

中国氢能交通产业的现状、挑战与展望

孟翔宇¹, 顾阿伦², 曾静¹, 陈铭韵¹, 周剑², 刘滨², 毛宗强^{1,3*}

1. 东莞深圳清华大学研究院创新中心, 东莞 523808
2. 清华大学能源环境经济研究所, 北京 100084
3. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084

摘要 综述了中国氢能公路交通、轨道交通、船舶和航空领域的发展现状, 辨析了中国氢燃料电池车的综合性能, 指出中国氢能汽车面临的挑战主要在于2个方面: 一是成本高, 包括氢燃料电池车成本高, 且氢燃料价格高; 二是加氢基础设施不足。分析表明, 中国正处于城镇化的中后期阶段, 重载交通、拥有固定路线的特种交通等将成为氢能汽车发展的机遇, 家庭乘用车将成为未来氢能汽车发展的重要方向。氢能轨道交通将在难以电气化的地域发挥作用, 以氢基化合物为动力的船舶和航空器将成为氢能船舶和航空发展的重点, 未来氢能交通应完善规划、促进技术融合创新, 发展新型氢能交通出行方式, 构建完善的政策体系, 并利用碳市场机制实现新飞跃。

关键词 氢能交通; 氢能汽车; 船舶; 航空; 减排

党的二十大报告^[1]指出了实现第2个百年奋斗目标的战略, 其中实现人与自然和谐共生的现代化, 到2035年, 广泛形成绿色生产生活方式, 碳排放达峰后稳中有降, 生态环境根本好转, 美丽中国目标基本实现是重要表述。而要实现这些战略目标的核心就是要减少人为活动产生的CO₂排放, 由于交通运输领域的排放占到了中国碳排放总量的10%^[2], 因此, 推动交通运输领域的低碳绿色转型, 实现可持续发展, 既是交通运输领域发展的内在要求, 也是中国实现“双碳”目标的重要措施。

交通运输是居民出行和物流服务的基础支撑和保障。需注意的是, 随着经济社会的快速发展和人民生活水平的不断提高, 运输需求总量、运输装备保有量仍将增加, 在现有交通领域以化石能源为主的能耗结构下, 碳排放总量仍将持续增加。同时, 全社会对运输时效性、个性化、舒适度等的要求越来越高, 单位运输周转量能耗水平已接近发达国家, 单位碳排放下降面临瓶颈。而交通运输领域的减排成本明显高于工业、建筑等行业^[3], 因此加快推进运载工具的能源清洁化, 推动相关技术的革命

收稿日期: 2023-03-06; 修回日期: 2023-12-12

基金项目: 清华大学绿色经济与可持续发展研究中心课题(202206)

作者简介: 孟翔宇, 高级工程师, 研究方向为能源规划、低碳及可持续发展政策等, 电子信箱: mengxy@tsinghua-dg.org; 毛宗强(通信作者), 教授, 研究方向为氢能及燃料电池技术、氢能政策与战略、标准等, 电子信箱: maozq@tsinghua.edu.cn

引用格式: 孟翔宇, 顾阿伦, 曾静, 等. 中国氢能交通产业的现状、挑战与展望[J]. 科技导报, 2024, 42(3): 6-26; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.03.001

性突破和产业化发展,是实现交通运输业降碳的关键。氢能由于其具备的来源广泛、清洁无污染、安全性可控等特点,成为交通运输业当前及未来发展的重要清洁能源载体^[4-5]。而氢能相关技术在交通领域的应用,历来是氢能产业发展的核心与重点。发展氢能交通,构建清洁、安全、高效的现代交通体系,将为中国交通领域实现脱碳化发展提供有力支撑。

当前中国已形成了以政策导向为指引、以氢燃料电池车的产业化为核心、相关装备研发及基础设施建设为重要布局的初步氢能交通体系。然而,氢能交通涵盖公路交通、轨道交通、船舶及航空等各个领域,因此全面分析当前中国氢能交通的现状,辨析面临的挑战及发展的机遇,不仅有利于深入理解中国氢能交通体系的特征,也将对未来氢能交通的发展提供有益借鉴。

1 氢能地面交通

在交通运输部门中,地面交通领域是其最大碳排放源,地面交通包括公路交通、轨道交通等,因此实现地面交通领域的减碳就是氢能交通的最重要的任务,这既包括氢能交通载具的开发也包括相关基础设施的建设,同时也需要配套的政策和财政支持。

1.1 氢燃料电池车

1.1.1 国际及国内发展现状

新能源车的发展主要有2个方向:纯电动车与氢燃料电池车。与纯电动车相比,氢燃料电池车具有低温下性能稳定、续航里程长、启动速度快、充电/充氢时间短等优势,这些优势使其更适合运用于重载卡车、运输车、港口叉车、铲车及商务车等领域。世界主要发达国家对于氢燃料电池汽车的发展现状和规划^[6-7]如表1所示。

中国燃料电池汽车已进入商业化初期。2016—2021年,中国氢燃料电池汽车保有量逐年上升,受新冠肺炎疫情影响,2020年销量有所下滑。2022年全年,中国氢燃料电池汽车产量3626辆,销量3367辆,总保有量达到12306辆,我国氢燃料电池汽车正逐渐被市场认可接纳^[8]。2021年8月,财政部、工业和信息化部、科技部、国家发展改革委、国家能源局等五部委联合发布《关于启动燃料电池汽车示范应用工作的通知》^[9],同意北京、上海和广东报送的城市群启动实施燃料电池汽车示范应用。2021年12月,河南和河北燃料电池汽车示范城市群相继获批,全国形成了“3+2”燃料电池汽车示范格局。与日本、韩国不同的是,目前我国燃料电池汽车产业以商用车为主,乘用车为辅。优先发展商

表1 部分国家和地区的氢燃料电池车发展现状与规划

国家或地区	发展现状	目标和规划
美国	截至2020年6月,美国氢燃料电池乘用车(含租赁)达8413辆,叉车超30000辆。目前加氢站数量次于日本和德国。	2025年580座加氢站;氢能源汽车30万辆,2030年预计建成1000座加氢站
欧盟	欧洲先后出台了《欧洲氢能路线图》、《欧洲氢能战略》等一系列战略,目前德国有约100座加氢站,其余国家合计约79座	德国预计到2025年加氢站达到400座;法国规划到2028年,加氢站规模在400~1000座,轻型商用车2~5万辆,重型800~2000辆;荷兰计划到2025年建成50座加氢站并投放1.5万辆氢能源燃料电池汽车
日本	截至2019年底,日本共有139座加氢站,超3500辆氢燃料电池乘用车,计划于2025年投入使用320座加氢站,以及20万辆燃料电池乘用车	2030年建成加氢站900座,燃料电池乘用车80万辆;氢燃料电池轿车累计产量8.1万量,1200辆燃料电池巴士,10000辆燃料电池叉车,未来实现加氢站取代加气站,氢能源汽车取代传统燃油车
韩国	2019年,现代NEXO氢燃料乘用车售出4987辆,超过丰田Mirai居世界第1	预计到2040年达到620万辆氢能源车和1200座加氢站,4万辆氢燃料电池巴士、8万辆氢燃料电池出租车,3万辆氢燃料电池卡车

用车的原因在于以下3点。第一,客车、物流车等商用车通常有固定的行驶线路,方便加氢站等基础设施的建设。第二,根据中国现阶段的补贴标准,商用车的补贴售价相比乘用车的补贴售价更显经济性。第三,由于中国在燃料电池关键技术研发方面不及世界发达国家,而燃料电池商用车的技术要求较乘用车低,更易研发并实现量产,因此,现阶段发展燃料电池商用车更符合中国国情,未来将随着关键技术的突破、相关基础设施的完善而逐步向乘用车领域前进。

1.1.2 面临的挑战与机遇

1) 国际、国内性能对比。

在过去20多年,国际、国内的车用燃料电池技术取得了长足进展,若选取电堆功率密度、发动机成本、效率、低温启动性能、可靠性、耐久性等产业发展现状的关键指标,可得中外燃料电池车性能对比如图1所示。

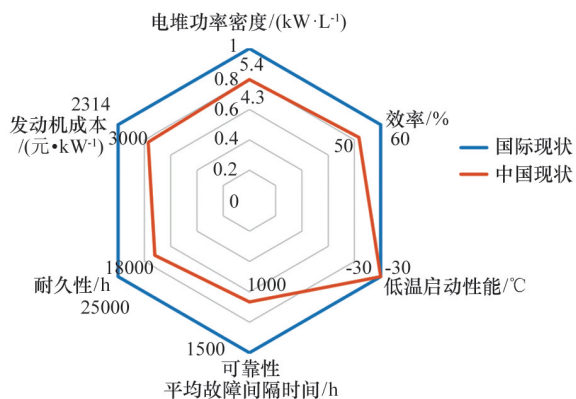


图1 国际国内氢燃料电池车性能对比示意
(根据现有文献数据收集绘制)

图1表明,中国在燃料电池系统的性能、成本、寿命和可靠性指标方面距离国际商业化先进水平仍有差距,但部分指标已接近或达到国际先进水平。需要特别说明的是,图1中所述发动机成本数据,其中中国现状中所引用的数据是当前国内氢燃料电池车发动机的实际成本数据,而国际现状中所引用的数据为美国能源部设定的氢燃料电池重卡在每年生产1000套装置情况下的成本预测数据^[10]。从现在的发展趋势看,中国有望在2025年

将氢燃料电池车发动机成本降至国际先进水平,而未除需要大幅度降低燃料电池发动机成本外,还需要降低氢气成本和车辆生产及运营成本,并注重提升耐久性和可靠性,未来市场化需要的产品首要指标是高性价比。

2) 拥有的机遇。

由于中国处于城镇化和工业化的中后期阶段,在基础设施建设、工业生产、公路货物运输、码头货物运输等领域对重型卡车有大量需求,致使中国拥有世界上最大的重卡市场,重卡保有率和产量均位居世界第一。而燃油重卡尾气排放严重超标,与碳达峰、碳中和目标相悖,因此各车企现正积极布局燃料电池重卡产业,已有部分燃料电池重卡投入运营。日后我国燃料电池重卡保有量有望达到重卡总保有量的50%以上,届时产业规模将达到万亿级别。相较于传统重型载货车,燃料电池重型载货车动力系统功率至少需达到300 kW,寿命达30000 h,系统驱动效率达60%以上,车辆续航里程不低于1000 km,才能满足大范围商业化应用需求^[11]。为提升氢气储量、满足车辆长续航需求,需重点攻克储氢压力等级提升、先进储氢方案开发、整车储氢系统布局优化等技术,并推动产业链建设降低氢能重型载货车全生命周期成本。目前中国正致力于氢能及燃料电池的核心技术攻关及产业化建设工作,预计燃料电池重型载货车会在未来5~10年内实现商业化运营,逐步替代传统燃油车市场。

