

# 高炉细灰冷压成型回收铁锌

张胜全, 张茂林\*, 王胜, 孔繁繁, 王鹏

兰州理工大学材料科学与工程学院, 兰州 730050

**摘要** 在资源短缺和环保形势日益严峻的情况下,高炉细灰的回收再利用逐渐被人们重视。XRF、SEM、EDS和XRD分析确定了细灰的元素含量、分布状态、颗粒形貌及物相组成。高炉细灰原样和添加5%的CaCO<sub>3</sub>的高炉细灰的TG-DSC分析表明细灰冷压块高温焙烧的最低温度应为950℃。按一定比例的马铃薯全粉和水配加不同比例的CaO制备复合黏结剂,配加到高炉细灰中压块并测定强度,当CaO含量在7%时,压块强度最大。在充入保护性气氛N<sub>2</sub>的管式炉中,950、1050、1150、1250℃,分别焙烧CaO配比为7%的压块1h,分析结果表明1150℃时细灰去Zn效果良好,焙烧所得物质主要为Fe。该工艺除可以调节细灰的碱度外,也可以有效利用马铃薯全粉。

**关键词** 高炉细灰;冷压块;高温焙烧;马铃薯全粉

中图分类号 X705 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2017)09-5249-07 DOI 10.12030/j.cjee.201609171

## Iron and zinc recovery of fine ash by cold pressed forming

ZHANG Shengquan, ZHANG Maolin\*, WANG Sheng, KONG Fanfan, WANG Peng

School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

**Abstract** In the situation of resource shortage and environmental protection, recycling the blast furnace (BF) fine ash is becoming important gradually. Content of elements, distribution, morphology and phase composition of the BF fine ash were confirmed by XRF, SEM, EDS and XRD. The TG-DSC analysis of the original BF fine ash and the BF fine ash added 5% of CaCO<sub>3</sub> revealed that the lowest temperature of the BF fine ash cold-briquet was 950℃. The percentage of potato granule, water and different proportion of CaO acted as a composite adhesive was added to the BF fine ash for the forming of the cold-briquet. The strength of the cold-briquet was the largest when the proportion of CaO was 7%. Filling N<sub>2</sub> as a protective atmosphere, the cold-briquet added a proportion 7% of CaO was roasted at 950, 1050, 1150, 1250℃ for one hour in the tube furnace. After being roasted, the main material was iron when the temperature was 1150℃. Zinc was removed. This technology not only adjust the basicity of BF fine ash, but also use the potato granule effectively.

**Key words** blast furnace fine ash; cold-briquet; high temperature roasting; potato whole powder

钢铁厂每生产1t钢,就要产生20kg含Zn10%~20%的高炉细灰,我国近年转炉钢的产量为5亿~6亿t·a<sup>-1</sup>,因此每年产生约1000万~1200万t含Zn10%~20%的高炉细灰<sup>[1]</sup>。高炉粉尘经重力除尘器和旋风除尘器得到高炉粗灰,进一步布袋除尘或文丘里洗涤器得到高炉细灰或高炉瓦斯泥,粒度较细,表面粗糙<sup>[2]</sup>。这些细灰含有Fe、Zn、Na、K等元素,不能直接加入到高炉原料中利用<sup>[3]</sup>,长期放置会对土壤、水体、空气造成不同程度的污染<sup>[4]</sup>,对资源也是一种严重的浪费<sup>[5]</sup>。广西柳州钢铁集团有限公司通过Fe、C分选得到Fe、C,剩余的尘泥用作制砖材料<sup>[6]</sup>。宝钢集团有限公司采用浮选-磁选或磁选-浮选联合流程处理高炉粉尘,分别获得含Fe、含C为60%、67%的铁精矿和碳精粉<sup>[7]</sup>。刘建辉等<sup>[8]</sup>采用“威尔兹”回转窑法,使细灰中Fe、Zn分别得到富集。LANZERSTORFER<sup>[9]</sup>介绍了一种风筛的方法,将高炉粉尘经过风筛处理去除粉尘中含锌较多的小颗粒,剩余返回烧结料中回收利用。SHEN等<sup>[10]</sup>利用超声波与高温酸性浸出相结合的方法提取高炉细灰中的Zn。罗文群等<sup>[11]</sup>采用火法富集和湿法浸取的方法,以高炉细灰为

基金项目:甘肃省科技重大专项计划(145RTSA004)

