

湿法磷酸转台式真空过滤机的固液分离增效机制与磷石膏品质调控模型研究

郑映, 苏加林

(瓮福(集团)有限责任公司, 贵州 贵阳 550000)

[摘要] 以瓮福(集团)有限责任公司120 m²翻盘式过滤器改造为220 m²转台式过滤器为研究对象, 系统对比分析翻盘式与转台式真空过滤器的工作原理、结构特点、工艺指标(过滤洗涤能力、生产能力、能耗、维护)、运行稳定性及固液分离效率。结果表明: 转台式过滤器下抽真空、四级洗涤、滤布再生及漏料控制等方面优势显著, 其综合性能(处理能力、占地面积、运行稳定性、磷回收率)优于翻盘式过滤器, 是二水湿法磷酸扩能改造的优选方案。基于改造后的生产数据(2025年2—8月), 构建磷石膏品质(共晶磷含量、可溶磷含量)调控机器学习模型。该模型采用固定步长滑动窗口处理时序数据, 融合工艺知识构建衍生特征, 并集成网格搜索与遗传算法优化参数(随机森林RF、梯度提升回归GBR等)。预测结果显示, RF模型对共晶磷含量($R^2=0.994$, MAPE=1.65%)和可溶磷含量($R^2=0.849$, MAPE=3.05%)均有优异预测效果。该研究实现了设备升级与智能调控的结合, 在保障石膏品质($w(\text{总磷}) \leq 0.8\%$)的前提下, 年分离磷酸能力达23.15万t。

[关键词] 二水湿法磷酸; 转台式真空过滤器; 固液分离; 磷石膏; 品质调控; 增效机制

[中图分类号] TQ126.3⁵ **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566(2026)02-0041-06

Research on the solid-liquid separation enhancement mechanism and phosphogypsum quality regulation model of the rotary table vacuum filter for wet-process phosphoric acid

ZHENG Ying, SU Jialin

(Wengfu (Group) Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

Abstract: Taking the transformation of the 120 m² disc filter of Wengfu (Group) Co., Ltd. into a 220 m² rotary table filter as the research object, a systematic comparative analysis is conducted on the working principle, structural features, process indicators (filtration and washing capacity, production capacity, energy consumption, maintenance), operational stability and solid-liquid separation efficiency of the disc and rotary table vacuum filters. The results show that the rotary table filter has significant advantages in aspects such as bottom vacuuming, four-stage washing, filter cloth regeneration and leakage control. Its comprehensive performance (processing capacity, floor area, operational stability and phosphorus recovery rate) is superior to that of the disc filter. It is the preferred solution for the capacity expansion and transformation of wet-process phosphoric acid with dihydrate. Based on the modified production data (February - August 2025), a machine learning model for regulating phosphogypsum quality (eutectic phosphorus content, soluble phosphorus content) is constructed. This model uses a fixed-step sliding window to process time series data, integrates process knowledge to construct derived features, and integrates grid search and genetic algorithms to optimize parameters (such as random forest RF, gradient boosting regression GBR, etc.). The prediction results show that the RF model has excellent prediction effects on both eutectic phosphorus content ($R^2=0.994$, MAPE=1.65%) and soluble phosphorus content ($R^2=0.849$, MAPE=3.05%). This research has achieved a combination of equipment upgrading and intelligent regulation. Under the premise of ensuring the quality of gypsum (total phosphorus $\leq 0.8\%$), the annual separation capacity of phosphoric acid has reached 231 500 t.

Key words: dihydrate wet-process phosphoric acid; table-type vacuum filter; solid-liquid separation; phosphogypsum; quality control; enhancement mechanism

