

绿电制氢柔性合成氨耦合能质集成研究

李进通

惠生工程(中国)有限公司 河南 郑州 450018

摘要: 绿电制氢柔性合成氨耦合能质集成研究旨在探索利用可再生能源发电(绿电)进行电解水制氢,进而合成氨的先进工艺。本研究通过集成多种能源转换与物质转化技术,优化能量流动与物质循环,实现高效、清洁的氨生产。研究结果显示,该系统不仅提高能源利用效率,还显著降低碳排放,为柔性合成氨工业的绿色转型提供可行的技术路径。

关键词: 绿电制氢; 柔性; 合成氨; 能质集成; 耦合系统; 能源转化

1 绿电制氢技术综述

1.1 绿电制氢的基本原理

绿电制氢是一种利用可再生能源(如太阳能、风能等)生产绿色氢气的技术。其基本原理是通过电解水的方式,将水分解为氢气和氧气。这个过程需要使用可再生能源来提供电能,驱动电解槽中的电解反应。具体来说,当电流通过水时,水分子在电解槽的阴极接受电子,分解成氢气和氢离子(质子),而氢离子通过电解质移动到阳极,并在那里失去电子,形成氧气。这样,通过可再生能源产生的电力,就可以实现零排放、低碳的氢气生产。

1.2 绿电制氢技术发展现状

近年来,绿电制氢技术发展迅速,成为全球能源转型和碳中和目标下的重要技术路径。随着全球对可再生能源和清洁能源需求的增加,绿电制氢技术得到了广泛的关注和研究。目前,绿电制氢的技术路线主要包括太阳能光解水、生物质发酵制氢、生物质热解制氢等。这些技术路线各有特点,适用于不同的应用场景和条件^[1]。随着技术的进步和成本的降低,绿电制氢的商业化应用也在逐步推进。例如,我国已经建设了多个万吨级的光伏制氢项目,成为全球规模最大的光伏制绿氢项目之一。这些项目的成功实施,为绿电制氢技术的进一步推广和应用提供了有力的支撑。

1.3 绿电来源与稳定性

绿电制氢技术的核心在于绿电的供应。绿电主要来源于太阳能、风能、生物质能等可再生能源。这些能源具有清洁、低碳、可持续等优点,是替代传统化石能源的重要选择。绿电的供应也存在一定不稳定性与波动性。例如,太阳能和风能的发电量受到天气、季节、地理位置等多种因素的影响,导致绿电的供应存在间歇性和不确定性。为了解决这个问题,需要采取一系列措

施来提高绿电的供应稳定性和可靠性。一方面,可以通过建设大规模的储能设施来储存多余的绿电,以应对供电不足的情况;另一方面,可以通过优化电网调度和配置,实现绿电与传统能源的互补和协同,提高整个能源系统的稳定性和可靠性。此外,还可以通过技术创新和研发,提高绿电制氢技术的效率和灵活性,进一步降低生产成本和提高市场竞争力。

2 耦合能质集成在绿电制氢柔性合成氨中的创新价值

耦合能质集成在绿电制氢柔性合成氨中的创新价值主要体现在其对整个能源转换与化工生产流程的优化与升级上。通过耦合能质集成,绿电制氢与合成氨两个过程得以高效协同,实现了能量与物质的优化利用。首先,耦合能质集成能够显著提高绿电制氢的效率,在绿电制氢过程中,电解水需要消耗大量的电能,而耦合能质集成技术可以充分利用可再生能源发电的波动性,通过智能调度和优化配置,确保电解槽在最优工况下运行,从而提高电能到氢能的转换效率。其次,耦合能质集成在柔性合成氨过程中也发挥着重要作用,传统合成氨工艺往往需要高温高压条件,能耗较高。而耦合能质集成技术可以通过热化学、电化学和动力循环等多种复杂工艺过程的优化,实现能量的梯级利用和物质的循环利用,从而降低合成氨的能耗和成本。另外,耦合能质集成还有助于提升整个系统的灵活性和可靠性。在可再生能源发电不稳定的情况下,耦合能质集成技术可以通过储能和调峰等手段,确保绿电制氢和合成氨过程的连续稳定运行。该技术还可以通过智能监测和预警系统,及时发现和解决潜在的运行问题,提高整个系统的安全性和可靠性。

