

航空活塞发动机可持续燃料燃烧排放碳烟 颗粒微观特性

曹 阳¹, 陈龙飞^{1,2}, 胡雪欢¹, 陈晓阳¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191; 2. 杭州市北京航空航天大学国际创新
研究院(北京航空航天大学国际创新学院), 杭州 311115)

Microscopic Characteristics of Soot Derived from an Aviation Piston Engine Fueled with Sustainable Aviation Fuel

CAO Yang¹, CHEN Longfei^{1,2}, HU Xuehuan¹, CHEN Xiaoyang¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Hangzhou International Innovation Institute, Beihang University, Hangzhou 311115, China)

Abstract: The microscopic characteristics of soot particles emitted by a piston aircraft engine using 100% hydro-processed esters and fatty acids-sustainable aviation fuel (HEFA-SAF) and conventional jet fuel RP-3 at three operation modes (idle, cruise and takeoff) were analyzed. The results show that the carbon-to-oxygen (C/O) ratios of soot aggregates were observed to be larger under take-off conditions for HEFA-SAF and under idle conditions for RP-3. For both fuels, the reactivity of nanostructures was observed to decrease with increasing engine load. Soot particles derived from HEFA-SAF were observed to possess smaller mean primary particle diameters than those from RP-3 at all load conditions. However, under idle conditions, RP-3 soot particles exhibited relatively lower reactivity, whereas HEFA-SAF soot particles demonstrated even lower reactivity under takeoff conditions. Through experimental data analysis, it is established that the C/O ratio, internal nanostructures, and the degree of graphitization of soot particles exhibited significant coupling relationships with engine loads. Notably, the chemical composition of aviation fuels is demonstrated to show distinct non-linear trends in influencing these critical microstructural parameters. The phenomenon fundamentally originates from the complex synergistic effects between fuel atomization/mixing processes and high-temperature pyrolysis reaction kinetics occurring across different temporal scales.

摘要: 探究了燃用 100% 加氢酯和脂肪酸途径生产的可持续航空燃料(hydro-processed esters and fatty acids-sustainable aviation fuel, HEFA-SAF)和常规航空煤油 RP-3 的航空活塞发动机排放的碳烟颗粒的微观特性。发动机设计负荷包括慢车、巡航和起飞。结果表明: HEFA-SAF 碳烟聚集体在起飞工况下具有较大的碳氧质量比(记为 C/O 比), 而 RP-3 碳烟聚集体在慢车工况下具有较大的 C/O 比。两种航空燃料衍生的碳烟颗粒的初级颗粒平均粒径均随发动机负荷的升高而增大, 但在所有工况下 HEFA-SAF 碳烟颗粒的平均粒径均小

第二十七届中国科协年会学术论文

收稿日期: 2025-04-02

修回日期: 2025-04-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2602000); 国家自然科学基金项目(52306127)

Foundation Item: National Key Research and Development Program of China(2022YFB2602000); National Natural Science Foundation of China(52306127)

作者简介: 曹 阳(1995—), 女, 博士生, 主要研究方向为碳烟颗粒生长机制及其微观特性, E-mail: caoyang9508@buaa.edu.cn;

胡雪欢(通信作者), E-mail: huxuehuan@buaa.edu.cn。

于 RP-3 碳烟颗粒。从低负荷升至高负荷时,两种航空燃料衍生的碳烟颗粒内部纳米结构反应性均有所降低。在慢车工况下 RP-3 碳烟颗粒反应性较小,而在起飞工况下 HEFA-SAF 碳烟颗粒反应性更小。研究结果揭示了 C/O 比、内部纳米结构、碳烟颗粒石墨化程度和发动机负荷之间密切相关,而燃料成分对这些参数具有非单调性影响,这可归因于燃料-空气混合和燃料热解动力学之间的动力学时间尺度竞争。

关键词: 可持续航空燃料;碳烟颗粒;化学组分;微晶反应性

Key words: sustainable aviation fuel (SAF); soot particle; chemical composition; crystallite reactivity

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2025.03.002

中图分类号: TK46⁺4

0 概述

因高安全标准、复古兼容性问题(新型燃料或技术需与现有发动机及燃油系统和基础设施兼容的特性)和符合高密度能量载体等多方面的严格要求,航空业是最难脱碳的领域之一^[1]。现有的航空脱碳机制包括提高燃料利用效率、使用可持续航空燃料(sustainable aviation fuel, SAF)及开发电力系统和氢能等^[2]。目前,SAF 已实现规模化生产并完成国际适航认证,具备快速部署的产业化基础;相比之下,电力驱动系统仅适用于短途小型飞机,氢能航空的燃烧控制与安全性仍处于技术验证阶段,两者短期内均难以匹配主流航空市场的运力与可靠性要求。鉴于涉及新技术壁垒的脱碳途径快速脱碳潜力有限,且航空运输需求在持续增大,使用 SAF 被认为是在中短期内实现航空脱碳的最佳选择。