收稿日期:2016-09-20;录用日期:2016-12-27

第一作者:张胜全(1961—),男,硕士,高级工程师,研究方向:有色金属冶金。E-mail:zhangsq168@lut.cn

\* 通信作者, E-mail:185426135@qq.com

原料制取活性 ZnO。我们采用添加自制复合黏结剂、冷压成型、高温焙烧的方式,对细灰进行回收再利用研究。本文用马铃薯全粉作为传统有机黏结剂中淀粉的替代品,充分利用了马铃薯薯渣(马铃薯淀粉生产过程中产生的废弃物),既可以充分利用资源,又可以减少环境污染。

## 1 实验仪器及方法

### 1.1 原料及主要实验设备

实验原料使用某钢厂高炉细灰, CaO(分析纯), 马铃薯全粉(自制); 主要设备有 FW-4 型压片机, HTL1600-80 高温管式炉, MagixPw2403 型 X 射线荧光光谱仪(XRF), D/Amax-2004 型 X 射线衍射仪(XRD), Quanta450FEG 场发射扫描电镜, CS-2008 红外碳硫分析仪, STA449C 同步热分析仪, AG-10TA 岛津万能材料实验机, BT224S 型电子分析天平。

### 1.2 压块制备及焙烧

称量 100 g 高炉细灰, 加 10% 的水、7% 的马铃薯粉, 同时分别加 5%、7%、9%、11% 的 CaO。马铃薯全粉是将马铃薯用粉碎机粉碎成糊状, 去水后在 50 °C 干燥, 再用球磨机磨成粉状。加料时先将细灰与 5% 水混匀, 再加马铃薯全粉和 CaO, 然后再加 5% 的水, 并放置适当时间。压片机压块压强为 15 MPa, 压块在 150 °C 干燥 2 h, 分别测定湿压块和干燥压块的强度。根据 TG-DSC 分析的结果, 在不同的温度下对干燥压块在隔绝空气的条件下焙烧 1 h, 然后在 N<sub>2</sub> 保护下自然冷却至室温。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高炉细灰成分及组成物相

对细灰分析了化学成分及物相, 化学成分及物相如表 1、图 1 所示, 细灰中 Fe、Zn、C、Si 含量较高。细灰主要组成为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 其次是 ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、SiO<sub>2</sub> 和 C, 另外还有 ZnO, 所以细灰中 Fe 主要以 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Zn 主要以 ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 和 ZnO 的形态存在。

为了观察细灰的表观形貌、各元素的分布状况及颗粒的大小, 进行了 SEM 和 EDS 分析, 结果如图 2、表 2 所示。由图 2(a) 可知细灰原样颗粒大小、形状不一。颗粒直径在 30 ~ 70 μm, 形状并不是标准的球形或椭圆形, 而是边缘有棱的不规则形状, 这种形状对压块的冷固成型是有利的<sup>[12]</sup>。在一定的压力作用下, 有利于增强颗粒之间的机械联结力, 从而增加压块强度。由图 2(b) 可知此颗粒中 Zn 元素含量很高, Zn 元素的化合物和其他一些硅钙铝氧的化合物互相包裹形成一个较大的颗粒。针对细灰中不同颗粒元素分布的不同, 将谱图点 1, 谱图点 2, 谱图点 3, 谱图点 4 的能谱分析列于表 2。由表 2 可知, 图 2(a) 中白色颗粒主要是 Fe 或 Zn 的分布区域, 黑色颗粒主要是碳元素的分布区域(背底是双面导电胶)。谱图点 2 的颗粒主要是由 Fe 元素组成的, 其铁元素含量为 43.7%; 谱图点 3 中的黑色区域主要是碳元素, 其含量达 89.8%。焦炭以粉末状形式覆盖在颗粒表面; 谱图点 4 中的颗粒主要成分也为碳元素, 其碳元素含量达 90.1%, 此颗粒为焦炭颗粒。

表 1 高炉细灰的成分(质量分数)

Table 1 Compenents of blast furnace fine ash (mass fraction) %

成分	质量分数	成分	质量分数
Fe	25.73	Zn	9.41
Si	5.82	Na	7.46
Cl	5.03	Ca	4.01
Al	2.97	S	2.13
Mg	2.23	C	18

