

# 燃煤超细颗粒物形成机理及其控制的研究进展

屈成锐, 赵长遂, 段伦博, 李英杰

(东南大学热能工程研究所 洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 对燃烧过程超细颗粒物形成机理及其控制技术的国内外研究现状进行了综述, 介绍了国内外开展的有关超细颗粒物形成的影响因素、形态分析、元素分析和排放控制等几方面的研究成果, 阐明了燃烧过程中超细颗粒物形成机理: 在燃烧过程中, 煤中无机物首先汽化, 然后均相成核或者冷凝在已有的细颗粒物上。预测了超细颗粒物形成机理研究、采样和分析方法及其控制技术的发展趋势, 提出目前我们应该开展超细颗粒物研究的重点和方向。

**关键词:** 燃烧; 超细颗粒物; 形成机理; 控制

中图分类号: X513

文献标识码: A

## 引言

目前颗粒物是城市大气环境的重要污染物之一, 煤燃烧产生的颗粒物是大气中细颗粒物的主要来源。煤燃烧后产生的超细颗粒物表面富集了许多痕量重金属元素, 进入大气后, 对环境危害极大。大量研究表明, 许多有毒痕量元素在超细颗粒物中明显富集, 并且随颗粒粒径的减少而增加。根据颗粒物空气动力学直径的大小定义粒径小于 10、2.5 和 1  $\mu\text{m}$  的颗粒物分别为  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_1$ 。 $\text{PM}_{10}$  能够进入人体的呼

吸系统, 称为可吸入颗粒物,  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_1$  称为超细颗粒物。现有的除尘设备对超细颗粒物的捕集效率相对较低。这部分细颗粒物有较大的数量和表面积, 吸附和富集了大量有毒的重金属元素, 这部分毒性更大的  $\text{PM}_{2.5}$  可以进入人的肺泡, 沉积在肺中被称为可入肺颗粒物。超细颗粒物不仅危害人体健康, 致病率和死亡率增加, 大气的能见度降低。基于此, 许多国家已经制定了相关的政策和法规限制颗粒物的排放, 例如: 美国、日本和澳大利亚等国已经将  $\text{PM}_{2.5}$  的排放标准纳入国家大气排放标准。目前  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_1$  已经成为人类重点关注和研究对象, 其中, 超细颗粒物的形成机理是研究的重点, 机理研究能为排放控制提供理论依据。

## 1 细颗粒物形成机理

从 20 世纪 70 年代末期开始, Flagan, R. C., Quann, J. R 等人开始对颗粒物形成机理进行研究<sup>[1~2]</sup>, 对颗粒物的形成原因作了合理的假设, 较好地解释了一些现象, 之后许多学者陆续对颗粒物形成机理进行广泛的研究。

到目前为止, 人们对燃烧过程中颗粒物的形成机理有了一些共识, 认为主要有以下 4 种机理: (1) 内在矿物质的凝并机理。当碳颗粒燃烧时, 其内部温度很高, 会引起内在矿物质熔融, 若碳颗粒不发生破碎, 熔融的内在矿物质会凝并形成相对较大的颗粒, 其直径一般大于 1  $\mu\text{m}$ , 其形成受内在矿物质的种类、尺度和分布的影响; (2) 燃烧过程中焦炭颗粒的破碎机理。焦炭破碎与其本身的孔隙结构密切相关。孔隙结构的存在是引起焦炭破碎的主要原因, 颗粒孔隙率越大, 发生破碎的概率越大。但是, 实验研究发现, 并非所有孔隙对颗粒破碎都有重大影响, 对破碎起决定作用的是颗粒中的大孔, 没有大孔, 焦炭不会破碎, 单颗焦炭就只会生成一颗灰粒。大孔越多破碎越剧烈, 生成飞灰颗粒粒径越小, 飞灰中小粒径的灰粒含量也越高。焦炭破碎是许多因素综合影响的结果, 除了大孔结构, 燃烧模式和煤种也是影响焦炭破碎的重要因素; (3) 外在矿物质的破碎机理。煤中的外在矿物质在煤燃烧过程中由于煤颗粒产生的热应力而导致破碎, 破碎产生的颗粒直径一般大于 1  $\mu\text{m}$ , 外在矿物质的数量、尺度和种类决定了外在矿物质的

收稿日期: 2007-11-26; 修订日期: 2008-01-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2006CB705806)

