

甲烷摩尔分数及初始压力对甲烷/RP-3 航空煤油混合燃料燃烧特性的影响

刘宇, 孙震, 罗睿, 马洪安, 赵欢, 曾文
(沈阳航空航天大学 航空航天工程学部(院), 沈阳 110136)

摘 要: 采用定容燃烧实验装置获得初始温度为 450 K、初始压力为 0.1~0.3 MPa、当量比为 0.7~1.5 以及甲烷摩尔分数为 0~0.8 工况下甲烷/RP-3 航空煤油混合燃料火焰发展特性图片、马克斯坦长度和层流燃烧速度等燃烧特性,分析甲烷摩尔分数及初始压力对甲烷/RP-3 航空煤油混合燃料燃烧稳定性及层流燃烧速度的影响。结果表明:当量比为 1.3 时,随着甲烷摩尔分数增加,甲烷/RP-3 航空煤油混合燃料燃烧趋于稳定,初始压力对燃烧稳定性影响较大,随着初始压力增加,燃烧稳定性变差。混合燃料马克斯坦长度随当量比增加而减小,当甲烷摩尔分数增加时,混合燃料马克斯坦长度减小趋势变缓,当初始压力增加时,混合燃料马克斯坦长度减小趋势明显变缓。混合燃料层流燃烧速度随当量比增加呈现先增大后减小的变化趋势。当甲烷摩尔分数为 0、0.4 和 0.6 时,随着甲烷摩尔分数增加,混合燃料层流燃烧速度逐渐增大,当初始压力为 0.1、0.2、0.3 MPa 时,随着初始压力增加,混合燃料层流燃烧速度显著降低,随着甲烷摩尔分数和初始压力的增加,混合燃料层流燃烧速度峰值有向当量比大的区移动的趋势。

关键词: 甲烷; RP-3 航空煤油; 混合燃料; 燃烧稳定性; 层流燃烧速度

中图分类号: V231; TK401

文献标志码: A

Effects of methane mole fraction and initial pressure on the combustion characteristics of methane/RP-3 kerosene mixture

LIU Yu, SUN Zhen, LUO Rui, MA Hongan,
ZHAO Huan, ZENG Wen

(Faculty of Aerospace Engineering,
Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: The combustion characteristics such as flame propagation characteristic, Markstein length and laminar burning velocity of methane/RP-3 mixture were obtained in a constant volume chamber at initial temperature of 450 K, initial pressures of 0.1–0.3 MPa, equivalence ratios of 0.7–1.5 and methane mole fraction of 0–0.8, and the effects of methane mole fraction and initial pressure on combustion stability and laminar burning velocity of methane/RP-3 mixture were analyzed. The results showed that at the equivalence ratio of 1.3, with the increase of methane mole fraction, the combustion of methane/RP-3 kerosene

收稿日期: 2017-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(51606129, 51676132); 辽宁省教育厅系列项目(L2016029)

作者简介: 刘宇(1983—),男,讲师,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,罗睿,等. 甲烷摩尔分数及初始压力对甲烷/RP-3 航空煤油混合燃料燃烧特性的影响[J]. 航空动力学报, 2018,33(6):1305-1314. LIU Yu, SUN Zhen, LUO Rui, et al. Effects of methane mole fraction and initial pressure on the combustion characteristics of methane/RP-3 kerosene mixture[J]. Journal of Aerospace Power, 2018,33(6):1305-1314.

mixture became stable. The effect of initial pressure on combustion stability was greater. With the increase of initial pressure, the combustion stability of the mixture became worse. Markstein length of the mixture decreased with the increase of equivalence ratio. With the increase of methane mole fraction, the decrease tendency of Markstein length became slow, and with the increase of initial pressure, this decrease tendency became slow significantly. The laminar burning velocity of the mixture increased first and then decreased with the increase of equivalence ratio. At methane mole fraction of 0, 0.4 and 0.6, with the increase of methane mole fraction, the laminar burning velocity of the mixture increased gradually. At initial pressure of 0.1, 0.2, 0.3 MPa, with the increase of initial pressure, the laminar burning velocity decreased evidently. With the increase of methane mole fraction and initial pressure, the peak value of laminar burning velocity of the mixture had the trend to move towards the fuel-rich zone.

Key words: methane; RP-3 kerosene; mixture; combustion stability; laminar burning velocity

为解决我国石油对外依存度持续增高造成的能源安全问题,以及满足国际航空运输协会(IA-TA)提出的减排要求,寻求航空替代燃料已迫在眉睫^[1-2]。液化天然气(LNG)的主要成分是甲烷(CH_4)。由于 CH_4 具有存储丰富、价格便宜、燃烧排放少以及能够保证火灾爆炸安全等诸多优势,LNG将成为一种有效航空煤油替代燃料。

在航空领域,将LNG作为航空替代燃料早有试飞先例^[3]。俄罗斯航空科技委员会研制的发动机型号为HK-89的图-156客货两用机,成为第一架使用LNG燃料且能长时间飞行的飞机。NASA和美国空军研究实验室也曾开展合作,支持波音公司研发采用航空煤油和LNG双燃料的0009A型翼身融合飞机^[4]。然而,他们在研制过程中也发现,将LNG作为航空替代燃料存在诸多问题。LNG气化成 CH_4 后体积热值降低,难以满足航空发动机动力输出要求,且 CH_4 燃点高,火焰传播速度慢,不利于其在航空发动机中的应用^[5]。因此,研究人员提出将LNG/航空煤油混合燃料作为航空替代燃料,与此同时,为论证其应用可行性,研究人员拟对其着火与燃烧特性进行研究。

目前,国内外学者已对 CH_4 以及多种航空煤油的燃烧特性进行大量研究。其中,对 CH_4 燃烧特性的研究较为全面和细致。Hassan、Rozenchan、Park、Lowry、何佳佳、常铭等^[6-11]都曾采用实验方法测量宽广工况范围内 CH_4 /空气混合气层流燃烧速度。对于航空煤油,国内外学者普遍采用定容燃烧法获得其层流燃烧速度。Vukadinovic等^[12]在定容燃烧弹中获得Jet A-1航空煤

