

# 纳米 TiO<sub>2</sub> 催化煤燃烧的实验研究

王淑勤, 赵 毅, 李丹丹, 张一鸣

(华北电力大学 环境科学与工程学院, 河北保定 071003)

**摘 要:** 研究了纳米 TiO<sub>2</sub> 在有、无 CaO 脱硫的工况下, 对汶南褐煤和内蒙烟煤的催化燃烧效果。通过热重曲线, 从着火温度、失重量、放热量等燃烧特性方面, 对实验结果进行了分析。结果表明: 在无 CaO 脱硫时, 纳米 TiO<sub>2</sub> 使烟煤的着火温度下降 15 °C, 褐煤的燃尽温度降低了 32 °C; 在有 CaO 脱硫时, 纳米 TiO<sub>2</sub> 使褐煤的着火温度下降 17 °C, 烟煤的燃尽温度降低了 8 °C, 同时褐煤、烟煤的燃烧反应活化能分别降低了 5.9 kJ/mol 和 1.3 kJ/mol, 褐煤的发热量升高。XRD 图谱中没有新物质生成也证明了纳米 TiO<sub>2</sub> 的催化燃烧作用。这一结果为燃烧脱硫的同时, 提高煤的燃烧效率, 节约用煤量提供了理论依据。

**关 键 词:** 纳米 TiO<sub>2</sub>; 催化燃烧; 热重分析; X 射线衍射分析

中图分类号: TQ536.9 文献标识码: A

## 引 言

纳米 TiO<sub>2</sub> 作为一种新型的材料, 由于其粒径小、比表面积大、反应活性高、吸附能力强、性能稳定、反应彻底高效, 被广泛的应用于环保领域<sup>[1]</sup>。但对于其在催化煤燃烧领域的研究还很少见报道。本文利用热重分析技术, 研究了纳米 TiO<sub>2</sub> 在有、无氧化钙脱硫条件下, 对燃烧性能差别较大的汶南褐煤和内蒙烟煤燃烧效果的影响; 利用 X 射线衍射分析技术, 对燃烧后的各种灰份进行了产物分析。旨在探索纳米 TiO<sub>2</sub> 的催化特性, 提高煤的燃烧效率, 节约用煤量, 以缓解能源紧张局势和适应环境保护要求。

## 1 实验部分

### 1.1 实验样品

(1) 煤样: 实验所用汶南褐煤、内蒙烟煤的成分分析结果如表 1 所示。

表 1 汶南褐煤及内蒙烟煤的工业分析及元素分析结果 (%)

	元素分析					工业分析			
	C <sub>ad</sub>	H <sub>ad</sub>	O <sub>ad</sub>	N <sub>ad</sub>	S <sub>ad</sub>	M <sub>ad</sub>	V <sub>ad</sub>	A <sub>ad</sub>	FC <sub>ad</sub>
汶南褐煤	60.75	4.56	2.96	1.23	2.35	1.82	32.89	26.30	38.99
内蒙烟煤	62.33	4.27	10.95	1.16	1.25	1.75	30.07	18.29	49.89

(2) 添加剂: 利用溶胶-凝胶法, 由钛酸正丁酯水解合成, 干燥后的凝胶在 750 °C 焙烧 2 h, 纳米 TiO<sub>2</sub> 的掺加量为实验煤样的 8% (质量百分比)。

### 1.2 实验仪器

WCT-2 型微机差热分析仪、Y2000 型 X 射线衍射分析仪。

### 1.3 实验内容

(1) 热重分析: 热重分析法是在程序控制温度下, 测量物质质量与温度关系的一种技术。热重法试验得到的曲线称为热重曲线 (即 TG 曲线)。将 TG

曲线对温度 (或时间) 取一阶导数即得热商热重曲线 (DTG 曲线)。实验时称取一定量的煤样和纳米 TiO<sub>2</sub>, 加或不加 CaO, 研磨混合均匀后把样品放入 WCT-2 型微机差热分析仪, 对煤样进行燃烧特性分析, 采用热重分析仪研究煤的燃烧特性主要是了解煤的燃烧特性指标, 包括煤的着火点、DTG 的峰值 (dw/dt), 对应于 (dw/dt) 的温度以及燃尽温度 (T<sub>p</sub>)。

工作气氛为动态空气, 流量为 60 ml/min; 升温速率为 20 °C/min; 温度变化范围为 30 ~ 900 °C; 试

收稿日期: 2007-01-09; 修订日期: 2007-06-08

基金项目: 华北电力大学留学基金资助项目 (200514002)

