

静电增强湿式除尘器捕集可吸入颗粒物的定量描述

赵海波, 郑楚光

(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 湿式重力喷淋除尘器一般对可吸入颗粒物的除尘效率较差, 而借助静电力, 则有望改善湿式除尘器对细微颗粒的除尘效果. 首先介绍了静电增强湿式除尘器的捕集机制, 包括布朗扩散、拦截、惯性碰撞和静电捕集; 然后利用事件驱动常体积法描述了典型火电厂中三峰分布的烟尘颗粒群的尺度分布函数的动力学演变过程, 以此量化静电增强湿式除尘器的除尘过程. 结果表明, 典型的传统湿式重力喷淋除尘器对 PM 的分级除尘效率在 5% 以上; 如果液滴荷电, 有望使得该除尘器对 PM 的分级除尘效率达到 70% 以上; 如果颗粒荷电, PM 的分级除尘效率将在 25% 以上; 在液滴和颗粒同时荷上相反电荷的静电增强湿式除尘器中, PM 的分级除尘效率接近 100%.

关键词: Monte Carlo 算法; 通用动力学方程; 可吸入颗粒物; 颗粒尺度分布; 沉积

中图分类号: TK16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8740(2007)02-0119-07

Quantitative Description of Removal Process of Particulate Matter in Gravitational Wet Scrubbers with Electrostatic Enhancement

ZHAO Hai-bo, ZHENG Chu-guang

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

Abstract: Traditional gravitational wet scrubbers have low removal efficiency for particulate matters (PM), but the performance of the scrubbers for PM can be greatly improved by the help of electrostatic force. First, the removal mechanisms of scrubbers with electrostatic enhancement, that is, Brownian diffusion, interception, inertial impaction and electrostatic collection are introduced. Then event-driven constant volume method is used to describe the dynamic evolution of fly ash size distribution function with initial tri-modal in typical power plants, in such a way that the removal process in wet scrubbers with electrostatic enhancement is described quantitatively. Numerical simulation shows that, in comparison to that the grade removal efficiency of PM in traditional wet scrubbers is above 5%, grade efficiency of PM in wet scrubbers with electrostatic enhancement reaches above 70% when droplet charging, above 25% when particle charging, and even near 100% when particle charging and droplet charging with opposite polarities.

Keywords: Monte Carlo method; general dynamic equation; particulate matter; particle size distribution; deposition

湿式除尘器被广泛应用于冶金、矿山和电力等行业的含尘气体净化, 其形式多样, 液滴捕集颗粒的机制主要包括布朗扩散 (Brownian diffusion)、惯性碰撞 (inertial impaction) 和拦截 (interception), 它被认为对细微颗粒的去除效果较差. 可以通过改造传统湿式除尘器 (如板-柱式旋风湿式除尘器^[1]等) 来提高细微颗粒

物的去除效率, 而另外一种方式是采用静电增强湿式除尘器, 使得液滴荷电、或颗粒荷电、或甚至液滴和颗粒同时荷上相反电荷, 此时液滴和颗粒之间的镜像力或库仑力将有助于更有效地清除可吸入颗粒物^[2].

从工程的角度出发, 已经发展了一系列的方法来计算湿式除尘器的分级除尘效率、总体除尘效率和分

收稿日期: 2006-12-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90410017); 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (2006CB200304).

作者简介: 赵海波 (1977—), 男, 博士, 副教授, hzhao@hust.edu.cn.

割粒径等^[3]，但是这些工作无法定量描述除尘器捕集粉尘颗粒的动力学过程。王京刚等^[4]采用拉氏轨道跟踪的方法描述了荷电水雾除尘器对粉尘的捕集过程，模型复杂而计算代价极大；而仅仅通过得到颗粒尺度分布函数的沿程演变过程的详细信息也可量化除尘器捕集粉尘颗粒的复杂过程，此时需要求解考虑颗粒捕集的通用动力学方程 (general dynamic equation, GDE)。

Kim 等^[5]采用矩方法求解 GDE 以此来描述重力喷淋湿式除尘器对粉尘颗粒的捕集过程，由于矩方法的局限性，初始颗粒尺度谱假设为单峰对数正态分布，并对沉积核做了诸多简化和假设。笔者发展了一种描述颗粒离散系统动力学演变过程的随机算法——事件驱动常体积法^[6]。本文利用该随机算法定量描述湿式除尘器的除尘过程，目的是从数值模拟的角度寻找对可吸入颗粒物具有高除尘效率的除尘方案，并为这种新型除尘器的设计和优化提供依据。

