

· 双清论坛:变革性储能技术的化学工程科学问题 ·

基于智慧能源系统的低碳化工过程^{*}

张香平^{1, 2**} 海彬³

1. 中国科学院过程工程研究所, 北京 100190

2. 中国石油大学(北京)化学工程与环境学院, 北京 102249

3. 河南大学化学化工学院, 开封 475000

[摘要] “双碳”目标为化工行业低碳转型提出了挑战, 清洁能源将逐渐替代化石能源成为能源供应主体, 化工过程电气化成为必然趋势。但以风力和太阳能为主体的清洁能源具有随机性、波动性和间歇性特点, 而化工过程无论是“供能”还是“撤能”, 都必须保障全过程的连续、稳定和安全。因此, 如何实现以新能源为主体的热电供应与化工生产过程的灵活匹配和稳定衔接是当前亟需解决的重大科技难题。以太阳能塔式发热/电为例, 将供能系统与原油催化裂解、化学品生产相集成, 需重点开发高效储电/储热材料及系统、换热器以及基于人工智能的电、热负荷协同调控系统, 实现“产-储-调-用”全链条的能量高效利用和智慧化管理, 为未来低碳负碳化工过程提供新范式。

[关键词] 低碳化工; 智慧能源; 集成优化; 清洁能源; 协调控制

温室气体排放导致全球范围内高温、强降雨等极端天气事件频发, 积极应对气候变化、发展低碳能源技术已经成为全球共识^[1]。2020年, 我国提出“碳达峰、碳中和”的目标, 这势必加速能源系统低碳转型。化工行业是典型的高耗能、高碳排放行业, 2021年我国化工行业碳排放约13亿吨, 在碳中和的大背景下, 面临着发展与减碳的双重挑战: 一方面, 化工产品的需求持续增长, 碳排放量随之增加; 另一方面, 作为高碳排行业, 低碳转型升级刻不容缓。清洁能源替代化石能源成为化工过程能源供应的主体, 可显著降低化工行业碳排放, 是化工低碳转型的重要途径之一^[2]。

智慧能源系统利用各个能源子系统在时间空间上的耦合, 实现多能互补、能源梯级利用^[3]。智慧能源系统与化工过程耦合, 利用智慧化手段实现能源供给、需求及储能调节的动态平衡, 推动化工过程能源供应从化石能源向清洁能源转变^[4, 5]。目前世界各国积极部署, 推进智慧能源系统与化工过程耦合技术发展。如沙特阿拉伯启动了“太阳神绿色燃料



张香平 中国科学院过程工程研究所研究员, 中国石油大学(北京)教授, 博士生导师, 国家杰出青年科学基金获得者, 2019年入选国家“万人计划”。主要从事离子液体/材料构效设计和应用、温室气体减排、化工过程系统集成等研究, 先后主持国家重点研发计划、国家自然科学基金多项课题, 至今发表学术论文260余篇, 授权发明专利50余项。获国家自然科学基金二等奖、侯德榜化工科学技术奖—创新奖、闵恩泽能源化工奖杰出贡献奖等奖励。

项目(Helios Green Fuels Project)”, 利用太阳能和风能生产“绿氢”“绿氨”, 每年可获得120万吨“绿氢”; 西班牙伊比德罗拉(Iberdrola)将投资近7000万欧元, 建造一座100兆瓦的太阳能光伏电站, 打造全球首座完全依靠可再生能源运转的大型化工生产基地; 我国兰州新区“千吨级液态太阳燃料合成示范项目”开发了可再生能源到绿色液体燃料甲醇生产的全新途径, 利用太阳能等可再生能源产生的电力电解水制“绿氢”, 并将二氧化碳加氢转化为“绿色”甲醇。

当前智慧能源系统与化工过程耦合技术的设计与运行依然存在诸多挑战, 需重点发展并亟待解决

收稿日期: 2023-04-03; 修回日期: 2023-04-12

* 本文根据第311期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者, Email: xpzhang@ipe.ac.cn

