

## 电解水制氢技术研究进展与发展建议

任楠楠

华电科工股份有限公司, 北京 100160

**[摘要]**在国内外能源结构变革及双碳战略中,水电解生产氢气是目前最具有潜力的“绿色氢气”的制取手段之一,受到广泛的关注。文章对碱性电解水(ALK)、质子交换膜电解水(PEM)、阴离子交换膜电解水(AEM)以及固体氧化物电解水(SOEC)四种主要类型的电解水制氢技术进行综述,在技术原理、性能参数、产业水平等方面做出对比。在总结以上研究的基础上,重点探讨了高效率与低能耗、材料费用及资源消耗、耐久性和稳定性、系统集成与大规模生产四大难题。最后,在关键技术开发、系统集成及智能调控、政策措施和技术标准、产业协同发展机制四个方向上,给出相关建议希望能够对我国电解水制氢行业发展有所帮助。

**[关键词]**电解水制氢; 质子交换膜电解; 阴离子交换膜电解; 固体氧化物电解

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19384

中图分类号: TQ116.2

文献标识码: A

## Research Progress and Development Suggestions on Hydrogen Production Technology through Electrolysis of Water

REN Nannan

Huadian Engineering Co., Ltd., Beijing, 100160, China

**Abstract:** In the transformation of energy structure and dual carbon strategy at home and abroad, water electrolysis to produce hydrogen is currently one of the most promising methods for producing "green hydrogen" and has received widespread attention. The article provides an overview of four main types of hydrogen production technologies using alkaline electrolyzed water (ALK), proton exchange membrane electrolyzed water (PEM), anion exchange membrane electrolyzed water (AEM), and solid oxide electrolyzed water (SOEC). Comparisons are made in terms of technical principles, performance parameters, and industry level. Based on the summary of the above research, the four major challenges of high efficiency and low energy consumption, material cost and resource consumption, durability and stability, system integration and large-scale production were discussed in detail. Finally, relevant suggestions are given in four directions: key technology development, system integration and intelligent regulation, policy measures and technical standards, and industrial collaborative development mechanism, hoping to be helpful for the development of China's electrolytic water hydrogen production industry.

**Keywords:** electrolysis of water to produce hydrogen; proton exchange membrane electrolysis; anion exchange membrane electrolysis; solid oxide electrolysis

在全球各国为实现气候目标、促进能源结构调整的过程中,氢气是高效低碳的能源载体,在全世界范围内对它的需求将会增长到2050年的5.3亿t。大约有三分之二的的需求需要依靠通过电解水来生产氢气来满足。但是目前化石燃料制氢产生的每公斤氢气会产生约10公斤二氧化碳的排放量,限制着其在环境保护方面的贡献效果。在此情况下,电解水制氢根据电解质种类及运行温度的不同大致可分为以下四种类型:碱性水电解(ALK)、质子交换膜水电解(PEM)、阴离子交换膜水电解(AEM)和固体氧

化物水电解(SOEC)<sup>[1]</sup>。近几年我国电解水制氢产业取得了很大的进步,在全世界清洁氢项目的投资总额中占比高达30%,酸性电解槽已经实现了90%以上的国产化替代。但是技术走向大规模商业化的步伐依然受到了成本、稳定性的制约等问题阻碍着。

### 1 电解水制氢技术原理与分类

电解水制氢基本反应包括阴极析氢反应以及阳极析氧反应。理论上分解电压是1.23V,但由于有超电压的存在使得实际分解电压远远高于理论值。按电解质种类不同、

离子传输方式及运行温度高低不同主要分为四种类型:①碱性电解水(ALK)以 KOH 或者 NaOH 溶液作为电解液,用多孔隔膜把电极隔开,运行温度控制在 60~90°C 之间。ALK 工艺成熟、价格低廉、使用周期较长,但是电流密度较小、响应速度慢。②质子交换膜电解水(PEM)使用全氟磺酸型质子交换膜,纯水为原料。高电流密度,1.5~2.5A/cm<sup>2</sup>、快速动态响应,<1s 和高压输出能力,但依靠贵金属催化剂,铂、铱等以及钛双极板,成本高<sup>[2]</sup>。③阴离子交换膜电解水(AEM)传递氢氧根离子,兼备 ALK 低成本与 PEM 高动态响应特点,能用非贵金属催化剂,但是膜的电导率及化学稳定性成为主要障碍。④固体氧化物电解水(SOEC)在高温 700~900°C 下工作,传递氧离子,热效率高,但是对材料稳定性要求很高,起动时间很长。