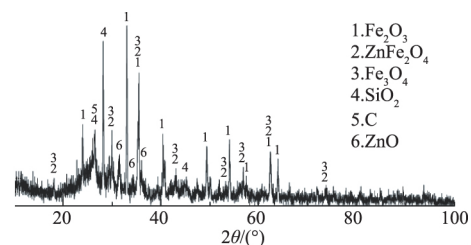


图 1 高炉细灰 XRD 分析结果

Fig. 1 Result of XRD analysis of BF fine ash

表2 高炉细灰的EDS(质量分数)  
Table 2 EDS of BF fine ash(mass fraction)

谱图	Fe	C	O	Zn	Cl	Si	Ca	Al	S
点1	6.4	50.2	15.5	15.4	3.1	3.2	2.3	1.7	1.3
点2	43.7	27.8	28.0	0	0	0.5	0	0	0
点3	0	89.8	9.0	0	0	0	0	0	1.2
点4	0	90.1	8.6	0	0	0	0.5	0	0.8

## 2.2 高炉细灰 TG-DSC 分析

取高炉细灰原样和配加 5% 的  $\text{CaCO}_3$  的高炉细灰各 10 mg 做 20 ~ 1 000 °C 的 TG-DSC 分析,升温速率  $10\text{ °C} \cdot \text{min}^{-1}$ ,保护性气体  $\text{N}_2$  流量  $20\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。根据不同温度区间的失重情况和吸放热情况确定发生哪些化学反应,进而确定压块的焙烧温度,结果如图 3 所示。其中图 3(a) 为原样 TG-DSC,图 3(b) 为配加  $\text{CaCO}_3$  的 TG-DSC。图 3(a) 与图 3(b) 的 TG 线中,细灰重量明显减少的开始温度大致都在 700 °C,同时其反应吸热量也明显开始增加。由图 3(a) 可知 20 ~ 1 000 °C 的升温过程中,细灰的失重率为 28.72%。在 DSC 曲线中,曲线整体呈现吸热反应的趋势,从 700 °C 开始,吸热反应趋势明显增大,这是因为固体碳的直接还原反应基本都是吸热反应。96.53、181.02、940.92 °C 分别有 3 个吸热峰,其中 96.53 °C、181.02 °C 分别为细灰中自由水和结合水的吸热蒸发,940.92 °C 左右发生的主要是铁的氧化物的还原反应。由图 3(b) 可知,升温过程中,细灰的失重率为 27.85%。在 DSC 中,曲线整体也呈现出吸热反应的趋势,从 700 °C 开始,吸热反应趋势也明显增大。104.14、181.44、889.44 和 955.74 °C 分别有 3 个吸热峰,其中 104.14 °C、181.44 °C 分别为细灰中自由水和结合水的吸热蒸发,889.44 °C 为添加的  $\text{CaCO}_3$  的吸热分解,生成  $\text{CaO}$  和  $\text{CO}_2$ ,所以此处有一个明显的吸热峰。接着在 955.74 °C 附近,由于前面  $\text{CaCO}_3$  分解生成大量  $\text{CaO}$  和  $\text{CO}_2$ ,C 与  $\text{CO}_2$  在 955.74 °C 附近发生碳气化反应,生成  $\text{CO}$ ,开始了 Fe、Zn 等金属氧化物的 CO 还原反应。由于还原后期,随着还原产物的生成,焦炭很难与金属氧化物接触,所以此时主要为 CO 取代 C 作为还原剂,进行间接还原反应。由上述分析可知,细灰中加入  $\text{CaO}$ ,与  $\text{H}_2\text{O}$ 、空气中的  $\text{CO}_2$  反应生成  $\text{CaCO}_3$ ,既有利于冷压成型,又有利于生成 CO 促进金属氧化物的还原。综合图 3(a)、图 3(b) 可得压块的最低焙烧温度应为 950 °C。

