

# Power-to-X 在电解水制氢中的应用

Christopher Lenz

质子交换膜电解（PEM 电解）在 Power-to-X 技术中，尤其是在氢气制备方面，起着至关重要的作用。随着清洁能源需求的增长，PEM 电解作为一种高效、紧凑且响应迅速地水电解技术，受到了广泛关注。在此背景下，超纯水作为 PEM 电解过程中的核心原料，其质量直接决定了氢气生产的效率和纯度。为了满足 PEM 电解对水质的严格要求，用于制备超纯水的设备必须达到高标准。这不仅涉及去除水中的各种杂质和离子，还需要控制微生物及有机物的含量，以确保最终产生的氢气纯度符合工业应用或能源存储的要求。因此，如何设计并实现高效的水处理系统，以生产出满足 PEM 电解所需的超纯水，成为该领域研究的重点之一。通过优化水处理工艺，不仅可以提高氢气生产的质量和效率，还能降低整个制氢过程的成本，推动清洁能源的发展。

随着全球气候变暖的加剧，人类逐渐从依赖有限的化石燃料转向可再生清洁能源，例如水电、太阳能、风能以及沼气能等。在其中，风能与太阳能已成为可再生电力生产的主要来源。然而，这类波动性可再生能源的广泛应用带来了显著的储能挑战，成为未来能源产业发展的一大障碍。为应对这一挑战，Power-to-X（以下简称



EnviroFALK 公司的循环净化系统对已使用的工艺用水进行再循环

“PtX”）技术作为减少碳排放的关键解决方案应运而生。PtX 泛指一系列将可再生能源产生的多余电力转化为其他形式的能量或物质进行储存的技术，具体包括：能源载体天然气——电转气（Power-to-Gas, PtG）；液体燃料——电转液（Power-to-Liquid, PtL）；化学基础原料——电转化学品（Power-to-Chemicals, PtC）。

在所有这些 PtX 技术中，超纯水都发挥着至关重要的作用，尤其是在通过电解制备绿色氢气的过程中。超纯水几乎不含任何杂质，如有机物、细菌、颗粒和溶解气体，其电导率通常低至  $0.055 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，非常适合用于质子交换膜（PEM）电解等对水质要求极高的敏感工艺。

由于超纯水可以从各种不同的水源中提取，而这些水源的质量可能因其来源而异，因此需要根据具体的水质情况采取个性化的处理方法，以确

保彻底去除所有可能影响电解过程的矿物质和气体。这不仅保证了氢气生产的质量和效率，同时也促进了清洁能源的有效利用和可持续发展。通过优化超纯水的制备过程，可以进一步推动 PtX 技术的发展，助力全球向低碳经济转型。

## 超纯水：PtX 技术的不可或缺的原材料

超纯水在 PtX（Power-to-X）过程中的作用至关重要。如果水质不达标，可能会导致电解装置的膜和电极上形成盐类沉积物，从而显著降低生产效率及设备使用寿命。因此，为确保工艺顺利进行，设计适合的超纯水处理系统不仅是必要的，更是实现合成燃料可持续生产的决定性因素。

在规划水处理厂时，确保水处理系统与 PtX 系统的无缝集成是至关重要的。这包括根据具体地理位置进行

本文作者系 EnviroFALK 业务拓展经理。

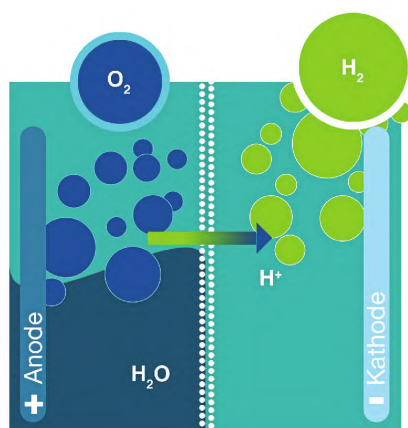
整体系统规划、通过指定的通信接口连接控制技术、使用统一型号的设备组件以及保持一致的文档记录。此外,在规划过程中还需考虑 LCOE (平准化电力成本),该成本不仅涵盖投资费用,还包括运行维护成本,如能源和介质消耗、废水排放量、运营物资和服务费用等。为了通过电解法制备氢气,需要将原水处理过程细分为多个阶段,并按照特定顺序执行,每个阶段都将根据当地的水质条件进行详细设计。

