

# 燃煤 PM<sub>10</sub> 磁聚并动力学数值模拟

李永旺, 吴 新, 赵长遂, 鲁端峰

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

**摘 要:** 提出了求解燃煤 PM<sub>10</sub> 磁聚并动力学方程的双分区算法, 应用该算法模拟了东胜烟煤燃烧产生的飞灰细微粒子在均匀磁场中的聚并动力学过程, 并与实验结果进行了比较。结果表明: 数值模拟结果与实验结果相一致, 双分区算法具有较好的适用性; 在 0.023~9.318 μm 的粒径范围内, 中间粒径粒子的聚并脱除效率高于小粒子和大粒子的聚并脱除效率; 提高外磁场磁感应强度、粒子总质量浓度、粒子在磁场中停留时间以及气流平均速度, 可提高粒子的聚并脱除效率; 在粒子达到饱和磁化后, 外磁场的增强对粒子的聚并无影响; 当气流平均速度与粒子在磁场中的停留时间的乘积为一定值时, 粒子的聚并脱除效率随气流平均速度的增大而减小; 粒子分粒径脱除效率最大值对应的粒径和粒子数目中位直径随聚并总脱除效率的增大而减小。

**关 键 词:** 燃煤 PM<sub>10</sub>; 磁聚并; 双分区算法; 脱除效率

中图分类号: X513 文献标识码: A

## 引 言

我国是燃煤大国, 燃煤排放的飞灰颗粒物成为大气可吸入颗粒物(空气动力学直径小于 10 μm, 通常用 PM<sub>10</sub> 表示)的主要来源之一。排放到空气中的飞灰颗粒物不仅降低了大气的能见度, 影响环境和气候, 而且危害人体健康, 导致发病率和死亡率上升<sup>[1-4]</sup>, 日益引起世界各国的高度重视。燃煤 PM<sub>10</sub> 具有体积小、重量轻、数量多的特点, 常规除尘方法难以奏效。由于燃煤 PM<sub>10</sub> 中通常含有一定量的铁磁性物质<sup>[5]</sup>, 具有较高的磁化率<sup>[6]</sup>, 磁化后形成磁偶极子, 在偶极子力和外磁场等作用下发生碰撞聚并, 从而使粒子长大, 便于常规除尘装置的直接脱除。因而, 利用燃煤 PM<sub>10</sub> 的上述特性, 研究其在磁场中的聚并动力学特性, 以期实现燃煤可吸入颗粒物在磁场中的高效聚并脱除, 已被列为国家重点基础研究规划项目的相关研究内容之一。

Smoluchowski 最早研究了气溶胶粒子的聚并<sup>[7]</sup>, 提出了静止介质中气溶胶粒子的布朗扩散聚并模型, 其后一些学者在此基础上对磁性粒子、弱磁性粒子在外加磁场中的聚并进行了初步的理论研究。Svoboda 提出了均匀磁场中弱磁性粒子的聚并模型<sup>[8]</sup>, 分析了粒径和外磁场强度对聚并速率的影响; Dominik 在只考虑磁偶极子径向力的条件下<sup>[9]</sup>, 推导了粒子有效碰撞截面的计算表达式; Prakash 对粒子间相互作用能做了必要的数学简化<sup>[10]</sup>, 提出了粒子在磁偶极子力作用下聚并系数的解析表达式。

然而, 布朗扩散聚并模型是一种较为理想化的聚并模型, 只考虑了粒子间相互作用力而忽略了其它对聚并有影响的作用力, 不适用于研究粒子在磁力、流体曳力、布朗力、重力等力共同作用下的聚并, 为此作者提出了均匀磁场中燃煤 PM<sub>10</sub> 二元碰撞聚并模型<sup>[11]</sup>, 对东胜烟煤燃烧产生的细微颗粒物在磁场中的聚并脱除效率进行了理论与实验研究, 但未对粒子聚并动力学方程的求解方法以及粒子聚并动力学特征加以分析讨论。为更好地理解燃煤 PM<sub>10</sub> 在均匀磁场中的聚并动力学特性, 从而为高效磁聚并脱除燃煤 PM<sub>10</sub> 装置的实践应用和设计提供科学依据, 本文提出了求解粒子聚并动力学方程的双分区算法, 采用该方法计算分析了东胜烟煤燃烧产生的 PM<sub>10</sub> 在均匀磁场中的聚并动力学特征, 并与实验结果进行了比较。

## 1 聚并动力学过程

### 1.1 聚并动力学方程

磁场中燃煤 PM<sub>10</sub> 由于粒子间的相对运动而发生碰撞聚并, 使得粒子数目浓度发生变化, 变化过程

收稿日期: 2006-07-24; 修订日期: 2006-08-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(2002CB211600)

