

“十四五”规划下氢能政策与电解水制氢研究

程文姬¹, 赵磊¹, 郝航¹, 洪小江², 王言达², 牛凯¹, 杨博¹, 朱彬莎¹, 吴琼¹

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西西安710054; 2.赣浙国华(信丰)发电有限责任公司, 江西赣州341600)

摘要:随着“十四五”发展规划的发布, 氢能在我国未来能源体系的地位进一步确定, 发展氢能技术, 推广氢能产业发展是国家和各省市地区都在考虑的重要事项。为此, 国家部委和省市发布氢能政策支持当地氢能产业发展。制氢是氢能产业链的重要一环, 而电解水制氢技术是最有前途的氢能获取方式。电解水制氢技术依然面临高成本、耐久性、运行稳定性等挑战。国内外相继开展了电解水制氢示范项目, 促进制氢技术发展和商业化运营的推广。

通过新型能源的可持续发展, 如何缓解能源消耗的急剧增长已经成为能源领域研究的共同认知难题。为此, 以化石燃料为主体的传统能源结构亟待改变, 朝着可蓬勃发展、可再生、持续性的能源结构前进, 是必然趋势。氢能是高效清洁环保型能源, 其能量利用的最终产物为水, 因此, 在国家层面发展氢资源具有重要的战略意义[1-3]。假设将中国能源消耗中的20%采用氢能代替, 则碳排放量将会显著降低, 同时氢能源的推进会满足社会能源需求[4-5]。

随着国家“双碳”目标以及“十四五”规划的提出, 低碳减排目标要求日益增长, 氢气的制取技术受到了研究者的关注。

制氢技术大致分为矿物能源制氢技术、光分解制氢技术和电解水制氢技术[6]。其中, 矿物质燃料制氢是从化石燃料和化工原料中提取氢元素, 技术相对成熟, 但生产过程碳排放量较多, 而且化石燃料的储量有限[7-9]; 光分解制氢利用太阳光辐射在催化剂的作用下直接分解水分子产生氢气[10-11], 制氢过程机理尚不明确, 其设备制作工艺较为复杂, 技术尚未成熟; 电解水制氢技术原理是在反应电解槽中加上电流, 在两端电极发生反应将水分子分解为氢气和氧气, 同时不会造成碳排放, 是未来最为理想的氢能源获取方式。

本文对“十四五”规划发布后的国内氢能政策进行了深入分析; 对氢能发展中的电解水制氢技术发展进行了剖析, 阐述了电解水制氢面临的挑战; 然后对国内外的不同类型电解水制氢示范项目进行了总结。

1 氢能利用政策分析

1.1 我国氢能利用政策历程

我国关于氢能的探究始于20世纪50年代, 最早氢能的研究是为了服务我国的航天事业, 利用氢气高热值的特点, 将液态氢添加到火箭推进剂中使用, 同时对氢能的民用一直处于了解探索阶段。“十三五”期间, 关于氢能民用的相关政策逐渐显现, 直至“十四五”规划期间, 氢能在我国大力推广, 政策逐渐增多[12]。图1描述了“十三五”后我国氢能产业政策的发展。我国部门或组织机构氢能相关政策见表1。

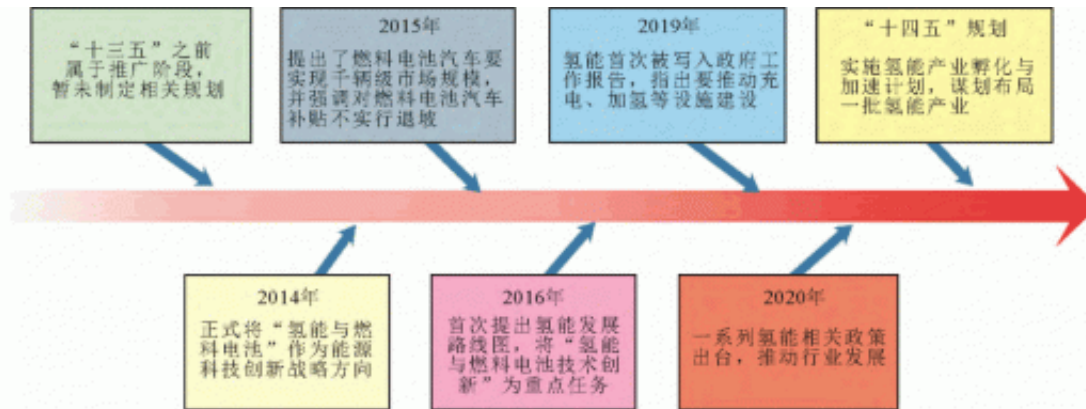


图1 中国氢能产业政策发展历程

Fig. 1 Development history of China's hydrogen industry policy.

