

特色专题

保持战略定力推进氢能航空动力科技创新发展

向巧

摘要 氢能作为零碳、高热值的清洁能源,被视为航空业脱碳的关键路径,主要航空强国已纷纷布局氢能航空技术研发。本文系统阐述了氢能在航空领域应用的必要性与可行性:氢能可助力航空业实现零碳排放、提升飞行性能,并已通过多项历史验证与当代工程研究证实其技术潜力和发展前景。全球氢能航空正从概念研究迈向工程应用,产业链与生态系统加速构建。然而,氢能航空仍面临储氢技术、燃烧控制、燃料电池功率密度、试验设施不足、产业链不完善及缺乏顶层统筹等挑战。对此,建议保持战略定力,打造氢能航空国家战略科技力量,创新科研组织模式,构建全产业链创新生态,并通过国家重大专项推动技术、政策与基础设施协同发展。

关键词 氢能航空;燃氢涡轮发动机;氢燃料电池;试验设施;产业链;创新联合体

氢能是无限能源、清洁能源和优质能源。氢元素是宇宙中分布最广泛的物质,主要以化合态形式存在于自然界中。氢能可通过电解水、化石燃料重整或工业副产等方式制取,具有可循环、零排放、可储能、能源互联等特点,被视为 21 世纪最具发展潜力的清洁能源,受到世界各国广泛关注。近年来的研究发现,大自然中储藏着丰富的氢能资源。2025 年 5 月,牛津大学、杜伦大学与多伦多大学研究发现,全球多地可能存在氢储层,或可满足人类 17 万年的能源需求^[1]。2024 年,阿尔巴尼亚蛇绿岩中发现大型氢储层,计算获得的年均氢气排放量高达 200 t 以上。氢燃烧或氢电化学反应产物只有水,可彻底摆脱碳排放;在相同质量下,氢的能量密度是航空煤油的 2.8 倍,在相同当量比条件下,氢燃料燃烧温度高出航空煤油 100 K 以上。

氢用于航空并非新鲜事物。早在 1852 年,法国人亨利·吉法尔(Henry Giffard)便制造了以氢气为浮升气体的世界上首架动力驱动的可驾驶飞艇。20 世

纪 50 年代至 21 世纪初,出于提升军用飞机性能和能源安全的考虑,人类开始利用氢气高热值、高比热等特性,开展将氢气作为燃料的氢动力飞机技术研究。近年来,随着全球航空业碳减排形势的日趋严峻,氢的绿色零碳特性被认为是航空业脱碳的重要途径,氢能航空发展受到各国政府、机构和航空企业的高度关注。在 2025 年 3 月召开的“2025 空客峰会”上,空客公司再次确认了将商业化可行的氢能源飞机推向市场的承诺,并公布了新修订的氢动力飞机发展计划,认为氢能航空是一条最有前途的发展路径^[2]。当然,氢能航空发展仍面临技术、经济、基础设施、政策等多方面的挑战。

1 氢能在航空领域应用的必要性

1.1 氢是航空业可持续发展的战略选择

传统化石能源产生的温室效应与空气污染,已对人类社会和自然环境构成了严重威胁,加快能源转型、实现绿色化发展已成为必然趋势。氢能具有零碳

太行实验室,成都 610213

收稿日期:2025-11-17;修回日期:2026-01-14

作者简介:向巧,研究员级高级工程师,中国工程院院士,研究方向为航空发动机,电子邮箱:xiang_qiao@vip.126.com

引用格式:向巧.保持战略定力推进氢能航空动力科技创新发展[J].科技导报,2026,44(3):66-75;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.11.00049

排放、高热值、高比热、高燃烧效率、高热沉、灵活变电、易获取等诸多优势。氢能航空动力发展对燃烧技术、材料、燃料电池与电机水平、精密加工等的要求很高,氢能在航空领域应用将促进氢内燃机、氢燃料电池、储氢等关键核心技术的突破,是航空业可持续发展的战略选择,对推动能源转型和制造业高端化、智能化、绿色化发展也将发挥极大的带动作用,并产生辐射效应。

1.2 氢是航空业实现零碳目标的理想选择

自古以来,人类减碳的努力从未停止过,从“柴、煤、油、气”到“风、光、核、氢”,人类能源发展史就是不断减碳的历史。近年来,全球航空业每年碳排放量已超过 10 亿 t,占碳排放总量的 2%~3%(图 1)。一架典型民航客机一年的碳排放量可高达 3600 t,相当于 90 万棵树 1 年吸收的二氧化碳,或 800 辆轿车 1 年的碳排放量^[3]。如不加控制,到 2050 年,全球 25% 的碳排放将来自航空业。据国际清洁运输委员会(International Council on Clean Transportation, ICCT)统计,干线飞机的碳排放量占全球客运航空碳排放量的 93%,是脱碳的关键^[4]。

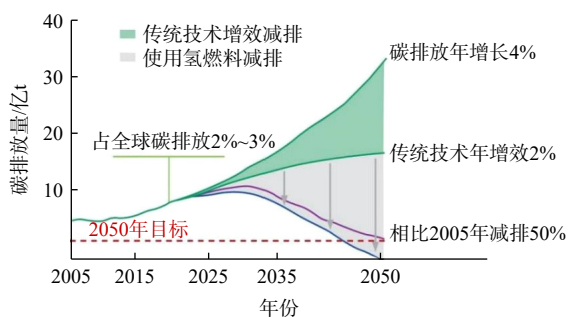


图 1 全球航空业每年碳排放量

航空业碳排放的 98% 来自飞机使用阶段,79% 来自航空燃料的燃烧过程。全球航空业正在从基于通过提高燃油效率减少碳排放的渐进式改革,向开发低碳、零碳航空动力技术的革命性变革方向转变,以期从根本上解决碳排放问题。氢元素是宇宙中分布最广泛的物质,构成宇宙质量的 75%。氢能是通过电解水、化石燃料重整或工业副产品等方式制取的清洁能源,具有可循环、零排放、可储能、能源互联等特点,采用氢能作为航空动力可完全实现零碳排放。国外研究认为,氢能飞机不仅技术上可行,且具备全部短途航线和 93% 远程航线的能力^[5],是航空业实现零

