



绿色低碳工业变革性技术及策略

石春艳¹, 张冰洁¹, 董坤¹, 张国帅¹, 李焱¹, 张香平^{1,2*}

1. 中国科学院过程工程研究所, 离子液体清洁过程北京市重点实验室, 北京 100190;

2. 中国石油大学(北京), 化学工程与环境学院, 北京 102249

* 联系人, E-mail: xpzhang@ipe.ac.cn

碳中和是国家重大战略, 将推动能源及产业技术革命, 重塑工业结构和人类生活方式. 工业过程是我国能源消耗和二氧化碳排放的主要领域, 工业过程的碳减排既是挑战也是机遇. 我国是世界工业大国, 工业体系门类齐全、规模宏大, 其中钢铁、水泥(<https://www.163.com/dy/article/ILRJRM4H0534PAAE.html>)、电解铝(<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1772531617627423742&wfr=spider&for=pc>)产量均占世界总产量的一半以上, 化工产值占世界40%以上(<http://pyrb.pyxww.com/content/202010/16/c69108.html>). 这些产业是我国国民经济的支柱产业, 对整个国家的发展起着至关重要的作用. 与此同时, 工业过程中钢铁、有色、化工、建材四大行业是工业二氧化碳排放的主要来源, 碳排放占我国碳排放总量约39%(不包括工业用电间接排放)^[1]. 因此, 工业过程碳减排是一个持续性、系统性、复杂性的长期工程. 相较于其他行业的碳减排, 工业碳减排更为复杂和困难, 是我国实现“双碳”目标的“重中之重”.

现有的工业体系大都是经过百余年形成的成熟工艺和大规模连续化过程, 众多因素环环相扣, 牵一发而动全身, 要在30~40年内完成工业低碳化转型和重塑, 是一项复杂又紧迫的任务. 比如已有百年历史的合成氨工艺, 采用传统哈伯法, 使用煤炭与水通过水煤气变换制氢、深冷空分制氮, 然后氮气和氢气在高压高温条件下(400~500°C, 10~15 MPa)合成氨^[2], 每吨合成氨排放约4.2吨二氧化碳^[3]. 目前, 国内外均在开展绿氢绿电合成氨新一代技术研究, 但直接电还原氮气制备合成氨产率很低, 大都在微摩尔级别, 要构建低碳合成氨新体系, 变革现有合成氨产业, 任重道远. 因此, 要实现工业过程的巨大变革, 任务艰巨, 需要深入分析工业碳排放源及减排路径, 再进行深入的理论、技术和系统创新, 制定技术路线图, 推进重大应用示范.

1 工业过程碳排放分析方法

工业碳排放分析和计算较为复杂, 这与工业过程流程复杂多样、物流能流体系庞大等因素有关. 碳排放分析和计算在系统边界界定方面的研究日渐规范, 但因涉及范围广、条件多仍存在争议. 以一个工厂为例(如图1所示), 首先需要确



石春艳 中国科学院过程工程研究所副研究员. 主要从事离子液体设计合成、基于离子液体的生物质催化转化与分离、超临界二氧化碳萃取、工业碳中和等领域的应用基础研究及咨询工作.



张香平 中国石油大学(北京)教授, 中国科学院过程工程研究所研究员. 主要研究方向为化工热力学及系统集成、离子液体绿色介质和工业应用、气体分离、CO₂分离转化利用、CO₂电催化还原. 开发了多套绿色技术并实现了产业化.

定生产的核心工艺以及清晰的碳排放核算边界, 还需要明确工厂生产过程中的原料和能量的类型和来源. 比如石油、煤炭、矿物等作为原材料、还原剂等供应给工厂, 在工艺生产过程中含碳原料会因加工、转化产生直接碳排放. 工厂生产的能量供应大多是采用化石燃料燃烧, 燃烧过程会产生大量二氧化碳, 也属于直接碳排放过程. 工厂生产过程还需要电力供应, 如泵、压缩机等用电设备及工厂照明等, 用电不直接产生二氧化碳, 但化石能源发电过程会产生碳排放, 所以电作为二次能源, 在工业生产中属于间接碳排放. 其他消耗外购热力和蒸汽而隐含的碳排放, 也属于间接碳排放. 简单来说, 工业过程的碳排放主要来自直接碳排放和间接碳排放两部分. 碳核算需要收集工业过程各碳源生产活动数据, 在选择和获取碳排放因子后, 参考对应的排放源公式进行计算