表1 我国部门或组织机构氢能相关政策

Tab.1 Hydrogen related policies of China's departments or organizations

部门或组织机构	政策	主要内容
国务院	《关于2030年前碳达峰行动方案的通知》 ^[13]	确定全国碳达峰整体战略规划，关注2030年整体目标，战略规划目标和任务更加详细化、具体化
发改委	《“十四五”全国清洁生产推行方案》 ^[14]	规划运用绿氢炼化等清洁无污染新型技术替代传统能源项目，并推进示范性项目的应用
能源局	《关于组织开展“十四五”第一批国家能源科研创新平台认定工作》 ^[15]	明确能源未来研究方向为氢能一体化、产业化发展；同时确定氢能与可再生新能源共同发展技术
发改委、能源局	《“十四五”现代能源体系规划》 ^[16]	以攻坚氢能等前沿技术为核心，重点研究氢能相关技术及产业的攻克，推动氢能全产业链的发展
国资委	《关于推进中央企业高质量发展做好碳达峰中和工作的指导意见》 ^[17]	关注氢能产业链一体化发展，完善制氢、储氢、运氢和用氢的体系，结合相关产业部署氢能示范项目
工信部	《“十四五”工业绿色发展规划》 ^[18]	积极推广氢能等新型能源在各个行业的应用

1.2 各省市氢能产业政策

我国各省份氢能产业发展的起步时间不同，氢能产业与技术发展水平参差不齐。部分省份早在“十二五”期间就出台政策支持当地氢能利用的发展，而某一些地区氢能产业与技术储备几乎为零。当前，氢能产业发展呈现“东强西弱”的局面，氢能产业主要集中在京津地区、长三角地区、珠三角。随着“十四五”规划的发布，国家对氢能在未来能源体系中地位的确认，各省市都陆续发布氢能利用相关政策，支持当地的氢能发展。

北京市发布《北京市氢能产业发展实施方案（2021—2025年）》和《北京市“十四五”时期高精尖产业发展规划》政策。以冬奥会和残奥会重点示范性项目为依托，确保2025年，京津冀地区累积实现氢能产业链规模1000亿元以上[19-20]。

上海市发布《上海市燃料电池汽车产业创新发展实施计划》文件，以“氢能产业链”发展为核心，以“上海2025年成为全球燃料电池汽车发展高地”为目标，引进国际相关产业公司[21]。

广州发布《广州市氢能产业发展规划（2019—2030年）》，文件中明确广州市未来10年氢能发展目标及重点方向，主要在氢能产业链发展及其他行业的应用。预计广州在2030年氢能产值达到2000亿元以上[22]。

1.3 国外氢能利用发展

国外较早地注意到氢能这一清洁能源在未来能源体系的重要性，技术储备充足，氢能制取—储运—利用的全产业链雏形已见规模。

随着各国陆续提出本国家碳达峰碳中和的时间线，氢能产业在世界各国快速发展。其中，日本和韩国都致力于构建以氢能为核心枢纽的全新“氢社会”蓝图。表2列举了部分国家在氢能发展中提出的部分政策，以及相关政策对本国的影响[23]。

表 2 国外氢能相关政策
Tab.2 The policies related to hydrogen energy in foreign countries

国家	相关政策	氢能发展方向
美国	《氢能项目计划》	氢能已上升到国家战略层面
欧盟	《欧盟战略能源技术计划》《欧洲氢能路线图：欧洲能源转型的可持续发展路径》和《气候中性的欧洲氢能战略》	积极利用自身优势加快氢能商业化进程
日本	《氢能基本战略》《氢能/燃料电池战略发展路线图》和《绿色增长计划》	推动氢能与其他能源耦合协同发展
韩国	《创新发展战略投资计划》《促进氢经济和氢安全管理法》和《氢经济发展基本规划》	致力于打造世界最大交通和电力氢燃料电池市场
澳大利亚	《国家氢能战略》	创建氢能枢纽
新西兰	《塔拉纳基氢气路线图》	路线图勾勒“成为氢生产的领导者”愿景

2 电解水制氢技术

2.1 制氢技术现状

根据氢气的来源分为灰氢、蓝氢和绿氢，而绿氢是氢能发展的终极目标。在目前商业化的制氢产业中，化石能源制氢与工业副产物提取氢依然是主流方式，其技术已成熟，但该过程会增加碳排放。美国能源部（DOE）支持的H2TooIs[24]上公布了当前主流制氢技术信息见表3。由表3可见：制氢技术的能量转换效率在40%~75%；除了电解水制氢，其余制氢过程都会伴随碳元素，会造成二氧化碳排放。进一步，若采用二氧化碳捕集减少碳排放，则会降低系统转换效率（需要额外的电能），煤气化制氢和天然气重整制氢的转换效率分别下降到53.8%和70.9%。因此，未来主流制氢技术发展必定是电解水制氢。

表 3 制氢技术发展现状
Tab.3 Current status of hydrogen production technology

制氢方式		生物质气化	煤气化	天然气重整	乙醇重整	电解水
获取 1 kg 氢气所需能量	农作物/kg	13.490				
	天然气/m ³	0.170		4.501		
	乙醇/L				8.294	
	煤炭/kg		8.508			
	电能/(kW·h)	0.980		0.569	0.490	50.000
转换效率/%		44.0	55.9	72.0	67.5	66.8

2.2 电解水制氢技术

电解水制氢是利用电流分解水分子来制造氢气，产品纯度可达99.99%，且生产过程无污染物产生。电解水制氢是获得氢气的重要途径，电网仍为电解水制氢的主要电力来源。电解水制氢技术主要分为：碱性电解水制氢（OH⁻）、氢质子电解水制氢（H⁺）和固体氧化物电解水制氢（O²⁻），其装置示意如图2所示。按照电解质状态，电解水制氢技术可以进一步分为6类，有关电解水技术制氢的详细信息见表4。

