

掺混与组分优化提高费托喷气燃料热氧化安定性的机理研究

杨晓奕*, 周凯琳, 杨 婷

北京航空航天大学能源与环境国际中心, 能源与动力工程学院, 北京
Email: yangxiaoyi@buaa.edu.cn

收稿日期: 2020年8月15日; 录用日期: 2020年8月27日; 发布日期: 2020年9月3日

摘 要

由于喷气燃料组成受限于原油组成与炼制工艺, 高热氧化安定性能喷气燃料逐步走向合成燃料与石油基喷气燃料的掺混与组分优化。通过静态、动态试验对比分析了费托喷气合成燃料(FT)与石油基喷气燃料(RP-3)的热氧化安定性, 并采用DTG-DSC同步测试对比了热氧化性和蒸发性。研究发现FT与RP-3掺混比对热氧化沉积量、引发温度的影响是非线性的, 对燃料的蒸发性影响是线性的。研究表明单环烃(甲基环戊烷与甲基环己烷), 与双环烃(四氢萘和十氢萘)都不同程度提高FT喷气燃料的热氧化安定性。其中甲基环戊烷、十氢萘在较宽掺混浓度范围内可显著提高FT燃料热氧化安定性。但甲基环己烷与四氢萘只在较窄低浓度掺混区域显著提高FT燃料热氧化安定性。通过层析浓缩获得的热氧化产物解析机理, 发现甲基环戊烷提高热氧化安定性能的是由于其氧化产物不易生成具有苯环结构的积碳母体且具有较好的溶剂作用。十氢萘提高热氧化安定性能机理是氧化产物具有良好供氢能力而且其热裂解产物结构稳定。甲基环己烷与四氢萘由于其自身氧化产物不稳定, 导致掺混浓度增加提高热氧化安定性的性能下降。

关键词

FT喷气燃料, 热安定性, 反应机理, 环烃, 热氧化产物

The Mechanism of Improving Thermal Stability of FT Jet Fuel by Blending and Component Optimization

Xiaoyi Yang*, Kailin Zhou, Ting Yang

School of Energy and Power Engineering, Energy and Environment International Centre, Beihang University, Beijing

*通讯作者。

文章引用: 杨晓奕, 周凯琳, 杨婷. 掺混与组分优化提高费托喷气燃料热氧化安定性的机理研究[J]. 国际航空航天科学, 2020, 8(3): 41-48. DOI: 10.12677/jast.2020.83006

Abstract

As the composition of petroleum-based jet fuel is confined by its crude oil and refining process, alternative aviation fuel becomes to undertake the composition optimization and blending technology of jet fuel with high thermal oxidation stability. The thermal oxidation stability of FT alternative jet fuel was compared with conventional petroleum-based jet fuel by static and dynamic tests, and the thermal oxidation trend and evaporation performance were investigated by DTG-DSC. The influence of the blending ratio is nonlinear on the weight of thermal oxidation deposition and initiation thermal oxidation temperature while is linear on the evaporation performance. The results show that monocyclic hydrocarbons (methylcyclopentane and methylcyclohexane) and dicyclic hydrocarbons (decaline and tetraline) can improve the thermal oxidation stability of FT jet fuel. Among them, the thermal oxidation stability of FT fuel can be significantly improved by a wide mixing concentration range of methyl-cyclopentane and decaline. However, methylcyclohexane and tetraline only significantly improved the thermal oxidation stability of FT fuel in a narrow region with low concentration blending. The methyl-cyclopentane can improve thermal oxidation stability because its oxidation products are not easy to form carbon deposit precursor with benzene ring structure and it possesses the capability of solvent action. The oxidation products derived from decalene still have good hydrogen supply capacity and the structure is stable in the pyrolysis region. When the blending ratios of methyl cyclohexane and tetraline are increasing, the oxidation products derived from those can further pyrolyze and thus decrease the ability of enhancements of thermal oxidation stability.

