

醇胺溶液在烟气 CO₂ 捕集过程中氧化降解的研究进展

陈祖翰¹ 吴爱琴¹ 罗 斌² 汤国军¹ 周明宇¹ 赵启龙³

1. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;
2. 中石油安岳天然气净化有限公司, 四川 资阳 642300;
3. 四川省精细化工研究设计院有限公司, 四川 自贡 643000

摘 要: 醇胺溶剂凭借优良的吸收能力和显著的经济优势被广泛应用于烟气二氧化碳(CO₂)捕集技术中。然而,通常烟气组分复杂,存在多种其他活性组分,氧气(O₂)会对醇胺溶剂产生较大影响。O₂与醇胺溶液反应,发生氧化降解,导致捕集效率降低,降解产物可能对捕集设备产生负面影响。为解决这一问题,探讨了醇胺溶液的氧化降解原理,分析了影响氧化降解的多种因素,总结了氧化降解过程中产生的物质,并研究了抗氧化剂的作用。在此基础上,展望了抗降解剂在醇胺溶液中的应用前景,指出开发适用于烟气 CO₂ 捕集技术的抗降解剂是提高醇胺溶液抗降解性能的重要研究方向。

关键词: 碳捕集;醇胺法;氧化降解;抑制氧化降解

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2025.02.006

Research progress on oxidative degradation of alcoholamine solution in flue gas CO₂ capture processes

CHEN Zuhan¹, WU Aiqin¹, LUO Bin², TANG Guojun¹, ZHOU Mingyu¹, ZHAO Qilong³

1. CPECC Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;
2. PetroChina Anyue Natural Gas Purification Co., Ltd., Ziyang, Sichuan, 642300, China
3. Sichuan Institute of Fine Chemical Industry Research and Design Co., Ltd., Zigong, Sichuan, 643000, China

Abstract: In carbon dioxide(CO₂) capture technology for flue gas, alcoholamine solutions are widely utilized owing to their exceptional absorption capacity and notable economic advantages. However, the composition of flue gas is typically complex, often containing numerous other reactive components, among which oxygen(O₂) has a particularly significant impact on alcoholamine solvents. When oxygen(O₂) reacts with alcoholamine solutions, oxidative decomposition occurs, resulting in reduced capture efficiency and potentially adverse effects on capture equipment due to degradation products. To address this issue, this paper explores the principle of oxidative decomposition of alcoholamine solutions, analyzes various factors influencing this process, summarizes the substances produced during oxidative decomposition, and

收稿日期:2024-02-21

基金项目:中国石油工程建设有限公司科研课题“天然气处理节能降碳关键技术研究”(CPECC2022KJ04)

作者简介:陈祖翰(1994-),男,四川成都人,工程师,学士,主要从事天然气储运研究与设计工作。E-mail:chenzuhan_sw@cnpc.com.cn

investigates the role of antioxidants. Furthermore, this paper also examines the potential applications of anti-degradants in alcoholamine solutions and highlights that the development of anti-degradants tailored for carbon dioxide (CO_2) capture processes represents an important research direction for enhancing the anti-degradation performance of alcoholamine solutions.

Keywords: Carbon capture; Alcoholamine method; Oxidative degradation; Inhibition of oxidative degradation

0 前言

工业生产活动会排放大量温室气体,导致气候变暖问题。二氧化碳(CO_2)的排放已经引起了全球重视,中国也于 2020 年提出了“双碳”目标。 CO_2 的排放源主要是工业生产中煤、石油等化石燃料的燃烧,2022 年中国煤炭消耗达到 $45.6 \times 10^8 \text{ t}$, CO_2 排放量为 $114.8 \times 10^8 \text{ t}$,如何将排放出的 CO_2 进行捕集再利用或封存,是当前研究的重点。目前 CO_2 捕集方法有吸附法、膜分离法、低温分离法、生物法、吸收法,其中以有机胺(醇胺溶液)为化学吸收剂的吸收法应用最为广泛^[1-2]。

