文章编号：1000-1964(2005)06-0735-05

选煤系统的耗散结构特征

张明青[1]，刘炯天[2]，韩宝平[1]，张　敏[2]，王永田[2]
(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院，江苏 徐州　221008；
2. 中国矿业大学 化工学院，江苏 徐州　221008)

摘要：选煤厂煤泥水系统从广义上包括了选煤系统的全部工艺过程，因此对选煤系统的研究可以集中在对煤泥水系统研究上. 分析了选煤厂煤泥水系统的微观结构，提出了影响煤泥水沉降效果的 3 种因素：煤质因素、水质因素和环境因素. 动力学方程分析结果表明煤泥水系统具有显明的耗散结构特征，所以构建了煤泥水系统的熵流模型，并对模型进行了举例说明. 该模型的建立可以为煤泥水系统和选煤系统的宏观控制提供依据.

关键词：选煤系统；煤泥水系统；动力学方程；耗散结构；熵流模型
中图分类号：TD 94　　**文献标识码**：A

Dissipation Structure Characteristics of Coal Processing System

ZHANG Ming-qing[1], LIU Jiong-tian[2], HAN Bao-ping[1],
ZHANG Min[2], WANG Yong-tian[2]
(1. School of Environment Science and Spatial Informatics,
China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;
2. School of Chemical Engineering and Technology,
China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: Research on coal processing system could be focused on coal slurry system, which generally consists of all steps of coal processing. Three key factors including coal, water and environment, which have influences on fine particles sedimentation in coal slurry, were proposed based on the analysis of slurry system microcosmic structure. Dynamic equation analysis indicates that slurry system has evident dissipation structure characteristics, therefore, an entropy exchange model was established and an example was given to illustrate its application. The model can be used to provide foundation for the macroscopic control of slurry system as well as coal processing system.

Key words: coal processing system; slurry system; dynamic equation; dissipation structure; entropy model

选煤厂煤泥水系统在广义上包括从入厂原煤至得出不同含泥产品的全部工艺过程[1]. 煤泥水基本上涉足了选煤过程的各个环节，煤泥水系统的特征基本反应了选煤系统的特征，因此本文将对选煤大系统的研究转换为对煤泥水系统的研究. 选煤厂属于大耗水单位，煤泥水必须循环使用，煤泥水处理效果同选煤厂技术经济指标和环境保护有着密切的联系，因此有必要通过建立模型来实现对煤泥水处理过程的宏观控制，同时也可以实现对整个选煤系统的宏观控制，从而避免因系统中各因素不协调造成的损失，如煤泥水浓度过高，不得不外排，浪费了水资源和煤炭资源，同时还影响了精煤质量.

收稿日期：2004－11－05
基金项目：国家自然科学基金项目(50174053)；国家杰出青年科学基金项目(50425414)
作者简介：张明青(1975-)，女，山西省阳泉市人，博士研究生，从事工业水处理方面的研究.
E-mail：zmqcumt@163.com　　Tel：0516-3995976

1 选煤系统

1.1 选煤系统结构分析

由于原煤中含有大量的矿物质，因此原煤洗选过程不仅仅是简单的固-液分离、固-液回收过程，其中还涉及一些化学反应、界面化学和胶体化学过程. 其微观作用过程如图 1 所示.

