转炉除尘灰碳热还原试验研究

张建松[1]，张玉柱[1]，龙 跃[1]，杜培培[2]，张良进[1]，王贵华[1]
（1. 华北理工大学 冶金与能源学院，河北 唐山 063210；2. 东北大学 冶金学院，辽宁 沈阳 110819）

摘要：本文采用FactSage热力学软件对不同温度、$n(C)/n(O)$（摩尔比）条件下转炉除尘灰碳热还原过程中各物质平衡关系进行研究，通过正交试验探究焙烧温度、焙烧时间和$n(C)/n(O)$三因素对转炉除尘灰金属化率和脱锌率的影响规律，得出最佳焙烧条件。结果表明：基于热力学原理，当焙烧温度不小于1 200 K时，粉尘中ZnO才能被全部脱除，并实现铁、锌分离；还原试验中，焙烧温度对转炉除尘灰金属化率和脱锌率的影响最大，其次是焙烧时间，$n(C)/n(O)$影响最小；根据配碳最小化原则，得出焙烧温度为1 100 ℃、焙烧时间为60 min、$n(C)/n(O)$为0.7时焙烧条件最佳，该条件下转炉除尘灰金属化率为99.10%，脱锌率为98.42%。

关键词：转炉除尘灰；碳热还原；金属化率；脱锌率
中图分类号：X757；TF09 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)06－0076－08
doi：10.13403/j.sjqt.2022.06.087

Experimental research on carbothermal reduction of converter fly ash

ZHANG Jiansong[1], ZHANG Yuzhu[1], LONG Yue[1], DU Peipei[2], ZHANG Liangjin[1], WANG Guihua[1]
(1. *College of Metallurgy and Energy, North China University of Technology, Tangshan* 063210, *Hebei, China*;
2. *School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang* 110819, *Liaoning, China*)

Abstract: FactSage thermodynamic software is used to study the material balance of converter fly ash during carbothermal reduction at different temperatures and $n(C)/n(O)$ (molar ratio). The influence rule of roasting temperature, roasting time and $n(C)/n(O)$ on metallization and dezincification rate of converter fly ash is explored by orthogonal test, and the best roasting conditions are obtained. The results show that, based on the thermodynamic principle, when the roasting temperature is equal or greater than 1 200 K, the ZnO in the dust can be completely removed, and the separation of iron and zinc can be realized. In the reduction test, roasting temperature has the greatest influence on metallization and dezincification rate of converter fly ash, followed by roasting time, and $n(C)/n(O)$ in order. According to the principle of minimum carbon distribution, the optimum roasting conditions are obtained when roasting temperature is 1 100 ℃, roasting time is 60 min and $n(C)/n(O)$ is 0.7. Under these conditions, the metallization and dezincification rate of converter fly ash are 99.10% and 98.42%, respectively.

Key words: converter fly ash; carbothermal reduction; metallization; dezincification rate

在转炉炼钢过程中，氧气流会冲击熔池反应区并与铁水中的碳剧烈反应产生局部高温热点和大量炉气。局部高温可导致少量物质蒸发气化，同时炉气逸出时也会夹带出一些物质微粒，这些烟气经干法除尘系统净化后收集得到的灰尘称为转炉除尘灰（以下简称“转炉灰”）[1-3]。每吨钢产生的转炉灰约为20 kg，按此计算2021年我国钢铁工业转炉灰的产量约为

收稿日期：2022－10－05；**修回日期**：2022－10－27
基金项目：国家自然科学基金联合基金资助项目(U20A20271)；河北省高等学校科学技术研究项目(QN2022091)
作者简介：张建松(1988—)，男，讲师，从事冶金节能与资源优化方面的研究。
通信作者：张玉柱(1956—)，男，教授，从事炼铁新工艺、冶金节能与资源优化等方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0.2 亿吨[4]。体量巨大的转炉灰如何在企业内部全量化利用成为各大钢铁企业关注的焦点之一。

转炉灰主要成分为铁氧化物，是宝贵的二次资源[5]。目前，转炉除尘灰大多以传统的方式，通过回配烧结的方法实现铁资源的回收。但相关研究表明，除尘灰配加量过高会影响烧结矿质量，而且除尘灰中还含有 Zn、Pb 等对高炉冶炼有害的元素，特别是镀锌板在转炉炼钢中大量使用，使转炉灰中含锌量升高，回配烧结会增加烧结矿的含锌量，导致高炉锌富集，不利于高炉顺行和长寿[6]。众多钢铁企业采用冷固结工艺将转炉灰制成球团，作为化渣剂和冷却剂在线回收到转炉工序中。首钢京唐[7]以淀粉为黏结剂，配加部分氧化铁皮或铁精粉，将转炉灰制成铁品位为 50%～55%，强度不小于 800 N/P 的球团，用于转炉工艺取得了较好的经济效益；福建三钢[8]以转炉灰、OG 泥和氧化铁皮为原料，配加部分催化剂，将其压制成直径为 30 mm、强度为 600 N/P 以上的球团，代替部分造渣剂和矿石用于转炉炼钢，运行稳定后该厂实现了 70% 以上转炉灰的在线回收，吨钢矿石消耗降至 2.39 kg。转炉灰替代化渣剂和冷却剂回收到转炉工艺可实现 Fe、CaO 等资源的高效回收[9-11]，但由于球团固结效果差，致使炼钢过程中烟尘含锌量升高，加重除尘负担，同时除尘灰中的锌资源不能有效回收。火法处理工艺可有效回收除尘灰中的铁、锌资源，生产效率高、脱锌率高，是当前冶金粉尘有价元素回收的有效途径，但火法工艺也存在设备投资大、能耗高等缺点[12]。当前，我国部分大型钢铁企业以高炉瓦斯灰(泥)、转炉除尘灰等为主要原料，通过回转窑和转底炉工艺分离、回收粉尘中的锌、铁资源[13]。

