

添加 CaO 对煤粉燃烧后一次颗粒物特性影响的研究

吕建燧, 李定凯

(清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 研究煤粉添加 CaO 3% (wt) 与否对燃烧后一次颗粒物特性的影响。以沉降炉作为燃烧设备, 燃烧温度 1 100 °C、氧化气氛下, 用 8 级安德森粒子撞击器分离并收集燃烧后的颗粒物样品。从颗粒粒度分布来看, 煤粉添加 CaO 减少了一次颗粒物中细粒子的相对量。以 Rosin-Rammler 分布函数对粒度分布曲线进行拟合, 得到了很好的拟合性质。从排放特性来看, 添加 CaO 降低了 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 的排放量。SEM 图像也显示, 添加 CaO 后生成的颗粒物有凝聚聚结的颗粒聚团。ICP-AES 分析结果表明, Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 等重金属元素的含量随颗粒粒径减小而增大; 而且煤粉添加 CaO 燃烧后, 颗粒物中重金属元素的含量有所降低。

关 键 词: 煤粉燃烧; 颗粒物; 排放特性; 重金属; 添加剂

中图分类号: TK16; X513 文献标识码: A

1 前 言

煤粉在燃烧并形成一次颗粒物的过程中, 由于形成机理不同, 会产生大于 1 μm 的超微米颗粒和小于 1 μm 的亚微米颗粒。超微米颗粒一般可由除尘设备脱除, 而亚微米颗粒却不易被除尘设备捕获, 最终逃逸到大气中。亚微米颗粒由于是由蒸发-凝结的机理形成的, 富含大量的重金属元素, 并且其较大的比表面积, 易于吸附有毒有害物质^[1-3]。排放到大气中以后, 对人类的生存环境和身体健康带来了不利的影响。

目前, 通过物理或化学作用使亚微米颗粒团聚成较大颗粒再脱除已成为除尘技术研究的一个新的热点^[3]。亚微米颗粒团聚除了物理的热、电、声、光、磁等团聚技术外, 还有使用固体吸附剂捕获亚微米颗粒物的化学团聚方式。国内现在对化学团聚的研究较少, 国外在这方面的研究也主要是高岭石、铝土矿、石灰石、熟石灰等常用吸附剂对亚微米颗粒物团聚的影响作用。另外, 在煤粉燃烧中添加吸附剂来

捕获痕量重金属也是一项有前景的技术。Chen 等人实验研究了不同条件下不同吸附剂对重金属元素 Pb、Cu、Cr、Cd 的吸附效率^[4]。Gullett 等人研究了在燃烧室中喷入吸附剂对重金属元素 As、Cd、Pb 等的排放影响^[5]。Cheng 等人研究了燃煤过程中不同吸附剂 (CaSO₄、高岭土、石灰石和铝土矿) 对有害物质的脱除^[6]。本研究在煤粉中加入了 3% (wt) 的 CaO, 研究添加 CaO 与否对煤粉燃烧后一次颗粒物的粒度分布, PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 的排放特性, 样品外观形貌以及特定痕量重金属元素的脱除作用等影响。

2 实 验

2.1 实验煤粉的特性

实验煤粉取自保定电厂。在实验室中利用磨煤机将煤粉磨制为 R₉₀ 为 11.87%, 煤粉样品的粒径分析结果由激光粒度分析仪给出。煤粉工业分析的结果是: 水分 1.2%, 灰分 36.12%, 挥发份 12.34%, 固定碳 50.34%; 元素分析 (空干基) 的结果是 C: 47.7%, H: 2.37%, N: 0.79%, O+S: 11.82%。为了研究添加剂对煤粉生成的一次颗粒物的影响, 将煤粉分成两部分, 将一部分煤粉添加 3% (wt) 的平均粒径约 3 μm 的 CaO, 分别在沉降炉中燃烧和采样。为方便起见, 未添加和添加 CaO 的情况分别简称为“A”和“J”。

2.2 实验系统

本研究中采用的实验系统在文献[7~8]中有详细介绍。套管式层流沉降炉作为煤粉燃烧的设备。煤粉在一次风作用下经微量给粉装置送入沉降炉燃烧。一、二次风供给燃烧所需的空气, 炉温 1 100 °C, 炉内采用氧化性气氛。燃烧后的飞灰颗粒经套管式取样枪冷却, 并经空气再冷却和稀释后, 用 8 级

