

# 锌元素在高炉中的分布及其对焦炭性能的影响

程彤<sup>1</sup>, 魏汝飞<sup>1</sup>, 钱章秀<sup>2</sup>, 任财轩<sup>3</sup>, 龙红明<sup>1</sup>

(1. 安徽工业大学冶金工程学院, 安徽马鞍山 243032; 2. 安徽冶金科技职业学院材料工程系, 安徽马鞍山 243041; 3. 云南曲靖钢铁集团呈钢钢铁有限公司炼铁厂, 云南曲靖 661199)

**摘要:** 通过分段式升温高炉模拟实验研究铁矿石还原及软熔过程中锌元素的迁移行为, 分析不同入炉方式(炉顶/风口)下锌的还原挥发特性及其对高炉冶炼的影响。结果表明: 无论采用炉顶加料还是风口喷吹方式, 锌元素主要富集于炉顶除尘灰和焦炭中, 铁水中锌含量极低; ZnO 块随炉顶炉料加入时, 炉顶除尘灰与焦炭中的锌含量相当; 而 ZnO 块随风口炉料加入时, 炉顶除尘灰中的锌含量显著高于焦炭, 这是由于风口喷入的锌经高温快速还原后, 锌蒸气迅速穿透料层到达炉顶, 在焦炭中停留时间较短。锌对焦炭熔损具有催化作用, 会导致焦炭反应性升高和反应后强度下降, 其作用机理是锌促进了酮基分解和 CO 生成反应。本研究揭示了锌元素在高炉内的分布规律及其对焦炭性能的影响机制。

**关键词:** 锌负荷; 焦炭劣化; 高炉操作; 反应后强度; 催化机理; 低碳炼铁; 锌挥发; 循环富集

**中图分类号:** TF 526.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24140



## Distribution of Zn Element in Blast Furnace and Its Influence on Coke Properties

CHENG Tong<sup>1</sup>, WEI Rufe<sup>1</sup>, QIAN Zhangxiu<sup>2</sup>, REN Caixuan<sup>3</sup>, LONG Hongming<sup>1</sup>

(1. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China; 2. Department of Materials Engineering, Anhui Metallurgical Technology Vocational College, Maanshan 243041, China; 3. Ironmaking Plant, Yunnan Qujing Iron and Steel Group Chenggang Iron and Steel Co., Ltd, Qujing 661199, China)

**Abstract:** A segmented heating blast furnace simulation experiment was conducted to investigate the migration behavior of zinc during iron ore reduction and softening-melting processes. The reduction-volatilization characteristics of zinc under different charging methods (top/bosh) and their impacts on blast furnace smelting were analyzed. The results indicate that zinc is predominantly enriched in the top dust and coke regardless of whether top charging or bosh injection is employed, with extremely low zinc content detected in the hot metal. When ZnO blocks are introduced through top charging, comparable zinc contents are observed between the top dust and coke. In contrast, when ZnO blocks are injected through the bosh, the zinc content in the top dust is significantly higher than that in the coke, which is attributed to the rapid penetration of zinc vapor through the burden layer after being subjected to high-temperature reduction at the bosh region, resulting in shorter residence time in the coke. The catalytic effect of zinc on coke dissolution loss is demonstrated, leading to increased coke reactivity and decreased

收稿日期: 2024-08-02

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U1860113); 安徽省自然科学基金面上项目(2208085ME121)

作者简介: 程彤(2000—), 女, 安徽池州人, 硕士生, 主要研究方向为低碳炼铁与固废资源利用。

通信作者: 魏汝飞(1985—), 男, 山东阳谷人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为低碳炼铁与固废资源利用。

引文格式: 程彤, 魏汝飞, 钱章秀, 等. 锌元素在高炉中的分布及其对焦炭性能的影响[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2025, 42(4):368-374.

post-reaction strength, with the mechanism explained by the promotion of ketone group decomposition and CO generation reactions. This study reveals the distribution pattern of zinc within the blast furnace and its influence mechanism on coke performance.

