

文章编号:1000-8055(2019)08-1663-08

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2019.08.004

小球藻油/RP-3 航空煤油混合燃料的层流燃烧特性

刘 宇, 汤 卓, 孙 震, 王金铎, 马洪安, 曾 文
(沈阳航空航天大学 航空发动机学院
辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室, 沈阳 110136)

摘 要: 在初始压力 0.1 MPa、初始温度 450 K 和当量比范围 0.8~1.2 工况下,进行小球藻油及其与 RP-3 航空煤油混合燃料的层流燃烧特性研究。研究表明:随着当量比增加,小球藻油着火滞燃期缩短,拉伸火焰传播速度增加。与 RP-3 航空煤油相比,小球藻油无拉伸火焰传播速度峰值更偏向于浓混合气区域,且对当量比较为敏感,随着当量比增加,其无拉伸火焰传播速度变化显著。随着小球藻油含量增加,混合燃料无拉伸火焰传播速度峰值右移,50%小球藻油/50%RP-3 航空煤油混合燃料无拉伸火焰传播速度峰值出现在当量比 $\Phi=1.4$ 附近。研究发现,与小球藻油和 RP-3 航空煤油单组分燃料相比,50%小球藻油/50%RP-3 航空煤油混合燃料马赫斯坦长度值变大,混合燃料具有较好的燃烧稳定性。

关 键 词: 定容燃烧弹; 小球藻油; RP-3 航空煤油; 火焰传播速度; 燃烧稳定性

中图分类号: V231; TK401 **文献标志码:** A

Laminar combustion characteristics of chlorella oil/RP-3 kerosene mixed fuel

LIU Yu, TANG Zhuo, SUN Zhen, WANG Jinduo,
MA Hongan, ZENG Wen

(Liaoning Key Laboratory of Advanced Measurement and
Test Technology Aviation Propulsion System, School of Aero-engine,
Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: The laminar combustion characteristics of chlorella oil and its blends with RP-3 kerosene were examined at initial pressure of 0.1 MPa, initial temperature of 450 K and equivalence range of 0.8—1.2 conditions. The results showed that with the increase of equivalence ratio, the ignition delay period of chlorella oil decreased and the stretched flame speed increased. Compared with RP-3 kerosene, the peak value of unstretched flame speed of chlorella oil was more shifted to the region of rich mixture, and the unstretched flame speed of chlorella oil was more sensitive to equivalence ratio. It was observed that with the increase of equivalence ratio, the unstretched flame speed of chlorella oil varied significantly. With the increase of chlorella oil addition, the peak value of unstretched flame speed shifted to right, the peak unstretched flame speed of the mixed fuel with 50% chlorella oil and 50% RP-3 appeared near the equivalence ratio of 1.4. It was found that compared with chorella oil and

收稿日期:2019-01-24
基金项目:国家自然科学基金(51606129); 国家自然科学基金(51676132)
作者简介:刘宇(1983—),男,副教授,博士后,主要从事航空燃料燃烧特性实验及燃烧反应机理研究。
引用格式:刘宇,汤卓,孙震,等. 小球藻油/RP-3 航空煤油混合燃料的层流燃烧特性[J]. 航空动力学报,2019,34(8):1663-1670.
LIU Yu,TANG Zhuo,SUN Zhen,et al. Laminar combustion characteristics of chlorella oil/RP-3 kerosene mixed fuel[J].
Journal of Aerospace Power,2019,34(8):1663-1670.

RP-3 single fuel, the Markse length of the mixed fuel was more larger, indicating the combustion of the mixture with chlorella oil and RP-3 is more stable.

Key words: constant volume combustion chamber; chlorella oil; RP-3 kerosene; flame propagation speed; combustion stability

近年来,随着中国民航事业的快速发展,航空煤油消耗加快,预计至 2020 年,中国油气对外依存度将达到 67%,届时中国石油供应安全问题将变得非常突出^[1]。与此同时,为了应对气候变化,减少温室气体排放,航空业一直在采取各种措施减少 CO₂ 排放。IATA (International Air Transport Association) 预测,航空工业要实现碳排放零增长,仅靠提高航空发动机技术和燃料的燃烧效率已经基本无法实现,只有采用可再生燃料。生物航空煤油是以可再生资源为原料生产的航空煤油,对其应用已成为航空减排、实现绿色、可持续循环发展目标的重要途径。

藻类因具有油脂含量高、生长快、单位面积产量大、生长空间广和净化作用强等突出优势,成为生物航空煤油原料的最佳选择^[2-3]。以生物海藻为原料,目前已生产出喷气燃料并试飞^[4]。结果表明,以海藻为代表的第二代生物燃料对现有飞机具有良好的适应性。目前,我国在微藻的大规模养殖方面具有较强的科研实力,在微藻原油提取、微藻原油制备生物燃料等方面也取得了显著进展,已初步获得以海藻为原料的生物航空煤油。但微藻生物航空煤油要成为切实可行的替代燃料,实现大规模商业化生产,仍存在原料供应不稳定、生产工艺尚需改进以及生产成本较高等问题。此外,对微藻生物航空煤油着火与燃烧特性了解不透彻也极大限制了其在航空发动机中的应用^[5-6]。

