

原料碳含量对转底炉处理含锌粉尘工艺产品质量的影响

王 飞, 毛 瑞, 姚海威, 余 水
(江苏省(沙钢)钢铁研究院 江苏 张家港 215625)

摘要: 原料碳含量是确保转底炉生产线能够高效、低成本处理含锌尘泥的关键参数。为研究原料碳含量对转底炉金属化球团产品质量的影响, 本文通过模拟转底炉工艺流程开展了试验研究。利用强度检测、化学分析、电镜分析等方法分析了不同原料碳含量对应的球团强度、金属化率、脱锌率等产品指标。结果表明, 原料碳含量增加会导致生球强度劣化, 并且碳含量对金属化球团的强度和金属化率指标影响较大, 但对脱锌率指标影响相对较小。当原料的碳氧摩尔比达到 0.68 时, 金属化球团产品的整体质量达到较优水平。原料碳含量会直接影响焙烧过程中球团内的 FeO 含量, 而 FeO 是球团内生成低熔点渣相的关键组分, 进而影响金属化球团中的渣相分布和孔隙分布, 改变球团内的还原动力学条件。工业试验数据表明, 原料碳质量分数从 13.61% 降低至 10.10%, 产品金属化率降低约 9 个百分点, 成球率提高约 11 个百分点, 残锌含量基本不变。原料碳质量分数每降低 1 个百分点, 金属化球团产品转鼓强度平均提高 4.2 个百分点。在转底炉处理含锌尘泥工业生产中, 将原料碳质量分数控制在 10%~11% 比较适宜。

关键词: 转底炉; 碳含量; 金属化率; 强度; 脱锌率

中图分类号: TF71; X757

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)01-0141-08

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.01.018

Effect of carbon content of raw materials on product quality of zinc-containing dust process treated by rotary hearth furnace

WANG Fei, MAO Rui, YAO Haiwei, YU Shui

(Research Institute of Iron & Steel of Jiangsu Province (Shasteel) Zhangjiagang 215625, Jiangsu, China)

Abstract: The carbon content of raw materials is a key parameter to ensure that the rotary hearth furnace production line can process zinc-containing dust sludge efficiently at low cost. In order to research the effect of raw material carbon content on the quality of metallized pellet products in rotary hearth furnaces, experimental studies are carried out by simulating the process flow of rotary hearth furnaces. Strength detection, chemical analysis, electron microscopy analysis and other methods are used to analyze the pellet strength, metallization rate, dezincification rate and other product indexes corresponding to the carbon content of different raw materials. The results show that the increase of carbon content of raw materials will lead to the deterioration of green pellet strength, and the carbon content has a great influence on the strength and metallization rate of metallized pellets, but a relatively small effect on the dezincification rate. When the carbon-to-oxygen molar ratio of the raw material reaches 0.68, the overall quality of the metallized pellet product reaches a better level. The carbon fraction of the raw material directly affects the FeO content in the pellet during the roasting process. Since FeO is a key component in the pellet to form a low melting point slag phase, which in turn affects the slag phase distribution and pore distribution in the metallized pellet, and changes the reduction kinetic conditions in the pellet. The industrial test data show that if the carbon mass fraction of raw materials is reduced from 13.61% to 10.10%, the metallization rate of the product is reduced by about 9%, the granulation ratio is increased by about 11%, and the residual zinc mass fraction is nearly constant. For

收稿日期: 2024-06-17; 修回日期: 2024-07-18

作者简介: 王 飞(1990—), 男, 研究员, 从事钢铁冶金固废研究。

通信作者: 毛 瑞(1988—), 男, 高级工程师, 从事钢铁冶金环保研究和管理工作。

every 1% decrease in the carbon mass fraction of raw materials, the drum strength of metallized pellet products is increased by 4.2% on average. In the industrial production of zinc-containing dust sludge treated by rotary hearth furnace, it is more appropriate to control the carbon mass fraction of raw materials at 10%~11%.

