

综合利用与环保

铁浴式熔融还原工艺处理电炉粉尘还原熔分分析

杨超¹, 余雪峰¹, 王如意², 王静松¹, 薛庆国¹

(1. 北京科技大学 钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083;

2. 宝山钢铁股份有限公司研究院, 上海 201900)

[摘要] 本文将电炉粉尘(EAFD)、还原剂和造渣剂按比例配制含碳球团并加入竖式管式炉内 1 500 °C 的铁浴,通过铁浴熔融还原工艺回收 EAFD 中的 Zn 和 Fe。使用 XRF、XRD、SEM-EDS 及化学分析等方法对 EAFD 和还原后的渣铁进行分析,研究了二元碱度 R 、还原时间和配碳量等因素对脱锌率和还原熔分效果的影响。结果表明,还原后熔渣中 ZnO 含量最高为 0.24 wt%、最低为 0.07 wt%,脱锌率超过 99%;在 $R=1.6$ 、C/O 摩尔比为 1.1、还原时间 40 min 时,EAFD 中的锌氧化物基本被还原为 Zn 金属并蒸发,然后进入烟气,铁氧化物大部分被还原为金属铁并发生渗碳反应后进入铁浴,其他氧化物则形成熔渣并与铁水分离后聚集在铁浴表面;配碳量增加有利于渗碳反应并促进渣铁熔分,但当配碳量超过渗碳需求($n_c/n_0=1.2$)时,过剩的 C 在熔渣中聚集并阻碍渣铁分离。

[关键词] 熔融还原;铁浴法;EAFD;还原熔分;含碳球团

[中图分类号] TF03+1 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2022)04-0081-07

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2022.04.013

中国钢铁产量逐年增加,2020 年粗钢产量达到 10.65 亿 t,创历史新高,其中电炉粗钢产量达到 9 796 万 t,占总产量的 9.2%,同比增长 9.33%。电炉每生产 1 t 钢水会产生 10~20 kg 的电炉粉尘(EAFD)^[1-3],即 2020 年我国产生 98~196 万 t EAFD,但利用率不足 20%^[4]。

EAFD 成分随冶炼钢种变化发生变化,但一般含有 Fe、Zn、Pb、Cr 等元素,其中 Zn 含量通常在 5%~20%。由于 EAFD 锌含量较高,无法直接配入烧结、炼铁等工序利用,需要通过其他技术进行回收利用。目前,处理含 Zn 粉尘主要有火法处理

和湿法处理等方式,其中火法处理由于具有处理能力大、环境压力小等优点被广泛使用。火法工艺主要包括转底炉工艺、回转窑工艺和熔融还原工艺等。转底炉工艺和回转窑工艺由于还原温度较低(约 1 250 °C),在处理含锌粉尘时随着锌含量增加球团脱锌率降低^[4-11],但是得到的金属化球团由于在利用过程中能耗高而使其经济性下降。熔融还原工艺则具有还原温度高、传热速度快、还原产物便于利用等特点,其中铁浴法熔融还原得到的铁水可直接用于转炉炼钢,提高了能源利用率和经济效益,成为研究的重点。

郭兴忠等^[12]研究了铁浴熔融还原处理氧化锌矿的工艺,得到的氧化锌粉 ZnO 含量在 95%~98%,脱锌率达到了 93% 以上。朱子宗等^[13]研究了用铁浴法分离高炉灰中的 Zn 和 Pb,Pb 在铁浴中沉积实现与 Zn 的分离,得到 ZnO 含量超过 87% 的富锌产品。Liu 等^[14]通过铁浴还原法从高炉粉尘中回收 Fe 和 Zn,发现脱锌率在 98% 以上并且反应 30 min 后可以实现渣铁分离。由于 EAFD 中 Zn 存

[收稿日期] 2022-01-15

[作者简介] 杨超(1993—),男,河北邯郸人,在读硕士研究生,研究方向为铁浴熔融还原。

[通信作者] 余雪峰(1978—),男,河北邯郸人,博士,教授,研究方向为能量高效转化与链接。

[基金项目] 国家重点研发计划重点专项(2019YFC1905703),广东省省级科技计划项目(GDKJ2020002)。

[引用格式] 杨超,余雪峰,王如意,等.铁浴式熔融还原工艺处理电炉粉尘还原熔分分析[J].中国有色冶金,2022,51(4):81-87.

