

电解水制氢成本分析及降本措施

刘 雷（水木明拓氢能科技有限公司，内蒙古 包头 014000）

摘 要：目前的电解水制氢技术中，碱性水电解槽因技术成熟、成本低依然是市场应用主体。通过建立电解水制氢 LCOH 模型，开展制氢平准化成本分析，首先进行制氢成本量化分析，然后进行影响因素敏感性分析。结果表明，制氢成本中电耗成本占比 80%，电价每降 0.05 元，制氢成本平均降低 4%；运行时间影响制氢成本，年运行时间每增加 500h，制氢成本可降低 3%；制氢成本中固定成本折旧占比 12%，固定投入每减少 10%，制氢成本可降低 1%；回收副产氧气作为产品利用或销售，可抵减 12% 的制氢成本。

关键词：电解水；电解槽；制氢；成本；降本措施

0 前言

随着 CO₂ 排放、气候变暖问题加剧，全球主要国家于 2016 签订了《巴黎气候协定》，并纷纷制定 CO₂ 减排计划，我国于 2020 年宣布了自己的“双碳目标”，即 2030 年碳达峰，2060 年碳中和。为了实现这一政策目标，氢能因为其可再生、可存储、无污染等优势，已成为未来能源发展的重要方向之一，被视为实现“双碳”目标必由之路。

自然界的氢元素以化合物存在，氢气主要通过化石燃料制氢、工业副产氢、电解水制氢三种途径。化石燃料制氢技术成熟、成本在 0.9-1.5 元 /Nm³，市场占有率约 81%，但生产过程排放大量 CO₂，产能扩张有限。

工业副产氢能提高资源利用效率和经济效益，成本在 0.8-2.0 元 /Nm³，市场占有率约 18%，但受上游产业限值，可作为制氢的过渡路线。电解水制氢目前市场占有率不到 1%，但通过可再生能源电解水制的氢气称为“绿氢”，能够有效解决可再生能源消纳、能源危机、CO₂ 排放等问题，成为未来氢能源发展主要方向，

2022 年我国氢气产能约 3300 万 t/a，占全球氢气产能 30%，主要作为工业原料使用，氢能应用较少，未来随着氢能技术推广，可广泛应用于化工、冶金、交通、电力等行业。预计 2030 年，我国氢气需求将达到 6000 万 t/a，产能增量主要由电解水制氢满足，电解水制氢产能达到 2000 万 t/a，市场占有率将由目前不足 1% 提升至 35%。

1 电解水制氢技术分析

电解水制氢是通过电提供能量，将水在电极上分解为氢气和氧气。电解水的主要生产设备是电解槽，按照电解质不同，可将电解槽分为 3 类，即碱性电

槽（ALK）、质子交换膜电解槽（PEM）、固体氧化物电解槽（SOEC）。

通过收集各类电解槽数据，对比各类电解槽技术性能（见表 1）。

表 1 电解槽技术性能对标表

电解槽类型	ALK	PEM	SOEC
电解质	20-30% KOH/NaOH	质子膜	Y ₂ O ₃ /ZrO ₂
电解效率（%）	60-75%	70-90%	85-100%
能耗（kWh/Nm ³ ）	4.5-5.5	3.8-5.0	2.6-3.6
工作温度（℃）	70-90	70-80	600-1000
工作压力（MPa）	0.1-3	3-8	0.1
电流密度（A/cm ² ）	0.2-0.4	1.0-2.0	1.0-10
电堆寿命（h）	120000	100000	--
单槽规模（Nm ³ /h）	1-3000	1-500	--
设备成本（万元 /WM）	130-150	500-800	--
载荷范围（%）	30-100	0-160	20-100
启动时间	60min	5min	启停慢
商业应用	应用成熟	小规模应用	实验阶段

通过技术分析对比可知：

碱性水电解槽技术成熟，投资低，适合大规模场景，是目前电解水制氢主流技术；质子交换膜电解槽技术启停快，但设备成本高，适合小规模应用；固体氧化物电解槽效率高，目前还处于实验开发阶段。所以未来中短期内碱性水电解槽依然是市场应用主体，下面主要选用碱性水电解槽进行制氢平准化成本分析。

2 制氢平准化成本分析

2.1 假设条件

本文以 100MW 离网型风光制氢项目为例，选用碱

性水电解槽制氢，氢气产量 2 万 Nm^3/h ，建设内容包括电气、制氢、公用、储运等单元装置，总占地约 200 亩。

①设备选型：选用 20 台 $1000\text{Nm}^3/\text{h}$ 的碱性水电解槽；②原料成本：电价 0.3 元 /kWh，水价 10 元 /t；③运行时间：年有效运行时间取 3000h；④产品方案：单产氢气，副产氧气排空；⑤劳动定员：共计 40 人，人均 15 万元 /a；⑥资金来源：全部自筹；⑦运行期限：20 年。

