

燃料电池技术及产业发展展望

■文 / 马晓晨（中国船舶重工集团公司第七一四研究所）

现

阶段，国外舰船动力形式基本固化，核动力、燃气轮机、柴油机等功率等级已能满足当前舰艇发展需求，继续提高的潜力不大。燃料电池是一种新型动力型式，效率高、噪声低、排放少，可替代热气机、闭循环蒸汽轮机等用于常规潜艇，是国外海军的发展重点。目前德国现役潜艇、俄罗斯在建的第五代常规艇、法国“短鳍梭鱼”型潜艇和西班牙 S80 级潜艇均使用燃料电池 AIP 系统，日本防卫省也论证了潜艇燃料电池方案。此外，燃料电池技术扩展性好，改变单电池或堆栈的使用数量，即可获得不同功率等级的产品，可用

于电动汽车、UUV、无人机、电站、便携式电源等领域。

一、燃料电池的原理

燃料电池是将燃料中的化学能直接转化为电能的装置，一般以氢气为燃料，与空气或氧气发生电化学反应，由阴极、阳极、电解质等构成。主要优点包括：一是效率高，发电理论效率可达 60%，而舰用燃气轮机、柴油机效率仅为 40%；二是清洁，副产物只有水，对环境污染极小；三是应用范围广，规模可从微瓦（便携式设备）到兆瓦（固定发电站）不等，适用于多种场合。

（一）分类

根据电解质的不同，燃料电池可分为质子交换膜燃料电池（PEMFC）、碱性燃料电池（AFC）、磷酸燃料电池（PAFC）、熔融碳酸盐燃料电池（MCFC）和固体氧化物燃料电池（SOFC）。电解质的性质决定了燃料电池的工作温度和离子转移过程。其中，碱性燃料电池、磷酸燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池的电解质有高度腐蚀性，限制了商业应用。

目前发展最多的是质子交换膜燃料电池和固体氧化物燃料电池，前者运行温度低、启动快，多用于潜艇、汽车等需要频繁起停和变工况运行的情况，后者运行温度高、启动慢、铂金属使用少，可用于固定式发电或重整燃料的情况。

（二）氢气的来源

氢气的储存或制备是限制燃料电池大规模应用的瓶颈。目前储氢方式包括高压氢气、金属氢化物、液氢三种。高压氢气用于汽车、无人机等；金属氢化物安全性好，多用于潜艇；液氢储存困难，用于火箭发动机，燃料电池使用较少。氢气制备方式主要包括醇类重整、燃油重整、金属置换反应、太阳能制氢等。国外为潜艇研

