

文章编号: 1674-8190(2024)06-077-09

氢能源动力试飞关键技术分析与发展展望

高扬, 张志强, 王赵蕊佳, 王凯

(中国飞行试验研究院 发动机所, 西安 710089)

摘要: 氢能源动力是推动实现航空领域“双碳”目标的重要形式之一, 氢能源动力的制造、试验及鉴定将为航空领域实现“双碳”目标提供重要支撑。本文结合航空领域“双碳”目标分析了国内外氢能源动力的发展背景, 系统地梳理了国内外氢能源的前沿规划、氢能源动力总体飞行试验的最新进展; 详细分析了氢能源动力试飞的关键技术, 着重针对适配航空发动机飞行平台的技术剖析, 涵盖氢的存储及输送、氢能源飞行平台适应性改造、特殊测量技术、安全防护及控制技术、试飞配套设施、试飞验证及评估技术和适航符合性研究, 为氢能源动力演示验证、氢能源动力产品考核、氢能源动力安全运行、航空科技革新、航空低碳高质量发展等研究提供参考。

关键词: 氢能源动力; 航空发动机飞行台; 试飞技术; 氢存储; 氢测量; 氢安全; 适航

中图分类号: V217

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.06.07

Analysis and development prospect of key technologies for hydrogen power flight test

GAO Yang, ZHANG Zhiqiang, WANG Zhaoruijia, WANG Kai

(Engine Institute, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: Hydrogen power is one of the important forms to promote the realization of the "double carbon" goal in aviation field. The manufacturing, testing and qualification of hydrogen power will provide important support for the realization of the "double carbon" goal in aviation field. In this paper, the development background of hydrogen energy power at home and abroad is analyzed in combination with the "double carbon" goal in aviation field, and the forward planning of hydrogen energy power and the latest progress of the overall flight test of hydrogen energy power are systematically reviewed. The key technologies of hydrogen power flight test are analyzed in detail, and the technology of adapting to aeroengine flight platform is analyzed emphatically. It covers hydrogen storage and transportation, adaptation transform of hydrogen powered flight platforms, special measurement technologies, safety protection and control technologies, flight test supporting facilities, flight test verification and evaluation technologies, and airworthiness compliance studies. The aim is to provide reference for the research on hydrogen power demonstration, hydrogen power product evaluation, safe operation of hydrogen power, aviation technology innovation, low carbon and high quality development of aviation.

Key words: hydrogen power; aeroengine flight platform; flight test technology; hydrogen storage; hydrogen measurement; hydrogen safety; airworthiness

收稿日期: 2024-04-29; 修回日期: 2024-06-04

通信作者: 王赵蕊佳(1995-), 女, 硕士, 工程师。E-mail: 18845105512@163.com

引用格式: 高扬, 张志强, 王赵蕊佳, 等. 氢能源动力试飞关键技术分析与发展展望[J]. 航空工程进展, 2024, 15(6): 77-85.

GAO Yang, ZHANG Zhiqiang, WANG Zhaoruijia, et al. Analysis and development prospect of key technologies for hydrogen power flight test[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(6): 77-85. (in Chinese)

0 引言

航空低碳发展是交通领域低碳发展的重要方向,氢燃料是未来实现零碳排放、可持续发展的战略能源,以氢燃料作为能源的氢能源动力是推动实现航空“双碳”目标的重要形式之一^[1],氢能源动力的制造、试验及鉴定将为航空领域实现“双碳”目标提供重要支撑,高效、安全完成氢能源动力中涉氢设备的试验及鉴定也是必不可少的重要环节,众多航空企业已经开始布局研究氢能源动力。

2020年以来,世界各国为达成航空碳排放减少目标,陆续增加氢能产业投资,并积极制定了与氢能航空发展相关的战略规划和前沿部署。2021年2月,欧盟推出了“2050年目标——欧洲航空零排放之路”计划^[2],计划中提出到2050年实现航空业二氧化碳净零排放^[3]。2020、2023年德国先后发布了两版“国家氢能战略”,支持在飞机推进系统中使用氢能^[4]。2023年9月,英国成立氢能航空(Hydrogen in Aviation,简称HIA)联盟,致力于英国氢能航空业发展,加快实现零碳航空^[5]。2020年,我国国家能源局印发《中华人民共和国能源法(征求意见稿)》^[6],将“氢能”纳入能源范畴。国家发改委、民航等部门出台了系列文件^[7-9],至此开启氢能多元化示范应用的篇章。