碳目标的理想选择。

1.3 氢是改善飞机飞行性能的优质能源

氢燃烧层流火焰传播速度是航空煤油的 10 倍,有利于燃烧室联焰,在更高来流速度下火焰也能稳定燃烧(图 2),适用于更高的飞行速度条件。洛马公司研究表明,高超声速飞机为实现高速巡航飞行,最好的选择是采用氢燃料涡喷发动机或变循环发动机^[6];氢的可燃极限是航空煤油的近 10 倍,采用氢燃料可在更小的燃料-空气质量比条件下稳定燃烧,且不需要燃料雾化过程,可提升燃烧室燃烧边界,进一步拓宽发动机工作包线;同时,氢燃料为气态且点火能量小,在发动机高空恶劣条件下仍能快速可靠点燃,可提升发动机起动和燃烧稳定性,从而提高发动机高空工作能力;此外,液氢的可用热沉远高于航空煤油,作为优质冷源可用于飞机和发动机的综合热管理,既可通过预冷/间冷等方式参与发动机热力循环,进一步提升发动机性能,还可用于飞机热沉的消耗,有利于高速下热防护,联合飞行平台开展一体化、机载储氢新构型等设计,可实现飞行器马赫数 10 以上的飞行(图 3)。

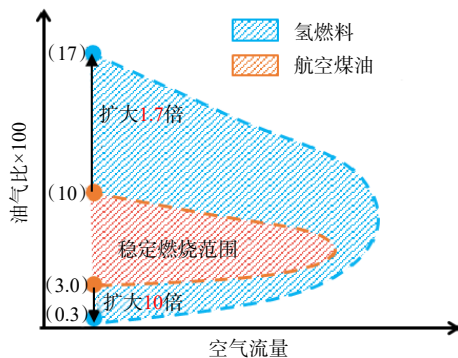


图 2 氢燃料与航空煤油稳定燃烧范围对比

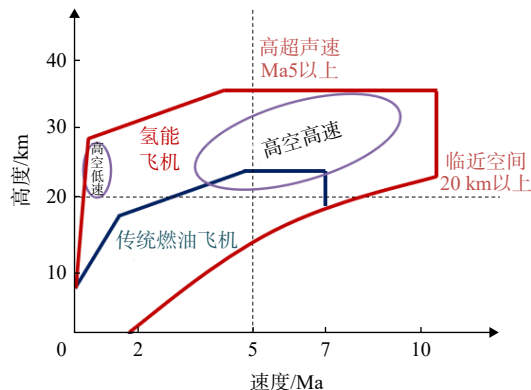


图 3 氢能飞机的优势

1.4 氢能飞机未来应用前景广阔

据统计,2024 年全球氢飞机市场规模价值 11.3 亿美元。据 Precedence Research 预测,氢飞机市场规模到 2034 年将达到 288.9 亿美元左右(图 4)^[7]。按载客量计算,100 座以下的细分市场在 2024 年贡献了最高的市场份额;从航程看,短途细分市场在 2024 年占据最大市场份额。

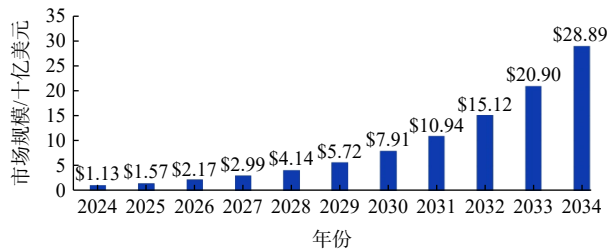


图 4 2024—2034 年氢飞机市场规模预测
(数据来源: <https://www.precedenceresearch.com/hydrogen-aircraft-market>)

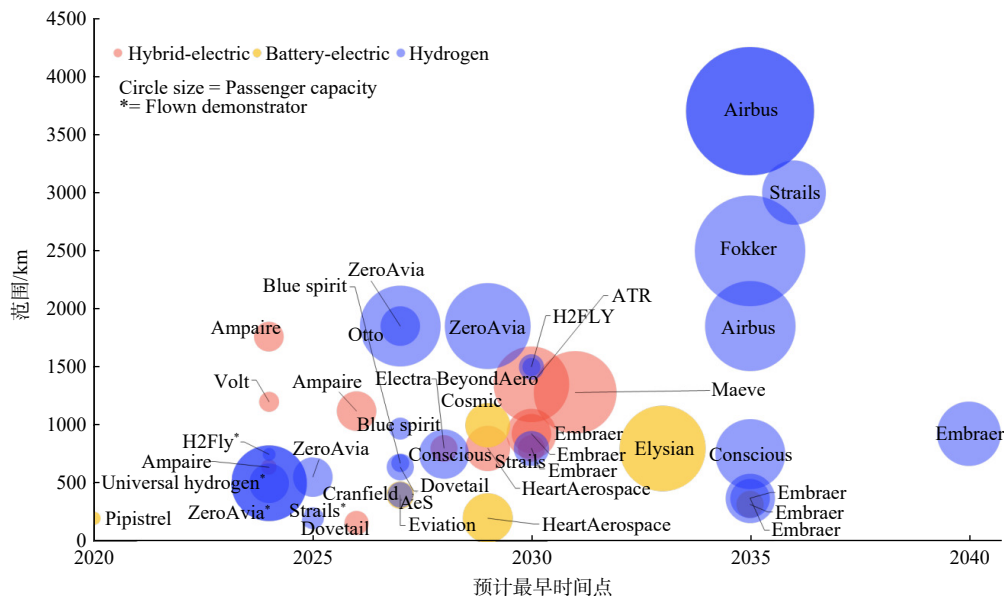


图 5 全球氢能航空动力研究项目

2 氢能在航空领域应用的可行性

2.1 氢能在航空领域应用的可行性已得到验证

从 20 世纪 30 年代的用氢测试,到 20 世纪 50 年代 NASA 氢动力军用飞机研究,再到 20 世纪 80 年代苏联氢动力超声速客机飞行,氢能在航空领域应用的可行性已得到验证。2020 年前,氢能航空技术研究经历了 2 个活跃期。第 1 个时期是在 1950—1960 年,以提高军机性能需求为目的。当时,美国空军启动了

