

## 醇胺法捕集 CO<sub>2</sub> 中的胺逃逸控制研究进展

黄显著<sup>1</sup>, 陈曦<sup>1</sup>, 王慧珺<sup>1</sup>, 申长俊<sup>2,3</sup>, 陆诗建<sup>2,3</sup>, 刘玲<sup>2,3</sup>, 康国俊<sup>2,3</sup>

(1. 中石化碳产业科技股份有限公司, 江苏 南京 210019; 2. 中国矿业大学 碳中和研究院, 江苏 徐州 221116;  
3. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 醇胺法捕集 CO<sub>2</sub> 技术因技术成熟被广泛应用于工业碳捕集。然而, 吸收剂(如有机胺)及其降解产物的排放, 会影响 CO<sub>2</sub> 捕集效率并增加环境和健康风险。因此, 有必要对醇胺法捕集 CO<sub>2</sub> 系统的胺逃逸进行控制。总结了胺逃逸的主要方式(物理夹带、气态排放和气溶胶排放), 并分析了各主要胺逃逸方式的产生原因和控制难点。对比了多种胺逃逸控制技术(多级水洗、酸洗、干床、湿式电除尘、蒸汽注入及除雾器等)的原理、优缺点及效果, 并对未来胺逃逸控制研究方向进行了展望。

**关键词:** 醇胺法捕集 CO<sub>2</sub> 技术; 气溶胶; 胺逃逸; 控制技术

中图分类号: TQ413 文献标志码: A 文章编号: 2097-2547(2025)04-113-09

### Research progress of amine escape control in CO<sub>2</sub> capture by alcohol amine method

HUANG Xianzhu<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>1</sup>, WANG Huijun<sup>1</sup>, SHEN Changjun<sup>2,3</sup>, LU Shijian<sup>2,3</sup>, LIU Ling<sup>2,3</sup>, KANG Guojun<sup>2,3</sup>

(1. SINOPEC Carbon Industry Technology Co., Ltd., Nanjing 210019, Jiangsu, China; 2. Institute of Carbon Neutrality, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 3. School of Chemical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

**Abstract:** Alcohol amine CO<sub>2</sub> capture technology is widely used for industrial carbon capture due to its mature technology. However, the emission of absorbents (such as organic amines) and their degradation products affect the CO<sub>2</sub> capture efficiency and increase the environmental and health risk. Therefore, it is necessary to control the amine escape from the CO<sub>2</sub> capture system by alcohol amine method. The main types of amine escape (physical entrainment, gaseous emission and aerosol emission) were summarized, and the causes and control difficulties of the main amine escape modes were analyzed. The principles, advantages and disadvantages and effects of various amine escape control technologies (multi-stage water washing, acid washing, dry bed, wet electrostatic precipitator, steam injection and mist eliminator, etc.) were compared, and the future direction of amine escape control research was prospected.

**Keywords:** alcohol amine CO<sub>2</sub> capture technology; aerosol; amine escape; control technologies

煤炭在世界能源供应中的占比为 25% 左右, 煤炭利用产生的碳排放量在全球碳排放总量中的占比为 40% 左右<sup>[1]</sup>。燃煤发电、钢铁制造、水泥和化工等行业能耗高, 是高二氧化碳(CO<sub>2</sub>)排放源<sup>[2]</sup>。在过去的几十年中, CO<sub>2</sub> 减排已逐渐受到广泛关注。为了将温室效应导致的全球平均气温增幅(较工业化前水平)限制在 2 °C 之内<sup>[3]</sup>, 有必要采取积极措施减少 CO<sub>2</sub> 排放。近年来, 二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)技术备受关注, CCUS 技术被认为是实现大

型排放源大量减排 CO<sub>2</sub> 的有效技术<sup>[4]</sup>。与应用可再生能源或改造现有生产工艺技术等减排方案相比, CCUS 技术的实施风险和不确定性较小。CO<sub>2</sub> 捕集是 CCUS 技术的关键步骤, 现有 CO<sub>2</sub> 捕集方法主要包括化学吸收法、吸附法、膜分离法、低温分离法、金属氧化物法、电化学法和水合物法等。其中, 以化学吸收法为基础的 CO<sub>2</sub> 捕集技术主要以单乙醇胺(MEA)、氨(NH<sub>3</sub>)、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和碱金属溶液(如 NaOH 和 KOH 溶液)作为吸收剂, 该技术具有成熟度较高、

收稿日期: 2024-07-31; 修回日期: 2024-09-11。

基金项目: 江苏省科技厅科技项目碳达峰碳中和科技创新专项资金(BE2022613); 中国和丹麦政府间科技合作项目(2022YFE0115800); 浙江省科技计划(2023C03156); 宁波市科技计划(2022Z163)。

第一作者: 黄显著(1992—), 硕士, 助理研究员, 研究方向为 CO<sub>2</sub> 捕集、利用与封存, E-mail: huangxz.scit@sinopec.com。

通信作者: 陆诗建(1984—), 博士, 研究员, 研究方向为 CO<sub>2</sub> 捕集、利用与封存, E-mail: lushijian@cumt.edu.cn。

气体处理规模较大和无需大幅改造设施等优点,是目前从烟道气及化学转化气中分离CO<sub>2</sub>的主流技术之一。近年来,国内外研究人员深入开展了醇胺法捕集烟气中CO<sub>2</sub>的研究,已陆续建成和运行一批示范项目(无特别说明,下文均使用缩写项目名),如加拿大Quest碳捕集项目<sup>[5]</sup>、美国国家碳捕集中心(NCCC)碳捕集项目<sup>[6]</sup>、包钢集团200×10<sup>4</sup>t/a碳捕集工程(在建)<sup>[7]</sup>和佛山佳利达万吨级CO<sub>2</sub>捕集与碳铵固碳项目<sup>[8]</sup>。