作者简介: 屈成锐(1970-), 男, 吉林人, 东南大学博士研究生。

破碎程度；(4)汽化和冷凝机理。亚微米颗粒物的形成是一个十分复杂的物理化学过程，在高温燃烧环境中，煤中部分无机物(0.2%~3%)首先发生气化，气化产物不断向外扩散，在焦炭边界区域遇氧发生反应。随后，无机蒸汽达到过饱和状态时，会通过均相成核形成许多细小微粒( $<0.01 \mu\text{m}$ )。颗粒通过两种途径逐渐长大：一种途径是相互碰撞的微粒发生凝并，合而为一，体积为发生碰撞的颗粒体积之和，组成是各微粒组成的混合体；另一途径就是无机蒸汽在已经形成的灰粒表面发生非均相凝结，使颗粒体积增加。在温度较低的区域，颗粒直径增长逐渐减缓，最终发生碰撞的灰粒烧结在一起形成空气动力学直径大于 $0.36 \mu\text{m}$ 的团聚物，随锅炉烟气排入大气环境中。由此可见，无机矿物的气化和随之而来的凝结是亚微米灰形成中两个重要的过程。气化和冷凝机理最初是由 Flagan, R. C 所提出的较合理假设<sup>[1]</sup>，它能很好地解释高挥发性 Na 和 K 在亚微米灰上的富集，同时也能解释低挥发性的 Si、Al、Fe、Mg 和 Ca 在亚微米灰中的存在，但是到目前还未被实验所完全证实。颗粒物形成机理如图 1 所示。

## 2 超细颗粒物形成机理的研究现状

### 2.1 超细颗粒物形成的影响因素

超细颗粒物形成的影响因素很多，主要有：燃烧温度、氧气浓度、燃烧气氛、烟气中  $\text{SO}_2$  含量、煤粉粒度、添加剂、压力和煤种等，下面对已有的研究成果分别加以介绍。

#### 2.1.1 燃烧温度的影响

煤颗粒燃烧温度对细颗粒物生成有很大的影响， $\text{PM}_{2.5}$  是由破碎聚合机理形成的，当煤粉进入温度较高的燃烧区域后较高的燃烧温度会增加颗粒内部的温度梯度导致较大的热应力颗粒较易发生破碎现象，温度越高，颗粒内部产生的温度梯度越大，颗粒越易破碎，所以，温度升高， $\text{PM}_{2.5}$  的生成量增加； $\text{PM}_1$  的排放量受煤粉中易挥发物质和难熔氧化物蒸汽量的影响，温度升高，蒸发速率加快，产生的蒸汽量越大，温度降低后凝结的亚微米颗粒物量就越多。Zhang L 和 Ninomiya Y 等人研究了煤颗粒燃烧温度对超细颗粒物( $\text{PM}_1$ )生成的影响<sup>[3]</sup>，煤颗粒燃烧温度越高，产生的  $\text{PM}_1$  越多。张军营等人在一维炉煤燃烧实验中发现<sup>[4]</sup>： $\text{PM}_{10}$ 和  $\text{PM}_{2.5}$ 的排

放量随温度升高而增多。Liu X W 等人研究了在沉降炉煤燃烧过程中发现<sup>[5]</sup>：对于  $\text{PM}_1$ ，当温度从 1 423 到 1 523 K，其含量增加很少，但是，当温度增加到 1 673 K，其含量显著增加。吕建燧和李定凯在沉降炉上研究了燃烧温度对颗粒物排放的影响<sup>[6]</sup>，得出的结论是：随着温度升高， $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_1$  的排放量均增加。

#### 2.1.2 氧气浓度的影响

Suriyawong A 等人研究了  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  气氛下煤粉燃烧形成亚微米超细颗粒物的规律<sup>[7]</sup>，得出了随  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  的比例的增大，超细颗粒物生成量增加。Liu X W 等人研究了在沉降炉煤燃烧过程中<sup>[5]</sup>，在氧气浓度为 50% 的情况下， $\text{PM}_1$  和  $\text{PM}_{1-10}$  的排放量要比氧气浓度为 20% 的情况下  $\text{PM}_1$  和  $\text{PM}_{1-10}$  的排放量要多；Buhre B J P 等人在研究氧气浓度对细颗粒物形成的影响时发现<sup>[8]</sup>：当  $\text{O}_2$  浓度从 21% 提高到 50% 后， $\text{PM}_1$  的排放量增加得出此结论(实验所用的五种煤均得出这一结论)。

#### 2.1.3 燃烧气氛的影响

Sheng C D 等人对煤粉在空气和  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  气氛下燃烧对细颗粒物形成的影响进行了研究<sup>[9]</sup>，当两种气氛下  $\text{O}_2$  份额一致时，煤粉在  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  气氛下燃烧生成的细颗粒物更多。