Keywords

Fischer-Tropsch Jet Fuels, Thermal Stability, Reaction Mechanism, Cyclic Hydrocarbons, Thermal Oxidation Product

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高性能航空飞行器在高马赫数飞行中由于热量累积, 喷气燃料不仅作为动力源而且还要承担吸收热量的任务从而温度显著升高。高温将引发氧化、蒸发与热裂解、聚合与焦化等复杂物理化学反应[1] [2], 产生胶质甚至是积碳, 其在进入燃烧室之前可堵塞供油管路导致事故。

喷气燃料化学物质组成是其热氧化安定性的关键因素[2] [3] [4] [5] [6]。烷烃、环烷烃和芳香烃是喷气燃料的主要烃族组成[7]。为提高喷气燃料热氧化安定性, 热氧化沉积机理和燃料组成结构优化成为研究热点。现在普遍认同的沉积机理[2] [3] [5]: 在氧化区(150°C~260°C), 喷气燃料在液相与溶解氧发生氧化反应产生胶质类物质; 在热裂解区($\geq 260^\circ\text{C}$), 喷气燃料由于热裂解导致沉积。在燃料组成优化方面, 对于燃料烃族组成中, 研究证实环烷烃在氧化区的氧化安定性和热裂解区的热安定性都较好[4] [8]。烷烃中由于直链烷烃 C-C 键或 C-H 键的键能高于支链烷烃, 支链烷烃更易断裂、裂解和脱氢, 且直链烃随碳

数增加活化能增加导致热稳定性增加。无论是氧化区还是热裂解区，直链烷烃优于支链烷烃。芳香烃在氧化区具有抗氧化能力，但在热裂解区容易发生脱氢缩合生成稠环芳烃类化合物，成为积碳沉积物质的母体。由于石油基喷气燃料组成受限于其原油组成与炼制工艺，对于高热氧化安定性能的喷气燃料逐步走向喷气替代燃料的组成优化和掺混技术[9]。费托(FT)工艺喷气燃料一方面具有原料来源的多元化，另一方面可以通过优化 FT 工艺获得不同碳数分布的链烷烃。FT 工艺喷气替代燃料一方面可以作为传统石油基喷气燃料的添加组分改善其燃烧性能[10]，另一方面通过掺混环烷烃类物质提高热氧化安定性能。

喷气燃料热氧化安定性的评定方法主要有符合 ASTM D3241 标准的喷气燃料动态热氧化安定性试验法(JFTOT 法)和符合 ASTM D6811 标准的高雷诺数动态热氧化安定性试验法(HiReTS 法)。俄罗斯采用综合鉴定法(ДТC 法)评价燃料的热安定性，包括静态法(ДТC 11802)和动态法(ДТC 17751 标准)。目前标准方法主要是评定喷气燃料的热氧化安定性，缺乏对热氧化产物的定性和定量评价方法。

研究建立静态和动态评定热氧化产物的定性和定量方法，采用热重分析 - 微分热重 - 差热扫描同步测定燃料的热氧化和蒸发性能，建立了引发温度与沉积指数评定方法。对比分析了 FT 工艺喷气燃料与传统石油基喷气燃料的热氧化安定性。研究通过环烷烃类物质的掺混提高 FT 工艺喷气燃料的方法，并通过产生的热氧化产物解析了其机理。

2. 实验材料与方法

2.1. 实验方法

热氧化安定性的评价测试包括：静态热氧化安定性评价试验，动态热氧化安定性评价试验，热氧化安定性特定理化参数评价。试验设备、试验方法、评价参数见表 1。

Table 1. Evaluation test of thermal oxidation stability

表 1. 热氧化安定性评价试验

	热氧化安定性特定理化参数评价	静态热氧化安定性评价	动态热氧化安定性评价
试验设备	热重分析 - 微分热重 - 差热扫描同步测定仪 Q600SDT TGA-DTG-DSC	高温高压静态反应釜	程序控温管式炉
试验方法	测试温度从 20℃ 至 500℃，氮气为保护气流量 100 mL/min，升温速率为 10℃/min	设定热氧化的温度和时间，设定釜体中氮气或空气气氛，设定磁力搅拌速率	设定反应温度和升温速率，设定评价管为石英反应管/金属管，进料包含气路和油路。气路用于设定热氧化过程的氮气/空气气氛，设定流量，流速和循环时间
评价参数	引发温度，沉积指数，最大失重温度，最大吸热温度	色度，有色组分	色度，有色组分