## 2 主要电解水制氢技术研究进展

### 2.1 碱性电解水(ALK)技术

ALK 技术成熟可靠、价格低廉、使用寿命长,在国际上电解水制氢领域占据了绝对的优势,我国碱性水电解槽国产率达 90% 以上,单槽产量可达到 1000Nm<sup>3</sup>/h 以上,催化剂的研究方向主要有过渡金属系催化剂,包括 Ni、Co、Fe 系材料以及碳基非金属催化剂等,同时催化剂性能的提高也是在对催化剂形状、电子轨道、晶格结构、载体等多方面进行控制的结果,Adnan Ozden 等人认为只有降低电压、延长催化剂/膜寿命>13140h、降低电解槽成本<200 美元/千瓦才能使电解水制氢变得经济可行。旭化成 10MW 级设备已有长时间的示范,证明了 ALK 的大规模可能性。

### 2.2 质子交换膜电解水(PEM)技术

PEM 技术以其高功率密度和快响应能力适于匹配间歇式的再生能源供给。质子交换膜水电解技术用于利用可再生资源制造氢气具有独特的优势,即快速响应<1s、高电流密度 1.5~2.5A/cm<sup>2</sup>、高压输出>350bar 可以减少压缩能耗。但其贵重催化剂铱基催化剂以及铂基阴极、钛双极板使得成本过高并且在苛刻环境条件下存在使用寿命短的问题。对此研究人员探索了低贵金属含量的催化剂、耐腐蚀多孔传输层、界面工程等方法。

### 2.3 阴离子交换膜电解水(AEM)技术

AEM 技术结合了 ALK 低廉的价格以及 PEM 快速的动力响应特性,被认为是未来新型绿色制氢的重要技术选择。而 AEM 水电解作为一种新型的绿色制氢方法也备受关注,其主要研发方向就是如何做到纯净水进料,但是由于膜—电极三相接触不稳定、电流密度小及使用寿命短等

问题的存在使得这一方向的发展受到了限制,中国科学技术大学徐铜文和杨正金课题组采用奎宁环鎓阳离子作为微孔分支阴离子交换膜,在 80°C, 10mol/L 的 NaOH 溶液中 3100h 后仍能维持 99.95% 的电导率。中科院大连化物所邵志刚、赵云课题组采用表面技术,在 80°C、1.8V 条件下实现了 1200mAcm<sup>-2</sup> 电流密度并且稳定运行了 2464h。我国华能集团首套 AEM 制氢装置已经完成了 72h 连续满负荷实验。根据中国氢能联盟的研究结果显示,我国 AEM 整体上处于跟随的状态,大规模的应用还需要的时间大概是 10~15 年内。

### 2.4 固体氧化物电解水(SOEC)技术

SOEC 工艺由于在高温下工作所带来的较高的热力学性能受到重视。SOEC 电解固体氧化物电解(SOEC)作为一种先进的制氢工艺已经崭露头角。其最大的优点就是在高温下工作的优势可以提高热力学效率并且部分的能量可以通过热的形式供给反应所需要的能量但是提高堆栈材料的寿命是一个巨大的难题。SOEC 可以同甲醇制造及高温废热回收等过程进行综合应用<sup>[3]</sup>。而在太阳能方面,SOEC 由于它可以将热能和电能转变成化学能的独特功能引起了人们的极大兴趣,学者们正在试图探究 SOEC 与太阳能全方位利用相结合的方法。但是高温造成启停时间过长、热疲劳抵抗能力弱,在耦合间歇性的可再生能源上存在着天生壁垒,今后需要开发可逆固体氧化物电池(rSOC)来提高灵活性。

## 3 电解水制氢技术面临的关键挑战

### 3.1 效率与能耗问题

电解水制氢的能量利用率一直限制着它的经济性。现阶段,电解水制氢系统整体的能量转化率一般处于 60% 到 80% 左右水平,大部分电能以热量形式损失掉,现有主流制氢方法基本上是以化石能源为主导,电解水制氢的最大障碍则是由于巨大的能耗造成的成本问题,与清洁能源相联结被认为是缓解这一问题的主要方式。绿色氢气的成本中有 70%~80% 来自于电费,是最大的一块支出,所以降低制氢能耗才是提高绿色氢气经济效益的根本方法,在电价为 0.6 元的时候,电解水制氢的成本依然要超过 30 元每公斤,而煤炭制氢成本只有 10 元每公斤,由此可见,电解水制氢的成本劣势仍然非常明显。所以建立高效、节能的电解水制氢系统已经成为学界以及业界研究的重点方向。

