关于氢能航空动力发展的认识与思考

向　巧[1,2],胡晓煜[1],王　曼[3],弓　升[1]
(1. 太行实验室,成都 610200;2. 中国航空发动机集团有限公司,北京 100097;
3. 中国商用飞机有限责任公司北京民用飞机技术研究中心,北京 102211)

摘要:近年来,在全球碳减排目标的驱动下,各国对发展氢能航空的热情空前高涨,在氢能飞机和氢能动力领域加速布局研究计划。通过研究国内外氢能飞机及动力发展历程和研究进展,发现人类对氢的认知始于其燃烧特性,认为氢能航空发展兴于"双碳"目标,指出燃氢涡轮发动机是航空业实现减碳目标的关键,分析了燃氢涡轮发动机和氢燃料飞机的性能优势,研判出氢能航空及动力发展难在全产业链重构和全链条颠覆创新,提出了创新氢能航空发展机制、加快发展燃氢涡轮发动机、健全氢能航空产业链条、实现全链条颠覆性创新和加强氢能航空基础建设等五方面的发展措施建议。

关键词:氢能航空;氢能飞机;氢能动力;氢燃料发动机;燃氢涡轮发动机
中图分类号:V235.1　　**文献标识码:**A　　doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.01.001

Observations on the Development of Hydrogen-powered Aircraft Propulsion System

XIANG Qiao[1,2], HU Xiao-yu[1], WANG Man[3], GONG Sheng[1]
(1. Taihang Laboratory, Chengdong 610200, China;
2. Aero Engine Corporation of China, Beijing 100097, China;
3. COMAC Beijing Aircraft Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: Driven by the global carbon reduction goals, the enthusiasm for the development of the hydrogen-powered aviation has been growing unprecedentedly in recent years, and a great number of research projects on hydrogen-powered aircraft and hydrogen-powered propulsion systems have been launched globally. Reviewing the development history of hydrogen-powered aircraft, it is found that the cognition of hydrogen started with its combustion characteristics, and the development of hydrogen-powered aviation is accelerated by the carbon peaking and carbon neutrality goals. It is suggested that the implementation of hydrogen-fueled gas turbine engines in the global aviation industry is vital in achieving carbon reduction goals. The performance advantages of hydrogen-fueled gas turbine engines and hydrogen-powered aircraft are analyzed. It is proposed that the difficulties of developing hydrogen-powered aircraft and hydrogen-fueled propulsion systems lie in the reconstruction and disruptive innovation of the whole industry chain. Suggestions are given on the following five aspects in the development of hydrogen-powered aviation, namely, innovating in the development mechanism of hydrogen-powered aviation, accelerating the implementation progress of hydrogen-fueled gas turbine engines, improving the hydrogen-powered aviation industry chain, launching disruptive innovation of the whole industry chain and developing the infrastructure for hydrogen-powered aviation.

Key words: hydrogen-powered aviation; hydrogen-powered aircraft; hydrogen-fueled propulsion system; hydrogen-fueled engine; hydrogen-fueled gas turbine engine

0　引言

随着航空市场的迅速发展,全球航空业二氧化碳排放量增长迅猛。目前,1架典型的民航客机1年的碳排放量可达3600 t,相当于90万棵树1年吸收的二氧化碳量,或800辆轿车1年的碳排放量。据国际能源协会(International Energy Agency, IEA)统计,2019年世界航空业碳排放总量达到近10^9 t,占碳排放总量的2.8%[1-2]。气候行动追踪组织将航空业碳中和发展目标进展评为"严重不足"。如不抓紧控制,到2050年,

收稿日期:2024-01-31
作者简介:向巧(1963),博士,研究员。

引用格式:*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 Qiao,HU Xiaoyu,WANG Man.Observations on the development of hydrogen-powered aircraft propulsion system[J].Aeroengine,2024,50(1):1-9.*

全球航空业碳排放将达到2019年的2~3倍[3]，中国民航业的快速发展带来碳排放量增长迅速，2019年，中国航空客运碳排放总量已达1.03×10^8 t，占据全球航空客运碳排放总量的13%[4]，航空业减碳形势非常严峻。为大幅降低航空业碳排放，国际航空运输协会（International Air Transport Association，IATA）已设定了到2050年航空运输业碳排放量较2005年减少50%的目标。多国航空业也共同做出承诺，到2050年航空业碳排放从2005年的水平削减一半甚至实现碳中和。为实现航空业碳减排目标，需要尽快解决一系列问题与挑战。

氢能具有绿色无污染、能量密度高等特点，被公认为是航空运输业实现“脱碳”的关键[5]。目前，全球范围正在掀起一场氢能航空发展热潮，各国纷纷出台氢能航空发展规划，飞机制造商和发动机制造商正在积极开展氢能飞机和氢能航空动力研究。本文通过对氢能航空动力的发展研究，分析了氢燃料用于飞机动力的性能优势，结合中国目前航空业情况，研判了氢能航空发展的主要难点，提出了发展氢能航空的建议措施。

