

氢能飞机发展现状分析

Hydrogen Powered Aircraft

■ 赖耀胜 李龙 / 中国航发涡轮院

减少碳排放的手段目前主要有三种：一是提高现有能源利用效率，二是利用替代能源，三是使用碳捕捉、封存和利用技术（CCUS）。具体到航空领域，前两种减排路径最为适用，并且只有采用替代能源才能实现净零碳排放。氢能源作为替代能源，具有储量丰富、来源广泛、能量密度高、清洁且价格低廉等优点，在航空减碳方面具有广阔的开发前景。

根 据麦肯锡咨询公司开展的一项研究显示：燃气涡轮发动机直接燃氢，可以将飞机排放气体等对气候的影响降低50%~75%；如果使用氢燃料电池来驱动电机，其对气候影响的正向效益将提高到75%~90%。当前，世界各国都纷纷开展了大量氢能飞机及动力系统的研究，动力方案主要有氢燃料发动机、氢燃料电池和氢燃料电池混合电推进系统等，推动了氢能飞机的发展。但不可否认的是，这些技术的发展程度离氢能飞机的商业应用尚有一定的差距，除了燃氢发动机的改造问题需要解决以外，还需要攻克氢的制备和储存等一系列难题。

氢能飞机研究进展概述

空客多方案并进推进氢能飞行技术发展

空客公司目前正在研究利用氢能制造合成燃料、氢燃料电池、可以直接使用氢燃料的改进型涡扇发动机和使用氢燃料和燃料电池的混合动力系统的氢能飞机方案。

2020年9月，空客公司发布了3个名为ZEROe的氢能飞机概念：涡扇氢混合动力、涡桨氢混合动力和翼身融合混合动力。其中，翼身融



空客发布带吊舱的氢能飞机概念

合飞机由两台氢燃料涡扇发动机提供动力，液氢储存和分配系统位于后增压舱，预计能搭载120~200名乘客，航程为3700km左右；涡桨氢混合动力飞机的液氢储存和分配系统设计与第一种类似，只是换成了两台氢燃料涡桨发动机驱动六叶螺旋桨提供推力，搭载乘客100名左右，瞄准短程飞行市场；涡扇氢混合动力液氢储罐位于机翼下方，内部空间较为宽敞，主动力仍为两台氢燃料涡扇发动机。

2020年12月，空客公司又公布了一种以6个推进吊舱为主要特征的全新氢动力飞机构型，每个吊舱有各自独立的液氢储罐、冷却系统、

燃料电池、电力电子装置、电动机、八叶螺旋桨和其他必要的辅助设备组成。2021年3月，空客公司透露其从2016年开始建设电动飞机系统试验中心，该中心可开展混合电推进系统架构设计集成、电推进子系统集成、替代能源发电系统（可持续航空燃料、氢）等技术的试验，该设施目前的核心任务是ZEROe氢动力飞行器项目。目前，ZEROe项目还停留在概念演示阶段，根据空客公司公布的氢动力飞机发展时间表，将在2024—2025年完成氢动力相关技术的选择，主要是氢燃料电池推进、氢燃料燃气轮机、氢燃料电池+氢燃料燃气轮机混合动力，

在之后5年内完成小尺寸技术验证机研制，并启动全尺寸原型机研制工作，以确保在2030—2035年间，实现100座级以上氢动力客机的商业化。

德国大力推动氢动力技术发展，开展兆瓦级氢动力系统研究

德国联邦运输和数字基础设施部于2021年1月宣布，向氢燃料电池航空电驱总成项目（BALIS）拨款2600万欧元，由德国航空航天中心（DLR）牵头，研制以氢燃料电池为动力的大功率航空电驱总成（单台功率不低于1.5MW），用于40~60座、1000km航程的支线客机。DLR已经在氢能航空技术领域进行了15年的深入研究，HY4氢燃料电池验证机项目是其中的代表性成果。该项目于2011年开始研究，2016年9月首飞，后续不断升级，2020年11月首次试飞了该机第六代氢燃料电池电驱总成，该验证机为4座，最大速度200km/h，电机功率120kW，燃料电池单个电堆功率55kW。目前，DLR正在建设专用试验设施，包括储氢罐、电机系统和控制系统等，可满足航空平台的要求。

