

2024年航空氢动力进展

Progress of Hydrogen Powered Aviation in 2024

■ 韩玉琪 / 中国航空发动机研究院

脱碳是航空业面临的重大挑战，氢能源是航空业实现脱碳目标的重大技术选项之一。2024年，美国和欧洲的氢能航空研发活动逐渐走深走实，着力开展关键技术攻关、集成及演示验证工作，并以商业应用为目标前瞻布局适航认证、机场运营及维护等工作。

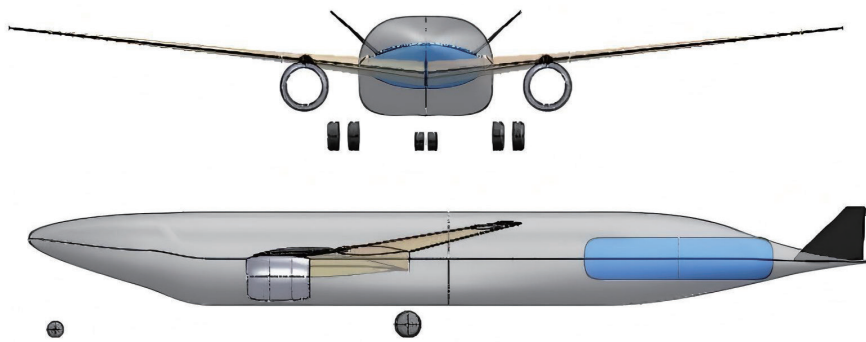
当前针对氢能航空的研究主要在氢能飞机架构、氢涡轮动力、氢燃料电池动力、机载储氢及低温燃料系统、机场氢能基础设施、安全与认证等6个方面。

各国积极研发氢能大飞机并计划2035年投入使用

在碳中和目标的牵引下，发达国家将氢能源视为航空业脱碳的一条重要技术途径，尤以欧洲国家最为积极，部分国家更是将氢能飞机作为“换道超车”的机遇。近中期氢能飞机仍将采用传统的管翼构型(CTW)，远期可采用翼身融合新构型，但由于氢燃料独特的性质，需研发不含整体油箱的干机翼，优化机身、尾翼、客舱和货舱的集成。

空客公司将于2026—2027年决策ZEROe氢能飞机验证机的动力系统选择

2024年3月，空客公司微调了其ZEROe氢能飞机验证机所用动力系统的决策时间表，表示将于2026年开始在A380飞行台上进行氢涡轮动力(使用GE航空航天公司的“通行证”发动机改进型)或氢燃料电池动力的飞行测试，氢能系统将包



NASA发布氢燃料HWB客机概念

括可容纳400kg液氢的储氢罐，以开展飞机配置研究，并将于2026—2027年做出动力系统选择决策(原计划为2025—2026年)，飞行试验将持续至2028年。从之前的进展来看，空客公司最初更倾向于氢涡轮动力，但后来氢燃料电池动力的研发进展超出其预期，因此可能会在两种动力的选择之间更加谨慎。空客公司的飞机验证机目标是100座、1850km至200座、3700km，具体数字取决于技术进展，空客公司计划于2035年将氢动力飞机投入使用。

NASA发布氢燃料翼身融合客机概念

2024年9月，美国国家航空航天局(NASA)发布了氢燃料混合翼身融合(HWB)客机概念，是NASA对商业可行性设计进行研究后得出

的最有前途的潜在零排放客机概念之一，可执行与波音737-800相同的任务。项目主要目标是通过集成低温轻质氢储罐、低温燃料管理系统和燃料电池，在系统层面将飞机的比能量提高2~3倍。该飞机概念将储氢罐内置，位于客舱后的机身尾部，可最大限度地减小飞机浸润面积进而降低气动阻力，但这种布局可能会在飞行过程中重心前移导致稳定性问题，从而带来5%的配平阻力损失。

