

文章编号:1000-8055(2018)04-0894-09

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2018.04.015

CH₄/正癸烷混合燃料燃烧特性

刘 宇, 孙 震, 罗 睿, 赵 欢, 曾 文, 陈保东
(沈阳航空航天大学 航空航天工程学部, 沈阳 110136)

摘 要: 为研究 CH₄/正癸烷混合燃料的燃烧特性及燃烧稳定性,在定容燃烧弹中测量了初始压力为 0.1 MPa、初始温度为 420 K、当量比范围为 0.8~1.5 和甲烷摩尔分数为 0~0.8 时 CH₄/正癸烷混合燃料的火焰扩散速度、拉伸火焰传播速度、马克斯坦长度、无拉伸火焰传播速度和层流燃烧速度等,分析了甲烷摩尔分数对马克斯坦长度及层流燃烧速度等的影响。结果表明:当量比为 1.3 时,随着甲烷摩尔分数的增加,火焰发展末期,锋面由网格形胞状结构发展为光滑球面,火焰稳定性增强;甲烷摩尔分数增加导致混合燃料马克斯坦长度随当量比增加而减小的趋势变慢,实验研究范围存在临界当量比,当量比小于 1.2 时,甲烷摩尔分数为 0.8 的混合燃料燃烧稳定性较差,而当量比大于 1.2 时,甲烷摩尔分数为 0.8 的混合燃料燃烧稳定性较好;当量比在 1.0~1.3 范围内,甲烷摩尔分数为 0.2 和 0.4 的混合燃料层流燃烧速度较快,而在实验测量当量比范围,甲烷摩尔分数为 0.8 的混合燃料层流燃烧速度较慢。

关 键 词: 燃烧特性; 燃烧稳定性; 定容燃烧弹; 马克斯坦长度; 层流燃烧速度

中图分类号: V231; TK401 **文献标志码:** A

Combustion characteristics of methane/*n*-decane mixed fuel

LIU Yu, SUN Zhen, LUO Rui, ZHAO Huan, ZENG Wen, CHEN Baodong
(Faculty of Aerospace Engineering,
Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: In order to study the combustion characteristics and combustion stability of CH₄/*n*-decane mixed fuel, the diffusion velocity of flame radius, the stretched flame speed, Markseim length, unstretched flame speed and laminar burning velocity of CH₄/*n*-decane mixture were measured experimentally in a constant volume chamber at initial pressure of 0.1 MPa, initial temperature of 420 K, over the equivalence ratios range of 0.8—1.5 and over the methane concentration range of 0—0.8. The influences of methane concentration on Markseim length and laminar burning velocity were investigated. Results showed that at equivalence ratio of 1.3, the observed cellular structure at the end of flame propagation disappeared with the increase of methane concentration and the flame front became smooth, along with the increase of the flame stability; the decreasing trend of Markseim length with the growing equivalence ratio became slower due to the increase of methane concentration, and there was a critical equivalence ratio, with the methane concentration of 0.8 the combustion

收稿日期: 2016-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(51606129); 辽宁省自然科学基金(201602577);
辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2015404)

作者简介: 刘宇(1983—),男,讲师,博士,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. CH₄/正癸烷混合燃料燃烧特性[J]. 航空动力学报, 2018, 33(4): 894-902. LIU Yu, SUN Zhen, LUO Rui, et al. Combustion characteristics of methane/*n*-decane mixed fuel[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(4): 894-902.

stability was poor when the equivalence ratio was smaller than 1.2 and to the contrary the combustion stability was better when the equivalence ratio was bigger than 1.2; over the equivalence ratio of 1.0—1.3 the laminar burning velocities of mixed fuel with methane concentration of 0.2 and 0.4 were faster, and over the equivalence ratios range of experiment conditions the laminar burning velocities of mixed fuel with methane concentration of 0.8 were slower.

Key words: combustion characteristics; combustion stability;
constant volume chamber; Marksein length; laminar burning velocity

为解决我国石油对外依存度持续增高带来的能源安全问题以及满足国际航空运输协会(IA-TA)提出的航空减排要求,寻求和开发航空替代燃料已成为研究热点^[1-2]。目前航空替代燃料以煤液化喷气燃料、气体合成喷气燃料和生物喷气燃料为主^[3-4],但这 3 种替代燃料生产工艺复杂、生产成本较高,短期内很难实现大规模应用。液化氢气和液化天然气(LNG)也可用作飞机燃料,但截至目前,液化氢气还未在民用飞机上得到实际应用,而将 LNG 应用于航空领域也尚未开展深入探讨^[5-7]。

LNG 主要成分是甲烷(CH₄)。由于具有存储丰富、价格便宜、燃烧排放少以及能够保证火灾爆炸安全等多方面优势,LNG 航空替代燃料将成为航空业节能减排、实现可持续发展的有效途径。俄罗斯将 LNG 作为航空替代燃料早有试飞先例^[8]。俄罗斯航空科技委员会在图-154 客机基础上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。美国国家航空航天局(NASA)和美国空军研究实验室也曾开展过合作,支持波音公司研发 0009A 型翼身融合飞机,并估算了该型飞机采用航空煤油和 LNG 双燃料的运行成本^[9]。