#### 2.1.4 烟气中 $\text{SO}_2$ 含量的影响

Smolik J 等人在一个 100 kW 的实验室规模的常压流化床锅炉上进行燃烧实验<sup>[10]</sup>，对燃烧产生的颗粒物的特性进行了研究，得出如下结论：减少烟气中的  $\text{SO}_2$  浓度，可以减少细颗粒物的排放量；另外，增加流化床层的高度，也可以减少细颗粒物的排放量。张军营等人在一维炉煤燃烧实验中发现： $\text{PM}_{10}$ 和  $\text{PM}_{2.5}$ 的排放量随

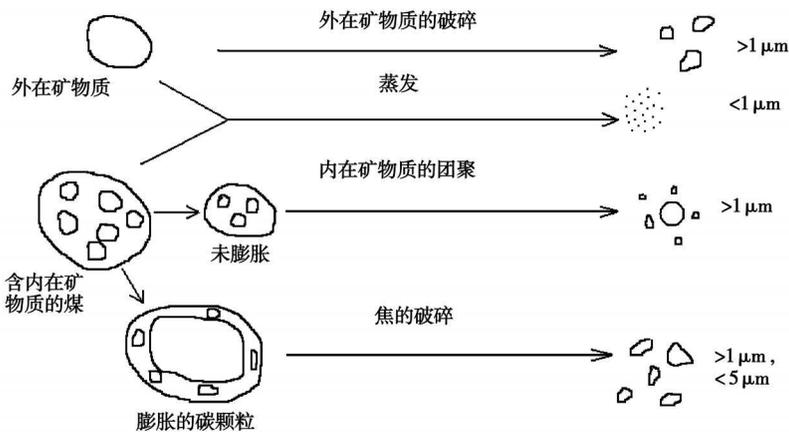


图 1 煤燃烧过程中细颗粒物形成机理示意图

煤中含硫量增加而增多<sup>[4]</sup>。

### 2.1.5 煤粉粒度的影响

Liu X W 等人研究了在沉降炉煤燃烧过程中<sup>[5]</sup>, 燃烧参数对颗粒物的排放的影响, 得出的结论是: 煤粉颗粒尺度对 PM<sub>10</sub> 排放影响很大, 煤粉颗粒尺度减小, PM<sub>1</sub> 和 PM<sub>1-10</sub> 的生成量均增加; 吕建燧和李定凯在沉降炉上研究了煤粉细度对颗粒物排放的影响<sup>[6]</sup>, 得出如下结论: 煤粉越细, 燃烧后产生的颗粒物也越细, PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>1</sub> 的排放量均相应增大。

### 2.1.6 添加剂的影响

采用固体吸附剂通过物理吸附和化学反应来固定煤燃烧过程中痕量重金属元素和细颗粒物的排放也是研究者目前研究的热点。在燃煤过程中添加吸附剂, 减少细颗粒物的排放, 其机理是吸附剂具有较大的表面积, 在燃烧过程中易挥发物质的蒸汽扩散到吸附剂表面被吸附剂吸附或发生化学反应, 同时吸附剂也为温度下降后均相凝结生成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。另外大量的 PM<sub>2.5</sub> 颗粒在布朗扩散和范德华力的作用下与吸附剂接触粘连碰撞凝并附着和沉积到吸附剂的内表面和外表面上使得小颗粒物的量减少粒度增大, 从而抑制了细颗粒物的生成。吕建燧和李定凯研究了煤粉添加 CaO (3%wt) 对燃烧一次颗粒物特性的影响<sup>[11]</sup>。以沉降炉作为燃烧设备, 燃烧温度 1 100 °C。得出如下结论: (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, 粒径较大的颗粒物的量增大; (2) 从实验所得的 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>1</sub> 的排放量来看, 煤粉添加 CaO 燃

烧后, PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>1</sub> 的排放量均有所降低。徐鸿和骆仲决等人研究了在煤粉中添加石灰石对细颗粒物生成的影响<sup>[12]</sup>, 加入石灰石后, 颗粒浓度明显从 2.98 增加到 5.04 g/m<sup>3</sup>, 颗粒的平均粒径从 6.2 增加到 10.1 μm, 而且, PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 所占的比例明显地下降, PM<sub>10</sub> 从 54.16% 降至 34.85%, PM<sub>2.5</sub> 也从 9.52% 降至 6.4%, 说明石灰石的加入减少了细颗粒物的生成。Takuwa T 和 Naruse I 研究了在煤粉燃烧过程中添加高岭石对细颗粒物生成的影响<sup>[13]</sup>, 得出的结论是: 高岭石能有效地捕获钠蒸汽; 捕获效率依赖于煤种。Zhang L 等人在一个实验室规模的燃烧煤粉的沉降炉上进行试验来研究 PM<sub>1</sub> 的形成<sup>[3]</sup>, 他们认为: (1) PM<sub>1</sub> 的生成量随煤种和反应温度变化很大; (2) PM<sub>1</sub> 形成两个有显著区别的组: PM<sub>0.1</sub> (直径小于 0.1 μm) 和 PM<sub>0.1+</sub> (直径大于 0.1 μm), PM<sub>0.1</sub> 的形成主要是由于蒸汽的凝结, 其主要成分包括: S、Si、Al、Na、K、P、Ca、Fe、碱金属和重金属。PM<sub>0.1+</sub> 有两种典型的形态: 一种是富含 Si 和 Al 的球形结构; 另一种的结构和 PM<sub>0.1</sub> 相似, 富含挥发性元素。

