

# 麻疯树油/RP-3 航油混合燃料燃烧特性实验研究\*

吴宗霖, 马洪安, 付淑青, 刘宇, 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, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:** 为研究麻疯树油/RP-3 航空煤油混合燃料的燃烧特性, 在定容燃烧弹内完成了体积混合比分别为 1:0, 1:1 和 1:3, 初始温度 500K, 初始压力 0.1MPa, 当量比为 0.7~1.5 混合燃料的实验。分析得到了混合燃料的火焰发展特性、火焰半径变化率、拉伸火焰传播速度、马克斯坦长度、无拉伸火焰传播速度等燃料燃烧特性, 并与 RP-3 航空煤油对比。得到以下结论: 在当量比为 0.7~1.2 时, 火焰传播稳定, 火焰前锋面较光滑; 在当量比增至 1.3~1.5 时, 火焰前锋面出现大量裂纹、胞状结构和微型火团, 与其他大分子碳氢燃料的燃烧性质相似; 在初始温度和初始压力一定时, 无拉伸层流火焰传播速度随当量比先增加后减小, 在当量比为 0.9~1.0 附近时, 无拉伸层流火焰传播速度达到最大值; 混合燃料的马克斯坦长度与当量比呈反比, 在当量比为 0.7~1.2 时, 马克斯坦长度为正值, 燃烧趋于稳定; 在当量比为 1.3~1.5 时, 马克斯坦长度为负值, 燃烧趋于不稳定。与 RP-3 航空煤油对比, 掺有麻疯树油时马克斯坦长度轻微降低, 燃烧稳定性稍差; 在当量比小于 1.0 时, 无拉伸火焰传播速度轻微降低, 在当量比大于 1.0 时, 无拉伸火焰传播速度显著降低。

**关键词:** 替代燃料; 麻疯树油; 混合燃料; 定容燃烧弹; 马克斯坦长度; 无拉伸火焰传播速度  
**中图分类号:** TK401      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4055 (2019) 10-2358-08  
**DOI:** 10.13675/j.cnki.tjjs.190156

## Experimental Study on Combustion Characteristics of Jatropha Oil/ RP-3 Kerosene Blended Fuel

WU Zong-lin, MA Hong-an, FU Shu-qing, LIU Yu, ZENG Wen

(Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technique for Aviation Propulsion System, Liaoning Province,  
School of Aero-Engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** In order to study the combustion characteristics of Jatropha oil / RP-3 kerosene blended fuel, experiments were carried out in constant volume incendiary bomb with volume mixing ratio 1:0, 1:1 and 1:3, initial temperature of 500K, initial pressure of 0.1MPa, and equivalence ratios of 0.7~1.5, respectively. The combustion characteristics such as flame propagation characteristic, flame radius change rate, tensile flame propagation speed, Markstein length, and unstretched laminar flame propagation speed were obtained. And compared with RP-3 kerosene, the following conclusion is drawn: At the equivalence ratios of 0.7~1.2, the flame propagation is stable and the flame front is relatively smooth; when the equivalence ratio increases to 1.3~1.5, a large number of cracks, cell structures, and micro-fire clusters appear on the flame front. This is similar to the com-

\* 收稿日期: 2019-03-14; 修订日期: 2019-06-12。

基金项目: 国家自然科学基金 (51506132; 51376133; 516061291008103)。

作者简介: 吴宗霖, 硕士生, 研究领域为航空发动机燃油系统的实验与数值模拟。E-mail: wzl\_rn@163.com

通讯作者: 马洪安, 博士, 副教授, 研究领域为航空发动机燃烧过程与排放物生成的实验与数值模拟。

E-mail: mahongan\_sy@163.com。

引用格式: 吴宗霖, 马洪安, 付淑青, 等. 麻疯树油/RP-3 航油混合燃料燃烧特性实验研究[J]. 推进技术, 2019, 40(10): 2358-2365. (WU Zong-lin, MA Hong-an, FU Shu-qing, et al. Experimental Study on Combustion Characteristics of Jatropha Oil/ RP-3 Kerosene Blended Fuel[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(10): 2358-2365.)

bustion behavior exhibited by other macromolecular hydrocarbon fuels. When the initial temperature and initial pressure are constant, the flame propagation speed of the unstretched laminar flame of the blended kerosene fuel increases with the equivalence ratio and then decreases. When the equivalence ratio is around 0.9~1.0, the unstretched laminar flame propagation speed reaches a maximum value. The Markstein length of blended fuel decreases with increasing equivalence ratio. When the equivalence ratio is 0.7~1.2, the Markstein length is positive and the combustion tends to be stable. At the equivalence ratio of 1.3~1.5, the Markstein length is negative and the combustion tends to be unstable. Compared with RP-3 kerosene, when jatropha oil was mixed in, the Markstein length of blended fuel decreased slightly and the combustion stability was slightly worse. When the equivalence ratio is less than 1.0, the unstretched laminar flame propagation speed decreases slightly, and when the equivalence ratio is more than 1.0, the unstretched laminar flame propagation speed decreases significantly.