作者简介: 王淑勤 (1965-) 女, 河北定州人, 华北电力大学副教授。

样重量为 5.00 mg 左右。汶南褐煤、内蒙烟煤试样组成为: A1—褐煤; A2—褐煤+8%TiO<sub>2</sub>; A3—褐煤+CaO; A4—褐煤+8%TiO<sub>2</sub>+CaO; B1—烟煤; B2—烟煤+8%TiO<sub>2</sub>; B3—烟煤+CaO; B4—烟煤+8%TiO<sub>2</sub>+CaO。

(2) 灰样: 将上述研磨混合均匀后的样品放入管式炉的瓷舟内, 通入氧气(流量 40 ml/min), 升温到 850 °C, 燃烧 25 min, 制得实验所用灰样。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 着火特性指数(D<sub>i</sub>)与燃尽特性指数(D<sub>f</sub>)

煤的着火温度是表征煤的燃烧特性的一个重要指标, 着火温度越低, 表示煤越容易着火, 燃烧特性就越好。着火点温度(T<sub>e</sub>)是指开始燃烧反应时的温度, 在热重(TG)曲线上表现为开始失重时的温度, 它的高低反映出试样开始燃烧反应的难易程度; 燃尽温度(T<sub>p</sub>)是煤燃烧反应结束时的温度在热重(TG)曲线上表现为试样恒重不变时的温度<sup>[2]</sup>。着火点温度和燃尽温度可以直接从热重(TG)曲线上获得。最大反应速率温度为反应过程中反应速度最快时所对应的温度, 在热重(TG)曲线上表现为 DTG 曲线的峰值所对应的温度。但是, 具体研究煤在着火燃烧期间不同组分对于着火和燃烧所起的作用时, 还要考虑燃烧条件, 因此引入煤的着火特性指数与燃尽特性指数综合考虑煤的着火温度和燃烧稳定性因素对煤燃烧的影响<sup>[3]</sup>, 两项指数数值越大, 表明煤的燃烧性能越好。

着火指数计算式为:

$$D_i = (dw/dt)_{\max} / (t_p \cdot t_e)$$

式中: t<sub>p</sub>—最大失重速率(dw/dt)<sub>max</sub>对应的时间; t<sub>e</sub>—着火时间。

燃尽指数计算式为:

$$D_f = (dw/dt)_{\max} / (\Delta t_{1/2} \cdot t_p \cdot t_f)$$

式中: Δt<sub>1/2</sub>—(dw/dt)/(dw/dt)<sub>max</sub>=1/2 时所对应的时间; t<sub>p</sub>—最大失重速率(dw/dt)<sub>max</sub>对应的时间; t<sub>f</sub>—燃尽时间。

(dw/dt)<sub>max</sub>是 DTG 曲线的峰值, 着火时间 t<sub>e</sub> 和燃尽时间 t<sub>f</sub> 可以直接从 TG 曲线获得。这样就可算出不同煤样的着火特性指数与燃尽特性指数。

