

300 MW 燃煤锅炉静电除尘器的 现场实验和数值模拟

赵海波, 郭 欣, 郑楚光

(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘 要: 采用实验研究和数值模拟的方法对除尘装置收集烟尘颗粒的过程进行定量描述, 是发展高效可吸入颗粒物 (PM) 除尘方案的理论基础。对 300 MW 燃煤锅炉静电除尘器 (ESP) 前后的飞灰颗粒进行在线采样, 以研究其尺度分布规律和排放特征, 采样系统由高温水冷取样管、旋风分离器和低压撞击器组成。实验结果表明, ESP 前后飞灰颗粒呈典型的双峰分布, 峰值出现在 $0.08 \mu\text{m}$ 和 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 附近。然后以 ESP 进口实验结果为初始条件, 采用事件驱动常体积法对 ESP 的除尘过程进行颗粒群平衡模拟, 能够得到烟尘颗粒尺度谱在 ESP 纵向长度上演变过程的细节信息, ESP 出口颗粒尺度分布的模拟结果与试验结果较为吻合。

关 键 词: 燃煤锅炉; 静电除尘器; 可吸入颗粒物; 颗粒群平衡模拟; 颗粒尺度谱

中图分类号: TK121; X513 文献标识码: A

引 言

静电除尘器 (ESP) 在我国大中型火力发电厂的除尘方式中占有重要的地位, 且一般均能达到 99% 以上的整体质量除尘效率^[1]。但是 ESP 对细微颗粒的捕集效率并不高, 如某电厂 ESP 对 $\text{PM}_{2.5}$ (粒径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的可入肺颗粒) 的除尘效率约为 90.6%^[2]。随着新的火电厂污染排放标准 (如对 $\text{PM}_{2.5}$ 的严格要求等) 的颁布和实施以及大容量机组对大烟量处理的要求, 需要对现有 ESP 进行改造或研发更高性能的 ESP 或混合除尘系统, 对现有除尘技术进行改进相对来说技术壁垒更少, 也更能被业界所接受。但是, 为了在现有传统除尘技术的基础上提高其对可吸入颗粒物 (PM) 的除尘效率, 必须了解 PM 在这些除尘装置中各种可控的外加条件下的行为规律, 以此作为理论基础是发展高效 PM 除

尘技术的必经之路。但是, 目前对传统除尘装置中各种尺度的飞灰颗粒的行为规律、相互影响、在不同外加条件和外力场中的动力学演变过程等等均认识不足, 对这些除尘过程的描述大多是基于工业中广泛应用的经验公式, 缺乏系统和科学地研究。

目前国内外已有研究者开始对燃煤电厂除尘设备进行在线测量以研究 PM 排放特征^[3-6], 然而对实际电厂 ESP 除尘过程的定量数值模拟仍然较为缺乏。对除尘装置中烟尘颗粒的行为规律进行定量描述的过程, 实际上就是得到颗粒群的动力学演变过程详细信息的过程, 可以采用作者所发展的事件驱动常体积 (EDCV) 法等随机模型对其进行颗粒群平衡模拟^[7], 此时主要考虑颗粒群在沉积事件 (静电除尘器中的静电捕集事件) 的控制下颗粒尺度分布函数的动力学演变过程, 通过求解考虑颗粒沉积的通用动力学方程 (GDE, 或称为颗粒群平衡方程 PBE) 可以描述颗粒尺度谱的演变过程, 此时各类沉积事件的核模型是关键问题。

基于此, 针对某电厂典型的 300 MW 燃煤锅炉的 ESP 进行了现场试验研究, 然后利用事件驱动常体积法得到了烟尘颗粒在 ESP 中的动力学演变过程, 并以数值模拟为工具探讨提高 ESP 除尘效率的可行方案。

1 实验研究

1.1 实验工况

实验是在某国产 300 MW 燃煤机组锅炉上进行的^[4-8], 该锅炉为 1 025 t/h 超高压自然循环固态排渣锅炉, 四角切圆燃烧, 燃烧器采用 GE 公司的大风

收稿日期: 2007-04-26; 修订日期: 2007-12-29

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目 (90410017); 国家重点基础研究专项经费 (2006CB200304)

作者简介: 赵海波 (1977-), 男, 湖南宁乡人, 华中科技大学副教授, 博士

箱摆动式宽调节比 WR 型直流燃烧器, 燃用烟煤, 整个实验过程基本是在稳定负荷下进行, 锅炉实际燃煤量为 136 t/h, 煤粉细度 $R_{90} = 24.31\%$, $R_{200} = 2.24\%$, 炉膛温度维持在 1 400 °C 左右, 炉膛出口烟