SAF 和传统航空燃料具有相近的能量密度,能够以任意比例与传统航空燃料混合使用而无需改变发动机构造^[3]。然而,由于兼容性问题,目前 ASTM D7566 标准规定各种 SAF 与传统燃料的最大掺混体积比不超过 50%^[4]。最大掺混体积比 50% 适用于经美国材料与试验协会(American Society for Testing and Materials, ASTM)认证的 3 种主要的 SAF 生产途径:费托(Fischer-Tropsch, FT)合成石蜡煤油(synthetic paraffinic kerosene, SPK)、醇制喷气(alcohol-to-jet, AtJ)燃料、加氢酯和脂肪酸(hydroprocessed esters and fatty acids, HEFA)合成链烷烃煤油,分别简称为 FT-SPK、AtJ-SPK 和 HEFA-SPK,其技术成熟度和商业可行性处于不同阶段^[3]。其中,HEFA 途径使用加氢处理和异构化将各类生物质原料转化为石蜡,具有成熟的商业规模技术、全生命周期碳排放量小及较高的总能量产率的全面优势^[5-6],成为主流 SAF 市场供应^[2]。

然而,50% 的最大混合体积比难以满足持续增长的脱碳需求,使用 100% SAF 是实现航空业可持续

发展的必然趋势。在德国航空航天中心(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)、空客和 Rolls-Royce 合作开展的替代燃料的排放分析及气候影响研究(emission and climate impact of alternative fuels 3, ECLIF3)中,DLR 猎鹰 20 研究飞机跟随一架由 Rolls-Royce Trent XWB-84 发动机驱动的空客 A350-941 源飞机在巡航高度进行了 1~2 min 的原位测量^[7]。结果表明相比于 Jet-A,燃用 100% HEFA-SAF 使碳烟颗粒、冰晶分别减少了 35% 和 56%^[7],这证实了 HEFA-SAF 对于减少碳烟颗粒及尾迹冰晶的环境效益。飞机尾迹中的冰晶(凝结尾迹和卷云)通过反射阳光和阻挡地表热辐射产生净增温效应,其短期气候影响甚至可能超过航空碳排放的长期作用,是航空业非 CO₂ 气候效应的主要来源之一。然而,这些昂贵的试飞研究缺少对 100% HEFA-SAF 碳烟颗粒微观特性的调查,从而无法明确由形态和内部纳米结构等决定的碳烟颗粒氧化反应性^[8]。本研究按照国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)规定推荐的采样方法,在航空活塞发动机^[9]上开展了 100% HEFA-SAF 碳烟颗粒微观特性研究。本研究将填补通用航空动力燃用 100% HEFA-SAF 排放碳烟的微观特性研究空白,为通用航空友好型绿色动力系统的评估奠定重要基础。

1 试验设置

图 1 为本研究试验流程图。其中,高效微粒空气过滤器(high efficiency particulate air filter, HEPA)用于过滤压缩空气中粒径大于 0.3 μm 的颗粒物,其过滤效率 ≥99.97%。质量流量控制器(mass flow controller, MFC)用于控制稀释空气的流量。单颗粒采样器(DKL-2 型号)用于采集碳烟颗粒。

本研究采用一台航空活塞发动机 CD-135 作为碳烟颗粒排放源,特征参数如表 1 所示。发动机负荷分别设置为 7% (慢车、6.93 kW)、50% (巡航、

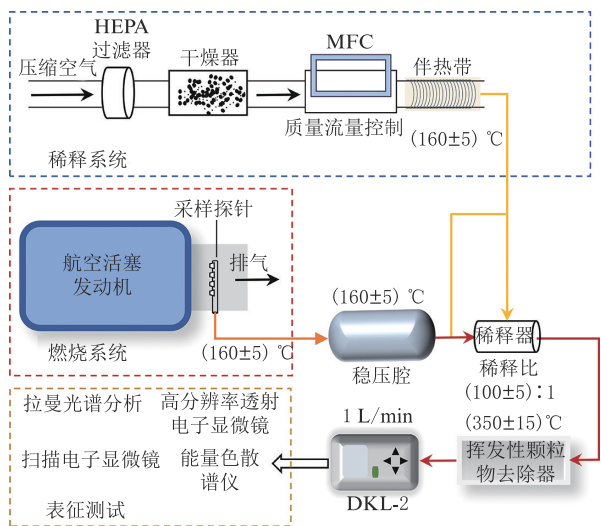


图1 试验流程图

Figure 1 Flow chart of the experiment

49.50 kW)和 100%(起飞、99.00 kW)。

表 1 CD-135 航空活塞发动机的规格参数

Table 1 Specifications of CD-135 aviation piston engine

项目	参数
发动机型式	4缸四冲程
压缩比	18
100% 负荷转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	2 300
50% 负荷转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 800
7% 负荷转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 000
标定功率/kW	99
缸径/mm	83
活塞行程/mm	92
气缸总排量/L	2
燃油喷射系统	高压共轨、电控喷射
燃料类型	RP-3、Jet A-1、Jet A、JP-8、柴油、SAF

