



储能科学与技术

Energy Storage Science and Technology

ISSN 2095-4239, CN 10-1076/TK

《储能科学与技术》网络首发论文

题目: “双碳”目标下我国低碳清洁氢能进展与展望
作者: 刘玮, 万燕鸣, 熊亚林, 刘坚
DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0385
收稿日期: 2021-07-30
网络首发日期: 2021-09-23
引用格式: 刘玮, 万燕鸣, 熊亚林, 刘坚. “双碳”目标下我国低碳清洁氢能进展与展望 [J/OL]. 储能科学与技术. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0385>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

收稿日期：2021-07-30；修改稿日期：2021-09-01。

基金项目：国家重点研发计划资助项目（2018YFB1503100），国华投资公司科技创新项目（碳中和愿景下公司氢能发展路径研究）。

第一作者：刘玮（1977—），男，博士，高工，研究方向为新能源、氢能与燃料电池，E-mail: wei.liu@chnenergy.com.cn；

联系人：熊亚林（1990—），女，博士，研究方向为氢能与燃料电池，E-mail: yalin.xiong@chnenergy.com.cn。

“双碳”目标下我国低碳清洁氢能进展与展望

刘玮¹，万燕鸣¹，熊亚林¹，刘坚²

（¹国华能源投资有限公司，中国氢能联盟研究院，北京 100000；²国家发展和改革委员会能源研究所，北京 100000）

摘要：2020 年是氢能发展加速之年。中国国家主席习近平在第 75 届联合国大会期间提出，中国二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。应对气候变化的脱碳愿景逐步成为氢能大规模部署的最重要驱动力。但我国目前在碳中和战略下氢能产业发展目标和路径尚不明确，本文应用情景分析方法和长期能源替代规划（LEAP）模型的计算，对我国交通、工业、建筑与发电等领域的氢能进行需求分析测算，研究结果表明，为实现 2060 年碳中和目标，我国氢气的年需求量将从目前的 3 342 万吨增加至 1.3 亿吨左右，在终端能源体系中占比达到 20%。随着深度脱碳的需求增加和低碳清洁氢经济性的提升，氢能在工业、交通、建筑与发电等领域逐步渗透，氢能供给结构从化石能源为主的非低碳氢逐步过渡到以可再生能源为主的清洁氢，并将提供 80% 氢能需求。2060 年，低碳清洁氢供氢体系二氧化碳减排量约 17 亿吨/年，约占当前我国能源活动二氧化碳总排放量的 17%。

关键词：碳中和；低碳氢；清洁氢；氢能；展望

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0385

中图分类号：TK91

文献标志码：A

文章编号：2095-4239（XXXX）XX-1-08

Outlook of low-carbon and clean hydrogen in China under the goal of "carbon peak and neutrality"

LIU Wei¹, WAN Yanming¹, XIONG Yalin¹, LIU Jian²

(¹Guohua Energy Investment Co., Ltd., China Hydrogen Alliance Research Institute, Beijing 100000, China; ²Energy Research Institute of National Development and Reform Commission, Beijing 100000, China)

Abstract: 2020 is the year of accelerating hydrogen energy development. Chinese President Xi Jinping proposed that China's carbon dioxide emissions should reach its peak by 2030 and strive to achieve carbon neutrality by 2060 during the seventy-fifth United Nations General Assembly. The decarbonization vision to deal with climate change has gradually become the most important driving force for large-scale deployment of hydrogen energy. However, the development goal and path of hydrogen industry under the carbon neutrality strategy are still unclear in China. This paper uses scenario analysis method and Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) model to analyze and calculate the demand of hydrogen energy in transportation, industry, construction and power generation in China. The results show that in order to achieve the goal of carbon neutrality in 2060, the annual demand of hydrogen in China will increase from 33.42 million tons to 130 million tons, accounting for 20% of the terminal energy system. With the increasing demand for deep decarbonization and the improvement of low-carbon clean hydrogen economy, hydrogen energy has gradually penetrated into the fields of industry, transportation, construction and power generation. The structure of hydrogen energy supply is gradually changing from non-low carbon hydrogen dominated by fossil energy to clean hydrogen dominated by renewable energy, and will provide 80% of hydrogen energy demand. In 2060, the CO₂ emission reduction of low-carbon clean hydrogen supply system is about 1.7 billion t/a, accounting for about 17% of the total CO₂ emission of China's energy activities nowadays.