本文受到国家自然科学基金项目(21838010)的资助。

解水制氢气和氧气。太阳能光伏板既可以为系统提供一部分电能,还可以提升水的温度,增加电解水的效率并将一部分热能储存起来用于供暖系统。进而作者探讨不同环境温度、压力、太阳辐射强度以及地热水温度对整体系统效率的影响,表明环境温度、压力和太阳辐射强度对系统效率的影响较小;而当地热水温度达到 220 °C,整体系统效率可提升 60%。在大多数电解水制氢系统中,氢气往往都是储存起来,储氢会极大地增加系统成本,Islam 等人^[12]利用均质压燃技术,将电解水生产的氢气直接燃烧,通过引入均质压燃发动机这一环节,不仅降低了系统成本,且增加了 4800 kw 的发电量,使系统的能源效率从 37.4% 提升到 53.4%。

清洁能源驱动的电解水制氢新技术逐渐由单一能源供能发展为多能互补供能,能源利用效率得以提高,但与化石能源制氢相比经济性仍然较差。利用清洁能源实现大规模电解水制氢还存在许多挑战,例如降低太阳能光伏板价格、提升电极材料性能、建立安全与高效的系统柔性动态调控模型。

1.2 清洁能源发电-制氢-合成氨耦合系统

传统合成氨生产过程(Haber-Bosch 工艺)以化石能源为原料,排放的二氧化碳占全球工业排放量的近 11%,占全球总排放量的 1.3%,在碳中和背景下,这一过程的减排是非常必要的。

Arora 等人^[13]利用多目标优化(Multi-Objective Optimization, MOO)方法对澳大利亚、巴西和印度的新型生物质驱动的合成氨生产工艺进行了全面的经济分析和生命周期评估。结果表明,生物基氨生产的经济和环境状况与生产位置密切相关,为生物质路线生产氨的成本和环境影响提供了一个全球帕累托前沿。Morgan 等人^[14]研究了全电动风力氨生产系统,并开发了基于风力发电的氨生产所需设备的成本模型,计算了小型工业规模的氨工厂和海上风电场的投资成本。Verleysen 等人^[15]研究了电力转氨过程在不确定条件下的优化问题,对优化设计进行了全局灵敏度分析,并在高效设计和稳健设计之间进行了权衡。未来的研究包括分析稳健的电力转氨过程的动态运行,研究不确定性对其成本的影响。Ardo 等人^[16]描述了太阳能制氢技术涉及的以光电化学或光伏驱动的电解装置和系统,详细介绍了设备和系统架构的技术方法、经济驱动因素、社会观念、政治影响、技术挑战和研究机遇。从长远来看,电化学太阳能制氢技术可以在能源市场上更广

泛部署,但需在提高效率、降低成本等方面再做努力。Rouwenhorst 等人^[17]回顾了分散式、孤岛式氨经济技术的最新进展,重点讨论了实际实施的可行性,对制氢、制氮、氨合成、氨分离、氨储存和氨燃烧的替代方案进行了比较和评价,提出了一种孤岛式氨生产系统的概念性工艺设计。Cinti 等人^[18]设计并分析了利用可再生能源发电生产绿色氨的创新系统,该概念将生产氢气的固体氧化物电解(Solid Oxide Electrolyser, SOE)与改进的 Haber-Bosch 合成氨反应器相结合,并引入了空气分离器来供应高纯氮气,其中 SOE 以极高的效率从 Haber-Bosch 反应器(Haber Bosch Reactor, HBR)回收高温热量,SOE 和 HBR 的工作温度均为 650 °C,与同等工厂相比,可以减少 40% 的电力输入,可实现零二氧化碳排放的氨生产过程。

清洁能源发电-制氢-合成氨耦合技术可实现清洁能源大规模消纳,降低合成氨过程碳排放。大规模清洁能源发电-制氢-合成氨技术亟需开展系统性研究,通过全流程优化与系统设计、协调控制策略研究以及安全防护体系建设,保障合成氨过程的连续、稳定和安全。

