

液化天然气作为航空燃料的发展趋势 及特点分析

刘爱骥, 陈 欣, 陈保东, 曾 文, 王成军
(沈阳航空航天大学 航空航天工程学部(院), 沈阳 110136)

摘 要: 为研究液化天然气(LNG)作为航空燃料的可行性,对 LNG 的特点、发展趋势及作为航空燃料存在的问题进行了分析.采用了横向比较的方法,将 LNG 与新的航空替代燃料和传统航空燃料进行了比较和计算分析.结果表明:与新的航空替代燃料相比,LNG 具有来源广泛、经济性好、发动机适应性强等优点.与传统航空燃料相比,LNG 的储量大,可使用 100 年以上;可燃极限宽、污染物排放低,NO_x 排放仅为航空煤油的 1/4;单位质量能量密度高、成本低,其燃料成本仅为航空汽油的一半,航空煤油的 1/3;同时还具有可用于发动机高温部件冷却用的冷能,是一种极富潜力的航空燃料.指出在 LNG 作为航空燃料方面急需开展动力系统与飞机结构的匹配、燃料相态的有效转化及不同燃料在燃烧室内的反应特性等方面的研究工作.

关 键 词: 航空替代燃料; 液化天然气; 低温燃料; 污染物排放; 发展趋势

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Development trend and characteristics of liquefied natural gas as the aviation fuel

LIU Ai-guo, CHEN Xin, CHEN Bao-dong, ZENG Wen, WANG Cheng-jun

(Faculty of Aerospace Engineering,
Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: The characteristics, development trend and existing problems of liquefied natural gas (LNG) as aviation fuel were analyzed. The differences among LNG, new and traditional aviation fuels were compared and analyzed by using the method of horizontal comparison in order to study the feasibility of LNG as the aviation fuel. The results showed that LNG had the advantages of wide source, good economy and strong adaptability compared with the new aviation substitute fuels. Compared with the traditional aviation fuel, LNG had large reserves which can be used for more than 100 years; it also had the advantages of wide flammability limit, low emissions of NO_x only accounting for 1/4 of aviation kerosene; LNG had high energy density and lower cost, as the fuel cost is only half of the aviation gasoline and 1/3 of aviation kerosene. As a highly potential aviation fuel, LNG also can be used for cooling high temperature components of engine with cold energy. It was also pointed out that many work had to be done on matching power system with the aircraft structure, effectively transforming the fuel phase and researching the reaction characteristics of different fuels in the combustion chamber if LNG was used as an aviation fuel.

Key words: aviation alternative fuels; liquefied natural gas (LNG);
low temperature fuel; pollutant emission; development trend

收稿日期: 2015-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(51476106); 航空基金(2014ZB54009)

作者简介: 刘爱骥(1979—),男,辽宁义县人,博士,副教授,主要研究方向为先进低排放燃烧技术.

根据飞机动力系统的不同航空燃料分为两大类,一类是针对航空活塞式发动机的航空汽油,另一类是针对喷气式航空发动机的喷气燃料,也称为航空煤油.从 1903 年美国怀特兄弟的第一架飞机开始使用活塞式发动机起,航空汽油就一直作为航空活塞式发动机的燃料.1937 年,美国 and 英国根据含铅量的不同制定了航空汽油标准,20 世纪 60 年代美国推出了 100LL 号低铅汽油,该型号汽油目前仍为活塞式发动机的主要燃料^[1].从 1944 年美国公布第一个煤油型军用喷气燃料 JP-1 起,到 1979 年美军专门为空军研制的 JP-8,美国先后研制了 10 个型号的军用航空煤油.1953 年美国民用航空开始使用涡轮发动机,同期制定了两个民用喷气燃料规格—Jet A 和 Jet B,其中 Jet B 主要在低温下使用,目前主要在加拿大和美国阿拉斯加州使用,世界其他地区主要使用 Jet A 和 Jet A-1.我国的航空喷气燃料的规格指标延续了前苏联的标准,并采用了军、民通用的原则,将航空涡轮燃料分为 1-6 号,其中 3 号喷气燃料的性能接近 Jet A^[2].