收稿日期: 2025-12-15

作者简介: 郑映(1978—), 男, 贵州凤冈人, 高级工程师, 主要从事磷酸、磷肥生产设备及化工装备相关研发、管理工作。

通信作者: 苏加林(1992—), 男, 贵州福泉人, 工程师, 主要从事磷酸、磷肥生产设备及化工装备相关研发、管理工作。

0 引言

在采用二水法流程制备湿法磷酸时，硫酸溶液与经过湿式研磨的磷矿浆发生化学反应，生成磷酸溶液及二水合硫酸钙晶体 (CaSO₄·2H₂O) 两种产物。后续工序中通过专用过滤设备完成磷酸与硫酸钙的液固分离^[1]。在过滤过程中，需对以下参数严格把控，具体为：温度、料浆液固比、SO₃浓度、黏度以及石膏结晶状态^[2]。为了使过滤效果符合标准，在实际生产过程中，对于滤饼厚度、料浆投加量、过滤机转速及洗水用量要合理调整，保障真空系统的过滤真空度处于合理范围^[3]。磷酸-石膏混合料是在过滤机的作用下实现固液分离的，作为重要设施的过滤机是否具备优良性能，对于磷酸产品的获取具有决定性作用^[4]。因此在挑选二水法湿法磷酸工艺中的过滤设备时，应当优先考虑具有有效过滤面积大、结构设计简单、运行稳定性强、设备运行效率高等特点的设备。基于此，本文以瓮福集团有限责任公司瓮福化工公司过滤机改造为研究对象，对二水法湿法磷酸转台式真空过滤机的固液分离增效机制与磷石膏品质调控模型进行研究。

1 翻盘式与转台式真空过滤机的系统对比

1.1 两种真空过滤机工作原理对比

翻盘式过滤机与转台式过滤机，均属连续真空过滤设备，有着相似的工作原理。多个梯形滤盘水平排列成环形，在大转盘的驱动作用下沿轨道运行。胶管将各滤盘连接到分配阀，建立与真空系统的相连，从而达成真空切换。滤盘每完成一次旋转，按顺序加料、初滤、过滤、洗涤、卸渣、滤布冲洗再生、滤布吸干至加料点，并反复进行循环，具体如图1所示。

在翻盘式过滤机的卸渣环节，滤盘必须完成

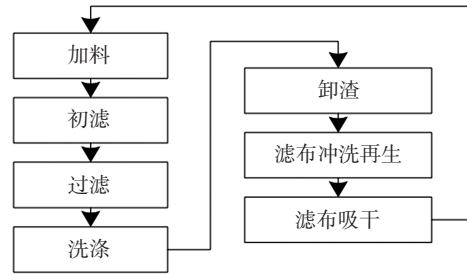


图1 滤盘水平旋转一周工作过程

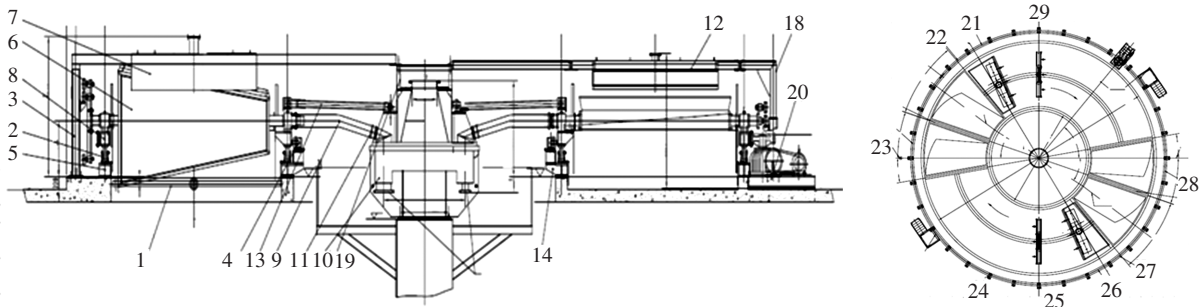
Fig. 1 The working process of filter disc rotating horizontally for one full circle

180°的翻转动作，这一动作依赖于反冲气流产生的推力和重力的共同作用。转台式过滤机采用橡胶带与挡轮的特殊结构设计，将环形过滤区与设备边缘有效隔离，从而构成了物料排出口。当过滤过程完成后，安装在设备内部的螺旋卸料装置会高速运转，将滤饼从中心区域逐步推送至外围的集料装置内。

1.2 两种真空过滤机构造对比

翻盘式过滤机的内部结构（见图2）包括多个关键部件，具体包括冲洗水管、托轮、导轨、挡轮、外挡轮底座、滤盘、加料斗、转盘、吸酸胶管、错气盘、管箍、洗涤斗、拨杆、内托轮底座、螺钉、铆钉、检查平台、中心座圈、传动装置、一次加料搁架、一次复位导轨、一次起翻导轨、立柱方位均布、二次洗架、二次加料搁架、二次复位导轨、二次起翻导轨、一次洗架等。

