

水平平面声波对重力场中PM_{2.5}颗粒作用的数值模拟及实验研究

王春波, 李 群, 陈鸿伟

(华北电力大学能源与动力工程学院, 河北省 保定市 071003)

Experiments and Numerical Simulation of the PM_{2.5} Driven by Level Sound Wave in Gravitational Field

WANG Chun-bo, LI Qun, CHEN Hong-wei

(School of Energy and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: A model that describes the movement of PM_{2.5} driven by level sound wave in gravitational field was suggested, and the resistance to PM_{2.5} brought by air was considered in this model. The pressure distribution during the whole period and the whole wavelength in the sound field were simulated, also including the speed tendency when particle at different positions and its displacement situation when PM_{2.5} located at the whole wavelength position. From the model some conclusions were drawn: the different initial positions would lead to different speed and orientation to PM_{2.5}; intensity and the frequency of sound field are important factors that affect the movement of particles; the combination of level displacement and vertical displacement would result in spiral movement of PM_{2.5} and this space is the effective space for collision. Visual experiments verified that the model is suitable.

KEY WORDS: PM_{2.5}; sound wave; gravity field; movement trail; modeling; visual experiments

摘要: 将空气对PM_{2.5}的阻力特性考虑在内, 建立了水平平面声波对重力场中PM_{2.5}颗粒动力学特性影响的数学模型, 以探讨声场和重力场双重作用下PM_{2.5}颗粒的运动情况。模拟了整周期时刻和整波长位置平面波声场内压力的分布情况。颗粒在不同初始位置的速度及颗粒在初始位置为整波长位置的位移情况。通过模拟计算发现: 颗粒初始位置的不同造成了颗粒初始速度的大小、方向不同; 声场的强度、频率是影响颗粒运动的重要条件; 颗粒的水平位移和垂直位移的综合结果是颗粒螺旋型下落, 这个空间是颗粒碰撞的有效空间。可视化实验验证了模型的可行性。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50606009); 华北电力大学重大预研基金项目。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50606009).

关键词: PM_{2.5}; 声波; 重力场; 运动轨迹; 数值模拟; 可视化实验

0 引言

近年来, 火电厂燃煤锅炉都安装了除尘效率达99%以上的静电除尘器, 但这些除尘器对可吸入颗粒物PM_{2.5}的捕获率很低。而这些颗粒易于富集空气中的有毒金属、酸性氧化物、有机污染物、细菌和病毒, 对环境和人体健康危害严重^[1-8]。正由于此, 近年来国内外学者针对PM_{2.5}的理化特性及控制方法, 开展了许多的研究^[9-14]。

由于PM_{2.5}体积小、重量轻, 常规离心式除尘、过滤除尘及电除尘难以达到很好的除尘效果, 因此探讨声波脱除PM_{2.5}的可能性已被列入国家重点基础研究发展规划项目相关内容之一。本文采用数值模拟方法对重力场中平面声波对PM_{2.5}运动规律的影响进行了研究并进行实验验证, 以期对声波法脱除PM_{2.5}提供理论依据。

1 声场压力

根据分子运动理论, 空气分子在没有外力的作用下一直做无规则的热运动。在这种状态下, 各水平位置的压力是一致的, 组成媒质的分子等微粒虽然不停地运动, 但任一体积元在时间 t 内流入与流出的质量是相等的, 因此体积元内的质量不随时间变化。如有声波作用时, 在组成媒质的微粒的杂乱运动中附加了一个有规律的运动, 使得体积元内有时流入的质量大于流出的质量, 有时反之, 即体积元

内的媒质时而稠密，时而稀疏，这种疏密的交替变化使声波以纵波波传播。由于气体压力是大量气体分子撞击器壁所形成的统计结果，因此体积元内媒质的疏密交替变化也就产生了压力的变化，形成声场压力的变化。获得声压变化规律是研究 PM_{2.5} 在声场中运动规律的前提。袁竹林^[15]等推导得到平面声波场中的压力公式

$$P(x,t) = P_0 + P_0 A \gamma \frac{\omega}{C} \sin[\omega(t - \frac{x}{C})] \quad (1)$$