2.2. 测试方法

热氧化产物层析分离方法：燃料热氧化产物根据其分子极性特点采用中性氧化铝吸附，乙酸解吸方法进行收集浓缩。将待测燃料样品置于球形漏斗中控制活塞使其以 20~40 滴/min 速率流过 100~200 目中性氧化铝砂板层析柱，然后加入过量正戊烷洗脱层析柱中的非极性燃料组分。然后采用无水乙酸脱附，蒸馏水冲洗得到脱附液。脱附液 25%氨水中和后二氯甲烷萃取，蒸发溶剂得到浓缩的热氧化产物，恒重后称重。

热氧化产物 GC-MS 定性分析：HP-5MS 色谱柱，以高纯氮气为载气，流量为 1 mL/min，分流比为 50:1。进样口温度 280℃，柱温 50℃，保持 5 min；以 2.5℃/min 升温至 300℃，保持 5 min。质谱条件：

离子源为 EI，离子源温度为 230℃，四级杆温度为 150℃。产物有色组分 GC-MS 仪器测定条件：柱温为 40℃，保持 2 min，以 5℃/min 升温至 300℃，保持 5 min。

热氧化产物色度分析：借鉴国标 GB/T 6540-1986 方法，配制 25 种标准比色液采用紫外可见分光光度计进行样品色度测定，依次建立了吸光度、波长与色度的对应关系，根据色度与吸光度函数关系选择合适透射光波长，获取各样品的吸光度和透射率。

3. 结果及讨论

3.1. FT 燃料族组分及碳数分布特征

FT 燃料与传统石油基航油组分在族组成与碳数分布上都有明显的差异。从族组成角度，根据航油组分统计规律其主要族组成为正构烷烃、异构烷烃、单环烃、多环烃、环烷基苯、烷基苯、萘系。正构烷烃和异构烷烃在 59%~85%之间，平均含量 72.9%，总环烷含量为区间为 8.0%~22%，平均为 12.9%。芳香族在 1%~20%之间，平均浓度 10%，其 C/H 比在 5.9~6.14 之间。FT 燃料主要由正构烷烃、异构烷烃构成，不含环烷烃、芳香烃等组分。其正构烷烃在 80%~85%之间，异构烷烃在 15%~20%之间。因缺少环烷烃和芳烃，其 C/H 比值低于传统石油基航油 5.5~5.7。

图 1 给出了典型 RP-3 与 FT 两个样本的族组成与碳数分布。从碳数分布角度，石油基航油碳分布以 C11、C12 为中心，从 C8 到 C16 呈正态分布，其中小于 C7 组分小于 3.5%，大于 C16 组分也小于 3.5%，主要在 C17~C20 之间。FT 燃料碳分布从 C8 到 C20，也呈现以 C11、C12 为中心，但高碳数 C17~C20 之间浓度可达 7.0%。

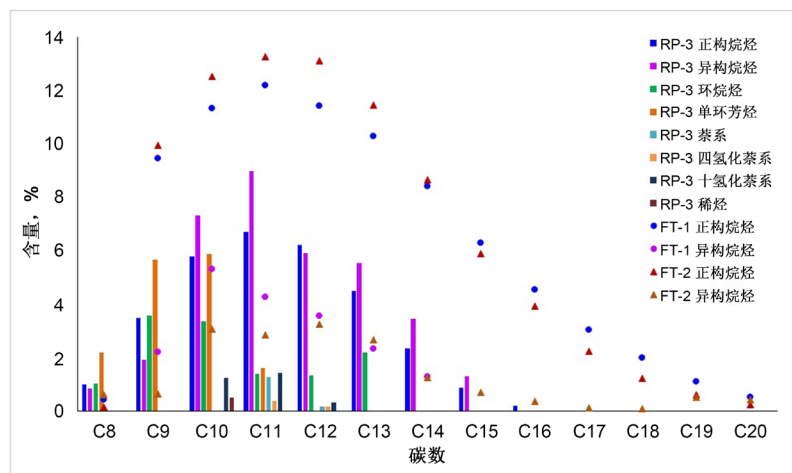


Figure 1. Distribution of classification and carbon number in FT and RP-3

图 1. FT 与 RP-3 燃料族组成与碳数分布特征

3.2. FT 燃料热氧化安定性特征

3.2.1. 热氧化安定性

喷气燃料的氧化胶质类物质是在氧化区(150℃~260℃)喷气燃料与液相中溶解的溶解氧发生氧化反应形成的。温度升高到热裂解区($\geq 260^\circ\text{C}$)将发生复杂的化学反应，特别是氧化区形成的氧化物容易发生裂解、环化、聚合形成沉积物。在相同工况条件下，静态评定其氧化产物的浓度高于动态评定的浓度，空气气氛比氮气气氛的氧化产物浓度高。为便于比较其差异和分析其机理，选取静态空气气氛下的色度变化，见图 2。RP-3 石油基航油热氧化产物呈现典型的分区：氧化区和热裂解区。氧化区喷气燃料氧化

