

碳捕集工艺节能降耗的 有机胺化学吸收剂专利技术分析

冯先明, 司会芳*, 张双梅, 刘 群

(国家知识产权局专利局专利审查协作河南中心, 河南 郑州 450046)

摘要:通过对碳捕集工艺节能降耗的有机胺化学吸收剂领域专利文献的检索、筛选、统计和分析, 针对不同类型的有机胺化学吸收剂, 进行剖析和深入发掘, 从全球专利申请发展趋势、技术发展路线以及技术薄弱点等方面进行研究分析, 展示了相关领域的产业技术现状, 给出研发建议并对产业化前景进行预测。

关键词:碳捕集; 有机胺; 发展趋势; 专利分析

中图分类号: TQ09

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S2-0005-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.002

Analysis of patent technologies for energy-saving organic amine chemical absorbents in carbon capture processes

FENG Xian-ming, SI Hui-fang*, ZHANG Shuang-mei, LIU Qun

(Patent Examination Cooperation (Henan) Center of the Patent Office, China National Intellectual
Property Administration, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Through the retrieval, screening, statistics, and analysis of patent literature in the field of energy-saving organic amine chemical absorbents for carbon capture processes, this paper conducts dissection and in-depth exploration of different types of organic amine chemical absorbents. It investigates aspects such as global patent application trends, technology development roadmaps, and technological weaknesses. The study presents the current status of industrial technologies in related fields, provides research and development recommendations, and forecasts the prospects for industrialization.

Key words: carbon capture; organic amine; development trend; patent analysis

碳捕集、利用与封存 (carbon capture, utilization and storage, CCUS) 是应对全球气候变化的关键技术之一^[1]。碳捕集成本一般占整个 CCUS 成本的 70%, 碳捕集的效率及其经济效益对 CCUS 至关重要, 降低捕集成本是实现“碳中和”的不变追求^[2]。化学吸收法是发展最为成熟的燃烧后碳捕集方法^[3-7], 节能降耗是化学吸收剂吸收性能的关键指标, 高吸收速率、高吸收容量、低再生能耗是化学吸收剂的开发方向, 也是开发节能降耗碳捕集技术的关键因素^[8-15]。

碳捕集工艺节能降耗化学吸收剂主要包括有机胺吸收剂、离子液体吸收剂、氨水吸收剂、氨基酸盐吸收剂、相变吸收剂等^[16-20]。通过统计分析碳捕集工艺节能降耗化学吸收剂相关专利, 得到全球碳捕集工艺节能降耗的化学吸收剂不同技术分支的申请量占比如下: 有机胺类占比高达 64.26%, 远高于相

变吸收剂 (12.19%) 和离子液体 (10.43%)。有机胺凭借 CO₂ 分离能力强、蒸气压低、成本低及可循环利用等优势脱颖而出, 是目前唯一实现大规模商业化应用的低浓度碳捕集吸收剂。本文中对有机胺化学吸收剂领域的专利申请等情况进行了统计分析, 为了解相关技术现状提供专利信息数据和资源支持。

1 有机胺化学吸收剂的专利技术整体分析

本节以 Incopat 专利数据库作为数据源, 检索日期为 2025 年 8 月 31 日。通过构建包含关键词、IPC/CPC 分类号的检索式 (表 1), 对 4 类占据绝对数量优势的传统有机胺、复配胺、官能团改造的新型胺以及有机胺为主的混合物 4 大技术分支专利进行了统计分析, 助力于国内产业界对不同类型有机胺化学吸收剂的发展形成整体的认识。

收稿日期: 2026-03-17; 修回日期: 2026-06-17

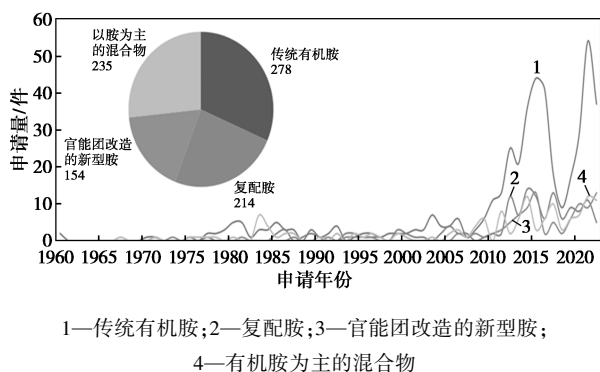
作者简介: 冯先明 (1991-), 男, 硕士, 助理知识产权师, 研究方向为化工分离等领域的专利审查, 1950888924@qq.com; 司会芳 (1993-), 女, 硕士, 助理知识产权师, 研究方向为化工分离等领域的专利审查, 通讯联系人, sihuiyang1993@163.com。

