

可持续航空煤油制备技术进展

胡亦工¹, 刘 强¹, 刘炳昱², 王奕皓², 李文慧², 郭新闻²

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013;

2. 大连理工大学 化工学院 精细化工全国重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:随着化石能源枯竭和碳减排压力日益增大,可持续航空煤油在航空业实现2050年净零排放目标中的作用越发显著。目前,可持续航空煤油制备技术多样,具有原料来源广泛和反应机制复杂等特点。对油脂加氢、生物质气化等可持续航空煤油制备技术进行了综述,重点分析了不同技术的原料可持续性、反应机理和工艺流程等,并从经济性、原料类型和二氧化碳减排贡献等维度对各技术进行了评估,以为可持续航空煤油制备技术选择和产业战略布局提供参考。

关键词:可持续航空煤油;碳减排;生物质;二氧化碳

中图分类号:TQ51 文献标志码:A 文章编号:2097-2547(XXXX)XX-001-16

Research progress on sustainable aviation fuel preparation technologies

HU Yigong¹, LIU Qiang¹, LIU Bingyu², WANG Yihao², LI Wenhui², GUO Xinwen²

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, Shandong, China; 2. State Key Laboratory of Fine Chemicals, School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: With the depletion of fossil fuels and increasing urgency to reduce carbon emissions, the role of sustainable aviation fuel (SAF) in achieving the aviation industry's 2050 net-zero emissions target has become increasingly prominent. Currently, the SAF preparation technologies are diverse, characterized by a wide range of feedstock sources and complex reaction mechanisms. Various SAF preparation technologies were reviewed, such as lipid hydroprocessing and biomass gasification, and the feedstock sustainability, reaction mechanisms and process flows of different technologies were mainly analysed. The assessment of each technology was conducted from economic feasibility, feedstock types and carbon reduction contributions, aiming to provide insights for the selection of SAF production technologies and strategic industrial planning.

Keywords: sustainable aviation fuel; carbon emission reduction; biomass; carbon dioxide

二氧化碳过度排放导致温室效应加剧,各国减排政策不断细化升级,这对航空业的可持续发展提出了更高要求。2023年,化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放量为 368×10^8 t,国际航空业当年二氧化碳排放量为 10×10^8 t左右^[1-3]。为应对全球气候变化和化石能源枯竭等挑战,国际民用航空组织(ICAO)在2016年10月召开的第39次全体成员国大会中提出了碳抵消和减排机制(CORSIA),其主要规划见图1^[4]。2021年10月,在国际航空运输协

会(IATA)的第77届年会上,全球航空运输业关于在2050年实现净零碳排放的决议正式通过。2022年10月,ICAO在第41届大会上通过决议,设定国际航空业在2050年实现净零碳排放的长期愿景目标(LTAG)。LTAG在CORSIA的基础上,从技术、运营和燃料等方面提出了变革措施以实现碳减排^[5-6]。

欧盟针对航空业碳排放超标和罚款情况进行了严格规定,我国发布了《绿色航空制造业发展纲要(2023—2035年)》和《“十四五”可再生能源发展

收稿日期:2025-11-03;修回日期:2025-12-16。

基金项目:国家重点研发计划子课题(2024YFB4105401);国家自然科学基金面上项目(22472017);辽宁滨海实验室联合专项开放创新基金(LBLG-2024-06);中央高校基本科研业务费(DUT24RC(3)071)。

第一作者:胡亦工(1968—),硕士,教授级高级工程师,研究方向为绿色氢基能源领域工程设计,E-mail:huyigong@spic.com.cn。

通信作者:李文慧(1989—),博士,副教授,研究方向为二氧化碳加氢转化,E-mail:liwh@dlut.edu.cn;

郭新闻(1967—),博士,教授,研究方向为新能源催化转化,E-mail:guoxw@dlut.edu.cn。

规划》，提出大力发展非粮生物质液体燃料，支持生物柴油、生物航空煤油等领域先进技术装备研发和推广使用^[7]。

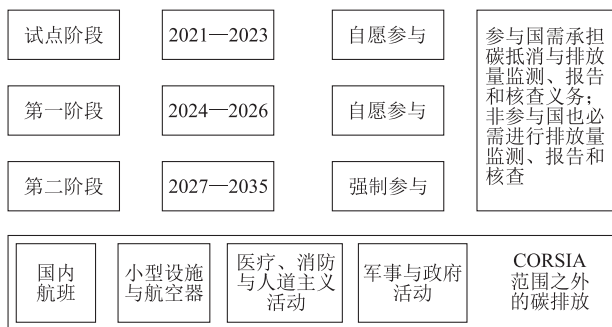


图1 CORSIA 主要规划^[4]

Fig. 1 Principal design of CORSIA^[4]

根据 CORSIA, 航空业实现净零排放的主要途径包括大规模应用可持续航空煤油(SAF)、开发新能源技术(如电动飞机、氢能飞机)、提高航空公司及机场的运营效率、碳捕集与封存和碳抵消等(图2)。

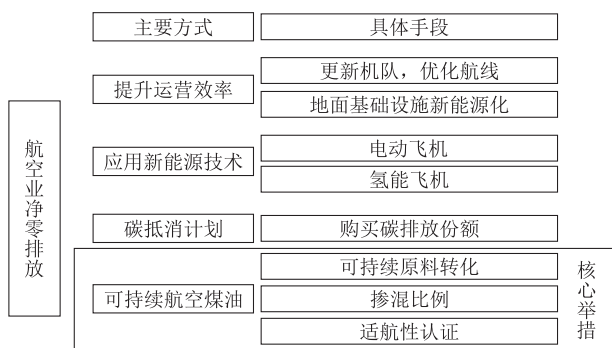


图2 国际航空业实现净零排放的主要途径

Fig. 2 Main approaches for international aviation industry to achieve net-zero emission

目前,航空业减排仍面临硬性二氧化碳排放量难以降低、技术瓶颈突出等问题^[8-9]。实现 IATA 净零排放的核心举措是再生航空煤油的开发与应用。可持续航空煤油具有降碳性能显著、兼容性强和可持续性高等特点,其性质和组成与传统航空煤油相似,目前主要通过按一定比例与传统航空煤油掺混的方式进行应用。与传统航空煤油相比,可持续航空煤油在生产-运输-消费的全生命周期内具有显著的碳减排效果。由于可持续航空煤油能够直接与传统航空煤油混合进行替代,与大规模应用氢能飞机或电动飞机相比,应用再生航空煤油无需对现有航空业燃料的储存-运输-消费供应链进行重构,也无需对地面基础设施和飞机型号进行重复开发,是一种极具潜力的碳减排方案。可持续航空煤油的原料与制备过程都应符合可持续标准,包括

原料可持续性(非化石能源)、制备工艺可持续性(可再生能源驱动)等。IATA 计划在 2025 年生产 79×10^8 L 可持续航空煤油(在燃料需求中占比 2%),到 2050 年产量提升至 4490×10^8 L(占比 65%)^[10]。

本文首先对主要可持续航空煤油制备技术进行总结,包括油脂加氢和气化-费托合成等,通过分析其原料类型、工艺流程和工业应用实例等呈现可持续航空煤油制备技术发展现状,并对各技术存在的技术瓶颈等进行分析。然后,对不同技术在不同时间节点的应用优势等进行分析。最后,基于我国航空业发展的战略需求与新能源产业大发展的时代背景,对未来可持续航空煤油产业发展进行展望。

1 可持续航空煤油制备技术

从原料来源来看,目前正在开发的可持续航空煤油可分为生物质基、塑料(主要是废旧塑料)基和二氧化碳基可持续航空煤油,其制备技术见图3。其中,生物质原料来源广泛且资源丰富、易得,目前已有多种技术可用于将不同生物质资源转化为可持续航空煤油,但各种技术的成熟度存在明显差异,如以废弃油脂作为原料的油脂加氢技术是我国唯一已开展工业化试点的技术路线^[11-13]。生物质气化(GTJ)技术路线是先将生物质气化,随后将获得的合成气转化为航空煤油,该技术适用的原料范围较广。电力燃料(PTL)技术路线是将直接空气捕集或工业定点捕集的二氧化碳进行加氢转化,该技术制备的二氧化碳基可持续航空煤油的全生命周期碳减排程度较高,但目前技术成熟度较低,尚处于实验室研究阶段。

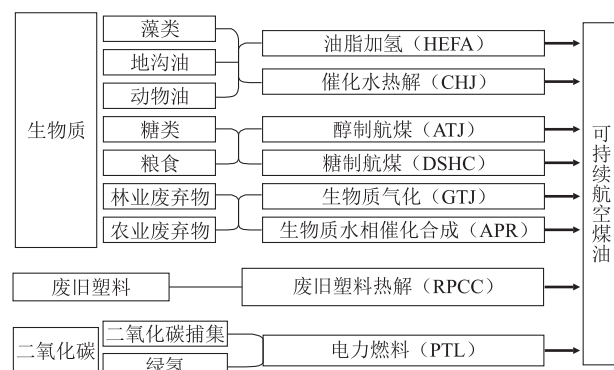


图3 SAF 制备技术

Fig. 3 SAF preparation technologies

传统航空煤油的组分较为复杂,主要包括碳数为 8~16 的正构烷烃(质量分数 20%~26%)、异构烷烃(质量分数 30%~37%)、环烷烃(质量分数 19%~25%)

和芳烃(质量分数14%~19%)。在可持续航空煤油的生产过程中,单一技术路线获得产品的烃类组成难以与传统航空煤油完全一致,进而在热值、冰点、闪点和抗爆性等方面与传统航空煤油存在一定差异。因此,需根据各种路线所得产品中各组分含量标准严格要求可持续航空煤油的掺混上限,以保证航空燃料在应用过程中的稳定性。目前,不同技术生产的可持续航空煤油的最大掺混比例见表1^[14-15]。

表1 不同技术生产的SAF的最大掺混比例^[14-15]

Table 1 Maximum blending ratios of SAF produced by different technologies^[14-15]

技术 ^①	SAF最大掺混比例 ^② /%
费托合成油改质	50
油脂加氢	50
合成异构烷烃	10
调入合成芳烃的费托合成	50
醇制喷气燃料	50
合成催化热裂解	50
基于藻类的脂肪酸加氢	10
醇制含芳烃的喷气燃料	50

注:①均已经过认证;②以体积分数计。

1.1 油脂加氢

油脂加氢技术是以废弃油脂(如地沟油、动物脂肪)、植物油(如棕榈油、菜籽油)和藻油等作为原料制备可持续航空煤油的路线。在该技术路线中,其生产和消费全生命周期的二氧化碳排放量较传统航空煤油明显降低,且不以石油等化石能源作为原料,因此该技术路线制备的航空煤油被认为是可

