

## ◆磷氟产业耦合与高端材料创制◆

## 磷化工体系中氟资源回收工艺的系统协同与集成优化研究综述

黄忠<sup>1,2</sup>, 何宾宾<sup>3</sup>, 张险峰<sup>1,2</sup>, 罗鸣坤<sup>1,2</sup>, 戴元华<sup>1,2</sup>(1. 湖北天宜磷氟科技研究有限公司, 湖北 宜昌 443000; 2. 广州天赐高新材料股份有限公司, 广东 广州 510000;  
3. 昆明理工大学 环境科学与工程学院 云南 昆明 650500)

**[摘要]** 从氟在磷化工典型工艺过程中的迁移路径与赋存形态出发, 分析其在气相、液相及固相介质中的分布特征, 梳理氟回收的主流技术手段, 包括干法冷凝、吸附, 湿法沉淀、萃取, 以及磷石膏脱氟与新兴分离方法等。探讨在多源氟污染背景下, 如何通过“源控—中段调节—末端回收”的流程重构实现回收效率、运行能耗与资源化利用之间的整体平衡。提出未来在工艺模块化设计、多污染协同处理与回收产品资源路径构建等方面的研究重点, 旨在为氟回收从“环节优化”迈向“系统协同”提供理论支持与集成化路径参考。

**[关键词]** 磷化工; 氟回收; 资源化利用

**[中图分类号]** TQ124.3

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 2097-4566 (2025) 08-0070-05

## System collaboration and integrated optimization of fluorine resource recovery process from phosphorus industry processes

HUANG Zhong<sup>1,2</sup>, HE Binbin<sup>3</sup>, ZHANG Xianfeng<sup>1,2</sup>, LUO Mingkun<sup>1,2</sup>, DAI Yuanhua<sup>1,2</sup>

(1. Hubei Tianyi Phosphorus and Fluorine Technology Research Co., Ltd., Yichang 443000, China; 2. Guangzhou Tianci New Materials Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 3. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** The migration pathways and occurrence forms of fluorine throughout key stages of the phosphorus chemical industry are investigated, including its distribution across gas, liquid, and solid phases. Mainstream recovery techniques—such as gas-phase condensation and adsorption, liquid-phase precipitation and solvent extraction, as well as fluorine removal from phosphogypsum and emerging separation approaches—are systematically reviewed. It explores how to reconstruct the recovery chain via source control, intermediate adjustment, and terminal resource capture to balance efficiency, energy input, and resource value. Key influencing factors such as material durability, process compatibility, and interfacial transport are critically analyzed. The review further highlights future priorities in modular process design, multipollutant co-treatment, and valorization of recovered fluorine products, aiming to provide a theoretical basis and strategic guidance for the systematic advancement of fluorine recovery in the phosphorus industry.

**Key words:** phosphorus chemical industry; fluorine recovery; resource utilization

### 0 引言

氟作为一种在自然界中分布广泛且工业应用极为广阔的元素, 凭借其独特的理化性质, 在冶金、化工、电子材料、医药及新能源等领域占重要地位。近年来, 随着全球氟资源消费量持续增长及优质矿源逐步枯竭, 氟资源供应的不确定性逐渐显现, 促使氟的高效利用与回收问题受到越来越多的关注。值得注意的是, 虽然从全球范围看氟资源总量尚具一定储备, 但考虑到地理分布极度不均、开采成本逐年上升以及环境压力不断加剧, 从现有工

业体系中回收氟资源的必要性正在以一种更具紧迫感的方式呈现出来<sup>[1]</sup>。

在这一背景下, 磷产业因其特有的资源结构和工艺特征成为氟元素排放与损失的重要领域。磷矿石中天然赋存的氟化物, 在湿法磷酸生产及下游加工过程中, 往往以氟化氢、氟硅酸及其他含氟物质的形式迁移并释放, 形成了气体排放与固废积累的