在形式和含量与氧化锌矿、高炉粉尘等均不同,需要单独研究。

本文通过铁浴式熔融还原工艺处理 EAFD, 研究熔渣二元碱度、还原熔分时间和 C/O 摩尔比等因素对 EAFD 还原熔分的影响, 通过试验确定较佳铁浴式熔融还原处理条件, 以期工业应用提供指导。

1 试验介绍

1.1 试验原料

试验原料包括某钢铁厂的 EAFD、还原剂、造渣剂、铁粉等。其中, 还原剂为石墨, 造渣剂为工业纯 CaO, EAFD 和铁粉成分分别见表 1 和表 2。图 1 为 EAFD 的 XRD 衍射图谱。从图中可以看出, Zn 主要以铁酸锌的形式存在, 铁氧化物主要是 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 , 与其他学者研究结果一致^[15]。

表 1 EAFD 化学成分

Table 1 Chemical compositions of dust containing

	zinc							%
成分	TFe	Fe_2O_3	ZnO	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	其他
含量	39.97	57.10	17.80	12.00	4.34	7.27	1.10	0.39

表 2 铁粉化学成分

Table 2 Chemical compositions of iron powder

	%					
成分	Fe	C	Si	Mn	P	S
含量	96.10	2.73	0.28	0.71	0.010	0.170

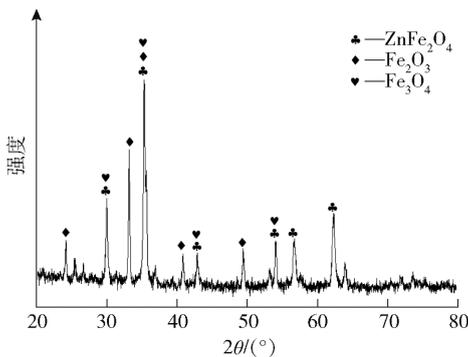


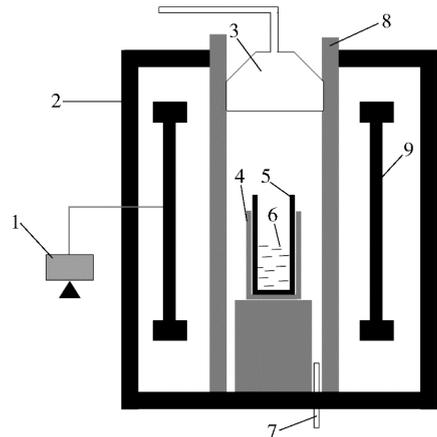
图 1 EAFD 的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of zinc-containing dust

1.2 试验方法

将 EAFD、还原剂和造渣剂按一定比例配比后混匀, 通过压球设备将 10 g 混匀的原料压制成直径

20 mm、高 10 mm 左右的含碳球团。然后将球团置于干燥箱中, 于 105 °C 干燥 8 h。称量 100 g 铁粉, 加入内径 30 mm、高 80 mm 的石墨坩埚, 并在石墨坩埚外套刚玉坩埚加以保护后加入竖式管式炉中加热。待炉温升至 1 500 °C 铁粉完全熔化形成铁浴后, 保温 30 min, 使铁浴成分均匀, 然后按铁浴球团比 10:1 将干燥的球团分批次加入铁浴, 进行还原熔分。加热及反应全程通入流量为 5 L/min 的高纯氮气 (99.99%) 保护。试验设备装置示意如图 2 所示。



1—电脑; 2—竖式管式炉; 3—烟气收集装置; 4—刚玉坩埚; 5—石墨坩埚; 6—铁粉; 7—氮气管; 8—刚玉管; 9—加热元件

图 2 试验设备装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental equipment set-up

1.3 二元碱度计算

渣相二元碱度 (R) 可根据公式 (1) 计算得出。

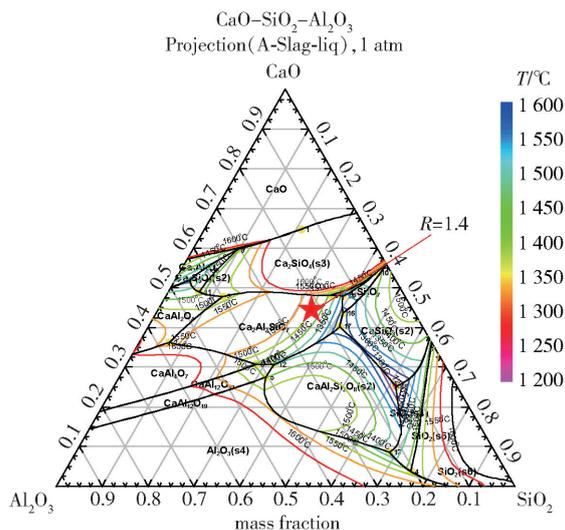
$$R = \frac{wt(\text{CaO})}{wt(\text{SiO}_2)} \quad (1)$$

