

中国氢能产业关键技术与应用探究

李致朋^{1,2}, 叱干东东¹, 肖仪卓¹, 潘贺彤¹, 翁乔丹²

(1.西北工业大学 柔性电子研究院, 西安 710072; 2.嘉庚创新实验室, 福建 厦门 361102)

摘要:发展氢能产业关乎国家能源安全以及能源结构转型的战略方针,研究氢能产业的关键技术和发展现状对我国氢能产业未来的发展方向具有指导意义.首先介绍了氢能作为能源载体和化工原料的优势,我国能源结构,安全面临的困境,以及如何利用氢能进行能源结构的调整和升级,氢能产业中的关键技术国内外发展现状.随后分析了电解水技术和燃料电池技术国内外发展的特点以及现状,并综合以上的研究内容提出我国氢能产业面临的挑战主要是关键材料以及储运技术和国外相比还存在差距.最后提出我国氢能产业未来发展的方向应因地制宜,北方地区优先发展陆上风电、光伏发电、氢能重卡、氢能轨交等,南方沿海地区优先发展海上风电、氢能船舶、生产绿色航煤等.

关键词:氢能;电解水技术;燃料电池技术;氢能产业

中图分类号:TK91

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2026)01-0147-10

我国作为全球能源消费大国,当前的能源供应体系存在结构不合理和地域分布不均衡的问题.传统化石能源在能源结构中仍占据主导地位.这些资源我国大量依赖进口,这给国家能源安全带来了巨大隐患.同时,风能、太阳能等绿色能源主要集中在人口稀少的西部地区,难以接入电网,导致大量能源浪费.此外,我国能源对化石能源的依赖使我国碳排放居高不下.为了保障国家能源安全并履行大国责任,我国亟需调整能源结构,加速低碳转型.

氢能是作为新型清洁能源,它以高能量密度、清洁、来源广等特征,被认为是化石能源的理想替代品^[1].以氢气为核心的新型能源体系能够整合多种可再生能源,通过氢气作为能量载体,实现能量的收集、储存、运输和利用,从而解决可再生能源因地域和储存时间限制导致的浪费问题.这种新型能源体系意味着可以利用风能、太阳能等方式从大自然中源源不断获取能源,同时大幅减少温室气体排放^[2].发展以氢能为核心的新型能源体系已是大势所趋,我国也在政策层面积极推动氢能产业发展.我国发布的《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》文件中指出,围绕实现碳达峰、碳中和目标,推动氢能产业健康、有序、可持续发展.2025年1月1日开始实施的《中华人民共和国能源法》首次将氢能纳入能源管理体系,从法律层面提升了氢能在能源体系中的地位.

当前,世界主要经济体纷纷将氢能视为新一轮能源技术革命和产业竞争的高地,持续推动氢能产业化与技术攻关^[3].其中,电解水制氢技术与燃料电池技术被公认为氢能产业链中的两大核心环节:前者是实现绿氢规模化生产的关键,后者是氢能高效利用的重要途径.两者技术进步与成本下降将直接决定氢能经济的成熟度^[4-5].可以预见,这些关键技术领域的突破将成为未来国际氢能竞争格局的决定性因素,也必然是我国氢能战略推进中需持续强化研发与创新的重点方向.

收稿日期:2025-08-08;**修回日期:**2025-08-28.

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(D5000230358);陕西省重点研发计划(2024GX-YBXM-456);国家级领军项目(D5113230023).

作者简介(通信作者):李致朋(1981—),男,四川广安人,西北工业大学教授,博士生导师,国家级领军人才,研究方向为氢能及燃料电池等, E-mail: iamzpili@nwpu.edu.cn; 翁乔丹(1987—),女, E-mail: jordanweng@xmu.edu.cn.

引用本文:李致朋,叱干东东,肖仪卓,等.中国氢能产业关键技术与应用探究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2026,54(1):147-156.(Li Zhipeng, Chigan Dongdong, Xiao Yizhuo, et al. Exploration of key technologies development and application in China's hydrogen energy industry[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2026, 54(1): 147-156. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.08.08.0001.)

1 氢能的优势及重大战略意义

1.1 氢能的优势

氢气作为能源载体使用不仅拥有超过同质量的化石燃料高热值,同时不会产生二氧化碳等温室气体.氢气的单位热值高达 $40\text{ kW}\cdot\text{h/kg}$,是传统化石燃料(汽油、柴油)的 $2\sim 4$ 倍,并且氢气燃烧的产物只有水,对环境无任何污染^[6].氢元素在地球上拥有丰富的储备,氢元素主要存在于水资源中,可以通过电解水等方式将水中的氢提取出来.海洋资源即是一个巨大的氢库.氢能应用范围广泛如图 1 所示,它既可以作为工业原料用于合成氨、合成甲醇等化工过程,也可作为二次能源载体,氢能可用于燃料电池汽车、建筑热电联供、航空航天燃料等领域,有效减少对化石燃料的依赖^[7-8].

1.2 氢能的分类定级

氢是地球上储量最大的元素,但是单质氢在自然界中存在却非常少,因此大部分氢气主要通过人工制造获得.研究人员根据氢气的制备方式及环境影响对其进行分类为绿氢、蓝氢、蓝绿氢、灰氢、黑氢、棕氢、粉氢、黄氢和金氢(白氢)^[9].绿氢是通过电解水制取,所用电能来自风能、太阳能、水力等可再生能源;蓝氢是通过甲烷重整并对产生的二氧化碳进行碳捕获与碳封存技术(CCUS);灰氢是通过甲烷重整获取,但不二氧化碳进行捕获与封存;蓝绿氢是通过甲烷热解其产物为氢气和石墨;粉氢是以核能作为能源电解水得到的氢气;黄氢是以化石燃料作为能量来源电解水制氢;金氢或白氢是自然界中存在的氢.

