

碱性电解槽制氢技术的研究现状及发展趋势

尹诗斌, 蒋文杰, 文欢*

(广西电化学能源材料重点实验室, 广西大学化学化工学院, 广西南宁 530304)

摘要: 碱性电解槽技术作为制氢的关键途径, 近年来得到了快速发展。文章综述了碱性电解槽的工作原理、性能指标及技术发展现状, 并深入探讨了其发展趋势及技术创新方向。碱性电解槽技术因成本低、工艺成熟、易于大规模应用等优势, 在电解水制氢领域占据重要地位。然而, 随着氢能产业的不断发展, 对电解槽的效率、稳定性及经济性提出了更高要求。未来, 碱性电解槽技术将趋向大型化、集成化, 并通过技术创新与优化, 如开发新型高效催化剂、优化电解槽结构以及升级系统等提升其性能和经济性。同时, 通过跨学科深度融合, 为碱性电解槽技术的发展注入新的活力, 推动氢能产业的持续进步与繁荣。

关键词: 碱性介质; 电解槽; 电解水; 析氢反应; 析氧反应; 电解水制氢

中图分类号: TQ116.2⁺1 文献标志码: A

文章微信二维码:



文章编号: 1673-159X(2025)01-0168-13

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.5746

Research Status and Development Prospects of Hydrogen Production Technology in Alkaline Electrolyzer

YIN Shibin, JIANG Wenjie, WEN Huan*

(Guangxi Key Laboratory of Electrochemical Energy Materials, School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530304 China)

Abstract: As a key method for hydrogen production, alkaline electrolyzer technology has been developed rapidly in recent years. This review systematically summarizes the principles, performance indicators, and current development status of alkaline electrolyzers while discussing their development prospects and technological innovation direction in depth. Alkaline electrolyzer technology plays a crucial role in hydrogen production due to its low cost, mature process, and suitability for large-scale applications. However, the continuous development of hydrogen energy industry, there are increasing demands for the efficiency, stability, and economy of electrolyzers. In the future, alkaline electrolyzer technology will tend to be large-

收稿日期: 2024-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(22162004); 广西自然科学基金(2022JJD120011)。

第一作者: 尹诗斌(1981—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为电化学能源材料。

ORCID: 0000-0002-1539-4474 E-mail: yinshibin@gxu.edu.cn

*通信作者: 文欢(1983—), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为电化学能源材料。

ORCID: 0009-0002-6484-1565 E-mail: wenhuan@gxu.edu.cn

引用格式: 尹诗斌, 蒋文杰, 文欢. 碱性电解槽制氢技术的研究现状及发展趋势[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2025, 44(1): 168-180.
YIN Shibin, JIANG Wenjie, WEN Huan. Research Status and Development Prospects of Hydrogen Production Technology in Alkaline Electrolyzer[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2025, 44(1): 168-180.

scale and integrated, and the performance and economy of electrolyzers can be further improved through the development of efficient catalysts, electrolyzer structure, and system optimization. Furthermore, the deep integration of interdisciplinary technology would inject new vitality into the development of alkaline electrolyzer technology, and promote the continuous progress and prosperity of hydrogen energy industry.

Keywords: alkaline electrolyte; electrolyzer; water electrolysis; hydrogen evolution reaction; oxygen evolution reaction; hydrogen production by water electrolysis

随着经济高质量发展和人类社会的进步,能源问题越来越引起人类的关注。由于传统的化石能源面临难以再生、污染环境的突出难题,因此,寻求能够持续使用的清洁能源有着重大价值。氢气是一种无污染的可再生清洁能源,并且具有能量密度高的优点。氢气的使用能够减轻化石燃料对环境的影响。然而,与化石燃料不同,氢气作为一种燃料形式无法从自然界中直接获得。目前,超过95%的氢气是通过蒸汽重整工艺生产的,主要依赖含有甲烷(CH_4)的化石燃料作为原料^[1],但是,化石燃料的重整会排放大量的二氧化碳,因此,通过此途径生产的氢气被称为“灰氢”。为了寻求更环保的解决方案,人们开始利用可再生能源驱动电解水来生产氢气(WE),这一过程不排放二氧化碳,被视为一种绿色的制氢方式^[2-3],如图1所示。电解水制氢不仅有助于减少碳排放,还可以推动氢气生产的绿色转型。

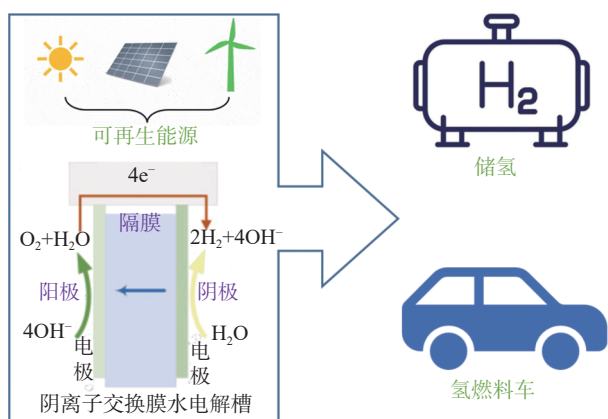
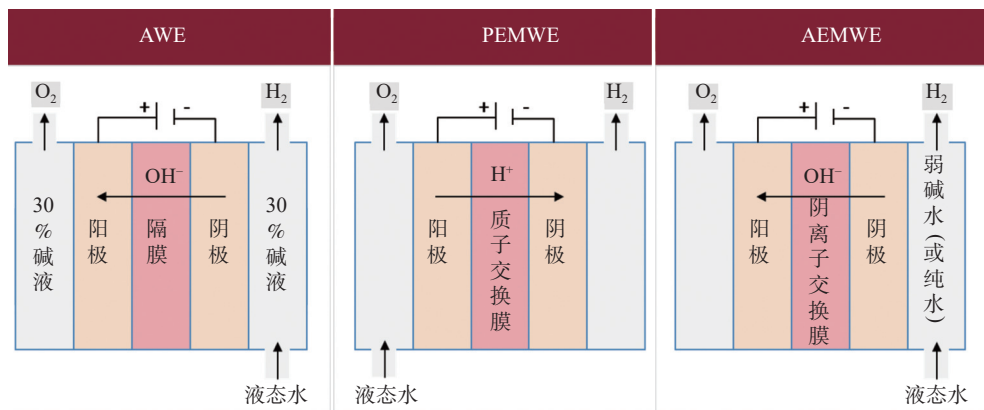


图1 碱性电解槽利用可再生能源制氢及氢能使用示意图
Fig.1 Alkaline electrolyzer for hydrogen production from renewable energy and hydrogen usage schematic

WE是利用外加电流将水分子分解成高纯度的氢气和氧气的电解技术,可按操作温度进行分类^[4-10]。低温电解水包括碱性电解水(AWE)、质子交换膜电解水(PEMWE)和阴离子交换膜电解水

(AEMWE),如图2所示。高温电解液的固体氧化物电解水(SOEC),本文将不作讨论。AWE是商业化程度最高的电解水技术,其电极板不含贵金属,因此电解槽成本相对较低。然而,受限于电极催化活性不足和高欧姆损耗,AWE的最大运行电流密度较低,且启动速度缓慢,对电力输入的波动敏感,在不稳定的电源环境下操作安全性较差,通常仅适用于稳定的电源环境,故不适宜与风能、太阳能等间歇性电能集成使用^[5]。近年来,PEMWE技术发展迅速并已初步实现商业化,根据国际能源署(IEA)2023年的报告,PEMWE技术水平已达到9级(即通过成功执行任务而证明的实际系统)。该技术采用质子交换膜(PEM)作为固体电解质。PEM不仅能够有效地阻隔阴阳两极的气体扩散,还能为质子(H^+)提供内部传导通道,实现质子的跨膜迁移,从而帮助电解系统形成完整回路。由于质子交换膜具有极低的气体渗透率和质子跨膜传输对功率输入的快速响应特性,PEM电解槽展现出动态响应敏捷、负荷范围广、运行电流密度大、输出氢气压力高以及系统结构紧凑等诸多优势,使其非常适合与可再生能源发电系统集成制氢^[6]。然而,PEM电解槽在强酸性和高氧化性环境中运行,器件依赖于贵金属材料如铱、铂、钛等,高昂的成本成为其大规模应用的主要障碍。相比之下,AEMWE技术兼具AWE技术的低成本和PEMWE技术的高动态响应两大优势,同时在碱性环境下催化剂和设备具有良好的抗腐蚀性^[7]。近年来,AEMWE技术因其独特的优势而备受业界瞩目,尽管目前仍处于产业化初期,但有望成为最具潜力的大规模可再生能源电解水制氢技术。