另外,氢燃料电池叉车、铲车由于具有工作范围小、路线固定、不需要建设太多加氢站等特点,被认为是叉车的重要转型方向。美国已有大量燃料电池叉车投入使用,但中国仍处于入门阶段。现已有多家车企看到了燃料电池叉车的潜力,开始投入研发,且燃料电池叉车对技术的要求不及其他车型,国产燃料电池叉车问世指日可待,普及后也将达百亿规模^[12]。

1.2 氢内燃机车

氢能汽车的另一条技术路线是氢内燃机车,以内燃机燃烧氢气提供动力。宝马是世界上第1家推出氢动力汽车的汽车制造商,已成功完成了系列开发过程。Hydrogen7采用191 kW/260 hp 6.0L

V12的6.0 LV12发动机,最大功率191 kW、最大扭矩390 N·m,9.5 s内速度可提升至0~100 km/h,最高车速限制在230 km/h^[13]。近年来,中国许多科研机构和企业,如北京理工大学、北京航天试验技术研究所、长安汽车、中国北方发动机研究所等,也对氢内燃机进行了研发^[14]。进入2023年后,广州汽车集团股份有限公司、潍柴控股集团有限公司、中国第一汽车集团有限公司、中国第二汽车集团有限公司等企业的氢内燃机汽车样机相继问世^[15]。由于其价格比氢燃料电池车便宜,仅为氢燃料电池车的1/3,解决了氢能汽车成本高的痛点。与氢燃料电池车相比,氢内燃机车对环境适应性较强,可应用于环境苛刻、地理形貌复杂的场景。而且氢气内燃机对氢气的纯度要求低,没有氢燃料电池车对氢气所含杂质含量(如CO、H₂S)的严苛要求。同时,氢内燃机汽车可基于成熟的发动机技术进行开发,具有可靠性高、耐久性好、功率密度大的优点。相关研究表明^[16],除成本优势外,氢内燃机比传统内燃机在节能减排、输出功率等方面具有更加优异的综合性能。虽然氢内燃机汽车还未做到100%零排放,但是也可先使用起来,推动氢能汽车的发展。

若氢气燃烧不能得到有效控制,那么氢内燃机中的过热点和润滑油等燃烧残渣处会产生难以预测的点火,导致急剧发热反应和异常燃烧,这也是氢内燃机面临的最主要的难点^[17]。缸内直喷氢内燃机可有效抑制回火,并显著提高功率密度,是氢内燃机近阶段的发展热点,引发了国内外汽车企业和研究机构的高度关注^[18],给氢能汽车的发展提供了新的思路和发展方向。但同时,相比于氢燃料电池,氢内燃机也具有体积大、能源效率低、易发生早燃、爆燃及材料氢脆等问题。而且由于缸内混合气分布不均匀、燃烧温度高等原因,直喷氢内燃机的NO_x排放水平很高^[19]。因此,未来氢内燃机的发展重点在于探索降低直喷氢内燃机NO_x排放的控制方法、提高能源效率、寻找新材料和开发新工艺方面。另外将氢内燃机与氢燃料电池构成“氢-氢”混合动力,以及“氢-锂”混合动力,发挥各自的优势,发展新一代氢能混合动力车也是未来发展的一个重要方向。

1.3 加氢站

加氢站是重要的氢能基础设施,大规模的加氢站建设和广泛布局是氢能汽车能够推广的前提。而加氢站的构成及其相关核心技术的进步,对中国氢能交通的发展至关重要,是氢能产业链的核心环节之一。

1.3.1 加氢站形式

加氢站主要包括外供氢高压氢气加氢站、外供液氢加氢站以及站内制氢加氢站3种形式。加氢站从组成上主要包含制氢系统(适用于有内制氢能力的加氢站)、纯化系统(站内制氢加氢站中用于纯化站内制备的氢气)、压缩系统、储氢系统、加氢系统、安全监控、电气设备以及其他机械设备(包括管道、配件、阀门等)。根据霍天晴等^[20]的研究,当可再生资源发电成本降至0.15~0.32元/(kW·h)时,整体氢气终端成本价格可控在35元/kg H₂以下。根据现有文献,得出3类加氢站的平均加氢成本价格如图2所示。

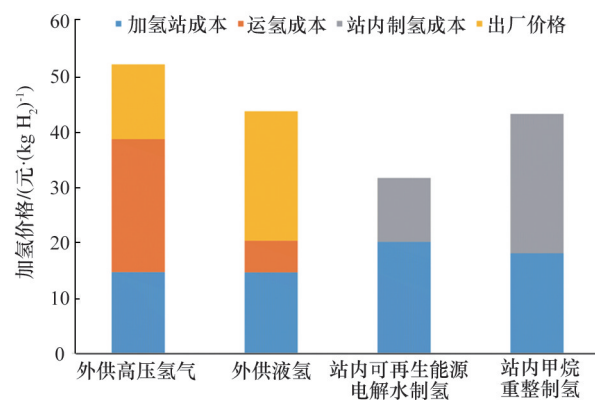


图2 3类加氢站加氢成本价格对比

由图2可知,站内可再生能源电解水制氢的加氢价格最低。这是因为站内电解水制氢加氢站由于具备制氢能力,与外供氢加氢站相比,省去了将氢气由制氢厂运至加氢站的运输费用,当可再生资源发电的成本下降后,其加氢价格具有优势。

全球已建成的加氢站中,以70 MPa外供高压气态加氢站为主,液氢加氢站主要分布在美国、德国和日本,据不完全统计,占比不到5%,站内制氢加氢占比约15%^[21]。我国加氢站以35 MPa外供高压加氢站为主,占比高达88%^[22],其主要为油、气、

电、氢的复合型加氢站。建成的加氢站中有 17 座为制加氢一体站,其中有 16 座是水电解制氢加氢一体站^[23-24]。另有一座采用的是天然气站内制氢-加氢的技术路线,座落于佛山。

考虑到加氢站用地成本和便利性等问题,将加氢站与现有的加油、加气站结合起来,形成综合性能源补给站就是未来加氢站建设的主要模式。由于站内制氢加氢站可以免去氢储运的难题,且可以就近利用可再生能源,加氢价格低,极具发展潜力,

未来将成为中国加氢站建设的模式之一。而外供液氢加氢站,适用于与绿氢制造基地较远且用量大的场合,可成为我国东部地区加氢站建设的选项之一。因此,未来应推动站内可再生能源电解水制氢、以及输氢、加氢“子母站”等类型的加氢站建设。

1.3.2 加氢站布局

截至 2023 年 6 月,国内共建成加氢站 385 座,剔除已拆除临时加氢站,目前运行加氢站数量为 351 座^[25]。具体分布如图 3 所示。

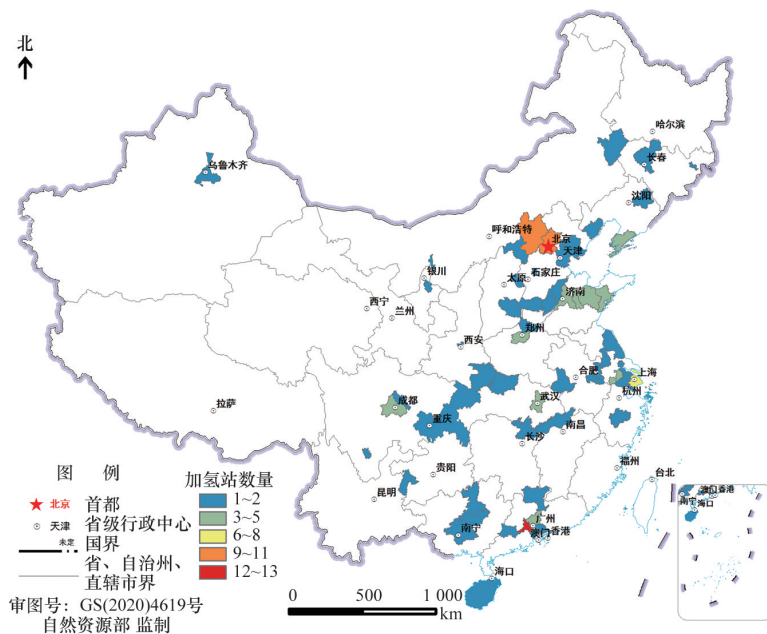


图 3 加氢站运营站点分布示意

由图 3 可知,加氢站分布广泛,这体现了中国各地对于发展氢能产业,建设加氢站的热潮未退。同时,加氢站数量较多的地区依然集中在中国燃料电池车城市示范群建设的地区,这反映了国家政策和定位对加氢站建设的促进作用依然十分重要,尽管中国加氢站建设取得了长足进步,但加氢站在全国范围内并未连接成网,这将成为氢燃料电池车推广的阻碍。未来可考虑建设氢能高速公路,利用有限数量的加氢站,借助高速公路运输系统,发挥超强的氢能运输效应。

根据中国各地出台的氢能产业规划或政策可知,我国加氢站主要布局在“工业园”“产业园”“科技园”等园区。在加氢站的空间布局方法和模型方面,项寅^[26]构建了双层规划模型,并结合长三角交

通网络进行仿真。Zhou 等^[27]构建了基于地理信息大数据的选址优化模型,为山东加氢站的建设提供了参考。Sun 等^[28]提出基于多目标定位模型来确定加氢站的最佳位置。复合式加氢能源站的布局,需要考虑地理、经济、社会、技术等多种因素的影响,满足交通便利性与安全性,以加氢站服务半径、氢源地以及输氢距离为判断标准对合建站具体位置进行分析。因此,加氢站的选址模型的适用性应根据加氢设施的空间维度、规划区域特点以及数量来决定,并考虑当地的人口、产业、城市建设规模等因素才能更好地提供解决方案。

1.3.3 加氢站核心装备

压缩机、储氢罐与加氢枪是加氢站 3 大核心装备。在压缩机方面,国内加氢站以隔膜压缩机为

主^[29],同时液驱压缩机也在逐步推广。在储氢罐方面,以35 MPa固定式储氢瓶为主。在加氢枪方面,以35 MPa加氢枪为主,70 MPa的加氢枪也有产品推出。不同装备的国内主要厂商如表2所示。

表2 加氢站主要装备供应商

主要装备	主要厂商	产品
压缩机	中鼎恒盛气体设备(芜湖)股份有限公司	隔膜式氢压缩机
	四川大川压缩机有限责任公司	90 MPa 液驱式氢压缩机
储氢瓶	浙江巨化股份有限公司	55~1500 mm 等多直径序列固定式高压储氢瓶
	浙江蓝能科技有限公司	35 MPa 加氢站用储氢瓶
加氢枪	液空厚普氢能装备有限公司	35 MPa 加氢枪与 70 MPa 加氢枪