据国际航空运输协会(International Air Transport Association, IATA)统计,当前,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、波音、空客、洛克希德·马丁、克兰菲尔德大学、德国航空航天中心(German Aerospace Center, DLR)、英国航空航天技术研究所(Aerospace Technology Institute, ATI)等开展的氢能航空动力项目可覆盖各种用途和大小的飞机^[8](图 5^[9])。据 ATI 预测,在 21 世纪 30 年代,由于可持续航空燃料(sustainable aviation fuel, SAF)提供动力的升级窄体飞机将占据主导,从而推迟零碳窄体飞机的到来,图 6 为 ATI 预测的开发气态氢和液态氢动力飞机的时间表^[10]。目前,支线级气氢飞机及一些小型液氢飞机正在开展飞行试验,为未来大型商用飞机技术奠定了基础。同时,ATI 提出下一代氢飞机很可能将液氢燃气涡轮与燃料电池相结合作为推进源,预计将在 21 世纪 40 年代投入使用。

“Suntan”项目,资助了洛克希德公司 Ma2.5 的侦察机 CL-400 换氢,研究氢作为燃料来提高高空侦察机性能。美国还同步开展了其他仿真计算和实验研究,探索氢推进、燃料系统、储存和安全性等方面的技术^[11]。这一时期对氢能航空的探索由于技术成熟度不高和政府的担忧而终止。第 2 个时期是在 1980—2000 年,以解决石油危机和能源短缺问题为目的。美国洛克希德公司再次获得 NASA 的资助,研究使用氢气为亚

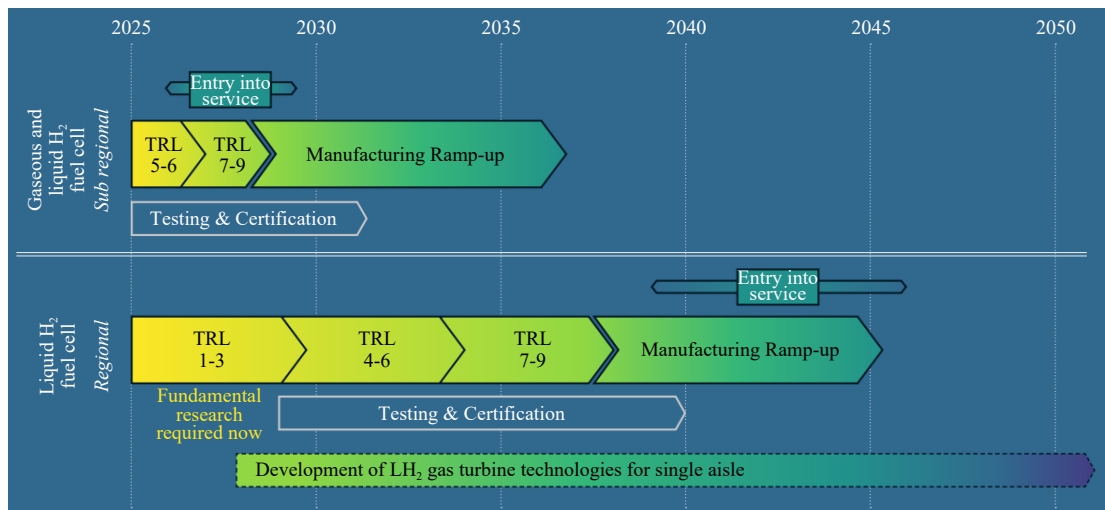


图6 英国航空航天技术研究所预测的氢飞机开发时间表

声速和超声速运输飞机提供燃料,对燃氢涡轮发动机、氢燃料系统、燃料密封系统和飞机方案开展计算研究,因预算有限没有深入展开。石油危机减弱后,当时的氢能航空发动机研究也没有进一步进行。目前,氢能航空动力技术正处于从实验室走向商业化的关键转折点,尽管仍面临技术、成本和基础设施等多重挑战,但发展前景依然乐观,有望重塑全球航空业新格局。

2.2 氢能航空发展已从概念研究转向工程应用

近年来,氢能航空进入快速发展新时期,主要发达国家纷纷发布氢能航空发展相关战略规划和计划,如欧盟《航迹 2050》《氢动力航空:到 2050 年氢技术、

经济和气候影响》、美国《氢能计划发展规划》《氢能经济路线图》、日本《航空脱碳化新技术路线图》等。2018 年 9 月,欧盟启动 ENABLEH2(氢基无二氧化碳空气运输)项目,专注于提高燃料系统热管理技术的成熟度,提出利用低温液氢冷却压气机进口气流,从而减少压气机的压缩功,提升循环效率;利用低温液氢与涡轮冷却空气进行换热,从而提高涡轮进口温度,提升循环效率;利用氢燃料与发动机高温排气进行换热,提高氢燃料的焓值,从而降低燃料消耗(图 7^[12])。2020 年 9 月,空客公司发布了名为 ZEROe 的研究计划,提出了 3 种氢能飞机概念^[13],分别采用上单翼布局翼吊液氢燃料涡桨发动机、常规布局翼吊液氢