日本政府投资300多亿美元研发氢动力客机

2024年3月，日本经济产业省宣布，计划投资超5万亿日元(约320亿美元)用于下一代氢动力飞机研究计划，建立公私合作伙伴关系，资助三菱重工(MHI)、石川岛

播磨重工 (IHI)、东丽化学等企业开展关键技术研究。随后,日本经济产业省的下属机构新能源和工业技术开发组织 (NEDO) 宣布,将在2024—2030年通过绿色创新基金对日本氢动力飞机研发提供306亿日元 (约2亿美元) 的经费支持,授予川崎重工 (KHI)、石川岛播磨重工、多摩川精机等企业多个研发项目,攻关氢能机身概念设计、氢燃烧室、氢燃料供给系统、液氢储罐、氢燃料电池动力、嵌入式兆瓦级电机、氢能飞机用复合材料等技术。日本的目标是氢动力飞机能在2035年实现商业化运营,在全球民机市场变革中占据领先地位,而不仅仅是当前扮演的航空产业供应商角色。

荷兰福克下一代公司将研发氢涡轮动力窄体客机

2024年6月,荷兰福克下一代 (Fokker Next Gen) 公司宣布将放弃对现有Fokker100飞机进行氢动力改装的计划,转而开发1型全新的氢动力窄体客机,该客机拥有120~150个座位,航程2600km。该飞机采用上单翼和翼吊发动机布局,以提高稳定性并容纳超高涵道比涡扇发动机,减小起落架的长度和质量,所需的发动机推力为80~89kN;低温储氢系统安装在客舱后的机身尾部,导致飞机较现有的150座级飞机 (空客A319neo或波音737MAX7) 稍长;飞机系统将全面电动化,并配备氢燃料电池辅助动力装置;从设计之初就考虑了液氢和可持续航空燃料 (SAF) 的双燃料系统,以降低运营风险。福克下一代公司参与了Cavendish项目 (罗罗公司牵头),该项目旨在改装“珍珠”15涡扇发动机在地面测试中使用液氢运行。福

克下一代公司将成为集成商,而不是开发自己的技术或系统,从而降低所需的总投资,该公司的目标是2035年将氢动力客机投入使用,服役后5年内在荷兰和拉脱维亚的两条计划生产线上每年生产150~175架飞机。

航空动力巨头开展氢涡轮动力地面测试工作

涡轮发动机是当前航空业的主流动力类型,传统航空动力巨头基于自身优势,积极开展改用氢燃料形成氢涡轮动力的研发工作。氢涡轮动力适用于支线及以上的大型飞机,而当前这些飞机的碳排放占据了全部机型的99.98%,因此其对于航空业脱碳目标而言具有重大意义,相关研发主要面临燃烧、计量和控制、热管理等方面的技术挑战。

罗罗公司开展氢涡轮动力测试并建设专用试验台

2024年7月,罗罗公司宣布已开始建设1个专用的发动机试验台,用于开展露天全尺寸燃气涡轮发动机的燃氢测试。该试验台的开发和发动机测试与易捷航空公司合作进行,选址在NASA斯坦尼斯航天中心,这将是罗罗公司在该中心的第三个试验台。这项测试将基于罗罗公司“珍珠”15涡扇发动机改进型开展100%氢燃料集成技术验证工作。2024年10月,罗罗公司提交了“低温燃料飞机”专利申请,详细介绍了将传统发动机改造为氢燃料发动机的方法,该方法允许运营商在使用氢燃料和传统燃料之间进行切换,在低温下以液态形式储存氢,并将氢燃料箱安装在机身外部以提升安全性,从而降低燃料泄漏