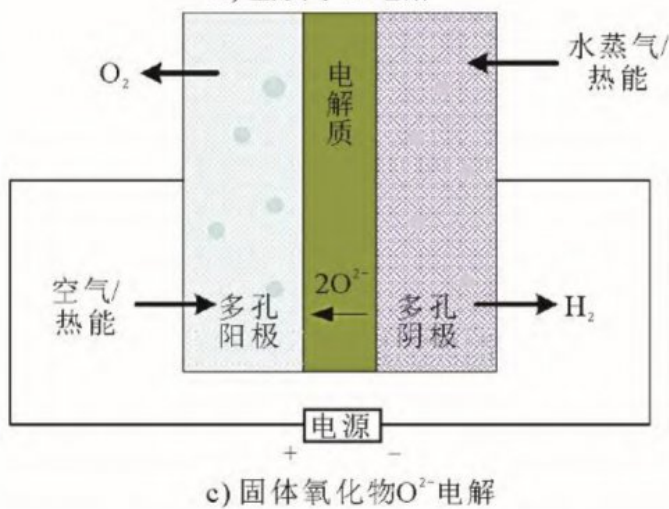
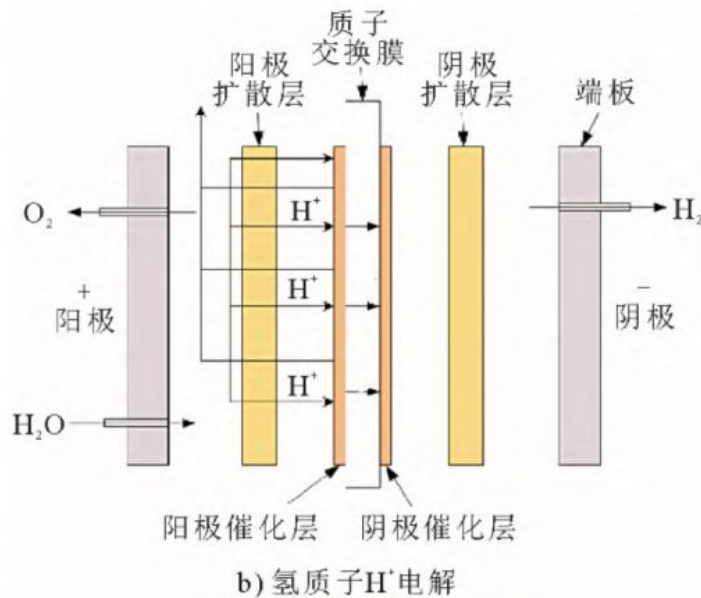
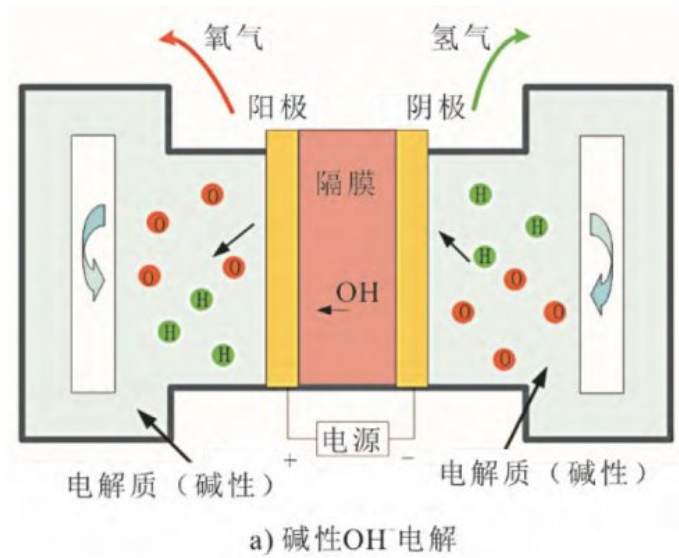


图2 电解水制氢装置示意

Fig.2 Schematic diagram of electrolytic water hydrogen production unit

表 4 电解水制氢类型
Tab.4 Types of water-electrolysis hydrogen

项目	碱性 OH ⁻ 电解		氢质子 H ⁺ 电解		固体氧化物 O ²⁻ 电解	
电解质	液体	聚合物	聚合物	陶瓷	陶瓷	陶瓷
工作温度/℃	20~80	20~200	20~200	500~1 000	500~1 000	750~900
阳极材料	Ni, Co, Fe, LaCoO ₃ , 钙钛矿 ^a	Ni 基材料	IrO ₂ , RuO ₂ , Ir _x Ru _{1-x} O ₂	具有传导质子的钙钛矿 ^a	LaxSr1-xMnO ₃ , LSM-YSZ	LaxSr1-xMnO ₃ , LSM-YSZ
阴极材料	Ni 合金	Ni, Ni-Fe, NiFe ₂ O ₄	Pt/C, MoS ₂	Ni 陶瓷	Ni-YSZ, LaCrO ₃	Ni-YSZ, 钙钛矿 ^a
工作效率/%	59~70		65~82	最高可接近 100%	最高可接近 100%	
优势	低成本，运行稳定，技术成熟	具有碱性电解和 PEM 电解的优势	紧凑设计，动态性好，制取 H ₂ 纯度高	低成本，低能量需求，电化学反应速率高		合成气（H ₂ , CO）生产
缺点	电极腐蚀，气体渗透，动态性差	低的 OH ⁻ 传输	PEM 成本高，需要昂贵的耐腐蚀金属	陶瓷机械性能不稳定，密封困难易引起氢泄漏		

碱性电解水制氢技术是最早开展的电解水制氢技术之一，其发展最成熟，设备成本较低，运行稳定性高，但电解槽设备体积较大，工作过程动态性较差。碱性电解水制氢的电解池主要由电解液、电极、隔膜、电解池构成。在外加电源作用下，电解液中的OH⁻附着在阳极催化层，OH⁻经催化后失去电子成为水和O₂，自由电子通过外接电路到阴极；阴极催化层的水分子与电子结合，生成氢气和OH⁻；电解液中的OH⁻和H₂O会透过隔膜，在2个电解槽间进行迁移和扩散，保持槽内离子溶度的平衡，以保持两极电解区中性。碱性电解质电解技术相对成熟，产业化较为成熟，但同时由于其电流密度上限低（<400mA/cm²），工作压力难以提升，气体交叉引起安全等问题，导致其在可再生能源领域难以推广。

