

文章编号: 1000-582x(1999)04-0114-06

②  
114-119

# 气尘两相旋流中尘粒运动特性及分离效率研究

TQ 051.8

0359

张力, 冉景煜, 李良生  
(重庆大学热能工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 根据气尘两相旋流内尘粒运动方程, 从机理上分析并确定了这种旋流中平衡尘粒的粒径、非平衡尘粒的运动特性时间和尘粒分离效率之间的关系, 另外, 还将其与有关文献中的实验结果进行了比较, 且吻合较好。

**关键词:** 气尘两相旋流; 尘粒运动特性; 分离效率

**中图分类号:** TK 282.5

**文献标识码:** A

旋转分离装置

气尘两相旋流已被普遍应用于动力工程和环境化学工程的旋转分离装置中, 提高其尘粒分离效率, 仍是众多科研人员和运行厂家所密切相关的问题<sup>[1~4]</sup>。

笔者正是以旋转分离器为例, 从气尘两相旋流内尘粒运动方程出发, 分析尘粒运动机理, 研究两相旋流中平衡尘粒之粒径、非平衡尘粒之运动特性时间及尘粒分离效率之间的关系, 以寻找提高尘粒分离效率的方法。

## 1 细微尘粒运动方程

### 1.1 研究对象

如图 1 所示旋转分离器为研究对象。

### 1.2 尘粒运动基本假设

含尘气流中尘粒在流道内不具有独立运动的能力, 它依靠气流作用而发生运动。当含尘气流从下部切向进入旋转分离器后, 气流带着尘粒旋转上升, 同时尘粒因惯性而向壁面运动, 当尘粒到达壁面时便被除去。旋转分离效率的高低与含尘气流的运动密切相关<sup>[5]</sup>。基于其复杂的三维运动特征, 分析假设如下<sup>[6]</sup>:

- 1) 尘粒为球形, 其初始径向、轴向速度为零, 初始切向速度  $V_t$  为分离器入口气流速度  $U_t$ ;
- 2) 在径向, 受运动阻力  $F_r$  作用, 尘粒自初始径向速度为零的位置向分离器壁面作速度

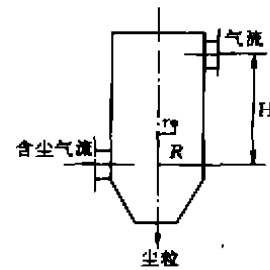


图 1 旋转分离器示意图

• 收稿日期: 1998-12-29

作者简介: 张力 (1956-), 男, 重庆大学副教授, 硕士。主要从事热能与环境工程的教学与研究。

减小的加速运动;当  $F_r < F_c$  时,向壁面作加速度减小的加速运动;当  $F_r = F_c$  时,尘粒绕轴向作匀速圆周运动;

3) 在切向,尘粒只受运动阻力  $F_t$  作用,此刻尘粒自初始位置作加速度减小的减速运动;

4) 在轴向,尘粒同时受到阻力  $F_z$ 、重力  $F_G$ 、浮力  $F_B$  及气流旋转及分离器进出口压差产生的升力  $F_L$  作用,此刻尘粒自初始径向速度为零位置向分离器顶端作加速度减小的加速运动;当  $F_R$ 、 $F_G$ 、 $F_B$ 、 $F_L$  力平衡时,如尘粒仍在分离器内,则其继续向分离器顶端作匀速运动,直至出口,该尘粒被排向大气。

### 1.3 尘粒运动方程

采用拉格朗日法,尘粒运动微分方程(雷诺数  $Re < 1.0$ ) 为:

$$\text{径向} \quad \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho) \frac{dV_r}{d\tau} = -3\pi (U_r - V_r) d_p \mu + \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_p \frac{V_r^2}{r} \quad (1)$$

$$\text{切向} \quad \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho) \frac{dV_t}{d\tau} = -3\pi (U_t - V_t) d_p \mu \quad (2)$$

$$\text{轴向} \quad \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho) \frac{dV_z}{d\tau} = -3\pi (U_z - V_z) d_p \mu + \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho - \rho_p) g + F_L \quad (3)$$

