

绿氢生产技术与应用研究进展

李赫龙^{1,2*}, 唐晶¹, 赵炎¹, 王成¹, 孙文涛¹

(1. 中车山东风电有限公司, 山东 济南 250022; 2. 中车科技创新(北京)有限公司, 北京 100083)

摘要: 系统综述了绿氢生产与综合利用技术进展。重点阐述了电解水与生物质制氢等主流绿氢生产技术的原理、特点与发展现状, 并对比分析了碱性电解、质子交换膜电解、固体氧化物电解及阴离子交换膜电解不同技术路线的优劣。深入探讨绿氢在能源、交通、工业、化工及医疗等关键领域的应用潜力与实施路径。最后, 针对当前绿氢产业发展所面临的技术成熟度、经济性、及储运安全等核心挑战, 提出了未来研究展望与发展建议。

关键词: 绿氢; 生产; 应用; 技术; 低碳

中图分类号: TQ116.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S1-0060-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.011

Advances in green hydrogen production technology and applications

LI He-long^{1,2*}, TANG Jing¹, ZHAO Yan¹, WANG Cheng¹, SUN Wen-tao¹

(1. CRRC Shandong Wind Power Co., Ltd., Jinan 250022, China;

2. CRRC Technology Innovation (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: This paper provides a systematic review of recent advances in green hydrogen production and comprehensive utilization technologies. It elaborates on the principles, characteristics, and development status of mainstream production methods, including water electrolysis and biomass-based hydrogen production, offering a comparative analysis of different technical routes such as alkaline, proton exchange membrane, solid oxide, and anion exchange membrane electrolysis. The application potential and implementation pathways of green hydrogen in critical sectors, including energy, transportation, industry, chemical production, and healthcare are thoroughly discussed. Finally, the paper addresses core challenges facing the industry—technological maturity, economic viability, and storage/transportation safety and outlines future research directions and development recommendations.

Key words: green hydrogen; production; application; technology; low carbon

随着全球经济深度融合与转型进程不断推进, 面对化石能源供应趋紧与温室气体增量持续累积的双重压力, 加快推进能源结构变革、构建清洁低碳的能源体系, 是实现高质量发展、应对资源环境挑战的根本出路。与化石燃料不同, 氢气在燃烧时只生成水, 具有环境友好和高能量密度的特性。作为一种清洁、高效、用途广泛、具有巨大发展潜力的能源载体与可持续能源转型桥梁, 氢能已被多国纳入战略性能源发展框架^[1]。

1 绿氢生产技术

1.1 电解水技术

电解水制氢作为一项工业化应用较早的制氢技术路线, 是当前最具代表性的绿色制氢方法之一。现行电解水制氢技术主要可分为 4 类: 碱性电解水 (alkaline water electrolysis, AWE)、质子交换膜电解水 (proton exchange membrane, PEM)、固态氧化物电

解水 (solid oxide electrolysis cell, SOEC) 以及固体聚合物阴离子交换膜电解水 (anion exchange membrane, AEM)^[2]。不同类型电解水制氢技术的原理如图 1^[3]所示。

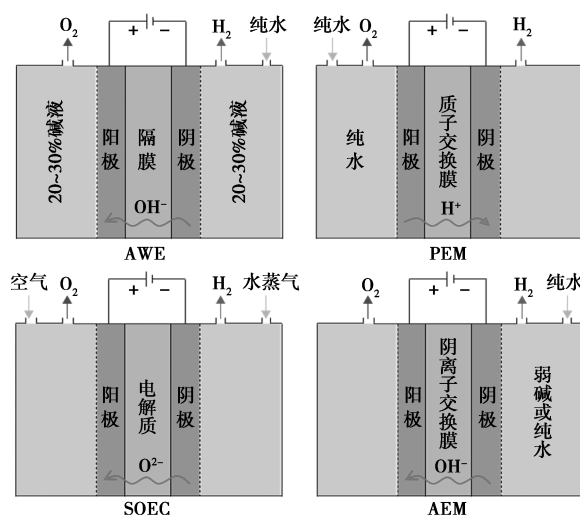


图 1 不同电解水制氢技术示意图

收稿日期: 2026-02-27; 修回日期: 2026-03-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFC3906000)

