

## 湿法磷酸生产磷氟资源回收创新工艺

李律超<sup>1</sup>, 宁平<sup>2</sup>, 李文超<sup>1</sup>, 毕仙兰<sup>1</sup>, 李凯<sup>1</sup>, 严世科<sup>1</sup>, 李治<sup>1</sup>, 李永辉<sup>1</sup>,  
刘敬业<sup>2</sup>, 贾丽娟<sup>3</sup>

(1. 昆明尔康科技有限公司, 云南 昆明 650600; 2. 昆明理工大学, 云南 昆明 650500;  
3. 云南民族大学, 云南 昆明 650504)

**[摘要]** 湿法磷酸生产过程中伴生氟的高值资源化利用是推动磷化工绿色低碳的关键环节。针对行业长期存在的二水法磷酸萃取尾气洗涤系统产生的氟硅酸浓度低、杂质磷含量高、硅胶堵塞严重、系统运行周期短等关键技术难题, 通过流程再造和核心参数调整, 开发了一套全新的磷氟资源回收工艺。该工艺构建了“源头阻磷-过程除硅-末端净气-循环提浓”的磷氟梯度定向分离系统, 通过旋风除沫、“文丘里+沉降+压滤”集成、塔后高效气液分离、多级闭环循环洗涤, 系统解决了磷氟产品品质与稳定性的难题; 通过精准调控混酸器高度, 将气相氟占比从17%提升至30%左右。产业化应用结果表明, 新工艺可使氟硅酸产品中磷含量(以 $P_2O_5$ 质量分数计)稳定降至 $\leq 250$  mg/kg, 浓度(以 $H_2SiF_6$ 质量分数计)提升至12%~18%, 尾气洗涤系统连续运行周期从7 d延长至50 d以上, 氟硅酸实现从副产废酸到化工原料的根本性转变。

**[关键词]** 湿法磷酸; 氟硅酸; 磷脱除; 硅胶分离; 磷氟资源化; 混酸器高度; 运行周期

**[中图分类号]** X781; TQ126.3<sup>5</sup> **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 04-0065-06

### Innovative process for phosphorus and fluorine recovery in wet-process phosphoric acid production

LI Lyuchao<sup>1</sup>, NING Ping<sup>2</sup>, LI Wenchao<sup>1</sup>, BI Xianlan<sup>1</sup>, LI Kai<sup>1</sup>, YAN Shike<sup>1</sup>, LI Zhi<sup>1</sup>, LI Yonghui<sup>1</sup>,  
LIU Jingye<sup>2</sup>, JIA Lijuan<sup>3</sup>

(1. Kunming Erkang Technology Co., Ltd., Kunming 650600, China; 2. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 3. Yunnan Minzu University, Kunming 650504, China)

**Abstract:** The high-value resource utilization of associated fluorine in wet-process phosphoric acid production is the key link to promote green and low-carbon phosphorus chemical industry. Aiming at the long-standing key technical problems in the industry, such as low fluosilicic acid concentration, high impurity phosphorus content, serious silica gel blockage, and short system operation cycle, a new phosphorus and fluorine resource recovery process has been developed through process reengineering and core parameter adjustment. This process constructs a phosphorus fluorine gradient directional separation system consisting of “source phosphorus blocking-process silicon removal-end gas purification circulation concentration”. Through cyclone foam removal, integration of “Venturi + sedimentation + pressure filtration”, high-efficiency gas-liquid separation after the tower, and multi-stage closed-loop circulation washing, the problems of quality and stability of phosphorus fluorine products are solved. By precisely adjusting the height of acid mixer, the proportion of fluorine in the gas phase is increased from 17% to about 30%. The results of industrial application show that after adopting the new process, the phosphorus content (calculated by  $P_2O_5$  mass fraction) in fluorosilicic acid products has steadily decreased to  $\leq 250$  mg/kg, the concentration (calculated by  $H_2SiF_6$  mass fraction) has increased to 12%-18%, and the continuous operation cycle of tail gas washing system has been extended from 7 days to more than 50 days, thus realizing the fundamental transformation of fluorosilicic acid from waste acid as a by-product to chemical raw materials.

