

水电解制氢技术的工业应用

闫芳¹, 王涛^{1*}, 张超群¹, 杨朝华¹, 白江虎², 陈志晨²

(1. 中国石油玉门油田炼油化工总厂, 甘肃 玉门 735200;

2. 中国石油玉门油田新能源事业部, 甘肃 酒泉 735200)

摘要:通过对碱性水电解制氢工业化生产进行研究, 分析水电解制氢的反应机理; 通过对核心电解槽设备的选型及电解水制氢装置的施工建设和调试运行, 评估碱性水电解制氢技术的经济性。项目运行情况表明, 4 000 Nm³/h 水电解制氢装置实现成功投产, 氢气纯度达 99.99%。所制氢气通过输氢管道、管式槽车等送至玉门老市区化工园区企业, 实现了从生产到销售的全流程贯通, 电解槽制氢单位能耗为 3.99 kW·h/m³, 为中国石油在绿电制氢技术应用提供了更大的平台。

关键词:水电解; 制氢; 氢气; 电解槽;

中图分类号:TK91

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S1-0366-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S1.066

Industrial application of water electrolysis for hydrogen production

YAN Fang¹, WANG Tao^{1*}, ZHANG Chao-qun¹, YANG Zhao-hua¹, BAI Jiang-hu², CHEN Zhi-chen²

(1. Refining and Chemical Complex, PetroChina Yumen Oilfield Company, Yumen 735200, China;

2. New Energy Business Division, PetroChina Yumen Oilfield Company, Jiuquan 735200, China)

Abstract: Through studying on the commercial hydrogen production via alkaline water electrolysis, the corresponding reaction mechanism is analyzed. The economic feasibility of alkaline water electrolysis technology for hydrogen production is evaluated by selecting core electrolyzer equipment, and constructing, commissioning and operating the water electrolysis to hydrogen plant. It is shown by the project operation situation that the 4 000 Nm³·h⁻¹ hydrogen production plant via renewable energy-driven water electrolysis has successfully been put into operation. The produced hydrogen with a purity of 99.99% is transported through hydrogen pipelines and tube tankers to the enterprises in the chemical industrial park in old urban area of Yumen, Gansu, China, realizing the full process from production to sales. The unit energy consumption of hydrogen production by the electrolyzer is 3.99 kWh·m⁻³, providing a larger platform for PetroChina in the application of green electricity hydrogen production technology.

Key words: water electrolysis; hydrogen production; hydrogen; electrolyzer

4 000 Nm³/h 水电解制氢装置由中国石油工程建设公司北京分公司设计, QQJ4000/1.6 电解槽成套设备由中能(江苏苏州)氢能能源科技有限公司设计和提供, 2023 年 8 月开始施工建设, 2024 年 1 月竣工, 一期氢气生产能力为 4 000 Nm³/h, 新建 4 套 1 000 Nm³/h 制氢设施, 1 套 4 000 Nm³/h 的气液分离设施, 1 套 4 000 Nm³/h 的氢气纯化设备(纯度不低于 99.99%), 2 台高压氢气压缩机(2.1 MPa)、2 台低压氢气压缩机(1.3 MPa)、一座氢气储罐(公称容积 1 000 m³, 储气压力 2.1 MPa, 储气能力为 1.66×10⁴ m³)及配套公用工程及辅助设施。水电解制氢装置 2024 年 3 月 16 日成功投产, 所制氢气纯度达 99.99%, 通过输氢管道、管式槽车等送至玉门老市区化工园区等企业, 实现从生产到销售的全流程贯通。

1 电解制氢技术对比

氢不仅是能源, 也是能源的载体和基础原料, 可广泛运用于化工、工业、交通、建筑和发电等领域。由于氢发生反应后只产生水, 且质量能量密度极高, 因此一直被认为是实现零碳排放的重要能源和能源转型重要方向。绿氢的生产主要依托水电解制氢技术, 水电解制氢技术在追求高效能源转换的同时也面临着能源消耗与成本效益之间的平衡难题, 虽然技术的成熟和发展使得能源转换效率得到了显著提升, 但实际操作中所需的高能量成本仍然是限制其大规模应用的关键因素。目前水电解制氢技术主要有碱性水电解制氢、质子交换膜水电解制氢和固体氧化物水电解制氢。表 1 列举了 3 种典型水电解制氢技术的优缺点。

收稿日期: 2024-05-14; 修回日期: 2024-11-16

作者简介: 闫芳(1986-), 女, 本科, 工程师, 研究方向为石油炼制和新能源, 565686049@qq.com; 王涛(1986-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为石油炼制和新能源, 通讯联系人, 418339445@qq.com。

