

文章编号: 0253-9993(2008)06-0685-05

# 基于 $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$ 的高梯度磁场中燃煤 可吸入颗粒物脱除实验

张 宇, 吴 新, 丛 俊, 杨荣清, 马海艳

(东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 利用流化床气溶胶发生器分别产生2种不同磁特性的燃煤可吸入颗粒物, 在高梯度磁场试验装置中通过添加  $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$  进行了可吸入颗粒物脱除的实验研究. 结果表明,  $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$  对高梯度磁场中提高可吸入颗粒物的脱除效率有一定的促进作用. 当  $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$  的添加量为 0.003 ~ 0.012 g/g (飞灰) 时, 2种可吸入颗粒物的总脱除效率提高了 20% ~ 50% 不等, 并且  $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$  对饱和磁矩较大样品的脱除效率促进作用较大; 可吸入颗粒物脱除效率随外加磁场、磁介质填充率、磁种与飞灰质量比的增加而增大; 磁场开启后, 可吸入颗粒物脱除效率的变化可分为缓慢提高、快速提高和稳定3个阶段.

**关键词:**  $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 高梯度磁场; 燃煤; 可吸入颗粒物

中图分类号: TQ534 文献标识码: A

## Removal experiment of inhalable particles emitted from coal combustion with high gradient magnetic field based on $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$

ZHANG Yü, WU Xin, CONG Jun, YANG Rong-qing, MA Hai-yan

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** On the cold-state test facility with a fluidized bed aerosol generator and a removal system in high gradient magnetic field, an experimental study of capturing two kinds of fine fly ash particles was conducted. The electrical low pressure impactor was used to measure the particle number concentrations. Experiment results indicate that adding  $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$  can promote fine particle removal efficiency. When the mass flow of  $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$  is 0.003 ~ 0.012 g/g (fly ash), the removal efficiency increases by 20% ~ 50%. When adding  $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$ , the higher the saturated particle magnetization of the fly ash particles, the more visible the promotion effect of  $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$  on particle removal efficiency is. The particle removal efficiency increases with the increase in the magnetic flux density, the fill ratio of magnet medium and the quality ratio of  $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$  to the fly ash, respectively. Once the fine particles flow into the high gradient magnetic field, the particle removal efficiency experiences slow-increase stage, fast-increase stage and steady stage during the initial time.

**Key words:**  $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$ ; high gradient magnetic field; coal combustion; inhalable particles

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  $\text{PM}_{10}$  表示)

收稿日期: 2007-07-27 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)

作者简介: 张 宇 (1982—), 男, 江苏南京人, 硕士研究生. 联系人: 吴 新, 副教授, 硕士生导师. E-mail: wuxin@seu.edu.cn

的主要来源之一<sup>[1]</sup>. 可吸入颗粒物影响大气能见度, 导致酸雨以及光化学烟雾, 并且易富集酸性物质、有机污染物、病菌等有害物质, 对环境和人体都有较大危害<sup>[2,3]</sup>. 常规的除尘方式如电除尘、布袋除尘以及旋风除尘等对燃烧源  $PM_{10}$  尤其是  $PM_{2.5}$  的排放缺乏有效的控制. 研究发现, 燃煤可吸入颗粒物中铁等金属氧化物含量较高<sup>[4-6]</sup>. 因此应用高梯度磁分离技术控制燃煤可吸入颗粒物污染是值得研究的方向. 磁介质磁化后自身会产生一个磁场, 与外加磁场相互叠加, 在磁介质的周围形成较高的磁场梯度, 磁化后的颗粒受到磁场梯度力的作用而被磁介质吸附, 这就是高梯度磁分离的原理<sup>[7]</sup>. 高梯度磁分离技术在环境工程领域有较广泛的应用<sup>[8,9]</sup>, 但在控制燃煤可吸入颗粒物排放的理论及试验方面的相关报道还比较少.