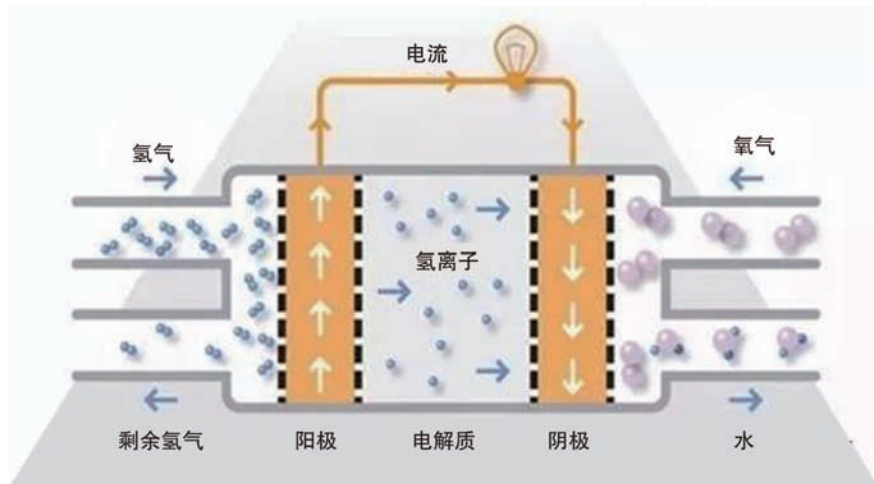


图 1 燃料电池原理示意图（图为质子交换膜燃料电池）

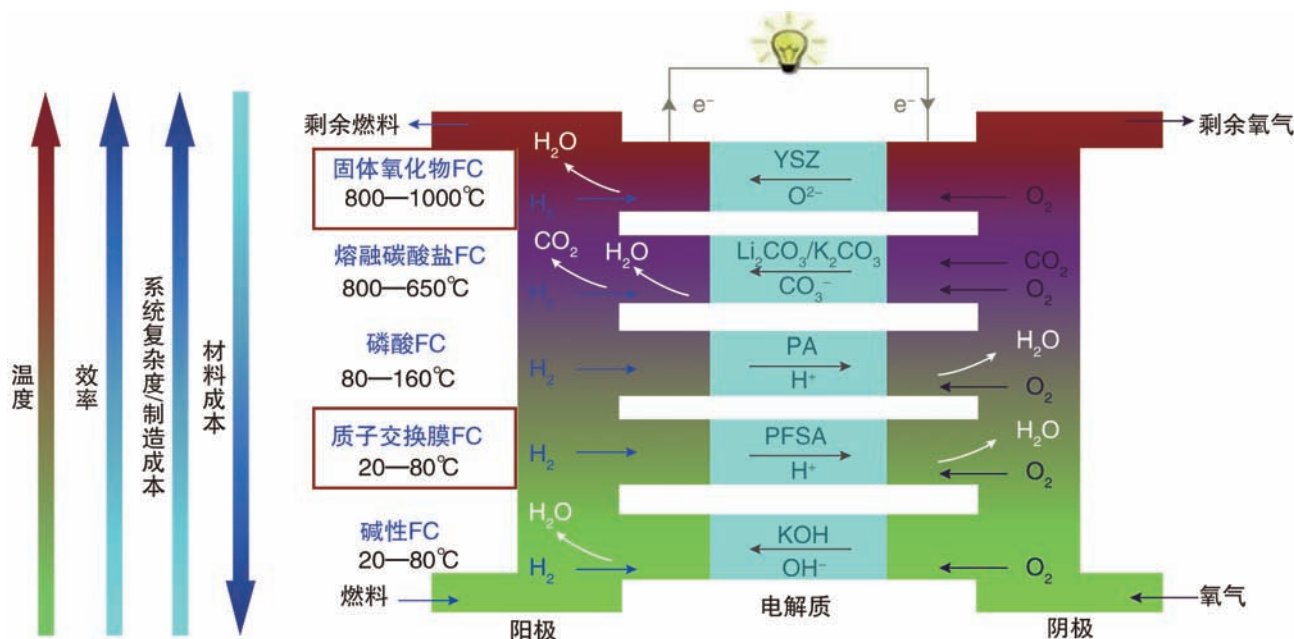


图2 不同的燃料电池（从下至上表示：燃料电池运行温度越高，效率越高、材料成本越低，但制造成本越高）

发了醇类和燃油重整制氢的方式，为UUV试验了甲醇、JP-10燃油（一种低硫燃料，多用于导弹发动机）、铝水反应等制氢方式。

二、燃料电池应用情况

燃料电池系统由多个单电池（内含多个堆栈）构成，技术通用性强，改变单电池或堆栈数量就可构成不同功率等级的动力系统。例如，汽车和潜艇的动力系统功率均为百千瓦量级，技术可相互转化。又如，通用汽车公司已经在雪佛兰车用燃料电池基础上研发了UUV燃料电池，并通过海军测试。

（一）潜艇AIP系统

1. 燃料电池已广泛用于国外常规潜艇

燃料电池已经成为国外潜艇AIP的重要发展方向。德国的212型/214型潜艇、俄罗斯第五代常规艇、西班牙S80潜艇、法国“短鳍梭鱼”型潜艇均已使用或确定使用燃料电池+柴

油机动力型式（澳大利亚“科林斯”级替代艇将采用法国“短鳍梭鱼”方案。）。此外，日本防卫省也在研发潜艇燃料电池动力系统，很可能用于下一代潜艇（“苍龙”级潜艇已放弃热机，12艘中的最后两艘将使用锂离子电池替代）。