1 人类对氢的认识始于燃烧特性

氢能从发现、发展到应用，距今已有近500年，人类对氢的认识始于其燃烧特性。早在16世纪，人类就发现，铁屑和硫酸接触会产生一种可燃烧的气体。18世纪，这种气体被正式命名为Hydrogen（中文名“氢”）。人们发现，氢不仅可燃，且可燃范围广、热值高，燃烧同等质量的氢气放出的热量是天然气的2.56倍、普通汽油的3倍、航空煤油的2.8倍、酒精的3.9倍，焦炭的4.5倍。理论上，使用氢燃料的飞机，在其他条件相同的情况下，完成特定任务所需燃料质量仅为传统飞机所需燃料质量的1/2.8。当飞机其它条件相同时，氢燃料的使用可显著减轻飞机总质量，因而可配装更小推力的发动机。但是，氢燃料的使用需要飞机对机载燃料系统进行改进，轻质高效安全的机载氢燃料存储输送系统将是氢能飞机的关键。此外，氢具有高比热和低温特性，可有效冷却发动机和热部件。液氢具有优越的冷却换热能力，燃烧热值高且无碳结焦问题，可用于高速飞行器。

1937年，德国机械工程师奥海因利用氢燃料良好的燃烧特性，发明了以氢气为燃料[6]的世界首台涡喷发动机HeS-1。1955年，美国国家航空咨询委员会（National Advisory Committee for Aeronautics，NACA）启动了Bee计划[7]，旨在利用氢燃料的高能量密度，通过燃氢拓宽发动机的工作边界，使飞机升限提升至27 km，以躲避地空导弹的袭击；刘易斯研究中心对PW公司的J65涡喷发动机进行改造，使其既能使用传统燃油，也能使用液氢燃料[8]。配装J65涡喷发动机的B-57轰炸机最终成功实现了在高空飞行中切换液氢燃料运行[9]。1956年，美国空军实施了Suntan计划，洛克希德·马丁公司负责研发2架可在高度30 km、Ma=2.5巡航的高空高速战略侦察机CL-400。PW公司仅用5个月就完成了J57涡喷发动机改用液氢燃料的试验研究，证明了传统燃气涡轮发动机对液氢燃料的适用性[10]，并于1957年9月首次进行了全新研制的燃氢涡轮膨胀循环Model304发动机[11]演示试验，试验累计时数25 h，所有性能预测均得到了验证。随着CL-400项目终止，该发动机的研制未能继续。1965～1968年，美国空军又进行了综合论证，探索使用液氢燃料的高超声速巡航飞行器的潜力。这一时期，人们对氢应用于航空飞行的研究均源自于其良好的燃烧特性。

氢燃料此时已经展现出其应用于航空领域的巨大潜在优势，燃氢涡轮发动机的可行性得到了证明，但是氢燃料的使用对飞机机载燃料系统也带来变革性影响，轻质高效安全的机载氢燃料存储输送系统尚未开展充分研究。由于当时全球航空业对环保性要求不高，同时氢燃料的制备、储运、使用等上下游配套产业链面临诸多问题和挑战，因此氢能航空在这一时期仅处于探索研究阶段。

2 氢能航空发展兴于“双碳”目标

进入21世纪，随着全球碳排放量的逐年增加，世界各国开始高度重视氢能产业发展，氢能产业发展成为加快能源转型升级、培育经济新增长点的重要战略选择。2020年以来，为实现航空碳减排目标，世界多国纷纷出台涉及氢能航空发展的战略规划。欧盟于2021年2月推出了一项可持续发展计划“2050年目标——欧洲航空零排放之路”，即到2030年欧盟境内和离境所有航班二氧化碳排放量减少45%，到2050年实现航空业二氧化碳净零排放。2020、2023年德国先后发布了2版“国家氢能战略”，支持在飞机推进系统中使用氢能。2023年9月，英国成立氢能航空

(Hydrogen in Aviation,HIA)联盟,致力于确保英国充分利用氢能为航空业和整个国家带来的巨大机遇,加快实现零碳航空。

飞机制造商纷纷布局氢能飞机发展。在氢燃料飞机发展上,2020 年 9 月,空客公司发布了名为 ZEROe 的计划,提出了 3 种氢能飞机概念[12],分别采用上单翼布局翼吊液氢燃料涡桨发动机、常规布局翼吊液氢燃料涡扇发动机以及翼身融合布局液氢燃料分布式动力。2021 年 12 月,在英国航空航天技术研究院(Aerospace Technology Institute,ATI)的领导下,FlyZero 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[13]。2022 年 5 月,日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency,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、Ma>5 飞行的氢动力超声速客机。2023 年 6 月,法国航空航天实验室(le centre français de recherche aérospatiale,ONERA)展示了一款 200 座级、航程约 7408 km 的氢燃料客机概念模型。

航空发动机制造商也积极开展氢能航空动力研发,其中燃氢涡轮发动机是重点研究领域。2021 年 6 月,CFMI 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,PW 公司获得美国能源部(Department Of Energy,DOE)支持,在氢-蒸汽喷射、间冷涡轮发动机(Hydrogen Steam Injected, Inter-Cooled Turbine Engine,HySIITE)计划[14]下研发高效氢燃料推进技术,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,RR 公司完成 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。2023 年 7 月,GE 公司完成了纯氢燃烧室部件试验。俄罗斯计划开展 VK2500 涡轴发动机改烧氢燃料研究,并计划 5 年内在雅克-40LL 飞行试验平台上开展飞行试验。预计到 2035 年,采用燃氢涡轮发动机的中型飞机将投入使用;到 2050 年,全球 50% 的商用飞机有望使用氢动力。