2.2 成本模型

采用平准化成本 (LCOH) 分析方法，从全生命周期量化分析电解制氢成本，将所需的固定成本和可变成本折算到每标方氢气。固定成本包括土地、设备、建设成本，可变成本包括电耗、水耗、人工、运维成本。

由此可以倒推出制氢成本计算公式。

平准化成本 = 固定成本 + 可变成本

固定成本 = 总投资 / (年产出 × 运行周期)

可变成本 = (年人工费 + 年运维费) / 年产出 + 电价 × 单位电耗 + 水价 × 单位水耗

2.3 量化分析

2.3.1 固定成本

根据行业同类项目建设投资情况，估算出 100MW 离网型风光制氢项目建设投资总投资约 42000 万元，设备购置费用占据项目总投资 70%，其中制氢设备占 42%，公辅设备占 28%；建设安装费用占 20%；工程设计费用占 5%，土地使用费占 3%，项目管理成本占 2%。计算出各单项投资费用如表 2。

表 2 单项投资表

单项费用	投资占比 (%)	投资金额 (万元)
设备购置	70	29400
施工安装	20	8400
工程设计	5	2100
土地使用	3	1260
项目管理	2	840
总成本	100	42000

项目建设总投资全部计入固定投资，固定投资折旧根据运行周期直线无残值折旧，平摊到制取每方氢气的固定成本如下：

固定成本 = $42000 \text{ 万元} / (6000 \text{ 万 } \text{Nm}^3/\text{a} \times 20 \text{ 年})$
= 0.35 元 / Nm^3

2.3.2 可变成本

可变成本 = (年人工费 + 年运维费) / 年产出 + 电价

× 单位电耗 + 水价 × 单位水耗 = $(600 \text{ 万元} + 900 \text{ 万元}) / 6000 \text{ 万 } \text{Nm}^3 + 0.3 \text{ 元} / \text{kWh} \times 5 \text{ kWh} / \text{Nm}^3 + 10 \text{ 元} / \text{t} \times 0.001 \text{ t} / \text{Nm}^3$
= 0.25 元 / Nm^3 + 1.5 元 / Nm^3 + 0.01 元 / Nm^3 = 1.76 元 / Nm^3

①年运维费：每年运维成本按设备总成本 3% 计，900 万元 /a；②年人工费：劳动定员 40 人，人均 15 万元 /a，600 万元 /a；③电价：按照新能源电价 0.3 元 /kWh；④电耗：单位电耗 $5 \text{ kWh} / \text{Nm}^3$ ；⑤水价：按照工业用水 10 元 /t；⑥水耗：单位水耗 $0.001 \text{ t} / \text{Nm}^3$ 。

2.3.3 平准化成本

平准化成本 = 固定成本 + 可变成本 = 0.35 元 / Nm^3 + 1.76 元 / Nm^3 = 2.11 元 / Nm^3

根据平准化成本计算得出本模型下电解水制氢成本为 2.11 元 / Nm^3 ，依然高于化石燃料制氢成本。通过固定成本和可变成本单项计算，计算出各单项成本及占比如表 3。

表 3 单项成本表

成本类别	单位成本 (元 / Nm^3)	成本占比 (%)
固定成本	0.35	16.5
运维成本	0.15	7
人工成本	0.10	5
电耗成本	1.50	71
水耗成本	0.01	0.05
总成本	2.11	100

根据平准化成本组成占比，其中电耗成本最高，占总成本 71%；其次为固定成本，占总成本 16.5%，主要电解槽成本较高；水耗成本占比 0.05%，对电解水制氢成本影响较小。

3 制氢成本影响因素敏感性分析

3.1 电价影响分析

假设其他条件不变，分别选取 0.1–0.5 元 /kWh 各阶段电价，根据平准化成本模型，计算不同电价对应的电解水制氢成本如下表。

表 4 电价对应制氢成本计算统计表

电价 (元 /kWh)	电耗成本 (元 / Nm^3)	制氢成本 (元 / Nm^3)	成本占比 (%)
0.1	0.5	1.11	45
0.15	0.75	1.36	55
0.2	1	1.61	62
0.25	1.25	1.86	67
0.3	1.5	2.11	71
0.35	1.75	2.36	74