AEMWE技术不仅承载着将可再生能源高效转化为绿色氢能的重任,还为实现能源结构的多元化、低碳化以及可持续发展提供了坚实的支撑。

图2 不同低温电解水制氢技术的工作原理^[9]Fig. 2 Comparison of different low temperature water electrolysis hydrogen production technologies^[9]

近年来,关于碱性电解槽技术制氢的研究日益广泛,并取得了显著进展。然而这些研究大多聚焦于催化材料的设计上,例如项俊欣等^[8]概述了碱性电解槽中镍基催化剂的设计与合成。本文旨在综述碱性电解槽技术的原理、特点及当前技术水平,探讨其发展趋势及未来可能的技术创新方向,以期为氢能产业的发展提供有益的参考和启示,推动氢能经济的蓬勃发展。

1 碱性电解槽技术

1.1 碱性电解槽工作原理

碱性电解槽作为一种成熟的电解水制氢装置,基于电解原理,其主要通过控制电流、电压和电解质浓度等参数,实现电能向化学能的转换^[10]。本文将从电解原理、离子迁移过程以及电解液的作用3方面阐述碱性电解槽的工作原理。

电解原理是碱性电解槽工作的基础。在电解过程中,直流电通过电解质溶液,使溶液中的离子在电场作用下发生迁移。在此过程中,阳极发生氧化反应释放电子产生氧气;阴极则发生还原反应接受电子产生氢气。通过电子的转移和离子的迁移形成电流,从而实现电能到化学能的转换^[11]。

离子迁移过程是碱性电解槽工作的关键^[12]。在电解过程中,离子在电场作用下定向迁移。这种定向迁移使得电解质溶液中的离子分布发生改变,从而实现了离子的分离和聚集。同时,通过离子的迁移也促进了电极反应的进行,使得电解过程持续进行。

电解液在碱性电解槽中起着至关重要的作

用。电解液能够传导离子,使得离子能够在电场作用下发生迁移。电解液能够降低电阻,使得电解过程中的电流能够顺畅流通。电解液的性质还会影响电解过程的效率和稳定性,电解液的浓度、温度、酸碱度等都会对电解过程产生影响^[13]。

1.2 关键技术参数与性能指标

电流密度是衡量电解槽工作效率的重要指标。在电解过程中,电流密度越大,单位面积上的电子流越多,电解反应的速度就越快。因此,提高电流密度可以显著提高电解效率。然而,电流密度的增加也会带来能耗的增加,同时过高的电流密度还可能导致电解槽的热效应增强,从而影响产物的纯度和电解槽的使用寿命。因此,在实际应用中,需要根据电解槽的设计和电解产物的需求来选择合适的电流密度。

槽压是电解槽内相邻阴阳极之间的电压降的总和,也是衡量电解过程能量利用效率的关键指标。槽压的大小取决于电解质的性质、电极材料的种类以及电解槽的设计等因素。降低槽压可以有效地降低电解过程的能耗,提高电解效率。然而,过低的槽压可能导致电解反应无法正常进行,因此,需要在保证电解反应顺利进行的前提下,尽可能地降低槽压。

电解质浓度是影响电解槽性能的重要因素之一。合适的电解质浓度可以保证电解质的电导率,从而确保电解反应的顺利进行。同时,电解质浓度还可以影响电解产物的纯度和电解槽的寿命。因此,在电解过程中,需要严格控制电解质的浓度,以保证电解槽的稳定运行和产物的高纯度^[11]。

1.3 碱性电解槽技术发展历程

碱性电解技术作为电解水制氢及氯碱工业等领域的重要技术,其发展历程可追溯至 19 世纪末。早期的研究主要集中在电解槽的设计和优化上,旨在提高电解效率和降低能耗。随着能源需求的增加和环境保护意识的提升,碱性电解槽技术逐渐受到重视。目前,尽管碱性电解槽具有成本低、操作简单等优点,但其电流密度低、能耗高的问题限制了其大规模应用^[14]。随着材料科学和电化学技术的不断进步,碱性电解槽技术迎来了新的发展机遇。碱性电解槽制氢过程如图 3(a)所示。目前,AEM 碱性电解槽通常由垫片、流场板、膜电极封

装而成,其中,膜电极(MEA)作为电催化反应发生的核心,对电解槽的整体性能起着至关重要的作用^[15]。它通常由 AEM、阳极和阴极催化剂层、扩散层等关键组件构成,如图 3(b)所示。研究人员通过开发新型催化剂、优化电解槽结构、发展新型阴离子交换膜、耦合有机氧化反应以及集成可再生能源系统等手段,提高了碱性电解槽的制氢效率和经济效益^[16]。欧阳明高院士指出碱性水电解制氢是当前低成本电解制氢的首选方法,但其进一步发展面临着关键材料性能提升、电解槽优化设计和运行调控等方面的技术挑战^[17]。

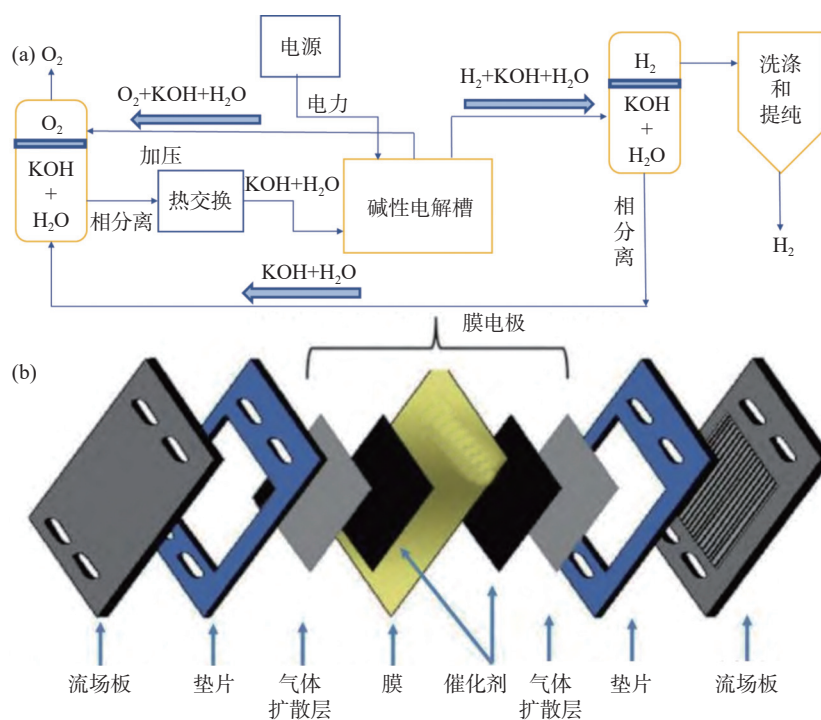


图 3 (a)碱性电解槽制氢过程示意图,(b)碱性电解槽结构示意图^[15]

Fig. 3 (a)Schematic diagram of hydrogen production process in alkaline electrolyzer and (b) alkaline electrolyzer structure ^[15]

