

文章编号: 1000-582X(2011)03-082-07

转底炉处理冶金粉尘工艺的锌钾钠脱除及烟气形成

王静松¹, 杨慧贤¹, 佘雪峰¹, 曾 晖², 丁银贵¹, 薛庆国¹

(1. 北京科技大学 教育部生态与循环冶金重点实验室; 冶金与生态工程学院, 北京 100083;
2. 山东莱芜钢铁集团公司技术研发中心, 山东 莱芜 271004)

摘 要: 转底炉直接还原处理钢铁厂冶金粉尘过程中, Zn、K、Na 等元素的脱除及烟气形成过程对转底炉工艺实施效果影响很大。采用高温管式炉模拟转底炉工艺条件, 用钢铁厂含锌粉尘制成内配碳球团, 进行直接还原实验研究, 并收集实验过程产生的烟气和二次粉尘, 对烟气中的气体成分以及烟气中的二次粉尘进行化学成分、微观结构以及物相组成分析。研究证明: Zn 的脱除率可以达到 98%, K、Na、Pb 的脱除率分别达到 80%、88% 和 85%; 烟气中 N₂、CO、CO₂ 的体积分数分别为 71.4%、14.5% 和 14.1%; 烟气中二次粉尘主要物相为 ZnO、KCl、Zn₅(OH)₈Cl₂H₂O、PbO 和 NaCl, 二次粉尘中 ZnO 含量高达 80%, 可作为二次锌资源加以利用。在此基础上分析了转底炉直接还原过程中 Zn、Pb、K、Na 脱除和烟气形成机理。

关键词: 转底炉; 粉尘; 直接还原; 脱锌

中图分类号: TF556

文献标志码: A

Study on mechanism of Zn, K, Na removal and flue gas formation in RHF direct reduction treat metallurgical dust process

WANG Jing-song¹, YANG Hui-xian¹, SHE Xue-feng¹, ZENG Hui², DING Yin-gui¹, XUE Qing-guo¹

(1. Key Laboratory of Ecological and Recycle Metallurgy, School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China; 2. Technical Research and Development Center of Lai Gang Group CO., Laiwu, Shandong 271004, P. R. China)

Abstract: In metallurgical dusts treating by RHF (rotary hearth furnace) direct reduction, processes of Zn, K, Na removal and flue gas formation have significantly influence on RHF process. Direct reduction experiment on cold bonded briquettes, made by mixing metallurgical zinc-bearing dusts with proper proportions, are investigated in a high temperature tube furnace simulated RHF. Ingredients, microstructures and phase compositions of flue gas and secondary dust are collected and analyzed. The results show that removal rates of Zn, K, Na and Pb are 98%, 80%, 88% and 85% respectively, gas ingredient of flue gas of N₂, CO, CO₂ are 71.4%, 14.5% and 14.1% respectively, and phase compositions of secondary dust are ZnO, KCl, Zn₅(OH)₈Cl₂H₂O, PbO and NaCl. Studies show that ZnO content of secondary dust is up to 80%, which can be reused as secondary zinc resource. Then mechanism of removal of Zn, Pb, K and Na and forming of flue gas are analyzed in direct reduction process.

Key words: rotary hearth furnace; metallurgical dust; direct reduction; dezincification

收稿日期: 2010-10-05

基金项目: 国家发改委循环经济示范工程(发改办高技[2007]3194号); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(FRF-MP-09-001A)

作者简介: 王静松(1968-), 男, 北京科技大学副教授, 博士, 主要从事冶金资源综合利用与外场影响金属凝固研究,
(E-mail) wangjingsong@ustb.edu.cn.

我国的钢产量超过 5×10^8 t,为国民经济发展发挥重要作用。钢铁生产中产生大量的粉尘和污泥,产生量一般为钢产量的 10%左右,按照目前的钢产量,我国钢铁行业每年产生的粉尘量达 5×10^7 t以上。占总粉尘量 30%左右的粉尘(污泥)中,除 Fe 之外还含有大量 Zn、Pb、K、Na 等有价元素,并且一些粉尘粒度非常细小,这些粉尘被称为难利用粉尘或含锌粉尘。直接将难利用粉尘返回烧结生产的传统利用方式虽然利用了粉尘中的铁元素,但是浪费了大量的其他有价元素,而且由于粒度细小以及 Zn、Pb、K、Na 等元素的存在使烧结矿质量下降,并对高炉顺行以及高炉寿命有严重的影响^[1-2],因此如何有效经济地利用这类粉尘成为钢铁厂目前亟待解决的问题。