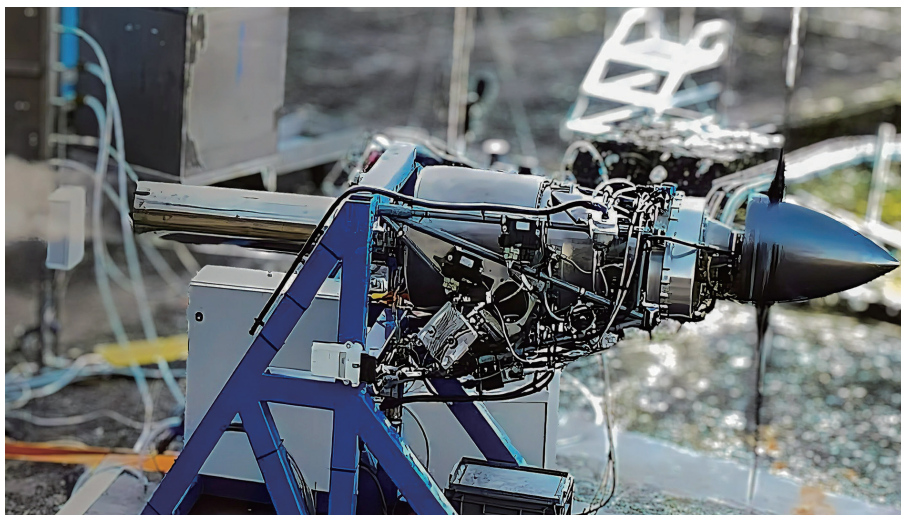
或发生火灾对乘客安全造成的风险。2024年11月,罗罗公司与加利福尼亚大学河滨分校合作,基于“珍珠”700发动机开发了1种新型燃氢技术,通过提高催化转化器的效率,成功减少了氢燃烧过程中产生的NO_x排放,其关键是一种叫作“Y形沸石”的多孔材料,这种材料被注入铂催化剂中。

普惠加拿大公司推进氢燃烧技术改造PW127XT发动机

2024年11月,普惠加拿大公司宣布,将基于燃氢先进设计发动机研究 (HyADES) 项目,对PW127XT涡桨发动机进行氢燃烧技术改造。该项目是加拿大可持续航空技术倡议的一部分,将与Next Hydrogen Solutions公司合作开展。该项目第一阶段主要开展氢燃料喷嘴与燃烧室的台架测试,未来将进行整机地面测试。

赛峰集团开始开展氢涡轮动力地面验证机支撑工作

2024年1月,赛峰集团牵头的氢能推进技术研究 (TROPHY) 项目开始实施,该项目计划于2026年12月结束,将为意大利Avio公司牵头开展的航空氢涡轮动力验证机 (HYDEA) 项目提供支撑, HYDEA项目将在短时间内 (2023—2026年) 开展地面测试并验证氢涡轮动力的可行性, TROPHY项目将为HYDEA项目的地面验证机提供燃料系统,开展支撑和预测飞行验证的准备工作。2024年1月,涡轮技术 (Turbotech) 公司和赛峰集团成功测试了第一台轻型飞机用氢燃料涡桨发动机,成功完成了具有超高性能回热循环的首次试验,该试验是BeautHyFuel项目的一部分。



赛峰集团氢燃料涡轮发动机

氢燃料电池动力作为新型航空动力研发持续火热

氢燃料电池动力作为航空动力领域的新生力量，成为该领域新参与者试图“换道超车”的重要选择。综合来看，质子交换膜燃料电池（PEMFC）和固体氧化物燃料电池（SOFC）在航空领域最具应用前景，而当前的研发以PEMFC为主。当前航空用氢燃料电池动力在系统级的比功率技术水平为0.75 ~ 1kW/kg，较涡轮发动机还有较大差距，故仅适用于支线及以下的飞机，相关研发还面临成本、寿命、环境适应性和比功率等方面的技术挑战。

空客公司将研发2MW超导氢电动力验证机

2024年5月，空客公司宣布将研发Cryoprop验证机，采用2MW超导电推进系统，以推进超导技术在未来的氢动力飞机中应用。在Cryoprop架构下，飞机储罐中携带的液氢将被配送到动力系统的氢燃料电池中，同时用于冷却氦，氦工质循环冷却超导电力传输系统和电机控制单元，超导技术将大幅减轻电

力传输系统的质量和发热。空客子公司UpNext打算通过Cryoprop验证超导技术在未来飞机开发中的潜力，并同时探索产业化、维护和运营相关的各方面专业知识。空客公司已在先进超导和低温动力总成系统演示（ASCEND）项目中探索500kW的动力验证机的超导技术，该验证机于2023年11月实现了通电。

