

# 离心磨矿机的工作状态模型<sup>①</sup>

唐果宁

(湘潭工学院机械工程系, 湘潭 411201)

周 贤

(焦作工学院矿山机械系, 焦作 454000)

**摘 要** 通过对离心磨矿机工作过程的试验分析, 研究了影响离心磨矿机工作状态及破碎效果的诸多因素联合作用的工作特性。在此基础上, 运用“灰箱”理论, 建立了包括能量、给料和设备工矿参数在内的稳态模型。它不仅描述了其生产运行过程, 而且还还可有效地对磨矿机进行监控和过程优化。通过实例论证, 该模型可为离心磨矿机的实际应用提供理论依据。

**关键词** 离心磨矿机 工作状态 稳态模型

**中图分类号** TD435

众所周知, 离心磨矿机是置介质和物料于一偏心的滚筒中高速旋转, 使介质获得 9~15 倍于重力的离心惯性力对物料进行冲击破碎, 因而具有较高的碎矿效率和均匀的产品粒度<sup>[1]</sup>。因此, 离心磨矿机无论是在结构上还是在运行方式上已不同于普通球磨机, 我们难以运用传统的功耗理论来描述其粉碎过程以及运用单因素法对其过程进行控制<sup>[2, 3]</sup>。虽然, 自 50 年代起就有学者将相似理论方法应用于粉磨过程, 建立了相应的数学模型<sup>[4-6]</sup>, 但这种模型因缺少全面工艺参数, 故还不能系统地描述粉磨过程。此外, 也有人采用系统工程方法对球磨过程及影响因素进行系统分析, 选出主要因素和参数, 用量纲分析法求得描述系统特性的稳定性参数-相似准数群之间关系, 以这些相似准数作为模型参数进行试验回归建模<sup>[7, 8]</sup>。对于离心磨矿机, 由于粉碎过程的因素多且复杂, 这不仅仅有能量传递的影响, 而且还有磨机转速、装球量、球径分布、偏心距等诸多因素的影响。

本文试图对上述因素联合作用的工作特性进行分析, 运用“灰箱”理论, 通过试验来研究其输入、输出状态参数之间的关系, 建立数学模型, 从而为离心磨矿机的监控和过程优化提

供理论依据。

## 1 离心磨矿机的工作过程分析

离心磨矿机可以简化为如下模型<sup>[1]</sup>(如图 1)。滚筒 2 由长度为  $e$  的偏心杆 1 带动绕固定点  $O$  以角速度  $\omega$  在平面作曲线平动, 滚筒 2 与柔性杆 3 铰接, 只能作曲线平动, 即  $M$  点在下,  $H$  点在上,  $S$  点在左,  $L$  点在右, 而滚筒轴心  $O$  作圆周运动。当能量以滚筒转动形式输入后, 滚筒内的介质和物料先是随滚筒一起运动, 转动到一定位置(如图 1 中  $\alpha$  角), 介质和物料被抛起(斜抛), 然后和转动的滚筒发生碰撞, 从而获得冲击动能而加速。加速后的介质和物料进一步和滚筒碰撞再次加速, 以至介质获得足够的动能对物料进行冲击破碎。因此, 离心磨矿机的工作过程非常复杂, 既有介质和物料的抛射、与滚筒的碰撞和摩擦, 又有介质和物料之间的相互影响。此外, 装球量、球径分布、偏心距以及滚筒的尺寸大小等对离心磨矿机的碎矿效果也有影响。由于其介质和物料运动、破碎空间变化以及能量传递过程均为动态值, 仅依靠现有的测试手段难以弄清其变化过程。为此, 我们把离心磨矿机的运行过