3 合成氨工业的绿色转型

3.1 传统合成氨工艺及其挑战

合成氨工业作为化学工业的重要组成部分,自19世

纪问世以来,一直扮演着全球氮肥生产的核心角色。传统的合成氨工艺,即哈伯-博施法,是一种基于煤炭或天然气作为原料,在高温高压下,通过催化作用将氮气和氢气转化为氨的方法。这一工艺自20世纪初工业化以来,极大地推动了全球农业的发展,使得氮肥的生产成本大幅降低,农作物产量显著提高。随着全球气候变化的严峻挑战和可持续发展理念的深入人心,传统合成氨工艺面临着前所未有的环境压力和转型需求。传统合成氨工艺的高能耗和高碳排放是其主要的挑战之一,该工艺需要大量的化石能源来提供反应所需的高温高压条件,同时产生大量的二氧化碳排放。在全球能源结构向低碳、清洁转型的大背景下,这种高碳排放的生产方式显然与环境保护和碳中和目标背道而驰^[2]。原料的依赖性和资源的有限性也是传统合成氨工艺面临的另一大挑战,传统的哈伯-博施法主要依赖煤炭和天然气作为原料,这些化石资源的开采和使用不仅加剧环境污染,还面临着资源枯竭的风险。特别是在一些煤炭和天然气资源匮乏的地区,传统合成氨工艺的发展受到极大的限制。传统合成氨工艺还存在环境污染和安全隐患等问题,生产过程中产生的废水、废气和固体废弃物如果不经过妥善处理,会对环境造成严重的污染。高温高压的生产条件也增加安全事故的风险,对工人的生命安全和身体健康构成威胁。

3.2 绿色柔性合成氨技术的发展路径

面对传统合成氨工艺的挑战,以及可再生能源如太阳能、风能等具有间歇性和波动性,传统合成氨工艺难以与之适配。而柔性合成氨技术能够以绿电、绿氢为原料,根据可再生能源的供应情况动态调整生产负荷,可在低至额定功率 10% 的负载下长期安全运行,更好地适应绿电、绿氢供应的不稳定性,实现与可再生能源的有效耦合。绿色柔性合成氨技术应运而生,成为合成氨工业绿色转型的关键路径。绿色柔性合成氨技术主要基于可再生能源和清洁能源,通过电解水制氢、空气分离制氮等过程,实现氨的绿色生产。这一技术的发展路径主要包括以下几个方面:一是电解水制氢技术的突破,电解水制氢是绿色柔性合成氨技术的核心环节之一。通过改进电解槽的设计和材料,提高电解效率,降低能耗和成本,是实现绿色柔性合成氨的关键。利用可再生能源如太阳能、风能等发电,为电解水制氢提供绿色电力,也是实现氨的绿色生产的重要途径。二是空气分离制氮技术的优化,空气分离制氮是绿色柔性合成氨技术的另一个重要环节。通过改进空气分离设备的设计和工艺流程,提高氮气的纯度和回收率,降低能耗和成本,也是

实现绿色柔性合成氨的重要手段。三是催化剂的改进和创新,催化剂在柔性合成氨过程中起着至关重要的作用。通过研发新型催化剂,提高催化效率和稳定性,降低反应温度和压力,是实现绿色柔性合成氨的关键技术之一。四是系统集成和工艺优化,绿色柔性合成氨技术的实现不仅需要单项技术的突破,还需要系统集成和工艺优化的支持。通过优化工艺流程,提高能量利用率和物质转化率,降低生产成本和环境污染,是实现绿色柔性合成氨的重要目标。五是碳捕集和利用技术的引入,对于无法完全避免碳排放的合成氨过程,可以通过引入碳捕集和利用技术,将排放的二氧化碳进行捕集、封存或转化利用,从而降低碳排放强度,实现合成氨的低碳生产。

3.3 市场与政策环境

绿色柔性合成氨技术能有效减少储氢储电设备投资:由于其柔性负荷能力,无需大规模的前端储氢储电设备来保证稳定生产,从而减少了相关设备的投资成本。绿氨工厂可就地消纳绿氢,避免了绿氢在储运环节的损耗和投资,进一步降低了绿氨的生产成本。该技术的发展也离不开市场与政策环境的支持。在市场方面,随着全球对可持续发展和碳中和目标的重视,绿色合成氨产品的市场需求不断增长。特别是在农业、化工、能源等领域,绿色合成氨作为氮肥、化工原料和氢能载体等,具有广阔的应用前景。随着技术的不断进步和成本的降低,绿色柔性合成氨产品的市场竞争力也在不断提升。在政策方面,各国政府纷纷出台了一系列支持绿色柔性合成氨技术发展的政策措施。政府还通过制定绿色采购政策、推广绿色消费理念等方式,引导市场需求向绿色柔性合成氨产品转移。政府还加强与国际社会的合作与交流,共同推动绿色柔性合成氨技术的研发和应用。随着柔性合成氨技术的发展,相关的标准规范也在不断完善。例如,惠生工程(中国)工程有限公司参编的《风光氢储氨醇一体化多稳态柔性合成氨技术要求》正式发布实施,为风光可再生能源制氢制氨的研发、设计和生产运营提供了必要的技术标准规范,将有助于推动柔性合成氨技术的规范化、标准化发展,提高项目的质量和可靠性,促进产业的健康发展。绿色柔性合成氨技术的发展仍面临着一些挑战。例如,技术成熟度不足、生产成本较高、市场接受度有限等问题。为了克服这些挑战,需要政府、企业和社会各界共同努力,加强技术研发、市场推广和政策支持等方面的合作与交流,推动绿色柔性合成氨技术的不断发展和完善^[3]。