研究发现,LNG 单一燃料难以满足航空发动机动力输出要求,在大功率输出时,航空发动机需要采用 LNG/航空煤油混合燃料。航空燃料的燃烧特性影响燃烧强度、效率和稳定性、发动机起动和高空再点火以及燃烧室温度分布和尾气排放等燃烧室性能参数,是决定燃烧室及航空发动机能否正常工作的关键。因此,当采用 LNG/航空煤油混合燃料时,对混合燃料燃烧特性进行研究十分必要。然而,目前国内外学者对 CH₄ 混合燃料燃烧特性的研究多停留在 CH₄ 与 H₂、CH₄ 与稀释气(如 CO₂ 等)、CH₄ 与低碳数小分子燃料(如乙烷等)上^[10-14],对 CH₄ 与高碳数大分子燃料混

合燃烧特性研究较少^[15-17]。Baloo 等^[15]对汽油单组份替代燃料异辛烷、甲烷以及异辛烷/甲烷混合燃料(70%和 95%甲烷体积分数混合燃料),在初始压力为 0.1、0.25、0.55MPa,初始温度为 368、408、448K,当量比范围为 0.85~1.2 的层流燃烧速度和马克斯坦长度进行实验研究,得到甲烷添加能够提高异辛烷火焰锋面稳定性等结论。分析指出,甲烷添加导致混合燃料膨胀比降低以及马克斯坦长度和火焰厚度增加是产生上述结论的原因。采用纹影法,WEI Haiqiao 等^[17]在圆筒形燃烧室中研究了甲烷添加对 PFR95(95%异辛烷和 5%正庚烷体积分数混合燃料)层流燃烧速度、马克斯坦长度和火焰稳定性的影响。实验初始压力为 0.25、0.5、1MPa,初始温度为 373K,当量比为 0.8、1.0、1.2,甲烷添加比为 25%、50%、75%。研究指出,在较低初始压力下,甲烷添加能够提高低当量比混合燃料拉伸火焰速度,但在高当量比区域,甲烷添加反而会降低混合燃料拉伸火焰速度。另外,研究还发现甲烷/PFR95 混合燃料燃烧速度快于甲烷和 PFR95 燃料,且这种现象在低初始压力下表现更为明显。到目前为止,国内外鲜有 CH₄/航空煤油混合燃料燃烧特性等相关实验研究的报道。

本文拟对 CH₄/正癸烷混合燃料的燃烧特性进行研究,其中 CH₄ 是 LNG 的主要成分,而正癸烷因具有与航空煤油相似的物理和化学性质,可用作航空煤油单组份替代燃料。本文利用定容燃烧反应器实验装置对甲烷摩尔分数为 0、0.2、0.4、0.6、0.8 的 CH₄/正癸烷混合燃料在初始温度 420 K、初始压力为 0.1 MPa、当量比范围为 0.8~1.5 条件下的燃烧特性进行实验研究,并分析了甲烷摩尔分数与当量比对 CH₄/正癸烷混合燃料火焰扩散速度、拉伸火焰传播速度、马克斯坦长度、无拉伸火焰传播速度和层流燃烧速度等的影响。本研究可为 LNG 在航空发动机中的应用

提供必要理论基础。

1 实验装置

定容燃烧反应实验装置如图 1 所示^[10],该装置包括定容弹、点火系统、加热系统、高速摄影系统、数据采集系统。定容弹本体为不锈钢圆柱型,其内径为 180 mm,容积约为 5.5 L,如图 2 所示。定容弹内布置有点火电极,定容弹外装有压力传感器、压力变送器、温度传感器、液体燃料注射阀与进排气阀等。定容弹两个端面装有 80 mm 厚石英玻璃窗,窗口直径为 130 mm。实验采用背影法测量 CH₄/正癸烷混合燃料火焰发展特性,并利用高速摄像机拍摄火焰发展相片。高速摄像机选用幻

影 Phantom v611,拍摄速度定为 10 000 幅/s。

实验测试过程中,先根据正癸烷与 CH₄ 化学分子式,计算出各燃空当量比和各甲烷摩尔分数下正癸烷、CH₄、氧气和氮气的体积分数,然后根据分压定律计算各组分分压。其次,依据分压依次充入相应组分,先通过蒸发罐将正癸烷气化(蒸发罐温度设为 493 K)并由液体燃料注入阀充入弹体内(由于容弹内压力低于大气压,且容弹温度为 420 K,与正癸烷沸点接近,因此,正癸烷进入容弹后仍保持气态),再通过进气系统依次向弹体内充入 CH₄、氧气与氮气。充气完成后静置 10 min,形成均匀混合气后点火,并在中心电极点火的同时触发高速摄像机对火焰发展进行拍照。

