

紧凑型混合颗粒收集器的数值模拟

赵海波, 郑楚光

(煤燃烧国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

Numerical Simulation of Compact Hybrid Particulate Collector

ZHAO Hai-bo, ZHENG Chu-guang

(State Key Laboratory of Coal Combustion(Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Individual electrostatic precipitator (ESP) and individual bag filter exhibit low collection efficiency of submicron particles with aerodynamic diameter of 0.1-1 μm . The hybrid external conditions, namely, the compact hybrid particulate collector (COHPAC) which is characterized by the combination of electrostatic precipitator and bag filter in series, is capable of updating the collection efficiency of particulate matter (PM). As for an original ESP with a low collection efficiency of PM which was equipped in a typical 300 MW coal-fired boiler, two technique schemes, the ESP retrofit and COHPAC, were discussed. Population balance modeling was carried out against the original and retrofitted ESPs, and the unsteady dynamic filtration of the COHPAC was numerically simulated, in such a way that the nonlinear and micro-scale dynamic evolution of particle size distribution under the hybrid external conditions was quantitatively described. The results of numerical simulation show that the COHPAC, in which the overall number and mass collection efficiency reach to 99%, possesses the higher collection efficiency than the retrofitted ESP and the original ESP.

KEY WORDS: electrostatic precipitator; bag filter; particulate matter; population balance modeling; collection efficiency; numerical simulation

摘要: 单独的静电除尘器(electrostatic precipitator, ESP)和布袋除尘器均对于 0.1~1 μm 的亚微米颗粒具有较低的除尘效率。采用复合外加条件, 即 ESP 和布袋除尘器串联的紧凑型混合颗粒收集器(compact hybrid particulate collector, COHPAC), 有望提高可吸入颗粒物的除尘效率。针对一典型 300 MW 机组的 ESP, 讨论了 2 种对其进行改造的技术方案, 即对 ESP 本体进行改造和采用 COHPAC, 对改造前后 ESP 的除尘过程进行了颗粒群平衡模拟, 并对电增强布袋除尘

器的非稳态除尘过程进行了数值模拟, 从而定量描述可吸入颗粒物在多种外加条件下的非线性和微尺度动力学演变规律。数值模拟结果表明, COHPAC 比本体改造前后 ESP 具有更高的可吸入颗粒物(particulate matter, PM)除尘效率, 整体质量和整体数目除尘效率可以达到 99%以上。

关键词: 静电除尘器; 布袋除尘器; 可吸入颗粒物; 颗粒群平衡模拟; 除尘效率; 数值模拟

0 引言

传统的静电除尘器(electrostatic precipitator, ESP)和布袋除尘器在燃煤电厂均得到了广泛应用, 布袋除尘器对于亚微米颗粒除尘效率略高于 ESP^[1], 但是单独的 ESP 或布袋除尘器仍然无法满足日益严格的可吸入颗粒物(particulate matter, PM)排放要求。ESP 中静电力与惯性力的相互竞争、布袋除尘器中惯性碰撞、拦截和布朗扩散等机制的相互竞争使得它们对于较大尺度颗粒(一般大于 10 μm)和较小尺度颗粒(一般小于 0.01 μm)具有较高的除尘效率, 但是对于中间尺度颗粒(特别是 0.1~1 μm 的细微颗粒)具有非常低的除尘效率。而燃煤产生的烟尘颗粒尺度谱在 0.08 和 1 μm 处恰好存在 2 个主要的峰值^[2], 很大数量份额的烟尘颗粒均属于普通除尘技术难以脱除的中等尺度颗粒范围。随着新的火电厂污染排放标准(如对 PM_{2.5} 的严格要求等)的颁布和实施, 有必要发展新的高效 PM 除尘技术。

诸多燃煤电厂^[3]对已有 ESP 进行改造以适合机组负荷和环境排放要求, 改造成本较大, 而将 ESP 与布袋除尘器串联或并联起来有望达到更高的可吸入颗粒物脱除效果^[4-5]。本文对 ESP 与布袋除尘器串联起来的混合(复合)除尘器, 即紧凑型混合颗粒收集器(compact hybrid particulate collector, COHPAC)^[6-8]进行研究。这种串联除尘器不需要对目前电厂已有

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

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (90410017); Project Supported by Special Fund of the National Priority Basic Research of China(2006CB200304).