**Keywords:** zinc loading; coke degradation; blast furnace operation; post-reaction strength; catalytic mechanism; low carbon iron-smelting; zinc volatilization; cyclic enrichment

确保高炉长寿是提升高炉生产效率和降低成本的关键,对推动钢铁工业绿色高质量发展具有重要意义。在影响高炉寿命和运行顺畅的诸多因素中,锌元素的作用尤为突出。由于其特殊的物理化学性质,锌在高炉冶炼过程中会产生复杂的影响效应。开展高炉长寿相关研究,特别是探究锌元素在高炉内的分布规律及其对焦炭性能的作用机制,既是冶炼技术发展的必然要求,也是响应国家“双碳”战略需求的重要体现。

锌元素对高炉冶炼的影响主要体现在炉衬侵蚀、炉况稳定性、铁水质量和焦炭性能四方面。首先,锌元素通过气态渗透和化学作用侵蚀炉衬:锌在高炉下部被还原成金属锌(金属锌沸点较低,约 907 °C),以气态形式渗透至炉衬内部,在低温区重新凝固时产生体积膨胀应力,长期积累导致炉衬结构破坏;同时与耐火材料中的某些成分反应生成低熔点化合物,这些化合物在高温下融化会加速炉衬侵蚀,进一步削弱炉衬的保护作用<sup>[1]</sup>。其次,锌蒸气在高炉上部低温区会被氧化成 ZnO,其易与炉料中的二氧化硅、氧化铝等结合形成黏性较强的锌硅酸盐等物质,这些物质附着在炉墙和炉料表面随时间的推移不断积累并长大,最终形成炉瘤,影响炉料的正常下降和煤气的均匀分布<sup>[2-3]</sup>。第三,溶解于铁水中的微量锌会影响铁水质量,一般情况下单质锌在铁水中的溶解度较低,但当单质锌含量升高时会降低铁水的纯净度,影响铁水的流动性与凝固特性,并通过消耗脱硫剂或改变反应条件降低脱硫效率,导致铁水硫含量升高<sup>[4-5]</sup>。最后,锌在焦炭层富集后显著劣化其性能<sup>[6-8]</sup>:一方面会削弱焦炭冷态和热态强度,导致死焦堆的形成,恶化炉缸区域的透气性和透液性<sup>[9-11]</sup>;另一方面对焦炭的熔损行为具有显著的催化作用,马超等<sup>[12]</sup>证实锌及其氧化物(如 ZnO)能够催化焦炭的气化反应,从而使焦炭反应性(reactivity index of coke, CRI)提高、焦炭反应后强度(coke strength after reaction, CSR)降低,周晓佳<sup>[13]</sup>通过微观结构分析发现锌以单质或氧化物的形式渗透至焦炭孔隙和气孔或在其表面冷凝形成薄膜,这些行为均会改变焦炭的微观结构及其反应动力学特性。

针对锌元素对高炉冶炼的危害性影响,国内主要钢铁企业已相应采取不同的防控措施,如广西钢铁集团<sup>[14]</sup>实施高炉排锌与炉外循环协同控制措施;酒钢 7 号高炉<sup>[15]</sup>通过调整装料制度、优化送风制度及提升炉顶压力来缓解锌对炉衬和焦炭的侵蚀;马钢 B 高炉<sup>[16]</sup>通过优化原料质量和强化炉内操作来减轻锌负荷。传统高炉中锌主要通过 2 种途径进入:随烧结矿、球团矿和焦炭等原料从炉顶加入或通过风口随喷吹煤粉加入<sup>[17]</sup>。然而,关于不同入炉方式下锌元素的迁移规律及其对焦炭性能的影响研究尚不充分。鉴于此,本研究通过实验分别模拟锌元素从风口和炉顶进入高炉的工艺过程,分析锌在炉内的分布及其对焦炭性能的作用机制,以期高炉锌害防控提供工艺优化理论基础和操作指导。

## 1 实验原料与方法

### 1.1 实验原料

实验用的烧结矿、球团矿和焦炭取自某钢铁厂。采用化学滴定和 X 射线荧光光谱(X ray fluorescence, XRF)相结合的方法分析烧结矿和球团矿的化学成分,结果如表 1。根据 GB/T 3875—2020 标准,对焦炭工业成分进行分析,包括水分( $M_{ad}$ )、灰分( $A_{ad}$ )、挥发分( $V_{ad}$ )及固定碳( $FC_{ad}$ )指标,结果如表 2。采用化学纯 ZnO 为含锌原料,其质量分数为 99.9%。

表 1 烧结矿和球团矿的化学成分 w/%

原料	TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	其他
烧结矿	75.11	1.42	7.64	12.50	1.86	1.38	0.08	0.01
球团矿	90.26	0.89	5.93	1.08	0.76	1.01	0.07	0

表 2 焦炭工业分析 w/%

$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$FC_{ad}$
0.48	11.43	1.36	86.73

从表 1, 2 可看出:球团矿和烧结矿的全铁(TFe)质量分数分别达 90.26%, 75.11%;焦炭固定碳含量高,灰分、挥发分和水分低,这既有利于高炉冶炼,又改善了炉料渗透性和透气性。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 分段式升温高炉模拟实验