醇胺法捕集CO<sub>2</sub>是一种广泛应用于工业CO<sub>2</sub>捕集的技术,该技术通过醇胺吸收剂与烟气中CO<sub>2</sub>发生化学反应,从而实现CO<sub>2</sub>捕集。然而在该过程中,部分醇胺吸收剂及其降解产物可能会随烟气排出,这不仅会影响系统的CO<sub>2</sub>捕集效率,还可能会导致环境和健康风险。挪威蒙斯塔德二氧化碳技术中心规定,其CO<sub>2</sub>捕集系统排放标准为烟气中有机胺排放量(无特别说明,均以体积分数计)不超过6×10<sup>-6</sup><sup>[9]</sup>,而部分研究机构在实际研究测试中发现化学吸收系统仅有机胺的挥发排放量就高达140×10<sup>-6</sup><sup>[10]</sup>。化学吸收系统中吸收剂及其降解产物的排放位置主要位于吸收塔和解吸塔。吸收塔是化学吸收系统中用于捕集CO<sub>2</sub>的关键设备,烟气从塔底进入,与从塔顶喷淋的吸收剂逆流接触<sup>[11]</sup>。在此过程中,吸收剂与CO<sub>2</sub>发生化学反应。然而,由于反应不完全或吸收剂

自身的挥发性,一部分吸收剂及其降解产物可能会随烟气从吸收塔顶部排出<sup>[12]</sup>。再生塔是化学吸收系统中用于吸收剂再生的设备,在再生塔中,富集了CO<sub>2</sub>的吸收剂被加热释放出CO<sub>2</sub>,使吸收剂得以再生<sup>[13]</sup>。在吸收剂再生过程中,由于高温和化学反应,吸收剂可能会发生降解,生成低分子量有机物,这些产物若未经处理直接排放至大气中,可能会与大气中的水分反应,进而与氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、硝酸(HNO<sub>3</sub>)和臭氧(O<sub>3</sub>)等发生光化学氧化反应,生成有害化合物<sup>[14]</sup>。有害化合物中包括强致癌物质,如硝基胺和亚硝基胺。

本文对醇胺法捕集CO<sub>2</sub>系统中污染物排放方式、排放特征及其控制难点进行概述,对气溶胶形成的基本原理进行分析,并对目前污染物控制技术及其优缺点进行评估,旨在为醇胺法捕集CO<sub>2</sub>技术在工业实践中的应用提供理论支持和优化建议。

## 1 醇胺法捕集CO<sub>2</sub>过程中胺逃逸特征与排放机理

### 1.1 醇胺法捕集CO<sub>2</sub>系统中胺逃逸特征

醇胺法捕集CO<sub>2</sub>系统中的胺逃逸主要指吸收塔出口污染物排放,包括物理夹带、气态排放和气溶胶排放,醇胺法捕集CO<sub>2</sub>系统中胺逃逸的方式和性质等见表1。

表1 醇胺法捕集CO<sub>2</sub>系统中胺逃逸情况对比

Table 1 Comparison of amine escape from CO<sub>2</sub> capture systems by alcohol amine method

排放方式	胺形态	产生原因	胺排放量 <sup>①</sup> /×10 <sup>-6</sup>	控制难点
物理夹带	液滴 <sup>②</sup>	气液接触时部分吸收剂被气流携带	小于1	
气态排放	气体	吸收剂及其降解产物挥发	0~100	有机胺等降解产物水溶速率较慢
气溶胶	气溶胶颗粒 <sup>③</sup>	吸收塔内非均相成核、均相成核或气泡破裂等	0~1000	气溶胶颗粒容易穿过水洗塔

注:①吸收塔后;②尺寸大于等于100 μm;③尺寸为1 nm~100 μm。

胺逃逸(指有机胺逃逸,下同)中的物理夹带是指在化学吸收系统中,有机胺溶液与烟气混合后,由于机械力的作用,有机胺溶液以微小液滴的形式被烟气夹带出来的现象<sup>[15]</sup>。该过程涉及气液两相流动时的相互作用,其中液体连续相被分散成细小的液滴,这些液滴随后被上升的烟气所携带。物理夹带的机制主要包括以下几个方面。(1)剪切力和湍流:在吸收塔内部,烟气与吸收剂接触过程中,烟气的高速流动会对液体产生剪切力,导致液体破裂形成细小液滴,同时烟气的湍流运动也有助于液滴的形成和分散<sup>[16]</sup>。(2)气泡破裂:在吸收塔的气液接触区,空气或其他气体可能进入液体中形成气泡,当这些气泡上升到气相区域并破裂时,会释放出液体液滴,这些液滴随之被烟气夹带<sup>[17]</sup>。(3)液滴动力学

行为:液滴在烟气中运动受到重力、浮力、惯性力和黏性力的共同作用,在特定操作条件下,液滴可能不会立即沉降,而是被烟气携带向上运动,直至最终脱离气相<sup>[18]</sup>。(4)气液界面稳定性:气液界面的表面张力会影响液滴尺寸和稳定性,在气液接触过程中,界面张力的变化可能导致液滴破裂或合并,进而影响夹带效率<sup>[19]</sup>。

胺逃逸中的气态排放是指在化学吸收系统中,有机胺以气态形式从吸收液中逸出到烟气中的现象<sup>[20]</sup>。该过程主要涉及以下几种物理化学机制。(1)有机胺在气相和液相间存在一定的平衡关系,其在气相中的分压由其在液相中的浓度决定。当有机胺的气相分压高于周围环境分压时,有机胺会从液相逸出到气相<sup>[21]</sup>。(2)有机胺的挥发性与其分子结构

和物理化学性质密切相关,分子量较小、挥发性较高的有机胺更容易从液态转变为气态<sup>[22]</sup>。(3)升高温度会加快有机胺的分子运动速度,降低其在液体中的溶解度,从而使有机胺挥发性升高。类似的,降低系统压力也会导致有机胺气相分压升高,促进其挥发<sup>[23]</sup>。

胺逃逸中的气溶胶排放是一种复杂而重要的排放形式,其复杂性主要与燃煤电厂烟气中液滴颗粒的特殊作用有关。这些液滴颗粒能够运输某些有机胺并将其吸附在液滴颗粒表面,然后以气溶胶的形式释放出来,排放量最高可达 $1000 \times 10^{-6}$ 。由于气溶胶排放对环境有较大影响,其形成机制和相关控制策略正受到越来越多的关注。因此,以下重点对气溶胶排放机理进行分析。

