

行星磨机^①

龚姚腾

(南方冶金学院机械系, 江西赣州 341000)

刘世勋

(中南工业大学机械系, 长沙 410083)

摘 要

从设计依据和无因次与运动学分析入手, 对行星磨机的结构和理论分析给出了一个清楚的概念。

关键词: 行星磨机 设计依据 无因次分析 运动学分析

目前主要由振动磨来细磨硬物料, 但是随着磨碎要求的进一步提高又导致了行星磨机的诞生。本文准备就行星磨机的结构和理论分析给出一个清楚的概念。

1 行星磨机设计依据

物体既绕自轴以某一角速度自转、又绕平行于自轴的固定轴线以另一角速度公转的运动就叫行星运(转)动。行星转动系统(图1)主要由若干个均匀地分布在圆周B上的转筒A组

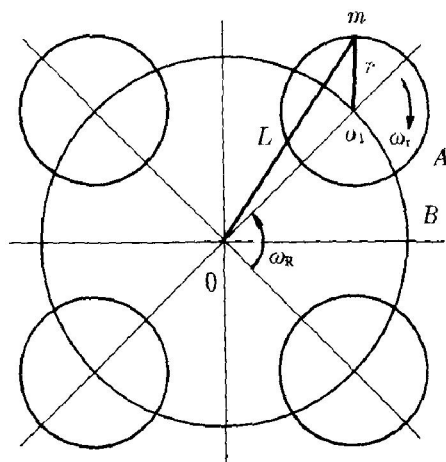


图1 行星式转动系统

成, 它们的自轴 o_1 相互平行, 自转角速度均为 ω_r ; 各转筒轴 o_1 则绕与其平行的中心轴 o 沿圆周 B 公转, 公转角速度为 ω_R 。在一般情况下, 转筒 A 内周边上质量为 m 的物料的受力 F 为

$$\vec{F} = \vec{G} + \vec{G}_1 + \vec{G}_k + m \frac{d\vec{\omega}_R}{dt} \quad (1)$$

式中 $G = m\omega_R^2 L$ —由公转引起的离心力; $G_1 = m\omega_r^2 r$ —由自转引起的离心力; $G_k = 2m\omega_R\omega_r r$ —哥氏力; $m d\vec{\omega}_R/dt$ —由公转角速度变化引起的向心力, 当 ω_R 恒定时, 此项为零

在行星转动系统中, 无论 ω_R 与 ω_r 的方向如何, 均能找出一个适当的 ω_R 使转筒周围某一区域 E 内物料的公转离心力 G 大于其自转离心力 G_1 , 这样一来, 对转筒来说便有了一个向心力; 而在转筒的其余圆周区域 D, 却仍受离心分力的作用, 如图2所示。于是就会发生这样一个特殊现象: 在转筒内处于离心力作用区域 D 内的物料, 压向转筒内壁; 但随着转筒绕轴 o_1 转动到达存在向心力的区域 E 时, 便会离开转筒内壁。行星式转动系统中的这种现象就是行星效应。也是行星磨机的设计依据。

2 行星磨机结构形式

根据行星效应原理, 目前设计的行星磨机

① 于1993年6月3日收到修正稿

大致分筒体呈立式布置和水平布置的两大类,其传动方式基本上都是皮带或齿轮传动,公转和自转方向可以相同也可以反向。比较简单的传动方案有以下三种:

- (1)中间轮和行星轮采用皮带传动;
- (2)中间轮和行星轮采用外齿轮传动;
- (3)中间轮为内齿轮,行星轮为外齿轮。

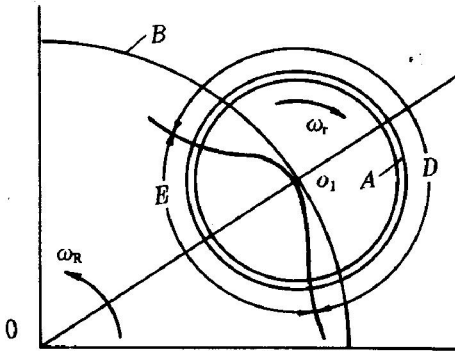


图2 行星效应现象

3 无因次分析

在通常情况下,球磨机内钢球拥有的最大位能为 mgH , 其中 m 为钢球质量(kg), H 为钢球抛落轨迹始点至筒底的高度(m), 这个能量由重力场提供。假设位能中用于击碎矿石的那部分能量为 $kmgH$, k 为系数。这部分能量转变为用来击碎矿石的功 Fx , 其中 F 为击碎力(N), x 为击碎力作用路程。因此筒型球磨机在重力场下的相似条件可用下式表征:

$$\frac{k_h m_h g_h H_h}{F_h x_h} = \frac{k_m m_m g_m H_m}{F_m x_m}$$

式中 h 代表天然模型; m 代表模拟模型

由此可以得出如下无因次相似参数等式:

$$\pi = kmgH/Fx \quad (2)$$

$$x = k_1 \cdot d$$

式中 k_1 —比例系数, 对不同粒度和种类的矿石有不同的值;

d —块矿直径

假设钢球下落高度 H 与筒体直径 D 成比例:

$$H = k_2 \cdot D \quad (4)$$

式中 k_2 为比例系数

由牛顿第二定律有:

$$F = ma \quad (5)$$

式中 a 为钢球开始击中矿石至击碎矿石时的平均加速度(为一负值)(m/s^2)