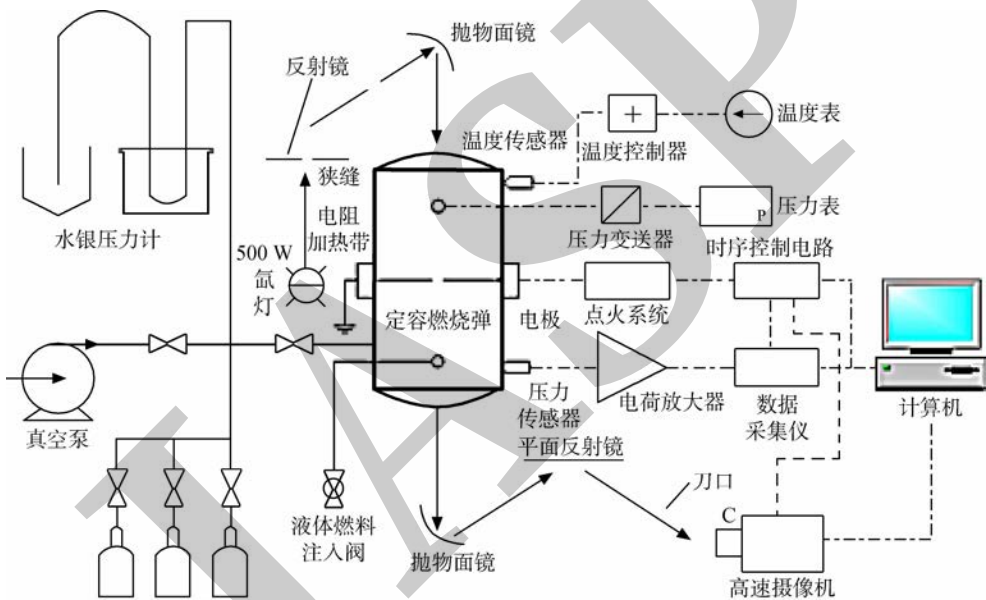


图 1 实验系统布置图
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

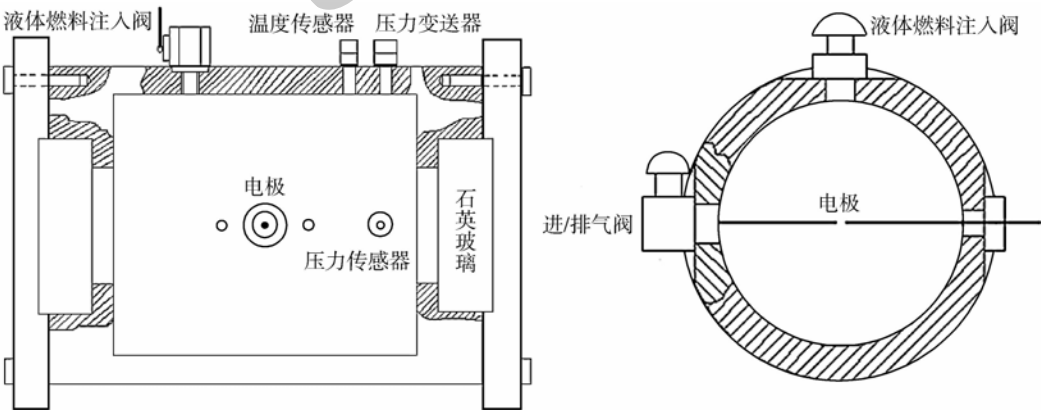


图 2 定容燃烧弹示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the constant volume combustion chamber

2 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 $S_n^{[18]}$

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

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

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

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

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

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 之间存在如下线性关系:

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

利用式(2)与式(4)可以求出 S_n 与 α ,将 $S_n-\alpha$ 直线倒推至 $\alpha=0$,直线在 S_n 轴上的截距即为无拉伸层流火焰传播速度,直线的斜率取相反数即

为马克斯坦长度 L_b 。

根据在火焰前锋面上的质量守恒,有

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

式中 ρ_u 与 ρ_b 分别为已燃区与未燃区混合气的密度。

由式(5)可获得层流燃烧速度 u_l

$$u_l = \frac{\rho_b S_l}{\rho_u} \tag{6}$$

3 实验结果与分析

3.1 甲烷摩尔分数对 CH₄/正癸烷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 为 420 K、初始压力 p_0 为 0.1 MPa、当量比 Φ 为 1.3、甲烷摩尔分数 x_{CH_4} 分别为 0、0.4、0.8 的 CH₄/正癸烷混合燃料火焰发展图片。从图中可以看出,当甲烷摩尔分数为 0 时,火焰发展初期,火焰前锋面已经开始变得极不光滑,火焰锋面由最初的梅花状边缘发展为长条形胞状结构,并在火焰发展末期,呈现出非常明显的网格形胞状结构;随着混合燃料中甲烷摩尔分数增加至 0.4,混合燃料燃烧过程中火焰前锋面变得较为光滑,只有在火焰