碳排放量^[4]。

当系统边界包括不同行业时, 每个行业的核算边界不同, 碳排放数据也不同, 有的行业只核算直接碳排, 有的会加上间接碳排, 有的会把系统外的生产活动所产生的碳排放, 比如运输原料进厂的交通燃油排放也核算进去, 还有的核算了工厂建筑用电导致的间接碳排放, 这样就造成了碳排放在不同行业中的重复计算。比如电的间接排放, 电力部门已经核算了发电过程的碳排放, 但其他行业在核算时为了突出行业的完整性, 也会核算用电的间接排放, 交通部门燃油的碳排放核算也是如此。核算边界不同, 核算结果数据也会出现很大差别, 只有按照实际应用及需求规定清晰的核算边界, 将直接碳排放和间接碳排放及其他碳排放分开来统计, 才能清楚核算不同行业的碳排放量^[5]。

以电解铝行业为例, 开展电解铝生产过程碳足迹评价应包括: 确定评价对象和系统边界、分析各环节物料平衡、建立温室气体排放清单和计算各环节碳排放足迹。若将其系统边界设定为铝产品生产过程, 此时需要核算的碳排放包括原材料发生反应的碳排放以及能源消耗的碳排放, 而如果将系统边界设定为产品全生命周期过程, 则需要加上原材料生产、运输及产品使用和回收时发生的碳排放。因此, 为了避

免重复计算, 可以将碳排放分为直接碳排放和间接碳排放, 其中直接碳排放包括生产过程中阳极效应所导致的全氟化碳排放和炭阳极消耗所导致的二氧化碳排放, 间接排放则包括燃料燃烧排放、电力和热力消耗排放的二氧化碳^[6]。据此对电解铝全生命周期的每个环节进行碳排放核算, 可清楚核算电解铝行业生产中每个环节的碳排放数据, 有助于精准定位高碳排放过程并采取针对性的减排措施。

2 工业低碳变革策略

要实现工业过程的绿色低碳化, 需要进行理论知识和研究范式的变革。除了加强理论创新和原创技术突破, 还要改变传统的能源利用方式, 从煤炭、石油、天然气等化石能源利用转向清洁的可再生能源利用, 该方式还需兼具低碳化、智能化和集成化的特点。工业低碳包括3个变革策略(如图2所示): 一是从热碳驱动转变为电氢驱动, 关键在于工艺变革; 二是从半经验调控转变为智能设计, 关键在于数字变革; 三是从单一过程转变为耦合集成, 关键在于系统变革。最终, 通过开发新一代绿色低碳变革性技术、调整产业结构及重构工艺流程等手段, 实现工业过程的低碳化甚至零碳化的可持续发展。