油层流燃烧速度和马克斯坦长度,并分析初始压力为0.1~0.8 MPa和初始温度为373~473 K对Jet A-1航空煤油层流燃烧速度和火焰稳定性的影响。曾文等^[13]在定容燃烧反应装置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范围下RP-3航空煤油的层流燃烧速度和马克斯坦长度,并分析了初始温度、压力以及当量比的影响。郑东等^[14]采用对冲火焰实验平台获得了RP-3航空煤油及其四组分替代燃料的层流火焰传播速度。将 $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ 作为航空煤油模拟替代燃料,Kumar等^[15]对 $\text{CH}_4/\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ 混合燃料层流燃烧速度进行研究,分析初始温度为400 K、初始压力为0.1 MPa、当量比为0.8工况下, CH_4 摩尔分数对 $\text{CH}_4/\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ 混合燃料层流燃烧速度影响。以上研究表明,对于航空煤油,目前仍多集中在其单组分燃料燃烧特性上,对 CH_4 /航空煤油混合燃料燃烧特性的研究仍较为匮乏。

针对研究人员提出的将LNG/航空煤油混合燃料作为航空替代燃料的构想,本文拟开展 CH_4 /RP-3航空煤油混合燃料燃烧特性研究。本文前期工作中,已获得初始温度为420 K工况 CH_4 /RP-3航空煤油混合燃料燃烧特性实验数据,并分析了添加 CH_4 对混合燃料马克斯坦长度及层流燃烧速度的影响。以此为基础,本文将进一步开展初始温度为450 K、初始压力为0.1~0.3 MPa、当量比范围为0.7~1.5以及 CH_4 摩尔分数为0~0.8工况下 CH_4 /RP-3航空煤油混合燃料燃烧特性实验,并分析 CH_4 摩尔分数及初始压力对 CH_4 /RP-3航空煤油混合燃料燃烧特性的影响。

1 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料燃烧特性实验

1.1 实验装置

本文采用定容燃烧实验装置获得 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料燃烧特性。实验装置如图 1 所示^[16],该装置包括定容燃烧弹、进排气系统、光学系统和高速摄像机等。如图 2 所示,定容燃烧弹为不锈钢圆柱型结构,其内径为 180 mm,容积约为 5.5 L。定容燃烧弹内部中心布置有点火电极,燃烧弹外装有压力变送器、温度传感器、液体燃料注入阀与进排气阀等。定容燃烧弹两端装入厚 80 mm、直径 130 mm 的石英玻璃窗,形成光学通路。本实验采用背影法获得 CH₄/RP-3 航空煤油

混合燃料火焰发展照片,所用高速摄像机为幻影 Phantom v611,拍摄速度设定为 10 000 帧/s。

1.2 实验方法

为获得实验工况所需 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料与空气混合气,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)与 CH₄ 化学分子式,计算出各当量比和甲烷摩尔分数下 RP-3 航空煤油、CH₄、O₂ 和 N₂ 的摩尔分数。然后根据分压定律计算混合气中各组分分压,并根据真空度和初始压力制定配气表。配气表中,RP-3 航空煤油分压是其气态分压,实验中,RP-3 航空煤油通过液体燃料注入阀注入到定容燃烧弹中,因此,还需将 RP-3 航空煤油气态分压换算成其液态体积。依次向定容燃烧

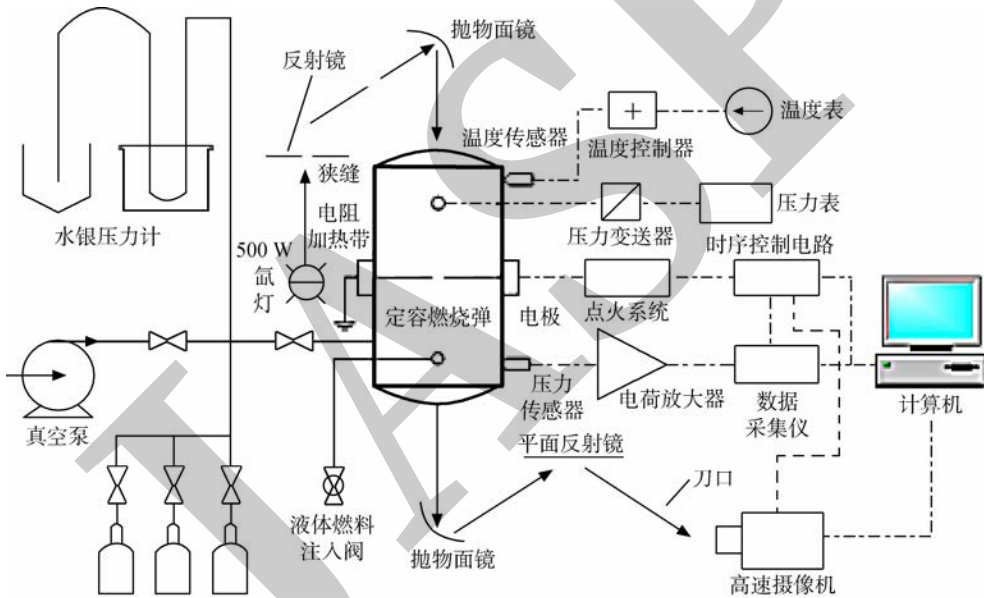


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

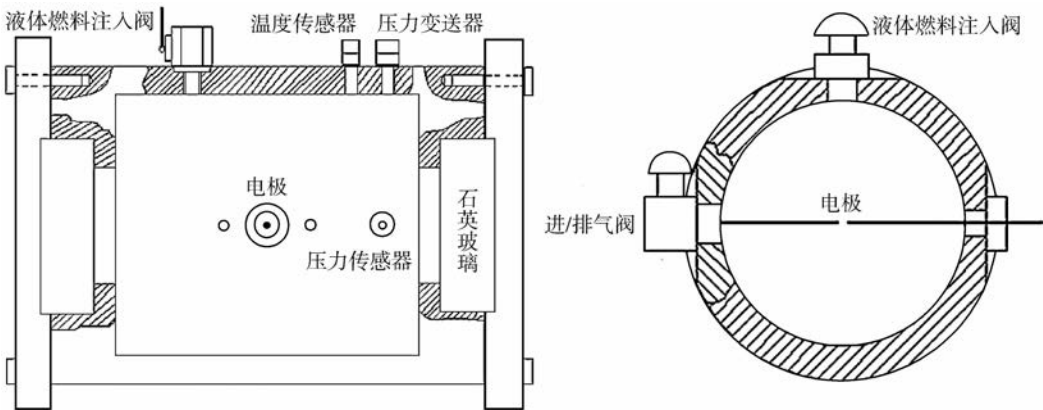


图 2 定容燃烧弹示意图

Fig. 2 Schematic diagram of constant volume chamber

弹注入液态 RP-3 航空煤油,充入 CH_4 、 O_2 和 N_2 。注入液态 RP-3 航空煤油时,需注意 RP-3 航空煤油饱和蒸气压与其在定容燃烧弹中分压关系,要确保其饱和蒸气压低于其分压,才能使 RP-3 航空煤油完全气化。待混合气各组分充入定容燃烧弹后,为使各组分间充分混合,还需将定容燃烧弹静置 10 min,最终形成均匀混合气。最后由中心电极点燃 CH_4 /RP-3 航空煤油混合燃料,与此同时,触发高速摄像机对火焰发展过程进行拍摄,获得 CH_4 /RP-3 航空煤油混合燃料火焰发展特性图片。

