

文章编号: 1001-3571 (2024) 04-0096-07

浮选智能加药系统在潘集选煤厂的研究与应用

孙宗成¹, 倪恒球¹, 吕文豹²

(1. 淮南矿业集团选煤分公司, 安徽淮南 232082; 2. 安徽理工大学材料科学与工程学院, 安徽淮南 232001)

摘要: 为了稳定浮选系统工况, 提高浮选效率, 满足浮选产品高效精准控制的需求, 潘集选煤厂通过在入浮管道上安装入浮矿浆浓度计和流量计, 实时在线监测入浮煤泥水浓度和流量, 自动计算入浮干煤泥量; 安装精煤矿浆灰分仪和尾煤图像识别仪, 自动检测浮选精煤灰分和尾煤灰分; 采用计量泵作为浮选药剂精准高效添加的执行机构, 基于干煤泥量的前馈控制和基于浮选精煤灰分、尾煤灰分的闭环控制, 建立了浮选智能加药系统。实践表明: 与人工加药方式相比, 浮选智能加药系统的药剂用量节约了 10% 以上, 精煤合格率由 60% 提高至 95% 及以上, 浮选精煤产率提高了约 0.2 个百分点, 年可节约成本 87.55 万元。浮选智能加药系统的应用提升了浮选的智能程度, 提高了浮选精煤的质量以及浮选效率, 降低了企业用人成本, 保障了职工身体健康。

关键词: 浮选; 智能加药系统; 前馈控制; 闭环控制; 自动加药; 精煤产率

中图分类号: TD943; TD948.9

文献标志码: B

Study and application of intelligent flotation reagent dosing system at Panji Coal Preparation Plant

SUN Zongcheng¹, NI Hengqiu¹, LYU Wenbao²

(1. Coal Preparation Branch, Huainan Mining Group, Huainan 232082, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to stabilize working condition of flotation system, improve flotation efficiency and meet the requirement for making efficient and accurate control of products, an intelligent flotation agent dosing system capable of performing the following of functions is applied at Panji Plant: real-time online monitoring of density and flow of pulp using densimeter and flowmeter fitted on feed pulp pipe; automation calculation of mass of dry coal in flotation feed; automation detection of ash contents of both concentrate and tailing products using concentrate ash monitor and tailings image identification instrument; effecting efficient and accurate dosing of reagent using metering pump as actuating mechanism; and execution of feedforward control based on mass of dry coal and closed-loop control based on ash contents of concentrate and tailing products. Field application shows that compared to the manual dosing mode, the use of the intelligent system can lead to reduction consumption of reagent by over 10%, an increase of qualification rate of concentrate from 60% to a level even exceeding 95%, a rise of yield of concentrate product by 0.2 percentage points, a save of operating costs by 875,5000 yuan a year, enhancement of intelligent level of flotation process, improvement of flotation efficiency and concentrate quality, reduction of labor costs, and improvement of health of operators.

Keywords: flotation; intelligent agent dosing system; feedforward control; closed-loop control; automatic dosing; yield of concentrate

收稿日期: 2024-03-18 责任编辑: 李梅 DOI: 10.16447/j.cnki.cpt.2024.04.014

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2023YFC2907705); 安徽高校协同创新项目(GXXT-2023-104)

作者简介: 孙宗成(1982—), 男, 辽宁大连人, 高级工程师, 从事选煤生产管理工作。E-mail: 973833254@qq.com, Tel: 13637115433。

引用格式: 孙宗成, 倪恒球, 吕文豹. 浮选智能加药系统在潘集选煤厂的研究与应用[J]. 选煤技术, 2024, 52(4): 96-102.

SUN Zongcheng, NI Hengqiu, LYU Wenbao. Study and application of intelligent flotation reagent dosing system at Panji Coal Preparation Plant[J]. Coal Preparation Technology, 2024, 52(4): 96-102.

