DOI: 10.19666/j.rlfd.202511013

燃煤电厂化学吸收碳捕集系统中胺基吸收剂净化回收装置性能研究

胡治平[1]，秦依婷[2]，付 耀[3]，高 军[1]，宋佳慧[3]，高云芳[1]，黄 艳[1]，
王勤辉[2]，王 涛[2]，方梦祥[2]
（1. 国能锦界能源有限责任公司，陕西 榆林 719319；
2. 浙江大学能源工程学院，浙江 杭州 310027；
3. 浙江大学青山湖能源研究基地，浙江 杭州 311300）

［摘 要］【目的】针对国能锦界能源有限责任公司 15 万吨/年燃煤烟气化学吸收碳捕集示范工程中胺液降解导致的热稳定盐（heat stable salt，HSS）积累、吸收性能衰退及胺损失问题，开发了 10 m³/h 胺基吸收剂净化回收装置并对其运行性能进行研究，同时引入二次回收工艺提升胺回收率。【方法】采用电导率法快速判断实际运行除盐节点，使用酸碱滴定法检测标准溶液及实际胺液的总 HSS 质量分数，并基于离子色谱法分析典型 HSS 组分的脱除情况。【结果】结果表明：一次净化后胺液中 HSS 质量分数从 2%降至 0.9%以下，去除率最高达 91.72%，其中甲酸盐与草酸盐去除率最高，分别达 95.29%与 96.48%；一次净化后胺回收率最高仅为 86.16%，二次回收后，胺回收率最高达 96.89%，经系统回补至吸收塔后胺质量分数稳定维持在 12.3%~13.0%；悬浮物过滤效果较好，平均去除率高达 75.9%。【结论】该装置在长期连续运行条件下具有高效稳定的脱盐性能与胺回收能力，使用的二次回收工艺显著提升了胺回收率，验证了其在工业 CCUS 系统中应用的可行性。研究为胺液再生与碳捕集工程长周期运行提供了关键技术支撑。

［关 键 词］碳捕集；化学吸收；吸收剂降解；热稳定盐；电渗析；胺回收

［引用本文格式］胡治平，秦依婷，付耀，等. 燃煤电厂化学吸收碳捕集系统中胺基吸收剂净化回收装置性能研究[J]. 热力发电，2026，55(8)：87. Hu Z P, Qin Y T, Fu Y, et al. Performance study on purification and recovery unit of amine-based absorbents in chemical absorption carbon capture systems of coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(8): 87.

Performance study on purification and recovery unit of amine-based absorbents in chemical absorption carbon capture systems of coal-fired power plants

Hu Zhiping[1], Qin Yiting[2], Fu Yao[3], Gao Jun[1], Song Jiahui[3], Gao Yunfang[1], Huang Yan[1], Wang Qinhui[2], Wang Tao[2], Fang Mengxiang[2]
(1. Guoneng Jinjie Energy Co., Ltd., Yulin 719319, China;
2. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
3. Qingshanhu Energy Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 311300, China)

Abstract: [Objective] To address the issues of heat stable salts (HSS) accumulation, absorption performance degradation, and amine loss caused by amine solvent degradation in the 150 000 tons/year coal-fired flue gas carbon capture demonstration project by chemical absorption at Guoneng Jinjie Energy Co., Ltd., a 10 m³/h amine-based absorbent purification and recovery unit was developed to study its operational performance. A secondary recovery

收 稿 日 期：2025-11-06 修 回 日 期：2025-11-21 接 受 日 期：2025-12-05 网络首发日期：2026-01-06
基 金 项 目：国家重点研发计划国际合作项目（2023YFE0199300）；浙江省尖兵计划项目（2025C01158）；中央高校基本科研业务费专项资金资助（226-2025-00076, 2022ZFJH004）
Supported by: National Key Research and Development Program (2023YFE0199300); Pioneer Research and Development Program of Zhejiang Province (2025C01158); Fundamental Research Funds for the Central Universities (226-2025-00076, 2022ZFJH004)
第一作者简介：胡治平（1982），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为化学吸收法二氧化碳捕集技术，16145013@chnenergy.com.cn。
通信作者简介：方梦祥（1965），男，博士，教授，主要研究方向为化学吸收法二氧化碳捕集技术，mxfang@zju.edu.cn。

process was introduced to enhance the amine recovery efficiency. In this study, 72-hour continuous operation of an industrial unit utilizing electrodialysis for amine absorbent purification and recovery was achieved, and the contents of HSS mass fraction, HSS removal efficiency, amine mass fraction, amine reclaiming efficiency, and mass concentration of suspended solids were tested to verify the operational performance of the unit. [Methods] Conductivity measurement was employed to rapidly assess the desalination endpoint during actual operation. Acid-base titration was utilized to determine the total HSS content in both standard solutions and the actual amine solution, while ion chromatography was employed to analyze the removal efficiency of specific HSS components. [Results] The HSS mass fraction was reduced from over 2% to below 0.9%, achieving a maximum removal efficiency of 91.72% after primary purification. Notably, the removal efficiencies for formate and oxalate reached 95.29% and 96.48%, respectively. After the primary purification process, amine recovery efficiency was only 86.16%. However, after the secondary recovery process, amine recovery efficiency reached as high as 96.89%. After being replenished to the absorption system, the mass fraction of amine remained stable between 12.3% and 13.0%. The filtration part demonstrated high efficiency in removing suspended solids, achieving an average removal efficiency of 75.9%. After filtration, the mass concentration of suspended solids was significantly reduced to 24.5~25.8 mg/L. [Conclusion] The control system monitors the threshold of the electric conductivity of the outlet amine solution, and uses it as a key node for controlling the desalination process. By gradually adjusting the appropriate desalination degree, it reduces the HSS mass fraction in stages. The unit demonstrates highly efficient and stable desalination performance and amine recovery capability during long-term continuous operation. The secondary recovery process markedly improved the amine recovery efficiency. These results verify the feasibility of this technology for industrial CCUS systems, providing critical technical support for amine solvent regeneration and the long-term operation of carbon capture engineering projects.