1.3.4 加氢站建设面临的问题

进入2023年后,中国加氢站建设并未明显增速,大部分地区建设的速度滞后于地区原有规划,究其原因主要在如下2个方面。

- 1) 加氢站建设落地流程繁杂,取证困难。
国内加氢站建设需要经历立项、用地申请、审

评建设、竣工验收和取证经营5个阶段。在竣工验收前需要包括各地区住建、国土、规划、环保、发改、市监以及质检等10多个政府职能部门的审批及审查。冗长的审批流程导致加氢站建设时间大部分消耗在审查方面,在此过程中,经常会因为安全、用地等问题导致建设计划不能落地。在加氢站建成后,还需取得《危险品化学经营许可证》和《气瓶充装许可证》。许多地区由于氢气管理的职能划分不清,且由于氢气的危险化学品属性,导致出现“不敢发证”的现象。

- 2) 实际应用的氢燃料电池车规模不够。

前文已述及,截至2022年底,中国氢燃料电池车保有量为12306辆,现有氢燃料电池车的保有量难以维持加氢站的正常运营,致使大部分加氢站运营负荷过低,进而导致氢气加注成本远高于预期,而过高的氢气加注和运营成本导致了加氢站建设速度的放缓。

加氢站和氢燃料电池车是互为支持的2个方面,氢燃料电池车和加氢站的推广需要系统规划、协调发展,在相互促进的过程中,取得共同进步。

1.3.5 未来发展趋势

根据各省规划的加氢站数量统计,至2030年,中国的加氢站建设数量与分布如图4所示。

如图4所示,按照现有规划,到2030年时,中国

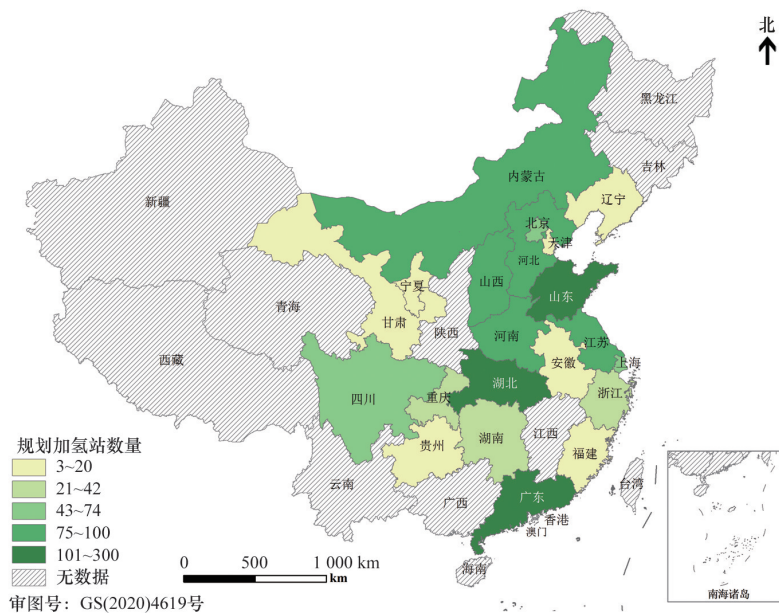


图4 2030年加氢站数量分布示意

加氢站数量将超过1000座,且主要集中在我国燃料电池汽车示范应用城市群建设的地区。事实上,按照现在我国氢能产业的发展速度和发展趋势,到2030年时,将初步形成较为完整的覆盖全国的加氢网络。

由于我国拥有更低的人力成本及建筑成本,使得我国在加氢站关键系统建设成本上较其他国家具有一定优势。但是未来加氢站成本降低的关键还是在于生产规模的扩大和核心技术的进步,因此加速发展氢能应用产业,扩大应用范围,形成上下一体的完整产业链及标准化部件体系就是加氢站发展的重要方面。

1.4 氢能轨道交通

随着中国经济发展和城市化进程的加快,对市内及城际间轨道交通的需求越来越迫切。大力发展地铁、轻轨、有轨电车及市域动车组等城市轨道交通成为推动城市化进程、改善城市交通现状的有力措施。然而,轨道交通也属于高能耗领域,由此带来的直接及间接CO₂排放问题依旧不容小视。

氢能轨道交通因其具备的清洁污染的特性,拥有十分广阔的发展前景,已经成为新能源轨道车辆的发展趋势。氢能轨道交通包括氢燃料电池有轨电车、城市轻轨、城际动车组等,除环保优势外,氢燃料电池列车还具有续航里程长、建设周期短、不依赖于复杂的地面供电系统和弓网系统等优点,十分适合于非电气化线路运营领域。

国际上,日本、美国、德国、法国等高速铁路发达国家在大功率燃料电池轨道车辆技术方面处于领先地位。2020年5月,法国阿尔斯通宣布正式完成了2列Coradia iLint型氢燃料电池动车组试运行,其在满载燃料时可连续行驶600~800 km,最高速度可达140 km/h,最多可运送300人,该动车组于2018年9月起在德国Elbe—Weser铁路运输公司进行客运服务试运行,试运行里程超过18万km^[30]。我国一直重视对于氢能轨道车辆技术的研发,近年来我国在氢能轨道车辆方面的研发和项目示范如表3所示。

表3 中国氢燃料电池轨道车辆研发与示范情况

时间	项目名称	研发单位	项目特点
2013年1月	第一列燃料电池机车示范	西南交通大学	采用150 kW 燃料电池作为牵引动力,2台120 kW 永磁同步电机作为牵引电机。车体长13.5 m、高3.5 m,设计速度65 km/h,持续牵引力20 kN,牵引重量200 t,装满氢气可连续运行24 h ^[31]
2015年3月	世界首列氢能源有轨电车下线	南车青岛四方机车车辆股份有限公司	可持续行驶100 km,最高运行速度可达70 km/h ^[32] 。
2016年	世界首列商用型燃料电池和超级电容混合动力有轨电车下线	中车唐山公司,西南交通大学	采用100%低地板,车载氢燃料电池能量密度高,整个反应过程最高温度不超过100℃ ^[33]
2019年11月	全球首条商业运营的氢能源有轨电车在佛山高明启动上线运营	中车青岛四方机车车辆股份有限公司	首期工程全长6.57 km,共设置车站10座,最高运行时速为70 km。全线为地面线,平均站间距640 m。设停车场1座,配套加氢站1座 ^[34]
2021年2月	首台氢燃料电池混合动力机车成功下线	西南交通大学,中车大同电力机车有限公司	设计时速为80 km/h,满载氢气可单机连续运行24.5 h,平直道最大牵引载重超过5000 t,在不用改变任何铁路基础线路的条件下,可在各类机务段、车辆段、编组站以及大型工厂、矿山、港口等场所执行运转、调车、救援等多用途任务 ^[35]

表3 中国氢燃料电池轨道车辆研发与示范情况(续)

时间	项目名称	研发单位	项目特点
2021年9月	国内最大功率氢燃料电池混合动力机车完成牵引等系列性能试验	中国中车集团有限公司, 同济大学	研制的氢燃料电池系统最高效率达55%, 功率密度大于等于3500 W/L, 为国内最早且具有自主知识产权的400 kW氢燃料电池系统, 相关技术指标达到世界先进水平 ^[36]
2022年12月	全球首列氢能源市域列车在位于成都新津的成都中车长客生产基地下线。	中车长春轨道客车股份有限公司, 成都轨道交通集团有限公司	采用“复兴号”关键核心技术, 4辆编组, 最高速度160 km/h, 内置“氢能动力”系统, 将为车辆运用提供强劲持久的动力源, 可实现600 km超长续航 ^[37]

需注意的是, 轨道交通用的质子交换膜燃料电池(PEMFC)系统需求功率大(百千瓦甚至兆瓦级), 单堆系统无法满足要求, 需要采用几个甚至多达几十个电堆系统构成复杂的多堆混合动力系统, 以充分发挥其具备的输出功率大、可靠性强、冗余度高、灵活可靠等优点。这也正是氢能轨道交通发展的核心技术所在^[38-39]。中国在这方面做了长期探索, 取得了很大突破^[40], 未来将加快相关技术的项目示范和产业化, 并在燃料电池市域动车组、有轨电车、山地旅游车、站场调车、工程作业车等轨道交通领域进行推广。

目前中国已规划建设有轨电车线路总长超过1200 km, 运营、在建、规划、拟建市域铁路线路里程超过10000 km, 可预见未来“氢-电”协同的现代轨道交通系统将成为中国轨道交通的主体, 且氢能轨道交通可以与电力轨道发挥互补作用, 为共同构建现代化轨道交通系统提供可行选项, 并为交通

领域的双碳目标的实现提供坚强支撑。

2 氢能水面及水下船舶

2.1 国际氢能船舶发展现状

全球船舶行业每年的碳排放量为11.2亿t以上, 约占世界CO₂排放总量的4.5%, 而且仍处于继续增加的趋势^[41]。船舶行业减碳是交通领域低碳化的重要方面, 近年来, 研究清洁、高效、可持续发展的新能源动力推进技术已经成为绿色船舶的重要发展方向, 而将零排放的氢燃料电池技术应用于船舶, 则被普遍视为一种有效的解决方案。多年来, 美国、英国、德国、韩国、日本等多国一直都将燃料电池作为一种船舶技术储备在不断地发展, 但主要应用于军事领域, 如潜艇、军舰等。近年来, 各国逐渐将氢燃料电池技术应用在民用船舶上。部分国家的相关项目如表4所示。

表4 部分国家氢燃料电池船舶示范项目

时间	项目	内容	承担企业
2018年	世界上第一艘自动航行氢动力船Energy Observer	使用太阳能、风能和波浪发电, 并且可以通过海水产生无碳氢作为动力。3年巡航距离约18000海里(1海里=1.852 km)	日本丰田汽车公司
2018年	测试燃料电池作为主要船舶推进能源的可行性	为商船和客船所需的电力提供燃料电池技术	阿西布朗勃法瑞公司(ABB)和挪威独立研究机构Sintef Ocean
2019年	乌斯坦SX190 DP2零排放氢动力船	总装机功率为7.5 MW, 其中2 MW由燃料电池动力系统产生, 能够在零碳排放模式下运行4 d	挪威乌斯坦公司和Nedstack燃料电池技术公司
2019年	开发零排放燃料电池系统的设计和技术规范	将基于几个特制的200 kW燃料电池系统模块并行连接, 总功率为3.2 MW	瑞典PowerCell公司与挪威Havyard Group

