

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.

降膜强化的离子液体中氨气解吸过程研究

王俊男^{1,3}, 董海峰^{2,3}, 刘伟², 马龙巍¹, 张香平¹

(¹ 中国石油大学(北京), 碳捕集与转化利用北京市重点实验室, 北京 102249; ² 中国科学院过程工程研究所, 固态电池及储能过程北京市重点实验室, 北京 100190; ³ 惠州市绿色能源与新材料研究院, 广东 惠州 516003)

摘要: 含氨离子液体解吸再生是离子液体法含氨尾气分离新技术的核心过程之一, 其性能决定了分离过程的能耗和成本。由于离子液体较高的黏度, 采用降膜蒸发有利于提高离子液体中氨的传递性能, 提高气液分离效率。本工作开展了降膜蒸发强化含氨离子液体解吸再生过程的实验研究, 系统评价了温度、压力、流量和富液氨含量对氨气有效解吸率、传质系数和解吸强度的影响, 进一步探究了内构件对氨气解吸的强化效果。结果表明, 贫液中氨含量随解吸温度的升高和压力的降低而降低; 提高富液氨含量和流量, 可增强表观传质系数和氨气解吸强度; 低流量下内置螺旋线可有效提高氨解吸率, 在 105 °C, 10 kPa 和 0.030 kg·m⁻¹·s⁻¹ 下, 氨气解吸率从 50.76% 提高至 69.04%, 但在流量较高时 (如 0.108 kg·m⁻¹·s⁻¹), 由于液膜自身波动加剧, 螺旋线对液膜扰动作用减弱, 使得其对氨气降膜解吸性能的影响不再显著。

关键词: 离子液体; 氨气; 解吸; 降膜蒸发; 螺旋线; 过程强化

中图分类号: TQ 028

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-11

Research on ammonia desorption from ionic liquid intensified by falling film evaporation

WANG Junnan^{1,3}, DONG Haifeng^{2,3}, LIU Wei², MA Longwei¹, ZHANG Xiangping¹

(¹ Beijing Key Laboratory of Carbon Capture, Conversion and Utilization, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; ² Beijing Key Laboratory of Solid State Battery and Energy Storage Process, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; ³ Huizhou Institute of Green Energy and Advanced Materials, Huizhou 516003, Guangdong, China)

Abstract: The regeneration of ammonia (NH₃)-rich ionic liquids (ILs) is a critical step in the new technology of IL-based NH₃ separation and recovery from NH₃-containing gas. The NH₃ desorption performance directly determines the energy consumption and cost of the overall separation process. Due to the high viscosity of ILs, the use of the falling film evaporator is beneficial to enhancing the mass transfer performance of NH₃ in ILs and improving separation efficiency. In this work, an experimental study was conducted on the process of NH₃

Keywords: ionic liquids; ammonia; desorption; falling film evaporation; spiral; process intensification

desorption and regeneration of NH₃-rich ILs operating parameters including temperature, pressure, intensified by falling film evaporation. The effects of mass flow rate and NH₃ content in NH₃-rich ILs on

收稿日期: 2026-04-01 修回日期: 2026-05-25

通信作者: 董海峰(1979—), 男, 博士, 研究员, hfdong@ipe.ac.cn

第一作者: 王俊男(1995—), 男, 博士研究生, jnwang19@ipe.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3902200); 国家自然科学基金项目(22278408)

引用本文: 王俊男, 董海峰, 刘伟, 马龙巍, 张香平. 降膜强化的离子液体中氨气解吸过程研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(X): 1–11

Citation: WANG Junnan, DONG Haifeng, LIU Wei, MA Longwei, ZHANG Xiangping. Research on ammonia desorption from ionic liquid intensified by falling film evaporation[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1–11

NH_3 effective desorption rate, mass transfer coefficient, and NH_3 desorption intensity were systematically investigated. Furthermore, the intensification effect of inserted spirals on NH_3 desorption from IL was explored. The results indicate that the NH_3 content in the NH_3 -lean IL decreases with increasing evaporation temperature and decreasing pressure. Increasing NH_3 content in NH_3 -rich ILs and mass flow rate of IL significantly enhances the mass transfer performance and NH_3 desorption ability. At low flow rates, the inserted spirals effectively reduced the NH_3 content in the NH_3 -lean IL. At 105 °C, 10 kPa and $0.030 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, the NH_3 desorption rate was increased from 50.76% to 69.04%. However, at a high flow rate, such as $0.108 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, the disturbance effect of spirals on the falling film is weakened due to intensified self-fluctuation of the falling film, resulting in an insignificant influence on the NH_3 desorption performance.

引 言

离子液体作为一种新型绿色溶剂,具有结构设计、气体饱和和溶解度高以及热稳定性好等优势,在气体分离领域展现出广阔的应用前景^[1-2]。在离子液体法含氨尾气分离工艺中,离子液体的高效再生是实现其循环利用的关键^[3]。目前,离子液体中氨气的解吸多采用旋转蒸发或惰性气体汽提等常规方式,普遍存在解吸效率低、耗时长、难以获得高纯度氨气等不足。此外,膜分离法、萃取法和吸附法等方法被用于离子液体的再生和回收^[4-6]。然而,这些方法适用于离子液体-水/有机体系中少量离子液体的回收,并存在处理能力小、回收效率低和二次污染等缺点^[7],难以满足工业含氨尾气高效分离与资源回收利用的需求。

降膜蒸发传热传质性能优异^[8],被广泛应用于海水淡化^[9]、食品浓缩^[10]和制冷^[11]等领域。该技术与离子液体极低饱和蒸气压、良好热稳定性的核心特性^[12]高度适配,可实现离子液体中水和气体等挥发性物质的脱除^[13-14],以获得相对高纯度的离子液体。Wellner等^[15]通过降膜蒸发将 $[\text{N}(\text{Et})_2(\text{HE})_2][\text{MeSO}_3]$ 和 $[\text{Emim}][\text{EtSO}_4]$ 中的含水量降低到0.2 wt%,并通过连续蒸发实验证明,即使经过长周期运行,离子液体

的脱水速率仍能维持恒定且离子液体结构不变^[16]。Cao等^[17]发现在降膜蒸发器中,离子液体的脱水速率比溴化锂-水溶液最多可高出25.9%,证明了降膜蒸发在离子液体再生方面的巨大应用潜力。为进一步提高降膜脱水效率,Indrawan等^[18]通过优化降膜表面结构提高了离子液体液膜润湿性,使离子液体的脱水速率从0.038 g/s提升至0.050 g/s,表明降膜表面结构对离子液体再生过程有显著影响。从降膜蒸发装置的结构上来讲,缩放管^[19-20]、螺旋槽管^[21]或内置螺旋线管^[22-23]等作为降膜表面结构,具有结构简单、性能稳定、成本低等特点,可通过增强液膜扰动,提高物料停留时间,强化降膜蒸发传热传质性能。Huang等^[20]发现硫酸铝富二氧化硫溶液在缩放管内的降膜蒸发性能明显优于在光滑管内,相对于光滑管,缩放管内研究体系降膜传热系数提高了17%-29%,二氧化硫的解吸率提高了6.7%-16.3%。彭德其等^[23]研究发现,内置螺旋线管内 MnSO_4 溶液降膜蒸发传热系数是光滑管的1.65倍。综上所述,现有针对离子液体体系降膜蒸发的研究多集中于离子液体中水的脱除,含氨离子液体降膜解吸及强化过程还鲜有报道,缺乏系统性研究。