## 1.2 气溶胶排放机理

气溶胶是固体或液体小颗粒悬浮在气体中形成的混合物,其形成机制复杂多样,如均相成核、非均相成核(异相成核)、液滴破碎和化学反应等<sup>[25]</sup>。其中,均相成核是在纯净气相环境中,由于气体分子的随机运动和碰撞,形成新液滴或固体颗粒的过程。在化学吸收系统中,高温和高浓度的有机胺蒸气环境容易诱发均相成核,形成微小的有机胺液滴。这些液滴随后可以凝结和生长,最终形成气溶胶颗粒<sup>[26]</sup>。非均相成核发生在气相和固体或液体表面的接触处。在化学吸收系统中,烟气中的颗粒物或设备壁面可以作为成核点,促进有机胺在其表面凝结形成新液滴,这种机制在存在大量颗粒物或污染物的情况下尤为显著<sup>[27]</sup>。液滴破碎发生在气液接触区域,如吸收塔内部,高速气流可导致液滴破碎形成更小的颗粒,这些小颗粒随后被烟气携带形成气溶胶。液滴破碎机制主要受气流速度、液滴尺寸和黏度等因素的影响<sup>[28]</sup>。化学反应是有机胺在高温和某些杂质(如O<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>和NO<sub>x</sub>)的共同作用下可能

发生化学转化,生成挥发性更强的产物,这些产物可以作为气溶胶结核,促进气溶胶生成<sup>[29]</sup>。

FULK等<sup>[30]</sup>将吸收塔内的工作介质分为3种相态:气溶胶液滴(气溶胶相)、游离气体(气相)和吸收剂(液相);在3种相态之间存在两种界面:气溶胶相与气相界面、气相与液相界面。由于气溶胶比表面积较大,CO<sub>2</sub>能够高效地穿透气溶胶,因此气溶胶中的CO<sub>2</sub>负载较高。气溶胶表面的有机胺挥发性较低,这与液相和气溶胶间的分压差产生协同作用,促进了胺的迁移。随着胺/CO<sub>2</sub>不断向气溶胶迁移,气溶胶内的CO<sub>2</sub>负载增大,从而促使水分由气体相向气溶胶相迁移,直至达到平衡,此过程推动了气溶胶的持续形成(图1)<sup>[31]</sup>。ZHANG等<sup>[32]</sup>进一步揭示了气溶胶生长动力学的深层机制,认为随着气溶胶浓度的提升,啉嗪(PZ)中气溶胶液滴与游离气体、游离气体与吸收剂的迁移速率无法匹配。

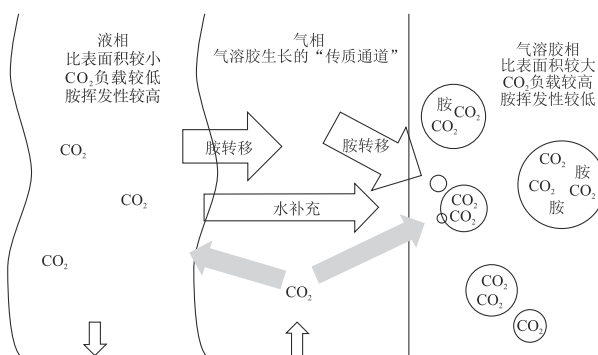


图1 气溶胶生长机理示意图<sup>[31]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of aerosol growth mechanism<sup>[31]</sup>

## 2 醇胺法捕集CO<sub>2</sub>过程中胺逃逸控制技术及相关研究进展

针对胺逃逸控制技术(如多级水洗和酸洗床等),系统梳理了相关技术的原理、控制对象和优缺点,结果见表2。

表2 胺逃逸控制技术对比

Table 2 Comparison of amine escape control technologies

控制技术	原理	控制对象	优点	缺点	文献
多级水洗		有机胺液和气溶胶	运行和维护成本低	需经过特殊设计才能达到控制效果	[33]
酸洗	酸液与气态胺液和NH <sub>3</sub> 快速反应	气态胺液和NH <sub>3</sub>	综合控制效果较好	脱除的有机胺无法回收利用	[34]
干床	控制吸收塔温度,进而降低胺液排放	气态胺液	运行及维护成本低	改造成本较高	[35]
湿式电除尘	电场控制气溶胶定向运动	气溶胶凝结核	气溶胶脱除率高达99.99%,维护简单	改造成本较高,投资费用增大	[36]
蒸汽注入	增大气溶胶颗粒粒径,使其更容易被除雾器脱除	气溶胶凝结核	与除雾器耦合使用时,可以增大除雾器脱除效率	需要蒸汽,增大额外运行费用	[37]
除雾器	通过惯性和撞击脱除气溶胶颗粒物	气溶胶	对于物理夹带产生的较大液滴(尺寸大于3 μm)控制效果较好	运行过程中压降较高,需要补充额外能量,导致运行成本增大	[38]

目前,胺逃逸控制技术领域亟待创新,需研发新型控制技术,在显著降低气相与气溶胶相污染物排放的同时,兼顾投资成本,实现环保效益和经济效益的双赢。

### 2.1 多级水洗

水洗(单级水洗、两级水洗和多级水洗)因其较好的有机胺液及气溶胶吸收性能而成为控制胺逃逸并减少胺液损失的最常用方法之一。法国阿尔斯通公司的冷氨工艺(CAP工艺)和韩国能源研究所(KIER)开发的相关工艺广泛采用了单级水洗<sup>[39]</sup>。然而,使用单级水洗难以完全回收逸出的胺液和NH<sub>3</sub>。在一般运行条件下,通过水洗塔后排放气体中的NH<sub>3</sub>排放量仍高于 $50 \times 10^{-6}$ ,超过了排放标准<sup>[40]</sup>。为进一步控制胺逃逸,通常会采用两级水洗或多级水洗。