随着各国氢能航空战略布局的火热开展,各国在氢能源动力的概念设计、原理验证、试飞验证上均开展了不同程度的研究。2022年12月,法国空中客车公司展示了三款名为“ZEROe”的零排放概念飞机,分别是涡扇氢混合动力、涡桨氢混合动力和翼身融合混合动力飞机^[10]。三款飞机均采用液氢燃料,液氢储存和分配系统位于后增压舱或机翼下方。同期,又公布了一款具有6个推进吊舱的分布式燃料电池推进系统的全新氢燃料飞机构型,目前该项目还停留在概念演示阶段。2023年1月,ZeroAvia氢能飞机公司宣布,基于19座多尼尔228双发涡桨飞机改装的氢燃料电池技术验证机在英国成功首飞,此次验证首飞采用左侧时候用氢燃料电池驱动的电动机带动螺旋桨,右侧则仍使用传统的标准煤油发动机的试飞方式,飞行过程持续了10 min。2023年3月,英国零碳航空公司(ZeroAvia)在改装了一架塞斯纳337双发飞机的基础上,完成了首次使用液态氢作为燃料的氢动

力试飞^[11]。2023年3月,美国通用氢燃料公司(Universal Hydrogen)完成了目前世界上最大的氢燃料电池验证机的首飞。此次试飞由一架改装后的Dash8-300氢动力飞机完成,消耗了大约16 kg气态氢,飞行时长约15 min,飞行高度达到3 500 ft(1 ft=0.304 8 m)^[12]。2023年9月7日,德国的氢电飞机动力总成系统开发商H2FLY宣布,已成功完成世界上首次使用液氢的电动飞机载人飞行。此次飞行持续了3 h 1 min,消耗氢10 kg。液氢的成功使用使得HY4验证飞机的最大航程从750 km增加到了1 500 km^[13]。

国内在氢动力方面的研究起步于无人机,在2012年7月30日,由辽宁通用航空研究院研制的我国首架氢燃料电池作为主要动力的无人试验机“雷鸟”首飞成功^[14]。随后,又有“飞跃一号”“灵雀H”、CW-25H等氢动力无人机的研制成功。2017年1月9日,中国自主研发的首架有人驾驶氢燃料电池试验机在沈阳试飞成功,试飞中燃料电池和锂电池共同工作时间为起飞和大速率爬升阶段,单燃料电池工作时间为巡航阶段,试飞高度320 m,全程零污染排放。至此,中国成为继美国、德国之后第三个拥有该技术的国家^[15]。2023年3月25日,首款四座氢燃料内燃机飞机验证机在沈阳某机场完成首飞,是我国自主研发的第一架以氢内燃机为动力的通航飞机^[16]。2023年9月4日,在2023年服贸会北京首钢展区,中国商用飞机有限责任公司展示了国内新一代氢燃料技术验证机——“灵雀M”,其机身按照加载液态氢原料设计。“灵雀M”原型机拟择机进行试飞,但实现商用化仍需要较长时间^[17]。

目前,氢能动力的技术路线分为氢内燃机、氢燃料电池和氢燃料涡轮发动机三种,前两种方式的功率密度较小,适合小型短距的通航类或低空经济类飞行器,第三种在航空领域的应用趋势是向着大型远距民航客机方向发展。氢内燃机及氢燃料电池的试验鉴定可在本机上进行,而氢燃料涡轮发动机则需要借助航空发动机飞行平台开展。航空发动机飞行平台,又称航空发动机空中试车台,是专为航空发动机试验而改装的试验平台,用于在真实大气环境和飞行条件下对发动机工作能力和可靠性进行试验的飞行平台。航空发动机飞行平台可实现涡扇、涡桨、涡轴系列发动机

的空中的实时测量与监控,助力评估发动机在实际飞行环境中的性能,累积飞行数据,为发动机的改进和优化提供支持,是检验发动机性能指标、保障试飞安全的重要平台,是新型发动机的研制及演示验证必不可少的技术设施。

至今,国内外已有多种类型的氢动力飞机完成首飞,但多为原理机验证飞行,且多为氢燃料电池+传统燃料系统的双系统飞行验证,基于单通道氢燃料涡轮发动机和外挂推进吊舱构型的氢动力验证还在概念设计阶段,未开展实质性试飞工作。氢能动力的试飞工作对飞行器本身产品功能验证、环保考核提供坚实的技术支撑,对氢能动力的安全验证提供重要保障,对氢能动力的适航及商业发展提供安全性支撑。面对现阶段氢能动力发展现状,需详细分析氢能动力试飞的关键技术,为氢能动力产品考核、氢能动力演示验证、氢能动力安全运行、航空科技革新、航空低碳高质量发展等研究提供参考。

本文通过分析国内外氢能动力在航空领域的发展背景和前沿规划,系统探讨和详细分析氢能动力试飞的关键技术,旨在为氢能动力试飞演示验证、产品考核、安全运行及低碳高质量发展提供参考。

1 氢的存储及输送

鉴于氢燃料具有高密度、高比热、低温、宽燃范围和易挥发特性,对于氢的存储较为困难,目前主流研究方式主要包括高压储氢、低温液态储氢以及金属氢化物储氢。氢燃料电池及氢内燃机因其飞行器短距运输的功能定义,多采用氢气为动力燃料,常采用高压储氢的方式存储。高压储氢目前需要关注轻质量、抗氢脆的储氢罐材料研制技术。

