

# 炉内喷钙脱硫实验研究

姚洪 周建平 范耀国 徐涛 徐明厚 袁建伟 曾汉才

(华中理工大学煤燃烧国家重点实验室)

**摘要** 本文讨论了炉内喷钙脱硫工况条件下,  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放的影响因素。实验表明,  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放与炉内温度、 $\text{Ca/S}$  脱硫剂细度、煤种、过剩空气系数等有密切关系。另外还分析了不同煤种在不同钙硫比下对结渣、粘污、灰负荷、飞灰含碳量、比电阻等的影响。

**关键词** 脱硫率 结渣 粘污 钙硫化 除尘器

**分类号** TK224

## 0 前言

在煤粉炉内喷钙脱硫中, 脱硫过程与降低氮氧化物往往是相互矛盾的, 而且对于不同的煤种喷钙对  $\text{NO}_x$  的影响也不尽相同等, 往往难以同时降低二者的排放水平。另外, 炉内喷钙脱硫对锅炉的影响还有待进一步研究 (如结渣、积灰、磨损和除尘器等)。

种煤 (表 1), 实验用的脱硫剂为某地的石灰石, 主要成为  $\text{CaCO}_3$  (88.33%),  $\text{CaO}$  (0.25%),  $\text{MgO}$  (3.4%) 颗粒尺寸  $< 74 \mu\text{m}$

## 2 实验结果及分析

### 2.1 $\text{SO}_2$ 排放的影响因素

#### 2.1.1 温度的影响

图 2 是沙市煤的脱硫率 ( $\text{Ca/S} = 2$ ) 随温度的变化曲线, 实验温度范围  $1000 \sim 1300^\circ\text{C}$ 。从图中可以看出, 脱硫率对温度是比较敏感的。温度较低时, 煤中的硫分析出速率也低一些, 固硫反应速度相对来说也小一些; 温度过高时, 由于氧化钙的高温烧结而降低活性, 而且温度大于  $1200^\circ\text{C}$  后, 固硫产物  $\text{CaSO}_4$  开始分解, 脱硫率也不高。因此存在一个最佳的脱硫温度。在本实验中为  $1100^\circ\text{C}$  左右。

#### 2.1.2 $\text{Ca/S}$ 的影响

图 3 是沙市煤, 温度在  $1200^\circ\text{C}$  时脱硫率和钙利用率随加入的脱硫剂数量 ( $\text{Ca/S}$ ) 之间的关系。随着  $\text{Ca/S}$  增加, 脱硫率是增加的, 但是  $\text{Ca/S}$  越大, 脱硫率的增加越不显著。钙利用率是随  $\text{Ca/S}$  的增加而减小的。

