DOI: 10.19666/j.rlfd.202601049

二氧化碳吸收系统的胺气溶胶排放特性研究

钱新凤[1]，汪 鑫[1]，张 辉[2]，李大才[3]，侯大伟[1]，蒋春晓[1]
（1. 中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华东电力试验研究院，安徽 合肥 230000；
2. 中国大唐集团科学技术研究总院有限公司，北京 100000；
3. 广东大唐国际雷州发电有限责任公司，广东 雷州 524200）

［摘 要］【目的】胺法捕集 CO_2 过程中形成的胺气溶胶是导致溶剂损失与二次污染的关键问题，本研究旨在揭示其形成机制及关键操作参数的影响规律。【方法】基于 20 m^3/h 化学吸收实验平台，系统探究了胺法捕集 CO_2 过程中胺气溶胶的形成机理与排放特性。重点考察了凝结核数量浓度、CO_2 体积分数、烟气温度、贫液温度及贫液 CO_2 负荷等关键操作参数的影响。【结果】结果表明，凝结核的存在是胺气溶胶生成的先决条件，其通过非均相凝结主导胺气溶胶的形成，可使胺气溶胶排放质量浓度提升 1 个数量级。入口烟气 CO_2 体积分数约 10%时胺气溶胶排放达峰值，而烟气与贫液温度的升高均会加剧排放。贫液 CO_2 负荷是影响最显著的因素，当其从 0.02 mol CO_2/mol MEA 增至 0.48 mol CO_2/mol MEA 时，胺气溶胶质量浓度锐减 94.6%，这归因于游离 MEA 浓度及其挥发性的降低。【结论】本研究揭示了非均相反应主导的胺气溶胶生长机制，为胺法碳捕集系统胺气溶胶排放控制与过程优化提供了重要理论依据。

［关 键 词］胺气溶胶排放；胺法碳捕集；非均相凝结；单乙醇胺；操作参数

［引用本文格式］钱新凤，汪鑫，张辉，等. 二氧化碳吸收系统的胺气溶胶排放特性研究[J]. 热力发电，2026, 55(10): 192.
Qian X F, Wang X, Zhang H, et al. Study on emission characteristics of amine aerosols from carbon dioxide absorption systems[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(10): 192.

Study on emission characteristics of amine aerosols from carbon dioxide absorption systems

Qian Xinfeng[1], Wang Xin[1], Zhang Hui[2], Li Dacai[3], Hou Dawei[1], Jiang Chunxiao[1]
(1. East China Electric Power Testing & Research Institute, China Datang Corporation Science and Technology General Research Institute Co., Ltd., Hefei 230000, China;
2. China Datang Corporation Science and Technology General Research Institute Co., Ltd., Beijing 100000, China;
3. Guangdong Datang International Leizhou Power Generation Co., Ltd., Leizhou 524200, China)

Abstract: [Objective] The amine aerosols formed during the amine-based CO_2 capture process are a critical issue leading to solvent loss and environmental risks. This work aims to elucidate the amine aerosols' formation mechanism and the influence of key operational parameters. [Methods] The formation mechanism and emission characteristics (mass concentration and size distribution) of amine aerosols were systematically investigated on a 20 m^3/h pilot-scale chemical absorption platform using monoethanolamine (MEA) as the solvent. The effects of five key parameters were examined, such as number concentration of condensation nuclei (from none to 1.03×10^6 cm^{-3}), CO_2 volume fraction in inlet flue gas (0 to 15%), flue gas temperature (40~70 ℃), lean liquid temperature (35~55 ℃), and CO_2 loading in lean liquid (0.02 to 0.48 mol CO_2/mol MEA). An electrical low-pressure impactor ($ELPI^+$) was used for real-time aerosol measurement. [Results] The results demonstrate that the presence of condensation nuclei is a prerequisite for significant aerosol formation, with heterogeneous condensation on nuclei surfaces being the dominant mechanism, capable of increasing the aerosol mass concentration by an order

收 稿 日 期：2026-01-19 修 回 日 期：2026-01-28 接 受 日 期：2026-02-06 网络首发日期：2026-07-16
基 金 项 目：大唐集团重点科技项目（燃煤电厂二氧化碳捕集与多场景利用技术研究及应用）（DTGD-2024-10241）
Supported by: Key Science and Technology Project of Datang Group (Research and Application of Carbon Dioxide Capture and Multi-Scenario Utilization Technology for Coal-Fired Power Plants) (DTGD-2024-10241)
第一作者简介：钱新凤（1991），女，硕士，高级工程师，主要研究方向为化学吸收法碳捕集工艺优化、胺气溶胶生成机理与高效脱除技术以及 CCUS 全流程环境风险评估等，qianxfdatang@163.com。