1.3 绿电驱动的二氧化碳催化转化技术

利用可再生能源将二氧化碳转化为甲醇、二甲醚及其他碳氢化合物,可有效解决新能源的电力消纳问题,构建人工碳循环以实现碳减排目标。其中,甲醇是一种在环境温度和压力下能够储存和运输的液体燃料,还可以分解为氢气直接用于燃烧或燃料电池提供能量,受到广泛关注。目前,绿电驱动生产甲醇的主要工艺路线是利用可再生能源驱动电解池电解水产生氢气,与空气捕获的 CO₂ 在反应器中反应生成甲醇和水,进一步利用蒸馏塔等设备分离产物。

基于以上体系,研究人员提出多种甲醇合成系统,如 Lonis 等^[19]提出了通过高温可逆固体氧化物电池(Reversible Solid Oxide Cell, RSOC)中电解池(Solid Oxide Electrolyser Cell, SOEC)模式和燃料电池模式(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)相互切换的方法,实现了对可再生能源生产的智能调控。当可再生能源过剩时,RSOC 可以在 SOEC 模式下运行,在甲醇合成工段中生产甲醇作为氢载体和储能介质;当在用电高峰时,储存的甲醇通过在 SOFC 下操作 RSOC 以供电。同时,引入热能储存(Thermal Energy Storage, TES)系统优化 SOFC 废气回收热量的管理,提高绿电驱动制甲醇的产量和

整体系统的效率。由于涉及甲醇合成和蒸馏的动力学等复杂过程,关于绿电驱动制甲醇的产能计算上更加困难,需要对其进行简化假设。Bos 等^[20]利用来自风能的再生电力电解水产生氢气,对固体胺催化剂捕获的 CO_2 氢化生产甲醇。对 100 MW 风力发电制甲醇系统做了系统评估,生产甲醇的效率 $\sim 50\%$,每吨甲醇的总成本约为 800 欧元/吨(不包括运营成本),远远超过目前的化石燃料生产甲醇的成本。但是在评估可再生能源的可行性时,还需要考虑可再生能源的可变性和可调度,及能源价格变化问题。Chen 等^[21]以美国 Kramer Junction 和德国 Norderney 地区的气象参数为依据,开发了非线性产能规划(Non-Linear Programming, NLP)模型,对可再生能源和外部电力对生产甲醇的成本进行优化,发现分别采用太阳能和风能为主的电力供应成本最低,成本分别为 1 490 美元/吨和 1 459 美元/吨,渗透率分别为 81%和 96%。

尽管使用可再生能源驱动二氧化碳催化转化技术取得了长足的进步,但是仍存在诸多问题。例如可再生能源的间歇性会导致整体系统的低效率和高成本,需要继续优化 CO_2 加氢工艺,同时开发生产和使用甲醇设施的能力规划模型,结合多种储存技术(如储氢、燃料电池),提高整体系统的灵活性。

1.4 零碳排放的生物油/化学品生产新过程

在化工行业对 CO_2 进行捕获、转化利用和储存是实现“双碳”目标的重要手段。通过将 CO_2 加氢和电解水技术结合合成各种化学品是最直接的利用

CO_2 方法。整个反应过程中只需要以 CO_2 和 H_2O 为原料,可再生能源提供的电力为能量输入,可生产 CH_4 、醇类和 CO 等产物。在各种反应产物中,由于甲醇在常压下的沸点高于室温,因此在产物收集阶段只需要通过简单的冷凝和液气分离就可以进行提纯。Sarp 等人^[22]设计了一种 CO_2 加氢和电解水一体化系统(图 2)。作者首先将捕获的 CO_2 和电解水产生的氢气混合进行预压缩和加热,之后进行反应器内反应。产物通过气液分离装置进行分离,未反应完的 CO_2 和 H_2 气体循环使用,而甲醇和水作为液体产物分离出来,经过蒸馏纯化得到高纯甲醇产品,而水回收利用作为电解水的原料。Aresa 和同事分析发现通过优化工艺可以将能量消耗降低约 17%,然而即使在优化工艺的条件下,该反应的能源消耗也是利用天然气传统合成方法的 7 倍。另外 CO_2 的成本高于天然气,利用 CO_2 生产甲醇成本在 1.25~2 美元/公斤,而传统天然气合成甲醇的成本为 0.12~0.25 美元/公斤。而且利用可再生能源电力的成本也远高于传统方法合成甲醇的成本。Younas 等人^[23]探讨分别使用热化学和电化学法通过 CO_2 合成 CH_4 , H_2 来源是电解水产生的。结果显示利用电化学的方法生成 CH_4 的产率低;而热化学法需要高温高压,造成催化剂失活以及复杂的操作系统,增加系统成本。Hertwich^[24]设计了一种结合储电、储热、电解水以及合成生物质燃料的模型。该研究利用太阳能塔为高温热源将生物质转化为生物燃料,而太阳能电解水产生的氢气作为反向水煤气变换,整个过程可以实现负碳排放。