氢质子电解水制氢技术因通常采用质子交换膜（proton exchange membrane，PEM），也被称为PEM电解水制氢技术。PEM膜常选用较厚的nafion膜，在电解过程为氢质子提供传输通道，同时可避免产物交叉渗透引起二次反应[25]。氢质子电解水制氢技术的电解池主要部件由膜电极、扩散层、电解液、电极板等组成。与碱性电解水制氢相比，氢质子电解水制氢的工作电流较高（>1000mA/cm²），在阴极可以获得高压力高纯度的氢气。此外，氢质子电解池也具备工作电流调节范围大、能耗低、设备紧凑的优势，被公认为制氢领域最具前景的技术之一[26-29]。但由于膜电极价格昂贵，设备工作寿命短，难以推广使用。

固体氧化物电解水制氢技术工作原理是通过电流电解，结合热能，产生氢能。在固体氧化物电解池中，水蒸气和循环氢气输送到阴极，电流将吸附在阴极催化层的水分子电解为H⁺和O₂⁻，H⁺得到外电路传输的自由电子，还原生成氢气，O₂⁻穿过电解质到达阳极催化层，失去电子转变为氧气，自由电子进入外电源[30]。该技术通常工作温度环境在700~1000℃，因此需要电解质具有较高的离子电导率和可忽略的电子电导，而多孔电极有利于气体的扩散和传输[31-33]。固体氧化物电解池的高温工作条件、损耗多和成本高等特点，阻碍了其规模化发展。

2.3 电解水制氢技术专利分析

图3展示了2005—2020年与电解水制氢相关的国际专利申请数量，其数据来源欧洲专利局（EPO）和国际可再生能源署（IRENA）在2022年5月联合发布的相关报告[34]。由图3可见，从2005年到2020年，每年与电解水制氢相关的专利申请数量急剧增加，2020年申请专利数量已是2005年的6.8倍，达到375项。