of magnitude. The aerosols' emission peaked at an inlet CO_2 volume fraction of approximately 10%. Increases in both flue gas temperature and lean liquid temperature were found to exacerbate aerosol emissions due to enhanced amine volatility and reaction kinetics. CO_2 loading in lean liquid was identified as the most influential parameter. Increasing the CO_2 loading in lean liquid from 0.02 mol CO_2/mol MEA to 0.48 mol CO_2/mol MEA resulted in a drastic 94.6% reduction in aerosols' emission mass concentration, which is primarily attributed to the decreased concentration and volatility of free MEA in the liquid phase. [Conclusion] This study elucidates the growth mechanism of amine aerosols dominated by heterogeneous reactions and interfacial chemistry. It clearly indicates that effective emission control can be achieved through a dual-strategy: removing condensation nuclei from the inlet flue gas at the source and optimizing operational parameters, notably operating at a moderately high CO_2 loading in lean liquid. The findings provide crucial experimental data and theoretical support for predicting, mitigating, and optimizing amine aerosol emissions in industrial amine-based carbon capture systems.
Key words: amine aerosol emission; amine-based carbon capture; heterogeneous condensation; MEA; operational parameters

化学吸收法因具备适应性强、改造需求少、CO_2捕集效率高（可超过 90%）及运行稳定等优点，已成为燃烧后二氧化碳捕集（post-combustion CO_2 capture，PCCC）的主流技术之一[1]。该工艺通过胺类吸收剂（如单乙醇胺 MEA、哌嗪 PZ）与 CO_2 发生可逆反应实现高效分离[2-3]。然而，在实际运行过程中，吸收剂及其降解产物可能随烟气逸出，对环境与设备安全造成潜在风险，其中胺气溶胶排放被认为是溶剂损失与污染排放的关键途径[4]。

在典型的胺吸收过程中，溶剂损失主要源于吸收剂的挥发性及气液两相间的温差引起的携带损失[5]。据文献报道，溶剂逸失量可达 0.21~3.65 kg/t CO_2，不仅显著增加捕集成本，也带来环境与健康隐患[6]。常规的液滴夹带可通过除雾器有效去除，而挥发态胺可经水洗塔吸收，去除效率可超过 85%[7-8]。相比之下，胺气溶胶排放机制更复杂，其粒径通常分布于 0.1~3.0 μm，难以被传统除雾装置截留[9]。胺气溶胶的形成主要包括：1）过饱和条件下可凝结组分的均相凝结；2）由凝结核诱导的非均相凝结；3）胺与 CO_2 在胺气溶胶表面发生界面反应生成非挥发性盐分[10]。这些多相耦合过程显著改变了溶剂的分压与迁移特征，使胺气溶胶排放呈现复杂的动力学与不可控性。

烟气中的颗粒物或酸性前驱体可作为凝结核，显著促进胺气溶胶的生成。当凝结核粒径小于 255 nm 且数量浓度超过 6×10^4 个/cm^3 时，胺气溶胶迅速形成并富集[11]。此外，胺气溶胶表面 CO_2 和胺反应生成的盐分会降低液滴表面胺的分压，从而持续驱动气相胺向胺气溶胶迁移，形成正反馈机制，导致溶剂损失加剧[12]。目前国内针对胺基 CO_2 吸收系统胺气溶胶排放的研究还处于起步阶段[13]。烟气凝结核对胺气溶胶排放的影响、吸收塔中胺气溶胶的生成与生长过程，塔内条件对有机胺排放的影响等都有待深入研究。因此，只有开展化学吸收系统有机胺排放的小试和中试研究，系统考察凝结核、贫液负荷、塔内温度等关键参数的影响，才能掌握 CO_2 化学吸收系统胺气溶胶的形成和控制机理。

为此，本研究基于 20 m^3/h 化学吸收实验平台，构建了典型烟气体系：压缩空气+CO_2+凝结核，系统研究胺基 CO_2 吸收过程中胺气溶胶的形成机理与排放特性。重点考察凝结核数量浓度、CO_2 浓度、烟气温度、贫液温度及贫液 CO_2 负荷等操作参数对胺气溶胶粒径分布与质量浓度的影响，以揭示典型烟气组分条件下胺气溶胶形成路径的主导机制及各操作参数的敏感性规律，为胺法碳捕集系统中胺气溶胶排放的预测、控制及过程优化提供实验依据与理论支撑。

1 实验系统与方法

1.1 CO_2 化学吸收试验平台

本研究依托自建的 CO_2 化学吸收实验平台开展，系统包括预洗涤塔、吸收塔、水洗塔及再生塔 4 个单元，如图 1 所示。

烟气经预处理塔增湿、调温后，与由胺气溶胶发生器（SAG410，Topas，德国）产生的凝结核混合，进入吸收塔进行化学吸收与反应生成胺气溶胶。研究使用的粉煤灰采自燃煤电厂静电除尘器出口，主要成分为 SiO_2、Al_2O_3 和 Fe_2O_3，并含有微量 CaO 和碱金属盐。使用前，粉煤灰经筛分和烘箱干燥处理以去除水分及大颗粒。预洗涤塔采用有机玻璃材质，内径 0.10 m，高度 2.0 m。吸收塔为核心单元，采用有机玻璃与 304 不锈钢组合结构，内径 0.15 m，总高 4.0 m，含有 4 段喷淋区，每段填料层高 0.8 m，内置多孔筛板以改善气液分布。为减弱尺

