

文章编号: 0253-9993(2007)05-0517-05

燃煤 PM_{10} 磁种聚并脱除动力学数值模拟

李永旺, 赵长遂, 吴 新, 鲁端峰, 韩 松

(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_{10} 磁种聚并动力学方程的二组元分区算法, 采用该算法模拟了均匀磁场中 Fe_3O_4 磁种对 $0.023 \sim 9.314 \mu m$ 粒径范围内东胜煤灰和大同煤灰的聚并动力学过程, 并与实验结果进行了比较. 结果表明: 计算值与实验值基本吻合; 中间粒径的飞灰粒子脱除效率高于小粒子和大粒子的脱除效率; 随磁感应强度、粒子质量浓度、粒子在磁场中停留时间的增加, 总脱除效率提高, 数目中位直径减小, 两种煤灰的总脱除效率的差异增大; 在粒子达到饱和磁化后, 磁感应强度的增大对聚并无影响; 随磁种添加质量比的增大, 飞灰总脱除效率提高, 数目中位直径增大, 两种煤灰总脱除效率的差异减小; 在相同条件下, 东胜煤灰总脱除效率高于大同煤灰总脱除效率.

关键词: 燃煤 PM_{10} ; 聚并; 磁种; 磁场

中图分类号: X513 **文献标识码:** A

Numerical simulation on aggregation dynamics of coal-fired PM_{10} by magnetic seeding

LI Yong-wang, ZHAO Chang-sui, WU Xin, LU Duan-feng, HAN Song

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

Abstract: A two-component sectional algorithm was developed for solving the general dynamic equation of coal-fired PM_{10} aggregation by magnetic seeding, and then it was used to simulate the aggregation dynamics process of fly ash particles from Dongsheng and Datong coal combustion in the size range of $0.023 \sim 9.314 \mu m$ in a uniform magnetic field by seeding Fe_3O_4 particles. And the comparison was done between the simulative and experimental data. The results show that the two set of results are essentially consentient. Mid-sized particle removal efficiencies are higher than those of the smaller and bigger ones. When the magnetic flux density, the particle mass concentration and the residence time in the magnetic field are increased, the total removal efficiencies rise and the number median diameters decrease, and the difference in total removal efficiency between the two kinds of fly ash increases at the same time. The increase in magnetic flux density no longer has effect on particle aggregation after particles are saturatedly magnetized. With increase in mass ratio of magnetic seeds/fly ash, the total particle removal efficiencies and number median diameter rise, and the difference in total particle removal efficiency between the two kinds of fly ash decreases. The total particle removal efficiencies for Dongshen coal are higher than those for Datong coal under the same conditions.

Key words: coal-fired PM_{10} ; aggregation; magnetic seeds; magnetic field

收稿日期: 2006-08-28 责任编辑: 柳玉柏

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(2002CB211600); 江苏省高等学校研究生创新计划基金资助项目; 东南大学优秀博士学位论文基金资助项目

作者简介: 李永旺(1979-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士研究生. Tel: 025-83793453, E-mail: ywli666@163.com

煤炭是我国的主要一次能源, 燃煤排放的细微飞灰粒子成为大气可吸入颗粒物 (通常用 PM_{10} 表示) 的主要来源之一^[1]. 燃煤 PM_{10} 具有体积小、重量轻、数量多的特点, 常规除尘方法难以奏效. 铁是组成燃煤飞灰粒子的主要元素之一, 因而飞灰粒子可以在磁场中磁化^[2,3], 被磁化的飞灰粒子可以和强磁性磁种粒子在磁偶极子力和外磁场等作用下发生碰撞聚并, 从而使飞灰粒子长大, 便于常规除尘装置的直接脱离^[4]. 所以, 采用磁种聚并脱除燃煤 PM_{10} , 已被列为国家重点基础研究项目.

在国外, 采用磁聚并治理环境污染已有广泛的实践应用, 如废物回收、污水净化以及大气污染防治等. 如 Svoboda^[5] 对磁旋风除尘器特性进行了实验研究; Ying^[6] 采用高梯度磁场对废水中矿物粒子进行了分离实验; Prakash^[7] 提出了粒子在磁偶极子力作用下聚并系数的解析表达式.

