

基于湿法磷酸伴生氟资源关键技术与产业化探索

叶建强

(云南三环中化化肥有限公司, 云南 昆明 650114)

[摘要] 氟是我国不可或缺的战略资源, 广泛应用于矿物冶金、轻工、电子、航空航天、农业及医药等关键领域。当前, 我国氟资源主要依赖萤石和磷矿石, 然而随着萤石资源的日趋枯竭, 其供应短缺问题日益严峻, 磷矿中伴生的大量氟资源成为极具潜力的替代来源。因此, 如何高效回收与利用磷矿伴生氟资源已成为磷化工行业亟待解决的核心问题。聚焦湿法磷酸生产过程中的伴生氟资源, 系统阐述伴生氟资源的赋存形态与迁移转化规律, 并详细梳理行业内在氟回收工程实践方面的最新技术进展。在此基础上, 深入分析现有氟回收技术存在的关键瓶颈与挑战, 并提出未来磷氟协同发展的研究方向与发展建议, 旨在为提升我国磷化工行业氟资源综合利用水平、保障氟资源战略安全提供科学依据和技术支撑。

[关键词] 湿法磷酸; 伴生氟资源; 赋存形态; 工程实践; 发展建议

[中图分类号] TQ126.3⁺1; F426 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 11-0062-07

Research on key technologies for the industrialization of fluorine resources associated with wet-process phosphoric acid

YE Jianqiang

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

Abstract: Fluorine is an indispensable strategic resource in China, widely applied in key sectors such as mineral metallurgy, light industry, electronics, aerospace, agriculture and pharmaceuticals. Currently, China's fluorine resources primarily rely on fluorite and phosphate rock. However, as fluorite reserves dwindle, supply shortages have become increasingly severe. The abundant fluorine resources associated with phosphate rock have emerged as a highly promising alternative source. Therefore, how to efficiently recover and utilize fluorine resources associated with phosphate rock has become a core issue that the phosphate chemical industry urgently needs to address. This paper focuses on fluorine resources associated with the wet-process phosphoric acid production process, systematically elucidating the occurrence forms and migration transformation patterns of these fluorine resources, and detailing the latest technological advancements in fluorine recovery engineering practices within the industry. Based on this, it conducts an in-depth analysis of the key bottlenecks and challenges faced by existing fluorine recovery technologies and proposes future research directions and development recommendations for the synergistic development of phosphorus and fluorine, aiming to provide scientific basis and technical support for enhancing the comprehensive utilization level of fluorine resources in China's phosphorus chemical industry and ensuring the strategic security of fluorine resources.

Key words: wet-process phosphoric acid; associated fluorine resources; storage pattern; engineering practice; development proposals

氟是现代工业体系中不可或缺的战略资源, 广泛应用于新能源、电子信息、航空航天、医药等多个领域。在新能源领域, 随着电动汽车和储能技术的发展, 六氟磷酸锂作为锂离子电池电解质的核心成分, 需求呈爆发式增长。在电子信息产业, 四氟化碳、六氟化硫等含氟气体在半导体制造中发挥重

要作用, 尤其在蚀刻和绝缘保护方面, 随着5G(第五代通信技术)和人工智能的发展, 高性能半导体芯片的需求进一步凸显氟资源的重要性。在航

[收稿日期] 2025-08-20

[作者简介] 叶建强(1996-), 男, 云南楚雄人, 助理工程师, 从事磷化工技术与开发工作。

空航天和国防军工等高端领域，氟橡胶、氟塑料等材料因耐高温、耐腐蚀等优异性能，成为制造关键零部件的理想材料。我国萤石资源储量有限，由于开采量日益增加导致资源日益枯竭，而磷矿中伴生的氟资源尚未被充分回收利用，回收率普遍低于50%。随着氟化工行业的快速发展，尤其是新能源产业的崛起，如何高效回收磷矿中的氟资源成为亟待解决的问题。

美国地质调查局 (USGS) 数据显示，2023 年全球探明萤石储量 (以 CaF_2 计) 约 2.8 亿 t，其中我国储量约 6 700 万 t，占比 23.93%；同年全球萤石产量约 880 万 t，我国产量达 570 万 t，占全球总产量的 64.77%；从储采比来看，2023 年全球萤石资源平均储采比为 31.82，我国则仅为 11.75^[1-2]，远低于全球平均水平。这种“储量占比低、产量占比高”的格局，凸显出我国萤石资源储采的严重失衡，其保障能力正面临严峻挑战。