度效应，系统采用低烟气流量与高比表面积填料（a=360 m^2/m^3，Φ10 Dixon 环），在此条件下，吸收塔内气体停留时间约为 11.3 s，CO_2 捕集效率可达 90%~95%。水洗塔用于去除挥发态胺及部分细微胺气溶胶，塔体同样采用有机玻璃制作，内径 0.10 m，高度 1.6 m，填充Φ10 Dixon 环，填料有效高度 0.9 m。再生塔采用 304 不锈钢材质，内径 0.07 m，高度 1.0 m，填充Φ8 Dixon 环（a=540 m^2/m^3），有效填料高度 0.8 m，并设置外部保温层以减少热损失。该实验平台具有较高的参数调控灵活性，可实现烟气温度、CO_2 体积分数、吸收液负荷及循环温度等多维可控。

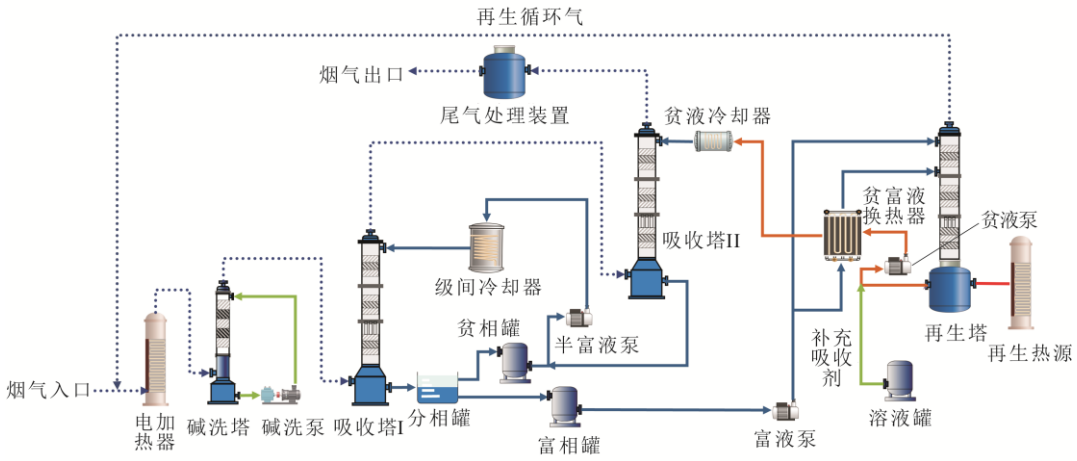


图 1 20 m^3/h 二氧化碳化学吸收实验平台示意

Fig.1 Schematic diagram of a 20 m^3/h CO_2 chemical absorption experimental platform

1.2 胺气溶胶测量与表征

胺气溶胶质量浓度及粒径分布采用电低压撞击仪（ELPI$^+$，Dekati Ltd.，芬兰）在吸收塔顶烟气出口（水洗塔前）进行在线测量。ELPI$^+$系统能够同时获得胺气溶胶的质量浓度与粒径分布，分级范围覆盖 0.006~10.000 μm，共 14 级，采样时间分辨率高，适用于胺基 CO_2 吸收体系中纳米至亚微米级胺气溶胶的动态监测。实验中，为避免液滴收缩或蒸发导致的测量误差，采样气体不经稀释直接进入检测系统。对于高凝结核数量浓度条件（>10^6 个/cm^3），该系统仍能维持良好的粒径分辨率与稳定性。采样使用短路径（<1.5 m）、加热保温（温度略高于烟气露点）的采样管，并尽量减少弯头。每组工况进行 3 次平行采样，单次采样时间为 120 s，以确保数据的可重复性与统计可靠性。

1.3 运行参数与原料

实验过程中，烟气入口温度通过调节预处理塔中循环水温度与流量进行控制；贫液 CO_2 负荷通过调节富液预热器与再生塔的加热功率实现；贫液温度则由贫液冷却器循环水流量控制。吸收塔入口 CO_2 浓度利用红外气体分析仪（GHX-3010 E1，北京华云仪器有限公司）在线测定，并通过浮子流量计精确调节。

标准工况下，吸收塔入口烟气温度为 50 ℃，流量为 20 m^3/h；贫液温度为 45 ℃，流量为 50 L/h；贫液 CO_2 负荷为 0.25 mol CO_2/mol MEA。吸收剂采用 30%（质量分数）MEA 水溶液，由高纯 MEA（纯度>99%，国药集团麦克林生化科技有限公司）与去离子水配制。CO_2（纯度>99%）由南京特气公司提供。所有化学试剂未经进一步纯化。

通过上述调控，实现了不同凝结核数量浓度及多操作参数（温度、负荷、流量）的综合变化条件，为后续分析胺气溶胶形成机理及排放特性提供了可靠的实验基础。系统测试结果显示，平台运行稳定、参数可控，能够真实反映实验尺度下胺法 CO_2 捕集过程中胺气溶胶的生成、迁移与去除规律。