1 静电增强湿式除尘器的数学模型

静电增强湿式除尘器捕集颗粒的机制非常复杂^[2]，一般主要考虑 4 种最主要的除尘机制，即布朗扩散、拦截、惯性碰撞和静电捕集，其中静电捕集机制视颗粒和液滴的荷电情况而不同，如颗粒荷电而液滴不荷电，则为荷电颗粒吸附 (CPA)，如液滴荷电而颗粒不荷电，则静电捕集机制就是镜像力控制下的荷电液滴洗涤 (CDS)，如果液滴和颗粒荷上相反电荷，则该机制就是库仑力控制下的 CDS。

静电增强逆流式重力喷淋除尘器的几何结构如图 1 所示。含尘气体处理量 ($Q_g, m^3/h$) 取决于气流上升速度 ($u_g, m/s$) 和除尘器内径 (D_{ws}, m)， $Q_g = 900 \cdot D_{ws}^2 \cdot u_g$ 。而除尘效果与除尘器的有效除尘高度 H 紧密相关，随着不同尺度的颗粒被液滴所捕集，颗粒尺度谱沿着除尘器高度 h 而不断演变，可以通过通用动力学方程描述，即

$$dn_p(d_p, t) / dt = -R(d_p) n_p(d_p, t)$$

$$\text{或 } dn_p(d_p, h) / dh = -R(d_p) n_p(d_p, h) / U_p \quad (1)$$

这里 U_p 为颗粒运动速度，注意到 $h = U_p t$ ； $n_p(d_p, h)$ 是尺度为 d_p 的颗粒的尺度谱函数 ($\mu m^{-1} \cdot m^{-3}$)，表示高度 h 、尺度为 d_p (量纲 μm) 的颗粒在单位体积内的数密度； $R(d_p)$ 为尺度为 d_p 的颗粒的沉积核，即尺度为 d_p 的颗粒在除尘器中被捕集的速率 (s^{-1})。为了得到沉积核的数学模型，通常作如下假设：湿式除尘器空间内颗粒和液滴均匀分布；喷淋过

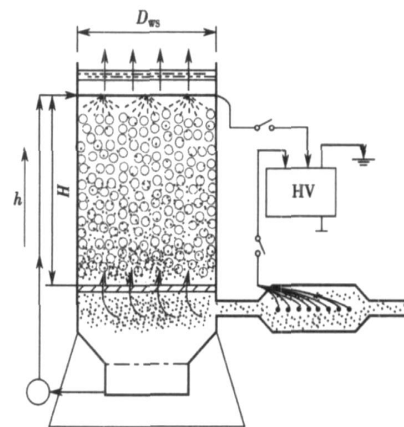


图 1 静电增强逆流式重力喷淋除尘器几何示意

程和含尘气体的流动过程均保持稳定；液滴尺度分布始终保持不变；不考虑颗粒之间的凝并、吸湿、破碎等现象；液滴和颗粒认为是规则球形等。如果颗粒与液滴发生碰撞，则认为颗粒被液滴所捕集，故沉积核模型为

$$R(d_p) = \int_{D_{d,min}}^{D_{d,max}} K(d_p, D_d) E(d_p, D_d) \cdot n_d(D_d) dD_d \quad (2)$$

其中， $K(d_p, D_d)$ 为碰撞核 (collision kernel)，表示颗粒 (d_p) 与液滴 (D_d) 在同一时刻几何轨道发生交叉而碰撞的概率， $K(d_p, D_d) = D_d^2 (U_d + U_p) / 4$ ， U_d 和 U_p 分别为液滴 (D_d) 和颗粒 (d_p) 的运动速度，这里认为所有液滴颗粒的运动速度均等于喷嘴出口向下的喷射速度，而所有颗粒的运动速度均等于气流上升速度 u_g ； $n_d(D_d)$ 为液滴尺度谱函数， $mm^{-1} \cdot m^{-3}$ ； $E(d_p, D_d)$ 为颗粒 (d_p) 和液滴 (D_d) 的碰撞效率，表示实际发生的碰撞次数与理论上将要发生的碰撞次数的比例，这是由于湍流扩散、布朗扩散、静电吸附等因素所引起的颗粒和液滴的轨迹滑移， $0 \leq E(d_p, D_d) \leq 1$ ，它的模型集中体现布朗扩散、拦截、惯性碰撞和静电捕集等机制。

$$E(d_p, D_d) = 1 - (1 - E_{diff})(1 - E_{int})(1 - E_{imp}) \cdot (1 - E_{elec}) \quad (3)$$

其中 E_{diff} 、 E_{int} 、 E_{imp} 和 E_{elec} 分别为布朗扩散、拦截、惯性碰撞和静电捕集机制导致的碰撞效率，模型^[7]为

$$\begin{cases} E_{diff} = 4.18 Re^{1/6} Pe^{-2/3} \\ E_{int} = (1 + d_p / D_d)^2 - D_d / (D_d - d_p) \\ E_{imp} = [St / (St + 0.7)]^2 \end{cases} \quad (4)$$