随着环保意识的提高和新能源技术的快速发展,碱性电解槽技术的前景越来越广阔。未来,碱性电解槽技术将继续朝着高效、环保、低成本的方向发展,为社会的可持续发展做出更大的贡献。

2 碱性电解槽技术现状

2.1 催化剂的选择与设计

在碱性电解槽技术中,催化剂作为电化学反应的核心组件,对制氢效率具有举足轻重的影响。催化剂在碱性电解槽中主要作用于阴极和阳极,通过

降低电解反应的活化能,加速水分子的还原与氧化反应,从而显著提升反应速率。这一过程依赖于催化剂表面丰富的催化位点和高效的电子转移能力。在阴极,催化剂促进水分子还原为氢气和氢氧根离子;在阳极,则推动氢氧根离子氧化为氧气和水^[18]。这种催化作用可以提高电解效率,降低能耗,是碱性电解槽技术得以广泛应用的关键。

评价催化剂性能的指标主要包括催化活性、稳定性和选择性。催化活性,即催化剂促进反应速率的能力,是衡量其性能的重要指标之一。稳定性

(耐久性)则关乎催化剂在长时间运行过程中的性能保持能力,对确保电解槽的长期稳定运行至关重要,是评估其经济价值的重要考量。选择性则反映了催化剂对目标反应(如氢气生成)的偏好程度,高选择性意味着更少的副产物和更高的能效。

在碱性电解槽技术中,电极材料主要分为贵金属、过渡金属及非金属三大类。在这些材料中,贵金属催化剂 Pt 在析氢反应(HER)中表现出色, Ru、Ir 和 Rh 具有优异的析氧反应(OER)性能^[19-22]。然而,由于贵金属的储量有限且价格昂贵,其大规模化应用受到了限制。另一方面,非金属碳材料催化剂以其成本低廉和性能稳定的特点而受到关注,但其实际应用仍受限于自身较低的本征催化活性^[23]。为了提高其催化性能,研究者们尝试通过高温处理并掺杂氮、磷或硫等非金属元素来对其进行改性。Murugan 等^[24]通过两步法活化从东方豹皮树芯中制备生物质衍生的无金属电催化剂,所制备的 N 掺杂富缺陷多孔碳纳米片具有大比表面积、高孔隙率和高导电率,该催化剂的性能与目前商用钌基催化剂接近。此外,过渡金属基催化剂(如镍、铁、钴、钼等及其化合物)因其成本低廉、制备方法简单且结构组成多样而备受青睐^[25-26]。这些催化剂包括过渡金属单质、硫化物、磷化物、氧化物、氢氧化物和氮化物等多种形式,被认为是替代贵金属催化剂的理想选择^[27-28]。西湖大学孙立成院士通过简单“一步法”成功制备用于碱性电解槽制氢的镍铁层状双氢氧化物(NiFe-LDH)^[29],将 NiFe-LDH 作为阳极 OER 催化剂组装到实际 AEM 碱性电解槽装置中,如图 4(a)红色框所示^[29],NiFe-LDH 在 60 °C 的温度下,仅需 1.80 V 的电压就能实现 2730 mA·cm⁻² 的高电流密度,如图 4(b)所示^[29]。这一性能表现已经超越了美国能源部设定的制氢指标(1.80 V, 2000 mA·cm⁻²),同时其具有超高稳定性,在 1000 mA·cm⁻² 的电流密度下能够稳定运行 19100 h,如图 4(c)所示^[29]。

为了进一步提升碱性电解槽的制氢效率,催化剂的优化策略显得尤为重要。一方面,通过调整催化剂的微观结构,如增大比表面积、增加孔隙率等来增加催化位点的数量,从而提高催化活性^[30-31];

另一方面,通过表面修饰、掺杂等方法改善催化剂的电子结构,提高其本征活性,降低过电位^[32-33]。此外,选择合适的载体材料、优化制备工艺等方法也能有效增强催化剂的稳定性,延长其使用寿命^[34]。结合材料科学、电化学等领域的最新研究成果,开发具有更高催化性能、更低成本的新型催化剂,也是提升碱性电解槽制氢效率的重要途径。Ding 等^[35]通过引入 CeO₂ 调控 FeNi 复合物的电子结构(NiFe₂O₄-Fe₂₄N₁₀-CeO₂/NF),有效提升了催化剂的本征活性;同时,他们在泡沫镍上原位制备的多孔纳米片增加了催化剂与电解液的接触,从而加快反应动力学,如图 4(d)(e)所示。这些研究表明,通过合理的催化剂设计,可以显著提高碱性电解槽的制氢效率。

2.2 新型阴离子交换膜设计

阴离子交换膜作为碱性电解槽水解制氢(AEMWE)技术的核心组件,它通过高分子主链上的荷正电官能团,利用静电吸引力与水中阴离子相互作用,同时排斥相同电荷的阳离子,在电场、浓度梯度等外部驱动力作用下,实现离子的选择性传输^[36]。其主要起到 2 方面的作用:一是作为固态电解质传导 OH⁻ 离子;二是作为屏障,将作为原料或产物的 H₂ 和 O₂ 气体分隔在膜两侧,防止氧化剂与还原剂直接接触。然而,阴离子交换膜在碱性环境下高浓度的离子交换基团容易表现出化学不稳定性。因此,如何制备具有高 OH⁻ 传导率和高稳定性的阴离子交换膜成为技术瓶颈之一。

以往研究表明,阴离子交换膜的骨架和侧链阳离子基团会长时间暴露于高温、高碱浓度的环境中,导致化学键发生不同程度的断裂,从而影响膜材料的性能。因此,设计稳定的高分子结构是提升阴离子交换膜稳定性的核心策略。目前,研究者们主要从 2 方面提升主链稳定性和阳离子基团稳定性。一方面,相比于部分含有杂原子(如 O、S 等)键的聚合物主链在 OH⁻ 的攻击下容易发生断裂,导致阴离子交换膜的韧性降低的情况,完全由碳氢键构成的聚合物主链,如聚烯烃类或聚芳基类主链,展现出更出色的耐碱稳定性^[37]。另一方面,设计合适的阳离子基团对于解决阴离子交换膜的稳定性