中国氢能产业发展迅速,已成为世界最大制氢国,初步形成了较完整的制氢—储运—应用产业链,为氢能航空发展奠定了较好基础。2023 年 10 月,工信部、科技部、财政部和民用航空局联合发布了“绿色航空制造业发展纲要(2023-2035 年)”,确定了氢能航空发展目标:到 2025 年氢能源飞机关键技术完成可行性验证。在国家政策的支持下,多家高校、企业和科研院所结合自身的研究基础和优势,开展了氢内燃机、氢燃料电池、燃氢涡轮和氢混电等多种氢能动力飞机概念方案论证和关键技术研究,开展了氢能航空动力部件级试验验证,验证了氢能在航空领域应用的可行性。2024 年 1 月,中国第一架 4 座氢内燃机飞机完成了原型机首飞。

3　大型客机是航空业“碳排放”大户

据统计,航空业近 98% 的碳排放来自飞机使用阶段,2% 的碳排放来自生产制造环节[15]。在飞机使用中,燃料燃烧产生的碳排放占 79% 以上。同时,国际航空业碳排放大部分来自大型客机,如图 1 所示。因此,减少大型客机的碳排放是航空业减碳的关键。

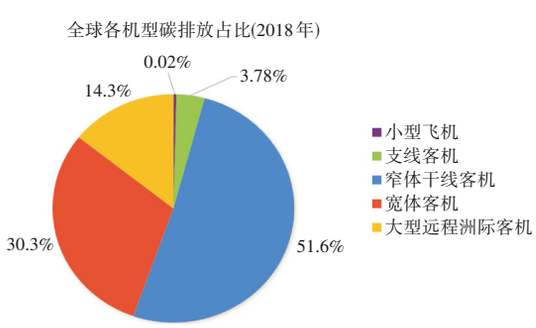


图 1　航空业各机型碳排放分布情况

4　燃氢涡轮发动机是航空业减碳关键

航空业减碳的主要路径是采用清洁能源,包括可持续航空燃料(Sustainable Aviation Fuel,SAF)、电池和氢能等[16]。使用 SAF 对现有飞机的改动最小,被认为是目前行业触手可及的、能实现较大程度减排的主要手段,颇受航空公司青睐[17-18]。但使用 SAF 仍面临原料供应不足、成本高等制约[19]。另外,SAF 对环境的影响最多可减少 80%,难以实现全生命期的近零碳

排放[20]。采用电池的全电飞机有可能消除短程航线的直接污染，但目前电池能量密度太低（仅为煤油的1/50），还无法用于大多数民航飞机[21]。研究表明，1架A320客机即使装满目前市场上能买到的最好电池，即使不搭乘旅客或燃油，也只能飞行10 min。

国外研究显示，氢能飞机不仅在技术上可行，且与常规航空煤油及SAF相比，运营经济性更高，具备全部短程航线和93%远程航线的使用能力[22]。据中国科学院《中国碳达峰碳中和路径与政策建议》报告，到2050年，中国民航运输量将达到2019年的4.5倍，碳排放量将达到2019年的2.5倍。如采用氢能航空动力替代传统动力，可使碳排放量降低50%以上。

目前，各国氢能航空动力研究主要有3条技术路线：发展燃氢涡轮发动机和氢内燃机，直接燃烧氢产生动力；发展氢燃料电池，连接电动机和推进装置为飞机提供动力；采用燃氢涡轮和氢燃料电池混合的推进系统。研究表明，氢内燃机适用于低速小型飞机，技术难度相对较低，对降低航空业碳排放贡献有限；燃氢涡轮发动机可使飞机碳排放降低50%～75%；氢燃料电池对气候的影响可降低75%～90%，但受限于电池能量密度低、比功率小等问题，仅适用于100座级以下飞机。燃氢涡轮发动机是中远程飞机的首选推进系统，是未来氢能航空动力发展的重点，如图2所示。

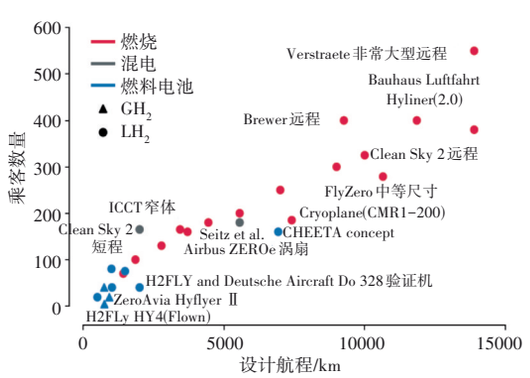


图2 燃氢涡轮发动机是中远程飞机的首选推进系统[14]

5 燃氢涡轮发动机的性能优势

氢燃料可燃范围宽，火焰传播速度快（最高为航空煤油的20倍），极易着火和燃烧。因此，燃氢涡轮发动机工作包线更宽。理论上燃氢涡轮发动机的空中起动包线可达到8 km以上，采用氢燃料和传统燃料的涡轮发动机起动包线对比如图3所示。试验表明，中国1000 kW级涡桨发动机采用氢燃料后，贫油熄火边界可拓宽40%，慢车转速可由原来的60%降低到50%以下，且更容易在空气稀薄的高原高寒环境下起动。