形成的氧化产物导致色度增加, 在 175℃ 附近出现了色度峰值, 温度继续升高, 氧化产物分解, 色度降低。进入热裂解区后, 色度开始升高, 有色物质的出现预示着裂解聚合反应的发生。FT 航油在氧化区与 RP-3 石油基航油不同, 在氧化区域没有出现色度的峰值温度, 即没有明显的氧化反应发生, 显示具有较好的氧化稳定性。进入热裂解区后, 其色度与 RP-3 石油基航油相当, 说明其热裂解程度与 RP-3 石油基航油相当。FT/RP-3 (1:1) 掺混航油呈现出两种航油的加和平均性质。

石油基航空煤油 RP-3 氧化产物主要为烷基萘(50%~60%), 烷基苯酚(10%~15%), 烷基联苯, 苯并噻吩等稠环芳烃类(10%~15%), 芳香醇、醚、醛、酮类化合物(3%~8%), 脂环族类化合物小于 2%。说明在氧化区, 芳烃类物质作为供氢体, 主要参与到氧化反应中。热裂解产物增加了酯类物质和芳香烃物质的取代衍生物, 苯基脂肪醛、苯基脂肪酮, 苯基脂肪酸。

FT/RP-3 (1:1) 燃料氧化产物与热裂解产物与石油基航空煤油 RP-3 氧化产物、热裂解产物类似。氧化产物主要仍然是烷基萘、烷基苯酚, 以及烷基联苯, 苯并噻吩等稠环芳烃类物质, 但脂肪醇、酮、酸、酯、烯类化合物含量增加到 8%~15%。热裂解产物主要是酯类和芳香烃取代衍生物。

FT 燃料氧化产物含量较低, 主要为脂肪醇、脂肪酮、脂肪醚、脂肪酸类脂肪族类氧化产物。热裂解产物主要为不饱和烯烃类化合物(20%~30%)与脂肪酯类化合物(15%~20%), 以及脂肪醇、脂肪酮、脂肪醚。

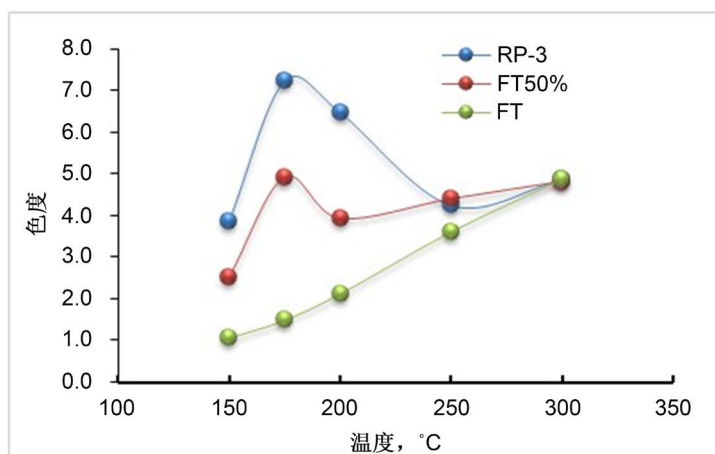


Figure 2. Concentration of components derived from thermal-oxidation duration test

图 2. 热氧化耐受测试热氧化产物色度变化

3.2.2. 引发温度与沉积指数

标准喷气燃料 RP-3, FT 喷气燃料, 以及标准喷气燃料 RP-3 与 FT 喷气燃料的掺混燃料的热重, 热重微分, 差热测试分析结果见表 2。

Table 2. Initial temperature and deposition index

表 2. 引发温度与沉积指数

数量	引发温度/°C	最大失重温度/°C	最大吸热温度/°C	沉积指数, %
FT	73.2	97.5	102	0.7%
FT/RP-3 = 1:3	69.5	97.3	102	0.6%
FT/RP-3 = 1:1	72.7	98.7	103	0.8%
FT/RP-3 = 3:1	75.7	102	106	0.6%
RP-3	80.7	109	113	0.5%