近些年来,国内外学者对钢铁厂粉尘的有效利用开展了大量的研究工作^[3-8],转底炉技术因其在技术成熟度和经济性等方面的优越性被人们普遍关注。日本新日铁在已建成年处理粉尘能力分别为 1.5×10^5 t 和 1.8×10^5 t 转底炉之后^[9-10],2008 年 3 月在君津制铁所投产了第三条转底炉处理钢铁厂尘泥生产线,至此新日铁共拥有 3 座转底炉,年处理粉尘能力 1.2×10^6 t^[11]。2009 年 7 月马鞍山钢铁公司引进新日铁技术建设的转底炉处理钢铁厂粉尘生产线正式投产^[12]。采用该工艺,粉尘被制成含碳球团,在炉内 1 473~1 673 K 的还原区还原为金属化球团,球团中的 Zn、Pb、K、Na 等元素由于其易于还原汽化或直接汽化,进入烟气而被脱除,而通过对烟气的收集可以得到富含 Zn、Pb、K、Na 等元素的二次粉尘,而生产出的金属化球团可以作为高炉原料使用。该工艺实现了对 Fe、C、Zn、Pb、K、Na 等有价元素的同时回收,较好地解决了钢铁厂难利用粉尘的综合利用问题。

转底炉处理钢铁厂难利用粉尘工艺顺利实施的关键工艺技术包括:原料处理、热工制度、余热利用、金属化球团冷却以及二次粉尘的产生与收集控制等。而烟气中二次粉尘的形成和收集过程控制不仅影响最终产品金属化球团的 Zn、Pb、K、Na 等元素含量控制,而且二次粉尘的产生温度、转底炉的不同位置的产生量、含 Zn、Pb、K、Na 化合物的二次粉尘的凝结温度等关键技术参数直接影响转底炉工艺的烟气处理、余热利用等关键设计参数,由于技术保密等原因,目前没有相关研究的报道。

基于我国钢铁厂粉尘的利用现状,2007 年国家发改委发布了转底炉处理钢铁厂含锌尘泥项目,由莱芜钢铁公司和北京科技大学共同完成该项目的开发建设。笔者以国家发改委循环经济示范工程项目——年产 2×10^5 t 金属化球团转底炉处理钢铁厂含锌尘泥工程为背景,采用莱芜钢铁股份有限公司生产中产生的粉尘为原料制成内配碳球团,模拟转底炉直接还原工艺条件,对转底炉生产金属化球团过程进行实验研究。在实验过程中收集烟气及二次粉尘,通过对烟气气体成分及烟气凝结形成的二次粉尘所含的 Zn、Pb、K、Na 元素物相组成以及化学成分进行分析,观察测定二次粉尘的凝结温度等,分析阐述了转底炉烟气及二次粉尘的形成机理,为钢铁厂含锌粉尘中有价元素的回收利用提供了重要基础数据,并据此指导转底炉工艺流程设计。

1 内配碳球团直接还原实验研究

1.1 实验原料

实验所用的粉尘由山东莱芜钢铁公司提供。各种粉尘的主要化学成分以及制备的碳氧比为 1:1 的内配碳球团的各种粉尘配加量见表 1。

表 1 各种粉尘的化学成分(质量分数)及配加量

粉类	%									配加量/kg
	TFe	MFe	FeO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	C	Zn	
高炉干灰	17.03	1.65	7.88	2.87	2.18	0.70	2.49	34.00	16.60	1.567
转炉细灰	52.30	2.48	15.59	2.37	6.52	1.05	0.79	1.52	0.03	1.250
转炉粗灰	56.32	24.04	26.34	2.99	18.84	3.76	0.53	0.70	0.05	0.642
电炉灰	44.73	0.34	8.91	2.06	2.92	1.38	0.56	1.14	2.61	0.097
轧线污泥	71.73	0.13	43.86	1.39	0.02	0.03	1.19	1.12	0.13	0.217
转炉污泥	58.19	6.43	59.58	1.98	10.28	3.47	1.83	1.65	0.25	0.856
高炉槽上槽下灰	51.50	0.18	5.16	4.68	3.86	0.91	1.78	3.66	0.02	0.563
转炉环境除尘灰	38.60	3.10	12.72	12.20	3.07	—	—	2.18	1.96	0.111

1.2 实验方法

按表1配料方案对各种粉尘进行配料(配入水量 $(12 \pm 0.5)\%$),充分混合的原料经对辊压球机压制成内配碳球团(称之为生球)。球团尺寸对于金属化率、杂质元素的脱除率以及生产效率等高温还原焙烧结果有显著影响,球团尺寸减小有利于提高反应速度,但是对于生球的压制、烘干以及转底炉的生产效率等有负面影响,球团尺寸过大则大幅降低金属化率、杂质元素的脱除效率,同样影响整个生产流程的生产效率。因此通过前期的实验研究,确定转底炉过程采用的生球尺寸为 $20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的椭球,本实验研究即采用与实际工程相同的生球形状、尺寸及压制工艺。将生球放入 378 K 烘干箱内烘干。烘干后的球团装入铁铬铝铂丝编成的吊篮,将吊篮放入管式炉内的恒温区进行还原焙烧。据文献报道转底炉处理钢铁厂粉尘的还原区温度一般为 $1473 \sim 1673 \text{ K}$,通过 1473 、 1523 、 1573 、 1623 以及 1673 K 的还原焙烧实验研究,综合考虑还原时间、金属化球团成分、生产效率以及生产成本等因素,确定实际转底炉生产的工艺参数为还原区温度 1573 K ,球团停留时间 15 min 。本研究即采用上述实际工况条件为实验控制参数,设定实验炉温为 1573 K 。同时为保证高温还原时炉内还原性气氛,管式炉通入流量为 5 L/min 的 N_2 气以排出 O_2 。