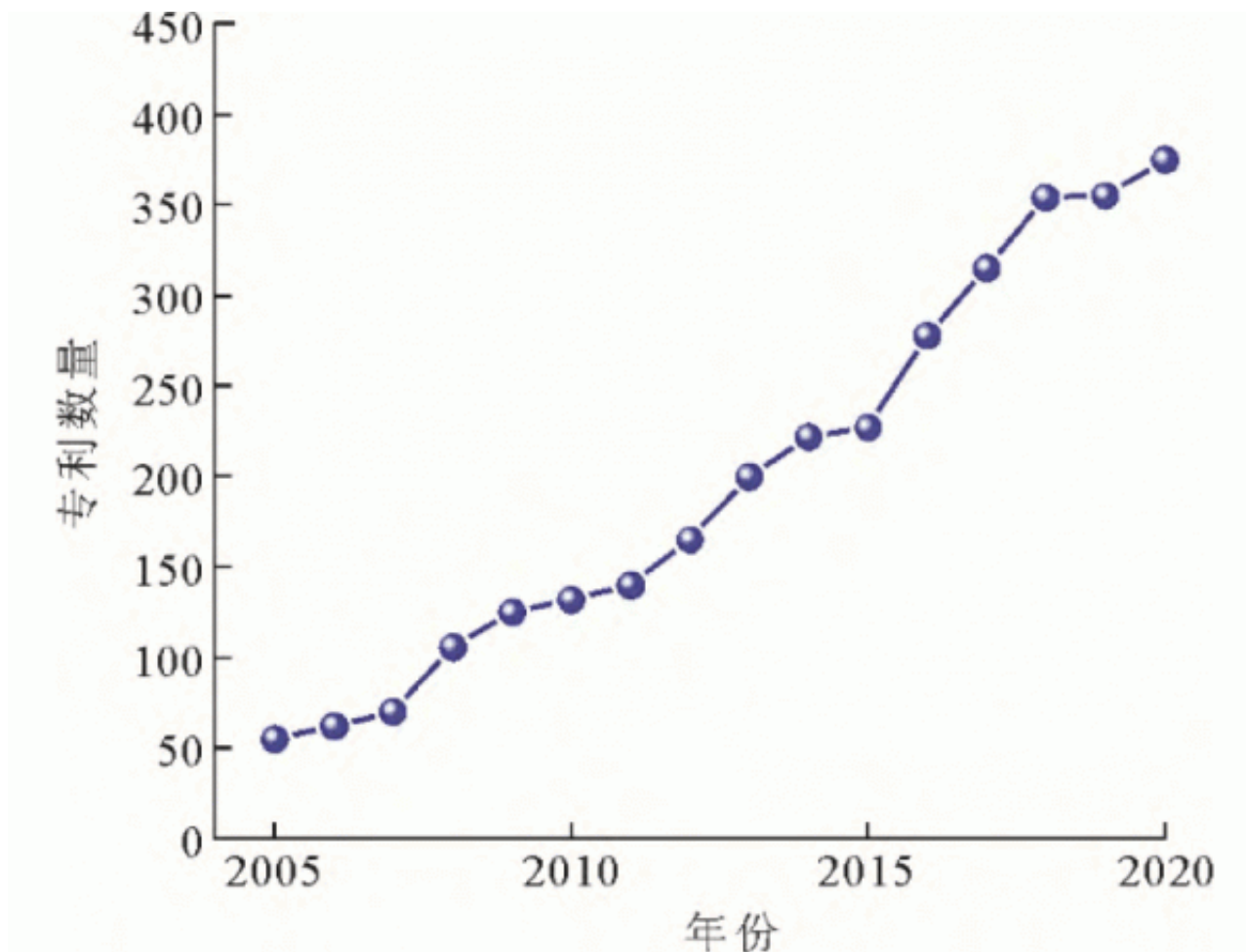


图 3 电解水制氢专利数量

Fig.3 Patents numbers for water-electrolytic hydrogen

图4展示了不同国家地区在电解水制氢领域的国际专利拥有数量。由图4可见，日本拥有该领域最多的专利，他们在该领域的技术储备也最为充足，其次是美国和德国，也具有较强的电解水制氢技术与设备制造研发实力。EPO和IRENA的报告显示，这3个国家的电解水制氢专利申请数量占国际专利申请总数的52%。我国近些年加大了对电解水制氢技术的突破，已申请国际专利253项。电解水制氢领域专利申请活跃，说明对电解水制氢技术的关注，会促进电解水制氢技术提高，以及电解水制氢装置成本降低，有利于其商业化发展。

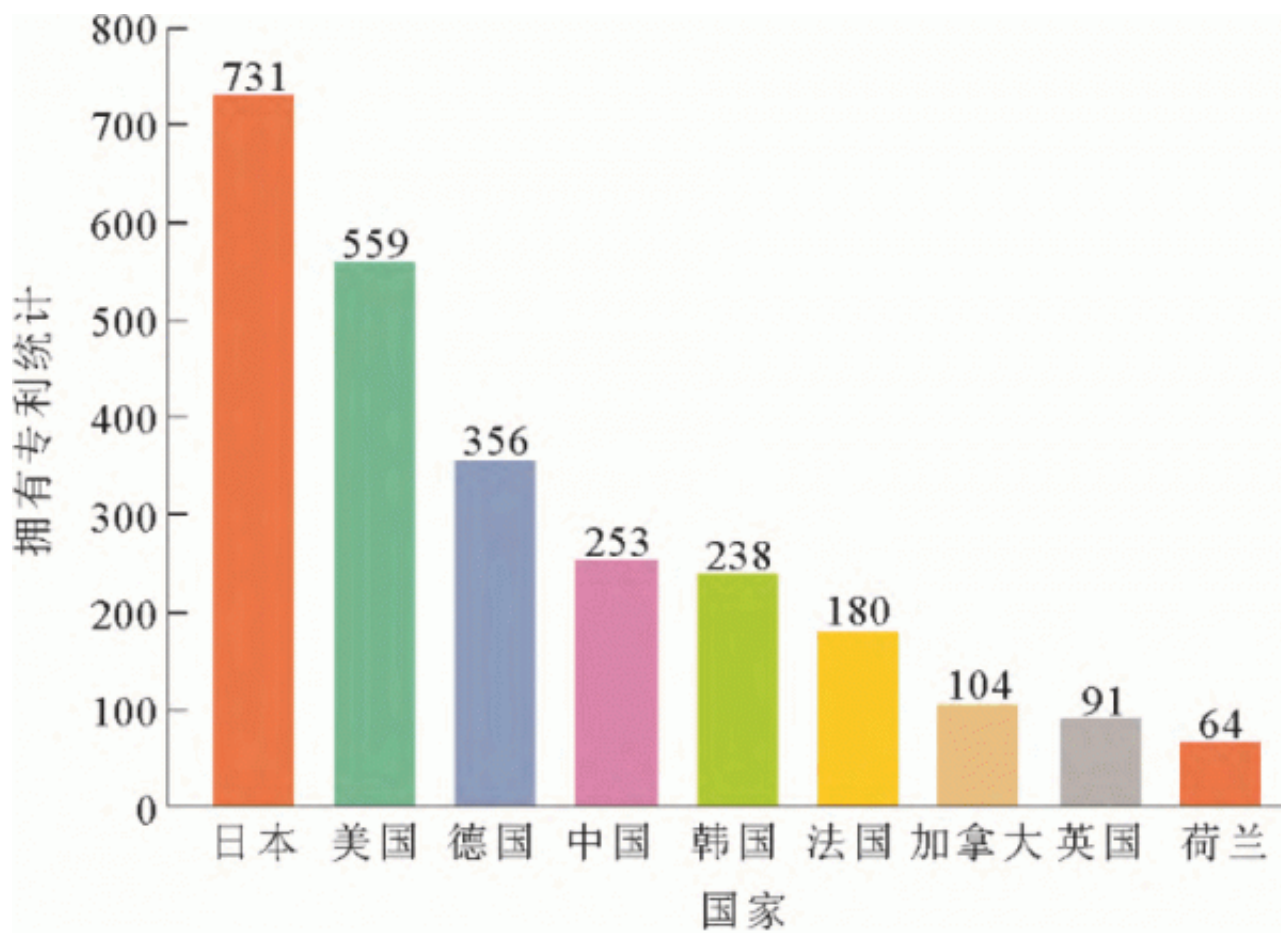


图 4 不同国家电解水制氢拥有专利

Fig.4 Patents numbers for water-electrolysis hydrogen at different countries

3 电解水制氢技术推广示范进展

氢能已成为国内新能源发展与转型的必要一环，“十四五”规划以来，氢能技术链逐步齐全完善，氢能产业链也在逐渐形成。氢能产业化发展在国内，乃至全世界已成为焦点，相关技术已经处于商业应用模式。

