

# 烟气循环流化床脱硫灰特性研究

徐夕仁<sup>1</sup>, 马春元<sup>2</sup>, 归柯庭<sup>1</sup>, 王文龙<sup>2</sup>

(1 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096 2 山东大学 能源与动力工程学院, 山东 济南 250061)

**摘 要:** 以典型烟气循环流化床脱硫工艺所产生的脱硫灰为样品, 采用理论分析、化学分析、电镜扫描、热重分析、X-衍射分析等手段, 较系统地研究了脱硫灰的化学组成、外观形貌、物相组成等特性。研究表明: 脱硫反应对原粉煤灰颗粒有侵蚀作用, 脱硫塔内存在明显的团聚效应; 脱硫灰的主要物相组成是: 莫来石、石英、 $Fe_2O_3$  等粉煤灰物相, 以及  $CaSO_3 \cdot \frac{1}{2} H_2O$ 、 $CaCO_3$ 、 $CaSO_4$  等脱硫物相。值得注意的是  $CaSO_3 \cdot \frac{1}{2} H_2O$  是主要的含硫物相, 且各灰样中  $CaCO_3$  含量较大。

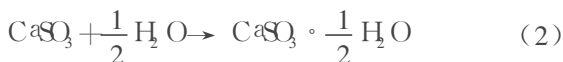
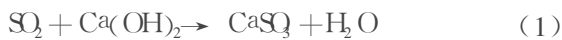
**关 键 词:** 烟气循环流化床; 脱硫灰; 烟气脱硫; 物相组成; 特性分析

中图分类号: X705 文献标识码: A

## 引 言

随着干法(半干法)烟气脱硫工艺的推广应用, 其副产物(脱硫灰)的产量越来越大。脱硫灰的性质和传统的粉煤灰差异较大, 一般认为脱硫灰是传统粉煤灰和钙基烟气脱硫产物的混合物。对脱硫灰的性质进行研究是对其进行综合利用的前提。国内外学者对炉内脱硫尾部增湿活化工艺(LFAC)脱硫灰的性质研究较为充分<sup>[1]</sup>, 但对烟气循环流化床脱硫灰特性研究较少。

从化学反应的角度分析, 在半干法烟气脱硫过程中主要发生如下的化学反应:



另外, 在半干法烟气循环流化床脱硫塔内, 温度在  $45 \sim 90^\circ C$  之间, 局部有液滴或浆滴存在, 湿度较大, 大部分脱硫灰再循环, 停留时间长, 在一定程度上满足脱硫灰与  $Ca(OH)_2$  的水合反应条件, 导致粉煤灰与部分  $Ca(OH)_2$  (或  $CaO$ ) 发生火山灰反应, 在

粉煤灰颗粒表面生成一系列水化物。如水化硅酸钙  $((CaO)_x(SiO_2)_y(H_2O)_z)$ 、水化铝酸钙  $((CaO)_x(Al_2O_3)_w(H_2O)_z)$  等。再考虑到钙基脱硫剂含有杂质、脱硫反应不完全以及粉煤灰中原有的成分和物相, 可以推断脱硫灰中含有的主要化学成分是:  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $CaO$ 、 $SO_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 。脱硫灰的主要物相按来源可分成两部分: 一部分来源于粉煤灰, 如石英、莫来石、赤铁矿、磁铁矿、碳粒、氧化镁、氧化钙、无水石膏等晶体矿物, 以及玻璃体、无定形碳和次生褐铁矿等; 另一部分来源于脱硫工艺, 如半水亚硫酸钙、二水硫酸钙、亚硫酸钙、氢氧化钙、碳酸钙、水化硅酸钙、水化铝酸钙、水化硅铝酸钙、水化亚硫酸钙铝酸钙等<sup>[2]</sup>。其中氢氧化钙是来自于未反应的脱硫剂, 碳酸钙是来自于脱硫塔内的碳化反应以及脱硫剂的杂质。

虽然, 理论分析可以判断脱硫灰的化学组成和物相组成, 但要详细了解脱硫灰的性质及定量分析脱硫灰的特性需要借助于试验手段。本研究经过试验对烟气循环流化床脱硫灰的性质进行研究, 为脱硫灰的综合利用提供依据和参考。