为充分理解燃煤 PM_{10} 磁种聚并机理, 本文提出了二组分分区算法, 采用该算法求解了 Fe_3O_4 磁种对 $0.023 \sim 9.314 \mu m$ 粒径范围内东胜和大同烟煤燃烧产生的飞灰聚并动力学方程, 并与实验结果进行了比较.

1 粒子聚并动力学

1.1 聚并动力学方程

气溶胶粒子由于粒子间的相对运动而发生二元碰撞聚并^[8], 使得粒子数目浓度发生变化, 变化过程可以通过粒子聚并动力学方程^[9]来描述, 即

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

式中, $n(v, t)$ 是体积为 v 的粒子在 t 时刻粒子数目浓度分布函数; $\beta(u, v-u)$ 是体积分别为 v 和 $u-u$ 粒子间聚并系数; v_0, v_k 分别为所研究颗粒物体系中粒子体积的最小值和最大值. 等号右边第 1 项表示体积为 u 和体积为 $v-u$ 的粒子聚并为体积为 v 粒子的速率; 第 2 项表示体积为 v 的粒子与其它粒径粒子的聚并速率.

然而, 式 (1) 只适用于单组分粒子的聚并, 对于由磁种和燃煤 PM_{10} 组成的二元混合气溶胶系统中, 存在 5 种形式的聚并: ① 飞灰粒子间的聚并; ② 磁种粒子间的聚并; ③ 磁种粒子与飞灰粒子间的聚并; ④ 磁种粒子与磁种飞灰聚并体间的聚并; ⑤ 飞灰粒子与磁种飞灰聚并体间的聚并. 飞灰粒子数目浓度的变化是由 ①, ③ 和 ⑤ 聚并引起的; 磁种粒子数目浓度的变化是由 ②, ③ 和 ④ 聚并引起的; 磁种飞灰聚并体数目浓度的变化由 ③, ④ 和 ⑤ 聚并引起的. 根据以上分析, 飞灰粒子的聚并速率为

$$\frac{\partial n_a(v, t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_{v_0}^v \beta_a(u, v-u) n_a(u, t) n_a(v-u, t) du - n_a(v, t) \int_{v_0}^{v_k} [\beta_a(u, v) n_a(u, t) + \beta_{m,a}(u, v) n_m(u, t) + \beta_{a,ma}(u, v) n_{ma}(u, t)] du, \quad (2)$$

式中, n_a, n_m, n_{ma} 分别为飞灰粒子、磁种粒子以及磁种飞灰聚并体的数目浓度分布函数; $\beta_a, \beta_{m,a}, \beta_{a,ma}$ 分别为飞灰粒子间、磁种与飞灰粒子间、飞灰与磁种飞灰聚并体间的聚并系数.

1.2 二组分分区算法

分区算法^[10] 由于其简单而有效的特点而被广泛用于求解粒子聚并动力学方程. 然而, 传统的分区算法的计算对象是单组元气溶胶粒子的聚并动力学方程 (式 (1)), 不适用于求解磁种聚并燃煤 PM_{10} 的二组分聚并动力学方程. 为此, 本文提出求解磁种聚并动力学方程的二组分分区算法.

引入分段函数 θ , 当条件满足时函数值为 1, 条件不满足时函数值为 0, 如

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

将粒子体积范围划分为 k 个区域, 并且假设在每个区域浓度分布函数为常数, 则第 l 个粒子体积分区内, 飞灰粒子数目浓度变化是以下 5 种聚并共同作用的结果: ① 粒径较小区域内或区域间飞灰粒子的聚并, 聚并生成的新粒子进入该区域; ② 该区域内飞灰粒子与粒径较小区域内飞灰粒子的聚并, 聚并生成

的新粒子停留在该区域或进入粒径较大的区域；③ 该区域内部飞灰粒子的聚并，聚并生成的新粒子停留在该区域或进入粒径较大的区域；④ 该区域内飞灰粒子与粒径较大区域内飞灰粒子的聚并，聚并生成的新粒子进入粒径较大的区域；⑤ 该区域内飞灰粒子与磁种粒子以及磁种飞灰聚并体的聚并，飞灰粒子数目减少。

