

The Development of Alternative Jet Fuel for Aviation

Zhiming Chen¹, Xiaoyi Yang^{1*}, Zhijun Peng²

1. Department of Thermal Energy Engineering, Beihang University, 37 Xueyuan Rd., Haidian District, Beijing, P. R. China

2. School of Engineering and Design, University of Sussex, Brighton BN1 9QT, UK

yangxiaoyi@buaa.edu.cn

Abstract: Alternative fuels for aviation refer to aviation jet fuels produced by non-liquid fossil fuels and bio-fuels. With the growing shortage in the international oil supply and increasing concern on global environment, people begin to divert attention to the development of new energy, while continue to improve combustion efficiency. For power plants used on aircrafts, it is not easy to develop new engine system due to technical reasons. Most of the current researches in particular those on alternative fuels are basing on existing engine systems without significant modification to the working principles and structure. With an emphasis on sources of raw materials for alternative fuels for aviation and their producing methods, researches about alternative fuels for aviation conducted by the major aviation organizations and institutions and the comprehensive analysis of their conclusions are reviewed in this paper. In addition, relevant technical, economic and social factors of the development of alternative fuels for aviation are analyzed for providing an insight into the performances and development potentials of alternative fuel used in the aviation field.

Keywords: alternative fuels for aviation; Synthetic Paraffinic Kerosene; life cycle GHG emissions

航空替代喷气燃料的发展

陈志明¹, 杨晓奕^{1*}, 彭志军²

1. 北京航空航天大学, 北京, 中国, 100191

2. 英国萨克斯大学, 布莱顿, 英国, BN1 9QT

yangxiaoyi@buaa.edu.cn

摘 要: 航空替代燃料是指由非液化化石燃料和生物质生产的航空喷气燃料。随着国际石油供给矛盾日益突出, 人们对环境的要求越来越高。在继续提高燃烧效率的同时, 人们开始把视线转移到新能源的发展上。目前的研究基本上是基于不对相关的交通工具进行大的原理结构修改的思路进行。在航空领域, 由于技术的原因不易开发新的动力系统, 于是现有的研究很多是对发动机燃料的开发和测试等相关方面。本文介绍了目前各大航空组织和机构对航空替代燃料的研究概况, 并对其得到的结论进行了综合分析。具体介绍了航空替代燃料的原料来源, 生产方法。并分析了与航空替代燃料发展相关的技术因素和经济、社会因素。最后给出了航空替代燃料发展的潜力和发展过程中要处理的技术、经济等相关问题。

关键词: 航空替代燃料; SPK; 全生命周期 GHG 排放

1 引言

近年来, 国际石油供求矛盾日益突出并且环保压力的不断增大, 单纯的在燃烧系统本身上的发展已不能更好的解决这些冲突。于是, 人们开始致力于新能源的开发。相对于地面交通工具, 航空飞行器由于技术等问题其能量供给灵活性相对不足, 不易开发新的动力系统^[1]。所以很多相关的研究致力在航空替代燃料的开发与应用。

目前正在研究的航空替代燃料有 F-T 法合成航空替代燃料和油料通过加氢、脱氧和裂解等方法生产的可再生航空替代燃料。其中 F-T 法合成的航空替代燃料包括煤制油 (CTL)、天然气制油 (GTL)、生物质制油 (BTL) 和煤、生物质联合制油 (CBTL) 等, 生产出的航空替代燃料称作合成烷基航空煤油 (SPK)。油料加氢、脱氧和裂解等方法生产的可再生航空替代燃料包括加氢可再生喷气燃料 (HRJ)、

加氢脱氧制航空燃料(HDO)^[2]等,其中HRJ是SPK的一种。本文将通过对这些燃料发展现状和前景的分析,给出未来航空替代燃料的发展的前景以及所面临的问题。

2 发展态势

2.1 参与组织机构及进展

在19世纪70年代中期,由于石油危机的影响,美国能源部开始赞助用煤、油页岩和沥青砂制取液化化石燃料进行的研究^[3]。美国国家航空航天局(NASA)在2006年的报告中考虑的航空替代燃料包括生物转化油,甲醇,乙醇,液态天然气,液氢和合成燃料,得出了这些燃料在应用中在安全、供给和性能方面的挑战^[1]。2009年前航空替代燃料的研究与测试主要由商业航空替代燃料机构(CAAFI)来组织开展,其组成成员为航空替代燃料发展相关的企业、组织、机构等。近两年来,航空替代燃料和能源的可持续发展道路组织(SWAFEA)、飞机发展中的替代燃料和生物燃料开发项目组(ALFA-BIRD)、美国能源安全中心(DESC)和美国替代燃料测试机构(AFCO)也对航空替代燃料进行了相应的研究并对其测试进行了规划^[2]。