① 煤炭科技发展项目资助 97-37 收稿日期: 1997-09-24; 修回日期: 1998-01-18 唐果宁, 男, 38 岁, 副教授

程当作“灰箱”来处理是可行的(如图 2)。

虽然离心磨矿机的工矿参数为动态值,但是,除一些随机干扰所产生的波动(如电压波动)外,各变量的均值不随时间变化,可以视为稳定状态<sup>[10]</sup>。

因此,我们把磨机的稳态工作点作为研究对象,并建立这一状态下的数学模型。其操作变量包括:装球量、球径分布、偏心距、转速、滚筒尺寸等。

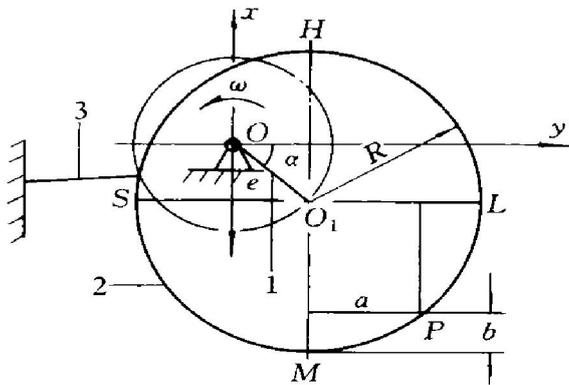


图 1 离心磨矿机滚筒运动模型

Fig. 1 Movement model of centrifugal attritor

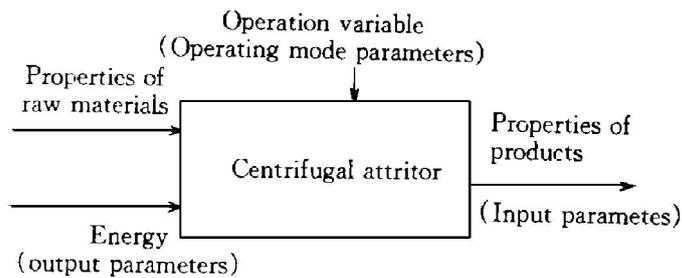


图 2 离心磨矿机“灰箱”模型

Fig. 2 Grey box of centrifugal attritor

## 2 模型的建立与求解

### 2.1 模型的建立

设磨机的给料总质量为  $F(g)$ , 根据其粒度, 分为  $n$  级, 各级的质量配比向量为:

$$f = [f_1, f_2 \dots, f_n]^T$$

式中  $f_1$  为最粗粒级的质量,  $f_n$  为最细粒级的质量, 且有  $F = \sum_{i=1}^n f_i$

设磨机的产品总质量为  $P(g)$ , 同样分为  $n$  级, 各级的质量配比向量  $P$  为:

$$P = [p_1, p_2 \dots, p_n]^T$$

式中  $p_1$  为最粗粒级的质量,  $p_n$  为最细粒级的质量, 且有  $P = \sum_{i=1}^n p_i$

设  $X$  为物料破碎分布概率矩阵, 可表示为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ x_{21} & x_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & \dots & x_{nn} \end{bmatrix}$$

式中  $x_{ij}$  表示给料中的  $j$  粒级颗粒破碎后进入产品中  $i$  粒级的概率;

设  $C$  为磨球等工矿参数对物料破碎的影响矩阵, 可表示为

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nm} \end{bmatrix} \quad \text{又有}$$

式中  $c_{ij}$  表示第  $j$  项工矿参数对第  $i$  级物料的影响系数。

取磨机的操作变量组成粉碎过程的工矿参数向量  $\alpha$ , 表示为

$$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_m]$$

式中  $\alpha_1$ —装球量,  $\alpha_2$ —球径分布,  $\alpha_3$ —偏心距,  $\alpha_4$ —磨机转速,  $\alpha_m$ —滚筒尺寸。

由以上条件, 可得出离心磨矿机运行过程的物料破碎数学模型:

$$P = Xf + C\alpha \quad (1)$$

设  $E$  为输入的能量向量, 可表示为:

$$E = [E_1, E_2, E_3, \dots, E_k]^T$$

式中  $E_k$  表示第  $k$  个运行周期的输入能量。

设  $U$  为各粒级的物料对能量的吸收矩阵, 可表示为:

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ u_{k1} & u_{k2} & \dots & u_{kn} \end{bmatrix}$$

