

RP-3 航空煤油层流燃烧特性的实验

曾文¹, 陈欣¹, 马洪安¹, 刘宇¹, 陈潇潇¹, 胡二江²

(1. 沈阳航空航天大学 航空航天工程学部(院), 沈阳 110136;

2. 西安交通大学 能源与动力工程学院 动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 为了阐明国产 RP-3 航空煤油的燃烧特性, 在定容燃烧反应器中实验测量了初始压力分别为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 MPa、初始温度分别为 390, 420, 450 K、当量比范围为 0.6~1.6 时, RP-3 航空煤油的层流燃烧速度与马赫斯坦长度, 分析了初始温度、压力以及当量比对火焰发展结构、层流燃烧速度及马赫斯坦长度的影响. 结果表明: 随着初始温度的升高或初始压力的降低, RP-3 航空煤油的层流燃烧速度逐渐升高; 随着当量比由 0.6 升高至 1.6, 层流燃烧速度呈现先增加后降低的趋势, 当当量比为 1.2 时, 层流燃烧速度最大. 随着初始压力或当量比的降低, 马赫斯坦长度逐渐增大, 火焰稳定性增强; 初始温度对马赫斯坦长度的影响不明显, 当当量比为 0.9~1.1 时, 随着初始温度的升高, 马赫斯坦长度逐渐减小, 但当当量比为 1.2~1.5 时, 马赫斯坦长度则有所增大.

关 键 词: RP-3 航空煤油; 燃烧稳定性; 层流燃烧速度; 马赫斯坦长度; 影响因素

中图分类号: V231; TK401

文献标志码: A

Experiment on laminar burning characteristics of RP-3 kerosene

ZENG Wen¹, CHEN Xin¹, MA Hong-an¹, LIU Yu¹,

CHEN Xiao-xiao¹, HU Er-jiang²

(1. College of Aerospace Engineering,

Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering,

School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to illustrate the combustion characteristics of RP-3 kerosene, the laminar burning velocity and Markstein length of RP-3 kerosene were investigated experimentally in a constant volume combustion bomb. The experiments were performed at four different pressures: 0.1, 0.3, 0.5 and 0.7 MPa, three different temperatures: 390, 420 and 450 K, and over the equivalence ratio range of 0.6~1.6. The influences of three crucial parameters: initial temperature, initial pressure and equivalence ratio on the flame structure, laminar burning velocity and Markstein length were investigated. The results showed that increasing the initial temperature or decreasing the initial pressure could lead to an increase in the laminar burning velocity of RP-3 kerosene. With the equivalence ratio increasing from 0.6 to 1.6, the laminar burning velocity increased initially and then decreased gradually. The highest laminar burning velocity was measured at fuel rich condition (equivalence ratio of 1.2). Furthermore, decreasing the initial pressure or equivalence ratio could increase the stability of the flame front, which is established by increased Markstein length. The effect of the initial temperature on the Markstein length is not clear; with the increase of the initial

收稿日期: 2014-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(51376133); 辽宁省自然科学基金(2013024009); 沈阳市科技攻关项目(F13024200)

作者简介: 曾文(1977—), 男, 湖南沅江人, 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.

temperature, the Markstein length has a decreasing trend at some conditions for the equivalence ratios of 0.9—1.1, and an increasing trend over the equivalence ratios range of 1.2—1.5.

Key words: RP-3 kerosene; combustion stability; laminar burning velocity; markstein length; influence factor

航空发动机燃烧室内航空燃料的混合、着火与燃烧是一个复杂的湍流混合和强烈受控于反应动力学的湍流燃烧过程^[1-2],而层流燃烧速度与湍流强度等是湍流燃烧速度的主要影响因素.因此,为了更好地了解航空发动机燃烧室内的湍流燃烧细节,必须对航空燃料的层流燃烧特性以及燃烧稳定性有充分的了解.测量碳氢燃料层流燃烧特性的方法包括滞止火焰面法^[3]、热流量法^[4]与球形火焰法^[5]等.相比其他测量方法,球形火焰法可获得火焰拉伸与层流火焰特性之间的关系^[6],并能对火焰稳定性进行详细分析,因此该方法获得了广泛的应用.

