

扩展式旋风静电除尘器空气粉尘 驱进速度的计算^{*}

郭金基

(中山大学应用力学与工程系, 广州 510275)

张康治 王国基

(广东英龙水泥厂)

摘 要 阐述扩展式旋风静电除尘器的降尘机理, 描述空气粉尘的荷电过程, 研究荷电粉尘的受力和运动规律, 建立气流粉尘的动力学方程, 计算粉尘的驱进速度, 并讨论介质阻力系数对驱进速度的影响, 最后给出在工业除尘的应用实例。

关键词 扩展式旋风分离器, 静电除尘器, 空气粉尘, 驱进速度

分类号 TB 12.X5

静电除尘器是依靠电力作用清除气体中悬浮的粉尘微粒(质点)的装置, 在工业降尘中应用类型较多, 主要有复合型厢式、水平板式电除尘器和旋风分离器与电收尘器串连的组合装置^[1]等; 最近还研制出“单管多层电场除尘装置^[2]”。这些装置未见对其内部流场结构进行分析, 以致未能充分利用流体分离机械的功能; 并且大多数设备体积大, 钢材用量多。针对上述情况, 本文研究一种新型的电除尘器, 即在扩展式旋风分离器内套装多层电场, 实现旋流惯性离心力和重力沉降除尘以及高压静电除尘。

1 静电除尘器的电压、电流方程和尘粒的荷电

扩展式旋风静电除尘器结构如图 1 所示。在分离器内设置圆形电晕线遍布外筒体内壁附近, 平行于壁面并与壁面同心的圆周上等间距分布; 电晕线为负极, 外壁面(圆锥或筒体)为正极组成高压静电场。由于同心圆半径较大, 曲率较小, 这电场可近似为板-线式结构, 正、负电极间距为 b , 电晕线间距为 a 。应用微扰理论, 板-线式电场电压、电流简化方程可写为^[3]

$$i = \frac{4\pi X_0 k}{b^2 \ln(d/r_a)} U^\circ (U - U_0) \quad \text{A/m} \quad (1)$$

式中 U 为两极间的电压, 单位 V; U_0 为始发电晕电压, 单位 V; r_a 为电晕线半径, 单位 m; k 为混合气体离子迁移率, 单位 m^2/Vs ; X_0 为真空中的介电常数, $f_0 = 1/4\pi X_0 \approx 9 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ (C 为库仑); 始发电晕电压又可表为:

$$U_0 = r_a^\circ E_0 \ln(d/r_a) \quad \text{V/m} \quad (2)$$

式中 d 是依据 b/a 比值决定的参数, 查阅文献 [3] 图 6-6 E_0 为始发电晕电场强度,

当 $b/a = 0.6 \sim 2$ 时, 在收尘极附近电场强度可以近似表为:

* 广东省自然科学基金资助项目
收稿日期: 1995-07-22 郭金基, 男, 57岁, 教授

$$E_c = \frac{ib}{\pi X_0 ak} \quad V/m \tag{3}$$

尘粒的荷电是电除尘过程中最重要的环节,荷电量的大小与尘粒粒径,电场强度及停留时间等因素有关。尘粒的荷电包括电场荷电和扩散荷电两种方式,对于粒径大于 $0.5 \mu\text{m}$ 的尘粒,电场荷电是主要的。所谓电场荷电是指在电场作用下离子沿电力线与尘粒碰撞粘附其上并将电荷传给尘粒。如图 2 所示,介电常数 $1 < X < \infty$ 的尘粒将引起电力线的畸变,此时有更多的离子被尘粒所吸引。随着尘粒电荷的增加,电场的畸变将减小,当没有电力线拦截尘粒运动时,尘粒的荷电将达到饱和状态。尘粒电场荷电表面的饱和电荷量^[3]可按下式计算:

$$q_{\infty} = 4 X_0 D_0 E_{D_0} a_s^2 \tag{4}$$

式中 $D_0 = 3X/(X+2)$, X 为尘粒相对介电常数; E_{D_0} 为未变形前的电场强度,单位 V/m ; a_s 为尘粒的半径。

2 荷电尘粒运动的微分方程和驱进速度

欲建立荷电尘粒的运动微分方程,必须分析它所受的作用力。在扩展式旋风除尘器内设置高压静电场,需了解其内部的流场结构。文[4]实测扩展式旋风除尘器内的速度模型,气流粉尘沿切向进入圆筒体后,以高

图 1 扩展式旋风静电除尘器示意图
Fig. 1 The signal figure of the spreading cyclone separator with electrostatic precipitator