Key words: carbon capture; chemical absorption; absorbent degradation; heat stable salt; electrodialysis; amine recovery

随着工业进程加速与人口持续增长，全球二氧化碳排放量呈显著上升趋势，加剧了气候变化与温室效应[1-2]。国际能源署（international energy agency，IEA）2023 年报告显示，全球 CO_2 排放总量增至 374 亿吨，同比增长 1.1%，创历史新高[3]。为应对这一挑战，碳捕集、利用与封存技术（carbon capture, utilization and storage，CCUS）成为解决大气 CO_2 浓度升高的关键路径[4-5]。中国在该领域已实现多项示范工程突破，如国能泰州发电有限公司 50 万吨/年 CO_2 捕集及综合利用项目、国能锦界能源有限责任公司 15 万吨/年燃烧后 CO_2 捕集工程、华能甘肃正宁电厂 150 万吨/年全球最大煤电碳捕集示范工程等。

在众多碳捕集技术中，化学吸收法因烟气适应性广、捕集效率高及技术成熟等优势，成为当前工业应用最广泛的方法[6-7]。该方法以有机胺溶液为核心吸收剂，但随着系统长期运行，烟气中残余氧气引发自由基链式反应，导致胺分子断链生成甲酸、草酸等有机酸及氨类挥发物，进而与质子化胺结合生成甲酸盐、硫酸盐等热稳定盐（heat stable salt，HSS）[8-9]；再生塔内高温环境也会促使负载 CO_2 的胺液聚合生成恶唑烷酮等中性分子[10]。这些吸收剂降解产物的积累会造成吸收剂粘度和发泡倾向升高、吸收剂吸收性能降低、再生能耗增加等一系列问题，成为制约碳捕集装置运行的关键瓶颈[11-12]。

为解决胺液降解产物累积导致的吸收性能衰退问题，研究者们提出了多种净化技术，如吸附过滤、热回收[13]、离子交换[14]及电渗析[15-16]等。其中，热回收法可以同时去除 HSS 和中性降解产物，应用广泛，但能耗高且易引发二次热降解[17]；离子交换法适用于低浓度 HSS 降解产物去除，但废液量大且再生液用量高[18]；电渗析适用于高浓度降解产物胺液净化，去除效率高，但膜抗污能力差[19]。

本文基于国能锦界能源有限责任公司 15 万吨/年燃煤烟气化学吸收碳捕集示范工程，创新设计了一套 10 m^3/h（标况）的电渗析胺基吸收剂净化回收装置，用于对已降解胺液进行净化回收。通过连续 72 h 运行及多批次胺液净化实验，验证了其工程应用的可行性与稳定性，为燃煤电厂化学吸收碳捕集系统中胺回收工艺的实际应用提供了重要技术支撑。

1 实验方法

1.1 测试平台

待净化的胺液来源于国能锦界能源有限责任公司 15 万吨/年燃煤烟气化学吸收碳捕集示范工程中运行的已降解贫胺液，测试阶段初始总胺质量分数为 12.37%。针对已降解贫胺液的净化回收，设计的胺基吸收剂净化回收装置的基本工艺流程如图 1 所示，主要包括过滤单元、除盐单元及控制单元。

过滤单元主要用于预处理分离胺液中的悬浮物颗粒及烃类等物质，除盐单元主要用于脱除胺液中的热稳定盐等杂质，配药单元主要用于添加装置正常运行所需的药剂，控制单元主要通过 PLC 控制溶液净化流程及附属设备。装置对外设有胺液入口管路、胺液出口管路、外排废液管路等。