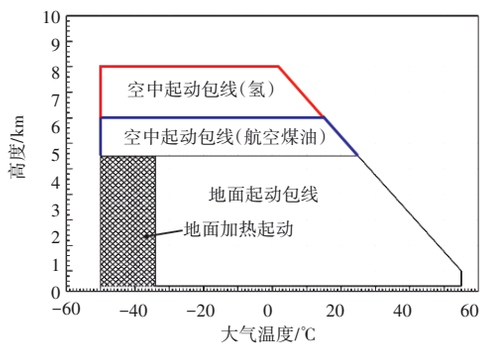


图3 采用氢燃料和传统燃料的涡轮发动机起动包线对比

氢具有良好的低温特性，定压比热容大、做功能力更强。基于氢的深冷特性，可设计更先进的间冷热力循环，使涡轮发动机的单位推力增大和燃料消耗率降低。研究表明，在涡轮进口温度不变情况下，采用氢燃料的V2500常规循环涡扇发动机推力可增大2.9%；如采用氢燃料预冷循环，推力可增大9.8%；如利用氢燃料调制冷却循环，推力可增大31.8%；如采用氢燃料预热循环，推力可增大2.1%[23]，如图4所示。

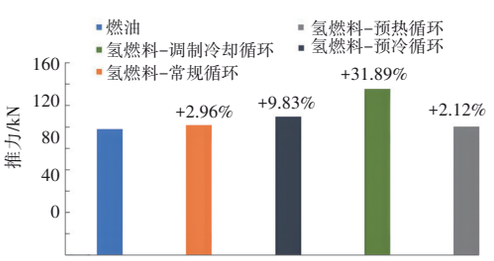


图4 涡轮进口温度不变的情况下，不同燃料和循环构型的V2500涡扇发动机推力对比

采用氢燃料的V2500常规循环涡扇发动机燃料消耗率可降低63.6%；如采用氢燃料预冷循环，燃料消耗率可降低65.7%；如利用氢燃料调制冷却循环，燃料消耗率可降低64.4%；如采用氢燃料预热循环，燃料消耗率可降低65.1%[23]，如图5所示。

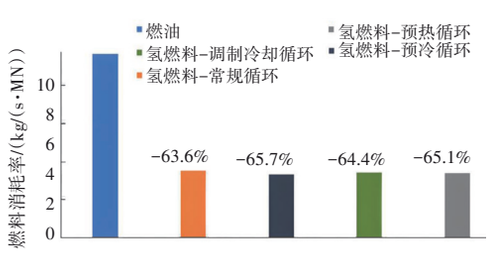
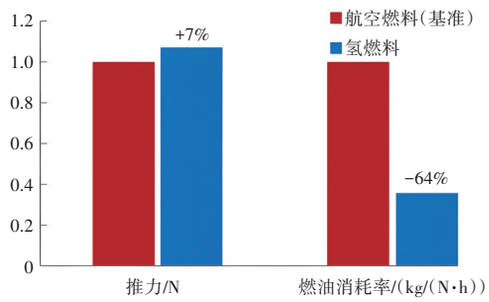
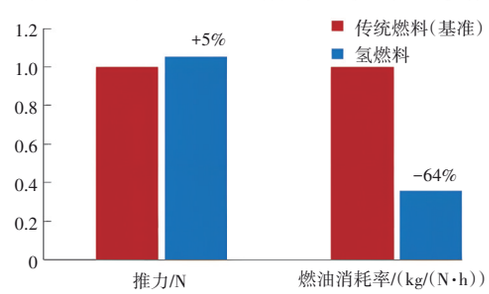


图5 涡轮进口温度不变的情况下，不同燃料和循环构型的V2500涡扇发动机燃料消耗率对比

在涡轮进口温度不变的情况下,对中国现有军民用涡轮发动机采用氢燃料后的性能分析表明,大涵道比涡扇发动机采用氢燃料后,推力可增大 5%～7%,如图 6 所示;加力式涡扇发动机采用氢燃料后,加力推力最多可增大 16%,如图 7 所示;1000 kW 涡桨发动机采用氢燃料后,功率最大可提高 16%,如图 8 所示。



(a) 推力 13 t 级大涵道比涡扇发动机换氢后的参数对比



(b) 推力 35 t 级大涵道比涡扇发动机换氢后的参数对比

图 6　采用传统燃料和氢燃料的中国大涵道比涡扇发动机性能对比

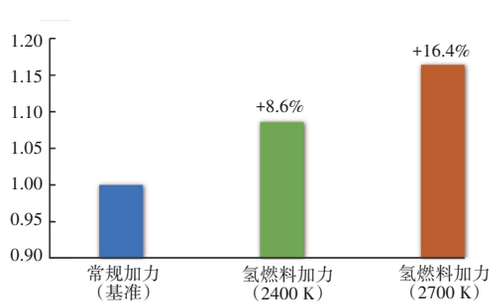


图 7　加力式涡扇发动机采用传统燃料和氢燃料的加力推力对比

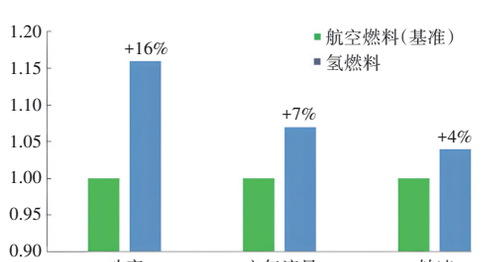


图 8　1000 kW 涡桨发动机采用传统燃料和氢燃料的性能对比

此外,综合利用氢燃料的低温特性有助于发动机性能提升,基于推力 13 t 级大涵道比涡扇发动机,对采用传统燃料和采用氢燃料的不同循环构型方案进行了性能分析,发动机单位推力最多可提高 15%,燃料消耗率最多可降低 72%,如图 9 所示。

