

# 碱性制氢电解槽系统研究及其能效优化综述

李彦

陕西煤业新能氢能技术有限公司, 中国·陕西 西安 710100

**摘要:** 碱性制氢电解槽在能源转化领域具有重要地位, 其能效优化是当前研究的热点。论文深入探讨了电解槽能效的关键影响因素, 包括电解反应电压、电解槽设计与材料选择、电解液性质、操作条件和控制策略。电压优化是降低能耗的有效途径, 而选用高性能的材料和设计能显著提升电解效率。电解质的性质直接影响离子传输效率, 影响电解电压, 进而影响能耗。合理的操作条件和精确控制策略也是降低能耗的关键。此外, 通过优化电解质组成、电极设计以及采用新型电源技术, 可进一步实现能耗的降低。研究指出, 碱性制氢电解槽的能效优化是一个多因素交织的过程, 需要综合考虑各个影响因素, 采取相应的技术手段和优化策略。未来的研究趋势将聚焦于这些领域的深化探索, 以期实现更高效、节能环保的电解制氢技术。

**关键词:** 氢能源; 电解槽系统; 能耗优化

## Research on Alkaline Hydrogen Production Electrolyzer System and Overview of Energy Efficiency Optimization

Yan Li

Shaanxi Coal Industry New Energy Hydrogen Energy Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710100, China

**Abstract:** Alkaline hydrogen electrolysis cells play an important role in the field of energy conversion, and their energy efficiency optimization is currently a hot research topic. The paper delves into the key influencing factors of electrolytic cell energy efficiency, including electrolytic reaction voltage, electrolytic cell design and material selection, electrolyte properties, operating conditions, and control strategies. Voltage optimization is an effective way to reduce energy consumption, and selecting high-performance materials and designs can significantly improve electrolysis efficiency. The properties of electrolytes directly affect ion transport efficiency, electrolysis voltage, and thus energy consumption. Reasonable operating conditions and precise control strategies are also key to reducing energy consumption. In addition, by optimizing electrolyte composition, electrode design, and adopting new power technology, energy consumption can be further reduced. Research has shown that optimizing energy consumption in alkaline hydrogen electrolysis cells is a process involving multiple intertwined factors, requiring comprehensive consideration of various influencing factors and adoption of corresponding technical measures and optimization strategies. The future research trend will focus on deepening exploration in these fields, in order to achieve more efficient, energy-saving and environmentally friendly electrolytic hydrogen production technology.

**Keywords:** hydrogen energy; electrolyzer system; energy consumption optimization

### 1 引言

自 18 世纪工业革命以来, 人类大量燃烧化石燃料并排放温室气体, 导致全球变暖、臭氧层破坏和生态系统破坏等环境问题。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 建议到 2050 年实现净温室气体排放为零, 以实现将环境空气温度升高控制在 1.5°C 以下的目标。虽然化石燃料仍是主要的发电来源, 但许多国家正在努力减少碳排放, 特别是欧盟的引领。欧洲一些国家已宣布在十年内永久退出燃煤发电, 并继续增加可再生能源发电能力。

在推进可再生能源电网的扩展过程中, 我们必须正视并解决由可再生能源间歇性与不可预测性所带来的供需失衡问题。为此, 已有多项将能量转换为不同形式的技术方案被提出, 并在图 1 中详细展示了若干主要的储能系统。其中,

抽水蓄能作为目前应用最为普遍的方法, 凭借其 153GW 的发电能力, 在全球各地的抽水蓄能地点发挥着重要作用。然而, 此方法对于地形高度和水资源条件有着严格的要求。电池储能技术虽为常见手段, 但受限于其高昂的成本、较低的能量密度以及潜在的泄漏风险, 并不适宜用于长期且大规模的能量存储。因此, 电转气 (P2G) 系统作为一种新兴的储能方案, 正逐渐受到业界的广泛关注与青睐。

