



## 全球绿色燃料产业发展方兴未艾



编者按

在全球能源转型加速与地缘动荡频发的双重驱动下,以绿氢、绿氨、绿色甲醇、可持续航空燃料(SAF)等为核心的绿色燃料,正成为航运、航空、重化工等高耗能、难脱碳领域实现低碳转型的关键支撑,也是重构全球能源体系、保障能源安全的重要抓手。当前,全球绿色燃料产业正处于从单一领域试点向全领域规模化转型的关键节点,在减排刚需、技术突破、政策驱动三重推动下,发展空间广阔。

本版文字由中国石化经济技术研究院 李雪 提供

## 全球绿色燃料产业呈多区域差异化发展格局

绿色燃料,是指在全生命周期中符合生态环境保护要求,碳排放较低的燃料。政策是全球绿色燃料产业发展的核心驱动力。国际海事组织(IMO)2023年修订船舶温室气体减排战略,提出到2030年、2040年温室气体排放总量较2008年至少降低20%、70%,争取达到30%、80%,2050年前后实现净零排放目标。国际民航组织(ICAO)通过国际航空碳抵消和减排机制(CORSIA),要求航空业碳排放量2021年~2035年保持零增长,2050年实现碳中和,CORSIA将在2027年强制实施。此外,欧盟、美国、韩国、日本等地区和国家政府也相继出台政策法规,推动氢基绿色燃料加速发展。当前,各国依托自身能源禀赋、产业基础与政策导向,在航运、航空、重化工等三大核心脱碳领域形成了特色布局。

### 欧洲:法规强制驱动,引领绿色燃料多领域应用

欧盟将航运业纳入碳市场,并出台《欧盟海运燃料条例》,从碳配额和技术层面强制推进减排,要求所有5000总吨(GT)及以上的商用船舶,按照欧盟碳市场价格核算应缴碳配额,并从技术层面直接对船舶温室气体排放进行限制,超过规定碳排放强度需要缴纳相应罚款。

在航空领域,欧盟依托可再生能源指令(RED III)与FuelEU Aviation政策,强制要求民航航班掺混可持续航空燃料(SAF),2025年掺混比例达2%、2035年达20%、

2050年达70%。值得注意的是,欧盟2026年取消向航空业发放免费碳配额,并从碳排放交易系统(ETS)收入中划拨16亿欧元(约合128.2亿元人民币)支持SAF发展,采取财政补贴、税收减免、金融支持等优惠措施降低其生产成本。欧洲现已成为全球SAF应用核心区域,2025年SAF用量已占全球总量70%以上,其中巴黎、法兰克福、阿姆斯特丹机场已实现SAF常态化加注。

### 亚太:绿色燃料产业增长最快,我国成为核心引擎

我国立足“十五五”规划,近期各项政策密集加码,绿色燃料产业迎来跨越式发展窗口期,产业规模、技术突破与场景应用均领跑全球。航运领域,截至2025年底,绿色甲醇备案产能已突破6500万吨/年,上海、宁波舟山、深圳等核心港口实现液化天然气(LNG)、绿色甲醇双燃料常态化加注,绿氢加注、船舶适配改造技术接连实现突破,保税加注体系持续完善。航空领域,SAF产能快速释放,废弃油脂、农林废弃物制SAF项目不断落地,北京、上海、广州等枢纽机场常态化开展SAF加注试点。重化工领域,风光制绿氢合成氨、绿氢直接还原铁等项目规模化落地,推动高耗能行业从源头降碳,同时兼顾能源自主可控,减少对海外化石能源的依赖。

日本要求,到2030年,航运领域碳排放量比2008年减少90%以上,并于2050年实现碳中和;SAF占航空燃料的比例必须达

到10%,并配套财政补贴与旅客税费机制,加速航空脱碳。此外,日本和韩国积极研发适配多场景的绿氢燃烧与储运技术,提出煤电掺氢燃烧规模化推广目标,到2030年氢/氨发电将占其总发电量的1%;到2038年氢/氨发电将占其总发电量的5.5%。同时,还布局绿氢、绿氨用于钢铁冶炼,推动重化工低碳转型。