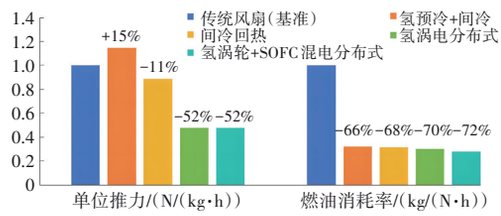


图 9　推力保持不变条件下,不同循环构型的推力 13 t 级大涵道比涡扇发动机方案性能对比分析

基于推力 35 t 级大涵道比涡扇发动机,对采用传统燃料和采用氢燃料的不同循环构型方案进行了性能分析,发动机单位推力最多可增大 32%,单位燃料消耗率最多可降低 72%,如图 10 所示。

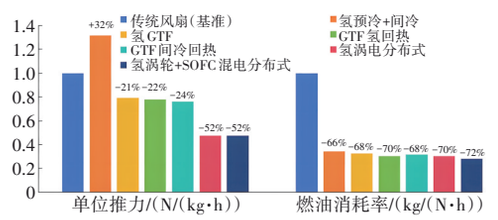


图 10　推力保持不变条件下,不同循环构型的推力 35 t 级大涵道比涡扇发动机方案性能对比分析

6　氢燃料飞机的性能优势

NACA 研究表明,亚声速(巡航 Ma=0.85)轰炸机发动机采用氢燃料后,航程可达 1.5×10^4 km、飞行高度可超过 30 km[24],如图 11 所示。

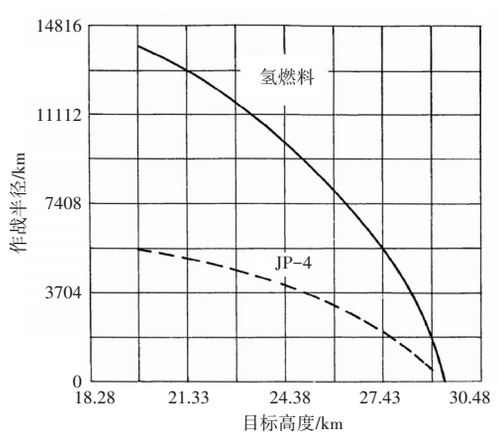


图 11　同样起飞质量条件下,液氢飞机航程更远

美国洛克希德·马丁公司研究表明,氢燃烧时产生的热量较高,燃料消耗率(SFC)显著降低,可大大减少飞机燃料重量,从而减轻飞机总质量,在相同的

有效载荷下，更轻的液氢飞机虽然需要更大的机身放置液氢储罐，但其所需的机翼面积和翼展却会更小，液氢飞机升阻比损失和燃料消耗率收益之间的权衡是飞机设计的重点。洛克希德·马丁公司的研究结果显示，采用传统燃料Jet A的亚声速飞机质量比液氢飞机高34%，所需燃料质量是液氢飞机的3倍以上，所需发动机推力是液氢飞机的1.14倍，见表1；采用传统燃料Jet A的超声速飞机质量比液氢飞机重93%，所需燃料的质量接近液氢飞机的4倍，所需发动机推力是液氢飞机的1.64倍，见表2。

表1 *Ma*=0.85的Jet A与液氢燃料亚声速客机对比
（400座级，航程10186 km）[25]

参数	Jet A	液氢
起飞总质量/kg	237320	177672
燃料质量/kg	86545	27941
巡航燃料消耗率/(kg/(N·h))	0.0593	0.0203
单台发动机推力（海平面静止）/kg	14832	13018
起飞距离/m	2435	1901
进近速度（当量空速）/(m/s)	63.72	69.37
质量组成		
燃料/%	36.5	15.7
有效载荷/%	16.8	22.5
动力装置/%	6.4	12.3

表2 *Ma*=2.7的Jet A和液氢燃料超声速巡航飞机对比
（234座级，航程7778 km）[25]

参数	Jet A	液氢
起飞总质量/kg	345714	179128
燃料质量/kg	179509	45665
巡航燃料消耗率/(kg/(N·h))	0.153	0.0587
单台发动机推力/kg	39412	23959
推重比（海平面静止）	0.456	0.535
起飞距离/m	2892.5	1853
质量组成		
燃料/%	52.0	25.5
有效载荷/%	6.4	12.4
动力装置/%	9.9	15.1

7 氢能飞机及动力发展难点

尽管氢能在航空领域应用的可行性已得到证明，但实现应用仍面临诸多难点和技术挑战，氢能航空产业涉及氢燃料生产、存储、输运、加注，涉及安全可靠的氢能航空动力研发，还涉及机场基础设施建设等，产业链长、复杂度高、技术难度大，需要进行众多持续性、颠覆性技术革新和产业链重构，着力解决低成本制氢、机载安全储氢、氢燃料输运、氢燃料计量控制、氢燃料稳定燃烧、适氢材料与工艺、氢能飞机与发动机一体化、氢能航空动力运行维护等一系列技术难点[26-28]。氢能航空发展的主要难点集中在以下两个方面。

