醇胺法 CO_2 捕集过程中溶液降解特性的研究进展

邵文婷[1],付小燕[1],王敬宽[1],付　东[1,2],高　凯[3],杜庶铭[3],袁世通[4],张　盼[1,2*]
(1.华北电力大学(保定)环境科学与工程系,河北 保定 071003;
2.河北省燃煤电站烟气多污染物协同控制重点实验室,华北电力大学(保定),河北 保定 071003;
3.国家能源集团新能源技术研究院有限公司,北京 102209;
4.中国大唐集团科技创新有限公司,河北 雄安 071799)

摘要:针对醇胺法 CO_2 捕集过程中醇胺富液的降解问题,系统分析了醇胺溶液的降解特性,重点综述了醇胺溶液热降解与氧化降解的主要产物、反应路径及现有控制手段,同时结合实际运行工况探讨了降解对系统性能的影响。最后,对醇胺溶液降解研究的未来方向进行了总结与展望,旨在为优化 CO_2 捕集工艺提供理论参考。

关键词:醇胺溶液;热降解;氧化降解;降解产物;降解机理;降解措施
中图分类号:TQ028.17　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:0253-4320(2026)11-0052-06
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.11.010

Research progress on solution degradation characteristics during CO_2 capture by alcohol amine method

PI Wen-ting[1], *FU Xiao-yan*[1], *WANG Jing-kuan*[1], *FU Dong*[1,2], *GAO Kai*[3], *DU Shu-ming*[3], *YUAN Shi-tong*[4], *ZHANG Pan*[1,2*]
(1.Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China; 2.Hebei Key Laboratory of Collaborative Control of Flue Gas Multi-pollutant in Coal-fired Power Station, North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China; 3.New Energy Technology Research Institute of the Nation Energy Group Co., Ltd., Beijing 102209, China; 4.China Datang Group Science and Technology Innovation Co., Ltd., Xiong'an 071799, China)

Abstract:Aiming at the degradation problem of alcohol amine rich solution during CO_2 capture by alcohol amine method, the degradation characteristics of alcohol amine solution were systematically analyzed, focusing on the main products, reaction pathways and existing control methods of thermal degradation and oxidative degradation of alcohol amine solution, and the effect of degradation on system performance was discussed in combination with actual operating conditions. Finally, the future direction of alcohol amine solution degradation research is summarized and prospected, aiming to provide a theoretical reference for optimizing CO_2 capture processes.

Key words:alcohol amine solution; thermal degradation; oxidative degradation; degradation products; degradation mechanism; degradation measures

随着工业化的持续发展,一系列环境变化日益凸显,包括全球气温升高、海平面上升及极端气候事件增多等现象,这些变化对地球的长期可持续发展构成了显著威胁。全球变暖与温室效应密切相关,其中人为活动排放的二氧化碳(CO_2)是增强温室效应、推动气候系统变化的关键因素[1]。因此,减少和控制二氧化碳的排放是首要任务。当前较为成熟的燃烧后 CO_2 捕集技术多采用醇胺溶液作为吸收剂。基本原理是 CO_2 在吸收塔内与胺发生可逆化学反应从而实现捕集。然而,在实际电厂烟气环境中,胺溶剂除了与 CO_2 反应外,还会与烟气中存在的 O_2、SO_x、NO_x 等杂质气体发生不可逆的副反应,生成热稳定盐等难以再生的副产物,这一过程通常被称为溶剂降解[2]。吸收剂的降解不仅直接导致

收稿日期:2026-01-12;**修回日期**:2026-09-03
基金项目:碳中和与能源智联项目(2023YFE0204600);国家自然科学基金青年项目(52106009);河北省自然科学基金面上项目(E2021502024);中央高校基本科研业务费专项资金(2024MS170,2023MS142)
作者简介:邵文婷(2000-),女,硕士,研究方向为醇胺脱碳异相催化过程的腐蚀及降解特性研究,pwt123hh@163.com;张盼(1986-),男,博士,副教授,研究方向为碳捕集与利用,通讯联系人,zhangpan01@ncepu.edu.cn。

有效溶剂回收量下降和 CO_2 捕集能力减弱,还会显著增加系统运行成本。此外,降解产物的持续积累会加剧管路及设备的腐蚀,缩短装置使用寿命。部分挥发性降解产物的排放还可能带来环境污染问题[3]。