对于采用氢燃料涡轮、涡扇动力发动机的长续航飞行器,多采用较高质量密度和能量密度的液氢燃料作为长续航飞行器的使用燃料。该类氢能动力发动机的试验鉴定需要借助飞行平台,适配于航空发动机飞行平台的氢能储存设备,需要减小油箱质量和体积对飞机性能带来的额外要求,提升有效载荷和航程。由此,低温液态储氢的优势突显出来,适配安装在飞行平台上的液氢罐也

变得尤为重要。

适配飞行平台的储氢罐涉及对体型、密封性、绝热性、材料的要求都比传统燃油系统更为复杂。常用的低温液态储氢罐有球形和圆柱形两种,如图1所示。同等容积下,两种形式储氢罐的优缺点各不相同,主要特点如表1所示。



(a) 球形

(b) 圆柱形

图1 液氢储罐形式^[18]

Fig. 1 Form of liquid hydrogen storage tank^[18]

表1 各类型储氢罐特点
Table 1 Characteristics of each type of hydrogen storage tank

类型	特点
球形	表面积小,漏热率低;受力性能好,壁面薄,质量轻
圆柱形	成型容易,易于加工及安装;适配性好,可适配各类飞行器;表面积大,相对质量大

储氢罐密封要更加关注加注口的密封性,防止加氢时氢泄露风险引发氢气点火或者燃烧问题,还需考虑恒温保持,以避免液化后的氢气由于气温的升高导致体积膨胀,进而导致燃料箱内压强骤增而发生的爆炸。液态储氢存在漏热和蒸发问题,对储存罐的绝热提出了较高要求^[18],绝热方式多考虑高真空多层绝热结构,在内外容器的布置与飞行平台所需小油箱质量的要求相悖,后续要针对轻质绝热方式开展研究。液氢的供给离不开高压液氢泵,航空上已使用的液氢泵为大涡轮泵,应针对机上储氢罐可使用的液氢泵进行小型化研发,开展高压液氢活塞泵研制研究。氢燃料系统用于分配、汽化和向涡轮机供液氢,需要低温冷却至20 K(-253℃)^[19],这一温度要求需要通过管道、阀门和压缩机来处理,以保证输送系统恒温 and 压差,设计时必须保持较低的沸腾损耗,同时避免材料的泄露和脆化。针对不可避免的氢脆,可

发展特殊合金和碳纤维增强树脂等材料^[13],以抵抗金属材料结构失效的弊端。

2 氢能源发动机飞行平台适应性改造

氢燃料的使用需要对飞行器燃料系统进行改造,轻质高效安全的氢燃料存储输送系统将是氢能源飞行器的关键^[13]。根据试飞需求,氢燃料内燃机和氢燃料电池在氢燃料角度相对简单,其飞行器的试飞验证主要集中在相关氢燃料泄露探测和氢气转换效率的相应改造上,以及氢燃料泄露带来的一次风险及再生风险监测改造。

对于大功率、长航时用途的氢燃料涡轮、涡扇动力发动机,其功能特性和产品安全验证则需要挂飞进行相关演示验证,因此需要根据实际情况对挂飞平台进行氢燃料适应性改造,其中包含了储氢装置适应性改造、氢燃料系统适应性改造、挂装平台适应性改造安全评估。

1) 储氢装置适应性改造:氢燃料的储氢装置因其高压、绝热、体积大的特点,无法采用机翼油箱布局对称装载,只能装在机身位置^[20],部分设计人员通过提高机身截面来布置储氢罐,其构型如图 2 所示。在挂装平台上的储氢罐建议选用一体式结构,最大程度上减少潜在泄漏源。同时储氢装置在轻量化、小体积的前提下尽量做成多个独立储罐,在单个储罐早期泄露氢气时关闭,其他储罐保持正常功能。此外,还需要考虑储氢罐在挂装平台安装时的支撑结构和安全附件等因素,以确保液态储氢罐在飞机大姿态状态下的安全。



图 2 储氢装置机上布置示意图^[21]

Fig. 2 Layout diagram of hydrogen storage device on board^[21]

2) 氢燃料系统适应性改造:氢燃料的加注需利用低温管道将液氢从存储位置输送到飞机上,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^[22]。供应管道外层可嵌套一层运输管道,用于放置气化氢气排气管线和应急泄露管线,或者作为驱散泄露氢气的通风管道,该运输管道需要防止静电积壁,以防止火花点燃。氢燃料系统挂装平台的管路布局上,根据飞行器平台结构进行布局优化,尽量避开电子设备区域,远离高热区;液氢进入发动机前须先气化,且对发动机自身及滑油等有冷却需求^[23],能量管理的重要性突显。因此,氢燃料系统改造时要充分考虑储氢装置和热管理系统与飞机的合理适配。B-57 飞机液氢燃料系统布置图如图 3 所示。

