

芳香烃种类及含量对航空发动机 燃烧的排放影响

郑璐恺, 朱彦澄, 周亚波
(南京工程学院 机械工程学院, 南京 211167)

摘 要: 为了对不同芳香烃种类及含量在航空发动机上表现开展综合评定,对 16 种芳香烃的 3 种配比和燃料开展发动机排放尾气碳烟浓度实验。根据实测颗粒物排放浓度值,对芳香烃的种类与含量增长对排放的影响进行比较;通过线性拟合计算芳香烃特性与颗粒物 PM(particulate matters)排放的相关性;结合燃料的能量密度与排放两大重要因素,给出综合评定排名。分析结果表明:茚与萘系类产生的 PM 数浓度显著更高,而加氢处理后对排放有明显改善。芳香烃的密度和碳氢比对 PM 的影响最大,并随着芳烃浓度的增加影响越显著。对异丙苯与苯乙烯在综合评定中被列为最优两种芳烃,对萘系列加氢处理可同时优化比能与排放。该结果为通过控制燃料中芳烃种类来优化燃料提供了研究基础。

关 键 词: 芳香烃; 碳烟排放; 航空燃料; 喷气式航空发动机; 碳烟浓度实验

中图分类号: V231.2 **文献标志码:** A

Effect of aromatic hydrocarbon type and content on combustion emission of aeroengine

ZHENG Lukai, ZHU Yancheng, ZHOU Yabo
(School of Mechanical Engineering,
Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: In order to carry out comprehensive evaluation of the performance of different aromatic hydrocarbon types and contents on aero engines, engine emission exhaust soot concentration experiments on 3 blended fuels of 16 aromatic hydrocarbons were conducted. According to the measured particulate emission concentration value, the effects of the types and content of aromatic hydrocarbons on the impact of emissions were compared; the correlation between aromatic hydrocarbon characteristics and PM emissions was calculated through linear fitting; and by combining these two important factors of fuel energy density and emissions, a comprehensive evaluation ranking was given. The analysis results showed that the PM concentration produced by indene and naphthalene series was significantly higher, and the emission after hydrotreatment was significantly improved. In addition, the density and carbon-hydrogen ratio of aromatic hydrocarbons had the greatest influence on PM, and the influence became more significant with the increase of aromatic hydrocarbon concentration. Finally, p-cumene and styrene were listed as the best two aromatic hydrocarbons in the comprehensive assessment. In addition, the series of naphthalene hydrotreating can simultane-

收稿日期:2020-08-26
基金项目:江苏省教育厅面上项目(19KJB590002);南京工程学院人才引进计划(YKJ201902)
作者简介:郑璐恺(1989—),女,讲师,博士,主要从事航空燃料燃烧学研究。

引用格式:郑璐恺,朱彦澄,周亚波. 芳香烃种类及含量对航空发动机燃烧的排放影响[J]. 航空动力学报,2021,36(6):1244-1252.
ZHENG Lukai,ZHU Yancheng,ZHOU Yabo. Effect of aromatic hydrocarbon type and content on combustion emission of aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power,2021,36(6):1244-1252.

ously optimize specific energy and emissions. This result provides a research basis for optimizing fuels by controlling the types of aromatics in the fuel.

Key words: aromatic hydrocarbon; soot emission; aviation fuel; jet aeroengine; carbon smoke concentration test

随着经济社会发展越来越迅速,中国航空煤油消费量增长了 140 余倍,成为我国消费经济的重要组成部分。然而,因为航空飞机在高空高速飞行行驶过程中,相比较于从地面直接排放的大气污染物而言,它所直接排放的大气污染物对全球大气的变化影响更为直接,也更为明显^[1]。其中,碳烟不仅是发动机燃油颗粒物废气排放的主要有害成分之一,会严重威胁影响到生态环境和危害人体健康。同时它们可直接吸附在航空发动机机体表面并且严重时损害发动机的燃油排气处理系统,从而缩短其设备使用寿命并且严重降低燃料综合利用效率^[2]。

早期,Hunt 测量了 108 种碳氢化合物,发现芳烃的烟点明显较低,即具有较高的烟熏倾向^[3]。但是部分人认为芳香烃结构不是确定烟灰形成的关键因素^[4]。再后来,实验表明合成燃料掺杂的高分子量芳香族溶剂会产生更多的烟尘。为了使合成燃料的有益性能最大化,他们认为必须确定合成燃料的最佳芳香族类型和浓度^[5]。科研人员经过观察燃油的燃烧情况,发现火焰中的煤烟浓度与燃料中的芳香烃浓度成正比^[6]。虽然芳香烃有助于提高燃烧性能,但它们促进煤烟的形成,这在大多数实际应用中是不可取的。燃料中天然存在的芳烃提供了形成多环芳烃(PAHs)的有效途径,这些多环芳烃被视为煤烟前体^[7-8]。清华大学的刘永峰等计算前驱物 PAHs 利用修改的 F-M 模型,认为温度和过量空气系数是影响碳烟生成的最主要因素^[9]。而多伦多大学的 Saffaripour 等比较了喷灰特性和火焰结构,认为碳烟浓度和阈值烟灰指数(TSI)值强烈依赖于燃料的芳烃含量^[6]。后来 Zheng 等测量了颗粒物的排放量。实验结果表明,较高的芳烃含量是导致燃烧不足和碳烟生成量增加的主要原因^[10]。再深入研究航空燃油的化学组成与理化性质的关系,对于碳原子数相同的烃类来说,其质量热值顺序为烷烃>环烷烃>烯烃>芳烃。通过研究可以看出直链烃、异构烃、环烷烃、芳烃都是影响热值的主要因素^[11]。