**Key words:** Alternative fuel; Jatropha oil; Blended fuel; Constant volume incendiary chamber; Markstein length; Unstretched flame propagation speed

## 1 引言

生物航空能源具有更好的低排放性、可再生性、安全性和更好的经济性等优势,生物航空燃料拥有广阔的应用前景,成为航空业减排、实现绿色、可持续发展目标的重要途径<sup>[1-4]</sup>。因此,寻求和开发可再生生物航空能源已引起全球各国普遍重视。2008年2月,英国一架波音747飞机使用棕榈油和椰子油制成的生物航空燃料完成试飞;2010年9月,全球首架使用纯合成航空燃料的客机,由约翰内斯堡飞往开普敦<sup>[3]</sup>;2011年10月,国航一架波音747飞机完成生物燃料的验证飞行<sup>[5]</sup>。

用于提炼麻疯树油(Jatropha oil)的麻疯树(也称麻风树、小油桐和膏桐等),是国内外公认的最具发展潜力的油脂植物之一,麻疯树种植广泛,资源丰富,极耐干旱贫瘠,其种仁具有很高的产油率,目前我国西南地区已广泛种植<sup>[6]</sup>。国内外研究人员对其生物柴油加工工艺、流程和理化属性研究也已展开。

燃料的燃烧特性是生物航空燃料研究的重点,其影响热释放率、火焰长度、发动机的点火成功率 and 高空再点火及熄火边界等,进而影响到发动机燃烧室的稳定运行和飞行安全。国外已开展生物燃料及其混合航空燃料的燃烧特性实验研究。Casey等<sup>[7]</sup>分析了对亚麻基和动物脂肪基进行氢化处理后得到的两种可再生航空燃料分别与JP-8组成的混合燃料的燃烧特性。Cheng等<sup>[8]</sup>完成了不同比例棕榈酸甲酯/Jet A-1混合燃料的层流燃烧速度实验研究。Xin等<sup>[9]</sup>分析了费托合成燃料IPK、亚麻茅、S-8等与常规航空煤油Jet-A的组分差异。同时,在当量比为0.7~1.4,初始温度为400K和470K,压力为0.1MPa的条件下,完成了混合燃料着火特性和层流燃烧速度实验,

得到结论,在当量比较低时,四种燃料火焰燃烧速度基本一致,在较大当量比时,S-8的燃烧速度比IPK和亚麻茅略大,同时,Jet-A,S-8,IPK和亚麻茅等混合燃料层流燃烧速度受拉伸率影响较大,因路易斯数(Lewis Number)不同也造成燃烧速度不同。国外部分学者已开展麻疯树油的相关研究。Rehman等<sup>[10]</sup>对比了麻疯树油和Jet A-1和JP-8等航空燃料的排放特性。Klingshirn等<sup>[11]</sup>研究了混合体积比为1:1的麻疯树油/JP-8航空煤油混合燃料的排放特性,得到结论:与纯JP-8航空煤油相比,混合燃料的颗粒物排放降低了96%。Sivakumar等<sup>[12]</sup>通过实验研究了单路单喷口麻疯树油与Jet A-1混合燃料的雾化特性,得到结论:随着麻疯树油所占比例的增加,雾化锥角变大,索特尔平均直径基本保持不变。此外,Kick等<sup>[13]</sup>,Mawid<sup>[14]</sup>,Dagaut等<sup>[15-16]</sup>,Saffaripour等<sup>[17]</sup>都对生物航空燃料及其与常规航空燃料混合燃料的燃烧反应机理在多种工况下进行了研究。

国内针对纯生物航空燃料、混合生物航空燃料的燃烧特性研究较少,一些团队<sup>[18-21]</sup>较早开展了生物汽油和生物柴油雾化性能、着火和燃烧特性的实验研究。耿莉敏等<sup>[18]</sup>研究得出,随着生物柴油掺混比的增大,喷雾锥角减小,喷雾油滴的平均直径增大;随着生物柴油掺混比越大,燃料雾化性能越差。姚春德等<sup>[19-20]</sup>在直喷发动机和涡轮增压发动机上,研究了采用甲醇/柴油等生物燃料的燃烧效率、放热率曲线、最高燃烧温度与污染物排放等。由于甲醇燃料含氧,利于燃料完成燃烧,碳烟与NO<sub>x</sub>排放均有所降低。黄佐华等<sup>[21]</sup>采用在柴油中添加不同比例正戊醇的混合柴油燃料,研究了直喷发动机的污染排放。高负荷下发动机CO和未燃HC有所降低,总的NO<sub>x</sub>排放有所增加,但碳烟排放显著降低。此外,国

内对于麻疯树油的研究较少。常敏等<sup>[22]</sup>研究表明,发展麻疯树油可有效降低碳排放量。张旭等<sup>[23]</sup>通过使用Pt/SAPO-11催化剂制备生物航空燃料,探究了反应温度、氢气压力、油剂比例等对制备过程的影响。

从国内外研究现状来看,对航空煤油等传统化石燃料研究已经取得少量成果,但到目前为止,还未发现有关麻疯树油层流燃烧特性的研究。本文将采用定容燃烧弹对麻疯树油/RP-3航空煤油混合燃料按体积混合比分别为1:0,1:1和1:3,在初始温度500K,初始压力0.1MPa,当量比0.7~1.5的燃烧工况下,对麻疯树油/RP-3航空煤油混合燃料的层流燃烧特性进行研究,并分析麻疯树油含量对混合燃料无拉伸火焰传播速度和燃烧稳定性等燃烧特性的影响。