细微尘粒所受升力<sup>[7]</sup>:

$$F_L = \frac{\pi}{8} [\alpha d_p^3 (U_r - V_r) \omega] + \left[ \Delta h - \frac{U_{z,u}^2 + (U_{t,u}^2 - U_{t,i}^2) + U_{z,u}^2}{2} \right] \frac{1}{6} \pi \rho g d_p^3$$

对上述微分方程(1)~(3)求解,得出稳定状态下细微尘粒运动方程为:

$$V_r = U_r - \frac{d_p^2 \rho_p}{18 \mu} \frac{V_r^2}{r} \quad (4)$$

$$V_t = U_t$$

$$V_z = U_z - \frac{d_p^2}{18 \mu} (\rho - \rho_p) g - \frac{\rho g d_p^2}{18 \mu} \left[ \Delta h - \frac{U_{z,u}^2 + (U_{t,u}^2 - U_{t,i}^2) + U_{z,u}^2}{12} \right] \quad (6)$$

由方程(4)~(6)可知,分离器内流场构造对细微尘粒运动有较大影响<sup>[8]</sup>。

## 2 平衡尘粒与非平衡尘粒

### 2.1 平衡尘粒

由式(4)~(6)可知,平衡尘粒是指仅绕 Z 轴旋转,没有轴向和径向运动的尘粒,其运动状态应满足的流场条件可描述为:

$$\begin{cases} U_r = \frac{d_p^2 \rho_p}{18 \mu} \frac{V_r^2}{r} \\ U_t = V_t \\ U_z = \frac{d_p^2}{18 \mu} (\rho - \rho_p) g + \frac{\rho g d_p^2 \Delta h}{18 \mu} - \frac{\rho g d_p^2}{36 \mu} [U_{z,u}^2 + (U_{t,u}^2 - U_{t,i}^2) + U_{z,u}^2] \end{cases} \quad (7)$$

由上式知,此平衡尘粒在分离器内流场为  $U_r$ 、 $U_t$ 、 $U_z$  的位置绕轴旋转,而不能到达壁面,使分离效果变差,如最大平衡尘粒粒径较大,则意味有很多尘粒都只在分离器内绕轴旋转,将使分离效率大大下降。

## 2.2 平衡尘粒粒径

由式(7)可得:

$$\begin{cases} d_{p,s1} = \sqrt{\frac{18\mu U_r^2}{\rho_p U_r^2}} \\ d_{p,s2} = \sqrt{\frac{U_z^2 - \frac{\rho g \Delta h_w}{18\mu}}{\frac{(\rho - \rho_p)g}{18\mu} - \frac{U_{z,u}^2 + (U_{z,u}^2 - U_{z,l}^2) + U_{z,s,u}^2}{36\mu} \rho g}} \end{cases} \quad (8)$$

分析分离效率时,平衡尘粒粒径可取式(8)计算出的较大值,通常为  $d_{p,s1}$ .

## 2.3 非平衡尘粒

如果式(4)~(6)中某尘粒在分离器中的  $V_r$ 、 $V_z$  都不为零,运动状态可由式(4)~(6)描述。此时,该尘粒可能被排向大气,也可能被除去,要判断其属于何种状况,由尘粒在分离器内的径向、轴向运动特性时间判断,从而确定分离效率。

## 2.4 非平衡尘粒运动特性时间

### 2.4.1 非平衡尘粒轴向运动特性时间

非平衡尘粒在其轴向加速度从最大值变化到零的过程中的运动时间为:

$$\tau_{z1} = \frac{\pi d_p^3 \rho_p V_z}{-18\pi(U_z - V_z) d_p \mu + \pi d_p^3 (\rho - \rho_p) g + 6 F_L} \quad (9)$$

此时,尘粒轴向运动位移为:

$$S_{z1} = \frac{\pi \rho_p d_p^3}{12} \left[ -3\pi(U_z - V_z) d_p \mu + \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho - \rho_p) g + F_L \right] \tau_{z1}^2 \quad (10)$$

当  $H = S_{z1}$ , 轴向运动特性时间为:  $\tau_z = \tau_{z1}$  (11)