另外，声场强度的表达式

$$I = \frac{1}{2} \rho_0 C A^2 \omega^2 \quad (2)$$

式中 $\gamma = c_p / c_v$ ， c_p 为气体定压热容， c_v 为气体定容热容； P_0 为静压力(当地大气压)； A 为声波信号振幅； $\omega = 2\pi f$ 为声波角频率； C 为当地声速； ρ_0 为介质密度。可见，声压是一个关于时间 t 和初始位置 x 的函数。式(1)中，右边第二项为声波作用引起的压力。

2 重力场中 PM_{2.5} 的受力

当 PM_{2.5} 在空气中借重力自由下沉时，作用力有 3 种：重力 G 、空气浮力 F_u 、由于运动而受到的阻力 F_c 。其运动表达式为

$$G - F_u - F_c = m \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

式中 m 为 PM_{2.5} 的质量。式中的重力及浮力不难求出。阻力 F_c 可以根据斯托克斯假设：在无限范围的粘性流体中沉降的球体颗粒的阻力，完全是由流体的粘滞力所致，表示为

$$F_c = 3\pi D \eta v \quad (4)$$

式中： D 为颗粒粒径； η 为空气粘度； v 为颗粒垂直方向运动速度。由于空气分子的不连续性^[16]，加入一个修正项 c_k ，则(4)式改写为

$$F_c = 3\pi D \eta v / c_k \quad (5)$$

其中， c_k 与空气分子平均自由行程和颗粒大小有关

$$c_k = 1 + \frac{l_i}{D} [2.514 + 0.8 \exp(-0.55 \frac{D}{l_i})] \quad (6)$$

式中 l_i 为空气分子的平均自由行程，其定义为

$$l_i = \frac{2\eta}{P} \sqrt{\pi \frac{RT}{8M}} \quad (7)$$

式中： P 为压力； R 为气体分子常数； T 为绝对温度； M 为气体分子量。

由于声场中颗粒所处位置压力的变化引起空气密度变化，所以对空气密度 ρ_f 进行修正

$$\rho_f = \rho_0 \frac{P}{101325} \cdot \frac{273.19}{T}$$

根据式(1)、(3)、(5)，得到层流区重力场中颗粒运动方程为

$$\frac{\pi}{6} (\rho_s - \rho_f) g D^3 - 3\pi D \eta v / c_k = \frac{\pi}{6} \rho_s D^3 \frac{dv}{dt} \quad (8)$$

式中 ρ_s 为颗粒的密度。令 $\rho = (\rho_s - \rho_f) / \rho_s$ ， $X = 18\eta / \rho_s D^2 c_k$ ，则式(8)可简化为

$$\frac{dv}{dt} = \rho g - Xv \quad (9)$$

即 $v = \frac{\rho g}{X} [1 - \exp(-Xt)]$ (10)

当 t 趋近无限时， v 无限接近一个终极速度，即当时间足够长时，颗粒会以某均速下落。并且通过式(10)可知， v 的大小只与颗粒的粒径有关，在测得 v 的情况下可以以此计算得到颗粒的粒径。

3 PM_{2.5} 受声场的作用

由于声场中压力梯度的存在，使处于声场中的 PM_{2.5} 在声场传播方向的两侧所受的压强不同，这个压差的存在，使颗粒受到声场压力。表达式^[15]为

$$F_s = [P(x - x', t) - P(x + x', t)] (\frac{D}{2})^2 \pi \quad (11)$$

其中， $x' = D\sqrt{2}/4$ 为压力等于半球面所受平均压力处距球心的距离。

在力 F_s 的作用下，PM_{2.5} 的运动方程为

$$V_t = V_0 + \frac{F_s}{m} \Delta t \quad (12)$$

式中： V_t 为 t 时刻的速度； V_0 为上一个时刻的值； Δt 为时间步长。

声波在空气中传播，使空气粒子产生振动，由于 PM_{2.5} 的密度并不与空气一样，所以 PM_{2.5} 并不随空气粒子一起振动。这就产生了空气对 PM_{2.5} 的作用力，这也是声场对 PM_{2.5} 的作用力。假设空气是理想气体，这个作用力表达为^[17]

$$F_m = m' \frac{dU}{dt} - \frac{m'}{2} (\frac{dV}{dt} - \frac{dU}{dt}) \quad (13)$$