收稿日期: 2005-12-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金资助项目 (2002CB211600)

作者简介: 吕建燧 (1972-) 男, 宁夏中卫人, 清华大学博士研究生, 现在华北电力大学工作, 讲师。

Andersen 粒子撞击器采集并分离。Andersen 粒子撞击器装有预分离器,在给定实验条件下预分离器可以分离出粒径大于 13.6 μm 的颗粒物。

2.3 样品处理

煤粉燃烧后的灰颗粒物经预分离器后,最终将较细的颗粒分级并收集在 8 级滤膜上(共 9 级,第一级不装滤膜,用于分布气流)。实验前,将滤膜烘干称重。另外准备 8 个称重瓶刷洗干净,烘干称重。采样后,将 8 级滤膜及金属底盘上的样品分别装入不同的称重瓶中,再烘干称重,得到每一级上颗粒物的重量。根据燃烧工况和采样条件,分级后从第二级~第九级的颗粒物粒径为: > 9.4 μm、6.4 ~ 9.4 μm、4.3 ~ 6.4 μm、2.8 ~ 4.3 μm、1.4 ~ 2.8 μm、0.87 ~ 1.4 μm、0.59 ~ 0.87 μm、0 ~ 0.59 μm。由粒径分级看出,Andersen 粒子撞击器采集到的一次颗粒物的粒径大约都在 10 μm 以下,属于可吸入颗粒物。

3 结果和讨论

3.1 添加剂对一次颗粒物粒度分布的影响

将 8 级滤膜上收集的颗粒物样品称重,总重量为 M_t 。将每一级滤膜上样品的重量 M_i 与 M_t 相比后,对应滤膜分级的粒径范围,得到一次颗粒物粒度分布关系,如图 1 所示。由图看出,A 曲线和 J 曲线是两条近乎平行的曲线,在颗粒粒径约 4.3 ~ 6.4 μm 处有交叉点。在交叉点的左侧,J 曲线位于 A 曲线的下方,即 J 的颗粒物粒径在 0 ~ 4.3 μm 分布的 5 级样品中,相应的部分所占的份额要较 A 的为小;在交叉点右侧,J 曲线位于 A 曲线的上方,即颗粒物粒径在 4.3 ~ 13.6 μm 范围内的 3 级样品中,J 比 A 的相应的部分所占的份额要大。说明在煤粉中添加 CaO 燃烧后,粒径较小的颗粒物的量减少了,粒径较大的颗粒物的量增大了。CaO 对小粒径的颗粒物的生成有抑制或凝并作用,使颗粒物粒径

变大。对安德森粒子撞击器预分离器中的粒径大于 13.6 μm 的样品称重,A 和 J 该部分样品重量分别占到了样品总重量的 94.13% 和 94.88%,也说明煤粉添加 CaO 燃烧后,增大了粒径较大的颗粒物的相对份额,CaO 促进了颗粒物的团聚和凝并。

Linak 等人在一座小型的旋流燃烧器中进行吸附剂团聚有害金属元素的研究中提出^[9],高于元素蒸气凝结的露点温度的燃烧温度下脱除有害金属颗粒物有两种机理:一种是金属蒸汽与吸附剂多孔表面之间发生发应;另一种是金属颗粒在吸附剂表面形成熔融物而导致团聚现象的发生。CaO 是钙基吸附剂中常用的添加剂,具有较大的表面积。在燃烧过程中,金属元素的蒸汽扩散到 CaO 表面被 CaO 吸附或发生化学反应,同时 CaO 也为温度下降后凝结成固态颗粒的金属元素提供了附着的场所,减少和降低了亚微米核态粒子形成的机会和数量。另外,大量的 PM_{2.5} 颗粒在扩散作用和范德华力的作用下与 CaO 接触、粘连、碰撞、凝并,附着和沉积到 CaO 的内表面和外表面,使得颗粒物的粒度增大,这与图 1 所示的实验结果相一致。表明在燃烧过程中,CaO 对颗粒物的团聚凝并起到了作用。

