DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.10.036

我国氢能航空动力发展研究

曹俊[1]，李维[1]，郭政言[1]，孙付军[1*]，康尧[1]，曾琦[1]，赵明东[1]，尹泽勇[2]

（1. 中国航发湖南动力机械研究所，湖南株洲 412002；2. 中国航空发动机集团有限公司科学技术委员会，北京 101304）

摘要：氢燃料是航空业实现净零碳排放和可持续发展的理想燃料，将给航空领域带来颠覆性的技术变革和产业重构；发展氢能航空动力是航空业实现“双碳”战略目标的重要举措。本文通过文献调研，总结了氢能航空动力的利用形式，从氢能航空动力的安全性、高原性能、燃料消耗率、污染物排放等方面着力分析后认为，氢燃料应用于航空动力是可行的；对世界主要国家、飞机／发动机制造商的氢能航空动力发展现状进行了梳理；从氢能航空动力的环保性、性能提升、高原高寒地区快速起动、高超声速等方面分析了氢能航空动力具有工程实用价值，并分析了氢能航空动力在飞机／发动机一体化设计、机载液氢存储、氢精准计量和控制、热管理、稳定低排放燃烧等方面面临的技术挑战。基于此，论证了氢能航空动力面向2028年、2035年和2050年的发展目标，从标准体系、机场氢能基础设施、关键应用技术、人才培养4个方面提出了氢能航空动力的发展重点和实施路径。研究建议，加强统筹协调，成立氢能航空发展联盟；建立和健全标准体系，推动氢能航空发动机安全高效发展；布局关键技术研究，加快民用氢能航空动力平台建设，以推动我国氢能航空动力的发展。

关键词：净零碳排放；氢燃料；航空动力；氢涡轮；氢燃料电池；飞机／发动机一体化设计

中图分类号：TD67；TD82　　**文献标识码：**A

Development of Hydrogen-Based Aviation Power in China

Cao Jun[1], Li Wei[1], Guo Zhengyan[1], Sun Fujun[1*], Kang Yao[1], Zeng Qi[1], Zhao Mingdong[1], Yin Zeyong[2]

(1. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, Hunan, China, 2. Science and Technology Committee of Aero Engine Corporation of China, Beijing 101304, China)

Abstract: As an ideal fuel for achieving net-zero carbon emissions and sustainable development in the aviation industry, the hydrogen fuel will bring disruptive technological changes and industrial restructuring to the industry, and developing hydrogen-based aviation power is an important measure to achieving the carbon peaking and carbon neutralization goals for the aviation industry. This study first summarizes the utilization forms of hydrogen-based aviation power through literature research, and concludes that the hydrogen fuel is applicable to aviation power considering the safety of hydrogen as well as the high-altitude performance, fuel consumption rate, and pollutant emissions of hydrogen aviation powerplants. Subsequently, the current development status of hydrogen-based aviation power in major countries and aircraft/engine manufacturers worldwide is reviewed. The practical engineering values of hydrogen-based aviation power are explored from the perspectives of environmental protection, performance improvement, quick-start in high-altitude and high-cold regions, and hypersonic flight. Moreover, the study presents the technical challenges faced by hydrogen-based aviation power development in terms of integrated aircraft–engine design, onboard storage of liquid hydrogen, precise hydrogen

收稿日期：2024-10-17；**修回日期：**2025-02-12

通讯作者：*孙付军，中国航发湖南动力机械研究所高级工程师，研究方向为航空发动机；E-mail: sunfujun_burner@163.com

资助项目：中国工程院咨询项目“新能源航空发动机发展战略研究”(2023-XBZD-15)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

metering and control, thermal management, and stable low-emission combustion. Finally, it proposes the development goals of hydrogen-based aviation power toward 2028, 2035, and 2050, and provides development priorities and implementation paths from four aspects: standards system, hydrogen infrastructure in airports, key application technologies, and talent cultivation. Furthermore, the following recommendations are proposed: (1) strengthening the overall coordination by establishing a hydrogen aviation development alliance; (2) establishing and improving the standards system to promote the safe and efficient development of hydrogen aviation engines; and (3) developing key technologies and accelerating the construction of hydrogen-based aviation power platforms for civil use.
Keywords: net-zero carbon emission; hydrogen fuel; aviation power; hydrogen gas turbine; hydrogen fuel cell; integrated aircraft–engine design

一、前言

近年来，温室气体排放导致的地球气候变化问题愈发严峻，引起全球广泛关注。目前，来自航空业的碳排放约占全球碳排放总量的2%，预计2050年的碳排放量占比将达到25%[1]。航空业的碳排放主要来自飞机燃油的燃烧排放（约占79%）、与飞机相关的地面排放以及与航空相关的用电量产生的碳排放[2]。从实现“双碳”目标的角度来看，逐步减碳至最终实现净零碳排放是航空业绿色低碳发展的关键和未来航空业发展的趋势。国际民航组织（ICAO）在2016年正式通过了国际航空碳抵消和减排计划[3]，要求2027年以后其成员国的所有航空公司均须强制执行；在2020年确定了长期气候目标，要求在2050年前实现国际航空业CO_2净零排放。2021年，国际航空运输协会通过了在2050年实现净零排放的决议[4]。我国提出“双碳”战略目标后[5]，2021年，中国民用航空局明确要求，2025年航空运输吨千米的碳排放量相比2020年要下降4.5%，单位旅客能耗下降10%。

