

# 可持续航空燃料发展展望

## Sustainable Aviation Fuel Outlook

■ 王翔宇 / 中国航发研究院

可持续航空燃料对于未来航空产业实现低碳发展具有重要意义。在各国政府机构、航空公司、燃料供应商和航空原始设备制造商纷纷努力促进可持续航空燃料普及应用的同时，相关产业也面临着降低制备成本、提升供应能力、明确组分特性以及简化认证流程等诸多方面的困难和挑战。

可持续航空燃料 (SAF) 一般指由各种可持续重复获得的原料 (生物原料或合成原料) 经过化学反应生成的航空煤油替代品。虽然 SAF 并不像电能或氢能那样有望成为未来航空业低碳发展的最终解决方案，不过其燃烧时产生的二氧化碳可借助原料生产得以中和，在其他技术路线成熟应用之前对于航空业实现净零碳排放这一短期目标具有极为重要的现实意义，也是可持续远程飞行最可行的选择。除了原料来源多样、全生命周期碳排放显著减少以外，SAF 与航空煤油相比所产生的烟尘、氮氧化物和硫化物都会大大降低，也无须对当前的飞机/发动机结构进行根本性的重新设计。

### 从航空燃料到可持续航空燃料

航空燃料是由几百种不同碳氢化合物组成的混合物，其组分从含 8 个碳原子的分子到含 16 个碳原子的分子不等。作为汽油和柴油的中间馏分产物，航空燃料的沸点与汽油有显著重合、与柴油几乎完全重合，相应的炼油厂商可根据市场条件和政策驱动有倾向性地选择生产哪种产品，这也意味着目前 SAF 和可再生柴油存在较为激烈的产能竞争关系。

为使 SAF 能够被等同于航空煤油使用，可从性能、可操作性和兼容性对其进行描述。其中，性能主要包括质量能量密度、体积能量密度、颗粒物排放量和热稳定性等，决定了 SAF 为航空发动机布莱顿循环提供服务的能力；可操作性的出发点在于确保燃料在恶劣环境条件下 (如低温冷启动和高空再点火) 的安全可用性，在美国材料与试验协会 (ASTM) D4054 标准框架下往往借助原始设备制造商 (OEM) 试验设施进行认证；兼容性是指 SAF 应在不改变运输条件和机场基础设施的基础上能够直接应用到现有飞机和发动机产品上，不会对现有操作规范进行大的调整变更。

早期的 SAF 只包括正构烷烃和异构烷烃两种组分，随着化工技术的进步已经扩展为正构烷烃、异构烷烃、芳香烃和环烷烃 4 个烃族，而传统航空煤油中的其他组分 (含氧分子、含杂原子分子、不饱和烯烃和金属原子等) 由于热稳定性差、冰点低、易形成污染物等问题已被 SAF 规格标准所剔除。正构烷烃和异构烷烃分子族通常占传统喷气燃料的 55% ~ 60%，前者虽可为 SAF 接受，但不符合 ASTM D1655 标准

的冰点和闪点要求，也不提供独特的性能属性，而异构烷烃则具有质量能量密度高、热稳定性好、凝固点低等优点。芳香烃能量密度较低，燃烧不像烷烃那样清洁，是航空煤油 90% 颗粒物排放的来源，也极易造成燃烧室内部结构的磨损。环烷烃则与异构烷烃相互补充，在满足燃料能量密度要求的同时提供与芳香烃类似的密封膨胀功能。可以说，目前通过在 SAF 中添加高质量异构烷烃来降低芳香烃的含量，并用环烷烃最终取代芳香烃的技术发展趋势已较为清晰，既可最大限度减少污染排放又能进一步提升燃料的能量特性。