式中： m' 为被 PM_{2.5} 挤掉的空气的质量； U 为空气粒子的速度； V 为 PM_{2.5} 的速度。右边第 1 项表示空气对粒子的作用，第 2 项表示 PM_{2.5} 对空气的相对加速度所决定的那一部分的空气作用。在理想流体中，这种作用使 PM_{2.5} 质量的表观增加量达到它所排挤的空气质量的一半。

在实际空气中，要加入空气粘度有关的项^[17]，

于是有运动方程式

$$m \frac{dV}{dt} = m' \frac{dU}{dt} - \frac{m'}{2} \left(\frac{dV}{dt} - \frac{dU}{dt} \right) - \frac{9}{4} m' \omega \beta (1 + \beta) \cdot (V - U) - \left(\frac{1}{2} + \frac{9}{4} \beta \right) m' \left(\frac{dV}{dt} - \frac{dU}{dt} \right) \quad (14)$$

式中： $\beta = 1.1 / D \sqrt{\omega}$ 。

由于PM_{2.5}的密度远远大于空气的密度，相同体积的PM_{2.5}质量远远大于空气的质量，即 m 远大于 m' ，故可略去 $(m'/2)(dV/dt)$ 。令 $m_r = m + 9m'\beta/4$ ， $1/B_r = 9m'\omega\beta(1+\beta)/4$ ，则式(14)简化为

$$m_r \frac{dV}{dt} + \frac{V}{B_r} = \frac{U}{B_r} + \left(\frac{9}{4} m' \beta + \frac{3}{2} m' \right) \frac{dU}{dt} \quad (15)$$

式(14)中，空气粒子的速度可根据 $U = -[\partial P / \partial x] dt / \rho_0$ [18-19]，及式(1)得到

$$U = U_a \sin[\omega(t - \frac{x}{C})] \quad (16)$$

式中 $U_a = P_0 A r \omega / C^2 \rho_0$ 。

对式(15)求解得到PM_{2.5}运动速度的表达式

$$V = \frac{B_r \omega U_a (m_r - \frac{9}{4} m' \beta + \frac{3}{2} m')}{1 + m_r^2 B_r^2 \omega^2} \{ e^{-\frac{t}{m_r B_r}} - \cos[\omega(\frac{x}{C} - t)] \} - \frac{1 + B_r^2 m_r \omega^2 (\frac{9}{4} m' \beta + \frac{3}{2} m')}{1 + m_r^2 B_r^2 \omega^2} U_a \sin[\omega(\frac{x}{C} - t)] \quad (17)$$

4 计算条件

对PM_{2.5}进行模拟，由于目前理论发展的限制，需要做一些假设[20-24]。该模型假设条件为：① PM_{2.5}颗粒为光滑的球体；② PM_{2.5}颗粒在一个无限空间内运动；③ PM_{2.5}颗粒由静止开始运动，在重力方向达到终极速度；④ 只有一个PM_{2.5}颗粒，不与其他颗粒有碰撞、吸引等作用，不与器壁碰撞；⑤ 不考虑由于摩擦引起的能量转化；⑥ 声波的传播是一个绝热过程。

表1给出了本文数值计算的具体参数。

表1 数值计算参数

Tab. 1 The parameters of calculation

频率/Hz	声强/dB	温度/K	大气压/Pa
1000	120	290	1.01325×10 ⁵
PM _{2.5} 粒径/m	PM _{2.5} 密度/(kg/m ³)	时间步长/s	当地声速/(m/s)
2×10 ⁻⁶	2100	1×10 ⁻¹⁰	340

