湿法磷酸工艺中滤盘磷石膏品质提升技术研究与实践

肖银兵，熊华军，周智武，刘　悦，唐　俊

（瓮福（集团）有限责任公司 瓮福化工公司，贵州 福泉　550501）

［摘　要］磷石膏作为湿法磷酸生产的副产物，其品质直接反映磷资源利用率与综合利用水平，非水溶性磷含量偏高是制约其品质提升的关键行业痛点。以滤盘磷石膏品质提升为研究目标，探究反应回浆比、矿浆与硫酸分布方式对磷石膏品质的影响规律，通过重构二水湿法磷酸反应体系、优化物料添加工艺、升级生产设备等方式开展实验室研究、小试装置验证及工业化试验。结果表明，该技术方案可将工业化生产中磷石膏w(总磷）平均值稳定控制在0.65%以下，实验室阶段w(总磷）平均值降至0.50%以下，同时显著增强工艺对磷精矿的适应性，降低磷石膏改性净化成本，提升磷酸装置磷收率。该研究成果为磷石膏规模化综合利用提供技术支撑，在湿法磷酸行业具有重要的推广应用价值。

［关键词］湿法磷酸；磷石膏；非水溶性磷；回浆比；品质提升

［中图分类号］TQ126.3+5　　［文献标志码］B　　［文章编号］2097-4566（2026）06-0048-08

Research and practice on quality improvement technology of filter disc phosphogypsum in wet-process phosphoric acid process

XIAO Yinbing, XIONG Huajun, ZHOU Zhiwu, LIU Yue, TANG Jun

(*Wengfu Chemical Company*, *Wengfu* (*Group*) *Co.*, *Ltd.*, *Fuquan* 550501, *China*)

Abstract: Phosphogypsum is a by-product of wet-process phosphoric acid production, and its quality directly reflects the utilization rate and the comprehensive utilization level of phosphorus resources. The high content of water-insoluble phosphorus in phosphogypsum is a key industry pain point restricting its quality improvement. Taking the quality improvement of filter disc phosphogypsum as the research goal, the influence laws of reaction slurry return ratio and distribution mode of ore slurry and sulfuric acid on phosphogypsum quality are explored. Laboratory research, pilot plant verification and industrial test are carried out by reconstructing the reaction system of dihydrate wet-process phosphoric acid, optimizing the material adding process and upgrading production equipment. The results show that the technical scheme can stably control the average total phosphorus content of phosphogypsum in industrial production below 0.65%, and reduce the average total phosphorus content to below 0.50% in the laboratory stages. At the same time, it significantly enhances the adaptability of the process to phosphorus concentrate, reduces the modification and purification cost of phosphogypsum, and improves the phosphorus recovery rate of phosphoric acid plant. The research results provide technical support for the large-scale comprehensive utilization of phosphogypsum and have important popularization and application value in the wet-process phosphoric acid industry.

Key words: wet-process phosphoric acid; phosphogypsum; water-insoluble phosphorus; slurry return ratio; quality improvement

0　引言

磷矿是我国重要的战略性矿产资源之一，在化工、农业、材料等领域应用广泛。我国已探明磷矿储量约176亿t，其中54%以上集中分布于云南、贵州、四川西南3省，资源分布的地域特征显著。从资源品位来看，我国高品位磷矿仅占磷矿总储量的6.4%，整体以中低品位为主。随着磷化工产业的快速发展，磷资源开采强度持续加大，磷资源贫化问题日趋突出，传统生产工艺逐渐面临资源保障不足、加工成本偏高、资源利用率低的多重困境。

收稿日期：2026-03-26

作者简介：肖银兵（1987—　），男，四川大英人，工程师，主要从事磷酸生产及相关技术管理工作。

通信作者：熊华军（1973—　），男，贵州瓮安人，助理工程师，主要从事磷酸生产及相关技术管理工作。

目前磷资源加工主要分为热法与湿法两大技术路径，热法磷酸虽产品纯度高，但存在能耗大、对原料要求高、生产成本高的问题，仅适用于高端磷酸产品生产；湿法磷酸则以硫酸法、盐酸法、硝酸冷冻法为主要工艺，其中二水湿法磷酸工艺因原料适应性强、工艺成熟、生产成本低、规模化生产优势显著，成为国内湿法磷酸工业化生产的主流工艺，市场占比超过90%[1]。二水湿法磷酸工艺满足了农业、工业用磷酸的大规模市场需求，但生产过程中副产磷石膏量巨大[2]。据行业统计，平均每生产磷酸（以P_2O_5计）1 t便会产生干基磷石膏4～5 t，磷石膏已成为磷化工行业产量最大的固体副产物[3]。