表 2 列出了试验用传统航空煤油燃料 RP-3 (GB 65372006)与可持续航空燃料 HEFA-SAF 的关键物性参数,表中数据由上海微谱(大型研究型检测机构)根据国家标准和行业标准测量提供。本文中所使用的 HEFA-SAF 由中国石化镇海炼化公司精炼和供应,该燃料已获得中国民航局适航认证和可持续生物材料圆桌会议(Roundtable on Sustainable Biomaterials, RSB)认证。文献[10]中研究表明该 HEFA-SAF 含有质量分数 14 %的正烷烃,85% 异构烷烃和 1% 的环烷烃,燃料组分或因生产批次不同存在微小差异。碳烟采样通过位于发动机排气管出口的 316 不锈钢采样探针完成。探针外径为 7 mm、内径为 5 mm,被垂直放置于排气段,距离排放平面不超过尾喷管直径的 0.5 倍。碳烟采样采用两种类型的收集衬底:用于扫描电子显微

镜-能谱分析仪(scanning electron microscope-energy dispersive spectrum, SEM-EDS)和拉曼光谱仪(Raman spectrum)观测的单晶硅片($3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,由开化立晶科技有限公司生产)与用于高分辨率透射电子显微镜(high-resolution transmission electron microscope, HRTEM)观测的铜网(孔径约 $50\text{ }\mu\text{m}$,由中兴百瑞科技有限公司生产)。

表 2 RP-3 和 HEFA-SAF 燃料理化特性

Table 2 Physicochemical properties of RP-3 and HEFA-SAF

项目	参数	
燃料	RP-3	HEFA-SAF
密度(20°C)/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	780	762
低热值/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	43 530	44 200
十六烷值	40	43
运动黏度(40°C)/($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	1.48	1.35
理论空燃比	14.78	14.50
闪点/ $^\circ\text{C}$	38	46
冰点/ $^\circ\text{C}$	-47	< -60

文献[11]中研究表明,碳烟一旦成核,初级颗粒会经历脱氢和表面生长两个过程,进而形成具有高抗氧化性的石墨型微观结构,直至由于表面氧化而形成尺寸稳定的结构。图 2 为碳烟颗粒量化参数定义。这些近球形初级颗粒随着沿燃烧室的布朗运动和碰撞而形成相似的链状或葡萄状聚集体,如图 2(a)所示。HRTEM 分析是目前被广泛认可的直接获取初级颗粒物理尺寸的首选方法^[12]。通过计算机软件圈取的拟合圆周长反算初级颗粒的直径(D_p)是确定其尺寸的常用方法,如图 2(b)所示。如图 2(c)所示,碳烟颗粒呈典型的“壳-核”结构。近乎平行的微晶(壳)具有石墨化特征,而随机取向的无定型碳(核)具有非晶化特征。如图 2(d)所示,微晶长度和微晶距离可以从 HRTEM 中被提取出来。微晶长度和微晶曲率(即微晶长度与微晶距离的比)被作为关键纳米参数用于定量分析微观结构。微晶长度越长,微晶曲率越小,石墨层排列越有序,碳烟颗粒反应性越低^[13]。特别说明, D_p 和微晶统计结果均源自 HRTEM 图像中的无包覆碳烟颗粒。

2 结果与讨论

2.1 碳烟聚集体形态与化学组分

图 3 为碳烟聚集体混合状态及碳氧元素质量(记为 C/O)比。碳烟聚集体的表面涂层可增强碳烟的光吸收,使碳烟聚集体具有更强的辐射强迫效应。本研究中的碳烟聚集体在被收集后立即进行了表征检测,其涂层是由未燃尽碳氢化合物、燃烧中间产物