截至 2021 年年初，共有 8 种 SAF 生产工艺获得了 ASTM 的认证，与航空煤油最大混合体积比例均不超过 50%。作为当下商业上最为可行的制备 SAF 途径，加氢酯和脂肪酸 (HEFA) 法通过将工业废油和植物油等进行脱氧反应后加入氢可形成碳氢化合物，2017 年其技术成熟度就已达到 8 ~ 9 级，未来含油的藻类也有望成为其原料。费托合成法是利用城市固体废物的木质纤维气化为二氧化碳和氢的混合物后进一步转化为 SAF，2019 年其技术成熟度也在 7 级以上，是目前唯一获批

3种不同组分的航空煤油性能比较 (来源:美国能源部)

	可操作性		
	最佳	中等	最差
正构烷烃质量占比	26%	20%	13%
异构烷烃质量占比	37%	30%	19%
单环烷烃质量占比	19%	25%	30%
双环烷烃质量占比	3%	7%	17%
芳香烃质量占比	14%	19%	20%
碳氢比	2.01	1.94	1.90
密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	780	803	827
质量能量密度 / (MJ/kg)	43.2	43	42.9
体积能量密度 / (MJ/L)	33.7	34.5	35.5
平均分子量 / (g/mol)	152	159	166
运动黏度 / (mm <sup>2</sup> /s)	3.5	4.6	6.5
闪点 / °C	42	48	60

的可在燃料中加入芳香烃的制备工艺,能够提供航空煤油中的全部组分,与当前航空发动机具有更好的兼容性。此外,还有醇喷合成法(糖、淀粉或水解纤维素发酵转化为酒精后加工并升级为燃料)、催化水热分

解法(利用催化剂将生物质衍生的含氧化合物转化为碳氢化合物的混合物)和糖类直接合成法(利用转基因微生物将糖转化为碳氢化合物或脂类)等,其生产工艺处于不断的改进发展中。

已获得ASTM批准的典型SAF

名称	原料	混合体积上限
费托合成石蜡煤油 (FT-SPK)	城市固体废物、农业和森林废物、能源作物等	50%
加氢酯和脂肪酸合成石蜡煤油 (HEFA-SPK)	动植物脂肪、油和油脂	50%
加氢发酵糖合成异构烷烃 (HFS-SIP)	糖类	10%
费托合成带芳香烃的石蜡煤油 (FT-SPK/A)	固体废物、农业和森林废物、木材、能源作物等	50%
醇喷合成石蜡煤油 (ATJ-SPK)	淀粉、糖、纤维素等生物质	50%
加氢碳氢化合物、酯和脂肪酸合成石蜡煤油 (HHC-SPK)	生物来源的碳氢化合物、脂肪酸酯和游离脂肪酸等	10%
催化水热合成煤油 (CH-SK)	动植物脂肪、油和油脂	50%
可再生原料与原油中间馏分的共加工	可再生脂类(植物和动物脂肪)	5%

## 促进可持续航空燃料普及应用

### 政府机构

SAF产业的培育离不开公共政策导向,这其中包括关于环境保护和燃料规格/质量的立法以及对于不同燃料的征税和补贴等诸多方面,之前很多国家为满足可持续发展目标而强制在汽车上推广使用乙醇和生物柴油就是一个很好的例子。2016年欧盟出台的第二期可再生能源法案(RED II)已经要求各成员国在2030年的SAF使用占比达到6.8%,欧洲航空业《目标2050》可持续发展战略则预期到2050年将其份额进一步提升到83%。同时,在欧盟排放交易体系(EU-ETS)下,若设置的碳排放配额价格高于SAF的成本,则必将对航空公司选用SAF起到积极的作用。早在2006年,由美国联邦航空局(FAA)牵头,代表美国航空公司、机场和OEM的3个协会共同发起的民航替代燃料倡议(CAAFI)就开始对SAF的应用可行性进行评估,2021年8月路透社报道称美国政府正计划到2050年让航空公司使用100%SAF,以此作为白宫应对气候变化的更广泛努力的一部分。