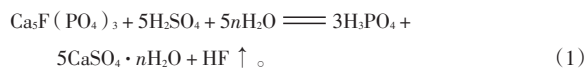
相比之下，我国磷矿资源较为丰富，根据《2024 年中国矿产资源报告》的数据，2024 年我国磷矿石储量约 34.4 亿 t，按照平均 $w(\text{F})$ 3% 计算，磷矿中伴生的氟资源量高达 1.032 亿 t，占我国氟资源总量的 87.4%^[3]。然而，当前磷矿湿法加工过程中大量氟资源进入磷产品和磷石膏中，2023 年我国磷化工产业回收的单质氟资源约为 89 万 t，损失量为 223 万 t，超过 2023 年国内氢氟酸表观消费量 (181.2 万 t)，磷矿中伴生氟资源回收率仅 28.5% 左右^[4]。因此，提高磷矿湿法加工过程中伴生氟资源回收率，对缓解我国氟资源短缺、提升资源利用效率具有重要意义。

综上所述，氟资源在现代工业中具有重要的战略价值，并且从湿法磷酸中回收氟资源对于资源利用和环境保护都具有至关重要的意义。深入研究氟资源在湿法磷酸体系中的迁移规律，开发高效的氟回收技术，对于保障我国氟资源供应安全、实现磷化工产业的绿色可持续发展具有重要的现实意义和战略价值。本文旨在深入探究湿法磷酸伴生氟资源的回收技术，通过对氟在湿法磷酸体系中的迁移规律进行系统研究，开发高效、经济、环保的氟回收技术，并进行工程实践创新，以提高氟资源的回收率，减少环境污染，实现磷化工产业的绿色可持续发展。

1 湿法磷酸中伴生氟资源的赋存形态

湿法磷酸工艺是目前工业上生产磷酸的主要方法，其核心化学反应原理是利用硫酸与磷矿发生反

应，将磷矿中的磷元素转化为磷酸，生成磷酸和硫酸钙结晶的混合料浆。其总反应表示如下：



实际生产过程中，硫酸钙会以不同的水合结晶形态出现，常见的有二水硫酸钙 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、半水硫酸钙 ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) 和无水硫酸钙 (CaSO_4)，相应的生产方法被称为二水物法、半水物法和无水物法。目前，全球 90% 的湿法磷酸都采用二水物法生产^[5]。

在湿法磷酸工艺中，伴生氟的赋存具有特殊性。磷矿中的氟主要以氟磷酸钙 ($\text{Ca}_3\text{F}(\text{PO}_4)_3$) 的形式存在，在酸解过程中，与硫酸、磷酸等发生反应，生成氟化氢 (HF) 和四氟化硅 (SiF_4) 等气态氟化物，这些气态氟化物会随着反应产生的气体逸出，部分会在后续吸收过程中被回收，但仍有一部分会排放到大气中，造成环境污染。同时，还有一部分氟会以络合态的形式存在于磷酸溶液中，主要是氟硅酸 (H_2SiF_6)。 H_2SiF_6 在磷酸溶液中具有一定的稳定性，但在浓缩等后续处理过程中，会发生分解反应，释放出 HF 和 SiF_4 。此外，还有少量的氟会残留在磷石膏中，难以被有效回收。湿法磷酸生产过程中氟资源分布情况如图 1 所示。

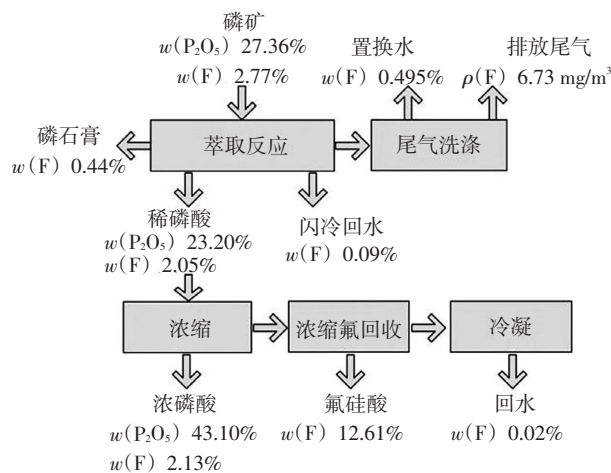


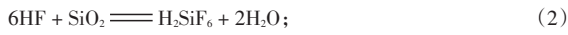
图 1 湿法磷酸生产中氟资源分布

Fig. 1 Fluorine resource distribution in wet-process phosphoric acid production

1.1 气相氟的生成与逸出机制

在湿法磷酸生产过程中，气相氟的生成与逸出是氟迁移的重要环节，深入了解其机制对于氟资源的回收至关重要。在湿法磷酸体系中，气相氟主要以 HF 和 SiF_4 的形式存在。其生成过程涉及一系列复杂的化学反应。磷矿中的氟磷酸钙与硫酸