表1 碳捕集节能降耗的有机胺化学吸收剂检索要素表

关键词	二氧化碳、吸收、捕集、捕获、再生、解吸、脱附、解析、循环、能耗、能量、降耗、降能、耗能、节(2N)能、ABSOR*、CAPTURE*、REGENER*、DESORP*、RECOV*、CO ₂ 、CARBON DIOXIDE、有机胺、哌嗪、PZ、二胺、EDA、(乙基(1W)胺)、TETA、TEPA、DETA、(烯(2W)胺)、TETA、TEPA、MEA、DEA、醇胺、MEA、三乙基胺、TEA、DAA、丁胺、DEEA、位阻胺、单胺、AMP、伯胺、仲胺、叔胺、MAE、MMEA、MDEA、TBEE、级胺、(环(1W)胺)、直链胺、聚乙烯亚胺、PEI、MCA、AMP、DIPA、TEA、AEEA、烷基胺、AMINE、CCUS
IPC	B01D53/14、B01D53/62、B01d53/18
CPC	B01D53/14、B01D53/1418、B01D53/1425、B01D53/1456、B01D53/1493、B01D53/62、B01d53/18

1.1 全球专利技术发展趋势

图1为有机胺吸收剂在全球专利申请趋势,其中,传统有机胺278件、有机胺为主的混合物235件、复配胺214件、官能团改造的新型胺154件,总体呈波动增长态势;近年来,以传统有机胺增长最为迅速。



1—传统有机胺；2—复配胺；3—官能团改造的新型胺；
4—有机胺为主的混合物

图1 有机胺吸收剂的二级分支在全球专利申请趋势图

1.2 传统有机胺

有机胺作为重要的CO₂化学吸收剂,实质是酸碱中和反应,弱碱和弱酸反应形成盐,并且该反应是可逆反应^[6]。该技术始于1958年英国HANS HESKY申请的专利GB848613A采用传统有机胺吸收剂单乙醇胺、二乙醇胺或三乙醇胺来吸收CO₂,能耗有着不错的表现。其发展与国际气候治理进程紧密相关:1979—2008年,随着第一次世界气候大会及《京都议定书》的推动,申请量进入发展阶段;2009—2017年,受哥本哈根和巴黎气候大会影响,进入快速发展期并实现工业应用;2018年后技术趋于成熟,进入成熟期。2020年中国提出“双碳”目标后,受政策强力驱动,2020—2025年申请量出现突

发式增长。

1.3 官能团改造的新型胺

为提高吸收剂的吸收容量,通过对胺分子上的官能团进行改造的新型胺化学吸收剂逐渐出现。1971年德国BASF AG公司申请的DE2146775A1是关于官能团改造的新型胺的专利,采用烷基或羟烷基官能团改造乙二胺或丙二胺获得的衍生物捕集CO₂,吸收容量大,使得设备尺寸减小;受此启发,德国Metallgesellschaft(MG)公司申请的EP0033401A2开发了烷基取代的仲胺或叔胺,具有能耗小、副产物少的优势;1973—2010年为初步萌芽期,受制于技术难度和经济性,申请量稀少(仅19件),分析其主要原因是官能团改造的技术难度较大,经济性达不到预期;此后,研究者针对性地研究有机胺的化学结构及特定官能团,例如链长、取代基种类和数目、胺基类型等,对二氧化碳吸收速率和吸收容量产生重要影响,专利申请在2011—2015年期间进入快速发展阶段;2016—2018年技术研究进入瓶颈期;2019年后,在低碳发展更高要求下进入二次发展阶段,人工合成新型胺成为研究热点。

1.4 复配胺

为克服单一胺的缺点,综合2种或多种吸收剂优点的复配胺应运而生^[6]。1971年德国BASF AG申请的DE2113898A1采用三胺水溶液作为吸收剂来去除二氧化碳,并向其中添加水溶性伯胺或仲胺作为活化剂以加速吸收过程;1995年日本Kansai Electric Power Co.申请的US5618506A采用R₂CHR₃NHCH₂CH₂OH的胺和哌嗪化合物的水溶液,展示出高的CO₂吸收量;1971—2011年为缓慢发展期;2012—2017年,进入快速发展期;随着多年的技术发展和积累,2016—至今,复配胺吸收剂进入成熟期。