欧盟部分航空技术发达国家的正在酝酿建立航空发动机烟雾排放标准,以提高产品的技术门槛,未来烟雾排放水平将会成为一个航空技术发

展的重要因素。对于现有燃料而言,芳香烃体积分数基本在 7%~20%之间。燃料成分中芳香烃含量对碳烟排放的影响占据绝对重要的地位^[12-13]。燃料中的附加剂、氢碳比和芳香烃体积分数对排气冒烟影响很大^[14]。吴施志等学者提出可减少燃油中芳香烃体积分数来抑制发动机冒烟数^[15]。更细致碳烟反应过程则多是基于柴油机,如张洪涛等学者^[16]通过对柴油燃烧过程分析,了解了甲烷,乙炔在反应过程中过的碳烟生成机理,并提出了基于喷油方式的改进建议。孙见忠等^[17]利用尾气静电监测的角度总结了尾气碳烟颗粒物的排放特性。刘永峰等学者^[9]为了精确计算柴油发动机中的碳烟生成提出了考虑多环芳烃前驱引起的碳烟生成计算模型。可见,基于燃料对于现有燃料的碳烟控制方法仅仅是单纯的控制整体的芳香烃含量,没有科学性的对芳香烃种类和其引发的碳烟程度的不同的机理进行研究。

芳香烃不但有不同族类,而且每族类还有多种细分的子种类,其碳烟排放影响和能量密度都相差甚远^[18]。因此,亟需研究不同种类和含量的芳烃类燃料对碳烟排放等性能的影响,以便在实际使用和标准制订时进行区别对待。通过对单个子种类芳香烃的燃烧和适航性能进行深入的实验分析,了解不同类别芳烃对碳烟排放和供油系统密封性的差异性和形成机理,科学的对芳烃的含量和种类进行控制与合理搭配,从而实现对即用型调合燃料在排放和密封性方面实现同时优化。

优化燃料组成的方法有很多,控制多环芳烃和芳烃的转化率、不同性质的复合原料、复合产品。选择一种或另一种研究方向取决于优化的标准,因为燃料某些特性(如:热氧化稳定性)的改善往往会导致其他特性(如:煤烟的形成)的恶化^[19]。燃油中不同的芳香烃成分以及其在燃油中的不同比例等各种因素,可以直接影响到燃油燃烧情况,并且对碳烟排放的质量有着显著的影响。因此,可以就单类别芳香烃的各种比例进行详细实验研究。

1 实验装置

为了更加直观地观察并更加准确测量不同芳

香烃成分及比例下的航空燃油实际燃烧情况,一个较为理想燃烧室实验平台是不可或缺的。其包括主燃烧室、供油系统、空气供应系统、压缩系统和光学数据采集系统等。

图1给出了燃烧室的细节片显示了实验硬件的外部视图。实验中所使用的航空喷气式 Tay 燃烧室由劳斯莱斯(Rolls Royce)赞助提供。利用电子控制的燃油系统将燃油供应到喷嘴。在油箱中利用氮气及气动调节阀对燃料供应系统加压,并提供稳定的燃料压力。随后,由双联(粗、细)气动针阀及一个气动燃油切断电磁阀控制输送的燃油。借助 NI(National Instruments)公司信号调理(SCXI)控制系统,通过 LabVIEW 模拟电压控制器以大约 5 Hz 的频率对每个气动燃油值和风扇电动机速度进行控制。大气压力孔板流量计和燃油流量计的数据也被系统读取并记录。所有控制及读取数据都显示在主机控制屏幕上,方便实验人员进行监控与操作。

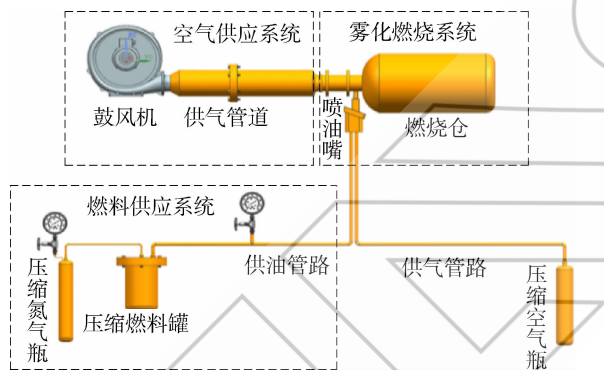


图1 实验总装置安装图

Fig. 1 Installation drawing of general experimental device

1.1 空气供应系统

空气是通过工业生产标准 BS EN ISO 5167 设计和生产的,从大气压风机通过工艺管线输送到燃烧室的。不确定度为测量值的 $\pm 2\%$ 。大气压风扇驱动电动机由速度控制器控制,并根据自定义 LabVIEW 代码的执行提供对风扇速度的模拟控制。空气供应管道连接鼓风机与燃烧室,负责将鼓风机提供的空气流输送至燃烧室,配合燃烧。该管道与鼓风机相连,在靠近燃烧室端,有供油管道透过小孔进入,在燃烧腔进行燃烧。初步选定鼓风机功率为 1500 W,最大风压为 32 kPa,风量为 $250\text{ m}^3/\text{h}$,最大负压为 26 kPa。电动机转速选择 1430 r/min。空气质量流量为 200 g/s 。该型鼓风机具有结构紧凑、震动小、使用时调节方