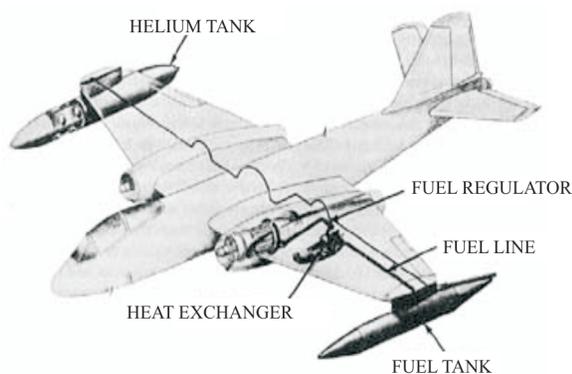


图 3 B-57 飞机液氢燃料系统布置图^[24]

Fig. 3 Layout diagram of liquid hydrogen fuel system for B-57 aircraft^[24]

3) 挂装平台适应性改造安全评估:储氢装置和氢燃料系统的适应性改造以及氢能源发动机的挂装都会对挂装平台带来影响,需要根据挂装吊舱和挂装平台装载的适应性改造对飞机本体结构系统改造设计进行分析研究,对载机平台结构、气动性能、操作稳定性等影响因素进行安全分析评估。

3 特殊测量技术

基于氢燃料物性参数的特殊性和实际试飞使用及环境带来的温差大、振动、测量间隙小等困难,国内目前测量手段已不再适用。对氢燃料电池热防护所需的温度参数,氢内燃机和氢涡轮发动机中温度、压力、流量,环境中氢气浓度、氮氧化物浓度等参数的测量带来了挑战,需要攻克氢能源动力试飞关键参数测量方法研究,明确测量参数,开展特殊测量关键技术研究。

氢燃料电池:为保障氢燃料电池的安全、高效工作,需研究抗振动^[25]、小体型抽拔式温度传感器

用于监测燃料电池的温度,研究抗光照及热辐射的红外热成像测温技术^[26],以辅助燃料电池的热管理、热防护^[27]研究。

氢内燃机及氢涡轮发动机:为实时监测发动机工作状态,需发展基于脉动压力^[28]和声学^[29]的燃烧稳定性测试技术;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基于CARS的温度测量技术^[30],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。为评估氢涡轮发动机的污染排放情况,更好地改善该缺点,需开展基于光学的氮氧化物浓度测量技术^[31]研究。

试飞安全保障:为保障试飞安全、试验安全,对氢气泄露的测量监测也是必不可少的,需发展基于电化学^[32]和热导原理氢气浓度无损检测技术研究^[33],融合空间氢气聚集区域测量预警技术。

4 安全防护及控制技术

当前氢能领域的涉氢试验设备安全理论及预警机制不够健全,缺乏安全理论支撑与试验验证,是氢能动力开展试飞的安全短板。各类氢能动力装置试飞风险如表2所示,需依据高级风险开展相关安全防护及预警机制研究,为氢能系统试验鉴定、氢能系统在飞行台上布局基础研究提供安全保障。

表2 各类型氢能动力装置试飞风险
Table 2 Flight test risks of various types of hydrogen energy power devices

类型	安全风险	风险等级
氢燃料电池	氢加注	☆☆☆
	连接段氢泄露	☆☆☆
	电池热失控	☆☆☆☆☆
氢内燃机	氢加注	☆☆☆
	整机及氢能系统氢泄露	☆☆☆☆☆
氢涡轮发动机	氢加注	☆☆☆
	液氢罐漏热	☆☆☆☆
	氢能系统氢泄露	☆☆☆☆☆

氢燃料电池热失控防护技术:为保障燃料电池的安全性、高效性与耐用性,目前已开展了燃料电池热管理的相关研究,亟需在高效散热、精准控温和余热利用等方面有所突破。为改进续航时长短、大功率输出效果弱、系统可靠性不佳的状况,

探究出燃料电池混合动力系统解决以上问题,能量管理则成为氢燃料混合动力研究的热点问题之一^[34]。燃料电池和锂电池依据不同使用场景分配使用时间,在提供飞行器所需功率的基础上,通过合理分配功率输出,提高能量效率,防止过载冲击造成的燃料电池热失控^[35]。同时开展充分的热稳定性试验,以确保锂电池的热稳定性和安全性^[36]。在燃料电池系统的热防护设计中,可考虑与供氢系统工艺流程进行集成设计,有利于能量管理^[37]。目前采取的冷却热防护措施,未来将从能量管理系统策略上开展防护研究。

液氢储罐漏热防护技术:根据液氢罐高蒸发率的特性,带来液氢储罐漏热的风险。目前,国际上采用储罐低蒸发率热控技术来减小对外界的漏热,从而降低液氢的蒸发,分为主动热控和被动热控两种^[38]。主动热控是在少量绝热材料的初步防护上,通过制冷设备消除部分漏热;被动热控是完全依靠低传热系数绝热材料的绝热作用减少漏热。目前,研究者发现两者相结合的方式能应用在更多场景下,美国NASA便在原有被动绝热技术基础上开发出SOFI/MLI新式组合绝热结构^[39]。

