
	>2.000			0.38	23.04

表 3 原料水分及物化特性检测结果

Table 3 Water moisture and physicochemical properties testing results of raw materials

原料名称	水分 /%	堆密度 / (g·cm ⁻³)	真密度 / (g·cm ⁻³)	孔隙率 /%	比表面积 / (cm ² ·g ⁻¹)
炼钢污泥	6.51	1.20	3.53	0.66	1 902.51
高炉除尘灰	0.78	1.24	4.53	0.73	5 669.10
TRT 灰	0.22	0.54	2.46	0.78	3 479.96
CDQ 粉	0.45	0.89	1.93	0.54	2 109.09

量。CDQ 粉为外配的焦粉,固定碳质量分数高达 85.10%。由于原料粒度组成差异较大,选择干筛和湿筛两种筛选方式。由表 2 可看出,四种原料在粒度组成上存在差异,其中高炉除尘灰的粒度最小,<0.020 mm 的粒级质量分数高达 79.52%; TRT 灰次之,<0.020 mm 粒级质量分数为 43.70%; 而炼钢污泥和 CDQ 粉的粒度相对更大,分布在 0.045 ~ 2.000 mm。由表 3 可看出,炼钢污泥在经过压滤、烘干后依然含有 6.51% 的水分,其余原料的含水量均小于 1%; 高炉除尘灰的比表面积最大,TRT 灰次之,CDQ 和炼钢污泥粉较小,其分别为 5 669.10、3 479.96、2 109.09、1 902.51 cm²/g。

1.2 试验方法

试验流程主要包括原料混合、生球压制、干燥、还原焙烧及还原产品指标检测。试验根据现场 3 种含锌粉尘的产量进行混合(配料方案为 58.8% 炼钢污泥、35.3% 高炉炉前灰、5.9% TRT 灰),并额外配加 4.5% CDQ 粉为还原剂 [$n(\text{C})/n(\text{O}) = 0.8$, 物质的量之比]、2.5% 改性淀粉为黏结剂,

混合过程中缓慢加水至混合料水分为 11%。混合料中锌质量分数为 6.36%, TFe 质量分数为 48.45%。采用定制模具和压片机压制团块,设置压片机压力为 20 MPa、保压时间为 3 min,设置压制出的椭圆形团块尺寸为 30 mm × 20 mm × 15 mm; 将生球置于 105 °C 鼓风干燥机中干燥 4 h,选择合适的干团块放置在圆柱形铸铁容器底部,置于高温竖式炉中还原焙烧。试验装置和团块尺寸如图 1 所示。参考现场工况设置还原参数,样品 180 °C 入炉后以 5 °C/min 的速度缓慢升温至 1 260 °C 并保持恒温 15 min。还原结束后,将反应罐取出并立即盖上煤粉以防止还原球团被氧化,并冷却至室温。金属化率和脱锌率的计算公式为

$$\delta = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{n_1}{n_0} \quad (2)$$

式中: δ 为球团的脱锌率,%; m_0 为混合料锌质量分数,%; m_1 为金属化团块锌质量分数,%; ϵ 为

金属化率, %, n_0 为金属化团块全铁质量分数, %; n_1 为金属化团块 Fe 质量分数, %。

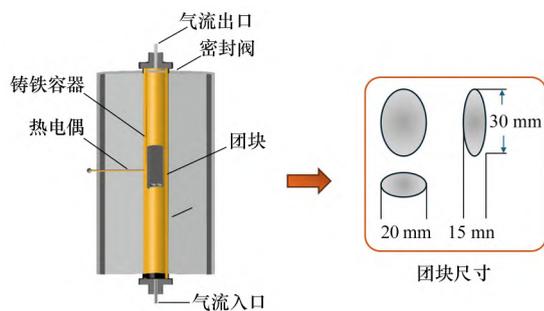


图 1 竖式炉示意

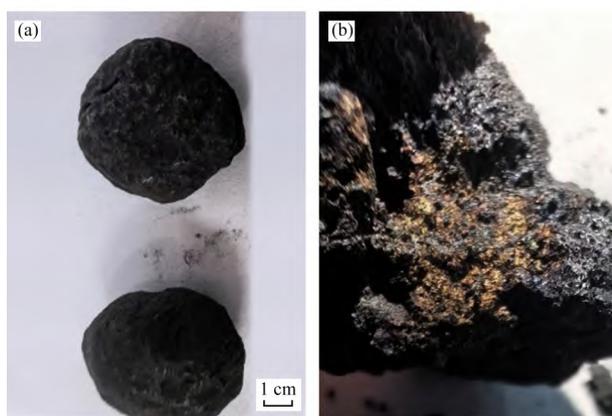
Fig. 1 Schematic diagram of the vertical furnace