作者简介: 李永旺(1979-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 东南大学博士研究生。

可以通过粒子聚并动力学方程 (General Dynamicc Equation, GDE) 来描述<sup>[12]</sup>, 即:

$$\frac{\partial n(v, t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_{v_0}^v \beta(u, v-u) n(u, t) n(v-u, t) du - n(v, t) \int_{v_0}^v \beta(u, v) n(u, t) du \quad (1)$$

式中:  $n(v, t)$ —体积为  $v$  的粒子在  $t$  时刻粒子数目浓度分布函数;  $\beta(u, v-u)$ —体积分别为  $v$  和  $u-v$  粒子间聚并系数;  $v_0, v_m$ —所研究颗粒体系中粒子体积的最小值和最大值。

GDE 由于其积分微分特性难以求解, 其计算方法一直是研究的重点之一, 主要有矩算法、Monte-Carol 算法和分区算法等, 分区算法由于其简单而有效的特点而被广泛使用<sup>[13]</sup>。分区算法由 Gelbard 提出<sup>[14]</sup>, 实质是一种离散求解 GDE 的数值方法, 计算时颗粒体积范围被划分为多个区域, 并且假设在每个区域, 颗粒的计算特征量为常数。此外, 分区算法假设任何时刻粒子在空间的分布都是均匀的, 即粒子间的聚并系数与空间位置无关。

图 1 为采用二元碰撞聚并模型对磁场中燃煤 PM<sub>10</sub> 在管道截面聚并系数分布的计算结果 (两聚并粒子粒径分别为 2.5、2.0 μm; 管道内径 0.05 m; 气流平均速度 0.08 m/s; 粒子饱和磁化, 磁化强度为  $4.38 \times 10^3 \text{ A/m}$ )<sup>[11]</sup>。该图表明, 聚并系数在管道轴线位置最小, 随距管轴线径向距离的增大, 聚并系数逐渐增大, 但在管壁附近又快速降低。这是由于管道内气流速度梯度随距管轴线径向距离的增大而增大, 从而促进粒子的聚并, 但在管壁处, 粒子间有效碰撞空间减小, 使得聚并系数随之减小。因而, 分区算法不能直接应用于燃煤 PM<sub>10</sub> 在磁场中聚并动力学过程的计算。

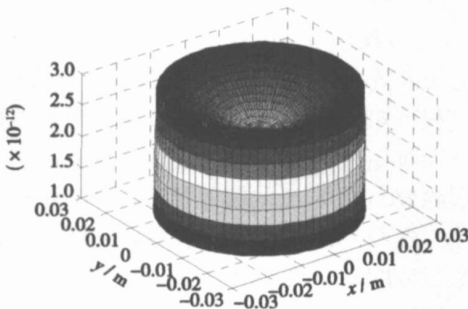


图 1 管道截面聚并系数分布

任何数值算法的本质都是将连续问题离散化, 因而可以根据管道截面聚并系数分布的特征, 对管

道截面进行分区, 计算每一个分区内的 GDE 方程, 即双分区算法。

### 1.2 双分区算法

燃煤 PM<sub>10</sub> 在气流携带下进入置于磁场中的通道并发生碰撞聚并, 每碰撞一次, 粒子数目减少 1。聚并初始时刻 ( $t=0$ ) 粒子数目浓度在通道截面上分布均匀, 随着聚并的发生, 由于聚并系数在聚并通道截面的非均匀分布使得粒子数目浓度在通道截面上的分布逐渐地出现不均匀。在通道截面上以同心圆方式将通道截面划分为多个环形区域, 每个环形区域内气流速度梯度按常数处理, 据此可计算出每个环形区间内各个粒径粒子间聚并系数。第  $r$  个环形区域内粒子聚并动力学方程可表达为:

$$\frac{\partial n(v, r, t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_{v_0}^v \beta(u, v-u, r) n(u, r, t) n(v-u, r, t) du - n(v, r, t) \int_{v_0}^v \beta(u, v, r) n(u, r, t) du \quad (2)$$

不同于式(1), 式(2)中聚并系数  $\beta$  和粒子浓度分布函数  $n$  都多一项空间位置  $r$  的影响因素。

引入分段函数  $\theta$ , 当条件满足时函数值为 1, 条件不满足时函数值为 0, 如:

$$\theta(v_{l-1} < u+v < v_l) = \begin{cases} 1 & v_{l-1} < u+v < v_l \\ 0 & v_l < u+v \text{ 或 } u+v < v_{l-1} \end{cases} \quad (3)$$

第  $l$  个粒子体积分区、 $r$  个管道环形截面分区内, 粒子数目浓度变化是以下 4 种聚并共同作用的结果:

(1) 粒径较小区域内或区域间粒子的聚并, 聚并生成的新粒子进入该区域, 粒子数目增加率为:

$$\frac{1}{2} \int_{v_0}^{v_{l-1}} \int_{v_0}^{v_{l-1}} \theta(v_{l-1} < u+v < v_l) \beta(u, v, r) n(u, t, r) n(v, t, r) dudv \quad (4)$$

(2) 该区域内粒子与粒径较小区域内粒子的聚并, 聚并生成的新粒子停留在该区域时, 粒子数目浓度不变, 进入粒径较大的区域时, 粒子数目减少, 可表示为:

$$- \int_{v_0}^{v_{l-1}} \int_{v_{l-1}}^{v_l} \theta(u+v > v_l) \beta(u, v, r) n(u, t, r) \times n(v, t, r) dudv \quad (5)$$

(3) 该区域内部粒子的聚并, 聚并生成的新粒子停留在该区域时, 每碰撞一次, 颗粒数目减少 1; 进入粒径较大的区域时, 每碰撞一次, 颗粒数目减少 2。该区域内粒子数目增加率为:

$$-\frac{1}{2} \int_{v_0}^{v_{l-1}} \int_{v_{l-1}}^{v_l} \{2\theta(u+v > v_l) + \theta(u+v < v_l)\} \times \beta(u, v, r) n(u, t, r) n(v, t, r) dudv \quad (6)$$

(4) 该区域内粒子与粒径较大区域内粒子的聚并, 聚并生成的新粒子进入粒径较大的区域, 粒子数目增加率为:

$$-\int_{v_l}^m \int_{v_{l-1}}^{v_l} \beta(u, v, r) n(u, t, r) n(v, t, r) dudv \quad (7)$$

考虑以上 4 种聚并, 第  $l$  个粒子体积分区、 $r$  个管道环形截面分区内粒子因聚并引起的数目浓度增加率可表示为:

$$\frac{dN_{l,r}}{dt} = \frac{1}{2} \int_{v_0}^{v_{l-1}} \int_{v_0}^{v_{l-1}} \theta(v_{l-1} < u+v < v_l) \beta(u, v, r) n(u, t, r) n(v, t, r) dudv - \int_{v_0}^{v_{l-1}} \int_{v_{l-1}}^{v_l} \theta(u+v > v_l) \beta(u, v, r) n(u, t, r) n(v, t, r) dudv - \frac{1}{2} \int_{v_0}^{v_{l-1}} \int_{v_{l-1}}^{v_l} \{2\theta(u+v > v_l) + \theta(u+v < v_l)\} \beta(u, v, r) n(u, t, r) n(v, t, r) dudv - \int_{v_l}^m \int_{v_{l-1}}^{v_l} \beta(u, v, r) n(u, t, r) n(v, t, r) dudv \quad (8)$$

式中:  $N$ —粒子数目浓度。等号右边前两项只对  $l > 1$  时适用,  $l=1$  时前两项等于 0; 最后一项只对  $l < m$  适用,  $l=m$  时最后一项等于 0。

在聚并系数和粒子初始数目浓度分布已知的条件下, 即可采用双分区算法求解燃煤 PM<sub>10</sub> 的磁聚并动力学方程。聚并系数可采用二元碰撞聚并模型进行求解, 粒子初始数目浓度分布可通过仪器来测量。

## 2 聚并动力学数值模拟

### 2.1 数值模拟条件

表 1 数值模拟条件

粒子真实密度 / kg·m <sup>-3</sup>	气体粘度 / Pa·s	气体分子平均自由程 / m	实验温度 / K
2 200	1.83 × 10 <sup>-5</sup>	7.33 × 10 <sup>-8</sup>	293

选用达拉特旗电厂煤粉锅炉静电除尘器四电场飞灰, 燃烧方式为四角喷燃, 燃用煤种为东胜烟煤。飞灰粒子初始粒径分布和磁滞回线分别如图 2 和图 3 所示。图 2 中  $d_p$  为粒子直径, 根据飞灰粒径分布可计算出粒子初始数目中位直径  $d_{nm}$  为 0.151 μm。图 3 表明飞灰粒子的磁化强度  $M$  随外磁场磁感应强度  $B$  的增强而增大, 在  $B$  为 0.45 T 时基本达到饱

