

粉煤灰旋风分选器分选性能的计算*

刘守圭

唐孟希

(中山大学应用力学与工程系, 广州 510275) (中山大学物理系, 广州 510275)

杨 荔 莫庭斌

(广州城建开发研究中心, 广州 510010)

摘 要 从动力学的基本原理出发, 分析了含煤灰气流在旋风分选器中的运动规律, 给出了分选效率的计算公式及计算实例, 并分析了旋风分离器结构参数对分选效率的影响. 理论结果与实验结果有较好的符合.

关键词 旋风分选器, 分选效率, 粉煤灰

分类号 X705, O359.1

我国目前的能源仍以煤为主, 仅广州市每年粉煤灰的排放量就超过 80 万吨. 为了有效利用粉煤灰, 必须对品质不稳定、活性较低的原状灰加以分选, 选出粒径较细、活性较高的成品灰供应市场. 用空气动力学方法对原状灰进行旋风分选, 无疑是一条经济可行的途径.

旋风除尘器利用旋风分离技术使气流中的溶胶粒子与气流脱离, 以达到除尘目的, 尽管它的理论分析尚未十分完善, 但由于该技术已得到广泛应用, 除尘器的主要组成部分——旋风分离器的外形、结构及尺寸等都有了较固定的模式, 但大容量气力分选系统在国内并无成功的报道. 本文将从动力学的基本原理出发, 对旋风分选器设计中的理论问题作一些分析.

1 分选器的工作任务与结构形式

旋风除尘器和旋风分选器虽然都是使含尘气流作旋转运动, 借助惯性作用将尘粒从气流中加以分离捕集的装置, 但由于两者使用目的差异, 在设计中后者不能用前者的理论和经验公式. 前者的目的是除尘, 应该把尽可能多的颗粒沉降下来, 而后者的目的是按粒径分选, 即要从收集管中获得尽可能多的小粒径粒子, 同时又要求在收集到的产品

收稿日期: 1993-03-9

* 广州市建委资助项目

中尽可能少地混入大颗粒,以保证成品灰的质量.我们的任务就是在两个互相矛盾的控制指标中选取一最佳状态.

从以后的分析可知,要获得较高的收集效率,粒子在分选器中旋转角度不宜过大,我们将采用卧式的扁平状柱体作为分选器的外形.另一方面,由于分选器处理的是大流量的气体,与立式旋风分离器相比,分选器应有较大的尺寸.

2 旋风分选器的基本理论和已有结果^[1~3]

含尘气流可视为常密度不可压缩流体,其基本运动方程可用 Navier-Stokes 方程和连续性方程描述.

$$\begin{cases} (\frac{\partial}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla(\frac{P}{\rho} + gz) + \nu \nabla^2 \vec{u} \\ \nabla \cdot \vec{u} = 0 \end{cases}$$

其中, $\vec{u} = \vec{u}(\vec{x}, t)$ 为速度矢量, $p = p(\vec{x}, t)$ 为压力, ρ 为流体密度, g 为重力加速度, $-z$ 向为重力加速度方向, ν 为运动粘性系数, 可视为常数, $\vec{x} = (x, y, z)$ 为位置矢量, 上述两方程加上适当的边界条件, 用数值方法, 原则上可以求出旋风筒内各点的流速分布, 进而求出粒子的运动, 但由于实际上的气流分布十分复杂, 影响因素很多, 为了便于用较简单的方法对粒子在旋风筒内的运动作半定量的分析(图 1), 需要引进一些简化假设.