鉴于降膜蒸发在离子液体脱水过程展现出的优异性能,将其应用于离子液体中氨气解吸具有显著的可行性与应用潜力。本工作探究了含氨离子液体降膜解吸规律,系统考察了温度、压力、流量和富液氨含量对解吸后离子液体贫液氨含量的影响,通过有效解吸率、传质系数和解吸强度等参数评价了氨气解吸性能;此外,通过在降膜管中内置螺旋线,以探究其对含氨离子液体降膜解吸性能的强化效果。该工作旨在为离子液体降膜再生关键设备放大和内构件强化设计提供设计依据。

1 实验材料和方法

1.1 材料

氨气(NH_3),惠州市南方华研化工产品有限公司,纯度为99.9%。实验用水为去离子水,由纯水机(Direct Pure UP 10,上海乐枫生物科技有限公司)制备。 NH_4^+ 标准样品(GSB 04-2833-2011),国家有色金属及电子材料分析测试中心,1000 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。内置螺旋线(两端固定安装),316L不锈钢,迪瓦实验设备河北有限公司加工,具体结构和参数分别如图1和表1所示。

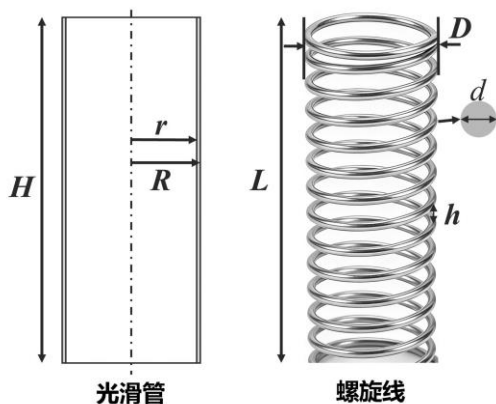


图1 光滑管和内置螺旋线示意图

Fig.1 Schematic diagram of smooth tube and inserted spiral

1.2 离子液体降膜解吸实验装置及流程

离子液体降膜解吸工艺流程图如图2所示,它由单管降膜蒸发器、物料运输系统、加热制冷系统及真空系统以及测量系统等部分组成。降膜蒸发器内的换热管为一根垂直的316L不锈钢管,换热管管内半径 $r=18\text{ mm}$,壁厚 1 mm ,长度 $H=1500\text{ mm}$ 。

表1 内置螺旋线参数

Table 1 Parameters of inserted spirals

名称	线径 d /mm	节距 h /mm	外径 D /mm	长度 L /m
螺旋线 1	1	12	36	1500
螺旋线 2	1	4	36	1500
螺旋线 3	2	4	36	1500

物料运输系统包含原料罐、进料泵、接收罐、出料泵和出料罐。加热制冷系统由两台恒温油浴、一台制冷循环器、一个预热器和一个冷却器组成,两个恒温油浴分别给预热器和降膜蒸发器加热。真空系统由一台螺杆真空泵和一个真空缓冲罐组成。离子液体富液进料流量由流量计测得,降膜解吸前后离子液体温度由安装在降膜蒸发器顶部和底部的温度传感器测定,降膜蒸发器内压力由安装在气液分离罐上的压力传感器检测。为减少热损失,降膜蒸发器、换热器、冷却器和管路等均采用高绝热性橡塑保温棉包裹。

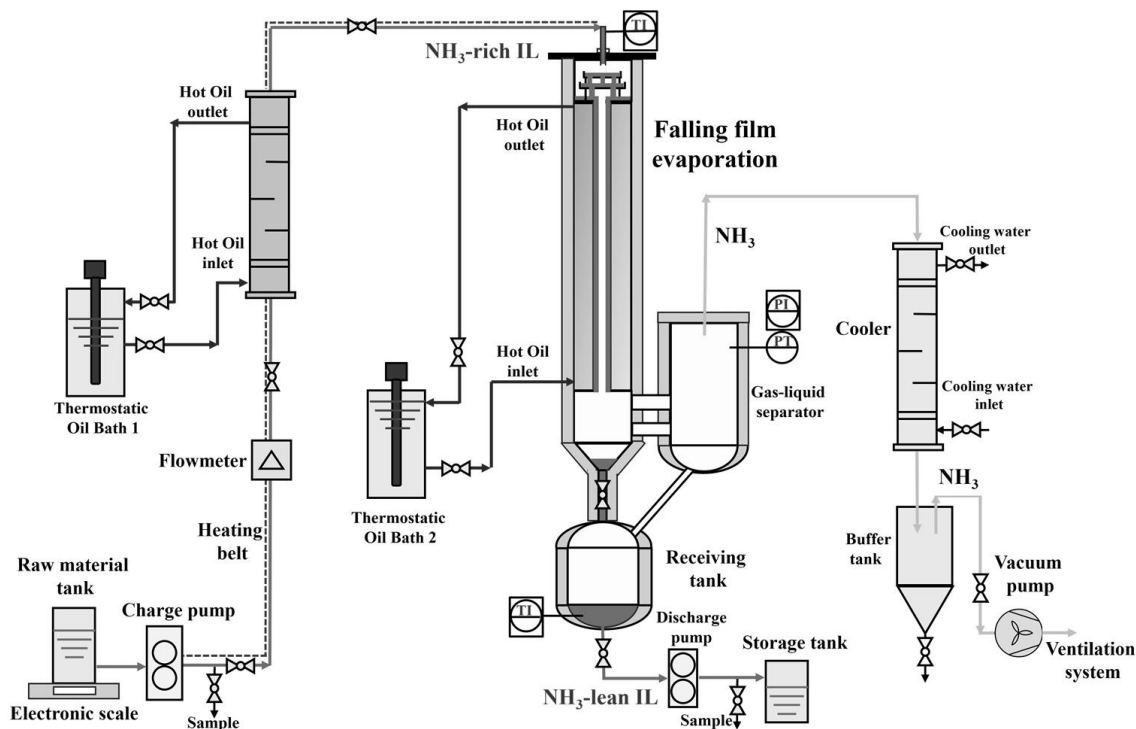


图2 离子液体降膜解吸工艺流程图

Fig.2 Process flow diagram of ionic liquid falling film desorption

具体的实验步骤如下所示:含氨离子液体富液被进料泵以设定流量泵入实验装置,经预热器加热至指定温度后进入降膜蒸发器。离子液体流经双层孔板布液器后均匀流入换热管,在管内壁形成液