这里 Re 和 Pe 分别为液滴的雷诺数和贝克列数； St 和 D_{diff} 分别为颗粒 Stokes 数和扩散系数。模型为

$$\begin{cases} Re = D_d U_d / \mu_g \\ Pe = D_d U_d / D_{diff} \\ St = 2 \rho_p (U_d + U_p) C_c / D_d \\ D_{diff} = k_B T C_c / (3 \mu_g d_p) \\ \rho_p = \rho_p d_p^2 / (18 \mu_g) \\ C_c = 1 + 2.493 / d_p + 0.84 / d_p \cdot \exp(-0.435 d_p) \end{cases} \quad (5)$$

式中： ρ_g 、 μ_g 分别为气体密度和动力黏度； ρ_p 为颗粒弛豫时间尺度； k_B 为 Boltzmann 常数 ($1.380 54 \times 10^{-23}$)； T 为气流的绝对温度； C_c 为 Cunningham 滑移修正系数；为大气中气体分子的平均自由程， $\lambda = 6.5 \times 10^{-8}$ m； Re_p 为颗粒雷诺数。

当颗粒与液滴附上极性相反的电荷时，颗粒与液滴之间通过库仑力相互吸引，所导致的碰撞效率为^[8]

$$E_{elec} = 4 C_c q_d q_p / [3^2 \mu_g (U_d + U_p) \rho_p D_d^2] \quad (6)$$

对于颗粒不荷电而液滴荷电的情况，荷电的液滴将使得颗粒表面感应产生极性相反的镜像电荷，在镜像力的作用下所导致的碰撞效率^[7]为

$$E_{elec} = \left\{ \frac{15}{8} \left[\frac{\rho_p - 1}{\rho_p + 2} \right] \frac{2 C_c [q_d / (D_d^2)]^2 d_p^2}{3 \mu_g (U_d + U_p) \rho_p D_d} \right\}^{0.4} \quad (7)$$

当颗粒荷电而液滴不荷电时，液滴表面产生镜像电荷，在这种镜像力作用下的碰撞效率^[9]为

$$E_{elec} = 2.89 (C_c q_d^2 / (3^2 \mu_g (U_d + U_p) \rho_p d_p D_p^2))^{0.353} \quad (8)$$

式中： ρ_p 为颗粒相对介电常数，本文取 $\rho_p = 5$ ； ρ_0 为空气介电常数， $\rho_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F·m⁻¹； q_d 和 q_p 分别为

液滴和颗粒荷电量。可以采用感应荷电、电晕荷电等几种方式使液滴荷电，颗粒荷电的方式一般有电场感应荷电和扩散荷电。本文认为液滴或颗粒均通过电场荷电方式而荷电，荷电量模型^[7, 10]分别为

$$\begin{aligned} q_d &= 3 \rho_0 E_d D_d^2 / (d + 2) \\ q_p &= \rho_0 E_p d_p^2 [(1 + 2 \rho_i / d_p)^2 + 2(\rho_p - 1) / [(1 + 2 \rho_i / d_p)(\rho_p + 2)]] \end{aligned} \quad (9)$$

式中： E_d 和 E_p 分别为用于液滴和颗粒荷电的电场强度； d 为液滴相对介电常数，本文取 $d = 80$ ； ρ_i 为离子平均自由程 $\rho_i = 1 \times 10^{-7}$ m。

2 数值模拟

2.1 颗粒尺度谱和液滴尺度谱

锅炉燃煤所产生的烟尘基本呈三峰分布^[11]，通过拟合，笔者采用了三峰对数正态分布来代表火电厂进入除尘器之前的烟尘尺度谱，即

$$n_p(d_p) = \sum_{i=1}^3 \frac{N_{p,i}}{\sqrt{2 \ln \rho_{pg,i}}} \exp\left[-\frac{\ln^2(d_p / d_{pg,i})}{2 \ln^2 \rho_{pg,i}}\right] \frac{1}{d_p} \quad (10)$$

式中： $N_{p,i}$ 、 $d_{pg,i}$ 和 $\rho_{pg,i}$ 分别为烟尘在不同区间的数密度、几何平均尺度和几何标准偏差，具体数值如表 1 所示。本文的数值模拟中烟尘尺度范围为 0.08 μ m d_p 20 μ m，此时颗粒初始数密度 $N_{p,0}$ 达到了 2.50×10^{14} m⁻³，初始几何平均尺度约为 0.11 μ m，初始的颗粒质量分数分布(如图 2(a)所示)和数目分数分布(如图 2(b)所示)与实验值^[12-13]较为接近。