我们假设:(i)气流的径向速度为零;(ii)粒子的切线速度与气流的切线速度一致;(iii)不考虑已沉降的粒子返回气流中;(iv)粒子为球状.在这样的假设下,考虑旋风筒内气流切向速度的经验分布规律(图 2)和气流内粒子的受力情况(图 3),可以得到粒子的径向运动速度

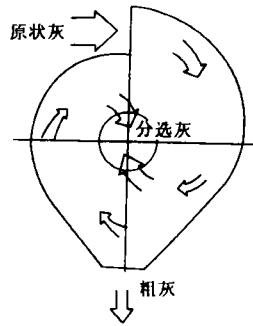


图 1 旋风筒内气流型
Fig. 1 Airstream mode in the cyclonic collector

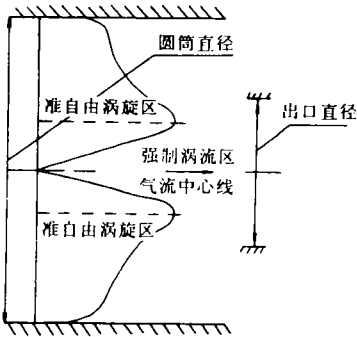


图 2 旋风筒内气流切向速度分布
Fig. 2 Distribution of tangent speeds of airstream in cyclonic collector

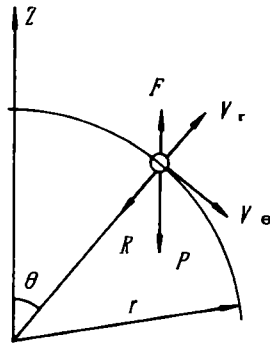


图 3 尘粒在旋风筒内受力分析
Fig. 3 Force analysis of the particle in the cyclonic collector

$$u_r(r) = \begin{cases} \frac{\rho_p d_p^2}{18\nu} \left(\frac{v_\theta^2}{r} - g \cos\theta \right), & \text{当 } Re \leq 1 \text{ 时} \\ \left[\frac{4\rho_p^2 d_p^3}{225\rho\nu} \left(\frac{v_\theta^2}{r} - g \cos\theta \right)^2 \right]^{1/3}, & \text{当 } 1 < Re \leq 500 \text{ 时} \end{cases} \quad (1)$$

式中, ρ_p 是粒子的密度, d_p 为粒子的直径, ν 为空气的运动粘性系数, g 为重力加速度, ρ 为空气的密度, (r, θ) 为粒子所在的位置, 如图 3. 而 v_θ 为粒子的切向速度, 即气流的切向速度,

$$v_\theta(r) = \frac{(1-n)Q}{Wr^n(r_2^{1-n} - r_1^{1-n})} \quad (2)$$

式中, r_1 为收集管外半径, r_2 为旋风筒内半径, W 为分选器厚度, Q 为气流入口处流量, 而无量纲数 n 由经验规律确定, 在旋风筒内, $n=0.5 \sim 0.8$.

进而可得到粒子的分离效率

$$\eta_p = \exp\left[-\frac{v_{r_2}}{v_{\theta_2}} \cdot \frac{r_2}{r_2 - r_1} \theta\right] \quad (3)$$

这里, θ 表示粒子从入口处到粗灰出口处所转过的角度.

3 旋风分离器结构参数对分选效率的影响

若原状灰的归一化质量——粒径分布函数 $m(d_p)$ 已知, 则由(3)可求得按质量计的总分离效率

$$\eta_m = \int_0^\infty m(d_p) \exp\left[-\frac{v_{r_2}(d_p)}{v_{\theta_2}} \cdot \frac{r_2}{r_2 - r_1} \theta\right] d d_p \quad (4)$$

若粒径分割点为 d_{p0} , 则混入成品灰中粒径大于 d_{p0} 的粒子质量数占成品灰的比为

$$\zeta = \frac{\int_{d_{p0}}^\infty m(d_p) \exp\left[-\frac{v_{r_2}(d_p)}{v_{\theta_2}} \cdot \frac{r_2}{r_2 - r_1} \theta\right] d d_p}{\int_0^\infty m(d_p) \exp\left[-\frac{v_{r_2}(d_p)}{v_{\theta_2}} \cdot \frac{r_2}{r_2 - r_1} \theta\right] d d_p} \quad (5)$$

由 η 的表达式可知, 分选效率 η 的大小与气流在分选器中转过的角度 θ 有关, θ 越大则 η 越小. 因此对除尘器要求气流转动较多的圈数, 以保证除尘的彻底, 而分选器转角不宜过大以保证一定的分选效率. 考虑到旋风涡流的形成, θ 取值在 $[\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}]$ 之间, 这就是分选器适合采用卧式柱体形状的理论依据.