便等特点。

1.2 雾化燃烧系统

雾化燃烧系统由喷嘴和燃烧室组成。喷嘴选用气动喷嘴。喷嘴里设有一条供油路和一条输气路以及一个旋流器。燃油雾化压力保持在 $50\pm 0.3\text{ kPa}$ 。选择该压力是为了在最小空气流量下提供最佳雾化。压缩干燥空气以受控压力供应。它进入分离盘,然后进入空气旋流器。相反,燃料是通过计数器供给的。选用单管燃烧室进行模拟航空燃油燃烧实验,可以较为直观了解火焰情况,准确采集实验数据。

1.3 燃料供应系统

燃油供应系统则是利用压缩系统中的氮气压力。氮气进入油箱,氮气压力作用在燃油上液面,并将燃油压入下端管道中,从而进入燃油管路,一路输送至燃烧室,保证高质量稳定的燃烧实验进行。初步确定管径为 25 mm,流速为 $0.5\sim 0.6\text{ m/s}$,流量为 $0.6\sim 0.7\text{ m}^3/\text{h}$ 。温度范围为 $50\sim 450\text{ }^\circ\text{C}$,油箱容量约为 30 L。

1.4 实验对象(芳香烃)

对于目前使用的喷气燃料,该标准要求芳香族含量在 $8\%\sim 25\%$ 体积百分比之间,这一标准可用于合成的喷气燃料。不同类型的芳香烃产生不同程度的烟雾和排放。适当选择特定的芳烃和混合燃料有助于实现燃料系统在密封膨胀和减少颗粒物排放方面的兼容性。本实验将 16 种芳烃与不含芳烃的直链烃溶剂($\text{C}_{11.78}\text{H}_{25.57}$),按 8% 、 13% 和 18% 的体积比混合。他们的性能评估与 PM(particulate matters)浓度数和碳烟火焰形成。实验测试的 16 种芳烃种类及特性在表 1 中列出,其中包括苯系类 12 中,茚与萘系列各 2 种。

1.5 实验方法

为了得到一个可测量的 PM 范围,对燃烧条件下的操作参数进行了经验确定。将空气质量流量均设定为 200 g/s 。考虑到不同芳烃在相同体积比下,若芳烃自身密度、氢/碳(H/C)比、质量等皆有差异,理想实验流量应根据恒定当量比进行测试。但由于所测燃料为实验室调和燃料,且燃料众多(16×3 种),而目前实验基础无法精确度量每种燃料后的分子式,从而无法以确定当量比为定值进行实验。因此本实验以恒定燃料流量为基准。所有比例配比的燃料流量恒定为 1.8 g/s ,此时存在分子质量较高的芳烃燃料造成实际燃烧时当量比略高的现象,因此仅对该实验结果定性

表 1 各芳香烃成分的特性

Table 1 Characteristics of aromatic components

中文名称		密度/ (g/cm ³)	比能/ (MJ/kg)	分子摩尔质量/ (g/mol)	氢/碳比
苯系列	甲苯	0.865	40.589	92.14	1.143
	苯乙烯	0.906	42.205	104.15	1
	邻二甲苯	0.879	40.961	106.17	1.25
	乙苯	0.867	40.938	106.17	1.25
	α-甲基苯乙烯	0.909	40.810	118.18	1.111
	1,2,4-三甲苯	0.876	40.984	120.19	1.333
	异丙苯	0.864	41.217	120.19	1.333
	二乙苯	0.87	43.683	134.22	1.4
	叔丁基苯	0.867		134.22	1.4
	对异丙苯	0.86	43.644	134.22	1.4
	3-异苯基异丙基苯	0.856		162.27	1.5
	叔丁基间二甲苯	0.867		162.27	1.5
茚(环芳烃)系类	茚	0.996	41.3	116.16	0.889
	茚满	0.965	42.162	118.176	1.111
萘(二环芳烃)系类	四氢萘	0.973	42.523	132.2	1.2
	甲基萘	1.001	40.668	142.2	0.909

而非定量分析。

实验开始点火后,当燃烧室温度达到并稳定在确定高度 700℃后,使用差分迁移率谱仪(DMS 500 快速颗粒谱仪)进行 PM 数浓度测定。

2 实验结果分析

2.1 PM 数据采集结果

根据图 2 可看出,总的来说,随着混合比例的增加,所有调和燃料的 PM 排放都呈现增加状态。特别是茚系列与萘系列调和燃料的增加趋势逐渐相对更大,且在 PM 质量浓度中表现更为明显。

在苯系列调和燃料中,α-甲基苯乙烯调和燃料排在数浓度和质量浓度方面都位于本组最高,相反,3-异苯基异丙基苯在两方面的排放表现都为最优。除该两种之外,其他种类芳烃调和燃料间存在排放差异,但无特别突出表现。

