

# 基于光电测量的煤泥水自动加药系统研究

邓建军,张孝逐,林 喆,王传真,顾加欢,王章国  
(中国矿业大学 化工学院,江苏 徐州 221116)

**摘要:**为实现煤泥水处理中自动添加絮凝剂,研制了一套实验室使用的煤泥水自动加药设备。通过试验验证设备的自动加药性能,求出了设备的传递函数,并通过仿真软件对传递函数进行了模拟仿真,将仿真结果与试验结果进行比较,判断设备的可行性。结果表明,试验中不同煤泥水浓度在最佳加药量的情况下,沉降速度为10~12 mm/s。仿真计算时,药剂达到最佳用量时,沉降速度稳定在10 mm/s,试验结果与仿真结果基本一致。且出现干扰时,系统能够自动调整并趋于稳定。该自动加药系统引入了光电测量技术,即通过光电传感器实时测量煤泥水的沉降速度,并用前馈与反馈相结合的控制方案,解决了传统煤泥水自动加药系统滞后性的问题。

**关键词:**煤泥水;自动加药系统;光电技术;仿真;控制策略

中图分类号:TD94 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)02-0092-06

## Study on the automatic dosing system of coal slurry based on photoelectric measurement

Deng Jianjun, Zhang Xiaozhu, Lin Zhe, Wang Chuanzhen, Gu Jiahuan, Wang Zhangguo  
(School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to achieve automatic adding flocculant in the coal slurry processing, the equipment of coal slurry automatic dosing used in the laboratory was developed. The transfer function of the experimental equipment was obtained through a series of exploratory experiments, and the transfer function was simulated by the simulation software, and they were compared with the experimental results to determine the feasibility of the device. Results show that the settling velocity is 10-12 mm/s in different concentration of coal slurry under the best dosage condition. In the simulation, the settling velocity is stable at 10 mm/s when the agent reaches the optimal dosage. The experimental results are basically consistent with the simulation results, and further, once the interference occurs, the system can automatically adjust and stabilize. The automatic dosing system has introduced the photoelectric measurement technology, which measures the settling velocity with the photoelectric sensor and has solved the lag problem of traditional automatic dosing system with the combination of feed forward and feedback control scheme.

**Key words:** coal slurry; automatic dosing system; photo electric technology; simulation; control strategy

## 0 引 言

煤泥水处理是实现煤泥水闭路循环、确保清水选煤的关键环节,其运行效果对分选过程影响较大<sup>[1]</sup>。目前,大多数选煤厂仍采用人工加药方式,这种方式药剂添加量不精确<sup>[2-3]</sup>。谷庆明<sup>[4]</sup>采

用自动加药系统处理煤泥水,根据需要可以在触摸屏上设定需要配制溶液的浓度,控制器根据给水量,按比例自动投加药剂。蒋玲等<sup>[5]</sup>根据聚丙烯酰胺 PAM 的溶解特性,利用 S7-200 系列的 PLC,设计了一套能实现粉状 PAM 高效分散溶解的自动控制系统。王彦<sup>[6]</sup>利用煤泥水检测控制系

收稿日期:2016-12-17;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.02.018

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51604273;51304195)

作者简介:邓建军(1973—),男,江西乐安人,副教授,博士研究生,从事矿物加工工程理论与工程设计、过程模拟与优化控制方面的教学与研究工作。E-mail:djjlc@cumt.edu.cn

引用格式:邓建军,张孝逐,林喆,等.基于光电测量的煤泥水自动加药系统研究[J].洁净煤技术,2017,23(2):92-97,102.

Deng Jianjun, Zhang Xiaozhu, Lin Zhe, et al. Study on the automatic dosing system of coal slurry based on photoelectric measurement[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(2): 92-97, 102.