新加坡聚焦航运与航空双枢纽定位,依托自由贸易港优势,打造全球绿色燃料补给中心,在航运领域推进绿色甲醇、生物燃料、LNG加注业务。新加坡提出,2030年起,在港口运营的新工作船必须采用全电力、B100生物燃料、氢等净零燃料或其他零排放方案;到2050年,港口船舶必须以净零排放方式运行。航空领域则通过政策约束与市场举措协同发力,计划2027年起实施SAF强制掺混要求,初期掺混比例为1%,后续逐步提升,2030年将增至3%~5%,并同步推行旅客SAF附加费制度,设立专项基金统一采购SAF,以平抑供应链成本波动。这一模式区别于欧盟的强监管路径,以柔性市场化手段推动航空领域减碳,为亚太地区普及SAF提供参考。

### 美洲:绿色燃料布局分层明显,聚焦本土资源与合规需求

美国政策以市场化激励为主,对国际统一碳规则持谨慎态度。航运领域主要依托页岩气资源,LNG燃料应用成熟,绿色甲醇、绿氨项目正稳步试点。航空领域,美国是全球

第二大SAF消费市场,农业部积极推动农林废弃物制SAF产业化,枢纽机场SAF加注覆盖率持续提升。美国能源部、交通部、联邦航空管理局等推出“SAF大挑战”行动计划,拟投入43亿美元,到2030年至少实现30亿加仑(约906万吨)的SAF供给,2050年实现100%的SAF供给。重化工领域则聚焦绿氢和生物燃料与碳捕集、利用与封存(CCCU)在炼油、钢铁行业的应用。

巴西依托甘蔗、大豆等生物质资源优势,已实现生物燃料的全场景渗透,航运与航空领域生物燃料应用成本全球最低。通过《未来燃料法》,巴西将乙醇与汽油的混合比例从22%提高到27%,目标是2030年达到35%,生物柴油的混合比例2030年达到20%。重化工领域以生物柴油替代传统燃料,同时布局LNG与绿氨项目,打造南美区域绿色燃料供应中心。

### 中东:资源赋能,绿氢与航运协同

中东国家依托丰富的天然气、风光资源,将绿氢作为核心绿色燃料,重点布局重化工与航运领域。凭借低成本能源优势,规划建设全球最大绿氢制备基地,一方面将绿氢用于本土化工、发电等重化工产业,替代传统化石能源;另一方面依托全球航运枢纽地位,打造绿氢加注与出口基地,满足全球远洋航运脱碳需求。

与此同时,中东国家还启动航空领域SAF布局,构建绿氢为主、多燃料补充的产业体系,推动向绿色低碳转型。

## 绿色燃料的技术路线

### 绿氢:以电解水制氢技术为主

目前电解水制氢技术主要包括:碱性电解水(ALK)、质子交换膜电解水(PEM)、固体氧化物电解水(SOEC)、阴离子交换膜电解水(AEM)。

ALK技术是我国现阶段主流的电解水制氢技术,碱性电解槽综合竞争力已超越国外产品。在技术层面,以“实用化+规模化”构建优势,单槽产氢量普遍达到1000~2000标准立方米/时(Nm<sup>3</sup>/h),最大单槽产氢量达到5000Nm<sup>3</sup>/h,远超国外的500~1000Nm<sup>3</sup>/h;经济性上,我国产品已形成绝对优势,初始投资仅600~1200元/千瓦(约100~200美元/千瓦),远低于国外的400~800美元/千瓦。

PEM技术高效、响应快速、氢气纯度高,是当前电解水制氢的理想选择,但成本高于ALK技术。

SOEC技术电能转化效率可接近100%,引入二氧化碳还能生产合成气,为合成燃料生产提供新途径。但该技术面临高温下材料稳定性和系统热管理难度大等问题,目前仍处于技术验证和系统测试阶段。

AEM技术采用镍、钴、铁等非贵金属作为电极和催化剂,成本大幅降低,且产氢纯度高、系统响应速度快,适合与波动性较大的可再生能源发电结合,有广阔的应用前景。目前,AEM技术正处于千瓦级的开发阶段,要实现大规模商业化应用,仍需在材料、结构等方面持续创新。

