

湿法磷酸空气汽提脱氟传质中试实验研究

罗攀^{1,2}, 李季^{2,3}, 王佳才^{1,2}, 马永强^{1,2}, 袁海斌^{1,2}, 朱家骅^{2,3*}

(1. 四川川恒控股集团股份有限公司, 四川 成都 610052; 2. 川大-川恒绿色化工技术研发中心, 四川 成都 610065; 3. 四川大学化学工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:在直径为 0.6 m、高 6 m 的湍球塔中,以 9 000 个直径 38 mm 的聚四氟乙烯空心球为填料,开展空气汽提脱湿法磷酸中氟的气液传质中试实验。系统考察了气速与喷淋密度对脱氟总量、平均传质推动力及体积传质系数的影响规律。结果表明,气速由 2 m/s 提高到 2.7 m/s 时,床层湍动增强,脱氟总量与体积传质系数显著提升;继续升高至 4 m/s,塔底温度降低使氟平衡分压下降、传质推动力减弱,脱氟总量降低,传质系数增长趋缓,证实过程受液膜控制。喷淋密度由 24.5 kg/(m²·s)增至 41.3 kg/(m²·s)时,脱氟效果提高;超过 49.8 kg/(m²·s)后,液相传质阻力增大,脱氟性能下降。较优操作区间为气速 2.7 m/s、喷淋密度 33.3~41.3 kg/(m²·s)。研究可为空气封闭循环汽提精制磷酸工艺的工业化设计与优化提供理论与数据支撑。

关键词:湿法磷酸;空气汽提;脱氟;气液传质;传质系数;中试实验

中图分类号:TQ021.4;X78

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S2-0350-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.057

Pilot study on mass transfer of fluoride removal from wet-process phosphoric acid by air stripping

LUO Pan^{1,2}, LI Ji^{2,3}, WANG Jia-cai^{1,2}, MA Yong-qiang^{1,2}, YUAN Hai-bin^{1,2}, ZHU Jia-hua^{2,3*}

(1. Sichuan Chanhen Holding Group Co., Ltd., Chengdu 610052, China;

2. Sichuan University-Chanhen R&D Center for Green Chemical Technology, Chengdu 610065, China;

3. School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A pilot-scale gas-liquid mass transfer experiment for fluoride removal from wet-process phosphoric acid by air stripping was carried out in a turbulent contactor with an inner diameter of 0.6 m and a height of 6 m, using 9000 polytetrafluoroethylene (PTFE) hollow spheres with a diameter of 38 mm as packing. The effects of superficial gas velocity and liquid spray density on total fluoride removal, average mass transfer driving force, and volumetric mass transfer coefficient were systematically investigated. The results indicated that increasing the gas velocity from 2 m/s to 2.7 m/s enhanced bed turbulence and significantly improved fluoride removal and volumetric mass transfer coefficient. A further increase to 4 m/s reduced the equilibrium partial pressure of fluoride and weakened the mass transfer driving force due to the decrease in bottom temperature, leading to lower fluoride removal and a slower increase in mass transfer coefficient, which confirmed that the process was controlled by liquid film resistance. The fluoride removal efficiency increased with rising spray density from 24.5 kg/(m²·s) to 41.3 kg/(m²·s), but decreased beyond 49.8 kg/(m²·s) owing to the increased liquid-phase mass transfer resistance. The optimal operating range was determined as a gas velocity of 2.7 m/s and a spray density of 33.3–41.3 kg/(m²·s). This study provides theoretical and data support for the industrial design and optimization of phosphoric acid purification by closed-circuit air stripping.

Key words: wet-process phosphoric acid (WPA); air stripping; defluorination; gas-liquid mass transfer; mass transfer coefficient; pilot-scale experiment

在湿法磷酸(WPA)生产过程中,磷矿石中的含氟固体矿物质易转化为液态氟硅酸(H₂SiF₆)、氢氟酸(HF)及金属氟化物并混入产品体系,给WPA生产及后续深加工带来多重技术难题^[1-3]。具体而言,过量氟会显著增大WPA黏度,降低过滤系统分离效能并延长生产周期;生产过程中挥发的HF气体不仅会腐蚀设备、缩短使用寿命,还会对操作人员的人体健康构成严重威胁^[4-5];更重要的是,含氟量