统,监测煤泥水沉降速度和溢流水浊度,通过反馈信号,调整、控制絮凝剂、净水剂的投入量,从而确保药剂的投入量能够及时适应生产变化。程显<sup>[7]</sup>基于 PLC 技术设计了“煤矿尾水浓缩机药剂添加、搅拌自动化系统”。已实现煤泥水自动加药的选煤厂的控制方式大同小异,大多采用浓度计来检测溢流水的浊度,并将浊度值作为反馈量,与给定值进行比较,通过控制器对加药量进行调整。但前馈与反馈控制的结合较少,造成药剂添加调整不及时<sup>[8-9]</sup>。由于上述问题,导致煤泥水处理效果不理想。通过构建以光电传感技术为基础、以絮凝剂自动添加为对象的煤泥水自动加药控制系统,对煤泥水沉降速度进行实时检测,并采用前馈与反馈相结合的控制方案,有效避免了单一控制方式的滞后性,实现了药剂自动添加,保证了药剂添加的准确性和调节的及时性<sup>[10]</sup>。

## 1 自动加药控制系统理论基础

### 1.1 絮凝剂添加理论

选煤生产过程中,絮凝剂添加量与入料中干煤泥量有直接关系,絮凝剂添加量可通过煤泥水的浓度和流量计算得出,其中矿浆浓度可由矿浆密度换算得出。

矿浆密度为

$$\rho_x = \frac{q(\rho - 1)}{1\ 000\rho} + 1 \quad (1)$$

故矿浆浓度可表述为

$$q = \frac{(\rho_x - 1)\rho}{\rho - 1} \times 1\ 000 \quad (2)$$

式中,  $\rho_x$  为被测矿浆密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $q$  为矿浆浓度,  $\text{g}/\text{L}$ ;  $\rho$  为矿浆中固体物质的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

絮凝剂的添加主要是依据煤泥水中干煤量,公式为

$$Q = Fqt \quad (3)$$

式中,  $Q$  为絮凝剂的添加量,  $\text{g}$ ;  $F$  为煤泥水的流量,  $\text{L}/\text{s}$ ;  $t$  为煤泥水加料时间,  $\text{s}$ 。

### 1.2 光电测量技术

煤泥水在絮凝剂的作用下,会发生明显的絮凝沉降,在煤泥沉降过程中会有清晰的沉降界面。在取样池的外壁装有光电开关,发射端发出红外线,可直接通过煤泥较少的上清液,进而被光电开关的接收端接收到,输出高电平信号;但不能通过含有颗粒较多的煤泥水,从而不能被光电开关的接收端接收,

输出低电平信号。光电开关检测上清液与煤泥水对比如图 1 所示。

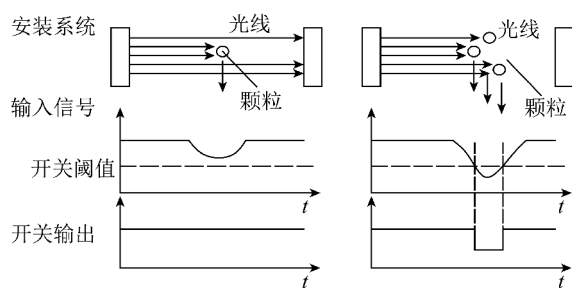


图 1 光电开关检测上清液与煤泥水对比

Fig. 1 Comparison of photoelectric switch detection supernatant and coal slurry

## 2 系统控制方案设计

控制系统设计中常用的控制策略有前馈和反馈 2 种。其中前馈控制是一种预测控制,需对系统模型有精确了解,但在实际工程中,并不是所有对象都可得到精确模型,所以仅用前馈并不能达到良好的控制效果。这时就需引入反馈,其特点是根据偏差来决定控制输入并进行纠正,可有效消除稳态误差,解决前馈中不能控制的干扰。煤泥水自动加药系统采用前馈+反馈的综合控制策略,取长补短,提高系统响应速度<sup>[11-13]</sup>。

系统采用 PID 控制器,根据设定目标值  $r(t)$  与实际输出值  $y(t)$  构成控制偏差  $e(t)$ ,将此偏差的比例,积分和微分通过线性组合构成控制量,对受控对象进行控制<sup>[14]</sup>。

PID 控制器控制方程为

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (4)$$

控制器时域输出  $u(t)$  方程为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

式中,  $K_p$  为比例系数;  $K_i$  为积分系数;  $K_d$  为微分系数。

煤泥水自动加药控制系统如图 2 所示。由图 2 可知,将煤泥水入料流量和浓度作前馈量,煤泥水絮凝沉降速度作反馈量。其中入料流量可通过电磁流量计测量,浓度可通过浓度计测量,煤泥水絮凝沉降速度可通过光电传感器检测得到,形成一个完整的控制系统<sup>[15]</sup>。