此外,新型制氢技术正在迅速发展。核能制氢(又称硫磺循环制氢)是以二氧化硫、水和碘为原料在本生反应下生成氢气,适于大规模制氢,但目前处于实验阶段;中科院光学所研发的多面体钛酸钨光催化制氢技术,据测算规模化制氢成本可达12元/千克。

### 绿色甲醇:工业化生产路径各有侧重

绿色甲醇主要工业化生产路径包括:绿氢和二氧化碳直接制甲醇、绿氢与二氧化碳间接制甲醇、生物质气化耦合绿氢制甲醇。

绿氢与二氧化碳直接制甲醇是现阶段产业化最成熟的主流路线,已初步实现商业化,中科院大连化物所的“液态阳光”技术就是基于该路线。

绿氢与二氧化碳间接制甲醇采用逆水煤气交换(RWGS)反应+合成气加氢工艺,技术成熟,催化剂稳定性高,但工艺流程较复杂。

生物质气化耦合绿氢制甲醇的核心在于生物质气化过程,可实现碳循环利用,但受限于生物质原料的稳定性和规模化供应,在欧盟低碳燃料标准的推动下,被视为符合可持续发展目标的潜力方向。

### SAF:多技术路线并行

美国材料与试验协会(ASTM)标准认定的SAF生产技术路线有11条,航空业普遍认为有较大发展前景的路线包括:油脂加氢工艺(HEFA)、生物质气化+费托合成工艺(G+FT)、醇制喷气燃料(AtJ)、二氧化碳加氢工艺(PTL)。

目前大部分SAF生产采用HEFA工艺,采用G+FT路线的项目大多处于示范和中试阶段。由于原料可获得性问题,我国AtJ技术研究较少。此外,PTL工艺减碳能力强、无原材料供应制约,是当前全球SAF研究重点方向。

SAF发展有助于全球航空业实现减排目标,但现阶段成本挑战比较严峻,全球范围内SAF成本是化石基航煤的2~7倍。

## 中国石化绿色燃料实践案例

### 绿氢:开启氢能工业化应用

中国石化在新疆库车建成我国首个万吨级光伏制绿氢示范项目,成为开启氢能时代的关键。氢能是公认的终极清洁能源。新疆库车绿氢项目配套300兆瓦光伏发电,年产绿氢2万吨,通过管道直供塔河炼化,替代天然气制氢,每年可减少二氧化碳48.5万吨。该项目贯通“光伏发电—绿电输送—电解水制氢—氢气储输—绿氢炼化”全产业链,实现我国绿氢工业化规模应用零的突破,为炼化行业深度脱碳提供了全新路径。

### 绿色甲醇:助力航运脱碳

燃料油公司近期为招商轮船旗下全球首艘甲醇双燃料动力汽车滚装船完成绿色甲醇加注,标志着中国石化船用绿色甲醇业务实现零的突破,并证明我国已具备船用绿色甲醇全环节国产化供应能力。此次加注累计使用绿色甲醇约300吨,全生命周期可实现70%的温室气体减排,累计可减少碳排放460吨,从源头大幅降低航运作业对海洋生态、港口环境的污染影响。中国石化正持续完善绿色甲醇加注体系和供应链建设,顺应航运业减排发展趋势,以清洁能源创新实践助力全球航运业绿色转型。

### 生物航煤:实现多场景应用

镇海炼化生物航煤装置是我国首套生物航煤工业化装置,设计加工能力为10万吨,若满负荷运行,一年可消化一座千万人口城市回收的餐饮废油,真正实现“变废为宝”。该装置每年可减碳约8万吨,相当于近5万辆经济型轿车停开一年的排放量。2022年5月,装置原料、工艺及产品获得可持续生物材料圆桌会议(RSB)认证,拿到进军国际市场的“绿色通行证”。目前,镇海炼化的生物航煤已实现从制造基地到商业航班、从客运航空到货运航空、从国内航线到国际航线的全覆盖。

(节选自《共进》中英文融媒体期刊4月刊)