EAFD 中的 SiO_2 、CaO 和 Al_2O_3 是构造渣相的主要物质, 由 FactSage8.0 计算 SiO_2 -CaO- Al_2O_3 三元系相图, 结果如图 3 所示。从图中可以看出, 当 $R = 1.4$ 时, 渣相点落在 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 相内, 熔点在 1 450 °C 左右。因此, 本试验中分别对 $R = 1.2$ 、1.4、1.6 和 1.8 进行试验。

2 结果及分析

2.1 碱度对还原熔分的影响

在还原温度 $T = 1\,500$ °C、还原时间 $t = 40$ min、 $n_c/n_o = 1.1$ 条件下, 不同碱度的还原结果如图 4 所示。从图中可以看出, 在碱度为 1.2 和 1.4 时有大量还原得到的金属铁存在于渣铁界面处。当碱度增加

图3 CaO-SiO₂-Al₂O₃相图Fig. 3 Phase diagram of CaO-SiO₂-Al₂O₃

到 1.6 时,熔渣聚集在铁浴表面,还原得到的金属铁与熔渣完全分离并进入铁浴。碱度继续增加至 1.8 时,部分熔渣掺混入铁浴,阻碍了渣铁分离。表明随着碱度增加,还原后的渣铁分离效果逐渐变好,当碱度达到 1.6 时渣铁完全分离,碱度继续增加阻碍渣铁分离。因此,选择渣铁分离的碱度为 1.6。

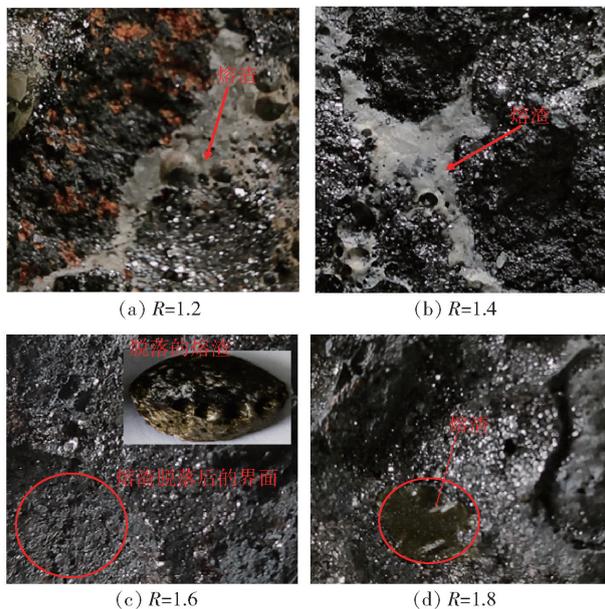
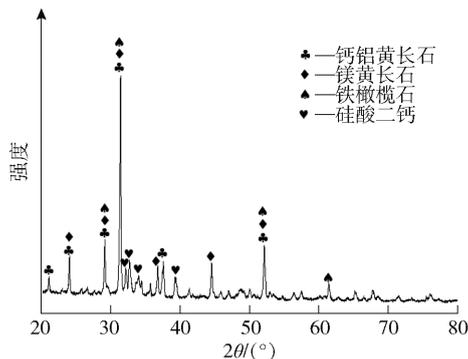


图4 不同碱度的还原熔分结果

Fig. 4 Results of reduction melting separation for different alkalinity

在 $R = 1.6, n_c/n_o = 1.1, t = 40 \text{ min}, T = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下还原得到的熔渣 XRD 衍射图谱如图 5 所示。

从图中可以看出,熔渣主要组成矿物是钙铝黄长石、镁黄长石,其中,部分 CaO 和 SiO₂ 化合生成 Ca₂SiO₄, Fe 则主要以铁橄榄石存在。

图5 $R = 1.6, n_c/n_o = 1.1, t = 40 \text{ min}, T = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 时熔渣的 XRD 图谱Fig. 5 XRD pattern of slag with $R = 1.6, n_c/n_o = 1.1, t = 40 \text{ min}, T = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$

该条件下得到的熔渣电镜扫描结果如图 6 所示。从图中可以看出,熔渣中有 C 聚集现象。这是因为在 $n_c/n_o = 1.1$ 时 C 处于过剩状态,这部分过剩的 C 与还原得到的金属铁发生渗碳反应;另外,由于试验过程中采用石墨坩埚,在高温条件下石墨坩埚的 C 会参与渗碳反应,导致碳在反应后存在局部过剩,并在熔渣中聚集使碳在电镜下被发现。熔渣主要是由 Ca、Si、Al、Mg 等氧化物组成,与图 5 的 XRD 结果一致。