**[收稿日期]** 2025-05-16

**[作者简介]** 黄忠(1983-), 男, 湖南溆浦人, 博士, 正高级工程师, 主要从事磷化工、新能源材料研究工作。

双重问题。这一过程不仅造成氟资源的巨大浪费，还对环境构成潜在威胁。若从资源循环利用的视角重新审视这些工业副产物，可以发现其中富集的氟资源具有极高的回收利用价值。但在现有技术条件下，其回收效率、过程经济性及环境友好性仍存在较大的提升空间，且不同技术路径的适用性亦存在一定的不确定性。近年来，针对磷产业氟资源回收的研究不断深入，涵盖了物理分离、化学沉淀、膜分离、离子交换、电化学回收等多种工艺方法<sup>[2]</sup>。值得进一步探讨的是，不同回收技术在能耗、回收率、环境负荷及适应性方面的权衡问题，决定了其未来发展的可行性与应用前景。

笔者围绕磷产业中氟元素的赋存特征、迁移转化过程与回收利用技术展开系统梳理与分析，力图在总结现有研究进展的基础上，揭示当前技术体系中尚存的关键问题与潜在改进方向。同时，尝试提出若干具有前瞻性的研究议题，为推动磷产业氟资源高效、可持续利用提供理论参考与实践指导<sup>[3]</sup>。

## 1 磷产业中氟的赋存与迁移特性

磷矿作为磷产业的基础原料，其矿物结构中天然赋存有相当数量的氟元素，通常以氟磷灰石( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ )的形式存在，部分则以离子取代的方式分布于羟基磷灰石或氯磷灰石等矿物之中。这种微观尺度上的赋存方式，使得氟在矿物晶格中与磷、钙形成较为稳定的结合结构。然而，矿石成因环境、地球化学条件乃至后期变质作用的差异，导致不同矿床中氟含量与赋存形态存在一定程度的波动。例如，某些沉积型磷矿中可检出游离的氟化钙( $\text{CaF}_2$ )细粒，而在风化壳型矿石中，氟元素则更多以结合水形式参与晶体结构，这些差异在一定程度上影响了后续工业过程中氟释放行为。

在湿法磷酸生产过程中，磷矿与硫酸反应使得氟元素得以从矿物结构中释放，初步以氟化氢(HF)气体形式逸出，或进一步与反应体系中存在的硅化合物反应生成氟硅酸( $\text{H}_2\text{SiF}_6$ )。值得注意的是，释放出的氟并非全部以游离气体形式存在，相当一部分氟以离子或络合物形态溶解于液相体系中，进而参与更为复杂的迁移与转化过程<sup>[4]</sup>。随着工艺条件(如温度、反应时间、硫酸浓度等)的变化，这些氟组分在气-液两相之间动态分配，形成了具有较高迁移活性的多形态体系。这种流动性不仅加剧了氟排放的控制难度，也使得氟回收过程中的物质平衡计算更为复杂。

与湿法工艺相比，热法磷酸制备由于反应温度

通常高达1 200 °C，矿石中氟元素的释放更加完全且迅速。此时，氟以氟化氢和其他含氟气体的形式大量逸散，且由于高温气流条件，氟组分极易扩散至整个生产系统。热法工艺虽然在磷回收率上具有一定优势，但对氟元素的收集与利用能力较为薄弱，目前仍以末端治理为主，回收技术尚处于探索阶段。这种工艺特点在一定程度上制约了热法磷酸生产的绿色化发展趋势<sup>[5]</sup>。