氢能系统露点泄露防护技术:氢气爆炸极限极宽,为4.0%~75.6%^[40],当系统出现露点或者连接不严密时,氢气会逸出,由于其易燃易爆的特性,加之火焰可见度低,极易出现燃爆的风险,同时液氢-253℃的极低温度对设备材料和人体都是严重安全隐患,低温泄露极易发生冻伤危害。为确保氢能航空动力系统安全运行,运维人员安全操作,建立安全防护系统,实时监测氢气压力、温度、泄漏量等参数,探索氢气泄露时,率先出现浓度上升的位置区域,为布置预警探测设备提供参考,并制定好相应的防爆措施。常见的氢气浓度探测包括便携式氢气检测仪、泵吸式检测仪、超声波探测器等,多用于作业环境,需要开展受限空间氢气泄露扩散区域阵列监测技术研究,为氢能系统故障分析、安全性评估积累技术基础。

5 试飞配套设施

氢燃料配套设施是进行氢能动力试验不可或缺的一环,具体设施涉及氢燃料的储存、运输、加注和防护。其中,氢燃料的储存是基础关注点,

在储氢容器附近建造屏障墙,减少氢气在近地面的扩散^[41],对泄漏区域进行通风,也可以采用高压氮气对氢气进行稀释^[42];加注基础设施是制约氢能源航空器产业发展的核心要素,需要攻克在快速加氢和安全加氢上的技术难题,同时关注加氢经济的实际问题。前期阶段,可根据氢燃料及传统燃料并行实施、并行建设的发展思路,建立全新加注设施,形成新的加注方案,探究氢燃料与传统燃料加注并行作业的耦合影响,制定相应的氢燃料加注安全措施。液氢飞机地面配套设施如图 4 所示。



图 4 液氢飞机地面配套设施^[43]

Fig. 4 Ground supporting facilities for liquid hydrogen aircraft^[43]

6 试飞验证及评估

氢能源动力的试飞验证不仅是对其功能实现的考核,也是对其安全使用的保障。针对原理样机,以实际试飞环境、平台包线、任务能力等条件进行试飞考核。对于氢燃料电池,需对燃料电池续航能力、燃料电池热管理、燃料电池环境适应性开展验证;对于氢内燃机,需对氢内燃机热效率转化、工作特性开展验证;对于氢涡轮发动机,需对功能特性、氢流量调节、预防“回火”能力、贫油预混燃烧能力开展验证,为获取氢能源航空发动机和氢能源系统功能性能结果提供参考。

氢能源动力试飞评估的目的是获取氢燃料存储、氢损伤的寿命评估、氢燃料电池能效评估和氢能源发动机挂载平台后的清洁污染分析,以完善氢能源飞行器及发动机的注意事项,需要攻克罐壁渗透、氢脆现象测试方法与评估准则研究,氢燃料电池能效评估准则研究、氢燃料涡轮发动机氮氧化物飞行测试与评估准则研究和试验风险及安

全性评估方法研究。

7 适航符合性研究

氢燃料及其储氢系统与传统燃油系统的性质截然不同,给氢能源动力的适航与安全带来了全新考验。基于氢燃料物性的特殊性、氢能源发动机使用场景的变换、氢能源动力推进系统形式多样的现状,需要开展相关危险源识别、安全性目标确定、安全试飞符合性验证方法、安全准则构建与评估、系统安全性分析等方面的研究。建立氢燃料发动机、氢能源动力的适航标准与符合性验证方法,加强各类氢能源飞行器适航标准制定,形成产业标准,辅助产业化发展,加强氢能源航空产业可持续发展内生力。

8 总结及展望

纵观我国氢能源飞行器目前发展状况,多处于研发及可行性验证阶段。尽管如此,国内多个企业与科研院所也在氢能源飞机试验机、概念机等方面已取得一些可喜进展,但关于实际试飞验证却屈指可数。以快速对接原理样机验证、追求系统高性能为目标,需尽快攻克氢的存储及输送、飞行器适应性改造、特殊测量技术、安全防护及控制技术、试飞配套设施、试飞验证及评估、适航符合性研究等关键技术,为面向氢能源动力的试验验证和市场应用提供前期的技术储备。为此,提出 3 条我国氢能源动力试验鉴定的相关发展建议。

1) 快速完善试飞配套设备设施。完整高效的氢能产业链是氢能源动力试飞鉴定的前提和基础。纵观全国,各企业、科研所在储氢容器、储氢材料、氢燃料输送、加氢站、氢动力、混合动力、氢燃料电池安全防护等方面都有进展,但属于各自为营,指标要求各不相同。试飞作为整个氢能源动力鉴定的最后一道环节,涵盖以上各项环节,需快速链接各环节,建立完整的机场基础配套设施、全面的适氢的试飞系统技术体系,集中优势力量突破氢能航空试飞配套地面站。

2) 多线并举开展飞行平台改造。主要针对适配长航远距离的氢能源发动机的飞行平台进行改造,坚持由简到繁、由易到难的原则,按照先吊舱改造后全平台改造和先双燃料系统后全氢燃料系

