

初始温度对CH₄/RP-3航空煤油混合燃料 层流燃烧特性的影响

刘宇¹, 孙震¹, 汤卓¹, 刘蕴文², 赵欢¹, 曾文¹

(1. 沈阳航空航天大学 发动机学院, 沈阳 110136;

2. 北方测盟科技有限公司, 沈阳 110042)

摘 要: 采用定容燃烧实验装置对初始压力为0.1 MPa、当量比为0.7~1.5、甲烷体积分数为0、0.4和0.8,以及3种初始温度工况下,CH₄/RP-3航空煤油混合燃料层流燃烧特性进行实验研究。获得混合燃料火焰发展图片、层流燃烧速度和马克斯坦长度等,并分析初始温度对CH₄/RP-3航空煤油混合燃料层流燃烧速度及燃烧稳定性的影响。结果表明,当火焰拉伸率趋于0时,非线性拟合方法NLM2(nonlinear fitting method 2)能够准确预测拉伸火焰传播速度随火焰拉伸率变化规律,外推可获得较为准确的无拉伸火焰传播速率。初始温度对稀混合燃料火焰传播速度的影响较大,而对化学当量比和浓混合燃料火焰传播速度的影响较小。3种甲烷体积分数混合燃料的层流燃烧速度均随初始温度增加而增加。当初始温度为420 K时,马克斯坦长度随当量比减小最快,而当初始温度为480 K时,马克斯坦长度减小最慢。在稀混合气和化学当量比工况,随着初始温度增加,混合燃料马克斯坦长度减小,混合燃料燃烧稳定性变差,而在浓混合气工况,各初始温度马克斯坦长度趋于一致,此时,初始温度增加对燃烧稳定性影响较小。

关 键 词: 混合燃料; 层流燃烧速度; 马克斯坦长度; 火焰拉伸率; 燃烧稳定性

中图分类号: V231; TK401

文献标志码: A

Effects of initial temperature on the laminar combustion characteristics of CH₄/RP-3 mixed fuel

LIU Yu¹, SUN Zhen¹, TANG Zhuo¹, LIU Yunwen²,

ZHAO Huan¹, ZENG Wen¹

(1. Faculty of Aero Engine,

Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. North China Metrology Accreditation Technology Company Limited,
Shenyang 110042, China)

Abstract: The laminar combustion characteristics of CH₄/RP-3 mixed fuel were studied in a constant volume chamber at initial pressures of 0.1 MPa, equivalence ratios of 0.7—1.5, methane volume fraction of 0, 0.4, 0.8 and three initial temperatures. The flame propagation photos, laminar burning velocity and Markstein length were obtained, and the effects of initial temperature on laminar burning velocity and combustion stability of CH₄/RP-3 mixed fuel were analyzed. The results showed that when the flame stretch was close to 0, the non-

收稿日期: 2018-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(51606129); 国家自然科学基金(51676132); 辽宁省教育厅一般项目(L2016029)

作者简介: 刘宇(1983—),男,副教授,博士后,主要从事航空发动机燃料燃烧实验与化学反应机理研究。

通讯作者: 曾文(1977—),男,教授,博士后,主要从事航空发动机燃烧过程与排放物生成的数值研究。E-mail: zengwen928@sohu.com

引用格式: 刘宇,孙震,汤卓,等. 初始温度对CH₄/RP-3航空煤油混合燃料层流燃烧特性的影响[J]. 航空动力学报,2019,34(2): 348-356. LIU Yu, SUN Zhen, TANG Zhuo, et al. Effects of initial temperature on the laminar combustion characteristics of CH₄/RP-3 mixed fuel[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(2): 348-356.

linear fitting method NLM2 can well predict the change of stretched flame speed with varying stretch rate, and extrapolation can obtain more accurate unstretched flame speed. The initial temperature had a great influence on the flame propagation velocity of lean mixed fuels, but little effect for chemical equivalent ratio or concentrated mixtures. The laminar burning velocities of CH₄/RP-3 mixed fuel with three methane volume fractions increased with the growing initial temperature. When the initial temperature was 420 K, Markstein length reduced fastest with the increase of equivalence ratio, and when the initial temperature was 480 K, Markstein length reduced slowest with the increase of equivalence ratio. Under lean and stoichiometric mixture conditions, with the increase of initial temperature, Markstein length decreased and combustion stability became worse. Under rich mixture condition, Markstein length with different initial temperatures tended to the same, and the effects of initial temperature on combustion stability was small.

Key words: mixed fuel; laminar burning velocity; Markstein length; flame stretch rate; combustion stability

近几年,随着石油资源日趋紧缺以及全球航空燃油需求不断增长,石油价格持续上涨,与此同时,随着全球温室效应加剧,航空煤油等化石燃料的使用也将面临巨大的环保压力。因此,为减少对化石燃料的依赖、实现航空减排,寻求可持续开发的航空燃料替代品已成为全球航空业的当务之急^[1-3]。

LNG(liquefied natural gas)主要成分是甲烷(CH₄),由于CH₄具有存储丰富、价格便宜、燃烧排放少等诸多优势,LNG有望成为航空业节能减排、实现可持续发展的有效替代燃料^[4]。然而,LNG作为航空替代燃料也存在问题,如LNG气化后体积热值显著降低,CH₄燃点高、火焰传播速度慢等^[5-6]。因此,目前研究人员普遍采用LNG/航空煤油混合燃料作为航空煤油替代燃料。同时,拟开展LNG/航空煤油混合燃料着火与燃烧特性研究。