1.5 有机胺为主的混合物

通过在有机胺中添加功能添加剂,如抗氧化剂、缓蚀剂、物理溶剂等,以改善综合性能。1964年美国Shell Oil Company申请的US3352631A是采用链烷醇胺的化学吸收剂与物理溶剂环四亚甲基砜的有机胺为主的混合物吸收剂,吸收剂可以通过汽提再生;受此影响,1977年美国Exxon Research & Engineering Co.申请的US4100257A采用以空间位阻胺为主和叔氨基醇以及物理吸收剂亚砜的混合有机胺吸收剂,与单独使用相同的空间位阻胺相比,空间位阻胺和叔氨基醇与溶剂的共同作用使得吸收含CO₂的酸性气体的量增加,并降低了反应热;

1967—2007 年为技术探索期,申请量少;2008—2014 年,研究者在有机胺中加入活化剂或促进剂等添加剂提升溶剂的吸收速率和吸收容量,此外在有机胺中加入抗腐蚀剂或抗氧化剂来增加有机胺的耐腐蚀性和抗氧化性;从 2014 年以后,有机胺为主的混合物进入成熟期,主要因为添加剂的功能明确,导

致技术发展空间减小。

2 技术发展路线分析

图 2 为有机胺各类型化学吸收剂技术发展路线图。有机胺类化学吸收剂最早出现的是以醇胺为代表。

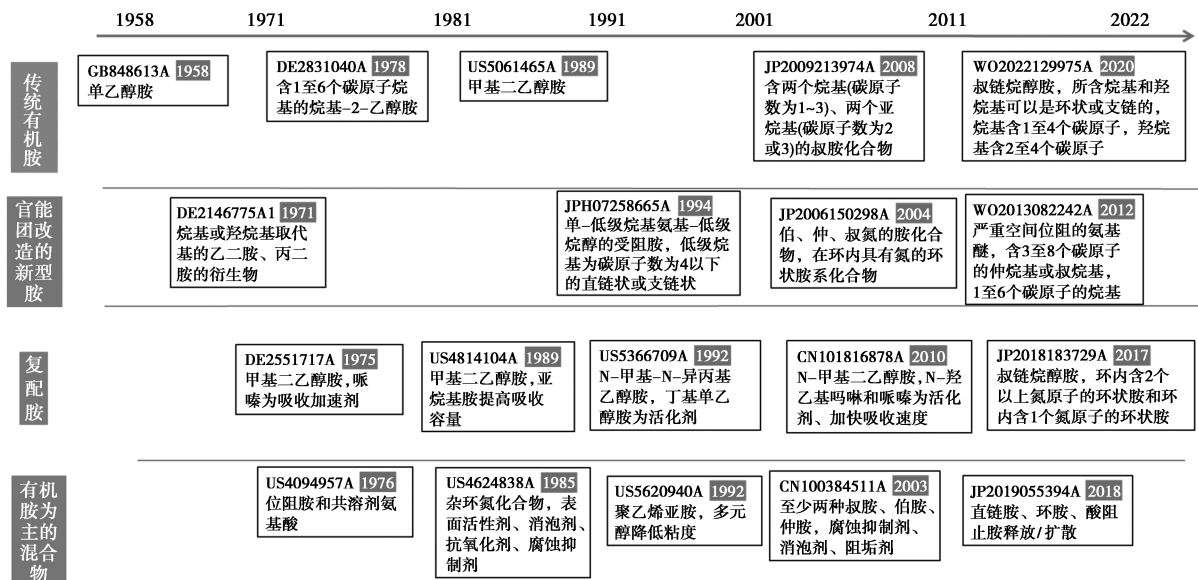


图 2 有机胺各类型化学吸收剂技术发展路线

2.1 传统有机胺

2000 年以前,传统有机胺以伯胺、仲胺为重点,这主要是由于伯胺与仲胺具有快速动力学的优点,但不足在于对 CO_2 吸收容量低、解吸能耗高。1958 年,德国 Hans Hesky 申请的 GB848613A 采用单乙醇胺、二乙醇胺或三乙醇胺从 H_2 中吸收 CO_2 ,但乙醇胺作为溶剂吸收 CO_2 时解吸能耗大、负载能力低,易降解及发泡,会与 CO_2 发生副反应导致脱碳效率下降,阻碍其商业化应用;1978 年美国的 Elf Aquitaine 申请的 DE2831040A 所采用的胺吸收剂是具有通式 $\text{R}-\text{NH}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$ 的烷基-2-乙醇胺类型,相比二乙醇胺吸收剂,显著提高负载率,相比单乙醇胺吸收剂等难降解的类型,能够降低循环再生胺所需的能量;之后,1980 年德国 Metallgesellschaft (MG) 公司申请的 DE3000250A 采用通式为 $\text{R}_1-\text{NH}-\text{R}_2$ 或 $(\text{R}_1)_2-\text{N}-\text{CH}_2-\text{N}-(\text{R}_2)_2$ 的仲胺或叔胺,相比于现有技术溶液吸收 CO_2 的量更大,且容器不会被腐蚀;1995 年日本 Mitsubishi Heavy 申请的 JP31412195A 采用通式 $\text{R}_1\text{R}_2\text{NCH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$ 的胺溶液吸收 CO_2 ,与使用 MDEA 水溶液的常规方法相比,具有更高的 CO_2 吸收能力和更低的再生能量消耗。