### 2.1.7 压力的影响

Wu H W 等人研究了压力对细颗粒物形成的影响<sup>[14]</sup>, 得出: 压力越大, 生成的细颗粒物粒径越小。

### 2.1.8 煤种的影响

Zhang L 和 Ninomiya Y 等人研究了煤种对超细颗粒物 (PM<sub>1</sub>) 生成的影响<sup>[3]</sup>, 发现烟煤燃烧后生成的 PM<sub>1</sub> 比无烟煤多。细颗粒物的排放和煤的可磨型、煤的显微结构、煤种矿物质的种类及其赋存形式有关, 而这些性质和煤种有关, 因此煤种对细颗粒物

的排放有一定影响。

## 2.2 超细颗粒物的元素分析

煤的组成异常复杂, 几乎所有出现于元素周期表中的元素都可在煤中找到。按照这些元素在煤中含量的不同, 可将其分为 3 大类: (1) 主量元素: 含量高于 1 000 μg/g, 如 C、H、O、N、S; (2) 次量元素, 含量介于 100 ~ 1 000 μg/g。如煤中矿物质 (Si、Al、Ca、Mg、K、Na、Fe、Mn 和 Ti) 及卤族元素; (3) 痕量元素, 含量低于 100 μg/g。次量和痕量元素在 PM<sub>1</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的富集程度是不同的, 下面分别简要介绍 PM<sub>1</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的元素分析以及痕量元素分析。

### 2.2.1 PM<sub>1</sub> 的元素分析

超细颗粒物的生成主要是通过蒸发—成核—冷凝—团聚的机理, 易挥发的元素在煤中的赋存形式及含量对超细颗粒物的生成有很大的影响, 大量的研究发现易挥发元素在亚微米灰上有富集的趋势。Marrero J 和 Polla G 等人发现 As、V、Sb、Sc、Ti 和 Pb 在 PM<sub>1</sub> 上的含量较高<sup>[15]</sup>。Yoo J I 和 Senior C L 等人发现 Cd、Cu、Pb 和 Zn 在亚微米颗粒物上极大地富集<sup>[16-17]</sup>, Lind T 等人对一台流化床锅炉的飞灰进行元素分析得出结论<sup>[18]</sup>: Cd、Cu 和 Pb 在 PM<sub>1</sub> 上明显富集。许多研究发现<sup>[20-23]</sup>: Si 和 Al 在 PM<sub>1</sub> 中相对较少; 碱金属在 PM<sub>1</sub> 的相对富集; Fe、Ba、Mn、Mg 和 Ca 在 PM<sub>1</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 富集程度相当。

### 2.2.2 PM<sub>10</sub> 的元素分析

许多研究发现<sup>[20-23]</sup>: Si、Mg、Mn、Fe、Ca 和 Al 在 PM<sub>10</sub> 相对富集; 碱金属在 PM<sub>2.5</sub> 中相对较少。Marrero J 和 Polla G 等人发现<sup>[15]</sup>: As、V、Sb、Sc、Ti 和 Pb 在 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的含量较少。

### 2.2.3 痕量元素分析

煤燃烧过程中痕量元素排放与其在煤中的存在方式,即化学亲和性有很大关系:与煤中有机成份及硫化物结合紧密的痕量元素易于快速蒸发,继而在烟气冷却过程中吸附到细微粒子上;与此相反,与煤中离散的矿物组分结合在一起的痕量元素更可能残留在飞灰基体里。

绝大多数痕量元素具有在细微粒子中富集的倾向,富集程度与颗粒粒径大小、元素性质、元素存在形态及燃烧工况条件有密切关系。痕量元素在亚微米细微粒子中富集的研究引起许多学者的关注。岳勇等人对痕量元素富集特性进行了实验研究<sup>[24]</sup>,发现随着粒径的减小,Cu、Cr、Co和Ni的相对富集倍数为4~6倍,挥发性最强的As的相对富集倍数接近30倍。隋建才等人对燃煤锅炉的元素分布特性进行了研究<sup>[19]</sup>,发现:随着飞灰颗粒粒径减小,元素Mg、Sb、Sc和Pb明显富集;Al、Si和Ca相对减少,而Fe和Mn基本不变。

