

电解水制氢成本分析

张轩¹，王凯¹，樊昕晔¹，郑丽君²

(1. 中国石油技术开发有限公司，北京100028；2. 中国石油石油化工研究院，北京102200)

摘要：氢能已成为未来能源发展的重要方向之一，被视为是实现碳达峰、碳中和的必由之路。目前氢气的主要来源以天然气和煤等化石燃料为主，生产过程仍要排放大量二氧化碳。电解水所产氢气被视为“绿氢”，被认为是氢气生产的最终方向，但目前“绿氢”成本远远高于化石燃料制氢。通过分析碱性电解槽（AWE）和质子交换膜电解槽（PEM）两种主流电解技术的制氢成本，发现氢气成本主要由设备折旧和电力成本两部分组成。由此降本措施主要是降低这两部分的成本，包括降低电价以降低电力成本，增加电解槽工作时间生产更多氢气以摊薄折旧和其他固定成本，以及通过技术进步和规模化生产降低电解槽尤其是PEM电解槽的设备成本等。

近年来，随着温室气体排放的加剧，全球气温持续变暖，气候问题日益突出。为应对这一挑战，全球主要国家于2016年签订了《巴黎气候协定》，形成了气候共识，并纷纷制定了二氧化碳减排计划，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，使用低碳清洁的可再生能源替代目前高碳的煤、石油等化石能源变得越来越紧迫。在此次能源变革中，氢能因为其清洁无污染、单位质量能量密度高、可存储、可再生、来源广泛等优势，成为各国竞相开发新能源的技术首选，甚至被称为21世纪的“终极能源”[1]。氢气目前主要作为工业生产的基础原料，广泛应用于各种化工行业，包括炼油、合成氨、合成甲醇等。由于近年来燃料电池技术的逐步成熟和燃料电池汽车的商业化推广，氢气作为动力燃料的潜力日益受到各界重视，预计在2050年，其占到我国能源消费比例将达到10%[2]，有望逐步取代传统汽柴油，彻底改变人类的动力能源，促成第三次能源革命。

目前氢气的生产主要来自于天然气制氢或者煤制氢，生产过程中会有二氧化碳产生，属于“灰氢”，而目前业界公认的发展方向是“绿氢”，即氢气生产过程中没有二氧化碳产生。当下绿氢主要的生产方式是电解水，通过电能提供能量，将水分子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，即碱性电解槽（AWE）、质子交换膜电解槽（PEM）、固体氧化物电解槽（SOEC），主要特点对比见表1[3]。

表1 主流电解水技术对比

| | 碱性电解槽(AWE) | 质子交换膜电解槽(PEM) | 固体氧化物电解槽(SOEC) |
|----------------------------|------------------------|---------------------|---|
| 电解质 | 20%~30%(质量分数) KOH/NaOH | PEM | Y ₂ O ₃ /ZrO ₂ |
| 工作温度/℃ | 70~90 | 70~80 | 600~1000 |
| 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 |
| 操作特征 | 启停较快 | 启停快 | 启停不便 |
| 运维 | 有腐蚀液体,运维复杂,成本高 | 运维简单,成本低 | 实验室研究为主,目前无运维要求 |
| 商业特点 | 技术成熟,商业化程度高,投资少 | 国外已经商业化,国内小规模应用,投资高 | 转化效率高,但高温限制材料选择,处于实验室研发阶段,尚未产业化 |

目前碱性电解槽和质子交换膜电解槽已经工业化，而固体氧化物电解槽尚处于实验室阶段，还未商业化，所以无法对其制氢成本进行分析，下面主要对前两种电解槽的制氢成本进行量化分析。

1碱性电解槽

碱性电解水制氢技术目前发展的最为成熟，具有槽体结构简单、安全可靠、运行寿命长、操作简便、售价低廉等优点，是市场上主要的电解制氢方式，广泛应用于冶金、医药、储能、食品等行业。碱性电解槽由电极、电解液、隔膜组成，电解槽内装填电解质溶液，通过隔膜将槽体分为阴、阳两室，各电极置于其中。在一定的电压下，电流从电极间通过，在阳极上产生氧气，在阴极上产生氢气，从而将水分解，制取氢气。电解槽工作温度一般为70~90℃，以KOH或NaOH水溶液为电解质。电解槽中的隔膜通常为石棉，或者为高分子复合材料，电极一般采用镍基金属材料，产生的氢气纯度在99%以上，经分离后的氢气需要脱除其中的水分和碱液。碱性电解槽一般需要降低电压增大电流以提高转化效率[4]。