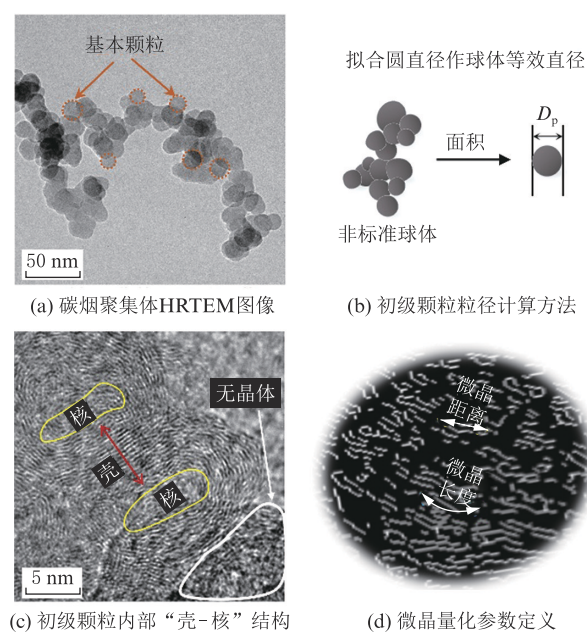


图2 碳烟颗粒量化参数定义

Figure 2 The definition of quantization parameters of soot particles

大分子多环芳烃和半挥发性有机物组成。根据碳烟形态和元素组成(统计自能谱分析仪),本研究中的碳烟聚集体被分为无包覆碳烟(图3(a))、部分包覆碳烟(图3(b))、全包覆碳烟(图3(c))三类。所有碳烟样品均同时具有这3种混合状态。通常情况下,涂层包覆面积越大,聚集体的C/O比越小。图3(d)表明,在慢车工况下,HEFA-SAF产生的碳烟C/O比小于RP-3;而在巡航和起飞工况下,HEFA-SAF产生的碳烟C/O比大于RP-3。这可能归因于HEFA-SAF比RP-3具有更少的芳烃和更高的燃烧热。在低负荷或较低燃烧温度下,芳烃的缺失导致了HEFA-SAF的碳烟成核与生长的全过程慢于RP-3。换言之,同样的燃烧停留时间内,当RP-3燃烧副产物正在从初级颗粒聚结为聚集体时,HEFA-SAF的燃烧副产物可能正在从PAHs变成初级颗粒。因此,在低负荷条件下,HEFA-SAF的C/O比较小,碳烟聚集体表面未燃尽碳氢化合物和/或多环芳烃较多。随着负荷或燃烧温度的升高,芳烃对碳烟生成的相对影响减小,而石蜡类化合物通过裂解-聚合反应生成碳烟的化学速率增大。此时,HEFA-SAF较高的燃烧热加剧了乙炔等小分子的热泳,从而缩短了多环芳烃的形成和生长过程。相比之下,RP-3较高的初始芳烃含量可能产生更多的表面涂层。

3.2 初级颗粒粒径分布

初级颗粒粒径分布受发动机和燃料类型的影响,通常呈现正态分布。本文中使用95%置信区间的高斯拟合函数来估计初级颗粒的平均粒径。图4展示了不同负荷条件下初级颗粒的平均粒径分布情

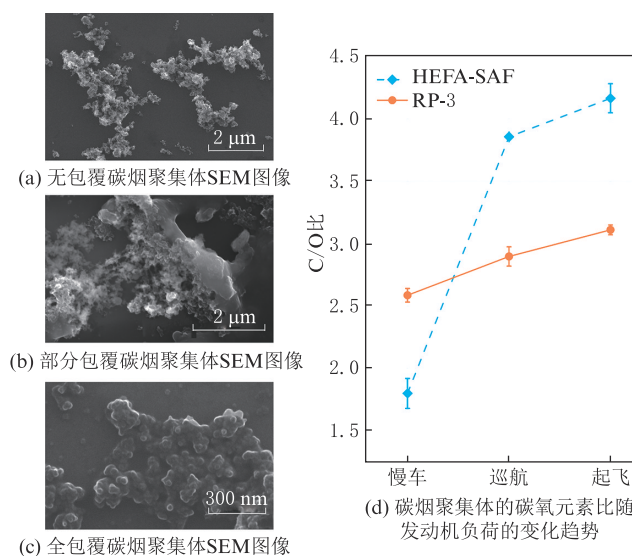


图3 碳烟聚集体混合状态及C/O比

Figure 3 The mixing state and the C/O ratio of soot aggregates

况,结果表明平均粒径均随发动机负荷的增大而增大。这可能与高负荷导致较高的燃空比(fuel air ratio, FAR)和较短的燃烧区停留时间有关。较高的FAR表明燃料增多,碳烟颗粒的成核前体物浓度随之增大;较短的停留时间削弱了燃烧后区颗粒的表面氧化。此外所有负荷下燃用HEFA-SAF排放的初级颗粒平均粒径均小于RP-3初级颗粒的平均粒径。HEFA-SAF较小的初级粒径可能归因于碳烟生长前体物的浓度较低。