### 2.3 细颗粒物的形态分析和尺度分布

许多研究人员对细颗粒物的形态进行了广泛的研究,发现:粒径在4.5 μm以下的细颗粒物外形基本呈球形,表明粒径减小,颗粒越接近球形,说明其形成主要来自汽化凝结机理。这种现象也验证了飞灰形成模型,粒径较大的颗粒形状不规则主要是受破碎机理影响,包括含矿物质的焦炭颗粒的膨胀、破裂,内部气体受热膨胀引起颗粒的裂化、脱落以及矿物质不完全熔化等因素;微米级的细颗粒,大多是矿物质挥发后在低温区均相或非均相成核凝结形成,在凝结中由于粒径很小,比

表面积很大,此时表面张力起主要作用,容易形成球形,典型的细颗粒物SEM图像如图2所示。

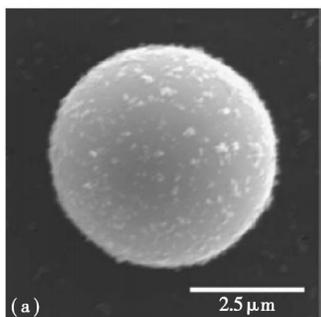


图2 典型的细颗粒物SEM图像

细颗粒物的尺度分布呈双峰分布<sup>[5,25]</sup>,亚微米颗粒物的峰值在0.1 μm附近,而超微米颗粒物的峰值在1~5 μm之间,如图3所示。

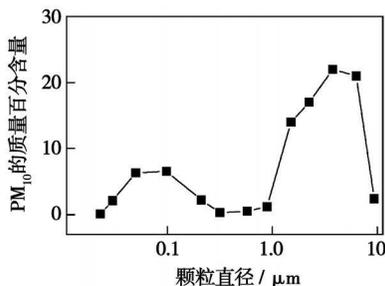


图3 PM<sub>10</sub>的颗粒尺度分布

## 3 细颗粒物的排放控制

### 3.1 加入添加剂控制细颗粒物的生成

Takuwa T和Naruse I研究在煤燃烧过程中加入高岭石控制钠化合物的生成<sup>[13]</sup>,发现:加入高岭石对亚微米细颗粒物的捕集很有效。Zhuang Y和Biswas P研究在煤燃烧过程中加入TiO<sub>2</sub>吸附剂控制超细颗粒物的生成<sup>[29]</sup>,得出如下结论:加入TiO<sub>2</sub>吸附剂能够减小成核速度和增加颗粒物的粒径。周英彪等人研究在煤燃烧过程中加入TiO<sub>2</sub>吸附剂控制超

细颗粒物的生成<sup>[29]</sup>,研究发现TiO<sub>2</sub>添加剂可以有效地抑制超细颗粒物的生成,并且实验发现在一定的温度范围内吸附剂的作用效果达到最佳。

### 3.2 采用磁场控制细颗粒物的生成

鲁端峰和赵长遂等人利用高梯度磁场试验装置进行了捕集燃煤可吸入颗粒物的试验研究<sup>[27]</sup>,试验结果表明:采用高梯度磁分离控制燃煤可吸入颗粒物是一种新型有效的方法。Li Y W和Zhao C S等人研究了在均匀磁场对细颗粒物团聚的影响<sup>[28]</sup>,发现:颗粒物尺度、磁流密度、颗粒停留时间和颗粒总浓度对细颗粒物团聚都有影响。

### 3.3 采用声场控制细颗粒物的生成

姚刚、赵兵和沈湘林利用高强度驻波声场对燃煤可吸入颗粒物清除规律进行了研究<sup>[29]</sup>,通过实验和数值模拟分析发现颗粒物团聚效果受到的影响因素很多,比如颗粒初始分布、声强、声场作用时间、频率和浓度等。

### 3.4 采用电凝并控制细颗粒物的生成

向晓东和陈旺生等人进行了交变电场中电凝并实验研究<sup>[30]</sup>,实验结果表明:新型双区电凝并除尘装置的除尘效率不仅高于电除尘器,而且优于三区电凝并除尘装置。

## 4 结语

在过去20多年间,许多国家开展了大规模的细颗粒物研究,主要涉及细颗粒物质量浓度和数量浓度的分布、排放特性、源解析以及细颗粒物对大气的污染和对人体健康影响等方面。在我国,