7.1 难在全产业链重构

氢能航空产业链上游涉及制氢产业。目前主要制氢方式包括化石燃料制氢、工业副产品制氢和电解水制氢等3类。其中，化石燃料制氢是主流方式，存在碳排放量高以及气体杂质多等问题。工业副产品制氢目前较为常见，但仍存在碳捕集与封存的技术问题。电解水制氢是最有潜力的绿色氢能生产方式，但受电力价格影响，成本较高。为解决上述问题，需加快布局利用可再生能源电解水制氢产业。

氢能航空产业链中游主要涉及氢储运产业，包括氢燃料的输运、储存和加注等基础硬件[29]。氢燃料储运主要包括高压气态储运、低温液态储运、有机液态储运和固态储运等方式。目前，无论航空公司还是机场配套设施，都不适合氢能飞机的商业化运行，需要基础及配套设施的重新搭建[30]。例如，利用现有天然气管网向机场输送氢气，需要发展氢气的调压装置和掺混装置，实现氢气与天然气的稳定掺混；还需发展高效的氢气液化装置，用于输运到机场氢气的液化。针对氢的低温液态储运，需加快发展液氢储罐等储氢装置及相关产业。同时，氢燃料的加注需利用低温管道将液氢从储存位置输送到飞机上，需在输氢管道和加注终端间加装中继罐等设备，以保证加注系统的压差。针对航空领域氢燃料固态储运和有机液态储运需求，需积极推动低成本固态/液态储氢材料和配套加氢、脱氢产业发展。

氢能航空产业链下游涉及氢能应用领域。在氢能航空动力基础零部件领域，将向氢防护涂层及材料、各类氢能泵管阀件与传感器、各种氢换热器等零部件生产制造业拓展；国外航空动力企业除加快燃氢涡轮发动机研究外，也在积极研究氢燃料电池技术。在分系统和整机生产制造与维护领域，以燃氢涡轮发动机为主，向氢燃料电池、电机及电堆集成等行业延伸；氢能航空动力维修，尤其是在线维修，与常规涡轮发动机差异较大，需要更严格的检测标准和维修管理流程；在维修布局上，为避免燃氢涡轮发动机和燃料电池分散维修带来的成本高问题，集中式维修中心是未来产业发展趋势。

7.2　难在全链条颠覆性创新

7.2.1　低成本制氢技术

目前,可再生能源电解水制氢成本仍较高,制备 1 kg 氢大约耗电 35 ~ 55 kW·h。为有效降低制氢成本,需大幅降低电价,加快突破电解槽等技术,实现规模化生产。

7.2.2　机载安全储氢技术

储氢技术是氢能航空发展的关键,也是目前限制氢能大规模应用的技术瓶颈。液氢存储温度极低(低于−253 ℃),液氢储罐结构和配套冷却系统异常复杂,需发展新型结构并探索轻质高效绝热材料。固态储氢安全性较高,也是未来机载储氢的重要发展方向,需探索高效物理储氢材料,发展具备能够在较低温度快速释氢的化学储氢材料。

7.2.3　氢燃料输运技术

氢燃料输运是实现氢能航空的关键。在发展初期,探索利用已建设的天然气输运管网与基础设施,开发天然气和氢气混合输送技术,实现低成本、规模化、连续性氢能供应。研究表明,在不做重大技术调整情况下,掺混 10% ~ 20% 氢至天然气中可以进行管道输运。天然气掺氢管道输运技术需解决管材、调压站、流量计、探测器等配套装备的掺氢相容性与适应性技术,并完善管网安全运行保障技术。同时,研究天然气管网输运纯氢技术,并发展有机液态输运技术。液氢输运是未来氢储运发展方向,针对液氢输运、储存容器,需发展特殊合金和碳纤维增强树脂等材料,突破液氢用浸液泵和高隔热容器等特殊设备技术。

7.2.4　高精度氢燃料流量控制技术

对于液氢燃料涡轮发动机,当燃料系统中的液态氢转化为气态时,系统内的压力将出现持续脉动变化,将表现出特殊的动力学特征和其他故障模式,需发展高精度的氢燃料流量控制技术。

7.2.5　氢燃料稳定燃烧技术

针对氢燃料燃烧温度高、燃烧稳定性差、氮氧化物排放高、火焰传播速度快且易发生回火,以及液氢燃料存储温度低、压力高、极易泄漏、易自燃、易扩散、易爆炸等特点[30−31],对于燃氢涡轮发动机,需在氢燃烧室、燃料管路、燃料控制和热管理系统等方面进行创新设计,突破燃烧稳定性、回火控制、氮氧化物排放控制、燃料密封、换热过程精密控制和能量管理等关键技术。