### 2.2 不加入氧化钙, 纳米 TiO<sub>2</sub> 对汶南褐煤、内蒙烟煤的催化燃烧效果

各试样燃烧特性指数计算结果如表 2 所示。由表可知, 烟煤的着火温度较褐煤的高, 因为挥发分

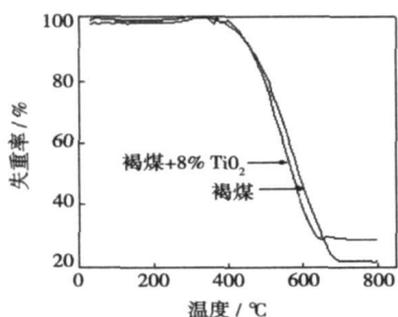
低的煤, 着火温度高; 烟煤的煤化程度比褐煤的高, 烟煤结构单元中芳香环缩合程度大、侧链少, 由于内部无规则排列比褐煤紧密, 因而煤的孔隙率、内孔比表面积降低, 挥发分析出的扩散阻力增加, 挥发分含量低, 所以着火困难。而褐煤的灰分含量高, 在燃烧过程中, 外层的内在灰分裹在内层焦炭上, 形成一层灰壳, 阻碍氧向焦炭表面的扩散, 使燃尽时间拖长, 导致燃尽温度高; 烟煤的灰分低, 所以燃尽温度也低。当加入 8% 纳米 TiO<sub>2</sub> 以后, 褐煤的着火温度升高了 23 °C, 燃尽温度降低了 32 °C, 而烟煤的着火温度下降了 15 °C, 燃尽温度升高了 21 °C。褐煤的着火指数降低了 35.0%, 烟煤的提高了 28.6%; 褐煤和烟煤的燃尽指数分别降低了 49.3% 和 5.5%。因此加入纳米 TiO<sub>2</sub> 以后, 使烟煤着火提前, 褐煤易于燃尽。添加纳米 TiO<sub>2</sub> 后, 在煤表面形成活性中心, 使挥发分容易析出, 从而降低着火温度, 这种作用对挥发分含量低的烟煤更明显, 使烟煤的着火温度下降。另一方面添加物包裹在炭粒表面, 堵塞气孔, 导致煤的燃烧性能下降, 这种作用对内部孔隙少, 吸附能力弱的烟煤更明显, 使燃尽温度升高。不加入氧化钙, 纳米 TiO<sub>2</sub> 与汶南褐煤、内蒙烟煤的 TG 曲线如图 1 所示。从图可知, 加入纳米 TiO<sub>2</sub> 以后, 煤燃烧后的剩余质量百分数增加, 意味着煤中不可燃物质增加; 同时煤燃烧后烟气中 SO<sub>2</sub> 浓度降低。这是纳米 TiO<sub>2</sub> 加速了煤中氧化钙等碱性物质的固硫作用。

表 2 各试样燃烧特性指数

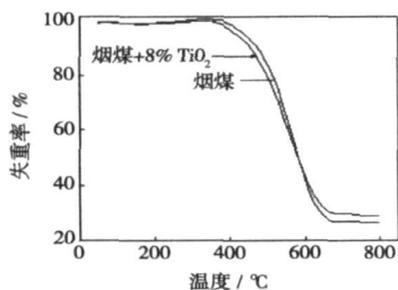
试样编号(Ca/S=2)	T <sub>e</sub> /°C	T <sub>p</sub> /°C	D <sub>i</sub> (×10 <sup>-4</sup> )	D <sub>f</sub> (×10 <sup>-4</sup> )
A1	363.41	669.60	10.90	2.19
A2	386.11	637.95	7.08	1.11
A3	373.33	638.50	8.04	1.63
A4	356.32	642.65	10.70	2.21
B1	379.11	648.80	9.25	2.00
B2	364.27	669.68	11.90	1.89
B3	361.8	668.06	11.70	1.70
B4	358.86	660.09	11.00	1.88

注: A1—褐煤; A2—褐煤+8%TiO<sub>2</sub>; A3—褐煤+CaO; A4—褐煤+8%TiO<sub>2</sub>+CaO; B1—烟煤; B2—烟煤+8%TiO<sub>2</sub>; B3—烟煤+CaO; B4—烟煤+8%TiO<sub>2</sub>+CaO。

从图 2 的 DTA 曲线上可以看出, DTA 曲线分两个峰, 第一个峰在 370 °C 左右, 是挥发分析出阶段; 第二个峰在 540 °C 左右, 是碳氧化燃烧阶段。添加纳米 TiO<sub>2</sub> 后对煤的挥发分析出和碳氧化燃烧都有影响, 增加纳米 TiO<sub>2</sub> 使褐煤的发热量降低, 使烟煤的发热量升高。