Far 等^[7-8]在定容燃烧反应器中对高温高压下 JP-8 航空煤油的火焰结构与层流燃烧速度进行了实验测量,同时分析了稀释气体(CO₂, N₂)对 JP-8 航空煤油的火焰结构与层流燃烧速度的影响. Singh 等^[9]采用预混球形燃烧器对初始温度为 400 K、初始压力为 0.1 MPa(1atm)、当量比范围为 0.7~1.6 下正癸烷、Jet A 航空煤油的层流燃烧速度以及马赫斯坦长度进行了实验测量. Vukadinovic 等^[10]采用定容反应器对 Jet A-1 航

空煤油的层流燃烧速度与马赫斯坦长度进行了实验测量,同时,分析了初始压力、初始温度以及当量比对层流燃烧特性的影响.但是,到目前为止,还无国产 RP-3 航空煤油的层流燃烧特性及燃烧稳定性等相关报道.由于 RP-3 航空煤油为我国航空发动机所采用的主要燃料,其物理与化学特性与国外航空煤油存在较大差异,因此,有必要开展国产 RP-3 航空煤油的着火与燃烧特性的实验研究,获得其着火与燃烧特性的实验数据,为构建其燃烧反应机理提供理论依据与实验支持.

本文利用定容燃烧反应器实验装置对 RP-3 航空煤油在初始温度(T)分别为 390,420,450 K、初始压力(p)分别为 0.1,0.3,0.5,0.7 MPa、当量比(ϕ)范围为 0.6~1.6 条件下的层流燃烧特性与燃烧稳定性进行了测量,并分析了初始压力、温度与当量比(ϕ)对 RP-3 航空煤油层流燃烧特性与燃烧稳定性的影响.

1 实验装置

定容燃烧反应器实验系统布置如图 1 所示^[11],由定容燃烧弹、点火系统、加热系统、高速

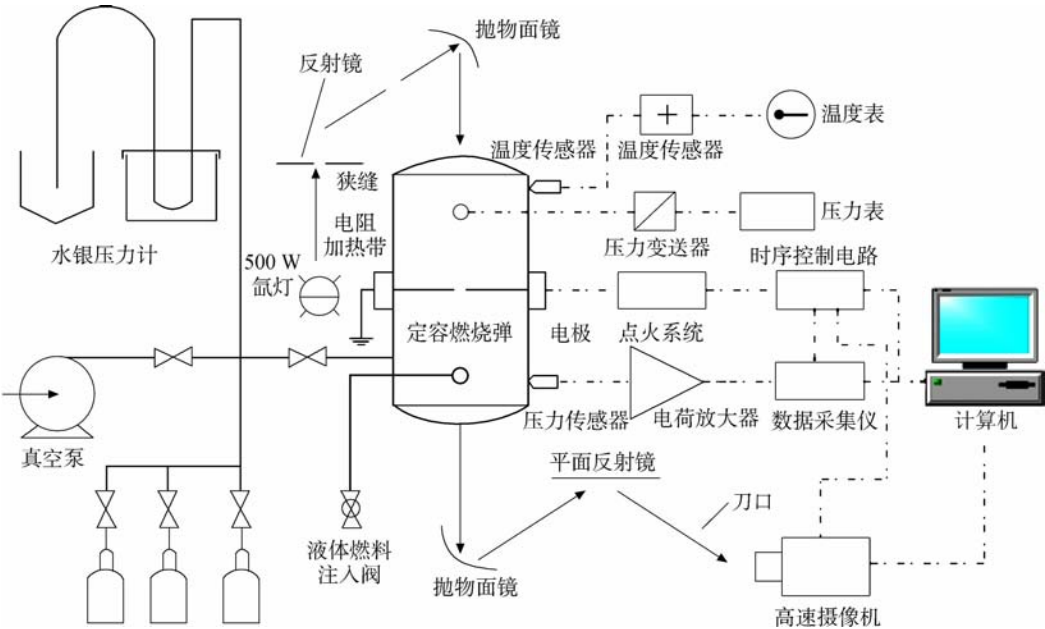
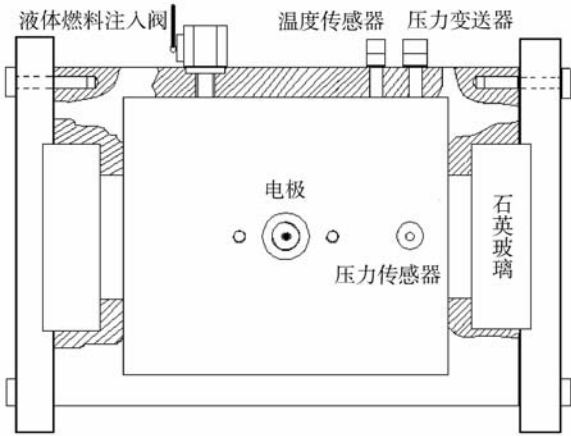