收稿日期: 2025-10-28; 修回日期: 2026-03-07

作者简介: 李律超(1992—), 男, 云南昆明人, 助理工程师, 从事湿法磷酸氟回收、化工冷却系统、尾气收集治理工作。

通信作者: 贾丽娟, 教授。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(2247061187)

**Key words:** wet-process phosphoric acid; fluorosilicic acid; phosphorus removal; silica gel separation; resource utilization of phosphorus and fluorine; height of acid mixer; operation cycle

磷化工是我国重要的基础原材料产业，湿法磷酸是其最主要的中间产品。在湿法磷酸生产过程中，磷矿中伴生的氟元素（通常  $w(F)$  为 2% ~ 4%）有 15% ~ 20% 以四氟化硅（ $SiF_4$ ）、氟化氢（HF）等气态形式从萃取反应槽中逸出<sup>[1]</sup>。这部分氟资源如不能有效回收，不仅造成战略资源浪费，而且含氟尾气直接排放也会对生态环境构成严重威胁。因此，实现萃取尾气中氟的高效回收与高值化利用，是磷化工行业践行“绿色发展”理念、构建循环经济体系的必然要求，也是应对萤石资源日益紧张局面的有效途径。

氟为国家战略资源，行业重点应加强湿法磷酸源头及浓缩过程中氟回收技术研发，推动磷氟产业耦合<sup>[2]</sup>。然而，目前，国内大中型湿法磷酸装置（以二水法和半水法为主）的萃取尾气洗涤系统，大多仍沿用数十年未有变革的传统流程<sup>[3]</sup>（见图1）。

该流程中，萃取槽尾气经文丘里洗涤，进入一级洗涤，再通过引风机进入二级洗涤，洗涤后直接排放。流程侧重于基本的吸收与尾气达标排放，基

本不考虑副产氟硅酸的高值资源化利用和系统长周期稳定运行，引发了一系列长期困扰行业的共性技术难题：（1）氟硅酸产品品质低劣，资源化路径受阻。回收的氟硅酸浓度极低， $w(H_2SiF_6)$  通常仅为 3% ~ 6%，并且其  $w(P_2O_5)$  高达 400 ~ 1 200 mg/kg。下游高附加值的氟化产品，如氟化铝、冰晶石、电子级氢氟酸等，对原料中的磷杂质极为敏感，通常要求  $w(P_2O_5) \leq 250$  mg/kg。高磷含量导致该氟硅酸无法直接用于高端产品生产，经济价值低下，常被视作“废酸”处理。（2）生产连续性差。在洗涤过程中， $SiF_4$  气体水解会生成大量黏稠的硅胶（水合二氧化硅），由于缺乏有效的硅胶分离手段，导致硅胶富集于管路、喷头及系统设备中，尤其引风机叶轮结垢后振动问题突出，系统平均运行约 7 d 即需停车清理，造成装置频繁开停车，产能损失巨大，维护成本高昂。（3）氟回收率与氟硅酸浓度难以兼顾。传统一次性大流量洗涤模式虽能保证较高的氟吸收率，但所得氟硅酸浓度被过度稀释。而简单的循环洗涤又会因硅胶和磷的累积而迅速恶化系