持续航空煤油^[16-18]。通过油脂加氢技术生产的可持续航空煤油在2011年通过了美国材料与试验协会(ASTM)D7566标准认证。

1.1.1 技术路线

油脂加氢技术主要以含有饱和和/或不饱和脂肪酸的甘油三酯作为原料进行可持续航空煤油生产^[19-21],其生产步骤与生物柴油的生产步骤相似。原料油脂经脱硫、脱磷和脱金属等预处理步骤后,进入加氢脱氧(HDO)反应器中,然后在300~400℃、5~10 MPa的条件下,甘油三酯和脂肪酸一步转化为烷烃,原料中氧原子主要以H₂O、CO和CO₂的形式被脱除,烷烃产物为以C₁₆、C₁₈为主的直链正构生物烷烃。现有工艺的主要目标是促进主反应加氢脱氧,抑制副反应加氢脱羧,从而降低含碳气相产物含量,提高碳利用率和氢利用率^[17]。在该路径中,可用于生产航空煤油的原料主要有藻油、蓖麻油、大豆油、菜籽油、餐饮废油、棕榈油、麻疯树油和椰子油等植物油^[22-28]。

在获得直链正构烷烃后,一般还会对其进行二段加氢,经异构化转化为具有较低凝固点的支链烷烃,使燃料(主要为碳原子数为9~15的正构、异构烷烃混合物)能够满足复杂工况下的性能要求^[29]。工业领域主要采用具有金属位点(用于加氢-脱氢)和酸性位点(用于异构化)的双功能催化剂催化该反应^[30],如Pd、Pt等贵金属与分子筛组成的双功能催化剂^[31]。此外,成本较低的非贵金属(Ni、W和Cu)可作为双功能催化剂的金属位点^[32-33]。油脂加氢技术路线见图4^[34]。

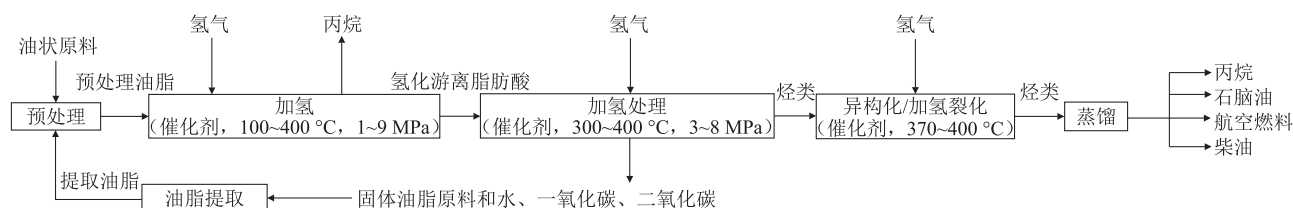


图4 油脂加氢技术路线^[34]

Fig. 4 Route of hydroprocessed esters and fatty acids technology^[34]

油脂加氢技术的核心优势在于技术成熟度高、工艺流程相对简单且原料来源广泛。该技术通过加氢脱氧、异构化和分馏等步骤,将动植物油脂、废弃食用油等生物质原料转化为与传统航空煤油化学性质相近的烃类,产物能够与传统航空煤油直接掺混使用,无需改造现有航空发动机和燃料基础设施,兼容性好。此外,油脂加氢技术的原料适应性广,不仅可利用大豆油、棕榈油等植物油脂^[35],还适

用于氧含量(质量分数,下同)高达11%的废弃油脂(如地沟油)^[36]。

1.1.2 工业化进展

早在2006年,中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院就已经开展了以棕榈油和菜籽油为原料的生物航空燃料的生产技术开发,该技术先后以棕榈油、菜籽油和废弃油脂为原料成功生产了生物航空燃料,并以该燃料完成了首次商业飞行^[37]。

目前,中石化宁波镇海炼化有限公司已建成 10×10^4 t/a 生物航空煤油工业装置,该装置采用其自主知识产权的 SRJET 技术,以餐饮废油为主要原料。SRJET 技术采用多级加氢反应器系统,通过优化的催化剂级配技术和精确控制的反应条件,首先对原料进行加氢处理,去除氧(生成水)并将脂肪酸、甘油酯等转化为直链烷烃,然后通过加氢异构/裂化反应调整产物碳数分布,以最大化航空煤油组分选择性和产率。据测算,餐饮废油至生物航空煤油的转化率为 37% 左右,即处理 3 t 左右餐饮废油可产出 1 t 左右生物航空煤油。同时,SRJET 技术产出的生物航空煤油符合 ASTM D7566 标准的 HEFA-SPK 要求,并获得了中国民用航空局适航证书和全球可持续生物材料圆桌会议(RSB)的可持续性认证,其全生命周期二氧化碳排放量相比传统石油基航空煤油最高可降低 50% 以上^[38-40]。当装置满负荷运行时,每年可减少二氧化碳排放量约 8×10^4 t^[41]。目前,其产品已用于 C919、ARJ21 国产飞机试飞,并与波音、空客公司进行了合作验证。在 SRJET 技术基础上申请的专利 CN202410457273.2,可通过废水电解制氢实现 99% 水循环,结合“绿氢”降低“灰氢”碳排放。

山东三聚生物能源有限公司开发的油脂加氢技术以废弃动植物油脂为主要原料,通过加氢处理、异构化等关键步骤可产出符合标准的生物航空煤油。该公司已建成具备 5×10^4 t/a 生物航空煤油产能的装置,该装置于 2025 年 4 月完成建设并用于 20×10^4 t/a 生物柴油异构项目(试生产阶段),将生物航空煤油的产能提升至 11.57×10^4 t/a。该技术已获得了中国民用航空局颁发的《技术标准规定项目批准书》(CTSOA0308),并获得了国际认可的 ISCC CORSIA 和 ISCC-EU 认证,这为其进入国际市场奠定了基础^[42-43]。

1.1.3 技术瓶颈

尽管油脂加氢技术是目前可持续航空煤油生产中最成熟的技术路径之一,但其规模化应用的核心瓶颈在于复杂且高成本的预处理需求。餐饮废弃油脂中通常含有多种有害杂质,如磷脂、氯离子、金属离子(钙、镁、钠)和磷化合物。为满足油脂加氢技术对进料纯度的要求,原料必须经过脱胶、脱氯、脱金属和脱水等深度预处理。这一系列预处理涉及复杂的物理化学过程,能耗与物耗均较高。目前,油脂加氢技术的预处理成本在生产总成本中占比高达 20%~30%,成为影响其经济竞争力的关键负面因素^[44-45]。此外,油脂加氢技术生产生物质燃料

时多采用固定床加氢模式,部分工厂沿用了为石化柴油生产所设计的工艺路线和催化剂。然而,两种技术路线的原料性质等存在显著差异,导致工厂的生产效率差距明显,因此亟需进一步完善和优化工艺路线以匹配天然油脂高不饱和度和高氧含量的特点。为了提高反应效率、降低能耗和延长运行周期,当前亟需研发更高效、稳定且能适应复杂原料的催化剂和反应器。

1.2 生物质气化

生物质气化制航空煤油技术是将半纤维素、纤维素和木质素等生物质气化为合成气后,利用费托合成催化剂将其转化为合成油,然后对其进行加氢裂化和加氢异构化处理,最终得到可持续航空煤油的过程^[46]。生物质气化技术的原料来源较广,能充分利用农林废弃物和城市废弃物,在原料应用端和消费端都具有显著环境效益^[47]。

1.2.1 技术路线

(1) 固相生物质生成合成气

固相生物质生成合成气的原料较为广泛,如农林废弃物、废木材、锯末和造纸工业纤维废料,以及城市固体废弃物的有机组分。从反应温度来看,生物质气化技术的主要阶段包括生物质中水分蒸发(70~80 °C 及以上)和生物质中弱共价键断裂(200 °C 以上)。生物质气化技术的主要气相产物为一氧化碳、氢气、二氧化碳、甲烷、乙烷、乙烯和丙烷等,液相产物为焦油,固相产物为焦炭^[48]。

反应温度和气化剂等均对生物质气化技术的合成气产率有重要影响。NAGY 等^[49]使用固定床装置研究了食物残渣和橡木共水蒸气气化过程,发现固体残留物中碳含量从 72.1% (700 °C 下)降低到 61.7% (900 °C 下)。亚力昆江·吐尔逊等^[50]解耦分离了松木屑气化过程中热解、焦油重整以及半焦燃烧等反应,发现反应器温度等工艺条件对反应物转化率、气相产物组成和焦产率都有较大影响。

(2) 费托合成

费托合成是指合成气在催化剂表面转化为碳数为 1~n 的烯烃和烷烃产物的过程,传统费托合成通常以煤或天然气作为原料^[51-52]。将生物质气体制合成气与较成熟的费托合成进行耦合,可实现可持续航空煤油的生产。目前基于费托合成的航空燃料生产工艺主要有两种,其中高温费托技术(300~350 °C)主要产出汽油和烯烃,低温费托技术(220~250 °C)主要用于生产柴油、长链烷烃、费托蜡和润滑油。费托合成产物的碳数分布范围较广,最大可达 100,

其中碳数大于60的组分的质量分数在12%以上;同时,费托合成产物以正构烷烃为主,其质量分数大于90%,支链烷烃、环烷烃和芳烃的质量分数较低。

费托合成催化剂通常选用具有优异CO解离、加氢和链增长性能的Co、Fe和Ru作为活性组分,目前在工业生产中应用较多的费托合成催化剂是Fe基和Co基催化剂。费托合成直接制航空煤油的挑战在于突破Anderson-Schulz-Flory(ASF)分布规律对产物选择性的限制。研究人员通过制备双功能催化剂,将费托合成活性金属(如Co、Fe)与分子筛(如ZSM-5、Beta和Y型)相结合,通过金属中心的链增长与分子筛酸中心的裂解/异构化的协同作用调控产物分布。双功能催化剂可通过金属-分子筛协同作用突破ASF限制,直接将合成气转化为汽油、喷气燃料和柴油(图5)^[53]。目前,其工业应用已进入商业化阶段。

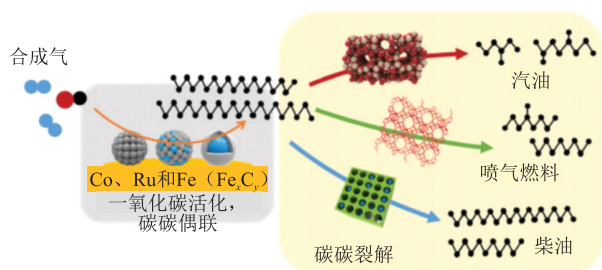


图5 双功能催化剂作用下合成气直接转化为汽油、喷气燃料和柴油示意图^[53]