## 1 样品来源和试验方法

### 1.1 样品来源

样品取自济宁新河电厂  $2 \times 300$  MW 机组的循环流化床脱硫塔底部(称为塔底灰)、脱硫塔出口、静电除尘器排灰和马头电厂 6 号 200 MW 机组的静电除尘器排灰。马头电厂脱硫塔位于两座静电除尘器之间, 脱硫塔前的静电除尘器是预除尘器, 除尘效率为 90%。各试样编号: 1 号—马头电厂脱硫塔后静电除尘器排灰; 2 号—新河电厂静电除尘器排灰; 3 号—新河电厂脱硫塔底灰; 4 号—新河电厂脱硫塔出口旋风分离器排灰。粉煤灰取自新河电厂。

### 1.2 试验仪器及方法

收稿日期: 2009-02-23 修订日期: 2009-06-12

作者简介: 徐夕仁(1963—), 男, 山东莱州人, 东南大学博士研究生, 现工作在山东大学, 副教授。

外观形貌观察采用山东建筑大学材料测试中心的扫描电子显微镜 (SEM) 仪器型号为 JSM-6380 LA 工作参数: 电压 30 kV 工作距离 10 mm。方法是 将粉煤灰颗粒黏附在样品上、镀金膜、然后进行扫描电镜观察、拍照<sup>[3]</sup>。1号、2号样品采用济南大学材料学院的 beckman Coulter LS13320型激光粒度分析仪分析, 3号、4号样品用筛分法进行粒度分析。热重分析采用山东大学能动学院的热分析系统, 仪器型号是 TGA/SDTA851; 参数设置: 气体流量 10 ml/min 升温速率 10 °C/min 气氛分别为空气和氮气 (纯度 99.9%), 试样质量为 10 mg 左右, 升温曲线是以升温速率 10 °C/min 从室温升温至 105 °C, 维持 10 min (目的去除水分), 继续以 10 °C/min 的升温速率升温至 1000 °C, 在维持 10 min。化学分析根据国标 GB/176-2008 进行。物相分析在采用山东大学材料学院材料测试中心的阳极转靶 X 射线衍射仪, 仪器型号 D/max-rc 采用粉末压片法, 工作条件为 Cu靶 (40 kV 300 mA), 扫描范围  $2\theta=2^{\circ}\sim 80^{\circ}$ , 扫描速度  $2\theta=2^{\circ}/\text{min}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 形貌特征

#### 2.1.1 颜色

经肉眼观察, 颜色由浅到深的排序为 1号、2号、3号、4号、粉煤灰。而 4号、3号可见明显的颗粒状, 有一部分白色颗粒, 少部分黑色颗粒 (应为碳粒) 白色颗粒应为未反应的消石灰, 以及脱硫产物硫酸钙和亚硫酸钙。从细度看, 3号最粗, 4号次之, 1号、2号最细。

#### 2.1.2 形貌特征

1号样品的 SEM图及其局部能谱元素分析如图 1所示。整体上看 1号样品形状不规则, 以结构疏松的海绵状多颗粒聚集为主, 少部分为表面较光滑的球形颗粒。典型球形颗粒表面粗糙, 由能谱元素分析发现其元素组成及其含量如表 1所示。

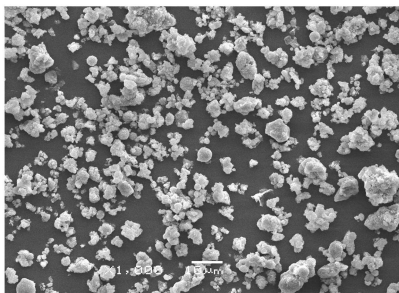
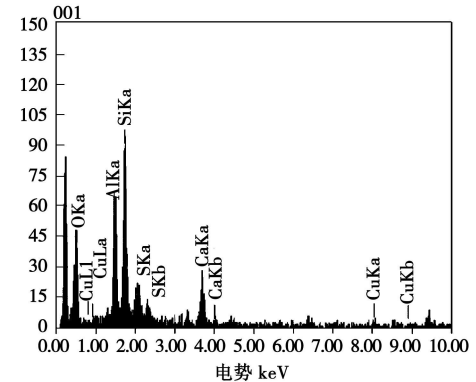
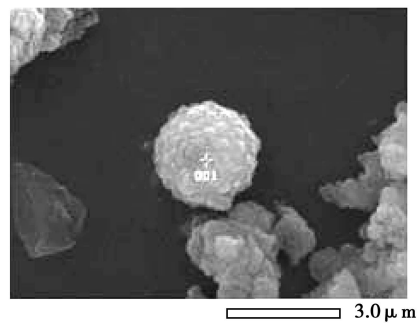
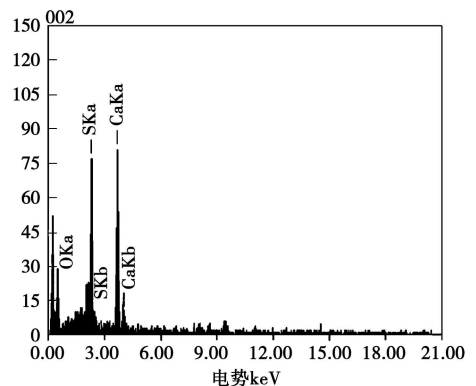
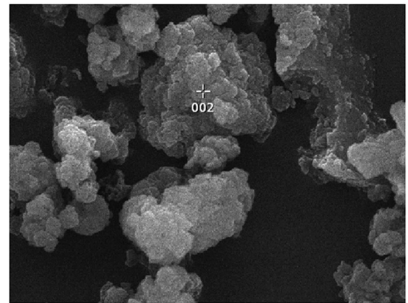


