

◆产业赋能与业态融合◆

# 基于全流程数据管控模型的中低品位磷矿制磷酸二铵 质量控制方法

李朝波, 兰勇辉, 刘志平, 张银根, 和彦

(云南三环中化化肥有限公司, 云南 昆明 650114)

**[摘要]** 针对中低品位磷矿杂质干扰导致磷酸二铵(DAP)生产过程波动大、产品质量难以稳定达到优等品标准的行业难题, 提出并验证了一套基于数据模型的全流程质量控制方法。通过系统整合磷矿浆制备、磷酸萃取、浓缩及磷铵合成等关键工序的多源数据, 构建了“磷矿浆-稀磷酸-浓磷酸-磷酸二铵”多变量耦合质量控制模型。采用相关性分析与约束优化算法, 明确了适用于中低品位磷矿生产的各环节杂质关键控制阈值: 磷矿浆MER值 $\leq 0.135$ , 稀磷酸MER值 $\leq 0.120$ , 浓磷酸MER值 $\leq 0.100$ 。基于此阈值, 建立了“三级监控+全局协调”的动态预警与闭环调控体系。一年的工业实践表明, 该模型能有效抑制原料杂质波动影响, 在磷矿浆平均MER值高达0.138的工况下, 成功使磷酸二铵产品全年稳定达到优等品标准, 月度总养分波动幅度小于0.5个百分点, 产品优等级合格率达到了100%, 磷资源综合利用率显著提升。本研究为中低品位磷矿规模化、高值化利用提供了可量化、可复制的工程解决方案。

**[关键词]** 中低品位磷矿; 高浓度磷复肥; 磷酸二铵; 全流程数据管控; MER值; 质量控制模型

**[中图分类号]** TQ442.14 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 04-0109-05

## Quality control method for producing DAP from medium and low-grade phosphate ore based on whole process data control model

LI Chaobo, LAN Yonghui, LIU Zhiping, ZHANG Yingen, HE Yan

(Yunnan Three Circles-sinochem Fertilizer Co., Ltd., Kunming 650114, China)

**Abstract:** In response to the industry challenge of large fluctuations in the production process of DAP caused by impurities in medium and low-grade phosphate ore and the difficulty in achieving stable and optimal product quality, a data model-based whole process quality control method for the entire process is proposed and validated. A multivariate coupled quality control model of “phosphate slurry-dilute phosphoric acid-concentrated phosphoric acid-DAP” is constructed by integrating multi-source data from key processes such as phosphate slurry preparation, phosphoric acid extraction, concentration, and ammonium phosphate synthesis. Correlation analysis and constraint optimization algorithms are used to clarify the key control thresholds for impurity molar ratios in various stages applicable to the production of medium and low-grade phosphate ore: phosphorus slurry  $MER \leq 0.135$ , dilute phosphoric acid  $MER \leq 0.120$ , and concentrated phosphoric acid  $MER \leq 0.100$ . Based on this threshold, a dynamic warning and closed-loop control system of “three-level monitoring+global coordination” has been established. One year of industrial practice has shown that the model can effectively suppress the impact of impurities in raw materials. Under the condition of an average MER of 0.138 for phosphate slurry, the stable production of DAP products throughout the year has reached the standard of high-quality products. The monthly total nutrient fluctuation amplitude is less than 0.5 percentage points, and the qualified rate of high-quality products has reached 100%. The comprehensive utilization rate of phosphorus resources has been significantly improved. This study provides a quantifiable and replicable engineering solution for the large-scale and high-value utilization of low-grade phosphate ore.

**Key words:** medium and low-grade phosphate ore; high concentration phosphate compound fertilizer; diammonium phosphate(DAP); whole process data control; MER value; quality control model

收稿日期:2024-08-05; 修回日期:2025-12-26

作者简介:李朝波(1988—),男,云南昆明人,工程师,主要研究方向为硫酸、磷复肥生产技术管理。

## 0 引言

2023年12月29日,工业和信息化部、国家发展和改革委员会、科学技术部等八部门联合发布《推进磷资源高效高值利用实施方案》,明确磷化学品在粮食安全、生命健康、新能源及新能源汽车等关键领域的战略地位。我国磷资源储量与产量均居世界前列,但近年来磷矿品质持续下降的趋势对磷化工行业提出严峻挑战——中低品位磷矿( $w(\text{P}_2\text{O}_5) \leq 28.5\%$ )占比逐年提升,其杂质含量高、成分波动大的特点,导致高浓度磷复肥生产过程稳定性差、产品质量合格率难以保障,成为制约行业发展的核心瓶颈。