### 3.2 材料成本与资源依赖

材料成本是制约成本的重要因素,在 PEM 中,铱、铂等贵金属的匮乏成为 PEM 大规模应用的一大阻碍,研究预计到 2030 年铱的需求量超过当前的年产 7t,还需要

将催化剂负载降低到 0.55kg/MW 到 0.07~0.02kg/MW 之间来满足需求。全世界用于 PEM 电解槽阳极催化剂的铱金属年产量只有 9t, 而铂金年产量也只有 200t 左右。而在 ALK 领域, 镍基催化剂储量较多但是耐久性不足, 在 SOEC 领域, 陶瓷电解质以及高温电极的价格昂贵, 缩减甚至去除贵金属催化剂使用量是迫在眉睫的工作。

### 3.3 耐久性与可靠性

长周期运行耐久性直接关系到产品全寿命周期的经济效益, 在 ALK 技术上碱液电解质对金属件的侵蚀以及启动停止过程中的催化剂损耗是两大挑战。电解水制氢与可再生能源结合时, 间歇式的供电所带来的电极损耗需要精确计算并加以控制<sup>[4]</sup>; 另外, 在 PEM 技术中, 高电压、高浓度酸性溶液以及高氧含量对于阳极催化剂的侵蚀以及质子交换膜的化学损失都是造成阳极催化剂降解的主要原因。西安交大赵旭等人 AEM 电解水制氢催化剂的研究方面取得了较大的突破, 找到了一种新的解决方案来缓解阳极催化剂在苛刻的条件之下发生的失稳现象<sup>[5]</sup>。将催化剂/膜寿命延长到 13,140h 以上是碱性电解水制氢产业化经济可行的基础条件。

### 3.4 系统集成与规模化瓶颈

大规模推广应用受限于系统集成以及可再生能源配合难度较大。风力发电和光伏发电具有波动性的特点使得电解槽面临着热量调节、压力调节以及气体净化等诸多难题, 而在中国能建松原项目中采用的自主研发的“风光储氢氨醇工业智能体”的方案很好地解决了电解水制氢技术与新能源供电的兼容性问题。我国已经有制定出台的《电解水制氢系统功率波动适应性测试方法》国家标准。但是在百千瓦级向百兆瓦级的跨越过程中涉及到电解槽堆组负荷调控、系统热量匹配及氢气回收等一系列的技术难题亟需整体破解。

## 4 发展建议

### 4.1 加强关键材料与核心部件研发

解决电解水制氢技术瓶颈的关键在于攻克核心材料及零部件的技术障碍。可以从以下几个方面着手: 第一种是以低铱甚至超低铱乃至无铱的非贵金属阳极析氧电催化剂为基础, 采用纳米组装技术及表面结构调变来实现活性和稳定性的平衡; 第二种是针对高功率密度需求开发高性能、耐久性强的离子交换膜, 对于全氟磺酸膜增强其力学性能与耐热性的同时探索以非氟芳烃类材料作为阴离子交换膜基底来开发具有更高工作温度范围的新一代膜材料, 并着重于解决高碱溶液环境中加速老化的问题; 第

三种为改善多孔传导层、双极板等组件所用材料及设计, 在保证较低欧姆损失及减小传质效应的同时获得较为理想的电流分布特性等。四、加快开展高温 SOEC 电解质和电极材料低成本制备技术的研发, 例如流涎成型、丝网印刷、等离子喷涂等工程技术的应用。

### 4.2 推动系统集成与智能化控制

电解水制氢系统的高效稳定运行离不开整个系统的集成优化以及智能化控制。可以从以下几方面着手: 一是在电解槽和可再生能源发电系统的一体化协同优化技术上进行研发, 建立“源-网-荷-储”的综合型智慧能源控制系统, 利用智能优化求解出风光电量预测、电解槽群集负荷分配、储能系统运行的最优方案<sup>[6]</sup>; 二是在模块化的电解槽上进行开发, 研制出标准型可以快速安装的电解槽模块来减少建设投资及运维难度; 三是在光风电解水制氢智能调节系统的技术标准上加强研究, 使其成为系统设计、开发、建设、运维的基础指导准则。四是在电解水制氢系统的运行中引入数字化孪生技术, 达到对系统进行全方位实时检测、故障预警以及预见性保养的目的。