5 数值模拟计算结果

5.1 声场压力分布

图1(a)、(b)分别为整周期时刻和整波长位置平面波声场内压力的分布情况。由计算结果知，在表

1条件下声波所引起的压力幅值为28.197Pa，约占大气压力的0.0278%。

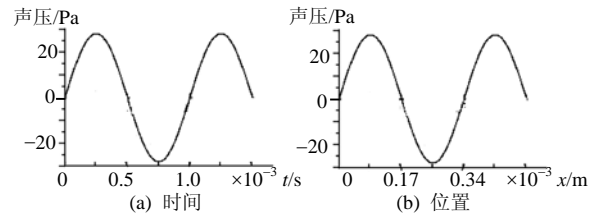


图1 声场中压力随位置和时间的变化

Fig. 1 The sound pressure changes with position and time

5.2 PM_{2.5}的速度

在垂直方向，颗粒由于受力逐渐减为0，其速度V₂先逐渐增大，最后稳定在终极速度，做匀速下落，通过计算，终极速度为1.4328×10⁻⁷m/s。在水平方向，颗粒速度V₁作周期变化。颗粒初始位置的不同造成颗粒速度的不同。图2给出了颗粒在初始位置为整波长位置的速度分布(声场传播方向和重力方向为正)。图3给出了不同初始位置造成颗粒速度的差异。

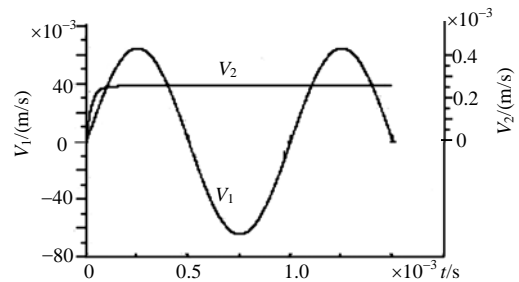
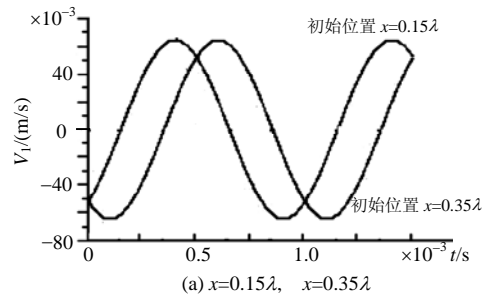
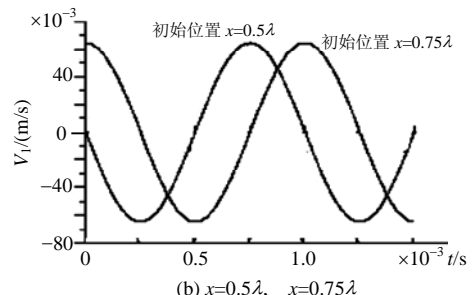


图2 颗粒在初始位置为整波长的速度

Fig. 2 The velocity of PM_{2.5} when its initial position is at 1.0λ



(a) x=0.15λ, x=0.35λ



(b) x=0.5λ, x=0.75λ

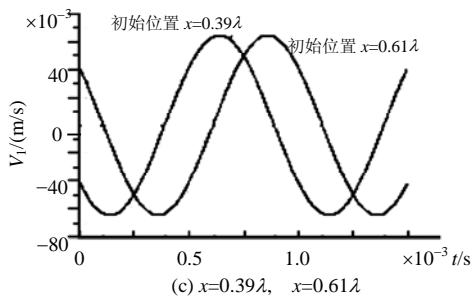


图 3 颗粒在不同初始位置的速度

Fig. 3 The velocity of PM_{2.5} at different initial position

由图 3 可以看出，颗粒初始位置的不同造成了颗粒初始速度的大小、方向不同。颗粒最大速度幅值为 $64.289 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 。颗粒受声场作用而具有的速度明显大于重力的作用，颗粒速度在时间轴上是正余弦分布。

5.3 PM_{2.5} 的位移

以 S_1 为横向位移， S_2 为纵向位移，图 4 给出了颗粒在初始位置为整波长位置的位移情况，图 5 为重力作用的放大图(声波传播方向及重力方向为正)。从图 5 看出，重力方向上的位移并不是一条直线，颗粒在这个方向上速度的分布情况决定了位移先有一个曲线变化后才是直线变化。