速沿 180° 渐开线向下旋转,切向速度 w 在中心区以外区域按半径 r 负幂次律变化,朝壁面方向迅速衰减。当尘粒相对气流的速度较小和尘粒很微小 ($\alpha < 1$) 时,尘粒在气流中相对运动的雷诺数 $Re_t < 1$; 在此条件下,微细尘粒遇到的阻力适应于 stokes 阻力定律范围,径向速度 w_r 可表示为:

$$w_r = \frac{4(d - d_0)}{18} \cdot \frac{w^2}{r} \cdot a_s^2 \tag{5}$$

式中 μ 为粉尘气流(混合气体)的动力粘性系数; d 为尘粒的密度; d_0 为气流的密度。

图 2 尘粒的荷电过程

Fig. 2 The carry electricity process of the dust

旋转粉尘气流进入电场区,是受有离心惯

性力(与向心加速度 w^2/r 方向相反)作用的. 当 $Ret < 1$ 时, 从 (5) 式可以看出它与 w 成线性关系. 事实上, 设尘粒为球形, 体积为 $(4/3)\pi a_s^3$, 其离心惯性力为 $(4/3)\pi a_s^3 (d - d_0) w^2 / r$. 将 (5) 乘以 $\alpha_{-} a_s$ 后, 它正等于 $\alpha_{-} a_s w$. 为考虑尘粒受电场作用及形状变化等因素, 离心惯性力表为 $\alpha_{-} \alpha_{-} a_s r$ (α_{-} 为物理常数) 为宜. 荷电尘粒在流场中运动, 在 r 方向还受有粘滞力作用, 当 $Ret < 0.5$ 时, 文 [3] 指出它可以表为 $\alpha_{-} a_s w$. 离心惯性力抵消了它的一部分作用; 将它们合并记为 F_z ; 可写为:

$$F_z = C_d \alpha_{-} a_s w \quad (6)$$

式中 $C_d = 1 - \alpha_{-}$ 称为阻力系数, 由实验确定.

在负电晕情况下, 大量荷电尘粒都带负电荷, 向收尘极方向运动, 所受的静电力为:

$$F_e = E_c \cdot q_{es} \quad (7)$$

式中 E_c 为电场强度, 单位 V/m ; q_{es} 为尘粒的饱和荷电量, 单位 C .

依据荷电尘粒在 r 向的作用力 (见图 3), 设在此方向运动速度为 w_r , 尘粒的质量为 m , 应用牛顿第二定律可得尘粒运动的微分方程为:

$m \frac{dw_r}{dt} = E_c \cdot q_{es} - F_z$. 将 (6), (7) 式代入此式, 经化简移项后得:

$$\frac{dw_r}{dt} + \frac{\alpha_{-} C_d a_s}{m} \cdot w_r = \frac{q_{es}}{m} \cdot E_c \quad (8)$$

当电晕极位于扩展式旋风分离器内 $r = r_0$ 时, 由于旋动的尘粒在 r 向是有初始速度的, 可用 (5) 式表示, 即:

图 3 荷电尘粒所受的作用力

$$\text{当 } t = 0 \text{ 时, } w_r = \frac{4(d - d_0)}{18} \cdot \frac{w_0^2}{r_0} \cdot a_s^2 \quad (9)$$

ig. 3 The acting force of the carrying electricity dust

式中 w_0 为 $r = r_0$ 位置上粉空气流的切向速度.

荷电尘粒所受的电场力主要沿着 r 方向的条件下, 它在 z 方向受有重力 F_g , 浮力 F_{iz} , 粘滞力 F_z 作用如图 3 所示, 假设它们处于平衡状态, 即: $F_g - F_{iz} - F_z = 0$, 此时, 可忽略尘粒在 z 方向的运动.

求解微分方程 (8) 并利用初始条件 (9), 可得:

$$w_r = \frac{q_{es}}{\alpha_{-} C_d a_s} \cdot E_c \left[1 - \exp\left(\frac{-\alpha_{-} C_d a_s}{m} \cdot t\right) \right] + \frac{4(d - d_0)}{18} \cdot \frac{w_0^2}{r_0} \cdot a_s^2 \quad (10)$$

令 $\tau = \frac{m}{\alpha_{-} C_d a_s}$, 称 τ 为尘粒运动的时间常数. 当 $t > 5\tau$ 时, 上式方括号内 $\exp(-t/\tau)$ 项近似为 0. 由于尘粒质量 m 十分微小, 时间常数 τ 为一小量, 通常当 $t > 10^{-2} s$ 时, 已满足大于 5 倍时间常数的条件, 则 (10) 式可写为:

$$w_r = \frac{q_{es}}{\alpha_{-} C_d a_s} \cdot E_c + \frac{4(d - d_0)}{18} \cdot \frac{w_0^2}{r_0} \cdot a_s^2 \quad (11)$$

从物理意义上, 荷电尘粒在电场力作用下向收尘极运动; 随着时间 t 的增加, 尘粒所受的静电力和介质阻力 (含粘滞力和离心惯性力) 作用达到平衡状态, 此时荷电尘粒向收尘极作等速运动, 此速度称为驱进速度; (11) 式即为驱进速度表达式.