#### 2.1.3 脱硫剂细度的影响

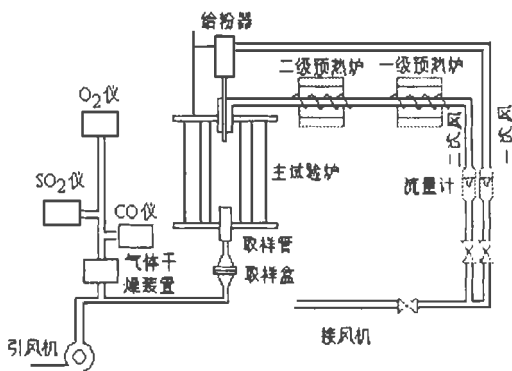


图 1 实验装置示意图

## 1 实验

实验是在一滴管炉上进行的 (图 1) 试验用四

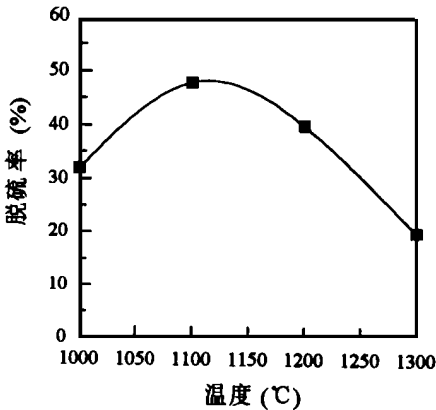


图 2 沙市煤脱硫率随温度变化曲线

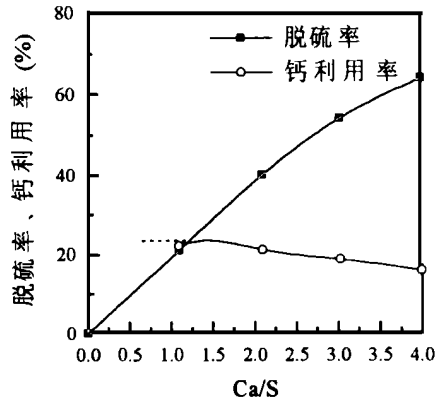


图 3 沙市煤脱硫率和钙利用率变化图

表 2 是沙市煤温度为 1200°C, Ca/S= 2 时, 三种不同粒径的煅烧石灰石脱硫性能比较。脱硫剂的粒径越小, 其比表面积越大, 对气—固反应也越有利, 脱硫效率因此也越高。但当粒径过分小时, 由于 CaO

内部细孔被脱硫产物 CaSO<sub>4</sub> 所堵塞, 脱硫效率反而有所降低。本实验中, 粒径相对来说还是比较大的, 因此脱硫效率随粒径的减小有所增加。

表 1 煤的分析数据

| 煤种 | N <sup>f</sup> | S <sup>f</sup> | W <sup>f</sup> | A <sup>f</sup> | V <sup>f</sup> | FC <sup>f</sup> |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 沙市 | 1.18           | 3.62           | 0.92           | 34.07          | 19.17          | 45.84           |
| 青山 | 0.95           | 0.7            | 2.03           | 31.36          | 17.49          | 49.12           |
| 黄石 | 0.77           | 1.76           | 1.56           | 41.80          | 8.43           | 48.21           |
| 合山 | 0.42           | 4.52           | 2.90           | 49.56          | 10.70          | 36.84           |

表 2 不同粒径煅烧石灰石对 SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 的影响

| 粒径, μm                | 150—300 | 75—150 | < 75 |
|-----------------------|---------|--------|------|
| SO <sub>2</sub> , ppm | 961     | 855    | 781  |
| 脱硫效率, %               | 21.7    | 30.4   | 36.4 |
| NO <sub>x</sub> , ppm | 336     | 342    | 353  |

### 2.1.4 煤种的影响

煤种对 SO<sub>2</sub> 排放的影响主要是煤中硫的含量。高硫分的煤, 由于烟气中的 SO<sub>2</sub> 浓度高, 能加快 SO<sub>2</sub> 向 CaO 表面的扩散, 提高固硫反应的速度和程度, 使 CaO 更快更多地转化为 CaSO<sub>4</sub>, 因而脱硫效率和钙利用率都比低硫煤要高。图 4 是四种煤在不同 Ca/S 下的脱硫效率曲线。从图中可以清楚地看到, 相同

Ca/S 下, 脱硫效率高低顺序依次为: 合山煤 > 沙市煤 > 黄石煤 > 青山煤, 这与四种煤中硫的含量是一致的。

### 2.1.5 过剩空气系数的影响

图 5 是青山煤在不同过量空气系数下的试验结果。其中炉温为 1200°C, Ca/S= 2 由该图我们可以看出脱硫效率是随 α 的增加而增加。这主要是由于 α 增大时, O<sub>2</sub> 浓度增加, 煤中硫转变为 SO<sub>2</sub> 的量增多, SO<sub>2</sub> 和 CaO 的反应更充分, 脱硫效率因而越高。

## 2.2 炉内喷钙脱硫时对 NO<sub>x</sub> 的影响

炉内喷钙后对 NO<sub>x</sub> 排放的影响比较复杂, 除了煤本身的挥发分、氮含量对 NO<sub>x</sub> 的排放有影响外, 喷入煅烧石灰石后, 由于钙基物质具有很强的催化作用, 这种关系就更加复杂了。从图 6 中可以看出,

