

可再生能源耦合PEM电解水制氢研究进展

席 魁¹ 王振宇² 郭丽娜¹

1. 包头职业技术学院 内蒙古 包头 014030

2. 内蒙古西部天然气股份有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘 要：本文聚焦可再生能源耦合PEM电解水制氢技术，阐述可再生能源与PEM电解水制氢原理，深入探讨电解槽、匹配、储运及系统集成等关键技术进展，分析其在交通、工业、能源领域的应用前景与现状，并结合德、中典型案例剖析。研究表明，该技术虽发展显著，但仍面临成本高、基础设施不足等问题，未来将朝着低成本、规模化方向迈进，有望推动能源转型。

关键词：可再生能源；PEM电解水制氢；耦合系统；研究进展

1 可再生能源与 PEM 电解水制氢技术概述

1.1 可再生能源简介

在全球能源结构转型浪潮中，可再生能源以清洁、永续的特性，成为能源领域核心发展方向。其涵盖太阳能、风能、水能、生物质能、地热能 and 海洋能等。太阳能通过光辐射供能，光伏发电将其转化为电能，具备无污染、分布广优势。近年来光伏电池效率提升、成本下降，推动全球装机容量激增，我国2023年新增装机超1.6亿千瓦，累计容量占全球超三分之一。风能分陆上与海上，陆上风电场成本低、技术成熟；海上风电资源丰富、不占陆地，发展迅猛，如丹麦风电占比超国内用电量50%。水能技术成熟、应用广泛，三峡水电站装机2250万千瓦，年发电量超千亿千瓦时，保障我国能源供应。生物质能利用有机物质转化能源；地热能源于地球内部；海洋能含潮汐、波浪能等，虽开发规模小，但潜力巨大，共同为能源清洁转型筑牢基础。

1.2 PEM电解水制氢技术原理

质子交换膜（PEM）电解水制氢技术凭借高效清洁的特性，在氢能产业中占据重要地位，其核心是在直流电场作用下分解水产生氢气和氧气。该系统关键部件包括质子交换膜、催化剂、电极和双极板^[1]。质子交换膜作为核心，分隔氢氧气体，传导氢离子，常用的全氟磺酸膜具备出色的化学稳定性与质子传导性。电解过程中，阳极的水在催化剂作用下氧化，生成氧气、氢离子与电子；电子经外电路至阴极，氢离子透过膜迁移，在阴极与电子结合还原生成氢气。相较于传统碱性电解水制氢技术，PEM技术响应迅速，可适配可再生能源发电波动；运行电流密度高，制氢效率出色；产出氢气纯度高，无需复杂纯化，因此成为可再生能源耦合制氢的优选方案。

2 可再生能源耦合 PEM 电解水制氢关键技术研究进展

2.1 PEM电解槽技术

近年来，PEM电解槽技术在多个方面取得了显著进展。在材料研发方面，新型催化剂的研究成为热点。传统的贵金属催化剂（如铂、铱）虽然催化活性高，但成本昂贵，限制了PEM电解槽的大规模应用。科研人员致力于开发低成本、高活性的非贵金属催化剂，如过渡金属基催化剂、碳基催化剂等。质子交换膜的性能也在不断优化，一方面，通过改进膜的制备工艺，提高质子传导率和机械强度；另一方面，开发新型质子交换膜材料，如复合膜、有机-无机杂化膜等，以增强膜的化学稳定性和耐久性。双极板材料的研究也在持续推进，金属双极板凭借其优异的导电性和机械性能，逐渐取代传统的石墨双极板，成为PEM电解槽的主流选择，同时通过表面改性技术解决了金属双极板的腐蚀问题。在结构设计方面，科研人员通过优化流道设计、电极结构和密封方式，提高电解槽内的物质传输效率和电流分布均匀性，降低内部电阻，从而提升电解槽的整体性能。

2.2 可再生能源发电与电解水制氢的匹配技术

由于太阳能、风能等可再生能源具有波动性和间歇性的特点，如何实现其与PEM电解水制氢系统的高效匹配，是可再生能源耦合制氢面临的关键挑战之一。在能量管理系统方面，智能控制策略的应用成为解决匹配问题的重要手段。通过建立可再生能源发电预测模型，结合实时气象数据、电网负荷等信息，对PEM电解水制氢系统的运行参数进行动态调整。同时引入储能系统（如锂电池、超级电容器等）作为缓冲环节，在可再生能源发电过剩时储存电能，在发电不足时释放电能，保障PEM电解水制氢系统的稳定运行。在电力电子技术方面，高效的变流器和逆变器是实现可再生能源与电解水