本文采用碳热还原法处理转炉灰，将焙烧温度、焙烧时间和 $n(C)/n(O)$ 作为转炉灰碳热还原过程中的主要影响因素，通过正交试验研究这 3 个因素对转炉灰脱锌率和金属化率的影响规律，提出在低配碳(实验室条件下)的基础上实现锌铁分离回收的最佳工艺条件，以期为多源冶金粉尘协同还原提供理论依据和参考。

1　理论计算

1.1　$ZnFe_2O_4$ 还原热力学

除尘灰中的锌主要以 $ZnFe_2O_4$ 形式存在，在碳热还原的条件下，$ZnFe_2O_4$ 可以与 C 发生直接还原反应，也可与 CO 发生间接还原反应。反应(1)～(6)为 $ZnFe_2O_4$ 被 C、CO 还原的主要反应。利用 FactSage 热力学软件 Reaction 模块计算反应(1)～(6)在不同温度条件下的标准吉布斯自由能，结果如图 1 所示。由图 1 可知：$ZnFe_2O_4$ 同 C、CO 的还原反应与 Fe_2O_3 相似，遵循逐级还原反应规律，反应(1)和(4)易发生，当反应(1)和(4)中的 Fe_3O_4 生成时，意味着实现了 $ZnFe_2O_4$ 的分解。实际上，$ZnFe_2O_4$ 被还原为金属铁和锌的过程，可近似认为是 ZnO 和 Fe_2O_3 的还原。

$$3ZnFe_2O_4 + C = 3ZnO + 2Fe_3O_4 + CO(g) \quad (1)$$

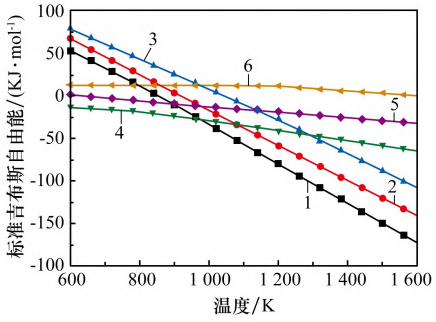
$$ZnFe_2O_4 + C = ZnO + 2FeO + CO(g) \quad (2)$$

$$1/4ZnFe_2O_4 + C = 1/4Zn(g) + 1/2Fe + CO(g) \quad (3)$$

$$3ZnFe_2O_4 + CO(g) = 3ZnO + 2Fe_3O_4 + CO_2(g) \quad (4)$$

$$ZnFe_2O_4 + CO(g) = ZnO + 2FeO + CO_2(g) \quad (5)$$

$$1/4ZnFe_2O_4 + CO(g) = 1/4Zn(g) + 1/2Fe + CO_2(g) \quad (6)$$



1～6—反应(1)～(6)。

图 1　$ZnFe_2O_4$ 与 C、CO 反应的热力学分析

Fig. 1　Thermodynamic analysis of the reaction of $ZnFe_2O_4$ with C and CO

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.2 转炉除尘灰碳热还原物质平衡

转炉除尘灰碳热还原反应既包括 C 与氧化物的直接还原，也包括 CO 与氧化物的间接还原，反应(7)～(14)为转炉除尘灰中锌、铁氧化物被 C、CO 还原的主要反应。利用 FactSage 热力学软件 Reaction 模块计算反应(7)～(14)在不同温度条件下的标准吉布斯自由能，结果如图 2 所示。

$$ZnO + C = Zn(g) + CO(g) \quad (7)$$

$$3Fe_2O_3 + C = 2Fe_3O_4 + CO(g) \quad (8)$$

$$Fe_3O_4 + C = 3FeO + CO(g) \quad (9)$$

$$FeO + C = Fe + CO(g) \quad (10)$$

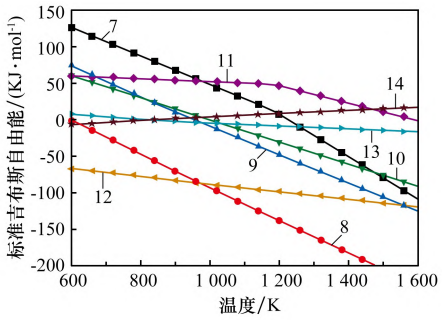
$$ZnO + CO(g) = Zn(g) + CO_2(g) \quad (11)$$