1.3 实验数据处理

在定容燃烧弹中,可燃混合气层流燃烧速率受混合气理化性质、当量比、初始状态参数与点火能量等多种因素影响。排除点火能量和容积限制对火焰传播的影响,本文选择火焰半径为 7~25 mm 所对应的火焰发展特性图片,利用非线性外推法得到无拉伸层流火焰传播速度。

非线性外推的基础是拉伸火焰传播速度和火焰拉伸率之间的关系,排除拉伸作用得到无拉伸层流火焰传播速度。

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 $S_n^{[17]}$

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

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

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

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(2)还可以表示为

$$\alpha = 2dr/(r dt) = \frac{2S_n}{r} \quad (3)$$

Ronney 和 Sivashinsky^[18]提出的非线性外推方法对于具有正马克斯坦长度的混合物较为准确,该方法中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 之间存在如下关系

$$S_n = S_l - S_l L_b \frac{2}{r} \quad (4)$$

式中 L_b 为马克斯坦长度,利用式(3)与式(4)可以获得 S_n 与 α 的非线性关系

$$S_n = S_l - S_l L_b \frac{\alpha}{S_n} \quad (5)$$

根据在火焰前锋面上的质量守恒,有

$$A \rho_u u_1 = A \rho_b S_l \quad (6)$$

式中 ρ_u 与 ρ_b 分别为未燃区与已燃区混合气密度,层流燃烧速度 u_1 可由式(6)获得

$$u_1 = \rho_b S_l / \rho_u \quad (7)$$

2 实验结果与分析

2.1 CH_4 摩尔分数和初始压力对混合燃料火焰发展特性的影响

图 3 为高速摄像机拍摄的初始温度 $T_0=450$ K、初始压力 $p_0=0.1$ MPa、当量比 $\phi=0.8, 1.0, 1.3, 1.5$ 工况下 RP-3 航空煤油火焰发展图片。从图中可以看出,RP-3 航空煤油经火花塞点火后,在定容燃烧弹中心形成火核。随着燃烧所释放能量的增加,火核快速发展成球形火焰锋面,同时向外扩散。如图 3(a)和图 3(b)所示,在当量比为 0.8 和 1.0 工况下,从火核形成到火焰扩散至定容燃烧弹壁面,火焰锋面都十分光滑,说明当量比较小的 RP-3 航空煤油混合气及其化学当量比(即当量比为 1)混合气的火焰发展都较为稳定。但随着当量比增加到 1.3,如图 3(c)所示,在火焰发展中期,点火电极附近出现少量条形胞状结构,且随着火焰进一步发展,条形胞状结构变得越来越明显。综合图 3(a)~图 3(c)可知,随着 RP-3 航空煤油混合气当量比由小变大,混合气燃烧火焰开始变得不稳定。

随着当量比继续增加至 1.5,如图 3(d)所示,由混合气当量比导致火焰不稳定现象变得更加明显。在火焰发展初期,火焰锋面仍保持光滑,当火焰发展至中期,火焰锋面开始破裂,并在火焰内部形成大块胞状结构,随着火焰发展,大块胞状结构又迅速破裂成更小块状胞状结构,当火焰发展至末期,火焰内部已呈现均匀网格形胞状结构。

图 4 为高速摄像机拍摄的初始温度 $T_0=450$ K、初始压力 $p_0=0.1$ MPa、当量比 $\phi=1.3$ 、 CH_4 摩尔分数 $x_{\text{CH}_4}=0, 0.4, 0.8$ 工况下 CH_4 /RP-3 航空煤油混合燃料火焰发展图片。由图 3 可知,随着当量比增加,RP-3 航空煤油燃烧趋于不稳定。图 4(a)~图 4(c)的火焰发展图片显示在当量比 $\phi=1.3$ 时, CH_4 添加对 RP-3 航空煤油燃烧稳定性的影响。如图 4(b)所示, CH_4 摩尔分数增加至 0.4 时, CH_4 /RP-3 航空煤油混合燃料火焰发展图片与 4(a)中 RP-3 航空煤油火焰发展图片极为相似,说明 CH_4 摩尔分数由 0 增加至 0.4 对 RP-3 航空煤油燃烧稳定性影响很小。随着 CH_4 摩尔