2 结果与讨论

2.1 入口烟气中凝结核的粒径分布

凝结核的存在，尤其是硫酸、烟尘等污染物的影响，可能导致显著的胺气溶胶排放。为研究凝结核对胺气溶胶生成的影响，本文对 4 种典型凝结核数量浓度的烟气情况进行了实验：无添加、低数量浓度（1.42×10^4 个/cm^3）、中数量浓度（2.87×10^5 个/cm^3）和高数量浓度（1.03×10^6 个/cm^3）。不同凝结核数量浓度下的入口烟气中凝结核粒径分布如图 2 所示。

从实验结果看，凝结核的粒径分布在不同数量浓度下始终集中在 0.009~0.314 μm 内。

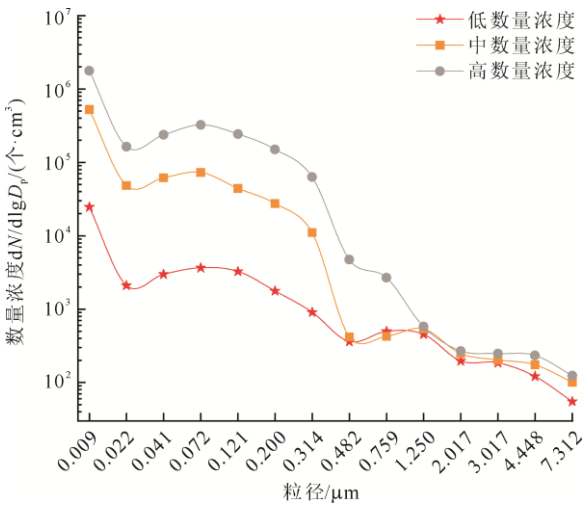


图 2 入口烟气中凝结核的粒径分布

Fig.2 Particle size distribution of condensation nuclei in the inlet flue gas

为探究凝结核数量浓度对胺气溶胶生成的影响，在入口烟气（空气+10%CO_2（体积分数，下同））中系统改变凝结核数量浓度，结果如图 3 所示。

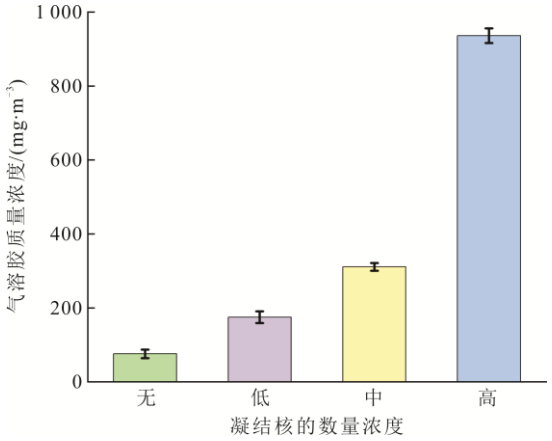


图 3 不同凝结核数量浓度下吸收塔出口胺气溶胶质量浓度

Fig.3 Aerosol emission concentration at the absorption tower outlet under different condensation nuclei concentrations

由图 3 可以看出，当无凝结核存在时，吸收塔出口胺气溶胶质量浓度仅为 75.8 mg/m^3，胺气溶胶主要来源于液滴夹带及高饱和度下的非均相凝结[14]。当引入凝结核后，因其较大的比表面积，气相 MEA 易在凝结核表面冷凝形成前驱液滴，经非均相反应及团聚后形成大量胺气溶胶[15]。在高数量浓度凝结核条件下，出口胺气溶胶质量浓度高达 936.4 mg/m^3，较无凝结核条件提升超过 10 倍，表明非均相反应成为主导机制。

该现象表明，烟气中细微颗粒（如盐粒、飞灰等）可作为活性成核中心，显著提高 MEA 在颗粒表面冷凝的概率，从而大幅提高胺气溶胶排放水平。工程上可通过加强前端除尘、湿式电除雾等手段降低烟气中颗粒物含量，以减少凝结核数量、从源头抑制胺气溶胶生成[16]。

图 4 为吸收塔进、出口烟气中颗粒物的粒径分布。图 4 表明，当入口烟气凝结核数量浓度为中等水平时，出口烟气中纳米级颗粒数量明显减少，微米级颗粒数量增加。这表明凝结核上的非均相冷凝以及 MEA-CO_2 反应生成的盐类共同促进了颗粒生长[17]。盐分浓度的增加降低了液滴表面水蒸气的分压，促进水汽向液滴迁移，使胺气溶胶粒径增大，呈现以非均相反应主导的增长特征[18]。

