

# 生物航煤生产技术的发展现状

王圣, 杨鹤, 闫瑞, 伏朝林, 赵杰, 陶志平

中国石油化工股份有限公司 石油化工科学研究院, 北京 100083

王圣, 杨鹤, 闫瑞, 伏朝林, 赵杰, 陶志平. 生物航煤生产技术的发展现状. 生物工程学报, 2022, 38(7): 2477-2488.

WANG S, YANG H, YAN R, FU ZL, ZHAO J, TAO ZP. Development of bio-jet fuel production technology: a review. Chin J Biotech, 2022, 38(7): 2477-2488.

**摘要:** 由于温室气体的大量排放和对化石燃料的高度依赖, 航空业的可持续发展得到了全世界的关注。生物航煤被认为是一种有前景的传统航空燃料替代品。本文概述了制备生物航煤的代表性工艺技术路线、发展现状以及生物航煤产业发展所面临的机遇和挑战。迄今为止, 已经有多种生物航煤制备工艺得到美国材料实验协会 (American Society for Testing and Materials, ASTM) 认证。其中, 酯和脂肪酸加氢是目前最为成熟、可以实现完全商业化的路径。考虑到技术经济性和成熟度, 短期内, 费托合成是比较有发展前景的工艺。

**关键词:** 生物航煤; 可持续发展航空燃料; 生物质; ASTM

## Development of bio-jet fuel production technology: a review

WANG Sheng, YANG He, YAN Rui, FU Zhaolin, ZHAO Jie, TAO Zhiping

Research Institute of Petroleum Processing, Sinopec, Beijing 100083, China

**Abstract:** Due to the large amount of greenhouse gas emissions and the high dependence on fossil fuels, the sustainable development of aviation industry has attracted worldwide attention. Bio-jet fuel is considered to be a promising alternative to traditional aviation fuel. This article summarizes the representative technological route, development status, opportunities and challenges faced by the development of bio-jet fuel industry. So far, several bio-jet fuel production technologies have been certified by the American Society for Testing and Materials (ASTM). Hydroprocessed esters and fatty acids is currently the most mature process that can be fully commercialized. Considering economic characteristics and technology maturity, Fischer-Tropsch is promising in near term.

**Keywords:** bio-jet fuel; sustainable aviation fuel; biomass; (American Society for Testing and Materials, ASTM)

**Received:** December 20, 2021; **Accepted:** April 6, 2022

**Corresponding authors:** TAO Zhiping. E-mail: taozp.ripp@sinopec.com  
ZHAO Jie. E-mail: zhaojie.ripp@sinopec.com

航空运输对于促进全球社会交往和商业发展有着非常重要的作用。在 COVID-19 疫情期间, 航空业在全球范围内运输医疗用品和疫苗, 为国际社会稳定发展提供了有效帮助<sup>[1]</sup>。COVID-19 可能会在中期内影响乘客增长速度, 但国际航空运输协会 (International Air Transport Association, IATA) 预计到 2035 年, 航空业年旅客人数仍将增长至 75 亿人次, 这意味着航煤的需求也将大幅度地增加<sup>[2]</sup>。

2019 年, 航空业载客量超过 45 亿人次, 产生约占全球人为碳排放量的 2% (相当于  $9 \times 10^8$  t CO<sub>2</sub>)<sup>[2]</sup>。因此, 减少航空业的碳排放对于实现全球碳中和是至关重要的。2008 年, 欧盟提出指令 2008/101/EC, 并正式将航空碳排放纳入欧盟排放交易计划 (European Union Emissions Trading, EU ETS): 从 2012 年开始, 任何航班进入欧盟地区时都需要支付其碳排放量的费用。2009 年, 国际航协提出了整个航空业的 3 个减排目标, 其中之一是到 2050 年将净排放量减少到 2005 年的一半<sup>[3]</sup>。2016 年, 国际民航组织 (International Civil Aviation Organization, ICAO) 在第 39 届大会上正式通过了国际航空碳抵消和减排计划 (carbon offsetting and reduction scheme for international aviation, CORSIA), 这是世界上第一个全球性的行业减排市场机制, 也标志着航空业成为世界上第一个由各国政府协定实施全球碳中和增长措施的行业<sup>[4]</sup>。为了实现航空业的碳减排目标, 仅靠提高燃油效率是不够的。对于路上交通, 由可再生能源驱动的电动汽车和氢能汽车可能成为传统油车的有效替代品, 但现有电池和氢能发动机的效率还不足以支撑长距离的航空飞行。因此, 为实现减少碳排放和航空业的可持续发展, 生产以生物质为原料的航空喷气燃料被广泛研究<sup>[5-6]</sup>。

对于航空业, 生物航煤不仅可以减少对化石燃料的依赖, 还可以通过生物质的碳中和实现生命周期中碳排放量的减少。本文概述了现有的生物航煤制备技术、发展现状, 以及生物航煤产业发展的机遇和挑战。

## 1 生物航煤的生产技术

喷气燃料(航空煤油/航煤)是根据功能特性和理化性质来定义的, 如黏度、碳数、沸点范围、凝固点、闪点、芳烃含量等。喷气燃料没有标准的化学式, 而是由炼厂馏分中碳数范围在 C<sub>7</sub>-C<sub>17</sub> 的碳氢化合物的混合物组成。汽油的碳数范围在 C<sub>4</sub>-C<sub>12</sub>, 柴油的碳数在 C<sub>12</sub>-C<sub>20</sub> 不等<sup>[7]</sup>。不同的燃料可以根据沸点的不同分馏得到。

与传统化石能源制备的航煤不同, 生物航煤由生物质转化并可以与传统航煤混合使用。生物航煤的原料种类很多, 通常可以分为 3 类。第一代原料主要是可食用的农作物, 但这类原料会占用土地并且会消耗粮食储量。因此, 该类原料并不是非常理想。第二代原料通常是非食用性的油料作物或木质纤维素, 如: 亚麻荠、麻风树、餐饮废油等。这类原料的脂肪酸含量很高, 可以通过加氢酯化等方法得到生物航煤。第三代原料是藻类。与其他生物质原料相比, 藻类不仅含油量很高, 而且占用的土地较少<sup>[8]</sup>。