表4 部分国家氢燃料电池船舶示范项目(续)

时间	项目	内容	承担企业
2019年	全球首艘液态氢运输船“SUISO FRONTIER”	该船全长116 m、宽19 m、重约8000 t, 可以存储1250 m ³ 的液态氢	川崎重工业株式会社
2019年	移动氢燃料电池系统	单位输出功率体积与固定式燃料电池系统体积相比减少了1/3, 总功率30 kW	日本东芝公司
2020年	世界上第1艘零排放补给船	2023年将在“维京能源”上安装总功率为2 MW的燃料电池模块, 该船将在海上使用新能源系统运行1年	瓦锡兰集团, Eidesvik Offshore、Equinor, Prototech 和 ShipFC
2020年	开发以氢燃料电池为动力的船舶	2022年向客户推销一艘氢燃料电池船舶	三星重工布鲁姆能源公司
2021年	开发纯氢燃料电池标准组件“H2Rex”-Mov系统	200kW级, 该系统将比已经在开发和商业化的轿车和公交车系统具有更高的耐用性, 2024年末完成	日本东芝能源系统与解决方案公司(东芝ESS)
2021年	C-H ₂ 项目	采用新型氢燃料电池动力船舶, 用于运输高压气氢	巴拉德公司, Global Energy Ventures

从国际现有的氢能船舶技术发展态势而言, 日本车用燃料电池技术领先世界, 拥有较好的质子交换膜燃料电池基础, 但船用燃料电池推广速度较慢。欧洲各国对船用燃料电池的支持力度最大, 具有多年船用燃料电池工程开发经验和示范项目, 相关技术国际领先, 其中德国技术最为突出。

目前应用最为广泛的3种船用燃料电池分别为质子交换膜燃料电池(PEMFC)、熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)和固体氧化物燃料电池(SOFC)。其中质子交换膜燃料电池最佳输出功率范围一般在300

kW以下, 如果运用于远洋航轮, 则功率更大的固体氧化物燃料电池和熔融碳酸盐燃料电池是更好的选择, 它们具有更高的运行温度, 一般在600~700℃, 故而可以提供高品质热量, 不仅可以满足远距离航海时乘员的热需求, 还可以结合燃气轮机等功能设备进一步提升燃料的综合利用效率^[42]。

2.2 中国氢能船舶发展情况

中国的燃料电池船舶研究起步较晚, 近年来, 在动力系统认证和整船方面同时发展迎来实质性的突破。代表性的项目如表5所示。

表5 国内氢能船舶开发项目

时间	项目	内容	开发单位
2021年1月	TWZFCSZ系列燃料电池系统	获得由中国船级社颁发的中国首张船用燃料电池产品型式认可证书	武汉众宇动力
2021年2月	“蠡湖”号燃料电池游艇	70 kW氢燃料电池电堆和86 kW·h的锂电池组成混合动力	大连海事大学, 中国科学院大连化学物理研究所
2021年3月	氢能源船舶项目	开发适用于旅游业的氢能船舶项目	广东喜玛拉雅氢能科技有限公司、桂林旅游股份有限公司, 广西新能源船舶电池工程技术研究中心
2021年5月	首艘氢能源船舶“仙湖1号”在佛山南海下水	游船采用30 kW氢燃料电堆, 续航可达10 h以上, 具有高环保性、高舒适性和低能耗、低噪声的显著特点	广东中氢博创产业发展有限公司
2021年6月	大功率船用燃料电池模组	在中国推出200 kW FCwave™船用燃料电池模组	巴拉德动力

表5 国内氢能船舶开发项目(续)

时间	项目	内容	开发单位
2021年8月	氢-电混合动力船	一艘500 kW额定输出功率氢燃料电池为主并辅以磷酸铁锂电池动力的双体交通船,主要用于三峡库区及两坝间交通、库区巡查、应急等工作	中国长江三峡集团有限公司
2021年10月	氢燃料电池船产学研合作	开展氢燃料电池动力船舶的技术研究、标准制定、检验检测、产品定型、市场推广等方面的合作	未势能源科技有限公司,大连海事大学
2021年10月	首家氢能船艇动力系统公司ExploMar获得资助	首艘搭载自主研发氢能动力系统的60尺游艇将于2022年初投放市场	北京险峰长青投资咨询有限公司,擎波探索(上海)能源科技有限公司
2022年11月	“三峡氢舟1号”成功合拢	采用氢燃料电池和锂电池动力系统,氢燃料电池额定输出功率500 kW,最高航速达到28 km/h,巡航航速20 km/h时的续航里程可达200 km	江龙船艇科技股份有限公司,中国长江电力股份有限公司
2022年12月	颁发首张船舶氢燃料电池领域试验机构认可证书	中国船级社向中汽研新能源汽车检验中心(天津)有限公司颁发国内首张船用氢燃料电池及发电系统检测和试验机构认可证书	中国船级社
2023年2月	国内首艘氢电双动力商用船在江西九江开建	设计总长23.65 m、型宽5.5 m,设计航速25 km/h,采用国电投氢燃料电池和锂电池组双动力系统推进方案	九江湖心科技产业发展有限公司,江西庐山山西海国资旅游发展有限公司

2.3 未来发展趋势

从技术层面来看,相对于纯电动船舶,氢燃料电池船舶3大优势:氢燃料电池性能稳定可靠;可快速加氢,适用于长途运输;可在现有码头建设覆盖制氢、储氢、加氢的氢能供应体系,便于码头加氢。纯电动船舶和氢燃料电池船舶这2条技术路线在船舶应用的起点差距不大,各有适用的场景:纯电动船舶一般适用于短途、轻量运输、小型游船等领域。氢燃料电池船舶一般适用于长途运输、货物运输、大型商务及公务船舶等领域。在“双碳目标”下,氢燃料电池船舶和纯电动船舶的示范应用和产业化进程速度将会加快,并有望在5~8年内实现产业化。

发展以氢基燃料(如绿色甲醇、合成氨)为动力的氢能船舶(燃料电池或内燃机)是另一条技术路线,该技术路线可避免氢储运带来的难题,可成为

未来清洁动力船舶的技术选择之一。

在政策方面,自2019年以来,有3个国家级政策中提到氢燃料电池船舶^[43-45],而在省市级政策中,有12个地方出台政策明确提出要发展氢燃料电池船舶,其中广东省出台的政策最多,分别为广州、茂名、佛山,在各自的氢能产业规划中都有明确提出推广应用和发展氢燃料电池船舶,这也与广东省氢能产业发展基础相关。

中国是造船大国,航运交通大国,也是船舶污染大国。在“双碳目标”下,应加大支持氢能船舶的推广力度,同时应注意氢能车辆和氢能船舶的同步发展具有产业协同效应,既可以实现节能航运行业减排和产业转型升级的目标,也可以倒逼中国企业打造出全球最大的氢能船舶市场,成为未来中国低碳社会发展的新经济增长点之一,具有广阔的前景。

3 氢能航空

3.1 氢能航空基本技术路线

目前,全球航空业产生的CO₂排放量占全球温室气体排放总量的2.1%,而且客机在大气对流层直接排放污染物和温室气体将加剧全球温室效应。据国际民航组织(ICAO)的预测,基于现有传统航空技术的进步,航空业可持续发展以及2050年碳排放量减少至2005年50%的目标将无法实现^[46]。中国民航运输业目前还属于发展阶段,据预测到2030年将会超过美国成为全球最大的民航运输市场。在实现2020年全球航空业碳排放零增长的情境下,中国航空业的碳排放将占国际航空业可排放总量的17%,而中国的减排需求量约占国际航空总减排需求量的22%^[47],中国航空业面临越来越大的减排压力,因此,探索航空业的减排路径就成为越来越紧迫的课题。现在主要有3种方案替代传统航空燃油:纯电动飞机、氢能飞机、使用可持续航空燃料(sustainable aviation fuel, SAF)。当前SAF是氢能航空发展研究的热点。相对于其他2种方案,氢能飞机由于具有航程远、零碳等优势而备受关注。目前,氢能飞机有条技术路线,分别为氢气涡轮机路线与氢燃料电池路线^[48],其原理如图5所示。

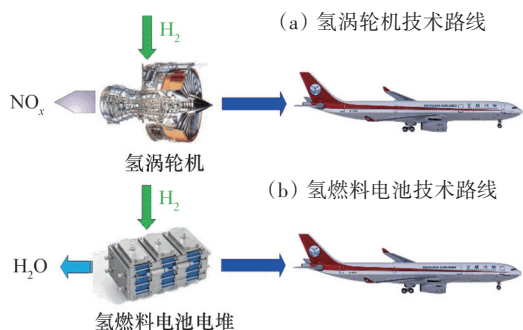


图5 氢能飞机基本技术路线

如图5所示,氢涡轮机技术路线中,氢燃料在燃烧室内燃烧,然后推动涡轮产生动力;氢燃料电池技术路线中,氢在燃料电池中通过电化学反应直接产生电并排出水,电动机带动风扇产生推力。这2种技术路线各有优势,对比如表6所示。

表6 氢能飞机技术路线对比

项目	氢涡轮机飞机	氢燃料电池飞机
动力	氢在涡轮机内燃烧产生推力	氢燃料电池提供电力
效率	40%	45%以上
难点	现有涡轮机改造及储氢	高效率电堆开发
优势	大功率、零碳,可在传统涡轮机技术上改进	零碳、零污染,能量利用效率高
劣势	改进现役飞机结构设计以适应液氢燃料储存,同时能量利用效率略低	功率密度低,对飞机结构改进要求高
环境影响	无CO ₂ 排放,但有NO _x 排放	无CO ₂ 及其他污染物排放
适用领域	远途客机、大型客机、货运飞机	无人机与支线客机

3.2 国际氢能航空现状

国际上对氢能飞机的关注持续了多年,许多著名的飞机制造企业如空客、波音等的都对氢能飞机进行了长期的研究,并取得了很多成果。早期氢能飞机的研发主要集中在氢涡轮机技术方面,近年来随着燃料电池技术的进步,关注的重点开始转向氢燃料电池飞机的研发和应用,国际上氢能飞机发展的典型案例如表7所示。

3.3 国内氢能航空发展情况

中国氢能飞机的研发主要集中在氢燃料电池无人机领域,与锂电比较,氢燃料电池无人机具有能量密度高、飞行时间长、耐低温、长寿命、低维护等多项优势。中国相关代表性的项目如表8所示。

3.4 氢能航空面临的挑战

从应用的角度而言,氢能飞机面临许多挑战,主要集中在4个方面。

1) 飞机总体结构设计需要大幅度调整。

由于氢气的密度远远小于航空燃油,因此,氢能飞机的整体结构设计必须考虑不同储氢方式带来的影响,而精准的燃料流量计量对动力系统的控制至关重要。如果是气态氢气,燃料箱内的压力会推动氢气进入发动机,这就会变成一个气态氢流量计量与控制的问题;如果是液氢,则需借助燃料泵来抽取氢气。由于储氢方式的不同,导致技术路线