1.3 氢能产业的重要战略意义

我国发展氢能产业是保障能源安全、优化可再生能源分配、构建新型能源体系、实现碳达峰碳中和目标的共同选择.在能源安全方面:我国作为全球最大的石油进口国,海上石油运输对马六甲海峡等重要通道依赖严重,能源生命线面临威胁,能源安全形势严峻.在可再生能源利用方面:我国风电、太阳能发电产生的大量电能无法接入电网,造成极大浪费,而氢气可通过电解水制取的方式成为可再生能源的载体,实现电能的再分配.在新型能源体系中:持续增长的电力需求使电网负荷不堪重负.氢能的发展有利于布局分布式电网和微电网,减轻电网压力,同时满足用电需求.在碳达峰、碳中和目标方面,氢能的发展可以显著减少二氧化碳排放,是实现“双碳”目标的有效途径^[10].发展以氢能为核心的零排放清洁能源体系已成为全球趋势,世界各国都在大力发展氢能产业.

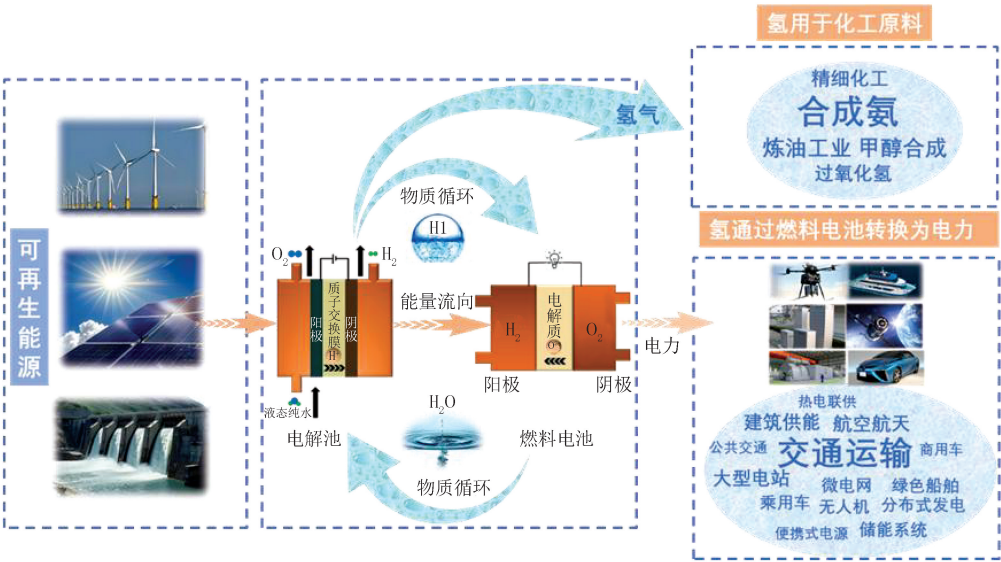


图1 氢生产与消纳流程

Fig.1 Hydrogen production and utilization process flow

2 绿氢产业的关键技术介绍

2.1 绿氢制备技术

在绿氢上下游产业链中,电解水制氢技术和燃料电池技术,被称为绿氢产业中的“中央处理器”,同时它也是决定绿氢产业链发展的关键环节.电解水技术可将风能、太阳能、水力发电等清洁能源转化为氢气储存起来,有效解决可再生能源受地域和时间限制的问题^[11].燃料电池作为提供电力的终端设备,可将氢气转化为电能,广泛应用于汽车、轮船、发电厂、航空航天、居民用电等领域.通过电解水技术和燃料电池技术可构建一个能量利用的闭环系统.这两项技术是研究的热点与难点.

2.1.1 电解水制氢

电解水技术根据电解质类型可分为碱性(ALK)电解水技术、质子交换膜(PEM)电解水技术、阴离子交换膜(AEM)电解水技术以及固体氧化物(SOEC)电解水技术^[12].4 种电解水技术原理如图 2 所示,每种技术路线各有优缺点及不同的技术成熟度,具体对比见附录表 S1 所示.