气温度 1 013 °C, 排烟温度维持在 150 °C 左右。除尘装置采用浙江诸暨电除尘器厂生产的四电场静电除尘器, 结构参数如表 1 所示。

表 1 静电除尘器结构参数

| 锅炉烟气量/ $m^3 \cdot h^{-1}$ | 每台锅炉 ESP 数目 | 电场风速 $/m \cdot s^{-1}$ | 电场内烟 气停留时间/s | 单台电场数 | 单电场长度 /m | 总电场长度 /m |
|------------------------------|---|---------------------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| 1 704 412 | 2 | 1.4 | 15.43 | 4 | 5.4 | 21.6 |
| 收尘面积 /m ² | 比收尘面积 /s ⁻¹ m ⁻¹ | 直流输出电压 /kV | 同级间距 /mm | 阳极板形式 /C | 电除尘器 本体压降/Pa | 漏风率/% |
| 15 400 | 34.29 | 72 | 450 | 480 | ≤200 | ≤3% |

1.2 取样系统

取样系统由高温水冷取样管、旋风分离器、低压撞击器(Low Pressure Impactor, LPI) 组成, 如图 1 所

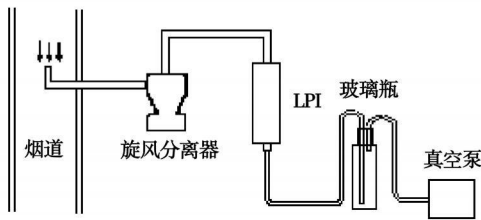


图 1 取样系统示意图

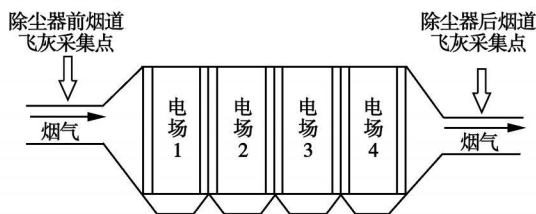


图 2 飞灰取样位置

示。为防止烟气中的水蒸气在取样系统内凝结, 沿取样管路缠上电加热带, 并控制其温度在 150 °C 左右。飞灰随着烟气流经取样枪进入切割粒径为 10 μm(空气动力学直径)的旋风分离器, 旋风分离器通过导管、连接件与取样管尾部相连, 用来脱除烟气中大于 10 μm 的颗粒物, 防止后面低压撞击器每一级膜片上的颗粒超重; 然后, 飞灰颗粒进入 LPI 并将飞灰颗粒按空气动力学直径大小分成 13 级, 其粒径范围分别为: 0~ 0.028 1, 0.028 1~ 0.056 5, 0.056 5~ 0.094 4, 0.094 4~ 0.154 0, 0.154 0~ 0.258 0, 0.258 0~ 0.377 0, 0.377 0~ 0.605 0, 0.605 0~ 0.936 0, 0.936 0~ 1.580 0, 1.580 0~ 2.360 0, 2.360 0~ 3.950 0, 3.950 0~ 6.600 0, 6.600 0~ 9.800 0 μm, 取

样时末级膜片处压力维持 10 kPa 左右。取样之前, 首先用微电脑烟尘平行采样仪测量烟道流速, 根据真空泵流量及烟道流速选取取样枪喷嘴, 以保证等速取样。飞灰取样位置分别设在静电除尘器入口和出口烟道, 如图 2 所示, 实验共分 3 次取样, 在 ESP 进口处取样 1 次, 在 ESP 出口处取样 2 次。

1.3 分析方法

实验中撞击器内的膜片采用有机膜, 为了防止颗粒反弹, 在有机膜上涂上用四氯化碳稀释后的阿匹松油(Apiezon L Vacuum Grease)。取样前的膜片及取样后载有颗粒的膜片置于烘箱中, 其温度控制在 105 °C 干燥 1 h, 以避免油脂在试验过程中挥发带来人为误差, 然后在干燥器中冷却至室温, 在灵敏度为 0.001 mg 的分析天平上称重。

1.4 实验结果

对 LPI 每一级膜片上的灰颗粒进行称重分析, 根据真空泵的抽气流量计算出不同粒径颗粒的质量浓度, 于是就可以得到 ESP 前后 PM₁₀ 的质量粒径分布, 如图 3(a) 所示, 可知, ESP 入口和出口的颗粒尺度谱满足典型的双峰分布, 其峰值分别在 0.08、2~ 5 μm 左右。需要指出的是, 除尘器入口仍然有一定比例的尺度大于 10 μm 的飞灰颗粒, 取样系统的旋风分离器把这些大颗粒预先分离开来, 通过称重旋风分离器出口颗粒可以得到除尘器入口大颗粒的质量浓度分别为 21 400 mg/m³。所以, 虽然图中没有列出除尘器入口尺度大于 10 μm 大尺度颗粒的数据, 但是实际的颗粒尺度谱将呈现典型的三峰分布, 峰值分别为 0.08、2~ 5 μm 和 > 10 μm, 这种结果是与众多试验结果定性吻合的^[5, 9]。

如果认为每个粒径范围内颗粒具有同样的密度且均为球形颗粒, 且认为 LPI 每一级膜片收集的颗粒均具有同样的粒径, 其值为 $d_{pi} = \exp([\log(d_{pi}^+) +$