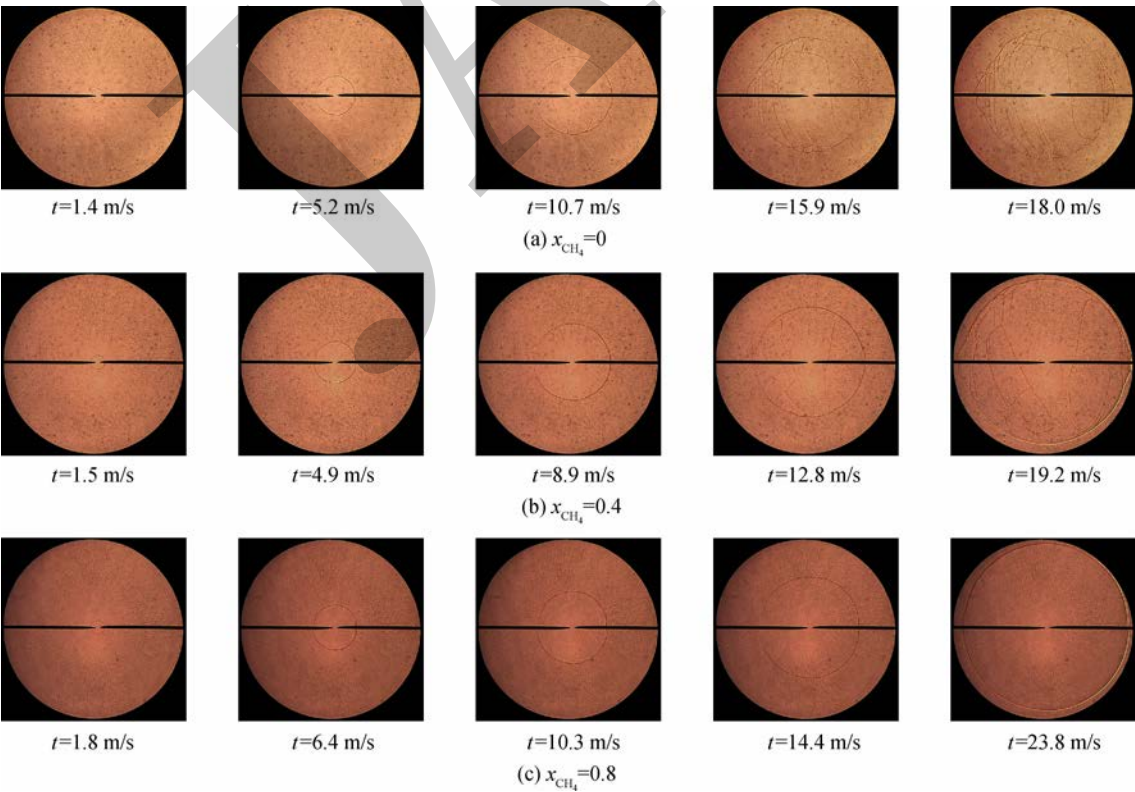


图 3 甲烷摩尔分数对混合燃料的火焰发展特性的影响($\Phi=1.3$)

Fig. 3 Influence of methane mole fraction on flame propagation characteristics of mixed fuel ($\Phi=1.3$)

发展末期呈现出少量的胞状结构;当甲烷摩尔分数进一步增加,提高至 0.8 时,从火焰发展图片中可观察到,火焰从早期发展至末期始终呈现出极为光滑的前锋面,并未出现胞状结构。

在定容燃烧弹中,可燃混合气层流燃烧速度受混合气理化性质、当量比、初始状态参数与点火能量等多种因素影响。考虑到火焰半径 r 小于 7 mm 时点火能量所造成的影响以及火焰半径大于 25 mm 时未燃 CH_4 /正癸烷混合气温度和压力变化带来的影响,本文选择对火焰半径 7~25 mm 所对应的纹影照片进行测量与分析。同时,考虑到实验设备的变值系统误差以及实验人员的粗大误差等因素,采取对每一工况进行 3 次实验和对实验数据取平均值的方法减小实验测量误差。

图 4 显示了初始温度 T_0 为 420 K、初始压力 p_0 为 0.1 MPa 时,不同当量比和甲烷摩尔分数对 CH_4 /正癸烷混合燃料火焰扩散半径随时间变化趋势的影响。从图 4 中可以看出,各个实验工况的火焰扩散半径与时间基本呈线性关系。图4(a)中,甲烷摩尔分数为 0.2 和 0.4 的曲线斜率较大,其中甲烷摩尔分数为 0.4 曲线斜率略大于 0.2,说明在当量比为 1.0 条件下,甲烷摩尔分数为 0.4 的火焰半径随时间增长速度最快;另外,甲烷摩尔分数为 0.8 时,火焰扩散半径随时间增长速度最慢;而甲烷摩尔分数为 0、0.6 和 1.0 的火焰半径扩散速度介于甲烷摩尔分数为 0.4 和 0.8 之间,其中甲烷摩尔分数为 0 和 0.6 时,火焰扩散半径随时间变化趋势非常接近,甲烷摩尔分数为 1.0 时火焰半径扩散速度略高于甲烷摩尔分数为 0 和 0.6 工况。

图 4(b)显示当量比为 0.8、1.0 和 1.4,甲烷摩尔分数分别为 0、0.4 和 1.0 时火焰扩散速度曲线。从图中可以看出,当量比为 1.0 时,3 种甲烷摩尔分数混合燃料火焰扩散速度均快于其他当量