## 3 煤泥水自动加药系统设计

### 3.1 系统结构设计

基于光电测量的煤泥水自动加药系统设计如图

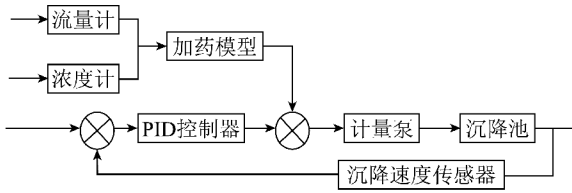
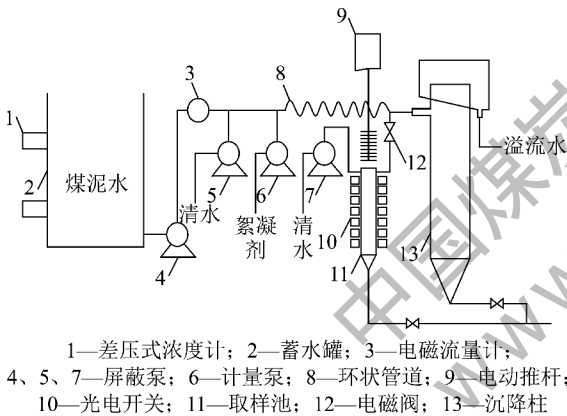


图2 煤泥水自动加药控制系统

Fig. 2 Automatic dosing control system of coal slurry

3所示。由图3可知,蓄水罐内煤泥水通过底部的屏蔽泵输送至沉降柱内,其中煤泥水浓度可由浓度计在线实时检测,给料流量可由电磁流量计在线实时检测,絮凝剂通过计量泵自动给入,与煤泥水混合后通过环状管道充分搅匀进入沉降柱。输送清水的屏蔽泵用于调节煤泥水浓度,自清洗屏蔽泵用于自动清洗取样池。环状管道末端设有电磁阀,可把一部分沉降液引入取样池,其周围装有7对光电传感器,可实时测量煤泥水的沉降速度,从而对整个加药系统沉降过程进行实时动态模拟,并对沉降效果进行评价。



1—差压式浓度计; 2—蓄水罐; 3—电磁流量计;  
4、5、7—屏蔽泵; 6—计量泵; 8—环状管道; 9—电动推杆;  
10—光电开关; 11—取样池; 12—电磁阀; 13—沉降柱

图3 光电测量的煤泥水自动加药系统

Fig. 3 Automatic dosing system of coal slurry based on photoelectric measurement

光电开关的安装如图4所示。光电传感器相关参数见表1。煤泥水沉降过程中,将煤泥水的沉降层经过各个光电开关的时刻记入集合  $T_i$  中,  $T_i = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6\}$ 。通过以下公式可以计算出平均沉降速度:

$$\Delta T_i = T_{i+1} - T_i \quad (6)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \frac{L}{\Delta T_i} \quad (7)$$

式中,  $\Delta T_i$  为经过相邻光电开关的时间差, s;  $T_i$  为经过第  $i$  个光电开关的时刻, s;  $T_{i+1}$  为经过第  $i+1$  个光电开关的时刻, s;  $i$  为光电开关数, 取 1~6 的任意整数;  $L$  为相邻光电开关之间的距离, m。

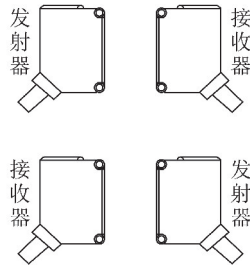


图4 光电开关安装

Fig. 4 Schematic diagram of photoelectric switch installation

表1 光电传感器相关参数

Table 1 Related parameters of photoelectric sensor

项目	参数
光电传感器外壳形状	螺纹圆柱形
外壳材料	铜镀镍
外形规格尺寸	M18
感应模式	对射式
感应距离/cm	40
输出模式	PNP
输出状态	常开
工作电压/V	直流 10~30
电线芯线及接头针数	3 芯线
开关保护	有短路、逆极性、过载保护

