

# 颗粒层过滤除尘的实验研究及分析

李阳, 侯军锁, 高文

(中机国能电力工程有限公司, 上海 200061)

**摘要:**通过建立固定床颗粒层过滤实验装置, 利用量纲分析建立了颗粒层过滤效率及压力损失的无量纲数群的关系表达式, 并采用四水平正交表安排多因素实验, 以石英砂为过滤介质, 在常温下进行粉尘过滤效率和压力损失实验测试。对试验数据进行多元非线性回归分析, 得出过滤效率和压力损失与表观过滤速度、过滤层厚度、过滤颗粒平均粒径、粉尘浓度和过滤时间的回归关系表达式。实验结果表明: 颗粒层过滤器过滤性能对粉尘粒径具有明显选择性。

**关键词:**颗粒层; 过滤效率; 压力降; 正交试验; 回归分析

中图分类号: X701.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2013)04-0022-04

## ORTHOGONAL TEST AND REGRESSION ANALYSIS ON FIXED BED FILTER

LI Yang, HOU Jun-suo, GAO Wen

(China Sinogy of Electric Engineering Co., Ltd, Shanghai, 200061, China)

**Abstract:** The filtration efficiency and pressure drop of fixed bed filter using quartz was investigated at normal temperature. A four-level orthogonal table was adopted in the experiment and the experiment data were processed by dimension analysis and multiple element nonlinear regression method using SPSS. Regression equation to analyze the relation between filtration efficiency, pressure drop and experimental factors (such as filtration velocity, layer thickness, filter particle diameter, dust concentration and filtration time) of composites was obtained. The filtration efficiency of granular bed for different size dust particle was shown in the experiment.

**Keywords:** granular layer; filtration efficiency; pressure drop; orthogonal test; regression analysis

### 1 引言

在高温除尘技术中, 颗粒层过滤除尘被认为是最具发展前途的技术之一, 它采用颗粒状的材料(如砂、石等)过滤含尘流体中的粉尘。颗粒层过滤技术中最重要的两个指标为过滤效率和过滤压力损失, 很多研究表明: 在过滤效率提高的同时, 过滤器的总压力损失往往会明显的增大, 如何解决此矛

盾是颗粒层过滤技术的关键问题。因此, 本文通过建立固定床颗粒层过滤实验装置, 利用正交实验方法, 以石英砂为过滤介质, 在常温条件下, 对影响过滤效率和压力损失的主要因素(过滤颗粒的粒径, 过滤层的厚度, 表观过滤速度, 粉尘浓度和过滤时间)进行实验测试及分析, 采用多元非线性回归的方法处理试验数据, 得出过滤效率及压力损失与其影响因素之间的回归关联表达式。并分析各因素对过滤效率和压力降的影响程度, 选择效率最优方案进行颗粒层分级过滤效率特性实验, 分析过滤性能对尘粒粒径的选择特性, 以便提高颗粒层过滤

收稿日期: 2012-12-20

作者简介: 李阳(1983-), 男, 工学硕士, 工程师, 2008年毕业于东华大学热能工程专业。现任中机国能电力工程有限公司数字化部副主任工程师, 主要从事发电厂系统设计和安装设计。

器对微细粉尘颗粒的捕集效率。

## 2 正交试验设计

### 2.1 试验系统

实验在设计的固定床颗粒层过滤实验台上进行,实验装置如图 1 所示:

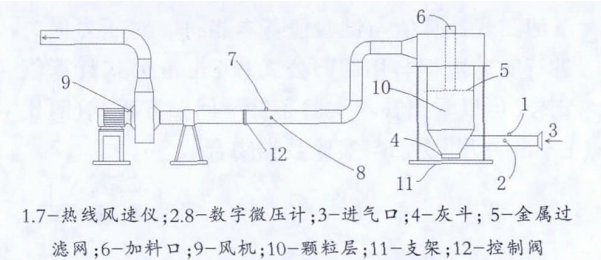


图 1 固定床颗粒除尘实验系统简图

实验采用平均粒径为 3mm 和 5mm 两种石英砂(比重为 2.65)颗粒作为过滤介质。图 1 中 5 为两处孔径 0.216mm 的金属过滤网,进气口采用 SwemaAir50 热线风速仪和 SwemaAir80 数字微压计测量风速和压力,过滤器的压力损失为进气口与出气口静压之差。试验开始后由风机带动进气口 3 进气,经过固定过滤层后离开过滤器,在风机出口处连接布袋除尘器进行收尘。进气口的气体浓度测量采用等速取样法,出口气体浓度测量采用等速取样与袋式除尘器收尘取样对比取值以减小误差。