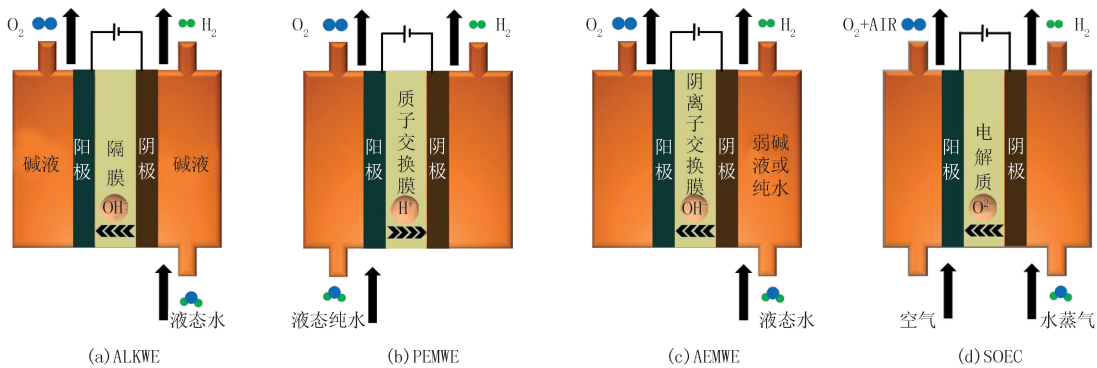


图2 电解水原理图

Fig.2 Schematic diagrams of hydrogen production technologies

2.1.1.1 碱性电解水制氢技术

碱性电解水制氢技术是工业界应用最为成熟的技术,其结构如图 3 所示,主要以 KOH 等碱性物质作为电解液,多孔膜作为阴阳极隔膜材料^[14].碱性电解水最大的优点是无需贵金属催化剂,核心材料成本较低.其次,该技术成熟稳定,通常应用规模较大,可有效降低整体生产成本.缺点是无法适应宽功率波动,难以在低负荷($<50\%$)下运行.由于阴阳两极的隔膜孔径较大,制备的氢气和氧气易混合,具有较大的安全隐患(如氧中氢超标引起爆炸),同时也需要对制备的混合气进行二次分离.此外,较厚的电解质隔膜,使得电阻过高,整体的电解效率较低,在相同的产量下,电解槽的占地面积也大于其他的电解方式^[15].

2.1.1.2 质子交换膜电解水制氢技术

质子交换膜电解的电解质由较薄的聚合物膜组成,允许 H^+ 离子通过,电极则由涂有特定催化剂的钛板组成.PEM 电解槽设计紧凑,可在宽功率负荷范围($5\% \sim 150\%$)下运行^[16].然而,其最大的问题是需要使用铂和铱等贵金属作为催化剂.这些贵金属材料储量有限,限制了 PEM 的大规模产业化,并导致 PEM 电解水的成本较高.目前 PEM 电解水面临最大的挑战是减少贵金属的使用量,降低制造成本.尽管如此,PEM 电解水技术在国外已较为成熟,如西门子、普顿等企业已推出兆瓦级产品,但国内应用规模仍落后于西方,主要受限于成本较高,以及质子交换膜等关键材料技术有待攻克.

2.1.1.3 阴离子交换膜电解水制氢技术

AEM 电解水技术的结构和原理与 PEM 电解水技术类似,但其阴离子交换膜只允许 OH^- 离子通过^[17].AEM 技术理论上结合了 ALK 和 PEM 的优点,其碱性环境简化了对催化剂和耐化学腐蚀材料的要求.但目前 AEM 的技术水平整体较低,尤其是阴离子交换膜的电阻和寿命是其发展的主要难题.与 ALK 和 PEM 相比,AEM 电解槽发展较晚,目前仍处于实验室阶段,商业化应用案例较少^[18-19].

2.1.1.4 固体氧化物电解水制氢技术

固体氧化物和其他电解技术最大的不同是该电解技术采用全固态结构,使用寿命较长^[21],其次是 SO-EC 的工作温度较高,通常超过 700 ℃.由于 SOEC 电解水技术的高温工作特性,使其电化学反应动力学显著提高,电解电压可低至 1.3 V,大幅降低了电能消耗.电解池由多孔结构的氢电极和氧电极,以及一层致密的固体氧化物构成.SOEC 在高温气冷堆、太阳能集热和核能余热等特殊场景下具有明显优势.然而,SOEC 面临最大的挑战是耐高温材料和制造工艺成本过高、启停时间长等问题,目前仍处于实验室验证阶段.随着研究的深入,成本瓶颈有望突破,未来实现大规模产业化应用.

2.1.1.2 太阳能制备绿氢

太阳能分解制氢包含 3 种主流方式(图 3):光催化法制氢,光热解法制氢,光电化学法制氢^[22].光催化法制氢是利用光催化剂的吸光特性实现光解水反应.但目前制氢效率较低,仍处于验证示范阶段.光电化学法制氢利用光电化学电池工作原理需要外加电路参与,而光热解法是直接将系统温度在光照下达到 2 000 K 以上,使用一步法直接分解水制取氢气和氧气.后两者在某些场景下已有一定的商业化应用^[23].

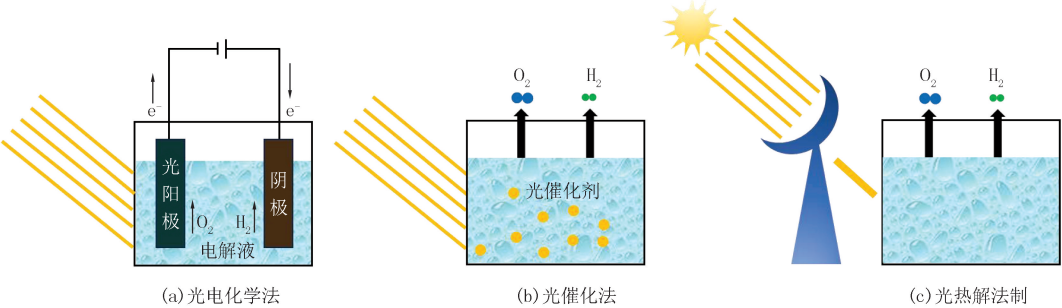
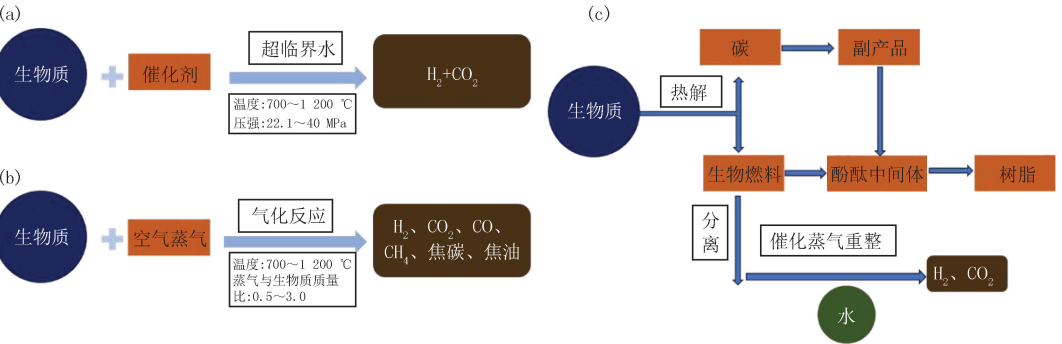