2.2 还原时间对还原熔分的影响

在 $R = 1.6, n_c/n_o = 1.1, T = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,不同反应时间对还原熔分的影响如图 7 所示。从图中可以看出,还原 20 min 时熔渣已经形成,粉尘中的铁氧化物已被还原并聚集成金属球。Fe 液滴与熔渣界面清晰,同时 Fe 液滴出现在渣铁界面,表明还原 20 min 得到的铁金属在熔渣中聚集,并正在通过熔渣进入铁浴。随着熔分时间增加到 40 min, Fe 液滴与熔渣实现彻底分离,熔渣在铁浴表面聚集形成密实的熔渣体。熔分时间增加到 60 min 时,熔渣平铺在铁浴表面并且变得疏松多孔,但并未影响渣铁分离。因此,从节约能源和渣铁分离角度考虑,最佳熔分时间为 40 min。

图 8 为不同还原熔分时间得到熔渣的 XRD 衍射图谱。从图中可以看出,从 20 min 到 60 min 熔渣的衍射峰基本一致,这表明在 1500 °C 铁浴熔融还

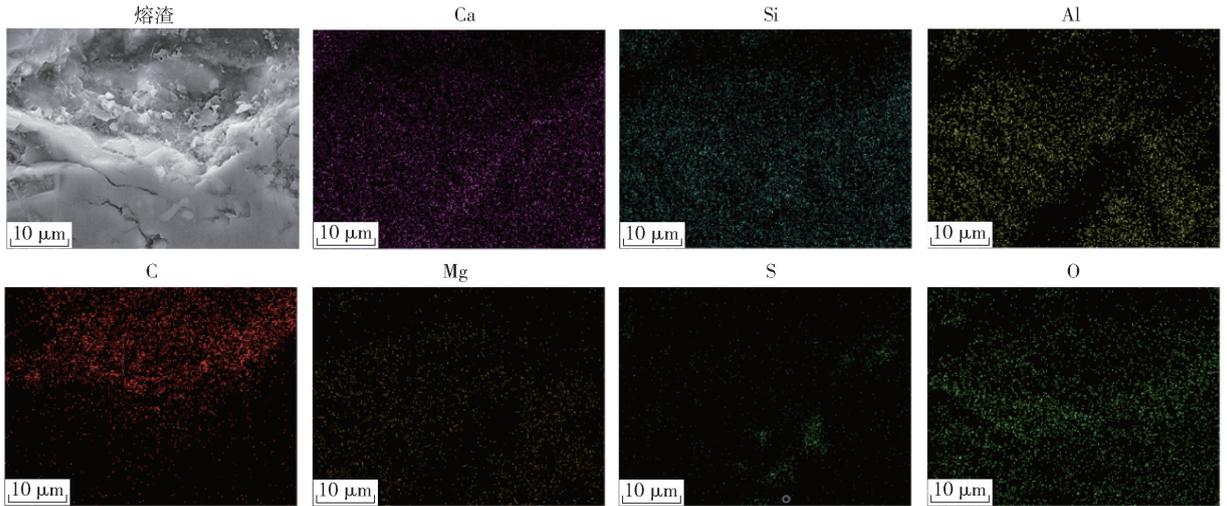


图6 $R = 1.6, n_C/n_0 = 1.1, t = 40 \text{ min}, T = 1500^\circ\text{C}$ 时熔渣电镜扫描结果

Fig. 6 Slag electron microscope scanning results when $R = 1.6, n_C/n_0 = 1.1, t = 40 \text{ min}, T = 1500^\circ\text{C}$