### 3.2 检测部位自动清洗设计

由于煤泥水会黏附在壁面,降低设备透光性,影响光电传感器的测量精度,故在该系统中加入自动清洗装置非常必要。自动清洗装置主要部件有电动推杆、电机、长毛刷和清水泵。电动推杆将长毛刷伸进取样池内,在电机带动下转动,同时,清水泵向取样池内注入清水。长毛刷深入取样池底部后,再将电动推杆的电源进行反接,长毛刷收回,将取样池清洗干净,保证下次煤泥水沉降速度检测的准确性。自动清洗装置如图5所示。

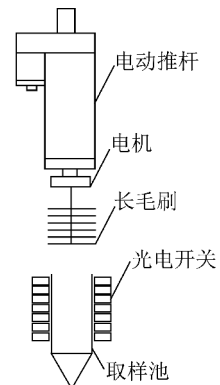


图5 自动清洗装置

Fig. 5 Schematic diagram of automatic cleaning device

## 4 自动加药系统的应用

### 4.1 煤泥水沉降速度检测

在煤泥水浓度 50 g/L, 凝聚剂氯化铝 PAC 浓度 2 g/L, 絮凝剂 PAM 浓度 1 g/L 的条件下, 用光电传

感器检测煤泥水的沉降速度。保持凝聚剂添加量为 10 mL/L, 絮凝剂添加量分别为 2.5、10.0 和 17.5 mL/L 进行试验。为减少试验误差, 每组试验分别做一组平行试验。研究不同药剂用量下, 澄清界面随时间的变化(图 6)。

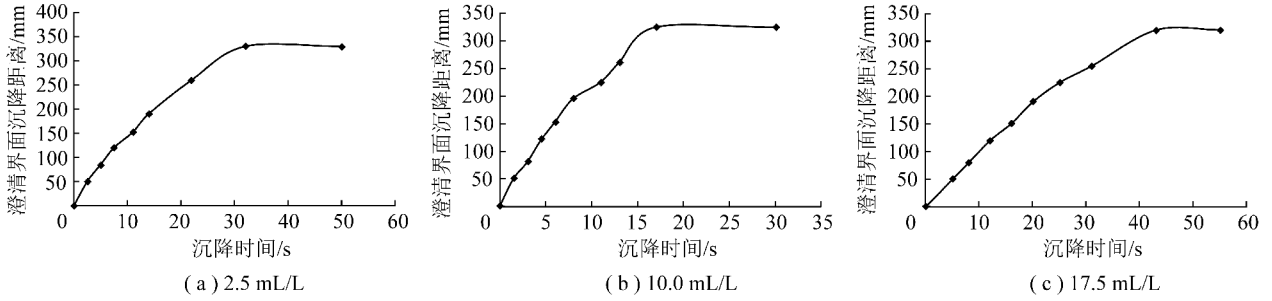


图 6 澄清界面随时间的变化

Fig. 6 Change of clarifying interface with time

由图 6 可知, 该光电系统可以准确检测出煤泥水的沉降速度, 能明显区分煤泥水的沉降界面。此外, 随着加药量的增加, 澄清界面达到稳定所用时间分别为 30、20 和 40 s, 即煤泥水沉降速度先增加后减小。

液的浊度及沉降速度。上清液浊度越小, 沉降速度越快, 则煤泥水沉降效果越好<sup>[5]</sup>。试验选用浓度为 40、50 和 80 g/L 的煤泥水和浓度为 1 g/L 的絮凝剂在 1 000 mL 试管中进行试验, 分别探究不同加药量时, 煤泥水上清液的浊度及沉降速度, 具体见表 2~4。

### 4.2 最佳加药量的确定

#### 4.2.1 絮凝剂最佳加药量

煤泥水沉降效果的好坏, 体现于煤泥水上清

液的浊度先减小后增加, 沉降速度则先增加后减小, 存在

表 2 浓度 40 g/L 加药量的确定

Table 2 Determination of dosage in concentration of 40 g/L

加药量/mL	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5
上清液浊度/NTU	91.6	60.5	32.0	29.3	24.5	27.6	36.1	49.0	58.0
沉降速度/(mm · s <sup>-1</sup> )	5.64	7.36	11.04	8.83	7.16	7.57	6.63	6.31	6.02

