

航空替代燃料燃烧特性及碳烟生成数值模拟

杨晓军¹, 郑佳伦¹, 杨志衡², 刘文博¹

(1. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300;

2. 中国国际航空股份有限公司西南分公司, 成都 610202)

摘 要: 对一种生物燃油(FAME)和传统航油(Jet-A)掺混后的碳烟生成情况进行了研究, 燃烧室采用贫油预混预蒸发(lean premixed prevaporized, LPP)低污染燃烧室设计, 应用 ANSYS fluent 软件计算分析了在地面慢车, 起飞工况下燃烧室内的冷态流场, 热态燃烧和碳烟生成三方面内容。结果表明: FAME 燃油的添加有助于降低燃烧室内生成的碳烟数量和质量, 但会生成更为精细的碳烟颗粒。随着 FAME 掺混比的增加, 燃烧场温度、碳烟前驱体含量的下降引起了碳烟生成速率的降低, 主燃区中心氧化速率的上升使得碳烟初始颗粒的粒径更小, 进而最终生成更为精细的碳烟颗粒。FAME 燃油的添加能大幅降低慢车工况下的碳烟排放, 但对起飞工况下碳烟排放的降低并不显著。

关 键 词: 低污染; 燃烧室; 贫油预混预蒸发; 生物燃料; 碳烟

中图分类号: V312.1

文献标志码: A

Numerical simulation of combustion characteristics and soot generation of aviation alternative fuel

YANG Xiaojun¹, ZHENG Jialun¹, YANG Zhiheng², LIU Wenbo¹

(1. College of Aeronautical Engineering,

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Air China Limited Southwest Branch, Chengdu 610202, China)

Abstract: Soot generation of a biofuel (FAME) blended with conventional jet fuel (Jet-A) was investigated, and the combustion chamber was designed as a lean premixed prevaporized (LPP) low-pollution combustion chamber. The three aspects of cold flow field, combustion and soot generation were analyzed by ANSYS fluent software. The results showed that the addition of FAME fuel could help reduce the quantity and quality of soot generated in the combustion chamber, but may generate finer soot particles. The addition of FAME fuel can significantly reduce the soot emission in the idle condition, but the reduction of soot emission in the take-off condition was not significant.

Keywords: low emission; combustor; lean premixed prevaporized (LPP); bio-fuel; soot

在过去的十几年中, 世界范围内航空运输量迅速增长, 航空排放对环境及人类活动的危害也逐渐受到大众的关注。航空燃油中含有的碳氢化合物及硫经航空发动机燃烧后会产生大量排放物,

包括气态排放物如一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)及未燃碳氢化合物(UHC)等^[1-2], 飞机排放的颗粒物主要包括极细的碳烟颗粒(soot)或黑碳(black carbon), 由于其在随后与环境或大气混合

收稿日期: 2021-07-15

基金项目: 中国民航大学中央高校基本科研业务费项目(3122019187)

作者简介: 杨晓军(1980—), 男, 教授、硕士生导师, 博士, 主要从事航空环境保护与节能减排研究。E-mail: xiaojunyoung@hotmail

通信作者: 郑佳伦(1998—), 男, 硕士生, 主要从事航空发动机燃烧室污染物生成模拟研究。E-mail: zhengjialun@foxmail.com

引用格式: 杨晓军, 郑佳伦, 杨志衡, 等. 航空替代燃料燃烧特性及碳烟生成数值模拟[J]. 航空动力学报, 2023, 38(10): 2317-2327. YANG Xiaojun, ZHENG Jialun, YANG Zhiheng, et al. Numerical simulation of combustion characteristics and soot generation of aviation alternative fuel[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(10): 2317-2327.

稀释过程中质量和数量不会发生改变,也被称作非挥发性颗粒物(nvPM)。这些污染物会对公众健康和环境产生持续危害,如会导致居住在机场附近的居民患上呼吸和心血管疾病^[3-4]。此外由于飞机尾气直接排放到高层大气中,意味着他们能对全球气候变化产生更为显著的影响^[5]。

化石燃料燃烧产生的气体污染物和颗粒物质,在开发新型燃料^[6-7]、先进发动机^[8]等方面已经引起了越来越多的关注和重视。与汽车排放规章相似,从国际民航组织(ICAO)对 CAEP 规章的历年修改中也可以看出国际社会对污染物排放要求日趋严格,不仅需要进一步降低 NO_x 的排放量,对于非挥发性颗粒物(nvPM)排放限制也越加严格^[9]。相比汽车排放,航空排放特性及其减缓技术的研究非常有限,因此未来对于航空发动机排放的研究将显得尤为重要。

为了降低航空发动机的污染物排放,近几十年来针对航空发动机发展的新燃烧技术主要包括基于贫油燃烧路线的 LPP 燃烧室和基于富油燃烧路线的富油燃烧-淬熄-贫油燃烧(RQL)燃烧室。本文采取的燃烧室是基于贫油燃烧思路的贫油预混预蒸发(LPP)燃烧室,其代表性设计为通用(GE)公司研制的双环预混旋流器(TAPS)燃烧室^[10]。这种燃烧室采用了新型,具有广阔应用前景的低污染燃烧技术,除了能降低 NO_x 等排放量之外,还具有显著降低碳烟排放的能力。

尽管飞机和航空发动机技术的进步和革新为减少污染物排放及燃油消耗起到了极大作用,但是按照如今国际民航组织提出的减排要求来看,仅凭发动机燃烧技术的改进来达到减排要求仍十分困难,此外一台低排放航空发动机的研制需要大量的资金投入和较长的研发时间,这无疑增加了航空减排的成本。与地面交通不同,航空器对于推力的要求使得燃料电池、蓄电池等清洁能源无法对其完全替代,因此在可预见的未来,由液态烃燃料驱动的燃气涡轮发动机依然是飞机主要推进动力的唯一来源。

影响航空发动机排放的另一个关键因素是燃油的类型及其化学成分。相比传统航空燃油,使用生物燃油可以减少温室气体排放及多种发动机污染物排放^[11-14],且由于其相比化石燃料更低的价格,使用生物燃油还可以大幅度降低航空业的成本。多年来航空业针对各种生物燃油已经开展了一系列测试以期能够早日投入使用,降低航空

排放及减轻对化石燃料的依赖性。对于生物燃油的研究国外早在 10 多年前就已开展研究,波音公司在 2008 年就曾针对多种混合生物燃油开展了多次实际飞行测试,实验结果证实了部分生物燃油热稳定性好,能量高,其既能与传统航油部分掺混,也可完全替代传统航油作为航空燃油来使用。NASA 也在 2009 年开展了 AAFEX^[15](飞机替代燃油排放实验),结果发现替代燃料能够降低污染物排放,且对发动机的运行及性能影响较小。