LNG是将天然气干燥脱酸处理后,经低温液化所形成的一种液态燃料。其主要成分为甲烷(96%以上)、乙烷、氮气及少量C₃~C₅烷烃。因此,对LNG/航空煤油混合燃料着火与燃烧特性的研究可通过CH₄/航空煤油混合燃料着火与燃烧特性实现。

航空煤油燃烧特性主要包括其层流燃烧速度等,是设计航空发动机的重要依据。目前,国内外学者已对多种航空煤油(Jet-A、JP-8、JP-10、RP-3)的燃烧特性开展大量研究^[7-10]。Kumar等^[7]采用对冲火焰法对初始压力为101325 Pa、初始温度为400、450 K和470 K、当量比为0.8~1.4范围Jet-A/空气混合气的层流燃烧速度进行研究。结

果发现,不同初始温度混合气最大层流燃烧速度均出现在当量比为1.1附近,且混合气层流燃烧速度峰值随初始温度增加而增加。Vukadinovic等^[8]在定容燃烧弹中完成了初始压力0.1、0.2、0.4、0.6 MPa和0.8 MPa、初始温度为373、423 K和473 K、当量比为0.67~1.43范围Jet A-1/air混合气的燃烧特性实验。研究发现,在当量比0.67~1.43范围内,随着初始温度增加,混合气层流燃烧速度增加。另外,初始温度由373 K增加到423 K时,马克斯坦长度增加,混合气燃烧趋于稳定,而当初始温度由423 K增加到473 K时,初始温度增加对马克斯坦长度影响较小。Far等^[9]在定容燃烧弹中对JP-8/空气混合气在初始压力为(1~6)×101.325 kPa、温度范围500~700 K、当量比为0.8~1.0条件下的燃烧特性进行了实验研究。研究发现,混合气层流燃烧速度随未燃混合气温度的增加而增加。曾文等^[10]在定容燃烧弹中测量了初始压力为0.1~0.7 MPa、初始温度为390~450 K、当量比为0.6~1.6范围的RP-3航空煤油层流燃烧速度和马克斯坦长度,并分析了初始温度对火焰发展结构、层流燃烧速度及马克斯坦长度的影响。随着混合气初始温度的升高,火焰锋面均较为光滑,火焰稳定性受初始温度影响不大。上述研究表明,初始温度影响层流燃烧速度和马克斯坦长度,初始温度增加使航空煤油混合气层流燃烧速度增加,但初始温度对航空煤油混合气马克斯坦长度影响尚无统一结论。

目前,国内外研究多集中在航空煤油单组份燃料燃烧特性上,尚无针对CH₄/RP-3航空煤油混合燃料燃烧特性的研究。另外,在航空发动机

中,压缩过程终了时的总温为 479~820 K,燃烧室出口的气流总温为 1400~1950 K,故在宽广范围内探讨温度对航空煤油燃烧特性的影响,对设计航空发动机具有重要意义。基于此,本文拟开展初始压力为 0.1 MPa,初始温度为 420、450 K 和 480 K,当量比为 0.7~1.5、甲烷体积分数为 0~0.8 下 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料燃烧特性研究,并着重分析初始温度对混合燃料层流燃烧速度和燃烧稳定性的影响。

1 实验装置

本文所采用定容燃烧实验装置如图 1 所

示^[11],该装置包括定容燃烧弹本体、进气系统、加热系统、点火系统、高速摄影系统、数据采集与处理系统等。如图 2 所示,定容燃烧弹本体采用不锈钢材料加工而成,内腔为圆柱型,直径为 180 mm,容积约为 5.5 L。弹体内布置中心点火电极,弹体外装有压力变送器、温度传感器、液体燃料注射阀等,弹体两端装有厚 80 mm、直径 130 mm 石英玻璃视窗。本实验将采用背影法拍摄 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料火焰发展照片,高速摄像机(Phantom v611)拍摄速度设为 10 000 幅/s。