$$3Fe_2O_3 + CO(g) = 2Fe_3O_4 + CO_2(g) \quad (12)$$

$$Fe_3O_4 + CO(g) = 3FeO + CO_2(g) \quad (13)$$

$$FeO + CO(g) = Fe + CO_2(g) \quad (14)$$

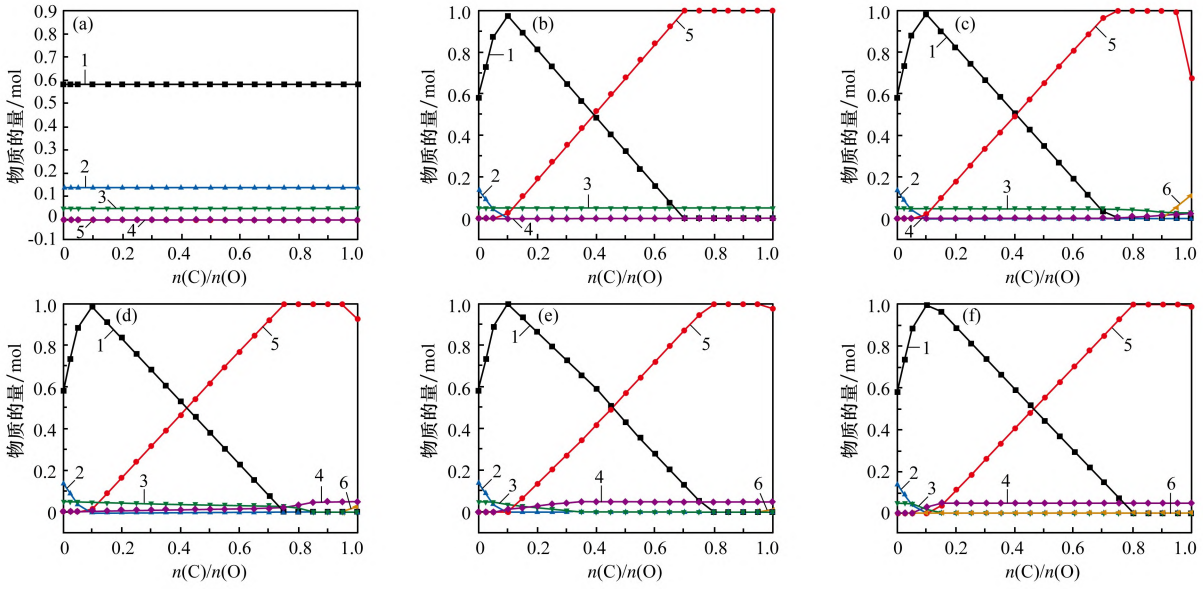
由图 2 可知，当温度超过 1 225 K 时，铁、锌氧化物均能与 C 发生直接还原反应，而 ZnO、FeO 与 CO 的间接还原不易发生。实际上，铁、锌氧化物与 C 发生固－固反应受到反应物间接触面积的限制，反应速度较慢，间接还原在转炉灰碳热还原反应中起到了主导作用[14]。间接还原反应发生与否不能只考虑标准吉布斯自由能，还要考虑 CO 体积浓度，碳热还原过程中 CO 体积浓度又受到碳气化反应的影响。为确定转炉灰碳热还原试验的反应温度与配碳量，利用 FactSage 热力学软件 Equilib 模块模拟 100 g 转炉灰碳热还原反应过程，计算分析转炉灰中铁、锌氧化物在不同温度和 $n(C)/n(O)$ 条件下的物质平衡关系。假定除尘灰中只有铁、锌氧化物参加反应，其他组成部分不影响反应的进行，模拟初始条件：FeO 为 0.582 5 mol，Fe_3O_4 为 0.138 6 mol，ZnO 为 0.047 7 mol，$n(C)/n(O)$ 为 0～1，计算结果如图 3 所示。



7～14—反应(7)～(14)。

图 2 铁、锌氧化物与 C、CO 反应的热力学分析

Fig. 2 Thermodynamic analysis of the reaction of iron and zinc oxides with C and CO



温度/K：(a) 900；(b) 1 000；(c) 1 100；(d) 1 200；(e) 1 300；(f) 1 400

1—FeO；2—Fe_3O_4；3—ZnO；4—Zn (g)；5—Fe；6—Fe_3C。

图 3 不同温度下各物质的量与 $n(C/O)$ 的关系

Fig. 3 Relationships between the amount of substances and $n(C/O)$ at different temperatures