反应生成HF，见式(1)。生成的HF进一步与磷矿中的SiO₂反应，生成SiF₄：



这些反应的动力学过程受到多种因素的影响，其中温度是一个关键因素。温度升高会加快反应速率，使得HF和SiF₄的生成速率增加。根据化学反应动力学原理，反应速率常数*k*与温度*T*之间遵循阿伦尼乌斯方程：

$$k = A \cdot \exp(-Ea/RT). \quad (4)$$

其中，*A*为指前因子，*Ea*为活化能，*R*为气体常数。对于上述反应，随着温度升高，反应速率常数增大，反应更加容易进行。研究表明，当反应温度从50℃升高到80℃时，气相中HF和SiF₄的逸出率显著提高，温度每升高10℃，气相氟的逸出率增加10%~15%^[3]。这是因为温度升高使得分子的热运动加剧，气相氟分子更容易克服液相的阻力而逸出。此外，温度升高还会促进一些副反应的发生，进一步增加气相氟的生成量。

温度不仅影响气相氟的生成速率，还对其逸出机制有着显著的影响。在较低温度下，HF和SiF₄的生成量相对较少，且部分溶解在液相中。随着温度的升高，气相氟的生成量迅速增加，同时其在液相中的溶解度降低，导致更多的气相氟逸出。

除了温度外，气相氟逸出率还受到其他因素的影响，其中反应体系的压力是一个重要因素。在较

低压力下，气相氟更容易逸出，因为压力降低会减小气相与液相之间的压力差，使得气相氟分子更容易从液相中分离出来^[6]。反应物料的粒度也会影响气相逸出率。较小的物料粒度可以增加反应物之间的接触面积，加快反应速率，从而提高气相氟的生成量和逸出率。此外，反应时间、搅拌转速等因素也会对气相氟逸出率产生一定的影响。

综上所述，气相氟的生成与逸出是一个复杂的过程，受到多种因素的影响。其中，温度是最为关键的因素之一，它不仅影响气相氟的生成速率，还对其逸出有着显著的影响。通过深入研究气相氟的生成与逸出机制，可以更好地掌握氟迁移规律，为氟资源的回收提供理论依据。

1.2 固相氟的赋存形态与束缚机制

磷石膏是湿法磷酸生产的主要固体副产物，其中含有一定量的可溶氟与难溶氟，磷石膏杂质主要存在形式及危害见表1。磷石膏中氟的稳定化主要与石膏的晶体结构有关，二水磷石膏(CaSO₄·2H₂O)具有层状结构，在其形成过程中，氟离子可能会进入到石膏的晶格间隙或取代部分硫酸根离子的位置。这种掺杂作用使得氟与石膏晶体形成了较为稳定的结合，从而实现了氟的稳定化^[7-8]。此外，磷石膏中的其他杂质成分也可能对氟的稳定化起到一定的作用。例如，一些金属离子可能会与氟离子形成络合物，进一步增强了氟在磷石膏中的稳定性。

表1 磷石膏杂质主要存在形式和危害

Table 1 Main forms and hazard of impurities in phosphogypsum

种类	杂质	主要存在形式	主要危害
含磷杂质	可溶磷	H ₃ PO ₄ 、H ₂ PO ₄ ⁻ 、H ₂ PO ₃ ⁻	进入地表水和土壤，使环境酸性增强，影响动植物生长，危害人体健康
	共晶磷	CaHPO ₄ ·2H ₂ O、CaSO ₄ ·2H ₂ O	
	难溶磷	Ca ₃ (PO ₄) ₂ 、FePO ₄	
含氟杂质	可溶氟	NaF、KF	进入地表水和土壤，影响动植物生长，危害人体健康
	难溶氟	Na ₂ SiF ₆ 、CaF ₂ 、Na ₂ AlF ₆	
有机质类杂质	有机质	富里酸类、胡敏酸类、胡敏素类 有机浮选药剂、絮凝剂和消泡剂	影响磷石膏的白度，阻碍磷石膏资源化利用进程