$\log(d_{pi}^-)]/2)$, d_{pi}^+ 和 d_{pi}^- 分别为该级的切割粒径范围的上下限。例如, 对于 LPI 的第 7 级, 切割粒径范围为 0.377~0.605 μm , 则认为该级 LPI 所收集的飞灰颗粒的代表粒径为 $d_{p7} = \exp([\log(0.377) + \log(0.605)]/2) = 0.478 \mu\text{m}$ 。在这些假设下, 可以依据颗粒质量粒径分布得到颗粒的数目粒径分布曲线, 每级颗粒的数目浓度 (m^{-3}) 如下计算:

$$N_p(d_{pi}) = 6 \Delta M_i / (\rho_p d_{pi}^3)$$

式中: ΔM_i —该级颗粒的质量浓度, kg/m^3 。于是可以依据颗粒质量粒径分布曲线得到颗粒数目尺度分布曲线, 如图 3(b) 所示, 除尘器入口、出口煤灰分布特征有明显不同。表 2 为 ESP 入口、出口不同粒径煤灰的累计百分率, 除尘器前空气动力学直径大于 10 μm 的飞灰颗粒(记为 PM_{10+}) 约占 96.85%, PM_{10} 约占 3.15%, 而除尘器后 PM_{10+} 约占 18.85%, PM_{10} 约占 81.15%。一方面表明绝大多数尺度较大的颗粒均被 ESP 所捕集, 而从 ESP 逃逸出来的烟尘颗粒无论按照质量比例还是按照数量比例, 均主要为亚微米颗粒; 另外一方面也表明, ESP 的除尘效率与颗粒尺度具有非常大的相关性, 颗粒尺度越大越容易被捕集。

表 2 ESP 入口和出口煤灰颗粒的筛下累计分布率

| 位置 | $\text{PM}_{0.4}$ | $\text{PM}_{1.0}$ | $\text{PM}_{2.5}$ | PM_{10} | PM_{10+} |
|--------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| ESP 入口 | 0.139 | 0.462 | 1.690 | 3.150 | 96.850 |
| ESP 出口 | 2.406 | 16.079 | 51.409 | 81.146 | 18.854 |

2 数值模拟

2.1 数学模型

不同尺度的烟尘颗粒不断被捕集, 导致烟尘颗粒的尺度分布函数随时间而变化, 此时, 考虑烟尘捕集的通用动力学方程为:

$$dn_p(d_p, x) / dx = -R(d_p) n_p(d_p, x) \quad (2)$$

式中: x —沿 ESP 纵向(气流流动方向)距入口处的距离; $n_p(d_p, x)$ —粒径为 d_p 的烟尘颗粒的尺度谱函数, $\text{m}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$, 表示距离 x 、尺度为 d_p (量纲一般为 m) 的烟尘颗粒在单位体积(量纲一般为 m^3) 内的数目浓度; $R(d_p, x)$ —尺度为 d_p 的烟尘颗粒在位置 x 处的沉积核, 即烟尘颗粒被 ESP 捕集的速率, m^{-1} 。

实际电厂 ESP 捕集烟尘的过程相当复杂, Kim 等人发展的沉积核模型没有考虑气流场和静电场的不均匀性和脉动性^[10], 也没有考虑颗粒场和气流场的相互影响、两相湍流场与静电场的相互作用^[11~13]; 没有考虑边界条件、不均匀温度场等的影响; 更没有考虑电极和集尘板的各种异常情况, 如污染、二次扬尘、电风, 等等^[1]。为了全面准确地考虑以上因素对实际电厂 ESP 除尘性能的影响, 必须发展更为复杂和精确的沉积核模型, 这在当前阶段仍然是一项艰巨的研究课题。通常, 人们采用修正的 Deutsch 模型来描述实际电厂 ESP 的除尘过程^[14]。

$$R(d_p) = k \omega / (U_{av} W) \quad (3)$$

式中: k —根据现场实验结果得到的一个经验系数, 对于实际电厂的静电除尘器, 一般修正系数 $k = 0.5$; U_{av} —烟气水平输运平均速度, m/s , $x = U_{av} t$, t 为从进入 ESP 入口开始的时间; W —集尘板与放电电极之间的横向距离; ω —颗粒驱进速度, 模型为^[15~16]:

$$\omega = q E_c C_c / (3 \pi \mu d_p); C_c = 1 + 2.493 N d_p + 0.84 N d_p \exp(-0.435 d_p / \lambda) \quad (4)$$

式中: q —颗粒荷电量; C_c —Cunningham 滑移修正系数; E_c —集尘区电场强度; E —荷电(电晕)电场强度, 这里认为 $E_c = E$; μ —烟气动力粘度; λ —烟气气体分子平均自由程。