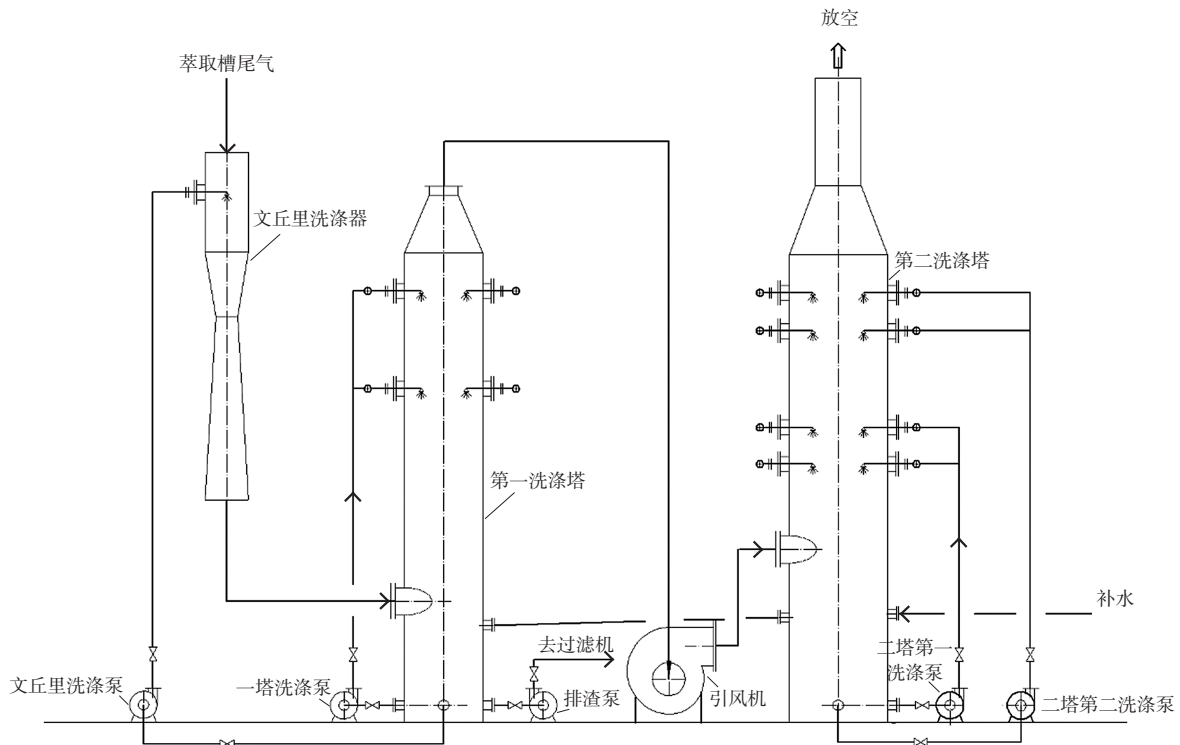


图1 萃取尾气洗涤系统传统工艺流程

Fig. 1 Traditional process flow of the extraction tail gas scrubbing system

统工况，陷入“保浓度则堵系统，保运行则浓度低”的两难境地。

刘志平等<sup>[4]</sup>提出湿法磷酸萃取尾气洗涤系统硅胶后移的解决措施，通过优化管路设计，延长了尾气风机运行周期，从而延长了尾气洗涤系统的运行周期。周华波<sup>[5]</sup>探索了提高氟收率的工艺操作，优化了操作参数，取得了一定效果。但前期工作主要针对企业工况进行局部调整或单目标优化，缺乏系统性和普适性，未能从根本上解决磷氟产品品质低、浓度低与操作系统稳定性差等多重难题。

本研究旨在研发能彻底解决上述难题的普适性技术。核心思路是“开源节流”，即通过主动干预萃取槽内的微观反应环境，调控氟元素的相间迁移路径，从源头增加可回收氟产量；通过构建全新的梯度净化与分离流程，确保氟硅酸在富集过程中持续保持高纯度和低杂质含量，并保障系统设备长期稳定运行。

## 1 问题分析

### 1.1 氟硅酸中磷含量高的原因分析

研究表明，氟硅酸中的磷主要来源于萃取槽气相空间被夹带出的含磷泡沫与液滴，由多重因素耦合引起：

(1) 磷矿浆带来的起泡剂。为应对磷矿品位下降，磷矿浮选技术被广泛应用。浮选过程引入的起泡剂（表面活性剂）残留于矿浆中，在萃取反应激烈的气液界面显著降低表面张力，产生大量稳定的泡沫<sup>[6]</sup>。

(2) 磷矿中碳酸盐与有机物分解。磷矿中的碳酸镁、碳酸钙等杂质与硫酸反应释放大量CO<sub>2</sub>气体，形成气鼓泡。某些有机物亦能稳定泡沫，镁含量高时，泡沫黏度更大，泡沫更趋稳定。