由于燃煤可吸入颗粒物的磁性较弱, 直接采用外加磁场聚并脱除的效率较低. 而强磁性磁种与飞灰粒子的磁相互作用力远大于飞灰粒子间的磁相互作用力, 因此可以添加磁性颗粒, 利用磁性与非磁性颗粒在磁场中运动的明显差异, 增大颗粒物的碰撞与结合的几率, 得到尺寸更大的颗粒团, 提高脱除效率.  $\gamma-Fe_2O_3$  是一种顺铁磁性物质, 磁化后具有较高的饱和磁化强度, 另外  $\gamma-Fe_2O_3$  活化能较低, 还可以作为 SCR 脱硝反应的催化剂<sup>[10]</sup>, 有望在  $PM_{10}$  与  $NO_x$  协同脱除中得到应用. 本文通过在燃煤飞灰中加入  $\gamma-Fe_2O_3$ , 改变外加磁场强度、磁介质填充率  $W$ 、飞灰种类, 磁种与飞灰质量比  $R$ 、外加磁场作用时间等因素, 研究其对可吸入颗粒物脱除效率的影响.

## 1 实 验

### 1.1 实验材料

选用东胜烟煤、大同烟煤燃烧产生的飞灰作为燃煤可吸入颗粒物样品源. 其磁性特征如图 1 所示. 可以发现, 当外加磁场为 0.05 T 时东胜烟煤与大同烟煤的颗粒都已趋近饱和磁化, 其饱和磁化强度分别为  $4.4 \times 10^3$ ,  $2.75 \times 10^3$  A/m. 由此可知, 东胜烟煤的饱和磁化强度大于大同烟煤的饱和磁化强度.

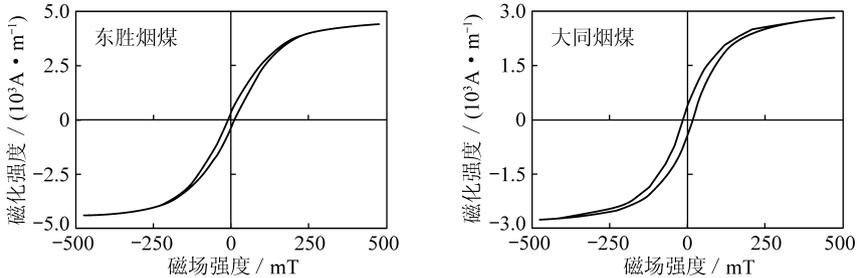


图 1 样品磁性特征

Fig. 1 Hysteresis loops of particles

磁种子采用粒径为  $1 \sim 3 \mu m$  的  $\gamma-Fe_2O_3$  粉末, 磁介质为  $\phi 0.35$  mm 的纯镍丝. 镍丝和  $\gamma-Fe_2O_3$  磁性特征如图 2 所示. 由图 2 可知, 镍丝和  $\gamma-Fe_2O_3$  的饱和磁化强度分别为  $3.44 \times 10^5$  A/m 和  $1.18 \times 10^5$  A/m.

### 1.2 实验仪器和装置

如图 3 所示, 实验装置主要由 3 部分组成: 可吸入颗粒物发生段、磁场实验段、实验测试段. 磁性可吸入颗粒物发生系统采用东南大学热能工程研究所研制的流化床干颗粒气溶胶发生器, 该发生器以不锈钢珠为床料, 粒径在  $100 \sim 120 \mu m$ , 混以适量用来产生气溶胶的飞灰颗粒, 飞灰颗粒被气体介质夹带出流化床形成  $PM_{10}$  气溶胶<sup>[11]</sup>. 磁场实验段采用大小可调的直流电磁铁产生磁场, 并在有机玻璃通道中放入镍丝格栅以产生高梯度磁场; 实验测试段采用芬兰 Dekati 公司生产的电感式低