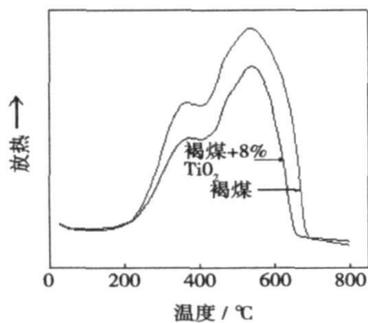


(a) 褐煤与纳米TiO<sub>2</sub>的TG曲线

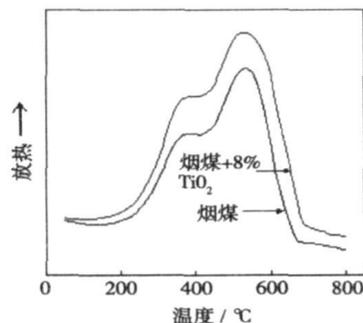


(b) 烟煤与纳米TiO<sub>2</sub>的TG曲线

图1 煤与纳米TiO<sub>2</sub>的TG曲线



(a) 褐煤与纳米TiO<sub>2</sub>的DTA曲线



(b) 烟煤与纳米TiO<sub>2</sub>的DTA曲线

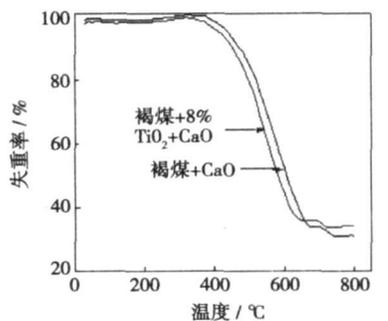
图2 煤与纳米TiO<sub>2</sub>的DTA曲线

添加的催化剂在一定程度上加快了煤本身的裂解反应,使反应系统中不易被氧化、被转化的物质发生氧化转化反应,使焦油、粗苯易于分解,使煤的挥

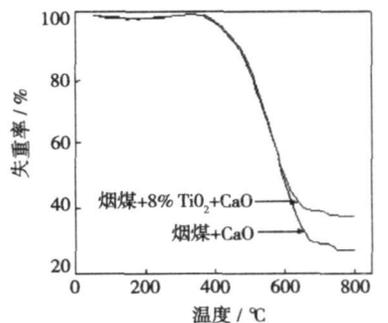
发分释量增大,有利于燃烧,这种作用对低挥发分煤更明显,烟煤的挥发分比褐煤的低,因此,在不添加CaO脱硫剂的工况下,纳米TiO<sub>2</sub>对烟煤的催化燃烧效果更明显。

### 2.3 加入氧化钙以后,纳米TiO<sub>2</sub>对汶南褐煤、内蒙烟煤的催化燃烧效果

由表2可知,加入氧化钙脱硫剂时,在添加纳米TiO<sub>2</sub>以后,褐煤的着火温度降低了17℃,燃尽温度升高了4℃;烟煤的着火温度降低了3℃,燃尽温度降低了8℃。褐煤的着火指数提高了24.9%,烟煤的降低了5.98%;褐煤燃尽指数提高了26.2%,烟煤的提高了10.6%。因此有氧化钙脱硫剂时加入纳米TiO<sub>2</sub>以后,使褐煤着火提前,烟煤易于燃尽。加入氧化钙,纳米TiO<sub>2</sub>与汶南褐煤、内蒙烟煤的TG曲线如图3所示。从图可知,加入纳米TiO<sub>2</sub>以后,有氧化钙脱硫剂时煤燃烧后的剩余质量百分数也增加,与无氧化钙脱硫剂时规律一样。这是纳米TiO<sub>2</sub>加速了氧化钙的固硫作用。



(a) 褐煤与氧化钙、纳米TiO<sub>2</sub>的TG曲线



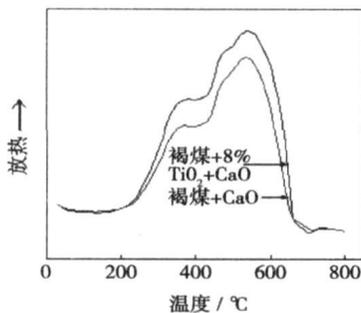
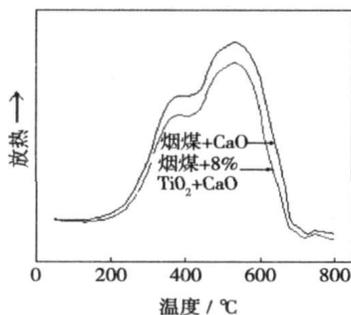
(b) 烟煤与氧化钙、纳米TiO<sub>2</sub>的TG曲线