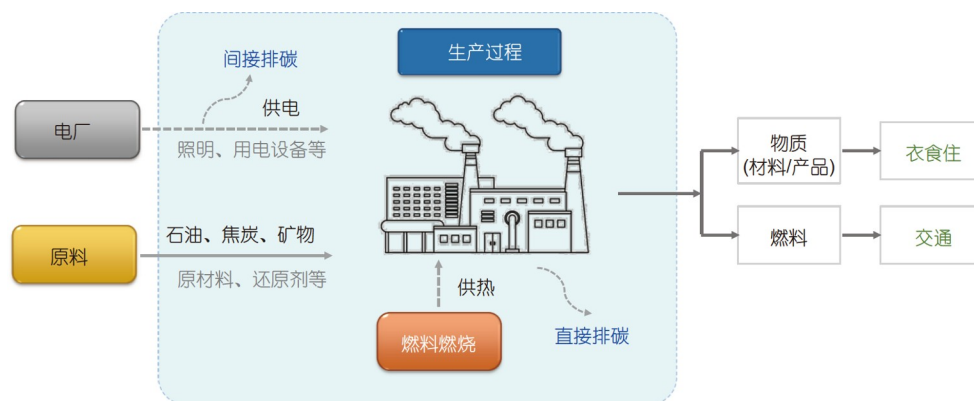


图 1 工业过程碳排放分析

Figure 1 Analysis of carbon emissions for industrial processes

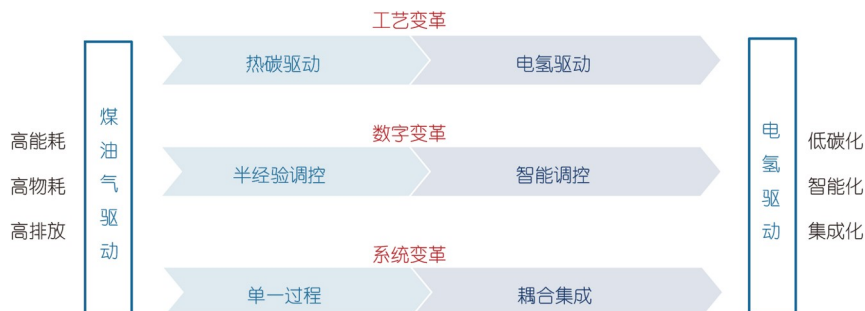


图 2 工业低碳变革策略

Figure 2 Strategies for low carbon transformation in industrial

2.1 工艺变革: 热碳驱动转变为电氢驱动

化石能源驱动的传统工业体系以钢铁、有色、化工、建材行业为主,目前很多工艺使用煤炭作为还原剂、原料和燃料,生产过程中会排放大量的二氧化碳。以驱动力彻底转变为关键,将由传统的热碳驱动转变为电氢驱动,采用绿电驱动工业过程低碳技术变革和流程重构,推进工业过程与绿电、绿氢产业的耦合,解决无碳燃料替代、过程替代和过程减碳难题,形成以清洁能源驱动的未来工业过程生产新模式^[7]。

我国钢铁行业以高炉-转炉长流程为主,主要的排碳单元是高炉炼铁环节,占钢铁全流程碳排放的约74%^[1](<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1772270047253282062&wfr=spider&for=pc>)。铁在自然界都是以氧化物形式存在,目前最常见的方法是采用碳作为还原剂和热源,这也是导致钢铁行业产生大量二氧化碳的主要原因。目前普遍采用碳作为还原剂的主要原因是该工艺很成熟,且经济性好。然而,未来钢铁行业减排的关键是碳原料替代和流程变革,包括使用电氢驱动还原氧化铁的方法,如合成气冶金、富/全氢冶金、直接电解冶炼,可以避免排放量最大的碳还原炼铁环节^[8,9]。目前国内外都积极对电氢驱动还原铁技术进行了大量研究和探索,且已取得了显著进展,如日本神户制钢公司MIDREX(直接还原炼铁法)工艺的500万吨氢直接还原铁项目、德国蒂森克虏伯钢铁公司2023年宣布建造的一座年产250万吨氢基直接还原铁装置(<https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309404901993474031939>)、瑞典钢铁公司的突破性氢能炼铁(HYBRIT)竖炉项目(https://www.sohu.com/a/416275536_313737)。国内河钢集团以氢作为大工业生产能源应用的第一例120万吨氢冶金示范工程,实现连续生产直接还原铁产品,每年可减少二氧化碳排放80万吨,减排比例达到70%(https://business.sohu.com/a/730106029_121123843)。

电解铝及氧化铝为铝行业的主要碳排放环节,其碳排的主要特点是高温电解和碳作为阳极还原。针对铝行业减排的关键是引入绿电进行电解,及开发惰性阳极材料和低温电解技术^[10-12]。比如尖晶石基惰性阳极材料,用来替代炭阳极材料,可大大减少碳排放;开发离子液体低温电解铝新技术,可以实现低温(<100°C)、低能耗高效电解铝^[13,14]。根据上文所述碳排放分析方法进行核算,如果将系统边界设定为从氧化铝到铝产品的过程,采用离子液体低温电解铝技术,比传统的霍尔法碳排放减少将近40%;如果再将绿电引入到电解过程中,则碳排放将大幅度减少80%左右。

