

含锌尘泥球团直接还原的影响因素与参数优化

李圣辉, 任 煜, 张江鸣

(宝武环科武汉金属资源有限责任公司, 湖北 武汉 430080)

摘要:为解决工业化生产中转底炉球团金属化率偏低的问题,探究含锌尘泥球团直接还原的影响因素和最佳参数,本文通过设计五因素五水平正交试验,分析不同空煤比、 $n(C)/n(O)$ (物质的量之比)、还原温度、炉底转速对球团金属化率的影响,获得最佳的还原工艺参数,并开展不同入炉生球量对比验证试验。结果表明:转底炉还原二区温度和 $n(C)/n(O)$ 是影响直接还原的显著因素,对还原过程的影响远大于空煤比、还原一区温度和炉底转速。此外,球团金属化率与入炉生球量关系密切,随着入炉生球量的增加,球团金属化率逐渐下降。在空煤比为2.2、 $n(C)/n(O)$ 为1.4、还原一区温度为1 250 ℃、还原二区温度为1 260 ℃、炉底转速为25 min的最佳还原参数下进行生产实践,在满足设计指标的前提下,即入炉生球量 ≥ 26 t/h时,球团的金属化率明显提高,从2023年的67.10%提升至2024年的72.16%。本文研究成果可为转底炉生产中提升含锌尘泥球团的金属化率提供技术参考。

关键词:直接还原; 转底炉; 金属化率; 正交试验; 冶金尘泥

中图分类号:TF09

文献标志码:A

文章编号:1000-8764(2025)04-0114-08

doi:10.13403/j.sjqt.2025.04.065

Influencing factors and parameters optimization of direct reduction of zinc-containing dust pellets

LI Shenghui, REN Yu, ZHANG Jiangming

(Baowu Environmental Technology Wuhan Metal Resources Co., Ltd., Wuhan 430080, Hubei, China)

Abstract: In order to solve the problem of low metallization rate of pelletization in the rotary bottom furnace in industrial production, and explore the influencing factors and optimal parameters of direct reduction of zinc-containing dust pellets, the effects of different empty coal ratios, $n(C)/n(O)$ (ratio of substances), reduction temperature and furnace bottom speed on pelletization rate are analyzed by designing a five-factor five-level orthogonal test, the optimal reduction process parameters are obtained, and comparative verification tests of different amount of fresh pellets in the oven are proposed. The results show that the temperature of the second reduction zone and $n(C)/n(O)$ of the rotary bottom furnace are significant factors affecting the direct reduction, and the influence on the reduction process is much greater than that of the empty coal ratio, the temperature of the first reduction zone and the speed of the rotary bottom furnace. In addition, the pellet metallization rate is closely related to the amount of fresh pellets in the furnace, and with the increase of the amount of fresh pellets in the furnace, the metallization rate of pellets gradually decreases. The production practice is carried out under the optimal reduction parameters of 2.2 empty coal ratio, 1.4 $n(C)/n(O)$, 1 250 ℃ in the first zone, 1 260 ℃ in the second zone, and 25 min in the rotary bottom speed of the furnace. Under the premise of meeting the design indicators, that is, when the amount of pellets entering the furnace is ≥ 26 t/h, the metallization rate of pellets is increased significantly, from 67.10% in 2023 to 72.16% in 2024. Under the premise of meeting the design indicators, that is, when the amount of fresh pellets in the furnace is ≥ 26 t/h, the metallization rate of pellets is increased significantly, from 67.10% in 2023 to 72.16% in 2024. The research results can provide a technical reference for improving the metallization rate of zinc-containing dust pellets in the production of rotary bottom furnaces.

收稿日期: 2024-07-29; 修回日期: 2024-10-18

作者简介: 李圣辉(1986—),男,工程师,从事钢铁冶金固废处置和绿色低碳冶金方面的工作。

Key words: direct reduction; rotary bottom furnace; metallization rate; orthogonal test; metallurgical dust

