

# 移动颗粒层过滤除尘的数值模拟及实验对比

袁竹林<sup>1</sup>, 许世森<sup>2</sup>

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

(2. 国家电力公司热工研究院, 西安, 710032)

[摘要] 通过建立离散颗粒运动数学模型,对移动颗粒层过滤除尘器中粉尘颗粒与过滤介质颗粒碰撞以及对除尘效率的影响进行了初步研究.模拟计算了碰撞次数与系统风速之间的变化关系.与实验结果对比发现,随系统风速的变化,颗粒碰撞频次与除尘效率之间存在定性的一致.颗粒碰撞作用对移动颗粒层的除尘性能起着重要作用.

[关键词] 离散颗粒;数值模拟;过滤除尘

[中图分类号]TK16; [文献标识码]A; [文章编号]1008-1925(2001)01-0019-05

## 0 引言

随着人们对环境保护意识的不断重视和提高,洁净煤发电及燃烧技术研究已被包括中国在内的许多国家列为重点研究项目之一.IGCC和PFBC-CC燃气蒸汽联合循环发电以其能够同时达到提高煤电转换效率和降低污染排放的优点,被列为未来燃煤发电技术的主要发展方向之一.

为了减少对燃气轮机的磨损,IGCC和PFBC-CC技术均涉及高温除尘问题,目前该问题已成为技术关键之一,尚未取得突破.综合比较不同的除尘方式来看,在高温条件下采用移动颗粒层过滤是非常具有发展前景的除尘技术,尤其是其具有良好的耐高温性能和能够连续运行的特点,现被认为是最具发展前景的高温除尘技术之一<sup>[1]</sup>并被列入国家重点基础研究项目.

移动颗粒层过滤除尘的性能涉及众多因素,其中包括过滤介质颗粒直径、尘粒粒径、床层移动速度、床层高度、入口含尘浓度和气流速度等,同时还涉及到这些参数间的优化组合问题.由此可见,如果完全通过实验的方法寻求内在除尘机理和不同工况的优化方案,实验所需时间及费用是巨大的,并且对某些机理性的问题也难以完全用实验的方法来解决.随着计算机计算速度的快速提高,数值模拟已成为目前研究气固运动规律的重要方法之一,数值模拟技术也在随计算机计算能力的提高而不断发展.针对移动颗粒层中颗粒相互密集接触,粉尘颗粒与过滤介质颗粒间存在着激烈的碰撞摩擦,本文在用欧拉方法处理气相场的同时用拉格朗日方法处理离散颗粒场,直接跟踪离散颗粒场中每一个颗粒<sup>[2,3]</sup>,就颗粒间碰撞作用对移动颗粒层除尘性能的影响进行了基础性探讨研究.

收稿日期:2000-12-01

基金项目:国家重点基础研究专项经费资助项目(G1999022104-4)

作者简介:袁竹林,1955-,东南大学动力工程系教授,博士,主要从事热能工程,气固两相流、流化床燃烧、热管技术等方面的研究.

# 1 数学模型

## 1.1 移动颗粒层过滤除尘物理模型

移动颗粒层过滤除尘器的主体是一移动流化床,过滤颗粒由床上部加入,含尘气体则由床下进入床体与过滤颗粒形成逆向流动.颗粒层过滤除尘的先决条件是表观过滤速度小于临界流化速度.若过滤速度大于或等于流化速度,则过滤失效.在没有附加外场力的条件下,移动颗粒层过滤器的除尘机理主要是通过颗粒间的碰撞与摩擦,降低尘粒运动动能,使过滤介质颗粒能够对尘粒进行吸附和捕捉.影响过滤除尘性能的主要因素包括过滤介质颗粒直径、尘粒粒径、床层循环速率、入口含尘浓度和气流速度<sup>[1]</sup>.

## 1.2 离散颗粒运动数学模型

移动颗粒层过滤除尘器中颗粒主要受到下述力的作用:(1)颗粒与颗粒相互接触所产生的力;(2)颗粒与器壁接触所产生的力;(3)气流与颗粒相对运动对颗粒产生的力;(4)重力.以上是颗粒所受到的主要作用力.