(3) 操作条件的影响。萃取槽搅拌强度不足，易在硫酸加入点（混酸器附近）造成局部反应剧烈、料浆飞溅。搅拌强度过高，则易将空气卷入形成泡沫。反应温度过高（超过82℃）会加剧泡沫生成与料浆雾沫夹带。此外，萃取槽在高液位下超负荷运行，导致气相空间被压缩，是加剧含磷雾沫夹带的关键操作因素。

### 1.2 系统运行不稳定的原因分析

(1) 流程设计缺陷。传统流程是一个重吸收、轻分离的串联工艺。文丘里洗涤器作为核心洗涤装置，承担了冷却、吸收和分离（硅胶初步生成）的多重任务，但其后的洗涤塔并无固相分离功能，更无固相硅胶移除装备，必然导致杂质累积和系统堵塞。

(2) 操作参数缺陷。传统工艺流程中，高温含

氟气体（约80℃）在文丘里洗涤器内与低温洗涤水（约32℃）急冷接触，SiF<sub>4</sub>瞬间剧烈水解（反应式为： $3\text{SiF}_4 + (n+2)\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2\text{SiF}_6 + \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ），生成大量无定形硅胶。这些硅胶随气液混合物进入第一洗涤塔，但该塔作为单一的气液分离设备，对细微固形物的分离效率有限，导致大量硅胶最终在风机叶轮上粘附、堆积，破坏动平衡<sup>[4]</sup>。

### 1.3 氟硅酸浓度低的原因分析

氟硅酸浓度低源于传统工艺中洗涤水量与氟负荷设计不匹配。为了保证排放达标，采用大流量水一次性洗涤，氟被吸收后随即被移出系统，没有富集提浓过程。其背后更深层次的原因是，传统观念认为萃取槽气相氟占比是固定的（约17%）<sup>[7]</sup>，可回收总量有限，缺乏通过工艺手段主动提升此比例的意识。

### 1.4 小结

基于以上剖析，本研究提出流程再造理念：主动调控源头分配，强化过程分级分离，实现闭路循环富集提浓。通过干预氟的源头分配，提高“原料”（气相氟）供给；在杂质产生和累积的关键节点设置高效、专用的分离设施，实现“磷、硅、液滴”的梯级去除，为系统长期清洁运行扫清障碍；在洁净的系统中实施可控的循环洗涤，实现氟的定向富集提浓。

## 2 萃取尾气洗涤系统流程再造

本研究开发的“二水法磷酸萃取低浓度氟硅酸的收集和控磷”成套工艺流程如图2所示。

(1) 创新单元一：前置旋风除沫塔（液沫分离器）——源头磷阻截器。在萃取槽尾气出口，于文丘里洗涤器之前，创新性地增设了专用旋风除沫塔。含氟气体以15~20 m/s的流速切向进入旋风除沫塔内，在塔壁导向下形成高速旋流。气体中夹带的密度较大的液滴、泡沫颗粒在强大离心力作用下被甩向塔壁，与壁面碰撞后失去动能，沿壁面下落。塔内设置的层流式高效喷淋系统，进一步洗涤气体并促进液滴凝聚。分离下来的含磷液体从塔底导流管连续排出，返回萃取槽或前期酸系统，从而将绝大部分磷阻截在氟回收主系统之外。该单元将气固液初级分离任务前移，解决了传统流程中磷直接进入洗涤液的根本问题。

(2) 创新单元二：文丘里-沉降-压滤集成系统——硅胶在线移除中心。对文丘里洗涤器单元进行集成化改造，文丘里洗涤器本体仍采用大流量循环液（设计流量250 m<sup>3</sup>/h）进行高效传质与降温，