据统计,我国每年钢铁生产过程中产生的含铁、锌尘泥固废量约为3 700万吨^[1],其主要包括高炉瓦斯灰或泥、高炉重力灰、高炉布袋灰、炼钢除尘灰、炼钢污泥等。这些尘泥中含有铁、碳等有价值元素,但同时也含有锌等有害元素。长期以来,这些尘泥大部分直接返回烧结利用,在炼铁工序内部循环。这导致碱金属元素富集,特别是锌在高炉内易蒸发变成锌蒸汽,侵入高炉炉衬,使其受到侵蚀破坏;此外,锌元素易与硅铝氧化物生成炉瘤,阻碍炉内气体流通,从而减少铁水产量,堵塞煤气系统,影响高炉顺行^[2]。因此,有必要将这些有害杂质去除后再返回钢铁生产流程^[3]。

某钢铁厂在平衡自身固废规模和性能的基础上,综合考虑回转窑和转底炉工艺的优缺点,建设两座年处理量为20万吨的转底炉,采用直接还原方法处理含铁、锌较高的尘泥,实现铁、锌元素回收^[4-5]。目前国内建造的转底炉约有29座,其中宝武环科运营了9座,主要技术来源为北京科技大学、中冶赛迪、新日铁、钢铁研究总院、神雾科技集团北京研究院等单位。转底炉工艺流程紧凑,自动化程度高且环保措施良好,但在工业化应用中遇到诸多问题,如球团的金属化率及强度偏低、粉化率偏高等^[6]。马钢转底炉通过稳定生球含碳量、入炉量,优化烘干和还原参数,使球团的金属化率由50%左右提升到了65%以上,但生球入炉量为17~25 t/h,未达设计产能^[7];河钢转底炉采用造球—直接还原和压球—直接还原工业试验得到的球团金属化率分别为57.01%~60.94%和60%~80%,但金属化率不稳定且成品粉化率过高^[8];日本朝日工业电炉粉尘转底炉已稳定运行15 a,通过多次设备改进、优化生产参数,其还原产品的金属化率稳定在60%~70%^[9];山钢日照转底炉因原料带来的脉石与金属化球团产生复杂的低熔点硅酸铁导致金属化率偏低,通过在助燃空气加入30%的富氧气后金属化率提升了7%^[10]。国内其他处理冶金固废的转底炉,如新钢、宝钢湛江、中南钢铁等转底炉球团的金属化率也因原料、设备和操作等原因未

能稳定达到设计指标,因此有必要开展直接还原参数研究来提高转底炉球团的金属化率。

国内研究人员对转底炉直接还原的研究主要集中在原料结构、堆料层数、 $n(C)/n(O)$ (物质的量之比)、还原气氛、焙烧温度和反应时间上,并取得了较好的试验结果^[11-14],但在工业方面的研究和应用较少。为此,本文通过设计五因素五水平正交试验,分析不同空煤比、 $n(C)/n(O)$ 、还原温度、炉底转速对球团金属化率的影响,获得最佳的还原工艺参数并进行试验验证,以期为同行提供参考与借鉴。

1 转底炉工艺流程

转底炉工艺流程如图1所示。将烘干后的各类含铁、锌污泥与各类高炉粉尘、CDQ粉、黏结剂按一定比例配料,采用胶带机将混合料输送至强力混合机内加水混匀,通过定量给料秤将混合料送入压球机[生球粒度为28 mm×25 mm×15 mm,生球落下强度 ≥ 4 次/(0.5 m)],筛分后将生球送入链算机进行烘干,然后通过振动布料器将干球均匀布到转底炉的环形炉床上进行还原反应。生球中的氧化铁大部分被还原为金属铁,同时氧化锌被还原为锌并挥发进入烟气中,最后被氧化成氧化锌粉末。还原后的金属化产品进入圆筒冷却机冷却后经过筛分,合格的金属化产品球进入成品料仓储存供高炉、转炉使用,筛下金属粉进入预处理系统回用。转底炉高温烟气经过沉降室、余热锅炉后,由袋式除尘器净化外排,氧化锌粉在余热回收过程中被袋式除尘器逐级回收。

2 试验原料与方法

2.1 试验原料

试验原料来自某钢铁厂转底炉,不同种类污泥的配比以及污泥、生球的主要化学成分如表1所示。由表1可见:转底炉主要原料为炼铁、炼钢及冷轧工序产生的各类粉尘和污泥,其中转炉炼钢污泥、冷轧中性污泥和高炉TRT灰是高锌原料,CDQ粉和TRT灰的含碳量较高。转底炉配料