氢能, 作为一种真正零排放的绿色能源, 正日益受到社会各界的广泛关注。其中, 碱性制氢电解槽, 作为绿色能源转化领域的核心技术之一, 在氢经济体系中的地位日益凸显。电解水制氢作为一种极具潜力的储能方式, 特别是在与风能、太阳能等可再生能源相结合的应用场景中, 充分展现了其电力高效存储与利用的优势。然而, 电解水制氢系统的

高能耗是制约氢能发展的重要因素，因此本文从电解槽结构设计、电极优化、电解液成分等方面介绍了影响碱性电解槽

的能耗研究，并探讨了其在提高制氢效率和降低能耗方面的潜力。

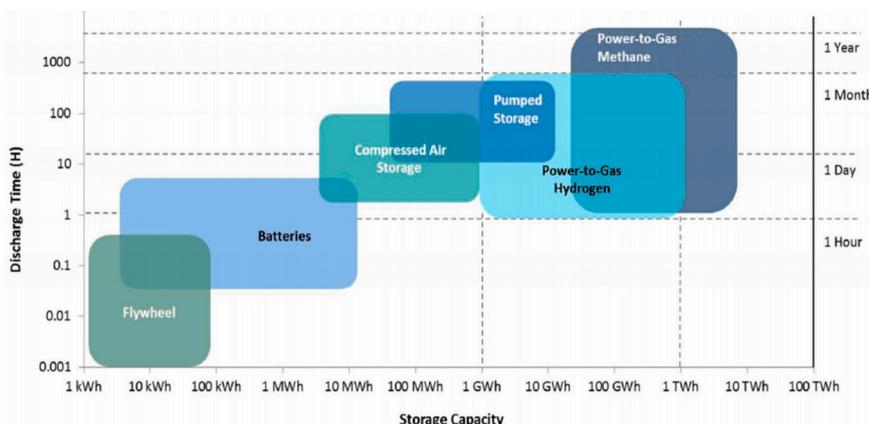


图 1 基于放电时间和存储容量的当前储能技术

## 2 碱性电解槽的基本原理与结构

碱性制氢电解槽是当前唯一满足大规模工程应用的电解水制氢设备，具有技术成熟、成本低等优势。碱性电解槽通常由电解槽体、电极、隔膜、电解液循环系统等部分组成，其结构如图 2 所示。

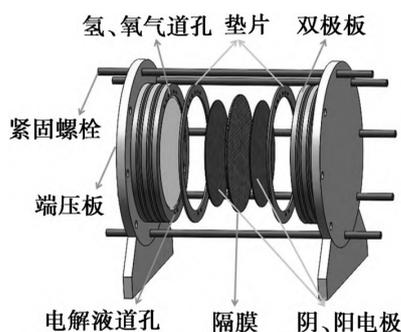
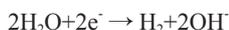


图 2 碱性制氢电解槽示意图

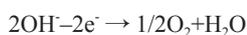
电解反应是碱性制氢电解槽的核心过程，其主要包括水分解的半反应：氢气在阴极析出（还原反应），氧气在阳极析出（氧化反应）。在碱性环境下，这两个反应的平衡电位分别约为 0V（相对于标准氢电极，SHE）和 1.23V。然而，实际操作中，由于电极过电势的存在，这两个电位会有所提高，导致能量损失。

在阴极，水的还原反应通常遵循以下步骤：



该过程需要克服一定的活化能障碍，过电势的降低是提高阴极效率的关键。采用具有高催化活性的电极材料，如镍铁基或金属氧化物，可以有效降低析氢反应的过电势，提高反应速率。