Key words: rotary hearth furnace; carbon content; metallization rate; strength; dezincification rate

钢铁生产过程会产生大量含锌尘泥, 回收利用价值较高。目前国内很多钢铁企业建设转底炉生产线用于处理含锌尘泥, 生产氧化锌副产品和金属化球团, 实现对含锌尘泥的高附加值利用。到 2023 年底, 国内已建设的转底炉生产线不少于 22 座^[1]。转底炉处理含锌尘泥工艺一般采用钢铁厂产生的含碳尘泥(如高炉二次除尘灰、干熄焦除尘灰等), 作为配碳原料, 将尘泥原料混合成型制成含碳球团, 在转底炉内进行焙烧还原^[2-5]。

原料碳含量是影响转底炉工艺产品质量的关键参数。杨春善等^[6]在日钢转底炉生产实践中发现, 配碳原料高炉布袋灰的配比从 18% 提升至 35%, 生球强度下降较快, 金属化球团粉化率随之增加。翁荣平^[7]在马钢转底炉运行中发现, 转底炉混合料含碳量偏高或偏低都会造成球团在还原过程中金属化率下降。郭秀键等^[8]的研究表明, 碳氧物质的量之比在 1.0~1.1 之间时, 配碳原料高炉旋风灰配比较高会使金属化球团表面结壳, 内部发生粉化。毛瑞等^[9]研究结果表明, 含铁尘泥球团随着碳氧摩尔比的增加, 球团的金属化率和脱锌率呈先增加后降低的趋势。李岩等^[10]研究表明, 要保证转底炉处理含锌尘泥工艺的产品金属化率大于 70%, 混合料的碳氧比要高于 0.9。

根据含碳球团还原机理, 碳氧物质的量之比为 1.0 时是铁氧化物被完全还原的理论配碳量^[11]。在采用铁矿粉为原料的含碳球团研究领域, 为获得较高金属铁回收率, 原料配碳量较, 一般将原料碳氧摩尔比控制在 1.0 以上^[12-15]。但

在工业化的转底炉处理含锌尘泥生产中, 由于尘泥原料铁品位相对较低, 除考虑金属铁回收率外, 要综合考虑配碳量对金属化球团强度、成球率、脱锌率的影响, 以保证转底炉高效、低成本运行。本文根据转底炉生产线运行情况的客观需要, 研究原料碳含量对金属化球团产品质量的影响, 以期为工业生产提供理论指导。

1 试验原料及方法

1.1 试验原料

试验所用尘泥原料分别为转炉二次污泥、电炉初炼灰、出铁场除尘灰、高炉矿槽除尘灰、干熄焦除尘灰, 采用膨润土做黏结剂。结合转底炉实际生产配料情况, 将原料配比进行调整, 得到基准配比。基准配比的碳质量分数为 9.02%, 对应碳氧摩尔比为 0.54。采用与干熄焦除尘灰成分类似的焦粉作为配碳原料, 在基准配比的基础上配加焦粉得到不同碳含量的原料。各原料组成如表 1 所示。5 组原料中碳含量逐渐升高, 其余化学组分变化较小, 碳质量分数最高为 17.07%, 对应碳氧摩尔比为 1.12。

1.2 试验方法

在实验室条件下模拟转底炉的工艺流程。首先将各组原料混合均匀后, 配入相同比例的水分将原料润湿。采用圆盘造球机对原料进行造球成型, 圆盘造球机直径为 1 000 mm, 转速为 28 r/min, 边高为 150 mm, 圆盘倾角为 47°。造球时, 每组用料量为 5 kg, 造球时间控制在 10 min 左右, 并