在大多数有机胺液及气溶胶处理工艺中,水洗是一种简单而有效的方法,但该方法也存在一些缺点,如需要消耗大量水,而且废水需要进一步处理;如果将产生的稀胺溶液注入原溶剂中,会导致系统水量失衡,影响系统持续运行<sup>[41]</sup>。此外,有机胺液回收工艺也会导致CO<sub>2</sub>捕集系统的能耗和设施成本增加,从而导致运行成本大幅增大。MANI等<sup>[42]</sup>对阿尔斯通CAP工艺进行了热力学分析。结果表明,在CO<sub>2</sub>质量分数为26%、吸收温度为10℃的条件下,CO<sub>2</sub>消减再生器的能耗为2377 kJ/kg(处理1 kg气体的能耗为2377 kJ,下同),而CO<sub>2</sub>汽提器的能耗仅为2291 kJ/kg。NIU等<sup>[43]</sup>对常温常压下氨水捕集CO<sub>2</sub>的过程进行了模拟。结果表明,NH<sub>3</sub>减排系统的能耗(1703 kJ/kg)远高于CO<sub>2</sub>再生能耗(1285 kJ/kg)。这两项研究都表明,回收NH<sub>3</sub>的能耗可能等于或超过仅捕集CO<sub>2</sub>的能耗。

### 2.2 酸洗

为了提高吸收效率,酸洗是可以采用的重要方法。与水洗相比,酸洗的反应速率更快,去除效率更高<sup>[44]</sup>。硫酸、盐酸、硫化氢和其他多种酸均可用于吸收逸出的气态胺,处理后所得产品可用作复合肥料。SUN等<sup>[45]</sup>在水洗塔下游安装了1个酸洗塔,并使用硫酸处理烟气。为了测试酸洗洗涤器性能,还向处理后的烟气中添加了NH<sub>3</sub>(标况下流量最高为150 mg/m<sup>3</sup>)。结果表明,该工艺可以将NH<sub>3</sub>排放量降至5 mg/m<sup>3</sup>以下。BONALUMI等<sup>[46]</sup>和GAL等<sup>[47]</sup>均提出了湿法烟气脱硫工艺与控制胺逃逸系统的集成方案。该集成方案通过结合烟气脱硫(WFGD)技术与胺逃逸控制技术,可有效提高脱硫效率并减少胺

类吸收剂的挥发,进而实现烟气中SO<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>的高效协同脱除,同时减少环境排放和提高化学吸收剂利用效率。

### 2.3 干床

干床是位于吸收塔上部的微湿填料,可从气相中有效回收有机化合物。干床工艺可显著降低气相中吸附剂含量,并能轻微冷却烟气颗粒和液滴,但对气溶胶控制效果有限。张贤等<sup>[48]</sup>发现当气溶胶浓度较高时,使用干床工艺也能显著减少胺逃逸(较初始值减少1个数量级左右)。

### 2.4 湿式电除尘

以湿式电除尘器(WESP)为基础的湿式电除尘工艺是一种可减少有机胺逃逸的后处理方法。WESP是结合静电除尘和湿法除尘两种原理设计的装置,主要用于去除烟气中粉尘、酸性气体和其他悬浮微粒<sup>[49]</sup>。具体而言,通过在阳极板和阴极线之间施加高压直流电产生电晕放电,使烟气中的颗粒带电,随后在电场力作用下沉积到极板上,然后通过水膜或水雾将沉积颗粒冲洗下来,从而实现烟气净化。MERTENS等<sup>[50]</sup>研究了WESP对CO<sub>2</sub>捕集过程中气溶胶排放的控制效果,发现湿式电除尘器通过内部电晕放电可产生离子,气溶胶与离子碰撞带电后在静电场中脱离烟气撞向极板。MA等<sup>[51]</sup>发现WESP对于从烟气中去除凝结核非常有效(有效率可达100%),因此可以有效防止胺液在吸收器内形成气溶胶。

### 2.5 蒸汽注入

蒸汽注入是一种通过向烟气中引入水蒸气来达到减少胺逃逸的技术。MOSER等<sup>[52]</sup>在BASF的CO<sub>2</sub>捕集实验平台上进行了一系列研究,评估了烟气预处理技术在提升污染物捕集效率方面的效果。结果表明,采用冷却或蒸汽注入策略,均可有效增大进入吸收塔的凝结核尺寸。凝结核尺寸增大后,污染物在通过吸收塔时能够更高效地与吸收剂接触,从而提高了污染物的捕集率。更为关键的是,冷却或蒸汽注入策略为后续的除雾器或湿式电除尘系统的协同作用创造了有利条件,使系统在污染物去除方面表现出了显著的协同效应。该研究为工业界提供了污染物控制新策略。

### 2.6 除雾器

除雾器是工业领域用于从气体流中去除液滴的设备,广泛应用于湿法脱硫和气体洗涤等领域。除雾器由单个或多个安装在容器或槽体内的除雾元件组成,含有雾粒的气体通过除雾器时,可通过

惯性碰撞、直接拦截和布朗运动捕集微小液滴,这些微小液滴会逐渐聚合成大颗粒或液膜。在气流驱动与重力作用下,沿床层内表面排出,从而实现气体净化与雾液捕集。传统除雾器(如金属丝网、屋脊和旋流板型)侧重于利用惯性与结构高度清除颗粒,在消除大液滴(尺寸大于3 μm)和因传输或机械夹带而产生的更大液滴时非常有效,但在消除小颗粒时效果较差。通常情况下,吸收塔中产生的气溶胶颗粒尺寸小于2 μm,因此需要使用亚微米颗粒分离器进行控制。

KAMIJO等<sup>[53]</sup>报道三菱重工(MHI)进行了一系列胺排放试验评估,以评估硫酸气溶胶KS-1和MEA排气中SO<sub>3</sub>的影响,发现其专门设计的多级水洗系统与除雾器结合可以有效控制污染,胺排放量由 $12 \times 10^{-6}$ ~ $35 \times 10^{-6}$ 降低至 $0.7 \times 10^{-6}$ ~ $3.0 \times 10^{-6}$ ,吸收剂消耗量降为原消耗量的25%左右。