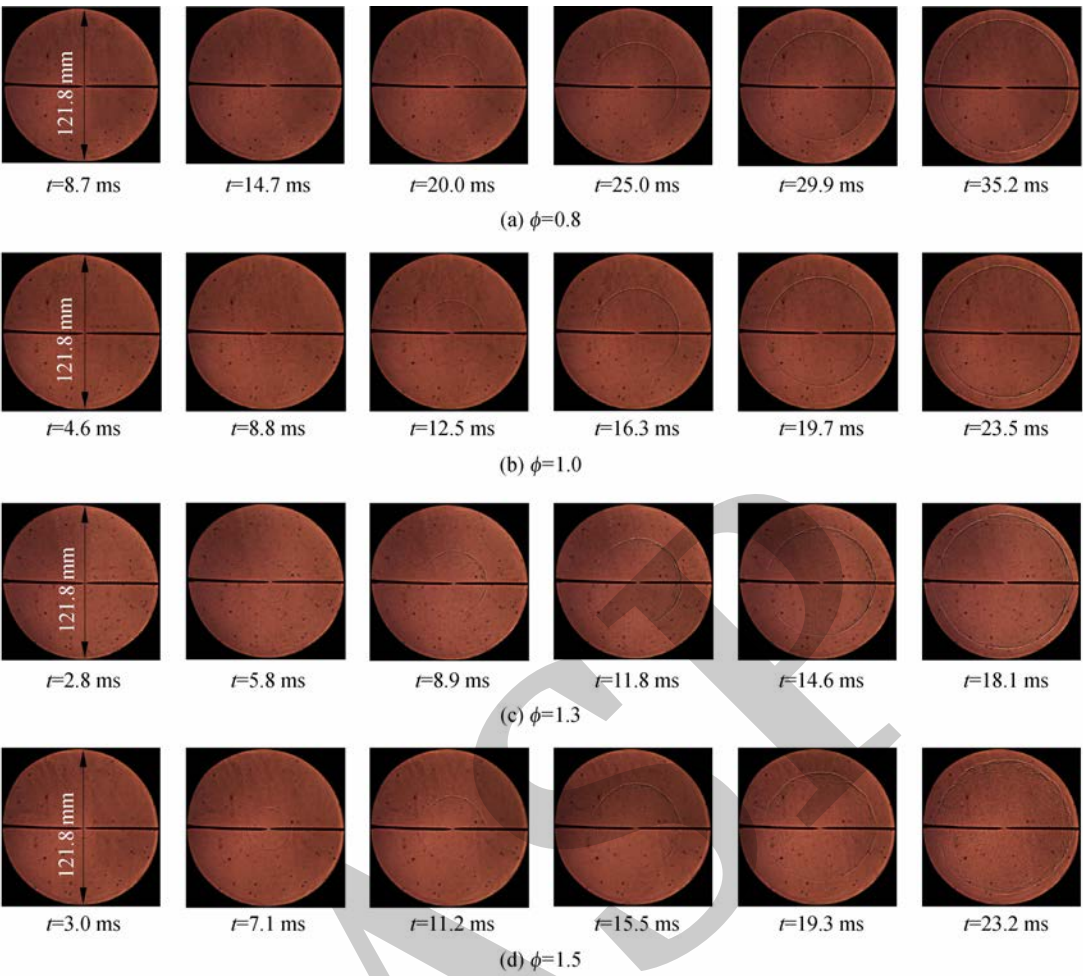


图 3 当量比对 RP-3 航空煤油火焰发展特性的影响 ($p_0=0.1\text{ MPa}$, $x_{\text{CH}_4}=0$)

Fig. 3 Effects of equivalence ratio on flame propagation characteristics of RP-3 kerosene ($p_0=0.1\text{ MPa}$, $x_{\text{CH}_4}=0$)

分数进一步增加至 0.8, 如图 4(c) 所示, 在火焰发展末期, 火焰锋面仍较为光滑。综合图 4(a)~图 4(c) 可知, 在 RP-3 航空煤油中添加 CH_4 对 RP-3 航空煤油火焰稳定作用效果并不明显。

图 5 为高速摄像机拍摄的初始温度 $T_0=450\text{ K}$ 、当量比 $\phi=1.3$ 、初始压力 $p_0=0.1, 0.2, 0.3\text{ MPa}$ 工况下 RP-3 航空煤油火焰发展图片。图 5(a)~图 5(c) 的火焰发展图片显示在当量比为 1.3 时, 初始压力对 RP-3 航空煤油燃烧稳定性的影响。如图 5(b) 所示, 初始压力 $p_0=0.2\text{ MPa}$ 时, 在火焰发展初期, 火焰锋面就开始出现梅花状边缘, 随着火焰发展至中期, 梅花状边缘逐渐破裂, 并在火焰内部形成胞状结构, 且胞状结构呈现出点火电极附近较密、远离点火电极处较稀疏的不均匀性。随着火焰发展, 火焰内部胞状结构又迅速破裂, 在火焰发展末期, 火焰内部胞状结构已经非常致密且均匀, 说明此时火焰变得极为不稳定。如图 5(c) 所示, 当初始压力增加至 0.3 MPa

时, 在火焰发展初期, 光滑火焰锋面便难以形成, 火焰内部出现大量网格状胞状结构。在火焰发展初期, 网格状胞状结构并不均匀, 表现为在火焰锋面附近较密, 在火焰内部较稀疏。随着火焰发展至后期, 网格状结构逐渐趋于均匀。如图 5(c) 所示, 在火焰发展中期至后期, 胞状网格大小并无明显改变, 说明随着火焰的发展, 胞状结构不断生长破裂, 燃烧始终处于不稳定之中。综合图 5(a)~图 5(c) 可知, 初始压力对燃烧火焰稳定性影响较大, 随着初始压力增加, 燃烧趋于不稳定。

2.2 CH_4 摩尔分数和初始压力对混合燃料燃烧稳定性的影响

2.2.1 混合燃料燃烧稳定性的影响因素分析

相关研究表明, 影响预混层流火焰稳定性的因素主要包括体积力、流体动力学和热扩散因素。其中体积力导致的火焰不稳定是由于浮力对火焰影响而造成, 其影响只在当量比过大或过小的混合气中表现较为明显; 流体动力学不稳定是由火

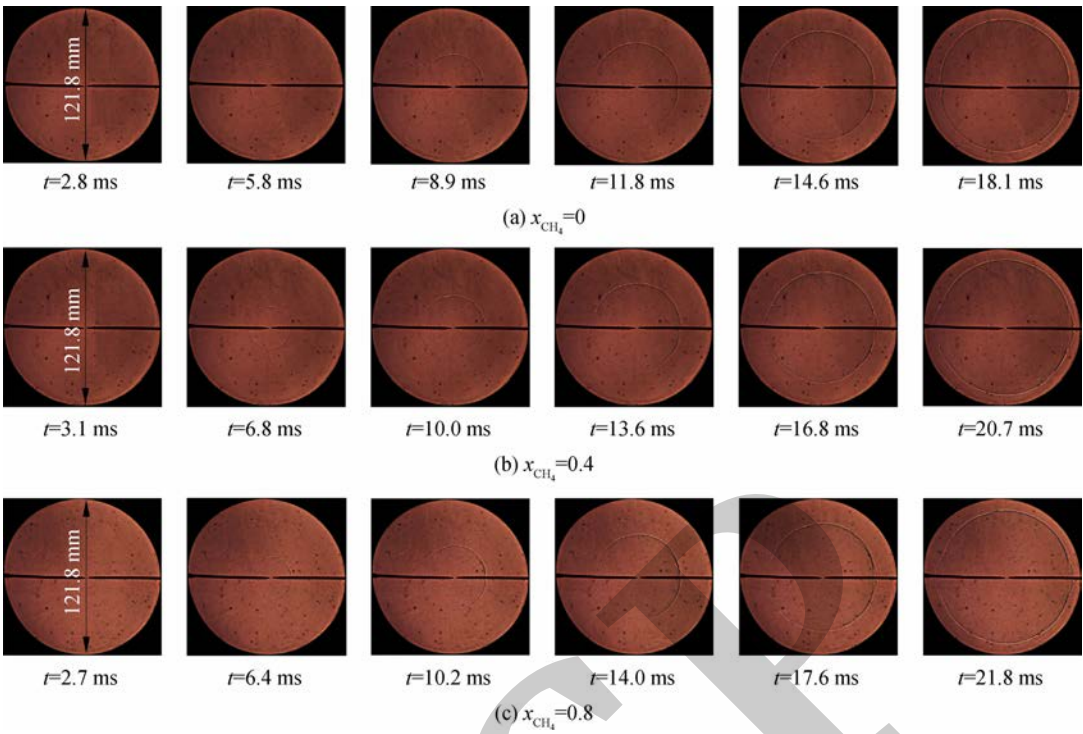


图 4 CH_4 摩尔分数对 $\text{CH}_4/\text{RP-3}$ 航空煤油混合燃料火焰发展特性的影响 ($p_0=0.1\text{ MPa}$, $\phi=1.3$)