美国ZeroAvia公司为其氢电动力产品2025年投放市场冲刺

美国Zero Avia公司600kW的氢燃料电池动力产品ZA600将用于9 ~ 19座飞机，计划于2025年进入市场。2024年1月，ZeroAvia公司完成了200kW连续功率逆变器的初步试验，该逆变器可在直流800V电压下运行，最大功率为230kW，比功率超过20kW/kg。2024年7月，ZeroAvia公司宣布，使用人工智能（AI）驱动的软件至少可以降低20%的氢能生产成本。2024年8月，ZeroAvia公司获得第二架多尼尔228飞机，以扩大ZA600动力系统的飞行试验项目并加快测试和认证工作。2024年8月，ZeroAvia公司获得美国联邦航空

局（FAA）价值420万美元的低排放技术助力航空可持续转型酌情拨款计划（FAST Tech）合同，将用于进一步开发和验证其为2 ~ 5MW氢电动力系统而设计的电推进系统。未来除了为飞机改造提供的完整氢电发动机外，ZeroAvia公司还计划单独销售各种单独部件，包括电动机、燃料电池系统和电力电子设备。

德国MTU公司完成液氢飞行燃料电池系统的新一轮测试

2024年1月，德国MTU公司牵头的氢电零排放动力系统（HEROPS）项目开始实施，该项目计划于2026年12月结束，将验证总功率为1.2MW的氢燃料电池动力系统，该系统基于可扩展的600kW核心模块构建而成。该核心模块当前技术成熟度（TRL）为4级，核心模块和所有其他子系统将在项目中验证至TRL5。项目还将通过补充对整个模块化系统的模拟和电网测试，来评估进一步扩展至2 ~ 4 MW功率水平的可行性。2024年9月，MTU公司完成了为新动力系统开发的液氢燃料电池系统的新一轮性能测试工作，整个液氢飞行燃料电池系统包括储箱、传感器、换热器、阀门、安全系统和控制装置。MTU公司表示，该型号液氢燃料电池的装机测试将于2026年开始，计划与德国航空航天中心（DLR）合作，在改装的多尼尔228飞机上对该系统进行飞行测试，将使用600kW的液氢燃料电池系统替换2台霍尼韦尔公司TPE331发动机中的1台，进行首次飞行试验。

德国H2FLY公司牵头研发2MW氢电动力

2024年5月，德国政府将在

2024—2026年通过BALIS2.0项目提供930万欧元（约1000万美元）的资金支持，目标是21世纪30年代初实现未来2MW氢燃料电池动力系统的商业化。BALIS2.0项目中，由H2FLY公司牵头开发输出功率达350kW的氢燃料电池系统，计划于2025年开展地面试验，迪尔航空航天公司将使用多个350kW的氢燃料电池系统（包含电堆和辅助系统）串组形成更强大的动力系统。此外，H2FLY公司还承担了多个德国支持的项目，旨在为支线飞机提供高性能、可商用的氢电力系统，并将使用改装的多尼尔328客机验证平台，验证子系统或模块级部件的优化和集成，计划于2026—2027年进行首飞。

英国GKN公司开发2MW级氢电力验证机

2024年7月，英国吉凯恩（GKN）公司获得总价值为4400万英镑（约5700万美元）的H2FlyGHT项目合同，用于开发2MW级低温氢燃料电池动力系统，项目部分资金由英国航空航天技术研究院（ATI）提供。H2FlyGHT项目将简化飞行测试和认证的路径，包括燃料电池、低温电力分配和先进的低温驱动系统。

英国CAeS公司计划于2027年实现9座氢电力飞机商业运营

2024年3月，英国克兰菲尔德航空航天解决方案（CAeS）公司公布了氢燃料电池动力系统的最终设计细节，该系统用于在改进版的9座BN-2“岛民”飞机上开展飞行测试，氢燃料电池系统（240kW）和电力推进装置（包括电机和逆变器控制器）将与相关的电缆、冷却系统和螺旋桨螺距控制装置一起安装在机舱前部，后机舱部分包含地