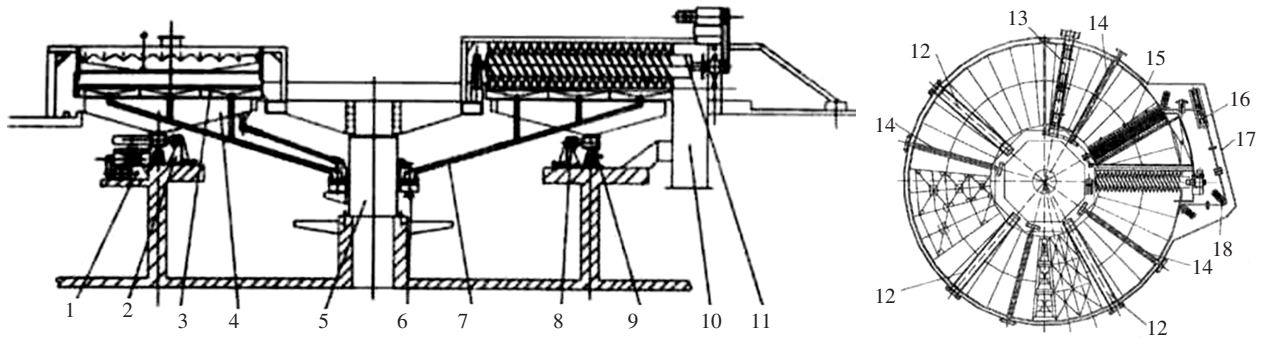
由转台式过滤机的内部结构（见图3）来看，以转盘和中心立柱为核心，环绕布局扇形滤盘、浮动式支架及挡堰。其驱动与传动涵盖挡轮、托轮、传动装置；辅助系统则包括料浆/洗涤水加料斗、中心分配阀、吸酸胶管、冲渣水管、排渣斗、卸料



1-冲洗水管;2-托轮;3-导轨;4-挡轮;5-外挡轮底座;6-滤盘;7-加料斗;8-转盘;9-吸酸胶管;10-错气盘;11-管箍;12-洗涤斗;13-拨杆;14-内托轮底座;15-铭牌;16-螺钉;17-铆钉;18-检查平台;19-中心座圈;20-传动装置;21-一次加料搁架;22-一次复位导轨;23-一次起翻导轨;24-立柱方位均布;25-二次洗架;26-二次加料搁架;27-二次复位导轨;28-二次起翻导轨;29-一次洗架

图2 翻盘式过滤机结构

Fig. 2 The structure of disc filter



1-传动装置;2-挡轮;3-料斗;4-漏斗用支撑架;5-中心立柱;6-中心配阀;7-耐酸胶管;8-转盘;9-拖轮;10-渣斗;11-快速螺旋卸渣器;12-洗涤水加料斗;13-料浆加料斗;14-挡堰;15-冲渣水管;16-皮带张紧轮;17-橡胶带;18-皮带挡轮

图3 转台式过滤机结构

Fig. 3 The structure of rotary table-type filter

螺旋机, 以及橡胶带与其张紧轮、挡轮。

1.3 两种真空过滤机特点对比

1.3.1 翻盘式过滤机

(1) 每只滤盘非常接近理论的最佳过滤条件, 其过滤原理和布氏漏斗一样, 并且连续地完成加料、过滤、洗涤滤饼、翻盘排渣、冲洗滤布、滤布吸干、滤盘复位等操作。

(2) 真空抽滤的方向与重力沉降的方向一致, 对容易沉降的料浆的分离尤为适用。

(3) 结构合理, 料浆和各次洗液都能依次加入不同滤盘, 实现多次洗涤, 滤饼洗涤效果好。

(4) 对性质不同的过滤料浆, 可以根据要求调整到最佳转速, 生产能力大。

(5) 占地面积大, 转动部件多, 维护费用高。

(6) 滤盘底斜度小 ($3^\circ \sim 5^\circ$), 滤液流速慢; 残留在滤盘中的滤液会随滤盘翻到垂直位置时流到滤盘外, 随滤饼排走, 增加磷损失, 增大滤饼水含量。