同时，传统二水湿法磷酸工艺普遍存在磷石膏总磷质量分数偏高（0.8%～1.2%）、磷资源损失偏大的问题，其中非水溶性磷占比超80%，是制约磷石膏品质的核心因素[4]。近年来，国家及地方相继出台磷化工行业绿色发展政策，磷石膏产品化、规模化综合利用成为磷化工行业高质量发展的硬性要求[5]，磷石膏品质直接决定其综合利用方向与利用价值，低品质磷石膏不仅无法实现高值化利用，还会增加堆存、处理的环保成本。在此背景下，瓮福（集团）有限责任公司（以下简称公司）提出从产、输、堆、取、用多端提升磷石膏品质的整体要求，滤盘作为磷石膏生产的核心环节，其磷石膏品质提升势在必行。开展滤盘磷石膏品质提升技术研究，不仅能改善磷石膏后续产业化应用性能，而且能有效提高磷酸装置磷收率，减少磷资源损失，对推动磷资源高效利用、实现磷化工行业绿色低碳发展具有重要的现实意义与行业价值[6]。

1　当前磷石膏品质现状及影响因素

某公司磷酸生产装置近年来通过工艺微调，磷石膏总磷含量呈逐年下降趋势，但仍未达到公司提出的滤盘磷石膏w（总磷）≤0.5%的指标要求。经系统分析，造成磷石膏总磷含量偏高的核心成因源于原料特性与生产系统条件的双重制约，具体表现为：磷酸装置使用的磷精矿为旋流后细粒径矿，粒径小、比表面积大，在现有反应体系中与硫酸接触后反应速率快、反应过程剧烈，极易造成矿粒被生成的磷石膏晶体包裹，形成“包裹现象”，导致被包裹的磷矿无法与硫酸充分反应，未反应磷矿占比增加，直接造成磷石膏中非水溶性磷含量升高。同时，细粒径矿中镁、铝、铁等金属离子含量相对偏高，这类金属离子会与料浆中的磷酸根离子发生络合反应，引发料浆黏度变化，促使共晶磷生成，共晶磷以晶体形式存在于磷石膏中，无法通过洗涤等方式脱除，进一步加剧了磷石膏非水溶性磷含量偏高的问题。此外，现有原料磷精矿pH在8.4左右，呈弱碱性，与酸性的硫酸、磷酸接触后初始反应剧烈，也为包裹现象与共晶磷生成创造了条件。

针对上述问题，公司项目组确立了“从反应机制入手，结合生产实际优化”的研究思路，从磷精矿与硫酸在反应槽中的反应特点出发，采取弱化、强化分段反应的方式，改善磷石膏的结晶状态，降低反应过程中非水溶性磷的生成量。

2　磷石膏品质提升实验研究

为探明反应回浆比、矿浆与硫酸分布方式对磷石膏品质的影响规律，项目组开展系统的实验室研究，通过设计分段反应实验，优化工艺参数，改善磷石膏结晶状态，降低非水溶性磷含量，为后续小试与工业化试验奠定理论与实践基础。

2.1　实验原理

本研究基于二水湿法磷酸反应机制，将磷矿与硫酸的反应分为两步进行，通过分步反应弱化初始剧烈反应，减少包裹现象与共晶磷生成。第一步为氟磷酸钙与磷酸反应生成磷酸一钙[7]，第二步为磷酸一钙与硫酸反应生成磷酸和二水硫酸钙，核心化学反应方程式如下：

$$Ca_5F(PO_4)_3+7H_3PO_4=\!=\!=5Ca(H_2PO_4)_2+HF\uparrow; \quad (1)$$

$$Ca(H_2PO_4)_2+H_2SO_4+2H_2O=\!=\!=CaSO_4\cdot 2H_2O+2H_3PO_4。 \quad (2)$$

磷酸装置生产用磷矿浆中含大量细粒精矿，其进入反应槽后与硫酸直接接触，易发生剧烈反应形成包裹现象，导致磷矿反应不完全，造成石膏非水溶性磷升高、磷收率降低。现有原料磷精矿pH约8.4，为缓解初始剧烈反应，先将部分细粒径矿与磷酸进行预混反应，生成性质相对稳定的磷酸一钙，再将磷酸一钙与硫酸进行反应，通过控制反应速率与反应过程，改善磷石膏结晶状态，降低石膏中非水溶性磷含量。同时，通过调整反应回浆比、矿浆与硫酸的分布方式，降低硫酸钙的过饱和度，促进磷石膏形成粗大、规则的晶体，减少磷包裹，进一步降低非水溶性磷含量。

2.2　实验方法

实验以磷酸装置实际生产参数为基准，采用同比例缩小法开展实验室模拟实验，核心操作步骤如下。

（1）预混矿浆制备：称取矿浆（干基）200 g，按照m（矿浆（干基））∶m（返酸）=1.00∶3.06加入返酸，充分搅拌混合，控制预混反应时间为2.5～3.0 h，