生物航煤的原料也可以分为油类作物、木质纤维素、糖和淀粉生物质。不同类型的原料可以通过不同的技术路径转化成生物航煤。现有的主要生物航煤技术转化路径如图 1 所示。在该综述中, 生物航煤生产技术按照醇制航煤 (alcohols-to-jet, ATJ)、油制航煤 (oil-to-jet, OTJ)、气制航煤 (gas-to-jet, GTJ) 以及糖制航煤 (sugar-to-jet, STJ) 来进行讨论。

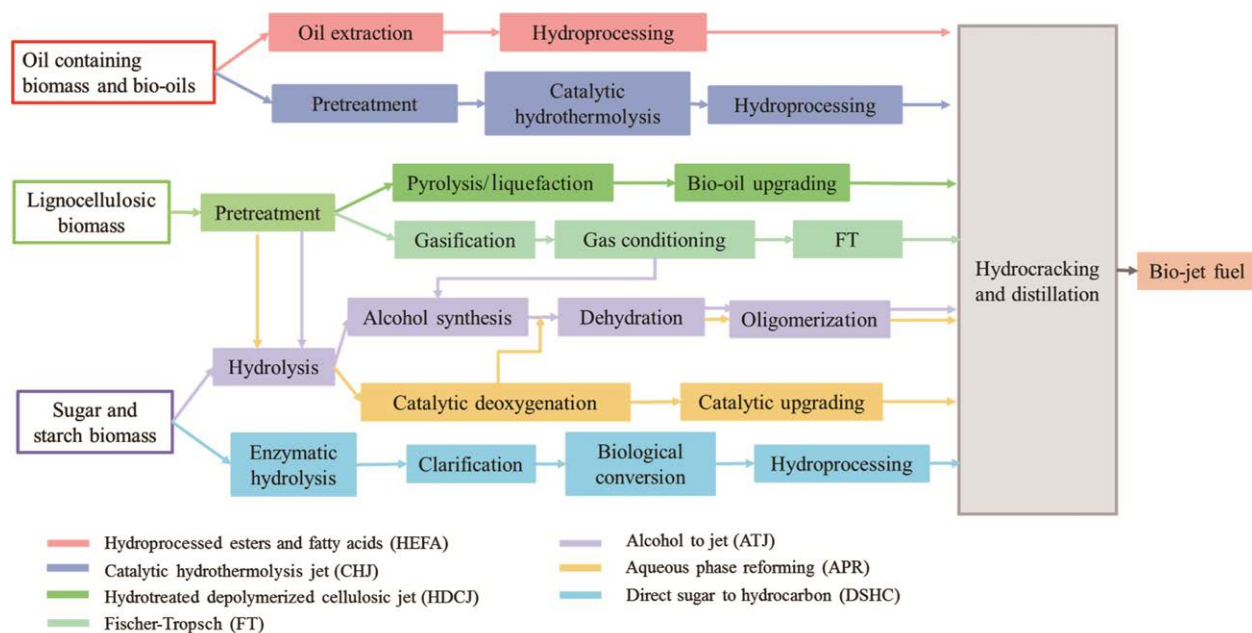


图1 生物航煤主要制备技术

Figure 1 The main processes for bio-jet fuels production.

### 1.1 醇制航煤 (ATJ)

ATJ 技术分为醇的生产和醇的转化两部分。醇最常见的制备方法是糖的生物发酵。醇也可以通过淀粉水解、发酵得到。木质纤维素也能转化成醇。但该过程很复杂,包括发酵、水解、气化等过程<sup>[9]</sup>。ATJ 的第二步是将醇作为基本原料转化为长链碳氢化合物。该过程通常分4步,首先是醇脱水生成烯烃,然后烯烃在催化剂作用下低聚生成中间馏分;接着,中间馏分加氢得到烷烃;最后,精馏制得航煤<sup>[8]</sup>。

工业上一般使用乙醇、丁醇和异丁醇作为中间产物将生物质转化成燃料。乙醇脱水制备乙烯已经是一个很成熟的工艺。在这一步中,常用的催化剂有  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、过渡金属氧化物、沸石催化剂和杂多酸催化剂等<sup>[10]</sup>。丁醇脱水没有乙醇脱水工艺成熟,但丁烯低聚所需的温度和压力比乙烯低聚要低<sup>[11]</sup>。

醇脱水生成烯烃这一步中会生成水,因此该过程的催化剂应该是耐水的。对于低聚过

程,可以使用均相或非均相催化剂。沸石催化剂被广泛用在低聚过程中,但沸石催化剂容易结焦失活的问题依然难以解决。使用不同的醇低聚制备的航煤略有不同。丁醇脱水低聚会得到  $\text{C}_8$ 、 $\text{C}_{12}$ 、 $\text{C}_{16}$  等化合物,而乙烯低聚得到的化合物范围更广泛<sup>[6]</sup>。低聚得到的烯烃通过加氢得到饱和烷烃,然后蒸馏得到航煤。

### 1.2 油制航煤 (OTJ)

OTJ 顾名思义是指将油类原料转化为航煤。常见的 OTJ 原料包括植物油、餐饮废油、藻油、热解油等。油制航煤技术的主要路径有:酯和脂肪酸加氢 (hydroprocessed esters and fatty acids, HEFA)、催化水热解 (catalytic hydrothermolysis jet, CHJ)、热解等。HEFA 和 CHJ 都是将原料中的脂肪酸和脂肪酸酯转化成航煤,而热解是将原料先转化为热解油,然后再将热解油升级成航煤。热解中比较知名的方法有加氢解聚纤维素 (hydrotreated depolymerized cellulosic jet, HDCJ)。