ETH Zurich(苏黎世联邦理工学院)的学者们使用 SR Technics 技术研究了航油中芳烃含量对飞机 nvPM 的排放影响,并得出了芳烃含量与排放值之间的修正关系^[16]。国内针对生物燃油对排放的影响多集中地面交通使用的柴油机,汽油机等,在航空领域的研究并不多。国内学者近年来也曾对多种可能的航空替代燃油开展过相关研究,并取得了不少成果^[17-19],但对含氧生物燃油在航空领域的应用研究依旧较少。含氧燃油作为地面交通使用的柴油机等发动机的燃油已经被证实能够降低碳烟的排放^[20-21],且具体减排机理也已得到研究,这对航空领域的研究也起到了一定程度的帮助。

目前大多数生物燃油主要由饱和脂肪酸甲酯(FAME)组成,其主要由植物油或动物脂肪通过酯化反应生产而得。经过测试,发现 FAME 与 Jet-A 的相容性也较好^[22],是一种可行的未来航空替代燃油。考虑到目前国内对于使用生物燃油下航空发动机内颗粒物排放测试较少,且减排机理也不清晰,因此本文通过 CFD 数值模拟的方式对这种 FAME 燃料部分掺混传统航油 Jet-A 进行了研究,以期获得相对应的排放结果及颗粒物生成情况。

1 数值模拟

1.1 几何模型简介

本文所采用的 LPP 单管燃烧室头部旋流器主要由副模旋流器、主模旋流器、主模直射喷嘴、副模压力雾化喷嘴、法兰组成(如图 1 所示)。燃烧室整体由外侧的燃烧室机匣与内侧的火焰筒组成。主、副模轴向旋流器布置方式为同心同旋向,叶片均采用直叶片,叶片角分别为 60°和 30°。主、副模流道均采用收敛形出口,两个流道之间为法兰结构,主要由冷却孔板及冷却孔组成,其上设置冷却孔的主要目的是在进口空气实现对内

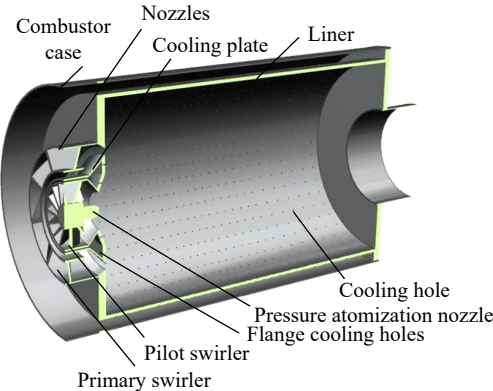


图 1 燃烧室几何模型
Fig. 1 Combustor geometry model

外侧流道壁面冷却后,还能进入燃烧室参与燃烧,最大化利用空气。

副模压力雾化喷嘴位于副模旋流器中心,雾化锥角为 90°,轴向喷射形成直混扩散燃烧;主模喷嘴为多点直射喷油孔,位于主模旋流器每两个叶片之间的外层壁面上,共 9 个,与轴向成 45°角^[23]向内喷射。采用 45°喷射角可以使燃烧室内最高温度和 NO_x 生成量相对较低,且出口温度分布也最均匀。火焰筒壁面采用切向进气发散小孔冷却结构^[24],冷却气进口与轴向成 45°角入射,发散小孔总数量为 1 260 个,小孔在周向上每排均布 45 个,在轴向上的排列见表 1,共计 28 排小孔。

表 1 冷却小孔轴向排列	
Table 1 Axial arrangement of cooling holes	
排数	间距
0~3	9
3~11	7
11~17	6
17~23	7
23~28	10

轴向上采用非等差间距可以根据燃烧室不同分区特点,调整至最优的冷却效果。燃烧室设计为主模流道内完成燃油蒸发和空气的混合,此后在火焰筒中实现贫油燃烧,副模采用多点直射的原因是在燃烧室内产生一个局部富油的区域以保证火焰稳定燃烧,而主要燃烧为主模引起的贫油燃烧,以此来同时实现贫油燃烧和燃烧稳定。

主、副模的设计空气流量分配为 50%、15%,为满足这些燃烧区空气,火焰筒设计冷却空气量为 25%。剩余为头部法兰冷却空气 4%,掺混空

气量 6%。在 100% 工况下,主模设计当量比为 0.673,副模当量比为 0.316,整个燃烧室平均当量比 0.384,符合文献 [25] 中所述实现 LPP 排放的条件。

1.2 燃油介绍

计算中传统航油 Jet-A 考虑用 C₁₂H₂₃ 进行替代^[26],FAME 燃料则考虑用葵酸甲酯(MD)C₁₁H₂₂O₂ 单组分替代^[27-28],实验中使用的两种燃料具体性质如表 2 和表 3 所示。

表 2 燃油化学组成			
Table 2 Chemical composition of experiment fuels			
燃油类型	质量分数/%		芳烃 体积分数/%
	氢	氧	
Jet-A	13.9	0	18.5
FAME	12.0	15.8	0

表 3 燃油代表性物理化学性质			
Table 3 Representative physicochemical fuel properties			
燃油类型	密度/(g/cm ³)	热值/(MJ/kg)	沸点/K
Jet-A	0.797	43.5	250
FAME	0.864	36.9	294

1.3 碳烟模型介绍

本文通过 Moss-Brookes-Hall 模型和矩量法两种法对碳烟生成进行了模拟。其中,Moss-Brookes-Hall 模型是一个半经验模型,可以比较准确地计算出碳烟的成核,凝结,表面生长,氧化速率,这在实验中是很难直接测得的。而矩量法(MOM)是通过动力学理论,根据不同粒径下粒子产生的几率对碳烟生成进行预测,可以计算出碳烟的浓度以及场内碳烟的粒径分布,对于燃烧室整体产生的颗粒能有较好的认识。本文通过使用两种原理不同的方法对碳烟进行模拟除了可以提高结果可靠性外,还可以相互作为佐证。

Moss-Brookes 模型^[29]是在 Brookes 等人^[30]提出的模型上进一步发展得出,该模型假定碳烟颗粒是球形,且符合具有代表性的单分散粒度分布,其方程包含了描述碳烟颗粒成核,凝结,表面生长和氧化等关键过程的步骤。根据其理论,考虑乙炔(C₂H₂)作为碳烟形成的关键前驱体,成核过程的活化温度采用由 Lindstedt 提出的数据^[31],碳烟氧化模型采用 Fenimore-Jones 模型^[32-33]。矩量法^[34](method of momentum)对碳烟形成过程进行

了详细动力学建模,其主要控制方程由碳烟粒子数平衡和矩输运方程组成。粒子数平衡法使用 PSD(粒度分布)对颗粒表面涉及碳烟碳烟形成过程的重要子步骤建模计算,并认为碳烟形成各个阶段均会对 PSD 产生影响。

1.4 网格划分

采用 ANSYS ICEM 软件对所建立的三维燃烧室模型进行非结构化网格划分(如图 2 所示),通过对比采用不同网格数下距离旋流器出口轴向距离 $Z=25\text{ mm}$ 处的截面速度分布,当回流区及速度分布不再随网格数发生明显变化时,认为网格达到无关,最终网络总数确定为 1 400 万,以下为网格无关性验证。