的静电或布袋除尘器进行较大的改造，只需要在已有的 ESP 之后串联一个传统布袋除尘器、或已有的布袋除尘器之前添加一个传统的 ESP。ESP 负责脱除绝大部分烟尘颗粒，ESP 出口排放的烟气中烟尘颗粒尺度主要为 $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$ ^[9]，带相同类型的电荷，这些荷电颗粒将使得布袋纤维感应荷电，纤维迎风端将带上与颗粒所带电荷相反的电荷，荷电颗粒与感应荷电纤维在镜像力的作用下相互吸引，有利于增强布袋除尘器的除尘效率。荷电颗粒沉积在布袋纤维之后与纤维间发生电中和而导致颗粒之间的凝并现象，从而在滤袋表面形成更多空隙和更开放结构的颗粒层，导致布袋除尘器非稳态除尘过程的压降减小，表面清灰效率更高、能耗更低，过滤速度增加。本文通过 COHPAC 的除尘过程的数值模拟来分析其对于 PM 高效脱除的可行性。

1 紧凑型混合颗粒收集器的数学模型

本文考虑的 COHPAC 如图 1 所示。

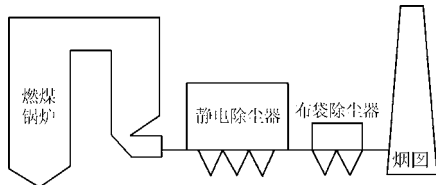


图 1 COHPAC 结构图

Fig. 1 Schematic of the COHPAC

ESP 捕集烟尘颗粒的数学模型和颗粒群平衡模拟参照文献[9]。对于装备在火电厂的大型 ESP, Kim 等^[10]发展的模型往往高估了 ESP 的分级除尘效率，这里采用修正的德意希(Deutsch)分级公式^[3]：

$$\eta_n(d_p, x) = 1 - \exp[-k\omega x / (U_{av} W)] \quad (1)$$

式中： x 为沿 ESP 纵向(烟气流动方向)距入口处的距离； $\eta_n(d_p, x)$ 为 ESP 对于尺度为 d_p 的颗粒、距离 x 处的分级数目除尘效率； ω 为尺度为 d_p 的颗粒的驱进速度； U_{av} 为气流平均速度； W 为集尘板与放电电极之间的横向距离； k 为根据现场实验结果得到的一个经验系数，对于实际电厂的 ESP，一般 $k=0.5$ 。

清洁布袋除尘器运行的初始阶段、或含尘浓度较低时，布袋除尘器的除尘过程可视为稳态过程。此时布袋除尘器对尺度为 d_p 的颗粒的除尘效率为

$$\eta_c = 1 - \exp\left[-\frac{4\alpha_f \eta_s h}{\pi(1-\alpha_f)d_f}\right] \quad (2)$$

式中： η_s 为单纤维除尘效率； α_f 为纤维填充密度； d_f 为纤维直径； h 为布袋厚度。考虑布朗扩散、拦截、惯性碰撞、重力沉积和静电吸引机制的单纤维

除尘效率的数学模型如下：

$$\eta_s = \gamma[1 - (1 - \eta_{Diff})(1 - \eta_{Inte})(1 - \eta_{Impa})(1 - \eta_{Grav}) \cdot$$

$$(1 - \eta_{Elc})] \approx \gamma(\eta_{Diff} + \eta_{Inte} + \eta_{Impa} + \eta_{Grav} + \eta_{Elc}) \quad (3)$$

式中： η_{Diff} 、 η_{Inte} 、 η_{Impa} 、 η_{Grav} 和 η_{Elc} 分别表示布朗扩散、拦截、惯性碰撞、重力沉积和静电吸引机制独立作用时的单纤维除尘效率； γ 为粘结效率，即考虑颗粒反弹等现象对于除尘效率的影响而导致颗粒与纤维碰撞但无法被捕集的现象，其数学模型如下：