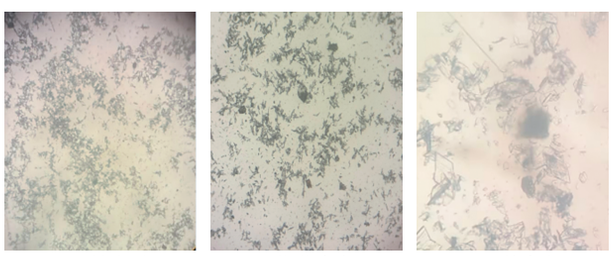
使部分矿粒与磷酸充分反应生成磷酸一钙。

（2）分段添加物料反应：将预混矿浆分成两步加入，第一步，将3/5的预混矿浆加入1 000 mL烧杯，将烧杯放置于82 ℃的恒温水浴锅中，保温稳定后，加入返酸和硫酸混合液总量的3/5，搅拌反应5 min；第二步，将余下2/5的预混矿浆加入烧杯，继续搅拌反应1 min后，加入剩余2/5的返酸和硫酸混合液，密封烧杯后持续搅拌反应5.5 h，确保反应充分进行。

（3）产物分离与检测：反应结束后，采用抽滤方式将反应料浆分离为滤液和滤饼，将滤饼用去离子水多次洗涤后干燥，检测滤液磷含量以及滤饼的总磷、水溶性磷含量。

2.3 实验现象

在实验过程中，通过不断调整预混反应时间、物料添加比例、反应温度等预混条件，观察磷石膏的结晶形态变化，结果见图1。由图1可知，初始实验中（预混时间2 h，停留时间3.0 h，ρ（游离SO_3）35 g/L，w（固）30.84%，料浆密度1.490 g/mL，滤液密度1.285 g/mL），磷石膏结晶晶体粒径小、分布不均、结晶度低，极易包裹未反应矿粒；随着预混条件优化（预混时间2.5 h，停留时间3.0 h，ρ（游离SO_3）37 g/L，w（固）31.28%，料浆密度1.498 g/mL，滤液密度1.290 g/mL），磷石膏结晶逐渐变大，晶体粒径均匀性提升；当预混反应时间、物料添加比例达到最佳值（见表1）时，磷石膏结晶呈片状，晶体粗大、规则、结晶度高，片状结晶的形成可有效减少磷包裹现象，降低石膏非水溶性磷含量，为磷石膏品质提升奠定了微观基础。



a. 初始实验 b. 优化条件 c. 最佳条件

图 1 实验过程中磷石膏晶体变化

Fig. 1 Crystal changes of phosphogypsum during the test

表 1 实验室最佳参数

Table 1 Optimal parameters in laboratory experiment

预混时间/h	停留时间/h	ρ（游离SO_3）/（g·L^{-1}）	w（固）/%	反应温度/℃	料浆密度/（g·mL^{-1}）	滤液密度/（g·mL^{-1}）
2.5 ~ 3.0	3.5 ~ 4.0	39	31	82	1.480 ~ 1.530	1.291 ~ 1.300

2.4 实验分析与讨论

2.4.1 实验室实验数据

在最佳实验参数下进行重复实验，分步加入预混矿浆进行反应后，对磷石膏样品进行检测，石膏中的总磷、水溶性磷和非水溶性磷检测数据见表2。

由表2可知，在实验室最佳工艺条件下，磷石膏中w（非水溶性磷）范围为0.20% ~ 0.48%，平均值为0.37%，远低于公司提出的≤0.5%的指标要求，满足品质提升目标。

表 2 实验室实验磷石膏指标

Table 2 Phosphogypsum indicators in laboratory experiment

项目	w（总磷）/%	w（水溶性磷）/%	w（非水溶性磷）/%	项目	w（总磷）/%	w（水溶性磷）/%	w（非水溶性磷）/%
1	0.44	0.08	0.36	9	0.53	0.05	0.48
2	0.45	0.08	0.37	10	0.52	0.07	0.45
3	0.50	0.06	0.44	11	0.51	0.05	0.46
4	0.50	0.05	0.45	12	0.51	0.06	0.45
5	0.27	0.06	0.21	13	0.31	0.04	0.27
6	0.28	0.08	0.20	14	0.40	0.06	0.34
7	0.35	0.01	0.34	15	0.48	0.02	0.46
8	0.34	0.01	0.33	平均值	0.43	0.05	0.37

2.4.2 实验影响因素

通过对实验过程与实验数据的系统分析，发现影响预混实验效果的核心因素主要有3点：①反应温度，反应温度须严格控制在82 ~ 83 ℃，温度过低会导致反应速率慢、反应不充分，温度过高则会加剧共晶磷生成；②反应时间，总反应时间在6.5 h时效果最佳，预混反应2.5 ~ 3.0 h，分段反应3.5 ~ 4.0 h，可确保矿粒充分反应；③浓硫酸、返酸、矿浆的预混及加入顺序，先将矿浆与返酸预混，再分

段加入硫酸的方式，可有效弱化初始反应，减少包裹现象。

为进一步降低硫酸钙的过饱和度，项目组同步开展了矿浆与硫酸的分布实验研究，通过优化矿浆与硫酸在反应体系中的添加位置与添加比例，实现物料的均匀混合，避免局部过饱和度偏高。由表2实验数据可知，通过分段反应与物料分布优化，实验过程中磷石膏w（非水溶性磷）平均值仅为0.37%，验证了工艺优化思路的可行性。