表7 国际氢能飞机发展近况

时间	开发单位	项目	动力系统	内容
2008年	波音	双座滑翔机	氢燃料电池系统	第1架依靠氢燃料电池实现直线飞行 ^[49]
2009年	德国宇航中心(DLR)	AntaresDLR-H2	氢燃料电池系统	第1架仅靠氢燃料电池为动力起飞的飞机 ^[50]
2016年	DLR的H2Fly分公司	Hy4验证机	氢燃料电池系统	开发模块化的混合电力推进架构 ^[51]
2017年	俄罗斯中央空气流体和动力研究院(TsAGI)	提出CA200的200~230座远程宽体飞机设计方案	液氢+氢涡轮机	将低温燃料箱安装在客舱顶部,机尾安装有高效率的桨扇 ^[52]
2020年	ZeroAvia	PiperM350飞机	氢燃料电池系统	6座飞机,迄今为止最大的氢燃料电池动力飞机 ^[53]
2020年	Universal Hydrogen	冲8-300和ATR 42涡桨支线飞机改装	氢燃料电池系统	2024年投放市场 ^[54]
2020年	空客	公布了3种零排放液氢燃料客机的概念	液氢+氢涡轮机	2种传统概念机,一种新概念机,2035年投入商业应用 ^[55]

表8 中国氢燃料电池无人机代表项目

时间	地点	研发单位	项目信息
2019年	天津	天津飞眼无人机科技有限公司,中国科学院大连化学物理研究所	飞眼科技无人机FY-36L,最大起飞重量≤15 kg,续航时间≤6 h ^[56]
2020年	浙江	上海大学	无人机消毒作业,续航时间2 h ^[56] 。
2020年	北京	新研氢能科技有限公司	不间断飞行331 min,打破世界纪录 ^[57]
2020年	深圳	斗山创新(深圳)有限公司	DT-30多旋翼工业无人机,燃料电池功率2.6 kW,能够防尘、防水 ^[56]
2021年	郑州	中国商用飞机有限责任公司	与氢能大巴“空地联合”,系统额定输出2.5~30.0 kW ^[58]
2021年	温州	国网浙江省电力有限公司温州供电公司,国网浙江电力温州近零碳数智技术实验室	“氢霆”的氢能多旋翼无人机顺利完成对500 kV望南线的通道自主巡检作业,续航时间>2 h ^[59]

也不一样,对飞机的结构设计要求也不同,而相关问题带来的飞机结构设计方案将成为氢能飞机发展的重要挑战。

2) 氢气供给链体系需要完善。

完整、安全的氢气供给体系是保障氢能航空的前提和基础。而机场氢能基础设施主要包括氢气的制备、氢气储运和加注系统。氢气需通过可再生能源制取,而氢燃料与传统石化燃料有很大的不同,如何低成本实现氢燃料的运输和储存,将会直接影响到氢能飞机能否真正投入商业运营^[60]。根

据中国航空业发展现状,小型机场可依靠高压长管拖车的方式进行日常氢气输送,大型枢纽机场需建立氢气管路运输系统,将氢气从附近的可再生能源电解水制氢站运输至机场,而后通过机场专用的液化设备进行液化储存。

3) 动力系统需要改进。

采用氢气涡轮机技术的飞机,必须向高超音速($Ma>6$)、远航程(1万 km 以上)、超高空(3万 km)发展,才能更好地发挥液氢的优势,以替代现在航速较低、飞行时间长、航空煤油消耗量多的大型客机。

对于采用氢燃料电池技术的飞机,现有的氢燃料电池的功率密度较低,初期应用于航空领域的氢燃料电池为车载氢燃料电池的改装版本,其功率密度约为0.75 kW/kg,需提高2~3倍后才适用于航空领域。目前一些氢燃料电池动力系统采用集成锂电池来应对瞬时负载和功率峰值,然而由此也带来了系统总重量增加的问题。因此,氢燃料电池在航空领域上的应用借鉴氢燃料电池汽车的发展经验,并围绕提高功率密度、降低系统材料重量、优化系统集成等方面展开进一步的研究工作。

4) 环境影响问题需要解决。

氢能飞机在运行过程中不产生CO₂排放,然而对于采用氢涡轮机技术的飞机,其排放气体中含有NO_x污染物颗粒,因此,低NO_x排放技术就成为未来氢涡轮机飞机发展的关键。无论是氢涡轮机技术还是氢燃料电池技术,其排放物中都有水,水蒸气在足够低的温度和饱和蒸汽压下排入大气时,会凝结成冰晶云,也称为凝结尾迹。研究表明,凝结尾迹捕获的热量比反射到宇宙空间的热量要多,所以会加剧温室效应^[61]。与氢涡轮发动机相比,由于氢燃料电池内部氢与氧电化学反应环境纯净,极少产生水蒸气凝结核,因此能够大大削弱凝结尾迹的形成,故有更好的环境效益。目前航空业对于传统燃油的凝结尾迹展开了很多的研究,然而对氢气的凝结尾迹还知之甚少,未来需加强相关问题的研究,并提出量化评估结果和解决方案。

氢能为低碳化航空提供了选择,使用氢能可以消除航空业对日益减少的原油资源的依赖,同时也可以消除或大幅度降低航空业所带来的温室效应。但是,氢能航空在应用中所面临的挑战也不容小觑,氢能供应链系统中的每一个环节对于航空领域来说都是新的尝试,需要克服重大的技术、运营和经济方面的困难。氢能航空的发展路径应从当前重点研究SAF掺混比例,逐步过渡到氢能航空。因此,中国应同时对氢涡轮飞机和氢燃料电池飞机技术路线的进行布局,推动核心相关技术研发,并推动航空业氢能基础设施的建设,完善供给体系。同时应加强对于氢能航空领域安全管理标准体系的研究,推动氢能航空产业的深入发展。

4 氢能交通产业面临的整体挑战

从中国氢能交通发展的整体层面而言,面临4方面的挑战。

第一,技术创新核心环节是燃料电池装置,需要实现率先突破。中国车用质子交换膜燃料电池(PEM)系统集成已取得重大突破,部分企业生产的电堆,其体积功率密度等性能指标已达到或超过国际先进水平,但膜电极基础材料技术是进一步发展的瓶颈,需要重点突破。同时,中国现有的氢储运技术是氢能产业链发展的难点,需要有革命性突破,而当前需要根据市场需要选择适合的氢储运技术路线。

第二,当前发展氢能交通的战略价值已获得社会的广泛认可,并由此催生了氢能交通产业的发展浪潮,亟待开发的是氢能交通的商业价值,也即扩大氢能交通的应用市场,其源头是实现绿氢制取的经济性,核心技术在于电解装置技术的突破和进一步优化。另外,中国车用燃料电池系统已进入价格下降的快速通道,但是车载氢瓶价格偏高,发展偏慢。同时氢燃料价格偏高,制约了燃料电池车购置和使用成本的下降速度。

第三,氢燃料电池车是氢能交通应用的先导,而氢能应用正从单一的氢能交通应用向氢能动力、氢原料、氢储能等多元应用场景转变,氢能与风电、光伏结合正在成为新趋势。“双碳目标”下氢能交通的发展需要构建多场景协调发展的路径,注意相关绿色氢能产业链的建设,并制定具有前瞻性的综合性发展策略,并以此推动氢能产业从绿色氢交通向绿色氢能全产业链的转变。但相关领域缺乏系统性的政策研究,无法对各地区出台合理的氢能产业扶持政策提供有效科学支撑,也成为氢能交通发展的另一障碍。

第四,以加氢站为代表的氢能基础设施建设不足。加氢站是氢能交通得以推广的关键基础设施,但正如前文所述,中国加氢站建设面临诸多挑战,未来需要改革加氢站的审批及管理体制,降低加氢站建设及运营成本,并与氢燃料电池车的发展形成互相促进的产业形态。

5 氢能交通展望与政策建议

5.1 关键装备研发与产业化

燃料电池系统是氢燃料电池车的核心部件。按其电解质不同,常用的燃料电池包括质子交换膜

燃料电池(PEMFC)、固体氧化物燃料电池(SOFC)、磷酸燃料电池(PAFC)等。质子交换膜燃料电池是中国商务车普遍采用的燃料电池技术。

燃料电池主要由电堆和系统部件组成,其结构和 workflows 如图6所示。

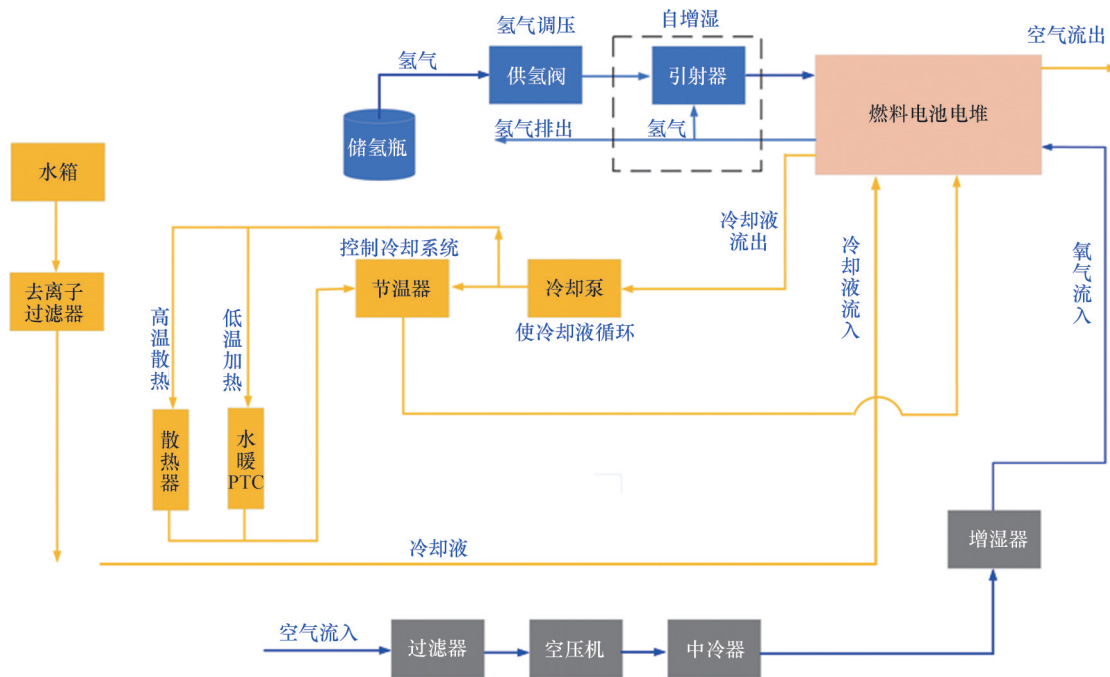


图6 燃料电池系统流程

如图6所示,电堆是整个电池系统的核心,包括由膜电极、双极板构成的各电池单元、以及集流板、端板及密封圈等(图7(a));膜电极的关键材料是质子交换膜(图7(b))、催化剂、气体扩散层;系统部件则包括空压机、增湿器、氢循环泵、储氢瓶等。这些关键部件的性能直接决定了燃料电池系统的使用寿命和工作范围。