标准航油 RP-3 失重区间在 20℃~150℃之间, 最大失重温度 109℃; FT 航油失重区间为 20℃~135℃之间, 最大失重温度 97.5℃; 失重温度区间在一定程度上体现了燃料的蒸发性能。热重和微分热重结果表明 FT 航油, RP-3 与 FT 航油的混合油的失重终点温度和最大失重点的温度与标准航空煤油 RP-3 相比均向低温区移动。

从沉积角度分析, RP-3 终点温度沉积指数为 0.5%。FT 沉积指数分别为 0.7%。说明 RP-3 比 FT 航油积碳倾向低。其中 1:3 与 3:1 两种混合油的沉积指数介于两种未掺混的油品之间, 但在 1:1 时其沉积性能高于两种未掺混的油品。说明燃料掺混对由于热氧化导致的沉积量的影响是非线性的。

从吸热角度, RP-3 吸热曲线峰值在 113℃, FT 为 102℃。RP-3 与 FT 航油的混合油的最大吸热在两种未掺混的油品之间。与标准航油的热重曲线和热重微分曲线结果对应, 均向低温区移动。说明掺混对燃料的蒸发性能影响是线性的。

引发温度反映了起始发生分解的温度, 从表 1 可以看出, RP-3 引发温度为 80.7℃, FT 的引发温度 73.2℃。从 RP-3 与 FT 航油的混合油的引发温度变化可以得出燃料掺混对热氧化发生温度的影响同沉积量相似, 也是非线性的。

3.3. 基于热氧化安定性的 FT 燃料

为提高 FT 燃料热安定性, 选取具有吸收自由基的供氢体进行掺混。环烷烃(甲基环己烷, 甲基环戊烷)与环烷芳烃(四氢萘, 十氢萘)。静态氧化安定性评价不同掺混浓度下的色度变换见图 3。

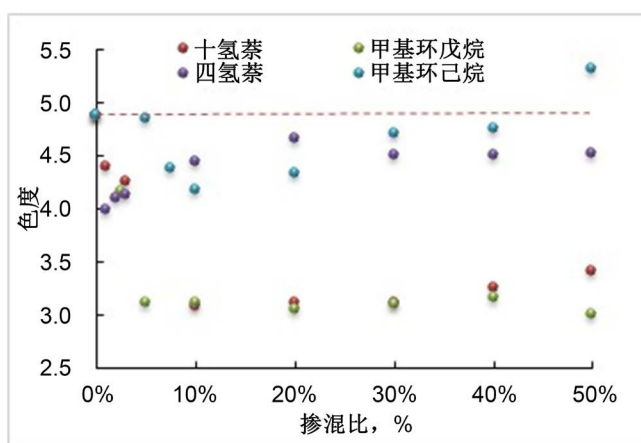


Figure 3. Concentration of colored components derived from thermal-oxidation duration
图 3. 热氧化耐受测试有色组分色度浓度分布

甲基环己烷、甲基环戊烷在 10% 浓度掺混范围, 随掺混浓度的增大产物色度均呈现明显的下降, 甲基环戊烷抑制热氧化产物产生的优势明显优于甲基环己烷。随着掺混浓度进一步增大, FT 喷气燃料掺混甲基环己烷的色度则呈现缓慢的上升趋势, 当达到 50% 时, 甲基环戊烷添加导致 FT 燃料热氧化产物色度高于未添加的 FT 燃料。但甲基环戊烷即使掺混浓度达到 50%, 仍然可以有效的抑制热氧化产物的产生, 色度明显低于 FT 燃料。

萘系中的四氢萘和十氢萘, 四氢萘掺混浓度低于 3% 时可以有效抑制热氧化产物的产生, 1% 时显示最佳的抑制热氧化产物的效果。浓度继续增加, 其虽然还是呈现抑制氧化产物的正效应, 但其自身的氧化产物在热裂解区域的裂解导致正效应降低。十氢萘掺混浓度达到 5% 时色度明显降低, 继续增大掺混浓度色度变化不大。说明十氢萘不仅可以有效抑制氧化产物的产生, 而且其自身氧化产物在热裂解区域也相对稳定, 没有因为裂解导致色度增加。

为解析其抑制机理，对燃料热氧化反应产物经层析浓缩后测试结果见表 3。

Table 3. Typical products of colored components after reaction of each mixed fuel
表 3. 典型热氧化产物