在茚系列中,茚与茚满的分子结构皆为苯环外加一环,但由于茚的分子结构比茚满多出一键,拥有更稳定的分子结构,从而更不容易被分解导致了更高的 PM 排放。

在萘系类调和燃料中,四氢萘为甲基萘加氢

裂化所得,从而未拥有真正意义上的萘系列芳烃结构(双苯环)。且加氢处理后的 H/C 比较原来增加 32%,密度降低 3%,从 PM 排放的结果中可以看出,加氢处理的四氢萘在排放方面明显优于甲基萘,甚至低于茚系类调和燃料的排放表现。但单位比能提高 1.855 MJ/kg,因此,可以看出对特定芳烃进行加氢处理是提高发动机效率降低排放的有效手段。

经过以上讨论结果表明,芳香烃的分子种类与分子结构不同对燃料排放的影响有重大的差异。并证实了芳香烃含量在颗粒物排放中的重要性,强调了控制芳香烃的选择对于减少燃烧产生的颗粒物排放的必要性。并在一定程度上证实加氢处理是提高燃油品质的重要方法。

从 PM 数量及质量浓度结果中可以看出,不同芳烃在增加体积分数配比时,所导致的 PM 排放增长率也不同。因此为了方便比较,通过对每一条芳烃增长线图的进行直线拟合后,计算得出的斜率 *k* 则为 PM 排放的增长率分析。*k* 值越大表示随着燃料芳香烃体积分数含量的增长 PM 排放浓度增长速度的越快,燃烧越不完全程度越高,

反之亦然。将每条增长线图的 k 记录并排序后在图 3 中画出。

图 3 中展示了在溶剂中分别混合不同百分比 (8%、13%、18%) 的 16 种芳香烃后,PM 颗粒数

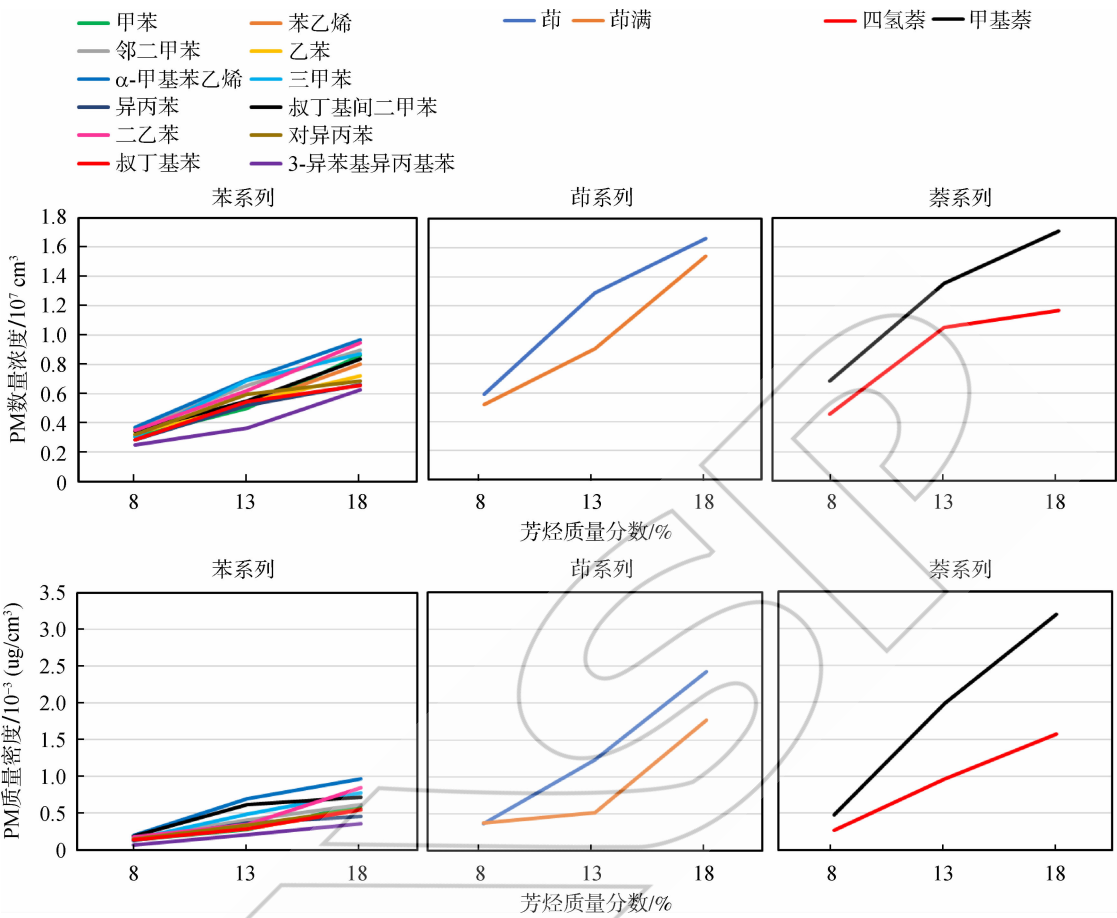


图 2 16 种芳香烃 3 种比例混合燃油的 PM 颗粒数量及质量结果

Fig. 2 PM Number and mass data acquisition results of 16 kinds of aromatic hydrocarbon 3 proportions mixed fuels