图1 (a) 放大1000倍SEM图片



电势 keV

图1 (b) 典型球形颗粒观及其局部能谱元素分析图



电势 keV

图1 (c) 典型絮状物观及其局部能谱元素分析图

图 1 1号样品 SEM图片

表 1 典型球形颗粒表面能谱元素分析组成

	O	Al	Si	S	Ca	Cu
含量 / %	14.69	23.78	35.10	0.18	0.1	0.64

其中 Cu 元素来自样品制作过程, Al、S 主要来自粉煤灰, S、Ca 主要来自脱硫过程, 说明有脱硫产物附着于粉煤灰颗粒表面。

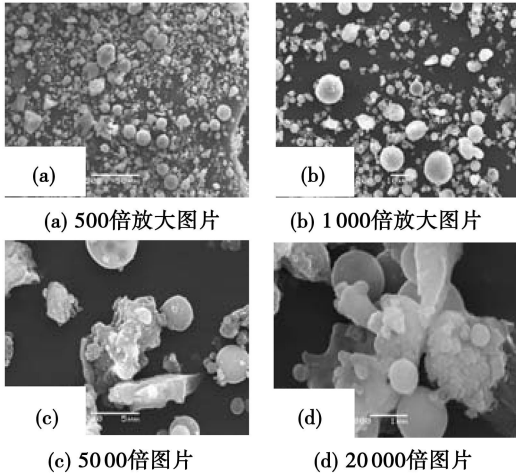


图 2 2 号样品 SEM 图片

由典型的颗粒聚集体表面能谱元素分析可知其元素组成为 O 7.77%, S 37.37%, Ca 54.87%, 没有发现 Si、Al 等元素, 说明该颗粒聚集体的这个局部表面只有脱硫产物, 其钙硫质量比为 1.46 而纯脱硫产物的理论钙硫质量比为 1.25 钙的含量高于脱硫产物的理论钙含量, 说明表面物相并不只有硫酸钙或亚硫酸钙 (或其水合物), 还可能含有氧化钙或氢氧化钙。

2 号样品的 SEM 图如图 2 所示, 和 1 号样品的 SEM 图相比, 2 号样品具有较多球形大颗粒 (这些颗粒应来自粉煤灰) 这是由于 1 号样品来自经初步除尘的脱硫塔后, 粉煤灰含量少, 且较大的颗粒已经除去。2 号样品中的细颗粒也成絮状, 如图 1 (a)、(b)。大多数球形颗粒表面较光滑, 说明粉煤灰颗粒较少受到脱硫反应的侵蚀。

3 号样品的 SEM 图如图 3 所示, 其中图 3 (a) 是 SEM 100 倍照片, 直径较大, 相当多的颗粒直径大于 100 μm 大多数颗粒基本呈球形, 少部分形状不规则。仔细观察, 大多数颗粒上有小孔洞, 如图 3 (b) 所示, 说明这些颗粒来源于粉煤灰 (小孔系粉煤灰形成过程中内部气体逸出形成)。图 3 (c)、图 (d) 分别是典型较大球形 (直径大约 100 μm) 和较小球形 (60 μm 左右) 的表面形状 (放大 1 000 倍), 可