从晶体结构来看，CaF₂沉淀和CaSiF₆·2H₂O晶格包裹以及磷石膏对氟的稳定化作用，是导致固相氟残留率高的根本原因。CaF₂的面心立方结构使得其晶体内部的离子键较强，氟离子被紧密束缚在晶格中，难以被其他试剂溶解或置换^[6]。

CaSiF₆·2H₂O的复杂晶格结构则为氟提供了多重保护。氟离子与硅、钙等原子形成的化学键具有较高的键能，使得氟在晶格中的迁移活化能较高，

不易脱离晶格的束缚。磷石膏的层状结构和杂质的络合作用，也使得氟在其中的稳定性增加。氟离子在磷石膏晶格中的扩散速度较慢，难以在常规的处理条件下从固相转移到液相中，从而导致大量的氟残留在固相中，使得固相氟残留率居高不下。

综上所述，固相氟的赋存形态和束缚机制与晶体结构密切相关，深入理解这些原理，对于开发有效的氟回收技术具有重要意义。

1.3 液相氟的络合形态与浓缩相变

在湿法磷酸的液相体系中， H_2SiF_6 是氟的主要络合形态。其形成过程与体系中的硅、氟离子浓度密切相关。当体系中存在一定量的 SiO_2 和 HF 时，会发生式(2)反应生成 H_2SiF_6 ；生成的 H_2SiF_6 在溶液中会进一步发生解离：



H_2SiF_6 的络合态分布特征受到多种因素的影响，如温度、酸度、离子强度等。在较低温度和较高酸度条件下， H_2SiF_6 的解离程度相对较小，主要以分子形式存在于溶液中；而随着温度升高和酸度降低，其解离程度会逐渐增大，溶液中 SiF_6^{2-} 的浓度会相应增加^[6,8]。

当对含有 H_2SiF_6 的溶液进行浓缩时，会发生一系列复杂的分解反应。随着溶液中水不断蒸发， H_2SiF_6 的浓度逐渐升高，当达到一定程度时，会发生式(3)分解反应。

这个分解反应是一个吸热反应，温度对其影响较大。在较低温度下，分解反应进行得较为缓慢；而随着温度升高，分解反应速率会显著加快。此外，溶液的酸度和离子强度也会对分解反应产生一定的影响。较高的酸度和离子强度会抑制 H_2SiF_6 的分解，使得分解反应需要更高的温度才能进行，氟硅酸钠与氟硅酸钾在不同磷酸浓度、温度下的溶解度曲线如图2所示。

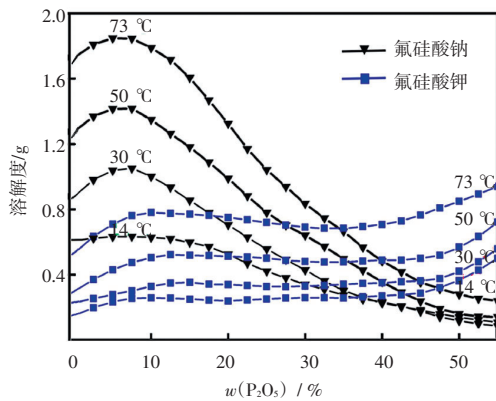


图2 氟硅酸钠与氟硅酸钾在不同磷酸浓度、温度下的溶解度曲线

Fig. 2 Solubility curves of sodium fluorosilicate and potassium fluorosilicate at different phosphoric acid concentrations and temperatures

湿法磷酸中氟和铝的行为高度依赖于它们的摩尔比 ($n(\text{F}^-)/n(\text{Al}^{3+})$)，该比值显著影响它们进入酸相的比例和形态（溶解络合物或沉淀）。在浓缩磷酸中，氟主要分布在 SiF_6^{2-} 和 AlF_2^+ 等离子形态

中， Fe^{3+} 络合物难形成^[9]。湿法磷酸中存在多种复杂的固相氟化物，其中氟硅酸钠/氟硅酸钾 ($\text{Na}_2\text{SiF}_6/\text{K}_2\text{SiF}_6$) 是最主要的固相氟成分，需根据具体工艺条件选用钾盐或者钠盐。对于溶液中优势氟铝络合物的具体形态 (AlF_2^+ 或 AlF_5^{2-})，不同研究者的结论存在差异^[10-11]。