2 结果与讨论

2.1 锌残留解析

2.1.1 宏观形貌及化学成分

转底炉工艺适用于处理中低锌含量的尘泥, 该工艺一般需要配加环境灰等低锌冶金尘泥至混合料锌质量分数小于 3%, 但各类尘泥中锌含量受原料影响较大, 其混合料中锌含量的调控难度较高。某钢铁厂原料中锌质量分数提高至 6% 后, 生产指标不佳, 生产的金属化团块难以满足高炉入炉要求^[15]。现场金属化团块产品表面及内部宏观形貌如图 2 所示。由图 2 可见, 该产品外表呈黑色, 有金属光泽, 且由于生产过程中团块发生转运破损及高温粉化现象^[16], 产品形状呈不规则椭圆形。将其压碎后发现其内部存在黄色富集部分, 取出黄色富集部分与整个团块分别做化学成分分



(a) 金属化团块宏观图片; (b) 内部黄色富集部分

图 2 产品宏观形貌

Fig. 2 Macro morphology of the product

析。结果如表 4 所示。由表 4 可见, 金属化产品中黄色部分有明显的锌富集, 相比整体压块中 1.96% 的锌质量分数, 黄色部分中锌质量分数高达 3.80%, 且金属化率仅为 22.70%, 大幅低于整体压块 48.25% 的金属化率。

表 4 产品不同部位化学成分和金属化率对比(质量分数)

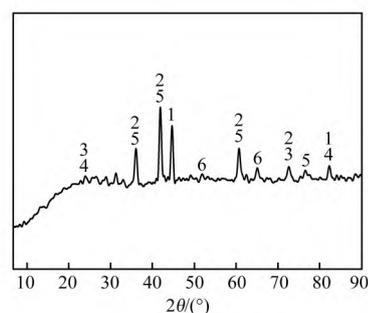
Table 4 Comparison of chemical composition

metallization rate in different parts of the product %

样品名称	Fe	TFe	Zn	金属化率
黄色部分	13.05	57.49	3.80	22.70
金属化团块	31.66	65.61	1.96	48.25

2.1.2 物相组成及微观结构

现场金属化团块产品中黄色富集部分表现出锌含量高和低金属化率的特点。为分析黄色富集部分的物相组成、元素分布和微观结构特性, 取出黄色富集部分样品进行 X 射线衍射和 SEM-EDS 分析, 结果如图 3、4 和表 5 所示。由图 3 可以看出, 黄色部分的主要矿物包括金属铁、浮氏体、氧化锌、锌、方镁石以及锌铁尖晶石。由图 4 可知: 亮白色位置(2 和 4)分布在灰色及白色周边, 铁质量分数为 82% 以上、锌质量分数为 7% 以上, 其为 ZnO 和 Zn 在金属铁上附着; 位置 1 处大面积的金属铁连结成片, 铁元素质量分数高于 92%, 为单质铁, 少量的锌以 ZnO 形式存在; 灰色区域 3 以 O、Si、Ca 为主, 是以硅酸钙为主的脉石成分^[17], 锌质量分数为 3.40%, 以 $ZnFe_2O_4$ 的形式存在。锌在铁连晶与杂质交界处以 Zn 和 ZnO 形式富集。推断黄色部分产生原因: 大面积铁连晶及低熔点液相的产生阻碍了孔隙发展, 使锌无法充



1—金属铁; 2—锌; 3—浮氏体; 4—方镁石;

5—氧化锌; 6—锌铁尖晶石。

图 3 XRD 物相组成分析

Fig. 3 Phase composition analysis of XRD

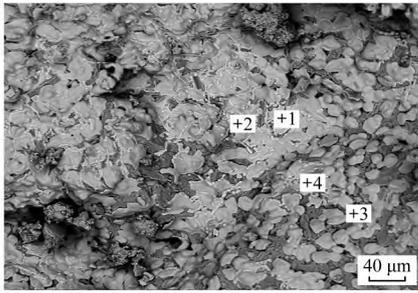


图 4 现场产品黄色富集处 SEM 图像

Fig. 4 SEM image of the yellow enrichment area of the on-site product

表 5 通过 EDS 分析团块中各位置元素组成

Table 5 Composition of elements at various positions in the lump through EDS analysis

