

# 声波对悬浮PM<sub>2.5</sub>作用的数值研究

袁竹林, 李伟力, 魏星, 凡凤仙, 沈湘林

(东南大学洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏省南京市 210096)

## STUDY OF THE SOUND WAVE EFFECT ON THE PM<sub>2.5</sub>S SUSPENDED IN THE AIR BY NUMERICAL METHOD

YUAN Zhu-lin, LI Wei-li, WEI Xing, FAN Feng-xian, SHEN Xiang-lin

(The Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology  
of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** In order to investigate the possibilities of using sound energy to remove the fine particles (PM<sub>2.5</sub>) from air, the acting force caused by plane sound wave was discussed. The velocities and the moving behavior of PM<sub>2.5</sub> suspended in a sound field were studied by numerical method. Researches found that sound wave has obvious effect on the suspended PM<sub>2.5</sub>s. When the PM<sub>2.5</sub>s are static in the air, the sound wave will make them moving with period velocities. It is found that the values of PM<sub>2.5</sub>'s velocities are different, which change with the initial position located along the sound propagation direction. As an example, when the plane sound wave frequency is 10000Hz and the sound intensity is 1 W/m<sup>2</sup>, the movement of PM<sub>2.5</sub> in the sound field can be against the sound wave, along the sound wave and vibration at original position.

**KEY WORDS:** Thermal power engineering; Fine particles (PM<sub>2.5</sub>); Sound wave; Dust remove; Numerical method

**摘要:** 采用数值方法对平面声波场中悬浮PM<sub>2.5</sub>的受力进行了研究,探讨了在声波作用下PM<sub>2.5</sub>的运动速度与运动轨迹,为采用声波脱除PM<sub>2.5</sub>的可能性做了机理上的探讨。研究发现,在声音频率10000Hz、声强度为1W/m<sup>2</sup>条件下,声波对空气中悬浮PM<sub>2.5</sub>有显著作用,悬浮PM<sub>2.5</sub>在声场中作周期性变速运动,其运动方向和轨迹与PM<sub>2.5</sub>在声场中的初始位置有重要关系,存在顺声波而下、逆声波而上和原地振动不同情况。

**关键词:** 热能动力工程; 细粒子 (PM<sub>2.5</sub>); 声波; 除尘; 数值方法

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB211604)。

Project Supported by the Special Funds of State Key Projects for Fundamental Research (2002CB211604).

## 1 引言

近年来的研究表明,大气中的可吸入颗粒物(直径在2.5 $\mu$ m以下的细粒子,以下用PM<sub>2.5</sub>表示)对人体带来的危害是严重的,由于PM<sub>2.5</sub>易于富集空气中的有毒重金属、酸性氧化物、有机污染物、细菌与病毒,其有害影响远高于粗粒子<sup>[1-3]</sup>,PM<sub>2.5</sub>通过呼吸进入人体肺部后难以排出并沉积,进而进入血液循环,它与癌症的发生有密切关系,因此对PM<sub>2.5</sub>的脱除研究也越来越引起重视并逐渐深入<sup>[4-6]</sup>。PM<sub>2.5</sub>的主要来源之一是电厂燃煤锅炉的排放物<sup>[7-9]</sup>,在发达国家已将PM<sub>2.5</sub>的脱除放在与SO<sub>x</sub>和NO<sub>x</sub>同等重要的地位。由于PM<sub>2.5</sub>体积小、重量轻和数量多,常规离心式除尘、过滤除尘以及电除尘等方式均难以奏效,给脱除带来困难。利用声波引起空气分子振动,通过分子稀疏和稠密的变化对PM<sub>2.5</sub>产生作用,探讨声波脱除PM<sub>2.5</sub>的可能性,已被列为国家重点基础研究发展规划项目相关研究内容之一。对于微尺度条件下颗粒受力及运动特性的研究,数值模拟往往更能有效地发挥出探讨其内在机理的作用<sup>[10-11]</sup>,本文采用数值方法对平面声波场中悬浮PM<sub>2.5</sub>的受力及运动规律进行了研究,数值研究虽不能取代实验,但可为实验研究提供重要信息作为确定实验方案和设计实验装置时的参考。