作者简介: 李赫龙 (1988-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为有机固体废弃物处理、生物质制氢、生物炭高值利用等, 通讯联系人, helonlee@163.com。

在 4 种电解水制氢技术中, AWE 作为最早实现产业化的技术相关数据和应用经验最为丰富。主要优势在于工艺路线成熟, 兼具较低的制造成本与高度的运行可靠性, 系统服役寿命可达 15 年之久。与同等单机规模的 PEM 电解槽相比, AWE 电解槽的生产成本仅为 25% 左右。弊端主要包括效率低、启动慢、不适合频繁启停, 难以与波动性较大的新能源电力耦合。此外, 该技术生产的氢气中含有碱液和水蒸气, 需要额外配备除杂装备。为了降低制氢成本、减少电解能耗、解决电解效率低等问题, 主要的研发方向包括研制高性能隔膜以提高隔膜电导率, 开发高性能电极涂层以降低过电势, 改进电解槽结构如流道设计, 以及增加电解小室数量等。

PEM 技术具有以下优势: 电解质膜厚度小, 电解池结构紧凑, 工作电压低, 电解效率高; 电解质膜耐压差强度较高, 压力调控范围广, 只传导 H^+ , 氢气与氧气的直接分离, 系统安全性高; 工作模式灵活, 对绿色电力的适应性好, 氢气纯度高。总体而言, PEM 技术相较于 AWE 技术更适用于不稳定电源情况下的制氢, 离网制氢将成为主流绿氢生产方式。然而, 电解槽阳极的析氧过程产生大量 H^+ , 导致催化剂反应能垒升高、效率降低、高电压和强酸环境带来的稳定性问题。贵金属铂 (Pt)、铱 (Ir) 及其氧化物具有优异的催化活性和稳定性, 但较高的成本已成为该技术推广的重要制约因素。研究人员选择生产成本更低的钌 (Ru) 作为催化剂, 并将钨和硅原子围绕钌原子周围, 从而增加催化剂表面对质子的吸附强度^[4]。

虽然 AWE 和 PEM 技术应用范围较广, 但 SOEC 槽是目前唯一能够实现全自动化生产的制氢装备。与其他技术相比具有诸多优势: 在高温下能量转化率高, 电能需求大幅减少; 电解池为全固态结构, 电极反应简单, 不使用贵金属催化剂; 灵活的运行模式、可控的规模和长久寿命; 电池与电解池模式之间可以切换, 可充分利用工业余热资源。另外, SOEC 技术不仅可用于制氢, 还可应用于热电联产领域, 是我国落实“双碳”愿景、构建新能源体系不可或缺的一环与核心驱动力^[5]。

AEM 技术有效吸纳了质子交换膜电解技术的模块化与效率特点, 优势在于能量转化效率高。此外, 使用纯水或低浓度碱液作为电解液, 可以缓解设备的腐蚀问题。采用铁 (Fe)、镍 (Ni) 等非贵金属作为电极催化剂, 显著降低制造成本^[4]。目前该技术仍处于商业化应用的初级阶段, 产业化推广还需在关键环节实现技术突破^[6]。其中, 阴离子交换膜作为该技术的核心组件, 已成为制约 AEM 技术发展的主要瓶颈, 主要体现在离子电导率不足及在强碱环境下化学稳定性较差。近年来, 研究主要围绕聚合物主链工程与阳离子功能基团创新 2 个维度展开。突破性进展在于开发了具有本征高稳定性的新型哌啶鎓阳离子 (如 *N*-螺环哌啶) 阳离子, 相关膜材料在 80℃ 碱液中已实现数千小时的稳定运行^[7]。然而, 如何进一步降低贵金属催化剂负载、提高膜电极集成工艺的成熟度并实现吉瓦级规模的膜材料低成本制造, 仍是其迈向全面产业化必须攻克的核心挑战。上述 4 种电解水制氢技术对应参数及优缺点对比见表 1。