当  $H > S_{z1}$ , 尘粒从位移为  $S_{z1}$  到  $H$  的运动时间,可描述为:

$$\tau_{z2} = \frac{H - \frac{\pi d_p^3}{12} \left[ -3\pi(U_z - V_z) d_p \mu + \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho - \rho_p) g + F_L \right] \tau_{z1}^2}{U_z - \frac{d_p^2}{18\mu} (\rho - \rho_p) g - \frac{\rho d_p^2}{24\mu} [(U_z - V_z) \omega] - \frac{\rho g \rho d_p^2}{18\mu} \left[ \Delta h + \frac{U_{z,u}^2 + (U_{z,u}^2 - U_{z,l}^2) + U_{z,s,u}^2}{2} \right]} \quad (12)$$

尘粒轴向运动特性时间为:  $\tau_z = \tau_{z1} + \tau_{z2}$  (13)

当  $H < S_{z1}$ , 轴向运动特性时间为:

$$\tau_z = \sqrt{\frac{72H}{\pi \rho d_p^3 [-18\pi(U_z - V_z) d_p \mu + \pi d_p^3 (\rho - \rho_p) g + 6 F_L]}} \quad (14)$$

### 2.4.2 非平衡尘粒径向运动特性时间

非平衡尘粒在其径向加速度从最大值变化到零的过程中的运动时间为:

$$\tau_{r1} = \frac{V_r \pi d_p^3 \rho_p}{V_r^2 d_p^3 \rho_p - 18 r \mu (U_r - V_r)} \quad (15)$$

此时尘粒径向位移为:

$$S_{r1} = \frac{1}{2} \left( \frac{V_r^2}{r} - \frac{18\mu(U_r - V_r)}{d_p^2 \rho_p} \right) \tau_{r1}^2 \quad (16)$$

当  $R - r = S_{x,1}$ , 径向运动特性时间为:  $\tau_r = \tau_{r,1}$  (17)

当  $R - r > S_{x,1}$ , 径向运动特性时间为:

$$\tau_{r,2} = \frac{R - r - \frac{1}{2} \left( \frac{V_i^2}{r} - \frac{18 \mu (U_i - V_i)}{d_p^2 \rho_p} \right) \tau_{r,1}^2}{U_i - \frac{d_p^2}{18 \mu^2 \rho_p} \frac{V_i^2}{r}} \quad (18)$$

这里, 为尘粒从位移为  $S_{x,1}$  到  $R - r$  的运动时间, 可描述为:

$$\tau_r = \tau_{r,1} + \tau_{r,2} \quad (19)$$

当  $R - r < S_{x,1}$ , 径向运动特性时间为:

$$\tau_r = \sqrt{\frac{2 d_p^2 \rho_p r (R - r)}{V_i^2 d_p^2 \rho_p - 18 \mu r (U_i - V_i)}} \quad (20)$$

已知分离器结构及运行参数, 可首先求出分离器内的流场特性, 由式(8) ~ (20) 便可得到平衡尘粒粒径及非平衡尘粒特性时间<sup>[9]</sup>。

### 3 气粒两相旋流中尘粒运动特性及其分离效率分析

上述分析表明, 在一定的分离器结构及运行参数的情况下, 其含尘气流中的尘粒可分为两类, 即平衡尘粒和非平衡尘粒。要提高尘粒分离效率, 则气粒两相流中尘粒能否在离开分离器前到达壁面将是最关键的问题。

#### 3.1 分离器运行参数对尘粒运动特性的影响

对于平衡尘粒, 由式(8) 知, 只要分离器结构及运行参数合适, 能使平衡尘粒径达到最小, 则大于该粒径的尘粒为非平衡尘粒, 增加其到达壁面的可能性。图 2 为分离器运行参数(初速  $V_i$ ) 对平衡尘粒粒径及非平衡尘粒运动特性时间影响(其余参数如分离器结构特性参数、气尘物性参数维持恒定)。初速  $V_i$  愈大, 则  $d_b$  愈小,  $\tau_r$  愈小, 尘粒愈易分离, 效率愈高。