吸收剂的降解主要可分为氧化降解、热降解以及硫降解 3 种类型。在碳捕集系统中,烟道气进入吸收装置前通常经过脱硫、除尘等预处理过程,使其中含硫杂质气体含量较低,所以残余含硫杂质对胺液降解的影响已显著降低,因此实际运行中降解机制主要集中于氧化降解与热降解 2 方面[2]。基于此,本文中系统综述了特定醇胺溶液的主要降解产物、降解机制及现有降解抑制策略。

1　热降解产物、机理与控制措施进展

1.1　热降解产物

醇胺热降解是指吸收了 CO_2 的富胺溶液在高温条件下发生的降解反应,此类反应主要发生在解吸塔中。目前,国内外学者已对醇胺溶液热降解展开深入研究,以下是对热降解产物的相关研究进行总结与分析。Davis 等[4]和李世霞[5]探究了乙醇胺(MEA)热降解行为,采用气相色谱质谱联用仪(GC-MS)检测 MEA 的热降解产物,结果表明 MEA 的热降解产物主要为二噁唑酮(OZD)、1-(2-羟基-乙基)-2-咪唑烷酮(HEIA)。值得注意的是,李世霞探究在没有 CO_2 参与的条件下,纯热降解产物只有乙二醇(DEA)和氨,说明 CO_2 负载会对热降解产生影响。Pal 等[6]探究了 *N*-甲基二乙醇胺(MDEA)的热降解产物,结果表明,热降解产物主要有 DEA、二甲氨基乙醇(DMAE)、三乙醇胺(TEA)和环氧乙烷(EO)。在烧杯试验中,Saeed 等[7]研究了 DEA 的热降解行为。结果发现,DEA 在有 CO_2 存在的情况下降解会更严重,主要降解产物为 3-(2-羟乙基)-2-噁唑烷酮(HEOD)、1,4-二(2-羟乙基)哌嗪(BHEP)和 TEA。在没有 CO_2 的情况下,热降解缓慢进行,TEA 和三-2-氨基乙胺(TAA)的含量也很低。Mazari 等[8]研究了哌嗪(PZ)+二乙醇胺(DEA)在降解 5 周后的热降解产物主要有 *N*-氨乙基哌嗪(AEP)、HEOD、BHEP、四乙烯五胺(TEPA)、TEA、OZD 等。研究表明在控制温度和胺浓度不变的情况下,PZ 和 DEA 的降解水溶液在高温不同的 CO_2 负荷下,有不同的降解产物。Saeed 等[9]和柴欢欢[10]对 AEEA 进行热降解研究,结果表明,Saeed 发现在有 CO_2 条件下,AEEA 表现得非常不稳定,并鉴定出了许多降解产物,1-(2-羟乙基)-2-咪唑烷酮(HEIA)是体系中富集度最高的降解产物,HEOD、BHEP、DEA 为初始降解产物。柴欢欢通过 GC-MS 检测出一些新产物,主要是羟乙基乙二胺、1-(2-羟乙基)哌嗪、1-(2-羟乙基)-2-咪唑啉酮、3-羟基哌啶。Gao 等[11]研究发现,在没有 CO_2 的情况下,DEEA 的热降解非常低。此外,DEEA 溶液比 MEA 溶液更能抵抗 CO_2 的热降解。作者通过 GC-MS 检测 175℃下的 DEEA 热降解产物,结果发现 3 种富集降解产物 *N*-乙基乙醇胺(EEA)、*N*,*N*-二乙基哌嗪(DEP)和 *N*-乙氧唑烷酮(EOZD)。

1.2　热降解机理

在醇胺溶液热降解中,通常通过降解产物来推测降解机理,典型的醇胺溶液降解机理如下。Polderman 等[12]通过探究 MEA 的热降解烧杯实验,采用 GC-MS 检测其产物,进一步推断热降解路径,如图 1 所示。实验发现 MEA 与 CO_2 反应生成氨基甲酸酯,氨基甲酸甲酯会环化形成 OZD,OZD 是中间产物,OZD 再与 MEA 反应得到 *N*-(2-羟乙基)乙二胺(HEED)。Pal 等[6]探究 MDEA 的热降解路径,MDEA 与 CO_2 的反应速度很慢,阻碍了吸收过程,MDEA 的一个分子甲基化和另一个 MDEA 分子去甲基化形成 DEA,这是一个主要的降解产物,通过 MDEA 的歧化反应生成 *N*,*N*-二甲基乙醇胺(DMAE)和三乙醇胺(TEA),通过脱烷基后生成 *N*-甲基乙醇胺(MAE)和环氧乙烷(EO)。