### 1.2.1 酯和脂肪酸加氢 (HEFA)

HEFA 是一种对植物油、餐饮废油和动物脂肪中的甘油三酯、饱和及不饱和脂肪酸加氢处理的过程<sup>[8]</sup>。该工艺大体上分为 3 步。第一步是通过催化加氢的方法将不饱和脂肪酸以及甘油三酯转为饱和脂肪酸,其中甘油三酯通过 $\beta$ -氢消除反应生成脂肪酸<sup>[12]</sup>。第二步是饱和脂肪酸通过加氢脱氧和脱羧反应转化成 C<sub>15</sub>-C<sub>18</sub> 的直链烷烃<sup>[8]</sup>。这一步早期主要使用沸石或氧化物负载的贵金属催化剂,但由于催化剂易中毒失活、生成裂解产物、成本高等原因,之后逐步改用过渡金属如 Ni、Mo、Co 或其负载型的双金属催化剂<sup>[13]</sup>。第三步是裂化和异构化反应,脱氧直链烷烃进一步选择性加氢裂化和深度异构化生成高度支化的烷烃。该步骤常用的催化剂是 Pt 负载的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、沸石分子筛等<sup>[14-15]</sup>。最后通过分馏过程将混合的液体燃料分离为轻质气体、石脑油和生物航煤。

HEFA 生产的主要产品是生物柴油,该生物航煤约占总产品的 15%。如果想要提高生物航煤所占的比重,需要改变分馏的温度或者进一步的裂化。HEFA 制备的航煤,有高热稳定性、良好的冷流动性、高十六烷值和尾气排放低等优点,但芳烃含量低,容易导致燃油低润滑性和燃油泄漏问题<sup>[16]</sup>。

### 1.2.2 催化水热解 (CHJ)

CHJ 可以将藻类或油料作物转化为航煤<sup>[8]</sup>。CHJ 通过对脂肪酸酯和脂肪酸水热处理,将其转化成含有芳烃的合成煤油<sup>[17]</sup>。CHJ 需要的反应温度比较温和,一般在 50 °C 到 380 °C 之间,所需的压力通常在 5 MPa 至 30 MPa 之间<sup>[8]</sup>。CHJ 可以使用湿原料并且因反应条件温和而具有高效能。根据 Li 等的研究<sup>[18]</sup>,CHJ 工艺主要分为 3 个步骤,包括甘油三酯的预处理、催化水热解和后精炼步骤。预处理包括共轭、环化

和交联,旨在改善分子结构。预处理产物在水和催化剂的作用下裂化和水解,然后进行脱羧和脱水反应。最后,通过精炼和分馏得到航煤组分。

与 HEFA 相比,CHJ 的优势之一是降低了约 25% 氢消耗量<sup>[7]</sup>。此外,与 HEFA 不同,CHJ 得到的生物航煤不仅有链烷烃,还有环烷烃和芳烃,更类似于传统的喷气燃料。根据 ASTM D7566,CHJ 的芳烃含量在 8% 到 20% 之间<sup>[17]</sup>。CHJ 制备的航煤有着优异的燃烧性能、低冰点和稳定性,不仅符合 ASTM 的标准,还符合军队 MTL 标准<sup>[18]</sup>。

### 1.2.3 加氢解聚纤维素 (HDCJ)

HDCJ 是 KIOR 公司研发的催化热解技术。HDCJ 工艺比较简单,主要是将生物质通过热解或液化得到生物油,然后将生物油提质得到生物航煤。尽管 KIOR 公司已经开始申请 ASTM 认证,但由于公司倒闭,导致该技术的认证过程不得不中断<sup>[7]</sup>。HDCJ 得到的热解油因含氧量高,具有高腐蚀性、低能量密度和较差的热稳定性等缺点<sup>[8]</sup>。因此,HDCJ 热解油必须通过进一步的处理,才能得到航煤组分。

## 1.3 气制航煤 (GTJ)

GTJ 是指将沼气、天然气或合成气转化成生物航煤。最主要的 GTJ 方法有费托法 (Fischer-Tropsch process, FT) 和气体发酵法。

### 1.3.1 费托合成 (FT)

FT 通过合成气生产液体碳氢燃料。煤、天然气、生物质、城市固体废物都可以制备合成气。其中,生物质和城市固体废物是更有利于环保的原料。FT 制生物航煤的流程可以分为 6 个步骤:原料预处理、生物质气化、气体调节、酸性气体去除、FT 合成和合成原油精炼。

合成气的质量对于 FT 合成的影响很大,而生物质原料通常含氧量高且含有多种污染

物,因此合成气的净化至关重要。先进的气化技术可以减少合成气净化的复杂程度。等离子气化技术可以得到非常纯净的合成气,但成本太高<sup>[7]</sup>。目前常采用的气化技术,在气化前需要先对原料进行干燥和研磨以减小其粒度和含水量。气化时,温度、气化剂、生物质种类、粒径、加热速率、操作压力、当量比例和反应器配置等许多因素都会影响合成气的产量和组成<sup>[8]</sup>。气化过程在高纯度氧气和高温蒸汽(约1 300 ℃)下进行。气化反应器通常是固定床、流化床等。气化后,合成气进入酸气脱除系统去除CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S和硫化物等酸性气体。去除CO<sub>2</sub>可以提高下游合成过程的动力学和经济性,去除H<sub>2</sub>S是为了避免催化剂中毒。对于FT合成,H<sub>2</sub>/CO的理想比例是2:1。但生物质制备的合成气,H<sub>2</sub>/CO一般在0.6到0.8之间,所以通常需要加氢调节H<sub>2</sub>/CO的比例<sup>[7]</sup>。FT过程中,CO和H<sub>2</sub>反应主要生成C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>O<sub>2</sub>、C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>O、C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>O、C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>和C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>。未转化的合成气和一些FT气体重整后可循环至FT反应器。液体产品通过精炼以获得不同类型的燃料。多余的气体可以用来发电。

FT工艺可以使用的催化剂有Fe、Ni、Co、Ru,催化剂的活性为Ru>Fe>Ni>Co。但因为Ru太贵,FT工艺常用的催化剂是Fe和Co。Fe基催化剂产率高,但寿命短。Co基催化剂具有良好的碳链生长能力,催化剂产物中含氧化合物少且不容易积碳<sup>[19]</sup>。

FT合成又可分为高温FT和低温FT<sup>[20]</sup>。高温FT的温度为310–340 ℃左右,产品主要有汽油、溶剂油和烯烃;低温FT的温度约为210–260 ℃,产品主要有煤油、柴油、润滑油和石脑油。FT温度过低会形成大量甲烷作为副产品。FT工艺的压力一般在10<sup>5</sup>–10<sup>7</sup> Pa范围内。高压会生成长链烷烃<sup>[19]</sup>。