化石燃料燃烧后排放出的烟气中含有氧气(O_2)、硫氧化物、氮氧化物等杂质,再生过程中处于高温环境($>105^\circ\text{C}$),使用金属设备会引入亚铁离子(Fe^{2+})、铜离子(Cu^{2+})等微量金属离子,这些均会对有机胺降解产生重要影响。有机胺的主要降解方式为热降解、氧化降解和金属离子催化降解^[3-4],其中氧化降解造成的有机胺损耗占比 70%, CO_2 捕集过程中的降解问题会严重影响有机胺的捕集性能。降解产物具有腐蚀性,会影响设备的使用寿命,因此有必要针对有机胺降解问题,探究氧化降解机理、氧化降解影响因素以及筛选合适的抗氧化剂,从而提升有机胺的抗降解性能。

近年来,国内外学者通过理论分析并结合实验数据,研究了有机胺降解的反应机理、影响因素、降解产物以及抗降解能力等^[5],为有机胺 CO_2 捕集技术的改进优化及抗降解剂的选择提供了理论指导及研究方向^[6]。本文综述了在使用有机胺进行 CO_2 捕集过程中降解机理及抗降解剂的应用情况,探讨了醇胺溶液的氧化降解原理,分析了影响氧化降解的多种因素,总结了氧化降解过程中产生的物质,并研究了抗氧化剂的作用,最后对抗降解剂在醇胺溶液中的潜在应用进行了展望。

1 氧化降解机理

醇胺溶剂氧化降解的原因可归结为三类^[7-10]:一是原料气带入 O_2 而引起降解,此时吸收塔中 O_2 浓度较高,为胺溶液氧化降解的主要场所;二是反应体系中没有 CO_2 时的高温氧化降解;三是因存在金属离子而催化的氧化降解。

醇胺溶剂的氧化降解主要发生在其分子结构中的胺基和羟基上。氧化过程中,醇胺溶剂中胺基被氧化成亚胺基或羧基,羟基则被氧化成醛基或羧基。这些氧化产物进一步发生缩合、聚合等反应,形成高分子量物质,导致醇胺溶剂的黏度增加、颜色加深、性能下降。部分研究人员认为主要有电子转移机理和氢转移机理描述醇胺溶液氧化降解反应。

1.1 电子转移机理

自由基从胺类化合物的氮原子上夺取电子,从而形成带正电的胺基,随后带正电的胺基经去质子化过程,转化为亚胺基。亚胺基进一步氧化及水解,生成醛或酮与胺或[氨气(NH_3)]。以乙醇胺(Monoethanolamine, MEA)为例,氧化降解电子转移机理见图 1^[8]。具体而言,在自由基铁离子的催化下,MEA 分子被诱导形成 MEA 胺自由基,该自由基去质子化成为亚胺基。亚胺基在后续反应中,依据不同的引发条件,可能经历以下两条路径:一是亚胺基与 O_2 反应,生成过氧胺基自由基,该自由基再与 1 个 MEA 胺分子结合,形成不稳定的过氧化胺,该过氧化胺最终分解为亚胺分子和过氧化氢分子;二是在自由基引发剂的作用下,亚胺基转化为亚胺离子,亚胺离子水解产生羟基乙醛和 NH_3 ,或者直接分解为甲醛和 NH_3 ^[11]。