由于叔胺吸收剂化学稳定性好,吸收 CO_2 过程中发生起泡与腐蚀倾向低,不易降解变质,2000 年以后,出现了以叔胺为主的有机胺化学吸收剂重点专利,如 2008 年 JP2009213974A 采用具有特征结构通式的叔胺化合物,研究叔胺化合物与二氧化碳反应热低于以往的叔胺,获得反应热降低、再生能量降低的叔胺类型;2020 年法国 Total Energies 申请的 WO2022129975A 采用的胺化合物是叔胺,选自 N-甲基二乙醇胺、2-(2-二乙基氨基乙氧基)乙醇、(2,2'-[(甲基氮烷二基)双(乙烷-2,1-二基)]双(氧基)}二乙醇)、3,9-二甲基-6-氧杂-3,9-二氮杂十一烷-1,11-二醇和 4-吗啉-4-基戊-1-醇及其混合物,能够选择性吸收包括其他气体成分的 CO_2 气体、提高再生再循环效率。虽然叔胺反应动力学相对较慢,但是具有较高的 CO_2 吸收容量和低解吸能耗的优点,逐渐成为 2000 年以来传统有机胺化学吸收剂技术与专利申请的重点,由于叔胺的吸收速率较低,因此在开发叔胺吸收剂时,需添加合适的活化剂或有机溶剂形成复配胺形式予以调节。

2.2 复配胺吸收剂

1975 年出现第一篇关于复配胺的专利 DE2551717A 由德国 Basf AG 申请,通过哌嗪和甲基

二乙醇胺的洗涤液去除 CO_2 , 哌嗪的添加显著提高 CO_2 的吸收速率和 CO_2 负载能力, 循环量减少。1987 年美国 UOP 申请的 US4814104A 通过在溶液中掺入至少 1 种亚烷基胺, 改进了用叔链烷醇胺的水性吸收剂溶液吸收二氧化碳, 亚烷基胺的存在促进了二氧化碳吸收速率和叔链烷醇胺水溶液的二氧化碳容量。此后, 1992 年美国 Elf Aquitaine 申请的 US5366709A 通过用 1 种或多种叔链烷醇胺和丁基单乙醇胺 (BMEA) 的吸收剂液体接触和洗涤气体, 从酸性气体流中吸收 CO_2 , BMEA 充当叔胺吸收 CO_2 的活化剂, 并再生载有 CO_2 的吸收剂液体, 吸收 CO_2 优异且损失的溶剂少。2010 年四川省精细化工研究设计院申请的 CN101816878A 采用 *N*-甲基二乙醇胺 (MDEA)、*N*-羟乙基吗啉、2-氨基-2-甲基-1-丙醇 (AMP)、哌嗪组合的高效复合脱碳溶剂, 选用 *N*-羟乙基吗啉、哌嗪、2-氨基-2-甲基-1-丙醇, 能加快 MDEA 与 CO_2 的反应速度, 增加 MDEA 对 CO_2 的吸收容量, 降低 CO_2 从脱碳液解吸时的单位能耗。

2.3 官能团改造的新型胺

通过增加官能团数量、改变官能团的结构和添加含氮的官能团等对胺分子上的官能团进行改造以形成官能团改造的新型胺, 提高对 CO_2 的吸收能力。1971 年德国 Basf AG 申请的 DE2146775A1 采用烷基或羟烷基取代基的乙二胺、丙二胺的衍生物, 在相同的吸收传质速率下, 节省吸收剂。1994 年日本 Mitsubishi Heavy Industries 申请的 JPH07258665A 采用位阻胺, 如单低级烷基氨基-低级烷醇的水溶液, 碳原子数 4 以下的直链状或支链状, 与传统的 MEA 相比, 吸收 CO_2 的性能得到提高。2000 年以前的重点专利申请主要通过烷基或羟烷基简单改造二元/多元胺, 以提高吸收选择性。