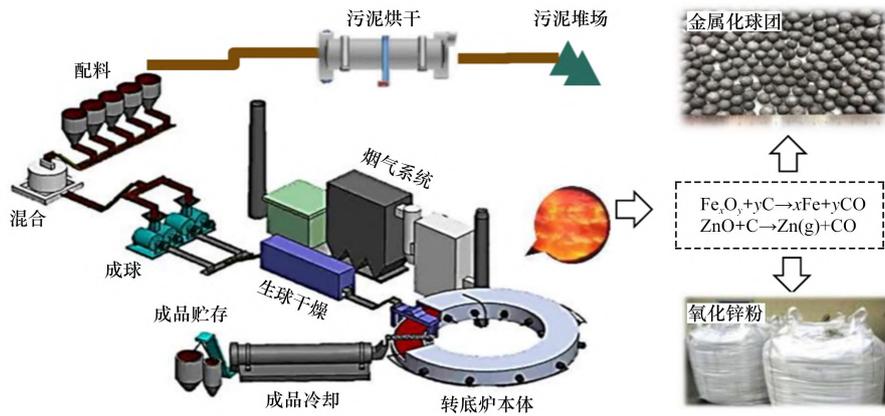


图 1 转底炉工艺流程

Fig. 1 Process flow chart of rotary hearth furnace

表 1 原料配比及主要化学成分(质量分数)

Table 1 Ratio and main chemical composition analysis of raw materials

%

原料名称	主要化学成分							配比
	TFe	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Zn	C	
炼钢污泥	56.40	11.07	2.51	4.81	1.36	4.93	3.80	50
中性污泥	36.30	9.84	0.47	4.86	1.91	3.31	4.30	4
高炉布袋灰	60.64	4.92	0.83	4.20	1.59	0.83	9.10	16
高炉槽下灰	43.42	8.09	1.39	6.01	2.41	0.32	15.02	20
TRT 灰	22.92	4.07	0.82	7.13	3.68	2.64	26.94	10
CDQ 粉	—	—	—	—	—	—	80.78	0~10
生球	48.31	8.58	1.81	4.88	1.68	3.07	—	—

以平衡铁、锌为基本原则，转炉炼钢污泥配比为 50%，炼铁各类粉尘配比为 46%，剩余 4% 为冷轧中性污泥。试验根据需要需要通过增减 CDQ 粉配比来调节生球配碳量。

2.2 试验方案

不考虑各因素之间的交互作用，设计五因素五水平进行直接还原试验研究，选用 L₂₅(5⁶) 正交表开展试验，以金属化率作为直接还原过程评价指标。各因素、水平的取值如表 2 所示。试验结果越大，还原效果越好。

以含锌尘泥球团作为直接还原研究对象，稳定原料品种和生球成分，控制入炉生球量为 20 t/h、生球水分质量分数 < 1%、转底炉出口烟气负压为 1 Pa，单次试验时间为 6 h。通过调整空煤比、 $n(C)/n(O)$ 、还原一区温度、还原二区温度、炉底转速等主要生产参数，改变还原条件与工况，并使用金属化率作为评价指标，探索影响直接还原的显著因素及各因素的最佳取值区间；最后进

行验证试验，获得最佳还原参数下的球团金属化率。

2.3 试验平台

试验在某钢铁厂转底炉生产线开展，转底炉的炉体结构如图 2 所示。该转底炉中径为 23 m，炉底宽度为 5.1 m，炉底转速为 15~40 min/r，炉底机械装置为 4 台。由图 2 可见，经过干燥的球团由振动布料器均匀布入移动炉床上，随炉底机械作圆周运动并在烧嘴提供的辐射热环境下进行直接还原反应，最后通过出料螺旋排出炉体。

转底炉本体所用燃料为转炉煤气，煤气压力 > 9 kPa，热值 > 6 500 kJ/Nm³。转底炉加热还原过程采用四段式煤气系统，从装料至出料依次为加热段、还原一段、还原二段、还原三段(共计 4 段)，每段均设置烧嘴侧向供热，加热段设置空气供风烧嘴。考虑转炉煤气热值不足，需对入炉煤气和助燃空气进行预热。转底炉燃烧烧嘴共设置 40 台，包括加热段 7 台(2 内、5 外)、还原一