见表面比较粗糙。原因是脱硫反应物颗粒粘附其它小颗粒或颗粒在塔内增湿后的“滚雪球”效应。

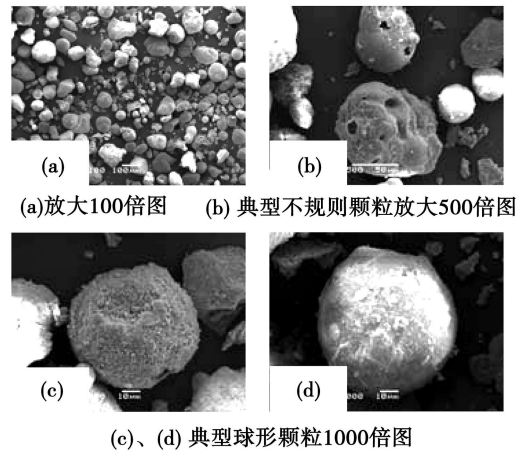


图 3 3 号样品 SEM 图

4 号样品的 SEM 图和 3 号类似, 只是颗粒直径较小。

图 4 为粉煤灰的 SEM 图。由图可见, 粉煤灰的 SEM 图和 2 号样品图相近, 因为 2 号样品中大多数是粉煤灰物相; 不同的是粉煤灰的颗粒直径略大于脱硫灰直径, 典型球形颗粒表面非常光滑, 表面黏附小颗粒很少, 不规则形状的聚集体的表面相对于脱硫灰的聚集体的表面没有较多的突起。这些均是由于脱硫反应所致, 同时预示着脱硫灰较粉煤灰具有更大的比表面积。

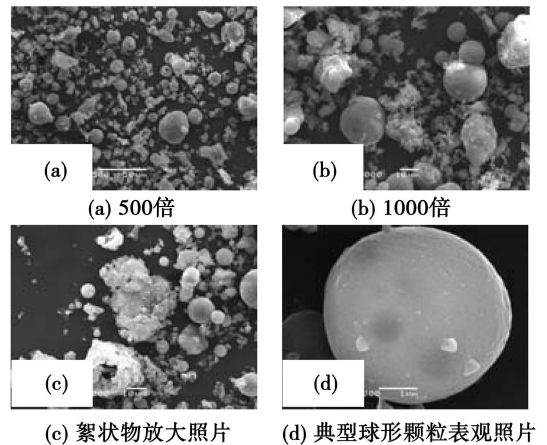


图 4 粉煤灰 SEM 照片

2.2 化学成分分析

化学分析结果如表 2 所示, 马头电厂脱硫灰 (1 号样) CaO、SO<sub>3</sub> 含量远高于其它灰样, 这是由于马头电厂的脱硫塔前设置有预除尘器, 且其除尘效率较高 (90%), 因此其脱硫灰中 SO<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等

粉煤灰的成分含量大大减少,相应地 CaO、SO<sub>3</sub> 含量增加。2号、3号、4号样品的化学成分含量差别不大,但 2号 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量明显高于 3号、4号,说明细颗粒含有较高的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。而 3号、4号 CaO 含量较多,而其 SO<sub>3</sub> 含量差别不大,说明循环灰和塔底灰中含有较高的未反应的 CaO。从外观观察,可以看到 3号、4号含有较多的白色颗粒,是未反应的 CaO 或氢氧化钙,另外塔底灰含有较多的黑色颗粒,是未燃尽的碳粒,故其烧蚀量较高。另外 2号烧蚀量较高,应含有较高的碳酸钙或氢氧化钙。

表 2 4种脱硫灰样的化学成分

样品 编号	成分 / %						Σ
	烧蚀量	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	
1号	17.83	39.30	0.94	5.04	10.73	24.60	98.44
2号	4.68	11.65	2.50	23.96	49.24	6.57	98.60
3号	7.23	15.38	3.29	18.56	46.18	8.08	98.72
4号	4.91	20.62	4.01	12.63	48.60	7.85	98.62

### 2.3 粒度分析

1号、2号脱硫灰粒度分析如表 3 所示,其特征粒径如表 4 所示,3号、4号脱硫灰粒径分布如表 5 所示。

由表 3、表 4 可知,1号样品比 2号样品细,这是因为 1号样品和 2号样品的取样地点不同,这也从一个侧面反映了脱硫副产物颗粒确实比粉煤灰细这样一个事实。3号样品比 4号样品粗,即塔底灰要比循环灰粗。

表 3 1号和 2号脱硫灰的粒径分布

	质量百分比 / %				
	<10	<25	<50	<75	<90
粒径 / μm					
1号	1.823	4.63	14.44	47.81	89.04
2号	1.594	3.429	6.898	14.31	60.12