Key words: carbon neutrality; low carbon hydrogen; clean hydrogen; hydrogen energy; outlook

随着全球气候变暖压力增大以及后疫情时代绿色经济复苏加速，氢能凭借其低碳清洁、能量密度高、可储存、来源广等特点，成为新时代能源低碳转型的重要抓手^[1-4]。2019 年底，在西班牙举行的联合国气候变化框架公约缔约方大会上，77 个国家承诺 2050 年实现零碳排放目标^[5]。2020 年中国国家主席习近平在第 75 届联合国大会期间提出，中国二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。从各个国家地区提出碳中和目标来看，应对气候变化的脱碳愿景逐步成为推动氢能大规模部署的最大驱动力，我国于 2020 年 12 月由中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟（简称“中国氢能联盟”）牵头率先发布《低碳氢、清洁氢与可再生氢气标准及评价》^[6]。低碳清洁氢由于碳排放低等优点成为实现碳中和路径的重要手段。

国际氢能委员会将氢能视为全球变暖控制在 2 摄氏度能源转型的支柱，预测到 2050 年，氢能将在全球终端能源需求中占比 18%，在交通运输、化工原料、工业能源、建筑供暖、发电等领域实现深度脱碳，将减少 60 亿吨二氧化碳排放，消纳和存储 500 太瓦时的电力来促进可再生能源大规模部署^[7]。德国 2020 年通过国家氢能战略，为实现碳中和目标，确认了“绿氢”的优先地位，同时明确了氢能的主要应用领域：船运、航空、重型货物运输、钢铁和化工等行业。并计划在 2030 年建成 5 GW 电解“绿氢”产能，2040 年前建成 10 GW^[8]。

全球主要发达经济体已先后制定氢能国家战略或顶层设计，在氢能产业和技术的战略布局走在了前面。而作为全球最大碳排放国，中国的碳排放在全球占比接近 30%，碳中和目标实现面临严峻挑战。2021 年作为“十四五”计划的开局之年，明确我国在碳中和目标下氢能产业应用重点领域和分阶段低碳清洁氢能发展目标是关键。因此，本文对交通、工业、建筑与发电等领域的氢能进行需求分析测算，在此基础上提出低碳清洁氢供给结构展望，最后提出我国氢能关键技术攻关方向，以期为氢能发展提供参考，对我国氢能产业的发展提供指导。

1 分析模型原理

本研究选用情景分析模型，具体采用基于长期能源替代规划系统 LEAP 模型（Long-range Energy Alternatives Planning System）的自下而上分析方法，利用现有统计和预测数据，对人口、城镇化进程、以及工商业、建筑、交通和农业等各部门中不同技术转换、能源产品生产以及终端用能特性进行分析，推演并预估能源消费终端中消耗的能源类型、消费方式、能源效率以及年活动水平等参数的变化趋势，同时根据发展需求设置不同情景，依此分析预测 2060 年前的氢能的消费总量及结构。

模型将终端能源消费划分为交通、工业、建筑等部门，模型的运行需要大量的统计数据以及预测性数据的输入。这些数据主要来源于中国统计年鉴、中国能源统计年鉴数据、主要行业研究机构和领先国家相关预测，其中经济社会预测模型使用了中国政府或大型国际组织的预测数据，能效等技术数据着眼于相应技术或领域的国际领先水平，如图 1 所示。

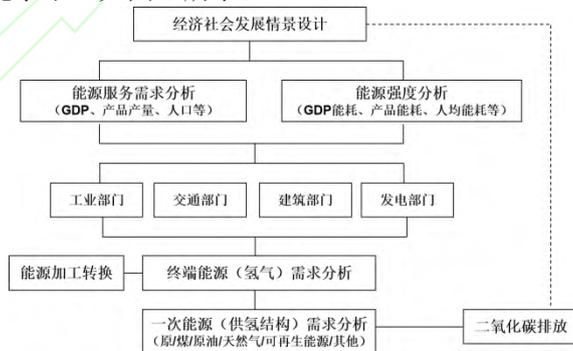


图 1 分析方法基本原理
Fig. 1 Basic principles of analytical methods

2 我国碳中和情景下氢能需求预测

继“双碳”目标提出以后，2020 年 12 月 12 日，国家主席习近平在气候雄心峰会上进一步宣布：到 2030 年，中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比 2005 年下降 65%以上，非化石能源占一次能源消费比重将达到 25%左右，森林蓄积量将比 2005 年增加 60 亿立方米，风电、太阳能发电总装机容量将达到

