

综述与专论

DOI: 10.11949/0438-1157.

海上制氢工艺系统与过程安全研究进展

汪侃¹, 刘姿妤¹, 徐思源¹, 时婷婷²(¹ 上海海事大学商船学院, 上海 201306; ² 国家电投氢能科技发展有限公司电堆产品事业部, 北京 102600)

摘要: 海上制氢系统涉及风电供电、海水预处理、电解制氢、氢能储存及运输等多个工艺环节, 其工艺流程的紧密关联性与复杂海洋环境持续扰动作用, 使海上制氢过程安全呈现多源风险叠加和动态演化特征, 成为海上氢能规模化发展的关键制约因素。本文围绕海上制氢工艺系统全过程安全问题, 梳理了制氢动力供给、海水淡化处理、电解反应过程及氢能储运等环节的工艺流程、失效机理及风险演化规律, 构建了覆盖设备、单元和系统等尺度的多层级安全认知框架。本文重点分析了风-浪-流耦合作用、高盐雾高湿腐蚀环境、波动性可再生能源输入以及海洋极端气象条件对海上制氢过程安全的影响机制, 揭示了工艺扰动、设备失效与环境载荷共同影响下的风险传递、放大及演化路径。研究表明, 海上制氢过程安全具有显著的多尺度耦合、时变非线性及不确定性传播特征, 传统基于静态假设的安全评价方法难以全面表征复杂海洋工况下系统风险演化过程。结果表明, 海上制氢工艺过程风险来源于材料腐蚀与氢脆失效、电解过程副反应竞争、气体交叉渗透、热失稳以及储运系统多场耦合等机制。面向海上制氢过程本质安全, 需综合考虑耐腐蚀与抗氢脆材料、电解过程调控、高效密封与隔膜优化以及氢能储运安全等关键技术, 融合物理模型与数据驱动的评估手段能兼顾风险分析与预测能力。现有海上制氢标准体系仍缺乏针对多技术融合和复杂海洋环境条件的一体化规范, 亟需构建覆盖设计、建造、运行、维护及退役全过程的安全标准体系, 为海上制氢工艺系统发展提供安全保障。

关键词: 海上制氢; 工艺环节; 海洋环境; 电解制氢; 过程安全

中图分类号: TQ 086

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-21

Advances in offshore hydrogen production process systems and process safety

WANG Kan¹, LIU Ziyu¹, XU Siyuan¹, SHI Tingting²

(¹ Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; ² Fuel Cell Stack Products Division, State Power Investment Corporation Hydrogen Energy Technology Development Co., Ltd., Beijing 102600, China)

Abstract: Offshore hydrogen production system involves multiple integrated processes, including offshore wind power supply, seawater pretreatment, hydrogen production, storage, and transportation. Strong interdependence among these processes, coupled with continuous disturbances from marine environments, results in multi-source risk interactions and dynamic risk evolution, thereby becoming a critical constraint for large-scale deployment of offshore hydrogen energy. This study investigates process safety issues throughout lifecycle of offshore hydrogen production system. The process configurations, failure mechanisms, and risk evolution characteristics associated with power supply, seawater desalination and treatment, electrolysis processes, and hydrogen storage and transportation are addressed, and a multilevel safety cognition framework covering equipment, process units, and

收稿日期: 2026-04-03 修回日期: 2026-07-21

通信作者: 汪侃(1986—), 男, 博士, 副教授, wangk@shmtu.edu.cn

第一作者: 汪侃(1986—), 男, 博士, 副教授, wangk@shmtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(52001196); 上海市“科技创新行动计划”自然科学基金面上项目(24ZR1428000)

引用本文: 汪侃, 刘姿妤, 徐思源, 时婷婷. 海上制氢工艺系统与过程安全研究进展[J]. 化工学报, XXXX, XX(X): 1-21

Citation: WANG Kan, LIU Ziyu, XU Siyuan, SHI Tingting. Advances in offshore hydrogen production process systems and process safety[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1-21

system scales is established. The impacts of wind-wave-current environmental loads, high-salinity and high-humidity environments, fluctuating renewable power inputs, and extreme marine meteorological conditions on offshore hydrogen production safety are analyzed. The risk propagation, amplification, and evolution pathways induced by combined effects of process disturbances, equipment degradation, and environmental loads are revealed. Results demonstrate that offshore hydrogen production safety is governed by pronounced multiscale coupling, time-dependent nonlinear behaviors, and uncertainty propagation characteristics. The process safety risks originate from material corrosion and hydrogen embrittlement, competitive side reactions during electrolysis, gas crossover, thermal instability, and multi-physics coupling effects within hydrogen storage and transportation system. Integrated optimization of corrosion-resistant and hydrogen-resistant materials, electrochemical process regulation, advanced sealing and membrane technologies, and safe hydrogen storage and transportation strategies is required. Meanwhile, the integration of physics-based models and data-driven approaches can provide complementary advantages in risk interpretation and predictive capability. Existing standards for offshore hydrogen production remain insufficient in addressing the challenges associated with multi-technology integration and marine environments. A comprehensive safety standard framework covering the design, construction, operation, maintenance, and decommissioning should be established to provide systematic safety assurance for the future development of offshore hydrogen production systems.

Keywords: offshore hydrogen production; process unit; marine environment; electrolytic hydrogen production; process safety

引 言

随着全球能源转型进程持续加速,氢能正成为构建新型能源体系和实现“双碳”目标的重要载体^[1]。《中华人民共和国能源法》《氢能产业发展中长期规划(2021–2035年)》及“十四五”专项文件内均明确氢能将在未来国家能源结构中具备战略定位^[2],氢能产业发展由政策导向逐步向“深远海风-光-氢-储”一体化模式推进。2025年,国家发展改革委与国家能源局相继发布指导意见^[3],进一步统筹推进海上风电制氢及绿氢、绿醇等燃料协同发展的产业布局,同时强调提升新能源集成融合系统的可靠性和稳定性。海上制氢工艺通过直接利用海上风电技术进行电解水制氢,不仅实现了可再生电力就地消纳,缓解了远海风电场并网与输电压力,还能将电能转化为更灵活的氢能载体,以实现高效储运。根据能源传输路径、空间布局及系统集成方式的差异,海上制氢工艺可通过陆上制氢与海上原位制氢两种途径实现,如图1所示。

陆上制氢工艺由电力供给系统、水处理系统、电解制氢系统、气体分离纯化系统和压缩储运系统构成,其本质是电能驱动下的多单元连续化工过程。由于陆上制氢模式常通过海底电缆将海上风电输送至陆地进行氢气制取,因而在工艺过程中可规避海洋极端环境对电解设备等敏感装置的影响。

在深远海场景中,离岸距离越大,电力输送成本和能量损耗随之大幅增加。当输电距离超过20公里,陆上制氢模式在远海应用中的经济性逐渐被弱化^[4–5]。近年来随着绿氢制备装备的发展,海上原位制氢被视为能够实现深远海风电高效消纳最可靠的路径^[6],可分集中式与为分布式两种构型。其中,集中式海上制氢通过在海上设立统一制氢平台(如能源岛或半潜式综合平台等),将多台海上风机或海上可再生能源装置的电力汇集,在集中制氢平台上完成包括海水处理、电解制氢、氢气处理与初步储存的工艺流程,最后通过管道或船舶外输至下游用户。集中式海上制氢工艺过程有利于规模化生产及集中管理,可合理延用油气行业成熟的海洋工程基础设施。但远海大规模开发和运行下的资本支出较高,且集中制氢平台增大了氢气泄漏和火灾爆炸的潜在风险^[7–8]。与集中式不同,分布式海上制氢模式的特征就是去中心化,以模块化形式实现氢能就地转化与分散储运,能够直接降低输电损耗。在其工艺流程中运用单台或若干台风机塔基直接部署模块化电解装置,完成就地发电和就地制氢的衔接运行^[9]。分布式海上制氢过程中的局部故障不会引发整体系统失效,但所选设备在小型化设计和抗海洋环境能力等方面都应具备更高的安全标准^[10]。

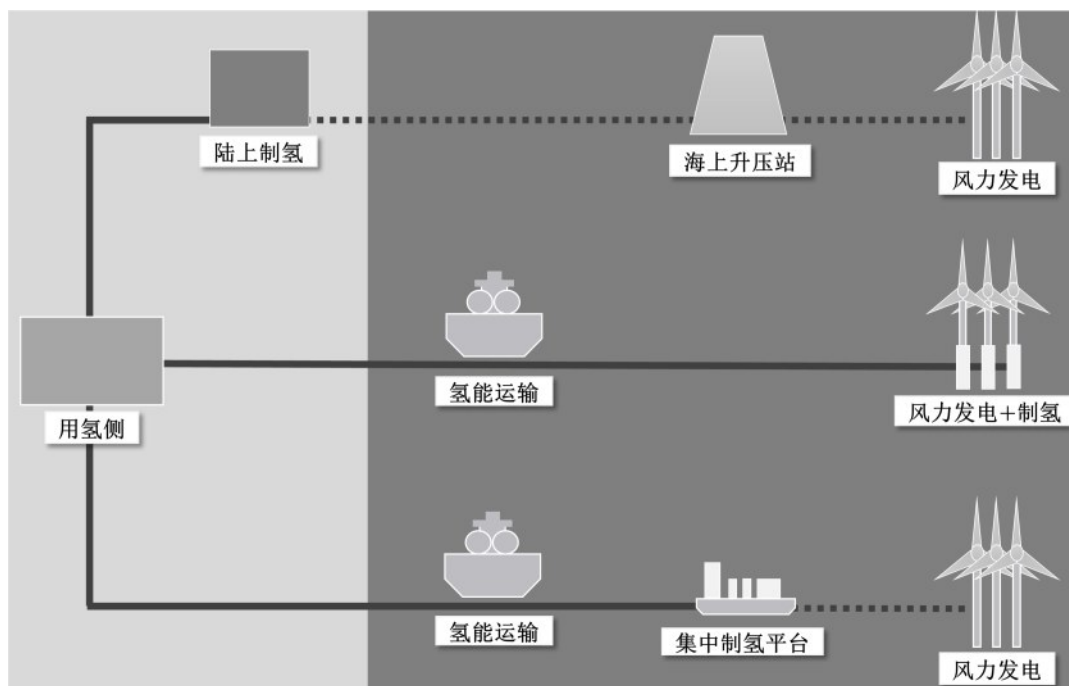


图1 不同海上制氢模式及其重要构成环节

Fig. 1 Offshore hydrogen production modes and critical system components

海上制氢工艺及其所涉及的技术已从实验室验证阶段进入规模化项目示范与应用阶段,目前中国有47个兆瓦级及以上的可再生能源制氢项目已建成,在建和规划中的海上风电制氢示范工程数量仍在快速增加^[11],若干典型项目概况见表1。在“双碳”目标与海洋能源开发战略的双重驱动下,海上制氢产业正处于快速发展期。针对海上制氢工艺的应用不仅包括氢气本身的生产过程,还涉及氢气转化、储存、运输及终端利用等,以此形成完整的氢源应用链条^[12-13]。其中,海上氢源应用依托利用海上风电等海上可再生动力源制取绿氢,由系统进一步转化形成氢基能源,目前主要包括氢气、绿氨、甲醇以及液态有机氢载体(LOHC)等。在海上氢源布局规划中,海上风电通过电解水工艺制取氢气是首当其冲的应用之一,海上氢源应用还包括海上能源岛、海底输气管道、液货船运输、绿色双燃料动力船加注、港口能源供应以及滨海城市能源供给等方向。在工程项目和应用实践迅猛推进中暴露出若干突出的安全问题,如海上风电出力的间歇性和波动性对制氢系统稳定运行产生影响^[14],高盐雾、高湿度及强风浪等极端海洋环境对设备可靠性和结构安全的长期作用^[15],电解系统的氢氧交叉渗透导致混合气体达到爆炸极限发生爆炸,氢气外输过程中因装卸接口失效或管道疲劳破损导致氢气泄漏扩

散等事故隱患。

随着海上制氢逐步迈向规模化与工程化应用,安全问题已从可行性验证转向可靠性与本质安全提升阶段。由于氢气泄漏、氢气扩散、喷射火、蒸气云爆炸(VCE)及其毁伤效应等典型风险源在海洋环境中的演化机制与陆上存在显著差异,风浪耦合作用、开放空间湍流结构及海气界面传质过程均会对氢气泄漏扩散行为产生重要影响。由于当前针对海上制氢相关安全标准及规范体系尚不健全,现有规范多基于陆上化工工艺过程或海上油气平台安全管理的经验,难以涵盖深远海复杂环境下所有的工况及特殊的风险特征。这要求对海上制氢多工艺耦合、强环境扰动及多因素风险交叉作用下呈现出的过程安全复杂性具备更明确的机理性认知,以支撑其过程安全管理执行和体系化标准建设。本研究重点关注了海上制氢工艺及系统相关的过程安全问题,围绕海水淡化系统、电解制氢系统及海上氢储运装置等场景,同时涉及海洋环境因素影响、安全评估标准体系和安全评估方法。本文梳理了与海上制氢工艺系统相关的国内外研究进展,针对海上制氢系统的过程安全研究进行归纳总结,明确了海上制氢工艺关键控制参数及风险主导机理,通过分析不同制氢技术路径在安全设计、风险评估与监测预警方面的共性问题与差异特征,为完善海

表1 中国海上制氢示范项目

Table 1 Offshore hydrogen production demonstration projects in China

类型	名称	地点	时间	项目进度
分布式海上制氢	“东福一号”漂浮式海上制氢平台 ^[16]	福建	2023年5月	已完成中试,连续稳定运行超240小时,制氢纯度达99.9%~99.99%。
陆上制氢	国家能源集团如东光氢储一体化项目 ^[17]	江苏	2024年12月	成功并网并开始运行。
集中式海上制氢	中国海油兆瓦级电解海水制氢撬装装置 ^[18-19]	珠海	2024年12月 (试运行启动)	试运行成功,克服电解海水杂质多、盐度高、腐蚀强等问题。
集中式海上制氢	中石化青岛炼化工厂化海水制氢科研项目 ^[20]	山东	2024年12月 (试运行启动)	已建成试运行,所产氢气并入公司管网系统,用于氢能车辆加注或掺入炼化生产过程。
陆上制氢	山东港口渤海湾港绿氢制输储加用一体化示范项目 ^[21]	山东	2025年7月 (投用启动)	已全面投用,实现风电弃电转化为氢能,全流程稳定运行。
分布式海上制氢	东方电气漂浮式风电耦合海水无淡化原位制氢综合平台 ^[22]	福建	2025年12月 (研发启动)	获得中国船级社原则性批准证书,全球首个通过该认证的漂浮式风电制氢平台。

