

用响应曲面法研究高梯度磁场下 燃煤PM₁₀的捕集效率

赵健植¹, 鲁端峰²

(1. 上海市环境科学研究院, 上海市 徐汇区 200233;

2. 中国烟草总公司郑州烟草研究院, 河南省 郑州市 450001)

Study on Capture Efficiency of PM₁₀ From Coal Combustion in High Gradient Magnetic Field Using Response Surface Methodology

ZHAO Jian-zhi¹, LU Duan-feng²

(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Xuhui District, Shanghai 200233, China;

2. Zhengzhou Tobacco Research Institute of CNTC, Zhengzhou 450001, Henan Province, China)

ABSTRACT: The capture efficiency of PM₁₀ from coal combustion in high gradient magnetic field was studied using response surface methodology (RSM), which enables effect examinations of parameters with a moderate number of experiments. All experiments were conducted on a test rig, which incorporates a high gradient magnetic field, with variations of particle concentration real time measured by an electric low pressure impactor (ELPI). The PM₁₀ capture efficiency was well correlated with operating parameters, including particles density, magnetic flux density, gas velocity and magnetic medium's filling ratio. Effect test indicate that the magnetic flux density has the most significant influence on the capture efficiency. All of the interactions of particles density with magnetic flux density, magnetic flux density with gas velocity, and magnetic flux density with magnetic medium's filling ratio play important roles.

KEY WORDS: response surface methodology; high gradient magnetic field; PM₁₀ from coal combustion; capture efficiency

摘要: 建立高梯度磁场捕集燃煤PM₁₀实验台, 采用电气低压冲击器测量颗粒浓度的变化, 利用响应曲面法对PM₁₀捕集效率进行实验研究, 得到捕集效率的预测模型。计算结果表明通过该预测模型可以很好地描述捕集效率与颗粒浓度、磁场强度、气体流速和磁介质填充率等重要操作参数之间的关系。因素分析表明磁场强度对捕集效率的影响最大, 同时颗粒浓度与磁场强度、磁场强度与气体流速以及磁场强度与磁介质填充率的交互作用均对捕集效率有重要的影响。

关键词: 响应曲面法; 高梯度磁场; 燃煤PM₁₀; 捕集效率

0 引言

PM₁₀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^[1-2]。煤的燃烧是PM₁₀污染的重要来源, 燃煤PM₁₀中富集多种有毒痕量元素如砷、硒、铅、铜、锌、溴等, 且含量随着颗粒粒径的减小而增加, 因此具有更大的危害性^[3]。常规的除尘方式如电除尘、布袋除尘以及旋风除尘等对燃煤PM₁₀的排放缺乏有效的控制, 研究新的控制燃煤PM₁₀的理论和方法十分迫切。

国内已有学者对燃煤PM₁₀在高梯度磁场下的捕集规律进行了初步研究, 获得了有参考意义的结果^[4-8]。但是这些研究往往使用的是单因素实验设计, 即在其他参数不变的情况下考察某一参数对捕集效率的影响, 因此不能得出捕集效率与所有重要的操作参数之间的函数关系, 同时也无法评价各操作参数对捕集效率的影响程度。事实上, 在复杂多参数控制的实验中采用这种实验设计是不合适的。近年来响应曲面法(response surface methodology, RSM)在实验设计上的应用越来越引起国内外专家学者的重视, 应用响应曲面法进行实验设计可以通过统计学方法系统而有效地研究操作参数的影响^[9-16]。

该文建立了高梯度磁场捕集燃煤PM₁₀实验台, 借助高精度分析仪器电气低压冲击器(electric low pressure impactor, ELPI), 通过应用响应曲面法对

捕集效率进行实验研究，得到了捕集效率与颗粒浓度、磁场强度、气体流速和磁介质填充率等重要的操作参数之间的关系，研究结果有助于评价各参数对捕集效率的影响程度。

1 响应曲面设计

响应曲面设计是在实验设计中使用的—种数据处理方法，在探索科学及工程中的各类仿真优化、参数配置、观测设计等问题中已得到广泛的应用。该文选择二次响应曲面方程，并考虑所有的一次项、二次项和两两交叉项(响应曲面设计的工作原理及二次响应曲面方程形式参见文献[16])。

—般认为高梯度磁场下 PM₁₀ 的捕集效率主要受到以下 4 个因素的影响：颗粒浓度 C 、磁场强度 B 、烟气流速 u 和磁介质填充率 R_f 。表 1 给出响应曲面模型中变量的范围。