Fig. 5 Schematic diagram of direct conversion of syngas to gasoline, jet fuel and diesel fuel with bifunctional catalysts^[53]

生物质气化是以生物质或煤为原料,经气化生成合成气后通过费托合成制航空煤油,具有原料适用性强等优势,生物质气化技术路线见图6^[54]。

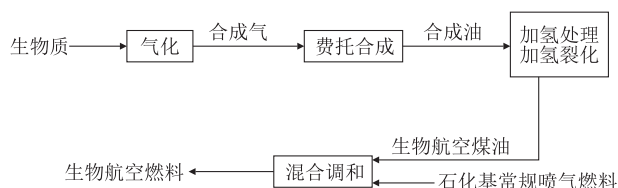


图6 生物质气化技术路线^[54]

Fig. 6 Route of biomass gasification technology^[54]

生物质气化技术的核心优势在于其原料的多样性和可再生性,无需占用耕地资源,避免了与粮食生产的直接竞争。技术上来说,生物质气化与费托合成均具备较高的技术成熟度。煤气化工程经验为生物质气化步骤的设计提供了重要参考。费托合成航空煤油的烃类组成虽与传统航空煤油存

在差异,但具有热值高、硫含量低和燃烧性能优异等优点,目前已通过部分国际认证(如ASTM D7566)。

1.2.2 工业化进展

ASTM D7566要求通过生物质气化技术生产的可持续航空煤油与传统石油基航空煤油的掺混比例最高可达50%。目前,生物质气化技术生产可再生航空煤油的工业示范装置主要有DG Fuels路易斯安那州工厂、Strategic Biofuels路易斯安那州工厂和DG Fuels内布拉斯加州工厂。

DG Fuels路易斯安那州工厂以甘蔗渣、森林废弃物等木质生物质废弃物作为原料。该项目每年计划采购价值 1.2×10^8 USD的甘蔗废料作为原料,设计年产能为 60×10^4 t,预计在2028年投产。该项目建成后将成为全球最大的非油脂加氢技术装置之一。目前,该项目的开发商已与达美航空、法荷航空等公司签订了采购协议,并与空客公司建立了战略伙伴关系以推动全球范围内可持续航空燃料的应用。Strategic Biofuels路易斯安那州工厂以林业剩余物、木材加工废料等木质生物质作为原料,计划在2029年投产一期工程,年产约 12×10^4 kL可持续航空燃料和石脑油。DG Fuels内布拉斯加州工厂以玉米秸秆等农业废弃物为原料,预期可持续航空煤油年产能为 1.93×10^8 加仑(1美制加仑 ≈ 3.785 L),计划在2030年投产。

1.2.3 技术瓶颈

生物质气化技术制备可持续航空煤油的技术瓶颈主要在于生物质原料成分复杂、原料能量密度较低和整体工艺流程能耗较高。生物质大分子气化需要较高的能耗,同时合成气净化和费托反应的高温高压条件进一步提高了能耗。从反应角度来看,由于费托合成的产物分布较广,焦油处理和催化剂寿命延长都是该路线的技术难点。

1.3 醇制航空煤油技术

醇制航空煤油技术是利用从富含碳水化合物生物质(如甘蔗、甜高粱、甜菜、厨余垃圾和玉米饲料)或木质纤维素基生物质(如谷物、稻草)中提取的水解物,使其发酵生产醇类(如乙醇和异丁醇),生成的醇类经过脱水、聚合和加氢步骤转化为可再生航空煤油的过程。目前,以乙醇和异丁醇作为中间体制备航空煤油的醇制航空煤油技术路线已通过ASTM认证。

1.3.1 技术路线

(1) 发酵

在发酵步骤中,采用基因编辑后的梭状芽孢杆

菌和大肠杆菌作为菌种,通过丙酮-丁醇-乙醇(ABE)发酵工艺生产异丁醇,而乙醇生产则大多通过酵母发酵完成^[55]。发酵步骤的温度取决于该过程使用的微生物,通常为20~95 °C。发酵后,通过膜分离、蒸馏和固体/液体分离等方式分离出醇类,此时得到的醇类产物通常为碳数为2~6的醇类混合物,包括乙醇、丙醇、丁醇、异丁醇和戊醇等^[56-65]。

(2)脱水、聚合和加氢

在异丁醇中间体路线中,产出的异丁醇通常在具有酸性位点的催化剂作用下脱水生成异丁烯,反应温度为250~350 °C^[66]。异丁烯在酸或金属基催化剂作用下发生低聚,形成分子长链烯烃($C_{10=}\sim C_{16=}$)和短链烯烃($C_{4=}\sim C_{8=}$)的混合物。其中,短链烯烃被分离并回收到低聚化单元中,长链烯烃($C_{10=}\sim C_{16=}$)则进行部分加氢,所得产物经分馏后能够产出碳数与航空煤油组分一致的混合烃。与油脂加氢和生物质气化技术制备的可持续航空煤油相比,该技术所得产物的芳烃含量较高,且更符合目前航空煤油的组分分布^[67-68]。

采用醇制航空煤油技术生产可持续航空煤油的优势在于其原料的多样性。除传统糖类作物外,还可利用从农林废弃物分离的木质纤维素等非粮原料。醇制航空煤油技术可依托成熟的生物乙醇工业基础,利用和整合现有工艺和装置。在农业资源丰富的地区,醇制航空煤油技术具有显著的成本优势。此外,醇制航空煤油技术可与多产品生物精炼厂结合,同步生产“绿氢”、生物沥青等高附加值产品,进一步提升其经济性。

1.3.2 工业化进展

美国 Gevo 公司利用加州大学筛选的大肠杆菌转基因菌株,实现了糖制异丁醇,并基于该技术进行了放大生产。2023年8月,Gevo公司以玉米基糖类发酵生产的异丁醇作为原料的示范项目已投产,实现了醇制航空煤油商业化应用^[69]。

在丹麦,科威工程咨询公司与瑞典生物燃料公司合作,计划在瑞典斯德哥尔摩阿兰达机场附近建设3处可持续航空燃料工厂。预计在2025年首次交付,年产能达 40×10^4 t。该项目使用霍尼韦尔公司开发的醇制航空煤油技术,从玉米基或纤维素乙醇出发生产航空煤油,全生命周期碳排放量较化石航空煤油降低了80%^[70]。

1.3.3 技术瓶颈

尽管醇制航空煤油技术的原料来源比较广泛,但其预处理过程能耗高、成本高昂。纤维素生物质

需经过粉碎、酸/酶水解等多道工序才能转化为可发酵糖,这一系列过程不仅需要使用高效催化剂,还会产生抑制发酵的副产物(如呋喃类化合物),导致原料转化效率降低。此外,由于生物质醇低能量密度的特点和生物质醇转化为航空煤油步骤繁琐的缺点,醇制航空煤油技术的能源转化效率普遍低于其他技术路线。同时,醇制航空煤油技术仍缺乏高产物选择性和高稳定性的低聚催化剂。

1.4 催化水热解技术

催化水热解技术于2020年通过了ASTM D7566认证。该技术以植物或动物脂肪、油脂和油作为原料,首先经催化裂解转化为低碳芳烃和低碳烯烃,再通过C1烷基化反应将其转化为芳烃,最后通过加氢反应定向转化为环烷烃^[71]。

1.4.1 技术路线

催化水热解技术可通过水热反应将油基原料转化为直链烃、支链烃和环烃的混合物。该技术主要包括水热预处理、催化水热裂解、水处理升级和产物分馏4个步骤。在水热预处理阶段,油基原料发生裂解,产生游离脂肪酸,同时去除杂原子(S、N和金属原子);生成的脂肪酸在高温(513~723 K)和高压(1.5~25.0 MPa)条件下进行裂解、水解、脱羧、异构化和环化等反应,生成直链烃和环烃的混合物^[72]。反应产物中水相主要是碳原子数为2~5的低分子量羧酸、甘油和极性小分子。水相产物通过脱羧和脱水转化为烯烃产物。这些产物通过醇回收(低聚化、氢化和蒸馏)升级为航空生物燃料。油相通过脱羧、氢化和蒸馏产出石脑油、煤油和柴油等^[73]。该技术路线生产的航空生物燃料主要包括高密度芳烃、异石蜡和环旋石蜡^[74]。

催化水热解技术的优势在于其原料多样性和可再生性。催化水热解技术的原料主要包括废弃油脂和非食用油脂。此外,市政固体废弃物衍生的微生物油脂作为原料的可行性也在探索之中。相较于其他可持续航空煤油生产技术路线,催化水热解技术的原料预处理要求较低。废弃油脂仅需简单净化除杂即可进入反应体系,这大大降低了能耗和成本。催化水热解技术通常与加氢技术进行集成,形成完整的“水热液化-加氢脱氧-分馏”链条。

1.4.2 工业化进展

美国 Applied Research Associates(ARA)公司和 Chevron Lummus Global(CLG)公司共同开发了一种催化水热解技术(BIC技术),该技术已于2019年通过了ASTM D7566认证,允许以最高50%的比例

与常规航空煤油混合使用。美国已有多个商业项目进入工程化阶段^[75]。日本 Euglena 公司在横滨的综合生物燃料 ISOCONVERSION 装置成功启动。该项目最初主要生产可再生柴油,但 Euglena 公司计划后续生产符合 ASTM 标准的催化水热解可持续航空煤油,并供应给日本商业航班使用^[76]。

1.4.3 技术瓶颈

催化水热解技术的挑战在于催化剂寿命和抗结焦性能。原料中游离脂肪酸和含氧化合物易使催化剂表面结焦,导致催化剂失活。从产品应用角度来看,航空煤油中需要质量分数为 14%~19% 的芳烃组分以保证密封材料溶胀性和燃烧稳定性,而 ASTM D7566 要求催化水热解技术制备的可持续航空煤油的芳烃组分必须源自脂类转化过程,这限制了原料选择的灵活性。从催化反应角度来看,催化水热解过程产生的二氧化碳和甲烷等气体副产物需进一步处理。此外,水热液化所需的高温高压条件导致能耗较高,其大规模工业化仍需依赖廉价可再生能源的支持。

1.5 糖制航空煤油技术

糖制航空煤油技术使用的原料为高糖含量作物、农业与食品加工工业废弃物和木质纤维素生物质(甘蔗、甜菜和甜高粱等)。含有纤维素和半纤维素工农业废弃物可经酸解或酶解过程转化为葡萄糖和木糖。在糖制航空煤油技术路线中,糖类原料能够不经过发酵生成醇类中间体,直接生成可持续航空煤油;或者在酵母作用下水解糖发酵,将生物质水解的糖转化为类异戊二烯法尼烯($C_{15}H_{24}$)^[77]。反应后对液体/固体进行离心以分离酵母细胞和上清液,所得上清液由法尼烯油、法尼烯乳液和发酵液组成。在一定温度下,向液体中加入表面活性剂能够进一步分离水相和油相。分馏阶段中,将甘油三酯、单甘油酯和盐与法尼烯分离后,法尼烯在 Ni、Pd、Ru、Pt、Mo 或 Zn 等催化剂作用下发生加氢反应。