表 1 电解水制氢技术指标参数及优缺点对比

技术分类	碱水电解 (AWE)	质子交换膜 (PEM)	固体氧化物 (SOEC)	阴离子交换膜 (AEM)
隔膜材料	石棉布	质子交换膜	固体氧化物	阴离子交换膜
电流密度/($A \cdot cm^{-2}$)	0.2~0.6	1.0~4.0	1.0~10.0	0.8~2.0
工作温度/℃	70~90	65~85	600~1000	65~85
能耗/($kWh \cdot m^{-3}$)	4.5~5.5	4.0~5.0	2.6~3.6	4.2~4.8
能源效率/%	60~80	80~90	85~95	70~90
电源要求	稳定	稳定或波动	稳定	稳定或波动
寿命/h	80000	20000	待验证	20000
设备成本/(元· kW^{-1})	2000	8000	待验证	12000
产业化程度	充分产业化	产业化初期	实验室研究	实验室转向产业化
优缺点	技术成熟, 稳定性好, 成本低; 效率低, 腐蚀性 强, 运维成本高	电流密度高, 氢纯度高, 结构紧凑; 催化剂稳定性 较差, 膜成本高	生产效率高, 产量大, 能 耗低; 材料设计要求较高, 工作温度高	操作简单, 稳定性好, 电 流密度高; 腐蚀性, 膜成本 高, 离子导通率低

1.2 生物质制氢技术

生物质制氢技术主要通过化学或生物技术,将富含氢元素的生物质原料高效转化为高纯度的氢气产物。生物制氢技术主要分为 2 类:热化学转化法和微生物法^[8]。主要的反应路径如图 2^[9]所示。

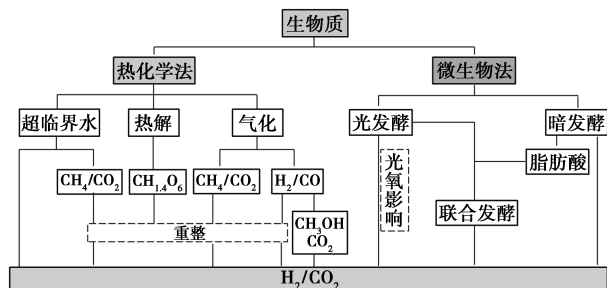


图 2 生物质制氢路径

1.2.1 热化学法

热化学法制氢是利用热化学反应将生物质定向转化为富氢混合气的过程。优势在于工艺适用范围广泛,整体能效(热能至氢能转化率)较高(约达 52%),可以大幅降低生产成本,有利于实现大规模应用。生物质热化学转化技术可以分为 2 类:气化技术和热解技术。其中,气化技术为生物质在高温反应炉中与氧化剂反应,氧化剂通常为空气、水蒸气、超临界水等,分解为以 CO、CO₂、H₂ 和 CH₄ 为主的混合气的过程。在以水蒸气和超临界水为氧化剂的气化过程中,生成的氢气来源于生物质和水。该技术具有原料种类适应性强、规模便于调节、资金门槛低等优点,主要缺陷在于生物质原料分解过程中产生焦油和二噁英等污染物。热裂解技术是在无氧或缺氧条件下,利用高温对生物质进行处理生成合成气、生物油以及固体炭的过程,具有反应条件温和、环境友好、经济性高、灵活性强等特点。在热解与气化工艺中,通常采用水煤气变换反应将合成气转化为氢气,通过压力摆动吸附技术实现产物纯化。

1.2.2 微生物法

微生物法指借助生物工程技术,利用微生物分解有机物的能力,催化代谢生物质内的水分子和有机物质生产氢气^[10]。目前已知的产氢微生物主要包括蓝细菌、厌氧菌及发酵菌 3 类,发酵法制氢是最具应用前景的技术路线。根据发酵反应环境和反应过程,分为光发酵、暗发酵和联合发酵。其中,光发酵的核心是光合紫色非硫细菌,制氢效率容易受环境光源强度和氧气影响,二者均会阻碍固氮酶的生成;暗发酵工艺需在无光环境中实施,核心为梭状芽孢杆菌或肠杆菌属内氢化酶,不仅成本低廉且制氢速率快,易于实现大规模生产,但暗发酵会产生有毒副产物(脂肪酸),抑制菌类活性;而光发酵细菌能够利用脂肪酸生产氢气,因此将光发酵和暗发酵法耦合,形成完整发酵体系,有望推动微生物发酵法制氢技术的进一步发展。例如,以单糖为底物进行暗发酵,存在效率低的难题,采用暗发酵-光发酵双级耦合系统可显著提升整体产氢效率:第一阶段通过厌氧菌对葡萄糖或淀粉进行乙酸型发酵代谢,第二阶段在光生物反应器中利用光合细菌将乙酸转化为氢气。相较于单一暗发酵工艺,该系统的产氢量可提升 2 倍^[11]。微生物法制氢虽更节能环保,但在产氢过程易受环境影响,导致产氢效率不理想,因而该领域的研究尚未完成从实验室向工业化的关键转化。

