

# “面向重排放工业的CO<sub>2</sub>减排增效”专题

## 客座主编致读者

2030年“碳达峰”目标、2060年“碳中和”愿景，是全国范围内自上至下的共识，是我国向国际社会做出的庄严承诺。而作为国民经济发展重要支撑的水泥、钢铁、耐材、电石、陶瓷材料和有色金属冶炼等过程工业，则需要碳酸盐作为共同原料。这些碳酸盐经高温热分解形成金属氧化物，并释放大量CO<sub>2</sub>，属于重排放过程，如水泥生产、钢铁行业中的CaCO<sub>3</sub>，耐火材料工业中的MgCO<sub>3</sub>等。这使得该类工业的CO<sub>2</sub>排放量约占全国工业碳排放总量的30%。因此，在保证国民经济发展需求的同时，实现重排放过程工业的CO<sub>2</sub>减排增效势在必行且迫在眉睫，具有重要的科学与工业价值，尤其对实现“碳达峰”、“碳中和”目标具有重要战略意义。

减产或实现CO<sub>2</sub>的高效利用是公认的过程工业减排途径，然而减产并不符合社会发展需求。因此，为实现有效的CO<sub>2</sub>减排增效，我国学者在CO<sub>2</sub>捕集、利用、转化及化工过程耦合CO<sub>2</sub>循环等方面展开了大量深入研究，取得了一系列重要的研究进展。应《洁净煤技术》编辑部邀请，我们组织了“面向重排放工业的CO<sub>2</sub>减排增效”专题。专题收录了来自浙江大学、四川大学、山西大学、西安科技大学、华北理工大学、湖南大学、内蒙古科技大学、中国科学院过程工程研究所、中国科学院大学、内蒙古大学、北京化工大学等国内多家高校与科研机构的13篇论文，包括6篇综述与7篇研究论文，系统总结了CO<sub>2</sub>转化、矿化、碳酸盐加氢炼制减排增效等方面的科学技术及政策进展。具体内容如下：

(1) CO<sub>2</sub>转化的催化化学研究：北京化工大学赵宇飞、华北理工大学孟宪光与南方科技大学林蒙等综述了太阳能驱动的CO<sub>2</sub>与CH<sub>4</sub>干重整反应中反应理论、催化剂、催化条件、反应器和反应系统等方面的进展，分析了各种光热耦合反应与热催化反应的异同及其存在的问题，并对该领域的催化研究和规模化、工业化提出了展望与发展建议。华北理工大学孟宪光等还对焦炉煤气中CO/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>等组分催化转化为CH<sub>4</sub>与小分子醇的反应进行了系统综述，详细探讨了其反应机理、工艺和催化剂设计，并总结了主流催化系统的优势和挑战，为推动钢化联产及清洁能源技术的发展提出了有益参考。湖南大学黄宏文等综述了电催化CO<sub>2</sub>还原技术铜基催化剂的优化设计策略研究进展，详细探讨了各类代表性调控策略的研究进展，及电催化剂核心参数的协同效应，并提出了该领域的前景和挑战。内蒙古大学郝海刚等综述了金属及碳基电催化剂电催化CO<sub>2</sub>还原的研究进展，针对其原理、产物和评价等方面进行详细探讨，并对相关研究进行总结和展望。

(2) 碳酸盐加氢炼制实现源头减排增效研究：北京化工大学邵明飞等采用碳酸盐共热耦合原位加氢还原的创新策略，在700℃下实现了水泥生料（CaCO<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和SiO<sub>2</sub>的混合物）原位加氢，气相产物CO选择性可达94.8%，显著抑制了CO<sub>2</sub>的排放，同时获得了均匀多孔的CaO基水泥熟料；并重点探究了反应温度和水泥不同组分（Fe、Si和Al）等因素对碳酸盐加氢性能的影响规律。本研究为实现水泥工业源头降耗与减排增效提供了新策略与理论依据。

(3) CO<sub>2</sub>催化转化的工艺研究：四川大学宋磊等研究了生产规模下商用Cu-ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>催化剂对CO<sub>2</sub>加氢制CH<sub>3</sub>OH的反应动力学及工艺流程。中国科学院工程热物理研究所郭啸晋等研究了由可再生资源生产的电力（绿电）供热与传统供热催化煤气化反应的差异，显示了绿电耦合的巨大优势及CO<sub>2</sub>减排潜力。

(4) 绿氢制备实现CO<sub>2</sub>减排：西安科技大学刘向荣等利用超声悬浮剥离法实现了超薄超小水滑石纳米片的快速制备，并将其用于电催化全解水反应，实现了高性能的绿氢制备。