颗粒通过两种不同的荷电机理在电晕电场中被荷电, 电场荷电或碰撞荷电是离子在静电力作用下

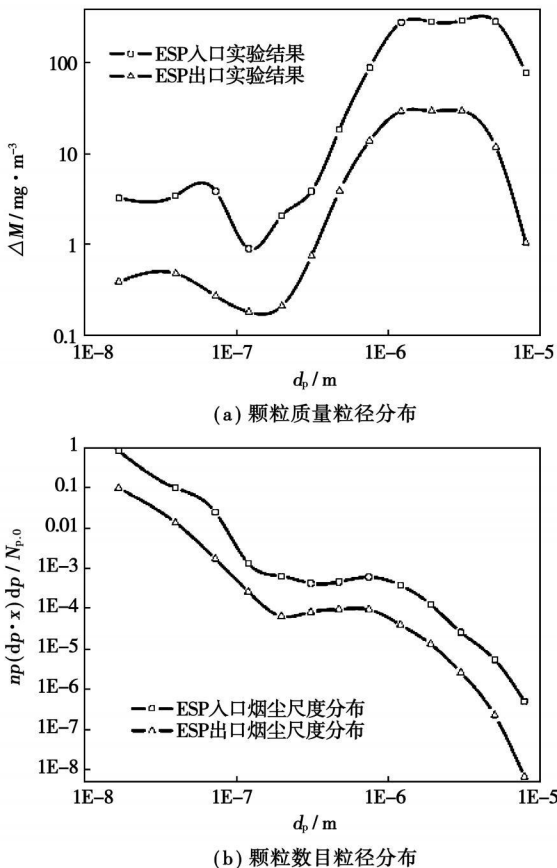


图 3 除尘器入口和出口尺度谱

定向运动而与颗粒碰撞的结果,而扩散荷电是离子布朗随机扩散而与颗粒碰撞的结果。颗粒通过电场荷电机理所荷电量为^[17]:

$$q_f(t) = q_\infty \frac{t/\tau}{1 + t/\tau} \quad q_\infty = \pi \epsilon_0 E d_p^2 \frac{3 \epsilon_s}{\epsilon_s + 2}$$

$$\tau = \frac{4 \epsilon_0 E}{J} \quad (5)$$

式中: q_∞ —饱和荷电量, C; t —荷电时间; τ —电场荷电时间常数; ϵ_0 —真空介电常数, 8.85×10^{-12} F/m; ϵ_s —颗粒的电介质常数; J —电流密度, A/m²。通常认为颗粒通过电场荷电而达到饱和荷电量的时间很短,甚至可以忽略,而认为进入 ESP 的颗粒马上就通过电场荷电方式达到了饱和荷电量 q_∞ 。而颗粒通过扩散荷电方式的荷电量为^[17]:

$$q_d(t) = q^* \ln(1 + t/\tau^*), \quad q^* = 2 \pi \epsilon_0 d_p k_B T / e,$$

$$\tau^* = 8 \epsilon_0 k_B T / (d_p \bar{u}_i n_i e^2) \quad (6)$$

式中: q^* 为荷电常数, C, τ^* —扩散荷电时间常数; e —电子电量, $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C; \bar{u}_i —气体离子的平均热运动速度, m/s; n_i —气体离子数密度, m⁻³。在扩散荷电机理下,颗粒荷电量随时间按对数增长,通常认为 $t = 500 \tau^*$ 或 $q_{500} = 6.2 q^*$ 时,颗粒已经通过扩散荷电方式达到了饱和电量,通常认为颗粒荷电量 $q(t) = q_f(t) + q_d(t) = q_\infty + q_d(t)$ 。

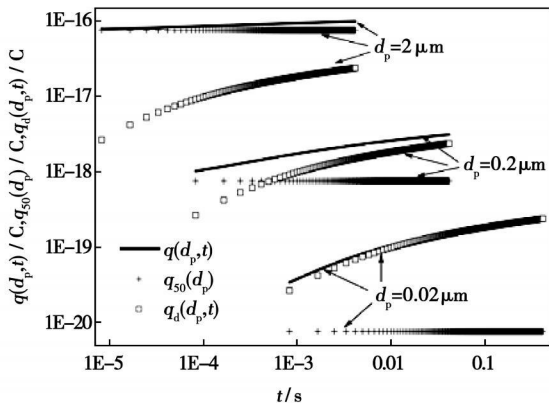


图 4 不同粒径烟尘颗粒荷电量

实际电厂 ESP 中,烟尘颗粒通过电场荷电和扩散荷电 2 种方式而带上电荷。3 种典型粒径的烟尘颗粒(直径分别为 0.02、0.2、2.0)荷电量(依据式(5)和式(6))随时间的变化,如图 4 所示。烟尘颗粒(2.0 μm)尺度越大,荷电量越多,达到饱和荷电量的时间越短;大尺度颗粒(如 2.0 μm 颗粒)主要通过电场荷电方式荷电,而小尺度颗粒(如 0.02 μm 颗粒)主要通过扩散荷电方式荷电,而电场荷电和扩散荷

电 2 种机制均对中等尺度颗粒(如 0.2 μm 颗粒)的荷电产生重要影响;无论哪种尺度的颗粒,达到饱和荷电量的时间均远远小于颗粒在 ESP 中的停留时间。所以,对于实际电厂 ESP 除尘过程的数值模拟,认为颗粒在较短的时间内通过电场荷电和扩散荷电方式达到了饱和荷电量。