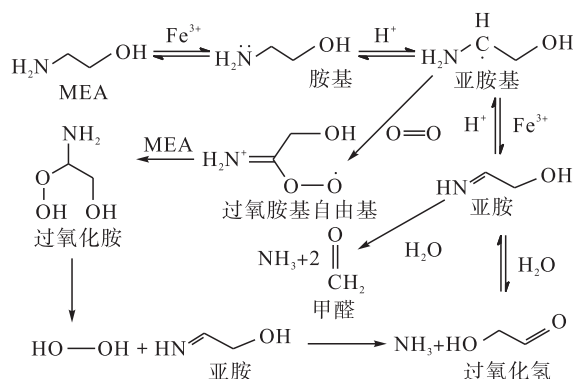


图 1 MEA 氧化降解电子转移机理图

Fig. 1 Electron transfer mechanism of MEA oxidative degradation

1.2 氢转移机理

该机理阐释了自由基如何从有机胺的氮原子或 α -碳原子、 β -碳原子位置上夺取氢原子,进而促使有机胺转化为自由基。此过程中,未成对电子能在环状结构内

部迁移,诱发碳氮键的断裂,产生 NH_3 、乙醛(CH_3CHO)或乙醛自由基($\text{CH}_3\text{CHO}\cdot$)等降解产物。此外,这些自由基还可能进一步氧化,生成甲醛和 NH_3 。以 MEA 为例,其氧化降解过程中氢转移机理见图 2^[12]。在电离辐射作用下,MEA 溶液会发生氧化降解,产生氢自由基

($\text{H}\cdot$)和羟自由基($\text{OH}\cdot$)。在水溶液中,MEA 分子通过氢键作用形成 $\text{O}\cdots\text{HN}$ 或 $\text{OH}\cdots\text{N}$ 键,构成五元环状结构。依据氢原子转移机制及五元环上不同 C 原子(α -碳原子、 β -碳原子)上氢离子(H^+)的转移路径,可以观察到不同的降解产物生成^[11]。

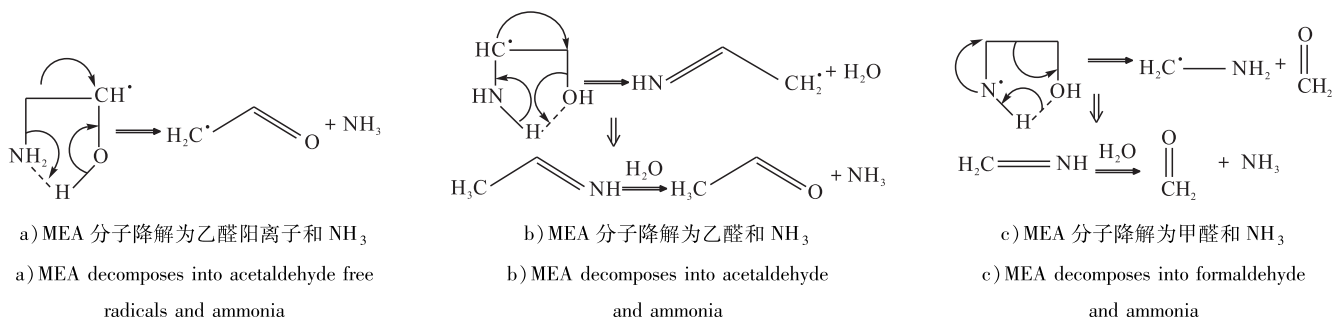


图 2 MEA 氧化降解氢转移机理图

Fig. 2 Diagram of hydrogen transfer mechanism of MEA oxidation degradation

2 氧化降解影响因素

醇胺溶剂氧化降解受到多种因素的影响,主要包括温度、 O_2 浓度、金属离子、 CO_2 负载等。

温度是影响醇胺溶剂氧化降解的重要因素^[13]。随着温度的升高,醇胺溶剂分子的运动速度加快,与氧分子的碰撞频率增加,从而加速氧化降解反应的进行。

O_2 是醇胺溶剂氧化降解的主要氧化剂。随着 O_2 浓度的增加,醇胺溶剂氧化降解速率加快。

金属离子对醇胺溶剂氧化降解具有显著影响^[14-15]。三价铁离子(Fe^{3+})、二价镍离子(Ni^{2+})等金属离子可以催化醇胺溶剂氧化降解反应,加速氧化降解过程。

CO_2 负载对醇胺溶剂氧化降解也有一定影响^[16]。首先,醇胺分子与 CO_2 反应,生成氨基甲酸酯中间体。随后在 O_2 存在或温度较高的环境下,这些中间体经历内环化反应,最终转化为恶唑烷氧化降解产物。