将(3)、(4)、(5)式代入(2)式得

$$\pi = kmgH/Fx = kk_2gD/k_1ad \quad (2a)$$

因 $a = |d^2x/dt^2|$, 且积分不会影响数值的因次。因此由(2a)式可确定钢球在一次击碎矿石时矿石的破碎时间为

$$t = \frac{k_1 d}{D} \sqrt{\frac{\pi}{kk_2g}} \quad (6)$$

式中 $\sqrt{\pi/kk_2g}$ 对于同一球磨机和矿石而言为一常数

对于大多数岩石而言, 可假定为具有弹性性质, 即服从虎克定律。因此块矿粉碎时有:

$$x/d = \sigma_p/\varepsilon = k_1$$

式中 σ_p —矿石破碎应力; ε —矿石产生的应变, 代入 k_1 值得:

$$t = \frac{\sigma_p \cdot d}{\varepsilon \cdot D} \sqrt{\pi/kk_2g} \quad (6a)$$

由此可见, 矿石受钢球抛落作用而击碎的时间与球磨机内完成磨矿的给定时间有关, 此时间越长, 磨矿机的生产能力就越小。另外, 随着被击碎矿石的强度与粒度积($\sigma_p \cdot d$)的增大磨矿时间将延长; 而增大磨矿机的直径, 则磨矿时间占总时间的比例减小。

对于行星式磨机, 根据力学原理可知钢球在离心力场的位能为:

$$U_{cen} = m \cdot \omega^2 \cdot R^2 \quad (7)$$

式中 R —旋转半径, m;

m —球的质量, kg;

ω —旋转钢球的圆周速度, rad/s

若矿石被击碎所消耗的功 Fx 不变, 则离心力场下的无因次相似参数为

$$\pi = km\omega^2 R^2/Fx \quad (8)$$

同理可得, 钢球在一次击碎矿石时, 矿石破碎的时间为:

$$t = \frac{\sigma_p \cdot d}{\varepsilon \cdot \omega \cdot R} \sqrt{\frac{\pi}{kk_2g}} \quad (9)$$

从(9)式可看出, 在离心力场下, 行星式离心

磨机的生产能力可由转速 ω 与旋转半径 R 来调节。在此条件下, 即使是一个很小的磨矿机, 只要能保持很高的转速, 也能获得较高的生产能力。

4 运动学分析

如图3所示对行星磨机建立坐标系, 其中 P 为磨筒自转中心, S 为磨筒公转中心。

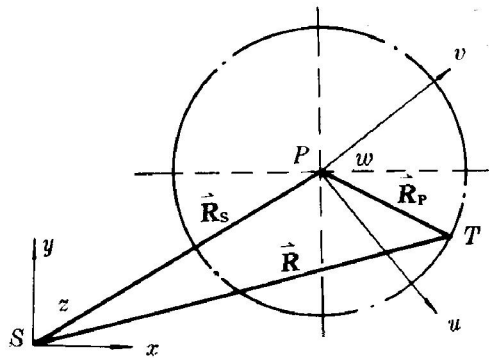


图3 由矢量 $\vec{R}$ 表示的绝对运动

$$\vec{e}_p = (\vec{e}_u, \vec{e}_v, \vec{e}_w) \quad (10)$$

$$\vec{e}_s = (\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z) \quad (11)$$

这样就可由位置矢量 $\vec{R}$ 来描述筒壁上颗粒的运动, 当然, 颗粒与筒壁之间的摩擦应足以防止产生滑动。

$$\vec{R} = \vec{R}_s + \vec{R}_p \quad (12)$$

物料在位置 T 时的绝对速度为:

$$\vec{V} \frac{d}{dt} \vec{R} = \vec{R}_s + \vec{R}_p \quad (13)$$

$$\text{先计算牵连速度 } \vec{V}_p = \vec{R}_s \quad (14)$$

$$\text{设动坐标系绕定坐标系的转速为 } \vec{\omega} = \vec{\omega}_F \quad (15)$$

而 T 点相对于 P 点的相对速度为:

$$\vec{V}_{T \cdot \text{rel}} = \vec{R}_{T \cdot \text{rel}} = \dot{\vec{R}}_p \cdot \vec{e}_p \quad (16)$$