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由图 3 可知：$n(C)/n(O)$在 0 ~ 1 范围内，当温度为 900 K 时，Fe_3O_4、FeO、ZnO 均不能与 C 发生反应；当温度大于或等于 1 000 K，$n(C)/n(O) \geqslant 0.7$ 时，铁氧化物全部被还原为金属铁，当温度升高到 1 200 K 以上时，铁氧化物全部还原所需 $n(C)/n(O)$提高到 0.8；当温度在 1 200 K 以下时，ZnO 很难被还原；当温度超过 1 200 K，$n(C)/n(O) \geqslant 0.9$ 时，ZnO 能够全部转化为锌蒸汽；当温度继续升高时，ZnO 全部转化为锌蒸汽所需 $n(C)/n(O)$降低。通过模拟可知，当温度不小于 1 200 K 时，可通过碳热还原实现铁、锌分离。

2　试验原料与方法

2.1　试验原料

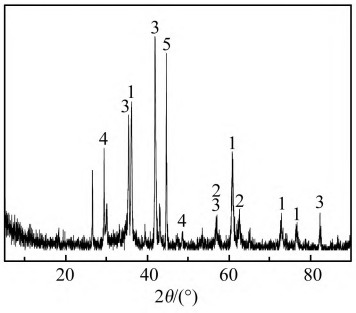
原料选自某钢铁公司的转炉除尘灰，其化学成分见表 1。

表 1　转炉除尘灰的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Mainchemical composition of converter dust　%

TFe	FeO	MFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	TiO_2	S	P	MnO	Pb	Zn
57.64	51.92	1.74	2.56	5.98	1.3	0.39	0.034	0.087	0.1	0.74	0.037 8	3.1

由表 1 可知：该除尘灰的 TFe 质量分数高达 57.64%，且超过 70% 的铁以 FeO 形式存在，同时存在少量的单质铁；除尘灰中 CaO 质量分数较高，为 5.98%；锌的质量分数为 3.1%。除尘灰的物相组成如图 4 所示。由图 4 可知：转炉灰铁存在的物相有 FeO、MFe、Fe_3O_4 和 $ZnFe_2O_4$，锌主要以 $ZnFe_2O_4$ 形式存在。试验所用煤粉为烟煤，煤粉的工业分析如表 2 所示。由表 2 可知，试验所用煤粉挥发分较高，固定碳质量分数为 61.6%。



1—FeO；2—Fe_3O_4；3—$ZnFe_2O_4$；4—$CaCO_3$；5—Fe。

图 4　转炉除尘灰 XRD 衍射图谱

Fig. 4　XRD pattern of converter dust

表 2　煤粉工业分析(质量分数)

Table 2　Industrial analysis of pulverized coal　%

水分	灰分	挥发分	硫	固定碳
0.28	5.66	32.46	0.26	61.6

2.2　试验方法

将转炉灰和烟煤放入干燥箱中，在 105 ℃下干燥 3 h，干燥后将其破碎磨细至 −0.154 mm 粒级占比为 50% 左右；将 20 g 转炉灰与一定量的煤粉混合，混合均匀后放入带盖的石墨坩埚中备用；在 KY-DZ1700-12LD 型高温箱式炉内进行转炉灰还原焙烧试验，当炉温达到设定温度后，将放好混合料的坩埚送入炉内，待炉温稳定后开始计时，焙烧结束时迅速取出坩埚置于氮气桶中冷却至室温，并对焙烧矿样进行称重。试验主要流程如图 5 所示。

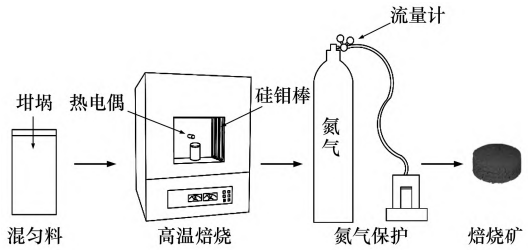


图 5　试验主要流程示意

Fig. 5　Schematic diagram of main flow of the experiment

采用正交试验，所设因素水平如表 3 所示，其中 $n(C)/n(O)$是指煤粉中固定碳与原料中铁、锌氧化物中氧的摩尔比。试验前对转炉灰全铁、金属铁和锌的质量分数进行检测，试验结束后对所有焙烧后矿样进行金属铁和锌的质量分数检测。金属化率 η 和脱锌率 X_{Zn}计算方法如式(15)、(16)所示。

$$\eta = \frac{m_2 \times w(MFe_2) - m_1 \times w(MFe_1)}{m_1 \times w(TFe) - m_1 \times w(MFe_1)} \times 100\% \tag{15}$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$X_{Zn}=\frac{m_1\times w(Zn_1)-m_2\times w(Zn_2)}{m_1\times w(Zn_1)}\times 100\% \tag{16}$$

式中：m_1、m_2 分别为焙烧前转炉灰和焙烧后焙烧矿的质量，g；$w(MFe_1)$、$w(MFe_2)$分别为焙烧前转炉灰和焙烧后焙烧矿中金属铁的质量分数,%；$w(TFe)$为焙烧前转炉灰中全铁质量分数,%；$w(Zn_1)$、$w(Zn_2)$分别为焙烧前转炉灰和焙烧后焙烧矿中锌的质量分数,%。

