

南化公司与华东油气合作建设的20万吨/年碳捕集装置。 沈志军摄



南化公司捕集的二氧化碳输送至扬子石化作为生产原料。 陈襄正摄

碳循新路 向绿而行

——二氧化碳化学转化利用的实践与展望

二氧化碳化学利用的主要技术路线与进展

传统的二氧化碳减排思路主要依靠碳捕集与封存(CCS)技术。与之相比,碳捕集、利用与封存(CCUS)技术,特别是其中的“利用(U)”环节,将二氧化碳视为一种廉价、丰富且可再生的碳—资源并转化为具有经济价值的产品,实现了从“被动封存”到“主动利用”的范式转变。二氧化碳利用技术主要包括地质利用、化学利用、生物利用等大类,其中二氧化碳化学利用是指以化学转化为主要手段,将二氧化碳和其他反应物转化为化学品、燃料、聚合物等产物。二氧化碳化学利用作为一种具有创新性和可持续性的解决方案,逐渐成为研究和应用的热点领域,在应对气候变化、资源循环、保障能源安全、产业升级等方面具有不可忽视的重要意义。

专家观点

二氧化碳化学利用处于产业化破晓前夜

在全球碳中和浪潮的推动下,二氧化碳的化学利用已从一项前沿的科学技术,迅速演变为一场深刻的产业变革。它不仅实现了大规模深度减排的关键技术路径,更被视为重塑未来碳基工业原料体系、构建循环经济新生态的战略核心。作为长期关注该领域的从业者,我认为当前行业发展已进入从“技术验证”迈向“商业示范与生态构建”的关键转折期,机遇与挑战并存,前景广阔且路径清晰。

当前,二氧化碳化学利用的技术格局呈现多元化、梯次化的发展格局。根据化学反应还原的路径和目标产品,其利用技术主要有三类:一是二氧化碳还原转化制备能源与大宗化学品,该技术旨在将二氧化碳中的碳原子还原,合成市场所需的基础化学品和燃料,是技术开发热度与资本关注度最高的领域;二是还原路径结合成为高附加值化学品,此技术不改变碳的价态,主要通过加成、酯化等反应,将二氧化碳引入产品分子结构中,其中,以二氧化碳为原料生产碳酸酯产业链是当前产业化程度最高、经济效益最明确的路径之一;三是矿化利用固定于无机材料,该技术通过将二氧化碳与含钙的工业固废(如废、磷石膏、电石渣)或建材原料反应,生产碳酸盐产品,其最大优势在于无须对尾气中的二氧化碳分离提纯,可直接从废气中利用低浓度工业尾气,同时消除大宗固废,环境效益突出。综合来看,我国在二氧化碳化学利用的多个赛道上已建立起基础研究、关键材料开发、工艺与设备、工程放大与示范的完整研发链条,二氧化碳矿化重选、合成碳酸酯、矿化等技术已完成了工业化示范和数万吨级规模化生产,达到了国际领先水平,为产业化奠定了坚实的技术基础。

尽管技术不断取得突破,但二氧化碳化学利用从示范项目走向大规模产业,仍面临三大核心挑战。首先,经济性

非还原转化:已率先实现工业化应用

二氧化碳非还原转化主要通过与富电子反应物(如环氧化物、胺类)发生反应,二氧化碳中高价态的碳原子不发生价态变化,热力学相对有利,部分可在相对温和的条件下实现二氧化碳的高效转化,是目前率先实现大规模工业化应用的二氧化碳资源化利用方向。根据产物的不同,可进一步分为有机小分子、聚合物和矿化产物三类。

在有机小分子方面,尿素是当前二氧化碳非还原转化最成熟的大宗应用领域,年消耗二氧化碳超亿吨级。2025年11月,吉丰能源碳循环经济项目在广东茂名投产,实现了资源的最大化利用。二氧化碳制脲碳足迹低,且依托东伟能源及名项目的合成氨原料优势,生产颗粒尿素,缩短了资源链,提升了经济效益。我国二氧化碳制脲碳酸酯技术具有较成熟的成熟度,唐山好德科技术开发有限公司、山东海科控股有限公司、中国科学院过程工程研究所等单位自主开发的技术均已实现工业化应用,中国石化上海院开发的多相催化技术则实现了电子级碳酸酯乙酯工业化生产从均相催化向多相催化的变革。

还原转化:示范应用与前沿探索并行

二氧化碳还原转化通过强还原性反应物(如氢气或外部高能输入/热/光/电)来活化CO₂并还原成高附加值产品,也是化工、工程塑料及高性能塑料等的关键原料。以二氧化碳与绿氢结合制备高附加值