表 4 1号和 2号脱硫灰的统计中径

样品编号	平均粒径 / μm	中径 / μm	最频直径 / μm
1号	25.24	6.453	6.898
2号	32.36	14.94	14.44

注:文中最频直径是灰粒出现频率曲线最高点粒径值。

表 5 3号和 4号粒径分布

	粒径范围 d / μm		
	<69	69 < d < 78	> 78
质量百分比 / %			
3号	14.05	27.87	58.08
4号	27.00	43.70	29.30

### 2.4 物相分析

图 5 为 1号 ~4号脱硫灰的 X-射线衍射图。由图可知,1号样(马头电厂脱硫灰)主要含 CaSO<sub>4</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、莫莱石(3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SO<sub>2</sub>)、石英、CaSO<sub>3</sub>· $\frac{1}{2}$ H<sub>2</sub>O、CaCO<sub>3</sub>; 2号样(新河电厂静电除尘器排灰)中不含 CaSO<sub>4</sub>,主要含有莫莱石(主要成分)、石英、CaSO<sub>3</sub>· $\frac{1}{2}$ H<sub>2</sub>O、CaCO<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。不含 CaSO<sub>4</sub> 的原因可能是 CaSO<sub>4</sub> 含量小, X衍射未测到;而莫莱石来自粉煤灰,它不与 SO<sub>2</sub> 反应,粉煤灰含量高则莫莱石含量也高。3号样(新河电厂塔底灰)主要含 CaSO<sub>4</sub>、莫莱石、石英、CaSO<sub>3</sub>· $\frac{1}{2}$ H<sub>2</sub>O、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaCO<sub>3</sub>、Ca(OH)<sub>2</sub>。3号样莫莱石含量最大,莫莱石来自粉煤灰,它不与 SO<sub>2</sub> 反应,粉煤灰含量高则莫莱石含量也高。4号样(新河电厂循环灰)主要含 CaSO<sub>4</sub>、莫莱石、石英、CaSO<sub>3</sub>· $\frac{1}{2}$ H<sub>2</sub>O、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaCO<sub>3</sub>。

4种样品物相组成中均含有莫莱石、石英、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等组成粉煤灰物相,也均含有 CaSO<sub>3</sub>· $\frac{1}{2}$ H<sub>2</sub>O、CaCO<sub>3</sub>。4种样品中除 2号样没有测到 CaSO<sub>4</sub>,其它 3个样均含有 CaSO<sub>4</sub>,且 2号、3号、4号样来自同一脱硫装置,说明 2号样含有的 CaSO<sub>4</sub> 很少,没有测到。从各物相的衍射峰值可以估算出主要的脱硫物相是 CaSO<sub>3</sub>· $\frac{1}{2}$ H<sub>2</sub>O 而不是硫酸钙,说明脱硫塔内亚硫酸钙的氧化程度较低。另外,在 3号样中检测到 Ca(OH)<sub>2</sub>,原因是脱硫塔入口喷入的脱硫剂中较大的颗粒,未与烟气反应便直接落到塔底;各样品中还检测到 CaCO<sub>3</sub>,且 CaCO<sub>3</sub> 含量较大,原因是脱硫剂不纯,以及低温潮湿环境下 CO<sub>2</sub> 与 Ca(OH)<sub>2</sub> 反应所致。

### 2.5 热重分析

4种样品分别在惰性气氛(氮气)和氧化气氛(空气)中的热重曲线如图 6 所示。以 10℃/min 的升温速率升温至 1000℃,然后保温 20 min。

由图可知,在同一气氛下,大约 450℃ 以前,4种样品的热重曲线的形状相似,而在 760℃ 以后有较大差异。

分析各样品的热重曲线,除了在 105℃ 有明显失重(失去物理水所致),各样品均有 2个明显的失重段,第一个失重段开始在 350℃ 左右,失重明显,应为半水亚硫酸钙脱水所致;第二个失重段开始在 600℃ 左右,各曲线出现较大失重,应是碳酸钙、氢