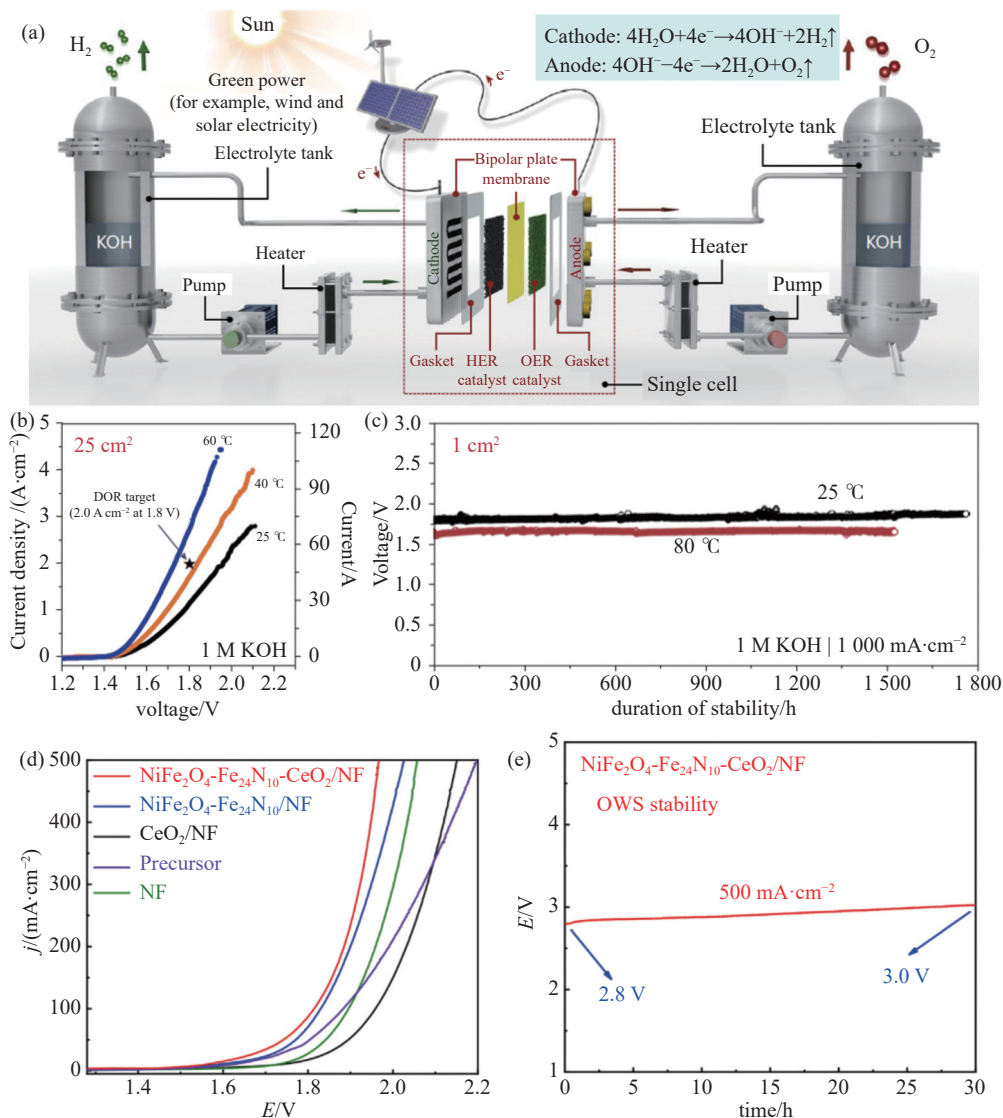


图 4 (a)绿色电力驱动 AEM 碱性电解槽系统示意图^[29], (b) 25 cm^2 的 NiFe-LDH 电极在不同温度下的极化曲线^[29], (c) 1 cm^2 的 NiFe-LDH 电极在 $1000\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 条件下分别于 25°C 和 80°C 的稳定性^[29], (d) 碱性全水解曲线^[35], (e) $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Fe}_{24}\text{N}_{10}\text{-CeO}_2/\text{NF}$ 在 $500\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 条件下的稳定性^[35]

Fig. 4 (a) Schematic of a green electricity-driven AEMWE plant^[29], (b) polarization curves of the 25 cm^2 NiFe-LDH electrode at different temperatures^[29], (c) stability of the 1 cm^2 NiFe-LDH electrode measured at 25°C and 80°C respectively under $1000\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ^[29], (d) comparison of LSV curves for water electrolysis^[35], (e) long-term stability of $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Fe}_{24}\text{N}_{10}\text{-CeO}_2/\text{NF}$ at $500\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ^[35]

问题同样至关重要。季铵盐阳离子结构在高浓度碱环境中容易受到 OH^- 的攻击, 发生亲核取代或霍夫曼消除反应, 转变为非荷电基团, 从而降低阴离子交换膜的整体离子交换容量和电导率。为此, 大量研究聚焦于开发不同种类的耐碱阳离子基团, 如非芳香型季铵盐、芳香型季铵盐、季磷盐、金属配位盐等, 并通过实验验证或理论计算证实了这些结构的耐碱稳定性^[37-38]。

2.3 电解槽结构与系统的优化

除了电催化剂外, 电解槽的结构和系统优化也

是提高制氢效率的关键。传统的碱性电解槽存在电流密度低、能耗高等问题。为了克服这些问题, 研究人员开发了多种新型电解槽结构, 旨在通过设计创新来提升制氢效率并降低成本。

熊海燕等^[39] 通过精细设计双极板的流道布局, 使得电解槽内部的流体分布更加均匀, 有效减少了流体死角和涡流现象, 从而显著提高了电流密度和制氢效率。双极板作为电解槽的关键组件, 其流道结构的设计直接影响到电解液的流动状态、气体产物的排出以及电极表面的反应速率。因此, 通过

精准调控流道形状、尺寸和布局,可以实现对电解过程的精细控制,进而提升整体的制氢性能。

此外,将碱性电解槽与可再生能源系统相结合,是降低制氢成本并提高系统稳定性的另一重要途径。太阳能、风能等可再生能源具有清洁、可持续的特点,但其波动性和不稳定性也给电解槽的运行带来了挑战。为了克服这一难题,Wang 等^[40]报道了一种直接太阳能驱动的碱性电解槽系统,该系统通过高效的光伏转换装置将太阳能转化为电能,直接供给电解槽使用,从而在模拟太阳光照射下展现出了高效的制氢性能。这一创新设计不仅实现了能源的高效利用,还降低了对传统电网的依赖,提高了系统的灵活性和稳定性。

值得注意的是,将碱性电解槽与可再生能源系统相结合并非简单的技术叠加,而是需要深入的系统整合和优化。这包括电解槽与可再生能源发电装置的匹配性设计、能量管理系统的优化,以及电解槽运行策略的调整等多方面。通过综合考虑这些因素,可以构建出一个高效、稳定、可持续的氢能制取系统,为氢能的大规模应用奠定坚实基础,推动氢能产业的快速发展。

2.4 耦合有机氧化反应的应用

在传统碱性电解槽中,电解水制氢的过程往往伴随着阳极析氧反应,这一反应不仅能耗高,而且产生的氧气附加值相对较低。为了提高碱性电解槽的制氢效率和经济性,研究人员发现将电解水制氢与有机氧化反应相耦合是一种极具潜力的策略^[41]。这种耦合反应不仅能够有效降低制氢成本,还能同时产生高附加值的化学品,实现资源的综合利用和经济效益的最大化。Wu 等^[42]引入了 5-羟甲基糠醛(HMF)氧化反应作为阳极反应,构建了将电解水制氢与 HMF 氧化反应相耦合的系统,通过这一耦合反应,电解槽在制取氢气的同时,还能在阳极生成高附加值 2,5 呋喃二甲酸(FDCA)的化学品,从而实现了双重效益。

这种耦合反应之所以能够提高电解槽的制氢效率,原因在于它改变了电解槽内部的反应机制。在传统的电解水制氢过程中,阳极的析氧反应是一个动力学上较为缓慢的过程,需要较高的电位才能驱动^[43]。而 HMF 氧化反应则具有较低的反应电

位,因此更容易进行。当 HMF 氧化反应替代析氧反应作为阳极反应时,电解槽的整体反应电压降低,从而减少了能耗。同时,由于阳极产物具有更高的附加值,因此这种耦合反应在经济上也更具吸引力^[44]。

除此之外,研究人员也探索了将电解水制氢与其他有机氧化反应相耦合的策略。通过选择合适的有机氧化反应和优化电解槽,可以进一步提高制氢效率和经济性,如图 5(a)所示。例如:湖南大学王双印教授课题组将电解水制氢与醇类氧化、糠醛化合物氧化等反应相耦合,取得了显著效果^[45-46];中国科学院大学福建物构所温海珍教授团队选择甘油氧化反应(GOR)替代阳极 OER,通过在碳布(CC)上原位生长五元金属-有机框架(MOF)并热解还原,制备了基于 HEA-CoNiCuMnMo 纳米颗粒的自支撑电极,该电极在碱性电解液中表现出优异的 GOR 电催化性能,在 1.25 V 时电流密度达到 $10 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$,远低于 OER 在同一电流密度下所需电压,并且在宽电位范围(1.27~1.47 V vs. RHE)内催化生成高附加值甲酸盐产物的法拉第效率超过 90%^[47]。