1.3.2 转台式过滤机

(1) 排渣用螺旋卸渣机卸料, 排渣时不用翻盘。

(2) 因排渣不用翻盘, 转动部件少, 维护工作量小。

(3) 滤盘底部和抽液管斜度大 (10° 和 17°), 滤液流速快, 各次洗液不会混淆, 洗涤效果好。

(4) 滤液流速快, 过滤机转速可以提高, 根据不同性质的料浆调到最佳转速, 生产能力大。

(5) 滤布用压力较高的2排水管冲洗, 洗涤干净, 滤布再生好。

(6) 单位过滤面积占地面积小, 建筑费用省。

(7) 生产能力大, 效率高, 实现装置大型化比

较方便。

(8) 操作成本低。

(9) 用螺旋卸渣后, 滤布上仍残留有5~8 mm左右的石膏, 这部分冲渣水可返回过滤机作过滤的滤饼洗涤水。

1.4 五氧化二磷损失对比

在实际生产过程中, 两种过滤设备的过滤真空度基本相当, 均稳定在35~41 kPa范围内。表1呈现了两种过滤机在生产过程中 P_2O_5 损失情况。

表1 两种过滤机在生产过程中 P_2O_5 损失对比

Table 1 Comparison of P_2O_5 loss during the production process of two types of filter machines

项目名称	水溶磷损失 $w(P_2O_5)/\%$	机械磷损失 $w(P_2O_5)/\%$
翻盘式过滤机	0.25	2
转台式过滤机	0.15	0

表1显示, 翻盘式过滤机在生产过程中造成的 P_2O_5 损失明显高于转台式过滤机。

1.5 过滤强度对比

通过公式(1), 可计算出连续型过滤机的过滤能力:

$$Q = A \cdot (\Delta p \cdot N \cdot \left(\frac{\psi}{\mu \cdot R}\right))^{1/2} \quad (1)$$

式中, 过滤机的生产能力(Q)正比于其过滤面积(A)、转速(N)、压差(Δp)与有效面积系数(ψ)平方根的乘积; 与过滤阻力(R)和滤液黏度(μ)平方根的乘积成反比关系, 因此, 提升转速是增产的有效途径。另外, 翻盘式过滤机 $3^\circ \sim 5^\circ$ 的滤盘底坡使滤液流速缓慢, 导致翻转时残留液流失, 进而增加了磷元素的损失。滤盘在翻转时承受着可观的回转力矩, 运行速度受到一定限制, 造成产量增长空间较小^[9]。转台式过滤机抽液管、滤

盘底部斜度大，滤液流速快，这对过滤机转速提高有利。表2为生产运行中2种过滤机过滤强度比较。

表2 两种过滤机生产过程中过滤强度比较

Table 2 Comparison of filtration strength during the production process of two types of filter machines

翻盘式过滤机过滤强度/ (t·m ⁻² ·d ⁻¹)				转台式过滤机过滤强度/ (t·m ⁻² ·d ⁻¹)			
1组	2组	3组	平均值	1组	2组	3组	平均值
3.92	4.08	4.04	4.01	4.46	4.26	4.34	4.35

由表2可知，转台式过滤机过滤强度要高于翻盘式过滤机。

1.6 单位过滤面积占地面积对比

两种过滤机单位过滤面积占地面积对比如表3所示。

表3 两种过滤机单位过滤面积占地面积对比

Table 3 Comparison of floor space for per unit filtration area of two types of filter machines

项目名称	总面积/ m ²	滤盘数	滤盘最大 外径/mm	单位过滤面积 占地面积/m ²
翻盘式过滤机 (PF-120)	120	24	17 800	2.07
转台式过滤机 (HDZT-220)	220	24	18 500	1.21

由表3可知，转台式过滤机单位过滤面积占地面积要优于翻盘式过滤机。

1.7 生产过程检维修对比

两种过滤机的结构特点与维护费用对比见表4，清晰地展示了相关数据及潜在问题。

由表4可知，转台式过滤机在维修难度、维护

表4 两种过滤机生产过程中维护和检修比较

Table 4 Comparison of maintenance and repair during the production process of two types of filter machines