浮选利用煤与矸石颗粒间表面物理化学性质上的差异, 通过添加浮选药剂提高煤炭颗粒的疏水性, 从而实现对煤炭颗粒的有效分选。浮选适于 $<0.5\text{ mm}$ 煤泥的分选, 同时也是一种合理、高效的洁净煤技术^[1-2]。通过浮选智能化可实现对浮选过程的精确控制, 优化浮选参数, 减少人为操作失误, 提高浮选效率, 降低浮选能耗和成本等。

当前浮选智能化只停留在药剂的自动添加阶段, 且存在浮选系统自动化程度低、加药量控制不精确、产品灰分检测结果严重滞后等问题^[3]。影响浮选效果的因素不仅有浮选机本身的性能、入料浓度等因素^[4], 还有浮选药剂用量。对于已确定工艺、设备的选煤厂, 浮选药剂用量及其配比成为浮选效果好坏的关键。传统的人工加药方式, 其浮选效果主要取决于浮选司机的操作经验和精心管理程度, 一般为眼看手调的定性操作, 没有定量的概念, 既不准确也不及时^[5-6]; 同时, 操作人员长期与药剂接触, 对操作人员的身体健康不利^[7-8]; 若浮选精煤快灰的滞后时间长, 也会导致浮选精煤产品质量不稳定, 甚至灰分超出所要求的灰分值^[9-11]。

潘集选煤厂为入选原煤 12.00 Mt/a 的矿区型炼焦煤选煤厂, 选煤厂工艺流程为: $50\sim 0.5\text{ mm}$ 采用无压三产品重介质旋流器分选, 粗煤泥采用煤泥重介分选, 细煤泥脱泥浮选, 浮选精煤采用加压过滤脱水, 尾煤浓缩后压滤回收, 实现洗水闭路循环。随着潘集选煤厂二期智能化建设, 提出并设计了浮选智能加药系统, 即浮选智能加药前馈+灰分反馈闭环控制^[12-13]。在传统的自动加药的基础上, 采用入浮干煤泥量及吨煤药剂用量作为药剂前馈控制, 对浮选精煤灰分和尾煤灰分进行在线监测, 构建基于浮选精煤灰分和尾煤灰分的药剂调节闭环控制系统, 以期可解决浮选药剂调整滞后的问题, 在稳定浮选精煤质量、提高产率、节省浮选药剂用量的同时, 较大幅度地降低操作者的劳动强度。

1 浮选系统现状

1.1 浮选工艺现状

潘集选煤厂浮选采用脱泥二次浮选工艺, 精煤磁选尾矿经过弧形筛、煤泥离心机回收后, 掺入精煤产品; 弧形筛筛下水自流进入浮选入料脱泥池, 利用水力分级原理预先脱除部分高灰细泥。潘集选煤厂采用4个容积为 500 m^3 的浮选入料脱泥池。脱泥池溢流由二段浓缩机回收, 脱泥池底流通过变频入料泵输送至进矿浆准备器, 然后进入一次浮选机

进行一次浮选, 一次浮选精矿再经二次浮选机进行二次浮选, 二次浮选精矿经消泡后, 再用泵输送至加压过滤机, 脱水后经刮板输送机转载进入精煤产品带式输送机。一、二次浮选机尾矿均进入一段浓缩机进行处理。浮选工艺原则流程如图1所示。

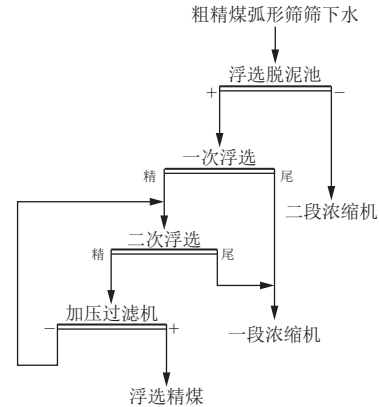


图1 浮选工艺原则流程

Fig. 1 Basic flowsheet of flotation process

1.2 浮选生产现状

1.2.1 浮选指标

潘集选煤厂入选原煤分为高灰原煤和低灰原煤, 入浮煤泥水经泵进入矿浆预处理器, 在矿浆预处理器里添加捕收剂和起泡剂并混合, 通过自流进入一次浮选, 一次浮选的精煤进入二次浮选; 浮选系统入浮干煤泥量约为 300 t/h , 浮选药剂平均消耗量约为 360 kg/h , 入浮浓度控制在 80 g/L 以下; 浮选精煤灰分考核指标在 $9.8\%\sim 11.3\%$ 之间, 生产中灰分在 $10.3\%\sim 10.8\%$ 之间, 质量相对稳定; 尾矿灰分考核指标为: 一浮尾矿 $>58\%$; 二浮尾矿 $>56\%$, 根据入选原煤煤质确定。