膜向下流动。恒温油浴2的热导热油进入降膜蒸发器壳程,为换热管提供热量。降膜蒸发器内的压力通过真空泵降至实验压力。在高温和真空条件下,氨气从离子液体液膜中解吸。随后,氨气和解吸后

的离子液体在气液分离器中分离。氨气经冷却器冷却后进入缓冲罐,随后被真空泵抽出系统,排入实验室尾气处理系统。解吸后的离子液体贫液经接收罐后通过出料泵排出至出料罐。通过上述过程,实现了含氨离子液体富液中氨气的解吸和离子液体的再生。实验过程中,在出料泵出口的取样口处,每间隔 30 min 取离子液体贫液样品,并立即进行氨含量检测,当连续三个样品中氨含量差值小于 0.2 wt% 时,表明解吸达到稳定状态,结束该实验;每个工况,进行 3 次重复实验。

离子液体的密度和黏度分别采用密度仪 (Anton Paar, DMA 5000) 和落球式黏度计 (Anton Paar, Lovis 2000 ME) 测得;解吸前后离子液体中的氨含量通过离子色谱仪 (Thermo Fisher Scientific, ICS-6000) 进行检测,具体配置及检测方法为:CS17 阳离子分析柱,甲基磺酸淋洗液流量 1 mL/min,浓度为 2 mM,分析柱柱箱温度为 35 °C,检测时间为 20 min。将 NH_4^+ 标准样品用去离子水稀释至不同浓度 (10、20、40、60、80 $\mu\text{g/mL}$),经上述检测方法建立的标准曲线 $R^2 > 0.9999$ 。

1.3 数据处理

离子液体进料流量 (Γ) 的计算公式为:

$$\Gamma = \frac{M}{2\pi r} \quad (1)$$

式中, Γ 为单位周长换热管上的质量流量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; r 为换热管内径, m; M 为离子液体富液质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

氨气有效解吸率 η 的计算公式为:

$$\eta = \frac{(w_{\text{in}} - w^*) - (w_{\text{out}} - w^*)}{(w_{\text{in}} - w^*)} \times 100\% \quad (2)$$

式中, w_{in} 为离子液体富液氨含量, wt%; w_{out} 为离子液体贫液氨含量, wt%; w^* 为解吸实验条件下离子液体中的氨气饱和溶解度, wt%;

单位换热面积上氨气解吸强度 ψ 的计算公式为:

$$\psi = \frac{M(w_{\text{in}} - w_{\text{out}})}{A} \quad (3)$$

式中, A 为降膜蒸发器换热管的换热面积, m^2 。

离子液体中氨气降膜解吸过程的表现传质系数计算公式^[24]为:

$$G = Q(C_{\text{in}} - C_{\text{out}}) = \frac{M}{\rho} (C_{\text{in}} - C_{\text{out}}) \quad (4)$$

$$J = k_l \Delta C_m \quad (5)$$

$$G = JA = Ak_l \Delta C_m = Q(C_{\text{in}} - C_{\text{out}}) \quad (6)$$

$$\Delta C_m = \frac{(C_{\text{in}} - C^*) - (C_{\text{out}} - C^*)}{\ln\left(\frac{C_{\text{in}} - C^*}{C_{\text{out}} - C^*}\right)} \quad (7)$$

$$k_l = \frac{Q(C_{\text{in}} - C_{\text{out}})}{A \Delta C_m} = \frac{Q}{A} [\ln(C_{\text{in}} - C^*) - \ln(C_{\text{out}} - C^*)] \quad (8)$$

式中, G 为单位时间解吸氨气的摩尔量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$; C_{in} 为离子液体富液中氨的摩尔浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$; C_{out} 为离子液体贫液中氨的摩尔浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$; C^* 为解吸实验条件下离子液体的氨气饱和溶解度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$; Q 为离子液体富液的体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; ρ 为离子液体富液的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; J 为氨气解吸的摩尔通量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$; k_l 为表观传质系数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ΔC_m 为解吸传质推动力, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2 实验结果与讨论

2.1 离子液体物性和氨饱和溶解度

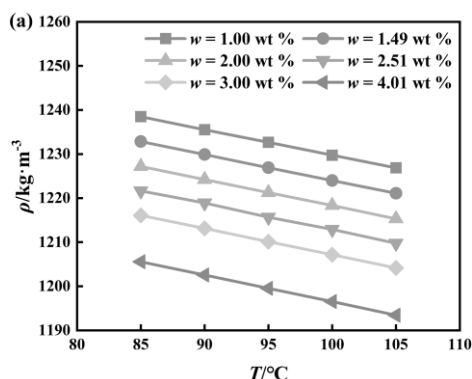
离子液体的基础物性以及氨在其中的相平衡特性,是决定降膜解吸过程中液膜流动行为、传质推动力与解吸性能的关键基础参数。

2.1.1 离子液体的密度和黏度 离子液体的密度和黏度会显著影响离子液体液膜流动行为(膜厚和流速)及传质性能^[25],是离子液体降膜解吸过程的重要参数。温度和氨含量对离子液体的密度和黏度有着显著的影响。由于离子液体是不可压缩流体,压力对物性的影响在此忽略。在 85–105 °C 下,不同氨含量 (1.00–4.01 wt%) 离子液体的密度和黏度分别如图 3 所示,其中, 90 °C 和 100 °C 的物性数据引用自前期工作^[24]。密度和黏度均随着温度和氨含量的升高而降低,密度与温度呈线性关系,而黏度的降幅随着温度的升高而降低。

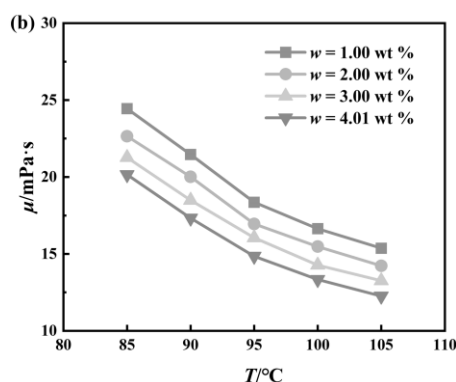
2.1.2 离子液体氨饱和溶解度 离子液体中氨气饱和溶解度 (w^*) 决定着降膜解吸过程的传质推动力,对降膜解吸性能有着重要的影响。温度和压力对离子液体的氨气饱和溶解度有着显著影响,本工作测量了在 10–40 kPa、85 °C 和 95 °C 时离子液体中氨气饱和溶解度, 90 °C、100 °C 和 105 °C 下离子液体的氨饱和溶解度引用自前期工作^[24]。结果如图 4 所示,随着温度的升高, w^* 随之下降。此外,降低压力即是降低了气相中氨气的分压,使得气液平衡状态下,离子液体中的氨气饱和溶解度降低。

