

氢能航空产业配套分析

Analysis to the Industrial Supporting of Hydrogen Powered Aviation

■ 王翔宇 / 中国航发研究院 刘向雷 韩枫 / 南京航空航天大学

虽然氢燃料的制备、储运和加注在一些行业并不鲜见，但对航空运营商而言，引入液氢燃料是一个独特的、前所未有的过程。有必要进一步明确航空用氢燃料的需求和保障供给，完善液氢燃料储存和运输等外部产业环节，论证机场固定加氢设施建设的可行性，为可能到来的氢能航空商业运营做好准备。

技术的进步正推动氢能航空器从概念走向现实，并有可能彻底改变全球航空业的未来。在保持航空市场运营效率和满足新的监管要求的前提下引进氢能航空器，以氢燃料制备、运输、储存和加注为代表的各个产业配套支持环节必不可少。当前，与氢燃料在交通运输领域应用相关的基础设施还十分匮乏，指望氢能航空器像电动航空器那样直接借鉴转化汽车行业的先期成果并不现实，传统的航空运营商甚至完全没有处理氢燃料的经验与基础，相应的氢能航空产业配套也会有更多的工作需要提前准备与布局。氢能航空商业运营的主要环节构想如图1所示。

氢燃料制备

从全生命周期碳排放的角度看，利用可再生能源电解水获得的氢燃料（绿氢）是未来氢能航空业可持续发展的理想燃料。除了推动技术进步、提升系统转化效率并优化催化剂原材料外，降低电解槽设备和可再生能源成本将是氢燃料制备发展的重点，特别是在电力成本占据绿氢生产总成本三分之二的情况下，充足且廉价的再生电力供应将是大规模绿氢制备的核心前提条件。而立足航空产业自身，考虑到从电能到氢能的转化损失，以及面向支线和干线的长距离、大载荷运输任务，伴随氢能航空市场运营的整体电力需求，甚至可能超过单纯的电动航空器。

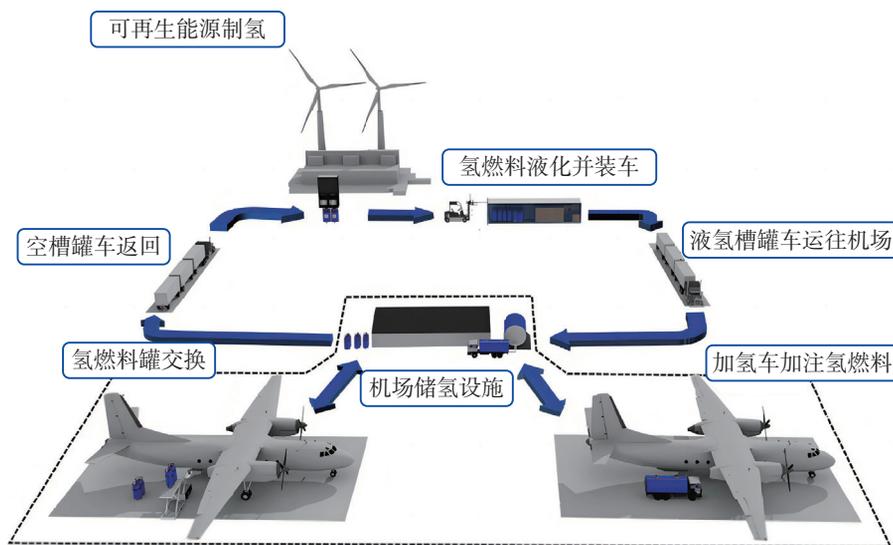


图1 氢能航空商业运营的主要环节构想（来源：美国国家科学院）

英国航空航天技术研究院(ATI)主导的FlyZero项目曾估计，在氢动力飞行发展较为乐观的假设下，到2050年需要7000万t氢燃料来满足全球航空运输需求，接近2021年全球全部电解氢产能的8倍，相应的制备绿氢的电量将超过3800MW。如果

使用海上风力发电可能需要配置大约17.5万km²的风电场，相当于北海海域面积的30%。显然，仅为航空业提供氢燃料就需要大量的基础设施建设和清洁能源生产投资，考虑到氢燃料自身的理化特性带来的独特储运要求，氢燃料供给可能会形成类似于传统能源行业与化工行业那样集中生产的格局，并呈现出较强的规模经济优势。

氢燃料储运

储能密度的巨大优势意味着液氢将

是氢能航空最为可行的供能选项。氢燃料的液化过程耗能巨大，与氢燃料制备类似，同样需要充足且廉价的电力作为支持，伴随航空业对大规模液氢的特殊需求而来的是专门的材料技术开发和电力系统投资。而氢燃料最终如何输送到机场主要取决于机场大小、位置以及燃料需求的情况，随着氢能航空器机队数量的扩张，一些机场可能会在不同的储运模式选择之间过渡，如图2所示。