面电源接口和高压配电系统，采用35MPa气态储氢罐和三叶可变桨距螺旋桨（最大转速2300r/min）。同时，CAeS公司正在寻求该技术的其他应用，包括无人驾驶货运飞机和替换现有客机上的辅助动力装置（APU）。2024年7月，CAeS公司表示，计划在完成地面测试后，于2025年7月开始飞行技术演示。CAeS公司计划在2027年将首架改装的9座“岛民”飞机投入商业运营。

新加坡H3动力公司为空客公司研发500kW的氢燃料电池APU

2024年5月，新加坡H3动力公司计划为空客子公司UpNext提供一个500kW的氢燃料电池HyPower，作为APU的替代品，在空客A330飞机上进行飞行验证，以减少排放和噪声。HyPower的目的是证明氢燃料电池在飞行中的稳定运行，包括重新启动。H3动力公司计划于2025年年底进行验证，爬升到7.6km，并载上10kg的氢燃料飞行1h。

机载储氢及低温燃料系统作为氢能航空瓶颈技术受到重视

液氢的体积能量密度仅为航空煤油的1/4，同时为了减少液氢沸腾导致的损失，当前的解决方案是以略高于大气压力（101 ~ 150kPa）低温（20 ~ 25K）存储，导致液氢储罐结构和配套冷却系统异常复杂，再加上其他低温燃料系统（燃料管道、泵、封严和阀门等）的质量，使得储氢系统整体的能量密度较低，对飞机的气动效率和质量造成不利影响。当前的机载储氢罐主要采用铝合金制造，未来采用复合材料有望减轻75%的质量，欧美企业已就此

开展技术攻关。燃料的能量密度直接决定了飞行器的航程和载荷，据初步评估，储氢系统的重量指数（GI，液氢质量/（液氢质量+罐质量+其他燃料系统质量））需达到35% ~ 40%，才能使氢动力飞机达到传统航空煤油飞机的性能水平。

空客公司多措并举研发液氢储存和分配技术

2023年12月，空客公司供应商Aresia公司的金属液氢储罐制造成熟度（MRL）已达到4级，主要技术挑战在于公差和焊接。Aresia公司是空客公司牵头的低温储存氢气（STOHC）项目的合作伙伴，STOHC项目要求氢储罐的公差缩小至传统航空煤油油箱的1/10。2024年1月，空客公司在德国施塔德建立一个ZEROe开发中心（ZEDC），加速研发用于低温液氢储存和分配等氢能系统的复合材料技术。重点任务是采用复合材料研制高性价比、轻量化的氢气系统（如低温储氢罐），包括产品研发和工业化能力，涵盖复合材料液氢储罐从部件设计、生产、组装到制造相关试验的全过程。此前，空客公司已在德国不莱梅、英国菲尔顿、西班牙马德里和法国南特建立多个ZEDC，施塔德ZEDC将与上述ZEDC以及施塔德地区的空客复合材料技术中心（CTC GmbH）、碳纤维增强塑料（CFK NORD）研究中心等机构合作开展研发活动。2024年5月，欧盟委员会批准14亿欧元（约15.1亿美元）分13个项目来支持交通运输业开发并部署氢能，空客公司将参与其中的Hy2Move项目以开发下一代机载储氢解决方案、氢运输和高性能氢燃料电池技术。

美国 Universal Hydrogen 公司使用液氢胶囊运行 1MW 燃料电池动力系统

2024年2月，Universal Hydrogen 公司首次采用液氢胶囊提供燃料，在加利福尼亚州的莫哈韦航空航天港向地面“铁鸟”试验台提供燃料超过 1h40min，运行 1MW 飞机燃料电池动力系统，作为模拟支线飞机飞行剖面的一部分。测试中，冷却剂在氢燃料电池系统内吸热后，将储存在双层壁真空绝热胶囊内的液氢蒸发为气态，然后气态氢进入氢燃料电池产生电力带动电动机。Universal Hydrogen 公司的目标是在灌装设施中对胶囊进行灌装，然后使用现有的联运货运系统运输到机场，之后将胶囊装载到配备标准机场货物装卸设备的飞机上，每个胶囊都有防漏快速连接以及氢泄漏检测和排气系统，以使飞机燃料加注快速安全。每个液氢胶囊含有大约 200kg 的液氢，2 个这样的胶囊可使 1 架 ATR72 支线客机飞行 926km 并保留氢燃料储备裕度。但在 2024 年 6 月，Universal Hydrogen 公司由于融资失败而宣告破产。