上制氢过程安全管理规范和选择适用的风险评估方法提供依据。本研究旨在促进海上制氢基础工艺环节与系统可靠性之间的衔接,为海上制氢与氢源利用的过程安全提供科学参考。

1 海上制氢工艺环节风险关键因素

1.1 海上制氢动力系统

海上制氢工艺的实现依赖于电解水技术的发展,以直接或间接电解海水为核心路径^[23]。电解海水的动力来源于海上的可再生能源(如风能、太阳能、潮汐能及生物质能等),海上风电技术因其成熟度高和经济性优势,成为当前主流的供能方式^[24]。配套高电压集电与远距离输电技术逐步成熟,整体系统度电成本得以优化,为海上制氢提供更稳定且资源更优的电力来源。海上风电技术中的电能变换与功率电控系统为核心能量调控工艺,由整流单元(AC/DC)、DC/DC变换器、逆变/并网模块、直流母线、滤波与储能缓冲单元及基于DSP/FPGA架构的控制器构成^[25]。工艺流程中,风机输出的变频变压交流电经整流器转换为直流电,通过DC/DC变换器进行电压匹配与功率调节,满足碱性电解水(ALK)、质子交换膜电解水(PEM)或阴离子交换膜(AEM)电解槽对输入电压、电流纹波及爬坡速率的要求。系统过程中需对海上风速扰动引起的功率波动进行干预,利用直流母线电容单元吸收高频功率尖峰,以避免电解槽因频繁功率冲击产生热电耦合疲劳等安全隐患。与传统风电技术不同,海上制氢风电系统中的电解槽不再是电网的被动负载端,而成为系统核心能量的消纳端。风电输出后用于匹配电解制氢工艺对电压、电流与功率爬坡速率的动态

需求,因此对于风电系统控制目标从传统保障电网稳定供电转向面向电解制氢过程安全性和能效最优。当前,海上风电技术仍面临多重挑战,如风电出力的波动性、结构动力稳定性不足、飞溅区腐蚀以及运维保障困难等问题。其中,风力因素作为影响系统性能的关键参数^[26],其随机性与间歇性特征将改变电解槽的稳态运行状态,导致电解槽输入功率频繁波动。这对制氢效率和设备寿命产生了显著影响,更重要的是增加了电解槽运行过程中的潜在失效风险。本研究认为,优化电解槽的柔性运行是海上风电制氢过程中亟需完善的任务。将短时海上储电技术与制氢系统平台相结合,在协同框架下实现电力波动功率的缓冲与稳定调节。例如,利用超级电容在毫秒级高频波动抑制的优势,对海上制氢动力系统下风力来源中存在电流尖峰进行快速存储,是过程安全保障措施之一。

海上漂浮式装备作为深远海风能开发的基础设施,其动力响应受到风、浪、流等多源环境载荷耦合作用。在海上出现极端海况时,复杂动力行为将引发海上风机的结构疲劳累积,甚至导致倾覆或倒塌等失效模式^[27]。海上风电机组除承担发电功能外,在分布式模式下还需集成制氢模块,从而改变整体结构的质量分布与阻尼特性。传统海上风机的质量集中在发电机、齿轮箱、叶轮系统及塔架基础,制氢模块引入以后,新增的电解槽、储氢缓冲容器、冷却系统及功率电子设备改变了平台质量沿高度方向与平面方向的分布。这种质量再分配导致结构整体固有频率发生偏移,使原本设计避开的风浪主激励频段重新耦合,当新系统固有频率向波浪低频谱或叶片通过频率靠近时,会显著放大结构振

动响应,长期可能诱发低周疲劳裂纹扩展甚至结构屈曲失效。与此同时,海上漂浮式装备的钢结构在飞溅区长期处于干湿交替、高盐雾与富氧环境中,极易发生以氯离子为主导的电化学腐蚀。该区域难以实施有效的阴极保护,腐蚀问题尤为突出^[28]。尽管重防腐涂层、热喷涂及复层矿脂包覆等技术在一定程度上延缓了腐蚀进程,但实际工程中仍面临涂层损伤、维护成本高及密封要求严格等局限^[29-30]。针对现有深远海风电场运维策略开展的优化工作^[31-32],其目标多聚焦于降低全生命周期成本。分析认为,在海上制氢应用场景中应将安全性置于更高优先级,尤其将制氢设备失效对整体系统的级联影响纳入运维决策框架,以实现风险导向的过程安全管理与应急保障。

1.2 海水预处理系统

利用海水制氢分为直接海水电解和海水间接电解两类技术路径。直接海水制氢工艺的关键在于高离子强度和杂质体系中进行电化学生物分解。海水复杂成分中的高浓度氯离子(Cl^-)会优先发生析氯反应,生成 Cl_2 和次氯酸盐等腐蚀性副产物。这不仅会降低析氢效率,还会加速电极和膜材料失效。海水中存在的钙、镁离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+})易形成碳酸钙和氢氧化镁沉积,引起电极表面结垢和传质恶化。海洋环境中的高盐度环境和生物附着对金属基底的腐蚀作用及其对催化剂活性的抑制效应,导致离子传输通道堵塞与活性位点失效^[33],进一步降低系统的安全稳定性。显然,直接通过海水制氢最大的技术瓶颈源自于海水中的复杂成分影响。直接利用海水制氢在理论上是更适用于海上制氢场景的技术,在未来被视为海上平台、漂浮式能源岛及远海原位制氢等应用的重要环节。当前的技术攻关锚定在高选择性析氧催化剂、抗氯腐蚀电极材料、AEM和界面离子调控等方向。如海水无淡化原位直接电解制氢技术^[34],提出将分子扩散、界面相平衡等物理力学过程与电化学反应结合,在微米级气隙通路下利用界面压力差对海水自发相变传质,形成电化学反应协同海水迁移的动态自调节稳定电解制氢方法。新工艺的创新和技术瓶颈破局,有助于解决海水电解制氢的腐蚀性难题,也有利于为海水直接制氢稳定运行提供安全保障。

目前而言,海水间接电解技术无论在工艺成熟度,还是在运行稳定性方面都更适合目前海上制氢的规模化部署。海水预处理工艺形成以预过滤、膜

分离和水质调控为核心的基本流程。以反渗透(RO)与电去离子耦合工艺为当前的主流方案,反渗透作为主脱盐单元,是整个海水淡化工艺流程的关键环节^[35]。RO工艺可实现95~99%的可溶性盐(Na^+ 、 Cl^- 等)去除,但也同时仍会存在溶解 CO_2 、硅酸盐和微量金属离子等,因而水质波动随膜污染和运行状态变化。为保障RO工艺流程的稳定,海水预处理阶段需投加杀菌剂、阻垢剂及絮凝剂等化学药剂。杀菌剂残留的余氯可能对RO膜及后续质子交换膜产生氧化破坏,诱发氢氧混合过程中潜在的爆炸风险。阻垢剂与絮凝剂的过量投入将引发膜面有机污染或胶体沉积,在电解槽阳极形成绝缘层,导致局部过热现象^[36]。RO工艺中产水在深度脱盐后呈弱酸性且具有较强侵蚀性,易对输水管网产生腐蚀作用^[37]。腐蚀过程中释放的金属离子(Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 等)在电解槽阴极发生欠电位沉积,形成枝晶结构刺穿隔膜,易引发电解槽内部的短路。由于残余微量硬度离子在高温浓缩条件下,仍可析出硫酸钙或碳酸钙垢,将会造成流道堵塞^[38]。 Cl^- 与硫酸盐还原菌的协同作用,加剧了对去除有害金属离子阴材料的腐蚀^[39]。铝离子进入后续RO工艺流程后,与阻垢剂反应生成胶体沉积,严重时将导致系统停运。藻类和藤壶等海洋生物在取水口附着,会引起进水流量波动,降低淡化系统运行的稳定性。特别是当季节性赤潮暴发时,进水有机负荷显著增大,导致预处理单元失效甚至整个系统瘫痪^[36]。

海水预处理单元对后续制氢过程的水质保障与过程安全具有决定性影响,通过水质提升可降低膜污染、局部过热、氢氧交叉污染及电极失活速率等诱发的风险。从系统集成角度来看,仍存在能耗较高、流程复杂及与电解系统耦合不足等问题。预处理工艺正在经历着由高标准深度脱盐到按需处理以降低能耗的转型,新型抗污染膜材料、抗氯电解催化剂及耐腐蚀电极体系的协同发展,推动预处理单元与电解过程的边界逐步弱化。针对海上制氢环境的特点,预处理工艺应更注重低维护设计,结合智能控制技术实现结垢的主动调控。由于海水预处理工艺尚未针对海上制氢场景实现最优匹配,因而构建覆盖取水、预处理、淡化和供水的全流程水质管控体系极为有必要。同时,运用危害分析与关键控制点的方法^[37],通过气浮、超滤、反渗透等多级屏障实现污染物逐级去除,结合矿化调节工艺优化产水pH值与碱度以降低腐蚀性。此外,利用

在线监测系统对余氯、浊度、电导率等关键参数进行实时监控,能实现异常工况的快速识别与响应。现行水质控制标准多以饮用水规范为依据,而电解制氢过程对 Cl^- 及痕量金属离子的敏感性更高。为此,亟需建立面向电解制氢工艺的专用海水淡化水质标准与安全规范,以提升海水预处理系统的运行可靠性与过程安全性。

1.3 海水电解系统

海水电解制氢是海上制氢系统的核心环节,全球电解槽技术进步与否直接决定了电解制氢产业化程度的高低。当前电解制氢技术主要包括ALK电解水、PEM电解水、AEM电解水及固体氧化物电解池(SOE)等。ALK电解水工艺常以30~35%KOH或NaOH水溶液作为电解质,在隔膜式电解槽内通过直流电驱动水在阴极析氢、阳极析氧,实现氢氧气体分离制取^[40]。该工艺过程中存在动态负荷工况,电流波动会导致产气速率与传质过程失配,增加隔膜两侧气体扩散与混合风险。PEM电解水工艺以全氟磺酸质子交换膜为隔膜,通过贵金属催化电极实现高电流密度下的水电解反应,阳极析氧、阴极析氢过程在致密膜结构两侧空间隔离^[41]。PEM电解水工艺中对水质的要求高,微量杂质可能导致膜污染与电极钝化,诱发局部热点与电化学失稳。AEM电解水工艺以阴离子交换膜为分隔与传导介质,在低浓度KOH或纯水中实现阴离子(OH^-)迁移

驱动的电化学水分解反应,在阴极析氢、阳极析氧的同时实现气体空间隔离与产氢输出^[42]。低碱或纯水运行环境虽降低腐蚀可能性,但对水管理与离子平衡控制提出更要求,一旦出现局部干涸或离子迁移受阻,将诱发电阻升高形成电化学失稳。SOE工艺在650~850℃条件下利用氧离子导体陶瓷电解质实现水蒸气电解制氢,核心反应发生在多孔电极与致密电解质界面,因而该工艺系统由高温电解堆、蒸汽发生与预热单元、热管理系统、电功率调节单元及气体分离与余热回收系统构成^[43]。高温氢气一旦发生泄漏,由于点火能极低易迅速被引燃导致火灾爆炸发生。分析认为,海水电解制氢工艺若在集中式场景下应提升单体规模与系统集成效率,在分布式场景中应强化模块化设计与快速部署能力。同时,降低贵金属用量、研发高耐腐蚀电极与高导电膜材料,成为提升耐久性的关键方向。基于相变迁移驱动的无泵海水电解技术因其系统结构简化、占地面积小等优势,被视为海水直接电解路径中的潜在突破^[44-45]。海水电解过程的关键瓶颈在于副反应的有效抑制,其发生机理与体系pH值、电极电位及离子浓度等运行参数密切相关,如图2所示。受限于海水中复杂离子组分(如 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+})引发的副反应与材料腐蚀问题,以及在波动工况下气体积聚与燃爆风险,该技术在安全性方面仍存在挑战。

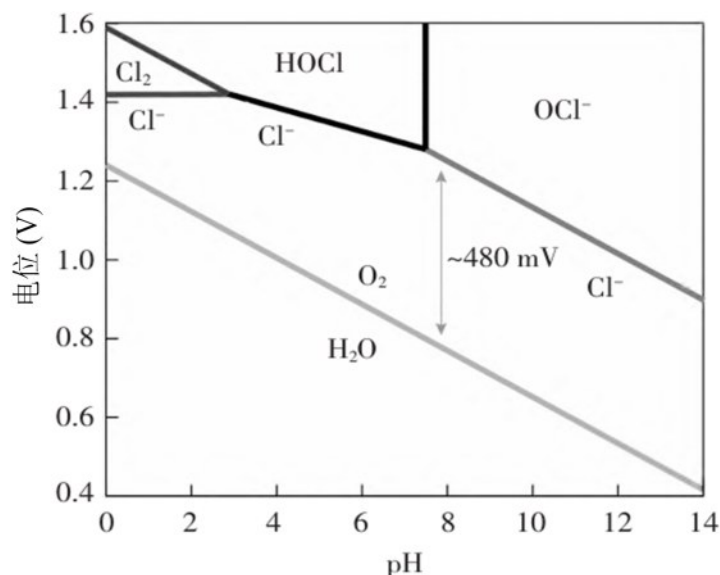


图2 人工海水模型的Pourbaix图^[47]

Fig. 2 Pourbaix diagram for an artificial seawater model^[47]