在有潜力应用于航空的低碳燃料中，氢燃料因其来源广泛、质量能量密度高、绿色零碳、燃烧性好等优势[6]，成为航空业实现零碳排放和可持续发展的理想燃料。可以预判，氢能航空动力将成为未来航空的主要动力形式，推动航空领域产生颠覆性技术变革和产业重构[7]。美国在20世纪50年代为B57轰炸机配装的J65涡喷发动机，实现了液氢动力飞行[8]。随着航空业减碳要求的提出，欧美国家均制定了国家级科研计划来开展氢航空动力研发，并取得了突破性进展。2023年，英国罗尔斯–罗伊斯公司完成了100%氢燃料的全环燃烧室性能试验[9]，验证了在航空发动机最大推力状态下燃用氢燃料的技术可行性。目前，我国氢燃料航空动力研究处于技术培育阶段，基础薄弱、技术成熟度不高，在技术研究、集成验证和飞行试验等方面暂落后于欧美国家；此外，氢能航空动力的标准体系及试验设施不完善，飞机/发动机协同设计配合度低，技术和产业发展迟缓，亟需开展相关研究。

积极发展氢能航空动力，有利于我国抢占航空动力变革的新赛道，迅速赶超世界先进水平，提高同国际航空动力强国和优势航空企业的市场竞争力，打破欧美航空动力强国的垄断地位，实现航空动力发展的“换道超车”，同时带动我国航空动力和氢能等多个相关产业的整体发展，促进经济增长。基于此，本文通过对世界主要国家、飞机/发动机制造商的氢能航空动力发展现状进行分析，总结氢能航空动力的利用形式、可行性、主要技术挑战及工程实用性，提出氢能航空动力的发展目标、发展重点和实施途径，基于我国氢能航空动力发展现状及存在的问题，提出适用于我国国情的氢能航空动力发展建议。

二、氢能航空动力的利用形式与可行性

（一）氢能航空动力的利用形式

现阶段，氢能航空动力技术的利用形式大致分为氢涡轮、氢燃料电池和氢燃料混合动力。氢涡轮的结构与现役航空涡轮发动机基本相同。氢燃料在燃烧室内燃烧，然后推动涡轮并带动风扇产生推力。氢燃料与传统石化燃料相比，具有完全不同的物理化学特性，需要对传统航空发动机的燃烧室、氢燃料管路、综合热管理系统进行改进或重新设计，以满足氢燃料的使用要求[10]。另外，为进一步降低NO_x的排放量，需要开发针对氢燃料涡轮发动机的大尺度直接混合燃烧、大尺度预混合燃烧、微混合燃烧等低排放燃烧技术[11]。

氢燃料电池是按照电化学原理，通过氧化还原反应，将氢气和氧气中的化学能直接转化为电能。氢燃料电池在航空动力方面的利用方式为：通过燃料电池发电供应电动机，由电动机带动风扇或者螺

旋桨做功；氢燃料电池产生的富余电力可以储存在蓄电池中，供飞机在爬升、起飞等状态下使用。氢燃料电池的效率为45%~50%，高于燃用航空煤油的传统航空燃气涡轮发动机30%~40%的效率[11]。目前，氢燃料电池主要有质子交换膜氢燃料电池、固体氧化物氢燃料电池、碱性氢燃料电池、磷酸氢燃料电池、熔融碳酸盐氢燃料电池[12]等。

受电池能量密度限制，氢燃料电池暂不适用于中远程氢能飞机飞行，因此，将氢涡轮与氢燃料电池结合，研究人员提出了氢燃料混合动力方案。氢燃料既进入燃气涡轮中燃烧做功，又进入燃料电池中进行氧化还原反应产生电力，电动机与燃气轮机通过减速器同时对风扇 / 螺旋桨输出轴功[13]。氢燃料混合动力结合了氢燃料电池和氢涡轮的优势，在地面慢车等小功率状态下，氢燃料电池单独提供动力；在起飞、爬升等大功率状态下，采用氢涡轮为主、氢燃料电池为辅助的混合动力模式。

（二）氢能航空动力的可行性分析

1. 氢安全性分析

安全性是氢燃料在航空领域广泛应用的首要条件。氢燃料化学组成单一，热辐射、毒性危险均要低于航空煤油[11]（见表1）。氢燃料与航空煤油的物理化学性质存在巨大差异，氢燃料的冻伤、泄漏和非明火燃烧风险均要高于航空煤油，需要突破液氢密封关键技术、发展金属储氢和有机物储氢等新型储氢技术、建立相应的氢能航空动力适航安全标准，推动氢燃料在航空领域的大规模使用。

2. 氢能航空动力性能分析

相比于航空煤油，氢燃料的质量热值高、燃烧范围宽、火焰传播速度快且只有单一氢元素，使氢涡轮航空发动机在推力 / 功率、高原性能、燃料消耗率、污染物排放（碳排放）水平等方面具有显著优势（见表2）。此外，与燃用航空煤油的航空发动机相比，氢燃料电池具有无噪声、能量转换效率高、零碳和零NO_x排放等优势。美国ZeroAvia公司氢燃料电池商用飞机的成功试飞[14]、英国罗尔斯 – 罗伊斯公司“珍珠”700发动机全环燃烧室氢燃料的性能达标[9]、我国氢涡轮成功试车等工程实践表明，氢能作为航空动力在航空业应用是可行的。

表1　氢气和航空煤油的安全性对比

对比项目	氢燃料	航空煤油
热辐射危险	低	高
冻伤危险	高	低
泄漏危险	高	低
着火温度高低	高	低
非明火燃烧危险	高	低
毒性危险	低	高

三、国内外氢能航空动力的发展现状

在全球碳排放和绿色航空发展的背景下，美国、欧盟、英国等国家和地区积极抢占氢能航空动力的技术高地，依托国家级预研计划，持续开展氢能航空动力关键技术研究，研究领域涵盖氢涡轮动力、氢燃料电池动力、机载储氢、氢能飞机架构、机场氢能基础设施、运营安全与认证6个方面[15]。