3 试验结果与讨论

采用正交表 $L_{25}(5\times3)$进行试验，试验设计和结果如表4所示。表中 $k_1\sim k_5$ 为各因素相应每个水平综合平均值，极差 R 为同一列 k_i 中最大值与最小值之差。

表3 试验因素水平

Table 3 Factor level design of the experiment

水平	因素		
	A(焙烧温度)/℃	B[n(C)/n(O)]	C(焙烧时间)/min
1	950	0.7	30
2	1 000	0.8	40
3	1 050	0.9	50
4	1 100	1.0	60
5	1 150	1.1	70

表4 试验设计及结果

Table 4 Design and results of the experiment

试验编号	A(焙烧温度)/℃	B[n(C)/n(O)]	C(焙烧时间)/min	金属化率/%	脱锌率/%
1	1(950)	1(0.7)	1(30)	3.72	3.39
2	1	2(0.8)	2(40)	11.76	5.72
3	1	3(0.9)	3(50)	50.13	9.49
4	1	4(1.0)	4(60)	52.18	11.96
5	1	5(1.1)	5(70)	70.44	26.85
6	2(1 000)	1	2	90.41	39.14
7	2	2	3	88.64	64.84
8	2	3	4	95.15	91.58
9	2	4	5	96.03	90.92
10	2	5	1	87.19	32.73
11	3(1 050)	1	3	90.24	87.40
12	3	2	4	95.92	98.62
13	3	3	5	94.04	99.08
14	3	4	1	98.21	90.43
15	3	5	2	96.82	97.33
16	4(1 100)	1	4	99.10	98.42
17	4	2	5	97.26	99.54
18	4	3	1	96.50	99.14
19	4	4	2	97.79	99.56
20	4	5	3	95.41	99.73
21	5(1 150)	1	5	99.07	99.12
22	5	2	1	99.34	99.22
23	5	3	2	97.28	99.75
24	5	4	3	96.40	99.84
25	5	5	4	95.43	99.87

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

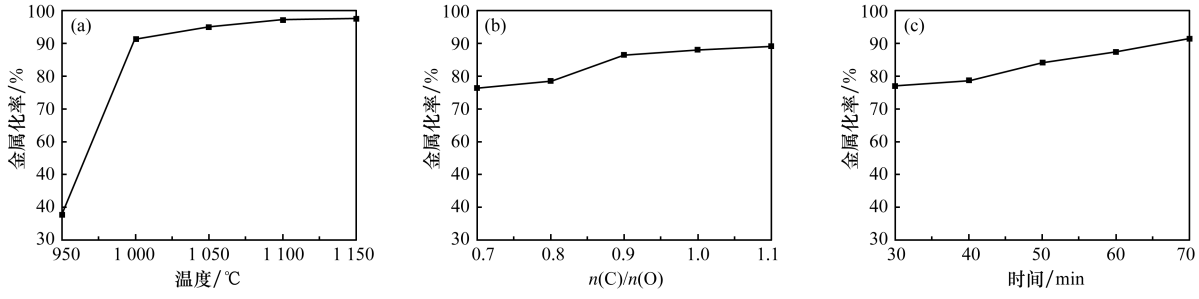
（续表 4）

试验编号		A(焙烧温度)/℃	B[n(C)/n(O)]	C(焙烧时间)/min	金属化率/%	脱锌率/%
金属化率	k_1	37.65	76.51	76.99	—	—
	k_2	91.48	78.58	78.81	—	—
	k_3	95.05	86.62	84.16	—	—
	k_4	97.21	88.12	87.56	—	—
	k_5	97.50	89.06	91.37	—	—
	R	59.85	12.55	14.38	—	—
脱锌率	k_1	11.48	65.49	64.98	—	—
	k_2	63.84	73.59	68.30	—	—
	k_3	94.57	79.81	72.26	—	—
	k_4	99.28	78.54	80.09	—	—
	k_5	99.56	71.30	83.10	—	—
	R	88.08	14.32	18.12	—	—

3.1　焙烧温度、n(C)/n(O)、焙烧时间对转炉灰金属化率的影响

从表 4 可以看出，对于转炉灰金属化率来说，焙烧温度、n(C)/n(O)、焙烧时间 3 个因素所对应的极差值分别为 59.85、12.55、14.38，即：$R_A > R_C > R_B$，这表明影响转炉灰金属化率的主次顺序为焙烧温度、焙烧时间、n(C)/n(O)。

