

我国石化工业推进绿氢炼化的思考

刘佩成

(中国石油化工集团有限公司综合管理部, 北京100728)

摘要：2060年前实现碳中和，对于我国来说时间紧、任务重，对于我国石化工业来说更是挑战性大、困难多。未来我国将建成以新能源为主体的新型电力系统，为石化工业提供安全可靠的绿氢和绿电。绿氢炼化是我国石化工业实现碳中和的重要措施和路径，但将给现有炼化工艺流程带来重大变革，需要提前部署关键技术攻关和关键问题研究。建议加快研究绿氢稳定供应方案、绿电电气化应用场景、炼化工艺主流程再造及工程设计方案、全厂用能低碳化实施路线图以及降碳、零碳、负碳技术攻关等，为我国石化工业实现碳中和提供强有力的技术支撑。

力争2030年前实现碳达峰、努力争取2060年前实现碳中和，是党中央经过深思熟虑作出的重大战略决策，也是我国对国际社会作出的庄严承诺。石化工业产业规模大、能源消耗多、二氧化碳排放较大。通过加快推进绿色低碳转型发展，我国石化工业2030年前实现碳达峰难度不是很大，但是碳达峰以后，要利用30年时间即在2060年前实现碳中和，任务艰巨、形势紧迫，必须实施切实可行、经济有效的深度减碳路径。绿氢炼化是我国石化工业实现碳中和的重要措施，将给传统工艺流程和全厂用能方式带来巨大变革，应提前进行研究和谋划。

1 我国石化工业实现碳中和任务艰巨

1.1 实现“双碳”目标是党中央作出的重大战略部署

近年来，全球气候变化对人类社会构成重大威胁。政府间气候变化专门委员会（IPCC）认为，若全球气温升温控制在1.5℃以内，则需要全球在2050年左右实现碳中和；若全球气温升温控制在2℃以内，则需要全球在2070年左右实现碳中和[1]。这成为全球实现碳中和目标的时间点，所剩时间只有30~50年。据能源与气候智库（ECIU）统计，截至2021年10月，全球已经有132个国家和地区提出了碳中和目标。

应对气候变化是全人类的共同责任。十八大以来，党和国家高度重视应对气候变化，实施积极应对气候变化国家战略。2020年9月22日，习近平主席在第75届联合国大会一般性辩论上宣布，中国将提高国家自主贡献力量，采取更加有力的政策和措施，力争2030年前二氧化碳排放达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。2021年10月，中共中央、国务院发布的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》（简称“意见”）和《2030年前碳达峰行动方案》（简称“方案”）文件，提出了碳达峰、碳中和的主要目标、实施重点和路径，制定了时间表、路线图。2021年12月，中央经济工作会议提出，要坚定不移推进碳达峰碳中和，新增可再生能源和原料用能不纳入能源消费总量控制，创造条件尽早实现能耗“双控”向碳排放总量和强度“双控”转变。2022年1月25日，习近平总书记在中央政治局第三十六次集体学习时强调，实现“双碳”目标，要坚决控制化石能源消费，尤其是严格合理控制煤炭消费增长，有序减量替代；要把促进新能源和清洁能源发展放在更加突出的位置，积极有序发展光能源、硅能源、氢能源、可再生能源。2022年3月23日，国家发展和改革委员会、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划（2021—2035）》（简称“氢能规划”），首次明确氢能是未来国家能源体系的重要组成部分，确定可再生能源制氢是主要发展方向，到2025年可再生能源制氢成为新增氢能消费的重要组成部分，到2030年形成较为完备的氢能产业技术创新体系、清洁能源制氢及供应体系，到2035年形成氢能产业体系，构建涵盖交通、储能、工业等领域的多元化氢能应用生态。这将对推动我国能源绿色低碳转型、实现碳达峰碳中和目标发挥重要作用。