1.2.2 存在问题

浮选药剂由人工凭生产经验设定数值后添加到矿浆预处理器中, 加药量调节依据浮选尾矿班灰和浮选精煤小时快灰, 岗位司机结合浮选泡沫情况、尾矿颜色等经验进行调节, 不仅职工的劳动强度大, 大面积巡视观察费时费力, 而且粗糙的人工添加药剂方式导致浮选药剂消耗较大: 捕收剂吨煤药剂用量为 0.17 kg , 起泡剂吨煤药剂用量为 0.06 kg ; 同时造成浮选精煤灰分波动大: 入选高灰时, 精煤灰分在 $9.34\%\sim 12.77\%$ 之间, 入选低灰时精煤灰分在 $6.12\%\sim 9.42\%$ 之间, 且精煤产率偏低。因此, 需要对浮选药剂加药方式进行改进。

2 浮选智能加药系统

2.1 工作流程及工作原理

浮选智能加药系统在矿浆预处理器中单点加

药，通过收集浮选系统一段时间的运行数据（包括入料浓度、入料流量、清水流量、目标灰分、加药量、加药比例等），根据浮选系统历史运行数据建立数学模型，制定控制策略调整浮选加药的工艺参数。浮选智能加药控制系统工作流程如图 2 所示。

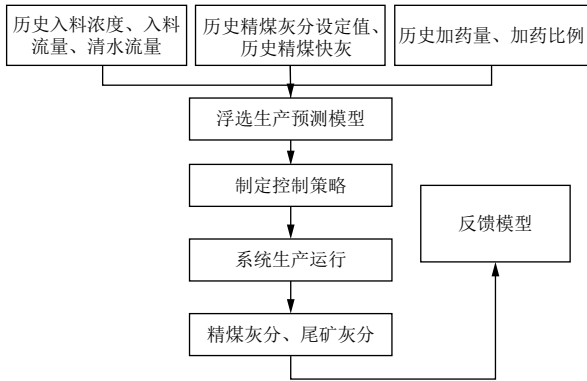


图 2 浮选系统控制工作流程

Fig. 2 Flowchart of flotation system control process

实现浮选智能化的关键是实现浮选智能加药前馈+灰分反馈闭环控制，反馈闭环控制包括浮选精煤灰分反馈和尾煤灰分反馈控制。

(1) 前馈控制。根据进入浮选系统的入浮矿浆浓度和流量自动计算入浮干煤泥量，根据入浮干煤泥量和相应的吨煤药剂用量确定药剂添加量，再控制执行机构添加药剂。

(2) 反馈闭环控制。通过浮选精煤矿浆灰分仪和尾矿图像识别仪在线检测得到实测浮选精矿和尾矿灰分，然后计算实测灰分与目标灰分的差值（灰分偏差），根据试验数据拟合灰分偏差与浮选药剂添加量的关系，遵照最小化灰分偏差原则动态修正浮选药剂添加量^[14-15]。

浮选智能加药控制系统的工作原理如图 3 所示。

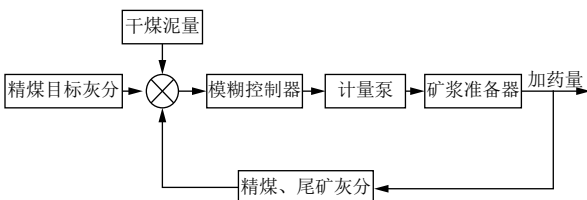


图 3 浮选加药智能控制的工作原理

Fig. 3 Working principle of intelligent reagent dosing control process

设浮选入料浓度为 $P(t)$ ，流量为 $F(t)$ ，吨煤药剂用量为 C ，加药比例（起泡剂：捕收剂）为 R_1 ，则根据入料中干煤泥含量确定的加药量 $T_C(t)$ 为：

$$T_C(t) = C \cdot P(t) \cdot F(t), \quad (1)$$

一般来讲，根据干煤泥量确定的加药量要比根据产品灰分确定的加药量多，设前者占比为 p ，则根据入料特征确定的实际加药量为：

$$\text{捕收剂: } C_1(t) = \frac{p \cdot T_C(t)}{(1 + R_1)}, \quad (2)$$

$$\text{起泡剂: } F_1(t) = \frac{pR_1 \cdot T_C(t)}{(1 + R_1)}. \quad (3)$$

设根据浮选精矿、尾矿灰分确定的综合加药比例为 R_2 ，加药调整量为 Q ，步长为 k ，则药剂用量为：

$$\text{捕收剂: } C_2(t) = \frac{(1 - p) \cdot T_C(t) \cdot Qk}{(1 + R_2)}, \quad (4)$$

$$\text{起泡剂: } F_2(t) = \frac{(1 - p)R_2 \cdot T_C(t) \cdot Qk}{(1 + R_2)}. \quad (5)$$