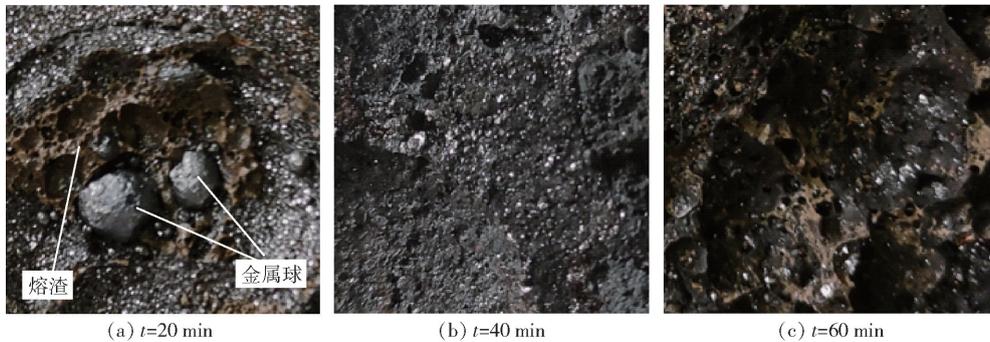


图7 $R = 1.6, n_C/n_0 = 1.1, T = 1500^\circ\text{C}$ 时不同还原时间的熔分结果

Fig. 7 Melting separation results for different reduction times when $R = 1.6, n_C/n_0 = 1.1, T = 1500^\circ\text{C}$

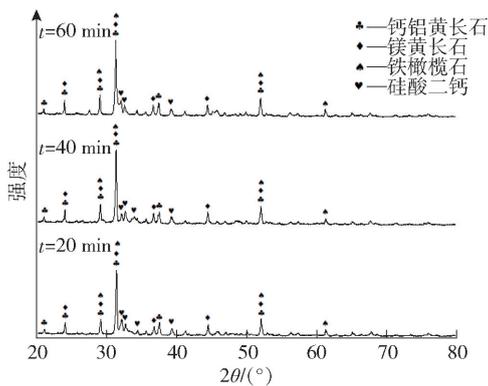


图8 不同熔分时间熔渣的 XRD 衍射图谱

Fig. 8 XRD diffraction pattern of slag with different melting separation time

原熔分过程中还原反应在前 20 min 内已经完成, 20 min 之后的期间主要为形成的金属熔体与熔渣之

间的分离过程。

2.3 C/O 对还原熔分的影响

在 $R = 1.6, t = 40 \text{ min}, T = 1500^\circ\text{C}$ 条件下不同 n_C/n_0 对还原熔分的影响如图 9 所示。 $n_C/n_0 = 1.0$ 时, 还原反应可以正常进行并且渣铁基本分离, 还原得到的熔渣聚集, 但是熔渣疏松多孔。随着配碳量增加到 $n_C/n_0 = 1.1$ 时, 渣铁熔分效果进一步增强, 同时形成致密的熔渣球。这是因为随着配碳量增加, 碳在满足还原需要后剩余的碳与还原得到的金属铁发生渗碳反应导致金属铁熔点降低, 促进了渣铁分离。同时配碳量增加使粉尘中铁氧化物、锌氧化物充分还原需要的时间更短, 渣铁分离时间更为充足。当 n_C/n_0 增加到 1.2 时, 还原反应及渗碳反应后还有大量 C 剩余, 剩余的 C 在熔渣界面富集并形成 C 球, 熔渣中富集的 C 使熔渣与铁液之间的浸润性增加, 不利于渣

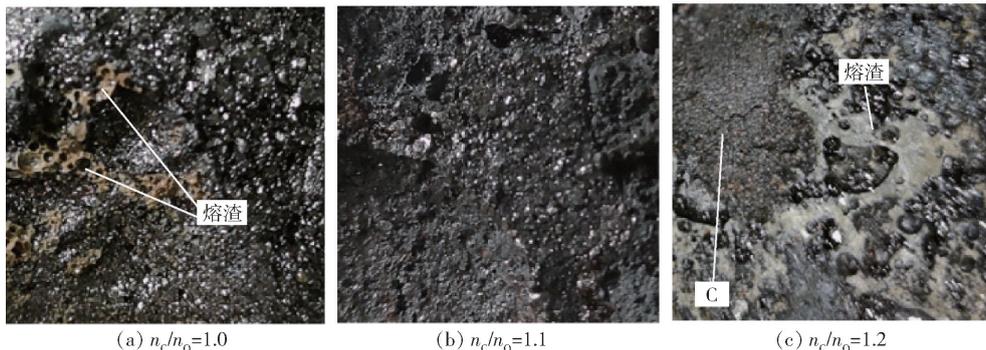


图9 $R = 1.6, t = 40 \text{ min}, T = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 时不同 n_c/n_o 熔分结果

Fig. 9 Different n_c/n_o ratios melting separation results when $R = 1.6, t = 40 \text{ min}, T = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$