综上所述，液相氟的络合形态与浓缩相变是一个复杂的过程，受到多种因素的影响。 H_2SiF_6 主导的络合态分布特征和浓缩分解反应是其中的关键环节，而副产物也会对其产生一定的影响。定量描述 P_2O_5 浓度的相变临界点，有助于更好地理解液相氟的迁移规律，为氟资源的回收提供重要的理论依据。

2 湿法磷酸伴生氟资源工程实践

2.1 磷矿萃取过程中氟的脱除与回收

在磷矿酸解（萃取）过程中，氟元素主要以挥发性气体氟化氢和四氟化硅的形式释放至气相。目前，水洗法是处理此类含氟尾气的主流技术，通过水吸收将 HF 和 SiF_4 转化为氟硅酸溶液， H_2SiF_6 直接回收并进一步加工为氟化工下游产品。当前，该技术已发展成熟并被广泛采用，核心设备通常配置多级串联的洗涤吸收塔系统。含氟尾气依次通过各塔，在塔内与循环喷淋的吸收液（水或稀氟硅酸溶液）充分逆流接触，第一级通常使用来自后续吸收塔的稀氟硅酸溶液进行预吸收，以提高效率并减少新鲜水用量；后续级次则主要使用清水进行深度吸收，确保尾气中的氟化物被高效捕集。该技术显著提升了尾气中氟的捕集效率和回收率，同时降低了洗涤水消耗，实现了氟资源的有效回收与利用。段思勤等^[12]对萃取尾气氟回收工艺流程进行技术改造，其萃取尾气氟回收工艺流程如图3所示。在反应槽和第一洗涤塔之间增加一个洗涤塔，渣场回水氟质量浓度从3 788 mg/L降至2 440 mg/L，吨 P_2O_5 氟硅酸产量提高9.8 kg，尾气氟质量浓度小于9 mg/m³。

2.2 湿法稀磷酸中氟的脱除与回收

在较低浓度的湿法稀磷酸中，氟主要以溶解态的氟硅酸和游离氟离子形式存在，目前，已实现产业化应用的主要为化学沉淀法和浓缩法^[6,13]。化学沉淀法是通过向稀磷酸中加入金属盐类作为沉淀剂，生成难溶的氟硅酸盐，从而实现氟的分离与回收。该方法操作相对简单，但存在氟化物沉淀纯度低，难以资源化利用和可能引入杂质或产生需要处理的固废等生产瓶颈问题，故化学沉淀法只适用于预脱氟工艺，如需达到更高品质磷酸

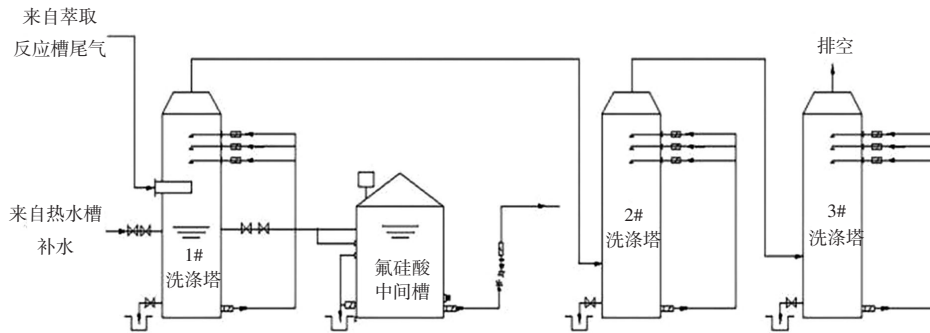


图3 湿法磷酸萃取尾气氟回收工艺流程

Fig. 3 Process flow for fluorine recovery from wet-process phosphoric acid extraction tail gas

的标准，可考虑与其他脱氟工艺结合脱氟。

浓缩脱氟技术是目前湿法磷酸氟回收的主流技术，通过提高磷酸的浓度、温度和真空度，使氟元素以 SiF_4 和 HF 形式逸出，通过进一步吸收转化为氟硅酸从而回收，大部分采用典型的强制循环真空

蒸发流程，其主流氟回收工艺流程如图4所示。但因设备腐蚀或蒸发效率等因素，浓缩温度一般控制在 $80 \sim 88 \text{ }^\circ\text{C}$ ，浓缩磷酸 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 一般低于 53%，氟收率普遍低于 50%，大部分氟进入磷肥等磷化工产品中，造成资源的浪费与潜在的环境风险。