和磁化。聚并通道水平布置, 管道内径为 0.05 m, 外磁场方向水平垂直于管道轴线, 其它条件如表 1 所示。

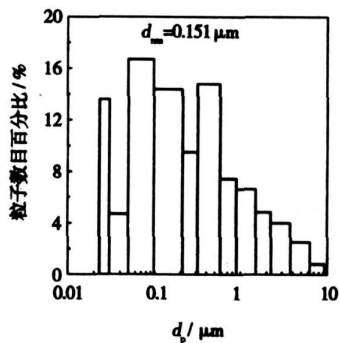


图 2 飞灰粒子粒径分布

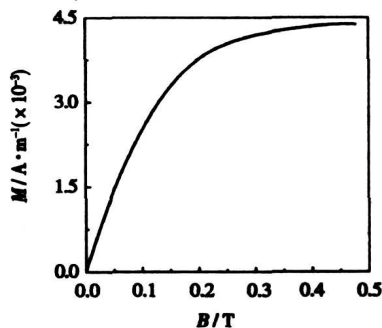


图 3 飞灰粒子磁化曲线

### 2.2 数值模拟结果及分析

均匀磁场中燃煤 PM<sub>10</sub> 在磁偶极子力、曳力、布朗力、范德华力以及重力的作用下作相对运动而发生碰撞聚并, 聚并使得粒子数目浓度减少。某一粒径粒子的数目浓度的减少率为分粒径聚并脱除效率 ( $\eta$ ), 0.023 ~ 9.318 μm 粒径范围内粒子总数目浓度的减少率为聚并总脱除效率 ( $\eta$ )。根据 1.2 节中分析的粒子 4 种聚并过程可知, 当粒子数目浓度和聚并系数不随粒径的改变而改变时, 小粒子聚并脱除效率要高于大粒子聚并脱除效率, 即粒子的聚并脱除效率随粒径的增大而减小。然而, 飞灰粒子的粒径分布表明不同粒径的粒子数目浓度是不同的 (见图 2); 粒径不同, 粒子间作用力也不同, 使得聚并系数因聚并粒子粒径的差异而不同。因而, 在粒子数目浓度和聚并系数共同作用下, 分粒径聚并脱除效率会有图 4 所示的结果, 即中间粒径粒子的聚并脱除效率高于小粒子和大粒子的聚并脱除效率。图 4 中实验结果与数值计算结果相一致<sup>[1]</sup>, 表明双分区算法可合理应用于求解燃煤

PM<sub>10</sub> 磁聚并动力学方程。

径减小, 这与图 5 的结论一致。

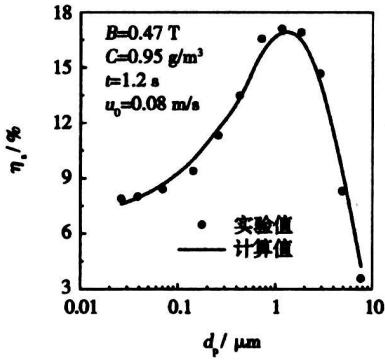
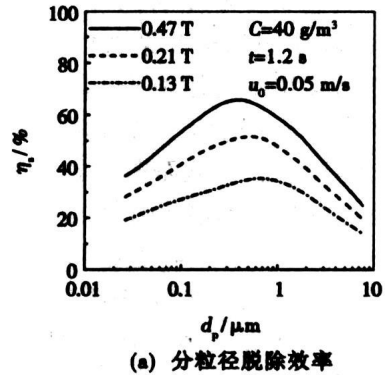


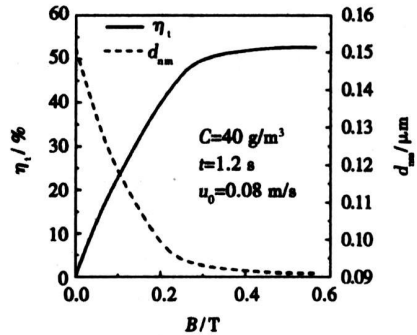
图 4 不同粒径粒子脱除效率的实验值与计算值

影响燃煤 PM<sub>10</sub> 在均匀磁场中聚并的因素主要有外磁场磁感应强度、粒子总质量浓度、粒子在磁场中停留时间以及气流速度。图 5 为在粒子总质量浓度  $C=40 \text{ g/m}^3$ 、粒子在磁场中停留时间  $t=1.2 \text{ s}$ 、气流平均速度  $u_0=0.08 \text{ m/s}$  时, 外磁场磁感应强度  $B$  对聚并总脱除效率  $\eta_t$ 、数目中位直径  $d_{nm}$  和分粒径聚并脱除效率  $\eta_s$  的影响。图 5(a) 表明, 在相同条件下, 中间粒径粒子的聚并脱除效率高于一小粒子和大粒子的聚并脱除效率, 同图 4 粒子质量浓度较低时的结果一致; 随外磁场磁感应强度的增强, 粒子的分粒径聚并脱除效率提高, 磁感应强度越大, 分粒径聚并脱除效率最大值对应的粒径越小。分粒径聚并脱除效率的提高, 必然使得聚并总脱除效率随之提高, 因而, 随磁感应强度的增强, 粒子的聚并总脱除效率迅速提高, 在磁感应强度达到 0.3 T 后, 脱除效率缓慢升高, 在粒子达到饱和磁化后脱除效率达到最大值, 不再随磁感应强度的增大而提高, 如图 5(b) 所示。对比图 5(a) 和 (b) 可知, 分粒径聚并脱除效率最大值对应的粒径随聚并总脱除效率的提高而降低。由于不同粒径粒子的聚并脱除效率不同, 使得聚并过程中粒子的浓度分布随聚并的发生而不断变化, 这一变化可通过粒子数目中位直径的改变来有效地表达。图 5(b) 中, 粒子的数目中位直径对磁感应强度的变化规律与聚并总脱除效率相反, 即随总脱除效率的提高, 粒子数目中位直径减小。这表明大粒子比小粒子更易于聚并脱除。