2.2 氨气解吸性能

2.2.1 温度的影响 如图 5(a) 所示,在 $\Gamma = 0.108 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, $p = 10 \text{ kPa}$, $w_{\text{in}} = 3.05 \text{ wt\%}$ 的条件下,当温度从



(a) 不同温度和氨含量时离子液体的密度



(b) 不同温度和氨含量时离子液体的黏度

图3 不同温度和氨含量时含氨离子液体的物性
Fig.3 Properties of NH_3 -containing IL at different temperatures and NH_3 contents

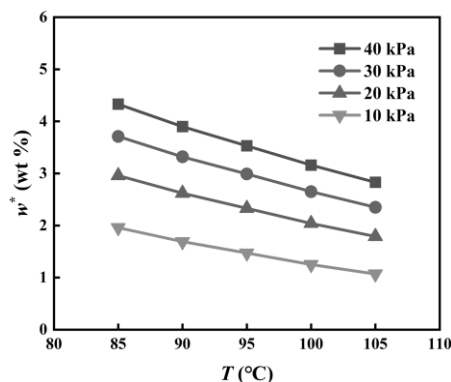
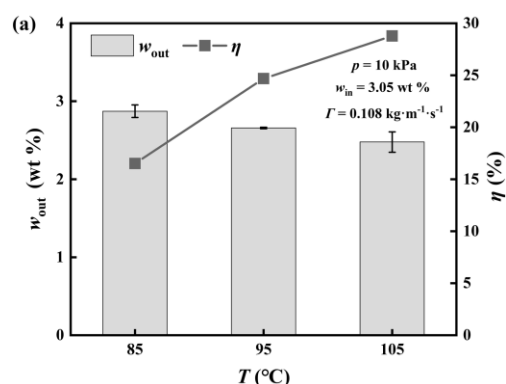


图4 不同温度和压力下离子液体的氨气饱和和溶解度

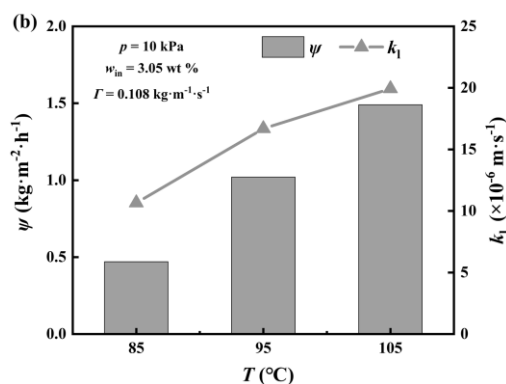
Fig.4 NH_3 saturation capacity of IL at different temperatures and pressures

85 °C 提高至 105 °C 时, w_{out} 从 2.87 wt% 降低至 2.48 wt%, η 从 16.51% 升高至 28.79%, 氨气解吸性能显著提升。 NH_3 在离子液体中扩散系数的预测公式 ($D_{\text{NH}_3} \propto \mu_{\text{IL}}^{-1.45}$) [26] 表明, 扩散系数随着离子液体黏度的降低而增加。如图 3(b) 所示, 当温度从 85 °C 升高到 105 °C 时, 离子液体 ($w=3.00$ wt%) 的黏度从 24.72

$\text{mPa}\cdot\text{s}$ 降低到 14.27 $\text{mPa}\cdot\text{s}$, 使氨气的扩散系数提高了 121.82%, 促进氨气的解吸。此外, w^* 随温度的升高而降低 (图 4), 使得富液氨含量与平衡液相氨浓度的差值增加, 根据公式 (7) 计算得到的解吸传质推动力从 $701.14 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ 升高至 $1180.04 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$, 也促进了氨气的解吸。因此, 温度升高有利于离子液体液膜中氨气的解吸, 由图 5(b) 所示, k_i 从 $10.66 \times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $19.93 \times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ψ 从 $0.47 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 增加到 $1.49 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 提高了 217.02%。



(a) 温度对贫液氨含量和有效解吸率的影响



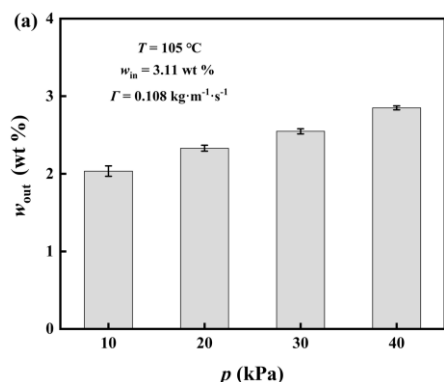
(b) 温度对解吸强度和传质系数的影响

图5 温度对解吸性能的影响

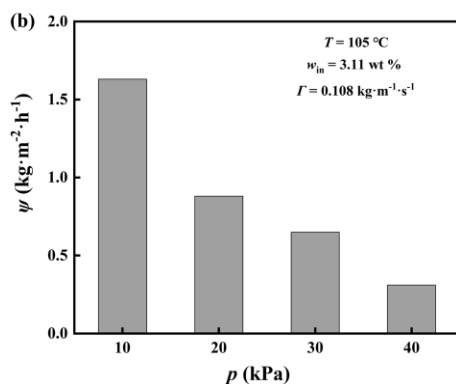
Fig.5 Effect of temperature on NH_3 desorption performance

2.2.2 压力的影响 实验探究了压力 (p) 对氨气解吸性能的影响, 实验条件为 $\Gamma=0.108 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, $T=105 \text{ }^\circ\text{C}$, $w_{\text{in}}=3.11 \text{ wt}\%$, $p=10, 20, 30, 40 \text{ kPa}$ 。结果表明, 较低的解吸压力更有利于氨气的解吸。如图 6 (a) 和 (b) 所示, 在 40 kPa 时, w_{out} 从 3.11 wt% 降至 2.99 wt%, 降低了 0.28 wt%, ψ 为 $0.31 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 而在 10 kPa 下, w_{out} 从 3.11 wt% 降至 2.48 wt%, 氨含量降低了 0.63 wt%, ψ 提高至 $1.63 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。这是由于压力的降低使得气相中氨气的分压降低, 降低了离子液体的氨气饱和溶解度, 增大了气相浓度与富液氨含

量所对应气相浓度之间的差值,解吸传质推动力增加,促进了氨气的解吸,使得贫液氨含量降低,解吸强度提升。



(a) 压力对贫液氨含量的影响



(b) 压力对解吸强度的影响

图6 压力对氨气解吸性能的影响

Fig.6 Effect of pressure on NH_3 desorption performance

2.2.3 流量的影响 物料流量是降膜蒸发器设计和运行过程中的重要参数^[27]。在 105 °C 和 10 kPa 下,探究了离子液体流量对解吸后贫液氨含量的影响。如图 7(a)所示,当流量从 0.030 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 0.108 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, w_{out} 从 2.04 wt% 升高到 2.48 wt%, η 从 51.74% 降低到 29.85%,氨气解吸性能显著下降。采用离子液体液膜平均膜厚[公式(9)]^[28]和平均流速计算公式[公式(10)]^[29]计算了不同流量下离子