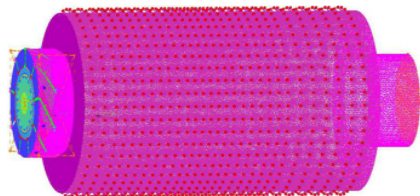


图 2 燃烧室网格

Fig. 2 Combustor mesh

1.5 网格无关性验证

数值计算中,网格质量及数量会影响计算的最终结果和计算精度,本文所选用的模型网格数量主要来自于头部旋流器结构及火焰筒切向发散进气小孔,这些地方的网格质量会对流场产生决定性影响,因此针对这两部分的网格质量进行了一定的调整,建立了 3 种数量不同的网格进行验证,网格信息如表 4 所示。

表 4 网格无关性验证对比

Table 4 Validation mesh comparison

网格	数量/ 10^6
1	10.5
2	14.1
3	16.5

在保证湍流模型和边界条件等设置完全相同的情况下,对以上 3 种网格下的冷态流动进行计算,监测截面选取距离旋流器出口轴向距离 $Z=25\text{ mm}$ 处截面是因为该截面处流场信息丰富,可以同时监测到角回流区,中心回流区的速度分布情况。当监测截面的速度相对波动值小于 1% 时认为计算结果达到收敛。从图 3 中可以看出:网格 2 和网格 3 的计算结果几乎无差异,而网格 1

无论是速度大小还是速度分布情况与前两者差异都较大,因此本文认为网格 2 已经达到网格无关,最终确定网格总数为 1 400 万。

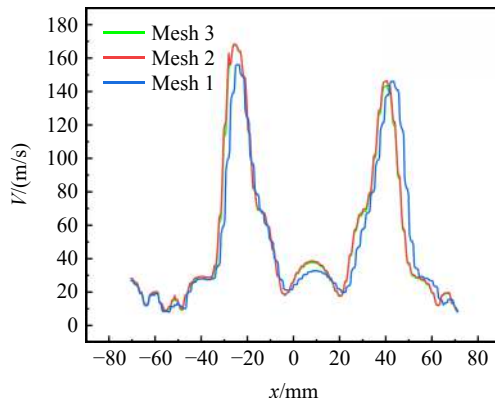


图 3 $Z=25\text{ mm}$ 处的截面速度分布

Fig. 3 Cross-sectional velocity distribution of $Z=25\text{ mm}$

1.6 计算方法

本文采用 ANSYS fluent 软件进行数值模拟,求解器采用压力基计算,由于流场存在较强的旋流,因此湍流模型采用 Reliable $k-\varepsilon$ 模型,使得近壁面的壁面函数处理得到的计算结果与实验结果更接近。辐射选取 DO(Discrete Ordinates)模型,与能量方程每 10 步进行一次迭代,燃烧模型选取 PDF(概率密度函数法)模型,压力和速度的耦合采用 SIMPLE 求解方式,压力的离散采用 PRESTO 格式,对松弛因子进行了合理设置,从而在降低计算时间的同时保证计算准确性。

1.7 计算工况及边界设置

空气进口边界条件选取为质量流入口,燃烧室出口边界条件设置为压力出口。工况条件如表 5 所示,工况 1 为慢车推力 7% 工况;工况 2 为起飞推力 100% 工况。以工况 1 工作时仅副模压力喷嘴供油,副模供油量为 0.008 kg/s 。以工况 2 工作时主、副模喷嘴同时供油,燃油分配为:

表 5 计算工况

Table 5 Working condition

参数设置	工况 1	工况 2
进口总温/K	515.86	839
进口总压/kPa	505	3 250
空气流量/(kg/s)	0.558 6	2.808 2
燃油流量/(kg/s)	0.008 1	0.073 9
油气比	0.014 5	0.026 3
副模当量比	1.41	0.31

副模燃油流量 0.009 11 kg/s, 主模每个直射喷油孔燃油流量 0.007 20 kg/s, 共 9 个。

2 流场及燃烧场分析

2.1 冷态流场分析

计算得到的冷态流线图如图 4 和图 5 所示, 可以看出两种工况下的流场相似, 且均呈现出对称形状。流场最大的特点为在火焰筒中形成 3 个回流区, 分别为位于中心的中心回流区(CRZ), 区域左上和左下角的角回流区(COZ)和靠近头部旋流器的唇口回流区(LRZ)。中心回流区主要受到副模气流影响, 经过主模旋流的空气在角回流区和中心回流区之间与副模空气混合, 并向外扩张, 从而导致此处径向速度为整个流场中最大径向速度。径向速度表征了旋转射流向外扩张的速度快慢, 因此此处向外扩张速率也达到最大, 从而在中心形成了低压区, 使得中心回流区得以形成。这个中心回流区的形成使得空气和燃油可以源源不断循环至副燃级附近, 从而产生稳定火焰。对于发动机稳定运行有着重要作用。头部旋流器出口附近区域形成了 4 个较小的唇口回流区, 其作用除了可以隔开主模和副模气流, 防止主模较大的气流对副模产生淬熄, 其中储存的由燃烧产生的自由基还可以稳定主火焰^[35]。

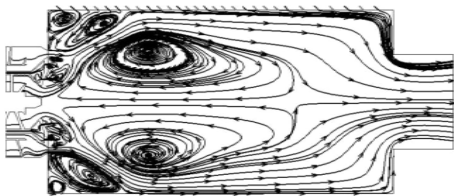


图 4 冷态流线图(工况 1)

Fig. 4 Stream line of central section (condition 1)

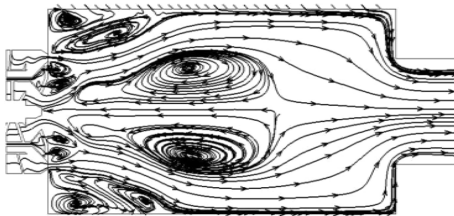


图 5 冷态流线图(工况 2)

Fig. 5 Stream line of central section (condition 2)

比较两个工况下的流线图可以看出: 工况 1 下的中心回流区在长度和宽度上都要更大一些, 主要原因是慢车时主模流量较小, 因此主模气流对副模气流形成的回流区抑制作用要更小。

图 6 是两个工况下流经头部旋流器的气流速度云图, 在主副模转折处均未出现明显的低速区(若出现低速区则可能导致流道自燃), 同时也可以看出主副模出口的速度均大于 110 m/s, 可以防止火焰由下游逆向向上游传播。此外, 主模内的气流轴向速度约为 80 m/s, 主模流道长度为 29 mm, 可以计算出燃油混合气在流道内停留的时间为 0.36 ms, 小于发生自燃的极限时间 1 ms^[36]。由以上两点可以看出设计的 LPP 燃烧室流场基本符合要求。

