

颗粒层过滤压力损失的实验研究

付海明 李 阳

(东华大学环境科学与工程学院,上海 201620)

摘 要 为减小颗粒层过滤器过滤压力损失及降低运行费用,探寻颗粒层过滤压力损失的变化规律及减低其压力损失的途径,合理地确定清灰周期,通过建立颗粒层实验装置,在稳态过滤及非稳态过滤2种条件下,进行过滤压力损失的单因素及正交实验研究,得出了过滤风速、过滤入口粉尘浓度及过滤时间对颗粒层过滤器压力损失的影响规律。通过回归分析得出了颗粒层过滤器压力损失在稳态过滤及非稳态过滤过程的关联计算式及计算式的适用范围,关联计算式计算结果与相关文献对比结果基本吻合。

关键词 颗粒层过滤器 压力损失 关联计算式

中图分类号 X513 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2009)02-0322-05

Experimental study on pressure drop of granular bed filter

Fu Haiming Li Yang

(College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620)

Abstract In order to reduce the pressure drop and running cost of granular bed filter, and to find the way of reducing pressure drop and determining the cleaning time of the granular bed filter, the orthogonal experiment on pressure drop was carried out under stationary and non-stationary conditions. The rule of the effects of filtering speed, dust concentration at inlet of the filter and filtering time on the pressure drop was obtained. The relative computing formula of pressure drop and its use range under stationary and non-stationary conditions were get by regression analysis. The result of relative computing formula is basically accordant with the result from literature.

Key words granular bed filter; pressure drop; relating compute ring formula

压力损失是表征颗粒层过滤器性能的一个重要指标,是影响颗粒层过滤器运行能耗的主要因素,为探寻颗粒层过滤压力损失的变化规律及减低其压力损失的途径,合理地确定清灰周期,通过建立实验台进行影响颗粒层过滤器关联压力损失主要影响因素的实验研究,实验测量分为稳态条件和非稳态条件2部分,并对影响过滤压力损失的单因素进行分析,通过正交实验及回归分析,得出过滤压力损失计算关联式,并进行非样本实验数据检验及相关研究文献结果对比。

1 实验装置

实验台搭建尺寸参考文献[1,2]进行确定,颗粒层表观过滤速度变化范围0.1~2 m/s。其主体尺寸为:高1400 mm,滤层最大填充高度500 mm,上下双层金属筛网用来固定颗粒层滤料。实验台装置如图1所示。本实验 $Re \gg 30$,原型和模型的雷诺数处于同一紊流射流自模区则可以不考虑流体雷诺

准则数 Re 相似;因此,本实验台按弗诺得数 Fr 和 D/L 为主要相似准则模化。实验研究采用正交实验及回归分析法进行颗粒层过滤压力损失全过程的研究。

2 过滤压力损失单因素实验

实验在常温条件下,以稳态和非稳态过滤时的过滤时间,过滤风速,过滤层厚度,粉尘浓度和颗粒层滤料均粒径这5个因素进行实验,找出其对过滤压降的影响趋势。

2.1 过滤风速对过滤压降的影响

过滤风速实验条件下选取0.52~1.65 m/s之间,平均粉尘浓度为5 g/m³,颗粒层滤料均粒径为

基金项目:上海市重点学科建设资助项目(B604)

收稿日期:2008-04-21; 修订日期:2008-06-03

作者简介:付海明(1962~),男,高级工程师,博士,主要研究方向:空气质量品质控制及有害气体过滤净化技术。

E-mail: fhm@dhu.edu.cn

3 mm, 过滤时间 20 min。每次实验重复 4 次得到总过滤压力损失的均值, 绘制过滤压降与过滤风速的曲线关系如图 2 和图 3 所示。

从测试结果可以看出, 稳态和非稳态时, 过滤风速增大都会使过滤总压降显著增大。图 2 和图 3 显示在相同的过滤风速时非稳态过滤压力损失比稳态过滤压力损失大。因为非稳态时随着含尘气体中粉

尘粒子不断被过滤层捕获并填充颗粒层的空隙, 使得过滤压力损失大于洁净滤层时的压力损失, 这与实际情况相符。由图 2 和图 3 可知: 过滤压力损失随颗粒过滤层厚度的增加而增大。在 1 m/s 过滤风速及颗粒层厚度为 60 mm 时, 其颗粒层过滤器结构压力损失小于 500 Pa。