因此有 T 位置时的绝对速度:

$$\vec{V} = \vec{V}_p + \vec{\omega}_F \times \vec{R}_p + \vec{V}_{T \cdot \text{rel}} \quad (17)$$

$$\text{加速度 } \vec{a} = \frac{d}{dt} \vec{V} = \dot{\vec{R}} \quad (18)$$

对(17)式微分得:

$$\begin{aligned} \vec{a} = & \vec{a}_p + \vec{\omega}_F \times \vec{R}_p + \vec{\omega}_F (\vec{\omega}_p \times \vec{R}_p + \vec{V}_{T \cdot \text{rel}}) \\ & + \vec{\omega}_F + \vec{V}_{T \cdot \text{rel}} + \vec{a}_{T \cdot \text{rel}} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{令 } \vec{a}_F = \vec{a}_p + \vec{\omega}_F \times \vec{R}_p + \vec{\omega}_F (\vec{\omega}_p \times \vec{R}_p)$$

$$\text{并有哥氏加速度 } \vec{a}_c = 2\vec{\omega}_F \times \vec{V}_{T \cdot \text{rel}} \quad (20)$$

则(19)式可简写成:

$$\vec{a} = \vec{a}_F + \vec{a}_c + \vec{a}_{T \cdot \text{rel}} \quad (21)$$

给转动系统加一约束成平面问题, 并令矢量 $\vec{e}_x$ 与 $\vec{R}_p$ 的方向相同(如图4), 则由(19)式或(21)式可得行星磨转筒中物料的加速度表达式为:

$$\begin{aligned} \vec{a}_T = & [\omega_s^2 \cdot R_s (\cos\beta - (1 \mp \frac{\omega_p}{\omega_s})^2 \cdot \frac{R_p}{R_s})] \vec{e}_x \\ & - [\omega_s^2 \cdot R_s \cdot \sin\beta] \vec{e}_y \end{aligned} \quad (22)$$

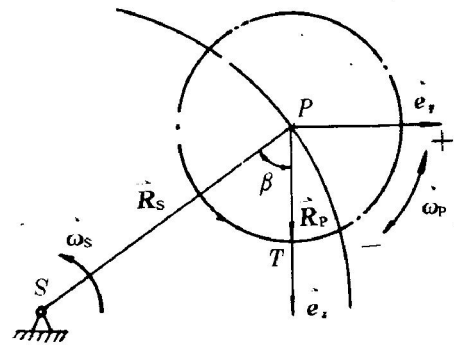


图4 用位置矢量 $\vec{R}_p$ 表示的相对运动

由力学知识可知, 物料在筒壁上甩脱的临界条件为:

$$a_T \cdot \vec{e}_x = 0$$

代入(22)式中, 得物料被甩出时角度 β 的表达式:

$$\beta = \arccos[(1 \mp (\frac{\omega_p}{\omega_s})^2) \cdot \frac{R_p}{R_s}] \quad (23)$$

上述分析都是针对单颗粒子的, 对于整体物料, 同时还必须考虑固体粒子之间的互相约束和干涉现象。因此不能认为物料也在单颗粒分析时的位置 A (图5)离开筒壁, 而要取决于倾角 α 。当 $\beta = 0^\circ$ 或 360° 时, 物料则出现离心状态。

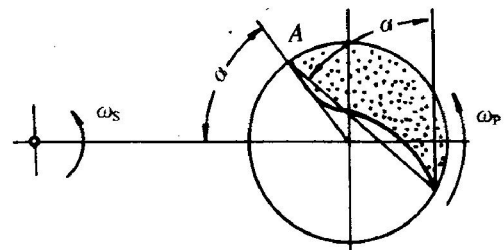


图5 脱离点 A 与倾角 α 的关系

从(23)式可推出临界速比及临界半径:

$$\omega_c^* = \pm \sqrt{1/R^*} - 1 \quad (24)$$

$$R_c^* = 1/(1 \pm \omega^*)^2 \quad (25)$$

其中 $\omega^* = \omega_p / \omega_s$; $R^* = R_p / R_s$.

和磨碎技术目前尚未成熟,主要原因是材料的耐磨性和强度问题尚未解决。有关磨球的动力学问题和运动轨迹仿真将在以后的文章中叙述。

5 结语

作为新型超细磨设备的行星磨机,是磨矿机发展的一项突破。其应用前景将非常广阔,在陶瓷、磁性金属粉末、食品、医药及化工等超细微粒子的制造领域尤其如此。但这种设备

参考文献

- 1 Schmidt P, Korber R. Aufbereitungs-Technik, 1991, 12: 659—669.
- 2 王启运、姜恩泽. 选矿机械, 1987; 3: 28—30.
- 3 龚姚腾. 硕士学位论文, 中南工业大学, 1993.