表 1 不同碳含量原料的主要化学成分

Table 1 Chemical composition of raw materials with different carbon content

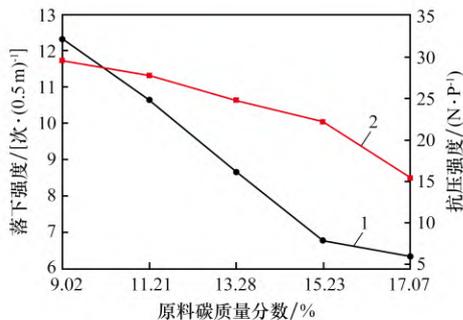
编号	化学成分(质量分数) / %								$n(\text{C}) / n(\text{O})$
	TFe	FeO	Zn	C	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	
1 [#]	44.20	20.81	4.06	9.02	1.20	2.16	5.89	7.17	0.54
2 [#]	42.92	20.19	3.94	11.21	1.17	2.22	5.87	7.01	0.68
3 [#]	41.71	19.63	3.83	13.28	1.15	2.27	5.84	6.86	0.83
4 [#]	40.57	19.06	3.72	15.23	1.13	2.31	5.82	6.72	0.98
5 [#]	39.49	18.55	3.62	17.07	1.11	2.36	5.80	6.58	1.12

根据各组原料成球性差异控制造球加水量。将造好后的生球进行筛分,取10~12.5 mm粒径的生球作为合格生球,并测试生球强度指标。每组选取大小相近的生球进行焙烧试验,焙烧炉为卧式管式炉,控温精度 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。将生球在炉口预热3 min后放入1000 $^{\circ}\text{C}$ 温度下焙烧5 min,然后迅速放入1250 $^{\circ}\text{C}$ 的高温下焙烧15 min。为模拟转底炉内焙烧气氛,在焙烧过程中向炉管内通入流量为200 L/h的氮气。焙烧结束后,将球团迅速取出,放入密闭的石墨坩埚中冷却至室温,测量并记录球团的强度指标,并对球团样品进行SEM-EDS分析和化学分析。

2 试验结果与分析

2.1 碳含量对生球质量的影响

原料结构的变化会对生球强度指标产生影响。不同含碳原料对应的生球强度变化如图1所示。结果表明,随着原料碳含量的增加,生球落下强度和抗压强度整体呈下降趋势。碳含量(质量分数)为9.02%的生球落下强度为12.33次/(0.5 m),抗压强度为29.5 N/P。当碳含量增加至17.07%,对应生球落下强度和抗压强度分别下降至6.33次/(0.5 m)和15.3 N/P。原料中的含碳颗粒主要是高炉矿槽除尘灰、干熄焦除尘灰和配加焦粉中的焦炭颗粒,这些焦炭颗粒有较强的疏水性,不易形成能使颗粒彼此黏结的吸附水膜。因此当生球中的含碳颗粒占比增加时,会使生球的机械强度呈降低趋势。在工业生产中,生球强度的劣化会增加造球返矿量,降低原料的成球效率。



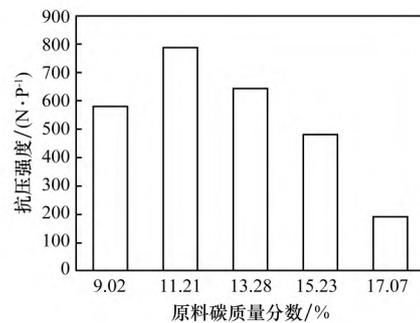
1—落下强度; 2—抗压强度。

图1 不同碳含量原料对应的生球强度

Fig. 1 Strength of green balls related to raw materials with different carbon content

2.2 碳含量对金属化球团质量的影响

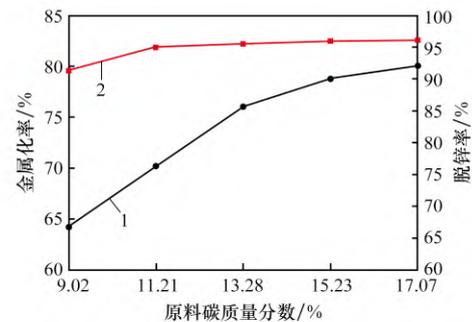
强度是金属化球团在下游使用的关键指标^[16-17]。不同含碳原料对应的金属化球团抗压强度如图2所示。由图2可知,当原料碳质量分数为9.02%时,金属化球团抗压强度为580.9 N/P。当原料碳质量分数增加到11.21%时,对应金属化球团抗压强度上升至788.7 N/P。之后,随着原料碳含量继续增加,金属化球团抗压强度呈降低趋势。当原料碳质量分数为17.07%时,金属化球团抗压强度只有191.3 N/P。金属化率和脱锌率是金属化球团重要的经济指标,表征了转底炉工艺对铁、锌有价值元素的收得率。不同含碳原料对应金属化球团的金属化率和脱锌率如图3所示。由图3可知,当原料碳质量分数从9.02%增加至13.28%时,金属化球团的金属化率增加趋势较快,随着碳含量继续增加,金属化率增加趋势变小。脱锌率随原料碳含量增加变化较小,整体保持在较高水