Fig. 4 Effects of CH_4 mole fraction on flame propagation characteristics of $\text{CH}_4/\text{RP-3}$ kerosene mixture ($p_0=0.1\text{ MPa}$, $\phi=1.3$)

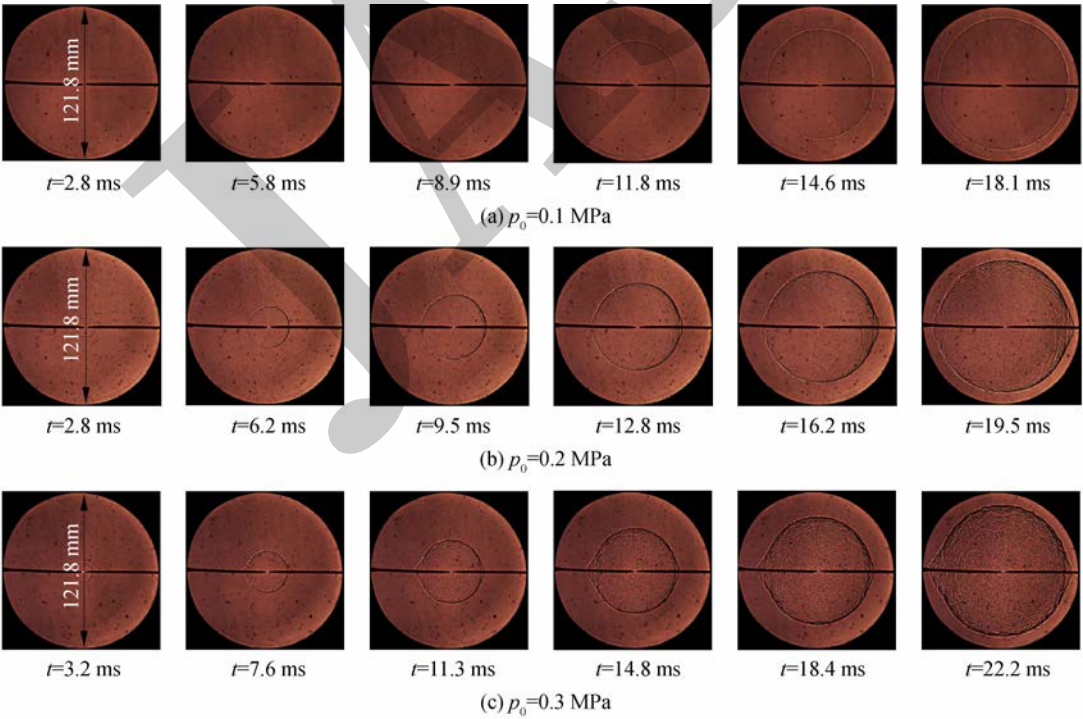


图 5 初始压力对 RP-3 航空煤油火焰发展特性的影响 ($\phi=1.3$, $x_{\text{CH}_4}=0$)

Fig. 5 Effects of initial pressure on flame propagation characteristics of RP-3 kerosene ($\phi=1.3$, $x_{\text{CH}_4}=0$)

焰前锋面热膨胀引起火焰温度梯度与流线的正方向发生偏离引起的,且这种因素只在火焰半径足够大时才对火焰稳定性产生影响;热扩散不稳定

性是由火焰前锋面附近质量相对于热量的优先扩散引起的,如果混合气中扩散能力较强的组分较多,则优先扩散作用使预混火焰稳定。如图 3~

图 5 所示,预混火焰未出现明显上浮,因此,可排除体积力对火焰不稳定性影响。本文将着重考虑流体动力学和热扩散因素对燃烧稳定性的影响。

火焰前锋面的密度变化造成流体动力学不稳定,可以通过火焰厚度 δ 和密度比 σ 来分析流体动力学不稳定性。其中火焰厚度由下式计算得到:

$$\delta = \nu / u_1$$

(8)

式中 ν 为未燃气体的运动黏度。

密度比为未燃区混合气密度和已燃区混合气密度之比

$$\sigma = \rho_u / \rho_b$$

(9)

图 6 给出在初始温度 $T_0=450\text{ K}$ 、当量比 $\phi=1.3$ 工况下 $\text{CH}_4/\text{RP-3}$ 混合燃料火焰厚度和密度比随 CH_4 摩尔分数及初始压力的变化规律。

如图 6(a) 所示,初始压力 $p_0=0.1\text{ MPa}$ 时,混合燃料火焰厚度随 CH_4 摩尔分数增加呈现出先增大后减小再增大的变化趋势,而初始压力为 0.2 MPa 时, CH_4 摩尔分数从 0 增加到 0.6 时,混合燃料火焰厚度随 CH_4 摩尔分数增加基本保持不变,当 CH_4 摩尔分数从 0.6 增加到 0.8 时,火焰厚度明显减小。同时,随着初始压力增加,混合燃料火焰厚度急剧减小。图 6(b) 显示当量比为 1.3 的 $\text{CH}_4/\text{RP-3}$ 混合燃料的密度比随 CH_4 摩尔分数和初始压力的变化趋势。如图所示,混合燃料密度比随 CH_4 摩尔分数的增加而减小,而初