图3 太阳能分解制氢原理图

Fig.3 Solar-driven hydrogen production methodologies

2.1.1.3 生物质制备绿氢

生物质制氢有 2 种主要方式热化学法和生物法.热化学法(图 4)还可以细分为:超临界水气化、蒸汽气化、生物质热解重整法制氢^[24].其中生物质热解重整法制氢已实现商业应用^[25].热化学法制氢的缺点是制备的氢气纯度不高.生物法制氢包括暗厌氧菌发酵、光合生物及其耦合制氢等,但目前面临生产成本高和技术尚未成熟的问题.



(a)超临界水气化;(b)蒸汽气化;(c)生物质热解重整法

图4 热化学法制氢技术原理图

Fig.4 Schematic diagrams of hydrogen production technology via thermochemical processes

2.2 氢能的应用

除了作为传统化工原料外,氢气在发电领域的应用备受关注,尤其是燃料电池技术.燃料电池能够将氢气中的化学能直接转化为电能,转化效率高达 60%~80%,远高于传统发电技术约 40%(无法突破卡诺循环的限制).利用燃料电池将氢气的化学能转换为电能,广泛应用于分布式发电、交通工具、航空航天等领域.

图5 燃料电池热电联供系统^[36]

Fig.5 Layout of PEMFC-CHP system^[36]

以热定电或以电定热,确保能源供需平衡^[37].

燃料电池以其能源效率高、排放物环保、续航里程长、运行噪声低等优势被广泛应用于交通领域.在交通领域中研究热度最高的是燃料电池汽车与燃料电池船舶.两者的工作原理类似,都是通过燃料电池将燃料中的化学能转化为电能驱动电机运转.目前主流的动力系统结构为燃料电池加锂电池的配置,燃料电池提供长期的动力供应,锂电池用于应对高的负载冲击.动力系统除了配备燃料电池之外,还具有氢气供应系统、空气供应系统、冷却系统和电力管理系统等,保障整个运行过程的顺利进行^[38-40].目前,丰田、现代等汽车制造商已经推出了燃料电池汽车的量产车型,并开始商业化运营^[41].

燃料电池船舶的动力系统的主要组成部分和燃料电池汽车基本一致,如图 6 所示为混合动力船舶系统^[42].该系统包含了燃料电池模块、锂电池模块、电压转换模块、负载模块及^[43-44].燃料电池船舶也是通电化学反应来产生电力驱动船舶^[45-46],但燃料电池船舶对燃料电池的功率要求通常更高^[47-49].整个燃料电池船舶由控制系统监控确保船舶的稳定运行,包括燃料和氧化剂的供应、温度控制、压力控制等.目前燃料电池船舶的研发正成为各国竞相追逐的焦点,如法国“Energy Observer”号、挪威“Viking Lady”号等.我国燃料电池船舶研究也有一定的基础,但仍处于探索阶段^[50-52].

除汽车和船舶这类经典燃料电池交通工具使用场景外,燃料电池技术还可以用于轨道交通车辆,如氢燃料电池火车等.法国阿尔斯通推出的氢燃料电池列车,速度可达 140 km/h,续航里程可达 600~800 km.该列车使用纯氢气作为燃料,从环境空气中收集氧气,燃料电池只产生蒸汽和冷凝水,且噪声很低.除此之外燃料电池还可以应用于有轨列车和智轨电车、叉车、航空飞机、航天飞行器等其他交通工具^[53].

3 氢能产业中关键技术的发展现状

3.1 电解水制氢技术国内外发展现状

我国电解水制氢装机容量以 ALK 制氢为主,在电解水制氢总产能中占据约 92%,目前我国单体最大的 ALK 制氢速度可达到 3 000 Nm³/h.ALK 主要优势是技术成熟度高,但其占地面积大,电解效率较低.国外以 PEM 制氢为主,国内 PEM 设备成本是碱性的 4~6 倍,而国外 PEM 仅为碱性的 1.2~1.5 倍.总体来说欧美等国具有更高的成熟度和商业化水平.2024 年日本某公司发布了单台 PEM 电解槽其制氢速度高达 300 Nm³/h,且各项指标远超国际水平.PEM 相较 ALK 其制氢效率更高,体积更小,响应速度也更快,但在制氢规模和成本上 ALK 仍然具备相当的优势.美国制氢成本为每千克氢气 \$ 5.00~5.50,而国内低至每千克氢气 ¥2~3(约 \$ 0.3~0.4).这有利于我国氢能产业在国际贸易中占据优势地位,从而加速产业的发展和技术的快速迭代.目前,PEM 电解水制氢领域,质子交换膜等关键材料仍亟需我国基础研究优势单位从源头上突破 PEM 电解水制氢瓶颈^[54].