依据 GB/T 10132.1 标准,将烧结矿、球团矿及焦炭破碎至 10.0~12.5 mm 粒度范围后,置于 (105±5) °C 烘箱中烘 120 min,保存于干燥器中备用。将 ZnO 粉末压制成 3 g 块状试样,与 120 g 焦炭(上下层质量比 1:2)、500 g 混合矿(烧结矿与球团矿质量

比 7:3) 共同装入  $\Phi 40\text{ mm}\times 200\text{ mm}$  石墨坩埚,装料顺序及 ZnO 加料方式见图 1。采用表 3 所示的分段升温制度(模拟高炉间接还原、直接还原、软熔滴落及渣铁分离等工艺)在高温炉中模拟分析锌元素从炉顶或风口不同入炉方式下的迁移分布规律。图中  $p$  表示压强, $V$  表示体积。

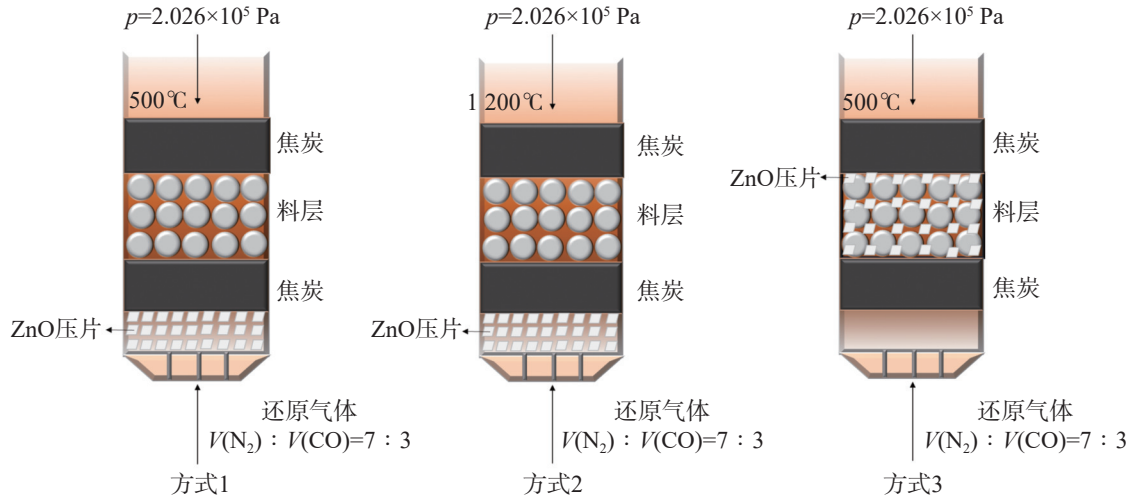


图1 含锌原料高炉装料方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of blast furnace charging method for zinc-bearing raw materials

表 3 高炉模拟实验升温程序与还原性气体配比制度

Tab. 3 Heating program and reducing gas proportioning system for blast furnace simulation experiments

温度/°C	气体	流量/(L/min)	升温时间/min
室温~200	Air	—	20
>200~500	N <sub>2</sub>	5	30
>500~900	V(N <sub>2</sub> ):V(CO)=7:3	5	40
>900~1100	V(N <sub>2</sub> ):V(CO)=7:3	5	100
>1100~1600	V(N <sub>2</sub> ):V(CO)=7:3	5	100

试样装料方式 1: 将 ZnO 块状试样置于高温炉石墨坩埚底层,自 500 °C 开始通入还原气体。

试样装料方式 2: 将 ZnO 块状试样置于高温炉石墨坩埚中,自 1 200 °C 开始通入还原气体。

试样装料方式 3: 将 ZnO 块状试样置于高温炉石墨坩埚料层中,自 500 °C 开始通入还原气体。

方式 1, 2 中均将 ZnO 块置于高炉底部,方式 1 于 500 °C 开始通入还原性气体,是方式 2 的对照实验,模拟慢速升温条件下锌元素的还原行为;方式 2 于 1 200 °C 时开始通入还原性气体,模拟锌由风口进入高炉后的还原状态;方式 3 将 ZnO 块置于料层,模拟锌随炉顶炉料加入高炉后的还原过程。

考虑到炉料在高炉冶炼状态下的环境因素主要包括升温过程、还原气氛、煤气流速、炉料负荷,采用铁矿石高温荷重还原软熔滴落性测定方法<sup>[18-19]</sup>研究铁矿石从还原、软化到熔融滴落的全过程。具体实验条件如表 3,在此条件下实验的重现率可达到 90% 以上<sup>[20]</sup>。