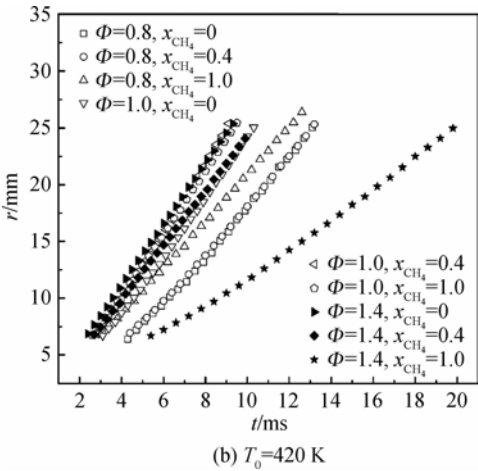
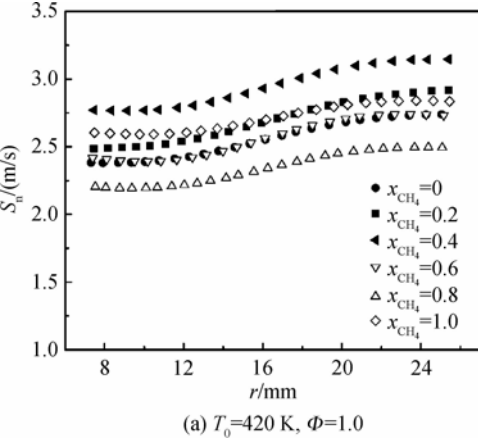
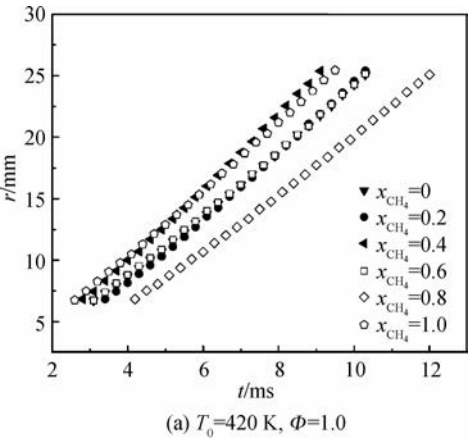


图 4 甲烷摩尔分数对火焰半径扩散速度的影响
Fig. 4 Influence of methane mole fraction on diffusion velocity of flame radius

比工况;当量比为 1.4 时,甲烷摩尔分数变化对混合燃料火焰扩散速度影响最为明显,随着甲烷摩尔分数的增加,混合燃料火焰扩散速度显著下降;而当量比为 0.8 时,甲烷摩尔分数的增加对混合燃料火焰扩散速度影响极小。可见,在浓混合气下,甲烷添加对混合燃料火焰扩散速度影响最为明显。理论分析可知,甲烷和正癸烷气相标准燃烧热相差较大,浓混合气下,甲烷摩尔分数不同造成绝热火焰温度差异更为明显,绝热火焰温度的降低是导致火焰扩散速度显著下降的主要原因。

根据火焰扩散半径与时间的关系,可以计算出拉伸火焰传播速度 S_n ,来进一步表征火焰内在的传播规律。图 5 显示了初始温度为 420 K、初始压力为 0.1 MPa、当量比分别为 0.8、1.0 和 1.4 工况下,不同甲烷摩尔分数的 CH_4 /正癸烷混合燃料拉伸火焰传播速度随火焰扩散半径的变化趋势。

火焰发展初期,火焰前锋面拉伸率大,随着火焰发展,前锋面拉伸率逐渐降低。排除前面提到



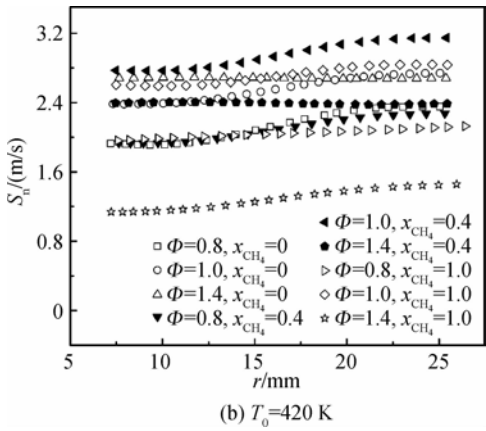


图 5 甲烷摩尔分数对拉伸火焰传播速度随火焰半径变化的影响

Fig. 5 Influence of methane mole fraction on variation of stretched flame speed with flame radius

的点火能量和火焰发展后期压力和温度变化对层流燃烧速度造成的影响,火焰半径在 7~25 mm 范围内,拉伸火焰传播速度 S_n 与拉伸率 α 基本成线性关系。将 S_n 外推至 $\alpha=0$ 处,可得到无拉伸火焰传播速度 S_l , $S_n-\alpha$ 拟合直线的斜率可定义为已燃气体马赫斯坦长度 L_b 的负值。

从图 5(a)中可以看出,当量比为 1.0 时,不同甲烷摩尔分数混合燃料的拉伸火焰传播速度随火焰扩散半径均呈现出非线性增长趋势,火焰扩散半径在 12~20 mm 范围内,拉伸火焰传播速度增长较为明显,而在 7~12 mm 和 20~27 mm 范围内,拉伸火焰传播速度增长缓慢或仅维持不变;在实验测量火焰扩散半径范围内,甲烷摩尔分数为 0.4 混合燃料的拉伸火焰传播速度最快,甲烷摩尔分数为 0.8 的拉伸火焰传播速度最慢。