从习近平总书记和党中央的这些要求部署中可以看出，“十四五”及更长一段时间，我国生态文明建设将进入以降碳为重点战略方向、降碳减污扩绿增长协同推进的关键时期，将加快推进经济社会发展全面绿色转型，加快构建清洁低碳安全高效能源体系，坚定不移走生态优先、绿色低碳的高质量发展之路。

1.2 我国实现碳中和时间更紧、任务更重

据2021年《BP世界能源统计年鉴》，美国碳排放量于2007年达到峰值58.8亿吨，到2020年已降为44.6亿吨，下降了24.1%；欧盟碳排放量于2006年达到峰值50.6亿吨，到2020年已降为36.0亿吨，下降28.9%[2]。这些发达国家已实现碳达峰，二氧化碳排放呈下降趋势，2050年甚至更早实现碳中和问题不大。而我国则不同，我国是世界人口最多的国家，仍处于现代化发展阶段，整体处于工业化中后期，以化石能源为主的能源结构短期内难以改变，可再生能源消纳及存储障碍待解，传统“三高—低”（高投入、高能耗、高污染、低效益）产业仍占较高比例，深度脱碳技术成本高且不够成熟，碳排放量仍处于增长阶段。研究显示[3]，2020年我国与能源相关的碳排放量为100亿吨，约占全球的30%，

比2005年增长了近80%，是全球碳排放量最多的国家，碳排放量相当于美国和欧盟合计的1.24倍，面临巨大的碳减排压力；预计2030年我国与能源相关的碳排放量将达到峰值约106亿吨，之后逐步回落，2050年降至27亿吨左右，2060年通过碳捕集、利用与封存（CCUS）等负碳技术能够实现净零碳排放。

由此可见，从现在起到2030年，还有不到10年时间，我国在比发达国家碳排放量多、尚未基本实现现代化的情况下实现碳达峰，极具挑战性。困难再多，第一阶段目标必须按时完成，并且要尽可能提前完成、低峰值完成。碳达峰是碳中和前提，达峰时间越早、峰值越低，碳中和代价越小、效益越大。欧美国家从碳达峰到碳中和普遍有50~70年的过渡期，而我国从碳达峰到2060年实现碳中和的过渡期只有30年。考虑到我国人口数量、发展速度、经济规模和资源禀赋等情况，我国实现碳中和时间更紧、任务更重，必须采取切实可行的深度减碳行动，实现绿色工业革命。

1.3我国石化工业实现碳中和挑战性更大、困难更多

石化工业是我国能源消耗和碳排放的主要领域之一，也是我国实现碳中和的关键产业之一。

我国石化工业的碳排放包括与能源相关排放（直接排放）、过程排放、净购入的电力与热力产生的排放（间接排放），主要集中在炼化产业。据测算[4]，2019年我国炼化产业碳排放量约为4.7亿吨，约占全国碳排放总量的5%。其中，与能源相关的碳排放约占45%，过程排放约占32%（主要是化石能源制氢），间接排放约占23%。“双碳”目标下，我国石化工业仍存在许多问题：一是我国炼化产业总规模较大，炼油和部分大宗石化产品产能严重过剩，能源消耗比较多；二是能源消费以化石能源特别是煤炭为主，能效与国外先进水平有差距，节能降碳难度较大；三是先进产能不足，仍存在大量小炼油、小化工装置，淘汰落后产能任重道远；四是高性能、高端产品供应不足，绿色低碳产品占比不高，产品结构仍需大力调整；五是生产运营对能源的安全稳定性和技术经济性要求较高，新能源存在波动性间歇性，电气化替代化石能源难度较大，绿氢成本相对较高；六是油气资源对外依存度较高，存在较大安全风险；七是废旧石化产品回收率不高，循环经济发展仍需努力；八是科技原始创新能力不足，现有的降碳、零碳和负碳技术无法支撑实现“双碳”目标。

