

文章编号:1000-6761(2007)06-954-06

静电增强湿式除尘器的优化运行

赵海波, 郑楚光

(1. 华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 利用颗粒和液滴间的静电吸引力可以大幅度提高传统湿式重力喷淋除尘器的除尘性能。着重分析液滴荷电而颗粒不荷电的湿式除尘器的工作状况, 阐述了布朗扩散、拦截、惯性碰撞和静电捕集等4种除尘机理。介绍了典型工况中该除尘器烟尘颗粒度分布, 并通过分析捕集速率(沉积核)的方式对该除尘器的运行优化进行了分析。结果表明: 含尘气流输运速度越大, 液滴喷射速度越小; 液滴几何尺度越小, 液滴荷质比越高; 液气比越大, 越有利于可吸入颗粒物的高效脱除。

关键词: 环境工程学; 湿式除尘器; 除尘效率; 颗粒群平衡模拟; 可吸入颗粒物

中图分类号: TK223.27, X701.2 **文献标识码:** A

Operation Optimization of Electrostatically Enhanced Wet Scrubbers

ZHAO Hai-bo, ZHENG Chu-guang

(National Key Lab of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The dedusting performance of traditional wet scrubbers, based on gravitation, can remarkably be improved by making use of electrostatic attraction forces between particles and droplets. Electrostatically enhanced wet scrubbers, which have only the droplets but not the dust particles electrically charged, are mainly being analyzed and four dedusting mechanism discussed, i. e. by Brownian diffusion, by interception, by inertial collision and by electrostatic clustering. The dust particles' size distribution in the deduster, under typical operating condition, is described and the possibility of optimizing the scrubber's operation analyzed by way of analyzing the rate of clustering (deposition kernels). Study results indicate, that all the following circumstances are beneficial for raising the efficiency of removing inhalable particles, i. e.: higher flow velocity of dust entraining gas, or slower spraying velocity of the liquid droplets; smaller average droplet size; larger electric charge to mass ratio of the droplets and a larger liquid to gas ratio.

Key words: environmental engineering; wet scrubber; dedusting efficiency; population balance modeling; inhalable particulate matter

湿式除尘器在电站锅炉、矿山开采、冶金等行业中广泛应用,可以高效清除含尘气流中的超微米(10 μm 以上)颗粒,但是对细微颗粒的去除效果较差,难以满足越来越严格的可吸入颗粒物(PM10)排放控制要求。在传统湿式重力喷淋除尘器的基础上,采

用某种方式使得液滴荷电、或颗粒荷电、或甚至液滴和颗粒同时荷上相反电荷,发展静电增强湿式除尘器,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^[1]。

湿式除尘器的除尘效果与运行状况关系密切,根据实际工况(如进口含尘气体的流量、流速、尘粒尺度谱等)来调整除尘器的运行参数使其达到最优的除尘效果是非常重要的。从工程的角度出发,人们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、总体除尘效率和粒径分级等^[2],并考察

收稿日期:2007-02-10

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

作者简介:赵海波(1977-),男,湖南宁乡人,副教授,博士,主要从事煤燃烧污染物控制等方面基础研究。

了荷电方式、液气比、气体速度、液滴荷质比和粉尘尺度等因素对除尘器性能的影响^[3],以期达到系统的优化运行。但是,这些工作是针对分散性单颗粒和单液滴来进行分析的。实际上,锅炉燃煤所产生的烟尘基本呈三峰分布^[4],即一个以 0.08 μm 为中心的亚微米烟尘区;一个以 2.0 μm 为中心的细微颗粒区以及一个以 5.0 μm 或更大颗粒为中心的超 μm 颗粒区。烟尘颗粒的尺度范围从纳米量级跨越到 mm 量级。喷嘴出口的液滴尺度谱也是分散性的。因此,在定量分析静电增强湿式除尘器的除尘性能时,有必要研究分散性颗粒群和液滴群对其的影响。

笔者^[5]利用事件驱动常体积(Event-driven constant volume, EDCV)法定量描述了典型工况下 4 种类型的湿式除尘器(传统重力喷淋除尘器 A,液滴荷电而颗粒中性的静电增强湿式除尘器 B,颗粒荷电而液滴中性的静电增强湿式除尘器 C,颗粒和液滴同时荷上相反电荷的静电增强湿式除尘器 D)中液滴群捕集烟尘颗粒群的过程。结果表明,就分级除尘效率而言,除尘器 D 依次高于除尘器 B、除尘器 C 和除尘器 A。在实际的工业除尘装置中,要使大流量的含尘气体中的颗粒荷电,需要体积庞大、投资较高的静电设备,可行性一般较小;而通过电晕荷电或感应荷电方式使喷嘴出来的液滴荷电则较为简易可行,所以本文只针对液滴荷电而颗粒不荷电的静电增强湿式除尘器进行定量分析。