实验高温还原设备采用高温硅钼炉,额定功率 8 kW ,最高加热温度 1923 K ,炉管材质为刚玉-莫来石,炉管尺寸: $\phi 95 \text{ mm} \times 720 \text{ mm}$ 。生球以及还原后的金属化球团的化学成分通过化学分析得出;使用气相色谱仪分析获得烟气中的气体成分;采用化学分析法分析二次粉尘的化学成分;用扫描电镜(SEM)、X射线衍射仪(XRD)以及电子探针(EPMA)来分析二次粉尘所含元素及物相组成。

2 实验结果及讨论

2.1 生球和金属化球团的化学成分

所制备的内配碳球团(生球)及金属化球团化学成分见表2,可以看出粉尘所制内配碳球团经过高温还原后化学成分变化很大。生球中铁氧化物大部分被还原,金属化率达到 85% ,Zn的脱除率达到 98% ,K的脱除率为 80% ,Na的脱除率高于K的脱除率达到 88% ,Pb的脱除率达到 85% ,证明转底炉直接还原工艺具有生产金属化球团,快速脱除Zn、Pb、K、Na等有害元素的功能。

表2 生球和金属化球团的化学成分(质量分数) %

成分	TFe	MFe	Fe_2O_3	FeO	SiO_2	CaO	MgO
生球	43.20	5.29	29.68	21.90	2.66	6.79	1.55
金属化球团	67.57	55.25	—	16.53	3.63	10.63	2.43
成分	Al_2O_3	C	K	Na	Zn	Pb	
生球	1.55	11.30	0.74	0.85	5.48	0.066	
金属化球团	2.43	4.42	0.23	0.15	0.12	0.015	

2.2 烟气气体成分分析

在还原焙烧过程中,球团放入炉内 5 min 时炉口开始冒出大量的白色及淡黄色烟气,在炉壁和炉口可以收集到白色或淡黄色的粉尘。同时用气体收集袋收集炉口冒出的气体,用气相色谱仪分析了烟气中的气体成分,经归一化处理后得到烟气的主要成分如表3所示。

表3 烟气的主要组分(体积分数) %

组分	N_2	CO	CO_2
含量	71.4	14.5	14.1

由于还原实验是在 N_2 气氛(流量为 5 L/min)中进行的,因此烟气中的 N_2 含量较高,为 71.4% ,主要为实验过程所通入的保护气体带入,CO和 CO_2 是球团还原过程产生,比例约为 $1:1$ 。

2.3 二次粉尘的化学成分及物相组成分析

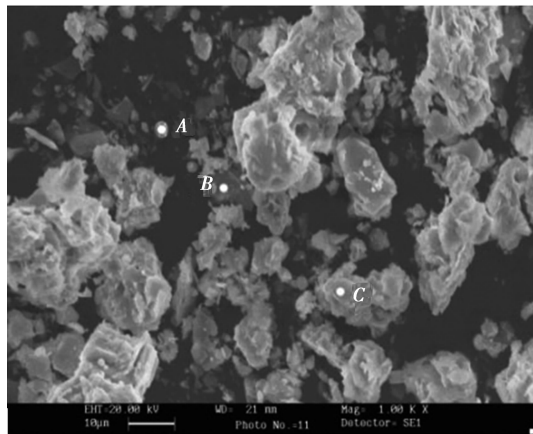
在内配碳球团的加热及自还原过程中,Zn、Pb等元素的化合物被还原为单质金属Zn和Pb,由于这两种金属元素蒸汽压很高,在 1573 K 时被汽化进入烟气,在外溢过程中被氧化成 ZnO 、 PbO 而凝结。粉尘中所含的K、Na的氯化物本身蒸汽压很高,直接汽化进入烟气,经冷凝后形成二次粉尘。由于炉内温度分布已预先测得,通过不同位置凝结物的化学成分分析,就可以判断不同化合物的凝结温度区间,进而为转底炉的工艺设计及二次粉尘的回收提供重要依据。

ZnO 和 NaCl 呈白色,KCl为淡黄色,收集到的二次粉尘外观呈白色和淡黄色,与具体物相相符。烟尘的颜色与其沉积位置和时间有关,说明不同的挥发物挥发温度不同、冷凝温度也不同。经分析测定,二次粉尘开始粘结温度约为 1173 K 。随着温度的降低,二次粉尘的沉积形态逐渐变化,在 $1173 \sim 1123 \text{ K}$ 的温度区间内以白色细小绒毛状粘附于炉