AEM 和 SOEC 制氢技术是新型技术.在 AEM 制氢方面,受限膜和非贵金属催化电极等关键材料缺乏限制了国内外目前均无大功率 AEM 电解堆实际运行.最近德国某公司推出了单台 AEM 电解槽产量可达 500 NL/h.同样,我国也取得了突破进展,厦门大学/嘉庚创新实验室在 AEM、催化剂和膜电极等关键材料集成经过 10 kW 电解堆 1 000 h 运行验证,其性能衰减小于 3%.然而,这需通过机理/机制研究、新材料开发解决 AEM、电极等关键材料的耐久性瓶颈问题,才能快速实现 AEM 制氢技术的工业应用.SOEC 以其超高的电解效率吸引了全球研究者的关注,目前美国的 Nasa Ames 研究中心拥有 4 MW 的 SOEC 电解槽系统,

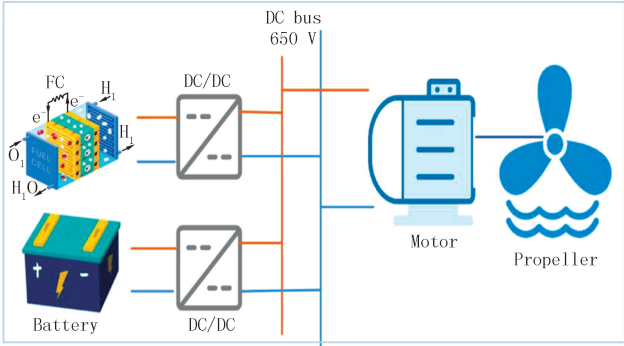


图6 燃料电池动力系统拓扑图^[42]
Fig.6 Schematic diagram of FCBHPS topology structure^[42]

这也是迄今为止最大功率的 SOEC 系统,每天可产氢气 2.4 t,而国内 SOEC 也在迅速发展并且已拥有 SOEC 电堆的自动化产线^[55].

3.2 燃料电池国内外发展现状

目前燃料电池较为成熟的国家和地区是日本、美国、欧洲.在这些国家中燃料电池技术被广泛应用于分布式发电、交通工具动力系统等领域^[56].

美国早在 1970 年就将燃料电池作为未来能源革命的重要战略.在随后的几十年里持续出台相应的政策,大力推动燃料电池技术的发展.1996 年美国的通用公司首次将燃料电池应用于汽车领域,该车辆配备了 32 kW 的燃料电池.其燃料电池的发展包括固定式发电、燃料电池汽车、便携式发电等领域^[57].

日本对氢能、燃料电池的研究开始较早,尤其对小型燃料电池的研发.日本在燃料电池上的应用主要在家庭热电联产和燃料电池汽车领域.日本于 2014 年推出一款可批量生产的燃料电池汽车 Mirai,其搭载了功率密度为 1.4 kW/L 的燃料电池.截至 2020 年日本已经拥有 146 个加氢站,在 2025 年预计达到 320 个,2030 年计划建设数量到 900 座,同时在 2040 年实现普及氢能源燃料电池汽车^[58].

我国的燃料电池技术发展起步较晚,但在“双碳”政策的背景下,燃料电池技术受到广泛关注,研究热潮不断涌现.政府也相继出台了一系列政策鼓励燃料电池的技术研发.2016 年,《能源技术革命创新行动计划(2016—2030 年)》,制定的“氢能与燃料电池技术创新”任务,极大地推动了我国东南部省份氢能和燃料电池产业的发展.目前国内已经有较为成熟的 PEM 燃料电池产品,最高功率可以达到 110 kW.并且国内部分公司也掌握了一定的自主知识产权.目前的难点是质子交换膜的关键部件的批量化生产.国内的众多企业也纷纷开展了燃料电池的研发,潍柴集团联合潍能集团、氢能科技公司、低碳清洁能源研究院签署研究氢燃料电池重载矿用卡车.中化集团将燃料电池的研发作为公司的整体发展战略.截至 2024 年底,我国建成加氢站超 540 座,推广燃料电池汽车约 2.4 万辆.目前我国燃料电池技术发展已经初具规模,正处于快速发展的上升期.国内的优势在于具有广阔的市场,这为技术的快速迭代与进步提供了强大的推力.

4 结 语

随着我国“双碳”目标的提出,氢能的战略地位从传统化工原料逐步转变为一次能源载体,成为世界各国能源战略的重要组成.我国具有较好的氢能产业基础,相关技术不断迭代升级,成本也在降低,与国际水平的差距正在缩小.但我国氢能产业的发展仍面临多方面挑战,在关键技术方面,产品同质化问题严重,现有技术的成熟度和可靠性未经过长期验证;质子交换膜、催化剂、膜电极等核心材料存在一些关键技术卡点,关键材料依靠进口.在氢能储运方面,储运技术尚不完善,由于储运成本在氢气终端售价中占比较大,使得氢气应用推广成本较高.

我国氢能产业未来的发展是朝着清洁制备、安全储运、高效利用 3 个方向发展.在氢能制备领域增大光电、风电等清洁能源电解水制氢的比例.我国西北和东南地区的自然环境以及人口密度具有明显的差异,西北地区人口较少且风光资源优势明显,地域面积大,可以大力发展陆上风电、光伏发电.南方沿海地区人口密度大,但拥有丰富的海上风力资源,可以大力发展海上风电.大规模氢能储运是未来的趋势,因此应着力于管道输氢技术,同时高压储运、等温储运,以及固态储运等方式应共同发展.在氢能应用领域,西北地区充分发挥陆运的优势,大力发展氢能重卡、氢能轨交,以及与煤化工相结合制备化工原料.东南沿海地区应结合自身海运优势,发展氢能船舶、生产绿色航煤、氢能源的对外出口等.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.08.08.0001).

参 考 文 献

[1] SIKIRU S, OLADOSU T L, AMOSA T I, et al. Hydrogen-powered horizons: Transformative technologies in clean energy generation, distribution, and storage for sustainable innovation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 56: 1152-1182.