1 静电增强湿式除尘器除尘过程的数学模型

静电增强湿式除尘器捕集颗粒的机制非常复杂,Melcher 等^[6]总结如下:自团聚沉积(Self-Agglomerator, SAG,相反电荷的颗粒静电吸引而成团),空间电荷沉降(Space-Charge Precipitator, SCP,单极荷电颗粒由于自身所产生的空间电场偏移本来轨迹而沉降到壁面),荷电液滴洗涤(Charge Droplet Scrubber, CDS,荷电液滴在静电力的作用下吸附带相反电荷的颗粒或在镜像力的作用下吸附中性颗粒),荷电液滴沉降(Charge Droplet Precipitator, CDP,在荷电液滴所产生的空间荷电场的作用下同极性颗粒沉降到壁面),荷电颗粒吸附(Charge Particle Attraction, CPA,荷电颗粒在镜像力的作用下吸附到中性液滴表面),以及布朗扩散,拦截,惯性碰撞,壁面扩散和重力沉降等“非电”机制。这些除尘机制的数学模型非常复杂,影响范围也各异。在液滴荷电而颗粒中性的静电增强湿式除尘器中,荷电液滴在镜像力的作用下吸附中性颗粒,此时的静电捕集机

制即为荷电液滴洗涤。另外 3 种主要的“非电”捕集机制为布朗扩散、拦截、惯性碰撞。

静电增强逆流式重力喷淋除尘器的几何结构示于图 1。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)。

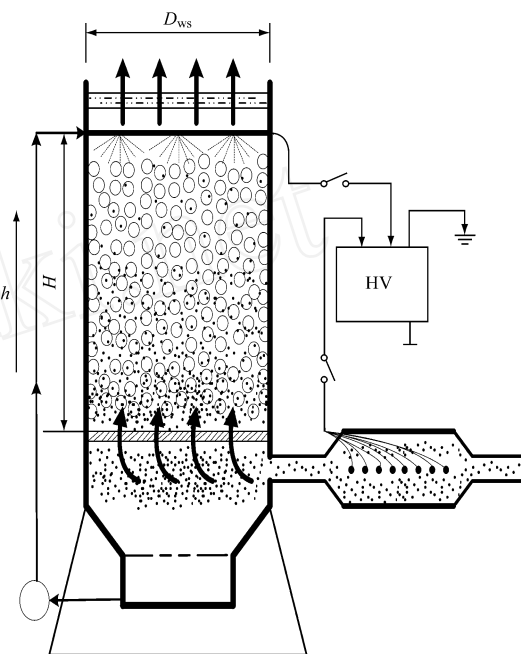


图 1 除尘器的几何示意图

Fig 1 Schematic of a scrubber's geometry

沿除尘器高度的颗粒尺度变化:

$$Q_g = 900 D_{ws}^2 u_g$$

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

式中: h 为在除尘器轴向(气流方向)上距进口处的距离; U_p 为颗粒运动速度,而 $h = U_p t$; $n_p(d_p, h)$ 为颗粒直径 d_p 的颗粒的尺度谱函数(μm^{-3});表示高度 h 、尺度为 d_p (尺度的量纲一般为 μm)的颗粒在单位体积内的数目分数; $R(d_p, h)$ 为高度 h 处尺度为 d_p 的颗粒的沉积核或捕集速率,即尺度为 d_p 的颗粒在除尘器中被捕集的速率(s^{-1})。

尺度较大的液滴捕集尺度较小的烟尘颗粒的过程,就是烟尘与液滴发生碰撞而被粘附的过程,故沉积核模型如下^[7]:

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

式中, $K(d_p, D_d)$ 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 ($\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$); $E(d_p, D_d)$ 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:

$$E(d_p, D_d) = 1 - (1 - E_{\text{diff}})(1 - E_{\text{int}}) \times (1 - E_{\text{imp}})(1 - E_{\text{elc}}) \quad E_{\text{diff}} + E_{\text{int}} + E_{\text{imp}} + E_{\text{elc}} \quad (3)$$

式中, E_{diff} 、 E_{int} 、 E_{imp} 和 E_{elc} 分别为布朗扩散、拦截、惯性碰撞和静电捕集机制的所导致的碰撞效率,前三者的模型如下^[8]:

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

这里 $Re (= D_d U_d / \mu_g)$ 和 $Pe (= D_d U_d / D_{\text{diff}})$ 分别为液滴的雷诺数和贝克利数 (Peclet number), St 和 D_{diff} 分别为颗粒的 Stokes 数和扩散系数,其模型如下:

$$Re = D_d U_d / \mu_g; Pe = D_d U_d / D_{\text{diff}}; St = 2 \rho_p (U_d + U_p) C_c / D_d; D_{\text{diff}} = k_B T C_c / (3 \mu_g d_p); \rho_p = \rho_d d_d^2 / (18 \mu_g); C_c = 1 + 2.493 / d_p + 0.84 / d_p \times \exp(-0.435 / d_p) \quad (5)$$

式中, ρ_g 、 μ_g 分别为气体密度和动力粘度; ρ_p 为颗粒弛豫时间尺度; k_B 为 Boltzmann 常数 ($= 1.38054 \times 10^{-23}$); T 为气流的绝对温度; C_c 为 Cunningham 滑移修正系数; λ 为气体分子的平均自由程 (6.5×10^{-8} m)。

对于颗粒不荷电而液滴荷电的情况,荷电的液滴将使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为^[9]

$$E_{\text{elc}} = \left\{ \frac{15}{8} \left[\frac{\rho_p - 1}{\rho_p + 2} \right] \frac{2 C_c [q_d / (D_d^2)]^2 d_p^2}{3 \mu_g (U_d + U_p) \lambda D_d} \right\}^{0.4}; q_d = 3 \rho_d E_d D_d^2 \frac{d}{d + 2} \quad (6)$$

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 ($= 8.85 \times 10^{-12}$ F · m⁻¹); q_d 为液滴和颗粒荷电量,通过电场荷电方式而荷电; E_d 为用于液滴荷电的电场强度, ρ_d 为液滴相对介电常数,本文取 $\rho_d = 80$, λ 为离子平均自由程 ($= 1 \times 10^{-7}$ m)。

2 求解通用动力学方程的事件驱动常体积法

事件驱动常体积法属于 Monte Carlo 技术,该算

法引入加权虚拟颗粒的概念,首先对实际颗粒谱按照某种离散规则进行分类,认为每个颗粒区间内的实际颗粒具有相同的尺度并因此而具有同样的属性和动力学行为,某个颗粒区间内的实际颗粒能够被数目少得多的虚拟颗粒所代表,每颗虚拟颗粒具有一定的数目权值,虚拟颗粒的演变过程可以代表这些实际颗粒的演变过程。当考虑纯沉积过程时,并不要求所有虚拟颗粒的数目权值均相等,这样将使虚拟颗粒群能够尽可能的继承实际颗粒群的信息。

事件驱动常体积法分为 3 步来考虑颗粒的沉积过程。第一步,计算 2 个沉积事件之间的时间间隔 t 。首先计算所有颗粒在计算区域内发生沉积事件的速率,即

$$V_s R_{\text{depo}} = V_s \sum_{d_p} R(d_p) n_p(d_p) d d_p = \sum_{i=1}^{N_f} R_i \quad (7)$$

式中, V_s 为计算区域体积; R_{depo} 为单位体积、单位时间内发生沉积事件的总概率; N_f 为虚拟颗粒总数目; R_i 为编号为 i 的虚拟颗粒所对应的沉积核。 $t = 1/(V_s R_{\text{depo}})$ 。第二步,通过满足均匀分布的随机数 $r(0 \leq r \leq 1)$ 来选择发生沉积事件的主颗粒。如果

$$\sum_{m=1}^{i-1} R_m t < r \leq \sum_{m=1}^i R_m t \quad (8)$$

则认为虚拟颗粒 i 将沉积下来。第三步,处理沉积事件的后果。发生沉积事件的虚拟颗粒 i 将被抛弃而不再继续跟踪。为了保持一定的统计精度,事件驱动常体积法中虚拟颗粒数目在 $N_{f,0} \sim N_{f,0}/2$ 之间波动 ($N_{f,0}$ 为初始虚拟颗粒总数目)。当虚拟颗粒数目减少到 $N_{f,0}/2$ 时,把现存的 $N_{f,0}/2$ 个虚拟颗粒全部复制拷贝一份并添加到虚拟颗粒数列中,同时把新的虚拟颗粒数列中所有虚拟颗粒的数目权值均各自减半,此时计算区域内虚拟颗粒总数目将恢复到初始值,计算区域也将保持不变。在下一个时间步长内,继续描述这些新的虚拟颗粒的沉积过程。利用该算法求解方程 (1) 可以获取除尘器中沿高度 h 的颗粒尺度谱。