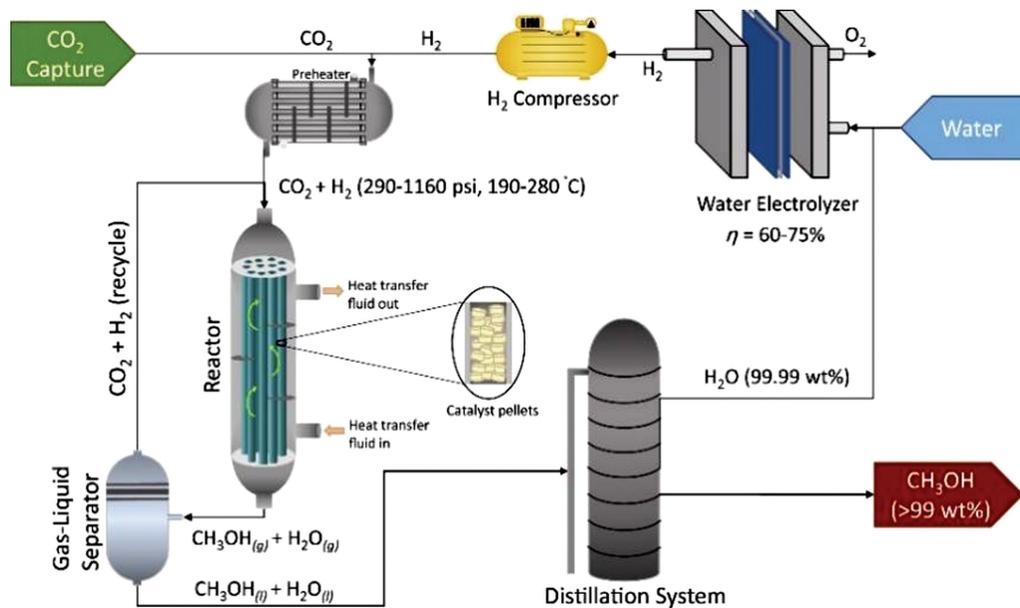


图 2 CO_2 加氢制 $\text{CH}_3\text{OH}-\text{H}_2\text{O}$ 电解一体化系统示意图^[22]

零碳排放的生物油/化学品生产新过程,不仅需要增加对可再生能源的使用,消除生产过程中的碳排放,还需要优化原料来源,使用零碳原料,从而实现全生命周期零碳排放。

2 智慧能源系统与化工过程耦合集成

当前智慧能源系统与化工过程耦合技术发展尚不成熟,需要重点发展并亟待解决的关键技术包括核心设备电气化、多能源的协调控制策略、“产-储-调-用”系统集成与优化运行等。

2.1 核心设备电气化

在碳中和的背景下,化工行业迎来了“去碳化”改革浪潮,如设备改造和能源结构升级等。对于石化工业来说,裂解炉是石化联合装置的“心脏”,但其都是采用化石燃料对炉管进行加热^[25]。据报道,石化行业大约 3/4 的二氧化碳排放主要来源是制造基础化学品过程,如蒸汽裂解占目前排放量 40% 左右^[26]。