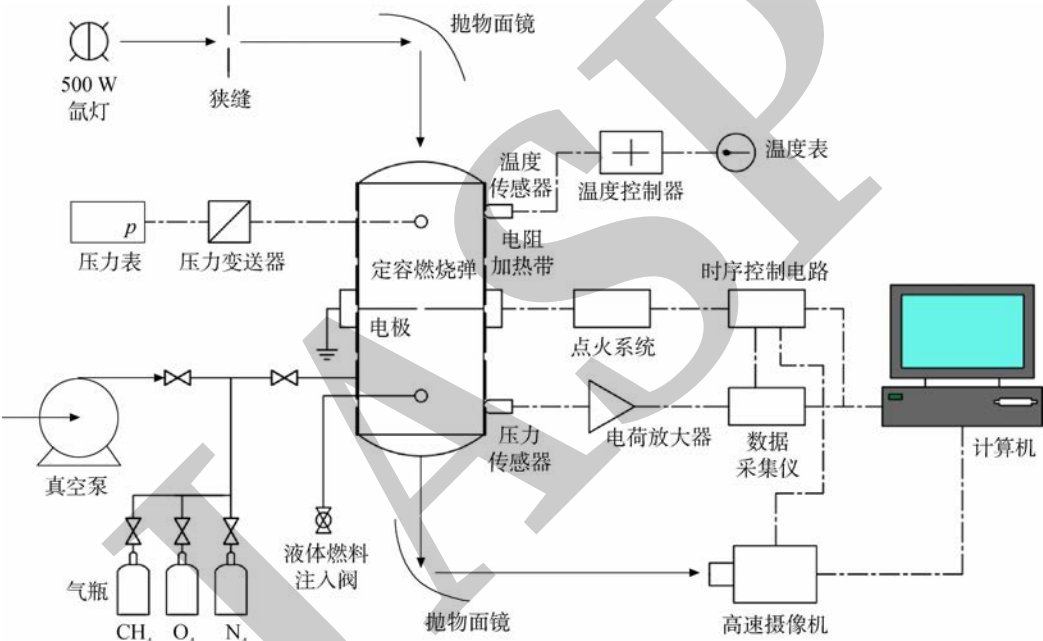


图 1 定容燃烧实验装置图

Fig. 1 Experimental diagram of constant volume combustion

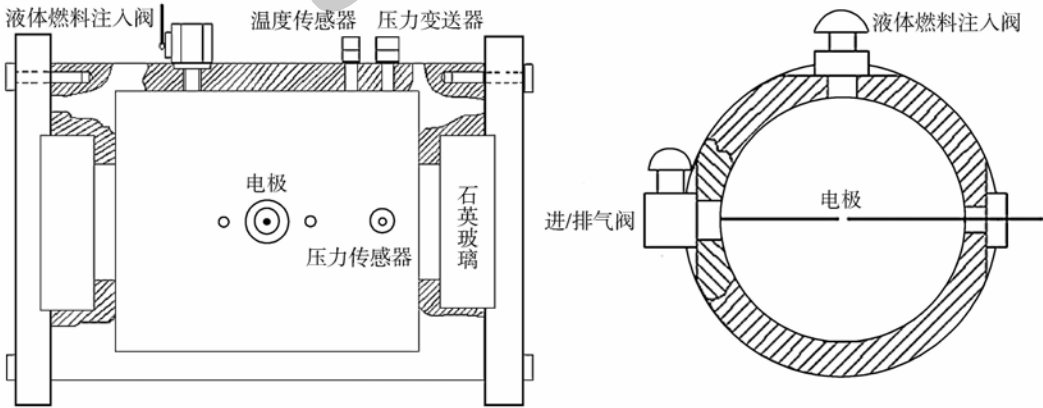


图 2 定容燃烧弹剖面图

Fig. 2 Cross-section view of constant volume chamber

2 实验方法

RP-3 航空煤油因产地不同成分略有差异,对本文所采用 RP-3 航空煤油进行色谱-质谱分析,确定其组成成分,如表 1 所示。实验中,首先根据 RP-3 航空煤油平均分子式 C_{10.45}H_{19.595}(由 RP-3 航空煤油物性分析得到^[12])与 CH₄ 化学分子式以及 RP-3 航空煤油和 CH₄ 的化学反应方程式计算出各当量比和甲烷体积分数下 RP-3 航空煤油、CH₄、O₂ 和 N₂ 的摩尔分数。然后由分压定律计算 CH₄/RP-3/空气混合气各组分分压,并根据真空度和初始压力制定配气表。

表 1 国产 RP-3 航空煤油组成成分表
Table 1 Composition of RP-3 aviation kerosene

成分		体积分数/%
饱和碳氢化合物	烷烃	52.2
	单循环环烷烃	33.8
	双循环环烷烃	6.0
	多环环烷烃	0.1
芳香烃碳氢化合物	烷基苯	5.1
	四氢化萘	1.3
	萘	0.6
	萘衍生物	0.9

配气表中 RP-3 航空煤油分压是其气态分压,而实验时 RP-3 航空煤油是以液态形式注入到定容燃烧弹中。因此,为确定 RP-3 航空煤油注入量,还需将其气态分压换算成液态体积。配气时,首先向定容燃烧弹中注入液态 RP-3 航空煤油,此时,由于容弹已抽真空,压力极低,RP-3 航空煤油注入后将迅速气化。待容弹内压力升高至其配气表分压或接近至误差满足要求时,可视为 RP-3 航空煤油完全气化,随后依次向容弹充入 CH₄、O₂ 和 N₂。混合气各组分充入容弹后,为使其完全预混,还需将容弹静置一段时间,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。图 3 为某工况测得无拉伸火焰传播速度 S_l 随静置时间 t 变化规律。如图 3 所示,随静置时间的延长,无拉伸火焰传播速度逐渐降低,当静置时间超过 8 min 后,CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料无拉伸火焰传播速度稳定在固定值。此时,静置时间增加对无拉伸火焰传播速度影响很小。本文选择静置时间为 10 min。

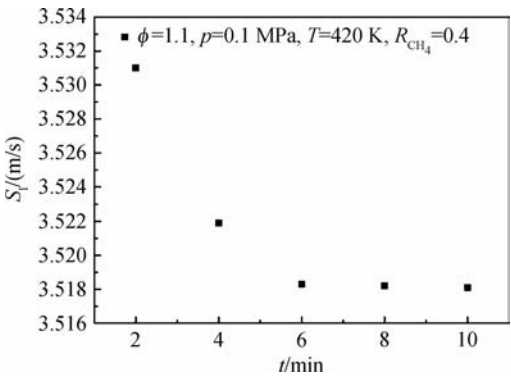


图 3 无拉伸火焰传播速度随静置时间变化规律
Fig. 3 Variation of unstretched flame speed versus standing time

本文拟开展 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料层流燃烧特性研究,其中,甲烷体积分数为

$$\varphi_{\text{CH}_4} = \frac{V_{\text{CH}_4}}{V_{\text{RP-3}} + V_{\text{CH}_4}} \tag{1}$$