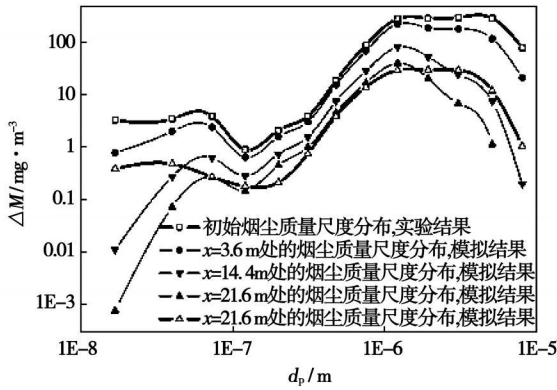
随机算法能够得到虚拟颗粒群沿 ESP 纵向距离 x 的详细信息,算法的具体描述参照文献[7]。通过统计这些虚拟颗粒群,就可以得到烟尘颗粒群尺度谱动力学演变过程的详细信息,包括一些“宏观参数”——颗粒数目浓度 $N_p(x)$ 、几何平均体积 $v_{pg}(x)$ 和几何平均直径 $d_{pg}(x)$ 、几何标准偏差 $\sigma_{pg}(x)$ 、整体质量除尘效率 $\eta_{om}(x)$ 和整体数目除尘效率 $\eta_{on}(x)$ 等以及“微观参数”——分级数目除尘效率 $\eta_n(d_p, x)$ 、分级质量除尘效率 $\eta_m(d_p, x)$ 和筛下累积分布率 $Y(d_p, x)$ (定义 x 处为尺度小于 d_p 的所有颗粒的质量之和占有所有颗粒总质量的比例)和任意 x 处颗粒尺度分布函数 $n_p(d_p, x)$ 等。

2.2 实际电厂 ESP 除尘过程的数值模拟

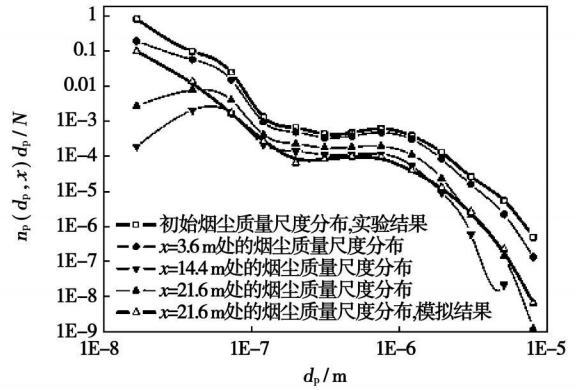
以实际电厂的运行条件和除尘器进口处实验测量得到的颗粒尺度谱为初始条件,利用事件驱动常体积法求解方程,可以得到 ESP 中颗粒尺度谱的沿程演变过程,如图 5 所示。图 5(a)为几个特定纵向距离处的颗粒质量尺度分布,沿着除尘器纵向长度,各种尺度的颗粒均被 ESP 不同程度地捕集,导致各个尺度的烟尘颗粒的质量浓度不断降低,但是不同粒径的烟尘质量浓度降低的幅度不一,表明 ESP 对粒径不同的烟尘有着不同的除尘效率。由图 5(a)中可知,较大尺度和较小尺度的烟尘颗粒的质量浓度衰减地更快更剧烈一些,而 0.1~1 μm 的烟尘颗粒的质量浓度衰减较为平缓,这表明 ESP 对于大尺度和小尺度烟尘颗粒具有较好的捕集效率,而对于中间尺度颗粒的捕集效率要相对差一些。由图 5(a)可知,颗粒质量尺度分布曲线在演变过程中仍然保持典型的双峰曲线形式,而除尘出口处实验测量得到的颗粒尺度分布曲线与数值模拟结果定性定量均较为吻合,这表明所采用的数值模型和数值方法均能够较为准确地描述实际电厂 ESP 的除尘过程;图 5(b)为几个特定纵向距离处颗粒(数目)尺度分布曲线,随着烟气进入 ESP 纵向长度 x 的增加,各种尺度的颗粒的数目浓度都越来越小,即不同程度地被 ESP 所捕集;图 5(c)为几个特定纵向距离处分级数目除尘效率 $\eta_n(d_p, x)$ 的曲线,中等尺度颗粒(0.1~1 μm)的除尘效率较为明显地低于小尺度和

大尺度颗粒的除尘效率; 图 5(d) 为颗粒尺度谱的 2 个整体统计参数- 即烟尘颗粒比总数目浓度 ($N_p / N_{p,0}$) 和比总质量浓度 ($M_p / M_{p,0}$) - 随纵向距离的变化趋势。由图 5(d) 可知, 颗粒总数目浓度和总质量浓度均沿 ESP 纵向长度显著降低, ESP 的整体数

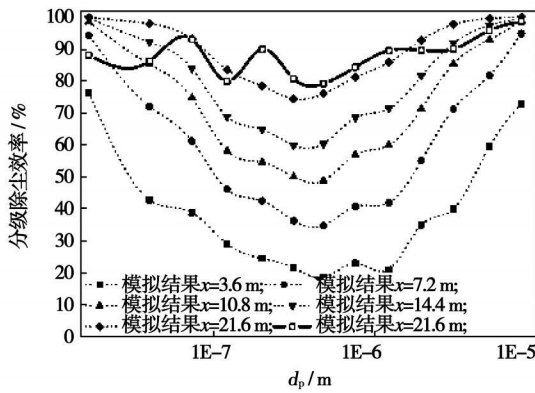
目除尘效率超过了 97.5%, 而整体质量除尘效率仅为 93.3%, 而如果把质量份额极大而数目份额极小的超微米颗粒 ($> 10 \mu\text{m}$) 也统计在内的话, ESP 整体质量除尘效率将达到甚至超过 99%, 而 ESP 整体数目除尘效率仍然为约 97.5%。