2000 年之后有关官能团改造的新型胺的重点专利中采用的官能团包括伯、仲和叔氮中的 2 个或多个或全部的胺化合物, 也采用具有氮的环状胺, 这是由于一级的氮原子承担着与 CO_2 结合形成氨基甲酸酯离子的作用, 有助于提高初期的吸收速度; 仲氮原子起到将结合的 CO_2 转化为碳酸氢根离子 HCO_3^- 的作用, 有助于提高反应后半段的速度; 叔氮原子与碳酸氢根离子 HCO_3^- 成对地质子化, 通过碳酸氢根离子 HCO_3^- 的大量生成, 有助于电解反应热的降低和饱和吸收容量的增大。如 Mitsubishi Heavy Industries 在 2004 年申请的 JP2006150298A 采用伯、仲、叔胺的环状胺化合物, 并在环内具有氮的环

状胺系化合物。2012 年美国 Exxon Mobil 申请的 WO2013082242A 采用的胺吸收剂溶液包括空间位阻的氨基醚的水溶液 $\text{R}^1-\text{NH}-[\text{C}_n\text{H}_{2n}-\text{O}-]_x-\text{OY}$, 具有优异的选择性、负载、容量且高容量使得能够减少待循环的胺溶液的量, 再生能耗低; 并在其他研究机构中被借鉴, 推动了空间位阻胺吸收剂的发展。

2.4 有机胺为主的混合物

2001 年以前的重点专利主要是通过添加助剂、表面活性剂、多元醇等改善有机胺的黏度, 增强传质效率, 提高 CO_2 的溶解度。1976 年美国 Exxon Mobil 申请的 US4094957A 采用添加氨基酸作为空间位阻胺的助溶剂, 防止溶液在气液接触过程中在高温和低转化率下发生相分离, 还可以减少泡沫的形成; 之后, 1985 年美国 Exxon Mobil 申请的 US4624838A 采用包括咪唑、4-甲基咪唑或 *N,N'*-哌嗪二乙醇以及表面活性剂、消泡剂、抗氧化剂、腐蚀抑制剂及其混合物的添加剂脱除酸性气体二氧化碳, 提高 CO_2 溶解度、避免吸收和解吸时的溶剂损失、增大 CO_2 吸收能力。1992 年美国 United Technologies Corporation 申请的 US5620940A 采用提高胺的二氧化碳解吸速率的多元醇、聚乙二醇和/或聚甘油, 多元醇通过降低胺的黏度来增强吸附动力学、降低扩散阻力, 增强了二氧化碳向胺的迁移。

2001 年以后, 研究者在有机胺中加入活化剂或促进剂等添加剂提升溶剂的吸收速率和吸收容量, 此外在有机胺中加入抗腐蚀剂或抗氧化剂以及其他增进剂来增加有机胺的耐腐蚀性、抗氧化性以及吸收性能。2018 年日本 Toshiba Corp 申请的 JP2019055394A 采用包括链状胺、环状胺的 CO_2 吸收剂, 该 CO_2 吸收剂中包含 2 种胺, 对于 1 种胺, CO_2 的吸收和释放效率低, 通过组合方式的胺能高效进行 CO_2 的吸收和释放。

3 技术功效分析

通过对有机胺吸收剂专利申请的检索和梳理, 有机胺吸收剂在节能降耗方面改进的各项关键技术功效主要包括吸收容量、吸收速率、再生恢复率、循环次数、解吸速率、溶剂损失、挥发性、腐蚀性、抗氧化性、稳定性和黏度等, 进一步统计分析获得技术功效的专利申请趋势、技术功效分布及技术空白点、热点、薄弱区, 可以看出申请人在碳捕集工艺节能降耗的有机胺化学吸收剂领域的主要研究方向和考虑因素。

结合图 3 有机胺化学吸收剂的技术功效专利申

请趋势图分析,2012 年以前的有机胺吸收剂专利关于各项功能效果的研究相对较少。2012—2015 年有机胺吸收剂的研究主要集中在吸收容量、吸收速率、腐蚀性。2015—2020 年有机胺吸收剂关于吸收容量、吸收速率、腐蚀性的专利申请量相对降低,主要是由于各类型吸收剂关于吸收容量、吸收速率、腐蚀性方面影响的研究相对趋于成熟,而 CO₂ 捕集工

艺能耗高、成本大的问题亟待解决。经过研究发现,吸收容量、吸收速率相对较高的大部分吸收剂,循环再生相对复杂、能耗相对较高,因此,有关吸收剂再生功能效果指标之一的解吸速率的专利申请量相对增加。2020 年至今有机胺吸收剂关于吸收容量、吸收速率、再生恢复率的申请相对增加;这源于平衡吸收与解吸的指标、寻求综合性能好的迫切需求。