制氢系统匹配的关键设备。新型变流器能够快速响应可再生能源发电的电压和频率变化,将不稳定的交流电转换为稳定的直流电供给电解水制氢系统。

2.3 氢气储存与运输技术

氢气的储存与运输是可再生能源耦合PEM电解水制氢产业链中的重要环节,其技术水平直接影响氢能的大规模应用和市场竞争能力。在高压气态储氢方面,主要发展方向是提高储氢压力和储氢密度,降低储氢成本。目前,70MPa高压气态储氢技术已在燃料电池汽车领域得到广泛应用。通过采用高强度复合材料(如碳纤维增强复合材料)制造储氢瓶,在保证安全性的前提下,显著提高了储氢瓶的储氢密度和耐压性能。优化储氢站的压缩、储存和加注设备,提高储氢系统的整体效率和可靠性。液态储氢技术具有储氢密度高、运输效率高等优势,是长距离、大规模氢气运输的重要发展方向。但液氢的制备需要消耗大量的能量,且储存过程中存在蒸发损失等问题。近年来,通过改进液化工艺和低温绝热技术,降低了液氢的制备能耗和储存损耗^[2]。固态储氢利用金属氢化物、配位氢化物等材料与氢气发生化学反应储存氢气,具有安全性高、储氢密度大等特点。目前,科研人员正在研发新型固态储氢材料,提高材料的吸放氢速率、循环稳定性和储氢容量。例如,镁基储氢材料具有较高的理论储氢容量,通过纳米化、合金化等改性手段,显著改善了其吸放氢性能,有望实现商业化应用。在氢气运输方面,管道运输是大规模、长距离输送氢气的最经济方式。随着氢能产业的发展,全球多个地区开始规划和建设氢气运输管道网络。

2.4 系统集成与优化技术

可再生能源耦合PEM电解水制氢系统是一个复杂的多能源、多设备集成系统,需要对各个子系统进行优化集成,以提高系统的整体性能和经济性。在系统架构设计方面,通过合理布局可再生能源发电设备、PEM电解水制氢设备、储能设备和氢气储存运输设备,实现能源的高效转换和利用。在系统控制与优化方面,采用先进的建模和仿真技术,对系统的运行过程进行模拟和分析,找出系统的瓶颈和优化空间。通过建立系统的数学模型,结合人工智能算法(如遗传算法、粒子群优化算法等),对系统的运行参数进行优化,实现系统的最优运行。另外,系统的监测与维护技术也是保障系统稳定运行的重要环节。通过安装传感器和监测设备,实时采集系统的运行数据,对设备的性能和状态进行在线监测和故障诊断。利用大数据分析和机器学习技术,预测设备的故障发生概率,提前进行维护和维修,降低系统的

停机时间和维护成本。

3 可再生能源耦合 PEM 电解水制氢的应用前景与发展趋势

3.1 应用领域分析

可再生能源耦合PEM电解水制氢技术具有广阔的应用前景,在多个领域展现出巨大的发展潜力。在交通领域,氢能燃料电池汽车是最具代表性的应用方向。与传统燃油汽车和纯电动汽车相比,燃料电池汽车具有续航里程长、加氢时间短、零排放等优势。随着可再生能源耦合制氢成本的降低和氢气基础设施的不断完善,氢能燃料电池汽车将逐步实现大规模商业化应用。除了乘用车,氢能在商用车、轨道交通、船舶等领域也具有广阔的应用前景。在工业领域,氢气是重要的工业原料,广泛应用于化工、冶金、炼油等行业。传统的工业制氢方式主要依赖化石能源,存在碳排放高的问题。可再生能源耦合PEM电解水制氢技术生产的绿色氢气,可替代传统的化石能源制氢,实现工业生产的低碳化和绿色化。在能源领域,氢气可作为储能介质,解决可再生能源发电的波动性和间歇性问题。当可再生能源发电过剩时,将电能转化为氢气储存起来;当发电不足时,通过燃料电池或燃气轮机将氢气转化为电能,实现能源的时空转移和稳定供应。另外,氢气还可与天然气混合,用于供热和发电,提高能源系统的灵活性和可靠性。