4 耦合能质集成系统设计

4.1 系统架构与工作原理

耦合能质集成系统是一种创新的能源与物质转化系统，其设计旨在通过高效整合多种能源输入和物质流程，实现能量的高效利用与物质的深度转化。系统架构主要包括能源输入模块、物质转化模块、能量存储与转换模块以及智能控制模块。能源输入模块负责接收多种可再生能源（如太阳能、风能、生物质能等）及传统能源（如煤炭、天然气等），通过预处理和转换，为系统提供稳定可靠的能源输入。物质转化模块则利用这些能源，驱动化学反应或物理过程，将输入的原料转化为目标产物。能量存储与转换模块负责在能源供需不匹配时，对剩余能量进行存储并在需要时释放，或进行能量形式的转换，以提高系统的整体能效。智能控制模块作为系统的“大脑”，通过实时监测和分析系统状态，优化能源分配、物质流动和能量转换过程，确保系统高效稳定运行。工作原理方面，耦合能质集成系统通过集成多种能源转换和物质转化技术，形成一个高度协同的系统。

4.2 关键技术与设备

耦合能质集成系统的关键技术与设备主要包括高效能源转换技术、物质转化与分离技术、能量存储与转换技术以及智能控制系统。高效能源转换技术涉及太阳能光伏/光热转换、风力发电、生物质能转换等，旨在提高能源转换效率和降低成本。物质转化与分离技术则包括电解水制氢、化学合成、膜分离等，用于实现原料的高效转化和目标产物的分离提纯。能量存储与转换技术涵盖电池储能、热储能、氢能储能等，用于平衡能源供需和转换能量形式。智能控制系统则通过集成传感器、数据分析、优化算法等技术，实现对系统状态的实时监测和智能控制。关键设备方面，系统包括太阳能光伏板、风力发电机、生物质气化炉、电解槽、化学合成反应器、膜分离装置、储能电池、热储能装置、氢能存储罐以及智能控制平台等。这些设备通过精密的设计和高效的集成，共同构成了耦合能质集成系统的核心。

4.3 系统优化策略

4.3.1 能量流动与物质转化的效率提升

为了提升耦合能质集成系统的能量流动与物质转化效率，优化能源输入组合，根据能源的可获得性、成本和环境影响，智能选择最优的能源组合，提高能源利用效率；改进物质转化技术，通过研发新型催化剂、优化

反应条件等手段，提高原料的转化率和目标产物的选择性；加强能量存储与转换技术的研发，提高储能设备的能量密度和循环寿命，降低能量转换过程中的损失。

4.3.2 系统稳定性与可靠性保障

保障耦合能质集成系统的稳定性与可靠性是确保系统长期高效运行的关键。加强系统故障诊断与预警技术的研发，通过实时监测和分析系统状态，及时发现并处理潜在故障；优化系统架构设计，通过冗余设计和故障切换机制，提高系统的容错能力和可靠性；加强系统维护与保养，定期对系统进行检查和维修，确保设备处于最佳工作状态^[4]。

4.3.3 经济性分析与成本节约措施

耦合能质集成系统的经济性分析是评估系统综合效益的重要环节。为了降低成本，优化系统配置，根据实际需求合理选择设备和能源输入，避免过度投资；提高设备利用率，通过优化运行策略，提高设备的运行效率和产能；探索多元化盈利模式，如通过出售电力、氢气、氨等产品，实现系统的多元化收益；加强技术创新和产业升级，通过研发新技术、新工艺，提高系统的能效和降低成本。

结束语

本研究通过对绿电制氢柔性合成氨耦合能质集成的深入探索，揭示了其在促进能源结构转型、实现绿色低碳发展方面的重要作用。研究成果不仅为合成氨工业的绿色转型提供有力支撑，也为其他高能耗、高排放行业的绿色化改造提供了借鉴。未来，将继续深化相关研究，优化系统集成方案，推动绿电制氢柔性合成氨技术的商业化应用，为实现全球碳中和目标贡献科技力量。

参考文献

- [1]冯雨涛.氢气存储及运输技术现状及分析[J].科技资讯,2021,19(25):44-46.
- [2]刘理.化学工艺学[M].北京:化学工业出版社,2020:45-54.
- [3]陈华勤.氨合成工艺技术的新进展[J].化肥工业,2022,29(5):12-19+60.
- [4]丁泽群,祝洪青,周伟业,等.绿电制氢合成氨耦合能质集成研究[J].石油石化物资采购,2024(11):67-69. DOI:10.12316/j.issn.1674-0831.2024.11.023.