

# 氢能与燃料电池汽车关键技术挑战

文 | 章俊良 (上海交通大学致远学院常务副院长、燃料电池研究所所长) 演讲实录

燃料电池汽车的下一步,一是向大功率发展,二是向低成本发展。2030年燃料电池汽车成本和电动汽车基本持平。

我从事能源动力工作已经有30多年,前10年做内燃机相关工作,后面的时间从事氢能与燃料电池相关的工作,同时把内燃机相关的知识积累应用到了新的工作领域。

## 绿氢 2030 年有可能实现平价销售

我们知道碳达峰碳中和是国家战略,推动能源绿色、低碳、安全、高效转型是实现双碳目标的必由之路。

基于上海交大黄震院士团队关于能源的数据统计和预测研究,了解到新能源将会从目前的补充能源逐渐向主体能源转化。目前可再生能源只占能源总消费量的百分之十几,2060年将达到85%,占比的不断提升将主要由风力发电和光伏发电装机容量大幅提升来补

充。2060年新能源发电量占比将接近70%

氢能是新能源中的一种,当采用风力发电和光伏发电时,氢是非常好的储能介质,化学品储能,不变质,可以实现长周期大规模储能。氢能在交通、工业、居民建筑物用电、分布式发电站等领域,都会渗透进去。作为一个能源的基本形态,经国际氢能委员会预测,氢能在2050年左右占比会达到18%。

我们大家都非常关心氢能的未来发展蓝图。我所引用的数据内容一部分来源于我们调研的公开资料及专业研究报告,一部分来自国际氢能委员会的报告,并被很多媒体引用。比较让人兴奋的测算数据显示,绿氢在2030年有可能实现平价销售。

主要有几个因素:

一是目前所使用的电解槽规模增长,它的成本会下降。目前碱水制氢占比高,将来PEM(质子交换膜)电解槽制氢占比会不断上升。现有应用结果调

研发现,PEM电解槽制氢更适用于可再生能源。应对大规模制氢波谷和波峰动态变化,PEM电解槽制氢技术在安全性等方面更能体现优势。二是可再生能源大规模部署也会带来成本的下降。比如光伏发电和风力发电,尤其是光伏发电,在有的地方已经可以达到0.1元/(kW·h)。三是电解装备利用率持续提升。现在电解装备还不是满负荷制氢,如利用率越来越高,成本会不断降低。

计入二氧化碳排放成本,预计2028年绿氢价格将达到2美元/kg左右,2034年左右绿氢将实现平价。在风光资源丰富的地域,发电成本非常低,绿氢更容易实现平价。

从贵金属用量上看,从2000年左右1.1g/kW,到现在可以做到0.2g/kW,2025~2030年降至0.1g/kW以下,这可以为实现燃料电池电堆规模化量产做准备了。

## 2030 年燃料电池车成本和电动车基本持平

从氢能产业上游的制氢到中游的储氢、加氢，再到下游的能源动力应用端，都可能用到燃料电池。

其实，燃料电池是一个非常大的家族，有质子交换膜燃料电池、磷酸燃料电池和固体氧化物燃料电池等。目前质子交换膜燃料电池发展最活跃，因为其在能源转化效率、工作温度、负载响应速度以及环境适应性等方面综合优势最佳。

一个比较乐观的预测是，将未来燃料电池汽车跟电动车和燃油车百公里综合成本进行比较，包括加注氢气/燃料成本或充电成本、维修保养成本、折旧成本，结论是，到 2030 年燃料电池汽车百公里综合成本和电动车基本持平，如果考虑碳税方面的因素，比燃油车更有优势。

基于做电堆研发和系统研发的经验，根据燃料电池电堆和系统的成本分解，比较贴近实际市场情况的是，2021 年每 1kW 电堆价格为 2000 多元。现在市场上电堆价格在 1500 元/kW 左右，随着材料技术的进步、规模化效应提升以及政府政策激励加强，未来几年将实现电堆年单价目标 1200 元/kW、1000 元/kW，甚至 800 元/kW 的逐步下降。

燃料电池全生命周期拥有的技术成本越来越低了，但是它有一块最大的成本是氢的成本，到 2030 年如果降不下来，燃料电池汽车还是不能实现大规模应用。

对于绿氢成本的变化趋势预测，其实每个国家差不多。以美国为例，有一个 111 计划，大概在 10 年内，到

2030 年左右，将实现 1kg 氢气的成本在 1 美元左右。最大的一个诉求是用电成本要下降，所谓用电成本下降，一方面是电费单价下降，另一方面是电解装备效率提升，使制取 1kg 氢气所消耗的电量下降。个人认为非常有可能实现用电成本下降到预期目标。