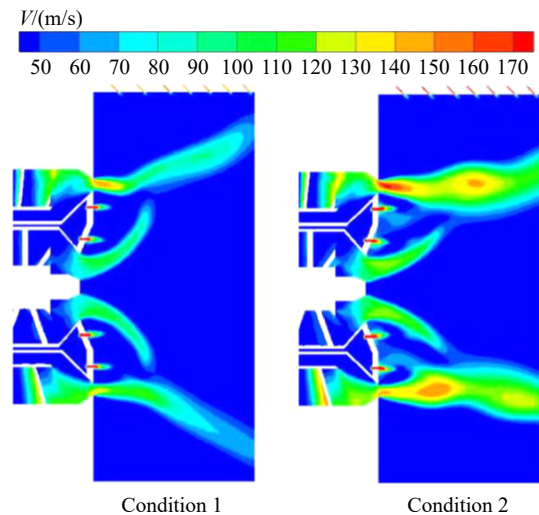


图 6 头部气流速度比较

Fig. 6 Head axial velocity contour comparison

2.2 燃烧温度场分析

图 7 所示为使用纯 Jet-A, 7% 推力慢车工况下的燃烧室轴向温度云图, 此时仅由副模供油。从图中可以看出副模部分区域温度可以达到 2 250 K 左右, 且高温区呈现出轴对称分布。主要原因是副模采用直混燃烧的方式, 火焰为扩散火焰, 慢车工况下副模油气比为 1.41, 达到富燃水平, 且处在中心回流区顶部附近的区域燃料和空气都

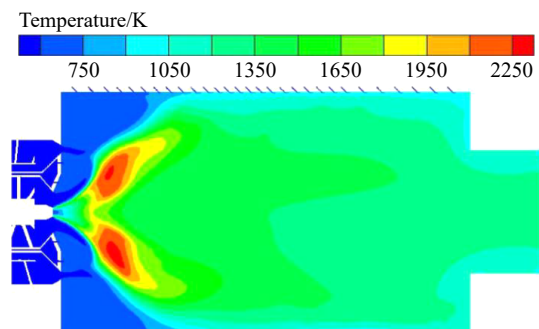


图 7 轴向温度云图(工况 1)

Fig. 7 Axial temperature contour (condition 1)

比较充沛,因此达到化学恰当比的区域较多,从而出现局部温度较高的情况。虽然燃烧场中出现局部高温区对污染物排放较为不利,但富燃对于慢车工况下,稳定燃烧室中火焰,保证发动机正常运行却非常有好处,且考虑到慢车工况在整个起飞降落(LTO)循环过程所占时间不长,因此整体的污染物排放水平并不会提高很多。

图 8 所示为使用 100%Jet-A 燃油,工况 2 下的燃烧室轴向温度云图,工况 2 下主副模同时供油,供油量和空气流量均比慢车时更大,主模采用预混预蒸发燃烧方式,燃油颗粒从主模直射喷嘴喷出后在流道内蒸发,与来流空气充分混合形成均匀混合气,然后离开预混流道,由收缩段进入燃烧室,产生预混火焰。从图中可以看出主模出口处仍有部分高温区,主要原因是预混流道长度有限,使得出口燃油和空气混合并不是十分均匀,使得局部燃烧温度较高,但总体而言绝大多数油气混合物都在中心回流区中完全燃烧,主燃区温度分布非常均匀,稳定在 1800 K 左右,有利于减少热力型 NO_x 的生成^[37]。

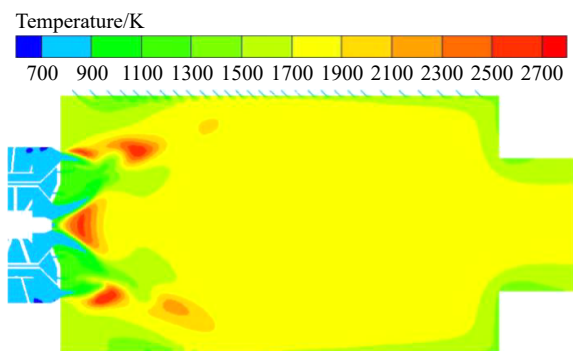


图 8 轴向温度云图(工况 2)

Fig. 8 Axial temperature contour (condition 2)

相比慢车工况下的温度场,起飞工况下最高温度达到了 2700 K 上下,更高的燃油流量和空气流量使得燃烧更为剧烈,提高了燃烧室最高温度,相比主模的贫油混合气,副模燃烧区达到化学恰当比燃烧的区域更多,整个火焰筒中最高温度仍在副燃级附近发生。此外相比慢车工况,起飞工况下副模火焰更靠近头部,主要原因是起飞工况下更高的进气温度使得副模燃油蒸发更快,更快发生燃烧。

3 碳烟生成结果及分析

通过改变 FAME 的掺混比,计算并比较了 100%Jet-A、80%Jet-A+20%FAME、60%Jet-A+40%

FAME 和 50%Jet-A+50%FAME 这 4 种掺混比下的混合燃油在工况 1 和工况 2 下的碳烟排放情况,为表述简洁,下文使用编号 B0、B20、B40、B50 来代表不同 FAME 掺混比的混合燃油。

图 9~图 11 汇总了两个工况下燃烧室出口的碳烟质量,粒子数以及平均几何直径(D)。其中,EXP(experiment)曲线代表实验获取的数据, SIM(simulation)曲线代表仿真计算得出的数据。曲线实验(EXP)所采用的数据为 Timko 等人^[38]在 CFM56 发动机上所做的 FAME 生物燃料排放测试结果。为了让由 FAME 添加而带来的影响更为直观清晰,排放情况采用了 ICAO 制定的 EI 排放指数(E)^[9]方式进行汇报,且最终都用 100% Jet-A 的排放数据统一标准化后再进行比较。

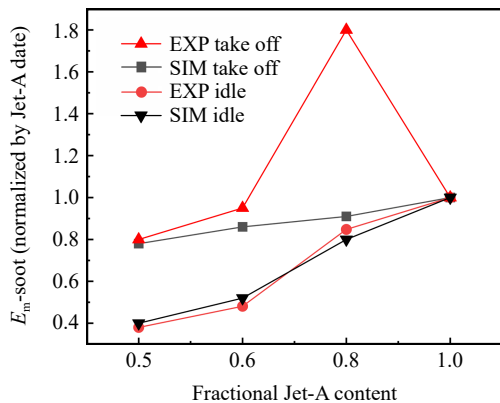


图 9 碳烟质量(Jet-A 数据标准化)

Fig. 9 Soot mass (normalized by Jet-A date)

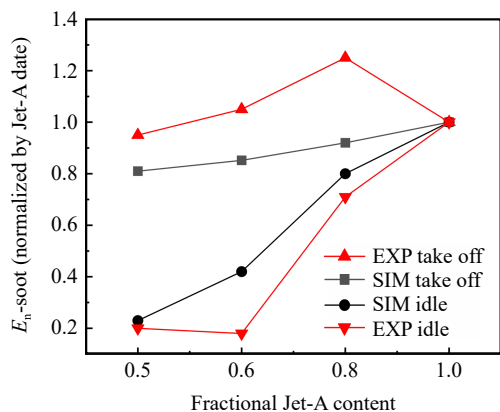


图 10 颗粒物数量(Jet-A 数据标准化)