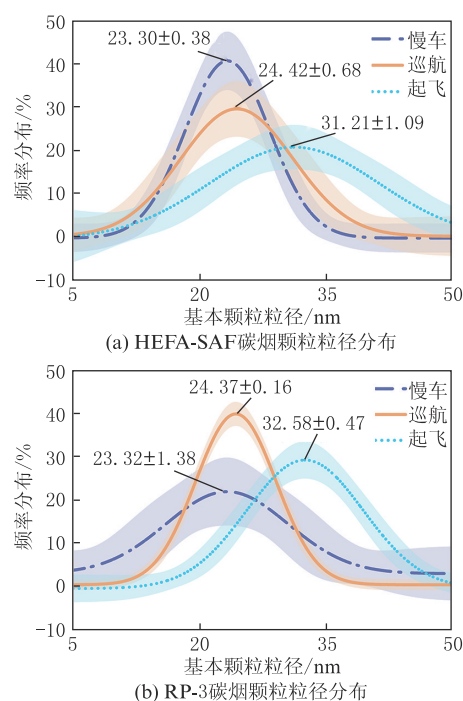


图4 不同发动机负荷条件下初级颗粒的平均粒径分布
Figure 4 The distribution of primary particle diameters under different engine loads

2.3 颗粒内部纳米结构

由于在巡航工况下的碳烟颗粒提取微晶数量低于 2 000, 无法对该工况下的纳米结构进行有效分析。这与之之前关于 100% HEFA-SAF 排放浓度的研究结果相关, 即在中负荷下 HEFA-SAF 具有最低的微晶数量排放指数或者最出色的减排特性^[14]。利用高斯拟合函数确定了其他样品的平均微晶长度和平均微晶曲率。图 5 为碳烟颗粒微观参数随发动机负荷的变化。两种燃料平均微晶长度均随发动机负荷的升高而增加, 而平均微晶曲率相应减小。这表明在起飞工况下, 碳烟颗粒的石墨微晶排列最有序。微晶长度的增加和微晶曲率的减小意味着碳烟的反应性更低。这是因为较长的微晶长度包含较少的边缘碳原子, 而边缘碳原子比基面上的碳原子反应活性更高。较低微晶曲率意味着非平面的石墨片层更少。这种非平面性通常由五元环造成, 由此产生的空间和静电斥力促进片层分离, 使得氧化剂更容易进入。本研究中, 燃料特性对碳烟纳米结构的影响具有非单调性。在慢车工况下, HEFA-SAF 平均微晶长度比 RP-3 短; 而在起飞工况下, HEFA-SAF 平均微晶长度比 RP-3 长。这可能由 HEFA-SAF 较低的运动黏度、芳烃含量和略微提高的燃烧室局部温度等多种因素共同造成。