理想的分选器, 分选效率曲线应如图 4(a) 所示. 直径小于 d_{p0} 的粒子全部被收集, 直径大于 d_{p0} 的粒子全部被排入粗灰.

为了更好地分析结构参数对分离效率的影响, 把(3)式改写为

$$\eta_p = \exp(-k\theta) \quad (6)$$

而

$$k = \begin{cases} \alpha_1 \frac{d_p^2 v_{\theta 1}}{r_2 - r_1} & \text{当 } Re \leq 1 \text{ 时} & (7-1) \\ \alpha_2 \frac{r_2^{2/3} d_p \cdot v_{\theta 2}^{1/3}}{r_2 - r_1} & \text{当 } 1 \leq Re \leq 500 \text{ 时} & (7-2) \end{cases}$$

其中, $\alpha_1 = \frac{\rho_p}{18\nu}$ 及 $\alpha_2 = (\frac{4\rho_p^2}{225\rho\nu})^{1/3}$ 是只与空气和粉煤灰性质有关的参数. 当其他参数固定时, η_p-d_p 曲线由两段组成, 分别与(7-1)和(7-2)式对应. 在两段曲线连接点 C 的左边, k 与 d_p^2 成正比; 在 C 右边, k 与 d_p 成正比. C 点右边的曲线应在左边曲线延伸线的上方. 连接点 C 对应的 d_{pc} 可由 $Re=1$ 的条件求得.

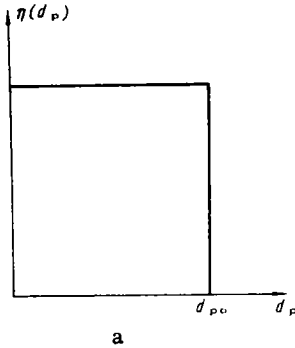


图 4(a) 理想效率曲线

Fig. 4(a) Ideal curve of efficiency

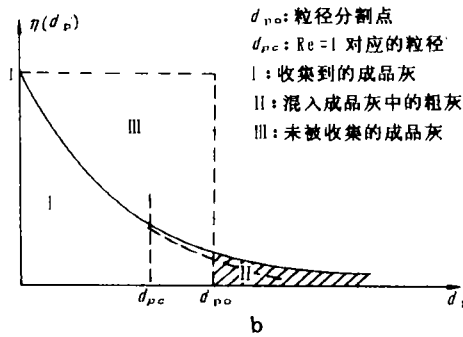


图 4(b) 实际效率曲线

Fig. 4(b) Practical curve of efficiency

如图 4(b)所示, 在同一个 η_p-d_p 图上作理想效率曲线和实际效率曲线, 两条曲线把平面分割成四个区域. 其中区域 I 的面积表示收集到的成品灰占原状灰的百分比, 即分选效率 η ; 区域 II 的面积表示混入成品灰中的粗灰占原状灰的百分比; 区域 III 的面积表示应收集而未被收集到的成品灰占原状灰的百分比.

当曲线上移时, 收集到的成品灰较多, 但混入的粗灰也较多. 所以若以产量为首要考虑指标时, 应选择参数使曲线上移, 若以质量为首要考虑指标时, 应选择参数使曲线下移. 进一步的分析表明, 减小收集管径与减少入口风速都将有利于产量的提高.

4 旋风筒的改进——螺旋形旋风筒

为了更宜于在旋风筒内形成旋风式气流, 分选器的轮廓可考虑选用螺旋线. 如图 5 所示. 我们选用阿基米德螺旋线作为外壳轮廓, 这时

$$r_2 = a - \frac{a-b}{\pi} \theta \tag{8}$$

其中, a 和 b 分别为螺旋线入口处和出口处的矢径. 经过与以上类似的分析, 对应于(3)式可得分选效率的表示式.