1.6 生物质水相催化合成技术

通过水解生物质原料中纤维素和半纤维素制备单糖,随后单糖脱水可转化为糠醛类物质。糠醛作为一种重要的平台化合物,其催化转化技术已经过较全面的研究^[78]。通过糠醛类与酮类物质的羟醛缩合反应能够实现高效碳链增长,然后对初步制备的高碳产物进行加氢、脱氧、开环和裂化反应等,最后获得符合航空煤油组分分布的长链烷烃产物。以 5-羟甲基糠醛和糠醛与丙酮的缩合工艺为例,5-羟甲基糠醛和糠醛与丙酮可在碱催化剂作用下进

行羟醛缩合反应,生成的碳原子数为 8~15 的含氧化合物通过低温预加氢和高温加氢脱氧转化为长链烷烃,最后经加氢异构等反应制得包含正构烷烃与异构烷烃的产物^[79-81]。从该制备路径的各个工艺步骤来看,工业领域已能通过水解生物质中纤维素与半纤维素大规模生产糠醛,但 5-羟甲基糠醛大规模生产的相关研究仍在进行之中,尚未实现工业化^[82-85]。

生物质水相催化合成技术生产航空煤油的核心反应是 5-羟甲基糠醛和糠醛与丙酮发生的羟醛缩合反应。该反应条件较为温和,产物选择性较高。近年来,以乙酰丙酸替代丙酮参与羟醛缩合反应的研究已取得一定进展,这对该技术路线经济性与可持续性的提升有积极作用^[86-89]。然而总体而言,生物质水相催化合成技术是一条较为复杂的路径,较高的催化剂成本和设备投资导致该技术制备的航空煤油成本较高,目前仍处于基础研究阶段^[90]。

1.7 废旧塑料热解技术

回收废旧塑料,对其进行热解并制备可持续航空煤油不仅能够解决废旧塑料污染问题,还能助力实现航空业的可持续发展。目前,废旧塑料热解技术已从实验室走向规模化应用。

1.7.1 技术路线

在催化热解前,首先需要去除废旧塑料中的各类杂质,并通过破碎、熔融造粒过程将废旧塑料转化为尺寸均一的原料,以减少对后续反应的干扰。以不含氧原子和氯原子的聚乙烯(PE)为例,在 300~500 °C 的反应温度下,其 C—C 键会发生断裂生成短链烯烃、烷烃和少量碳原子数为 10~20 的长链烃^[91]。如果废旧塑料中含有苯环,催化热解后则会生成苯、甲苯等芳烃。催化热解步骤一般需要使用具有较强酸性和一定择型性的 HZSM-5 或 HY 分子筛作为催化剂。

废旧塑料初步热解后得到的产物以烯烃为主,且在分子筛酸性位点的作用下,碳数分布较宽的中间体由于碳链长度不同,可分别发生大分子烃类裂解和小分子烃类齐聚反应,然后转化为异构烯烃并加氢生成碳原子数为 8~16 的异构烷烃。部分烯烃可经多聚、环化和氢转移反应生成环烷烃和芳烃^[92]。通过催化剂设计可调控产物中各组分的相对含量,以满足航空煤油对组分分布、冰点、闪点和低温性能的要求。

1.7.2 工业化进展

重庆华晟新碳能源科技有限公司的新碳项目以废旧塑料为原料,采用低温绝氧热解,避免了二噁英

生成。项目首期的废旧塑料处理量为 1.5×10^4 t/a, 可持续航空煤油前体油产量为 7000 t/a, 年产值超过 3000×10^4 CNY。到 2026 年, 该项目的废旧塑料处理量可扩大至 10×10^4 t/a。热解油经加氢重整可转化为可持续航空煤油, 副产燃气用于系统供热, 炭黑用作工业原料, 整个工艺形成闭环。

中国石化塔河炼化有限责任公司以 PE 和聚丙烯(PP)作为原料, 采用废旧塑料热解技术生产热解油, 项目总投资 1.62×10^8 CNY, 每年可处理 3.5×10^4 t 废弃地膜, 同时热解副产物乙烯能够进一步转化为树脂产品。该项目于 2024 年完成设备制造与调试, 2025 年建成投产, 为全球首个废弃地膜化学循环工业项目^[93]。

2022 年, 我国废塑料年产量约 6300×10^4 t, 回收率不足 30%, 低值塑料(如 PE 包装膜)在废塑料总量中占比超过 60%, 填埋处理成本较高^[94-95]。然而, 低值塑料不含杂原子且具有适宜的碳氢比, 这有利于高效热解并抑制副产物生成, 是制备可持续航空煤油的理想原料之一。此外, 废旧塑料回收可获得政策补贴, 有助于降低成本。

1.7.3 技术瓶颈

尽管我国废旧塑料中以低值塑料为主, 但仍有相当一部分废旧塑料中含有氧、氮和氯等杂原子, 同时生活垃圾中的废弃塑料还含有大量杂质, 导致预处理成本较高。此外, 废旧塑料热解技术的热解工段难以稳定连续运行, 设备易腐蚀且催化剂易失活, 综合成本较高。

1.8 电力燃料技术

电力燃料技术是利用可再生氢源对大气或工业尾气中捕集的二氧化碳进行加氢以生产液体燃料的技术路线。该技术具有原料来源广、产品不含硫和氮等杂原子的优点, 其生产原料可与生物质完全脱钩的特点也受到了广泛关注。同时, 与新兴的电(电池)航空和氢航空技术相比, 电力燃料技术路线可提供更高能量密度的燃料, 以减小飞机装载质量。在 IATA 发布的欧盟 Refuel 法案声明中, 要求电力燃料技术生产的可持续航空煤油在航空煤油中的掺混比例在 2030 年、2035 年和 2050 年分别需达到 1.2%、5% 和 35%^[96]。以下分别从可再生氢源、二氧化碳捕集和可再生航空煤油生产 3 个方面对电力燃料技术进行介绍。

1.8.1 可再生氢源

目前, 全球工业领域使用的氢气有三分之一左右是化工过程产生的副产品。因此电力燃料技术

的重点是利用非化石能源, 在非传统化工过程中实现氢气生产, 通过应用“绿氢”实现生产过程的净零排放。

近年来, 利用电化学(如水电解和光电解)、热化学或生物水裂解技术生产“绿氢”受到广泛关注。在光伏发电、风力发电功率较高引起电网波动的情况下, 水电解作为一种调峰手段已经受到了重点关注。目前, 碱性电解、质子/聚合物交换膜(PEM)电解和固体氧化物电解(SOE)等水电解技术研究已取得一定突破。然而, 这些水电解技术的成本仍然相对昂贵, 同时高度依赖可再生能源。例如, 通过碱性电解制备氢气的成本是天然气重整制氢成本的 2~4 倍^[97]。

1.8.2 二氧化碳捕集

电力燃料技术使用的碳源为从钢铁/水泥生产废气、天然气重整废气和矿山气等含碳气体中捕集的二氧化碳, 以及直接空气捕集(DAC)技术捕集的二氧化碳。二氧化碳捕集不仅能够为可持续航空煤油生产提供碳源, 还能有效降低大气中温室气体浓度, 促进实现我国“双碳”目标。

目前, DAC 技术主要有两种技术路线。一种是使用低毒性溶剂和碱性水溶液(如氢氧化钠溶液和氢氧化钾溶液)对二氧化碳进行吸收。另一种是利用碱性碳酸盐与介孔固体载体结合制备易于再生的固体吸附剂(如负载胺吸附剂)。与液体吸收剂相比, 固体吸附剂的捕集性能更好、气体选择性更高且再生能耗更低。

1.8.3 可再生航空煤油生产

(1) CO₂-费托合成路径

CO₂-费托合成路径是先通过逆水汽变换(RWGS)反应将二氧化碳转化为一氧化碳, 随后一氧化碳通过费托合成步骤生成烯烃和烷烃。该路径往往需要使用含有各种助剂的铁基催化剂, 如添加碱金属提高催化剂的二氧化碳吸附性能并促进铁基催化剂碳化, 同时促进长碳链产物生成。

然而, 费托合成存在 ASF 分布限制, 其烃类产品中航空煤油组分选择性较低。因此, 研究人员将铁基催化剂与分子筛进行组合构建了双功能催化剂, 利用分子筛的酸性位点促进铁基催化剂上生成的烯烃发生碳碳偶联、环化和芳构化。WEI 等^[98]报道了一种双功能催化剂(Na-Fe₃O₄/ZSM-5)。在 320 °C、 $n(\text{H}_2)/n(\text{CO}_2) = 3$ 的反应条件下, 该催化剂的二氧化碳转化率为 34%, 液态烃选择性达到 78%, 并且主要产物为支链烷烃和芳烃。作者发现铁基催

化剂上生成的烯烃中间体可扩散到 ZSM-5 的酸性位点上选择性生成汽油组分。YANG 等^[99]采用 Na、Cu 对 Fe_2O_3 进行改性, 然后与经十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 改性的 ZSM-5 进行组合, 制备了双功能催化剂。结果表明, $2.3\text{Na-Cu-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZSM-5}$ 双功能催化剂的芳烃选择性为 57.74%, 液体产物中芳烃选择性为 94.81%。Na 对 Fe_2O_3 的改性促进了二氧化碳的转化和活性位点 Fe_3C_2 的形成; Na 和 Cu 之间的协同作用促进了铁物种的还原和活化; 对 ZSM-5 进行 CTAB 改性提升了其对芳烃产物的扩散性能, 促进了芳烃产物生成, 同时由于改性后 ZSM-5 的酸强度有所降低, 抑制了烷基化和结焦, 有利于提高芳烃选择性和延长催化剂寿命。

(2) 甲醇中间体路径

对于甲醇中间体路径, 二氧化碳首先在金属氧化物上加氢生成甲醇, 生成的甲醇随后扩散到分子筛的酸性位点发生芳构化反应生成芳烃。与费托合成路径相比, 甲醇中间体路径不受 ASF 分布限制, 可以有效促进高碳芳烃产物生成。生成的芳烃可以通过进一步加氢、裂化和异构化反应, 转化为符合航空煤油需求的异构烷烃。