## 2 平面声波及声场中的谐振压力

声波含有能量,在一个很强的声源附近,能够感受到物体产生的振动,其原因就是空气将声源所发出的能量传递到了物体。根据分子运动理论,空气分子没有外力作用时在无休止地作分子热运动,

水平空间不同位置处的压力是相同的。当存在平面声波场时，空气分子在原有热运动的基础上叠加声波引起的分子运动，设声场为一正弦平面波

$$y(x,t) = A \sin[2\pi f(t - \frac{x}{c})] \quad (1)$$

式中  $y$  为质点沿声波传播方向的位移； $A$  为振幅； $f$  为频率； $c$  为声速； $x$  为离开声源的距离； $t$  为时间。

沿声波传播方向不同位置处分子所形成的统计运动规律可用振动质点来表示，如图 1 所示。图 1 给出了声波的形成和传输过程，在声源振动物体的作用下，最靠近声源物体的气体分子与声源物体碰撞并获得动能，分子运动速度发生变化，随后气体分子又与周围其它气体分子相撞，以纵波的形式将能量传递开来。同一时刻 1 至 13 各质点运动速度和方向是不同的，从而造成声场中的气体分子沿声波传播方向“数密度”（单位体积内的分子个数）的变化，形成一个具有稀疏和稠密区域的纵波波形并沿声音传播方向移动。虽然声波由上游传向下游，但声场中的气体分子所发生的统计运动（图 1 中的质点运动）为振动，并遵循式(1)规律，并不发生宏观上的流动。

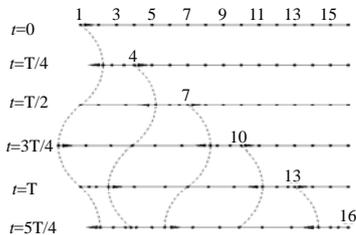


图 1 声波的形成与传播

Fig. 1 Formation and propagation of a sound wave

压力是大量气体分子撞击器壁所形成的统计结果，因此声场中沿声波传播方向分子数密度的变化将产生压力的变化，获得声场中的压力变化规律是研究PM<sub>2.5</sub>受力及运动的前提。沿声波方向取一长度为 $dx$ 的空间微元，见图 2，当没有声波作用时，

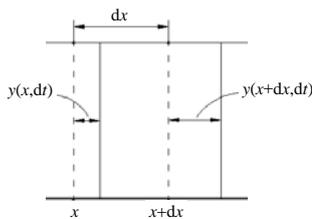


图 2 声波微元界面的纵向位移

Fig.2 The displacements of the boundaries of a micro-control body

微元体体积  $V$  为

$$V = Sdx \quad (2)$$

式中  $S$  为微元体的横截面积。

在声波作用下，微元体的左、右界面发生位移，根据式(1)可知，经  $dt$  时间后微元在  $x$  和  $x+dx$  处边界分别移动了  $y(x, dt)$  和  $y(x+dx, dt) = y(x, dt) + dx(\partial y / \partial x)$ ，由于左、右界面位移的不同，微元体体积发生了变化，微元体内的气体密度和压力也都随之发生变化。变化后的微元体积为  $Sdx(1 + \partial y / \partial x)$ 。体积变化量

$$dV = Sdx(\partial y / \partial x) \quad (3)$$

在声波中，气体按声波的频率不断发生压缩与膨胀，由于过程进行得极快，在压缩过程中没有热量来得及从气体的压缩部分传出，其过程可以看作是绝热过程<sup>[12-13]</sup>。根据热力学第一定律，理想气体准静态过程解析式可以表示为<sup>[14]</sup>

$$\delta q = c_v dT + p dv \quad (4)$$

式中  $q$  为热量； $c_v$  为气体的定容比热； $T$ 、 $p$ 、 $v$  分别为气体的温度、压力和比容。

对理想气体状态方程式  $p v = R T$  取微分  $p dv + v dp = R dT$ ，并将  $\delta q = 0$  带入式(4)得

$$(c_v + R) p dv + c_v v dp = 0 \quad (5)$$

将关系式  $c_p = c_v + R$  和  $\frac{c_p}{c_v} = \gamma$  带入式(5)进一步整理得

$$\frac{dp}{p} = -\gamma \left( \frac{dv}{v} \right) \quad (6)$$

根据图 2 所示微元体，在没有声波作用时，气体的体积为  $V$ ，气体压力为静态压力  $p_0$ （如气压），经过  $dt$  时间后，体积变化量为  $dV$ ，压力变化量为