在图 5(b)中,拉伸火焰传播速度随火焰扩散半径的变化趋势受当量比影响,呈现出显著差异。在当量比为 1.4,甲烷摩尔分数为 0 和 0.4 时,拉伸火焰传播速度随火焰扩散半径增加略有降低,总体呈现出线性负增长趋势;在当量比为 1.0,甲烷摩尔分数为 1.0 时,拉伸火焰传播速度随火焰扩散半径增加略有升高,总体呈现线性增长趋势;而其他工况,拉伸火焰传播速度对火焰扩散半径均呈现非线性增长趋势,其中当量比为 1.0,甲烷摩尔分数为 0.4 混合燃料的拉伸火焰传播速度最快,其随火焰扩散半径增长趋势也最为明显。

图 6 为初始温度为 420 K,初始压力为 0.1 MPa,当量比分别为 0.8、1.0 和 1.4 时,甲烷摩尔分数对 CH₄/正癸烷混合燃料拉伸火焰传播速度随拉伸率变化的影响。从图 6(a)中可以看出,当

量比为 1.0 时,在实验测量范围内,火焰拉伸率值介于 200~800 之间,不同甲烷摩尔分数混合燃料的拉伸火焰传播速度均随火焰拉伸率增加而减小。从图 6(b)中可以看出,多数工况下,拉伸火焰传播速度随火焰拉伸率增加而减小,仅当当量比为 1.4 时,甲烷摩尔分数为 0 和 0.4 工况,拉伸火焰传播速度随着火焰拉伸率增加而增加,拟合直线斜率为正值。可知,这两种工况的马赫斯坦长度为负值。

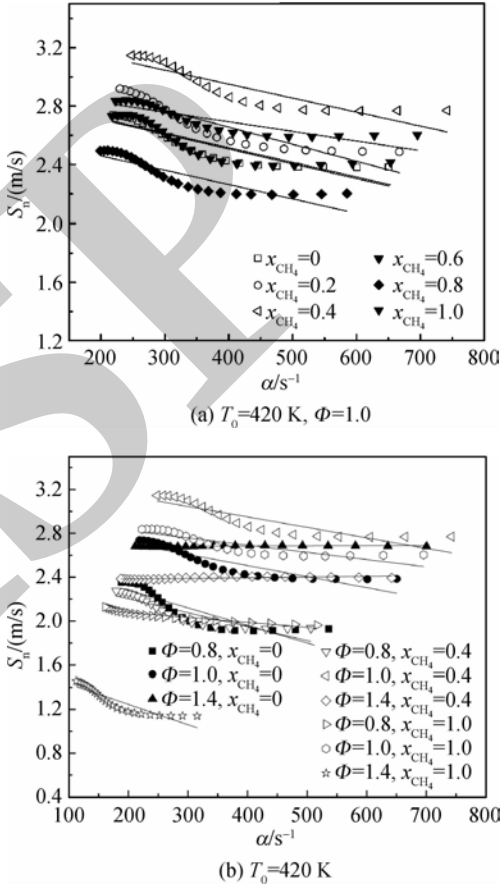


图 6 甲烷摩尔分数对拉伸火焰传播速度随拉伸率变化的影响

Fig. 6 Influence of methane mole fraction on variation of stretched flame speed with flame stretch rate

3.2 甲烷摩尔分数对燃烧稳定性的影响

马赫斯坦长度 L_b 表征火焰对拉伸的敏感程度,继而反映出火焰稳定性。马赫斯坦长度为正值时,火焰锋面出现凸起部分的火焰传播速度将得到抑制,火焰趋于稳定;而马赫斯坦长度为负值时,火焰锋面出现凸起部分的火焰传播速度不但没有得到抑制,反而会进一步增加,火焰变得更加不稳定。

图 7 为初始温度为 420 K、初始压力为 0.1

MPa, 当量比为 0.8~1.5, 甲烷摩尔分数在 0~0.8 内 40 个工况的马克斯坦长度。从图中可以看出, 不同甲烷摩尔分数混合燃料的马克斯坦长度均随当量比的增加而减小, 说明随着当量比的增加, 混合燃料燃烧趋于不稳定; 当量比为 1.4、甲烷摩尔分数为 0.4 的混合燃料以及当量比为 1.5 的所有甲烷摩尔分数的混合燃料的马克斯坦长度均出现负值, 说明在这些工况下, 混合燃料的燃烧极为不稳定; 另外, 从图中可以看出, 当量比在 0.9~1.4 (1.1 和 1.3 除外) 范围内, 甲烷摩尔分数为 0.2 的混合燃料燃烧稳定性优于其他工况, 说明添加少量甲烷, 对混合燃料稳定性影响较为明显。其次, 值得注意的是, 相比于其他混合燃料, 甲烷摩尔分数为 0.8 的混合燃料马克斯坦长度随当量比的增加而减小缓慢。