根据基本物理定律,两个球形颗粒的弹性对心碰撞微观过程为:首先在碰撞点接触,接触点处发生弹性变形,颗粒在前进方向受到阻力,随着变形的增大颗粒向前运动的阻力相应增大,颗粒运动速度下降,在达到最大变形位移时,颗粒停止运动,随后在该力的作用下,沿原来运动方向反弹.对于非完全弹性碰撞,碰撞后颗粒的动能发生损失,动能损失的大小与颗粒材料的物性和碰撞时的相对速度有关,该部分损失在物理上可以归结为在碰撞过程中受到一个与颗粒运动方向相反的力<sup>[4]</sup>,该力的大小等于两个相撞颗粒的相对速度与系数  $\delta$  的乘积,通常称为阻尼系数.当两颗粒发生偏心碰撞时,相撞点处的接触力可分解为法向分力和切向分力,由法向和切向分别进行计算,法向分力的作用结果等同对心碰撞,切向分力的作用结果是对颗粒球心产生一个矩,该矩将使颗粒发生旋转,由该矩和颗粒的转动惯量可求出所产生的转动角加速度.由摩擦定律可知,切向分力的极值受到颗粒表面摩擦系数与法向分力积的限制,当所计算出的切向分力大于该乘积时,两颗粒在接触表面将发生滑动.对于更一般的情况是两个旋转着的颗粒发生偏心碰撞,这时除计算法向位移和切向位移外,还应计及由于颗粒自转在接触点处所造成的切向速度.

颗粒与器壁的碰撞类同于颗粒与颗粒的碰撞,只需用器壁取代另一颗粒.

当一个颗粒同时与几个颗粒相碰撞时,通过矢量叠加算出该颗粒所受到的合力与合力矩.上述物理过程可用以下数学模型描述:

$$f_{Cnij} = (-k_n \delta_{nij} - n v_{rij} \delta_{nij}) n_{ij} \tag{1}$$

$$f_{Ctij} = -k_t \delta_{tij} - n v_{sij} \tag{2}$$

$$v_{sij} = v_{rij} - (v_{rij} \cdot n) n + r(\omega_i + \omega_j) \times n \tag{3}$$

式中  $f_c$ : 接触力;  $k$ : 颗粒的刚度;  $\delta$ : 颗粒相撞所产生的弹性变形;  $\delta$ : 阻尼系数;  $v_r$ : 相对速度;  $n$ : 单位法向向量;  $v_s$ : 接触点滑移速度;  $r$ : 颗粒半径;  $\omega$ : 颗粒角速度. 下标  $n$  和  $t$  分别为法向和切向;  $i, j$  为颗粒.

$$|f_{Ct\bar{ij}}| > \delta |f_{Cnij}| \tag{4}$$

$$f_{Ct\bar{ij}} = -\delta |f_{Cnij}| t_{ij} \tag{5}$$

$$t_{ij} = v_{sij} / |v_{sij}| \quad (6)$$

$$F = f_c + f_F \quad (7)$$

$$v = F/m + g \quad (8)$$

$$= T/I \quad (9)$$

式中  $f$ : 摩擦系数;  $t$ : 单位切向向量;  $F$ : 合力;  $f_F$ : 流体力;  $m$ : 颗粒质量;  $g$ : 重力加速度;  $T$ : 合力矩;  $I$ : 颗粒转动惯量.

$$v = v_0 + v \quad (10)$$

$$r = r_0 + v \quad (11)$$

$$= 0 + t \quad (12)$$

式中  $v$ : 颗粒速度向量;  $t$ : 时间步长;  $r$ : 颗粒重心的位置向量; 下标 0: 前一  $t$  旧值.

### 1.3 气相场数学模型

气相场数学模型为用欧拉方法建立的 N—S 方程. 在气固两相流中, 固相颗粒的存在对气体的流动产生影响, 该部分影响通过各网格空隙率及 N—S 方程源项得到反映<sup>[5]</sup>. 由于所模拟研究的移动颗粒层过滤器空隙率较小, 这里采用 N—S 会带来一定误差. 各网格的空隙率通过统计每一时间步长内各网格中的颗粒数计算得出.

在离散颗粒数值模拟中, 时间步长  $t$  的选取与所模拟离散颗粒的最小粒径、颗粒的运动速度以及颗粒材料的刚度有关, 粒径越小、运动速度越高以及材料刚度越大, 则  $t$  应取得越小. 这是因为颗粒每做一次  $t$  时间运动后进行一次碰撞判别, 若  $t$  选得大, 则相撞接触颗粒所产生的碰撞变形及变形引起的反作用力就大, 将会导致计算发散. 较小的时间步长能够提高计算精度和计算的稳定性, 但不利之处是引起计算时间的增加. 计算实验表明, 对本文研究的移动颗粒层过滤除尘模拟, 当  $t$  小于  $10^{-7}$  s 时能够稳定计算.