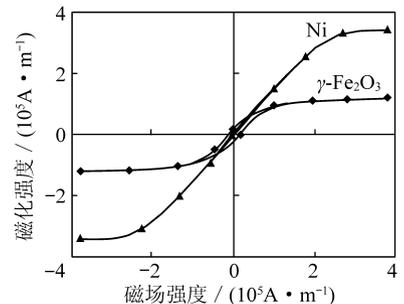


图 2 镍丝和  $\gamma-Fe_2O_3$  的磁性特征

Fig. 2 Hysteresis loops of Ni wire and  $\gamma-Fe_2O_3$

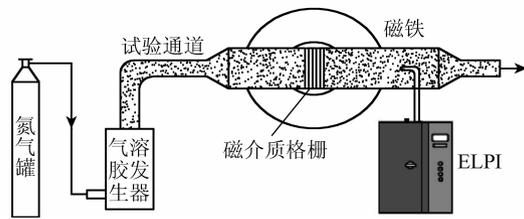


图3 实验流程

Fig. 3 Experimental system

物的脱除效率。再将床料和混有一定比例  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  粉末的飞灰混合后加入气溶胶发生器，重复上述步骤，就得到了基于  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  可吸入颗粒物的脱除效率，对比相同条件下的脱除效率，可以得到  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  对可吸入颗粒物的脱除影响。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 外加磁场强度对脱除效率的影响

如图4所示，燃煤可吸入颗粒物的脱除效率随着外加磁场强度的增大而提高，但其增幅在减小，并趋向于稳定在一定的数值。可以发现，外加磁场强度由0.1 T增大到0.2 T时，未加入  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  样品的脱除效率由约12%增大到约20%，而加入  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  样品的脱除效率由约20%增大到约28%。由此可知，在较低强度的磁场中，加入  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  比未加入  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  的样品脱除效率提高大约65%；但当磁场强度由0.6 T增大到0.8 T时，2种样品各自的脱除效率分别增加了3%左右，且加入  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  比未加入  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  的样品脱除效率只提高了大约12%。这是因为在较低磁场强度的情况下，随外加磁场的增加，粒子的磁化强度增大，粒子间作用力增大，颗粒物脱除的全效率得到提高。且在加入  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  后，颗粒之间的磁团聚力增加，团聚效果更加显著，所以比未加入  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  的样品更易被脱除；但在粒子达到饱和磁化后，无论加不加入  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ，颗粒之间的磁团聚力不再随磁感应强度的增强而增大，所以脱除效率不再随磁感应强度的增强而提高。

### 2.2 磁介质填充率 (W) 对分级脱除效率的影响

由图5可看出，当磁介质填充率由0.6增加到1.2时，粒径为  $1.84\ \mu\text{m}$  的颗粒的脱除效率由约35%提高到约55%，而总脱除效率提高了18.7%。这主要是由于颗粒到达第1排时会有部分颗粒未被镍丝捕集而直接穿过，到达第2排时可以重新被镍丝捕获，从而使颗粒捕集效率得到明显提高。当磁介质填充率由1.2增加到1.7时，粒径为  $1.84\ \mu\text{m}$  的颗粒的脱除效率由约55%提高到约65%；但磁介质填充率继续由1.7增加到2.3时，各粒径颗粒脱除效率的增加幅度并不很大。这是由于此时颗粒物的脱除效率已较高，到后面几排镍丝时，颗粒物浓度已较低，继续增加填充率脱除效率增加不明显。

压冲击颗粒分析仪 (ELPI) 进行实验数据的采集分析。

### 1.3 实验方法

试验时首先将床料和飞灰按照一定质量比例充分混合后加入气溶胶发生器。产生的气溶胶先通入空通道，以此时测得的颗粒物数量浓度作为入口浓度进行测量。测量完毕后加入磁介质格栅，并进行各种工况的调节，得到相应工况下颗粒物的出口浓度。通过对比各粒径下可吸入颗粒物浓度变化，得到高梯度磁场中可吸入颗粒

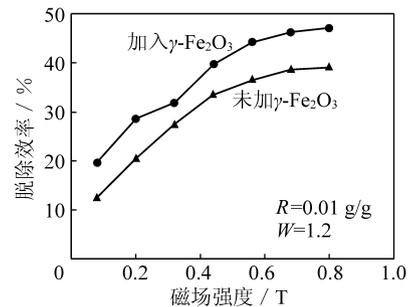


图4 外加磁场强度和总脱除效率的关系

Fig. 4 The effect of magnetic flux density on total particle removal efficiency

R——磁种与飞灰质量比；W——磁介质填充率

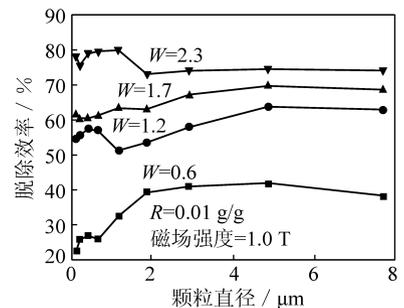


图5 磁介质填充率 (W) 和分级效率的关系

Fig. 5 The effect of magnetic medium fill ratio on single-sized particle removal efficiency