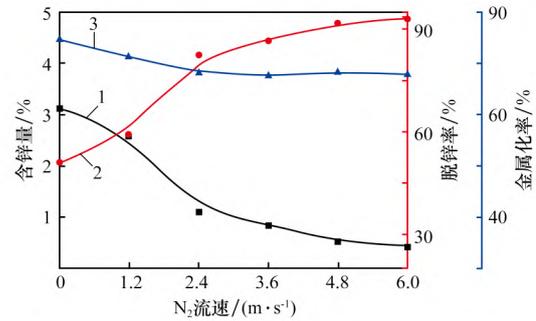
位置	元素组成(质量分数) /%						矿物相
	O	Mg	Si	Ca	Fe	Zn	
1	1.61	0	0.69	1.02	92.42	4.26	ZnO
2	3.24	0	1.59	3.16	84.17	7.85	ZnO 和 Zn
3	29.72	0	17.71	43.88	5.28	3.40	ZnFe ₂ O ₄
4	2.79	0	1.13	2.89	86.18	7.02	ZnO 和 Zn

分挥发, 部分再氧化成 ZnO, 以 ZnO 和 Zn 的形式嵌布在铁连晶和杂质周围。

2.2 还原性气流对还原效果的影响

2.2.1 N₂ 流速的影响

转底炉脱锌主要依靠锌化合物被还原为锌蒸汽(沸点为 907 °C)并向外挥发^[18-20], 但现场样品中检测到单质锌的存在, 说明锌的挥发过程受到阻碍。故在竖式炉内由下往上通入 N₂, 探究 N₂ 流速对还原效果的影响。试验结果如图 5 所示。由图 5 可见, 通入 N₂ 大幅提高了团块的脱锌效果, 当 N₂ 流速由 0 增加到 6 m/s 时, 团块含锌量由 3.127% 降低至 0.433%, 脱锌率从 50.83% 增长至 93.19%, 增加了 42.36 个百分点。这表明还原过程中锌蒸汽的挥发是限制性因素之一。通入 N₂ 加快了锌蒸汽的挥发过程, 极大提高了锌铁分离的效率。同时, 当 N₂ 流速由 0 增加到 6 m/s 时, 随着气体流速的提高, 团块的金属化率小幅度降低, 从 74.69% 降低至 67.92%, 这是因为通入 N₂ 带走了团块表面的还原性气体, 导致团块表面还原性气氛不足, 铁的还原被抑制^[21]。由于现场要求金属化团块含锌量小于 0.5%, 故后续试验中以气体流速为 6 m/s 作为试验条件。



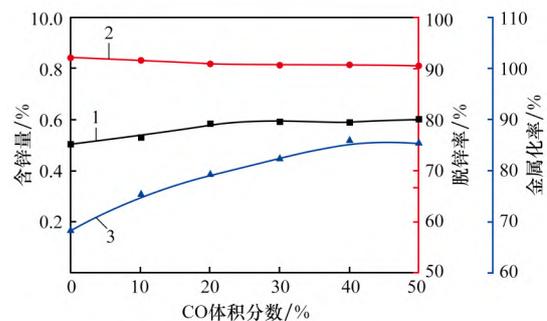
1—含锌量; 2—脱锌率; 3—金属化率。

图 5 气体流速对团块还原脱锌效果的影响

Fig. 5 The effect of gas flow rate on the reduction and de-zincing effect of agglomerates

2.2.2 CO 体积分数的影响

还原性气氛是保障转底炉还原脱锌效果的关键因素之一^[22]。N₂ 的通入损耗了部分由内配碳燃烧产生的 CO, 降低了团块的金属化率, 故在总气体流速为 6 m/s 的条件下, 将部分 N₂ 替换成 CO, 探究 CO 体积分数对还原效果的影响。试验结果如图 6 所示。由图 6 可见, 随着 CO 体积分数的提高, 团块脱锌率保持在 90% 以上, 无显著变化, 说明内配碳源足以供给锌的还原, 限制性环节是锌的挥发过程。当 CO 体积分数从 0 增加到 40% 时, 金属化率由 68.30% 升高至 85.77%; 继续提高 CO 体积分数, 团块的金属化率变化不显著。当气体流速为 6 m/s、CO 体积分数为 40% 时, 团块的脱锌率为 90.75%、金属化率为 85.77%。在此 $n(C)/n(O) = 0.8$ 条件下还原脱锌效果大幅优于现场以及其他研究情况, 达到高效低碳的锌铁分离^[23-25]。本文后续所述气流条件均为 CO 体积分数为 40%、总气体流速为 6 m/s。



1—含锌量; 2—脱锌率; 3—金属化率。

图 6 CO 体积分数对团块还原脱锌效果的影响

Fig. 6 The effect of CO content on the reduction and de-zincing effect of agglomerates