布朗扩散和拦截机制^[11-12]

$$\eta_{Diff} = 1.6\left(\frac{1-\alpha_f}{Ku}\right)^{1/3} Pe^{-2/3} C_1 C_2 \quad (4)$$

$$\eta_{Inte} = 0.6\left[\frac{1-\alpha_f}{Ku}\left(\frac{I^2}{1+I}\right)\right](1 + 1.996\frac{Kn}{I}) \quad (5)$$

式中： $Ku = -0.5 \ln \alpha_f - 0.75 + \alpha_f - 0.25 \alpha_f^2$ ； $Pe = d_f U_g / D_{Diff}$ ； $D_{Diff} = k_B T C_c / (3\pi \mu_g d_p)$ ； $C_c = 1 + 2.493 \lambda / d_p + 0.84 \lambda / d_p \exp(-0.435 d_p / \lambda)$ ； $C_1 = 1 + 0.388 Kn_f [(1 - \alpha_f) Pe / Ku]^{1/3}$ ； $C_2 = 1 / \{1 + 1.6 [(1 - \alpha_f) / Ku]^{1/3} Pe^{-2/3} C_1\}$ ； $I = d_p / d_f$ ； $Kn_f = 2 \lambda / d_f$ 。

惯性碰撞机制^[13]

$$\eta_{Impa} = St_k^3 / (St_k^3 + 0.77 St_k^2 + 0.22) \quad (6)$$

式中 $St_k = \frac{\rho_p d_p^2 U_g C_c}{18 \mu_g d_f}$ 。

重力沉积机制^[14]

$$\eta_{Grav} = \frac{d_f g}{U_g^2} St_k = \frac{\rho_p d_p^2 g C_c}{18 \mu_g U_g^2} \quad (7)$$

静电吸引机制^[15-16]

$$\eta_{Elc} = \frac{3\pi(1-\alpha_f)}{400\alpha_f} K_{ex} \quad (8)$$

式中 $K_{ex} = \frac{\omega_p}{U_g}$ ； $\omega_p = \frac{q_p E_c C_c}{3\pi \mu d_p}$ ； $q_p = \pi \epsilon_0 E_c d_p^2 [(1 + 2\lambda_i / d_p)^2 + \frac{2}{1 + 2\lambda_i / d_p} \cdot \frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2}]$ 。

粘结效率 γ_k 为^[17]

$$\gamma = \begin{cases} 1, & St_k < 0.01 \\ 0.00318 St_k^{-1.248}, & St_k \geq 0.01 \end{cases} \quad (9)$$

布袋除尘器的除尘过程非常复杂，主要原因在于其除尘过程为非稳态过程，分级除尘效率和压降均随时间而改变。Thomas^[18-19]和赵钟鸣等^[15]分别发展了荷尘纤维除尘效率的模型，前者假设颗粒晶簇纤维和原始纤维独立捕集烟尘颗粒，而忽略两者之间的相互作用；赵钟鸣等^[15]的模型则将纤维和包裹

在其中的颗粒看作一个整体(当量纤维),当量纤维的直径 d_f' 和纤维层的当量填充密度 α_f' 随纤维层中的荷尘量不断增加而逐渐增大,把 d_f' 和 α_f' 分别取代稳态除尘效率公式中的 d_f 和 α_f ,即得到非稳态除尘效率,非稳态除尘过程的压降模型也类似处理。 d_f' 和 α_f' 的数学模型如下:

$$\begin{cases} \alpha_f' = K_d^2 \alpha_f \\ d_f' = K_d d_f \end{cases} \quad (10)$$

式中: K_d 为荷尘系数, $K_d = 1 + W_d / (\alpha_f \rho_p h)$; h 为布袋厚度; W_d 为单位面积布袋荷尘量($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$), 时间 t 处的 W_d 计算如下:

$$W_{d,t} = \sum_{i=1}^{n_c} (\pi \rho_p \eta'_{C,i,t} N_i d_{pi}^3 U_g \Delta t / 6) \quad (11)$$

式中: n_c 为颗粒类的数目; N_i 为 ESP 之后、布袋除尘器之前尺度为 d_{pi} 的烟尘颗粒的数目浓度, m^{-3} ; U_g 为布袋迎风速度; $\eta'_{C,i,t}$ 为 t 时刻、荷尘纤维对尺度为 d_{pi} 的颗粒的除尘效率;

$$\eta'_{C,i,t} = 1 - \exp[-4\alpha_f' \eta'_{s,i,t} h / (\pi(1 - \alpha_f') d_f')] \quad (12)$$