一般碱性电解槽的成本与其制氢能力有关，制氢能力越大，成本越高。目前国内市场在售的碱性电解槽单台设备制氢能力从几十到1000Nm³/h，价格从100万~1000余万元不等。其中1000Nm³/h的制氢能力是当前碱性电解槽单台设

备制氢能力的上限，其价格在700万~1000万元之间。根据市场主要碱性电解槽厂家的报价，发现设备的制氢能力与其成本基本呈线性正相关关系，详见图1。

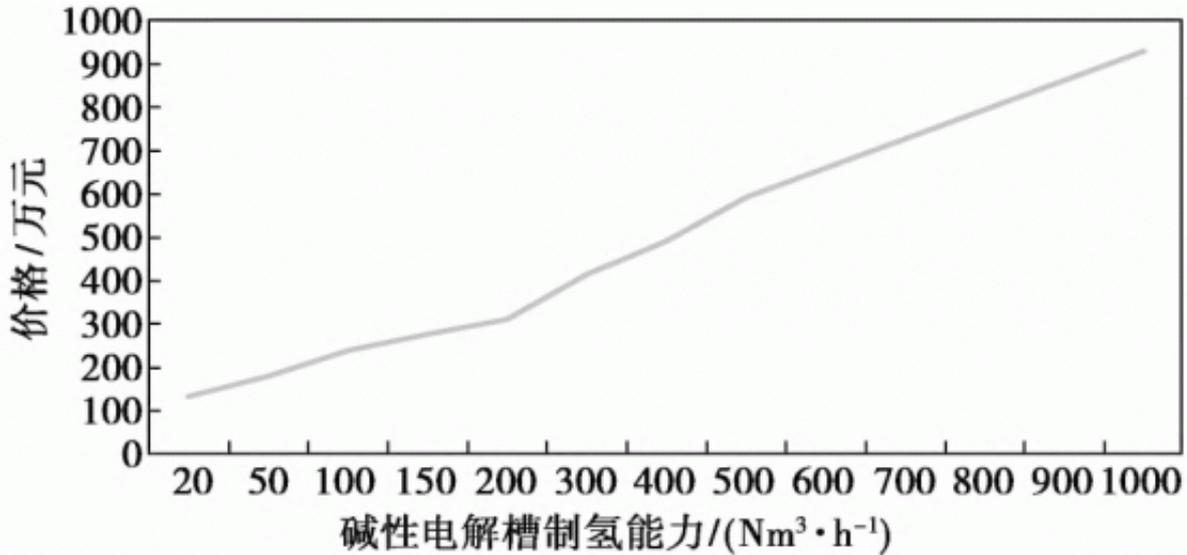


图1 碱性电解槽制氢能力与成本的关系

一般制氢成本分为固定成本和可变成本，固定成本包括设备折旧、人工、运维等，可变成本包括制氢过程的电耗和水耗。由此可以倒推出碱性电解槽制氢成本计算公式，详见式(1)。

$$\text{制氢成本} = \text{电价} \times \text{单位电耗} + (\text{每年折旧} + \text{每年运维}) / \text{每年制氢总量} + \text{单位水耗} \times \text{水价} \quad (1)$$

为了计算电解水制氢的具体成本，做出如下假设：1000Nm³/h碱性电解槽成本850万元，不含土地费用，土建和设备安装150万元；每1m³氢气消耗原料水0.001t，冷却水0.001t，水费5元/t；设备折旧期10a，土建及安装折旧期20a，采用直线折旧，无残值，设备每年折旧10%，土建和安装每年折旧5%；工业用电价格0.4元/kWh，每1m³氢气耗电5kWh；每年工作2000h，每年制氢200万Nm³；人工成本和维护成本每年40万元。结果见表2。