$dp$ ，由此可得<sup>[12]</sup>： $\frac{dv}{v} = \frac{dV}{V} = \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right)$ ， $\frac{dp}{p} \square \frac{dp}{p_0}$ 。代

入式(6)得

$$dp = -p_0 \gamma \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right) \quad (7)$$

$dp$  即为由于声波中分子数密度变化而引起的压力波动，将  $dp$  与静态压力  $p_0$  叠加即可得到声场中不同位置、不同时刻的谐振声压  $p(x, t)$

$$p(x, t) = p_0 + dp = p_0 - p_0 \gamma \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right) \quad (8)$$

将式(1)对  $x$  求偏导后带入式(8)得

$$p(x, t) = p_0 + p_0 A \gamma \frac{2\pi f}{c} \cos[2\pi f(t - \frac{x}{c})] \quad (9)$$

式中  $p_0 A \gamma \frac{2\pi f}{c}$  为声压幅值  $p_m$ ，它与振幅  $A$  的关系

为  $p_m = 2\pi f \rho c A$ ； $\rho$  为气体密度。

与声波相关的另一重要参数是声强度  $I$ ，是指单位时间内穿过单位面积的能量

$$I = \frac{1}{2} \rho c A^2 (2\pi f)^2 = \frac{1}{2} \frac{p_m^2}{\rho c} \quad (10)$$

由式(10)可见，声强度与振幅和频率均成平方关系。

### 3 声场中悬浮 PM<sub>2.5</sub> 的受力计算方法

由于声场中沿声波传播方向存在压力梯度，直径为  $d$  的细微颗粒在沿声波方向两个半球面受到的压力不平衡，因此悬浮于声场中的 PM<sub>2.5</sub> 将受到力的作用。根据压力分布式(9)可知，沿声波方向球面不同位置所受到的压力是不同的，为了便于计算，取距球心  $x'$  处的压力作为半球面所受到的平均压力的计算依据，如图 3，设  $x'$  处球冠底圆直径为  $d_i$ ，球冠底圆面积等于颗粒直径  $d$  构成的投影面积的一半，即等于图 3 中的阴影环形面积，由此可得到以下关系

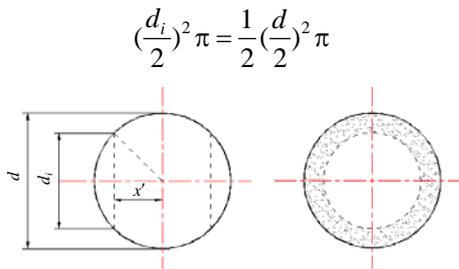


图 3 球形微粒在压力梯度场中受力计算  
Fig. 3 The calculation of the pressure acting on a half spherical surface

即

$$\left(\frac{d_i}{2}\right)^2 \pi = \frac{1}{2} \left(\frac{d}{2}\right)^2 \pi \quad (11)$$

$$x' = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_i}{2}\right)^2} \quad (12)$$

将式(11)代入式(12)后整理得

$$x' = \frac{d\sqrt{2}}{4} \quad (13)$$

位于  $x$  处的 PM<sub>2.5</sub> 所受到的作用力  $F$  以及在该力作用下时间步长  $\Delta t$  内所发生的运动可以通过下式进行计算

$$F = [p(x - x', t) - p(x + x', t)] \left(\frac{d}{2}\right)^2 \pi \quad (14)$$

$$a = F / m \quad (15)$$

式中  $a$  为加速度； $m$  为 PM<sub>2.5</sub> 的质量。

$$V_t = V_0 + a\Delta t \quad (16)$$

式中  $V$  为 PM<sub>2.5</sub> 的速度，下标“0”表示上一时间步长的旧值；“ $t$ ”为当前时间步长计算值。

$$S = V_0 \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2 \quad (17)$$

式中  $S$  为 PM<sub>2.5</sub> 在  $\Delta t$  时间内所发生的位移。

### 4 数值计算条件

表 1 给出本文的数值计算条件，为了着重探讨声波对空气中悬浮 PM<sub>2.5</sub> 的作用，忽略了重力的影响，将 PM<sub>2.5</sub> 的密度取相同环境条件下的空气密度。并在以下假设条件下进行数值模拟计算：不考虑 PM<sub>2.5</sub> 间的相互碰撞；不考虑空气阻力。根据以上假设条件，则不存在由于碰撞与摩擦所引起的动能与热能之间的能量转换。