Fig. 10 Particle number (normalized by Jet-A date)

总体而言,数值计算与实验得出的碳烟颗粒物排放情况变化趋势是相同的,用 FAME 掺混传统航油有助于减少排放颗粒物的质量,数量和粒径,且对于碳烟颗粒数量的减少最为明显。相比质量和数量,碳烟颗粒的粒径虽然没有随着 FAME

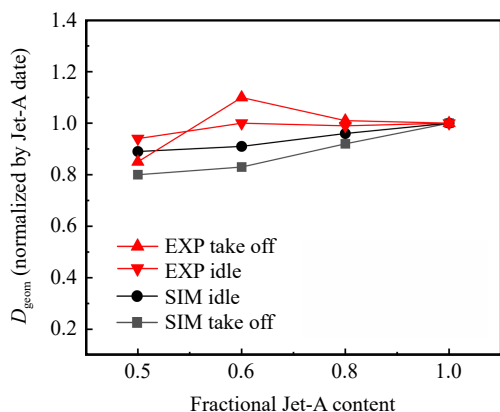


图 11 颗粒物尺寸(Jet-A 数据标准化)

Fig. 11 Particle size (normalized by Jet-A date)

掺混比的增加而明显减小,但也有一定程度的下降,且两个工况下的减小幅度差距不大。在工况 1 下,颗粒物的排放减少最为显著,而在工况 2 下颗粒物排放的减少并不明显,这与 Corporan 等人^[39-40]得出的结论一致。在本文的燃烧室模型下产生这种排放差异的原因是:碳烟颗粒主要是在扩散燃烧过程中形成的,在慢车工况下只有预燃级工作,燃烧产生扩散火焰,因此生物燃料的含氧量能更有效地减少颗粒物的生成^[41]。

数值计算与实验在 B20 这种情况下的差异较大,实验发现 20% 的 FAME 掺混反而增加了 30% 颗粒物数量,85% 颗粒物质量排放这一特殊情况, Timko 等人检查了几种不同 FAME 掺混比下的燃油密度,热值,运动黏度等几种常规理化性质,并没有发现 20% 生物燃料掺混比下的燃油有反常情况,混合燃油的理化性质随着掺混比改变呈现出单一变化。但根据结果可以得知在工况 2, 20% 掺混比下, FAME 的添加反而会增加颗粒物的排放。在工况 1 下实验与数值模拟的契合度较好, 3 种比例的掺混都降低了颗粒物的排放。虽然仿真与实验在 20% 掺混比下颗粒物排放情况存在较大差异,但总体变化趋势契合度较好,因此可以得出:随着 FAME 掺混比的增加,碳烟排放随之减少这一结论,这一结论也被作为多数作者得出的最终结论^[42-44]。在此基础上,本文后续利用仿真结果对 FAME 添加能够降低航空发动机内碳烟排放的原因做了分析。

在航空发动机燃烧室内,影响碳烟最终排放水平的中间过程复杂且繁多,本文力图从碳烟生长的主要中间过程去分析 FAME 添加能够降低碳烟最终排放水平的原因。图 12 汇总了两组工况下燃烧室内最高温度的变化情况,从表中可以

看出随着掺混比的增加,两组工况的最高温度均出现了一定程度的降低,原因在于 FAME 的热值要低于 Jet-A, 因此燃烧释放的热量会出现下降。因此在实际使用中为弥补由于燃烧温度下降而造成的发动机推力降低,应适当增大燃油流量。在本文使用的碳烟模型中,碳烟成核的前驱体及表面生长过程所需的小分子选用了燃料裂解形成的乙炔小分子,乙炔间通过成环反应生成第 1 个苯环,后续在苯环表面通过脱氢加乙炔机制(HACA)生长成为复杂的碳烟颗粒物,以此来模拟碳烟的生成。因此在本模型中,气态小分子乙炔的含量将影响到芳烃的生成量,进而对碳烟生成的过程产生影响,这种模拟碳烟生成的方式此前也被其他学者使用过^[45]。图 13 汇总了两组工况下燃烧场内乙炔最高及平均质量分数的变化情况,其总体变化趋势随着掺混比的增加,两者均出现了一定程度的下降,主要原因有二,其一由于燃料裂解生成气态前体这一过程随着温度变化十分敏感^[46],乙炔生成量随着燃烧场内温度的下降而降

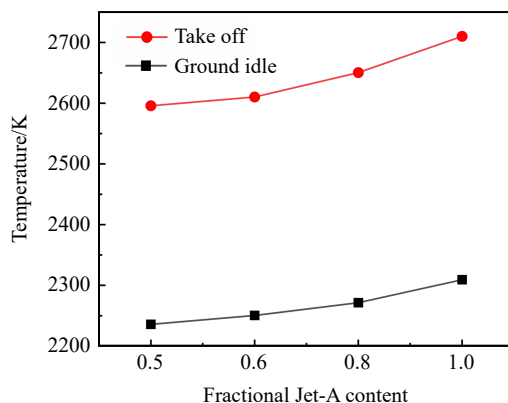


图 12 场内最高温度的变化情况

Fig. 12 Variation of maximum temperature in the field

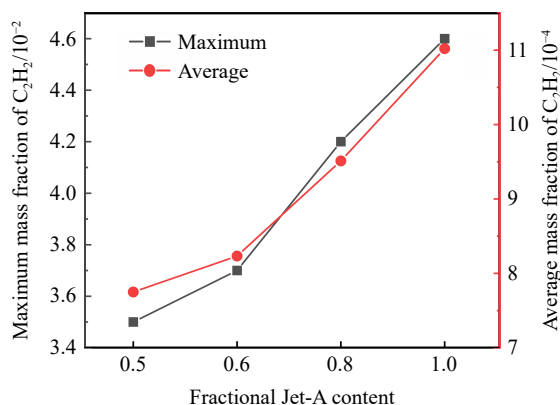


图 13 乙炔最高及平均质量分数

Fig. 13 Maximum and average acetylene mass fraction

低,其二在于 FAME 燃油中含碳量相比 Jet-A 更低,燃油本身的性质影响了乙炔的生成量。

碳烟颗粒的形成与局部燃料过富、温度过高有关,LPP 燃烧室主燃级为贫油燃烧,主燃级燃料几乎完全燃烧,产生的碳烟量极少,因此在整个燃烧室内,主要产生碳烟的区域为预燃级高温富燃区域。此外高温燃烧产物会沿中心回流区回流至副模喷嘴附近,导致局部燃油蒸汽被包围在一个高温缺氧环境中,而在这个富油区域内,碳烟会大量地生成。因此,预燃级碳烟生成量在 LPP 燃烧室总体碳烟生成量中占着绝大多数部分。图 14 和图 15 显示了工况 2 下 B0 的碳烟质量分数及乙炔质量分数的分布,和温度分布云图比较后可以发现,碳烟生成量与温度成正比,高温回流区中心碳烟生成量远大于燃烧室其他区域。而在碳烟生成量较大的区域内,乙炔浓度也明显高于其他区域。这一点也证明了气态小分子前体的浓度对于碳烟生成的影响极为重要,其浓度高低不仅会影响碳烟的成核速率,同时在碳烟后续生长过程中也发挥着关键性的作用^[31]。图 16 显示了碳烟后续生长过程中表面生长速率的分布云图,可以看出在乙炔浓度高的区域表面生长速率远大