表 1 RSM 模型中变量及范围

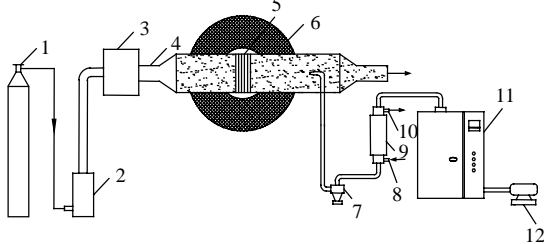
Tab. 1 Low and high level settings of the factors used in the response surface model

因素	变量 x_i	X_{iL}	X_{iH}
$C/(10^{10}/m^3)$	x_1	4.5	9.5
B/T	x_2	0.2	0.8
$u/(m/s)$	x_3	0.04	0.08
R_f	x_4	0.02	0.06

2 实验概况

2.1 实验系统

实验系统由气溶胶发生装置、高梯度磁场作用段和测量分析系统组成，如图 1 所示。气溶胶发生系统采用流化床干颗粒气溶胶发生器。实验通道横截面尺寸为 50 mm×50 mm，长为 1.2 m，通道 2 侧布置双轭双调协可调气隙电磁铁。气流通道的内部布置磁介质，材料为圆柱状铁丝，该材料具有典型的铁磁特性，不仅具有很高的磁化强度，且退去外加磁场后剩磁极小，易于实验后清灰处理。磁介质



1—氮气罐；2—燃煤 PM₁₀ 气溶胶发生器；3—混和器；4—气流通道；5—磁介质格栅；6—磁铁；7—旋风分离器；8—稀释气进口；9—稀释器；10—稀释气出口；11—电称低压冲击器(ELPI)；12—真空泵。

图 1 实验系统图

Fig. 1 Schematic illustration of the experimental system

制成格栅布置在气流通道内部，布置方式如图 2 所示。采用芬兰 Dekati 公司生产的电气低压冲击器测量气溶胶颗粒浓度的变化，其响应时间短，测量精度高，可以实时测量颗粒物数目浓度和粒径分布。

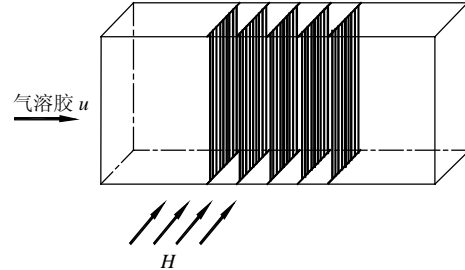


图 2 磁介质格栅布置示意图

Fig. 2 Schematic illustration of the magnetic medium grid

2.2 实验样品

选取内蒙古达旗电厂飞灰(简称达旗飞灰)作为实验样品，真实密度为 2230 kg/m³，饱和磁化强度为 4.4×10³ A/m，磁滞回线如图 3 所示。

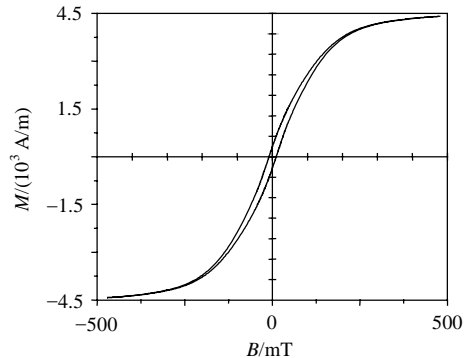


图 3 燃煤 PM₁₀ 磁滞回线

Fig. 3 Schematic illustration of the PM₁₀ magnetic hysteresis loops

2.3 试验方法

首先对采集到的达旗飞灰进行烘干处理，与作为床料的不锈钢珠按照一定的比例均匀混和后添加到气溶胶发生器内，然后开启气溶胶发生系统，同时开启 ELPI，对产生的气溶胶进行实时监测，至 ELPI 显示颗粒数浓度稳定后开启磁场进行实验。

定义 C_{in} 表示进入通道内总的颗粒浓度， C_{out} 表示经磁场作用段作用后总的颗粒浓度，定义颗粒捕集效率为

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \tag{1}$$

3 结果及分析

3.1 实验设计及参数分析

中心复合设计的设计点位于一个面中心的超立方体中，由 3 部分组成^[17]：16(2⁴)个部分全部析

因的点; 8(2×4)个每个因素原点轴向部分的点; 1个中心点。表2为中心复合设计的实验点以及相应的实验值。

表2 中心复合设计的设计点及实验值
Tab. 2 Central composite experimental design and responses experimentally observed