3.2 发展趋势与未来展望

未来,可再生能源耦合PEM电解水制氢技术将朝着低成本、高效率、规模化的方向发展。在技术研发方面,随着材料科学、纳米技术和人工智能等领域的不断进步,PEM电解水制氢技术的性能将进一步提升。新型催化剂、质子交换膜和电极材料的研发,将降低制氢成本,提高制氢效率;智能控制和优化技术的应用,将实现系统的高效运行和智能化管理。可再生能源发电技术也将不断创新,太阳能光伏电池的转换效率和风电设备的发电效率将持续提高,为耦合制氢提供更加充足、稳定的能源供应。在产业发展方面,随着政策的支持和市场需求的增长,可再生能源耦合PEM电解水制氢产业将逐步形成完整的产业链。从可再生能源发电设备制造、PEM电解水制氢装备生产,到氢气储存运输和应用,各个环节将实现协同发展^[3]。产业规模的扩大将带来成本的下降,进一步推动氢能的商业化应用。在国际合作方面,氢能作为全球能源转型的重要方向,各国将加强在可再生能源耦合制氢技术研发、标准制定和产业合作等方面的交流与合作。通过共享技术成果、共建示范项目,推动全球氢能产业的共同发展,实现能源的可持续

发展目标。

4 可再生能源耦合 PEM 电解水制氢的应用现状与案例分析

4.1 应用现状

目前,可再生能源耦合PEM电解水制氢技术在全球范围内已经进入示范应用和小规模商业化阶段,但距离大规模推广仍面临一些挑战。在政策层面,许多国家和地区出台了一系列支持氢能产业发展的政策和规划,为可再生能源耦合制氢技术的发展提供了良好的政策环境。例如,欧盟提出了“欧洲氢能战略”,计划在2030年前建成多个大规模可再生能源制氢项目;我国发布了《氢能产业发展中长期规划(2021-2035年)》,明确了氢能产业的发展目标和重点任务。在技术层面,虽然PEM电解水制氢技术取得了显著进展,但制氢成本仍然较高,制约了其大规模应用。目前,可再生能源耦合PEM电解水制氢的成本约为传统化石能源制氢成本的2-3倍。氢气储存运输基础设施不完善、产业链协同不足等问题也限制了产业的发展。在市场应用方面,可再生能源耦合PEM电解水制氢技术主要应用于示范项目和高端领域。

4.2 案例分析

案例一:德国H2Future项目是全球知名的可再生能源耦合PEM电解水制氢示范项目。该项目位于德国南部的布鲁克豪森,利用当地丰富的风电资源,建设了一套20MW的PEM电解水制氢装置。项目产生的氢气通过管道输送至附近的钢铁厂,替代部分焦炭用于钢铁冶炼,每年可减少二氧化碳排放量约20万吨。该项目采用先进的PEM电解槽技术,通过优化电极材料和流道设计,提高电解槽的制氢效率和稳定性^[4]。同时建立智能能量管理系统,根据风电的实时发电功率,自动调整电解水制氢系统的运行参数,实现可再生能源与制氢系统的高效匹配。H2Future项目的成功实施,为钢铁行业的低碳转型提供可行的解决方案,也为全球可再生能源耦合制氢技术的发展提供了宝贵经验。

案例二:我国青海拥有丰富的太阳能和风能资源,

是我国重要的可再生能源基地。在青海海西州,建设了大规模的可再生能源耦合PEM电解水制氢项目。该项目总装机容量达到50MW,利用当地的光伏电站和风电项目产生的电能,通过PEM电解水制氢装置生产氢气。项目产生的氢气一部分用于当地的燃料电池公交车和物流车,推动交通运输领域的绿色化;另一部分通过高压气态储氢方式运输至周边城市,用于工业生产。该项目在系统集成与优化方面进行创新,采用先进的储能系统和智能控制技术,有效解决可再生能源发电的波动性问题,提高系统的整体运行效率和稳定性。通过与当地企业的合作,构建完整的氢能产业链,带动区域经济的发展,为我国可再生能源耦合制氢技术的规模化应用提供示范。

结束语

综上所述,可再生能源耦合PEM电解水制氢技术在技术研发、应用探索上已取得阶段性成果,为能源清洁转型提供新路径。然而制氢成本高昂、基础设施薄弱及产业链协同欠佳等问题,严重制约其大规模推广。未来,需持续深化技术创新,强化政策支持,完善产业生态,促进国际合作,以加速该技术的商业化进程,助力全球碳中和目标的实现。

参考文献

- [1]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. DOI:10.19769/j.zdhy.2025.07.035.
- [2]曹雪洁,杨磊,徐光宇,等.质子交换膜电解水制氢阳极析氧反应催化剂的研究进展[J].硅酸盐学报,2024,52(6):1861-1872. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.20240019.
- [3]余晖迪,张琳,赵永明,等.油气行业可再生能源制氢技术进展与前景展望[J].石油科技论坛,2024,43(1):40-49. DOI:10.3969/j.issn.1002-302X.2024.01.005.
- [4]司杨,陈来军,陈晓弢,等.基于分布鲁棒的风-氢混合系统氢储能容量优化配置[J].电力自动化设备,2021,41(10):3-10.