

惯性式振动流化干燥装置的研制

许介卫 许菊若

(机械工程系)

摘要 阐明了惯性式振动流化干燥装置及其主要参数理论计算方法。

主题词 流态化; 振动; 振动电机

中图分类号 TB123

0 前言

流化态干燥设备具有干燥速度快、结构简单、占地面积小、制造方便等优点,因此广泛应用于制药、化肥、食品、塑料、石油化工等工业。流化干燥装置的形式很多,有的装置采用加大穿过物料层的气流速度,使物料沸腾(流态化),有的装置采用振动方式使物料流态化。振动流化干燥装置比气流化干燥装置所选用的进气速度要减低得多,因此可以减少热空气的供应量,同时减小了风机和加热器的容量。本设计的惯性式振动流化干燥装置是利用周期的惯性力使物料振动而引起沸腾的一种干燥方式,经工厂实际运行,效果良好,并已发展成双层式振动流化干燥,每层采用独立振动器,效果得到进一步提高。

1 结构简介

惯性式振动流化干燥装置的外形如图1所示,主要由振动器3、弹簧组和缓冲器4,筛床

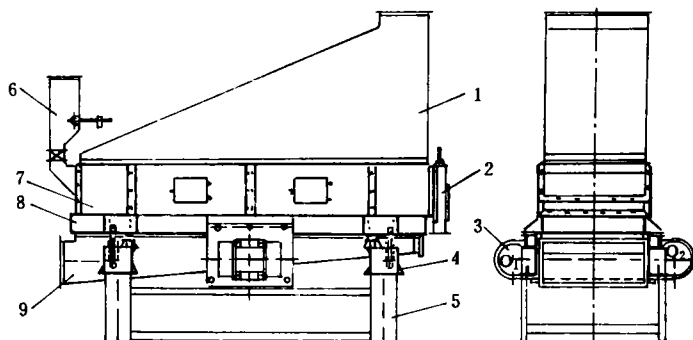


图1 惯性式振动流化干燥装置外形图

收稿日期:1995-01-17

8,料室7,进料斗6,出料装置2,进气室9,排气室1和机架5等组成。

1.1 振动器

主要由两个相同的振动(即偏心)电机组成,分别装在筛床两侧。偏心块运动时的惯性力引起振动机体的振动,因此进出料口、进出气口都应软连接。电机装有调节惯性力(激振力)大小的可调偏心块。两电机转向相反,因此惯性力在水平方向的分力互相被平衡。

1.2 弹簧组及缓冲器

在筛床底下装有4个弹簧组和缓冲器4分别固定在机架5上(见图1),其具体结构见图2,两只圆柱压缩弹簧2用螺栓5串在一起,两弹簧间的中间托板(3,4)是固定不动的。当振动机体向下振动时,筛架经上托板1压缩了上弹簧,而下弹簧被回复,当振动机体向上振动时,筛架经螺栓、下托板6压缩了上弹簧而此时上弹簧被回复。为了保证振动过程中弹簧始终受压缩,弹簧预压缩量应该大于最大振幅的1/2,以确保振动的稳定性。中间托板所受的力为两弹簧作用在该托板上力之差。调整弹簧的预压量不仅可克服振动机体的自重对弹簧产生预压的缺点,还可避免两弹簧在振动过程中发生压缩量不一致的现象。

缓冲器可在开机和停机时限制振动机体的振动,使其很快达到稳定振动状态或停机。限振块7由硬橡胶等制成的。在弹簧预压后,限振块顶面与筛床底面的间隙应大于振动机体的最大振幅的1/2。

出料装置的溢料高度可通过调节螺杆进行调整,以便控制出料速度。

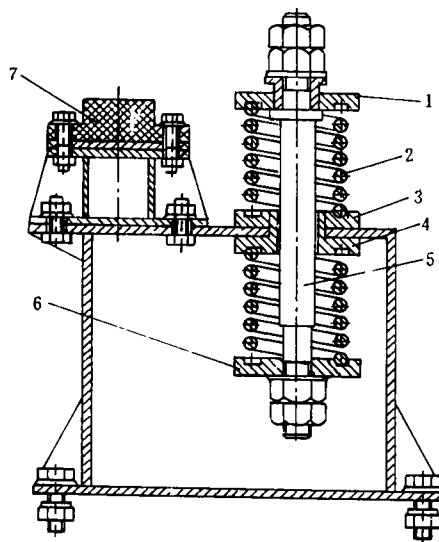


图2 弹簧组和缓冲器

2 惯性振动流化的计算

惯性式振流化干燥装置的振动机体可以简化成如图3所示。双振动电机分别以偏心质量

m_1 , 回转半径 r , 角速度 ω 绕中心 O_1, O_2 回转, 旋转方向相反, 各偏心块产生的惯性力为:

$$\rho = m_1 \omega^2 \cdot r$$

两惯性力在 x 方向的分力大小相等, 方向相反, 互相平衡。在 y 方向的分力大小相等, 方向相同其合力为:

$$\rho_y = 2m_1 \omega^2 \cdot r \sin \omega t \quad (1)$$

式中: m_1 为偏心块质量, r 为偏心块重心至振动电机回转轴线的距离, ω 为振动电机的角速度。 K 在 y 方向的惯性合力 ρ_y 使振动机体振

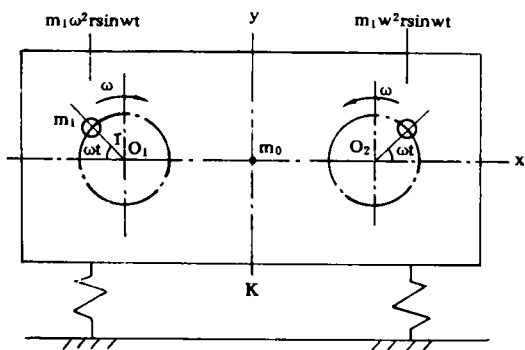


图3 原理图

动,其振动微分方程式为:

$$m_0 \ddot{y} + c \dot{y} + ky = 2m_1 \omega^2 \cdot r \sin \omega t \quad (2)$$

其中 $m_0 = m_2 + qm_3$, m_2 为振动机体的总质量, m_3 为料室内物料质量, q 为物料系数(考虑到物料不是同时全部作用在筛板上), K 为弹簧总刚度(本振动机体有 4 个弹簧组支承, 因此总刚度为弹簧组刚度 k 的 4 倍, 即 $K = 4k$), c 为阻力系数。

式(2)在稳定状态情况下的解 $y = A \sin(\omega t - \varphi)$ 的振幅 A 和相位差 φ 为:

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{2m_1 \omega^2 r \cos \varphi}{K - m_0 \omega^2} = -\frac{2m_1 r \cos \varphi}{m'} \\ \varphi &= \tan^{-1} \frac{c \omega^2}{K - m_0 \omega^2} = \frac{-c}{m'} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中计算质量 $m' = m_0 - \frac{K}{\omega^2}$

从式(3)可知, 当远离共振处 $K \ll m_0 \omega^2$ 条件下, 此时弹簧刚度 K 对振幅的影响不是很大, 振幅 A 近似为

$$A \doteq \frac{2m_1 r}{m_0} \quad (4)$$

2.1 抛掷指数 D

物料沿 j 方向溢流出料(见图4), 振动电机可绕 $o_1 - o_2$ 轴转动(见图3), $o_1 - o_2$ 轴垂直坐标 u, j 组成的平面(见图4), 振动 y 方向与 j 方向夹角为 α 。因此振动体在 u 和 j 方向的速度和加速度为

$$\left. \begin{aligned} v_j &= A \omega \cos \alpha \cos(\omega t - \varphi) = A \omega \cos \alpha \cos \varphi_0 \\ v_u &= A \omega \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi) = A \omega \sin \alpha \cos \varphi_0 \\ a_j &= -A \omega^2 \cos \alpha \sin(\omega t - \varphi) = -A \omega^2 \cos \alpha \sin \varphi_0 \\ a_u &= -A \omega^2 \sin \alpha \sin(\omega t - \varphi) = -A \omega^2 \sin \alpha \sin \varphi_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

设物料的颗粒质量为 m , 重力为 $G = mg$ 。当物料在筛面上时, 颗粒在 j 方向的受力之和为:

$$F_j = -m(a_j + \Delta \ddot{j}) \quad (6)$$

作用在筛面上的正压力为:

$$N = m(a_u + \Delta \ddot{u}) + G \quad (7)$$

式中 $\Delta \ddot{j}$ 和 $\Delta \ddot{u}$ 是颗粒对筛面在 j 和 u 方向的相对加速度。只有物料从筛面上被抛上空中才能使物料沸腾。物料刚出现抛掷瞬时,

在 u 方向的加速度 $\Delta \ddot{u} = 0$, 且正压力 $N = 0$ 。将式(5)代入式(7), 把 φ_0 改为抛始角 φ , 则

$$-mA \omega^2 \sin \alpha \sin \varphi + G = 0$$

$$\therefore \varphi = \sin^{-1} \frac{G}{mA \omega^2 \sin \alpha} = \sin^{-1} \frac{g}{A \omega^2 \sin \alpha} = \sin^{-1} \frac{1}{D} \quad (8)$$