### 1.2.2 焦炭吸附锌的测定

二水合醋酸锌 ( $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 水溶性良好且溶解度较高,将其配制成溶液后浸泡焦炭可使醋酸锌均匀渗透至焦炭孔隙中。当温度升至 370 °C,二水合醋酸锌会完全分解生成  $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ ,  $\text{CO}_2$  和 ZnO,此时 ZnO 便能均匀地分布于焦炭基质中。在 1.2.1 节的实验过程中,锌元素虽然能进入焦炭,但存在含量较低且分布不均匀的问题。为此,本研究采用二水合醋酸锌(下文简称醋酸锌)浸泡法对焦炭进行处理,以提高锌元素的负载量和分布均匀性。依据 GB/T 4000—2017 制备焦炭样品,样品经破碎后依次通过  $\Phi 25\text{ mm}$  和  $\Phi 20\text{ mm}$  圆孔筛,收集  $\Phi 20\text{ mm}$  筛上物。取 2 kg 粒径为 20~25 mm 的筛分焦炭置于 I 型转鼓中,以 20 r/min 转速旋转 50 圈后再次过  $\Phi 20\text{ mm}$  圆孔筛,记录筛分后的焦炭质量。将处理后的焦炭分别浸入质量分数为 0, 10%, 20%, 30%,

40% 的醋酸锌溶液, 其中质量分数为 30% 和 40% 溶液经 30 min 加热以促进溶解。浸泡 24 h 后取出焦炭, 置于 180 °C 干燥箱中烘干 2 h, 冷却后称重测定锌吸附量。

### 1.2.3 焦炭反应性及反应后强度的测定

取 500 g 焦炭放入如图 2 所示实验装置的还原管中, 按照指定升温 and 气氛制度 (如表 4) 进行焦炭反应性实验。待焦炭冷却至室温后称量记录, 根据反应后焦炭质量与吸附醋酸锌焦炭质量的差值, 按式 (1) 计算焦炭反应性 (CRI); 随后将反应后焦炭置于 I 型转鼓机以 20 r/min 转速处理 30 min (共 600 r), 经 10 mm 圆孔筛筛分后称量筛上物质, 按式 (2) 计算焦炭反应后强度 (CSR)。

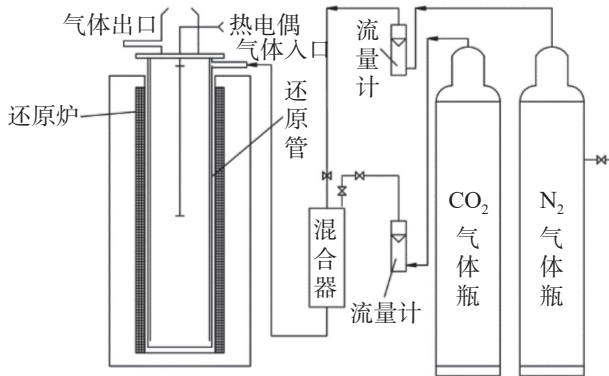


图 2 焦炭反应实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coke reaction experimental apparatus

$$CRI = \frac{m - m_1}{m} \times 100\% \quad (1)$$

$$CSR = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $m$  为反应前吸附醋酸锌的焦炭质量;  $m_1$  为反应后残余焦炭的质量;  $m_2$  为转鼓后大于 10 mm 粒级的焦炭质量。

表 4 焦炭反应过程温度与气氛控制

Tab. 4 Temperature and atmosphere control during the coke reaction process

温度/°C	气体	流量/(L/min)	时间/min
[室温, 400]	Air	—	40
(400, 1 100)	N <sub>2</sub>	0.8	70
1 100 (恒温)	CO <sub>2</sub>	5.0	120
(1 100, 100]	N <sub>2</sub>	2.0	—

## 2 实验结果与分析

### 2.1 不同入炉方式下锌元素在高炉中的分布

锌元素分布表示锌在单一物料 (炉顶除尘灰、焦炭和铁水) 中的质量占 3 种物料总锌量的百分比,

其不同入炉方式的分布情况如表 5。

表 5 不同入炉方式下锌元素在高炉中的分布

Tab. 5 Distribution of Zn element in the blast furnace under different charging methods

入炉方式	w(Zn)/%		
	炉顶除尘灰	焦炭	铁水
方式 1	51.77	47.72	0.51
方式 2	90.63	9.29	0.08
方式 3	58.16	41.28	0.56