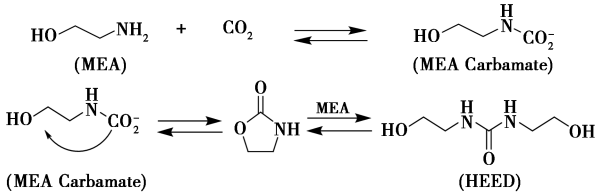


图 1　MEA 热降解机理

李红等[13]研究 *N*-乙基乙醇胺(EMEA)+二乙氨基乙醇(DEEA)+哌嗪(PZ)热降解机理。研究表明,EMEA 与 DEEA 可通过脱乙基化/乙基化反应相互转化。具体反应路径为:在高温下,EMEA 与 CO_2 反应首先生成 3-乙基唑烷-2-酮,该中间体继而可与哌嗪或另一分子 EMEA 反应,分别生成乙基[2-(哌嗪-1-基)乙基]氨基甲酸和 2-{乙基[2-(乙基氨基)乙基]氨基}乙烷-1-醇。值得注意的是,EMEA 分子内的 N 与 C 原子在高温下会形成双键,此双键遇水后断裂,最终导致 MEA 的生成;而 DEEA 则经过一系列反应转化为二乙胺,

如图 2 所示。

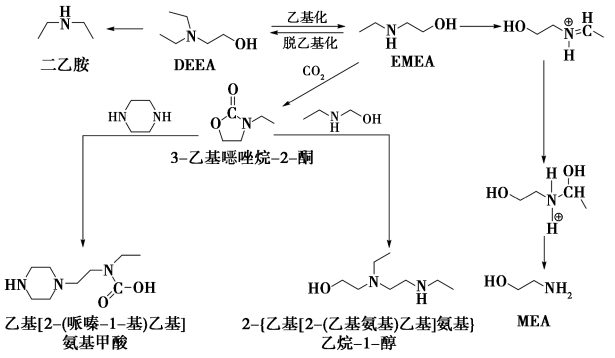


图 2 EMEA+DEEA+PZ 热降解的机理分析

Thompson 等[14]利用飞行时间(TOF)质谱仪(LC-TOF-MS)对乙二胺(EDA)的热降解产物进行定量分析,结果发现,热降解的主要产物为 2-咪唑烷酮(IZD)、*N*,*N*′-双(2-氨基乙基)尿素。EDA 的热降解机理,如图 3 所示。作者通过降解产物推测降解机理,首先,乙二胺氨基甲酸酯的生成是热降解过程中的关键初始步骤。随后,该中间体可通过 2 种主要途径进一步反应:其一发生分子内环化,转化为 IZD;其二则受到游离 EDA 的亲核进攻,促使 *N*,*N*′-双(2-氨基乙基)尿素的形成。此外,二乙烯三胺(DETA)等热降解产物的生成也与氨基甲酸酯结构的形成密切相关,其后续转化同样涉及亲核进攻机制。

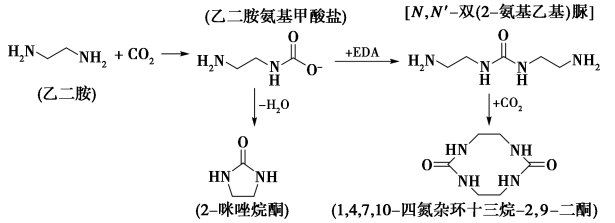


图 3 乙二胺(EDA)的热降解途径

在高温高压条件下,醇胺的热降解过程较为复杂。该过程中生成的大量中间产物可能引发持续且多样的后续反应,使得降解路径难以完全确定。目前提出的降解机理主要基于已检出的商业化降解产物。需指出的是,降解混合物中仍存在多种未鉴定的组分。因此,当前所归纳的降解途径仅为基于现有数据的最合理推断。