图 1 实验系统布置图
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental facility

摄影与纹影系统、数据采集系统等组成。定容燃烧弹为不锈钢圆柱体,其内径为 180 mm,容积为 5.5 L,如图 2 所示。混合气在定容燃烧弹中采用电感放电点火方式点燃,点火电极布置在定容燃烧弹中心。定容燃烧弹的两个端面装有直径为 80 mm 的石英玻璃窗口。实验采用纹影法测量火焰发展特性,利用高速摄像机拍摄火焰发展相片,拍摄速度选择为 10 000 幅/s。



在实验测试过程中,先根据 RP-3 航空煤油的化学分子式,计算出各燃空当量比下燃料与空气的体积分数,并根据分压定律依次向定容燃烧弹中注入燃料与空气。为了在定容燃烧弹中形成均匀的混合气,燃料与空气进入定容燃烧弹后静置时间至少为 10 min。当中心电极点火时,定容燃烧弹中的燃烧压力由数字采集系统采集,火焰发展特性由高速摄像机拍照,三者须保持同步。

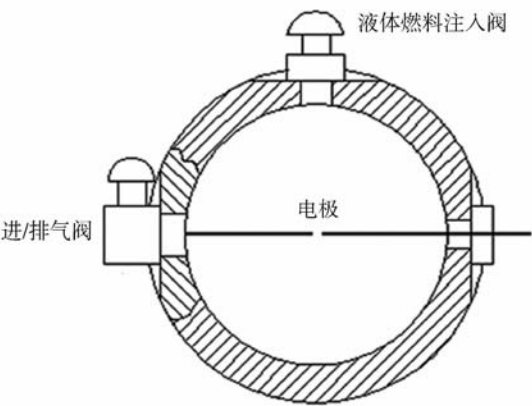


图 2 定容燃烧弹示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the constant volume combustion chamber

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 $S_n^{[12]}$

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

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

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

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

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

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:

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

利用式(1)与式(3)可以求出 S_n 与拉伸率 α , 将 $S_n-\alpha$ 直线倒推至 $\alpha=0\text{ s}^{-1}$, 直线在 S_n 轴上的截距为无拉伸层流火焰传播速率, 马克斯坦长度

L_b 为该直线的斜率的相反数。

根据在火焰前锋面上的质量守恒,有

$$A\rho_u u_1 = A\rho_b S_l \tag{5}$$

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_1

$$U_1 = (\rho_b S_l) / \rho_u \tag{6}$$

3 实验结果与分析

RP-3 航空煤油的组成非常复杂,包含 C_7-C_{16} 等多种链烃、环烷以及芳香族化合物^[13]。在 RP-3 航空煤油层流燃烧特性的实验测试之前,需先确定该航空煤油的化学分子式。在作者的先期研究中^[14],提出了 RP-3 航空煤油的一种 3 组分模拟替代燃料,包括 65% 的正癸烷、10% 的甲苯与 25% 的丙基环己烷(体积比),对其在多工况下的着火特性进行了数值计算,并与 RP-3 航空煤油的着火特性实验数据进行了对比分析,两者吻合良好。因此,本文选定 $C_{9.45}H_{19.6}$ 作为 RP-3 航空煤油的化学分子式。

3.1 火焰发展特性

可燃气体的层流燃烧速度受初始压力、初始

温度、混合气的物理与化学性质、当量比与点火能量等多种因素影响. Bradley, Huang, Burke 等^[15-17]研究发现,当火焰半径在 6~25 mm 之间时,点火能量对火焰传播的影响可忽略,并且未燃区压力和温度变化较小. 因此,在对火焰纹影照片

后期处理时,本文只选择火焰半径在 6~25 mm 之间的纹影照片.