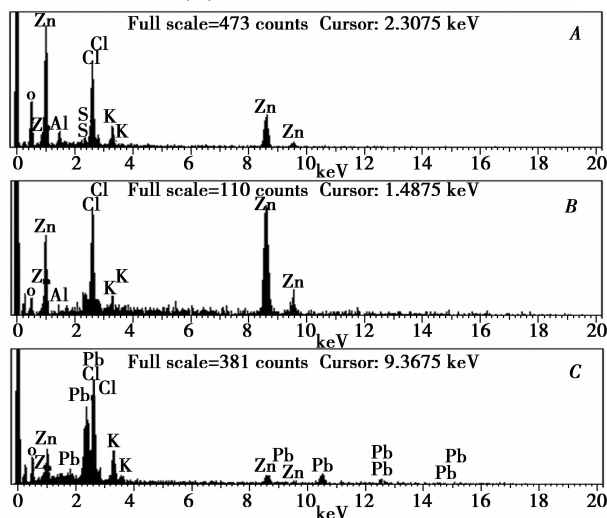
壁;1 123~1 073 K 的温度区间呈白色偏淡黄绿色絮状物粘结在炉壁上。二次粉尘中的 Zn、Pb、K、Na 等金属元素的具体成分如表 4 所示。

表 4 二次粉尘的主要有色金属元素成分(质量分数) %

元素	Zn	Pb	K	Na
含量	64.20	1.08	3.87	1.00



(a) 二次粉尘扫描电镜照片



(b) 二次粉尘电子探针谱线

图 1 二次粉尘形貌及成分

表 5 A、B、C 各点处的成分含量(质量分数) %

位置	Zn	K	Cl	Pb	S	Al
A	13.29	18.06	55.92	12.73	—	—
B	75.61	2.06	19.87	—	—	2.45
C	49.34	8.15	32.76	—	2.16	7.59

图 1 为二次粉尘的扫描电镜照片(a)及电子探针谱线(b),通过图 1(a)可以发现,二次粉尘是由不同尺寸的颗粒及其团聚物构成。进一步采用

EPMA 对粉尘进行扫描分析,图 1(a)中标示的 A、B、C 点的扫描谱线如图 1(b)所示,具体成分(原子百分比)列于表 5,可以看出烟尘中 A、B、C 三点的 Zn、K 和 Cl 元素的含量较高,有少量的 Pb、S、Al 存在,并且 Cl 元素的原子数目明显偏高。进一步采用 X 射线衍射(XRD)分析确定二次粉尘中各个元素的化学构成,从 XRD 衍射图(图 2)中知道烟尘中的 K 和 Na 分别以 KCl 和 NaCl 形式存在,Zn 主要以 ZnO 存在,同时含锌化合物还包括复杂化合物 $Zn_5(OH)_8Cl_2H_2O$ 。综合分析上述结果,可以判断转底炉烟气中二次粉尘的主要物相有 ZnO、KCl、NaCl、PbO 以及 $Zn_5(OH)_8Cl_2H_2O$ 等,而且 Zn 含量很高,转底炉工艺可以有效地使 Zn 从钢铁厂粉尘中脱除并收集作为锌生产的原料。

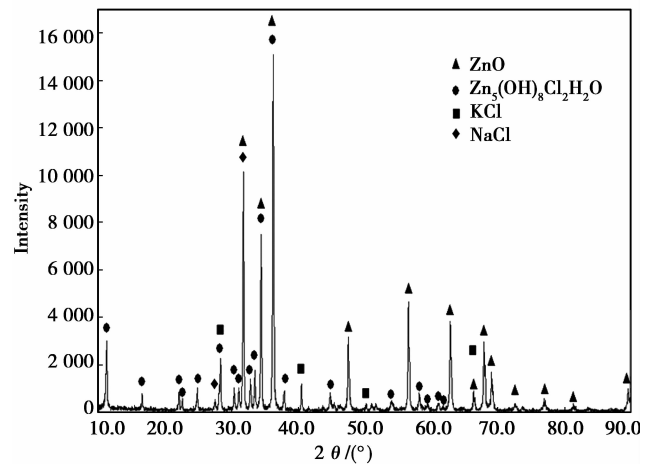


图 2 二次粉尘的 X 射线衍射谱线

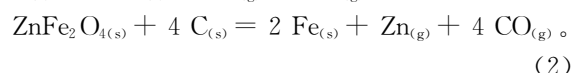
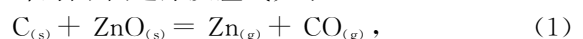
2.4 转底炉烟气及二次粉尘形成机理