氧化钙分解所致。

缓慢, 且持续时间长, 原因不明。

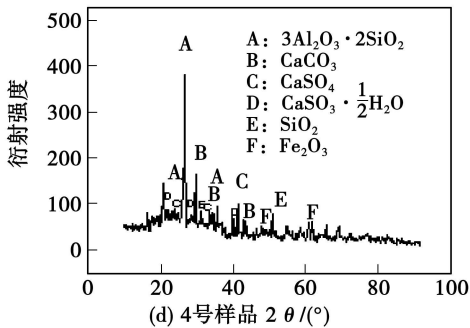
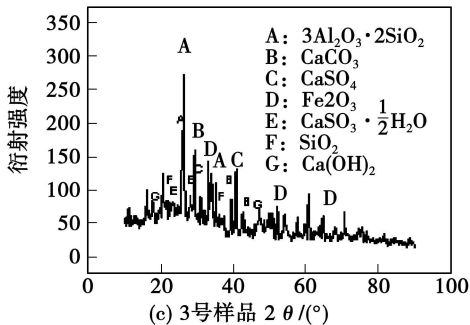
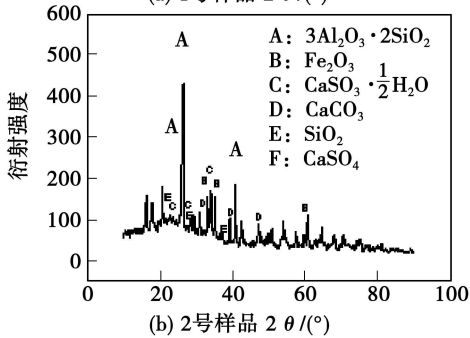
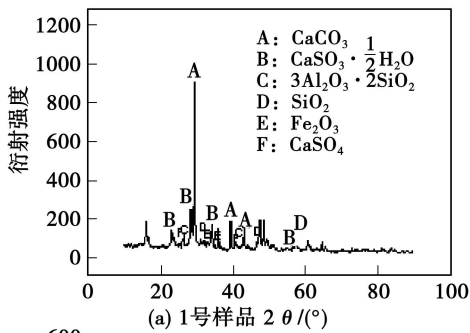
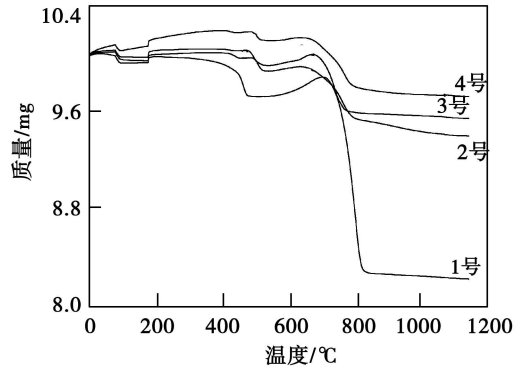


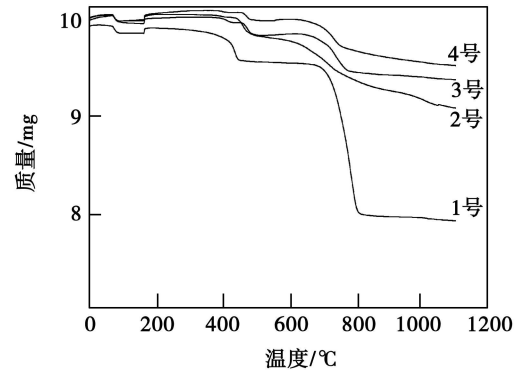
图 5 脱硫灰 X—射线衍射图

1号样品和其它样品有所不同, 两个失重段的失重量均较大, 说明其半水亚硫酸钙、碳酸钙(氢氧化钙)的含量较高, 这可以从成分分析中得到确认。

气氛对各脱硫灰热重曲线失重段温度范围影响不大, 但在空气气氛下, 420~600℃间有一个缓慢的升重段, 这是由于亚硫酸钙的氧化所致, 而在氮气气氛下不存在此升重段。另外, 2号样品在氮气气氛下第二个失重段明显不同于氧气气氛下, 质量下降



(a) 空气气氛下4种脱硫灰的热重曲线



(b) N<sub>2</sub>气氛下4种脱硫灰的热重曲线

图 6 脱硫灰样品的热重曲线

### 3 结 论

通过测试和分析, 可得到以下结论:

(1) 烟气循环流化床脱硫工艺的脱硫灰的颜色呈灰白色, 比粉煤灰颜色浅。脱硫灰颗粒外观类似于粉煤灰, 但球形颗粒相对较少, 絮状物较多, 且球形颗粒表面较粗糙, 黏附较多细小颗粒, 说明脱硫反应对原粉煤灰颗粒有侵蚀作用, 脱硫塔内存在明显的团聚效应。