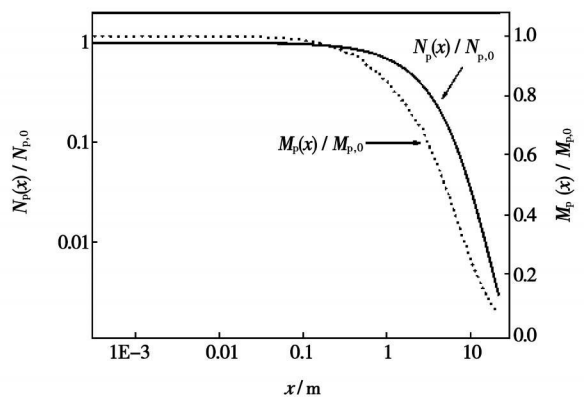
(a) 烟尘质量尺度分布的演变



(b) 烟尘数目尺度分布的演变



(c) 分级除尘效率的演变



(d) N_p 和 M_p 的演变

图 5 实际电厂 ESP 中烟尘颗粒尺度谱的演变

小尺度烟尘颗粒 ($< 0.1 \mu\text{m}$) 处的模拟结果与实验结果有一定误差, 主要原因分析如下: (1) 小尺度烟尘颗粒数目浓度很大而质量浓度较小, LPI 对这些小尺度烟尘颗粒质量浓度的微小称样和取样误差将在数目浓度方面产生更大的误差放大效应; (2) 每级 LPI 收集的烟尘颗粒有着某个粒径范围, 但是数值模拟过程中认为这些颗粒有着单一粒径; (3) 不同尺度烟尘颗粒的化学成分存在较大的差异, 但是数值模拟中认为所有烟尘颗粒具有相同的材料密度; (4) 烟尘颗粒并非球形颗粒, 但是数值模拟中认为这些颗粒均为球形颗粒; (5) 修正的 Deutsch 模型由于经验系数 k 的引入, 必然存在一定程度的误差。

3 结论

燃煤产生的飞灰颗粒已经成为我国大气颗粒物污染的主要来源之一, 而实际电站锅炉配备的 ESP 对于大量亚微米颗粒难以脱除, 故研究实际电厂的 ESP 的除尘过程因此显得尤为重要。采用低压撞击器 (LPI) 对某电厂燃煤机组 ESP 前后的飞灰颗粒进行了取样, 得到了 ESP 前后飞灰颗粒尺度谱, 实际飞灰颗粒尺度谱呈典型的三峰分布, 峰值分别为 0.08 、 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $> 10 \mu\text{m}$ 。进而, 利用事件驱动常体积法对该实际电厂 ESP 的除尘过程进行颗粒群平衡模拟, 得到 ESP 纵向长度上烟尘颗粒总数目、几何平均尺度、分级除尘效率、烟尘质量尺度分布和烟尘数目尺度分布

等, 所得到的 ESP 出口分级除尘效率的模拟结果与试验结果定量上符合较好, 表明颗粒群平衡模拟可以作为一种简单快捷的手段合理地描述 ESP 的除尘过程, 其所得到的数据对于优化 ESP 运行条件和改进 ESP 设计等均具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 郝吉明, 马广大. 大气污染控制工程[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2002.

[2] 刘建忠, 范海燕, 周俊虎, 等. 煤粉炉 PM₁₀/PM_{2.5}排放规律的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 145- 149.

[3] 易红宏, 郝吉明, 段 雷, 等. 电厂除尘设施对 PM₁₀ 排放特征影响研究[J]. 环境科学, 2006, 27(10): 1921- 1927.

[4] 隋建才, 徐明厚, 丘纪华, 等. 燃煤锅炉 PM₁₀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.

[5] 岳 勇, 陈 雷, 姚 强, 等. 燃煤锅炉颗粒物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.

[6] MARKOWSKI G R, ENSOR D S, HOPPER G R. A Submicron aerosol mode in flue gas from a pulverized coal utility boiler[J]. Environmental Science & Technology, 1980, 14(11): 1400- 1402.

[7] 赵海波, 郑楚光. 单区静电除尘器捕集烟尘过程的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 31- 35.

[8] 隋建才. 燃煤过程中亚微米颗粒形成与排放的研究[D]. 武汉:

华中科技大学, 2006.

[9] SEAMES W S. An initial study of the fine fragmentation fly ash particle mode generated during pulverized coal combustion[J]. Fuel Processing Technology, 2003, 81(2): 109- 125.

[10] KIM S H, PARK H S, LEE K W. Theoretical model of electrostatic precipitator performance for collecting polydisperse particles[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 50(3): 177- 190.