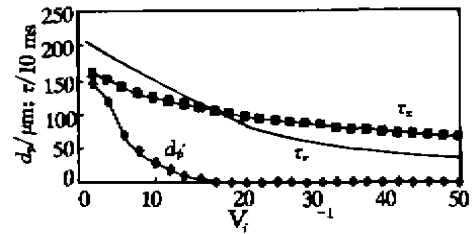


图 2 分离器运行参数  $V_i$  对平衡尘粒粒径及尘粒 ( $d_b = 3 \mu\text{m}$ ) 运动特性时间影响

#### 3.2 分离器结构参数对尘粒运动特性影响

由式(9) ~ (20) 式知, 尘粒在分离器内的运动时间可按其在轴向运动时间  $\tau_z = \tau_{z,1} + \tau_{z,2}$  为准。当然, 如在  $\tau_z$  时间内尘粒已到达壁面, 则该尘粒已被除去。所以, 要判断该尘粒是否被除去, 其径向运动时间  $\tau_r = \tau_{r,1} + \tau_{r,2}$  得被先确定, 以便于  $\tau_z$ 、 $\tau_r$  比较。当  $\tau_z > \tau_r$ , 则尘粒被除去, 如该尘粒又是含尘气流中粒径最小者, 则分离器效率可达 100% (大于该粒径的尘粒之  $\tau_r$  更小, 已率先到达壁面)。图 3 ~ 4 分别为分离器结构参数(高度  $H$  及半径  $R$ ) 对平衡尘粒粒径及非平衡尘粒运动特性时间影响(其余参数如气尘物性参数维持恒定)。高度  $H$  愈高, 则  $d_b$  愈小;  $\tau_z$  越大,  $\tau_r$  越小, 尘粒愈易分离; 半径  $R$  愈大, 则  $d_b$  愈大,  $\tau_r$  比  $\tau_z$  增加快, 尘粒愈不易分离。

#### 3.3 平衡尘粒粒径、非平衡尘粒运动特性时间及尘粒分离效率之间的关系

分离器内平衡尘粒及非平衡尘粒和其运动特性, 与尘粒分离效率之关系可描述为<sup>[7-9]</sup>:

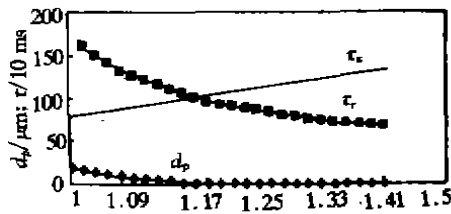


图3 分离器结构参数 H 对平衡尘粒粒径及尘粒 ( $d_p = 3 \mu\text{m}$ ) 运动特性时间影响

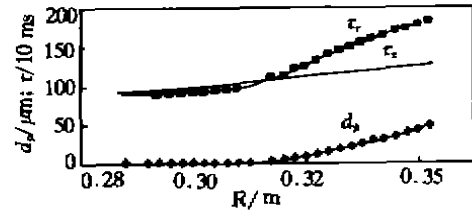


图4 分离器结构参数 R 对平衡尘粒粒径及尘粒 ( $d_p = 3 \mu\text{m}$ ) 运动特性时间影响

$$\eta_i = 1 - \exp\left(-\frac{2\pi R^2 V_d L}{Q d_{h,d}}\right) \quad (21)$$

式中  $V_d$  为尘粒分离速度,  $L$  为分离高度,  $Q$  为气流流量,  $d_{h,d}$  为平衡尘粒粒径,  $V_d$  可按下述确定。当  $\tau_c < \tau_r$ , 则

$$\begin{cases} V_d = \frac{\pi \rho_p d_p^3}{6} \left[ -3\pi(U_x - V_x) d_p \mu + \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho - \rho_p) g + F_L \right] \tau_c \\ L = \frac{\pi \rho_p d_p^3}{6} \left[ -3\pi(U_x - V_x) d_p \mu + \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho - \rho_p) g + F_L \right] \tau_c^2 \end{cases} \quad (23)$$

当  $\tau_c > \tau_r$

$$V_d = \left( \frac{V_r^2}{r} - \frac{18\mu(U_x - V_x)}{d_p^2 \rho_p} \right) \tau_r, \quad L = H_0 \quad (24)$$

分离器效率为:

$$\eta = \sum \eta_i g_i = \sum \left( 1 - \exp\left(-\frac{2\pi R^2 V_d L}{Q d_{h,d}}\right) g_i \right) \quad (25)$$