KNUDSEN等<sup>[54]</sup>报道了阿克清洁公司(ACC)开发的一种新型吸收塔除雾器,该除雾器能够有效防止有机胺气溶胶生成,当有机胺气溶胶初始排放量达到 $200 \times 10^{-6}$ 时,经过该除雾器处理后,出口处胺排放量显著降低至 $2 \times 10^{-6}$ 。此外,美国国家碳捕集中心采用ACC开发的新型吸收塔除雾器对5号煤块进行了类似的排放测试,发现在采用该除雾器之前,有机胺排放量为 $10 \times 10^{-6}$ ~ $40 \times 10^{-6}$ ,而在安装该除雾器后,有机胺排放量迅速降至 $1 \times 10^{-6}$ 以下。除了对有机胺的有效控制,ACC开发的新型吸收塔除雾器还对水冲洗和雾化难以处理的污染物(如NH<sub>3</sub>)有一定控制效果。如使用该除雾器能够将NH<sub>3</sub>排放量从初始的 $4 \times 10^{-6}$ 降低至 $1 \times 10^{-6}$ 以下。此外,二甲基乙酰胺(DMA)、丙烯酸甲酯(MA)、丙烯酸乙酯(EA)和N,N-二异丙基乙胺(DIEA)等降解产物的排放量也明显减少。因此,ACC开发的新型吸收塔除雾器在污染物控制方面表现出良好性能和广泛适用性。

KHAKHARIA等<sup>[55]</sup>研究了纤维除雾器在控制吸收塔气溶胶方面的效果。结果表明,纤维除雾器在处理较大颗粒时效果更佳,因为这些颗粒更容易从吸收塔出口处被移除,但随之而来的问题是随着气溶胶尺寸的增大,其含水量也相应增大,这会导致系统压降增大。当吸收塔入口处的颗粒含量为 $1 \times 10^7$ ~ $1 \times 10^8$  cm<sup>-3</sup>时,纤维除雾器的去除效率高达99.99%。值得注意的是,在被去除的颗粒中,绝大多数颗粒的尺寸都小于1 μm。此外,作者还发现在采用了纤维除雾器之后,MEA排放量(标况计)显著

下降(从85~180 mg/m<sup>3</sup>降低至1~4 mg/m<sup>3</sup>)。作者在丹麦Dong Energy热电厂进行的实地测试进一步验证了实验研究结果。实地测试结果表明,在加入纤维除雾器之后,MEA排放量可被控制在极低水平(0.02~0.70 mg/m<sup>3</sup>)。

根据以上分析,认为气溶胶排放主要受烟气中凝结核和塔内条件影响。当凝结核数量越多时,气溶胶数量越多。此外,贫溶液入口温度、烟气入口温度、有机胺类型和贫溶液负载量也会对气溶胶排放量产生影响。上述报道虽然使用不同的测试设备和方法进行了研究,但存在研究不够系统和全面等缺点,导致许多因素的影响存在不确定性,还需进行系统研究和分析。

### 3 醇胺法捕集CO<sub>2</sub>过程中胺逃逸控制技术改进措施研究进展

#### 3.1 对吸收剂的改进

##### 3.1.1 吸收剂组分

DU等<sup>[56]</sup>研究了胺类化合物的基团和分子结构对其挥发性的影响,重点关注了羟基、胺基、醚基、甲基以及环状结构等对胺类化合物挥发性的影响。EDWARDS等<sup>[57]</sup>发现含有羟胺基和醚基等极性基团的胺类化合物,如MEA、二甘醇胺(DGA)和甲基二乙醇胺(MDEA),其挥发性相对较低。这是因为极性基团能够增大分子间相互作用力,从而降低挥发性。而含有非极性基团(如甲基和亚甲基)的胺类化合物,如氨基甲基丙醇(AMP),则表现出较高的挥发性。这可能是因为非极性基团减少了分子间相互作用,使分子更容易从液相转移至气相。陆诗建等<sup>[58]</sup>对化学吸收法胺液逃逸控制技术进行了综述,认为具有环状结构的胺类化合物(如哌嗪(PZ)及其衍生物)的挥发性通常低于直链胺,其原因在于环状结构能够增加分子稳定性,从而降低其挥发性。为了进一步分析胺类化合物的挥发性,NGUYEN等<sup>[59]</sup>使用Aspen Plus软件,并结合UNIFAC-DMD模型估算了有机胺的亨利常数(可用于描述气体在液体中溶解度的参数,与挥发性密切相关)。结果表明,除MEA外,其他有机胺的亨利常数计算值与实验值之间存在2~20倍的差异。作者认为产生这种差异的原因可能是UNIFAC-DMD模型最初是基于烷胺的平衡数据建立的,并未充分考虑极性基团(羟基和酯基等)在水溶液中可形成的强氢键作用。因此,在应用UNIFAC-DMD模型预测含有极性基团的胺类化合物时,可能需要进行适当修正和改进。

### 3.1.2 添加剂

添加剂通常用于增强主吸收剂的吸收性能。这种增强作用与主吸收剂和添加剂之间的分子间相互作用密切相关。结构中同时含有羟基和氨基的烷醇胺可与有机胺分子形成氢键,并增强  $\text{CO}_2$  吸收,被认为是最具潜在应用价值的添加剂之一<sup>[60-61]</sup>。EIKELAND 等<sup>[60]</sup>以 PZ 和 AMP 作为添加剂,发现胺排放量可较未使用添加剂时减少 44.1%。然而,相同添加剂的胺排放减少率差异较大,如以质量分数为 30% 的 AMP 作为添加剂,胺排放减少率最低为 27.4%,最高为 64.0%。这可能是因为 AMP 等作为添加剂时,其与游离胺分子之间的作用主要为较弱的分子间相互作用,而此相互作用形成的弱键对外部变量非常敏感,最终导致相同添加剂在不同情况下的实验结果差异较大。此外,在减少氨法脱硫过程胺逃逸的研究中,YANG 等<sup>[62]</sup>提出黄腐酸(FA)可以用于抑制胺逃逸,因为 FA 中的羧基和酚基会与氨水相互作用形成相对稳定的黄腐酸铵,从而抑制胺逃逸。因此,氨基酸作为同时具有氨基和羧基的添加剂,被认为是抑制胺逃逸和改善吸收的理想添加剂之一。HU 等<sup>[63]</sup>研究了 L-组氨酸作为添加剂时的吸收性能。结果表明,以 L-组氨酸作为添加剂,体系具有较好的  $\text{CO}_2$  吸收率和循环性能,L-组氨酸结构中的 1 个羧基和 3 个氨基对提高  $\text{CO}_2$  捕集性能并减少胺逃逸有积极作用。