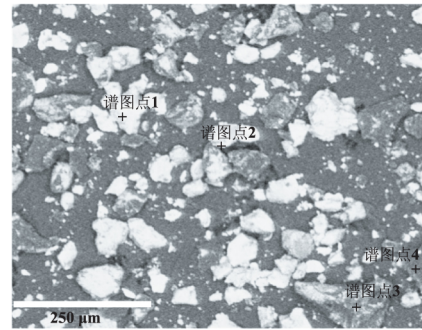


图2 高炉细灰 SEM 结果

Fig. 2 Result of SEM of BF fine ash

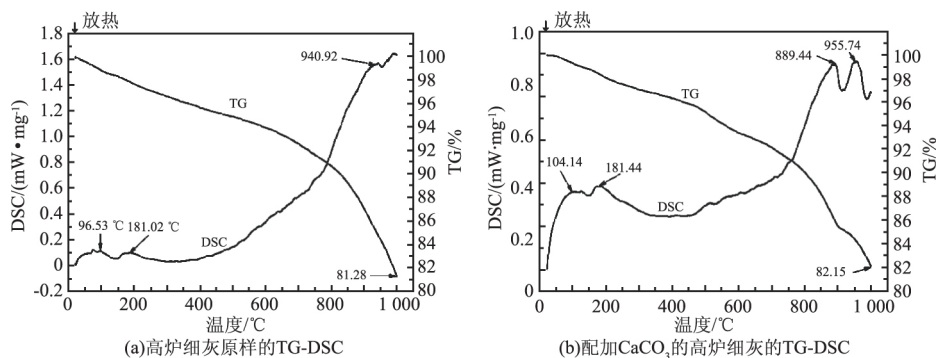


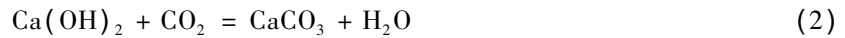
图3 高炉细灰的 TG-DSC

Fig. 3 TG-DSC of blast furnace fine ash

## 2.3 压块强度及焙烧结果分析

### 2.3.1 成型机理

无机黏结剂 CaO 的黏结机理:



有机黏结剂,如马铃薯全粉、淀粉等,它们的分子结构一般具有以下特征:具有与高炉细灰表面发生强烈化学吸附的极性官能团;具有亲水基团;介于前面 2 种基团之间的有机高分子骨架,有良好的胶结性能,不易断裂<sup>[13]</sup>。

机械压力成型主要机理:由图 2 的高炉细灰形貌分析可知其颗粒形状为边缘带有棱的不规则多边形,在机械压力的作用下颗粒之间互相匹配、变形产生机械联接作用,同时通过黏结剂与被黏结物之间的分子间黏结力,使细灰冷压成型<sup>[14]</sup>。细灰冷压块如图 4 所示。

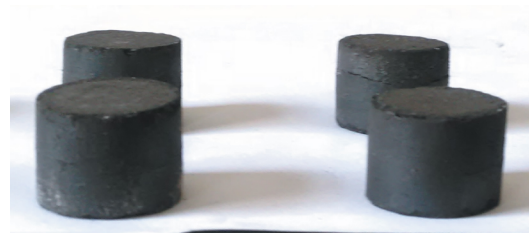


图 4 冷压块形状

Fig. 4 Shape of cold pressed block

### 2.3.2 CaO 不同配比压块的强度

不同配比压块强度测定:落下强度,取压块 10 个,分别从 500 mm 高度自由落在 10 mm 厚的钢板上,以不破裂的次数计,取平均值;抗压强度在万能材料实验机上,取样 10 个测定抗压强度,取平均值。

不同配比 CaO,其湿压块和干燥压块的落下强度和抗压强度如图 5 所示。由图 5(a)可知,湿压块和干燥压块的落下强度在 CaO 配比为 7% 时都达到最大,此时湿压块落下强度为 25 次·个<sup>-1</sup>,干燥压块落下强度为 55 次·个<sup>-1</sup>;由图 5(b)可知,湿压块和干燥压块的抗压强度在 CaO 的配比为 7% 时也达到最大,此时湿压块的抗压强度为 1 048 N·cm<sup>-2</sup>,干燥压块的抗压强度为 1 204 N·cm<sup>-2</sup>。所以,在水分配比为 10% ,压片机压强为 15 MPa ,马铃薯全粉配比为 7% 的情况下,CaO 的最佳配比为 7%。此时,所得湿压块和干燥压块的强度完全满足工业转底炉工艺处理冶金粉尘对压块强度的要求。

水分在压块过程中既对高炉细灰颗粒间起黏结作用,又参与 CaCO<sub>3</sub> 的生成过程,CaO 完全生成 CaCO<sub>3</sub> 时 CaO 与 H<sub>2</sub>O 的比值为 1.3:1。随着 CaO 配比的增大,由于没有足够的水分参与反应生成 CaCO<sub>3</sub> 以增大压块的强度,CaO 自身并不能起到增加压块强度的作用,多余的 CaO 间隔了高炉细灰与黏结剂的黏结作用,压块强度反而下降。