表 1 静电除尘器结构参数

Tab. 1 Structural parameters of electrostatic precipitator

ESP	锅炉烟 气量/(m^3/h)	数目/ 台	通流 面积/ m^2	电场 风速/(m/s)	烟气停留 时间/ s	同级间 距/ mm	单电场 长度/ m	总电场 长度/ m	极板 高度/ m	收尘 面积/ m^2	比收尘 面积/(s/m)	长高 比	直流输出 电压/ kV	单台 电场数	承受 负压/ Pa	漏风 率/%
原始 ESP	1 138 345	2	192.5	1.2	9.33	400	3.75	11.25	13	10 822.5	46.88	0.865	95	3	6 000	<3
改造 ESP	1 714 680	2	220	1.08	20.22	450	3.64	21.84	14.84	23 984	100.7	1.47	95 或 80	9	5 730	<2.5

设定除尘器入口之前烟尘颗粒尺度谱满足三峰对数正态分布:

$$n_p(d_p) = \sum_{i=1}^3 \frac{N_{p,i}}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_{pg,i}} \exp\left[-\frac{\ln^2(d_p / d_{pg,i})}{2 \ln^2 \sigma_{pg,i}}\right] \frac{1}{d_p} \quad (15)$$

式中: $N_{p,i}$, $d_{pg,i}$, $\sigma_{pg,i}$ 分别为烟尘在不同区间的数目浓度、几何平均尺度和几何标准偏差, 如表 2 所示。颗粒尺度范围限定为 $0.08 \sim 20 \mu\text{m}$ 。除尘器入口颗粒数目浓度和质量浓度分别为 $2.501 3 \times 1 014 \text{ m}^{-3}$ 和 $9.662 2 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

如图 1 所示, COHPAC 的除尘过程的数值模拟包括 2 部分, 首先是 ESP 捕集烟尘颗粒的过程, 具体过程和数学模型参见文献[9](采用修正的德意希分级公式^[3]); 然后是静电增强布袋除尘器对剩余的亚微米颗粒的除尘过程, 布袋除尘器之前的烟尘尺度分布、烟尘的荷电分布等均依据 ESP 末端出口的数据。

静电增强布袋除尘器的除尘过程为非稳态。数值模拟的初始时刻, 依照清洁布袋的除尘效率公式计算得到第 1 个时间步长之内单位面积纤维荷尘量(依据公式(11))和压降(依据公式(14)), 并更新纤维

式中: $\eta'_{s,i,t} = \gamma'_{i,t} (\eta'_{\text{Diff},i,t} + \eta'_{\text{Inte},i,t} + \eta'_{\text{Impa},i,t} + \eta'_{\text{Grav},i,t} + \eta'_{\text{Elc},i,t})$; $\eta'_{s,i,t}$, $\eta'_{\text{Diff},i,t}$, $\eta'_{\text{Inte},i,t}$, $\eta'_{\text{Impa},i,t}$, $\eta'_{\text{Grav},i,t}$, $\eta'_{\text{Elc},i,t}$, $\gamma'_{i,t}$ 分别为 t 时刻荷尘单纤维的各种效率, 将 d_f' 和 α_f' 取代公式(4)~(9)中的 d_f 和 α_f , 即可得到这些效率。而 t 时刻、布袋除尘器总质量除尘效率为

$$\eta'_{C,t} = \sum_{i=1}^{n_c} (\pi \rho_p \eta'_{C,i,t} N_i d_{pi}^3 / 6) / \sum_{i=1}^{n_c} (\pi \rho_p N_i d_{pi}^3 / 6) \quad (13)$$

布袋除尘器的压降计算如下^[18-19]:

$$\Delta P = 64 \mu_g U_g h \alpha_f'^{3/2} (1 + 56 \alpha_f'^3) / d_f'^2 \quad (14)$$

2 紧凑型混合颗粒收集器除尘过程的数值模拟

针对一典型的 300 MW 机组(华北电网 A 厂 3 号炉, 锅炉额定蒸发量 $1 110 \text{ t/h}$)^[3]进行模拟, 原 ESP 难以满足新排放标准要求, 该电厂曾对其进行增容改造。改造前后 ESP 的主要设计参数见表 1。改造后 ESP 达到了很好的除尘效果, 但这种改造方案代价巨大。本文考察投资较少的 COHPAC 的除尘效果。