## 3.2 对控制设备的改进

### 3.2.1 纤维团聚沉积技术

纤维团聚沉积技术是一种通过促进小尺寸气溶胶团聚和生长,进而增强其沉积和沉降效率的技术。该技术在新型纤维团聚装置中得到了应用,新型纤维团聚装置示意图见图 2<sup>[64]</sup>。

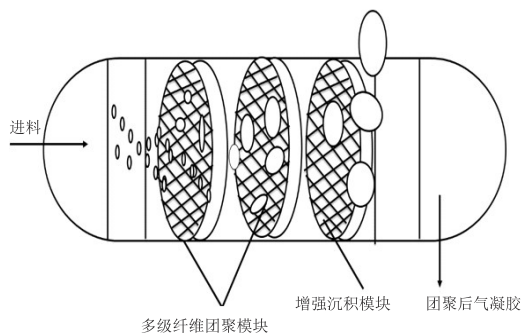


图 2 新型纤维团聚装置示意图<sup>[64]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of novel fiber agglomerator<sup>[64]</sup>

新型纤维团聚装置的工作流程如下。(1)流体通过专门的入口分配器进入系统,分配器的主要功

能是确保流体均匀分布和稳定流动。(2)流体进入多级纤维团聚模块,模块可根据不同的精度设置,逐步将小尺寸液态胺气溶胶聚集成更大尺寸的气溶胶颗粒,该过程不仅增大了气溶胶尺寸,还使其变得更加易于沉淀和分离。(3)流体进入增强沉积模块,该模块能够加速大尺寸气溶胶颗粒的沉淀和分离,从而显著减少分离器长度,进而提高系统效率。

### 3.2.2 级间冷却技术

级间冷却技术在醇胺法捕集  $\text{CO}_2$  系统中扮演着至关重要的角色,被视为一种有效提升溶剂吸收效率和增强传质过程的方法。该技术通过在吸收塔适当位置引入冷却机制,不仅能够显著提升溶剂的吸收效率,还能优化  $\text{CO}_2$  捕集过程<sup>[64-65]</sup>。具体而言,级间冷却技术通过降低溶剂温度,进而降低溶剂挥发性,增强了溶剂的  $\text{CO}_2$  吸收性能,提高了溶剂的  $\text{CO}_2$  吸收容量。同时,级间冷却技术也有助于减少溶剂在吸收过程中蒸发损失,进而提高溶剂的稳定性和循环利用效率。在传质方面,级间冷却技术通过改善气液接触条件,促进了  $\text{CO}_2$  从气相向液相的转移。此外,级间冷却技术还能减少气溶胶形成,减少胺逃逸,进一步提升了系统的环保性和经济性。

KARIMI 等<sup>[66]</sup>发现在 MEA 吸收系统中,将冷却器安装在吸收塔高度四分之一处最为有效。级间冷却技术的作用在于可以增大烟气中液滴尺寸,从而使液滴能有效包裹游离胺和少量氨基甲酸酯,促进后续的水洗涤处理。MAJEED 等<sup>[67]</sup>证实级间冷却技术可显著降低 MEA 分压以控制气溶胶生长,并有效防止胺逃逸。目前,控制有机胺逃逸的级间冷却技术仍处于实验室研究和软件模拟阶段,尚未在大型项目中应用。

## 4 结语与展望

本文综述了醇胺法捕集  $\text{CO}_2$  系统中胺逃逸的主要形式,包括物理夹带、气体排放和气溶胶排放,指出胺逃逸现象对系统捕集效率及环境、健康存在潜在影响。同时总结了目前用于处理胺逃逸问题的控制技术,包括多级水洗、酸洗、干床、湿式电除尘、蒸汽注入和除雾器等,并分析了各项控制技术的原理、优缺点及效果。

为进一步提升  $\text{CO}_2$  捕集效率并减少胺逃逸带来的环境和健康风险,未来需从以下方面继续进行研究。(1)研究并开发低挥发性、高稳定性的新型吸收

剂,从源头减少胺逃逸发生,如添加醇类、氨基酸类等添加剂,通过增强吸附剂体系与游离胺之间的相互作用,进而控制胺逃逸。(2)通过改进吸收塔和解吸塔的设计和操作条件,优化气液接触过程,提高CO<sub>2</sub>吸收效率并降低胺液排放。(3)针对气溶胶等较难控制的污染物形式,开发更加高效、低成本的脱除技术,提高系统整体排放控制水平。(4)深入分析气溶胶尺寸和浓度,研究气溶胶生长规律,筛选出控制气溶胶生长的方法。