12 亿千瓦以上。这为我国以新发展理念为引领，在推动高质量发展中促进经济社会发展全面绿色转型指明了方向。作为全球第二大经济体，宣布碳达峰碳中和目标愿景彰显了我国携手各国积极应对全球性挑战、共同保护地球家园的雄心和决心，为我国参与全球气候治理、坚持多边主义、构建人类命运共同体展现了大国担当。

2.1 碳中和情景下的测算边界

改革开放以来，我国经济持续发展，2020 年人均 GDP 连续第二年超过 1 万美元，脱贫攻坚战取得了全面胜利。作为负责任大国，我国一直积极参与应对气候变化工作。2019 年与 2005 年相比，我国单位国内生产总值二氧化碳排放下降 48.1%，提前超额完成对国际社会承诺的单位国内生产总值二氧化碳排放 2020 年比 2005 年下降 40%~45% 的目标。碳达峰碳中和目标的提出，意味着我国要用不到 10 年时间实现碳达峰、用不到 30 年时间完成从碳达峰向碳中和过渡。美国和欧洲从碳达峰向碳中和过渡的计划周期分别是 43 年和 71 年。与之相比，我国碳达峰碳中和的速度更快、力度更大、任务更艰巨，建设清洁低碳、安全高效的能源体系，是实现碳达峰碳中和的必由之路^[9-11]。

2020 年，我国的温室气体排放量约 125 亿吨，其中二氧化碳排放量约 112 亿吨。能源活动二氧化碳排放约 99 亿吨，占我国二氧化碳排放总量的 85%。根据科技部中国 21 世纪议程管理中心统计数据显示，能源活动中，电力领域二氧化碳排放约 40 亿吨，工业领域二氧化碳排放约 36.1 亿吨（其中钢铁、水泥与化工行业的二氧化碳排放占 61%），建筑与交通领域二氧化碳排放分别约为 11.5 亿吨和 11.2 亿吨，如图 2 所示。中国 21 世纪议程管理中心研究，预计我国将于“十五五”初期实现碳达峰，温室气体排放峰值不超过 130 亿吨，能源活动二氧化碳排放峰值不超过 105 亿吨，碳汇约 9 亿吨；2060 年实现碳中和时，我国的温室气体排放量不超过 15 亿吨，碳汇约 15 亿吨，其中，能源活动二氧化碳排放量约 5 亿吨，如图 3 所示。

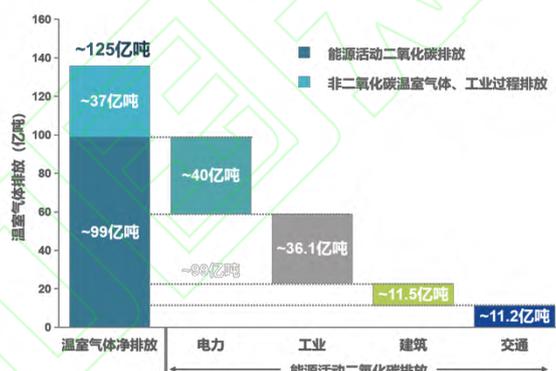


图 2 我国 2020 年温室气体排放现状

Fig. 2 Greenhouse gas emission in China in 2020

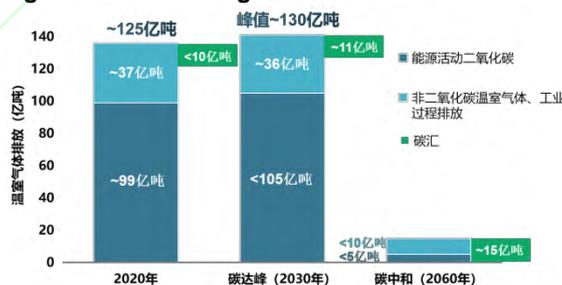


图 3 碳达峰碳中和目标的实现路径

Fig. 3 The way to achieve the goal of carbon peak and carbon neutrality

我国要实现碳达峰碳中和的目标，能源领域的绿色转型起着至关重要的作用。国务院《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》明确指出，要完善能源消费总量和强度双控制度，提升可再生能源利用比例，大力推动风电、光伏发电发展，因地制宜发展水能、地热能、海洋能、氢能、生物质能、光热发电。预计 2030 年和 2060 年中国单位 GDP 能耗分别降至 2020 年的 63% 和 17%；2025 年煤炭消费实现零增长，电力生产碳排放率先达峰；2030 年，非化石能源占一次能源消费比重将约 30%。