液体液膜的膜厚和流速,如表 2 所示,流量的增加增大了离子液体液膜的厚度和流速,膜厚从 0.463 mm 增加到 0.639 mm,使得氨气从液膜中解吸时的扩散距离增加;液膜流速则从 0.095 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 0.224 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,导致离子液体在换热管中的停留时间从 15.76 s 降低至 6.71 s,从而使得 w_{out} 升高, η 下降。

$$\delta = 1.138(\nu/g)^{1/3} Re^{0.252} \quad (9)$$

$$u = 0.774^3 (\nu g)^{1/3} Re^{2/3} \quad (10)$$

$$Re = \frac{4\Gamma}{\mu} \quad (11)$$

其中, δ 为离子液体平均液膜厚度, mm; u 为离子液体液膜平均流速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; ν 为离子液体动力黏度, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$; g 为重力加速度, $9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; Re 为 Reynolds 数。

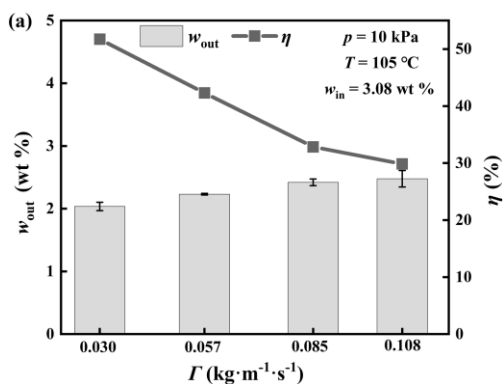
如图 7(b)所示,在实验流量范围内, k_i 和 ψ 却随着流量的增加而升高。流量为 0.030 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,贫富液氨含量差值为 1.04 wt%,而流量为 0.108 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,虽然贫富液氨含量差值降至 0.60 wt%,根据公式(3)算得单位面积换热管上氨气解吸量从 0.75 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 增加至 1.55 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,流量的增加使得处理总量增加,从而弥补了解吸率下降的影响,使得解吸强度提高。根据传质系数计算公式[公式(8)],氨气解吸量随流量增加而增加,使得传质系数也升高。

2.2.4 富液氨含量的影响 受尾气组成或吸收工况改变的影响,离子液体富液中氨含量会发生变化。为保障离子液体的循环吸收性能,需明确不同氨含量的降膜解吸特性,因此探究了富液氨含量 (w_{in}) 对氨气解吸性能的影响。通过制备不同 w_{in} (1.18 wt%–5.27 wt%) 的含氨离子液体富液,开展了两组降膜解吸实验,解吸条件分别为 $T=105\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=40\text{ kPa}$, $\Gamma=0.108\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $T=105\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=10\text{ kPa}$, $\Gamma=0.030\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。结果如图 8 所示,虽然 w_{out} 均随着 w_{in} 的增加而升高[图 8(a)(c)],但两组实验的 η 、 k_i 和 ψ 均随着 w_{in} 的增加而增加,证明了解吸性能随着 w_{in} 增加而增加。这是由 w_{in} 增大使得 NH_3 解吸过程中传

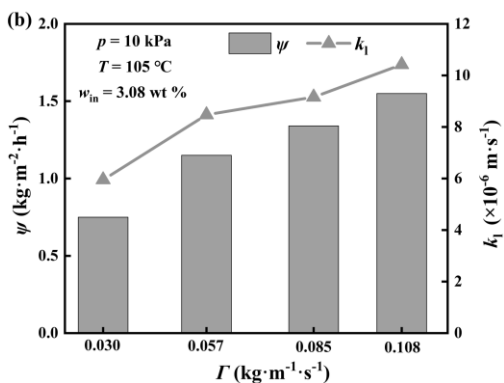
表 2 不同流量下的液膜厚度和流速

Table 2 Film thickness and flow velocity at different flow rates

离子液体流量 Γ / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	Re	液膜厚度 δ /mm	液膜流速 u / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	液膜停留时间 t /s
0.030	8.85	0.463	0.095	15.76
0.057	16.81	0.544	0.146	10.27
0.085	25.07	0.602	0.191	7.87
0.108	31.86	0.639	0.224	6.71



(a) 流量对贫液氨含量和有效解吸率的影响



(b) 流量对解吸强度和传质系数的影响

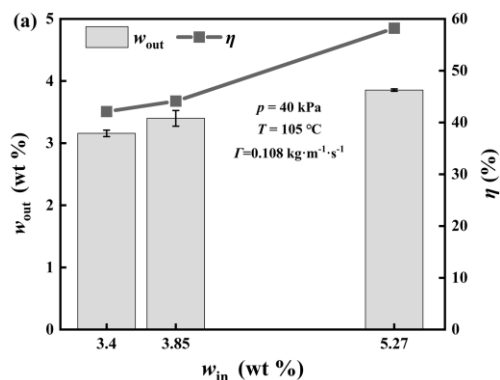
图7 流量对氨气解吸性能的影响

Fig.7 Effect of mass flow rate on NH₃ desorption performance

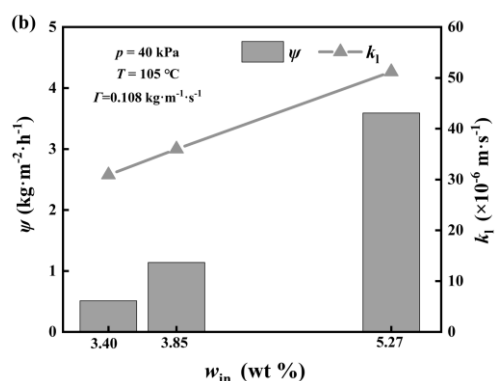
质推动力 ΔC_m [公式(7)] 提高, 在 $T=105\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=40\text{ kPa}$, $\Gamma=0.108\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, w_{in} 从 3.40 wt% 增加到 5.27 wt%, ΔC_m 提高了 271%, 促进了离子液体中 NH₃ 的解吸。

此外, 由于实验室高度限制, 在解吸条件为 $T=105\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=40\text{ kPa}$, $\Gamma=0.108\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的实验过程中, 对 w_{in} 为 5.27 wt% 的离子液体采用连续解吸方式, 进行了三次降膜解吸。通过该方法所获得的结果, 虽无法等同于不同长度降膜管上的直接解吸结果, 但可间接反映其影响。在多次解吸过程中, 解吸次数增加 1 次, 降膜管长度增加 1.5 m, 解吸 3 次对应的降膜管长度为 4.5 m。由图 8(a) 可知, 三次解吸后的贫液氨含量分别为 3.85 wt%, 3.40 wt% 和 3.16 wt%, 对应的 1.5 m, 3.0 m 和 4.5 m 降膜管上的解吸率分别为 58.20%, 76.64% 和 86.48%。可以看到, 随着降膜管长的增加, 出口氨浓度降低, 解吸率增加, 但增速放缓。根据初始氨含量的影响规律可以发现, 随着离子液体中氨含量的降低, 解吸效率降低。虽然管长的增加提高了液膜停留时间, 但无法完全弥补氨含