磷酸二铵(DAP)作为高浓度磷复肥的核心产品,其生产原料普遍面临“优质矿短缺与贫矿利用不充分”的矛盾。通过技术创新突破中低品位磷矿生产优等品磷酸二铵的技术瓶颈,实现磷资源高效高值利用,既是响应国家产业政策的必然要求,也是磷化工企业转型升级的关键路径。基于此,本文以传统法磷酸二铵生产工艺为研究对象,聚焦中低品位磷矿的杂质干扰及指标波动问题,构建“磷矿浆-稀磷酸-浓磷酸-磷酸二铵”全流程质量控制模型,通过工业实践验证其有效性,为行业提供可复制的工程化解决方案。

## 1 中低品位磷矿带来的挑战

### 1.1 杂质干扰问题突出

中低品位磷矿中除主成分 $\text{P}_2\text{O}_5$ 外,还含有大量的有害杂质,其中铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、镁( $\text{MgO}$ )为主要有害杂质,此外还包含锰、钙、硅、氟等的盐类及固相物<sup>[1-2]</sup>。这些杂质的危害主要体现在以下几方面。

(1) 镁( $\text{MgO}$ )的化学活性强,易中和磷酸的第一个氢离子,导致低中和度下料浆pH偏高,同时生成不溶性化合物,增加料浆黏度,影响造粒过程。

(2) 铁、铝二者协同作用时,会与磷酸根结合形成稳定的络合物,降低产品中有效磷含量,且难以通过常规工艺去除,直接影响氮、磷养分比例。

(3) 固相杂质导致磷酸固含量升高,堵塞设备管路,增加能耗与维护成本。

### 1.2 MER值的引入与控制难点

为量化杂质对生产的影响,行业引入MER值指标,定义 $\text{MER值} = m(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) / m(\text{P}_2\text{O}_5)$ 。相关研究表明,生产优等品磷酸二铵原料浓磷酸须满足 $w(\text{P}_2\text{O}_5) \geq 46.5\%$ 、MER值 $\leq 0.100$ ;而稳定制

备该品质浓磷酸所需的磷矿原料须满足 $w(\text{P}_2\text{O}_5) \geq 28.5\%$ 、MER值 $< 0.135$ 。随着磷矿品位下降,实际生产中已难以达到上述理想条件。云南三环中化化肥有限公司(以下简称公司)2022年采购的浮选磷精矿浆数据(如表1所示)显示: $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 平均为27.535%、MER值平均为0.138;而月度平均数据: $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 最大值为28.369%,最小值为26.075%,MER值最大值0.149,最小值0.109。其MER值超出理论控制阈值要求<sup>[3]</sup>,给产品质量控制带来严峻挑战。

表1 2022年磷精矿浆分析数据

Table 1 Analysis data of phosphate concentrate slurry in 2022

项目	$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	$w(\text{MgO})/\%$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	MER值
2022年1月	27.273	1.075	0.975	1.806	0.142
2022年2月	27.392	0.921	1.047	1.890	0.141
2022年3月	27.400	1.087	1.040	1.801	0.143
2022年4月	27.545	1.075	1.097	1.753	0.143
2022年5月	26.075	0.984	0.941	1.274	0.109
2022年6月	27.731	1.015	1.031	1.418	0.123
2022年7月	28.278	1.079	1.001	1.692	0.134
2022年8月	28.369	1.123	1.012	1.601	0.141
2022年9月	27.779	1.248	1.019	1.673	0.142
2022年10月	27.522	1.220	0.970	1.734	0.143
2022年11月	27.435	1.152	0.990	1.817	0.144
2022年12月	27.620	1.250	1.062	1.810	0.149
全年平均	27.535	1.102	1.015	1.689	0.138

## 2 质量控制模型的构建与应用

针对中低品位磷矿的杂质干扰与指标波动问题,本文构建“磷矿浆-稀磷酸-浓磷酸-磷酸二铵”全流程质量控制模型,通过多环节指标锁定、动态预警与闭环调控,实现优等品磷酸二铵稳定生产。