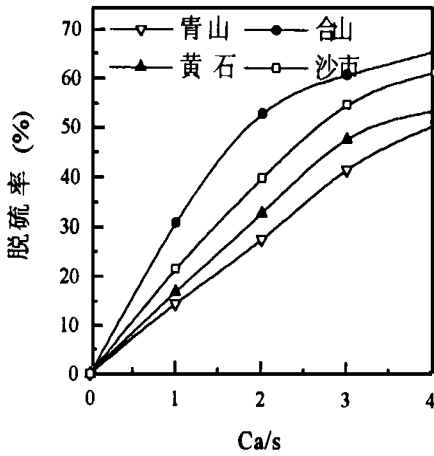


图 4 不同煤种脱硫率随钙硫比变化

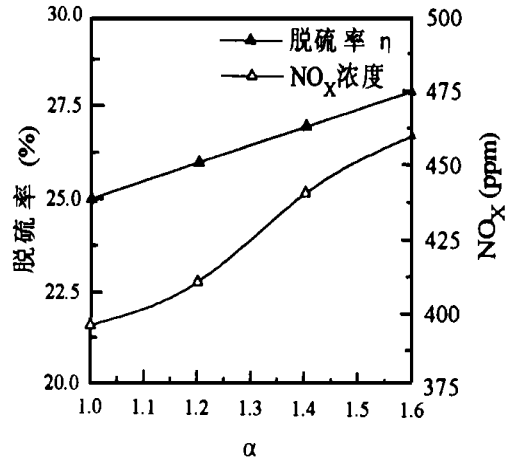


图 5 青山煤脱硫率和 NO<sub>x</sub> 随 α 变化图

对于沙市煤而言，喷入煅烧石灰石后，NO<sub>x</sub> 的浓度有明显的增加。对于青山煤而言，也有相同的结果，只是增加的幅度没有沙市煤明显。然而对于黄石煤和合山煤，却得到截然不同的结论。从图 6 可以看出，尽管合山煤由于过剩空气系数取得比较大，因此 NO<sub>x</sub> 初始浓度也比较大，但随着 Ca/S 的增加，NO<sub>x</sub> 的浓度降低；黄石煤随着 Ca/S 的增加，NO<sub>x</sub> 的浓度也是降低的，但降低的幅度没有合山煤显著。对高挥发分的青山煤 ( $V^r = 30\%$ ) 和沙市煤 ( $V^r = 26\%$ )，CaO 对 NH<sub>3</sub> 转化成 NO 有强烈的催化作用，只是由于含硫量不一样，在相同的 Ca/S 的情况下，加入的 CaO 数量也不一样，因此 NO<sub>x</sub> 增加的幅度也不同。对于某些低挥发分的燃料，国外一些学者发现加入石灰石后，NO<sub>x</sub> 的排放量不变甚至有些是下降的。这与我们的黄石贫煤和合山煤的试验结果是相吻合的。至于合山煤，虽然  $V^r$  为 22%，但灰分高达 50%，灰分阻碍了挥发分的析出，燃烧特性实属贫煤。我们分析其中的原因主要有三个：其一，由于挥发分不同，挥发分中主要的氮化合物 HCN 和 NH<sub>3</sub> 的比例也不同。挥发分越低，NH<sub>3</sub> 也越少，转化成 NO 的量也少一些；其二，由于合山煤硫含量高，而固硫反应是耗氧反应，喷钙后消耗的氧基团也多一些，减少了部分 N 向 NO 的转变；其三，由于合山煤和黄石煤中灰分很高，燃烧不充分，烟气中 CO 浓度和灰中含碳量均很高。这样的 CaO 的催化作用下 NO 被大量还原成 N<sub>2</sub>，而且是焦炭表面也能还原已有的 NO 使其转化成 N<sub>2</sub>。