[2] YOUNAS M, SHAFIQUE S, HAFEEZ A, et al. An overview of hydrogen production: current status, potential, and challenges[J]. Fuel, 2022, 316: 123317.

[3] CAPURSO T, STEFANIZZI M, TORRESI M, et al. Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition[J]. Energy

Conversion and Management,2022,251:114898.

[4] QASEM N A A,ABDULRAHMAN G A Q.A recent comprehensive review of fuel cells:history,types,and applications[J].International Journal of Energy Research,2024,2024(1):7271748.

[5] BODARD A,CHEN Z S,ELJARRAY O,et al.Green hydrogen production by low-temperature membrane-engineered water electrolyzers, and regenerative fuel cells[J].Small Methods,2024,8(12):2400574.

[6] 宋泽林.氢能源利用现状及发展方向[J].石化技术,2021,28(5):69-70.

SONG Z L.Utilization status and development direction of hydrogen energy[J].Petrochemical Industry Technology,2021,28(5):69-70.

[7] HABIB M A,ABDULRAHMAN G A Q,ALQUAITY A B S,et al.Hydrogen combustion,production,and applications;a review[J].Alexandria Engineering Journal,2024,100:182-207.

[8] GE L J,ZHANG B H,HUANG W T,et al.A review of hydrogen generation,storage,and applications in power system[J].Journal of Energy Storage,2024,75:109307.

[9] MAJEWSKI P,SALEHI F,XING K.Green hydrogen[J].AIMS Energy,2023,11(5):878-895.

[10] BHANDARI R,ADHIKARI N.A comprehensive review on the role of hydrogen in renewable energy systems[J].International Journal of Hydrogen Energy,2024,82:923-951.

[11] 聂家波,邓建悦.燃料电池用氢气的制备工艺探讨[J].化工技术与开发,2021,50(8):46-50.

NIE J B,DENG J Y.Discussion on preparation technology of hydrogen for fuel cell[J].Technology & Development of Chemical Industry, 2021,50(8):46-50.

[12] 张正,宋凌璐.电解水制氢技术:进展、挑战与未来展望[J].工程科学学报,2025,47(2):282-295.

ZHANG Z,SONG L J.Hydrogen production by water electrolysis:advances,challenges and future prospects[J].Chinese Journal of Engineering,2025,47(2):282-295.

[13] 俞红梅,邵志刚,侯明,等.电解水制氢技术研究进展与发展建议[J].中国工程科学,2021,23(2):146-152.

YU H M,SHAO Z G,HOU M,et al.Hydrogen production by water electrolysis:progress and suggestions[J].Strategic Study of CAE, 2021,23(2):146-152.

[14] 尹诗斌,蒋文杰,文欢.碱性电解槽制氢技术的研究现状及发展趋势[J].西华大学学报(自然科学版),2025,44(1):168-180.

YIN S B,JIANG W J,WEN H.Research status and development prospects of hydrogen production technology in alkaline electrolyzer[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition),2025,44(1):168-180.

[15] BRAUNS J,TUREK T.Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy:A Review[J].Processes,2020,8(2):248.

[16] CARMO M,FRITZ D L,MERGEL J,et al.A comprehensive review on PEM water electrolysis[J].International Journal of Hydrogen Energy,2013,38(12):4901-4934.

[17] 邢学奇,宋鹏翔,申爱景,等.电解水制氢用阴离子交换膜研究进展[J].储能科学与技术,2024,13(11):3856-3870.

XING X Q,SONG P X,SHEN A J,et al.Recent progress of anion exchange membrane for hydrogen production via water electrolysis[J]. Energy Storage Science and Technology,2024,13(11):3856-3870.

[18] LI C Q,BAEK J B.The promise of hydrogen production from alkaline anion exchange membrane electrolyzers[J].Nano Energy,2021,87: 106162.

[19] HAGESTEIJN K F L,JIANG S X,LADEWIG B P.A review of the synthesis and characterization of anion exchange membranes[J].Journal of Materials Science,2018,53(16):11131-11150.

[20] PALANIVEL T,MAMLOUK M,POLLET B G,et al.Exploring properties of hyperbranched polymers in anion exchange membranes for fuel cells and its potential integration for water electrolysis;a review[J].Journal of Energy Chemistry,2025,102:670-702.

[21] 王平.高温固体氧化物电解池应用领域研究进展[J].现代化工,2024,44(11):81-84.

WANG P.Research progress in application fields of high-temperature solid oxide electrolysis cell[J].Modern Chemical Industry,2024, 44(11):81-84.

[22] 关键,马荣,李东辉,等.全光谱太阳能光热催化制氢研究进展[J].洁净煤技术,2024,30(12):22-37.

GUAN J,MA R,LI D H,et al.Recent advances in full-spectrum solar photothermocatalytic hydrogen production[J].Clean Coal Technology,2024,30(12):22-37.

[23] 李建林,梁忠豪,梁丹曦,等.“双碳”目标下绿氢制备及应用技术发展现状综述[J].分布式能源,2021,6(4):25-33.

LI J L,LIANG Z H,LIANG D X,et al.Overview of development status of green hydrogen production and application technology under targets of carbon peak and carbon neutrality[J].Distributed Energy,2021,6(4):25-33.

[24] 银建中,王伟彬,张传杰,等.超临界水处理生物质制氢技术[J].生物技术,2007,17(3):92-95.

YIN J Z,WANG W B,ZHANG C J,et al.The hydrogen production methods from biomass using catalysis gasification in supercritical water[J].Biotechnology,2007,17(3):92-95.

[25] 栾天翔,赵维维.新能源制氢技术发展现状及研究进展综述[J].石化技术,2022,29(8):153-154.