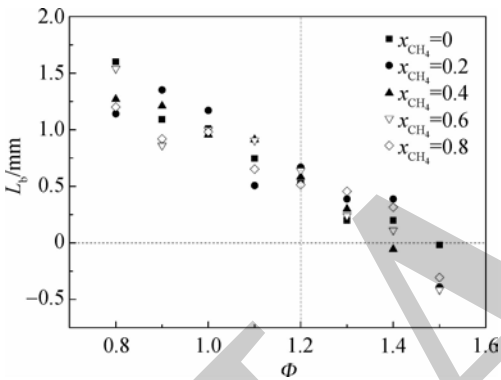


图 7 甲烷摩尔分数对马克斯坦长度随当量比变化的影响

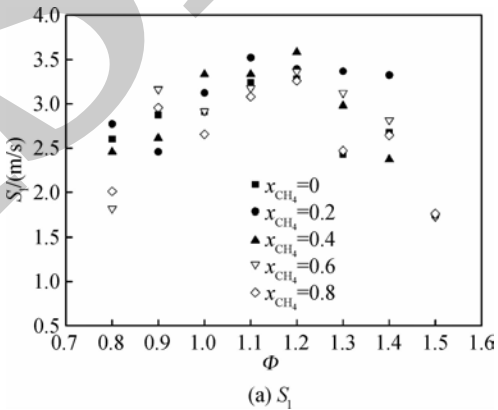
Fig. 7 Influence of methane mole fraction on variation of Markstein length with equivalence ratio

如图 7 所示, 当量比在 0.8~1.5 范围内, 甲烷摩尔分数对混合燃料稳定性的影响存在一定规律, 即以 1.2 当量比为界线, 当量比小于 1.2 时, 甲烷摩尔分数为 0.8 混合燃料马克斯坦长度较小, 燃烧稳定性较差, 而当当量比大于 1.2 时, 甲烷摩尔分数为 0.8 混合燃料马克斯坦长度较大, 燃烧稳定性较好。分析原因可知, 甲烷马克斯坦长度随当量比增加而增加^[19], 而正癸烷马克斯坦长度随当量比增加而减小。由于两者具有截然相反的趋势, 使得甲烷与正癸烷混合后, 必然存在随甲烷摩尔分数的增加, 混合燃料马克斯坦长度随当量比增加而减小趋势变弱的现象。排除实验误差等因素, 推测甲烷摩尔分数对混合燃料燃烧稳定性的影响趋势为: 以当量比为 1.2 为分界线, 当量比小于 1.2 时, 甲烷摩尔分数的增加降低了混

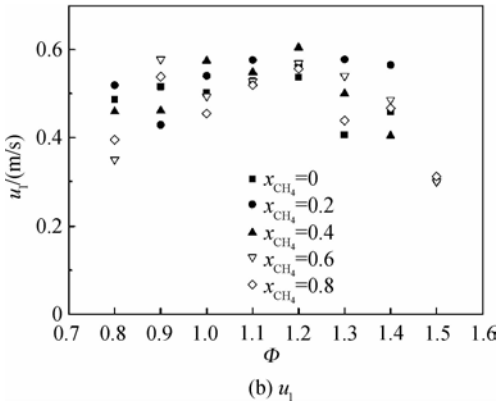
合燃料稳定性, 而当量比大于 1.2 时, 甲烷摩尔分数的增加提高了混合燃料稳定性。

3.3 甲烷摩尔分数对无拉伸火焰传播速度和层流燃烧速度的影响

图 8 显示了初始温度为 420 K, 初始压力为 0.1 MPa, 甲烷摩尔分数在 0~0.8 范围内, CH₄/正癸烷混合燃料无拉伸火焰传播速度 S_l 和层流燃烧速度 u_l 随当量比变化情况。从图 8 中可以看出, 无拉伸火焰传播速度和层流燃烧速度变化趋势基本一致, 即随着当量比的增加, 无拉伸火焰传播速度和层流燃烧速度均呈现出先增加后减小趋势。如图 8(b) 所示, 不同甲烷摩尔分数混合燃料层流燃烧速度峰值出现当量比在 1.1~1.2 之间, 且随着甲烷摩尔分数的增加, 峰值有向浓混合气方向移动的趋势, 其中当量比为 1.0 和 1.2 时, 甲烷摩尔分数为 0.4 的混合燃料层流燃烧速度最快, 而当量比为 1.1、1.3 和 1.4 时, 甲烷摩尔分数为 0.2 的混合燃料层流燃烧速度最快。综合分



(a) S_l



(b) u_l

图 8 甲烷摩尔分数对无拉伸层流火焰传播速度和层流燃烧速度随当量比变化的影响 ($T_0=420\text{ K}$)
Fig. 8 Influence of methane mole fraction on variation of unstretched flame speed and laminar burning velocity with equivalence ratio ($T_0=420\text{ K}$)

析,相比于其他工况,甲烷摩尔分数为 0.2 和 0.4 的混合燃料在当量比 1.0~1.4 范围内层流燃烧速度较快,而在实验测量当量比范围,甲烷摩尔分数为 0.8 的混合燃料层流燃烧速度均较慢。