图3 煤与氧化钙、纳米TiO<sub>2</sub>的TG曲线

从图4的DTA曲线上可以看出,DTA曲线也分两个峰,与无氧化钙脱硫剂时规律一样,添加纳米TiO<sub>2</sub>后使褐煤的发热量升高,使烟煤的发热量降低。

氧化钙的存在,使得纳米TiO<sub>2</sub>对于褐煤、烟煤的作用效果发生了明显的变化。这是由于氧化钙有

固硫作用,使煤燃烧产生的 SO<sub>2</sub> 形成 CaSO<sub>4</sub> 而固定下来,纳米 TiO<sub>2</sub> 的作用不仅加速了煤的燃烧还促进了氧化钙的固硫作用。含有纳米 TiO<sub>2</sub> 添加剂的颗粒形成的产物层结构疏松,有较大的孔隙,有利于二氧化硫的扩散从而提高固硫率,添加剂的作用是促进固硫反应产物层的扩散。褐煤反应活性高,易于与空气中的氧气反应,加入纳米 TiO<sub>2</sub> 后,催化剂中的金属离子供电子能力增加煤燃烧过程中碳环或碳链活性,有利于固定碳的燃烧和燃尽。另外,催化剂在着火过程中,充当了氧的活性载体,促进氧从气相向表面扩散,氧转移的结果使挥发分和固定碳着火温度降低,发热量明显增加,褐煤的结构单元中侧链较多,极性基团也多,芳环的缩合程度小,表面积大,吸附能力强;而烟煤的结构单元中侧链较少,芳环的缩合程度大,内部孔隙少,吸附能力弱。因此当有氧化钙脱硫剂存在时,加入纳米 TiO<sub>2</sub> 后,对褐煤作用效果更明显。

(a) 褐煤与氧化钙、纳米TiO<sub>2</sub>的DTA曲线(b) 烟煤与氧化钙、纳米TiO<sub>2</sub>的DTA曲线图 4 煤与氧化钙、纳米TiO<sub>2</sub>的DTA曲线

#### 2.4 对燃烧产物进行 X 射线衍射分析

对样品 A1、A2、A3、A4, 温度 850 °C 时, 燃烧所得的煤灰, 进行 X 射线衍射分析, 结果如图 5 所示。由标准图谱可知, SiO<sub>2</sub> 的主峰出现在  $2\theta = 26.66^\circ$ , CaSO<sub>4</sub> 的主峰出现在  $2\theta = 25.46^\circ$ , CaO 的主峰出现在  $2\theta = 37.46^\circ$ , TiO<sub>2</sub> 的主峰出现在  $2\theta = 27.86^\circ$ 。

从图 5 可知煤的燃烧产物主要为 SiO<sub>2</sub>; 加入 CaO 后, 煤灰中含有 SiO<sub>2</sub>、CaSO<sub>4</sub>、CaO, 说明实验条件下, CaO 转化成 CaSO<sub>4</sub>。在没有 CaO 脱硫剂的情况下, 加入纳米 TiO<sub>2</sub>, 煤灰中只增加了 TiO<sub>2</sub> 这种成分, 没有新物质生成, 表明在燃烧过程中, TiO<sub>2</sub> 没有与煤中物质发生反应。在加入 CaO 脱硫剂的情况下, 加入纳米 TiO<sub>2</sub> 后, 煤灰中含有 SiO<sub>2</sub>、CaSO<sub>4</sub>、CaO、TiO<sub>2</sub>, 并没有 CaO 与 TiO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 与 TiO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub> 与 TiO<sub>2</sub> 反应的新产物生成, 由此可以判定, TiO<sub>2</sub> 在整个燃烧过程中是一种催化剂。

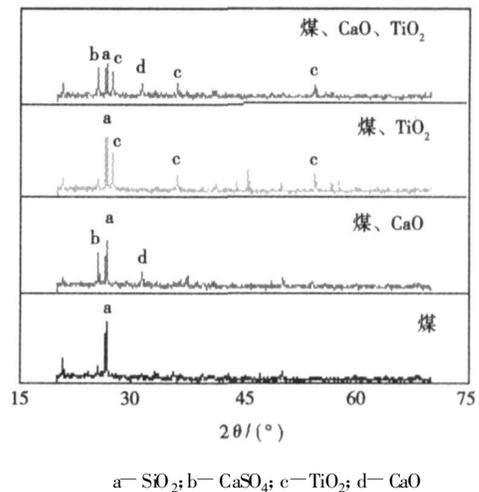


图 5 各种工况下燃烧产物的 XRD 图谱

### 3 燃烧动力学分析

按照 Coats-Redfern 法<sup>[4]</sup>, 将煤燃烧的过程近似看成一级动力学反应, 可得:

$$\ln \left[ \frac{-\ln(1-a)}{T^2} \right] = \ln \left[ \frac{AR}{\beta E} \left( 1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT}$$

式中:  $\beta$ —升温速率, K/min;  $a$ —转化率, %;  $E$ —活化能, kJ/mol;  $A$ —前因子, min<sup>-1</sup>;  $T$ —温度, K;  $R$ —气体常数, 8.314 J/(mol·K)。对一般的反应温度区域