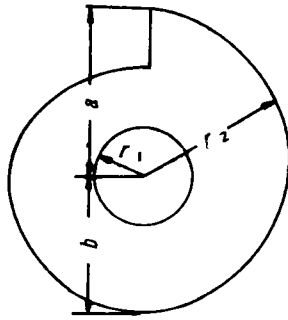


图 5 阿基米德螺旋线形
Fig. 5 spiral of Archimedes

$$\eta_p = \begin{cases} \exp\left[-\frac{\rho_p d_p^2 Q(1-n)}{18\nu W} \int_0^\pi \frac{1}{r_2^n(r_2^{1-n} - r_1^{1-n})(r_2 - r_1)} d\theta\right] & \text{当 } Re \leq 1 \text{ 时} & (9-1) \\ \exp\left\{\left[-\frac{4\rho_p d_p^3 \theta(1-n)}{225\rho\nu W}\right]^{1/3} \int_0^\pi \frac{1}{r_2^{\frac{n-1}{3}}(r_1^{1-n})^{1/3}(r_2 - r_1)} d\theta\right\} & \text{当 } 1 < Re \leq 500 \text{ 时} & (9-2) \end{cases}$$

与圆柱形外壳有所不同的是, 现在 $r_2=r_2(\theta)$.

若保持收集管径 r_1 不变, 外壳螺旋出口处的半径 b 与圆柱形外壳 r_2 相等的情况下, 采用螺旋形外壳, 除了在 $\theta=\pi$ 外的各处, r_2 都比原来增大, 导致积分值变小, 使图 4 的分选效率曲线上移, 而有利于产量的提高, 但同时质量下降.

反之, 若保持收集管径 r_1 不变, 在外壳螺旋入口处的半径 a 与圆柱形外壳 r_2 相等的情况下, 则产量下降而品质提高.

5 计算实例

设计一个螺旋形柱体卧式旋风分选器, 分选对象是粉煤灰. 主要参数为:

风量 $Q=2.5\text{m}^2/\text{sec}$; 空气粘性系数 $\nu=1.8\times 10^{-5}\text{kg}/\text{m}\cdot\text{sec}$;

空气密度 $\rho=1.2\text{kg}/\text{m}^3$; 粒子密度 $\rho_p=2.15\times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$;

旋风筒厚度 $W=0.6\text{m}$.

旋风筒外壳线型: 阿基米德螺旋线 $r_2=a-\frac{a-b}{\pi}\theta$ (其中, 螺旋入口矢径 $a=0.70\text{m}$, 螺旋线出口矢径 $b=0.60\text{m}$).

收集管外径 $r_1=0.40\text{m}$; 粒子运动区域 $\theta\in[0,\pi]$. 计算时取 $n=0.5$.

由于计算分选效率所用的公式对于不同的雷诺数 Re 有不同的表示形式. 对于一定的流体和一定粒径的粒子, 雷诺数 $Re=\frac{\rho\nu d_p}{\nu}$ 取决于粒子的径向速度 v_r . 而由(9)式知, 计算 v_r 时又取决于 Re 的取值范围. 因此我们可以采用尝试法计算, 即先假定 Re 的范围, 计算 v_r , 从 v_r 的计算结果计算 Re , 看是否与我们预先假定的 Re 相符合. 若不符合, 可另行选择 Re 的范围.

同时还需注意, 即使是对于同一粒径的粒子, 在螺旋形旋风筒中, v_r 也是 θ 及 r 的函数, 因此 Re 也在一定范围内变化.

由于 η_p 表示式(9)中被积函数的形式较为复杂, 可以用数值方法计算积分, 计算结果见表 1.