目前,某钢铁厂转底炉出口烟气流速超过 10 m/s, CO 体积分数为 3% 左右。转底炉烟气处理流程: 转底炉出口—沉降室—余热锅炉—布袋除尘器—烟囱。实际生产对转底炉出口烟气仅进行余热回收,并未将其中的 CO 和烟气流速充分利用。其烟气流速大于 6 m/s, 远超促进脱锌的气体流速要求,同时可以采用混合部分煤气的方法提高 CO 体积分数。采取在转底炉料层一定高度处设置高压喷枪,将余热利用后的转底炉出口烟气与部分煤气混合后,由高压喷枪喷入,贯通转底炉料层,形成还原性循环气流。故增加利用转底炉内气体流速和 CO 体积分数的相关装置,具有一定的可行性。

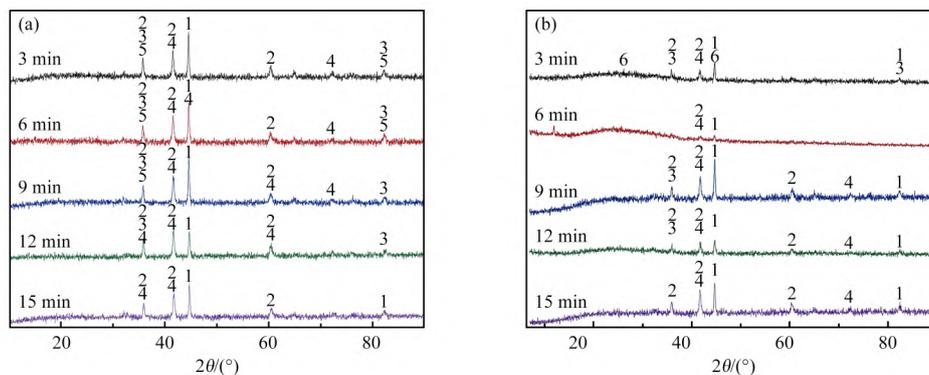
2.3 气流强化脱锌机理

为探讨还原性气流的作用机理,在有气流与无气流两种条件下,对不同焙烧时间处理的样品进行 X 射线衍射(XRD)分析。试验结果如图 7 所示。由图 7(a)可见,在无气流条件下,焙烧后金属化团块的主要物相包括金属铁、浮氏体、锌铁尖晶石、方镁石以及氧化锌。锌铁尖晶石和氧化锌物相仅存在于 3~9 min 的 XRD 图谱中,12 min 的 XRD 图谱中氧化锌物相消失,15 min 的 XRD 图谱中氧化锌和锌铁尖晶石物相都消失。这是因为锌铁尖晶石存在先分解成氧化锌后,被还原为锌单质并挥发的逐步还原过程^[26]。由图 7(b)可以看出,在有气流条件下,焙烧后金属化团块的主要物相包括金属铁、浮氏体、方镁石以及锌铁尖晶石。与无气流条件不同的是,3 min 的 XRD 图

谱中观测到少量的石墨存在,说明还原性气氛的通入延缓了团块内配碳的消耗速度,延长了内配碳的作用时间。

在无气流和气流两种条件下,对焙烧 15 min 后金属化团块样品进行微观结构分析,如图 8 所示。图 8(a)、(b)为团块横截面的宏观图像,图 8(a1)和(a2)、图 8(b1)和(b2)为团块不同位置区域的微观形貌观察及面扫分析结果,表 6 为 1~6 位置处的点扫分析结果。由图 8(a)可以观察到,无气流条件下焙烧样品中含有数个大小不一的黑斑嵌布在致密的金属铁中,而气流条件下焙烧样品中几乎不存在黑斑。由微观结构及元素分析结果可知,图谱中亮白色部分(位置 2 和 5)中铁元素质量分数高达 92% 以上;浅灰色部分(位置 1 和 4)以铁、氧、锌元素为主,为 ZnO 与铁氧化物的混合物;深灰色部分(位置 3 和 6)以 O、Ca、Si、Fe 组成,是硅酸盐等组成的杂质^[27]。由微观结构可以看出:Fe 通常分布在孔隙周围,将中间的灰色浮氏体包裹。这是因为孔隙主要由内配碳消耗产生,铁氧化物先在孔隙周围与碳进行直接还原,反应产生的 CO 向未还原的铁氧化物扩散,铁氧化物继续以间接还原的形式进行还原^[28-30]。

另外,a1 区域在宏观上表现为黑斑,其微观结构为铁氧化物,几乎不含金属铁,锌在此区域显著富集,平均锌质量分数高达 11.04%,明显高于区域 a2 处(团块边缘)的平均锌质量分数(4.43%)。b1 区域为气流条件下焙烧样品横截面中部,平均锌质量分数为 5.92%;b2 区域为气流