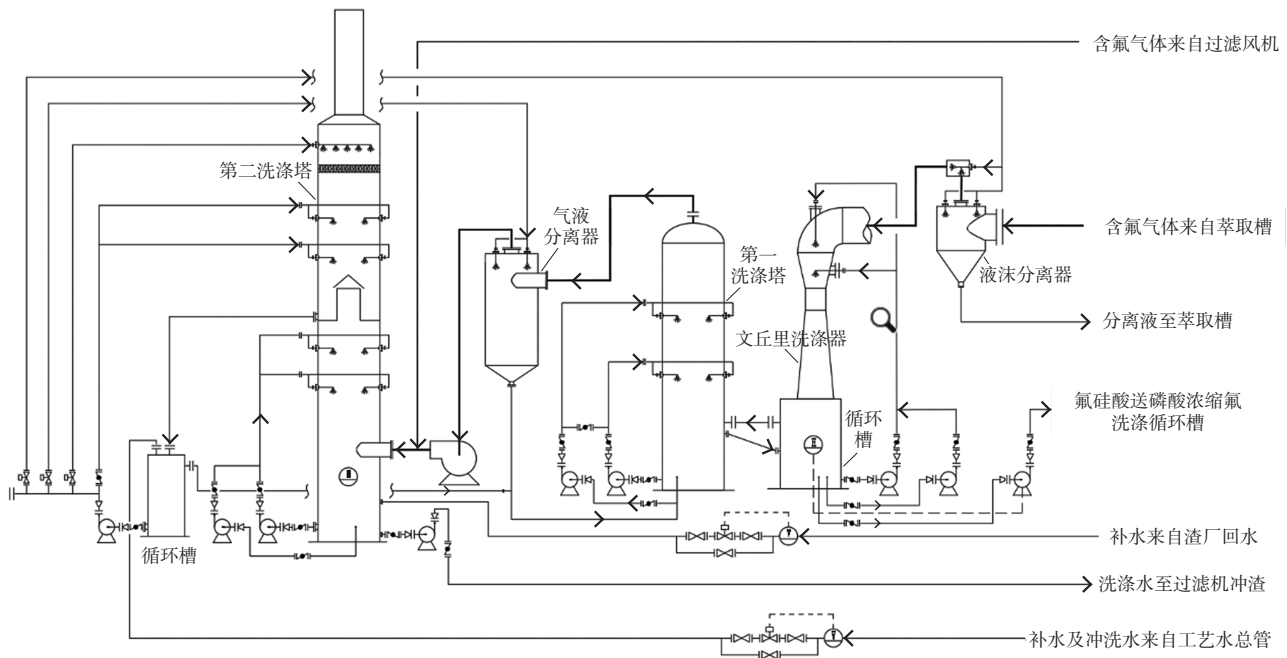


图2 湿法磷酸萃取尾气氟回收创新工艺流程

Fig. 2 Innovative process flow for fluorine recovery from extraction exhaust gas of wet-process phosphoric acid

关键改进在于其底部直接连接一个大型缓冲沉降槽(循环槽)。文丘里中生成的硅胶絮团随液体进入沉降槽后,流速骤降,为硅胶提供了充足的静置沉降时间。浓缩后的硅胶浆液( $w(\text{固})$  5%~15%)从底流口由专用泵稳定输送至固液分离单元。

(3) 创新单元三: 厢式高压板框压滤机固液分离。其主要操作参数为过滤压力0.6~0.8 MPa, 过滤周期2~4 h, 滤饼厚度30~35 mm, 采用二次水反吹卸料。所得硅胶滤饼 $w(\text{H}_2\text{O})$ 可稳定控制在45%以下, 呈干爽块状, 便于运输和后续利用(如制备白炭黑)。滤液为清澈的氟硅酸溶液, 返回沉降槽或洗涤塔循环系统。该集成系统实现了硅胶的连续生成、高效浓缩与机械化移除, 彻底切断了硅胶在系统内循环累积的路径。

(4) 创新单元四: 塔后高效气液分离器——风机的“保护神”。在第一洗涤塔顶部气体出口与引风机进口之间, 增设高效折流板式气液分离器。经过充分洗涤降温后的湿饱和气体进入分离器后, 流道面积急剧扩大, 流速从20 m/s降至4 m/s以下。气体中携带的微量雾滴(粒径 $>10 \mu\text{m}$ )在惯性作用下与折流板碰撞、聚集, 最终靠重力向下流入集液槽回收。经此处理后, 进入引风机的气体已达“机械除雾”后的干气状态, 几乎不含液滴和固体颗粒, 从根本上消除了风机叶轮结垢的诱因。