FT燃料通常不含硫、氮,且热稳定性高,缺点是芳烃含量少和能量密度低<sup>[8]</sup>。

### 1.3.2 气体发酵工艺

除了利用FT工艺制备生物航煤之外,还可以利用微生物将合成气转化成醇类,然后通过ATJ工艺制备生物燃料。比如可以将木质纤维素生物质气化为合成气,然后产乙酸菌可以将合成气发酵成乙醇或丁醇<sup>[21]</sup>。之后,再利用ATJ技术得到生物航煤。气体发酵具有几个潜在的优势。与传统的生化或热化学途径相比,它对于原料的选择更为灵活,能够很好地处理原料中的各种污染物避免催化剂失活等问题。此外,发酵法的产率也更高,运营成本也更低。另外,木质纤维素发酵产生的沼气也可以通过甲烷氧化菌(比如:变形菌(Alphaproteobacteria),γ-变形菌(Gammaproteobacteria)和疣微菌门(Verrucomicrobia))转化成生物航煤<sup>[22]</sup>。

### 1.4 糖制航煤(STJ)

与ATJ将糖发酵成乙醇,再将乙醇转化成航煤不同,糖类可以通过厌氧发酵直接生成烷烃类燃料,该方法称为直接糖制碳氢化合物(DSHC),或直接发酵糖制航煤(DFSTJ)。除了生化途径,糖也可以通过热化学方法转化为喷气燃料,例如:水相重整(APR)。

#### 1.4.1 直接糖制航煤(DSHC)

DSHC工艺主要包括6个主要步骤:预处理和调节、酶水解、水解物澄清、生物转化、产品纯化和加氢处理<sup>[8]</sup>。

DSHC的原料与生物乙醇的原料相似,包括甘蔗、甜菜和玉米。木质纤维素生物质也可以通过一些预处理作为DSHC的原料<sup>[23]</sup>。DSHC的发酵过程既可以是厌氧的也可以是好氧的。发酵的产物与原材料、发酵过程、微生物的种类都有关。Amyris公司利用酵母细胞中

的甲羟戊酸将糖发酵成法呢烯。法呢烯是一种高价值的产品，不仅可以用作柴油、航煤，还可以应用于医药、化妆品等行业<sup>[7]</sup>。

2014 年被 Renewable Energy Group 收购的 LS9 是另一家将糖生物转化为航煤的公司。除了有氧生产脂肪酸外，LS9 公司致力于用一步发酵的方法将糖转化成烷烃。该过程在不需高温、高压、有毒催化剂、氢气及复杂的单元操作的情况下，已经实现了柴油的生产<sup>[8]</sup>。

#### 1.4.2 水相重整 (APR)

APR 可以将可溶性植物糖转化为醇、酮、醛、酸、呋喃等化学中间体，然后进一步将这些中间体转化为航煤<sup>[24-26]</sup>。对于生物质原料被转化为可溶性糖的工艺，比较典型的一种转化方法是将木质纤维素生物质预处理和酶水解得到 C<sub>5</sub> 和 C<sub>6</sub> 糖。然后将水溶性糖纯化并浓缩。不能转化成可溶性糖的固体和杂质被移除反应体系以提高反应的转化效率。纯化好的水解物先通过加氢转化成多元醇或者氢解转化成短链含氧化合物，然后再进行水相重整。最后将产物分馏得到喷气燃料<sup>[26]</sup>。未转化的固体、木质纤维素和 APR 过程中产生的轻质烷烃会被送到燃烧室为该反应提供热能<sup>[24]</sup>。

在水相重整过程中，中间体含氧化合物通过酸缩合、碱缩合和脱水/低聚转化为喷气燃

料。酸缩合是将醇类、酮类、醛类、酸类通过固体酸催化剂等转化为烷烃。该过程包括将含氧物脱水成烯烃，接着烯烃低聚成更大的烯烃，然后较大的烯烃裂化、环化、脱氢等形成烷烃。碱缩合是将醇、酮和醛通过直接催化缩合转化为烷烃。氧气首先通过羟醛缩合转化为 β-羟基酮或 β-羟基醛，然后 β-羟基酮或 β-羟基醛脱水形成共轭烯酮。共轭的烯酮转化为酮或醛或进一步氢化成醇。最后醇通过脱水/低聚或氢解转化为喷气燃料<sup>[27]</sup>。

其他的糖催化转化燃料的方法还有羟甲基糠醛 (hydroxymethylfurfural, HMF) 路径等。在 HMF 途径中，果糖或葡萄糖脱水转化为 HMF。然后，在 Cu、Ru 催化剂上通过氢解反应将 HMF 转化为二羟甲基呋喃 (dimethylfuran, DMF)<sup>[28]</sup>。DMF 因具有高热量密度而成为很有潜力的燃料。

#### 1.5 主要生物航煤技术路线对比

上述 7 种生物燃料的生产技术 (图 1)，原则上都可归纳为两道工序，即前脱氧、后改质。7 种生产路线的最大差异在于改质原料的不同。在本文中，将改质的原料称为“油潜”原料 (crude products)。从化学组成上来看，HEFA 和 FT 路线的“油潜”原料为烷烃，与航煤的组成比较相近 (表 1)。CHJ 得到的“油潜”原料仅需加氢和精馏就可以得到含有直链烷烃、

表 1 生物航煤技术路线对比

Table 1 Comparison of different processes for production of bio-jet fuels

Technology types	Deoxidation process	Crude products	Upgrading process
HEFA <sup>[29]</sup>	Hydrodeoxygenation	Alkanes	Isomerization, cracking
CHJ	Decarboxylation, dehydration	Alkenes	Hydrotreating
HDCJ <sup>[29]</sup>	Pyrolysis/liquefaction	Bio-oil	Hydrodeoxygenation, isomerization, cracking
FT <sup>[29]</sup>	Gasification, FT	Alkanes	isomerization, cracking
ATJ <sup>[29]</sup>	Alcohol synthesis, dehydration, oligomerization	Alkenes	Hydrogenation, isomerization, cracking
APR	Acid/base condensation, dehydration, oligomerization	Alkenes	Hydrogenation, isomerization, cracking
DSHC <sup>[29]</sup>	Conversion to sugar, fermentation	Farnesene	Hydrogenation, isomerization, cracking