当分离器气流进口速度 ( $V_i$ ) 发生变化时, 分离器内的平衡尘粒及非平衡尘粒和其运动特性也随着变化。图 5 为式(21) 结果与实验结果比较的情况, 在分离器入口气流速度  $V_i = 25 \text{ m/s}$  时本模型结果与实验结果稍有差别外, 但与  $V_i = 20 \text{ m/s}$  及以下几组分离器入口气流速度吻合较好, 表明本模型的合理性与正确性。

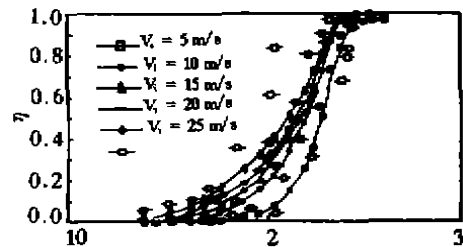


图5 模型计算结果与实验结果<sup>[1]</sup> 比较

#### 4 结论及建议

1) 通过对气尘两相旋流中尘粒运动特性进行的深入分析, 得到的两相旋流中平衡尘粒之粒径、非平衡尘粒之运动特性时间(各方向的有效位移时间)的计算式, 可用于确定分离器内尘粒分离效率的影响因素;

2) 文中提出的基于非平衡尘粒运动特性的分离器分离效率计算式, 与文献中的实验结

果吻合较好,表明该式是合理的、正确的;

3) 增加尘粒轴向运动时间,减小径向运动时间和尘粒粒径是提高分离器内尘粒分离效率的重要手段,但分离器结构、运行参数及其中运动工质的最佳匹配关系仍有待探讨。

#### 符号说明

$a$ ——尘粒加速度;  $d$ ——尘粒粒径;  $F$ ——外力;  $g$ ——重力加速度;  $g_i$ ——入口粒径频率分布;  $H$ ——高度;  $\Delta h$ ——引风机压头;  $R$ ——分离器内径;  $r$ ——径向位置;  $S$ ——位移;  $U$ ——气流速度;  $V$ ——尘粒速度;  $\rho$ ——密度;  $\mu$ ——粘性系数;  $\omega$ ——尘粒自旋速率;  $\tau$ ——时间

#### 下标说明

$r$ ——径向;  $t$ ——切向;  $z$ ——轴向;  $p$ ——尘粒;  $i$ ——进口;  $o$ ——出口;

#### 参考文献

- [1] DIRGO J, LEITH D. Cyclone collection efficiency: Comparison of experimental results with theoretical predictions [J]. *Aerosol Sci Technol*, 1985, 4, 401~411.
- [2] 佟庆理. 两相流动理论基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982, 1~264.
- [3] 郝吉明. 大气污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989, 145~283.
- [4] 李绍林. 两相悬浮体剪切流的理论和实践[M]. 北京: 科学出版社, 1985, 1~70.
- [5] 阮少明. 译. 粉粒体的空气输送[M]. 北京: 电力工业出版社, 1974, 74~165.
- [6] 王应时. 燃烧过程数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1986, 204~348.
- [7] KALLIO G A, REEKS M W. A numerical simulation of particle deposition in turbulent boundary layers, *Int. J. Multiphase Flow*[J]. 1989, 15(3): 433~446.
- [8] ONIKO J S. Cyclone separator scaling revisited[J]. *Powder Technology*, 1996, 87: 93~100.
- [9] CLIFT R. A critique of two models for cyclone performance[J], *AIChE* 1991, 37(2): 285~288.

## The Motion Characteristics and Deposition Efficiency of Particles in the Gas - Particle Rotary Flow

ZHANG Li, RAN Jing-yu, LI Liang-sheng

(College of Thermal Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**ABSTRACT:** Based on the motion equations of particles in the gas - particle rotary flow, the relationship among the equivalence particle diameter, characteristic time of the nonequivalence particle and their deposition efficiency is analyzed, and then the results of this study agree very well with the experimental data.

**KEYWORDS:** gas - particle rotary flow; motion characteristics of particles; deposition efficiency

(责任编辑 刘尚坤)