式中 V_{CH₄} 表示混合燃料完全气化后甲烷的体积, V_{RP-3} 表示混合燃料完全气化后 RP-3 航空煤油的体积。

CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料当量比为

$$\phi = \frac{F/A}{(F/A)_{\text{st}}} \tag{2}$$

因此,不同甲烷体积分数和当量比工况下 CH₄/RP-3 混合燃料反应物组分可表示为

$$(1 - \varphi_{\text{CH}_4}) \cdot \text{C}_{10.45}\text{H}_{19.595} + \varphi_{\text{CH}_4} \cdot \text{CH}_4 + \left[\frac{15.34875}{\phi} (1 - \varphi_{\text{CH}_4}) + \frac{2\varphi_{\text{CH}_4}}{\phi} \right] \cdot (\text{O}_2 + 3.762\text{N}_2) \tag{3}$$

3 实验原理

对于球形扩散火焰,火焰半径对时间的变化率即为拉伸火焰传播速度 S_n^[13]

$$S_n = \frac{dr}{dt} \tag{4}$$

式中 r 为火焰半径, t 为时间。

火焰拉伸率 α 为火焰表面上一个无限小面积的对数值对时间的变化率

$$\alpha = \frac{d(\ln A)}{dt} = \frac{dA}{A \cdot dt} \tag{5}$$

式中 A 为火焰前锋面积。

如果燃烧火焰为球形扩散火焰,运用球形的面积公式,式(5)还可以表示为

$$\alpha = 2 \cdot dr / (r \cdot dt) = \frac{2S_n}{r} \tag{6}$$

由马克斯坦理论可知,球形扩散火焰的无拉

伸层流火焰传播速度 S_l 与拉伸层流火焰传播速度 S_n 之间存在如下线性拟合关系

$$S_l - S_n = -L_b \alpha \tag{7}$$

S_l 由线性外推得到,斜率代表马克斯坦长度。另外,无拉伸层流火焰传播速度 S_l 与拉伸层流火焰传播速度 S_n 之间也存在由 Frankel 和 Chen 等^[14-15]提出的非线性拟合关系

$$S_n = S_l - S_l L_b \frac{2}{r} \tag{8}$$

同时,由 Ronney 和 Kelley 等^[16-17]提出的另一种非线性拟合关系

$$\left(\frac{S_n}{S_l}\right) \ln\left(\frac{S_n}{S_l}\right) = -\frac{2L_b}{r} \tag{9}$$

将式(6)分别代入式(8)和式(9)中,可获得 S_n 与 α 的两种非线性拟合关系

$$S_n = S_l - S_l L_b \frac{\alpha}{S_n} \tag{10}$$

$$\left(\frac{S_n}{S_l}\right) \ln\left(\frac{S_n}{S_l}\right) = -\frac{L_b \alpha}{S_n} \tag{11}$$

其中 L_b 为马克斯坦长度。

式(7)、式(10)和式(11)拟合方法分别称作 LM、NLM1 和 NLM2,本文将首先对比 LM、NLM1 和 NLM2 拟合方法,确定最为准确的 S_l 值。然后根据在火焰前锋面上的质量守恒

$$A \rho_u u_l = A \rho_b S_l \tag{12}$$

获得层流燃烧速度 u_l

$$u_l = (\rho_b S_l) / \rho_u \tag{13}$$

式中 ρ_u 与 ρ_b 分别为未燃区与已燃区混合气的密度,由化学反应动力学软件 CHEMKIN-PRO 计算得到,计算中采用刘宇等^[18]修正的 RP-3 航空煤油 3 组分替代燃料燃烧反应机理,该机理由 150 种组分和 591 个基元反应组成。

4 数据处理方法

层流燃烧速度受未燃气体温度、压力以及燃气物性和当量比等诸多变量影响。求取一定条件下的层流火焰燃烧速度,只有在未燃区气体温度和压力变化很小的情形下才可能进行。胡二江、Liu 等^[19-20]研究表明火焰半径为 6~25 mm 时,火焰受初始点火能量及边界压力升高的影响微弱。本文对同一工况进行 3 次点火实验,采用自开发软件 cmcmark1.04 测量火焰半径并进行光顺和拟合处理。图 4 所示为火焰锋面的测量过程,图 5 为拉伸火焰传播速度随火焰半径变化曲线,火焰半径选择范围为 6~50 mm。从图 5 中可以看出,在初始压力为 0.1 MPa、初始温度为 420、

450 K 和 480 K、当量比为 1.0、甲烷体积分数为 0.4 工况下,拉伸火焰传播速度随火焰拉伸率变化曲线在火焰半径为 27~30 mm 范围内出现明显拐点,说明边界压力升高对火焰发展的影响开始变得显著,这与胡二江等人确定的 25 mm 火焰半径较为一致。本文将采用火焰半径为 6~27 mm 范围内图片进行处理分析。

图 6 采用式(7)、式(10)和式(11)对图 5 中 3

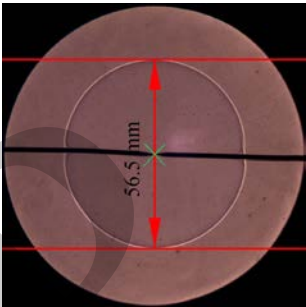


图 4 火焰锋面的测量
Fig. 4 Measurement of flame front

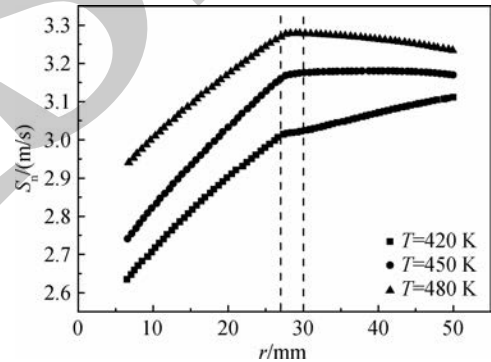


图 5 拉伸火焰传播速度随火焰半径变化曲线
Fig. 5 Variation of stretched flame speed versus flame radius