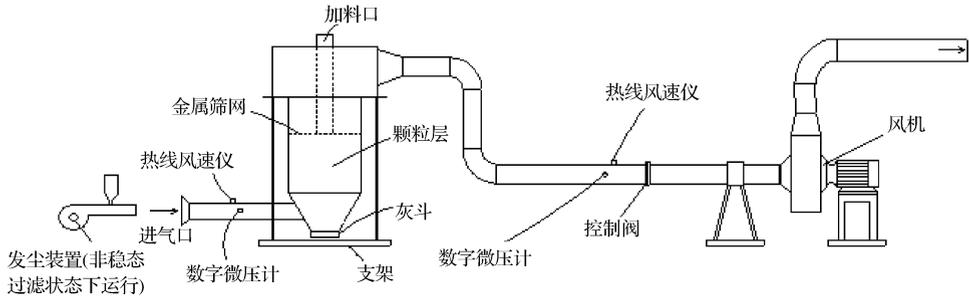


图 1 固定床颗粒除尘实验系统示意图

Fig. 1 Sketch map of granular bed filter

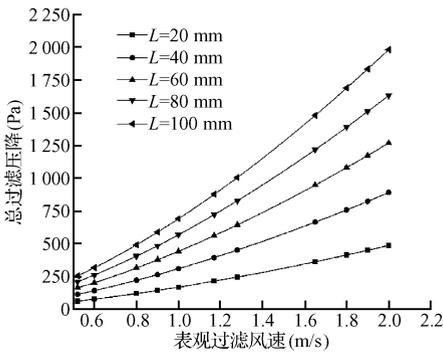


图 2 稳态过滤压降随表观过滤风速变化

Fig. 2 Change of pressure drop with surface filtration velocity under stationary condition

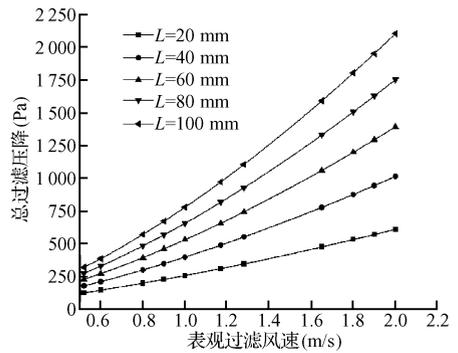


图 3 非稳态过滤压降随表观过滤风速变化

Fig. 3 Change of pressure drop with surface filtration velocity under non-stationary condition

2.2 过滤时间对过滤压力损失的影响

平均粉尘浓度为 5 g/m^3 , 颗粒层滤料均粒径为 3 mm。过滤风速为 1 m/s, 在不同颗粒层厚度的情况下, 从过滤开始到 30 min 时间内, 每次实验重复 4 次测量瞬时压力损失数值并求平均, 实验结果绘制过滤时间与过滤压降曲线关系如图 4 所示。

由图 4 可知: 随着过滤时间的延长, 过滤压力降不断的增大。对 100 mm 滤层厚度条件下进行了 80 min 的测试, 实验数据表明过滤压力损失在 0 ~ 7 min 内压力降与过滤时间成线性关系, 在 7 ~ 15 min 内压力降曲线出现弯曲, 之后随着时间不断的增长

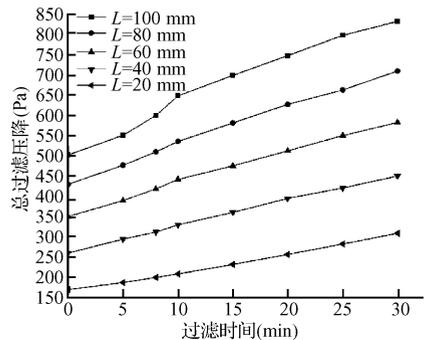


图 4 非稳态过滤压力降随过滤时间变化

Fig. 4 Change of pressure drop with filtration time under non-stationary condition

压降不断增大,到 60 min 后过滤压降缓慢增大,趋于稳定。这是由于在过滤初期粉尘直接进入颗粒过滤层,压力变化主要是粉尘沉积在颗粒层内部;随着时间增加,颗粒层表面形成粉尘层,出现粉尘过滤粉尘现象,压力损失曲线发生弯曲;到了过滤后期,表面粉尘层达到一定厚度,粉尘在重力和气流吹打的作用下,使粉尘层厚度在一定范围内波动,过滤压力损失因此缓慢增大,曲线趋于平稳。