在风、光、电等新能源迅猛发展下,并随着新能源车的普及,人们将减少对石油的需求,这给化工行业提供了新机遇。未来石油将主要用来生产化学品及新材料,“减油增化”的产业结构调整将实现化工行业大幅度减碳。采用“绿氢”“绿电”驱动化工行业低碳技术变革和流程重构,推进化

工行业与“绿氢”“绿电”产业相耦合,开展化工电气化替代及无碳燃料替代研究,重构以化石燃料为主的传统化学工业过程,将成为化工行业碳减排的重要发展方向。大力开发原油直接裂解多产化学品技术^[15]、电催化二氧化碳合成烃类^[16,17]、电催化绿氢制备合成氨/尿素技术^[18,19]、电催化二氧化碳还原制合成气/醇/酸技术^[20]等与绿电/绿氢等耦合,构建低碳化工新体系,可实现化工技术的低碳升级。例如绿电作为驱动力的电催化CO₂和H₂O合成烯烃,使用CO₂替代化石燃料作为碳源,H₂O用作氢源,能够从根本上解决传统热催化烯烃生产的严重碳排放问题。目前该技术已取得较大突破,文献报道的乙烯最高选择性大于85%,电流密度接近1 A cm⁻²^[21]。该技术向工业化推进的关键问题是CO₂的单程转化率,其直接关系着工业化装置的生产效率和成本。近年来研究表明,通过采用强酸性电解质^[22,23]、电极结构设计^[24,25]、双极膜^[26]等手段,可显著提高CO₂的单程转化率和全电解槽装置的能量利用效率。使用绿电驱动绿氨合成中,绿氢与氮气合成氨被认为是未来近中期的主流技术^[27]。通过向氨合成工序引入电驱动力,降低反应温度、压力,以显著减少压缩、冷冻功耗^[28]。目前,电驱动氨合成研究主要包含电流强化、微波强化、等离子体、电催化氨合成等实现形式^[29]。如何提高电能向电强化关键作用主体的能量传递效率,解析复杂电磁场条件下的传递过程与反应机制,是绿电绿氢驱动的新型氨合成中亟需解决的前沿化工问题。

建材行业在水泥原料分解过程中产生大量二氧化碳的排放,因此减少碳排放的重点在于低碳水泥技术和替代原料/燃料等技术的开发和应用。例如,低碳含量的高贝利特水泥、硫(铁)铝酸盐水泥等,通过使用高硅钙含量的工业固废替代原料生产水泥,将大大减少建材行业碳排放。建材行业另一个具有前景的变革性技术是用“绿电”电解水制氢气,结合捕集分离工业过程不得不排放的二氧化碳,将制得的氢气与捕集的二氧化碳合成制备乙烯等化工产品,以此为原料生产新型负碳聚合物建筑材料^[30,31]。另外,发展碳纤维、新型塑料、3D打印材料等新型建筑材料也有望为建材行业的碳减排做出重要贡献。

2.2 数字变革: 半经验调控转变为智能调控

工业过程碳减排离不开大数据和智能化。通过收集和分析大量的数据,可以深入了解工业过程中碳排放的来源和影响因素,从而制定有效的减排策略。智能化技术的应用可以实现对工业过程的精细控制和优化,减少能源的浪费和碳排放。现有技术从实验室走向工业化通常经历10年甚至数十年的时间才能完成,主要是中间要经历小试-中试-示范装置等环节,每一个环节都要经历较长时间。随着数字技术的发展,这种“逐级放大”的传统设计模型,逐渐被以人工智能为代表的新的设计范式所取代,可以实现从实验室到工厂的“一步智能放大”,实现这样的革新技术,根本依赖于理论、方法和

研究范式的创新.