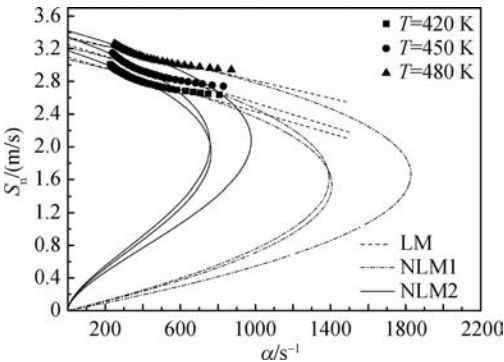


图 6 3 种线性及非线性拟合对比
Fig. 6 Comparison of 3 linear and nonlinear fitting methods

种工况在火焰半径为 6~27 mm 范围内拉伸火焰传播速度与火焰拉伸率进行线性及非线性拟合,并外推至 $\alpha=0\text{ s}^{-1}$ 处,获得无拉伸层流火焰传播速度。从图 6 中可以看出,随着火焰拉伸率减小,无拉伸火焰传播速度显著增加,两者很难再维持线性关系,随着火焰拉伸率进一步减小,由式(11)获得的非线性拟合关系最符合无拉伸火焰传播速度的变化趋势,因此本文将采用式(11)进行拟合。

图 7 为本文测量的初始温度为 420 K、初始压力为 0.1 MPa 工况 RP-3 航空煤油层流燃烧速度与相似工况文献实验数据对比图。本文实验数据与 Kumar 等^[7] 和 Vukadinovic^[8] 等吻合良好,说明对于不同种类航空煤油,由于化学组成相似,层流燃烧速度基本相同。同时,实验数据的吻合也验证了本文实验数据的准确性。另外,从图 7 中可以看到,本文实验数据只与曾文等^[10] 实验数据差异较大。分析可知,曾文等在实验和数据处理过程中,采用 C₁₀ H₂₂ 作为 RP-3 航空煤油平均分子式,这使得配气表及密度比存在一定误差,导致其实验结果偏差较大。

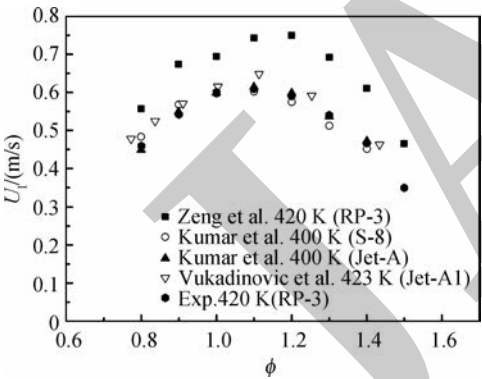


图 7 航空煤油层流燃烧速度对比

Fig. 7 Comparison of linear burning velocities of kerosene

5 实验结果分析

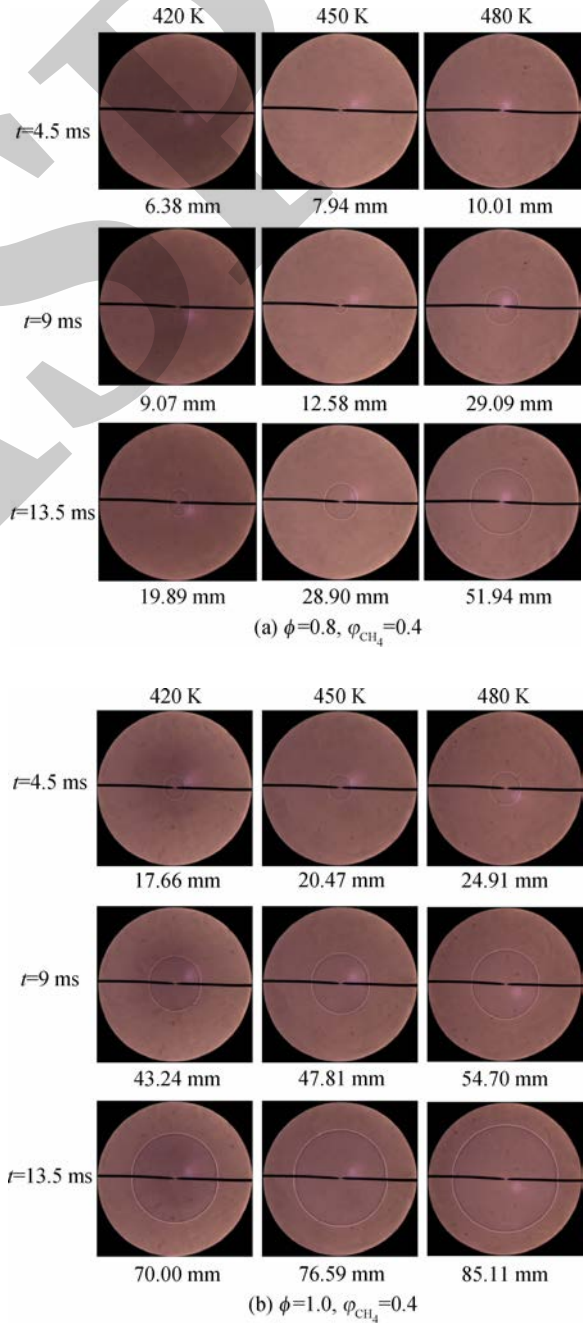
5.1 初始温度对混合燃料火焰传播速度的影响

图 8 为在初始压力为 0.1 MPa、甲烷体积分数为 0.4,当量比为 0.8、1.0 和 1.2、初始温度为 420、450 K 和 480 K 工况下 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料火焰发展图片。如图 8 所示,所有图片均未出现明显胞状结构,说明混合燃料燃烧后火焰较为稳定。另外,对比同一时刻、不同初始温度的火焰半径发现,在当量比为 0.8 时,初始温度变化对火焰传播速度影响较大,随着初始温度增加,