3.2 Rosin-Rammler 分布函数曲线拟合

Rosin-Rammler(罗辛-拉姆勒)分布函数,简称 R-R 分布,是国内外用以描述粉尘粒径分布最广泛的分布函数。其表达式为:

$$R = 100 \exp(-\alpha \delta^\beta)$$

式中: R —粉尘重量筛上累计分布,%; δ —粉尘颗粒粒径,μm; α, β —待定系数。也可以以粉尘重量筛下累计分布 D 来表示, %:

$$D = 100 - R = 100(1 - \exp(-\alpha \delta^\beta))$$

根据图 1 中的粒径-质量对应的关系,进行归一化处理,得到待定参数 α, β 和相关系数 γ^2 ,各参数列于表 1 中。用 R-R 分布函数进行曲线拟合,如图 2 所示。通过相关系数 γ^2 和图 2 来看, γ^2 均在 0.985 以上,两种曲线都有很好的拟合性质。说明,煤粉中添加与未添加 CaO 燃烧后的一次颗粒物的分布均符合 R-R 分布函数。由此,可以通过拟合的 R-R 分布函数计算和预测某一粒径颗粒物的质量筛下累计分布值。

表 1 R-R 分布中的参数及估算出的 PM₁/PM_{2.5}、PM_{2.5}/PM₁₀ 值

	α	β	γ^2	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM ₁ /PM _{2.5}
A	0.080 9	1.910 2	0.985 0	0.373	0.209
J	0.056 8	2.092 4	0.988 4	0.321	0.172

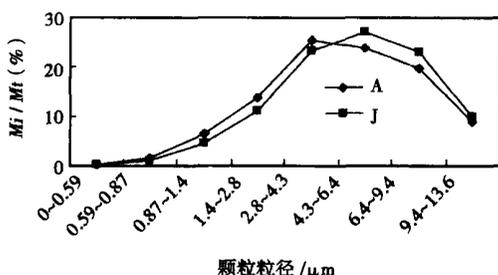


图 1 颗粒粒度分布图

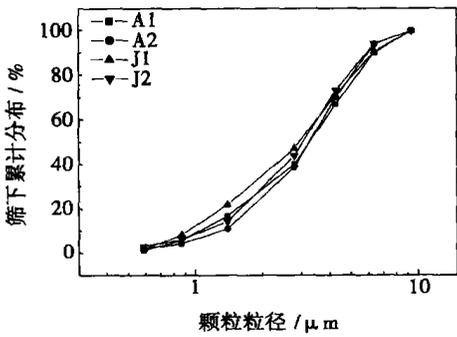


图 2 颗粒物筛下累计分布的拟合曲线 (1 为实验值, 2 为拟合值)

3.3 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 的排放特性

为了符合常用的描述颗粒物的 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 的概念, 文中将实验所得的 9.4 μm 以下的颗粒物近似表示为 PM₁₀, 2.8 μm 以下的颗粒物表示为 PM_{2.5}, 1.4 μm 以下的颗粒物表示为 PM₁。将 Andersen 粒子撞击器预分离器中以及所有滤膜上收集的样品汇总, 得到燃烧后的总灰量 M, 将两种条件下燃烧后的 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 的重量与总灰量相比, 即 PM_i/M, 得到相应的 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 的排放情况如图 3 所示。由图看出, J 情况下排放的 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 都有不同程度的降低, 比 A 情况下分别减少了 0.47%、0.38% 和 0.18%。说明 CaO 对颗粒物的凝并和团聚起到了促进作用。

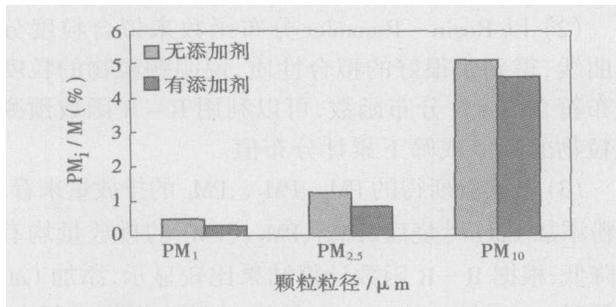
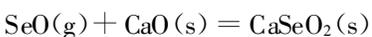
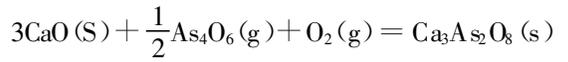


图 3 添加 CaO 对颗粒物排放的影响

CaO 是钙基吸附剂中常用的添加剂。CaO 不仅能除去热烟气中的气体硫化物, 而且具有较强的吸附 Se、As 的能力。Se、As 属于易挥发物质, 在较低的温度下就蒸发, 以气相形式存在。CaO 捕获 Se 的机理为^[10]:



CaO 还是 As 吸附的活性位。主要的化学吸附的机理是^[11]



因此, 在燃烧过程中, 易挥发物质的蒸汽扩散到 CaO 表面被 CaO 吸附或发生化学反应, 同时 CaO 也为温度下降后均相凝结生成的固态颗粒提供了附着的场所, 减少和降低了亚微米核态粒子形成的机会和数量。

另外, 由表 1 所示的根据 R-R 分布函数计算的结果也可看出, J 和 A 相比, PM_{2.5}/PM₁₀、PM₁/PM_{2.5} 的值均降低, 表明在燃烧过程中, CaO 对细小颗粒物的团聚、凝并起到了促进作用。

3.4 颗粒物的外观形貌和组成分析

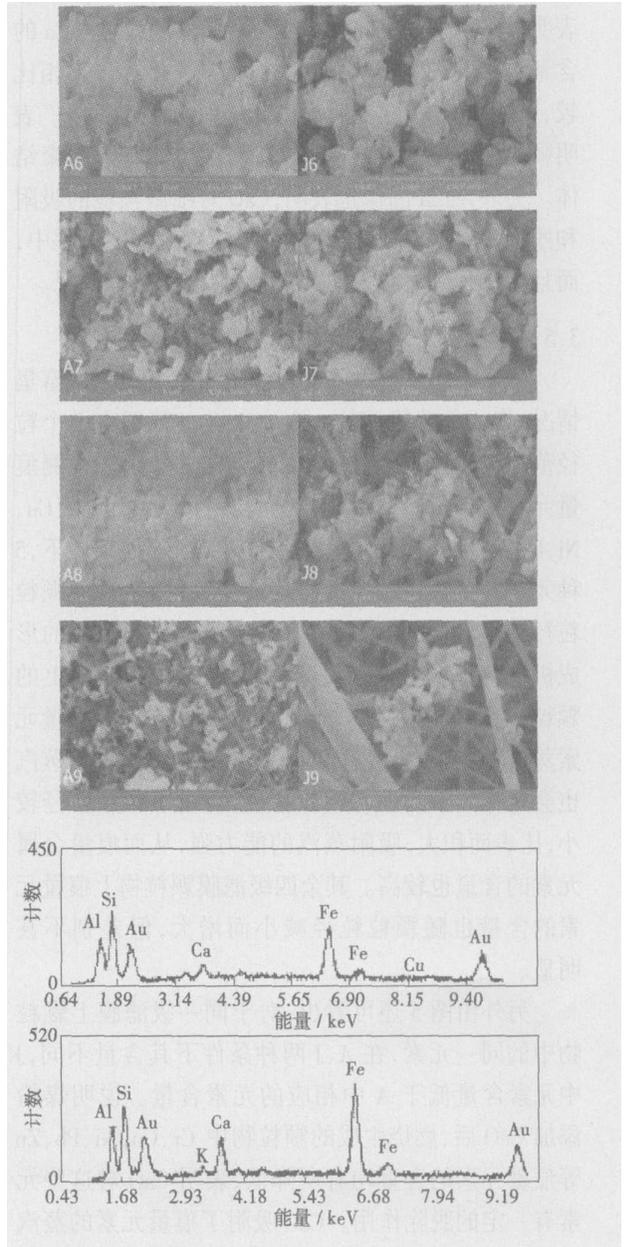


图 4 颗粒物 SEM 和 EDX 分析 (A6、J6 图像 EDX 分析结果)

扫描电镜(SEM)及其分析附件能谱分析(EDX)是确定细微颗粒物外观形貌和组成的常用分析手段。A和J末四级的颗粒物的SEM图像示于图4中。由考察的4级样品的形貌来看,J的颗粒均是由球形颗粒和不规则细微颗粒聚合在一起形成的聚团。与A的颗粒物的图像比较来看,颗粒不是简单堆积在一起,而是凝并形成块状的整体。并且在J8、J9的图像中没有观察到A8、A9所呈现出的由元素蒸汽凝结后形成的絮状体颗粒物,说明CaO对元素蒸汽有吸附作用,或者发生了表面化学反应,减少了蒸汽的凝结。另外,对A6和J6的EDX分析结果表明,J中颗粒聚团的成份除了Al、Si、Fe之外,Ca的含量也很高,如图4所示。与A中Ca的含量相比较,J中Ca的峰值要明显高于A中Ca的峰值。表明颗粒聚团是由CaO颗粒吸附、粘结在一起的聚结体。另外,SEM图像也表明,CaO对细微颗粒的吸附和团聚,不仅发生在煤粉燃烧形成颗粒物的过程中,而且在沉积到滤膜上时,也有凝并和团聚的情况。