超标的WPA不符合肥料行业相关标准,其农田施用会导致土壤与地下水氟含量累积,既抑制作物发芽生长,还可能引发食物链传导下的慢性氟中毒风险^[6]。

相较于直接废弃处理,氟资源的回收利用已成为行业共识,这一转变源于氟作为珍贵战略资源的核心属性——广泛应用于电子、光伏、高级有机氟基润滑油等高端制造领域,是众多氟基产品不可或缺

收稿日期:2026-03-30;修回日期:2026-06-11

基金项目:四川省科技计划资助中央在川高校院所“聚源兴川”项目(2023ZHJY0015)

作者简介:罗攀(1995-),男,本科,工程师,研究方向为磷酸及磷酸盐产品的研究与开发,luop@chanhen.com;朱家骅(1953-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为化工尾气封闭循环与资源化系统与先进装备,通讯联系人,028-85990908,jhzhz@scu.edu.cn。

的核心原料^[7]。近年来,随着含氟产品市场需求的快速增长,天然萤石储量日趋稀缺,从 WPA 中回收氟资源已成为氟化工业可持续发展的关键战略^[8]。回收的氟资源可进一步转化为氟化盐、氟硅酸、六氟磷酸锂等高附加值产品,广泛应用于医药、化工及新能源行业,为企业创造显著经济收益。与此同时,《推进磷资源高效高值利用实施方案》等国家政策明确支持磷氟锂一体化开发,推动磷氟资源协同利用模式的发展——这一模式不仅能提升资源综合利用率、降低环境污染,还能促进相关产业技术升级与社会责任履行,其重要性将随技术进步与社会需求升级持续凸显^[9-12]。

目前,湿法磷酸脱氟与氟资源回收技术主要包括化学沉淀法、溶剂萃取法、吸附法及蒸发浓缩法^[13-15]。其中,前 3 种技术因固有缺陷已逐渐被淘汰:化学沉淀法氟回收效率低、选择性差,易导致 PO_4^{3-} 共沉淀损失;溶剂萃取法需使用高腐蚀性有机试剂,既损害设备又推高生产成本;吸附法在反复吸附-解吸循环中易出现吸附剂结构坍塌,稳定性大幅下降。相较之下,蒸发浓缩法凭借操作简便、成本可控的优势备受关注,被视为极具应用前景的 WPA 脱氟技术^[16-17]。核心原理是通过加热使液态 H_2SiF_6 分解为气态 SiF_4 和 HF ,同时蒸发 WPA 中原有的 HF ,经收集溶解后重新转化为 H_2SiF_6 ,实现与 H_3PO_4 的选择性分离;回收的 H_2SiF_6 可直接用于生产氢氟酸、氟化铝、冰晶石等高价产品。但受 WPA 成分复杂性影响,该方法仍存在氟回收率偏低的技术瓶颈。

汽提法作为蒸发浓缩法的延伸与优化技术,具备显著应用潜力^[18]。核心原理是利用惰性气体将液体中的易挥发组分带出,实现目标物质的分离;在磷酸脱氟场景中,通过精准调控操作条件,可使氟化物以气态形式从磷酸溶液中高效脱除,达到净化磷酸与回收氟资源的双重目的。该技术具有脱氟效率高、可连续作业、环境友好等优势,但对设备精密度要求较高,技术工业化实施存在一定挑战。基于此,本研究基于湍球塔结构简单、处理量大、不易堵塞的特性^[19],以直径 0.6 m、高度 6 m 的湍球塔为核心装置,填充 9 000 个直径 38 mm 的聚四氟乙烯空心小球作为填料,开展空气汽提蒸发浓缩脱氟精制磷酸的气液两相传质动力学中试研究。通过系统评估气速和喷淋密度对气液传质系数的影响,旨在为空气封闭循环汽提浓缩脱氟技术的工业化推广提供坚实的实验数据支撑与理论模型参考。

1 实验部分

1.1 实验流程

如图 1 所示,将浓度 40% P_2O_5 的半水湿法磷酸输送至磷酸预混槽,同时手动加入 SiO_2 并混合均匀;混合料浆经管道送入磷酸中转槽 A/B,再通过中转泵输送至汽提脱氟循环槽。循环槽内磷酸经循环泵送入石墨换热器加热后,进入湍球塔进行循环汽提脱氟与浓缩;达到指标要求后,通过脱氟循环泵出口三通输送至产品磷酸槽。原料酸初始温度 65°C ,采用鼓风空气与加热蒸气联合汽提脱氟;湍球塔出口尾气经两级洗涤(氟含量 $\leq 3 \text{ mg/m}^3$)和电除雾处理(雾滴含量 $\leq 5 \text{ mg/m}^3$)后,由引风机排放至大气。