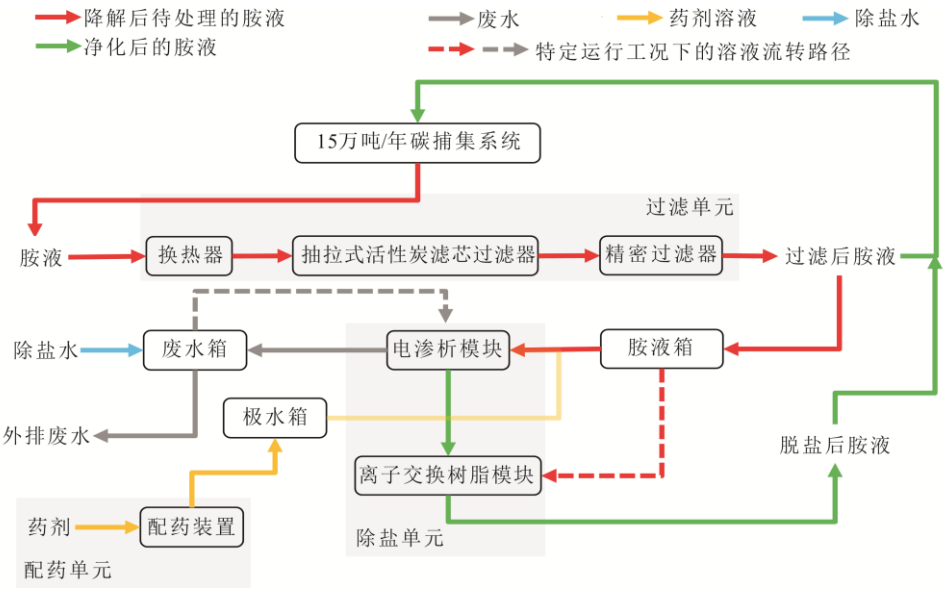


图 1　胺基吸收剂净化回收装置的基本工艺流程

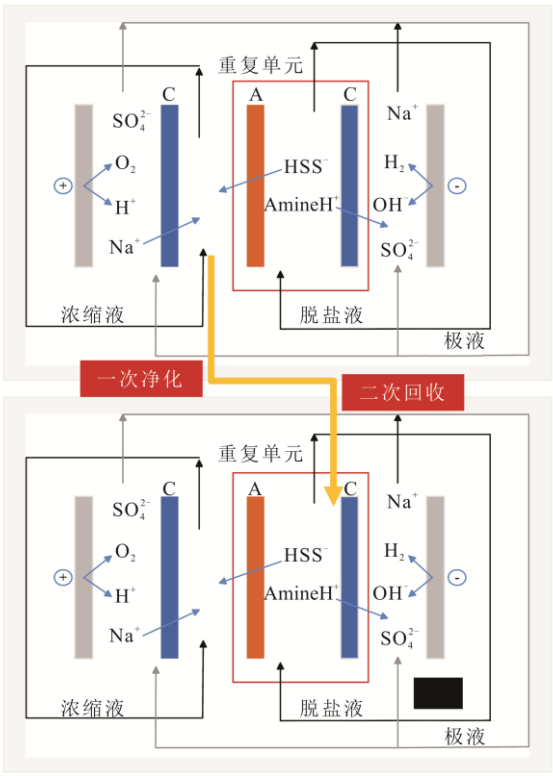
Fig.1 Basic process flow of the amine-based absorbent purification and recovery unit

待净化的胺液首先被送入列管式换热器降温，后经过活性炭滤芯过滤器和精密过滤器吸附去除其中的颗粒物、悬浮物、油类等物质，之后一部分过滤胺液进入胺液箱用于后续单元模块处理，另一部分则返回碳捕集系统。

胺液箱中的胺液经循环泵进入电渗析模块中进行循环净化，含 HSS 废水在废水箱富集累积；当净化后的胺液电导率达到预设值后，经过胺液泵将胺液打入离子交换模块进行深度处理，处理后胺液经装置的胺液出口管路返回至碳捕集系统。

当废水箱中的含 HSS 废水电导率达到预设值时，经过循环泵进入胺液箱，再次将这部分含 HSS 废水打入电渗析模块进行二次处理；按照和常规净化相同的流程处理后，胺液经装置的胺液出口管路返回至碳捕集系统，借此对净化过程中损失的部分胺组分进行回收，产生的含 HSS 废水则由废水箱经外排废液管路排出装置。

除盐单元通过电渗析模块进行胺液净化。电渗析是一种基于电场驱动与离子交换膜选择性渗透的膜分离技术[20]。该技术通过直流电场促使溶液中的带电离子定向迁移，并借助离子交换膜的选择性透过性，实现目标离子的高效分离与富集[21-22]。电渗析装置原理如图 2 所示。



注：C 为阳离子交换膜；A 为阴离子交换膜。

图 2　电渗析模块净化原理

Fig.2 Schematic diagram of the principle of purification by the electrodialysis module

该装置中的极水室装有 200 L 的 0.5%~1.0%硫

酸钠（极液），脱盐室装有 800 L 待净化胺液（脱盐液），浓缩室装有 600 L 纯净水（浓缩液）；核心组件为膜堆，主要由离子交换膜、电极板和隔板等部分构成，共同协作完成胺回收过程。测试期间电渗析膜堆为稳流状态，膜堆电流范围为 27~30 A，平均值为 29.6 A，电流密度为 100 A/m^2；膜堆电压范围为 60~100 V，平均值为 73.3 V。离子交换膜是膜堆的关键部件，其排布以及性能影响离子迁移速率、特定离子去除效率等关键性评价指标。离子交换膜的物性参数如表 1 所示。

表 1 离子交换膜的关键物性参数
Tab.1 Key physical property parameters of ion-exchange membranes

内容	阳离子交换膜（C 膜）	阴离子交换膜（A 膜）
种类	Na 型	Cl 型
电阻/(Ω·cm^{-2})	1.5~2.5	1.5~2.5
爆破强度/MPa	＞0.3	＞0.3
厚度/mm	0.15±0.03	0.15±0.03
耐受温度/℃	40	40

一次净化过程：来自碳捕集系统的待净化胺液经过滤单元预处理后进入除盐单元电渗析装置的脱盐室进行净化处理，当脱盐室电导率降低至设定值时控制单元会控制脱盐室内胺液重新回到吸收塔，而浓缩室中的废水则排入废水箱。

二次回收过程：将一次净化的脱盐室中的胺液送回吸收塔，再将浓缩室的含 HSS 废水通入脱盐室进行二次回收处理。

1.2 测试方法

针对胺基吸收剂净化回收装置运行过程中需要关注的几项关键性指标，包括处理后 HSS 质量分数、胺回收率、处理后悬浮物质量浓度等，本次测试采用 72 h 连续运行并开展取样分析。通过测试净化回收装置取样样品组分确定处理前、后的 HSS 质量分数、胺质量分数以及悬浮物质量浓度；通过延长运行时间确定净化回收装置所能达到的最高 HSS 去除率；通过测试净化回收装置外排废水样品组分确定胺回收率。

本次测试共进行 5 轮净化回收处理，每轮处理包括 3 组一次净化和 1 组二次回收，其中第 3 轮的一次净化只进行了 2 组，第 5 轮的一次净化只进行了 1 组。净化回收装置配置的在线电导率仪会测量处理后的胺液电导率，当电导率达到设定值时视作除盐过程完成。为验证净化回收装置能达到的最高 HSS 去除率，将第 8 组运行时间延长。总的实验测试情况如表 2 所示。

表 2 实验测试时间表
Tab.2 Schedule of the experimental test

轮数	回收阶段	运行时间/h	一次净化组数
1	一次净化	2.5	1
		4	2
		4	3
	二次回收	~2.5	/
2	一次净化	4	—
		3.5	—
		2.5	4
	二次回收	2.5	/
3	一次净化	~4.5	5
		~3	6
	二次回收	~2.5	/
4	一次净化	4	—
		~4	—
		3	7
	二次回收	~2.5	/
8	一次净化	~10	8
	二次回收	~1	/