## 我国绿色燃料发展已形成全产业链优势

“十五五”时期,我国绿色燃料产业迎来政策与市场双重机遇。今年政府工作报告明确提出设立国家低碳转型基金,培育氢能、绿色燃料等新增增长点,“十五五”规划纲要更将绿色低碳与能源安全置于突出位置,为绿色燃料产业发展锚定方向。

目前,绿色燃料产业政策呈现“顶层设计引领、央地协同发力、全链条系统推进”的特征。国家层面出台行业标准与专项方案,构建起战略、规划、资金、标准四维顶层框架。中央通过以奖代补、试点示范赋能产业发展,地方则结合资源禀赋布局风光氢氨醇项目,以上海为代表的城市打造航运加注中心,形成上下贯通、精

准落地的推进格局。政策覆盖技术攻关、原料保障、生产应用、储运加注与碳认证全链条,贯通“电—氢—燃料—应用”闭环,为产业规模化、市场化、国际化发展提供坚实支撑。

产业规模方面,截至2025年底,我国风光氢基能源项目共908个,合计规划绿氢产能为1526万吨/年,已建成绿氢产能突破26.5万吨/年。累计规划绿醇产能约6480万吨/年、绿氨产能约2570万吨/年、SAF产能近800万吨/年。

空间布局上,我国绿色氢氨醇项目呈现“北方资源型省份领跑、东部沿海示范带动、中西部潜力地区加速跟进”的格局,与资源禀赋、产

业基础和交通条件深度契合。其中,内蒙古项目数量最多,已建立多个绿氢基地,重点建设配套管网。其次为新疆,以昌吉、乌鲁木齐、喀什为主,重点布局煤化工耦合绿氢、绿氨生产项目。沿海地区依托港口优势布局绿氢、绿醇项目,便于产品运输和出口。

我国SAF市场供需两侧均处于起步阶段,需求潜力较大。全国已有6家生产企业投产,应用场景主要为航司试飞和机场试点。预计2030年我国SAF需求将达到130万~150万吨,占航煤需求总量的2%~3%。目前我国正在持续完善SAF政策,暂未出台强制性掺混比例要求。

## 多方协同促进我国绿色燃料产业高质量发展

我国绿色燃料产业发展势头强劲,但仍面临多重挑战。首先是标准认证体系尚不完善,与国际认证规则存在差异,产品认证周期长、成本高,制约了国际贸易流通与市场准入。其次是技术经济性瓶颈突出,绿氢、绿氨、绿色甲醇及SAF等核心产品的规模化生产技术尚未成熟,单位能耗与生产成本仍高于传统燃料,商业化难度大。与此同时,资源与需求的时空错配问题显著,跨区域长距离输送设施建设滞后,物流成本高、损耗大,阻碍了绿色燃料的高效流通与产业整体发展。

需从以下5个方面协同推进,促进绿色燃料产业高质量发展。

强化顶层设计,将绿色燃料纳

入新型能源体系建设重点,统筹“制储输用”一体化产业,明确其在“沙戈荒”新能源基地开发中的灵活负荷定位。支持“氢电协同、以氢代储”的新能源大基地开发模式,统筹布局全国性输氢管道,降低氢基燃料储运成本。

聚焦技术攻关,设立国家低碳转型基金绿色燃料专项,重点支持柔性电解水制氢、波动性适配合成、生物氢高效气化、液氢等新型技术攻关。加速推进绿色氢氨醇一体化示范项目,尽快形成可复制推广的技术路径和商业模式。

完善标准机制,建立与国际接轨的绿色燃料认证、碳足迹核算和追溯全生命周期标准体系,推动绿

色燃料产品纳入国家核证自愿减排量(CCER)交易,通过市场机制弥补初期成本差距。完善绿电直供、绿电交易与碳市场协同机制,为绿色燃料生产提供稳定经济的零碳电力保障。

加强政策支持,针对长输管道工程一次性投入较大的初期项目,在生产端、消费端提供补贴、无息贷款等支持政策,激发有效市场需求,推动重点项目尽快落地。

深化产业融合,支持油气田与风光资源协同开发,利用油气产区丰富用能场景和二氧化碳驱油需求,构建“绿电—绿氢—绿色燃料—绿色化工”循环产业链,推动油气企业向综合能源服务商转型。