统的顺序,双线并举展开氢能动力飞行平台改造。以理论研究、可行性验证、改装改造、系统验证、型号应用的顺序,逐步深入,优质高效地完成多种类氢能动力试验改造。

3) 同步开展多种类氢能动力试飞及适航研究。根据不同类型的氢能动力,研究确定氢燃料电池、氢内燃机、氢涡轮机的安全性目标及试飞符合性方法,形成各类型氢能动力适航符合性工作指南,为当前氢能动力安全性适航要求的制定及符合性验证工作提供指导。

参考文献

- [1] 宋薇薇, 杨凤田, 项松, 等. 氢能飞机研制进展及产业化前景分析[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 192-201.
SONG Weiei, YANG Fengtian, XIANG Song, et al. Development progress and industrialization prospect of hydrogen-powered aircraft[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(5): 192-201. (in Chinese)
- [2] 韦东远. 全球电动飞机发展战略动向及其对我国的启示[J]. 新经济导刊, 2023(s2): 125-131.
WEI Dongyuan. The trend of global electric aircraft development strategy and its implications for China[J]. Journal of New Economy, 2023(s2): 125-131. (in Chinese)
- [3] 魏晨涛. 欧盟《氢动力航空》研究报告解读[EB/OL]. (2020-07-31) [2024-04-29]. <https://www.can-news.com.cn/2020/07/31/99308516.html>.
WEI Chentao. A review on potential use of hydrogen in aviation applications [EB/OL]. (2020-07-31) [2024-04-29]. <https://www.can-news.com.cn/2020/07/31/99308516.html>. (in Chinese)
- [4] 双碳情报. 德国更新国家氢能战略[EB/OL]. (2023-07-28) [2024-04-29]. https://mp.weixin.qq.com/s/_ez1cFnj-preObWL2b51pw.
Dual Carbon Goals. Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie updated by Germany [EB/OL]. (2023-07-28) [2024-04-29]. https://mp.weixin.qq.com/s/_ez1cFnj-preObWL2b51pw. (in Chinese)
- [5] Docbond. 英国氢能联盟成立,旨在加速零碳航空为国家带来340亿的效益[EB/OL]. (2023-09-07) [2024-04-29]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1776340290005083732&wfr=spider&for=pc>.
Docbond. The UK Hydrogen Alliance has been established with the aim of accelerating zero carbon aviation to bring 34 billion benefits to the country [EB/OL]. (2023-09-07) [2024-04-29]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1776340290005083732&wfr=spider&for=pc>. (in Chinese)
- [6] 国家能源局. 中华人民共和国能源法(征求意见稿)[EB/OL]. (2020-04-10) [2024-04-29]. http://www.nea.gov.cn/2020-04/10/c_138963212.htm.
National Energy Administration. Energy law of the People's Republic of China (draft for comments) [EB/OL]. (2020-04-10) [2024-04-29]. http://www.nea.gov.cn/2020-04/10/c_138963212.htm. (in Chinese)
- [7] 中国新闻网. 中国氢能产业发展报告2020 [R/OL]. [2024-04-29]. http://www.china-nengyuan.com/news/chinanengyuan_news_162482.pdf.
China-Nengyuan. Hydrogen energy industry development report of China 2020 [R/OL]. [2024-04-29]. http://www.china-nengyuan.com/news/chinanengyuan_news_162482.pdf. (in Chinese)
- [8] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于加快推动新型储能发展的指导意见[EB/OL]. (2021-07-15) [2024-04-29]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202107/t20210723_1291321.html?code=&state=123.
NDRC, NEA. Guiding opinions on accelerating the development of new energy storage [EB/OL]. (2021-07-15) [2024-04-29]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202107/t20210723_1291321.html?code=&state=123. (in Chinese)
- [9] 中国氢能联盟. 中国氢能及燃料电池产业白皮书[R]. 北京: 中国氢能联盟, 2019.
China Hydrogen Energy Alliance. White paper on China's hydrogen energy and fuel cell industry [R]. Beijing: China Hydrogen Energy Alliance, 2019. (in Chinese)
- [10] 能源Time. 全球首架载人液氢飞机成功试飞[EB/OL]. (2023-09-12) [2024-04-29]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1776821468838510514&wfr=spider&for=pc>.
Energy Time. The world's first manned liquid hydrogen aircraft has successfully test flown [EB/OL]. (2023-09-12) [2024-04-29]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1776821468838510514&wfr=spider&for=pc>. (in Chinese)
- [11] 杨志刚, 王曼, 张志雄, 等. 商用飞机新能源动力发展路径分析与展望[J]. 推进技术, 2024, 45(3): 32-40.
YANG Zhigang, WANG Man, ZHANG Zhixiong, et al. Analysis and prospect of new energy power development path of commercial aircraft [J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(3): 32-40. (in Chinese)
- [12] 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.
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. (in Chinese)
- [13] 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, et al. Observations on the development of hydrogen-powered aircraft propulsion system [J]. Aeroengine, 2024, 50(1): 1-9. (in Chinese)