序号	X_1	X_2	X_3	X_4	Y
1	4.5	0.2	0.04	0.02	0.04
2	9.5	0.2	0.04	0.02	0.06
3	4.5	0.8	0.04	0.02	0.27
4	9.5	0.8	0.04	0.02	0.38
5	4.5	0.2	0.08	0.02	0.03
6	9.5	0.2	0.08	0.02	0.05
7	4.5	0.8	0.08	0.02	0.15
8	9.5	0.8	0.08	0.02	0.24
9	4.5	0.2	0.04	0.06	0.07
10	9.5	0.2	0.04	0.06	0.09
11	4.5	0.8	0.04	0.06	0.42
12	9.5	0.8	0.04	0.06	0.53
13	4.5	0.2	0.08	0.06	0.05
14	9.5	0.2	0.08	0.06	0.07
15	4.5	0.8	0.08	0.06	0.29
16	9.5	0.8	0.08	0.06	0.41
17	4.5	0.5	0.06	0.04	0.08
18	9.5	0.5	0.06	0.04	0.12
19	7.0	0.2	0.06	0.04	0.07
20	7.0	0.8	0.06	0.04	0.37
21	7.0	0.5	0.04	0.04	0.16
22	7.0	0.5	0.08	0.04	0.10
23	7.0	0.5	0.06	0.02	0.11
24	7.0	0.5	0.06	0.06	0.14
25	7.0	0.5	0.06	0.04	0.19

经过多重回归, 可以得到预测模型为

$$Y = -0.11324 + 0.07453X_1 - 0.61511X_2 + 2.14206X_3 - 3.69835X_4 - 0.00555X_1^2 + 0.948211X_2^2 - 11.6525X_3^2 + 38.3475X_4^2 + 0.029167X_1X_2 - 0.0125X_1X_3 + 0.0375X_1X_4 - 4.6875X_2X_3 + 5.3125X_2X_4 - 1.5625X_3X_4 \quad (2)$$

表3为该模型的方差分析。表中的 P 值, 以及 R^2 值可以达到0.988, 均说明数据和预测模型

表3 二阶模型的方差分析
Tab. 3 Corresponding analysis of variance of second-order model

参数	方差来源				残差	总和
	模型					
	总项	线性项	平方项	交互项		
自由度	14	4	4	6	10	24
平方和	0.494697	0.429133	0.028927	0.036638	0.00799	0.495496
均方和	0.036031	0.100764	0.016187	0.006106	0.000090	—
F 值	0.035336	0.107283	0.007232	0.006106	—	—
P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	—	—

吻合很好。

3.2 操作参数的影响检验

表4所示为操作参数的影响检验。小的 P 值说明因素的影响显著。当因素的 P 值大于0.05时, 意味着该因素的影响程度小于95%置信区间。有些因素, 标准偏差远大于回归系数, 会导致 P 值接近于1, 从而表明这些因素对目标函数影响不显著。该文15项中有11项(包括常数项, 4个线性项 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 , 3个平方项 X_1^2 、 X_2^2 、 X_4^2 和3个交叉项 X_1X_2 、 X_2X_3 、 X_2X_4)对目标函数影响显著。

对于线性项, 磁场强度对颗粒捕集效率影响最大。外加磁场在2个方面影响 PM_{10} 的捕集, 随着外加场强的增大, 一方面磁介质周围形成的磁场梯度增大, 另一方面颗粒磁化强度增大, 这都使颗粒所受磁场作用力增大, 有利于颗粒捕集。颗粒浓度对于颗粒捕集效率也有较大影响, 颗粒浓度越高, 颗粒间的相互作用越明显, 越有利于颗粒的捕集。从图4中可以看出, 颗粒浓度和磁场强度的交互作用对颗粒捕集效率的影响非常明显, 高的颗粒浓度和高的磁场强度会带来比较高的颗粒捕集效率, 同时在高的磁场强度下相对于低的磁场强度条件下, 增大颗粒浓度对颗粒捕集效率的影响更为显著。气流速度对于颗粒捕集效率也有一定的影响, 提高气流速度使得 PM_{10} 在磁场作用区域的停留时间减少, 颗粒捕集效率随之降低。从图5中可以看出, 在高的磁场强度条件下相对于低的磁场强度, 提高气流速度对颗粒捕集效率的影响更大。磁介质填充率对颗粒捕集效率也有较大的影响, 提高磁介质的填充率将增强磁介质的吸附能力, 从而提高了颗粒捕集