针对细颗粒物开展的研究相对较少,对细颗粒物的形成机理、污染机制、控制技术以及对人体健康影响等的研究还有许多工作要做,主要有以下几点:

(1) 煤燃烧过程可吸入颗粒物的形成机理研究:研究不同燃烧方式产生的颗粒物的特征和物理化学性质、痕量重金属元素迁移机理、飞灰颗粒对主要痕量元素的自脱除效应、固体吸附剂与痕量元素的反应机理、加入吸附剂条件下痕量元素的富集规律、痕量元素之间以及痕量元素与燃料中矿物质的相互作用等。

(2) 对细颗粒物的控制要兼顾到对锅炉污染排放物( $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、痕量元素和颗粒物)的综合控制,突破传统的除尘技术,研究新型的联合脱除技术并开发出联合脱除设备。

(3) 由于细微颗粒物的微观性和复杂性,发展科学的细微颗粒物采集、分析手段,改进开发新型的实验仪器,提高实验精度和准确度,是进行超细颗粒物形成机理理论研究的重要基础。

(4)  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  燃烧技术是目前煤燃烧研究领域的一个热点, $\text{O}_2/\text{CO}_2$  燃烧条件下细颗粒物的生成机理的研究刚刚开始,我们课题组承担了国家973课题《循环流化床 $\text{O}_2/\text{CO}_2$ 循环燃烧及污染物的协同脱除》,本课题采用理论分析、实验研究(已建成热输入为50 kW的循环流化床 $\text{O}_2/\text{CO}_2$ 循环燃烧综合试验装置)和数学模型相结合的总体研究方法,应用热重天平—红外傅立叶联用技术,研究不同比例 $\text{O}_2/\text{CO}_2$ 及空气气氛下煤的挥发分析出及着火燃烧特性、焦炭燃烧特性、钙基脱硫剂脱硫特性以及竞争氧化还原机理、 $\text{NO}_x$ 生成机理;应用ELPI

(Electrical Low Pressure Impactor)、激光粒度分析仪和SEM—EDS等手段研究超细颗粒物形成的影响因素、痕量元素的富集规律,从而得出其生成机理。

(5) 通过实验研究,发展科学的数据分析和处理手段,建立包含痕量元素挥发冷凝动力学、粒子成长过程中气溶胶动力学以及各种元素之间的化学反应动力学在内的痕量元素赋存、迁移的数学模型,建立系统的理论研究的体系。从而推动我国燃煤中细微颗粒物研究的进展。

#### 参考文献:

- [1] FLAGAN R C. Submicron particles from coal combustion // Seventeenth Symposium (International) on Combustion [C]. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1979. 97—104.
- [2] QUANN R J, SAROFIM A F. Vaporization of refractory oxides during pulverized coal combustion // Nineteenth Symposium (International) on Combustion [C]. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1982. 1429—1440.
- [3] ZHANG L, NINOMIYA Y, YAMASHITA T. Formation of submicron particulate matter (PM1) during coal combustion and influence of reaction temperature [J]. Fuel, 2006, 85: 1446—1457.
- [4] 张军营, 魏凤.  $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 排放的一维炉煤燃烧实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2005, 26(增刊): 257—260.
- [5] LIU X W, XU M H, YAO H, et al. Effect of combustion parameters on the emission and chemical composition of particulate matter during coal combustion [J]. Energy & Fuels, 2007, 21: 157—162.
- [6] 吕建燧, 李定凯. 不同条件对煤粉燃烧后 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_1$ 排放影响的实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 103—107.
- [7] SURIYAWONG A, GAMBLE M, LEE M H, et al. Submicrometer particle formation and mercury speciation under  $\text{O}_2$ — $\text{CO}_2$  coal combustion [J]. Energy & Fuels, 2006, 20: 2357—2363.