(2) 烟气循环流化床脱硫装置的不同部位的排灰, 粒径分布差异很大, 静电除尘器排灰很细。而化学组成、物相组成也有一定差别。经过预除尘处理的烟气脱硫装置的脱硫灰(如 1号样品)的化学组成、粒径分布和没有经过预除尘处理的脱硫灰(如 2号样品)相比, 均发生较大变化, 除烧蚀量增大, 脱硫产物的含量大大增加。

(3) 综合热重分析、X—衍射分析, 脱硫灰的主要物相组成是: 莫来石、石英、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等粉煤灰物相

(下转第 220 页)

飞灰含碳量有所增大, 燃尽率降低, 这可以通过改进燃烧器进行调节。

表 4 炉膛出口飞灰可燃物含量比较

O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> 体积比	飞灰可燃物含量 /%
空气气氛	1.30
21% /79%	12.83
30% /70%	0.35
35% /65%	1.63
40% /60%	2.39

### 5 结 论

在 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 体积比为 21% /79%的情况下, 与空气气氛相比, 烟气辐射增强加大了火焰与壁面的辐射换热, 降低了炉膛火焰温度水平; 当初始氧浓度提高到 30%时, 炉内的火焰温度水平提高并且与空气燃烧工况相当, 继续提高至 35% ~ 40%时, 炉膛出口烟气温度较空气气氛降低 40 ~ 70 K

O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下 NO的生成量均小于空气气氛, 一是由于 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下无 N<sub>2</sub>, 避免了热力型 NO和快速型 NO的生成; 二是由于初始高浓度 CO<sub>2</sub>的存在增加了 CO形成的机会, 还原气氛的形成使产生的 NO被还原降解。随着初始氧浓度的增大并不会提高 NO的生成量, 初始氧浓度为 30% ~ 40%时, NO生成量比空气燃烧工况下降降低 38.89% ~ 40.84%, 而在初始氧浓度为 30%时, 飞灰可燃物含量最低。

兼顾到燃尽效率与 NO生成量, 富氧燃烧方式

下初始氧浓度取为 30%比较合理, 更高的氧浓度对 NO的减排作用不明显, 而且存在输粉安全及过强的还原气氛增加了水冷壁高温腐蚀与结渣的可能性问题。

### 参考文献:

- [ 1 ] 阎维平. 温室气体的排放以及烟气再循环煤粉燃烧技术的研究 [ J ]. 中国电力, 1997(6): 59—62
- [ 2 ] 樊越胜, 邹 峥, 高巨宝, 等. 煤粉在富氧条件下燃烧特性的实验研究 [ J ]. 中国电机工程学报, 2005 25(24): 118—121
- [ 3 ] 李庆钊, 赵长遂, 武卫芳, 等. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下煤粉燃烧反应动力学的试验研究 [ J ]. 动力工程, 2008 28(3): 447—452
- [ 4 ] 王 宏, 董学文, 邱建荣, 等. 燃煤在 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 方式下 NO<sub>x</sub>生成特性的研究 [ J ]. 燃料化学学报, 2001, 29(5): 458—462
- [ 5 ] 孟德润, 周俊虎, 赵 翔, 等. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下氮反应机理的研究 [ J ]. 环境科学学报, 2005 25(8): 1011—1014
- [ 6 ] 林鹏云, 罗永浩, 等. 燃煤电站锅炉 NO<sub>x</sub>排放影响因素的数值模拟分析 [ J ]. 热能动力工程, 2007 22(5): 529—533
- [ 7 ] 邢 菲, 樊未军. 某 200 MW 四角切圆锅炉燃烧器改造降低 NO<sub>x</sub>数值模拟 [ J ]. 热能动力工程, 2007, 22(5): 534—538
- [ 8 ] 阎维平, 刘亚芝. 300 MW 四角切圆煤粉锅炉燃烧工况的数值模拟及优化研究. 锅炉技术, 2007, 38(6): 14—19.
- [ 9 ] CFX—TASC flow User Documentation Version 10 [ Z ]. AEA Technology Engineering Software Limited Water—loo Ontario Canada No. 5Z4 2000.
- [ 10 ] MOLINA A, SHADDIX C R. Ignition and devolatilization of pulverized bituminous coal particles during oxygen/carbon dioxide coal combustion [ J ]. Proceedings of the Combustion Institute 2007, 21(2): 1905—1912

(本文责任编辑 陈 滨)

(上接第 215 页)