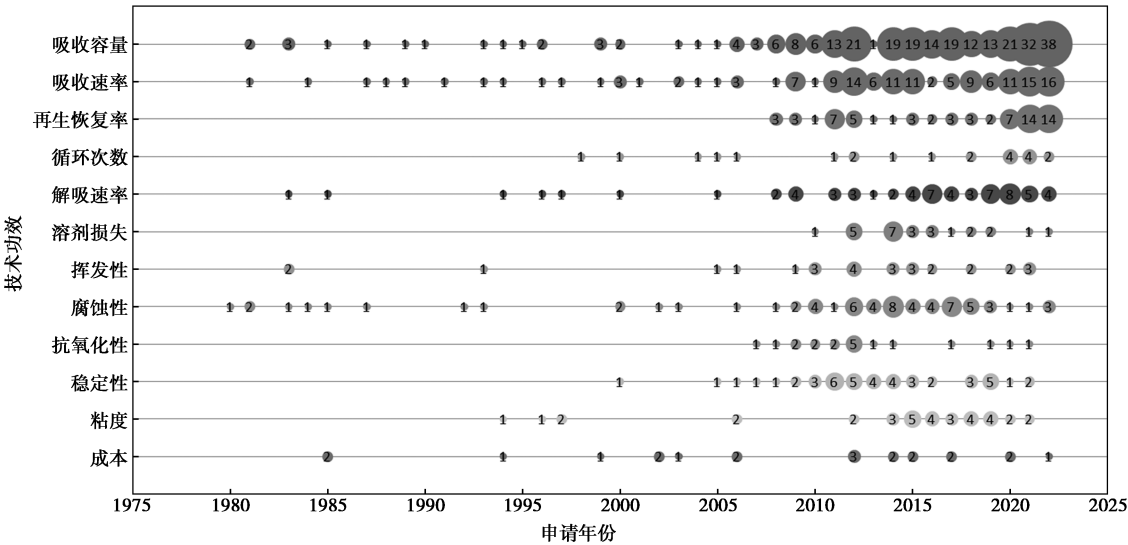


图 3 有机胺化学吸收剂的技术功效专利申请趋势

图 4 为有机胺化学吸收剂各技术分支的功效分布情况,除了从吸收容量、吸收速率、再生恢复率、腐

蚀性进行重点考虑之外,技术人员也会从腐蚀性、稳定性、黏度方面对有机胺性能进行衡量。

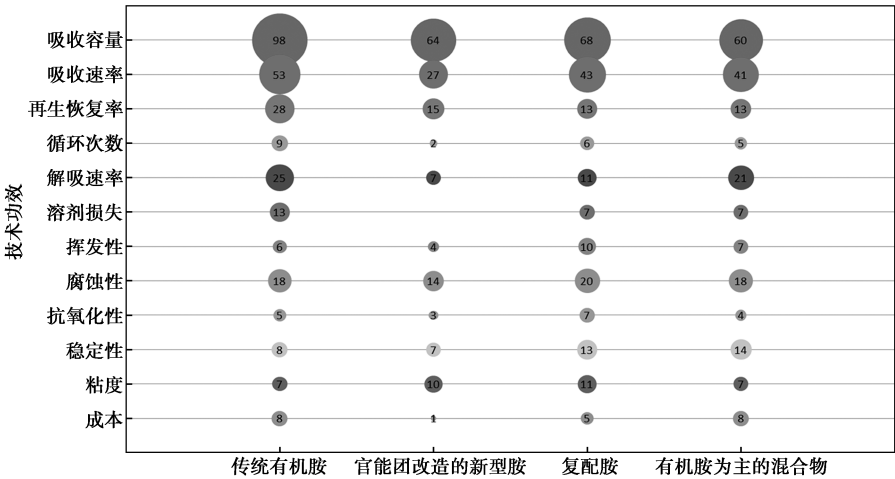


图 4 有机胺化学吸收剂各技术分支的功效分布情况

鉴于专利公开、公布时间的限制,图 5 为有机胺化学吸收剂各分支的功效分布情况,集中显示了 1980—1989 年、1990—1999 年、2000—2009 年、2010—2014 年、2015—2019 年、2020—2022 年 6 个时间段相应技术分支实现对应的技术方向的专利数

量,横轴为专利的技术方向,纵轴为专利的二级技术分支,其中深灰色代表技术热点区,浅灰色代表技术薄弱区,白色代表技术空白区,技术薄弱区对应的 3 个时间段专利申请量小于等于 5 项,技术空白区对应的时间段无专利申请。