将液氢通过公路槽罐车运送到机场是最简单最直观的方式，航空运营商额外的成本负担较小，在氢能航空运营最初的阶段可能会是大部分市场的首选，此时储氢罐必须具备高度隔热能力以防止温度上升到使液氢汽化的程度，对相关容器材料有较为苛刻的要求。储氢罐的任何明显膨胀和收缩都可能导致材料开裂，还需要建立一个合理的燃料运输调度系统，减少对单个储氢设施频繁重复使用。显然，一旦需求过大，这种移动输送方案的供应能力就显得捉襟见肘了。

管道输送是长距离大规模输送氢燃料最高效的方法。除了专门建设新的氢气输送管道外也可利用现有输送天然气的管线设施，甚至在不同的压力下实现氢气和天然气的混合输送，这么操作的前提条件是天然气输送管道的金属材料已被聚乙烯（PE）材料替换，从而防止氢脆导致的泄漏。考虑到管道运输的氢燃料是气态的，需要在机场液化设施中液化后再转移到储罐中供飞机使用，机场的空调系统和地面支持设备则可直接将氢气作为替代能源。

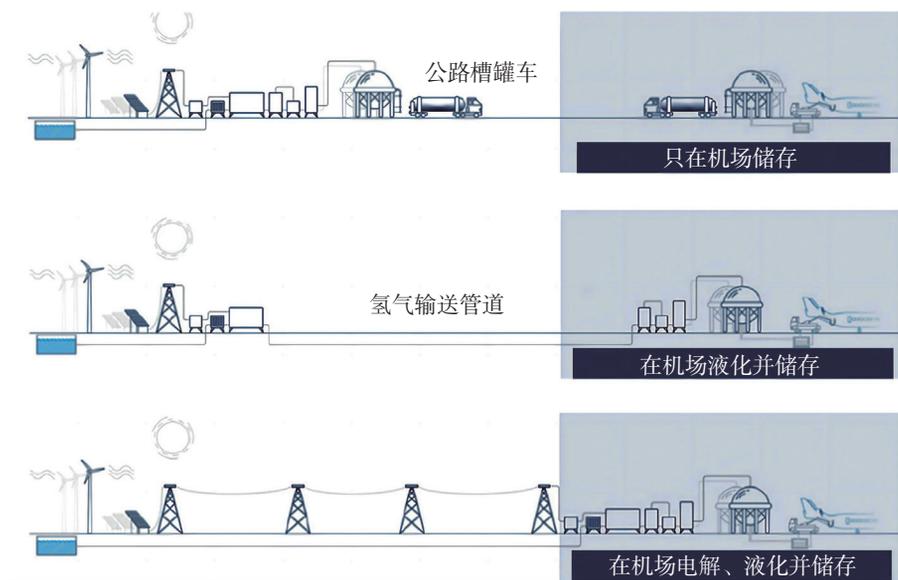


图2 几种不同的氢燃料储运概念方案（来源：ATI）

理论上航空运营商还可在机场附近实现液氢制备和运输的一体化，但显然这可能只会是一些资源禀赋极为突出的地方实现。也许在机场附近可以因地制宜建设小型发电厂，但从安全性的角度评估想要建设制氢厂则困难得多，就像现在也没有哪个机场会配套建设炼油厂一样。对于绝大多数机场来说，一旦公路槽罐车运力瓶颈出现，氢燃料的管道供应将是更为现实更为普遍的选择，而自产自氢燃料只会在极少数机场显示出综合优势。

氢燃料加注

在氢能航空市场发展的初期，移动加氢车可能会是所有机场燃料加注的首选方式。当氢能航空器机队规模扩大到一定程度后，机场需要考虑建设固定加氢设施，这一时间点可能会在2040年之后。而由于储运和加氢系统的投资花费和复杂程度远超过电动航空器配套的快速充电设备，一些小型机场可能会一直选

择加氢车作为氢能航空器的供能方案。用充满氢燃料的储罐直接替换航空器上空储罐的换氢模式似乎也是一种可能，不过这将给本就面临很多问题的氢能航空器设计带来更大的困难，并带来了新的标准化和适航挑战。通常情况下的氢能航空器燃料罐加注流程如图3所示。