项目	主要转动部件	转动点/轴承总数	结构特点	易损情况	维修难度	年维护费用/万元
转台式过滤机 (220 m ² , 24 盘)	托轮(24个)、挡轮(24个)、皮带张紧轮机构(4套)、中央分配头(1件)	转动点共 50 个	结构相对集中, 转动部件数量较少		容易	50
翻盘式过滤机 (120 m ² , 24 盘)	支撑轮(220个)、滤盘(24盘)、中央分配头(1件)	转动点约 320 个	结构分散, 翻转机构复杂, 转动点数量多	部分转动部件易受侵蚀	困难	55

费用方面优于翻盘式过滤机。

1.8 小结

基于以上优势，瓮福（集团）有限责任公司瓮福化工公司利用已建成的PFS-120翻盘式真空过滤机（过滤面积为120 m²）的厂房和真空泵等主要设备，将其改为HDZT-220 m²的转台式真空过滤机，目前设备运行平稳，操作维护简单，生产指标更优。

2 基于机器学习的磷石膏品质调控模型

2.1 原始数据采集和预处理

该研究基于瓮福（集团）有限责任公司瓮福化工公司将120 m²翻盘过滤机改造为220 m²转台过滤机后的实际运行数据。该模型采用固定步长滑动窗口处理时序数据，融合工艺知识构建衍生特征。

核心改造点包括：真空方式由翻盘式上抽真空改为转台式下抽真空；洗涤流程由翻盘式3级洗涤升级为转台式4级洗涤；转台式过滤机可利用滤盘冲洗水作为洗涤水回用，而翻盘式无法利用，从而减少污水排放。数据采集时间段为2025年2月至8月，包含11个维度的原始特征：9个过程变量和2个质量变量（磷石膏品质指标），具体见表5。

表5 数据集的过程变量及质量变量

Table 5 process variables and quality variables of the dataset

项目	符号	单位	含义
过程变量	L	%	滤饼含水量
	X	m ³ /h	稀酸输送泵流量
	GT	m ³ /h	过滤机的投料负荷
	GD	m ³ /h	过滤系统单台过滤流量
	GK	kW·h	过滤系统吨矿耗电
	GL	°	过滤机滤液区角度
质量变量	GY	°	过滤机一洗区角度
	GE	°	过滤机二洗区角度
	GS	°	过滤机三洗区角度
	CG	%	共晶磷含量
	CK	%	可溶磷含量

2.2 测试和训练数据划分

产品定量数据中存在的局部特征，导致其在划分时于数据集内表现出明显的聚集性^[10]。在划分训练数据与测试数据过程中，本研究结合相关研究，提出局部建模、聚类划分等思想。采用定量方法将原始数据划分为6个有监督子空间。为确保评

估公平性，从各子空间均匀抽取等量样本构建测试集，其余数据组成训练集。这一设计源于工业场景下数据采集量虽不均但质量等效的特性。通过等量抽样，可保证在计算 R^2 、RMSE等含均值运算的评估指标时，每个子空间对结果贡献度一致，从而消除样本量差异对模型评价的干扰，详见图4。

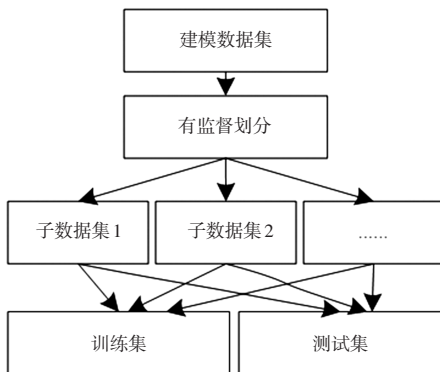


图4 训练集与测试集的划分方法

Fig. 4 The dividing method of training set and test set

2.3 特征生成与特征选择

产品品质与生产各要素密切相关，其中，动态调节化学添加剂乃关键途径。本研究据此构建基于化学添加剂消耗量的新特征。通过专家经验、相关系数矩阵对冗余变量进行处理，通过综合分析变量间的关联程度矩阵、实际物理意义以及特征的可解释程度，最终确定了用于构建模型的输入参数。