套技术迈出工业化应用的关键一步。

二氧化碳制聚合物的另一重要方向是制备二氧化碳基多元醇。根据主链结构不同,二氧化碳基多元醇可分为聚碳酸酯多元醇和聚碳酸酯—醚多元醇(PCE)。二甲醚基多元醇可与二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI)、甲苯二异氰酸酯(TDI)等产品反应制备聚氨酯发泡、热塑性聚氨酯弹性体(TPU)、胶粘剂、合成革等聚氨酯下游产品,兼具减碳概念与经济性,市场空间更广阔。中国科学院广州化学所、长春应化所、广东工业大学等单位长期致力于双金属氧化物(DMO)催化环氧丙烷与二氧化碳共聚合成PCE的研究。2025年1月,安徽普碳新材料30万吨/年二氧化碳基多元醇项目(一期)投料试车,是目前全球规模最大的二氧化碳基多元醇装置。

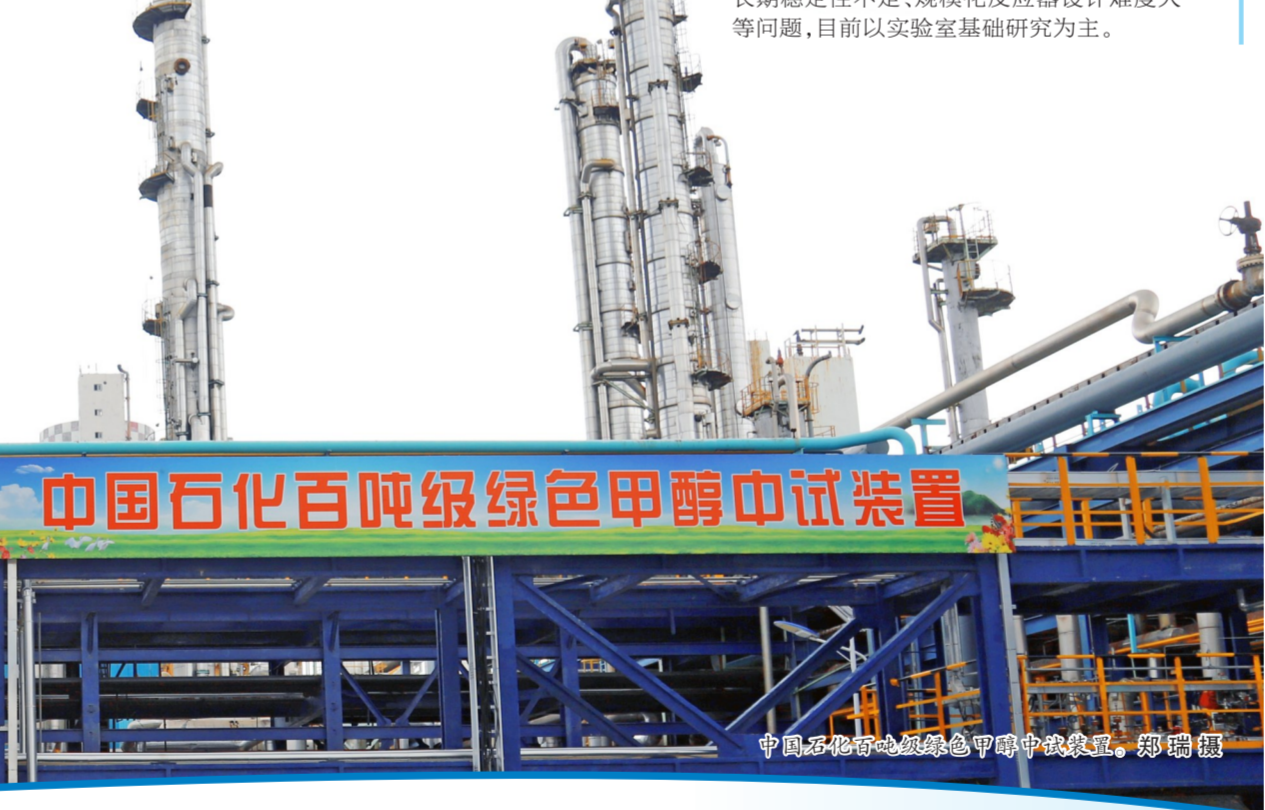
在矿化利用方面,利用含钙、镁的碱性矿物或工业固废与二氧化碳反应,生成热力学稳定的碳酸盐,可实现二氧化碳的永久封存,同时联产建材、化工填料等高附加值产品,是兼具封存安全性与资源化价值的技术路线,国内目前已建设多个水泥、钢铁行业的矿化利用示范项目。2024年,清浦零碳公司联合浙江大学在浙江省嘉兴市启动百万吨商品混凝土二氧化碳矿化利用示范项目,与传统工艺生产的预拌混凝土相比,每立方米产品可减排70千克二氧化碳,全生命周期碳排放减排约20%。