石化行业设备电气化受到了全球关注。欧洲生产者正从裂解炉设备入手,努力减少裂解炉的碳生成。巴斯夫、沙特和林德公司正在开发电加热蒸汽裂解炉,计划 2023 年启动,旨在通过使用可再生电力并将其应用于大型工厂,计划可减少多达 90% 的 CO₂^[27]。壳牌公司和陶氏公司也启动了电加热裂解炉试验装置研发,正在对新开发的电气化模型进行测试,解决不同原料提供热量的影响,为工业应用提供技术支持^[28]。这些化工企业都对大型工厂“去碳化”积极努力,但都仅限于“电加热”替代“燃料加热”技术提出,或者处于开发试验阶段。

对于电加热替代燃料加热,相关企业进行了小型技术革新。Coolbrook 公司提出了开发全新裂解炉的概念,采用可再生电力开发了再生式涡轮机,反应器中间为一个 2 000 r/min 的转子^[29],可使装置在工作中将机械能转变为内能,进而加热流体,该结构可将产品收率提高 34%,二氧化碳排放减少 70%。我国炼化一体化也迎来了新路径-电烯氢绿色低碳技术^[30]。以电代替燃料供能,蒸汽裂解加工石油及各类烃类原料,主要生产三烯三苯化学品,产生的干气氢资源用于钢铁产业脱碳,如氢冶金还原铁等,既消纳了绿电,又促使炼化工业向绿色低碳方向发展。

现如今,已有绿电技术应用于炼化一体化或裂解炉,而对大型工厂的核心设备电气化也为石化行业的发展趋势,这也是碳中和时代石化行业的发展

新方向。

2.2 多能互补的协调控制策略

多能互补系统中能源形式包括太阳能、风能、潮汐能、水能等,由于可再生能源具有随机性、波动性和间歇性特点,但化工过程无论是“供能”还是“撤能”,都必须保障整个过程的连续、稳定和安全,因此多能互补协调控制策略的研究尤为重要,不仅要准确预测可再生能源发电量与负荷消耗量,优化电源及储能装置的耦合,保证能源系统安全稳定,同时还要考虑本地区电、气等价格,实现多种能量的互补程度,提高能源系统的经济性。

国内外学者将预测控制、全无限规划、随机优化、人工智能等方法应用到多能互补系统调控中。Kong 等人^[31]针对独立的风能/太阳能/电池能源系统,基于经济模型和动态性能模型,构建分层分布式模型预测控制器(Hierarchical Distributed Model Predictive Control, HDMPC),通过子系统之间的协调优化,实现分布式能源的即插即用,在保证输出功率和负荷需求良好平衡的同时,经济性能也明显提高。Zhu 等人^[32]针对海岛多能互补独立电力系统,提出了基于 copula 函数的全无限规划方法(Copula-Based Interval Full-Infinite Programming, CIFP),将化石能源价格作为系统优化的一个重要因素,随着化石能源价格波动,调节可再生能源发电量,保障海岛能源供应的稳定性以及系统运行的经济性。Liu 等人^[33]采用蒙特卡洛模拟,对可再生能源发电量与负荷消耗量的不确定性进行预测,并通过基于不确定性的多目标随机优化设计方法(Uncertainty-Based Multi-Objective Stochastic Optimal Design Method, UMSODM)对多能互补能源系统规模进行优化,与确定性优化设计(Deterministic Optimal Design Method, DODM)相比,该方法得出的最佳规模具有更好的经济效益及环境效益。为提高调度算法计算效率,Zhou 等人^[34]使用 Swish 激活函数改进的深度神经网络预测光伏发电和负荷需求,基于预测结果,采用强化学习算法求解储能调度模型,获得最优调度策略,与混合整数线性规划相比,强化学习算法求解时间减少了 61.17%,求解精度仅降低 3.13%。在可再生能源发电快速发展的同时,弃风、弃光问题也日渐严重,大大降低了可再生能源的经济性,为缓解这一问题,Shams 等人^[35]使用不同类型的机器学习(Machine Learning, ML)方法开发预测方法,并基于留出法(Hold-Out, HO)和交叉验证

