

文章编号: 1003-7837(2001)01-0024-05

高梯度磁选数学模型及计算机模拟的研究(II)

向发柱

(广州有色金属研究院选矿工程研究所, 广东广州 510651)

摘要: 利用有限差分法、龙格-库塔法等数值方法对高梯度磁选数学模型进行了数值求解, 估计出了模型参数与影响因素之间的关系表达式。选择磁性产品的产率、品位及回收率等工艺指标为模型输出指标, 开发了高梯度磁选计算机模拟软件, 在各种操作条件下对高梯度磁选非线性动态模型进行了验证和模拟研究。结果表明, 模型的计算值和试验结果相一致, 说明建模的方法是可行的, 模型的结构是合理的, 模型能比较全面地、正确地描述各种影响因素对高梯度磁选过程的影响。

关键词: 数学模型; 计算机模拟; 高梯度磁选
中图分类号: TD924.11 **文献标识码:** A

1 模型参数估计

第1部分建立的描述高梯度磁选过程的非线性动态模型中^[1], 有三个参数必须确定, 这三个参数是: 单位长度时粒度级别为 d_i 、磁性级别为 χ_i 物料的最大捕集机率 $K0_{ij}$; 单位体积中粒度级别为 d_i 、磁性级别为 χ_i 物料的实际饱和捕集体积 V_{Tij} ; 非磁性颗粒的夹杂参数 k 。

采用分步估计的方法, 利用先进的算法, 编制不同的专用程序, 借助于计算机求出模型参数与颗粒粒度、颗粒磁性、磁场强度、矿浆流速、矿浆浓度等影响因素之间的关系表达式, 获得了描述高梯度磁选过程的非线性动态模型表达式, 其形式如式(1)所示。式中: $V_{ij}(x, \tau)$ 是在 τ 时刻、磁选机分选区 x 处单位体积中, 粒度级别为 d_i 、磁性级别为 χ_i 物料的捕集体积; $C_{ij}(x, \tau)$ 是矿浆浓度, 即在磁选机分选区 x 处、 τ 时刻时, 单位体积矿浆中粒度级别为 d_i 、磁性级别为 χ_i 的物料所占的体积; V_0 是矿浆流速, 即矿浆流入磁选机的速度; $K0_{ij}$ 是单位长度时, 磁介质对粒度级别为 d_i 、磁性级别为 χ_i 颗粒的最大捕集机率; $V(x, \tau)$ 是捕集总体积, 即在磁选机分选区 x 处、 τ 时刻时, 单位体积中各个粒度级别、各个磁性级别的物料的捕集体积之和; V_{Tij} 是单位体积中粒度级别为 d_i 、磁性级别为 χ_i 的物料的实际饱和捕集体积; e 是非磁性颗粒的夹杂概率; k 是非磁性颗粒的夹杂参数; V_{Tmn} 是单位体积中粒度级别为 d_m 、磁性级别为 χ_n 的磁性颗粒的饱和捕集体积; $K0_{mn}$ 是单位长度时, 磁介质对粒度级别为 d_m 、磁性级别为 χ_n 磁性颗粒的最大捕集机率; $C_{mn}(x, \tau)$ 是矿浆浓度, 即在磁选机分选区 x 处、 τ 时刻时, 单位体积矿浆中粒度级

收稿日期: 2000 11 20

作者简介: 向发柱 (1970), 男, 湖北宜昌人, 高级工程师, 博士。

别为 d_m 、磁性级别为 χ_m 的磁性颗粒所占的体积; a_c, b_c, c_c 是常数; $a_k, a_{kl}, a_{kk}, b_k, b_{kl}, b_{kk}, c_k, c_{kl}, c_{kk}$ 是变量的系数; r_k, r_l 是变量。

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial V_{ij}(x, \tau)}{\partial \tau} + V_0 \frac{\partial C_{ij}(x, \tau)}{\partial x} = 0; \\ & \frac{\partial V_{ij}(x, \tau)}{\partial \tau} = K_{0ij} \left[1 - \frac{V(x, \tau)}{V_{Tij}} \right] V_0 C_{ij}(x, \tau), \quad [V_{Tij} > V(x, \tau)]; \\ & \frac{\partial V_{ij}(x, \tau)}{\partial \tau} = e V_0 C_{ij}(x, \tau), \quad [V_{Tij} \leq V(x, \tau)]; \\ & V(x, \tau) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J V_{ij}(x, \tau); \\ & e = \frac{k \sum K_{0mn} \left[1 - \frac{V(x, \tau)}{V_{Tmn}} \right] V_0 C_{mn}(x, \tau)}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J V_0 C_{ij}(x, \tau)}, \quad [V_{Tmn} > V(x, \tau)]; \\ & \ln V_{Tij} = a_c + \sum_k a_k r_k + \sum_{l < k} a_{kl} r_k r_l + \sum_k a_{kk} r_k^2; \\ & \ln K_{0ij} = b_0 + \sum_k b_k r_k + \sum_{l < k} b_{kl} r_k r_l + \sum_k b_{kk} r_k^2; \\ & \ln k = c_0 + \sum_k c_k r_k + \sum_{l < k} c_{kl} r_k r_l + \sum_k c_{kk} r_k^2. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