1.3 绿氢制备技术对比

近年来,世界各国围绕电解水制氢和生物质制氢及多能互补制氢等技术开展了大量研究。绿氢制备正朝多元化方向发展,各类新兴技术得到广泛应用,对提升氢资源利用水平发挥关键作用。不同绿氢制备技术在原理、适应性、能效及经济成本等方面均具备独特的技术特性。如表 2 所示,各类技术可适配不同的应用场景与需求,为构建绿色低碳的能源体系提供多样化解决方案。

表 2 绿氢制备技术特性对比

绿氢生产技术	优势	劣势	产业化程度
碱水电解(AWE)	技术成熟,可靠性高,成本低	电流密度小,具有腐蚀性,维护成本高	工业应用非常成熟
质子交换膜(PEM)	电流密度高,氢气纯度高,效率高	使用寿命短	初始商业化
固体氧化物(SOEC)	效率高,产量大	稳定性差,材料和工作环境要求高	实验室研究阶段
阴离子交换膜(AEM)	操作简单,稳定性好,高电流密度	成本高	实验室研究及初步示范阶段
热解法	产氢效率高,成本低	制氢纯度低,设备密封要求高	工业示范和初步商业化
气化法	应用范围广,处理量大,产热量大	容易生成焦油,产物分离困难	工业示范和初步商业化
光发酵法	应用范围广,产氢效率较高	对光照条件严格,受原料类型和浓度的影响较大	实验室阶段
暗发酵法	成本低,制氢速度快,易于规模化	易产生有毒副产物	实验室阶段
光-暗耦合发酵法	制氢和转化效率高,可利用有机酸等中间产物	条件苛刻,反应控制要求高,微生物难共存	实验室阶段

2 绿氢应用

二氧化碳作为引发全球变暖的主要温室气体,其排放主要来源于化石能源的燃烧。绿氢的应用可充分利用可再生资源,助力能源结构调整,是实现双碳目标和可持续发展的关键组成部分。

2.1 能源

氢气具有高达 122 kJ/g 的能量密度,在所有常规燃料中比能最高。液态氢密度非常低,为 0.07 g/cm³,相当于汽油的十分之一,单位质量储存能量约为汽油的 2.6 倍,如图 3^[12]所示。

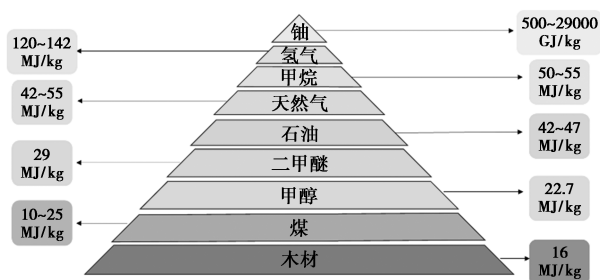


图3 常用燃料的热值图

交通运输行业石油消耗量占全球总量的 60%, CO₂ 排放量约占全球排放量的五分之一^[13]。氢气燃烧特性显著优于汽油和甲烷等传统燃料,与空气混合,体积含量仅需 4% 就能燃烧。相较于安全系数分别为 0.80 和 0.53 的汽油和甲烷,氢气(安全系数为 1)是安全性相对较高的燃料^[14]。由于氢气扩散效率是汽油的 12 倍,氢动力车比汽油车风险更低^[15]。氢气作为车辆燃料利用方式有 2 种:一种是使氢气与空气在内燃机中燃烧提供动力,另一种是使氢气在燃料电池中与空气进行电化学反应,产生电力和热量^[16]。氢气和化石燃料的燃烧本质相同,因此传统内燃机可以经过改装成为纯氢发动机。