- [14] 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): 6-23.
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): 6-23. (in Chinese)
- [15] 任治瀚. 氢能飞机会否成为航空业的新蓝海[J]. 大飞机, 2022(8): 45-48.
REN Zhilun. Will hydrogen powered aircraft become a new blue ocean for the aviation industry[J]. Jetliner, 2022(8): 45-48. (in Chinese)
- [16] 张胜杰. 当飞机用上氢能[N]. 中国能源报, 2024-02-05(009).
ZHANG Shengjie. When the aircraft using the hydrogen [N]. China Energy News, 2024-02-05(009). (in Chinese)
- [17] 李岩, 谭广琨, 赵志高, 等. 通航飞机新能源动力改型设计可行性初探[J]. 航空科学技术, 2024, 35(1): 91-96.
LI Yan, TAN Guangkun, ZHAO Zhigao, et al. Feasibility study on new energy power retrofit design for general aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(1): 91-96. (in Chinese)
- [18] 王绍成, 齐济. 临近空间飞行器氢燃料电池电推进关键技术[J]. 空天技术, 2022(5): 58-67.
WANG Shaocheng, QI Ji. Key technologies of hydrogen fuel cell electric propulsion for near space vehicles[J]. Aerospace Technology, 2022(5): 58-67. (in Chinese)
- [19] ACEVES S M, ESPINOSA-LOZA F, LEDESMA-OROZCO E, et al. High-density automotive hydrogen storage with cryogenic capable pressure vessels [J]. International Journal of Hydrog Energy, 2010, 35: 1219-1226.
- [20] 孙敏. 氢能飞机离我们还有多远[J]. 大飞机, 2020(9): 45-49.
SUN Min. How far is the hydrogen powered plane from us [J]. Jetliner, 2020(9): 45-49. (in Chinese)
- [21] 张新替, 于航, 彭俊毅, 等. 氢能源民用飞机技术路线与总体概念设计方法研究[J]. 推进技术, 2024, 45(3): 58-64.
ZHANG Xintao, YU Hang, PENG Junyi, et al. Technical route research and concept design of hydrogen aircraft [J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(3): 58-64. (in Chinese)
- [22] KOMODA R, YAMADA K, KUBOTA M, et al. The inhibitory effect of carbon monoxide contained in hydrogen gas environment on hydrogen accelerated fatigue crack growth and its loading frequency dependency[J]. International Journal of Hydrog Energy, 2019, 44: 29007-29016. (in Chinese)
- [23] HWANG J S, KIM J H, KIM S K, et al. Effect of PTFE coating on enhancing hydrogen embrittlement resistance of stainless steel 304 for liquefied hydrogen storage system application[J]. International Journal of Hydrog Energy, 2020, 45: 9149-9161.
- [24] 张永杰, 王鸿琛, 崔博, 等. 氢能客机低温液氢储罐的装机环境适应性分析研究进展[J/OL]. 航空学报: 1-35[2024-04-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20240115.1621.014.html>.
ZHANG Yongjie, WANG Hongchen, CUI Bo, et al. Research progress in the analysis of the installed environment adaptability of cryogenic liquid hydrogen tanks for hydrogen-powered aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica: 1-35[2024-04-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20240115.1621.014.html>. (in Chinese)
- [25] 佚名. 美国邦纳 Q45 系列无线振动温度传感器[J]. 自动化博览, 2015(7): 7.
Anon. Bonner Q45 series wireless vibration temperature sensor[J]. Automation Expo, 2015(7): 7. (in Chinese)
- [26] 汪茂海, 郭航, 马重芳, 等. 质子交换膜燃料电池表面温度分布的测量[J]. 电源技术, 2004(12): 764-766.
WANG Maohai, GUO Hang, MA Chongfang, et al. Measurement of surface temperature distribution in a proton exchange membrane fuel cell [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2004(12): 764-766. (in Chinese)
- [27] 袁磊, 吕婷婷, 李康, 等. 一种机车用氢燃料电池热管理系统[J]. 铁道机车与动车, 2024(1): 35-37, 44.
YUAN Lei, LYU Tingting, LI Kang, et al. A hydrogen fuel cell thermal management system for locomotives[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2024(1): 35-37, 44. (in Chinese)
- [28] 金庆铭. 燃烧场脉动压力功率谱密度测量[J]. 动力工程, 1990(2): 43-45, 62.
JIN Qingming. Measurement of pulsating pressure power spectral density in combustion field[J]. Power Engineering, 1990(2): 43-45, 62. (in Chinese)
- [29] 杜军, 文璧. 基于声学特征信号提取的燃烧不稳定性试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2020, 33(1): 27-30.
DU Jun, WEN Bi. Experimental research on combustion instability based on acoustic characteristic signal extraction[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2020, 33(1): 27-30. (in Chinese)
- [30] 王鑫宇, 安保林, 章欣达, 等. 基于主动式激光辐射测温技术的黑体腔底真实温度测量研究[J]. 计量学报, 2024, 45(4): 514-519.
WANG Xinyu, AN Baolin, ZHANG Xinda, et al. Measurement of the true temperature at the bottom of a black-body cavity based on active laser radiation thermometry[J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(4): 514-519. (in Chinese)
- [31] 巨翊宇, 梁红侠, 索建秦, 等. 某航改燃机氢燃料燃烧室污染排放特性研究[J]. 推进技术, 2024, 45(3): 194-206.
JU Hongyu, LIANG Hongxia, SUO Jianqin, et al. Pollution emission characteristics of hydrogen-fueled combustor of an aero-engine conversion gas turbine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(3): 104-206. (in Chinese)