英国资助零排放航空氢电替代动力技术开发

2021年3月，英国商业、能源和工业战略部（BEIS）宣布投入8460万英镑支持开发开创性的绿色航空技术，共支持氢电混动系统（H2GEAR）、HyFlyer二期和电动飞机飞行控制、储能和推进综合系统（InCEPTion）3个研发项目，重点关注利用氢或电力作为替代动力开发零排放航空技术。H2GEAR项目将开发创新的液氢电动混合推进系统，用于区域航线飞行，并确保可扩展至

更大型飞机用于更长航线。HyFlyer二期计划研制50座氢燃料电池支线飞机，目标是2026年投入商业运营，2024年将有19座以下的名为HyFlyer II的氢燃料电池电动飞机首先投入运营，设计航程560km。InCEPTion项目将开发全电动零排放推进系统，可用于短途飞行的小型飞机，具备静音、高效等优点。

航空发动机燃氢技术

目前氢能飞机的动力主要包括氢燃料电池、燃氢发动机等，相较于氢燃料电池，燃氢发动机的发展较为缓慢，这跟氢燃料与航空煤油的许多特性的不同有密切关系，航空发动机从燃油到燃氢，对结构设计尤其是燃烧室的设计带来了挑战。20世纪80年代，苏联便在航空发动机上使用氢燃料开展了试验研究，在图-155飞机上成功测试了NK88双燃料（煤油和氢）发动机。20世纪90年代后，氢能飞机的研究从军用扩展至民用。2000年，欧盟资助了一项为期两年的低温民用飞机项目（CRYPLANE），系统研究了液氢在民用航空亚声速飞行领域使用液氢的可能性，研究内容包括传统结构燃氢发动机和非传统结构燃氢发动机。自2000年低温民用飞机项目后，尽管空客公司在2020年提出了氢能飞机方案，但至今燃氢航空发动机的研究未见有重大进展。

传统结构燃氢发动机

传统结构燃氢航空发动机即在不对发动机结构进行大改的前提下，实现发动机燃氢。为了提升氢的温度，突破燃油控制系统极限，同时实现效益最大化，需要采用换热器。换热器位置不同，则发动机结构不

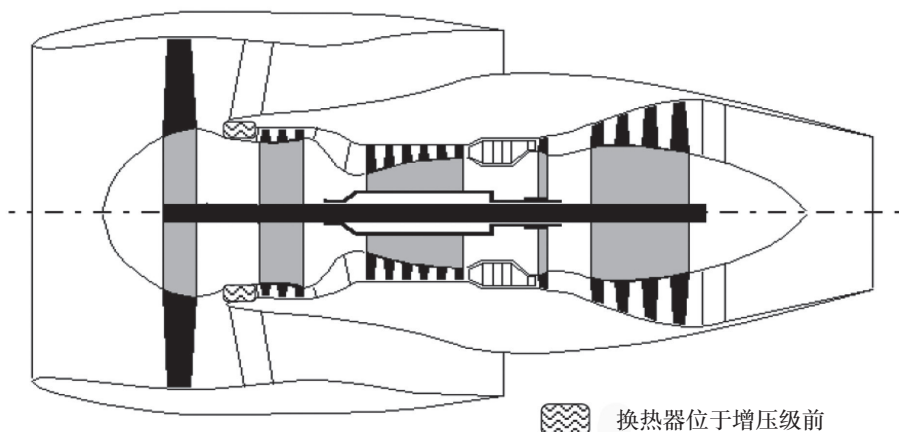
同，而在加入换热器后，发动机热力循环必然发生变化，需要对一些部件做一些小更改。例如，西班牙学者科切洛（Corchero）和蒙塔涅斯（Montanes）等人提出了3种方案：在发动机主流中插入换热器；从主流中引一部分空气流经换热器，再从发动机下游气动截面返回主流；把换热器放到外部气流中，即置于发动机外部。科切洛等随后在BR710-48涡扇发动机上对上述方案进行了试验，结果表明，外部换热器方案具备诸多优点，耗油率也低，但是会带来发动机结构问题；低压涡轮出口换热器方案虽然也具备耗油率优势，但推力损失较大。从发动机部件匹配工作角度而言，需缩短涡轮半径，所幸缩短的尺寸在涡轮半径公差范围内。