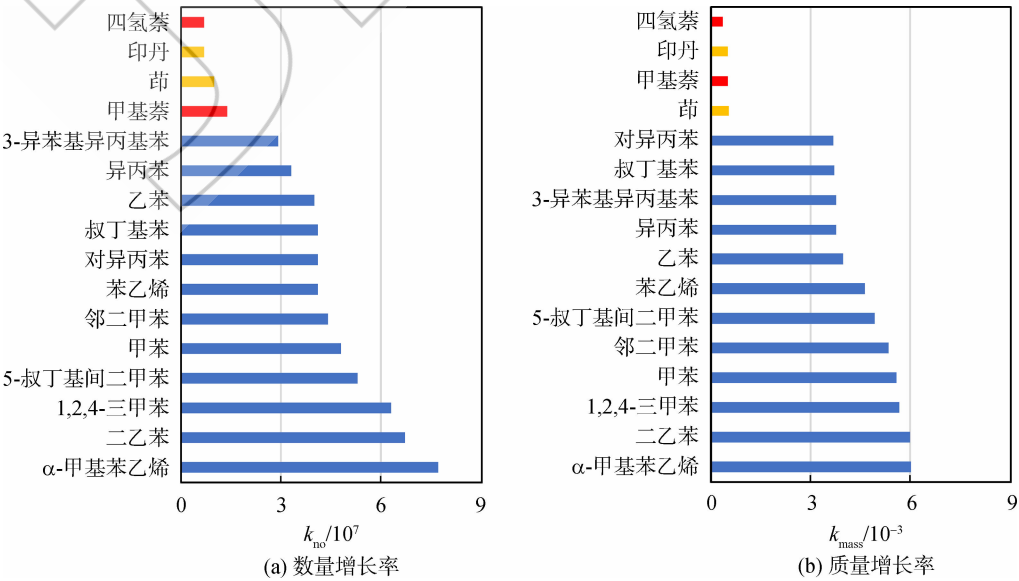


图 3 16 种芳香烃 PM 颗粒数量与质量随比例混合的增长率

Fig. 3 Growth rate of PM of 16 aromatic hydrocarbon mixed fuels

量与质量的增长程度,分别用横坐标 k_{no} 与 k_{mass} 表示。可以发现,虽然在茛与萘系类的调和燃料排放浓度很高,但若增大该类型芳香烃含量,其排放浓度增长速率普遍较低,特别是在排放数量浓度增长方面,其仅为苯系列调和燃料的 1/6,或更小。其中四氢萘调和燃料的排放增长速度最低。这也就意味着,若由于实际燃烧需要,如:达到要求能量密度,需要增加芳香烃含量,可以适当增加四氢萘的含量而并同时有效控制排放,从而实现燃料性能优化的可能性。另外,对于苯系类来说,虽然整体排放基数较低,但其增长速率普遍较高,特别是二乙苯、三甲苯等芳烃。也就是说,若在燃料中添加该类芳烃溶剂,应控制好添加比率,避免因排放增长过快而超出限制。最后,值得注意的是,在质量增长趋势中,所有苯系列燃料的增长率远远超过萘系列与茛系列,且在数量增长率方面未发现明显断层。也就意味着,若提高该苯系列芳烃溶剂含量后,该调和燃料排放的颗粒数变化较小,但是单个颗粒的质量有显著增大。

2.2 稳定燃烧下特性与 PM 的关系

通过之前的文献调查发现,影响燃烧排放的主要特性包括密度,分子质量,碳氢比,分子结构等,在文中第 3.1 节的研究中已针分子结构对排放及排放增量率的影响做出讨论,在这一小节中将针对,芳香烃的其他特性与 PM 排放间的关系