煤油型喷气燃料从投入使用以来,一直作为航空涡轮发动机的最佳选择.据世界石油巨头雪佛龙公司的估计,2007 年全球航空业每天消耗的燃油多达 6.57 亿升.我国对喷气燃料的消费以每年 13% 左右的速率快速增长,2010 年国内喷气燃料消费量达到 4×10^9 kg 以上^[3].喷气燃料消费量的增加一方面对原油的供应是一个巨大的挑战,另一方面也会导致 CO₂ 等污染物的增加.本世纪初欧美等国家已经意识到自身对石油基航空燃料的过分依赖,给国防和经济安全留下严重隐患.国际气候变化委员会认为,排放高度增加对环境的影响程度也增加,确定到 2050 年时 CO₂ 排放量减到 2005 年排放量的一半^[4].采用新的航空替代燃料,并制订相关的法规、建立燃料生产企业与航空公司之间的有效交流机制将是解决这些问题的有效途径^[5].煤和天然气基合成燃料、生物燃料、低温燃料是目前航空替代燃料关注的热点,对合成燃料和生物燃料的研究和报道目前已经开展了很多,并进行了试验飞行,获得了大量的可靠数据^[6].但对低温燃料的使用,由于存在一定的技术问题目前还需进行深入的研究.本文总结了各种航空替代燃料的特点及存在的问题,研究了低温燃料中液化天然气(LNG)的特点及作为航空燃料的优势,对 LNG 作为航空燃料的可行性及存在的问题进行了分析,以期推动 LNG 作为航空

燃料的发展.

1 航空替代燃料的发展及使用

1.1 煤和天然气基合成燃料

合成燃料是将煤炭和天然气通过化工流程转变而成的一种液态燃料,包括煤液化合成喷气燃料(CTL)和天然气合成喷气燃料(GTL),其中 CTL 又分为间接液化和直接液化两种.合成燃料最早由德国科学家 Fischer 和 Tropsch 于 20 世纪 20 年代发明,简称为费托法(FT),并于 1936 年建成工业规模的合成油厂^[7].费托法制成的合成燃油在燃烧时产生的硫化物和芳香烃类物质极少,它的热稳定性也非常优秀^[8].煤基合成喷气燃料与 Jet A-1 航空煤油的理化性能、热稳定性和燃烧性能比较见表 1^[9].

表 1 煤基合成喷气燃料与航空煤油性能比较

Table 1 Performance of coal based synthetic jet fuel and aviation kerosene

参数	煤基合成燃料	Jet A-1 航空煤油
芳香烃体积分数/%	10.9	22.9
饱和烃体积分数/%	89.1	77.1
硫体积分数/%	<0.01	<0.08
闪点/℃	51	47
冰点/℃	-55	-47
(-20℃)黏度/(Pa·s)	4.09	8.00
密度/(kg/m ³)	782	816
燃烧热值/(MJ/kg)	43.50	43.22
烟点/mm	28	25
热沉积厚度/nm	<20	120
未燃烧烃体积分数/10 ⁻⁶	11.8	16

南非沙索(SASOL)公司使用费托法生产 GTL 的历史已经有了几十个年头,年处理煤炭总计达 45.9×10^9 kg,燃油总产量达 7.6×10^9 kg/a,而且从 1982 年开始就将这一合成燃油与传统航空煤油混合后输送往约翰内斯堡国际机场^[10].2008 年,SASOL 公司宣布煤基全合成喷气燃料生产成功,并且这种燃料获得了国际商用航空认证^[11].2008 年 4 月,英国官方批准了使用 SASOL 公司 100% 合成燃油的飞行.同年,使用过达 900 发动机的 A380 客机采用加注了混合比 40% 的

GTL 合成燃油完成了从英国到法国的飞行. 除此之外, 空客公司还和卡塔尔航空公司和卡塔尔当地多家石油公司签订了共同发展航空替代燃料的研究发展项目. 由于 GTL 已经在世界上很多地方投入生产, 空客公司认为 GTL 是近期最有可能投入实际使用的航空替代燃料.

国际商业航空协会经过多年研究, 逐步将煤气化费托合成喷气燃料列入标准中, 目前英国国防部标准 DEF STAN91-91/ASTM D1655 及联合加油等国际标准, 均允许安全使用由 50% 的合成燃料与 50% 的 Jet A 或 Jet A-1 组成的混合燃料^[12]. 2007 年的英国国防部标准 DEF STAN 91-91 第 5 版, 允许 100% 使用 SASOL 煤液化喷气燃料^[13].

虽然合成燃料具有原料来源丰富、费托法工艺流程逐渐成熟的特点, 不过由于煤炭较难气化, 同时含有大量的灰分和惰性组分, 生产需要大量的水(每生产 1000 kg 的合成油大约需要 10000~13000 kg 的水), 导致合成燃料成本升高^[14-16]. 美国国家航空航天局格林研究中心燃烧部表示, 攀升的油价意味着合成燃料将是一种经济的替代品, 但格劳沃表示, 生产合成燃料将要消耗比传统燃料更多的资源.

1.2 生物燃料

航空生物燃料的制备有 3 种技术, 即费托合成技术、氢化处理技术以及生物合成烃技术^[17-18]. 其中氢化处理技术被称为第 2 代可再生新型生物燃料技术, 由于其使用非粮食作物被认为是未来生物燃料制备的关键技术^[19-20]. 目前, 比较典型的第 2 代航空生物燃料技术包括美国 Honeywell's

UOP 公司开发的 UOPTM 工艺和美国 Syntroleum 公司开发的 Bio-SynfiningTM 工艺^[21].