(5) 创新单元五: 多级闭环循环洗涤与智能浓

度调控系统。整个洗涤系统(旋风除沫塔、文丘里洗涤器、第一洗涤塔)的洗涤液构成多个相互关联又相对独立的循环回路。通过PLC/DCS控制系统, 实时监测关键点位的氟硅酸密度(在线监测浓度)、液位、pH等参数。系统根据氟负荷和设定的目标浓度(如 $w(\text{H}_2\text{SiF}_6)$  15%), 智能调节各循环泵的流量、补充新鲜工艺水量以及从系统中提取合格氟硅酸产品的速率。通过精确控制系统的水平衡和氟物料平衡, 实现连续运行状态下氟硅酸浓度的稳步提升和稳定维持。

### 3 提高气相氟占比的工业试验

#### 3.1 调控原理

业界普遍接受萃取槽中总氟在气相、液相(磷酸)、固相(磷石膏)中的分配比例大致为17:70:13<sup>[7]</sup>, 并视其为由热力学平衡决定的固定值。本研究提出了不同的过程机制: 该分配比例并非绝对不变, 它受到反应区局部物理化学环境(如温度、过饱和度、气液传质速率)的强烈影响。硫酸与磷矿浆的初始反应剧烈, 释放大热量和气体, 反应发生的位置(即混酸器出口相对于料浆液面的深度)直接决定了反应产物的初始相态和后续迁移路径。因此可以假设, 通过提升混酸器高度, 将剧烈反应区移至气液界面附近, 可以强化气态氟化物的直接逸出动力学, 抑制其向液相的溶解扩散, 从而改变最终的稳态分配比例, 提高气相氟占比。

### 3.2 工业化试验

为验证上述假设，在云南（A、B厂）、湖北（C、D厂）4套运行稳定、采用不同产地磷矿的二水法磷酸装置上，进行了严格的工业化对比试验，试验研究方法如下。

（1）控制变量。固定磷矿投料量、矿浆品位、反应温度（ $80 \pm 2$ ）℃、搅拌转速等主要生产参数，确保变化主要来自混酸器高度的调整。

（2）调控梯度。以气液界面为基准（0点），将混酸器从初始的液面下200 mm开始，以100 mm为步长，逐步提升至液面上400 mm，共7个试验工况。

（3）稳定与取样。每次参数调整后，系统稳定运行6.0 h以上（超过物料平均停留时间4.5 h），确保数据代表新稳态。在每一工况稳定末期，同步、同时时间点进行三位一体取样：气相样取自萃取槽至除沫塔的干气管道专用取样口；液相样取过滤机滤液区的稀磷酸；固相样为过滤机上的新鲜磷石膏。所有样品立即密封处理。

（4）分析检测。氟含量采用蒸馏-电位滴定法（GB/T 1873—1995）精确测定，每个数据点为同一样品3次测定的平均值。

### 3.3 混酸器位置对氟回收的影响

4家工厂数据趋势高度一致，主要结果整合于图3。

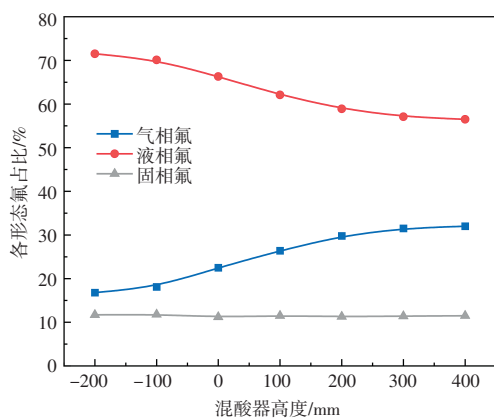


图3 各形态氟占比随混酸器高度变化的规律曲线

Fig. 3 Variation of various forms of fluorine proportion with the height of the acid mixer