1—落下强度; 2—抗压强度。

图2 不同碳含量原料对应的金属化球团强度

Fig. 2 Strength of metallized pellets of raw materials with different carbon content



1—金属化率; 2—脱锌率。

图3 不同碳含量原料对应的球团金属化率和脱锌率

Fig. 3 Metallization rate and dezincification rate of products of raw materials with different carbon content

平,其中,碳质量分数为 9.02% 的样品脱锌率最低,为 91.32%,其余样品脱锌率基本不变,均达到 95% 以上。综上可知,原料碳含量对金属化球团的强度和金属化率指标影响较大,对脱锌率指标影响相对较小。在本研究条件下,综合考虑金属化球团的生产过程和下游工序对质量的要求,原料中碳质量分数为 11.21%、碳氧摩尔比控制在 0.68 为最佳。

2.3 碳含量对金属化球团质量影响的机理分析

图 4 和图 5 分别是 1[#]和 5[#]原料对应金属化球团的电镜照片,原料碳质量分数分别为 9.02% 和 17.07%。由图 4、5 分析可知,在原料碳含量最低的 1[#]金属化球团内,还原生成的白色金属铁呈细带状连晶结构,夹在大片灰色渣相区域之间;原料碳含量最高的 5[#]金属化球团内,白色金属铁呈相互接触的蠕虫状连晶结构,且灰色渣相较少,存在较多黑色孔隙区域。从电镜分析可判断,原料碳含量不同会影响金属化球团中的渣相分布和孔隙分布,进而改变球团还原的动力学条件。在高温焙烧条件下,合适的渣系组成,可使球团在高温下形成一定比例的熔融渣相,促进球团体积收缩,填充孔隙的同时可以促进金属铁连晶的形成,使球团获得较高的强度。FeO 是高价铁氧化物还原的中间产物,其含量的增加能够显著降低球团渣系的熔点,促进熔融渣相的形成^[18]。碳含量会影响球团内碳的气化反应速率,而碳的气化反应速率和 FeO 的间接还原速率是球团还原过程的重要控速环节^[19-20],因此碳含量会影响球团中 FeO 的含量。不同含碳原料对应金属化球团的 FeO 含量变化如图 6 所示。由图 6 可知,随着原料碳含量增加,金属化球团中 FeO 的含量逐渐降低。当原料碳质量分数从 9.02% 升高至 17.07% 时,金属化球团中 FeO 质量分数从 28.01% 降低至 14.75%。当原料碳含量较低时,球团内部还原势弱,氧化铁不能被快速还原成金属铁,使中间产物 FeO 含量较高,并在高温下参与造渣,形成较多低熔点渣相,恶化球团内部的还原动力学条件,进一步对铁和锌元素的还原造成负面影响。当原料碳含量较高时,球团内部还原势较强,铁氧化物可较快还原成金属化铁,只有少量的 FeO 参

与形成熔融渣相,因此球团收缩较小,孔隙率较高,虽然获得了较高的金属化率和脱锌率,但金属化球团的强度较低。关于原料碳含量对脱锌率的影响机理,作者在之前的研究中^[21]分析了在转底炉焙烧条件下原料中锌元素的还原热力学,单质锌一般要优先于单质铁被还原。因此,在焙烧过程中,球团内部的单质碳会优先还原锌氧化物,所以原料碳含量的变化对脱锌率的影响较小,而对金属化率的影响较大。