注：“—”表示该阶段未取样，“/”表示二次回收阶段不区分组数。

1.2.1 HSS 质量分数测试

HSS 质量分数测试主要包括 3 部分内容：采用电导率法测量标准溶液，建立电导率与 HSS 质量分数间的关联性，作为实际运行除盐过程结束节点的判断依据；采用酸碱滴定法测定标准溶液及实际样品胺液的总 HSS 质量分数，通过计算消耗的标准酸量准确测定样品中 HSS 的总质量分数，并评估整体脱除效率；采用离子色谱法分析典型 HSS 组分的脱除情况，精确比较一次净化前后不同 HSS 组分的去除效果，并从离子特性、浓度等角度分析差异原因。

为建立溶液电导率与 HSS 质量分数之间的定量关系，首先根据现场胺液中 HSS 的组成特征选取实际含量较高的阴离子和阳离子作为代表，将其加入与系统胺液相同配方的模化物中，制备盐质量分数分别为 0、0.1%、0.5%、0.9%、1.3%、1.7%的标准溶液，溶液包括不同单一及混合阴离子对应的钠盐，以及不同金属阳离子对应的硫酸盐。

采用校准后的电导率仪依次测量不同浓度的标准含盐胺溶液的电导率，并将测量结果拟合为标准曲线。最后，基于标准曲线，通过实测现场胺液样品的电导率即可得出对应的 HSS 质量分数。

在使用酸碱滴定法[23]的过程中：先取再生阳离子树脂柱放入层析柱，加入适量 3~5 mol/L 的浓硫酸对树脂进行再生并用去离子水将再生阳离子树脂

冲洗至 pH 值呈中性；再加入 1.0 mL 待测胺液，并分 2 次加入 100 mL 去离子水，收集层析柱下端流出的溶液于锥形瓶中；再向锥形瓶中滴入 2~3 滴酚酞指示剂，用 0.1 mol/L 的 NaOH 滴定至粉红色，记录 NaOH 溶液的用量。HSS 质量分数 W_{HSS} 的计算如式(1)所示，HSS 去除率η的计算如式(2)所示。

$$W_{HSS}=\frac{C_{d1}V_{d1}M_{HSS}}{m_{d1}}\times 100\% \tag{1}$$

式中：C_{d1} 为滴定的 NaOH 溶液浓度，mol/L；V_{d1} 为滴定的 NaOH 溶液的体积，mL；M_{HSS} 为等效 HSS 的平均摩尔质量，为 70 g/mol；m_{d1} 为待测胺液的质量，mg。

$$\eta=\frac{W_{HSS1}-W_{HSS2}}{W_{HSS1}}\times 100\% \tag{2}$$

式中：W_{HSS1}、W_{HSS2} 分别为净化前、后 HSS 的质量分数，%。

为探究胺液中典型 HSS 组分的净化效果，本研究基于阴离子色谱仪器随机选取 4 组胺液进行深度分析。其中，阴离子色谱仪器分离柱为 AS18-250/2.0 mm，用氢氧化钾溶液梯度洗脱，流速为 0.5 mL/min[24]。依据文献中常见的降解盐成分，重点检测了乙醇酸盐[25]、乙酸盐[21]、甲酸盐[26]、氯盐[27]、硫酸盐[28]及草酸盐[22]等 6 种 HSS 组分。

1.2.2 胺质量分数测试

利用酸碱中和原理测量总胺质量分数。以溴甲酚绿−甲基红为指示剂（3 份 0.1%溴甲酚绿乙醇液与 1 份 0.2%甲基红乙醇液混合），用标准 0.1 mol/L 硫酸溶液直接滴定至红色，以酸的消耗量计算总胺质量分数。溶液胺质量分数δ的计算如式(3)所示，一次净化后胺回收率α_{p1}的计算如式(4)所示。

$$\delta=\frac{C_{d2}V_{d2}M_{Amine}}{m_{d2}}\times 100\% \tag{3}$$

式中：C_{d2} 为标准硫酸溶液的摩尔浓度，mol/L；V_{d2} 为滴定所消耗标准硫酸溶液的体积，mL；M_{Amine} 为吸收剂中胺的摩尔质量，以 84.06 g/mol 计；m_{d2} 为吸收剂的样品质量，mg。

$$\alpha_{p1}=\frac{\delta_1-\delta_2}{\delta_1}\times 100\% \tag{4}$$

式中：δ_1、δ_2 分别为净化前、后胺的质量分数，%。

通过测量废液中的胺质量分数和装置外排废液量，计算外排有机胺量以及在此期间经过装置处理的累计有机胺总量，得到二次回收后的胺回收率α_{p2}，如式(5)所示。

$$\alpha_{p2}=1-\frac{\delta_{waste}Q_{single}}{\delta_3 Q_{total}}\times 100\% \tag{5}$$

式中：δ_{waste} 为废液中的胺质量分数，%；Q_{single} 为单次废液排放量，kg；δ_3 为装置进口中的有机胺质量分数，%；Q_{total} 为装置进液总量，kg。

1.2.3 悬浮物质量浓度测试

采用重量法测量悬浮物的质量浓度。具体过程如下：先将孔径为 0.45 μm、直径为 45~60 mm 的滤膜放在称量瓶中，于 103~105 ℃烘箱中烘 3 h，取出置于干燥器内冷却至室温；在精度为 0.1 mg 电子天平上进行称量；反复烘干、冷却、称量，直至 2 次称量相差不超过 0.2 mg；取 100 mL 混合均匀的胺液，借助抽滤仪器并使用上述恒重的滤膜进行过滤，直至胺液全部抽滤完全；将截留悬浮物的滤膜放入原称量瓶中，继续上述烘干、冷却、称量步骤，直至 2 次称量相差不超过 0.2 mg。悬浮物质量浓度 c_s（mg/L）的计算公式如下：

