碳热还原作用下烧结机机头灰中钾、钠、锌脱除规律

张建松[1]，张玉柱[1a]，龙 跃[1a]，杜培培[1a]，任倩倩[1a,2]，刘 超[1a]
（1. 华北理工大学 a. 冶金与能源学院；b. 综合测试分析中心，河北 唐山 063210；
2. 河北普阳钢铁有限公司，河北 邯郸 056307）

摘要：烧结机机头灰中 Fe 和 K 具有较高的回收价值，两种金属的回收是机头灰资源化的主要目标。本文采用化学分析、X 射线衍射和扫描电镜对机头灰的化学组成、物相组成及微观结构等理化性质进行研究，通过焙烧试验探究焙烧温度、焙烧时间和 $n(C)/n(O)$（物质的量之比）三因素对机头灰金属化率和 K、Na、Zn 脱除率的影响规律。结果表明：机头灰中 Fe、K 和 Cl 主要组成元素总质量分数为 55.72%，灰中 K、Na、Zn 分别以 KCl、NaCl 和 $ZnFe_2O_4$ 形式存在；含碳团块的金属化率和 K、Na、Zn 脱除率随焙烧温度、焙烧时间和 $n(C)/n(O)$ 的增加呈升高趋势；团块中 Zn 的脱除比较容易，K、Na 的脱除相对困难；当焙烧温度为 1 150 ℃、焙烧时间为 10 min、$n(C)/n(O)$ 为 0.9 时，团块的金属化率和 Zn 脱除率分别为 93.97% 和 98.53%；当焙烧温度为 1 150 ℃、焙烧时间为 60 min、$n(C)/n(O)$ 为 1.2 时，团块中 K、Na 的脱除率分别为 90.14% 和 81.37%。

关键词：烧结机；除尘灰；碳热还原；金属化率；含碳团块
中图分类号：TF046.4；X757 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)06－0111－09
doi：10.13403/j.sjqt.2024.06.097

Removal rules of potassium, sodium and zinc from sinterstrand head ash under carbon thermal reduction

ZHANG Jiansong[1], ZHANG Yuzhu[1a], LONG Yue[1a], DU Peipei[1a], REN Qianqian[1a,2], LIU Chao[1a]
(1. North China University of Science and Technology a. College of Metallurgy and Energy; b. Comprehensive testing and analyzing center, Tangshan 063210, Hebei, China; 2. Hebei Puyang Iron and Steel Co., Ltd., Handan 056307, Hebei, China)

Abstract: Fe and K in sinterstrand head ash have high recovery value, and the recovery of these two metals is the main goal of head ash resource utilization. Chemical analysis, X-ray diffraction and scanning electron microscopy are used to study the physical and chemical properties of sinterstrand head ash, such as chemical composition, phase composition and microstructure. Roasting experiments are conducted to explore the influence of roasting temperature, roasting time and $n(C)/n(O)$ (ratio of amount of substance) on the metallization rate and K, Na and Zn removal rate of sinterstrand head ash. The results show that the main components of Fe, K and Cl in the sinterstrand head ash account for 55.72% of the total mass, and K, Na and Zn in the ash exist in the form of KCl, NaCl and $ZnFe_2O_4$, respectively. The metallization rate and K, Na and Zn removal rates of carbon-containing agglomerates increase with the increase of roasting temperature, roasting time and $n(C)/n(O)$. The removal of Zn in the agglomerates is relatively easy, while the removal of K and Na is relatively difficult. When the roasting temperature is 1 150 ℃, the roasting time is 10 min and the $n(C)/n(O)$ is 0.9, the metallization rate and Zn removal rate of the carbon-containing agglomerates are 93.97% and 98.53%, respectively. When

收稿日期：2024－09－26；**修回日期**：2024－10－23
基金项目：国家自然科学基金区域创新发展联合基金资助项目（U20A20271）；河北省自然科学基金资助项目（E2022209072）
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。

the roasting temperature is 1 150 ℃, the roasting time is 60 min and the $n(C)/n(O)$ is 1.2, the removal rates of K and Na in the agglomerates are 90.14% and 81.37%, respectively.

Key words: sinterstrand; dust removal; carbon thermal reduction; metallization rate; carbon-bearing lump

烧结机机头灰(简称“机头灰”)是由电除尘器捕获的烧结烟气中的极细粉尘，平均粒径在100 μm左右。机头灰的主要组成元素为Fe、Cl和K，质量分数分别为10%~40%、5%~25%和4%~25%，主要物相为Fe_2O_3、Fe_3O_4、KCl和NaCl[1-2]。机头灰中的Fe和K具有较高的回收价值，两种金属的回收是机头灰资源化的主要目标。机头灰中KCl的脱除和提取一般采用水洗工艺[3]。KCl的提取主要包括水洗浸出、固液分离、除杂与脱色、真空蒸发和冷却结晶等步骤[4]。张静等[5]采用水洗工艺处理某钢铁厂的机头灰，在浸出温度为100 ℃、固液比为1∶4、浸出时间为10 min、二次浸出的条件下，K、Na浸出率分别为100%、97.72%。钱峰等[6]提出通过水洗浸钾、磁选除铁、过滤、蒸发等工艺，去除其中的杂质元素，并采用二次提纯结晶的方法，得到纯度高达99.8%的KCl产品。水洗工艺脱除机头灰中的K、Na相对容易，水洗后滤饼中铁品位得到提高。该滤饼可以返回烧结工序，实现铁的回收。