考虑以上5种聚并，第*l*个粒子体积分区内聚并引起的飞灰粒子数目浓度增加率可表示为

$$\begin{aligned} \frac{dN_{a,l}}{dt} = & \frac{1}{2} \int_{v_0}^{v_{l-1}} \int_{v_0}^{v_{l-1}} \theta(v_{l-1} < u + v < v_l) \beta_a(u, v) n_a(u, t) n_a(v, t) dudv - \int_{v_0}^{v_{l-1}} \int_{v_{l-1}}^{v_l} \theta(u + v > v_l) \times \\ & \beta_a(u, v) n_a(u, t) n_a(v, t) dudv - \frac{1}{2} \int_{v_0}^{v_{l-1}} \int_{v_{l-1}}^{v_l} [2\theta(u + v > v_l) + \theta(u + v < v_l)] \times \\ & \beta_a(u, v) n_a(u, t) n_a(v, t) dudv - \int_{v_l}^{v_k} \int_{v_{l-1}}^{v_l} \beta_a(u, v) n_a(u, t) n_a(v, t) dudv - \\ & \int_{v_0}^{v_k} \int_{v_{l-1}}^{v_l} n_a(v, t) [\beta_{m,a}(u, v) n_m(u, t) + \beta_{a,ma}(u, v) n_{ma}(u, t)] dudv, \end{aligned} \quad (4)$$

式中， $N_{a,l}$ 为第*l*个体积区域内飞灰粒子的数目浓度。

在聚并系数和粒子初始数目浓度分布已知的条件下，即可求解式(4)。

2 聚并动力学数值模拟

2.1 数值模拟条件

选取达拉特旗电厂和大同电厂煤粉锅炉静电除尘器4电场飞灰，燃用煤种分别为东胜烟煤和大同烟煤。选取 Fe₃O₄ 颗粒为磁种。3种粒子的初始粒径分布和磁滞回线分别如图1, 2所示。由图可知，磁种粒子的饱和磁化强度明显高于飞灰粒子的饱和磁化强度，而东胜煤灰粒子的饱和磁化强度又高于大同煤灰粒子的饱和磁化强度。聚并通道内径为50 mm，水平布置于均匀外磁场中，磁场方向水平垂直于通道轴线。东胜煤灰、大同煤灰、Fe₃O₄ 三种粒子密度分别为2 230, 2 260, 5 180 kg/m³，气流速度为0.08 m/s，介质温度为293 K。

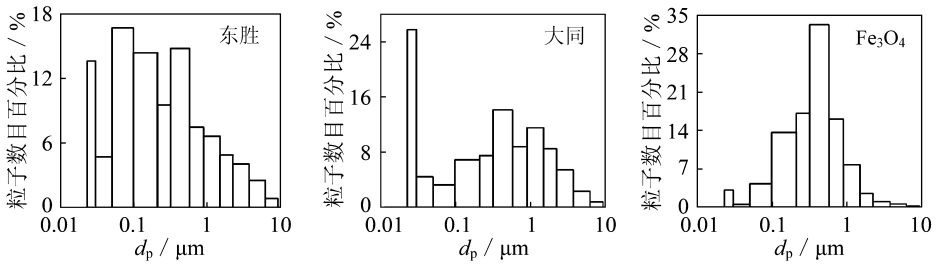


图1 飞灰粒子粒径分布

Fig. 1 Histograms of particle size distribution

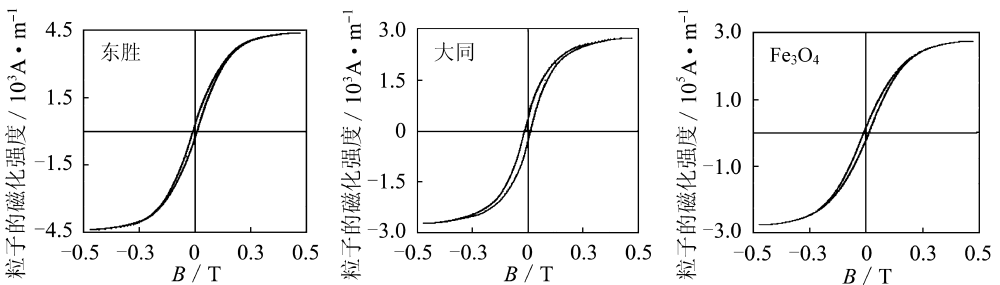


图2 粒子磁滞回线

Fig. 2 Hysteresis loops of particles

2.2 数值模拟结果及分析

均匀磁场中磁种粒子和燃煤 PM_{10} 在磁偶极子力等作用下发生碰撞聚并, 聚并后粒径长大, 使粒子数目浓度减少. 在一段时间内, 飞灰粒子某一粒径数目浓度的相对减少率为单粒径脱除效率 (η_s), $0.023 \sim 9.314 \mu\text{m}$ 粒径范围内飞灰粒子总数目浓度的相对减少率为总脱除效率 (η_t).