其中 $D = M \sin \alpha$

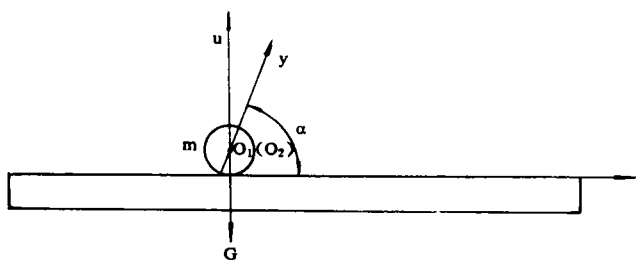


图4 物料受振情况

$$M = \frac{A\omega^2}{g} \quad (9)$$

式中 M 为振动强度。

从式(8)可知,当 $D < 1$ 时,无抛始角 φ_s ,即物料没有抛掷运动。在 α 很小($\alpha = 0$) 式 $A\omega^2 \ll g$ 时都可能出现 $D < 1$ 的情况。

如振动电机转速为 n ,就可根据式(9) 求出振幅 A :

$$A = \frac{900Dg}{\pi^2 n^2 \sin \alpha} \quad (10)$$

2.2 上升角 θ_h

物料被抛起以后,筛面的正压力为零。将式(5) a_c 代入式(7),由于上抛从 φ_s 开始,因此参数 $\varphi_0 = \theta + \varphi_s$ 代入后得:

$$\Delta \ddot{u} = A\omega^2 \sin \alpha \sin(\theta + \varphi_s) - g$$

对上式积分后,则得物料对筛面的相对速度计算公式:

$$\Delta \dot{u} = -A\omega \sin \alpha \cos(\theta + \varphi_s) + A\omega \sin \alpha \cos(\theta + \varphi_s) - \frac{g}{\omega} \theta \quad (11)$$

当物料相对筛面达到最高位置时,相对速度 $\Delta \dot{u} = 0$, $\theta = \theta_h$,抛高角 $\varphi_h = \varphi_s + \theta_h$, θ_h 为上升角。代入上式后得:

$$\cos(\varphi_s + \theta_h) = \cos \varphi_s - \frac{g}{A\omega^2} \frac{\theta_h}{\sin \alpha} \quad (12)$$

根据式(8)可得: $\sin \varphi_s = \frac{1}{D}$, $\cos \varphi_s = \frac{1}{D} \sqrt{D^2 - 1}$, 并和式(9)代入式(12)经化简后得:

$$\theta_h \sqrt{D^2 - 1} (1 - \cos \theta_h) + \sin \theta_h \quad (13)$$

若物料离开筛面后不考虑振动机体的运动,根据运动学可以推出:

$$\theta_h^* = \sqrt{D^2 - 1} \quad (14)$$

2.3 抛掷指数 D 与上升最大高度 $h_{\max}$

物料在 u 方向对筛面的相对位移计算公式可积分式(11)得到:

$$\Delta u = \int_0^\theta \Delta \dot{u} d\left(\frac{\theta}{\omega}\right) = A \sin \alpha [\sin \varphi_s - \sin(\theta + \varphi_s)] + A \sin \alpha \cdot \cos \varphi_s \cdot \theta - \frac{g}{2\omega^2} \theta^2 \quad (15)$$

物料颗粒达到最高点时, $\Delta u = h_{\max}$, $\theta = \theta_h$, 代入上式后:

$$A \sin \alpha [\sin \varphi_s - \sin(\varphi_s + \theta_h)] + A \sin \alpha \cdot \cos \varphi_s \cdot \theta_h - \frac{g}{2\omega^2} \theta_h^2 = h_{\max}$$

化简:

$$\sin(\varphi_s + \theta_h) = \sin \varphi_s + \theta_h \cos \varphi_s - \frac{g \theta_h^2}{2\omega^2 A \sin \alpha} - \frac{h_{\max}}{A \sin \alpha}$$

以 $\sin \varphi_s = \frac{1}{D}$, $\cos \varphi_s = \frac{1}{D} \sqrt{D^2 - 1}$ 和式(9)代入上式得:

$$\frac{\omega^2 h_{\max}}{g(\theta_h - \sin \theta_h)} + \frac{\theta_h^2 + 2(\cos \theta_h - 1)}{2(\theta_h - \sin \theta_h)} = \sqrt{D^2 - 1}$$