从最终赋存状态来看，氟在磷产业体系中的分布呈现出显著的分相化特征。在液相体系中，氟以氟离子( $\text{F}^-$ )、氟硅酸根离子( $\text{SiF}_6^{2-}$ )及其水解产物存在，随磷酸主产品或副产尾液排出；在气相中，氟主要以HF和 $\text{SiF}_4$ 为代表，具有高度挥发性与腐蚀性，对设备安全与环境排放管理构成挑战；而在固相体系中，氟则主要以磷石膏晶体中杂质的形式赋存，部分以吸附态结合于磷石膏颗粒表面，部分则嵌入晶格内部形成半稳定结构。已有研究指出，磷石膏中的氟元素并非完全惰性，特定条件下仍具有一定的迁移与释放潜力，这种潜力在资源化利用与污染控制过程中可能成为一把“双刃剑”。

笔者团队通过对二水法湿法磷酸工艺萃取槽中四氯化硅产生和逸出机制进行研究，结合酸加入方式和酸管道结构优化，能够使萃取槽尾洗中的氟硅酸收率达到30 kg/t以上。该项技术已在国内有代表性的两家磷化工企业应用，体现出非常好的效果。

就目前掌握的资料来看，磷产业中氟元素的迁移与赋存过程，并非单纯受化学反应控制，而是涉及物理迁移、相变转化、表面吸附-解吸以及复杂的液-固界面动力学等多重机制的耦合作用。如何在复杂的工艺条件下实现对氟迁移行为的精准调控，减少无序排放并提高氟资源回收率，仍是当前技术开发中亟须深入解决的问题。这一领域尚有诸多细节未被充分揭示，为未来的基础研究与应用创新留下了广阔的空间。

## 2 氟回收技术分类

### 2.1 干法回收

在磷化工生产过程中，大量氟元素以气态形式释放，主要包括氟化氢(HF)、四氯化硅( $\text{SiF}_4$ )及其水解产物。干法回收技术主要采用物理分离或材料吸附的方法针对这部分气相氟进行捕集与回收。由于气相氟具有强腐蚀性和高度迁移性，干法技术的选择与优化直接关系到回收效率与系统稳定性。目前，冷凝分离、干式吸附以及针对高温环境的特殊回收工艺构成了主要的技术路径。

### 2.1.1 冷凝分离

冷凝分离法基于气体温度降低后氟组分发生相变析出的原理,通常通过多级冷却设备将高温废气迅速降温,促使HF和SiF<sub>4</sub>等组分冷凝为液态或固态产物。该方法工艺简单,适合处理高浓度含氟废气,但对能耗和冷却效率要求较高。高湿度气体中水汽冷凝,以及设备表面氟化物沉积导致的腐蚀风险,仍是制约冷凝分离法长期稳定运行的重要因素。近年来,多级换热、复合冷却介质等改进措施被提出,尽管在一定程度上提高了系统效率,但在大规模连续生产中的应用效果仍有待进一步验证。薛继勇等<sup>[6]</sup>以NP蒸发冷凝系统为研究对象,提出在冷凝前增设旋流分离器,改造后冷凝器连续稳定运行超过两年半,有效提升了冷凝过程中的设备稳定性与氟回收效率。

### 2.1.2 干式吸附

干式吸附利用高比表面积材料选择性捕获气相氟组分,具有模块化、易操作的特点。常用吸附剂包括活性氧化铝、多孔碳材料及改性硅胶等,这些材料能在较宽温度范围内与HF发生物理或化学吸附。吸附效率受材料表面活性位点数量、耐湿性及再生性能的影响。高温动态环境下,吸附剂失活与结构退化问题较为突出,新型掺杂金属氧化物复合材料已显示出一定改善效果,但工业化应用仍存在成本与可靠性方面的挑战<sup>[7]</sup>。赖海涛等<sup>[8]</sup>以磷石膏和果皮为原料制备改性磷石膏生物炭,用于去除水中的氟离子。通过将改性磷石膏与生物质以不同比例混合并高温热解得到吸附剂。用该吸附剂处理氟离子质量浓度为100 mg/L的磷石膏渗滤液,在P-C 1:1投加量约为40 g/L时除氟率可达87.94%,吸附量可达2.2 mg/g。