表2 正交试验方案设计
Table 2 Design scheme of orthogonal test

试验 方案 编号	因素				
	空煤 比	$n(C)/n(O)$	还原一区 温度/℃	还原二区 温度/℃	炉底转速/ ($\text{min}\cdot\text{r}^{-1}$)
1 [#]	2.0	1.0	1 050	1 230	21
2 [#]	2.0	1.2	1 100	1 240	23
3 [#]	2.0	1.4	1 150	1 250	25
4 [#]	2.0	1.6	1 200	1 260	27
5 [#]	2.0	1.8	1 250	1 270	29
6 [#]	2.2	1.0	1 100	1 250	29
7 [#]	2.2	1.2	1 150	1 260	21
8 [#]	2.2	1.4	1 200	1 270	23
9 [#]	2.2	1.6	1 250	1 230	25
10 [#]	2.2	1.8	1 050	1 240	27
11 [#]	2.4	1.0	1 150	1 270	27
12 [#]	2.4	1.2	1 200	1 230	29
13 [#]	2.4	1.4	1 250	1 240	21
14 [#]	2.4	1.6	1 050	1 250	23
15 [#]	2.4	1.8	1 100	1 260	25
16 [#]	2.6	1.0	1 200	1 240	25
17 [#]	2.6	1.2	1 250	1 250	27
18 [#]	2.6	1.4	1 050	1 260	29
19 [#]	2.6	1.6	1 100	1 270	21
20 [#]	2.6	1.8	1 150	1 230	23
21 [#]	2.8	1.0	1 250	1 260	23
22 [#]	2.8	1.2	1 050	1 270	25
23 [#]	2.8	1.4	1 100	1 230	27
24 [#]	2.8	1.6	1 150	1 240	29
25 [#]	2.8	1.8	1 200	1 250	21

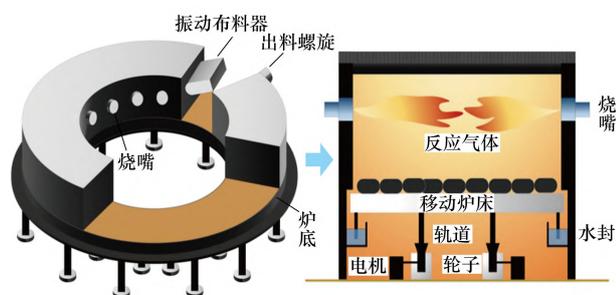


图2 转底炉炉体结构

Fig. 2 Structure diagram of rotary hearth furnace

段11台(5内、6外)、还原二段11台(5内、6外)、还原三段11台(5内、6外);在加热段设置供风烧嘴5台(2内、3外);预热空气温度为420~480℃,预热煤气温度为300~350℃。

3 试验结果与讨论

3.1 正交试验结果分析

正交试验结果、均值和极差分析如表3、4所示。根据表4的极差计算结果,在变化的水平范围内,可以看出影响直接还原过程的因素主次顺序:还原二区温度> $n(C)/n(O)$ >空煤比>还原一区温度>炉底转速。

3.1.1 空煤比对球团金属化率的影响

根据表2、3,可以计算出当空煤比为2.0、2.2、2.4、2.6、2.8时,球团金属化率的均值分别为58.314%、71.784%、65.974%、67.406%、63.194%。可以看出,随着空煤比从2.0逐渐升高到2.8,球团的金属化率先上升后下降。由于转炉煤气为直接还原反应提供热量,而当空煤比为2.0时,助燃空气中的氧不足以使CO完全燃烧,无法释放足够的热量维持转底炉各区温度来支撑直接还原反应的快速进行;当空煤比升高到2.2时,转炉煤气充分燃烧且供热充足,促使碳的气化反应速率加快,球团内部CO体积浓度快速升高,过剩系数增大,直接还原过程得以快速进行;继续提高空煤比,球团的金属化率呈下降趋势,这主要是随着还原反应的进行,球团中含碳量逐渐减少,而烟气中含氧量逐步上升,球团“再氧化”速率逐渐超过“自还原”速率,导致球团的金属化率下降。

3.1.2 $n(C)/n(O)$ 对球团金属化率的影响

根据表2、3,可以计算出当 $n(C)/n(O)$ 为1.0、1.2、1.4、1.6、1.8时,球团金属化率的均值分别为61.780%、63.104%、76.658%、73.126%、52.004%。可以看出,随着 $n(C)/n(O)$ 从1.0逐步上升至1.8,球团的金属化率上升后下降,在 $n(C)/n(O)$ 为1.4时金属化率达到最高值76.658%。说明在 $n(C)/n(O)$ 低于1.4时,球团配碳量不足,碳的转化效率和CO体积浓度不足以使 $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ 的还原过程充分进行,导致球团金属化率不高;