铁分离^[16],因此合适的 n_c/n_o 为 1.1。

当 $R = 1.6, T = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,不同 n_c/n_o 条件下还原熔分 40 min 得到的熔渣 XRD 衍射结果见图 10。从图中可以看出, n_c/n_o 从 1.0 升高到 1.1 时,钙铝黄长石、镁黄长石、铁橄榄石和硅酸二钙的衍射峰增强,这表明随着配碳量增加渣铁熔分效果变好,印证了图 9 的结论。当 n_c/n_o 升高到 1.2,出现极强的碳衍射峰,这是因为 $n_c/n_o = 1.2$ 时配入的石墨在完成还原反应和渗碳后仍有过剩并在熔渣表面富集。而 $n_c/n_o = 1.1$ 时未出现碳的衍射峰,这是因为在完成还原反应后剩余的 C 与还原得到的金属 Fe 发生渗碳反应被大量消耗,使 XRD 检测不到熔渣中的 C。

表 3 是不同 n_c/n_o 还原 40 min 后熔渣成分分析结果。从图中可以看出, n_c/n_o 为 1.0 时渣中 Fe 含量较高,这是因为 SiO_2 、 MnO 等氧化物部分发生还原反应,导致 C 量不足以完全还原铁氧化物,使渣中 FeO 含量较高; n_c/n_o 升高至 1.2 时渣中 Fe 含量升高,这是由于过剩的 C 在熔渣中阻碍了渣铁分离使 Fe 残留在熔渣中。在不同 n_c/n_o 条件形成的熔

渣中, ZnO 含量最高为 0.24%, 最低仅为 0.07%, 表明该试验条件下脱锌率在 99% 以上,这与图 8 中 XRD 未检测到 Zn 元素结论一致。还原得到的熔渣经过调质处理后可以得到类似于高炉渣的炉渣成分,利于后期回收利用^[16-18]。

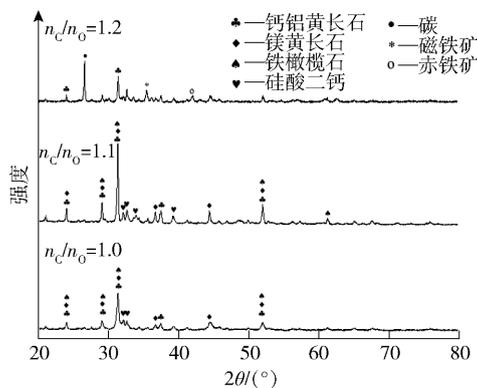


图 10 不同 n_c/n_o 还原熔分得到熔渣的 XRD 衍射图谱

Fig. 10 XRD diffraction patterns of slag obtained from different n_c/n_o ratios reduction melting separation

表 3 还原后熔渣成分

Table 3 Compositions of slag after reduction

项目	ZnO	CaO	Al_2O_3	MgO	SiO_2	MnO	FeO	C	S
$n_c/n_o = 1.0$	0.18	35.95	10.38	2.80	24.80	1.53	13.22	2.07	1.82
$n_c/n_o = 1.1$	0.24	42.44	9.66	3.53	27.42	3.03	5.46	1.68	1.42
$n_c/n_o = 1.2$	0.07	26.26	8.60	1.75	15.79	0.83	32.41	4.14	1.74

图 11 为 $n_c/n_o = 1.2$ 时渣铁界面的电镜扫描结果。从图中可以看出, C 主要富集在熔渣侧, S 则主要存在与渣铁界面处。C 元素的分布表明还原得到的金属 Fe 与 C 发生了渗碳反应。熔渣的元素主要

包括 Ca、Si、Al、O, 少量的 Fe 则存在于渣铁界面处, 印证了图 5 中 XRD 图谱的结论。表 4 为图 11 各点的 EDS 分析结果, 从表中可以看出 A 点物相主要由 Fe 和 C 组成, 其中 C 的质量分数为 20.71%, 远高

于铁水中 C 含量,这是因为在实验室条件下 C 在铁水中的扩散速度缓慢,过剩的 C 元素在渣铁界面来不及扩散便被凝固成固体,与其他学者研究一致^[19-20]。B 点是渣铁交界面上的点,从该点成分可

以看出大量的 Mn、S 存在于该处,这与高炉中锰氧化物还原和炉渣脱硫结果一致。C 点物相组成则主要为 C,包裹在 C 周围的是 Si、Ca、Al 等氧化物组成的熔渣。