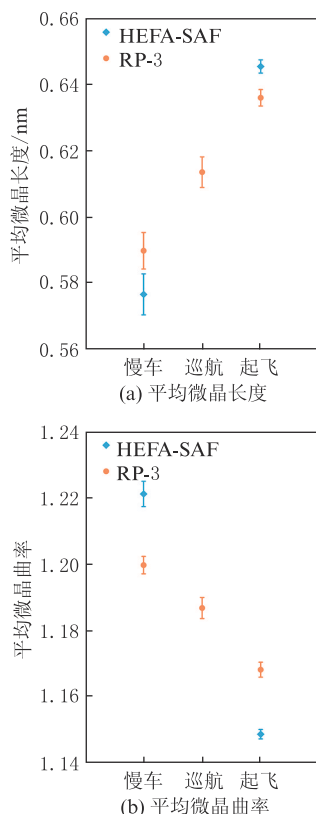


图5 碳烟颗粒微观参数随发动机负荷的变化

Figure 5 Variation of soot particle microstructural parameters with engine loads

2.4 碳烟颗粒石墨化程度

拉曼光谱对分子和芳香族化合物的化学键及振动频率敏感^[15], 可为揭示碳烟颗粒的组成(晶态、非晶态与缺陷)提供独特的视角^[16]。对于缺陷较少或理想的石墨晶体, 一阶拉曼光谱只有一个对应于具有 E_{2g} (晶体中原子在特定方向上的同步振动模式) 对称性的晶格振动模式的 G 峰(石墨峰)^[17-18]。然而, 本研究中从航空发动机取样的碳烟颗粒并不是理想石墨, 而是存在许多缺陷, 并且结构紊乱, 因此呈现 D 峰(缺陷峰)和 G 峰两个标准峰。在每个测量光谱中确定 G 峰的强度, 并将其拉曼强度进行归一化处理。文献[19]中为燃烧源衍生碳烟颗粒建立了五峰反褶积方法, 发现 D3 峰和 D4 峰为碳烟颗粒特有的拉曼峰。在不改变碳烟颗粒缺陷种类及其拉曼活性的基础上, 本研究采用改进的 3L2G 拟合方法(D1 峰、D2 峰和 G 峰使用洛伦兹函数进行拟合, D3 峰和 D4 峰使用高斯函数拟合)分析碳烟颗粒的拉曼光谱。通过对采集自不同燃烧源的碳烟颗粒进行拉曼光谱拟合分析, 验证了高斯翼型比洛伦兹翼型更适于拟合 $1\,200\text{ cm}^{-1}$ 附近的 D4 峰。考虑到燃烧过程的复杂性, 本征缺陷(碳碳单键的旋转、空位、位错、晶界等)与外源性缺陷(杂原子或含氧基团的嵌入等)可能同时存在微晶石墨中^[20]。缺陷峰的强度 I_{Di} ($i=1, 2, 3, 4$, 为缺陷强度比)与 G 峰强度 I_G 之比 I_{Di}/I_G 被用作基于现象学分析的定量表征参数^[21], 解析了碳烟颗粒的缺陷组成。本文重点讨论 I_{D1}/I_G 、 I_{D3}/I_G 这两个关键参数。

D1 峰与纳米结构的边缘状态有关^[17]。这些边缘是附着官能团或发生氧化反应的首选位置^[22]。通过化学或热处理产生的光滑边缘为锯齿型边缘或扶手椅型边缘^[22]。然而, 具有复杂的凝聚前体的碳烟颗粒石墨边缘并不一定是单一且有序的, 通常由两种基本边缘结构共同组成。以往的研究表明, 锯齿型边缘由于在边缘方向上的两个亚晶格之间缺乏对称性而无法激活 D1 峰^[17]。在单独的拉曼光谱分析和 HRTEM 图像中无法直接区分扶手椅型边缘和锯齿型边缘。因此, 虽然拉曼光谱可用于检测石墨层缺陷, 但使用 I_{D1}/I_G 难以完整地描述边缘缺陷来源。图 6 为 I_{D1}/I_G 和 I_{D3}/I_G 随发动机负荷的变化趋势。图 6(a)展示了不同碳烟颗粒的 I_{D1}/I_G 值。在慢车和起飞工况下, 燃用 HEFA-SAF 排放的碳烟颗粒 I_{D1}/I_G 值小于燃用 RP-3 排放的碳烟颗粒。结合之前的 HRTEM 分析可知, 大多数碳烟颗粒的 I_{D1}/I_G 值与微晶长度的变化趋势具有一致性, 即当 I_{D1}/I_G 值减小时, 微晶长度增大。拉曼与 HRTEM 数据的一致性

意味着这些碳烟颗粒的边缘结构以扶手型边缘为主。然而,并不是所有工况都具有类似的一致性。在起飞工况下,燃用 RP-3 燃料的碳烟颗粒 I_{D1}/I_G 值大于在慢车工况和巡航工况下的碳烟颗粒 I_{D1}/I_G 值,这不同于其他碳烟颗粒的 I_{D1}/I_G 值随发动机负荷升高而减小的规律。在这两方面的不一致性可能归因于这些碳烟颗粒中含有更多的锯齿型边缘,因此研究人员有可能从具有相同边缘密度的碳烟颗粒中获得不同的 I_{D1}/I_G 值^[23]。对于边缘类型的推断是具有挑战性的,考虑到这一限制,本研究中无法将 I_{D1}/I_G 值作为碳烟纳米结构反应性的度量参数。