表 3 浓度 50 g/L 加药量的确定

Table 3 Determination of dosage in concentration of 50 g/L

加药量/mL	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5
上清液浊度/NTU	129.0	119.0	94.0	66.0	72.3	49.0	44.4	47.5	48.8
沉降速度/(mm · s <sup>-1</sup> )	5.84	4.71	3.69	8.34	7.52	7.48	6.32	7.06	6.05

表 4 浓度 80 g/L 加药量的确定

Table 4 Determination of dosage in concentration of 80 g/L

加药量/mL	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5
上清液浊度/NTU	135.0	130.0	110.0	82.8	75.5	75.3	73.7	65.55	69.8
沉降速度/(mm · s <sup>-1</sup> )	0.67	1.36	3.15	6.25	6.66	8.48	8.54	8.69	7.45

最佳加药量使上清液浊度最小,沉降速度最大。根据选煤厂煤泥水排放标准,煤泥水上清液浓度小于300 mg/L时,可以直接外排。表2~4中煤泥水上清液的浊度均在300 NTU以下(1 NTU=1 mg/L),都能满足外排标准。因此本次试验以沉降速度为主要评价指标,确定系统最佳药剂添加量。40、60和80 g/L煤泥水最佳加药量分别为7.5、10.0和20.0 mL/L,换算成单位干煤泥所需加药量分别为0.187 5、0.200 0和0.250 0 mL/g,3个干煤泥加药

量平均值0.200 0 mL/g,为煤泥水单位干煤泥所需的最佳加药量。

4.2.2 凝聚剂最佳加药量

选用浓度2 g/L凝聚剂,50 g/L煤泥水,在1 000 mL试管中进行7组平行试验,结果见表5。由表5可以看出,凝聚剂最佳添加量为40 mL/L,此时煤泥水上清液的浊度是32.8 NTU,小于不加凝聚剂的浊度,沉降速度为12.56 mm/s,达到最大。

表5 最佳凝聚剂用量的确定

Table 5 Determination of the best coagulant dosage

加药量/mL	0	10	20	30	40	50	60	70
上清液浊度/NTU	110.7	43.8	37.0	28.5	32.8	26.8	25.7	24.6
沉降速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	4.34	8.86	9.27	11.82	12.56	8.19	6.96	5.42

4.3 沉降池的传递函数求解

本系统的絮凝剂是依据单位干煤泥所需加药量添加,根据试验得出单位干煤泥所需絮凝剂用量为0.2 mL/g,所用干煤泥密度为1.4 g/cm<sup>3</sup>,则最佳的煤泥水加药量为