- [32] 史俊茹, 邱利民. 液氢无损储存系统的最新研究进展[J]. 低温工程, 2006(6): 53-57.
SHI Junru, QIU Limin. Recent development of zero boil-off storage of liquid hydrogen [J]. Cryogenics, 2006 (6): 53-57. (in Chinese)
- [33] 张奇, 聂飞, 陈练, 等. 基于热导原理的氢浓度测试系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2018(2): 86-88.
ZHANG Qi, NIE Fei, CHEN Lian, et al. Design of hydrogen concentration test system based on principle of thermal conductivity [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018 (2): 86-88. (in Chinese)
- [34] 刘莉, 杜孟尧, 张晓辉, 等. 太阳能/氢能无人机总体设计与能源管理策略研究[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 144-162.
LIU Li, DU Mengyao, ZHANG Xiaohui, et al. Conceptual design and energy management strategy for UAV with hybrid solar and hydrogen energy [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 144-162. (in Chinese)
- [35] 段辰龙, 李岩, 徐悦, 等. 电动飞机发展关键技术与总体性能关联性分析[J]. 飞行力学, 2021, 39(2): 39-44.
DUAN Chenlong, LI Yan, XU Yue, et al. Analysis on the relationship of key technology for electric aircraft development and overall performance [J]. Flight Dynamics, 2021, 39(2): 39-44. (in Chinese)
- [36] 马迎坤, 邱毅. 航空锂电池适航审定规章解读及符合性方法研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(5): 657-663.
MA Yingkun, QIU Tao. Interpretation of airworthiness certification regulations and research on means of compliance for aircraft lithium-ion-battery [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(5): 657-663. (in Chinese)
- [37] 高彦峰, 宋琦, 谢高峰, 等. 临近空间无人机液氢供能系统技术分析[J]. 航空工程进展, 2024, 15(2): 11-24.
GAO Yanfeng, SONG Qi, XIE Gaofeng, et al. Analysis of liquid hydrogen power systems for near space unmanned aerial vehicles [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(2): 11-24. (in Chinese)
- [38] 杨文刚, 李文斌, 林松, 等. 碳纤维缠绕复合材料储氢气瓶的研制与应用进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(12): 99-104.
YANG Wengang, LI Wenbin, LIN Song, et al. Research and application progress of carbon fiber composite hydrogen storage cylinder [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015(12): 99-104. (in Chinese)
- [39] NGUYEN D H, KIM J H, VO T T N, et al. Design of portable hydrogen tank using adsorption material as storage media: an alternative to type IV compressed tank [J]. Applied Energy, 2022, 310: 118552. (in Chinese)
- [40] 汪侃, 张思琪, 刘晓雷, 等. 油氢合建站储氢瓶组氢气泄漏扩散行为研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(5): 1691-1700.
WANG Kan, ZHANG Siqi, LIU Xiaolei, et al. Research on hydrogen dispersion behavior induced by storage cylinder group failure in oil-hydrogen refueling station [J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(5): 1691-1700. (in Chinese)
- [41] 赵子贤. 氢气生产装置和储存设施爆炸安全性评估[J]. 化工管理, 2024(1): 105-108.
ZHAO Zixian. Explosion safety assessment of hydrogen production plants and storage facilities [J]. Chemical Engineering Management, 2024(1): 105-108. (in Chinese)
- [42] 刘虎平, 崔家文, 李秀, 等. 氢气使用实验室防火设计探讨[J]. 工程建设与设计, 2024(3): 58-60.
LIU Huping, SUI Jiawen, LI Xiu, et al. Fire prevention design for a hydrogen-using laboratory [J]. Construction & Design for Engineering, 2024(3): 58-60. (in Chinese)
- [43] 航空产业网. 空中客车公司、Avinor、SAS、Swedavia 和 Vattenfall 为瑞典和挪威的氢能航空铺平了道路 [EB/OL]. [2024-04-29]. <https://www.chinaerospace.com/article/show/871e2ab530c2f7fc013bbbed355043a87#:~:text=%E7%A9%BA%E5%AE%A2%E3%80%81Avinor%E3%80%81SAS%E3%80%81Sw>.
Chinaerospace. Airbus, Avenor, SAS, Swedavia and Vattenfall have paved the way for hydrogen aviation in Sweden and Norway [EB/OL]. [2024-04-29]. <https://www.chinaerospace.com/article/show/871e2ab530c2f7fc013bbbed355043a87#:~:text=%E7%A9%BA%E5%AE%A2%E3%80%81Avinor%E3%80%81SAS%E3%80%81Sw>. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)