## 2 实验方法

### 2.1 实验装置

如图1所示,实验系统由定容燃烧弹体、点火控制系统、配气系统、加热系统、高速摄影仪、纹影系统、时序控制系统和数据收集系统构成。燃烧在定容燃烧弹体内进行,内径为180mm,长度为215mm,容积为5500mL。图2所示为定容燃烧弹的内部结构图,加热系统由热电阻构成的加热带组成,功率为2.4kW。弹体外部设有热电偶、压力传感器、压力变送器、温度传感器、液体燃料注射阀与进排气阀等。弹体的两侧端面装有高透光、耐高温高压的石英玻璃,厚度为80mm,视窗直径为180mm。实验采用背影法测量火焰发展特性,并通过高速摄像机来拍摄火焰发展过程。由于火焰从点火到结束在瞬间完成,所以本实验采用幻影 Phantom v611 高速摄像机,其摄像频率范围为1kHz~10kHz。图片间隔时间越

小,就越能精确地记录火焰的传播过程,本实验研究中选用的拍摄频率为10kHz。

麻疯树油和RP-3航空煤油是典型的高碳数大分子碳氢燃料,其主要物理性质如表1所示,麻疯树油的芳香烃含量高于RP-3航空煤油,分别为12.2%和4.6%;麻疯树油的烯烃含量低于RP-3航空煤油,分别是1.18%和2.00%;麻疯树油的馏程稍低于RP-3航空煤油,两者密度、动力粘度、表面张力相似。实验时,先根据麻疯树油与RP-3航空煤油的分子式,计算出混合燃料, $O_2$ , $N_2$ 的体积分数,再计算出各组分分压,制定配气表,根据分压,通过胶垫阀门将混合燃料注射到弹体内,通过进气系统将 $O_2$ , $N_2$ 充入弹体内,注入时,确保各组分分压误差小于30Pa,注入后静置10min,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照。为确保实验数据准确可靠,每个工况进行3次重复实验。实验误差主要来源于注入时对分压的把握,测量误差和计算误差相对较小。

### 2.2 实验原理

在球形火焰中,燃料的燃烧速度可以近似的认为是拉伸火焰传播速度,表示的是火焰前锋面半径和时间的关系,可据公式(1)求得

$$S_n = \frac{dr_n}{dt} \quad (1)$$

式中 $r_n$ 为火焰半径, $t$ 为时间。

火焰拉伸率 $\alpha$ 是一个无穷小火焰面积 $A$ 随时间 $t$ 的变化率

$$\alpha = \frac{d \ln A}{dt} = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \quad (2)$$