表2 碱性电解槽制氢成本分析 元/Nm³

| 项目 | 成本 |
|--------------------------------|-------|
| 折旧成本 | 0.46 |
| 原料成本 | 0.01 |
| 人工运维成本 | 0.20 |
| 电耗成本 | 2.00 |
| 单位体积氢气成本 | 2.67 |
| 单位质量氢气成本/(元·kg ⁻¹) | 29.90 |

从表2可知，现有条件下的电解水制氢成本接近30元/kg，远远高于天然气制氢或煤制氢10~15元/kg的制氢成本，毫无竞争优势。从成本构成分析，电耗成本最高，占到74%；其次为折旧成本，占到18%，这两项就占到了总成本的90

%以上。由于人工运维和原料属于刚性支出，所以降低其制氢成本还需要从降低电耗和降低折旧这两方面入手。

由于我国电力以火电为主，如果采用电网电力则电解制氢的碳排放强度高于煤制氢和天然气制氢[5]，不符合目前的“双碳”政策导向，所以电解水应该与光伏、风电等可再生电力耦合，实现绿色制氢。根据国家发改委的《中国2050年光伏发展展望（2019）》的预测，至2035年和2050年光伏发电成本相比当前预计约下降50%和70%，达到0.2元/kWh和0.13元/kWh。由此采用相同计算方法，计算不同电价条件下氢气成本以及电费成本在其中的比例，具体见图2。

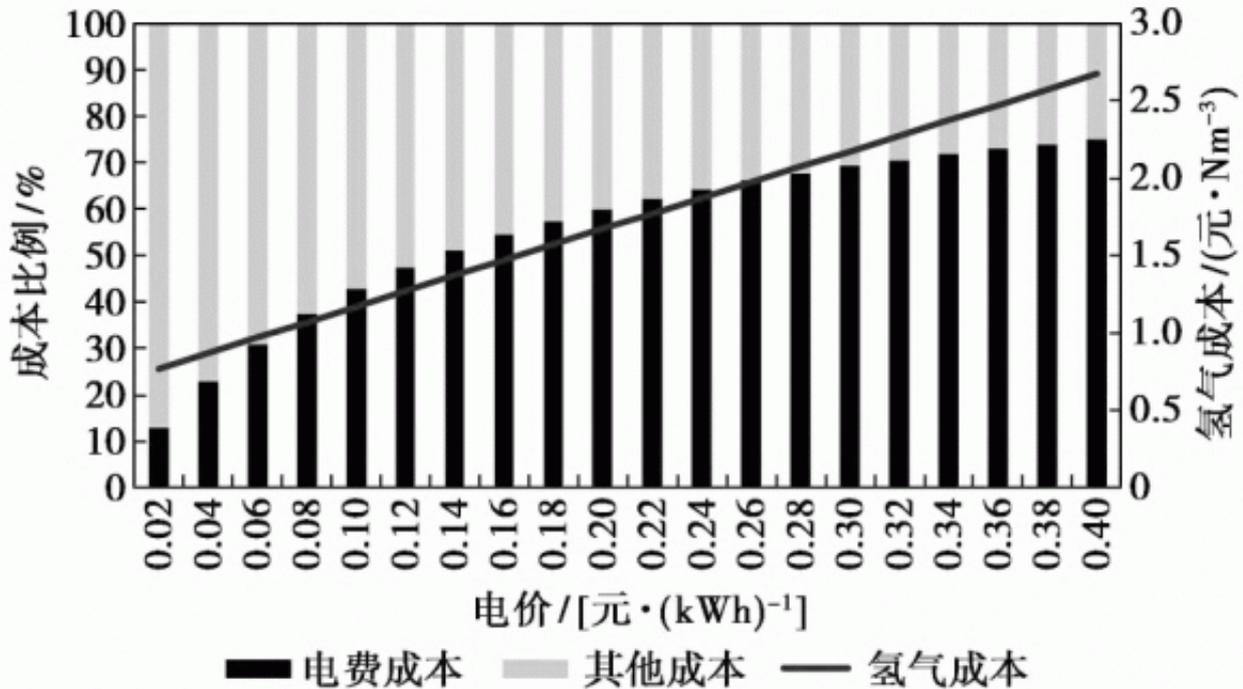
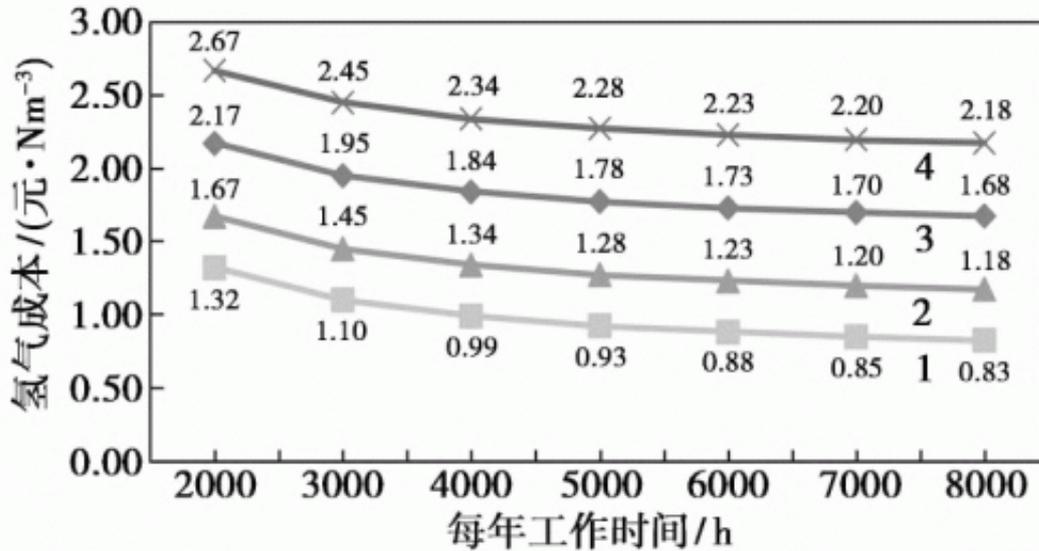


