

# 综合热分析法研究催化剂对煤粉燃烧过程的影响

张卉<sup>1,3</sup>, 郭占成<sup>1,2</sup>, 王志<sup>1</sup>, 许德平<sup>3</sup>

[1. 中国科学院过程工程研究所多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100080;

2. 北京科技大学循环与生态冶金教育部重点实验室, 北京 100083; 3. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083]

**摘要:** 利用综合热分析仪研究了  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$  四种化合物对煤粉燃烧过程的影响. 重点研究了稀土金属化合物  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  在不同添加量和不同粒度时对煤粉燃烧过程的影响. 结果表明,  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  能够显著促进煤粉的燃烧过程, 降低着火点温度. 添加量为 1.0% 时, 煤粉着火温度降低约 30 °C, 助燃性能优于其他 3 种催化剂. 在添加量小于 1.0% 时,  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  添加量越大, 着火温度越低. 在  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  不产生团聚的情况下, 催化剂粒径越小, 煤粉的着火温度越低.

**关键词:** 煤粉;  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$ ; 催化剂; 燃烧; 综合热分析法

**中图分类号:** TF538.6<sup>+3</sup>

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-606X(2007)06-1154-05

## 1 前言

提高煤的燃烧效率和降低污染物排放是煤炭能源高效利用的关键. 已有研究<sup>[1]</sup>表明, 添加适量的燃煤催化剂可以降低煤粉的着火温度、提高燃烧速度及燃烧效率, 即达到提高煤粉自身燃烧性能的目的. 目前研究的助燃剂主要包括碱金属、碱土金属和过渡元素的无机盐类, 已经发现这 3 类物质对煤粉的燃烧过程都具有一定的催化作用<sup>[2-5]</sup>. 程军等<sup>[6]</sup>指出, 添加 0.5% 电石渣能使晋城无烟煤的着火温度降低 6 °C, 使潞安贫煤的固定碳燃尽率提高约 5%. 但碱金属的氧化物或盐类对所使用的燃烧设备都有一定腐蚀作用, 所以其应用范围受到一定的限制. 稀土元素因其电子结构特点具有较高的催化活性, 是一种很有前途的燃煤催化剂. 田君等<sup>[7]</sup>指出, 稀土燃煤添加剂能改变劣质煤的燃烧历程, 显著降低反应活化能. 许莹等<sup>[8]</sup>在模拟高炉喷吹的条件下, 发现  $\text{CeO}_2$

和  $\text{La}_2\text{O}_3$  促进了煤粉的脱碳反应; 添加量在 2.0% 以内增加时助燃效果明显提高. 本工作基于我国稀土资源丰富、制备工艺成熟的现状, 选择  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$  四种催化剂进行对比分析, 重点研究了添加量和粒度对  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  催化煤粉燃烧过程的影响.

## 2 实验

### 2.1 实验原料

采用工业用无烟煤, 碾磨成粒度小于 200 目(75  $\mu\text{m}$ ) 的煤粉, 原料煤分析结果见表 1. 实验中使用的催化剂为稀土金属化合物  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$ ,  $\text{CeO}_2$  粉体和碱土金属化合物  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$  粉体, 粉体粒度小于 400 目(38  $\mu\text{m}$ ). 稀土金属化合物的含量均  $\geq 99.9\%$ , 碱土金属化合物为分析纯. 由于煤粉表面呈负电性, 为了提高催化剂与煤粉的附着性, 催化剂粉体经路易斯酸表面改性, 使其呈正电性.