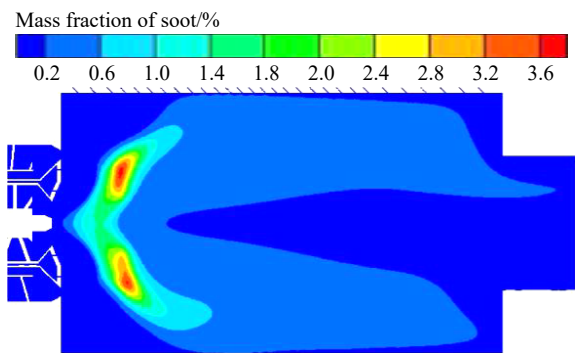


图 14 碳烟质量分数分布云图

Fig. 14 Soot mass fraction distribution contour

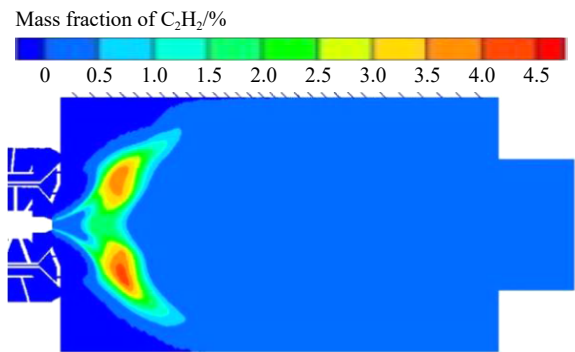


图 15 乙炔质量分数分布云图

Fig. 15 Acetylene mass fraction distribution contour

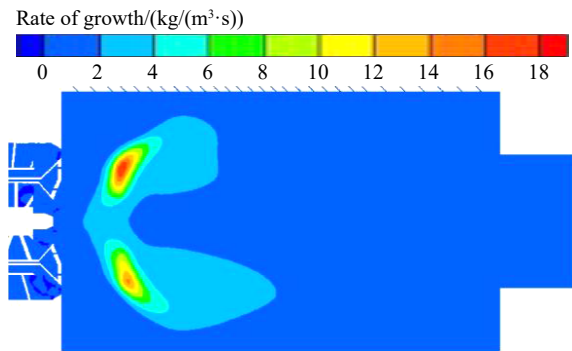


图 16 碳烟表面生长速率分布云图

Fig. 16 Rate of soot growth contour

于其他区域,这加快了碳烟由小分子前体向大分子凝聚体形成的过程。

碳烟生成过程中另一重要的过程是碳烟氧化,在燃烧场中,碳烟氧化速率受到 OH 自由基,游离氧原子, O_2 浓度影响,但在高温缺氧的中心回流区,OH 自由基氧化将占到主导作用。图 17 是碳烟氧化速率分布云图,可以发现氧化速率受到温度的影响,与图 15 对比后可以发现在乙炔浓度高,即成核、生长速率大的区域氧化速率同样也大。

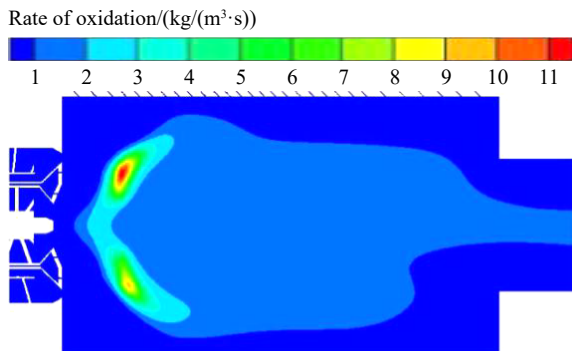


图 17 碳烟氧化速率分布云图

Fig. 17 Rate of soot oxidation contour

图 18 汇总了不同掺混比燃油在工况 1 下,过燃烧场内最高温度区域沿轴向氧化速率的变化曲线,可以发现在预燃级头部区域附近,峰值氧化速率随着 FAME 掺混比的增大而增大,而燃烧场内的温度是随着 FAME 掺混比的增大而降低的,这种现象与氧化速率随着温度升高而增大的一般情况是不符的,原因可能与生物燃料中氧含量较高有关。共混物中氧含量的提高会促进成核过程颗粒的氧化,而对颗粒后续生长氧化的过程影响较小^[47],因此可以看到在成核主要进行的预燃级中心区域,碳烟氧化速率随着生物燃料含量的增大而明显提高,而在其他区域氧化速率差异并不

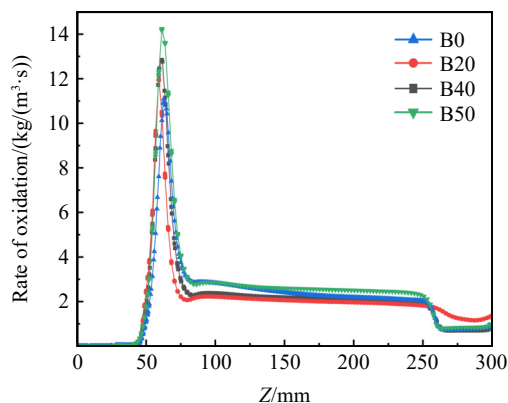


图 18 碳烟氧化速率曲线(工况 1)

Fig. 18 Rate of soot oxidation (condition 1)

明显。因此使用 FAME 燃料能减少碳烟排放的另一重要原因是提高了碳烟成核过程的氧化速率。

另一方面, FAME 的添加还对颗粒物粒径产生了影响, 在开启允许碳烟颗粒物凝聚的矩模型下, 对碳烟成核时形成的初始颗粒的粒径与经过后续一系列生长和氧化过程后形成的最终凝聚体颗粒的粒径进行了研究, 比较不同 FAME 掺混比下生成的碳烟颗粒的平均粒径, 发现在使用 B0 燃油下, 生成的颗粒物其初始粒径与凝聚体粒径都更大, 随着 FAME 掺混比的增加, 颗粒物粒径总体出现下降的趋势, 因此可以得出: 碳烟颗粒粒径随着 FAME 掺混比的增加而逐渐减小这一结论。图 19 汇总了两个工况下中心回流区附近生成的碳烟颗粒的初始粒径与凝聚体粒径之间的关系, 并通过线性拟合得出了变化曲线, 由曲线可以看出凝聚体粒径随着初始粒径增大而增大这一现象, 因此不难想到, 碳烟颗粒粒径随着 FAME 掺混比的增加而逐渐减小这一结果可以归因于: 添加 FAME 后的混合燃料, 燃烧形成的颗粒物初