2.5　小试装置试验

2.5.1　装置现状

磷酸装置采用传统的工艺流程（如图2）与物料加入方式，虽然整个反应槽物料还是趋于全混流的状态，但是其物料的均匀程度不一，反应强度在1#、4#、5#、6#室与2#、3#室存在巨大的差距，且未完全区分主晶槽，造成局部过饱和度偏高和包裹现象严重，使磷石膏非水溶性磷含量偏高。

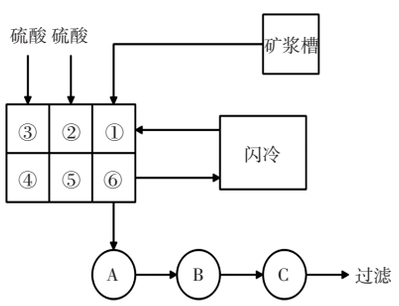


图 2　原磷酸生产工艺流程

Fig. 2　Original production process flow of phosphoric acid

2.5.2　小试装置及试验结果

基于实验室研究结果，项目组通过充分讨论和结合装置现状，完成了小试试验装置的建设。小试装置完全模拟工业化生产的反应体系与工艺流程，重构了二水湿法磷酸反应体系。新旧体系对比见图3。

完成改造后，构建新体系的工艺流程见图4。

小试装置以降低石膏非水溶性磷、探索最佳控制条件为核心目标，按照新体系的工艺流程，系统性地开展多组变量试验，先后调整反应负荷、料浆停留时间、料浆中游离SO_3浓度等关键参数，探究各参数对磷石膏品质的影响规律[8]，结果如下。

（1）反应室结构与停留时间影响：将传统6室反应槽改为8室结构，在料浆停留时间3.5 h条件下，控制料浆w（固）29%～33%、料浆密度1.480～1.530 g/mL、滤液密度1.285～1.300 g/mL、游离SO_3质量浓度36～40 g/L时，小试装置产出磷石膏w（非水溶性磷）平均值较原6室反应槽降低0.09百分点，验证了增加反应室可优化物料反应效率，减少磷包裹现象，结果见表3、表4。

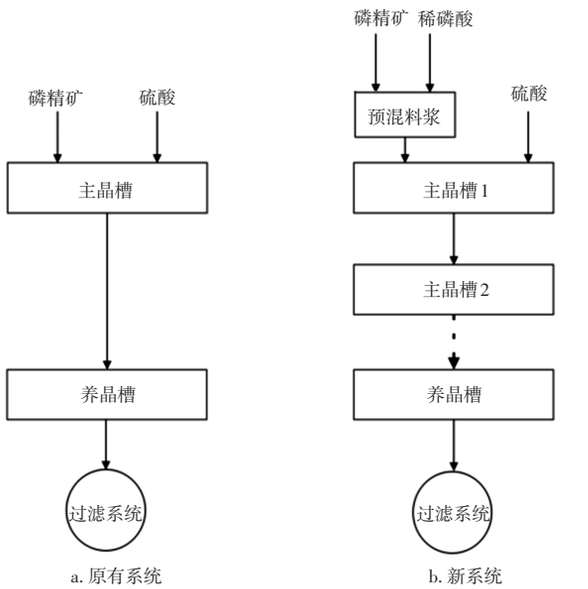


图 3　新旧体系对比

Fig. 3　Comparison of new and old systems

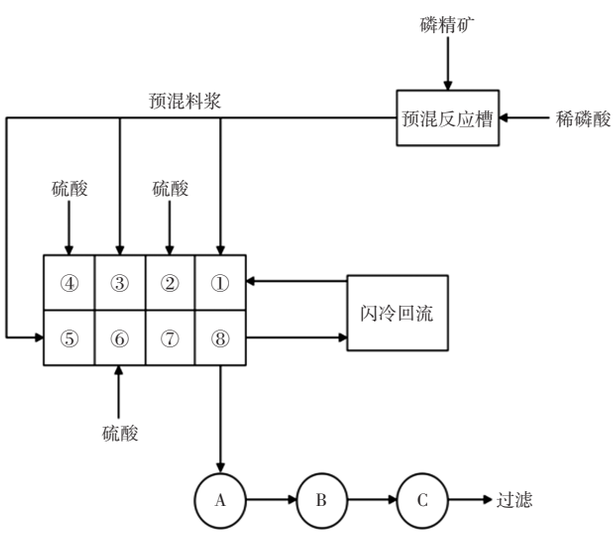


图 4　小试装置工艺流程

Fig. 4　Process flow of the bench-scale test device

表 3　6室反应槽磷石膏指标

Table 3　Phosphogypsum indicators in 6 chamber reaction tank

项目	停留时间/h	w(总磷)/%	w(水溶性磷)/%	w(非水溶性磷)/%
1	3.5	0.51	0.11	0.40
2	3.5	0.56	0.14	0.42
3	3.5	0.56	0.18	0.38
4	3.5	0.54	0.13	0.41
平均值				0.403