芳烃和环烷烃的混合物,和航煤组分更为接近。与 HEFA 和 CHJ 技术相比,FT 技术需要先将原料中的 C-C 键和 C-H 键断裂,之后又在 FT 合成中重新生成,单从“化学键经济性”的角度上考虑,FT 技术的经济性较差。

## 2 生物航煤生产技术的发展现状

尽管有很多种方法可以将生物质转化成生物航煤,但目前为止,得到 ASTM 认证或已经(即将)工业化生产的生物航煤转化技术还很少。

### 2.1 认证与商业飞行

可持续航空燃料认证最早由美国材料实验

协会 ASTM 提出。2009 年,ASTM D7566 批准了费托合成石蜡煤油 (FT-SPK) 工艺作为第一种用于商业飞行的生物燃料。很快之后,ASTM D7566 于 2011 年批准了酯和脂肪酸加氢合成石蜡煤油 (HEFA) 工艺生产的燃料。2014 年,ASTM D7566 批准了第三种生产途径,糖发酵加氢合成异构烷烃 (SIP)。到 2021 年为止,FT 合成石蜡煤油加芳烃 (FT-SPK/A),醇合成石蜡煤油 (ATJ-SPK),催化水热解 (CHJ),烃、酯和脂肪酸加氢合成石蜡煤油 (HC-HEFAs) 都已经得到 ASTM D7566 认证<sup>[17]</sup>。表 2 总结了目前已经得到 ASTM D7566

表 2 ASTM D7566<sup>[17]</sup>和 ASTM D1655<sup>[30]</sup>认证的生物航煤生产技术

Table 2 Bio-jet fuel production technology certified by ASTM D7566<sup>[17]</sup> and ASTM D1655<sup>[30]</sup>

Annex	Technology types	Feedstock	Feedstock sources	Blend requirement (max.)	Certification date	Technology developer/licensor <sup>[31]</sup>
ASTMD 7566A1	Fischer-Tropsch hydroprocessed synthesized paraffinic kerosine (FT-SPK)	Syngas	Coal, natural gas, biomass	50%	2009	Sasol, Shell, Velocys, Johson Mathey/BP...
ASTMD 7566A2	Synthesized paraffinic kerosene from hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA-SPK)	Fatty acids and fatty acid esters	Plant and animal fats, oils, and greases...	50%	2011	UOP/ENI, Axens IFP, Neste, Haldor-Topsoe, UPM, Shell, REG...
ASTMD 7566A3	Synthesized iso-paraffins from hydroprocessed fermented sugars (SIP)	Sugars	Sugars from direct (cane, sweet sorghum...) and indirect sources (C <sub>5</sub> and C <sub>6</sub> sugars hydrolyzed from cellulose)	10%	2014	Amyris
ASTMD 7566A4	Fischer-Tropsch hydroprocessed synthesized paraffinic kerosine plus aromatics (FT-SPK/A)	Syngas	Same as A1, with the addition of some aromatics derived from non-petroleum sources	50%	2015	Sasol
ASTMD 7566A5	Alcohol-to-jet synthetic paraffinic kerosene (ATJ-SPK)	C <sub>2</sub> -C <sub>5</sub> alcohols	C <sub>2</sub> -C <sub>5</sub> (same as A3), or those produced from microbial conversion of syngas	50%	2016	Gevo, Lanzatech...
ASTMD 7566A6	Catalytic hydrothermolysis jet (CHJ)	Fats, oils, greases	Same as A2	50%	2020	Applied Research Associates (ARA) / CLG
ASTMD 7566A7	Synthesized paraffinic kerosene produced from hydroprocessed hydrocarbons, esters and fatty acids (HC-HEFAs)	Algal oils	<i>Botryococcus braunii</i> species of algae	10%	2020	IHI Corporation
ASTM D1655 A1	Co-processing	Lipids, biocrude	Plant oils and animal fats, unrefined hydrocarbon content coming from an FT reactor	5%	-	BP, Fulcrum...

和 ASTM D1655 认证的生物航煤制备工艺的相关信息, 包括: 所需原料、与传统航煤的最大混合比例、获得认证的时间、工艺的发明者或者已经得到对该工艺认证的公司。

航空生物燃料作为一种航空替代燃料, 2008 年由英国维珍大西洋航空公司首次使用完成试飞。在我国, 中国石油、中国石化等能源公司与航空公司、飞机制造商、中国航油等合作, 先后完成了 2 次航空生物燃料验证飞行和 2 次载客商业飞行<sup>[32]</sup>。到 2019 年 12 月, 全球已经有超过 215 000 次商业航班使用可持续航空燃料飞行, 并且 40 家航空公司签署了 60 亿升生物航煤的长期采购协议<sup>[33]</sup>。

## 2.2 商业化进展

大多数生物航煤的最低售价高于传统航煤的售价 (表 3)。原料成本、设备成本和运营成本等都对生物航煤的价格有很大影响。研究表明原料成本可以占到 HEFA 航煤总成本的 80%<sup>[8]</sup>。由于原料的价格浮动大, 即使是同一种原料, 不同季节、不同地点的价格变化都很大, 从而导致 HEFA 航煤的价格浮动很大。ATJ 航煤的价格主要取决于醇的制备工艺, 不同的醇制备工艺及制备醇的原料对 ATJ 的价格影响很大。CHJ 和 HDCJ 工艺的原料转化率比

表 3 生物航煤技术的能效和最低售价

Table 3 Energy efficiency and minimum jet fuel selling price (MJFSP) of bio-jet fuel technology

Process	Energy efficiency <sup>[34]</sup>	MJFSP (\$/GJ) <sup>[34]</sup>
ATJ	0.91	4–215
HEFA	0.71–0.77	23–310
CHJ	0.58–0.89	31–108
HDCJ	0.60–0.80	37–60
FT	0.40–0.53	34–82
DSHC	0.50	>104
APR	0.32	58
Co-processing	–	–