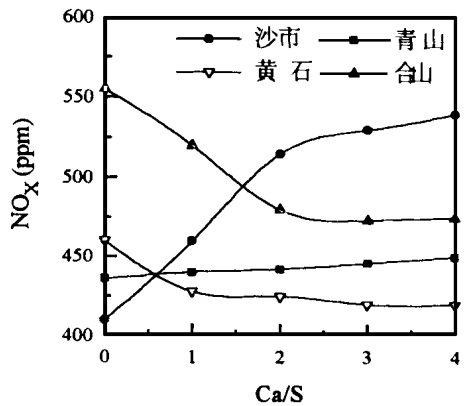


图 6 不同煤种 NO<sub>x</sub> 喷钙后的变化图

### 2. 3 喷钙后对结渣和粘污的影响

煤的灰渣特性对锅炉机组的经济运行有很大的影响。添加钙基吸着剂脱硫后使灰中 CaO 的含量增加 (CaO 的熔点较低)，引起灰成分的变化，从而对炉膛受热面的结渣和粘污产生影响。我们对黄石、青山和沙市煤在 1200℃ 时的灰样进行了灰成份分析，并用灰熔点  $T_2$ 、 $SiO_2/Al_2O_3$ 、硅比  $G = SiO_2 \times 100 / (SiO_2 + CaO + MgO + Fe_2O_3)$ 、碱酸比  $B/A = (Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O) / (Al_2O_3 + SiO_2 + TiO_2)$ 、 $R_s = B/A \cdot S$ 。综合判别指数  $R = 1.273B/A + 0.282SiO_2/Al_2O_3 - 0.0023T_2 - 0.0189G + 5.412$  进行了判别如下表所示。

从表中我们可以看出，加入 CaO 以后，高硫煤 (合山、沙市) 结渣和粘污倾向变为严重，而低硫煤 (青山) 变化没有高硫大。沙市煤在不同的钙硫比下  $T_2$  的变化先是减少后增大。

| 煤种 | $T_2$ (°C) | SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | G         | B/A       | Rs       | R        |
|----|------------|--|-----------|-----------|----------|----------|
| 沙市 | Ca/S= 0    | 1.80 (轻)   | 73.21 (中) | 0.257 (中) | 0.95 (中) | 1.93 (中) |
|    | Ca/S= 1    | 1.53 (轻)   | 62.54 (重) | 0.382 (中) | 1.41 (中) | 2.33 (中) |
|    | Ca/S= 2    | 1.45 (轻)   | 51.35 (重) | 0.574 (重) | 2.11 (重) | 2.76 (重) |
|    | Ca/S= 3    | 1.27 (轻)   | 44.02 (重) | 0.724 (重) | 2.66 (重) | 2.96 (重) |
| 合山 | Ca/S= 0    | 1.58 (轻)   | 79.81 (轻) | 0.187 (轻) | 0.94 (轻) | 1.29 (轻) |
|    | Ca/S= 2    | 1.39 (轻)   | 60.02 (重) | 0.414 (重) | 2.07 (重) | 2.15 (重) |
| 青山 | Ca/S= 0    | 2.03 (轻)   | 85.27 (轻) | 0.140 (轻) | 0.10 (轻) | 1.32 (轻) |
|    | Ca/S= 2    | 2.01 (轻)   | 76.23 (中) | 0.24 (中)  | 0.17 (轻) | 1.91 (中) |

2.4 灰负荷的影响

通过两种灰量差别不大的沙市和山煤在不同的钙硫比下灰负荷的变化如表 3 示。

灰负荷影响到炉内传热、受热面的积灰和磨损。

表 3 灰负荷变化 (单位:  $10^{-5}$  kg/kJ)

| 煤种 | Ca/S= 0 | Ca/S= 1 | Ca/S= 2 | Ca/S= 3 | Ca/S= 4 |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 青山 | 1.35    | 1.43    | 1.51    | 1.60    | 1.66    |
| 沙市 | 1.48    | 1.93    | 2.36    | 2.78    | 3.15    |

从表中可以看出,由于硫含量的不同,既使原煤中的灰分差别不大,在相同 Ca/S 下高硫煤(如沙市)煤灰负荷的增长大大高于低硫煤(如青山煤)。喷钙后灰负荷的增加主要与煤的含硫量、脱硫率和钙利用

