

- [3] Bhattacharyya, D. et al., *J. AlchE*, **19**(4), 766 (1973).
 [4] Bhattacharyya, D. et al., *J. AlchE*, **21**(6), 1057 (1975).

- [5] 吉田高年等, 膜, **5**(4), 257(1980).
 [6] 丸石功, 油化学, **29**(8), 592(1980).
 [7] 桥田勋等, 油化学, **29**(18), 596(1980).
 [8] Staude, E., et al., *Desalination*, **49**, 321(1984).

相似旋风除尘器分离特性的研究

孙一坚 刘建仁

(湖南大学 环境工程系)

旋风除尘器由于结构简单、造价低廉,在不同行业得到广泛应用。据预测,本世纪内我国中小型锅炉的烟气除尘仍将以旋风除尘器为主。由于旋风除尘器内气、固两相流运动的复杂性,它的性能要通过试验确定。旋风除尘器的性能是随运行条件而变化的,因此试验求得的分级效率曲线仅适用于试验的特定工况。不能把冷态的试验结果,直接应用于热态的性能预测,通常必须进行现场的热态测定。例如,1982—1983年机械部、国家环办为了寻求锅炉配用除尘器的最佳配套方案,曾组织大量人力、物力,进行现场热态测定,对不同的旋风除尘器进行评价。由于现场使用条件各不相同,不可能在同样条件下进行比较。因此,必须研究旋风除尘器的相似规律,通过试验求得相似准则之间的函数关系,这样才能把试验的结果推广应用到一切相似的现象中去。

旋风除尘器的分级效率可用下式表示^[1]:

$$\eta_i = 1 - P_d = 1 - \exp[-\alpha d_c^m] \\ = 1 - \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{d_c}{d_{C50}}\right)^m\right] \quad (1)$$

式中, η_i 为分级效率; P_d 为穿透率; d_c 为粒径 (μm); d_{C50} 为效率为 50% 时的临界粒径 (μm); α 为系数 (α 值随工况而改变); m 为系数 (对几何相似的旋风除尘器 $m = \text{常数}$)。

从公式 (1) 可以看出,只要已知任一工况下的 d_{C50} 及该类除尘器的 m 值,即可求得该工况下的分级效率。因此,本研究的实质就是要应用相似理论去寻求不同工况参数与 d_{C50} 之间的关系,以便把特定条件下的试验结果推广应用到其它的实际运行工况。

根据研究,当气流中固体微粒浓度在 100 g/m^3 以下时,旋风除尘器内尘粒运动保持相似的定性准则为 Frc 和 $\text{Stk}^{[2]}$ 。 Frc 是弗鲁德准则,它是反映重力对尘粒运动的影响。试验研究表明,对多数惯性设备,这个因素可以忽略不计。例如湖北工业设计院曾把 XXD/G 型旋风除尘器分别直立和倒立安装进行试验,两者的除尘效率仅相差 0.65%。

Stk 是斯托克斯准则,它是反映粘性力对尘粒运动的影响。

$$\text{Stk} = \frac{d_c^{2+1} \rho_c \rho^{n-1} v_j^{n[2]}}{C' \mu^n R_0} \quad (2)$$

式中, ρ_c 为尘粒密度 (kg/m^3); ρ 为气体密度 (kg/m^3); v_j 为除尘器进口风速 (m/s); μ 为气体粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); R_0 为除尘器半径 (m); C' 、 n 为与尘粒运动的雷诺数 Rec 有关的系数。

$$\text{Rec} = \frac{\rho v d_c}{\mu} \quad (3)$$

式中 v 为尘粒与气流的相对运动速度 (m/s)。

公式(2)中包含有粒径 d_c 。严格讲,此准则只适用于单一粒径的气流。但在实际工程中,气流中的尘粒几乎都有很广的粒径分布。分析表明,将准则中的粒径用某一特性粒径代替,就可以模拟多种粒径的尘粒在气流中的运动规律^[2]。

如果我们用 d_{C50} 代替 d_c ,对公式(2)进行适当变换,可得下式:

$$\frac{d_{C50}}{R_0} = A \left(\frac{\mu}{v_j R_0} \right)^{\frac{n}{n+1}} \left(\frac{1}{\rho_c} \right)^{\frac{1}{1+n}} \rho^{\frac{1-n}{1+n}} \quad (4)$$

式中, A 为系数(对几何相似的旋风除尘器 $A = \text{常数}$)。

C' 、 n 与 Rec 的关系如下^[2]:

$$\begin{aligned} Rec \leq 1 & \quad n = 1 & \quad C' = 24 \\ Rec = 1-50 & \quad n = 0.725 & \quad C' = 23.4 \\ Rec = 50-700 & \quad n = 0.425 & \quad C' = 7.8 \\ Rec > 700 & \quad n = 0 & \quad C' = 0.48 \end{aligned}$$