表 1 燃煤锅炉进入除尘器前的烟尘尺度谱特征参数

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

液滴尺度谱可由单峰对数正态分布函数^[14]代表，来即

$$n_d(D_d) = \frac{N_d}{\sqrt{2 \ln \rho_{dg}}} \exp\left[-\frac{\ln^2(D_d / D_{dg})}{2 \ln^2 \rho_{dg}}\right] \frac{1}{D_d} \quad (11)$$

其中， N_d 、 D_{dg} 和 ρ_{dg} 为液滴尺度谱的特征参数，分别表示液滴数密度、液滴几何平均尺度和液滴几何标准偏差。本文中， $D_{dg} = 1$ mm， $\rho_{dg} = 1.25$ 。喷淋流量 Q_d 或液气比 Q_d/Q_g 与液滴尺度谱的特征参数之间存在的

$$N_d = \frac{w_1}{d^3 d_{dg}^3 \exp(9^2 / 2) / 6} =$$

$$\begin{aligned} &\frac{Q_d / d / (D_{ws}^2 U_d / 4)}{d^3 d_{dg}^3 \exp(9^2 / 2) / 6} = \\ &\frac{Q_d / Q_g \cdot U_p / U_d}{d_{dg}^3 \exp(9^2 / 2) / 6} \end{aligned} \quad (12)$$

其中， w_1 为喷水量，kg/m³，即单位体积内所有液滴质量之和。

本文中，除尘器内径 $D_{ws} = 6$ m，有效喷淋高度 $H = 2$ m，烟气流速 $u_g = 0.6$ m/s，烟气处理量 $Q_g = 61 072.56$ m³/h，液滴喷射速度 $U_d = 1.2$ m/s，液气比 $Q_g/Q_d = 2.0$ L/m³， $d = 997.45$ kg/m³， $\rho_p = 2 270$ kg/m³， $\rho_g = 0.828 8$ kg/m³， $\mu_d = 9.591 \times 10^{-4}$ kg/(m·s)， $\mu_g = 2.4 \times 10^{-5}$ kg/(m·s)， $T = 433$ K。根据公式

(12) , 液滴数密度为 $N_d = 1.53 \times 10^7 \text{ m}^{-3}$.

$$(d_p, h) = 1 - N_p(h) / N_{p,0} =$$

$$1 - \int_{d_p} n_p(d_p, h) d d_p / N_{p,0} =$$
$$1 - \exp[-R(d_p) h / U_p] \quad (13)$$

2.2 传统重力喷淋除尘器

求解考虑颗粒捕集的通用动力学方程的事件驱动常体积(event-driven constant volume, EDCV)法的描述参见文献[6]. 首先利用 EDCV 法求解方程(1)以定量描述传统重力喷淋除尘器洗涤烟气的动力学过程, 此时只考虑布朗扩散、拦截和惯性碰撞三种机制对碰撞效率的贡献, 此时烟尘的清除过程类似于降雨过程对气溶胶的湿去除过程^[14]. 图 2(a)为指定的除尘器高度处的颗粒质量分数分布 (particle mass fraction size distribution). 图 2(b)为指定高度处颗粒尺度分布 (particle size distribution). 从图 2(a)和图 2(b)可知, 初始时刻, 超微米颗粒在质量分数分布中占据主导地位, 而亚微米颗粒的数密度则远远大于细微颗粒和超微米颗粒, 随着喷淋过程的持续进行, 即随着烟气在除尘器中的上升, 超微米颗粒的质量分数和数目分数均越来越小, 表明它们有效地被液滴所捕集而被清除, 但是亚微米颗粒和细微颗粒的尺度谱几乎没有任何变化, 这表明这些颗粒很难被捕集. 另外, 如图 2(c)所示, 颗粒总质量浓度随着喷淋过程而急剧下降, 传统湿式喷淋除尘器基于质量的总除尘效率可以达到 93.84%, 但是颗粒总数密度下降很少, 基于数目的总除尘效率仅为 4.18%, 而颗粒几何平均尺度也几乎没有变化. 图 2(d)为分级除尘效率 (d_p, h) 的沿程演变过程, 其理论解为

对于分级除尘效率, EDCV 法的模拟结果尽管存在一定的统计噪声, 但是与理论解基本符合较好, 从图 2(d)可清晰了解到, 随着有效喷淋高度的增加, 所有颗粒的分级除尘效率均一定程度地增加, 但是亚微米颗粒和细微颗粒的分级除尘效率均基本在 5% 以上. $h = 2 \text{ m}$ 时除尘器的分割直径为 $1.3 \mu\text{m}$.