- ash formation from coal combustion [J]. Fuel, 2005, 84: 1206—1214.
- [9] SHENG C D, LI Y, LIU X W, et al. Ash particle formation during  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  combustion of pulverized coals [J]. Fuel Processing Technology, 2007, 88: 1021—1028.
- [10] SMOLIK J, JAROSLAVSCHWARZ, VESELY V, et al. Characterization of solid emissions from atmospheric fluidized-bed combustion of two Czech lignites [J]. Environ Sci Technol, 1999, 33: 3543—3551.
- [11] 吕建燧, 李定凯. 添加CaO对煤粉燃烧后一次颗粒物特性影响的研究 [J]. 热能动力工程, 2006, 21(4): 373—377.
- [12] 徐鸿, 骆仲决. 石灰石对煤燃烧产生颗粒物及重金属影响研究 [J]. 工程热物理学报, 2004, 25(5): 871—874.
- [13] TAKUWA T, NARUSE I. Emission control of sodium compounds and their formation mechanisms during coal combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31: 2863—2870.
- [14] WU H W, BRYANT G, WALL T. The effect of pressure on ash formation during pulverized coal combustion [J]. Energy & Fuels, 2000, 14: 745—750.
- [15] MARRERO J, POLLA G. Characterization and determination of 28 elements in fly ashes collected in a thermal power plant in Argentina using different instrumental techniques [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2007, 62: 101—108.
- [16] YOON J I, KIM K H. Emission characteristics of particulate matter and heavy metals from small incinerators and boilers [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36: 5057—5066.
- [17] SENIOR C L, HELBLE J J. Emissions of mercury, trace elements and fine particles from stationary combustion sources [J]. Fuel Processing Technology, 2000, 66: 263—288.
- [18] LIND T, HOKKINEN J, JOKINIEMI J K. Fine particle and trace element emissions from waste combustion—comparison of fluidized bed and grate firing [J]. Fuel Processing Technology, 2007, 88: 737—746.
- [19] 隋建才, 徐明厚. 燃煤锅炉 $\text{PM}_{10}$ 排放

- 及元素分布特性的实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2006, 12(5): 432-437.
- [20] 隋建才, 徐明厚, 丘纪华, 等. 燃煤可吸入颗粒的物理化学特性及形成机理[J]. 化工学报, 2006, 57(7): 1664-1670.
- [21] 郑楚光. 燃烧过程中有害物质的富集与超细颗粒物的形成[J]. 东莞理工学院学报, 2006, 13(4): 20-24.
- [22] LINAK W P. Ultrafine ash aerosols from coal combustion: characterization and health effects [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31: 1929-1937.
- [23] SENIOR C, ZENG L T, CHE J, et al. Distribution of trace elements in selected pulverized coals as a function of particle size and density [J]. Fuel Processing Technology, 2000, 63: 215-241.
- [24] 岳勇, 陈雷, 姚强, 等. 燃煤锅炉颗粒粒径分布和痕量元素富集特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 74-79.
- [25] ZHUANG Y, BISWAS P. Submicrometer particle formation and control in a bench-scale pulverized coal combustor [J]. Energy & Fuels, 2001, 15: 510-516.
- [26] 周英彪, 王春梅, 张军营, 等. 煤燃烧超细颗粒物控制的实验研究[J]. 热能动力工程, 2004, 19(5): 474-478.
- [27] 鲁端峰, 赵长遂. 高梯度磁场中燃煤 PM10 的捕集试验[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(1): 89-93.
- [28] LI Y W, ZHAO C S. Aggregation experiments on fine fly ash particles in uniform magnetic field [J]. Powder Technology, 2007, 74: 93-103.
- [29] 姚刚, 赵兵, 沈湘林. 燃煤可吸入颗粒物声波团聚效果的实验研究和数值分析[J]. 热能动力工程, 2006, 21(2): 175-180.
- [30] 向晓东, 陈旺生. 交变电场中电凝并收尘理论与实验研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(2): 187-191.

(编辑 何静芳)

## 联合循环电站

### 聚焦在高部分负荷效率的联合循环电站

据《Gas Turbine World》2008 年 3—4 月号报道, 荷兰电力公司已授于 Alstom 一个价值 4 亿欧元的整套承包合同, 在 Lelystad 建造一座联合循环电站。

该电站围绕装置总输出功率为 870 MW、发电效率为 59% 的 2 套 435 MW KA26-1 联合循环装置设计。在启动时, 燃气轮机可以独立于汽轮机点火和运转, 以便更迅速地生产功率并减少启动燃料费用。

在要求降低功率时, 作为对停机和重新启动的一种更实用的替代方案, 装置能够提供高效低负荷的联合循环运行方式。

低负荷输出功率: 在降低功率要求时, 可安排装置在 15%~20% 全输出功率下运行, 装置净效率达到 33%~35%。

减负荷: 在运行时, 每个联合循环装置可以在约 110 min 时间内从 435 MW 基本负荷输出功率减少到约 70 MW。重新加载时, 每台燃气轮机可在 20 min 内增加到 95% 基本负荷输出功率, 并在另外 60 min 内恢复到联合循环全部输出功率。