随粒子总质量浓度的增加, 粒子的总目数浓度增大, 粒子间的碰撞频率提高, 从而提高粒子的聚并脱除效率, 图 6(a)、(b) 表明了这一结论。此外, 图 6(a)、(b) 还表明, 随聚并总脱除效率的提高, 分粒径聚并脱除效率最大值对应的粒径和粒子数目中位直

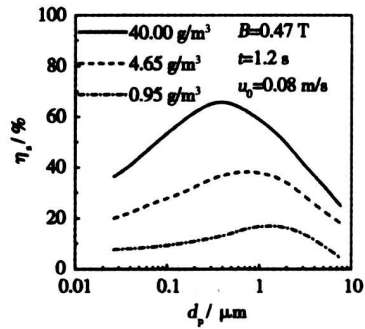


(a) 分粒径脱除效率

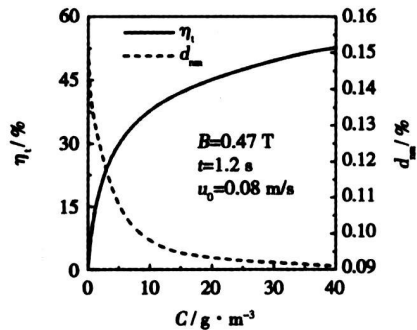


(b) 总脱除效率和数目中位直径

图 5 磁感应强度对总脱除效率、数目中位直径和分粒径脱除效率的影响



(a) 分粒径脱除效率



(b) 总脱除效率和数目中位直径

图 6 质量浓度对总脱除效率、数目中位直径和分粒径脱除效率的影响

粒子在磁场中的停留时间是影响粒子聚并的又一重要因素。在其它条件不变时,只改变粒子在磁场中的停留时间,粒子间的聚并系数以及某一时刻粒子的浓度分布将保持不变,但随停留时间的延长,并脱除效率提高,如图 7 所示。当增大气流平均速度时,通道内速度梯度增大,从而在一定程度上增大粒子间的相对运动速度,增强粒子间的聚并,所以在其它条件不变时,增大气流平均速度可在一定程度上提高粒子的聚并脱除效率,图 8 表明了这一结论。粒子在磁场中的碰撞次数增多,同样会使粒子的聚并,对于一定的磁聚并装置,其有效几何尺寸是固定不变的,因而在平均气流速度一定的情况下,粒子在磁场中最大停留时间是一定的,或者说通道内平均气流速度与最大停留时间的乘积为一定值。图 9 为  $u_0 \times t = 0.1 \text{ m}$  时,气流平均速度对粒子聚并的影响。该图表明,随气流速度的增大,粒子分粒径聚并脱除效率和聚并总脱除效率降低。尽管增大气流平均速度可在一定程度上增强粒子的聚并,但气流速度的增大,必然会使得粒子在磁场中最大停留时间缩短,从而抵消因气流速度增大而带来的脱除效率的提高,最终使得粒子的聚并脱除效率降低。由此可见,在磁场有效几何尺寸一定时,低的气流速度更