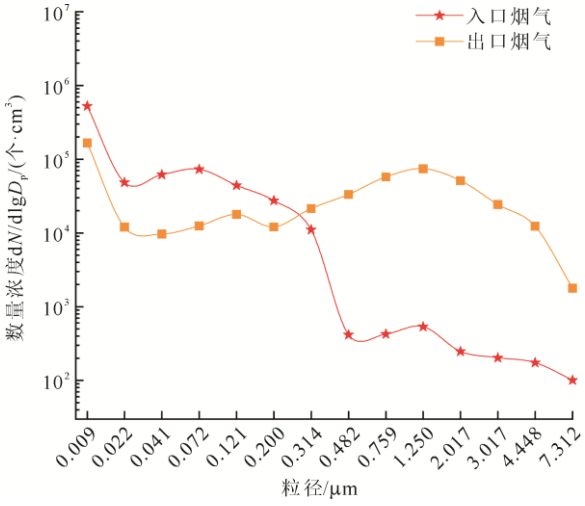


图 4 吸收塔进、出口烟气中颗粒物的粒径分布

Fig.4 Particle size distribution in flue gas at the inlet and outlet of the absorber tower

2.2 操作参数的影响

吸收塔入口烟气由压缩空气、CO_2 及凝结核组成。标准工况下，凝结核数量浓度处于中等水平（2.87×10^5 个/cm^3），吸收塔出口胺气溶胶质量浓度为 311.4 mg/m^3。此时塔内同时存在由 MEA 与 CO_2 反应放热导致的高温高蒸气压环境，以及凝结核诱导的非均相成核条件，2 种机制协同促进胺气溶胶的生成与增长。通过调节主要操作参数，进一步揭示 MEA-CO_2 反应与非均相凝结在胺气溶胶形成过程中的作用差异。

2.2.1 入口烟气中 CO_2 体积分数

不同入口烟气CO_2体积分数下吸收塔出口的胺

气溶胶质量浓度如图 5 所示。由图 5 可以看出，当入口烟气 CO_2 体积分数为 10%时，胺气溶胶质量浓度达到峰值 311 mg/m^3。该结果与 Fulk 关于哌嗪体系的实验及 Khakharia 的数值模拟结果一致，均表明在 CO_2 体积分数约为 10%时，胺气溶胶排放量达到最大[19]。当入口烟气 CO_2 体积分数由 0 上升至 10%时，MEA 与 CO_2 的吸收反应显著增强，释放大量反应热，使溶液温度升高、挥发性增加，促使 MEA 由液相转入气相。同时，烟气中存在足量凝结核，为 MEA 的冷凝提供了优先表面，从而形成非均相成核途径。此时气相 MEA 在凝结核表面与 CO_2 反应生成非挥发性氨基甲酸盐，使液滴中盐分浓度升高并降低表面水蒸气分压，进一步促进水汽向液滴内部迁移，导致粒径迅速增长。当入口烟气 CO_2 体积分数超过 10%后，液相中游离 MEA 含量下降，其蒸汽压显著减小，非均相凝结效率随之降低，胺气溶胶质量浓度明显减弱[20]。值得注意的是，典型燃煤电厂烟气中 CO_2 体积分数约为 10%~15%，正处于本实验观测到的胺气溶胶排放峰值区间。这表明，在实际电厂胺法碳捕集系统中，胺气溶胶的生成具有内在的高风险性，必须予以高度重视。

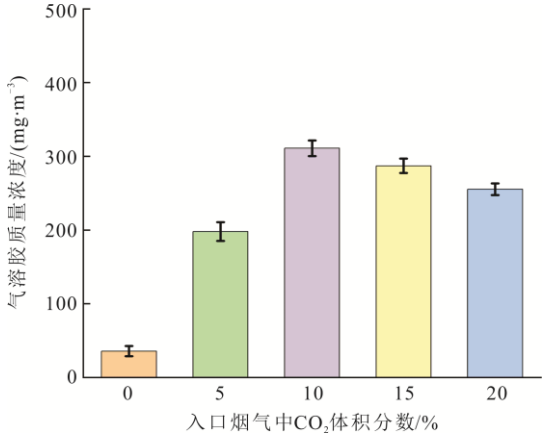


图 5 不同入口烟气 CO_2 体积分数下吸收塔出口的胺气溶胶质量浓度

Fig.5 Mass concentrations of amine aerosols at the absorption tower outlet under different CO_2 volume fractions

2.2.2 入口烟气温度

吸收塔环境温度亦是影响溶剂挥发与胺气溶胶生成的重要因素。实验中入口烟气温度设定为 40~70 ℃，该范围覆盖了典型燃烧后烟气经余热回收及预处理后进入吸收塔的常见温度区间，旨在考察实际运行中可能出现的温度波动对胺气溶胶排放的影响。不同入口烟气温度下吸收塔出口的胺气溶胶质量浓度如图 6 所示。由图 6 可以看出，入口烟气温度升高将导致胺气溶胶质量浓度持续增加。当温度升至 70 ℃时，吸收塔出口胺气溶胶质量浓度达到 359.1 mg/m^3，较标准工况提高约 15.3%。高温烟气增强了气液间的温度梯度，显著提升了贫液中 MEA 的分压，而烟气中的凝结核为 MEA 提供了非均相冷凝表面，强化了非均相成核过程[21]。同时，高温条件下气体动能和湍流强度增加，提高了胺气溶胶的夹带与输运效率，共同导致胺气溶胶质量浓度上升。