表 1 原料煤组成分析结果

Table 1 Composition analysis of coal used in the experiments

| Proximate analysis (ad, %) |          |              |     | Ultimate analysis (daf, %) |      |      |      |      |
|----------------------------|----------|--------------|-----|----------------------------|------|------|------|------|
| Moisture                   | Volatile | Fixed carbon | Ash | C                          | H    | N    | O    | S    |
| 2.0                        | 11.8     | 76.4         | 9.8 | 82.52                      | 5.48 | 1.68 | 7.54 | 2.78 |

### 2.2 实验方法

用 ZRY-2P 型综合热分析仪(上海天平仪器厂)进行煤粉燃烧特性研究. 先称取一定量催化剂, 在研磨过程中逐渐加煤至预定配比(0.5%~1.0%,  $\omega$ ). 实验样品总质量 25 mg 左右(误差 < 2.0%), 反应气氛为氧气, 流速 20 mL/min, 程序升温速率 15 °C/min, 实验温度 100~1000 °C. 实验过程动态记录数据, 经软件处理得热分析结果.

## 3 结果与讨论

### 3.1 催化剂种类对煤粉燃烧特性的影响

相同实验条件下不同种类催化剂对煤粉燃烧失重特性的影响如图 1(a)所示, 添加不同种类催化剂后煤粉的 DTA 曲线如图 1(b)所示. 从图 1(a)可以看到, 催化剂提高了煤粉燃烧速率, 使失重的起始温度降低, 说明催

收稿日期: 2007-04-02, 修回日期: 2007-05-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)基金资助项目(编号: 20060105Z2025)

作者简介: 张卉(1981-), 女, 黑龙江省大庆市人, 硕士研究生, 环境工程专业; 郭占成, 通讯联系人, Tel: 010-62558489, E-mail: guozc@home.ipe.ac.cn.

剂显著改善了煤粉的燃烧性能. 其中  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  的助燃效果最为突出, 使失重的起始温度降低了  $51.9^\circ\text{C}$ ;  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaCO}_3$  的助燃效果基本相当, 起始温度降低了约  $18.2^\circ\text{C}$ . 原煤粉的失重率从 30% 增加到 60% (属于

煤焦燃烧阶段) 所用的时间约为 260 s; 而添加  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaCO}_3$  后煤粉此阶段失重所用的时间分别为 230~235 s, 缩短了 11% 左右.

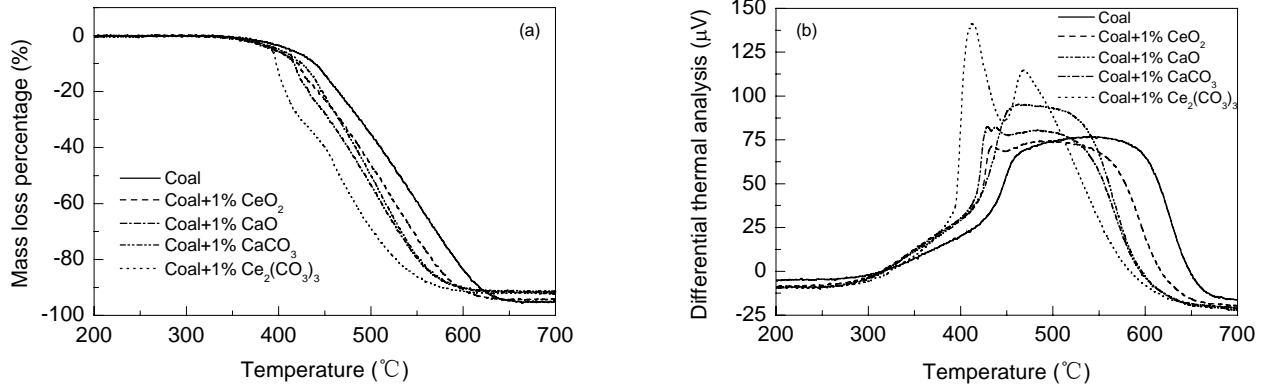


图 1 原煤粉及添加不同催化剂后煤粉的燃烧特性

Fig. 1 The combustion properties of raw pulverized coal and coals with different catalysts