和活化能  $E$  值而言,  $\ln \left[ \frac{-\ln(1-a)}{T^2} \right]$  对  $1/T$  作图可以得到一条直线, 其斜率为  $E/R$ , 从而得到活化能  $E$  值, 活化能计算结果如表 3 所示。

表 3 各种试样活化能计算结果

试样编号 (Ca/S=2)	活化能 /kJ·mol <sup>-1</sup>	试样编号 (Ca/S=2)	活化能 /kJ·mol <sup>-1</sup>
A1	56.76	B1	66.11
A2	61.20	B2	65.77
A3	65.83	B3	64.60
A4	59.92	B4	62.90

由表3可知,在没有氧化钙的条件下,加入纳米TiO<sub>2</sub>可使褐煤的活化能略有升高,烟煤的燃烧反应活化能略有降低;当有氧化钙脱硫剂存在时,加入纳米TiO<sub>2</sub>后,褐煤、烟煤的燃烧反应活化能均降低,分别为5.9 kJ/mol和1.3 kJ/mol,对褐煤作用效果更明显。煤的燃烧反应活化能所呈现出来的变化规律,与热重分析所得的燃烧规律是一致的。同时,活化能的计算结果再次证明纳米TiO<sub>2</sub>在燃烧过程中是一种催化剂,它可以降低燃烧反应的活化能,对整个燃烧过程起到催化作用。

纳米级二氧化钛具有催化作用的原因可以通过电子转移学说很好的解释。在煤的碳与氧的反应中,氧气的吸附被认为是反应的控制步骤。当煤中加入金属钛的氧化物时,燃烧反应过程中金属离子嵌入碳晶格的内部使碳的微观结构发生变化,其自身的电子发生转移,成为电子给予体。结果,金属离子将形成空穴,而碳表面的电子构型也将发生变化,碳晶格就会扭曲变形,碳-金属络合物容易从晶格中脱离出来,这种电荷的迁移使碳的表面棱、角、缺陷等活性部位增加,加快了氧气的吸附速度<sup>[5]</sup>;另一方面纳米材料具有极大的比表面积,使得反应物组分在纳米级TiO<sub>2</sub>表面上的化学吸附作用明显加强<sup>[6]</sup>。在两方面的作用下,纳米TiO<sub>2</sub>降低了反应的活化能,催化了整个燃烧过程。

## 4 结 论

(1) 在没有氧化钙存在时,褐煤的燃尽温度降

低了32℃,而烟煤的着火温度下降了15℃。因此加入纳米TiO<sub>2</sub>以后,使烟煤着火提前,褐煤易于燃尽,烟煤的发热量升高。纳米TiO<sub>2</sub>对于挥发分含量低的烟煤催化燃烧效果明显。

(2) 在有氧化钙存在时,烟煤的燃尽温度降低了8℃,褐煤的着火温度降低了17℃,因此有氧化钙脱硫剂时加入纳米TiO<sub>2</sub>以后,使褐煤着火提前,烟煤易于燃尽,褐煤的发热量升高。纳米TiO<sub>2</sub>对于表面积大、吸附能力强的褐煤催化燃烧效果明显。

(3) X射线衍射图谱中没有新产物生成;活化能计算也表明,当有氧化钙脱硫剂存在时,加入纳米TiO<sub>2</sub>后,褐煤、烟煤的燃烧反应活化能均降低。

(4) 纳米TiO<sub>2</sub>在煤燃烧时的催化特性表明,它不仅提高氧化钙的固硫效果,还可提高煤的燃烧效率,节约用煤量。

## 参考文献:

- [1] 刘太奇. 纳米空气净化技术[M]. 北京: 化工出版社, 2004
- [2] 谢克昌. 煤的结构与反应性[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [3] MA B G, LI X G, XU L, et al. Investigation on catalyzed combustion of high ash coal by thermogravimetric analysis[J]. *The modhimica Acta*, 2006(445): 19-22.
- [4] 刘建忠, 冯展管, 周俊虎, 等. 煤燃烧反应活化能的两种研究方法的比较[J]. *动力工程*, 2006 26(1): 121-124
- [5] 袁中山, 吴迪镛, 谭志诚, 等. 燃煤固硫及催化燃烧一体化添加剂的催化作用机理研究[J]. *燃料化学学报*, 2005 33(3): 267-272
- [6] 李莹莹, 刘艳华, 车得福. 添加剂对燃煤NO排放的影响[J]. *燃烧科学与技术*, 2004, 10(3): 275-277.