In_2O_3 和 Cr_2O_3 等单一金属氧化物在二氧化碳加氢制甲醇反应中具有较高的催化活性, 因此被用于与 HZSM-5 分子筛组合构建二氧化碳加氢制芳烃催化剂。TIAN 等^[100]制备了 $\text{c-In}_2\text{O}_3$ 和 $\text{h-In}_2\text{O}_3$, 其中 $\text{h-In}_2\text{O}_3$ 具有较大的比表面积和较高的氧空位占比。同时, DFT 理论计算结果显示 $\text{h-In}_2\text{O}_3$ 表面的氧空位对二氧化碳的吸附作用更强。颗粒混合制备的 $\text{h-In}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ 双功能催化剂具有较好的催化性能, 其二氧化碳转化率为 23.2%, 轻质芳烃 (苯+甲苯+二甲苯 (BTX)) 选择性为 29.7%, 芳烃选择性为 34.1%。WANG 等^[101]对 Cr 基金属有机框架进行了碳化-氧化处理, 制备了 Cr_2O_3 。结果表明, 与共沉淀法制备的 $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-P}$ 相比, 碳化-氧化处理制备的 Cr_2O_3 均具有更小的粒径和更高的氧空位占比。 $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{C-500-500/Z5-S}$ 双功能催化剂表现出相对最好的催化性能, 其二氧化碳转化率为 25.4%, 芳烃选择性为 80.1%。该催化剂具有较好催化性能的原因在于: (1) 富含氧空位, 可对二氧化碳进行吸附、活化和转化; (2) 较小的粒径提高了氧空位的可及性, 促进了二氧化碳加氢转化。ZHANG 等^[102]通过在母液中加入不同的分散剂, 制备了具有尖晶石结构的 ZnCrO_x 。结果表明, 向母液中添加四丙基溴化铵 (TPABr) 制备的 $\text{ZnCrO}_x\text{-TPABr}$ 具有最小的粒径和最

高的氧空位密度。同时, 向 ZnCrO_x 中引入 TPABr 也有利于形成尖晶石结构, 并促进了 Zn 物种在 ZnCrO_x 表面富集。在二氧化碳加氢反应中, $\text{ZnCrO}_x\text{-TPABr}$ 与 ZSM-5 组合制备的双功能催化剂的二氧化碳转化率达到 23.4%, 芳烃产物在 C_{5+} 组分中占比达到 87.9%。

在二氧化碳加氢制航空煤油反应中, 金属氧化物表面生成的甲醇可扩散到双功能催化剂的分子筛上发生碳碳偶联、多聚、环化和氢转移 (脱氢) 反应, 因此分子筛的酸性对于催化活性和产物选择性有显著影响。QU 等^[103]使用正硅酸乙酯 (TEOS) 处理商品化 ZSM-5 分子筛制备了 T-ZSM-5, 然后对其进行了 Mg 浸渍改性。结果表明, TEOS 处理钝化了 ZSM-5 分子筛的外表面酸性位, Mg 浸渍改性降低了分子筛中 Brønsted 酸酸量和酸强度。将经 TEOS 处理和 Mg 改性的 ZSM-5 分子筛与 ZnZrO 固溶体组合制备的 ZZO/Mg-Si-ZSM-5 双功能催化剂虽然二氧化碳转化率较低 (6.9%), 但对二甲苯在二甲苯产物中占比达到 84%, 这是因为表面改性对分子筛外表面酸性位点的覆盖限制了非对二甲苯产物的扩散, 同时 Mg 改性降低了分子筛酸性并减小了其孔径, 进一步提高了二甲苯选择性。ZHANG 等^[102]采用共沉淀法制备了 ZnZr 金属氧化物与 ZSM-5 分子筛组合而成的双功能催化剂。结果表明, 采用离子交换法对双功能催化剂中的 ZSM-5 分子筛进行 Zn 改性, 可以有效提高催化剂的二氧化碳转化率和 C_{5+} 产物选择性。以 ZnCr/ZnZ5(140) 作为催化剂时, 二氧化碳转化率为 30.5%。

1.8.4 技术瓶颈

尽管电力燃料技术被视为实现航空业脱碳的终极方案之一, 但其规模化应用仍面临严峻挑战。目前, 制约电力燃料技术应用的首要瓶颈在于成本居高不下。该技术路线的核心原料是“绿氢”, 其制备依赖大规模可再生能源电力, 但电解水制氢成本高昂, 其中电费成本在制氢总成本中占比约 80%。同时, 二氧化碳捕集与纯化过程同样能耗较高, 特别是 DAC 技术还具有较高的成本不确定性^[104]。尽管技术创新 (如新型带电吸附剂技术) 有望显著降低二氧化碳捕集成本, 但综合来看电力燃料技术的成本仍较高, 其经济竞争力有待提升。

此外, 电力燃料技术比较复杂, 多个关键环节的技术瓶颈有待突破。在“绿氢”生产端, 其规模化依赖于廉价可再生能源的稳定供应, 而可再生能源的间歇性对电解槽的响应速率和制氢系统的运营调度提出了挑战。在催化合成环节, 催化剂的产物

选择性和长期稳定性是关键。虽然可借鉴传统费托合成催化剂与分子筛进行组合构建双功能催化剂的思路,通过催化烯烃中间体提高航空煤油组分选择性,但如何进一步突破费托合成的ASF分布限制,并有效活化转化副产的低碳烷烃,仍是该技术面临的核心难题^[105]。

在目前技术水平和政策条件下,对不同技术的经济性、原料类型、二氧化碳减排贡献和技术成熟度进行了对比,结果见表2^[106-110]。油脂加氢技术是目前技术最成熟、商业化应用最广泛的技术路线。该技术原料来源稳定,尤其是对地沟油的利用既解决了废弃物回收难题,又避免了对粮食作物的竞争,并且具有显著的经济性,其主要技术瓶颈在于原料收集难度和预处理成本较高。在二氧化碳减排贡献方面,油脂加氢技术的全生命周期碳减排可达50%~80%,若结合可再生氢源,减排潜力可进一步提升。短期内(至2030年),油脂加氢技术仍将是市场主力,但长期来看可能会受原料供应分散性和成本问题影响。

生物质气化技术的原料适应范围较广,可适用于农林废弃物、城市固体垃圾等多种生物质资源,且合成气制备过程对原料杂质容忍度高,适合大规模集中处理。同时,该技术的全生命周期的碳减排率可达70%~90%,若结合生物质碳捕集(BECCS),甚至可以实现负碳排放。生物质气化技术存在的主要问题在于催化剂稳定性和系统集成效率不足。催化水热解技术的优势在于无需干燥预处理,适合处

理餐厨废油等高湿度原料,且反应条件相对温和(200~350℃)。然而,该技术使用的催化剂结焦问题严重,需频繁再生,且产物芳烃含量依赖原料组成,难以灵活调控。短期内,催化水热解技术可能作为油脂加氢技术的补充,长期来看则需解决催化剂寿命与产物调控难题。醇制航煤技术和糖制航煤技术分别以乙醇/异丁醇和糖类为原料,通过发酵或化学转化产出航空煤油。其中,醇制航煤技术的技术成熟度较高,但其依赖粮食基乙醇,存在“与人争粮”的问题;糖制航煤技术可利用纤维素糖作为原料,原料来源更加稳定且可持续,但原料转化效率较低,经济性较差。醇制航煤技术和糖制航煤技术的二氧化碳减排贡献分别为50%~70%和50%~60%。未来,若纤维素乙醇技术取得突破,醇制航煤和糖制航煤技术将可能在部分场景下适用。水相重整技术的优势在于反应条件比较温和(<250℃)且可处理高含氧量原料,但产物复杂、分离成本高且催化剂易被杂质毒化。目前,水相重整技术仅限于实验室规模验证,工业化前景不明朗。

电力燃料技术以“绿氢”和捕集的CO₂为原料,通过催化合成生产合成烃类燃料。其优势在于原料供应的可持续性与较高的减排潜力。然而,电力燃料技术目前经济性较低。在技术成熟度方面,千吨级示范装置已验证了可行性。短期来看,电力燃料技术可能局限于政策驱动的小规模应用。长期来看,随着可再生氢能与碳捕集技术的不断发展,该路线有望成为航空业深度脱碳的核心方案。

表2 不同可持续航空煤油制备技术的经济性、原料类型、二氧化碳减排贡献和技术成熟度^[106-110]

Table 2 Economies, raw material types, CO₂ emission reduction contributions and technological maturities of different sustainable aviation kerosene preparation technologies^[106-110]

技术	经济性/(USD·t ⁻¹)	原料类型	二氧化碳减排贡献/%	技术成熟度
油脂加氢	1500~1800	废弃油脂	50~80	已商业化
生物质气化	2000~3000	农林废弃物和城市垃圾	70~90	中试装置
电力燃料	>4000	二氧化碳和“绿氢”	90~100	示范装置
催化水热解	>4000	高湿生物质	50~80	中试装置
醇制航煤	3500~4000	粮食乙醇或纤维素乙醇	50~70	示范装置
糖制航煤	>5000	糖类	50~60	实验室验证
生物质水相催化合成		糖类和木质素纤维	60~70	实验室验证
废旧塑料热解		废旧塑料		中试装置

作为一种蓬勃发展的新兴技术,不同可持续航空煤油制备技术的适用性会随时间、技术发展和政策等因素的变化而表现出复杂的动态变化。因此,基于可持续航空煤油制备技术研究推广、

工业化发展与投资等关键性战略规划的需求,本文对不同可持续航空煤油制备技术在不同阶段的发展进行了动态分析,结果见表3。可持续航空煤油制备技术在不同阶段的发展呈现出清晰的时

序规律,其中油脂加氢技术是当前至2030年的市场主力,电力燃料技术是在2050年实现净零排放

的核心路径,但其发展依赖于可再生能源和碳捕集技术的突破。

表3 不同可持续航空煤油制备技术在不同发展阶段的动态分析结果

Table 3 Dynamic analysis results of different sustainable aviation kerosene preparation technologies at different development stages

技术	动态分析结果		
	当前至2030年 ^①	2030—2040年 ^②	2040年以后 ^③
油脂加氢	主导地位:技术成熟,已规模化,减排70%以上,但受限于废弃油脂原料供应	补充角色:原料瓶颈凸显,份额逐步被新兴技术取代	市场配角:限于特定废弃油脂资源区
生物质气化	示范突破:利用生物质废弃物,原料广泛,减排85%~94%,但投资成本高	主力之一:与化工园区耦合降本,原料收集体系完善	重要支柱:生物质+“绿氢”共气化提升经济性
醇制航煤	试点应用:原料适应性广,减排85%~94%,但转化效率和成本待优化	快速扩张:纤维素乙醇技术突破带动成本下降	稳定供应源:非粮能源作物提供稳定原料
电力燃料	技术示范:减排潜力最大(≈99%),但成本为传统航空煤油数倍	成本竞争力提升:“绿氢”降本与碳捕集技术普及	终极解决方案:实现近零碳排放,2050年在SAF消费量中占比有望突破60%