从图 1(b) 可以看到, 原煤粉的 DTA 结果是一个比较平缓的单峰曲线, 除添加  $\text{CaO}$  外, 添加其他催化剂后, 煤粉的 DTA 曲线均出现双峰, 且添加  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  后曲线的峰值最大,  $\text{CaCO}_3$  次之,  $\text{CeO}_2$  最小, 添加  $\text{CaO}$  后出现的单峰也变窄变高. 煤粉燃烧分为挥发分燃烧和煤焦燃烧两部分<sup>[9]</sup>, 即均相燃烧和异相燃烧. 因此图 1(b) 中前一个放热峰为挥发分燃烧峰, 后一个放热峰为煤焦的燃烧峰. 挥发分燃烧放热峰峰值大表明该阶段的放热量较大, 燃烧剧烈. 显然添加剂的催化作用主要体现在提高煤粉中挥发分的释放量和燃烧速率, 促进煤的均相着火过程.

煤的大分子结构是许多基本结构单元的组合<sup>[10]</sup>, 小分子嵌在大分子相中, 以键能小于  $62.7 \text{ kJ/mol}$  的非共价键缔合. 加热初期, 逸出的小分子相与  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  表面吸附的各类氧(气相氧  $\text{O}_2$  和催化剂表面氧  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}^{2-}$ ,  $\text{O}^-$  以及晶格氧  $\text{O}^{2-}$ )<sup>[11]</sup> 所释放的活性氧发生反应而被迅速消耗. 随着温度升高,  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  释放的金属离子  $\text{Ce}^{3+}$  嵌入碳晶格内部, 使碳表面的电子构型发生变化, 并作为电子的受体, 通过电荷的迁移加速反应进程<sup>[12]</sup>, 使煤粒中较大的脂肪烃分子和部分芳香环发生裂解, 产生大量的气态烃、 $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$  等. 这些成分与活性氧迅速反应并剧烈放热. 随着煤粉周围气体的消耗, 浓度梯度的增加提高了挥发成分的逸出速度. 因而添加  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  催化剂后煤粉的失重起始温度较低, 并且挥发分燃烧阶段的放热峰峰值较高.  $\text{Ce}^{3+}$  和  $\text{Ce}^{4+}$  对煤粒的电子效应不同, 所以助燃效果存在较大差异. 碱土金属类催化剂  $\text{CaCO}_3$  不具备空轨道, 不能与煤粉中一些官能团产生配位键, 但

它能够与煤粉中的酸性中心进行酸碱吸附<sup>[2,3]</sup>, 促进小分子相在较低的温度下发生断裂, 因而使煤粉的起始失重温度降低. 但由于其没有直接参与破坏煤粒网络结构, 所以  $\text{CaCO}_3$  对煤粉燃烧过程的催化效果低于  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$ .

为了定量说明催化剂对煤粉中挥发分逸出的促进作用, 采用挥发分释放特性指数  $R$  作为衡量其催化效果的指标,  $R$  的定义<sup>[13]</sup>为

$$R = (d\omega/dt)_{\max} / (T_{\max} \Delta T_{1/3}),$$

式中,  $(d\omega/dt)_{\max}$  为挥发分最大释放速率 ( $\text{mg/min}$ ),  $T_{\max}$  为  $(d\omega/dt)_{\max}$  对应的温度 ( $\text{K}$ ),  $\Delta T_{1/3}$  为  $(d\omega/dt)_{\max} = 1/3$  对应的温度区间.

挥发分释放特性指数综合了挥发分释放特性曲线上的 3 个特征数值. 其中,  $(d\omega/dt)_{\max}$  越大, 表示挥发分释放越强烈;  $T_{\max}$  越低, 挥发分的释放峰出现得越早;  $\Delta T_{1/3}$  越小, 释放越集中, 对着火越有利. 添加催化剂前后的挥发分释放特性指数  $R$  值见表 2. 由表可见, 催化剂添加量为 1.0% 时, 添加  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  的挥发分释放特征指数最高. 添加  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaCO}_3$  催化剂后, 挥发分释放特征指数分别是原煤粉的 3.98, 2.2, 1.87