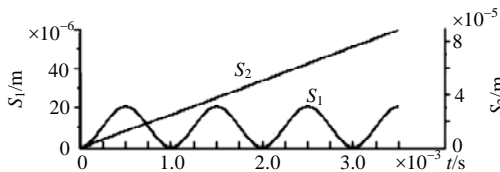


图 4 颗粒在初始位置为整波长的位移

Fig. 4 The displacement of PM_{2.5} when its initial position is at 1.0λ

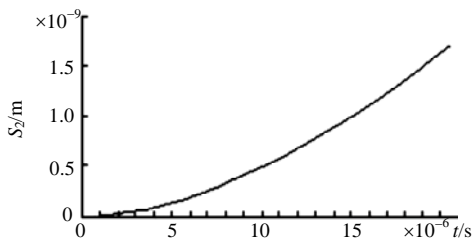


图 5 颗粒在垂直方向位移放大图

Fig. 5 The enlarged displacement of PM_{2.5} at vertical direction

从图 6 中可以看出，不同的初始位置使颗粒具有不同方向的位移(声波传播方向及重力方向为正)。颗粒在 $0.5n\lambda$ (n 为整数) 初始位置时拥有同时间内最大的位移，不同的是在 $0.5n\lambda$ (n 为奇数) 初始位置时拥有的是正向位移，而在 $0.5n\lambda$ (n 为偶数) 初始位置时拥有的是负向位移；颗粒在 $0.25n\lambda$ (n 为奇数) 初始位置时在原地正向或负向的振动。这一点与袁竹林等^[4]的研究并不相同，没有顺或逆声波传播方

向的直线移动。推断这是空气阻力作用的结果。声场是由介质(空气)传播的，没有介质不会有声场，空气阻力有足够的力量改变 PM_{2.5} 的运动规律，空气阻力对 PM_{2.5} 颗粒的作用不能忽略。颗粒的水平位移和垂直位移的综合结果是颗粒螺旋型下落。

通过图 6 还可以看出，无论颗粒的初始位置如何，都是沿着某一个轴简谐振动，这种振动的幅值与声场的强度和频率有关，图 7 给出了这种关系。在同一频率声场中，颗粒的振动随着声强的提高变得强烈；在同一声强声场中，颗粒的振动随着频率的提高变得柔和。

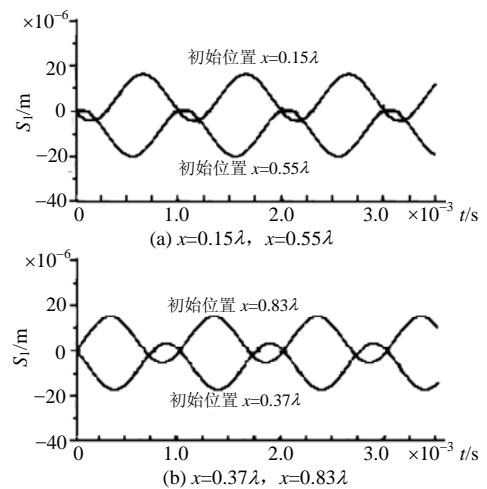


图 6 颗粒在不同初始位置的位移

Fig. 6 The displacement of PM_{2.5} at different initial position

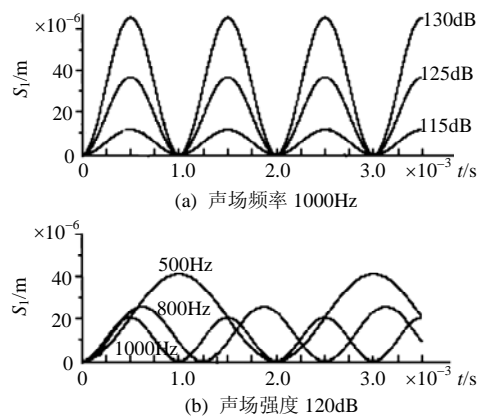


图 7 颗粒振动幅值与声场强度和频率的关系

Fig. 7 The relation between PM_{2.5} amplitude and intensity and frequency of sound

6 实验验证

为了验证模拟的结果，进行了可视化实验。实验装置如图 8 所示。实验台由 3 部分组成。①观测室及气溶胶发生系统，观测室是用有机玻璃制成，气溶胶发生系统由气溶胶发生器和输送气源组成；