SWAFEA是欧洲的一个组织,其目的是为航空用新燃料和能源建立一个发展思路,为政策制定者的决策提供信息和指导。其研究团队来自于相关的各大公司和研究机构,由法国空间实验室领导,其中法国空军和国际航空运输协会(IATA)代表航空工业也参与其中。ALFA-BIRD主要工作是关于飞机研发过程中使用航空替代燃料和生物燃料可行的技术方案规划。目前技术上的最大挑战是满足航空发动机长期使用的苛刻要求。为此,ALFA-BIRD召集了相关的专家对该项目进行了研究,并得到了企业财团的支持。DESC和AFCO已经对F-T法制取的航空替代燃料和加氢处理制取的航空替代燃料进行了相应的测试^[2]。

此外,IATA召集与发展航空替代燃料相关的机构及组织,对发展航空替代燃料过程中关于水和土地应用的权责、人权、食品安全、温室气体排放和经济性等重要话题进行了讨论^[2]。国际航空组织(ICAO)召开了研讨会来寻找航空替代燃料发展过程中新的问题的解决意见,以求为航空替代燃料的发展确定路线图。全球各大能源供给企业也逐渐参与到航空替代燃料的开发进程中^[4]。2009年9月1日美国材料和试验

协会(ASTM)发布了世界上第一个半合成航空燃料的标准,标准号是D7566^[2]。并且对多种航空替代燃料的燃烧性能进行了测试。

在国内,2010年6月1日,中国国际航空股份有限公司宣布,将在中国正式启动首次可持续航空生物燃料验证飞行计划。2010年5月26日,中国科学院青岛生物能源与过程研究所所长王利生与美国波音公司研发中心中国副总裁艾·博恩(Al Bryant)共同签署了“关于推进藻类可持续航空生物燃料合作备忘录”。并将在备忘录框架下,共同投资成立“可持续航空生物燃料联合研究实验室”。

2.2 航空替代燃料的飞行测试及规划

美国空军研究实验室(AFRL)计划在2011年前完成F-T法合成航空燃料和传统燃料的1:1混合测试。目前B-52、C-17、B-1B、F-22和F-15已经成功进行了F-T法合成航空替代燃料和传统燃料的1:1混合测试。KC-135、C-5、C-130J和T-38也已经完成了测试,正在等待最终的报告结果。F-16也正在进行测试,但由于维修问题使计划推迟。在各大航空公司的主导下F-T法合成航空替代燃料在商业应用中也进行了相关的测试。此外,有关合成燃料的商业应用规划在DESC的主导下正在进行。在另一方面,HRJ燃料在DESC和美国空军的主导下也与燃料供给公司签订合同进行测试^[2]。商业航空替代燃料机构(CAAFI)制订了在2010年完成HRJ和常规航空燃料1:1混合测试,2011年完成全部的由F-T法合成的SPK的测试,2013年完成HRJ的全部测试的计划^[5]。

3 航空替代燃料综合分析

目前航空替代燃料的原料来主要源自煤、天然气等化石燃料和生物质。其中生物质包括以油菜、大豆等农作物为主的第一代生物燃料,以木质纤维素为主的第二代生物燃料和以藻类为主的第三代生物燃料。

3.1 制取方法

目前航空替代燃料的制取方法主要有F-T合成法、油料加氢制取法和生物化学制取方法^[2]。F-T方法是把原料通过高温裂解过程生成挥发物、生物油、碳和灰烬。然后把高温裂解得到的产物通过气化反应生成合成气,合成气通过F-T方法合成各种大分子的碳氢化合物。当分子中碳原子数为9-15时,合成煤油完