表 2 原煤粉及添加不同种类催化剂后煤粉的挥发分释放特性指数

Table 2 The volatile release characteristic index ( $R$ ) of raw pulverized coal and coals with different catalysts

| Sample                                 | $R (\times 10^{-4})$ |
|--|----------------------|
| Coal                                   | 0.97                 |
| Coal+1.0% $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$ | 3.87                 |
| Coal+1.0% $\text{CeO}_2$               | 2.14                 |
| Coal+1.0% $\text{CaO}$                 | 1.82                 |
| Coal+1.0% $\text{CaCO}_3$              | 3.51                 |

和 3.61 倍。

着火温度的高低反映了煤粉燃烧性能的优劣, 温度越低, 表明着火越容易. 煤粉中添加不同种类催化剂前后的着火温度变化如图 2 所示. 煤粉的着火温度采用最常用的 TG-DTG 法确定, 即过 DTG 曲线峰值对应的温度位置作平行于 Y 轴的直线交于 TG 曲线上一点, 过

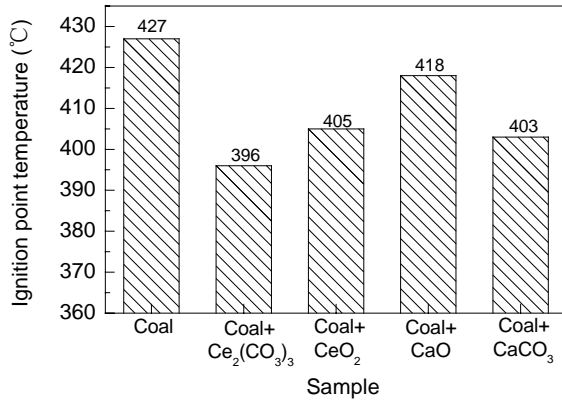
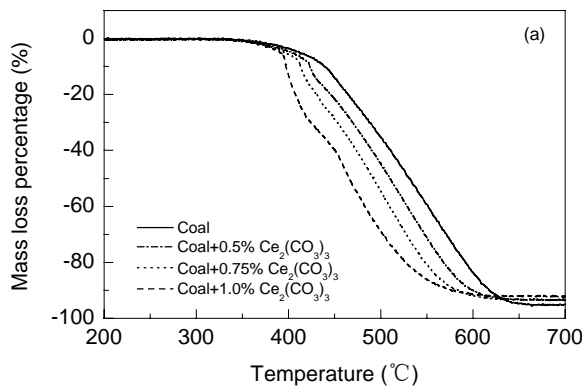


图 2 原煤粉及添加不同种类催化剂后煤粉着火点的比较  
Fig.2 The comparison of ignition point temperatures between raw pulverized coal and coals with different catalysts



该点作 TG 曲线的切线, 该切线与过 TG 曲线 0 点且与 X 轴平行的直线的交点所对应温度即为着火温度, 由综合热分析仪系统软件自动给出. 从图 2 可以看出, 添加  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  后煤粉的着火温度降低  $30^\circ\text{C}$  左右; 而添加  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaCO}_3$  后, 着火温度分别降低了约 22, 9 和  $24^\circ\text{C}$ . 挥发分特性指数表明, 添加催化剂后煤粉的挥发分释放特性显著提高, 煤粉的热解气体总量增加, 并且其中  $\text{H}_2$  和  $\text{CO}$  含量比无催化剂的煤粉热解的多<sup>[14]</sup>, 所以造成了煤粉着火温度的降低.

### 3.2 催化剂添加量对煤粉燃烧特性的影响

$\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  催化剂添加量对煤粉失重特性影响的 TG-DTA 曲线如图 3 所示. 从图可以看出, 当添加量为 0.5% 时, 失重的起始温度降低了约  $10^\circ\text{C}$ , 燃烧时间缩短了 210 s; 添加量为 1.0% 时, 起始失重温度降低了约  $52^\circ\text{C}$ , 燃烧时间缩短了 219 s. 但是煤粉的失重率从 30% 增加到 60% 所用的时间与  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  加入量关系不大, 这说明  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  催化剂的添加量对煤焦的燃烧速率几乎没有影响, 其作用主要体现在降低煤粉中挥发分的逸出起始温度和促进挥发分的燃烧过程.