$$w = 0.2qF \tag{8}$$

从而可以求出该系统的前馈加药模型为

$$Q = 70F(\rho_s - 1) \tag{9}$$

该数学模型根据煤泥水流量及矿浆密度可以直接确定所需絮凝剂用量,出现干扰及时调节,保证煤泥水及时加药。

沉降速度随加药量的变化如图7所示,由此对系统的传递函数进行拟合,如图8所示。

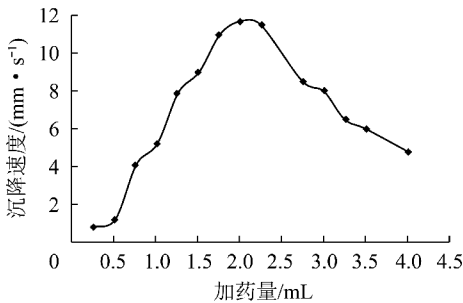


图7 沉降速度随加药量变化关系

Fig. 7 Change of settling velocity with dosage

根据图8可得出本系统的传递函数为

$$v(s) = \frac{1}{-2.481s^2 + 11.31s - 2.601} \tag{10}$$

式中,s为复变量;v(s)为系统的传递函数。

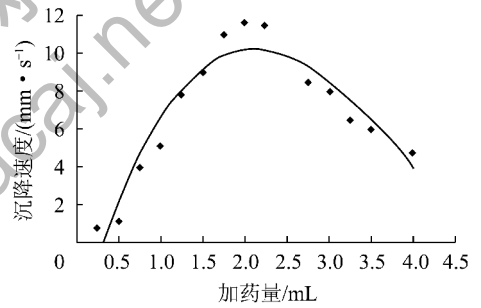


图8 沉降速度随加药量拟合图形

Fig. 8 Settling velocity fitted with change of dosage

4.4 仿真参数的设定及仿真结果

根据试验系统的控制思路,将传递函数(10)用Simulink仿真软件进行仿真,并求出仿真结果。仿真方框图如图9所示。仿真结果如图10所示。

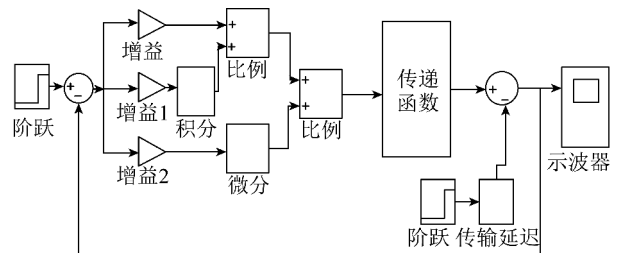


图9 仿真方框图

Fig. 9 Diagram of simulation block

由图10可知,沉降速度随着加药量增加而增大,达到最佳加药量时,煤泥水沉降速度趋于平稳。15 s受到外界扰动时,沉降速度突然下降,最后在控

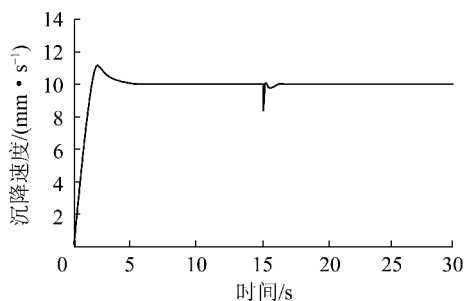


图10 仿真结果

Fig. 10 Simulation results

制系统的调节下,沉降速度又趋于稳定。

#### 4.5 试验设计验证

预先向煤泥水储罐中加入 40 mL/L 的凝聚剂。煤泥水的流量  $F$  可以通过电磁流量计得出,煤泥水浓度通过浓度计得出,按式(8)以最佳的煤泥水加药量加入絮凝剂,绘制出煤泥水沉降速度随浓度的变化关系,结果如图 11 所示。

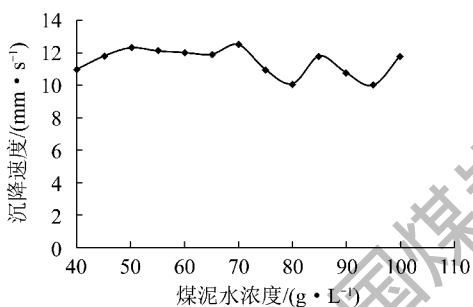


图11 不同浓度下煤泥水的沉降速度

Fig. 11 Settling velocity of slime water in different concentration

由图 11 可知,在最佳加药量的情况下,不同浓度的煤泥水,其沉降速度均在 10 mm/s 以上,说明煤泥水沉降过程很好。对比仿真结果与试验结果,可以看出仿真结果与实际结果具有很大的相似性。表明上述求出的传递函数能够反映本试验装置煤泥水的处理过程,自动加药系统能够进行自我调节,保证煤泥水沉降效果。