图 3、图 4 分别显示了初始温度为 390 K 时不同初始压力与当量比下的火焰发展趋势. 当初始压力或当量较小时,点火后火焰前锋面呈球形发

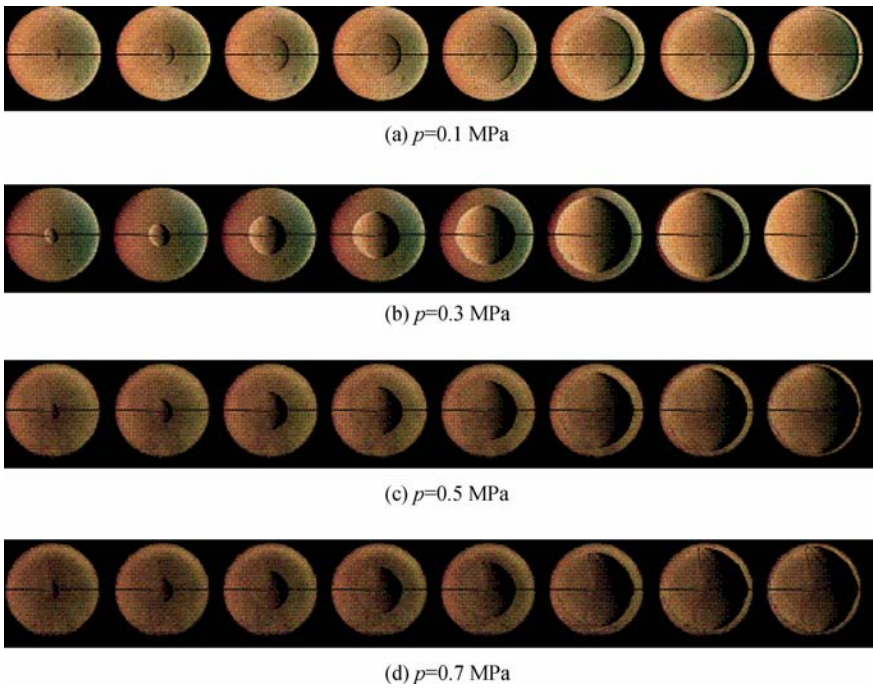


图 3 初始压力对火焰发展特性的影响($\phi=1.0$, $T=390\text{ K}$)
Fig. 3 Effects of initial pressure on flame propagation characteristics ($\phi=1.0$, $T=390\text{ K}$)

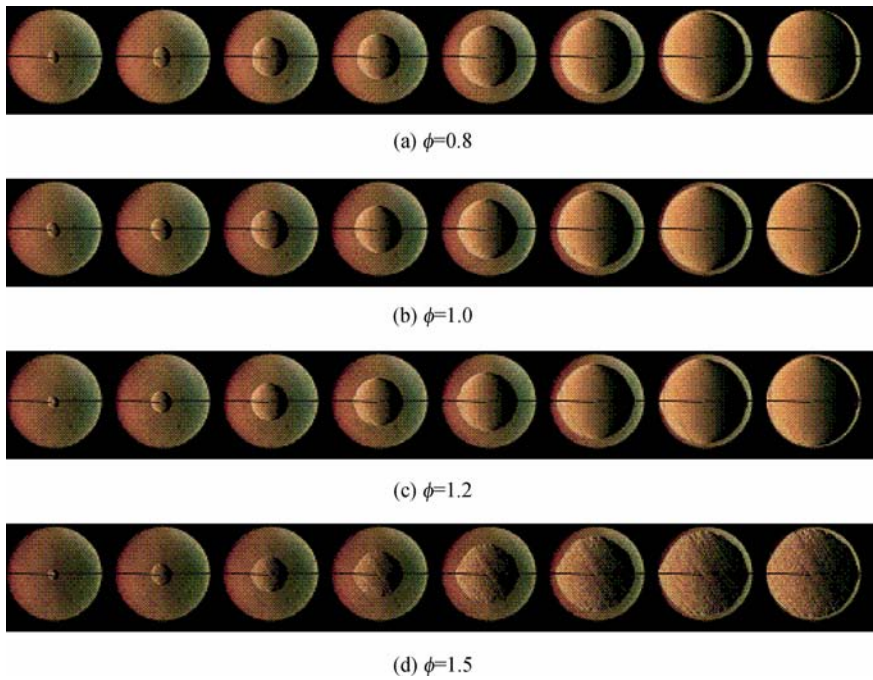


图 4 当量比对火焰发展特性的影响($p=0.3\text{ MPa}$, $T=390\text{ K}$)
Fig. 4 Effects of equivalence ratio on flame propagation characteristics ($p=0.3\text{ MPa}$, $T=390\text{ K}$)

展且锋面较光滑,如图 3(a)与图 4(a)所示.当初始压力或当量比升高时,在火焰发展早期,火焰锋面较为光滑,但随着火焰的进一步扩展,火焰锋面开始出现裂纹或褶皱,并且该现象随初始压力或当量比的进一步提高而变得更为明显.