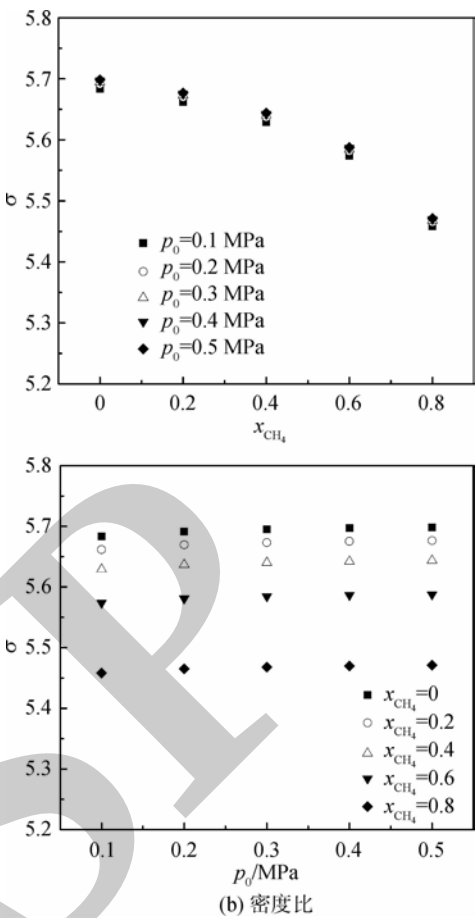


图 6 CH_4 摩尔分数及初始压力对火焰厚度和密度比的影响 ($T_0=450\text{ K}$, $\phi=1.3$)

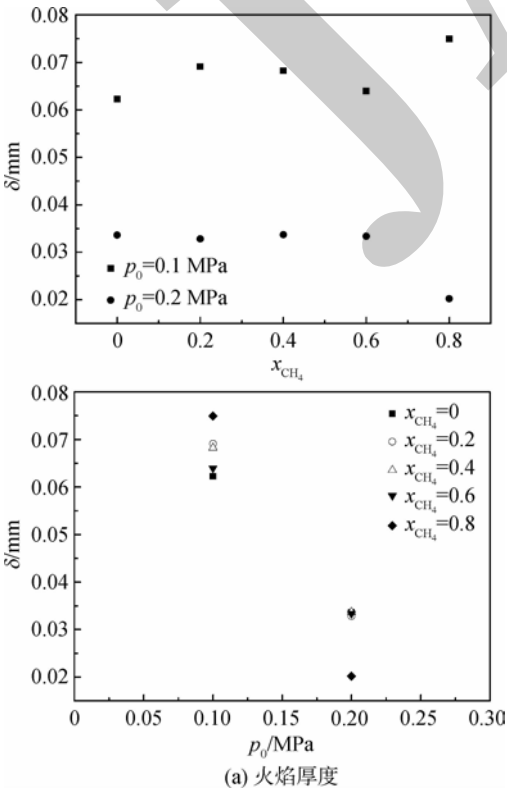
Fig. 6 Effects of CH_4 mole fraction and initial pressure on flame thickness and density ratio ($T_0=450\text{ K}$, $\phi=1.3$)

始压力对混合燃料密度比影响很小。

理论指出,火焰厚度的减小和密度比的增大都会增加流体动力学不稳定性。由上述分析可知, $\text{CH}_4/\text{RP-3}$ 混合气火焰厚度随 CH_4 摩尔分数从 0 增加到 0.4 再到 0.8 逐渐增加,导致燃烧趋于稳定。另外,当初始压力为 0.1 MPa 、初始温度为 450 K 、当量比为 1.3 时,随着 CH_4 摩尔分数的增加, $\text{CH}_4/\text{RP-3}$ 混合燃料密度比减小,导致燃烧趋于稳定。因此,综合火焰厚度和密度比影响可知,随着 CH_4 摩尔分数的增加, $\text{CH}_4/\text{RP-3}$ 混合燃料燃烧将趋于稳定。

分析初始压力对燃烧稳定性影响可知,在初始温度为 450 K 、当量比为 1.3 时,混合燃料火焰厚度随初始压力的增加急剧减小,但其密度比随初始压力增加基本不变,从而导致混合燃料燃烧随初始压力增加趋于不稳定。

热扩散不稳定性是由热量和质量的不等扩散引起的,可通过路易斯数 Le 来表征,其计算公式为



$$Le = a/D = \lambda/(\rho_u c_p D)$$
 (10)

式中 a 为热扩散系数, λ 、 c_p 分别为未燃混合气的导热系数和比定压热容; D 为不足反应物和缓冲气体的二元质量扩散系数。

本文 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料路易斯数的计算采用体积算法

$$Le = x_{CH_4} Le_{CH_4} + x_{RP-3} Le_{RP-3}$$
 (11)

式中 x_{CH_4} 和 x_{RP-3} 分别为 CH₄ 和 RP-3 航空煤油的摩尔分数, Le_{CH_4} 和 Le_{RP-3} 分别为 CH₄ 和 RP-3 航空煤油单组分燃料的路易斯数。

图 7 给出 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料路易斯数随 CH₄ 摩尔分数及初始压力的变化趋势。

如图 7 所示, 当量比为 1.3 时, 混合燃料路易斯数随 CH₄ 摩尔分数增加几乎不变, 说明在该工况下 CH₄ 摩尔分数的增加并不会改变热扩散因素对 CH₄/RP-3 混合燃料燃烧稳定性的影响。但路易斯数随初始压力变化较为明显, 如图 7(b) 所示, 随着初始压力增加, 路易斯数显著降低, 说明

混合气各组分扩散能力因压力增加而减弱, 从而导致 CH₄/RP-3 混合燃料燃烧稳定性变差。

2.2.2 CH₄ 摩尔分数和初始压力对马克斯坦长度的影响

马克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。当马克斯坦长度为正时, 若光滑的火焰锋面出现小扰动, 由式(4)和式(5)可知, 由于马克斯坦长度为正且火焰拉伸率为正, 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, 若马克斯坦长度为负, 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。

图 8 为初始温度 $T_0 = 450\text{ K}$, 不同甲烷摩尔分数和初始压力对 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料马克斯坦长度的影响。如图所示, 各工况下混合燃料马克斯坦长度均随当量比增加而减小。去除测量误差较大点, 对马克斯坦长度进行线性拟合, 并分析 CH₄ 摩尔分数和初始压力对马克斯坦长