表 3 正交试验结果(质量分数)

Table 3 Orthogonal test results

试验编号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]	11 [#]	12 [#]	13 [#]
金属化率	24.47	43.71	80.85	79.81	62.73	73.26	83.33	86.11	75.55	40.67	75.80	37.38	72.14
试验编号	14 [#]	15 [#]	16 [#]	17 [#]	18 [#]	19 [#]	20 [#]	21 [#]	22 [#]	23 [#]	24 [#]	25 [#]	
金属化率	77.80	66.75	55.45	74.55	86.72	84.93	35.38	79.92	76.55	57.47	47.54	54.49	

表 4 正交试验均值和极差

Table 4 Mean and range of orthogonal tests

参数	因素				
	空煤比 $n(C)/n(O)$	还原一区 温度	还原二区 温度	炉底 转速	
$K_1/\%$	58.314	61.780	61.242	46.050	63.872
$K_2/\%$	71.784	63.104	65.224	51.902	64.584
$K_3/\%$	65.974	76.658	64.580	72.190	71.030
$K_4/\%$	67.406	73.126	62.648	79.306	65.660
$K_5/\%$	63.194	52.004	72.978	77.224	61.526
$R/\%$	13.470	24.654	11.736	33.256	9.504

注: $K_1 \sim K_5$ 分别为对应水平试验指标的平均值,% ; R 为极差,%。

在 $n(C)/n(O)$ 高于 1.4 时,随着配碳量的升高,入炉初期碳的气化反应速率过快,球团内外压差过大,导致球团爆裂粉化升高,碳的燃烧反应加剧;伴随着脱碳反应进行,炉内还原气氛变差,铁氧化物还原进程受阻,球团金属化率下降。

3.1.3 还原一区温度对球团金属化率的影响

根据表 2、3,可以计算出当还原一区温度为 1 050、1 100、1 150、1 200、1 250 °C 时,球团金属化率的均值分别为 61.242%、65.224%、64.580%、62.648%、72.978%。可以看出,当还原一区温度从 1 050 °C 上升到 1 200 °C 时,球团金属化率变化不大,当温度继续上升到 1 250 °C 时,球团金属化率显著提升,说明随着炉内加热温度的升高,球团吸热使自身温度不断升高。由于铁氧化物的还原反应逐级进行,且反应前期的表观活化能较高,在加热温度上升到 1 200 °C 的过程中铁氧化物的还原反应受碳的气化反应和 CO 还原速度的影响,主要反应过程为 $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO$ 。在加热温度上升到 1 250 °C 时,球团吸热升温,碳的气化反应速率加快,使铁氧化物还原生成的 CO_2 能够迅速转化为 CO,碳的转化效率和 CO 的过剩系数大幅上升。大量 CO 包覆在球团表

面并逐层向内扩散,加快了铁氧化物的还原反应速率,这期间主要反应过程为 $Fe_3O_4 \rightarrow FeO$ 与 $FeO \rightarrow Fe$ 并行,球团金属化率快速上升。

3.1.4 还原二区温度对球团金属化率的影响

根据表 2、3,可以计算出当还原二区温度为 1 230、1 240、1 250、1 260、1 270 °C 时,球团金属化率的均值分别为 46.050%、51.902%、72.190%、79.306%、77.224%,试验结果验证了快速还原过程中温度变化对球团金属化率的影响。当还原二区温度在 1 250 °C 以下时,球团金属化率只有 50% 左右,随着还原温度升高到 1 250 °C,球团金属化率迅速达到 72.190%,继续升高还原温度至 1 260 °C,金属化率达到峰值 79.306%,再升高还原温度,金属化率不再提升,说明随着球团温度的不断升高,加热温度与球团温度的差值逐渐缩小,球团内外温差变小,还原反应从化学反应控制阶段向传热控制阶段转变,随着还原反应进程的逐步加深,球团吸热量逐渐减少,直至还原反应趋于停滞。