药剂总耗量为：

$$\text{捕收剂: } C(t) = C_1(t) + C_2(t), \quad (6)$$

$$\text{起泡剂: } F(t) = F_1(t) + F_2(t). \quad (7)$$

由浮选操作员选择或输入当日浮选入料信息、煤质信息，系统会根据对应模型计算出药剂初始添加量，浮选智能加药系统则根据药剂初始添加量，根据控制策略自动启动对应计量泵进行加药。

2.2 硬件与软件控制

潘集选煤厂已有的控制系统是以 AB 1756-L74 系列 PLC 为核心，根据浮选自动控制及灰分闭环控制的原理，拟在浮选原有控制 PLC 分站扩展相应的功能模块，用于连接浮选处理所用的传感器和自动调整装置。控制主机通过 PLC 主站和 PLC 分站进行通信，PLC 分站通过和各类传感器、药剂执行机构、灰分仪等装置进行通信，PLC 分站可以检测和控制入浮的实时流量和浓度、浮选液位高低、进气量等的工作状态。选煤厂集中控制系统通过 PLC 主站和 PLC 分站进行通信，PLC 分站在在线实时检测上述各种传感器的数值，并将传感器数据传输到主站 PLC 的 CPU 中，经过 PLC 程序计算出当前需要添加的药剂量，并通过该分站的开关量输出通道及模拟量输出通道控制相应的计量泵执行机构动作，添加相应的捕收剂和起泡剂到浮选系统中。浮选精煤、尾煤灰分检测装置通过通信将检测的精煤灰分和尾煤灰分传输到控制系统，通过灰分偏差与药剂调整量之间的关系对当前添加的捕收剂和起泡剂量

进行调整控制,使得浮选精煤、尾煤灰分处于所要求的范围内。

2.3 配套设备

浮选智能加药系统配套的智能检测浮选尾矿灰分和浮选精矿灰分的设备分别为:尾矿浆灰分仪、X光荧光灰分仪。

2.3.1 尾矿浆灰分仪

该设备由柜体及散热系统、取样系统、消泡除沉淀系统、识别系统、控制及网络系统等组成。现场安装完成的尾矿浆灰分仪如图4所示。



1—专用工业相机; 2—光源传感器; 3—光源; 4—尾矿采集槽;
5—液位传感器; 6—清扫机构; 7—反冲洗阀门; 8—除尘装置

图4 尾矿浆灰分仪

Fig. 4 Tailings pulp ash meter

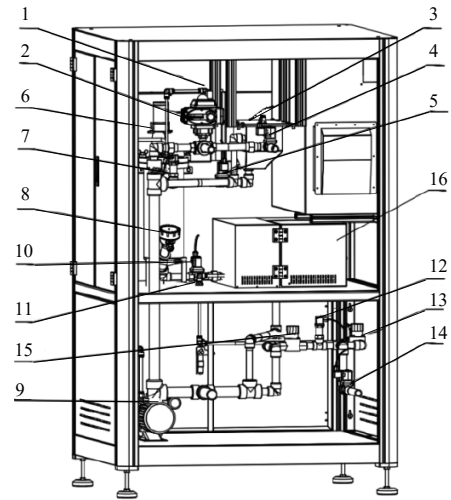
浮选尾矿进入尾矿采集槽,工业相机对尾矿进行拍照,利用图像识别技术将尾矿状态照片转换为尾矿灰分数据,再将灰分数据实时上传到主控制柜,为浮选自动加药控制提供指导数据。