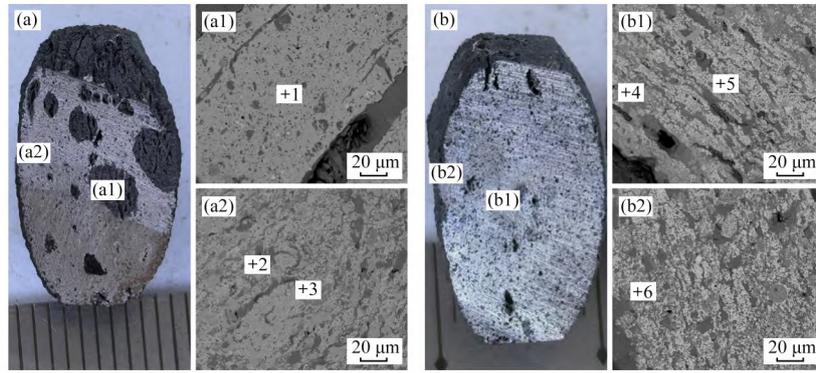


(a) 无气流条件; (b) 气流条件

1—金属铁; 2—浮氏体; 3—锌铁尖晶石; 4—方镁石; 5—氧化锌; 6—石墨。

图 7 还原产物物相随时间变化示意

Fig. 7 Schematic diagram of the phase of the reduction products changing with time



(a) 无气流条件; (b) 有气流条件

(a1)、(a2)、(b1)、(b2) 一相应区域的微观结构; 1~6—位置点。

图 8 焙烧 15 min 后还原产物横截面及其微观形貌示意

Fig. 8 Schematic diagram of the cross-section and micro-morphology of the reduction products after roasting for 15 minutes

表 6 通过 EDS 分析团块中各区域的平均元素组成和主要物相

Table 6 The average elemental composition and main phases of each region in the agglomerate analyzed by EDS

位置	元素组成(质量分数) /%						物相
	O	Mg	Si	Ca	Fe	Zn	
a1	16.58	0.75	12.96	6.05	52.62	11.04	—
a2	14.72	1.16	11.91	9.31	58.48	4.43	—
b1	14.82	1.24	11.28	7.23	59.52	5.92	—
b2	12.51	1.51	9.92	8.31	65.40	2.35	—
1	12.46	3.80	3.27	5.74	66.30	9.07	ZnO
2	1.61	0	0.69	1.02	92.31	4.25	ZnO
3	27.84	0	15.32	41.50	11.37	3.97	ZnFe ₂ O ₄
4	12.84	4.83	0.21	3.23	75.44	3.44	ZnO
5	1.06	0	0	0.31	98.87	0	—
6	28.08	0	15.47	40.12	15.78	0.55	ZnFe ₂ O ₄

条件下焙烧样品横截面边缘处, 平均锌质量分数为 2.35%。金属化团块内部的锌含量高于边缘, 且气流条件下团块各位置锌质量分数均远低于无气流条件。由此, 推断还原性气流促进脱锌的机制如图 9 所示。由图 9 可见, 锌在还原过程中存在由内向外迁移再挥发脱离的过程。在无气流条件下, 液相产生或者铁连晶长大阻碍了锌的挥发通道, 导致锌富集在团块内部; 而气流的存在能够提高锌的挥发速率, 使大部分锌在通道封闭之前完成脱离, 从而提高脱锌率。