根据实验研究与分析可知,转底炉处理含锌粉尘形成的烟气主要由加热用煤气燃烧产物(CO、CO₂),助燃风携带氮气等,以及粉尘中的 Zn、Pb、K、Na 的化合物还原或挥发产物形成的二次粉尘构成。二次粉尘的形成机理较为复杂,其组成及凝结温度直接影响转底炉烟气处理及二次粉尘的回收利用,因此需要系统分析其形成机理。

2.4.1 直接还原过程中 Zn 元素行为

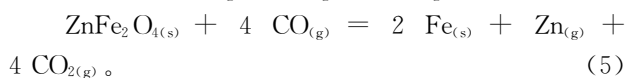
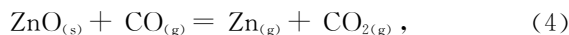
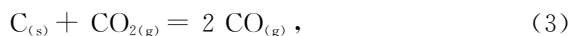
根据成分及物相分析可知,锌在球团中主要以氧化锌和铁酸锌的形式存在^[13]。而在本研究的实验条件下,锌有两种还原方式:1) ZnO-C 的固-固还原反应;2) ZnO-CO 的气-固还原反应。

锌的固-固还原反应式如下:



锌的气-固还原反应是由 3 个反应组成,如

下所示:



从表 6 看出,反应(1)比反应(4)的反应温度要低得多,ZnO 与 C 的直接还原更容易进行。但是由于固相之间发生的反应,反应物间的相互接触非常有限,当与 ZnO 接触的 C 反应耗尽以后,球团中

ZnO 的还原脱除以反应(3)的气-固还原反应为主。

由表 6 可以判断,焙烧温度的提高不仅使反应(4)的平衡常数急剧增大,而且反应的动力学条件也迅速改善。表 7 为 1 个标准大气压不同温度条件下,CO 还原 ZnO 的反应达到平衡时 CO 和 CO₂ 的体积分数,随着温度的升高,CO 还原 ZnO 所需炉气中的 CO 的平衡分压从 1 000 K 时的 96% 降低到 1 600 K 时的 18%,在本研究条件下能够满足 ZnO 的还原,进而使 Zn 从球团中脱除。

表 6 Zn 及 Fe 氧化物还原反应的 $\Delta G^{\theta}-T$ 的关系式^[14]

反应方程式	$\Delta G^{\theta} = A + BT$		开始还原 温度/K	ΔH_{298}^{θ} (kJ · mol ⁻¹)
	A (J · mol ⁻¹)	B (J · mol ⁻¹ · K ⁻¹)		
$\text{ZnO}_{(s)} + \text{C}_{(s)} = \text{Zn}_{(g)} + \text{CO}_{(g)}$	344 348	-281.10	1 225	237.57
$\text{C}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)} = 2\text{CO}_{(g)}$	1704 60	-174.43	977	172.43
$\text{ZnO}_{(s)} + \text{CO}_{(g)} = \text{Zn}_{(g)} + \text{CO}_2$	181 557	-113.23	1 603	65.14
$3\text{Fe}_2\text{O}_3(s) + \text{CO}_{(g)} = 2\text{Fe}_3\text{O}_4(s) + \text{CO}_{2(g)}$	-28 790	-56.45	—	-43.23
$\text{Fe}_3\text{O}_4(s) + \text{CO}_{(g)} = 3\text{FeO}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)}$	33 310	-41.45	804	19.29
$\text{FeO}_{(s)} + \text{CO}_{(g)} = \text{Fe}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)}$	-19 490	21.35	913	161.50
$3(\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)_{(s)} + \text{CO}_{(g)} = 3\text{ZnO}_{(s)} + 2\text{Fe}_3\text{O}_4(s) + \text{CO}_{2(g)}$	-3 561	-67.66	—	—

表 7 反应 $\text{ZnO} + \text{CO} = \text{Zn}_{(g)} + \text{CO}_2$ 的平衡气相组成^[15]

温度/K	P = 101.325 kPa	
	CO ₂ / %	CO / %
800	0.18	99.82
1 000	3.06	96.94
1 200	18.06	81.94
1 400	56.50	43.50
1 600	82.20	17.80

在本研究的反应条件下,C-CO 的气化反应速率比 CO 还原 ZnO 的反应速率小得多,因此 ZnO 被 CO 还原的速率由碳的气化反应控制,只有在一定温度下,C 的气化反应产生的还原性气体浓度满足反应(4)所需要的气氛才能保证其顺利进行^[16]。