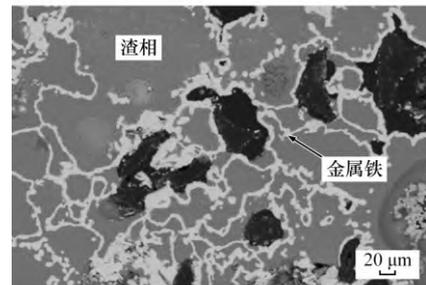


图 4 1[#]金属化球团电镜照片

Fig. 4 SEM image of 1[#] metallized pellets

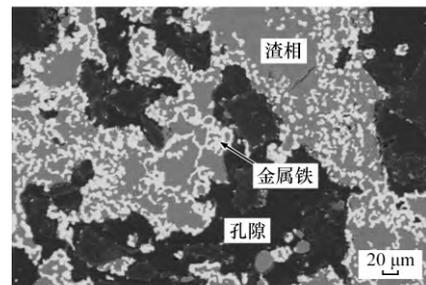


图 5 5[#]金属化球团电镜照片

Fig. 5 SEM image of 5[#] metallized pellets

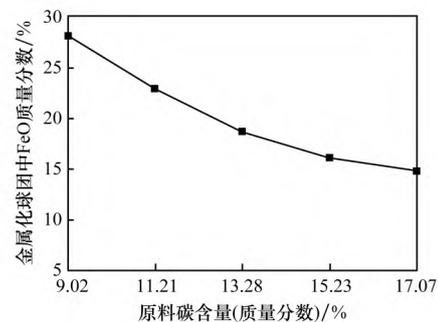


图 6 不同含碳原料金属化球团中 FeO 含量

Fig. 6 FeO content in different carbon containing raw material metallized pellets

3 工业试验

根据实验室试验结果,在转底炉生产线开展

工业化验证试验。该转底炉生产线每年可处理含锌尘泥30万t,生产金属化球团20万t,金属化球团产品用作电炉炼钢冷却剂。主体设备转底炉的炉膛中径为40m,炉底宽度为5m。

试验通过调整含碳原料的使用比例,制定三组不同原料碳含量的配料方案,如表2所示。试验期间对每个生产班的原料和金属化球团产品进行跟踪取样分析。工业试验过程保持转底炉炉体转速为22min/r,预热区温度为800~950℃,低温焙烧区温度为1000~1200℃,高温区焙烧温度为1250~1300℃。工业试验共计开展了52d,原料碳含量变化情况如图7所示。由图7可知,随着试验的开展,转底炉原料的碳含量逐渐降低,其中方案1~3的原料平均碳质量分数分别为13.61%、11.28%、10.10%。

表2 工业试验方案的原料配比(质量分数)

Table 2 Raw material ratio of industrial test %

编号	高炉 矿槽 灰	干熄 焦除 尘灰	转炉 二次 污泥	电炉 初炼 灰	出铁 场除 尘灰	内部 循环 灰	膨润 土
方案1	20	8	25	15	15	12	5
方案2	20	4	25	15	19	12	5
方案3	15	4	25	17	22	12	5

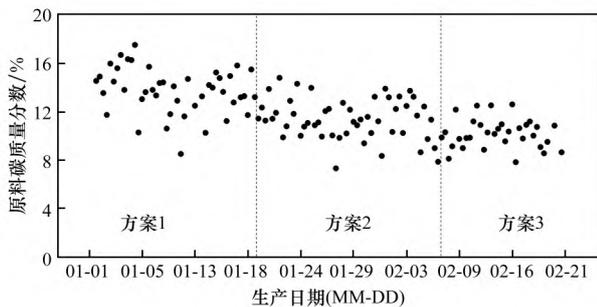


图7 工业试验期间原料碳含量的变化情况

Fig. 7 Changes of carbon mass fraction of raw materials during industrial test

图8~10所示分别为工业试验期间金属化球团产品的金属化率、残锌含量和成球率的变化情况。由图8~10可知,随着原料碳含量的降低,产品金属化率呈降低趋势,方案1至方案3的产品平均金属化率分别为75.27%、69.08%、66.05%。方案3较方案1的产品金属化率降低了约9个百分点;产品残锌含量变化较小,方案1至方案3对应产品残锌质量分数分别为0.49%、

0.54%和0.53%;产品成球率呈明显上升趋势,方案1至方案3的产品成球率平均分别为75.82%、80.46%、86.67%,方案3较方案1的产品成球率提高了约11个百分点。