### 2.1.3 高温气相氟回收

高温气相氟回收一直是个难题,主要体现在气体活性强、腐蚀性大,很多常规的吸附或冷凝方法在高温条件下无法起到作用。针对这些问题,可以尝试引入耐高温的功能材料、陶瓷膜系统,或者采用分段冷却的方式来缓解。实际应用中,把预处理降温 and 后续的分级回收结合起来,也被认为是兼顾能耗和回收效率的有效手段。陈冲等<sup>[9]</sup>提出将“气相冷凝—闪蒸提浓+热泵升温”的复合工艺用于高温气相氟的高效回收,在30 kt/a P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>的工业化装置中,采用该技术处理95℃、氟浓度较高的尾气,氟回收率超过98%,产物氟硅酸质量分数可达15%以上,净化尾气中氟质量浓度低于8 mg/m<sup>3</sup>。

刘正东等<sup>[10]</sup>采用高温气提脱氟技术,在磷酸中添加SiO<sub>2</sub>作为脱氟剂,通过加热至100℃使液相氟转化为SiF<sub>4</sub>挥发脱除,处理后磷酸的磷氟质量比可达330以上,体现出了良好的除氟效果与实用性,但该方法在复杂气氛与高负荷工况下,系统集成、材料寿命与过程稳定性等问题仍需深入优化。

## 2.2 湿法回收

在磷产业生产过程中,液相体系中氟元素的富集现象普遍存在,尤其在湿法磷酸制备及副产废液处理中尤为明显。为有效回收液相中的氟资源,同时减少环境排放负荷,湿法回收技术得到广泛应用。现有工艺主要包括沉淀分离、溶剂萃取与膜分离等路径,各有适用场景与技术特点。

### 2.2.1 沉淀法

沉淀法通过投加反应剂,使氟离子与金属离子形成沉淀,从而实现氟的去除与回收。常用沉淀剂为石灰(Ca(OH)<sub>2</sub>),生成的氟化钙具有较好的稳定性。纳海莺等<sup>[11]</sup>以湿法磷酸为原料,采用“化学沉淀+乙醇溶剂沉淀”的组合工艺进行氟的脱除。在乙醇与预处理磷酸体积比为2:1、沉淀剂RNH<sub>2</sub>添加量为3.5%、反应温度为40℃、反应时间为100 min的优化条件下,氟去除率可达96%以上,磷收率达86%以上。该方法对铝含量较高的湿法磷酸亦有良好适应性,显著提升了氟的脱除效果,可用于精细磷酸盐或饲料级磷酸的前处理。文明炬等<sup>[12]</sup>以磷石膏渗滤液为原料,采用“树脂除杂—分步沉淀”工艺资源化回收磷、氟资源。经铁盐沉淀回收P元素后,针对含F滤液,以Ca(OH)<sub>2</sub>为沉淀剂,在n(Ca)/n(F)为0.6、pH为8.5、反应时间为2.0 h的优化条件下,得到氟化钙产品,氟回收率达84.44%,产品纯度为70.26%。该方法工艺简单、运行成本低,在磷肥生产废水处理中广泛应用。但沉淀粒径小、固液分离困难、pH控制敏感等问题在一定程度上限制了回收效率。此外,沉淀物的后续资源化利用仍有待提升。近年有研究探索添加助凝剂、优化搅拌与沉降条件以改善沉淀性能,效果尚需在工业应用中进一步验证。

### 2.2.2 浸取法

浸取法主要借助水或碱性溶液将固相中的可溶性组分转移至液相,以实现目标组分的分离与富集。常用浸取剂包括纯水、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、NaOH等,纯水适用于溶解部分游离磷和氟化钠,Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、NaOH则能促进氟硅酸根等较难解离离子的分解和释放。由于浸取过程中不涉及有机溶剂或高能耗设