从图 3 中可以看出,随着温度的升高,碳气化反应产生 CO 的平衡分压逐渐增大。而在 Zn 的蒸气压一定时,随着温度的升高,ZnO 被 CO 还原所需要的 CO 的平衡分压逐渐降低。1 173 K 时,两反应的平衡线相交,高于 1 173 K 条件下,气氛中的 CO 分压可以满足反应(4)的需要。同时由表 6 和图 3 可知球团中铁氧化物的还原反应先于 ZnO 还原,为 ZnO 还原提供大量的 CO,保证球团内部 CO 分压高于 ZnO 还原所需分压,从而更有利于 ZnO 的还原。还原 ZnO 的还原产物为金属 Zn 单质,沸点为 907 °C,在 1 573 K 高温下,Zn 会汽化而很快离开反应区,随着烟气挥发出来,还原产物的脱除进一步促进了反应的进行,这就保证了转底炉处理含锌粉尘工艺在短时间内达到了很高的脱锌率。

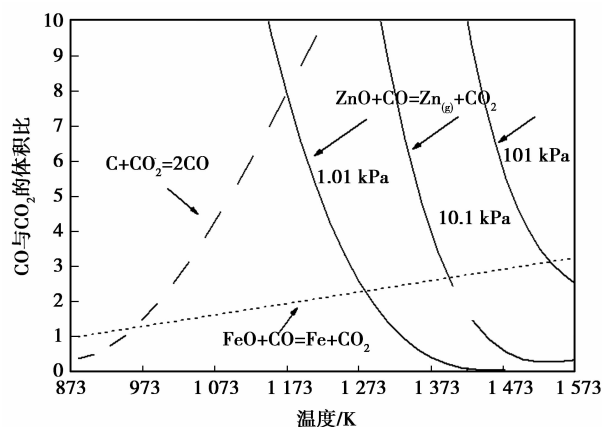


图 3 ZnO 以及 FeO 被 CO/CO₂ 混合气体还原的反应平衡关系图

Zn 蒸汽离开球团内部的还原气氛进入烟道后,随着烟气向低温区移动,烟气成分如表 7 所示,CO 分压小于 50%,当烟气温度降低到 1 400 K 时,Zn 又被氧化为 ZnO 而成为二次粉尘,随着烟气的上升在温度较低的炉壁上凝结而被收集。

2.4.2 直接还原过程中 NaCl、KCl 的行为

根据本研究及文献报道^[17-19],球团中的碱金属主要以氯化物的形式存在。NaCl 和 KCl 的熔点分别为 1 046 K 和 1 074 K;沸点分别为 1 680 K 和 1 738 K,同时蒸汽压很高。根据公式^[20](6)-(8)可得 NaCl 和 KCl 在不同温度下的蒸汽压变化如图 4 所示。

KCl 的蒸汽压 P_{KCl} :

$$\lg P_{KCl} = -10\,710 T^{-1} - 3.0 \lg T + 18.91, \\ (T=1\,046 \sim 1\,680 \text{ K}). \quad (6)$$

NaCl 的蒸汽压 P_{NaCl} :

$$\lg P_{NaCl} = -12\,440 T^{-1} - 0.90 \lg T - 0.46 \times 10^{-3} T \\ + 14.31, (T=298 \sim 1\,074 \text{ K}). \quad (7)$$

$$\lg P_{NaCl} = -11\,530 T^{-1} - 3.48 \lg T + 20.77, \\ (T=1\,074 \sim 1\,738 \text{ K}). \quad (8)$$

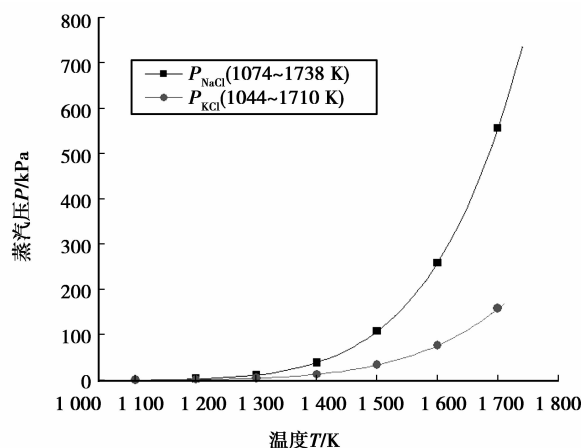


图 4 NaCl 和 KCl 在不同温度下的蒸汽压

从图 4 可知,1 573 K 时 KCl 和 NaCl 的蒸汽压分别达到 61 kPa 和 204 kPa,NaCl 和 KCl 在高温下被汽化,随废气进入转底炉烟气,在烟气排出炉外后经冷却凝结成为二次粉尘被烟气除尘系统回收。同时,由于 NaCl 的蒸汽压明显高于 KCl 的蒸汽压,NaCl 的脱除率高于 KCl,实验结果证明了这一结论。

综上所述,转底炉直接还原处理钢铁厂含锌粉尘所产生的烟气中,气体成分主要为煤气燃烧产物、助燃空气中的 N_2 ,以及粉尘中氧化物还原产生的 CO 和 CO_2 等,可以通过控制鼓入空气的过剩系数控制其中的 CO 与 CO_2 的分压来保证内配碳球团充分还原;二次粉尘中的主要物相为 ZnO、KCl 和 NaCl 等,可以通过转底炉除尘系统进行收集,作为 Zn 及 K、Na 的二次资源加以利用。