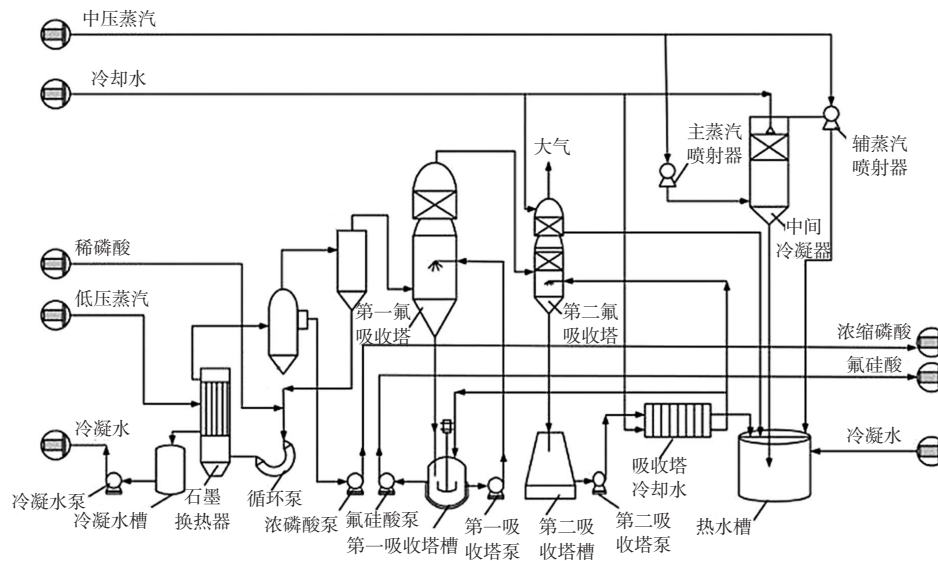


图4 典型强制循环真空蒸发氟回收工艺流程

Fig. 4 Fluorine recovery process flow for a typical forced circulation vacuum evaporation

2.3 湿法浓磷酸中氟的脱除与回收

在高浓度的湿法磷酸中，氟的脱除更具挑战性，主要技术路线为汽提法和溶剂萃取法。汽提法是向浓磷酸中通入蒸汽，利用气液传质作用，促使氟以挥发性组分（主要是 SiF_4 和 HF 等含氟物）的形式从磷酸中逸出，再用介质（空气/蒸汽）带出，不断改变气液平衡从而实现湿法磷酸快速脱氟。汽提法脱氟效率较高，是工业上应用较多的技术。王勃等^[14]通过脱氟蒸汽热耦合再利用的新工艺对含氟蒸汽进行了再利用（见图5），将汽提脱氟塔逸出含氟蒸汽作为萃余酸浓缩部分热源，大幅度降低了运行成本，该技术已成功应用于 10 万 t/a

净化湿法磷酸装置，具有较好的节能和经济效益。

溶剂萃取法是基于萃取原理利用特定的有机溶剂根据磷酸和氟化物（如 H_2SiF_6 ）的溶解度差异进行分离，磷酸被有机溶剂萃取进入有机相，而氟与金属离子等则留在水相中从而进入萃余酸中，实现氟的选择性分离和富集回收^[8,10]。溶剂萃取法具有产品纯度高、不引入其他杂质离子和环境污染小等优势，但同时也存在溶剂价格昂贵、设备投资大等问题。目前，磷化工企业生产工业级/食品级磷酸多采用溶剂萃取法来净化湿法磷酸中的大部分杂质，并结合汽提脱氟深度脱除磷酸中的氟，独立的溶剂萃取脱氟工艺尚未实现产业化应用。