部分氟化聚合物膜、新型非氟聚合物膜和复合膜。其中全氟质子交换膜是主流技术,产业化程度较高,东岳氟硅科技集团有限公司等单位已具备产业化能力^[62],国际、国内企业生产的质子交换膜性能对比如表9所示。

目前,国产质子交换膜的价格比进口的低30%~40%,但由于起步晚,氢能行业进入膜电极生产的企业不多,致使当前国内质子交换膜市场依旧依赖进口,且以美国杜邦公司Nafion为主要质子交换膜进口商。因此,推动国内科研院所与企业研发高性能质子交换膜,实现对进口膜在质量、性能等方面的超越,对中国燃料电池产业发展具有重要意义。

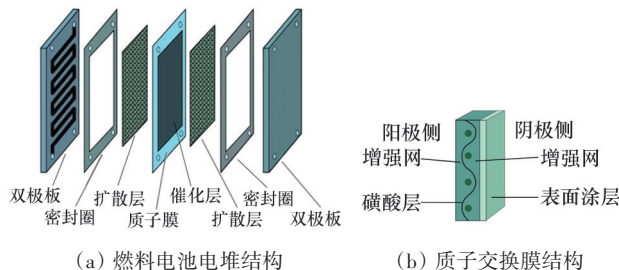


图7 燃料电池核心部件结构示意图

5.1.1 质子交换膜

按照含氟量,质子交换膜可分为全氟磺酸膜、

5.1.2 催化剂

应用于质子交换膜燃料电池的催化剂主要是Pt基催化剂。然而由于金属Pt存在储量低、价格高以及易被CO毒化等问题,使得现在的催化剂重点向低铂化、无铂化和铂合金催化剂方向发展。目

表9 国际、国内质子交换膜性能对比

企业	产品	厚度/ μm	物质当量 EW/(g/mol)	特点
美国杜邦公司	Nafion 系列膜	25~250	1100~1200	化学稳定性强、机械强度高、在高湿度下导电率高、低温下电流密度大、质子传导电阻小,当前市场占有率最高
美国戈尔 GORE 公司	GORE-SELECT 质子交换膜	—	—	增强全氟磺酸膜,技术领先,在丰田 Mira 车型上有应用
美国 3M 公司	PAIF 高温质子交换膜	—	—	工作环境为酸性
日本旭硝子玻璃股份有限公司 (AGC)	Flemion 离子膜	50~120	1000	性能与 Nafion 膜相当
东岳氟硅科技集团有限公司	DF988、DF2801	50~150	800~1200	高性能,适用于高温质子交换膜燃料电池(全氟磺酸膜)

前,燃料电池中常用的商用催化剂是 Pt/C,由 Pt 的纳米颗粒分散到碳粉(如 XC-72)载体上的担载型催化剂。与国外先进技术相比,国内燃料电池催化剂技术整体差距较大,但个别技术可达世界领先。以铂族金属载量为例,国际上已经进展到 0.06 g/kW、0.35 mg/cm²;美国 3M 公司基于超薄层薄膜催化技术研制的 Pt/Ir(Ta)催化剂,已实现在阴极、阳极平均低至 0.09 mg/cm² 的铂用量,催化功率密度达 9.4 kW/g(150 kPa 反应气压)、11.6 kW/g(250 kPa 反应气压)。德国大众汽车集团牵头研制的 PtCo/高表面积碳(HSC)也取得重要进展,催化功率密度、散热能力均超过了美国能源部制定的规划目标值(2016—2020 年)^[60]。国内现在的铂金属载量可达到 0.3 g/kW、0.16 mg/cm²,而清华大学开发的催化剂可实现铂金属载量达到 0.089 g Pt/kW,达到世界一流水平^[61],活性衰减方面,国际上已经实现 3 万次循环后衰减在 5% 以内;国内 3 千次循环后衰减达到 86%。未来对于减少铂基催化剂用量的研发,需要从膜电极材料体系、电极结构、组分与制备方法以及高性能催化剂的生产与回收等方向开展科研与创新。

5.1.3 气体扩散层

气体扩散层由基底层和微孔层组成,主要采用碳纤维纸和碳纤维布,以及石墨纸等为基材层,并在其表面上涂覆微孔层后形成电化学复合材料体

系。气体扩散层成本通常占据燃料电池的 20%~25%,成本构成主要是原材料(碳纤维纸/布)和制造成本 2 大部分。由于碳纸在微孔层、石墨化工中工艺相对复杂,设备投入大,故成本居高不下,而碳纸的制造成本约占总成本的 83.6%。未来碳纸的成本将随着量化生产及生产工艺的优化而降低。现阶段,日本东丽(TORAY)株式会社、美国 AvCarb 公司、德国 SGL 公司等厂商的气体扩散层产品具有领先水平。在中国,深圳市通用氢能科技有限公司、江苏氢电新能源有限公司、安泰科技股份有限公司等企业和技术层面基本可以对标国际先进产品,有望实现产业化。

中国目前膜电极已基本实现国产化,批量化生产的膜电极五合一、七合一组装基本还是基于片状组装工艺,三合一的 CCM 已实现卷对卷狭缝涂布工艺,且产品合格率较高,仍有部分企业制备的三合一催化剂涂层质子膜(catalyst coating membrane, CMM)采用喷涂工艺。同时,膜电极在常规的七合一、五合一组装工艺基础上,也有部分采用注塑工艺,将膜电极与极板一体化密封或通过注塑工艺直接制备单电池,单电池工艺将是未来发展方向。

5.1.4 双极板

双极板属于燃料电池中体积最大、质量最重的部件,且成本超过燃料电池整体成本的 20%。双极板有石墨、金属、复合材料等不同基体材料种类。

目前国内石墨板主要采用静压石墨机加工工艺制备,该工艺制备的极板最薄处厚度最小可达0.4 mm;碳复合板主要采用模压成型工艺或辊压工艺制备,模压工艺制备的极板最薄处厚度可达0.2 mm,并实现双极板厚度 ≤ 1.2 mm。

金属板由于其具备的板厚体积和质量相对较小、电堆功率密度高、延展性能好、易于导电、导热、断裂韧性高等特点,使其成为当前主流产品。国际供应商主要有美国 Graftech 公司、美国步高石墨有限公司、株式会社藤仓、德国德纳股份有限公司等。金属板制备工艺国内主流采用 100 μm 厚不锈钢 316L 卷材冲压成型而后通过镀层加强耐腐蚀性,其厚度普遍可以实现 1.0 mm,另外,碳复合板的发展也逐渐受到重视,金属板与碳复合板的特性对比如表 10 所示。

表 10 碳复合板与金属板特性对比

项目	碳复合板	金属板
寿命	长,是金属板的 3~4 倍	不及碳复合板
功率密度	较低,不及金属板	略高
成本	低	高,但未来下降潜力大
生产效率	低	高

由表 10 可知,金属板、碳复合板各有优劣,随着关键材料核心技术研发的不断推进,未来碳复合板和金属板都将有更多的进步,各自的拥有市场空间,共同成为双极板主流。

5.1.5 氢气循环泵

氢气循环产品主要包括氢气循环泵和氢气引射器,与氢气引射器相比,氢气循环泵在主动可调节、快响应速度和宽工作区间等方面占有一定优势。氢气循环泵通常有离心式、涡旋式、罗茨式、螺杆式等多种结构形式。其质量要求包括:良好的密封性能、低振动噪声、良好的除冰能力、低温冷启动能力、涉氢安全气密性良好、EMC 抗电磁干扰能力强,耐腐蚀性高等。在 2020 年以前,德国厂商普旭公司占据国内氢气循环泵 90% 的份额,近年来,福建雪人股份有限公司、山东东德陶瓷有限公司、苏州瑞驱电动科技有限公司等企业开始生产供应氢气循环泵,市场占比在不断提升。

5.1.6 空压机

空压机是氢燃料电池阴极供气系统的重要部件,约占燃料电池系统成本的 20%,能耗约占燃料电池输出功率的 20%~30%。从空压机类型来看,主要有离心式、螺杆式、罗茨式、涡旋式等。国内销售的空压机以双级增压空气箔片轴承离心空压机为主。目前空压机普遍存在的问题是:压气机效率比较低,噪声比较大,同时空气轴承稳定性不高,高速电机在高速运转的温升会比较高,散热会比较差,效率也较低。国内包括北京航天动力研究所、国家电力投资集团公司等央企在从事空压机相关产品的研发及生产,另外海德韦尔(太仓)能源科技有限公司、河北金士顿科技有限责任公司等也是空压机生产的重要企业。

5.1.7 储氢瓶

目前,高压气态储氢容器主要分为 I 型纯钢制金属瓶、II 型钢制内胆纤维缠绕瓶、III 型铝内胆纤维缠绕瓶和 IV 型塑料内胆纤维缠绕瓶 4 类。国外乘用车已经开始使用质量更轻、成本更低、质量储氢密度更高的 IV 型瓶,而中国 IV 型瓶处于小批量生产示范阶段。铝内胆纤维缠绕 III 型瓶在国内市场占据主流,已开发出 35、70 MPa 2 种容器,其中 70 MPa III 型瓶在乘用车样车上应用。储氢瓶的成本主要集中在外部缠绕用的碳纤维复合材料,对于储氢质量均为 5.6 kg 的 35、70 MPa 高压储氢 IV 型瓶,碳纤维复合材料成本分别占系统总成本的 75% 和 78%。因此,储氢瓶成本下降的关键在于碳纤维成本的下降。有研究表明^[64],目前车载储氢瓶成本在 16~21 美元/(kW·h),而未来目标为 8 美元/(kW·h),仍有超过 50% 的成本下降空间。根据美国国家橡树实验室的分析,在大规模(万吨级)生产条件下,储氢用碳纤维生产成本从原先的 9.88 美元/kg 下降至 7.86 美元/kg,下降幅度约 20%。国际国内的储氢瓶应用情况对比如表 11 所示。