7.2.6　适氢材料与工艺技术

燃氢涡轮发动机氢燃料管路长时间在氢环境下工作,会发生鼓包、裂纹和氢致塑性损失等失效问题;氢燃烧室、涡轮等热端部件长期服役,氢会快速渗透进入高温合金中,导致高温氢腐蚀开裂失效和氢致表面脱碳;需研究涉氢热端部件和系统的处理控制工艺,发展耐高温、高强度、抗氢性好的材料;研究压力容器和管材热处理及加工工艺;针对发动机管路普遍存在焊接的情况,研究新型焊接工艺技术,减弱焊接热影响区的氢致开裂敏感性。

7.2.7　氢能飞机与发动机一体化设计

液氢储罐的体积要求及存储条件使氢燃料难以在现有飞机上大量且安全储存。因此,采用氢能航空动力需改变机舱布局、增加机体尺寸以加大氢燃料储存能力,因此,将带来飞机气动外形的变化,需对飞机气动布局开展多目标综合优化,以及氢能航空动力内外流一体化设计等飞发一体化技术研究。

7.2.8　氢能航空动力运行维护技术

为保证氢能航空动力运行和维护过程的安全性,需及时对氢气的压力、温度、泄漏量以及氢气中的含氧量等参数进行监测并连接到安防设备,必要时采取控制措施;为及时掌握发动机工作状态,需发展基于脉动压力和声学的燃烧稳定性测试及辨识技术;为实现测试参数全域、精细化测量和多参数同步融合测量及关联分析,提升测量极限,发展多相态、多物理场信号智能感知与测量技术。

8　中国氢能航空发展存在不足

根据全球氢能航空发展动态,结合目前我国航空业实际情况,分析研判出我国在氢能航空领域的发展主要存在以下不足之处。

8.1　氢能航空发展缺乏统筹

氢能在航空领域的应用必将带来航空领域一场颠覆性的技术变革,世界各国正在加快布局,这一领域的激烈较量已经拉开序幕。然而,氢能航空产业专业面宽、产业链长、技术难度和挑战巨大,需加强顶层设计、统筹规划,集中全产业链上下游优势力量,共同打通技术产业结构障碍。目前,中国氢能航空发展尚缺乏顶层统筹规划,存在多头支持、各自为战现象。

8.2 技术水平多处于低端

目前，中国氢能航空及动力发展多处在应用可行性验证阶段，而国外早在20世纪50年代就已验证了氢能在航空领域应用的可行性。由于缺少统筹规划、研究基础薄弱、研发力量分散、试验测试条件不足，中国氢能航空发展尚难以形成合力，存在低水平重复、高端燃氢涡轮发动机研究缺少支持的现象。

8.3 氢能产业链有待完善

完整健康的产业链是氢能航空产业发展的前提和基础，目前，中国氢能航空产业链尚不完整、技术体系尚未建立。需加快打通制约氢能航空全产业发展的关键环节，集中优势力量突破氢能航空特有关键技术（如机载储氢技术），加强机场基础配套设施建设，同时开展适氢的设计技术、材料技术、制造技术和维修技术等研究。

9 中国氢能航空发展对策建议

9.1 创新氢能航空发展机制

成立国家级专家组，组织评估氢能航空市场需求，制定氢能航空产业发展战略与规划，明确氢能航空发展目标、重点任务和技术发展路线图，建立氢能航空创新发展机制，为建立氢能航空良性产业生态系统和产业发展奠定基础。

9.2 加快发展燃氢涡轮发动机

据国际清洁运输委员会（ICCT）统计，干线飞机碳排放量占全球客运航空碳排放量93%，燃氢涡轮发动机被公认为未来绿色中远程客机的首选动力装置。建议以燃氢涡轮发动机为重点，加快推动氢能航空动力关键技术研究与产品研发。

9.3 健全氢能航空产业链条

联合国内外高校、工业部门、科研机构，搭建跨领域、跨专业、跨学科的协同创新平台，健全氢能航空产业链，组建由民航企业、民航机场、中国商飞、中国航发和国家能源局等单位组成的氢能航空产业联盟，共同推动氢能航空技术产业化。

9.4 实现全链条颠覆性创新

依托国家级科技创新平台，聚合国内优势力量，系统开展机载储氢技术、氢能飞机技术、氢能动力技术、能量综合利用技术、氢防护材料技术和热量综合管理等氢能航空全链条颠覆性技术创新，为氢能飞机及动力发展提供技术储备。

9.5 加强氢能航空基础建设

围绕氢能航空动力技术研究与验证需要，加快部件和整机研究试验设施、试飞平台等科研条件和基础设施建设，构建安全、稳定、高效的氢能航空动力科研保障体系。加快论证设置氢能航空学科的可行性，加快跨专业、跨学科、跨领域的复合型人才培养，为氢能航空发展提供人才储备。

致谢 感谢太行实验室李刚团研究员、中国航发动研所肖为研究员、中国航发商发张漫研究员、西安交通大学宋志平教授、北京航空航天大学唐海龙教授在研究工作中给予的支持和协助。

参考文献：

[1] Candelaria Bergero, Greer Gosnell, Dolf Gielen, et al. Pathways to net-zero emissions from aviation. Nature Sustainability Aviation (IEA, 2022)[J]. Nature Sustainability, 2023, 6: 404-414.

[2] International Energy Agency. Tracking Aviation[EB/OL]. (2023-11-07)[2024-02-20]. https://www.iea.org/reports/aviation.

[3] Climate Action Tracker. International Aviation. (2022-09-22)[2024-2-20]. https://climateactiontracker.org/sectors/aviation.