2.3 入口气体粉尘浓度对过滤压降的影响

在带尘实验时,保持其他因素不变,实验选取入口气体粉尘平均浓度 $1 \sim 10 \text{ g/m}^3$ 之间,过滤层厚度为 100 mm,颗粒层滤料均粒径为 3 mm,过滤时间为 20 min,在不同的过滤风速 0.52, 1.01, 1.17 和 1.65 m/s 条件下测量过滤总压力损失,多次测量取平均值得到粉尘浓度与过滤压力损失的关系曲线如图 5 所示。

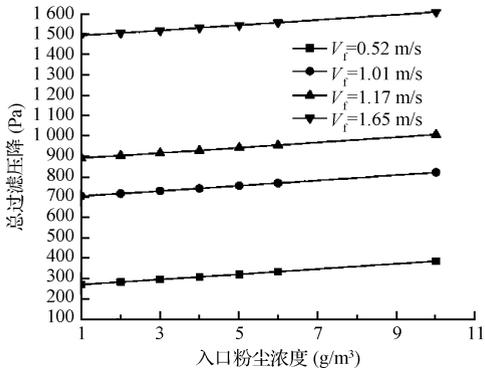


图 5 非稳态过滤压降随入口粉尘浓度变化

Fig. 5 Change of pressure drop with dust concentration under non-stationary condition

由图 5 可知:入口粉尘浓度对颗粒层的过滤压力损失有一定的影响,随着浓度的增加颗粒层压力损失将缓慢增长。这是由于入口粉尘浓度高时,粉尘之间相互碰撞凝成大粒子的趋势强于低浓度粉尘,滑石粉颗粒间也存在这种凝聚现象,当运行结束后对颗粒层进行观察,会发现许多团状的颗粒物凝聚在颗粒层表面。这种凝聚体附着在颗粒层表面上,与小颗粒物相比会堵塞更多的粉尘通道。粉尘浓度低时,可以认为粉尘能逐渐深入滤料内部,不易形成大凝聚物。因此随着粉尘浓度的增加,颗粒层压力损失增大。从图 5 中也看出过滤风速增大时过滤压力损失也随之增加,此现象与图 2 相一致。粉尘颗粒在颗粒层中的沉积机理及其变化规律的有

待进一步深入研究。

3 实验结果的回归分析

3.1 稳态过滤压力损失分析

基于对过滤风速,过滤层厚度和颗粒层滤料平均粒径 3 因素进行分析,可知三者之间交互作用可以忽略。在进行回归分析前首先对影响过滤压降的所有因素进行量纲分析。忽略其他因素,假设过滤压降与以下 6 个变量相关,其函数关系为:

$$P_1 = f(d_p, \rho, V_f, L, \mu, \varepsilon) \quad (1)$$

通过正交实验及回归分析,文献[3]给出稳态过滤时过滤压力降的多元非线性回归关联式为:

$$P_1 = K_1 Re_p^{-0.482} \left(\frac{L}{d_p}\right)^{0.872} \left(\frac{\rho V_f^2}{2}\right) \quad (2)$$

式中: d_p ——颗粒层滤料均粒径, m;

ρ ——流体密度, kg/m^3 ;

V_f ——表观过滤风速, m/s ;

L ——过滤层厚度, m;

μ ——流体粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;

ε ——颗粒层孔隙率;

P_1 ——稳态过滤状态下颗粒层过滤压力损失, Pa;

$K_1 = 77.73$; $Re_p = d_p V_f \rho / \mu$ 。

3.2 非稳态过滤压力损失分析

在过滤后期及过滤粉尘浓度较大时,压力损失是随过滤时间变化的,即属于非稳态过滤过程,此时过滤总压力损失可以表示成稳态过滤时滤料的压力损失和含尘滤料时粉尘颗粒引起的压力损失之和。

$$P_m = P_1 + P_2 \quad (3)$$

在非稳态过滤时,过滤压力损失的增大主要受过滤气体粉尘浓度 C 、过滤时间 t 和表观过滤风速 V_f 的影响,根据文献[4]可假设 P_2 表达式为:

$$P_2 = K_2 C^{n_1} V_f^{n_2} t^{n_3} \quad (4)$$

式(4)两边同时取自然对数使其线性化,并对实验数据进行多元回归,确定系数 K_2, n_1, n_2, n_3 的值,并得到过滤压力损失关于入口粉尘浓度,过滤时间和表观过滤风速的多元回归公式为:

$$P_2 = K_2 C^{1.03} V_f^{0.503} t^{1.161} \quad (5)$$

式中:系数 $K_2 = 5.42$ 。

从回归系数显著性检验可知:回归方程的方差统计量 $F = 10.585$,显著性水平为 0.001,说明回归方程是非常显著的。多元相关系数 R 为 0.852,表明回归效果佳。对回归方程贡献最大的是粉尘浓度项(显著水平为 0.000)。

综合式(2)和式(5)得非稳态过滤总压力损失为:

$$P_m = K_1 Re_p^{-0.482} \left(\frac{L}{d_p}\right)^{0.872} \left(\frac{\rho V_f^2}{2}\right) + K_2 C^{1.03} V_f^{0.503} t^{1.161} \quad (6)$$

式(6)各参数取值范围: $1.0 \text{ m/s} \leq V_f \leq 1.65 \text{ m/s}$; $3 \text{ mm} \leq d_p \leq 5 \text{ mm}$; $20 \text{ mm} \leq L \leq 100 \text{ mm}$; $1 \text{ g/m}^3 \leq C \leq 5 \text{ g/m}^3$; $0 \text{ min} \leq t \leq 30 \text{ min}$; $\varepsilon = 0.43$ 。进行非样本数据检验,80%数据计算结果相对误差在 15% 以内。

对于不同的工业颗粒层过滤过程,由于具体参数取值范围等因素的不同,式(6)中的系数及幂指数的具体数值可能存在差异,需进行修正或通过实验取得。

4 经典理论计算与实验结果对比分析

4.1 除尘器压力损失计算

稳态过滤时,计算颗粒层过滤的压力损失一般用 Ergun 公式^[5],它的无因次化形式:

$$f_0 \left[\frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} \right] = 180(1 - \varepsilon)/Re + 1.8 \quad (7)$$

计算固定床颗粒层过滤压降的 Ergun 公式形式:

$$-\frac{dP}{dL} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu V_f}{\varepsilon^3 (\phi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon) \rho V_f^2}{\varepsilon^3 \phi_s d_p} \quad (8)$$

式中: ϕ_s ——颗粒形状因数,其值可由实验数据计算得到。式(8)是对复杂的多孔介质进行简化及假设,推导得出的过滤压力损失表达式,但其存在一些参数在实际应用中不易确定,其计算值同实际测试值吻合程度较差等缺点。多元关联回归计算式(5)及式(6)利用非周期性函数可用幂函数的形式逼近的数学原理,通过实验得出的经验模型,它具有模型简单实用,可以通过具体实验,方便的确定实验参数,能较好的与实际结果吻合,方便指导实际过滤操作等优点。其缺点是无法提供过滤过程机理及适用性较差。

4.2 公式计算结果分析

为验证颗粒层过滤压力损失多元关联回归计算表达式的正确性,通过非样本数据实验测试及计算与传统的理论推论进行对比分析。

对于稳态过滤,Ergun^[5]的半经验公式(8)与实验值进行对比,对比结果如图 6 所示^[3]。由图 6 可知:在过滤层厚度 $L(20 \sim 100 \text{ mm})$,表观过滤速度 $V_f(1 \sim 1.65 \text{ m/s})$,颗粒层滤料平均粒径 $d_p(3 \sim$

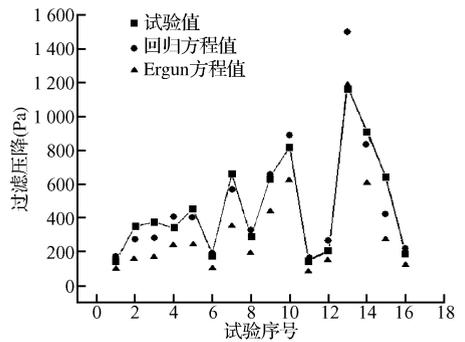


图 6 稳态过滤实验值与回归式计算值对比

Fig. 6 Comparison between experimental result and regress formula

5 mm)的条件下,非线性回归的关联式(6)与试验值基本吻合。与 Ergun 方程计算值的对比看出在试验条件下,回归式(6)更接近试验值。对于非稳态过滤,文献[6]和文献[7]提出用于建立过滤层非稳态过滤压力损失模型的微观分析法和宏观分析法新概念。通过微观分析法和宏观分析法比较,归纳出无论是纤维层过滤,还是颗粒层过滤,所反映的压力损失随过滤时间变化的规律是相同的,其非稳态过滤的压力损失可用统一的综合模型来描述。