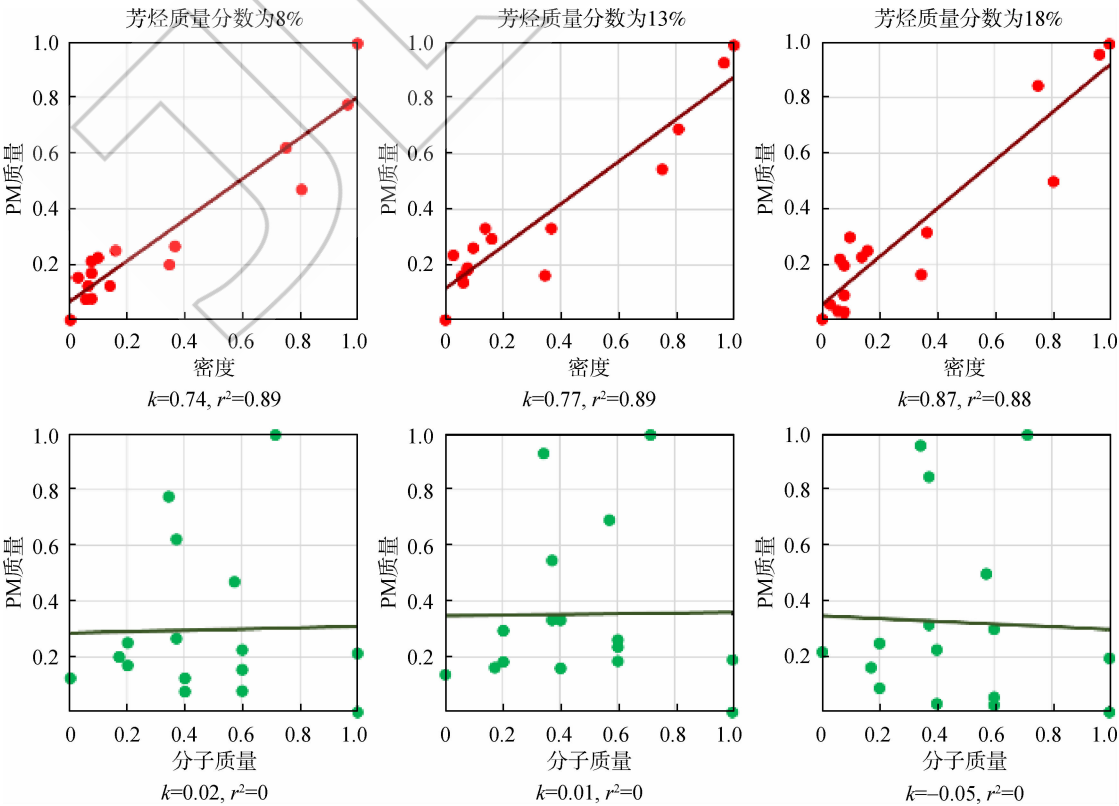
进行分析。

通过线性回归算法,确定芳香烃特性与排放 PM 之间的线性关系,特性包括:密度,分子质量,碳氢比和比能,共 4 项。因不同特性的单位及数量级不同,为使得所计算线性趋势线的梯度为 k 具有横向比较性,将所有特性的值在 x 轴方向进行被标准化在 0~1 的范围内,其中 0 为候选燃料的性能的最低值,1 则为最高值,其余按比例取值 0~1 之间。如,所测芳香烃的密度范围在 0.856~1.001,则 0 为 0.856,1 为 1.001,其余各点的数值根据式(1)计算。

$$p_x^{0\sim1} = \frac{p_x - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}} \tag{1}$$

同理, y 轴显示了标准化测量的燃烧 PM 排放值。斜率 k 的正负值可对特性对排放的正向或反向影响进行表示。线性趋势线被添加到每个图中,假设对每组数据进行线性回归。线性趋势线的梯度为 k ,其每个的值标注在图的下边。其中“—”符号表示燃烧性能随燃油特性值的增加而降低。相反,“+”符号表示性能结果有所提高。

计算结果及趋势如图 4 中所示,图中横纵坐标数值已做无量纲化处理。从图中可以清楚地看出,只有图 4(d)中的 PM 与碳氢比的线性关系呈现下降趋势,表明高的 H/C 比可以有效减少碳烟排放。另外值得注意的是,随着芳烃含量的增加,



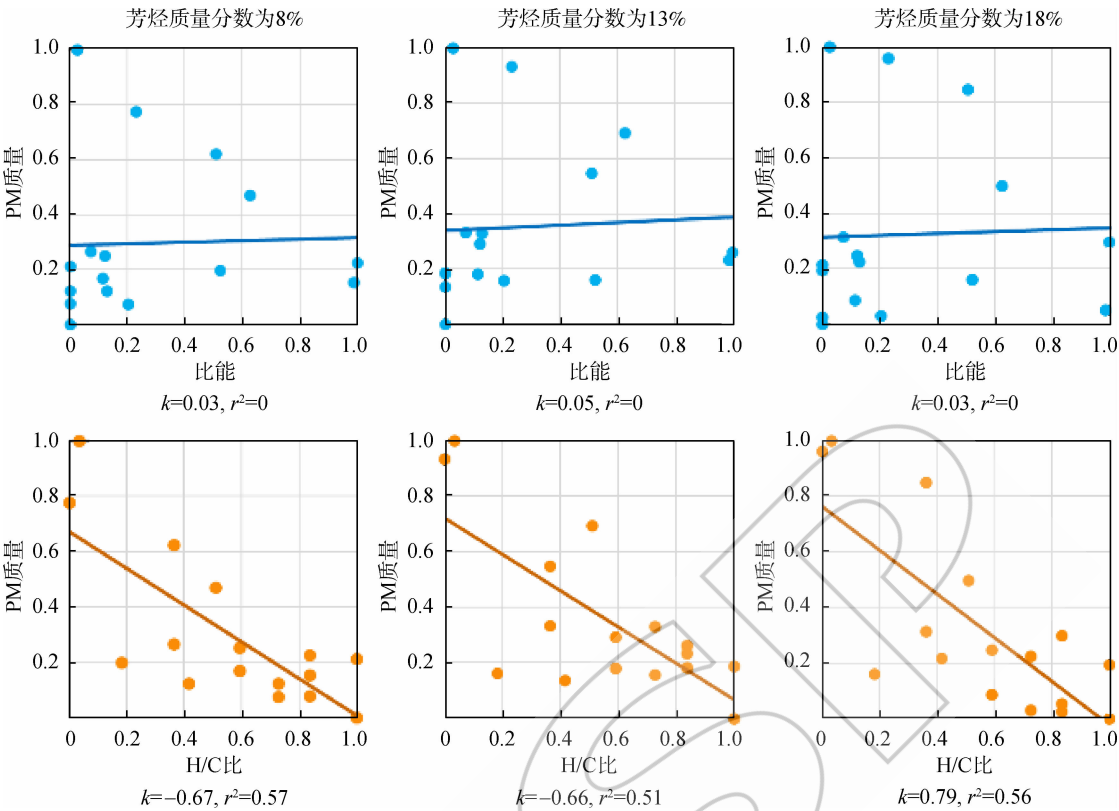


图 4 芳香烃特性与 PM 之间的线性关系

Fig. 4 Linear relationship between aromatic hydrocarbon characteristics and PM emission