表 1 数值计算参数  
Tab. 1 The parameters of calculation

频率 Hz	声强度 W/m <sup>2</sup>	空气温 度/K	空气 压力/Pa	PM <sub>2.5</sub> 直径/m	PM <sub>2.5</sub> 密度 kg/m <sup>3</sup>	时间步 长/s
10000	1	300	1.01325×10 <sup>5</sup>	2×10 <sup>-6</sup>	1.18	1×10 <sup>-9</sup>

### 5 数值计算结果

#### 5.1 声场中压力分布

图 4(a)是声场在时间  $t$  等于整周期时刻压力  $dp$  沿距离  $x$  分布，(b)是声场中整波长位置不同时刻压力波动值  $dp$  随时间变化。实际压力应在该基础上加上大气压力  $p_0$ 。由计算结果可见，声波所引起的声压幅值  $p_m = 29$  Pa，占静态压力  $p_0$  的 0.0286%。波形随时间  $t$  以声速  $c = 347$  m/s 向右移动。

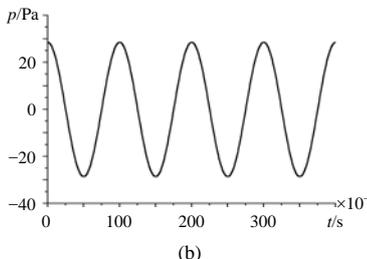
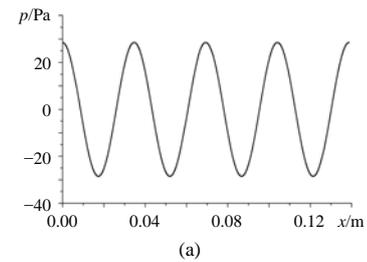


图 4 声场中压力  $dp$  随位置和时间  
Fig. 4 The sound pressure  $dp$  changes with position and time

#### 5.2 PM<sub>2.5</sub> 在声场中的受力

图 5 是 PM<sub>2.5</sub> 在声场中受力与时间的变化关系。

在时间 $t=0$ 时,  $PM_{2.5}$ 为静止起始状态并位于整波长处。图5结果表明,  $PM_{2.5}$ 在声场中受到大小和方向都在不断变化的作用力, 沿声波传播方向, 正、负受力幅值相同, 交替产生。

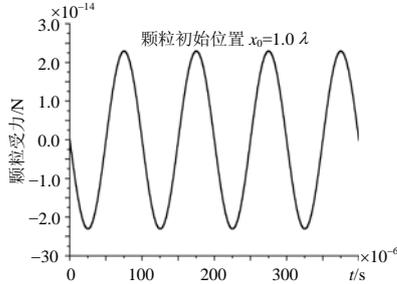


图5  $PM_{2.5}$ 在声场中受力随时间变化

Fig. 5 The force acting on  $PM_{2.5}$  changing with time

$PM_{2.5}$ 受力与其在声场中的初始位置有密切关系, 图6给出的是 $PM_{2.5}$ 初始位置分别为 $x_0=0.55\lambda$ 和 $x_0=0.35\lambda$  ( $\lambda$ 为波长)情况下其受力随时间的变化关系。结果表明, 力的振幅和周期没有变化, 但初始相位存在不同。

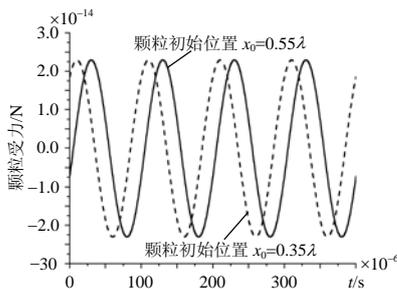


图6  $PM_{2.5}$ 在声场中受力随时间变化与其初始位置有密切关系

Fig. 6 The force acting on  $PM_{2.5}$  changes with different initial positions of  $PM_{2.5}$