芳烃也是实现二氧化碳减排且消纳绿氢的重要发展方向之一。清华大学魏飞团队开发的CO₂AF™技术可进一步将二氧化碳高效转化为含80%以上碳八—碳十二芳烃的产品,产品经过进一步加氢可实现全组分100%作为可持续航空煤油(SAF)加注使用。2022年5月,与内蒙古久泰集团合作的全球首套万吨级工业试验项目开工建设;2023年12月,采用该技术的“氢绿龙江”齐齐哈百万吨级氢基绿色能源基地百万吨级绿色航煤示范项目启动。

以二氧化碳和绿氢为原料制备汽油和柴油,可直接作为化石燃料的替代品用于道路交通及航运领域,且无须对发动机进行改造或建设单独的加油站网络。2022年,由天火化和珠海市福源能源科技有限公司联合开发的全球首套1000吨/年二氧化碳加氢制汽油中试装置在山东邹城工业园区开车成功。

二氧化碳还原通过利用可再生能源在常温常压下驱动反应,易模块化扩展。目前二氧化碳电催化还原的主要副产物,如一氧化碳/甲酸基本能实现90%以上的选择性并满足200毫安/平方厘米的工业电密度需求,具备工业化放大基础。碱能科技采用多个电解池串联后组成的二氧化碳电解装置电催化还原二氧化碳制备合成气已在内蒙古鄂尔多斯伊泰化工煤制油工厂完成中试,二氧化碳年处理量为30吨,稳定性达到2000小时。2023年碱能科技推出的R-Syn电合系列产品,单体反应器二氧化碳转化率最高可达500吨,可有效降低工业级电催化还原成本。

中国石化百吨级绿色甲醇中试装置



中国石化百吨级绿色甲醇中试装置。 彭琦摄



南化公司低浓度二氧化碳捕集装置中试装置。 杨明摄

上海院:多相催化“破局”绿色高端碳酸酯

碳酸乙酯(EC)是锂离子电池电解液溶剂体系必不可少的重要组成部分,也是生产碳酸二甲酯、碳酸甲乙酯等溶剂及氟代碳酸亚乙酯等高端添加剂的关键原料。将石化产业链中副产的二氧化碳回收后,与环氧乙烷反应制备碳酸乙酯,每吨产品可消耗0.5吨二氧化碳,具有100%原子经济性。传统碳酸乙酯生产工艺采用均相催化,存在催化剂分离困难、产品精制成本高三、“废”排放量高等痛点。发展低碳绿色的高端电子级碳酸乙酯生产,成为新能源材料领域的迫切需求。

上海院经过多年技术攻关,突破了高稳定性、高活性的复合多相催化体系,同时针对二氧化碳与环氧乙烷环加成反应强放热的特点,开发了高效气液固三相均温反应器及外循环移热工艺,创新低温反应热分布利用技术,实现了均温反应效果,确保了催化剂长期稳定运行。该技术于2021年在国际上首次实现了采用多相催化工艺的万吨级工业装置长周期稳定运行,装置运行期间无固废、液

南化公司:矿化技术实现“以废治废”固碳增值

南化公司作为中国石化与四川大学共建的“CCU及二氧化碳矿化利用研究院”的核心组成单位,围绕二氧化碳矿化技术持续开展基础研究、工艺开发、中试验证与工业示范,形成了覆盖“技术开发—工程示范—产业化”全链条的创新体系。

工业示范方面,基于中国石化与四川大学前期合作开发的脱碳渣矿化技术与百吨级扩试装置,南化公司、南京工程公司和四川大学成功建成了万吨级二氧化碳矿化脱碳渣工业试验装置。该装置在宝钢集团干熄焦车间完成72小时连续运行考核,烟气处理能力达1万吨/年,二氧化碳矿化固定率可达126千克二氧化碳/吨渣,烟气吸收转化率94.7%,碳封存率达75.1%,实现了烟气二氧化碳减排与半干法脱碳渣综合利用的协同。

石科院:烟气二氧化碳变身高价值催化剂

长期以来,工业烟气低浓度二氧化碳的直接捕集利用是CCUS技术的难点。在CCUS各环节中,二氧化碳的捕集和运输成本占总成本的80%以上,且二氧化碳浓度越低,捕集和运输成本越高。与此同时,生产催化裂化催化剂适用的氧化铝基质材料供应短缺、质量良莠不齐等难题。在中国石化科技部的支持下,石科院创新性地提出“一石二鸟”的解决方案,即通过传统CCUS中固废的提纯和运输环节,直接利用低浓度烟气二氧化碳制备氧化铝基质材料。