（一）美国

美国传统航空公司和初创公司协同推进氢能航空动力的关键技术研发与攻关。2020年8月，波音公司和澳大利亚联邦科学与工业研究组织联合发布《商用航空中的氢能机会》[16]，制定了近期、中期和远期3个阶段的发展目标：近期是用氢燃料电池替换目前使用液体燃料和其他类型电池的机场设备；中期是利用氢气与CO_2结合，生产不需改变现有航空基础设施的过渡燃料；远期是2050年以后推动氢基燃料完全替代传统航空燃料。2022年2月，国际发动机公司（CFM）与空客公司签署合作协议，进行氢涡轮动力系统研发验证，为2035年氢动力航空器投入使用做准备。CFM国际公司负责改造通用电气航空公司Passport发动机的燃烧室、燃料系统和控制系统，使之能够与液氢燃料相匹配[17]。

表2　以氢气和航空煤油为燃料的航空发动机性能对比

对比项目	氢燃料	航空煤油
推力 / 功率	★	☆
高原性能	★	☆
燃料消耗率	★	☆
燃料箱体积	☆	★
计量难度	☆	★
污染物排放	★	☆

注：★表示性能更优；☆表示性能一般。

2023年1月，美国初创公司ZeroAvia以氢燃料电池为动力（氢气存储罐和燃料电池安装在机身内部），成功试飞了通勤飞机，预计2025年可投入运营[18]；2023年7月，美国ZeroAvia公司同样以氢燃料电池ZA600为动力，完成了Dornier 288飞机首飞，燃料电池功率高达600 kW[19]。另外，2023年3月，美国Universal Hydrogen公司以氢燃料电池为动力，完成了Dash 8-300飞机首飞，电池功率高达800 kW；现已相继开展了10次飞行试验来验证以氢燃料电池为动力的氢能飞机技术成熟度以及飞行包线扩展情况[20]。

（二）欧盟

欧盟启动了一大批氢能航空项目，使其在全球氢能航空动力发展中处于领先地位。2023年1月，欧盟“清洁航空联合行动”正式启动了第一批项目，其中有8个为氢动力项目，主要涉及氢涡轮推进技术、兆瓦级氢燃料电池动力技术、机载储氢技术等[21]。欧洲“清洁氢能联合行动计划”于2021年11月启动，推动持续研发航空氢燃料电池及其相关技术，其中2023年的研究内容主要包括机载液氢储罐、航空用氢燃料电池及辅助动力装置等[22]。

2021年，法国赛峰集团联合通用电气航空公司推出了可持续发动机革命性创新技术开发项目，旨在研发一款未来发动机，能100%兼容可持续航空燃料或氢燃料[23]。2023年5月，赛峰集团、空客公司、阿丽亚娜集团共同开展了航空氢推进项目，完成了氢涡轮动力中氢气调节系统的概念验证测试[24]；2023年6月，赛峰集团针对氢涡轮发动机的燃烧子系统[25]，开展了氢气从储罐到喷射燃烧的全过程稳定性和可行性验证。

（三）英国

英国在国家政策的支持下，依托罗尔斯–罗伊斯公司等传统航空公司，积极开展氢能航空动力关键技术研发。英国航空航天技术研究院在“零碳飞行”项目的研究成果中，给出了氢能航空可行性报告和13个技术领域的发展路线图，包括氢燃料涡轮发动机、氢燃料电池、电推进系统、低温氢燃料系统和储存等6项关键技术，研究指出氢能飞机在技术上是可行的[26]。另外，英国航空航天技术研究院资助罗尔斯–罗伊斯公司研发与氢涡轮动力相关的关键技术，主要包括液氢涡轮动力的氢燃烧室零部件和子系统结构设计技术、集成的氢涡轮动力系统和储氢技术[27]。

2022年11月，罗尔斯–罗伊斯公司与易捷航空公司合作，利用改装后的AE2100-A支线喷气发动机完成了全球首次采用氢燃料的现代航空发动机试车[28]。2023年9月，罗尔斯–罗伊斯公司、英国拉夫堡大学和德国航空航天中心合作，基于“珍珠”700发动机全环形燃烧室，重新设计了氢燃料喷嘴，通过干预空气和氢燃料的反应速率来控制火焰的位置以防止发生回火，成功进行了100%氢燃料的燃烧测试，验证了氢燃料可以在最大起飞推力状态下进行燃烧，排放也符合预期[9]。

（四）中国

我国在氢能航空动力领域的研究起步较晚，但近年来逐步加快布局，在国家政策支持以及企业、科研院所等技术攻关下，已取得阶段性成果。2023年10月，工业和信息化部、科学技术部、财政部、中国民用航空局等四部门联合印发的《绿色航空制造业发展纲要（2023—2035年）》明确指出，进行氢能源飞机可行性论证与关键技术攻关，开展氢内燃机、氢涡轮发动机、氢涡轮混合动力、高效储氢技术、机载设备与可靠性研究，加快突破高效液氢存储系统、氢动力部件及整机试验装置、高效低排放氢燃烧、精确氢控制、综合热管理等氢能源核心系统关键技术[29]。2021年以来，中国航空发动机集团有限公司加快氢能航空动力基础理论创新和关键核心技术攻关，在氢燃料涡轮发动机和氢燃料混动发动机两个方向均已启动相关研究工作，并在氢燃烧、氢控制、氢密封等关键技术领域取得了阶段性进展；中国航空工业集团有限公司在2023年成功试飞氢燃料电池混合动力验证机“灵雀-H”，航程突破200 km。

（五）其他国家

俄罗斯依托传统能源优势和航空工业基础，逐步探索氢能技术在航空动力领域的应用，但起步相对较晚。俄罗斯中央航空发动机研究院和俄罗斯联合发动机公司计划在5年内将VK-2500发动机改造为氢燃料发动机，改造内容主要涉及低温液氢储罐、恒温控制系统以及液氢供应系统等；改造后的