试验结果表明，气相氟占比随混酸器高度提升而单调增加，从液面下200 mm时的17%，最高可提升至液面上400 mm时的32%，增幅接近1倍。在混酸器高度从液面下100 mm穿越气液界面至液面上200 mm的这个区间，曲线斜率最大。特别是从0 mm到液面上200 mm，气相氟占比从约22%跃

升至约30%，平均每提升100 mm增幅超过2%。证明在液相内部生成的 $\text{SiF}_4$ 气泡需经历漫长的上升路径才能逸出。将主反应区移至界面附近，能最有效地将氟“导向”气相。在此过程中，气泡表面的 $\text{HF/SiF}_4$ 与周围磷酸存在持续的相间溶解与再平衡，且气泡可能合并、破裂，导致氟最终大量滞留在液相，表现为“液封效应”主导。

在界面区域（0 mm点附近），反应热在极薄液层内释放，引起局部过热甚至“微爆沸”。这种剧烈的扰动产生大量微米级液滴，将反应生成的氟化物直接“抛射”进入气相空间，极大地缩短了气态产物的逸出路径，强化了传质速率。同时，界面处硫酸浓度梯度大，反应速率快，氟化物生成瞬时强度高。

当混酸器位置过高（液面上300 mm以上），曲线斜率减缓。这是因为当混酸器位置过高导致硫酸射流与料浆主体接触混合效果变差，部分硫酸及料浆飞溅至槽壁或气相，反应效率下降；此外，过度的飞溅带来腐蚀和安全风险，因此，混酸器位置存在工程上限。

混酸器位置调整对下游工序可产生连锁效益，气相氟比例提高，意味着在总氟投入不变的情况下，可供回收的氟绝对量增加了约76%。这不仅直接助力提升氟硅酸浓度，还带来了一个额外的重大好处：进入液相（磷酸）的氟相应减少。这能显著降低后续磷酸浓缩工段氟硅酸逸出和硅胶堵塞的负荷，有利于浓缩工序稳定运行。

## 4 创新集成工艺的运行效果

### 4.1 对运行周期的影响

以云南某大型磷酸企业2025年度的运行数据为例（见图4），改造前，风机轴向振动值通常在运行5~7 d后即超过7.1 mm/s的报警线，被迫停

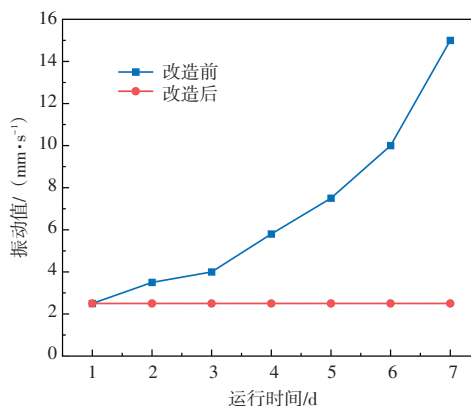


图4 工艺改造前后风机振动值运行趋势对比

Fig. 4 Comparison of fan vibration value trends before and after process modification

车。工艺改造并稳定运行后，风机振动值长期稳定在3.5 mm/s以下的优良区域。系统压差曲线也保持平稳，无上升趋势。该套系统已实现连续运行超过180 d，期间仅进行常规巡检和维护，验证了流程

再造创新工艺可行性。

#### 4.2 对工艺性能的影响

该集成工艺在多家企业实施后，关键性能指标发生了质的飞跃，创新工艺与传统工艺的对比如表1所示。

表1 创新集成工艺与传统工艺综合性能对比

Table 1 Comparative analysis of comprehensive performance between innovative integrated processes and traditional processes

项目	产品品质			系统可靠性		资源与环保	
	$w(\text{P}_2\text{O}_5)/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{H}_2\text{SiF}_6)/\%$	外观与硅胶	风机运行周期/d	系统压降稳定性	氟资源化程度	维护成本与频次
传统工艺	400 ~ 1 200	3 ~ 6	浑浊, 硅胶多	7	波动大, 逐渐上升	低, 常作为废酸处理	高, 频繁清理风机
创新集成工艺	$\leq 250$	12 ~ 18	清澈透明, 硅胶痕量	$\geq 50$ (最长纪录180)	长期保持稳定	高, 可作为原料出售或深加工	极低, 日常维护为主