3.1 碱性电解水制氢应用

碱性电解水技术在市场化方面最为成熟，占据主导地位，国内已有多家具有碱性电解水技术的公司。同时碱性电解水技术已经应用于国内外一些大型示范项目，具体项目见表5。示范工程采用的电解槽均具有15年的设计寿命，而且采用了非贵金属做催化剂，具有市场竞争力。通常碱性电解水技术用于电厂冷却用氢的制备项目，较少使用于可再生能源发电项目。主要原因在于：1）碱性电解水可以使用非贵金属电催化剂，因此电解槽的催化剂成本较低，同时副产品中的碱液、水蒸气等需要辅助设备去除；2）碱性电解水不可随启随停，无法调节制氢速度，因此与可再生能源发电的适配性较差。

3.2 PEM 电解水制氢应用

固体聚合物电解水技术运用灵活，适合具有波动性的可再生能源。目前，掌握固体聚合物电解水技术的企业大多分布在国外，主要有Proton Onsite公司、Giner公司和西门子股份公司，其中Proton Onsite公司所推出的质子交换膜电解水制氢装置占全球的70%。

代表性工程国家电网在浙江台州大陈岛氢利用示范工程PEM电解水制氢系统，是首个海岛“绿氢”综合能源示范项

目。该项目通过构建“制氢—储氢—燃料电池”热电联供系统,利用PEM电解水装置消纳海岛富余风电,年产氢7300 0m³(标况),实现海岛清洁能源100%消纳与全过程“零碳”供能。大陈岛PEM电解水制氢系统的运营,有助于我国在风、光、电、氢多能源形式协同综合利用领域的技术拓展和工程经验积累,为后续更多多能源耦合利用系统的开展提供示范与指导。

表 5 碱性电解水制氢项目
Tab.5 The alkaline electrolyzed water hydrogen production projects

项目名称	项目容量	建设时间	产氢率(标况)	影响力
沽源风电制氢综合利用示范项目	10 MW	2015 年	1 752×104 m ³ /a	迄今我国最大的风电制氢示范项目
日本福岛氢能研究项目(FH2R)	10 MW	2020 年	1 200 m ³ /h	世界上最大的光伏制氢装置
宝丰能源“国家级太阳能电解水制氢综合示范项目”	200 MW 光伏电站	2021 年	20 000 m ³ /h	全球最大太阳能电解水制氢项目
中国石化新疆库车绿氢示范项目	万吨级	2022 年	52 000 m ³ /h	我国首个万吨级光伏绿氢示范项目

3.3 固体氧化物电解水制氢应用

固体氧化物电解水技术由于电解池电堆寿命短的问题、电解制氢过程需要辅助部件耦合以及安全问题,远远达不到商业化要求。目前示范项目推广缓慢。

目前,固体氧化物电解水代表性项目有荷兰于2020年建成世界首台多兆瓦固体氧化物电解水槽,该电解槽额定功率为2.6MW,每小时产氢量可达60kg,电效率85%。

4 结语

氢能将在国家能源体系中占据重要位置。“十四五”时期,我国的氢能供应体系以可再生能源制氢和工业副产氢就近利用为主。电解水制氢技术具有绿色环保、生产灵活和产品纯度高等特点,因此,是光伏、风电等可再生能源制氢的主攻方向。本文总结归纳了我国对制氢的政策、电解水制氢技术和影响电解水制氢因素,电解水制氢相对于传统电解制氢工艺在安全、环保及运行方面都具有较大优势。

[参 考 文 献]

- [1] 张程. 碳中和下的“氢经济”[J]. 检察风云, 2022(2): 70-71.
ZHANG Cheng “Hydrogen economy” under carbon neutralization[J]. Procuratorial Fengyun, 2022(2): 70-71.
- [2] 何青, 孟照鑫, 沈轶, 等. “双碳”目标下我国氢能政策分析与思考[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 27-36.
HE Qing, MENG Zhaoxin, SHEN Yi, et al. Analysis and reflection on China’s hydrogen energy policy under the goal of “double carbon”[J] Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 27-36.
- [3] 刘玮, 万燕鸣, 熊亚林, 等. 碳中和目标下电解水制氢关键技术及价格平准化分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2888-2896.

- LIU Wei, WAN Yanming, XIONG Yalin, et al. Key technologies and price leveling analysis of hydrogen production from electrolytic water under the goal of carbon neutralization[J]. Journal of Electrotechnics, 2022, 37(11): 2888-2896.
- [4] 朱彤. 我国氢能产业发展的特点、问题与定位[J]. 中国发展观察, 2021(增刊 3): 112-117.
ZHU Tong. Characteristics, problems and orientation of the development of hydrogen energy industry in China[J]. China Development Observation, 2021(Suppl.3): 112-117.
- [5] 苗安康, 袁越, 吴涵, 等. “双碳”目标下绿色氢能技术发展现状与趋势研究[J]. 分布式能源, 2021, 6(4): 15-24.
MIAO Ankang, YUAN Yue, WU Han, et al. Research on the development status and trend of green hydrogen energy technology under the goal of “double carbon”[J]. Distributed Energy, 2021, 6(4): 15-24.
- [6] 徐钢, 薛小军, 张钟, 等. 一种基于电解水制氢及甲醇合成的碳中和能源技术路线[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-12[2022-07-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220413.1204.016.html>.
XU Gang, XUE Xiaojun, ZHANG Zhong, et al. A carbon neutral energy technology route based on hydrogen production from electrolytic water and methanol synthesis[J/OL]. Chinese Journal of Electrical Engineering: 1-12[2022-07-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220413.1204.016.html>.
- [7] 费鹏飞, 张超. 电解水制氢主题国际态势分析[J]. 高科技与产业化, 2022, 28(1): 46-57.
FEI Pengfei, ZHANG Chao. International trend analysis of hydrogen production from electrolytic water[J]. High Tech and Industrialization, 2022, 28(1): 46-57.
- [8] 王培灿, 万磊, 徐子昂, 等. 碱性膜电解水制氢技术现状与展望[J]. 化工学报, 2021, 72(12): 6161-6175.
WANG Peican, WAN Lei, XU Ziang, et al. Present situation and prospect of hydrogen production technology by alkaline membrane electrolysis of water[J]. Journal of Chemical Engineering, 2021, 72(12): 6161-6175.
- [9] 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 Hongmei, SHAO Zhigang, HOU Ming, et al. Research progress and development suggestions of hydrogen production technology from electrolytic water[J]. China