成^[2]。

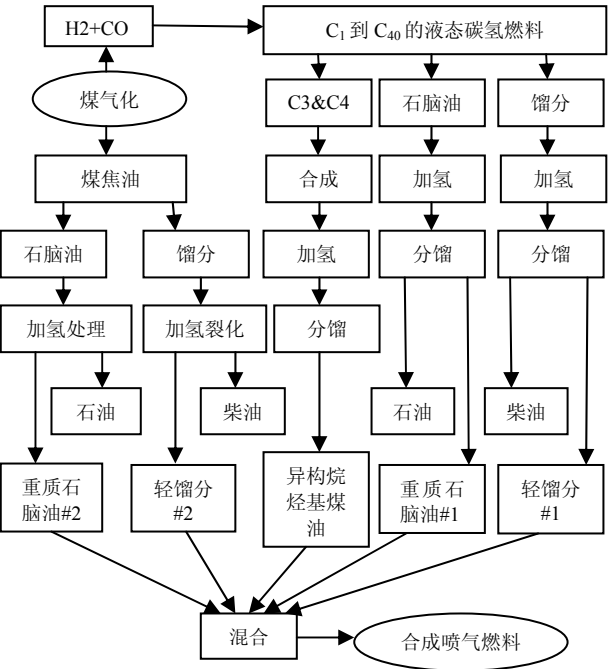


Figure 1. Production Schematic for SASOL Fully Synthetic Jet Fuel

图1. 萨索尔公司全合成喷气燃料生产图解^[6]

南非萨索尔公司生产了一种全合成喷气燃料（FSJF），即先将煤气化生成合成气和煤焦油。然后用 F-T 法将合成气转化为 C₁ 到 C₄₀ 的液态碳氢燃料，对其进行蒸馏，将不同馏分进行处理得到异链烷基煤油、重质石脑油、轻馏分以及汽油和柴油。同时对煤焦油进行蒸馏并处理得到重质石脑油和轻馏分以及汽油和柴油。具体生产过程如图 1 所示。然后将得到

的重质石脑油、轻馏分和异构烷基煤油按不同比例混合，从而制得 FSJF，对其测试结果表明 FSJF 的性能和常规喷气燃料的性能几乎一样^[6]。

生物油相对于矿物油含有较多的氧，在转化过程中先通过标准程序将生物油（甘油三脂、自由脂肪酸）中的杂质清除，然后通过脱氧过程将其转化为柴油碳链长度范围的烷基基柴油，然后通过异构化和裂解将碳链长度减少到航空燃料的长度，在裂解过程中将其和氢气反应使其转化为饱和烷烃这样就可以得到与传统航空燃料有相同碳长度的生物 SPK^[7]。生物化学制取方法是用酶和微生物将预处理过的纤维素和半纤维素等物质转化为糖类，然后再通过发酵作用将其转化为醇类燃料。该方法主要原料是生物质^{[2][8]}。

对于第三代生物燃料海藻，其制取液体燃料的方法有在催化剂作用下加氢热化学液化，高温热解，生物化学分解以及提炼海藻油后制取液体燃料^[9]。在海藻的裂化、加氢裂化、液化、热解和酯交换反应过程中要用到催化剂。常见的催化剂有过渡金属、分子筛、酸和碱催化剂。最近有研究指出有大量活性载体和大的表面积的纳米材料在海藻制油过程中有更好的催化效果^[10]。

3.2 组成及性能

合成燃料目前大部分都是合成烷基基航空煤油。分析发现生物油制取的 SPK 主要由链状的烷烃和异构链状烷烃组成，并含有少量的环烷烃，其碳链长度为 C₉ 到 C₁₅，和传统航空煤油的差不多^[7]。合成燃料中几乎没有芳香烃类化合物，不同烷烃的比例和常规喷气燃料的相似^[11]。

Table 1. Shows the CHN elemental analysis of the Bio-SPK samples by D5291
表 1. 由 D5291 进行的生物 SPK 的 CHN 元素分析^[7]

元素	亚麻荠 SPK	麻风树 SPK	麻风树-海藻 SPK	亚麻荠-麻风树-海藻 SPK
%C	85.4	85.4	85.7	85
%H	15.1	15.5	15.1	15
%N	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
%C+%H	100.5	100.9	100.8	100
C/H	5.7	5.5	5.7	5.7

表 1 是对生物油合成 SPK 的 C、H、N 元素含量的分析，可见其各元素含量基本相同，原料的种类对

最终制得的 SPK 元素组成几乎没有影响。并且碳氢比为 5.7 左右, 和常规航空燃料近似相等。相对于 C 和 H, N 的含量可忽略不计^[7]。

微量元素在航空替代燃料的制取中也是要考虑的重要因素, 因为它们对燃料的性能有很大的影响。表 2 为对各种生物制取的 SPK 中微量元素的含量比

较。从结果来看生物油制取的 SPK 中的微量元素均符合标准, 并且还远远低于标准, 在未来一段时间内不会因为标准的更改而不得不开发新的生产工艺。此外, 其含硫量相对于其它微量元素很小, 可以认为其含硫量为零^[7]。