3 结论

(1) 含碳、锌团块在被还原的过程中, 大面积铁连晶以及低熔点液相产生的封闭孔隙, 阻碍了锌的挥发通道, 导致锌以 Zn 和 ZnO 的形式附着在孔隙周边。

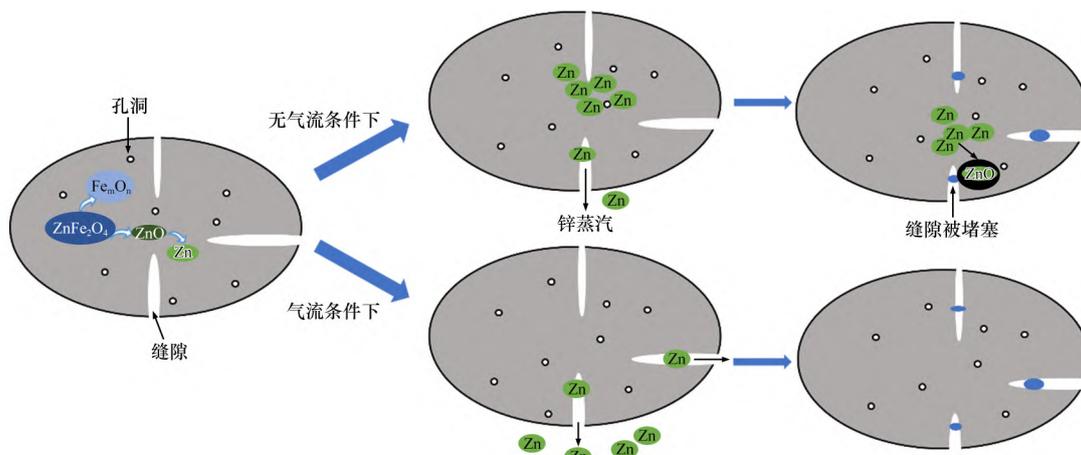


图 9 还原性气流作用机理示意

Fig. 9 Schematic diagram of the mechanism of reducing airflow

(2) 当 N_2 流速从 0 提高到 6 m/s 时,脱锌率由 50.83% 增长至 93.19%,金属化率由 74.69% 降低至 67.92%;当 CO 体积分数由 0 增长到 40% 时,脱锌率维持在 90% 以上,金属化率由 68.30% 增长到 85.77%,说明还原性气流可以促进锌的挥发,同时提高铁的金属化率。

(3) 金属化团块内部的锌含量高于边缘,且在无气流条件下团块各位置的锌含量均远低于无气流条件;在无气流条件下,液相产生或者铁连晶长大阻碍了锌的挥发通道,导致锌富集在团块内部,而还原性气流的存在能够提高锌的挥发速度,促进锌的挥发,同时保证铁的还原效果。

参考文献:

- [1] 毛瑞,张建良,刘征建,等. 钢铁流程含铁尘泥特性及其资源化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(3): 774-785.
MAO Rui, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Characteristic and resource utilization technique of dust and sludge containing iron from steel production process [J]. Journal of Central South University (Science and Technology) 2015 46(3): 774-785.
- [2] 吴胜利,张风杰,张建良,等. 钢厂含锌粉尘基本物性及其成球性能研究[J]. 环境工程, 2015, 33(7): 90-95.
WU Shengli, ZHANG Fengjie, ZHANG Jianliang, et al. Basic characteristics and balling performance of zinc-bearing dust in steel plant [J]. Environmental Engineering, 2015 33(7): 90-95.
- [3] LI X, TANG P, JIANG J, et al. Control of zinc-containing dust agglomerates in basic oxygen furnace flue gas cleaning system [J]. ISIJ International, 2021, 61(3): 763-772.
- [4] 潘刚,刘川俊,周从锐,等. 废钢对转炉除尘灰锌的影响[C]//2020年全国冶金能源环保技术交流会议文集. 唐山:中国金属学会, 2020: 371-376.
PAN Gang, LIU Chuanjun, ZHOU Congrui, et al. The influence of scrap steel on zinc in converter dust removal ash [C]//Proceedings of the 2020 National Metallurgical Energy and Environmental Protection Technology Exchange Conference. Tangshan: Chinese Society for Metals 2020: 371-376.
- [5] 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 [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.
- [6] 韦彦勇,韩磊,刘利军,等. 包钢高炉有害元素现状调查与应对[J]. 包钢科技, 2018, 44(4): 36-38.
WEI Yanyong, HAN Lei, LIU Lijun, et al. Status investigation and solutions for harmful elements of blast furnace of Baotou steel [J]. Science & Technology of Baotou Steel 2018 44(4): 36-38.
- [7] 李博,毛艳丽,曲余玲,等. 转底炉技术及其在含铁尘泥处理中的应用[C]//第八届中国金属学会青年学术年会论文集. 沈阳:中国金属学会, 2016: 335-337.
LI Bo, MAO Yanli, QU Yuling, et al. Rotary hearth furnace technology and its application in the treatment of iron containing dust and sludge [C]//Proceedings of the 8th Youth Academic Conference of the Chinese Society of Metals. Shenyang: Chinese Society for Metals, 2016: 335-337.
- [8] MAO R, WANG F, XU Y, et al. Preparation process of cold bonded pellets with iron-bearing dust and sludge from steel production process [J]. Metallurgical Research & Technology 2021, 118(6): 602.
- [9] 张建良,李洋,袁骥,等. 中国钢铁企业尘泥处理现状及展望[J]. 钢铁, 2018, 53(6): 1-10.
ZHANG Jianliang, LI Yang, YUAN Xiang, et al. Present situation and prospect of dust treatment in Chinese iron and steel enterprises [J]. Iron & Steel 2018 53(6): 1-10.
- [10] 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; 39.
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; 39.
- [11] 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.
- [12] 胡晓军,刘俊宝,郭培民,等. 铁酸锌气体还原的热力学分析[J]. 工程科学学报, 2015, 37(4): 429-435.
HU Xiaojun, LIU Junbao, GUO Peimin, et al. Thermodynamic analysis of the reduction of zinc ferrite with CO-CO₂ [J]. Chinese Journal of Engineering 2015,