式中 $A$ 为火焰前锋面面积。

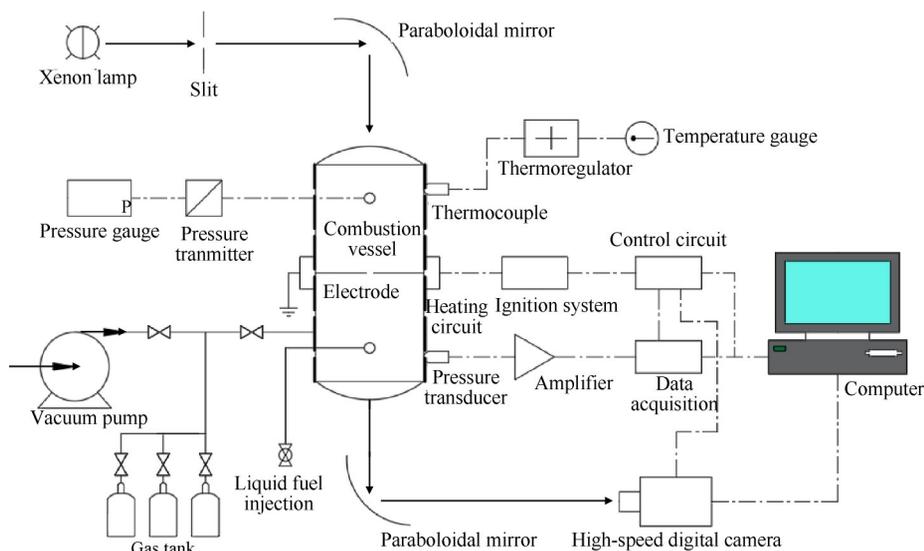


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

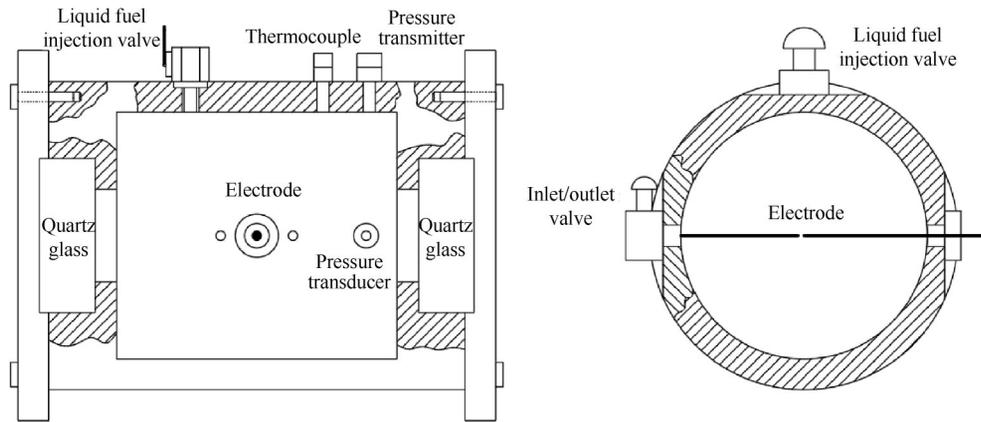


Fig. 2 Schematic diagram of constant volume chamber

Table 1 Basic physical properties of jatropa oil and RP-3 kerosene

Properties	Jatropa oil	RP-3 kerosene	Properties	Jatropa oil	RP-3 kerosene
Composition			Density@ 25°C/(kg/m <sup>3</sup> )	756.2	776
Aromatics/vol%	12.2	4.6	Dynamic viscosity@ 25°C/(N·s/m <sup>2</sup> )	0.00103	0.00114
Olefin/vol%	1.18	2.00	Surface tension@ 25°C/(N/m)	0.024	0.0236
Saturates/vol%	86.62	90.70	Refractive index@ 25°C	1.41	1.45
Sulfur/vol%	0.0334	0.0372	Flash point/°C	15	38
Physical distillation (distillation temperature/°C)			Freezing point/°C	-64	-47
Initial boiling point	139.8	166.4	Boiling point/°C	186.8	208.3
Final boiling point	249.3	253.7	Heat of combustion/(MJ/kg)	46.41	42.8

根据球形的面积公式,得到球形火焰的火焰拉伸率 $\alpha$ 为

$$\alpha = \frac{d \ln A}{dt} = \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} = \frac{1}{4\pi r^2} \frac{d(4\pi r^2)}{dt} = \frac{2}{r_n} \frac{dr_n}{dt} = 2 \frac{S_n}{r_n} \quad (3)$$

考虑到点火具有随机性,且火焰传播速度随瞬时拉伸率非线性变化和受燃烧室的结构限制,因此非线性的火焰传播速度为

$$\left(\frac{S_n}{S_1}\right)^2 \ln\left(\frac{S_n}{S_1}\right)^2 = -\frac{2L_b \alpha}{S_1} \quad (4)$$

当 $\frac{L_b \alpha}{S_1} \ll 1$ 时,此时火焰为弱拉伸火焰。拉伸火焰传播速度 $S_n$ 和无拉伸火焰传播速度 $S_1$ 呈如下线性关系

$$S_1 - S_n = L_b \alpha \quad (5)$$

由式(1)与式(2)可求得火焰拉伸率 $\alpha$ 和拉伸火焰速度 $S_n$ ,在 $\alpha - S_n$ 图中将数据 $S_n - \alpha$ 倒推至 $\alpha=0$ ,直线在 $S_n$ 轴上的截距为无拉伸火焰速度 $S_1$ 。直线斜率的相反数为马克斯长度 $L_b$ 。当 $L_b$ 小于0时,火焰传播速度与火焰面拉伸率呈正比关系,此时若火焰面出现突出,则突出部分的火焰传播速度将持续增大,火焰传播过程趋于不稳定。当 $L_b$ 大于0时,火焰传播速度与火焰面拉伸率呈反比,此时若火焰面出现突

出,则突出部分的火焰发展速度被抑制,火焰传播过程将趋于稳定。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 火焰发展特性

图3所示为初始温度 $T$ 为500K,初始压力 $p$ 为0.1MPa,当量比 $\phi$ 为0.8~1.5的工况下,麻疯树油/RP-3航空煤油体积混合比1:1的混合燃料燃烧过程中的火焰发展照片。由高速摄像机拍摄到的图片显示:在当量比小于1.2时,火焰传播较为稳定,火焰前缘面比较光滑;在当量比增至1.3~1.5时,火焰前缘面出现大量裂纹、胞状结构和微型火团。

在不同的当量比下,混合气由点火电极点火后,均呈类球状向周围未燃区扩散。随着当量比增大,火焰从点火开始到传播至定容燃烧弹边缘所用时间逐渐变快,这表示火焰传播速度随当量比增大逐渐增大,并在当量比为0.9~1.0时火焰传播速度最快。随着当量比增加,火焰从点火开始到传播至定容燃烧弹边缘所用的时间明显逐渐增加,这表示火焰传播速度随当量比增大而减小。

在稳定性方面,在当量比为0.8~1.1的工况下,火焰前缘面从点火开始到燃烧结束,均为光滑球面。

在当量比为1.2时,在火焰传播早期,火焰前锋面较光滑。但在火焰继续传播至快充满整个视窗时,点火电极附近开始出现少量的裂纹和胞状结构,但火焰前锋面仍比较光滑。在当量比增加到1.3时,在火焰传播早期,火焰前锋面仍然比较平滑,随着火焰传播的不断进行,火焰前锋面开始出现裂痕并在两个点火电极旁,出现胞状结构,火焰持续传播,胞状结构不断增多并向视窗中心发展,并最终连成一片,这时火焰前锋面大量褶皱,视窗内出现了非常明显的类似于爆炸时的微型火焰向还未燃烧的区域扩散。形成这一现象的原因是,随着当量比的不断增大,非对等扩散在混合气燃烧中进行,质量扩散系数远远大于热扩散系数,路易斯数小于1,燃烧出现热扩散不稳定性,在火焰发展过程中,裂纹、褶皱和微型火团逐渐出现在火焰前锋面。此现象与曾文等<sup>[24]</sup>RP-3航空煤油一致,即当量比很大程度地影响了火焰前锋面褶皱的生成。

### 3.2 层流燃烧速度

混合燃料的层流燃烧速度受初始温度、初始压力、混合燃料的理化性质、当量比和点火能量等因素的影响,Bradley等<sup>[25]</sup>,黄佐华等<sup>[26]</sup>,Burke等<sup>[27]</sup>研究发