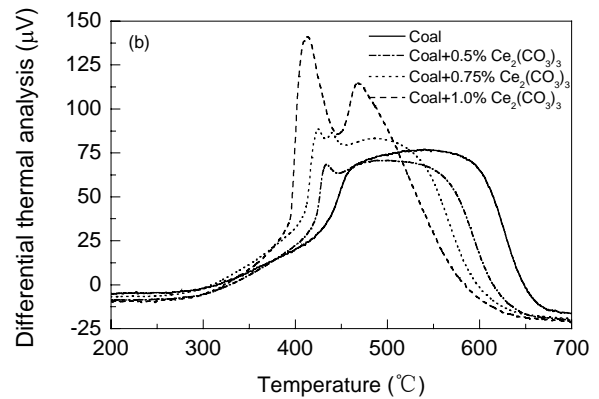


图 3 原煤粉及添加不同量  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  后煤粉的燃烧特性

Fig.3 The combustion properties of raw pulverized coal and coals with different amounts of  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$

添加不同量  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  后的挥发分释放特性指数见表 3. 由表可见, 在催化剂添加量小于 1.0% 的范围内, 添加量越大, 挥发分释放特征指数越高. 添加 0.5%, 0.75% 和 1.0% 的催化剂后挥发分释放特征指数分别是原煤粉的 1.61, 2.16 和 3.99 倍.

表 3 原煤粉及添加不同量催化剂后的挥发分释放特性指数  
Table 3 The volatile release characteristic index ( $R$ ) of raw pulverized coal and coals with different amounts of catalyst

| Sample                                  | $R (\times 10^{-4})$ |
|---|----------------------|
| Coal                                    | 0.97                 |
| Coal+0.5% $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  | 1.56                 |
| Coal+0.75% $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$ | 2.10                 |
| Coal+1.0% $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  | 3.87                 |

煤粉中添加不同量  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  催化剂的着火温度变化见图 4. 从图可以看出, 随着  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  添加量的增加, 着火温度逐渐降低. 添加量为 0.5% 时, 着火温度降低  $20^\circ\text{C}$  左右; 添加量为 1.0% 时, 着火温度降低约  $30^\circ\text{C}$ .

### 3.3 催化剂粒径对煤燃烧特性的影响

采用不同产地的  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  催化剂进行粒径对煤粉燃烧特性影响的研究. 将超声微气流粉碎机加工后的  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  催化剂用去离子水分出 3 种粒度级别, 由激光粒度分析仪测量, 粒径分别为  $>45 \mu\text{m}$ ,  $40\sim 19 \mu\text{m}$ ,  $<10 \mu\text{m}$ , 添加量为 0.75% 时的 TG-DTA 曲线如图 5 所示. 由图 5(a) 可见, 催化剂  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  的粒径越小, 失重起始

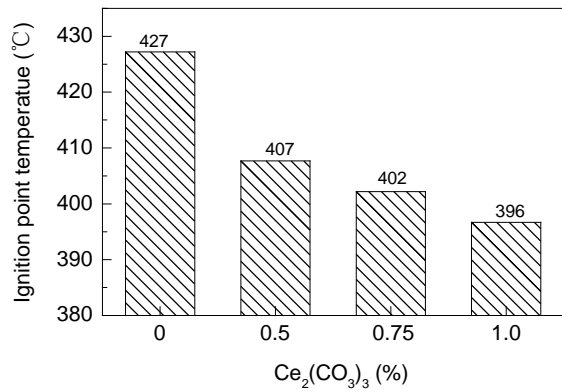


图 4 原煤粉及添加不同量 Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 后煤粉着火点的比较  
Fig.4 The comparison of ignition point temperatures between raw pulverized coal and coals with different amounts of Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>