2 输出指标模型

在选矿试验中分选工艺指标一般用产率、品位、回收率等表示, 因此, 系统的输出变量选产率、品位、回收率等为最终分选工艺指标。

设分选时间为 T ; 在磁选机分选区 x 处, T 时刻时, 单位体积中粒度级别为 d 、磁性级别为 χ 的物料的捕集体积设为 $V_{ij}(x, T)$; 设磁选机分选区长度为 L ; 设磁选机分选腔的横切面积为 A ; 设干净介质的孔隙率为 ϵ_0 ; 设矿浆流速为 V_0 ; 设在磁选机入口处, 粒度级别为 d 、磁性级别为 χ 物料的给矿浓度为 C_{0ij} ; 设给料中粒度级别为 d 、磁性级别为 χ 物料的质量分数为 W_{ij} ; 设给料中粒度级别为 d 、磁性级别为 χ 物料的品位为 β_{ij} , 则粒度级别为 d 、磁性级别为 χ 物料的回收率为

$$r_{ij} = \frac{\int_0^L V_{ij}(x, T) \epsilon_0 A dx}{\epsilon_0 A V_0 T C_{0ij}} = \frac{\int_0^L V_{ij}(x, T) dx}{V_0 T C_{0ij}} \quad (2)$$

磁性产品的产率为

$$r = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J W_{ij} r_{ij} \quad (3)$$

磁性产品的回收率为

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J r_{ij} \beta_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J W_{ij} \beta_{ij}} \quad (4)$$

磁性产品的品位为

$$\beta = \frac{\alpha \epsilon}{r} = \frac{(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J W_{ij} \beta_{ij}) \times (\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J r_{ij} \beta_{ij}) / \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J W_{ij} \beta_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J W_{ij} r_{ij}} = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J r_{ij} \beta_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J W_{ij} r_{ij}} \quad (5)$$

以上式(3)、(4)、(5)就是模型输出的最终指标表达式。

3 模型验证及计算机模拟

已建立的非线性动态模型不能直接进行模拟运算,必须用数值方法把它变换为“可以计算的模型”,即模拟模型(也称仿真模型),才能在计算机上进行模拟研究。

3.1 模型离散化

式(1)所建立的模型不能获得解析解,必须离散化。利用有限差分法、龙格-库塔法等数值方法,可得到如下的离散化的模型:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{V_{ij}(m, k+1) - V_{ij}(m, k)}{\Delta \tau} + \frac{[C_{ij}(m+1, k) - C_{ij}(m, k)]V_0}{\Delta \tau} = 0; \\ & \frac{V_{ij}(m, k+1) - V_{ij}(m, k)}{\Delta \tau} = K0_{ij} \left[1 - \frac{V(m, k)}{V_{Tij}} \right] V_0 C_{ij}(m, k), \quad [V_{Tij} > V(m, k)]; \\ & \frac{V_{ij}(m, k+1) - V_{ij}(m, k)}{\Delta \tau} = e V_0 C_{ij}(m, k), \quad [V_{Tij} \leq V(m, k)]; \\ & e = \frac{k \sum_{i=1}^I K0_{im} \left[1 - \frac{V(m, k)}{V_{Tmm}} \right] V_0 C_{im}(m, k)}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J V_0 C_{ij}(m, k)}, \quad [V_{Tmm} > V(m, k)]; \\ & V(m, k) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J V_{ij}(m, k); \\ & \ln V_{Tij} = a_0 + \sum_k a_k r_k + \sum_{l < k} a_{kl} r_k r_l + \sum_k a_{kk} r_k^2; \\ & \ln K0_{ij} = b_0 + \sum_k b_k r_k + \sum_{l < k} b_{kl} r_k r_l + \sum_k b_{kk} r_k^2; \\ & \ln k = c_0 + \sum_k c_k r_k + \sum_{l < k} c_{kl} r_k r_l + \sum_k c_{kk} r_k^2. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

上述离散化的微分方程组的初始条件和边界条件离散化为:

$$\begin{aligned} k=0, m=0, 1, 2, \dots, M-1, V_{ij}(m, 0) &= 0 \\ m=0, k=0, 1, 2, \dots, N-1, C_{ij}(0, k) &= C_{0ij} \end{aligned}$$

通过离散化的模型及其初始条件和边界条件,可求出 $V_{ij}(x, T)$, 根据式(2)、(3)、(4)及(5)便可求出最终的产率、品位、回收率等分选工艺指标。

3.2 计算机模拟程序

高梯度磁选数学模型的计算机模拟程序结构框图如图1所示。该程序由七个模块组成,即由一个主程序块和六个子程序块组成。各个模块的主要功能如下:(1)计算机模拟主程序(HGMSSIM):调用子程序 RESAMP 输入试验数据和分选物料特性基本数据;调用子程序 RESULTS 计算产率、品位及回收率等各项分选指标;调用 OUTPUT 子程序输出产率、品位及回收率等各项分选指标。(2)试验数据输入及预处理子程序(RESAMP):从磁盘读入试验数据,并对数据进行预处理。从磁盘读入分选物料特性基本数据,如:各个粒度和磁性级别的粒