②显微摄像系统,由激光器光源、体式显微镜、数字摄像设备及台式PC机组成;③声场产生及检测系统,由信号发生器、功率放大器、声源及分贝计组成。

实验开始时首先开启气溶胶发生系统,使气溶胶充满整个观测室;然后打开激光器光源并调整激光束的位置使其照射在体式显微镜的焦平面内;调节显微镜的放大倍数;开启声场产生系统并调整好产生声波的波形、频率及声强;打开数码摄像设备调整好拍摄速度并拍摄记录下颗粒的运动情况。

可视化实验台能观测到颗粒的运动轨迹,可以从颗粒在声场中的振动位移方面来验证模型的正确与否。拍摄的照片如图9。由于光的衍射等原因,图9不能表现 $PM_{2.5}$ 的真实粒径,其真实粒径的大小可用计算方法得知。从图9可以看出颗粒是螺旋型下落的,颗粒的振动位移分别约为13、 $24\mu m$,与计算所的相差并不是很大,约有 $2\sim 4\mu m$ 的差额。考虑到实验环境等因素,模型是可靠的。

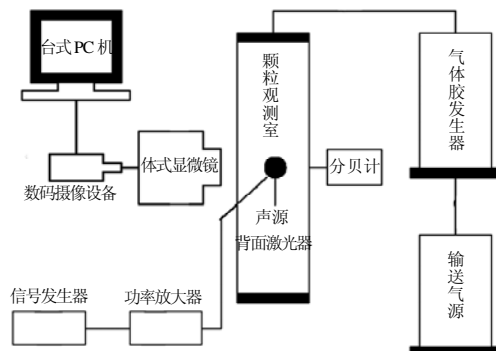
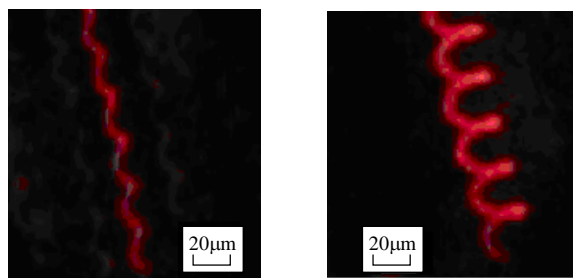


图8 $PM_{2.5}$ 声场中动力学特性可视化实验装置示意图
Fig. 8 The visual experimental device for investigating dynamic characteristic of $PM_{2.5}$ in sound field



(a) 110dB, 1000Hz (b) 120dB, 1000Hz
图9 $PM_{2.5}$ 在声场中的运动轨迹

Fig. 9 The movement orbit of $PM_{2.5}$ in the sound field

7 结论

(1) 将空气对颗粒的阻力特性考虑在内,建立了水平平面声波对重力场中 $PM_{2.5}$ 颗粒作用的数学模型,通过模拟计算发现声场对 $PM_{2.5}$ 颗粒有着明显

的作用,颗粒在水平方向发生强烈振动。在声场和重力场的综合作用下,颗粒垂直螺旋型下落。

(2) 颗粒的初始位置决定了颗粒在水平方向内的速度和位移。颗粒由于初始位置的不同在水平面内的振动位置会在原来的位置上偏向或背向声波方向(最大偏离一个振幅),但颗粒不会发生沿直线轨迹向声源或背向声源的移动。这种水平振动和垂直下落使颗粒在单位时间内扫过一个柱形的空间,这个空间是颗粒碰撞的有效空间。