现,当火焰半径在6mm~25mm时,点火能量对火焰传播的影响较小,并且在未燃区的压力和温度变化几乎可以忽略,因此,本文以垂直方向长度测量火焰半径,截取半径为6mm~25mm的纹影照片进行数据分析,通过对火焰前锋面半径的增长历程进行分析,依此来量化地研究火焰的传播发展特性。

#### 3.2.1 火焰半径与着火时刻的关系

图4所示为初始温度 $T$ 为500K,初始压力 $p$ 为0.1MPa,当量比分别为0.7~1.5的工况下混合气火焰前锋面半径 $r_n$ 随燃烧时间的变化。

如图4中所示,在各工况下,火焰半径均与燃烧持续时间呈线性正比关系,当混合比为1:1,当量比为0.7~0.9时,斜率持续变大,此时火焰半径随时间增长的速度加快,即火焰传播速度随当量比增加而增大;在当量比达到0.9时斜率最大,即火焰的传播速度最快;在当量比大于0.9时,斜率明显减小,火焰半径随时间的增长速度减慢,火焰传播速度呈下降趋势;同时,当量比为0.7时火焰传播速度最小。当混合比为1:3以及纯麻疯树油时,以上规律同样适用。

#### 3.2.2 拉伸火焰传播速度与火焰半径的关系

拉伸火焰传播速度是反应燃烧发展特征的基础

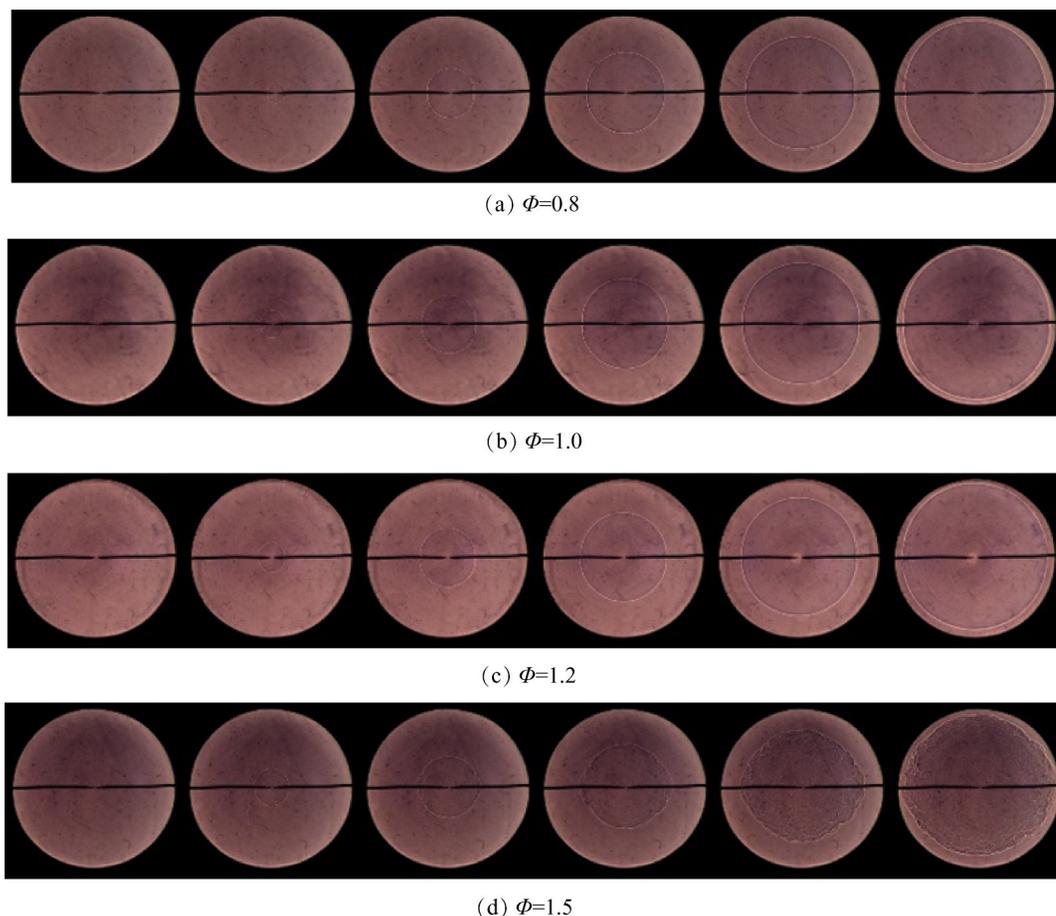


Fig. 3 Flame propagation characteristic of blended fuel characteristic at different equivalences ratio (Ja/RP-3=1:1)

特性物理量,说明火焰半径与着火时刻的变化关系。根据上文所阐述的火焰半径随时间的变化关系,对上述数据对时间求导并根据火焰拉伸率光滑,可以得到拉伸火焰传播速度 $S_n$ 。图5所示为在初始温度 $T$ 为500K,初始压力 $p$ 为0.1MPa,当量比分别为0.7~1.5的工况下拉伸火焰传播速度随火焰半径的关系。

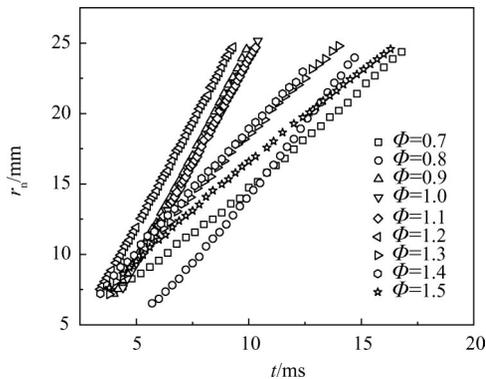


Fig. 4 Variations of flame radius versus time at different equivalences ratio (Ja/RP-3=1:1)