非传统结构燃氢发动机

研究非传统结构燃氢发动机的机构较多，但方案差别不大。例如，英国克兰菲尔德大学的博贾（Boggia）等人在V2527-A5发动机上研究了3种非传统结构燃氢发动机方案。

方案一是前冷发动机。该方案用液氢的吸热能力冷却压气机空气，为压气机节省一部分功；另外，材料耐高温性能基于压缩空气的最高温度，采用中间冷却可以匹配更高的总压比，也能提升发动机性能。以V2527-A5作为基准发动机，液氢通过增压级进口前的换热器后，可被蒸发加热至280K（起飞条件下），核心气流冷却近25K。

方案二是顶端循环发动机。该方案包括主涡扇发动机和顶端回路。来自主发动机的一部分压缩空气从高压压气机引出，进入顶端回路。这部分压缩空气先经氢—空气换热



前冷发动机方案

器完成预冷，然后和所有燃料一起在顶端回路燃烧室内富油燃烧，燃气流经顶端循环内的涡轮进入主燃烧室，燃气内的氢与主流空气掺混，充分燃烧，然后在主发动机涡轮内膨胀。该循环的主要目的是增大发动机输出的净推力。此外，在给定顶端回路工作介质高焓值条件下，增加的涡轮机械的质量相对于提取的功率而言并不多。

方案三是高涡轮进口温度发动机。就基准发动机V2527-A5而言，其冷却空气有15%来自压气机出口，用于冷却涡轮导向叶片和高压涡轮第一级转子，冷却空气的温度越低，

则叶片冷却效果更好，涡轮材料极限温度相同条件下，涡轮进口温度就可以越高。在该方案中，在低压涡轮前额外增加了一个氢-空气换热器，液氢首先通过基准发动机内的主换热器蒸发和预热，然后流经第二个换热器。让燃油得到进一步加热，冷却空气的温度进一步降低。为了进一步开发涡轮功率，将发动机的涵道比从4.8:1增至6.5:1。为了驱动更大的风扇，额外增加了两级低压涡轮。

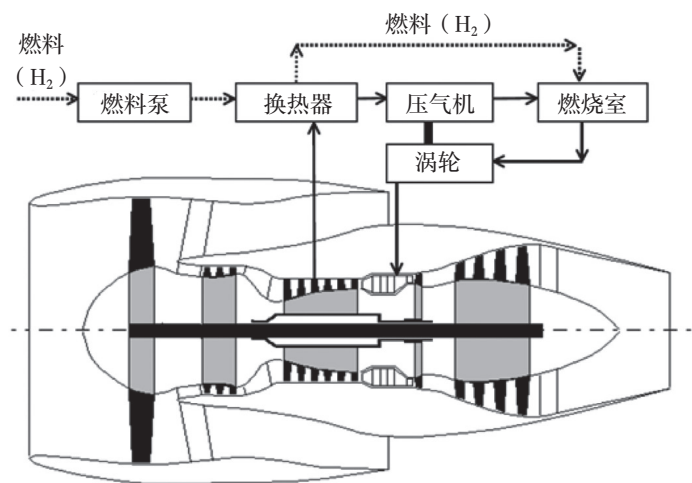
试验结果表明，运用液氢燃料的吸热能力可有效提升发动机性能，降低发动机运行成本。其中，方案一、