3 数值模拟

3.1 颗粒尺度谱和液滴尺度谱

通过拟合,我们采用如下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、采用单峰对数正态分布函数代表液滴尺度谱:

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

$$n_d(D_d) = \frac{N_d}{\sqrt{2} \ln d_{g,i} D_d} \exp \left[-\frac{\ln^2(D_d/D_{dg})}{2 \ln^2 d_{g,i}} \right] \quad (9)$$

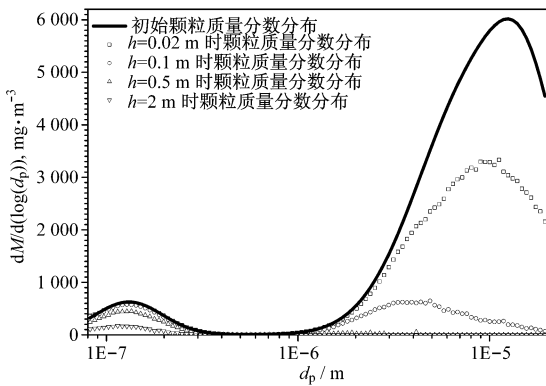
式中, $N_{p,i}$, $d_{pg,i}$, $d_{pg,i}$ 分别为烟尘在不同区间的数目浓度、几何平均尺度和几何标准偏差, 具体数值如表 1 所示; N_d , D_{dg} , $d_{g,i}$ 分别为液滴数目浓度、液滴几何平均尺度和液滴几何标准偏差, 本文取 $D_{dg} = 1 \text{ mm}$, $d_{g,i} = 1.25$ 。本文的数值模拟中烟尘尺度范围为 $0.08 \mu\text{m} \sim 20 \mu\text{m}$, 此时颗粒初始数目浓度 $N_{p,0}$ 达到了 $2.50 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$, 初始几何平均尺度约为 $0.11 \mu\text{m}$, 初始的颗粒质量分数分布(图 2(a)) 和数目分数分布(图 2(b)) 与试验值^[10-11] 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

Tab. 1 Characteristic parameters of dust size distribution in coal fired boilers before entering the scrubber

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

喷淋流量 Q_d 或液气比 Q_d/Q_g 与雨滴尺度谱的特征参数之间存在如下关系:



(a) 颗粒质量分数分布

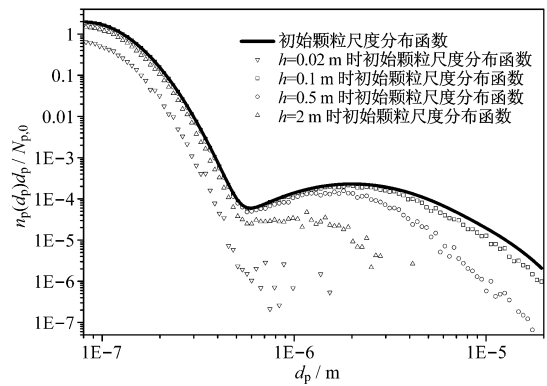
$$N_d = \frac{w_1}{d \cdot d_{dg}^3 \exp(9 \cdot d_{dg}^2/2)/6} = \frac{Q_d}{d \cdot d_{dg}^3 \exp(9 \cdot d_{dg}^2/2)/6} = \frac{Q_d/Q_g \times U_p/U_d}{d \cdot d_{dg}^3 \exp(9 \cdot d_{dg}^2/2)/6} \quad (10)$$

式中, w_1 为喷水量, kg/m^3 , 即单位体积内所有液滴质量之和。

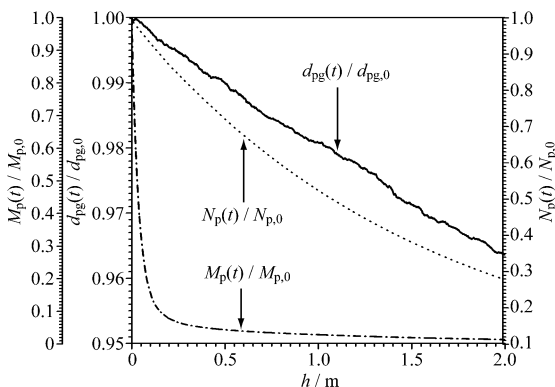
在本文中, 除尘器内径 $D_{ws} = 6 \text{ m}$, 有效喷淋高度 $H = 2 \text{ m}$, 烟气流速 $u_g = 0.6 \text{ m/s}$, 烟气处理量 $Q_g = 61072.56 \text{ m}^3/\text{h}$, 液滴喷射速度 $U_d = 1.2 \text{ m/s}$, 液气比 $Q_g/Q_d = 20 \text{ l/m}^3$, $d = 997.45 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 2270 \text{ kg/m}^3$, $\rho_g = 0.8288 \text{ kg/m}^3$; $\mu_d = 9.591 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; $\mu_g = 2.4 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, $T = 433 \text{ K}$ 。根据公式 (10), 液滴数目为 $N_d = 1.53 \times 10^7/\text{m}^3$ 。