氢燃料发动机计划在雅克-40LL 飞机试验平台上进行测试。

日本推出了“下一代飞机”发展计划，由日本宇宙航空研究开发机构和文部科学省等联合攻关氢涡轮动力、液氢储罐、氢动力飞机机体结构等关键技术，并计划2030年突破相关技术，以提高日本航空业的竞争地位。

综上所述，世界主要航空强国均制定了氢能航空动力发展计划和发展路线图，注重氢涡轮、氢燃料电池、氢混合动力、飞机 / 发动机一体化设计及机载液氢等关键技术研发，提高氢燃料在航空领域应用的技术成熟度。

四、氢能航空动力的工程实用性与关键技术挑战

（一）氢能航空动力的工程实用性

1. 环保性分析

针对氢涡轮航空动力，以氢气为燃料，完全消除了传统的基于航空煤油的航空发动机所产生的CO_2、CO、未燃碳氢、碳烟等污染物，实现了零碳排放。另外，尽管氢燃料绝热火焰温度较高，不利于NO_x的排放控制，但目前提出的大尺度直接混合燃烧[30]和微混燃烧[31]两种燃烧组织技术方案均可将氢燃烧NO_x排放量控制在可接受范围内。2023 年 9 月，罗尔斯 – 罗伊斯公司基于“珍珠”700 发动机全环形燃烧室进行了 100% 氢燃料的燃烧测试，其NO_x排放符合预期[9]。

2. 推力 / 功率提升

在常规热力循环下，推动发动机推力 / 功率提升。在相同热力循环条件下，氢发动机燃气的定压比热容更大，涡轮做功能力更强。以 1 MW 发动机为例，相比传统发动机，改用氢燃料常规循环的发动机功率较航空煤油可提升 10% 左右，发动机热效率提升 6% 左右。在非常规热力循环下，可以推动发动机推力 / 功率提升。基于氢工质深冷的特性，可对航空发动机分别建立预冷、间冷和回热非常规循环模式，这 3 种氢工质循环模式可单独使用，也可组合使用，均能提升发动机的单位功率 / 推力，并进一步降低发动机的能耗。其中，间冷循环对发动机性能提升的潜力最大，推力最大可提升 32%，推重比提升 9.2%[32,33]。

3. 高原高寒地区高效起动

氢气的可燃体积分数范围为 4%~75%，其常温、常压的下层流火焰传播速度约为航空煤油的 15 倍，极易着火与燃烧。在常温、常压下，氢燃料最低点火当量比为 0.1，相比之下，航空煤油的最低点火当量比为 0.6[34,35]。因此，氢燃料航空发动机点火起动性能优异，可实现高原高寒地区发动机的高效迅速起动，并极大地拓宽发动机起动包线[36]。

4. 高超声速技术优势

在飞行马赫数达到 5 时，空气滞止温度会达到 920 ℃[37]，远高于航空煤油开始出现氧化沉积结焦的温度值 370 ℃ 以及裂解沉积结焦的温度值 480 ℃[38]，而氢燃料不含碳，使其具有更好的热安定性；氢燃料的热沉性远优于航空煤油，具有更好的冷却效果，可被用作高超声速飞行器动力装置的冷却剂[39]。因此，氢气优异的热安定性和热沉性可有效提升发动机在高马赫数下的工作性能，并避免高马赫数下的结焦问题。

（二）氢能航空动力发展面临的技术挑战

虽然氢能具有绿色环保、能量密度高等优点，但以氢能为动力，实现航空领域的“绿色之旅”仍要面临诸多技术挑战。

1. 氢涡轮的氢燃料稳定、低排放燃烧技术

氢燃料的可燃范围宽、火焰传播速度快等特性，使氢涡轮发生自燃、回火和振荡燃烧的风险显著提高[40]，影响工作安全性；氢燃料的绝热火焰温度高达 2390 K，比传统航空煤油要高约 150 K，会增加NO_x的排放量[41]。因此，将氢燃料应用于涡轮发动机上，实现氢燃料的稳定、低排放燃烧是亟需解决的关键技术之一。

2. 高功率密度、长寿命的氢燃料电池技术

高功率密度是氢燃料电池在有限空间内提供足够电能的关键。航空发动机对尺寸和重量都要求极为苛刻，因此，功率密度是氢燃料电池实现航空应用的关键技术特征之一。长寿命是在复杂环境下确保氢燃料电池系统可靠运行的另一个重要因素。航空发动机的工作条件复杂多变，涉及高温高压、长时间高强度运行和频繁的起降循环等，对氢燃料电池的耐久性提出了极高要求[42]。另外，复杂航空应用环境下的氢燃料电池安全运行和快速起动技术也是其实现工程应用亟需解决的关键。

3. 氢燃料热管理技术

氢涡轮发动机需要新型热管理系统预热氢燃料以实现物态转换，并利用其热值高、热沉高的特点提高涡轮发动机自身性能[43]。由于液氢到气态氢的转化过程剧烈、气态氢压力波动大，需要对氢燃料储箱和管路结构进行精细设计、对氢燃料的换热过程进行精准管控，以确保氢燃料有序、可控地进行热交换和相变。

4. 氢燃料精确计量与控制技术

氢气可压缩性极强，在发动机燃料管路中对阀门的调节具有明显的阻尼、迟滞效应，使得氢气的动态、高精度计量和调节难度极大。考虑到氢燃料在发动机管路中是从液态变换为气态，氢在管路沿程的相变、压力、温度等参数往往处于一种动态变化、振荡的状态，更进一步增加了氢燃料控制和计量的难度[30]。因此，氢燃料计量与控制技术是氢燃料航空动力的关键技术之一。

