

氢燃料通用航空器发展及飞行安全问题探讨



赵国栋^{1,2}, 徐悦¹, 朱海涛¹, 段辰龙¹, 刘志君¹

1. 中国航空研究院, 北京 100012

2. 北京航空航天大学, 北京 100191

摘要: 氢能是未来绿色航空的必然方向和重要分支, 随着双碳战略的深入推进, 氢燃料通用航空器发展及飞行安全问题引发了广泛关注。本文首先概述了氢燃料通用航空器的发展, 介绍了部分氢能源发展战略规划, 解释了氢燃料通用航空器的基本概念, 并针对氢燃料电池和氢燃烧推进技术分别阐述了其基本原理、应用与发展。其次, 结合典型氢燃料飞机平台案例介绍了氢燃料在航空领域的应用现状; 从氢能特性出发, 围绕燃氢发动机使用过程中的安全问题、通用航空器的氢燃料储运安全问题以及氢燃料通用航空器的其他安全问题展开探讨。最后, 列举了氢燃料通用航空器安全性相关标准, 以供氢燃料通用航空器设计研发人员及相关领域的从业者参考借鉴。

关键词: 氢燃料飞机; 通用航空器; 飞行安全; 绿色航空; 碳减排; 可持续航空燃料

中图分类号: V272

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.12.002

气候变化是当今国际广泛关注的全球性议题, 近年来我国提出了碳达峰、碳中和的双碳战略目标, 旨在 2060 年全面建立绿色低碳循环发展的经济体系和清洁低碳安全高效的能源体系。航空运输作为全球经济活动不可或缺的一环, 碳排放总量多年居高不下, 占全球交通运输总碳排放量的 10% 以上^[1]。根据国际航空的有关分析, 如果不采取更加强有力的行动, 全球航空运输业的碳排放量将在 2050 年达到 $11 \times 10^8 \sim 18.5 \times 10^8 \text{t}$ ^[2], 是 2019 年 $6 \times 10^8 \text{t}$ 碳排放水平的 2~3 倍, 降低航空运输碳排放、推广使用清洁绿色的航空替代燃料迫在眉睫。

为了降低航空运输对环境的影响, 大力发展绿色低碳航空, 国际民航组织 (ICAO) 提出了国际航空碳抵消和减排计划 (CORSIA), 该计划中的航空运营商可以通过碳抵消项目或使用符合 CORSIA 标准的低碳或可持续航空燃料 (SAF) 来抵消或降低超过排放基准的碳增长。碳抵消路线作为 CORSIA 的一部分, 其有效性多年来备受质疑^[3-5], 而研发新技术无疑是从根本上解决航空碳排放问题的最佳方式, 使用可持续能源、利用氢能源等直接减排路线成为绿色航空的必经之路, 其中以氢能源为代表的清洁能源全面应用则是航空碳中和之路的终极目标。

从氢燃料航空器的发展路线来看, 短期的氢燃料电池发动机方案受电池能量密度的限制, 很难在大飞机上应用, 而氢涡轮发动机技术目前仍不成熟, 氢内燃机方案近期也只在一些小型通航飞机上进行了试飞验证^[6]。从新能源航空器的使用模式来看, 目前的在研项目大多朝着通用航空方向发展, 各国政府、相关组织也正在积极推动城市低空立体交通系统的建设, 意图彻底解决城市道路交通拥堵问题^[7]。通航作为目前国内整个交通运输体系中开发利用率极低、极欠发达的一环, 未来在我国的市场空间广阔, 发展空间很大。其中, 大力发展氢能源等清洁能源动力的通用航空器并率先实现推广应用将会是我国打破欧美发达国家对传统化石燃料航空产业垄断格局、实现弯道超车的重要契机和关键举措, 同时能够解决碳排放等环境问题、道路拥堵等交通问题、化石能源的安全问题等多项难题。而限制通用航空发展乃至新能源、氢燃料通用航空发展的一个重要因素, 就是航空安全问题。不能因安全认知偏差, 制约了航空兴国的发展前景^[8], 从技术上剖析新能源、氢燃料通用航空器的飞行安全问题是发展新能源通用航空的必要工作。我国航空运输业减少碳排放路线图如图 1^[9]所示。

收稿日期: 2023-06-21; 退修日期: 2023-09-26; 录用日期: 2023-11-09

引用格式: Zhao Guodong, Xu Yue, Zhu Haitao, et al. Discussion on development and flight safety of hydrogen-powered general aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(12): 9-19. 赵国栋, 徐悦, 朱海涛, 等. 氢燃料通用航空器发展及飞行安全问题探讨[J]. 航空科学技术, 2023, 34(12): 9-19.

为此,本文针对氢燃料通用航空器,概述其发展与应用现状,分析氢燃料的动力特性及其在航空领域的应用特点,探讨氢燃料应用于通用航空器的飞行安全问题,为我国的氢燃料通用航空发展建设工作提供借鉴。

1 氢燃料通用航空器发展概述

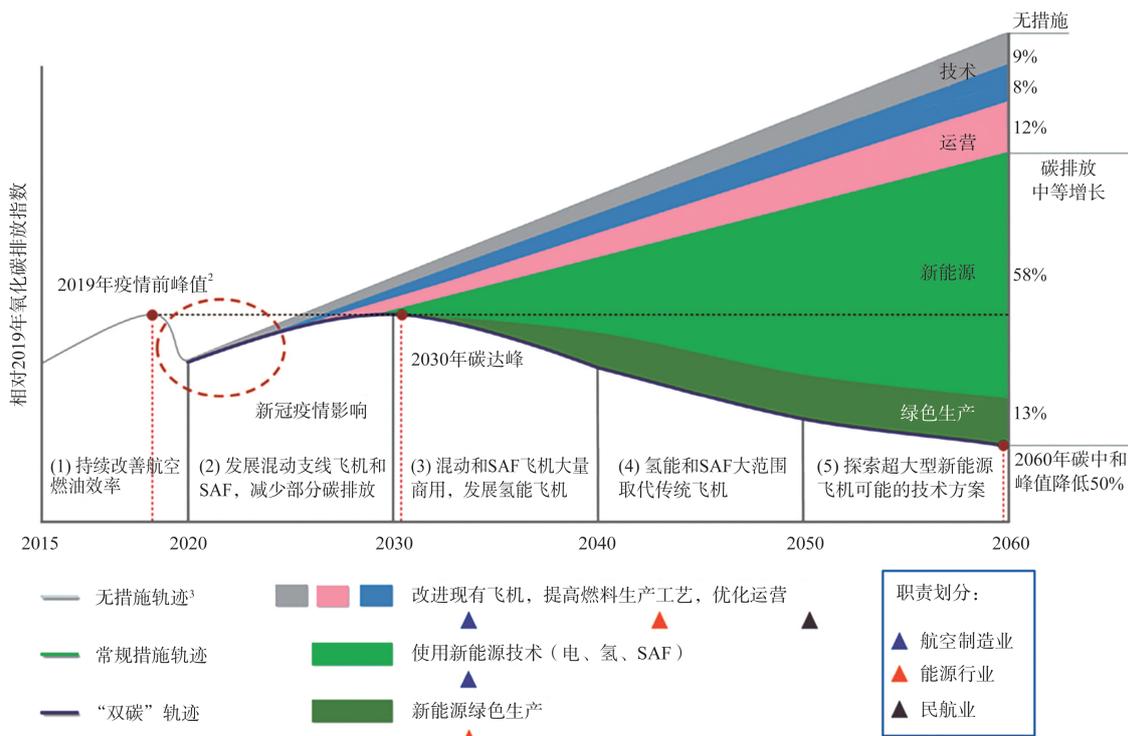
氢能源的开发和利用并不是一个新兴的命题,早在20世纪70年代,美国为了应对中东战争引发的石油危机,提出氢能源未来具备替代传统化石能源的潜力,有望成为未来交通运输业的主要能源。此后的几十年,氢燃料电池作为氢能源利用的一个重要方向,在发电、航空航天、交通领域积累了一定的基础,但并未引起大规模的关注。