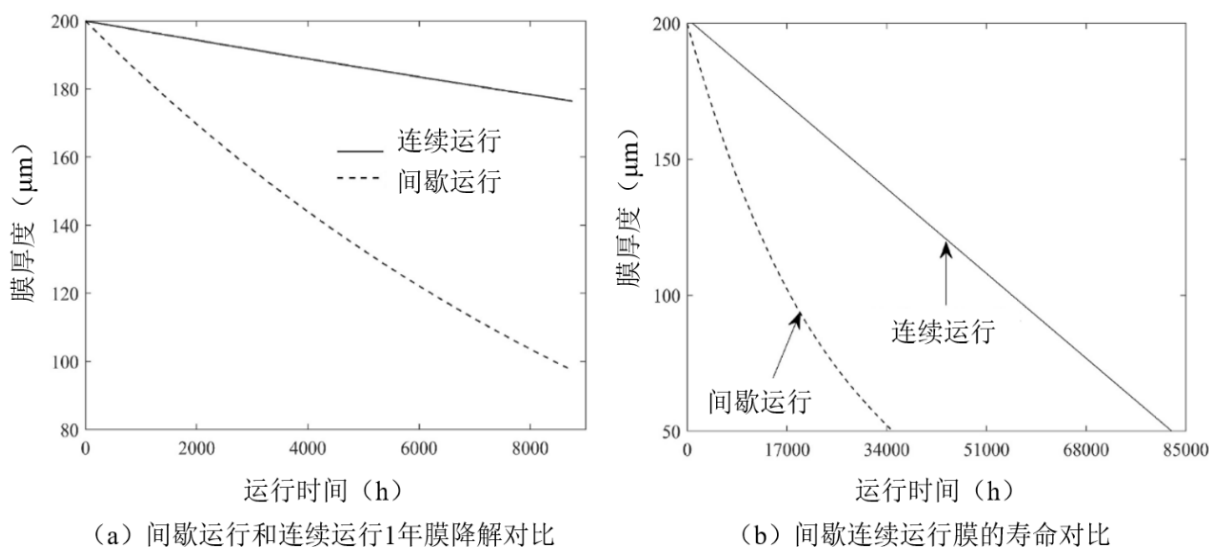
在复杂电解环境中,不同反应路径之间的竞争关系直接影响产氢效率与系统安全性,尤其在含氯

体系中可能诱发有害副产物生成及电极失效。未经深度脱盐的海水体系形成电解液中 Cl^- 浓度较高

时,阳极双电层结构会发生改变。 Cl^- 在界面富集程度高于 OH^- ,导致局部反应物占优,析氧反应(OER)路径被抑制。酸性环境下 OH^- 浓度极低,使得OER所需的反应前驱体不足,进一步强化了CER的路径。这一工艺过程中,富集氯气在电解槽顶部累积会形成高风险气相区,一旦发生氢气侧泄漏或隔膜失效,可能形成氯/氢爆炸混合气体。在碱性体系中, Cl_2 发生歧化反应生成 ClO^- ,其强氧化性加速催化剂基底溶解,可能引发膜材料穿孔,导致氢/氧混合诱发爆炸。因此,抑制CER是海水电解安全控制的关键。研究表明,通过选择析氧催化剂和构建碱性微环境($\text{pH}>7.5$)以提高析氯反应的热力学门槛,利用带负电聚合物对 Cl^- 的静电排斥效应,以及引入高价金属(如W、Mo)掺杂等可降低CER的发生概率^[46]。在阴极侧的析氢反应(HER)消耗了 H^+ ,导致局部界面碱化。当局部pH值超过9.5时,海水中的 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 易形成氢氧化物或碳酸盐沉淀。沉淀结垢会覆盖催化剂活性位点,反应效率由此下降,同时可能诱发局部热积聚,造成热失控反应^[47]。若沉积物堵塞流道,会增加整个系统的超压,致使结构失效风险增大^[48]。针对上述问题,研究认为可通过在循环电解液中加入磷酸盐或硫酸盐,形成缓冲体系抑制局部pH波动,以抑制结垢的发生过程。基

于疏水透气膜的相变迁移,通过实现水蒸气与溶解离子的物理分离,从源头上削弱海水中杂质离子干扰,是提升海水电解过程本质安全性的方法。现有局限在于实验室完成的催化剂优化结果,在真实海况和高电流密度条件下使用过程中的长期稳定性水平仍有待验证^[49]。探索基于真实海水全组分条件的长周期加速老化测试和验证方法,可有效提升技术工程化适用性。

海上风电供电的随机性与波动性易影响电解槽的运行模式,使其偏离传统稳态工况。这不仅降低了整个系统的运行效率,还会衍生多重的潜在安全隐患。在供电系统低负荷运转时,虽然产气速率下降,但气体通过隔膜的扩散和渗透并未同步降低,导致氧侧氢含量快速升高,可能达到氢/氧爆炸极限。同时,渗透至对侧的氢气和氧气可能在电极表面发生催化复合或局部燃烧,造成膜结构损伤甚至穿孔^[50]。在极端海况影响下,频繁启停或大幅度功率波动会加剧电极材料的机械疲劳与颗粒脱落,异常间歇运行时的膜降解速率明显高于正常连续运行下的工况,膜厚衰减速率提高两倍以上。在待机阶段的开路电压状态下,膜材料中氟离子的释放速率增加,加剧了膜结构劣化^[51-52],对比结果如图3所示。



(a) 间歇运行和连续运行1年膜降解对比

(b) 间歇连续运行膜的寿命对比

图3 波动电源与稳定电源运行对比^[52]

Fig. 3 Operational comparison of intermittent and stable power sources^[52]

为适应海上氢气管道输送、液氢储运等应用需求,高压电解工艺逐渐成为发展趋势。与常压系统不同,高压电解工艺通过增强密封结构、强化电堆压紧力及采用高强度端板与耐压流道设计,使气体

在生成阶段处于高压状态,通过动态压力控制和维持电堆内部压力平衡。电解槽内部直接实现了高压产氢,压力可达30 MPa^[53],由此可减少后续机械压缩环节,提升储运匹配性。与此同时,操作压力的

提升会加剧气体在隔膜两侧的反向渗透,从而增加了氢氧交叉混合风险,如图4所示。单纯通过增厚隔膜以抑制渗透,则会导致欧姆阻抗上升,系统能耗因此增大^[54]。针对上述问题,解耦电解水技术通过引入氧化还原介体,将析氢与析氧过程在时间或空间上进行分离,从机理上避免了氢氧气体的直接接触与混合。解耦电解水(DWE)工艺首先在电解单元的阴极侧进行HER,水或质子被还原生成氢气^[55]。同时,在阳极侧不直接发生传统的OER,而是通过引入可逆氧化还原介体(如金属离子对)实现电荷转移,使阳极反应转变为介体氧化反应。被氧化的介体被输送至再生单元,在另一独立反应器中重新还原或完成氧气释放。DWE工艺为高压海上制氢条件下实现本质安全提供了新技术路径,在降

低气体交叉风险与提升运行过程安全方面展现出应用潜力。在DWE工艺中风险转移至新的环节,例如介体可能存在腐蚀性或热稳定性问题,循环系统中可能出现泄漏导致的二次化学风险,再生单元若氧气释放控制不当形成局部富氧环境。因此,DWE工艺虽然可降低传统氢氧混合爆炸风险,但化学介体循环引起的系统安全需要额外隔离管理。未来发展值得重点关注高容量密度氧化还原介体材料的研发,以实现高效、可逆的电子/质子传递。同时,针对反应器结构与过程耦合方式的优化,将能提高析氢与析氧过程的匹配性。此外,发展适用于解耦体系的低渗透且高导电隔膜材料,可实现安全性与能效协同并举。

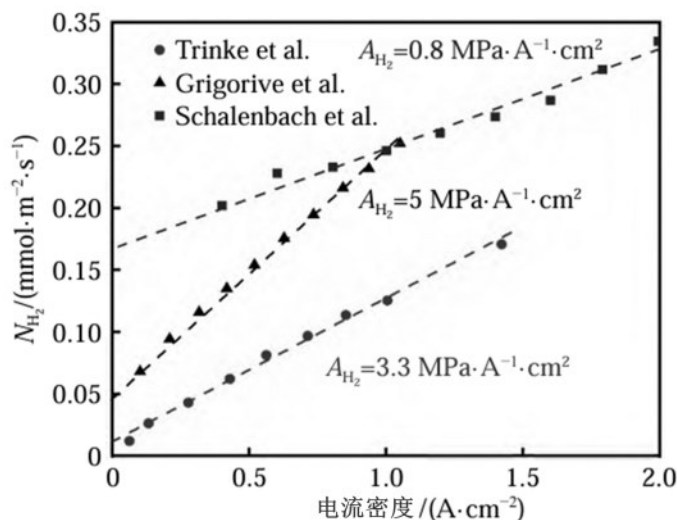


图4 氢气反渗速率与电流密度之间的关系^[54]

Fig. 4 Relationship between H_2 back-diffusion rate and current density^[54]

1.4 氢能储运装置

海上制氢工艺系统中另一个挑战在于为高成本储氢和跨海输氢提供可行方案与安全保障。高湿、高盐雾、强摇晃及空间受限等海洋环境特征,对储运介质的物理化学稳定性与热力学效率提出严苛要求。当前海上氢能储运技术包括高压气态储运、低温液态储运、固态储氢以及LOHC、氨与甲醇等泛氢载体^[56-57]。高压气态储运工艺将氢气通过多级压缩提升至高压状态,在高压容器或输气海管中以气态形式实现储存与远距离输送^[58]。输气海底管道具备实现大规模、长距离氢气输送的能力^[59],但在高压氢环境与海洋腐蚀介质作用下,管道材料易发生氢致开裂(HIC)与氢脆(HE)。海水腐蚀引发的电势差促进氢原子渗入金属内部,形成从应

力、腐蚀到氢脆的失效机制。针对输气海管存在的管材问题,研究认为可从微观氢扩散动力学与焊接缺陷容限角度入手,制备兼具抗氢脆与耐Cl⁻腐蚀性能的新型合金材料或防护涂层,同步构建基于多场耦合机制的寿命预测评估模型^[60-61]。低温液态工艺中包含多级预冷系统,采用液氮或氦制冷循环将氢气逐步降温至零下252.8℃以下,再通过膨胀制冷机深度冷却至液化点,使海上制取的氢气发生相变^[62]。由于氢气在常温下由75%的正氢与25%的仲氢组成,而在液化过程中正氢向仲氢的自发转化将释放大热量。若未加控制可能导致剧烈的蒸发气(BOG)产生^[63],引起储存的容器压力上升。海上存在的晃荡条件会强化储罐内流体的热分层与气液传质过程,放大了压力波动与BOG生成的不稳定

性^[64]。工程安全控制措施主要依赖于储罐防晃结构设计、BOG主动回收系统,以抑制流体扰动、集成高效正仲氢转化催化剂 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 与氢制冷循环系统,或采用主动制冷实现近零BOG储存^[65]。此外,液氢极低温会导致普通碳钢等金属材料发生脆性断裂,必须采用奥氏体不锈钢、铝合金或复合材料,并进行严格低温韧性测试。LOHC技术包括加氢、储运、脱氢和载体回收再利用四个工艺环节^[66],海上制取的氢气进入加氢反应器后与贫氢有机载体(如甲苯、二苄基甲苯、咔唑类化合物等)发生加氢反应,形成富氢载体,富氢LOHC可直接利用储罐或输送管道储存和运输。在固态储氢工艺中,氢气在一定温度和压力下扩散至固态储氢材料表面,经催化解离形成氢原子,扩散进入材料晶格后与金属原子发生可逆反应形成金属氢化物。吸氢过程可由公式(1)表示。



式中, M 为储氢合金; MH_{2n} 为形成的金属氢化物。

以 LaNi_5 、 TiFe 、 TiCr_2 和 MgH_2 等金属或合金为代表的储氢材料,因其高体积储氢密度及泄漏时吸热自抑制特性,在空间受限的海上环境中具有应用潜力。材料在循环过程中易发生晶格膨胀与粉化,且对水蒸气及 Cl^- 等微量杂质高度敏感,易发生中毒失效,该特点制约了其长期稳定应用^[56]。固态储氢在体积储氢密度方面具有突出的优势,部分低温或中温储氢材料已实现小规模应用验证^[25],但在循环寿命、材料稳定性及系统集成复杂度方面仍未达到大规模商业化的要求。高温金属氢化物、复杂氢化物(如硼氢化物、铝氢化物)和吸附型材料(如MOFs、多孔碳材料)等处于实验研究阶段,技术成熟度呈现明显梯度情况。分析认为,需通过元素掺杂、纳米结构调控及表面包覆等手段,增强晶格稳定性,降低对杂质的敏感性。解决吸放氢过程中的热效应与动力学制约,可提升整体效率与响应速度。针对海上的高湿和高盐环境,应发展具有环境耐受性的封装与防护技术,实现材料与环境的有效隔离。

LOHC在海上制氢完成后通过加氢实现储氢,能解决传统储氢模式下对容器压力和运输量的高要求^[63]。海上制氢平台的稳定性对LOHC加氢反应器内部流动状态产生扰动,这种周期性动态载荷会破坏反应器内部气液界面的稳定性,导致氢气气泡分布不均和局部湍动增强,影响氢气在液相中的溶

解与扩散过程。海洋高盐、高湿环境会加剧LOHC加氢系统的腐蚀,降低密封可靠性,增加反应器内部气液两相流动过程安全风险。此外,LOHC加氢反应过程为放热反应,需稳定的热交换系统维持反应温度,这对海洋环境中的LOHC加氢的热管理提出更高要求。分析认为,应避免因海洋环境下设备长期受低温海风、高湿空气及海水温差影响,而出现外部热损失增加和局部温度波动等问题。绿氨(NH_3)与甲醇(CH_3OH)作为典型泛氢载体,在运输距离超过1000公里时具有明显成本优势^[57]。氢气与空气分离装置获得的高纯氮气按化学计量比混合,在超过400~500℃和10~30 MPa条件下经铁基催化发生合成反应生成液氨。甲醇作为载体时,氢气与捕集的 CO_2 在 $\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$ 催化剂作用下,合成甲醇的条件变为200~300℃和5~10 MPa。由于液氨具有高毒性与强扩散性,对铜、锌等金属材料具有腐蚀作用。甲醇虽便于储运,但其重整制氢过程涉及复杂碳循环,且副产 CO 会造成燃料电池潜在的阳极毒化作用^[63]。因而,需采用耐腐蚀材料和高密封结构,同时辅助储运全过程的动态监测技术,以提升泛氢载体工艺过程的安全性。