3.5 重金属元素在颗粒物上的富集规律

为了考察不同粒径颗粒物上重金属元素的富集情况,将A、J分级后的a、b、c、d、e+f滤膜上5个粒径范围内的颗粒物借助于ICP-AES分别来检测痕量元素的含量。图5列出了A和J条件下Cr、Cu、Ni、Pb、Zn的检测结果。由图看出,在两种条件下,5种元素的含量随粒径减小均成增大的趋势,即颗粒粒径越小,重金属元素的含量越高。这与颗粒的形成机理及比表面积有关^[12]。对于e+f级滤膜上的颗粒,粒径范围为0.87~2.8 μm,其中包含有痕量元素蒸汽均相凝结后形成的亚微米颗粒物;另外,蒸汽也会异相凝结到已有颗粒物表面,由于颗粒粒径较小,比表面积大,吸附蒸汽的能力强,从而痕量金属元素的含量也较高。其余四级滤膜颗粒物上痕量元素的含量也随颗粒粒径减小而增大,但差别不甚明显。

另外由图5还可看出,对于同一级滤膜上颗粒物中的同一元素,在A、J两种条件下其含量不同,J中元素含量低于A中相应的元素含量。说明煤粉添加CaO后,燃烧生成的颗粒物中Cr、Cu、Ni、Pb、Zn等痕量元素的含量均有所降低,表明CaO对这些元素有一定的脱除作用。CaO吸附了痕量元素的蒸汽或含有这些元素的颗粒后,在凝并聚结长大后,被预分离器除去,降低了滤膜上收集的可吸入颗粒物上痕量元素的含量,所以呈现了图5所示的结果。

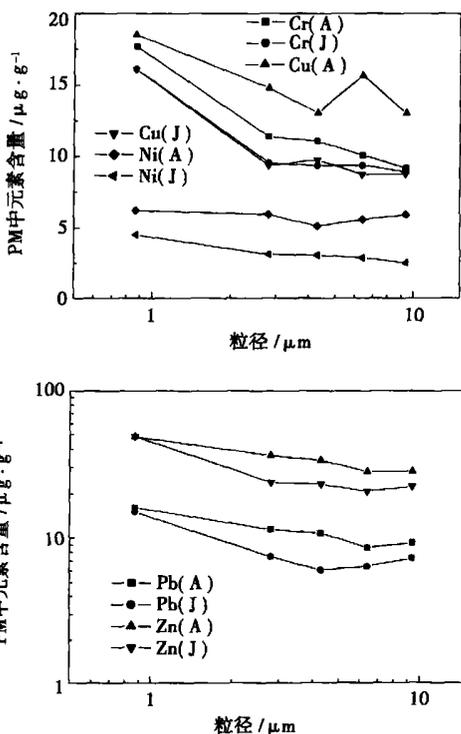


图5 不同重金属元素在不同粒径PM中的含量

4 结 论

(1) 从颗粒物粒度分布曲线来看,煤粉添加CaO燃烧后,粒径较小的颗粒物的量减少了,粒径较大的颗粒物的量增大了。说明CaO对小粒径的颗粒物的生成有抑制或凝并作用,使颗粒物粒径变大。

(2) 以Rosin-Rammler分布函数来拟合粒度分布曲线,得到了很好的拟合性质,说明颗粒物的粒度分布符合R-R分布函数,可以利用R-R函数预测颗粒物的筛上或筛下累计分布值。

(3) 从实验所得的PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁的排放量来看,煤粉添加CaO燃烧后,PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁的排放量均有所降低;根据R-R函数计算结果比较显示,添加CaO降低了PM_{2.5}/PM₁₀、PM₁/PM_{2.5}的值,表明在燃烧过程中,CaO对细小颗粒物的团聚、凝并起到了促进作用。

(4) 从形成的一次颗粒物的外观形貌来看,煤粉添加CaO燃烧生成的颗粒均是由球形颗粒和不规则细微颗粒聚合在一起形成的聚团。并且在末级滤膜上不存在有蒸汽凝结形成的絮状体颗粒物。