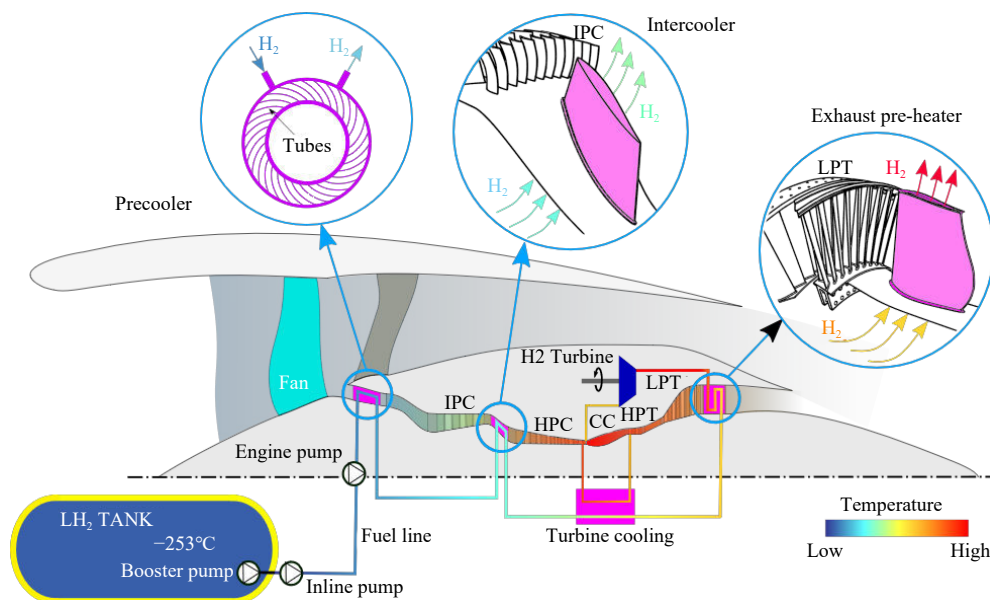


图7 ENABLEH2 项目中基于间冷回热循环的氢能航空发动机研究

燃料涡扇发动机及翼身融合布局液氢燃料分布式动力。2021年,欧盟启动清洁航空(Clean Aviation)计划,首批计划包括6个氢动力飞机项目,总经费为2.1亿欧元;第二批计划新增8个项目,包括混合动力、氢动力技术研究项目等^[14]。2021年,巴西启动 Energia 计划,计划开发低排放飞机,包括开发氢燃料电池驱动的19座飞机和35~50座燃氢涡轮发动机客机。

2021年12月,ATI启动了FlyZero项目,公布了采用2台氢燃料涡扇发动机为动力的液氢燃料远程中型飞机概念^[15]。2022年5月,日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)宣布,将在“绿色创新投资计划”下与川崎重工合作,开发以液氢为燃料的下一代氢能飞机核心技术。2023年4月,瑞士初创公司Destinus宣布,正在开发能够在高度超过50 km、马赫>5飞行的氢动力超声速客机。2025年6月,美国NASA在“创新先进概念计划”(NASA Innovative Advanced Concepts, NIAC)支持下开展氢混电推进技术研究验证,提出航空可持续系统的氢混合动力(Hydrogen Hybrid Propulsion for Aviation Sustainable Systems, Hy2PASS)(图8),通过解耦压气机与涡轮的机械联动,使能量转化效率提升40%以上^[16]。高空巡航时,由氢燃料电池供电;紧急爬升时,由燃料电池+涡轮双动力驱动。现已完成原理验证,下一阶段将改装小型公务机进行试验。

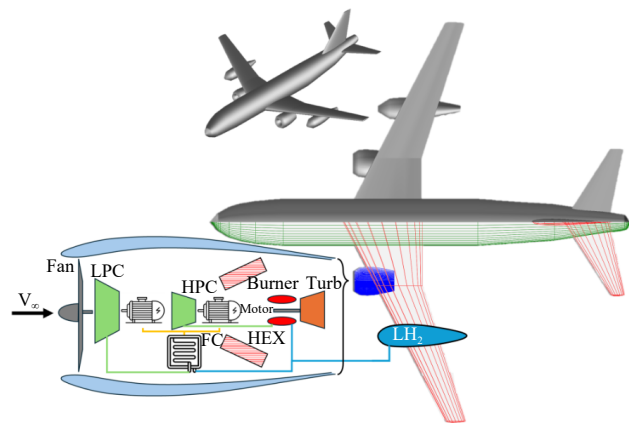


图8 Hy2PASS系统概念图

目前,国外氢能航空发展已从概念研究转向工程应用:燃氢涡轮发动机即将从气氢、部件级地面验证向液氢、整机级试验过渡。2021年6月,CFM国际(CFM International)公司启动了可持续发动机革新技术(revolutionary innovation for sustainable engines,

RISE)验证计划,将直接燃烧氢作为重要研究内容,计划2025年完成氢燃料发动机地面和飞行试验。2022年2月,普拉特·惠特尼集团公司(Pratt & Whitney Group, P&W)获美国能源部(United States Department of Energy, DOE)支持,在氢-蒸汽喷射间冷涡轮发动机(HySIITE)计划下研发高效氢燃料推进技术(图9^[17]),使用该技术有望使下一代单通道飞机发动机氮氧化物排放减少80%,燃料消耗减少35%,计划到2035年后配装飞机投入使用。2022年11月,英国罗尔斯-罗伊斯公司完成了AE2100-A涡桨发动机氢燃烧地面试验,计划2030年前后为中小型飞机提供动力;2023年9月,又完成了“珍珠”700涡扇发动机全环形燃烧室纯氢燃烧试验,验证了氢燃料在最大起飞推力状态下燃烧的技术可行性;2024年6月,验证了低温液氢泵技术,并与德宇航首次模拟发动机真实工况,对燃烧室中氢燃烧进行了光学观察和测量。通用电气(GE)公司于2023年7月完成了纯氢燃烧室部件试验。赛峰集团在2024年1月成功测试了具有高性能回热循环的氢燃料涡轮发动机TP-R90,使用气氢燃料验证了发动机和燃油控制系统在所有使用工况的工作能力;2025年1月,赛峰集团完成了基于超高效回热循环、使用液氢燃料的航空发动机地面试验。

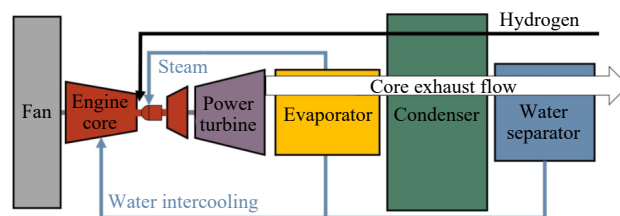


图9 普拉特·惠特尼集团公司氢蒸汽喷射间冷涡轮发动机(HySIITE)概念

2.3 氢能航空生态系统建设是未来发展的关键

氢能航空产业链长,技术研究领域与学科跨度大且高度交叉融合,氢能航空生态系统建设尤为重要,其关键要素包括政府、机场、航空公司、飞机制造商、发动机制造商和能源企业。国外氢能航空发展是通过政府主导下的多利益攸关方协同模式,其核心是政府机构作为战略引导者和资金启动方,通过国家项目牵引,将行业内顶尖企业、研究机构和大学组成联合团队。