当量直径 d_f' 和当量填充密度 α_f' , 在每个时间步长内, 认为静电增强布袋除尘器处于稳态除尘过程; 然后在第 2 个时间步长之内按照荷尘布袋的除尘效率公式(12)进行计算; 依次循环前进, 直到清灰或更换新的布袋。本文假设时间步长均为 1 s 。

假设布袋采用高效率细微颗粒过滤纤维(HEPA filters), 参照文献[19]的实验数据, 本文中布袋纤维(型号为 D306)的厚度 $h = 370 \mu\text{m}$, $\alpha_f = 9.4 \times 10^{-2}$, $d_f = 1.3 \mu\text{m}$, 来流速度 $U_g = 0.1 \text{ m/s}$, 采用脉冲喷吹清灰方式。

表 2 燃煤锅炉进入除尘器前的烟尘尺度谱特征参数

Tab. 2 Characteristic parameters of particle size distribution before precipitator inlet of coal-fired boiler

$N_{p,1}/\text{m}^{-3}$	$d_{pg,1}/\mu\text{m}$	$\sigma_{pg,1}$	$N_{p,2}/\text{m}^{-3}$	$d_{pg,2}/\mu\text{m}$	$\sigma_{pg,2}$	$N_{p,3}/\text{m}^{-3}$	$d_{pg,3}/\mu\text{m}$	$\sigma_{pg,3}$
5×10^{14}	0.08	1.5	1×10^{11}	2.0	2.0	1×10^9	10.0	1.5

图 2 为几种除尘器出口的分级除尘效率曲线。可知, 改造之前的原 ESP 对于 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 的超细微颗粒物的分级除尘效率在 $70\% \sim 80\%$ 左右, 总质量除尘效率为 98.62% , 总数目除尘效率仅为 84.27% , 还有大量亚微米颗粒尚未被脱除, 除尘器出口烟尘

数目浓度和质量浓度分别为 $3.9337 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ 和 $133.2895 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ；改造后的 ESP 对于 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 的烟尘颗粒能够达到 80%~95% 的分级除尘效率，其总质量除尘效率高达 99.35%，总目除尘效率达到 92.89%，从 ESP 逃逸到大气环境中的亚微米颗粒物相对来说大幅度降低，出口烟尘数目浓度和质量浓度分别为 $1.7794 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ 和 $62.9152 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。而对于 COHPAC，也能够达到非常好的除尘效果。在新鲜布袋除尘器除尘的初始阶段，其压降较低，约为 900 Pa，此时布袋除尘器对于亚微米颗粒物具有较高的除尘效率，而随着布袋荷尘量的增加，压降和穿透率都有一定程度的降低，但是仍然对亚微米颗粒物保持很好的除尘效果。一般认为压降达到 1 500 Pa 时需要对布袋除尘器进行清灰，清灰之前 (压降 $\Delta P=1\ 500 \text{ Pa}$) 和清灰之后 ($\Delta P=900 \text{ Pa}$) COHPAC 的除尘效果参照图 2。

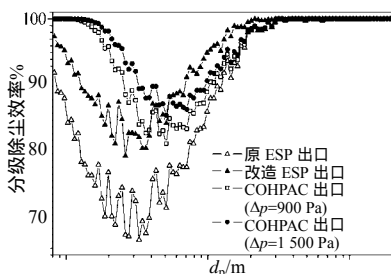


图 2 几种除尘器出口的分级除尘效率
Fig. 2 Grade number collection efficiency in the inlet of several precipitators

COHPAC 对于 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 的烟尘颗粒的分级除尘效率达到了 80%~100% 左右，对于 $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 的烟尘颗粒，COHPAC 的分级除尘效率要高于改造之后的 ESP，但是 $0.3 \sim 1 \mu\text{m}$ 颗粒分级除尘效率要稍微低于改造之后 ESP。清灰之后的 COHPAC 总质量除尘效率和总目除尘效率分别为 99.72% 和 99.48%，布袋除尘器出口烟尘数目浓度和质量浓度分别为 $1.4974 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ 和 $27.4743 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ；而清灰之前的 COHPAC 总质量和数目除尘效率分别为 99.80% 和 99.80%，而出口进入大气环境的烟尘数目浓度和质量浓度分别为 $7.2896 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ 和 $42.5262 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。这说明 COHPAC 的除尘效果甚至高于改造后的 ESP。