### 航空公司

在认识到额外增加的运营成本可通过国家财政补贴以及票价附加费用得以平衡后,越来越多的航空公司开始对使用SAF表现出明显的兴趣,而除了运营成本以外,安全性和环保收益也是航空公司关注的重点。从2008年至2018年年底,全球约有30家航空公司使用SAF执飞了15万架次航班,到了2021年则有超过40家航空公司的30万架次航班使用了SAF,待执行的SAF采购



耐斯特能源公司生产的SAF为飞机供能（来源：耐斯特能源公司）

协议则达到了500万t以上。此外，航空公司也积极地与SAF制造商合作，例如，早在2015年美联航就与Fulcrum生物能源公司合作，共同在洛杉矶建立了将城市固体垃圾转化为SAF的工厂，计划年产量为28万t。2021年Alder油料公司宣布获得了美联航和霍尼韦尔公司数百万美元的投资，并与美联航签署了150亿L的SAF购买协议，是美联航每年消耗燃料的40%，这也是目前航空史上最大的一宗SAF采购计划。

### 燃料供应商

面对日益旺盛的市场需求，传统能源巨头纷纷向着高质量、大规模和低成本生产SAF的方向不断努力，很多新兴能源公司也顺势而为致力于推动SAF的商业化发展。据IASC航空产业链的相关报道，世界最大石油交易商之一的荷兰皇家壳牌（Shell）公司表示，到2025年其SAF产能将达到200万t，比2019年全球总产量还多10倍，占到该公司航空燃料销售额的10%以上。芬兰耐斯特（Neste）能源公司的转型更为彻底，目前正在为旧金山国际机场提供SAF，随着其在荷兰鹿特丹

的工厂即将投产，SAF的年产量将从目前的10万t提升到2023年的150万t。但也必须认识到，虽然目前获得认证的SAF种类不少，但大多制备工艺并不成熟、距离市场应用仍有不小的差距，考虑到未来新工艺技术可用来制备更高质量的SAF并取代现有工艺，快速部署生产线投产可能存在较大的不确定性风险。

### 航空原始设备制造商

为使SAF能够符合操作和安全标准、满足适航审定要求，在ASTM D4054框架下由航空OEM主

导的测试认证不可或缺。霍尼韦尔公司于2011年完成了HEFA燃料的测试，该燃料于同年7月被添加到ASTM国际燃料规范中；2013年，波音公司测试了加入HEFA燃料后燃油系统密封件的性能变化，对其特性有了初步认识；2015年，普惠公司开展了一系列支持ASTM认证的测试工作，测试对象涵盖醇喷合成法、催化水热分解法和糖类直接合成法等多种制备工艺；同年罗罗公司进行了发动机台架试验，以进一步了解燃油系统密封件在不同SAF下的性能。从2016年开始，GE公司也陆续对多种SAF的燃烧特性进行试验，相关结果支持醇喷合成燃料以更高的比例与航空煤油混合。随着空客公司、德国航空航天中心（DLR）、罗罗公司以及耐斯特能源公司联手启动了具有开创性的“替代燃料排放和气候影响”（ECLIF3）项目，将SAF混合比例上限提升到100%后对发动机、燃油系统和飞机机体的影响成为未来测试的重点。

2020年年底，罗罗公司在其下



道达尔能源公司生产的SAF为飞机供能（来源：道达尔能源公司）



使用100%SAF的遛达1000发动机在波音747平台进行飞行测试（来源：罗罗公司）

一代“超扇”（UltraFan）发动机计划的技术演示验证机（配装ALECSys稀薄燃烧低排放系统的遛达发动机）的地面测试中首次使用了100%的SAF。该燃料由美国世界能源（World Energy）公司生产，这家公司也是当时美国唯一一家实现SAF商业规模生产的供应商。波音公司在2021年2月承诺到2030年其民用飞机能够获得认证使用100%SAF进行飞行，并在下半年与罗罗公司合作开展了飞行测试，波音747平台上的1台遛达1000发动机使用100%SAF，另外3台RB211发动机依旧使用航空煤油，近4h的飞行未出现任何工程问题，随后罗罗公司确认到2023年所有遛达发动机都将与100%SAF兼容。几乎同时，赛峰集团宣布全球首台完全采用SAF的涡轴发动机马基拉2（Makila 2）成功运转，并于1个月内在空客公司的H225直升机上首飞成功，标志着旨在评估非混合SAF对直升机系统影响的飞行测试活动的正式启动，其与GE公司合作