数量	典型热氧化型产物
FT	5-十二碳烯, 1,2-癸二醇, 1,2-十二烷二醇 1-十六烯, 6-十二碳烯, 十六酸甲酯, 十六酸乙酯 草酸烯丙基十五烷基酯, 7-十五烷酮, 3-二十碳烯, 十八碳烯酸甲酯
甲基环己烷	乙酸丁酯, 环庚醇, 2-甲基-环己酮, 3-甲基-环己酮
甲基环戊烷	2-己酮, 3-甲基-环戊醇, 乙酸丁酯, 3-甲基-3-己烯, 2-戊烯, 3-乙基-3-庚烯
四氢萘	2-丙基苯酚, 1,2,3,4-四氢-1-萘酚, 3,4-二氢-1(2H)-萘醌, 3,4-二氢-1(2H)-萘醌, -2-2H-1-苯并吡喃, 1-亚甲基丁基-苯, 3-(4-甲基苯基)-2-丙烯醛, 2-甲基-1-亚甲基丙基苯, 4-苯基-3-丁基醇, 2,3-二氢-3,3-二甲基-1H-茛满-1-醇, 2,3-二氢-1,6-二甲基-1H-茛, 2,3-二氢-3,3-二甲基-1H-茛满-1-醇, 1,2,3,4-四氢-1-萘酚 5,6,7,8-四氢-1-萘酚, 5,6,7,8-四氢-2-萘酚
十氢萘	甲基环己烷, 双环亚戊基, 1-乙基-1,4-二甲基-顺式-环己烷, 2-十氢萘酚, 1-十氢萘酚, 反式-4a(2H)-八氢萘, 2(1H)-八氢萘酚, 4-乙基-3,4-二甲基-环己酮, 2-乙酰基环己酮

FT 燃料因只含有直链烷烃和支链烷烃, 其热氧化产物主要为含酸、酯、醛的脂肪族氧化物(55%~65%)和烯烃类物质(35%~40%), 还有少量烯烃环化后生成的烯基环己烷, 以及进一步脱氢、缩合生成的芳烃。

甲基环己烷低浓度掺混时, 其热氧化产物主要为甲基环己烷氧化产物 2-甲基-环己酮, 3-甲基-环己酮, 环庚醇, 以及裂解产物乙酸丁酯, 直接来自链烃氧化的产物含量较少。说明甲基环己烷在氧化区承担了供氢体的作用, 吸收了燃料中溶解氧生成了以甲基环己烷为母体的氧化产物环己酮, 环己醇, 降低了链烃氧化的产物。在裂解区其环状的氧化产物将发生开环形成小分子或脱氢形成芳烃类物质, 有效的提高了掺混燃料的氧化与热安定性。但浓度升高达到 50%时, 由于脱氢形成芳烃类物质浓度增大, 导致多环芳烃类大分子物质的生成, 色度增高, 热氧化安定性能降低。

甲基环戊烷掺混, 其热氧化产物主要是 2-己酮, 3-甲基-环戊醇, 乙酸丁酯, 3-甲基-3-己烯, 2-戊烯, 3-乙基-3-庚烯。为甲基环戊烷的直接氧化产物和其热裂解开环产物。低浓度时, 甲基环戊烷在氧化温度区承担了供氢体的作用, 在裂解区其环状的氧化产物将发生开环形成小分子, 抑制了链烃参与氧化和热分解。高浓度时, 甲基环戊烷作为供氢体不如甲基环己烷, 在氧化区其对链烃氧化的抑制作用也不如甲基环己烷, 但由于其自身以及氧化产物具有较好的溶剂作用, 不仅可抑制链烃氧化产物聚合成大分子, 而且不易生成具有苯环结构的积碳母体, 显示了在宽浓度范围掺混都具有显著提高热氧化安定性的性能。

四氢萘热氧化产物种类较多, 主要检测到的物质有萘酚, 萘醌, 萘酚, 茛类物质。在氧化区四氢萘作为供氢体吸收氧, 氧化为 1,2,3,4-四氢-1-萘酚, 3,4-二氢-1(2H)-萘醌, 以及 1,2,3,4-四氢-1-萘酚 5,6,7,8-四氢-1-萘酚, 5,6,7,8-四氢-2-萘酚, 这些物质可进一步作为供氢剂抑制氧化。但在热裂解区, 掺混浓度仅为 1%时表现出最佳的热氧化安定性, 进一步提高掺混浓度, 虽然仍然具有抑制链烃发生热氧化反应的作用, 但由于其本身氧化产物的开环、聚合及溶解度, 导致提高热氧化安定性的性能下降。