3.2 静电增强湿式除尘器捕集烟尘过程的定量描述

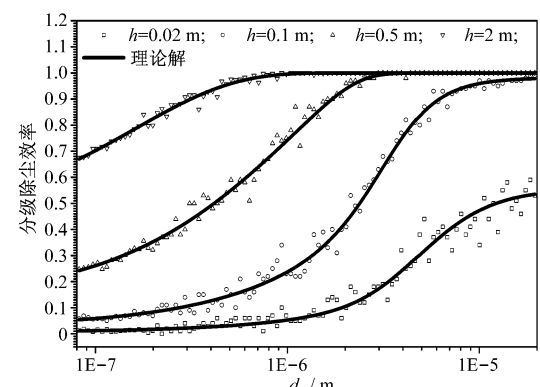
当液滴首先通过一个电场强度 $E_d = 5 \text{ kV/cm}$ 的电场时, 液滴表面将带上一定的电荷, 对于尺度为 1 mm 的液滴, 其液滴荷质比为 $7.79 \times 10^{-5} \text{ C/kg}$ 。此时在镜像力的作用下, 荷电液滴和颗粒之间的碰撞效率将一定程度提高, 即产生所谓的荷电液滴洗涤 (CDS) 效应。图 2 (a) 为指定的除尘器高度处的颗粒



(b) 颗粒尺度分布



(c) 颗粒数目分数、质量浓度和平均尺度



(d) 分级除尘效率

图 2 液滴荷电而颗粒不荷电的湿式除尘器中颗粒尺度谱

Fig 2 Evolution of particle size distribution in a wet scrubber where only the liquid droplets are electrically charged, but not the particles

质量分数分布,即 $dM/d[\log(d_p)] = N(d_p) \cdot d_p^3/6/[\log(d_p^+) - \log(d_p^-)]$, $N(d_p)$ 表示颗粒尺度为 d_p 的区间内实际颗粒数目; d_p^+ 和 d_p^- 分别表示该区间的尺度上限和尺度下限;图 2(b) 为指定高度处颗粒尺度分布,即 $n_p(d_p) \cdot d_p/N_p, 0 = N(d_p) \cdot d_p/(d_p^+ - d_p^-)/N_p, 0$ 。初始时刻,超 μm 颗粒 ($d_p > 10 \mu\text{m}$) 在质量分数分布中占据主导地位,而亚 μm 颗粒 ($d_p < 1 \mu\text{m}$) 的数目浓度则远远大于细微颗粒 ($1 \mu\text{m} < d_p < 10 \mu\text{m}$) 和超 μm 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,不仅仅超 μm 颗粒,而且细微颗粒和亚 μm 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,如图 2(c) 所示,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 μm 和细微颗粒均被有效脱除;颗粒几何平均尺度稍稍减小,这主要是因为超 μm 颗粒比亚 μm 颗粒更快地被脱除的缘故;图 2(d) 为分级除尘效率 (d_p, h) 的沿程变化,其中

$$(d_p, h) = 1 - N_p(h)/N_p, 0 = 1 -$$

$$[\int_{d_p} n_p(d_p, x) d d_p]/N_p, 0 = 1 - \exp[-R(d_p)h/U_p] \quad (11)$$

此时,事件驱动常体积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, $h = 2 \text{ m}$ 处可吸入颗粒物的除尘效率达到了 70% 以上。

4 静电增强湿式除尘器的运行优化

4.1 沉积核和碰撞效率的定量分析

沉积核 $R(d_p)$ 代表尺度为 d_p 的颗粒被除尘器所收集和清除的速率,它直接反映了颗粒 (d_p) 的分级除尘效率(公式(11)),也通过通用动力学方程(1)描述了颗粒尺度谱在除尘器中的动力学演变过程。所以,不同类型湿式除尘器、湿式除尘器在不同运行工况时的除尘性能均可以通过相应的沉积核曲线来定性分析。上述典型运行工况下静电增强湿式除尘器的沉积核曲线示于图 3(根据公式(2)计算所得)。可知,超 μm 颗粒的沉积核远远大于细微颗粒和亚 μm 颗粒的沉积核,且颗粒尺度越小,沉积核越小,但是当颗粒尺度小于 $0.02 \mu\text{m}$ 时,随着颗粒尺度的减小而沉积核增加。