表 4　8室反应槽磷石膏指标

Table 4　Phosphogypsum indicators in 8 chamber reaction tank

项目	停留时间/h	w(总磷)/%	w(水溶性磷)/%	w(非水溶性磷)/%
1	3.5	0.40	0.10	0.30
2	3.5	0.36	0.04	0.32
3	3.5	0.41	0.05	0.36
4	3.5	0.37	0.10	0.27
平均值				0.313

（2）反应负荷与停留时间耦合影响：料浆停留时间3.5 h、反应负荷0.1 m^3/h时，控制料浆w（固）29%～33%、料浆密度1.480～1.530 g/mL、滤液密度1.285～1.300 g/mL、游离SO_3质量浓度36～40 g/L时，石膏晶体较粗大，无包裹现象，w（非水溶性磷）平均值为0.31%（见表5、图5）；将停留时间降至3.0 h、负荷提升至0.112 m^3/h后，石膏晶体碎晶增多，出现包裹现象，w（非水溶性磷）升至0.42%（见表6、图5），表明反应负荷增加、停留时间缩短会显著降低磷石膏品质。

表 5　负荷0.1 m^3/h下磷石膏指标

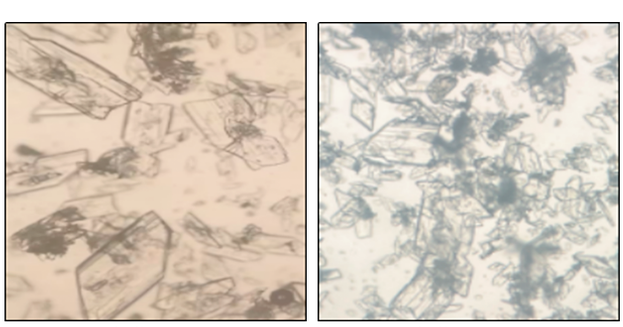
Table 5　Phosphogypsum indicators at a load of 0.1 m^3/h

项目	反应负荷/(m^3·h^{-1})	w(总磷)/%	w(水溶性磷)/%	w(非水溶性磷)/%
1	0.1	0.40	0.10	0.30
2	0.1	0.36	0.04	0.32
3	0.1	0.41	0.05	0.36
4	0.1	0.37	0.10	0.27
平均值				0.31

表 6　负荷0.112 m^3/h下磷石膏指标

Table 6　Phosphogypsum indicators at a load of 0.112 m^3/h

项目	反应负荷/(m^3·h^{-1})	w(总磷)/%	w(水溶性磷)/%	w(非水溶性磷)/%
1	0.112	0.52	0.09	0.43
2	0.112	0.49	0.08	0.41
3	0.112	0.51	0.11	0.40
4	0.112	0.52	0.10	0.42
平均值				0.42



a. 负荷0.1 m^3/h　　b. 负荷0.112 m^3/h

图 5　不同负荷下磷石膏晶体变化

Fig. 5　Crystal changes of phosphogypsum under different loads

（3）游离SO_3质量浓度影响：游离SO_3质量浓度为30～35、36～40、41～45 g/L时磷石膏非水溶性磷指标见表7、表8、表9，石膏晶体形貌见图6。在料浆停留时间3.0 h、负荷0.112 m^3/h条件下，控制料浆w（固）29%～33%、料浆密度1.480～1.530 g/mL、滤液密度1.285～1.300 g/mL、料浆游离SO_3质量浓度在36～40 g/L时，石膏晶体粗大，w（非水溶性磷）平均值为0.40%；游离SO_3质量浓度低于36 g/L时晶体细碎，高于40 g/L时出现包裹现象，非水溶性磷均明显升高。

表7　ρ（游离SO_3）30～35 g/L时磷石膏w（非水溶性磷）

Table 7　Water-insoluble phosphorus mass fraction in phosphogypsum under free SO_3 concentration of 30-35 g/L

项目	ρ(游离SO_3)/(g·L^{-1})	w(总磷)/%	w(水溶性磷)/%	w(非水溶性磷)/%
1	30	0.55	0.09	0.46
2	32	0.6	0.15	0.45
3	31	0.56	0.16	0.4
4	34	0.51	0.14	0.37
5	33	0.66	0.14	0.52
6	35	0.64	0.08	0.56
7	32	0.67	0.13	0.54
8	33	0.56	0.15	0.41
平均值	32.50	0.59	0.13	0.46

表8　ρ（游离SO_3）36～40 g/L时磷石膏w（非水溶性磷）

Table 8　Water-insoluble phosphorus mass fraction in phosphogypsum under free SO_3 concentration of 36-40 g/L

项目	ρ(游离SO_3)/(g·L^{-1})	w(总磷)/%	w(水溶性磷)/%	w(非水溶性磷)/%
1	40	0.52	0.08	0.44
2	39	0.45	0.06	0.39
3	39	0.50	0.10	0.40
4	36	0.43	0.05	0.38
5	38	0.53	0.11	0.42
6	40	0.50	0.09	0.41
7	37	0.46	0.11	0.35
8	38	0.48	0.10	0.38
平均值	38.38	0.48	0.09	0.40