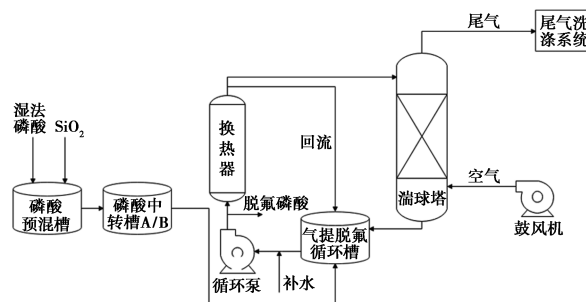


图 1 中试实验流程

如图 2 所示,填料塔内设有 4 块筛板,第 1~3 块筛板上方分别布置 3 段填料,每段含 3 000 个直径 38 mm、密度 400 kg/m^3 的聚四氟乙烯空心小球;第 4 块筛板为液体分布板。操作过程中,填料小球在塔内上下湍动,可有效防止硅胶沉淀堆积导致的填料层堵塞。通过计量泵向气体循环槽补充纯水以维持液位稳定,进而计算水分蒸发速率。实验在第 1、2、3 块筛板下方采集液体样品,用于检测磷和氟含量;实验分 2 轮进行:第一轮探索操作条件,第二轮在最佳条件下连续稳定运行,每个工况采集 5 组样品以确保数据准确性与可重复性。

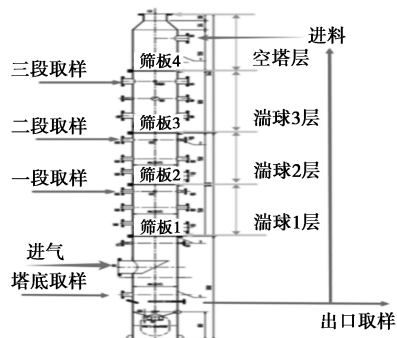


图 2 湍球塔结构与采样设置

1.2 数据分析

本次中试实验回归模型关键参数就是空气脱氟气液传质体系湍球塔体积传质系数,其中蒸发体积传质系数计算过程如式(1)所示:

$$K_Y a = (L_{in} \rho_{in} C_{W_{in}} - L_{in} \rho_{in} C_{W_{out}}) / \\ (M_w L N \{ [(P_{W_{in}}^* - P_{W_{in}}) - (P_{W_{out}}^* - P_{W_{out}})] / \\ [(P_{W_{in}}^* - P_{W_{in}}) / (P_{W_{out}}^* - P_{W_{out}})] \} \}) \quad (1)$$

式中, $K_Y a$ 为水分子从液相蒸发的体积传质系数, $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})$; L 为磷酸体积流量, m^3/h ; C_W 为磷酸水含量, %; ρ 为磷酸比重, g/mL ; M_w 为水分子摩尔质量, g/mol ; P_W^* 为磷酸气液界面水蒸气平衡分压, kPa ; in 为塔顶液相进口; out 为塔底液相出口。

脱氟体积传质系数计算过程如式(2)所示:

$$K_Y a = (L_{in} \rho_{in} C_{F_{in}} - L_{in} \rho_{in} C_{F_{out}}) / \\ (4 M_F L N \{ [(P_{\text{SiF}_4}^* - P_{\text{SiF}_4}^{\text{in}}) - (P_{\text{SiF}_4}^* - P_{\text{SiF}_4}^{\text{out}})] / \\ [(P_{\text{SiF}_4}^* - P_{\text{SiF}_4}^{\text{in}}) / (P_{\text{SiF}_4}^* - P_{\text{SiF}_4}^{\text{out}})] \} \}) \quad (2)$$

式中, $K_Y a$ 为 SiF_4 分子从液相蒸发的体积传质系数, $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})$; L 为磷酸体积流量, m^3/h ; C_F 为磷酸氟含量, %; ρ 为磷酸比重, g/mL ; M_F 为水分子摩尔质量, g/mol ; $P_{\text{SiF}_4}^*$ 为磷酸气液界面水蒸气平衡分压, kPa 。