值得注意的是，烧结工序机头电除尘器一般设有四个电场，从一电场至四电场，除尘灰中K、Na含量逐渐升高，而Fe含量逐渐降低[7]。对于水洗提钾企业来说，灰中K含量决定了KCl产品的产量和质量。因此，钢铁企业中K含量较低的机头灰很难被售出。大多数钢铁企业将一、二电场除尘灰少量配加到烧结工序使用，但长期配加会导致烧结过程“糊箅条”、烧结矿产量及质量降低[8-9]。因此，将含K、Na粉尘配入烧结工序不是明智之举。火法工艺是当前含铁粉尘无害化的主要工艺[10-11]。谢剑波等[12]、毕学工等[13]等将机头灰与轧钢铁皮、黏结剂等材料混合制成含碳球团，通过高温过程得到冶金性能较好、锌含量较低的金属化球团。SHE等[14]、PENG等[15]将多种粉尘混合压块，研究了不同焙烧条件下混合团块的金属化率和K、Na、Zn脱除率。研究表明，1 230 ℃、$n(C)/n(O)$(物质的量之比)为1.0、焙烧时间为15 min时，团块的金属化率为75%，K、Na、Zn脱除率均高于80%；当焙烧温度为1 300 ℃、$n(C)/n(O)$为1.0、焙烧时间为12 min时，团块的K、Na、Zn脱除率分别为94.5%、89.6%和97.1%。利用火法工艺将Fe含量高而K、Na含量低的粉尘中的有害元素脱除，将无害化的焙烧矿用于钢铁冶炼工序，是粉尘资源化的一种有效途径。

本文以某电场除尘灰为原料，添加一定数量的烟煤压制成含碳团块，采用焙烧试验研究不同焙烧条件下含碳团块金属化率和K、Na、Zn脱除率，探究基于回转窑焙烧温度条件下烧结粉尘火法无害化的工艺条件，为机头灰有害元素脱除及资源化利用提供参考。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

1.1.1 粒度组成及化学成分

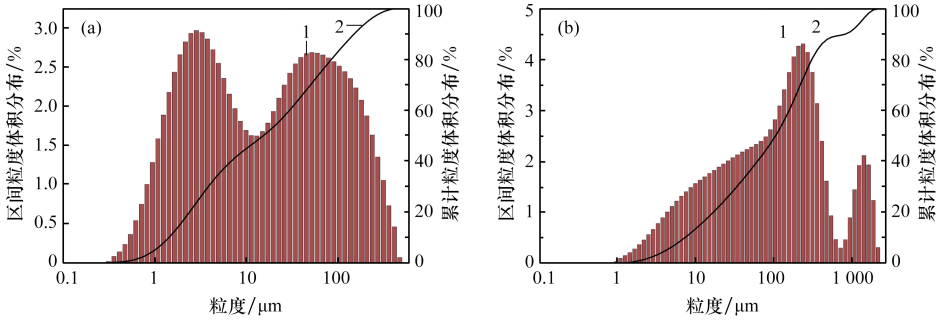
原料选自北方某钢铁公司烧结车间一电场除尘灰，其粒度组成及化学成分如图1(a)和表1所示。由图1(a)可知，机头灰粒度较小，主要分布在0.36~11.48 μm和11.48~316.23 μm两个区间内，其中位粒度为15.46 μm。由表1可知，该除尘灰的主要成分为Fe、K和Cl，其中TFe质量分数为32.35%，K和Cl的质量分数之和为23.37%。此外，机头灰中还含有Na、Zn和Pb等少量有害元素。

试验所用煤粉为烟煤，煤粉的粒度组成及工业分析分别如图1(b)和表2所示。由图1(b)可知，煤粉粒度绝大部分分布在0.96~549.54 μm

表1 机头灰的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical components of sinterstrand head ash %

TFe	Fe_2O_3	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K	Na	Cl	Pb	Zn	C
32.35	43.36	2.6	3.72	10.12	2.62	1.56	12.18	1.44	11.13	0.63	1.41	1.9



（a）机头灰；（b）煤粉

1—区间粒度体积分布；2—累计粒度体积分布。

图 1　机头灰与煤粉的粒度分布

Fig. 1　Particle size distribution of sinterstrand head ash and pulverized coal

细粒区间，少部分分布在 549.54 ~ 1 905.46 μm 粗粒区间内。由表 2 可知，试验所用煤粉的挥发分较高，固定碳质量分数为 57.43%。

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
0.3	7.68	34.38	0.35	57.43

1.1.2　微观形貌及物相组成

机头灰的微观形貌及元素分布如图 2 所示，表 3 为图 2 中对应点的能谱分析，图 3 为机头灰 X 射线衍射图谱。由图 2 可知，机头灰主要由表面光滑的颗粒状团簇和尺寸较大的块状颗粒组成，大小分布不均匀。从整体元素分布和表 3 中定点能谱分析结果可知，机头灰中 Na、K、Cl 分布情况基本一致，且主要分布在光滑的小颗粒表面，其物相组成为 KCl 和 NaCl。较大的块状颗粒中 Fe、O、Ca、Si四种元素分布较多，其物相为铁的氧化物或几种元素组成的化合物。这是由于烧结过程中燃烧层的高温导致矿石原料中 KCl、NaCl 挥发，并随着烟气进入除尘系统，温度降低后彼此凝聚或直接附着在块状大颗粒烟尘表面。而较大的含铁颗粒则是被抽风系统带出的烧结原料。图 3 也证实了 K、Na 的物相为 KCl 和 NaCl，含铁物相主要为 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4。此外，机头灰中锌以 $ZnFe_2O_4$ 形式存在。

1.2　试验方法

分别取 1 kg 机头灰和烟煤放置到 105 ℃烘箱中烘干，将烘干后的机头灰和烟煤抽真空密封保存。试验模拟回转窑温度条件进行焙烧。将原料制粒后能够有效减轻窑内扬尘情况，因此采用冷压球工艺对原料进行处理。每次试验取 25 g 机头灰与一定比例的煤粉充分混合，将混合料置于直径为 20 mm 的模具中，采用 YP-20TB 型油压式粉末压片机将混合料压制成含碳团块，设置压片机