图2 碱性电解槽在不同电价下的制氢成本比例以及氢气成本的变化

从图2可知，随着电价的降低，电解制氢成本也随之降低，同时电力成本的占比也同步降低。电力成本每下降0.1元/kWh，氢气成本平均下降0.5元/Nm³。如果对光伏上网电价的预测准确，则到2035年和2050年，电费占比分别为60%和49%，制氢成本将会为1.67元/Nm³和1.32元/Nm³，相比目前分别降低了37%和50%，分别接近和超过了目前制氢成本最低的煤制氢[6 - 7]。如果未来叠加一定的政策补贴，则电解制氢的成本将有可能等于乃至低于化石能源制氢。

降低成本的第二条路径为增加设备利用率。随着氢能行业的发展，如果未来氢气需求达到一定水平，并且可再生能源电力储能取得突破，则可以通过延长电解槽工作时间，生产更多“绿氢”以摊薄其固定成本。考察每年运行时间2000~8000h下，在0.13元/kWh、0.2元/kWh、0.3元/kWh和0.4元/kWh电价条件下的制氢成本，结果见图3。



1—0.13元/kWh; 2—0.2元/kWh; 3—0.3元/kWh;
4—0.4元/kWh

图3 不同条件下制氢成本与电解槽工作时间的关系

从图3可知，在不同电价条件下，随着电解槽每年工作时间的延长，由于单位氢气固定成本的降低，制氢成本随之下降，从2000h提升至8000h后，单位氢气成本平均降低30%以上。结合电费的降低和运行时间的延长，如果到2030年和2050年，电费分别为0.2元/kWh和0.13元/kWh，工作时间分别为4000h/a和8000h/a，则对应的制氢成本分别为1.34元/Nm³和0.83元/Nm³，那么在不依赖补贴的条件下，使“绿氢”的生产成本接近和低于“灰氢”。

除上述降本方式外，还可以通过降低电解槽采购成本和提升电解槽效率的办法来实现。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，根据预测[8]，未来10年通过技术改进和规模扩张，可以降本40%，1000Nm³/h电解槽成本会降至500万元，届时制氢成本将下降5%~10%。此外，通过开发先进性能的电极和隔膜材料，进一步优化槽体结构，可以进一步提高其转化效率，降低成本和能耗[9-10]。