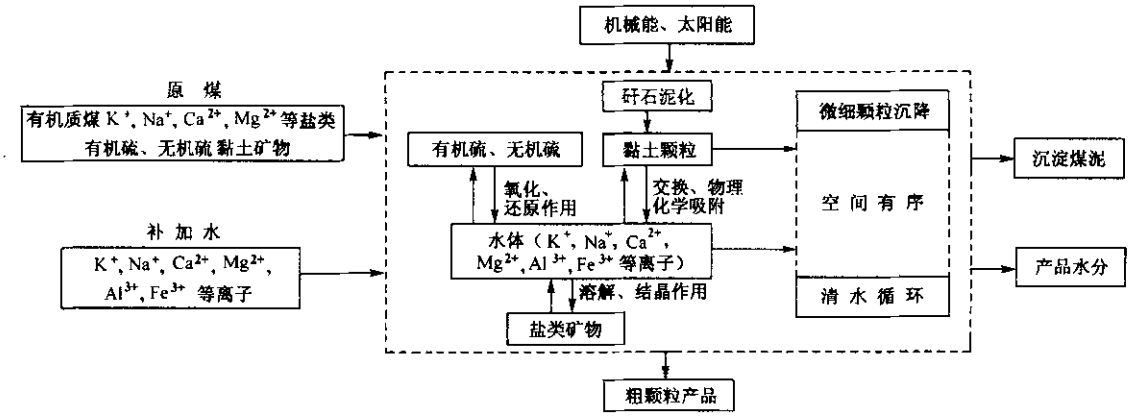


图 1 选煤系统微观作用及结构分析

Fig. 1 The structure and microcosmic action of coal processing

从外界输入煤泥水系统的物质包括原煤[2-3]、补加水和各种药剂. 原煤中除有机质煤外，还有硫化矿物、Ca^{2+}，Mg^{2+}，K^+，Na^+各种盐类矿物和粘土矿物等. 选煤厂补加水主要来自矿井水或地表水，其中的离子为常规离子组成. 投入药剂包括浮选药剂和煤泥水处理药剂. 这些外部投入量的控制主要根据选煤产品的各种指标反馈来调整. 能量输入主要是机械能和太阳能，输入系统的能量通过影响矿物溶解和微细颗粒碰撞来影响煤泥水的沉降效果. 在煤泥水系统内部，存在盐类矿物溶解结晶、无机硫的氧化还原、粘土矿物的吸附解吸等过程. 这些过程同水体矿化度和 pH 值相互平衡，最终决定了煤泥水中微细颗粒的沉降效果. 功能上实现了各种粒级产品和清水的分离.

1.2 影响煤泥水沉降的因素

影响煤泥水沉降的因素很多，基本上可以概况为水质因素、煤质因素和环境因素.

煤泥水中难于沉降的微细颗粒中有时高达 80% 以上是粘土颗粒，这些颗粒在水中带负电荷，因此补加水的矿化度在一定程度上决定了煤泥水的沉降特性. 但矿化度也不是越高越好，过高的矿化度可以影响煤泥的浮选效果[3]. 煤泥沉降和浮选效果之间的相互平衡也是控制煤泥水矿化度的目标之一.

原煤中的软岩夹矸，以及开采过程夹带在煤中的顶、底板矸石在水中容易泥化，形成微米级粘土矿物细颗粒. 这些微细颗粒本身不易沉降，成为煤泥水中悬浮固体的主要组成部分，同时还大量吸附水中的阳离子，恶化了水质条件，增强了后续微细颗粒的聚沉稳定性. 煤中无机硫的氧化还原影响了水体的 pH 值[4]，水体的 pH 值又决定了粘土颗粒在水中的粘合方式，最终影响了粘土颗粒在水中的沉降效果. 煤本身的进化程度对水质产生的影响也是不一样的，进化程度越低，煤表面的活性基团越多，对煤泥水水质影响也越明显，反之则越弱. 自然环境如环境温度等对煤泥水中微细颗粒的沉降过程还没有定量研究. 但环境温度对矿物溶解有一定的影响，环境温度可以影响水体温度，水体温度高，煤泥水中微细颗粒热运动加强，颗粒之间碰撞几率提高，煤泥水凝聚效果加强. 同时我们可以把人为投入系统的水处理药剂和浮选药剂等包括在环境因素中，这样有利于我们的分类讨论. 浮选药剂改变颗粒表面性质，水处理药剂（主要为絮凝剂）改变微细颗粒的聚集形态.

煤泥水系统沉降效果是胶体颗粒和煤泥水溶液化学相互作用的结果. 系统沉降效果可以用浓缩机溢流中固体颗粒含量来表征. 煤质因素主要是可泥化矸石的含量. 煤中无机硫含量和盐类矿物含量主要影响煤泥水水质. 有机质煤的进化程度也影响煤泥水中颗粒沉降，但这种影响可以折算成一个当量. 水体是承载所有作用的场所，水质因素可用水体电导率，pH 值和硬度来表示. 环境因素，主要是温度对煤泥水中的各种过程产生激励或抑制效应. 3 个因素对煤泥水系统沉降的影响可归纳成图 2 所示. 3 种因素之间相互协调、相互影响，形成了具有特定功能、宏观有序的煤泥水处理系统. 沉降过程和浮选过程为两个相反的过程[3-6]，沉降效果不好，会使精煤灰分升高，但沉降效果太好，也即水体

矿化度过高，会对浮选过程产生抑制作用. 在同时保证浮选效果和沉降效果的前提下这 3 种要素之间存在一个最佳匹配状态，煤泥水的宏观调控就是为了实现这种最佳状态. 最佳匹配的结果可以表示为

$$y_{opt}=f(I_{opt},E_{opt},W_{opt}), \tag{1}$$

式中：y_{opt}为溢流中最佳的浓度固体浓度；I_{opt}为最佳的输入煤质水平；E_{opt}为最佳的环境条件；W_{opt}为最佳的水质水平.