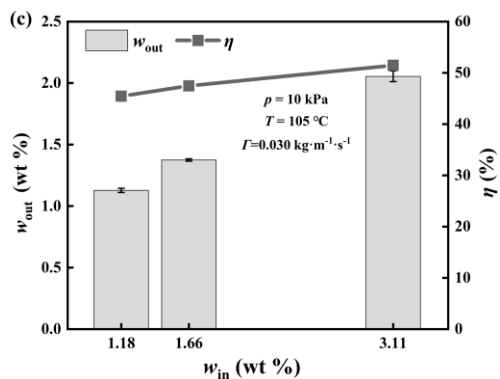
量下降的影响, 使得解吸强度从 $3.59\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 依次降低为 $2.37\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $1.78\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。



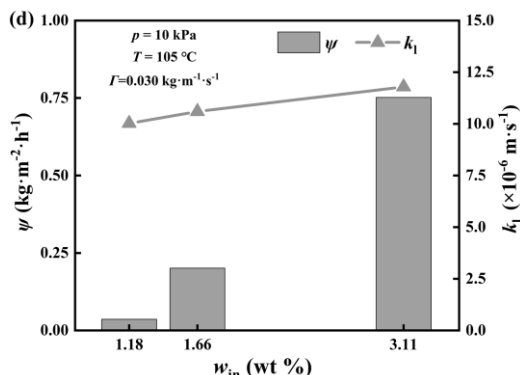
(a) 富液氨含量对贫液氨含量和有效解吸率的影响



(b) 富液氨含量对解吸强度和传质系数的影响



(c) 富液氨含量对贫液氨含量和有效解吸率的影响



(d) 富液氨含量对解吸强度和传质系数的影响

图8 富液氨含量对氨气解吸性能的影响

Fig.8 Effect of NH_3 content in NH_3 -rich IL on NH_3 desorption performance

(a)(b) $T=105\text{ }^\circ\text{C}$, $p=40\text{ kPa}$, $\Gamma=0.108\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$; (c)(d) $T=105\text{ }^\circ\text{C}$, $p=10\text{ kPa}$, $\Gamma=0.030\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$

2.3 内置螺旋线强化作用

2.3.1 螺旋线节距的影响 螺旋线通过扰动液膜流场,可增强降膜解吸过程的传热传质性能。通过在降膜换热管内安装不同节距的螺旋线(线径1 mm),探究了其对离子液体中氨气降膜解吸的强化效果。其中,螺旋管1内安装有节距为12 mm的螺旋线1,螺旋管2内安装有节距为4 mm的螺旋线2,实验条件为 $T=105\text{ }^\circ\text{C}$, $p=10\text{ kPa}$, $w_{\text{in}}=3.04\text{ wt}\%$, $\Gamma=0.030\text{--}0.108\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图9和表3表明,相比于两种规格的螺旋管,不同流量下光滑管中的 w_{out} 均最高, η 、 k_l 和 ψ 均最低,证明螺旋线可有效提高氨气解吸性能, ψ 最高可提升47.62%(螺旋线2, $\Gamma=0.085\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)。此外,不同流量下螺旋管2中的 w_{out} 均低于螺旋管1中的 w_{out} ,则证明了节距越小,螺旋线的强化解吸效果越显著。这是由于节距越小,螺旋线对液膜的扰动作用越强,导致液膜表面更新频率的提高^[30],促进了氨气解吸。但是,当 $\Gamma=0.108\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,螺旋线的强化作用大幅降低,螺旋管2中的 w_{out} (2.43 wt%)略低于光滑管中的 w_{out} (2.47 wt%), η 、 k_l 和 ψ 也基本一致(表3), ψ 仅提高2.04%。由于离子液体的黏度较高,使得其液膜流型转变临界 Reynolds 数低于常规水溶液1~2个数量级。由团队前期对离子液体液膜流动过程的研究结果^[28-29]可知,当 Re 为13.07时,在降膜换热管上离子液体液膜总体呈小幅二维波动流;当 Reynolds 数增加至30.55时,离子液体液膜呈三维波动流。因此在本工作中,当流量为 $0.030\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.057\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, Re 分别为8.85和16.81,离子液体液膜总体呈层流和小幅二维波动流,而当流量提高至 $0.085\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.108\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, Re 分别为25.07和31.86,离子液体液膜发展为三维波动流,液膜自身波动程度加剧。在层流和小幅波动流动时,螺旋线对液膜具有较强的扰动作用,而随着流量的增加,螺旋线对液膜的扰动作用减弱,使得螺旋线对氨气解吸的强化效果大大降低。

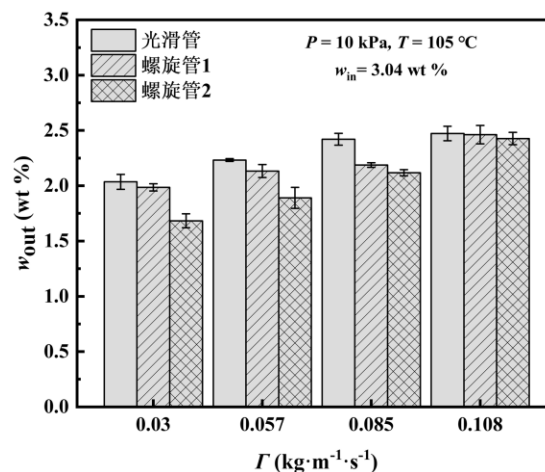


图9 不同流量下螺旋线节距对贫液氨含量的影响

Fig.9 Effect of spiral pitch on NH_3 content in NH_3 -lean IL at different mass flow rates

表3 不同流量下螺旋线节距对氨气有效解吸率、传质系数和解吸强度的影响

Table.3 Effect of spiral pitch on η , k_l and ψ at different mass flow rates

流量 $/\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	氨气解吸率 η $\text{\%}$			传质系数 k_l $/\times 10^{-6}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$			解吸强度 ψ $/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$		
	光滑管	螺旋管1	螺旋管2	光滑管	螺旋管1	螺旋管2	光滑管	螺旋管1	螺旋管2
0.030	50.76	53.30	69.04	11.56	12.43	19.18	0.72	0.75	0.98
0.057	41.12	46.19	58.38	16.32	19.11	27.06	1.10	1.23	1.56
0.085	31.47	43.15	46.70	17.39	26.01	29.00	1.26	1.72	1.86
0.108	28.93	29.44	30.61	20.05	20.48	21.76	1.47	1.50	1.58