方案三可节省约3%的运行成本，而且不需要额外增加涡轮机械，在技术上可行，从安全的角度也是可以实施的。

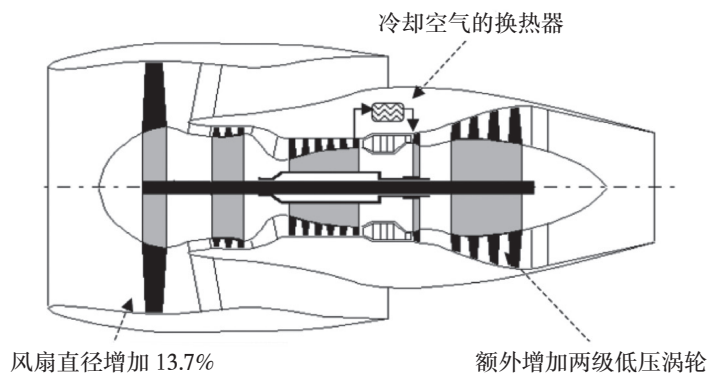
燃机燃氢技术

燃机的技术与航空发动机相似，部分燃机由航空发动机衍生发展而来，其燃氢技术对航空发动机燃烧室等部件的设计有一定的借鉴意义。目前，西门子和GE等公司都在进行燃机燃氢技术研究，其中西门子公司采用干低排放燃烧室（DLE）技术和湿低排放燃烧室（WLE）技术，目标是实现百分之百燃氢。DLE燃烧系统一般采用涡流稳定火焰结合贫油预混在不稀释燃料的前提下实现低 NO_x 排放，非DLE燃烧技术则采用扩散火焰或部分预混火焰。

西门子大型燃机SGT5/6-2000E和SGT5/6-4000F采用HR3火焰筒设计。基于混合火焰筒概念，HR3采用中央导向旋流器和同心对角旋流器，通过旋流器叶片（SFI）注入燃气。SGT5/6-5000F和SGT5/6-8000F燃机则采用超低 NO_x 平台燃烧系统（ULN/PCS），该系统将SFI技术与预混导向和同心布局主旋流器集成在一起，