$$c_s=\frac{m_1-m_2}{V_{d3}}\times 10^6 \tag{6}$$

式中：m_1 为过滤后滤膜及称量瓶的总质量，g；m_2 为过滤前滤膜及称量瓶的总质量，g；V_{d3} 为胺液体积，mL。

2 结果与讨论

2.1 HSS 去除节点判断

图 3 展示了不同浓度标准含盐胺液的电导率拟合标准曲线，拟合方程如式(7)—式(12)所示。根据国能锦界能源有限责任公司目前系统运行的胺液含盐质量分数（>2%）和电渗析技术的工作特点，初步确定除盐目标低于 0.9%。由图 3 拟合标准曲线可知，当电导率下降至 4 mS/cm 时，胺液中的 HSS 质量分数在 0.9%以下。基于上述电导率与 HSS 质量分数的关系，确定后续装置运行时脱盐室的电导率设定值为 4 mS/cm。当 HSS 的质量分数较高（1.7%草酸钠）时，盐无法完全溶解于胺液，形成非均相悬浮或沉淀，导致电导率测量值偏离理想趋势，无法准确反映该质量分数下的真实电导率。

$$\sigma_s=3.24S_h+0.59 \tag{7}$$

$$\sigma_f=3.68S_h+0.37 \tag{8}$$

$$\sigma_o=3.58S_h+0.39 \tag{9}$$

$$\sigma_h=3.38S_h+0.52 \tag{10}$$

$$\sigma_m=2.93S_h+0.38 \tag{11}$$

$$\sigma_i=2.65S_h+0.36 \tag{12}$$

式中：σ_s 为硫酸钠溶液的电导率，mS/cm；σ_f 为甲酸钠溶液的电导率，mS/cm；σ_o 为草酸钠溶液的电导率，mS/cm；σ_h 为甲酸钠和硫酸钠混合溶液的电导率，mS/cm；σ_m 为硫酸镁溶液的电导率，mS/cm；σ_i 为硫酸铁溶液的电导率，mS/cm；S_h 为各溶液的含盐质量分数，%。

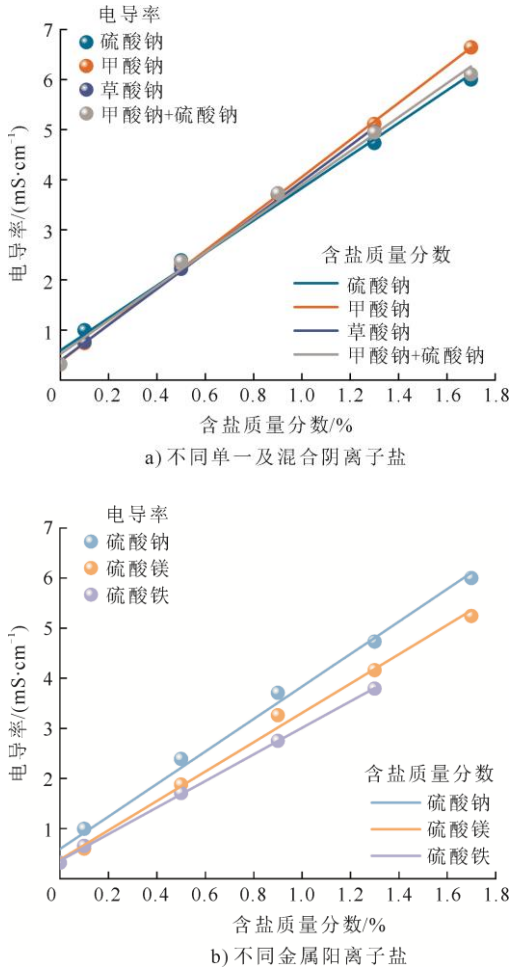


图 3 电导率法测试结果
Fig.3 Results of the conductivity method

在实际胺液净化过程中，将控制单元的电导率阈值设定为约 4 mS/cm 可实现对胺液中 HSS 质量分数的初步监测。但长时间运行的胺液成分复杂，导致监测的电导率波动较大，无法精准测定 HSS 质量分数。由此可知，电导率法适用于实际胺液净化过程中低 HSS 质量分数的快速除盐节点判断，对于具体 HSS 质量分数还需其他方法进行检测。

2.2 总 HSS 质量分数变化

采用酸碱滴定法测试不同浓度标准含盐胺液，并对比理论阴离子质量分数与滴定得到的阴离子质量分数，如表 3 所示。由表 3 可知：空白组（0%）的滴定阴离子质量分数仅为 0.075%，表明胺液中其他离子和指示剂对滴定结果的干扰较小；其他滴定结果与理论值的绝对偏差平均值约为 0.09%，表明二者吻合程度较好，酸碱滴定法具有较高的准确度和可靠性，可应用于后续实际胺液净化中总 HSS 质量分数的检测。

表 3 酸碱滴定法结果对比
Tab.3 Comparison of acid-base titration results

标准物质及质量分数	理论阴离子质量分数/%	滴定阴离子质量分数/%	绝对误差
0	0	0.075	0.075
0.1%Na_2SO_4	0.068	0.14	0.072
0.5%Na_2SO_4	0.338	0.495	0.157
0.9%Na_2SO_4	0.608	0.71	0.102
1.3%Na_2SO_4	0.879	1.05	0.171
1.7%Na_2SO_4	1.149	1.37	0.221
0.1%$Na_2C_2O_4$	0.066	0.14	0.074
0.5%$Na_2C_2O_4$	0.328	0.42	0.092
0.9%$Na_2C_2O_4$	0.591	0.62	0.029
1.3%$Na_2C_2O_4$	0.854	1.00	0.146
1.7%$Na_2C_2O_4$	1.116	1.19	0.074
0.1%HCOONa	0.066	0.15	0.084
0.5%HCOONa	0.33	0.43	0.1
0.9%HCOONa	0.596	0.75	0.154
1.3%HCOONa	0.860	0.97	0.11
1.7%HCOONa	1.125	1.28	0.155
0.1%$MgSO_4$	0.08	0.158	0.078
0.5%$MgSO_4$	0.4	0.485	0.085
0.9%$MgSO_4$	0.72	0.734	0.014
1.3%$MgSO_4$	1.04	1.046	0.006
1.7%$MgSO_4$	1.36	1.334	–0.026
0.1%$Fe_2(SO_4)_3$	0.072	0.091	0.019
0.5%$Fe_2(SO_4)_3$	0.36	0.288	–0.072
0.9%$Fe_2(SO_4)_3$	0.648	0.528	–0.12
1.3%$Fe_2(SO_4)_3$	0.936	0.739	–0.197
0.25%Na_2SO_4+0.25%HCOONa	0.334	0.372	0.038
0.45%Na_2SO_4+0.45%HCOONa	0.602	0.618	0.016
0.65%Na_2SO_4+0.65%HCOONa	0.870	0.865	–0.005
0.85%Na_2SO_4+0.85%HCOONa	1.137	1.000	–0.137