(编辑 滨)

## 新技术

# 前缘开槽定向润滑轴承

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2006年12月号报道, Kingsbury公司提供了先进的LEG(前缘开槽)润滑技术用于推力轴承和轴颈轴承。

LEG技术是一种已取得专利的用于液压轴承的直接润滑技术。LEG设计允许冷的进口油通过轴瓦前缘上的槽直接被喷入油膜。冷油膜使轴瓦与携带的热油隔开,从而减少了巴氏合金的温度。

把滑油直接引入油膜,允许消除寄生的无油膜损失,后者会减小在典型的溢流式轴承中的机械效率。

与溢流式润滑比较,先进的LEG技术显著减小了轴瓦的温度增加了承载能力,降低了滑油流量并减小了功率损失。

LEG不要求轴承油密封,而是使用供油管有效地引导油流到前缘开槽。

LEG供油槽位于轴瓦的前缘,这使轴承适于高速机械应用。

(吉桂明 供稿)

structure proposed by the authors and the rational configuration of such systematic parameters as liquid drag, heat dissipation, transmission medium, spring rigidity and the effective area of the piston etc. has the ability to realize a stepless speed control at a rated speed of 1500 r/min and a speed ratio of 0.15 ~ 1, meeting the practical engineering demands of thermal power-generation enterprises. **Key words:** hydro-viscous drive, liquid viscous transmission, stepless speed control, development, study

高压密相气力输送固相流量的实验与 GRNN 网络预测 = **Experimental Study of High-pressure Dense-phase and Pneumatically Transported Solid-phase Flow and its Prediction Based on a GRNN (generalized regression neural network)** [刊, 汉] / LU Peng, CHEN Xiao-ping, ZHAO Chang-sui, et al (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(1). — 41 ~ 45

Pulverized-coal high-pressure dense-phase pneumatic transmission represents one of the key technologies for the pressurized coal gasification of a gas fluidized bed. A systematic study was performed on a pneumatic transmission test rig featuring a transmission pressure up to 3.7 MPa and a pipeline solid-gas ratio of 660 kg/m<sup>3</sup> to investigate the influence of such conditions as transmission pressure, transmission pressure difference, fluidized air quantity, pressurized air quantity, supplementary air quantity and water content of pulverized coal etc. on the solid-phase mass flow rate. The results of the study show that the solid-phase flow rate increases with the increase of transmission pressure difference. It first increases with an increase in fluidized air flow rate, and then tends to be a constant value. When the injected air quantity reaches a constant one, the flow rate in question will first decrease and then increase with the increase of the pressurized air quantity, basically independent of the supplementary air quantity. The flow rate will decrease with an increase of the water content of the pulverized coal. In the meantime, a generalized regression neural network (GRNN) was established to effectively forecast the solid-phase flow rate with the maximal prediction error being within 2.3%. All these efforts will somewhat provide guidance for system control and operation, and at the same time lay a solid foundation for an in-depth study of the high pressure dense-phase pneumatic transmission. **Key words:** pneumatic conveyance, high pressure, dense phase, solid phase flow rate, generalized regression neural network

加压喷动流化床最小喷动速度的试验研究 = **Experimental Study of the Minimum Spouting Velocity in a Pressurized Spouted-fluidized Bed** [刊, 汉] / LI Qian-jun, ZHANG Ming-yao, SHI Ai-yang (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(1). — 46 ~ 49

A pressurized spouted-fluidized bed experiment was performed on an organic-glass cold model device with an inner diameter of 100 mm. Millet having a diameter of 1.6 mm and 2.3 mm respectively was used as the bed material. The influence of pressure, static bed height and fluidized air on the minimum spouting velocity was studied. The test results show that the minimum spouting velocity in a spouted-fluidized bed decreases with the increase of pressure, but the margin of such a decrease will gradually diminish. When the static bed height increases, the minimum spouting velocity will also increase. The influence of any increase of bed height on the minimum spouting velocity, however, becomes weakened with an increase of pressure. The increase of fluidized air quantity can lead to a decrease of the minimum spouting velocity. Based on the experimental data, a linear regression was conducted, and the minimum spouting velocity correlation formulae were obtained respectively when  $u_f$  equals to and is greater than 0 ( $u_f$  represents the apparent air velocity in the fluidized air bed) with their correlation coefficients being respectively 0.964 and 0.920. The results obtained from the correlation formulae are in relatively good agreement with those of the experimental measurements. **Key words:** spouted-fluidized bed, pressurization, minimum spouting velocity