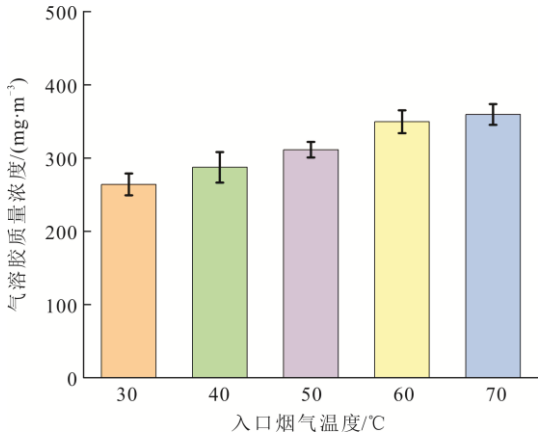


图 6 不同入口烟气温度下吸收塔出口的胺气溶胶质量浓度

Fig.6 Mass concentrations of amine aerosols at the absorption tower outlet under different inlet flue gas temperatures

2.2.3 贫液温度

不同贫液温度下吸收塔出口的胺气溶胶质量浓度如图 7 所示。

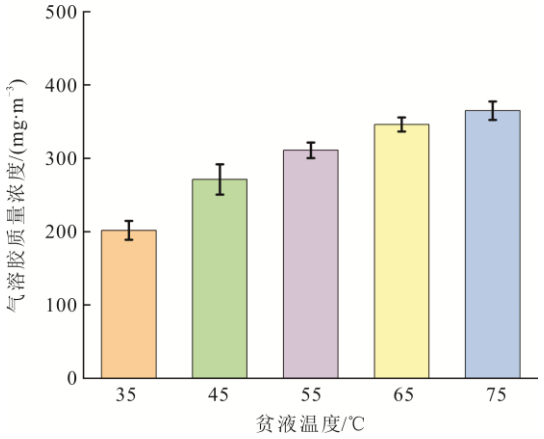


图 7 不同贫液温度下吸收塔出口的胺气溶胶质量浓度

Fig.7 Mass concentrations of amine aerosols at the absorption tower outlet under different lean liquid temperatures

由图 7 可以看出，贫液温度的升高同样会显著促进胺气溶胶排放。当贫液温度由 35 ℃升至

55 ℃时，出口胺气溶胶质量浓度由 201 mg/m³ 上升至 364 mg/m³。温度升高降低了溶液表面张力并提高了气相分压，促进 MEA 与水蒸气在凝结核表面的非均相冷凝[22]。同时，反应速率的提升加快了 MEA 与 CO_2 在凝结核表面的界面反应，二者协同作用加速了胺气溶胶的增长过程，使其排放量显著增加。

2.2.4 贫液负荷

不同贫液 CO_2 负荷下吸收塔出口的胺气溶胶质量浓度如图 8 所示。

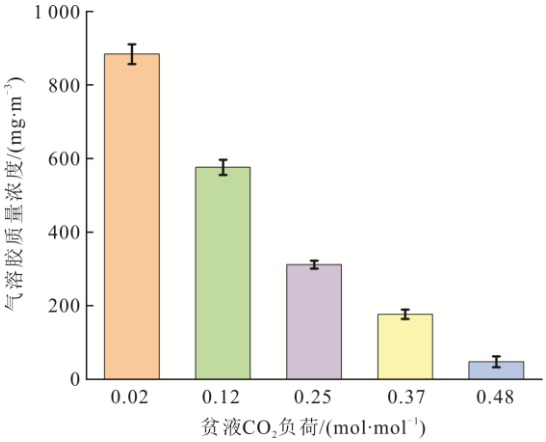


图 8 不同贫液 CO_2 负荷下吸收塔出口的胺气溶胶质量浓度
Fig.8 Mass concentrations of amine aerosols at the absorption tower outlet under different CO_2 loading conditions in the lean liquid

由图 8 可以看出，贫液 CO_2 负荷是影响胺气溶胶排放的最关键参数。当 CO_2 负荷由 0.02 mol CO_2/mol MEA 增加至 0.48 mol CO_2/mol MEA 时，出口胺气溶胶质量浓度由 883.7 mg/m³ 锐减至 47.2 mg/m³，降幅高达 94.6%。这一现象与 MEA 化学形态变化密切相关[23]。在低 CO_2 负荷条件下，体系中游离 MEA 浓度高、蒸气压大，易挥发进入气相并在凝结核表面冷凝，形成大量胺气溶胶前驱体；而在高 CO_2 负荷条件下，MEA 主要以氨基甲酸盐形式存在，反应活性和挥发性均显著降低，此时胺气溶胶生成主要依赖溶剂在凝结核表面的物理冷凝，化学反应作用较弱[24]。同时，CO_2 吸收热释放减少使塔内温度和温差下降，进一步抑制了胺气溶胶的形成[25]。贫液 CO_2 负荷是平衡系统运行性能的关键参数。从控制胺气溶胶排放的角度，适当提高贫液 CO_2 负荷（如从 0.02 mol CO_2/mol MEA 提至 0.25 mol CO_2/mol MEA 以上）效果显著。然而，CO_2 负荷过高可能导致吸收推动力下降，需增加液气比或填料高度以维持捕集率，并可能增加再生塔的蒸汽消耗。因此，在实际优化中，需在胺逃逸控制、CO_2 捕集效率与再生能耗之间寻求最佳平衡点。