SiF_4 平衡分压是热力学平衡参数,可由氟气液分配比计算:

$$P_{\text{SiF}_4}^* = [RT / (19 \times 4 \times 1000)] H m_{\text{H}_2\text{SiF}_6} \quad (3)$$

式中, H 为 SiF_4 气液分配比, $\text{g}(\text{F}) \cdot \text{m}^{-3} / [\text{mol}(\text{H}_2\text{SiF}_6) \text{kg}^{-1}]$; T 为磷酸温度, K ; R 为理想气体状态方程常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; $m_{\text{H}_2\text{SiF}_6}$ 为氟硅酸浓度, mol/kg 。

基于氟硅酸浓度 $0.327 \sim 1.332 \text{ mol/kg}$ 、磷酸浓度 $9.99 \sim 23.851 \text{ mol/kg}$ 、硫酸浓度 $0 \sim 2.912 \text{ mol/kg}$ 、温度 $70 \sim 94^\circ\text{C}$ 范围内的氟气液分配比实验数据^[20],对氟元素气液分配比模型进行参数回归,从而得到 $\text{H}_2\text{SiF}_6\text{-H}_3\text{PO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系的氟元素气液分配比 H 的模型预测公式(4):

$$\ln H = 28.151 + 2/3 \ln m_{\text{H}^+} - 2/3 \ln m_{\text{SiF}_6^{2-}} + 0.149 m_{\text{H}_3\text{PO}_4} + \\ 0.923 m_{\text{H}_2\text{SiF}_6} + 0.497 m_{\text{H}_2\text{SO}_4} - 10448.9/T \quad (4)$$

2 结果讨论

2.1 气速对脱氟传质系数的影响

由图 3 所示,取温度 105°C 、 P_2O_5 浓度 $52\% \sim 53\%$ 、含氟量 $0.2\% \sim 0.3\%$ 的塔顶磷酸条件,塔顶磷酸进料量为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$,汽提气速为 $2 \sim 4 \text{ m/s}$ ($1500 \sim 3000 \text{ m}^3/\text{h}$) 的脱氟总量进行分析,表明气速由 2 m/s

增加到 2.7 m/s 时,脱氟总量从 14 kg/h 增加到 30 kg/h ,但随着气速进一步增加到 2.4 m/s 和 4 m/s ,脱氟总量下降至 27 kg/h 左右。

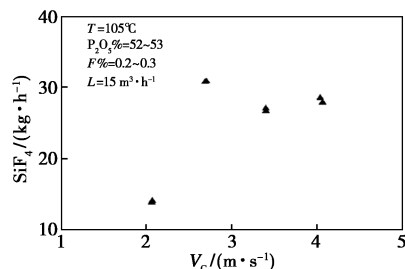


图 3 气速对脱氟总量的影响

由图 4 所示,取温度 105°C 、 P_2O_5 浓度 $52\% \sim 53\%$ 、含氟量 $0.2\% \sim 0.3\%$ 的塔顶磷酸条件,塔顶磷酸进料量为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$,汽提空气气速为 $2 \sim 4 \text{ m/s}$ ($1500 \sim 3000 \text{ m}^3/\text{h}$) 的脱氟平均推动力进行分析,表明气速由 2 m/s 增加到 2.7 m/s 时,脱氟平均推动力从 2.6 kPa 下降到 1.6 kPa ,但随着气速进一步增加到 $3.4, 4 \text{ m/s}$,脱氟平均推动力变化不明显。脱氟平均推动力下降,主要是温差变化导致的。当气速 2 m/s 时,塔底的温度为 85°C ,当气速增加到 2.7 m/s 时,塔底的温度下降为 78°C ,当气速增加到 4 m/s 时,塔底的温度下降为 72°C 。温度的下降,使得塔底平衡分压下降了。