- Engineering Science, 2021, 23(2): 146-152.
- [10] 蔡昊源. 电解水制氢方式的原理及研究进展[J]. 环境与发展, 2020, 32(5): 119-121.
CAI Haoyuan. Principle and research progress of hydrogen production from electrolytic water[J]. Environment and Development, 2020, 32(5): 119-121.
 - [11] 李建林, 梁忠豪, 李光辉, 等. 太阳能制氢关键技术研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(3): 2-11.
LI Jianlin, LIANG Zhonghao, LI Guanghui, et al. Research on key technologies of solar hydrogen production[J]. Journal of Solar Energy, 2022, 43(3): 2-11.
 - [12] “十四五”规划中的氢能(30个省级行政区)[J]. 河南科技, 2021(24): 1-4.
Hydrogen energy in the 14th Five Year Plan (30 provincial administrative regions)[J]. Henan Science and Technology, 2021(24): 1-4.
 - [13] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL]. (2021-10-24)[2022-07-20]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
The State Council of People's Republic of China. Notice of the State Council on printing and distributing the action plan for carbon peaking before 2030[EB/OL]. (2021-10-24)[2022-07-20]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
 - [14] 国家发展和改革委员会. “十四五”全国清洁生产推行方案[EB/OL]. (2021-10-29)[2022-07-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202111/t20211109_1303467.htm?code=&state=123.
National Development and Reform Commission. “14th Five-Year Plan” National cleaner production implementation plan[EB/OL]. (2021-10-29)[2022-07-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202111/t20211109_1303467.htm?code=&state=123.
 - [15] 国家能源局. 关于组织开展“十四五”第一批国家能源研发创新平台认定工作[EB/OL]. (2021-06-25)[2022-07-20]. http://www.nea.gov.cn/2021-06/25/c_1310027930.htm.
National Energy Administration. About the organization and development of the first batch of national energy R&D innovation platforms in the “14th Five-Year Plan”[EB/OL]. (2021-06-25)[2022-07-20]. http://www.nea.gov.cn/2021-06/25/c_1310027930.htm.
 - [16] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划[EB/OL]. (2022-01-29)[2022-07-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322_1320016.html?state=123&code=&state=123.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. “14th Five-Year” Modern energy system planning[EB/OL]. (2022-01-29)[2022-07-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322_1320016.html?state=123&code=&state=123.
 - [17] 国务院国有资产监督管理委员会. 关于推进中央企业高质量发展做好碳达峰碳中和工作的指导意见[EB/OL]. (2021-11-27)[2022-07-20]. <http://www.rmzxb.com.cn/c/2022-03-04/3064406.shtml>.
The State-owned Assets Supervision and Administration Commission of The State Council. Guiding opinions on promoting the high-quality development of central enterprises and doing a good job in carbon peak neutralization[EB/OL]. (2021-11-27)[2022-07-20]. <http://www.rmzxb.com.cn/c/2022-03-04/3064406.shtml>.
 - [18] 工业和信息化部. “十四五”工业绿色发展规划: 工信部规(2021)178号[A/OL]. (2021-11-15)[2022-07-20]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/03/content_5655701.htm.
Ministry of Industry and Information Technology. “14th Five-Year” Industrial green development plan: GXBG (2021) No.178[A/OL]. (2021-11-15)[2022-07-20]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/03/content_5655701.htm.
 - [19] 北京市经济和信息化局. 关于印发《北京市氢能产业发展实施方案(2021—2025年)》的通知[EB/OL]. (2021-08-16)[2022-07-20]. http://jxj.beijing.gov.cn/jxd/tzgg/202108/t20210816_2469059.html.
Notice of Beijing Municipal Bureau of Economy and Information Technology on Printing and Distributing the Implementation Plan for the Development of Hydrogen Energy Industry in Beijing (2021—2025) [EB/OL]. (2021-08-16)[2022-07-20]. http://jxj.beijing.gov.cn/jxd/tzgg/202108/t20210816_2469059.html.
 - [20] 北京市人民政府关于印发《北京市“十四五”时期高精尖产业发展规划》的通知[J]. 北京市人民政府公报, 2021(33): 4-69.
Notice of the Beijing Municipal People's Government on printing and distributing the *Beijing municipal high-tech industrial development plan for the 14th Five-Year Plan Period*[J]. Beijing Municipal People's Government Gazette, 2021(33): 4-69.
 - [21] 上海市经济信息化委, 上海市发展改革委, 上海市交通委, 上海市科委, 上海市住房城乡建设管理委, 上海市财政局. 关于印发《上海市燃料电池汽车产业发展实施计划》的通知[EB/OL]. (2020-11-13)[2022-07-20]. http://www.caam.org.cn/chn/9/cate_105/con_5232388.html.
Shanghai Municipal Economic and Information Commission, Shanghai Municipal Development and Reform Commission, Shanghai Municipal Transportation Commission, Shanghai Municipal Science and Technology Commission, Shanghai Municipal Housing and Urban and Rural Construction Management Commission, Shanghai Municipal Finance Bureau. Notice on printing and distributing of the *implementation plan for the innovative development of the fuel cell vehicle industry in Shanghai*[EB/OL]. (2020-11-13)[2022-07-20]. http://www.caam.org.cn/chn/9/cate_105/con_5232388.html.
 - [22] 广州市发展和改革委员会. 关于印发《广州市氢能产业发展规划(2019-2030年)》的通知[EB/OL]. (2020-07-30)[2022-07-20]. <https://wenku.baidu.com/view/290a73ea0f22590102020740be1e650e52eac6f5.html>.
Guangzhou Development and Reform Commission. Notice on printing and distributing of the *development plan of Guangzhou hydrogen energy industry (2019-2030)*[EB/OL]. (2020-07-30)[2022-07-20]. <https://wenku.baidu.com/view/290a73ea0f22590102020740be1e650e52eac6f5.html>.
 - [23] 中氢瑞达. 各国争抢氢能产业制高点[EB/OL]. (2022-05-23)[2022-07-20]. <https://mp.weixin.qq.com/s/V72gpGCfdnR90BK22yWCwg>.
Zhongqingruida. Countries scramble for the commanding heights of the hydrogen energy industry[EB/OL]. (2022-05-23)[2022-07-20]. <https://mp.weixin.qq.com/s/V72gpGCfdnR90BK22yWCwg>.
 - [24] HydrogenTools. Hydrogen analysis resource center: hydrogen production energy conversion efficiencies: current technologies[EB/OL]. [2022-07-20]. <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/hydrogen-production-energy-conversion-efficiencies>.