中国科学院过程工程研究所系统阐述了介尺度结构对过程计算模拟的重要性及其研究方法,形成了“介科学”理论和方法,其核心是解决过程工程的共性基础与前沿问题,包括气固、气液、湍流、颗粒等复杂系统和材料与生化等体系,且保持了问题、模型、软件和硬件的逻辑与结构一致性,为高效率、高精度的过程模拟,特别是实现“虚拟工厂”提供了可能^[32].基于这一理论,耦合人工智能、大数据等前沿科技,可突破机理模型及大规模多尺度软硬件并行计算的技术难题,实现基于虚拟工厂的低碳制造耦合技术.如低碳烯烃(DMTO)虚拟工厂,考虑甲醇年处理量、催化剂存量、催化剂循环量等因素对反应器性能影响,形成了操作条件优化数据库,结合超级计算的高精度实时模拟与数据处理,以及人工智能的实时分析与调控,能够实现工业过程的虚拟现实和数字孪生,成为目前工业过程研究的前沿技术.该技术在通用性、预测性、优化能力和时效性等方面均突破了传统仿真的限制,形成了现代工厂的新研究范式.

运用该技术,可在新工艺开发中通过虚拟运行交互地探讨不同工艺、装备和流程设计方案的优劣,并随即改进设计,查看和分析效果.同时,对既有工厂,也可实现内部过程的全透明展示,从而优化其操作参数、方式并指导其改造,为实现冶金、化工、建材等多过程的低碳耦合和优化集成提供了解决方案^[33].因此,大数据和智能化为工业碳减排提供更加可持续和高效的解决方案,将推动工业向绿色低碳发展迈进.

2.3 系统变革:单一过程转变为耦合集成

通过将传统工业过程耦合以实现行业间的能源集成、资源互补、产业协同和多元耦合发展,从单一过程向耦合再造转变的系统变革,也是工业绿色低碳发展的重要解决思路.系统变革可以提高能源利用效率,通过不同行业之间的协同合作和资源共享,最大程度地优化资源利用,实现循环经济的理念,推动工业可持续发展.

在碳中和大背景下,钢铁行业的耦合集成应用不仅仅局

限于目前广泛研究的钢化联产,未来还将与新能源绿电、绿氢产业紧密结合,向绿电绿氢驱动的低碳冶金方向迈进.同时,在钢铁冶炼过程中所产生的大量钢渣等工业固废,主要成分是氧化钙和二氧化硅及其他如铁、镍等有色金属,通过深度冶炼可以提取这些有色金属^[34],剩余物质再经过活化制作为低碳水泥,就可实现钢铁行业和建材行业、金属冶炼等行业协同耦合^[35].电解铝产业未来碳减排将更多地依赖于风电、光伏等大规模稳定的廉价绿电电源的发展.同时,氧化铝过程中产生的赤泥含有丰富的有色金属元素,可以通过亚熔盐法回收,其余的固废也可以用作生产低碳建材的原料.这种产业协同方式将有色行业与新能源产业、建材行业紧密耦合起来,以实现高质量可持续发展的减碳目标.化工行业未来也将更加注重生产高值化学品和高端材料,实现产业转型升级.同时,将更多地应用绿电、绿氢合成绿氨,或利用工业过程排放的二氧化碳生产绿色甲醇、聚碳、绿色航空煤油等新产品、新材料和清洁能源.建材行业与其他行业的协同耦合减碳技术则更加广泛.粉煤灰、钢渣、电石渣、赤泥等废弃物可以用于生产水泥,不仅可以减少工业固废的产生,还可以降低碳排放;新型碳负性水泥还可以固化二氧化碳^[36].未来建筑也有望更多地使用钢材、碳纤维、塑料等低碳建筑材料,从根本上减少对高碳排放材料如水泥的使用.

3 总结与展望

在全球碳中和和可持续发展目标下,工业过程面临巨大挑战,迫切需要根本性、系统性的变革.为此,我们需要交叉、开放、合作,引入新的发展动能.随着人们对物质文化生活要求的提高,新能源、新材料、生命健康等新兴产业的发展将进一步促进工业过程的产品结构和产业结构转型,提高国家创新能力和竞争力.绿色低碳工业变革是一个循序渐进的过程,需要从国家层面进行顶层设计,制定系统的规划,并有序推进,新技术和传统技术能够实现有机衔接、有序更替,以确保变革平稳进行,为经济社会高质量发展提供坚实支撑.