### 2.3 磁种与飞灰质量比对脱除效率的影响

如图 6 所示,随着磁种  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  添加量的增加,脱除效率也逐渐增大.当  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  与飞灰的质量比由 0 提高到 0.016 时,东胜烟煤所产生细颗粒的总脱除效率由约 24% 增加到 41%,而大同烟煤所产生细颗粒的总脱除效率由约 20% 增加到 33%.这是由于随着  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  的增加,磁种对颗粒物的聚并增强,得到尺寸更大的颗粒团,由于粒子间磁偶极子相互作用力与其体积成正比,因而,颗粒间磁偶极子力随粒径的增大而增加,颗粒间磁偶极子力增大,便于进一步的脱除,提高脱除效率.另外,由于东胜烟煤飞灰的饱和磁化强度大于大同烟煤飞灰,东胜烟煤飞灰与  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  的聚并效果明显强于大同烟煤飞灰,因此脱除效率也较高.

### 2.4 外加磁场作用时间对脱除效率的影响

如图 7 所示,当加入磁场后,脱除效率一开始随时间推移而提高,当作用到 30 s 左右时,脱除效率不再随着作用时间的增加而增加,而稳定在一定的数值.这是因为刚开始颗粒在磁场中运动时间短,吸附在镍丝上的大部分颗粒将被气流带走,其中以小颗粒居多,部分大颗粒将优先被镍丝捕集,然而由于大颗粒的入口浓度很低,所以全效率起初不是很高.随着时间的推移,颗粒愈积愈多,而且由于同时存在磁团聚的作用,此后全效率逐渐提高.但是由于镍丝在吸附颗粒的同时必然导致其表面上捕集点的减少,随后进入磁场试验段的颗粒被镍丝吸引的机会相应减少,镍丝上沉积的颗粒组成的新捕集点一方面增强了对颗粒捕集能力,另一方面当积累到一定程度其也会受气流作用而不断脱落并因重力作用掉入通道中.当沉积和脱落分别接近一定速率时,表现出来的分级效率就会如图 7 中后半段(从 30 s 左右开始)所示的趋于饱和,即颗粒在镍丝上的聚集量将基本维持不变.

## 3 结 论

(1) 磁场强度越大,可吸入颗粒物脱除效率越高.但通过提高磁场强度来提高脱除效率是有限度的,当颗粒物达到饱和磁化强度时,脱除效率也将达到极限值而不再增加.

(2) 在磁场强度较低的情况下(0.1 T),加入  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  可将脱除效率最大提高约 65%;但随磁场强度的增加, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  对脱除效率提高的贡献将减小,当磁场强度为 0.8 T 时,加入  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  脱除效率只提高了 12%.

(3) 增加磁介质填充率可以提高脱除效率.对于粒径为  $1.84\ \mu\text{m}$  的颗粒,当磁介质填充率由 0.6 增加到 1.2 时,颗粒的脱除效率提高了约 19%,但磁介质填充率继续由 1.7 增加到 2.3 时,脱除效率的增加不再明显.

(4) 随磁种与飞灰质量比的增加,燃煤可吸入颗粒物的脱除效率也逐渐增加,但其增幅在减小而趋于稳定.并且在相同条件下,饱和磁化强度较大的东胜烟煤飞灰的脱除效率要高于大同烟煤飞灰 5%~8% 不等.

(5) 脱除效率随外加磁场的作用时间的变化可分为 3 个阶段:缓慢提高段、快速提高段以及稳定段.