美国大陆航空公司在 2009 年 1 月 7 日完成了世界上首次使用生物燃料的试验飞行, 从此拉开了飞机使用生物燃料的序幕, 各大国际航空公司使用生物燃料的测试飞行如表 2 所示^[22].

尽管生物燃料在航空运输中的使用, 大多处于试验阶段, 但是却预示着航空运输界生物燃油时代即将到来^[23]. 2009 年, ASTM D7566-09 标准发布, 列入该标准中的航空生物燃料, 包括生物质气化-费托合成-加氢处理改质和动植物油脂经加氢处理改质的石蜡煤油两种^[24]. 2011 年 6 月, 美国材料与实验协会(ASTM)暂时批准了加氢处理的生物燃料在飞机中应用, 正式批准将在 7 月生效. 该规则为使用混合生物燃料给民用飞机提供动力扫清了制度上的障碍.

航空生物燃料虽然被认为是最有潜力的航空替代燃料, 但其高额成本和可提供性仍然是其被大规模采用的关键障碍. 新的生物燃料的研发和生产设施的建设需要巨大的资金投入, 目前航空生物燃料的价格大约是航空煤油价格的 2 倍, 同时生产生物燃油的原料, 需要持续可靠的供给来源才能满足需求^[25].

1.3 低温燃料

低温燃料是指将气态燃料在常压下通过深冷技术转化而成的液态燃料, 主要包括液化氢气(LH)和 LNG. LH 和 LNG 的能量密度非常高, 可以在提供更大推力的前提下大大缩小发动机的尺寸, 同时低温燃料具有很大的冷却能力, 这对保证冷却高飞行速度下的发动机是必须的^[26].

表 2 全球航空公司生物燃料试飞汇总表
Table 2 Summary table of bio fuel in test flights

航空公司名称	试飞机型	燃料组成
英国维珍航公司	波音 747-400	椰子油、棕榈油
美国大陆航空公司	波音 737-800	海藻油、麻风树油
日本航空公司	波音 747-300	亚麻籽油(84%)、麻风树油(16%)、海藻油(1%)
新西兰航空公司	波音 747-400	青桐木油(50%)、喷气机燃油 Jet A1 (50%)
荷兰皇家空军	波音 AH-64D	藻类、废弃食用油
荷兰皇家航空公司	波音 747	亚麻籽油(50%)、传统煤油(50%)
欧洲民航飞机制造公司	新一代钻石 DA42	100% 的海藻生物燃料
德国汉莎航空公司	空客 Sasa 321	来自植物油提炼的煤油占一半
中国国际航空公司	波音 747	麻风树油
巴西塔姆航空公司	空客 A320	麻风树生物燃油、传统航空燃油

美国航空航天局(NASA)曾开展过对波音737机型进行改装LH燃料的设想,由于LH的体积密度比很低,造成飞机燃料箱的体积过于庞大,增加阻力和质量飞机的客舱前后都被挤入了一个巨大的LH燃料箱,机翼面积缩小5%,发动机尺寸缩小25%。除了飞机布局的改变,飞机的燃油系统、发动机等系统都要完全重新设计,而且还要加入很多繁杂的新系统,以适应LH燃料^[27]。另外,LH的沸点为 -252°C ,燃料箱隔热和增压问题也是技术上要面对的一大挑战。同时,氢气的应用成本和安全性也是LH成为航空替代燃料的障碍。目前对氢燃料在航空发动机上应用的研究还处在试验阶段,还没有试验过氢燃料驱动飞机^[28-29]。

LNG的主要成分是甲烷(体积分数在96%以上),其沸点和密度比液氢高,由低温和容积引起的技术难题比LH容易解决^[30]。NASA从20世纪70年代就已经开展了将LNG作为航空燃料的基础技术研究,并预计在2025年之后使用LNG燃料的飞机技术将会走向成熟^[31]。NASA最近又开展了一项名为SUGAR Freeze的研究计划,在该项研究中确认了使用LNG飞机的很多优点,同时也指出将LNG作为航空燃料存在着巨大的挑战^[32]。1989年前苏联的图-155客货两用机成为世界上首次使用LNG为燃料进行飞行的飞机,使用LNG作为燃料可飞行2600 km。之后,又相继推出了图-156、图-206、图-330C等机型及为直升机发展的使用LNG为燃料的Mi-8TG航空发动机^[33-34]。在NASA和美国空军研究实验室的支持下,2013年由波音公司设计的翼身融合飞机也考虑采用LNG作为燃料^[35]。GE公司、罗·罗公司、空客、波音、瑞典国防研究院、麻省理工学院等都对LNG作为航空燃料表现出了极大的兴趣,并开展了相关的研究。GE公司在2012和2014年公开了使用LNG为燃料的航空发动机的国际专利,空客公司对使用LNG燃料后燃烧室内的反应特性开展了深入的研究^[36-38]。