### 参考文献

- [1] 陆诗建,王风,刘玲,等. 烟道气CO<sub>2</sub>捕集用醇胺溶液降解研究进展[J]. 低碳化学与化工, 2024, 49(7): 13-22.  
LU S J, WANG F, LIU L, et al. Research progress on degradation of alcohol amine solution for CO<sub>2</sub> capture in flue gas [J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2024, 49(7): 13-22.
- [2] TANG H T, ZHANG S, CHEN W Y. Assessing representative CCUS layouts for China's power sector toward carbon neutrality [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55: 11225-11235.
- [3] BAKER R W, FREEMAN B, KNIEP J, et al. CO<sub>2</sub> capture from cement plants and steel mills using membranes [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57: 15963-15970.
- [4] CHEN S Y, LIU J F, ZHANG Q, et al. A critical review on deployment planning and risk analysis of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) toward carbon neutrality [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 167: 112537.
- [5] HU G P, SMITH K H, LIU L, et al. Reaction kinetics and mechanism between histidine and carbon dioxide [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 307: 56-62.
- [6] 谢和平,刘涛,吴一凡,等. CO<sub>2</sub>的能源化利用技术进展与展望[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 145-156.  
XIE H P, LIU T, WU Y F, et al. Progress and prospect of CO<sub>2</sub> energy utilization technology [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(1): 145-156.
- [7] MIAO Y H, HE Z J, ZHU X C, et al. Operating temperatures affect direct air capture of CO<sub>2</sub> in polyamine-loaded mesoporous silica [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 426: 131875.
- [8] 申长俊,陆诗建,刘玲,等. 船舶尾气净化技术研究进展[J]. 低碳化学与化工, 2024, 49(4): 98-106.  
SHEN C J, LU S J, LIU L, et al. Research progress of ship exhaust purification technology [J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2024, 49(4): 98-106.
- [9] STENZEL F, GREVE P, LUCHT W, et al. Irrigation of biomass plantations may globally increase water stress more than climate change [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1512.
- [10] WEI N, LI X C, LIU S N, et al. A strategic framework for commercialization of carbon capture, geological utilization, and storage technology in China [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 110: 103420.
- [11] HUANG R T, WU H, YANG L J. Study on the ammonia emission characteristics in an ammonia-based WFGD system [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 379: 122257.
- [12] WEI N, JIAO Z S, ELLETT K, et al. Decarbonizing the coal-fired power sector in China via carbon capture, geological utilization, and storage technology [J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, 55(19): 13164-13173.
- [13] YANG L, LV H D, JIANG D L, et al. Whether CCS technologies will exacerbate the water crisis in China?—A full life-cycle analysis [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 134: 110374.
- [14] 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): 6397-6411.  
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): 6397-6411.
- [15] JAYAWEERA I, JAYAWEERA P, ELMORE R, et al. Update on mixed-salt technology development for CO<sub>2</sub> capture from post-combustion power stations [J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 640-650.
- [16] YANG L, WEI N, LV H D, et al. Optimal deployment for carbon capture enables more than half of China's coal-fired power plant to achieve low-carbon transformation [J]. *Science*, 2022, 25(12): 105664.
- [17] KHAKHARIA P, BRACHERT L, MERTENS J, et al. Understanding aerosol based emissions in a post combustion CO<sub>2</sub> capture process: Parameter testing and mechanisms [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 34: 63-74.
- [18] ZHANG L Y, SONG Y F, SHI J L, et al. Frontiers of CO<sub>2</sub> capture and utilization (CCU) towards carbon neutrality [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, 39: 1252-1270.
- [19] 许毛,张贤,樊静丽,等. 我国煤制氢与CCUS技术集成应用的现状、机遇与挑战[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(6): 659-666.  
XU M, ZHANG X, FAN J L, et al. Status quo, opportunities and challenges of integrated application of coal-to-hydrogen and CCUS technology in China [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(6): 659-666.
- [20] ZHANG W W, DAI C Y, LUO X M, et al. Policy incentives in carbon capture utilization and storage (CCUS) investment

- based on real options analysis [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2021, 23: 1311-1326.
- [21] LI L C, CONWAY W, BURNS R, et al. Investigation of metal ion additives on the suppression of ammonia loss and CO<sub>2</sub> absorption kinetics of aqueous ammonia-based CO<sub>2</sub> capture [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 56: 165-172.
- [22] 王宁, 陆诗建, 刘玲, 等. 胺吸收体系中 CO<sub>2</sub> 催化解吸再生技术的研究进展[J]. *化工进展*, 2025, 44(1): 445-464.  
WANG N, LU S J, LIU L, et al. Research progress of catalytic regeneration for energy-efficient CO<sub>2</sub> capture in amine absorption system [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2025, 44(1): 445-464.
- [23] LIANG Z W, FU K Y, IDEM R, et al. Review on current advances, future challenges and consideration issues for post-combustion CO<sub>2</sub> capture using amine-based absorbents [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2016, 24: 278-288.
- [24] BACHU S. Review of CO<sub>2</sub> storage efficiency in deep saline aquifers [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40: 188-202.
- [25] 方梦祥, 狄闻韬, 易宁彤, 等. CO<sub>2</sub> 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): 8-16.  
FANG M X, DI W T, YI N T, et al. Research progress on pollutant emission and control from CO<sub>2</sub> chemical absorption system [J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(2): 8-16.
- [26] 梅杰琼, 陆诗建, 任雪峰, 等. CO<sub>2</sub> 间接矿化工业固废制备多晶型碳酸钙研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(3): 59-71.  
MEI J Q, LU S J, REN X F, et al. Preparation of various crystal forms of calcium carbonate from industrial solid waste by CO<sub>2</sub> in direct mineralization [J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(3): 59-71.
- [27] LUO Q L, ZHOU Q L, FENG B, et al. A combined experimental and computational study on the shuttle mechanism of piperazine for the enhanced CO<sub>2</sub> absorption in aqueous piperazine blends [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2022, 61: 1301-1312.
- [28] CAI B F, LI Q, LIU G Z, et al. Environmental concern-based site screening of carbon dioxide geological storage in China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 7598.
- [29] 樊静丽, 李佳, 晏水平, 等. 我国生物质能-碳捕集与封存技术应用潜力分析[J]. *热力发电*, 2021, 50(1): 7-17.  
FAN J L, LI J, YAN S P, et al. Application potential analysis for bioenergy carbon capture and storage technology in China [J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(1): 7-17.
- [30] FULK S M. *Measuring and modeling aerosols in carbon dioxide capture by aqueous amines* [D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2016.
- [31] SCHABER K. *Aerosol formation in absorption processes* [J]. *Chemical Engineering Science*, 1995, 50(8): 1347-1360.
- [32] ZHANG Y, KANG J L, FULK S, et al. Modeling amine aerosol growth at realistic pilot plant conditions [J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 1045-1060.
- [33] WANG T, HOU C L, GE K, et al. Spontaneous cooling absorption of CO<sub>2</sub> by a polymeric ionic liquid for direct air capture [J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2017, 8(17): 3986-3990.
- [34] KNUDSEN J N, BADE O M, ANHEDEN M, et al. Novel concept for emission control in post combustion capture [J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 1804-1813.
- [35] DENG H, BIELICKI J M, OPPENHEIMER M. Leakage risks of geologic CO<sub>2</sub> storage and the impacts on the global energy system and climate change mitigation [J]. *Climatic Change*, 2017, 144(2): 151-163.
- [36] MERTENS J, ANDERLOHR C, ROGIERS P, et al. A wet electrostatic precipitator (WESP) as countermeasure to mist formation in amine based carbon capture [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 31: 175-181.
- [37] MERTENS J, BRUNS R, SCHALLERT B, et al. Effect of a gas-gas-heater on H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> aerosol formation: Implications for mist formation in amine based carbon capture [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 39: 470-477.
- [38] DA SILVA E F, KOLDERUP H, GOETHEER E, et al. Emission studies from a CO<sub>2</sub> capture pilot plant [J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 778-783.
- [39] YU H, QI G, WANG S, et al. Results from trialling aqueous ammonia-based post-combustion capture in a pilot plant at Munmorah power station: Gas purity and solid precipitation in the stripper [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2012, 10: 15-25.
- [40] KHAKHARIA P, HUIZINGA A, JURADO L C, et al. Acid wash scrubbing as a countermeasure for ammonia emissions from a post-combustion CO<sub>2</sub> capture plant [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(33): 195-204.
- [41] 张娟娟, 陆诗建, 刘玲, 等. CO<sub>2</sub> 驱采及输送防腐[J]. *现代化工*, 2024, 44(5): 66-69.  
ZHANG J J, LU S J, LIU L, et al. CO<sub>2</sub> flooding and transportation anticorrosion [J]. *Modern Chemical Industry*, 2024, 44(5): 66-69.
- [42] MANI F, PERUZZINI M, BARZAGLI F. The role of zinc(II) in the absorption-desorption of CO<sub>2</sub> by aqueous NH<sub>3</sub>, a potentially cost-effective method for CO<sub>2</sub> capture and recycling [J]. *ChemSusChem*, 2008, 1(3): 228-235.
- [43] NIU Z Q, GUO Y C, ZENG Q, et al. Experimental studies and rate-based process simulations of CO<sub>2</sub> absorption with aqueous ammonia solutions [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(14): 9-19.
- [44] DING H, ZHENG H R, LIANG X, et al. Getting ready for carbon capture and storage in the iron and steel sector in