表4 操作参数的影响检验
Tab. 4 Effect examinations of coded factors

项目	系数	标准差系数	T 值	P 值
常数项	0.13542	0.00386	35.095	0.000
X_1	0.03056	0.00211	14.506	0.002
X_2	0.14056	0.00211	66.727	0.000
X_3	-0.03500	0.00211	-16.616	0.015
X_4	0.04389	0.00211	20.836	0.001
X_1^2	-0.03466	0.00560	-6.189	0.000
X_2^2	0.08534	0.00560	15.239	0.000
X_3^2	-0.00466	0.00560	-0.832	0.425
X_4^2	0.01534	0.00560	2.739	0.021
X_1X_2	0.02188	0.00223	9.791	0.000
X_1X_3	-0.00062	0.00223	-0.280	0.785
X_1X_4	0.00188	0.00223	0.839	0.421
X_2X_3	-0.02813	0.00223	-12.588	0.000
X_2X_4	0.03188	0.00223	14.267	0.000
X_3X_4	-0.00062	0.00223	-0.280	0.785

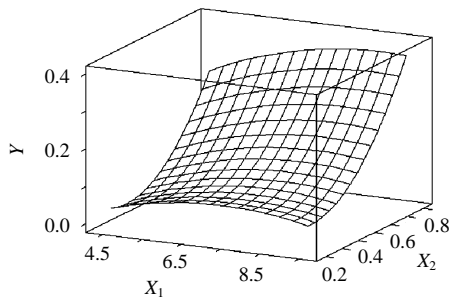


图 4 X₁和X₂对捕集效率的影响曲面(X₃=0.06, X₄=0.04)
Fig. 4 X₁vs.X₂ mesh plot under the conditions of X₃=0.06, X₄=0.04

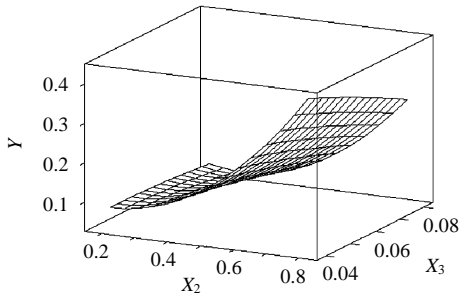


图 5 X₂和X₃对捕集效率的影响曲面(X₁=7, X₄=0.04)
Fig. 5 X₂vs.X₃ mesh plot under the conditions of X₁=7, X₄=0.04

效率。从图 6 中可以看出，在高的磁介质填充率条件下相对于低的磁介质填充率，增大磁场强度对颗粒捕集效率的影响更为明显。

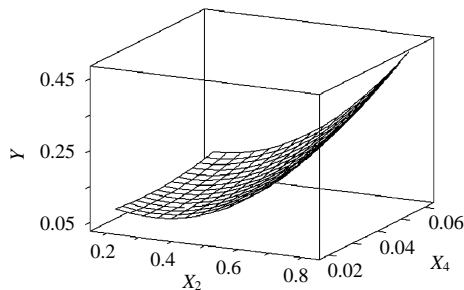


图 6 X₂和X₄对捕集效率的影响曲面(X₁=7, X₃=0.06)
Fig. 6 X₂vs.X₄ mesh plot under the conditions of X₁=7, X₃=0.06

3.3 预测模型的改进

由表 4 中可以看出预测模型中存在一些影响因素较小的因素项，将这些因素项去除可以使预测模型更具典型性。以式(2)为例，15 个因素相中有 11 个因素相的影响较大，因此建立了仅包含这 11 个因素项的改进的预测模型，如下式所示：

$$Y = -0.09202 + 0.078134X_1 - 0.60095X_2 + 0.59375X_3 + -3.27476X_4 - 0.00575X_1^2 + 0.934053X_2^2 + 35.1619X_4^2 + 0.029167X_1X_2 - 4.6875X_2X_3 + 5.3125X_2X_4 \quad (3)$$

为了评价改进模型的性能，将原始实验数据代

入式(3)中进行方差分析，分析结果如表 5 所示。从表 5 中可以看出，极小的 P 值以及较好的 R² 值均显示新的改进模型与数据吻合很好，R² 值逼近校正 R² 值是在预测模型中去除了影响较小的因素项的结果。

表 5 改进模型的方差分析
Tab.5 Corresponding analysis of variance of the evolutive quadratic model

参数	方差来源		
	模型	残差	总和
自由度	10	14	24
平方和	0.494573	0.009230	0.495496
均方和	0.049457	0.000666	—
F 值	750.38	—	—
P 值	0.00	—	—