0.4	2	2.61	76
0.45	2.25	2.86	78
0.5	2.5	3.11	80

根据计算数据, 电价成本与制氢成本成正比例关系; 电价每降 0.05 元, 制氢成本降 0.25 元 /kg, 氢气成本平均降低 4%。通过分析结果, 可见降低电价是制氢降本的最主要途径。

3.2 运行时间影响分析

假定其他条件不变, 延长电解槽工作时间, 生产更多氢气摊薄固定成本, 降低制氢成本。分别选定电解槽每年 2000~4500h 范围内运行时间, 计算得出不同运行时间对应的制氢成本如表 5。

表 5 运行时间与制氢成本计算数据统计表

运行时间 (h/a)	氢气产量 (万 Nm ³ /a)	制氢成本 (元 /Nm ³)	成本变化 (%)
2000	4000	2.41	114
2500	5000	2.23	106
3000	6000	2.11	100
3500	7000	2.02	96
4000	8000	1.96	93
4500	9000	1.91	91

根据表 4 计算数据, 从 3000h~4500h, 运行时间每增加 500h, 制氢成本平均降低 3%。从 3000h~2000h, 运行时间每减少 500h, 制氢氢气成本平均增加 6%, 所以电解水制氢项目建设选址应在风光资源丰富的沿海、三北地区, 同时根据综合效益配备一定的储能装置, 提高每年运行时间来降低制氢成本。

3.3 设备选型影响分析

假设其他条件不变, 选用不同规模电解槽, 进行制氢成本分析。目前市场上有 1000Nm³/h、2000Nm³/h、3000Nm³/h、4000Nm³/h 碱性水电解槽, 后期会有 5000Nm³/h 或更大的电解槽上市。单槽规模越大, 电解槽制造材料更加节约, 成本降低。电解槽规模扩大 1000Nm³/h, 固定成本降低 10%, 通过计算不同规模电解槽对应的制氢成本, 得出以下数据如表 6。

表 6 不同规模电解槽对应制氢成本统计表

规模 (Nm ³ /h)	数量 (台)	固定成本 (万元)	制氢成本 (元 /Nm ³)	占比 (%)
1000	20	42000	2.11	100
2000	10	37800	2.07	99
3000	7	34020	2.04	97
4000	5	30618	2.02	96
5000	4	27556	1.99	94

由于碱性电解槽工艺技术已经十分成熟, 很难通过技术革新降低成本。只能通过增大规模, 减少设备材料来降低成本, 通过减少台数来降低占地面积和建设施工成本, 根据计算结果, 电解槽规模扩大 1000Nm³/h, 制氢成本可降低约 1%。所以在技术性能达标的情况下, 选用大规模电解槽可以降低制氢成本。

3.4 产品方案影响分析

目前大多数企业电解水制氢副产的氧气都是排空处理。如果副产氧气提纯回收后利用或销售。不但提高能源利用率, 同时增加经营收入, 降低制氢成本。下面对氧气回收利用进行成本计算, 分析对制氢成本的影响。

3.4.1 假定条件

氧气提纯设施固定投入 3000 万元; 对应产量 1 万 Nm³/h, 年产 3000 万 Nm³/h; 销售价格 600 元 /t, 折合 0.6 元 /Nm³, 运维成本每年运维成本 150 万。

3.4.2 成本计算

氧气成本 = 固定成本 / (年产量 × 运行周期) + 运维成本 / 年产量 = 3000 万 / (3000 万 Nm³/h × 20) + 150 万 / 3000 万 Nm³ = 0.10 元 Nm³

氧气利润 = 氧气价格 - 氧气成本 = 0.6 元 /Nm³ - 0.10 元 /Nm³ = 0.50 元 /Nm³

制氢成本 = 2.11 元 /Nm³ - 0.50 元 /Nm³ ÷ 2 = 1.86 元 /Nm³

根据计算结构, 回收副产氧气, 可每方氢气抵减 0.5 元成本, 制氢成本降低 12%。所以电解水制氢应充分考虑副产氧气的回收利用, 实现经济效益的最大化。

4 总结

通过制氢平准化成本分析, 目前电解制氢的成本仍然远高于化石能源制氢, 其成本主要由固定折旧和电耗成本两部分组成, 合计达到 90% 以上, 可通过以下措施降低制氢成本。

①通过建设风光制氢一体化, 离网供电方式, 降低电价成本; ②选址风光资源富集区域, 合理配套储能, 延长有效运行时间; ③选用规模大、能耗低电解槽, 降低固定折旧、运行维护成本; ④回收利用或销售副产氧气, 实现利润最大化, 抵减制氢成本。

作者简介:

刘雷 (1986-), 陕西榆林人, 本科学历, 中级工程师, 从事煤制氢、电解水制氢、合成氨、甲醇技术管理工作。