火焰传播速度显著增加。在当量比为 1.0 时,初始温度变化对火焰传播速度影响变小,不同初始温度的火焰传播速度差异并不明显。而当当量比为 1.2 时,初始温度变化对火焰传播速度影响更小,初始温度为 450 K 和 480 K 混合燃料火焰传播速度基本一致。综上分析可知,对于稀混合燃料,初始温度对火焰传播速度的影响较大,而对于化学当量比和浓混合燃料,初始温度对火焰传播速度的影响较小。

5.2 初始温度对混合燃料层流燃烧速度的影响

由火焰发展图片获得火焰传播速度,进而采用非线性拟合式(11)对拉伸火焰传播速率外推至



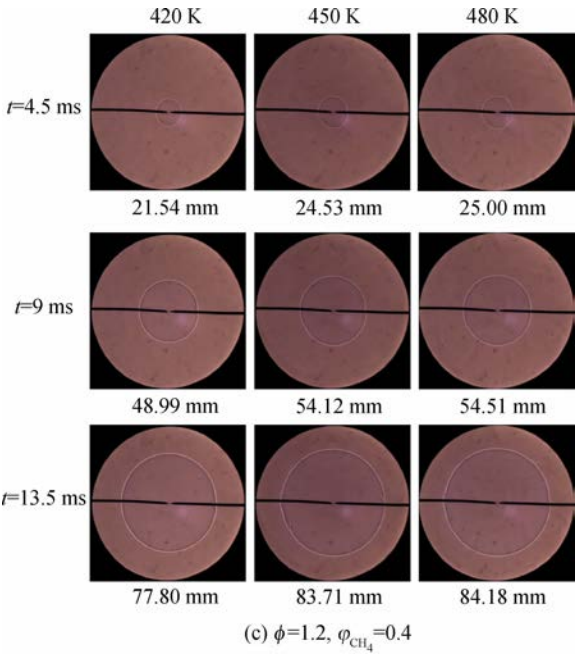


图 8 初始温度对 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料火焰传播速度的影响

Fig. 8 Effect of initial temperature on flame propagation speed of CH₄/RP-3 mixture

$\alpha=0\text{ s}^{-1}$ 处,得到无拉伸火焰传播速率,并根据式(13)计算层流燃烧速度。图 9 显示当初始压力为 0.1 MPa 时,甲烷体积分数分别为 0(纯 RP-3 航空煤油)、0.4 和 0.8 工况下,初始温度增加对 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料层流燃烧速度的影响。如图 9 所示,3 种甲烷体积分数混合燃料的层流燃烧速度均随当量比增加呈现出先增加后减小趋势,且层流燃烧速度峰值出现在当量比为 1.1 附近,说明略浓混合燃料的层流燃烧速度最大,这与理论相符。另外,3 种甲烷体积分数混合燃料的层流燃烧速度均随初始温度增加而增加。众所周知,绝热火焰温度是影响层流燃烧速度的重要因素。初始温度增加导致混合燃料绝热火焰温度相应增加,提高了分子平均动能,使活性自由基更为活跃,活性自由基从燃烧反应区跳跃到未燃区,提高了未燃区链式反应速率,从而导致层流燃烧速度的增加。

结合图 9(a)~图 9(c),分析甲烷体积分数对混合燃料层流燃烧速度的影响发现,在不同初始温度下,随着甲烷体积分数增加,层流燃烧速度均降低,由化学动力学分析可知,CH₄ 体积分数增加对 $\text{H}+\text{CH}_3(+\text{M})\rightleftharpoons\text{CH}_4(+\text{M})$ 基元反应抑制作用增加是影响混合燃料层流燃烧速度的主要原因,另外,随着甲烷体积分数增加,H、O 和 OH 等自由基浓度降低也将导致混合燃料层流燃烧度降低^[21]。

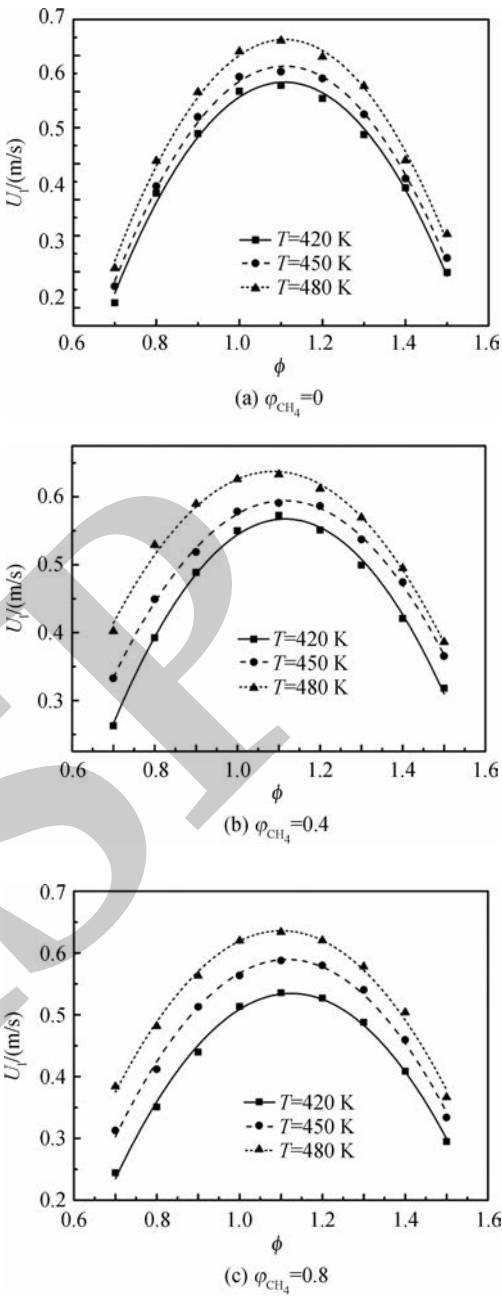


图 9 初始温度对 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料层流燃烧速度的影响

Fig. 9 Effect of initial temperature on laminar burning velocity of CH₄/RP-3 mixture