2. 燃料电池在效率、隐身性、续航力等方面具有明显优势

与热气机、闭循环蒸汽轮机等相比，燃料电池的优势主要体现在：①效率高达60%，约为其他AIP动力系统的2倍，耗氧量低；②不使用旋转或往复运动系统，机械噪声小，声隐身性好；③潜艇使用的质子交换膜燃料电池工作温度小于200℃，排气温度低，红外隐身性好。

与核动力相比，燃料电池的优势体现在：①不使用旋转机械，噪声低；②无需屏蔽层，体积重量上有优势；③续航力可达到3周，能够满足常规潜艇近海作战任务需求。

与锂离子电池相比，只要潜艇携

带足够多的氢气（或其他燃料），燃料电池系统的续航力理论上可远高于锂离子电池。

3. 国外正在试验重整制氢技术

由于高压氢气储存条件苛刻、金属氢化物储氢密度低，国外海军正在研发利用甲醇、乙醇、燃油为原料重整制氢的技术。

重整制氢需考虑燃料含氢量、重整效率、燃料来源、燃料储存、安全性、重整温度等问题。其中，甲醇的氢/碳比高、重整效率高、重整温度低（250℃）、原料不含硫，重整技术研发难度较小。德国蒂森·克虏伯造船集团和西班牙Sener公司已经验证了潜艇甲醇重整制氢技术，重整效率超过90%。然而，甲醇不是一种军用通用燃料，采购和补给有一定困难，为此国外还在积极研发燃油重整制氢方案。但燃油成分复杂、硫含量大、重整温度高（约850℃），研发难度较大。目前，俄罗斯正在为第五代常规潜艇试验燃油重整制氢技术，法国

“短鳍梭鱼”型潜艇也将提供燃油重整制氢方案。此外，德国 Sunfire 公司还研发出利用低硫燃料重整制氢的 50kW 固体氧化物燃料电池，用于 MS Forester 货船，可提供 25%~50% 的船用电力。

(二) UUV 动力系统

目前 UUV 续航力仅为 10—40 小时，动力已经成为限制 UUV 大规模部署的瓶颈问题。美国海军研究署希望通过燃料电池技术，将 UUV 续航力提高至 70 天。2012 年，美国海军

研究署向多家公司授予合同，研发燃料电池动力系统。这些机构采用技术路线各不相同，目标是达到峰值功率 37.5kW、巡航功率 700W。

(三) 无人机动力系统

美军分析认为，燃料电池适用于最大起飞重量不超过 25kg 的中小型无人机，可提高无人机续航力。

2012 年，美海军研究实验室在“离子虎”无人机上试验了燃料电池，使用 550W 的燃料电池续航力为 26 小时。若使用同等重量的蓄电池，则续航力

仅为 4 小时；若换装液氢为燃料，续航力可达到 48 小时。

2017 年，美军为早期的“扫描鹰”无人机换装了燃料电池动力系统，将续航力从 8 小时提高至 10 小时，同时故障率降低至 1/5。

(四) 车用燃料电池

目前，中国倡导新能源汽车的发展，为汽车产业带来了新的发展契机。现有的电动汽车普遍使用锂离子电池，车身重、续航力短（约 300 公里，特斯拉部分型号续航力可达 600 公里，