由理论可知,燃料层流燃烧速度强烈依赖于绝热火焰温度,且燃烧过程中活性自由基(H、O 和 OH 等)对层流燃烧速度影响也较大,为了进一步阐明甲烷摩尔分数对混合燃料层流燃烧速度的影响,需获得混合燃料绝热火焰温度以及对 CH₄/正癸烷混合燃料燃烧过程进行化学反应动力学分析,这部分内容将在今后工作中展开。

4 结 论

本文利用定容燃烧反应器实验装置对甲烷摩尔分数为 0、0.2、0.4、0.6、0.8 的 CH₄/正癸烷混合燃料在初始温度为 420 K、初始压力为 0.1 MPa、当量比范围为 0.8~1.5 条件下的燃烧特性进行实验研究,并分析了甲烷摩尔分数与当量比对 CH₄/正癸烷混合燃料层流燃烧特性与燃烧稳定性的影响,得到如下结论:

1) 当量比为 1.4,甲烷摩尔分数为 0 和 0.4 时,拉伸火焰传播速度随火焰扩散半径呈现出线性负增长趋势;当量比为 1.0,甲烷摩尔分数为 1.0 时,拉伸火焰传播速度随火焰扩散半径呈现线性增长趋势;实验研究其他工况,拉伸火焰传播速度对火焰扩散半径呈现非线性增长趋势,其中当量比为 1.0,甲烷摩尔分数为 0.4 的混合燃料的拉伸火焰传播速度最快,其随火焰扩散半径增长趋势也最为明显。

2) 甲烷摩尔分数为 0.8 的混合燃料马克斯坦长度随当量比增加减小缓慢,以 1.2 为临界当量比,当量比小于 1.2 时,相比于其他混合燃料,甲烷摩尔分数为 0.8 的混合燃料马克斯坦长度较小,燃烧稳定性较差,而当量比大于 1.2 时,甲烷摩尔分数为 0.8 的混合燃料马克斯坦长度较大,燃烧稳定性较好。

3) 不同甲烷摩尔分数混合燃料层流燃烧速度峰值出现在当量比为 1.1~1.2 之间,其中当量比为 1.0 和 1.2 时,甲烷摩尔分数为 0.4 的混合燃料层流燃烧速度最快,而当量比为 1.1、1.3、1.4 时,甲烷摩尔分数为 0.2 的混合燃料层流燃烧速度最快。在实验测量当量比范围,甲烷摩尔分数为 0.8 的混合燃料层流燃烧速度均较慢。

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 Chi, HUI Xin, LIN Yuzhen, 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] HARI T K, YAAKOB Z, BINITHA N N. Aviation biofuel from renewable resources: routes, opportunities and challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 1234-1244.
[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] 刘爱璇,陈欣,陈保东,等. 液化天然气作为航空燃料的发展趋势及特点分析[J]. 航空动力学报, 2016, 31(6): 1281-1288.
LIU Aiguo, CHEN Xin, CHEN Baodong, et al. Development trend and characteristics of liquefied natural gas as the aviation fuel[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(6): 1281-1288. (in Chinese)
[7] 余慧玲,曹春泉. 液化天然气(LNG)作为飞机燃料的可行性及经济性分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2015(1): 109-112.
YU Huling, CAO Chunquan. Analysis of the feasibility and economy for liquefied natural gas as aircraft fuel[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2015(1): 109-112. (in Chinese)
[8] 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.
[9] KAWA R. Benefit potential for a cost efficient duel fuel propulsion BWB[R]. AIAA-2013-0937, 2013.
[10] HU Erjiang, HANG Zuohua, HE Jiajia, et al. 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.
[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): 481-481. (in Chinese)
[12] MITU M, GIURCAN V, RAZUS D, et al. Inert gas influ-

ence on the laminar burning velocity of methane-air mixtures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 321(5): 440-448.

[13] 汤成龙,司占博,张旭辉,等. 稀释气对高甲烷含量天然气燃烧特性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(9): 41-46.

TANG Chenglong, SI Zhanbo, ZHANG Xuhui, et al. Effects of diluents on the combustion characteristics of natural gas with high methane content[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(9): 41-46. (in Chinese)

[14] 汤成龙,张旭辉,司占博,等. 甲烷/乙烷-空气预混层流燃烧特性试验和数值模拟研究[J]. 内燃机工程, 2016, 37(1): 83-88

TANG Chenglong, ZHANG Xuhui, SI Zhanbo, et al. Experimental and numerical investigation on the laminar flame characteristics of CH₄/C₂H₆-air mixture[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(1): 83-88. (in Chinese)

[15] BALOO M, DARIANI B M, AKHLAGHI M, et al. Effects of pressure and temperature on laminar burning velocity and flame instability of iso-octane/methane fuel blend[J]. Fuel, 2016, 170(15): 235-244.

[16] BALOO M, DARIANI B M, AKHLAGHI M, et al. Effect of iso-octane/methane blend on laminar burning velocity and flame instability[J]. Fuel, 2015, 144(15): 264-273.

[17] WEI Haiqiao, GAO Dongzhi, ZHOU Lei, et al. Experimental study on laminar flame characteristics of methane-PRF95 dual fuel under lean burn conditions [J]. Fuel, 2016, 182(15): 721-731.

[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.

[19] 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)

(编辑:王碧琚)