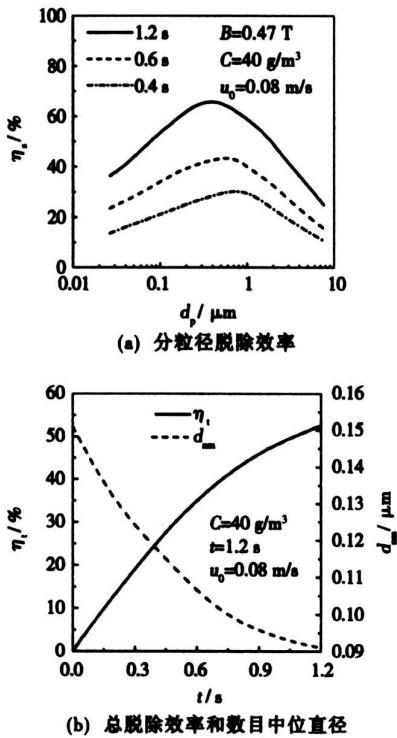


图 7 停留时间对总脱除效率、数目中位直径和分粒径脱除效率的影响

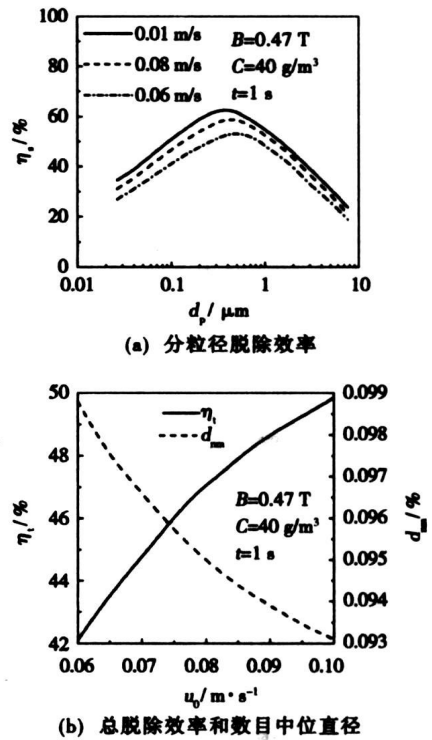


图 8 气流平均速度对总脱除效率、数目中位直径和分粒径脱除效率的影响

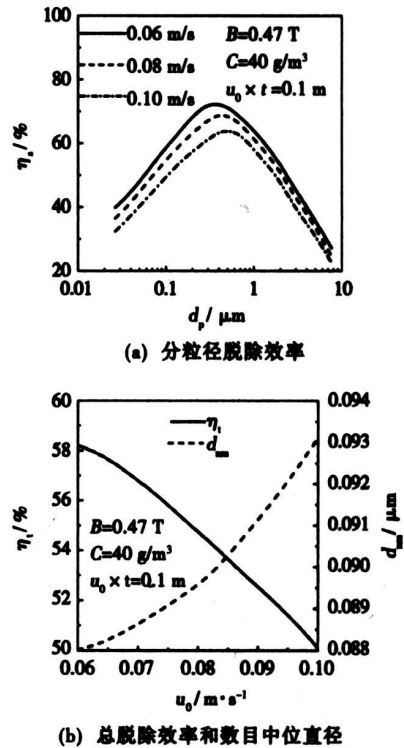


图 9 气流平均速度和停留时间对总脱除效率、数目中位直径和分粒径脱除效率的共同影响

有利于粒子间的有效聚并。此外,图7~图9同样表明了粒子的分粒径聚并脱除效率最大值对应的粒径和粒子数目中位直径随聚并总脱除效率的提高而减小。

### 3 结 论

(1) 本文提出的双分区算法具有较好的适用性,可很好地预测燃煤PM<sub>10</sub>磁聚并动力学过程。

(2) 在0.023~9.318 μm 粒径范围内,不同粒径的燃煤PM<sub>10</sub>聚并脱除效率不同,中间粒径粒子的聚并脱除效率高于小粒子和大粒子的聚并脱除效率;分粒径聚并脱除效率最大值对应的粒径随聚并总脱除效率的增大而减小。

(3) 提高外磁场磁感应强度、粒子总质量浓度、粒子在磁场中停留时间以及气流平均速度,粒子聚并脱除效率提高;在粒子达到饱和磁化后,外磁场的增强对粒子的聚并无影响;当气流速度和粒子在磁场中停留时间一定时,粒子聚并脱除效率随气流速度的增大而降低。

(4) 在粒子聚并过程中,其数目中位直径是不断变化的,随聚并总脱除效率的提高而降低。

致谢:本文受江苏省高等学校研究生创新计划和东南大学优秀博士学位论文基金资助。

### 参考文献:

[1] 姚刚,赵兵,沈湘林.燃煤可吸入颗粒物声波团聚效果的实验研究和数值分析[J].热能动力工程,2006,21(2):175-178.