5.2 政策建议

为应对气候变化带来的挑战,进一步落实党的二十大确定的目标任务,中国正在全面加速经济社会的低碳转型,力争如期实现“双碳目标”。为此,中国交通部门也需要以生态文明建设目标为指

表 11 国际储氢瓶应用情况对比

国家	企业	主要产品研发状况
挪威	Hexagon 公司	拥有先进的 IV 型高压储氢瓶技术, 70 MPa IV 型瓶在欧洲已成熟应用在多种车型上
法国	彼欧集团 佛吉亚公司	IV 型瓶重量比同等的 III 型瓶轻 20%~30%, 5 min 内完成加氢, 行程不低于 700 km IV 型产品采用优化的碳纤推结构设计, 减重 15%~20%
德国	NPROXX 公司	碳纤维增强结构可产生出色的强度/刚度与重量比, 使用寿命达 30 年, 是 I、II 型容器预期寿命的 2 倍
日本	丰田公司	掌握能确保罐强度的先进储氢罐生产工艺
韩国	ILJIN 公司	具有出色的储氢效率, 采用具有优异耐热性和抗疲劳性的高科技碳纤维复合材料, 不会出现性能下降的情况
中国	北京天海工业有限公司	IV 型瓶, 产品重量与同规格 III 型瓶相比可降低约 30%
	北京科泰克科技有限责任公司	III 型瓶主要生产企业, 现已开始进行 IV 型瓶的技术布局
	佛吉亚斯林达安全科技(沈阳)有限公司	2021 年 5 月获得国家市场监督管理总局认证的 IV 型瓶制造许可
	中材科技股份有限公司	具备年产 3 万只 III 型瓶制造能力和 70 MPa IV 型瓶的技术储备
	江苏国富氢能技术装备股份有限公司	在 III 型瓶的重量和抗疲劳性能上积累有一定的技术优势, 拥有 70 MPa IV 型瓶技术储备

引,着力推动氢能交通产业的发展,努力在促进疫情后经济绿色复苏、以及人们环境意识日益增强的背景下实现我国交通部门 CO₂ 排放早日达峰。

1) 以低碳交通发展理念为指导,完善氢能交通的整体规划。

国家发改委公布的《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》为中国氢能交通产业的发展制定了顶层设计,而各地区需要结合自身特点,进一步完善整体规划。中国正处于城镇化中后期阶段,未来还有大量的交通基础设施建设需要完成,要在城市规划、城市空间布局和基础设施建设中体现氢能交通的理念,充分考虑氢能交通的基础设施建设需求。为此,必须将氢能交通规划与城市规划紧密结合,从城市长期发展的角度对氢能交通方案进行提前布局,在低碳城市和智慧城市建设中实现氢能交通的可持续发展。

2) 构建全面的氢能交通政策体系,促进氢能交通产业发展。

氢能交通系统受到国家、地方以及行业等多个相关部门政策的影响,需要通过构建综合、全面的氢能交通政策体系,有机衔接各个部门的氢能交

通政策,避免不同部门政策带来的矛盾和空白,确保氢能交通产业政策间的连贯和可操作性,并充分发挥多种政策的协同优势。氢能交通政策的制定既要充分尊重氢能技术的特点和市场导向,也要发挥抑制相关市场机制失灵和引导氢能技术发展方向的作用。这不仅要制定和完善更加详细的标准为氢能交通产业提供规范指导,出台合理的财税政策鼓励氢能交通的发展和相关技术的产业化,而且要优化政策导向,充分发挥氢能公路交通、氢能轨道交通、氢能航运和氢能航空等多种氢能交通方式的联合优势,并对诸如氢能出租车、氢能网约车、氢燃料电池单车等交通出行方式进行规范和引导。

3) 部署氢能高速公路建设,打造覆盖全国的氢能高速公路网。

高速公路具有全封闭、通行能力大、经济效益显著的特点。同时,高速公路还具有完善的现代化交通管理及交通安全设施。因此,利用中国现有的高速公路网络,与现有加油、加气及充电站等基础设施结合起来,建设具有加氢设备的复合型能源站,将促进氢能高速公路的发展。

中国现有的高速公路里程超过 17 万 km,建设

覆盖全国的氢能高速公路网将使得氢能交通的应用场景得到极大的扩展和延伸。中国氢能高速公路的建设,应坚持先地方后全国的发展策略,按照先省内、再省际,最终达到全国的步骤制定发展规划,并及时总结各地发展经验,推动氢能高速公路健康、稳定的发展。

4) 鼓励不同技术路线并行发展,多措并举,推动氢能汽车降本减碳。

可根据场景需求,开发不同功率水平的氢燃料电池发动机,如30、60、80 kW,适当配合锂电池,氢电混合,以降低现有氢燃料电池发动机成本。同时,鼓励氢内燃机汽车发展,充分发挥氢内燃机汽车的成本优势,助推氢能汽车的普及。另外,以绿色甲醇、绿色合成氨为代表的氢基化合物,也是极具潜力的氢能汽车燃料,具有推广价值。当前,应鼓励不同技术路线发展,多措并举,在降低氢能汽车成本的同时,减少碳排放。

5) 鼓励氢能交通进军家庭乘用车领域,推动氢能家庭乘用车市场开发。

与国际上一些氢能产业发达国家如日本、韩国主要开发氢能家庭乘用车不同,中国氢能交通主要集中在重载交通领域,重点开发重载卡车、叉车、运输车、大巴车等。这主要和中国现阶段经济产业发展特点及人民居住方式有关。然而,与家庭乘用车相比,重载交通领域的市场不够广大,未来要促进氢能交通的技术进步、产业发展和成本下降,就必须开拓家庭乘用车市场。

开拓家庭乘用车市场主要面临2个方面的挑战:一是现有的加氢站数量不足,没有构成完善的加氢网络,阻碍了氢能家庭乘用车的推广;二是中国家庭乘用车主要停靠在居民楼的地下停车场,由于氢气泄漏、聚集而带来的安全隐患不容忽视。这就需要结合城市规划的需要,加大城市加氢站建设力度。另外,需要在城市楼房建设标准中,增补有关氢能安全的内容,引导未来城市居民楼建设。同时,对现有住宅楼地下停车场进行通风改造,以符合氢安全标准。

6) 增加对氢能交通的技术投入,推动技术创新。

随着氢能交通产业的发展,国家、地方和各大企业更加注重对于氢能交通核心技术的研发和国产化。这既包括新材料、新结构、新工艺、新系统在氢能交通装备中进一步应用,又包括互联网技术、人工智能技术与氢能交通技术相融合产生的诸如氢能无人驾驶车辆、氢能智能交通系统(ITS)和氢能共享单车等新兴氢能交通方式。氢能交通技术的发展将进一步促进交通系统的高效化、低碳化和智能化发展,而相关技术的融合创新将催生新的产业、新的经济增长点和新的就业机会,并为我国交通领域产业的低碳发展提供新的选择。

7) 充分发挥市场机制作用,促进氢能交通产业发展。

发展氢能交通产业,除了通过财税和补贴政策鼓励和引导之外,还可通过市场机制加速相关资源的优化配置,鼓励氢能交通产业发展。可以借鉴当前国际航空业和国际海运业正在建立的行业市场机制的做法,设立中国的行业市场机制,促进氢能相关行业的应用,推动氢能交通产业的发展,降低相关领域的CO₂排放。中国正在建设的全国统一的碳排放交易市场,目前已将航空业排纳入框架中,未来可以考虑覆盖更多的交通领域,相关市场机制的建设与发展,都可以在氢能交通产业中发挥优化配置资源的积极作用。

6 结论

发展氢能交通,需要以发展的眼光统筹谋划,在“双碳目标”整体战略指引下制定覆盖地面、水运及航空领域的整体规划方案。

在地面交通领域,应把握我国处于城镇化中后期阶段的发展机遇,在重点发展重载交通卡车和叉车、铲车等特种交通形式车辆的同时,聚焦于提升核心装备的技术水平和国产化率,扩展市场规模,提高加氢站建设数量,积极进军家庭乘用车领域。而氢能轨道列车需要在难以电气化地区发挥独特作用,与电力机车协同发展,共同构建氢电协同的地面低碳交通体系。

在水运领域,应重点发展氢燃料电池远途船

舶,以氢基化合物(甲醇、合成氨)为燃料的船舶是另一条重要发展路线,而氢能码头的建设将对氢能水运的发展起到支撑作用。

在航空领域,应同时对氢涡轮飞机和氢燃料电池飞机技术路线的进行超前布局,发展氢能支线客机和氢无人机,并建立完整的氢能航空产业链,促进相关装备制造成本下降。

未来应进一步完善氢能标准、利用好政策组合和碳市场机制,促进氢能交通产业实现质的飞跃。

参考文献(References)