经我们的分析计算,在工程上常用的旋风除尘器内,大部分尘粒的 Rec 是处于 1—50 之间。当 $Rec = 1-50$ 时, $n = 0.725$, 因此公式(4)应改写为:

$$\frac{d_{C50}}{R_0} = A \left(\frac{\mu}{v_j R_0} \right)^{0.42} \left(\frac{1}{\rho_c} \right)^{0.58} \rho^{0.16} \quad (5)$$

当气体温度 $t = 20 \sim 300^\circ\text{C}$ 时, $\rho^{0.16} \approx 1.02-0.93$, 近似认为 $\rho^{0.16} \approx 1.0$ 。因此上式可简化为:

$$\begin{aligned} \frac{d_{C50}}{R_0} &= A \left(\frac{\mu}{v_j R_0} \right)^{0.42} \left(\frac{1}{\rho_c} \right)^{0.58} \\ &= A \left(\frac{\mu}{v_j R_0 \rho_c} \right)^a \left(\frac{1}{\rho_c} \right)^b \quad (6) \\ a &= 0.42 \quad b = 0.16 \end{aligned}$$

公式(6)是 $Rec = 1-50$ 时相似旋风除尘器的基本关系式。考虑到实际旋风除尘器内气流运动的复杂性,如存在局部涡流;尘粒之间和尘粒与筒壁之间会发生碰撞;锥体底部会发生返混等,这些因素在公式(6)的推导过程中都未加考虑。而且实际旋风除尘器内尘粒的 Rec 并不全部都处于 1—50 之间。因此,上述关系式中的 a 和 b 值还需通

过试验加以验证和完善,以便公式(6)能应用于工程实际。

为此我们采用两组不同的相似旋风除尘器,每组有三种直径,在冷热态下分别用三种不同的粉尘进行试验,测出除尘器的全效率、分级效率、 d_{C50} 。我们把这两组除尘器分别称为 I 型和 II 型。最后把数据按公式(1)和(6)的形式进行整理。经过回归分析,

$$\text{I 型} \quad A_1 = 0.3304 \quad a_1 = 0.452 \quad b_1 = 0.236$$

$$\text{II 型} \quad A_{11} = 0.4010 \quad a_{11} = 0.446 \quad b_{11} = 0.253$$

由于除尘器分级效率测定的复杂性,以及试验数据需经过多次处理,两组除尘器的 a 、 b 值稍有不同也是必然的。实测值与理论值较为接近。我们把 I 型和 II 型的平均值作为最终的结果,这样 $a = 0.45$ $b = 0.245$

公式(6)应改写为:

$$\begin{aligned} \frac{d_{C50}}{R_0} &= A \left(\frac{\mu}{v_j R_0} \right)^{0.45} \left(\frac{1}{\rho_c} \right)^{0.695} \\ &= A \left(\frac{\mu}{v_j R_0 \rho_c} \right)^{0.45} \left(\frac{1}{\rho_c} \right)^{0.245} \quad (7) \end{aligned}$$

公式(7)是相似旋风除尘器的基本关系式,它对冷、热态都适用。通过公式(7),只要有了冷态试验得出的某一工况下的分级效率表达式,即可推算出在其它任何工况下(包括热态)的性能。

例如, I 型直径 $D = 700 \text{ mm}$ 的旋风除尘器用于锅炉烟气除尘。经实测除尘器进口处烟气温度 $t = 122^\circ\text{C}$, 除尘器处理风量 $L = 2986 \text{ m}^3/\text{h}$, 烟尘真密度 $\rho'_c = 1730 \text{ kg}/\text{m}^3$, 除尘器进口处烟尘的粒径分布如表 1 所示:

表 1 烟尘的粒径分布

粒径范围 (μm)	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	>50
质量百分数 $d\phi(\%)$	16	19	14	10	7	34

除尘器进口风速 $v'_j = 16.93 \text{ m/s}$, 烟气粘度 $\mu' = 22.93 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。现以 I 型在除尘器直径 $D = 300 \text{ mm}$ 、进口风速 $v_j = 18 \text{ m/s}$ 、

空气温度 $t = 28^{\circ}\text{C}$ 、空气粘度 $\mu = 18.62 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 、粉尘真密度 $\rho_c = 2730 \text{kg/m}^3$ 的试验工况为基准, 计算上述除尘器的全效率, 并与实测结果相比较。