图 3(a) 为压降 ΔP 和质量穿透率 P 随布袋单位面积荷尘量 W_d 的变化，随着布袋除尘器服务时间 T 的延长，布袋荷尘量逐渐增加，纤维当量直径 d_f' 和填充密度 α_f' 均不断增加 (图 3(b))，使得布袋除尘器的压降相应增加而穿透率相应降低。这些模拟结

果与 Walsh 等^[20] 的试验结果定性吻合。单纯就布袋除尘器而言，其整体目除尘效率 $\eta_{on,bag}$ 和整体质量除尘效率 $\eta_{om,bag}$ 如图 3(c) 所示，整体效率均随荷尘量增加而增加，但是整体目除尘效率高于整体质量除尘效率，这主要是因为布袋除尘器对于数目份额较大的亚微米颗粒的分级除尘效率高于质量份额较大的超微米颗粒。COHPAC 的整体目除尘效率 $\eta_{on,COHPAC}$ 和整体质量除尘效率 $\eta_{om,COHPAC}$ 如图 3(d) 所示，2 种效率均达到了 99% 以上，整体质量除尘效率稍微高于整体目除尘效率，主要原因在

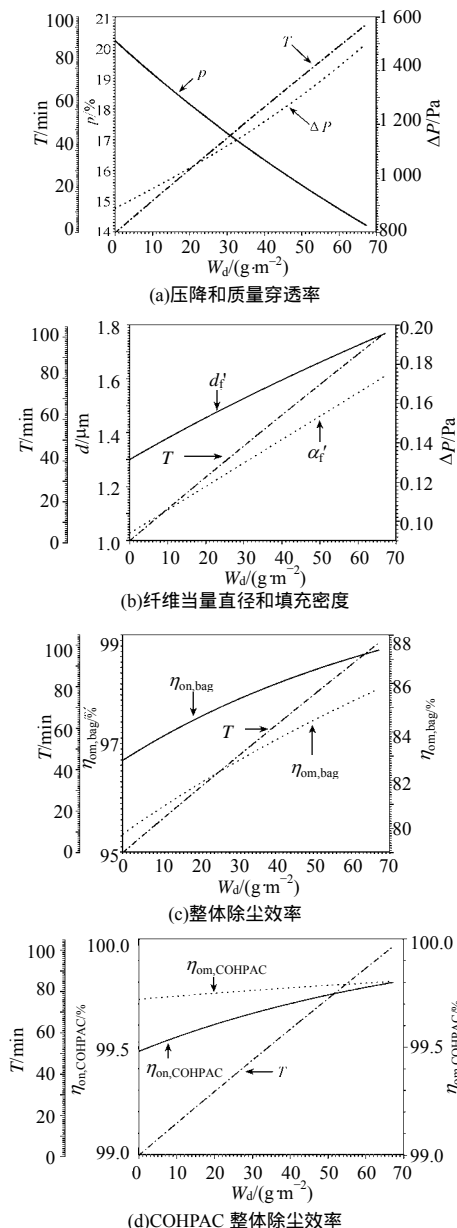


图 3 布袋除尘器关键参数的非稳态演变过程
Fig. 3 Evolution of several key parameters of bag filters during dynamic filtration

于 ESP 有效脱除了质量份额很大的那些超微米颗粒的缘故。

3 结论

在 ESP 之后串联布袋除尘器(即 COHPAC)有望满足燃煤电厂 PM 排放要求, 本文对其进行了基于颗粒群平衡模拟的数值模拟, 并以此为基础对这种除尘技术进行了可行性分析, 为其工业应用提供理论基础和理论指导。