制备超纯水的过程通常包含以下步骤:1) 预过滤,利用反冲洗过滤器、砂滤器或超滤技术去除较大的颗粒杂质;2) 离子交换软化,通过离子交换软化设备去除可能导致硬度的钙和镁离子(也可选择使用抗结垢剂稳定硬度);3) 脱除/结合  $\text{CO}_2$ ,采用膜脱气或氢氧化钠溶液处理;4) 反渗透,实现超过 98% 的脱盐率;5) 完全脱盐,通过第二级反渗透或电去离子(EDI)完成;6) 工艺水回收系统,持续脱盐至电导率小于  $0.1 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,并进行微粒过滤以确保粒子尺寸小于  $1 \mu\text{m}$ ;7) 脱气系统,去除残留的  $\text{H}_2$  和  $\text{O}_2$ ;8) 工艺水预处理系统,包括储罐和增压设备;9) 工艺水冷却设备(可选)。

最终产出的超纯水质量标准因工艺需求而异,但一般要求满足以下参数:电导率低于  $0.1 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,硅酸盐含量不超过  $100 \mu\text{g}/\text{L}$ ,总铁含量不超过  $100 \mu\text{g}/\text{L}$ ,钠和钾总量不超过  $20 \mu\text{g}/\text{L}$ ,以及颗粒物浓度符合严格限值。这些高标准保证了电解过程的高效性和产品的纯净度。

## 工艺水循环

Envirofalk 的纯水处理系统特别



聚合物电解质膜电解 (PEM) 示意图

适用于高压和高温的应用环境,比如 PEM 电解槽。其核心特色在于循环清洁系统,这项技术能够使被污染的工艺水得以回收并再次利用,不仅有助于环境保护,还能优化工业过程中的成本效益。该循环系统专为在高达 50 bar 的工作压力和超过  $65^\circ\text{C}$  的温度条件下处理工艺水而设计。通过采用专为持续运行设计的先进技术,确保了整个水处理过程的可靠性和经济性。

对于 PtX 过程而言,超纯水的质量及其供应稳定性至关重要。为了保证水处理系统的高效运作,高服务可用性、短维修时间(平均恢复时间—MTTR),以及高水平的系统可用性(服务水平协议—SLA)是必不可少的。为了尽可能减少停机时间,采取了一系列措施,包括但不限于关键部件的冗余设计、优化备件管理、使用经过验证的组件以及对过程参数进行精确监控等。这些策略共同作用,确保了系统的可用性可以达到 99% 以上。

这种高度可靠的系统设计,使得 Envirofalk 的纯水处理解决方案成为追求高效、环保及经济效益的企业理想选择。通过上述措施,不仅可以提

高氢气生产过程的稳定性和效率,同时也进一步推动了清洁能源的发展与应用。此外,这也有助于降低整体运营成本,增强企业在市场上的竞争力。

## 模块化纯水系统助力绿色能源

Envirofalk 的纯水工艺系统以其模块化设计为特色,能够灵活地集成到现有的设施布局中。这种模块化设计的优势在于,可以根据空间和工艺技术的具体要求,灵活布置系统的各个工艺阶段。无论是采用并排、叠放还是分开布置的方式,系统都能依据实际需要进行最佳调整。

近年来,通过与知名电解系统制造商的紧密合作,Envirofalk 开发并提供了许多面向应用的纯水工艺系统,特别适用于 PtX 项目。自 2012 年至今,Envirofalk 已经成功实现了超过 100 个不同概念和功率等级的纯水过程系统项目,广泛应用于多个 PtX 项目之中。

2015 年,在美因茨经济园区建成当时全球规模最大且最具灵活性的氢气生产设施之一,其电力输出达到 6 MW。该设施利用西门子的 PEM 电解槽,每小时可将多余的风能转化为高达  $1\,000 \text{ Nm}^3$  的绿色氢气。该过程中的原料“水”由 1 套处理量为  $1\,000 \text{ L}/\text{h}$  的纯水系统提供,并通过 1 个  $4\,200 \text{ L}/\text{h}$  的工艺水循环清洁系统去除细小颗粒和溶解盐分。