与其他航空替代燃料相比,LNG具有来源广泛、经济性好、发动机适应性强等优点,同时也具有油箱体积增大、需低温储存及燃烧特性与航空燃油不同等特点,在LNG作为航空燃料的研究上还需要开展大量的工作。

2 LNG特点及发展趋势

2.1 LNG基本特性及燃烧特性

LNG是将天然气经过干燥脱酸处理后,在低

温下液化成液态的一种液态燃料,主要成分是甲烷(96%以上)、乙烷、氮气(0.5%~1.0%)及少量C3烷烃~C5烷烃的低温液体。LNG的液态密度为 $420\sim 460\text{ kg/m}^3$ 无色、无味、无毒且无腐蚀性,其体积质量仅为同体积水的45%左右。与航空煤油相比,LNG具有热值高、密度低、成本低、燃烧后 CO_2 排放低的特点。LNG在存储时为液态,质量热值为 50 MJ/kg ,高于液态航空燃料的热值。LNG在应用中需要气化为气态,是一种气体燃料,与液体燃料相比不存在由于黏度过高或过低所导致的输送、气化和燃烧问题。其沸点、冰点远远低于液体燃料,完全可以满足飞机在高空飞行时外部低温对航空燃料的要求。LNG的闪点为 -190°C 且气化后极易挥发,爆炸极限为5%~15%,自燃点为 632.2°C ,这些特点决定了LNG具有较好的安全性及较宽的可燃范围。LNG燃烧过程中最大层流火焰传播速度为 37.31 cm/s ,与航空煤油相比下降了近42%,这将导致LNG的燃烧特性不同于传统航空燃料。同时,LNG为低温燃料,具有一定的冷能,在航空发动机中可以利用LNG的冷能来冷却发动机。

2.2 我国LNG发展趋势

全球的天然气探明储量高达 $1.38\times 10^{14}\text{ m}^3$,潜在储量 $2.52\times 10^{14}\text{ m}^3$,预计两者合计可供人类使用超过100年。天然气的供应量正在逐年上升,预计在2040年左右将超过石油和煤炭成为最主要的一次能源。我国能源中长期发展规划明确指出:“十二五”期间,大力发展天然气,2030年天然气将占到一次能源的10%,成为我国能源发展战略中的一个亮点和绿色能源支柱之一^[39]。

2003年全球天然气消费量为 $2.6\times 10^{12}\text{ m}^3$,至2006年持续以1.8%的比例增加,其后又以每年2.8%的比例增长,预计2025年全球天然气消费量将达 $5.1\times 10^{12}\text{ m}^3$,而在天然气贸易量中有7%是通过LNG的方式来进行的。

中国LNG工厂,从20世纪末开始经历了一个从无到有、从小到大的发展过程,近年来我国小型LNG工厂发展迅速,截止到2010年1月,我国已经运营的小型LNG装置有30多座,总规模近 $10^6\text{ m}^3/\text{d}$,年产量超过 $260\times 10^7\text{ kg}$ 。另外,在建和拟建设的LNG液化项目还有30座左右,近一两年将陆续投入运行,而且单座容量都有增大的趋势,设计规模介于 $2\times 10^6\sim 3\times 10^6\text{ m}^3/\text{d}$ 。同时,国家加大了跨国天然气管道和沿海进口LNG接收

站的规划建设规模. 因此, 未来 5 年, 中国无论是管道天然气还是沿海 LNG 接收站的天然气供应量都会有大幅度的增长.

3 LNG 作为航空燃料的特点

3.1 LNG 与航空燃料的比较

为分析 LNG 作为航空燃料的特点及可行性, 将 LNG 与目前在用的液态航空燃料进行了比较, LNG, 100LL 汽油和 3 号航空煤油的基本物性和燃烧特性的比较如表 3 及表 4 所示.

表 3 不同燃料物性比较
Table 3 Physical property of different fuels

参数	液化 天然气	航空汽油	航空煤油
密度/(kg/m ³)	426	720~737	775.5~825.0
相对分子量	16	98~120	112
(20℃时)			
恩氏黏度/(°E)		0.9296	0.9299
(20℃时)			
汽化潜热/	510	297	251~271
(kJ/kg)			
沸点/℃	-162	126	150~315
比热容/			
(kJ/(kg·℃))	3.4667	2.2	2.1
冰点/℃	-182.2	-60	-47

表 4 不同燃料燃烧特性比较
Table 4 Combustion characteristics of different fuels

参数	液化 天然气	航空汽油	航空煤油
热值/(MJ/kg)	50	43	42.5
闪点/℃	-190	-58~10	28~45
可燃极限/%	5~15	1~5	1.4~7.5
自燃点/℃	632.2	415~530	278
燃点/℃	650	427	86
最大火焰传播 速度/(cm/s)	37.31	37.74	64.2
最小点火/mJ	0.2~0.3	0.2	0.25~0.40

从 3 种燃料特性的比较可以看出 LNG 具有如下特点:

- 1) 密度低、热值高

航空发动机工作过程中所需携带的燃料数量由续航里程、飞机所能提供的用于承载燃料油箱的体积等因素所决定. 对使用不同燃料产生相同能量时所需油箱的体积和燃料质量进行了比较, 比较结果如表 5 所示 (以产生 2 000 MJ 能量为例).