表9　ρ（游离SO_3）41～45 g/L时磷石膏w（非水溶性磷）

Table 9　Water-insoluble phosphorus mass fraction in phosphogypsum under free SO_3 concentration of 41-45 g/L

项目	ρ(游离SO_3)/(g·L^{-1})	w(总磷)/%	w(水溶性磷)/%	w(非水溶性磷)/%
1	43	0.68	0.14	0.54
2	45	0.58	0.07	0.51
3	41	0.54	0.08	0.46
4	44	0.59	0.12	0.47
5	42	0.50	0.07	0.43
6	45	0.66	0.12	0.54
7	43	0.54	0.09	0.45
8	44	0.63	0.11	0.52
平均值	43.38	0.59	0.10	0.49



a. $\rho(SO_3)$ 30～35 g/L　　b. $\rho(SO_3)$ 36～40 g/L　　c. $\rho(SO_3)$ 41～45 g/L

图 6　不同SO_3质量浓度下磷石膏晶体变化

Fig. 6　Crystals changes of phosphogypsum at different SO_3 concentrations

综合实验室和小试装置的研究结果，改变回浆比、控制SO_3质量浓度等条件和优化矿浆与硫酸的物料分布方式，是降低磷石膏非水溶性磷含量非常有效的技术方案，为后续工业化试验与设备改造提供了核心工艺依据。

3　磷石膏品质提升工业化验证

在小试试验明确核心工艺参数可行性的基础上，项目组进一步开展工业化试验，验证工艺在磷酸装置实际生产条件下的适配性与稳定性。针对现有生产设备与工艺优化、高负荷生产不匹配的问题，项目组先完成核心设备的升级改造，再分阶段开展不同反应负荷下的工业化试验，确保试验结果的科学性与实用性。

3.1　设备升级改造

磷酸装置原A、B系列过滤机已运行多年，核心性能参数衰减、运行效率偏低，反应工段闪冷轴流泵、闪冷真空泵的处理能力不足，无法满足高回浆比的工艺要求，为此，项目组结合生产现场实际工况，开展针对性的设备升级改造，核心改造内容如下：（1）对B系列过滤机磨损严重的分配头部件进行更换；（2）对A系列过滤机过滤真空泵进行更换；（3）升级反应工段闪冷轴流泵与闪冷真空泵，闪冷轴流泵流量由原有13 000 m^3/h提升至18 000 m^3/h，闪冷真空泵吸气量由原有5 500 m^3/h提升至9 000 m^3/h，提升料浆循环与回浆能力。

在完成全部改造工序后，项目组对系统进行全面调试，确保各设备运行参数达标、各系统协同匹配，各项指标满足试车要求后，正式启动工业化试验试车。

3.2　工业化试验试车要求

依托装置优化现状，经评估，当前暂时无法满足磷石膏w（总磷）≤0.5%的指标要求，本次工业化试验的核心目标为：在硫酸（质量分数98%，下同）反应负荷由75～80 m^3/h提高至80～85 m^3/h的条件下，实现磷石膏w(总磷）平均值≤0.65%，同时确保各反应指标控制在合理要求范围内，实现产能提升与品质提升的双重目标。

3.3　工业化试验结果

近年来，受磷矿资源贫化影响，磷精矿中的倍半氧化物（Al_2O_3+Fe_2O_3）含量呈持续上升趋势，倍半氧化物会与磷酸根离子络合，加剧料浆黏度变化，造成磷石膏磷含量较之前有所升高，为工业化试验增加了难度。近6年来磷精矿中倍半氧化物含量见表10。由表10可知，倍半氧化物含量从2020年的1.74%升至2025年1—6月的2.65%，涨幅达52.3%，原料品质变差对工业化试验提出了更高要求。

表10　近6年来磷精矿中倍半氧化物含量

Table 10　Content of sesquioxides in phosphate concentrate in recent 6 years

年份	w(倍半氧化物)/%	年份	w(倍半氧化物)/%
2020	1.74	2023	2.14
2021	1.64	2024	2.31
2022	1.95	2025①	2.65

注：2025年为1—6月数据。

针对上述情况，项目组分4个阶段开展不同硫酸反应负荷下的工业化试验，逐步提升反应负荷，验证工艺与设备的适配性。

3.3.1　硫酸反应负荷42 m^3/h试验结果

项目组率先开展低负荷试验，反应负荷控制在42 m^3/h，试验周期为2025年5月28日至6月6日，磷石膏指标与历史数据对比如表11所示。由表11

表11　反应负荷42 m^3/h试验磷石膏指标

Table 11　Phosphogypsum indicators in test at a reaction load of 42 m^3/h

日期	w(游离水)/%	w(总磷)/%	w(水溶性磷)/%	w(非水溶性磷)/%
2024年同期	23.09	0.47	0.11	0.36
2025年改造前	21.44	0.62	0.17	0.45
2025-05-28—2025-06-06	17.45	0.44	0.11	0.33