近年来,研究者提出电氧化有机小分子废水(例如:尿素废水、氨废水、含胍废水)代替 OER 耦合制氢,如图 5(b)。相对于碱性电解水,其综合制氢成本降低了 30%~51%^[48]。此外,在电解有机小分子废水中,阳极侧可有效降解有机废水。华南理工大学黄建林等开发了一种在木质素化木碳(Ni-NC@DWC)上生长的 N 掺杂碳包覆具有晶格畸变的纳米颗粒,可在高电流密度下高效电解尿素辅助制氢^[49]。当它被组装为碱性电解槽时,达到 $2000 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的电解尿素耦合制氢仅需要 1.62 V 的电压,远低于大部分碱性电解水制氢催化剂,同时,阳极侧可将尿素废水中的含氮成分降解为无害的 N_2 。

值得注意的是,将电解水制氢与有机氧化反应相耦合虽然具有诸多优势,但也面临着一些挑战。例如:如何选择合适的有机氧化反应以确保其与电解水制氢过程的兼容性;如何优化电解槽的设计以提高反应效率和产物选择性;如何处理阳极产生的高附加值化学品以实现其有效利用等。为了解决这些问题,研究人员需要继续深入探索和创新,不

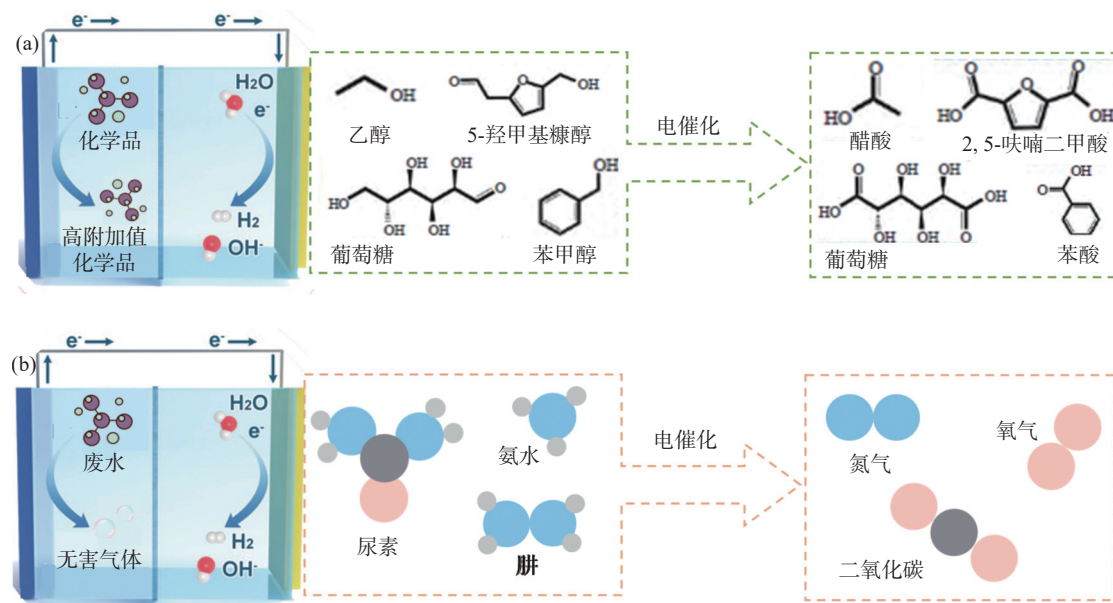


图 5 (a)电氧化有机化学品制氢, (b)电氧化有机小分子废水制氢

Fig. 5 (a) Electro-oxidation of organic chemicals and (b) organic small molecule wastewater for hydrogen production

断推动制氢技术的发展和进步。

3 碱性电解槽技术创新方向探讨

3.1 新型材料应用与结构设计优化

在新型电解水制氢技术中,电解槽是电解水产生氢气和氧气的核心部件。为了提高电解槽的耐久性和稳定性,降低能耗和成本,新型材料的应用与结构设计的优化显得尤为重要。

在新型材料应用方面,由于电解槽工作在强碱性的环境下,因此材料的耐腐蚀性和导电性成了重要的考虑因素。钛合金因其优异的耐腐蚀性和强度,被广泛应用于电解槽的电极和外壳中^[50]。钛合金的使用不仅延长了电解槽的使用寿命,还降低了维护成本。高强度不锈钢材料也因其良好的耐腐蚀性和强度被应用于电解槽的制造中,进一步提高了电解槽的稳定性和可靠性^[51]。

在结构设计优化方面,电解槽的结构设计对于电解效率和产物纯度有着重要影响。通过优化电极距离,可以提高电解效率,降低能耗。同时,合理的流场设计可以保证电解液在电解槽中的均匀分布,避免局部过热和产物积聚,从而提高产物纯度^[52]。对于电解槽的密封和散热设计也需要进行优化,以保证电解过程的安全性和稳定性。这些结构设计的优化不仅可以提高电解槽的性能,还可以降低制造成本,提高经济效益。王玉杰^[53]基于工

业生产中的碱性电解槽结构,运用计算流体力学软件仿真,深入探究了碱性水电解槽内部速度场、气液分布、压力分布和电压分布等特性,揭示了影响电解槽能耗的关键因素,研究发现,电解反应过程中产生的气体是导致电压上升的重要因素,且这些气体主要积聚在电极孔洞和电极室的上部区域,呈现出从电极正表面向电极室内部逐渐减少的趋势。根据仿真分析结果,王玉杰提出了 2 方面的优化策略:一方面是通过优化电极室的流道结构,提升室内气体的流速,增强对电极室内流体的扰动效应;二是通过改进电极结构的设计,加快电极表面气体的传输速度,降低气体含量,进而实现能耗的减少。

新型材料的应用与结构设计的优化是提高电解水制氢技术经济性的重要途径。未来,随着材料科学的不断发展和电解槽结构设计的不断优化,电解水制氢技术将有望得到更广泛的应用和推广。

3.2 智能化控制与运维管理技术创新

智能化控制和运维管理技术在碱性电解槽领域的应用,极大地推动了电解过程的稳定性和可靠性,同时降低了运维成本,提升了运维效率。

在智能化控制方面,传感器和智能控制系统的引入,使碱性电解槽实现了实时状态的监测和智能控制^[54]。这些高精度传感器能够实时采集电解槽的温度、压力、液位等关键参数,确保数据的准确

性和时效性,并通过数据传输至智能控制系统。智能控制系统根据预设的控制策略和算法,对电解槽的运行状态进行实时深度分析、精准判断和灵活调整。这种基于实时数据的智能控制,有效避免了传统控制方式下因人为操作不当或参数控制不准确而导致的电解过程波动,提高了电解过程的稳定性和可靠性。

在运维管理技术方面,大数据和云计算等先进技术的应用,为碱性电解槽的运维管理提供了数字化和智能化的解决方案^[55]。通过数据采集和传输,电解槽的运行数据被实时上传至云端服务器,并通过数据分析和处理,形成电解槽的运维管理数据库。这些数据可以用于对电解槽的运行状态进行实时监测和预测,及时发现并处理潜在的故障。同时,通过对数据的分析和挖掘,还可以优化电解槽的运行参数和控制策略,进一步提高电解效率,降低能耗成本。

智能化运维管理还可以实现远程监控和诊断^[56]。运维人员可以通过手机或电脑等终端设备,随时查看电解槽的运行状态和数据,并进行远程控制和调整。这种远程监控和诊断的方式,不仅减少了运维人员的工作量和劳动强度,还可以及时发现和处理电解槽的异常情况,避免了因故障而导致的停机和损失。