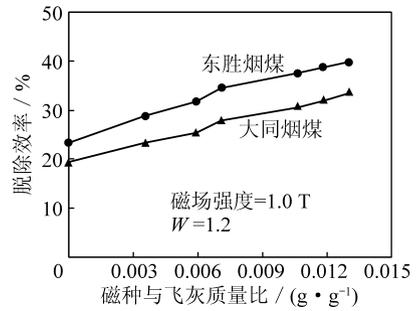


图 6 磁种与飞灰质量比对总脱除效率的影响  
Fig. 6 The effect of the quality ratio of  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  to the fly ash on total particle removal efficiency

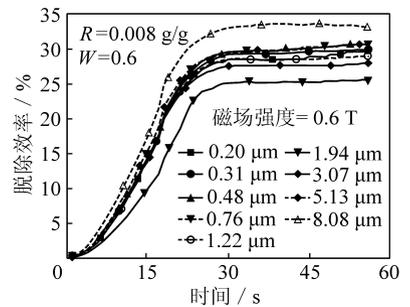


图 7 外加磁场作用时间对总脱除效率的影响  
Fig. 7 Variation in total particle removal efficiency with time

## 参考文献:

- [1] 耿郡, 柳朝晖, 张丰豪, 等. 燃煤微细粒迁移过程的动力学 [J]. 化工学报, 2006, 57 (2): 292~299.  
Geng Jun, Liu Zhaohui, Zhang Fenghao, et al. Dynamics of behavior of fine particulate matter in pulverized coal combustion [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57 (2): 292~299.
- [2] 汪安璞. 大气气溶胶研究新动向 [J]. 环境化学, 1999, 18 (1): 10~15.  
Wang Anpu. Recent trends on study of atmospheric aerosols [J]. Environmental Chemistry, 1999, 18 (1): 10~15.
- [3] 张军营, 魏凤, 赵永椿, 等.  $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 排放的一维炉燃烧实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2005, 26 (增刊): 257~260.  
Zhang Junying, Wei Feng, Zhao Yongchun, et al. Experiment research of emissions of  $\text{PM}_{10}$   $\text{PM}_{2.5}$  during coal combustion in one dimensional furnace [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26 (Sup.): 257~260.
- [4] 刘小伟, 徐明厚, 于敦喜, 等. 煤粉粒径对燃烧过程中可吸入颗粒物排放特性的影响 [J]. 动力工程, 2005, 25 (4): 593~598.  
Liu Xiaowei, Xu Minghou, Yu Dunxi, et al. Study on the influence of coal granule size on emission of inhalable particles during combustion [J]. Power Engineering, 2005, 25 (4): 593~598.
- [5] Zhang Chengfeng, Yao Qiang, Sun Junming. Characteristics of particulate matter from emissions of four typical coal-fired power plants in China [J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86 (7): 757~768.
- [6] Chen Yuanzhi, Naresh Shah, Frank E, et al. Investigation of primary fine particulate matter from coal combustion by computer-controlled scanning electron microscopy [J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85 (6): 743~761.
- [7] Ritter James A, Ebner Armin D, Daniel Karen D, et al. Application of high gradient magnetic separation principles to magnetic drugtargeting [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 280 (2): 184~201.
- [8] Karapinar N. Magnetic separation of ferrihydrite from wastewater by magnetic seeding and high gradient magnetic separation [J]. Int. J. Miner. Process, 2003, 71 (4): 45~54.
- [9] Svoboda J, Fujita T. Recent developments in magnetic methods of material separation [J]. Minerals Engineering, 2003, 16 (9): 785~792.
- [10] 宋海燕, 杨平, 华南平, 等. 负载型无铬超细铁基变换催化剂的制备和催化性能 [J]. 催化学报, 2003, 24 (5): 374~378.  
Song Haiyan, Yang Ping, Hua Nanping, et al. Preparation and performance of supported Cr-free ultrafine iron-based catalysts for water-gas shift reaction [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2003, 24 (5): 374~378.
- [11] 李永旺, 赵长遂, 吴新, 等. 新型流化床气溶胶发生装置及其特性 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2005, 35 (5): 742~745.  
Li Yongwang, Zhao Changsui, Wu Xin, et al. Development and characteristic of novel fluidized bed aerosol generator [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2005, 35 (5): 742~745.