(Cross-Validation, CV) 方法进行评估, 在所有模型中, 随机森林 (Random Forest, RF) 模型预测误差最小。

随着可再生能源发电规模的快速增长, 多能互补系统协调控制的难度不断增加, 因此针对多能互补系统不同能源之间存在时间、空间上的差异, 综合考虑安全、经济、高效等指标的协同控制策略的研究是未来主要发展方向。

2.3 “产-储-调-用”系统集成与优化运行

不稳定和间歇性等问题使得可再生能源的利用仍面临着巨大挑战。因此为确保连续运行, 将可再生能源技术与冷热电联产系统相结合是一个有效手段, 不仅可以提供低碳能源, 还能促进可持续发展。然而, 两个具有不同特征的系统结合使运行管理和控制策略复杂化, 增加了系统的复杂度。因此, 可再生能源的“产储”与冷热电联产系统的“调用”合理集成规划并确定优化运行策略至关重要。

Peng 等人^[36]基于 Stackelberg 博弈论进行了多能源系统的集成建模和优化运行分析。该方法建立了整个系统过程中能源生产、传输、转换、存储和消耗的能量流的耦合矩阵方程。对整个系统的冷-热-电-气多能互补与资源-网络-负载-存储协调相互作用进行了建模。并对模型进行优化分析实现了整个多能系统与能源子系统之间目标的平衡, 使综合效益得到充分发挥。Gimelli 等人^[37]通过电池储能与热电联产系统的集成, 提出一种特定的方法来优化混合 CHP-BESS 系统(热电联产-电池储能系统)的最佳配置并提供了调峰服务。Wu 等人^[38]以太阳光辅助热电联产系统为研究对象, 设计并比较了经典的四种太阳能热集成策略, 最终提出了一种新的集成策略该策略能够集成更多的太阳能热量。Duan 等人^[39]基于 8 个虚拟熔盐热交换器, 建立了一个通用的系统集成优化模型, 并利用该模型获得了太阳能辅助 600 MWe 超临界燃煤电厂发电系统在不同工况下的最优集成模式。Wang 等人^[40]构建了电力和热力网络的双层优化模型, 获得了集成能源网络中分布式可再生能源电能存储与热能存储单元的最佳安装节点与容量。

目前, 已建立的模型只考虑了能源的存储单元的经济型, 还需要对能效及环境效益进一步优化。因此, 未来我们需要进一步建立可再生能源负荷的准确预测方法, 优化综合考虑经济、能源效率、环境效益的复杂系统集成策略。

3 结论与展望

智慧能源系统与化工过程耦合, 推动化工过程能源供应从化石能源向清洁能源转变, 对化工领域“双碳”目标的实现具有重要意义。同时, 化工过程可以大规模消纳可再生能源发电, 有助于解决“弃风”“弃光”难题。目前, 大规模智慧能源系统与化工过程耦合技术主要包括电解水制氢、合成氨、二氧化碳催化转化、生物油/化学品生产等过程, 设计与运行依然存在诸多挑战, 需重点发展并亟待解决的关键技术: 推动石化行业核心设备电气化, “电加热”替代“燃料加热”, 大规模消纳“绿电”; 针对不同能源之间存在时空上的差异, 提出综合考虑安全、经济、高效等指标的协同控制策略; 建立“产-储-调-用”系统集成与优化运行动态调控模型, 准确预测可再生能源发电量与负荷消耗量, 实现以清洁能源为主体的热电供应与化工生产过程的灵活匹配和稳定衔接。总之, 开发智慧能源系统与化工过程耦合技术, 解决可再生能源本地消纳及化工过程低碳转型, 对于实现“双碳”目标具有十分重要的现实意义。

致谢 感谢薛其州、宋永政、刘泽涛、王凤、李凯凯等同学在本文撰写过程中提供的支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] Suman A. Role of renewable energy technologies in climate change adaptation and mitigation: a brief review from Nepal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 151: 111524.
- [2] Rissman J, Bataille C, Masanet E, et al. Technologies and policies to decarbonize global industry: review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*, 2020, 266: 114848.
- [3] Chertkov M, Andersson G. Multienergy systems. *Proceedings of the IEEE*, 2020, 108(9): 1387—1391.
- [4] Shih CF, Zhang T, Li JH, et al. Powering the future with liquid sunshine. *Joule*, 2018, 2(10): 1925—1949.
- [5] Service RF. Liquid sunshine. *Science*, 2018, 361(6398): 120—123.
- [6] Kojima H, Nagasawa K, Todoroki N, et al. Influence of renewable energy power fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(12): 4572—4593.