进入新发展阶段，为保障国家能源安全、满足人民对美好生活的向往，未来一段时间我国部分石化产品产能仍将保持持续扩张趋势，碳排放量仍将处于增长态势。预计到2025年，我国炼油产能将由2020年的8.90亿吨/年增长到9.89亿吨/年、乙烯产能将由2020年的3518万吨/年增长到6332万吨/年，分别为2020年的1.1，1.8倍[5]。尽管石化产品产能仍将增加，但通过采取严控产能盲目扩张、大力淘汰落后产能、不断提升能效、采用绿色先进工艺技术、压减高碳化石能源用量、增加新能源使用、加大废旧石化产品回收利用等措施，不搞“碳冲锋”和“运动式”减碳，避免人为“攀高峰”，预计2030年前我国石化工业完全能够实现碳达峰，峰值6亿吨左右，比2020年增长约28%，其中炼油产业基本可在2025年左右达峰、乙烯产业可在2030年前达峰。

我国石化工业2030年前实现碳达峰以后，随着电动汽车和氢燃料电池汽车的快速发展，成品油需求将快速下降，炼油产业将需要“油转化”“油转特”，原油加工量将逐步降低；化工产业要满足高端装备、汽车制造、电子信息、新能源、节能环保等新兴产业对高端新材料的需求，需要增产绿色低碳、高端高性能石化产品，加快建成绿色低碳产业。面对未来产业发展态势，我国石化工业要在30年内即2060年前实现碳中和，挑战性更大、困难更多：一是需中和的碳排放基数较大，达6亿吨左右。二是时间较为紧张，要用30年时间完成由碳排放峰值降至净零排放，难度很大。三是以化石能源为主的能源结构，在新能源未实现安全可靠的情况下，实现新能源完全替代难度较大。四是许多降碳、零碳、负碳技术还不够成熟、能耗高，还需要进一步攻克关键环节、降低成本。五是CCUS技术虽是实现碳中和的关键技术和托底技术，但捕集的二氧化碳进行地质封存存在源汇匹配问题和泄漏风险、开展化学利用存在产品成本高和市场容量问题，因此通过CCUS减排的二氧化碳数量有限，不可能完全依靠CCUS技术实现碳中和。据预测，到2050年我国钢铁、水泥、石化等工业领域通过CCUS技术实现碳减排量仅有约6亿吨/年[6]。CCUS技术可能更多的用于催化裂化烧焦、环氧乙烷副反应等难以压减的过程碳排放减排，解决碳中和“最后一公里”问题，确保最终实现碳中和目标。石化工业要实现碳中和，必须探索新的发展路径。

2绿氢炼化是石化工业实现碳中和的必由之路

目前，绿氢炼化已列入《“十四五”全国清洁生产推行方案》中，文件明确提出石化化工行业实施绿氢炼化降碳工程。绿氢炼化将成为石化工业实现碳中和的必由之路。

2.1绿氢炼化将推动石化工业实现深度减碳

在“双碳”目标下，氢作为世界公认的一种清洁、高效、安全的二次能源，可以作为清洁能源、能源载体和化工原料。作为能源，氢有两个极具竞争力的特征：一是高能量密度，单位质量的热值约是煤炭的4.0倍，汽油的3.1倍，天

然气的2.6倍；二是可存储且无碳，还能与多种能源耦合，相比电力可以实现跨时间跨地域的灵活运用。因此，在能源转型过程中，氢是最佳的碳中和能源载体，将是打造未来能源体系、实现能源变革的重要媒介，更是深度减碳的攻坚利器。据中国氢能联盟预测，在2030年碳达峰情景下，我国氢气的年需求量将达到3715万吨，在终端能源消费需求量中占比约为5%；在2060年碳中和情景下，我国氢气的年需求量将增至1.3亿吨左右，在终端能源消费需求量中占比约为20%，其中绿氢规模有望达到1.0亿吨。