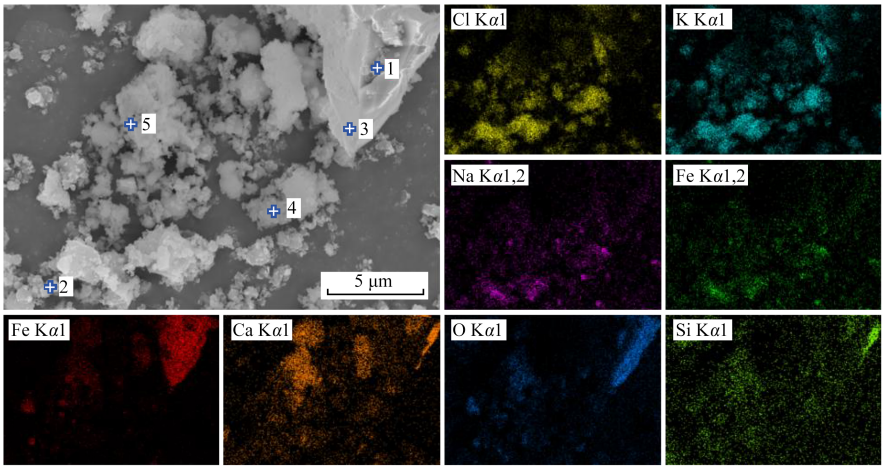


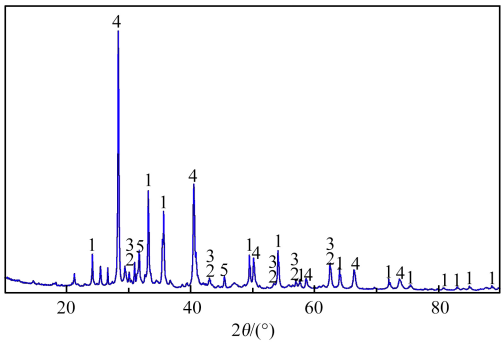
图 2　机头灰的微观形貌及元素分布

Fig. 2　Micro-morphology and element distribution of sinterstrand head ash

表 3 图 2 中对应点的能谱分析结果(质量分数)

Table 3 Results of EDS analysis of corresponding points in Fig. 2

能谱区	O	Fe	Si	Ca	Na	K	Cl
1	12. 16	82. 15	0. 16	1. 81	0. 21	1. 44	0. 65
2	12. 77	2. 35	0. 50	1. 71	3. 38	39. 56	35. 27
3	21. 32	68. 85	0. 60	1. 34	0. 71	2. 63	2. 59
4	12. 15	3. 07	0. 85	1. 78	1. 77	41. 48	34. 69
5	36. 26	20. 16	4. 58	18. 20	1. 42	7. 78	6. 83

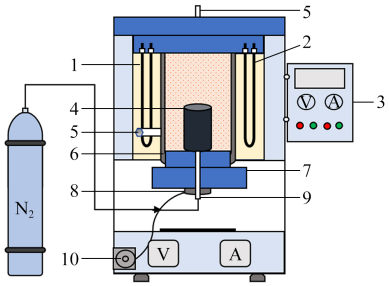


1—Fe_2O_3；2—Fe_3O_4；3—$ZnFe_2O_4$；4—KCl；5—NaCl。

图 3 机头灰的 XRD 衍射图谱

Fig. 3 XRD diffraction pattern of sinterstrand head ash

工作载荷为 6 t。将成型的含碳压块放入石墨坩埚中备用。还原焙烧试验在 ST-GP27-0757 型可升降高温管式炉内进行，试验设备如图 4 所示。试验过程中，通入的保护气体氮气的流量为 6 L/min。当炉温达到试验设定温度时，将含料坩埚送入炉内，待炉内温度稳定时开始计时，焙烧结束后迅速取出坩埚置于氮气环境中冷却。



1—排气口；2—硅钼棒；3—控制箱；4—坩埚；5—热电偶；6—刚玉管；7—耐火材料；8—升降台；9—通气管；10—升降电机。

图 4 含碳团块碳热还原试验设备

Fig. 4 Carbon thermal reduction test equipment for ore/coal composite briquettes

对冷却后的焙烧产物称重、研磨，然后进行化学分析、X 射线衍射和扫描电镜等检测，研究不同反应条件(焙烧温度、焙烧时间、配碳量)对含碳团块的金属化率，Zn、K、Na 脱除率的影响规律。金属化率 η(%)和锌、钾、钠脱除率 X_{Zn}(%)、X_k(%)、X_{Na}(%)计算方法分别如式(1)~(4)所示。

$$\eta = \frac{w(\mathrm{MFe})}{w(\mathrm{TFe})} \times 100\% \tag{1}$$

$$X_{Zn} = \frac{m_1 \times w_{Zn1} - m_2 \times w_{Zn2}}{m_1 \times w_{Zn1}} \times 100\% \tag{2}$$

$$X_K = \frac{m_1 \times w_{K1} - m_2 \times w_{K2}}{m_1 \times w_{K1}} \times 100\% \tag{3}$$

$$X_{Na} = \frac{m_1 \times w_{Na1} - m_2 \times w_{Na2}}{m_1 \times w_{Na1}} \times 100\% \tag{4}$$

式中：w(MFe)、w(TFe)分别为焙烧矿(焙烧后)中金属铁和总铁的质量分数,%；m_1、m_2 分别为含碳团块（焙烧前）和焙烧矿的质量，g；w_{Zn1}、w_{Zn2}分别为含碳团块和焙烧矿中 Zn 的质量分数,%。w_{K1}、w_{K2}分别为含碳团块和焙烧矿中 K 的质量分数,%；w_{Na1}、w_{Na2}分别为含碳团块和焙烧矿中 Na 的质量分数,%。

2 试验结果与讨论

2.1 焙烧温度对含碳团块金属化率和Zn脱除率的影响

在焙烧时间为 20 min、n(C)/n(O)为 1.0 条件下，试验设置焙烧温度分别为 950、1 000、1 050、1 100、1 150 ℃，探究还原过程中焙烧温度对含碳团块金属化率和 Zn 脱除率的影响规律。不同焙烧温度下团块的金属化率和 Zn 脱除率的变化规律如图 5 所示，焙烧产物的 X 射线衍射及 SEM 图片如图 6 所示。