在阳极，析氧反应是一个失电子过程，涉及多个中间步骤，通常为：



析氧反应的过电势较高，是电解槽能耗的主要贡献者。

研究显示，通过引入高效催化剂，如过渡金属氧化物或氮化物，可以降低析氧过电势，提高电解效率。

## 3 影响碱性电解槽能效的因素

电解槽的能效不仅由电极材料的催化性能所决定，同时亦受到电解液条件的显著影响。电解液的 pH 值、浓度以及离子种类的变化，均会对离子在电极表面的吸附行为产生作用，进而对电极反应动力学产生直接影响。具体而言，高浓度的电解液虽能提升离子浓度，降低离子迁移电阻，但过高的浓度可能抑制电极表面的气体逸出，增大过电势。此外，电解槽的操作条件，特别是温度和压力，同样对反应速率起到关键作用。温度的适当提升能够加快反应速率，但过高的温度可能引发电解液的蒸发和电解质的分解；而压力的调整则能有效控制氢气和氧气的析出效率。电解反应的基本原理涵盖了电极反应动力学、电解液性质以及操作条件的优化。通过深入剖析这些原理，并结合先进的材料设计和电解槽结构的优化，我们可以显著减少电解能耗，提高碱性制氢电解槽的能效。

### 3.1 电解槽结构的影响

电解槽的结构设计是决定其能效和稳定性的重要因素。在流体动力学设计上，需要考虑电解液的流动模式和分布，确保在电解过程中能够均匀分布和高效循环。这要求我们在电解槽内部设计合理的流道结构，通过优化流道布局和尺寸，实现电解液的高效流动和均匀分布，以提高电解效率。

Gao 基于工业碱水电解槽的紧凑装配结构，建立了耦合电场和欧拉 - 欧拉 k-ε 湍流流场的三维数值模型，以准确模拟碱性水电解槽的性能如图 3 所示。其研究表明随着电极与隔膜距离的增加，欧姆过电压显著增加；流道高度和双极板上导流柱的排列方式对电压的影响微弱，但三角形排列的导流柱和流道高度的增加有利于提高流体的分布均匀度，适当增加导流柱之间的距离有利于降低槽电压。

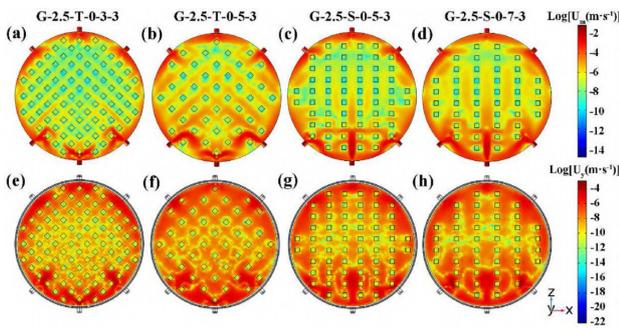


图 3 不同导电柱结构下电极表面溶液速度

肖宠等模拟了电解槽正常工况、碱液量增大 10 倍、电解槽碱液流道面积增大、电解槽碱液流道面积减小等 4 种情况。通过对模拟计算结果的分析，认为在合理的范围内减小碱液通道的面积，适当提高碱液流速，可以改善碱液在各个通道平均分配情况。

电极间距离和流场设计是电解槽结构优化的另一重要方面。王恒伟等人在探讨碱性水电解装置的研究时强调，减小电极间距、优化极板结构以及提升流场效率，可以有效增强气液传质传热，进一步提高电解效率。在电解槽中，电荷粒子从一个电极传输到另一个电极，距离越大，电阻越大。设计电解槽结构时，应尽量减小电极与电极、隔膜及极板的距离。国外研究出一种零极距电解槽，电极和隔膜距离为 0，阴阳电极直接接触两层膜的表面，使得电极之间的电压降最小，能耗最低。

综上所述，电解槽的结构设计需要综合考虑流体动力学、材料选择和热管理等多个方面的因素。只有在这些方面都得到了充分的考虑和优化，才能确保电解槽的高效、稳定运行，提高电解效率和降低能耗。

### 3.2 电解反应操作条件影响

电解反应电压是碱性电解槽能效的核心参数，直接影响到整个电解过程的能耗。

在电解水的过程中，电能的消耗主要包括槽体的消耗、直流电源部分的消耗。其中，约 90% 来源于槽体的消耗，因此如何降低电解槽的能耗至关重要。下面是水电解单位产氢量直流电耗计算公式：

$$\text{单位产氢量直流电耗 (KWh/Nm}^3\text{H}_2) = \frac{\text{电解槽能耗}}{\text{氢气产量}} = \frac{I_{\text{槽}} \times V_{\text{槽}} \times t}{22.4 \times I_{\text{槽}} \times \eta \times n \times t \times 10^3} = \frac{V_{\text{均小室}}}{0.4179 \times \eta}$$