- 37(4):429-435.
- [13] WU Y L,JIANG Z Y,ZHANG X X,et al. Process optimization of metallurgical dust recycling by direct reduction in rotary hearth furnace[J]. Powder Technology 2018, 326: 101-113.
- [14] 陈子罗,张建良,刘征建,等. 含锌粉尘团块脱锌行为研究[J]. 中南大学学报(自然科学版) 2017, 48(7): 1704-1711.
CHEN Ziluo,ZHANG Jianliang,LIU Zhengjian,et al. Research on dezincification of zinc-bearing dusts composite briquettes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2017,48(7): 1704-1711.
- [15] 赵朔. 内配碳含锌尘泥球团的还原行为研究[D]. 唐山: 华北理工大学 2018.
ZHAO Shuo. Study on reduction behavior of carbon containing zinc dust and sludge pellets [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology 2018.
- [16] 郑锡瀚,陈铁军,万军营,等. 中国转底炉处理含锌尘泥生产中含碳球团粉化原因解析[J]. 钢铁研究学报 2024, 36(5): 560-567.
ZHENG Xihan,CHEN Tiejun,WAN Junying,et al. An investigation into causes of degradation of carbon-containing pellet in production of zinc-containing dust sludge treated in rotary hearth furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research 2024, 36(5): 560-567.
- [17] 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.
YANG Tao,LEI Jie,REN Xiaojian,et al. Preparation and production process optimization of carbon-bearing pellets for rotary bottom furnace[J]. Iron & Steel 2023, 58(4): 157-166.
- [18] PU G Q,DU W T,CHENG H M,et al. Research on biomass waste utilization for synergetic reduction of stainless steel sludge and zinc-containing dust[J]. Journal of Sustainable Metallurgy 2024, 10(1): 83-95.
- [19] 杨雪峰,储满生,姜涛. 转底炉生产直接还原铁的工业性试验[J]. 钢铁 2009, 44(12): 17-20.
YANG Xuefeng,CHU Mansheng,JIANG Tao. Industrial trial on direct reduction iron production by rotary hearth furnace[J]. Iron & Steel 2009, 44(12): 17-20.
- [20] 罗宝龙,栗克建,郭秀健. 钢铁厂含锌铁粉尘资源化回收技术研究[J]. 资源再生 2022(7): 51-54.
LUO Baolong,LI Kejian,GUO Xiujian. Research on high efficiency recycling technology of zinc containing iron dust in steel plant [J]. Resource Recycling,2022(7): 51-54.
- [21] 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 study on the treatment of metallurgical zinc-containing dust sludge by rotary hearth furnace. Chongqing: Chongqing University 2012.
- [22] 李卫国,赵志坚,林培芳,等. 转底炉还原过程金属化球团强度变化规律[J]. 河北冶金 2024(10): 40-43;63.
LI Weiguo,ZHAO Zhijian,LIN Peifang,et al. The strength variation of metallized pellets during the reduction process in a rotary hearth furnace[J]. Hebei Metallurgy 2024(10): 40-43;63.
- [23] OMRAN M,FABRITIUS T. Utilization of blast furnace sludge for the removal of zinc from steelmaking dusts using microwave heating [J]. Separation and Purification Technology 2019, 210: 867-884.
- [24] WANG D Z,ZHU D Q,PAN J,et al. A high-efficiency separation process of Fe and Zn from zinc-bearing dust by direct reduction [J]. Journal of Iron and Steel Research International 2022, 29(10): 1559-1572.
- [25] 彭亚环,苗壮,林培芳,等. 转底炉直接还原含锌尘泥的工艺参数优化[J]. 河北冶金 2022(1): 14-21.
PENG Yahuan,MIAO Zhuang,LIN Peifang,et al. Optimization of process parameters for direct reduction of zinc containing dust and mud in rotary hearth furnace [J]. Hebei Metallurgy 2022(1): 14-21.
- [26] LI Y,LIU L,WANG J S,et al. Preparation of active zinc oxide from zinc-containing dust and synergistic recovery process of valuable elements[J]. Separation and Purification Technology 2025, 354: 128820.
- [27] 张高鹏. 转底炉工艺处理转炉炼钢粉尘的相关基础研究[D]. 重庆: 重庆大学 2020.
ZHANG Gaopeng. Basic research on the treatment of converter steelmaking dust by rotary hearth furnace process [D]. Chongqing: Chongqing University 2020.
- [28] MISHRA S,ROY G G. Effect of amount of carbon on the reduction efficiency of iron ore-coal composite pellets in multi-layer bed rotary hearth furnace (RHF) [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(4): 2347-2356. (下转第 148 页)