- [2] 金银龙,何公理,刘凡,等.中国烟煤型大气污染对人群健康危害的定量研究[J].卫生研究,2002,31(5):342-348.
- [3] 赵海波,郑楚光,徐明厚.用多重蒙特卡罗算法研究超细微颗粒物同时发生的凝并和破碎[J].中国电机工程学报,2005,25(16):97-101.
- [4] 刘建忠,范海燕,周俊虎,等.煤粉炉PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub>排放规律的试验研究[J].中国电机工程学报,2003,23(1):145-149.
- [5] 赵永椿,张军营,高全,等.燃煤飞灰中磁珠的化学组成及其演化机理研究[J].中国电机工程学报,2006,26(1):82-86.
- [6] 单红丹,卢升高.火电厂粉煤灰的矿物磁性及其环境意义[J].矿物学报,2005,22(2):141-146.
- [7] SMOLUCHOWSKI M. Versuch einer mathematischen theorie der koagulationskinetik kolloider löungen[J]. Zeitschrift für Physikalische Chemie, 1917, 92: 129-188.
- [8] SVOBODA J. Magnetic flocculation and treatment of fine weakly magnetic minerals[J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 1982, 18(2): 796-801.
- [9] DOMINIK C, NÜBOLD H. Magnetic aggregation: dynamics and numerical modeling[J]. Icarus, 2002, 157(1): 173-186.
- [10] PRAKASH K, PRATIM B. Analytical expressions of the collision frequency function for aggregation of magnetic particles[J]. Aerosol Science, 2005, 36(4): 455-469.
- [11] 李永旺,赵长遂,吴新,等.燃煤可吸入颗粒物在磁场中聚并脱除理论与实验研究[J].热能动力工程,2007,22(2):176-180.
- [12] PISKUNOV V N, GOLUBEV A I, BARRETT J C, et al. The generalized approximation method for modeling coagulation kinetics-part 2: comparison with other methods[J]. Journal of Aerosol Science, 2002, 33(1): 65-75.
- [13] 姚刚,盛昌栋,杨林军,等.燃烧超细颗粒声波团聚的谱分布数值模拟[J].燃烧科学与技术,2005,11(3):273-277.
- [14] GELBAR D F. Sectional representation for simulating aerosol dynamics[J]. Journal of Colloid and Interface, 1980, 76(2):541-556.

(编辑 渠源)

### 运行保障

## 延长汽轮机使用寿命的措施

据《Электрические станции》2006年6月号报道,УТМЗ(乌拉尔涡轮机制造厂)的T-250/300-240型汽轮机的额定输出功率为250~300 MW,效率为38%~40%。按照PД10-577-03“火力发电站锅炉、涡轮和管道主要部件金属的检查和延长使用寿命的典型规程”,T-250/300-240型汽轮机的总使用寿命按运行时间为220 000 h,启动次数为600次。

在完成下列措施的前提下,T-250/300-240型汽轮机总的使用寿命可增加到300 000 h,启动次数可增加到900次:

按照制定的方法对汽轮机金属进行定期的检查(要求对高压阀门进行专门的检查);

PCД-1(一号中压转子)采用冷却系统,同时在ЛСД-2(二号中压缸)后密封上安装蜂窝状密封,并在轴承座滑动表面上装上金属氟塑料带。

根据制定的装置热力系统模型进行的计算允许估计所提出措施的效果。

(吉桂明 供稿)

ment signals from the intermediate parts of a SSS clutch serving as an example. The measures include: the use of dB3 wavelets to conduct a 5-layer dissolution and the selection of heursure soft threshold values to perform a quantification of wavelet coefficient threshold values followed by a restructuring of signals. The tests and analysis show that the use of the wavelet analysis for achieving the elimination of noise from the signals is simple in theory, featuring an ease of its realization and an extremely high reliability. The signals after noise elimination provide a solid basis for fostering the feasibility of power-related maneuverability of the whole system. **Key words:** marine power plant, wavelet analysis, CODOG (combined diesel or gas turbine), signal noise elimination

双层滤料过滤床的压降特性研究= **A Study of the Pressure-drop Characteristics of a Dual-layer Filter-material Filtering Bed** [刊, 汉] / YANG Guo-hua, ZHOU Jiang-hua (College of Sea Transportation under the Ningbo University, Ningbo, China, Post Code: 315211) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(3). — 267 ~ 269

The working principle and high filtration efficiency of a dual-layer filter-material filtering bed are described along with its low pressure-drop filtration characteristics. The pressure drop at each layer of the above filtering bed was measured during tests. Analyzed were the total pressure drop of the bed layer and the pressure drop characteristics of a hot gas distributor, sand layer and an expanded perlite layer. The results show that the pressure drop of the sand layer accounts for 75% ~ 90% and that of the expanded perlite layer for 5% ~ 22% of the total pressure drop of the bed layer. The pressure-drop characteristics prove that the sand layer provides a surface filtration and the expanded perlite layer a deep bed one. This is the reason why a dual-layer filter-material filtering bed has a filtration efficiency of 99.99% and the bed layer a dust bearing capacity ten times as high as that of a single layer sand bed. **Key words:** high temperature gas, filtration, granular layer, dual-layer filter material

颗粒层除尘器过滤和清灰方式的优化= **Optimization of the Filtering and Deashing Modes for Granular-layer Dust Precipitators** [刊, 汉] / WANG Zhu-liang, LIU Xiao-hang, DU Bin (College of Energy Source and Power Engineering under Jiangsu University, Zhenjiang, China, Post Code: 212013) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(3). — 270 ~ 273, 283