在试验工况下, 试验求得的穿透率表达式为:

$$P_d = \exp[-0.74d_c^{0.62}]$$

令 $P_d = 0.5$, 该工况下的临界粒径

$$d_{c50} = (\ln 2 / 0.74)^{0.62} = 0.9 \mu\text{m}.$$

根据公式 (7), 试验工况:

$$\frac{d_{c50}}{R_0} = A \left(\frac{\mu}{v_j R_0 \rho_c} \right)^{0.45} \left(\frac{1}{\rho_c} \right)^{0.245}$$

现场运行工况:

$$\frac{d'_{c50}}{R'_0} = A \left(\frac{\mu'}{v'_j R'_0 \rho'_c} \right)^{0.45} \left(\frac{1}{\rho'_c} \right)^{0.245}$$

把上列两式相除:

$$\begin{aligned} d'_{c50} &= d_{c50} \left(\frac{R'_0}{R_0} \right) \left(\frac{\mu' v_j R_0 \rho_c}{\mu v'_j R'_0 \rho'_c} \right)^{0.45} \left(\frac{\rho_c}{\rho'_c} \right)^{0.245} \\ &= 0.9 \left(\frac{0.35}{0.15} \right) \\ &\quad \times \left(\frac{22.93 \times 10^{-6} \times 18 \times 0.15 \times 2730}{18.62 \times 10^{-6} \times 16.93 \times 0.35 \times 1730} \right)^{0.45} \\ &\quad \times \left(\frac{2730}{1730} \right)^{0.245} = 2.23 \mu\text{m} \end{aligned}$$

$P_d = 0.5$ 时,

$$\text{试验工况: } 0.5 = \exp[-\alpha d_{c50}^{0.62}]$$

$$\text{现场运行工况: } 0.5 = \exp[-\alpha' d'_{c50}{}^m]$$

$$\begin{aligned} \alpha' &= \alpha \left(\frac{d_{c50}}{d'_{c50}} \right)^m = 0.74 \left(\frac{0.9}{2.23} \right)^{0.62} \\ &= 0.42 \end{aligned}$$

因此, 现场运行工况下的除尘器穿透率表达式为:

$$P'_d = \exp[-0.42d_c^{0.62}]$$

根据上式及表 1 的烟尘粒径分布, 计算该除尘器的全效率。计算过程见表 2。

在现场实测的除尘器全效率

$$\eta_q = 91.25\%$$

计算值和实测值的相对误差

$$\Delta\eta = \frac{91.9 - 91.25}{91.25} = 0.7\%$$

表 2 全效率的计算

粒径范围 (μm)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	>50
平均粒径 (μm)	5	15	25	35	45	
穿透率 $P_d(\%)$	32.1	10.6	4.8	2.3	1.2	0
分级效率 $\eta_i(\%)$	67.9	89.4	95.2	97.7	98.8	100
烟尘粒径分布 $d\phi_i(\%)$	16	19	14	10	7	34
$\eta_i d\phi_i(\%)$	10.86	16.99	13.36	9.77	6.92	34
全效率 $\eta_q(\%)$	$\eta_q = \sum \eta_i d\phi_i = 91.9$					

为了进一步验证公式 (7) 的可靠性和实用性, 我们曾进行多方面的校核计算。

1. 对我们试验研究的 44 个试验工况进行校核计算, 计算全效率和实测值的标准偏差 $\sigma = 1.3\%$ 。

2. 用外单位的试验数据进行校核计算。

(1) 上海化工研究院在直径 $D = 830 \text{mm}$ 、进口风速 $v_j = 26.4 \text{m/s}$ 、粉尘真密度 $\rho_c = 2720 \text{kg/m}^3$ 、常温的工况条件下, 得出 D_1 型旋风除尘器的分级效率表达式为

$$\eta_i = 1 - P_d = 1 - \exp[-0.365d_c^{0.605}]$$

其它条件不变, 计算在 $v_j = 16.53 \text{m/s}$ 时的全效率。

根据计算, 新工况下的分级效率表达式为

$$\eta'_i = 1 - P'_d = 1 - \exp[-0.32d_c^{0.605}]$$

计算的全效率 $\eta'_q = 83.19\%$, 上海化工研究院的实测值 $\eta_q = 82.5\%$ 。两者的相对误差

$$\Delta\eta = \frac{82.5 - 83.19}{82.5} = 0.84\%$$

(2) 北京煤矿设计院在常温下用煤粉对 XLP/GII 型除尘器进行试验, 在 $v_j = 4.62 \text{m/s}$ 时, 其分级效率表达式为:

$$\eta_i = 1 - P_d = 1 - \exp[-0.339d_c^{0.747}]$$

其它条件不变, 计算 $v_j = 5.54 \text{m/s}$ 时的全效率。

根据计算, 新工况下的分级效率表达式为:

$$\eta_i' = 1 - P_d' = 1 - \exp[-0.36d_c^{0.747}]$$

计算的全效率 $\eta_a' = 90.81\%$, 北京煤矿设计院的实测值 $\eta_a = 90.4\%$ ^[3]。两者的相对误差

$$\Delta\eta = \frac{90.81 - 90.4}{90.4} = 0.44\%$$

上面从三个方面对相似旋风除尘器基本关系式进行了验算。验算结果表明, 无论是实验室试验, 还是工程应用; 无论是自己的试验数据, 还是外单位的试验数据, 计算值和实测值均很相近。这说明相似旋风除尘器基本关系式可以应用于工程实际。

相似旋风除尘器基本关系式的应用。

1. 应用相似特性可评价不同旋风除尘器的性能。不同型号的旋风除尘器如何进行性能评价, 是工程界很关心的问题。应用本文提出的关系式, 在冷态试验的基础上, 即可对不同型号旋风除尘器的冷、热态性能进行评价。

2. 在冷态试验的基础上, 可直接预测该类型除尘器在任何运行工况下的性能。这样可省去大量的现场测定工作, 加快科研工作的进程。

3. 使用者根据研制单位给出的某一特定工况下的分级效率曲线(或表达式), 可以较精确地选出满足工艺或排放标准要求的除尘

(上接第 74 页) 然后在此电解液中准确加入 1 ml 硫代硫酸钠, 然后加 5 ml 样品溶液, 滴定至终点, 所需时间为 t_2 , 按上述公式算出样品中的溶解氧。从表 2 可以看出本库仑法与标准法所测得的结果是一致的。

5. 方法的精密性

我们采用了经过长时间放置的各种水样, 北海水, 昆明湖水, 陶然亭水以及青龙桥和后海水样的混合样品测定了方法的标准偏差。其结果见表 3。从表 3 可以看出该方法的标准偏差小于 1%, 因此该法是比较理想的方法。

器。避免粗略地估计。

结 论

1. 通过理论分析和试验研究所导出的相似旋风除尘器基本关系式, 适用于在冷、热态工况下运行的、不同类型的相似旋风除尘器。

2. 通过相似旋风除尘器基本关系式, 设计者只要有了模型除尘器在冷态下试验求得的分级效率表达式, 即可推算出该系列不同尺寸的旋风除尘器应用于不同工况(包括热态)时的性能。这样可以避免大量的现场实测工作量, 直接预测出除尘器的性能。这就为新型除尘器的研制、不同型号除尘器的评价和旋风除尘器的选择计算提供极大的方便。

3. 今后在研制新的旋风除尘器时, 最好把试验数据整理成下列分级效率方程式:

$$\eta_i = 1 - P_d = 1 - \exp[-ad_i^m]$$

同时说明试验研究的具体条件。这样使用者就可以根据相似旋风除尘器基本关系式, 推算出在其它工况下使用时的性能。

参 考 文 献

- [1] [日]通商产业省公害保安局主编, 李金昌译, 除尘技术, 6 页, 中国建筑工业出版社, 1977 年。
- [2] 李之光编著, 相似与模化(理论及应用), 203—214 页, 国防工业出版社, 1982 年。
- [3] 郑德临, XLP/GII 型旋风除尘器试验研究, 通风除尘, 1, 38(1985)。

参 考 文 献

- [1] 成田荣一, Han Kook-Nam, Lawson Frank! 日本化学会誌, 3, 530(1982)。
- [2] Oesson Bo, Ögren Lars and Johansson Gillis, *Anal. Chim. Acta*, 145, 101(1983)。
- [3] A. И. Захаров, И. Т. Гримеева, *Ж. Аналит. Химии*, 37(10), 1753(1982)。
- [4] Griffiths, S. V., Jackman, I. M., *Talanta*, 9, 205(1962)。
- [5] 廖明; 仰蜀薰, 分析化学, 11(3), 207(1983)。
- [6] Keidel, A. F., *Industrial and Engineering Chemistry*, 52(6), 490(1960)。
- [7] И. А. Костромин, Ф. И. Абдуллин, Л. А. Дмитриев, З. Т. Бадретдинова, *Ж. Аналит. Химии*, 36(5), 884(1981)。
- [8] Karlsson Ronald, Torstensson Lars-Gunnar, *Talanta*, 21, 957(1974)。