设 $(\theta_h - \sin \theta_h) = B$, $\frac{\theta_h^2 + 2(\cos \theta_h - 1)}{2B} = E$ 代入上式得:

$$D = \sqrt{\left(\frac{\omega^2 h_{\max}}{Bg} + E\right)^2 + 1} \quad (16)$$

若不考虑振动机体的运动,(16)式可简化为:

$$D' = \sqrt{\frac{2\omega^2 h_{\max}}{g} + 1} \quad (17)$$

2.4 抛离角 θ_L

物料在重力和振动机体不断振动的作用下,从高度 $h_{\max}$ 下降至筛面相碰,所需的转角(即时间)称为下降角 θ_s ,物料离开筛面的整个转角称为抛离角 θ_L ,即 $\theta_L = \theta_h + \theta_s$. 当物料与筛面重新相碰时,相对位移 $\Delta u = 0, \theta = \theta_L$,代入式(15)经整理后得:

$$\sin(\varphi_s + \theta_L) = \sin\varphi_s + \theta_L \cos\varphi_s - \frac{\theta_L^2 \cdot \sin\varphi_s}{2} \quad (18)$$

将 $\sin\varphi_s = \frac{1}{D}, \cos\varphi_s = \frac{1}{D} \sqrt{D^2 - 1}$ 和式(11)代入式(18)后解得:

$$\theta_L = \sqrt{D^2 - 1} + \sqrt{D^2 + 1 - 2(\sqrt{D^2 - 1} \sin\theta_L + \cos\theta_L)} \quad (19)$$

若不考虑振动机体的运动,式(19)可简化为:

$$\theta'_L = 2\theta'_h = 2\sqrt{D^2 - 1} \quad (20)$$

2.5 理论平均速度

从图4可知,物料被抛起离开筛面后,在 j 方向的运动方程为:

$$m\Delta \ddot{j} = -ma_j$$

将式(5)代入后得:

$$\Delta \ddot{j} = A\omega^2 \cos\alpha \sin\varphi_s \quad (21)$$

对式(21)积分可求得每次抛掷运动在 j 方向相对位移公式:

$$\Delta j = \int_0^{\theta_L} \Delta \dot{j} d^2\left(\frac{\theta}{\omega}\right) = A\cos\alpha[-\sin(\varphi_s + \theta_L) + \sin\varphi_s + \theta\cos\varphi_s]$$

根据式(18)得:

$$-\sin(\varphi_s + \theta_L) + \sin\varphi_s + \theta_L \cos\varphi_s = \frac{\theta_L^2}{2} \sin\varphi_s$$

并将此式代入上式得:

$$\Delta j = \frac{1}{2} A\theta_L^2 \cos\alpha \sin\varphi_s \quad (22)$$

式(22)除以振动周期的时间 $2\pi/\omega$ 就可得理论平均速度 $\bar{v}_j$:

$$\bar{v}_j = \frac{\Delta j}{2\pi/\omega} = \frac{A\omega}{4\pi} \theta_L^2 \cos\alpha \sin\varphi_s = \frac{g}{4\pi\omega} \theta_L^2 \operatorname{ctg}\alpha \quad (23)$$

2.6 弹簧总刚度 K 和总压缩量 δ

弹簧总压缩量 δ 的大小受其弹簧非线性区影响,圆柱压缩弹簧工作区应避免非线性区,即非线性区在起始后 20% 和并圈前 20% 两段。在振动过程中为了保证两弹簧始终受压,预压量 δ_1 大于最大振幅的一半,即 $\delta_1 > 1/2 A_{\max}$,为了克服振动部分总重力 G 对弹簧的影响,应满足: $G \leq \delta_1 \cdot K$. 因此可按下列公式取:

$$\delta = (2.5 \sim 3.3) A_{\max} \quad (24)$$

$$\delta_1 = (0.4 \sim 0.45) \delta \quad (25)$$

$$G \leq \delta_1 \cdot K \quad (26)$$

按式(26)确定的总刚度 K 还应按式(4)验算。可以通过改变偏心块质量来满足振幅的要求。

3 结 论

根据对物料流化干燥的产量、抛高等要求,可根据式(17)、(10)、(4) 确定振动电机参数 $m_1 r$. 然后按式(17) 算出 D' , 经式(14)、(13)、(4) 反复计算比较求出 D , 再通过相应的公式可以求出 $\theta_L, \bar{V}, A$ 等参数. 由于参数互相影响, 因此用计算机进行计算较为方便, 其计算程序方框如图 5.