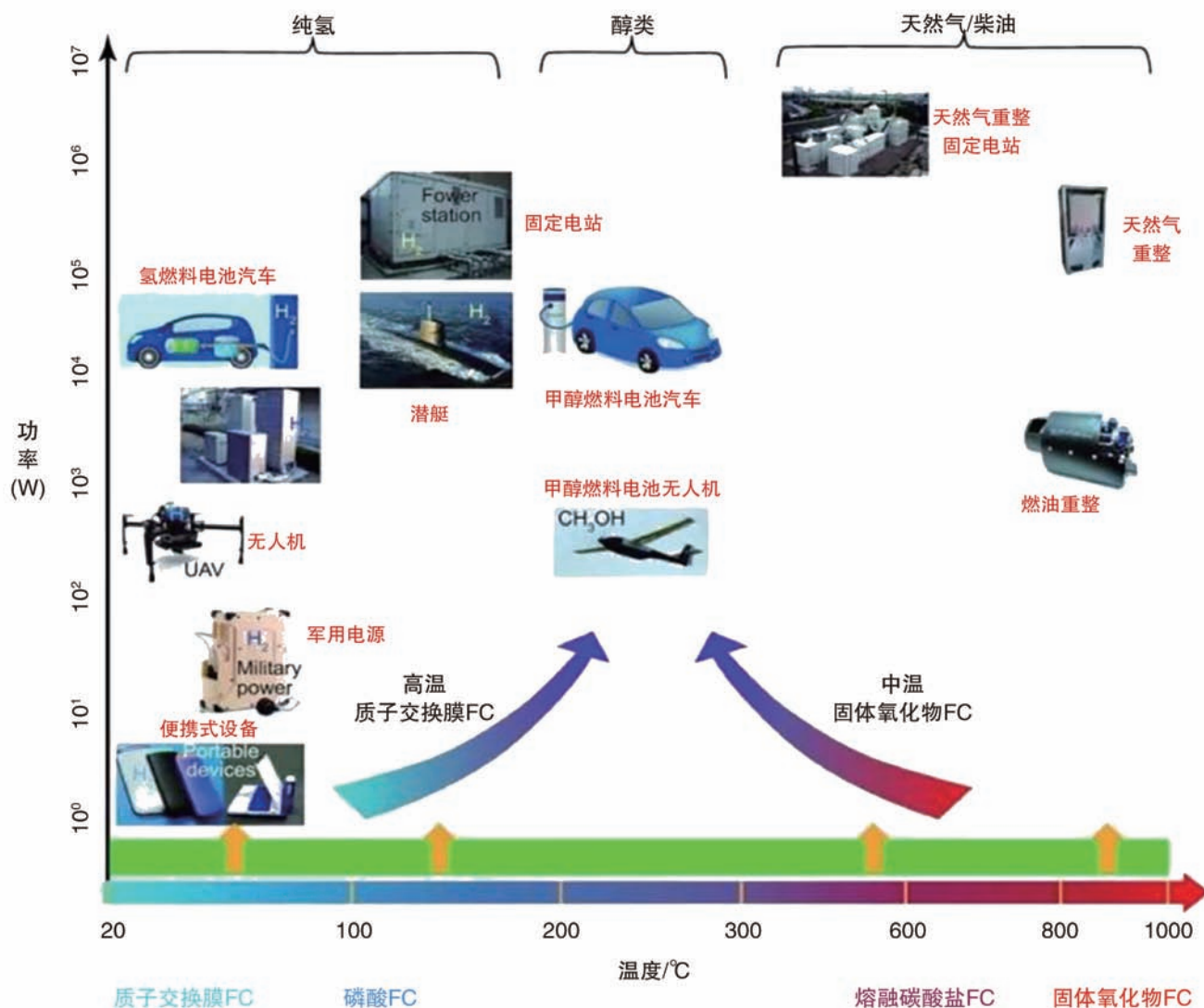


图 3 燃料电池的应用

但成本较高)，还存在自燃、爆炸等安全隐患。车用燃料电池是新能源汽车的重要发展方向，日本、韩国发展相对较快，已经开始商业化，美国也在发展军用燃料电池汽车。

已上市的燃料电池汽车包括丰田 Mirai 燃料电池汽车、本田 Clarity 燃料电池汽车、现代 ix 35 燃料电池版。美国通用汽车公司也与陆军装备司令部坦克机动车辆研发与工程中心（TARDEC）联合研发了雪佛兰科罗拉多 ZH2 燃料电池汽车，用于夏威夷军事基地。此外，戴姆勒、宝马、大众等车企也在研发车用燃料电池。

丰田 Mirai 于 2015 年上市，是最早开始商业化的燃料电池汽车，有出售和租赁两种销售模式，售价目前约 6 万美元左右（政府还会补贴约 2 万美元），续航力约 600 公里，性能媲美汽油车。若丰田 Mirai 燃料电池汽车至 2020 年的销量可达到预计的 30000 辆（2016 年特斯拉 MODEL S 年销量 38000 辆），则仅该型号带来的产值就达到 18 亿美元。