Analyzed were the issues affecting the dust removal performance of moving-bed granular-layer dust precipitators due to an increase in clearance between granular layers and also granular particle dislocation etc. Through an optimization effort a granular-layer dust precipitator with a new type of structure and filtering method was created to solve the above issues. Its structure and specific features are described, especially a built-up fluidized bed dust removal mechanism, which can accomplish a quick dust removal from the granular layers. A mathematical model featuring the pressure drop of the dust precipitator bed layer has been established. By way of experiments, the authors have identified the regularity of dust removal from a granular fluidized layer and the filtering performance of the precipitator. Both theoretical research and practice have indicated that the new type of granular-layer precipitators has a better dust removal performance than other granular-layer ones, making it possible to realize an integration of dust removal and deashing as well as to simplify the dust removal process. **Key words:** granular layer precipitator, ash removal, fixed bed, moving bed, fluidized bed

燃煤 PM<sub>10</sub>磁聚并动力学数值模拟= **Numerical Simulation of Magnetic Aggregation Dynamics of Fuel Coal PM<sub>10</sub>** [刊, 汉] / LI Yong-wang, WU Xin, ZHAO Chang-sui, et al (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(3). — 274 ~ 279

A dual-subregion algorithm has been presented for seeking a solution to the magnetic-aggregation dynamics equation of fu-

el coal PM<sub>10</sub>. By using the above algorithm, simulated was the aggregation dynamics process of fly-ash fine particles in a uniform magnetic field, which have been produced during the combustion of Dongsheng-origin bituminous coal. A comparison of the simulation results with the test ones shows a complete correspondence between the two results. The dual-subregion algorithm features a relatively good applicability. For particle diameters ranging from 0.023 to 9.318 μm, the aggregation and removal efficiency of the intermediate-sized particles is higher than that of small and large-sized particles. An enhancement of the following factors, i. e. magnetic induction intensity of an outer magnetic field, particle total mass concentration, residence time of particles in the magnetic field and gas flow average velocity, can increase the aggregation and removal efficiency of the particles. After the particles have attained saturation magnetization, the intensification of the outer magnetic field will have no influence on particle aggregation. When the product of the gas flow average velocity and the residence time of the particles in the magnetic field is a constant, the aggregation and removal efficiency of the particles will decrease with an increase of gas flow average velocity. The particle size corresponding to a maximal particle-size-based removal efficiency of the particles and the particle-number median diameter will decrease with an increase of the aggregation-related total removal efficiency. **Key words:** fuel coal PM<sub>10</sub>, magnetic aggregation, dual-subregion algorithm, ash removal efficiency

燃煤 PM<sub>10</sub>在高梯度磁场中的捕集 = **Capturing of Fuel Coal PM<sub>10</sub> in a High Gradient Magnetic Field** [刊, 汉] / LU Duan-feng, WU Xin, ZHAO Chang-sui, et al (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(3). — 280 ~ 283

According to the high-gradient magnetic separation theory and with the magnetic field, flow field, Brown diffusion and inertia action being taken into account, a model for capturing inhalable particles of fuel coal in a high-gradient magnetic field has been established along with a calculation of the capturing efficiency of particles. A contrast-based analysis of the calculation results and the test ones indicates that for the particle diameters ranging from 0.023 μm to 9.3 μm, the calculated value of the capturing efficiency of particles assumes a basically identical tendency as the test one and for the particle diameters ranging from 1 μm to 9.3 μm, the calculated value is in relatively good agreement with the test one with the error being less than 5%. A relatively high particle magnetized intensity, magnetic field intensity and relatively long residence time can all be favorable to the capture of particles in the magnetic field. The Brown diffusion plays a relatively strong contributory role in enhancing the efficiency of capturing particles having a diameter of less than 1 μm while the inertia action has a weak influence on particle capturing efficiency. The research results indicate that using a high gradient magnetic field to capture fuel-coal-produced inhalable particles is a valid and feasible approach. **Key words:** fuel coal PM<sub>10</sub>, high gradient magnetic field, numerical simulation

常温空气无焰燃烧在燃煤锅炉煤改气中的应用 = **Application of Flameless Combustion at a Normal Air Temperature for a Coal-fired Boiler Being Converted to Burn Gas** [刊, 汉] / XING Xian-jun, WANG Bao-yuan, LIN Qi-zhao (Department of Thermal Science and Energy Source Engineering, China National University of Science and Technology, Hefei, China, Post Code: 230026) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(3). — 284 ~ 287

By installing a flameless combustion reactor operating at a normal-air temperature in the furnace of a coal-fired boiler it is possible to convert a coal-fired boiler into a gas-fired one. Relevant calculation results show that as different from the predominant convection heat-exchange mode adopted by other gas-fired boilers, the furnace of the gas-fired boiler under discussion assumes mainly a radiation heat-exchange mode, thus intensifying in-boiler heat exchange. The actual measurement results indicate that a boiler thermal efficiency of 92.92% can be attained, over 30% higher than that of the boiler before modification and more than 4% higher than that of boilers with the same capacity currently available. As the boiler