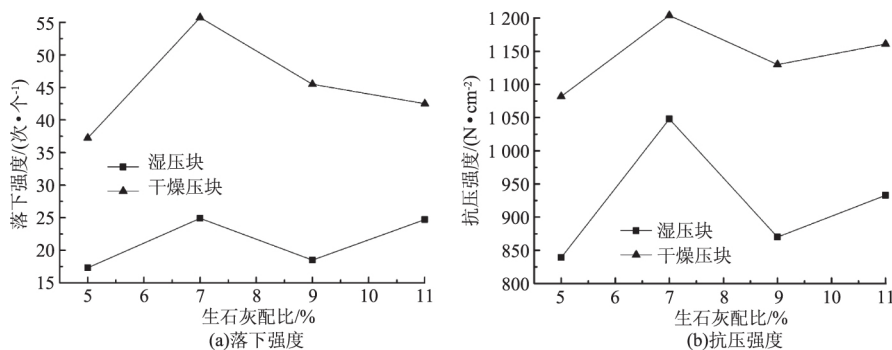


图 5 不同 CaO 配比压块的强度

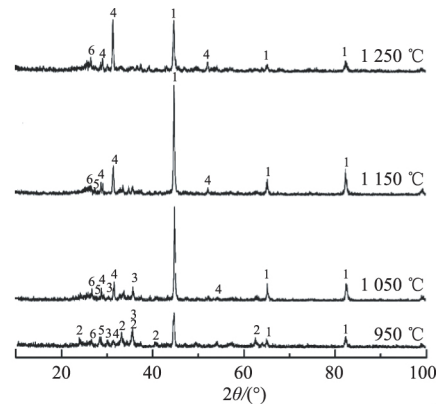
Fig. 5 Strength of blocks at different CaO ratios

2.3.3 焙烧后物相及形貌分析

由前面的 TG-DSC 分析可知,配加 5% 的  $\text{CaCO}_3$  的高炉细灰在 950 °C 左右,由于碳气化反应的发生,生成了大量的 CO,这有利于  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{ZnO}$  的还原。再者,资料<sup>[15]</sup>研究表明, $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  的气体还原遵循逐级还原规律,且  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  很容易被 CO 还原成  $\text{ZnO}$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。所以我们取 CaO 配比为 7% 的压块,并把还原温度定为 950、1 050、1 150、1 250 °C 进行焙烧。

焙烧结束后,对焙烧所得样品做 XRD、SEM 和 EDS 分析,结果如图 6 和图 7 所示。图 6 是在不同焙烧温度下的物相分析。由图 6 可知,950 °C 时,压块中生成了部分 Fe,但物相中也同时存在  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,Fe 的氧化物只被部分还原, $\text{ZnO}$  已经被还原为 Zn,由于 Zn 沸点为 906 °C,变为蒸气,我们可以另加收集装置收集。物相中还检测到生成一种新的物质  $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$ ,这是由于  $\text{SiO}_2$  与 CaO、MgO 的化学亲和力较强,大于  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,高温条件下生成了较多的  $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$ ,没有  $\text{CaFe}_2\text{O}_4$  生成<sup>[16]</sup>。同时物相检测中还有剩余的 C 和  $\text{SiO}_2$ 。随着反应温度的升高, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的含量越来越少,在 1 150 °C 时,XRD 已经检测不到  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的存在,都转变为 Fe。此时物相中只有 Fe、 $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$ 、 $\text{SiO}_2$  和 C。当温度升高到 1 250 °C 时,对其物相分析可知, $\text{SiO}_2$  已完全转化为  $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$ ,生成物中主要存在的物质为 Fe、 $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$ ,次要相为反应剩余的 C, $\text{SiO}_2$  已完全转化为  $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$ 。图 7 为焙烧 1 250 °C 后,压块的 200 倍的 SEM 图像。由图 7 可知,在高温焙烧时,随着反应的进行,部分金属氧化物复合物的分解,金属氧化物的还原,焦炭的消耗,高炉细灰颗粒变小。

为了弄清楚焙烧后不同形貌颗粒的元素分布,我们对其进行了 EDS 分析,分析结果如图 8 及表 3 所示。由图 8



1. Fe; 2.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 3.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ;  
4.  $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$ ; 5.  $\text{SiO}_2$ ; 6. C.  
图 6 焙烧所得样品的 XRD