5.3 初始温度对混合燃料燃烧稳定性的影响

图 10 显示当初始压力为 0.1 MPa 时,甲烷体积分数分别为 0、0.4 和 0.8 工况下,初始温度增加对 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料马赫斯坦长度的影响。马赫斯坦长度是表征火焰本身固有属性对锋面上扰动响应的参数。当光滑的火焰锋面出现小扰动时,若马赫斯坦长度为正,火焰传播速率将比未受扰动时低,从而抑制了火焰锋面的小扰动,火焰趋于稳定;反之,若马赫斯坦长度为负,则

受扰动处火焰传播速率比未扰动时加快,从而加速了扰动,火焰锋面趋于不稳定。本文马克斯坦长度采用非线性拟合式(11)求得。

如图 10 所示,3 种甲烷体积分数混合燃料的马克斯坦长度均随当量比增加而减小,说明随着当量比增加,混合燃料燃烧稳定性变差。但不同初始温度马克斯坦长度随当量比增加而减小趋势略有不同。由马克斯坦长度拟合曲线可知,当初始温度为 420 K 时,曲线斜率最大,马克斯坦长度随当量比减小最快,而当初始温度为 480 K 时,马克斯坦长度减小最慢。另外,在稀混合气和化学当量比工况,随着初始温度增加,混合燃料马克斯坦长度减小,说明初始温度增加导致混合燃料燃烧稳定性变差,而在浓混合气工况,各初始温度马克斯坦长度趋于一致,此时,初始温度增加对燃烧稳定性影响较小。

研究表明,影响燃烧稳定性的因素主要包括体积力、流体动力学和热扩散因素。如图 8 所示,各工况预混火焰均未出现明显上浮,因此,可排除体积力对燃烧不稳定性影响。密度比和火焰厚度是影响流体动力学不稳定性的主要参数,随着初始温度增加,稀混合气、化学当量比和浓混合气的密度比均呈减小趋势,但稀混合气、化学当量比和

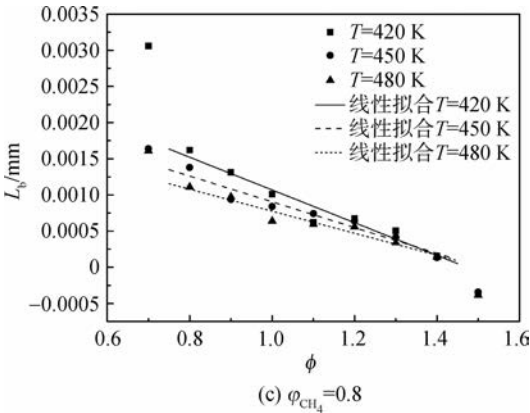


图 10 初始温度对 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料马克斯坦长度的影响

Fig. 10 Effect of initial temperature on Markstein length of CH₄/RP-3 mixture

浓混合气的火焰厚度变化趋势不同,稀混合气火焰厚度随初始温度增加而减小,而化学当量比和浓混合气火焰厚度会随初始温度增加而增加。结合图 10 可知,各当量比 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料火焰厚度随初始温度的变化规律是影响其燃烧稳定性的主要因素。

6 结 论

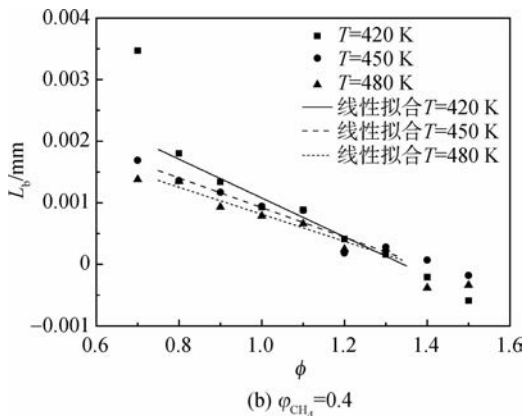
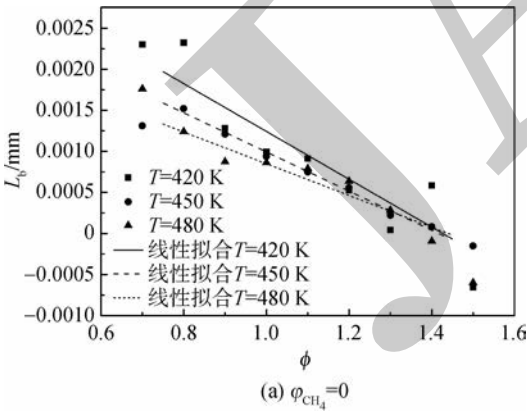
本文采用定容燃烧实验装置获得初始压力为 0.1 MPa、当量比为 0.7~1.5、甲烷体积分数为 0~0.8,初始温度为 420、450 K 和 480 K 工况下 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料火焰发展图片、层流燃烧速度和马克斯坦长度等,并分析初始温度对混合燃料燃烧特性影响,得到如下结论:

1) 比较 3 种线性及非线性拟合方法可知,当火焰拉伸率趋于 0 时,非线性拟合方法 NLM2 能够准确预测拉伸火焰传播速度随火焰拉伸率变化规律,外推可获得较为准确的无拉伸火焰传播速率。

2) 由火焰发展图片可知,在当量比 0.8 时,初始温度变化对火焰传播速度影响较大,随着初始温度增加,火焰传播速度显著增加,而在当量比 1.0 和 1.2 时,初始温度变化对火焰传播速度影响变小。

3) 不同工况混合燃料层流燃烧速度峰值均出现在当量比 1.1 附近,3 种甲烷体积分数混合燃料层流燃烧速度均随初始温度增加而增加,且在 3 种初始温度下,层流燃烧速度均随着甲烷体积分数增加而降低。

4) 在稀混合气和化学当量比工况,随着初始



温度增加,混合燃料马克斯坦长度减小,混合燃料燃烧稳定性变差,而在浓混合气工况,各初始温度马克斯坦长度趋于一致,此时,初始温度增加对燃烧稳定性影响较小。

参考文献:

[1] 柴建,张钟毓,李新,等. 中国航空燃油消费分析及预测[J]. 管理评论,2016,28(1):11-21.
CHAI Jian,ZHANG Zhongyu,LI Xin,et al. Analysis and forecast of aviation fuel consumption in China[J]. Management Review,2016,28(1):11-21. (in Chinese)

[2] 杨万柳. 国际航空排放全球治理的国际视域:以国际民航组织为中心[J]. 北京理工大学学报(社会科学版),2015,17(4):123-128.
YANG Wanliu. The international perspective of global governance on international aviation emissions:centering on ICAO[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition),2015,17(4):123-128. (in Chinese)

[3] ZHANG C,HUI X,LIN Y Z,et al. Recent development in studies of alternative jet fuel combustion:progress,challenges,and opportunities[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,54:120-138.

[4] WITHERS M R,MALINA R,GILMORE C K. Economic and environmental assessment of liquefied natural gas as a supplemental aircraft fuel[J]. Progress in Aerospace Sciences,2014,66:17-36.

[5] PEREIRA S R,FONTES T,COELHO M C. Can hydrogen or natural gas be alternatives for aviation?:a life cycle assessment[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2014,39(25):13266-13275.

[6] YAHYAOU I M. The use of LNG as aviation fuel:combustion and emissions[R]. AIAA-2015-3730,2015.

[7] KUMAR K,SUNG C J,XIN H. Laminar flame speeds and extinction limits of conventional and alternative jet fuels[J]. Fuel,2011,90(3):1004-1011.

[8] VUKADINOVIC V,HABISREUTHER P,ZARZALIS N. Influence of pressure and temperature on laminar burning velocity and Markstein number of kerosene Jet A-1:experimental and numerical study[J]. Fuel,2013,111(3):401-410.

[9] FAR K E,PARSINEJAD F,METGHALCHI H. Flame structure and laminar burning speeds of JP-8/air premixed mixtures at high temperatures and pressures[J]. Fuel,2010,89(5):1041-1049.

[10] 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)

[11] HU E J,HUANG Z H,HE J J. Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane/hydrogen/air flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2009,34(11):4876-4888.

[12] 刘宇,孙震,罗睿,等. CH₄/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 CH₄/RP-3 kerosene mixed fuel[J]. Journal of Propulsion Technology,2018,39(5):1177-1186. (in Chinese)

[13] 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.

[14] FRANKEL M,SIVASHINSKY G. On effects due to thermal expansion and Lewis number in spherical flame propagation[J]. Combustion Science and Technology,1983;31:131-138.

[15] CHEN Z,JU Y. Theoretical analysis of the evolution from ignition kernel to flame ball and planar flame[J]. Combustion Theory and Modeling,2007,11(3):427-453.

[16] RONNEY P D,SIVASHINSKY G. A theoretical study of propagation and extinction of nonsteady spherical flame fronts[J]. Journal on Applied Mathematic,1989,49(4):1029-1046.

[17] KELLEY A P,LAW C K. Nonlinear effects in the extraction of laminar flame speeds from expanding spherical flames[J]. Combustion and Flame,2009,156(9):1844-1851.

[18] 刘宇,曾文,马洪安,等. RP-3 航空煤油 3 组分模拟替代燃料燃烧反应机理[J]. 航空动力学报,2016,31(9):2055-2064.
LIU Yu,ZENG Wen,MA Hongan,et al. Combustion reaction mechanism of three-component simulation surrogate fuel for RP-3 kerosene[J]. Journal of Aerospace Power,2016,31(9):2055-2064. (in Chinese)

[19] 胡二江,黄佐华. 高温高压下甲烷-氢气预混层流燃烧研究[R]. 广州:中国工程热物理学会燃烧学学术会议,2010.

[20] LIU Dong. Kinetic analysis of the chemical effects of hydrogen addition on dimethyl ether flames[J]. Internal Journal of Hydrogen Energy,2014,39(24):13014-13019.

[21] 罗睿,刘宇,孙震,等. CH₄/C₁₀H₂₂ 混合燃料燃烧特性实验及反应动力学研究[J]. 沈阳航空航天大学学报,2017,34(6):46-54.
LUO Rui,LIU Yu,SUN Zhen,et al. Experimental study and reaction kinetics analysis on combustion characteristics of CH₄/C₁₀H₂₂ mixed fuel[J]. Journal of Shenyang Aerospace University,2017,34(6):46-54.