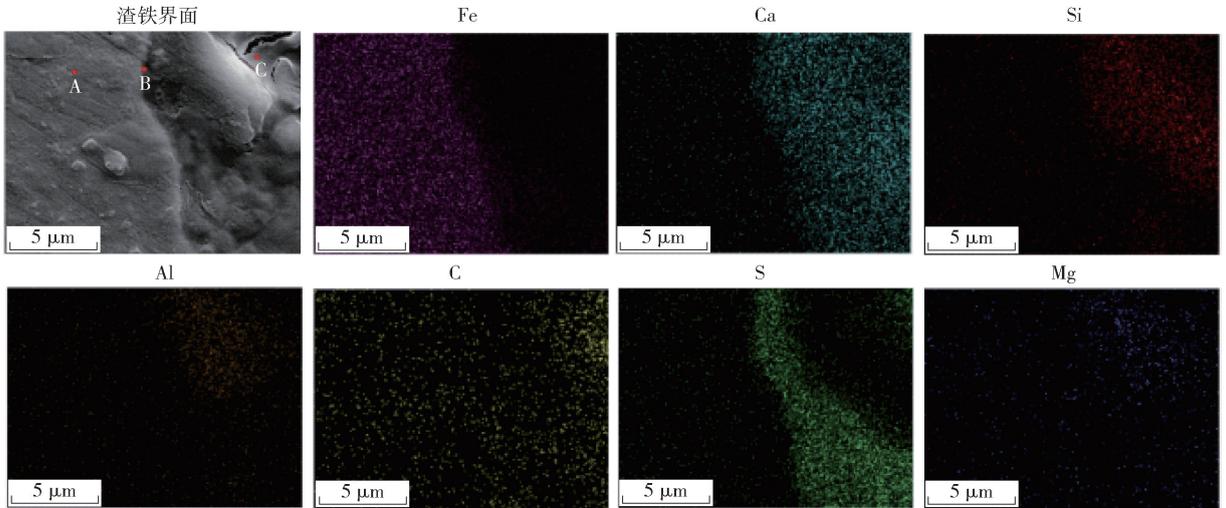


图 11 $n_C/n_0 = 1.2, R = 1.6, t = 40 \text{ min}, T = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 时渣铁界面电镜扫描结果

Fig. 11 Slag-iron interface electron microscopy scan results when $n_C/n_0 = 1.2, R = 1.6, t = 40 \text{ min}, T = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$

表 4 图 11 中样品各点的化学成分

Table 4 Chemical compositions of the sample at each point in Figure 11

物相	Fe	C	Si	Ca	Al	Mn	S	O	Mg	%
A	78.74	20.71	0	0	0	0.55	0	0	0	
B	45.21	25.44	0.58	4.82	0.40	9.93	10.31	3.31	0	
C	1.12	31.71	8.85	15.07	4.65	1.51	0.12	34.71	2.26	

3 结论

1) 随着二元碱度 R 的升高,渣铁熔分效果变好,并在 $R = 1.6$ 时渣铁完全分离。但 R 进一步增加到 1.8 时,熔渣开始混入铁浴,阻碍渣铁分离。

2) 渣铁熔分效果随着时间增加而变好,在熔分 20 min 时粉尘中的还原反应已完成,脱锌率在 99% 以上,同时金属汇集成球并在熔渣中下降。熔分时间达到 40 min 时金属球完全进入铁浴并与熔渣彻底分离,之后随着熔分时间增加熔分效果变化不大。

3) 当 $n_C/n_0 = 1.0$ 时,仅能满足还原需要,渣铁熔分效果差。随着配 C 量增加到 $n_C/n_0 = 1.1$ 时,C 除了可以满足还原需求,还能与 Fe 发生渗碳反应,从而促进了渣铁熔分。配 C 量进一步增加会使过剩的 C 在熔渣界面富集,阻碍渣铁分离。

[参考文献]

- [1] 李洋,张建良,袁襄,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.
- [2] SUETENS T, KLAASEN B, ACKER K V, et al. Comparison of electric arc furnace dust treatment technologies using exergy efficiency[J]. Journal of Cleaner Production,2014,65:152-167.
- [3] MA S B, ZHANG Z H, XU S X, et al. Recovery of zinc from electric arc furnace dust by vacuum carbothermal reduction[J]. Metallurgical Research & Technology,2021,118(4):1-12.
- [4] 谭宇佳,郭宇峰,姜涛,等. 含锌电炉粉尘处理工艺现状及发展[J]. 矿产综合利用,2017(3):44-50.
TAN Yujia, GUO Yufeng, JIANG Tao, et al. Treatment technology and development of zinc electric arc furnace dust[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2017(3):44-50.
- [5] 余雪峰,薛庆国,王静松,等. 钢铁厂含锌粉尘综合利用及相关