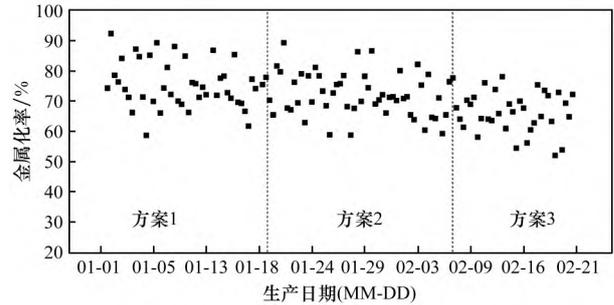


图8 工业试验期间产品金属化率的变化情况

Fig. 8 Changes of metallization rate of products during industrial test

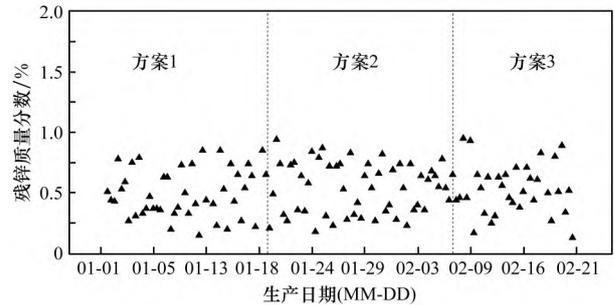


图9 工业试验期间产品残锌含量的变化情况

Fig. 9 Changes of residual zinc content in products during industrial test

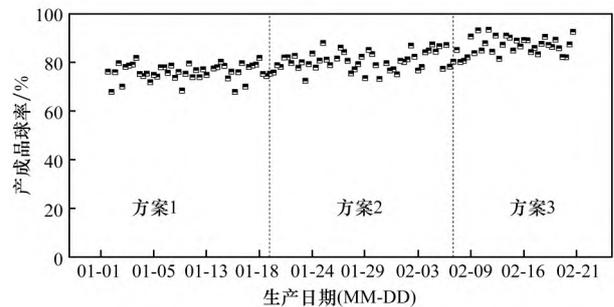


图10 工业试验期间产品成球率的变化情况

Fig. 10 Change of pellet rate of product during industrial test

另外,工业试验期间对金属化球团产品抽样进行强度检测。参考烧结矿转鼓强度的检测方法,对金属化球团进行转鼓强度检测,以表征其在转运和使用过程的强度变化。金属化球团的转鼓检测方法:选取直径5~16mm金属化球团12kg,采用烧结矿用标准转鼓转12min,然后筛选其中

大于 5 mm 球团并称量,其质量与原始质量之比记为金属化球团的转鼓强度。图 11 为工业试验期间不同原料碳含量对应的金属化球团产品转鼓强度。由图 11 可看出,原料碳含量增加,对应金属化球团转鼓强度呈明显降低趋势。统计数据表明,在现有碳含量控制范围内,原料碳质量分数降低 1 个百分点,产品转鼓强度平均提高 4.2 个百分点。

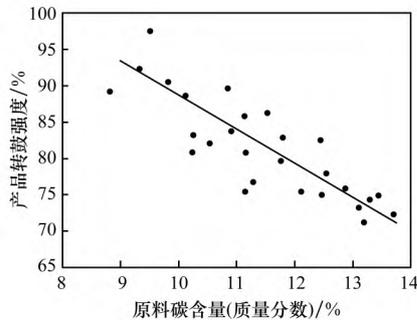


图 11 工业试验期间不同原料碳含量的产品转鼓强度

Fig. 11 Drum strength of products of raw materials with different carbon content during industrial test

由以上分析可知,工业试验与实验室试验的结果保持了一致性。将原料碳含量降低可以明显提高金属化球团的强度,使成球率增加,且对产品脱锌影响较小。这有利于提高转底炉生产效率,降低生产成本。虽然原料碳含量降低会导致产品金属化率降低,但考虑到金属化球团一般用作小高炉原料或者炼钢冷却剂,金属化率的适当降低是可以接受的。从实际生产需要的角度考虑,转底炉处理含锌尘泥工艺的原料碳质量分数控制在 10%~11% 比较合适。