美国初创公司 Verne 开发航空用低温高压储氢装置

2024年7月，《航空周刊》网站报道，Verne 公司与劳伦斯利弗莫尔国家实验室 (LLNL)、美国能源部预先研究计划局合作，开发了一种机载低温高压储氢 (CcH2) 系统，在 60 ~ 80K 的温度和 30 ~ 50MPa 的压力下储存氢气，最大氢密度比液氢大 33%，比 70MPa 的气态氢大 87%。Verne 公司还与氢电力开发商 ZeroAvia 公司合作，评估在飞机上 CcH2 系统以及从机场的气态和液态

氢源为 CcH2 系统加氢的可能性。

美国 GTL 公司的真空夹层复合材料氢储罐质量分数达到 55%

2024年3月，美国 Gloyer-Taylor Laboratories (GTL) 公司介绍了其开发的真空夹层复合材料液氢杜瓦罐，与当前主流航空储氢技术不同之处在于，其舍弃了主动温控装置，仅依靠真空夹层维持低温环境，故可减少 75% 的罐体质量，同等条件下存储的氢燃料增加了 10 倍，储氢系统的质量分数 (MF，液氢质量 / (液氢质量 + 罐质量)) 达到 55%。

法国 IMT Nord Europe 大学研发碳纤维增强复合材料氢储罐

2024年3月，法国 IMT Nord Europe 大学获得欧洲委员会 1000 万欧元的资助，牵头承研用于持久氢气储存的经济型可回收复合材料的制造过程 (ECOHYDRO) 项目，旨在为储氢罐开发可回收热塑性树脂复合材料、更具成本效益的新型纤维缠绕工艺、使用结构健康监测技术预测储罐剩余寿命的数字模型 (内置传感器和人工智能算法) 等，项目将开展地面车辆交通示范运输，还计划为航空领域开发 1 个专用于储存低温液态氢的示范装置。

机场氢能基础设施得到初步探索

机场的氢能基础设施主要包含液氢燃料的运输、储存和液氢加注等设备。由于氢燃料和航空煤油具有较大差异，氢能航空的实现需要相应机场氢能基础设施的设计与改造，且需充分考虑成本与安全效益，氢能航空头部企业已开始就此开展探索性研究。

空客公司开展机场氢能基础设施可行性研究

2024年2月，空客公司、Avinor 公司、SAS 公司、Swedavia 公司和 Vattenfall 公司签署了谅解备忘录，以评估在瑞典和挪威机场建立氢能基础设施的可行性。2024年5月，空客公司表示将牵头开展液态氢飞机地面运营 (GOLIAT) 项目，以在几个欧洲机场开发演示大流量液氢处理和加注技术，并安全可靠地用于机场运营，项目获得欧盟 1080 万欧元 (约 1170 万美元) 资助，将于 2027 年在里昂-圣埃克苏佩里的芬奇机场进行氢动力飞机演示。2024年10月，空客公司、日本关西国际机场和川崎重工签署谅解备忘录，三方将进行初步可行性研究，明确机场氢能



空客公司氢能飞机机场燃料加注假想图

基础设施和供应路线图，并开展示范项目，研究将从技术、经济、法规和运营的角度进行评估以推动制定政策建议，加速在日本关西地区的机场部署氢能航空基础设施。

美国ZeroAvia公司探索机场氢能基础设施

2024年之前，ZeroAvia公司已与北欧能源公司Fortum合作研究在北欧机场开发建设氢气生产和加注基础设施；与壳牌公司、海牙鹿特丹机场等合作制定机场氢能运营概念；与法国Absolut Hydrogen公司合作探索液氢在机场的生产、储存和加注，以及技术开发、运行概念、安全程序和标准。2024年9月，ZeroAvia公司与飞机维护和修理服务提供商FEAM航空公司签订了一项协议，为潜在的将飞机转换为使用氢燃料电池动力系统的运营商提供改装、维护和技术支持，为其即将推出的氢动力系统建立支持网络。