- 处理工艺比较[J]. 炼铁,2010,29(4):56-62.
- SHE Xuefeng, XUE Qingguo, WANG Jingsong, et al. Comprehensive utilization of zinc-containing dust in steel plants and comparison of related treatment processes[J]. Ironmaking,2010,29(4):56-62.
- [6] 胡晓军,郭婷,周国治. 含锌冶金粉尘处理技术的发展和现状[J]. 钢铁研究学报,2011,23(7):1-5,9.
- HU Xiaojun, GUO Ting, ZHOU Guozhi. Development and current states of techniques of disposal zinc-containing dust in metallurgical industry[J]. Journal of Iron and Steel Research,2011,23(7):1-5,9.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 徐春阳,周军民,徐文婧. 回转窑处理高炉瓦斯灰的生产试验和分析[J]. 中国冶金,2015,25(11):61-66.
- XU Chunyang, ZHOU Junmin, XU Wenjing. Production experiments and analysis on blast furnace gas ash treatment with rotary kiln[J]. China Metallurgy,2015,25(11):61-66.
- [10] 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.
- [11] GRUDINSKY P I, ZINOVEEV D V, DYUBANOV V G, et al. State of the art and prospect for recycling of Waelz slag from electric arc furnace dust processing[J]. Inorganic Materials: Applied Research,2019,10(5):1220-1226.
- [12] 郭兴忠,张丙怀,阳海彬,等. 氧化锌矿火法处理新工艺-铁浴熔融还原法[J]. 有色冶炼,2002(2):18-22,2-1.
- GUO Xingzhong, ZHANG Binghuai, YANG Haibin, et al. New process for fire treatment of zinc oxide ore-iron bath fusion reduction method[J]. Nonferrous Metallurgy,2002(2):18-22,2-1.
- [13] 朱子宗,沈勇玲,乔胜普. 用铁浴法分离高炉炉尘中的铅和锌[J]. 钢铁研究学报,2002(6):1-5.
- ZHU Zizong, SHEN Yongling, QIAO Shengpu. Separating Zn and Pb from BF dust by iron-bath process[J]. Journal of Iron and Steel Research,2002(6):1-5.
- [14] LIU X L, LIU Z J, ZHANG J L, et al. Recovery of iron and zinc from Blast furnace dust using iron-bath reduction[J]. High Temperature Materials and Processes,2019,38(1):767-772.
- [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] 张俊,严定鏊,齐渊洪,等. 钢铁冶炼渣的处理利用难点分析[J]. 钢铁,2020,55(1):1-5.
- ZHANG Jun, YAN Dingliu, Qi Yuanhong, et al. Difficulty analysis on treatment and utilization of iron and steel smelting slag[J]. Iron and Steel,2020,55(1):1-5.
- [17] 王德永,李勇,刘建,等. 钢渣中同时回收铁和磷的资源化利用新思路[J]. 中国冶金,2011,21(8):50.
- WANG Deyong, LI Yong, LIU Jian, et al. A new design of Fe and P simultaneous recovery from steel slag[J]. China Metallurgy,2011,21(8):50.
- [18] 居殿春,邱家用,徐敏人,等. 碳对含钛高炉渣钠化反应热力学及钠化率的影响[J]. 钢铁,2018,53(1):88.
- JU Dianchun, QIU Jiayong, XU Minren, et al. Effect of carbon on rate and thermodynamics of sodium reaction of titanium-bearing blast furnace slag[J]. Iron and Steel,2018,53(1):88.
- [19] 华福波,张伟,薛正良,等. 焦炭在铁水中溶解的动力学实验[J]. 钢铁研究学报,2018,30(6):427-433.
- HUA Fubo, ZHANG Wei, XUE Zhengliang, et al. Kinetic experiment of dissolving coke in molten iron[J]. Journal of Iron and Steel Research,2018,30(6):427-433.
- [20] BANDYOPADHYAY D, SINGH S D, SANYAL D, et al. A study on dissolution kinetics of carbon in liquid iron bath[J]. Chemical Engineering Journal,2003,94(2):79-92.

Analysis on electric furnace dust reduction melting-separation process by iron-bath smelting reduction process

YANG Chao¹, SHE Xue-feng¹, WANG Ru-yi², WANG Jing-song¹, XUE Qing-guo¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Baoshan Iron & Steel Co., Ltd. Research Institute, Shanghai 201900, China)

Abstract: In this paper, electric arc furnace dust (EAFD), reductant and slag-forming agent were proportioned into carbon-containing pellets and added to the iron bath at 1 500 °C in the vertical tube furnace to recover zinc and

(下转第 114 页)