1.3 热降解控制措施

为抑制吸收剂的热降解,目前广泛应用的传统措施包括添加抗降解剂、选用有机胺非水溶剂以及引入复配组分等。同时,开发新型胺类吸收剂体系以替代传统的 MEA 等吸收剂,已成为当前降低热降解影响的重要研究方向。李红[15]研究了在 2-氨基-2-甲基-1,3-丙二醇(AMPD)+哌嗪(PZ)+H_2O 溶液中分别加入己二胺、二异丙醇胺及咪唑作为抗热降解剂的效果。结果表明,添加己二胺后,体系在热降解过程中 AMPD 的浓度下降幅度为 8.15%。相比之下,二异丙醇胺和咪唑的加入则进一步加剧了 AMPD 的降解,浓度降幅较未添加任何抑制剂的体系分别额外增加了 18.70% 和 28.43%。黄宇辉[16]对 MAH(MEA+AMP)与 APH(PZ+AMP)2 种混合胺吸收剂各组分间的相互作用进行了研究。结果显示,在为期 14 d 的热降解实验后,2 种体系表现出不同的抑制与促进效应。对于 MAH 复合体系,MEA 与 AMP 之间呈现相互抑制热降解的关系。而在 APH 体系中,PZ 可抑制 AMP 的热降解,AMP 则反而促进了 PZ 的热降解过程。Chen 等[17]选取了一种典型的低再生能耗型酰胺基双相吸收剂——二乙烯三胺(DETA)/二乙醇胺(DEA)/*N*,*N*-二甲基乙酰胺(DMAC)体系,对其热降解行为展开了研究。结果表明,该体系(2DE1AC)中活性胺组分的热稳定性优于传统的质量分数 30% MEA 溶液。在发生相分离前,CO_2 吸收与温度上升会显著加速 DETA 的降解。但相分离过程能有效抑制体系中热降解的协同反应,使水相中 DETA 的降解速率在相分离后降低 27.4%。此外,相分离还削弱了温度升高对 DETA 降解的推动作用,使其降解速率相应下降 24.1%。张增伟等[18]为评估不同醇胺的热稳定性并探索可替代 MEA 的低降解率吸收剂,对 MEA、DEA、TEA、3-氨基丙醇(MPA)及 4-氨基丁醇 5 种醇胺进行了热降解实验。数据表明,TEA、MPA 和 4-氨基丁醇均表现出一定的抗热降解能力,其中 MPA 和 4-氨基丁醇的热稳定性显著优于 MEA。该研究进一步指出,醇胺分子碳链的增长有助于提升热稳定性能。

2 氧化降解产物、机理及控制措施进展

2.1 氧化降解产物

氧化降解过程主要发生于吸收塔内,且通常在含 CO_2 的溶液环境中发生,目前对无 CO_2 条件下的氧化降解研究报道相对较少。以下是醇胺溶液的氧化降解在不同条件下的降解产物的分析及总结。在实验室研究中,Orendi 等[19]、李世霞[5]和 Lee 等[20]分别对 MEA 进行氧化降解行为研究,前二者在负载 CO_2 的 MEA 溶液氧化降解产物中都发现了 1-(2-羟乙基)哌嗪-2-酮(HEPO)、OZD、*N*-(2-羟基乙