不同尺度颗粒的沉积核的差异可以通过分析它们的碰撞效率来寻求答案。图 3 为把液滴尺度 D_d 固

定为 1 mm 、采用式(3)~式(6)计算所得的各种尺度颗粒的碰撞效率,碰撞效率曲线 $E(d_p)$ 与其相应的沉积核曲线 $R(d_p)$ 非常类似,这表明碰撞效率是影响沉积核的最重要因素之一。该除尘器中碰撞效率曲线在颗粒尺度 d_p 为 $0.02 \mu\text{m}$ 附近出现拐点,即随着颗粒尺度的增加,碰撞效率先单调减小,然后单调上升。这些典型的“U”型曲线产生的原因是各种除尘机制之间的相互竞争。当不存在静电捕集机制时(即传统湿式除尘器),对于那些尺度小于 $0.2 \mu\text{m}$ 的亚 μm 颗粒,布朗扩散机制占主导地位,颗粒尺度越小,布朗扩散能力越强,碰撞效率越大;而对于那些尺度大于 $1 \mu\text{m}$ 的颗粒,惯性碰撞机制占主导地位,颗粒尺度越大,惯性越大,碰撞效率越大;而那些尺度在 $0.2 \sim 1 \mu\text{m}$ 的颗粒,布朗扩散、惯性碰撞和拦截机制均起重要作用;以上几种湿沉降机制的相互竞争造成了传统湿式除尘器碰撞效率、沉积核、分级除尘效率的“U”型曲线。而对于本文所述静电增强湿式除尘器,尽管布朗扩散、拦截和惯性碰撞机制仍然存在,但是,对于那些尺度范围在 $0.02 \sim 1 \mu\text{m}$ 的颗粒,静电捕集机制所控制的碰撞效率 E_{elc} 远远大于其它非电机机制所控制的除尘效率 E_{dir} 、 E_{int} 和 E_{imp} (图 3),且 E_{elc} 随着颗粒尺度增加而单调增加,即 E_{elc} 正相关于颗粒尺度 d_p (公式(6))。这几种机制的相互竞争是该除尘器中的碰撞效率曲线、沉积核曲线和分级除尘效率曲线均将在 $0.02 \mu\text{m}$ 附近出现拐点。

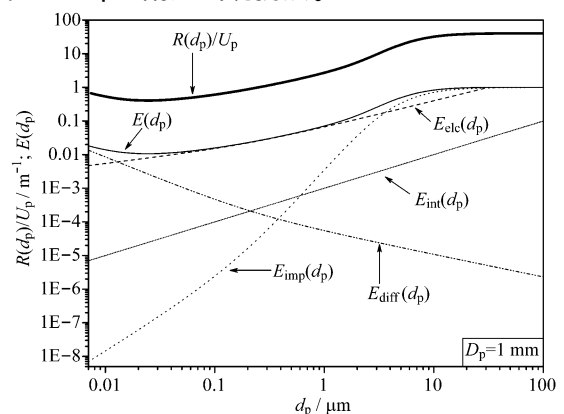


图 3 沉积核和碰撞效率

Fig 3 Deposition kernels and collision efficiency

4.2 外部运行条件对静电增强湿式除尘器除尘性能的影响

图 4 展示了不同的气流速度和液滴速度对除尘性能的影响。显然,气流速度越大,任何尺度的颗粒的沉积核均将增大,故该除尘器对任何尺度的颗粒的除尘效率均将增加。实际上,气流速度(也即颗粒运动速度 U_p)的增加虽然使得布朗扩散和静电捕集

机制对碰撞效率的贡献减小,但是将使得惯性碰撞机制的影响力增大,更重要的是, U_p 的增加将增大颗粒和液滴的碰撞核 $K(d_p, D_d)$ 。综合的效果就是,任何尺度的颗粒的沉积核均随着气流速度的增大而增大。从图4也可清晰地看到:液滴喷射速度的减小有利于任何尺度颗粒的高效捕集,特别是对亚 μm 颗粒和细微颗粒尤其如此;实际上,对于任何