2.4 机器学习算法与参数优化方法

集成法运用了思想基础相异的两种模型，分别为RF和GBR、KNN和PLS，在超参数调优过程中，网格搜索(GS)通过遍历所有参数组合来避免陷入局部最优，但当参数粒度细化或参数数量增多时，计算成本显著上升。相较而言，遗传算法(GA)作为启发式搜索方法，因其突出的局部寻优特性，在处理复杂优化问题时展现出高效的收敛性能。基于此，本项研究构建了一种融合网格搜索和遗传算法特性的混合超参数调优策略，采用交叉验证方法来筛选各模型的最优参数配置，图5为网格搜索结合遗传算法的调参框架。

基于网格搜索获取的近似最优解，可适当缩减参数搜索范围。随后利用遗传算法在局部区域进行精细搜索，以准确锁定最优参数组合。关于随机森林回归模型的构建与应用，关键参数包括决策树最大深度、基学习器数量、内部节点最小划分样，随后利用遗传算法在局部区域进行精细搜索，以准确锁定最优参数组合样本量以及各节点最小样本量；

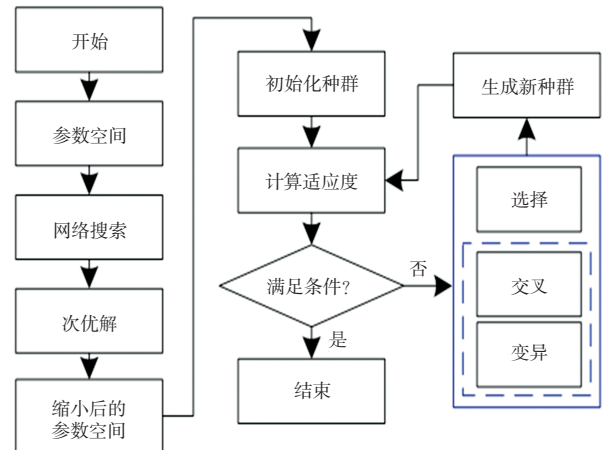


图5 网格搜索结合遗传算法的调参框架

Fig. 5 A parameter adjustment framework combining grid search with genetic algorithm

梯度提升回归模型需要优化的参数有树的最大深度、基学习器数量、叶节点最小样本量、学习速率和节点最小划分样本量；k近邻算法需要对近邻点数量以及距离权重系数进行调整；而偏最小二乘回归模型的核心参数则是主成分的选取数量。

2.5 模型评价指标

回归模型的性能通过3项指标进行综合评价：均方根误差(RMSE)用于衡量归一化后的预测偏差；判定系数(R^2)反映模型对数据拟合的优劣程度；平均绝对百分比误差(MAPE)则在相同数量级下评估不同算法间的相对误差表现。计算公式如下：

$$R^2 = 1 - [\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]; \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{(1/n) \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}; \quad (3)$$

$$MAPE = [(\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|) / y_i] / n \times 100\%. \quad (4)$$

在公式中， n 指待测试样本总量， y_i 表示第*i*个样本的实测值，而 \hat{y}_i 与 \bar{y} 则分别对应预测值及其平均值。

2.6 质量预测结果

表6为不同机器学习算法的预测表现。由表6可知，在共晶磷含量指标上，RF与GBR两种模型均表现优异，其 R^2 超过0.994，MAPE低于1.7%。这一结果得益于建模所用特征与共晶磷含量之间的高度相关性。而在预测可溶磷含量时，所有模型性能均出现一定程度下降，需要说明的是，预测目标自身的特性会对机器学习模型的预测上限产生影响。此外，还依据原始评价指标开展了倒数处理、归一化等后续计算工作。在3个预测目标上，集成模型(RF、GBR)表现均比简单模型(PLS)要优。在可溶磷含量和共晶磷含量指标上，表现最佳

的是RF。利用现有翻盘过滤机场地和真空泵，将原来120 m²的翻盘式过滤机改为220 m²的转台式过滤机，采用基于机器学习的磷石膏品质调控模型，在保证磷石膏 w (总磷) $\leq 0.8\%$ 的情况下，可实现分离磷酸能力达23.15万 t/a。