Fig. 6 XRD of residual material after roasting

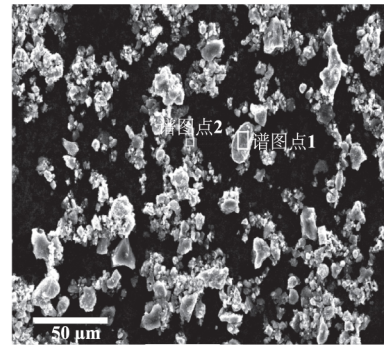


图 7 焙烧后细灰的 SEM  
(焙烧温度 1 250 °C)

Fig. 7 SEM of BF fine ash after roasting (temperature 1 250 °C)

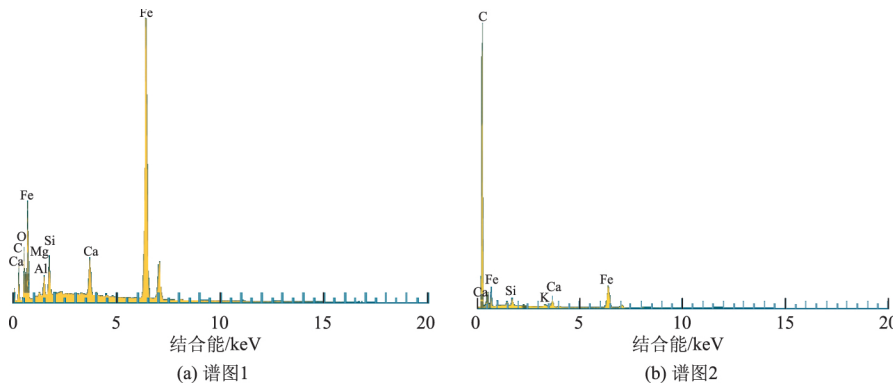


图 8 焙烧后细灰的 EDS(焙烧温度 1 250 °C)

Fig. 8 EDS of BF fine ash after roasting (temperature 1 250 °C)

(a)可知,谱图点1的颗粒主要为还原后的Fe,其含量为55.5%,少量的剩余C以及CaO、MgO与SiO<sub>2</sub>的复合物。由图8(b)可知,谱图点2的颗粒主要为剩余的焦炭,含量为81.7%,少量的还原Fe以及少量杂质元素的氧化物。

有关反应的热力学方程<sup>[17]</sup>如表4所示。由表4可知,大部分反应能够发生的热力学最低温度都比较低,当焙烧温度为1150℃时,大部分反应都可以发生。反应(6),即ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>在CO气氛下的还原很容易发生,当温度大于-264.5℃时,反应便可发生。在温度从常温上升到704℃时,发生的主要是固体碳的直接还原反应。当温度超过704℃时,由于反应(10)碳气化反应的发生,短时间内生成了大量的CO,开始了金属氧化物的CO还原反应。

表3 焙烧后细灰的EDS(质量分数)

Table 3 EDS of BF fine ash after roasting (mass fraction)

谱图	Fe	C	O	Si	Ca	Mg	Al	%
点1	55.5	24.4	11.6	2.1	2.4	0.5	1.7	
点2	4.5	81.7	12.7	0.3	0.5	0	0	

表4 高炉细灰中氧化物还原反应的 $\Delta G^\ominus-T$ 的近似关系式Table 4 Relationship between myopia oxide reduction reaction of fine ash in blast furnace  $\Delta G^\ominus-T$ 

反应方程式	$\Delta G^\ominus = A + BT$		开始还原温度/℃	反应式序号
	A/(J·mol <sup>-1</sup> )	B/(J·mol <sup>-1</sup> )		
ZnO(s) + C(s) = Zn(g) + CO(g)	344 347.5	-281.1	952	(1)
ZnO(s) + CO(g) = Zn(g) + CO <sub>2</sub> (g)	181 557.3	-113.23	1 330.4	(2)
3Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s) + C(s) = 2Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (s) + CO(g)	134 000	-224.25	324.5	(3)
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (s) + C(s) = 3FeO(s) + CO(g)	196 100	-209.25	664.1	(4)
FeO(s) + C(s) = Fe(s) + CO(g)	143 300	-146.45	705.5	(5)
3ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (s) + CO(g) = 3ZnO(s) + 2Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (s) + CO <sub>2</sub> (g)	962	-28.7	-264.5	(6)
3Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s) + CO(g) = 2Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (s) + CO <sub>2</sub> (g)	-28 790	-56.45		(7)
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (s) + CO(g) = 3FeO(s) + CO <sub>2</sub> (g)	33 310	-41.25	530.6	(8)
FeO(s) + CO(g) = Fe(s) + CO <sub>2</sub> (g)	-19 490	21.35	639.8	(9)
C(s) + CO <sub>2</sub> (g) = 2CO(g)	170 460	-174.43	704.2	(10)