基)咪唑(HEI)、*N*-(2-羟乙基)甲酰胺(HEF),而李世霞还发现了新的氧化降解产物 NH_3、*N*-(2-羟乙基)乙酰胺(HEA)和 *N*,*N*′-二(2-羟乙基)草酰胺(BHEOX)。Lee 与二者检测出的降解产物都不同,主要是甲酸盐、乙酸酯、亚硝酸盐和硝酸盐。基于前述 3 组实验产物可表明,在不同操作条件下,同一种胺液的降解产物组成存在明显差异。这一结果说明降解路径与产物分布受实验条件影响显著。Høisæter 等[21]进行三甘醇(TEG)的氧化降解实验,实验发现,TEG 在氧气存在和高温下是不稳定的,降解产物为乙二醇(MEG)、二甘醇(DEG)、甲酸、乙酸、乙醇酸、甲醛、乙醛和水。储可弘[22]使用电喷雾质谱分析饱和的 EMEA 非水溶液(EMEA+DEEA)的氧化降解产物,结果显示,EMEA 的主要氧化降解产物为羧酸类化合物(如羟基乙酸和乙二酸),DEEA 的主要氧化降解产物为多元胺类化合物。Lu 等[23]和柴欢欢[10]分别在不同实验条件下对 AEEA 进行强制降解实验,Lu 发现 AEEA 的主要降解产物是 1-(2-羟基-乙基)-2-咪唑烷酮(HEIA)、*N*-氨乙基哌嗪(AEP)和 2,5-哌啶二酮等。柴欢欢发现 AEEA 溶液氧化降解主要会生成两级产物,其中一级产物为氨基甲酸酯、单乙醇胺和乙二胺;二级产物为 1-(2-羟乙基)哌嗪、1-(2-羟乙基)-2-咪唑啉酮。Wang 等[24]研究 AMP+MEA 混合物的氧化降解行为,结果显示,在高温高压条件下 AMP+MEA 混合物的氧化降解产物是丙酮、2,4-二甲基吡啶和二羧基咪唑(DMOZD)。Vega 等[25]评估了新型 AMP+AEP 混合物在部分富氧燃烧条件下的氧化降解情况,结果显示,主要降解产物为甲酸和 2,4-二甲基吡啶。以上 2 组实验均检测到产物 2,4-二甲基吡啶的存在,表明混合胺液中若含有相同的胺类组分,则在降解过程中可能产生相同的降解产物。该产物可视为对应醇胺溶液的共同热降解产物。以上关于醇胺溶液降解产物的总结如表 1 所示。

表 1　醇胺溶液的降解产物

类型	吸收剂	降解产物
热降解	MEA[4]	OZD、HEIA
	MEA[5]	有 CO_2 负载:OZD、HEIA;无 CO_2 负载:DEA、氨
	MDEA[6]	DEA、DMAE、TEA、EO
	DEA[7]	有 CO_2 负载:HEOD、BHEP、TEA;无 CO_2 负载:TEA、TAA
	PZ+DEA[8]	AEP、HEOD、BHEP、TEPA、TEA、OZD
	AEEA[9]	HEIA、HEOD、BHEP、DEA
	AEEA[10]	羟乙基乙二胺、1-(2-羟乙基)哌嗪、1-(2-羟乙基)-2-咪唑啉酮、3-羟基哌啶
	DEEA[11]	EEA、DEP、EOZD
氧化降解	MEA[19]	HEPO、OZD、HEI、HEF
	MEA[5]	NH_3、HEF、HEA、HEI、BHEOX、HEPO、OZD
	MEA[20]	甲酸盐、乙酸酯、亚硝酸盐、硝酸盐
	TEG[21]	MEG、DEG、甲酸、乙酸、乙醇酸、甲醛、乙醛和水
	EMEA[22]	羧酸类化合物(如羟基乙酸和乙二酸),多元胺类化合物
	AEEA[23]	HEIA、AEP、2,5-哌啶二酮
	AEEA[10]	氨基甲酸酯、单乙醇胺、乙二胺、1-(2-羟乙基)哌嗪、1-(2-羟乙基)-2-咪唑啉酮
	AMP+MEA[24]	丙酮、2,4-二甲基吡啶和 DMOZD
	AMP+AEP[25]	甲酸和 2,4-二甲基吡啶

2.2　氧化降解机理

氧化降解通常发生在装置的气体入口处,因为此处 O_2 浓度最高,醇胺溶液与 O_2 发生不可逆的反应,产生氧化降解产物,由醇胺溶液到降解产物中间会发生一系列的降解机理,不同醇胺溶液的降解机理不同,典型醇胺溶液的降解机理如下。黄宇辉[16]对复配醇胺 MAH 吸收剂进行氧化降解实验研究,MAH 的主要成分为 MEA 和 AMP。吸收剂 MAH 在氧化降解 4 周后采用 GC-MS 检测氧化降解产物,分析 MAH 的氧化降解路径。作者研究发现,当 MAH 吸收 CO_2 后,MAH 会首先与 CO_2 反应生成氨基甲酸盐,然后在较高温和氧气气氛条件下,氨基甲酸盐会发生分子内环化,生成对应的噁唑烷类物质。当有 O_2 存在时,MEA 与 AMP 相比,MEA 更容易与 O_2 发生氧化反应,从而生成甘氨酸。储可弘[22]研究饱和非水溶液 EMEA 在氧化降解 30 d 后采用 ESI-MS 谱图分析氧化降解反应机理,认为 EMEA 吸收 CO_2 生成 EMEA 氨基甲酸盐,然后由 2 种途径继续降解。途径 1:氧化生成 *N*-(2-乙基)-*N*-(2-羧基)-乙酸,最后与 EMEA 发生分子间脱水反应;途径 2:发生分子内脱水环化反应生成 *N*-乙基-噁唑烷酮,然后与 EMEA 反应生成 1,3-二(2-羟乙基)咪唑烷酮,最后与乙醇酸发生分子间脱水反应,如图 4 所示。