注:①中数据均来自文献^[13];①~③核心驱动力分别为政策强制与废弃资源利用、技术创新与产业链整合和“绿氢”经济与“碳中和”目标。

2 结语与展望

本文系统综述了可持续航空煤油的主要制备技术的研究进展,重点对各技术的原料可持续性、反应机理和工艺流程等进行了分析,并对技术在未来的发展情况进行了动态评估和展望。油脂加氢技术作为目前最成熟的技术,已实现商业化应用,其原料适应性强,工艺流程相对简单。短期内油脂加氢技术仍将主导市场,而中长期来看其市场份额可能会因原料问题而被新兴技术替代。生物质气化技术的原料来源比较广泛,目前已进入中试阶段。随着其生产工艺与“绿氢”产业的耦合,生物质气化技术可能成为生产可持续航空煤油的主力之一。电力燃料技术以“绿氢”和捕集的二氧化碳为原料,全生命周期减排可达90%~100%,是实现航空业净零排放的核心路径。目前,该技术处于示范阶段,尚存在成本问题(>4000 USD/t)。未来要实现从实验室验证向大规模工业应用的成功跨越,关键在于催化剂设计和系统集成技术的协同突破。如在催化剂层面,需开发更高效、稳定且低成本的催化剂,以实现更高的二氧化碳转化率和目标产物选择性;在系统集成方面,则需要优化整个价值链的耦合情况,包括创新电解槽技术、优化反应器设计、实现可再生能源电力与生产工厂的智能柔性运行,并大幅降低碳捕集能耗。

航空业碳减排能否取得成功,取决于是否能发展出一条“政策驱动-技术创新-终极脱碳”的路径。这要求政府、产业界和科研界协同努力,通过持续的政策支持、精准的技术攻关、灵活的原料供应链

建设和与国际接轨的标准体系,共同推动可持续航空煤油产业的成熟与壮大,最终实现航空业的绿色低碳转型。

参考文献

- [1] SHIH C F, ZHANG T, LI J, et al. Powering the future with liquid sunshine [J]. *Joule*, 2018, 2(10): 1925-1949.
- [2] ZHAI S L, JIANG S C, LIU C C, et al. Liquid sunshine: Formic acid [J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2022, 13(36): 8586-8600.
- [3] LIU Z, DENG Z, DAVIS S J, et al. Global carbon emissions in 2023 [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2024, 5: 253-254.
- [4] FLORIAN W, WOLFGANG G, SVEN M, et al. CORSIA—A feasible second best solution? [J]. *Applied Science*, 2022, 12: 7054.
- [5] 刘岸. 国际航空碳减排机制在亚太地区效果引关注[EB/OL]. 北京: 中国发展网, 2025(2025-02-10)[2025-11-03]. <https://www.chinadevelopment.com.cn/news/2025/02/1931488.shtml>.
- [5] LIU A. International aviation carbon emission reduction mechanism's effect in the Asia-Pacific region draws attention [EB/OL]. Beijing: China Development Network, (2025-02-10) [2025-11-03]. <https://www.chinadevelopment.com.cn/news/2025/02/1931488.shtml>
- [6] ZHAO L. ICAO to realize net-zero carbon emissions by 2050 [EB/OL]. Beijing: China News Service, (2022-10-08) [2025-11-03]. <http://www.ecns.cn/news/cns-wire/2022-10-08/detail-ihcevpwn9248171.shtml>.
- [7] 工业和信息化部, 科学技术部, 财政部, 中国民用航空局. 绿色航空制造业发展纲要(2023—2035年)[Z/OL]. 北京: 工业和信息化部, 科学技术部, 财政部, 中国民用航空局, 2023(2023-10-10)[2025-11-03]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202310/content_6912080.html.

Ministry of Industry and Information Technology, Ministry

- of Science and Technology, Ministry of Finance, Civil Aviation Administration of China. Green Aviation Manufacturing Development Outline (2023—2035) [Z/OL]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Science and Technology, Ministry of Finance, Civil Aviation Administration of China, 2023(2023-10-10) [2025-11-03]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202310/content_6912080.html.
- [8] 华夏时报. 空客修订下一代单通道飞机路线图 继续坚持氢动力路线[EB/OL]. 北京: 华夏时报网, (2025-03-31) [2025-11-03]. <https://www.chinatimes.net.cn/article/125305.html>.
China Times. Airbus revokes next-generation single-engine aircraft roadmap but sticks to hydrogen-powered route [EB/OL]. Beijing: China Times Network, 2025 (2025-03-31) [2025-11-03]. <https://www.chinatimes.net.cn/article/125305.html>.
- [9] 环球网. 外媒:空客推迟氢动力商用飞机研发计划[EB/OL]. 北京: 环球网, (2025-02-08)[2025-11-03]. <https://tech.huanqiu.com/article/4LOqU0y1vbC>.
Guokr.com. Foreign media: Airbus postpones development plan for hydrogen-powered commercial aircraft [EB/OL]. Beijing: Guokr.com, 2025(2025-02-08)[2025-11-03]. <https://tech.huanqiu.com/article/4LOqU0y1vbC>.
- [10] IATA. Fact sheet: IATA net zero resolution [EB/OL]. Geneva: International Air Transport Association (IATA), [2025-11-03]. <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet-iata-net-zero-resolution/>.
- [11] DRAY L, SCHÄFER A W, GROBLER C, et al. Cost and emissions pathways towards net-zero climate impacts in aviation [J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12: 956-962.
- [12] DOLSAK N, PRAKASH A. Different approaches to reducing aviation emissions: Reviewing the structure-agency debate in climate policy [J]. *Climate Action*, 2022, 1: 2.
- [13] LU F, LI L P, YU Y X, et al. Road to carbon-neutral aviation: One-step conversion of CO₂ to sustainable aviation fuels [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2025, 64(6): 3118-3135.
- [14] ASTM International. Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons: ASTM D7566-23 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2023.
- [15] 聂红, 习远兵, 葛泮珠, 等. 可持续航空燃料生产路线与展望——以中石化石科院为例[J]. *化工进展*, 2025, 44(5): 2529-2534.
NIE H, XI Y B, GE P Z, et al. Sustainable aviation fuel production technology and prospects [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2025, 44(5): 2529-2534.
- [16] ZEMANEK D, CHAMPAGNE P, MABEE W. Review of life-cycle greenhouse-gas emissions assessments of hydroprocessed renewable fuel (HEFA) from oilseeds [J]. *Biofuels*, *Bioproducts and Biorefining*, 2020, 14(6): 935-949.
- [17] MANNION L A, REDINGTON C, KELLY M, et al. The effect of used cooking oil composition on the specific CO₂e emissions embodied in HEFA-SPK production [J]. *Biofuels*, *Bioproducts and Biorefining*, 2024, 18(4): 837-854.
- [18] RAJI A M, MANESCAU B, CHETEHOUNA K, et al. Thermal decomposition kinetics of Jet A-1, HEFA-SAF and Jet A-1/HEFA-SAF blends under oxidative atmosphere for aeronautical applications [J]. *Energy & Fuels*, 2025, 39(12): 18077-18094.
- [19] WANG F, RIJAL D. Sustainable aviation fuels for clean skies: Exploring the potential and perspectives of strained hydrocarbons [J]. *Energy Fuels*, 2024, 38 (6): 4904-4920.
- [20] 陈秀海, 王子超. 一种以地沟油为原料制备生物航空煤油的方法: 201210486177.8 [P]. 2013-06-05.
CHEN X H, WANG Z C. A method for preparing bioaviation kerosene using waste cooking oil as raw material: 201210486177.8 [P]. 2013-06-05.
- [21] 吴郡. 地沟油甲酯生产生物航空煤油催化剂的制备工艺研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
WU J. Study on the preparation process of bio-aviation kerosene catalyst produced by gutter oil methyl ester [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [22] 许金蓉, 晁琛, 吴家怀, 等. 固体碱催化地沟油制备生物柴油工艺研究[J]. *轻工科技*, 2016, 32(4): 23-25.
XU J R, CHAO C, WU J H, et al. Research on the process of preparing biodiesel from gutter oil catalyzed by solid alkali [J]. *Light Industry Science and Technology*, 2016, 32(4): 23-25.
- [23] BEN A A, KAOUBI S, STARCK L. Toward an optimal formulation of alternative jet fuels: Enhanced oxidation and thermal stability by the addition of cyclic molecules [J]. *Fuel*, 2016, 173: 98-105.
- [24] BUFFI M, VALERA-MEDINA A, MARSH R, et al. Emissions characterization tests for HRJ fuel from used cooking oil and its blends [J]. *Applied Energy*, 2017, 201: 84-93.
- [25] ITTHIBENCHAPONG V, SRIFA A, KAEWMEESRI R, et al. Deoxygenation of palm kernel oil to jet fuel-like hydrocarbons using Ni-MoS₂/γ-Al₂O₃ catalysts [J]. *Energy Convers Manage*, 2017, 134: 188-196.
- [26] LI T, CHENG J, HUANG R, et al. Conversion of waste cooking oil to jet biofuel with nickel-based mesoporous zeolite Y catalyst [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 197: 289-294.
- [27] CHEN R X, WANG W C. The production of renewable aviation fuel from waste cooking oil. Part I: Bio-alkane conversion through hydro-processing of oil [J]. *Renewable Energy*, 2019, 135: 819-835.
- [28] YANG J, XIN Z, HE Q, et al. An overview on performance