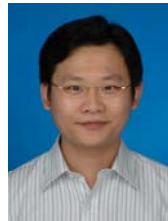
4 结论

本文对高梯度磁场捕集燃煤 PM₁₀ 进行实验研究，应用响应曲面法建立了颗粒浓度、磁场强度、气体流速和磁介质填充率等重要操作参数对捕集效率影响的预测模型。通过模型分析得出磁场强度对捕集效率的影响最大，同时颗粒浓度与磁场强度、磁场强度与气体流速以及磁场强度与磁介质填充率的交互作用均对捕集效率有较大影响。通过去除预测模型中影响较小的因素项，得到了高梯度磁场下燃煤 PM₁₀ 捕集效率的改进预测模型。该文得到的预测模型可以全面地反映操作参数对捕集效率的影响规律。

参考文献

- [1] Samet J M, Dominici F, Curriero F C, et al. Fine particulate air pollution and mortality in 20 US cities 1987-1994[J]. The New England Journal of Medicine, 2000, 343(24): 1742-1756.
- [2] Atkinson R W, Anderson H R, Sunyer J, et al. Acute effects of particulate air pollution on respiratory admissions: results from APHEA 2 project. Air pollution and health: a European approach [J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2001, 164(10Pt1): 1860-1881.
- [3] 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.
- [4] 鲁端峰, 赵长遂, 吴新, 等. 燃煤可吸入颗粒物在高梯度磁场中的捕集试验研究[J]. 动力工程, 2007, 27(1): 113-117. Lu Duanfeng, Zhao Changsui, Wu Xin, et al. Experimental study on capturing of originated coal combustion inhalable particle in high gradient magnetic fields[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2007, 27(1): 113-117(in Chinese).
- [5] 鲁端峰, 赵长遂, 吴新, 等. 高梯度磁场中燃煤 PM₁₀ 的捕集试验[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37(1): 89-93. Lu Duanfeng, Zhao Changsui, Wu Xin, et al. Experimental research

- on capture of PM_{10} emitted from coal combustion with high gradient magnetic field[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(1): 89-93(in Chinese).
- [6] Li Yongwang, Zhao Changsui, Wu Xin, et al. Aggregation experiments on fine fly ash particles in uniform magnetic field [J]. Powder Technology, 2007, 174(3): 93-103.
- [7] Zhao Changsui, Li Yongwang, Wu Xin, et al. Experimental investigation on aggregation of coal-fired PM_{10} by magnetic seeding [J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 133(1-3): 301-309.
- [8] Li Yongwang, Zhao Changsui, Wu Xin, et al. Aggregation mechanism of fine fly ash particles in uniform magnetic field [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2007, 24(2): 319-327.
- [9] Agarwala S, King O, Horst S, et al. Response surface study of inductively coupled plasma etching of GaAs/AlGaAs in BCl_3/Cl_2 [J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 1999, A17(1): 52-55.
- [10] Wächter R, Cordery A. Response surface methodology modeling of diamond-like carbon film deposition[J]. Carbon, 1999, 37(10): 1529-1537.
- [11] Chung T W, Yeh T S, Yang T C K. Influence of manufacturing variables on surface properties and dynamic adsorption properties of silica gels[J]. Journal of Non-Crystal Solids, 2001, 279(2-3): 145-153.
- [12] Kim Y K, Jo Y S, Hong J P, et al. Approach to the shape optimization of racetrack type high temperature superconducting magnet using response surface methodology[J]. Cryogenics, 2001, 41(1): 39-47.
- [13] Qian F P, Zhang M Y. Study of the natural vortex length of a cyclone with response surface methodology[J]. Computer and Chemical Engineering, 2005, 29(10): 2155-2162.
- [14] Zhao Jianzhi, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping. The degree of desulphurization of a limestone/gypsum wet FGD spray tower using response surface methodology[J]. Chemical Engineering & Technology, 2007, 30(4): 517-522.
- [15] Zhao Jianzhi, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping. Study of the separation efficiency of a demister vane with response surface methodology [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 147(1-2): 363-369.
- [16] 赵健植, 金保升, 仲兆平, 等. 基于响应曲面法的除雾器叶片效率模拟[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(23): 61-65.
Zhao Jianzhi, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping, et al. Simulation study of separation efficiency of demister vane based on response surface methodology[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(23): 61-65(in Chinese).
- [17] 辛益军. 方差分析与实验设计[M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2001: 13-25.



赵健植

收稿日期: 2008-11-27。

作者简介:

赵健植(1980—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为燃煤大气污染物控制, zhaojz@saes.sh.cn。

(编辑 张媛媛)