下降斜率从 0.67 增加到 0.79,表明在越高的芳烃浓度下,高 H/C 比对 PM 排放的改善越明显。反之,在图 4(a)中的 PM 排放与密度的线性关系显示,当芳香烃拥有高密度时,该燃料将倾向于排放更高的 PM 排放。另外随芳烃浓度的增加,斜率 k 值从 0.74 增长至 0.87,离散程度保持不变。同样表面,随着芳烃浓度的增加,密度激化 PM 排放的影响更加显著。另外,对于另外两项特性,分子质量和比能,点分布较为离散且趋势线没有明显增幅或降低,说明该两种特性与 PM 排放之间没有直接线性影响关系。

2.3 综合评定

由于在航空燃料中加入芳香烃的主要目的是保证足够的能量密度,因此,减少排放不能最为衡量芳烃种类优劣的唯一标准。因此,应对芳烃进行综合评定。为此本小节将综合考虑燃料的比能,PM 排放(数量浓度/质量浓度),及 PM 排放增长率(数量浓度/质量浓度)5 个方面,并对其进行加权后计算综合分数。其中比能 n_{se} 占据评定因素的 40%,所有 PM 排放表现占据 60%,具体包括:PM 数量 $n_{PM,no}$ 与 PM 质量 $n_{PM,mass}$ 分别占比 20%,PM 数量增长速率 k_{no} 与 PM 质量增长速率

k_{mass} 分别占比 10%, $n_{PM,no,k}$ 为 PM 数量增长速率排名, $n_{PM,mass,k}$ 为 PM 质量增长速率排名,分配如表 2 中所示。将 16 种芳烃的表现进行排序,最高比能者为 1,最低者为 16。最低 PM 排放为 1,最高 PM 排放为 16。每一项对应排名乘以权重值后相加得到最终的综合排名分值,具体计算如式(2)所示,分值最低者为最优芳烃,排名第一。

综合分数为

$$C = n_{se} \times 40\% + n_{PM,no} \times 20\% + n_{PM,mass} \times 20\% + n_{PM,no,k} \times 10\% + n_{PM,mass,k} \times 10\% \tag{2}$$

综合排名的结果如表 2 中最右栏所示。由于叔丁基苯、3-异苯基异丙基苯、叔丁基间二甲苯的比能值未能确定,为排序需要暂时设置为平均数,排名均为中间值 6。在共同考虑能量及排放因素下,3-异苯基异丙基苯位列第一,主要是由于其低排放的优异表现,但由于其比能值未知,因此仅作参考,不做最终结果。若其比能可达平均值以上则可成为最佳芳烃选择。对异丙苯与苯乙烯在比能与排放方面所有方面表现持中上,综合实力较好,分别排名第二与第三。相反,1,2,4-三甲苯、 α -甲基苯乙烯、甲基萘的综合排名为倒数三位。三甲苯、 α -甲基苯乙烯虽为苯系类,但其表现为苯

表 2 16 种芳烃的各项表现排名与权重分配以及综合排名

Table 2 Performance ranking and weight allocation and comprehensive ranking of 16 aromatic hydrocarbons

芳烃名称	比能	数量	质量	数量 k_{no}	质量 k_{mass}	排名综合分值	最终排名
权重/%	40	20	20	10	10		
3-异苯基异丙基苯	6	1	1	3	5	3.6	1
对异丙苯	2	5	7	10	9	5.1	2
苯乙烯	4	6	5	9	10	5.7	3
叔丁基苯	6	3	3	16	8	6	4
二乙苯	1	11	9	2	15	6.1	5
异丙苯	10	2	2	12	6	6.6	6
乙苯	13	4	4	1	7	7.6	7
四氢萘	3	13	14	11	1	7.8	8
5-叔丁基间二甲苯	6	8	11	6	13	8.1	9
印丹	5	14	13	15	2	9.1	10
邻二甲苯	12	10	8	4	11	9.9	11
茚	9	15	15	8	3	10.7	12
甲苯	16	7	6	7	12	10.9	13
1,2,4-三甲苯	11	9	10	14	14	11	14
α -甲基苯乙烯	14	12	12	5	16	12.5	15
甲基萘	15	16	16	13	4	14.1	16

系列中最差,而且其比能也较低。甲基萘的比能与排放均表现较差,因此排名最后。但其加氢处理后产物四氢萘的综合表现有明显提高,特别是在比能方面,最终排名居中。可以看出,加氢处理不但可以有效降低排放,还可以提升比能,对燃料优化有重大意义。

3 结 论

这项研究针对 16 种芳香族调和燃料对 PM 排放的影响进行了系统的实验与分析。研究结果对于低碳烟排放的航空燃料优化和替代燃料开发有着指导意义。结果表明:

- 1) 芳香烃的分子种类与分子结构不同对燃料排放的影响有重大的差异。控制芳香烃的种类可以成为减少燃烧产生的颗粒物排放的有效手段。
- 2) 茚与萘系类的调和燃料排放浓度很高,当增大其含量,排放浓度增长速率远低于苯。苯系列中的 α -甲基苯乙烯调和燃料,当含量的增加时,其排放的颗粒数变化不大,但是单个颗粒的质量有显著增大。

3) 分子结构在排放中起了关键作用。除此之外,高密度是导致碳烟形成的另一重要因素。高的 H/C 比对碳烟形成有良好的抑制作用。

4) 对异丙苯与苯乙烯在排放与比能两方面的综合表现最好。另外,加氢处理可以在降低排放的同时提高比能,是优化燃料的综合表现的有效手段。

参考文献:

[1] TURGUT E T,CAVCAR M,USANMAZ O,et al. Investigating actual landing and takeoff operations for time-in-mode,fuel and emissions parameters on domestic routes in Turkey[J]. Transportation Research Part D, 2017, 53: 249-262.