研发的RISE计划中的开式转子架构发动机也将支持使用100%SAF。

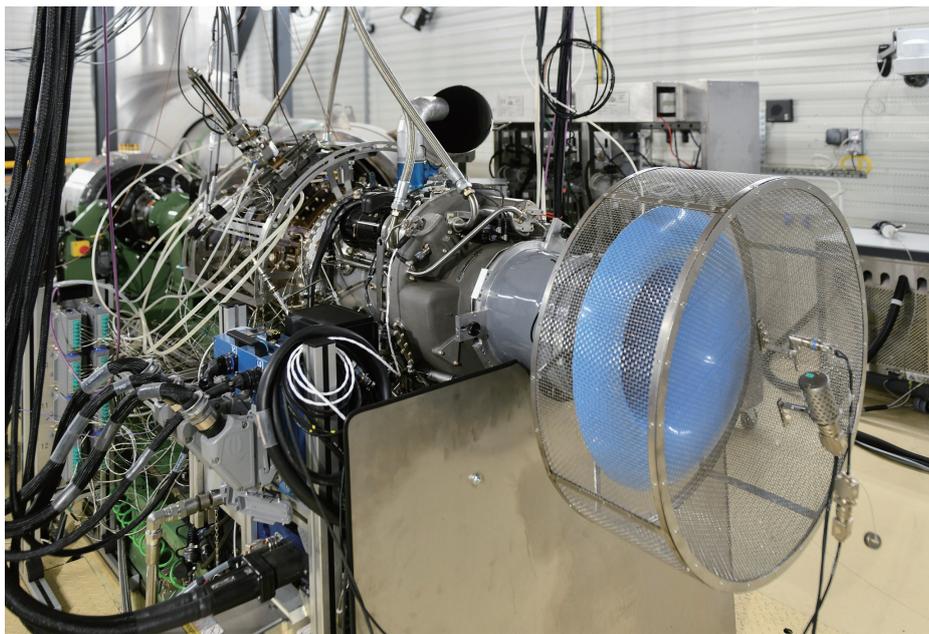
### 可持续航空燃料发展面临的挑战

在政府和业界的大力支持下，SAF虽然已经表现出了巨大的应用前景

和市场潜力，但其发展也面临着诸多挑战。

#### 降低制备成本

据国际清洁交通委员会（ICCT）相关统计，SAF的生产成本约为航空煤油的2~8倍。其中，即便是当前相对成熟的HEFA工艺，产品的最低市场价格也相当于航空煤油的1.9~2.8倍，特别是注意到其他行业对豆油、棕榈油、用过的食用油以及棕榈脂肪酸馏出物这些HEFA生产原料的迫切需求与竞争，短期内想要进一步降低HEFA的成本还有很大的困难。由于燃料成本占整个民航业运营成本的25%~40%，即便航空公司愿意以更高的价格购买一些SAF来支持其可持续发展，但这终究不是长久之计，尽快将SAF降到与航空煤油基本相同的成本是当下非常急迫的任务。一些燃料供应商已经注意到了富含一氧化碳的工业废气和易于气化的城市固体废物的潜在利用价值，其相较于农业生物质原