3 结 论

1) 钢铁厂含锌粉尘制成的内配碳球团在 1 573 K,加热焙烧 15 min 的实验条件下,铁氧化物被还原,金属化率超过 80%,可以作为金属化炉料用于钢铁生产。

2) 钢铁厂粉尘中 Zn 的脱除率可以达到 98%,K、Na、Pb 的脱除率分别达到 80%、88% 和 85%,Zn 及 K、Na、Pb 脱除后进入转底炉烟气形成二次粉尘。

3) 转底炉二次粉尘的主要物相为 ZnO,有少量的 $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$ 、NaCl、KCl 和 PbO,其中 ZnO 质量分数高达 80%,可以作为二次资源被利用。

参考文献:

- [1] 王成立,吕庆,顾林娜,等. 碱金属在高炉内的反应及分配[J]. 钢铁研究学报,2006,18(6):6-10.
WANG CHENG-LI, LU QING, GU LIN-NA, et al. Reaction and distribution of alkali metals in blast furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2006, 18(6):6-10.
- [2] YANG X F, CHU M S, SHEN F M, et al. Mechanism of zinc damaging to blast furnace tuyere refractory[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 22(6):454-460.
- [3] TOMAS H, BRUNA V S, ANDRE M B, et al. Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 135(1/3): 311-318.
- [4] ITOH S, TSUBINE A, KAZUYO M Y, et al. New EAF dust treatment process with the aid of strong magnetic field[J]. ISIJ International, 2008, 48(10): 1339-1344.
- [5] BRUCKARD W J, DAVEY K J, RODOPOULOS T, et al. Water leaching and magnetic separation for decreasing the chloride level and upgrading the zinc content of EAF steelmaking baghouse dusts [J]. International Journal of Mineral Processing, 2005, 75(1):1-20.
- [6] MATSUI H, MATSUO K, YAMAMOTO T. Waste treatment and metal recycling system for stainless steel making plant[J]. Electric Furnace Steel, 2009, 80(2): 199-204.
- [7] RUIZ O, CLEMENTE C, ALONSOI M, et al. Recycling of an electric arc furnace flue dust to obtain high grade ZnO[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 141(1):33-36.
- [8] DUTRA A J B, PAIVA P R P, TABARES L M. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust [J]. Minerals Engineering, 2006, 19(5): 478-485.
- [9] ODA H, IBARAKI T, TAKAHASHI M. Dust recycling technology by the rotary hearth furnace[J]. Nippon Steel Technical Report, 2002 (86): 30-34.
- [10] ODA H, IBARAKI T, ABE Y. Dust recycling technology by the rotary hearth furnace [J]. Nippon Steel Technical Report, 2006 (94): 147-152.
- [11] 竺义. 新日铁公司铁尘回收转底炉在君津厂投产 [EB/OL]. (2008-6-23) [2010-07-10]. <http://content.caixun.com/NE/00/rt/NE00rthj.shtm>.
- [12] 刘自民,金俊,苏允隆. 马钢冶金污泥循环利用技术研究[J]. 烧结球团, 2010, 35(2): 18-22.
LIU ZI-MIN, JIN JUN, SU YUN-LONG. Study on recycling technology of masteel metallurgical sludge[J]. Sintering and Pelletizing, 2010, 35(2): 18-22.
- [13] 张建良,闫永芳,徐萌,等. 高炉含锌粉尘的脱锌处理[J]. 钢铁,2006,41(10):78-81.
ZHANG JIAN-LIANG, YAN YONG-FANG, XU

- MENG, et al. Research on Removal of Zn From Blast Furnace Dust. *Iron and Steel*, 2006,41(10):78-81.
- [14] 库巴谢夫斯基. 冶金热化学[M]. 北京:冶金工业出版社,1985.
- [15] 陈少纯,周令治,邹家炎,等. 铁酸锌的还原分解和其中锗的行为研究[J]. 广东有色金属学报,1991,1(1):27. CHEN SHAO-CHUN, ZHOU LING-ZHI, ZOU JIA-YAN, et al. Studies on reducing decomposition of zinc ferrite and the behavior of germanium[J]. *Journal of Guangdong Non-Ferrous Metals*, 1991, 1(1):26-31.
- [16] 孟繁明,王文忠,八木顺一郎. 焦炭过滤床在线分离电炉粉尘中氧化锌的研究[J]. 钢铁,2008,43(4):91. MENG FAN-MING, WANG WEN-ZHONG, YAGI JUNICHIRO. Research on zinc oxide separation in EAF dust with coke bed filter[J]. *Iron and Steel*, 2008, 43(4):91.
- [17] MANTOVAN M C, TAKANO C. The strength and the high temperature behaviors of self-reducing pellets containing EAF dust [J]. *ISIJ International*, 2000, 40(3):224-230.
- [18] PENG CUI, GUO ZHAN-CHENG, ZHANG FU-LI. Discovery of potassium chloride in the sintering dust by chemical and physical characterization [J]. *ISIJ International*, 2008, 48 (10):1398-1403.
- [19] PENG CUI, ZHANG FU-LI, GUO ZHAN-CHENG. Separation and recovery of potassium chloride from sintering dust of ironmaking works [J]. *ISIJ International*, 2009, 49(5):735-742.
- [20] 沐继尧. 高炉冶炼中的碱金属[M]. 北京:冶金工业出版社,1992.