1.5 海上氢源应用

通过海上制氢获取的绿氢及其作为载体的衍生氢源燃料,可为航运与水上交通运输行业提供终端应用。氢燃料作为航运船舶顺应国际航运脱碳的重要代替燃料,在船舶能源流动、燃料消耗、碳排放、船舶碳强度指标和能效设计指数等方面均表现优异。大型邮轮改用氢燃料后,预计能实现18.7%的燃料消耗,船舶总能耗下降近25%^[67]。绿氨和甲醇作为大型双燃料动力船舶远洋航行的重要燃料,其核心工艺即为海上船对船加注。由燃料供应船直接向受注船输送液态氨或甲醇,工艺流程包括加注准备、船舶靠泊定位、船岸安全检查、连接输送系统、惰化置换、燃料输送、吹扫回收及断开撤离等环节。液氨和甲醇一旦在海上发生泄漏,会迅速蒸发并扩散到大气中,波及范围广泛。氨和甲醇都属于易燃介质,在海洋环境中扩散时存在重大火灾和爆炸风险^[68]。除此以外,海上平台与海洋装备同样需要海上氢源补给,利用海上风电为油气平台供能,是减少碳排放的高效策略。然而,海上风电固有的波动性给维持稳定运营带来挑战。利用海上氢源能为退役海上平台的再利用提供可行的途径^[69],通过减少排放支持能源转型,还解决了基础设施的限

制问题。

对于远离主电网的海岛及海洋设施,氢能可作为长周期储能介质,实现风电波动调节与持续供电。相较储能电池,氢能更适用于周级至季节级能源调节。以毛里求斯岛为例,通过专用波浪能和带有浮动海上太阳能光伏发电,混合波浪能系统可实现较低平准化电力成本^[70]。利用海上氢源解决季节性电力平衡的问题,为岛屿环境中可再生能源供需变化管理提供新方法。由于基于氢源的海岛多微电网系统对不确定性的敏感程度高,尤其是由风能变化驱动的不确定性,会影响可再生能源发电能力和能源输送网络的运行可靠性^[71]。利用海上氢源实现跨时间尺度储能与电网削峰填谷过程中,应同时考虑基础设施部署触发辅助需求等内生和外延不确定性(如风速、太阳能发电、负荷需求波动)。海上制氢为港口重卡、港机装备及船舶提供氢燃料来源,与港口综合能源系统共同发展。现有的多数港口缺乏加氢基础设施,这仍是推广氢源应用的障碍之一。港口大规模氢燃料加注需高通量的基础设施,设施集紧凑型储存和先进能源管理于一体,根据船舶需求、港口空间、加氢时间和电力需求选择压缩氢或液态氢^[72]。这一问题随着国际绿色港口建设推进将有望解决,港口型氢能供应体系将成为航运供应链中的重要应用环节。

2 海洋环境对制氢过程安全的影响

2.1 海洋动力因素的影响

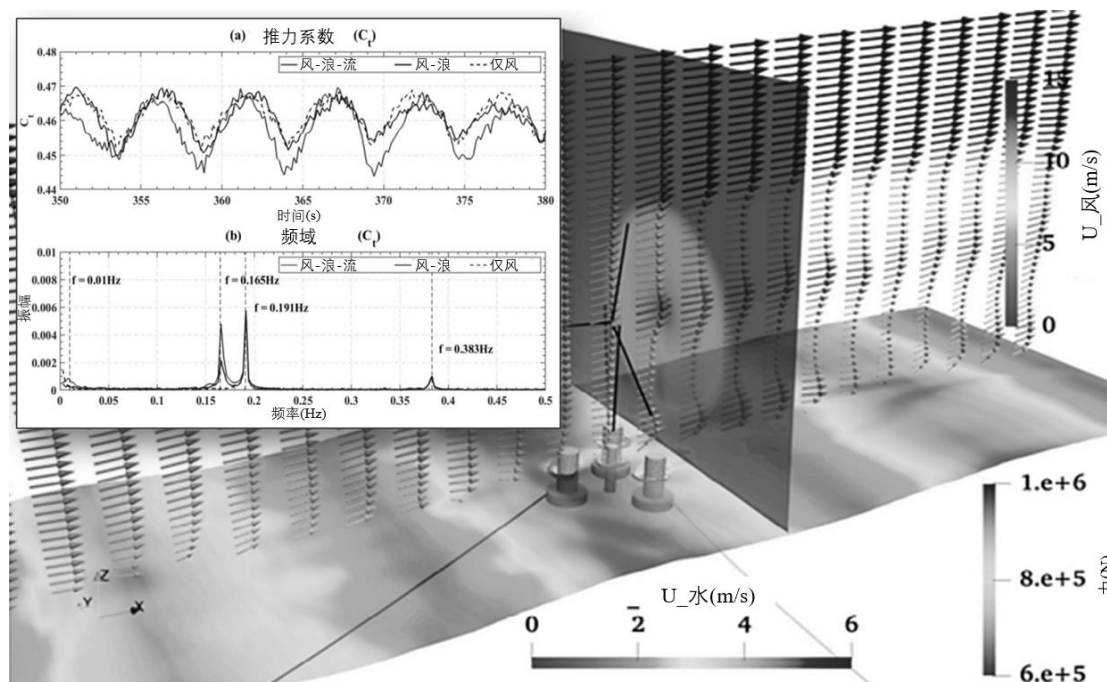
海上风电制氢系统的海面设施包括浮式风电平台、制氢设备集成模块及系泊系统,其整体稳定性高度依赖于海洋波浪与海流的耦合作用(WCI)特性。WCI并非简单的线性叠加过程,当波浪传播方向与海流方向一致时,波长增大且波高降低。反之,由于波能压缩作用,波长缩短且波高显著增大,产生更大的波陡和非线性波峰,形成复杂的三维波流场^[73]。海流会改变波浪的传播特性(如波长、波高及波速),增强波浪对海上平台结构的冲击载荷。另一方面,波浪运动引起的周期性压力变化会扰动局部流场,诱发涡旋结构与二次流动,加剧流场复杂性^[74]。WCI可放大波频载荷,在极端海况下导致结构纵荡响应幅值显著增加。同时,系泊系统的任何非线性特征使传统线性叠加方法失效。图5为WCI下时间序列和频谱特性,对比了风、风-浪及

风-浪-流耦合作用等场景^[75]。结果表明,在强台风条件下波流反向作用导致有效波高增加,最大差异可达1.5 m,对结构生存设计标准产生直接影响^[76]。传统二维线性波浪理论难以准确描述该类复杂工况,基于非线性波浪分解方法能实现对三维波场中水质点速度与加速度分布的预测,并修正波峰区域的预测偏差^[77]。WCI会诱发海上制氢平台结构的多自由度动态响应,造成潜在的结构失稳风险。海上制氢平台失稳后会扰动海水预处理装置、气液分离器、储氢设备及输送管路内部流体流动,诱发液位波动、压力脉动和局部振动放大,严重时导致管路密封失效和氢气泄漏。

在集成制氢模块的浮式平台上,因波浪与风向不一致,引起风产生前后弯矩,而波浪产生左右弯矩,将致使塔筒侧向及前后弯矩的疲劳载荷增加150%^[78]。对飓风环境下的半潜式平台,当低频涌浪与平台固有频率接近时,将产生双峰谱响应而放大结构疲劳损伤^[79]。当与制氢装置等多功能模块集成时,系统复杂性提升,涉及结构、载荷和工艺等多场问题仍需优化。海上浮式平台运动会削弱沉淀池与气浮单元的分离效率,导致预处理水质波动,进而影响系统的稳定运行。此时,WCI使风机功率系数波动增强,其标准差可提高至原有水平两倍以上。电解槽制氢效率下降和电力输出波动增强,诱发电网不稳定及关键机械部件的疲劳失效。同时,浮体运动对风机气动性能产生反向干扰,功率波动幅度随叶尖速比及纵荡频率的增加而放大^[80]。在极端海洋环境中,系泊系统与立管的极值载荷难以准确预测^[81],制氢模块的吊装与运维更易发生设备碰撞^[82]。分析认为,应考虑风-浪-流耦合、设备运行载荷及内部流体动力学,建立精细化的失效模型评估海上风电制氢平台的动力响应与结构安全。通过结构轻量化设计、阻尼控制技术及更合理的系泊方案降低疲劳载荷与共振风险,实现结构可靠性与工艺过程安全的协同优化。

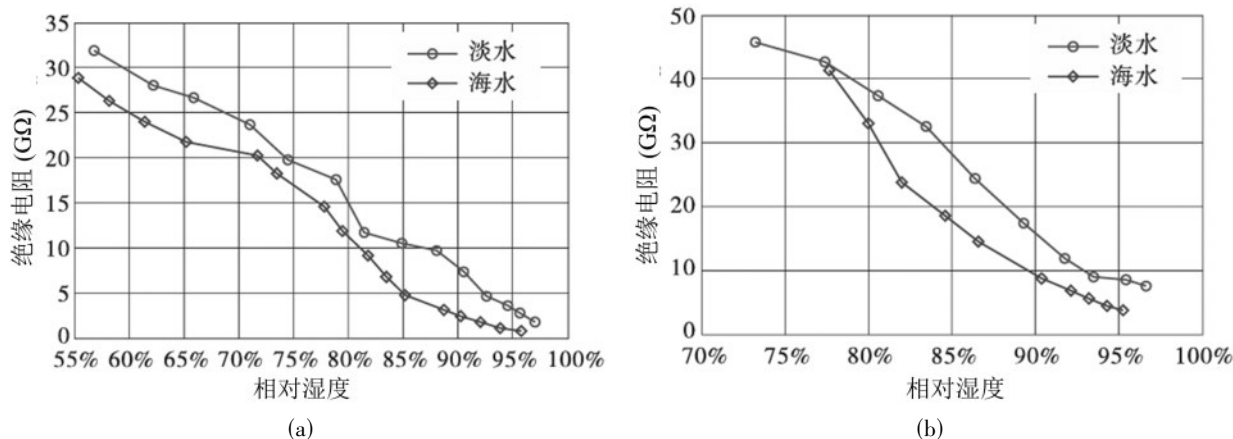
2.2 高盐雾高湿度腐蚀环境的影响

海上高盐雾与高湿度环境的协同作用,通过金属腐蚀、绝缘老化及密封退化等多重机制,对制氢系统的长期稳定运行构成威胁。海洋盐雾中以NaCl为主,伴随少量MgCl₂与CaCl₂,腐蚀作用表现为电化学腐蚀、缝隙腐蚀、点蚀和应力腐蚀开裂等形式。电解槽法兰及连接件等结构缝隙处电解液易滞留,形成局部缺氧环境而诱发加速腐蚀。Cl⁻易

图5 风、风-浪、风-浪-流耦合作用下时间序列与频谱特性^[75]Fig. 5 Time series and frequency spectrum under wind, wind-wave, and wind-wave-current coupling cases^[75]

在不锈钢或钛合金钝化膜缺陷处吸附并诱发点蚀,且坑内酸化效应将促进金属溶解。由于 Cl^- 离子半径小,在裂纹尖端的富集加速阳极溶解过程(AD),导致裂纹进一步扩展。同时,腐蚀过程中生成的氢原子一旦渗入金属晶格,将造成HIC行为。对于高强钢及不锈钢材料而言,随着 Cl^- 浓度升高,应力腐蚀开裂机制由以AD为主转变为以HE为主导^[83]。图6中对比了电气设备绝缘电阻在淡水和海水不同加湿条件下的影响,图中呈现了电气设备绝缘电阻值的变化趋势。图6(a)为抽屉单元绝缘电阻受湿度的影响,图6(b)为电缆绝缘电阻随环境相对湿度的变化。结果表明,海洋环境相对湿度维持在70%~95%,高湿度通过加速腐蚀过程,降低电气绝缘性能及削弱密封可靠性,对海上制氢过程安全产生不利影响。当相对湿度超过80%以后,绝缘电阻值出现明显下降趋势,此时极易诱发电气故障^[84]。此外,湿热环境中导致环氧树脂等绝缘材料发生水解、溶胀及微裂纹扩展,同时表面沉积盐分吸湿潮解形成导电薄膜,引发漏电、局部放电及表面碳化等潜在安全隐患。研究表明,经老化后的绝缘材料表面电阻率可降低至原始水平的0.06%,且疏水性退化^[85]。湿热电晕老化会在绝缘表面形成孔洞和裂纹结构,增强了材料的物理与化学吸湿能力,致使闪络电压和表面电阻率大幅度下降^[86]。

密封技术在陆上化工与电解装备中形成较成熟的工艺,如弹性体密封、金属密封及复合密封结构等。面向海上高湿、高盐雾及温度交变等复杂环境,长期耐久性与抗老化能力仍存在不足,特别在材料化学稳定性与力学性能共同退化方面,缺乏针对性的工艺解决方案。密封系统失效往往是导致设备腐蚀、海水侵入、氢气泄漏及火灾爆炸事故的重要诱因。海上制氢涉及大量承压设备和流体连接部件,包括反渗透装置、高压泵、电解槽、气液分离器、压缩机、储氢容器及输氢管道等,设备采用法兰密封、机械密封、O形圈密封、焊接密封及金属垫片密封等结构^[42]。电解槽密封失效后,高压氢气可能渗入氧气侧,在静电、电火花或局部高温作用下发生爆炸事故。若氧气进入氢气侧会降低氢气纯度,影响压缩和储存装置使用安全。在海洋环境作用下,酸性湿热环境可引发硅橡胶中 Si-O 键水解和氟橡胶的脱氟断链反应,叠加波浪载荷引起的周期性应力松弛,密封结构更易产生失效行为。由于密封失效所致的工艺系统泄漏率超过临界阈值时导致电压衰减,同时放大了阳极侧氢脆的衍生风险^[87]。海洋动载作用增加了设备长期承受交变载荷和低频振动的频率和强度,高压压缩机及氢气输送泵中的轴系振动会导致机械密封端面间隙周期性变化,加剧密封面的磨损而使密封寿命降低。密封技术