#### 4.3 技术经济指标

创新工艺虽然一次性投资较传统流程有所增加(主要增加旋风除沫塔、沉降槽、压滤机及气液分离器等设备), 但综合经济效益显著。以1套年产 $\text{P}_2\text{O}_5$  30万t的装置计, 年产氟硅酸可达约1.5万t(以100%  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ 计), 从“零价值”或“负价值”(处理费用)变为正收益产品; 风机等设备维修费用、因频繁停车导致的产量损失和能耗损失大幅度降低; 项目实现了氟资源的循环利用, 减少了萤石资源消耗和含氟废物排放, 环境效益显著, 符合国家绿色发展战略。投资回收期通常在1~2年。

### 5 结论与建议

#### 5.1 结论

针对二水法湿法磷酸行业氟硅酸回收的痛点, 通过机制研究与工程实践, 创新二水法磷酸萃取低浓度氟硅酸磷氟资源回收工艺。

(1) 构建了“源头除磷-在线除硅-末端除雾-循环富集”四位一体的全流程优化技术体系。该体系通过流程再造和专用设备集成, 系统性解决了氟硅酸高磷、高硅胶、低浓度与系统短周期的耦合难题, 实现了高品质氟硅酸的稳定生产。

(2) 实证了萃取槽内氟的气-液-固三相分配比例并非不可改变的定值, 而是可以通过调整混酸器插入深度这一工程参数进行主动、有效调控。将气相氟占比从17%提升至30%左右, 为从源头提高氟回收率提供了全新的、可操作的技术途径。

(3) 经多家企业工业化验证, 采用创新集成工艺可使氟硅酸产品满足高端应用要求( $w(\text{P}_2\text{O}_5) \leq 250 \text{ mg/kg}$ ,  $w(\text{H}_2\text{SiF}_6) 12\% \sim 18\%$ ), 系统运行周期延长7倍以上, 实现了显著的经济、环保和社会效益, 具备大规模推广的条件。

#### 5.2 建议

(1) 建立混酸器高度、搅拌强度、反应温度等多参数与氟分配比例的定量化模型, 实现更精准的智能调控。

(2) 探索该集成工艺在半水法、半水-二水法等不同磷酸工艺中的适应性及优化调整策略。

(3) 深化对副产硅胶的高值化利用研究, 如制备高比表面积二氧化硅, 进一步延伸产业链, 提升整个磷氟生态产业的价值与韧性。

#### [参考文献]

[1] BECKER P. Phosphates and phosphoric acid: raw materials, technology, and economics of the wet process[M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1989.

[2] 金涌. 磷氟资源协同与循环利用技术展望[C]//第九届全国磷氟生态产业技术创新论坛论文集. 遵义:[出版者不详], 2025: 1-8.

[3] 《磷酸磷铵生产技术》编写组. 磷酸磷铵生产技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.

[4] 刘志平, 严世科. 湿法磷酸萃取尾气洗涤系统硅胶后移的解决措施[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40(1): 96-100.

LIU Z P, YAN S K. Solution to backward movement of silica gel in tail gas washing system of wet-process phosphoric acid extraction [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(1): 96-100.

[5] 周华波. 二水法磷酸含氟气体中氟的回收探索与实践[J]. 磷肥与复肥, 2020, 35(2): 36-37, 44.

ZHOU H B. Exploration and practice of recovery of fluorine from fluorine-containing gas in dihydrate phosphoric acid [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020, 35(2): 36-37, 44.

[6] 胡晓华, 罗康碧, 李沪萍. 湿法磷酸生产中泡沫形成机理及消泡技术研究进展[J]. 无机盐工业, 2020, 52(5): 1-5.

HU X H, LUO K B, LI H P. Research progress on foam formation mechanism and defoaming technology in wet-process phosphoric acid production [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2020, 52(5): 1-5.

[7] SLACK A V. Phosphoric acid[M]. New York: Marcel Dek, 1968.