将 q_{es} 的 (4) 式代入 (11) 式, 并令荷电区电场强度 E_c 等于电场未畸变前的电场强度 E_0

(亦等于收尘区的电场强度^[3]);当采用国际单位制时,上式右边第一项写成 $(2/3)^\circ (1/4 X_0)^\circ (X_0 D a_s^\circ E_c^2 / C d^\circ _)$,若 $D=2$,其近似等于 $0.11 a_s^\circ E_c^2 / C d^\circ _ \times 10$,于是驱进速度可用下式计算:

$$u_r = \frac{0.1 K a_s^\circ E_c^2}{C d^\circ _ \times 10} + \frac{4(d_a - d_b)}{18} \cdot \frac{w_0^2}{r_0} a_s^2 \quad (12)$$

式中 E_c 采用静电单位 (esu), $1 \text{ equ} \approx 3.0 \times 10^4 \text{ V/m}$; $_$ 采用 $\text{Pa}^\circ \text{s}$ 单位.

3 计算实例与讨论

文 [3] 用板式电除尘器处理硫酸生产的烟气.作为实例,本文用扩展式旋风静电除尘器处理同一问题,以便进行比较.

实例 处理硫酸生产的电除尘器烟气主要特性如下^[3]:

处理烟气量 $5700 \text{ Nm}^3/\text{h}$;操作温度:进口 370°C ,出口 300°C ;操作压力 -2000 Pa ;

烟气粉尘成分 (%) SO_2 10.74, SO_3 0.107, O_2 5.893, N_2 75.43, H_2O 7.83

粉尘粒度半径 (μm) 20~15 15~10 10~8 8~6 6~4 4~2 <2

粉尘重量百分数 (%) 2.2 4.6 2.6 14.1 27.9 41.5 7.1

工作电压 50 kV ;电晕极与收尘极间距 $b=150 \text{ mm}$;电晕线间距 $a=200 \text{ mm}$;电晕线半径 $r=1.25 \text{ mm}$.试计算扩展式旋风静电除尘器驱进速度 w 并与板式电除尘器结果比较.

计算过程如下:

(1) 烟气的相对密度和粉尘的密度.烟气应满足状态方程

$$\frac{p_0}{d_0 t_0} = \frac{p_t}{d_t T_t} \text{, 则 } W = \frac{d_t}{d_0} = \frac{T_0}{T_t} \cdot \frac{p_t}{p_0} \quad (13)$$

称 W 为烟气的相对密度.在常温常压下, $t_0=25^\circ\text{C}$, $T_0=298 \text{ K}$, $p_0=0.1 \text{ MPa}$, 烟气密度 $d_0 \approx 1 \text{ kg/m}^3$;现处理烟气温度 $t=(370+300)/2=335^\circ\text{C}$, $T_t=608 \text{ K}$, 压力为 -2000 Pa , $d=98 \text{ kPa}$, 代入 (13) 式得 $W = d/d_0 = 0.48$, $d = 0.48 \text{ kg/m}^3$.

烟气粉尘由 SO_2 , SO_3 , O_2 , H_2O 及 N_2 组成,其平均分子量记为 M ;将组成各自的成分及分子量代入计算得 $M=31.37$.水的分子量 $M_{\text{H}_2\text{O}}=18$, $t=25^\circ\text{C}$, 标准大气压时 $d_{\text{H}_2\text{O}}=1000 \text{ kg/m}^3$;同温、同压、同体积条件下,粉尘的密度 $d_0=(M/M_{\text{H}_2\text{O}})^\circ d_{\text{H}_2\text{O}}=1743 \text{ kg/m}^3$.当温度从 25°C 升高到 335°C 时,假设相对密度 W 表达式 (13) 仍适用,可得 $d=0.48 \times d_0=836.6 \text{ kg/m}^3$.