风电、太阳能发电总装机容量将达到 12 亿~16 亿千瓦，电能占我国终端能源消费比重约 35%；2050 年交通行业力争实现净零排放，2060 年电能占我国终端能源消费比重将达到 70%^[12]。

2021 年 3 月 15 日，中央财经委员会第九次会议提出要把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局，要构建以新能源为主体的新型电力系统。电力将在碳达峰碳中和过程中扮演最重要的角色，可以直接使用，也可以用来生产氢气或其他合成燃料。氢则通过与电协同，推动高比例可再生能源发展，并实现终端部门的深度脱碳。

2.2 碳中和情景下的氢能需求测算

在 2030 年碳达峰情景下，我国氢气的年需求量将达到 3 715 万吨，在终端能源消费中占比约为 5%，可再生氢产量约 500 万吨/年，部署电解槽装机约 80 GW（按照电解槽负荷 3 000 小时/年，制氢效率 5 千瓦时/标方测算）。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，在终端能源消费中占比约为 20%，可再生氢产量约 1 亿吨，部署电解槽装机至少 500 GW（按照电解槽负荷 8 000 小时/年，制氢效率 3.6 千瓦时/标方测算）。其中，工业领域用氢占比仍然最大，约 7 794 万吨，占氢总需求量 60%；交通运输领域用氢 4 051 万吨，建筑领域用氢 585 万吨，发电与电网平衡用氢 600 万吨，如图 4 所示。

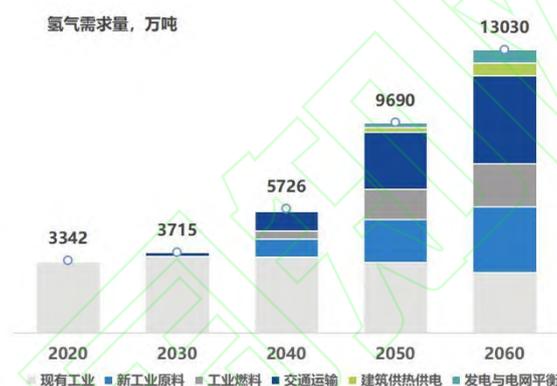


图 4 碳中和情景下氢能需求量预测

Fig. 4 Prediction of hydrogen energy demand under carbon neutrality scenario

2.2.1 交通部门

近年来，交通运输部门的碳排放年均增速保持在 5% 以上，成为温室气体排放增长最快的领域之一。交通运输领域碳排放约占全国终端碳排放 15% 左右。与此同时，中国人均出行距离与千人汽车保有量仍远低于发达国家，随着中国基本实现社会主义现代化，交通运输部门能源需求量仍会惯性增加^[13-14]。提高能源效率是缓解能源需求总量攀升的重要路径，但是在目前使用内燃机和石油的情况下，能源效率提高并不能实现交通领域零排放。交通运输部门要实现碳中和，将需要道路交通全面电气化，同时航空和航运逐步替换使用零碳燃料等。在碳中和情景下，预计到 2060 年交通部门氢消费量约 4 000 万吨，如图 5 所示。

道路交通。以氢燃料电池汽车协同纯电动汽车是道路交通全面实现电气化实现深度脱碳的关键。目前中国汽车交通电气化率不足 2%。2035 年前，在轻型道路交通领域，纯电动汽车仍将占据主流；氢燃料电池汽车将在中重型和长途道路交通领域起到至关重要的作用。预计到 2025 年我国加氢站超过 1 000 座，燃料电池汽车保有量超过 10 万辆；2035 年燃料电池商用车保有量达到 120 万辆，加氢站规模近万座；到 2060 年增加至 1 100 万辆，其中，中重型燃料电池商用车 750 万辆，占全部中重型商用车占比接近 65%。乘用车领域，2060 年燃料电池汽车市场占比有限，约 15% 左右。结合燃料电池与电动化技术，道路交通有望在 2050 年前实现净零排放。2060 年道路交通氢气消费量 3 570 万吨。