Table 2. Chemical analysis of neat Bio-SPKs
表 2. 对纯净的生物质制 SPK 的化学分析^[7]

元素	标准	麻风树	麻风树/海藻	亚麻荠/麻风树/海藻	ASTM 测试
氧, 重量百分数		<0.03	<0.03	<0.03	UOP
氮, ppm	2	<0.4	<0.4	<1	D4629
水, ppm	75	32.0	34.0	19.0	D6304
硫, ppm	15	<0.01	<0.01	<0.01	D5453
金属, ppm	≤0.1	-	-	-	-
Al, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Pd, Pt 等, ppm	-	<0.1	<0.1	<0.1	-
卤素, ppm	≤1	<0.1	<0.1	0.2	D7359

对于由 GTL 制取的合成喷气燃料 S-8, 研究发现其层流火焰速度和常规喷气燃料 Jet-A 基本无差别, 但其熄火特性相对于 Jet-A 有很大的改善^[12]。相对于 JP8 其点火延迟时间较短, 但减少量不多。其整体活化能量相对于 JP8 增加 11kcal/mol。由于 S-8 的 H、C 比相对于 JP8 较高, 其热稳定性相对较好。在燃烧 S-8 时烟和颗粒物的生成相对于 JP8 大大减少^[13]。将瑞典的 Oroburos AB 公司用合成气生产的合成喷气燃料和 Jet A1 进行对比, 在低温贫油时合成喷气燃料燃烧产生的 UHC 量相对很大并且燃烧效率很低, 但随着燃油流量的增加其燃烧产生的 UHC 先于 JetA1 达到最小值。由于在高温时 CO₂ 的分解作用合成喷气燃料燃烧排放的 CO 和 JetA1 基本相同, NO_x 排放量相对于 JetA1 较高, 但 Jet A1 的雾滴直径相对较小^[14]。对南非萨索尔公司通过高温 F-T 方法合成的 CTL 研究表明, 在空车状态下相对于 Jet A1 其烟排放量平均减少 95.3%, 巡航状态下平均减少 86.8%。巡航状态下 NO_x 排放降低 7%, 热力学效率提高 1.2%。合成喷气燃料燃烧时由于辐射减少, 火焰筒中心区温度相对于 Jet A1 减小 21.3K, 火焰筒尾部相对减小 5K^[15]。

4 航空替代燃料应用前景

4.1 经济社会因素分析

NASA 在其研究报告中认为由煤、天然气和其它原料来源的合成燃料可以在目前的航空发动机中应用而不需要发动机结构较大的改变^[1], 在应用中不需要大的人力、物力投入, 且生产技术相对成熟, 有广泛的应用前景。但煤和天然气作为化石燃料, 其储量有限, 并且在制取喷气燃料过程中有更多的能量消耗, 在目前生物质液体燃料没有大规模应用之前可以作为喷气燃料战略储备技术, 以应对紧急情况。

对于由生物质原料生产航空替代燃料不乏反对的声音。有文献指出空军开发航空替代燃料是基于国防安全的需要且主要集中于 CTL 和 GTL, 而民用航空替代燃料发展主要由民机制造企业推动, 而直接与航空替代燃料相关的航空发动机制造商则只是跟随测试。目前航空工业推进生物燃料在航空领域应用主要是基于商业利益的考虑, 而非燃料的可持续性考虑^[16]。但从前面分析可知国际化的航空组织均参与了生物替代

燃料的论证和开发过程, 不管航空工业推进在航空发动机上的应用的初衷是什么, 虽然在发展过程中还有很多技术问题需要解决, 生物燃料的发展前途仍然是光明的。

目前, 第一代生物燃料在技术和经济上已经成熟, 在世界一些国家已经形成商业化生产和应用。但由于其原料在生产过程中占用大量土地和水资源、全生命周期的温室气体排放由于土地用途改变而增多、和粮食生产相抵触等原因而不能大规模生产。于是促使研究重点转移到以木质纤维素为原料的第二代生物燃料上^[8]。相对于第一代生物燃料, 第二代生物燃料在相同的种植面积上有更大的产出, 并且可以在贫瘠的土地上种植。更重要的是第二代生物燃料不与人类争粮食, 目前仍然处于研究开发阶段^[8]。但由于其生产中仍然需要大量的土地和水的供应, 限制了大规模的生产。于是研究的重心又转到水生有氧光合微生物 (AMOPs) ^[17]。