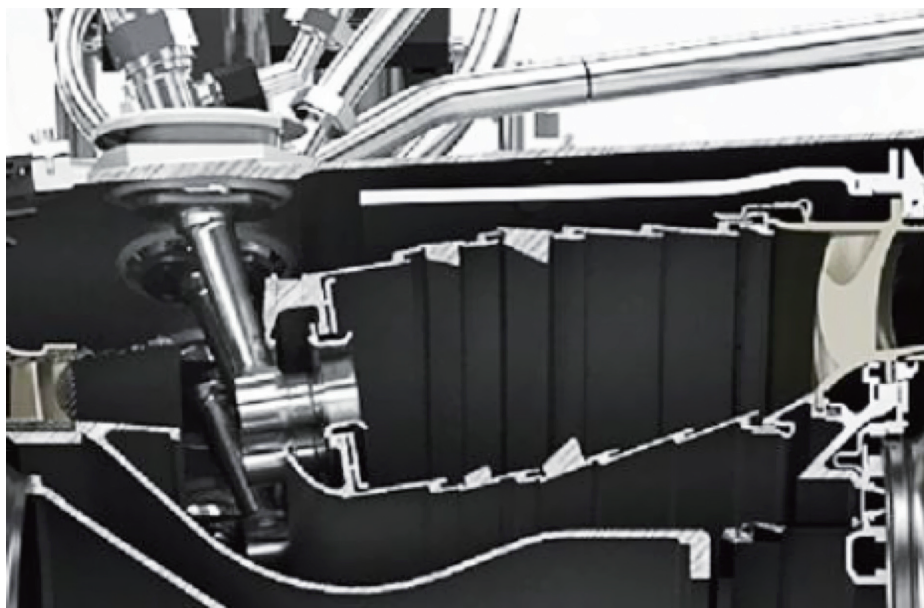
顶端循环发动机方案



风扇直径增加 13.7%

额外增加两级低压涡轮

高涡轮进口温度发动机方案



SGT-A65和A45非DLE燃烧系统

可以适应从纯天然气到氢含量达到30%体积的混合燃气，目标是2030年实现百分之百燃氢。中型燃机SGT-750燃机配备结合中央导流预混和径向主旋流器的第4代DLE火焰筒，试验表明SGT-750燃机最高可使用氢体积含量为40%的混合燃料。航空发动机衍生燃机SGT-A35和SGT-A65采用轴向分级DLE火焰筒（第一级采用径向旋流器，第二级采用位于轴向下流的非旋流预混管道），目前这两型燃机的燃料氢体积含量最高达到了15%。

西门子航空发动机衍生燃机的非DLE系统改良自航空发动机应用，可以在气态和液态燃料之间切换，通过注水降低火焰温度的方式降低NO_x排放。SGT-A65和SGT-A45采用第五代燃烧系统，而SGT-A35采用第二代燃烧系统。以上3种非DLE燃机都具备燃烧纯氢燃料的能力。

储氢技术

氢的能量密度接近40kW·h/kg，是

传统汽油的近3倍，而且其燃烧产物为水，对环境无污染。但是氢作为飞机燃料，也存在一些缺点，如体积密度小和易燃易爆导致的储运困难。相较于传统航空燃油，液氢燃料需要额外占据3倍体积，压缩氢气则需要额外占据5倍体积。目前氢能储存技术主要有以下几种：高压储氢、液化储氢、固态储氢和有机氢化物储氢。

高压储存室是应用最广的一种储存方式，通常采用气瓶作为容器。由于氢密度小、储氢效率低，故需加大压力来提高携氢量，但加压有可能导致氢分子从容器壁溢出或产生氢脆现象。

将温度降至-253℃以下，可以实现液态储氢，这种储存方式体积储氢密度高，适合于航空应用。但长时间存放会出现氢气排尽现象，且因为液氢储存温度低，需要复杂的冷却系统和高度绝缘的球形或紧凑圆柱体储罐，导致整个燃料系统的质量能量密度下降。另外，传统

机翼油箱无法采用，需要引入革命性机体设计思路，如翼身融合结构或分布式氢燃料电池推进系统。

通过氢气与材料发生化学反应或者物理吸附将氢储存于固体材料中可实现固体储氢，具有体积储氢密度高、储氢压力低、结构紧凑、安全性高和氢气纯度高优点，缺点是质量储氢密度低和成本高。目前常用的储氢材料主要为不饱和芳烃与对应氧化物（环烷烃），可以在不破坏碳环的主体结构下加氢和脱氢，反应可逆，具有储存密度高、安全和储运方便的优点，在规模化储运氢方面有广阔的发展前景，但同时也存在工艺复杂、释氢效率低等不足。

结束语

在减排压力下，世界各国都在寻求以氢作为绿色航空的出路，计划在2035年左右实现氢能飞机的商业化。目前，对氢燃料电池方案的探索比较多，功率水平大概在100kW级左右，载客量为10座以下，应用对象为通用飞机，更大载客量（如几十座）的支线飞机，则需要几百千瓦至兆瓦级的燃料电池。只有空客公司计划研究氢能涡扇和涡桨混合动力方案，但也并未完全确定其氢能飞机到底是采用氢燃料电池还是燃氢发动机作为动力。另外，不管是氢燃料电池还是燃氢发动机，都绕不开氢储存的难题，目前，空客公司提出的翼身融合方案和以推进吊舱为特征的分布式氢推进系统结构或许能在一定程度上解决氢在飞机上储存难的问题。

航空动力

（赖耀胜，中国航发涡轮院，工程师，从事航空发动机研究）