## 5 结 论

1) 引入光电技术检测煤泥水沉降速度,各个光电开关能准确记录沉降层经过的时刻,通过公式可实时测量煤泥水的沉降速度。

2) 采用以煤泥水沉降速度作为反馈值,煤泥水入料流量与入料浓度作为前馈测量的干扰。采用前馈与反馈复合的复杂控制系统,保证了煤泥水能够

准确及时加药。

3) 在系统应用中,通过传递函数的求解仿真与试验结果比较,结果基本一致,验证了该自动加药系统的可行性。

#### 参考文献 (References):

- [1] 王小斌,刘长春,梁世红. 浓缩机加药方式对煤泥水沉降效果影响研究[J]. 洁净煤技术,2015,21(5):23-26.  
Wang Xiaobin, Liu Changchun, Liang Shihong. Influence of addition methods of reagent on slime water setting efficiency[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(5): 23-26.
- [2] 张牧,王启立,李昊,等. 煤泥水处理过程控制系统的设计[J]. 煤炭技术,2016,35(6):279-281.  
Zhang Mu, Wang Qili, Li Hao, et al. Design of control system of slime water sedimentation treatment process[J]. Coal Technology, 2016, 35(6): 279-281.
- [3] Wang Haihui. Kinetic analysis of dehydration of a bituminous coal using the TCA technique [J]. Energy and Fuel, 2007, 21(6): 3070-3075.
- [4] 谷庆明. 自动加药装置在煤泥水处理中的应用[J]. 露天采矿技术,2007(S1):36,44.
- [5] 蒋玲,张东晨,张超. 尾煤浓缩机自动加药在我国的研究现状与展望[J]. 矿山机械,2007,35(1):71-74.  
Jiang Ling, Zhang Dongchen, Zhang Chao. Domestic current study and prospect of the automatic medicine feeding system of the concentrator for the coal tailing[J]. Mining & Processing Equipment, 2007, 35(1): 71-74.
- [6] 王彦. 煤泥水药剂自动添加系统的改造[J]. 科技情报开发与经济,2008,18(25):181-182.  
Wang Yan. The transformation of the slime-water drug auto-adding system[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2008, 18(25): 181-182.
- [7] 程显. 煤矿尾水浓缩机药剂添加、搅拌自动化系统设计[J]. 平顶山工学院学报,2008,17(2):21-23.  
Cheng Xian. Design of thickener pharmacy adding and stirring automation system for mine tail water[J]. Journal of Pingdingshan Institute of Technolog, 2008, 17(2): 21-23.
- [8] 宋风华,陈光柱,罗成名,等. 煤泥水自动加药控制系统设计[J]. 煤矿机械,2012,33(2):168-170.  
Song Fenghua, Chen Guangzhu, Luo Chengming, et al. Controlling system of automatic medicine for coal slime water [J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(2): 168-170.
- [9] 程雅丽,刘海增,王海涛. 煤泥水处理自动控制技术现状及存在问题[J]. 洁净煤技术,2013,19(5):112-115.  
Cheng Yali, Liu Haizeng, Wang Haitao. Automatic control technology of coal slime water treatment [J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(5): 112-115.

(下转第 102 页)