2.3 液滴荷电而颗粒不荷电的静电增强湿式除尘器

当液滴首先通过一个电场强度 $E_d = 5 \text{ kV/cm}$ 的电场时, 液滴表面将带上一定的电荷 (公式(9)), 对于尺度为 1 mm 的液滴, 其液滴荷质比为 $7.79 \times 10^{-5} \text{ C/kg}$. 在镜像力的作用下, 荷电液滴和颗粒之间的碰撞效率将一定程度提高, 即产生所谓的荷电液滴洗涤 (CDS) 效应. 液滴不荷电而颗粒荷电时, 产生荷电颗粒吸附效应. 如图 3(a)和 (b)所示, 相比较于传统湿式除尘器, 不仅仅超微米颗粒, 而且细微颗粒和亚微米颗粒的质量分数分布和数目分数均随着喷淋高度的增加而越来越小, 可见 CDS 效应非常有利于可吸入颗粒物的高效脱除. 在这种静电增强湿式除尘器中, 在保持基于质量的总除尘效率仍然较高 (达到 98.62%) 的同时, 基于数目的总除尘效率也达到了 72.01%, 进一步证明数目份额极大的亚微米和细微颗粒均被有效

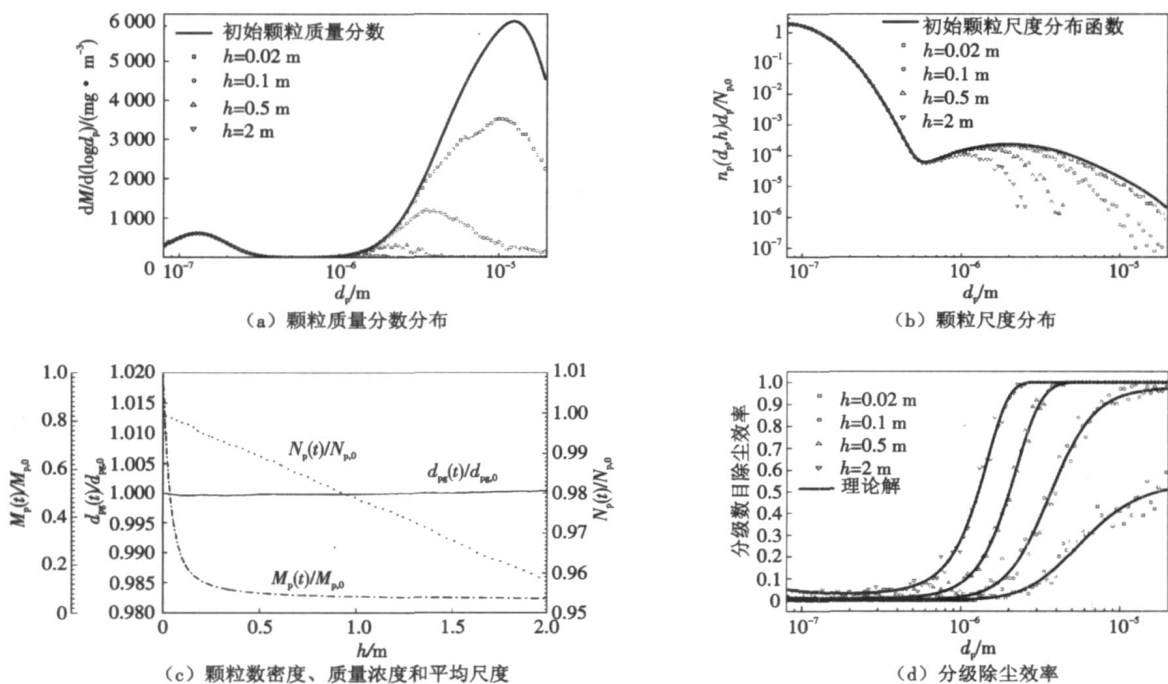


图 2 传统重力喷淋除尘器中颗粒尺度谱的演变过程

脱除. 值得注意的是, 颗粒几何平均尺度稍稍减小, 这主要是因为超微米颗粒比亚微米颗粒更快地被脱除的缘故. 如图3(d)所示, $h = 2\text{ m}$ 处可吸入颗粒物的分级除尘效率达到了70%以上, 另外, 与传统湿式除尘器相比, 超微米颗粒物的分级除尘效率更快地(即在更小的有效喷淋高度 h 处)接近了100%.

2.4 颗粒荷电液滴不荷电时静电增强湿式除尘器

颗粒荷电而液滴不荷电, 产生荷电颗粒吸附(CPA)效应, 电场强度为 5 kV/cm . 由图4可知, CPA效应对于任何颗粒的清除过程都起着增强作用. 但是, 比较图4和图3可知, 当用于颗粒或液滴荷电的电场强度相同的情况下, 该种除尘器中任何尺度的烟