图 5 显示了初始压力为 0.1 MPa、当量比为 1.0 时,不同初始温度下的火焰发展趋势.从图可以看出,RP-3 航空煤油层流燃烧过程中火焰发展趋势受初始温度的影响较小.

图 6 显示了不同初始压力、温度与当量比下火焰半径随时间的变化趋势.从图可知,在各工况下火焰半径随时间的变化呈线性关系.随着初始压力的提升,火焰半径增长速度逐渐降低;当初始温度由 390 K 升高至 420 K 时,火焰半径增长速

度变化较小,但当初始温度继续升高至 450 K 时,火焰半径增长速度显著升高;随着混合气当量比的升高,火焰半径的增长速度呈现先增加后降低的趋势,当当量比为 1.2 时,火焰半径增长速度最大.

进一步分析火焰半径随时间的变化曲线,可获得拉伸火焰传播速度 S_n .图 7 显示了不同初始工况下拉伸火焰传播速度随火焰半径的变化趋势.

火焰在以球形向外膨胀发展过程中,在不同初始压力、温度与当量比下,随火焰半径的增加,拉伸火焰传播速度呈现出不同的发展趋势.当初始压力为 0.1 MPa 时,随着火焰半径的增加,拉伸火焰传播速度呈先下降后上升的趋势;但是,随着

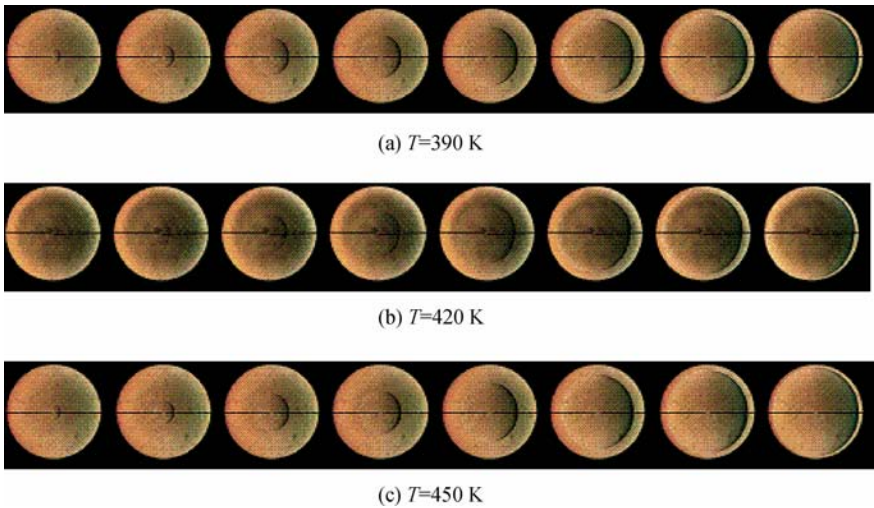


图 5 初始温度对火焰发展特性的影响($\phi=1.0$, $p=0.1$ MPa)
Fig. 5 Effects of initial temperature on flame propagation characteristics ($\phi=1.0$, $p=0.1$ MPa)