- characteristics of bio-jet fuels [J]. *Fuel*, 2019, 237: 916-936.
- [29] ROBOTA H J, ALGER J C, SHAFER L. Converting algal triglycerides to diesel and HEFA jet fuel fractions [J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(1): 985-996.
- [30] LIU S Y, ZHU Q Q, GUAN Q X, et al. Bio-aviation fuel production from hydroprocessing castor oil promoted by the nickel-based bifunctional catalysts [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 183: 93-100.
- [31] WANG X Y, ZHANG X W, WANG Q F. N-dodecane hydroisomerization over Pt/ZSM-22: Controllable microporous Brönsted acidity distribution and shape-selectivity [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2020, 590: 117335.
- [32] PANAHİ P N, NIAEI A, SALARI D, et al. Ultrasound-assistant preparation of Cu-SAPO-34 nanocatalyst for selective catalytic reduction of NO by NH₃ [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 35: 135-143.
- [33] WANG D X, KANG X, GU Y, et al. Electronic tuning of Ni by Mo species for highly efficient hydroisomerization of *n*-alkanes comparable to Pt-based catalysts [J]. *ACS Catalysis*, 2020, 10(18): 10449-10458.
- [34] SU-UNGKVAUTIN P, TIRUTA-BARNA L, HAMELIN L, et al. Biofuels, electrofuels, electric or hydrogen? A review of current and emerging sustainable aviation systems [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2023, 96: 101073.
- [35] XING G H, LIU S Y, GUAN Q X, et al. Investigation on hydroisomerization and hydrocracking of C₁₅-C₁₈ *n*-alkanes utilizing a hollow tubular Ni-Mo/SAPO-11 catalyst with high selectivity of jet fuel [J]. *Catalysis Today*, 2019, 330: 109-116.
- [36] ODT S W. European and US used cooking oil demand increasingly unsustainable—Analysis [EB/OL]. Brussels: Transport & Environment (T & E), (2024-06-18)[2025-11-03]. <https://www.transportenvironment.org/articles/european-and-us-used-cooking-oil-demand-increasingly-unsustainable-analysis>.
- [37] 杨智渊, 夏祖西, 郭强. 中国航空生物燃料首次试飞用油适航评审[J]. *中国民用航空*, 2012, (1): 39-41.
YANG Z Y, XIA Z X, GUO Q. Airworthiness evaluation of the oil used in the first biofuel flight test [J]. *China Civil Aviation*, 2012, (1): 39-41.
- [38] 陈婉. 镇海炼化: 能源与环境和谐共生[J]. *环境经济*, 2019, (Z1): 45-47.
CHEN W. Zhenhai Refining: Harmonious coexistence of energy and environment[J]. *Environmental Economy*, 2019, (Z1): 45-47.
- [39] 梅辽颖, 卞江岐. 镇海炼化逐绿记[J]. *中国石化*, 2018, (20): 60-63.
MEI L Y, BIAN J Q. Zhenhai Refining's green pursuit [J]. *China Petrochemical*, 2018, (20): 60-63.
- [40] 李鑫轶. 追寻绿色航空梦——中国石化研发生产生物航空煤油纪实[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2013, (11): 4.
LI X T. Pursuing the green aviation dream: A record of SINOPEC's research and production of bio-aviation fuel [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2013, (11): 4.
- [41] 郭玮宏. “地沟油”怎么摇身一变,成了国产大飞机的航空燃油? [EB/OL]. 北京: 网易, (2024-06-08)[2025-11-03]. <https://www.163.com/dy/article/J45CLHK30511C40P.html>.
GUO W H. How did “gutter oil” transform into aviation fuel for China's large aircraft? [EB/OL]. Beijing: NetEase, (2024-06-08)[2025-11-03]. <https://www.163.com/dy/article/J45CLHK30511C40P.html>.
- [42] 闪电新闻. 山东首家! 山东三聚生物能源开辟可持续航空燃料新赛道[EB/OL]. 济南: 闪电新闻, (2025-07-03)[2025-11-03]. <https://app-api.sdnews.com.cn/share/article/1621080>.
Flash News. The first of its kind in Shandong! Shandong Sanju Bioenergy opens a new path for sustainable aviation fuel [EB/OL]. Jinan: Flash News, (2025-07-03)[2025-11-03]. <https://app-api.sdnews.com.cn/share/article/1621080>.
- [43] 莒县人民政府. 科技赋能“废油重生”——山东三聚生物能源打造生物航空煤油新标杆[EB/OL]. 莒县: 莒县人民政府, (2025-04-07)[2025-11-03]. <https://www.juju.gov.cn/col/col204576/index.html>.
Ju County People's Government. Technology empowers “waste oil rebirth” —Shandong Sanju Bioenergy establishes a new benchmark for bio-aviation kerosene [EB/OL]. Ju County: Ju County People's Government, (2025-04-07)[2025-11-03]. <https://www.juju.gov.cn/col/col204576/index.html>.
- [44] 王一方, 李春桃. 一种废弃油脂的纯化系统及纯化方法: 114574287A [P]. 2022-06-03.
WANG Y F, LI C T. A purification system and purification method for waste oil: 114574287A [P]. 2022-06-03.
- [45] 央广网. 餐余废油制成航空燃料, 国产商用飞机加注演示[EB/OL]. 北京: 央广网, (2024-06-06)[2025-11-03]. <https://www.163.com/dy/article/J4072VQT0514R9NP.html>.
CRI News. Waste cooking oil from meals is turned into aviation fuel, demonstration of domestic commercial aircraft refueling [EB/OL]. Beijing: CRI News, (2024-06-06)[2025-11-03]. <https://www.163.com/dy/article/J4072VQT0514R9NP.html>.
- [46] LIU G R, YAN B B, CHEN G Y. Technical review on jet fuel production [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 25: 59-70.
- [47] HANAOKA T, LIU Y Y, MATSUNAGA K, et al. Benchscale production of liquid fuel from woody biomass via gasification [J]. *Fuel Processing Technology*, 2010, 91(8): 859-865.
- [48] XU T, ZHENG X R, XU J, et al. Hydrogen-rich gas production from two-stage catalytic pyrolysis of pine

- sawdust with nano-NiO/Al₂O₃ catalyst [J]. *Catalysts*, 2022, 12(3): 256.
- [49] NAGY G, DOBÓ Z. Experimental investigation of fixed-bed pyrolysis and steam gasification of food waste blended with woody biomass [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2020, 139: 105580.
- [50] 亚力昆江·吐尔逊, 潘岳, 别尔德汗·瓦提汗, 等. 基于热解-重整-燃烧解耦三床气化系统的生物质催化制富氢气体 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(17): 222-228.
- YALKUNJAN T, PAN Y, BIEERDEHAN W, et al. Catalytic biomass gasification for hydrogen rich gas production in decoupled-triple-bed gasification system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(17): 222-228.
- [51] WANG P, CHIANG F K, CHAI J, et al. Efficient conversion of syngas to linear α -olefins by phase-pure χ -Fe₃C₂ [J]. *Nature*, 2024, 635: 102-107.
- [52] 卢美贞. Pt/Al-MCM-41 加氢裂化生物烷烃制备航空煤油 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- LU M Z. Hydrocracking of bio-alkanes over Pt-Al-MCM-41 for bio-jet fuel production [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [53] WEI Z, KANG C, KANG J C, et al. New horizon in C1 chemistry: Breaking the selectivity limitation in transformation of syngas and hydrogenation of CO₂ into hydrocarbon chemicals and fuels [J]. *Chemical Society Review*, 2019, 48: 3193-3228.
- [54] COSTA O Y A, SOUTO B M, TUPINAMBA D D, et al. Microbial diversity in sugarcane ethanol production in a Brazilian distillery using a culture-independent method [J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2015, 42: 73-84.
- [55] QURESHI N, LOLAS A, BLASCHEK H P. Soy molasses as fermentation substrate for production of butanol using *Clostridium beijerinckii* BA101 [J]. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 2001, 26: 290-295.
- [56] PETERS M W, TAYLOR J D. Renewable jet fuel blendstock from isobutanol: US8975461 B2 [P]. 2015-03-10.
- [57] MA K, RUAN Z, SHUI Z, et al. Open fermentative production of fuel ethanol from food waste by an acid-tolerant mutant strain of *Zymomonas mobilis* [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 203: 295-302.
- [58] YAO G, STAPLES M D, MALINA R, et al. Stochastic techno-economic analysis of alcohol-to-jet fuel production [J]. *Biotechnol Biofuels*, 2017, 18: 10.
- [59] GELEYNSE S, BRANDT K, GARCIA-PEREZ M, et al. The alcohol-to-jet conversion pathway for drop-in biofuels: Techno-economic evaluation [J]. *ChemSusChem*, 2018, 11: 3728-3741.
- [60] EVANKO W A, EYAL A M, GLASSNER D A, et al. Recovery of higher alcohols from dilute aqueous solutions: US8101808 B2 [P]. 2012-01-24.
- [61] DAVID P R, ALTO P. Compositions and methods for producing fermentation products and residuals: US7309602 B2 [P]. 2007-12-18.
- [62] MANSÁ R, MANSUIT H, SIPAUT C S, Comparative studies on the alcohol types presence in *Gracilaria* sp. and rice fermentation using *Sasad* [J]. *Earth and Environmental Science*, 2016, 36: 12041
- [63] JANG Y S, MALAVIYA A, LEE J, et al. Metabolic engineering of *Clostridium acetobutylicum* for the enhanced production of isopropanol-butanol ethanol fuel mixture [J]. *Biotechnology Progress*, 2013, 29: 1083-1088.
- [64] BUIJS N A, SIEWERS V, NIELSEN J. Advanced biofuel production by the yeast *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2013, 17: 480-488.
- [65] SANCHEZ N, RUIZ R Y, INFANTE N, et al. Bioethanol production from Cachaza as hydrogen feedstock: Effect of ammonium sulfate during fermentation [J]. *Energies*, 2017, 10(12): 2112.
- [66] TAYLOR J D, JENNI M M, PETERS M W. Dehydration of fermented isobutanol for the production of renewable chemicals and fuels [J]. *Topics in Catalysis*, 2010, 53: 1224-1230.
- [67] LUO Y H, HE Y T, ZHANG R. A novel integrated process for selective preparation of jet-range fuels from low carbon alcohols and ABE [J]. *Fuel Processing Technology*, 2023, 241: 107603.
- [68] DAHAL K, BRYNOLF S, XISTO C, et al. Technoeconomic review of alternative fuels and propulsion systems for the aviation sector [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 151: 111564.
- [69] International Air Transport Association. IATA: SAF registry goes live [EB/OL]. Geneva: International Air Transport Association, (2024-04-04)[2025-11-03]. <https://ethanolproducer.com/articles/iata-saf-registry-goes-live>.
- [70] 生物质能观察. 瑞典将建设3家乙醇制航空燃料工厂 [EB/OL]. 北京: 网易, (2023-11-16)[2025-11-03]. <https://www.163.com/dy/article/IJLIK8HJ0553SGE5.html>. Biomass Energy Update. Sweden to build 3 ethanol-to-air-fuel plants [EB/OL]. Beijing: NetEase, 2023(2023-11-16)[2025-11-03]. <https://www.163.com/dy/article/IJLIK8HJ0553SGE5.html>.
- [71] 李全新, 毕培燕, 汪继聪, 等. 一种利用生物油合成航空煤油环烷烃和芳烃组分的方法: 201410723188 [P]. 2014-12-03.
- LI Q X, BI P Y, WANG J C, et al. A method for synthesizing aviation kerosene naphthenic and aromatic components from bio-oil: 201410723188 [P]. 2014-12-03.
- [72] LI L X, COPPOLA E, RINE J, et al. Catalytic hydrothermal