由图 5(a)可知，含碳团块的金属化率和 Zn 脱除率随焙烧温度的升高而增加。当焙烧温度为 1 000 ℃时，团块的金属化率和 Zn 脱除率均超过了 90%。当焙烧温度为 1 150 ℃时，团块的金属化率和 Zn 脱除率分别为 96. 5% 和 99. 4%。铁、锌氧化物还原过程为吸热反应，温度升高加速了这一过程的进行。

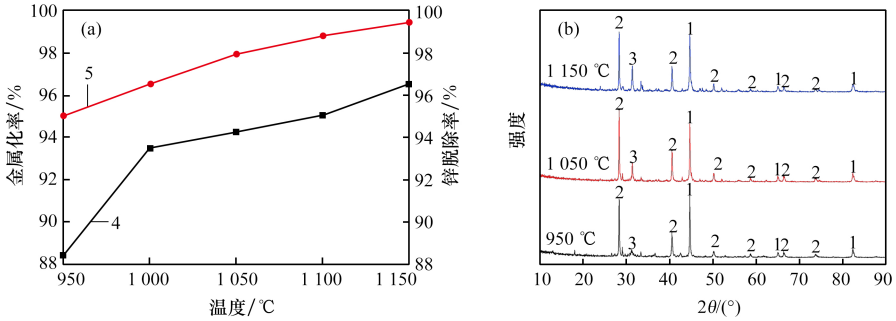
对于铁氧化物的碳热还原过程，温度升高有利于提高碳气化反应速率，使反应系统中 CO 浓度

升高。此外，由图 6 可知，当焙烧温度升高，生成的金属铁从弥散的颗粒状逐渐生长成蠕虫状。当温度高于 1 100 ℃时，焙烧产物中多为金属铁和脉石，很难发现铁氧化物的存在。对于锌氧化物的还原过程，温度升高不仅有利于增加体系中 CO 浓度，也促进了锌蒸汽的挥发，导致焙烧产物中未发现残余的含锌物相。当焙烧温度为 1 150 ℃时，铁、锌氧化物的还原效果非常理想。

2.2　焙烧时间对含碳团块金属化率和Zn脱除率的影响

在焙烧温度为 1 150 ℃、$n(C)/n(O)$ 为 1.0 条件下，试验设置焙烧时间分别为 5、10、20、30、40 min，研究焙烧时间对含碳团块金属化率和锌脱除率的影响规律。不同焙烧时间对含碳团块金属化率和 Zn 脱除率的影响规律如图 7 所示，焙烧产物的 X 射线衍射及 SEM 图片如图 8 所示。

由图 7(a)可知，含碳团块的金属化率和 Zn 脱除率随焙烧时间的延长而增加。当焙烧时间为 40 min 时，团块的金属化率和 Zn 脱除率分别为 99.06% 和 99.81%，焙烧效果最好。值得注意的是，当焙烧时间为 5 min 时，团块的金属化率和 Zn 脱除率均超过了 90%。当焙烧时间超过 10 min 时，团块的金属化率和 Zn 脱除率增长速度放缓。从图7(b)焙烧产物的XRD衍射图谱中可以发现，

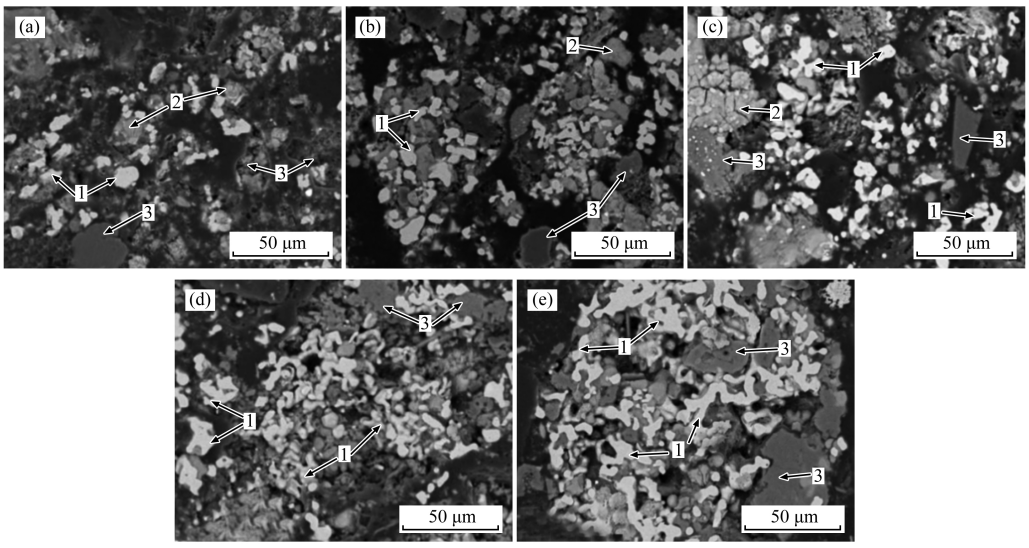


(a) 不同焙烧温度下含碳团块的金属化率和 Zn 脱除率；(b) 焙烧产物的 XRD 衍射图谱

1—Fe；2—KCl；3—$Ca_2Al(AlSiO_7)$；4—金属化率；5—脱锌率。

图 5　不同焙烧温度对含碳团块还原行为的影响规律及产物的 XRD 衍射图谱

Fig. 5　Influence of different roasting temperatures on the reduction behavior of ore/coal composite briquettes and the XRD diffraction patterns of the products