3 结　论

1）凝结核是非均相凝结的主导因素。实验证实，烟气中的凝结核是触发胺气溶胶大量生成的核心诱因。其不仅为气相胺提供了冷凝表面，其表面发生的 MEA-CO_2 界面反应更会形成持续驱动胺迁移与颗粒生长的正反馈机制，在高凝结核数量浓度（如>10^6 个/cm³）条件下，胺气溶胶排放质量浓度可骤增 10 倍以上。

2）操作参数中贫液 CO_2 负荷的影响最关键。在诸多参数中，贫液 CO_2 负荷对胺气溶胶排放的抑制作用最显著。当贫液 CO_2 负荷由 0.02 mol CO_2/mol MEA 增至 0.48 mol CO_2/mol MEA 时，因游离 MEA 浓度与挥发性急剧下降，胺气溶胶排放锐减超过 94%。此外，在 CO_2 体积分数 10%时存在排放峰值，而烟气与贫液温度的升高均会加剧胺气溶胶的排放。

3）胺气溶胶排放控制策略需聚焦源头抑制与过程调控。基于上述机理，有效控制胺气溶胶排放应双管齐下：一是加强前端烟气净化，最大限度去除凝结核，从源头抑制成核；二是在运行中优化操作参数，尤其是适当提高贫液 CO_2 负荷并控制吸收温度，以从根本上降低胺的挥发驱动力，实现高效低耗的稳定运行。

[参 考 文 献]

[1] 陆诗建, 祝文举, 刘玲, 等. 胺吸收剂逃逸引发的大气气相反应进展[J]. 化工进展, 2024, 43(11): 6397.
Lu S J, Zhu W J, Liu L, et al. Advances in atmospheric gas-phase reactions initiated by amine absorbent escape[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(11): 6397.

[2] 陈娇, 王根, 隋新秀, 等. 有机胺促进大气气溶胶成核机理研究进展[J]. 大气与环境光学学报, 2024, 19(2): 142.
Chen J, Wang G, Sui X X, et al. Research progress of mechanism of atmospheric aerosol nucleation promoted by organic amines[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2024, 19(2): 142.

[3] 沈丹, 骆仲泱, 方梦祥, 等. 电场对有机胺气溶胶作用机理与实验研究[J]. 热力发电, 2021, 50(7): 137.
Shen D, Luo Z Y, Fang M X, et al. Mechanism and experimental study on the effect of electric field on organic amine aerosol[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(7): 137.

[4] 蒋友凌, 马嫣, 郑军, 等. 不同 NO_x 条件下有机胺光氧化二次气溶胶的形成及其云凝结核活性[J]. 环境科学学报, 2023, 43(5): 301.

Jiang Y L, Ma Y, Zheng J, et al. Formation and cloud condensation nuclei activity of secondary aerosol from amine photo-oxidation under different NO_x conditions[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(5): 301.

[5] 祁珣, 冯鑫鑫, 陈颖军, 等. 轻型汽油卡车尾气颗粒物中氨和有机胺的排放特征及影响因素[J]. 生态环境学报, 2025, 34(7): 997.
Qi X, Feng X X, Chen Y J, et al. Emission characteristics and influence factors of NH_3 and amines in particulate matter emitted by light-duty gasoline trucks[J]. Ecology and Environment Sciences, 2025, 34(7): 997.

[6] Moser P, Wiechers G, Schmidt S, et al. Results of the 18-month test with MEA at the post-combustion capture pilot plant at Niederaussem-new impetus to solvent management, emissions and dynamic behaviour[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2020, 95: 102945.

[7] 杨正大, 贤振楠, 邵凌宇, 等. 胺法碳捕集过程胺气溶胶形成与排放研究现状[J]. 能源环境保护, 2023, 37(3): 195.
Yang Z D, Xian Z N, Shao L Y, et al. Research status of amine aerosol formation and emission in amine carbon capture process[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(3): 195.

[8] 方梦祥, 狄闻韬, 易宁彤, 等. CO_2 化学吸收系统污染物排放与控制研究进展[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(2): 8.
Fang M X, Di W T, Yi N T, et al. Research progress on pollutant emission and control from CO_2 chemical absorption system[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(2): 8.

[9] 张新军, 陆诗建, 李世霞, 等. 胺基碳捕集工艺过程中 VOCs 排放与迁移[J]. 环境工程, 2017, 35(1): 89.
Zhang X J, Lu S J, Li S X, et al. Analysis of emission and diffusion of VOCs from amine-based post-combustion CO_2 capture[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(1): 89.

[10] 黄显著, 陈曦, 王慧珺, 等. 醇胺法捕集 CO_2 中的胺逃逸控制研究进展[J]. 低碳化学与化工, 2025, 50(4): 113.
Huang X Z, Chen X, Wang H J, et al. Research progress of amine escape control in CO_2 capture by alcohol amine method[J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2025, 50(4): 113.