2 质子交换膜电解槽

虽然碱性电解槽作为最为成熟的电解技术占据着主导地位，但由于碱性电解槽电解效率低，需要使用强腐蚀性碱液，氢气需要脱除水和碱，难以快速启动和变载，同时无法快速调节制氢的速度，因而与可再生能源发电的适配性较差，且由于碱性电解槽的技术特点，以上缺点难以克服，所以近年来质子交换膜电解槽（PEM）日益受到人们的重视。质子交换膜电解槽采用高分子聚合物质子交换膜替代了碱性电解槽中的隔膜和液态电解质，具有离子传导和隔离气体的双重作用[11]。PEM电解槽结构与燃料电池类似，由膜电极、双极板等部件组成。膜电极提供反应场所，由质子交换膜和阴阳极催化剂组成。相比于碱性电解槽，PEM电解槽具有反应无污染、氢气无需分离碱液、转化效率高、能耗低、槽体结构紧凑、运行更加灵活（负荷范围0~150%[12]）、更适合可再生能源的波动性等优点，很多新建电解制氢项目开始选择PEM电解槽技术。但由于PEM电解技术商业化时间不长，质子交换膜和铂电极催化剂等关键组件成本较高，导致PEM电解槽制造成本较高，为相同规模碱性电解槽的3~5倍。

为计算PEM电解槽制氢成本，做出如下假设：1000Nm³/h的PEM电解槽成本3000万元，不含土地费用，土建和设备安装200万元；每1m³氢气消耗原料水0.001t，冷却水0.001t，水费5元/t；设备折旧期10a，土建及安装折旧期20a，采用直线折旧，无残值，设备每年折旧10%，土建和安装每年折旧5%；工业用电价格0.4元/kWh，每1m³氢气耗电4.5kWh；每年工作2000h，每年制氢200万m³；人工成本和维护成本每年40万元。

从表3可知，按照相同的计算原则，PEM电解槽制氢成本高于碱性电解槽，主要由于PEM电解槽的采购成本太高，带来每年的折旧成本太高，抬高了制氢成本。设备折旧成本占到总成本的44%，电耗成本占到50%，所以降低成本还是要从这两方面入手。不同电价条件下电力成本占比和氢气成本的变化见图4。

表3 PEM 电解槽的制氢成本分析 元/Nm³

| 项目 | 成本 |
|--------------------------------|-------|
| 折旧成本 | 1.55 |
| 原料成本 | 0.01 |
| 人工运维成本 | 0.20 |
| 电耗成本 | 1.80 |
| 单位体积氢气成本 | 3.56 |
| 单位质量氢气成本/(元·kg ⁻¹) | 39.87 |