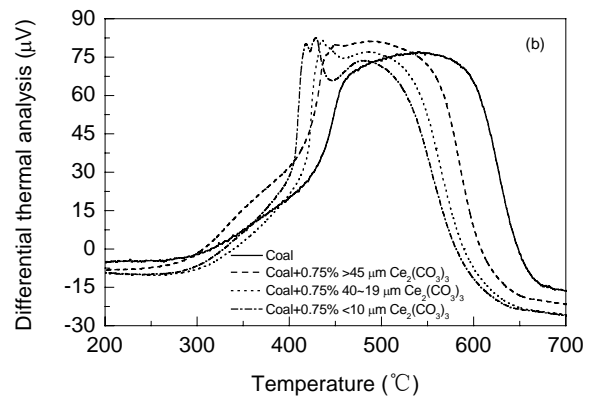
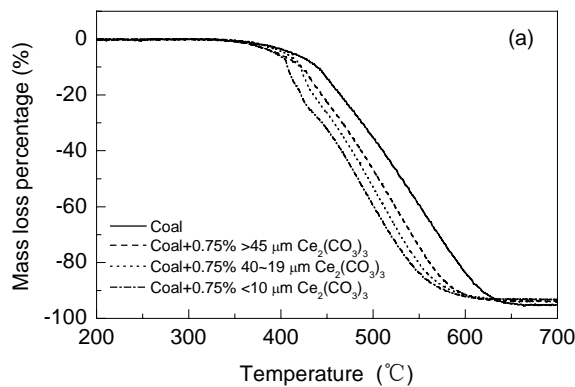


图 5 原煤粉及添加不同粒级催化剂 Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 后煤粉的燃烧特性  
Fig.5 The combustion properties of raw pulverized coal and coals with different sizes of Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>

表 4 原煤粉及添加不同粒级催化剂后的挥发分释放特性指数  
Table 4 The volatile release characteristic index (*R*) of raw pulverized coal and coals with different sizes of catalysts

| Sample  | <i>R</i> (×10 <sup>-4</sup> ) |
|---|-------------------------------|
| Coal  | 0.97                          |
| Coal+0.75% >45 μm Ce <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>   | 1.77                          |
| Coal+0.75% 40~19 μm Ce <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> | 3.32                          |
| Coal+0.75% <10 μm Ce <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>   | 6.60                          |

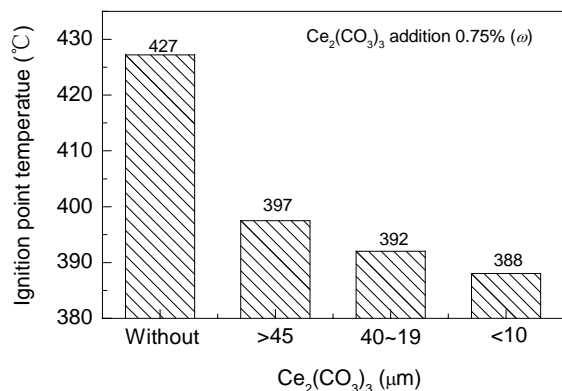


图 6 原煤粉及添加不同粒级催化剂 Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 后煤粉着火点的比较  
Fig.6 The comparison of ignition point temperatures between raw pulverized coal and coals with different sizes of Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>

温度越低, 分别降低了 13.7, 14.2 和 27.6 °C; 煤粉失重率从 30% 增加到 60% 所用的时间与催化剂粒度关系不大, 约为 230 s, 但比原煤粉失重率从 30% 增加到 60% 所用的时间缩短了 13% 左右. 从图 5(b) 可以看到, 添加 <10 μm 的 Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 后煤样挥发分燃烧放热峰的峰值最大.

添加不同粒径 Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 催化剂前后的挥发分释放特性指数 *R* 见表 4. 由表可见, 在催化剂添加量为 0.75% 时, 粒径越小, 挥发分释放特征指数越高. 其中添加 <10 μm 的 Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 后挥发分释放特征指数是原煤粉的 6.8 倍.