在未来能源体系中，氢能将与电力一起居于核心地位。世界能源理事会将氢能分为绿氢、灰氢、蓝氢三类，其中绿氢来自风能、太阳能、生物质等可再生能源，制备过程无直接碳排放，但成本较高[7]。现有技术条件下，石化工业应用氢能减碳，短期内可能面临缺乏经济性、储运困难和安全等问题，是制约绿氢进入石化工业的瓶颈。但是从长远看，在碳中和推进过程中，随着绿氢生产技术不断进步和规模化应用带来的成本下降，未来绿氢将发挥重要作用，构建以绿氢为源头的新型工业系统是石化工业实现碳中和的关键。同时，电气化替代也是石化工业实现碳中和的重要路径，大规模用绿电替代煤炭、石油和天然气等化石能源，可有效减少对化石能源的依赖，进一步降低碳排放强度，有利于实现碳中和。面向“双碳”目标，利用绿氢和绿电协同重构以化石能源为主的炼化工艺流程，不仅可促进石化工业深度减碳，而且可推动石化工业实现高质量发展。但是，这一过程需要变革性技术作支撑，需要新能源安全可靠作为基础。

绿氢炼化是指在新能源安全可靠的基础上，石化工业在实现节能减排、绿色低碳发展的同时，用氢以绿电电解水制取的绿氢为主，用能以绿电和绿氢为主，改造提升炼化工艺流程和生产装置，重塑炼化产业链、产品链、服务链和价值链，生产更多绿色低碳石化产品，推动石化工业实现净零排放。具体体现在：一是氢气生产暂时以灰氢为主，以蓝氢作为过渡，最终以绿氢替代灰氢、蓝氢，如果绿氢技术发展较快、经济上可行，甚至可能绿氢直接替代灰氢，减少自身制氢环节碳排放。二是利用绿电和绿氢的能源属性，以绿氢和绿电替代炼化工艺用化石燃料，绿氢与绿电协同减少炼化生产用能环节的碳排放，推动石化工业低碳化转型。三是依靠科技进步，对炼化工艺流程进行适应绿电、绿氢再造，实现节能降碳、绿色环保，未来短流程生产特色产品、低碳排放的总流程方案将成为炼化工艺主流。四是利用氢的物质属性，以绿氢为原料生产碳足迹更少的石化产品，特别是加强二氧化碳资源化利用，为石化工业提供碳中和解决方案。

2.2 绿氢炼化将推动石化工业转型升级

为有效应对全球气候变化，目前许多国外大石油石化公司都明确提出了净零碳排放目标和低碳发展战略，加快部署“绿电—绿氢—炼化”一体化示范项目，积极推进绿色低碳转型。如，BP公司与海上风电开发商合作，将在德国Lingen炼油厂大规模应用绿氢；2024年建成一座50兆瓦电解水制氢设施，利用海上风电生产绿氢，替代现有20%的天然气制氢产能，项目后期规模将扩大至500兆瓦，完全取代该厂的化石能源制氢装置[8]。壳牌公司现已公布7个碳中和绿氢项目；2021年7月，开始建设欧洲最大的质子交换膜电解槽，可年产1300吨绿氢，用于德国莱茵兰炼厂加氢装置；2022年1月28日，壳牌与中国企业合资建设的世界最大的8万千瓦绿氢项目一期（2万千瓦），在张家口建成投产，全部投产后可年产氢约2800吨、液氧2.28万吨。2021年3月，巴斯夫公司、沙特基础工业公司和林德公司签署了一项联合协议，开发和验证电加热蒸汽乙烯裂解炉解决方案，打造全球首座电加热裂解炉，可减少碳排放达90%[9]。石化工业作为我国碳排放量较多的产业之一，要在2060年前实现碳中和，亟待探索以绿氢炼化为特征的新发展路径，试点示范并推广应用绿氢+绿电+化石能源（紧急保障用）取代化石能源的工艺流程，全面实现低碳化发展和绿色转型升级。