十氢萘氧化产物中出现了十氢萘的脱氢与氧化产物十氢萘酚(1-十氢萘, 2-十氢萘酚), 十氢萘酮, 八氢萘等, 但没有检测出链烃深度氧化的产物, 显示了十氢萘在氧化反应中作为供氢体吸纳自由基的良好作用。而且, 其氧化产物不仅还具有良好的供氢能力, 而且其热裂解的产物主要是以结构稳定的环己烷、环己酮为母体(甲基环己烷, 1-乙基-1,4-二甲基-顺式-环己烷, 酮, 4-乙基-3,4-二甲基-环己酮, 2-乙酰基环己酮), 与甲基环戊烷相似, 显示了宽浓度掺混的高热氧化安定性能。

4. 结论

1) FT 燃料与 RP-3 标准航油掺混比对热氧化沉积量、引发温度的影响是非线性的, 对燃料的蒸发性能影响是线性的。

2) 甲基环戊烷、十氢萘在宽浓度(5%~50%)掺混范围内显著提高了 FT 燃料的热氧化安定性。甲基环戊烷提高热氧化安定性能的机理是由于其氧化产物不易生成具有苯环结构的积碳母体且具有较好的溶剂作用。十氢萘提高热氧化安定性能的机理是氧化产物还具有良好的供氢能力, 而且其热裂解的产物结构稳定。

3) 甲基环己烷(10%)与四氢萘(1%)可在较窄的低浓度掺混时显著提高 FT 燃料的热氧化安定性。掺混浓度增加, 由于其自身氧化产物不稳定导致提高热氧化安定性的性能下降。

基金项目

国家高技术研究发展计划(2018YFB1501505)。

参考文献

- [1] DeWitt, M.J., Edwards, T., Shafer, L., Brooks, D., Striebich, R., Bagley, S.P. and Wornat, M.J. (2011) Effect of Aviation Fuel Type on Pyrolytic Reactivity and Deposition Propensity under Supercritical Conditions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **50**, 10434-10451. <https://doi.org/10.1021/ie200257b>
- [2] Edwards, T., DeWitt, M., Shafer, L., Brooks, D., Huang, H., Bagley, S., Ona, J. and Wornat, J. (2006) Fuel Composition Influence on Deposition from Endothermic Fuels. *14th AIAA/AHI Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, Canberra, Australia, 6-9 November 2006, 645-657. <https://doi.org/10.2514/6.2006-7973>
- [3] Zabarnick, S. (1993) Chemical Kinetic Modeling of Jet Fuel Autoxidation and Antioxidant Chemistry. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **32**, 1012-1017. <https://doi.org/10.1021/ie00018a003>
- [4] 刘国柱, 等. 吸热型碳氢燃料的理论设计与化学改性研究[C]//中国力学学会. 第一届全国高超声速科技学术会议论文集. 2008.
- [5] Edwards, T. and Zabarnick, S. (1993) Supercritical Fuel Deposition Mechanisms. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **32**, 3117-3122. <https://doi.org/10.1021/ie00024a022>
- [6] 杨婷, 李健坤, 周文杰, 杨晓奕. 煤基费托航空燃料热氧化安定性研究[J]. 现代化工, 2018, 38(6): 64-68
- [7] Yang, X.Y., Guo, F., Xue, S. and Wang, X. (2016) Carbon Distribution of Algae-Based Alternative Aviation Fuel Obtained by Different Pathways. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **54**, 1129-1147. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.045>
- [8] 刘国柱, 等. 高热安定型碳氢燃料的理论设计与制备[J]. 中国科学(B 辑: 化学), 2007(6): 612-617.
- [9] Amara, A.B., Kaoubi, S. and Starck, L. (2016) Toward an Optimal Formulation of Alternative Jet Fuels: Enhanced Oxidation and Thermal Stability by the Addition of Cyclic Molecules. *Fuel*, **173**, 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.040>
- [10] 周冠宇, 等. 煤基费托航空燃料燃烧性能及航程[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(8): 1632-1638.