欧洲通过欧盟委员会的强力牵引,由空客公司主

导的跨国团队和产业联盟实施了“净洁天空”“清洁航空”等计划,共同制定氢能航空愿景,研究氢供应链及其挑战,评估市场需求,制定政策、法规和激励措施,联合开展技术攻关,合作开发氢动力飞机机场,法国通过多个主体参与的战略合作,构建了全球氢能合作网络。美国氢能航空主要由 NASA 主导的“创新生态”、国防部的需求驱动和初创公司的敏捷竞争来推进,NASA 通过设定宏大的技术目标,通过创新项目的方式资助企业和大学等开展前沿研究;国防部则基于能源和安全需求,推动氢能航空技术的应用;初创公司 ZeroAvia、Joby 等公司利用风险投资和资本市场快速进行技术验证和原型机试飞,加速了创新进程。英国主要通过代表政府的 ATI 与工业界共同资助氢能航空项目,ATI 明确技术路线,罗尔斯-罗伊斯公司攻关动力系统,克兰菲尔德大学开展氢能航空机理与实验研究。

2.4 中国氢能航空动力技术研究开始起步

2016 年以来,中国已陆续出台 16 项政策或规划,支持绿色低碳氢研究应用与发展。在氢能航空发展上,国务院分别在 2016、2021 和 2024 年发布的《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》《2030 年前碳达峰行动方案》和《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》中,对氢能航空技术、产品、产业发展分别做出了规划和部署。2023 年 10 月,工业和信息化部、科学技术部、财政部和中国民用航空局发布《绿色航空制造业发展纲要(2023—2035 年)》,明确规划布局氢能航空新赛道,支持探索氢内燃机技术、氢涡轮发动机技术、氢涡轮混合电推进技术等氢能源飞机关键技术。2024 年 12 月,工业和信息化部、发展和改革委员会、国家能源局联合印发《加快工业领域清洁低碳氢应用实施方案》,明确推进氢燃料电池、氢内燃机、氢涡轮等动力装置理论研究与技术验证,计划到 2027 年在航空等领域实现示范应用。

2021 年以来,中国航空发动机集团(中国航发)开展了燃氢涡轮发动机需求分析、方案设计和关键技术研究,加快氢能航空动力基础理论创新和关键核心技术攻关,在氢燃烧、氢控制、氢密封等关键技术领域取得了阶段性进展^[18]。2021 年,中国航发“微小尺度的氢燃料混合组织燃烧”技术研究启动,将 200 kg 推力级燃油涡轮发动机改造为燃氢发动机,于 2024 年

8 月成功完成整机地面验证,目前正在攻克氢气计量难题;2025 年 6 月,千牛级氢燃料涡喷发动机成功完成国内首次氢燃料航空涡轮动力飞行验证,采用 70 MPa 气氢储控/加注系统,成功开展了多高度氢涡喷空中起动点火、氢涡喷主动力巡航飞行、氢涡喷空中加减速测试等项目,最大飞行高度为海拔 3 km;2025 年 11 月,中国航发兆瓦级氢燃料涡桨发动机亮相亚洲通用航空展,提出了“对撞射流微混燃烧室技术”,是突破氢燃料航空发动机“爆震”与“高 NO_x”难题的关键核心技术,该发动机已完成 60 h 持续摸底试验。2023 年,中国航空工业集团有限公司的氢燃料电池混合动力验证机“灵雀-H”成功试飞,航程突破 200 km。辽宁通用航空研究院、沈阳航空航天大学、中国商飞北京民用飞机技术研究中心、浙江氢航客机有限公司等也在积极研发氢燃料电池动力。

3 氢能航空动力发展仍面临诸多挑战

尽管氢能在航空领域应用的可行性已得到验证,但氢能飞机技术尚未发展成熟,距离实际应用仍需时日。目前,氢涡轮喷气飞机技术成熟度为 4 级,仍处在实验室环境下的关键技术验证阶段,而氢涡桨飞机的技术成熟度为 6 级,开始在使用环境下验证关键技术(图 10^[19])。2025 年 2 月,空客公司宣布将氢动力飞机投入使用时间表推迟 5~10 年,主要原因是部分关键技术的成熟度提升速度低于预期,同时基础设施进展缓慢,规模化可再生能源制氢的供应能力有限^[20]。

3.1 产业链有待完善,关键技术尚待突破

氢能航空产业链上游涉及制氢产业。当前的化石燃料制氢和工业副产品制氢的碳排放量高,产出多为灰氢和蓝氢;电解水制氢是最佳的绿氢生产方式,但受电力价格的影响,制氢成本高;需要加快布局利用可再生能源电解水制氢产业。产业链中游主要涉及氢储运产业。目前,无论航空公司还是机场配套设施,都不适合氢能飞机商业化运行,需要重新搭建基础与配套设施^[21]。产业链下游涉及氢能应用领域。需要加快发展适应低储氢体积占比的飞机新构型,攻克氢能航空动力技术,以及机载储氢与氢加注、氢燃料交叉供给和传输、氢加压/吹洗和应急排放等技术。以储氢技术为例,在航空领域,其储氢系统设计有严