2.3 绿氢炼化将带动石化工艺流程变革

我国石化工业现有工艺流程是烃基炼化，主要依赖化石能源。随着绿电和绿氢成本的大幅降低及逐步大规模应用，绿电将替代化石能源发电、中低位热能供热，绿氢将替代化石能源制氢、作燃料用于高位热能供热，工艺流程将变为绿氢炼化，这必将对生产过程产生较大影响，需要对现有工艺流程再造。如，乙烯装置中，采用绿电和装置自产氢气替代烃类燃料气为裂解炉提供热量，制冷压缩机由透平驱动改为电机驱动，裂解产生的蒸汽仅用于驱动裂解气压缩机等，都需要对乙烯裂解工艺流程再造。再如，乙苯装置加热炉加热温度不大于400℃、可以用绿电加热导热油或绿氢直接作为燃料，苯乙烯装置加热炉加热温度800℃以上、可以用绿氢直接作为燃料，取代传统的燃料气加热炉，这可大幅减少碳排放，但需要对乙苯/苯乙烯工艺流程进行再造。我国石化工业要推进现有工艺流程适应绿电、绿氢技术改造，必须要依靠科技进步，加快研究绿氢、绿电应用场景，解决相关技术问题，推进石化生产过程绿色和节能降碳。

3 石化工业推进绿氢炼化的分阶段情景研判

3.1 当前阶段：以灰氢为主的炼化流程

当前，由于重劣质原油加工量仍然较多，为满足国内及后国清洁汽柴油、航煤和低硫船燃需求，炼油工艺流程中加氢处理、加氢裂化、加氢精制等临氢产能仍将增加，用氢量不断增多。由于可再生能源发电成本相对较高、水电解制氢能耗和投资较大，绿电、绿氢以试点示范为主，还难以大规模进入炼化产业主流，炼化产业仍以灰氢、火电为主，基本完全依赖化石原料制氢以及炼厂和乙烯装置副产氢，用能仍然以化石能源为主。

3.2 2030年前阶段：由灰氢向蓝氢甚至绿氢过渡的炼化流程

从《意见》《方案》和《氢能规划》中可以看出，到2025年，我国可再生能源制氢量达到10~20万吨/年，非化石能源消费比重达到20%左右，单位国内生产总值二氧化碳排放比2020年下降18%，为实现碳达峰奠定坚实基础；到2030年，我国可再生能源制氢广泛应用，非化石能源消费比重达到25%左右，风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿千瓦以上，单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降65%以上，加快构建清洁低碳安全高效的能源体系，顺利实现2030年前碳达峰目标。

我国石化工业要在2030年前实现碳达峰，需要根据国家非化石能源发展态势，加快调整能源结构，降低碳排放强度，使产业发展逐步与碳脱钩，尽早经济可行的实现碳达峰。预判2030年前我国石化工业可能呈现如下发展情景：一是据中国石化集团经济技术研究院有限公司（EDRI）预测，2025年前后交通用油基本饱和、化工用油仍将增长，2030年前石油需求将达峰值并进入平台期，原油加工量基本达到峰值。二是炼化产业供氢先由灰氢逐步向蓝氢过渡，然后绿氢逐步替代灰氢或蓝氢，到2030年绿氢广泛应用，有力支撑石化工业碳达峰目标实现。三是用能结构将向低碳化方向调整，逐步“减煤”“控油”“增气”“强新”，推动多种能源优化耦合，节能提高能效，探索工业用能电气化和绿氢作为燃料。四是加快研发适应绿电、绿氢的工艺技术，利用煤+氢+电取代煤炭的工艺完成试点示范，采用绿色先进工艺技术，提高能源利用效率，降低能耗，减少碳排放总量。五是在有碳封存地点或驱油的源汇匹配地区，应用CCUS减少碳排放。六是大力调整产品结构，多产绿色环保石化产品。