LUAN T X,ZHAO W W.Review on the development status and research progress of hydrogen production technology from new energy

- sources[J].Petrochemical Industry Technology,2022,29(8):153-154.
- [26] 王明华.绿氢耦合现代煤化工发展路径研究[J].中国煤炭,2023,49(5):102-107.
WANG M H.Research on the development path of modern coal chemical industry coupled by green hydrogen[J].China Coal,2023,49(5):102-107.
- [27] SINGH G, RAMADASS K, DASIREDDY V D B C, et al. Material-based generation, storage, and utilisation of hydrogen[J]. Progress in Materials Science, 2023, 135: 101104.
- [28] 李政贤,耿志勇,李一凡,等.质子交换膜燃料电池关键材料发展现状综述[J].商用汽车,2023(4):93-95.
LI Z X, GENG Z Y, LI Y F, et al. Review on the development of key materials for proton exchange membrane fuel cells[J]. Commercial Vehicle, 2023(4): 93-95.
- [29] CAI F Y, CAI S S, TU Z K. Proton exchange membrane fuel cell(PEMFC) operation in high current density(HCD): Problem, progress and perspective[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 307: 118348.
- [30] DAUD W R W, ROSLI R E, MAJLAN E H, et al. PEM fuel cell system control: a review[J]. Renewable Energy, 2017, 113: 620-638.
- [31] ATHANASAKI G, JAYAKUMAR A, KANNAN A M. Gas diffusion layers for PEM fuel cells: Materials, properties and manufacturing- A review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(6): 2294-2313.
- [32] XU Q D, GUO Z J, XIA L C, et al. A comprehensive review of solid oxide fuel cells operating on various promising alternative fuels[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 253: 115175.
- [33] RADENAHMAD N, AZAD A T, SAGHIR M, et al. A review on biomass derived syngas for SOFC based combined heat and power application[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 119: 109560.
- [34] TIMURKUTLUK B, TIMURKUTLUK C, MAT M D, et al. A review on cell/stack designs for high performance solid oxide fuel cells[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56: 1101-1121.
- [35] 王波.中国首套固体氧化物燃料电池热电联供系统面世[J].能源研究与信息,2023,39(1):36.
WANG B. China's first solid oxide fuel cell cogeneration system comes out[J]. Energy Research and Information, 2023, 39(1): 36.
- [36] 彭黎菊,李爽,史翔翔,等.首都住宅建筑燃料电池热电联供系统建模与能量供需分析[J].中国电机工程学报,2024,44(10):3905-3916.
PENG L J, LI S, SHI Y X, et al. Simulation study of fuel cell CHP system and energy demands analysis for residential buildings in Beijing [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 3905-3916.
- [37] CORIGLIANO O, PAGNOTTA L, FRAGIACOMO P. On the technology of solid oxide fuel cell(SOFC) energy systems for stationary power generation: a review[J]. Sustainability, 2022, 14(22): 15276.
- [38] LI C H, CHENG K L, LI C J, et al. Performance assessment of pressurized SOFC power generation system for hypersonic vehicles: Thermodynamic analysis, system configuration optimization[J]. Energy, 2025, 315: 134377.
- [39] BESSEKON Y, ZIELKE P, WULFF A C, et al. Simulation of a SOFC/battery powered vehicle[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(3): 1905-1918.
- [40] SANDRINI G, GADOLA M, CHINDAMO D, et al. Application of solid oxide fuel cells on hybrid electric vehicles operating in fleet[J]. Transportation Research Procedia, 2023, 70: 20-27.
- [41] 李勃昕,马叶叶,任赟,等.氢能汽车的产业化场景开拓与培育策略[J].新能源科技,2024(1):31-38.
LI B X, MA Y Y, REN Y, et al. Industrialization application and cultivation strategies of hydrogen powered vehicles[J]. New Energy Science and Technology, 2024(1): 31-38.
- [42] LIU H Y, FAN A L, LI Y P, et al. Multi-objective hierarchical energy management strategy for fuel cell/battery hybrid power ships[J]. Applied Energy, 2025, 379: 124981.
- [43] 邴绍旺,王新宁,董建智,等.氢能船舶动力系统的发展现状与技术展望[J].交通节能与环保,2024,20(4):67-71.
BING S W, WANG X N, DONG J Z, et al. Development status and prospect of the marine hydrogen-fuelled vessels powertrain system[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2024, 20(4): 67-71.
- [44] 李致朋,肖仪卓,刘宣佑,等.绿色船舶燃料电池混动系统能量管理策略研究[J].舰船科学技术,2025,47(2):120-126.
LI Z P, XIAO Y Z, LIU X Y, et al. Analysis of energy management strategies for marine fuel cell hybrid systems[J]. Ship Science and Technology, 2025, 47(2): 120-126.
- [45] XIAO Y Z, LI Q, ZHENG J F, et al. Design and control studies of six-phase interleaved boost converter for integrated energy efficiency improvement of green ship[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 96: 112549.
- [46] 张勇,徐昌.氢能船上应用的关键技术研究[J].舰船科学技术,2022,44(4):97-100.
ZHANG Y, XU C. Analysis of hydrogen industrial chain and key technology of application on ships[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(4): 97-100.
- [47] VAN VELDHUIZEN B, VAN BIERT L, ARAVIND P V, et al. Solid oxide fuel cells for marine applications[J]. International Journal of Energy Research, 2023, 2023(1): 5163448.
- [48] BALDI F, MORET S, TAMMI K, et al. The role of solid oxide fuel cells in future ship energy systems[J]. Energy, 2020, 194: 116811.

