

可再生能源发电制绿氢及其在氨、甲醇合成中的应用

王伟明¹, 刘滢洁²

1. 国家电力投资集团吉林电力股份有限公司, 吉林 长春 130000

2. 中石油克拉玛依石化有限责任公司, 新疆 克拉玛依 834000

DOI:10.61369/ETQM.2025060018

摘要 : 本文主要围绕着可再生能源发电制绿氢展开, 在文中系统地阐述了其在氨与甲醇合成中的应用策略。首先介绍了全球能源转型的背景, 以此引出绿氢的重要地位, 随后对于可再生能源发电制绿氢的原理与技术进行详细地阐述, 当中包括碱性电解水、质子交换膜电解水等, 均进行了深入地剖析。同时还探讨了制绿氢过程中面临的成本、技术等挑战。最终在氨与甲醇合成应用方面, 详细地讲解了反应原理与工艺流程, 并且结合实际案例分析了其应用成效, 还给出了具备针对性的优化策略。

关键词 : 可再生能源; 绿氢; 氨合成; 甲醇合成

Renewable Energy Generation for Green Hydrogen Production and Its Application in Ammonia and Methanol Synthesis

Wang Weiming¹, Liu Yingjie²

1. Jilin Electric Power Co., LTD., State Power Investment Corporation, Changchun, Jilin 130000

2. CNPC Karamay Petrochemical Co., LTD. Karamay, Xinjiang 834000

Abstract : This article mainly focuses on the production of green hydrogen from renewable energy generation, and systematically elaborates on its application strategies in the synthesis of ammonia and methanol. Firstly, the background of global energy transition was introduced to highlight the important role of green hydrogen. Then, the principles and technologies of renewable energy generation for producing green hydrogen were elaborated in detail, including alkaline electrolysis of water, proton exchange membrane electrolysis of water, etc., all of which were deeply analyzed. At the same time, the cost and technological challenges faced in the process of producing green hydrogen were also discussed. In the final application of ammonia and methanol synthesis, the reaction principle and process flow were explained in detail, and the application effectiveness was analyzed based on practical cases. Targeted optimization strategies were also proposed.

Keywords : renewable energy; green hydrogen; ammonia synthesis; methanol synthesis

引言

现阶段随着全球经济的持续发展, 传统的化石能源消耗在日益地增长, 使得储量逐渐减少, 导致能源危机的阴影愈发逼近。与此同时, 大量使用化石能源引发的环境污染和气候变化问题, 对于人类的生存和发展构成了严重的威胁。基于此背景, 全球各国纷纷加快自己能源转型的步伐, 积极地寻求清洁、低碳、可持续的能源解决方案。

氢气是一种理想的清洁能源载体, 它具有燃烧热值高、零碳排放、来源广泛等诸多优点。而在众多的制氢路径之中, 利用可再生能源发电电解水制绿氢, 被公认为是最具发展潜力的制氢方式, 因为它在整个生命周期内几乎不产生温室气体地排放。同时绿氢不仅可以直接应用于燃料电池, 能够为交通运输、分布式发电等领域提供动力, 还能在化工原料合成方面发挥重要的作用。尤其是在氨和甲醇的合成过程, 可以为减少化工行业的碳排放提供有效的途径, 因此在全球能源转型中占据着关键的地位。

一、可再生能源发电制绿氢技术

(一) 可再生能源发电技术概述

实际上, 太阳能、风能、水能等可再生能源发电技术的不断

进步, 是为绿氢的大规模制取提供了稳定的电力来源。其中太阳能光伏发电通过半导体材料的光电效应, 可将太阳光直接转化为电能, 它具有安装灵活、维护简单等优点, 但发电受到昼夜、天气等因素的影响较大。风力发电则是利用风力带动风机叶片旋

作者简介: 王伟明 (1997.05-), 男, 汉族, 吉林省长春市人, 学历: 硕士研究生, 职称: 中级工程师, 研究方向: 风电制绿氢合成绿色氢基能源 (氨、甲醇)。

转,进而驱动发电机发电,尽管风能资源丰富且分布广泛,但当中存在着间歇性和波动性的问题。而水能发电凭借其技术成熟、发电稳定的优势,当前在可再生能源发电中占据重要地位,然而其开发会受到地理条件的限制^[1]。

(二) 电解水制氢原理与技术类型

作为获取绿氢的关键路径,电解水制氢凭借着多样化的技术,展现出了广阔的应用前景。当前主流的电解水制氢技术包含碱性电解水(AWE)、质子交换膜电解水(PEM)和固体氧化物电解水(SOEC),但它们在工作原理、性能表现以及应用场景上各有差异。