由表 5 可看出: 采用风口入炉方式 (方式 2) 时, 锌元素在炉顶除尘灰、焦炭和铁水中的质量分数分别为 90.63%, 9.29%, 0.08%; 而采用炉顶入炉方式 (方式 3) 时, 三者的质量分数分别为 58.16%, 41.28%, 0.56%。对比表明: 风口入炉方式下锌元素主要富集于炉顶除尘灰中, 焦炭中的锌含量较炉顶入炉方式显著降低。这是因为温度超过 800 °C 后, 焦炭对 ZnO 的吸附能力随温度升高而降低<sup>[21]</sup>。与此同时, 风口区 ZnO 在高温下会被迅速还原生成单质锌蒸气, 随煤气流快速上升至炉顶进入除尘灰。图 3 为炉顶除尘灰的 XRD 图谱。由图 3 可看出: 炉顶除尘灰主要物相为 ZnO (锌蒸气在炉顶再次氧化产生) 和单质锌, 由此也可以证实上述推断。

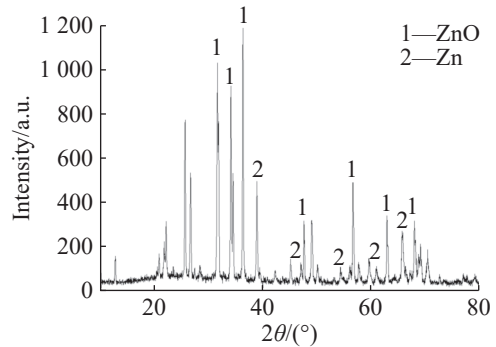


图 3 炉顶除尘灰的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD pattern of dust collected from the furnace top

为验证温度对风口入炉锌元素分布的影响规律, 另外设计方式 1 对比实验 (通入气体温度 500 °C)。结果表明: 在 500 °C 低温条件下, 锌元素还原速率缓慢, 其高炉物料中的分布特征与炉顶入炉方式 (方式 3) 相似; 当通入气体温度升至 1 200 °C (方式 2) 时, 锌元素被快速还原。这一对比实验充分证实了风口区高温环境对锌元素快速还原的决定性作用, 揭示了不同入炉方式下锌元素分布差异的原因为温度依赖的还原动力学。XRD 物相分析显示 (图 3), 高温还原条件下炉顶除尘灰中单质锌含量显著增加, 进一步佐证了温度对锌元素迁移路径的调控机制。

锌元素除主要富集于炉顶除尘灰和焦炭中外,

还存在于铁水中。表5数据显示,无论采用哪种入炉方式,铁水中锌元素的质量分数均维持在较低水平(方式1,2,3分别为0.51%,0.08%,0.56%)。这是由于炉内渣铁体系中锌含量处于过饱和状态,当炉缸区域还原温度降低时,铁水中锌的饱和蒸气压随之下降,促使锌元素从铁水中析出并随煤气迁移至除尘系统。相较于炉顶加料方式,风口喷吹方式(方式2)下铁水锌含量(0.08%)显著低于炉顶加料方式(方式1:0.51%;方式3:0.56%),其机理在于风口喷入的ZnO块在高温区被迅速还原为锌蒸气后,受煤气流驱动快速穿透料柱进入炉顶除尘系统,大幅减少了锌元素在铁水中的滞留量。

### 2.2 锌对焦炭反应性及反应后强度的影响

将焦炭样品分别浸渍于质量分数为0%,10%,20%,30%,40%的醋酸锌溶液中静置24h后,在180℃干燥处理2h再次称重,通过质量差减法测

定锌吸附量,结果表6。

表6 不同浓度醋酸锌溶液中焦炭的吸附量

Tab.6 Adsorption capacity of coke in zinc acetate solutions with different concentrations

样品	w(醋酸锌)/%	醋酸锌增加量/g	含锌率/%
1 <sup>#</sup>	0	0	0
2 <sup>#</sup>	10	1.05	0.20
3 <sup>#</sup>	20	2.74	0.51
4 <sup>#</sup>	30	6.69	1.21
5 <sup>#</sup>	40	11.86	2.10

由表6可知:当醋酸锌溶液的质量分数为10%时,焦炭吸附醋酸锌增加量为1.05g,对应含锌率为0.20%;质量分数提升至20%,30%时,含锌率分别增至0.51%,1.21%;当质量分数达到40%时,醋酸锌增加量最大(为11.86g),含锌率达2.10%,表明该条件下锌吸附效果最优。图4的吸附效果对比显示:经180℃烘干处理后,吸附锌的焦炭表面出现白色物质。



图4 不同浓度醋酸锌溶液中样品焦炭的吸附效果

Fig.4 Adsorption effect of coke samples in zinc acetate solutions with different concentrations

为研究锌吸附对焦炭微观结构的影响,设置0%(空白对照组)、20%(中等浓度组)、40%(高等浓度组)3个质量分数的醋酸锌溶液浓度梯度,经吸附处理后焦炭样品的SEM形貌如图5。