图6 海水与淡水作用下绝缘电阻受湿度的影响^[84]Fig. 6 Influence of humidity on insulation resistance under seawater and freshwater environments^[84]

属于设备机械设计层面的问题,同时也是保障海上制氢系统本质安全的屏障。未来海上制氢密封技术应重点提升密封材料的环境耐受性,通过分子结构改性、纳米填料增强和表面涂层技术^[88],提高抗水解、抗腐蚀及抗氢渗透的能力。引入多级密封与冗余密封等工艺,结合预紧力自适应调节与抗松弛设计,降低循环载荷作用所致的失效。围绕海上制氢电解系统的特性,通过研制低渗透性与低电阻界面的密封材料,减缓密封性能与电化学性能共同作用下的失效速率。

2.3 极端气候条件的影响

极端海洋气象条件包括台风、强风暴、暴雨及寒潮等,具有突发性强、影响范围广等灾害特征。从过程安全角度来看,海上极端气候通过超设计载荷冲击、能源供应中断及设备功能退化等多个环节影响,对原本独立的海上风电制氢系统各单元构成工艺和结构风险。台风和强风暴形成极端风-浪-流载荷,强风作用于海上风机叶片和塔架,使其承受的气动力载荷超出设计值。瞬时极端阵风(如台风眼壁区域)可引起风机叶片结构损伤及塔筒屈曲,直接切断制氢系统的电力来源^[89]。当风速超过设计切出风速时,风机为避免叶片超速而自动停机,导致电解槽失去稳定电源,引起催化剂极化和电极过电位增加。波浪和海流持续作用于海上平台和系泊系统,平台结构失稳增加了平台上设备位移和密封原件松动的可能性。此外,在强风与逆流共同作用下,承担氢能运输任务的船舶易发生失速和剧烈横摇所致的倾覆风险^[90],对于水下输气管道而言,存在承受超过其更大弯曲载荷和拉伸载荷的失效风险。

海上雷电是诱发电气故障、氢气泄漏、火灾爆炸及系统停运等事故的触发因素,通过直接雷击、感应雷、雷电电磁脉冲(LEMP)及雷电过电压等多种作用形式,对海上风电、海水电解、氢气储运及控制系统产生全过程安全影响。海上风机塔筒高度超过120 m,叶尖高度可达250 m以上,若引流系统设计不足,雷电冲击电流进入变流器和升压变压器,会产生数十千伏以上的瞬态过电压,导致电解过程供电中断^[91]。供电中断会直接破坏电解槽的过程安全,此时气体扩散持续存在,隔膜两侧的氢氧浓度梯度不断减小,氧侧氢含量迅速升高,PEM系统进入危险运行状态。相比雷电瞬态冲击作用,暴雨通过持续雨水和高积水等方式影响海上制氢系统的过程安全。暴雨还影响海水预处理系统,强降雨使近岸海域悬浮颗粒、有机物及微生物浓度迅速升高,导致海水浊度显著增加。预处理系统中粗滤器和RO膜污染速率加快,当RO系统运行压力超过设计值时,可能引起膜元件破裂。与此同时,大量雨水进入取水区域改变局部海水盐度和pH值,使海水预处理系统运行参数频繁波动,增加工艺控制难度。海雾中的微小盐雾颗粒(如NaCl、MgCl₂和CaCl₂)易沉积于电气设备表面,形成连续导电液膜并使绝缘电阻显著下降。同时,高湿环境还促进电缆绝缘层吸湿膨胀,加速硅橡胶和氟橡胶等绝缘材料的水解老化,使密封性能逐渐下降。海上寒潮期间,局部海域环境温度降至接近0℃,海水预处理系统RO跨膜压差升高,导致产水通量下降。低温还会降低超滤膜及离子交换树脂的传质效率,加剧了预处理系统水质波动,导致电解制氢产生不稳定运行风险。

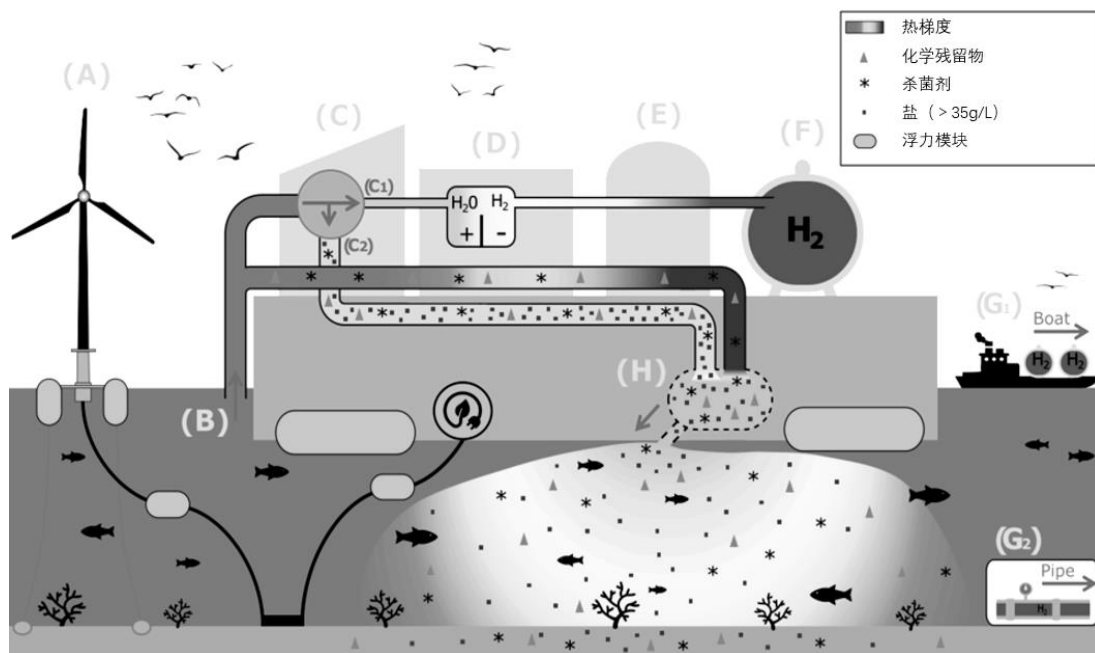
针对海上极端气候产生的潜在过程其安全隐患,应基于更多源途径观测的数据与人工智能方法,构建高精度海洋气象模型。当前海洋气象模型在10~100公里内对台风路径、强度演化及风场结构预测具备较高精度,可实现数天尺度的有效预报。随着引入集合预报与不确定性量化方法,可使极端事件风险评估由静态确定分析向概率预测转变。在近海海上制氢平台周围低于1公里范围内,概率预测与风险量化方法可实现对阵风、局地湍流及浪-流耦合呈现结果仍然存在分辨率不佳、精细预测能力不足等问题。通过实现极端天气的提前预警与风险评估,为海上制氢系统提供必要的运行调整与避险窗口,提升整个工艺过程在复杂海洋环境下的安全性与韧性^[92]。研究认为,一方面依赖卫星遥感、浮标观测、雷达及平台原位监测数据,能够提升海上极端气候预测模型的初始场精度和时空连续性。另一方面,融合大气、海洋、波浪及海冰等因素进行统一建模,构建集成机理约束和数据驱动的混合模型,可提升海上制氢系统应对突发极端气候的响应水平。

2.4 对海洋生态系统的影响

海上制氢工艺涉及海水淡化、电解制氢、氢气压缩、储存及运输等多个关键工艺环节,各环节之间具有关联性。海上风电制氢工艺流程涵盖了从海水抽取到产水排放,以及现场氢气生产运输的所有活动和阶段,如图7所示。其运行过程中会对海洋生态环境产生热污染、高盐排放及化学扰动,同时可能引发氢气泄漏、可燃气体扩散、火灾爆炸及温室效应等过程安全与环境破坏。热法淡化排放是海上制氢供水系统的重要工艺环节,热法海水淡化装置在生产淡水过程中,将高温、高盐度浓盐水以及部分化学残留物经排放系统输送至海洋的全过程。在蒸发过程中,仅有水分发生汽化,绝大部分盐分(如NaCl、MgCl₂、CaSO₄等)仍保留于液相,因此剩余海水不断浓缩形成高温高盐卤水。高温高盐卤水会改变水体的密度结构与渗透压分布,降低溶解氧含量,对浮游生物、鱼卵、底栖生物及海草等敏感生态系统造成长期影响^[93]。用于稀释排放的高压扩散装置所产生的近底高速射流,对固着型无脊椎生物具有冲刷与破坏作用^[94]。海上制氢平台运行过程中持续产生不同频段的机械噪声、水动力噪声及电磁设备伴生噪声,来源海上风电机组、海水取水泵、高压压缩机、海水淡化装置、电解循环泵、冷

却系统、增压设备以及氢气输送泵等。由于设备运行产生的背景噪声频率范围与许多海洋生物的通信频率存在重叠,持续噪声可能损伤海洋生物听觉系统或干扰其群体声学联系。海缆周围形成的局部磁异常区域会改变原有地磁场分布,导致鱼类出现迁徙路线改变现象。研究表明,部分鳐鱼在经过海底电缆区域时会明显降低游动速度,表现出重复绕行行为,其导航系统受到一定程度干扰^[95]。海上制氢平台的照明系统会改变浮游生物的昼夜垂直迁移规律,浮游生物在平台附近大量聚集增加海水取水系统中的生物负荷,使过滤器、RO预处理系统更易发生堵塞^[96]。大量生物聚集也促进贝类在平台结构和取水设施表面附着,加剧冷却系统与海水淡化装置腐蚀风险。海上制氢系统氢气泄漏爆炸产生冲击波,将直接导致海洋生物组织损伤甚至死亡^[97]。

海水抽取和产水排放工艺集成至海上制氢平台后,在空间受限、能源波动及生态敏感环境约束下的适应性尚处于过渡阶段。取水环节应更注重生态友好型设计,如采用低流速取水、仿生过滤结构及多级拦截技术,降低对浮游生物及幼体的卷吸与损伤。淡化工艺应顺应低能耗与高适应性方向发展,利用高通量低压膜材料、抗污染膜及能量回收装置的优化配置,适应海上制氢过程中的波动电源条件。海水经过取水、预处理、RO或热法淡化后,淡水进入电解制氢系统,而浓盐水则首先进入排放调节单元。浓盐水经排放泵输送至海底排放管道,排放末端设置扩散器实现高速喷射,使浓盐水与周围海水快速混合稀释,降低排放羽流的盐度和温度梯度。高盐环境会促进海洋生物污损和结晶沉积,因此在海水排放环节应重点优化浓盐水扩散与混合过程^[98]。通过多孔扩散器、分层排放及远场稀释耦合设计,降低局部高盐、高温羽流对海洋生态的破坏。海底输气管道运载氢气过程中存在微小泄漏风险,若缺乏有效控制措施,氢气泄漏将显著削弱海上制氢在减缓气候变化方面的潜在效益。研究表明,氢气作为一种间接温室气体,其泄漏对大气化学过程具有重要影响。管道泄漏率维持在5%的条件下,氢气对短期全球变暖的贡献率可达总影响50%~63%^[99]。分析认为,海上制氢工艺过程运行应充分考虑生态环境保护的需求,通过优化浓盐水排放工艺、控制设备噪声和海底电缆电磁辐射、加强氢气泄漏监测预警,降低制氢工艺对海

图7 海上风电场制氢的一般工艺流程^[97]Fig. 7 General process of offshore H₂ production from offshore wind farm^[97]

洋生态环境的影响,实现能源开发、环境保护与过程安全协同发展。

3 海上制氢安全标准体系与评估方法

3.1 规范标准体系

海上制氢工艺系统及过程环节中涉及海洋法、能源法、安全生产法及环境保护法等不同监管领域的法律法规。目前,国际上尚未形成专门针对海上制氢的系统性法规体系,导致现阶段相关监管主要借鉴海上油气开发、海洋工程及陆上氢能相关法规进行延伸适用。表2汇总了目前已发布的典型氢能相关法规与标准。总体来看,海上制氢面临标准缺失与适用性不足的双重挑战,通用性规范正逐步建立。中国船级社发布的《海上制氢设施指南(2025)》^[100]首次针对我国海上制氢设施进行了系统规范,为海上制氢设施的设计、建造、检验及安全评估提供重要技术准则。针对海水预处理工艺,《反渗透海水淡化产品水水质要求》等相关标准的发布,为电解制氢原料水水质控制提供了技术支撑^[101]。然而,现有标准体系主要来源于陆上化工装置和海上油气工程的工程实践,尚难以全面覆盖海上风电制氢系统的特殊工况及其过程安全需求。波动性可再生能源供电条件下电解槽动态运行特

性及寿命衰减规律、复杂海洋环境对氢气储运系统安全性的影响,以及风-浪-流多场作用下工艺系统风险演化等关键问题,在现行标准体系中均缺乏系统规定和针对性技术要求。因此,现有标准体系在系统安全设计、动态工况适应性、多场耦合过程安全分析以及风险评估方法等方面仍存在不足,亟需建立面向海上制氢全生命周期的专用标准体系。未来,应构建覆盖设计、建造、安装、调试、运行、检验、维护直至退役全过程的海上制氢标准体系,完善本质安全设计准则、多场耦合工况适应性要求、极端海洋环境下安全评价方法以及全过程风险管理规范。同时,应加快制定关键工艺环节的专用技术标准,包括波动电源条件下电解制氢设备运行规范、海上氢气储存与运输安全标准、海水制氢原料水水质标准以及海上制氢环境影响评价技术规范等,加强与国际标准体系的协调衔接,推动我国海上制氢标准体系与国际规则接轨。

3.2 风险评估方法

传统安全评价方法在海上工程设施安全分析中仍具有较高的适用性和工程应用价值。表3汇总了适用于海上制氢系统的主要风险评估方法。从技术发展水平看,现有风险评估方法总体处于工程应用成熟阶段,形成以SCL、F&EI、HAZOP及FMEA等的方法体系,在危险源辨识、工艺偏差分析、事故情景推演及风险定性与半定量评价等方面具有较