- 其中， $I_{\text{槽}}$ ——实际槽电流；
- $V_{\text{槽}}$ ——实际槽电压；
- $V_{\text{均小室}}$ ——平均小室电压；
- $t$ ——电解时间 (h)；
- $n$ ——电解小室数；
- $\eta$ ——电流效率。

由上可知，水电解槽的单位产氢量的能耗与电解槽的

平均小室槽压成正比，与电解的电流效率成反比。当电流密度一定时，电解槽的单位产量电耗只与小室的槽压有关。因此，降低水电解槽能耗的关键就是降低电解槽小室的槽压。

操作过程中如温度和压力，对电解槽的电压也有着直接的影响。温度可以加速离子的扩散和电化学反应，但过高可能导致电解液蒸发和分解。云程研究表明，保持电解槽的工作温度在适宜范围内，可以防止电解液的异常稀释，维持电压电流的稳定。此外，温度会对溶液的电导率造成影响，图 4 是 KOH 电解液在不同温度下的电导率，可以看出随着温度的升高其电导率是逐步提升的，这是因为温度的升高导致了 KOH 电解液中离子的热运动加剧。当离子在电场作用下移动时，它们能够更有效地传导电流，导致电导率的提升，有效降低电阻。

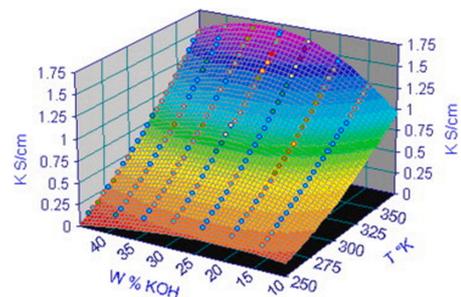


图 4 不同浓度和温度的 KOH 溶液的电导率

电解槽压力的控制则直接影响气体的析出效率和电解液的气泡动力学，合理的压力可以帮助优化气液间的传质过程，提高电解效率。Jang 的深入研究揭示了压力增长对阳极激活、阴极激活以及欧姆过电压产生的显著影响。如图 5 所示，随着压力从 1 巴逐步提升至 5 巴，分别从 0.241V 降至 0.282V 和从 0.245V 降至 0.234V。随后，随着压力进一步攀升至 100 巴，这些过电位呈现逐渐下降趋势，最终稳定在 0.215V 和 0.221V。分析认为压力增加导致的气泡直径变化。随着压力的增大，气泡的尺寸逐渐减小，进而减少了气泡的覆盖率。因此，气泡占据电解质的体积以及覆盖电极表面活性区域的面积均有所减少，进而降低了电解质和电极的电阻，并最终导致了欧姆过电压和放电过电压的降低。

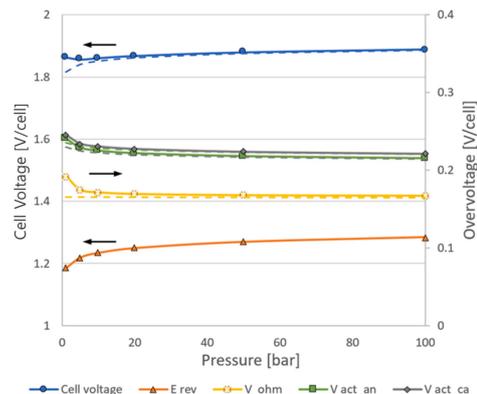


图 5 不同压力下电流密度为 0.6A/cm<sup>2</sup> 和温度为 70℃ 的情况下，电池电压、阳极活化、阴极活化和欧姆过电压的变化图

### 3.3 电极材料的影响

在碱性制氢电解槽的运作中，电极材料扮演着举足轻重的角色，它们直接关乎电解反应速率与能效的关键指标。当前，对电极的研究主要聚焦于材料优化与结构优化的双重视角，旨在降低析氢电位，从而显著提升电解槽的能效。