分别以各因素的水平值和每个水平综合平均值 k_i 为横、纵坐标，绘制焙烧温度、n(C)/n(O)、焙烧时间对转炉灰铁氧化物金属化率影响关系曲线，结果如图 6 所示。由图 6 可知，综合金属化率随着焙烧温度、n(C)/n(O)和焙烧时间的增加都呈现增加的趋势，焙烧温度增加对金属化率影响较为显著。金属化率随着焙烧温度的升高呈先急剧增加后缓慢增加的趋势，当焙烧温度从 950 ℃增加到 1 000 ℃时，金属化率从 37.65% 增加到 91.48%；而从 1 000 ℃升高到 1 100 ℃的过程中金属化率增加缓慢，1 100 ℃到 1 150 ℃趋于平稳。当焙烧温度超过 1 000 ℃时，综合金属化率均高于 91.48%，说明转炉除尘灰粒度细小，且 SiO_2 质量分数较少，形成难还原的铁橄榄石($2FeO·SiO_2$)相较少，转炉除尘灰还原较为容易。当 n(C)/n(O)从 0.7 增加到 0.9 时，综合金属化率提高了 10.11%，n(C)/n(O)继续增加，综合金属化率趋于稳定。焙烧时间的增加综合金属化率呈现一直增加的趋势，但整体增加的幅度较小。综合以上分析，正交试验最佳组合为 $A_5B_5C_5$。



（a）温度；（b）n(C)/n(O)；（c）时间

图 6　3 个因素对转炉灰金属化率的影响规律

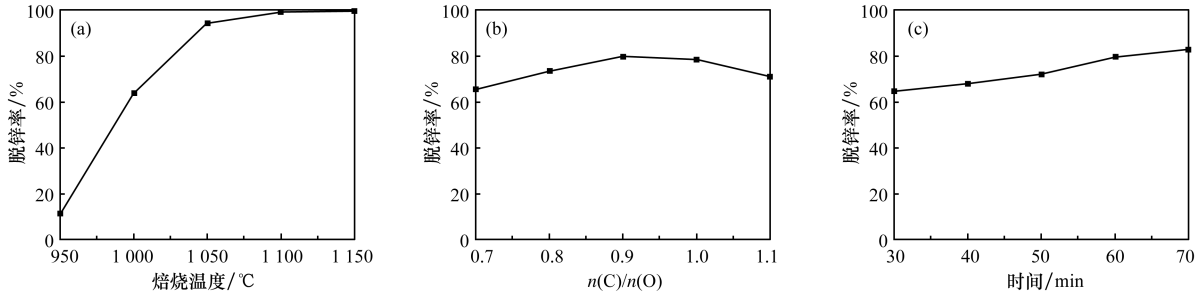
Fig. 6　Influence law of three factors on metallization rate of converter dust

3.2　焙烧温度、n(C)/n(O)、焙烧时间对转炉灰脱锌率的影响

从表 4 可以看出，对于转炉灰脱锌率来说焙烧温度、n(C)/n(O)、焙烧时间 3 个因素所

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对应的极差值分别为 88.08、14.32、18.12，即：$R_A > R_C > R_B$，这说明焙烧温度对转炉灰脱锌率影响最大，焙烧时间对脱锌率影响次之，$n(C)/n(O)$影响最小。分别以各因素的水平值和每个水平综合平均值 k_i 为横、纵坐标，绘制焙烧温度、$n(C)/n(O)$、焙烧时间对脱锌率影响关系曲线，结果如图7所示。



（a）温度；（b）$n(C)/n(O)$；（c）时间

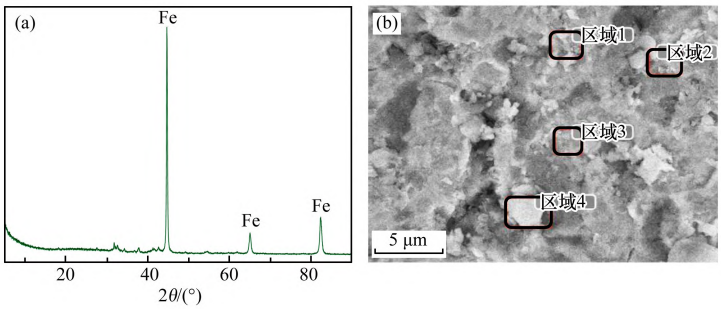
图7 三因素对转炉灰脱锌率的影响规律

Fig. 7 Influence law of three factors on dezincification rate of converter dust

由图7可知：转炉灰综合脱锌率受焙烧温度影响较大；随着焙烧温度增加，综合脱锌率随之增加。当焙烧温度为950 ℃时，综合脱锌率仅为11.48%；当焙烧温度从950 ℃增加到1 050 ℃时，综合脱锌率达到了94.57%；当焙烧温度超过1 100 ℃时，综合脱锌率超过了98%，脱锌效果较好。焙烧时间是脱锌反应的次要因素，综合脱锌率随着焙烧时间的延长而缓慢增加。$n(C)/n(O)$对脱锌反应影响较小，综合脱锌率随着$n(C)/n(O)$的增加呈现增加后减小的趋势。当$n(C)/n(O)$为0.9时综合脱锌率最大。通过以上分析，正交试验最佳组合为$A_5B_3C_5$。