图 5 有机胺化学吸收剂各分支的功效分布情况

图 5 中的不同区域单表的数量可以直观地显示该技术的热点和空白点,具体表现出以下特点。

(1) 吸收容量、吸收速率、再生恢复率、解吸速率和腐蚀性是有机胺所有技术分支共同的研究热点。其中,吸收容量和吸收速率是最核心的关注点,因为它们直接反映吸收效率。

(2) 循环次数、挥发性、抗氧化性和成本是普遍存在的薄弱环节。这主要是因为胺类在多次循环后性能易衰减,且挥发会导致溶剂损失、成本增加和二次污染。

(3) 传统有机胺吸收剂的技术热点表现在溶剂损失的功能效果研究上,这主要是由于减少吸收剂用量、降低能耗是传统有机胺吸收剂改进的强烈需求。官能团改造的新型胺因结构复杂、制备成本高,在循环次数和成本方面是薄弱区,而降低溶剂损失则是未来的技术空白点。

(4) 复配胺通过组分互补,在改善挥发性、稳定性和黏度方面表现出色,但循环次数、抗氧化性和成本仍需进一步研究。有机胺为主的混合物的研究热点在提升稳定性,而循环次数、溶剂损失、抗氧化性和黏度是其主要薄弱区。

4 结语与展望

(1) 传统有机胺中伯胺、仲胺吸收速率快,吸收容量大,但是解吸能耗高,叔胺具有较高的 CO_2 吸收容量和低解吸能耗的优点,逐渐成为传统有机胺化学吸收剂研究与专利申请的重点;复配胺通过组分协同,综合提升吸收速率、容量并降低再生能耗,是实现性能优化的有效途径;通过增加官能团数量、改变官能团的结构和添加含氮的官能团等对胺分子

上的官能团进行改造以形成官能团改造的新型胺,进而提高其对 CO_2 的吸收能力;以有机胺为主的混合物主要通过添加剂解决单一胺的黏度、腐蚀、氧化等工程应用问题。

(2) 聚焦于各分支的技术薄弱区,通过添加稳定剂、抗氧化剂等,重点攻克传统有机胺和复配胺在循环稳定性、抗氧化性方面的难题,并研究如何降低胺的挥发损失,对官能团改造的新型胺,应致力于优化合成工艺,降本增效;平衡吸收与解吸的能耗关系,开发兼具高吸收容量与低再生能耗的吸收剂,利用量子化学、分子模拟等手段,深入研究胺分子结构与吸收/解吸性能、降解机理的本质关系,指导开发新的、可设计的官能团胺类吸收剂,从分子层面实现节能降耗的目标,并注重其在降低二次污染方面的潜力。

参考文献

- [1] 王亮方.中国碳捕获与封存(CCS)产业化发展研究[D].长沙:湖南大学,2014.
- [2] 盛荟霖.混合有机胺法捕集低浓度二氧化碳性能研究[D].大连:大连理工大学,2024.
- [3] 唐思扬,李星宇,鲁厚,等.低能耗化学吸收碳捕集技术展望[J].化工进展,2022,41(3):1102-1106.
- [4] Kang J N, Wei Y M, Liu L C, et al. Observing technology reserves of carbon capture and storage via patent data: Paving the way for carbon neutral[J]. Technological Forecasting & Social Change, 2021, 171: 20933.
- [5] 王梅.液-液相溶剂吸附二氧化碳关键设备设计与数值模拟研究[D].青岛:青岛科技大学,2019.
- [6] 王玉玮. CO_2 有机胺吸收剂稳定性研究:降解-腐蚀协同抑制与电渗析净化技术[D].杭州:浙江大学,2025.

(下转第 16 页)

(3) 面对上述挑战,建议中国大型能源企业从规模扩张转向质量提升。应确立面向生产实际、注重工艺机理融合的研发方向,重点突破“机理+AI”混合建模技术;同时,加快构建差异化、高价值且具备国际竞争力的知识产权战略体系,通过产学研深度融合与全球化专利布局,为能源化工产业的数字化与绿色化协同转型提供坚实的法律与技术保障。