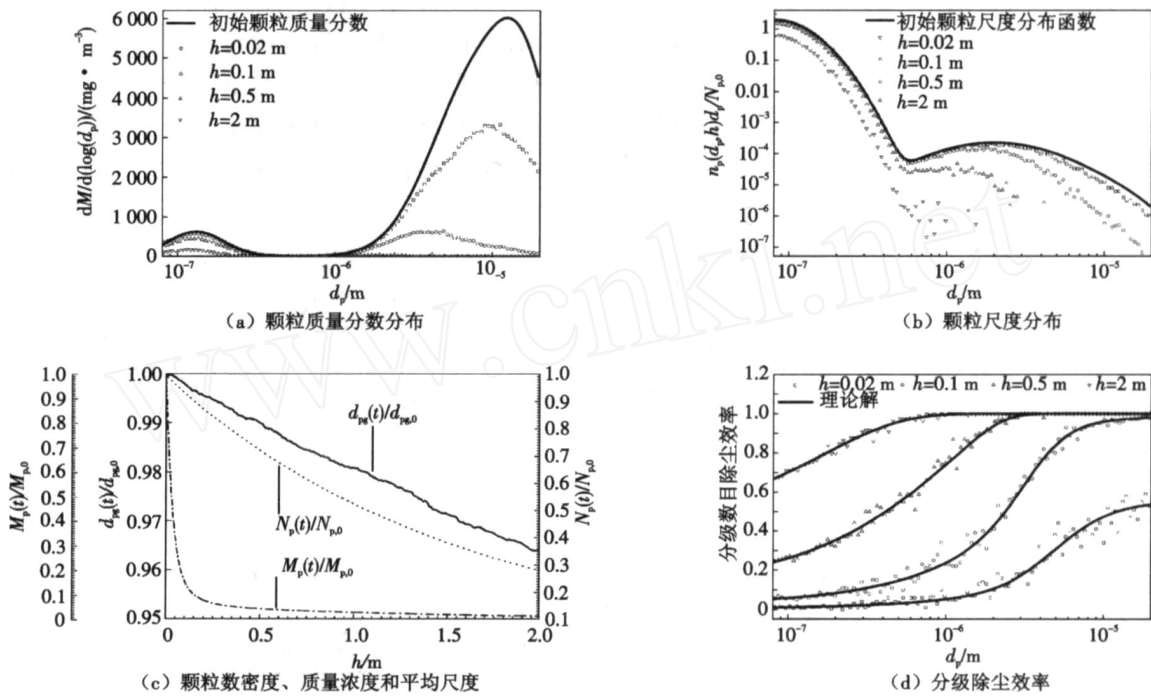


图3 液滴荷电而颗粒不荷电的湿式除尘器中颗粒尺度谱的演变过程

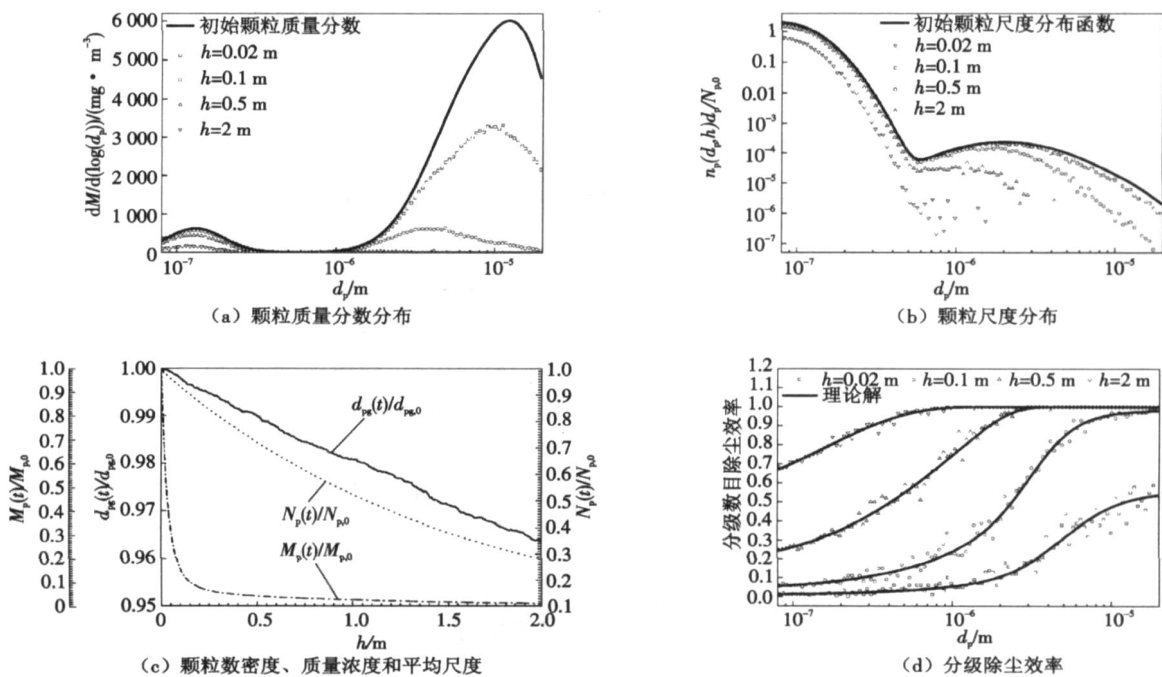


图4 液滴不荷电而颗粒荷电的湿式除尘器中颗粒尺度谱的演变过程

尘颗粒的清除效果均差于液滴荷电的静电增强湿式除尘器。实际上，颗粒尺度谱小于液滴尺度，其表面积相对来说也小于液滴的表面积，使得颗粒的荷电量普遍少于液滴的荷电量，从而使得带电颗粒与液滴之间的镜像力小于带电液滴与颗粒之间的镜像力，并进而影响到 CPA 效应所导致的颗粒-液滴碰撞效率。在这种除尘器中，基于质量的总除尘效率为 95.41%，基于数目的总除尘效率为 25.08%，PM 的分级除尘效率在 25% 以上，出口处的分割粒径为 0.71 μm，颗粒几何平均尺度几乎保持不变。

2.5 液滴和颗粒荷上相反电荷静电增强湿式除尘器

如果液滴和颗粒荷上相反电荷，则库仑吸引力影

响下的荷电液滴洗涤 (CDS) 效应将随之产生。这里 $E_p = 1 \text{ kV/cm}$ ， $E_d = 5 \text{ kV/cm}$ ，且不考虑同性液滴或同性颗粒之间的相互排斥力。图 5 的结果显示，这种静电增强湿式除尘器对细微颗粒和超微米颗粒具有比上述三种湿式除尘器更好的除尘效果，不仅仅超微米颗粒很快被清除，而且在除尘器出口处，也几乎不存在细微颗粒和亚微米颗粒，其基于质量的总除尘效率达到 99.99%，基于数目的总除尘效率也达到 99.93%。颗粒几何平均尺度随着喷淋过程的进行而不断增加，这是因为不仅仅数目较少的超微米颗粒被很快脱除，而且数目众多的亚微米颗粒也很快被该除尘器所洗掉，综合效果就是剩下少量粒径在 0.15 μm 附近的亚