从材料选择方面，催化制氢领域中电极材料的选择主要集中于过渡金属氧化物及其化合物类别，这些化合物涵盖了磷氧化物及含硫化合物（如 NiP、FeP、MoS<sub>2</sub>）等。同时，金属合金材料也因其独特的性质在该领域占据重要位置，特别是镍的二元和三元合金（如 Ni-Mo、Ni-Mo-Ge）。此外，碳基底复合材料同样展现出显著的应用潜力，其中一维材料如碳纳米管，以及二维平面材料如氧化石墨烯等，均被证实为具有潜在应用价值的材料。

在电极结构设计的优化过程中，我们着重于提升电极表面的利用率，并致力于改善电化学反应的动力学特性。彭昊通过运用管式炉烧结技术，成功实现了金属粉末的冶金结合。如图 6 所示，在高温条件下，造孔剂经历了分解或挥发的过程，从而在基体材料中形成了特定的孔隙结构。这一结构的形成，如图 6 所示，显著增加了电极材料的比表面积。这种较大的比表面积不仅有助于有效降低析氢反应中的阴极电流密度，还能使更多的活性位点得以暴露，从而进一步提升电极的性能。

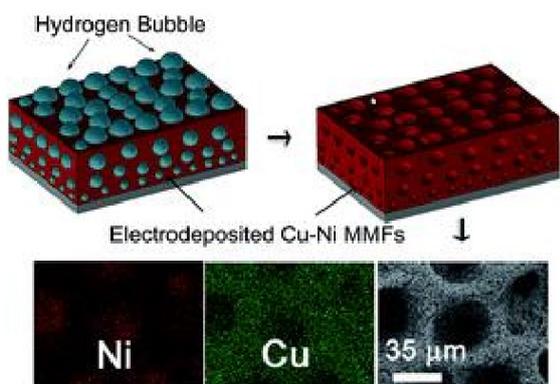


图 6 Cu-Ni MMFs 的制备示意图

清华大学王保国经过深入研究，提出了有序化膜电极制备的策略。如图 7 所示，为提升能量转换效率及材料稳定性，特别是在高电流密度条件下，该团队精心设计并成功制备了一种新型的三维有序膜电极（MEA）。该电极具备垂直通道的多孔催化剂层、超薄膜层以及三维界面结构。得益于其整体三维有序的结构设计和高效的传质通道，电解池在 2.0V 的电压下实现了高达 4200mA/cm<sup>2</sup> 的电流密度，展现了在碱性膜电解水制氢过程中的卓越性能。

同时，电极材料的化学稳定性也至关重要。在碱性环境中，电极材料需要具备良好的耐腐蚀性，以保证长期运行的稳定性。

电极材料与设计的优化是提升碱性电解槽性能的关键途径。通过选取高活性、低成本、稳定性的电极材料，结合创新的电极结构设计，可以降低过电势，提高电流密度，从而实现电解槽能效的显著提升。这不仅有助于降低制氢成本，对于推动电解槽在大规模储能和可再生能源转化中的应用具有重要意义。

### 3.4 电解液影响

电解液作为电解过程中的介质，其性质直接影响离子传输效率，进而影响电解槽的电压损失和能效。马刚研究表明，电解液的 pH 值、浓度和杂质含量是决定其性能的重要参数。碱性电解液的 pH 值过高或过低会影响离子的活性，导致电极表面的电荷转移电阻增加。

电解液的浓度对电导率有显著影响。朱佳研究表明，适当增加电解液的浓度可以提高离子的迁移速率，降低电压损失。然而，过高的浓度可能导致电极表面的气体析出受阻，增加过电势，同时可能导致电极腐蚀，降低电解槽的稳定性和寿命。