H₂ 被用作航天推进器燃料的优势在于其高能量密度、安全以及无污染的特性。在所有气体中,氢气热导率最高,综合高热容和极低的动态黏度特征,在高速飞行和燃烧室高温环境下展现卓越的冷却性能。从燃料存储角度分析氢燃料飞机比煤油燃料飞机更具优势,将液态氢储存在机身而非机翼中,可以使比表面积最小化并减少热损失^[17]。而机翼尺寸不会受到燃料储存容量的限制,面积可以减少 31%,机身增大导致的空气动力效率降低被较低的燃料重量所抵消,使能源利用减少 11%^[18]。目前,多家航空航天公司正在开发氢燃料飞机,作为航空行业减少温室气体排放的有力措施^[19]。

自液体火箭推进技术诞生以来,大量的推进剂组合得到广泛研究。研究机构以能量密度、挥发性、腐蚀性和反应性为主要评价标准,分析评估 1 800 多种燃料和约 2 000 种双推进剂组的理化特性、燃烧极限、冷却效率、低凝点和高沸点等适应极限操作环境的特性,证明最优的高能量释放推进剂组合是液氧和液氢组合^[20]。

氢气以高比能成为极具潜力的清洁能源,为构建可再生能源新型电力系统提供了不可或缺的解决方案。商业化的核心瓶颈已从技术验证转向加氢基础设施的网络化建设与车辆总拥有成本的降低,需要产业链上下游的协同推进与规模效应驱动。

2.2 工业生产

氢气在化工生产中最广泛的应用是作为生产氨(48%)和甲醇(8%)等化学品的原料^[21]。氨作为化肥工业核心化学品,全球年产量已突破 1.8 亿 t 规模,全球大约 50% 的氢气用于合成氨^[22]。在聚丙烯生产中,氢气通过调控聚合反应动力学实现分子质量精准控制。借助熔融态塑料的催化氢化裂解,可以使高分子废弃物大分子中的 C—C 键经氢解断裂,生成的小分子可以被重新利用生产聚合物^[23],实现有机高分子材料的闭环生产。

全球大约 37% 的 H₂ 用于石化炼制领域^[24]。氢气可以通过多种方式与碳氢及杂原子化合物发生反应,主要为氢化裂解和加氢还原。氢化裂解过程中,碳氢化合物的裂化和加氢同时进行,生成分子更小、H/C 比更高的精炼燃料;加氢还原过程,增加烯烃、炔烃、芳香化合物的饱和度,同时可以定向生成异构化产物。氢气还可以和石化资源中的 O、N、S 等杂原子及卤素反应,以 H₂O、NH₃、H₂S 和卤化氢的形式从产物中分离,提高石化产品质量^[25]。

图 4 为典型的石油炼化过程加氢处理装置工艺示意图。首先,烃类原料和氢气混合后流经加热器预热后从顶部进入下流式固定床反应器,在金属氧化物催化剂(如 CoMo 或 NiMo)的作用下发生反应。反应器流出的产物经冷却、闪蒸后,分离出氢气和低碳烃类产物,氢气被重新压缩并循环用于反应器,而

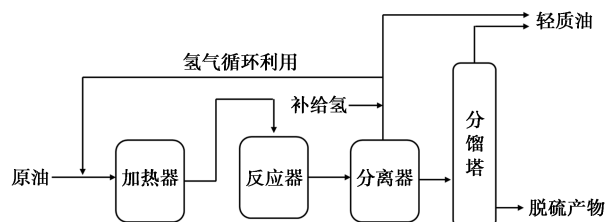


图4 催化加氢反应

烃类产物则在脱气塔中脱除 H_2S 、 NH_3 、 H_2O 等轻质组分并将剩余低碳烃类产物分离。

H_2 常被用于冶金, O_2 和 H_2 反应生成 H_2O , H_2O 氧化电位比 O_2 低, 可以在高温环境下作为保护剂防止金属被氧化, 同时 O_2 、 H_2O 及其他氧化物可以大幅提高氢与碳的反应能力。通过将钛金属材料置于高压氢环境中并保持高温状态进行热处理或机械加工, 完成后通过真空或惰性气体退火技术将氢去除^[26]。经氢合金化处理后, 钛合金呈现 2 大改进: 流变应力显著降低, 可在更低的温度与应力下进行热加工; 通过特定的退火工艺, 激发二次相析出等微观结构演变, 获得机械性能增强的新型组织。