3.1.5 炉底转速对球团金属化率的影响

根据表 2、3,可以计算出当炉底转速为 21、23、25、27、29 min/r 时,球团金属化率的均值分别为 63.872%、64.584%、71.030%、65.660%、61.526%。可以看出,当炉底转速从 21 min/r 延长至 25 min/r 时,球团金属化率逐步上升至 71.030%,继续延长炉底转速至 29 min/r,球团金属化率反而逐渐下降。说明当炉底转速低于 25 min/r 时,球团在主还原阶段的还原时间不足,直接还原过程尚未达到顶峰;而当炉底转速高于 25 min/r 时,高温区剧烈的还原反应使球团内配碳逐渐消耗殆尽,此时球团金属化率达到峰值,继续延长球团在高温区的停留时间,球团中的金属铁与高温烟气中的 CO_2 发生氧化反应,使金属铁逐渐被氧化从而降低了球团金属化率。

3.2 正交试验的方差分析(F 检验)

对表3、4中正交试验结果进行方差数据计算和处理,可以得到表5,以确定各因素对试验效果影响的显著性以及合理性。

通过 F 值与 F 临界值的比较,可以得出各因素的显著性。由表5可知,还原二区温度和 $n(\text{C})/n(\text{O})$ 的 F 值大于 F 临界值,表明还原二区温度和 $n(\text{C})/n(\text{O})$ 对球团金属化率影响显著,而空煤比、还原一区温度和炉底转速对球团金属化率影响不显著。其中,还原二区温度影响最为显著,其次是 $n(\text{C})/n(\text{O})$,再次为空煤比、还原一区温度和炉底转速等非显著因素。本文检验与极差分析中各因素对球团金属化率影响的主次顺序保持一致。

表5 正交试验的方差分析

Table 5 Analysis of variance for orthogonal test

因素	偏差平方和	自由度	F 值	F 临界值	显著性
空煤比	500.83	4	2.37	2.78	—
$n(\text{C})/n(\text{O})$	1 921.20	4	9.10	2.78	*
还原一区温度	414.85	4	1.97	2.78	—
还原二区温度	4 679.42	4	22.18	2.78	*
转速	248.76	4	1.19	2.78	—
试验误差	211.02	4	—	—	—
总误差	7 976.08	24	—	—	—

注: $F_{0.05}(4,24) = 2.78$, *表示因素显著。

4 验证试验

上述正交试验已经得出直接还原参数的最佳取值区间,即还原二区温度为 $1\ 260\ ^\circ\text{C}$ 、 $n(\text{C})/n(\text{O})$ 为1.4、空煤比为2.2、还原一区温度为 $1\ 250\ ^\circ\text{C}$ 、炉底转速为25 min。现将优化参数在不同工况下进行试验验证,按入炉生球量为20、22、24、26、28 t/h等5种工况各试验6 h,以金属化率为评价标准。试验结果如表6所示。由表6可见,随着入炉生球量的增加,球团在高度方向的布料层数增多,反应初期受烧嘴燃烧产生的高温辐照影响,上层球团的直接还原反应快速发生,越往下球团离辐射热源越远,传热效率下降。温度降低使碳的气化反应速率下降,还原反应进程被限制,但随着反应的深入进行,受中下层球团

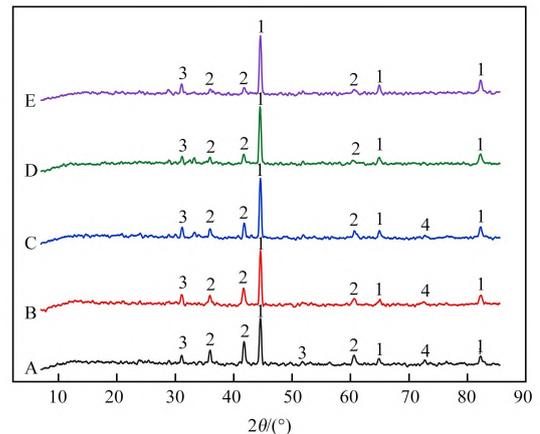
表6 验证试验结果

Table 6 Verify test results

检验编号	$w(\text{TFe})/\%$	$w(\text{MFe})/\%$	金属化率/%	入炉量/ $(\text{t}\cdot\text{h}^{-1})$
A	70.13	48.32	68.90	28
B	69.05	51.92	75.19	26
C	70.69	54.77	77.48	24
D	68.11	53.19	78.09	22
E	67.09	55.41	82.59	20