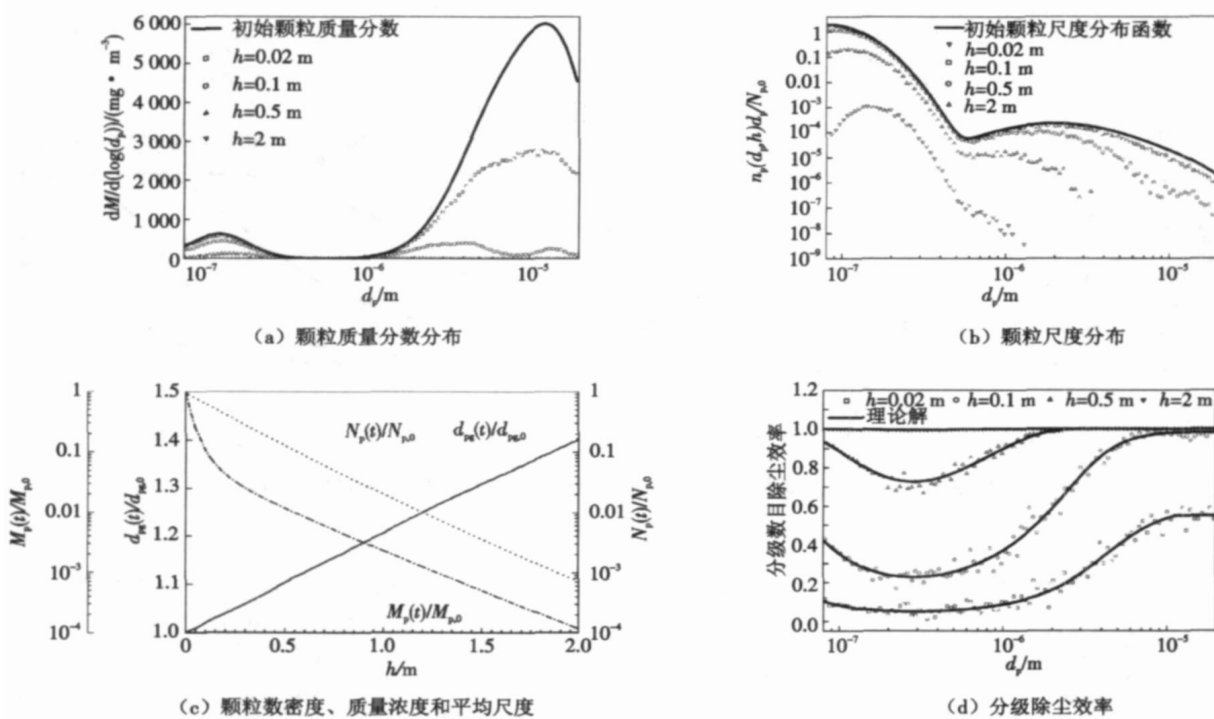


图 5 液滴和颗粒荷相反电荷的湿式除尘器中颗粒尺度谱的演变过程

微米颗粒。出口处 PM 的分级除尘效率均接近 100%。

3 结 语

本文利用事件驱动常体积法描述湿式重力喷淋除尘器对典型火电厂烟尘颗粒的除尘过程，定量揭示了烟尘颗粒尺度谱在除尘器内沿程的动力学演变过程。本文的重点在于利用静电捕集机制来增强传统湿式除尘器对可吸入颗粒物的除尘效率。分别数值模拟了颗粒不荷电而液滴荷电的静电增强湿式除尘器、颗粒荷电而液滴不荷电的静电增强湿式除尘器以及颗粒和液

滴同时荷上相反电荷的静电增强湿式除尘器的除尘性能，并与传统湿式重力喷淋除尘器进行比较，结果表明，液滴荷电、或颗粒荷电、或液滴和颗粒同时荷上相反电荷均将非常有利于湿式除尘器对可吸入颗粒物的有效捕集，相对而言，如果液滴或颗粒同时荷上相反电荷，将最有利于细微颗粒和亚微米颗粒的清除，而液滴荷电的除尘器比颗粒荷电的除尘器对可吸入颗粒物的清除效果更好。

参考文献：

[1] Fan X, Schultz T, Muschelknautz E. Experimental results from

- a plate-column wet scrubber with gas-atomized spray [J]. *Chemical Engineering and Technology*, 1988, 11(1): 73-79.
- [2] Melcher J R, Sachar K S, Warren E P. Overview of electrostatic devices for control of submicrometer particles [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1977, 65(12): 1659-1672.
- [3] Metzler P, Wei P, Bütner H, et al. Electrostatic enhancement of dust separation in a nozzle scrubber [J]. *Journal of Electrostatics*, 1997, 42(1/2): 123-141.
- [4] 袁颖, 王京刚. 荷电水雾除尘过程中颗粒运动轨迹的数值模拟[J]. 北京化工大学学报, 2005, 32(1): 28-32.
Yuan Ying, Wang Jinggang. Numerical simulation for particle-trajectory in a spray charging precipitator [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, 2005, 32(1): 28-32 (in Chinese).
- [5] Kim H T, Jung C H, Oh S N, et al. Particle removal efficiency of gravitational wet scrubber considering diffusion, interception, and impaction [J]. *Environmental Engineering Science*, 2001, 18(2): 125-136.
- [6] 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).
- [7] 吴琨, 王京刚, 毛益平, 等. 荷电水雾振弦栅除尘技术机理研究[J]. 金属矿山, 2004, 338(8): 59-62.