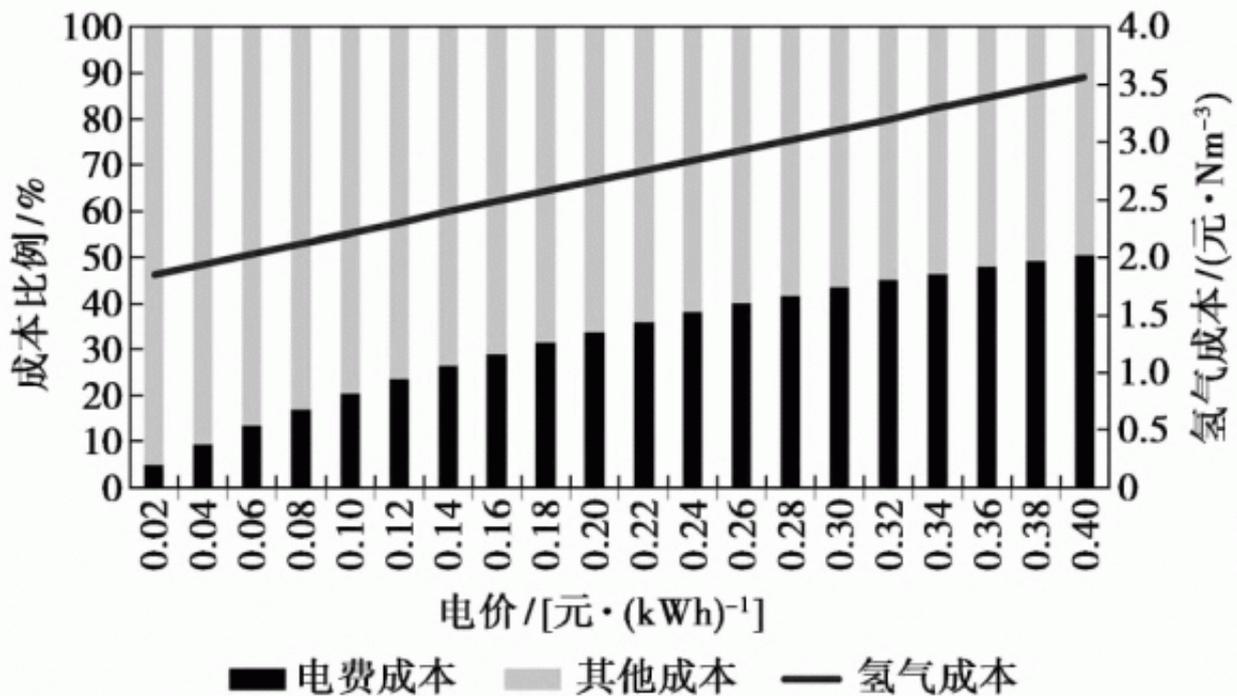


图4 PEM 电解槽在不同电价下的制氢成本比例以及氢气成本的变化

从图4可知，随着电费的下降，电力成本在总成本中的比重逐渐下降，氢气成本也逐渐降低。当电费分别为0.13元/kWh和0.2元/kWh时，氢气成本分别为2.4元/Nm³和2.71元/Nm³，成本占比分别为24%和33%。与碱性电解槽制氢成本相比，仍有一定差距，主要在于PEM电解槽价格太贵，折旧成本太高。

通过对过去几十年PEM电解槽的成本分析，根据学习率曲线，PEM电解槽的平均学习率为13%[13]，至2030年1000Nm³/h的PEM电解槽价格预计为1500万元，至2050年约为500万元。计算不同PEM电解槽成本对制氢成本的影响，见图5。