- [7] Ager JW, Lapkin AA. Chemical storage of renewable energy. *Science*, 2018, 360(6390): 707–708.
- [8] Smith C, Torrente-Murciano L. Exceeding single-pass equilibrium with integrated absorption separation for ammonia synthesis using renewable energy—Redefining the Haber-Bosch loop. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(13): 2003845.
- [9] Bhattacharyya R, Misra A, Sandeep KC. Photovoltaic solar energy conversion for hydrogen production by alkaline water electrolysis: conceptual design and analysis. *Energy Conversion and Management*, 2017, 133: 1–13.
- [10] Khalilnejad A, Riahy GH. A hybrid wind-PV system performance investigation for the purpose of maximum hydrogen production and storage using advanced alkaline electrolyzer. *Energy Conversion and Management*, 2014, 80: 398–406.
- [11] Bicer Y, Dincer I. Development of a new solar and geothermal based combined system for hydrogen production. *Solar Energy*, 2016, 127: 269–284.
- [12] Islam S, Dincer I, Yilbas BS. System development for solar energy-based hydrogen production and on-site combustion in HCCI engine for power generation. *Solar Energy*, 2016, 136: 65–77.
- [13] Arora P, Hoadley AFA, Mahajani SM, et al. Multi-objective optimization of biomass based ammonia production—Potential and perspective in different countries. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 148: 363–374.
- [14] Morgan E, Manwell J, McGowan J. Sustainable ammonia production from U. S. offshore wind farms: a techno-economic review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5: 9554–9567.
- [15] Verleysen K, Coppitters D, Parente A, et al. How can power-to-ammonia be robust? Optimization of an ammonia synthesis plant powered by a wind turbine considering operational uncertainties. *Fuel*, 2020, 266: 117049.
- [16] Ardo S, Fernandez Rivas D, Modestino MA, et al. Pathways to electrochemical solar-hydrogen technologies. *Energy & Environmental Science*, 2018, 11(10): 2768–2783.
- [17] Rouwenhorst KHR, Ham AVD, Mul G, et al. Islanded ammonia power systems: technology review & conceptual process design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 114: 109339.
- [18] Cinti G, Frattini D, Jannelli E, et al. Coupling Solid Oxide Electrolyser (SOE) and ammonia production plant. *Applied Energy*, 2017, 192: 466–476.
- [19] Lonis F, Tola V, Cau G. Renewable methanol production and use through reversible solid oxide cells and recycled CO₂ hydrogenation. *Fuel*, 2019, 246: 500–515.
- [20] Bos M, Kersten S, Brilman D. Wind power to methanol: renewable methanol production using electricity, electrolysis of water and CO₂ air capture. *Applied energy*, 2020, 264: 114672.
- [21] Chen C, Yang AD, Bañares-Alcántara R. Renewable methanol production: understanding the interplay between storage sizing, renewable mix and dispatchable energy price. *Advances in Applied Energy*, 2021, 2: 100021.
- [22] Sarp S, Gonzalez Hernandez S, Chen C, et al. Alcohol production from carbon dioxide: methanol as a fuel and chemical feedstock. *Joule*, 2021, 5(1): 59–76.
- [23] Younas M, Loong Kong L, Bashir MJK, et al. Recent advancements, fundamental challenges, and opportunities in catalytic methanation of CO₂. *Energy & Fuels*, 2016, 30(11): 8815–8831.
- [24] Hertwich EG, Zhang XP. Concentrating-solar biomass gasification process for a 3rd generation biofuel. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(11): 4207–4212.
- [25] 从容. 蒸汽裂解的绿色发展趋势. *石油石化绿色低碳*, 2020, 5(4): 76–77.
- [26] Gao Y, Neal L, Ding D, et al. Recent advances in intensified ethylene production—a review. *ACS Catalysis*, 2019, 9(9): 8592–8621.
- [27] 无. 巴斯夫、SABIC 和林德合作开发电加热蒸汽裂解炉. *石油化工技术与经济*, 2021, 37(2): 48.
- [28] 张伟清. 壳牌公司和陶氏公司启动电加热裂解炉试验装置. *石油炼制与化工*, 2022, 53(9): 114.
- [29] Tullo A. The search for greener ethylene. *Chemical & Engineering News*, 2021, 99(9): 20–22.
- [30] 黄文章, 袁建军, 石国峰, 等. 风电制氢与煤化工集成系统可行性分析. *现代化工*, 2021, 41(7): 5–8.
- [31] Kong XB, Liu XJ, Ma LL, et al. Hierarchical distributed model predictive control of standalone wind/solar/battery power system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(8): 1570–1581.
- [32] Zhu Y, Tong QL, Yan XX, et al. Optimal design of multi-energy complementary power generation system considering fossil energy scarcity coefficient under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 274: 122732.