目前,国外已经开展多种生物燃料着火特性的实验研究^[7-10]。在生物燃料的燃烧特性实验研究方面,在高温高压定容燃烧弹内,何旭等^[11]采用高速摄影法对不同掺混比例的生物柴油混合燃料进行研究,获取了燃烧火焰图像,分析了生物柴油的燃烧过程。朱浩月等^[12]在一台单缸柴油机上进行了以大豆为原料的甲酯类生物柴油低温燃烧试验。尧命发等^[13]在一台改造的单缸柴油机上,研究了正丁醇/生物柴油高预混压燃的燃烧特性。Hui 等^[14]分析了 Jet-A、三种费托(F-T)合成石蜡煤油(IPK)和三种加氢处理可再生喷气燃料(HRJ)的基础燃烧特性。研究指出,燃料的层流火焰速度强烈依赖于绝热火焰温度,而燃料的拉

伸火焰熄灭极限受燃料芳香烃组分影响较大。Li 等^[15]在对冲火焰实验装置中比较了正十四烷、正十六烷、JP-5、CHRJ、F-76 与 AHRD 的层流火焰速度。研究发现,正十四烷和正十六烷层流火焰速度十分接近,而其他四种燃料,由于燃料组成中存在芳香烃和支链烷烃,层流火焰速度均低于正十四烷和正十六烷;同时,由于石油基燃料(JP-5 和 F-76)组成中存在较多芳香烃,其层流火焰传播速度低于替代燃料(CHRJ 和 AHRD)。以上研究表明,生物燃料的芳香烃及支链烷烃组分对火焰传播速度与熄灭极限等燃烧特性有较大影响。然而目前,国内对生物航空燃料燃烧特性研究极少。

小球藻是微藻能源中的典型藻种,其主要成分为 C16 : 0 饱和脂肪酸、C16 : 3(n-3)和 C18 : 3(n-3)不饱和脂肪酸,经脱氧加氢工艺后主要成分为 C14、C16 和 C18 直链烷烃。作为喷气燃料需要的合成烷烃煤油(SPK),小球藻油可与 RP-3 航空煤油按一定比例调和和使用,且按照 ASTM (American Society for Testing and Materials) 组织要求,掺混比例不得高于 50%。本文拟对小球藻油、50%(质量分数)小球藻油/50%RP-3 航空煤油、RP-3 航空煤油层流燃烧特性进行实验研究,本研究可为航空发动机采用生物航空燃料提供理论基础。

1 实验装置

本文采用定容燃烧实验平台开展小球藻油及其与 RP-3 航空煤油层流燃烧特性研究。实验平台如图 1 所示^[16],包括定容燃烧弹、进排气系统、加热系统、纹影系统、点火装置、图片采集系统等。其中,定容燃烧弹采用 304 不锈钢制造,内部设计为圆柱形,容积约为 4.2 L,如图 2 所示。定容燃烧弹内布置有中心点火电极;定容燃烧弹上装有压力变送器、K 型温度传感器、进排气阀和液体燃料注入阀等;定容燃烧弹两端装有 80 mm 厚高透光石英玻璃窗,窗口直径为 130 mm。本实验将采用背影法拍摄小球藻油/RP-3 航空煤油混合燃料的着火与燃烧过程,所用高速摄像机为幻影 Phantom v611,拍摄速度为 10 000 幅/s。