还原反应生成的 CO_2 等氧化性气氛影响,上层球团被氧化,从而球团整体金属化率降低。

对不同入炉生球量下还原球团进行XRD衍射分析,如图3所示。由图3可以看出,随着入炉生球量的增加,金属铁的衍射峰强度逐渐减弱,而 FeO 的衍射峰强度逐渐增强,说明金属铁在球团中的含量随着入炉生球量的增加而减少, FeO 质量分数则与之相反,这与验证试验结果一致。

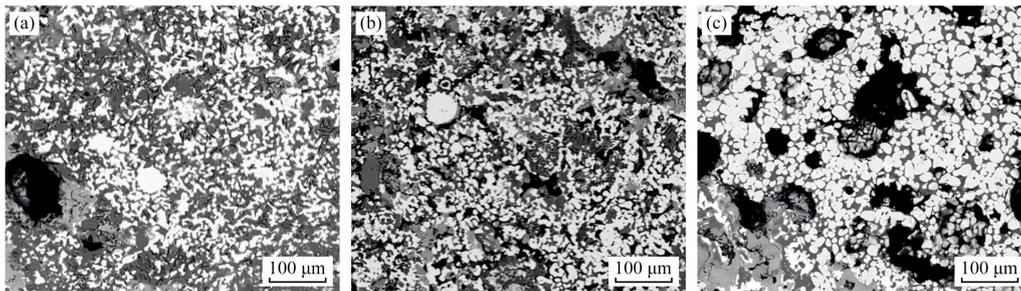


1—Fe; 2—FeO; 3— $\text{Ca}_2\text{Ti}_2\text{O}_6$; 4— $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ 。

图3 不同入炉量下还原球团XRD分析

Fig. 3 XRD analysis of reduced pellets under different raw pellet quantity

对不同入炉生球量下还原球团进行微观形貌分析,内部结构如图4所示。图4中,白色部分为直接还原生成的金属铁,灰色部分为渣相,黑色部分为孔隙。由图4可见,随着入炉生球量从28 t/h逐步下降至24 t/h,球团内部金属铁从零散的点状分布逐渐向点与点之间相互连接长大转变;继续减小入炉生球量至20 t/h,金属铁扩展到整个断面并形成致密的金属结构,这进一步验证了试验结果的正确性。



入炉生球量/(t·h⁻¹): (a) 28; (b) 24; (c) 20

图 4 不同入炉量下还原球团微观形貌分析

Fig. 4 Analysis of micromorphology of reduced pellets under different raw pellet quantity

根据试验结果开展生产实践,在转底炉达到设计指标的前提下,即入炉生球量 ≥ 26 t/h时,在前述原料条件和最佳工艺参数下,各项技术经济指标表现良好。其中,2024年产量指标高于2023年相应值,且还原球团的金属化率达到72.16%,较2023年的67.10%提升了5.06%。

5 结论

(1) 还原温度是转底炉直接还原过程最重要的影响因素,当还原温度大于1 250 ℃时,碳的气化反应速率和转化效率加快,铁氧化物的还原进程加速,球团金属化率迅速提升;当还原温度超过1 260 ℃时,球团内外温差变小,吸热量逐渐减少,还原反应趋于停滞,金属化率不再提升。

(2) $n(\text{C})/n(\text{O})$ 对直接还原反应影响显著,当 $n(\text{C})/n(\text{O})$ 小于1.4时,配碳量不足以维持碳的高转化效率和高CO体积浓度,使 $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ 的还原过程进行不完全;当 $n(\text{C})/n(\text{O})$ 大于1.4时,碳的气化反应随配碳量的升高而越发剧烈,球团内外压差过大,导致球团粉化严重,使炉内还原气氛变差,阻碍铁氧化物还原进程,引起球团金属化率下降。

(3) 随着空煤比的升高和反应时间的延长,球团金属化率逐渐升高,当空煤比大于2.2、炉底转速大于25 min时,球团金属化率不再升高,且会因球团被氧化而不断下降。

(4) 影响直接还原过程的因素主次顺序:还原二区温度 $> n(\text{C})/n(\text{O}) >$ 空煤比 $>$ 还原一区温度 $>$ 炉底转速,且还原二区温度和 $n(\text{C})/n(\text{O})$ 的影响远大于其他因素。