固定加氢设施需要使用低温管道将液氢从储存位置直接输送到航空器上。考虑到航空器位于距离液氢储罐1km甚至更远的位置，肯定会有多架飞机同时加注燃料的情况出现。如果继续沿用传统航空燃料那种单一主干路和多个支路的管网布局，整个加注系统的压力差就会很难控制。潜在的设计方案就是在管路和加注终端之间加装中继罐，罐体的尺寸与航空器燃料箱尺寸一致。不过若将中继罐建设在地下，不但施工成本很高，在到达使用寿命后也难以更换，采用中继罐也会对机场设施提出很高的要求，除非重新设计建造专供氢能航空器使用

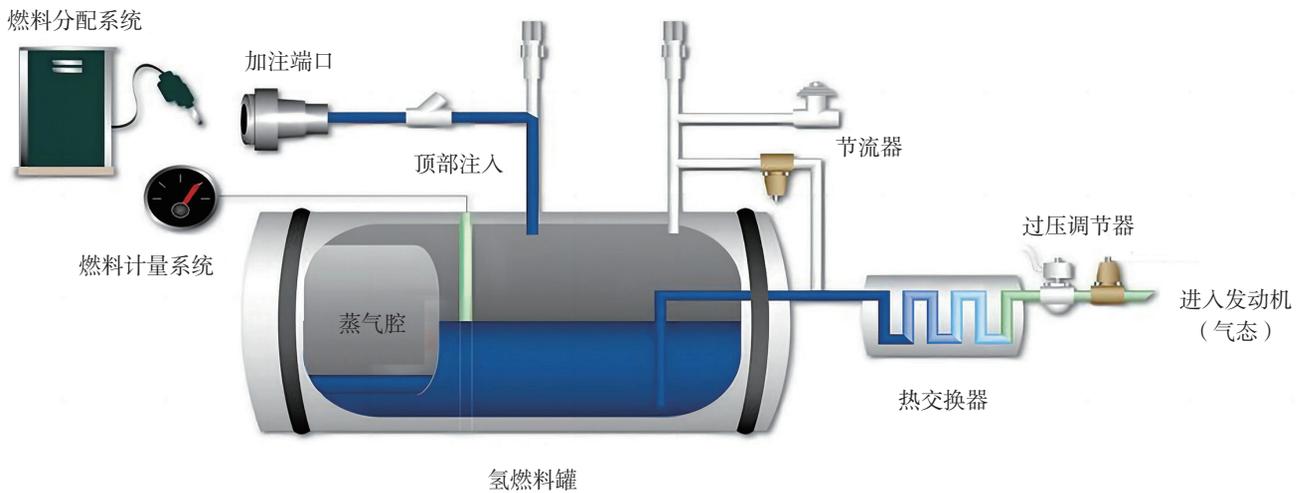


图3 液氢加注示意（来源：国际垂直飞行协会）

的航站楼。

表1给出了不同氢能航空器对应的燃料需求与加注时间。由于液氢的密度比传统航空燃料低，使用相同直径和流量的软管加氢比加油需要更长的时间，导致航班周转时间延长，从而使航空器在全生命周期内的综合利用率降低5%~10%。为此，在航空器设计时就要将支持更多数量、更大直径加注端口的问题纳入考量。考虑到连接或断开加注端口时操作安全半径比常规机队大，这会对机场的空间产生一定的影响，同时改装后的加注软管可能过于沉重、操作时可能不够

灵活方便，也对地面服务提出了更高要求。

氢能航空经济性

氢能航空的市场经济性主要从基础设施建设成本和运营成本两方面考量。其中，基础设施建设成本主要与氢燃料的储运和加注相关，除了氢液化和槽罐运输技术得益于外部氢能产业的发展而较为成熟外，与航空产业自身密切相关的长距离管道输氢、机场加氢固定管网、中继罐储氢系统和终端计量控制设备等技术成熟度普遍在3以下，很多概念方案还在构想阶段，这也意味着

不同研究机构对未来氢能航空基础设施的建设费用估算存在很大差异，ATI估算的机场基础设施改造成本如表2所示。考虑到机场兴建氢能航空基础设施时面对的复杂性、不确定性和经济风险，有理由认为实际成本支出会在预期最大值的基础上进一步上浮，这一点在氢燃料输送管网建设上可能更加突出。

为了降低建设成本，有必要将机场氢燃料配置与整个地区的氢能产业发展统筹考虑，例如机场储氢能力一般根据氢能航空器机队最大规模确定，在航班执飞的非高峰时段过剩的氢燃料可以在机场的其他地方使用，或者出售给第三方以增加航空运营商的收益，附近地区的汽车加氢站、发电厂和工业企业都可能成为受众。换言之，虽然机场用氢具有很强的特异性，但其不应被视作氢能产业终端的孤岛，而应当成为一个具有强大辐射效能的枢纽节点，在满足航空运输需求的基础上实现氢燃料的分配调度，也只有这样才能放大其基础设施投资潜力。