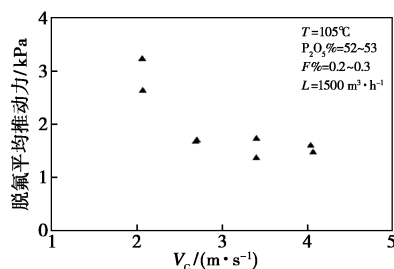


图 4 气速对脱氟平均推动力的影响

由图 5 所示,取温度 105°C 、 P_2O_5 浓度 $52\% \sim 53\%$ 、含氟量 $0.2\% \sim 0.3\%$ 的塔顶磷酸条件,塔顶磷酸进料量为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$,汽提空气气速为 $2 \sim 4 \text{ m/s}$ ($1500 \sim 3000 \text{ m}^3/\text{h}$) 的脱氟体积传质系数进行分析,表明气速由 2 m/s 增加到 2.7 m/s 时,脱氟体积传质系数从 $0.15 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{kPa} \cdot \text{h})$ 增大到 $0.6 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{kPa} \cdot \text{h})$,但随着气速进一步增加到 $3.4, 4 \text{ m/s}$,脱氟体积传质系数变化不明显。说明气速从由 2 m/s 增加到 2.7 m/s 时,膨胀高度从 60 cm 增加到 70 cm ,湍球塔的气液接触状态(湍动效果)改善明显,此时的膨胀床层高度是静止床层高度的 1.42 倍。但气速的进一步增加,膨胀高度从 70 cm

增加到 80 cm,对湍球塔的湍动状态影响不明显。也说明了,脱氟传质过程是液膜控制过程,在气液接触面积不变(小球填料比表面积 $284 \text{ m}^2/\text{m}^3$) 的时候,气速的增加对脱氟传质系数的影响不大。

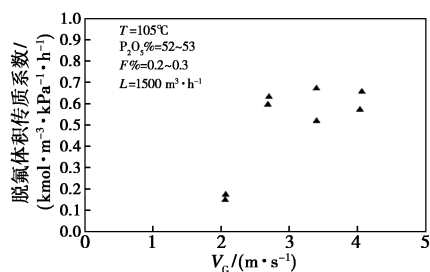


图 5 气速对脱氟体积传质系数的影响

2.2 喷淋密度对脱氟传质系数的影响

如图 6 所示,取温度 105°C 、 P_2O_5 浓度 53%~54%、含氟量 0.2%~0.3% 的塔顶磷酸条件,汽提进塔空气流量为 $1\,500 \text{ m}^3/\text{h}$,塔顶磷酸喷淋密度为 $24.5\sim 49.8 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ($15\sim 30 \text{ m}^3/\text{h}$) 的脱氟总量进行分析,表明磷酸喷淋密度由 $24.5 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 增加到 $41.3 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,脱氟总量从 $14 \text{ kg}/\text{h}$ 增加到 $30 \text{ kg}/\text{h}$,但随着磷酸喷淋密度进一步增加到 $49.8 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,脱氟总量下降至 $25 \text{ kg}/\text{h}$ 左右。

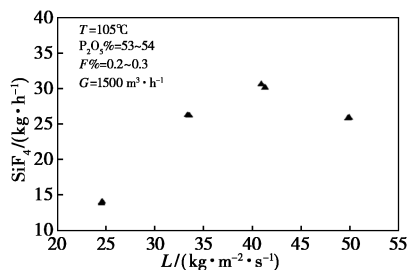


图 6 喷淋密度对脱氟量的影响

如图 7 所示,取温度 105°C 、 P_2O_5 浓度 53%~54%、含氟量 0.2%~0.3% 的塔顶磷酸条件,汽提进塔空气流量为 $1\,500 \text{ m}^3/\text{h}$,塔顶磷酸喷淋密度为 $24.5\sim 49.8 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ($15\sim 30 \text{ m}^3/\text{h}$) 的脱氟传质推动力进行分析,表明磷酸喷淋密度由 $24.5 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 增加到 $41.3 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,脱氟传质推动力从

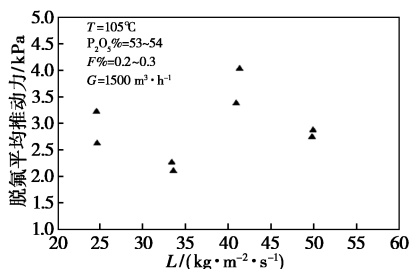


图 7 喷淋密度对脱氟传质推动力的影响

2.9 kPa 增加到 3.5 kPa ,主要原因是随着喷淋密度增加,塔底磷酸的温度从 84°C 增加到 92°C ,但随着磷酸喷淋密度进一步增加到 $49.8 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,脱氟传质推动力从 3.5 kPa 下降到 2.7 kPa ,塔底磷酸的温度从 92°C 下降到 89°C 。