图 4 展示了一次净化前、后 HSS 的质量分数和去除率变化。由图 4 可见：一次净化前 HSS 的质量分数始终高于 2%，一次净化后则显著降低，始终维持在 0.9%以内，最低可降至 0.18%；随着运行时间的延长（第 8 组），HSS 去除率最高可达到 91.72%，表明该装置在长周期运行中能维持稳定的高效脱盐性能，并具备深度除盐的能力。

2.3 典型 HSS 组分质量浓度变化

一次净化前、后典型 HSS 组分质量浓度分布与

去除率结果如图 5、图 6 所示。

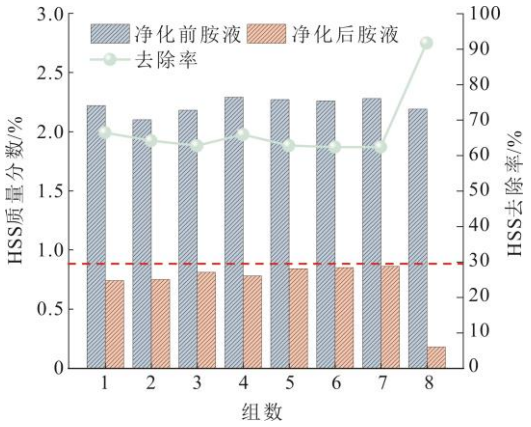


图 4 一次净化前、后 HSS 的质量分数和去除率
Fig.4 Mass fraction and removal efficiency of HSS before and after primary purification

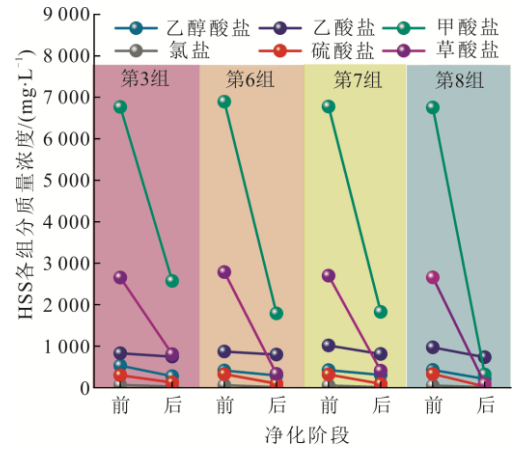


图 5 一次净化前、后典型 HSS 各组分质量浓度
Fig.5 Mass concentration of each typical HSS component before and after primary purification

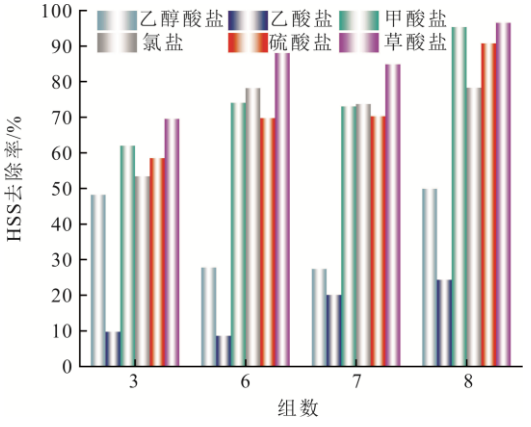


图 6 一次净化前、后典型 HSS 各组分去除率
Fig.6 Removal efficiency of each typical HSS component before and after primary purification

由图 5 可知，净化前甲酸盐和草酸盐是胺液中主要的 HSS 组分，其中甲酸盐质量浓度最高，达 6 897.74 mg/L，约占全部 HSS 质量分数的 60%；氯盐质量浓度最低，仅为 53.11 mg/L。净化后 HSS 各组分质量浓度均显著下降，其中甲酸盐和草酸盐降幅较大。从图 6 可进一步看出：甲酸盐和草酸盐的去除率均高于 60%，最高分别达到 95.29%、96.48%；乙醇酸盐和乙酸盐的去除率较低，其中乙醇酸盐的去除率低于 50%，乙酸盐的去除率低于 30%。

甲酸根离子（pK_a=3.75）的分子量较小（46.03 g/mol）且初始质量浓度最高（~7 000 mg/L），去除效率较快；草酸根离子初始质量浓度（~3 000 mg/L）低于甲酸根离子，但高电荷密度的二价离子所受到的电场驱动力远强于一价离子，因此去除率最高；乙酸根离子（pK_a =4.74）、乙醇酸根离子（pK_a=3.83）的初始质量浓度较低（~1 000 mg/L），酸解离常数较大，导致去除率较低。

2.4 胺质量分数变化

经电渗析装置一次净化后，胺以氨基甲酸盐的形式和 HSS 阴离子一同被迁往浓缩室，造成胺损失。为降低一次净化的胺液损失，本研究引入二次回收工艺。选取每一轮一次净化后的最高胺回收率与二次回收后的胺回收率进行对比，如图 7 所示。由图 7 可知，二次回收后的胺回收率均显著高于一次净化后。前 4 轮二次回收前的胺回收率为 82.95%~86.16%，第 5 轮由于净化时间较长，此阶段的胺回收率较低，仅为 65.51%，表明一次净化后胺有一定程度的损失，且随着运行时间的延长，胺损失逐渐明显。二次回收后胺回收率大幅提升至 96%左右，第 5 轮经二次回收后胺回收率由 65.51% 提升至 85.91%，胺损失显著降低，表明二次回收可大幅提高胺液的胺回收率，有效减少胺损失。