率等有关。随着灰负荷增加,灰浓度也相应增大,随煤种不同增大的幅度与负荷的增加有相似的结果,如表 4 示。

表 4 灰浓度变化 (单位:  $10^{-2}$  kg/Nm<sup>3</sup>)

| 煤种 | Ca/S= 0 | Ca/S= 1 | Ca/S= 2 | Ca/S= 3 | Ca/S= 4 |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 青山 | 4.71    | 4.97    | 5.23    | 5.52    | 5.73    |
| 沙市 | 5.17    | 6.68    | 8.13    | 9.56    | 10.81   |

2.5 比电阻的影响

通过对青山、合山和沙市煤在不同钙硫化脱硫后的灰样进行分析,发现喷钙后灰的比电阻增加 3~5 个数量级,这与国外的报道是一致的。具体值见表 5

表 5 灰比电阻变化 (单位:  $\Omega \cdot \text{cm}$ )

| 煤种 | Ca/S= 0               | Ca/S= 1               | Ca/S= 2               |
|----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 青山 | $4.97 \times 10^{11}$ |                       | $1.32 \times 10^{14}$ |
| 沙市 | $7.47 \times 10^9$    | $2.09 \times 10^{13}$ |                       |
| 合山 | $2.84 \times 10^9$    |                       | $1.50 \times 10^{14}$ |

3 结论

(1) 炉内喷钙对 SO<sub>2</sub> 排放的主要因素有: 温度、钙硫比、煤的含硫量、脱硫剂粒径和过量空气系数等。

(2) 喷钙后对 NO<sub>x</sub> 排放的因素有: 煤种、温度、钙硫比和过量空气系数等。

(3) 一般而言。喷钙后结渣和粘污朝着加重的方向发展,但高硫煤较低硫煤严重,不同煤种也有差别。

(4) 原煤中灰分相同,但喷钙后高硫煤的灰负荷和灰浓度增加幅度远远大于低硫煤,在 Ca/S= 3 时增加到原来的 2 倍以上。

(5) 喷钙后灰的比电阻增加 3-5 个数量级。

NH<sub>3</sub> oxidation over CaO based sorbents during sulphation. Proc. 12th Int. Conf. on FBC, 1993, pp 1093 - 1100.

### 参考文献

- 侯栋岐、祝捷等. 电站锅炉炉膛射钙基吸着剂烟气脱硫技术. 电站系统工程, 1991, (1)
- Lin W., Johnsson J.E., Dam-Johansen K and van den Bleek C.M. Interactions between NO<sub>x</sub> emission and desulphurization in FBC—a laboratory study of catalytic

- Gooch J.P. etc. (马洁梅译). 炉内燃烧脱硫对除尘器性能的影响及其改进措施. 热力发电译丛, 1989, (4)
- Lyngfelt A and Leckner B. Sulphur capture in fluidized bed boilers—the effect of reductive decomposition of Ca-SO<sub>4</sub>. Chem. Engng J. Vol. 40, 1989, pp59-69.

(渠源 编辑)

## 新型过滤器

据 Diesel & Gas Turbine Worldwide” 1996年 12月号报道, 美国明尼苏达州明尼阿波利斯市的 Donaldson 公司推出一种用于燃气轮机的高性能轻量化板式过滤器。新的 DZ2000 过滤器结合了改进的过滤介质组装技术, 以便提供比普通板式过滤器更高的集尘能力并增加过滤效果。

DZ2000 过滤器利用了已在许多产品应用中得到证实的 Donaldson 的 Spider-Web 过滤介质。Spider-Web 介质包括专利的超微合成纤维基体, 具有高的透气性和很小的流动阻力。小的孔隙尺寸和大量纤维被设计成通过拦截不足 2 $\mu$ m 的微粒来有效地截获尘粒。