在 AMOPs 中最有开发潜力的是微藻, 它包括所有的单细胞和简单多细胞微生物。微藻的优势在于: 能在全年快速生长并且生长中需水量相对于陆地作物大大减少; 能在微咸的非耕种土地上种植, 对环境的影响甚微; 产油率高并且在生长过程中吸收大量的 CO_2 (1kg 干的藻类生物燃料消耗大约 1.83kg 的 CO_2); 种植过程中不需要除草剂和杀虫剂并且副产品的商业价值也很高^[9]。虽然有这么多的优点, 但要实现微藻的大规模生产和应用还有许多问题需要解决: 在培养微藻时要对其品种进行筛选, 使其满足大规模生产时的高生长速度和产油率; 要解决在其培养过程中的能源消耗问题; 要对其中含有的 NO_x 和 SO_x 进行净化; 要解决在高纬度地区因昼夜温差大而引起的生长速度减缓的问题等^[9]。

目前对微藻生产过程出现的问题提出的解决方法有: 针对美国国情一些学者提出了建立综合可再生能源园区的方案, 就是把太阳能、风能、地热能等可再生能源和为微藻的生产提供能量, 并将多余的电能用智能电网输送到用户^[18]; 在微藻收获过程中用超滤膜技术, 提高了分离效果^[19]; 将微藻的培养和制油过程与鱼的养殖和食物生产结合起来; 在需处理的废水中培养微藻; 用火电厂生产的电能、余热和 CO_2 用来提供微藻生长过程所需的能量和养分^[20]。有学者对在废水中培养微藻的经济性和环境影响进行了分析, 并对生产过程中参数控制进行了优化分析^[21]。

针对生物原料生产替代燃料的潜能美国空军和环境与能源机构进行了联合研究, 其结果如图 2 所示。其中 F-T 合成方法假设生成的油料中有 25% 的喷气燃料, 55% 的柴油和 20% 的石脑油; CBTL 中含有 75% 的煤和 25% 的生物质^[5]。

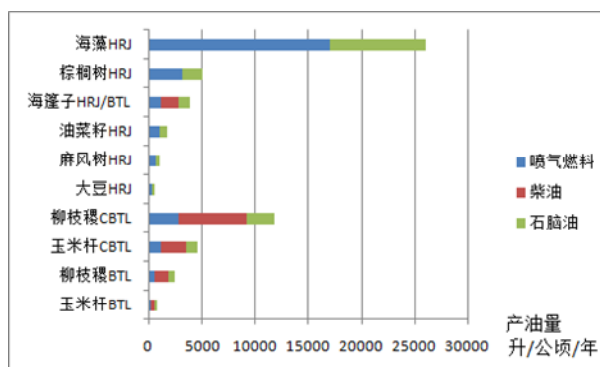


Figure 2. Fuel that could be derived from biomass production potential for various alternative jet fuels

图2. 来自于生物质的替代喷气燃料的生产潜能^[5]

从图中可以看出 F-T 法制取的航空替代燃料占 F-T 法生成燃料的份额不可能是 100%, 要生成一定量的航空燃油必须用更多的原料。在各种生物质中以海藻为原料的生物燃料生产潜力最大。其中油菜籽的产油率为 44%, 麻风树种子产油率为 35%, 海藻产油率为 25%, 棕榈果产油率为 22%, 大豆产油率为 18%^[5]。对于海藻子, 由于其生产的油中有 BTL 和 F-T 法合成燃料, 其组成为 65% 的 F-T 制取燃油和 35% 的 HRJ^[5]。目前全球的大豆油、棕榈油和菜油的产量分别只能满足现有美国航空用油的 34%、43% 和 18%^[5]。

ICAO 在其研究报告中指出用麻风油制取的航空燃料的规模生产技术会在 2 到 4 年里解决。而盐生植物制航空替代燃料会提供大量的燃料, 其技术会在近期得到突破。而海藻制油的商业应用估计要有 8 至 10 年^[4]。

根据国际航空运输协会 (IATA) 的研究结果, 目前在经济上航空替代燃料的生产总体上是不合算的。但是到 2012 年, 由于要遵循欧共体的排放标准, 在价格中收取二氧化碳排放的成本, 生物燃料就会相对有竞争力。但是其每升的价格仍然比传统航空燃料仍高出 0.3 美元。但考虑到航空替代燃料的生产技术日益进步, 并且由于资源短缺导致常规喷气燃料价格的进一步上升, 预计在 2030 年左右 BTL 和 HRJ 的价格会