2.3.2 X光荧光灰分仪

X光荧光灰分仪(图5)由柜体及散热系统、采样系统、消泡除沉淀系统、制样系统、X荧光检测系统、清洗系统、控制及网络系统等组成。

浮选精煤在设备内部通过,检测结果不受外部环境的影响。X光荧光灰分仪检测单元由激发源(X射线管)和检测器、计算显示单元等组成。X射线管产生入射X射线(一次X射线),激发被测样品,受激发的样品中的每一种元素会放射出二次X射线,并且不同的元素所放射出的二次X射线具有特定的能量特性或波长特性;检测系统负责测量放射出来的二次X射线的能量及数量,由仪器软件将探测系统所收集到的信息转换成样品中各种元素的种类及含量;由于煤中矿物质成分包括高岭石、莫来石、钙长石、硅钙石等多种矿物质,通过测得各元素的种类和含量可以计算出煤灰中矿物质含量,从而进一步得到灰分数据;最后将灰分数据

据实时上传到主控制柜,为浮选自动加药控制提供指导数据。



1—泄气阀; 2—三通入料阀; 3—定量仓; 4—1#反冲洗阀; 5—2#截流阀; 6—搅拌电机; 7—负压变送器; 8—浓度计; 9—真空泵;
10—1#截留阀; 11—反冲洗管道; 12—压力变送器; 13—背压阀;
14—2#反冲洗阀; 15—泄压阀; 16—X射线检测单元

图5 X光荧光灰分仪

Fig. 5 X-ray fluorescence ash analyzer

3 结果与分析

选择4111号浮选机为对照试验浮选机,入选原煤分高灰和低灰,通过试验得到应用浮选智能加药系统和人工加药方式下浮选精煤快灰和药剂消耗情况,选取入选高灰、低灰原煤时试验数据40组(智能加药20组,人工加药20组)进行分析。

当入选原煤为高灰和低灰时,试验结果分别见表1和表2。

3.1 精煤合格率对比

入选高灰、低灰原煤时采用浮选智能加药和人工加药方式下的浮选精煤合格率对比见表3。其中浮选精煤合格率参照潘集选煤厂考核指标,即入选高灰原煤时,浮选精煤快灰的合格灰分在9.80%~11.50%之间;入选低灰原煤时,浮选精煤快灰的合格灰分在6.50%~8.00%之间。

由表3可知:与人工加药方式相比,采用浮选智能加药系统时的精煤合格率更高,由60%提升至95%及以上。

3.2 浮选药剂用量对比

入选高灰、低灰原煤时采用浮选智能加药和人工加药方式下的浮选药剂用量的对比如图6所示。

由图6可知:与人工加药方式相比,采用智能浮选系统的药剂用量得到了明显降低。为了更精准

地测算药剂用量情况,对潘集选煤厂应用浮选智能加药系统前后两个月以来,入选原煤量和浮选药剂用量进行统计,并计算捕收剂和起泡剂吨原煤药剂用量情况(表4)。

表1 入选高灰原煤时试验结果

Table 1 Results of test on flotation of high-ash raw coal

序号	人工加药				浮选智能加药			
	起泡剂用量/ (L·t ⁻¹)	捕收剂用量/ (L·t ⁻¹)	精矿灰分/%	尾矿灰分/%	起泡剂用量/ (L·t ⁻¹)	捕收剂用量/ (L·t ⁻¹)	精矿灰分/%	尾矿灰分/%
1	14	55	9.96	55.96	13	54	10.03	59.51
2	13	54	10.45	60.16	13	53	10.45	65.16
3	13	55	11.84	70.35	13	54	10.55	69.52
4	12	55	9.34	51.55	13	54	10.60	60.36
5	14	55	10.53	59.55	13	54	10.50	64.35
6	14	55	10.50	60.10	13	54	10.49	63.10
7	14	56	10.11	58.18	13	54	10.15	61.25
8	15	55	12.77	77.09	13	54	11.46	74.25
9	14	55	11.83	67.72	13	54	11.23	68.12
10	14	55	11.65	69.06	13	54	11.20	68.00
11	14	54	11.52	64.27	13	54	11.11	68.21
12	14	55	11.69	64.64	14	53	11.13	67.48
13	14	53	11.63	68.30	14	52	11.03	67.23
14	13	53	10.70	65.35	13	52	10.68	69.12
15	13	53	10.65	64.76	13	52	10.67	65.32
16	13	50	10.11	60.16	13	50	10.10	64.15
17	13	54	10.91	70.70	13	53	10.76	68.15
18	13	53	10.70	70.21	13	52	10.45	68.45
19	13	53	10.65	68.74	13	52	10.50	70.12
20	13	53	10.60	70.21	13	52	10.55	71.54