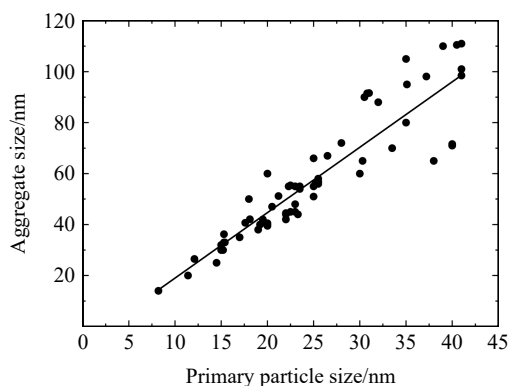


图 19 初始颗粒粒径与凝聚体粒径间的关系曲线

Fig. 19 Correlation between primary particle size and aggregate size

始粒径减小, 使得最终凝聚体的粒径也随之减小, 使得燃烧室出口产生的碳烟颗粒也更为精细。添加 FAME 燃油后初始颗粒粒径减小的原因在于: 乙炔作为碳烟成核的前体物质, 也是后续表面生长等过程的重要原料, FAME 的添加降低了乙炔的浓度, 使得初始颗粒形成所需原料含量降低, 初始颗粒的粒径及尺寸也随之减小。

在实际情况中, 各种燃料之间的芳烃含量存在较大差异, 这种差异导致了燃烧生成的碳烟颗粒质量、数量和粒径的不同。Richter 等人^[48]回顾了碳烟生成的化学途径, 最后得出: 含芳烃的燃料燃烧往往会产生更多的碳烟。Jet-A 是一种含芳烃燃料, 因此 PAH 在燃烧的最初阶段就存在, 碳烟也在燃烧的最初阶段就开始形成。而 FAME 燃料本身并不含有芳烃, 必须首先裂解出气态小分子, 这些前驱体再通过一系列反应生成 PAH 后才能生成碳烟颗粒, 而苯作为 PAH 形成的最初形态, 其含量及生成速率在碳烟及碳烟前体的生成中起着限速的关键作用^[18], Jet-A 中存在的初始芳烃含量加速了碳烟的生成速率, 这也是导致 FAME 和 Jet-A 最终碳烟排放不同的另一关键因素。

4 结 论

本文对一种 LPP 低污染燃烧室的流场及热态燃烧做了分析, 并在此基础上对 FAME 掺混传统航油 Jet-A 的排放进行了数值模拟, 最终得出了以下结论:

1) 在 Jet-A 中掺混 FAME 燃油能够降低碳烟排放, 主要原因在于 FAME 燃油的添加降低了碳烟前驱体的含量及生成率, 因此降低了碳烟成核及后续生长的速率。FAME 燃油中的氧含量提高了碳烟的氧化速率, 加快了颗粒氧化破碎的过程。

2) 使用 FAME 燃油会生成更为精细的碳烟颗粒, 原因在于 FAME 燃料中的氧含量在碳烟生成的第一步中抑制了成核的速率, 使得通过成核过程形成的碳烟颗粒粒径及含量都出现了降低, 最后经过后续一系列过程形成的凝聚体的粒径也有所降低。

3) 发动机处在低功率运行工况下(工况 1), FAME 燃油的添加对碳烟排放的减少最为显著, 而在高功率下(工况 2), 碳烟排放虽也有所减少, 但减少幅度并不明显。

4) 当 Jet-A 被 FAME 生物燃料部分替代时, 随着 FAME 掺混比的增加, 可以大幅度降低碳烟

颗粒数量, 颗粒物质质量的排放, 碳烟颗粒的粒径虽有一定程度的减小, 但减小幅度并不明显。

参考文献:

- [1] D'ALESSANDRO F, PACCHIAROTTA G, RUBINO A, et al. Lean catalytic combustion for ultra-low emissions at high temperature in gas-turbine burners[J]. *Energy & Fuels*, 2011, 25(1): 136-143.
- [2] MENDEZ C J, PARTHASARATHY R N, GOLLAHALLI S R. Performance and emission characteristics of butanol/Jet A blends in a gas turbine engine[J]. *Applied Energy*, 2014, 118: 135-140.
- [3] MONIRUZZAMAN C G, YU F. A 0D aircraft engine emission model with detailed chemistry and soot microphysics[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(4): 1670-1686.
- [4] ARGYROPOULOS G, SAMARA C, VOUTSA D, et al. Concentration levels and source apportionment of ultrafine particles in road microenvironments[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 129: 68-78.
- [5] VEDANTHAM A. Aviation and the global atmosphere: a special report of IPCC working groups I and III[R]. San Jose, Costa Rica: IPCC, 1999.
- [6] AMARA A B, DAUPHIN R, BABIKER H, et al. Revisiting diesel fuel formulation from Petroleum light and middle refinery streams based on optimized engine behavior[J]. *Fuel*, 2016, 174: 63-75.
- [7] CHEN L, STONE R, RICHARDSON D. A study of mixture preparation and PM emissions using a direct injection engine fuelled with stoichiometric gasoline/ethanol blends[J]. *Fuel*, 2012, 96: 120-130.
- [8] CHEN L, STONE R, RICHARDSON D. Effect of the valve timing and the coolant temperature on particulate emissions from a gasoline direct-injection engine fuelled with gasoline and with a gasoline-ethanol blend[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2012, 226(10): 1419-1430.
- [9] International Civil Aviation Organization. Annex 16 to the convention on international civil aviation volume II: aircraft engine emissions[M]. 4th ed. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2017.
- [10] MONGIA H. TAPS: a fourth generation propulsion combustor technology for low emissions[R]. AIAA 2003-2657, 2003.
- [11] CORPORAN E, DEWITT M J, BELOVICH V, et al. Emissions characteristics of a turbine engine and research combustor burning a fischer-tropsch jet fuel[J]. *Energy & Fuels*, 2007, 21(5): 2615-2626.
- [12] DEMIRBAS A. Importance of biodiesel as transportation fuel[J]. *Energy Policy*, 2007, 35(9): 4661-4670.
- [13] LAI J Y W, LIN K C, VIOLI A. Biodiesel combustion: advances in chemical kinetic modeling[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, 37(1): 1-14.
- [14] KOHSE-HÖINGHAUS K, OSSWALD P, COOL T A, et al. Biofuel combustion chemistry: from ethanol to biodiesel[J]. *Angewandte Chemie (International Edition)*, 2010, 49(21): 3572-3597.
- [15] BULZAN D, ANDERSON B, WEY C, et al. Gaseous and particulate emissions results of the NASA alternative aviation fuel experiment (AAFEX)[R]. ASME Paper GT2010-23524, 2010.
- [16] BREM B T, DURDINA L, SIEGERIST F, et al. Effects of fuel aromatic content on nonvolatile particulate emissions of an in-production aircraft gas turbine[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(22): 13149-13157.
- [17] GRIBI B, LIN Yuzhen, HUI Xin, et al. Effects of hydrogen peroxide addition on combustion characteristics of *n*-decane/air mixtures[J]. *Fuel*, 2018, 223: 324-333.
- [18] CHEN L, ZHANG Z, LU Y, et al. Experimental study of the gaseous and particulate matter emissions from a gas turbine combustor burning butyl butyrate and ethanol blends[J]. *Applied Energy*, 2017, 195: 693-701.
- [19] XUE X, HUI X, SINGH P, et al. Soot formation in non-premixed counterflow flames of conventional and alternative jet fuels[J]. *Fuel*, 2017, 210: 343-351.
- [20] 张鹏, 刘海峰, 陈贝凌, 等. 掺混含氧燃料的柴油替代物部分预混火焰中多环芳香烃的荧光光谱和碳烟浓度[J]. *物理化学学报*, 2015, 31(1): 32-40.
- [20] ZHANG Peng, LIU Haifeng, CHEN Beiling, et al. Fluorescence spectra of polycyclic aromatic hydrocarbons and soot concentration in partially premixed flames of diesel surrogate containing oxygenated additives[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2015, 31(1): 32-40. (in Chinese)
- [21] 王贺武, 周龙保. 含氧燃料添加剂对柴油机性能和排放的影响[J]. *内燃机学报*, 2001, 19(1): 1-4.
- [21] WANG Hewu, ZHOU Longbao. Effect of oxygenate additive on performances and emissions of diesel engines[J]. *Transactions of Csice*, 2001, 19(1): 1-4. (in Chinese)
- [22] LAPUERTA M, CANOIRA L. Biofuels for aviation[M]. Amsterdam: Elsevier, 2016: 47-84.
- [23] 朱嘉伟, 颜应文, 李诗, 等. LPP低污染燃烧室两相喷雾燃烧性能数值研究[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(4): 792-800.
- [23] ZHU Jiawei, YAN Yingwen, LI Shi, et al. Numerical investigation of two-phase spray combustion performance for LPP low-emission combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(4): 792-800. (in Chinese)
- [24] 汪涛, 索建秦, 梁红侠, 等. 火焰筒切向进气发散小孔冷却数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(5): 1052-1058.
- [24] WANG Tao, SUO Jianqin, LIANG Hongxia, et al. Numerical study of tangential effusion cooling for combustor liner[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(5): 1052-1058. (in Chinese)
- [25] LYONS V J. Fuel/Air nonuniformity-effect on nitric oxide emissions[J]. *AIAA Journal*, 1982, 20(5): 660-665.
- [26] PENKO P, KUNDU K, SIOW Y, et al. A kinetic mechanism for calculation of pollutant species in Jet-a combustion[R]. AIAA2000-3035, 2000.
- [27] HERBINET O, PITZ W J, WESTBROOK C K. Detailed chemical kinetic oxidation mechanism for a biodiesel surrogate[J]. *Combustion and Flame*, 2008, 154(3): 507-528.
- [28] WANG W, OEHLSCHLAEGER M A. A shock tube study of methyl decanoate autoignition at elevated pressures[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(2): 476-481.
- [29] BROOKES S J, MOSS J B. Predictions of soot and thermal radiation properties in confined turbulent jet diffusion flames[J]. *Combustion and Flame*, 1999, 116(4): 486-503.
- [30] BROOKES S J, MOSS J B. Measurements of soot production and thermal radiation from confined turbulent jet diffusion flames of methane[J]. *Combustion and Flame*, 1999, 116(1/2): 49-61.
- [31] LEUNG K M, LINDETEDT R P, JONES W P. A simplified reaction mechanism for soot formation in nonpremixed flames[J]. *Combustion and Flame*, 1991, 87(3/4): 289-305.
- [32] FENIMORE C P, JONES G W. Oxidation of soot by hydroxyl radicals[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1967, 71(3): 593-597.
- [33] PURI R, SANTORO R J, SMYTH K C. The oxidation of soot and carbon monoxide in hydrocarbon diffusion flames[J]. *Combustion*

- and Flame, 1994, 97(2): 125-144.
- [34] FRENKLACH M. Method of moments with interpolative closure[J]. *Chemical Engineering Science*, 2002, 57(12): 2229-2239.
- [35] LIU Y, SUN X, SETHI V, et al. Review of modern low emissions combustion technologies for aero gas turbine engines[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2017, 94: 12-45.
- [36] BECKER J, HASSA C. Liquid fuel placement and mixing of generic aeroengine premix module at different operating conditions[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003, 125(4): 901-908.
- [37] HEYWOOD J B, MIKUS T. Parameters controlling nitric oxide emissions from gas turbine combustors[R]. NASA-CR-132959, 1973.
- [38] TIMKO M T, HERNDON S C, DE LA ROSA BLANCO E, et al. Combustion products of petroleum jet fuel, a fischer-tropsch synthetic fuel, and a biomass fatty acid methyl ester fuel for a gas turbine engine[J]. *Combustion Science and Technology*, 2011, 183(10): 1039-1068.
- [39] CORPORAN E, EDWARDS T, SHAFER L, et al. Chemical, thermal stability, seal swell, and emissions studies of alternative jet fuels[J]. *Energy & Fuels*, 2011, 25(3): 955-966.
- [40] CORPORAN E, REICH R, MONROIG O, et al. Impacts of biodiesel on pollutant emissions of a JP-8-fueled turbine engine[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2005, 55(7): 940-949.
- [41] SALAMANCA M, MONDRAGÓN F, AGUDELO J R, et al. Influence of palm oil biodiesel on the chemical and morphological characteristics of particulate matter emitted by a diesel engine[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 62: 220-227.
- [42] GRABOSKI M S, MCCORMICK R L. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1998, 24(2): 125-164.
- [43] LAPUERTA M, ARMAS O, BALLESTEROS R. Diesel particulate emissions from biofuels derived from Spanish vegetable oils[R]. SAE 2002-01-1657, 2002.
- [44] CARDONE M, PRATI M V, ROCCO V, et al. Brassica carinata as an alternative oil crop for the production of biodiesel in Italy: engine performance and regulated and unregulated exhaust emissions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(21): 4656-4662.
- [45] 李宇航, 张弛, 王建臣, 等. 预燃级对TeLESS II 燃烧室冒烟排放的影响[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(10): 2424-2433.
- LI Yuhang, ZHANG Chi, WANG Jianchen, et al. Effect of pilot structures on smoke emissions in the TeLESS II combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(10): 2424-2433. (in Chinese)
- [46] WANG Y, CHUNG S H. Soot formation in laminar counterflow flames[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, 74: 152-238.
- [47] MCENALLY C S, PFEFFERLE L D, ATAKAN B, et al. Studies of aromatic hydrocarbon formation mechanisms in flames: progress towards closing the fuel gap[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006, 32(3): 247-294.
- [48] RICHTER H, HOWARD J B. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and their growth to soot—a review of chemical reaction pathways[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2000, 26(4/5/6): 565-608.

(编辑: 张 雪)