4 结 论

(1) 原料碳含量增加首先会导致转底炉生球强度劣化,降低原料的成型效率。其次,原料碳含量对金属化球团的强度和金属化率指标影响较大,对脱锌率指标影响相对较小。综合考虑金属化球团的生产过程和下游使用过程对质量的要求,将原料中碳氧摩尔比控制在 0.68 为宜。

(2) 在转底炉焙烧条件下,原料碳含量会直接影响球团中 FeO 含量,而 FeO 通过影响球团中低熔点渣相的生成量进而改变金属化球团中的渣相分布和孔隙分布,使球团内的还原动力学条件

发生改变。较高原料碳含量会获得较高产品金属化率,但球团收缩效果差,内部孔隙率高,导致产品强度低;适当降低原料碳含量,金属化率会相应降低,但可获得较高强度的金属化球团产品。

(3) 工业试验中,当原料碳质量分数从 13.61% 降低至 10.10%,产品金属化率降低约 9 个百分点,而产品残锌含量基本不变,产品成球率提高约 11 个百分点,且金属化球团强度提升明显。统计数据表明,原料碳质量分数降低 1 个百分点,金属化球团产品转鼓强度平均提高 4.2 个百分点。转底炉处理含锌尘泥工艺的原料碳质量分数控制在 10%~11% 比较合适。

参考文献:

- [1] 李海东. 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.
LI Haidong. Overview of industrial development of RHF technology for metallurgical zinc-containing dust and sludge disposal [J]. Industrial Heating, 2022, 51(9): 1-4.
- [2] 吕为建,王龙,张浩,等. 钢铁冶金尘泥提锌工艺的研究进展[J]. 钢铁, 2024, 59(1): 157-167.
Lü Weijian, WANG Long, ZHANG Hao, et al. Research on progress of zinc extraction process from iron and steel metallurgical sludge [J]. Iron and Steel, 2024, 59(1): 157-167.
- [3] 毛瑞,王飞,金海,等. 转底炉工艺处理含铁尘泥关键技术[J]. 钢铁, 2020, 55(8): 199-205.
MAO Rui, WANG Fei, JIN Hai, et al. Key technology of treating iron-bearing dust and sludge by rotary hearth furnace process [J]. Iron and Steel, 2020, 55(8): 199-205.
- [4] 彭程,范建峰. 宝钢转底炉工艺技术发展[J]. 钢铁, 2019, 54(2): 97-100.
PENG Cheng, FAN Jianfeng. Rotary hearth furnace process development in Baosteel [J]. Iron and Steel, 2019, 54(2): 97-100.
- [5] 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 hearth furnace [J]. Iron and Steel, 2023, 58(4): 157-166.