The selling price of conventional jet fuel (around 18 \$/GJ)

较高, 价格相对稳定。相比较其他方法, FT 法的固定资产成本占比非常大<sup>[8]</sup>, 但由于 FT 法可以处理多种原料 (生物质、城市固体废物等) 且部分原料 (城市固体废物) 几乎没有成本, 所以 FT 航煤不仅售价比较低且价格浮动比较小。DSHC 工艺更适合制备高价值的中间产物而不是航煤。APR 制备航煤的价格不仅比较适中, 而且浮动也不算大。

此外, 对生物航煤发展有重要影响的是政府的决策。欧洲提出强制性要求在欧盟机场加油的飞机必须添加生物航煤, 这大幅促进了生物航煤的需求。但并非政府决策一定是先导性的, 例如新西兰、澳大利亚的航空公司就比政府先一步规划了生物航煤的添加需求。目前, 在中国, 生物航煤的政策还处于萌芽阶段, 由于只有倡议性而非强制性政策, 生物航煤目前在中国并没有明朗的市场。但随着国际生物航煤市场的变化, 中国的生物航煤市场在未来必然会有显著的变化。

燃料准备级别 (fuel readiness level, FRL) 是商业航空燃料替代倡议 (Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative, CAAFI) 提出的可替代燃料生产路径技术和商业成熟度的评价方式<sup>[34]</sup>。FRL 分为 1 到 9 级。其中 1–5 级是研发阶段, 6–7 级是认证阶段, 8–9 级是商业化阶段。此外, 技术准备水平 (technology readiness level, TRL) 范围从 1“基础技术研究”到 9“非常成熟的技术”评价了不同工艺的技术成熟度<sup>[35]</sup>。表 4 总结了不同技术制备生物航煤的 TRL 和 FRL 级别。

迄今为止, HEFA 是最为成熟和使用最广泛的生物航煤生产技术。HEFA 的代表性工艺主要有 Honeywell UOP 公司开发的 Ecofining 和 Renewable Jet Process 工艺、美国能源与环境研究中心 (EECR) 开发的两段加氢工艺、



美国 Syntroleum 公司开发的 bio-synfining 工艺、芬兰 Neste Oil 公司开发的 NExBTL 工艺和中国石化石油化工科学研究院开发的两段加氢工艺。上述 5 种工艺技术均较成熟, 都已完成了技术中试或工业示范<sup>[29]</sup>。由于政策原因, HEFA 技术目前主要被用来生产生物柴油, 全球 HEFA 生物柴油的年产量约  $5 \times 10^9$  L (表 5)。但如果需要生产生物航煤, HEFA 生产生物柴油的公司可以通过改变截取馏分温度或进一步裂化等方式增加生物航煤的产量<sup>[7]</sup>。

表 4 生物航煤技术的 TRL 和 FRL

Table 4 TRL and FRL of bio-jet fuel technology

Process	TRL level <sup>[35]</sup>	FRL level <sup>[35-36]</sup>
ATJ	6-8	7-8
HEFA	9	9
CHJ	4-6	6
HDCJ	-	6
FT	6-8	6-8
DSHC	7-9	5-8
APR	-	6
Co-processing	7-8	6-7

表 5 现有 HEFA 生物燃料的主要运营商和年产量<sup>[7]</sup>

Table 5 Current world annual production capacity of HEFA drop-in biofuels<sup>[7]</sup>

Company	Location	Capacity (L/year)
Neste	USA	$1.26 \times 10^9$
Neste	Singapore	$1.26 \times 10^9$
Neste	Finland	$2.40 \times 10^8$
Neste	Finland	$2.40 \times 10^8$
ENI	Italy	$4.50 \times 10^8$
Diamond Green Diesel	USA	$5.00 \times 10^8$
UPM	Finland	$1.20 \times 10^8$
World Energy	USA	$1.50 \times 10^8$
Renewable Energy Group	USA	$3.15 \times 10^8$
Emerald Biofuels	USA	$3.30 \times 10^8$

作为最早得到 ASTM 认证的 FT 工艺, 其商业化进展相对较慢。1999 年, 煤基的 FT 喷气燃料已经与传统航煤混合用于商业飞行。2012 年, 天然气制备的 FT 喷气燃料也已经商业化生产<sup>[36]</sup>。然而, FT 生物航煤目前还没有完全商业化。日本三菱重工与 JERA Co. Inc., Toyo Engineering Corporation 以及日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 合作, 在 2017 年至 2020 年间完成了 FT 生物质制航煤的中试及工业示范, 并计划于 2030 年实现该项目的商业化生产<sup>[37]</sup>。根据 CAAFI 报道, Fulcrum Bioenergy、Red Rock、Biofuels 和 Velocys 都正在推进生物质 FT 制备航煤的商业化进程<sup>[7]</sup>。此外, 国泰航空、西南航空公司、联邦快递和英国航空公司已在商业飞行中使用过 FT 燃料<sup>[36]</sup>。

ATJ 生产的生物喷气燃料已在 2012 年用于 A-10 飞机 (美国空军) 和 2014 年的 F/A-18 霍纳战斗机 (美国海军)<sup>[38]</sup>。但到目前为止, ATJ 工艺生产生物喷气燃料还没有商业化生产。ATJ 航煤的研发主要由 Gevo 和 Lanza Tech 公司推动<sup>[6]</sup>。此外, 其他公司, 包括 BYOGY、Cobalt、Swedish Biofuels、Terrabon、UOP、Zechem 和 Vertimass 也对 ATJ 有一定的研究<sup>[7]</sup>。

DSHC 路线是 Armyris 公司在其开发的糖发酵制法尼烯技术基础上提出的。Armyris 公司生产的 SIP 产品不仅于 2014 年 6 月通过了 ASTM D7566 认可, 还于 2014 年 9 月完成了燃料试飞。Armyris 和 Total 公司在巴西建成一套以蔗糖为原料的  $4 \times 10^4$  t/年生物燃料生产装置<sup>[32]</sup>。

### 3 生物航煤产业的机遇与挑战

值得注意的是, 我国本身是一个石油高度依赖进口的国家。2017 年, 我国首次超过美国成为世界上最大的原油进口国, 进口依存度达到 67.4%。此外, 我国还是能源消耗大国。随