备,整体工艺较为简便,具备一定的工业推广基础。然而,实际操作中仍存在若干不确定性,氟在渣相中的赋存形态对其浸取率影响显著,当氟与硅或钠形成难溶复盐时,即便提高碱度或延长反应时间,其浸出效率仍受限制。此外,pH调控、温度控制、固液比以及渣体结构等因素也会对磷、氟的浸取行为产生复杂影响,这使得实验优化的参数很难直接迁移到工业化中。张程等<sup>[13]</sup>以湿法磷酸脱氟渣为原料,采用水浸取法分离回收其中的磷、氟资源,在浸取时间为30 min、液固质量比为2:1、温度为30℃的条件下,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和F的浸出率分别为92.38%、11.56%,所得浸出液的磷氟质量比为9.54。付子启等<sup>[14]</sup>以湿法磷酸脱氟渣为原料,采用甲醇有机溶剂浸取法回收其中的磷酸,在浸取温度为33.5℃、时间为60 min、液固质量比为3:1的优化条件下,磷的浸取率达97.13%,浸出液的磷氟质量比为50.96。

### 2.2.3 膜分离

膜分离技术通过物理筛分或电荷排斥效应,实现氟离子与其他溶质的有效分离。常用膜种类包括纳滤膜(NF)与反渗透膜(RO),适用于中低浓度氟废液处理。膜分离技术具有能耗低、操作简便、设备模块化的优点,但膜污染、膜寿命短及运行压力高等问题仍是制约因素。中化重庆涪陵化工有限公司与广州鑫丰科创科技有限公司联合开发出一项膜分离与化学沉淀相结合的处理工艺。该工艺采用微滤与反渗透过滤技术对磷石膏库渗滤液进行处理,所得清液中的磷和氟可达到排放标准<sup>[15]</sup>。近年来,耐污染、耐高压的新型膜材料和预处理-膜法组合工艺受到重视,初步显示出改善系统稳定性与延长使用寿命的潜力,未来有望在规模化应用中获得更广泛推广。

## 3 未来发展方向

随着磷化工产业向精细化、绿色化持续推进,氟资源的回收问题已从末端治理扩展为全流程系统优化的重要议题。未来相关研究不应局限于单一方法的参数优化,而更需立足于多工艺之间的协同机制与集成设计,以实现源头减排、中段调控与终端资源化的动态联动<sup>[16]</sup>。在材料维度,新型功能化吸附剂、耐腐蚀膜材料及复合分离介质的开发仍具有关键意义,但研究重点已逐渐转向其在复杂多相工况下的长期运行稳定性与系统兼容性。相比之下,单一工艺的高性能指标越来越难以直接转化为工程化价值,只有在多污染物协同处理、能质流统

筹管理的背景下,材料才能发挥真实效益<sup>[17]</sup>。

此外,氟回收过程的工艺模块化与流程耦合将成为系统集成的核心。吸附-膜分离耦合系统可以兼顾选择性与通量,沉淀-萃取联动路径有助于实现不同氟形态的分级利用,中温气相冷凝与固相富集的集成方案为磷炉尾气治理提供了能效优化的新思路。这类流程整合不仅关注技术环节的拼接,更需要在系统层面探索负载响应、能耗平衡与运行弹性之间的关系<sup>[18]</sup>。

值得进一步探讨的是,氟资源的高值化利用路径有待从传统的CaF<sub>2</sub>副产物产出,转向具有产业接口价值的精细氟化物或功能中间体产品,这对氟回收产品的品质控制、纯度调控与工艺适配性提出了更高要求。而支撑这些路径顺利实施的,还包括数字化监测、智能控制与自动化管理等手段的嵌入,以构建具有自适应能力的多元回收系统。总的来看,未来氟回收技术的发展将更多依赖于化学工程、过程控制与资源管理等多学科协同推进,以打破“单点治理”的路径依赖,实现氟资源回收的体系化重构与价值链延伸<sup>[19-20]</sup>。