表2 海上制氢工艺安全相关的规范标准

Table 2 Standards and guidelines for process safety in offshore hydrogen production

名称	发布机构	发布年份	适用对象
GB 4962-2008《氢气使用安全技术规程》 ^[102]	国家质检总局(AQSIQ)/国标委(SAC)	2009	强制性国家标准,规定了氢气在生产、储存、输送过程中的基础安全要求。
ATEX Directive 2014/34/EU ^[103]	欧盟议会(EU Parliament)	2016	针对在潜在爆炸性环境(如制氢车间、加氢站)中使用的设备和保护系统的防爆认证指令。
GB/T 34542-2017系列《氢气储存输送系统》 ^[104]	SAC	2018	规定了氢气储存和输送系统的通用技术要求,包括固定式和移动式设备。
ISO 19880-1:2020(Gaseous hydrogen fueling stations) ^[105]	国际标准化组织(ISO)	2020	规定了气态氢加氢站的通用安全要求和设备规范。
Alternative Fuels Infrastructure Regulation ^[106]	欧盟理事会(Council of the European Union)	2023	强制要求欧盟主要交通干道和港口部署加氢站,为海上氢能运输和港口应用提供法律强制力。
《能源法案 2023》(Energy Act 2023) ^[107]	英国议会(The Parliament of United Kingdom)	2023	英国氢能生产、运输、储存,含海上制氢许可制度。
NFPA 2 Hydrogen Technologies Code ^[108]	美国国家消防协会(NFPA)	2023	美国最核心的氢能法规,涵盖制氢、储氢、管道输送及加注的消防与安全距离要求。
ASME B31.12 Hydrogen Piping and Pipelines ^[109]	美国机械工程师学会(ASME)	2023	专门针对氢气工业管道和长输管道的设计、材料、制造和测试标准。
《海上制氢设施指南(2025)》 ^[100]	CCS	2025	海上浮动与固定制氢设施,含风电制氢平台。

成熟的理论基础和工程实践经验。然而,上述方法大多建立在静态或准静态分析假设基础上,在表征海上制氢系统所具有的动态多物理场作用、非线性风险演化、不确定性传播以及多故障耦合失效分析等方面,其适用性有待进一步提升。近年来,随着动态风险评估理论的发展,将BN、DFT及马尔可夫过程等动态建模方法引入海上制氢安全分析,可实现系统运行状态随时间演化的动态更新,并提高复杂工况下事故演化过程的描述能力^[110-111]。在此基础上,通过强化多源不确定性建模,将风-浪-流环境载荷、设备性能退化、工艺参数波动及人为操作行为等关键影响因素纳入统一分析框架,可构建面向海上制氢系统的多尺度、多物理场耦合风险评估模型。同时,结合大数据分析机器学习技术,对历史运行数据、在线监测数据及故障事件数据进行深度挖掘,实现模型参数的自适应更新、风险状态实时识别及事故发展趋势预测,提升风险评估模型的准确性与泛化能力。

4 结 论

海上制氢作为深远海可再生能源高效消纳与就地转化的重要技术路径,不仅能提高海洋可再生

能源利用效率,且有助于重构新型海洋能源供给体系,是实现“双碳”目标和全球能源低碳转型的重要发展方向。本文围绕海上制氢工艺系统及其过程安全问题,对关键工艺、风险机理、安全评估方法及标准规范体系进行系统梳理,得到以下结论:

- (1)海上风-浪-流多场环境载荷耦合作用、高盐雾高湿腐蚀环境及台风、雷电等极端海洋气象条件,共同增加了海上制氢系统在电力供应、电解制氢、结构完整性及设备可靠性等关键工艺环节中的运行风险,导致海上制氢工艺系统全过程安全面临更高的不确定性和复杂性。
- (2)海上制氢工艺涵盖海水预处理、电解制氢、氢气净化、压缩储存及输送等关键工艺环节,其过程安全风险主要表现为材料腐蚀与氢脆失效、电极副反应竞争、气体交叉渗透、热失稳及储运系统多物理场耦合等典型问题。应围绕耐腐蚀与抗氢脆材料开发、电解过程选择性调控、高效密封与隔膜优化以及储运系统安全等开展协同研究,持续提升海上制氢系统的本质安全水平。
- (3)针对海上制氢工艺系统动态运行、多源耦合及强不确定性的典型特征,风险评估应构建机理模型与数据驱动模型相融合的综合分析框架,以物理机理模型保障风险分析的可解释性,以数据驱动

表3 海上制氢过程的安全评估方法

Table 3 Evaluation methods for process safety in offshore hydrogen production

评估方法	适用场景	优点	局限
安全检查表 (SCL) ^[112-113]	平台运维与应急管理,特别是辅助设施的日常巡检。	直观、快速核对规范的符合性,适合标准化管理。	无法量化设备性能退化带来的动态风险;无法揭示事故发生的因果逻辑。
火灾爆炸指数 分析(F&EI) ^[114-116]	化工及海洋油气工艺系统中涉及易燃、易爆、化学活性物质的生产、储存、运输及处理环节。	量化风险及采取措施后的效果;精准识别与排序危险源;可评估经济损失。	对物质系数(MF)高度依赖,若介质为复杂混合物(如多相流),MF取值可能存在偏差。
危险与可操作性分析 (HAZOP) ^[117-118]	PEM电解水系统、油气水处理流程等工艺流程。	分析流体、压力、温度等工艺参数偏差;识别电解槽过温、氢氧混合爆炸等过程安全隐患;结构化强,适合流程性工业。	耗时较长,侧重单一参数偏差,难以涵盖海上平台外部冲击对内部工艺系统的连锁影响;无法分析多重故障并发场景。
失效模式与影响分析 (FMEA) ^[119-122]	海上光伏、风电装备运维。	系统识别组件级的单一失效模式,适合识别关键薄弱环节。	无法处理海上环境多因素耦合下的演化风险。
故障树分析 (FTA) ^[123]	关键设备失效与海上平台桩腿穿刺事故。	展示事故路径,逻辑清晰;适合分析特定顶事件根本原因组合。	无法处理海上复杂系统中部件间的非线性依赖关系。
事件树分析 (ETA) ^[124]	氢气输送管道泄漏、扩散及火灾演变后果分析。	推导初始事件成败演变路径,适用火灾、爆炸等事故序列。	保护层增多,分支指数级增长;无法更新海上风况对事故后果概率的影响。

模型提高风险预测精度、动态更新能力及响应效率,推动风险评估由静态分析向动态预测演进,由事故失效预防向系统安全韧性评估与恢复能力分析拓展。

(4)目前面向海上制氢工艺系统的一体化标准体系仍存在明显不足,应加强能源工程、海洋工程、过程安全及装备制造等领域的跨学科协同,完善覆盖设计、建造、运行、维护及退役全过程的标准规范体系,建立动态更新与持续优化机制,逐步形成适应海上制氢复杂工况、多技术融合及全生命周期安全管理需求的标准体系。

参考文献

[1] 雷宪章. 电氢协同: 开启风光新能源高质量发展新篇章[J]. 天然气与石油, 2025, 43(5): 1-7.
Lei X Z. Electro-hydrogen synergy: Opening a new chapter for the high-quality development of wind and solar energy[J]. Natural Gas and Oil, 2025, 43(5): 1-7.

[2] 于广欣. 把握未来能源机遇,探索培育海洋氢能产业[J]. 中国能源观察, 2025(11): 36-38.
Yu G X. Seize the future energy opportunities and explore the cultivation of marine hydrogen energy industry [J]. China Energy Observer, 2025(11): 36-38.

[3] 王林. 海洋氢能开发可期[N]. 中国能源报, 2025-11-03(19).
Wang L. Marine Hydrogen Development Is Promising[N]. China Energy News, 2025-11-03(19).

[4] Ibrahim O S, Singlitico A, Proskovics R, et al. Dedicated large-scale floating offshore wind to hydrogen: assessing design variables in proposed typologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 160: 112310.

[5] 徐燕, 裴佳梅, 张欣钰. 中国海上风电制氢技术经济性研究[J]. 气候变化研究进展, 2025, 21(5): 698-708.

Xu Y, Pei J M, Zhang X Y. The economic feasibility of hydrogen production technology from offshore wind power in China[J]. Climate Change Research, 2025, 21(5): 698-708.

[6] 刘恒. 深远海风电制氢技术与模式研究[J]. 石化技术, 2025, 32(1): 109-111.
Liu H. Research on deep sea wind power hydrogen production technology and mode[J]. Petrochemical Industry Technology, 2025, 32(1): 109-111.

[7] 张涛, 李双胜, 郝孟江, 等. 海上风电制氢开发模式适用性分析[J]. 石油和化工设备, 2024, 27(11): 69-72.
Zhang T, Li S S, Hao M J, et al. Research on influence of deepwater floating production platform characteristics to topside general layout [J]. Petro & Chemical Equipment, 2024, 27(11): 69-72.

[8] 陈严飞, 王志浩, 刘瑞昊, 等. 海上平台集中式制氢技术研究进展[J]. 海洋技术学报, 2024, 43(3): 107-118.
Chen Y F, Wang Z H, Liu R H, et al. Research progress of centralized hydrogen production technology on offshore platforms [J]. Journal of Ocean Technology, 2024, 43(3): 107-118.

[9] 刘佳. 基于海上风电的海上制氢平台方案研究[J]. 科学技术创新, 2023(4): 5-9.
Liu J. Research on offshore hydrogen production platform based on offshore wind power[J]. Scientific and Technological Innovation, 2023(4): 5-9.

[10] Mudhafar M A H, Zayed M E, Rehman S. Offshore wind-to-green hydrogen: a comprehensive review on current challenges, techno-economic analyses, environmental implications, and potential risks [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 201: 107631.

[11] 金子儿, 王子缘, 李亚杰, 等. 我国海上风电制氢产业发展现状、问题与展望[J]. 南方能源建设, 2025, 12(3): 33-41.
Jin Z E, Wang Z Y, Li Y J, et al. Development status, problems and prospects of offshore wind hydrogen production industry in China[J]. Southern Energy Construction, 2025, 12(3): 33-41.

[12] Otlu O, Yumurtaci Z. Offshore hydrogen, methanol, and ammonia production review[J]. Energies, 2026, 19(3): 789.