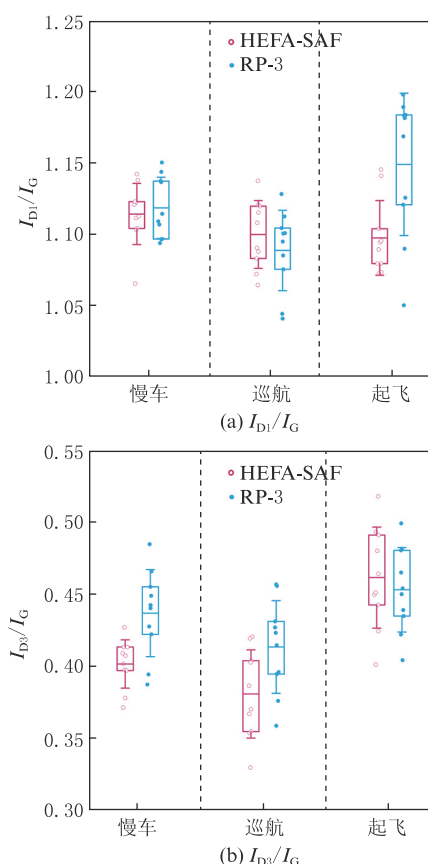


图6 拉曼特征参数随发动机负荷的变化趋势

Figure 6 Variation of Raman characteristic parameters with engine loads

此外,在 1500 cm^{-1} 附近的 D3 峰是由 sp^2 和 sp^3 杂化碳原子组成的无序非晶态混合物^[19],随着石墨化而消失^[24]。其中, sp^2 杂化是指碳原子形成 3 个平面共价键(如石墨烯中的六元环),而 sp^3 杂化是指碳原子形成 4 个四面体共价键(如金刚石中的三维网络)。在碳烟颗粒典型的壳-核结构中,D3 峰通常由核心区域较短的弯曲碳链激发,这与文献[18,25]中的研究一致。以往的研究表明,核心区域的无序具有更强的反应性,在燃烧后期更易被氧化进而变成

中空碳烟颗粒^[26]。在慢车和巡航工况下,燃用 HEFA-SAF 排放的碳烟颗粒的 I_{D3}/I_G 均小于 RP-3,这表明本研究中 HEFA-SAF 碳烟颗粒具有更小的反应性。而在起飞工况下的 HEFA-SAF 与 RP-3 碳烟颗粒不符合该规律可能是由数据的离散区间差异较小造成的。本研究中还发现 I_{D3}/I_G 的变化趋势与 I_{D1}/I_G 一致,与文献[27]中报道的航空发动机碳烟颗粒拉曼结果类似。这可能是因为本研究中碳烟颗粒的壳与核结构区分不明显,存在较多能够同时激发 D3 峰与 D1 峰的小尺寸石墨微晶。

3 结论

(1) HEFA-SAF 碳烟聚集体在起飞工况下具有较大的 C/O 比,而 RP-3 碳烟聚集体在慢车工况下具有较大的 C/O 比,这表示衍生自 HEFA-SAF 的碳烟聚集体在高负荷下表现出更低的凝结概率。

(2) 所有负荷下 HEFA-SAF 初级颗粒平均粒径均小于 RP-3。

(3) 从低负荷升至高负荷时,两种航空燃料衍生的碳烟纳米结构的反应性均有所降低。但在慢车工况下 RP-3 碳烟颗粒反应性较小,而在起飞工况下 HEFA-SAF 碳烟颗粒反应性更小。

(4) 碳烟颗粒石墨化程度并未随发动机负荷或燃料组分的变化而单调变化,受到燃料组分与发动机负荷的耦合影响。本研究中 HEFA-SAF 对于降低碳烟颗粒光吸收能力的潜力尚未得到验证。

参考文献:

- [1] NOBILI A, VELTRI M, D'ANDRIA M, et al. A kinetic study on the blending behavior of sustainable and conventional aviation fuels: soot formation processes [J/OL]. Proceedings of the Combustion Institute, 2024, 40 (1): 105761 (2024-09-17) [2025-04-11]. DOI:10.1016/j.proci.2024.105761.
- [2] BELL A, MANNION LA, KELLY M, et al. Life cycle CO_2 e intensity of commercial aviation with specific sustainable aviation fuels [J/OL]. Applied Energy, 2025, 382: 125075 (2025-03-15) [2025-04-11]. DOI:10.1016/j.apenergy.2024.125075.
- [3] UNDAVALI V, OLATUNDE O B G, RAHIM B, et al. Recent advancements in sustainable aviation fuels [J/OL]. Progress in Aerospace Sciences, 2023, 136: 100876 (2022-12-06) [2025-12-06]. DOI: 10.1016/j.paerosci.2022.100876.
- [4] SCHRIPP T, ANDERSON B E, BAUDER U, et al. Aircraft engine particulate matter emissions from sustainable aviation fuels: results from ground-based measurements during the NASA/DLR campaign ECLIF2/ND-MAX [J/OL]. Fuel, 2022, 325: 124764 (2022-10-01) [2025-04-11]. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124764.
- [5] NG K S, FAROOQ D, YANG A D. Global biorenewable development strategies for sustainable aviation fuel production