VEVELSTAD S J 等人^[17]对 MEA 及其氧化降解产物的稳定性进行研究,结果表明,在不同实验条件下胺损失不同。在封闭系统中,MEA 发生明显降解。金属离子、 O_2 浓度以及温度均是影响氧化降解过程的关键因素,它们首先作用于初级氧化降解产物的形成机制。进一步地,通过探究影响次级氧化降解产物中间体形成的因素及调整平衡条件,揭示出温度是影响初级及次级氧化降解产物形成的关键要素。

Chen D 等人^[14]研究认为,由于吸收塔内壁存在抗腐蚀的硫化亚铁(FeS)与有机胺吸收液混合 Fe^{2+} 会被氧化成 Fe^{3+} , Fe^{3+} 作为催化剂促进了有机胺的氧化过程,生成氨基酸自由基。随后,这些氨基酸自由基会进一步被氧化为含有羟基的化合物,加快有机胺溶液氧化降解

速率。

李世霞^[18]探究了 CO_2 负载对 MEA 降解产物的影响。相较于无 CO_2 负载时,除产生多种酰胺类、咪唑类降解产物外,MEA 负载 CO_2 后其氧化降解产物中增加了 2-噁唑烷酮(2-Oxazolidone, OZD),实验结果表明, CO_2 负载会促进生成降解氧化产物。

3 氧化降解产物

由于烟气携带 O_2 进入 CO_2 捕集装置(包括吸收塔、解吸塔、重沸器等设备),加之 CO_2 捕集装置本身难以完全隔绝空气,以及贫胺液填充过程中的空气侵入,导致醇胺溶剂与 O_2 接触,并发生氧化反应。此外,微量金属离子也被视为影响氧化降解的重要因素^[19]。Fredriksen S B 等人^[20]的研究揭示,醇胺的氧化降解过程颇为复杂,且所有醇胺类在氧化降解时均会产生甲酸、乙酸、草酸等物质。这些羧酸会进一步与其他化合物反应,生成难以再生的热稳定性盐(Heat Stable Salt, HSS)。

柴欢欢^[21]研究了羟乙基乙二胺的氧化降解过程及其产物,发现有些氧化降解产物不稳定,可以和溶液中有机胺吸收剂继续反应,实验结果表明,羟乙基乙二胺的主要包括两级降解产物,其中一级产物为氨基甲酸酯、MEA 以及乙二胺,二级产物为 1-(2-羟乙基)咪唑、1-(2-羟乙基)-2 咪唑啉酮。

Gouedard C 等人^[22]详细介绍 MEA、二乙醇胺(Diethanolamine, DEA)、甲基二乙醇胺(Methyldiethanolamine, MDEA)、哌嗪(Piperazine, PZ)和 2-氨基-2-甲基-1-丙醇(Aminomethyl propanol, AMP)的氧化降解产物,并对其他胺和胺共混物进行了研究,发现在不同反应条件下醇胺溶液的氧化降解产物有差异。例如,在中试装置中,

MEA 的主要降解产物通常为 NH_3 、N-(2-羟乙基)-哌啶和 N-(2-羟乙基)-2-(2-羟乙基氨基)乙酰胺。在实验室研究中, MEA 主要降解产物是 NH_3 、羧酸、N-(2-羟乙基)-甲酰胺、N-(2-羟乙基)-乙酰胺(HEA)和 N-(2-羟乙基)-咪唑。MEA、DMEA、MDEA、PZ 和 AMP 的氧化降解产物基本与 MEA 氧化降解产物相同, 尽管已经确定了许多氧化降解产物, 但仍存在一部分未知的氧化降解产物。

Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 等对醇胺溶液氧化降解起促进作用^[19-21]。研究人员为探究 Fe^{2+} 对醇胺溶剂氧化降解实验的作用, 将不同浓度的氯化亚铁加入 MEA 与 2-氨基-2-甲基-1-丙醇的复合溶剂中, 开展氧化降解实验。实验结果显示, 相比于未添加 Fe^{2+} 的空白对照组, 加入 Fe^{2+} 使 MEA、2-氨基-2-甲基-1-丙醇总降解率均提升 80% 以上, 因此 Fe^{2+} 对 MEA 与 2-氨基-2-甲基-1-丙醇的复合溶剂的氧化降解存在较明显的催化作用^[16]。

4 氧化降解控制

关于缓解醇胺溶液氧化降解的研究主要集中在筛选合适的抗氧化剂方面。目前广泛使用的醇胺溶液抗氧化剂主要有两类: 一是捕获溶液中 O_2 , 避免溶液与 O_2 发生氧化反应, 被称为 O_2 捕获剂; 二是捕获溶液中金属离子, 从而消除溶液中的金属离子, 防止其对氧化降解产生催化作用, 被称为金属捕获剂。

4.1 O_2 捕获剂

O_2 捕获剂在溶液中会先与 O_2 发生反应, 使溶液中 O_2 浓度降低, 从而减少 O_2 对醇胺溶液的氧化作用。Delfort B 等人^[23]通过实验分别评价了抗坏血酸、对苯二酚、3,5-二叔丁基-4-羟基苯甲酸、2,2,5,7,8-五甲基-6-酚和 2,2,6,6-四甲基-4-哌啶醇的加入对 MEA 溶液的影响。这五种常规抗氧化剂的主要抗降解机理是通过捕获自由基来阻止自由基引发链反应。降解过程中由于碳碳共价键断裂, 碳氧化后生成大量甲酸, 所以 MEA 降解产物中主要为甲酸, 也是 MEA 氧化过程的最终降解产物之一, 甲酸浓度高低能客观反应抗降解剂的性能。实验结果表明, 常规抗降解剂几乎不起作用, 甚至会起反作用, 所以在 CO_2 捕集过程中要想寻求良好的抗降解性能, 需要有针对性的抗降解剂。

季芹芹等人^[24]在 MEA 中加入烷基多酚类抗氧化剂 [β -(3,5-二叔丁基-4-羟基苯基)丙酸]季戊四醇酯(抗氧化剂 1010), 探究了抗氧化剂 1010 在 MEA 中的抗氧化机理, 并优化了抗氧化剂加量, 结果表明抗氧化剂 1010 用量为吸收剂用量的 0.15% 时, 能有效减缓 MEA 的氧化降解速率。大量的工业应用证明, 低分子酚类化合物可以有效去除锅炉水中的 O_2 , 不仅可用作抗氧化剂, 还能保护设备, 起到缓蚀作用, 且毒性较低。储可弘等人^[25]探究

了醇胺类非水碳捕集溶剂体系的氧化机理, 并评价了抗氧化剂乙醛肟的性能, 实验结果表明, 抗氧化剂乙醛肟具有较佳的抗氧化降解性能。陆诗建等人^[26]在相同工况下分别探究了 6 种抗氧化剂的抗氧化效果, 实验结果表明, 丙酮肟的抗氧化效果最佳, 最优加量为 800 mg/L, 氧化降解抑制率为 98.32%。

4.2 金属捕获剂

金属捕获剂通过分子与金属离子的螯合作用结合, 游离的金属离子与捕获剂分子结合后生成稳定的化合物, 从而有效抑制金属离子在醇胺溶液中的催化降解作用^[27]。Lee I 等人^[28]分别考察了抗降解剂乙二胺四乙酸(Ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)和二乙烯三胺五甲基膦酸(DTPMP)在 MEA 溶液中的抗降解性能。实验结果表明, 在加入 EDTA 与 DTPMP 后 MEA 溶液损耗大幅减少。EDTA 和 DTPMP 发生螯合作用, 与溶解在 MEA 溶液的金属离子化学键合, 有效抑制了 MEA 溶液的氧化降解。后又对氧化降解产物浓度进行分析, 结果表明, 使用 EDTA 和 DTPMP 后氧化降解产物浓度大幅降低, 其中 EDTA 的抗降解性能较 DTPMP 的抗降解性能更加优异。