表 1 3 种典型水电解制氢技术对比

项目	碱性水电解制氢	质子交换膜水电解制氢	固体氧化物水电解制氢
电解质/膜	30%氢氧化钾溶液/隔膜	纯水/质子交换膜	固体氧化物
效率/%	60~75	70~90	85~95
能耗/(kW·h·Nm ⁻³)	4.5~5.5	3.8~5.0	2.6~3.6
运行成本	有腐蚀液体,后期运维复杂,成本高	无腐蚀液体,运维简单,成本低	目前尚处于实验室阶段,运维需求暂不明确
寿命/h	60000	5000~8000	—
特点	技术成熟,已实现工业大规模应用,成本低	较好的可再生能源适应性,无污染,质子交换膜更换成本较高,催化剂为贵金属	部分电能可以使用热能替代,转化效率较高,高温下材料选择困难

碱性水电解制氢技术中隔膜常因为碱液的腐蚀而受损,这影响了电解槽的寿命并增加了运维成本^[1]。同时质子交换膜水电解技术虽然能源效率较高,但贵金属催化剂和专用膜材料使得成本较高,严重影响了成本效益比^[2]。固体氧化物水电解制氢技术有较好的前景,但其为高温操作,对材料的稳定性要求更高,增加了技术难度,制约了其商业化应用。因此需要跨学科的合作和努力,在材料、电化学等方面取得进展,推动水电解制氢技术的进步和发展。通过相关技术的对比,最终选择了目前性价比较高的碱性水电解制氢工艺,实现工业化应用。但是水电解制氢技术要想在能源市场上取得成功,不仅需要技术的进步、成本的降低,还需要产业链协同发展、政策扶持以及公众接受度的提升,只有这样水电解制氢技术才能进一步发挥潜力。

本文对碱性水电解制氢工业化生产进行研究,分析水电解制氢的反应机理,通过对核心电解槽设备的选型、电解水制氢装置的施工建设和调试运行,评估了碱性水电解制氢技术的经济性,为商业化提供成本效益分析;同时全线贯通的工业化试运行结果对促进氢能产业链的整合和指导后续氢能市场的拓展、促进可再生能源消纳、助力实现“双碳”目标具有深远的意义^[3]。

2 水电解制氢技术原理

2.1 水电解制氢的机理

水电解制氢是在直流电的作用下将水电解以制取氢气和氧气的技术。

水电解制氢符合法拉第电解定律,即在标准状态下,阴极析出 1 g 分子的氢气,所需电量为 53.6 A/h。经过换算,生产 1 m³ 氢气(副产品 0.5 m³ 氧气)所需电量约 2 393 A/h,原料水消耗 0.9 kg。

由浸没在电解液中的一对电极、中间隔以防止气体渗透的隔膜而构成水电解池,通以一定电压(达到水的分解电压 1.23 V 和热平衡电压 1.47 V 以上)的直流电,使水发生电解。根据用户产量需求,使用多组水电解池组合,减小体积和增加产量,以形成水电解槽的压滤型组合结构。

本装置的压力型水电解槽采用并联型结构,左右两侧端极板为直流电源负极,中间极板为直流电源正极,电解槽采用双极性极板和隔膜垫片组成多个电解池,并在槽内下部形成共用的进液口和排污口,上部形成各自的氢碱和氧碱的气液体通道。具有结构紧凑、运行安全、使用寿命长的特点,电解液采用强制循环,电解消耗的原料水由补水泵自动补充,相关参数实现自动监测和控制。正常生产时采用 30% KOH 水溶液作为电解液,槽温控制在 90℃±5℃,兼顾隔膜垫片的使用寿命和降低能耗的要求。

2.2 核心设备电解槽结构

电解槽作为制氢系统的“心脏”,其材料性能的好坏直接关系到整个系统的效率、稳定性以及经济性^[4],当直流电通过电解槽时,在阳极与溶液界面处发生氧化反应,产生氧气,在阴极与溶液界面处发生还原反应,产生氢气,电解槽结构如图 1 所示。