(3) 在同一介质中,颗粒在水平方向内的振动强烈情况与声场的强度和频率有关,当频率一定时随强度的增大,振动幅度变大;当声强一定时随频率的提高,振动幅度变小。

(4) 可视化实验验证了模型的可靠性。

参考文献

- [1] Saskia C, Zee V D. Characterization of particulate air pollution in urban and non-urban areas in the Netherlands[J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(21): 3717-3729.
- [2] Itziar G. Particle measurements of particle entrainment in a standing-wave acoustic field between 20 and 30Hz [J]. J. Aerosol Sci, 2000, 31(12): 1461-1468.
- [3] Tsuyoshi Takuwa. Mechanisms of fine particulates formation with alkali metal compounds during coal combustion [J]. Fuel, 2006, 85(4): 671-678.
- [4] Buhre B J P. Submicron ash formation from coal combustion [J]. Fuel, 2005, 84(5): 1206-1214.
- [5] Andrew G H. Source contributions to atmospheric fine carbon particle concentration[J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(22): 3805-3825.
- [6] Hideo S, Heru S, Takuya A, et al. An experimental and theoretical investigation of rarefied gas flow through circular tube of finite length [J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(19): 4027-4036.
- [7] Hoffmann T L. Environmental implications of acoustic aerosol agglomeration [J]. Ultrasonics, 2000, 38(1-8): 353-357.
- [8] Xavier Q. Monitoring of $PM_{1.0}$ and $PM_{2.5}$ around primary particulate anthropogenic emission sources[J]. Atmospheric Environment, 2001, 5(4): 845-858.
- [9] Kuprianov V I. Assessment of gaseous, PM and trace element emissions from a 300MW lignite-fired boiler unit for various fuel qualities[J]. Fuel. 2006, 85(11): 2171-2179.
- [10] Jones M R. Characteristics of the ultrafine component of fly ash [J]. Fuel, 2006, 85(11): 2250-2259.
- [11] Zhang L, Ninomiya Y. Emission of suspended PM_{10} from laboratory-scale coal combustion and its correlation with coal mineral properties[J]. Fuel, 2006, 85(1): 194-203.
- [12] Buhre B J P. Fine ash formation during combustion of pulverized coal-coal property impacts [J]. Fuel, 2006, 85 (1): 185-193.
- [13] Zhang L. Formation of submicron particulate matter (PM_1) during coal combustion and influence of reaction temperature[J]. Fuel, 2006, 85(5): 1446-1457.
- [14] Win Lee S, He I, Young B. Important aspects in source $PM_{2.5}$ emissions measurement and characterization from stationary combustion systems

- [J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(4): 687-699.
- [15] 袁竹林, 李伟力, 魏星, 等. 声波对悬浮 $PM_{2.5}$ 作用的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 121-125.
Yuan Zhulin, Li Weili, Wei Xing, et al. Study of the sound wave effect on the $PM_{2.5}$ suspended in the air by numerical method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 121-125 (in Chinese).
- [16] T·艾伦. 颗粒大小测定[M]. 喇华璞, 童三多, 施娟英. 译. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [17] 福克斯. 气溶胶力学[M]. 北京: 科学出版社, 1960.
- [18] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001.
- [19] 马大猷, 沈曦. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [20] 袁竹林, 许世森. 颗粒层过滤除尘和分级过滤特性的数值模拟及实验对比[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 41-45.
Yuan Zhulin, Xu Shisen. Simulation research on the moving granular bed dust filter and experimental contrast [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 41-45(in Chinese).
- [21] 凡凤仙, 袁竹林. 外加声场对增加 $PM_{2.5}$ 碰撞几率的数值模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 12-16.
Fan Fengxian, Yuan Zhulin. Numerical simulation of the collision rate of $PM_{2.5}$ in sound wave field[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 12-16(in Chinese).
- [22] 蔡桂英, 袁竹林. 用离散颗粒数值模拟对陶瓷过滤器过滤特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12), 203-207.
Cai Guiying, Yuan Zhulin. Study on the filtration mechanism of ceramic filter by numerical simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 203-207(in Chinese).
- [23] 陈敏, 袁竹林, 郜时旺. 移动床过滤除尘的直接数值模拟研究及实验对比[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 195-199
Chen Min, Yuan Zhulin, Gao Shiwang. Direct numerical simulation and experimental contrast of the moving granular bed dust filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 195-199(in Chinese).
- [24] Helland E, Occelli R, Tadriss L. Numerical study of cluster formation in a gas-particle circulating fluidized bed[J]. Power Technology, 2000, 110(3): 210-221.
-
- 收稿日期: 2007-02-21。
作者简介:
王春波(1973—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为洁净煤燃烧及污染物控制, hdwchb@126.com。

(编辑 王庆霞)