式中  $u_{ij}$  表示第  $j$  级物料对第  $i$  个运行周期输

入能量的吸收系数。

设  $V$  为工矿参数对能量的影响矩阵, 可表示为

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ v_{k1} & v_{k2} & \dots & v_{km} \end{bmatrix}$$

式中  $v_{ij}$  表示第  $j$  项工矿参数对第  $i$  个运行周期输入能量的影响系数;

$E$  是  $X$  和  $C$  共同运行的结果, 仿照式(1)可得离心磨矿机的能耗矩阵:

$$E = Uf + V\alpha \tag{2}$$

式(1)和式(2)分别表示了离心磨矿机运行过程的两个重要方面, 因此将两式联合, 可得离心磨矿机运行过程的稳态数学模型:

$$\begin{bmatrix} P \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & C \\ U = Vn \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ \alpha \end{bmatrix} \tag{3}$$

### 2.2 模型的求解

对于模型(3), 可用如下方法求解<sup>[11]</sup>:

首先测出  $k(k \geq 1)$  个运行周期所对应的输入、输出参数, 即:  $[f \ \alpha]^T, [P \ E]^T$  矩阵。将输入、输出矩阵代入式(3)并施以最小二乘法回归运算, 经整理可得离心磨矿机运行过程的稳态特性矩阵:

$$\begin{bmatrix} X & C \\ U & V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \\ E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ \alpha \end{bmatrix}^T \left[ \begin{bmatrix} f \\ \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ \alpha \end{bmatrix}^T \right]^{-1} \tag{4}$$

### 3 模型的应用举例

已知某离心磨矿机试验前和试验后的有关参数如下:

$$\begin{bmatrix} X & C \\ U & V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.17 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.11 & 0.16 & 0.2 & 0.15 & 0.21 & 0.3 & 0.22 & 0.19 & 0.25 \\ 0.22 & 0.15 & 0 & 0 & 0 & 0.14 & 0.18 & 0.11 & 0.21 & 0.34 & 0.27 & 0.32 & 0.41 & 0.33 \\ 0.17 & 0.25 & 0.2 & 0 & 0 & 0.22 & 0.3 & 0.37 & 0.15 & 0.24 & 0.33 & 0.35 & 0.29 & 0.36 \\ 0.12 & 0.2 & 0.25 & 0.15 & 0 & 0.34 & 0.42 & 0.3 & 0.28 & 0.4 & 0.17 & 0.21 & 0.35 & 0.28 \\ 0.12 & 0.1 & 0.15 & 0.28 & 0.43 & 0.16 & 0.2 & 0.22 & 0.31 & 0.35 & 0.4 & 0.42 & 0.29 & 0.33 \\ 0.2 & 0.15 & 0.28 & 0.22 & 0.25 & 0.51 & 0.45 & 0.38 & 0.47 & 0.36 & 0.43 & 0.34 & 0.44 & 0.5 \end{bmatrix}$$

图3 模型应用计算矩阵

Fig. 3 Calculating matrix of model application

给料: 煤矸石; 其粒度为: 5~ 1.25 mm; 其质量配比向量为:  $f = (0.5, 0.1, 0.11, 0.2, 0.09)$ ; 破碎介质:  $d12$  mm 的钢球 40%,  $d15$  mm 的钢球 40%,  $d20$  mm 的钢球 20%; 磨机转速: 400 r/min; 磨矿时间: 10 min; 磨机偏心距: 20 mm; 电流, 前: 4.5 A, 后: 5.5 A; 产品粒度: 1.25~ 0.097 mm; 其质量配比向量为:  $p = (0.34, 0.03, 0.04, 0.09, 0.5)$ 。

由上述试验条件可得其工况参数向量为:  $\alpha = (0.3, 0.4, 0.4, 0.2, 0.02, 41.9, 0.03)$ ; 能量参数为:  $E = (220 w)$ ;