参考文献

- [1] 赵君强.“双碳”视野下现代煤化工的发展前景探究[J].内蒙古煤炭经济,2023,(6):147-149.
- [2] 李民,吕丰,孙保全,等.双碳目标约束下现代煤化工企业绿色低碳发展路径浅析[J].中外能源,2024,29(1):17-21.
- [3] 任怀影,刘芷若,李红阳,等.能源转型变革中数字技术的应用场景与模式研究[J].信息通信技术与政策,2024,50(10):15-20.
- [4] 王新平,肖雪,王双明,等.新质生产力驱动能源绿色低碳转型:作用机理、现实挑战与实现路径[J].技术与创新管理,2025,46(6):627-639.
- [5] 姜培学,金红光.面向“双碳”目标的能源转化利用领域前沿交叉战略研究[J].科学通报,2024,69(34):5007-5015.
- [6] 韩震,沈君,曲莎莎.RFID 技术趋势及竞争态势的专利计量分析[J].科研管理,2013,34(7):11-16.
- [7] 屈琪.人工智能技术在脑机接口领域的应用研究[J].世界科技研究与发展,2026,48(1):58-68.
- [8] 王宁远,张华夏,董和煦,等.人工智能在核领域知识产权工作中的应用研究[J].中国发明与专利,2024,21(S1):141-147.
- [9] 杨婕.全球人工智能发展的趋势及挑战[J].世界电信,2017,(2):15-19.
- [10] 苏剑波,陈叶飞,马哲,等.从 AlphaGo 到 BetaGo——基于任务可完成性分析的定性人工智能的定量实现[J].控制理论与应用,2016,33(12):1572-1583.
- [11] 本刊.国务院发布《新一代人工智能发展规划》[J].中国标准化,2017,(15):28.
- [12] 陈永伟.超越 ChatGPT:生成式 AI 的机遇、风险与挑战[J].山东大学学报:哲学社会科学版,2023,(3):127-143.
- [13] 赵志宏.生成式 AI 开启生产力新范式[J].银行家,2023,(4):18-23.
- [14] 王山,谭宗颖.技术生命周期判断方法研究综述[J].现代情报,2020,40(11):144-153.
- [15] 张海锋,张卓.技术生命周期阶段特征指标构建及判定[J].技术经济,2018,37(2):108-112.
- [16] 金丽杰.能源转型背景下煤炭产业绿色低碳发展路径研究[J].知识经济,2025,(32):142-145.
- [17] 张晓华,徐丽娜,景海霞,等.技术创新视角下煤炭资源型经济转型路径[J].企业科技与发展,2025,(7):63-67.
- [18] 韦建辉,李作泉,朱事能,等.煤炭智能化开采技术现状及展望[J].煤,2025,34(8):96-100.
- [19] 赵春晖,胡赞响,郑嘉乐,等.数据驱动的燃煤发电装备运行工况监控——现状与展望[J].自动化学报,2022,48(11):2611-2633.
- [20] 李鹏,孙鹤,张健,等.电厂锅炉燃烧系统先进过程控制实验仿真平台[J].计算机与应用化学,2012,29(10):1216-1220.
- [21] 张仰敏,王振环.人工智能与 AI 大模型在现代煤化工设备管理中的应用[J].氮肥技术,2025,46(3):1-4. ■
-
- (上接第 10 页)
- [7] Bian K, Liu Y, Zhou L, *et al.* Recent advances in CO₂ solid adsorbents and application prospect in biofuel production[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 214: 115560.
- [8] 向晟.基于量子化学的燃烧后碳捕集有机胺溶剂智能设计方法[D].大连:大连理工大学,2024.
- [9] Zhao S, Zhang Y, Li L, *et al.* Degradation of amine-functionalized adsorbents in carbon capture and direct air capture applications: Mechanism and solutions[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 354(P8): 129586.
- [10] Yang Y, Liu Y, Liu S, *et al.* Experimental and theoretical investigation of amine-modified biomass-derived activated carbon for CO₂ capture: The effects of carbon chain length and types of amine[J]. Chemical Engineering Science, 2024, 292: 119968.
- [11] 向晟,刘奇磊,张磊,等.基于反应动力学的计算机辅助碳捕集有机胺溶剂设计[J].清华大学学报:自然科学版,2024,64(3):520-527.
- [12] 王睿.燃烧后烟气 CO₂ 捕集吸收剂的性能研究[D].沈阳:东北大学,2023.
- [13] 杨祥富.高负载量二氧化碳吸收剂性能研究[D].北京:北京化工大学,2023.
- [14] 叶凯.基于有机胺吸收法的碳捕集工艺研究进展[J].中国资源综合利用,2021,39(9):117-119.
- [15] 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):69-78.
- [16] Khan J, Iqbal N, Asghar A, *et al.* Novel amine functionalized metal organic framework synthesis for enhanced carbon dioxide capture[J]. Materials Research Express, 2019, 6(10): 105539.
- [17] 李京.基于离子液体—有机胺水溶液脱碳技术的研究[D].北京:华北电力大学,2018.
- [18] 郭超.有机胺溶液捕集二氧化碳的研究[D].大连:大连理工大学,2014.
- [19] 晏水平,方梦祥,张卫风,等.烟气中 CO₂ 化学吸收法脱除技术分析进展[J].化工进展,2006,(9):1018-1024.
- [20] 方梦祥,周旭萍,王涛,等.CO₂ 化学吸收剂[J].化学进展,2015,27(12):1808-1814. ■