(5) CO<sub>2</sub>矿化减排与利用技术研究：浙江大学王涛等以国标水泥为原料，系统研究了水泥材料各因素对其固碳性能及力学性能的影响，并测试、分析和总结了多种因素对矿化过程的协同影响。四川大学钟山等系统研究了石膏矿化CO<sub>2</sub>联产CaCO<sub>3</sub>及(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>工艺，确定了最优工艺流程与工艺条件，为固废石膏矿化CO<sub>2</sub>技

术的经济应用提供了有力的基础支持。内蒙古科技大学王玉清等研究了多孔有机聚合物负载的MgO对于CO<sub>2</sub>的吸附效果，并详细阐明其构效关系，为CO<sub>2</sub>矿化剂设计提供新思路。山西大学成怀刚等综述了电石渣循环用于各生产领域以实现废物利用和减少碳排放的研究或应用进展，并系统分析了各类循环途径的碳减排效果及生命周期评价，为碳减排方案的制定提供了有力参考。中国科学院过程工程研究所陈运法等针对化工冶金跨行业耦合难、循环利用难度大的问题，详细分析了碳排放治理现状及国家战略需求，结合现状与发展趋势提供了减碳增效策略，为工业低碳绿色发展提供了有效支撑。

值此专题刊出之际，我们谨代表编辑部对众多学者的踊跃投稿表示真诚的谢意，同时感谢同行专家们对每篇稿件耐心细致的审阅和提出的真知灼见。希望本专题能加深读者对重排放工业中CO<sub>2</sub>减排增效的了解和关注，加强重排放工业中CO<sub>2</sub>减排增效相关研究和技术的发展。



2024年4月

## 客座主编



**赵宇飞** 教授  
北京化工大学

赵宇飞，教授，博士生导师，科技部重点研发计划青年科学家，国家自然科学基金委优秀青年基金获得者（2019）、中国科协青年人才托举工程入选者；2019—2023年科睿唯安全球高被引学者，2021—2023年爱思唯尔中国高被引学者。2013年博士毕业于北京化工大学，2011、2018年在牛津大学访问。现从事水滑石基纳米材料的可控合成及其在矿化和催化方面的研究。发表SCI论文120余篇，总引23000余次，H因子73。其中以第一/通讯作者在*Chemical Society Reviews*、*Journal of the American Chemical Society*、*Angewandte Chemie International Edition*、*Advanced Materials*、*Chem*、*Joule*及*AIChE Journal*等SCI期刊发表论文70余篇，已授权国家发明专利22项。作为共同主编出版RSC英文专著1部；入选美国化学会2023 Ind Eng Chem Res “有影响力研究者”（2023 Class of Influential Researchers），2022年石油化学工业联合会科技进步二等奖、2021中国感光学会特等奖。任《物理化学学报》、*Transactions of Tianjin University*、*SmartMat*编委/青年编委，北京化工大学资源化学研究所副所长。



**岳海荣** 教授  
四川大学

岳海荣，教授，博士生导师，长江学者奖励计划青年学者。主要从事烟气与固体污染治理领域的催化与化学反应工程研究，承担了包括CO<sub>2</sub>捕集与矿化、天然气脱硫、含氢尾气分离、脱硫渣资源化利用在内的多个化学反应工程相关课题任务，特别在CO<sub>2</sub>矿化利用协同固废治理技术方面取得了重要科研成果。在*Journal of the American Chemical Society*、*Nature Communications*、*Chem*、*Chemical Society Reviews*、*Accounts of Chemical Research*等学术期刊发表论文130余篇；申请或授权发明专利40余项；获2023年侯德榜化工科技青年奖、2021年四川省科技进步一等奖、2020年四川省技术发明一等奖、2020年中国化工学会科技奖一等奖；担任*Chemical Engineering Science*副主编、*Chinese Chemical Letters*期刊编委。



**邵明飞** 教授  
北京化工大学

邵明飞，教授，博士生导师，化工资源有效利用国家重点实验室副主任，曾获国家自然科学基金优秀青年科学基金（2019）、中国催化新秀奖。研究方向为氢能化学与器件：基于过程耦合思想，围绕绿氢的制取、存储与利用，提出了电解水制氢耦合有机物氧化的绿氢提效降本新策略，创制了新型催化剂和反应器，实现了电极放大制备和千瓦级耦合氧化系统集成；进一步将绿氢用于碳酸盐的原位加氢炼制，为水泥等重排放过程的源头减排增效提供了新路线。研究成果以第一/通讯作者在*Journal of the American Chemical Society*、*Angewandte Chemie International Edition*、*Advanced Materials*、*Chem*、*Nature Communications*、*CCS Chemistry*、*AIChE Journal*等发表论文110余篇，H因子为61。主持国家自然科学基金重大项目课题和国家重点研发计划课题等国家级项目，同时积极推进原创技术的工程化应用研究，主持多项企业项目。