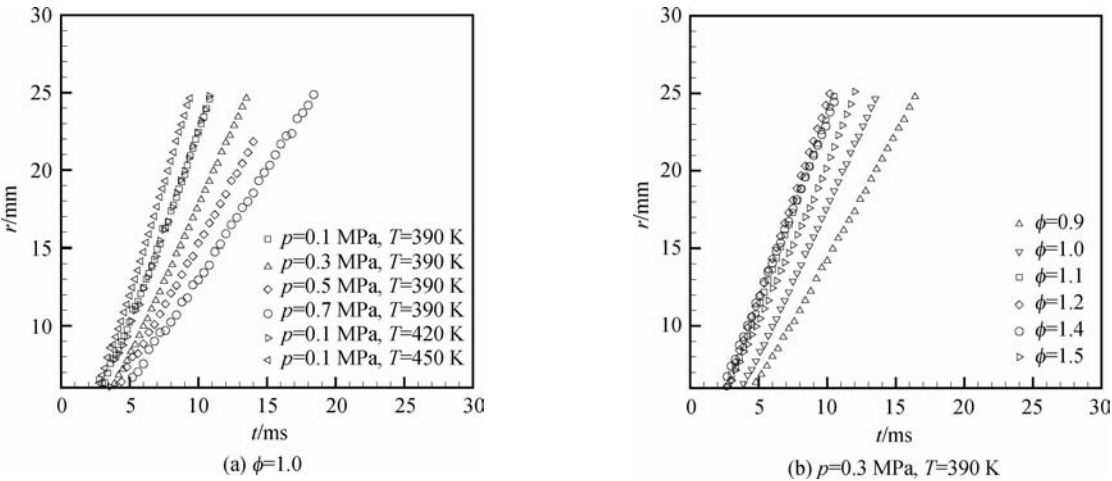


图 6 火焰半径随时间的变化趋势
Fig. 6 Evolutions of flame radius versus time

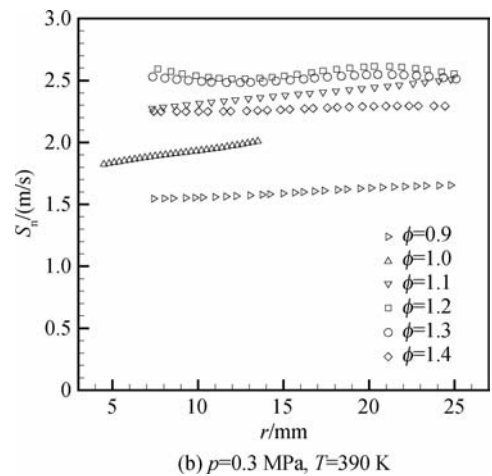
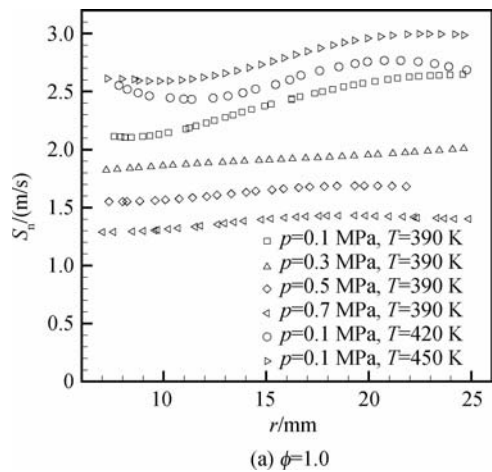


图 7 拉伸火焰传播速度随火焰半径的变化趋势
Fig. 7 Variations of stretched flame speed with flame radius

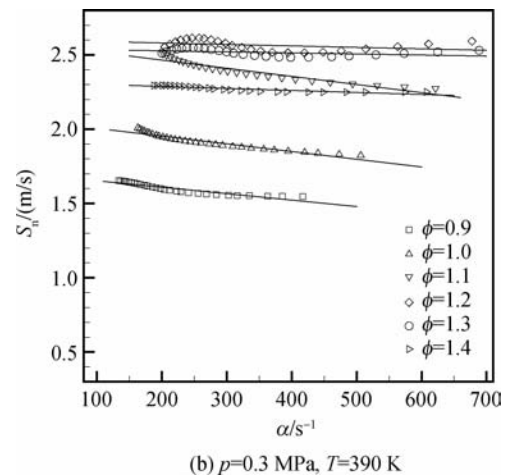
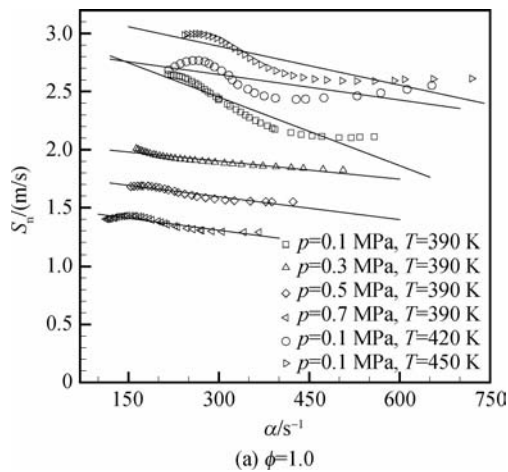