- [25] 张开悦, 刘伟华, 陈晖, 等. 碱性电解水析氢电极的研究进展[J]. 化工进展, 2015, 34(10): 3680-3687.
ZHANG Kaiyue, LIU Weihua, CHEN Hui, et al. Research progress of hydrogen evolution electrode for alkaline electrolytic water[J]. Progress in Chemical Industry, 2015, 34(10): 3680-3687.
- [26] 李微微, 谢晓峰, 王树博. 固体聚合物电解水制氢性能衰减分析[J]. 化工进展, 2020, 39(增刊 2): 168-174.
LI Weiwei, XIE Xiaofeng, WANG Shubo. Attenuation analysis of hydrogen production from solid polymer electrolyzed water[J]. Progress in chemical industry, 2020, 39(Suppl.2): 168-174.
- [27] 刘亚迪, 刘锋, 王诚, 等. 固体聚合物电解池析氧催化剂[J]. 化学进展, 2018, 30(9): 1434-1444.
LIU Yadi, LIU Feng, WANG Cheng, et al. Oxygen evolution catalyst for solid polymer electrolytic cell[J]. Chemical Progress, 2018, 30(9): 1434-1444.
- [28] 瞿丽莉, 郭俊文, 史亚丽, 等. 质子交换膜电解水制氢技术在电厂的应用[J]. 热能动力工程, 2019, 34(2): 150-156.
QU Lili, GUO Junwen, SHI Yali, et al. Application of proton exchange membrane electrolysis water hydrogen production technology in power plant[J]. Thermal Power Engineering, 2019, 34(2): 150-156.
- [29] 孙邦兴, 杨华, 骈松. PEM 型电解水制氢设备在电厂的应用[J]. 山东化工, 2020, 49(8): 182-184.
SUN Bangxing, YANG Hua, PIAN Song. Application of PEM type electrolytic water hydrogen production equipment in power plant[J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(8): 182-184.
- [30] 张晨佳, 蔡军, 张玉魁, 等. 基于热力学平衡的高温固体氧化物电解水制氢模拟[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 210-217.
ZHANG Chenjia, CAI Jun, ZHANG Yukui, et al. Simulation of hydrogen production by electrolysis of water with high temperature solid oxide based on thermodynamic equilibrium[J]. Journal of Solar Energy, 2021, 42(9): 210-217.
- [31] 王丹丹, 李亚楼, 李芳, 等. 碳中和背景下高温固体氧化物电解制氢的过程建模与热力学分析[J]. 发电技术, 2021, 42(5): 554-560.
WANG Dandan, LI Yalou, LI Fang, et al. Modeling and thermodynamic analysis of hydrogen production by high temperature solid oxide electrolysis under the background of carbon neutralization[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(5): 554-560.
- [32] 张文强, 于波. 高温固体氧化物电解制氢技术发展现状与展望[J]. 电化学, 2020, 26(2): 212-229.
ZHANG Wenqiang, YU Bo. Development status and prospect of hydrogen production technology by high temperature solid oxide electrolysis[J]. Electrochemistry, 2020, 26(2): 212-229.
- [33] CHI J, YU H M. Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2018, 39(3): 390-394.
- [34] IRENA. Patent insight report: Innovation trends in electrolyzers for hydrogen production[EB/OL]. [2022-07-20]. https://public.tableau.com/views/IRENA_Electrolyzers_Patents_Insights/Electrolyzers_patent_insight?:showVizHome=no&embed=yes.
- 原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/209831.html>