工业生产是当前氢气最大的消费领域, 绿氢的应用是现有产业链的低碳化直接替代。大宗化学品对绿氢的需求稳定且巨大, 这为绿氢提供了明确的初期市场出口。同时, 以绿氢为原料衍生绿色燃料和材料, 更拓展了其作为“可再生碳循环”枢纽的战略价值。在重工业领域, 绿氢的核心作用是作为高品质还原剂与过程保护气。不仅是能源替代, 更是生产工艺的深度脱碳革新。尽管技术路径已得到验证, 但大规模应用仍面临绿氢成本与传统工艺成本的激烈博弈, 其进程直接取决于绿氢平准化成本的下降速度。

2.3 食品加工

大豆、鱼、棉籽、玉米、花生和椰子的不饱和油脂需要进行加氢处理, 利用氢气还原性在镍的催化作用下降低脂肪和油的不饱和度, 可以增加油脂熔点和抗氧化性, 改善气味、颜色和一致性特性, 延长保存时间。另外, 不可食用油脂和动物油脂也可进行加氢处理, 油脂经严格加氢和净化处理后, 可以作为用于食品加工设备的润滑剂。氢化反应可有效降低油脂不饱和度, 具体表现为油脂熔点提升 ($\Delta T = 20 \sim 30^\circ\text{C}$) 与抗氧化性增强 (货架期延长 2~3 倍)^[27]。在食品加工领域, 氢气的应用工艺成熟, 但属于氢气在特定细分市场的成熟化学应用, 碳减排潜力取决于所使用氢气的来源。从产业发展视角看, 此领域虽非驱动绿氢规模化需求的主动动力, 却是实现全产业链深度脱碳不可或缺的一环。

2.4 医疗制药

H_2 作为一种抗氧化剂能够选择性消除培养基中毒性极强的活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 羟基自由基。在动物及人类临床试验中, 通过摄入氢气, 机体内超氧化物歧化酶含量有所增加, 同时氢气还可以诱导生物体内强抗氧化酶血红素氧合酶的

产生, 都可以抑制 ROS 含量升高^[28]。

天然存在的氢及其同位素在制药行业中具有广泛的应用。氘通过同位素动力学效应能够有效减缓药物代谢过程, 为了创建质谱标准品, 通常将氘引入药物类似物中。氢氘交换法作为一种重要的技术手段, 在药物发现和蛋白质行为研究中发挥着关键作用, 它通过连接结构、功能与构象动力学, 为相关研究提供了有力支持。

氢气在医疗健康领域的应用, 展现了其作为具有生物活性的选择性抗氧化剂的新颖价值。尽管该领域目前规模较小, 但代表了氢能应用从宏观能源向微观生命科学的重要跨界, 揭示了氢气作为治疗性气体的潜力, 相关作用机制与应用标准化是未来研究的重点。

3 结论与展望

本文中系统梳理了包括电解水和生物质制氢的绿氢主流生产技术及其多元应用。当前技术路径呈互补格局: 碱性电解技术成熟, 适于近期规模化; 质子交换膜电响应快, 利于耦合可再生能源; 固体氧化物电解效率最高, 是未来零碳工业的关键; 光解与生物质制氢则为分布式供氢提供了补充。绿氢的应用正从传统化工领域向交通、工业及能源系统深度拓展, 作为重型交通燃料、绿色冶金还原剂及“电-氢-化”耦合枢纽的关键作用日益凸显, 共同驱动产业需求。然而, 产业规模化仍面临制氢成本偏高、储运安全性不足及基础设施薄弱等核心挑战。展望未来, 发展重点在于: 突破低成本长寿命电解槽材料 (如非贵金属催化剂、稳定隔膜); 推动“电-氢-电/化”系统集成, 提升与波动性绿电的耦合能力; 加快构建绿氢认证、安全标准与政策激励体系, 以支撑完整产业链的成熟与商业闭环的形成。