表6 不同机器学习算法的预测表现

Table 6 Prediction performance of different machine learning algorithms

项 目	RF			GBR			PLS		
	R ²	RMSE	MAPE/ %	R ²	RMSE	MAPE/ %	R ²	RMSE	MAPE/ %
<i>S</i>	0.860	0.619	4.73	0.862	0.616	4.66	0.780	0.763	6.12
<i>Rf</i>	0.849	0.344	3.05	0.829	0.364	3.28	0.693	0.478	4.34
<i>Fb</i>	0.994	3.671	1.65	0.994	3.643	1.68	0.991	4.894	2.42

注:*S*表示负荷,m³/h;*Rf*表示磷石膏共晶磷平均值;*Fb*表示磷石膏可溶磷平均值;*R*²表示回归模型中自变量对因变量变异的解释比例,取值范围为0~1,数值越大说明模型拟合效果越好。

3 结论

以瓮福集团有限责任公司瓮福化工公司翻盘式过滤机改转台式过滤机为研究对象,对二水湿法磷酸转台式真空过滤机的固液分离增效机制与磷石膏品质调控模型进行了研究,得出如下结论:

(1) 过滤机更改后,由原有负荷(以硫酸计)75~80 m³/h提高到80~85 m³/h的条件下,石膏 w (总磷)平均值 $\leq 0.8\%$ 。

(2) 过滤机面积增大,由120 m²改为220 m²,在提升反应负荷后有利于系统平衡稳定,且能保证稀磷酸出酸量及反应槽返酸的要求

(3) 过滤机面积增大和提高回浆比,在倍半氧化物提升后,依然能够有效地降低石膏的磷含量,提升了现有装置对精矿的适应性。

[参考文献]

[1] 杨培发,陈军民,陈志华.我国湿法磷酸生产技术对比[J].磷肥

与复肥,2020,35(1):24-26.

YANG P F, CHEN J M, CHEN Z H. Comparison of WPA production technology in China [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020, 35(1):24-26.

[2] 王洪.真空转台式过滤机滤盘优化改造[J].化工管理,2020,(14):137-138.

[3] LU Z J, DOURDAIN S, PELLET-ROSTAING S. Understanding the effect of phase modifier as n-octanol on extraction, aggregation and third phase appearance in solvent extraction [J]. Langmuir, 2020, 36(41):12121-12129.

[4] 刘志平.湿法磷酸转台式过滤机长周期高负荷运行探索[J].低碳世界,2020,10(6):43-44.

[5] MICHALOVICZ L, MÜLLER M M L, TORMENA C A, et al. Soil chemical attributes, nutrient uptake and yield of no-till crops as affected by phosphogypsum doses and parceling in southern Brazil [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019, 65(3):385-399.

[6] 吴长江.磷石膏可溶磷水洗影响因素研究[J].化工设计通讯, 2018, 44(9):147-148.

WU C J. Study on influencing factors of phosphogypsum soluble phosphorus washing [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2018, 44(9):147-148.

[7] AGATA M, SZYMON O, MICHAŁ D. Influence of supersaturation, temperature and rotational speed on induction time of calcium sulfate crystallization [J]. Crystals, 2021, 11(10): 1236.

[8] 张利珍,吕子虎,张永兴,等.磷石膏提质降杂实验研究[J].无机盐工业,2021,53(6):171-173,184.

ZHANG L Z, LYU Z H, ZHANG Y X, et al. Experimental study on improving quality and reducing impurity of phosphogypsum [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2021, 53(6):171-173, 184.

[9] 王敏,刘闯,刘超,等.磷酸转台式真空过滤机分区挡皮支架结构改进[J].磷肥与复肥,2023,38(9):39-40.

WANG M, LIU C, LIU C, et al. Structure improvement of partition leather bracket for rotary table vacuum filter in phosphoric acid plant [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(9):39-40.

[10] 周华波.半水-二水法、二水法磷酸工艺浓磷酸质量比较[J].磷肥与复肥,2020,35(4):21-24,27.

ZHOU H B. Comparison of concentrated phosphoric acid quality between HDH process and DH process [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020, 35(4):21-24, 27.