低于常规喷气燃料的价格加上排放二氧化碳的成本，从而在经济上相对于常规喷气燃料更有竞争力。BTL 技术由于其经济性和确定的原料来源使其能够在未来航空生物燃料中占一席之地^[2]。虽然 CTL 和 GTL 的技术相对成熟，但其成本在考虑和不考虑二氧化碳的条件下相对于当前的航空燃料还很高，在未来会由于各国的能源结构会有不同的价格竞争力。

4.2 环境因素分析

在 2003 年交通领域的二氧化碳排放量占总排放量的 24%，而航空运输排放的二氧化碳仅占 2%^[22]。但由于近几年航空运输业的快速发展，航空运输二氧化碳的排放量迅速增长，预计到 2050 年达到 2000Mt/Yr 以上，是目前的 3~4 倍^{[23][24]}。目前欧洲在二氧化碳减排方面采用了收碳税的方式^[23]，有学者对欧洲航空运输污染排放的外部成本进行了定量分析^[25]，以便于碳税的收取。目前的航空运输中二氧化碳的减排方法主要有提高燃烧效率，改进飞行方式等^[26]，但这些方法不能满足大量的二氧化碳的减排要求。而

用生物制取航空替代燃料虽然在技术上不成熟，但考虑到全生命周期有实现低排放甚至零排放的潜力。

2010 年，美国空军和环境与能源机构对航空替代燃料的全生命周期 GHG 排放进行了联合研究。在研究中将土地用途改变（LUC）引起的碳排放和二氧化碳的捕获与封存技术（CCS）考虑在内。其中 LUC 引起的碳排放分析在能源作物全生命周期 GHG 排放分析中起重要作用^[27]，引起碳排放的原因是作物种类改变引起了土壤中有机碳含量改变^[28]。CCS 技术是将排放的二氧化碳先捕获然后将其排入地下储存起来，该技术的发展还需要很多技术、政策等方面的问题需要解决，但就目前来看是二氧化碳大规模减排的有效手段^{[29][30]}。

在该研究中以美国本土的能量供给来源为研究对象，并结合当下先进的航空替代燃料生产技术以及其发展潜力，并进行了一些可行的假设得到了常规航空燃料和航空替代燃料的全生命周期 GHG 排放，见图 3 所示（其中 gCO₂e/MJ 为每消耗 1 兆焦的燃料生成的

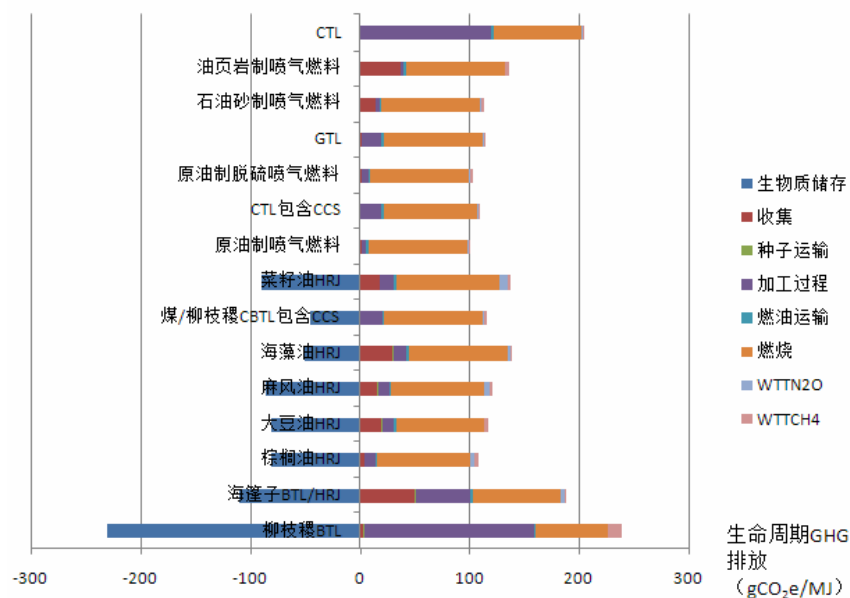


Figure 3. Life cycle GHG emissions for the alternative jet fuel pathways under consideration
图3. 所考虑的替代喷气燃料生命路线的全生命周期的GHG排放^[5]