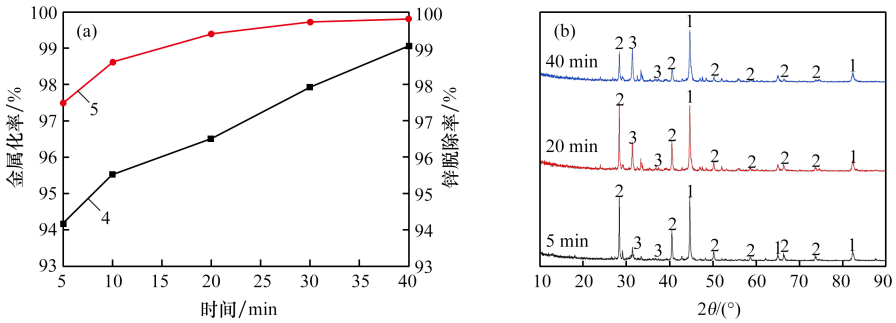


焙烧温度/℃：(a) 950；(b) 1 000；(c) 1 050；(d) 1 100；(e) 1 150

1—金属铁；2—铁氧化物；3—脉石。

图 6　不同焙烧温度下还原产物的 SEM 图片

Fig. 6　SEM images of reduced products at different roasting temperatures

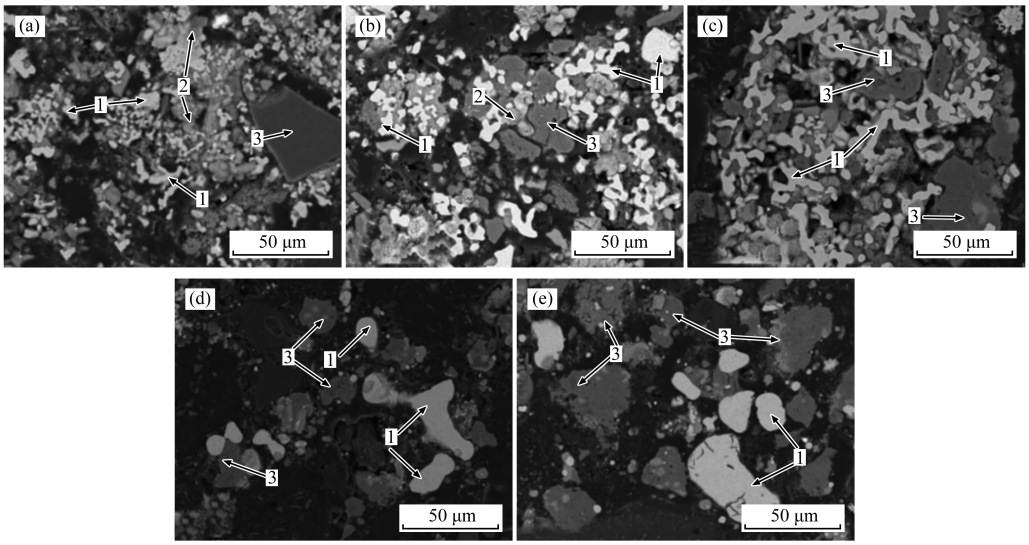


（a）不同焙烧时间下含碳团块金属化率和锌脱除率；（b）焙烧产物的 XRD 衍射图谱

1—Fe；2—KCl；3—$Ca_2Al(AlSiO_7)$；4—金属化率；5—脱锌率。

图 7 不同焙烧时间对含碳团块还原行为的影响规律及产物的 XRD 衍射图谱

Fig. 7 Influence of different roasting times on the reduction behavior of ore/coal composite briquettes and the XRD diffraction patterns of the products



焙烧时间/min：（a）5；（b）10；（c）20；（d）30；（e）40

1—金属铁；2—铁氧化物；3—脉石。

图 8 不同焙烧时间下还原产物的 SEM 图片

Fig. 8 SEM images of reduction products at different roasting times

焙烧产物主要物相为 Fe、KCl 和 $Ca_2Al(AlSiO_7)$。焙烧时间延长至 40 min 时，产物中 KCl 的峰强度明显降低。

此外，由图 8 可知，焙烧时间为 5 min 时，生成的金属铁为弥散的小颗粒，10 ~ 20 min 时逐渐生长成蠕虫状，30 ~ 40 min 时生长到个体较大的草履虫状。焙烧时间延长有利于金属铁晶体的长大，可提高后期选矿工序 Fe 的收得率。综合考虑团块的金属化率和 Zn 脱除率，焙烧时间为 10 min 时，焙烧效果已令人满意，过长焙烧时间会增加成本和能源消耗。

2.3 $n(C)/n(O)$对含碳团块金属化率和Zn脱除率的影响

在焙烧温度为 1 150 ℃、焙烧时间为 10 min 条件下，试验设置 $n(C)/n(O)$分别为 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2，探究还原过程中配碳量对含碳团块金属化率和 Zn 脱除率的影响规律。不同 $n(C)/n(O)$对含碳团块金属化率和锌脱除率的影响规律如图 9 所示，焙烧产物的 X 射线衍射及 SEM 图片如图 10 所示。

由图 9(a)可知，随着配碳量的增加，团块的金属化率和 Zn 脱除率均有增大的趋势。当焙烧温度为 1 150 ℃、焙烧时间为 10 min 时，改变配碳量

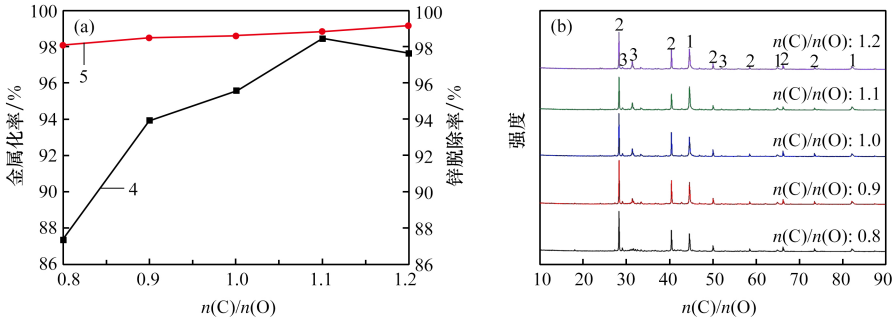
对锌脱除率影响较小，说明焙烧温度为 1 150 ℃、焙烧时间为 10 min、$n(C)/n(O)$ 为 0.8 的焙烧条件已经足够满足团块中锌的脱除。而 $n(C)/n(O)$ 的变化对铁还原影响较大，其从 0.8 提高到 1.1 时，团块的金属化率提高了 11.2%。配碳量进一步提高，会使团块的金属化率略微降低。煤粉含量的增加，在一定情况下能够改善还原情况，但增加过多会使团块过于疏松，降低内部的 CO 分压。同时，由图 10 可见，配碳量增加，煤粉中的灰分容易与机头灰中硅、钙化合物反应，生成大量液相渣分布在生成的铁晶体周围不利于铁晶体长大，同时阻碍 CO 的进入。