度及比磁化率; 各个粒度和磁性级别颗粒的初始体积浓度; 各个粒度和磁性级别颗粒的质量分数; 各个粒度和磁性级别颗粒的品位等; (3) 计算模拟结果子程序 (RESULTS); 调用子程序 FUNVT、FUNK0 及 FUNVK, 根据式(6)及其初始条件和边界条件求出 $V_{ij}(x, T)$, 然后根据式(2)、(3)、(4)及(5)求出磁性产品的产率、品位、回收率等分选指标。(4) 参数 V_T 求解子程序 (FUNVT); 根据 V_T 与各影响因素之间的关系表达式求出。(5) 参数 K_0 求解子程序 (FUNK0); 根据 K_0 与各影响因素之间的关系表达式求出。(6) 参数 k 求解子程序 (FUNVK); 根据 k 与各影响因素之间的关系表达式求出。(7) 输出模拟结果子程序 (OUTPUT); 输出磁选磁性产品模拟结果和试验结果, 这些结果包括磁性产品产率、品位及回收率。

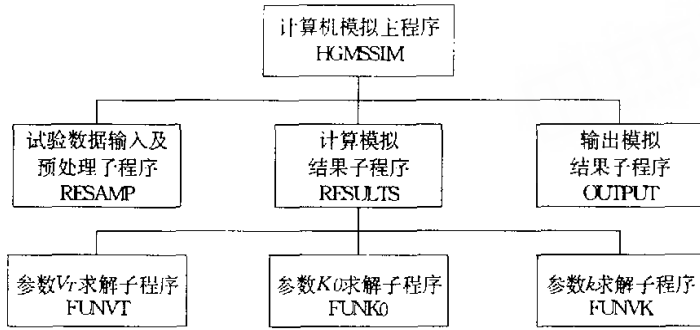


图 1 高梯度磁选数学模型计算机模拟程序结构框图

Fig. 1 Computer simulation program block diagram of the mathematical model of high-gradient magnetic separation

3.3 模型验证及计算机模拟

进行模型验证和模拟试验的矿样为黑钨矿和石英的混合物. 在不同的给料粒度组成和不同的操作条件下, 高梯度磁选非线性动态模型模拟结果与试验结果的比较如图 2 所示. 由图 2 可以看出, 模型的计算值和试验结果相一致, 模型的模拟结果和试验结果非常接近. 这说明建模的方法是可行的, 模型的结构是合理的. 模型能比较全面地、正确地描述各种操作变量对磁选过程的影响.

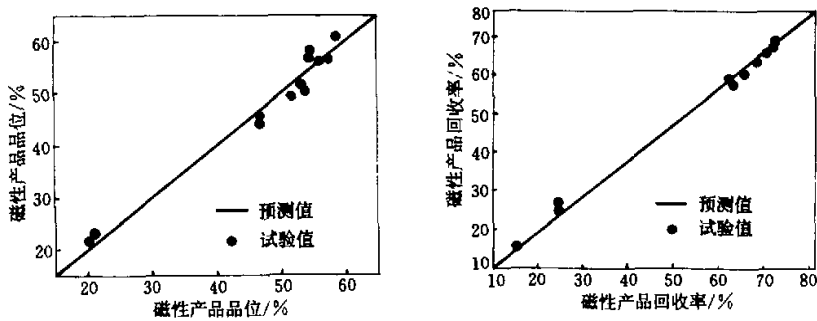


图 2 各种操作条件下的模型预测值和试验值

Fig. 2 Model predictions and experimental values under various operating conditions

4 结 论

(1)选择磁性产品的产率、品位及回收率等工艺指标为模型输出指标,开发了高梯度磁选计算机模拟软件,建立了在各种操作条件下高梯度磁选非线性动态模型,模型的计算结果和试验结果非常接近.

(2)建模的方法是可行的,模型的结构是合理的,模型能比较全面地、正确地描述各种影响因素对高梯度磁选过程的影响.

参考文献:

- [1] 向发柱. 高梯度磁选数学模型及计算机模拟的研究(1)[J]. 广东有色金属学报, 2000, 10(1): 1-6.

Mathematical model of high-gradient magnetic separation and its computer simulation (II)

XIANG Fa-zhu

(*Department of Mineral Processing Engineering under Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510651, China*)

Abstract: Finite-difference method, Runge-Kutta method and other numerical methods were employed to solve the equations of mathematical model of high-gradient magnetic separation by means of computer software developed. The parameters in the model were estimated by fitting the model to the laboratory measurements. The magnetic product's technological indexes such as grade, recovery and yield were selected as the outputs of the model. The experimental verification of high-gradient magnetic separation process model and computer simulation studies on high gradient magnetic separation process by means of simulation softwares developed were carried out under the various operating conditions of the equipment. The model predictions provide a close match to the trends observed in the experimental measurements and give a good numerical agreement over the broad operational range. The results show that the model is physically sensible and valid, and can give a correct and adequate description of various factors influencing the high-gradient magnetic separation process.

Key words: mathematical model; computer simulation; high-gradient magnetic separation