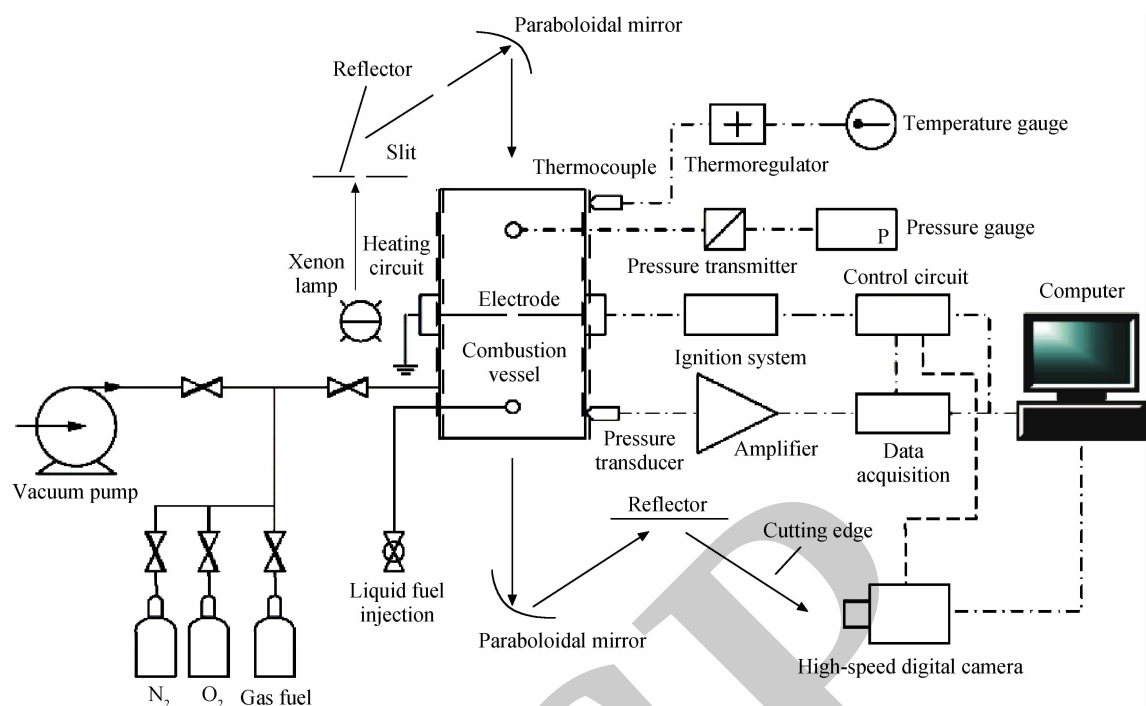


图 1 实验系统布置图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental facility

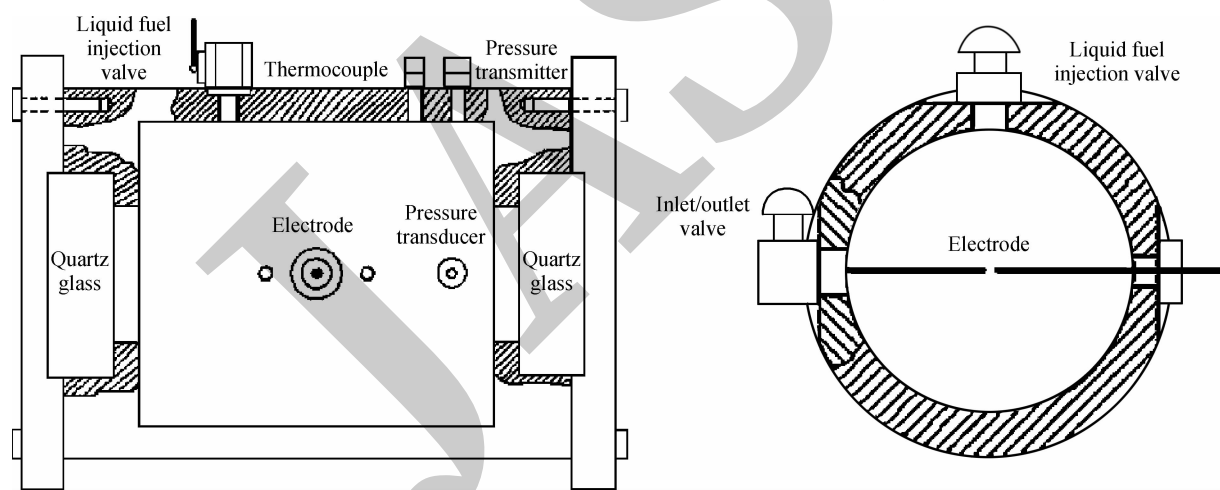


图 2 定容燃烧弹示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the constant volume combustion chamber

微藻油由藻脂肪酸脱氧加氢后获得,其主要组成为正构烷烃,芳香烃和环烷烃含量较低。分析指出,小球藻油烷烃组成中正构烷烃 C₁₄、C₁₆、C₁₈ 质量比为 2:47:51^[17]。本文根据正十四烷、正十六烷、正十八烷的分子式以及质量比,估算出小球藻油燃料的平均分子式 C_{16.91} H_{35.8}。实验中,先根据小球藻油燃料的平均分子式 C_{16.91} H_{35.8},计算出各工况条件下小球藻油、O₂、N₂ 的物质的量比,再根据分压定律算出小球藻油、O₂ 和 N₂ 的各自分压,制定配气表。其次,根据配气表充入相应组分,即通过液体燃料注射阀将小球

藻油注入弹体内,再由进气系统按分压依次充入 O₂ 与 N₂。充气完成后静置 8 min,待形成均匀混合气后,通过中心电极点火,同时触发高速摄像机对火焰发展进行拍摄。