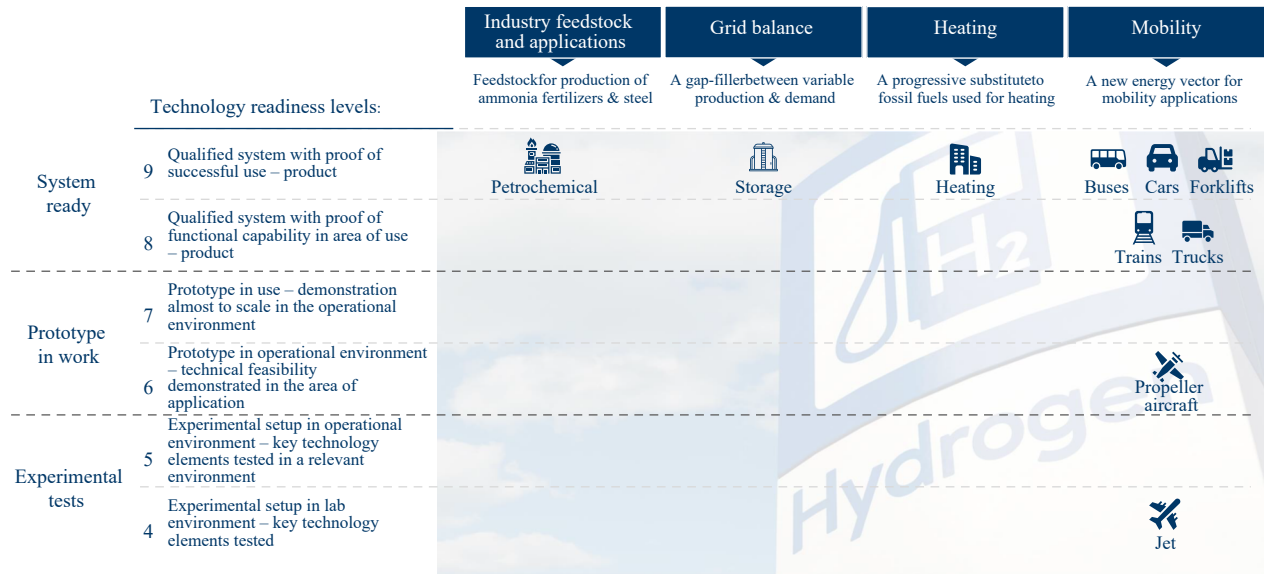


图 10 氢能在不同领域应用的技术成熟度等级

苛的要求,必须克服包括高存储容量、轻质量、高循环稳定性和完全可逆性等挑战。由于飞机载荷有限,对储氢系统的质量储氢比提出要求,研究表明,当通勤飞机、短程飞机和远程飞机的液氢燃料储供系统质量储氢比分别超过 20%、35% 和 38% 时,液氢动力飞机在经济性上比传统煤油飞机更具优势^[22],同时,液氢的存储温度是-253℃,轻质储罐构型和高效绝热材料是难点。固态储氢安全性高,是未来机载储氢的重要发展方向,但现阶段燃料质量分数仅为 1.5%~7%,需要进一步优化材料质量占比,同时还面临低温环境下释氢速度慢的问题。

氢能航空动力发展不仅仅是把燃油替换成氢,还需要解决在工程约束下的系统布局,以及应用带来的其他技术挑战,是涉氢技术全体系的技术创新。对航空动力本身而言,需要突破氢循环技术、氢换热技术、氢控制技术、机载氢传输技术、氢能飞机与动力的一体化等总体匹配与系统集成技术,氢燃烧技术、适氢叶轮机技术、适氢匹配先进单元体技术。例如,液氢从储罐到发动机的流动过程极其脆弱,需要使用专门设计的低温泵将-253℃ 的液氢加压输送,同时保持低温状态以防止液氢气化,管道必须具备极佳的真空绝热层,需要配备主动/被动防潮装置,防止冷凝水积聚导致腐蚀,在进入燃烧室前,液氢需通过换热器快速气化,并精确计量流量,这一过程涉及复杂的瞬态操作管理^[23];一旦液氢没有完全气化并形成气液两相流,容易在管路中使氢达到临界速度进而引发管路

堵塞^[24];氢燃料燃烧时火焰传播速度快,若喷嘴出口流速不足以克服火焰传播速度,火焰会窜回喷嘴内,导致燃烧室损坏^[25];氢的导热性约是空气的 7.5 倍,高导热性会导致燃烧室局部温度波动迅速传递,容易激发高频压力脉动;因此,对于燃氢涡轮发动机,需要在氢燃烧室、燃料管路、氢控制、热管理系统等方面进行创新设计,突破氢稳定燃烧、回火控制等关键技术。此外,还要解决油改氢后相关零部件在高温水氧环境下的适应性改进、安全用氢带来的系统复杂性和重量增加等问题;高含湿排气的喷流航迹云凝结机理等基础研究也缺少研究数据;需要开展系统性功能集成、结构简洁设计、轻量化研究、高温水氧和高含湿环境对关键零部件影响的机理研究等;油改氢后,氢能航空动力的运行维护也与使用煤油的传统航空动力有所区别,这也是氢能航空动力投入使用前需要攻克的技术难题。此外,还需特别关注液氢泄漏可能带来的安全风险。

对于航空氢燃料电池动力系统,虽然其具有高能量密度(33.3 kWh/kg,约为航油的 3 倍)、高能量转换效率(≥55%)、低噪声等优势,但燃料电池的功率较低,当前最先进的航空燃料电池堆的功率约为 1.5~2.5 kW/kg,这与涡桨发动机相差一个数量级,严重限制了燃料电池动力在支线、干线客机中的应用。对于质子交换膜燃料电池,其催化剂“铂”成本过高,效率较低(35%~40%),工作温度范围窄(约 25~120 K);对于固体燃料电池,目前发展尚不成熟,其功率密度低

于 1 kW/kg; 此外, 完整的燃料电池系统除了电堆, 还包括复杂的气体管理系统、水管理系统、功率调节系统、热管理系统等^[26], 这就意味着氢燃料电池系统的质量必须尽可能轻, 这对材料提出极高的要求。

3.2 特有试验设施和条件缺乏, 试验体系不完备

试验是揭示科学机理、验证关键技术的必要手

段, 航空发动机是设计出来的, 也是制造出来的, 更是试验出来的。洛克希德公司发现, 由于氢能航空技术研究的开创性, 几乎每前进一步都必须进行大量的试验来验证理论分析的正确性。氢能航空动力涉及循环、燃烧、换热、传输、测控、安全、涉氢材料等关键核心技术, 每项技术都有必须要完成的试验(图 11)^[27]。