当量二氧化碳的克数)。WTT 为从油料从原料到交通工具中油箱过程中的碳排放量^[5]。由于和常规喷气燃料进行对比，在图中没有列出土地用途改变引起的二氧化碳排放。

由图可以看出，常规喷气燃料的全生命周期GHG排放相对最小。生物喷气燃料虽然在理论上有更少的全生命周期GHG排放，可在现有的技术条件下全生命周期GHG排放没有竞争力，要实现喷气燃料的全生命

周期的低GHG排放还有很长的路要走。

5 结论

航空替代燃料在近几年的快速发展是基于能源安全的考虑。对于由非液化化石燃料制取的航空替代燃料,虽然有相对充足的原料来源,但其在成本、全生命周期 GHG 排放和使用性能等方面和常规喷气燃料均有一定差距,目前只能作为应急的技术储备手段。对于生物质制取航空替代燃料,第一代和第二代生物燃料均由于土地、水等资源的限制而不能够大规模的应用,而第三代生物燃料目前正处于研究开发阶段,虽然在理论上有充足的原料来源,但要实现其大规模的商业应用还有很长的路要走。此外,虽然理论上生物质制取的航空替代燃料全生命周期 GHG 排放相对于常规喷气燃料很小,但目前在生产成本、使用性能和全生命周期 GHG 排放等方面相对还有一定差距。

目前航空替代燃料的发展还处于起步阶段,有许多技术问题需要进一步解决。但随着液化化石燃料的日益紧缺,其发展前景是广阔的。对于地面交通工具,非油料动力系统目前发展很快。但由于航空飞行的苛刻条件,其动力系统的更新换代相对难得多。在这种情况下大力发展航空替代燃料将是一个不错的航空动力解决方案。在性能方面,CTL 能够制取几乎和常规喷气燃料性能一样的航空替代燃料。对于生物质制取的航空替代燃料,虽然在性能上和常规喷气燃料有一定差异,但其使用也不需要现有航空发动机大的结构修改。并且第三代生物原料海藻的大规模商业生产在不远的将来可能成为现实。在新的航空动力系统大规模应用和氢能时代到来之前,现有的航空替代燃料必将成为航空业持续发展的可靠保障。

致谢

本研究课题由“航空推进创新引智项目”(111 项目)提供资金支持。

References (参考文献)

- [1] D.Daggett, O.Hadaller, R.Hendricks, R.Walther. Alternative Fuels and Their Potential Impact on Aviation[R]. Hamburg, Germany: German Society for Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [2] Günther Matschnigg. Alternative Fuels Foreword 2009[EB/OL]. <http://www.iata.org/ps/publications/Pages/alternative-fuels.aspx>, 2009-12.
- [3] L.Q. Maurice, H. Lander, T. Edwards, W.E. Harrison III. Advanced aviation fuels: a look ahead via a historical perspective[J]. *Fuel*, 2001, 80 (5), P747-756.
- [4] Ebad Jahangir, Theodore Thrasher. A Summary of Research and perspectives Presented at the ICAO Workshop on Aviation and Alternative Fuels[EB/OL]. <http://www.icao.int/waaf2009/Documentation.htm>, 2009-02-12.
- [5] Russell W. Stratton, Hsin Min Wong, James I. Hileman. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Alternative Jet Fuels[EB/OL]. <http://web.mit.edu/aerastro/partner/projects/project28.html>, 2010-07.
- [6] Clifford A. Moses, Petrus N. J. Roets. Properties, Characteristics and Combustion Performance of SASOL Fully Synthetic Jet Fuel[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2009, 131(4), P1-17.
- [7] James D.Kinder, Timothy Rahmes, Evaluation of Bio-Derived Synthetic Paraffinic Kerosene(Bio-SPK)[EB/OL]. <http://www.oilgae.com/blog/2009/09/evaluation-of-bio-derived-synthetic.html>, 2009-9-22.
- [8] Ralph E.H. Sims, Warren Mabey, Jack N. Saddler, Michael Taylor. An overview of second generation biofuel technologies[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(6), P1570-1580.
- [9] Liam Brennan, Philip Owende. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(2), P557-577.
- [10] N.H. Tran, J.R. Bartlett, G.S.K. Kannangara, A.S. Milev, H. Volk, M.A. Wilson. Catalytic upgrading of biorefinery oil from micro-algae[J]. *Fuel*, 2010, 89(2), P265-274.
- [11] Timothy F. Rahmes, James D. Kinder, et al. Sustainable Bio-Derived Synthetic Paraffinic Kerosene(Bio-SPK) Jet Fuel Flights and Engine Tests Program Results[A]. AIAA 2009-7002, 9th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO) (2009).
- [12] Kamal Kumar, Chih-Jen Sung, Xin Hui. Laminar Flame Speeds and Extinction Limits of Conventional and Alternative Jet Fuels[A]. AIAA 2009-991, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition(2009).
- [13] P. Gokulakrishnan, M. S. Klassen, R. J. Roby. Ignition Characteristics of a Fischer-Tropsch Synthetic Jet Fuel[A]. Volume 3: Combustion, Fuels and Emissions, Parts A and B[C]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2008:921-929.
- [14] Fredrik Hermann, Per Hedemalm, Raik Orbay. Comparison of Combustion Properties Between a Synthetic Jet Fuel and Conventional Jet A1[A]. Volume 2: Turbo Expo 2005[C]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2005: 389-397.
- [15] Nigel Bester, Andy Yates. Assessment of the Operational Performance of Fischer-Tropsch Synthetic-Paraffinic Kerosene in a T63 Gas Turbine Compared to Conventional Jet A-1 Fuel[A]. Volume 2: Combustion, Fuels and Emissions[C]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2009: 1063-1077.
- [16] George Marsh. Biofuels: aviation alternative?[J]. *Renewable Energy Focus*, 2008, 9(4), P48-51.
- [17] G Charles Dismukes, Damian Carrieri, Nicholas Bennette, Genady M Ananyev, Matthew C Posewitz. Aquatic phototrophs: efficient alternatives to land-based crops for biofuels[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2008, 19(3), P235-240.
- [18] Bobban Subhadra, Mark Edwards. An integrated renewable energy park approach for algal biofuel production in United States[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(9), P4897-4902.
- [19] Xuezhi Zhang, Qiang Hu, Milton Sommerfeld, Emil Puruhito, Yongsheng Chen. Harvesting algal biomass for biofuels using ultrafiltration membranes[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14), P5297-5304.
- [20] Anoop Singh, Poonam Singh Nigam, Jerry D. Murphy. Mechanism and challenges in commercialisation of algal biofuels[J]. *Bioresource Technology*, In Press, Corrected Proof, Available online 6 July 2010.