现在有的地方可以做到光伏发电每 1kW·h 9 分钱到 1 毛钱，如制取 1kg 氢气按大约 50kW·h 电计，那么 1kg 氢气就是 5 块钱，加上储运就是 10 来块钱。所以，将来 1 美元/kg 氢气非常有可能实现。如果能实现氢气成本价 1 美元/kg，从汽车百公里燃料消耗角度来说，这将比柴油和汽油都更便宜，大概是这么一个趋势。

因此，燃料电池汽车在经济性上也快具备应用的条件了。

### 大功率、低成本是趋势

再看氢燃料电池技术最近几年的发展。

首先是燃料电池汽车保有量，全球到 2021 年为止是 5 万辆左右，2021 年这一年增加了 16000 多辆，2022 年中国增加了大约 5000 辆，应该是排世界前三，在这之中中国的燃料电池汽车有明显增加的趋势。目前全球五六万辆燃料电池车在路上跑，其安全性是非常有保障的。

当然还有一个，大家关心的加氢站。从过去的趋势来看，发展速度非常快。全球 2021 年新增 124 座加氢站，截至 2021 年总共拥有 685 座，其中中国 105 座，计划到 2025 年增加到几百座。加氢站的推广发展，对普及氢燃料电池汽车有非常大的促进作用。

我国的产业政策对氢燃料电池给

予了极大推动。2022 年国家发展改革委和国家能源局发布了《氢能产业发展中长期规划(2021 ~ 2035 年)》。2025 年燃料电池汽车推广应用有望达到 5 万辆，产业规模千亿元。过去十年，国家各部委密集发布了很多跟氢燃料电池相关的新政策，包括能源，包括汽车动力等方面。

对于燃料电池汽车来讲，下一步发展的趋势是什么？在我们看来可能是向大功率发展，向功率密度进一步提升发展，以及向低成本发展。

过去 20 年，我们的功率密度由 1kW/L 提升到现在的 6kW/L 左右，市场上比较先

进的燃料电池发动机功率密度是 5 ~ 6kW/L，与国际是平齐的。另外，从贵金属用量上看，从 2000 年左右 1.1g/kW，到现在可以做到 0.2g/kW，2025 ~ 2030 年降至 0.1g/kW 以下，这可以为实现燃料电池电堆规模化量产做准备了。

从成本分析来看，将 1000 辆车与 50 万辆车相比，催化剂的成本占比越来越高，在一个电堆里面催化剂成本占 40% 以上，因为铂金属成本不会随用量增加而降低，而极板、涂层都会越来越便宜。

从制造成本和技术角度来讲，内燃机比燃料电池更复杂，所以燃料电池规模化制造将越来越便宜，从这个角度看规模化越来越有条件。

### 铂用量降低到 0.1g/kW 以下

要解决这个问题，将来采用低铂催化剂是趋势。催化剂变了，膜电极和电堆设计都会有变化，极板和气体扩散层匹配也要变化，带来了几个技术的更新

迭代。如果需要进一步降低铂的用量，会带来一系列的其他更新。

现在市场上买到的商用铂催化剂，用量是 0.3 ~ 0.4g/kW，如果需要降到 0.1g/kW 以下还有很多工作需要做。如果一年有 100 万辆车，铂用量能降到 0.15g/kW 也就是每 100kW 铂用量 15g，100 万辆车大概需要 15 吨的铂。现在的水平是每 100 万辆车需要 30 ~ 40 吨铂。

据报道，2022 年全中国铂的消费大概是 100 吨，燃料电池大规模使用对铂的市场将造成巨大的冲击，这个铂用量不努力降下来，大规模使用将变得很困难。我个人认为，在 2030 年左右首先降到 0.15g/kW 以下，往后再努力降到 0.1g/kW 以下，将使燃料电池实现规模化量产

低铂化带来技术挑战，需要将催化剂、离聚物以及催化层等加入一些新的设计来完成。

总体来讲，如果是采用低铂燃料电池，对车用来说，有三大问题：第一是高功率输出；第二是长寿命运行；第三是复杂运行工况。高功率输出，主要大电流区域性能会急剧恶化；长寿命运行，催化剂衰减加速；复杂运行工况，在零增湿或低湿等条件下都会有问题。