由图 6 可见, 催化剂添加量相同(0.75%)的条件下, 添加 >45 μm 的 Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 后着火温度为 397 °C, 而添加 <10 μm 的 Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 后着火温度为 388 °C, 说明催化剂粒径越小, 对煤粉挥发分燃烧过程的催化作用越强, 煤粉的着火温度越低. 对比表 3, 4 可见, 在 Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 催化剂添加量和粒度基本相同时, 由于不同工厂在生产中沉淀、灼烧条件和灼烧时间等因素的差异, 使稀土化合物具有不同的表面结构和比表面积<sup>[15-17]</sup>, 因而不同产地的 Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 对煤粉燃烧过程的催化效果存在较大差异.

通过 Zeta 电位分析可知, 煤粉表面带负电(ζ=-33.9 mV), 而 Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 表面带正电(ζ=26.4 mV), 煤粉对 Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 有较好的吸附作用. 由于实验中煤粉粒径大于催化剂粒径, 且煤粉和 Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 颗粒均为不规则的形体, 当催化剂粒径相对较大时, 煤粉表面吸附的催化剂量少, 同时接触面小, 产生的催化活性点较少<sup>[18]</sup>, 催化作用较弱; 催化剂粒径较小时, 可以满足催化剂与煤粉充分接触的要求, 但粒径过小, 催化剂本身易产生团聚, 使有效颗粒的数量减少, 也不利于催化活性点产生.

综合以上分析可知, Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 对煤粉中挥发分的催化作用主要取决于产生的活性氧的数量和 Ce<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>

颗粒与煤粒的接触面积。催化剂含量的增加和粒径的减小(颗粒不产生团聚)在一定程度上增加了能够产生活性氧的有效颗粒数量,增加了催化活性点的产生几率,所以提高了  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  对煤粉燃烧过程的催化作用。

采用文献[19]中 DTA 峰面积转换为放热量的计算方法,原煤粉的放热量为 32.7 MJ/kg,  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  催化剂添加量为 0.75%时,煤粉的放热量为 36.5 MJ/kg。目前  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  的市场价格约为 6200 元/t<sup>[20]</sup>,煤粉的市场价格为 600 元/t 左右<sup>[21]</sup>,则在实际工业中获取 1000 MJ 热量时,原煤粉的投资成本为 18.3 元,添加 0.75%的  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  催化剂后,投资成本变为 17.5 元,减少了 0.8 元。因此,采用  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  作为燃煤催化剂的应用前景广阔。

## 4 结论

(1) 相同实验条件下,  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  能够显著提高煤粉中挥发分的释放量和燃烧速率,促进煤的均相着火过程。当  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  添加量为 1.0%时,煤粉的失重起始温度降低了 51.9 °C,着火点温度降低了约 30 °C,在  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaCO}_3$  这 4 种催化剂中助燃效果最为突出。

(2) 在  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  的添加量小于 1.0%的范围内,添加量越大,煤粉的挥发分特性指数越高,着火温度越低。添加量为 0.5%时,煤粉的着火温度降低 20 °C 左右;添加量为 1.0%时,着火温度降低约 30 °C。

(3) 在催化剂  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  不产生团聚的情况下,添加量相同时,催化剂粒径越小,煤粉的着火温度越低。

### 参考文献:

- [1] Babich A, Yaroshevskii S, Formoso A. Increase of Pulverized Coal Use Efficiency in Blast Furnace [J]. ISIJ Int., 1996, 10: 1250-1258.
- [2] Wu Z H, Xu L, Wang Z Z. Catalyzed Effects on the Ignition Temperature of Coal [J]. Fuel, 1998, 77(8): 889-893.