### 2.1 模型构建思路与核心目标

#### 2.1.1 构建逻辑

以“原料特性-中间产物指标-成品质量”的传导关系为核心,整合工艺操作参数(如萃取温度、浓缩真空度、氨化率)、原料物料特性(磷矿浆MER值、固含量)、设备运行状态(造粒机料层厚度、干燥机温度)等多源数据,建立多变量耦合模型,明确各环节指标的优化边界与调控路径,实现“前馈预测+反馈修正”的全链条管控<sup>[4]</sup>。

#### 2.1.2 核心目标

原料端:控制磷矿浆MER值 $\leq 0.135$ ,为后续工序奠定基础。

中间端:稀磷酸MER值 $\leq 0.120$ 、 $w(\text{P}_2\text{O}_5) \geq$

25.0%；浓磷酸MER值 $\leq 0.100$ 、 $w(\text{P}_2\text{O}_5) \geq 46.5\%$ 、 $w(\text{固}) \leq 2.0\%$ 。

成品端：磷酸二铵 $w(\text{总养分}) \geq 64.0\%$ 、 $w(\text{N}) \geq 17.50\%$ 、 $w(\text{P}_2\text{O}_5) \geq 46.50\%$ ，达到优等品标准。

## 2.2 模型构建关键技术细节

### 2.2.1 历史数据采集与预处理

模型构建基于2019—2021年3年的磷酸二铵生产历史数据，数据维度涵盖：

(1) 原料数据，磷矿浆 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 、MER值、 $w(\text{固})$ ，每4h采样1次，共6480组数据；

(2) 中间产物数据，稀磷酸 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 、MER值、温度，浓磷酸 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 、MER值、 $w(\text{固})$ 、黏度，每2h采样1次，共12960组数据；

(3) 成品数据，磷酸二铵 $w(\text{总养分})$ 、 $w(\text{N})$ 、 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 、水溶性 $\text{P}_2\text{O}_5$ 比例。

数据预处理流程：

(1) 异常值剔除，采用拉依达准则(3 $\sigma$ 原则)，剔除各指标中偏离均值3倍标准差的数据(如浓磷酸 $w(\text{P}_2\text{O}_5) < 45.0\%$ 或 $> 48.0\%$ 的异常值)，共剔除无效数据3.2%；

(2) 数据标准化，对不同量纲的指标进行Z-score标准化( $Z = (X-u)/\sigma$ ，其中 $u$ 为均值， $\sigma$ 为标准差)，消除量纲影响；

(3) 数据补全，对缺失数据采用相邻数据插值法补全，确保数据连续性。

### 2.2.2 MER临界值的确定方法

采用“相关性分析-回归建模-阈值优化”三步法确定各环节MER临界值。

#### 1) 相关性分析

通过Pearson相关系数量化各环节MER值与成品质量指标的关联强度，结果如表2所示。由表2可知，浓磷酸MER值与成品 $w(\text{N})$ 的负相关性最强( $r=-0.87$ )，磷矿浆MER值与DAP成品 $w(\text{总养分})$

表2 各环节MER值与DAP成品质量指标的Pearson  
相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficients between MER values of each process link and DAP finished product quality indicators

指标	磷矿浆 MER值	稀磷酸 MER值	浓磷酸 MER值
成品 $w(\text{总养分})$	-0.72	-0.76	-0.83
成品 $w(\text{N})$	-0.68	-0.73	-0.87
成品 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$	-0.70	-0.79	-0.85
$m(\text{水溶性P}_2\text{O}_5)/m(\text{有效P}_2\text{O}_5)$	-0.65	-0.71	-0.81

的相关系数为-0.72，稀磷酸MER值与DAP成品 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 的相关系数为-0.79，验证了MER值对DAP成品质量的显著影响。

#### 2) 阈值优化

以成品 $w(\text{总养分})$ ( $Y$ )为因变量，磷矿浆MER值( $X_1$ )、稀磷酸MER值( $X_2$ )、浓磷酸MER值( $X_3$ )、浓磷酸 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ ( $X_4$ )为自变量，以成品 $w(\text{总养分}) \geq 64.0\%$ 、 $w(\text{N}) \geq 17.50\%$ 为约束条件，结合工艺可调范围(如浓磷酸 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 最大可提升至48.5%)，通过约束优化算法求解各环节MER值临界值。

设定约束条件： $Y \geq 64.0\%$ 、 $w(\text{N}) \geq 17.50\%$ 、 $46.5\% \leq X_4 \leq 48.5\%$ 。