- conversion of triglycerides to non-ester biofuels [J]. *Energy and Fuels*, 2010, 24: 1305-1315.
- [73] LI L X. Method of converting triglycerides to biofuels: US7691159 B2 [P]. 2007-09-19.
- [74] MCGARVEY E, TYNER W E. A stochastic techno-economic analysis of the catalytic hydrothermolysis aviation biofuel technology [J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2018, 12: 474-484.
- [75] 邓京波. ASTM批准了ARA公司的可持续航空燃料生产新途径[J]. *石油炼制与化工*, 2020, 6: 12.
DENG J B. ASTM approves ARA's new approach to sustainable aviation fuel production [J]. *Petroleum Refining and Chemical Industry*, 2020, 6: 12.
- [76] 李晓彤, 王树雷. 生物喷气燃料应用进展[J]. *广东化工*, 2021, 3: 63-65.
LI X T, WANG S L. Recent application progress of bio-jet [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2021, 3: 63-65.
- [77] MEADOWS A L, HAWKINS K M, TSEGAYE Y, et al. Rewriting yeast central carbon metabolism for industrial isoprenoid production [J]. *Nature*, 2016, 537: 694-697.
- [78] 陈善帅, 路之纤, 卢奇棋, 等. 生物质制备航空燃油级烷烃的研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(9): 1-9.
CHEN S S, LU Z Q, LU Q Q, et al. Research progress on biomass preparation of jet fuel ranged hydrocarbons [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(9): 1-9.
- [79] 张琦, 马隆龙, 张兴华. 生物质转化为高品质烃类燃料研究进展[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(1): 170-179.
ZHANG Q, MA L L, ZHANG X H. Progress in production of high-quality hydrocarbon fuels from biomass [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1): 170-179.
- [80] 石宁, 唐文勇, 唐石云, 等. 木质纤维素衍生平台化学品制备液态烷烃的研究进展[J]. *化工进展*, 2019, 38(7): 3097-3110.
SHI N, TANG W Y, TANG S Y, et al. Advances in the catalytic conversion of lignocellulosic derived platform chemicals into liquid alkanes [J]. *Chemical Industry and Engineering progress*, 2019, 38(7): 3097-3110.
- [81] HUBER G W, CHHEDA J N, BARRETT C J, et al. Production of liquid alkanes by aqueous-phase processing of biomass-derived carbohydrates [J]. *Science*, 2005, 308(5727): 1446-1450.
- [82] 王琼, 王闻, 元伟, 等. 木质纤维素酸催化制备糠醛的工艺及机理研究进展[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(15): 272-282.
WANG Q, WANG W, QI W, et al. Research progress on the process and mechanism of catalytic preparation of furfural from lignocellulosic acid [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(15): 272-282.
- [83] 聂一凡, 候其东, 李维尊, 等. 糠醛的水解制备和应用研究进展[J]. *化工进展*, 2019, 38(5): 2164-2178.
NIE Y F, HOU Q D, LI W Z, et al. Advances in production furfural via hydrolysis and application of furfural [J]. *Chemical industry and engineering progress*, 2019, 38(5): 2164-2178.
- [84] 李昕, 史高峰, 王昭, 等. 生物质资源转化制备5-羟甲基糠醛的研究进展[J]. *现代化工*, 2020, 40(4): 22-26.
LI X, SHI G F, WANG Z, et al. Progress in preparation of 5-hydroxymethylfurfural by conversion of biomass resources [J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(4): 22-26.
- [85] 蒲红霞, 戴睿, 韩凯翔, 等. 生物质制备5-羟甲基糠醛(5-HMF)及其研究进展[J]. *皮革科学与工程*, 2020, 30(1): 23-26.
PU H X, DAI R, HAN K X, et al. Preparation of 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) from biomass and its research progress [J]. *Leather science and engineering*, 2020, 30(1): 23-26.
- [86] LIANG G F, WANG A Q, ZHAO X C, et al. Selective aldol condensation of biomass-derived levulinic acid and furfural in aqueous-phase over MgO and ZnO [J]. *Green Chemistry*, 2016, 18(11): 3430-3438.
- [87] CUETO J, KOROBKA V, FABIA L, et al. Aldol condensation of biomass-derived levulinic acid and furfural over acid zeolites [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(11): 4371-4383.
- [88] SU M X, LI W Z, MA Q Z, et al. Efficient synthesis of liquid fuel intermediates from furfural and levulinic acid via aldol condensation over hierarchical MFI zeolite catalyst [J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(12): 12518-12526.
- [89] AMARASEKARA A S, SINGH T B, LARKIN E, et al. NaOH catalyzed condensation reactions between levulinic acid and biomass derived furan-aldehydes in water [J]. *Industrial Crops and Products*, 2015, 65: 546-549.
- [90] 陈伦刚, 张兴华, 张琦, 等. 木质纤维素解聚平台分子催化合成航油技术的进展[J]. *化工进展*, 2019, 38(3): 129-142.
CHEN L G, ZHANG X H, ZHANG Q, et al. Progress in aviation biofuel technology by catalysis synthesis of platform molecules from lignocelluloses depolymerization [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(3): 129-142.
- [91] 宋成运, 魏晓丽, 陈学峰, 等. 废塑料热解油催化裂化反应性能研究[J]. *石油炼制与化工*, 2024, 55(5): 87-95.
SONG C Y, WEI X L, CHEN X F, et al. Study on catalytic cracking performance of pyrolysis oil from waste plastics [J]. *Petroleum Progressing and Petrochemicals*, 2024, 55(5): 87-95.
- [92] DANNA N, ALEXIS T B. Role of Ga³⁺ sites in ethene oligomerization over Ga/H-MFI [J]. *ACS Catalysis*, 2022, 12(22): 14173-14184.
- [93] 可持续塑料与燃料. 告别填埋焚烧! 中国石化用“黑科技”让废塑料重获新生[EB/OL]. 北京: 可持续塑料与燃料,

- (2025-06-05)[2025-08-25]. <https://mp.weixin.qq.com/s.> Sustainable Plastics and Fuels. Say goodbye to landfilling and incineration! SINOPEC uses “black technology” to give waste plastics a new lease on life [EB/OL]. Beijing: Sustainable Plastics and Fuels, (2025-06-05) [2025-08-25]. <https://mp.weixin.qq.com/s.>
- [94] 张鹏飞. 废弃塑料回收难,再生利用难题亟待破解[EB/OL]. 北京: 中证网, (2024-07-11)[2025-11-03]. https://www.cs.com.cn/ssgs/gsxw/202407/t20240711_6424055.html. ZHANG P F. Recycling of waste plastics is difficult, and the problem of regeneration and utilization needs to be solved urgently [EB/OL]. Beijing: China Zengxun Network, (2024-07-11) [2025-11-03]. https://www.cs.com.cn/ssgs/gsxw/202407/t20240711_6424055.html.
- [95] 证券时报. 解决低值废塑料回收难题,促行业转型发展[EB/OL]. 北京: 证券时报网, (2024-03-04)[2025-11-03]. <https://www.stcn.com/article/detail/1137406.html>. Securities Times. Solving the problem of low-value waste plastic recycling and promoting industry transformation and development [EB/OL]. Beijing: Securities Times Network, (2024-03-04)[2025-11-03]. <https://www.stcn.com/article/detail/1137406.html>.
- [96] Airbus. Power-to-liquids, explained [EB/OL]. Toulouse: Airbus, (2021-07-15)[2025-11-03]. <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-07-power-to-liquids-explained>.
- [97] GIUSEPPE P, GIULIA Z, RAFFAELE P, et al. Sustainable aviation fuel production using in-situ hydrogen supply via aqueous phase reforming: A techno-economic and life-cycle greenhouse gas emissions assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 418: 138141.
- [98] WEI J, GE Q J, YAO R W, et al. Directly converting CO₂ into a gasoline fuel [J]. Nature Communication, 2017, 8: 15174.
- [99] YANG X P, SONG G Y, LI M Z, et al. Selective production of aromatics directly from carbon dioxide hydrogenation over *n*Na-Cu-Fe₂O₃/HZSM-5 [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022, 61: 7787-7798
- [100] TIAN H F, JIAO C X, ZHA F, et al. Tandem catalysts of different crystalline In₂O₃/sheet HZSM-5 zeolite for CO₂ hydrogenation to aromatics [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, 653: 1225-1235.
- [101] WANG W H, HE R S, WANG Y, et al. Boosting methanol-mediated CO₂ hydrogenation into aromatics by synergistically tailoring oxygen vacancy and acid site properties of multifunctional catalyst [J]. Chemistry—A European Journal, 2023, 29(40): e202301135.
- [102] ZHANG J F, ZHENG K W, WANG X X, et al. Promotional effect of dispersant modification to ZnCr on CO₂ hydrogenation into aromatics over hybrid catalysts [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022, 61: 10766-10774.
- [103] QU Y Z, LI Z L, HU H W, et al. Highly selective conversion of CO₂ to *para*-xylene over tandem catalysts [J]. Chemical Communications, 2023, 59: 7607.
- [104] 肖志平. 金属-有机框架(MOFs)材料吸附二氧化碳的动力学行为及传质特性研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2025. XIAO Z P. Study on the characteristics of CO₂ adsorption performance and its mass transfer in metal-organic frameworks [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2025.
- [105] VAQUERIZO L, REGO-FERNÁNDEZ D. Net-zero sustainable aviation fuel (SAF) production via CO₂ hydrogenation in low-temperature Fischer-Tropsch synthesis: Process design and alternatives [J]. Journal of CO₂ Utilization, 2025, 102: 103225.
- [106] 舟舟. 我国可持续航空燃料开发现状[J]. 中外能源, 2023, 28(8): 31. ZHOU D. Current development status of sustainable aviation fuel in China [J]. Sino-Global Energy, 2023, 28(8): 31.
- [107] 王涛. 国内外生物燃料产业发展特点及对中国的启示[J]. 国际石油经济, 2024, 32(6): 51-61. WANG T. Development characteristics of domestic and foreign biofuel industry and implications for China [J]. International Petroleum Economics, 2024, 32(6): 51-61.
- [108] 管建强, 陈诗麒. 可持续航空燃料的规制现状、挑战与展望[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2023, 36(6): 173-185. GUAN J Q, CHEN S Q. Status, challenges and prospects of sustainable aviation fuel regulation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2023, 36(6): 173-185.
- [109] 许绩辉, 王克. 中国民航业中长期碳排放预测与技术减排潜力分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3412-3424. XU J H, WANG K. Medium- and long-term carbon emission prediction and technical emission reduction potential analysis of China's civil aviation industry [J]. China Environmental Science, 2022, 42(7): 3412-3424.
- [110] ADRIAN R, ABHISHEK D C, DOKANIA A, et al. Effect of zeolite topology and reactor configuration on the direct conversion of CO₂ to light olefins and aromatics [J]. ACS Catalysis, 2019, 9: 6320-6334.