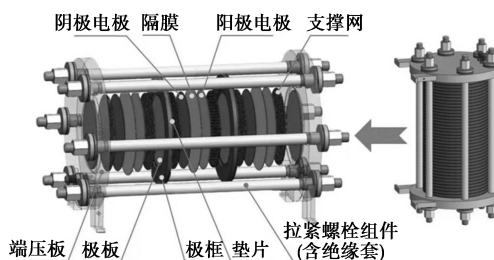


图 1 电解槽结构图

电解槽主要由以下部分组成:端压板、端极板、

中间极板(有的电解槽没有)、双极板、支撑网(有的电解槽没有)、绝缘板(有的电解槽没有)、催化极网、隔膜、密封垫片、拉紧螺杆、碟簧、螺母、绝缘套管等。

本装置电解槽设计参数和运行实测数据如表 2。

表 2 电解槽设计参数和运行实测数据

项目	设计值	实测值
额定产氢量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	1000	11111.7
额定电流/A	10712	10714
电压/V	496	450
工作压力/MPa	1.6	1.6
氢气纯度/%	99.80	99.88
负荷运行范围/%	30~120	30~120
最大电流密度/(A·m ⁻²)	—	4885
能耗/(kW·h·Nm ⁻³)	—	3.99(在 2500 A/m ² 下)

3 碱性水电解制氢的工业应用

3.1 水电解制氢装置的建设

项目可行性研究报告由中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司于 2022 年 8 月完成编制;

初步设计由中国寰球工程有限公司北京分公司于 2023 年 3 月完成编制;详细设计由中国石油工程建设有限公司北京分公司于 2023 年 8 月 4 日开始设计。水电解制氢装置于 2023 年 8 月开工建设,至 2024 年 1 月 29 日已完成了主体施工、试压和单机测试等工作,办理了工程完工(中间)交接证书。项目配套工程除盐水、生产水、消防水、开闭式循环水、冷冻水机组、氮气、仪表风等公用工程及辅助设施已满足投用条件;制氢主体电解槽、气液分离系统及纯化系统已完成打压试漏;氢气储罐、高低压氢气压缩机等储运系统也完成了打压和测试运行,水电解制氢装置达到试生产开工条件。

3.2 水电解制氢装置试生产情况

《玉门油田可再生能源制氢示范项目一期工程》水电解制氢装置于 2024 年 1 月 31 日开始试生产,2 月 5 日完成电解槽分离系统及纯化系统试生产。2024 年 2 月 19 日开始整改试生产中问题,3 月 7 日开启公用系统,12 日电解槽上电开始试生产调试,15 日全流程打通,16 日开始外输氢气,所制氢气纯度达 99.99%,通过输氢管道、管式槽车等送至玉门老市区化工园区等企业,实现从生产到销售的全流程贯通。不同负荷下的生产数据如表 3。

表 3 电解槽生产运行数据

负荷/%	PT102003 压力/MPa	IT100001 1#电流/A	ET100001 1#电压/V	IT100002 2#电流/A	ET100002 2#电压/V	TT102001 1#槽温/°C	TT102003 2#槽温/°C	氧中氢/%	氢中氧/%
50	0.80	6864	441.6	2795	407.4	57.1	51.6	0.48	0.08
50	0.95	6841	439.5	2869	409.5	57.8	53.2	0.40	0.08
50	1.00	6845	439.5	2854	409.5	57.9	53.6	0.40	0.08
70	1.10	6869	438.5	6047	440.8	58.7	54.9	0.39	0.08
70	1.20	6845	437.4	6865	446.8	58.9	55.3	0.40	0.08
80	1.20	7852	442.6	7871	451.0	60.5	58.7	0.32	0.08
80	1.35	7848	441.6	7880	450.0	61.3	59.8	0.26	0.08
80	1.45	7865	441.7	7880	448.9	61.6	60.2	0.25	0.08
80	1.55	7925	440.6	7867	447.9	62.1	60.7	0.25	0.08
80	1.60	7869	440.6	7892	447.9	62.6	61.3	0.25	0.08
90	1.60	8660	444.5	8462	451.0	62.9	61.7	0.25	0.08
95	1.60	9469	449.7	9256	456.0	63.9	62.9	0.24	0.08
100	1.60	10604	455.8	10608	464.2	64.4	63.5	0.24	0.08
100	1.60	10543	449.8	10596	459.1	68.2	67.7	0.23	0.08

通过 72 h 的连续运行,测试了不同负荷下的运行数据,在 30%~120% 负荷间,氢气纯度达到 99.8% 以上,氧中氢和氢中氧均小于 2%,满足设计要求。

装置成本估算见表 4。装置运行在相对稳定、无氢气排空的情况下,对产氢量和用电数据进行采

集,网电价格按照 0.485 元/度计算,得出装置产氢成本约为 2.5 元/Nm³。制氢量达到 4 000 m³/h 左右、新能源平价指导价时,装置成本中电耗占 82%~86%,辅助成本占 13%~17%;电价达到 0.27 元/度时,与天然气制氢成本相当;当电价达到 0.14 元/度