## 2 数值模拟计算及系统风速对除尘的影响

由于离散颗粒数值模拟计算过程跟踪到颗粒场中每一个颗粒, 计算量比其它数值模拟方法大, 需要花费较长的计算时间. 目前用微机计算, 模拟颗粒的数量受到限制, 为避免计算时间过长, 模拟计算取移动颗粒层过滤器中一部分, 并将移动过滤介质颗粒简化为非移动颗粒. 根据移动颗粒层除尘机理推测, 粉尘颗粒与过滤介质颗粒间的碰撞对除尘效果起重要作用, 其除尘效率应当同碰撞次数有密切关系. 在数值计算过程中, 通过统计每一计算时间步长内粉尘颗粒与过滤介质颗粒处于碰撞接触状态的数目, 能够得到每一时间步长内碰撞接触颗粒与系统风速的关系曲线, 以探讨系统风速变化对颗粒间发生碰撞的影响. 数值模拟计算条件由表 1 列出.

表 1 模拟计算条件

过滤颗粒数	150 个
过滤颗粒直径	24 mm
过滤颗粒密度	1 000 kg/m <sup>3</sup>
粉尘颗粒直径	960 μm
粉尘颗粒密度	1 000 kg/m <sup>3</sup>
粉尘颗粒流率	3 200 个/s
系统表观风速	1.1 ~ 1.9 m/s
模拟除尘器高度	0.7 m
模拟除尘器宽度	0.25 m
模拟除尘器厚度	0.03 m
计算时间步长	10 <sup>-7</sup> s

对每一计算工况, 先将过滤介质颗粒由过滤器上部按自由落体投入过滤器, 颗粒达到稳定后由过滤除尘器下部风入口处按 3200 个/s 速率投入粉尘颗粒, 粉尘颗粒在风的携带下进入过滤除尘器同过滤颗粒发生碰撞, 由于数学模型中未加入颗粒间吸附粘滞作用, 因此粉尘颗粒在同过滤介质颗粒多次碰撞后在风的携带下由过滤除尘器上部离开. 图 1 是数值模拟得到的

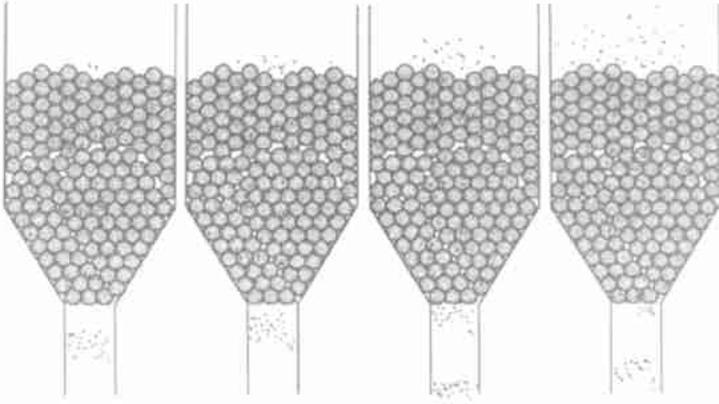


图 1 过滤介质颗粒与粉尘颗粒离散颗粒场

过滤介质颗粒与粉尘颗粒构成的离散颗粒场,由此可以看到粉尘颗粒穿过滤介质的过程.数值计算用 P 300 微机,内存配置 128 M,每个模拟实际工况为 8s,需要花费约 62h CPU 时间.图 2 是不同系统风速工况下数值计算得到每一时间步长内处于碰撞状态粉尘颗粒数与系统表观风速的变化关系.

数值模拟计算结果表明,在风速较低时,每时间步长内处于碰撞状态粉尘颗粒数较大,随着风速的增加逐渐下降.在计算条件下当风速达到一定值之后碰撞次数开始明显减少.

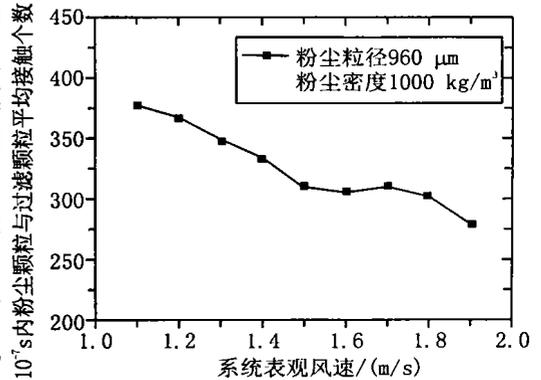


图 2  $\Delta t$  时间内处于碰撞状态粉尘颗粒数与系统表观风速的变化关系

### 3 移动颗粒层过滤除尘实验及对比分析

在一特制的移动颗粒层除尘装置上对系统风速的影响做了专门探讨研究<sup>[1]</sup>,实验条件由表 2 列出.所得到的过滤除尘效率随风速变化的实验结果如图 3 所示.