2.3.2 螺旋线线径的影响 通过在降膜换热管内安装不同线径的螺旋线(节距4 mm),探究了其对氨

气解吸性能的强化效果。螺旋管2内安装有线径为1 mm的螺旋线2,螺旋管3内安装有线径为2 mm的

螺旋线3,实验条件为 $T=105\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=10\text{ kPa}$, $w_{\text{in}}=3.04\text{ wt\%}$, $\Gamma=0.030\text{--}0.108\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。结果由图10所示,在不同流量下仍然为螺旋管2中的 w_{out} 最低,光滑管中的 w_{out} 最高。但当 $\Gamma=0.108\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,三种管内的 w_{out} 较为接近,分别为 $2.47\text{ wt\%}$, $2.43\text{ wt\%}$ 和 $2.41\text{ wt\%}$ 。证明了在中低流量下,螺旋线可强化离子液体中的氨气解吸,而在大流量下,螺旋线的强化解吸效果大幅降低。螺旋线线径的增加并未导致解吸性能的持续提升,这与螺旋线导致的液膜堆积有关。螺旋线线径越大,液膜受空间挤压与阻尼作用增强波动强度不再上升^[31],同时,螺旋线与降膜管的夹缝之间堆积的离子液体体积增加,螺旋管3内螺旋线位置的液膜厚度大于螺旋管2内的膜厚,导致这部分离子液体中氨气解吸困难,从而使得解吸强化效果弱于螺旋管2。但是由于螺旋线对液膜流场的扰动,螺旋管3内的氨气解吸性能仍然优于

光滑管,当 $\Gamma=0.057\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, η 从光滑管的 41.12% 提高至 50.25% 。

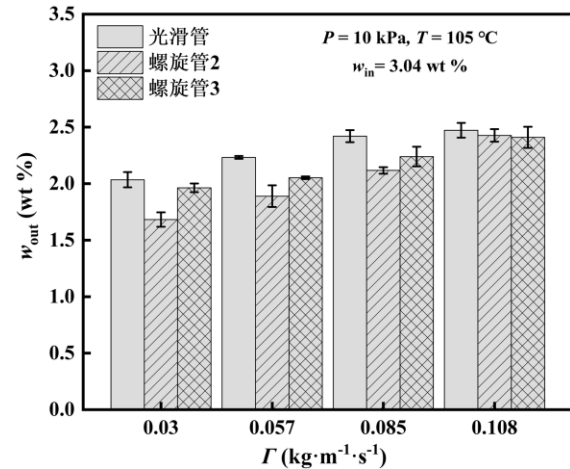


图10 不同流量下螺旋线线径对贫液氨含量的影响
Fig.10 Effect of spiral line diameter on NH_3 content in NH_3 -lean IL at different mass flow rates

表4 不同流量下螺旋线线径对氨气有效解吸率、传质系数和解吸强度的影响

Table.4 Effect of spiral line diameter on η , k_l and ψ at different mass flow rates

流量 $/\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	氨气解吸率 η $/\%$			传质系数 k_l $/\times 10^{-6}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$			解吸强度 ψ $/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$		
	光滑管	螺旋管2	螺旋管3	光滑管	螺旋管2	螺旋管3	光滑管	螺旋管2	螺旋管3
0.030	50.76	69.04	54.82	11.56	19.18	12.97	0.72	0.98	0.77
0.057	41.12	58.38	50.25	16.32	27.06	21.54	1.10	1.56	1.34
0.085	31.47	46.70	40.61	17.39	29.00	23.99	1.26	1.86	1.62
0.108	28.93	30.61	31.98	20.05	21.76	22.63	1.47	1.58	1.63

3 结论

本文针对降膜强化的离子液体中氨气解吸过程,系统研究了温度、压力、流量和富液氨含量对氨气解吸性能的影响,探究了内置螺旋线对氨气降膜解吸的强化作用。主要规律和结论如下:

(1)温度的升高降低了离子液体黏度,使得离子液体中氨气扩散系数提高 121.82% ,促进了氨气解吸;升高温度和降低压力,离子液体中氨饱和溶解度降低,增大了解吸过程富液氨浓度和平衡液相氨浓度的差值,解吸传质推动力增大,可显著提升氨气解吸性能。富液氨含量的增加,同样使得浓度差和解吸传质推动力增大,提高了解吸传质系数和解吸强度。

(2)流量的增加导致液膜厚度和流速增加,不利于氨气的解吸,使得贫液氨含量升高。然而,在 $0.030\text{--}0.108\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,氨气解吸总量随着流量

的增加而增加,弥补了解吸率降低的影响,使得表观传质系数和解吸强度升高。

(3)相比于光滑管,在中低流量下,不同实验规格的螺旋线均能强化离子液体中氨气的降膜解吸性能。螺旋线最优线径为 1 mm ,节距从 12 mm 降低至 4 mm ,强化解吸效果显著增强;在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 kPa 和 $0.085\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下,解吸强度提升高达 47.62% 。而当流量较高时(如 $0.108\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$),由于液膜自身波动加剧,螺旋线扰动作用减弱,使得强化效果不再显著。

本研究揭示了离子液体性质、工艺条件和降膜蒸发器内构件对离子液体中氨气降膜解吸性能的影响规律,为含氨离子液体解吸工艺优化和降膜蒸发器优化-放大设计提供了依据,助力离子液体法含氨尾气分离技术的工业应用。

符号说明

A ——换热管内表面积, m^2
 C ——离子液体中氨浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
 $C_{\text{in}}, C_{\text{out}}$ ——分别为离子液体富液和贫液中的氨浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
 C^* ——离子液体饱和溶解度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
 ΔC_{m} ——浓度差推动力, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
 D ——离子液体中氨气扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
 d ——螺旋线线径, m
 G ——单位时间氨气解吸量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$
 g ——重力加速度, $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
 H ——换热管长度, m
 h ——螺旋线节距, m
 J ——氨气解吸摩尔通量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
 k_i ——传质系数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 L ——螺旋线长度, m
 M ——离子液体质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
 p ——解吸压力, kPa
 Q ——离子液体体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 R ——换热管管外半径, m
 Re ——Reynolds数
 r ——换热管管内半径, m
 T ——解吸温度, $^{\circ}\text{C}$
 t ——液膜停留时间, s
 u ——离子液体液膜流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 W ——螺旋线外径, m
 w ——离子液体中氨含量, $\text{wt}\%$
 $w_{\text{in}}, w_{\text{out}}$ ——分别为离子液体富液和贫液中的氨含量, $\text{wt}\%$
 w^* ——离子液体饱和溶解度, $\text{wt}\%$
 Γ ——离子液体单位周长流量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
 δ ——离子液体液膜厚度, mm
 η ——氨气有效解吸率, $\%$
 μ ——离子液体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$
 ρ ——离子液体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 ψ ——氨气解吸强度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$
下角标
 in ——离子液体富液
 out ——离子液体贫液