如图 8 所示,取温度 105°C 、 P_2O_5 浓度 53%~54%、含氟量 0.2%~0.3% 的塔顶磷酸条件,汽提进塔空气流量为 $1\,500 \text{ m}^3/\text{h}$,塔顶磷酸喷淋密度为 $24.5\sim 49.8 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ($15\sim 30 \text{ m}^3/\text{h}$) 的脱氟传质系数进行分析,表明磷酸喷淋密度由 $24.5 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 增加到 $33.3 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,脱氟传质系数从 $0.14 \text{ kmol}/(\text{m}^3\cdot\text{kPa}\cdot\text{h})$ 增加到 $0.29 \text{ kmol}/(\text{m}^3\cdot\text{kPa}\cdot\text{h})$,膨胀高度由 60 cm 增加到 65 cm ,湍动状况进一步优化,随着磷酸喷淋密度进一步增加到 $40.6 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,小球膨胀高度维持在 $60\sim 65 \text{ cm}$,脱氟传质系数变化不明显,但随着磷酸喷淋密度进一步增加到 $49.8 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,小球膨胀高度也下降到 60 cm ,脱氟传质系数从 $0.29 \text{ kmol}/(\text{m}^3\cdot\text{kPa}\cdot\text{h})$ 下降到 $0.22 \text{ kmol}/(\text{m}^3\cdot\text{kPa}\cdot\text{h})$,说明喷淋量过大,导致湍球塔气液两相接触状态恶化,不利于脱氟传质。

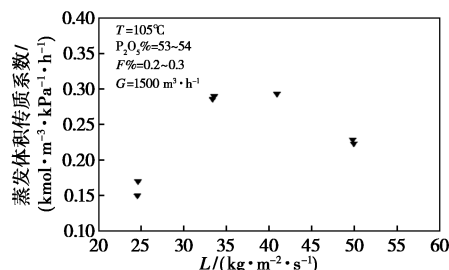


图 8 喷淋量对脱氟传质系数的影响

3 小结

通过中试规模的湍球塔实验,系统探究了气速与喷淋密度对湿法磷酸空气汽提脱氟过程的综合影响,明确了其传质特性与优化操作区间,主要结论如下。

(1) 气速对脱氟过程的影响存在显著非线性关系。气速从 2 m/s 提高至 2.7 m/s 时,床层膨胀高度增加,气液湍动增强,使脱氟总量与体积传质系数显著提升;但气速进一步升高至 4 m/s 时,因汽提冷却效应导致塔底温度下降,氟的平衡分压降低,传质推动力减弱,脱氟总量不增反降,体积传质系数亦趋于稳定。这表明脱氟过程为液膜控制,仅依靠提高气速无法持续强化传质。

(2) 喷淋密度对脱氟效率具有双重影响。在 $24.5\sim 41.3 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 范围内,提高喷淋密度有助

于提升系统温度与传质推动力,同时改善初始段湍动状态,促进脱氟总量与传质系数同步增加;但当喷淋密度超过 $49.8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 后,液膜增厚与流动状态恶化导致气液接触效率下降,脱氟性能不升反降。

(3) 确定了协同优化操作区间。在本实验条件下,气速约 2.7 m/s 、喷淋密度 $33.3 \sim 41.3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 为较优操作参数组合。该条件下湍动充分、传质推动力与传质系数协同作用最佳,可实现脱氟效率最大化。

(4) 研究对工程实践具有指导意义。实验验证了在保持一定气液接触状态与温度平衡的基础上,通过协调气速与喷淋量可实现对脱氟过程的有效调控,为空气封闭循环汽提脱氟工艺的工业放大与操作优化提供了关键理论与数据支持。