### 2.2 正交试验水平选择及试验结果

在常温下,固定颗粒层过滤器的除尘效率和压力损失主要受表观过滤风速  $U_f$ 、过滤层的厚度  $L$ 、过滤颗粒的粒径  $d_p$ 、粉尘浓度  $C$  和过滤时间  $t$  五个因素的影响,采用 L16(45)四水平正交表安排试验<sup>[2-3]</sup>。为此把 3mm 和 5mm 的石英砂以 8:2 和 2:8 的比例混合而成 3.4mm 和 4.6mm 的平均粒径而得到 4 个水平。试验采用 1.0~1.65m/s 的过滤风速,均小于临界流化速度。把上述的 5 个因素安排在正交表各列中。表 1 为其正交试验因素水平表,表 2 为总过滤效率和压力降正交设计方案及试验结果。

由表 3 对试验数据进行的直观分析可知:过滤风速  $U_f$  对滤效率影响最大,过滤风速的水平变化使过滤压力降波动最大。其次是过滤层厚度、过滤颗粒平均粒径、气体含尘浓度和过滤时间。随着过滤风速的增大过滤效率明显的降低;随着过滤颗粒均粒径和粉尘浓度的增大过滤效率降低;随着过

表 1 正交试验因素水平表

水平	过滤风速/ ( $U_f/m \cdot s^{-1}$ )	过滤颗粒平均 粒径/( $dp/mm$ )	过滤层厚 度/( $L/mm$ )	气体含尘浓 度/( $C/g \cdot m^{-3}$ )	过滤时间/ ( $t/min$ )
1	1.00	3.0	20	5	20
2	1.17	3.4	40	4	15
3	1.28	4.6	60	2	10
4	1.65	5.0	100	1	8

表 2 过滤效率和压降正交试验设计方案及结果

试验 号	过滤风速/ ( $U_f/m \cdot s^{-1}$ )	颗粒均粒 径/( $dp/mm$ )	过滤层厚 度/( $L/mm$ )	含尘浓度/ ( $C/g \cdot m^{-3}$ )	过滤时间/ ( $t/min$ )	过滤效 率/( $\eta/\%$ )	压降 $\Delta P$ / ( $P/Pa$ )
1	1(1.00)	1(3.0)	1(20)	1(5)	1(20)	89.6	142.4
2	1(1.00)	2(3.4)	2(40)	2(4)	2(15)	90.1	351.7
3	1(1.00)	3(4.6)	3(60)	3(2)	3(10)	83.8	376.1
4	1(1.00)	4(5.0)	4(100)	4(1)	4(8)	84.1	341.3
5	2(1.17)	1(3.0)	2(40)	3(2)	4(8)	85.2	453.7
6	2(1.17)	2(3.4)	1(20)	4(1)	3(10)	77.9	185.5
7	2(1.17)	3(4.6)	4(100)	1(5)	2(15)	91.5	661.6
8	2(1.17)	4(5.0)	3(60)	2(4)	1(20)	84.7	293.2
9	3(1.28)	1(3.0)	3(60)	4(1)	2(15)	86.9	643.2
10	3(1.28)	2(3.4)	4(100)	3(2)	1(20)	88.5	816.8
11	3(1.28)	3(4.6)	1(20)	2(4)	4(8)	80.3	155.9
12	3(1.28)	4(5.0)	2(40)	1(5)	3(10)	82.2	205.3
13	4(1.65)	1(3.0)	4(100)	2(4)	3(10)	79.4	1179
14	4(1.65)	2(3.4)	3(60)	1(5)	4(8)	72.8	904.1
15	4(1.65)	3(4.6)	2(40)	4(1)	1(20)	67.8	641.8
16	4(1.65)	4(5.0)	1(20)	3(2)	2(15)	59.6	189.7