致谢 感谢中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA29010500)和中国石油大学(北京)科研基金(2462022YJRC012)资助.感谢中国科学院过程工程研究所张锁江院士对本文的指导.

推荐阅读文献

- 1 Zhang S J, Zhang X P, Ge W, et al. Carbon neutral transformative technologies for industrial process (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2022, 37: 511–521 [张锁江, 张香平, 葛蔚, 等. 工业过程绿色低碳技术. 中国科学院院刊, 2022, 37: 511–521]
- 2 MacFarlane D R, Cherepanov P V, Choi J, et al. A Roadmap to the ammonia economy. *Joule*, 2020, 4: 1186–1205
- 3 Ni J. Under the background of carbon neutrality, how much pressure does the chemical industry face in terms of carbon emissions (in Chinese)? *China Petr Chem Ind*, 2021, 4: 22–27 [倪吉. 碳中和背景下, 化工行业碳排放压力有多大? 中国石油和化工, 2021, 4: 22–27]
- 4 Ding Z L, Zhang T, Wang Y B, et al. Carbon Neutrality: Logic System and Technical Requirements (in Chinese). Beijing: Science Press, 2022 [丁仲礼, 张涛, 王一波, 等. 碳中和: 逻辑体系与技术需求. 北京: 科学出版社, 2022]