通过基础研究突破,石科院研发团队打破了低浓度烟气二氧化碳难以制备氧化铝基质材料的固有认知,构建了低浓度二氧化碳与铝酸钠溶液生成氧化铝基质材料的理想反应路径,成功构建了三维反应网络,这张“地图”如同精准的导航系统,确保在复杂条件下也能稳定、高效地生产符合要求的氧化铝基质材料。由于所有制备过程均在原地开展,无须进行二氧化碳提纯和运输,规避了高昂的捕集及运输成本,且生产出的氧化铝基质材料可用于生产催化裂化催化剂,产品价值高,因此成本优势明显。

石科院:烟气二氧化碳变身高价值催化剂

□陈子佩 宋 烨

南化公司:矿化技术实现“以废治废”固碳增值

同时,针对碳酸乙酯下游衍生产物的碳酸酯(如碳酸二甲酯、碳酸甲乙酯、碳酸二乙酯等),上海院开发了碳酸乙酯醇解催化精馏塔反应区控制技术,通过反应—分离耦合机制优化催化精馏塔结构,已完成千吨级多相催化精馏制碳酸二甲酯级产品。未来将进一步推进万吨级电子级碳酸二甲酯多相工艺的工业应用,利用AI智能技术构建碳酸二甲酯、碳酸二乙酯、碳酸甲乙酯、碳酸乙酯等锂离子电池溶剂用高端电子级产品低成本一体化柔性生产体系技术,促进二氧化碳制碳酸酯产业链零碳足迹的绿色融合。

矿化反应过程强化与反应器研究方面,通过数值模拟与结

三个层面协同发力 推动二氧化碳化学利用高质量发展

国家层面:强化顶层设计,完善政策支撑体系

首先,需加快完善全国碳市场建设,通过逐步收紧碳排放配额,扩大行业覆盖范围,并适时引入碳税等机制,推动碳价回归至能有效激励减排与利用的水平,破解成本倒挂困境。

其次,应制定强制性激励与激励性相结合的需求侧政策,例如参照国际经验,在交通燃料、化工材料等领域设立分阶段的二氧化碳产品最低碳排放比例标准,以法规形式创造稳定市场预期。

再次,可通过设立国家级科技攻关项目,集中资源支持高效催化剂、新型反应器、低成本捕集与绿氢制备等关键核心技术研发,并牵头规划建设跨区域的二氧化碳运输管网基础设施,为构建规模化碳循环体系奠定基础。

行业层面:健全标准体系,促进产业协同

一方面,应加速建立和完善全产业链的技术标准与认证体系。针对二氧化碳化学利用各环节,制定统一、权威的碳排放核算方法与产品低碳认证规范,推动与国际标准互认,使产品的环境价值得以量化,引导绿色消费市场。

另一方面,应大力推进跨行业协同合作,打破电力、钢铁、化工等行业间的壁垒,建立耦合度高的转化路线。

挑战

制约二氧化碳化学利用规模化的三重挑战

技术层面:催化效率与工业放大的双重瓶颈

二氧化碳分子的标准吉布斯自由能 ΔG° 为-394.38千焦/摩尔,其固有的热力学稳定性与动力学惰性致使作为原料制备化学品时,须有高能量的输入和有效的催化剂进行活化,这是一项极具挑战的任务。

当前,不同二氧化碳催化转化路径均存在技术瓶颈。例如,加氢制甲醇受热力学平衡限制,转化率偏低;合成乙

经济层面:高成本与跨行业壁垒双重制约

例如,在二氧化碳加氢制甲醇反应中,绿氢成本在整个甲醇生产成本中占比约为70%,当前15—18元/千克的绿氢价格使甲醇成本在4500—5500元/吨,远超化石路线的甲醇生产成本(约2000元/吨)。

此外,跨行业协同壁垒与基础设施不完善阻碍了规模化产业生态的形成。二氧化碳资源化利用本质是构建一个连接“排放源”与“转化端”的跨行业循环体系,涉及电力、钢铁、化工等多个领域的紧密协作。目前,行业间缺乏有效的资源整合机制与商业合作模式,加之专用的二氧化碳运输管网等关键基础设施覆盖不足,导致资源难以实现规模化、经济化的跨区域调配与利用。

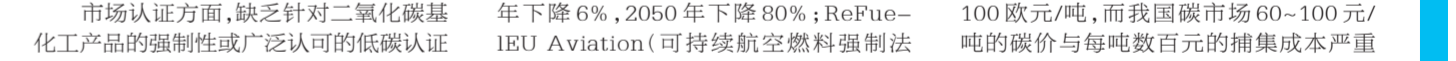
应对措施

能源化工领域的龙头企业应立足自身优势,在技术攻关与产业链整合中发挥带动作用。

研发方面可聚焦高活性、高选择性、长寿命催化体系攻关,优化与现有装置

能源至净 生活至美

Cleaner Energy Better Life



二氧化碳矿化养护混凝土中试装置。郭本师摄