3.3 最佳焙烧条件下产物的微观分析

经过上述结果分析可知，铁氧化物还原的最佳条件为$A_5B_5C_5$，脱锌反应的最佳条件为$A_5B_3C_5$。当焙烧温度超过1 100 ℃后，焙烧产物金属化率和脱锌率基本保持稳定，因此确定1 100 ℃为最佳焙烧温度。按配碳最小原则，当焙烧温度为1 100 ℃，焙烧时间为60 min，$n(C)/n(O)$为0.7时，转炉除尘灰金属化率为99.10%，脱锌率为98.42%，焙烧产物的锌脱除率与金属化率均达到较好水平。图8为该焙烧条件下还原产物的XRD衍射图谱和SEM图片。由图8(a)可以看出，铁为主要物相，说明该条件下铁氧化物还原程度较高。由图8(b)可以发现，还原产物分布较为均匀，未发现较大颗粒状或带状金属铁。表5为图8扫描电镜图片中4个区域的能谱分析。由表5可看出：区域4内Si、Ca、Mg、Al、O质量分数均高于其他3个区域，说明该区域为几种元素组成的盐类可能性较大；其他3个区域的Fe质量分数较



（a）XRD衍射图谱；（b）SEM图片

图8 还原产物的XRD衍射图谱和SEM图片

Fig. 8 XRD diffraction patterns and SEM images of reduction products

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 5　图 8 中对应区域的能谱分析结果(质量分数)

Table 5　Results of EDS analysis of corresponding regions in Figure 8　%

能谱区域	O	Mg	Al	Si	Ca	Mn	Fe
1	7.07	1.31	0.68	1.00	4.70	0.90	84.34
2	6.25	1.38	0.13	1.13	4.46	0.95	85.69
3	8.74	5.60	0.31	2.07	8.23	2.30	72.74
4	35.48	14.22	1.10	5.63	16.52	2.34	24.71

高，O 质量分数较低，铁氧化物还原效果较好；4 个区域均未发现 Zn 元素存在，表明焙烧产物中锌脱除较为彻底。

4　结　论

(1) 根据热力学理论分析，$ZnFe_2O_4$ 与 Fe_2O_3 反应性相似并且遵循逐级反应规律，在高温下易被 C、CO 还原成 ZnO 和 Fe_3O_4。经 FactSage 数值模拟可知：在碳热还原过程中碳充足的条件下，当焙烧温度不小于 1 000 K 时，铁氧化物可以完全转化为金属铁；当焙烧温度不小于 1 200 K 时，ZnO 可以全部转化成锌蒸汽。通过碳热还原实现锌铁分离需满足焙烧温度不小于 1 200 K 的焙烧条件。

(2) 在试验研究条件下，转炉除尘灰金属化率和脱锌率受焙烧温度影响较大，焙烧时间影响次之，$n(C)/n(O)$ 影响最小。转炉除尘灰火法工艺实现锌、铁分离的主要因素为焙烧温度。试验所得铁氧化物还原的最佳条件为 $A_5B_5C_5$，脱锌反应的最佳条件为 $A_5B_3C_5$。

(3) 按配碳最小原则，当焙烧温度为 1 100 ℃，焙烧时间为 60 min，$n(C)/n(O)$ 为 0.7 时，转炉除尘灰金属化率为 99.10%，脱锌率为 98.42%，可获得 TFe 质量分数为 81.53%、含锌量为 0.07% 的金属化炉料。

参考文献：

[1] 冯捷，张红文. 转炉炼钢生产[M]. 北京：冶金工业出版社，2006.
FENG Jei, ZHANG Hongwen. Converter steelmaking production[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.

[2] DANIEL JC, ANDREW R. Pyrometallurgical removal of zinc from basic oxygen steelmaking dust: A review of best available technology[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2020 (157): 104746.

[3] 李翔. 转炉除尘灰冷固球团气硬性粘结机制及除尘系统结垢研究[D]. 重庆：重庆大学，2021.
LI Xiang. Nonhydraulic bonding mechanism of cold-bonded BOF dust pellets and agglomeration in cleaning system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.

[4] 余非漉，王海涛，王冠，等. 冶金工业烟尘减排与回收利用[M]. 北京：化学工业出版社，2012.
YU Feilu, WANG Haitao, WANG Guan, et al. Emission reduction and recycling of smoke and dust in metallurgical industry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.

[5] 熊果，刘欣，周云花，等. 含锌转炉炼钢泥的理化特性分析研究[J]. 烧结球团，2021，46(3)：93－98.
XIONG Guo, LIU Xin, ZHOU Yunhua, et al. Analytical research on physicochemical property of zinc-containing dust from converter steelmaking process[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(3): 93－98.

[6] 尚海霞，李海铭，魏汝飞. 钢铁尘泥的利用技术现状及展望[J]. 钢铁，2019，54(3)：9－17.
SHANG Haixia, LI Haiming, WEI Rufei, et al. Present situation and prospect of iron and steel dust sludge utilization technology. Iron and Steel, 2019, 54(3): 9－17.