(2) 烟气的粘度及烟气离子迁移率.烟气的粘度随着粉尘的成份不同和温度升高而改变,由文 [3] 已算出 $t=335^\circ\text{C}$ 时, $__{\text{SO}_2}$, $__{\text{SO}_3}$, $__{\text{O}_2}$, $__{\text{H}_2\text{O}}$, $__{\text{N}_2}$, 然后算出混合烟气的粘度 $_ = 2.9 \times 10^{-5} \text{ Pa}^\circ \text{s}$.烟气离子迁移率经文 [3] 计算得 $k=2.69 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V}^\circ \text{s}$.

(3) 电场的电流与电压.依据电晕极与集电极间距 $b=150 \text{ mm}$,电晕极间距 $a=200 \text{ mm}$, $b/a=0.75$,查文 [3] 图 6-6 得 $d/a=1.5$, $d=300 \text{ mm}$, 临界电场强度^[3] $E_0=33.59 \times 10^3 \text{ V/cm}$ 及 $r_a=0.125 \text{ cm}$ 代入 (2) 式得始发电晕电压 $U_0=23.0 \times 10^3 \text{ (V)}$.已知 $U=50 \times 10^3 \text{ V}$; $_ X_0 = \frac{1}{9 \times 10^9} C^2 / N^\circ \text{ m}^2$; b, k, d, r_a 及 U_0 代入 (1) 式得 $i=3.27 \times 10^{-4} \text{ (A/m)}$.将 $_ X_0$, k, b, a 及 i 代入 (3) 式得 $E_c=6.038 \text{ (esu)}$

(4) 驱进速度. (12) 式右边第一项记为 u_r^* , 第二项记为 u_r^0 , 将 $_$, E_c 代入得:

$$u_r^* = \frac{0.1 K (6.038)^2}{C d^\circ _ \times 10} \times 10^6 a_s (\text{m/s}) = \frac{1.383 \times a_s}{C d} (\text{cm/s})$$

当 C_d 选取为 1 时, u_r^* 即为板式电除尘器的驱进速度,但在文 [3] 本算例 $b/a=1.5$,查图 6-6 得 $d/a=3.5$, $d=350$ mm, 导致 U_0, i, E_c 结果有错, 计算 $u_r^* = 1.30 \times a_s$ (cm/s), 误差 6.2%.

扩展式旋风分离器 $w=5.41$ m/s, $r=1.45$ m, 并将尘粒的密度 d , 烟气的密度 d_b 及粘度 μ , 一并代入 (12) 式得:

$$u_r^0 = \frac{4 \times (836.6 - 0.48) \times (5.41)^2}{18 \times 2.9 \times 10^{-5} \times 1.45} \times 10^{-12} a_s^2 = 1.293 \times a_s^2 \text{ (cm/s)}$$

把 u_r^* , u_r^0 并入 (13) 式得扩展式旋风静电除尘器的驱进速度:

$$u_r = \frac{1.383}{C_d} \cdot a_s + 0.01293 \times a_s^2 \quad \text{(cm/s)} \quad (14)$$

式中 a_s 采用 μm 为单位

本算例给出不同半径的粉尘, 用板式及扩展式旋风电除尘器计算驱进速度结果 (表 1).

表 1 不同半径的粉尘的驱进速度

Tab. 1 The drive velocity of the different radii dust

粉尘平均半径 $a_s, \mu\text{m}$	17.5	12.5	9	7	5	3	1
板式电除尘器驱进速度 u_r^*	24.2	17.29	12.45	9.68	6.92	4.15	1.38
(14) 式 $C_d=1$							
计算驱进速度 $u_r / \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	28.17	19.31	13.50	10.31	7.24	4.27	1.39

按不同半径粉尘所占的重量百分数 W_i (已知) 和按不同半径粉尘的驱进速度 u_{r_i} (表 1) 可用下式计算粉尘的平均驱进速度:

$$\bar{u}_r = \sum_{i=1}^n \frac{W_i u_{r_i}}{100} \quad (15)$$

将表 1 不同半径粉尘的 u_r^* 代入 (15) 式得, $\bar{u}_r^* = 6.77 \text{ cm/s}$ (文 [3] 计算有错得 6.35 cm/s), 将表 1 不同半径粉尘的 u_r 代入 (15) 式得 $\bar{u}_r = 7.203 \text{ cm/s}$.

从 (14) 式可看出, 介质阻力系数 C_d 对驱进速度有明显影响, 扩展式旋风分离器的粘滞力与离心惯性力是同时作用在 r 方向抵消一部分相互作用, (见 (6) 式), 阻力系数 C_d 要由实验确定, 通常取小于 1. 本文选取不同的阻力系数 C_d 考察它对驱进速度的影响, 按不同半径的粉尘由 (14) 式计算驱进速度 u_r , 并按不同半径的粉尘所占的重量百分比 w_i (已知) 代入 (15) 式计算平均的驱进速度 \bar{u}_r 列于表 2.