黄钟斌^[29]以 MEA 与抗氧化剂 NCT 为研究对象, 探究了不同抗氧化剂使用量、残碳、 O_2 浓度、胺液浓度以及温度对氧化抑制效果的影响。结果表明, 适当提高抗氧化剂浓度、降低反应温度、降低 O_2 浓度、降低胺液浓度有利于减缓中间产物的生成速率。此外也验证了 NCT 抗氧化机理为降低氧化降解过程中关键中间产物的生成速率。但当抗氧化剂抑制中间产物的量小于中间产物的累计量时, 此时可能出现抑制氧化降解失效的问题。

黄宇辉等人^[30]对比了不同类型抗氧化剂对混合胺中各组分降解速率、 CO_2 负载、溶液相对碱度的作用效果, 实验数据表明, 氧化 4 周后, 加入金属捕获剂 EDTA 能有效减少氧化降解量达 60% 以上, 由此也可以推断混合胺氧化降解过程中金属离子起到了关键的作用, 在混合胺中加入 EDTA 也有显著的抗降解效果。黄钟斌等人^[31]使用三氧化二铋作为抗降解剂, 三氧化二铋中的离子具有两种或两种以上的稳定价态, 抗氧化剂中的金属离子为稳定价态中的低价态, 使得三氧化二铋能够起到抗氧化的作用, 三氧化二铋是非耗氧型抗氧化剂, 不需要再定期往胺液中补充, 能节省成本、简化流程, 延长胺液的使用寿命。毛松柏等人^[32]在多种醇胺溶液中加入其研发的抗降解剂体系, 该体系为金属螯合剂羟基乙叉二膦酸和有机金属配合物葡萄糖酸铋钠复合体系, 该复合体系能有效发挥出各单一组分的优势, 羟基乙叉二膦酸降低体系中游离金属离子浓度, 葡萄糖酸铋钠阻断醇胺溶液氧化连锁反应的进行, 同时形成协同作用, 增强

抗降解性能,还对管道污垢有一定清除能力。

5 结论

以有机胺作为化学吸收剂是当前烟气 CO_2 捕集技术的主要方法,但醇胺溶液在烟气 CO_2 捕集过程中氧化降解问题严重,影响捕集性能,因此国内外研究人员做了大量研究,也取得了很大进展,但仍然存在一些亟待解决的问题与挑战:目前对醇胺溶液的氧化反应机理认知较为清楚,自由基反应学说为主流,但降解产物类型较多,更进一步的反应机理还有待深入研究,可以借助当前先进的表征测试手段明确反应机理。对于碳捕集技术中有机胺吸收剂的抗氧化剂研究较少,大部分是借鉴其他行业的成熟产品,由于实际使用条件以及现场工况不同,很难有较好的抗降解效果。大量的研究数据表明,相较于 O_2 捕获剂,对金属捕获剂的研究开发更加重要,未来针对醇胺溶液抗降解剂的研究应以金属捕获剂为主, O_2 捕获剂为辅,通过切断金属离子对醇胺溶液的催化反应,从而达到抑制醇胺溶液降解的目的。开发适用于 CO_2 捕集技术的抗降解剂是未来提高醇胺溶液抗降解性能的重要研究方向。

参考文献:

- [1] 储可弘. 乙基乙醇胺非水 CO_2 吸收剂的降解性能研究 [D]. 大连:大连理工大学,2020.
CHU Kehong. Study on the degradation performance of ethylethanolamine non-aqueous CO_2 absorbent [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [2] 徐燕洁. 用于烟气 CO_2 捕集的双胺类少水吸收剂性能研究 [D]. 杭州:浙江大学,2021.
XU Yanjie. Evaluation on diamine based water lean solvents for post-combustion CO_2 capture [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [3] RAO A B, RUBIN E S, KEITH D W, et al. Evaluation of potential cost reductions from improved amine-based CO_2 capture systems [J]. *Energy Policy*, 2006, 34 (18): 3765-3772.
- [4] ANDREW J S, GARY T R. Catalysts and inhibitors for oxidative degradation of monoethanolamine [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2009, 3 (6): 704-711.
- [5] 陆诗建,王家凤,李世霞,等. 复合胺溶液吸收 CO_2 降解实验研究 [J]. *高校化学工程学报*, 2019, 33 (5): 1240-1246.
LU Shijian, WANG Jiafeng, LI Shixia, et al. Experimental study on degradation of CO_2 absorbed enylamine mixed-solution [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2019, 33 (5): 1240-1246.
- [6] 雷轩邈,王 甫,朱先会,等. 胺法碳捕集胺的降解与抑制方式的研究进展 [J]. *高校化学工程学报*, 2021, 35 (6): 966-978.
LEI Xuanmiao, WANG Fu, ZHU Xianhui, et al. Review on degradation and inhibition of amine from amine carbon capture processes [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2019, 33 (5): 966-978.
- [7] CHI S, ROCHELLE G T. Oxidative degradation of monoethanolamine [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2002, 41 (17): 4178-4186.
- [8] BELLO A, IDEM R O. Pathways for the formation of products of the oxidative degradation of CO_2 -loaded concentrated aqueous monoethanolamine solutions during CO_2 absorption from flue gases [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, 44 (4): 945-969.
- [9] CLOSMANN F, ROCHELLE G T. Degradation of aqueous methyldiethanolamine by temperature and oxygen cycling [J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 23-28.
- [10] LENARD G, VOICE A, TOYE D, et al. Influence of dissolved metals and oxidative degradation inhibitors on the oxidative and thermal degradation of monoethanolamine in postcombustion CO_2 capture [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53 (47): 18121-18129.
- [11] 高红霞. 低能耗新型脱碳工艺流程与捕获剂的开发及吸收剂降解性能研究 [D]. 长沙:湖南大学,2016.
GAO Hongxia. Development of innovative process configurations and solvents with low energy consumption and studies of amine degradation performance for carbon dioxide (CO_2) capture [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [12] PETRYAEV E, PAVLOV A, SHADYRO O. Homolytic deamination of amino-alcohols [J]. *Zhurnal Organicheskoi Khimii*, 1984, 20 (1): 29-34.
- [13] DAVIS J D. Thermal degradation of aqueous amines used for carbon dioxide capture [D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2009.
- [14] CHEN D, MARTELL A E, MCMANUS D. Studies on the mechanism of chelate degradation in iron-based, liquid redox H_2S removal processes [J]. *Canadian Journal of Chemistry*, 1995, 73 (2): 264-274.
- [15] MOHAMMED M E C P. DFT studies on thermal and oxidative degradation of monoethanolamine [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59 (34): 15214-15225.
- [16] 黄宇辉. 用于烟气 CO_2 化学吸收技术的混合胺吸收剂降解研究 [D]. 杭州:浙江大学,2021.
HUANG Yuhui. Research on degradation of blended amine solution for CO_2 chemical absorption technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