航运与航空。航运领域，通过动力电池和氢燃料电池技术可实现内河和沿海航运电气化，通过生物燃料或零碳氢气合成氨等新型燃料实现远洋航运脱碳。我国在船用动力电池技术、船用直流推进技术、船用充电技术等方面都具备了比较成熟的技术水平。考虑到目前高功率燃料电池技术尚未成熟，燃料电池船只在早期阶段推广速度相对滞后于电动，但后期随着氢燃料存储优势逐步显现，燃料电池船舶市场渗透率将逐步提升至纯电动船舶水平，预计 2030 年开始市场化推广，到 2050 年约 6% 的航运能源消耗通过氢燃料电池技术，氢气消费量接近 120 万吨，2060 年氢气消费量 280 万吨。航空领域，以生物燃料、合成燃料为主，以氢能等为辅共同实现脱碳。以氢为燃料的飞机可能成为中短途航空飞行的一种脱碳路

径。目前，全世界已有多种机型正在开发和试验。但在长距离航空领域，仍须依赖航空燃油，可通过生物质转化或零碳氢气与二氧化碳合成制得。预计 2060 年氢气消费量 200 万吨，提供 5%左右航空领域能源需求。

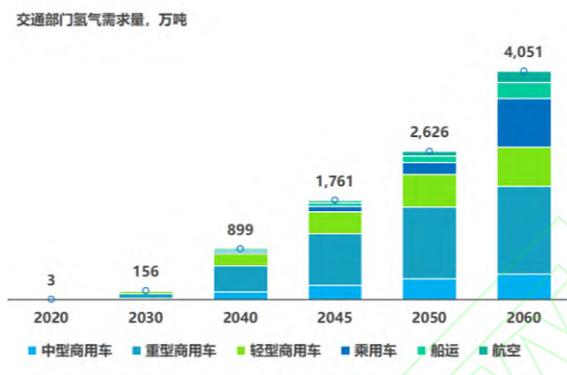


图 5 交通部门氢气需求量
Fig. 5 Hydrogen demand in transportation sector

2.2.2 工业部门

工业是当前脱碳难度最大的终端部门，化石能源不仅作为工业燃料，还是重要的工业原料。工业燃料通过电气化可实现部分脱碳，但是作为工业原料部分，直接电气化的空间十分有限。在氢冶金、合成燃料、工业燃料等行业增量需求的带动下，2060 年工业部门氢需求量将到 7 794 万吨，具体如图 6 所示。

传统工业。氢气是合成氨、合成甲醇、石油精炼和煤化工行业中的重要原料，还有小部分副产气作为回炉助燃的工业燃料使用。目前，工业用氢基本全部依赖化石能源制取，未来通过低碳清洁氢替代应用潜力巨大。合成氨的需求主要来自农业化肥和工业两大方面，其中农业肥料占 70%左右。目前，我国合成氨行业步入微量增长阶段。随着肥效提高和有机肥替代，未来合成氨在农业消费量将下降至 60%。非农业领域消费量受环保、新材料、专用化学品等工业消费拉动，需求量增长，但合成氨整体呈稳中有降趋势^[17]。合成甲醇方面，传统领域甲醇消费增长依然较为缓慢，新兴的甲醇消费的增长主要受甲醇制烯烃和甲醇燃料的发展推动。石油精炼氢气主要用于石脑油加氢脱硫、精柴油加氢脱硫以改善航空燃油的无烟火焰高度、燃料油加氢脱硫、加氢裂化^[15]。2019 年我国原油加工量 6.52 亿吨。随着石油消费量的增长和成品油品质要求的不断提升，石油炼制行业的氢气消费量有望持续增加。2030 年以后，由于油品标准达到较高水平和交通部门能源效率和电气化率持续提升，炼厂氢气消费将大幅下降。煤化工方面，出于我国能源安全的考虑，未来将扮演比较重要的角色。整体来说，现有工业氢气需求量将呈现先增后降趋势，2060 年降低至 2 800 万吨。

新工业原料。氢气通过氢冶金、合成航空燃料、合成氨作为运输用燃料等方式，在钢铁、航空、航运等难以脱碳行业中发挥重要作用。绿色转型下钢铁行业具有巨大清洁氢气需求。2020 年我国粗钢产量首次突破 10.65 亿吨，占全球产量 50%以上。2030 年后，氢气作为冶金还原剂的需求开始释放，到 2060 年电炉钢市场占比有望提升至 60%，超过 30%钢铁产量采用氢冶金工艺，氢冶金领域氢气需求量超过 1 400 万吨。合成燃料方面，氢气与一氧化碳经费托合成可生成氢基柴油，航空燃料等^[16]，与氮气在高温高压和催化剂存在下合成氨燃料，从而对重型货运、水运及工业领域传统石油基柴油形成替代。2060 年，合成燃料方面氢气需求量 1 560 万吨，占航运与航运能源需求总量的 40%。