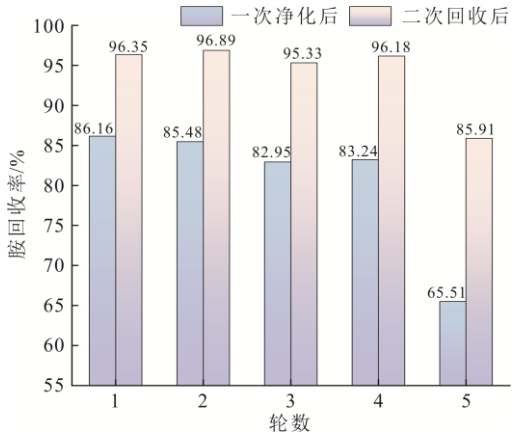


图 7 一次净化与二次回收后的胺回收率对比
Fig.7 Amine recovery efficiency after the primary purification and secondary recovery

由图 4 和图 7 可知，一次净化的 HSS 去除率与胺回收率呈负相关性。随着运行时间的延长，HSS 去除率会显著提升，但胺液中的胺也会被迁移，即胺回收率降低，应考虑适当调整除盐幅度，分阶段逐步降低 HSS 质量分数。

图 8 为同一运行期间吸收塔内胺质量分数的波动情况。由图 8 可知，吸收塔内胺质量分数始终处于 12.3%~13.0%，整体变化幅度较小，表明一次净化后胺质量分数有所降低，经二次回收后胺回收率提升，使胺液回补至吸收塔后，并未对塔内胺液主体质量分数造成显著影响，系统仍保持稳定运行。

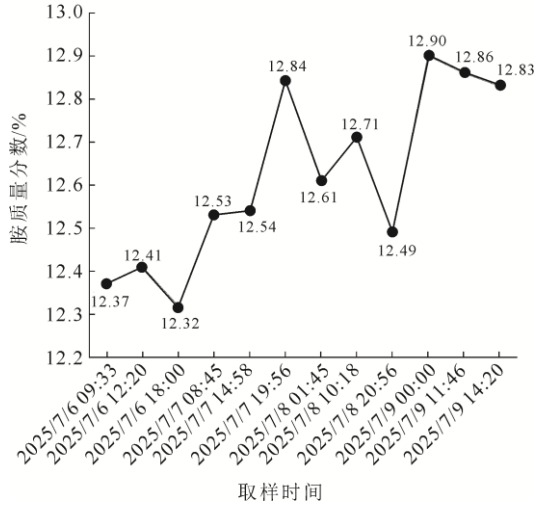


图 8 吸收塔内胺质量分数变化

Fig.8 Mass fraction variation of amine in the absorption tower

2.5 悬浮物质量浓度变化

在 72 h 连续运行过程中，随机选取 3 组过滤前、后的胺液进行悬浮物质量浓度测试，结果如表 4 所示。由表 4 可知，过滤前胺液悬浮物质量浓度为 101.0~107.3 mg/L，过滤后显著降低至 24.5~25.8 mg/L，平均去除率高达 75.9%，表明净化回收装置的过滤单元具有较高的处理效率，可保障后续除盐单元能够持续高效地脱除胺液中的 HSS。

表 4 悬浮物质量浓度测试结果 单位：mg/L

Tab.4 Detected mass concentrations of the suspended solids

取样时间	悬浮物质量浓度 1	悬浮物质量浓度 2	悬浮物质量浓度 3	平均值
20250706 18: 00	95.7	108.2	99.2	101.0
20250706 22: 00	21.3	27.6	24.8	24.6
20250707 14: 58	97.6	110.8	100.2	102.9
20250707 19: 46	20.1	30.3	26.9	25.8
20250708 10: 18	109.3	100.5	112.1	107.3
20250708 13: 20	19.8	26.2	27.5	24.5

3 结 论

研究实现了电渗析胺基吸收剂净化回收工业装置 72 h 连续运行，并对 HSS 质量分数、胺质量分数和悬浮物质量浓度开展测试，主要结论如下：

1）针对不同环境提出对应的 HSS 质量分数测试方法：实际胺液净化运行过程中采用电导率法快速预测 HSS 质量分数变化，取样后采用酸碱滴定法相对准确定量分析 HSS 总质量分数，并基于阴离子色谱仪器对典型 HSS 组分进行脱除情况分析。

2）胺基吸收剂电渗析净化回收装置净化效果显著：一次净化后 HSS 去除率最高可达 91.72%，其中甲酸盐和草酸盐的去除率最高，分别达到 95.29%、96.48%；经二次回收后胺损失显著降低，胺回收率提高至 96%左右；悬浮物过滤效果较好，平均去除率高达 75.9%。表明该装置可为胺液净化工艺的长期稳定运行提供有力保障。

3）一次净化后胺回收率最高仅为 86.16%，二次回收后胺回收率最高达 96.89%，系统回补可使吸收塔内胺质量分数稳定维持在 12.3%~13.0%，未对主系统运行造成显著影响，展现了其在实现胺液深度回收和支持系统长周期运行方面的应用潜力。

4）一次净化的 HSS 去除率与胺回收率呈负相关性。随着运行时间的延长，HSS 去除率会逐步提升，同时胺液中的胺也会被迁移，即胺回收率降低。为保障胺基吸收剂净化回收装置长周期稳定运行，应控制系统出口胺液的电导率实时监测阈值，将其作为除盐流程控制的关键节点，通过逐步调整合适的除盐幅度，分阶段逐步降低 HSS 质量分数，以维持较高的 HSS 去除率和胺回收率。

［参 考 文 献］

［1］ Dubey A, Arora A. Advancements in carbon capture technologies: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 373: 133932.