3.3 2060年前阶段：以绿氢为主的炼化流程

根据《意见》《氢能规划》的要求，到2035年我国可再生能源制氢在终端能源消费中的比重明显提升，预计2040—2050年我国以新能源为主体的新型电力系统逐步建成，适应碳中和的能源系统和经济系统基本形成，非化石能源加速替代化石能源，减碳速度明显加快，煤炭作为兜底紧急保障；2060年非化石能源占比达80%以上，化石能源回归原料属性，碳中和的能源系统和经济系统完全形成，届时化石能源消费主要起稳定系统的作用，电力供应90%以上是绿电，绿氢已大规模商业化应用，普遍开始征收较高碳税。

我国石化工业实现碳达峰后，将要进入深度降碳期和碳中和期。预判2060年前我国石化工业可能呈现如下发展情景：一是由于产业结构调整、能源低碳化转型、淘汰落后产能等需要有一定的时间过程，可能存在3~4年碳达峰平台期，而后在新能源安全可靠的替代基础上，传统化石能源将逐步退出，绿电和绿氢等新能源将大规模进入炼化主流。二是据EDRI预测，到2060年公路交通用油可能将逐步转为电力和氢能、塑料回收率可能提高到40%、二氧化碳资源化利用可能取得突破进展，因此预计2030—2060年我国石油需求将快速下降，交通用油将由2030年的3.5亿吨降至2050年的1.4亿吨和2060年的0.5亿吨；化工用油由2030年的2.5亿吨降至2050年的2.0亿吨和2060年的1.2亿吨，原油加工量将不断下降。三是据有关研究表明，从碳达峰到碳中和，石化产品产量和原油加工量下降对实现碳中和的贡献率可达40%以上，节能提高能效贡献率可达25%以上，调整燃料原料结构贡献率可达15%以上，CCUS贡献率在10%以上。因此，原油加工量下降和节能能效提高虽然对石化工业碳减排贡献较大，但还不足以推动石化工业实现碳中和，需要全面推进绿氢炼化。四是为实现碳中和目标，2060年前炼化产业需要全面完成低碳化改造，炼厂生产流程将以生产化工原料为主，炼化工艺流程按碳中和标准运行，400℃以下中低位热能用电或绿氢替代，400℃以上高位热能用绿氢替代，原料用氢都是绿氢或副产氢，少量未中和的过程排放二氧化碳通过CCUS、林业碳汇解决，最终实现石化工业净零排放。

4 石化工业推进绿氢炼化的思路建议

在“十四五”及更长一段时间，绿氢、绿电将在我国石化工业推进“双碳”目标的进程中发挥重要作用，更是实现碳中和的关键。但是，绿氢、绿电要大规模进入石化工业现有工艺流程，还有许多工作需要提前部署和谋划。

一是要加快研究开发支撑绿氢炼化的前沿核心技术。根据绿电和绿氢将大规模进入炼化产业链的情况，建议加快部署高效电解水制氢、有机液体储氢、超级储能、多种可再生能源耦合、燃煤锅炉电能替代、电加热乙烯裂解炉、电加热再沸器替代、电解水制氢耦合制取化学品、液态阳光甲醇、干热岩开发利用、低碳新反应过程等前沿技术研究开发，加快攻克CCUS等负碳技术关键环节，降低能耗和成本，加快推进工业应用示范工程。

二是要加快研究绿氢持续稳定供应方案。若石化工业原料用氢和部分燃料用氢都是绿氢，绿氢年需求量将非常大。要研究提出石化企业绿氢持续稳定供应方案，使绿氢产业链的制、储、运、加各环节顺利打通，确保企业正常生产。