赛峰集团对使用SAF的直升机发动机进行测试评估（来源：赛峰集团）

料更易获取也廉价得多。

### 提升供应能力

2019年全球航空业共消耗了约3600亿L燃料，预计未来还将以3%左右的年化速率不断增长，而目前的SAF的年产量仅为5000万L，不到总量的0.02%，即便不考虑价格的问题，在今后的几年必须大幅增加SAF的产能才能满足市场的需求。然而，各种获得认证的SAF工艺或多或少地面临原料的长期可用性以及大规模生产的问题，工业废物废气的来源极为有限，而生产其他生物质原料又需要占用大量的耕地和水资源。长期最可行的技术方案就是利用费托方法将工业途径得到的氢（如电解）和大气中二氧化碳合成用来制备燃料的碳氢化合物，但这也会带来巨大的可再生电力需求缺口。此外，在全球范围内支持SAF的基础设施体系也远未成形，为使传统炼油厂具备原料一体化处理能力，额外的投资必不可少，而若在现有供应链之外拓展SAF专业工厂，相应地也要配套建设管道运输和分装储存系统。

### 明确组分特性

为确保减排潜力最大化，理想状态下的SAF应无须与任何传统燃料混合使用，但由于现在生产技术

大多只是复刻了航空煤油中以正构烷烃和异构烷烃为代表的石蜡类组分，业界对SAF的性能特性到底能在多大程度上还原航空煤油还缺乏全面的认识，导致了SAF在商业使用中的混合体积被限制在了50%以下。波音公司的最新测试显示在波音777飞机上使用100%HEFA燃料时，以前没有接触过燃料的密封件即便不需要芳香烃组分也能获得可接受的性能，不过在充分的化工机理研究和令人信服的试验证据出现前，业界对于老旧飞机/发动机系统中能否用环烷烃代替芳香烃仍持审慎的态度，而为了允许与航空煤油组分不同的SAF能单独使用，未来发动机燃烧系统也可能重新设计以保持最佳的运行性能。

### 简化认证流程

ASTM D4054是评估新型航空燃料和燃料添加剂的核心标准操作规程，旨在确保使用替代航空燃料的飞机安全可靠地运行。整个测试由航空OEM主导，一般分为4个主要步骤，是一个反复迭代和异常严格的评估过程。这也导致了目前SAF的认证需要3~5年的时间、500万美元以上的成本，全流程费用支出则高达1000万~1500万美元，耗费的大量燃料样品对于很多新兴燃料

供应商也是一个沉重的负担。减少认证时间并降低认证成本已经势在必行，2020年1月ASTM D4054快速认证附件得到批准，但通过该附件认证的SAF最大混合比例被限制在10%以下，后续仍有很多工作要做。当然也要注意，虽有简化ASTM认证流程的空间，但随着技术的不断进步，对SAF性能规范的要求只会收紧而不是放宽。

## 结束语

2021年10月，《中共中央、国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》发布，为碳达峰、碳中和这项重大工作进行系统谋划、总体部署，明确了在提高非化石能源消费比重、降低二氧化碳排放水平等方面的发展目标。在这一大背景下，伴随着我国民航运输市场需求的快速增长，政府机构、航空公司、燃料供应商和航空OEM等方方面面应通力协作，充分认识SAF对于我国航空产业未来实现低碳发展的重要意义，及时将SAF的研究与推广应用纳入顶层发展规划，积极参与SAF国际认证标准的制定，加快SAF生产新技术研发以及工业生产装置建设，解决原料、技术与产能难题，形成完备的SAF产业体系，为应对风险挑战、抢抓发展机遇做好充分准备。

**航空动力**

（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）

### 参考文献

- [1] 邢子恒. 航空可持续燃料在中国航空业实现“双碳”目标中的作用和意义[J]. 中国民用航空, 2021 (8): 9-12.

ASTM D4054测试主要步骤（来源：美国能源部）

	消耗燃料/L	时间/月	成本/万美元
第一步：燃料规格特性审查	40	6	5
第二步：适用用途审查	40 ~ 400		
OEM审查	—	6 ~ 12	35
第三步：组件和台架测试	950 ~ 40000	24 ~ 36	约400
第四步：飞机和发动机飞行测试	约850000		
OEM审查	—	6 ~ 12	约100