工业燃料。氢气可通过专用燃烧器提供高品质热源，从而代替部分天然气和其他化石燃料，弥补电力在该领域的不足^[9]。例如，高能耗的水泥、钢铁、炼化行业中需要大量的高温热量。其中，钢铁和水泥热耗中高品质热占比近 87.5%^[7]。预计 2060 年氢气在钢铁和水泥高品质能耗中将提供 35%热量需求，需求量达到 1 980 万吨。

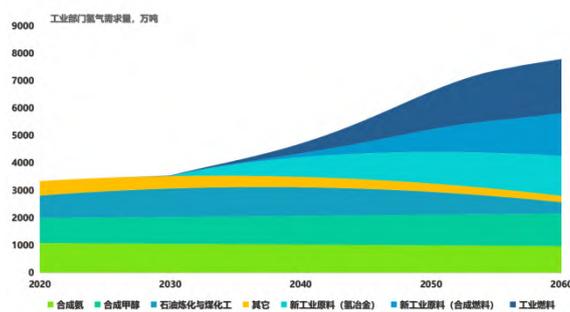


图 6 工业部门氢气需求量
Fig. 6 Hydrogen demand in the industrial sector

2.2.3 建筑与发电部门

随着我国城镇化水平不断提高，建筑部门的能源需求快速增长。2020 年中国城市化率达到 63%，预计到 2030 年建筑部门终端能源需求达到 7.9 亿吨标准煤。

建筑部门能源需求主要用于采暖、生活热水、炊事和各种电器设备的电能消耗。公共建筑将大量采用集中供热、先进节能保温技术，建筑节能率逐年提高，建筑采暖能耗强度指数将持续降低。建筑部门完全脱碳的难点在于供暖与炊事，尤其在季节性和每日变化的情况下，峰值热需求相当大。一方面可以通过集中空调系统供暖、电力烹饪等技术实现建筑电气化，另一方面通过燃氢锅炉和燃料电池等方式与分布式风光等可再生能源结合逐步打造零碳建筑。根据国际氢能委员会的研究，对于现有天然气为供能基础的建筑，到 2030 年通过燃氢锅炉供暖方式相比于热泵更具有经济性。尤其管网与电解水制氢技术结合，可以实现储能与更有效的需求波动管理，支撑清洁氢的推广应用。此外，对于部分公共及商业建筑等，燃料电池热电联产与热泵将是适合的零碳解决方案。2060 年预计 20% 天然气供暖需求被纯氢替代，剩余需求可以通过一定比例的掺氢实现脱碳，预计 2060 年建筑供热供电领域氢气消费量将达到 585 万吨。

氢发电领域。随着可再生能源装机规模的快速扩展，掺氢燃气轮机和燃氢轮机技术的成熟，以及固体氧化物燃料电池（SOFC）技术的进步，氢作为储能和调峰电源的需求将得到释放，尤其作为季节性储能可显著提升波动性可再生能源的消纳规模^[17-19]。电解槽可以设计为一种灵活的需求侧调节工具，一方面同过分布式促进电力系统负荷灵活调整，保障电网安全稳定，另一方面为高比例可再生能源发电波动性提供消纳途径，绝大多数富余电力以氢气形式流向交通和工业等部门，不足 10% 可再生氢通过以电力形式回到电网。预计 2060 年，发电与电网平衡用氢 600 万吨。

3 我国低碳清洁氢供给结构展望

氢气可以采用多种工艺和能源制取，为表述方便，业界经常以颜色进行区分，诸如灰氢、蓝氢、绿氢等。但是，上述分类方法难以对所有制氢工艺进行明确量化的区分，即使针对同一制氢工艺（如电解水制氢）也很难体现为一种颜色。因此，随着各国碳中和目标的提出，基于生命周期温室气体排放方法客观量化定义不同制氢方式逐步为业界所认可。根据中国氢能联盟提出的团体标准《低碳氢、清洁氢与可再生氢标准与评价》，制取单位氢气温室气体排放量 $\leq 14.51 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/kg H}_2$ 的氢气为低碳氢，制取单位氢气温室气体排放量 $\leq 4.9 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/kg H}_2$ 的氢气为清洁氢，可再生氢同时要求制氢能源为可再生能源。简单来讲，可再生氢与清洁氢与通俗意义上的“绿氢”大体相当，低碳氢与“蓝氢”大体相当。