[11] Moser P, Schmidt S, Stahl K, et al. Demonstrating emission reduction-results from the post-combustion capture pilot plant at niederaussem[J]. Energy Procedia, 2014, 63: 902.

[12] 王少娜, 杨阳, 徐文青, 等. CO_2 液相吸收−电催化转化一体化研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(22): 22.
Wang S N, Yang Y, Xu W Q, et al. Research progress of integrated CO_2 liquid-phase absorption electrocatalytic conversion[J]. Materials Reports, 2025, 39(22): 22.

[13] 杨田萌, 杨凡, 热则耶·热合米图力, 等. 醇胺吸收法捕集二氧化碳研究进展[J]. 新疆石油天然气, 2024, 20(1): 52.
Yang T M, Yang F, Rehemtuli R, et al. Research progress on capture of CO_2 by alcohol amine absorption method[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2024, 20(1): 52.

[14] 宋菁. CO_2 捕集溶剂吸收法的研究进展[J]. 现代化工, 2023, 43(12): 42.
Song J. Research progress in CO_2 capture solvent absorption method[J]. Modern Chemical Industry, 2023, 43(12): 42.

[15] 李媛, 张辰, 张腾, 等. 新型 CO_2 捕集溶剂及工艺的研究进展[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 14.
Li Y, Zhang C, Zhang T, et al. Research progress of novel carbon dioxide capture solvents and processes[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 14.

[16] 魏炜, 曾令梓, 刘凤霞, 等. 混合醇胺捕集低浓度 CO_2 性能研究[J]. 低碳化学与化工, 2023, 48(3): 116.
Wei W, Zeng L Z, Liu F X, et al. Research on performance of mixed alcohol-amine in capturing low-concentration CO_2[J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2023, 48(3): 116.

[17] 陆诗建, 贡玉萍, 刘玲, 等. 有机胺 CO_2 吸收技术研究现状与发展方向[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(9): 44.
Lu S J, Gong Y P, Liu L, et al. Research status and future development direction of CO_2 absorption technology for organic amine[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(9): 44.

[18] 孙路长, 王争荣, 吴冲, 等. 燃煤电厂万吨级碳捕集工程设计与运行优化研究[J]. 华电技术, 2021, 43(6): 69.
Sun L C, Wang Z R, Wu C, et al. Research on operation optimization of a 10000 t/a carbon capture project for coal-fired power plants[J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 69.

[19] 吕春捷, 李孟盈, 徐立华, 等. 复配醇胺水溶液捕集 CO_2 过程中的解吸研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(1): 238.
Lü C J, Li M Y, Xu L H, et al. Research progress in desorption of CO_2 capture by blended amine aqueous solution[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(1): 238.

[20] 肖坤儒, 王梅, 吴鹏涛, 等. 以 AMP 为主体的混合胺溶液捕集 CO_2 性能研究[J]. 化学工程, 2016, 44(4): 6.
Xiao K R, Wang M, Wu P T, et al. Capture of carbon dioxide with blended amine solution based on AMP[J]. Chemical Engineering, 2016, 44(4): 6.

[21] 张亚萍, 刘建周, 季芹芹, 等. 醇胺法捕集燃煤烟气 CO_2 工艺模拟及优化[J]. 化工进展, 2013, 32(4): 930.
Zhang Y P, Liu J Z, Ji Q Q, et al. Process simulation and optimization of flue gas CO_2 capture by the alkanolamine solutions[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(4): 930.

[22] 汪铁林, 延斯·克劳斯. 二氧化碳捕集中 2-氨基-2-甲基-1-丙醇溶剂的热降解[J]. 武汉工程大学学报, 2013, 35(10): 1.
Wang T L, Jens K. Thermal degradation of 2-amino-2-methyl-1-propanol solvent for carbon dioxide capture[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2013, 35(10): 1.

[23] 李洪, 赵淑芳, 刘长岩, 等. CO_2 捕集技术的研究进展[J]. 天津化工, 2011, 25(1): 1.
Li H, Zhao S F, Liu C Y, et al. Process of studies on CO_2 capture technology[J]. Tianjin Chemical Industry, 2011, 25(1): 1.

[24] 赵慧, 李梦华, 康雄, 等. 宁夏气溶胶光学厚度时空变化及驱动因素分析[J]. 环境科学学报, 2026, 46(1): 263.
Zhao H, Li M H, Kang X, et al. Spatiotemporal variations and driving factors of aerosol optical depth in Ningxia[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2026, 46(1): 263.

[25] 李正强, 冀哲, 张子晗, 等. 机器学习在大气气溶胶卫星遥感中的应用和挑战[J]. 遥感学报, 2025, 29(6): 1788.
Li Z Q, Ji Z, Zhang Z H, et al. Application and challenge of machine learning in the satellite remote sensing of atmospheric aerosols[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2025, 29(6): 1788.

（责任编辑　李园）