- 5 Liu H X, Wu L M, Lin Q Y, et al. Carbon footprint assessment technology and its application in key industries (in Chinese). *Chem Ind Eng Progr*, 2023, 42: 2201–2218 [刘含笑, 吴黎明, 林青阳, 等. 碳足迹评估技术及其在重点工业行业的应用. *化工进展*, 2023, 42: 2201–2218]
- 6 Li C H, Cao A L. Carbon emission accounting methods for aluminum electrolysis industry (in Chinese). *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2023, (3): 47–52 [李春焕, 曹阿林. 铝电解工业碳排放核算方法. *有色金属(冶炼部分)*, 2023, (3): 47–52]
- 7 Zhang S, Zhang X, Shi C, et al. Revolutionary technology of low-carbon chemical processes. *Natl Sci Rev*, 2023, 10: nwad132
- 8 Shi C Y, Zhang G S, Li Y, et al. Development trend for co-production of steel and chemical in the context of carbon neutrality (in Chinese). *Chin J Process Eng*, 2022, 22: 1317–1324 [石春艳, 张国帅, 李益, 等. 碳中和背景下的钢化联产发展趋势. *过程工程学报*, 2022, 22: 1317–1324]
- 9 Rechberger K, Spanlang A, Sasiain Conde A, et al. Green hydrogen-based direct reduction for low-carbon steelmaking. *Steel Res Int*, 2020, 91: 2000110
- 10 Huang Y, Yang Y, Zhu L, et al. Electrochemical behavior of Fe-Ni alloys as an inert anode for aluminum electrolysis. *Int J Electrochem Sci*, 2019, 14: 6325–6336
- 11 Maniam K K, Paul S. A review on the electrodeposition of aluminum and aluminum alloys in ionic liquids. *Coatings*, 2021, 11: 80
- 12 Wang J, Wang P, Wang Q, et al. Low temperature electrochemical deposition of aluminum in organic bases/thiourea-based deep eutectic solvents. *ACS Sustain Chem Eng*, 2018, 6: 15480–15486
- 13 Yang X Q, Zheng Y, Wang Q, et al. Aluminum electrodeposition and refining in ionic liquids (in Chinese). *Chin J Process Eng*, 2023, 23: 396–410 [杨晓晴, 郑勇, 王倩, 等. 离子液体中铝的电沉积及精炼. *过程工程学报*, 2023, 23: 396–410]
- 14 Lang H, Zhang J, Kang Y, et al. Effects of lithium bis(oxalato)borate on electrochemical stability of [Emim][Al₂Cl₇] ionic liquid for aluminum electrolysis. *Ionics*, 2017, 23: 959–966
- 15 Liu Y H, Gong Y N. Development and trend of petrochemical technologies in 2020 (in Chinese). *World Petrol Ind*, 2020, 27: 75–80 [刘雨虹, 龚雅妮. 2020石油化工技术进展与趋势. *世界石油工业*, 2020, 27: 75–80]
- 16 Choi W, Park S, Jung W, et al. Origin of hydrogen incorporated into ethylene during electrochemical CO₂ reduction in membrane electrode assembly. *ACS Energy Lett*, 2022, 7: 939–945
- 17 Liu W, Zhai P, Li A, et al. Electrochemical CO₂ reduction to ethylene by ultrathin CuO nanoplate arrays. *Nat Commun*, 2022, 13: 1877
- 18 Suryanto B H R, Du H L, Wang D, et al. Challenges and prospects in the catalysis of electroreduction of nitrogen to ammonia. *Nat Catal*, 2019, 2: 290–296
- 19 Wang M, Khan M A, Mohsin I, et al. Can sustainable ammonia synthesis pathways compete with fossil-fuel based Haber–Bosch processes? *Energy Environ Sci*, 2021, 14: 2535–2548
- 20 Luo H, Li B, Ma J, et al. Surface modification of nano-Cu₂O for controlling CO₂ electrochemical reduction to ethylene and syngas. *Angew Chem Int Ed*, 2022, 61: e202116736
- 21 García de Arquer F P, Dinh C T, Ozden A, et al. CO₂ electrolysis to multicarbon products at activities greater than 1 A cm⁻². *Science*, 2020, 367: 661–666
- 22 Huang J E, Li F, Ozden A, et al. CO₂ electrolysis to multicarbon products in strong acid. *Science*, 2021, 372: 1074–1078
- 23 Xie Y, Ou P, Wang X, et al. High carbon utilization in CO₂ reduction to multi-carbon products in acidic media. *Nat Catal*, 2022, 5: 564–570
- 24 O'Brien C P, Miao R K, Liu S, et al. Single pass CO₂ conversion exceeding 85% in the electrosynthesis of multicarbon products via local CO₂ regeneration. *ACS Energy Lett*, 2021, 6: 2952–2959
- 25 McCallum C, Gabardo C M, O'Brien C P, et al. Reducing the crossover of carbonate and liquid products during carbon dioxide electroreduction. *Cell Rep Phys Sci*, 2021, 2: 100522
- 26 Xie K, Miao R K, Ozden A, et al. Bipolar membrane electrolyzers enable high single-pass CO₂ electroreduction to multicarbon products. *Nat Commun*, 2022, doi: 10.1038/s41467-022-31295-3
- 27 Bu J, Liu Z, Ma W, et al. Selective electrocatalytic semihydrogenation of acetylene impurities for the production of polymer-grade ethylene. *Nat Catal*, 2021, 4: 557–564
- 28 Lee B, Lim D, Lee H, et al. Which water electrolysis technology is appropriate? Critical insights of potential water electrolysis for green ammonia production. *Renew Sustain Energy Rev*, 2021, 143: 110963
- 29 Mehta P, Barboun P M, Engelmann Y, et al. Plasma-catalytic ammonia synthesis beyond the equilibrium limit. *ACS Catal*, 2020, 10: 6726–6734
- 30 Wang X P, Song J L, Li G X. Prospect of carbon peak and carbon neutrality of China cement industry (in Chinese). *Cement*, 2021, (8): 1–9 [王新频, 宋教利, 李光鑫. 我国水泥工业碳达峰与碳中和前景展望. *水泥*, 2021, (8): 1–9]
- 31 Zhu B B, Zheng Z L, Zou X F. Analysis of carbon emission reduction technology path of cement enterprises (in Chinese). *Cement*, 2021, (10): 4–5 [朱兵兵, 郑志龙, 邹兴芳. 水泥企业碳减排技术路径浅析. *水泥*, 2021, (10): 4–5]
- 32 Chen C, Guan X, Ren Y, et al. Mesoscale modeling of emulsification in rotor-stator devices. *Chem Eng Sci*, 2019, 193: 171–183
- 33 Chen J, Ren Y, Huang W L, et al. Multilevel mesoscale complexities in mesoregimes: Challenges in chemical and biochemical engineering. *Annu Rev Chem Biomol Eng*, 2022, 13: 431–455