组成, 以及 CaSO<sub>3</sub> · 1/2 H<sub>2</sub>O, CaCO<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub> 等脱硫物相。其中 CaSO<sub>3</sub> · 1/2 H<sub>2</sub>O 是主要的含硫物相, 且各灰样中 CaCO<sub>3</sub> 含量较大。

(4) 4种脱硫灰的热重曲线在 350 °C以前差别较小, 760 °C以后基本没有失重, 说明 760 °C以后没有激烈的分解反应。

### 参考文献:

- [ 1 ] 张瑞荣, 贾海红. LIFAC脱硫灰的特性及其研究现状 [ J ]. 再生资源研究, 2003(2): 34—37
- [ 2 ] 沈晓冬, 等. LIFAC脱硫粉煤灰物相分析 [ J ]. 建筑材料学报, 2002 5(4): 12—14
- [ 3 ] 杨南如. 无机非金属材料测试方法 [ M ]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1990 55—58

(本文责任编辑 陈 滨)

will approach the shell wall surface at the location of 5.2 D in the axial direction and the quasi free vortex disappear thus forming a full rigid vortex below the above mentioned location. For the risers with a diameter of 135 mm and 180 mm, the value and location of the maximal tangential speed will undergo a similar change. On this basis the definition of the natural cyclone length of the cyclone separator was presented, i.e. the distance from the lower port of the riser to the location where the quasi free vortex disappears shall be defined as the natural cyclone length  $L_c$  of the separator. The result of the formula (5) was given according to the test results. Finally by analyzing the attenuation characteristics of the swirling flow in the cyclone separator and the energy transfer process between the two vortices, further explained was the physical meaning of the natural cyclone length of the cyclone separator.

Key words: cyclone separator; natural cyclone length; gas phase flow field; swirling flow; attenuation

烟气循环流化床脱硫灰特性研究 = Study of the Desulfurized Ash Characteristics of a Flue Gas Circulating Fluidized Bed 刊, 汉 / XU Xi ren, GUI Ke ting (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096), MA Chun-yuan, WANG Wen-bing (College of Energy Source and Power Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(2), —211 ~215

With the desulfurized ash produced in the typical desulfurization process in a flue gas circulating fluidized bed serving as a sample, by using such methods as theoretical analysis, chemical analysis, electronic telescope scanning, thermogravimetry analysis and X-ray diffraction analysis etc., more or less systematically studied were such characteristics as the chemical composition, morphological appearance and physical phase composition etc. of the desulfurized ash. It has been found that the desulfurization reactions can play a role of eroding the raw ash particles from pulverized coal and there exists a conspicuous agglomeration effect in the desulfurization tower. The main physical phase composition of the desulfurized ash includes pulverized-coal produced ash phase, such as mullite, quartz and  $F_2O_3$  etc., and desulfurization-produced physical phase, such as  $CaSO_3 \cdot \frac{1}{2} H_2O$ ,  $CaCO_3$  and  $CaSO_4$  etc. It is worth paying attention to the fact that  $CaSO_3 \cdot \frac{1}{2} H_2O$  represents the main sulfur containing physical phase and the  $CaCO_3$  content in various ash samples is relatively big.

Key words: flue gas circulating fluidized bed; desulfurized ash; flue gas desulfurization; physical phase composition; characteristics analysis

初始氧浓度对锅炉富氧燃烧和 NO<sub>x</sub>排放的影响 = The Influence of the Initial Oxygen Concentration on Boiler Oxygen-enriched Combustion and NO<sub>x</sub> Emissions 刊, 汉 / YAN Wei-ping, MI Cui-li, LI Hao-yu (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, College of Energy Source and Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(2), —216 ~220

For a 300 MW coal-fired boiler in a power plant and on the basis of a specially developed software platform CFX-TASC Flow, numerically studied were the flow, combustion and pollutant production in the furnace under the rated-load air environment in the  $O_2/CO_2$  atmosphere of various initial oxygen concentrations ( $O_2$ ) = 21%, 30%, 35% and 40% totaling five operating conditions. The calculation results show that under the  $O_2/CO_2$  combustion mode, the  $CO_2$  concentration of the flue gas at the outlet of the furnace can reach over 90%, facilitating the recovery of  $CO_2$ . With an increase of the initial oxygen concentration, the in-furnace flame temperature will go up, the temperature drop margin along the furnace height direction increase and the flue gas temperature at the outlet of the furnace go down. The amount of NO<sub>x</sub> product being generated will be less than the air quantity. The combustible