近年来,随着全球能源结构向着低碳无碳、绿色清洁方向加速转型,许多政府、组织陆续发布了氢能源发展战略规划,氢能源作为“21世纪的终极能源”再一次回归到人们的视野。同时,为应对全球能源体系的深刻变革,航空业也掀起一波氢能源化浪潮。

2020年,我国政府提出2030年碳达峰、2060年碳中和的战略目标之后,航空产业也迅速布局,如国务院在《2030年前碳达峰行动方案》中提出,大力推进可持续航空燃料替

代传统燃油,发展新能源航空器,以及积极参与国际航运、航空减排谈判^[10];国家发改委及能源局联合印发的《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》中提出,积极探索燃料电池在航空器等领域的应用,推动大型氢能航空器研发^[11];民航局、发改委及交通部联合印发的《“十四五”民用航空发展规划》中提出,加强氢燃料电池等适航验证方法的基础性研究,推进可持续航空燃料常态化应用试点示范工作^[12]。近期,航空工业发布了重要顶层文件——《中共中国航空工业集团有限公司党组关于民用航空产业高质量发展的决定》,航空工业集团将打造包含“通用飞机”在内的六大产业化发展平台,实施包含“航空应急救援装备发展、通用航空产业发展、绿色低碳航空器发展”等在內的七大创新工程。坚持创新驱动,面向前沿发展,聚焦新能源、无人机等战略性新兴产业新兴领域,协同社会各方力量加快创新突破,探索实践“换道超车”和创新引领新方向^[13]。

2020年5月,欧盟发布了“氢能航空”研究报告^[14],给出了氢燃料航空的研发和创新活动路线图,包括氢燃料动力核心组件、氢燃料飞机系统研发等内容,并明确提出欧盟氢能航空发展的第一阶段是2020—2028年,重点发展基础共性技术、通航飞机通过认证、短途氢能飞机试飞等^[15]。



¹根据《“十四五”民用航空发展规划》和历史数据进行预测。²中国民航局《2020年民航行业发展统计公报》

³国际能源署《2020年全球能源报告》

图1 2020—2060年我国航空业减少碳排放路线图^[19]

Fig.1 Road map for reducing carbon emissions in China's air transport industry(2020—2060)^[9]

2021年10月,英国政府发布了“净零”(Jet Zero Strategy)战略计划^[6],旨在推动英国航空业向更为环保和可持续发展的方向转型,该计划将投资数百万英镑用于研究和开发氢能航空技术,并将在未来几年内开展氢燃料航空器的试飞项目。

尽管美国并未发布过针对航空氢能源发展的相关战略规划,但其能源部在2020年11月发布了《氢能计划发展规划》^[7],其中涉及氢能源生产、储存、运输和应用技术的发展规划,以及对氢燃料电池和氢涡轮发动机等氢能转化技术的研究,这些推广氢能技术的目标和措施将有助于氢能航空技术的发展和應用。

1.1 氢燃料通用航空器的概念

氢燃料航空器是指使用氢作为主要能源的航空器,其动力系统主要由燃料电池或氢燃料发动机构成。与传统燃油动力的航空器相比,氢燃料航空器具有更高的能源转化效率和更低的碳排放量。氢燃料通用航空器是指使用氢作为燃料的小型航空器,通常用于轻型客货运、私人飞行、应急救援、探测观测、科学研究等。

氢燃料通用航空器具有广泛的应用场景和多种用途,具有灵活、便捷和安全等特点。随着氢燃料电池发动机技术的迅猛发展及通用航空器研制水平的提升,氢燃料通用航空器在未来投入使用成为可能。在需求和技术的双重推动下,全球航空产业已开始升级和转型,部分国家已陆续将低空域的开放提上日程,希望能够实现低空区域内航空器的自主飞行和管理,打开通航在城市规划、私人飞行、物流配送、农业种植等多领域的巨大市场,推动经济发展和社会进步。

氢燃料本身的特性为氢燃料通用航空器带来了许多传统航空器不具备的优势。首先,氢燃料动力系统的排放物只有水蒸气和少量的氧气,能够真正达到零排放。其次,氢元素在宇宙组成中的占比非常高,根据现代宇宙学的研究,氢元素在宇宙物质中的质量占比大约为75%,因此氢燃料与化石燃料相比是一种更为丰富的资源,并且可以通过水解、太阳能等可再生能源生产,理论上不存在能源枯竭问题。在能源的使用方面,氢气是一种高能量密度的燃料,可以提供高性能和长航程的飞行;氢燃料电池系统的噪声远低于传统燃油动力系统;随着技术的进步和规模效应的充分发挥,氢燃料动力的运营成本有望低于化石燃料。

1.2 氢燃料动力推进技术的发展与应用

氢燃料动力推进主要分为两种类型:一种是氢燃料电池动力推进,另一种是氢燃烧动力推进。氢燃料电池动力推进技术是一种将氢气与氧气反应产生电能,再通过电动机带动风扇转动产生推力的技术。氢燃烧动力推进技术则