随着深度脱碳的需求增加和低碳清洁氢的经济性提升，氢能供给结构将从化石能源为主的非低碳氢逐步过渡到以可再生能源为主的低碳清洁氢，助力以新能源为主体的新型电力系统建设。

从时间来看，2030 年，我国非化石能源占一次能源消费比重将超过 25%，风电、太阳能发电总装机容量将达到 12 亿~20 亿千瓦。如果取中位数 16 亿千瓦，按照可再生能源电解水制氢 5% 比例配置，装机规模有望达到 80 GW，可再生氢产量 500 万吨/年，占氢气年度总需求的 13%。考虑到电解槽渗透率和利用负荷的提升，2035 年，我国可再生氢产量有望达到 1 500 万吨/年。与此同时，化石能源制氢将逐步配套碳捕获、利用与封存（CCUS）技术，与可再生氢为代表的清洁氢共同成为我国氢源供应主体。预计到 2060 年我国电解槽装机有望达到 500 GW，可再生氢产量提升至 1 亿吨，占氢气年度总需求的 80%，如图 7 所示。

从结构来看, 2030 年碳达峰时, 可再生氢与清洁氢占比尚不足 20%, 新增氢气需求以可再生能源制氢为主, 但存量氢气的减碳工作更需引起重视, 以 CCUS 技术为代表的技术需要规模化部署, 尤其对于现有大规模煤制氢项目其二氧化碳排放浓度高达 90%, 易于捕集和利用。随着可再生能源制氢达到规模生产和具备成本竞争力, 其还可以进一步转化为其它能源载体, 如氨、甲醇、甲烷和液态碳氢化合物等。

从碳减排来看, 通过低碳清洁氢供给体系的建立, 2060 年可减排二氧化碳排放量约 17 亿吨, 约占当前我国能源活动二氧化碳总排放量的 17%。分部门来看, 到 2060 年, 交通部门、建筑与发电部门用氢需求几乎全部由清洁氢供给, 交通部门清洁氢可减排 CO₂ 量约 4.6 亿吨, 超过当前交通部门碳排放量 40%, 建筑与发电部门清洁氢 CO₂ 减排量约 1.4 亿吨。工业部门清洁氢提供至少 66% 用氢需求, 低碳氢供给量占比约 26%, 工业部门低碳清洁氢 CO₂ 减排量约 11 亿吨, 约占目前工业部门碳排放量 28%。

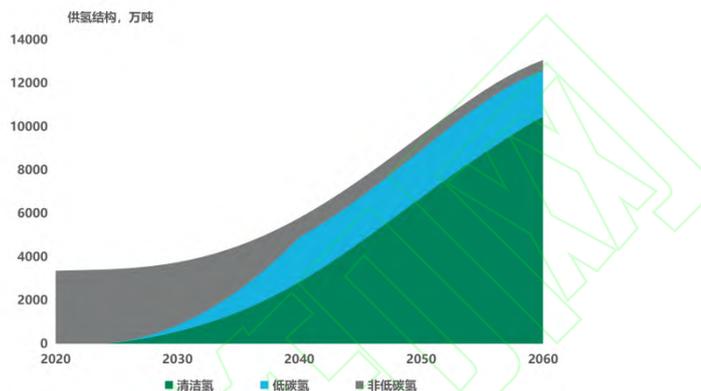


图 7 2020—2060 年氢源供给结构展望
Fig. 7 Prospect of hydrogen supply structure in 2020-2060

4 结论

本文基于发达国家氢能战略中氢能在终端领域的应用需求, 结合中国国情和碳中和愿景, 通过 LEAP 模型进行情景模拟, 对我国工业、交通、建筑与发电领域进行低碳清洁氢应用前景与需求预测, 得到以下结论:

(1) 氢能在终端能源体系的需求: 为了实现碳达峰碳中和的目标, 在 2030 年碳达峰情景下, 我国氢气的年需求量将达到 3 715 万吨, 在终端能源消费中占比约为 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, 在终端能源消费中占比约为 20%。其中, 工业领域用氢占比仍然最大, 约 7 794 万吨, 占氢总需求量 60%; 交通运输领域用氢 4 051 万吨, 建筑领域用氢 585 万吨, 发电与电网平衡用氢 600 万吨。