由于密度低, 在产生相同的能量时 LNG 需要更大容积的油箱, 与使用航空汽油和航空煤油比油箱体积分别增加了 47.41% 和 59.64%. 但由于 LNG 的热值高, 因此在产生相同能量时所需燃料的质量下降 15% 左右. 燃油质量是飞机起飞质量的重要组成部分, 对中短程客机 B737-300、远程客机 B747-400、中远程客机 B767-300 分别使用航空煤油和 LNG 作为燃料产生相同能量时的质量进行了比较, 结果如表 6 所示.

表 5 航空发动机使用不同燃料时的比较
Table 5 Comparison of different fuels for aircraft engines

参数	液化 天然气	航空汽油	航空煤油
体积/L	93.9	63.71	58.82
体积增加百分比/%		47.41	59.64
质量/kg	40.0	46.51	47.06
质量减少百分比/%		13.99	15.01

表 6 使用航空煤油与 LNG 燃料时质量比较
Table 6 Weights of using aviation kerosene and LNG fuel

燃料	参数	B737- 300	B747- 400	B767- 300
航空 煤油	燃油质量/10 ³ kg	16.12	173.47	53.78
	最大起飞 质量/10 ³ kg	62	362~395	163
	燃油占起飞 质量百分比/%	25.8	47.8~ 43.8	32.9
	燃油质量/10 ³ kg	13.7	147.44	61.82
液化 天然气	最大起飞 质量/10 ³ kg	59.58	335.97~ 368.9	176.1
	燃油占起飞 质量百分比/%	22.99	43.88~ 39.95	35.1
	燃油质量比	0.849	0.849	0.849
不同 燃料 比较	最大起飞质量比	0.960	0.92~ 0.93	0.94

从比较的结果上看, 使用 LNG 时由于燃料

的热值高于航空煤油,因此在产生相同能量的前提下所需燃料的质量会下降 15%左右,导致燃油占起飞质量的百分比下降,最终导致不同机型的最大起飞质量下降 4%~8%。但由于未考虑使用 LNG 时所需气化增压装置等的质量,所获得的结果是偏高的。起飞质量降低,可增加飞机的载货能力和续航里程,降低航空运输成本。这是 LNG 与航空煤油相比的一大优点。

2) 低温储存气态使用

航空发动机的工作高度一般在 10 km 左右,此时的大气温度在 -50°C 左右。在这样的工作环境下工作时,要求所使用燃料的冰点要低于 -50°C 以保证燃料有较好的流动性。LNG 是通过深冷技术将天然气在常压下冷却到 -162°C 的,因此不会存在外界温度过低而影响燃料流动性的问题。同时,低温燃料气化过程中还会释放冷能,可用于航空发动机高温部件的冷却。

液体燃料的黏性会影响到燃料的雾化及燃烧特性,通常希望航空燃料的黏度适中。为实现好的雾化及燃烧特性,在使用液体燃料时需要通过使用燃油雾化喷嘴及对流场的组织使燃料的雾化特性满足燃烧的要求。而 LNG 在使用时为气体燃料,因此不存在雾化问题,也不会存在由于雾化效果差所导致的燃烧问题。

3) 可燃极限宽燃烧特性好

LNG 的可燃极限为 5%~15%,远高于航空汽油的 1%~5%和航空煤油的 1.4%~7.5%。宽的可燃极限导致燃料的点火性能好,尤其是当飞机出现高空停车再启动时,宽可燃极限对空中再启动非常有利。

燃料的燃烧效率会影响燃料的经济性和环保性,在航空发动机燃烧室上的试验测试表明,LNG 和航空煤油在相同状态下的燃烧效率分别为 0.986 和 0.981,燃料效率基本相同。表 7 中尾气排放比较可以看出,燃用 LNG 时的 NO_x 及 CO 排放明显低于航空煤油^[40]。

4) 经济性好

从 2009 年起,国际原油期货价格一路走高,而天然气的价格基本稳定不变,且低于原油价格。原材料的价格直接影响到成品油和 LNG 的价格,从单位质量成本上看与航空煤油相比 LNG 具有明显的价格优势。以远程客机 B747 为例,对使用不同燃料时的经济性进行了比较。其中,B747-300 一次飞行最大装载航空煤油所产生的总能量为 7.372×10^6 MJ,航程 14 000 km,载客数