是将氢气与空气混合燃烧产生推力的技术,其主要应用有氢涡轮发动机和氢涡轮电动发动机,如图2所示。

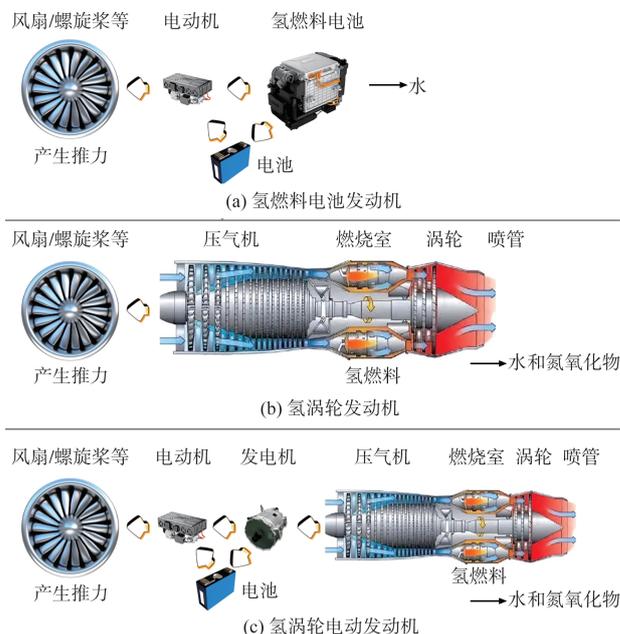


图2 氢涡轮和氢燃料电池发动机

Fig.2 Hydrogen turbines and hydrogen fuel cell engines

1.2.1 氢燃料电池动力推进技术

氢燃料电池动力推进技术是一种以氢为燃料的新型动力推进技术,它通过氢和氧的电化学反应产生电能,进一步将电能转化为机械能,为飞行器提供推力,在航空领域的应用主要面向小型通用航空飞行器。

氢燃料电池系统大致可分为氢气供应系统、氢燃料电池系统及电动驱动系统。氢气供应系统主要包括氢气储存罐、氢气传输管路和氢气供应系统控制单元等部分。氢燃料电池系统将氢气和氧气进行反应生成电能,它主要包括燃料电堆、电池控制单元和电池压缩系统等部分。电动驱动系统将燃料电池系统产生的电能转化为机械能,主要包括电动机、变速器和驱动轴等部分。

氢燃料电池有很多种,但它们的工作原理大致相同:氢燃料电池由阳极、电解质和阴极三个相邻的部分组成,氢气在阳极发生氧化反应($H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$)产生阳离子,通过电解质迁移到阴极,自由电子流动到外部电路。同时,阴极发生还原反应,氧气被阳离子和电子还原成水($4H^+ + O_2 + 4e^- \rightarrow 2H_2O$)。

根据使用的电解质类型,燃料电池可分为碱性燃料电池(AFCs)、质子交换膜燃料电池(PEMFCs)、磷酸燃料电池(PAFCs)、高温熔融碳酸盐燃料电池(MCFCs)和固体氧化物燃料电池(SOFCs)等。燃料电池的分类和特性见表1^[8]。

表1 燃料电池的分类及特性

Table1 Classification and characteristics of fuel cells

类型	碱性燃料电池	质子交换膜燃料电池	磷酸型燃料电池	熔融碳酸盐燃料电池	固体氧化物燃料电池
简称	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
电解质	KOH溶液	含氟质子交换膜	H_3PO_4	$Li_2CO_3-K_2CO_3$	固体氧化物
燃料	纯氢	氢、甲醇、天然气	天然气、氢	天然气、煤气、沼气	天然气、煤气、沼气
氧化剂	纯氧	空气	空气	空气	空气
效率/%	60~90	43~58	37~42	50~80	50~65
使用温度/ $^{\circ}C$	60~120	80~100	160~220	600~1000	600~1000

AFCs在较低的氧还原过电位和较低的工作温度(20~80 $^{\circ}C$)下反应,电解质为KOH, OH^- 为移动离子。PEMFCs在-40~90 $^{\circ}C$ 的工作温度下反应,移动离子为 H^+ ,阴极内的氧化剂为空气和氧气。PAFCs和MCFCs因输出范围大而广泛应用于发电站。SOFCs在高温(600~1000 $^{\circ}C$)下反应,陶瓷材料(如 $Y_2O_3-ZrO_2$)作为电解质。燃料电池可根据所需功率输出规模在不同场景下使用,通用航空领域应用的燃料电池大多在100kW~1MW量级。PEMFC具有启动时间快、工作温度范围广(-40~90 $^{\circ}C$)、高比能等独特优势,使其在所有类型的燃料电池中脱颖而出,应用较为广泛,典型集成化PEMFC电堆的基本结构如图3所示。

氢燃料电池动力推进技术具有零排放、高效能、安静舒适、能量转化效率高等优点,但目前的挑战在于新型氢燃料飞行器的设计或改型、氢的存储及输送系统、氢供应的成本和可靠性以及相应的基础设施建设等。

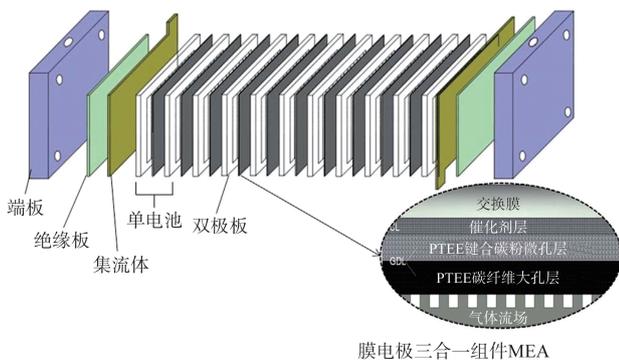


图3 典型集成化PEMFC电堆的基本结构

Fig.3 Basic structure of typical integrating PEMFC stack

1.2.2 氢燃烧动力推进技术

除了氢燃料电池动力推进技术外,氢燃烧动力推进技术是另一种受到广泛关注的氢燃料动力推进技术,目前主要有可以应用于小型通用航空飞机上的氢内燃机、可以应用于中大型通用航空飞机及运输类飞机的氢涡轮发动机,以及拥有更大推力的氢氧火箭发动机。

氢内燃机是在传统内燃机的基础上改变燃料并做出一

系列的适应性改型而来的。其基本原理与传统的燃油内燃机相同,通过氢在汽缸中燃烧产生能量带动活塞运动,按吸气—压缩—做功—排气四冲程将氢燃烧的热能转化为机械能。氢内燃机对氢燃料的纯度要求不高,因此可以利用工业副产氢而无须提纯,也可以在一定条件下与其他燃料混合使用,具有成本低、转化应用便捷的优势,但同时也存在由氢燃料本身特性引起的早燃、爆燃、回火、氢脆等问题,由内燃机工作方式引起的振动和噪声大的问题,由高温下掺混燃烧等引起的氮氧化物排放高的问题,以及能量转换效率低、功率较低、安全性较低等问题。