表2 入选低灰原煤时试验结果

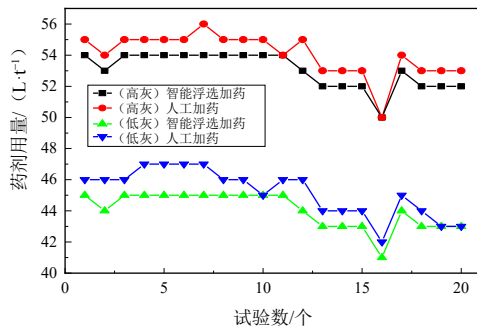
Table 2 Results of test on flotation of low-ash raw coal

序号	人工加药				浮选智能加药			
	起泡剂用量/ (L·t ⁻¹)	捕收剂用量/ (L·t ⁻¹)	精矿灰分/%	尾矿灰分/%	起泡剂用量/ (L·t ⁻¹)	捕收剂用量/ (L·t ⁻¹)	精矿灰分/%	尾矿灰分/%
1	7	46	6.66	55.76	7	45	6.53	60.22
2	8	46	7.20	60.10	7	44	6.95	63.23
3	8	46	8.50	70.15	7	45	7.05	71.25
4	7	47	6.12	50.23	7	45	7.10	73.15
5	9	47	7.21	58.23	7	45	7.03	68.14
6	9	47	7.20	60.10	7	45	7.00	62.32
7	9	47	6.80	52.41	7	45	6.61	59.23
8	10	46	9.42	76.12	7	45	8.27	76.15
9	9	46	8.50	68.29	7	45	7.95	68.59
10	9	45	8.32	68.25	7	45	7.65	68.45
11	9	46	8.22	65.25	7	45	7.50	65.21
12	9	46	8.39	64.00	8	44	7.32	68.12
13	9	44	8.34	67.12	8	43	7.30	68.45
14	8	44	7.30	62.32	7	43	7.20	68.79
15	8	44	7.25	63.23	7	43	7.15	68.32
16	8	42	6.91	59.82	7	41	6.61	61.85
17	8	45	7.60	70.00	7	44	7.41	71.89
18	8	44	7.40	70.45	7	43	7.20	72.58
19	8	43	7.35	69.25	7	43	7.15	67.45
20	8	43	7.30	70.12	7	43	7.10	73.12

表 3 浮选精煤合格率对比

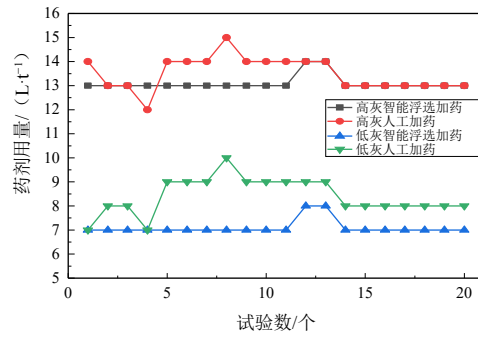
Table 3 Comparison of up-to-standard rates of concentrate product before and after the use of the intelligent dosing system

加药方式	合格率/%	
	高灰原煤	低灰原煤
浮选智能加药	100	95
人工加药	60	60



由表 4 可知，与人工加药方式相比，采用浮选智能加药系统时吨煤可节约捕收剂用量为： $(0.17 - 0.15) \times 100 / 0.17 = 11\%$ ，可节约起泡剂用量为： $(0.06 - 0.04) \times 100 / 0.06 = 33\%$ 。由此可见，采用浮选智能加药系统时药剂用量可节约 10% 以上。