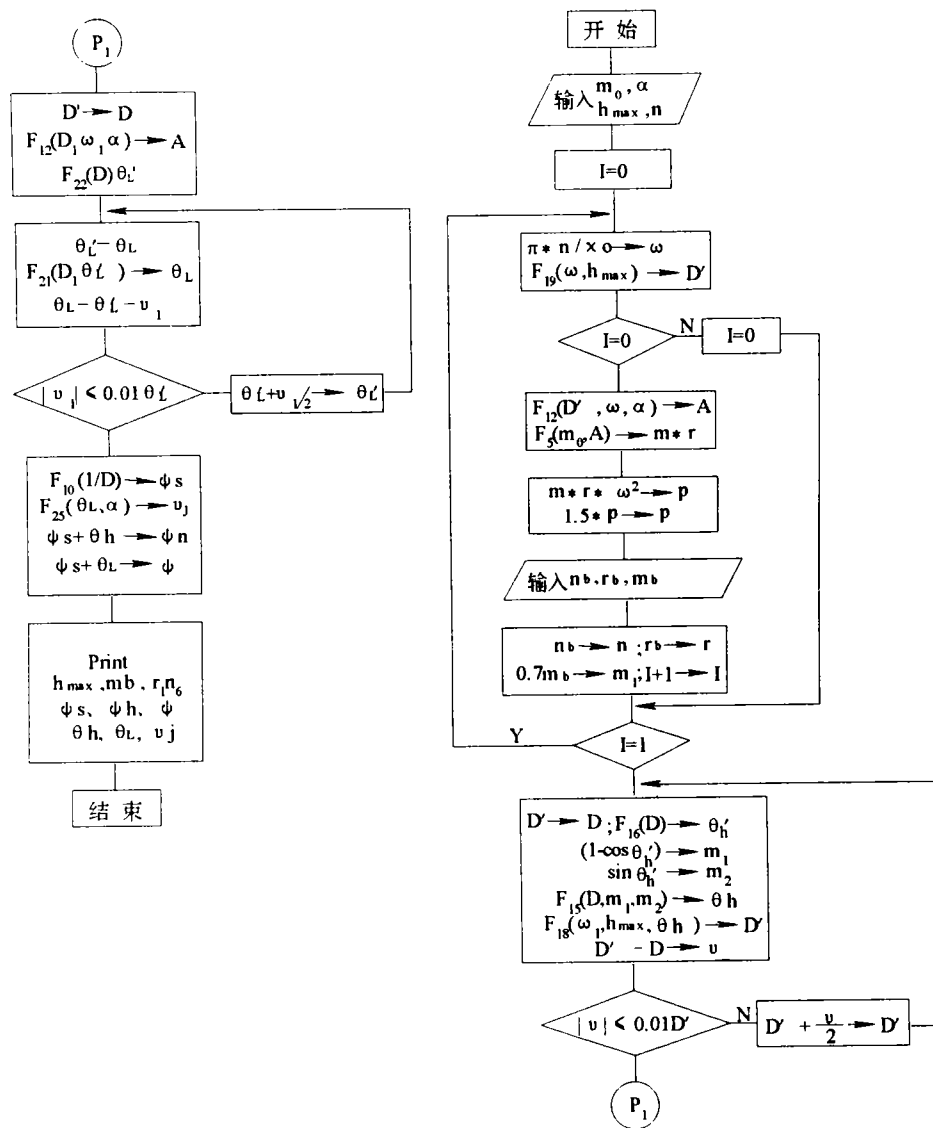


图 5 程序框图

$F_i(\quad)$ 表示计算公式

致 谢

本装置的研制是在丁霄霖、谷文英教授指导下进行的。周洪军同志在研制过程中也做了不少工作,在此深表谢意。

参 考 文 献

- 1 童景山,张克. 流态化干燥技术. 中国建筑工业出版社,1985
- 2 南京工学院,西安交通大学. 理论力学. 人民出版社,1978
- 3 张阿舟,姚起航. 振动控制工程. 航空工业出版社,1989
- 4 王 立. 粮食干燥. 中国财政经济出版社,1983
- 5 Proceedings of the International Conference Machine Dynamic and Engineering applications Xian Jiao—tong University Press,1988

Inertial Vibrating Fluid-bed Dryer

Xu Jiewei Xu Juruo
(Dept. of Mach. Eng.)

Abstract The inertial vibrating fluid-bed dryer and the related parameter computing method are introduced.

Subject-words Fluid-bed; Vibration; Vibratory motors