综上可知，在焙烧温度为 1 150 ℃、焙烧时间为 10 min、$n(C)/n(O)$ 为 0.9 的试验条件下，团块的金属化率和 Zn 脱除率均能达到较高水平，继续提高配碳量会造成能源浪费。

2.4　不同焙烧条件对机头灰 K、Na 脱除率的影响

分别进行焙烧温度、焙烧时间和配碳量三个因素试验，探究不同焙烧条件对含碳团块还原过程中 K、Na 脱除率的影响规律。试验结果如图 11 所示。

由图 11 可知，含碳团块 K、Na 脱除率随着焙烧温度、焙烧时间和 $n(C)/n(O)$ 的增加都呈现升高的趋势，且增幅明显。机头灰中 K、Na 主要以 KCl 和 NaCl 形式存在，KCl 和 NaCl 的熔点分别为

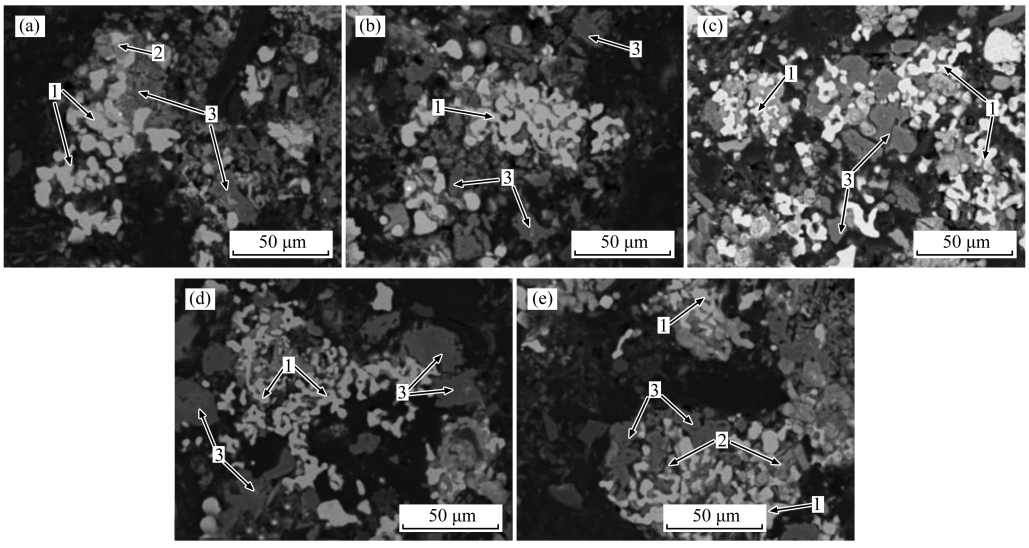


（a）$n(C)/n(O)$ 对含碳团块金属化率和锌脱除率的影响规律；（b）焙烧产物的 XRD 衍射图谱

1—Fe；2—KCl；3—$Ca_2Al(AlSiO_7)$；4—金属化率；5—脱锌率。

图 9　不同 $n(C)/n(O)$ 对含碳团块还原行为的影响规律及产物的 XRD 衍射图谱

Fig. 9　Influence of different $n(C)/n(O)$ ratios on the reduction behavior of ore/coal composite briquettes and the XRD diffraction patterns of the products

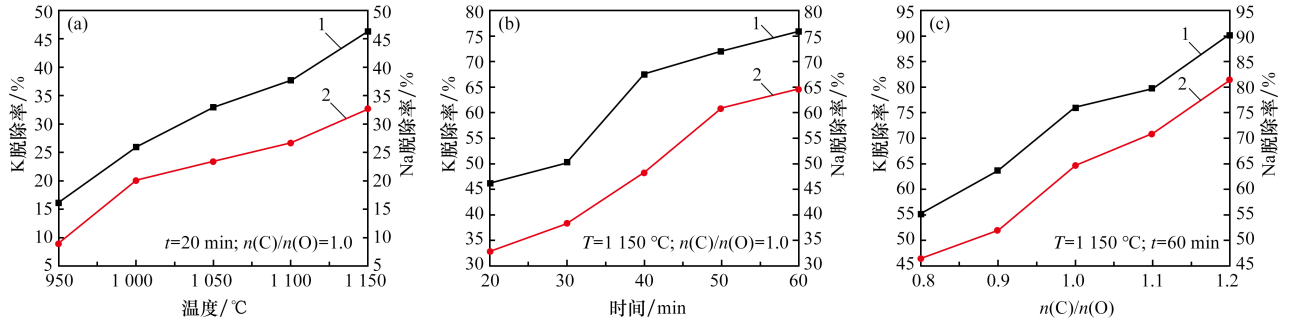


$n(C)/n(O)$：（a）0.8；（b）0.9；（c）1.0；（d）1.1；（e）1.2

1—金属铁；2—铁氧化物；3—脉石。

图 10　不同 $n(C)/n(O)$ 下还原产物的 SEM 图片

Fig. 10　SEM images of reduction products under different $n(C)/n(O)$ conditions



（a）焙烧温度；（b）焙烧时间；（c）$n(C)/n(O)$

脱除率：1—K；2—Na。

图 11 焙烧条件对含碳团块钾、钠脱除的影响规律

Fig. 11 Influence of roasting conditions on the removal of potassium and sodium from ore/coal composite briquettes