（五）固定式发电

燃料电池的固定式发电应用包括发电站、家用热电联产系统、备用电源等。备用电源主要为通信基站或发电站提供备用电力。从经济效益来看，燃料电池发电成本过高，用作备用电源的前景更好。

燃料电池发电站以美国、韩国发展最为迅速。韩国建成了多个燃料电池发电厂，其中华城燃料电池园是目前世界最大的燃料电池发电站，配备 21 座功率为 2.8MW 的燃料电池（美国燃料电池能源公司提供技术支持），总功率达到 59MW，可为 13.5 万户家庭提供电力。

家用热电联产系统从城市煤气中

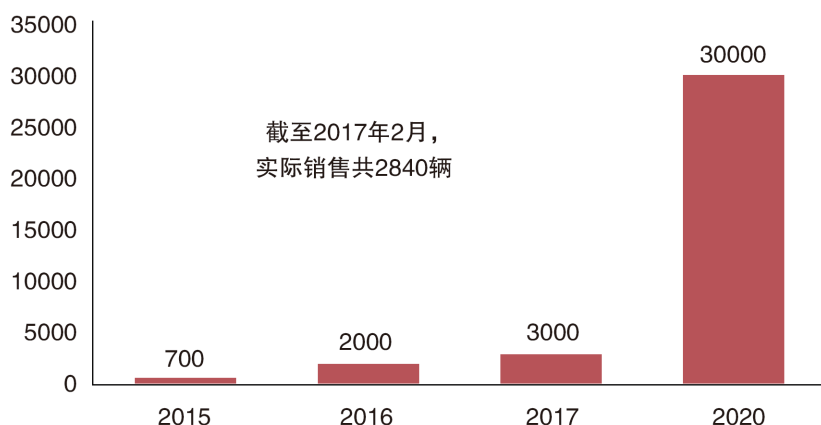


图4 丰田 Mirai 燃料电池汽车计划销量（单位：辆）

制氢，由燃料电池发电，产生的热量用于加热水，可以不依赖电网独立运行。主要产品包括日本的 Ene. Farm 系统和欧洲的 Ene. Field 系统。

燃料电池还可用作备用电源，在恶劣天气下保证通信和电力供应。通信基站燃料电池备用电源主要用于印度和中国的偏远地区。Intelligent Energy 公司为印度电信通讯塔部署的燃料电池备用电源覆盖了印度 27400 座基站，总价值 12 亿英镑。美国巴拉德也为中国移动提供了 50 套 DBX2000 型的燃料电池备用电源试验系统。发电厂备用电源用于电力突然中断的情况。例如，美国巴拉德公司为巴哈马地区安装了 21 套 ElectraGen-ME 后备发电系统，在 3 天飓风期间提供电力供应。ElectraGen-ME 后备发电系统单台功率 5kW，满功率下可运行 40 小时，使用甲醇-水混合燃料制氢，燃料储存量为 225 升。

三、燃料电池的发展方向和存在问题

（一）成本因素

燃料电池成本中占比最高的是燃料电池组，其次是氢燃料罐和电池配件。为了实现燃料电池的商业化，燃

料电池组的成本必须下降，重点是铂催化剂、电解质膜和双极板的价格控制。国内中国科学院大连化物所、清华大学等机构均在开展相关的研究。

铂催化剂。当前车用燃料电池大量使用铂催化剂，为了降低成本，需进一步降低铂催化剂的使用量，并寻求廉价的替代品。

电解质膜。目前应用最多的质子交换膜是全氟磺酸膜（PFSA）主要依靠进口，价格约 600 美元 / 平方米左右。

双极板。目前常用不透性石墨材料，需精密加工、不易批产。

（二）燃料来源

加氢站数量少是制约燃料电池汽车发展的重要因素。此外，廉价制氢也是燃料电池产业需要考虑的重要问题。推广初期主要以分散制氢为主，可控制成本、使用便利。未来规模化发展之后，将主要采用集中制氢的方式，可能应用太阳光催化光解制氢、生物制氢等新方法。

（三）安全储存

短期内，高压罐储氢仍是主要氢气储存手段。长期来看，需要发展储氢容量高、安全性好、吸 / 放氢速率快、寿命长、成本低的新材料。[科技](#)