可以看出，2024 年同期生产过程中磷石膏 w（总磷）为 0.47%，2025 年改造前受原料品质变差影响，w（总磷）升至 0.62%，改造后 w（总磷）降至 0.44%，w（非水溶性磷）由 0.45% 降至 0.33%，w（游离水）由 21.44% 降至 17.45%，各项指标均实现显著改善。

3.3.2 硫酸反应负荷 75 ~ 80 m^3/h 试验结果

2025 年 6 月 7 日开展高负荷试验，反应负荷控制在 75 ~ 80 m^3/h，试验周期为 6 月 7 日至 6 月 18 日，试验数据见表 12。由表 12 可知，2024 年同期生产中磷石膏 w（总磷）为 0.63%，2025 年 3—4 月改造前 w（总磷）升至 0.72%，改造后 w（总磷）降至 0.63%，w（非水溶性磷）由 0.53% 降至 0.44%，在原料品质变差、反应负荷提升的双重条件下，实现了磷石膏品质的显著提升。

表 12 反应负荷 75 ~ 80 m^3/h 试验磷石膏指标

Table 12 Phosphogypsum indicators in test at a reaction load of 75 - 80 m^3/h

日期	w（游离水）/%	w（总磷）/%	w（水溶性磷）/%	w（非水溶性磷）/%	备注
2024 年同期	22.22	0.63	0.15	0.48	改造前
2025–03–25—2025–04–25	20.35	0.72	0.19	0.53	改造前
2025–06–07—2025–06–18	19.05	0.63	0.19	0.44	改造后

3.3.3 硫酸反应负荷 80 ~ 85 m^3/h 试验结果

2025 年 6 月 19 日开展更高负荷试验，反应负荷控制在 80 ~ 85 m^3/h，截至 6 月 26 日，试验数据平均值见表 13。由表 13 可知，该负荷下磷石膏 w（游离水）平均值为 22.49%，w（总磷）平均值为 0.63%，w（水溶性磷）平均值为 0.20%，w（非水溶性磷）平均值为 0.43%，w（总磷）平均值低于 0.65% 的试车目标。

表 13 反应负荷 80 ~ 85 m^3/h 试验磷石膏指标

Table 13 Phosphogypsum indicators in test at a reaction load of 80 - 85 m^3/h

日期	w（游离水）/%	w（总磷）/%	w（水溶性磷）/%	w（非水溶性磷）/%
2025–06–19—2025–06–26	22.49	0.63	0.20	0.43

3.3.4 硫酸反应负荷 85 m^3/h 试验结果

2025 年 6 月 27 日开始将反应负荷稳定在 85 m^3/h 开展试验，运行至 7 月 2 日，试验数据平均值见表 14。由表 14 可知，该负荷下磷石膏 w（游离水）平均值为 18.97%，w（总磷）平均值为 0.65%，w（水溶性磷）平均值为 0.17%，w（非水溶性磷）平均值为 0.48%，w（总磷）平均值精准达到 ≤0.65% 的试车目标，且各项指标运行稳定，表明该技术方案在工业化生产中具有良好的稳定性与适配性，可实现规模化应用。

表 14 反应负荷 85 m^3/h 试验磷石膏指标

Table 14 Phosphogypsum indicators in test at a reaction load of 85 m^3/h

日期	w（游离水）/%	w（总磷）/%	w（水溶性磷）/%	w（非水溶性磷）/%
2025–06–27—2025–07–02	18.97	0.65	0.17	0.48

3.4 工业化试验小结

2025 年 5 月 28 日至 7 月 2 日的工业化生产试验，历时 35 d，分阶段完成了不同负荷下的试验验证，试验结果表明，本次工艺优化与设备改造取得了显著成效。

（1）整个工业化试验期间，各反应指标均控制在考核要求范围内，磷石膏 w（总磷）平均值稳定 ≤0.65%，试车达到预期考核指标，验证了工艺优化方案的工业化可行性。

（2）闪冷轴流泵与闪冷真空泵的改造，一方面有效增加了料浆回浆比，为未反应矿粒充分反应创造了条件；另一方面维持了高负荷下反应系统的能量平衡，满足反应料浆蒸发要求，在不降低稀磷酸浓度的前提下，确保了过滤机洗水的加入量，稳定了系统的水平衡，同时满足水溶性磷脱除的要求。

（3）提高回浆比使生产装置在磷精矿倍半氧化物含量持续提升的情况下，依然能够有效降低磷石膏中磷含量，显著提升了现有装置对不同品质磷精矿的适应性，缓解了磷资源贫化带来的生产压力。

4 效益分析

通过实验室研究、小试装置验证与工业化试验，解决了磷酸反应系统在现有精矿品质下适应性不足的行业问题，有效降低了石膏非水溶性磷含量，为磷石膏下游综合利用创造了有利条件，同时实现了显著的经济效益、资源效益与环保效益。