- [13] Song S J, Lin H Y, Sherman P, et al. Production of hydrogen from offshore wind in China and cost-competitive supply to Japan[J]. *Nature Communication*, 2021, **12**: 6953.
- [14] 李京润, 杨思宇, 刘庆辉, 等. 大规模风电耦合火电制氢多情景下不同运行策略分析[J]. *化工学报*, 2025, **76**(3): 1191-1206.
- Li J R, Yang S Y, Liu Q H, et al. Analysis of multiple operating strategies for large-scale wind power coupled with thermal power for hydrogen production under various scenarios[J]. *CIESC Journal*, 2025, **76**(3): 1191-1206.
- [15] 龙潇, 张晋宾, 陈令特. 未来能源技术展望[J]. *发电技术*, 2025, **46**(4): 651-693.
- Long X, Zhang J B, Chen L T. Prospects for future energy technologies[J]. *Power Generation Technology*, 2025, **46**(4): 651-693.
- [16] 福建要闻, 福建省人民政府门户网站. 我省海水直接电解制氢技术迈出产业化关键一步.[EB/OL]. [2026-01-05]. https://www.fujian.gov.cn/xwdt/fjyw/202512/t20251228_7061510.htm. Fujian Provincial People's Government Portal, Fujian News. A major step toward industrialization of direct seawater electrolysis hydrogen production in our province.[EB/OL]. [2026-01-05]. https://www.fujian.gov.cn/xwdt/fjyw/202512/t20251228_7061510.htm.
- [17] 国家能源局. 国内规模最大光氢储一体化海上光伏示范项目并网发电.[EB/OL]. [2026-01-05]. <https://www.nea.gov.cn/20250110/d3c3ba4aaf3545c8ac845dfd4b9984a2/c.html>. National Energy Administration. The largest domestic offshore integrated solar-hydrogen-energy storage photovoltaic demonstration project connected to the grid.[EB/OL]. [2026-01-05]. <https://www.nea.gov.cn/20250110/d3c3ba4aaf3545c8ac845dfd4b9984a2/c.html>.
- [18] 珠海政务. 制氢纯度99.999%全球首台套兆瓦级电解海水制氢装置在珠海试运行.[EB/OL]. [2026-01-05]. https://www.zhuhai.gov.cn/xwzx/zhyw/content/post_3751943.html. Zhuhai Government Affairs. The world's first megawatt-class seawater electrolysis hydrogen production unit (hydrogen purity 99.999%) enters trial operation in Zhuhai.[EB/OL]. [2026-01-05]. https://www.zhuhai.gov.cn/xwzx/zhyw/content/post_3751943.html.
- [19] 中国石油化工. 全球首台套兆瓦级电解海水制氢装置试运行成功.[EB/OL]. [2026-01-05]. http://www.chinacpc.com.cn/info/2024-12-20/news_8965.html. China Petrochem. Successful trial operation of the world's first megawatt-scale seawater electrolysis hydrogen production unit.[EB/OL]. [2026-01-05]. http://www.chinacpc.com.cn/info/2024-12-20/news_8965.html.
- [20] 青岛市情网. 我国首个工厂化海水制氢项目在青岛建成[EB/OL]. [2026-01-05]. http://qdsq.qingdao.gov.cn/xwdt_86/jjqd_86/202412/t20241216_8702338.shtml. qdsq.qingdao.gov.cn. China's first factory-scale seawater hydrogen production project completed in Qingdao[EB/OL]. [2026-01-05]. http://qdsq.qingdao.gov.cn/xwdt_86/jjqd_86/202412/t20241216_8702338.shtml.
- [21] 省内要闻, 山东省人民政府. 全国首个港口绿氢"制输储加用"一体化项目落地.[EB/OL]. [2026-01-05]. http://www.shandong.gov.cn/art/2025/7/28/art_97564_680599.html. Provincial News, Shandong Provincial People's Government. The Nation's First Port-Based Integrated Green Hydrogen Project Covering Production, Transmission, Storage, Refueling, and Launched Utilization. [EB/OL]. [2026-01-05]. http://www.shandong.gov.cn/art/2025/7/28/art_97564_680599.html.
- [22] 榕城要闻, 福州市人民政府门户网站. 全球首个漂浮式风电海水制氢平台获权威认证.[EB/OL]. [2026-01-05]. https://www.fuzhou.gov.cn/zwgk/gzdt/rcyw/202512/t20251207_5241131.htm. Rongcheng News, Fuzhou Municipal People's Government Portal. The world's first floating offshore wind-powered seawater hydrogen production platform receives authoritative certification. [EB/OL]. [2026-01-05]. https://www.fuzhou.gov.cn/zwgk/gzdt/rcyw/202512/t20251207_5241131.htm.
- [23] 万晶晶, 张军, 王友转, 等. 海水制氢技术发展现状与展望[J]. *世界科技研究与发展*, 2022, **44**(2): 172-184.
- Wan J J, Zhang J, Wang Y Z, et al. Development status and prospect of hydrogen generation from seawater[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2022, **44**(2): 172-184.
- [24] 伍婧, 涂敏, 严新平, 等. 我国海洋港口新能源技术应用发展探析[J]. *中国工程科学*, 2024, **26**(4): 234-244.
- Wu J, Tu M, Yan X P, et al. Application of new energy technologies in marine ports of China[J]. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*, 2024, **26**(4): 234-244.
- [25] 张振, 李炬添, 毕书奇, 等. 基于改进CRITIC熵权组合赋权法的海上风电系统规划综合评价方法[J]. *电工电能新技术*, 2024, **43**(11): 1-10.
- Zhang Z, Li J T, Bi S Q, et al. A comprehensive evaluation method for offshore wind system planning based on improved CRITIC entropy weight combination weighting method[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2024, **43**(11): 1-10.
- [26] 高波, 王佳琪, 刘志亮, 等. 海上风电制氢系统建模及热力学与经济学分析[J]. *化工学报*, 2025, **76**(3): 1207-1220.
- Gao B, Wang J Q, Liu Z L, et al. Modeling and thermodynamic and economic analysis of offshore wind power-based hydrogen production systems[J]. *CIESC Journal*, 2025, **76**(3): 1207-1220.
- [27] 赵龙, 杨三元, 李甜, 等. 基于数值模拟和实时监测的海上风机及基础结构安全分析[J]. *船海工程*, 2025, **54**(6): 28-36.
- Zhao L, Yang S Y, Li T, et al. Safety Analysis of offshore wind turbine and its foundation based on numerical simulation and real-time monitoring[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2025, **54**(6): 28-36.
- [28] 陈慧芸, 李琰琛, 朱宇. 海洋能源钢结构的防腐技术研究与应用[J]. *山西建筑*, 2024, **50**(23): 5-8, 14.
- Chen H Y, Li Y C, Zhu Y. Research and application of corrosion protection technology for marine energy steel structures[J]. *Shanxi Architecture*, 2024, **50**(23): 5-8, 14.
- [29] 贾文虎, 徐群杰. 海上风电设施防腐蚀技术研究进展[J]. *发电技术*, 2023, **44**(5): 703-711.
- Jia W H, Xu Q J. Research progress of anti-corrosion technology for offshore wind power facilities[J]. *Power Generation Technology*, 2023, **44**(5): 703-711.
- [30] 汉继程, 宋小龙, 刘澳门, 等. 海洋石油平台飞溅区的腐蚀与防护技术[J]. *涂料工业*, 2025, **55**(11): 76-82.
- Han J C, Song X L, Liu A M, et al. Corrosion and protection technology in splash zone of offshore oil platforms[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2025, **55**(11): 76-82.
- [31] 宋明阳, 瞿晟珉, 秦少茜, 等. 基于故障风险水平的海上风电场机会维护策略[J]. *电力工程技术*, 2023, **42**(6): 117-129.

- Song M Y, Qu S M, Qin S Q, et al. Offshore wind farm opportunity maintenance strategy based on failure risk level[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, **42**(6): 117-129.
- [32] 严新荣, 张宁宁, 马奎超, 等. 我国海上风电发展现状与趋势综述[J]. *发电技术*, 2024, **45**(1): 1-12.
- Yan X R, Zhang N N, Ma K C, et al. Overview of current situation and trend of offshore wind power development in China[J]. *Power Generation Technology*, 2024, **45**(1): 1-12.
- [33] 柯善超, 陈锐, 陈刚华, 等. 风电耦合海水淡化制氢技术研究[J]. *分布式能源*, 2021, **6**(4): 41-46.
- Ke S C, Chen R, Chen G H, et al. Study on hydrogen production technology of wind power coupled seawater desalination[J]. *Distributed Energy*, 2021, **6**(4): 41-46.
- [34] Xie H P, Zhao Z Y, Liu T, et al. A membrane-based seawater electrolyser for hydrogen generation[J]. *Nature*, 2022, **612**(7941): 673-678.
- [35] 陶安, 贾献林, 张磊, 等. 海上风电制氢工艺系统及关键装备的研究现状及展望[J]. *太阳能*, 2025(6): 13-22.
- Tao A, Jia X L, Zhang L, et al. Research status and prospect of process system and key equipment of offshore wind power hydrogen production[J]. *Solar Energy*, 2025(6): 13-22.
- [36] 刘桂鑫. 海水淡化过程中药剂残留风险物质的识别分析[C]// 工程技术与新能源经济学术研讨会. 江西, 2025: 4, 377-380.
- Liu G X. Identification and analysis of residual risk substances of chemicals in the seawater desalination process[C]. *Conference on Engineering Technology and New Energy Economics*, Jiangxi, 2025, **4**: 377-380.
- [37] 吴水波, 杨兴涛. 海水淡化全流程水质管控理论的构建与实践[J]. *水利规划与设计*, 2025(8): 80-83, 153.
- Wu S B, Yang X T. Construction and practice of water quality control theory in the whole process of seawater desalination [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2025(8): 80-83, 153.
- [38] 孙洪斌, 宋浩. 海水淡化系统在海上稠油油田锅炉的给水应用[J]. *化工管理*, 2023(14): 59-61.
- Sun H B, Song H. Application of seawater desalination system in the boiler feed water of offshore heavy oilfield[J]. *Chemical Engineering Management*, 2023(14): 59-61.
- [39] 邢兆强, 依庆文, 张文帅, 等. 海水预处理离子阱铝环腐蚀机理研究及应用[C]// 第九届发电行业水处理技术研讨会. 山东, 2025, **4**: 48-51.
- Xing Z Q, Yi Q W, Zhang W S, et al. Study and application of the corrosion mechanism of ion trap aluminum rings in seawater pretreatment[C]// *Proceedings of the 2025 (9th) Power Industry Water Treatment Technology Seminar*. Shandong, 2025, **4**: 48-51.
- [40] Campo Schneider L P, Dhrioua M, Ullmer D, et al. Advancements in hydrogen production using alkaline electrolysis systems: a short review on experimental and simulation studies[J]. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2024, **47**: 101552.
- [41] Kumar S S, Himabindu V. Hydrogen production by PEM water electrolysis - A review[J]. *Materials Science for Energy Technologies*, 2019, **2**(3): 442-454.
- [42] Li C Q, Baek J B. The promise of hydrogen production from alkaline anion exchange membrane electrolyzers[J]. *Nano Energy*, 2021, **87**: 106162.
- [43] Robin H M, Chowdhury C R, Tahmid Boni S F, et al. Emerging application of solid oxide electrolysis cells in hydrogen production: a comprehensive analytical review and life cycle assessment[J]. *Energy Conversion and Management*: X, 2025, **28**: 101226.
- [44] 高莹, 滕霄云, 张帆. 海水制氢现状研究及建议[J]. *中外能源*, 2024, **29**(12): 19-25.
- Gao Y, Teng X Y, Zhang F. Research on current status of hydrogen production from seawater and some suggestions[J]. *Sino-Global Energy*, 2024, **29**(12): 19-25.
- [45] Meharban F, Tang X, Yang S, et al. Harnessing direct seawater electrolysis for a sustainable offshore Hydrogen future: a critical review and perspective[J]. *Applied Energy*, 2025, **384**: 125468.
- [46] 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.
- Li Y, Wang J Y, Pan X H, et al. Research progress on safety of hydrogen production by alkaline electrolysis of water[J]. *CIESC Journal*, 2025, **76**(10): 4961-4975.
- [47] 贺腾腾, 刘乾锋, 王红涛, 等. 直接电解海水制氢面临的挑战与解决策略[J]. *可再生能源*, 2023, **41**(8): 1008-1014.
- He T, Liu Q F, Wang H T, et al. Challenges and solutions of directly seawater electrolysis-for hydrogen generation[J]. *Renewable Energy Resources*, 2023, **41**(8): 1008-1014.
- [48] Umair S M, Hamdan M O, Abu-Nabab B A. Seawater electrolysis for green hydrogen: a critical review of challenges, advances, and future directions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, **177**: 151554.
- [49] 郭博文, 罗聃, 周红军. 可再生能源电解制氢技术及催化剂的研究进展[J]. *化工进展*, 2021, **40**(6): 2933-2951.
- Guo B W, Luo D, Zhou H J. Recent advances in renewable energy electrolysis hydrogen production technology and related electrocatalysts[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, **40**(6): 2933-2951.
- [50] Liu Z, Ren J, Sun W, et al. Analyzing gas crossover risk of proton exchange membrane water electrolyzer through a perspective of disease prevention and treatment[J]. *Applied Energy*, 2026, **403**: 127028.
- [51] Minnah P, Pope K. Chemical degradation of PEM electrolyzers powered by unsteady wind energy[J]. *Journal of Power Sources*, 2026, **664**: 238968.
- [52] Minnah P, Pope K. Degradation modelling and the impact of intermittent operation on proton exchange membrane electrolyzers [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2026, **202**: 152962.
- [53] 王凯晨. 质子交换膜电解槽多物理场耦合分布及动态特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2025.
- Wang K C. Study on coupling distribution and dynamic characteristics of multiple physical fields in proton exchange membrane electrolyzer [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2025.
- [54] 吴家哲, 张国傲, 常禹豪, 等. 电解水制高压氢气研究进展[J]. *工程科学学报*, 2025, **47**(11): 2309-2320.
- Wu J Z, Zhang G A, Chang Y H, et al. Research progress of high-pressure hydrogen production via water electrolysis[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, **47**(11): 2309-2320.
- [55] Yang J Z, Lam T Y, Luo Z X, et al. Renewable energy driven electrolysis of water for hydrogen production, storage, and transportation[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, **218**: 115804.
- [56] Chen S L, Xiao X Z, Li Z N, et al. The perspective of offshore wind power: based hydrogen production, hydrogen storage, and