## 4 结论

随着产业绿色转型与资源利用效率要求提高,氟回收不应再被视为单一治理技术,而应作为磷化工系统中可嵌入、可协同的关键功能模块进行整体优化<sup>[21]</sup>。基于笔者的梳理与分析,未来氟资源回收的技术体系构建可重点关注以下几个方向:

(1) 面向多形态氟的赋存解析与迁移机制研究。进一步厘清气相、液相与固相中氟组分的相互转化路径,是建立合理分级回收策略的前提。应重视过程温度、pH、杂质组分等因素对氟迁移的动态影响。

(2) 推进工艺模块的功能集成与动态协同。通过将不同原理的分离单元进行结构性组合,如沉淀-膜分离、吸附-电化学或冷凝-吸附系统,有望在控制能耗的同时提升回收效率与系统鲁棒性。

(3) 构建以资源化为导向的回收产品利用路径。回收产物不应仅视作废弃物处理结果,而应纳入磷化工产品体系,向氟化盐、含氟材料等方向延伸其应用价值,推动副产资源进入主链条。

(4) 引入系统优化工具与智能控制手段。面向工业实际,应结合过程模拟、能效分析与在线监测技术,实现对氟回收系统的可调、可视与可控,提升其环境绩效与经济适应性。

### [参考文献]

[1] 崔荣政,高永峰,王臣,等. 磷氟产业协同发展势在必行[J]. 生

- 态产业科学与磷氟工程,2024,39(8):VI-VII.
- CUI R Z, GAO Y F, WANG C, et al. Collaborative development of phosphorus and fluorine industry is imperative[J]. *Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering*, 2024, 39(8): VI-VII.
- [2] 何宾宾. 对我国磷氟协同发展的思考与建议[J]. *云南化工*, 2024,51(S1):20-24.
- HE B B. Thoughts and Suggestions on the Coordinated Development of Phosphorus and Fluorine in China[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2024, 51(S1): 20-24.
- [3] 杨磊. 关于磷化工企业布局氟化工业务的思考[J]. *生态产业科学与磷氟工程*,2024,39(12):1-5.
- YANG L. Considerations on the integration of fluorine chemical business within phosphorus chemical enterprises[J]. *Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering*, 2024, 39(12): 1-5.
- [4] 赵玲. 磷石膏中磷氟赋存状态及无害化处理研究[D]. 南昌:江西农业大学,2024.
- ZHAO L. The research of Phosphofluorine occurrence state in phosphogypsum and harmless treatment[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2024.
- [5] 刘懿麒. 磷化工含氟废水的回收利用[J]. *化工时刊*,2024,38(1):41-44.
- LIU Y Q. Recovery and Utilization of Fluorine-containing Wastewater from Phosphorus Chemical Industry[J]. *Chemical Industry Times*, 2024, 38(1): 41-44.
- [6] 薛继勇. 氮磷蒸发器冷凝器管束腐蚀原因分析及对策[J]. *磷肥与复肥*,2001,16(4):37.
- [7] 张钰卿,刘佳,许兵,等. 含氟废水处理中的除氟吸附技术研究进展[J]. *净水技术*,2022,41(5):23-29,61.
- ZHANG Y Q, LIU J, XU B, et al. Research Progress of Adsorption Technology for Defluorination in Fluoride-Containing Wastewater Treatment[J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(5): 23-29,61.
- [8] 赖海涛. 改性磷石膏生物炭吸附水中磷、氟性能与机理研究[D]. 南昌:华东交通大学,2024.
- LAI H T. Study on the Mechanism of Adsorption of Phosphorus and Fluorine in Water by Modified Phosphogypsum Biochar[D]. Nanchang:East China Jiaotong University,2024.
- [9] 陈冲,李季,朱家骅,等. 湿法磷酸尾气封闭循环工艺与氟回收技术开发[J]. *磷肥与复肥*,2018,33(1):32-35.
- CHEN C, LI J, ZHU J H, et al. Development of tail gas close loop and fluorine recovery technology for WPA production[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2018, 33(1): 32-35.
- [10] 刘正东,金伟潮,刘庆,等. 湿法磷酸高温脱氟装置材料的选择与应用[J]. *磷肥与复肥*,2023,38(10):43-45.
- LIU Z D, JIN W C, LIU Q, et al. Selection and application of materials for high temperature defluorination unit of wet - process phosphoric acid[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2023, 38(10): 43-45.