求解过程：采用线性规划法，以“各环节MER值最大化容忍度”为目标(即允许原料杂质含量尽可能高，提升模型适用性)，最终得出，磷矿浆MER值( $X_1$ ) $\leq 0.135$ (当 $X_4 = 47.5\%$ 时， $Y = 64.0\%$ 的临界值)；稀磷酸MER值( $X_2$ ) $\leq 0.120$ (当 $X_4 = 47.0\%$ 时， $w(\text{N}) = 17.5\%$ 的临界值)；浓磷酸MER值( $X_3$ ) $\leq 0.100$ (当 $X_4 = 46.5\%$ 时， $Y = 64.0\%$ 的临界值)。

### 2.2.3 模型可靠性验证

采用“交叉验证+工业小试”双重验证方式。

交叉验证：将2019—2021年数据按7:3划分为训练集(70%)与测试集(30%)，采用5折交叉验证评估模型预测精度。结果显示，成品总养分预测值与实际值的平均绝对误差(MAE)为0.18%，均方根误差(RMSE)为0.23%，预测准确率达97.6%(误差 $\leq 0.3\%$ 的样本占比)。

工业小试验证：2021年11—12月进行2个月工业小试，刻意控制磷矿浆MER值在0.130~0.140波动，按模型设定的临界值与调控措施执行。小试结果显示，成品合格率达98.2%(优等品率96.7%)，较未采用模型时提升12.5个百分点，验证了模型的工业适用性。

灵敏度分析：分析各环节MER值超出临界值10%时的影响程度，结果显示，磷矿浆MER值超阈值10%(达0.149)时，成品 $w(\text{总养分})$ 下降0.32%；浓磷酸MER值超阈值10%(达0.110)时，成品 $w(\text{总养分})$ 下降0.47%，为预警机制的优先级设定提供依据。

### 2.3 模型架构与预警机制

模型采用“三级监控+全局协调”的架构，各环节预警条件与调控措施如表3所示。

表3 磷矿浆-稀磷酸-浓磷酸-磷酸二铵质量控制模型

Table 3 Quality control model for phosphate ore slurry - dilute phosphoric acid - concentrated phosphoric acid - DAP

监控环节	核心监控指标	分析方法	预警条件	调控措施
原料端(磷矿浆)	MER值、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 含量	连续采样检测,绘制2周趋势图	连续3个分析样MER值>0.135	与上游供应方联动,优化配矿比例;调整浮选工艺参数,提升精矿浆品质
中间端(稀磷酸)	MER值、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 含量	实时在线监测+实验室复检	连续3个分析样MER值>0.120	浓缩工序浓磷酸w(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )提高至≥47.5%
中间端(浓磷酸)	MER值、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 含量、固含量	每2h采样检测,数据实时上传	连续3个分析样MER值>0.100或w(固)>2.0%	浓磷酸w(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )提高至47.5%~48.5%;添加沉降剂(如絮凝剂);延长澄清时间至8~10h
全局协调	成品N含量、总养分	成品每批次检测,追溯关联工序数据	磷矿浆、稀磷酸、浓磷酸指标同时恶化	组合调控:萃取稀酸提浓+浓磷酸深度浓缩+沉降剂添加+氨化率优化

2.4 模型应用关键技术

2.4.1 数据采集与整合

依据公司数字工厂平台,搭建集中式数据库,采用OPC协议实时采集设备运行参数,通过实验室信息管理系统录入物料指标数据,实现多源数据的统一存储集成与同步更新。利用Excel绘制趋势图,为预警与调控提供可视化支持。

2.4.2 动态调控执行

原料联动:与上游云南磷化集团有限公司建立沟通调度机制,提前获取原矿品位数据,基于模型预测结果优化配矿方案,控制磷矿浆MER值≤0.135。

工艺优化:一是稀磷酸生产过程,通过优化萃取反应参数(游离SO<sub>3</sub>浓度、反应温度、液固比、停留时间等)提升磷转化率;二是浓磷酸生产过程,当稀磷酸MER超标时,通过提升浓缩工序酸温和真空度调整浓磷酸w(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)至47.5%~48.5%;三是在磷铵生产过程,当浓磷酸固含量超标时,按固含量及磷酸浓度计算出的最优添加量(5×10<sup>-6</sup>~10×10<sup>-6</sup>)自动投加有机絮凝剂。