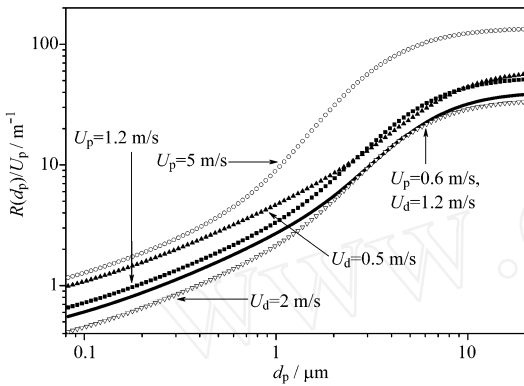


图4 气流速度和液滴速度对沉积核的影响

Fig 4 Influence of gas velocity and droplet velocity on the deposition kernels

液滴荷质比和液气比对沉积核的影响示于图5。电场强度 E_d 分别为 1 kV/cm、5 kV/cm 和 10 kV/cm 时对应的液滴荷质比 (取尺度为 1 mm 的液滴作为参考液滴) 分别为 1.56×10^{-5} 、 7.79×10^{-5} 和 1.56×10^{-4} C/kg。显然, E_d 越大, Q_d/Q_g 越大,因此 E_{elc} 越大,从而任何尺度的颗粒的沉积核亦随之增大。应该注意到,液滴荷质比对细微颗粒和亚微米颗粒的捕集效果影响更大一些。液气比 (Q_d/Q_g) 增加将有利于除尘器对任何尺度的颗粒的捕集。原因在于,假设烟气流速 Q_g 一定的情况下, Q_d/Q_g 增加即意味着喷雾流量增加,虽然 Q_d 的增加对碰撞效率没有影响,但是在液滴几何平均尺度和几何标准偏差一定的情况下,液滴总浓度 N_d 将随 Q_d 的增加而线性增加(式(10)),因此根据式(2),任何尺度的颗粒的沉积核均将随之增加。

液滴尺度谱也对湿式除尘器的除尘性能有着重要的影响。如图6所示,液滴几何平均尺度越小,几何标准偏差越小(即液滴的尺度越来越均匀),对于 $0.08 \mu\text{m} \sim 20 \mu\text{m}$ 的颗粒,其沉积核均将增加,即有利于其被湿式除尘器所捕集。几种因素均对沉积核的增加有贡献。首先, D_{dg} 和 σ_{dg} 越小,则 N_d 越大,故液滴总表面积越大,故亚 μm 颗粒由于布朗扩散机制所控制而运动到液滴表面而被液滴所捕集的概率就越大(即 E_{diff} 越大);第二方面,拦截机制所主导的

尺度的颗粒,液滴运动速度越小,其布朗扩散机制所导致的碰撞效率 (E_{diff}) 越大,其惯性碰撞机制所导致的碰撞效率 (E_{imp}) 越小,其静电捕集机制所导致的碰撞效率 (E_{elc}) 越大,其拦截机制所导致的碰撞效率 (E_{int}) 不变,其与某个尺度的液滴的碰撞核 $K(d_p, D_d)$ 越小,几种非线性因素综合的结果是 U_d 越小,沉积核越大。

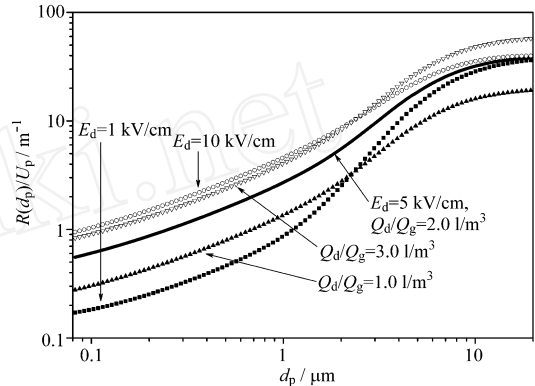


图5 液滴荷质比和液气比对沉积核的影响

Fig 5 Influence of the droplets' charge-to-mass ratio and liquid-to-gas flow ratio on the deposition kernels

碰撞效率 (E_{int}) 取决于颗粒尺度与液滴尺度的比值 (d_p/D_d), D_{dg} 越小,则比值 d_p/D_d 越大, E_{int} 亦将越大;第三方面, D_{dg} 越小,则 St 越大,由于 E_{imp} 与颗粒的 Stokes 数 (St) 呈正相关关系,故 E_{imp} 将随之增大;第四方面,根据式(6), E_{elc} 与液滴尺度 D_d 成反比;最后,越小的 D_{dg} 和 σ_{dg} 也将导致越大的 N_d ,从而将增大沉积核(式(2))。以上因素的共同作用使越小和越均匀的液滴有利于这些烟尘颗粒的清除。