(1) 单粒径脱除效率 粒子间磁偶极子相互作用力与其体积成正比, 因而, 飞灰粒子间磁偶极子力以及磁种粒子间磁偶极子力都是随粒径的增大而增加. 由于磁种的磁化强度远高于飞灰粒子, 因而磁种与飞灰粒子间磁偶极子力对飞灰粒径的变化很小. 聚并系数和粒子数目浓度是影响粒子聚并的主要因素. 粒子间磁偶极子力越大, 聚并系数越大, 脱除效率也越高. 所以, 飞灰粒子间聚并系数和磁种粒子间聚并系数随飞灰和磁种粒径的增大而增大. 当外磁场磁感应强度 $B = 0.47 \text{ T}$ 、飞灰粒子质量浓度 $c = 0.96 \text{ g/m}^3$ 、粒子在磁场中停留时间 $t = 1.2 \text{ s}$ 、磁种与飞灰质量比 $R = 0.013$ 时, 东胜煤灰 (P1) 和大同煤灰 (P2) 的单粒径脱除效率实验值^[4]与计算值如图3所示. 在聚并系数和粒子数目浓度的共同影响下, 中间粒径粒子的脱除效率高于大粒子和小粒子的脱除效率. 由于东胜煤灰的磁化强度高于大同煤灰的磁化强度, 在相同条件下东胜煤灰的聚并系数大于大同煤灰的聚并系数, 使得东胜煤灰的脱除效率高于大同煤灰的脱除效率. 图3中实验值与计算值基本吻合, 表明本文提出的二组元分区算法可合理应用于求解燃煤 PM_{10} 磁种聚并动力学方程.

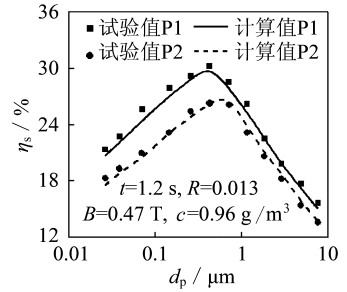


图3 单粒径脱除效率

Fig. 3 Single-sized particle removal efficiency

(2) 总脱除效率和数目中位直径 影响飞灰粒子聚并的外部条件有磁感应强度、飞灰质量浓度、粒子在磁场中停留时间以及磁种的添加量. 在聚并过程中, 飞灰粒子的粒径分布是不断变化的, 这一变化过程可以用数目中位直径 d_m 来表示.

随磁感应强度的增强, 粒子的磁化强度增大, 粒子间作用力增大, 总脱除效率提高, 粒子数目中位直径减小 (图4 (a)). 在粒子达到饱和磁化后, 磁化强度不再随磁感应强度的增强而增大, 总脱除效率达到最大值. 飞灰粒子数目中位直径的减小表明飞灰大粒子比小粒子更易聚并长大到粒径大于 $9.314 \mu\text{m}$. 此外, 图4 (a) 还表明, 在粒子达到饱和磁化前, 东胜煤灰和大同煤灰总脱除效率的差异随磁感应强度的增强而增大, 且东胜