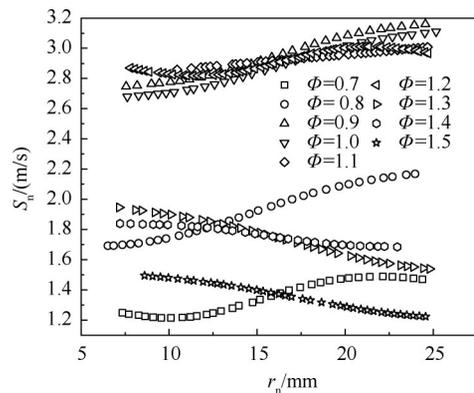


Fig. 5 Variations of stretched flame speed with flame radius (Ja/RP-3=1:1)

如图5所示,拉伸火焰传播速度在当量比为0.7~0.8和1.4~1.5的工况下最小。当混合比为1:1时,火焰传播前期( $r_n < 16\text{mm}$ ),当量比为0.7时拉伸火焰传播速度最小;在火焰传播后期( $r_n > 16\text{mm}$ ),当量比为1.5时,拉伸火焰传播速度最小。当量比为0.9时,拉伸火焰传播速度最大。当混合比为1:3时,当量比为0.7和1.4时,拉伸火焰传播速度较小,当量比为1.2时,拉伸火焰传播速度最大。在三组对照实验中,当量比为0.7时,在火焰传播前期( $r_n < 12\text{mm}$ )时,拉伸火焰传播速度基本保持不变或略微下降;在火焰传播中期( $12 < r_n < 19\text{mm}$ )时,拉伸火焰传播速度持续增加;在火焰传播后期( $r_n > 19\text{mm}$ )时,拉伸火焰传播速度基本保持不变。当量比为0.9~1.2时,拉伸火焰传播速度明显增大,且与半径保持正比,拉伸火焰传播速度

随火焰传播进程不断增加,且在当量比为0.9和1.0时增速最快。在当量比为1.3~1.5时,拉伸火焰传播速度减小,并随着半径增大而持续下降,近似一条持续下降的直线。且当量比为1.5时下降趋势大于当量比为1.3。得出结论,随着当量比的增加,拉伸火焰传播速度呈先增大后减小的趋势,同时,随着半径的增加,拉伸火焰传播速度大致呈稳定-增加-稳定-减小的趋势。

3.2.3 拉伸火焰传播速度与拉伸率的关系

图6所示为在工况为初始温度 $T$ 500K,初始压力 $p$ 0.1MPa,当量比分别为0.7~1.5的工况下拉伸火焰传播速度随拉伸率的变化。其中,斜率的相反数为马克斯坦长度 $L_b$ ,纵坐标轴的截距为无拉伸层流火焰传播速度 $S_l$ 。

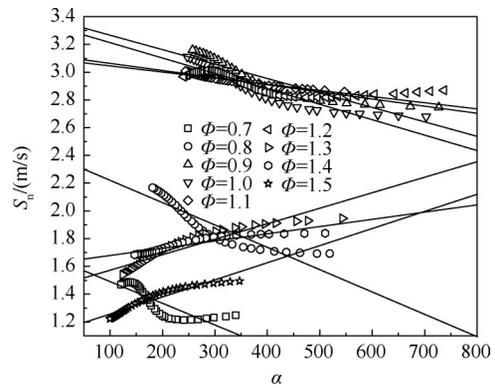


Fig. 6 Variations of stretched flame speed with flame stretched rate (Ja/RP-3=1:1)

如图6所示,当量比为0.7时,拉伸火焰传播速度随火焰拉伸率的增大快速降低,即马克斯坦长度 $L_b > 0$ ;当量比为0.9~1.2时,直线的斜率为负值,即马克斯坦长度 $L_b > 0$ ,与当量比为0.7对比,拉伸火焰传播速度随拉伸率的变化趋势明显放缓,同时纵轴截距(即无拉伸火焰传播速度)也有所增大;在当量比达到1.3~1.5时,拉伸火焰传播速度随火焰拉伸率的增大而增加,此时该工况的直线斜率大于0,即马克斯坦长度 $L_b < 0$ 。

3.2.4 无拉伸层流火焰传播速度与当量比的关系

图7所示为在初始温度 $T$ 为500K,初始压力 $p$ 为0.1MPa,混合燃料无拉伸层流火焰传播速度随当量比的变化关系,并将所得数据与曾文等<sup>[24]</sup>,刘宇等<sup>[28]</sup>,张存杨等<sup>[29]</sup>RP-3航空煤油实验数据进行比较。

如图7所示,在不同当量比下,无拉伸层流火焰传播速度所绘制出的曲线呈二次抛物线形,即无拉伸层流火焰传播速度先增加后减小,且增速逐渐放

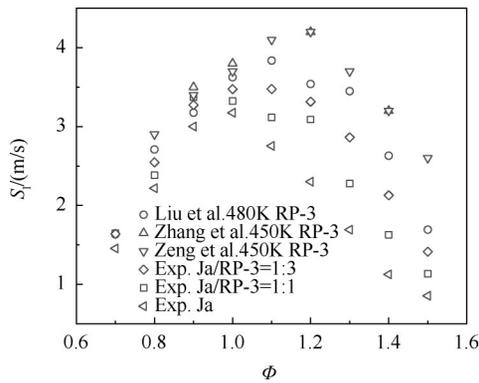


Fig. 7 Variations of unstretched speed with equivalence ratio

缓,直到无拉伸层流火焰传播速度达到最大,之后随当量比增加,无拉伸层流火焰传播速度降低,即当量比在较小和较大的工况下,层流燃烧速度和无拉伸层流火焰传播速度都会减小。不同当量比下,三组对照实验的无拉伸层流火焰传播速度低于RP-3航空煤油,在当量比大于1.0时尤为明显;混合比为1:1的无拉伸层流火焰传播速度比混合比为1:3的略低,纯麻疯树油的无拉伸层流火焰传播速度最低。