- [7] KIM Y ,WORRELL E. International comparison of CO₂ emission trends in the iron and steel industry [J]. Energy Policy 2002 30(10) : 827 – 838.
- [8] 徐润生 张雨晨 张建 等. 钢铁冶金固废固化 CO₂ 研究现状及趋势 [J]. 钢铁研究学报 ,2023 ,35 (7) : 779 – 789.
XU Runsheng ZHANG Yuchen ZHANG Jianliang et al. Status and trends of steel metallurgical solid waste solidification CO₂ research [J]. Journal of Iron and Steel Research 2023 35(7) : 779 – 789.
- [9] PAN S Y ,CHEN Y H ,FAN L S et al. CO₂ mineralization and utilization by alkaline solid wastes for potential carbon reduction [J]. Nature Sustainability 2020 3(5) : 399 – 405.
- [10] LIU W Z ,TENG L M ,ROHANI S ,et al. CO₂ mineral carbonation using industrial solid wastes: A review of recent developments [J]. Chemical Engineering Journal , 2021 416: 129093.
- [11] PARK A A , FAN L S. CO₂ mineral sequestration: Physically activated dissolution of serpentine and pH swing process [J]. Chemical Engineering Science 2004 , 59(22/23) : 5241 – 5247.
- [12] XU R S ,ZHANG Y C ,ZHANG J L ,et al. Research on the leaching of calcium ions from de-vanadiumized steel slag for indirect CO₂ mineral sequestration: Thermodynamics , kinetics , and parameter optimization [J]. Metallurgical and Materials Transactions B ,2024 , 55(2) : 877 – 890.
- [13] DE WINDT L ,CHAURAND P ,ROSE J. Kinetics of steel slag leaching: Batch tests and modeling [J]. Waste Management 2011 31(2) : 225 – 235.
- [14] 黄小葳. 阿伦尼乌斯活化能的统计分析 [J]. 首都师范大学学报(自然科学版) ,1995 ,16(1) : 62 – 66.
HUANG Xiaowei. Statistical thermodynamic analysis of Arrhenius activation energy [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition) ,1995 , 16(1) : 62 – 66.
- [15] 金会心 李军旗 吴复忠. 含稀土磷矿酸解动力学及稀土浸出机理 [J]. 北京科技大学学报 2011 33(9) : 1071 – 1078.
JIN Huixin ,LI Junqi ,WU Fuzhong. Acidolysis kinetics and RE leaching mechanisms of RE-bearing phosphorite ores [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing 2011 33(9) : 1071 – 1078.
- [29] 王琼. 含铁尘泥还原脱锌过程的研究 [D]. 唐山: 河北联合大学 2014.
WANG Qiong. Research on zinc removal from metallurgy dust containing iron [D]. Tangshan: Hebei United University 2014.
- [30] WANG W A ,QIU G X ,WANG J L ,et al. Effect of CaO on zinc migration mechanism and kinetics during zinc ferrite reduction [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 2023 33(9) : 2832 – 2842.

(上接第 140 页)

武汉科技大学资源与环境工程学院介绍

武汉科技大学资源与环境工程学院涵盖矿业工程、安全科学与工程、环境科学与工程、地理学四个一级学科; 拥有矿业工程、安全科学与工程两个一级学科博士点, 矿冶环境工程二级学科博士点; 建有矿业工程、安全科学与工程两个博士后流动站。矿业工程学科入选湖北省“双一流”国内一流学科建设。学院拥有“国家环境保护矿冶资源利用与污染控制重点实验室”、“冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室”等科研机构, 设有矿物加工工程、资源工程、安全科学与工程、环境科学与工程四个系和矿业工程实验中心、安全工程实验中心、环境工程教学示范中心。学院学科设置具有明显交叉优势, 在特色钒资源高效提取与深加工、矿物深加工及精细加工、深部地下金属矿山开采及灾害防控、矿山安全与灾害防治、矿冶过程工艺减排及资源再生利用、工业烟气污染控制、矿冶生态环境修复理论与技术、矿冶废水处理与资源化等方面的理论研究与工程应用具有鲜明特色。近年来, 获得国家科技进步二等奖 2 项、国家技术发明二等奖 1 项, 省部级技术发明、科技进步一等奖及其他科技成果奖 26 项, 获国家授权专利 160 余件, 承担国家“863”计划、国家科技支撑计划、国家重大研发计划项目、国家自然科学基金及其他国家级科研项目 56 项; 承担各类横向科研 600 余项; 在国内外期刊发表学术论文 1200 余篇, 其中 SCI、EI 收录近 460 篇; 出版学术专著 18 部。