我们上海交大燃料电池研究所和课题组长期做燃料电池的研发，比如说高活性低成本的催化剂，电极动力学和传质机理，材料和组件的设计和制造，电池组和系统集成，以及测试分析。在质子膜燃料电池，还有水电解制氢这两方面都有做研发，主要是从深层机理开始，到核心材料研制，再到后端的测试和验证系统进行全面覆盖。

燃料电池里面的化学反应是这样

的：氧还原变成水，氢氧化变成质子，也就是氢离子。氢氧化非常简单，反应速度快；氧还原反应比较慢，对催化剂要求比较高。一个想法，铂含量在将来要降到 0.1g/kW 以下是什么技术？在我看来就是把铂用量最大限度地降低，降低的概念是什么呢？把里面的每个铂原子用起来，做成类似鸡蛋壳型的催化剂，也就是铂原子全部在表面，里面是其他的金属。

因为在燃料电池中起催化作用的是表面的原子，里面的原子不直接起作用，就是一个颗粒，即使 3 纳米的颗粒，也有 75% 的原子不暴露，25% 的原子在表面。如果能把所有的原子都暴露到表面上来，成为一个效率最高的催化剂，那么用量也会是低的。

我们开发出来的技术就是原子单层的催化剂，就是把颗粒做到纳米化，一致性好，全部做成球形，稳定性提高，铂的质量比活性可以做到提高 10 倍以上。

在这个基础之上，我们开发了新的低温下合成的合金催化剂。怎么提升活性和稳定性？大部分合金催化剂是由高温制备，如何用电化学方法在低温下达到更好的效果，过去几年我们有效地解决了这个问题

### 低铂化传质机理研究

膜电极低铂化之后，燃料电池里面电极的额外阻力怎么来的，设计实验将阻力进行了区分认识，对于进一步提升低铂燃料电池的性能，尤其大电流的性能具有非常大的指导意义。

研究显示，在燃料电池发生铂用量下降的时候，里面的传质机理全部改变了，尤其是电极里面的传质机理。当铂

载量降到 0.05g/kW 以下的时候，电极里的传质阻力占整个传质阻力的 70% 以上，导致燃料电池根本不能用。为什么现在要做到 0.2g/kW 以下非常困难？如果这个机理不清楚，要突破低铂化技术，走向低铂化燃料电池就非常困难。我们在这个机理上做了很多研究：

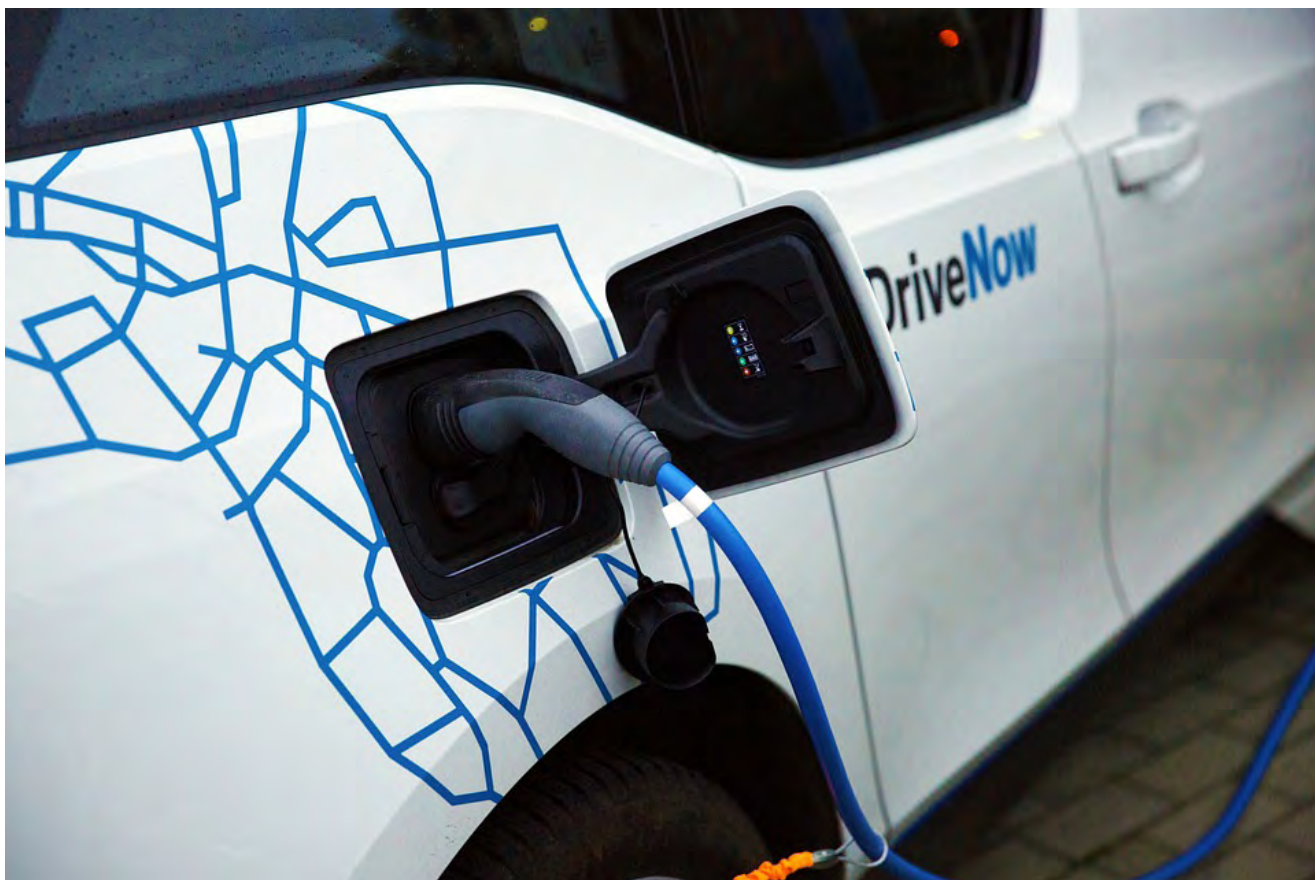
简单讲一下，电极里面氧气传质通过分子动力学来模拟是什么过程，最主要的是碳颗粒和铂表面的一个传输过程。在燃料电池里面，电极三相界面，既需要有氧气，又需要有电子，还需要有质子，电化学反应发生在催化剂表面、氧气和离子聚合物交界的地方，这个时候质子导体是覆盖在催化剂表面的，如果质子导体不打开，三相界面就非常小。