[4] Brandon G, Dan R, Sola Zheng. CO_2 emissions from commercial aviation: 2013, 2018, and 2019[R]. United States of America: International Council on Clean Transportation, 2020.

[5] 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.

[6] Meher-homji C B, Prisell E. Pioneering turbojet developments of Dr. Hans von Ohain - from the HeS 1 to the HeS 011[J]. Journal of engineering for gas turbines and power: Transactions of the ASME, 2000, 122(2): 191-201.

[7] Cipolla V, Zanetti D, Abu Salem K, et al. A parametric approach for conceptual integration and performance studies of liquid hydrogen short-medium range aircraft[J]. Applied Sciences, 2022, 12(14): 6857.

[8] Haglind F, Hasselrot A, Singh R. Potential of reducing the environmental impact of aviation by using hydrogen part I: background, prospects and challenges[J]. The Aeronautical Journal, 2006, 110(1110): 533-540.

[9] Trudell J. Dual hydrogen-jet fuel aircraft - a path to low carbon emissions[C]//25th Joint Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (CEC/ICMC). Honolulu: NASA, 2023: 1-23.

[10] Peschka W. Hydrogen combustion in tomorrow's energy technology[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1987, 12(7): 481-499.

[11] Watters B, Gonzalez L, Coleman G, et al. Novel senior design approach of a hydrogen citation X[R]. AIAA-2010-1394.

[12] Scholz D. Design of hydrogen passenger aircraft: how much" zero-emission" is possible?[C]//Hamburg Aerospace Lecture Series 2020.

Hamburg:Royal Aeronautical Society,2020:11-19.

[13] Barton D I, Hall C A, Oldfield M K.Design of a hydrogen aircraft for zero persistent contrails[J].Aerospace,2023,10(8):688.

[14] Cotto B, Patel K, Otto M, et al.Thermodynamic cycle modeling of an ammonia aero engine[C]//AIAA Scitech 2024 Forum.Orlando, AIAA, 2024:1179.

[15] Lo P L, Martini G, Porta F, et al.The determinants of CO_2 emissions of air transport passenger traffic: an analysis of Lombardy (Italy) [J]. Transport Policy,2020,91:108-119.

[16] Bergero C, Gosnell G, Gielen D, et al.Pathways to net-zero emissions from aviation[J].Nature Sustainability,2023,6(4):404-414.

[17] Fu J, Houston L, Giordan J, et al. Opportunities and challenges for building market-aligned sustainable aviation fuels[J].ACS Energy Letters,2023,8(8):3558-3564.

[18] Klein B, Scheidemantle B, Hanes R J, et al. Economics and global warming potential of a commercial-scale delignifying biorefinery based on co-solvent enhanced lignocellulosic fractionation[J]. Energy and Environmental Science,2024,17(3):1202-1215.

[19] Pio D T, Vilas-Boas A C M, Araújo V D, et al.Decarbonizing the aviation sector with electro Sustainable Aviation Fuel(eSAF) from biogenic CO_2 captured at pulp mills[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 463:142317.

[20] Abrantes I, Ferreira A F, Silva A, et al.Sustainable aviation fuels and imminent technologies - CO_2 emissions evolution towards 2050[J]. Journal of Cleaner Production,2021,313:127937.

[21] Ayyaswamy A, Vishnugopi B S, Mukherjee P P. Revealing hidden predicaments to lithium-ion battery dynamics for electric vertical take-off and landing aircraft[J].Joule,2023,7(9):2016-2034.

[22] Undavalli V, Gbadamosi O O B, Boylu R, et al.Recent advancements in sustainable aviation fuels[J].Progress in Aerospace Sciences,2023, 136:100876.

[23] Boggia S, Jackson A. Some unconventional aero gas turbines using hydrogen fuel[C]//ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Amsterdam:ASME,2002:683-690.

[24] Hall E W, Silverstein A. Liquid hydrogen as a jet Fuel for high-altitude aircraft[R].NACA-RM-E55C28a.

[25] Brewer G D. Hydrogen aircraft technology[M]. New York CRC Press, 1991:43-55.

[26] Manigandan S, Praveenkumar T R, Ir R J, et al. Role of hydrogen on aviation sector: a review on hydrogen storage, fuel flexibility, flame stability, and emissions reduction on gas turbines engines[J]. Fuel, 2023,352:129064.

[27] Prewitz M, Bardenhagen A, Beck R.Hydrogen as the fuel of the future in aircrafts – challenges and opportunities[J].International Journal of Hydrogen Energy,2020,45(46):25378-25385.

[28] Qazi U Y.Future of hydrogen as an alternative fuel for next-generation industrial applications; challenges and expected opportunities[J].Energies,2022,15(13):4741.

[29] Dawei X.Technologies and challenges of hydrogen powered aviation [C]//The 3rd International Conference on Materials Chemistry and Environmental Engineering (CONFMCEE 2023). Honolulu: IOP publishing,2023:012003.

[30] Singh G, Ramadass K D B C, Dasireddy V, et al. Material-based generation, storage, and utilisation of hydrogen[J].Progress in Materials Science,2023,135:101104.

[31] Zhang T, Uratani J, Huang Y, et al.Hydrogen liquefaction and storage: recent progress and perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2023,176:138.

（编辑：兰海青）