(5) 将正交试验得出的最佳生产参数应用于

转底炉生产实践,产出的还原球团金属化率与入炉生球量关系密切。随着入炉生球量的增加,球团在高度方向布料层数增多,还原中、后期上层球团的再氧化会降低金属化率。因此,在满足转底炉设计指标的前提下,即入炉生球量 ≥ 26 t/h时,还原球团的金属化率有明显提升。

参考文献:

- [1] 罗磊,郭灵巧. 转底炉助力钢铁企业实现绿色制造[J]. 工业加热,2021,50(11):59-62.
LUO Lei, GUO Lingqiao. Rotary hearth furnace helps iron and steel enterprises achieve green manufacturing[J]. Industrial Heating, 2021, 50(11): 59-62.
- [2] 尹慧超,张建良,王传琳. 国丰1号1 780 m³高炉锌平衡的研究[J]. 炼铁,2009,28(3):48-50.
YIN Huichao, ZHANG Jianliang, WANG Chuanlin. Research on zinc balance of Guofeng No. 1 1 780 m³ blast furnace[J]. Ironmaking, 2009, 28(3): 48-50.
- [3] 郭明军,张亚魁. 转底炉技术在钢铁冶金工程中的应用[J]. 中国金属通报,2022(4):4-6.
GUO Mingjun, ZHANG Yakui. Application of bottom turning furnace technology in steel metallurgy engineering[J]. China Metal Bulletin, 2022(4): 4-6.
- [4] 李东海. 转底炉处理冶金含锌尘泥技术工业化历程概述[J]. 工业加热,2022,51(9):1-4;14.
LI Donghai. Overview of industrial development of RHF technology for metallurgical zinc-containing dust and sludge disposal[J]. Industrial Heating, 2022, 51(9): 1-4;14.
- [5] 许海川,周和敏,齐渊洪,等. 转底炉处理钢厂固废工艺的工业化及其生产实践[J]. 钢铁,2012,47(3):89-93.
XU Haichuan, ZHOU Hemin, QI Yuanhong, et al.

- Engineering and productive practice on rotary hearth furnace for steel dust and sludge[J]. Iron and Steel, 2012,47(3):89-93.
- [6] 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;145.
- 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;145.
- [7] 翁荣平. 马钢20万吨/a转底炉还原球团金属化率提高的途径[C]//2012年全国炼铁生产技术会议暨炼铁学术年会文集(下). 无锡:中国金属学会,2012:365-368.
- WENG Rongping. Ways to improve the metalization rate of reduced pellets in a 200 000 t/a rotary hearth furnace at Ma' anshan Iron and Steel Company[C]//Proceedings of the 2012 National Ironmaking Production Technology Conference and Ironmaking Academic Annual Meeting. Wuxi:The Chinese Society for Metals,2012:336-339.
- [8] 金永龙,孙宇佳,王倩. 转底炉处置含锌固废的工业试验及生产实践[J]. 河北冶金,2022(5):61-64;86.
- JIN Yonglong, SUN Yujia, WANG Qian. Industrial tests and actual products of zinc-containing solid waste treatment by rotary hearth furnace[J]. Hebei Metallurgy, 2022(5):61-64;86.
- [9] 李林,野田悦郎,李健,等. 电炉粉尘转底炉工艺试验、技术特征研究与应用实践[J]. 工业技术创新, 2023,10(3):107-118.
- LI Lin, NODA Etsuro, LI Jian, et al. Process test, technology characteristics study and application practice of rotary hearth furnace for electric arc furnace(EAF) dust[J]. Industrial Technology Innovation,2023,10(3):107-118.
- [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] 柴志鹏,罗德庆,韩红伟,等. 气固基作用下含碳球团还原试验研究[J]. 烧结球团,2023,48(4):65-71.
- CHAI Zhipeng, LUO Deqing, HAN Hongwei, et al. Experimental research on reduction of carbon-containing pellets under gas-solid base function[J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(4):65-71.
- [12] 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 and Steel, 2023, 58(4):157-166.
- [13] 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.
- [14] 王飞,茅沈栋,毛瑞,等. 原料锌含量对转底炉球团还原焙烧过程的影响[J]. 烧结球团,2018,43(5):51-55.
- WANG Fei, MAO Shendong, MAO Rui, et al. Influence of zinc content in raw materials on pellets of rotary hearth furnace during the roasting and reduction process[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(5):51-55.

本刊编辑部版权许可声明

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