纳米 TiO<sub>2</sub> 催化煤燃烧的实验研究 = **Experimental Study of Nano-TiO<sub>2</sub> Catalyzed Coal Combustion** [刊, 汉] / WANG Shu-qin, ZHAO Yi, LI Dan-dan, et al (College of Environmental Science and Engineering, North China Electric

Power University, Baoding, Post Code: 071003)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. —2008, 23(1). —50 ~ 54

Under an operating condition of desulfurization with or without CaO, studied was the nano-TiO<sub>2</sub>-catalyzed combustion effectiveness of Wen-nan lignite and Inner-Mongolia bituminous coal. Through the thermogravimetric curves an analysis was conducted of the experimental results from such combustion properties as ignition temperature, weight loss and heat release rate etc. The analytic results show that during the desulfurization without CaO, the nano-TiO<sub>2</sub> can lower the ignition temperature of the bituminous coal by 15 °C and the burn-off temperature of the lignite, by 32 °C. During the desulfurization with CaO, however, the nano-TiO<sub>2</sub> can lower the ignition temperature of the lignite by 17 °C, and the burn-off temperature of the bituminous coal, by 8 °C. In the meanwhile, the activation energy of both coals from combustion reaction has decreased by 5.9 kJ/mol and 1.3 kJ/mol respectively, and calorific power of the lignite, increased. No new substance being generated in the XRD (X-ray diffraction) spectrum also proves the catalyzed combustion effectiveness of the nano-TiO<sub>2</sub>. The above result can provide a theoretical basis for the simultaneous implementation of desulfurization and the combustion efficiency enhancement, resulting in sizable coal savings. **Key words:** nano-TiO<sub>2</sub>, catalyzed combustion, thermogravimetric analysis, X-ray diffraction analysis

220 MW 燃煤机组飞灰对汞的吸附特性研究 = A Study of the Mercury Adsorption Characteristics of Flyash in a 220 MW Coal-fired Power Plant [刊, 汉] / JIANG Yi-man, DUAN Yu-feng, WANG Yun-jun, et al (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Southeast University, Nanjing, Post Code: 210096)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. —2008, 23(1). —55 ~ 59

The specific surface area, pore diameter, pore volume, pore distribution and fractal dimension of flyash in four electric fields of an electrostatic precipitator (ESP) in a 220 MW coal-fired power plant were measured by use of nitrogen isothermal adsorption (at a constant temperature of 77.35 K). By employing a scanning electron microscope the visual morphological characteristics of flyash particles were analyzed. The results show that the smaller the particle diameter and the greater the specific surface area, the higher the mercury content in flyash. The carbon and mercury content in flyash exhibits a positive correlation. With an increase of load, the mercury adsorption tends to be weakened. There exists an optimum fractal dimension, at which the physical and chemical adsorption of mercury by flyash attains a maximum value. The broader the pore distribution and the greater the effective utilization rate of the pore volume, the more favorable condition for the adsorption of mercury. The adsorption capacity of mercury by a sub-micron level particle depends on its pileup morphology and the utilization rate of its specific surface area. **Key words:** coal-fired plant, mercury, flyash, adsorption, surface utilization rate, fractal dimension

带预测有效约束的优化法对燃烧室构件的设计 = Design of Structural Members of a Combustion Chamber by Adopting an Optimization Method Featuring a Predictable Effective Restraint [刊, 汉] / ZHANG De-xin, AN Wei-guang (Aerospace Engineering Department, Harbin Engineering University, Harbin, Post Code: 150001)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. —2008, 23(1). —60 ~ 63

By adopting a fully analytic sensitivity analysis method with a predictable effective restraint, an optimization design was conducted of the structural members of a combustion chamber shell in order to better improve the stress concentration condition of the shell in question, prevent any damage from thermal distortion and enhance its load bearing capacity. During the optimization design of the shell members, a fully analytic sensitivity analysis technology, incorporating the above restraint, was established. By a combination of the above technology with a general-purpose shape optimization design algorithm, a shape optimization design of the structural members under a plane stress in the combustion chamber shell was conducted, thus reducing the maximal shear stress of the inner holes and finally achieving a satisfactory result. **Key words:** combustion chamber shell, effective restraint, boundary element, optimization design

周期性模型在管壳式换热器数值模拟中的应用 = Application of a Periodic Model in the Numerical Simulation