1. 碱性电解水(AWE)

碱性电解水技术历经了长期的发展与实践,它是当下最为成熟、应用范围最广的电解水制氢技术。该技术需要以碱性电解液构建反应的环境,当外接直流电源之后,水分子在电场的作用下会发生定向地移动。展开来说:在阴极水分子可获得电子,发生还原反应,从而生成氢气;在阳极水分子则会失去电子,被氧化为氧气。该反应过程可以通过如下方程式直观呈现:(阴极反应) $2\text{H}_2\text{O}+2\text{e}^-=\text{H}_2\text{O}\uparrow+2\text{OH}^-$, (阳极反应) $4\text{OH}^--4\text{e}^-=\text{O}_2\uparrow+2\text{H}_2\text{O}$ 。

此技术最大的优势在于设备成本相对较低。其原因在于:电解液常采用氢氧化钾(KOH)水溶液,而KOH价格低廉且来源广泛,以及电极材料多为镍基合金等,使得成本可控。然而碱性电解水技术也存在着明显的短板。一方面是电解过程的能耗较高,会导致电解的效率相对偏低;另一方面为碱性电解液具有较强的腐蚀性,电极在长期使用的过程中易被腐蚀,进而极大程度上缩短了设备的使用寿命,也增加了维护成本与更换频率^[2]。

2. 质子交换膜电解水(PEM)

质子交换膜电解水技术的核心在于其采用了质子交换膜作为核心电解质,凭借着独特的技术特性,已然在诸多的领域当中展现出了巨大的应用潜力。该技术的原理是在PEM电解槽中,阳极侧的水分子会在催化剂的作用下分解,从而产生氧气和氢离子,而氢离子带有正电荷,它在电场的驱动下会通过质子交换膜迁移至阴极。与此同时,电子将通过外部电路由阳极流向阴极,在阴极氢离子便会与电子结合,最终生成高纯度的氢气。其阳极反应为 $2\text{H}_2\text{O}=\text{O}_2\uparrow+4\text{H}^++4\text{e}^-$,而阴极反应为 $4\text{H}^++4\text{e}^-=2\text{H}_2\uparrow$ 。

PEM与碱性电解水技术相比而言,其优势更加显著。因为该技术能够在高电流密度下运行,且响应速度极快,可实现短时间内的启动和停止,进而满足不同场景下的制氢需求。不仅如此,此技术产出的氢气纯度极高,甚至可达99.99%以上。但不可忽视的是,PEM电解水技术对于水质的要求极为严格,在操作过程中需使用高纯度的去离子水,以防止杂质对于质子交换膜造成污染。此外质子交换膜和贵金属催化剂的成本高昂,于此提高了设备的初始投资,也限制了该技术的大规模应用^[3]。

3. 固体氧化物电解水(SOEC)

固体氧化物电解水技术属于高温电解水技术,其工作的温度通常需要维持在700-1000℃的高温区间。具体而言:基于高温环境,水分子在阳极会发生氧化反应,进而释放出氧气并产生电子,之后电子通过外部电路可传输至阴极,水分子在阴极即可获得电子,被还原为氢气。该过程的阳极反应为 $2\text{O}^{2-}=\text{O}_2\uparrow+4\text{e}^-$,阴极反应为 $2\text{H}_2\text{O}+4\text{e}^-=2\text{H}_2\uparrow+2\text{O}^{2-}$ 。

SOEC技术的突出优势在于其电解的效率,因此反应需要在高温下进行,因此可直接利用工业余热等高温热能,如此便降低了对电能的消耗,间接地实现了能量的高效利用。可高温条件对于设备的材料性能便提出了严苛的要求。基于此条件,设备需采用耐高温、耐腐蚀的特种陶瓷材料,而这无疑增加了设备的制造成本,并且设备的启动和停机过程比较复杂,需要相关人员耗费大量的时间和能源来升降温,此问题在一定程度上阻碍了该技术的商业化推广。

(三) 制绿氢面临的挑战

1. 成本问题

现阶段可再生能源发电成本和电解水设备的投资成本均居高不下,此方面是制约绿氢大规模生产的主要因素。尽管近年来太阳能、风能等可再生能源发电成本有所下降,但它与传统的化石能源发电相比来说,依然缺乏竞争力。另外电解水制氢设备中的关键材料,如质子交换膜、贵金属催化剂等,价格都比较昂贵,从而导致设备的初始投资成本过高。同时制氢过程中的运维成本、能耗成本等,也进一步增加了绿氢的生产成本。