氢涡轮发动机目前又分为直接驱动和电动两种主要形式:直接驱动的氢涡轮发动机与传统的航空发动机构造相似,通过氢燃料在燃烧室内燃烧来推动涡轮转动,并带动风扇或螺旋桨等推进器产生较大功率的推力;而氢涡轮电动发动机则由涡轮带动发电机,将氢燃烧产生的化学能转化为电能,驱动电动风扇或螺旋桨进而产生推力,同时可以通过电池来储存多余电力并调节飞机电力的供需,氢涡轮电动发动机能够更加高效地利用能量并减少对环境的影响。由于氢气可以快速反应,并且制热量大,因此氢涡轮发动机具有较高的功率输出和瞬间响应能力,可以满足高速、长途、重载等专业需求。此外,涡轮发动机不仅需要承受高压氢气的作用,还要选用耐高温、耐腐蚀、抗氢脆的材料,因此其对材料和制造要求比传统燃油发动机高得多,导致设计和制造难度大、成本高;在制氢、储氢、供氢方面,有关技术也尚需发展,经济性仍有待提高,故目前氢涡轮发动机尚未得到广泛应用。

1.3 氢燃料在航空领域的应用现状

目前在航空领域,氢燃料电池动力推进技术发展更为成熟,应用更为广泛;而氢燃烧动力推进技术虽然更具潜力,但仍存在更大的挑战,在航空领域的应用尚处于试验阶段。由于氢燃料通用航空器的动力需求较低,研制难度小于大型民航客机,因此目前成功试飞的氢燃料飞机中,通航类飞机占比较大,同时也有望更早投入使用。

早在十几年前,空客的母公司欧洲宇航防务集团就提

出了零排放超声速飞机(ZEHST)方案,设计速度可达到4倍声速(即 $Ma\ 4$)。ZEHST的动力由三类7台发动机共同提供,其中低速起降段的动力主要依靠两台传统航空喷气发动机,燃料为由藻类制造的生物燃料;起飞完成后继续依靠三台低温火箭发动机加速爬升至32km高度,此后依靠两台大推力冲压火箭发动机保持巡航,燃料均为液氢液氧。由于该方案较为激进,各项指标都很高,因此短期内难以实现,空客计划最早于2050年后才能投入使用^[19]。2020年,空客公司又公布了ZEROe氢动力飞机方案的三种概念机型,如图4所示,分别采用氢涡桨、氢涡扇混合动力及翼身融合混合动力,计划于5年内完成氢燃料动力方案选型及氢燃料发动机测试,并在15年内开始投入使用^[20-21]。



图4 ZEROe氢燃料飞机方案的三种概念机型

Fig.4 Three concept models of the ZEROe hydrogen powered aircraft program

除空客公司外,美国波音公司早在2003年就启动了氢燃料飞机的研究项目,波音的一架小型氢燃料电池飞机早在2008年就已首飞。此后,波音又进行了氢燃料方向的多次尝试,包含约5种混有氢燃料的航空器。近年来,波音公司将目光更多地转向了SAF,但美国仍有一些企业关注氢能源航空发展。仅2023年初,就有两家公司的氢燃料飞机成功首飞:1月,美国ZeroAvia公司的多尼尔228氢燃料电池电推验证机成功首飞,如图5所示^[22];3月,美国氢能航空初创企业“环球氢能”公司(Universal Hydrogen)研制的基于冲锋8-300型支线客机改装的氢燃料电池电推验证机成功首飞^[23],该验证机是全球第一架改装氢燃料电池动力的25部飞机,在氢能飞机中重量(质量)仅次于1988年苏联试飞的液氢动力图-115。

国内的氢燃料通用航空器研究近年来在一系列政策和项目的支持下突飞猛进发展,有望进一步实现“换道超车”。2017年,我国自主研制的首架有人驾驶氢燃料电池试验机在沈阳试飞成功;2023年3月,我国首款四座氢内燃机验证机在沈阳完成首飞,搭载的是一汽集团基于“红旗”汽油机



图5 ZeroAvia 19座氢燃料电池载人飞机首飞

Fig.5 ZeroAvia made its maiden flight with 19 manned hydrogen fuel cells

研发的国内首款2.0L零排放增压直喷氢燃料内燃机^[6]。这些氢燃料通用航空器的研制成果为后续研制更成熟、更安全的氢燃料飞机打下了坚实的基础。

2 氢能特性及氢燃料通用航空器的安全问题

氢气是最轻的气体,密度仅仅是空气的1/14,黏性很低且具有强扩散性,因此氢气易泄漏,泄漏后会迅速扩散上浮,速度可达9m/s,开放环境下不易聚集爆炸。氢气无色、无味、无毒、无腐蚀性,因此氢的泄漏和聚集难以被察觉,在密闭环境下容易产生安全隐患。氢气高度易燃,纯氢燃烧后的产物只有水,火焰无色也不会产生烟雾,因此是一种理想的清洁能源。但每种能源都有其局限性,尽管氢能源具备清洁环保的优势,但氢气自身的一些物理化学特点,给氢气成为清洁优质的航空燃料带来了独特的挑战。如氢气的爆炸极限范围非常宽,在4%~75.6%(而天然气是5%~15%),最小点火能量仅需0.02mJ,相对来说,氢气非常易于爆炸。1937年,兴登堡号飞艇火灾空难结束了氢气飞艇的客运历史;近年来,世界范围内多起加氢站、储氢罐等爆炸事故更是引起了公众对氢能源安全性的广泛关注。

就通用航空器而言,其功率需求比运输航空飞机小,大多采用氢内燃机或氢燃料电池发动机即可满足需求,而目前试飞过的氢燃料飞机也是这两种能量供给形式,因此本节重点围绕氢内燃机或氢燃料电池发动机展开探讨。氢燃料的使用可粗略分为氢燃料在飞机中存储以及能量转换反应,而氢燃料电池发动机的能量转换过程相较燃氢而言十分温和,安全性问题较小,因此氢燃料对于通用航空器的安全问题主要体现在燃氢发动机的使用以及氢燃料的存储上。

2.1 燃氢发动机使用过程中的安全问题

燃氢发动机使用过程中的安全问题直接影响氢燃料通

用航空器的飞行安全。由于氢气比燃油更易燃,相比传统燃油发动机,氢燃料发动机更容易出现早燃、回火、爆燃与爆轰等异常燃烧的问题;氢气与金属之间发生的“氢脆”反应更是会影响氢燃料发动机的使用寿命与使用安全。