表1 不同氢能航空器的燃料需求与加注时间（来源：国际垂直飞行协会）

类型	航程/km	燃料质量/kg	加注时间/min
城市空中交通氢能航空器	105	<100	15
氢能旋翼机	648	60~90	15
支线氢能航空器	1481	1300	20
窄体氢能航空器	4445	2600	25~30
宽体氢能航空器	10650	11700	60

表2 氢燃料不同储运和加注方式对应的机场基础设施改造费用预估 (来源: ATI)

改造费用/亿英镑	储运方式		
	公路液氢槽罐车	氢燃料输运管道	机场内制备氢燃料
机场规模及加注方式			
大型机场 移动加氢车加注	3.25 ± 2.25	6.25 ± 5	25 ± 13
中型机场 移动加氢车加注	1 ± 0.6	2 ± 1.5	8.5 ± 4
小型机场 移动加氢车加注	0.2 ± 0.1	0.25 ± 0.25	1 ± 0.5
大型机场 地面固定设施加注	5.25 ± 2.5	8.50 ± 5.25	27.5 ± 13
中型机场 地面固定设施加注	1.75 ± 0.75	2.75 ± 1.75	9.25 ± 4.25
小型机场 地面固定设施加注	0.40 ± 0.15	0.5 ± 0.25	1.15 ± 0.5

氢能航空运营首先要分析购买氢燃料的费用。根据麦肯锡公司的研究结论,到2050年液氢燃料每吨价格约为1800欧元,不过由于氢能基础设施建设的巨大投资,航空公司很可能附加所谓的机场建设费并最终分摊到了每位旅客,按照20%的费率计算则此时的氢燃料成本为每吨2200欧元,近似为传统航空燃料的2倍。虽然液氢较传统航空燃料有2.79倍的能量密度优势,但考虑储罐的质量后,前者综合质量效率仅相当于后者的61.2%,若认为两种燃料在航空器上的利用效率相同,氢燃料使用成本比传统航空燃料高14%。

另一个影响运营成本的因素就是氢能航空器自身的产品特性。有分析认为,储氢罐和燃料配送系统以及更大的机体可能会使得氢能航空器较737或A320的维护费用增加47%。即便燃料加注时间与现有机

队持平,氢能航空器略低的巡航速度可能会使得飞行时间延长、飞行循环减少,同时更少的载客量也意味着运营效率的降低。综合各种因素,氢能航空器的飞行生产率大概会出现18%的损失,加上上调的航空器销售与保障支出后这一部分的合计费用较常规飞机上升了26%。再与燃料成本合并加权,氢能航空的运营成本要高出21%左右。

如果说电动飞行的经济性在使用初期存在一定争议、运营的价格优势潜力展示尚不够充分的话,那么氢能航空的经济性可能更是一个长期困扰航空界的系统性问题,特别是在2035—2040年面向干线运输的氢能航空器刚开始进入市场时,航空公司所承担的额外成本可能远不止21%这么简单。例如,新机采购费用有可能是常规飞机的2倍甚至更多,在这种情况下想要说服运营商启动氢能航空产业配套工作需要

强大的外部助推力。

结束语

同为完全零排放的飞行方案,也许氢能航空器的市场应用前景比电动航空器更广,能够执行各种支线和干线飞行任务,但因产业配套所衍生的一系列问题却也更加充满挑战。从氢燃料的制备角度看,在远离机场、有资源优势的地方集中生产氢燃料可能会成为主流,尽管电解水制氢的技术已较为成熟,但要达到未来航空产业预期的成本与供应能力并不容易。从氢燃料的储运角度看,当前的氢能产业化应用以氢气为主,而氢能航空对大量液氢的特殊需求可能游离于一般意义的氢能经济体系之外,这必将伴随额外的技术开发和设备投资。从氢燃料的加注角度看,为氢能航空配套的机场固定低温加注系统方案有待进一步论证,而保持现有机队的周转时间对于实现氢能航空器的高效商业化运营至关重要。

根据目前公布的氢能航空器概念的产品特性,不存在将其集成到现有空中交通管理系统的根本性障碍,当然这一结论的根本前提是要有庞大完备的基础设施体系进行支撑,并同步制订安全高效且符合成本效益的航班计划,确保氢能航空器和机场空间利用率最大化。更新机场安全和基础设施建设规章、打造成功商业案例形成试点效应并增强经济收益等也将是氢能航空产业关注的内容,这一点与电动航空器产业配套并无本质差异。

(王翔宇,中国航发研究院,高级工程师,主要从事航空发动机发展战略研究)