### 5.3 $PM_{2.5}$ 在声场中的运动速度

图7是 $PM_{2.5}$ 初始位置位于整波长情况下其速度与时间的变化关系。由图7可见,  $PM_{2.5}$ 在声场中的速度大小作周期性变化, 但速度却始终为负值, 说明 $PM_{2.5}$ 朝声源方向逆声波运动。数值研究发现,  $PM_{2.5}$ 的运动方向与其在声场中的初始位置有密切关系, 与图6相对应, 图8给出的是 $PM_{2.5}$ 初始位置分别为 $x_0=0.55\lambda$ 和 $x_0=0.35\lambda$ 情况下的速度随时间变化。由图8可见, 对于 $x_0=0.55\lambda$ 情况,  $PM_{2.5}$ 的速度几乎全部为正值, 说明 $PM_{2.5}$ 主要顺声波方向运动。而对于 $x_0=0.35\lambda$ 情况,  $PM_{2.5}$ 大部分时间速度为正值, 小部分为负值, 说明 $PM_{2.5}$ 大部分时间是顺声波方向运动的, 而小部分时间逆声波方向运动。

对比图5和图7可以发现,  $PM_{2.5}$ 的速度变化较其受力变化存在滞后, 这是由于 $PM_{2.5}$ 的运动惯性造

成的。如根据式(15), 当 $F$ 达到峰值后转为下降, 在 $F$ 没有成为负值前, 由其产生的加速度为正值, 根据式(16)计算得到的 $PM_{2.5}$ 的速度仍旧是增加的。 $PM_{2.5}$ 在声场中不同起始位置受力初相的不同以及速度与受力之间的滞后作用, 导致了运动速度的差异(见图8), 使不同起始位置的颗粒具有不同的运动方向。

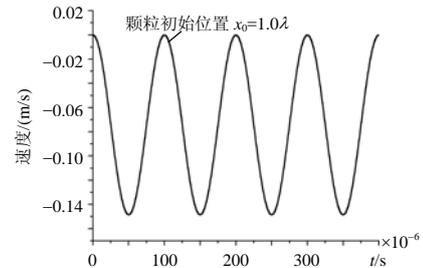


图7  $PM_{2.5}$ 在初始位置为整波长时的运动速度与时间关系

Fig. 7 The velocity of  $PM_{2.5}$  when its initial position is at  $1.0\lambda$

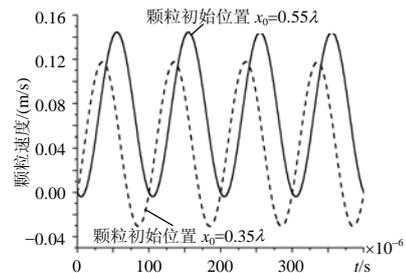


图8  $PM_{2.5}$ 的运动速度与初始位置有密切关系

Fig. 8 The velocity of  $PM_{2.5}$  has close relation with its initial position

### 5.4 $PM_{2.5}$ 在声场中的运动轨迹

图9是与图5、图7对应条件下 $PM_{2.5}$ 在声场中的位置与时间关系, 在负值速度的作用下,  $PM_{2.5}$ 向声源方向运动。

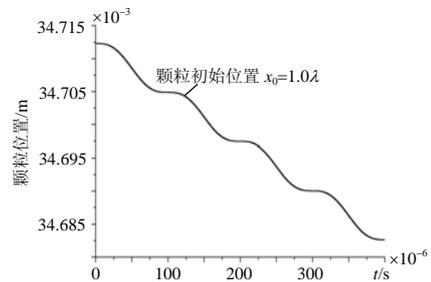


图9  $PM_{2.5}$ 在初始位置为一个波长时位置与时间关系

Fig. 9 The relation between  $PM_{2.5}$  position and time when the initial position is at  $1.0\lambda$

图10给出的是 $PM_{2.5}$ 在不同起始位置情况下所发生的位移与时间的关系, 结果表明, 随着初始位置的不同,  $PM_{2.5}$ 在声场中存在顺声波而下、逆声波而上和原地振动不同运动方式。