表 3 直观分析

因素	过滤风速 ( $U_f/m \cdot s^{-1}$ )	颗粒均粒 径/( $dp/mm$ )	过滤层厚 度/( $L/mm$ )	气体含尘浓 度/( $C/g \cdot m^{-3}$ )	过滤时间/ ( $t/min$ )
效率均值 1(%)	86.900	85.275	76.850	84.025	82.650
效率均值 2(%)	84.825	82.325	81.325	83.625	82.025
效率均值 3(%)	81.475	80.850	82.050	79.275	80.825
效率均值 4(%)	69.900	77.650	85.875	79.175	80.600
效率极差 (%)	17.000	7.625	9.025	4.850	2.050
压力损失 均值 1(Pa)	302.875	604.575	168.375	478.350	473.550
压力损失 均值 2(Pa)	398.500	564.525	413.125	494.950	461.550
压力损失 均值 3(Pa)	455.300	458.850	554.150	459.075	486.475
压力损失 均值 4(Pa)	728.650	257.375	749.675	452.950	463.750
压力损失 极差(Pa)	425.775	347.200	581.300	42.000	24.925

滤层厚度增加和过滤时间的延长过滤效率提高。通过方差分析,取  $\alpha=0.01$  和  $\alpha=0.05$  分别进行 F 检验,检验结果表明:表观过滤风速为高度显著因素,过滤颗粒平均粒径和过滤层厚度为显著因素。

过滤层厚度  $L$  对过滤压力损失影响最大,过

滤风速和颗粒平均粒径影响较小,过滤层厚度的水平变化使过滤压力损失波动最大。水平平均值的变动表明过滤层厚度是对过滤压力损失影响最大的因素。随着过滤层厚度和过滤风速的增加,压力损失剧烈增大;而随着颗粒层平均粒径的增大过滤压力损失明显减小。通过方差分析可知,取  $\alpha=0.01$  对方差进行 F 检验,表明三个影响因素的 F 比均大于临界  $F_{\alpha}=9.78$ ,为高度显著因素。

### 3 试验结果回归分析

通过交互作用分析假定试验的 5 个因素之间交互作用可以忽略,对影响固定颗粒层过滤效率和压力损失的所有因素进行量纲分析。设过滤效率和压降的函数表达式为:

$$\eta=1-\exp[f(L, d_p, \varepsilon, u_f, \mu, \rho, C, t)] \quad (1)$$

$$\Delta p=f(d_p, \rho, u_f, L, \mu, \varepsilon) \quad (2)$$

式中:  $d_p$  是过滤颗粒均粒径,  $m$ ;  $\rho$  是流体密度,  $kg/m^3$ ;

$U_f$  是表观过滤风速,  $m/s$ ;

$L$  是过滤层厚度,  $m$ ;

$\mu$  是流体粘度,  $Pa \cdot s$ ;

$\varepsilon$  是过滤颗粒空隙率, %;

$C$  是粉尘浓度,  $kg/m^3$ ;

$t$  是过滤时间,  $s$ 。

将式(1)和式(2)写成幂函数形式可得:

$$\eta=1-\exp[K\varepsilon^{n_1}L^{n_2}d_p^{n_3}u_f^{n_4}\mu^{n_5}\rho^{n_6}C^{n_7}t^{n_8}] \quad (3)$$

$$\Delta p=Kd_p^{n_1}L^{n_2}u_f^{n_3}\rho^{n_4}\mu^{n_5}\varepsilon^{n_6} \quad (4)$$

根据白金汉的  $\pi$  定理和量纲一致性原则,带入各物理量的量纲进行无因次化简可得:

$$\eta=1-\exp[-2.52582 \times 10^{11} \varepsilon^{23.446} \left(\frac{L}{d_p}\right)^{0.164} Re_p^{-1.184} \left(\frac{u_f t}{d_p}\right)^{0.108} \left(\frac{C}{\rho}\right)^{0.111}] \quad (5)$$

$$\Delta p=9.1858 \times 10^4 Re_p^{-0.483} \varepsilon^{6.476} \left(\frac{L}{d_p}\right)^{0.872} \left(\frac{u_f^2 \rho}{2}\right) \quad (6)$$