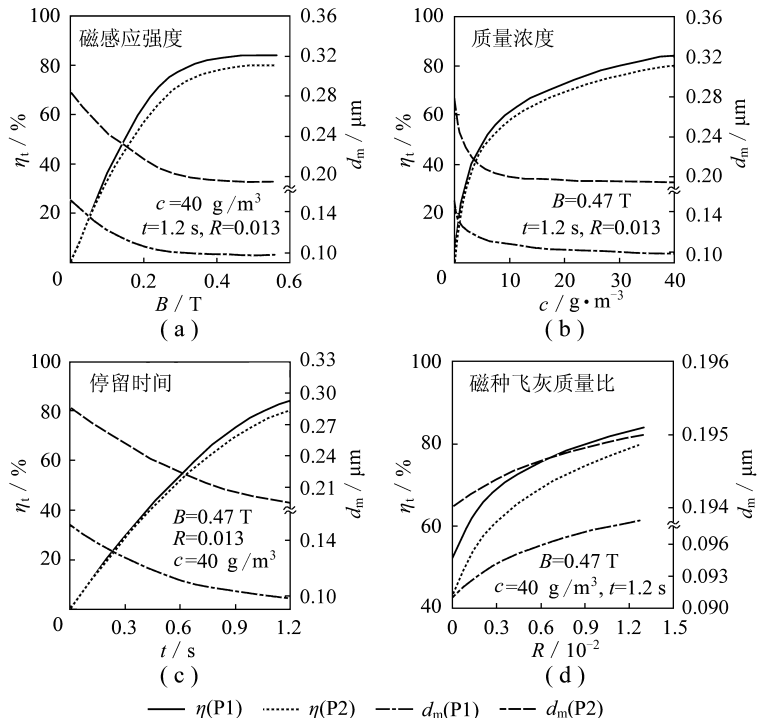


图4 磁感应强度、质量浓度、停留时间、磁种飞灰质量比对聚并的影响

Fig. 4 Effect of magnetic flux density, mass concentration, residence time and mass ratio of magnetic seeds/fly ash on aggregation

煤灰的总脱除效率高于大同煤灰的总脱除效率。

提高飞灰粒子质量浓度, 其数目浓度增大, 粒子间碰撞频率提高; 延长粒子在磁场中停留时间, 粒子间碰撞次数增多。因而提高粒子质量浓度, 延长粒子在磁场中停留时间, 都可以提高其脱除效率, 同时飞灰粒子的数目中位直径减小(图4(b), (c))。此外, 图4(b), (c)也表明, 东胜煤灰和大同煤灰总脱除效率的差异随质量浓度和停留时间的增大而增加, 东胜煤灰的总脱除效率高于大同煤灰的总脱除效率。磁种的添加量是影响磁种聚并脱除燃煤 PM_{10} 的一个重要因素。增大磁种的添加比例, 磁种对飞灰粒子的聚并增强, 飞灰粒子的脱除效率迅速提高, 东胜煤灰的总脱除效率高于大同煤灰的总脱除效率, 它们的差异也逐渐减小(图4(d))。由于磁种与飞灰粒子间磁偶极子力随飞灰粒径增大而变化较小, 增大磁种添加量, 磁种对飞灰中粒子数目较多的小粒子的聚并强于数目较少的大粒子, 小粒子的脱除效率有较大的提高, 从而使 $0.023 \sim 9.314 \mu\text{m}$ 粒径范围内未脱除的小粒子飞灰数目减少, 其数目中位直径增大。

3 结 论

(1) 数值计算结果与实验结果基本吻合, 本文提出的二组元分区算法可合理应用于求解燃煤 PM_{10} 磁种聚并动力学方程。

(2) $0.023 \sim 9.314 \mu\text{m}$ 粒径范围内, 中间粒径的飞灰粒子脱除效率高于小粒子和大粒子的脱除效率。

(3) 随磁感应强度、质量浓度、停留时间的增大, 燃煤 PM_{10} 的总脱除效率提高, 数目中位直径减小, 东胜煤灰和大同煤灰总脱除效率的差异增大; 在粒子达到饱和和磁化后, 磁感应强度的增大对聚并无影响。

(4) 随磁种添加质量比的增大, 飞灰总脱除效率提高, 数目中位直径增大, 东胜煤灰和大同煤灰总脱除效率的差异减小。在相同条件下, 东胜煤灰总脱除效率高于大同煤灰总脱除效率。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [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] 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.
- [5] Svoboda J, Coetzee C, Campbell Q P. Experimental investigation into the application of a magnetic cyclone for dense medium separation [J]. Minerals Engineering, 1998, 11 (6): 501 ~ 509.
- [6] Ying T Y, Yiacoumi S, Tsouris C. High-gradient magnetically seeding filtration [J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55 (6): 1 101 ~ 1 113.
- [7] Prakash K, Pratim B. Analytical expressions of the collision frequency function for aggregation of magnetic particles [J]. Aerosol Science, 2005, 36 (4): 455 ~ 469.
- [8] Piskunov V N, Golubev A I. The generalized approximation method for modeling coagulation kinetics - part 1: justification and implementation of the method [J]. Journal of Aerosol Science, 2002, 33 (1): 51 ~ 63.
- [9] 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.
- [10] Gelbard F. Sectional representation for simulating aerosol dynamics [J]. Journal of Colloid and Interface, 1980, 76 (2): 541 ~ 556.