［2］ Huang X, An S, Wang R, et al. Anti-degradation biphasic absorbent for efficient and stable CO_2 capture[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 59(24): 12108.

［3］ International Energy Agency. CO_2 emissions in 2023: a new record high, but is there light at the end of the tunnel?[R/OL]. Paris: IEA, 2024. https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023.

［4］ Chen Z, Wang T, Li C, et al. Phase separation behavior and CO_2 absorption kinetic analysis of DETA/DEA/DMAC biphasic absorbent[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 496: 154002.

［5］ Gao Y, Ning C, Liu L, et al. Research progress of CO_2 absorbent in postcombustion capture process[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2025, 20(2): e3172.

［6］ Chai S Y W, Ngu L H, How B S. Review of carbon capture absorbents for CO_2 utilization[J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2022, 12(3): 394.

［7］ Chowdhury F A, Goto K, Yamada H, et al. A screening study of alcohol solvents for alkanolamine-based CO_2 capture[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2020, 99: 103081.

［8］ Hasan S, Abbas A J, Nasr G G. Improving the carbon capture efficiency for gas power plants through amine-based absorbents[J]. Sustainability, 2020, 13(1): 72.

［9］ Azarpour A, Zendehboudi S. Hybrid smart strategies to predict amine thermal degradation in industrial CO_2 capture processes[J]. ACS Omega, 2023, 8(30): 26850.

［10］Jorgensen T B, Liu K, Thompson J G. Examining the reactions of ethanolamine's thermal degradation compounds in carbon capture through ^{1}H NMR and ^{13}C NMR[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024, 63(25): 10863.

［11］Ouyang Y, Liu Q, Luo T, et al. Experimental and computational study of the thermal degradation of primary amines used in CO_2 capture[J]. Chemical Engineering Science, 2024, 288: 119786.

［12］He Z, He L, Wang L, et al. Thermal oxidation degradation mechanism under the rust-catalyzed condition of CO_2 absorbent monoethanolamine and the DFT analysis of pathway[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13(3): 116189.

［13］Tavan Y, Moradi M, Rostami A, et al. Theoretical and industrial aspects of amine reclaiming unit to separate heat stable salts[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 237: 116314.

［14］Li X, Cheng S, Ge D, et al. Study on the chloride removal performance of porous anion exchange resin models constructed via 3D printing technology[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 356: 129908.

［15］Zhou Z, Lin Y, Jin Y, et al. Removal of heat-stable salts from lean amine solution using bipolar membrane electrodialysis[J]. Journal of Membrane Science, 2022, 645: 120213.

［16］Vevelstad S J, Buvik V, Knuutila H K, et al. Important aspects regarding the chemical stability of aqueous amine solvents for CO_2 capture[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022, 61(43): 15737.

［17］Chen G, Liu Q, Liu L, et al. Research on the process for removing heat-stable salts from organic amine absorbents via electrodialysis[J]. Processes, 2025, 13(8): 2519.

［18］Bazhenov S D, Novitskii E G, Vasilevskii V P, et al. Heat-stable salts and methods for their removal from alkanolamine carbon dioxide absorbents (review)[J]. Russian Journal of Applied Chemistry, 2019, 92(8): 1045.

［19］He C, Li X, Yan L, et al. Electrodialysis-based purification process for CO_2 capture amine solvent: concepts, efficiency, and challenges[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 376: 133993.

［20］李水飞, 黄艳, 王玉玮, 等. 基于电渗析装置的碳捕集装置降解胺液回收工艺优化研究[J/OL]. 发电技术, 2025-08-04. https://link.cnki.net/urlid/33.1405.TK.20250804. 1015.004.
Li S F, Huang Y, Wang Y W, et al. Process optimization for recovery of degraded amine solution in carbon capture systems based on electrodialysis device[J/OL]. Power Generation Technology, 2025-08-04. https://link.cnki.net/urlid/33.1405.TK.20250804.1015.004.

［21］Kikhavani T, Mehdizadeh H, Van Der Bruggen B, et al. Removal of heat-stable salts from lean amine of a gas refinery via electrodialysis[J]. Chemical Engineering & Technology, 2021, 44(2): 318.

［22］Gao J, Cao Q, Liu L, et al. Amine purification technology using electrodialysis for CO_2 capture[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13(5): 118046.

［23］邓博文, 杨阳, 杜庶铭, 等. 一种测定醇胺类二氧化碳吸收剂中热稳定性盐的方法: CN 118731275[P]. 2024-10-01.
Deng B W, Yang Y, Du S M, et al. A method for determining the heat stable salts in alkanolamine carbon dioxide absorbents: CN 118731275[P]. 2024-10-01.

［24］Wang Y, Fang M, Huang Y, et al. Removal of heat stable salts from degraded amine solvent by "BMED+ED" two-stage electrodialysis unit[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2023, 127: 103939.

［25］黄艳, 胡治平, 王玉玮, 等. 电渗析用于燃烧后二氧化碳捕集的胺回收技术研究进展[J]. 热力发电, 2025, 54(6): 79.
Huang Y, Hu Z P, Wang Y W, et al. Advances in electrodialysis technologies for amine reclaiming in post-combustion carbon dioxide capture[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(6): 79.

［26］Ghorbani A, Bayati B, Poerio T, et al. Application of NF polymeric membranes for removal of multicomponent heat-stable salts (HSS) ions from methyl diethanolamine (MDEA) solutions[J]. Molecules, 2020, 25(21): 4911.

［27］Bayati B, Mirshekari M, Veisy A, et al. Removal of HSS from industrial amine solution by anionic resin (case study: Ilam gas refinery)[J]. Chemical Papers, 2019, 73(2): 491.

［28］Wang Y, Li W, Yan H, et al. Removal of heat stable salts (HSS) from spent alkanolamine wastewater using electrodialysis[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2018, 57: 356.

（责任编辑　李园）