同济大学江悦等^[57]基于碱性电解槽的工作原理及流程,积极开展了数字孪生建模与应用研究,并构建了碱性电解槽的数字孪生系统框架。该系统框架从基础物理层到顶层应用层依次涵盖了系统物理层、数据感知层和仿真模型层3个层级。这些层级之间、数字孪生体与物理实体之间,通过虚实数据的双向流通紧密相连,每一层的实现均基于前面各层。系统物理层是碱性电解槽制氢系统装置的实体,它作为数据源,提供系统运行数据以及系统环境参数;数据感知层则基于系统物理层的底层,负责数据的采集和传输;在仿真模型层,则利用系统物理层提供的多维度数据,结合碱性电解槽的工作机制,通过融合理论模型与数据驱动模型的混合建模技术,来构建碱性电解槽的数字孪生体,实现对物理槽体的虚拟映射,如图6所示。当设备上的各类传感器装置实时采集到电解槽的温度、

压力、液位等关键参数后,通过访问已建立的、融合了模型驱动和数据驱动的电解槽数字孪生体模型,并结合运行环境数据、设备工艺制造数据、设备离线试验数据、运维检修数据以及故障案例数据等,就可以基于设备状态评价模型和故障诊断模型,在物理空间和虚拟空间进行设备的同步运行与交互比对,从而在线实时地获取电解槽的运行状态评估等信息,进而实现对碱性电解槽装置的故障诊断、运行控制参数的优化以及集群化管理等。

3.3 跨学科融合与技术创新趋势

碱性电解槽作为可再生能源技术的重要组成部分,在跨学科融合与技术创新方面展现出了巨大的潜力。其技术进步不仅依赖于化学领域的深入研究,更需跨越物理、材料、计算机等多个领域,实现知识的融合与创新。

在跨学科融合方面,化学与物理学的结合为碱性电解槽的电解质优化提供了新思路。通过研究电解质的物理化学性质,科学家能够设计出更高效的电解质配方,提高电解效率。同时,材料科学的进步为电极材料的创新提供了可能。新型电极材料具有更高的催化活性和稳定性,能够降低电解过程中的能耗,提高电解槽的整体性能。

技术创新是碱性电解槽未来发展的关键。通过引入人工智能技术,可以实现电解槽的智能化控制,优化电解过程,提高电解效率。物联网技术的应用也使得电解槽的远程监控和维护成为可能,进一步降低了运行成本。阳光氢能绿色化是另一个重要的趋势。随着环保意识的提高,电解槽的环保性能越来越受到关注。未来,碱性电解槽将更加注重绿色化生产,减少废弃物排放,实现可持续发展。高效化是碱性电解槽技术创新的终极目标。通过不断的技术改进和创新,可以提高电解槽的转化效率,降低生产成本,为可再生能源的广泛应用提供有力支持。

安徽阳光氢能科技有限公司通过实施“数字+”系列举措,成功实现了制氢装备在智能制造、实证测试以及智慧运营方面的重大飞跃,电解水制氢效率提升了60%^[58]。此举不仅突破了传统生产管理的限制,还在效率、质量和敏捷性上实现了全方位的提升。此外,武汉华工激光工程有限责任公司专

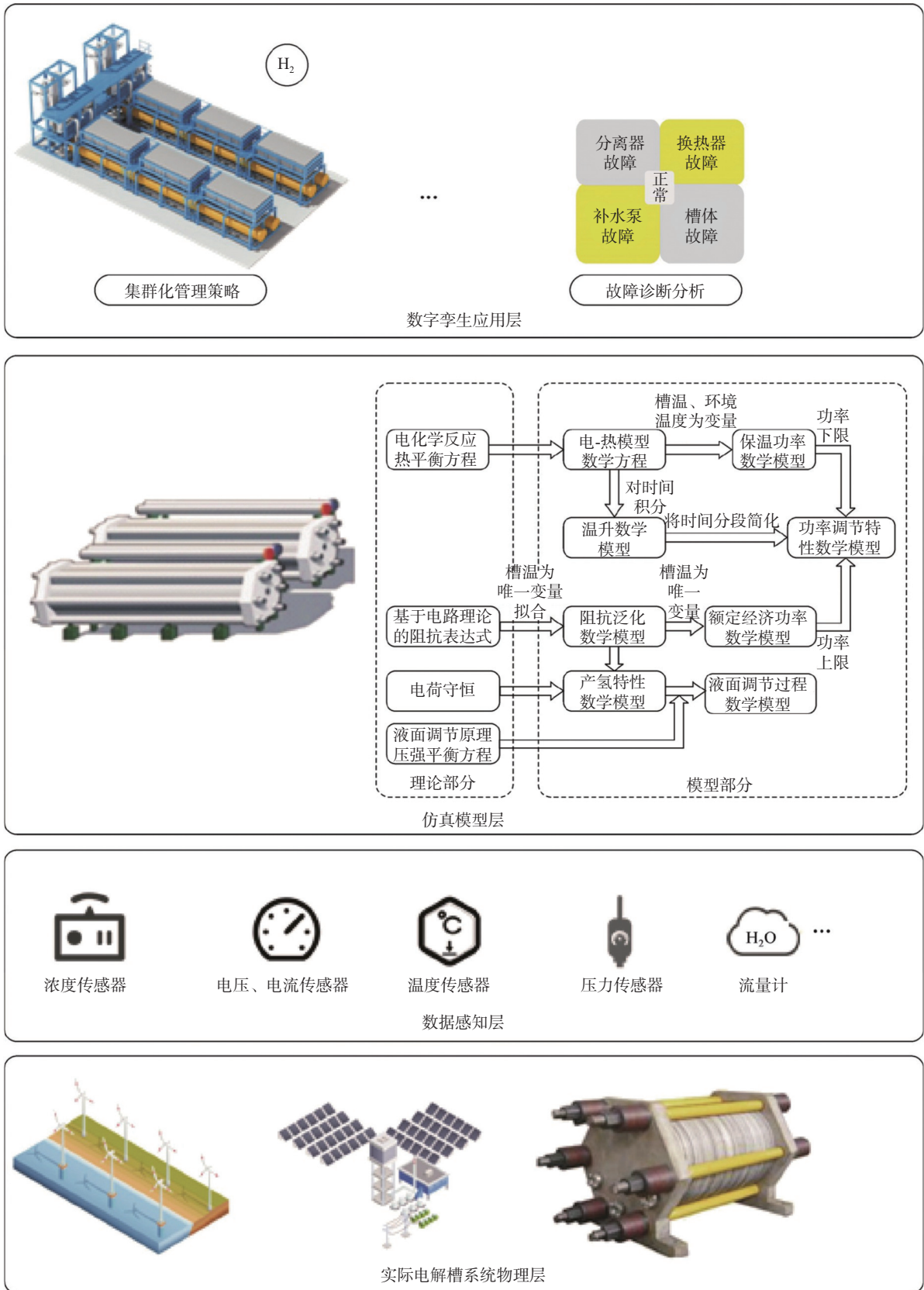


图 6 碱性电解槽数字孪生体的构建框架^[57]

Fig. 6 Construction framework of digital twinning in alkaline water electrolyzer^[57]

门设计了针对碱性电解槽的生产制造线,能够实现机器人焊接,从而显著提升电解槽的平面度和气密

性,最终提高电流效率和产品纯度。同时焊接配备焊接质量监测系统,出现异常及时报警,确保生产

过程的稳定性和可靠性^[59]。

4 总结与展望

碱性电解槽技术作为电解水制氢的关键手段,凭借其成本低、工艺成熟的优势,在绿氢领域获得了广泛应用。该技术通过电解质溶液中的离子在电场作用下的氧化还原反应,实现电能向化学能的转化。本文对近年来在碱性电解槽方面的研究进展进行了综述,提出了性能改进方向:优化参数、创新电极材料制造方法和发展新型阴离子交换膜来降低反应过电位和提升效率。此外,还讨论了几种电解槽结构优化方式。未来,碱性电解槽技术将趋向大型化与集成化,通过技术创新与优化,如开发新型高效催化剂、电解槽结构与系统的智能化与集成化升级等,以提升制氢效率和使用寿命。同时,通过跨学科深度融合,构建绿色氢能制取体系,为碱性电解槽技术的发展开辟更广阔的市场空间,推动氢能产业的持续进步。