到了 2023 年,Air Liquide 与西门子能源在德国奥伯豪森共同启动了名为“Trailblazer”的项目——这是一个装机容量为 20 MW 的 PEM 电解槽项目,用于生产绿色氢气。该项目通过现有的氢气管道每年向钢铁、化工、炼油和交通等关键行业供应约



电解水用纯水处理系统

2 900 t绿色氢气和氧气。在这个项目中，Envirofalk 提供了一套流量为 30 000 L/h 的模块化循环系统。这套系统在莱沃库森的制造厂进行了预安装和准备，因此能够在最短的时间内完成现场安装并投入使用。

这些成就不仅展示了 Envirofalk 在纯水处理领域的创新能力，同时也体现了其在全球清洁能源转型过程中所作出的重要贡献。通过这些高效、灵活的解决方案，Envirofalk 正在帮助推动工业过程的可持续发展，助力实现低碳未来。

#### 4 PtX 项目助力实现气候中立的欧洲

规划创新的 PtX (Power-to-X) 项目是迈向 2050 年实现气候中立欧洲目标的重要步骤。通过实施这些项目，不仅可以减少对化石燃料的依赖，还能促进能源供应的多样化，提高能源系统的稳定性和可持续性。弗劳恩霍夫能源经济与能源系统技术研究所编制的全球首个 PtX 图谱，生动展示了这一领域所蕴含的巨大潜力和广阔前景，为全球向清洁能源转型提供了宝

贵的参考。

Envirofalk 在这一进程中扮演了重要角色，通过提供先进的纯水设备支持

各类 PtX 项目的发展。其专业的水处理解决方案不仅确保了电解过程中所需的高质量超纯水的稳定供应，而且有助于提升整个生产过程的效率和环保性能。这无疑对加速推进绿色氢气及其他合成燃料的生产具有重要意义，进一步助力于达成气候中立的目标。

通过这样的合作和支持，Envirofalk 不仅推动了技术创新，也为构建更加清洁、可持续的未来做出了贡献。在全球共同努力应对气候变化的大背景下，这类举措不仅是实现长期气候目标的关键，同时也促进了全球经济向低碳模式转型。

#### 氢气、燃料还是化学品？这取决于 Power-to-X (PtX) 技术的具体应用方向

**电力转化为化学品 (PtC)：**在此过程中，基于电力转化为气体 (PtG) 的技术，通过使用绿色电力和氢气与二氧化碳及氮气的合成来生产化学原料。这种技术旨在提供一种替代方案，以取代传统的石油和天然气等化石原料。这些化学品可用于制造各种产品，从塑料到药品，有助于减少对化石资源的依赖。

**电力转化为气体 (PtG)：**PtG 过程利用多余的可再生能源产生的电力生产“绿氢”。通过电解水制氢的方法，特别是采用聚合物电解质膜电解 (PEM) 技术，因其能够适应波动的可再生能源负荷变化、高效性以及快速响应时间而受到青睐。生成的氢气可以被压缩用于存储或运输，并广泛应用于燃料电池车辆、工业企业作为能源载体，或者进一步加工成为化学制品的重要成分。

**电力转化为液体 (PtL)：**在 PtL 技术中，绿色氢气与一氧化碳一起被用来合成合成气，然后从中制造液态合成燃料，即电子燃料 (E-Fuels)。这些合成燃料可以作为汽油和柴油的替代品，并且特别适用于航空和航运行业。由于电子燃料可以在现有的加油站和运输基础设施中使用，因此它们具有显著的优势。此外，由于合成过程中吸收的二氧化碳量与燃烧时释放的量相等，这些燃料被认为是气候中性的。

综上所述，无论是选择将电力转化为氢气、其他形式的燃料还是化学品，都是为了促进清洁能源的应用和发展，减少温室气体排放，实现可持续发展目标。每种方法都有其独特的应用场景和技术特点，共同致力于构建更加环保和可持续的未来。