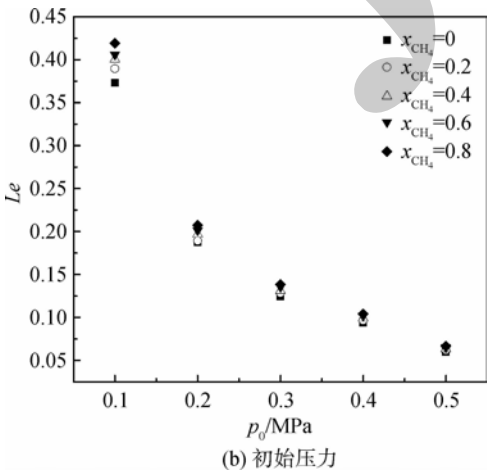
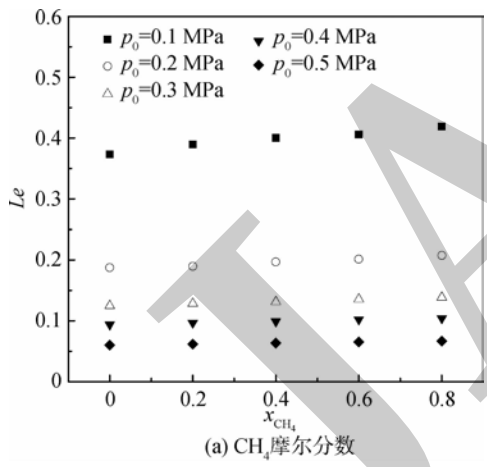


图 7 CH₄ 摩尔分数及初始压力对路易斯数的影响
($\phi = 1.3$)

Fig. 7 Effects of CH₄ mole fraction and initial pressure on Lewis number ($\phi = 1.3$)

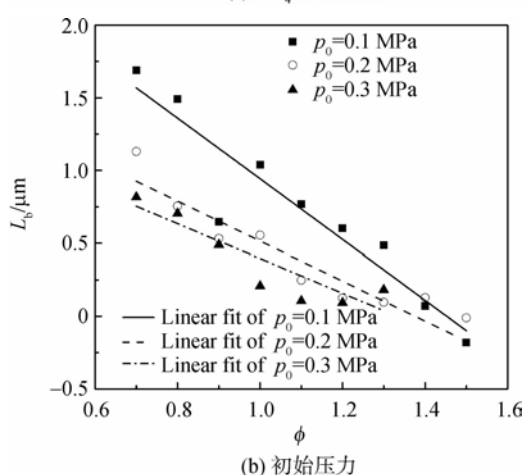
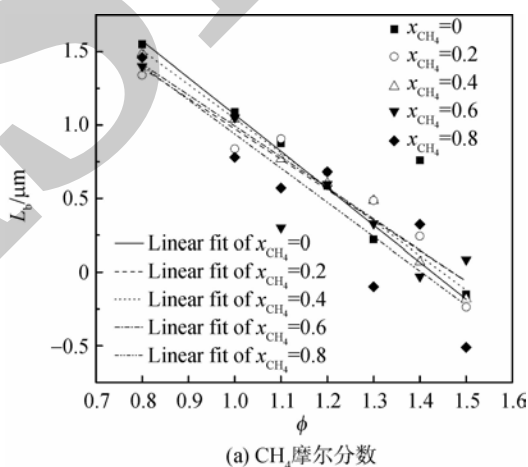


图 8 CH₄ 摩尔分数和初始压力对马克斯坦长度的影响
($T_0 = 450\text{ K}$)

Fig. 8 Effects of CH₄ mole fraction and initial pressure on Markstein length ($T_0 = 450\text{ K}$)

度影响发现,在所有 CH_4 摩尔分数中, CH_4 摩尔分数为 0 时(即纯 RP-3 航空煤油)混合燃料马赫斯坦长度随当量比的增加减小最快,随着混合燃料中 CH_4 摩尔分数增加,混合燃料马赫斯坦长度减小趋势变缓。如图 8(a)所示,混合燃料(CH_4 摩尔分数为 0.8 除外)马赫斯坦长度拟合直线在当量比为 1.2 附近出现交叉,当量比小于 1.2 时,混合燃料马赫斯坦长度有随 CH_4 摩尔分数增加而减小的变化趋势,而当量比大于 1.2 时,混合燃料马赫斯坦长度有随 CH_4 摩尔分数增加而增加的变化趋势。

如图 8(b)所示,当初始压力增加时,随着当量比由小到大,混合燃料马赫斯坦长度减小趋势明显变缓。当量比为 1.5 时,不同初始压力混合燃料的马赫斯坦长度基本趋于一致,其值趋于 0 甚至为负,说明此时混合燃料燃烧已经变得极不稳定。另外,由马赫斯坦长度拟合曲线随当量比变化趋势可知,初始压力对当量比较小的混合燃料燃烧稳定性影响较为显著,随着初始压力增加,当量比较小的混合燃料马赫斯坦长度明显减小,而相比于当量比较小的混合燃料,初始压力对当量比较大的混合燃料燃烧稳定性影响较小。

2.3 CH_4 摩尔分数和初始压力对混合燃料层流燃烧速度的影响

图 9 显示 CH_4 摩尔分数和初始压力对 $\text{CH}_4/\text{RP-3}$ 航空煤油混合燃料层流燃烧速度的影响。去除测量误差较大点,对混合燃料层流燃烧速度进行多项式拟合,并分析 CH_4 摩尔分数和初始压力对混合燃料层流燃烧速度影响发现,不同 CH_4 摩尔分数和初始压力混合燃料层流燃烧速度均随当量比增加呈现先增加后减小的变化趋势。其中,甲烷摩尔分数为 0.2 和 0.8 时,混合燃料层流燃烧速度拟合曲线形状与其他 CH_4 摩尔分数混合燃料差异较大。分析拟合曲线峰值及随当量比变化趋势可知,其层流燃烧速度峰值出现在当量比在 1.1 附近,且当 CH_4 摩尔分数为 0.2 时,混合燃料层流燃烧速度随当量比变化缓慢,当 CH_4 摩尔分数为 0.8 时,混合燃料层流燃烧速度随当量比变化显著。分析 CH_4 摩尔分数对混合燃料层流燃烧速度影响发现,随着 CH_4 摩尔分数增加,层流燃烧速度峰值有向当量比大的混合区移动趋势,当 CH_4 摩尔分数由 0.2 增加至 0.4 时,其峰值对应当量比移动至 1.2 附近。另外,从图 9(a)中还可以看出, CH_4 摩尔分数为 0、0.4 和

0.6 混合燃料层流燃烧速度拟合曲线峰值对应当量比及其随当量比变化趋势基本一致,区别在于不同 CH_4 摩尔分数混合燃料层流燃烧速度峰值大小略有不同,随着 CH_4 摩尔分数增加,混合燃料层流燃烧速度峰值逐渐增加。