5. 机载氢燃料存储技术

氢燃料具有高质量能量密度和低体积能量密度的双重特点，如何高效安全地在飞机上存储是氢能航空动力发展及应用的关键技术问题[44]。在航空业已掌握的储存技术中，低温液态储氢最有发展前景，但低温液态储氢能量消耗大，绝热和密封要求高，导致储氢罐结构和配套冷却系统异常复杂，使储氢装置重量大且储氢率低。因此，轻质、安全、节能、高储氢率的液氢储存技术是限制氢燃料实现航空动力应用的技术瓶颈。

6. 氢能航空动力飞机 / 发动机一体化技术

对于氢涡轮需要改变机舱布局、增加机体尺寸以加大氢燃料储存能力，这必然会带来飞机气动外形的变化。而氢燃料电池飞机除了储能方面的考虑外，还要整合电动机、电力电子设备等分布式推进系统，飞机的外形同样需要重新设计。因此，为保证配装氢能航空动力的飞机具备良好的飞行性能，需要采用飞机 / 发动机一体化设计方法，对飞机动力布局形式、飞机气动构型等开展创新性研究。

五、我国氢能航空动力的发展目标与重点

（一）氢能航空动力的发展目标

立足氢能航空动力技术领域，针对未来通用航空、民用航空运输市场以及部分军用航空应用领域等的发展潜在需求，亟需有序推进氢能航空动力重点任务的实施，开展氢燃料电池和氢燃料航空燃气涡轮发动机关键技术及应用基础研究，完善相关试验设备建设。

初期发展目标：到2028年，完成氢能航空动力技术路线制定和基础方案规划，建立小规模集群管网、扩展卡车等储运方式以及移动加氢站等机场氢能基础设施，初步解决机载氢燃料安全存储和氢燃料快速加注问题。针对氢燃料电池航空动力，初步解决氢燃料电池能量密度低、寿命短问题，完成在无人机、小型直升机、城市空运飞机（通勤飞机为主，10座以下）、涡桨短途支线飞机（10~80座，航程1500 km）上试飞；针对氢燃料涡轮发动机，初步突破氢燃料稳定燃烧、低NO_x排放、气 / 液态氢燃料精准计量与控制等技术瓶颈，完成在氢燃料涡桨短途支线飞机（10~80座，航程1500 km）上试飞。

中期发展目标：到2035年，初步建立氢能航空动力技术装备体系、标准体系以及适航设计验证技术方法等，整合天然气输运管道以实现较大规模管道氢储运，解决机载氢燃料的安全高效存储。针对氢燃料电池航空动力，进一步提高电池能量密度和使用寿命，实现在中型干线客机（80~150座，航程4000 km）上试飞；针对氢燃料涡轮发动机，解决氢燃料稳定燃烧、低NO_x排放、气 / 液态氢燃料精准计量与控制、飞机 / 发动机一体化等技术瓶颈，在涡桨短途支线飞机（10~80座，航程1500 km）投入使用以及氢涡轮中程干线客机（80~150座，航程5000 km）上试飞。

长期发展目标：到2050年，健全完善的氢能航空动力技术装备体系、标准体系以及适航设计验证技术方法，建立氢气输运管道以实现大规模氢燃料储运，进一步优化改善机载氢燃料的存储装置以实现安全高效轻量化存储。针对氢燃料电池航空动力，建立完善的设计研发准则、标准和体系；针对氢燃料涡轮发动机，进一步提高液氢存储系统供氢效率和优化涡轮发动机系统设计，在涡扇大型干线客机（150~300座，航程10 000 km）和超大型干线客机（＞300座，航程12 000 km）上投入使用。

（二）氢能航空动力的发展重点及实施途径

1. 建立和健全氢能航空动力政策与标准体系

在氢能航空动力产业管理政策体系方面，明确

氢能航空动力主管部门和产业链各环节的归口管理部门，健全相关管理章程、法规体系，制定统一的氢能航空基础设施管理标准和审批验收程序。

在氢能航空动力激励政策体系方面，积极开展氢能航空动力国家标准体系建设、产业链发展、基础设施建设与运营管理、应用关键核心技术突破和氢能航空动力装备应用试点示范等，制定和出台相关激励政策，有效发挥政策的引导作用。

在氢能航空动力标准体系方面，充分调动高校、科研院所、标准化技术组织和企业等的积极性，基于氢能航空动力产业，重点围绕氢能品质、氢安全等基础技术，氢制取、储运氢装置、加氢站等基础设施，氢燃料电池、氢燃料涡轮应用等的发展需求，制定一批关键核心标准。

在氢动力适航审定体系方面，针对氢能航空动力的安全性问题，重点开展相关的氢动力适航设计验证技术和标准方法研究，主要包括氢动力环境保护适航设计与验证技术、氢动力适航标准的数据架构和规范研究、氢动力运营支持系统理论方法与应用研究。

2. 规划机场氢能基础设施建设

在机场氢燃料输运设施建设方面，航空动力用氢气的输运方式一般与机场大小（用氢量）、氢气产地到机场距离、运营成本等相关。受氢运输技术条件制约，小型机场短期内仍以高压气氢拖车运输为主，中长期可规划采用液氢槽罐车或管道输运方式；中大型机场短期内可通过现有天然气网络向机场输运氢气，中长期可规划采用纯输氢管道输运方式。另外，针对附近可再生能源极其丰富的机场，可建立液氢制备和运输的一体化设施。

在机场氢燃料存储设施建设方面，机场低成本、安全储存大量液氢是氢能航空动力投入运营的前提。机场储氢方式一般与机场大小（用氢量）相关：在氢能航空动力飞机较少时，机场燃料存储的首选方式是地下储罐，而随着机场用氢量增加，布置于地面上的真空绝缘双壁储罐和绝缘单壁储罐将成为机场储氢的主要方式。另外，还需考虑将液氢从储氢罐输运、加注至飞机的加氢回路等的复杂性。