### 3.3 燃烧稳定性

图8所示为在初始温度 $T$ 为500K,初始压力 $p$ 为0.1MPa,混合燃料的马克斯坦长度随当量比的变化关系,为验证混合燃料的燃烧稳定性及掺入麻疯树油对其稳定性的影响,将所得数据与曾文等<sup>[24]</sup>,刘宇等<sup>[28]</sup>,张存杨等<sup>[29]</sup>RP-3航空煤油实验数据进行比较。

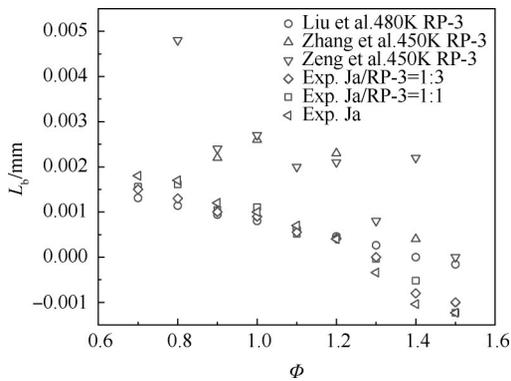


Fig. 8 Variations of Markstein length with equivalence ratio

如图8所示,混合气的马克斯坦长度随当量比的增加而不断减小,当混合气当量比 $<1.2$ 时,马克斯坦长度 $>0$ ,当混合气当量比 $>1.3$ 时,马克斯坦长度 $<0$ 。这反映出混合气在稀薄状态下的火焰锋面比在浓郁状态下稳定,此性质与刘宇,张存杨等<sup>[28-29]</sup>研究得出的RP-3航空煤油等大分子碳氢燃料数据吻合,而

与小分子碳氢燃料相反。这类现象可参照层流燃烧稳定性理论进行解释,即在预混合层流燃烧中,最大扩散系数反应物组分直接影响优先扩散不稳定性。当混合燃料内缺少最大扩散系数的组分,受组分优先扩散的原因,火焰锋面不稳定性增加。在麻疯树油/RP-3航空煤油混合燃料的未燃混合燃料中,扩散系数最大的是 $O_2$ 。随着混合气当量比的增加,未燃气体中 $O_2$ 的占比逐渐降低,因此增强了混合燃料优先扩散不稳定性,燃烧趋于不稳定状态。此外,不同当量比下掺有麻疯树油的混合气的马克斯坦长度略低于曾文等<sup>[24]</sup>、张存杨等<sup>[29]</sup>RP-3航空煤油数据,在大当量比时低于刘宇等<sup>[28]</sup>RP-3航空煤油数据;三组对照实验的马克斯坦长度差异不大。得出结论,麻疯树油的添加轻微降低了火焰稳定性。

## 4 结论

本文通过对麻疯树油/RP-3航空煤油混合燃料燃烧特性进行研究,获得如下结论:

(1)不同混合比的混合燃料火焰传播过程受当量比影响较大。在当量比为0.7~1.3时,火焰传播较为稳定,火焰锋面比较光滑;在当量比增至1.3~1.5时,火焰锋面出现大量裂纹、胞状结构和微型火团。这与其他大分子碳氢燃料表现出来的燃烧性质相似。

(2)在初始温度和初始压力一定时,不同混合比的混合燃料的无拉伸层流火焰传播速度随当量比先增加后减小,在当量比为0.9~1.0附近时,无拉伸层流火焰传播速度达到最大值。与RP-3航空煤油相比,麻疯树油的添加使燃料的无拉伸层流火焰传播速度在当量比 $<1.0$ 时轻微降低,在当量比 $>1.0$ 时显著降低。

(3)在初始温度和初始压力一定时,不同混合比的混合燃料的马克斯坦长度随当量比增大而减小。在当量比为0.7~1.2时,马克斯坦长度为正值,燃烧趋于稳定;在当量比为1.3~1.5时,马克斯坦长度为负值,燃烧趋于不稳定。与RP-3航空煤油相比,麻疯树油的添加轻微减小了马克斯坦长度,即轻微降低了火焰稳定性。

致谢:感谢国家自然科学基金资助。

### 参考文献:

- [1] Alice B, Kevin A, Paul P. Air Transport, Climate Change and Tourism [J]. *Tourism and Hospitality Planning & Development*, 2009, 6(1): 7-20.