[11] SOLDATI A, ANDREUSSI P, BANERJEE S. Direct simulation of turbulent particle transport in electrostatic precipitators[J]. AIChE J, 1993, 39(12): 1910- 1919.

[12] CHOI B S, FLETCHER C A J. Computation of particle transport in an electrostatic precipitator[J]. J. Electrostat, 1997, 40&41: 413- 418.

[13] GALLIMBERTI I. Recent advancements in the physical modelling of electrostatic precipitators[J]. J. Electrostat, 1998, 43: 219- 247.

[14] 张殿印, 王 纯. 除尘器手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[15] BAI H, LU C, CHANG C L. A model to predict the system performance of an electrostatic precipitator for collecting polydisperse particles[J]. J Air Waste Management Assoc, 1995, 45: 908- 916.

[16] YOO K H, LEE J S, OH M D. Charging and collection of submicron particles in two-stage parallel plate electrostatic precipitators[J]. Aerosol Sci. & Tech, 1997, 27: 308- 323.

[17] MIZUNO A. Electrostatic precipitation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(5): 615- 624.

(编辑 伟)

新技术、新工艺

LM2500 高温部件寿命的延长

据《Gas Turbine World》2007- 2008 年年度手册报道, GE Energy 发布了一个用于额定功率为 22 MW 的 LM2500(具有六级动力涡轮方案)和 PGT25(具有二级高速动力涡轮方案)系列燃气轮机的升级改进计划, 目标是减少维护费用并避免按计划的停机。

升级改进是基于采用先进技术系统的可靠性和发动机寿命的模拟, 改进的材料和冷却技术, 并在燃气发生器的二级高压涡轮内采用单晶合金材料。

升级改进的燃气发生器

两型燃气轮机共用压比为 18: 1 的压气机, 由 16 级轴流压气机、具有 30 个单独的可更换的燃料喷嘴的环形燃烧室和(驱动压气机的)二级高压涡轮组成。

燃气发生器在气动上被连接到 3 600 r/min 的六级动力涡轮(在 LM2500 情况下), 或连接到用于 PGT25 的高效 6 500 r/min 二级动力涡轮。

升级改进的效果

借助于改进了高压涡轮、环形燃烧室和燃料喷嘴的设计, 排除了 25 000 h 高温部件维修时限。

排除了高温部件修理的时限, 将使 LM2500 和 PGT25 燃气轮机的营运者节省 300 万美元维护费用, 以及避免停机。

(吉桂明 供稿)

奇异值分解在气液两相流流型识别中的应用= **Application of Singular Value Decomposition for the Identification of Gas-liquid Two-phase Flow Patterns**[刊, 汉]/ SUN Bin, ZHONG Jin-shan, CHEN Fei, ZHOU Yun-long (College of Energy Source and Mechanical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin, China, Post Code: 132012)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2008, 23(3). - 252~ 255

Presented was a method for the identification of gas-liquid two-phase flow patterns by combining phase-space restructure with singular value decomposition. First, the authors have created an attractor trajectory matrix of pressure-difference fluctuation signals by adopting the phase space restructure method. Then, the matrix is decomposed to obtain its singular values to serve as an eigenvector of the flow pattern. In the light of such problems as both a low convergence speed and an easy fall into partial limit values, to which BP (back propagation) neural network is susceptible, the L-M optimization algorithm was used to design a BP network model for identifying the flow patterns. The research results show that the method in question can effectively identify 4 typical flow patterns of air-water two-phase flow in horizontal tubes. Compared with other improved algorithms, the L-M optimization algorithm has the highest identification rate of 95%, thus providing a new effective approach for the identification of flow patterns. **Key words:** flow pattern identification, phase space restructure, singular value decomposition, L-M optimization algorithm, BP neural network

气液两相流体流量或质量含气率的液体取样测量方法= **A Method for Liquid Sampling and Measurement of Gas-liquid Two-phase Fluid Flow Rate or Mass Quality**[刊, 汉]/ LIANG Fa-chun (College of Transport & Storage and Building Engineering, China University of Petroleum, Dongying, China, Post Code: 257061), WANG Dong, LIN Zong-hu (National Key Laboratory of Multi-phase Flows in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2008, 23(3). - 256~ 258

A portion of single-phase liquid is sampled and separated out from the gas-liquid two-phase fluid under measurement. Through the flow rate measurement of this portion of the single-phase liquid, the flow rate or dryness fraction of the two-phase fluid can be determined. Through a conversion from the measurement of a two-phase fluid to that of a single-phase liquid, the effect of two-phase fluid fluctuation on measurement accuracy can be avoided. The analytic results show that the ratio of the sampled liquid phase flow rate and the total flow rate in the main pipeline assumes a linear relationship with the mass quality of the main pipeline. If either one parameter of the mass quality or mass flow rate is known, the other parameter can be determined. A liquid sampling device has been designed and tested on a gas-liquid two-phase flow test loop. The test results show that within the range of the present test, the maximum measurement error of a flow rate and mass quality is less than 10%. **Key words:** two-phase flow, sampling, flow rate, mass quality, measurement