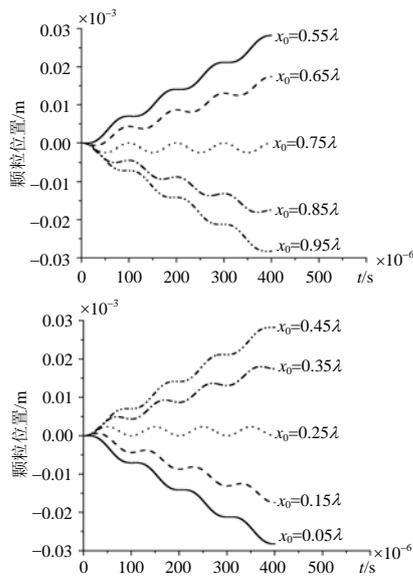


图 10  $PM_{2.5}$  在不同初始位置情况下位移与时间关系  
Fig. 10 The relation between the displacements and time for different initial positions of  $PM_{2.5}$

## 6 结论

(1) 声波对空气中悬浮  $PM_{2.5}$  有显著作用, 悬浮  $PM_{2.5}$  在声场中受到周期性作用力, 在该力作用下做周期性变速运动, 在本文所列计算条件下,  $PM_{2.5}$  的最大运动速度可达  $0.15\text{m/s}$ 。

(2)  $PM_{2.5}$  在平面声场中的运动与其沿声波方向的初始位置有密切关系, 不同初始位置的颗粒具有不同的运动速度, 主要体现在沿声波方向运动速度的不对称性, 这种不对称性是由于不同起始位置颗粒受力初相的不同以及速度与受力变化之间存在滞后所造成。

(3) 平面声场中的悬浮  $PM_{2.5}$  存在顺声波而下、逆声波而上和原地振动的不同运动方式。

## 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] 王玮, 汤大纲, 刘红杰, 等. 中国  $PM_{2.5}$  污染状况和污染特征的研究[J]. *环境科学研究*, 2000, 13(1): 1-5.  
Wang Wei, Tang Dagang, Liu Hongjie *et al.* The characteristics of  $PM_{2.5}$  pollution in China[J]. *Study of the Environment Science*, 2000, 13(1): 1-5.
- [3] 何兴舟, 杨儒道. 室内燃煤空气污染与肺癌[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1994.
- [4] 朱广一. 大气可吸入颗粒物研究进展[J]. *环境保护科学*, 2002,

28(113): 3-5.

- Zhu Guangyi. Study progress on inhalable particles in atmosphere [J]. *Journal of Environmental Protection Science*, 2002, 28(113): 3-5.
- [5] 张大年. 城市大气可吸入颗粒物研究[J]. *上海环境科学*, 1999, 18(4): 154-157.  
Zhang Danian. Study on inhalable particulates in urban ambient air [J]. *Shanghai Environmental Science*, 1999, 18(4): 154-157.
  - [6] 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.
  - [7] Gray H Andrew. Source contributions to atmospheric fine carbon particle concentration[J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(22): 3805-3825.
  - [8] 金银龙, 何公理, 刘凡, 等. 中国煤烟型大气污染对人群健康危害的定量研究[J]. *卫生研究*, 2002, 32(5): 342-348.  
Jin Yinlong, He Gongli, Liu Fan *et al.* Quantified study on human health impact caused by coal-burning air pollution in China [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2002, 32(5): 342-348.
  - [9] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京大气  $PM_{2.5}$  中微量元素的浓度变化特征与来源[J]. *环境科学*, 2003, 24(6): 33-37  
Yang Fumo, He kebin, Ma Yongliang *et al.* Characteristics and sources of trace elements in ambient  $PM_{2.5}$  in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(6): 33-37.
  - [10] 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 Shishen. Simulation research on the moving granular bed dust filter and experimental contrast[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22(4): 42-45.
  - [11] 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.  
Guiying Cai, Zhulin Yuan. Study on the filtration mechanism of ceramic filter by numerical simulation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(12): 203-207.
  - [12] 莫尔斯 P M. 振动与声[M]. 北京: 科学出版社, 1974.
  - [13] Horst Stocker. 物理手册[M]. 北京: 北京大学出版社, 2004.
  - [14] 沈维道, 郑佩芝, 蒋淡安. 工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.

收稿日期: 2005-01-10.

作者简介:

袁竹林 (1955-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事气固两相流动与传热研究;

李伟力 (1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事气固两相流动数值模拟研究;

魏星 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事气固两相流动数值模拟研究;

凡凤仙 (1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事气固两相流动研究;

沈湘林 (1946-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事可吸入颗粒物脱除研究。