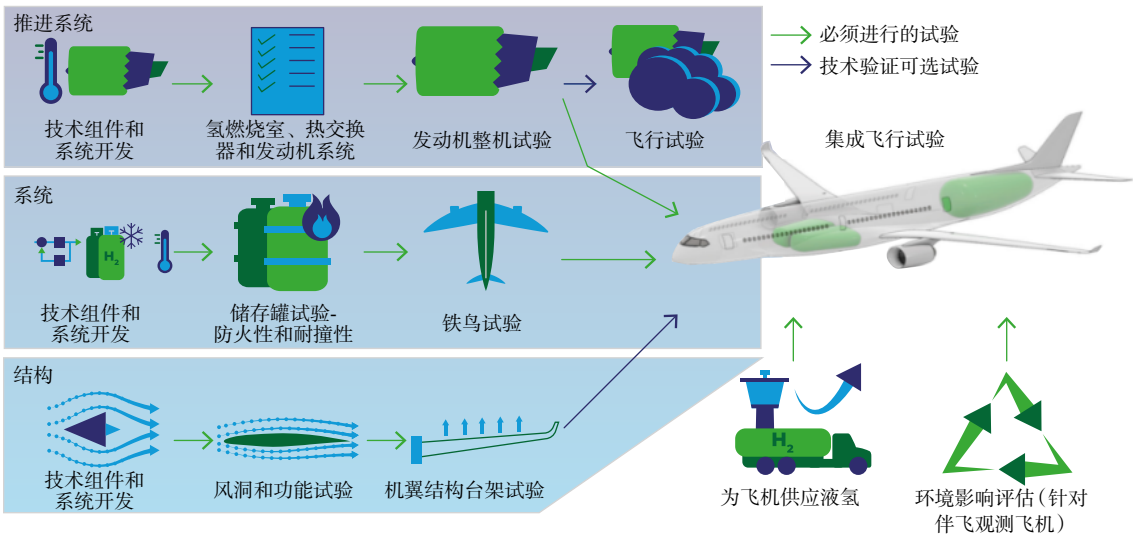


图 11 氢能航空动力关键核心技术与试验

虽然氢能在航天领域早有应用, 但与航空领域使用条件差异较大。研究选取了几个典型发动机的数据, 大致分析了液体火箭发动机与氢能航空动力的试验装置的差异(表 1), 其试验设备和试验经验无法直接用于航空领域, 例如, 试验时长量级的差异会影响很多问题的处理思路, 如供气方式、噪音、污染排放等; 介质压力、流量、节流需求的量级差异会导致试验管阀无法直接兼容; 氧化剂供应方式的差异使试验配套设施的需求不同。

表 1 航空与航天领域氢能动力试验装置的差异

参数	液体火箭发动机试验装置	氢能航空动力试验装置
试验时长	秒级	小时级
最高试验压力	数十兆帕级	数兆帕级
燃料流量	吨/秒级	千克/秒级
最大推力与最小推力的比值(节流需求)	≤3	≤50
氧化剂供应	液氧储罐	压气机组/高压气罐

DLR、美国 NASA 格林研究中心、俄罗斯中央航空发动机研究院(Central Institute of Aviation Motors,

CIAM)等研究机构在 20 世纪就已布局面向航空发动机的氢燃料试验装置, 已建成涵盖氢燃烧、换热、测控、安全等氢能航空动力试验设施, 在关键技术研究方面发挥了重大作用。而目前中国满足氢能航空动力技术研究要求的试验设备仅 6 台套, 主要集中在高校, 且只有极少量气氢机理级试验器, 燃烧室试验台技术参数也偏低, 缺乏面向工程应用的部件试验、整机试验和测试能力, 难以满足氢能航空动力研究需求。

建设开放共享的氢能航空动力试验装置, 满足氢能航空动力科学问题验证和关键技术攻关需求, 是氢能航空动力研发的必要条件。

3.3 行业优势力量分散, 缺乏顶层设计与引领

当前, 中国氢能航空领域虽已汇聚了航空工业集团、中国航发集团、航天科技集团、重点高校及一批创新企业的研发力量, 但在国家层面尚未形成清晰有力的战略牵引与系统性布局。研究资源呈现出“点状分布”特征: 各单位基于自身技术积累, 分别在燃氢涡轮发动机、氢内燃机、燃料电池电堆、轻型储氢罐等细分方向独立推进, 彼此间技术路线各异, 研发目标分散。这种产业优势资源整合不够的现状, 导致宝贵

的科研资金与人才投入难以汇聚形成合力,重复性预研与低水平竞争时有发生。

氢能航空横跨航空制造、能源化工、新材料与电力电子等多个重大产业,其发展亟需超越单个部门或企业的宏观规划与协调。然而,目前缺乏一个权威的顶层架构来定义中国氢能航空的阶段性发展目标、主导技术路径与分工协同网络,使得基础研究、关键技术攻关、集成验证与适航审定等环节衔接松散;尚未建立由国家主导,能够统筹科技、工业、能源、民航等部门的专项决策与协调机制;也缺乏类似国家重大科技专项那样的长期、稳定、集中的资源投入渠道。这种顶层设计的缺位,不仅使国内技术路线长期徘徊在分歧与不确定中,难以像空客 ZEROe 计划那样清晰地向产业界传递未来飞机的技术愿景,也使得中国在氢能航空国际标准制定方面话语权薄弱,只能被动跟随。

4 建议

1) 保持氢能航空发展战略定力。当前,氢动力飞机以其独特的优势,正成为全球航空领域的研究热点,主要航空制造商正在加紧构建氢能产业链。中国已明确未来氢能航空发展战略方向与技术路线,作为世界最大制氢国,中国在制氢、氢储运、燃料电池等关键技术领域已取得显著进展,具备从基础研究到工程应用的协同创新能力。因此,应坚定氢能航空发展信心、保持战略定力,做好顶层规划,保持政策连续性和投入稳定性。

2) 创新氢能航空发展组织模式。依托正在建设的氢能航空重大科技基础设施,完善氢能航空动力试验设施设备,补齐试验体系,发挥国家实验室和领军企业作用,引导各类创新主体及用户,形成对氢能航空发展的科学认知与共识,打造氢能航空国家战略科技力量;创新氢能航空科研组织模式,通过专业化分工、体系化协同,系统组织开展氢能航空全链条颠覆性科技创新。

3) 构建氢能航空创新发展生态。制定《中国氢能航空全产业链发展纲要》,明确阶段目标、技术路径、重点任务和责任主体;构建氢能航空创新联合体,充分发挥国家战略科技力量作用,探索“创新链+产业

链”双链融合管理模式,推动科技创新和产业创新深度融合,建立“制氢—储运—加注—飞机/动力研发—运营—适航—维护”的氢能航空全链创新生态。

4) 实施氢能航空国家重大专项。实施国家重大科技专项,系统规划氢能航空技术发展,分阶段推进军民用氢能航空技术研究,制定短期(5~10年)、中长期(10~20年)氢能航空应用场景和技术路线,同步推动技术、政策和基础设施“三位一体”发展。