2 实验原理

通过定容燃烧实验装置可获得预混燃料火焰发展过程图片,其形状为球形扩散火焰。数据处理中,将球形火焰半径随时间的变化率定义为拉伸火焰传播速度 S_n ^[18]

$$S_n = \frac{dr}{dt} \tag{1}$$

式中 r 为球形火焰半径, t 为从点火到拍摄所经历的时间。

另外, 将球形火焰表面上无限小面积的对数值对时间的变化率定义为火焰拉伸率 α

$$\alpha = \frac{d(\ln A)}{dt} = \frac{dA}{A \cdot dt} \tag{2}$$

式中 A 为球形火焰表面积。

对于球形扩散火焰, 式(2)还可以表示为

$$\alpha = \frac{2dr}{r \cdot dt} = \frac{2S_n}{r} \tag{3}$$

在球形火焰扩散初期, 受定容弹内压力、温度升高影响较小, 拉伸火焰传播速度 S_n 与火焰拉伸率 α 存在线性关系

$$S_l - S_n = L_b \alpha \tag{4}$$

当火焰拉伸率 $\alpha=0$ 时, 得到 $S_n-\alpha$ 直线在 S_n 轴的截距 S_l , 定义为无拉伸火焰传播速率, 将 $S_n-\alpha$ 直线斜率的相反数定义为马克斯坦长度 L_b 。

由火焰前锋面处质量守恒定律可知

$$A\rho_u u_l = A\rho_b S_l \tag{5}$$

式中 ρ_u 、 ρ_b 分别为未燃区与已燃区混合气密度。

由式(5)可获得层流燃烧速度 u_l

$$u_l = (\rho_b S_l) / \rho_u \tag{6}$$

3 实验结果分析

3.1 火焰发展特性

图 3 为初始压力 $p=0.1\text{ MPa}$ 、初始温度 $T=450\text{ K}$ 、当量比 Φ 为 $0.8\sim1.2$ 范围小球藻油火焰发展特性图片。从图中可以看出, 在实验工况下, 火焰面从定容燃烧弹中心向外扩展, 火焰呈球形。在所有图片中, 火焰面未出现明显上浮, 说明浮力对燃烧稳定性影响很小。另外, 所有工况下, 火焰锋面在其发展过程中均保持光滑状态, 说明燃烧较为稳定。从火焰面形成角度来看, 当量比为 0.8 时, 点火后 33.4 ms 观察到明显火焰面, 而随着当量比增加到 1.2 , 点火后 4 ms 便观察到明显火焰面, 说明随着当量比增加, 着火滞燃期缩短。从火焰传播速度快慢角度来看, 随着当量比增加, 从所观察到明显火焰面到其传播至定容弹壁面所需时间由 28 ms 缩短至 14 ms , 可知, 随着当量比增加, 火焰传播速度变快, 从变化趋势来看, 在稀混合气区域, 火焰传播速度随当量比变化较为明显。

3.2 火焰传播速度

图 4 为小球藻油火焰半径随时间变化趋势,

横坐标是火花点火后时间, 纵坐标是火焰半径。本文采用自开发软件 cmcmark 1.04 测量火焰半径, 并进行光顺和拟合处理。由图可知, 当量比 0.8 时, 点火后 33.4 ms 才出现明显火焰面, 此时, 火焰面半径为 10 mm 左右, 而随着当量比增加, 火焰面出现时间提前, 观察到的火焰面半径均为 5 mm 左右, 以上现象表明, 对于稀混合气, 燃烧释放能量较少, 在燃烧初始阶段, 燃烧释放的化学能量仅能勉强维持火核向外界的散热量, 导致稳定火焰锋面形成时间较晚, 而随着当量比增加, 单位体积燃料燃烧释放能量增加, 热能与质量的传递引起火核附近区域未燃混合气产生化学反应, 燃烧反应区向未燃混合气方向推进形成稳定火焰锋面。

图 5 显示小球藻油拉伸火焰传播速度随火焰半径变化规律, 可见, 随着火焰半径的增加, 拉伸火焰传播速度有增加的趋势。除当量比为 1.1 工况, 其它当量比工况拉伸火焰传播速度均呈现在某一火焰半径开始增加, 到某一火焰半径拉伸火焰传播速度又维持不变的规律, 且随着当量比增加, 拉伸火焰速度开始增加所对应的火焰半径提前。而在当量比为 1.1 工况, 随着火焰半径增加, 拉伸火焰传播速度呈现准线性增加趋势。拉伸火焰传播速度是指在火焰拉伸作用下, 火焰锋面相对于静止燃烧室壁面的运动速度, 受到绝热火焰温度、已燃及未燃区混合气压力综合影响, 随着火焰传播, 已燃区混合气压力及绝热火焰温度增加, 推动火焰锋面向外运动, 而未燃区混合气压力也相应增加, 又抑制了火焰锋面向外运动。如图 5 所示, 各当量比工况拉伸火焰传播速度虽然不为定值, 但在同一火焰半径处, 随着当量比增加, 拉伸火焰传播速度增加。

图 6 为小球藻油拉伸火焰传播速度随火焰拉伸率变化规律。Bradley 和 Gu 等学者认为, 火焰拉伸对层流燃烧速度影响较大。球形火焰拉伸率定义简单明确, 火焰面上拉伸分布均匀, 其火焰拉伸率可由式(2)获得。另外, 由式(3)可知, 当拉伸火焰传播速度一定时, 火焰拉伸率与火焰半径存在反比关系, 说明火焰拉伸率越大, 对应的火焰半径越小。因此, 如图 6 所示, 随着球形火焰传播, 火焰半径变大, 火焰拉伸率变小, 拉伸火焰传播速度具有增加的趋势。