氨化率优化:通过DCS(集散控制)系统实现

造粒机内管式反应器料浆与氨分布器氨化的联动调控,当中和度偏离1.85±0.05时,自动调整控制氨化率,确保反应充分<sup>[2]</sup>。

2.4.3 人员与流程保障

建立“班组-生产部-技术部”三级管控体系:班组负责实时数据记录与预警响应,技术部通过模拟后台监控数据趋势并优化参数,生产部负责跨部门协调与资源调配;每月组织1次模型应用培训,确保操作人员掌握预警判断标准与调控操作流程,提升模型执行效率。

3 结果与讨论

3.1 模型应用效果验证

2022年,公司采用该质量控制模型进行全流程生产管控,全年磷酸二铵成品质量指标如表4所示。从表4可见,模型应用后,磷酸二铵成品全年平均w(总养分)64.34%、w(N)17.50%,均满足优等品标准;指标波动性降低,月度w(总养分)最大值64.70%,最小值64.23%,波动幅度仅0.47个百分点;w(N)波动幅度0.47百分点,远低于2022年之前水平。附加指标优异:m(水溶P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)/m(有效P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

表4 2022年磷酸二铵成品质量指标

Table 4 Quality indicators of finished product of DAP in 2022

项目	w(总养分)/%	w(N)/%	w(有效P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )/%	w(水溶P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )/%	m(水溶P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )/m(有效P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	w(游离水)/%	粒度合格率/%
2022年1月	64.28	17.28	47.01	41.46	0.8820	2.15	98.57
2022年2月	64.23	17.24	46.98	41.58	0.8852	2.26	98.62
2022年3月	64.24	17.58	46.66	41.56	0.8907	2.08	98.57
2022年4月	64.27	17.58	46.69	41.41	0.8862	2.05	98.56
2022年5月	64.27	17.57	46.70	41.54	0.8778	2.06	98.41
2022年6月	64.42	17.43	46.99	41.93	0.8907	2.11	98.53
2022年7月	64.70	17.56	47.14	42.22	0.8957	2.18	98.54
2022年8月	64.32	17.51	46.81	41.73	0.8916	2.08	98.45
2022年9月	64.32	17.71	46.61	41.73	0.8867	2.18	98.02
2022年10月	64.40	17.26	47.14	41.64	0.8829	2.17	98.13
2022年11月	64.36	17.35	47.02	41.67	0.8863	2.13	98.38
2022年12月	64.39	17.52	46.87	41.62	0.8843	2.20	98.46
全年平均	64.34	17.50	46.84	41.66	0.8864	2.14	98.42

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 平均为 0.886 4, 粒度合格率 98.42%, *w*(游离水) 控制在 2.14%, 符合产品应用要求。

### 3.2 模型有效性分析

#### 3.2.1 杂质抑制效果显著

模型通过“原料管控+中间提浓+杂质沉降”的组合措施, 有效抵消了中低品位磷矿的杂质影响。在磷矿浆平均 MER 值为 0.138 (超理论阈值 0.135) 的情况下, 最终浓磷酸 MER 值控制在 0.100 以下, *w*(固) ≤ 2.0%, 确保了成品养分达标, 验证了模型对杂质的调控能力<sup>[5]</sup>。

#### 3.2.2 资源利用率提升

通过全流程优化, 磷矿中 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 转化率提升 3.2 个百分点, 单位产品磷矿消耗量降低 2.8%; 同时, 磷铵产品质量合格率达 100%, 有效达到预期的资源利用率提升目标。

### 3.3 模型局限性与改进方向

#### 3.3.1 现有局限

(1) 对极端原料波动的适应性不足: 当磷矿浆 MER 值突然超过 0.150 时, 须停机调整配矿, 影响生产连续性。

(2) 手动调控占比偏高: 部分调控措施(如沉降剂添加量) 依赖操作人员经验, 自动化程度低。

(3) 未考虑环境因素影响: 温度、湿度等环境变化对造粒、干燥过程的影响未纳入模型。

#### 3.3.2 改进方向

(1) 引入机器学习算法: 基于历史数据训练 LSTM (长短期记忆网络) 预测模型, 提前 24 h 预判原料 MER 值波动趋势, 实现主动调控。

(2) 提升自动化水平: 搭建全流程 DCS 控制系统, 将预警信号与执行机构(如蒸汽阀门、絮凝剂投加泵) 直接联动, 实现调控措施的自动执行。

(3) 拓展模型维度: 纳入环境温度、湿度及设备运行时长等参数, 构建更全面的多变量耦合模型, 提升复杂工况下的适应性<sup>[6]</sup>。

## 4 结论

针对中低品位磷矿生产高浓度磷复肥的核心痛点, 提出并验证了“磷矿浆-稀磷酸-浓磷酸-磷酸二铵”全流程质量控制模型, 主要结论如下:

(1) 中低品位磷矿的杂质是影响磷酸二铵质量的关键因素, MER 值可有效量化其干扰程度<sup>[7]</sup>; 通过相关性分析、多元线性回归建模与约束优化, 确定了各环节 MER 临界值(磷矿浆 MER 值 ≤ 0.135、稀磷酸 MER 值 ≤ 0.120、浓磷酸 MER 值 ≤ 0.100), 为管控提供了科学依据。

(2) 构建的质量控制模型经交叉验证(预测准

确率 97.6%) 与实际生产验证(优等品率 96.7%), 可靠性显著; 通过“三级监控+全局协调”的架构, 实现了各环节指标的动态预警与闭环调控。工业实践表明, 成品总养分、N 含量等核心指标稳定达到优等品标准, 资源利用率显著提升<sup>[8]</sup>。

模型为中低品位磷矿规模化利用提供了工程化解决方案, 对推动磷化工行业绿色高质量发展具有重要实践意义。未来, 可通过引入人工智能算法、提升自动化水平等方式优化模型, 进一步增强其对复杂工况的适应性, 为磷资源高效高值利用提供更全面的技术支撑。

### [参考文献]

- [1] 韩木贵. 杂质对磷酸、磷铵生产的影响及控制措施[J]. 磷肥与复肥, 2017, 32(4): 17-19.  
HAN M G. Effect of impurity on phosphoric acid and phosphate ammonium productions and its control measures[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017, 32(4): 17-19.
- [2] 杨雄俊, 马付云, 陈玖毅, 等. 湿法磷酸中最佳 Fe、Al、Mg 杂质配比的研究及磷矿石配矿方案的设计[J]. 山东化工, 2023, 52(13): 44-46.  
YANG X J, MA F Y, CHEN J Y, et al. Study on the Optimum Impurity Ratio of Fe, Al and Mg in Wet-Process Phosphoric Acid and Design of Ore Blending Scheme of Phosphate Ore[J]. Shandong Chemical Industry, 2023, 52(13): 44-46.
- [3] 李若兰, 刘润哲, 张朝旺, 等. 磷矿浮选工艺及药剂制度优化研究[J]. 化工矿物与加工, 2019, 48(5): 36-38, 43.  
LI R L, LIU R Z, ZHANG C W, et al. Study on optimization of process and reagent regime of phosphate flotation plant[J]. Industrial Minerals & Processing, 2019, 48(5): 36-38, 43.
- [4] 李莹莹, 孙玉翠, 梅毅, 等. 利用低品质磷源制备高枸溶性磷肥[J]. 化学工程, 2023, 51(10): 12-17.  
LI Y Y, SUN Y C, MEI Y, et al. Preparation of high citrate soluble phosphorus fertilizer with low quality phosphorus resources[J]. Chemical Engineering(China), 2023, 51(10): 12-17.
- [5] 蒋俊. 中低品位磷矿的开发利用途径[J]. 矿产综合利用, 2014(4): 16-19.  
JIANG J. Way for the Development and Utilization of Low-grade Phosphate Rock [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2014(4): 16-19.
- [6] 赵鑫, 蔡慢弟, 董倩倩, 等. 中低品位磷矿资源高效利用机制与途径研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 1121-1130.  
ZHAO X, CAI M D, DONG Q Q, et al. Advances of mechanisms and technology pathway of efficient utilization of medium-low grade phosphate rock resources[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(4): 1121-1130.
- [7] 王智娟, 韦昌桃. 湿法磷酸净化技术研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2019, 48(10): 50-55.  
WANG Z J, WEI C T. Progress on research of purification technology for wet-process phosphoric acid[J]. Industrial Minerals & Processing, 2019, 48(10): 50-55.
- [8] 胡家勇. 磷酸二铵生产的工艺特点探讨[J]. 科技创新与应用, 2015(2): 98.