图 9(b)显示混合燃料层流燃烧速度随初始压力变化规律,随着初始压力增加,混合燃料层流燃烧速度显著降低。另外,随着初始压力增加,混合燃料层流燃烧速度峰值也有向当量比大的混合区移动趋势。

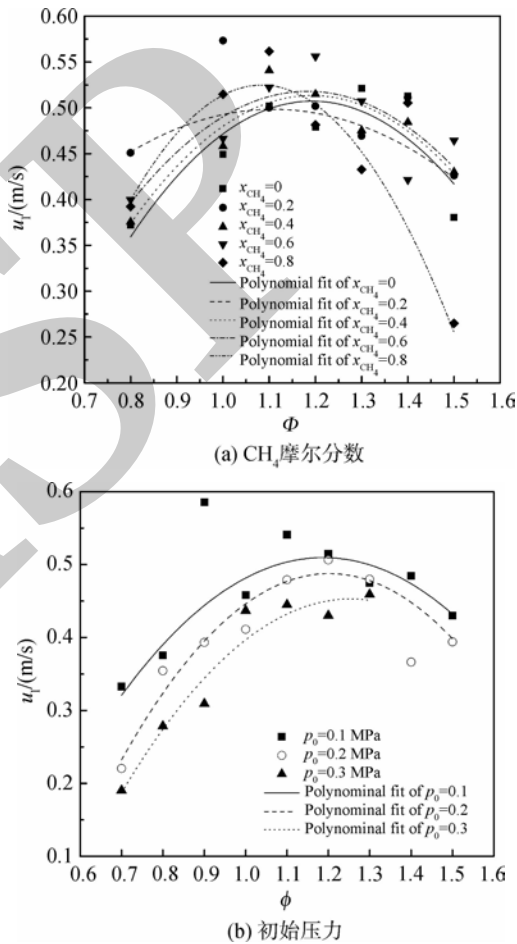


图 9 CH_4 摩尔分数和初始压力对层流燃烧速度的影响
Fig. 9 Effects of CH_4 mole fraction and initial pressure on laminar burning velocity

3 结 论

本文获得初始温度为 450 K、初始压力为 0.1~0.3 MPa、当量比为 0.7~1.5 以及 CH_4 摩尔分数为 0~0.8 工况下 $\text{CH}_4/\text{RP-3}$ 航空煤油混合燃料火焰发展特性图片、马赫斯坦长度和层流燃烧速度等燃烧特性,分析 CH_4 摩尔分数及初始压力对 $\text{CH}_4/\text{RP-3}$ 航空煤油混合燃料燃烧特性影

响,得到如下结论:

1) 在当量比为 1.3 工况下,CH₄ 摩尔分数增加使 CH₄/RP-3 航空煤油当量比大的混合燃料燃烧趋于稳定,但效果并不明显;初始压力对燃烧火焰稳定性影响较大,随着初始压力增加,燃烧明显变得不稳定。

2) 混合燃料马赫斯坦长度随当量比的增加而减小。随着 CH₄ 摩尔分数的增加,马赫斯坦长度减小趋势变缓,且随着初始压力增加,减小趋势明显变缓。另外,由马赫斯坦长度随当量比变化可知,初始压力对当量比小的混合燃料燃烧稳定性影响较为显著,但对当量比大的混合燃料燃烧稳定性影响较小。

3) 不同 CH₄ 摩尔分数和初始压力混合燃料层流燃烧速度均随当量比增加呈现先增加后减小的变化趋势。随着 CH₄ 摩尔分数增加,层流燃烧速度峰值有向当量比大的混合区移动趋势。当 CH₄ 摩尔分数为 0、0.4 和 0.6 时,混合燃料层流燃烧速度峰值随着 CH₄ 摩尔分数增加逐渐增加。随着初始压力增加,混合燃料层流燃烧速度显著降低。与此同时,随着初始压力增加,混合燃料层流燃烧速度峰值也有向当量比大的混合区移动趋势。

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 Zhongliu,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] 吴良彦.用液化天然气作燃料的飞机[J].石油石化节能,2000(9):32-33.
- [4] KAWA R. Benefit potential for a cost efficient duel fuel propulsion BWB[R]. AIAA-2013-0937,2013.
- [5] YAHYAOU M. The use of LNG as aviation fuel; combustion and emissions[R]. AIAA-2015-3730,2015.
- [6] HASSAN M I,AUNG K T,FAETH G M. Measured and predicted properties of laminar premixed methane/air flames at various pressures[J]. Combustion and Flame,1998,115(4):539-550.
- [7] ROZENCHAN G,ZHU D L,LAW C K. Outward propagation, burning velocities, and chemical effects of methane

flames up to 60 ATM[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2002,29(2):1461-1470.

- [8] PARK O,VELOO P S,LIU N. Combustion characteristics of alternative gaseous fuels[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2011,33(1):887-894.
- [9] LOWRY W. Laminar flame speed measurements and modeling of pure alkanes and alkane blends at elevated pressures[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2011,133(9):091501.1-091501.9.
- [10] 何佳佳,胡二江,金春,等.不同初始温度下甲烷-空气混合气流燃烧速率的测定[J].内燃机学报,2009,27(6):487-492.
HE Jiajia,HU Erjiang,JIN Chun,et al. Measurement of laminar burning velocity of methane-air premixed flame at different initial temperatures[J]. Transactions of CSICE,2009,27(6):487-492. (in Chinese)
- [11] 常铭,苗海燕,刘岩,等.高温高压下掺氢天然气的燃烧特性[J].内燃机学报,2010,28(6):481-487.
CHANG Ming,MIAO Haiyan,LIU Yan,et al. Combustion characteristics of hydrogen-enriched natural gas under elevated temperature and pressure [J]. Transactions of CSICE,2010,28(6):481-487. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 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)
- [14] 郑东,于维铭,钟北京.RP-3 航空煤油替代燃料及其化学反应动力学模型[J].物理化学学报,2015,31(4):636-642.
ZHENG Dong,YU Weiming,ZHONG Beijing. RP-3 aviation kerosene surrogate fuel and the chemical reaction kinetic model[J]. Acta Physico-Chimica Sinica,2015,31(4):636-642. (in Chinese)
- [15] KUMAR K,HUI Xin,DAS A K.,et al. Autoignition, flame propagation, and extinction of binary fuel blends of *n*-decane/ethylene and *n*-decane/methane[R]. AIAA 2011-315,2011.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] RONNEY P D,SIVASHINSKY G I. A theoretical study of propagation and extinction of nonsteady spherical flame fronts[J]. Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Applied Mathematics,1989,49(4):1029-1046.