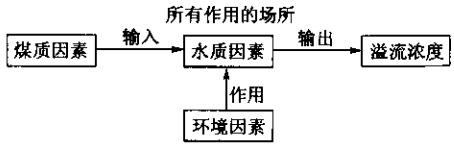


图 2　煤泥水系统 3 个影响因素相互关系

Fig. 2　The relationship among three factors in slurry system

2　煤泥水系统的耗散结构

2.1　耗散结构的形成条件

Prigogine 把那种在开放和远离平衡的条件下[7]，在与外界环境交换物质和能量的过程中通过能量耗散过程和内部的非线性动力学机制来形成和维持的宏观时空有序结构称为耗散结构. 形成耗散结构所必须具备的条件为：

1）体系为远离平衡态的开放体系. 开放体系是指体系与外界之间存在物质和能量的交换. 外界不断的物质和能量的输入所形成的负熵流是系统维持时间、结构或功能上有序的必要条件. 非平衡态存在线性区和非线性区，形成耗散结构的系统必须处于非平衡态非线性区.

2）体系开放的外界输入达到一定阈值. 体系出现耗散结构的条件当然不是有外界输入输出即可，当这种输入达到一定阈值，体系才可能向耗散结构转化，但是这个阈值是可以通过试探性尝试找到的，因此具有操作性.

3）内部存在非线性相互关系. 当系统处于远离平衡态时，非线性项的作用十分明显，一个非平衡约束就对应多重定态解，有的定态解稳定，有的定态解不稳定. 在不稳定分支附近的扰动时间增长，会演变到一个稳定的分支上.

4）涨落导致有序. 在非线性系统中，当非平衡约束使得系统远离平衡态进入非线性区时，热力学分支由稳定转变为不稳定，系统会演化到一个稳定的耗散结构分支上. 当存在两个稳定耗散结构分支时，系统究竟选择哪一个分支又如何进入这一分支是由涨落来完成的，即涨落导致有序.

2.2　选煤系统的耗散结构特征

从动力学观点来看，系统 3 要素与溢流浓度之间存在如图 3 所示关系.

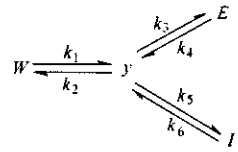


图 3　3 要素与煤泥水溢流浓度之间关系

Fig. 3　Relationship between three factors and concentration of overfall

图 3 中 y 为状态变量，用浓缩机溢流浓度来表示，W,E,I 为状态参量，分别代表水质因素、环境因素和煤质因素. 根据文献[8-9]，3 因素系统的动力学方程为

$$\frac{dy}{dt}=(k_2W+k_4E+k_6I)-(k_1+k_3+k_5)y, \tag{2}$$

$$\lambda=\frac{k_1+k_3+k_5}{k_2W+k_4E+k_6I}, \tag{3}$$

$$\lambda_0=\frac{k_1}{k_2W_0}, \tag{4}$$

式中：k_i 为转化速率常数$(i=1,2,\cdots,6)$；λ 为控制参数；λ_0 为系统平衡态的控制参量. λ 偏离 λ_0 越大，系统距离平衡态越远，因此可用 λ 的数值来表示系统偏离平衡态的程度. 对式(2)进行积分运算得

$$y=\frac{1}{\lambda_0}+\frac{k_2a+k_4b+k_6c}{(k_1+k_2+k_3)^2}\left[e^{-(k_1+k_3+k_5)t}+(k_1+k_3+k_5)t-1\right]=$$

$$\frac{1}{\lambda_0}+\frac{1}{\lambda}\left[1+\frac{e^{-(k_1+k_3+k_5)t-1}}{(k_1+k_3+k_5)t}\right], \tag{5}$$

式中：a,b,c 为 W,E,I 的变化率. 当 $k_1+k_3+k_5<0$ 时，y 的变化率比 $k_1+k_3+k_5>0$ 时要大，且变化方向取决于系统处于 $k_2a+k_4b+k_6c$.