分析图5可知:经不同浓度醋酸锌溶液处理后,焦炭的微观结构发生显著变化,随醋酸锌浓度增加,焦炭表面孔隙数量明显增多,结构破坏程度逐渐加剧,表明锌吸附对焦炭具有明显的腐蚀作用。

焦炭含锌率与CRI和CSR的关系曲线如图6。

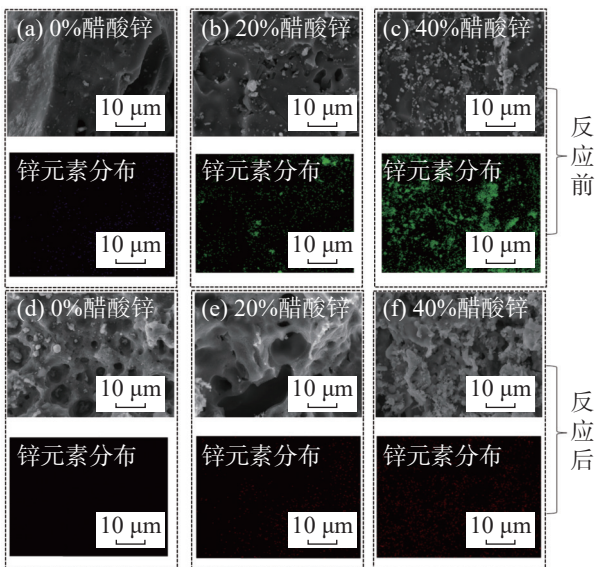


图5 焦炭在不同浓度醋酸锌溶液中浸泡后的SEM形貌

Fig.5 SEM morphology of coke samples after immersion in zinc acetate solutions with different concentrations

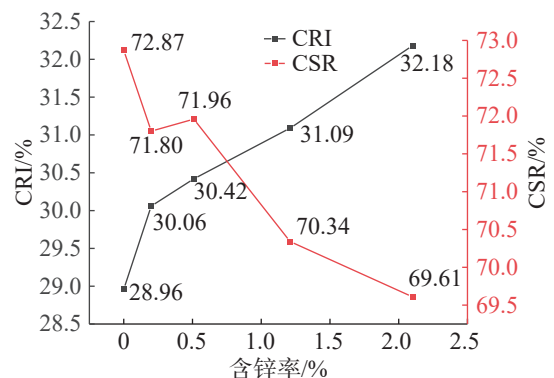


图6 焦炭含锌率与其性能的关系曲线

Fig.6 Relationship curves between zinc content and performance parameters of cokes

由图6可知:焦炭含锌率在0%~2.10%范围,随含锌率的增加CRI呈单调上升趋势,含锌率为0%时CRI为28.90%,含锌率为2.10%时增至30.06%

(最大值); 焦炭含锌率在 0%~2.10% 范围, 随含锌率的增加 CSR 总体呈下降趋势, 除含锌率为 0.51% 时 CSR 略有升高, 含锌率为 0% 时 CSR 为 72.87%, 含锌率为 2.10% 时 CRI 降至最小 (69.61%)。上述结论与文献 [21] 中的研究结论一致。

综合实验结果表明, 当醋酸锌质量分数在 0%~40% 范围时, 随锌吸附量的增加 CRI 与 CSR 之间呈负相关性, 证实锌对焦炭气化反应具有催化作用。其作用机理为: 在气化反应过程中, 线性结构的二氧化碳分子键断裂产生 O 原子和  $\text{C}=\text{O}$  基团, 其与含有 C 原子的不饱和键反应生成稳定的酮基 ( $>\text{C}=\text{O}$ , 在 950 °C 以下不会分解) 和不稳定的乙烯酮基 ( $>\text{C}=\text{C}=\text{O}$ , 在 600~700 °C 开始分解)。由于 O 的电负性 ( $X$ ) 高于 C ( $X_{\text{O}}=3.5$ ,  $X_{\text{C}}=2.5$ ), 在酮基结构 ( $>\text{C}=\text{O}$ ) 中电子将向 O 原子转移导致碳晶格内部不平衡。为保持以前的稳定状态, C 原子组将夺取已向 O 原子转移的电子, 导致 C 和 O 原子之间的动态变化<sup>[22-24]</sup>。在这种情况下, 锌原子 (存在于 ds 区, 会失去最外面的电子) 因具有较高的外层电子离域倾向 (C 原子的电负性 2.5, Zn 原子的电负性 1.6) 而介入该反应体系。锌原子通过提供外层电子参与反应最终导致碳键断裂、酮基分解和 CO 加速生成, 完成催化循环<sup>[25-26]</sup>。这一电子层面的作用机理完整解释了锌含量增加导致 CRI 上升而 CSR 下降的实验现象, 为理解高炉焦炭性能劣化提供了理论依据。