参 考 文 献

- [1] RANJEKAR A M, YADAV G D. Steam reforming of methanol for hydrogen production: a critical analysis of catalysis, processes, and scope[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, 60(1): 89 – 113.
- [2] XIAO J W, OLIVEIRA A M, WANG L, et al. Water-fed hydroxide exchange membrane electrolyzer enabled by a fluoride-incorporated nickel-iron oxyhydroxide oxygen evolution electrode[J]. *ACS Catalysis*, 2021, 11(1): 264 – 270.
- [3] LI X, ZHAO L L, YU J Y, et al. Water splitting: from electrode to green energy system[J]. *Nano-Micro Letters*, 2020, 12(1): 131.
- [4] DAVID M, OCAMPO-MARTÍNEZ C, SÁNCHEZ-PEÑA R. Advances in alkaline water electrolyzers: a review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 23: 392 – 403.
- [5] 钱圣涛, 何勇, 翁武斌, 等. 阴离子交换膜电解水制氢技术的研究进展[J]. *新能源进展*, 2024, 12(1): 1 – 14.
- QIAN S T, HE Y, WENG W B, et al. Research progress of anion exchange membrane water electrolysis technology for hydrogen production[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2024, 12(1): 1 – 14.
- [6] BODARD A, CHEN Z S, ELJARRAY O, et al. Green hydrogen production by low-temperature membrane-engineered water electrolyzers, and regenerative fuel cells[J]. *Small Methods*, 2024: e2400574.
- [7] YANG Y X, LI P, ZHENG X B, et al. Anion-exchange membrane water electrolyzers and fuel cells[J]. *Chemical Society Reviews*, 2022, 51(23): 9620 – 9693.
- [8] 项俊欣, 马昕霞, 吴江, 等. 镍基磷化物在碱性电解水析氢反应中的研究进展[J]. *应用化工*, 2023, 52(9): 2627 – 2631.
- XIANG J X, MA X X, WU J, et al. The research progress of nickel based phosphide in hydrogen evolution reaction of alkaline electrolytic water[J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(9): 2627 – 2631.
- [9] LEE S A, KIM J, KWON K C, et al. Anion exchange membrane water electrolysis for sustainable large-scale hydrogen production[J]. *Carbon Neutralization*, 2022, 1(1): 26 – 48.
- [10] LIU T T, CHEN C, PU Z H, et al. Non-noble-metal-based electrocatalysts for acidic oxygen evolution reaction: recent progress, challenges, and perspectives[J]. *Small*, 2024, 20(48): e2405399.
- [11] HE L X, WANG N, SUN L K, et al. Heterostructure WC/Ni/Cu nanorod array towards ultra-long hydrogen evolution durability at room temperature and industrial conditions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 500: 157271.
- [12] 徐京辉, 王宇超, 殷雨田, 等. 工业电解海水制氢技术及电极材料研究进展[J]. *低碳化学与化工*, 2024, 49(9): 72 – 81.
- XU J H, WANG Y C, YIN T Y, et al. Research progress of industrial seawater electrolysis hydrogen production technologies and electrode materials[J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2024, 49(9): 72 – 81.
- [13] ROSSI R, TAYLOR R, LOGAN B E. Increasing the electrolyte salinity to improve the performance of anion exchange membrane water electrolyzers[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(23): 8573 – 8579.
- [14] LI Z L, GAO L, WU X M, et al. Development of boosted microphase separation exploiting highly rigid poly(phenyl-alkane)s anion exchange membranes for excellent performance fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 628: 235911.
- [15] 郭丹丹, 俞红梅, 迟军, 等. 自支撑 NiFe LDHs@Co-OH-CO₃ 纳米棒阵列电极用于碱性阴离子交换膜电解水[J]. *电化学*, 2022, 28(9): 77 – 93.
- GUO D D, YU H M, CHI J, et al. Self-supporting NiFe LDHs@Co-OH-CO₃ nanorod array electrode for alkaline anion exchange membrane water electrolyzer[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2022, 28(9): 77 – 93.
- [16] 明丽英. 电催化醇类有机小分子氧化耦合电解水产氢的研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2023.
- MING L Y. Hydrogen production by water electrolysis coupled with the electrooxidation of alcohol organic small molecules [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2023.
- [17] 李洋洋, 邓欣涛, 古俊杰, 等. 碱性水电解制氢系统建模综述及展望[J]. *汽车工程*, 2022, 44(4): 567 – 582.
- LI Y Y, DENG X T, GU J J, et al. Comprehensive review and prospect of the modeling of alkaline water electrolysis system for hydrogen production[J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(4): 567 – 582.
- [18] CHEN J P, REN H J, WU K, et al. Boosting hydrogen

production of ammonia decomposition via the construction of metal-oxide interfaces[J]. *Chinese Journal of Structural Chemistry*, 2024, 43(2): 100236.

[19] ZHANG J Y, DANG J, ZHU X H, et al. Ultra-low Pt-loaded catalyst based on nickel mesh for boosting alkaline water electrolysis[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2023, 325: 122296.

[20] GALANI S M, MONDAL A, SRIVASTAVA D N, et al. Development of RuO₂/CeO₂ heterostructure as an efficient OER electrocatalyst for alkaline water splitting[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(37): 18635 – 18644.

[21] ZHAO Y, WANG Z, GUAN S Y, et al. Atomically dispersed Ir Lewis acid sites on (111)-oriented CeO₂ enable enhanced reaction kinetics for Li-O₂ batteries[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 500: 156972.

[22] GAN J C, JIANG Z F, FANG K M, et al. Low Rh doping accelerated HER/OER bifunctional catalytic activities of nano-flower-like Ni-Co sulfide for greatly boosting overall water splitting[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2025, 677(Pt B): 221– 231.

[23] 邓冰露. 非金属碳材料和过渡金属化合物的制备及其电催化性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.

DENG B L. Preparation and electrocatalytic properties of nonmetallic carbon materials and transition metal compounds[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

[24] MURUGAN N, THANGARASU S, BIN SEO S, et al. N-doped defect-rich porous carbon nanosheets framework from renewable biomass as efficient metal-free bifunctional electrocatalysts for HER and OER application[J]. *Renewable Energy*, 2024, 222: 119801.

[25] LI J J, JING Z Y, BAI H T, et al. Optimizing hydrogen production by alkaline water decomposition with transition metal-based electrocatalysts[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21(5): 2583 – 2617.

[26] XIE X H, DU L, YAN L T, et al. Oxygen evolution reaction in alkaline environment: material challenges and solutions[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(21): 2110036.

[27] GUO B R, DING Y N, HUO H H, et al. Recent advances of transition metal basic salts for electrocatalytic oxygen evolution reaction and overall water electrolysis[J]. *Nano-Micro Letters*, 2023, 15(1): 57.

[28] HU Q, LI G M, HAN Z, et al. Recent progress in the hybrids of transition metals/carbon for electrochemical water splitting[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(24): 14380 – 14390.

[29] LI Z H, LIN G X, WANG L Q, et al. Seed-assisted formation of NiFe anode catalysts for anion exchange membrane water electrolysis at industrial-scale current density[J]. *Nature Catalysis*, 2024, 7: 944 – 952.

[30] 田臻, 康建光, 孙梅娟, 等. 过渡金属双功能催化剂在碱性条件下电解水[J]. *工业催化*, 2022, 30(8): 11 – 18.

TIAN Z, KANG J G, SUN M J, et al. Water electrolysis on transition metal bifunctional catalysts under alkaline conditions[J]. *Industrial Catalysis*, 2022, 30(8): 11 – 18.

[31] WANG Y M, MENG C, ZHAO L, et al. Surface and near-surface engineering design of transition metal catalysts for promoting water splitting[J]. *Chemical Communications*, 2023, 59(56): 8644 – 8659.