将文献[7]计算式和本实验回归关联式(6)及实验测试值进行比较,对比结果如图 7 所示。实验对比条件如表 1 所示。由图 7 可知:回归方程式(6)比文献[7]提出的计算式计算结果更接近本实验的测量值,可能由于实验具体条件不同而造成的。

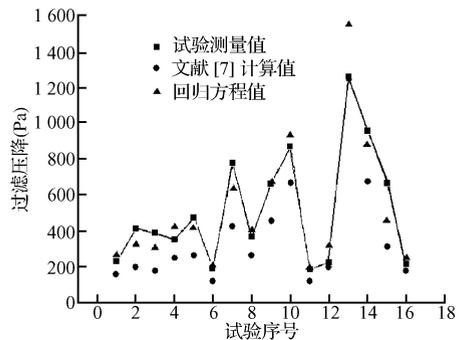


图 7 非稳态过滤实验测量与公式计算值对比

Fig. 7 Comparison between non-stationary experimental result and regress formula

本文提出的颗粒层过滤压力损失计算表达式与文献[7]相比,已包括所有过滤过程主要运行参数,表达式简单、明确,可以预测过滤的清灰周期,以便指导过滤运行操作。

表1 本实验条件与文献实验条件对比表

Table 1 Comparison between experimental condition and that in literature

	床层过滤面积 (m^2)	石英砂平均粒径 (mm)	颗粒层孔隙率	床层厚度 (mm)	过滤速度 (m/s)
本实验条件	0.36	3	0.43	20,40,60,80,100	0.52~1.65
文献[6]实验条件	0.44	2	0.47	30,50	0.5

5 结 论

通过正交实验和回归分析提出了固定床颗粒层稳态和非稳态过滤压力损失与表观过滤速度、过滤层厚度、颗粒层滤料平均粒径、粉尘浓度和过滤时间等5个影响因素的回归关联计算式。

对稳态过滤,在过滤层厚度 L (20~100 mm)、表观过滤速度 u_f (1~1.65 m/s) 和颗粒层滤料平均粒径 d_p (3~5 mm) 的条件下,非线性回归的关联式(2)与试验值基本相符,与 Ergun 方程计算值的对比可知:在试验条件下,回归关联式更接近试验值;对非稳态过滤,将文献[7]提出的计算公式与本文回归关联式计算结果进行比较,结果显示回归关联计算式(6)更符合本实验测量值。过滤总压力损失回归关联式(6)与80%非样本实验测量值及文献数据值偏差在15%以内,可据此关联式对稳态及非稳态时总过滤压力降变化趋势进行预测及确定清灰时间。

参 考 文 献

- [1] Smid J., Hsiau S. S., Peng C. Y., *et al.* Hot gas cleanup: New designs for moving bed filters. *Filtration & Separation*, **2005**, 42(10): 36~39
- [2] Smid J., Hsiau S. S., Peng C. Y., *et al.* Moving bed filters for hot gas clean up. *Filtration & Separation*, **2005**, 42(6): 34~37
- [3] 李阳,付海明,赵友军. 固定床颗粒过滤器的正交实验及回归分析. *能源与环境*, **2007**, (5): 16~17
- [4] Rothwell E. An analysis of fabric dust filtration; Model observation of dust cake formation. *Filtration and Separation*, **1985**, 22(5): 318~324
- [5] Ergun S. Fluid flow through packed columns. *Che. Eng. Prog.*, **1952**, 48(2): 89~94
- [6] 向晓东,幸福堂,等. 颗粒层除尘器过滤状态压力损失的研究. *环境科学学报*, **1997**, 17(1): 100~105
- [7] 向晓东,朱东升,等. 非稳态过滤除尘压力损失的研究. *工业安与环境*, **2002**, 28(9): 5~7