- [17] VEVELSTAD S J, GRIMSTVEDT A, KNUUTILA H, et al. Influence of experimental setup on amine degradation [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014, 28: 156-167.
- [18] 李世霞. CO₂ 吸收剂降解分析与实验研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
LI Shixia. Experimental study and degradation analysis of CO₂ absorbent [D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2017.
- [19] POINDEXTER, G S, OWENS D A, DOLAN P L. The use of 2-oxazolidinones as latent aziridine equivalents. 2. Aminoethylation of aromatic amines, phenols and thiophenols [J]. Journal of Organic Chemistry, 1992, 57 (23): 6257-6265.
- [20] Fredriksen S B, Jens K. Oxidative degradation of aqueous amine solutions of MEA, AMP, MDEA, Pz: A review [J]. Energy Procedia, 2013, 37: 1770-1777.
- [21] 柴欢欢. 羟乙基乙醇胺溶液捕集 CO₂ 过程中的降解及再生[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
CHAI Huanhuan. A study on degradation and reclamation of aqueous 2-(2-aminoethylamino-ethanol solution for CO₂ capture [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [22] GOUEDARD C, PICQ D, LAUNAY F, et al. Amine degradation in CO₂ capture. I. A review [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 10: 244-270.
- [23] DELFORT B, CARRETTE P, BONNARD L. MEA 40% with improved oxidative stability for CO₂ capture in post-combustion [J]. Energy Procedia, 2011, 4: 9-12.
- [24] 季芹芹, 刘建周, 张亚萍, 等. 有机胺吸收燃煤烟气 CO₂ 中抗氧化剂的作用机理研究 [J]. 中国煤炭, 2012, 38 (5): 113-117.
JI Qinqin, LIU Jianzhou, ZHANG Yaping, et al. Themechanism of antioxidant on the absorption of CO₂ from flue gas by organic amine [J]. China Coal, 2012, 38 (5): 113-117.
- [25] 储可弘, 陈绍云, 李 强, 等. 基于 N-乙基乙醇胺非水 CO₂ 吸收剂的抗氧化剂 [J]. 化工进展, 2019, 38 (12): 5565-5571.
CHU Kehong, CHEN Shaoyun, LI Qiang, et al. Oxidation inhibitor for thylethanolamine based non-aqueous CO₂ absorbent [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38 (12): 5565-5571.
- [26] 陆诗建, 刘 玲, 刘滋武, 等. AEP-DPA-CuO 相变纳米流体吸收 CO₂ 稳定性 [J]. 化工进展, 2022, 41 (8): 4555-4561.
LU Shijian, LIU Ling, LIU Ziwu, et al. Study of CO₂ absorption stability of AEP-DPA-CuO phase change nanofluids [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41 (8): 4555-4561.
- [27] 林晓栋. 整合剂在治理垃圾筛分腐殖土中重金属时的应用 [J]. 中国环保产业, 2020 (12): 70-72.
LIN Xiaodong. Application of chelating agents in the treatment of heavy metals in waste screening humus soil [J]. China Environmental Protection Industry, 2020 (12): 70-72.
- [28] LEE I, KWAK N, LEE J, et al. Oxidative Degradation of Alkanolamines with Inhibitors in CO₂ capture process [J]. Energy Procedia, 2013, 37: 1830-1835.
- [29] 黄钟斌. NCT 对-乙醇胺水溶液氧化抑制作用的实验研究 [J]. 气体净化, 2013, 13 (5): 8-10.
HUANG Zhongbin. Experimental study on the inhibitory effect of NCT on the oxidation of-ethanolamine aqueous solution [J]. Gas Purification, 2013, 13 (5): 8-10.
- [30] 黄宇辉, 方梦祥, 王 涛, 等. 新型 MEA-AMP 混合胺吸收剂的抗降解剂研究 [J]. 能源工程, 2021, 41 (5): 35-42.
HUANG Yuhui, FANG Mengxiang, WANG Tao, et al. Inhibitor for new MEA-AMP blended amine absorbent [J]. Energy Engineering, 2021, 41 (5): 35-42.
- [31] 黄钟斌, 陈 曦, 汪 东, 等. 用于脱碳溶液的抗氧化剂、脱碳溶液及其制备方法和应用: CN115591385A [P]. 2023-01-13.
HUANG Zhongbin, CHEN Xi, WANG Dong, et al. Antioxidants for decarburization solutions, decarburization solutions and their preparation methods and applications: CN115591385A [P]. 2023-01-13.
- [32] 毛松柏, 黄钟斌. 一种用于有机胺型脱碳溶液的抗氧化剂: CN104226079A [P]. 2014-12-24.
MAO Songbai, HUANG Zhongbin. An antioxidant for organic amine type decarburization solutions: CN104226079A [P]. 2014-12-24.