综上所述，从提高浮选精煤合格率和节约浮选药剂用量方面来说，均表明智能浮选系统具有良好的效果。



(a) 捕收剂用量

(b) 起泡剂用量

图 6 药剂用量对比

Fig. 6 Comparison of dosage of reagents

表 4 吨原煤药剂用量情况

Table 4 Consumption of reagents for treating each ton of coal

药剂类型	加药方式	吨原煤药剂用量/kg
捕收剂	人工加药	0.17
	浮选智能加药	0.15
起泡剂	人工加药	0.06
	浮选智能加药	0.04

5 结语

潘集选煤厂在对浮选系统充分研究的基础上，积极推进浮选智能化，通过浮选闭环控制实现了浮选加药系统的智能化。该厂建立了基于前馈入浮干煤泥量的药剂添加和基于浮选精煤灰分和尾煤灰分的药剂调节闭环控制。与人工加药方式相比，浮选智能加药系统药剂用量节约了 10% 以上，精煤合格率由 60% 提高至 95% 及以上，提高浮选精煤产率约 0.2 个百分点。浮选智能加药系统的应用对降低浮选药剂的消耗、提高浮选产率、降低职工劳动强度等方面具有十分重要的意义。

参考文献：

- [1] 孙良, 刘惠, 陈延伟, 等. 孙村选煤厂二次浮选工艺改造实践 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2023(7): 26-28.
- [2] 金明国, 张秀峰. 选煤厂浮选智能化技术研究及应用 [J]. 选煤技术, 2021(1): 155-162.
- [3] 张举丘, 杨小平. 淮北选煤厂浮选控制系统研究 [J]. 中国煤炭, 2011, 37(3): 82-84.
- [4] 卜显忠, 杨怡琳, 宛鹤. 基于浮选泡沫图像预测精矿品位的研究进展 [J]. 金属矿山, 2024(2): 25-38.
- [5] 周长春, 温智平, 周脉强, 等. 基于数据生命周期的煤泥浮选智能控制技术的研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30(1): 45-57.

4 经济效益分析

2023 年，浮选智能加药系统已在潘集选煤厂应用。通过对系统应用前后的生产数据进行统计和分析，改造后浮选精煤灰分稳定，精煤合格率由 60% 提升至 95% 及以上，提高浮选精煤产率约 0.2 个百分点。潘集选煤厂运营车间共 5 个班，每个班原配备一名浮选工位，智能浮选系统投用后，实现了无人值守有人巡视，按照人工工资 1 万元/月，则每年可节约人工费 $1 \times 5 \times 12 = 60$ 万元。潘集选煤厂月平均入选原煤为 93.7 万 t，捕收剂单价按 8.85 元/kg、起泡剂单价按 5.85 元/kg 计算，应用浮选智能加药系统后，潘集选煤厂每年节省浮选药剂费 $93.7 \times (0.17 - 0.15) \times 8.85 + 93.7 \times (0.06 - 0.04) \times 5.85 \approx 27.55$ 万元。仅考虑节省人工和药剂消耗两项，浮选智能加药系统每年可为潘集选煤厂节约成本 $60 + 27.55 = 87.55$ 万元。

- [6] 张臻悦, 蒋 灵, 郭文达, 等. 智能技术在矿物加工领域中的应用进展 [J]. 有色金属(选矿部分), 2023(6): 1-8, 18.
- [7] 王传真, 吕锦涛, 刘海增, 等. 基于新陈代谢算法优化的GM(1, N)动态网络灰分拟合研究 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4549-4558.
- [8] 雷佳俊, 李富强. 智能化洗煤厂建设思路及实践探讨 [J]. 能源科技, 2023, 21(3): 63-66.
- [9] 付永礼, 赵晏民. 选煤厂智能化建设进展及展望 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2023(4): 39-42, 46.
- [10] 褚 菲, 王 佩, 朱安强, 等. 面向过程控制的煤泥浮选机理建模与仿真[J/OL]. 控制工程, 1-11[2024-03-18]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20220466>.
- [11] 郭 通, 侯宗波, 余家辉, 等. 二次浮选智能化控制系统的设计 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2023(3): 47-50.
- [12] 韩 宇, 王兰豪, 刘秦杉, 等. 基于CNN-BP的浮选尾煤灰分智能检测方法 [J]. 工矿自动化, 2023, 49(3): 100-106.
- [13] 王 康, 徐 航, 李晓理, 等. 数据驱动的浮选过程建模、控制与优化研究进展 [J]. 北京工业大学学报, 2023, 49(4): 485-506.
- [14] 陈慧杰. 选煤厂浮选过程智能控制系统设计研究 [J]. 矿业装备, 2023(3): 161-163.
- [15] 马 坤. 选煤厂智能浮选系统应用研究 [J]. 山西焦煤科技, 2023, 47(2): 38-40.