### 3 结论

1) 锌元素入炉方式显著影响其在高炉内的分布特征。炉顶加料时锌元素主要分布于除尘灰和焦炭中 (质量分数分别为 58.16%, 41.28%), 而在铁水中的含量较低 (质量分数 0.56%)。风口喷吹时锌元素主要富集于除尘灰中 (质量分数达 90.63%), 焦炭和铁水中的含量显著降低。对比分析表明, 炉顶加料会加剧锌在炉身上部循环富集, 而风口喷吹通过高温还原促使锌蒸气直接进入除尘系统。因此, 含锌炉料宜优先采用风口喷吹工艺以减轻锌害。

2) 醋酸锌质量分数在 0%~40% 范围, 焦炭含锌率随溶液含量的增加而持续上升。当含锌率从 0% 增至 2.10% 时, CRI 由 28.96% 提升至 32.18%, 同时 CSR 从 72.87% 降至 69.61%。这种变化规律表明锌对焦炭熔损过程具有显著催化作用, 其作用机理为锌通过催化焦炭气化反应, 加速碳基质的消耗, 从而导致焦炭孔隙率增大和结构强度降低。

### 参考文献:

- [1] 罗国立, 贾中帅, 史培阳. 包钢高炉瓦斯灰中钾锌铅元素的提取研究 [J]. 中国有色冶金, 2024, 53(4):113-124.  
LUO G L, JIA Z S, SHI P Y. Study on extraction of potassium, zinc and lead from blast furnace gas ash of Baotou Steel[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(4):113-124.
- [2] 辛莹娟, 蒋绪, 张静, 等. 钢铁厂含铁尘泥处理碳质还原剂选择性研究 [J]. 工业加热, 2015, 44(4):36-39.  
XIN Y J, JIANG X, ZHANG J, et al. Study on the selective of carbonaceous reductant in the treatment of iron-bearing dust and sludge obtained from steel plants[J]. Industrial Heating, 2015, 44(4):36-39.
- [3] 尹慧超, 张建良, 王传琳. 国丰 1 号 1 780 m<sup>3</sup> 高炉锌平衡的研究 [J]. 炼铁, 2009, 28(3):48-50.  
YIN H C, ZHANG J L, WANG C L. Zinc balance study in the 1 780 m<sup>3</sup> BF No.1 at Guofeng Steel[J]. Ironmaking, 2009, 28(3):48-50.
- [4] 易博达. 含锌粉尘协同还原及高效分离基础研究 [D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2023.  
YI B D. Fundamental Research on Cooperative Reduction and Efficient Separation of Zinc-bearing Dusts [D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2023.
- [5] 周进东, 李九林, 竺龙. 锌对高炉软熔带性能及滴落带锌收入量的影响 [J]. 武汉科技大学学报, 2020, 43(4):241-246.  
ZHOU J D, LI J L, ZHU L. Effects of zinc on the properties of blast furnace cohesive zone and zinc accumulation in dropping zone[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2020, 43(4):241-246.
- [6] 任毅超, 梁红星. 浅议锌对高炉的危害及控制 [J]. 甘肃冶金, 2019, 41(5):16-17, 22.  
REN Y C, LIANG H X. Discussion on the harm and control of zinc to blast furnace[J]. Gansu Metallurgy, 2019, 41(5):16-17, 22.
- [7] YANG X F, CHU M S, SHEN F M, et al. Mechanism of zinc damaging to blast furnace tuyere refractory[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2009, 22(6):454-460.
- [8] VAN HERCK P, VANDECASTEELE C, SWENNEN R, et al. Zinc and lead removal from blast furnace sludge with a hydrometallurgical process[J]. Environmental Science & Technology, 2000, 34(17):3802-3808.
- [9] ESEZOBOR D E, BALOGUN S A. Zinc accumulation during recycling of iron oxide wastes in the blast furnace[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2006, 33(5):419-425.
- [10] JIAO K X, ZHANG J L, LIU Z J, et al. Circulation and accumulation of harmful elements in blast furnace and their impact on the fuel consumption[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2017, 44(5):344-350.
- [11] 焦克新, 张建良, 左海滨, 等. 锌在高炉内渣铁中溶解行为计算分析 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2014,