- China: Assessing the value of capture readiness [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 244: 118953.
- [45] SUN L L, DOU H G, LI Z P, et al. Assessment of CO<sub>2</sub> storage potential and carbon capture, utilization and storage prospect in China [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2018, 91(6): 970-977.
- [46] BONALUMI D, GIUFFRIDA A. Investigations of an air-blown integrated gasification combined cycle fired with high-sulphur coal with post-combustion carbon capture by aqueous ammonia [J]. *Energy*, 2016, 117: 43-49.
- [47] GAL E. Use of SO<sub>2</sub> from flue gas for acid wash of ammonia: US 7867322 [P]. 2011-11-01.
- [48] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 70-80.  
ZHANG X, LI Y, MA Q, et al. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China [J]. *Engineering Science*, 2021, 23(6): 70-80.
- [49] 韩永嘉, 王树立, 张鹏宇, 等. CO<sub>2</sub>分离捕集技术的现状与进展[J]. *天然气工业*, 2009, 29(12): 79-82.  
HAN Y J, WANG S L, ZHANG P Y, et al. Current status and progress of CO<sub>2</sub> separation and capture technology [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(12): 79-82.
- [50] MERTENS J, ANDERLOHR C, ROGIERS P, et al. A wet electrostatic precipitator (WESP) as countermeasure to mist formation in amine based carbon capture [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 31: 175-181.
- [51] MA S C, SONG H H, ZANG B, et al. Experimental study on additives inhibiting ammonia escape in carbon capture process using ammonia method [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2013, 91(12): 2775-2781.
- [52] 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: 902-910.
- [53] KAMIJO T, KAJIYA Y, ENDO T, et al. SO<sub>3</sub> impact on amine emission and emission reduction technology [J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 1793-1796.
- [54] KNUDSEN J N, BADE O M, ANHEDEN M, et al. Novel concept for emission control in post combustion capture [J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 1804-1813.
- [55] KHAKHARIA P, KVAMSDAL H M, DA SILVA E F, et al. Field study of a brownian demister unit to reduce aerosol based emission from a post combustion CO<sub>2</sub> capture plant [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 28: 57-64.
- [56] DU Y, YUAN Y, ROCHELLE G T. Volatility of amines for CO<sub>2</sub> capture [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 58: 1-9.
- [57] EDWARDS R, CELIA M A. Infrastructure to enable deployment of carbon capture, utilization, and storage in the United States [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115: 201806504.
- [58] 陆诗建, 张娟娟, 杨菲, 等. 化学吸收法胺液逃逸控制技术研究进展[J]. *化工进展*, 2024, 43(8): 4562-4570.  
LU S J, ZHANG J J, YANG F, et al. Research progress of amine escape control technology by chemical absorption method [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, 43(8): 4562-4570.
- [59] NGUYEN T, HILLIARD M, ROCHELLE G. Volatility of aqueous amines in CO<sub>2</sub> capture [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 4: 707-715.
- [60] EIKELAND P, SKJAERSETH J B. The politics of low-carbon innovation: Implementing the European Union's strategic energy technology plan [J]. *Energy Research & Social Science*, 2021, 76: 102043.
- [61] 陆诗建, 张娟娟, 杨菲, 等. CO<sub>2</sub>管道输送技术进展与未来发展浅析[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2022, 58(6): 944-952.  
LU S J, ZHANG J J, YANG F, et al. Progress and future development trend of CO<sub>2</sub> pipeline transportation technology [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2022, 58(6): 944-952.
- [62] YANG J T, GAO H Y, HU G X, et al. Novel process of removal of sulfur dioxide by aqueous ammonia-fulvic acid solution with ammonia escape inhibition [J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30: 3205-3218.
- [63] HU B Y, ZHAI H B. The cost of carbon capture and storage for coal-fired power plants in China [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 65: 23-31.
- [64] HUANG Y, YI Q, KANG J X, et al. Investigation and optimization analysis on deployment of China coal chemical industry under carbon emission constraints [J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 113684.
- [65] MAJEED H, SVENDSEN H F. Effect of water wash on mist and aerosol formation in absorption column [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 333: 636-648.
- [66] KARIMI M, HILLESTAD M, SVENDSEN H F. Investigation of intercooling effect in CO<sub>2</sub> capture energy consumption [J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 1601-1607.
- [67] MAJEED H, SVENDSEN H F. Characterization of aerosol emissions from CO<sub>2</sub> capture plants treating various power plant and industrial flue gases [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, 74: 282-295.