- [ 2 ] Kerr R A. Global Warming is Changing the World [J]. *Science*, 2007, 316(5822): 188–190.
- [ 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.
- [ 4 ] Kalscheuer R, Stölting T, Steinbüchel A. Microdiesel: Escherichia Coli Engineered for Fuel Production [J]. *Microbiology*, 2006, 152(9): 2529–2536.
- [ 5 ] 王 晋. 民航“航油梦”——关于民航生物航油新技术[J]. *中国民用航空*, 2013, (10): 57–58.
- [ 6 ] 陈 放, 徐 莺, 唐 琳, 等. 麻疯树生物柴油研究和开发进展[J]. *生物产业技术*, 2009, (5): 54–60.
- [ 7 ] Casey A, Daniel V, Elisa T, et al. Ignition Behavior and Surrogate Modeling of JP-8 and of Camelina and Tallow Hydrotreated Renewable Jet Fuels at Low Temperatures [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(2): 232–239.
- [ 8 ] Cheng T C, Simone H. Measurements of Laminar Flame Speeds of Liquid Fuels: Jet A-1, Diesel, Palm Methyl Esters and Blends Using Particle Imaging Velocity (PIV) [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(1): 979–986.
- [ 9 ] Xin H, Kamal K, Chih-Jen S, et al. Experimental Studies on the Combustion Characteristic of Alternative Jet Fuels [J]. *Fuel*, 2012, 98(8): 176–182.
- [ 10 ] Rehman A, Phalke D R, Pandey R. Alternative Fuel for Gas Turbine: Esterified Jatropa Oil-Diesel Blend [J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(10): 2635–2640.
- [ 11 ] Klingshirn C D, Dewitt M, Striebich R, et al. Hydro-processed Renewable Jet Fuel Evaluation, Performance, and Emissions in a T63 Turbine Engine [R]. *ASME 2011-GT-46572*.
- [ 12 ] Sivakumar D, Vankeswaram S K, Sakthikumar R, et al. An Experimental Study on Jatropa-Derived Alternative Aviation Fuel Sprays from Simplex Swirl Atomizer [J]. *Fuel*, 2016, 179(3).
- [ 13 ] Kick Th, Herbst J, Kathroia T, et al. An Experimental and Modeling Study of Burning Velocities of Possible Future Synthetic Jet Fuels [J]. *Energy*, 2012, 43(1): 111–123.
- [ 14 ] Mawid M A. Development of a Detailed Chemical Kinetic Mechanism for JP-8 & Fisher-Tropsch Derived Synthetic Jet Fuels [R]. *AIAA 2007-5668*.
- [ 15 ] Dagaut P, Gail S. Kinetics of Gas Turbine Liquid Fuels Combustion: Jet A1 and Biokerosene [R]. *ASME 2007-GT-27145*.
- [ 16 ] Dagaut P, Karsenty F, Dayma G, et al. Experimental and Detailed Kinetic Model for the Oxidation of a Gas to Liquid (GtL) Jet Fuel [J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(3): 835–847.
- [ 17 ] Saffaripour M, Veshkini A, Kholghy M T. Experimental Investigation and Detailed Modeling of Soot Aggregate Formation and Size Distribution in Laminar Diffusion Flames of Jet A-1, a Synthetic Kerosene, and N-Decane [J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(3): 848–863.
- [ 18 ] 耿莉敏, 曹建明, 王 磊, 等. 生物柴油/柴油混合燃料喷雾特性[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2009, 29(3): 89–92.
- [ 19 ] 姚春德, 段 峰, 李云强, 等. 柴油/甲醇组合燃烧发动机的燃烧特性与排放[J]. *燃烧科学与技术*, 2005, 11(3): 214–217.
- [ 20 ] WEI Lijiang, YAO Chunde, WANG Quangang, et al. Combustion and Emission Characteristics of a Turbo-charged Diesel Engine Using High Preblended Ratio of Methanol and Diesel Fuel [J]. *Fuel*, 2015, 140(1): 156–163.
- [ 21 ] WEI Liangjie, Cheung C S, HUANG Zuohua. Effect of N-Pentanol Addition on the Combustion, Performance and Emission Characteristics of a Direct-Injection Diesel Engine [J]. *Energy*, 2014, 70(6): 172–180.
- [ 22 ] 常 敏, 王 芳. 边际土地麻疯树柴油生产与碳减排潜力测算研究[J]. *可再生能源*, 2018, 36(3): 325–333.
- [ 23 ] 张 旭, 陈玉保, 高燕妮, 等. 麻疯树油一步加氢催化制备生物航空煤油[J]. *中国油脂*, 2018, 43(1): 48–51.
- [ 24 ] 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.
- [ 25 ] Bradley D, Gaskell P H, Gu X J. Burning Velocities, Markstein Numbers, and Flame Quenching for Spherical Methane-Air Flames: a Computational Study [J]. *Combustion and Flame*, 1996, 104(3): 176–198.
- [ 26 ] Huang Z H, Wang Q, Yu J R, et al. Measurement of Laminar Burning Velocity of Dimethyl Ether-Air Premixed Mixtures [J]. *Fuel*, 2007, 86(15): 2360–2366.
- [ 27 ] Burke M P, Chen Z, Ju Y, et al. Effect of Cylindrical Confinement on the Determination of Laminar Flame Speeds Using Outwardly Propagating Flame [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(4): 771–779.
- [ 28 ] 刘 宇, 孙 震, 罗 睿, 等. CH<sub>4</sub>/RP-3航空煤油混合燃料燃烧特性的实验研究[J]. *推进技术*, 2018, 39(5): 1177–1186. (LIU Yu, SUN Zhen, LUO Rui, et al. Experimental Study on Combustion Characteristics of CH<sub>4</sub>/RP-3 Kerosene Blended Fuel [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(5): 1177–1186.)
- [ 29 ] 张存杨, 曾 文, 陈保东, 等. RP-3航空煤油层流燃烧特性的影响因素[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(1): 182–192.