- hydrogen transportation[J]. *Materials Today*, 2025, **90**: 800–814.
- [57] 陈文君, 杨洋, 刘畅, 等. 海上泛氢运输系统技术经济性与发展路径[J]. *油气与新能源*, 2025, **37**(1): 33–45.
- Chen W J, Yang Y, Liu C, et al. Techno-economic and development path of the offshore generalized hydrogen transportation system[J]. *Petroleum and New Energy*, 2025, **37**(1): 33–45.
- [58] 战东豪, 苏莉玲, 沈国强, 等. 储能技术在绿氢生产的应用[J]. *化工进展*, 1–21.
- Zhan D H, Su L L, Shen G Q, et al. Application of energy storage technologies in green hydrogen production[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 1–21.
- [59] d'Amore-Domenech R, Meca V L, Pollet B G, et al. On the bulk transport of green hydrogen at sea: Comparison between submarine pipeline and compressed and liquefied transport by ship[J]. *Energy*, 2023, **267**: 126621.
- [60] 朱凯, 董国庆, 曲彦东, 等. 输氢管道技术发展现状及挑战[J]. *油气与新能源*, 2025, **37**(5): 125–130, 136.
- Zhu K, Dong G Q, Qu Y D, et al. Current status and challenges of the technology development of hydrogen pipelines[J]. *Petroleum and New Energy*, 2025, **37**(5): 125–130, 136.
- [61] Zhang X Y, Zhang H, Zhang L B, et al. Layout optimization of the hydrogen network orienting towards hydrogen production from offshore wind power[J]. *Energy*, 2025, **336**: 138393.
- [62] 程友良, 王乃潇, 丁瑞, 等. 氢能利用技术关键力学问题研究进展[J]. *力学进展*, 2025, **55**(3): 642–705.
- Cheng Y L, Wang N X, Ding R, et al. Fundamental mechanical problems in hydrogen energy utilization technology: State-of-art review[J]. *Advances in Mechanics*, 2025, **55**(3): 642–705.
- [63] 何玥晨, 陈严飞, 饶云松, 等. 适用于海洋运输的储氢技术及其应用现状[J]. *油气与新能源*, 2024, **36**(2): 66–73.
- He Y S, Chen Y F, Rao Y S, et al. Development and applications status of hydrogen storage technologies for marine transportation[J]. *Petroleum and New Energy*, 2024, **36**(2): 66–73.
- [64] 史陈芳达, 吕蓉蓉, 李春煜, 等. 液氢海上运输关键技术发展[J]. *船电技术*, 2024, **44**(1): 1–5.
- Shi C F D, Lyu R R, Li C Y, et al. Development of key technologies for the maritime transportation of liquid hydrogen[J]. *Marine Electric & Electronic Engineering*, 2024, **44**(1): 1–5.
- [65] Kenez M C, Dincer I. Development and assessment of an offshore-based integrated hydrogen production and liquefaction system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, **236**: 121574.
- [66] Yasin Q U A, Hosseini T, Li C E, et al. Liquid organic hydrogen carriers for hydrogen storage: a review of chemistry, engineering design and economic feasibility[J]. *Energy Conversion and Management*, 2026, **29**: 101493.
- [67] Elg M, Molchanov B, Krishnan A, et al. Holistic view to decarbonising cruise ships with a combination of energy saving technologies and hydrogen as fuel[J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, **26**: 100953.
- [68] Hwang I, Jeong B, Jang H, et al. An integrated qualitative – quantitative risk assessment for defining toxic and hazardous zones on hydrogen-fuelled ships with ammonia cracking systems[J]. *Ocean Engineering*, 2025, **341**: 122475.
- [69] Wang J Y, Nie S H, Gao Y, et al. Enhancing offshore oil and gas platform sustainability through wind-powered hydrogen production[J]. *Natural Gas Industry B*, 2025, **12**(6): 734–749.
- [70] Arachchi G V, Keiner D, Khalili S, et al. Electricity balancing for resilient 100% renewable energy systems on islands: Imported e-fuels versus domestic e-hydrogen on the case of Mauritius[J]. *Energy*, 2026, **351**: 140758.
- [71] Dong Y C, Lu Z S, Cao X Y, et al. Distributionally robust planning of hydrogen-electrical microgrids for sea islands[J]. *Applied Energy*, 2026, **411**: 127630.
- [72] Zhaka V, Samuelsson B, Nemanova V. Large-scale hydrogen refuelling infrastructure in ports[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2026, **235**: 116974.
- [73] Zhang X, Simons R, Zheng J H, et al. A review of the state of research on wave-current interaction in nearshore areas[J]. *Ocean Engineering*, 2022, **243**: 110202.
- [74] Sarpkaya T'. *Wave Forces on Offshore Structures*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010.
- [75] Dong Y Y, Tan W K, Luo K Q, et al. The impact of wave – current interaction on the dynamic response of a floating offshore wind turbine: a CFD investigation[J]. *Applied Ocean Research*, 2026, **167**: 104928.
- [76] 孟凡昌, 李本霞. 强海况下波流相互作用对有效波高的影响研究[J]. *海洋学报*, 2023, **45**(7): 1–7.
- Meng F C, Li B X. The study of the influences of wave-current interaction on significant wave height under serious sea conditions[J]. *Haiyang Xuebao*, 2023, **45**(7): 1–7.
- [77] Iversen S K, Eldrup M R, Lykke Andersen T. Estimation of wave kinematics of nonlinear multidirectional waves using multiple surface elevation measurements[J]. *Coastal Engineering*, 2026, **205**: 104926.
- [78] Saenz-Aguirre A, Ulazia A, Ibarra-Berastegi G, et al. Floating wind turbine energy and fatigue loads estimation according to climate period scaled wind and waves[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, **271**: 116303.
- [79] Kang T W, Kim E S, Yang H I. Effects of dynamic motion and structural response of a semi-submersible floating offshore wind turbine structure under waves generated in a hurricane environment[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2022, **9**(2): 537–556.
- [80] Wen B R, Tian X L, Dong X J, et al. Influences of surge motion on the power and thrust characteristics of an offshore floating wind turbine[J]. *Energy*, 2017, **141**: 2054–2068.
- [81] Cheng A K, Low Y M. A new metamodel for predicting the nonlinear time-domain response of offshore structures subjected to stochastic wave current and wind loads[J]. *Computers & Structures*, 2024, **297**: 107340.
- [82] 严傲宇, 万长卫, 仇明, 等. 风浪流与冲击载荷作用下FPSO生产模块结构响应研究[J]. *舰船科学技术*, 2025, **47**(17): 25–32.
- Yan A Y, Wan C W, Qiu M, et al. Research on the structural response of FPSO production module under wind, wave, current and impact loads[J]. *Ship Science and Technology*, 2025, **47**(17): 25–32.
- [83] 刘成. 金属材料在氯离子环境下的应力腐蚀开裂行为综述[J]. *涂层与防护*, 2025, **46**(3): 56–60.
- Liu C. Research on stress corrosion cracking behavior of metal materials in chloride ion environment[J]. *Coating and Protection*, 2025, **46**(3): 56–60.
- [84] 王巍, 杨涛. 环境湿度对绝缘电阻影响的试验研究[J]. *建筑电气*, 2018, **37**(12): 49–55.

- Wang W, Yang T. Experimental study on the influence of ambient humidity on insulation resistance[J]. *Building Electricity*, 2018, **37** (12): 49–55.
- [85] 徐治仁, 钱勇, 周录波, 等. 高湿度重污秽环境下户内 40.5 kV 开关柜用环氧树脂电流互感器绝缘的老化与失效分析[J]. *高电压技术*, 2025: 1–12.
- Xu Z R, Qian Y, Zhou L B, et al. Aging and failure analysis of epoxy resin current transformer insulation for indoor 40.5 kV switchgear in high-humidity and heavy-contamination environments[J]. *High Voltage Engineering*, 2026, **52**(3): 1418–1430.
- [86] 文娅. 湿热环境下环氧树脂电晕老化特性研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.
- Wen Y. Study on corona aging characteristics of epoxy resin in humid and hot environment[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2022.
- [87] 盛万佳, 邢彦锋, 林雨芳. PEMFC 密封材料与结构设计研究综述[J]. *电源技术*, 2025, **49**(11): 2224–2236.
- Sheng W J, Xing Y F, Lin Y F. Review of PEMFC sealing materials and structural design[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2025, **49**(11): 2224–2236.
- [88] 苏建洲. 车用聚氯乙烯耐湿密封胶的制备及其性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- Su J Z. Study on preparation and properties of automotive polyvinyl chloride moisture resistant sealant[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [89] 王博妮, 王锋, 葛行成, 等. 海上风电气象服务关键技术及应用分析[J]. *南方能源建设*, 2025, **12**(1): 65–74.
- Wang B N, Wang F, Ge X C, et al. Analysis of key technologies and applications of meteorological service for offshore wind power[J]. *Southern Energy Construction*, 2025, **12**(1): 65–74.
- [90] 黄萧霖, 徐晶, 金铸钰, 等. 全球海洋气象导航业务和技术研究进展[J]. *气象科技进展*, 2024, **14**(3): 30–39.
- Huang X L, Xu J, Jin Z Y, et al. Research progress in global marine meteorological navigation operation and technology[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2024, **14**(3): 30–39.
- [91] 郭松华. 雷击海上风电场电磁暂态特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2025.
- Guo S H. Study on electromagnetic transient characteristics of lightning strike offshore wind farm[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2025.
- [92] 王群朋, 廖群香, 刘传润, 等. 浅析气象导航在远洋航行中的应用[J]. *中国水运*, 2025(21): 102–104.
- Wang Q P, Liao Q X, Liu C R, et al. A preliminary analysis of the application of meteorological navigation in ocean-going voyages[J]. *China Water Transport*, 2025(21): 102–104.
- [93] Krek A, Gusev A, Krek E, et al. Impact of the brine discharge on the bottom ecosystem of the Sambia Peninsula coast (South-Eastern Baltic Sea)[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2022, **56**: 102673.
- [94] Clark G F, Knott N A, Miller B M, et al. First large-scale ecological impact study of desalination outfall reveals trade-offs in effects of hypersalinity and hydrodynamics[J]. *Water Research*, 2018, **145**: 757–768.
- [95] 胡源祥, 黄金赫, 杜澄浩, 等. 变暖情景下食物网简化和地表径流脉冲对底栖动物群落结构及多样性的影响[J]. *水生生物学*, 2026: 1–12.
- Hu Y X, Huang J H, Du C H, et al. Effects of food web simplification and surface runoff pulse on macrozoobenthic community structure and diversity under climate warming[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026: 1–12.
- [96] 董向前, 袁宇翔, 路永正, 等. 光照与浮游动物耦合作用对浮游植物群落的影响: 以小兴凯湖为例[J]. *湿地科学*, 2024, **22**(2): 227–235.
- Dong X Q, Yuan Y X, Lu Y Z, et al. Interaction of Light and Zooplankton on Phytoplankton Community: Taking the Xiaoxingkai Lake as An Example[J]. *Wetland Science*, 2024, **22** (2): 227–235.
- [97] Dussauze M, Wlodarczyk R, Labeled-Veydert T, et al. Anticipating potential environmental risks of offshore hydrogen production powered by offshore wind farm[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2026, **226**: 116221.
- [98] Morgante C, Herrero-Gonzalez M, Lopez J, et al. A global outlook of the desalination industry and state-of-the-art technologies for brine valorisation[J]. *Desalination*, 2026, **621**: 119718.
- [99] Gogiyev T, Condon S K, Cherubini F, et al. Environmental implications of alternative production, distribution, storage, and leakage rates of hydrogen from offshore wind in Norway[J]. *Energy Reports*, 2025, **14**: 657–670.
- [100] 中国船级社. 海上制氢设施指南: GD 017–2025[S]. 北京: 中国船级社, 2025.
- China Classification Society. Guidelines for offshore hydrogen production facilities: GD 017—2025[S]. Beijing: China Classification Society, 2025.
- [101] 全国海洋标准化技术委员会. 反渗透海水淡化产品水水质要求: GB/T 43230—2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- National Technical Committee 283 on Ocean Standardization of SAC. Water quality requirements of product water of seawater reverse osmosis desalination: GB/T 43230—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [102] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 氢气使用安全技术规程: GB 4962—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical safety regulation for gaseous hydrogen use: GB 4962—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [103] Equipment for potentially explosive atmospheres (ATEX) – internal market, industry, entrepreneurship and SMEs[EB/OL]. [2026–02–04].
- [104] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 氢气储存输送系统通用要求: GB/T 34542—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. General Requirements for Hydrogen Storage and Transportation Systems: GB/T 34542—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [105] Online Browsing Platform (OBP). ISO 19880–1: 2020(en), Gaseous hydrogen – fuelling stations – Part 1: general requirements[EB/OL]. [2026–02–04]. <https://www.iso.org/obp/ui/en/>.

- [106] European Council, Council of the European Union. Alternative fuels infrastructure: council adopts new law for more recharging and refuelling stations across Europe[EB/OL]. [2026-01-29]. <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/07/25>.
- [107] legislation.gov.uk. Energy Act 2023[EB/OL]. [2026-02-04]. <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2023/52/contents>.
- [108] National Fire Protection Association (NFPA). NFPA 2 Hydrogen Technologies Code[S]. National Fire Protection Association, 2026.
- [109] American Society Of Mechanical Engineers (ASME). Hydrogen Piping and Pipelines: B31.12-2023[S]. American Society Of Mechanical Engineers, 2024.
- [110] Dong J J, Wang J J, Zhang F L. Dynamic evolutionary Bayesian network model for offshore risk assessment[J]. Ocean Engineering, 2026, **343**: 123593.
- [111] Viana F F C L, Alencar M H, Ferreira R J P, et al. Multidimensional risk assessment and categorization of hydrogen pipelines[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, **47** (42): 18424-18440.
- [112] 严铭, 安再展, 徐晗, 等. 中欧海上风电前沿技术领域标准对比分析与研究[J]. 能源工程, 2024, **44**(6): 42-50.
Yan M, An Z Z, Xu H, et al. Comparative analysis and research on standards of forefront offshore wind power technologies between China and Europe[J]. Energy Engineering, 2024, **44**(6): 42-50.
- [113] 单新新, 王圣. 海上油气田岸电平台火灾风险评估与防控策略研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, **21**(S2): 196-199.
Shan X X, Wang S. Research on fire risk assessment and prevention strategies for offshore oil and gas field shore power platforms[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2025, **21** (S2): 196-199.
- [114] 乔长庆, 李军, 崔江, 等. 基于PHA法海域环境桥梁施工安全对策研究[J]. 铁道建筑技术, 2022(4): 100-103, 150.
Qiao C Q, Li J, Cui J, et al. Study on safety countermeasures of bridge construction in sea environment based on PHA method[J]. Railway Construction Technology, 2022(4): 100-103, 150.
- [115] 孙森. 海洋石油平台工艺系统安全评价技术研究[J]. 石化技术, 2023, **30**(8): 40-42.
Sun S. Research on safety assessment technology of offshore oil platform process system[J]. Petrochemical Industry Technology, 2023, **30**(8): 40-42.
- [116] 牛帅. 海洋油气集输容器失效事故树分析与可靠性评价模型研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
Niu S. Failure fault tree analysis of marine oil and gas gathering and transportation vessel and research of reliability evaluation model[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.
- [117] 林一, 尹志林, 孙建. 自升式平台火灾爆炸风险评定[J]. 船舶工程, 2013, **35**(S2): 179-182.
Lin Y, Yin Z L, Sun J. Risk assessment of fire and explosion on jack-up unit[J]. Ship Engineering, 2013, **35**(S2): 179-182.
- [118] 张纳纳. 海上生产平台危险与可操作性分析[J]. 化工管理, 2021(17): 103-104.
Zhang N N. Analysis of the danger and operability of offshore production platforms[J]. Chemical Enterprise Management, 2021 (17): 103-104.
- [119] Zhu T L, Meng C Y, Han X Z, et al. A risk assessment framework for water electrolysis systems: Mapping System Theoretic Process Analysis (STPA) and Event Tree Analysis (ETA) into Fuzzy Bayesian Networks (FBN)[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, **194**: 306-323.
- [120] Ni S T, Tang Y, Wang G R, et al. Risk identification and quantitative assessment method of offshore platform equipment[J]. Energy Reports, 2022, **8**: 7219-7229.
- [121] Goksu S, Arslan O. A quantitative dynamic risk assessment for ship operation using the fuzzy FMEA: The case of ship berthing/unberthing operation[J]. Ocean Engineering, 2023, **287**: 115548.
- [122] 张鑫红. 基于FMEA的海上光伏运维管理风险研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2024.
Zhang X H. Research on offshore photovoltaic operation and maintenance management risks based on FMEA[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2024.
- [123] 汤蕊瞳. 海上漂浮式光伏典型失效模式风险评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
Tang R T. Research on risk assessment method for typical failure modes of offshore floating photovoltaics[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024.
- [124] 王德岭, 刘以俊. 基于事故树分析和贝叶斯网络的海上平台穿刺风险分析[J]. 上海海事大学学报, 2025, **46**(3): 129-136.
Wang D L, Liu Y J. Puncture risk analysis of offshore platforms based on fault tree analysis and Bayesian network[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2025, **46**(3): 129-136.