电解液中的杂质离子，如金属离子，可能会在电极表面形成不可逆的沉积，阻碍电极反应，降低电解效率。因此，严格控制电解液的纯度，定期进行电解液的净化和更换，是保证电解槽高效、稳定运行的重要措施。

电解液的性质和操作条件是影响碱性电解槽能效的关

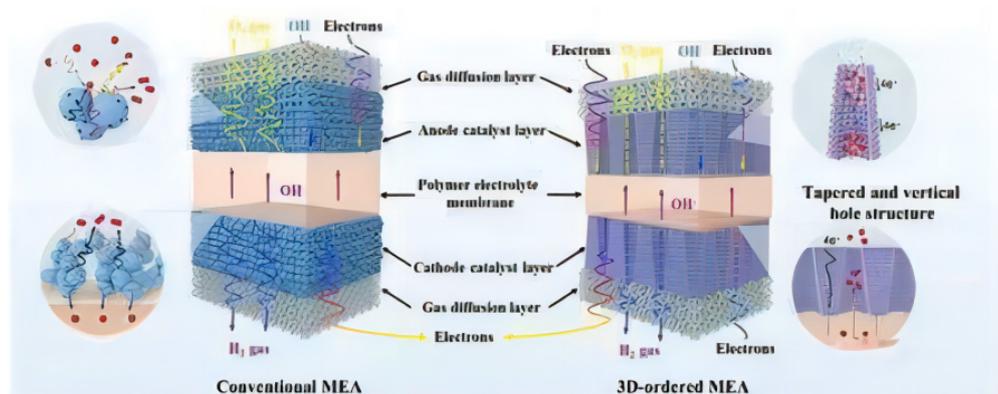


图 7 传统 MEA 和三维有序 MEA

键因素。通过精细调控电解液的 pH 值、浓度和杂质含量,以及优化温度、压力等操作参数,可以减少电压损失,提高电解效率。同时,对电解液质量和状态的严格监控和管理,是确保电解槽高效运行不可或缺的一环。

#### 4 未来展望

在碱性制氢电解槽的领域,研究人员已取得众多的进步与突破。然而,能效优化仍然是该领域的核心挑战。小室电压优化是降低能耗的基础,电极材料和设计的创新是提高效率的关键,而电解液的优化和精确的操作条件控制则是实现低能耗运行的保障。

未来的研究趋向将会更为侧重于电催化剂的开发工作,特别是针对析氧反应的高性能催化剂,旨在降低过电势和能耗。电解槽的结构设计将会愈发精细化,涵盖电极的多孔结构以及新型复合材料的运用,以此来增进电解效率。电解质的组成与管理会更具科学性,努力探寻最佳浓度和添加剂,以优化离子传输过程。另外,智能控制策略和新型电源技术的应用。

随着可再生能源的快速发展,碱性制氢电解槽需要适应风能和太阳能等不稳定的电源,这要求电解槽具有更好的动态响应能力和低能耗启停功能。电极的稳定性、耐腐蚀性及抗沉积能力的提升,将是确保电解槽在可再生能源耦合系统中长期稳定运行的关键。

#### 参考文献:

- [1] 李建林,李光辉,梁丹曦,等.“双碳目标”下可再生能源制氢技术综述及前景展望[J].分布式能源,2021,6(5):9.
- [2] 殷喜平,王加欣,李腾飞.碱性电解水制氢催化剂的研究现状与进展[J].当代石油石化,2022,30(10):7.
- [3] 白佳凯,李朋喜,乔东伟.水电解制氢技术现状与展望[J].现代化工,2023,43(S1):63-65.
- [4] 赵永勤,白书霞,陈柯仰.电解槽在电解水制氢技术中的应用进展[J].中国科技纵横,2015(14):2.
- [5] 刘明昊,解辉,张振扬.制氢用碱性水电解槽隔膜材料研究进展[J].化工新型材料,2023(S2):561-564.
- [6] 李泽娟,丁丽萍.高熵析氧催化剂的研究进展[J].纳米技术,2022,12(4):8.