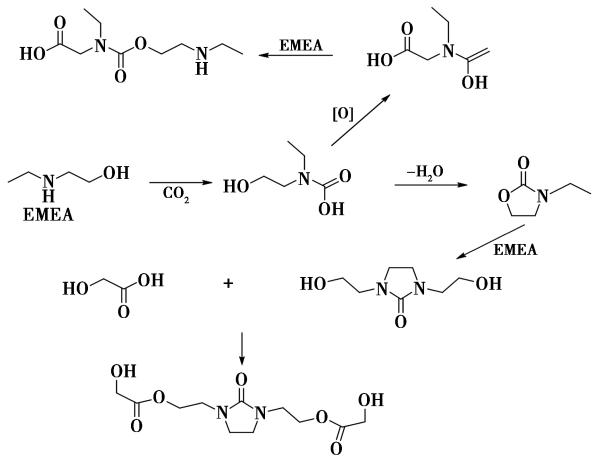


图 4　EMEA 氧化降解途径

Wang 等[26]研究 AMP 的氧化降解行为，利用 GC-MS 分析 16 d 后 AMP 的氧化降解产物，进一步确定可能的氧化降解机理。作者通过研究得出，AMP 更有可能是通过氢提取机制降解的，AMP 形成新的烷基，与 O_2 快速反应转化为相应的过氧基，然后过氧化基会转化为进一步的产物。这一途径可以解释氧气分压对 AMP 氧化速率的显著影响。过氧基通过六元环过渡态抽出 1 个氢原子，从这个过渡态中排出 1 个·OH 自由基后，分解成甲酸和亚胺，亚胺在水溶液中不稳定，容易水解成氨和丙酮。Lu 等[23]研究质量分数 30% AEEA 溶液在全负荷二氧化碳和纯 O_2 分压下降解 14 d 后的完全降解。结果表明，在二氧化碳气氛和高温降解条件下，仲氨基甲酸酯或伯氨基甲酸酯可通过脱水和分子内环化生成 HEIA。HEIA 消除质子化生成 HEI 和 EO，当 AEEA 暴露在二氧化碳中时，会经历一系列的转化，最初，会形成氨基甲酸酯，然后会降解为 2,5-哌啶二酮，如图 5 所示。