- [11] 纳海莺,蒋丽红,陈雪萍. 化学沉淀-溶剂沉淀法脱除湿法磷酸中氟的研究[J]. *云南大学学报(自然科学版)*,2010,32(1):68-72.
- NA H Y, JIANG L H, CHEN X P. Defluorination of wet - process phosphoric acid with chemical precipitation - solvent precipitation [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2010, 32(1): 68-72.
- [12] 文明炬. 磷石膏渗滤液树脂除杂-分步沉淀回收磷、氟资源的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2024.
- WEN M X. A Dissertation Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Master Degree in Engineering [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [13] 张程,钟文婧,纪利俊,等. 湿法磷酸脱氟渣中磷和氟的浸取回收[J]. *化学工程*,2019,47(8):1-5,21.
- ZHANG C, ZHONG W J, JI L J, et al. Recovery of phosphorus and fluorine in defluorination sludge from wet - process phosphoric acid by leaching[J]. *Chemical Engineering (China)*,2019, 47(8): 1-5,21.
- [14] 付子启,张程,盛勇,等. 有机溶剂浸取湿法磷酸脱氟渣制备磷酸的研究[J]. *无机盐工业*,2022,54(7):129-134.
- FU Z Q, ZHANG C, SHENG Y, et al. Study on preparation of phosphoric acid by leaching fluoride residue from wet-process phosphoric acid with organic solvents[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2022, 54(7):129-134.
- [15] 李兵,韦莎,谭伟.磷石膏库渗滤液处理技术进展[J]. *磷肥与复肥*,2020,35(2):45-48.
- LI B, WEI S, TAN W. Progress of leachate treatment technology in phosphogypsum slag yard[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2020, 35(2): 45-48.
- [16] 刘海霞,杨华春,杨明霞. 磷氟协同发展未来思考[J]. *生态产业科学与磷氟工程*,2024,39(6):49-52,80.
- LIU H X, YANG H C, YANG M X. Future considerations for the synergetic development of phosphorus and fluorine [J]. *Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering*, 2024, 39(6): 49-52,80.
- [17] DONG W, SUN N, DENG X, et al. Study on the occurrence state of main components of phosphogypsum dihydrate and its impurity distribution [J]. *Rsc Advances*, 2024, 14(31): 22280-22291.
- [18] 刘帅杰,姜国庆,高璐阳. 磷矿伴生氟资源生产氟化氢的前景分析[J]. *磷肥与复肥*, 2023, 38(6): 31-36.
- LIU S J, JIANG G Q, GAO L Y. Prospect analysis of hydrogen fluoride production from fluorine resources associated with phosphate rock [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2023, 38(6): 31-36.
- [19] LI Z, CHEN J, ZHANG Q, et al. A Study on the removal of phosphorus and fluorine impurities from phosphogypsum [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2020, 40(5): 639-646.
- [20] 刘帅杰. 磷氟化工产业的协同发展研究[J]. *现代化工*,2024, 44(3):1-4.
- LIU S J. Synergistic development of phosphorus and fluorine chemical industries [J]. *Modern Chemical Industry*, 2024, 44(3): 1-4.
- [21] 杨华春. 以新质生产力推进磷氟产业协同发展[J]. *生态产业科学与磷氟工程*,2024, 39(11): 刊首页.
- YANG H C. Promote collaborative development of phosphorus and fluorine industry with new quality productivity [J]. *Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering*, 2024, 39(11): Issue of home page.