时,与煤制氢成本相当^[5-7]。可以看出用电成本较高,直接购买网电并不能获得更低的用电成本,因此需要通过电力市场化交易乃至微网直购电实现更低的用电价格,需要寻找更好的光照资源和高风速进一步降低发电成本,离网制氢可以最大化发挥新能源电力降本作用,实现制氢成本最小化^[8]。

表 4 成本估算

时间	15:30	16:30
电解槽电流/A	6869	6881
电解槽电压/V	438	438
氢气外输/Nm ³	650	680
电耗/(kW·h)	3395	3570
单位能耗/(kW·h·Nm ⁻³)	5.22	5.25
成本/(元·Nm ⁻³)	2.53	2.55

3.3 电解槽评价

本装置电解槽设计电压 496 V,电流 10 712 A,氢气产量 1 000 m³,2024 年 2 月 17 日第三方进行评估,得出限定 2 500 A/m² 电流密度下直流能耗为 3.99 kW·h/m³ 氢气。

氢系统标定单位能耗中直流能耗按照 3.2 MPa 气堆出压力进行核算,当出口压力低于 3.2 MPa 时,氢气压力提升至 3.2 MPa 所需能耗按下列公式计算:

$$E_1 = [nRT \times (\ln p_2 - \ln p_1)] / (11.215 \times 3.6 \times 10^6 \times \eta) \quad (1)$$

$$E_1 = \{500 \times 8.34 \times 293.15 [\ln(3.2 \times 10^6) - \ln(1.6 \times 10^6)]\} / (11.215 \times 3.6 \times 10^6 \times 0.85)$$

$$E_1 = 0.0247 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{Nm}^3$$

标定单位直流能耗:

$$W_{ds} = W_d + E_1 = 3.9196 + 0.0247 = 3.9443 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{Nm}^3$$

单位交流能耗计算公式:

$$W_a = (P_1 + P_2 + P_3) / Q \quad (2)$$

$$Q = (6550 \times 248) \div 2390 = 679.6 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$W_a = (18.5 + 7.5 + 3) / Q = 0.0426 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{Nm}^3$$

制氢系统标定的单位能耗计算公式:

$$W = W_{ds} + W_a \quad (3)$$

$$W = 3.9443 + 0.0426 \approx 3.99 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{Nm}^3$$

装置电解槽单位能耗处于国内较高水平,电解槽运行平稳,实现了碱性水电解制氢技术的工业应用,探索出一条规模化氢气生产路线。

4 结论

综上所述,本文对水电解制氢技术的机理、电解槽结构进行了介绍。从水电解制氢装置的运行可以看出用电成本较高,直接购买网电并不能获得更低的用电成本,下一步将探索如何进一步降低用电成本。

参考文献

- [1] 王培灿,雷青,刘帅,等.水电解制氢 MoS₂ 催化剂研究与氢能技术展望[J].化工进展,2019,38(1):278-290.
- [2] 丛琳,王楠,李志远,等.水电解制氢储能技术现状与展望[J].低压电器,2021,(7):1-7,28.
- [3] 俞红梅,邵志刚,侯明,等.电解水制氢技术研究进展与发展建议[J].中国工程科学,2021,(2):145-152.
- [4] 郭博文,罗聘,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.
- [5] 王彦哲,周胜,周湘文,等.中国不同制氢方式的成本分析[J].中国能源,2021,43(5):29-37.
- [6] 张玉魁,陈焕军,孙振新,等.高温固体氧化物电解水制氢效率与经济性[J].广东化工,2021,48(18):3-6,24.
- [7] 王红卫,曾秀敏,许光明,等.天然气压力能发电用于电解水制氢工艺经济性分析[J].化学工程与装备,2020,(3):106-108,114.
- [8] 廖远旭,董英瑞,孙翔,等.可再生能源制氢综合能源管理平台研究[J].南方能源建设,2022,(4):47-52. ■

塞拉尼斯宣布有意剥离电子墨水和浆料业务

5月5日,塞拉尼斯宣布有意剥离其先进电子墨水和浆料业务,以推进公司现金生成和去杠杆化的战略实施。

塞拉尼斯总裁兼首席执行官 Scott Richardson 表示,目前的重点仍然是资产负债表去杠杆化,并探索产生现金的机会,包括剥离电子墨水和浆料产品组合。

塞拉尼斯的电子墨水和浆料产品组合包括导电、电阻

和介电厚膜油墨,以及用于创建多层电路的低温共烧陶瓷(LTCC)材料,主要应用于导航和防御、医疗监测和先进电路板组件等领域。预计2025年的收入将超过3亿美元。

塞拉尼斯表示,通过此次资产剥离,可以在现有的运营模式下更加专注于高增长资产,释放股东价值并增加现金流。(中化新网)