模拟结果表明, COHPAC 整体数目除尘效率和整体质量除尘效率可达到 99% 以上, 其中 ESP 主要脱除大尺度烟尘颗粒和一部分亚微米烟尘颗粒, 且对颗粒进行荷电, 从 ESP 逃逸出来的亚微米荷电颗粒进入布袋除尘器, 借助荷电颗粒与感应荷电纤维之间的镜像力, 布袋纤维在布朗扩散、拦截、惯性碰撞、静电吸引和重力沉积等除尘机理的控制下, 这些质量浓度较小而数目浓度很大的亚微米颗粒被布袋除尘器所捕集。这种除尘技术是基于现有传统除尘装置的改造, 具有较小的投资成本和技术成本, 具有工业应用前景, 是值得参考的一种 ESP 或布袋除尘器改造方案。

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] 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.
- [3] 原永涛, 林国鑫, 宣伟桥, 等. 火力发电厂电除尘技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [4] 黄斌, 姚强, 李水清. 静电增强脱除 PM_{2.5} 研究进展[J]. 电站系统工程, 2003, 19(6): 44-46.
Huang Bin, Yao Qiang, Li Shuiqing. Progress in technology of electrostatic enhancement for removal of PM_{2.5}[J]. Power System Engineering, 2003, 19(6): 44-46(in Chinese).
- [5] 黄斌, 姚强, 宋蕾, 等. 静电对纤维滤料过滤飞灰颗粒的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 106-110.
Huang Bin, Yao Qiang, Song Qiang, et al. Effect of the electrostatics on the fibrous filter filtrating fly ash[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(24): 106-110(in Chinese).
- [6] Chang R. Compact hybrid particulate collector (COHPAC): US, 5158580[P]. 1992-10-27.
- [7] Bustard J, Durham M, Starns T, et al. Full-scale evaluation of sorbent injection for mercury control on coal-fired power plants[J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(6-7): 549-562.
- [8] Chang R. COHPAC compacts emission equipment into smaller, denser unit[J]. Power Engineering, 1996, 100(77): 22-25.
- [9] 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.
Zhao Haibo, Zheng Chuguang. Numerical simulation of single-stage electrostatic precipitator for collecting fly ashes[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 31-35(in Chinese).
- [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] Lee K W, Liu B Y. Theoretical study of filtration by fibrous filters[J]. Aerosol Science and Technology, 1982, 1(1): 147-161.
- [12] Payet S, Boulaud D, Madelaine G, et al. Penetration and pressure drop of a HEPA filter during loading with submicron liquid particles[J]. Journal of Aerosol Science, 1992, 23(7): 723-735.
- [13] Landahl H D, Herrmann R G. Sampling of liquid aerosols by wires, cylinders and slides and the efficiency of impaction of the droplets[J]. Journal of Colloid Science, 1949, 4(2): 103-136.
- [14] Tardos G, Pfeffer R. Interceptional and gravitational deposition of inertialess particles on a single sphere and in a granular bed[J]. AIChE Journal, 1980, 26(4): 698-701.
- [15] Zhao Z M, Tardos G I, Pfeffer R. Separation of airborne dust in electrostatically enhanced fibrous filters[J]. Chem. Eng. Commun, 1991, 108(1/2): 307-332.
- [16] Zhao Z M, Tardos G I, Pfeffer R. Separation of aerosol in electrostatically enhanced fibrous filters[C]. Proceedings of the Second World Congress on Particle Technology, Japan, Kyoto, 1990: 12-24.
- [17] Tien C. Granular Filtration of Aerosols and Hydrosols[M]. Boston: Butterworth Publishers, 1989.
- [18] Thomas D, Penicot P, Contal P, et al. Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles experimental and modelling study[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(11): 3549-3561.
- [19] Thomas D, Contal P, Renaudin V, et al. Modelling pressure drop in HEPA filters during dynamic filtration[J]. Journal of Aerosol Science, 1999, 30(2): 235-246.
- [20] Walsh D C, Tenhouse J I T. Clogging of an electrically active fibrous filter material: experimental results and two-dimensional simulations[J]. Powder Technology, 1997, 93(1): 63-75.

收稿日期: 2007-11-05。

作者简介:

赵海波(1977—), 男, 博士, 副教授, 从事颗粒群平衡模拟、热经济学和 CO₂ 减排等研究, klinsmanzhb@163.com;

郑楚光(1945—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事多相流、煤的清洁燃烧、重金属污染等研究。

(编辑 车德竟)