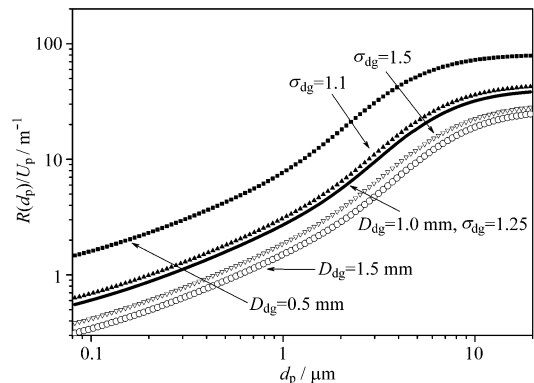


图6 液滴尺度谱对沉积核的影响

Fig 6 Influence of droplets' size distribution on the deposition kernels

5 结论

利用事件驱动常体积法对液滴荷电而颗粒不荷
(下转第 968 页)

原 NO 过程受扩散-反应动力学联合控制。

5 结 论

(1) 在实验条件范围内,超细煤焦再燃还原 NO 过程受扩散-反应动力学的联合控制。

(2) 在实验条件范围内,提高再燃煤焦的细度、采用活性较高的煤焦作为再燃燃料或者提高再燃区反应温度,可以提高 NO 还原效率。

(3) 在获得相同的再燃还原 NO 效率的条件下,使用超细煤焦或者活性高的煤焦、提高再燃区温度水平,均可适当缩短煤焦在再燃区的停留时间,但是如果低于 0.6 s,NO 的还原效率会大幅度下降,同时也会导致煤焦燃尽率的降低。

参考文献:

- [1] 阎维平. 洁净煤电发电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002:1 - 3.
- [2] 刘 忠, 赵 莉, 胡满银, 等. 超细煤粉颗粒的升温速率及其对再燃还原 NO 的影响[J]. 华北电力大学学报, 2005(5): 95 - 98.
- [3] 韩元才, 徐明厚, 周怀春, 等. 煤粉燃烧[M]. 北京:

科学出版社, 2001.

- [4] 刘 忠, 阎维平, 高正阳. 停留时间对微细煤粉再燃还原 NO 效率的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2004(4): 354 - 358.
- [5] Burch T E, Chen W Y, Lester T W, et al. Interaction of fuel nitrogen with nitric oxide reburning with coal [J]. **Combustion and Flame**, 1994, 98(3): 391 - 401.
- [6] Chen W Y, Ma L. Importance of heterogeneous mechanisms during reburning of nitrogen oxide[C]. In Third Symposium (international) on Coal Coal Combustion, Beijing, China, 1995: 594 - 601.
- [7] Zhong B J, Shi W W, Fu W B. Effect of catalysts on the NO reduction during the reburning with coal chars as the fuel. **Combust [J]. Sci. and Tech.**, 2001(164): 239 - 251.
- [8] Thomas K M. The release of nitrogen oxides during char combustion[J]. **Fuel**, 1997, 76(6): 457 - 473.
- [9] Guo F, Hecker W C. Effects of CaO and buno on kinetics of NO reduction by the Beulah zap char[C]. In Twenty-sixth symposium (International) on combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1996: 2251 - 2257.

(上接第 959 页)

电的静电增强湿式除尘器在典型工况下的除尘过程进行了颗粒群平衡模拟,进而通过计算在不同工况下的沉积核对该除尘器的优化运行进行分析。增大含尘气流输运速度或减小液滴喷射速度,增大液气比或液滴荷质比,减小液滴平均尺度有利于提高该种除尘器对可吸入颗粒物的除尘效率。

参考文献:

- [1] Metzler P, Wei P, Büchner H, et al. Electrostatic enhancement of dust separation in a nozzle scrubber [J]. **Journal of Electrostatics**, 1997, 42(1 - 2): 123 - 141.
- [2] 吴忠标. 大气污染控制工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002, 128 - 151.
- [3] 蒋仲安. 湿式除尘器分级效率的计算和分析[J]. 安全, 1995, 16(3): 1 - 6.
- [4] 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.
- [5] 赵海波, 郑楚光. 静电增强湿式除尘器捕集可吸入颗

粒物的定量描述[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(2): 109 - 116.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Markowski G R, Ensor D S, Hooper D S. A submicron aerosol mode in flue gas from a pulverized coal utility boiler [J]. **Environmental Science & Technology**, 1980, 14(11): 1400 - 1402.
- [10] 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.
- [11] 赵海波, 郑楚光. 水滴清除气溶胶过程的随机算法和数值模拟[J]. 应用数学和力学, 2006, 27(10): 1159 - 1168.