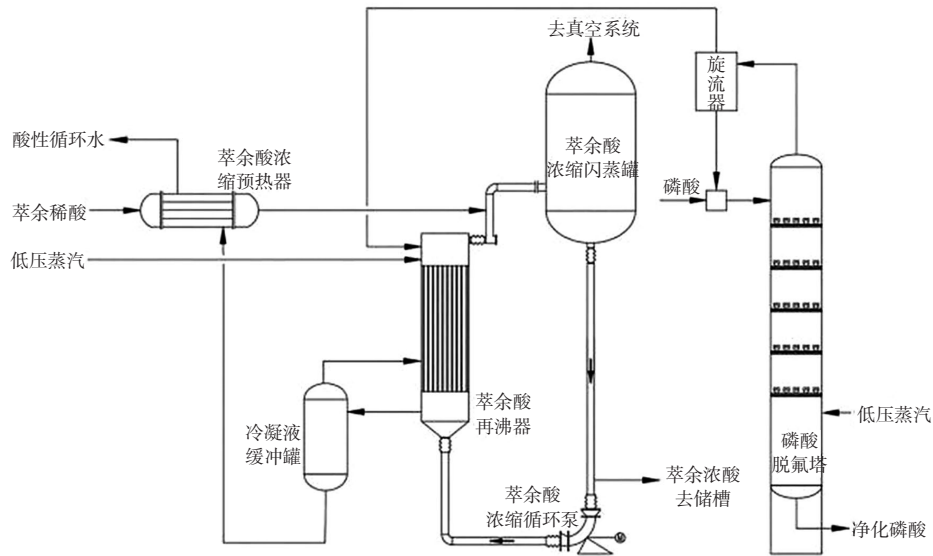


图5 脱氟蒸汽用于萃余酸浓缩热耦合的新工艺流程

Fig. 5 New process flow for thermal coupling of defluorinated steam for residual acid concentration

3 当前技术存在的问题与挑战

(1) 氟回收率偏低，资源浪费与污染并存。当前湿法磷酸生产过程中氟的平均回收率不足50%，大量氟元素随磷石膏排放或残留于磷化工产品中，不仅造成宝贵资源的浪费，还衍生出环境污染隐患，提升氟回收率成为行业亟待攻克的技术难题。

(2) 回收成本高昂，技术推广受阻。回收成本高昂严重制约着氟回收技术的推广应用。现有主流回收技术如化学沉淀法，需投入大量沉淀剂以实现氟元素分离，显著增加生产成本；溶剂萃取法依赖昂贵的有机溶剂，且溶剂回收再生工艺复杂、能耗高，经济可行性差，开发兼具低成本与高效率的氟回收技术迫在眉睫。

(3) 磷石膏氟回收困难，技术亟待突破。磷石膏作为主要副产物，其内含的氟资源回收技术尚未成熟。现有方法普遍存在回收效率低、处理成本高的瓶颈，加之磷石膏长期堆存可能引发土壤污染、水体污染等潜在环境风险，加速研发并推广经济可行的磷石膏氟回收技术，对于实现氟资源循环利用和缓解环境压力具有双重意义，是当下磷化工行业可持续发展的重要任务。

4 未来研究方向与发展建议

4.1 优化工艺提升氟回收率

聚焦湿法磷酸生产过程，氟元素在气相、液相和固相中的流失仍是制约回收率的关键瓶颈。未来需通过多学科交叉研究，精准调控反应温度、压力、物料配比等工艺参数，同时加快新型逸氟剂的

研发，提升氟元素在各相态中的富集效率。此外，构建全流程污染防控体系，强化尾气净化与废水处理技术创新，在提高氟回收率的同时，实现绿色生产目标。

4.2 突破技术，降低回收成本

针对当前氟回收技术普遍存在的高成本困境，亟须开发经济可行的创新方案。一方面，可探索工业废弃物（如电石渣、钢渣）或副产物作为新型沉淀剂、吸附剂的应用潜力，通过变废为宝降低原料成本；另一方面，基于绿色化学理念开发新型有机溶剂或离子液体，优化溶剂萃取工艺，在提升氟选择性回收效率的同时，降低能耗与设备损耗。

4.3 推进磷石膏氟资源高值化利用

磷石膏作为磷肥生产的大宗固废，其堆存问题与氟资源浪费形成双重挑战。未来需深入研究磷石膏中氟元素的微观赋存形态与迁移转化规律，解析回收过程的热力学、动力学机制，加速高效分离技术的工业化验证。同时，构建磷石膏“氟资源提取-材料化利用”一体化产业链，通过制备建筑材料、土壤改良剂等高附加值产品，提升磷石膏综合利用率与市场竞争力。

4.4 强化政策驱动产业升级

政府层面需构建完善的政策支持体系。通过制定严格的氟资源回收技术规范与环境排放标准，倒逼企业开展技术革新；同时，设立专项财政补贴、税收减免等激励措施，引导企业加大研发投入，推动氟资源回收技术从实验室走向产业化，最终形成