[2] 赵坚行. 民用发动机污染排放及低污染燃烧技术发展趋势[J]. 航空动力学报,2008,23(6):986-996.
ZHAO Jianxing. Development trend of civil engine pollution emission and low pollution combustion technology [J]. Journal of Aerospace Power,2008,23(6):986-996. (in Chinese)

[3] HUNT R A. Relation of smoke point to molecular structure [J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1953, 45(3):602-606.

[4] NAEGELI D W,MOSES C A. Effects of fuel properties on

- soot formation in turbine combustion[R]. San Diego, US: SAE Technical Paper 781026, 1978.
- [5] REEVES C M, LEFEBVRE A H. Fuel effects on aircraft combustor emissions[R]. Dusseldorf, Germany: Proceedings of the ASME 1986 International Gas Turbine Conference and Exhibit, V003T06A016, 1986.
- [6] SAFFARIPOUR M, ZABETI P, MOHAMMADREZA K, et al. An experimental comparison of the sooting behavior of synthetic jet fuels[J]. *Energy and Fuels*, 2011, 25(12): 5584-5593.
- [7] APPEL J, BOCKHORN H, FRENKLACH M. Kinetic modeling of soot formation with detailed chemistry and physics, laminar premixed flames of C_2 hydrocarbons[J]. *Combustion and Flame*, 2000, 121(1): 122-136.
- [8] LOVESTEAD T M, BURGER J L, SCHNEIDER N, et al. Comprehensive assessment of composition and thermochemical variability by high resolution GC/QToF-MS and the advanced distillation-curve method as a basis of comparison for reference fuel development[J]. *Energy and Fuels*, 2016, 30(12): 10029-10044.
- [9] 刘永峰, 裴普成, 田洪森. 缸内燃油喷射发动机碳烟生成机理特征分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, 44(7): 102-107.
- LIU Yongfeng, FEI Pucheng, TIAN Hongsen. Analysis on soot formation mechanism in direct-injection fuel engine [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, 44(7): 102-107. (in Chinese)
- [10] ZHENG L K, LING C X, UBOGU E A, et al. Effects of alternative fuel properties on particulate matter produced in a gas turbine combustor [J]. *Energy and Fuels*, 2018, 32(9): 9883-9897.
- [11] 刘国柱, 沈慧明, 曲海杰, 等. 喷气燃料的化学组成与理化性质的定量关系研究[J]. *燃料化学学报*, 2007, 35(6): 737-742.
- LIU Guozhu, SHEN Huiming, QU Haijie, et al. Chemical composition-property relation of jet fuels [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2007, 35(6): 737-742. (in Chinese)
- [12] BOTERO M L, MOSBACH S, KRAFT M. Sooting tendency of paraffin components of diesel and gasoline in diffusion flames[J]. *Fuel*, 2014, 126: 8-15.
- [13] WITKOWSKI D, KONDO K, VISHWANATHAN G, et al. Evaluation of the sooting properties of real fuels and their commonly used surrogates in a laminar co-flow diffusion flame[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(6): 1129-1141.
- [14] AGOSTA A, CERNANSKY N P, MILLER D L, et al. Reference components of jet fuels, kinetic modeling and experimental results[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2004, 28(7): 701-708.
- [15] 吴施志, 黄开明, 刘伟, 等. 芳香烃对涡轴发动机排气冒烟影响的试验[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(5): 1094-1100.
- WU Shizhi, HUANG Kaiming, LIU Wei, et al. Test of the effect of aromatic hydrocarbons on exhaust smoke from turboshaft engines [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(5): 1094-1100. (in Chinese)
- [16] 张洪涛, 莫建文, 邱卓丹. 柴油机碳烟的生成及控制[J]. *广西工程学院学报*, 2000, 11(4): 74-76.
- ZHANG Hongtao, MO Jianwen, QIU Zhuodan. The production and control of diesel carbonsmokes [J]. *Journal of Guangxi University of Technology*, 2000, 11(4): 74-76. (in Chinese)
- [17] 孙见忠, 左洪福, 刘鹏鹏, 等. 航空发动机尾气静电信号基线模型分析及应用[J]. *航空动力学报*, 2013, 28(3): 531-540.
- SUN Jianzhong, ZUO Hongfu, LIU Pengpeng, et al. Baseline model analysis and application of aero engine exhaust electrostatic signal [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(3): 531-540. (in Chinese)
- [18] DEWITT M J, CORPORAN E C, GRAHAM J, et al. Effects of aromatic type and concentration in fischer-tropsch fuel on emissions production and material compatibility [J]. *Energy and Fuels*, 2008, 22(4): 2411-2418.
- [19] PETRUKHINA N N, MAKSIMOV A A. Physicochemical properties and performance characteristics of naphthenoaromatic jet and diesel fuels obtained by hydrotreating of highly aromatic fractions [J]. *Petroleum Chemistry*, 2018, 58(5): 347-374.

(编辑: 张 雪)