[32] LIU C, GENG Z, WANG X K, et al. Development of advanced anion exchange membrane from the view of the performance of water electrolysis cell[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2024, 90: 348 – 369.

[33] MA H B, ZHOU X Y, LI J Y, et al. Rational design of heterostructured nanomaterials for accelerating electrocatalytic hydrogen evolution reaction kinetics in alkaline media[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2024, 30(1): 2305101.

[34] XIA J L, ZHAO H Y, HUANG B L, et al. Efficient optimization of electron/oxygen pathway by constructing ceria/hydroxide interface for highly active oxygen evolution reaction[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(9): 1908367.

[35] DING M Y, JIANG W J, YU T Q, et al. Electronically modulated FeNi composite by CeO₂ porous nanosheets for water splitting at large current density[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2023, 29: 2208121.

[36] LEE W H, KIM Y S, BAE C. Robust hydroxide ion conducting poly(biphenyl alkylene)s for alkaline fuel cell membranes[J]. *ACS Macro Letters*, 2015, 4(8): 814 – 818.

[37] YOU W, NOONAN K J T, COATES G W. Alkaline-stable anion exchange membranes: a review of synthetic approaches[J]. *Progress in Polymer Science*, 2020, 100: 101177.

[38] MARINO M G, KREUER K D. Alkaline stability of quaternary ammonium cations for alkaline fuel cell membranes and ionic liquids[J]. *ChemSusChem*, 2015, 8(3): 513 – 523.

[39] XIONG H Y, ZHU Z X, GAO X, et al. Optimization of channel structure of alkaline water electrolyzer by using expanded mesh as bipolar plate[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2024, 30(9): 2312281.

[40] WANG H, JIANG N N, HUANG B, et al. Surface amorphization and functionalization of a NiFeOOH electrocatalyst for a robust seawater electrolyzer[J]. *EES Catalysis*, 2024, 2(5): 1092 – 1099.

[41] 刘启. 双功能 NiMo 合金电极用于电催化有机氧化反应与析氢耦合[D]. 天津: 天津大学, 2021.

LIU Q. Bifunctional NiMo alloy electrode for electrocatalytic coupling of organic oxidation and hydrogen evolution[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.

[42] WU J, CHEN J L, YU T Q, et al. Boosting electrochemical kinetics of NiCo₂ via MoO₂ modification for biomass upgrading assisted hydrogen evolution[J]. *ACS Catalysis*, 2023, 13(20): 13257 – 13266.

[43] WANG K, WU J, ZHENG S Y, et al. NiCo alloy nanoparticles anchored on mesoporous Mo₂N nanosheets as efficient

catalysts for 5-hydroxymethylfurfural electrooxidation and hydrogen generation[J]. *Chinese Journal of Structural Chemistry*, 2023, 42(10): 100104.

[44] YANG Z H, CHEN L, YIN Y J, et al. Weakened hydrogen bond connectivity promotes interfacial mass transfer for industrial level scalable biomass electrooxidation[J]. *Energy & Environmental Science*, 2024, 17(22): 8801 – 8809.

[45] CHEN W, SHI J Q, WU Y D, et al. Vacancy-induced catalytic mechanism for alcohol electrooxidation on nickel-based electrocatalyst[J]. *Angewandte Chemie (International Ed in English)*, 2024, 63(4): e202316449.

[46] HE Y Q, MA C Y, MO S H, et al. Unilamellar MnO₂ nanosheets confined Ru-clusters combined with pulse electrocatalysis for biomass electrooxidation in neutral electrolytes[J]. *Science Bulletin*, 2024, S2095-S9273(24): 00647 – 9.

[47] FAN L F, JI Y X, WANG G X, et al. High entropy alloy electrocatalytic electrode toward alkaline glycerol valorization coupling with acidic hydrogen production[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2022, 144(16): 7224 – 7235.

[48] LI Y, WANG H H, PRIEST C, et al. Advanced electrocatalysis for energy and environmental sustainability via water and nitrogen reactions[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(6): e2000381.

[49] SHI Z K, ZHANG Y, GUO W, et al. Self-encapsulated Ni nanoparticles on delignified wood carbon for efficient urea-assisted hydrogen production[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024: 2414935.

[50] 吕焱明. 钛合金深窄槽电解加工技术基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

LYU Y M. Basic research on electrolytic machining technology of deep and narrow groove of titanium alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[51] ZUO Y, MASTRONARDI V, GAMBERINI A, et al. Stainless steel activation for efficient alkaline oxygen evolution in advanced electrolyzers[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(21): e2312071.

[52] 王森. 质子交换膜电解槽阳极催化材料与催化层结构优化研究[D]. 上海: 同济大学, 2022.

WANG S. Study on optimization of anode catalytic materials and catalytic layer structure in proton exchange membrane electrolyzer[D]. Shanghai: Tongji University, 2022.

[53] 王玉杰. 高效低耗碱性电解水制氢装置的结构设计及性能研究[D]. 盐城: 盐城工学院, 2023.

WANG Y J. Structure design and performance study of high efficiency and low consumption alkaline electrolytic water hydrogen production unit [D]. Yancheng: Yancheng Institute of Technology, 2023.

[54] 年珩, 陈磊磊, 赵建勇, 等. 基于电解槽状态识别的风光制氢系统能量管理优化[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(10): 10 – 16.

NIAN H, CHEN L L, ZHAO J Y, et al. Energy management optimization of wind-solar hydrogen production system based on electrolytic cell state recognition[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(10): 10 – 16.

[55] 刘昌盛, 王世刚, 李永全, 等. 大数据在电解槽管理中的应用[J]. *氯碱工业*, 2017, 53(1): 14 – 20.

LIU C S, WANG S G, LI Y Q, et al. Application of big data in management of electrolyzers[J]. *Chlor-Alkali Industry*, 2017, 53(1): 14 – 20.

[56] 魏东辉. 智能化技术在变电运维中的应用分析[J]. *光源与照明*, 2024(10): 243 – 245.

WEI D C. Application analysis of intelligent technology in substation operation and maintenance[J]. *Lamps & Lighting*, 2024(10): 243 – 245.

[57] 江悦, 沈小军. 碱性电解槽制氢设备数字孪生体构建及应用[J]. *高电压技术*, 2022, 48(5): 1673 – 1683.

JIANG Y, SHEN X J. Construction and application of digital twin in hydrogen production system of alkaline water electrolyzer[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(5): 1673 – 1683.

[58] 项目一线, 见证制氢“阳光”力量[N/OL]. *中国能源报*, 2024-10-28[2024-10-28]. http://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202410/28/content_30029407.html.

On the front line of the project, we witnessed the "sunshine" power of hydrogen production[N/OL]. *China Energy News*, 2024-10-28[2024-10-28]. http://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202410/28/content_30029407.html.

[59] 武汉华工激光工程有限责任公司. 引领氢能发展新未来, 华工激光带来碱槽智造“光力量”[EB/OL]. (2024-08-16)[2024-10-28]. <https://www.hglaser.com/about/hynews-detail-51245.htm>.

Wuhan HGLaser Engineering Co., Ltd. Leading the new future of hydrogen energy development, Huagong laser brings "light power" to the intelligent manufacturing of alkali tanks[EB/OL]. (2024-08-16)[2024-10-28]. <https://www.hglaser.com/about/hynews-detail-51245.htm>.

特约专家介绍



尹诗斌(1981—), 教授, 博士, 博士生导师, 广西电化学能源材料重点实验室主任, 《电化学》和《结构化学》杂志编委, 《物理化学学报》青年编委, 广西化学化工学会常务理事。在 *Energy & Environmental Science*, *Advanced Materials*, *Advanced Energy Materials*, *Advanced Functional Materials*, *Electrochemical Energy Reviews* 等专业期刊上发表学术论文 100 余篇。

(责任编辑: 饶莉)