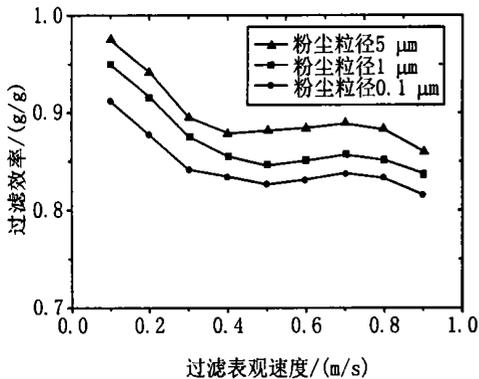


图 3 除尘效率随风速变化的实验结果

表 2 实验条件

过滤介质颗粒	石英砂 1~2 mm
系统风量	50~150 m <sup>3</sup> /h(标)
床层移动速率	1.0 kg/min
含尘浓度	1.0 g/m <sup>3</sup> (标)
含尘为粒度范围	0~100 μm

实验结果表明,在低风速时,除尘效率高.在实验条件下当风速大于 0.7m/s 时,由于气流的携带能力增强和过滤介质颗粒间空隙开始增大,各种尘粒的分级分离效率也开始下降.由于目前计算条件的限制,本文的模拟计算颗粒规模与计

算工况条件与实验条件有较大的差别,因此在定量上不能进行对比,但在定性上反应出存在的共性:在数值模拟中研究的碰撞频次和实验过程测取的除尘效率反映出与风速变化的相同规律,均显示出在低风速下移动颗粒层过滤除尘器效率高,并随风速的增加而下降,当风速增大到某一值后,除尘效率开始明显下降.根据碰撞频次与除尘效率随风速变化的一致性可以推测,粉尘颗粒与过滤介质颗粒间的碰撞作用对过滤除尘器的性能起重要作用.

与实验研究相比,采用离散颗粒数学模型对移动颗粒层过滤除尘器进行研究可从除尘机理上进行深层次的分析 and 发掘信息,能够对实验研究形成有力地补充.

## 4 结论

采用离散颗粒气固流动数值模拟方法可对移动颗粒层过滤除尘机理进行探讨研究,并在定性上与实验结果反映出存在共性.在移动颗粒层过滤除尘器中,粉尘颗粒与过滤介质颗粒间的碰撞对除尘起着重要作用,碰撞发生的频次在低风速时较大,随风速提高而下降,当风速达到某一值时,碰撞频次开始明显减少.由数值模拟得到的碰撞频次和实验过程测取的除尘效率与风速变化具有相同变化趋势.

### [参考文献]

- [1] 许世森.移动颗粒层过滤高温除尘过程结构和参数优化实验研究[J].中国电机工程学报,1999,19(5):13~17
- [2] Yuan Zhulin. Direct Numerical Simulation of Dense Gas Solid Two Phase Flows [J]. Journal of Developments in Chemical Engineering & Mineral Processing, 2000, 8(3/4): 207~217
- [3] 袁竹林.用直接数值模拟方法对流化床内颗粒运动区域的研究[J].燃料化学学报,2000,28(4):372~375
- [4] T suji Y. Discrete Particle Simulation of Gas-Solid Flows[J]. KONA, 1993, (11):57~68
- [5] Elghobashi S E, Abou Arab T W. A Two Equation Turbulence Model for Two Phase Flows [J]. Phys. Fluids, 1983, (4): 931~938

# Simulation Research on the Moving Granular Bed Dust Filter and Experimental Contrast

Yuan Zhulin<sup>1</sup>, Xu Shisen<sup>2</sup>

(1. Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Nanjing, 210096, PRC)

(2. Thermal Power Research Institute of State Electric Power Corporation, Xian, 710032, PRC)

**Abstract:** A mathematical model to simulate the discrete particle behavior in a moving granular bed dust filter was established. The experiments prove that the collision times between the dust particles and filter particles change with the dusty air velocity and the variation is qualitatively identical with the change of dust removal efficiency. Preliminary research shows that particles collision has important effect on the dust removal efficiency.

**Key words:** discrete particles; numerical simulation; filter dust removal

[责任编辑:刘健]