由公式(6)可知, 层流燃烧速度与无拉伸火焰传播速度存在对应关系, 因此, 为得到层流燃烧速度, 首先要获得无拉伸火焰传播速度。所谓无拉

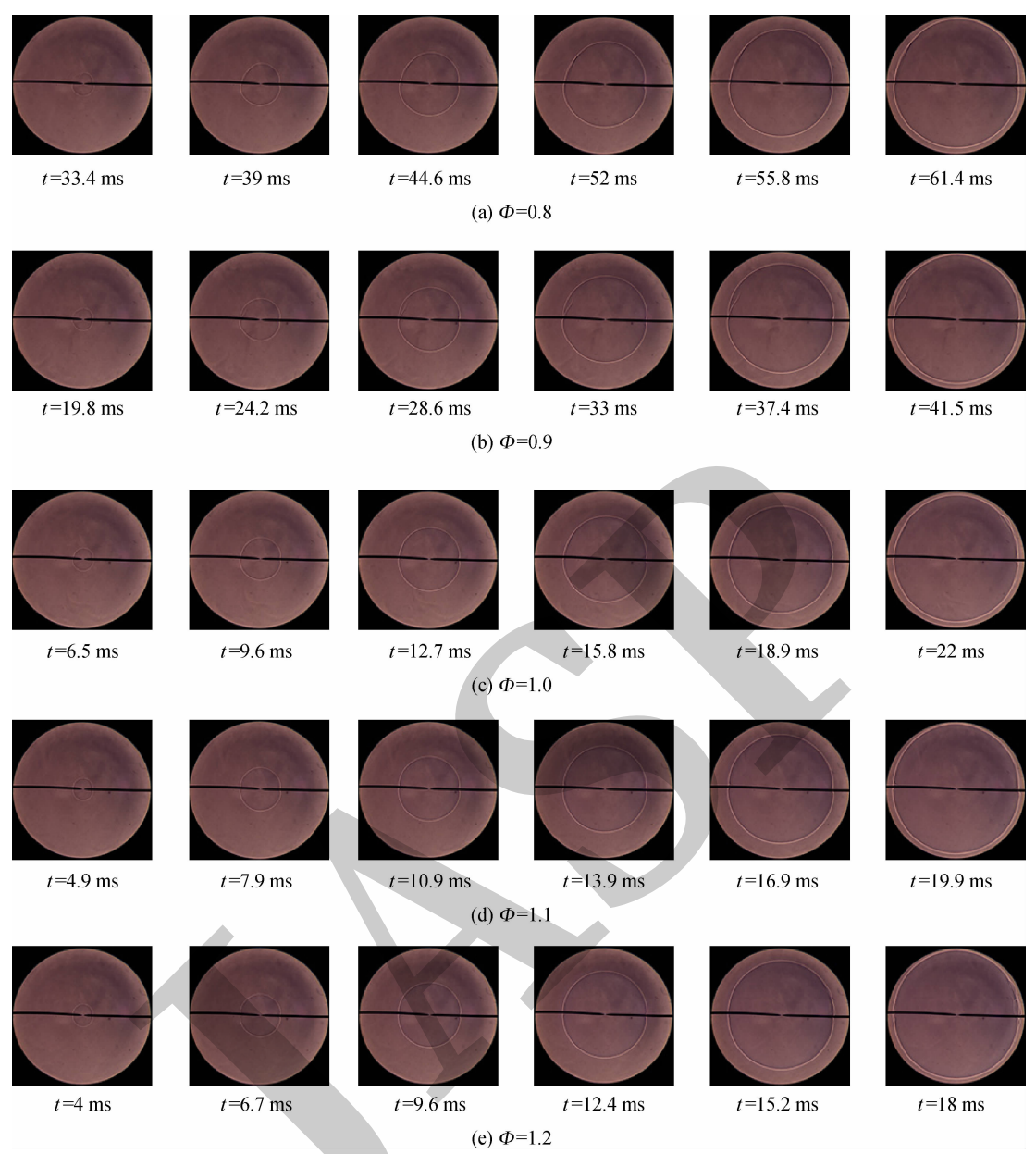


图 3 小球藻油燃烧火焰发展特性图片 ($p=0.1\text{ MPa}$, $T=405\text{ K}$)

Fig. 3 Photos indicating flame propagation characteristic of chlorella oil ($p=0.1\text{ MPa}$, $T=405\text{ K}$)

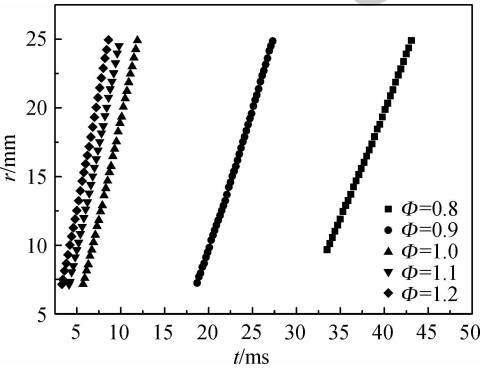


图 4 小球藻油火焰半径随时间变化趋势
($p=0.1\text{ MPa}$, $T=405\text{ K}$)