在机场氢燃料加注设施建设方面，针对应用于航空的液氢燃料加注方式，建议在氢能航空发展初期，机场燃料加注的首选方式是移动加氢车，而随着机场规模扩大，固定加氢站将成为机场加氢的主要方式。无论是加氢车或是加氢站，均需针对液氢燃料开发安全、高效的加注技术和加注系统。

3. 突破氢能航空动力应用关键技术

在飞机 / 发动机一体化设计方面，根据液氢的物理特性，液氢存储罐宜采用球形或柱形设计，不宜储存在传统的机翼油箱中。针对中、大型支线或干线飞机，需要重点开展翼身融合设计、新型箱式机翼结构等关键技术攻关，提高飞机内部空间的利用率并减小飞机体积。

在氢燃料电池技术方面，采用新型电极材料、电池一体化结构设计，高效水、热管理和运行控制等方法，重点研发高效、高功率密度、长寿命的氢燃料电池。基于航空动力的振动、变海拔（温度、压力和湿度变化）、倾斜（不同飞行姿态）、失重 / 超重等复杂工作环境，通过结构设计优化、管理系统精准控制等方法，提高氢燃料电池运行安全性和快速起动性能。

在氢燃料涡轮技术方面，采用贫油直接喷射燃烧和微混合燃烧组织技术路线，重点解决喷射与混合、稳定燃烧、NO_x排放控制等氢燃料燃烧组织关键技术，设计和研发新方案氢燃料燃烧室。开展微通道式氢冷换热器的紧凑设计以及氢燃料低延时、高精度控制等技术研究，解决氢涡轮热循环管理和氢燃料精确计量、控制等问题。

在氢燃料安全高效存储技术方面，实现氢燃料液态存储方案在飞机上的成功应用，需要重点研发轻量化存储系统，包括开发新型低热导率、高强度、良好低温性能的低温容器材料，新型存储结构和循环蒸发处理系统；研发低温冷却系统，包括低温泵、管道和状态监测传感器等；开放高电压高功率电力系统；研发机载液氢分配系统，包括燃料管、液氢循环系统、通风管理系统、气化装置等。

4. 加强人才培养和激励

在人才培养方面，依据氢能航空动力发展现状和趋势，创新技术人才培养模式，依托国家重大科技项目平台，加速技术研发、技术管理、成果转化等方面的中青年技术骨干人才培养，培育一批引领氢能航空动力设计研发的技术带头人和真懂技术、精细管理的复合型人才。

在人才激励方面，聚焦低温液氢存储、氢能飞机 / 发动机一体化、氢燃料涡轮发动机、氢动力

适航审定等氢能航空关键技术领域，制定相关政策，优先支持高层次技术人才申报科技奖励。充分挖掘广大技术人员、工程人员的积极性和创造力，适当加大对技术创新、成果转化做出重要贡献人员和团队的奖励。

六、我国氢能航空动力发展建议

（一）加强统筹协调，成立氢能航空发展联盟

建议成立由国家部委、工业生产部门和相关优势科研院所协同参与的氢能航空发展联盟。氢能航空发展联盟可立足当前、着眼长远，统筹和协调氢能飞机、氢能航空动力的协同设计，推动氢能飞机和氢能航空发动机的同步发展，为加快氢能飞机投入市场提供保障，抢占绿色氢能航空新领域、新赛道。

氢能航空发展联盟可设置由低温液氢存储、氢能飞机 / 发动机一体化、氢燃料涡轮发动机、氢燃料电池、氢混合动力、氢航空动力适航审定等氢能航空关键技术领域的领军人才和骨干专家组成的专家委员会，制定国家氢能航空动力发展规划和路线图，强化氢能航空发动机前瞻性、战略性重大问题研究和决策咨询，引导形成氢能航空动力产业发展共识。

（二）建立和健全标准体系，推动氢能航空发动机安全高效发展

明确氢能为新一代航空能源介质，确定氢能航空的归口管理部门，建立和健全氢气质量、安全等基础标准，制氢装置、储运氢设备、加氢站等基础设施标准，氢能航空动力及相关产业链政策和标准体系，加速推进与氢涡轮、氢燃料电池等航空动力的应用基础和工程应用研究相关的试验装置及安全试验条件建设，同时布局规划氢能航空动力整机及飞行验证平台建设。

开展氢能航空动力适航审定技术预先研究，建立适用于以低温液氢为燃料的氢能航空动力适航审定标准、安全性标准以及燃料排泄和排气排出物标准。尤其是针对机载液氢存储系统、热管理系统、液氢泵等新型装置，需尽快开展适航审定标准的预先研究，推动氢能作为清洁能源在航空动力领域的规模化应用。

（三）布局关键技术研究，加快民用氢能航空动力平台建设

基于氢燃料电池和氢涡轮发动机的能量密度及技术特征，发展氢燃料电池作为无人机、城市空运飞机、小型直升机、涡桨短程支线飞机等飞行器的动力装置，发展氢涡轮作为涡桨中短程支线飞机、涡扇中程窄体干线客机、涡扇中远程宽体干线客机等飞行器的动力装置。以涡桨支线飞机动力为切入点，开展氢燃料电池和氢涡轮航空动力技术攻关，既能助力低空经济和通用航空产业链发展，又可为大飞机氢能航空动力研发提供技术支持。

针对氢燃料电池，集中力量推进质子交换膜氢燃料电池关键技术突破和新材料开发，提高关键零部件的主要性能指标；通过结构设计优化、管理系统精准控制等方法，持续提升氢燃料电池功率密度、寿命、复杂环境适应性和快速起动性能。针对氢涡轮发动机，优先支持稳定低排放氢燃料燃烧、精确氢计量与控制、综合热管理、高效安全轻量化机载氢存储、飞机 / 发动机一体化设计等关键技术攻关。尤其是基于氢燃料深冷特性和高热安定性等优势，预先开展高超声速民用氢涡轮航空动力的关键技术攻关和验证。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: October 17, 2024; **Revised date:** February 12, 2025

Corresponding author: Sun Fujun is a senior engineer from AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute. His major research field is aircraft engine. E-mail: sunfujun_burner@163.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of New Energy Aero-engine” (2023-XBZD-15)

参考文献

[1] 于占福. 航空产业碳中和之路全方位解析 [EB/OL]. (2021-08-24)[2024-02-18]. https://www.ccaonline.cn/yunshu/yshot/667761.html.
Yu Z F. Comprehensive analysis of carbon neutrality in the aviation industry [EB/OL]. (2021-08-24)[2024-02-18]. https://www.ccaonline.cn/yunshu/yshot/667761.html.