416 人。比较结果如表 8 所示。

表 7 尾气排放比较

Table 7 Comparison of gas emissions

燃料排放量	航空煤油	液化天然气
$\text{NO}/10^{-6}$	996.68	248.3
$\text{CO}/10^{-6}$	1 090.1	758.3
可溶性有机物/ 10^{-7}	1.5	1 860

表 8 不同燃料的经济性比较

Table 8 Economic comparison of different fuels

参数	液化天然气	航空汽油	航空煤油
最大油箱容量/L	346 126	2 348 666	216 840
燃油质量/kg	147 450	171 450	173 470
消耗率/(L/100 km)	5.94	4.03	3.72
燃料成本/(万元)	66.35	137.39	188.21

由消耗率指标的比较结果可以看出,LNG 的燃油消耗明显升高,这是由 LNG 的密度低引起的。由燃料成本的比较可以看出,在一次航空飞行中,以 LNG 为燃料时其燃料成本仅为航空汽油的一半,为航空煤油的 1/3。值得注意的是,在经济性的比较中未考虑由于使用不同燃料时飞机最大起飞质量变化所引起的燃料消耗量的变化。由前面的比较可知,在应用 LNG 为燃料时飞机的起飞质量将下降 4%~8%,这将导致使用 LNG 为燃料时的燃料成本进一步降低。从价格指标上的比较可以看出,LNG 的经济性非常明显,将成为吸引航空运输企业的一大亮点。

3.2 LNG 作为航空燃料存在的问题

通过对国产航空煤油和 LNG 基本物性的对比及着火特性、火焰传播速度等的研究中发现,航空煤油与 LNG 的基本物性和燃烧特性存在很大差别,如甲烷的燃点为 650°C ,而航空煤油仅为 86°C ,甲烷的闪点为 -190°C ,而航空煤油为 $28 \sim 45^{\circ}\text{C}$,甲烷的火焰传播速度为 37 cm/s,而航空煤油为 64.2 cm/s 等。这些燃烧特性上的不同会导致 LNG 在燃烧室内的反应特性与航空煤油不同,为航空煤油设计的燃烧室将不适合 LNG 燃料。另外,在进入燃烧室时航空煤油为液态需要燃油喷嘴进行雾化蒸发,而 LNG 为气态,所需的喷嘴和进入燃烧室后的燃烧组织形式都会不同。

为促进 LNG 作为替代燃料的应用还需要在多个方面深入的开展相关工作,一方面由于 LNG

需要采用低温储罐进行储存,原有位于机翼中的燃料箱由于与外界接触面积大及可增加的空间有限,因此需要解决应用 LNG 燃料时飞机结构、气动布局的改变;另外一方面 LNG 在储存时为低温液态燃料,在应用时要转化为气态,因此需要解决低温液态燃料的增压、输送、气化等问题;同时,由于燃烧特性的不同,原有为液态燃料设计的航空发动机燃烧室将不适用于气体燃料,因此还需要对 LNG 发动机燃烧室的结构形式、工作方式及 LNG 在燃烧室内的反应特性等基础问题开展深入的研究。

4 结 论

由能源危机和气候恶化所引起的一系列社会、环境问题急需航空业寻找一种新的替代燃料,煤和天然气基合成燃料、生物燃料、低温燃料是目前备受关注的 3 种航空替代燃料。合成燃料、生物燃料已达到了试验飞行和实际应用的阶段,但其原料来源、成本及生产过程中高的能源消耗都成为制约其发展的因素。低温燃料中的 LH 由于受安全性、燃料来源等因素的制约,目前还处于理论研究阶段。LNG 由于具有来源广泛、储存技术成熟、燃烧特性好及优秀的经济性等优点,可作为未来航空燃料的首选。本文在分析总结了 LNG 的特点及作为航空燃料优势的基础上,提出了目前 LNG 作为航空燃料存在的问题及需要开展的相关工作,以期望推动 LNG 作为航空燃料的发展。

参考文献:

- [1] 郑宁来. 华亚国联研发低含铅量航油[J]. 炼油技术与工程, 2015, 45(5): 35-35.
ZHENG Ninglai. Asian countries and China joint development low lead fuel[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2015, 45(5): 35-35. (in Chinese)
- [2] 付伟, 李明, 陶志平. 世界航空燃料规格及进展[M]. 北京: 中国石化出版社, 2011.
- [3] 石宝明, 王皓东. 中国航空煤油市场 2006 年回顾及 2007 年展望[J]. 国际石油经济, 2007, 15(2): 43-46.
SHI Baoming, WANG Haodong. Review of China aviation kerosene market in 2006 and prospect in 2007[J]. International Petroleum Economy, 2007, 15(2): 43-46. (in Chinese)
- [4] 姜克隽, 胡秀莲, 庄幸, 等. 中国 2050 年的能源需求与 CO₂ 排放情景[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5): 296-302.
JIANG Kejuan, HU Xiulian, ZHUANG Xing. Energy demand of China in 2050 and CO₂ emissions scenario[J]. Research Progress of Climatic Change, 2008, 4(5): 296-302. (in Chinese)
- [5] Christie S, Blakey S, Clercq P L, et al. Research strategies for developing alternative fuels in aviation[R]. Bad Kohlgrub, Germany: 4th Conference on Transport, Atmosphere and Climate, 2015.
- [6] Riedel U. Alternative fuels in aviation[J]. Ceas Aeronautical Journal, 2014, 6(1): 1-11.
- [7] 陈梦, 徐双. 国内外煤炭间接液化技术现状分析和展望[J]. 硅谷, 2010(10): 27-30.
CHEN Meng, XU Shuang. Analysis and prospect of coal indirect liquefaction technology at home and abroad[J]. Silicon Valley, 2010(10): 27-30. (in Chinese)
- [8] Blakey S, Rye L, Wilson C W. Aviation gas turbine alternative fuels: a review[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2863-2885.
- [9] 杨文, 吴秀章, 陈茂山, 等. 煤基喷气燃料研究现状及展望[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(5): 52-57.
YANG Wen, WU Xiuzhang, CHEN Maoshan, et al. Current situation and prospect of coal based jet fuel[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(5): 52-57. (in Chinese)
- [10] 李文华. 煤炭间接液化技术及其新进展[J]. 中国科技产业, 2006, 2(2): 36-38.
LI Wenhua. Indirect coal liquefaction technology and its new development[J]. China Energy Science & Technology, 2006, 2(2): 36-38. (in Chinese)
- [11] Moses C A, Roets P N. Properties, characteristics, and combustion performance of sasol fully synthetic jet fuel[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(4): 1-17.
- [12] American Society for Testing and Materials. ASTM D1655-10 Standard specification for aviation turbine fuels [S]. [S. l.]: ASTM, 2012.
- [13] United Kingdom Ministry of Defence Standard. DEF STAN 91-91/R6 Turbine fuel, aviation kerosine type, Jet A-1 NATO code; F-35, joint service designation; AVTUR [S]. [S. l.]: Ministry of Defence Standard, 2008.
- [14] 吴春来, 舒歌平. 中国煤的直接液化研究[J]. 煤炭科学技术, 1996, 24(4): 12-16.
WU Chunlai, SHU Geping. Study on direct Chinese coal liquefaction[J]. Coal Science and Technology, 1996, 24(4): 12-16. (in Chinese)
- [15] 任相坤, 房鼎业, 金嘉璐, 等. 煤直接液化技术开发新进展[J]. 化工进展, 2010, 29(2): 198-204.
REN Xiangkun, FANG Dingye, JIN Jialu, et al. New development of coal direct liquefaction technology[J]. Development in Chemical Industry, 2010, 29(2): 198-204. (in Chinese)
- [16] 范传宏. 煤直接液化工艺技术及工程应用[J]. 石油炼制与化工, 2003, 34(7): 20-24.
FAN Chuanhong. Process of direct coal liquefaction and its application in engineering[J]. Petroleum Processing and Petrochem, 2003, 34(7): 20-24. (in Chinese)
- [17] Chiaramonti D, Prussi M, Buffi M, et al. Sustainable bio kerosene: process routes and industrial demonstration activities in aviation biofuels[J]. Applied Energy, 2014, 136