参考文献

- [1] 张洪,李军.净化湿法磷酸浓缩酸性含氟冷凝水回用工艺研究[J].无机盐工业,2026,58(1):67-73.
- [2] 段利中,高璐阳,王硕,等.湿法磷酸除氟制冰晶石[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(12):45-49.
- [3] 刘文凯,李彦春.湿法磷酸生产中氟资源回收利用提升改造[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(1):79-83.
- [4] 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.
- [5] 王巍,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.
- [6] 何宾宾.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] 李朝波,刘志平,杨利春,等.湿法磷酸生产中氟硅资源循环经济技术研究与实践[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(6):84-88.
- [8] 李志祥,明大增,钟英.磷矿伴生氟资源的综合利用[J].磷肥与复肥,2008,23(1):64-66.
- [9] 赵晓飞.《推进磷资源高效高值利用实施方案》发布——磷化工行业剑指高端新材料[J].中国石油和化工,2024,(2):26-29.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 曹骥,张志业,王辛龙.磷化工副产氟硅酸的利用及无水氟化氢的生产研究进展[J].无机盐工业,2010,42(5):1-4.
- [13] 黄忠,何宾宾,张险峰,等.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[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(8):70-74.
- [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.
- [15] 欧健,李天祥,隋岩峰,等.工业含氟废气处理及资源回收的概述[J].无机盐工业,2021,53(5):39-46.
- [16] 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.
- [17] 王喜恒,孙文哲.湿法磷酸过程氟回收技术研究进展[J].无机盐工业,2020,52(8):25-29.
- [18] 朱家骅,夏素兰,李季,等.空气循环气提浓缩脱水溶液挥发性杂质和制备结晶产品的方法与装置:CN 202011006416.6[P].2026-03-06.
- [19] 豆瑞刚,王文辉,朱家骅,等.尾气脱氨湍球塔临界流化速度研究[J].化学工程与装备,2014,(6):1-3.
- [20] Van der Sluis S, Schrijver A H M, Baak F P C, et al. Fluoride distribution coefficients in wet phosphoric acid processes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1988, 27(3):527-536. ■
- (上接第349页)
- [7] Wang H, Zhang M, Han X, et al. Production of biocrude oils from various bio-feedstocks through hydrothermal liquefaction: Comparison of batch and continuous-flow operations[J]. Biomass & Bioenergy, 2023, 173:106810.
- [8] Summers S, Valentine A, Wang Z, et al. Pilot-scale continuous plug-flow hydrothermal liquefaction of food waste for biocrude production[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2023, 62(31):12174-12182.
- [9] Ghadge R, Nagwani N, Saxena N, et al. Design and scale-up challenges in hydrothermal liquefaction process for biocrude production and its upgradation[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 14:100223.
- [10] 程肖帝,石金明,艾仙斌,等.一种连续生物质水热液化反应预处理新方法:CN 202411327460.5[P].2024-09-23.
- [11] 程肖帝,周建平,石金明,等.一种湿料筛分装置及筛分控制方法:CN 202511786641.9[P].2025-12-01.
- [12] 程肖帝,黄蓉,石金明,等.一种连续生物质水热液化反应智能控制方法及其系统:CN 202510980898.1[P].2025-07-16.
- [13] 程肖帝,石金明,艾仙斌,等.一种连续生物质水热液化反应进料方法和进料系统:CN 202510792109.1[P].2025-06-13.
- [14] 程肖帝,石金明,徐春保,等.一种连续管式水热液化反应器温度控制新方法:CN 202410751944.6[P].2024-06-12.
- [15] 程肖帝.一种生物质连续水热液化制油气液分离系统和方法:CN 202410428078.7[P].2024-04-10.
- [16] 程肖帝,石金明,艾仙斌,等.一种连续生物质水热液化反应稳压控制方法及系统:CN 202511513274.5[P].2025-10-22.
- [17] 程肖帝,石金明,艾仙斌,等.一种生物质水热液化反应后处理新方法:CN 202411616179.3[P].2024-11-13.
- [18] 程肖帝,石金明,徐春保,等.一种微负压旋蒸萃取联用连续分离的方法:CN 202510282450.2[P].2025-03-11.
- [19] 程肖帝,阙志刚,石金明,等.共水热液化关键参数对废弃稻秆与城市污泥制油的影响[J].能源研究与管理,2025,17(2):101-107.
- [20] 黄蓉,程肖帝,石金明,等.一种生物质连续水热液化制油清洗系统:CN 202510930859.0[P].2025-07-07.
- [21] 蒋海伟,俞成达,文震林,等.钢渣对蜈蚣草水热液化产油特性及砷固化影响研究[J].应用化工,2025,54(8):1997-2001.
- [22] Yang X, Li J, Xu Y, et al. Hydrodeoxygenation of lignin-derived biooil over NiMn/NC catalyst for bio-based liquid fuel[J]. Biore-source Technology, 2026, 445:134117. ■