[2] 许绩辉, 王克. 中国民航业中长期碳排放预测与技术减排潜力分析 [J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3412–3424.
Xu J H, Wang K. Medium-and long-term carbon emission forecast and technological emission reduction potential analysis of China’s civil aviation industry [J]. China Environmental Science, 2022, 42(7): 3412–3424.

[3] Monvoisih M. Carbon offsetting and reduction scheme for international aviation (CORSIA) [R]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2018.

[4] International Air Transport Association. Resolution on the industry's commitment to reach net zero carbon emissions by 2050 [R]. Montreal: International Air Transport Association, 2021.

[5] 新华网. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话 [EB/OL]. (2020-09-22)[2025-02-10]. https://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.htm.
Xinhua News. Statement by H. E. Xi Jinping President of the People's Republic of China at the general debate of the 75th session of the United Nations General Assembly [EB/OL]. (2020-09-22)[2025-02-10]. https://www. xinhuanet. com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.htm.

[6] 赵钦新, 王宗一, 邓世丰, 等. 氢气燃烧技术及其进展 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(36): 15870–15880.
Zhao Q X, Wang Z Y, Deng S F, et al. Hydrogen combustion technology and progress [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(36): 15870–15880.

[7] 吉力强. 氢能航空——航空领域的颠覆性技术变革新发展、新机遇、新挑战 [R]. 北京: 中国工程科技知识中心, 2023.
Ji L Q. Hydrogen powered aviation — New development, new opportunities and new challenges of disruptive technological changes in the aviation industry [R]. Beijing: China Knowledge Centre for Engineering Sciences and Technology, 2023.

[8] Trudell J. Dual hydrogen-jet fuel aircraft—A path to low carbon emis-sions [R]. Honolulu: 25th Joint Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (CEC/ICMC), 2023.

[9] Aviation Week. ROLLS-ROYCE [EB/OL]. (2023-09-26)[2024-02-21]. https://aviationweek.com/aerospace/rolls-royce-61.

[10] Cecere D, Giacomazzi E, Ingenito A. A review on hydrogen industrial aerospace applications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(20): 10731–10747.

[11] 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.
Zhang Y J, Peng J, Qian Y P, et al. Key technologies and challenges of hydrogen powered aviation [J]. Aerospace Power, 2021 (1): 20–23.

[12] 侯绪凯, 赵田田, 孙荣峰, 等. 中国氢燃料电池技术发展及应用现状研究 [J]. 当代化工研究, 2022 (17): 112–117.
Hou X K, Zhao T T, Sun R F, et al. Research on the development and application status of hydrogen fuel cell technology in China [J]. Modern Chemical Research, 2022 (17): 112–117.

[13] 李成杰, 刘禾, 郭发福, 等. 航空燃料电池燃气涡轮混合动力系统研究进展 [J]. 航空动力, 2024 (2): 17–20.
Li C J, Liu H, Guo F F, et al. Development of aviation fuel cell gas turbine hybrid power system [J]. Aerospace Power, 2024 (2): 17–20.

[14] Aviation Week. ZeroAvia flies prototype for hydrogen-electric regional aircraft [EB/OL]. (2023-01-19)[2025-02-12]. https://aviationweek.com/air-transport /aircraft-propulsion/zeroavia-flies-prototype-hydrogen-electric-regional-aircraft.

[15] 韩玉琪. 2023 年航空氢动力进展 [J]. 航空动力, 2024 (1): 38–42.
Han Y Q. Progress of hydrogen powered aviation in 2023 [J]. Aerospace Power, 2024 (1): 38–42.

[16] Bruce S, Temminghoff M, Hayward J, et al. Opportunities for hydrogen in commercial aviation [R]. Canberra: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 2020.

[17] Duvelleroy M, Benquet L, Stolzke H, et al. Airbus and CFM international to pioneer hydrogen combustion technology [EB/OL]. (2022-02-22)[2025-02-10]. https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-02-airbus-and-cfm-international-to-pioneer-hydrogen-combustion.

[18] Graham W. ZeroAvia flies prototype hydrogen- electric regional powerplant [EB/OL]. (2022-02-22)[2025-02-10]. https://aviationweek.com/aerospace/emerging-technologies/zeroavia-flies-prototype-hydrogen-electric-regional-powerplant.

[19] Graham W. ZeroAvia's 228 completes initial hydrogen-electric flight campaign [EB/OL]. (2023-07-19)[2025-02-10]. https://aviationweek.com/air-transport/aircraft-propulsion/zeroavias-228-completes-initial-hydrogen-electric-flight-campaign.

[20] Norris G. UH2 hydrogen-electric dash 8 flight tests move to phase 2 [EB/OL]. (2023-10-12)[2025-02-10]. https://aviationweek.com/aerospace/aircraft-propulsion/uh2-hydrogen-electric-dash-8-flight-tests-progress-phase-2.