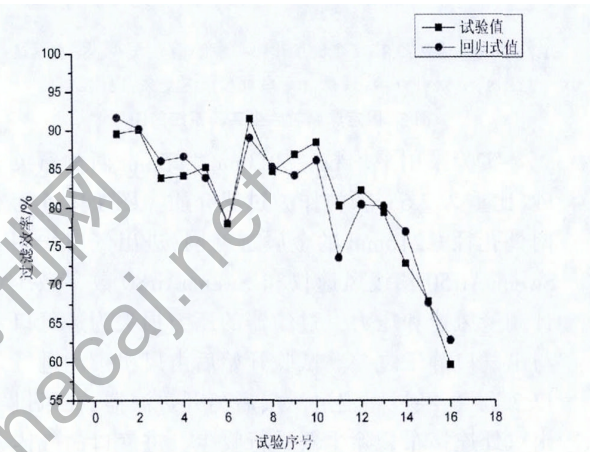
在方程式(5)(6)中  $\rho, \mu, \varepsilon$  为已知量,将试验数据带入式中,应用 SPSS 分析程序对实验数据进行多元回归分析,得出过滤效率及过滤压力损失的多元非线性回归关联表达式为:

$$\eta=1-\exp\left\{K\varepsilon^{n_1}\left(\frac{L}{d_p}\right)^{n_2}\left(\frac{d_p u_f \rho}{\mu}\right)^{-n_3}\left(\frac{u_f t}{d_p}\right)^{n_4}\left(\frac{C}{\rho}\right)^{n_5}\right\} \quad (7)$$

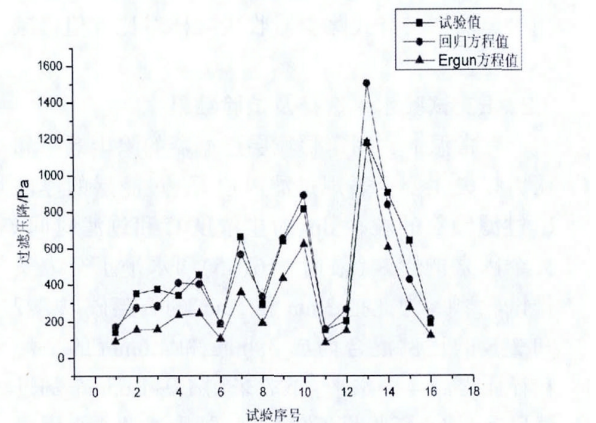
$$\Delta p=K\varepsilon^{n_6}\left(\frac{L}{d_p}\right)^{n_7}\left(\frac{\mu}{d_p u_f \rho}\right)^{n_8}\left(u_f^2 \rho\right) \quad (8)$$

式中,  $Re_p=d_p u_f \rho / \mu$  为颗粒雷诺数<sup>[4]</sup>。

回归方程的方差统计量  $F=15.713$ , 显著性水平为 0.000,说明回归方程是非常显著的。多元相关系数  $R$  为 0.942,表明回归效果极佳。在对回归系数的  $t$  检验表明对回归方程贡献最大的是  $Re_p$  项(显著水平 0.000)。进一步比较试验值与用回归公式(7)(8)计算值,可以看出(图 2)在实验条件下回归式计算值与试验值基本相符。对压力损失进行实验数据与用回归公式和 Ergun 公式计算值比较,可以看出在本实验条件下回归方程式(8)比 Ergun 方程<sup>[5]</sup>更加与实验数据吻合。