4.1 经济效益

本技术方案在工业化生产中可将磷石膏 w（总磷）平均值控制在 0.65% 以下，相较于改造前的 0.72%，w（总磷）降低 0.07 百分点。按 2025 年 P_2O_5 产量 72.17 万 t 测算，仅回收 P_2O_5 产生的直接经济价值为 647.9 万元/a。同时，磷石膏品质提升降低了后续改性净化成本。

4.2 资源效益

一方面，本技术方案提升了磷酸装置磷收率，减少了磷资源损失，实现了中低品位磷矿资源的高效利用，缓解了我国磷资源贫化、高品位磷矿短缺的问题，提升了磷资源保障能力；另一方面，显著增强了生产装置对不同品质磷精矿的适应性，可处理倍半氧化物含量更高的中低品位磷矿，拓展了原料来源，降低了原料采购成本。同时，磷石膏品质提升推动了其由固体废弃物向资源的转化，实现了磷化工产业的资源循环利用。

4.3 环保效益

磷石膏是磷化工行业产生量最大的固体废弃物，低品质磷石膏难以实现综合利用，多采取堆存处理，不仅占用大量土地资源，还存在淋溶污染、扬尘等环境风险。本技术方案提升了磷石膏品质，使磷石膏可应用于建材、路基、化工填料等领域，实现规模化综合利用，减少磷石膏堆存量，降低了堆存带来的环境压力[9]。同时，磷资源利用率的提升可减少磷矿开采量，有利于保护磷矿资源与生态环境，契合“双碳”目标与磷化工行业绿色低碳发展的要求。

4.4 行业效益

本研究构建的二水湿法磷酸工艺磷石膏品质提升技术体系，为湿法磷酸行业解决磷石膏非水溶性磷偏高的行业痛点提供了可复制、可推广的技术方案，填补了行业内相关技术空白。该技术方案无需大规模改造现有生产装置，仅通过工艺优化与核心设备升级即可实现磷石膏品质提升，改造成本低、见效快，适合国内多数湿法磷酸生产企业推广应用，对推动我国磷化工行业高质量发展、实现磷石膏“产消平衡”具有重要的行业示范价值。

5 结论

本研究以解决湿法磷酸生产中磷石膏非水溶性磷含量偏高的核心行业痛点为目标，构建了二水湿法磷酸工艺新型分段反应体系，通过系统开展实验室研究、小试装置验证及工业化试验，实现了滤盘磷石膏品质的有效提升，可推动磷石膏规模化综合利用，减少固体废弃物堆存，达成经济效益、资源效益与环保效益的协同统一，为磷石膏综合利用创造有利条件。

[参考文献]

[1] 何宾宾，姜威，龚丽.中低品位磷矿绿色全量资源化利用[J].磷肥与复肥，2020，35(4)：28-29.
HE B B，JIANG W，GONG L. Green full-scale resource utilization of medium-low grade phosphate rock[J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2020，35(4)：28-29.

[2] 张允湘.磷肥及复合肥料工艺学[M].北京：化学工业出版社，2008.

[3] 梁成波，解田，杨林，等.磷酸分解磷矿过程中金属元素的浸出规律研究[J].无机盐工业，2021，53(11)：49-54.
LIANG C B，XIE T，YANG L，et al. Study on leaching law of metal elements in process of decomposing phosphate rock by phosphoric acid [J]. Inorganic Chemicals Industry，2021，53(11)：49-54.

[4] 周智武，冷启辉，肖银兵.二水湿法磷酸提升磷收率的优化改造[J].生态产业科学与磷氟工程，2025，40(6)：50-53.
ZHOU Z W，LENG Q H，XIAO Y B. Optimization and transformation of dihydrate wet-process phosphoric acid to enhance phosphorus yield[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering，2025，40(6)：50-53.

[5] 于建国，张婷.落实“双碳”战略，磷化工大有可为[J].磷肥与复肥，2022，37(8)：刊首页.

[6] 钟艳君，陈彦逍，王辛龙，等.浅析我国磷化工绿色化发展现状与趋势[J].磷肥与复肥，2019，34(9)：9-12.
ZHONG Y J，CHEN Y X，WANG X L，et al.Analysis on present situation and trend of green development of phosphorus chemical industry in China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2019，34(9)：9-12.

[7] 贡长生.现代磷化工技术和应用[M].北京：化学工业出版社，2013.

[8] 宁廷建，彭家惠，李美.湿法磷酸工艺对磷石膏中残磷含量的影响[J].贵州化工，2011，36(2)：1-2，6.
NING T J，PENG J H，LI M. Effect of Wet-Process Phosphoric Acid Technology on Residual Phosphorus Content in Phosphogypsum[J]. Guizhou Chemical Industry，2011，36(2)：1-2，6.

[9] 汪巧玲.磷石膏在矿坑生态修复中的应用研究[J].绿色科技，2025，27(12)：159-164，192.
WANG Q L. Research on the Application of Phosphogypsum in Ecological Restoration of Mines[J]. Journal of Green Science and Technology，2025，27(12)：159-164，192.