- [3] McKee D W. Mechanisms of the Alkali Metal Catalyzed Gasification of Carbon [J]. Fuel, 1983, 62(2): 170-175.
- [4] Badin E J. Coal Combustion Chemistry-correlation Aspects [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1984. 157-159.
- [5] Hedden K, Wilhelm A. Catalytic Effects of Inorganic Substance on Reactivity and Ignition Temperature of Solid Fuels [J]. German Chemical Engineering, 1980, (3): 142-147.
- [6] 程军, 周俊虎, 刘建忠, 等. 电石渣催化煤燃烧特性的影响因素分析 [J]. 燃料化学学报, 2004, 32(1): 37-42.
- [7] 田君, 朱百鸣, 尹敬群. 稀土催化劣质燃煤燃烧动力学研究 [J]. 稀土, 2002, 23(2): 16-19.
- [8] 许莹, 胡宾生.  $\text{CeO}_2$  和  $\text{La}_2\text{O}_3$  对高炉喷吹煤粉燃烧过程的影响 [J]. 稀土, 2005, 26(2): 56-58.
- [9] Paolo D, Paolo G, Loretta B, et al. Investigation of the Combustion of Particles of Coal [J]. Fuel, 1996, 75(9): 1083-1088.
- [10] Gorbaty M L. Prominent Frontiers of Coal Science: Past Present and Future [J]. Fuel, 1994, 73(12): 1819-1828.
- [11] 邹兴, 卢惠民, 方克明. 变价稀土氧化物对催化剂性能的影响 [J]. 稀土, 2000, 21(2): 17-21.
- [12] Juniper L A, Wall T F. Combustion of Particles in a Large Pulverized Brown Coal Flame [J]. Combust. Flame, 1980, 39(1): 69-81.
- [13] 孙学信. 燃煤锅炉燃烧试验技术与方法 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002. 55-58.
- [14] 许莹, 胡宾生.  $\text{CeO}_2$  和  $\text{La}_2\text{O}_3$  对混合煤在等离子体中热解的影响 [J]. 稀土, 2006, 27(4): 45-47.
- [15] 鲍卫民, 公锡泰. 稀土沉淀条件及形态控制研究 [J]. 稀土, 1995, 16(2): 33-35.
- [16] 张丽英, 吴志华, 张怀军. 晶型混合碳酸稀土的沉淀条件研究 [J]. 稀土, 1996, 17(3): 61-63.
- [17] 魏昆, 何地宝, 翟建伟. 沉淀法制备稀土氧化物纳米粉体的研究 [J]. 稀土, 1999, 20(4): 27-28.
- [18] Liu W. Catalyst Technology Development from Macro-, Micro- to Nano-scale [J]. China Particuology, 2005, 3(6): 383-394.
- [19] 李余增. 热分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1987. 75-80.
- [20] 稀土行业协会. 稀土产业 2006 年上半年经济运行情况分析报告 [OL/R]. <http://www.im-reg.com/gyxh/xhzn.htm>, 2007-05-25.
- [21] 中国国家发展和改革委员会. 动力煤交易价格回落—3 月份煤炭市场情况 [OL/R]. [http://www.sdpc.gov.cn/zjgx/t20070420\\_130636.htm](http://www.sdpc.gov.cn/zjgx/t20070420_130636.htm), 2007-05-25.

## Effects of Catalysts on Combustion of Pulverized Coal by Synthetical Thermo-gravimetric Analysis

ZHANG Hui<sup>1,3</sup>, GUO Zhan-cheng<sup>1,2</sup>, WANG Zhi<sup>1</sup>, XU De-ping<sup>3</sup>

(1. State Key Lab. Multi-phase Complex System, Institute of Process Engineering, CAS, Beijing 100080, China;

2. Key Lab. Recycling and Ecologic Metallurgy, Ministry of Education, Univ. Sci. & Technol. Beijing, Beijing 100083, China;

3. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The effects of  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ , four kinds of catalysts, on combustion property of pulverized coal were investigated with a synthetical thermal analyzer, especially the influences of addition content and particle size of  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  powder during the combustion process of pulverized coal. The results show that  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  powder can increase the combustion process of pulverized coal, and lower its ignition point temperature. The pulverized coal ignition temperature can be reduced about 30 °C when the addition content of  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  powder is 1.0%. With the addition content of  $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$  powder increasing and its particle size decreasing, the catalytic effect becomes more eminent when its addition content is less than 1.0%.

**Key words:** pulverized coal; cerium carbonate; catalysts; combustion; synthetical thermal analysis