参考文献

- [1] Mansilla C, Bourasseau C, Cany C, et al. Chapter 7-hydrogen applications: Overview of the key economic issues and perspectives [M]. AZZARO-PANTEL C. Hydrogen Supply Chains. Academic Press, 2018; 271-292.
- [2] 党成雄, 杨光星, 王宇, 等. 绿氢生产技术研究进展及发展趋势 [J]. 前瞻科技, 2024, 3(4): 9-21.
- [3] 李冰峰, 李婉, 张晓勤, 等. “双碳”背景下制氢技术前景展望 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50(2): 134-136.
- [4] Mannal M. Recent advancement on anion exchange membranes for fuel cell and water electrolysis [J]. ChemElectroChem, 2021, 8(1): 36-45.
- [5] 仲蕊. 电解水制氢主流技术实现突破 [N]. 中国能源报, 2023-05-01(011).
- [6] 李建林, 李光辉, 马速良, 等. 碳中和目标下制氢关键技术进展

- 及发展前景综述[J].热力发电,2021,50(6):1-8.
- [7] Yadav V, Miyatake K, Ahmed Mahmoud A M, *et al.* Poly (arylene piperidinium) terpolymer membranes with dual piperidinium cations and semi-fluoroalkyl pendants for anion exchange membrane water electrolyzers[J]. *J Mater Chem A*, 2024, 12(37): 25429-25441.
- [8] Wang Z, Li B, Pipitone I G, *et al.* Hydrogen production from biomass: A review combined with bibliometric analysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 117: 271-291.
- [9] Balat H, Kirtay E. Hydrogen from biomass-present scenario and future prospects[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(14): 7416-7426.
- [10] 钟鸣. 中国绿色制氢关键技术发展现状及展望[J]. *现代化工*, 2023, 43(4): 13-17.
- [11] Tuluhong A, Chang Q, Xie L, *et al.* Current status of green hydrogen production technology: A review[J]. *Sustainability*, 2024, 16: 9070.
- [12] Rasul M G, Hazrat M A, Sattar M A, *et al.* The future of hydrogen: Challenges on production, storage and applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 272: 116326.
- [13] Kwilinski A, Lyulyovo O, Pimonenko T. Reducing transport sector CO₂ emissions patterns: Environmental technologies and renewable energy[J]. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 2024, 10(1): 100217.
- [14] Sharma S, Ghoshal S K. Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications[J]. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 2015, 43: 1151-1158.
- [15] Lattin W C, Utgikar V P. Transition to hydrogen economy in the United States: A 2006 status report[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(15): 3230-3237.
- [16] Halder P, Babaie M, Salek F, *et al.* Performance, emissions and economic analyses of hydrogen fuel cell vehicles[J]. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 2024, 199: 114543.
- [17] Manigandan S, Praveenkumar T, Ryu J I, *et al.* Role of hydrogen on aviation sector: A review on hydrogen storage, fuel flexibility, flame stability, and emissions reduction on gas turbines engines[J]. *Fuel*, 2023, 352: 129064.
- [18] Verstraete D. Long range transport aircraft using hydrogen fuel[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(34): 14824-14831.
- [19] Okolie J A, Patra B R, Mukherjee A, *et al.* Futuristic applications of hydrogen in energy, biorefining, aerospace, pharmaceuticals and metallurgy[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(13): 8885-8905.
- [20] Cecere D, Giacomazzi E, Ingenito A. A review on hydrogen industrial aerospace applications[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(20): 10731-10747.
- [21] Cui J, Aziz M. Techno-economic analysis of hydrogen transportation infrastructure using ammonia and methanol[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(42): 15737-15747.