Wu Kun, Wang Jinggang, Mao Yiping, et al. Study on mechanism of vibrating grid dedusting technology with charged fog [J]. *Metal Mine*, 2004, 338(8): 59-62 (in Chinese).
- [8] Davenport H M, Peters L K. Field studies of atmospheric particulate concentration changes during precipitation [J]. *Atmospheric Environment*, 1978, 12(5): 997-1008.
- [9] 余战桥, 吴学文, 蒋国仁, 等. 用荷电水雾控制敞开空间粉尘污染[J]. 工业安全与防尘, 1997, 23(2): 1-3.
Yu Zhanqiao, Wu Xuewen, Jiang Guoren, et al. The control of the dust population in open space by means of charging water fog [J]. *Industrial Safety and Dust Control*, 1997, 23(2): 1-3 (in Chinese).
- [10] Kim S H, Park H S, Lee K W. Theoretical model of electrostatic precipitator performance for collecting polydisperse particle [J]. *Journal of Electrostatics*, 2001, 50(3): 177-190.
- [11] 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.
- [12] Markowski G R, Ensor D S, Hooper R G. A Submicron aerosol mode in flue gas from a pulverized coal utility boiler [J]. *Environmental Science and Technology*, 1980, 14(11): 1400-1402.
- [13] 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.
Yue Yong, Chen Lei, Yao Qiang, et al. Experimental study on characteristics of particulate matter size distribution and trace elements enrichment in emissions from a pulverized coal-fired boiler [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(18): 74-79 (in Chinese).
- [14] 赵海波, 郑楚光. 降雨过程中气溶胶湿沉降的数值模拟[J]. 环境科学学报, 2005, 25(12): 16-22.
Zhao Haibo, Zheng Chuguang. Numerical simulation of wet removal of aerosols when raindrop falling [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(12): 16-22 (in Chinese).