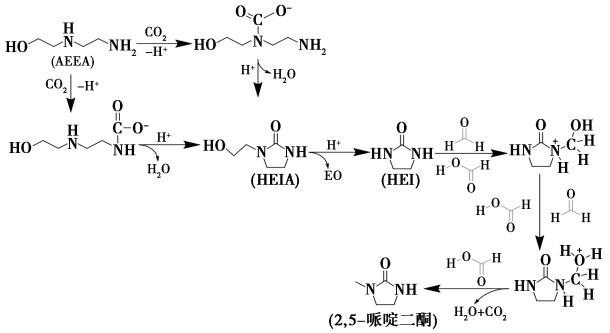


图 5　AEEA 的氧化降解机理

2.3　氧化降解控制措施

氧化降解抑制剂按作用机理主要可分为 3 类：第一类为氧气或自由基清除剂，例如亚硫酸钠或甲醛，能够有效消除引发降解的活性氧物种；第二类为金属离子螯合剂，如乙二胺四乙酸、磷酸钠或焦磷酸钠，通过络合溶液中溶解的金属离子，抑制其催化降解反应的进行；第三类为物理性抑制剂，如某些稳定的无机盐，可通过降低氧气在吸收剂中的溶解度来减缓氧化降解过程[27]。Zhao 等[28]对 MEA 的氧化降解合成了 2 种新型离子降解抑制剂：酒石酸单乙醇胺(MTA)和酒石酸巯基乙胺(HTA)。结果表明，新型离子降解抑制剂 MTA 可以有效减少碳捕集 MEA 溶液的降解，HTA 次之。Vega 等[25]研究了 AMP+AEP 的氧化降解行为，并采用液相色谱仪对氧化降解产物进行了分析，发现 AMP+AEP 比 MEA 具有更好的抗氧化降解性能，且在相同的运行条件下 AMP+AEP 的损耗仅为 MEA 的一半。此外，作者还发现高含量的 CO_2 会抑制 AMP+AEP 的氧化降解。黄宇辉[16]对 MAH(MEA+AMP)和 APH(无水 PZ+AMP)进行抗氧化实验研究，分别选用金属捕获剂乙二胺四乙酸(EDTA)，氧化膜型缓蚀剂偏钒酸钠，氧气捕获剂亚硫酸钠和对苯二酚作为抗降解剂，结果表明，抗氧化剂 EDTA 对混合胺吸收剂 MAH 的抗氧化性能最好，EDTA、偏钒酸钠对 APH 的降解有明显抑制作用，可以作为 APH 的抗降解剂。Lee 等[20]检查了烷醇胺(例如 MEA、DEA、AMP 和 MDEA)的氧化降解。胺类的氧化降解率顺序为 MEA>DEA>AMP = MDEA。研究了抗氧化剂 EDTA 和二乙烯三胺五甲叉膦酸(DTPMP)对 MEA 氧化降解的影响，研究发现阻止程度按 EDTA>DTPMP 的顺序排列，且 EDTA 和 DTPMP 减少了氧化降解产物。Huang 等[29]根据分子结构特征筛选出具有较高化学稳定性的胺类化合物，合成了 3-氨基-1 丙醇(MPA)-2-氨基-2-甲基-1-丙醇(AMP)-*N*,*N*,*N*′,*N*′-四甲基-1,3-丙二胺(TMPDA)-聚乙二醇二甲醚(NHD)两相二氧化碳捕集吸附剂，研究其氧化降解行为，研究发现与 MEA 相比损耗降低了 48.3%，氧化降解液的碱度损失约为 10%。

3　结语与展望

醇胺溶液吸收 CO_2 在工业上显示出重大潜力。目前，实验室研发多种醇胺溶液用于吸收 CO_2，但是，醇胺溶液易降解造成设备腐蚀，从而进一步造成离子催化降解，是限制此技术的关键。目前该项技术面临以下挑战。

(1)降解的发生不是单一存在的，而是热降解、氧化降解等相互作用、相互影响，最终会生成复杂的

降解产物。而实验室实验是将降解实验单独分开,没有考虑降解的协同耦合作用,这就造成降解路径单一。目前,这方面研究还比较欠缺,是未来重点关注方向。

(2)当前关于热降解控制措施的研究尚不系统,未来重要研究方向是探索其他醇胺溶液替代 MEA,以提升体系的抗热降解能力,对于抗热降解的醇胺溶液还有待开发。

(3)目前提出的多种氧化降解控制方法多数仍处于实验室研究阶段。由于高温环境易导致抗氧化剂失效,这些方法尚未实现工业化应用,在实际工业条件下的适用性仍需进一步验证。

(4)醇胺溶液在降解过程后再生问题同样是一个不可忽视的关键环节,采取科学有效的再生方法,以确保溶液的性能得以恢复并维持系统长期稳定运行是当前针对醇胺富液降解的有效措施。

参考文献

[1] 张建宇,潘荔,杨帆,等.中国燃煤电厂大气污染物控制现状分析[J].环境工程技术学报,2011,1(3):185-196.

[2] 张欢.新型高性能 CO_2 吸收剂的开发及热降解性能研究[D].北京:北京化工大学,2022.

[3] 杨清泉,杨德锋,郝金军,等.一乙醇胺在烟气 CO_2 回收系统中的降解及对策[J].化学工业与工程技术,2005,(2):53-54,58.

[4] Davis J, Rochelle G. Thermal degradation of monoethanolamine at stripper conditions[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 327-333.