(5) ICP-AES分析结果表明,煤粉燃烧后,Cr、Cu、Ni、Pb、Zn等元素的含量均随粒径减小而增大。煤粉添加CaO燃烧后,降低了这些元素在颗粒物中的含量。

参考文献:

- [1] SENIOR CONSTANCE L, HELBLE JOSEPH J, SAROFIM ADEL F. Emissions of mercury, trace elements, and fine particles from stationary combustion sources [J]. *Fuel Processing Technology*, 2000, **65**: 262—288.
- [2] HUANG YAJI, JIN BAOSHENG, ZHONG ZHAOPING, *et al.* Trace elements (Mn, Cr, Pb, Se, Zn, Cd and Hg) in emissions from a pulverized coal boiler [J]. *Fuel Processing Technology*, 2004, **86**: 23—32.
- [3] 魏 凤, 张军营, 王春梅, 等. 煤燃烧超细颗粒物团聚促进技术的研究进展 [J]. *煤炭转化*, 2003, **26**: 27—31.
- [4] CHEN JYHCHERNG, WEY MINGYEN, LIN YAOCHL. The adsorption of heavy metals by different sorbents under various incineration conditions [J]. *Chemosphere*, 1998, **13**: 2617—2625.
- [5] GULLETT B K, RAGHUNATHAN K. Reduction of Coal-based metal emissions by furnace sorbent injection [J]. *Energy & Fuels*, 1994(8): 1068—1074.
- [6] CHENG J F, ZENG H C, ZHANG Z H, *et al.* The effects of solid adsorbents on the emission of trace elements, SO₂, and NO_x during coal combustion [J]. *Int J Energy Res*, 2001, **25**: 1043—1052.
- [7] 吕建焘, 李定凯. 不同粒径煤粉燃烧后一次颗粒物的特性研究 [J]. *热能动力工程*, 2005, **20**(5): 513—516.
- [8] LU JIANYI, LI DING KAI. Characteristics of primary particulate matter during different size coal combustion [A]. *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Combustion* [C]. Adelaide: 2005. 141—144.
- [9] LINAK W P, SRIVASTAVA R K, WENDT J O. Sorbent capture of nickel, lead, and cadmium in a laboratory swirl flame incinerator [J]. *Combustion and Flame*, 1995, **100**: 241—250.
- [10] 刘 晶, 郑楚光, 曾汉才, 等. 固体吸附剂控制燃煤重金属排放的实验研究 [J]. *环境科学*, 2003, **24**(5): 23—27.
- [11] KEVIN C GALBREATH, CHRISTOPHER J ZYGARLICHE. Formation and chemical speciation of arsenic-, chromium-, and nickel-bearing coal combustion PM_{2.5} [J]. *Fuel Processing Technology*, 2004, **85**: 701—726.
- [12] 徐明厚, 郑楚光, 冯 荣, 等. 煤燃烧过程中痕量元素排放的研究现状 [J]. *中国电机工程学报*, 2001, **21**(10): 33—38

(辉 编辑)

新技术

升级改进燃气轮机的湿压缩系统

据《Gas Turbine World》2005年9~10月号报道, AxEnergy 能源公司最近推出了高效的湿压缩系统。利用该系统升级改进燃气轮机能增加输出功率、提高效率和减少排放。

根据燃气轮机的型式和现场条件, 采用湿压缩能使燃气轮机输出功率约增加20%, 效率提高约2%。喷雾也能减少每单位功率的 NO_x 和 CO₂ 排放。

从1999年下半年起, 由 AxEnergy 公司供应的几个湿压缩系统已被安装在电站, 增加了电厂的输出功率, 产生了明显的经济效益。

高效喷雾通过使燃气轮机内的空气过度饱和起作用, 它不同于在压缩前冷却入口空气的入口激冷, 利用喷雾, 喷入的水在各级压气机内蒸发, 而不是在第一级前蒸发。

中间冷却效应减少了压缩耗功, 增加了通过机器的质量流量并生产更多的输出功率。

高效喷雾系统关键的设计要素是喷水雾化架的布置和喷嘴, 两者都是针对燃气轮机型号和现场安装条件专门设计的。

系统的设计在仔细控制流动条件下必须提供到压气机的雾化水的均匀分布, 以便获得最大的性能收益。雾化水滴的平均直径应该小于 20 μm, 以避免对压气机叶片可能产生的破坏。