- [J/OL]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 150: 111502 (2021-10-01) [2025-04-11]. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111502.
- [6] SU-UNGKAVATIN P, TIRUTA-BARNA L, HAMELIN L. Biofuels, electrofuels, electric or hydrogen? A review of current and emerging sustainable aviation systems [J/OL]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2023, 96: 101073 (2023-05-02) [2025-04-11]. DOI: 10.1016/j.pecs.2023.101073.
- [7] MÁRKL R S, VOIGT C, SAUER D, et al. Powering aircraft with 100% sustainable aviation fuel reduces ice crystals in contrails [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2024, 24: 3813 – 3837.
- [8] CHEN L F, CUI B X, ZHANG C L, et al. Impacts of fuel stage ratio on the morphological and nanostructural characteristics of soot emissions from a twin annular premixing swirler combustor [J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58 (24): 10558 – 10566.
- [9] UNDERWOOD S C, TAGHAVI R, MILLER T. Analysis of exhaust emissions of an aircraft diesel engine using Jet-A [C/OL]//AIAA Aviation 2019 Forum, June 17-21, 2019, Dallas, Texas. New York: AIAA, 2019; AIAA 2019-3345 (2019-06-17) [2025-04-11]. DOI: 10.2514/6.2019-3345.
- [10] LIANG Y L, LIU X T, YANG M, et al. Investigating the oxidation characteristic of a hydro-processed bio-jet fuel: experimental and modeling study [J/OL]. *Combustion and Flame*, 2024, 270: 113778 (2024-10-03) [2025-04-11]. DOI: 10.1016/j.combustflame.2024.113778.
- [11] LAPUERTA M, BALLESTEROS R, GONZÁLEZ-CORREA S. Relationships between morphology and optical properties of vehicle-emitted soot [J/OL]. *Journal of Aerosol Science*, 2023, 174: 106261 (2023-09-07) [2025-04-11]. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2023.106261.
- [12] SAFFARIPOUR M, THOMSON K A, SMALLWOOD G J, et al. A review on the morphological properties of non-volatile particulate matter emissions from aircraft turbine engines [J/OL]. *Journal of Aerosol Science*, 2020, 139: 105467 (2019-11-09) [2025-04-11]. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2019.105467.
- [13] VANDER WAL R L, TOMASEK A J. Soot oxidation: dependence upon initial nanostructure [J/OL]. *Combustion and Flame*, 2003, 134(1/2): 1 – 9.
- [14] XU Z, WANG M H, CHANG L Y, et al. Assessing the particulate matter emission reduction characteristics of small turbofan engine fueled with 100% HEFA sustainable aviation fuel [J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2024, 945: 174128 (2024-10-01) [2025-04-11]. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174128.
- [15] LE K C, PINO T, PHAM V T, et al. Raman spectroscopy of mini-CAST soot with various fractions of organic compounds: structural characterization during heating treatment from 25 °C to 1 000 °C [J]. *Combustion and Flame*, 2019, 209: 291 – 302.
- [16] SCHUEPFER D B, BADACZEWSKI F, GUERRA-CASTRO J M, et al. Assessing the structural properties of graphitic and non-graphitic carbons by Raman spectroscopy [J]. *Carbon*, 2020, 161: 359 – 372.
- [17] PIMENTA M A, DRESSELHAUS G, DRESSELHAUS M S, et al. Studying disorder in graphite-based systems by Raman spectroscopy [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2007, 9: 1276 – 1291.
- [18] HU X H, YU Z H, CHEN L F, et al. Morphological and nanostructure characteristics of soot particles emitted from a jet-stirred reactor burning aviation fuel [J/OL]. *Combustion and Flame*, 2022, 236: 111760 (2021-10-03) [2025-04-11]. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111760.
- [19] SADEZKY A, MUCKENHUBER H, GROTHE H, et al. Raman microspectroscopy of soot and related carbonaceous materials: spectral analysis and structural information [J]. *Carbon*, 2005, 43(8): 1731 – 1742.
- [20] AHMAD W, ULLAH Z, SONIL N I, et al. Introduction, production, characterization and applications of defects in graphene [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2021, 32: 19991 – 20030.
- [21] DASAPPA S, CAMACHO J. Evolution in size and structural order for incipient soot formed at flame temperatures greater than 2 100 K [J/OL]. *Fuel*, 2021, 291: 120196 (2021-05-01) [2025-04-11]. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120196.
- [22] FERRARI A C, BASKO D M. Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene [J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8: 235 – 246.
- [23] AGUDELO J R, ALVAREZ A, ARMAS O. Impact of crude vegetable oils on the oxidation reactivity and nanostructure of diesel particulate matter [J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161 (11): 2904 – 2915.
- [24] GUO Y, RISTOVSKI Z, GRAHAM E, et al. The correlation between diesel soot chemical structure and reactivity [J]. *Carbon*, 2020, 161: 736 – 749.
- [25] GUO Y, HORCHLER E J, FAIRLEY N, et al. An experimental investigation of diesel soot thermal-induced oxidation based on the chemical structure evolution [J]. *Carbon*, 2022, 188: 246 – 253.
- [26] VANDER WAL R L, BRYG V M, HUANG C H. Aircraft engine particulate matter: macro- micro- and nanostructure by HRTEM and chemistry by XPS [J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(2): 602 – 611.
- [27] SAFFARIPOUR M, TAY L L, THOMSON K A, et al. Raman spectroscopy and TEM characterization of solid particulate matter emitted from soot generators and aircraft turbine engines [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2017, 51 (4): 518 – 531.