- [21] J.B.K. Park, R.J. Craggs, A.N. Shilton. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production[J], *Bioresource Technology*, In Press, Corrected Proof, Available online 10 July 2010.
- [22] Werner Rothengatter. Climate change and the contribution of transport: Basic facts and the role of aviation[J], *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2010, 15(1), P5-13.
- [23] David S. Lee, David W. Fahey, Piers M. Forster, Peter J. Newton, Ron C.N. Wit, Ling L. Lim, Bethan Owen, Robert Sausen. Aviation and global climate change in the 21st century[J], *Atmospheric Environment*, 2009, 43(22-23), P3520-3537.
- [24] Donald Wuebbles, et al. Workshop on the Impacts of Aviation on Climate Change: A Report of Findings and Recommendations[EB/OL], <http://web.mit.edu/aeroastro/partner/reports/index.html>, 2006-06-09.
- [25] Youdi Schipper. Environmental costs in European aviation[J], *Transport Policy*, 2004, 11(2), P141-154.
- [26] D.S. Lee, G. Pitari, V. Grewe, K. Gierens, J.E. Penner, A. Petzold, M.J. Prather, U. Schumann, A. Bais, T. Bernsten, D. Iachetti, L.L. Lim, R. Sausen. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation[J], *Atmospheric Environment*, In Press, Corrected Proof, Available online 12 June 2009.
- [27] R. Benndorf, S. Federici, C. Forner, N. Pena, E. Rametsteiner, M.J. Sanz, Z. Somogyi. Including land use, land-use change, and forestry in future climate change, agreements: thinking outside the box[J], *Environmental Science & Policy*, 2007, 10(4), P283-294.
- [28] Miguel Brandão, Llorenç Milà i Canals, Roland Clift. Soil organic carbon changes in the cultivation of energy crops: Implications for GHG balances and soil quality for use in LCA[J], *Biomass and Bioenergy*, In Press, Corrected Proof, Available online 12 January 2010.
- [29] Liang Dapeng, Wu Weiwei. Barriers and incentives of CCS deployment in China: Results from semi-structured interviews[J], *Energy Policy*, 2009, 37(6), P2421-2432.
- [30] M. Odenberger, F. Johnsson. The role of CCS in the European electricity supply system[J], *Energy Procedia*, 2009, 1(1), P4273-4280.