政策引导、企业主导、市场驱动的良好发展格局。

5 结论

湿法磷酸生产过程中伴生氟资源的高效回收利用,对于保障我国磷化工、氟化工及新能源等关键战略产业的资源安全与可持续发展具有重大意义。当前研究表明,氟资源在湿法磷酸体系中以气、液、固多形态赋存,现有回收技术虽在工艺原理上具备可行性,但受限于回收率低、回收成本高昂及磷石膏氟分离技术瓶颈等诸多因素,尚未形成大规模产业化应用。未来需聚焦高效分离材料开发、低成本联用工艺创新及磷石膏氟资源定向活化技术,推动氟资源从磷矿“副产物杂质”向“战略资源”的价值转变,构建磷矿伴生氟资源高效、经济、环境友好的回收利用体系,推动相关产业向资源节约型、环境友好型方向转型升级,助力磷化工产业绿色低碳转型与可持续发展。

[参考文献]

- [1] 杜春彦,苑帅,尉雪菲.全球萤石资源分布格局与中国产业发展挑战及优化策略研究[J].中国矿业,2025,34(7):324-334.
DU C Y, YUAN S, WEI X F. Distribution pattern of global fluorite resources and the challenges and optimization strategies of China's industrial development [J]. China Mining Magazine, 2025, 34(7): 324-334.
- [2] 张必欣,李政,陈从喜,等.中国萤石资源形势分析及开发利用现状研究[J].中国矿业,2025,34(2):306-313.
ZHANG B X, LI Z, CHEN C X, et al. Analysis of the situation of fluorite resources in China and research on the current status of development and utilization [J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2): 306-313.
- [3] 李丰,耿一硕,单冰.磷矿中伴生氟资源的赋存特征及资源化利用策略[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(7):6-10.
LI F, GENG Y S, SHAN B. Occurrence characteristics and resource utilization strategies of associated fluorine resources in phosphate rock [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(7): 6-10.
- [4] 何贵宾.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.
- [5] 何贵宾,傅英,张儒学,等.湿法磷酸中伴生氟的赋存形态与回收现状及展望[J].磷肥与复肥,2023,38(12):30-36.
HE B B, FU Y, ZHANG R X, et al. Present situation and prospect of occurrence and recovery of associated fluorine in WPA [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(12): 30-36.
- [6] 何贵宾.湿法磷酸中液相氟的赋存形态及其对氟回收的影响研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.
- [7] 张海燕,明大增,吉晓玲,等.浅析湿法磷酸脱氟反应原理[J].无机盐工业,2015,47(1):9-12.
ZHANG H Y, MING D Z, JI X L, et al. Analysis on de-fluorination reaction principle of wet process phosphoric acid [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2015, 47(1): 9-12.
- [8] 王崴,范丹,陈豆林,等.湿法磷酸脱氟工艺及氟资源回收利用研究进展[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(7):31-40.
WANG W, FAN D, CHEN D L, et al. Research progress of defluorination process for wet-process phosphoric acid and recycling of fluorine resources [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(7): 31-40.
- [9] 任孟伟.湿法磷酸反应过程脱氟技术研究[D].郑州:郑州大学,2018.
REN M W. Studies on de-fluorination technology of wet phosphoric acid reaction process [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [10] 杨文贡,首志欣,项双龙,等.磷化工中氟元素迁移转化规律及其回收利用现状[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(7):11-15,40.
YANG W G, SHOU Z X, XIANG S L, et al. The migration and transformation laws of fluorine element in phosphorus chemical industry and the current status of its recovery and utilization [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(7): 11-15, 40.
- [11] 陈迎新.湿法磷酸生产中氟化物溢出行为强化及机理研究[D].武汉:武汉工程大学,2023.
CHEN Y X. Study on the promotion and mechanism of fluorine spillover in the production of wet-process phosphoric acid [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2023.
- [12] 段思勤,蔡杰,姜威,等.湿法磷酸装置提高氟收率技术改造[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(3):73-77.
DUAN S Q, CAI J, JIANG W, et al. Technical transformation of wet-process phosphoric acid plant to increase fluorine yield [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(3): 73-77.
- [13] 刘正东,姜威,龚丽.湿法磷酸生产中提高氟收率的技术方案[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(7):41-45,124.
LIU Z D, JIANG W, GONG L. Technical scheme for improving fluorine yield in wet-process phosphoric acid production [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(7): 41-45, 124.
- [14] 王勃,高保亮.磷酸净化脱氟蒸汽热耦合再利用的工程应用[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(4):75-78,128.
WANG B, GAO B L. Engineering application of thermal coupling reuse of defluorination steam of phosphoric acid purification [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(4): 75-78, 128.