(2) 氢能供给体系结构: 随着深度脱碳的需求增加和低碳清洁氢的经济性提升, 氢能供给结构将从化石能源为主的非低碳氢逐步过渡到以可再生能源为主的低碳清洁氢。2030 年我国非化石能源占一次能源消费比重将超过 25%, 风电、太阳能发电总装机容量将达到 12 亿~20 亿千瓦, 可再生氢产量 500 万吨/年, 新增氢气需求以可再生能源制氢为主; 预计到 2060 年我国电解槽装机有望达到 500 GW, 可再生氢产量提升至 1 亿吨, 占氢气年度总需求的 80%。

(3) 低碳清洁氢碳减排作用: 通过低碳清洁氢供给体系的建立, 2060 年可减排二氧化碳排放量约 17 亿吨, 约占当前我国能源活动二氧化碳总排放量的 17%。

参考文献

- [1] PIVOVAR B, RUSTAGI N, SATYAPAL S. Hydrogen at Scale (H₂@Scale): Key to a Clean, Economic, and Sustainable Energy System[J]. The Electrochemical Society Interface, 2018, 27(1): 47-52.
- [2] 郭秀盈, 李先明, 许壮, 何广利, 缪平. 可再生能源电解制氢成本分析[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 688-695. GUO Xiuying, LI Xianming, XU Zhuang, HE Guangli, MIAO Ping. Cost analysis of hydrogen production by electrolysis of renewable energy[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 688-695.
- [3] 翟俊香, 何广利, 熊亚林. 燃料电池系统氢气利用率的试验研究[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 684-687. ZHAI Junxiang, HE Guangli, XIONG Yalin. Experimental study on hydrogen utilization of proton exchange membrane fuel cell system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 684-687.
- [4] TAIBI E, MIRANDA R, VANHOUDT W, et al. Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition[R]. IRENA, 2018.
- [5] Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective[R]. Hydrogen council, 2020.
- [6] 中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟. 低碳氢、清洁氢与可再生氢的标准与评价: T/CAB 0078-2020[S]. 北京: 中国产学研合作促进会, 2020.

- China Hydrogen Alliance. Standard and evaluation of low-carbon hydrogen, clean hydrogen and renewable hydrogen:T/CAB 0078-2020[S].Beijing:China Industry-University-Research Institute Collaboration Association,2020.
- [7] Hydrogen, Scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition[R]. Hydrogen council, 2017.
- [8] The National Hydrogen Strategy[R]. Germany: The federal government, 2020.
- [9] 王灿,张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理,2020, 12(6): 58-64.
WANG Can, ZHANG Yaxin. The realization path and policy system of carbon neutral vision[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(6): 58-64.
- [10] 孟翔宇,顾阿伦,郭新国,等. 中国氢能产业高质量发展前景[J]. 科技导报,2020, 38(14): 77-93.
MENG Xiangyu, GU Alun, WU Xinguo, et al. Prospects for high quality development of China's hydrogen energy industry [J]. Science and technology guide, 2020, 38 (14): 77-93.
- [11] 罗佐县,曹勇. 氢能产业发展前景及其在中国的发展路径研究[J]. 中外能源,2020, 25(2): 9-15.
LUO Zuoxian, CAO Yong. Development prospect of hydrogen energy industry and its development path in China [J]. Sino foreign energy, 2020, 25 (2): 9-15.
- [12] MARTIN A, AGNOLETTI M F, BRANGIER E. Hydrogen Energy Technologies' Acceptance Review and Perspective: Toward a Needs' Anticipation Approach - First Results[C]// 20th Congress of the International Ergonomics Association. Springer, Cham, 2019.
- [13] LINLING Z, RUYIN L, HONG C, et al. A review of China's road traffic carbon emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207 (10): 569-581.
- [14] McKinsey China Auto Consumer Insights 2019[R]. McKinsey company, 2020.
- [15] China 2050: A Fully Developed Rich Zero-Carbon Economy[R]. Commission on energy transformation (ETC) and Rocky Mountain Institute (RMI), 2019.
- [16] The future of hydrogen[R]. IEA, 2019.
- [17] 缪平,姚祯,刘庆华,王保国. 电池储能技术研究进展及展望[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 670-678.
MIAO Ping, YAO Zhen, LEMMON John, LIU Qinghua, WANG Baoguo. Current situations and prospects of energy storage batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 670-678.
- [18] 吴贤章,尚晓丽. 可再生能源发电及智能电网储能技术比较[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(3): 316-320.
WU Xianzhang, SHANG Xiaoli. A review of electrical energy storage technologies for renewable power generation and smart grids[J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(3): 316-320.
- [19] Hydrogen: A renewable energy perspective [R]. IRENA, 2019.