将有关向量代入式(4)并计算, 可得出结果如图3所示, 由此可知式(3)正确。

### 4 模型的应用与讨论

从式(4)的稳态特性矩阵中的  $X$  子阵中, 可以得到离心磨矿机中不同粒级物料的破碎效果与速度信息; 从  $C$  子阵中, 可以得到离心磨矿机工矿参数对物料破碎效果与速度影响的强弱情况; 从  $U$  子阵中, 可以得到不同粒级物料对能量吸收的强弱情况; 从  $V$  子阵中, 可以得到离心磨矿机工矿参数对能量消耗的影响情况。

利用本模型, 可以根据生产实际要求, 在确定主要影响因素的条件下, 减少操作变量, 简化模型, 找出最佳工艺参数来指导生产, 从而达到高效节能的目的。利用本模型还有助于全面了解离心磨机系统特性, 从复杂的内部关系中理清深入认识系统的思路。

由以上分析可知: 动态平衡是磨机系统正

常工作的先决条件, 作为状态变化外因(如给料特性等)的输入稳定是其关键, 而保持系统状态稳定的内因是由磨机自身的结构因素和操作变量(如磨机构造、配球等)所决定的, 对磨机系统工作进行评价的指标是系统的输出(如产品粒度等)。因此, 对磨机的破碎效果进行评价必须全面考虑各因素的联合作用, 忽视任一方面都将造成结果的片面性和系统状态的不稳定。

## 5 结论

从以上分析, 我们可以得出如下结论:

(1) 本模型从输入、输出状态出发, 从多个侧面讨论了工作状态因素对离心磨矿机运行过程的影响, 较全面、细致地描述了其生产运行过程。

(2) 利用本模型, 可以知道工作状态因素的变化( $\alpha$  向量)对物料破碎效果( $P$  矩阵)的影响( $C$  矩阵), 也知道对能量( $E$  矩阵)的影响( $V$  矩阵)。从而可有效地对磨机进行监控和过程优化。

(3) 本模型实现了多变量的系统优化。对

不同的工作要求, 在确定主要因素的前提下, 可求得最优操作条件。

## REFERENCES

- 1 Liloyd P J D. Mining Machinery( 矿山机械), 1988; (11): 42~ 47.
- 2 Kelsall D F. Tran Inst Metall, 1968, (77): 120.
- 3 Lynch A J. Design and Control, 1977, 85- 87.
- 4 Shen Ziqiu( 沈自求). Journal of Dalian Institute of Technology( 大连工学院学报), 1956, (6): 35.
- 5 Andreasen A H M. Trans Ins Chem. Eng, 1957, (35): 104.
- 6 Sun Yubo( 孙玉波). Dongbei Gongxueyuan Keji Qingbao( 东北工学院科技情报), 1979.
- 7 Ge Guosheng( 盖国胜). Journal of Mining Engineering( 矿冶工程), 1994, 14(2): 22- 26.
- 8 David F W and Noue H. Butterworth, 1982: 46.
- 9 Tang Guoning *et al*( 唐果宁等). Journal of Xiangtan Mining Institute( 湘潭矿业学院学报), 1993, (4): 24- 28.
- 10 Ren Zhiyu( 任志宇等). Journal of China Coal Society( 煤炭学报), 1997, (3): 312- 317.
- 11 Ren Zhiyu( 任志宇) and Wang Zhendong( 王振东). Journal of Power Engineering( 动力工程), 1995, (4): 51- 55.

# MATHEMATICKAL MODEL FOR OPERATION OF A CENTRIFUGAL ATTRITOR

Tang Guoning and Zhou Xian<sup>†</sup>

*Xiangtan Institute of Technology, Xiangtan 411201, P. R. China*

<sup>†</sup> *Jiaozuo Institute of Technology, Jiaozuo 454000, P. R. China*

**ABSTRACT** By means of experiment and observation for work process of centrifugal attritor, the features of a centrifugal attritor are analysed, which is a combination of multiple factors that affect work state and broken effect. Based on this, a steady state model was established by applying grey box theory, which not only describes the moving process but also provides monitoring and process optimization effectly for centrifugal attritor. It has been also verified by living example that this model can provide theoretical basis for the practical application of the centrifugal attritor.

**Key words** centrifugal attritor work state steady state model

(编辑 何学锋)