随着我国经济的快速发展,2008–2017年,成品油的年表观消费量从 $2.05 \times 10^8 \text{ t}$ 增加到 $3.15 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[39]</sup>。在这种情况下,对于海外石油资源的高度依赖是非常危险的。因此,为了保障国家安全,我国很有必要通过开发多种能源,确保将能源掌握在自己的手中。特别是在国家“十四五双碳”目标的号召下,生物航煤的发展不仅是有前景的,更是必需的。

尽管生物航煤的需求正在快速增加,但在它取代化石燃料之前还有许多挑战需要克服,如:原料可利用性、技术经济性、可持续性等。

在长期发展中,原料的可持续是生物航煤商业化的重要挑战。生物航煤的生产原料应该具有产量大、分布广、价格低、获取途径方式多、不与粮食生产竞争、不造成森林砍伐等特点。原料可以长期并大规模生产的关键是研发出需要最少的土地、水以及营养的原料。此外,充分利用餐饮废油、城市固体垃圾等,也是提高原料可利用性的理想方案。目前,中国的餐饮废油依然约有40%–60%会通过不法手段回到餐桌上,这不仅无法保障食品安全,也没有将餐饮废油发挥出更高的价值<sup>[40]</sup>。针对这一情况,可以向欧盟学习,政府通过政策实施,强制要求必须使用部分生物燃料,进而提高餐饮废油的回收率。

可替代航空燃料发展的最大阻碍是经济性。现有生物航煤的价格远高于传统的化石喷气燃料。提高可替代航煤竞争力的关键因素是降低市场价格。政府可以通过实施激励措施和针对环境效益补偿机制为航空公司购买燃料弥补差价,比如:推广碳税等。此外,影响生物航煤生产的经济性的主要因素包括原料价格、运营成本、设备成本、转化效率、产品产量以及馏分燃料和副产品的售价<sup>[41]</sup>。所以,进一步

降低成本应侧重于提高原料产率,研发性价比更高的催化剂,降低设备成本,优化反应条件、工厂规模,增加副产品的价值等。比如,以APR工艺为例,在将糠醛转化成航煤的过程中,同时将糠醛转化为糠醇、甲基咪喃等高附加值产品,以提高总生产路线的经济价值,弥补生物航煤的经济“损失”。另外,不单一生产生物航煤,而是将生物低碳能源作为产业整体布局,可以更有效地降低生物能源的成本,提高整个产业的利润。

除了原料的可用性和技术的经济性,可持续性也是生物航煤发展的一个重要问题。商业化大规模生产生物航煤可能会对环境、社会和经济造成广泛的后果。例如,生物质的大量生产可能会造成土地和水资源的过度利用、破坏生物多样性、土壤流失等问题,甚至会影响城镇的发展<sup>[8]</sup>。因此,以可持续发展为目标,制定并推动可持续使用替代燃料的政策是必要的。

## 4 结语

利用可再生生物资源生产航空燃料是航空工业减少对化石燃料依赖、实现碳减排目标的一种很有前景的途径。原料的可用性、技术的经济性和可持续性为航空燃料商业化的主要挑战。短时间内,生物航煤的价格很难与传统航煤竞争,应该通过政策的支持以及技术的进步使生物航煤具有市场竞争力。HEFA是目前唯一实现了完全商业化的生物航煤制备工艺。考虑到技术的成熟度和经济性,短期内,FT工艺比较有可能实现商业化生产。

## REFERENCES

- [1] IATA annual review 2021[EB/OL]. [2022-3-29]. <https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0b>