Fig. 4 Variation in flame radius of chlorella oil versus time ($p=0.1\text{ MPa}$, $T=405\text{ K}$)

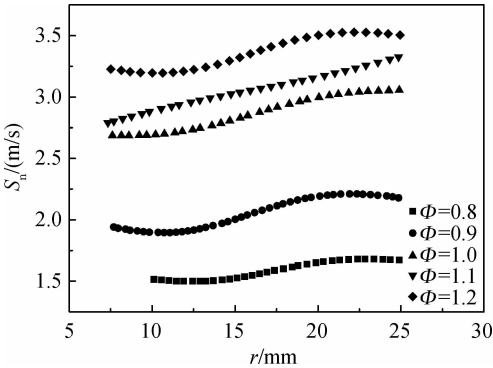


图 5 小球藻油拉伸火焰传播速度随半径变化规律
($p=0.1\text{ MPa}$, $T=405\text{ K}$)

Fig. 5 Variation in stretched flame speed of chlorella oil versus flame radius ($p=0.1\text{ MPa}$, $T=405\text{ K}$)

伸火焰传播速度是指火焰拉伸率为 0 时的拉伸火焰传播速度。对于球形火焰,当火焰传播到无穷远处时,球形火焰表面近似于平面,火焰拉伸率接近于 0,此时,拉伸火焰传播速度可看作为无拉伸火焰传播速度。显然,采用定容燃烧弹无法直接获得无拉伸火焰传播速度,需通过式(4)拟合得到。式(4)采用线性拟合得到拉伸火焰传播速度与火焰拉伸率之间的关系,并进一步外推至 $\alpha=0$ 处获得无拉伸火焰传播速度,拟合直线如图 6 所示。

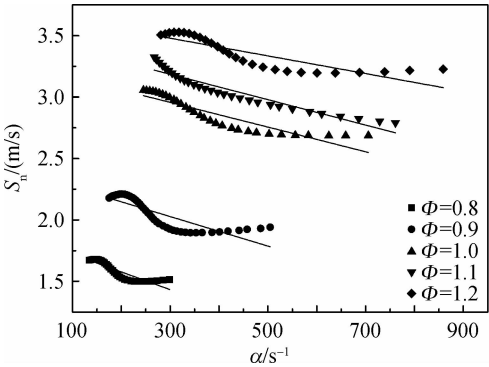


图 6 小球藻油拉伸火焰速度随火焰拉伸率变化规律
($p=0.1\text{ MPa}$, $T=405\text{ K}$)

Fig. 6 Variation in stretched flame speed of chlorella oil versus stretch rate ($p=0.1\text{ MPa}$, $T=405\text{ K}$)

图 7 为初始压力 0.1 MPa,初始温度 450 K,小球藻油、50% 小球藻油/50% RP-3 航空煤油、RP-3 航空煤油 3 种燃料无拉伸火焰传播速度对比图。从小球藻油和 RP-3 航空煤油的无拉伸火焰传播速度随当量比变化趋势对比发现,在稀混合气区($\phi<1.0$)时,RP-3 航空煤油无拉伸火焰传播速度高于小球藻油,而在浓混合气区域相反。从无拉伸火焰传播速度随当量比变化趋势可知,小球藻油对当量比更为敏感,随着当量比增加,其无拉伸火焰传播速度显著增加。另外,如图 7 所示,RP-3 航空煤油无拉伸火焰传播速度峰值出现在当量比 $\phi=1.1$ 附近,而从现有实验数据推断,小球藻油的峰值将向浓混合气区移动。小球藻油与 RP-3 航空煤油无拉伸火焰传播速度受烷烃组分影响较大,相比于 RP-3 航空煤油,小球藻油以高碳数直链烷烃为主,导致其无拉伸火焰传播速度与 RP-3 航空煤油差异较大。

从 RP-3 航空煤油和 50% 小球藻油/50% RP-3 航空煤油的无拉伸火焰传播速度随当量比变化趋势对比发现,RP-3 航空煤油与 50% 小球藻油/50% RP-3 航空煤油对当量比敏感程度相似,50% 小球藻油/50% RP-3 航空煤油混合燃料无拉伸火

焰传播速度峰值出现在当量比 $\phi=1.4$,其峰值速度高于 RP-3 航空煤油。由以上分析可知,当在航空发动机中掺混使用微藻油时,应适当增加混合燃料量,确保燃烧在浓混合气区域进行,才能保障火焰锋面具有较高的传播速度,以提高航空发动机功率。