[49] MICOLI L,COPPOLA T,TURCO M.A case study of a solid oxide fuel cell plant on board a cruise ship[J].Journal of Marine Science and Application,2021,20(3):524-533.

[50] TONG L,YUAN Y P,LI X,et al.Innovative developmental of hydrogen-powered ships in China[J].Chinese Journal of Engineering Science,2022,24(3):127.

[51] 徐晓健,杨瑞,纪永波,等.氢燃料电池动力船舶关键技术综述[J].交通运输工程学报,2022,22(4):47-67.

XU X J,YANG R,JI Y B,et al.Review on key technologies of hydrogen fuel cell powered vessels[J].Journal of Traffic and Transportation Engineering,2022,22(4):47-67.

[52] 刘彦呈,曾宇基,尤石,等.氢燃料电池船舶直流综合电力系统研究及应用[J].供用电,2022,39(1):8-16.

LIU Y C,ZENG Y J,YOU S,et al.Research and application of hydrogen fuel cell ship DC integrated power system[J].Distribution & Utilization,2022,39(1):8-16.

[53] 刘道建,黄水林,冯维超.直升机绿色航空动力技术发展研究[J].航空科学技术,2024,35(1):97-104.

LIU D J,HUANG S L,FENG W C.Research on the development of green power technologies for helicopter[J].Aeronautical Science & Technology,2024,35(1):97-104.

[54] 李晨宇,吴亮.国内外电解水制氢技术及其装备研究进展[J].山东工业技术,2025(3):30-38.

LI C Y,WU L.Research progress of electrolytic water hydrogen production technology and equipment at home and abroad[J].Journal of Shandong Industrial Technology,2025(3):30-38.

[55] 赵雪莹,李根蒂,孙晓彤,等.“双碳”目标下电解制氢关键技术及其应用进展[J].全球能源互联网,2021,4(5):436-446.

ZHAO X Y,LI G D,SUN X T,et al.Key technology and application progress of hydrogen production by electrolysis under peaking carbon dioxide emissions and carbon neutrality targets[J].Journal of Global Energy Interconnection,2021,4(5):436-446.

[56] 王薛超,金茂菁.燃料电池汽车国内外发展现状 & 对策建议[J].科技中国,2019(5):6-8.

WANG X C,JIN M J.Development status and countermeasures of fuel cell vehicles at home and abroad[J].China Scitechnology Business,2019(5):6-8.

[57] 杨斯琦,蒋玉福,余翠兰.氢燃料电池开发现状分析[J].南方农机,2025,56(15):139-142.

YANG S Q,JIANG Y F,YU C L.Analysis of development status of hydrogen fuel cell[J].China Southern Agricultural Machinery,2025,56(15):139-142.

[58] 贾光.日本氢能技术发展现状[J].安全、健康和环境,2019,19(8):1-4.

JIA G.Development of hydrogen technology in Japan[J].Safety Health & Environment,2019,19(8):1-4.

Exploration of key technologies development and application in China's hydrogen energy industry

Li Zhipeng^{1,2}, Chigan Dongdong¹, Xiao Yizhuo¹, Pan Hetong¹, Weng Qiaodan²

(1. Institute of Flexible Electronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Tan Kah Kee Innovation Laboratory, Xiamen 361102, China)

Abstract: The development of the hydrogen energy industry is crucial to China's national energy security and the strategic transformation of its energy structure. Research on the key technologies and the current development status of the hydrogen energy sector provides significant guidance for its future direction. This paper first introduces the advantages of hydrogen as both an energy carrier and a chemical feedstock, analyzes the challenges in China's energy structure and security, and explores how hydrogen can facilitate energy restructuring and upgrading. Then the domestic and international development status of key technologies in the hydrogen industry is reviewed. Subsequently, the characteristics and current progress of electrolysis and fuel cell technologies are analyzed. Based on these findings, the paper identifies the primary challenges facing China's hydrogen industry, including gaps in key materials, as well as storage and transportation technologies compared to global standards. Therefore, the future development of China's hydrogen energy industry should be adapted to local conditions: the northern regions should prioritize the development of onshore wind power, photovoltaics, hydrogen-powered heavy-duty trucks, and hydrogen rail transit; while the southern coastal regions should focus on offshore wind power, hydrogen-powered vessels, and the production of sustainable aviation fuel.

Keywords: hydrogen energy; water electrolysis technology; fuel cell technology; hydrogen energy industry

附 录

表 S1 电解水制氢技术参数对比^[13]

Tab. S1 Comparative Analysis of Water Electrolysis Hydrogen Production Technologies^[13]

运行条件	ALK	PEM	AEM	SOEC
使用温度/℃	60~80	50~90	50~90	600~1 000
电压/V	1.4~3.0	1.4~2.5	1.4~2.0	1.0~1.5
电流密度/(A·cm ⁻²)	0.2~0.8	1.0~2.0	0.2~2.0	0.3~1.0
电解效率/%	59~70	60~75	65~82	85~100
氢气纯度/%	99.500 0~99.999 8	99.900 0~99.999 9	99.900 0~99.999 9	99.9
成本/(USD/MW)	270	400	未知	2 000
优势	工业领域的商业化应用 不含贵金属电催化剂,成本相对较低,长期稳定性好	商业化技术运行电流密度更高,气体纯度高,系统设计紧凑,响应速度快	不含贵金属电催化剂,低浓度碱性液态电解质	工作温度高,效率高
劣势	电流密度有限,氢气与氧气混合,高浓度的碱性液体电解质	电池组件的成本贵,金属电催化剂酸性电解质	稳定性有限,发展中	稳定性有限,发展中