- b4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2021.pdf.
- [2] IATA fact sheet 4: strategic direction the wedge chart [EB/OL]. [2022-4-6]. <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-the-wedge-chart.pdf>.
- [3] IATA carbon offsetting for international aviation [EB/OL]. [2022-3-29]. <https://www.iata.org/contentassets/fb745460050c48089597a3ef1b9fe7a8/paper-offsetting-for-aviation.pdf>.
- [4] ICAO environmental report 2019\_chapter 6[EB/OL]. [2022-4-6]. [https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/ICAO%20Environmental%20Report%202019\\_Chapter%206.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/ICAO%20Environmental%20Report%202019_Chapter%206.pdf).
- [5] Gutiérrez-Antonio C, Gómez-Castro FI, De Lira-Flores JA, et al. A review on the production processes of renewable jet fuel. *Renew Sustain Energy Rev*, 2017, 79: 709-729.
- [6] Geleynse S, Brandt K, Garcia-Perez M, et al. The alcohol-to-jet conversion pathway for drop-in biofuels: techno-economic evaluation. *ChemSusChem*, 2018, 11(21): 3728-3741.
- [7] Van Dyk S, Saddler J. Progress in commercialization of biojet/sustainable aviation fuels (SAF): technologies, potential and challenges, IEA bioenergy task 39, 2021 [EB/OL]. [2022-4-6]. <https://task39.sites.olt.ubc.ca/files/2021/08/Task-39-Progress-in-the-commercialisation-of-biojet-fuels-FINAL-August-2021.pdf>.
- [8] Wei HJ, Liu WZ, Chen XY, et al. Renewable bio-jet fuel production for aviation: a review. *Fuel*, 2019, 254: 115599.
- [9] Kennes D, Abubackar HN, Diaz M, et al. Bioethanol production from biomass: carbohydrate vs syngas fermentation. *J Chem Technol Biotechnol*, 2016, 91(2): 304-317.
- [10] Zhang MH, Yu YZ. Dehydration of ethanol to ethylene. *Ind Eng Chem Res*, 2013, 52(28): 9505-9514.
- [11] Brooks KP, Snowden-Swan LJ, Jones SB, et al. Low-carbon aviation fuel through the alcohol to jet pathway. *Biofuels for Aviation*. Amsterdam: Elsevier, 2016: 109-150.
- [12] Morgan T, Santillan-Jimenez E, Harman-Ware AE, et al. Catalytic deoxygenation of triglycerides to hydrocarbons over supported nickel catalysts. *Chem Eng J*, 2012, 189/190: 346-355.
- [13] Galadima A, Muraza O. Catalytic upgrading of vegetable oils into jet fuels range hydrocarbons using heterogeneous catalysts: a review. *J Ind Eng Chem*, 2015, 29: 12-23.
- [14] Fu J, Lu XY, Savage PE. Hydrothermal decarboxylation and hydrogenation of fatty acids over Pt/C. *ChemSusChem*, 2011, 4(4): 481-486.
- [15] Lu MZ, Liu XJ, Li YQ, et al. Hydrocracking of bio-alkanes over Pt/Al-MCM-41 mesoporous molecular sieves for bio-jet fuel production. *J Renew Sustain Energy*, 2016, 8(5): 053103.
- [16] Kandaramath Hari T, Yaakob Z, Binitha NN. Aviation biofuel from renewable resources: routes, opportunities and challenges. *Renew Sustain Energy Rev*, 2015, 42: 1234-1244.
- [17] ASTM D7566-21, Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons [S] .
- [18] Li LX, Coppola E, Rine J, et al. Catalytic hydrothermal conversion of triglycerides to non-ester biofuels. *Energy Fuels*, 2010, 24(2): 1305-1315.
- [19] Luque R, De La Osa AR, Campelo JM, et al. Design and development of catalysts for biomass-to-liquid-Fischer-Tropsch (BTL-FT) processes for biofuels production. *Energy Environ Sci*, 2012, 5(1): 5186-5202.
- [20] Leckel D. Diesel production from Fischer-Tropsch: the past, the present, and new concepts. *Energy Fuels*, 2009, 23(5): 2342-2358.
- [21] Daniell J, Köpke M, Simpson S. Commercial biomass syngas fermentation. *Energies*, 2012, 5(12): 5372-5417.
- [22] Fei Q, Guarnieri MT, Tao L, et al. Bioconversion of natural gas to liquid fuel: opportunities and challenges. *Biotechnol Adv*, 2014, 32(3): 596-614.
- [23] Al-Zuhair S, Ahmed K, Abdulrazak A, et al. Synergistic effect of pretreatment and hydrolysis enzymes on the production of fermentable sugars from date palm lignocellulosic waste. *J Ind Eng Chem*, 2013, 19(2): 413-415.
- [24] Wang WC, Tao L. Bio-jet fuel conversion technologies. *Renew Sustain Energy Rev*, 2016, 53: 801-822.
- [25] Tompsett GA, Li N, Huber GW. Catalytic conversion of sugars to fuels. *Thermochemical Processing of Biomass*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011: 232-279.
- [26] Bidy M, Jones S. Catalytic Upgrading of Sugars to Hydrocarbons Technology Pathway. Office of scientific and technical information (OSTI), 2013.
- [27] Blommel PG, Cortright RD. Production of conventional liquid fuels from sugars, Madison: Virent Energy Systems, Inc, 2008: 1-14.
- [28] Román-Leshkov Y, Barrett CJ, Liu ZY, et al. Production of dimethylfuran for liquid fuels from biomass-derived carbohydrates. *Nature*, 2007,

- 447(7147): 982-985.
- [29] 乔凯, 傅杰, 周峰, 等. 国内外生物航煤产业回顾与展望. 生物工程学报, 2016, 32(10): 1309-1321.  
Qiao K, Fu J, Zhou F, et al. Progress and prospect of bio-jet fuels industry in domestic and overseas. Chin J Biotech, 2016, 32(10): 1309-1321 (in Chinese).
- [30] IATA sustainable aviation fuels fact sheet 2019[EB/OL]. [2022-4-6]. <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-fact-sheet-2019.pdf>.
- [31] ASTM D1655-05, standard specification for aviation turbine fuels [S].
- [32] 何皓, 邢子恒, 李顶杰, 等. 可持续航空生物燃料的推广应用及行业影响与应对措施. 化工进展, 2019, 38(8): 3497-3507.  
He H, Xing ZH, Li DJ, et al. Industry impact and countermeasures for the promotion and application of sustainable aviation biofuel. Chem Ind Eng Prog, 2019, 38(8): 3497-3507 (in Chinese).
- [33] Csonka S. Aviation's market pull for SAF (Sustainable aviation fuel), CAAFI, 2021[EB/OL]. [2022-4-6]. [https://www.caafi.org/focus\\_areas/docs/CAAFI\\_SAF\\_Market\\_Pull\\_from\\_Aviation\\_September2021.pdf](https://www.caafi.org/focus_areas/docs/CAAFI_SAF_Market_Pull_from_Aviation_September2021.pdf).
- [34] CAAFI 对 FRL 的介绍 [EB/OL].[2022-03-28]. [https://caafi.org/tools/Fuel\\_Readiness\\_Level.html](https://caafi.org/tools/Fuel_Readiness_Level.html).
- [35] Dahal K, Brynolf S, Xisto C, et al. Techno-economic review of alternative fuels and propulsion systems for the aviation sector. Renew Sustain Energy Rev, 2021, 151: 111564.
- [36] Mawhood R, Gazis E, Jong SD, et al. Production pathways for renewable jet fuel: a review of commercialization status and future prospects. Biofuels Bioprod Biorefining, 2016, 10(4): 462-484.
- [37] Fujii A, Inada K, Takahashi H, et al. Development of bio-jet fuel production system. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2021, 58(3): 1.
- [38] Lim JHK, Gan YY, Ong HC, et al. Utilization of microalgae for bio-jet fuel production in the aviation sector: challenges and perspective. Renew Sustain Energy Rev, 2021, 149: 111396.
- [39] Yuan M, Zhang HR, Wang BH, et al. Downstream oil supply security in China: policy implications from quantifying the impact of oil import disruption. Energy Policy, 2020, 136: 111077.
- [40] Zhao YH, Wang CB, Zhang LX, et al. Converting waste cooking oil to biodiesel in China: environmental impacts and economic feasibility. Renew Sustain Energy Rev, 2021, 140: 110661.
- [41] Bond JQ, Upadhye AA, Olcay H, et al. Production of renewable jet fuel range alkanes and commodity chemicals from integrated catalytic processing of biomass. Energy Environ Sci, 2014, 7(4): 1500-1523.

(本文责编 郝丽芳)