我们通过一个方法就把它变成多孔型的结构，使整个三相界面极大地增加。另外，高活性的合金催化剂也带来很多问题，尤其是贵金属，加上其他过渡金属，比如说钴原子的掺杂，是国际上应用的一款主流催化剂，钴溶解出来导致了一系列的问题，这些事情如果机理上不清楚，优化它非常困难。

我们也对电堆的设计和装配做了很多研究，包括里面的流场分布、诊断和测试，我们交大燃料电池研究所实验室有成套的技术。

### 质子交换膜电解槽是大趋势

电解水制氢涉及的装置有碱性电解槽和酸性电解槽。现在研究最活跃的是酸性质子交换膜电解槽，传统碱性电解槽已经实现了工业化，成本比较低。但为了能够适应可再生能源发电的间歇性、波动性和随机性，我认为未来绿电制氢主流还是基于酸性质子交换膜电解



槽更有机会。

基于更多场景适用考虑，现在碱性电解槽也在往碱性膜电解槽方向发展。碱性膜结合了碱水和质子膜的特点和优势，它的问题就是目前因碱性膜不够成熟，还没有商业化应用案例，技术发展还需要时间。

质子交换膜电解槽的问题在哪里？目前一个最大的问题是成本太高了。把成本分解出来，我们可以看出来，针对兆瓦级制氢电解槽，它最大的成本是膜电极、双极板，其次是多孔扩散层（PTL）。

膜电极成本最大的部分是催化剂中

的钌金属和质子交换膜。钌在地球上的储量是铂的 6% 到 8%，其价格是铂的 3 倍以上，是钨的 15 倍左右，它们之间的相对价格会随着市场需求发生改变。

为降低 PEM 电解槽的成本，钌金属在质子交换膜电解槽中需要被用到极致，甚至被替代。初步研究发现 RuMn 合金因其性能和耐久性有望替代钌基材料，为后续研发低成本电解水制氢膜电极打开了另外一扇大门。

电解水制氢还有一个问题，质子膜最大的优势是可以实现大电流制氢，但是大电流工作阳极会产生大量的氧气，

电极里面的排气做得不好会有很大的电压损失，导致效率下降。这里面的电极过程怎么优化也是非常大的技术障碍，现在研究所课

题组也在做很多工作。我们最终也出了催化剂、膜电极的产品，结合国家项目，我们研究出来了电解槽以及燃料电池系统样机。值得大家关注的是，目前膜电极产品已经装配到 6000 辆燃料电池汽车上。（涂彦平整理，略有删节）MFC