介质的组装如同介质本身一样重要。不是打褶布置, DZ2000 过滤介质被排列成成形槽, 一端敞开, 另一端密封。进口和出口槽相互邻近布置, 其形式类似波纹盒。

为了满足用户的要求, 提供有二种型号的 DZ2000 板式过滤器。一种被设计成正面安装到过滤系统的支承框架上, 另一种被设计成通过支承框架伸出并插入清洁空气室。

过滤器框架是用耐用塑料构成的, 过滤器介质组装方法不需要用金属网来保持介质就位。这种设计就消除了湿或含盐空气环境中腐蚀的可能性, 也使 DZ2000 过滤器重量减轻并易于在现场装拆。

(思娟 供稿)

### 电站管理

## 火电站先进计算机管理系统的开发

据“火力原子力发电” 1997年 1月号报道, 日本东北电力公司和东芝公司联合开发了用于火电站的先进的计算机管理系统。

详细介绍了该管理系统的构成及其职能。这些职能包括电站综合管理、业务管理 (发电实绩、环境实绩管理、办公自动化)、保守支援、设备经历管理、倾向管理、设备诊断、运转监视和控制、设备诊断、维护计划的制定等。

该系统在东北电力公司火电站的运行表明, 系统工作性能良好, 促进了电站有效的运行和维护。

(思娟 供稿)

**Air Preheaters in Utility Boilers** [刊,中] / Yan Weiping, Shan Wei, Jiang Ping (Northeast Electric Power University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 416~ 418

An investigation and study of the operation of heat pipe air preheaters in some utility boilers and the thermodynamic calculation results of various schemes involving the replacement of a low-temperature pipe air preheater by a heat pipe preheater for a 200 MW coal-fired boiler have shown that the installation of a heat pipe air preheater for a drastic reduction of exhaust gas temperature is very irrational from technical and economic viewpoints. This paper also presents methods for justifying the adoption of various modification decisions. **Key words** boiler, heat pipe type air preheater, economic analysis

**引射器特性的实验研究和理论分析 = Experimental Study and Theoretical Analysis of an Ejector Behavior**

[刊,中] / Li Xueliang, Yang Ruichang (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 419~ 423

On the basis of an experimental study the behavior of an ejector is analysed and studied. Furthermore, the calculation method of flow characteristics for an ejector-mounted circuit system is given, which has practical value in engineering applications. **Key words** ejector, hydrodynamic characteristics, experimental study, theoretical analysis

**炉内喷钙脱硫实验研究 = Experimental Study of Limestone Desulphurization in Pulverized Coal-fired Boilers**

[刊,中] / Yao Hong, Zhou Jianping, et al (Central China University of Science and Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 424~ 428

The influencing factors of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions are discussed under the conditions of limestone desulphurization in pulverized coal-fired boilers. The test results show that the SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions are heavily dependent on such factors as furnace temperature, Ca/S, sorbent particle size, coal type, excess air coefficient, etc. Also studied in this paper is the effect of various types of coal under different Ca/S ratios on slagging, fouling, ash load, fly ash carbon content and specific electrical resistance. **Key words** desulphurization ratio, slagging, fouling, Ca/S ratio, electrical precipitator

**S1A-02燃气轮机箱装体隔声设计与试验研究 = The Acoustic Design and Experimental Study of a S1A-02 Gas Turbine Package**

[刊,中] / Wang Xu, Tian Yuchun, Liu Jiancheng (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 429~ 433

Based on the analysis of S1A-02 gas turbine noise and frequency spectra the authors have provided the related acoustic design parameters for the S1A-02 gas turbine package. The operation test has shown that the said package features a good sound-isolation performance, which approaches the world advanced level of sound-proof quality of gas turbine packages. **Key words** gas turbine, package, noise, frequency spectrum

**核蒸汽轮机系统数模混合实时仿真 = The Hybrid Real-time Simulation of a Nuclear Steam Turbine System**

[刊,中] / Yu Mingyi, Huang Shanheng, Weng Shilie (Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 434~ 437

This paper describes a mathematical model and a hybrid digital/analog real-time simulation model for the analysis of a nuclear submarine plant steam turbine system. With the effect of moisture separator volume inertia and thermal inertia on the system being taken into account a real-time simulation of the dynamic behavior of nuclear steam turbine system was conducted on a Dornier 960 hybrid simulation system. **Key words** nuclear