2.1.1 早燃

早燃是指燃料进入气缸后,未等点火系统点燃就提早发生的燃烧现象。氢气作为燃料时存在点火能量低、着火界限宽、火焰淬息距离小和火焰传播速度快的特性。因此,相比传统的燃油和天然气发动机,氢燃料发动机的早燃问题更加严重,由此引发的氢燃料发动机工作不稳定现象也更常见。除氢气自身的特性外,早燃还受进入汽缸的混合气的温度、压力以及发动机转速的影响,进入汽缸的混合气的温度、压力以及发动机转速的数值越高越容易引起早燃。氢气燃烧后的火焰传播速度可达汽油燃烧时的9倍,当氢气早燃现象发生后,燃烧区域大、火焰传播速度快^[24],燃烧汽缸内温度、压力会急剧升高,轻则引发发动机振动、噪声增大,重则引发发动机运行异常及破坏气缸、进气管和点火系统等安全问题。早燃可通过控制进气量、进气温度以及进气时间来解决。

2.1.2 回火

回火是指在氢燃料供应过程中,进气门打开,火焰迅速进入进气管道燃烧的现象。回火的主要原因也是氢燃料极易燃烧的特性,同时早燃也易引起氢发动机回火问题。氢燃料发动机的燃料喷射方式也在一定程度上影响氢气的燃烧质量和安全。对发动机本身而言,提早结束喷氢能够遏

制回火现象发生,但会损失燃氢的效率和动力提供,因此避免发动机回火问题的一个重要设计参数是喷气管喷氢的脉宽。发动机回火可能会引起噪声、进气管和供氢系统的损坏,进而引起发动机空中停车等安全隐患。回火问题可以通过安装回火抑制器、改进供氢系统、控制进氢量和进氢状态以及缩短进氢持续时间来控制,其中供氢系统的设计是解决回火问题的关键。

2.1.3 爆燃与爆轰

氢气与空气的预混合气体的燃烧可能会产生爆燃或爆轰现象。爆燃是指燃烧波以亚声速向未燃混合燃料传播的剧烈燃烧过程;爆轰则是燃烧波以超声速传播的剧烈燃烧现象^[25]。燃氢发动机内发生轻微的爆燃会在汽缸内产生金属的敲击声,俗称敲缸,此时发动机功率也会出现一定程度的增加;高速的爆燃和爆轰都会产生强烈的冲击波,可以认为是一种爆炸。爆燃和爆轰发生时发动机易产生剧烈振动、过压过热等异常情况,严重时损坏发动机部件和供氢系统。氢燃料发动机中的氢气燃烧反应易受掺混的空气影响,当燃烧过程中空气与氢气的比例不同时,燃烧的反应也会发生相应的变化。因此,氢燃料发动机的转速和缸内压强控制、燃料空燃比和压缩比控制、燃料喷射方式和点火时机是保证氢气正常燃烧的重要设计要素。

2.1.4 氢脆和氢腐蚀

氢气是自然界中分子量最小的物质,化学性质活泼,且具有很强的渗透性。通常情况下,高强度钢等金属材料在

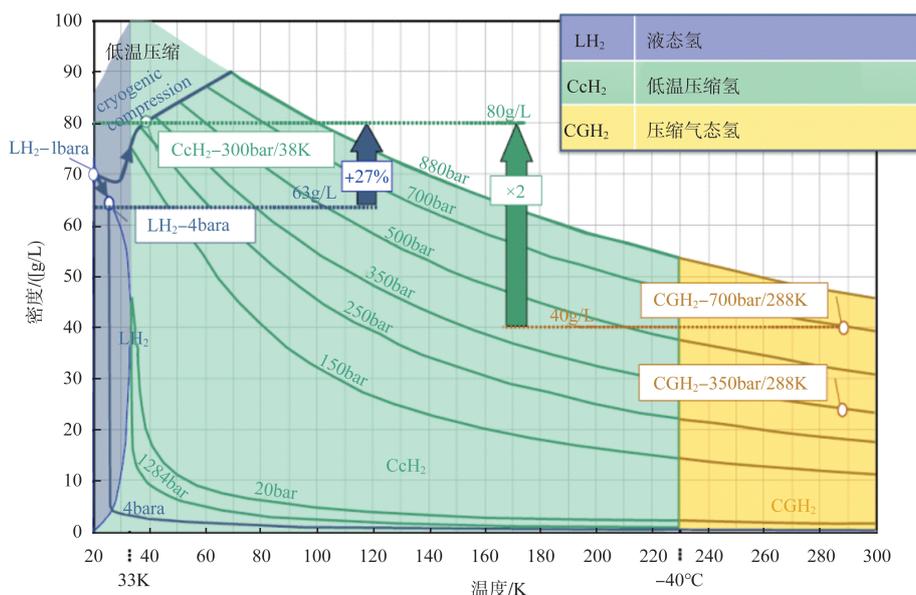


图6 氢密度与压力和温度的关系^[27]

Fig.6 Hydrogen density versus pressure and temperature^[27]

制造过程中接触氢气时,氢会通过金属表面吸附、溶解、扩散等过程渗入金属晶体结构内部,形成固溶体、氢化物、氢分子、氢原子、氢离子等物质,改变金属的微观结构,使其易在应力作用下产生裂纹等氢致损伤缺陷,导致金属变脆,即氢脆现象^[26]。另外,由于氢元素化学性质活泼,其在高温高压环境下更容易渗透到金属内部,并与金属发生反应,导致氢腐蚀的发生。氢燃料发动机在使用过程中无法避免与氢的接触,发动机汽缸、储氢罐及输气管道等部件处于高氢浓度、高温、高压环境下,极易发生氢脆、氢腐蚀现象,对发动机的性能造成很大的影响,同时存在结构断裂失效等安全隐患。此外,氢脆、氢腐蚀会在接触面拐角或尖锐部位加快,在平缓表面比较缓慢,传统机翼油箱处于机翼中,大多为不规则多边形结构,拐角部分更易受到腐蚀。解决氢脆问题的关键是针对氢燃料发动机及储氢供氢系统研制抗氢脆、耐腐蚀的新材料、新结构,采用球形或柱形新型存储罐以缓解结构形状引起的氢脆;同时建立相关材料在氢燃料发动机特殊工况下的性能数据库,为氢燃料航空发动机的安全性设计奠定理论基础和提供数据支撑。

2.2 通用航空器的氢燃料储运安全问题

在氢燃料通用航空器系统中,如何储存并运输氢燃料是一个重要议题,同时也是影响氢燃料通用航空器安全性的一个方面。相比于传统的化石燃料,氢燃料的质量和体积密度很低,如图6所示^[27]。同时,氢气易燃、易扩散、渗透性及高压/低温液氢等物理化学特性也给氢燃料的航空储运带来了挑战。

目前有望应用在通用航空领域的储氢方式主要有高压气态储氢、低温液态储氢、金属氢化物及有机液体等储氢方式。

2.2.1 高压气态储氢及其安全问题

常态下氢气密度很低,可以通过加压来增加其存储密度,从而减小储氢体积。高压气体储氢是最易行且成熟的方法,在氢燃料电池车等领域已有一定的应用市场。其优点是技术简单,且充放氢速度快、温度适应范围广;其主要缺点是空间需求大和安全问题突出。