- 35(3):383-387.
- JIAO K X, ZHANG J L, ZUO H B, et al. Calculation analysis of zinc dissolution behaviors of the slag- iron in blast furnaces[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2014, 35(3):383-387.
- [12] 马超, 李东涛, 赵鹏, 等. 焦肥煤配比对顶装和捣固焦性能的影响[J]. *中国冶金*, 2020, 30(4):6-11.
- MA C, LI D T, ZHAO P, et al. Influence of coking coal and fat coal ratio on performance of top-charging coke and stamping coke[J]. *China Metallurgy*, 2020, 30(4):6-11.
- [13] 周晓佳. 氯元素对高炉内焦炭气化反应过程的影响[D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.
- ZHOU X J. Influence of Chlorine Elements on Coke Gasification Reaction Process in Blast Furnace [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2020.
- [14] 李星志, 郑镇鹏, 赵财波. 分析高炉中碱金属和锌的循环及危害控制措施[J]. *中国金属通报*, 2022(9):234-236.
- LI X Z, ZHENG Z P, ZHAO C B. The circulation of alkali metals and zinc in blast furnace and its hazard control measures are analyzed[J]. *China Metal Bulletin*, 2022(9): 234-236.
- [15] 张磊, 杨斌, 张国波, 等. 酒钢7号高炉有害元素分析及操作对策[J]. *炼铁*, 2022, 41(4):53-56.
- ZHANG L, YANG B, ZHANG G B, et al. Analysis of harmful elements in Jiuquan Steel No. 7 BF and operational solution[J]. *Ironmaking*, 2022, 41(4):53-56.
- [16] 王阿朋, 张越强, 沈龙龙. 马钢B高炉炉役后期有害元素分析与控制[J]. *中国钢铁业*, 2023(5):46-50.
- WANG A P, ZHANG Y Q, SHEN L L. Analysis and control of harmful elements in B blast furnace of Maanshan Iron and Steel Co., Ltd[J]. *China Steel*, 2023(5):46-50.
- [17] 刘海彬. 凌钢5号高炉碱金属和锌负荷分析[J]. *冶金信息导刊*, 2018, 55(6):18-21.
- LIU H B. Analysis of alkali metal and zinc load in No. 5 BF of Lingyuan Steel[J]. *Metallurgical Information Review*, 2018, 55(6):18-21.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 铁矿石 高温荷重还原软熔滴落性能测定方法: GB/T 34211—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Determination method for high temperature load-bearing reduction softening and melting dripping properties of iron ores: GB/T 34211—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [19] 廖玉通, 王子宏, 赵秀华, 等. 铁矿石荷重软熔滴落性能的检测[J]. *柳钢科技*, 2012(6):44-47.
- LIAO Y T, WANG Z H, ZHAO X H, et al. Inspection of reflowing and dropping property under load of iron ore[J]. *Liugang Technology*, 2012(6):44-47.
- [20] 付式. 论铁矿石(烧结矿、球团矿)软化、熔化、滴落测试方法和基本参数的选择[J]. *烧结球团*, 1989, 14(1): 3-10.
- FU S. Methods for softening, melting and dropping tests of iron ores (sinters and pellets) and their basic parameters[J]. *Sintering and Pelletizing*, 1989, 14(1):3-10.
- [21] 赵丽树, 张宝会, 赵佳顺, 等. 影响焦炭质量的因素及改进措施[J]. *煤化工*, 2007, 35(4):25-26.
- ZHAO L S, ZHANG B H, ZHAO J S, et al. Factors to affect coke quality and improvement measures[J]. *Coal Chemical Industry*, 2007, 35(4):25-26.
- [22] 赵小燕, 高贵平, 王东峰. 炼焦配煤技术的研究与应用进展[J]. *煤化工*, 2024, 52(S1):34-40.
- ZHAO X Y, GAO G P, WANG D F. Research and application progress of coal blending technology for coking[J]. *Coal Chemical Industry*, 2024, 52(S1):34-40.
- [23] WANG W, WANG J, XU R S, et al. Influence mechanism of zinc on the solution loss reaction of coke used in blast furnace[J]. *Fuel Processing Technology*, 2017, 159: 118-127.
- [24] 金家敏. 再论固体渗碳剂中碳酸盐的催化机理[J]. *金属热处理*, 2000, 25(10):37-41.
- JIN J M. Re-exploring on catalyzing mechanism of carbonate in pack carburizing[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2000, 25(10):37-41.
- [25] VASHUKOV I A. On mechanism of carbon dissolution in liquid iron[J]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Metally*, 1978:33-37.
- [26] WANG J, WANG W, CHEN X H, et al. Optimizing the performance of iron coke by coal blending: insights from the metallurgical properties and structural characteristics[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 450:142017.

责任编辑: 何莉