表 2 不同阻力系数 C_d 对粉尘的平均驱进速度的影响

Tab. 2 The influence of different resistance factor on the average drive velocity of the dust

阻力系数 C_d	1	0.95	0.9	0.88	0.85
平均驱进速度 $\bar{u}_r / \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	7.203	7.67	7.96	8.12	8.40

从表 2 看出, 当阻力系数从 1 降低到 0.85 时, 平均驱进速度从 7.2 cm/s 升高到 8.4 cm/s , 上升 14.3%; 当 $C_d=0.85$ 时, 平均驱进速度 $\bar{u}_r = 8.40 \text{ cm/s}$, 比板式电除尘器平均驱进速度 $\bar{u}_r^* = 6.77 \text{ cm/s}$ 提高 19.4%, 由此看出扩展式旋风电除尘器对除尘效率有显著的提高.

从上述驱进速度方程的推导和算例, 讨论如下:

(1) 扩展式旋风静电除尘器驱进速度微分方程 (8) 是假设粉尘相对气流的雷诺数 $Re_t < 0.5$ 条件下导出的. 当 $Re_t > 0.5$ 时, 粉尘所受的粘滞力 $F_z = C_s \rho_a u_r^2 / 2$, 式中 C_s 为阻力系数, ρ_a 为气体的密度; 由此建立的尘粒运动微分方程是非线性的. 要寻求其解析解是困难的, 可用 Runge-Kutta 法或其它数值方法求解.

(2) 考察粉尘受力情况假设 z 方向受重力, 浮力及粉滞力作用处于平衡, $u_z = 0$. 但若 z 向受力不平衡, 必须列出 z 方向运动微分方程, 求出速度 u_z . 此时扩展式旋风分离器内尘粒运动的速度是由 u_r 和 u_z 合成, 且尘粒所受作用力方向的改变造成对运动微分方程的影响.

(3) 由于电场的均匀性, 荷电尘粒还受到电场空间位置变化而产生的所谓梯度力作用, 在建立方程 (8) 时未予考虑. 这种力在电场梯度大的电晕线附近特别大, 使粉尘吸附在电晕线上, 对除尘效果是不利的. 它与电晕线形状有关, 解决的方法是选择合理形状的电晕线, 减少电场梯度变化.

(4) 以上驱进速度 u_r 是理论算式. 在实用上除考虑烟气的成分、粘度、湿度、含尘浓度、尘粒直径及化学成份外, 还应考虑比电阻及内部结构等因素影响, 因而采用所谓有效的驱进速度. 它是电除尘器设计中最有价值的诀窍参数^[3]. 但要各种因素考虑进去精确地计算它是困难的. 各有各自的计算方法, 并且都根据中间试验和现场测试加以验证.

本文首次计算扩展式旋风分离器设置静电场的尘粒驱进速度, 并研究介质阻力系数的影响, 有独到的见解. 所计算的驱进速度在扩展式旋风电除尘器的设计中, 作为主要参数得到应用. 这种除尘器实现旋流离心惯性力分离和高压静电除尘, 已申请获得了国家专利, 具有重要的实用价值.

参 考 文 献

- 1 大野长太郎. 除尘、收尘理论与实践. 单文昌译. 北京: 科技文献出版社, 1982
- 2 罗家源. 单管多层电场除尘装置. 实用新型专利. ZL93235115. 8 1994, 8
- 3 冯伯华主编. 化学工程手册 (5). 北京: 化学工业出版社, 1989. 21~ 273
- 4 郭金基. 扩展式旋风分离器的性能计算. 中山大学学报 (自然科学版), 1987, (3): 30~ 35

Theoretical Computation of Driving Velocity of the Air Dust Concerning Spreading Cyclone Separators with Electrostatic Precipitator

Guo Jinji* Zhang Kangzhi Wang Guoji

Abstract The laying dust mechanism of the spreading cyclone separators with electrostatic precipitator is presented. The carry electricity process of the dust is described. The paper studies acting force and movement law of the carrying electricity dust, and sets up hydromechanics equation of the air dust. The driving velocity of the air dust is calculated and the influence of different resistance factor on the driving velocity is discussed. Finally, examples are given as to where spreading cyclone separators with electrostatic precipitator are used to solve industrial laying the dust.

Keywords spreading cyclone separator, electrostatic precipitator, air dust, driving velocity

* Department of Mechanics and Engineering, Zhongshan University, Guangzhou 510275