压缩氢气的储存压力主要取决于氢气储存的体积能量密度和储氢罐重量之间的权衡。控制变量情况下,氢存储压力越大,体积能量密度越大,则需要的储罐、阀门等配套设备的承压能力和重量就越大,造成系统整体的质量能量密度减小。在航空应用领域,各系统的重量要求更为严苛,储氢罐的轻量化设计更为重要。

目前常用的储氢罐大致分为4类,分别为I型、II型、III型

和IV型,如图7所示。其中,I型、II型的主要材料为耐高压钢材,以固定式应用为主。I型的构造只有一层材料,结构简单,成本低,重量大,一般存储的气体压力为15~20MPa。II型比I型增加了外层的箍圈式纤维树脂复合材料包裹,增强了一定的抗压能力,存储气体压力为20~30MPa。III型、IV型在轻量化方面做出了较大的改进,主要是为了解决氢燃料交通工具对移动储氢罐的应用需求。III型罐体内层采用较薄的高强度金属,外层采用两极或螺旋铺设的纤维树脂复合材料包裹,压力主要有35MPa和70MPa两种,此类氢罐在氢燃料电池领域应用较为成熟。IV型罐体内层采用了抗压高分子材料,具备强度高、工艺性好、热稳定性高、化学稳定性好等优势,外层采用两极或螺旋铺设的纤维树脂复合材料包裹,进一步突出了轻量化设计,储氢压力有望继续提升至100MPa^[26]。



图7 主流氢罐结构

Fig.7 Mainstream hydrogen tank structure

高压气态储氢的安全性主要受储氢瓶内压力、温度以及储氢瓶结构状态的影响。在加氢、机体剧烈振动或发生碰撞等特殊情况下,储氢瓶内燃料状态变化幅度大,容易产生安全隐患。主要安全问题可能存在于以下几种情况:(1)受氢气宽爆炸极限范围(4%~75.6%)和最低点火能量(0.02mJ)的燃烧特性影响,异常状态下氢燃料的泄漏、燃烧和爆炸是氢燃料航空器的一项重大安全隐患;(2)储氢瓶的环境温度会随着飞机的飞行高度、地理位置等产生一定变化,为了提高储氢密度,储氢温度可能设计为低于氢罐外的环境温度,当温度控制系统发生故障等,将外界热量导入罐内时,会影响储氢瓶内压力变化,从而引发泄漏甚至物理爆炸风险;(3)I型、II型、III型储氢瓶的内层为金属材料,与氢接触易发生氢脆现

象,从而破坏储氢瓶的结构,造成氢气泄漏的安全隐患。

因此,储氢瓶内的气体状态和储氢瓶各结构的使用状态需时刻监测,机载储氢瓶需要配备安全管理监测系统和相应的安全控制策略,基于温度、压力等传感器获取状态数据,进而通过安全控制策略判断储氢状态,并在存在安全隐患时做出相应的安全防护动作。

2.2.2 低温液态储氢及其安全问题

氢可以在液态下储存,低温液态储氢是另一种更为高效的储氢方式。由图6可以看出,同等压力下,温度越低,储氢密度越大,因此低温是另一个提高储氢效率的方向。标准大气压下,当温度降低到 -253°C 以下时氢气液化,加压时至少可提高到 -240°C 左右,液氢密度可达气氢密度的几千倍^[26],能够有效降低移动储氢容积需求。在液化再气化的过程中氢气被再次提纯,对提高氢燃料电池发动机的寿命是有利的。液氢储运的工作压力较小,相较高压储氢,安全性得以提高。液氢存储技术相较高压存储技术难度更高,配套储氢系统也更复杂,目前的储氢系统在维持低温环境时也会消耗大量额外能量,进一步降低用于飞机推进系统的有效燃料比例,因此如何减少环控系统的能量消耗是提高氢动力飞机性能的另一个重要议题。液氢动力在航空器领域的应用尚不成熟,国内的移动液氢存储技术起步较晚,目前仅在航天军工领域有所应用。由于液氢储运在通用航空器领域尚无应用案例,其安全问题暂无法从应用中得知。结合液氢储运特性,预想液氢在通用航空器领域的储运安全问题可能集中在4个方面:(1)与高压氢相同,氢特性导致液氢在使用时或加氢时存在氢泄漏风险,进而引发燃烧或爆炸等安全问题;(2)剧烈振动或低温绝热系统损坏等引起外界热量导入液氢储罐,液氢快速气化会引起储罐迅速增压,罐内巨大压力易引发结构破坏或物理爆炸等安全问题;(3)超低温液氢泄漏后引起阀门及管路等机载部件结冰、堵塞或结构破坏,以及接触人员冻伤等安全问题;(4)液氢低温氢脆引起金属材料结构失效带来安全问题。

此外,金属氢化物及有机液体等其他储氢方式目前仍在预研阶段,短期内无法应用于通用航空领域,在此不作探讨。

2.3 氢燃料通用航空器的其他安全问题

除氢燃料及氢燃料动力系统本身带来的安全问题外,氢燃料通用航空器还存在许多其他衍生出来的系统安全性问题:(1)在整机设计过程中,由于氢燃料推进的特殊性,需平衡动力、气动、结构、控制、电系统等多方面的需求,复杂程度高、综合性强、目标新颖的系统设计带来了一定的安全问题;(2)由于目前能应用在飞机上的氢燃料的体积密度较小,为

了最大限度利用机上空间,多采用翼身融合布局,从而衍生出氢燃料翼身融合布局航空器相关适航安全性问题;(3)目前氢燃料电池发动机的功率普遍较小,在大功率的氢能源发动机投入应用之前,过渡阶段多采用分布式推进布局,从而衍生出一系列安全问题;(4)为了最大限度减少材料的氢脆现象发生,氢燃料通用航空器需采用抗氢脆及抗氢腐蚀的新型复合材料,由此引发的结构安全问题;(5)目前国内外通航飞机的事态率远大于民航大型飞机,加之氢燃料易燃易爆,因此氢燃料航空器故障坠地导致爆炸的概率可能大于民航飞机,对地面的人、财、物造成安全威胁。

尽管现阶段氢燃料通航飞机还有很多安全性问题有待研究解决,如飞机氢燃料地面加注过程中的防泄漏与防灭火、故障后的爆炸可能性问题等,但这并不意味着它们注定会成为“自爆卡车”或“自爆飞机”。随着氢燃料飞机及相关系统研制技术的进步、氢能源相关政策的支持,氢燃料电池、氢燃烧控制、抗氢脆材料及氢储运、氢燃料飞机平台的集成以及高安全性的设计方案、相关标准正在逐步发展和完善,这些成果及进步都在推动氢燃料通用航空器的落地应用,并逐步提高其安全性水平。