非平衡态的线性区时，煤泥水中微细颗粒基本不沉，溢流浓度大大超过理想值. 这时 λ 接近 λ_0，当有扰动产生，系统会自发产生某过程而使系统恢复到与外界条件相适应的定态，但不会形成宏观有序的现象，也即溢流浓度不会明显降低. 但当系统远离平衡态，即处于非线性非平衡区时，控制参数 λ 超过某临界值 λ_c 时，系统的非平衡态可能失稳，这时任何微小的扰动都会使系统越来越远离原来的状态而发展到某种新的状态，宏观上表现为微细颗粒“集体”快速沉降，溢流浓度大幅度降低. W,E,I 定量后，λ_c 可以通过实验手段和数学手段来确定.

由以上分析可知，有 W,E,I 这 3 因素控制的煤泥水系统具有明显的耗散结构特征.

3 煤泥水系统的熵流模型

根据耗散结构理论，一个开放系统的熵变 $\mathrm{d}s$ 存在如下关系：$\mathrm{d}s=\mathrm{d}_e s+\mathrm{d}_i s$. 其中 $\mathrm{d}s$ 越负，系统越有序；$\mathrm{d}_e s$ 为输入和输出系统熵的代数和，$\mathrm{d}_i s$ 为系统自身的熵产生，衡为正值. 只有输入系统的负熵超过系统产生的正熵，有序度才能维持并有希望相更加有序的方向发展.

煤质因素中粘土矿物和有机质煤的输入为正熵流，而各种盐类矿物的输入为负熵流，能量输入也为负熵流，各因素和溢流浓度之间的相互关系明显是非线性. 输入系统的总的负熵流越大，系统呈现宏观有序状态就越容易.

根据上述分析，参照文献[8]的研究结果，煤泥水系统的熵流模型可表示如下[8-9]

$$S=\sum_{i=1}^{3}\omega_i s_i=(-1)^n\frac{|E(t)-E(0)|}{E(0)}\omega_1+(-1)^n\frac{|W(t)-W(0)|}{W(t)}\omega_2+(-1)^n\frac{|I(0)-I(t)|}{I(0)}\omega_3, \tag{6}$$

式中：ω_i 为 3 种熵流的权重；s_i 为 3 因素产生的熵流；$(-1)^n$ 为符号函数；$E(0),W(0),I(0)$ 为环境、水质和原煤煤质投入的初始状态；$E(t),W(t),I(t)$ 为某一时刻输入系统各因素取值.

表 1 为某设计能力为 200 万 t 选煤厂的系统值，煤泥量为入洗原煤的 15%，设计时没有考虑细泥循环集聚，生产中由于煤泥水浓度限制，实际洗煤量小于设计值，调试后洗水浓度降低，洗煤量相应升高. 同一系统在同一时间的环境温度是相对稳定的，但在不同的季节变化较大，对煤泥水处理效果影响也较大，为了验证该熵变模型，选择调试前为夏季平均水温，调试后为冬季平均水温，如果两个测试点温度相差不大，在式(5)中环境因子相接近 0，对系统影响不大；煤质因素中各种指标的相对含量在原煤煤质相近时变化不大，但由于水质的好坏影响到入洗原煤量的变化，这就导致各种因素绝对含量的变化，从而引起系统的变化，因此调试前后是有差别的；式(5)中初始状态值取我们以往实验研究和现场经验中得出的数值，如电导率为 1.8 mm/cm 以上、补加水硬度在 50 德国度以上的的煤泥水沉降容易，pH 在 7.0 以下细颗粒之间不容易形成“静电桥”凝聚，煤质因素的初始状态为该选煤厂设计时的标准值.

$E(t),W(t),I(t)$ 分别为系统调试前后两个单位时间点的系统值，通过大量生产数据的校正，最终确定该系统的各个权重值如下表所示.

计算结果如表 1 所示，系统调试前的熵流为 0.098 89，调试后的熵流为 −0.031 09，调试前流入系统的总熵流为正，表示煤泥水系统不会形成宏观有序的状态，也即浓缩机溢流不会出清水，调试后的系统流入熵为负值，表示系统可能会呈现宏观有序的状态，这同实际情况是一致的，说明所取的 ω 值较为合理. 对于同一个系统，我们可根据历史资料反复调整 ω 至最优. 通过对历史资料验证，结合实际的生产状况，可以得出该系统的临界 S 值，也即当超过临界值时系统可能失稳. 当然，考虑到煤泥水沉降和浮选是反向的，S 值也不是越负越好，生产过程中也可以求证变量 S 的这个临界值. 实际生产中可以利用此公式来预测系统的运行状况，从而调整各因素的配比，实现对选煤系统的宏观控制.