- 34 He S, Lin L, Liu Y Q, et al. Recovery of valuable elements from molten modified phosphorous steel slag by carbothermic reduction (in Chinese). *Iron Steel*, 2022, 57: 167–174 [何赛, 林路, 刘亚琴, 等. 熔融改质含磷钢渣碳热还原回收有价值元素试验. *钢铁*, 2022, 57: 167–174]
- 35 Han C J, Yang X J, Zhou H Q, et al. Steel slag and its application in cement industries (in Chinese). *Mater Rep*, 2010, 24(S2): 440–443 [韩长菊, 杨晓杰, 周惠群, 等. 钢渣及其在水泥行业的应用. *材料导报*, 2010, 24(S2): 440–443]
- 36 Zhang D, Ghoulah Z, Shao Y. Review on carbonation curing of cement-based materials. *J CO₂ Util*, 2017, 21: 119–131

Summary for “绿色低碳工业变革性技术及策略”

Revolutionary technologies and strategies for green and low-carbon industry processes

Chunyan Shi¹, Bingjie Zhang¹, Kun Dong¹, Guoshuai Zhang¹, Yao Li¹ & Xiangping Zhang^{1,2*}

¹ Beijing Key Laboratory of Ionic Liquids Clean Process, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

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

* Corresponding author, E-mail: xpzhang@ipe.ac.cn

Carbon neutrality is a major national strategy to promote the energy and industrial technology revolution and reshape the industrial structure and human lifestyle. China is a world industrial power with a comprehensive and large-scale industrial system. Industrial processes are the primary areas of energy consumption and carbon dioxide emissions in China, with steel, nonferrous metals, chemicals, and building materials being the primary sources of industrial carbon dioxide emissions. Therefore, industrial process carbon reduction is a sustainable, systematic, and complex long-term project. Compared with other industries, industrial carbon reduction is more complex and difficult. Therefore, realizing significant changes in industrial processes is arduous. We need to analyze industrial carbon emission sources and emission reduction paths, followed by in-depth theoretical, technological, and systematic innovation, to develop a technical roadmap and promote major application demonstrations.

The analysis and calculation of industrial carbon emissions are relatively complicated. The boundary definition of carbon emission analysis and calculation in the system remains debating. First, it is imperative to identify the core production process and clear carbon emission accounting boundaries. In addition, the types and sources of raw materials and energy used in the factory production process should be clarified. Carbon emissions from industrial processes primarily come from direct and indirect carbon emissions. Carbon accounting requires collecting production activity data from various carbon sources in industrial processes, selecting and obtaining carbon emission factors, and referring to the corresponding emission source formula to measure carbon emissions. Different accounting boundaries can lead to significant differences in accounting data. Only by delineating clear boundaries based on needs and conducting classified statistics based on direct and indirect carbon emissions can industrial carbon emissions be calculated.

To achieve green and low-carbon industrial processes, it is necessary to transform theoretical knowledge and research paradigms. Three transformation strategies are proposed: (1) Shifting from thermal carbon-driven to electric hydrogen-driven, with the key being process transformation, (2) shifting from semiempirical regulation to intelligent design, with the key being digital transformation, and (3) shifting from a single process to a coupled integration, with the key being system transformation. Eventually, sustainable development of low-carbon or even zero-carbonization in industrial processes can be realized by developing new-generation green and low-carbon transformative technologies, adjustment of industrial structure, and restructuring of technological processes.

By analyzing the current situation and trends of the steel, nonferrous metals, chemical, and building material industries with high carbon emissions in industrial processes, three strategies and methods for low-carbon transformation are described, and key breakthroughs in industrial green and low-carbon transformative technologies are summarized. Based on the current status and future development trends of current industrial processes, suggestions and actions to speed up industrial transformation are outlined, and the development prospects of green and low-carbon industrial processes are predicted.

industrial processes, green and low carbon, carbon emission analysis, revolutionary technologies

doi: [10.1360/TB-2023-1039](https://doi.org/10.1360/TB-2023-1039)