3 氢燃料通用航空器安全性相关标准

国际氢安全相关的标准主要集中于国际标准化组织(ISO)和国际电工委员会(IEC),目前均为氢安全的通用标准,由于氢燃料通用航空器仍在设计研发阶段,因此目前尚无有针对性的专用标准。

ISO TR 15916—2015《氢系统安全的基本考虑》是有关氢的基本特性及氢系统危险因素及风险控制的一项基础标准。在此基础上,我国国家市场监督管理总局和中国国家标准化管理委员会发布了GB/T 29729—2022《氢安全的基本要求》。

在更具针对性的燃料电池交通工具领域,ISO1988X、ISO 1398X分别规定了地面车辆使用气氢、液氢的相关标准,中国国标的相关标准规范集中在GB/T 400XX中。ISO 12619系列《道路车辆—压缩气态氢(CGH₂)和氢/天然气混合燃料系统部件》规定了一系列详细标准规范。近年来,我国的新能源汽车发展迅速,氢燃料电池汽车相关的安全要求及标准规范也陆续出台,如GB/T 31138—2022《燃料电池电动汽车安全要求》、GB/T 26779—2021《燃料电池电动汽车加氢口》等标准规范对于氢燃料电池飞机设计均有一定的参考价值。

在氢气储运方面,ISO 210XX系列规定了固定低温容器的设计、装配、检查、测试及其材料、结构、组件等相关的要求;而ISO 7866、ISO 9809及ISO11119系列则覆盖了可

移动式氢罐的相关标准。

在基础设施方面,国际标准化组织出版了ISO 19880系列,如加氢站的技术规范ISO 19880-1:2020《气态氢—加氢站—第1部分:一般要求》,限定了轻型道路车辆气态氢加氢站的最低设计、安装、调试、运行、检查和维护及在适当情况下的性能要求,该标准中同时也提到了部分液氢的相关要求。ISO 19880-2到ISO 19880-9分别规定了加氢站的加氢机和分配系统、阀门、加氢机软管和软管组件、配件、O形密封圈、燃料质量控制及燃料质量分析取样,其中多项标准仍处于计划完善状态。与此相关的中国国家标准有GB 50516—2010《加氢站技术规范》、GB/T 34584—2017《加氢站安全技术规范》、GB/T 34583—2017《加氢站用储氢装置安全技术要求》以及GB/T 31138—2022《加氢机》等。

目前,氢能源在全球范围内属研究热点领域,除上述标准外,仍有非常多与氢能源相关的标准和规范已发布或在快速的研究制定中,如欧洲标准(EN)、欧洲工业气体协会(EIGA)、美国国家标准学会(ANSI)、美国汽车工程师学会(SAE)、电机电子工程师学会(IEEE)、美国电气制造商协会(NEMA)、加拿大标准协会(CSA)等组织机构均发布了氢能源相关标准规范,在氢燃料通用航空器设计过程中,以上标准提供了丰富的安全性指标和准则,但在空中应用场景下的专用标准目前仍不完善,需在大量试验测试数据及设计经验支撑下补充制定。

4 结束语

在未来的通用航空领域,我们可以预见到更加绿色环保、高效安全的飞行方式。但受限于各种影响因素,目前国内通用航空发展仍非常缓慢^[28-30]。究其原因,包括但不限于以下几点:

(1) 国防安全问题,近年来国际局势动荡,存在“低慢小”乃至通用航空器的渗透风险。

(2) 交通安全问题,2022年我国通航事故率为0.0367起/万架次远大于运输航空重大事故率0.011起/百万架次^[28],国外通航飞机事故频发,事故率约为50起/百万架次^[29],同样远大于民航飞机总事故率1.21起/百万架次^[30],而氢能源通航飞机一旦坠落,造成的安全问题将更加严重,目前的通航产品、运营经验、技术手段等仍达不到社会可接受的安全水平,不足以全面放开并推广低空立体交通。

(3) 产业安全问题,国内的通航产品及技术水平近年来已在稳步提升,但仍存在政策孵化不足、技术人才稀缺、运营经验较少、民众认识不够等问题,整体滞后于国际同行

产业发展,若在准备不足的情况下贸然开放,存在引入国外竞争性要素挤占国内通航产业市场的风险。

随着技术的不断革新和完善,未来氢燃料通用航空器将越来越多地出现在我们的视野中。而氢燃料通用航空器设计是一项前沿的科学技术研究,仍有很多难题需要逐一解决。我们不能忽视任何一个威胁飞行安全的潜在隐患,但仍需要客观理性地对待氢燃料通用航空器的安全问题,需要依靠充分的试验数据、科学的设计生产、严格的维护检测以及规范的制度标准^[31]来保证未来氢燃料通用航空器的安全性。

AST

参考文献

- [1] Timothy G. Global energy review 2021 [S]. International Energy Agency, 2021.
- [2] Climate Action Tracker. International aviation [EB/OL]. (2022-05-09). <https://climateactiontracker.org/sectors/aviation>.
- [3] Maertens S. ICAO's new CORSIA scheme at a glance: A milestone towards greener aviation? [M]. Abingdon: Routledge, 2020.
- [4] UN Environment Programme. Carbon offsets are not our get-out-of-jail free card [EB/OL]. (2019-06-10). <https://www.unep.org/news-and-stories/story/carbon-offsets-are-not-our-get-out-jail-free-card>.
- [5] 薛飞. 国际航空碳抵消和减排计划在曲折中前行[EB/OL]. (2018-02-08). http://www.caacnews.com.cn/1/88/201802/t20180208_1240593.html.
Xue Fei. International aviation carbon offsetting and emission reduction plans are moving forward in twists and turns[EB/OL]. (2018-02-08). http://www.caacnews.com.cn/1/88/201802/t20180208_1240593.html.(in Chinese)
- [6] 高铭,王莹,刘思远. 我国自主研发四座氢燃料内燃机飞机验证机成功首飞[EB/OL]. (2023-03-29). http://www.news.cn/politics/2023-03/29/c_11_29474597.htm.
Gao Ming, Wang Ying, Liu Siyuan. China's self-developed four-seat hydrogen-fueled internal combustion engine aircraft verification aircraft successfully made its first flight [EB/OL]. (2023-03-29). http://www.news.cn/politics/2023-03/29/c_11_29474597.htm.(in Chinese)
- [7] 中华人民共和国中央人民政府. 国家综合立体交通网规划纲要[S]. 中华人民共和国国务院公报, 2021.