[5] 李世霞.CO_2 吸收剂降解分析与实验研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2017.

[6] Pal P, AbuKashabeh A, Al-Asheh S, *et al*. Role of aqueous methyldiethanolamine (MDEA) as solvent in natural gas sweetening unit and process contaminants with probable reaction pathway[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 24: 124-131.

[7] Saeed I M, Ali B S, Jan B M, *et al*. Thermal degradation of diethanolamine at stripper condition for CO_2 capture: Product types and reaction mechanisms[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 27(12): 2900-2908.

[8] Mazari S A, Ali B S, Jan B M, *et al*. Thermal degradation of piperazine and diethanolamine blend for CO_2 capture[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016, 47: 1-7.

[9] Saeed I M, Lee V S, Mazari S A, *et al*. Thermal degradation of aqueous 2-aminoethylethanolamine in CO_2 capture; identification of degradation products, reaction mechanisms and computational studies[J]. Chemistry Central Journal, 2017, 11(1): 10.

[10] 柴欢欢.羟乙基乙二胺溶液捕集 CO_2 过程中的降解及再生[D].大连:大连理工大学,2017.

[11] Gao H, Liang Z, Liao H, *et al*. Thermal degradation of aqueous DEEA solution at stripper conditions for post-combustion CO_2 capture[J]. Chemical Engineering Science, 2015, 135: 330-342.

[12] Polderman L D, Dillon C P, Steele A B. Why monoethanolamine solution breaks down in gas-treating service[J]. Oil Gas J, 1955, 54(2): 180-183.

[13] 李红,吉轲,齐天勤机,等.复配醇胺溶液对 CO_2 的吸收解吸性能及其降解性能[J].化工进展,2022,41(2):1025-1035.

[14] Thompson J, Richburg H, Liu K. Thermal degradation pathways of aqueous diamine CO_2 capture solvents[J]. Energy Procedia, 2017, 114: 2030-2038.

[15] 李红.醇胺溶液捕集 CO_2 过程的氧化、热降解研究[D].大连:大连理工大学,2021.

[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.

[17] Chen Z, Meng F, Xia Z, *et al*. Phase separation behavior and thermal degradation analysis of DETA/DEA/DMAC biphasic absorbent[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 500: 157163.

[18] 张增伟,美合日阿依·穆太力普,李立雯,等.燃烧后碳捕集醇胺吸收剂热降解特性研究[J].低碳化学与化工,2025,50(9):83-90.

[19] Orendi H W, Joby K, Šiller L. Enhancements of monoethanolamine CO_2 absorption rate and degradation in the presence of nickel nanoparticles catalysts[J]. Journal of CO_2 Utilization, 2024, 79: 102654.

[20] Lee I Y, Lee J H, Kim J H, *et al*. Effect of corrosion Inhibitors on oxidative degradation of MEA in carbon dioxide capture[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2011, 44(4): 273-277.

[21] Høisæter K K, Buvik V, Gonzalez S V, *et al*. Oxidative degradation of triethylene glycol[J]. Chemical Engineering Science, 2024, 287: 119706.

[22] 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.

[23] Lu S, Ma Y, Kang G, *et al*. Forced degradation of AEEA under full CO_2 loading, high temperature and high O_2 partial pressure conditions: Degradation reaction pathway and degradation inhibitor studies[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 363: 132010.

[24] Wang T, Jens K J. Oxidative degradation of AMP/MEA blends for post-combustion CO_2 capture[J]. Energy Procedia, 2013, 37: 306-313.

[25] Vega F, Cano M, Sanna A, *et al*. Oxidative degradation of a novel AMP/AEP blend designed for CO_2 capture based on partial oxycombustion technology[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 350: 883-892.

[26] Wang T, Jens K J. Oxidative degradation of aqueous 2-amino-2-methyl-1-propanol solvent for postcombustion CO_2 capture[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(18): 6529-6536.

[27] 杜延年,王乐,马骏,等.CO_2 捕集过程醇胺吸收剂降解路径及腐蚀特性分析[J].炼油技术与工程,2025,55(5):34-37.

[28] Zhao Z, Dong H, Huang Y, *et al*. Ionic degradation inhibitors and kinetic models for CO_2 capture with aqueous monoethanolamine[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 39: 119-128.

[29] 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): 12108-12120.■