- [22] Kammert J, Moon J, Cheng Y, *et al.* Nature of reactive hydrogen for ammonia synthesis over a Ru/C12A7 electride catalyst[J]. *J Am Chem Soc*, 2020, 142(16): 7655-7667.
- [23] Li H, Song G. Ru-catalyzed hydrogenolysis of lignin: Base-dependent tunability of monomeric phenols and mechanistic study[J]. *ACS Catal*, 2019, 4054-4064.
- [24] Bampaou M, Panopoulos K, Seferlis P, *et al.* Evaluation of novel hydrogen integration options in bio-oils introduction to petrochemical refineries[J]. *Energy*, 2022, 254: 124353.
- [25] Pivetta D, Dall'armi C, Sandrin P, *et al.* The role of hydrogen as enabler of industrial port area decarbonization[J]. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 2024, 189: 113912.
- [26] Yang J, Song Y, Dong K, *et al.* Research progress on the corrosion behavior of titanium alloys[J]. *Corrosion Reviews*, 2023, 41(1): 5-20.
- [27] Da Silva F T, Dos Santos F N, Fonseca L M, *et al.* Oleogels based on germinated and non-germinated wheat starches and orange essential oil: Application as a hydrogenated vegetable fat replacement in bread[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253: 126610.
- [28] Liao X, Song X, Li J, *et al.* An injectable co-assembled hydrogel blocks reactive oxygen species and inflammation cycle resisting myocardial ischemia-reperfusion injury[J]. *Acta Biomaterialia*, 2022, 149: 82-95. ■
- (上接第59页)
- [6] 唐小华, 惠菲, 查飞, 等. 有机过氧化物的稳定性研究进展[J]. *应用化工*, 2019, 48(10): 2444-2449.
- [7] 李祥茜. 过氧乙酸生产工艺安全及反应过程危险性研究[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2019.
- [8] 孙峰, 谢传欣, 张帆, 等. 过氧丙酸的制备及热危害研究[J]. *现代化工*, 2010, 30(2): 186-189.
- [9] Cogliano T, Russo V T, Turco R, *et al.* Revealing the role of stabilizers in H₂O₂ for the peroxyformic acid synthesis and decomposition kinetics[J]. *Chemical Engineering Science*, 2022, 251: 117488.
- [10] Da Silva W P, Carlos T, Cavallini G, *et al.* Peracetic acid: Structural elucidation for applications in wastewater treatment[J]. *Water Res*, 2020, 168: 115143.
- [11] 吴海涛, 刘建云. 过氧乙酸生产工艺和稳定性研究[J]. *中国动物保健*, 2011, 13(1): 28-32.
- [12] 马静. 温度、溶剂及稳定剂对过氧乙酸稳定性的影响[J]. *中国药物与临床*, 2006, (5): 371-372.
- [13] 李连峰, 樊永明. 过甲酸制备过程中活性氧的转化及稳定性研究[J]. *中华纸业*, 2007, 28(4): 55-58.
- [14] 江佳佳, 杨建洲, 蒋军成, 等. 间氯过氧化苯甲酸热分解动力学及危险性[J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(7): 110-114.
- [15] 李起龙. 有机过氧化物分解机理及热伤害[J]. *化工管理*, 2020, (30): 177-188.
- [16] 郑建美. 金属离子影响过氧乙酸分解速度的探讨及对策[J]. *化学工程与装备*, 2007, (4): 8-12.
- [17] Dutka V S, Zagorskaya V V, Dutka Y V. Catalytic decomposition of aliphatic peroxy acids[J]. *Kinetics and Catalysis*, 2010, 51(3): 364-369.
- [18] 郑建美, 张艳, 张琳. 不同浓度金属离子对过氧乙酸分解速度的影响[J]. *化学工程与装备*, 2008, (11): 26-30.
- [19] Deary M E. Boric acid catalysed hydrolysis of peroxyacids[J]. *RSC Adv*, 2023, 13(17): 11826-11837.
- [20] 张春泉. 时间、浓度、温度与光线对配制过氧乙酸原液的影响[J]. *海峡药学*, 2006, 18(2): 36-37.
- [21] 程永喜, 温婧, 刘旭. 美国高浓度过氧化氢与金属材料相容性研究进展[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2018, 16(5): 10-19.
- [22] 鄢冬茂, 殷国强, 龚党生, 等. 一种微反应器中连续流过氧乙酸合成装置: CN 217511832U[P]. 2022-09-30.
- [23] 周宛欣, 叶文馨, 杨涛, 等. 新型过氧化氢稳定剂的制备及性能研究[J]. *中国造纸*, 2024, 43(2): 119-125.
- [24] 许妍, 徐开熠, 刘海. 几种非硅过氧化氢稳定剂在化机浆漂白过程中的应用研究[J]. *纸和造纸*, 2021, 40(5): 13-16.
- [25] 赵梦奇, 司马义·努尔拉, 廖银念, 等. 马来酞酸-丙烯酰胺交联共聚物的制备及其重金属吸附性能[J]. *合成树脂及塑料*, 2015, 32(5): 24-26. ■