- Central Government of the People's Republic of China. Outline of national comprehensive three-dimensional transportation network planning [S]. Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2021. (in Chinese)
- [8] 王文慧. 专访李健:不能因安全认知的偏差,制约了航空兴国的发展前景 [EB/OL]. (2023-04-05). <http://www.cctvjingji.com/part-157/7307.htm>.
Wang Wenhui. Interview with Li Jian: The deviation of safety cognition should not restrict the development prospect of aviation [EB/OL]. (2023-04-05). <http://www.cctvjingji.com/part-157/7307.htm>. (in Chinese)
- [9] 纪宇晗,孙侠生,俞笑,等. 双碳战略下的新能源航空发展展望[J]. 航空科学技术,2022, 33(12): 1-11.
Ji Yuhan, Sun Xiasheng, Yu Xiao, et al. Development prospect of new energy aviation under carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(12): 1-11. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国中央人民政府. 2030年前碳达峰行动方案 [S]. 中华人民共和国中央人民政府,2021.
Central People's Government of the People's Republic of China. Action plan for carbon peak before 2030 [S]. Central People's Government of the People's Republic of China, 2021. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国国家发展和改革委员会,国家能源局. 氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)[S]. 中华人民共和国国家发展和改革委员会,国家能源局,2022.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, National Energy Administration. Medium and long-term plan for the development of hydrogen energy industry (2021-2035) [S]. National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, National Energy Administration. Medium and long-term plan for the development of hydrogen energy industry, 2022. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国国家发展和改革委员会,交通部,中国民用航空局. “十四五”民用航空发展规划[S]. 中华人民共和国国家发展和改革委员会,交通部,2021.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, Ministry of Communications, Civil Aviation Administration of China. The 14th five-year plan for civil aviation development [S]. National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, National Energy Administration. Medium and long-term plan for the development of hydrogen energy industry,2021.(in Chinese)
- [13] 航空工业. 全面推进民用航空产业高质量发展,为中国式现代化贡献航空力量[EB/OL]. (2023-04-18). https://mp.weixin.qq.com/s/gZ7B_Gg7pb6lUqBBV3Mn9w.
AVIC. The all-round quality of civil aviation industry, contributing to Chinese modern aviation power [EB/OL]. (2023-04-18). https://mp.weixin.qq.com/s/gZ7B_Gg7pb6lUqBBV3Mn9w. (in Chinese)
- [14] European Commission. Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050 [S]. Belgium: European Commission, 2020.
- [15] Boretti A. Perspectives of hydrogen aviation [J]. *Advances in Aircraft and Spacecraft Science*, 2021, 8(3): 199-211.
- [16] Department for Transport, United Kingdom. Jet zero strategy: Delivering net zero aviation by 2050 [Z]. Department for Transport, United Kingdom, 2022.
- [17] Department of Energy, US. Energy department releases its hydrogen program plan [EB/OL]. (2020-11-12). <https://www.energy.gov/articles/energy-department-releases-its-hydrogen-program-plan>.
- [18] 秦江,姬志行,郭发福,等. 航空用燃料电池及混合电推进系统发展综述[J]. 推进技术, 2022, 43(7): 210164.
Qin Jiang, Ji Zhixing, Guo Fafu, et al. Review of aviation fuel cell and hybrid electric propulsion systems [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(7):210164. (in Chinese)
- [19] Defoort S, Serre L, Grenon R, et al. ZEHST: Environmental challenges for hypersonic passenger transport [R]. AIAA-2012-5873, 2012.
- [20] Airbus. The ZEROe demonstrator has arrived: A giant leap towards hydrogen-powered aircraft by 2035 [EB/OL]. (2022-02-22). <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>.
- [21] Airbus. At Airbus, hydrogen power gathers pace [EB/OL]. (2023-06-20). <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2023-06-at-airbus-hydrogen-power-gathers-pace>.
- [22] ZeroAvia. ZeroAvia makes aviation history, flying world's largest aircraft powered with a hydrogen-electric engine [EB/OL]. (2023-01-19). <https://www.zeroavia.com/do228-first-flight>.

- [23] Universal Hydrogen. Universal hydrogen flies hydrogen-powered Dash 8[EB/OL]. (2023-03-03). <https://futureflight.aero/news-article/2023-03-01/universal-hydrogen-flies-hydrogen-powered-dash-8>.
- [24] Xiao Jianjun, Kuznetsov M, Travis J R. Experimental and numerical investigations of hydrogen jet fire in a vented compartment[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 178(3): 10167-101854.
- [25] Yang Fuyuan, Wang Tianze, Deng Xintao, et al. Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(61): 31467-31488.
- [26] Elham A, Fatemeh S, Mohsen S, et al. Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021, 72: 104569.
- [27] Barthelemy H, Weber M, Barbier F. Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(11): 7254-7262.
- [28] 中国民用航空局. 2022年民航行业发展统计公报[S]. 中国民用航空局, 2023.
- Civil Aviation Administration of China. Statistical bulletin on development of civil aviation industry in 2022 [S]. CAAC, 2023.
- [29] EASA. EASA annual safety review 2022[S]. European Union Aviation Safety Agency Safety Intelligence Department, 2022.
- [30] The International Air Transport Association. IATA annual review 2023[C]. 79th Annual General Meeting and World Air Transport Summit, 2023.
- [31] 卢溢, 岳宁, 苗延青, 等. FAR-23部规章重组分析研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(2): 65-69.
- Lu Yi, Yue Ning, Miao Yanqing, et al. Analysis and research on reorganization of FAR-23 regulations[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(2): 65-69. (in Chinese)

Discussion on Development and Flight Safety of Hydrogen-powered General Aircraft

Zhao Guodong^{1,2}, Xu Yue¹, Zhu Haitao¹, Duan Chenlong¹, Liu Zhijun¹

1. Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100012, China

2. Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: Hydrogen energy is the inevitable direction and important branch of green aviation in the future. With the in-depth promotion of dual-carbon strategy, the development and flight safety of hydrogen-fueled general aircraft have attracted wide attention. Firstly, the development of hydrogen-powered general purpose aircraft is summarized, the hydrogen energy development strategy plans formulated and issued by various countries in the world are introduced, the basic concept of hydrogen-powered general purpose aircraft is explained, and the basic principle, application and development of hydrogen fuel cell and hydrogen combustion hydrogen propulsion technologies are expounded respectively. Then the application status of hydrogen powered aviation is introduced through several typical cases of hydrogen powered aircraft platform. Combined with hydrogen energy characteristics, the safety problems in the use of hydrogen-burning engine, the safety problems of hydrogen energy storage and transportation for general purpose aircraft and other safety problems of hydrogen powered general purpose aircraft are discussed. Finally, the safety standards of hydrogen-powered general aircraft are listed to provide reference for the design and development personnel of hydrogen-powered general aircraft and practitioners in related fields.

Key Words: hydrogen-powered aircraft; general aircraft; flight safety; green aviation; carbon emission reduction; SAF