- terization of large-ring number polycyclic aromatic hydrocarbons in non-distillable, pyridine soluble coal-liquids[J]. Fuel, 1986, 65(12):1677-1683.
- [2] Sakai T, Murakami T, Yamamoto Y, et al. A naphthenic oil of hydrogenated coal tar distillate as a lubricant with low solidification pressure[J]. Journal of Synthetic Lubrication, 2006, 9(3):223-235.
- [3] Balster L M, Corporan E, DeWitt M J, et al. Development of an advanced, thermally stable, coal-based jet fuel[J]. Fuel Processing Technology, 2008, 89(4):364-378.
- [4] 张昌鸣, 李允梅, 令狐文生, 等. 气-液色谱联合分析煤油共炼产物族组成[J]. 分析实验室, 2003, 22(2):24-26.  
Zhang Changming, Li Yunmei, Linghu Wensheng, et al. Analysis of group composition in product from coprocessing of coal and petroleum resid by gas-liquid chromatography[J]. Analytical Laboratory, 2003, 22(2):24-26.
- [5] 陈繁荣, 马晓迅, 曹巍, 等. 陕北中低温煤焦油常压馏分的GC/MS分析[J]. 煤炭转化, 2013, 36(4):52-56.  
Chen Fanrong, Ma Xiaoxun, Cao Wei, et al. Atmospheric distillation and GC/MS analysis of coal tar in low temperature from northern Shaanxi[J]. Coal Conversion, 2013, 36(4):52-56.
- [6] Iglesia E, Soled S L, Kramer G M. Cheminform abstract: Isomerization of alkanes on sulfated zirconia; promotion by Pt and by adamantyl hydride transferspecies[J]. ChemInform, 1994, 144(4):238-253.
- [7] 丁福臣, 周志军, 杨桂忠, 等. 十七集总催化重整反应动力学模型研究(I):模型的建立[J]. 石油化工高等学校学报, 2002, 15(1):15-17.  
Ding Fucheng, Zhou Zhijun, Yang Guizhong, et al. 17-lumped kinetic model for naphtha catalytic reforming(I): Establishment of the model[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2002, 15(1):15-17.
- [8] 侯祥麟, 中国炼油技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2001: 155-164.
- [9] 黄澎, 张晓静, 毛学锋, 等. 神府煤液化油加氢精制过程中硫氮化合物分布的变化[J]. 燃料化学学报, 2016, 44(1):37-43.  
Huang Peng, Zhang Xiaojing, Mao Xuefeng, et al. Change of sulfur and nitrogen compounds in the direct liquefaction oil from Shenfu coal upon the hydrofining process[J]. Journal of Fuel Chemistry & Technology, 2016, 44(1):37-43.
- [10] 李伟林, 石智杰, 张晓静, 等. 煤直接液化油中硫氮化合物的类型分布[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(4):55-57.  
Li Weilin, Shi Zhijie, Zhang Xiaojing, et al. Structures and composition of S and N compounds in direct coal liquefaction oil[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(4):55-57.
- [11] 李军芳, 李文博, 史士东, 等. 石油系加氢精制剂用于煤直接液化油的研究[J]. 煤炭转化, 2013, 36(2):36-39.  
Li Junfang, Li Wenbo, Shi Shidong, et al. Study on petroleum hydrofining catalysts for coal direct liquefaction oil[J]. Coal Conversion, 2013, 36(2):36-39.
- [12] 马爱增. 芳烃型和汽油型连续重整技术选择[J]. 石油炼制与化工, 2007, 38(1):1-6.  
Ma Aizeng. Technology selection for ccr units to produce either aromatics or high octane number gasoline component[J]. Petroleum Processing & Petrochemicals, 2007, 38(1):1-6.
- [13] Tailleux R G, Davila Y. Optimal hydrogen production through re-vamping a naphtha-reforming unit: Catalyst deactivation[J]. Energy & Fuels, 2008, 22(5):2892-2901.
- [14] 黄永章, 赵玉军, 苏建伟, 等. 掺炼高比例加氢后焦化汽油对连续重整装置的影响[J]. 炼油技术与工程, 2007, 37(10):17-19.  
Huang Yongzhang, Zhao Yujun, Su Jianwei, et al. Impact of processing high ratio hydrotreated coker naphtha in ccr unit[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2007, 37(10):17-19.
- (上接第97页)
- [10] 王光辉, 匡亚莉, 王传真, 等. 基于Fuzzy-Smith补偿控制的煤泥水自动加药系统仿真研究[J]. 工矿自动化, 2012(9):39-42.  
Wang Guanghui, Kuang Yali, Wang Chuanzhen, et al. Simulation research of automatic dosing system of slime water based on fuzzy-smith compensation control[J]. Industry and Mine Automation, 2012(9):39-42.
- [11] 张同军. 煤泥水处理技术与实践[J]. 科技创新导报, 2011(20):98-100.
- [12] 王光泽, 宋万军, 张宁. 煤泥水处理系统的优化[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(2):21-23.  
Wang Guangze, Song Wanjun, Zhang Ning. Transformation of slime water processing system[J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(2):21-23.
- [13] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊PID控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1):166-172.  
Wang Shuyan, Shi Yu, Feng Zhongxu. A method for controlling a loading system based on a fuzzy PID controller[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(1):166-172.
- [14] 张英杰, 巩冠群, 吴国光. 煤泥水处理方法研究[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(3):1-4.  
Zhang Yingjie, Gong Guanqun, Wu Guoguang. Research of slime water treatment methods[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(3):1-4.
- [15] 孙华峰. DLVO理论在煤泥水絮凝机理中的应用分析[J]. 选煤技术, 2013(1):39-41.  
Sun Huafeng. The application analysis of DLVO theory in slime water flocculation mechanism[J]. Coal Preparation Technology, 2013(1):39-41.