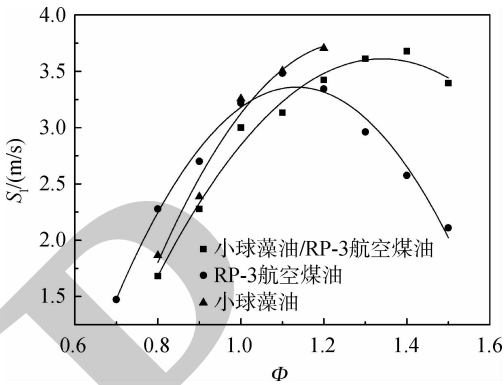


图 7 小球藻油、50% 小球藻油/50% RP-3 航空煤油、RP-3 航空煤油无拉伸火焰传播速率随当量比变化规律($p=0.1\text{ MPa}$, $T=405\text{ K}$)

Fig. 7 Unstretched flame speed of chlorella oil, 50% chlorella oil/50% RP-3, RP-3 versus equivalence ratio ($p=0.1\text{ MPa}$, $T=405\text{ K}$)

3.3 火焰燃烧稳定性

图 8 为初始压力 0.1 MPa,初始温度 450 K,小球藻油、50% 小球藻油/50% RP-3 航空煤油、RP-3 航空煤油 3 种燃料马赫斯坦长度对比图。马赫斯坦长度由式(4)得到,是拟合直线斜率的相反数。马赫斯坦长度反应燃烧速率对火焰拉伸的

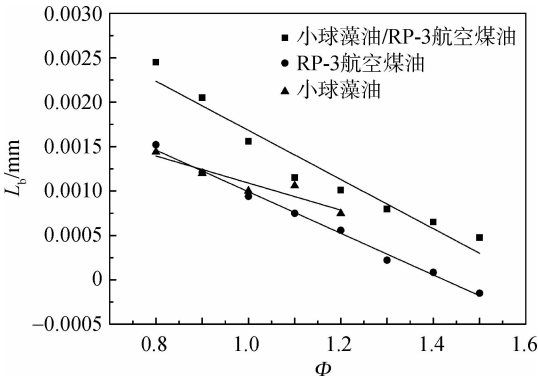


图 8 小球藻油、50% 小球藻油/50% RP-3 航空煤油、RP-3 航空煤油马赫斯坦长度随当量比变化规律($p=0.1\text{ MPa}$, $T=405\text{ K}$)

Fig. 8 Markseim length of chlorella oil, 50% chlorella oil/50% RP-3, RP-3 versus equivalence ratio ($p=0.1\text{ MPa}$, $T=405\text{ K}$)

敏感程度,用于表征火焰的稳定性,其值越大,火焰稳定性越强。如图8所示,随着当量比增加,3种燃料马克斯坦长度均有所降低,说明燃烧稳定性变差,另外,在同一当量比工况下,相比于小球藻油和RP-3航空煤油单组分燃料,50%小球藻油/50%RP-3航空煤油混合燃料的马克斯坦长度较大,说明混合燃料具有较好的燃烧稳定性。在航空发动机设计中,必须要充分保证燃烧室中火焰的稳定性,以保障发动机工作稳定、可靠、安全,同时提高燃烧效率,从马克斯坦长度对比分析可知,在RP-3航空煤油中掺混使用微藻油有利于提高燃烧稳定性,对航空发动机工作有利。

4 结 论

本文采用定容燃烧实验装置对小球藻油及其与RP-3航空煤油混合燃料的层流燃烧特性进行研究,研究结果如下:

1) 获得初始压力为0.1 MPa、初始温度为450 K、当量比为0.8~1.2范围小球藻油火焰发展特性图片。分析图片可知,随着当量比增加,小球藻油着火滞燃期缩短,火焰传播速度变快,且在稀混合气区域,火焰传播速度随当量比变化较为明显。

2) 在稀混合气区($\Phi < 1.0$),RP-3航空煤油无拉伸火焰传播速度高于小球藻油,而在浓混合气区低于小球藻油。RP-3航空煤油无拉伸火焰传播速度峰值出现在当量比 $\Phi = 1.1$ 附近,而小球藻油的峰值更偏向于浓混合气区。小球藻油对当量比更为敏感,随着当量比增加,其无拉伸火焰传播速度变化显著。

3) RP-3航空煤油与50%小球藻油/50%RP-3航空煤油对当量比敏感程度相似,50%小球藻油/50%RP-3航空煤油混合燃料无拉伸火焰传播速度峰值出现在当量比 $\Phi = 1.4$ 附近,且其峰值速度高于RP-3航空煤油。

4) 相比于小球藻油和RP-3航空煤油单组分燃料,50%小球藻油/50%RP-3航空煤油混合燃料的马克斯坦长度较大,说明混合燃料具有较好的燃烧稳定性。

参考文献:

[1] 张彤,张文琴,王渊,等. 中国石油供应安全状态分析与风险预警[J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2014, 30(2): 1-7.
ZHANG Tong, ZHANG Wenqin, WANG Yuan, et al. Analysis and warning on Chinese oil supply security[J].

Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Science), 2014, 30(2): 1-7. (in Chinese)

[2] 张玉玺. 从生物燃料原料的开发现状看生物燃料发展的利与弊[J]. 当代化工, 2013, 42(11): 1538-1541.
ZHANG Yuxi. Discussion on advantages and disadvantages of biofuel development from the aspect of development status of biofuel feedstocks[J]. Contemporary Chemical Industry, 2013, 42(11): 1538-1541. (in Chinese)

[3] 姚国欣. 加速发展我国生物航空燃料产业的思考[J]. 中外能源, 2011, 16(4): 18-26.
YAO Guoxin. Accelerating bio-jet fuel development in China[J]. Sino-Global Energy, 2011, 16(4): 18-26. (in Chinese)

[4] 诸逢佳, 刘建周. 航空生物燃料的现状 & 研制前景展望[J]. 能源与环境, 2011, (4): 19-21.

[5] 孙晓英, 刘祥, 赵雪冰, 等. 航空生物燃料制备技术及其应用研究进展[J]. 生物工程学报, 2013, 29(5): 285-298.
SUN Xiaoying, LIU Xiang, ZHAO Xuebing, et al. Progress in synthesis technologies and application of aviation biofuels[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2013, 29(5): 285-298. (in Chinese)

[6] 张玉玺. 生物航空煤油的发展现状[J]. 当代化工, 2013, 42(9): 1316-1318.
ZHANG Yuxi. Development status of bio-jet fuel[J]. Contemporary Chemical Industry, 2013, 42(9): 1316-1318. (in Chinese)

[7] GOWDAGIRI S, WANG W J, OEHLSCHLAEGER M A. A Shock tube ignition delay study of conventional diesel fuel and hydroprocessed renewable diesel fuel from algal oil[J]. Fuel, 2014, 128: 21-29.

[8] HOANG V N, THI L D. Experimental study of the ignition delay of diesel/ biodiesel blends using a shock tube[J]. Biosystems Engineering, 2015, 134: 1-7.

[9] ZHU Yangye, LI Sijie, DAVIDSON D F, et al. Ignition delay times of conventional and alternative fuels behind reflected shock waves[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35: 241-248.

[10] CASEY A, ELISA T, TIM E, et al. Application of a novel charge preparation approach to testing the autoignition characteristics of JP-8 and camelina hydroprocessed renewable jet fuel in a rapid compression machine[J]. Combustion and Flame, 2012(159): 2780-2788.

[11] 何旭, 郑亮, 赵陆明, 等. 生物柴油喷雾、着火和燃烧特性试验研究[J]. 内燃机工程, 2012, 33(5): 41-45.
HE Xu, ZHENG Liang, ZHAO Luming, et al. Experimental research on spray, ignition and combustion characteristics of biodiesel blend[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2012, 33(5): 41-45. (in Chinese)

[12] 朱浩月, ASSANIS Dennis, 黄震. 低温燃烧模式生物柴油发动机 CO 和 HC 的排放[J]. 内燃机学报, 2014, 32(1): 1-5.
ZHU Haoyue, ASSANIS Dennis, HUANG Zhen. CO and HC Emissions of Biodiesel in Low Temperature Combustion Mode[J]. Transactions of CSICE, 2014, 32(1): 1-5.

(in Chinese)

[13] 尧命发,庞阔,谷静波,等. 正丁醇/生物柴油高预混压燃燃烧及排放特性的试验[J]. 内燃机学报,2013,31(3):193-199.

YAO Mingfa, PANG Kuo, GU Jingbo, et al. Experiment on combustion and emission characteristics of n-butanol/biodiesel dual fuel HPCC [J]. Transactions of CSICE, 2013,31(3):193-199. (in Chinese)

[14] HUI X, KUMAR K, SUNG C J, et al. Experimental studies on the combustion characteristics of alternative jet fuels [J]. Fuel, 2012, 98: 176-182.

[15] LI Bo, LIU Ning, ZHAO Runhua, et al. Flame propagation of mixtures of air with high molecular weight neat hydrocarbons and practical jet and diesel fuels[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013(34):727-733.

[16] 曾文,陈欣,马洪安,等. RP-3 航空煤油层流燃烧特性的实验[J]. 航空动力学报, 2015, 30(12):2888-2896.

ZENG Wen, CHEN Xin, MA Hongan, et al. Experiment on laminar combustion characteristics of RP-3 kerosene[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(12):2888-2896. (in Chinese)

[17] 杨晓奕,王智超,刘子钰,等. 微藻航空燃料的热氧化安定性与热沉[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(2):223-228.

YANG Xiaoyi, WANG Zhichao, LIU Ziyu, et al. Thermal stability and heat sink of microalgae aviation fuels [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(2):223-228. (in Chinese)

[18] BRADLEY D, HICKS R A, LAWES M, et al. The measurement of laminar burning velocities and Markstein numbers for iso-octane-air and iso-octane-n-heptane- air mixtures at elevated temperatures and pressures in an explosion bomb[J]. Combustion and Flame, 1998, 115(1):126-144.

(编辑:李岩梅、张 雪)