300 MW 燃煤锅炉静电除尘器的现场实验和数值模拟= **On-site Experiments and Numerical Simulation of an Electrostatic Precipitator for a 300 MW Coal-fired Boiler**[刊, 汉]/ ZHAO Hai-bo, GUO Xin, ZHENG Chu-guang (National Key Laboratory on Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2008, 23(3). - 259~ 264

The use of an experimental study and a numerical simulation to quantitatively describe the smoke particle collection process in a dust removal device provides a theoretical basis for developing an effective PM (particulate matter) dust removal scheme. The fly ash particles before and after an electrostatic precipitator (ESP) of a 300 MW coal-fired boiler were sampled on-line to investigate their size distribution law and emission characteristics. The sampling system was composed of a high-temperature water-cooled sampling tube, cyclone separator and low-pressure impactor. The test results show that the fly ash particles before and after the ESP assume a typical dual-peak distribution with the peak values emerging at around 0.08 μm and 2~ 5 μm . Thereafter, with the test results at the inlet of the ESP serving as initial conditions, an event-driven constant volume method was used to carry out a particle cluster equilibrium simulation of the dust removal process in the ESP. The detailed information about the evolution process of the smoke particle size spectrum along the longitudinal length of the ESP can thus be obtained. The simulation results of the particle size distribution at the ESP outlet were in relatively good agreement with the test results. **Key words:** coal-fired power plant, electrostatic precipitator, ir-

halable particulate matter, particle cluster equilibrium simulation, particle size spectrum

应用局部投影网络预测燃料分级燃烧锅炉的飞灰含碳量= **Forecast of Fly- ash Carbon Content in a Fuel- graded Combustion Boiler by Using a Local Projection Network**[刊, 汉]/ ZHU Yu- dong, OU Zong- xian, YAN Wei- ping (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003), WANG Yun- ze (Huadian (Beijing) Thermal Power Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100055) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2008, 23(3). - 265 ~ 268

The pulverized coal combustion efficiency of a thermal power plant is reflected in the fuel burn- out degree and can be usually evaluated by way of the fly- ash carbon content of a boiler. A foreknowledge of this parameter is of the utmost importance for fuel- graded combustion optimization, i. e. for assuring a high combustion efficiency of pulverized coal simultaneously with the reduction of NO_x emissions, thus enhancing boiler efficiency. Analyzed were the influencing factors of the boiler fly- ash carbon content. By using the specific features of a local projection network (LPN), such as simple structure, quick convergence speed, strong generalization ability and suitability for a non- linear time- variation process, a model for undergoing training and the dynamic prediction of boiler fly- ash carbon content was established and tested by use of the data obtained from boiler hot- state tests. The results show that the model in question has forecast relatively accurately the carbon content of fly ash, thus providing a model basis for the fuel graded- combustion optimization. **Key words:** burn- out rate, carbon content of fly ash, local projection network, fuel gradation, boiler

燃煤过程中亚微米颗粒生成及影响因素的研究= **A Study of the Formation of Submicron Particles in the Process of Coal Combustion and Its Influencing Factors**[刊, 汉]/ SUI Jian- cai, LIU Yi (China Power Investment Corporation Yuanda Environment Protection Engineering Co. Ltd., Chongqing, China, Post Code: 400060), XU Ming- hou (National Key Laboratory on Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), DU Yun- gui, YIN Guang- zhi (College of Resources and Environment, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2008, 23(3). - 269~ 272

Through a coal combustion experiment in a sedimentation furnace, the formation mechanism of submicron particles in the process of coal combustion has been discussed along with a study of the influence of furnace temperature, pulverized coal particle diameter and oxygen concentration on the formation of submicron particles. During the experiment, Pingdingshan, Liupanshui and Heshan- origin bituminous coal were chosen by the authors with the pulverized coal particle diameters of each kind ranging from 100 to 200 μm , 63 to 100 μm and less than 63 μm respectively. After the pulverized coal has been burned under different conditions, a 13- stage low- pressure impactor was used to collect inhalable particles in different diameters to perform a study. The research results show that the particles with a diameter of less than 0.377 μm are likely to be formed through a gasification- condensation mechanism while the particles with a diameter greater than 0.377 μm are formed through a fragmentation and agglomeration mechanism of mineral substances. With an increase of the furnace temperature, a decrease of pulverized coal diameter and an enhancement of oxygen concentration, the amount of submicron particles produced will increase to various extents. The furnace temperature is the most important influencing factor with the pulverized coal diameter and atmosphere playing a secondary role. **Key words:** coal combustion, submicron particle, formation mechanism, influencing factor

变氧量工况下煤粉炉内辐射能检测特性= **Detection Characteristics of Radiant Energy in a Pulverized Coal- fired Boiler at Variable Oxygen- content Operating Conditions**[刊, 汉]/ YANG Chao, LUO Zi- xue, ZHOU Huai- chun (National Key Laboratory on Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2008, 23(3). - 273~ 277

In a 300 MW double- furnace coal- fired utility boiler, flame images were real- time photographed by making use of several CCD (charge- coupled device) flame probes installed on the boiler proper. Radiant energy detection values re-