美国GTL公司复合材料管道技术可将飞机液氢加注时间缩短至分钟级

2024年8月，美国Gloyer-Taylor Laboratories (GTL) 公司宣布其共混杂化层合板 (BHL) 复合材料技术在液氢传输方面取得突破。测试结果显示，与现有的金属管道相比，BHL管道的热容降低至1/10，且能够在2s内达到-273°C的工作温度并开始液氢传输。GTL公司还在不同测试中验证了BHL管道的扩展性，包括制造不同直径和长度的管道，以及满足各种复杂弯曲和灵活性需求的能力。BHL管道可将飞机或火箭的液氢加注时间从小时级缩短到分钟级，减少液氢挥发损失、降低成本并增强操作安全性。

安全与认证得到前瞻布局

尽管当前学术界的研究表明，氢燃料的危险性较航空煤油并未明显增加，甚至更为安全，但公众对于氢能航空的安全性仍有较大疑虑。当前的适航规章中，关于使用氢动力后的验证缺乏充分的符合性验证方法和符合性判定依据，对于氢能航空的真正实现，需要相应适航文件与法规的制定完善，欧美的适航管理机构已联合氢能航空全生态链参与者开展布局研究。

欧洲航空安全局主办首届氢动力飞机认证国际研讨会

2024年12月，欧洲航空安全局 (EASA) 主办了首届关于氢动力飞机认证的挑战和未来流程的国际研讨会，旨在开发一种得到整个生态参与者支持的认证方法，参会人员超过100人，来自飞机制造商、动力制造商、学术界、研究机构、行业协会，以及FAA、英国民航局 (CAA)、日本民航局 (JCAB) 等政府机构。

英国民航局资助开展氢能航空适航与监管技术研究

2024年3月，英国民航局选择了CAeS公司、埃克塞特机场联合体、ZeroAvia公司参加氢沙盒挑战赛 (Hydrogen Sandbox Challenge)，以探索氢能航空的可行性，并发展相应适航与监管技术，识别危险、风险和安全挑战，提供相关安全案例、测试计划和风险评估反馈，研究成果将用于指导适航文件与法规的制定。

空客公司通过飞行测试研究氢动力尾迹

2024年6月，空客公司进行了1项飞行试验，研究氢燃料电池系

统排出的水蒸气，以了解它是否会产生凝结尾迹。2024年12月，空客公司继续基于改装后的“蓝色秃鹰”滑翔机开展氢涡轮动力的飞行测试，以研究氢气对尾迹形成的影响。飞行测试的首批结果预计将于2025年公布，根据水滴的温度和大小，持久性会有所不同，可以通过影响水滴的大小，设计出对气候影响极低的解决方案。

结束语

航空业正处在脱碳技术革命的风口浪尖，氢能航空的发展有望重塑航空业发展格局，是业界新参与者的独特机遇，氢能飞机的最终运营将彻底改变整个航空生态系统，需要在研发、制造、运营、基础设施和监管等方面开展协同行动。从航空动力的视角来看，实现脱碳需要两手准备：既要持续提升传统发动机的燃油效率，又要积极探索SAF、氢能、电能的应用。可持续航空燃料可直接加注使用，是近中期的优先选项；氢、电等能源的使用需要大量全新研发工作，但降碳潜力更大，是中远期的重大技术选项。对于航空氢动力而言，氢燃料电池动力有望于2025—2030年率先在通用航空及低空经济领域实现应用，进一步带动氢能航空生态的持续完善，而后氢涡轮动力有望于2035年实现在商用航空领域的示范应用，进而带动机场基础设施的进一步发展完善，最终于2040年后实现氢能飞机的小规模部署运营。

航空动力

(韩玉琪，中国航空发动机研究院，高级工程师，主要从事航空发动机科技情报与战略论证研究)