三是要加快研究炼化工艺流程再造方案。要针对炼化企业用能结构由煤、石油焦、石油等高碳能源转向天然气、绿电、绿氢等低碳和无碳能源，或多种低碳能源耦合，分别深入研究炼油、乙烯、芳烃等主要工艺总流程如何调整优化，以适应用能方式和能源结构变化，确保炼化主要工艺流程再造成功，实现直接排放近零、过程排放最小。同时，工艺流程再造要注重推动互联网、大数据、5G通讯、人工智能、云计算、物联网、区块链等新兴信息技术与绿色低碳石化产业深度融合，加快建成新一代数字化网络化智能化石化工厂，大力提升能效、减少资源能源消耗，推动碳减排迈上新台阶，助力石化工业实现碳中和。

四是要加快研究炼化企业电气化改造方案。针对我国能源结构不断向低碳化绿色化方向发展、将建成以新能源为主体的新型电力系统的情况，在新能源安全可靠的替代基础上，研究提出炼化企业用能如何逐步实现由火电和化石能源转向绿电、实现电气化，分析研究不同工艺单元电气化进程的差异性以及难以电气化应用的场景，制定安全可靠、经济可行的电气化解决方案。

五是要加快研究炼化企业用能低碳化调整方案。随着我国将建成以新能源为主体的新型电力系统，炼化企业用能也将逐步由火电和化石能源转向绿电、绿氢、生物质能、核能（高温气冷堆）等多种低碳能源耦合。要根据炼化产业用能变化，分析研究冷、热、电、气（汽）等能源服务的场景和路线图，制定实现碳中和的技术路径。

5结语

在推进“双碳”目标的进程中，我国石化工业实现碳达峰并没有一个确定的“天花板”，只是峰值越低越有利于实现碳中和，因此2030年前实现碳达峰问题不大，但是2060年前要实现碳中和挑战性较大。实现碳中和并不是二氧化碳“零排放”，而是“净零排放”。鉴于通过CCUS减碳的规模有限，如果仅靠原油加工量下降、产品产量减少和节能提高能效等措施，我国石化工业难以在2060年前实现碳中和，必须在新能源安全可靠的基础上，大力发展绿氢炼化。但是，发展绿氢炼化还有许多关键技术需要提前开展攻关，还有许多研究工作需要提前部署，必须未雨绸缪、循序渐进、持续发力，加快低碳工艺革新和数字化转型，加快绿色低碳化发展，确保2060年前实现碳中和。

参 考 文 献

- [1] IPCC. Special report global warming of 1.5°C [EB/OL].
<https://unfccc.int/topics/science/workstreams/cooperation-with-the-ipcc/ipcc-special-report-on-global-warming-of-15-degc>, 2018.
- [2] BP. Statistical review of world energy[EB/OL]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>, 2021.
- [3] 余国，姜学峰，戴家权，等. “双碳”目标下中国能源发展与能源安全若干问题思考 [J]. 国际石油经济，2021，29（11）：1-8.
- [4] 刘红光，何铮，刘潇潇，等. 我国石化产业碳达峰、碳中和实现路径研究 [J]. 当代石油石化，2022，30（2）：1-4.

- [5] 戴宝华. “双碳”目标约束下炼化产业转型发展思考 [J]. 石油炼制与化工, 2021, 52 (10) : 25–30.
- [6] 邢力仁, 武正弯, 张若玉. CCUS 产业发展现状与前景分析 [J]. 国际石油经济, 2021, 29 (8) : 99–105.
- [7] 世界能源理事会. 氢能—工业催化剂 (加速世界经济在 2030 年前实现低碳目标) [EB/OL]. [2019-03-06]. <http://www.nengyuanjie.net/article/24432.html>.
- [8] Reuters. BP Orsted launch green hydrogen project at German oil refinery[EB/OL]. [2020-11-10]. <https://www.marketscreener.com/quote/stock/BP-PLC-9590188/news/BP-Orsted-launch-green-hydrogen-project-at-German-oil-refinery-31733556>.
- [9] 徐海丰. “净零”排放目标下国外炼油和化工公司低碳发展策略分析 [J]. 国际石油经济, 2021, 29 (12) : 61–68.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/213613.html>