Alstom GT26 燃气轮机简单循环额定输出功率为 288 MW, 低热值效率为 38%。压气机压比为 34:1, 涡轮转速为 3 000 r/min。

以联合循环方式运行, 涡轮排气流量为 650 kg/s, 排气温度为 616 °C。余热锅炉为卧式、三压和再热式汽包锅炉。

从余热锅炉出来, 过热的高压蒸汽被供入高压汽轮机, 在该处它膨胀到冷的再热级。离开高压汽轮机出口, 通过冷的再热管线, 蒸汽被送回到余热的锅炉。

在余热锅炉中, 低温再热蒸汽在再次加热前与中压蒸汽混合, 再次加热的蒸汽通过热的再热管线被供到中压/低压汽轮机, 在该处它膨胀到低压级。

在这个阶段, 进一步被过热的高压蒸汽从余热锅炉供入汽轮机, 其在水冷式冷凝器内冷凝以前, 蒸汽最终膨胀到真空。

(吉桂明 供稿)

燃煤超细颗粒物形成机理及其控制的研究进展= **Latest Advances in Research on the Formation Mechanism of Superfine Particles During Coal Combustion and Its Control**[刊, 汉]/ QU Cheng-mei, ZHAO Chang-sui, DUAN Lun-bo, LI Ying-jie (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Thermal Energy Engineering Research Institute, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 447~452

A survey of the status quo of the study both at home and abroad on superfine particle formation mechanism during coal combustion and its control technology has been given along with a description of the research results achieved worldwide in such aspects as relevant influencing factors, morphological analysis, elementary analysis and emission control etc. relating to the formation of superfine particles. The formation mechanism in question has been expounded as follows: the inorganic matter of coal during combustion will be first evaporated and then homogeneously nucleated or condensed on the existing fine particles. Furthermore, predicted was the development trend of the research on the formation mechanism of superfine particles, their sampling and analytical methods as well as control technologies with the main focus and orientation of superfine particle research to be pursued at the moment being proposed. **Key words:** combustion, superfine particle, formation mechanism, control

基于统计学习理论的叶片动静频率概率设计及敏感性分析= **Probabilistic Design and Sensitivity Analysis of Blade Dynamic and Static Frequencies Based on a Statistical Learning Theory**[刊, 汉]/ DUAN Wei, WANG Zhang-qi (Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 453~458

With the chance factors being taken into account, a probabilistic analysis of the inherent vibration frequency of blades has been conducted and a proposition, made that the sensitivity of random parameters constitutes a basis for the dynamic strength reliability design of the blades. With the straight blades of a steam turbine in a test rig serving as an object of study, the randomness of geometrical parameters (including length, width, thickness), material parameters (elastic modulus, density) and rotating speed was taken into consideration. On this basis, a statistical learning theory was applied to obtain the statistical parameters and accumulative distribution function of static (dynamic) frequencies of blades by an integration of the deterministic finite element and radial basis function (RBF) with Monte Carlo simulation method. By adopting a probabilistic sensitivity analytic method, the authors have made a quantitative assessment of the sensitivity of blade static and dynamic frequencies to random input variables. The analytic results can provide positive guidelines for general engineering practice. Furthermore, the authors have compared the calculation results with those obtained by a response surface method, and concluded that the analytic method in question offers a quicker approach than the response surface method. It can serve as an alternative method for the dynamic strength reliability analysis of blades. **Key words:** statistical learning theory, blade, static (dynamic) frequency, probabilistic design, probabilistic sensitivity analysis, radial basis function (RBF) neural network

某 1 000 MW 汽轮发电机组轴承载荷灵敏度计算分析= **Calculation and Analysis of the Bearing Load Sensitivity of a 1 000 MW Turbo-generator Unit**[刊, 汉]/ TIAN Yong-wei, YANG Jian-gang (National Engineering Research Center of Thermal Power Plant Vibrations, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 459~461

A large-sized turbo-generator unit represents a multiple supporting structure, in which any change in the elevation of a bearing in the shafting will affect the load distribution over all the bearings. Therefore, to study the sensitivity of bearing loads is of the utmost importance for the stable operation of the unit. By adopting a transfer matrix method, the authors have calculated the shafting elevation curve, bearing loads and sensitivity of a 1 000 MW turbo-generator unit, comparing and analyzing the calculated elevation curve and the actually measured one. The results show that both curves in the middle of the shafting are in comparatively good agreement with each other. At both ends however, there is a relatively big difference. The load distribution on various bearings of the shafting was calculated respectively from both the calculated elevation curve and the actually measured one. The bearing load distribution of one and the same rotor obtained from the calculated elevation values was relatively uniform. In the light of the sensitivity of the load to a change in elevation, analyzed was the law governing the change of bearing load with elevation. The sensitivity of the bearings at both ends of the turbo-generator unit to load is relatively small, but that in the middle of the unit, is relatively big. The ana-