2. 技术难题

目前电解水制氢技术在提高电解效率、降低能耗、延长设备寿命等多个方面仍存在着技术瓶颈。例如碱性电解水技术的电极腐蚀问题,影响着设备的长期稳定运行;PEM电解水技术当中质子交换膜的耐久性和抗污染性能依然有待提高;SOE技术的高温密封和材料兼容性问题,直接地限制了其商业化应用。

二、绿氢在氨合成中的应用

(一) 氨合成反应原理与工艺流程

传统的氨合成工艺采用的是化石能源制氢,该方式会产生大量的二氧化碳排放,而使用绿氢作为原料,则可以实现氨合成过程的低碳甚至零碳排放^[4]。

1. 反应原理

氨合成的化学反应方程式为 $\text{N}_2+3\text{H}_2\rightleftharpoons 2\text{NH}_3$,该反应是一个可逆的放热反应。而在实际的生产之中,为了提高氨的合成效率,通常需要在高温、高压以及催化剂的作用下进行。

2. 工艺流程

以绿氢为原料的氨合成工艺流程主要包括了氢气和氮气的制备、气体净化、压缩、合成反应以及氨的分离等环节。首先利用可再生能源发电制得绿氢,同时通过空气分离技术获取氮气。然

后再将氢气和氮气进行净化处理，目的是去除其中的杂质，以防止发生催化剂中毒的情况。经过净化后的气体需要使用压缩机压缩至一定的压力，并送入氨合成塔。此时在合成塔内，氢气和氮气在催化剂的作用下会发生反应生成氨，反应后的气体经过冷却、分离，即可得到液氨产品，而未反应的氢气和氮气则需要循环回合成塔继续参与上述反应。

（二）优化策略

1. 催化剂优化

如果能够研发出新型高效的氨合成催化剂，便能够提高催化剂的活性、选择性和稳定性，并降低反应的温度和压力，从而减少能耗和设备投资。例如采用新型的钌基催化剂来替代传统的铁基催化剂，即可显著地提高氨的合成效率，进而降低反应条件的苛刻程度。

2. 工艺流程优化

通过优化氢气和氮气的比例、循环气的流量、反应温度和压力等操作参数，能够使得氨的合成转化率得到提升。同时采用先进的节能技术，如余热回收、能量梯级利用等，能够降低生产过程中的能耗。此外对于工艺流程进行模块化设计，还能提高装置的灵活性和可扩展性，从而便于大规模地推广与应用^[9]。

三、绿氢在甲醇合成中的应用

（一）甲醇合成反应原理与工艺流程

1. 反应原理

甲醇合成的主要化学反应方程式为 $\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH}$ 和 $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ 该反应同样是可逆的放热反应，其需要在合适的温度、压力和催化剂条件下进行。具体来说，该方式主要使用了绿氢参与甲醇合成，进而可以有效地降低甲醇生产过程中的碳排放，生产得到绿色的甲醇。

2. 工艺流程

绿氢参与的甲醇合成工艺流程包括了原料气制备、净化、压缩、合成反应以及甲醇分离等步骤。第一步将绿氢与一氧化碳、二氧化碳等原料气进行混合，此时原料气中的一氧化碳和二氧化碳可以通过工业尾气回收、生物质气化等方式获得。而混合后的原料气经过净化处理，去除当中的杂质后，需要压缩至一定压力，才能送入甲醇合成反应器^[9]。接着在反应器内，原料气在催化剂的作用下会发生反应生成甲醇，然后反应后的气体经过冷却、分离便可得到粗甲醇产品，粗甲醇还需要经过精馏提纯，才能得到高纯度的甲醇产品。

（二）优化策略

1. 催化剂研发

同样地，在操作过程中使用新型的甲醇合成催化剂，即可提高催化剂对二氧化碳加氢合成甲醇的选择性，达到降低反应温度和压力，与减少副反应发生的目的。如采用铜基催化剂与其他金

属或助剂进行复合，就可以改善催化剂的性能，进而提高甲醇的合成效率^[7]。

2. 反应条件优化

若优化原料气的组成、反应温度、压力和空速等操作条件，就能够提高甲醇的合成转化率和时空产率。基于此还可加强对反应过程的监测和控制，在实践中及时地调整操作参数，以确保反应的稳定进行。另外还需探索新的反应工艺，如将甲醇合成与其他化工过程进行耦合，进而实现资源的高效利用和节能减排。