### 3 结论

1)高炉细灰中的主要物相是Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,同时也存在ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>,Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>,SiO<sub>2</sub>和C。Zn元素以ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>和ZnO 2种物相存在。细灰颗粒为边缘有棱的不规则形状,这种形状是有利于压块的冷固结成型的。

2)由细灰原样和添加5%的CaCO<sub>3</sub>的细灰TG-DSC分析确定了CaCO<sub>3</sub>对高炉细灰金属氧化物压块还原的重要性,同时确定了压块焙烧的最低温度为950℃。

3)在压片机压强15 MPa、水分配比为10%、马铃薯全粉配比为7%的情况下,CaO的最佳配比为7%,此时压块强度最大。其湿压块和干燥压块的落下强度分别为25.55次·个<sup>-1</sup>,抗压强度分别为1 048、1 204 N·cm<sup>-2</sup>。

4)对CaO配比为7%的压块在1150℃焙烧1h,Fe的氧化物被还原为Fe单质,可以用选矿法进一步精选,也可以直接返回高炉利用。ZnO被还原为Zn,由于Zn单质沸点较低,还原后变为蒸气上升,可以另加收集装置收集利用。考虑升温对设备成本的提高,此冷压块的最低焙烧温度应为1150℃。

### 参考文献

- [1] 刘秉国,彭金辉,张利波,等.高炉瓦斯泥(灰)资源化循环利用研究现状[J].矿业快报,2007(5):14-18
- [2] 曾丹,林苏敏,刘胜兰,等.利用高炉瓦斯泥-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>处理硝基苯废水[J].环境工程学报,2015,9(4):1670-1671
- [3] GLADYSHEV V I, FILIPPOV V V. Influence of zinc on the life of the heart lining and blast furnace operation [J]. Steel in Translation, 2001, 31(1):1-4
- [4] WU Y H, JIANG Z Y, ZHANG X X, et al. Numerical simulation of the direct reduction of pellets in a rotary hearth furnace for zinc-containing metallurgical dust treatment [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2013, 20(7): 636-644
- [5] 何环宇,唐忠勇,裴文博,等.高炉瓦斯灰和转炉污泥造块制备金属化压块[J].过程工程学报,2012,12(1):92-96
- [6] 覃洁,阮积海.钢铁联合企业固体废物综合利用分析[J].环境工程,2011,29(5):109-112
- [7] 宣守蓉,于留春.用选矿方法从高炉瓦斯泥中回收铁精矿的研究[J].金属矿山,2007(11):123-127
- [8] 刘建辉,王祖荣,罗斌辉,等.威尔兹工艺无害化处理及综合利用含锌物料的生产实践[J].湖南有色金属,2008,24(6):16-18
- [9] LANZERSTORFER C. Air classification of blast furnace dust catcher dust for zinc load reduction at the sinter plant [J]. International Journal of Environmental Science & Technology, 2016, 13(2):755-760
- [10] SHEN X M, LI L S, WU Z J, et al. Ultrasonic-assisted acid leaching of indium from blast furnace sludge [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2013, 44: 1324-1328
- [11] 罗文群,刘宪,杨运泉,等.用高炉瓦斯泥中得锌制备活性氧化锌的研究[J].环境工程学报,2012,6(1):317-318
- [12] 杨先觉.锰硅合金粉冷压成型强度的研究[J].铁合金,2000(5):22-28
- [13] 李强.复合铁矿产块粘结剂研究[D].沈阳:东北大学,2007
- [14] 傅菊英,黄天正,王建晖.铁精矿低温固结团块的研究[J].烧结球团,1996,21(3):9-12
- [15] 胡晓军,刘俊宝,郭培民,等.铁酸锌气体还原的热力学分析[J].工程科学学报,2015,37(4):430-434
- [16] 罗果萍,孙国龙,赵艳霞,等.包钢常用铁矿粉烧结基础特性[J].过程工程学报,2008,8(1):198-204
- [17] 李洪桂.冶金原理[M].北京:科学出版社,2005:190-218