- (3):767-774.
- [18] International Air Transport Association. Summary of IATA 2009 report on alternative fuels[EB/OL]. [2009-07-12]. <http://www.iata.org/>. 2009.
- [19] 李翔宇,蒋剑春,王奎,等. 生物柴油酯交换反应机理和影响因素分析[J]. 生物质化学工程,2010,44(3):1-5.
LI Xiangyu,JIANG Jianchun,WANG Kui,et al. Analysis on the mechanism and influencing factors of transesterification of biodiesel [J]. Biomass Chemical Engineering, 2010,44(3):1-5. (in Chinese)
- [20] 张贵芝,王勇,曹宁,等. 微藻超临界甲醇直接酯交换法制备生物柴油[J]. 生物质化学工程,2012,46(1):6-10.
ZHANG Guizhi,WANG Yong,CAO Ning,et al. Preparation of biodiesel by direct transesterification of microalgae with supercritical methanol[J]. Biomass Chemical Engineering,2012,46(1):6-10. (in Chinese)
- [21] Adesina A A,Silveston P L,Hudgins R R. Fischer-Tropsch synthesis under periodic operation[J].Catalysis Today, 1995,25(2):127-144.
- [22] 刘广瑞,颜蓓蓓,陈冠益. 航空生物燃料制备技术综述及展望[J]. 生物质化学工程,2012,46(3):45-48.
LIU Guangrui,YAN Beibei,CHEN Guanyi. Review and prospect of the preparation technology of aviation bio fuel [J]. Biomass Chemical Engineering, 2012, 46 (3): 45-48. (in Chinese)
- [23] 龙继林. 低碳经济下发展航空运输新能源的战略思考[J]. 综合运输,2013,1(4):9-13.
LONG Jilin. Strategic thinking on the development of new energy sources of air transport in low carbon economy[J]. Integrated Transportation,2013,(4):9-13. (in Chinese)
- [24] 聂红,孟祥堃,张哲民,等. 适应多种原料的生物航煤生产技术的开发[J]. 中国科学:化学,2014,44(1):46-54.
NIE Hong,MENG Xiangkun,ZHANG Zhemin,et al. The development of bio-air-coal production technology adapting to various raw materials[J]. Scientia Sinica Chimica,2014, 44(1):46-54. (in Chinese)
- [25] Hari T K,Yaakob Z,Binitha N N. Aviation biofuel from renewable resources: routes, opportunities and challenges [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews,2015,42: 1234-1244.
- [26] 甘晓华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [27] 王鑫. 航空替代燃料的曙光[J]. 中国民用航空,2009,98 (2):64-67.
WANG Xin. Dawn of aviation alternative fuels[J]. China Civil Aviation,2009,98(2):64-67. (in Chinese)
- [28] 刘昊,宋文艳,王隼. 氢燃料双模态燃烧室模态转换[J]. 航空动力学报,2011,26(3):576-581.
LIU Hao,SONG Wenyan,WANG Dian. Mode conversion of dual mode combustion chamber of hydrogen fuel[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26 (3): 576-581. (in Chinese)
- [29] 邓洋波,孙海涛,王玉龙,等. 氢燃料先进旋涡燃烧室流动和燃烧特性[J]. 航空动力学报,2013(1):120-128.
DENG Yangbo,SUN Haitao,WANG Yulong,et al. Flow and combustion characteristics of advanced vortex combustor[J]. Journal of Aerospace Power,2013(1):120-128. (in Chinese)
- [30] 刘大响,彭友梅. 新概念航空发动机展望[J]. 现代军事, 2003,1(12):12-15.
LIU Daxiang,PENG Youmei. Expectation of new concept aero engine[J]. Modern Military, 2003,1(12):12-15. (in Chinese)
- [31] Carson L K,Davis G W,Versaw E F,et al. Study of methane fuel for subsonic transport aircraft[R]. NASA Contractor Report 159320,1980.
- [32] Pereira S R,Fontes T,Coelho M C. Can hydrogen or natural gas be alternatives for aviation;a life cycle assessment [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39 (25):13266-13275.
- [33] Pohl H P,Malychev V V. Hydrogen in future civilaviation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1997, 2 (10):1061-1069.
- [34] 吴良彦,朱孝琪,Солозобов В И,等. 用液化天然气作燃料的飞机[J]. 石油石化节能,2000,9(9):32-33.
WU Liangyan,ZHU Xiaoqi,Солозобов В И,et al. Aircraft using liq-uefied natural gas as fuel[J]. Petroleum and Petrochemical Energy Saving,2000,9(9):32-33. (in Chinese)
- [35] Kawa R. Benefit potential for a cost efficient dual fuel propulsion BWB[R]. AIAA-2013-0937,2013.
- [36] Gonyou C A,Weisgerber R H,Epstein M J,et al. Aircraft engine fuel system and method of operating the same;US, 2011/067461[P]. 2012-12-20.
- [37] Kamath D M,Baladi M M,Jerebets S A,et al. System for temperature and actuation control and method of controlling fluid temperatures in an aircraft; US, 2013/071789 [P]. 2014-07-03.
- [38] Yahyaoui M,Anantha-Subramanian A,Lombaert-Valot I. The use of LNG as aviation fuel combustion and emission [R]. AIAA-2015-3730,2015.
- [39] 顾安忠. 迎向“十二五”中国 LNG 的新发展[J]. 天然气工业,2011,31(6):1-11.
GU Anzhong. Toward the “12th Five Year Plan” China’s new development of LNG[J]. Natural Gas Industry,2011, 31(6):1-11. (in Chinese)
- [40] 李锋,郭瑞卿,唐正府,等. 地面燃机燃用不同燃料的燃烧室性能分析[J]. 吉首大学学报:自然科学版,2014,35(2): 35-40.
LI Feng, GUO Ruiqing, TANG Zhengfu, et al. Performance analysis of combustion chamber with different fuel combustion chamber [J]. Journal of Jishou University: Natural Science Edition,2014,35(2):35-40. (in Chinese)

(编辑:叶青)