- [1] 习近平:高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[R/OL]. (2022-10-25) [2023-10-30]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm.
- [2] 中国交通碳排放占总量 10%,近九成是公路运输,如何减碳[EB/OL]. (2021-09-09) [2023-10-30]. https://www.sohu.com/a/488801941_161795?g=0.
- [3] 高园, 欧训民. IPCC AR6 报告解读:强化技术和管理创新的交通运输部门减碳路径[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(5): 567-573.
- [4] 张磊, 谢南宏, 曹田田, 等. 氢能在交通领域的应用及燃料电池汽车成本分析[J]. 石油石化绿色低碳, 2022, 7(4): 1-5, 30.
- [5] 仲蕊. 交通降碳撬动氢能规模化发展[N]. 中国能源报, 2022-07-04(04).
- [6] 王可岩, 王作函. 双碳目标下燃料电池汽车发展现状与趋势[J]. 商用汽车, 2021(8): 76-83.
- [7] 新能源、轻能源、氢能源—氢能专题报告[R]. 北京: 中国银河证券研究院, 2021.
- [8] 氢能行业深度: 投融资方向、产业链及相关公司深度梳理[R]. 北京: 慧博智能投研, 2022.
- [9] 王瑞芬. 关于《财政部工业和信息化部科技部发展改革委国家能源局关于开展燃料电池汽车示范应用的通知》的解读[J]. 中国宽带, 2020(11): 1-2.
- [10] US Department of Energy. DOE national clean hydrogen strategy and roadmap[R/OL]. [2023-10-30]. <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf>.
- [11] Tan X G, Chen W M, Pan F W. Fuel cell heavy-duty trucks: application and prospect[J]. Engineering, 2021, 7(6): 59-65.
- [12] 重卡、叉车引领未来燃料电池市场——燃料电池行业专题报告之六[R]. 北京: 万联证券, 2020.
- [13] 氢内燃机与氢燃料电池谁更能代表未来? [EB/OL]. (2021-11-05) [2023-10-30]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1715566931716779587&wfr=spider&for=pc>.
- [14] 张小帆, 张春鹏, 潘子康. 基于专利分析的氢发动机技术发展研究[J]. 汽车文摘, 2021(6): 12-18.
- [15] 广汽、潍柴、一汽发布氢混动内燃系统, 氢内燃机春天来了[EB/OL]. [2023-10-30]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1736868241077206658&wfr=spider&for=pc>.
- [16] 李星国. 氢燃烧特性对氢内燃机性能的影响[J]. 自然杂志, 2023(1): 57-67.
- [17] Ezoe S, Takahashi K, Furukawa H, et al. Development of remade hydrogen out-board combustion engine and the characteristics in no-load operating conditions[J]. Journal of National Fisheries University, 2009, 57(4): 309-316.
- [18] 孙柏刚, 包凌志, 罗庆贺. 缸内直喷氢燃料内燃机技术发展及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(3): 265-278.
- [19] 包凌志, 孙柏刚, 汪熙. 直喷氢内燃机实现 NO_x 近零排放的试验研究[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(2): 257-264.
- [20] 霍天晴, 刘家璇, 李东, 等. 平准化成本的加氢站供氢路径分析比较研究[J/OL]. [2023-12-10]. 西安交通大学学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20231-031.1125.003.html>.
- [21] 刘玮, 万燕鸣, 熊亚林, 等. 中国氢能源及燃料电池产业发展报告 2020[M]. 北京: 人民日报出版社, 2021.
- [22] 熊亚林, 许壮, 王雪颖, 等. 我国加氢基础设施关键技术及发展趋势分析[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(10): 3391-3400.
- [23] 王江涛. 多种形式加氢合建站建设优化与技术研究[J]. 现代化工, 2022, 42(1): 7-12.
- [24] 刘峻, 赵汪, 高学强, 等. 全球加氢站产业、技术及标准进展综述[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 362-372.
- [25] 2023 年中国氢能源: “十四五+双碳”推动, 市场规模将进一步扩大[EB/OL]. [2023-10-30]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1775455538013174896&wfr=spider&for=pc>.
- [26] 项寅. 考虑产业布局和用户满意度的氢能源汽车加氢网络优化模型[J]. 中国管理科学, 2023, 31(5): 164-175.
- [27] Zhou J L, Wu Y N, TAO Y, et al. Geographic information big data-driven two-stage optimization model for location decision of hydrogen refueling stations: An empiri-

- cal study in China[J]. *Energy*, 2021, 225: 120330.
- [28] Sun H R, He C M, Yu X Z, et al. Optimal siting and sizing of hydrogen refueling stations considering distributed hydrogen production and cost reduction for regional consumers[J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(9): 4184-4200.
- [29] 何太碧, 邹铖, 刘芮言, 等. 车用加氢站压缩机选型[J]. *天然气技术与经济*, 2022, 16(4): 67-73.
- [30] Amy Adams, 贾宇航. 氢燃料电池在铁路客运的应用前景[J]. *国外铁道机车与动车*, 2021(4): 6-7.
- [31] 伍赛特. 燃料电池机车与混合动力机车的研究现状及发展前景[J]. *铁道机车与动车*, 2019(2): 1-3, 25, 5.
- [32] 李克雷. 世界首列氢能源有轨电车在南车四方股份下线[J]. *机车电传动*, 2015(3): 55.
- [33] 李昂. 世界首列氢燃料混合动力有轨电车亮相河北唐山[EB/OL]. (2017-10-28) [2023-10-30]. <https://www.crrcgc.cc/ts/g8197/s15830/t276792.aspx>.
- [34] 王伟. 世界首条氢能源有轨电车投入商业运营[EB/OL]. (2020-01-01) [2023-10-30]. <https://baijiahao.baidu.com/sid=1651786266086349228&wfr=spider&for=pc>.
- [35] 首台氢燃料电池混合动力机车下线[J]. *浙江化工*, 2021, 52(2): 19.
- [36] 康劲松. 中国中车与同济大学联合研制的国内最大功率氢燃料电池混合动力机车完成牵引等系列性能试验[J]. *城市轨道交通研究*, 2021, 24(10): 114.
- [37] 时速 160 km! 氢能“复兴号”今日下线[EB/OL]. [2023-10-30]. <https://mp.weixin.qq.com/s/uw11VPG8pL-8B24QM-9cZ0A>.
- [38] Yan Y, Li Q, Chen W R, et al. Optimal energy management and control in multimode equivalent energy consumption of fuel cell/supercapacitor of hybrid electric tram[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(8): 6065-6076.
- [39] Yan Y, Li Q, Chen W R, et al. Hierarchical management control based on equivalent fitting circle and equivalent energy consumption method for multiple fuel cells hybrid power system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(4): 2786-2797.
- [40] 陈维荣, 安祺, 王轶欧, 等. 一种混合储能式有轨电车系统的配置优化方法: CN110896246B[P]. 2022-04-26.
- [41] 重车轻船? 看看全球氢能船舶的发展形势[EB/OL]. (2021-11-24)[2023-10-30]. http://t.10jqka.com.cn/pid_187727727.shtml.
- [42] 刘易明, 王甫, 王珺, 等. 燃料电池船舶应用形式及其关键技术[J]. *船舶工程*, 2021, 43(3): 18-26, 33.
- [43] 中共中央 国务院印发《交通强国建设纲要》[M]/2020 中国仓储配送行业发展报告(蓝皮书). 北京: 中国商业出版社, 2020: 397-406.
- [44] 交通运输部. 内河航运发展纲要[J]. *中国水运*, 2020(6): 17-19.
- [45] 交通运输部关于推进海事服务粤港澳大湾区发展的意见[J]. *中国海事*, 2020(9): 6.
- [46] Hydrogen-powered aviation: A factbased study of hydrogen technology, economics and climate impact by 2050 [EB/OL]. (2020-05-07) [2021-1-17]. https://www.cleansky.eu/sites/default/files/inline-files/20200507_Hydrogen-Powered-Aviation-report.pdf.
- [47] 刘洪铭. 国际航空业 2020 年碳排放零增长目标下的碳减排路径思考[J]. *世界环境*, 2019(1): 33-35.
- [48] Hydrogen :A future fuel for aviation[EB/OL]. (2020-05-07) [2021-1-17]. <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Hydrogen-A-future-fuel-for-aviation.html>.
- [49] 波音成功完成氢动力飞机首次载人飞行[J]. *舰船知识*, 2008(6): 13.
- [50] Flade S, Weiss-Ungethüm J, Suchaneck A, et al. Direct hybrid system in the Antares DLR-H2[C]/20th World Hydrogen Energy Conference, 2014.
- [51] 德国宇航院计划研制 HY4 新概念飞行器[EB/OL]. (2017-02-03)[2023-10-30]. <https://www.81uav.cn/uav-news/201702/03/22577.html>.
- [52] 俄罗斯公布液氢燃料客机设计方案[J]. *国际航空*, 2017(3): 80.
- [53] ZeroAvia 公司开展小型飞机氢动力系统研究[EB/OL]. (2019-08-21)[2023-10-30]. <https://www.81uav.cn/uav-news/201908/21/61498.html>.
- [54] Universal Hydrogen 将为首批 15 架客机改装氢燃料动力系统[EB/OL]. (2021-07-20) [2023-10-30]. <https://www.cnbeta.com/articles/tech/1155647.html>.
- [55] 空中客车公布三款全新零排放概念飞机[EB/OL]. (2020-09-22)[2023-10-30]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1678546430316928082&wfr=spider&for=pc>.
- [56] 从标准、项目以及产品盘点, 中国氢燃料电池无人机发展现状[EB/OL]. (2020-07-29)[2023-10-30]. https://m.thepaper.cn/newsDetail_forward_8487066.
- [57] 高博. 打破世界纪录! 中国氢能无人机不间断飞行 331 分钟[EB/OL]. (2020-02-03)[2023-10-30]. <https://m.gmw.cn/baijia/2020-02/03/33517692.html>.
- [58] 未来科学城“氢能大巴+无人机”空地联合, 跨界创新成果助力绿色冬奥[EB/OL]. (2021-12-24)[2023-10-30]. <http://www.bjchp.gov.cn/cpqzf/xxgk2671/ztzl/lqzb/ep5481-632/index.html>.

- [59] 蒋周晴. 国网温州供电公司氢能无人机首检成功[EB/OL]. (2021-12-14)[2023-10-30]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1719085060271496093&wfr=spider&for=pc>.
- [60] 氢燃料电池电催化剂简单介绍[EB/OL]. [2023-10-30]. <http://www.pearlhydrogen.com/html/zh-detail-139.html>.
- [61] 张扬军, 彭杰, 钱煜平, 等. 氢能航空的关键技术与挑战[J]. 航空动力, 2021(1): 20-23.
- [62] 2022年中国氢能源产业战略发展报告[R]. 北京: 大象投资顾问, 2022.
- [63] Gao W T, Yin Q N, Zhang X, et al. Low-platinum dissymmetric membrane electrode assemblies for fuel cells suitable for a variety of external humidification conditions[J]. Journal of Power Sources, 2022, 547: 232013.
- [64] 邓轲. 氢能源新材料行业深度报告: 质子交换膜及碳纤维[R]. 北京: 中航证券, 2022.

Status quo, challenges, and prospects of China's hydrogen transportation industry

MENG Xiangyu¹, GU Alun², ZENG Jing¹, CHEN Mingyun¹, ZHOU Jian², LIU Bin², MAO Zongqiang^{1,3*}

1. Tsinghua Innovation Center in Dongguan, Dongguan 523808, China
2. Institute of Energy, Environment and Economy, Tsinghua University, Beijing 100084, China
3. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract This paper provides an overview of the current development status of hydrogen energy highway transportation, rail transit, shipbuilding, and aviation in China. It analyzes the comprehensive performance of hydrogen fuel cell vehicles in China and points out that the challenges faced by Chinese hydrogen energy vehicles are mainly high costs of vehicles and fuel and insufficient refueling infrastructure. However, as China steps into the middle and late stage of urbanization, heavy-load transportation and special transportation with fixed routes provide opportunities for the development of hydrogen vehicles, and family passenger vehicles will become an important direction. Hydrogen energy rail transit will also play a role in areas where electrification is difficult. Ships and aircraft powered by hydrogen compounds will become the focus of shipbuilding and aviation industries. In the future, hydrogen energy transportation should improve planning, promote technological integration and innovation, develop new hydrogen energy transportation travel modes, build a sound policy system, and adopt carbon market mechanism to achieve a new leap.

Keywords hydrogen transportation; hydrogen vehicle; shipping; aviation; emission reduction ●



(责任编辑 刘志远)