### 4.3 完善政策支持与标准体系

政策指引及标准体系建设对促进电解槽制氢产业发展起着至关重要的作用, 在政策方面, 《中华人民共和国能源法》于 2025 年开始实施, 这是第一次以法律法规的形式明确氢能源的能源属性, 将其与煤炭、石油、天然气、核能、水能、风电、光伏等一起列为法定能源之一; 同时工信部、财政部、发改委共同印发的《关于支持氢燃料电池汽车动力系统关键技术研发示范应用的通知》中指出, 到 2030 年终端用户用氢平均价低于 25 元/公斤, 希望能在一定好的地方降到大概 15 块钱每公斤这样一个水平。建议在此基础上再制订电解水制氢专项支持政策, 比如绿氢生产的电价优惠、电解水制氢设备的固定资产加速折旧、绿氢认证及碳交易机制等。在标准体系上, 尽快建立一套完整的电解水制氢全产业链的标准体系, 包括原材料检测、电解槽检测、系统安全性要求、产品质量检测等, 为我国电解水制氢产业走向国际市场做好准备。

### 4.4 构建产业链协同创新生态

电解水制氢工艺的发展离不开跨领域合作即材料、化工、电化学、机械、电工电子等多个学科领域的相互渗透以及高校、研究机构、企业之间协同工作才能取得突破性进展。为此提出了以下三点意见, 以构建一个良好的协同创新生态系统: 一是建设国家氢能技术创新中心, 整合高校、院所及骨干企业的各自优势力量, 针对电解水制氢关

键技术进行联合攻关;二是建设电解水制氢工业试验平台,促进实验室内研究成果向工业规模化生产转化,加快先进电解水制氢技术产业化进程<sup>[7]</sup>;三是鼓励上下游企业间合作共建,打造完整的氢能产业链条,加强供应链自主保障能力。四、加大国际合作力度,在积极参与国际电解水制氢技术标准建立的同时,将中国的电解水制氢技术及产品推向世界。

## 5 结束语

电解水制氢充当了可再生能源和氢能应用之间的纽带作用,在达成“双碳”战略以及建立清洁低碳能源系统方面扮演着重要的角色。目前我国电解水制氢技术进入了快速发展的阶段,ALK 技术已经实现大规模应用,PEM 技术进行了试验性示范,而 AEM、SOEC 技术也分别完成了基础理论的研究及工程化验证。但是技术进步向产业化转变的过程中还有很长的一段距离要走,提高效率、降低成本、采用新材料、增加使用寿命等一系列难题都需要尽快找到答案。日后电解水制氢将会采取多种技术路线共同发展、互相取长补短,不同的使用场合会选用最合适的技术手段。核心材料的成本化下降以及国产化的发展将会进一步加快,金属催化剂及新材料的研发将会彻底突破电解水制氢的困境,在系统的集成度和智能化方面都会有很大进步,绿色氢气的生产由单纯的电解环节转变为风光储氢一体式的综合能源系统,政策和市场需求将会推动大规模绿氢的应用,“十五五”期间绿氢的价格可能会逼近甚

至低于石化原料制氢的成本。

## [参考文献]

- [1]吴宇,胡佩瑶.电解水制氢技术电极催化剂研究进展[J].辽宁化工,2025,54(11):1930-1933.
- [2]周峻,冀承泽,李儒欢,等.电解水制氢技术发展现状及其在新型电力系统中的应用进展[J].高电压技术,2025,51(5):2096-2113.
- [3]Li S ,Wrubel A J ,Blair J S , et al.An Acid-Free, Temperature-Based Cation Contamination Removal Strategy for PEM Water Electrolysis[J].Journal of The Electrochemical Society,2026,173(7):074503-074503.
- [4]李赫龙,唐晶,赵炎,等.绿氢生产技术与应用研究进展[J].现代化工,2026,4(2):1-7.
- [5]郝新朝,王健,闫兆乾,等.可再生能源耦合 PEM 电解水制氢研究进展[J].自动化应用,2025,66(7):129-134.
- [6]李怡,王纪元,潘旭海,等.碱性电解水制氢安全研究进展[J].化工学报,2025,76(10):4961-4975.
- [7]Hong R, Su J, Li J, et al.Recent Advances in Membrane Electrode Assembly for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis: Performance and Durability Enhancement[J].Electrochemical Energy Reviews,2026,9(1):8-8.

作者简介:任楠楠(1987.9—),女,汉,高级工程师,华电科工股份有限公司,研究方向:电解水制氢领域。