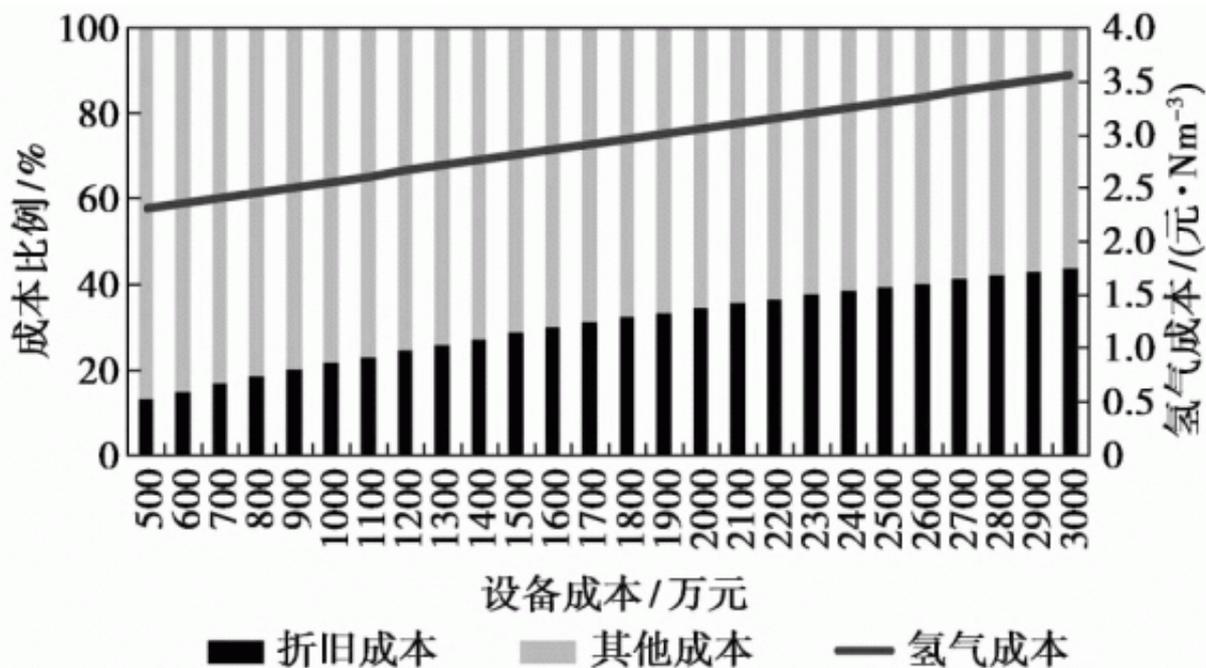
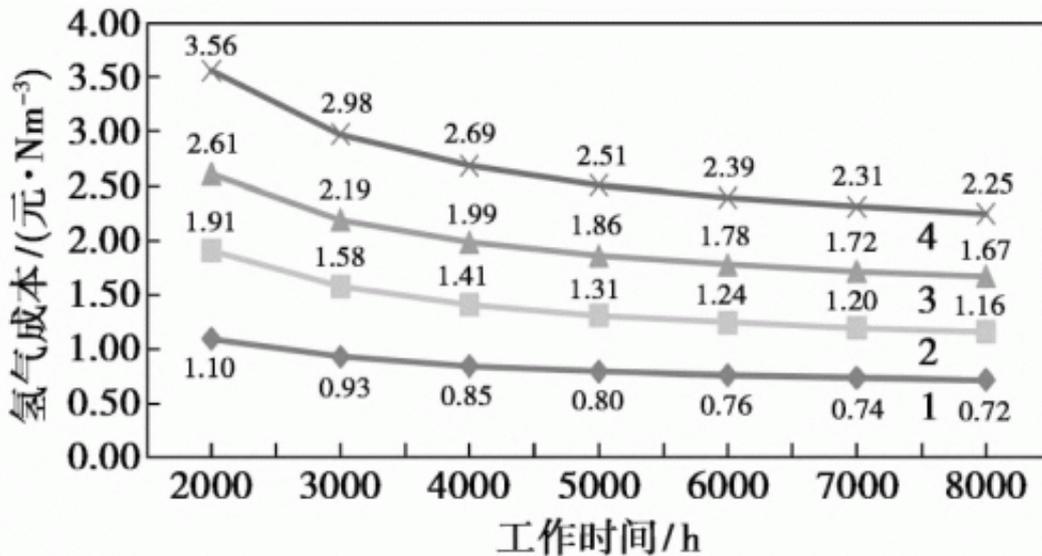


图5 PEM电解槽在不同设备成本下的制氢成本比例以及氢气成本的变化

从图5可以看出，随着电解槽成本的下降，氢气成本和折旧在成本的占比也同步下降，如果其他条件不变，至2030年和2050年，PEM电解槽设备成本为1600万元和500万元，氢气成本分别为2.86元/Nm³和2.31元/Nm³，设备折旧在成本中的占比分别为30%和13%。虽然相比目前价格基准大幅降低，但与碱性电解槽相比仍不具有价格优势。下面考察在不同电价和不同电解槽成本的组合条件下，即电价0.4元/kWh、电解槽成本3000万元，电价0.3元/kWh、电解槽成本2000万元，电价0.2元/kWh、电解槽成本1500万元，电价0.13元/kWh、电解槽成本500万元，运行时间对制氢成本的影响，详见图6。



1—0.13元/kWh-500万; 2—0.2元/kWh-1500万;
3—0.3元/kWh-2000万; 4—0.4元/kWh-3000万

图6 不同条件下制氢成本与电解槽工作时间的关系

从图6可以看出，随着电解槽工作时间的延长，氢气产量的增加，氢气成本逐渐下降。其中，电力成本和固定成本越高，下降趋势越明显。到2030年和2050年，预计电费分别为0.2元/kWh和0.13元/kWh，工作时间分别为4000h/a和8000h/a，对应PEM电解槽成本分别为1500万元和500万元，则对应的制氢成本分别为1.41元/Nm³和0.72元/Nm³，对比目前制氢成本大大降低。虽然中期相比碱性电解槽PEM电解的氢气成本仍然偏高，但随着PEM电解槽采购成本的降低，预计会在2030年后逐渐低于碱性电解槽的制氢成本，并在2040年后低于化石燃料制氢。