四、可再生能源发电制绿氢及其在氨、甲醇合成中的协同发展策略

（一）能源协同

能源供应方、制氢企业与氨、甲醇生产企业应共同构建起可再生能源发电、制氢、氨合成和甲醇合成一体化的能源系统，借此系统实现能源的梯级利用与优化配置^[8]。以太阳能、风能资源丰富的地区为例，能源供应方可以将太阳能光伏电站、风力发电场与制氢企业的电解水制氢装置进行有机地结合。而在光照充足、风力强劲但发电量过剩时，即可将多余的电能用于电解水制氢，并且通过高压气态储存、低温液态储存等方式将氢气储存起来。若太阳能、风能发电因天气等原因不足时，制氢企业则可将储存的氢气供应给氨合成和甲醇合成企业，以此保障生产过程的稳定运行。

（二）技术协同

对于科研机构而言，应该与企业保持紧密的合作，合力加强可再生能源发电、制氢、氨合成和甲醇合成技术的研发与创新，目的是促进技术的协同进步。就应对可再生能源间歇性和波动性方面来说，科研机构可联合制氢企业，一同研发新型的电解水制氢技术^[9]。比如开发具有快速响应能力的电解水制氢设备，使其能够根据可再生能源发电量的变化，迅速地调整制氢规模；又如研究高效的储能与制氢耦合技术，以此实现多余电能的存储，将其用于发电低谷期的制氢应用。

（三）产业协同

可再生能源发电企业、制氢企业、氨和甲醇生产企业均要积极地推动彼此之间的合作与协同发展，多方共同发力打造出完整的产业链。展开来说：产业链上游的可再生能源发电企业，可以为中游的制氢企业提供更加稳定的电力供应；制氢企业则负责将生产的绿氢，供应给下游的氨和甲醇生产企业。最终通过上述这种紧密的合作模式，便能实现资源共享、优势互补，达到降低生产成本的效果^[10]。

五、结语

可再生能源发电制绿氢及其在氨、甲醇合成中的应用，在现

阶段是实现能源转型和化工行业低碳发展的重要途径。为此本文通过研究与分析相关的技术原理、工艺流程、应用案例和优化策略,表明了虽然目前该领域仍着面临成本、技术等方面的挑战,但通过技术创新、产业协同和政策支持,还是有望突破这些瓶颈,从而实现绿氢及相关产业的大规模发展。

未来随着可再生能源发电成本的进一步降低、电解水制氢技术的不断进步以及氨、甲醇合成工艺的优化,相信绿氢在氨、甲

醇合成中的应用将会变得更加广泛。因此以后的可再生能源发电制绿氢及其相关产业将会朝着规模化、低成本、高效益的方向发展,最终将为全球能源转型和可持续发展做出更大的贡献。同时相关人员需要进一步加强国际方面的合作,和国外力量共同推动技术地创新和产业地发展,合力探索更多绿氢的应用场景,如在航空航天、储能等领域的应用。

参考文献

- [1]周君,安娟,杨宽辉,等.现代能源体系耦合绿氢化工应用的研究进展[J].低碳化学与化工,2023,48(04):46-54.DOI:10.12434/j.issn.2097-2547.20220383.
- [2]孔燕,危伟,徐乐凯,等.电催化氮集成二氧化碳还原反应合成有机氮化合物[J].物理化学学报,2024,40(08):4-7.DOI:10.3866/PKU.WHXB202307049.
- [3]中国科学院大连化学物理研究所.一种催化剂及其制备方法和在钢厂尾气耦合可再生能源制氢合成绿色甲醇中的应用:CN118634827A[P/OL].2024-09-13[2025-04-03].https://www.cqvip.com/doc/patent/3467862971.
- [4]黑冬梅.绿色甲醇的生产方法及其在可再生能源中的应用[J/OL].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(12)[2024-12-01].https://www.cqvip.com/doc/journal/2010228893235545089.
- [5]王宇田.我国大型风光发电制绿氢主要装备发展现状及展望[J].当代石油石化,2024,32(10):42-46.
- [6]谷莹秋.过渡金属基复合材料的制备及其催化氨分解制氢性质研究[D].山东省:山东大学,2016.
- [7]朱家锦.PtM(M=Ru、Cu)/CNTs催化剂的制备及其电催化甲醇氧化性能的研究[D].陕西省:西安科技大学,2020.DOI:10.27397/d.cnki.gxaku.2020.001038.
- [8]杨鹏威,于琳竹,王放放,等.氨储能在新型电力系统的应用前景、挑战及发展[J].化工进展,2023,42(08):4432-4446.DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1817.
- [9]段建斌,尹梦,康明,等.SiO₂@TiO₂催化剂载体在甲醇重整制氢中的应用研究[J].西南科技大学学报,2024,39(03):36-41.DOI:10.20036/j.cnki.1671-8755.2024.03.006.
- [10]李晨鹏,李政,刘培,等.应用无碳氨的氨煤混燃机组平准化电力成本计算[J].动力工程学报,2022,42(11):1042-1050.DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2022.11.006.