表 1 数值计算实例
Tab. 1 Numerical example

$d_p(\times 10^{-6}\text{m})$		10	20	30	40	50	60	70	80	90
按(9-1) 式计算	η_p (%)	93.79	77.38	56.16	35.85	20.14	9.94	4.32	1.65	0.60
	Re max	0.89	3.56	24.03	56.96	74.16	127.7	202.7	302.6	430.8
	Re min	0.094	0.75	2.54	6.61	11.75	20.30	32.24	48.13	68.53
按(9-2) 式计算	η_p (%)	64.83	42.03	27.25	17.67	11.45	7.42	4.81	3.12	2.02
	Re max	0.88	3.54	7.96	14.14	22.10	31.80	43.32	56.58	77.60
	Re min	0.37	1.48	33.33	5.92	9.25	13.32	18.13	23.68	29.97
η_p (%)		93.79	42.03	27.25	17.67	11.45	7.42	4.81	3.12	2.02

注: \square 中数字表示根据 Re 范围所选取的 η_p

为了验证上述旋风分选器旋的理论与分析的有效性, 我们进行了一个小型模型试验. 分选器风筒外形采用圆柱形.

有关参数如下:

入口风量 $Q=0.23\text{m}^3/\text{sec}$

旋风筒尺寸 $r_2=0.2\text{m}$, $r_1=0.1\text{m}$, $W=0.2\text{m}$

则根据(6)、(7)式可以计算出不同粒径粒子分选效率如表 2 所示.

表 2 不同粒径粒子的分选效率

Tab. 2 Separating efficiency for ashes particles, having different radius

$d_p(\times 10^{-6}\text{m})$		10	20	30	40	50	60	70	80
(7-1)式	η_p (%)	93.9	77.7	56.7	36.5	20.7	10.35	4.56	1.77
	Re	0.20	0.80	5.37	12.73	24.87	42.97	68.24	101.86
(7-2)式	η_p (%)	89.9	80.8	72.6	65.3	58.7	52.8	47.5	42.6
	Re	0.61	2.44	5.49	9.76	15.25	21.96	29.89	39.04
η_p (%)		93.9	77.7	72.6	65.3	58.7	52.8	47.5	42.6

以上只计算出不同粒子的相对于同粒径粒子中的收率 η_p . 分选灰的总收率则还要依据不同粒径粒子在灰中的分布才能确定.

模型试验的指标主要有两项, 分选灰的收率与分选灰中粒径大于 40μ 的粗粒子的含量. 另外由于试验设备条件限制, 试验结果只给出 4 种不同粒径范围灰粒子的总收率(见表 3).

表 3 各类灰中 4 种粒径范围内粒子的分布/%
Tab. 3 Distribution of ash particles having different radius, among different kinds of ashes

粒径范围	$<40\mu$	$40\mu\sim 50\mu$	$50\mu\sim 61\mu$	$>61\mu$
粗灰	55.6	8.4	5.0	31.0
分选灰	93.0	2.4	1.7	2.0
原状灰	69.5	6.6	5.4	18.5
收率 η	53.50	14.55	12.59	6.27

试验表明:①分选灰的总收率为原状灰的 40%, 其中粒径小于 40μ 的粒子比例达到 93%(国家标准为 88%). 可以认为分选效果是比较理想的. ②比较原状与分选灰中不同粒径粒子的比例, 可见分选时小粒径粒子收率大大高于大粒径粒子, 这正是对分选器的要求. 而收率 η 随粒径变化的趋势也符合理论分析的结果.

参 考 文 献

- 1 张国权. 气溶胶力学——除尘净化理论基础. 北京:中国环境科学出版社, 1987
- 2 S. K. 弗里德兰德, 常乐丰译. 烟、尘和霾——气溶胶性能与基本原理. 北京:科学出版社, 1983
- 3 P. N. 切雷米诺夫, R. A. 杨格主编, 胡文龙, 李大志译. 大气污染控制设计手册, 北京:化学工业出版社, 1984

Calculation of Separating Function of a Cyclone Separating Device Used for Fly Ashes

Liu Shougui * Tang Mengxi Yang Li Mo Tingbin

Abstract Based on fundamental principles of dynamics, motion pattern of airstream with fly ashes in a cyclone separating device is studied. Formulas, used for calculating separating efficiency, and a numerical result are given. It is also studied how its structural parameters affect on separating efficiency. The theoretical result is a good coincidence with the experimental ones.

Keywords cyclone separating device, separating efficiency

* Department of Applied Mechanics and Engineering, Zhongshan University, Guangzhon 510275