参考文献(References)

- [1] Ballentine C J, Karolytè R, Cheng A R, et al. Natural hydrogen resource accumulation in the continental crust[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2025, 6(5): 342–356.
- [2] Airbus. Airbus showcases hydrogen aircraft technologies during its 2025 Airbus Summit[EB/OL]. [2025–11–17]. <https://www.airbus.com>.
- [3] 向巧, 胡晓煜, 王曼, 等. 关于氢能航空动力发展的认识与思考[J]. *航空发动机*, 2024, 50(1): 1–9.
- [4] Adler E J, Martins J R R A. Hydrogen-powered aircraft: Fundamental concepts, key technologies, and environmental impacts[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2023, 141: 100922.
- [5] Undavalli V, Gbadamosi Olatunde O B, Boylu R, et al. Recent advancements in sustainable aviation fuels[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2023, 136: 100876.
- [6] author, Brewer G D. Hydrogen aircraft technology[M]. Boca Raton: CRC Press, 1991: 43–55.
- [7] Precedence research. Hydrogen aircraft market size and growth 2025 to 2034[EB/OL]. [2025–11–17]. <https://www.precedenceresearch.com/hydrogen-aircraft-market>.
- [8] Hancock C. EASA H₂ activities—general overview[EB/OL]. [2025–11–17]. <https://www.easa.europa.eu/en>.
- [9] Block A, Desharnais J. Enabling a zero-carbon future for aviation[EB/OL]. [2025–11–17]. https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/2025/Envreport2025_30.
- [10] Aerospace Technology Institute. What next for hydrogen in aviation[EB/OL]. [2025–11–17]. https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2025/09/ATI-HCN_Conclusions_FINAL.pdf.
- [11] Brewer G D, Morris R E. Study of LH₂ fueled subsonic passenger transport aircraft[EB/OL]. [2025–11–17]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19760012056>.
- [12] Sethi V, Sun X X, Nalianda D, et al. Enabling cryogenic hydrogen-based CO₂-free air transport: Meeting the demands of zero carbon aviation[J]. *IEEE Electrification*

- Magazine, 2022, 10(2): 69–81.
- [13] Scholz D. Design of hydrogen passenger aircraft: How much "zeroemission" is possible [C]//Hamburg Aerospace Lecture Series 2020. Hamburg: Royal Aeronautical Society, 2020: 11–19.
- [14] European Union. Clean aviation joint undertaking in September 2024[EB/OL]. [2025–11–17]. <https://www.clean-aviation.eu>.
- [15] Barton D I, Hall C A, Oldfield M K. Design of a hydrogen aircraft for zero persistent contrails[J]. Aerospace, 2023, 10(8): 688.
- [16] Ansell P. Hydrogen hybrid power for aviation sustainable systems (Hy2PASS)[EB/OL]. (2025–01–10) [2025–11–17]. <https://www.nasa.gov/directorates/stmd/niac/niac-studies/hydrogen-hybrid-power-for-aviation-sustainable-systems-hy2pass>.
- [17] Cotto B, Patel K, Otto M, et al. Thermodynamic cycle modeling of an ammonia aero engine[C]//Proceedings of AIAA SCITECH 2024 Forum. New York: AIAA, 2024: 2024–1179.
- [18] 曹俊, 李维, 郭政言, 等. 我国氢能航空动力发展研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27(2): 39–48.
- [19] Olivier Saint Esprit. Hydrogen for aviation[EB/OL]. [2025–11–17]. <https://www.iacpartners.com/wp-content/uploads/2022/07/IAC-Partners-Webinar-Hydrogen-for-aviation.pdf>.
- [20] Perry D. Airbus pushes back ZEROe timeline and ditches A380 fuel cell flight-test plan[EB/OL]. (2025–02–08) [2025–11–17]. <https://www.flightglobal.com/air-transport/airbus-pushes-back-zeroe-timeline-and-ditches-a380-fuel-cell-flight-test-plan/161718.article>.
- [21] Singh G, Ramadass K, DasiReddy V D B C, et al. Material-based generation, storage, and utilisation of hydrogen[J]. Progress in Materials Science, 2023, 135: 101104.
- [22] McKinsey&Company. Hydrogen-powered aviation: A fact based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050[R]. Brussels: Publications Office of the European Union, 2020.
- [23] Clean aviation joint undertaking, towards disruptive technologies for new generation aircraft by 2035[EB/OL]. [2025–11–17]. <https://www.clean-aviation.eu>.
- [24] NASA. Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems—Guidelines for hydrogen system design, materials selection, operations, storage, and transportation: NSS 1740.16[S]. Washington, DC: Office of Safety and Mission Assurance, 2005.
- [25] Schefer R W. Reduced turbine emissions using hydrogen-enriched fuels[EB/OL]. [2025–11–17]. https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/ixa1_schefer.pdf.
- [26] Federal Aviation Administration. Hydrogen-fueled aircraft safety and certification roadmap[EB/OL]. [2025–11–17]. https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/step/disciplines/propulsion_systems/hydrogen-fueled_aircraft_roadmap.
- [27] ATI FlyZero. Technology pathways to enable zero carbon emission flight[EB/OL]. [2025–11–17]. <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-IST-MAP-0012-FlyZero-Technology-Roadmaps>.

Maintain strategic resolve to promote sci-tech innovation and development of hydrogen aviation power

XIANG Qiao

TaiHang Laboratory, Chengdu 610213, China

Abstract This paper expounds the necessity and feasibility of the application of hydrogen energy in aviation field, reviews the research and development history of hydrogen aviation power at home and abroad, looks forward to the development prospect of hydrogen aviation power, points out that the development of hydrogen aviation power needs the reconstruction of the whole industrial chain, the innovation of the whole chain, the whole process test and the establishment of a new national system, and puts forward some suggestions, such as firm confidence in promoting the development of hydrogen aviation, building a national strategic scientific and technological force of hydrogen aviation, building an innovative development ecology of hydrogen aviation, and implementing the national science and technology project of hydrogen aviation.

Keywords hydrogen aviation; hydrogen turbine engine; hydrogen fuel cell; test facility; industrial chain; innovation consortium ●



(责任编辑 王丽娜)