(编辑 王维朗)

(上接第74页)

- [4] 徐庆斌. 可反复使用的长寿命 Al_2O_3-C 质长水口的设计方案[J]. 国外耐火材料, 2006,31(4):44-52. XU QIN-BIN. Design scheme of long life Al_2O_3-C ladle nozzle for repeated use[J]. *Foreign refractories*, 2006, 31(4):44-52.
- [5] JHA P K. 出口位置,前置浇铸箱高度和大包长水口浸入深度对中间包内钢液混合的影响[J]. 现代冶金, 2003(1):39-48. JHA P K. Effect of molten steel mix in tundish on immersion depth of ladle nozzle [J]. *Modern metallurgy*, 2003(1):39-48.
- [6] SOL ORIO-DIAZ G, RAMOS-BANDERAS A. Modeling study of turbulent flow effect on inclusion removal in a tundish with swirling ladle shroud[J]. *Steel Research International*, 2009,80(3):223-34.
- [7] 王波,郭俊玉,张捷宇,等. 板坯连铸异型中间包卷渣水模型实验研究[J]. 铸造技术, 2007,28(4):504-507. WANG BO, GUO JUN-YU, ZHANG JIE-YU, et al. Hydraulics simulation investigation on tundish for slab casting[J]. *Foundry Technology*, 2007,28(4):504-507.
- [8] KASAI N, YAMAZOE H, IQUCHI M. Development of optimum argon shrouding system between ladle and tundish[J]. *Journal of the iron and steel institute of Japan*, 2005,91(10):763-768.
- [9] 孙彦辉,蔡开科,赵长亮. 非稳态浇注操作对连铸坯洁净度影响[J]. 钢铁, 2008,43(1):22-25. SUN YAN-HUI, CAI KAI-KE, ZHAO CHANG-LIANG. Effect of transient casting operation on cleanliness of continuously cast strands[J]. *Iron and steel*, 2008,43(1):22-25.
- [10] ZHONG L C, LI B K, ZHU Y X, et al. Fluid flow in a four-strand bloom continuous casting tundish with different flow modifiers[J]. *ISIJ International*, 2007,47(1):88-94.
- [11] ANIL K, DIPAK M, KORJA S C. Experimental validation of flow and tracer — dispersion [J]. *Metallurgical and materials transactions*, 2005,36(12):777-785.
- [12] 李刚,何俊范. 多流水方坯连铸中间罐内液体流动状态的研究[J]. 重庆大学学报,1994,17(1):100-106. LIN GANG, HEN JUN-FAN. A study on liquid steel mixing and flow state in tundish for CC multi-strand billets[J]. *Journal of Chongqing University*, 1994, 17(1):100-106.
- [13] EPEREZ L M, DIAZ C M. Physical modeling of steel flow in a tundish equipped with a turbulence inhibitor and a gas curtain[J]. *Revista De Metalurgia*, 2005, 41(6):410-418.
- [14] 张胜军,朱苗勇. 连铸中间包内夹杂物去除机理的水模型研究[J]. 金属学报,2007,43(9):1004-1008. ZHANG SHENG-JUN, ZHU MIAO-YONG. Water model study of removal mechanism of inclusion in continuous casting tundish [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2007,43(9):1004-1008.
- [15] 文光华,唐萍,祝明妹,等. 板坯连铸中间包钢水洁净度的水力学模拟和应用[J]. 特殊钢, 2004,25(1):10-14. WEN GUANG-HUA, TANG PING, ZHU MING-MEI, et al. Apply and water modeling simulation of molten steel purity in tundish for slab continuous casting[J]. *Special steel*, 2004,25(1):10-14.
- [16] RUCKERT A, WARZECHA M, KOITZSCH R, et al. Particle distribution and separation in continuous casting tundish[J]. *Steel research international*, 2009,80(8):568-574.
- [17] LIU J G, YAN H C. Water modeling of optimizing tundish flow field [J]. *Journal of iron and steel research, International*, 2007,14(3):13-17.
- [18] SAHAI Y, EMI T. Melt flow characterization in continuous casting tundishes [J]. *ISIJ International*, 1996,36(6):667-672.

(编辑 王维朗)