[21] 韩玉琪, 王则皓, 付玉. 欧盟清洁航空计划分析 [J]. 航空动力, 2023 (2): 28–30.
Han Y Q, Wang Z H, Fu Y. Analysis of European union's clean aviation program [J]. Aerospace Power, 2023 (2): 28–30.

[22] 韩玉琪. 欧盟清洁氢能联合行动推进氢能航空技术创新 [J]. 航空动力, 2023 (5): 28–30.
Han Y Q. European union's CHJU innovates H2-powered aviation technologies [J]. Aerospace Power, 2023 (5): 28–30.

[23] 何萍, 王翔宇. 赛峰和GE启动可持续发动机革新技术演示验证计划 [J]. 航空动力, 2021 (4): 40–43.
He P, Wang X Y. Safran and GE aviation launch RISE program [J]. Aerospace Power, 2021 (4): 40–43.

[24] Graham W. Daher preparing to fly ecopulse on hybrid-electric power [EB/OL]. (2023-06-22)[2025-02-10]. https://aviationweek.com/shownews/paris-air-show/daher-preparing-fly-ecopulse-hybrid-electric-power.

[25] Thierry D. Safran tests hydrogen combustion system components [EB/OL]. (2023-07-03)[2025-02-10]. https://aviationweek.com/aerospace/emerging-technologies/safran-tests-hydrogen-combustion-system-components.

[26] 李明, 刘金超. 英国零碳飞行氢动力技术发展路线图 [J]. 航空动力, 2022 (3): 28–32.
Li M, Liu J C. Analysis to hydrogen gas turbine roadmap and thrust generation of FlyZero [J]. Aerospace Power, 2022 (3): 28–32.

[27] 韩玉琪, 刘英杰. 欧盟清洁航空联合行动中的氢动力飞机分析 [J]. 航空动力, 2023 (6): 27–29.
Han Y Q, Liu Y J. Hydrogen powered aircraft projects in European union's CAJU [J]. Aerospace Power, 2023 (6): 27–29.

[28] Norris G. Rolls-Royce AE2100 run marks hydrogen power milestone [EB/OL]. (2022-11-28)[2025-02-10]. https://aviationweek.com/air-transport/rolls-royce-ae2100-run-marks-hydrogen-power-milestone.

[29] 工业和信息化部, 科学技术部, 财政部, 等. 绿色航空制造业发展纲要(2023—2035) [EB/OL]. (2023-10-10)[2025-02-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202310/content_6908243.htm.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, Ministry of Finance of the People's Republic of China, et al. Outline for the development of green aviation manufacturing industry (2023—2035) [EB/OL]. (2023-10-10) [2025-02-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202310/content_6908243.htm.

[30] Tacina R. Combustor technology for future aircraft [R]. Orlando: 26th Joint Propulsion Conference, 1990.

[31] Goldmeer J, York W, Glaser P. Fuel and combustion system capabilities of GE's F and HA class gas turbines [R]. Charlotte: ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2017.

[32] Boggia S, Jackson A. Some unconventional aero gas turbines using hydrogen fuel [R]. Amsterdam: ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air, 2002.

[33] Ponater M, Marquart S, Ström L, et al. On the potential of the cryoplane technology to reduce aircraft climate impact [R]. Friedrichshafen: the AAC-conference, 2003.

[34] Cecere D, Giacomazzi E, Ingenito A. A review on hydrogen industrial aerospace applications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(20): 10731–10747.

[35] Winter C J. Hydrogen in high-speed air transportation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1990, 15(8): 579–595.

[36] 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.
Xiang Q, Hu X Y, Wang M, et al. Observations on the development of hydrogen-powered aircraft propulsion system [J]. Aeroengine, 2024, 50(1): 1–9.

[37] 梁义强, 范宇, 周建军, 等. 高超声速动力能热管理技术综述 [J]. 航空发动机, 2024, 50(2): 11–21.
Liang Y Q, Fan Y, Zhou J J, et al. Overview of power and thermal management technology for hypersonic engine [J]. Aeroengine, 2024, 50(2): 11–21.

[38] 金如山, 索建秦. 先进燃气轮机燃烧室 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2016.
Jin R S, Suo J Q. Advanced gas turbine combustor [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2016.

[39] 华清, 严成忠. 液氢在高超声速航空发动机上的应用 [J]. 航空发动机, 2000, 26(2): 10–13.
Hua Q, Yan C Z. Application of liquid hydrogen in hypersonic aeroengine [J]. Aeroengine, 2000, 26(2): 10–13.

[40] 莫妲, 林宇震, 韩啸, 等. 氢气微混燃烧技术研究现状和未来展望 [J]. 航空学报, 2024, 45(7): 028994.
Mo D, Lin Y Z, Han X, et al. Research progress and future prospect of hydrogen micromix combustion technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(7): 028994.

[41] 李维, 曹俊, 肖为. 氢燃料发动机技术及发展趋势 [J]. 航空动力, 2022 (2): 39–42.
Li W, Cao J, Xiao W. Technology and development trend of hydrogen gas turbine [J]. Aerospace Power, 2022 (2): 39–42.

[42] Lin R H, Xi X N, Wang P N, et al. Review on hydrogen fuel cell condition monitoring and prediction methods [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(11): 5488–5498.

[43] 李明, 陈健. 英国零碳飞行氢涡轮发动机热管理技术 [J]. 航空动力, 2022 (4): 29–32.
Li M, Chen J. Analysis to hydrogen gas turbine thermal management technology of FlyZero [J]. Aerospace Power, 2022 (4): 29–32.

[44] 徐伟强, 李倩倩, 李万青. 无人机机载低温液氢储罐结构设计与强度分析 [J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(8): 1017–1022.
Xu W Q, Li Q Q, Li W Q. Simulation of mechanical strength of novel cryogenic liquid hydrogen tank for unmanned aerial vehicle [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(8): 1017–1022.