装置控制系统的修改包括补充用于喷雾系统对发动机运行条件响应的逻辑线路。唯一需要的控制调整是对喷雾橇上的 PLC 信号和电站控制系统信号之间进行调整。

(吉桂明 供稿)

Based on the distribution function of pore lengths and in combination with such parameters as specific surface area and porosity etc. A pore diameter distribution model was established for the first time for CaO product generated in the process of limestone calcination. In conjunction with experimental results, a simulation study was conducted of CaO pore distribution characteristics and their continuously evolving process when being subjected to the influence of sintering. In the course of the study, a section-by-section analysis has been made with emphasis on the pores with a diameter in the range of 0 ~ 50 Å, 50 ~ 200 Å and over 200 Å. The calculation results indicate that the contribution from the pores in three ranges of pore diameters (0 ~ 50 Å, 50 ~ 200 Å and over 200 Å) to specific surface areas in different calcination stages undergoes a continuous change. On this basis, a concept of optimum calcination rate is proposed, which will take place later with an increase in calcination temperature. **Key words:** limestone, CaO, calcination, pore diameter distribution, optimum calcination rate

添加 CaO 对煤粉燃烧后一次颗粒物特性影响的研究 = A Study of the Effect of CaO Addition on Primary Particle Characteristics after Pulverized Coal Combustion [刊, 汉] / LU Jian-yi, LI Ding-kai (Education Ministry Key Laboratory on Thermal Sciences and Power Engineering under Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 373 ~ 377

A study is made of the effect of CaO addition (3wt%) to pulverized coal on primary particle characteristics after combustion. With a sedimentation furnace serving as a combustion device under an oxidizing atmosphere and combustion temperature of 1 100 °C, sample particles after combustion were separated and collected by use of a 8-stage Anderson particle impactor. As seen from the distribution of particle diameters, the addition of CaO to the pulverized coal can reduce the relative amount of fine particles among the primary particles. When Rosin-Rammler distribution function is used to conduct fitting with a particle diameter distribution curve, a very good fitting character has been obtained. As viewed from the emission characteristics, the addition of CaO has reduced the emissions of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁. The SEM image also shows that the particles produced after an addition of CaO contain particle aggregates as a result of merging and clustering. The results of ICP-AES analysis indicate that the content of such heavy metals as Cr, Cu, Ni, Pb and Zn has increased with a decrease in particle diameters. Moreover, when pulverized coal is burned after an addition of CaO, the content of heavy metal elements in the particles has been somewhat reduced. **Key words:** pulverized coal combustion, particle, emission characteristics, heavy metal, additive

大型褐煤锅炉煤粉再燃技术的数值模拟 = Numerical Simulation of Pulverized-coal Reburning Technology for a Large-sized Lignite-fired Boiler [刊, 汉] / TANG Hao, ZHONG Bei-jing, FU Wei-biao (Aeronautics and Astronautics College under Tsing University, Beijing, China, Post Code: 100084), QIU Peng-hua (Energy Source Science and Engineering College under Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 378 ~ 382

A numerical simulation was conducted of the different combustion air-supply modes for reburning super-fine pulverized coal in an integral furnace of Yuanbaoshan Power Plant No. 3 Boiler on the basis of a dynamic model featuring coal tar NO reduction reaction and by using software Fluent. The numerical simulation results show that a variety of factors, such as the proportion of fuels being reburned, air-coal ratio in the combustion air for reburning and the size of the reburning zone etc. can exercise a major influence on combustion efficiency and NO_x emissions. An optimization calculation has revealed that when the excess air factor in the main combustion zone is controlled at 1.1, a scheme with the following characteristics, namely, the fuel being reburned accounting for 15% of the total fuel amount, coal-air ratio in the combustion air for reburning being set at 2 and the residence time of the flue gas in the reburning zone being about 0.5 s, may be considered as a comparatively well organized mode for reburning. **Key words:** pulverized coal, reburning, numerical simulation

多孔介质内往复流动超绝热燃烧的简化解 = A Simplified Solution for the Super-adiabatic Combustion of Reciprocal Flows in Porous Media [刊, 汉] / SHI Jun-rui, XIE Mao-zhao (Energy Source and Power Engineering College under Dalian University of Science and Technology, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 383 ~ 386

A simplified theoretical solution has been obtained through an analogy with stable-state reversed-flow burners followed by a comparison with experimental results. Such a solution is applicable to super-adiabatic combustion in adiabatic inertial po-