(a) 过滤效率与实验序号关系曲线



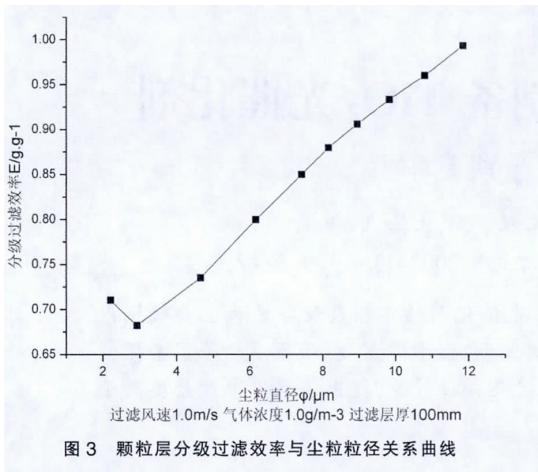
(b) 过滤压力损失与实验序号关系曲线

图2 实验值数据与回归式计算值对比

### 4 分级过滤效率实验

由正交试验结果可知:最优效率方案为过滤风速最低,过滤颗粒均粒径 3.0mm,过滤层厚度为 100mm,气体含尘浓度为  $1g/m^3$  和过滤时间最长,因此取过滤风速为 1.0m/s 和过滤时间为 30min 进行实验,得到过滤效率达 98.5%,用激光粒度分析仪 LS13320 测定过滤前后粉尘的粒径分布,得出

颗粒层颗粒器分级过滤效率与尘粒粒径关系曲线,如图3所示。



实验结果表明:过滤分级效率对粉尘粒径具有明显选择性。在实验条件下存在一个最小分级效率(约68%),对应的粒径范围约2.6~3.2 $\mu\text{m}$ 。大于该值的尘粒受惯性碰撞和直接拦截等机理影响,过滤效率随粒径的增大而提高;小于该值的尘粒受扩散沉积机理的影响,分级效率随粒径的减小而回升。

## 5 结论

(1)通过正交试验和回归分析获得了固定床颗粒层过滤效率和压降与表观过滤速度、过滤层厚度、过滤介质平均粒径、粉尘浓度和过滤时间5个影响因素的回归关联表达式。

(2)在过滤层厚度  $L$  (20~100mm),表观过滤

速度  $U_f$  (1.0~1.65m/s),过滤颗粒平均粒径  $d_p$  (3~5mm),粉尘浓度  $C$  (1~5g/m<sup>3</sup>)和过滤时间 (8~20min)的条件下,非线性回归的方程式(7)和式(8)与实验值基本吻合。

(3)表观过滤风速对过滤效率影响最大,其次是过滤层厚度、过滤颗粒平均粒径、气体含尘浓度和过滤时间。随着表观过滤风速的增大过滤效率明显降低;过滤颗粒均粒径和粉尘浓度的增大也使过滤效率降低;而延长过滤时间和增加过滤层厚度使过滤效率提高。过滤层厚度对过滤压降影响最大,其次是表观过滤风速和过滤颗粒均粒径。实验采用较低 ( $U_f < 1.0\text{m/s}$ )的过滤风速能提高颗粒层总过滤效率,并降低压力损失使过滤器内部流动均匀。

(4)实验表明:过滤分级效率对粉尘粒径具有明显选择性。分级过滤效率存在一个最小值(约68%),即颗粒层过滤器存在最大穿透率,其对2.6~3.2 $\mu\text{m}$ 尘粒捕集效率最低。

## 参考文献

- [1] Takematsu T, Maude C. Coal gasification for IGCC power generation [M]. London: IEA Coal Research, 1991. 46~54.
- [2] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [3] 付海明,张吉光. 实验技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [4] Kwauk M. Generalized fluidization. Scientia Sinica, 12 (4),587~612(1963).
- [5] Ergun S. Fluid flow through packed columns. Che.Eng.Prog., 48,89~94(1952).

(上接第43页)

水质能稳定达到《污水综合排放标准》(GB8978-96)三级排放标准。

## 参考文献

- [1] 张自杰主编. 废水处理理论与设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [2] 张自杰主编 张忠祥主审 钱易 章非娟副主编. 环境工程手册

(水污染防治卷)[M].北京:高等教育出版社,1996.

- [3] 张忠祥 钱易主编 顾夏声 胡纪萃审. 废水生物处理新技术[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [4] [美]梅特卡夫和埃迪公司(Metcalf & Eddy, Inc.) [美]乔巴诺格罗斯(Tchobanoglous, G.) [美]伯顿(Burton, F.L.) [美]斯滕西(Stensel, H. D.)修订;秦裕珩等译. 废水工程:处理及回用[M].第四版.北京:化学工业出版社,2004.