[7] 王欣，崔乾民，徐栋梁. 首钢京唐钢铁厂转炉除尘灰冷固球团生产线工程设计特点[C]//第八届(2011)中国钢铁年会论文集. 北京：中国金属学会，2011.
WANG Xin, CUI Qianmin, XU Dongliang. Design characteristic of converter dust ash cold solid pellet line in jingtang plant [C]//Proceedings of the 8th(2011) China Iron and Steel Annual Conference. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2011.

[8] 柯建祥. 转炉炼钢粉尘的内循环利用研究[J]. 炼钢，2013，29(2)：71－74.
KE Jianxiang. Research on cyclic utilization of converter steelmaking dust in BOF[J]. steelmaking, 2013, 29(2): 71－74.

[9] 雷爱敏. 转炉除尘灰在线回收利用的探讨[J]. 冶金与材料，2020，40(5)：147－148.
LEI Aimin. Discussion on on-line recycling of converter dust [J]. Metallurgy and materials, 2020, 40(5): 147－148.

[10] 张沅，徐铁，陈高亮. 转炉除尘灰的循环利用技术和应用[J]. 包钢科技，2017，43(6)：17－19.
ZHANG Yuan, XU Tie, CHEN Gaoliang. Recycling technology and application of converter dust ash[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2017, 43(6): 17－19.

(下转第 131 页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

process of high concentration hydrogen chloride flue gas from incineration of medical waste[J]. Environmental Sanitation Engineering 2022,30(1):60 – 64.

[25] 周康. 活性炭纤维(ACF)吸附脱除废气中氯化氢(HCl)的实验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
ZHOU Kang. Experimental study on a dsorpt ion and removal of hydrogen chloride (HCl) from exhaust gases by activated carbon fiber (ACF)[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2013.

[26] 杨本涛,冯哲愚,叶恒棣,等. 钢铁工业高盐废水来源及零排放技术对比[J]. 烧结球团,2022,47(4):77 – 82.
YANG Bentao, FENG Zheyu, YE Hengdi, et al. High-salt wastewater sources in steel industry and comparison on zero-discharge technologies[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(4):77 – 82.

[27] 张乾,薛建明,吴春华,等. 碳基多孔材料脱除烟气中二噁英的研究进展[J]. 烧结球团,2021,46(5):65 – 72.
ZHANG Qian, XUE Jianming, WU Chunhua, et al. Research progress on desorption of dioxins in flue gas of carbon-based porous materials[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(5):65 – 72.

(上接第 83 页)

[11] 王少军,周朝刚,蒋朝敏,等. 基于干法除尘灰返回转炉的应用实践[J]. 中国冶金,2020,30(4):74 – 78.
WANG Shaojun, ZHOU Chaogang, JIANG Chaomin, et al. Application practice of dust returning to converter based on dry dedusting[J]. China Metallurgy,2020,30(4):74 – 78.

[12] 巨建涛,党要均. 钢铁厂含锌粉尘处理工艺的现状及发展[J]. 材料导报 A,2014,28(5):109 – 113.
JU Jiantao, DANG Yaojun. Present State and Development of Zinc-bearing Dust Treatment Process in Iron and Steel Plants[J]. Materials Reports A,2014,28(5):109 – 113.

[13] 刘超,张玉柱,王峰. 多源冶金粉尘资源化研究现状及展望[J]. 中国冶金,2022,32(10):38 – 44.
LIU Chao, ZHANG Yuzhu. Research status and prospect of multi-source metallurgical dust recycling[J]. China Metallurgy,2022,32(10):38 – 44.

[14] 高建军. 钒钛磁铁矿回转窑预热还原 – 全氧熔池熔炼基础研究[D]. 北京:钢铁研究总院,2018:32 – 33.
GAO Jianjun. Basic research for vanadium titano-magnetite extracted by rotary kiln pre-reduction and full oxygen bath smelting process[D]. Beijing:Central Iron & Steel Reasearch Institute,2018:32 – 33.

(上接第 105 页)

[11] 张强. 高炉冶炼炼铁技术工艺及应用探究[J]. 冶金管理,2021(7):9;30.
ZHANG Qiang. Study on the technology and application of Blast Furnace smelting Iron making[J]. China Steel Focus, 2021(7):9;30.

[12] 杨本涛,冯哲愚,叶恒棣,等. 钢铁工业高盐废水来源及零排放技术对比[J]. 烧结球团,2022,47(4):77 – 82.
YANG Bentao, FENG Zheyu, YE Hengdi, et al. High salt wastewater sources in steel industry and comparison on zero-discharge technologies[J]. Sintering and Pelletizing, 202, 47(4):77 – 82.

[13] CHIANG K Y,HU Y H. Water washing effects on metals emission reduction during municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash melting process[J]. Waste Management, 2010,30(5):831 – 838.

[14] 刘智勇. 氧化锌矿物在氨 – 铵盐 – 水体系中的浸出机理[D]. 长沙:中南大学,2012.
LIU Zhiyong. Leaching mechanism of zinc oxide ores in ammonia-ammonium aqueous solution[D]. Changsha:Central South University,2012.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net