- [6] 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 and Steel 2019, 54(4): 83-91.
- [7] 翁荣平. 马钢 20 万 t/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. The way to improve the metallization rate of Masteel pellets in 200 000 t/a rotary hearth furnace[C]//2012 National Ironmaking Technology Conference and Ironmaking Academic Annual Conference (Part 2). Wuxi: The Chinese Society for Metals, 2012: 365-368.
- [8] 郭秀键,罗宝龙,赵忠宇,等. 金属化球团抗压强度的影响因素分析及资源化利用[J]. 烧结球团, 2023, 48(4): 59-64.
GUO Xiujian, LUO Baolong, ZHAO Zhongyu, et al. Analysis on influencing factors of compressive strength of metallized pellets and resource utilization[J]. Sintering and Pelletizing 2023, 48(4): 59-64.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 汪琦. 铁矿含碳球团技术[M]. 北京: 冶金工业出版社 2005.
WANG Qi. Technology of iron ore carbon-containing pellets[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press 2005.
- [12] 董剑豪,王广,张浩,等. 塑料-无烟煤混合还原剂对含碳球团还原的影响[J]. 中国冶金, 2021, 31(2): 90-94.
DONG Jianhao, WANG Guang, ZHANG Hao, et al. Effect of plastic-anthracite mixed reducing agent on reduction of carbon-bearing pellets[J]. China Metallurgy, 2021, 31(2): 90-94.
- [13] 张笑菲,王博,居天华,等. 还原剂对含碳球团预还原过程尾气成分的影响[J]. 烧结球团, 2020, 45(6): 5-9.
ZHANG Xiaofei, WANG Bo, JU Tianhua, et al. Influence of reducing agent to tail gas composition during the pre-reduction process of carbon-containing pellets[J]. Sintering and Pelletizing 2020, 45(6): 5-9.
- [14] 陈雯,王鑫,雷鹰,等. 高磷铁矿石含碳球团等温还原动力学[J]. 钢铁 2020, 55(9): 11-15.
CHEN Wen, WANG Xin, LEI Ying, et al. Isothermal reduction kinetics of high-phosphorus iron ore carbon-containing pellets[J]. Iron and Steel, 2020, 55(9): 11-15.
- [15] 吴恩辉,侯静,李军,等. 钒钛铁精矿非自然碱度含碳球团高温固态还原试验[J]. 钢铁, 2018, 53(1): 24-28.
WU Enhui, HOU Jing, LI Jun, et al. Experiment on solid state reduction of non-natural basicity carbon-containing pellet of vanadium-bearing titanomagnetite at high temperature[J]. Iron and Steel 2018, 53(1): 24-28.
- [16] 张旭孝,韩宏亮,姜曦. 高炉添加金属化球团炉料的冶金性能试验[J]. 中国冶金 2015, 25(5): 15-18.
ZHANG Xunxiao, HAN Hongliang, JIANG Xi. Experiment on metallurgical properties of blast furnace burden containing metallized pellets[J]. China Metallurgy 2015, 25(5): 15-18.
- [17] 蔡大为,陈青月,潘建,等. 金属化炉料的高炉低碳冶炼研究现状[J]. 中国冶金 2024, 34(2): 9-20.
CAI Dawei, CHEN Qingyue, PAN Jian, et al. Research status of low carbon smelting for metallized burden in blast furnace[J]. China Metallurgy, 2024, 34(2): 9-20.
- [18] 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, 124.
WANG Fei, MAO Rui, MAO Shendong. Utilization of converter sludge by rotary hearth furnace[J]. Iron and Steel 2019, 54(12): 111-116, 124.
- [19] 何环宇,刘虹灵,崔一芳,等. 冶金尘泥含碳球团直接还原机制的试验研究[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(3): 196-201.
HE Huanyu, LIU Hongling, CUI Yifang, et al.

- Experimental study on mechanism of direct reduction of metallurgical dust carbon-containing pellets [J]. *Journal of Iron and Steel* 2021, 33(3): 196–201.
- [20] 郭培民,董亚峰,孔令兵,等. 碳热 FeO 反应过程的控速环节分析[J]. *钢铁研究学报* 2020, 32(2): 111–116.
- GUO Peimin, DONG Yafeng, KONG Lingtan, et al. Analysis on controlling step during FeO reduction by carbon[J]. *Journal of Iron and Steel*, 2020, 32(2): 111–116.
- [21] 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.
-
- (上接第 109 页)
- [12] 吴金霞,宋雨萱. 基于数据驱动的烧结质量指标预测模型[J]. *冶金自动化* 2023, 47(A1): 83.
- WU Jinxia, SONG Yuxuan. A data-driven prediction model for sintering quality indicators[J]. *Metallurgical Automation* 2023, 47(A1): 83.
- [13] 邱海雨. 梅钢 5 号烧结机自动控制模型的研究及应用[J]. *冶金自动化* 2021, 45(3): 79.
- QIU Haiyu. Research and application of automatic control model for Meigang No. 5 sintering machine[J]. *Metallurgical Automation* 2021, 45(3): 79.
- [14] 顾文雅. 面向智能制造的大型烧结机控制系统集成技术[J]. *冶金自动化* 2021, 45(增刊 1): 204.
- GU Wenya. Fully integrated technology for large scale sintering machine control system for intelligent manufacturing[J]. *Metallurgical Automation*, 2021, 45(Suppl 1): 204.