- [33] Liu ZQ, Cui YP, Wang JQ, et al. Multi-objective optimization of multi-energy complementary integrated energy systems considering load prediction and renewable energy production uncertainties. *Energy*, 2022, 254: 124399.
- [34] Zhou KS, Zhou KL, Yang SL. Reinforcement learning-based scheduling strategy for energy storage in microgrid. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51: 104379.
- [35] Shams MH, Niaz H, Hashemi B, et al. Artificial intelligence-based prediction and analysis of the oversupply of wind and solar energy in power systems. *Energy Conversion and Management*, 2021, 250: 114892.
- [36] Guo TY, Li P, Wang ZX, et al. Integrated modelling and optimal operation analysis of multienergy systems based on Stackelberg game theory. *Energy*, 2021, 236: 121472.
- [37] Gimelli A, Mottola F, Muccillo M, et al. Optimal configuration of modular cogeneration plants integrated by a battery energy storage system providing peak shaving service. *Applied Energy*, 2019, 242: 974—993.
- [38] Wu JJ, Han YR. Integration strategy optimization of solar-aided combined heat and power (CHP) system. *Energy*, 2023, 263: 125875.
- [39] Wang JX, Duan LQ, Yang YP, et al. Study on the general system integration optimization method of the solar aided coal-fired power generation system. *Energy*, 2019, 169: 660—673.
- [40] Wang JJ, Lei T, Qi XL, et al. Chance-constrained optimization of distributed power and heat storage in integrated energy networks. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105662.

Low-carbon Chemical Processes Based on Smart Energy Systems

Xiangping Zhang^{1, 2*} Bin Hai³

1. *Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*

2. *College of Chemical Engineering and Environment, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249*

3. *College of Chemistry and Chemical Engineering, Henan University, Kaifeng 475000*

Abstract The target of “dual carbon” promotes the low-carbon transformation and upgrading of the chemical industry. And clean energy will gradually replace fossil energy as the main body for the supply of chemical process energy, thus the electrification of the chemical process becomes an inevitable trend. Clean energy, mainly wind and solar energy, has strengthened the characteristics of randomness, volatility, and intermittency, but the entire process of a chemical process, whether “energy supply” or “energy withdrawal”, must ensure continuity, stability, and safety. How to realize the new energy-based combined heat and power supply and the chemical process to match the interface has become a major problem to be resolved. Taking solar tower heat/power as an example, the integration of an energy supply system with crude oil catalytic cracking and chemical production, which requires the development of high-efficiency power/heat storage materials and systems, heat exchangers and artificial intelligence-based electric and thermal load co-regulation systems, realizing efficient energy utilization and intelligent management of the whole chain of “production-storage-regulation-use”. It will grow up to be a new paradigm of future low-carbon and carbon-negative chemical processes.

Keywords low-carbon chemical industry; smart energy system; integrated optimization; clean energy; coordination control

(责任编辑 魏鹏飞 张强)

* Corresponding author, Email: xpzhang@ipe.ac.cn