（注：t 为时间；T 为温度）

770 ℃和 801 ℃。温度高于上述熔点时会有气体挥发，温度越高挥发率越大。团块中 K、Na 脱除要经历 KCl 和 NaCl 熔融、熔融的 KCl 和 NaCl 向压块表面迁移和压块表面的熔融 KCl 和 NaCl 挥发三个过程，因此焙烧时间延长有利于提高团块中 K、Na 脱除率。挥发过程中 KCl 和 NaCl 不与 C 发生反应，但提高配碳量相当于降低了压块中 K、Na 的含量，可提高焙烧过程中压块的气孔率，增加压块中熔融态 KCl 和 NaCl 的比表面积。因此，$n(C)/n(O)$的增加可有效促进团块中的 K、Na 的脱除。

3 机头灰资源化利用途径

机头灰中 K、Na 多以氯化物形式存在，KCl 和 NaCl 易溶于水。采用水洗提盐工艺处理含 K 高的机头灰是一种有效的资源化途径。水洗提盐工艺一般由水洗、除杂、脱色和多效蒸发结晶等环节组成，技术成熟、可靠，目前该工艺已在唐山某节能公司等投产运营。但水洗工艺仅适合处理 K 含量较高的粉尘，当粉尘中 K 含量较低时，采用水洗工艺会增加生产成本，浪费大量水资源。同时，水洗工艺不能脱除粉尘中的 Zn，也存在高浓度卤水对设备的腐蚀问题。

火法工艺是当前粉尘资源化的主流工艺。北京科技大学[16]提出根据各种尘泥的成分特征进行协同搭配，并科学集成各单元工艺技术的回收方法，实现了冶金尘泥中有色金属的分离和全量化利用。安徽工业大学[17]采用火法富集－湿法分离联合处理工艺，提出采用回转窑低温冶炼提取锌、铅、铟、铋等多种有色金属的技术。与水洗提盐工艺相比，火法工艺可脱除粉尘中的 Zn，也可减小高浓度卤水对设备的侵蚀。值得注意的是，KCl 的沸点高于转底炉和回转窑的生产温度。当粉尘中 K 含量过高、焙烧温度低于 KCl 的沸点时，回收工艺需要较长的焙烧时间，势必会增加生产成本。因此，在火法工艺资源化过程中要控制原料中 K 的含量。

通过试验研究可知，在 950～1 150 ℃的温度范围内粉尘中 Zn 脱除较为彻底，而 K、Na 脱除相对困难。目前，火法工艺多以高炉布袋灰中的 C 为还原剂，以脱除、富集转炉尘泥和电炉粉尘中的有色金属为目的，实现含铁物料与有色金属分离。在火法工艺中，将机头灰与其他尘泥协同处理，以此控制混合料中 K 含量，提高 K 的挥发率。将混合料中 K、Na、Zn、Pb 等挥发性物质富集至二次灰中，通过水洗和湿法工艺对其进行逐级回收，可以实现多种冶金尘泥协同资源化利用。

4 结 论

（1）在机头灰含碳团块还原过程中，焙烧温度、焙烧时间、$n(C)/n(O)$对其金属化率和 Zn 脱除率均有促进作用。当焙烧温度为 1 150 ℃、焙烧时间为 10 min、$n(C)/n(O)$为 0.9 时，含碳团块的金属化率和 Zn 脱除率分别为 93.97% 和 98.53%，还原效果理想。

（2）机头灰中 K、Na 以 KCl、NaCl 形式存

在，KCl、NaCl 的脱除属于物理挥发过程。焙烧温度、焙烧时间、$n(C)/n(O)$的增加均有利于提高含碳团块中 K、Na 的脱除率。当焙烧温度为 1 150 ℃、焙烧时间为 60 min、$n(C)/n(O)$为 1.2 时，团块中 K、Na 的脱除率分别为 90.14% 和 81.37%。

（3）碳热还原能够实现机头灰中 K、Na、Zn 的脱除。在试验条件下，团块中 Zn 脱除较为容易，K、Na 脱除相对困难。在火法工艺资源化过程中，可以将少量机头灰配加到其他粉尘中协同还原，减少原料中 K、Na 的含量，以达到较好的焙烧效果。

参考文献：

[1] 于恒,黄细聪,李科,等. 钢铁企业除尘灰综合利用现状与展望[J]. 矿产保护与利用,2021,41(4):164 – 171.
YU Heng,HUANG Xicong,LI Ke,et al. Present situation and prospect of comprehensive utilization of precipitator dust in iron and steel enterprises[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2021,41(4):164 – 171.

[2] 张梅. 钢铁冶金含铁尘泥中氯化钾的回收[D]. 湘潭:湘潭大学,2015:8 – 10.
ZHANG Mei. Recovery of potassium chloride in iron-containing dust from ferreous metallurgical process[D]. Xiangtan:Xiangtan University,2015:8 – 10.

[3] 刘超,张玉柱,王峰,等. 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,WANG Feng,et al. Research status and prospect of multi-source metallurgical dust recycling[J]. China Metallurgy,2022,32(10):38 – 44.

[4] 张梅,付志刚,吴滨,等. 钢铁冶金烧结机头电除尘灰中氯化钾的回收[J]. 过程工程学报,2014,14(6):979 – 983.
ZHANG Mei,FU Zhigang,WU Bin,et al. Recovery of potassium chloride from sintering EAF dust[J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2014,14(6):979 – 983.

[5] 张静,薛彦辉,李伟杰,等. 烧结机头灰化学浸出试验研究[J]. 烧结球团,2020,45(1):77 – 81.
ZHANG Jing,XUE Yanhui,LI Weijie,et al. Experimental study on chemical leaching of dust at sintering machine feed end[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(1):77 – 81.

[6] 钱峰,于淑娟,侯洪宇,等. 烧结机头电除尘灰资源化再利用[J]. 钢铁,2015,50(12):67 – 71.
QIAN Feng,YU Shujuan,HOU Hongyu,et al. Recycling of the electric dust in sintering machine head[J]. Iron and Steel,2015,50(12):67 – 71.