参考文献

- [1] Zhang L, Dong H F, Zeng S J, et al. An overview of ammonia separation by ionic liquids[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, **60**(19): 6908–6924.
- [2] 罗凯, 郭超, 侯微, 等. 丙烯/丙烷分离的离子液体设计与工艺并行优化[J]. 化工学报, 2026, 1–11.
Luo K, Guo C, Hou W, et al. Design of ionic liquids and process parallel optimization for separation of propylene/propane[J]. CIESC Journal, 2026, 1–11.
- [3] Zhan G X, Cao F, Chen J J, et al. Comprehensive evaluation of an ionic liquid based deep purification process for NH_3 -containing industrial gas[J]. Journal of Environmental Sciences, 2024, **136**: 698–708.
- [4] Khoo Y S, Tjong T C, Chew J W, et al. Techniques for recovery and recycling of ionic liquids: a review[J]. Science of the Total Environment, 2024, **922**: 171238.
- [5] Sosa F H B, Carvalho P J, Coutinho J A P. Preconcentration of superbase ionic liquid from aqueous solution by membrane filtration[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022, **61**(39): 14626–14636.
- [6] Ramajayam J G, Samal P, Lakshmiathy M V, et al. Emerging roles of ionic liquids in biodiesel: a review on catalysis, process design, and recyclability[J]. Energy & Fuels, 2025, **39**(34): 15961–15990.
- [7] Zhou J J, Sui H, Jia Z D, et al. Recovery and purification of ionic liquids from solutions: a review[J]. RSC Advances, 2018, **8**(57): 32832–32864.
- [8] Battisti R, Machado R A F, Marangoni C. A background review on falling film distillation in wetted-wall columns: From fundamentals towards intensified technologies[J]. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification, 2020, **150**: 107873.
- [9] Dai Z S, Zhang Y H, Wang S, et al. Falling-film heat exchangers used in desalination systems: a review[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, **185**: 122407.
- [10] Tobar-Bolaños G, Casas-Forero N, Orellana-Palma P, et al. Blueberry juice: Bioactive compounds, health impact, and concentration technologies: a review[J]. Journal of Food Science, 2021, **86**(12): 5062–5077.
- [11] Yang Z Q, Chen Y, Zhao X, et al. Dynamics and heat-transfer characteristics of the liquid film flow in upward- and vertical-facing spray cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, **233**: 125995.
- [12] Mahboob A, Bashir A, Kamal M S, et al. Application of ionic liquids in CO_2 capture, sequestration, and conversion: a comprehensive review[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2026, **13**(1): 18.
- [13] Chugh D, Gluesenkamp K, Abdelaziz O, et al. Ionic liquid-based hybrid absorption cycle for water heating, dehumidification, and cooling[J]. Applied Energy, 2017, **202**: 746–754.
- [14] Seo K, Chen Z C, Edgar T F, et al. Modeling and optimization of ionic liquid-based carbon capture process using a thin-film unit [J]. Computers & Chemical Engineering, 2021, **155**: 107522.
- [15] Wellner N, Siebeneck K, Ramunno M, et al. Dewatering of ionic liquids in a falling film evaporator[J]. Chemie Ingenieur Technik, 2011, **83**(9): 1493–1501.
- [16] Wellner N, Siebeneck K, Scholl S. Continuous dehydration of ionic liquids in a falling film evaporator[J]. Separation and Purification Technology, 2015, **150**: 44–51.
- [17] Cao B W, Yin Y G, Zhang F, et al. Experimental study on heat and mass transfer characteristics between a novel ionic liquid and air under low-humidity conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, **198**: 123373.
- [18] Indrawan W, Lubis A, Alhamid M I. The impact of wettability on the performance of a two row wavy fin and tube liquid desiccant system for dehumidification and regeneration[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, **241**: 122387.

- [19] 黄阔. 降膜蒸发器传热传质强化及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
Huang K. Heat and mass transfer enhancement of falling film evaporator and its applications[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [20] Huang K, Deng X H, Chen M. Falling film evaporator for desorption of basic aluminum sulfate SO_2 -Rich solution and enhancement of heat and mass transfer[J]. Energy & Fuels, 2017, **31**(12): 13871–13882.
- [21] 邢玉雷, 齐春华, 韩旭, 等. 螺旋槽管降膜蒸发强化传热与结垢特性研究[J]. 化学工业与工程, 2013, **30**(4): 48–54.
Xing Y L, Qi C H, Han X, et al. Enhanced heat transfer and fouling performance of the spirally fluted tube in falling film evaporation[J]. Chemical Industry and Engineering, 2013, **30**(4): 48–54.
- [22] 彭德其, 陈兰伟, 罗海松, 等. 内插螺旋线强化糖浆立式降膜蒸发传热[J]. 过程工程学报, 2017, **17**(6): 1134–1139.
Peng D Q, Chen L W, Luo H S, et al. Heat transfer enhancement of syrup vertical falling-film evaporation by spiral inserts[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, **17**(6): 1134–1139.
- [23] 彭德其, 侯家鑫, 陈康, 等. 降膜蒸发管内插往复螺旋强化传热实验研究[J]. 化学工业与工程, 2020, **37**(4): 15–22.
Peng D Q, Hou J X, Chen K, et al. Experimental research on heat transfer enhancement of reciprocating spiral-inserts in falling film evaporator tubes[J]. Chemical Industry and Engineering, 2020, **37**(4): 15–22.
- [24] Wang J N, Wang J B, Li K K, et al. NH_3 mass transfer in ionic liquid film driven by falling film evaporation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2026, **261**: 128549.
- [25] He L, Xie H G, Zong Y, et al. Enhancing interfacial mass transfer for high-viscosity fluids: Hydrodynamic and mass transfer by twin-liquid film[J]. AIChE Journal, 2025, **71**(4): e18708.
- [26] Wang M, He L J, Infante Ferreira C A. Ammonia absorption in ionic liquids-based mixtures in plate heat exchangers studied by a semi-empirical heat and mass transfer framework[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, **134**: 1302–1317.
- [27] Zhang F F, Che S Y, Yin H, et al. Falling film flow pattern transition of ionic liquid aqueous solution on horizontal tube bundles[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2025, **166**: 111490.
- [28] Wang J N, Hu Z Y, Dong H F, et al. Experimental study on hydrodynamics of ionic liquids systems in falling film evaporator [J]. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification, 2022, **170**: 108701.
- [29] Hu Z Y, Wang J N, Dong H F, et al. Hydrodynamics numerical simulation of a vertical falling film evaporator for ionic liquid systems[J]. Chemical Engineering Science, 2021, **237**: 116563.
- [30] Lu H, Lu L, Gao X X. Mass transfer enhancement of falling film liquid desiccant dehumidification by micro-baffle plates[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, **169**: 120945.
- [31] Park Y, Chang S H. Swirl flow analysis in a helical wire inserted tube using CFD code[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, **240**(10): 3405–3412.