表 1 某选煤厂煤泥水系统熵流计算示例

Table 1 Entropy calculation results of slurry system in coal preparation

因子、权重	环境因素 0.05	水质因素 0.3			煤质因素 0.65(小时入量，t)				S 值
	温度/℃	电导率/(mm·cm^{-1})	pH 值	初加水硬度/DH°	无机硫含量	黏土矿物含量	盐类矿物含量*	煤泥量	
	0.05	0.1	0.05	0.15	0.05	0.15	0.05	0.4	
调试前	25	1.2	7.9	8	0.65	13	2.6	65	0.098 89
调试后	5	2.3	6.4	27	0.82	14.76	3.28	82	−0.031 09
理想值	15	1.8 以上	7.0	50 以上	0.71	13.48	2.84	71	

* 主要为钙盐类物质.

4 结 论

1) 煤泥水基本涉足了选煤系统的所有过程，因此对选煤系统的研究可以集中在对煤泥水性质的研究上. 选煤系统不仅包括简单的固-液分离和固-液回收过程，在煤泥水中还存在大量的溶液化学和表面化学过程，这些作用过程在一定程度上决定了煤泥水的沉降和浮选效果.

2) 煤泥水中微观作用分析表明，煤泥水系统影响因素可分为煤质因素、水质因素和环境因素. 3

因素之间相互影响，相互协调，最终表现为对煤泥水沉降和浮选效果的影响.

3）3 因素动力学方程分析表明煤泥水系统满足形成耗散结构所必须的 4 个条件. 控制参数存在临界值，当超过，系统失稳突变，形成了结构和功能上宏观有序的系统. 因此煤泥水系统、选煤系统是耗散结构系统.

4）在此基础上构建了煤泥水系统的熵流模型. 以某选煤厂运行数据为例，把系统设计值和经验值作为各变量的初始值，系统调试前后某两个时间点运行数据为各变量取值，用熵流模型算得系统调试前熵流为 0.098 89，调试后的熵流为 −0.031 09，正熵流表示系统宏观“无序”，煤泥水中微细颗粒基本不沉，负熵流表示系统会出现宏观有序的状态，即煤泥水中颗粒集体下沉，实现了清水洗煤的功能. 这同实际运行状况是一致的，因此该模型也可作为选煤系统宏观控制的依据，但参数的精确化还需进一步校正.

参考文献：

[1] 郝凤印，李文林. 选煤手册[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业出版社，1993.

[2] 范　彬. 循环水聚沉稳定性的特点——电解质阳离子对循环水聚沉作用的研究[D]. 徐州：中国矿业大学化工学院，1995. 5-6.

[3] 郭　德，张秀梅，吴大为. 对 Ca^{2+} 影响煤泥浮选和凝聚作用机理的认识[J]. 煤炭学报，2003，28(4)：433-436.
Guo D，Zhang X M，Wu D W. Understanding of the effect mechanism of Ca^{2+} on flotation and coagulation of slimes[J]. Journal of China Coal Society，2003，28(4)：433-436.

[4] 张明青，刘炯天，李小兵. 煤泥水中黏土颗粒对钙离子的吸附实验研究及机理探讨[J]. 中国矿业大学学报，2004，33(5)：547-551.
Zhang M Q，Liu J T，Li X B. Adsorption properties and mechanism of calcium ions on clay particles surface in coal slurry[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2004，33(5)：547-551.

[5] Polat M，Polat H，Chander S. Physical and chemical interactions in coal flotation[J]. Int J Miner Process，2003(72)：199-213.

[6] Harvey P A，Nguyen A V，Evans G M. Influence of electrical double-layer interaction on coal flotation[J]. Journal of Colloid and Interface Science，2002(250)：337-343.

[7] 李如生. 非平衡态热力学和耗散结构[M]. 北京：清华大学出版社，1986.

[8] 卞正富，张国良. 矿区复垦土地生产力的耗散结构模型[J]. 煤炭学报，1998，23(6)：663-668.
Bian Z F，Zhang G L. Entropy exchange model for ebaluating reclaimed land productivity[J]. Journal of China Coal Society，1998，23(6)：663-668.

[9] 曾丹岑. 工程非平衡动力学[M]. 北京：科学出版社，1991.

（责任编辑　陈其泰）