通过上述分析可知，相比于碱性电解槽，PEM电解槽由于设备成本过高，制氢成本相对较高，但随着氢能行业的发展，氢气需求的增加，以及技术的进步，会带来PEM电解槽成本的下降，叠加可再生能源电力成本的下降和产氢数量的增加，最终PEM电解槽制氢成本会低于碱性电解槽。如果考虑用地面积，即土地成本，PEM电解槽更加紧凑，同等规模下PEM占地面积几乎为碱性装置的一半，在土地昂贵的地区PEM电解槽优势更加明显，结合其效率高、能耗少、响应快、负载高等优势，PEM电解槽将是未来电解制氢的主流方向[14]。

3结语

电解水是“绿氢”生产的主要途径，是氢能发展的必要技术，是实现“双碳”目标的重要支柱，而电解槽是电解制氢的核心设备。通过对目前市场上主流的碱性电解槽和PEM电解槽的制氢成本进行分析，得知目前电解制氢的成本仍然远高于化石能源制氢，没有经济优势，其成本主要由电解槽的设备折旧和电费两部分组成，合计达到90%以上。未来降本空间主要在于降低电价，增加电解槽的工作时间以摊薄折旧和其他固定成本，通过技术进步和规模化生产降低电解槽的投资成本（尤其对于PEM电解槽）等。随着“双碳”政策的不断推进和深化，可再生能源（如光伏、风电等）电力成本的降低，氢燃料电池汽车的规模化推广和氢能市场的逐渐成熟，市场对氢气的的需求将呈爆发式增长，虽然传统的化石原料所生产的“灰氢”在中短期内仍将占据市场主流，但通过“绿色”电力来电解水制氢将是未来低碳经济的主流方向，也是氢能发展的必经之路。“绿氢”成本也必将随着氢能的推广和技术的进步下降到可接受的水平，电解水会成为氢气的主要来源，氢能社会的最终目标也终将实现。

参考文献

- [1] Jiao Yan, Zheng Yao, Jaroniec Mietek, *et al.* Design of electrocatalysts for oxygen- and hydrogen-involving energy conversion reactions [J]. *Chemical Society Reviews*, 2015, 46(8) : 2060-2086.
- [2] 中国电动汽车百人会.中国氢能产业发展报告 2020 [R].2020.
- [3] 张轩,樊昕晔,吴振宇,等.氢能供应链成本分析及建议 [J/OL]. *化工进展*: 1-10. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2021-1062>.
- [4] 郭博文,罗聃,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] 李家全,刘兰翠,李小裕,等.中国煤炭制氢成本及碳足迹研究 [J].*中国能源*,2021,43(1) : 51-54.
- [6] 张彩丽.煤制氢与天然气制氢成本分析及发展建议 [J].*石油炼制与化工*,2018,49(1) : 94-98.
- [7] 苗军,郭卫军.氢能的生产工艺及经济性分析 [J].*能源化工*, 2020,41(6) : 6-10.
- [8] 邓甜音,何广利,缪平.不同应用场景的电解水制氢成本分析 [J].*能源化工*,2020,41(6) : 1-5.
- [9] 杨阳,张胜中,王红涛.碱性电解水制氢关键材料研究进展 [J].*现代化工*,2021,41(5) : 78-82.
- [10] Chi Jun, Yu Hongmei. Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2018, 39(3) : 390-394.
- [11] 王飞,周抗寒,管春磊,等.PEM 水电解技术在航天上的应用现状与发展趋势 [J].*上海航天*,2020,37(2) : 23-29.
- [12] 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*,2021,23(2) : 146-152.
- [13] Saba Sayed, Muller Martin, Robinius Martin, *et al.* The investment costs of electrolysis—A comparison of cost studies from the past 30 years [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(3) : 1209-1223.
- [14] 郭秀盈,李先明,许壮,等.可再生能源电解制氢成本分析 [J].*储能科学与技术*,2020,9(3) : 688-695. ■

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/204215.html>