[7] 秦立浩,墙蔷,阳红辉,等. 烧结机头电除尘灰的分级利用[J]. 钢铁研究学报,2020,32(9):802 – 808.
QIN Lihao,QIANG Qiang,YANG Honghui,et al. Classified utilization of sintering EAF dust[J]. Journal of Iron and Steel Research,2020,32(9):802 – 808.

[8] 田颖,孙磊,王雨. 烧结机头、高炉布袋除尘灰回用技术探讨[J]. 包钢科技,2023,49(1):36 – 40.
TIAN Ying,SUN Lei,WANG Yu. Discussions on technologies for recycling fly ash of sintering machine head and blast furnace bag[J]. Science & Technology of Baotou Steel,2023,49(1):36 – 40.

[9] 张传炳. 九钢烧结机炉箅条糊堵现象的原因分析及解决措施[J]. 福建冶金,2018,47(3):20 – 22.
ZHANG Chuanbing. Analysis and solution of grate bar blocking phenomenon of nodal furnace[J]. Fujian Metallurgy,2018,47(3):20 – 22.

[10] 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.

[11] LI Y,FENG H X,WANG J S,et al. Current status of the technology for utilizing difficult-to-treat dust and sludge produced from the steel industry[J]. Journal of Cleaner Production,2022,367:132909.

[12] 谢剑波,周建安,王亚雨,等. 烧结电除尘灰球团制备及脱锌探索[J]. 钢铁钒钛,2017,38(1):91 – 94.
XIE Jianbo,ZHOU Jian'an,WANG Yayu,et al. Exploration of preparation and dezincification percentage of metallic pellets from sintering electric remove dust[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2017,38(1):91 – 94.

[13] 毕学工,王亚雨,谢登高,等. 烧结电除尘灰内配碳球团的试验研究[J]. 烧结球团,2017,42(1):38 – 44.

（下转第 136 页）

[6] 范晓慧,甘敏,季志云,等. 复合气体介质烧结的节能减排技术开发与应用[J]. 钢铁,2020,55(8):62 – 69;74.
FAN Xiaohui, GAN Min, JI Zhiyun, et al. Development and application of techniques for energy conservation and emission reduction during sintering process based on multiple-component gases medium[J]. Iron & Steel, 2020,55(8):62 – 69,74.

[7] 龙红明,丁龙,赵贺喜,等. 典型钢铁生产流程烟气中CO减排研究进展[J]. 钢铁,2023,58(8):1 – 12;24.
LONG Hongming, DING Long, ZHAO Hexi, et al. Research progress of CO removal in flue gas of typical steel production process[J]. Iron & Steel,2023,58(8): 1 – 12;24.

[8] 吴宏亮,罗云飞,周江虹,等. 富氧协同烟气循环对烧结矿质量指标和CO排放的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(4):1179 – 1188.
WU Hongliang, LUO Yunfei, ZHOU Jianghong, et al. Influence of oxygen enrichment and flue gas circulation on quality index of sinter and CO emissions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022,53(4):1179 – 1188.

[9] 廖继勇,郑浩翔,甘敏,等. 烧结烟气CO的产生及治理途径:源头及过程控制技术[J]. 烧结球团,2021,46(2):8 – 16.
LIAO Jiyong, ZHENG Haoxiang, GAN Min, et al. Generation and governance way of CO in sintering flue gas:Source and process control technology[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(2):8 – 16.

[10] 范振宇. 烟气循环烧结的基础研究[D]. 长沙:中南大学,2011:94.
FAN Zhenyu. A fundamental investigation on flue gas circulating sintering[D]. Changsha: Central South University,2011:94.

[11] 徐慧如,高培程,朱旺,等. 首钢股份2#烧结烟气内循环单因素试验及应用实践[J]. 矿业工程,2023,21(2):48 – 51;65.
XU Huiru,GAO Peicheng,ZHU Wang,et al. Single factor test and application practice of internal circulation of 2# sintering flue gas of Beijing Shougang Co., Ltd.[J]. Mining Engineering,2023,21(2):48 – 51;65.

[12] ZHANG H L, RAO M J, FAN Z Y, et al. Effects of circulated flue gas components on iron ore sintering[J]. ISIJ International,2012,52(12):2139 – 2144.

[13] FAN X H,YU Z Y,GAN M,et al. Appropriate technology parameters of iron ore sintering process with flue gas recirculation[J]. ISIJ International, 2014, 54(11): 2541 – 2550.

[14] WU Y F,FAN X H,JI Z Y,et al. Influence of multiple gaseous medium injection on low-carbon iron ore sintering performance:Characteristics of natural gas and steam coupling injection[J]. Journal of Cleaner Production,2022,374:133907.

(上接第119页)

BI Xuegong, WANG Yayu, XIE Denggao, et al. Experimental study on production of carbon-blended pellets with using sinter ESP dusts[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(1):38 – 44.

[14] SHE X F, WANG J S, WANG G, et al. Removal mechanism of Zn,Pb and alkalis from metallurgical dusts in direct reduction process[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2014,21(5):488 – 495.

[15] PENG C,ZHANG F L,LI H F,et al. Removal behavior of Zn, Pb, K and Na from cold bonded briquettes of metallurgical dust in simulated RHF[J]. ISIJ International,2009,49(12):1874 – 1881.

[16] 王静松,李岩,冯怀萱,等. 钢铁产业集聚区难处理尘泥处理与全量资源化利用进展[J]. 工程科学学报,2021,43(12):1737 – 1749.
WANG Jingsong,LI Yan,FENG Huaixuan,et al. Progress in treating difficult-to-handle dust and sludge and full-scale resource utilization in an iron and steel industry cluster[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(12):1737 – 1749.

[17] 尚海霞,李海铭,魏汝飞,等. 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 and sludge utilization technology[J]. Iron & Steel,2019,54(3):9 – 17.