图 8 拉伸火焰传播速度随拉伸率的变化趋势
Fig. 8 Variations of stretched flame speed with flame stretch

初始压力的升高,拉伸火焰传播速度随火焰半径的变化呈线性关系,且变化不大. 当当量比为 1.2 与 1.3 时,拉伸火焰传播速度随火焰半径的变化呈先下降后上升的趋势,在其他当量比下则呈线性关系;当当量比为 0.9 与 1.4 时,拉伸火焰传播速度随火焰半径的增长变化较小,当当量比为 1.0 与 1.1 时则逐渐增大.

根据球形火焰扩散理论,由拉伸火焰传播速率与火焰拉伸率之间的关系,可获得反映火焰稳定性的马克斯坦长度 L_b 以及无拉伸层流火焰传播速度 S_l . 图 8 显示了不同初始工况下拉伸火焰传播速度随拉伸率的变化趋势.

从图 8 可以看出,当处于高初始压力以及当量比为 0.9~1.1 与 1.4 时,拉伸火焰传播速度随拉伸率的增加呈线性关系,并逐渐降低;而当初始压力为 0.1 MPa 以及当量比为 1.2 与 1.3 时,拉伸火焰传播速度随拉伸率的增加并不呈线性关系.

3.2 燃烧稳定性

马克斯坦长度能反映出火焰的稳定情况. 马克斯坦长度为正值时,火焰较为稳定,并且马克斯坦长度越大,火焰越稳定;当马克斯坦长度为负值时,火焰不稳定. 图 9 显示了不同初始压力与温度下马克斯坦长度随当量比的变化趋势.

预混火焰的不稳定性受热扩散因素(热扩散不稳定性)和流体力学因素(流体力学不稳定性)的综合影响^[18],而这两种不稳定性的区分标准主要是路易斯数(Le),其是未燃混合气的热扩散系数与质量扩散系数的比值. 当 $Le < 1$ 时,预混火焰的不稳定性主要体现为热扩散不稳定性. Bechtold 等^[19]经过研究发现,当碳氢燃料中碳原子个数超过 3 时, Le 一般都大于 1,而 RP-3 航空煤油的碳原子个数大约为 10,因此,在本文中,RP-3 航空煤油预混层流火焰的不稳定性主要为流体力学不稳定性.

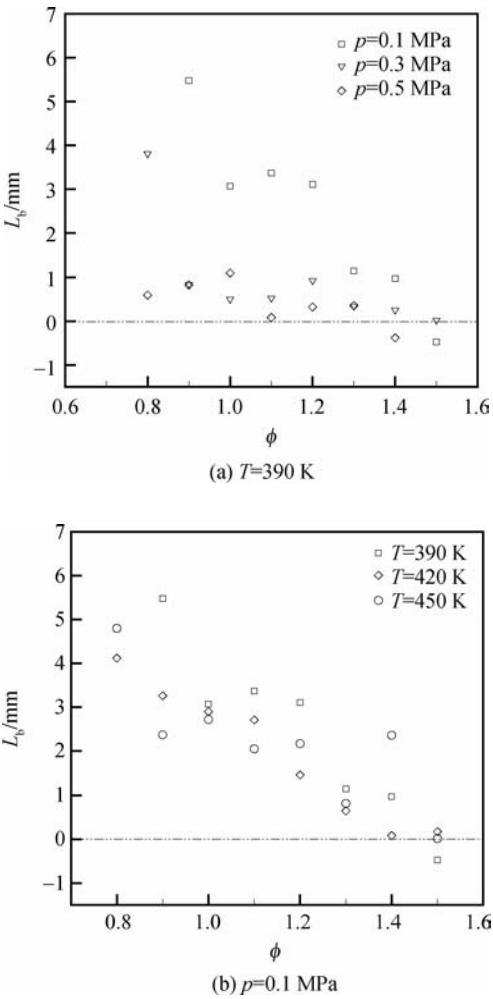


图 9 马克斯坦长度随当量比的变化趋势

Fig. 9 Variations of Markstein length with equivalence ratio

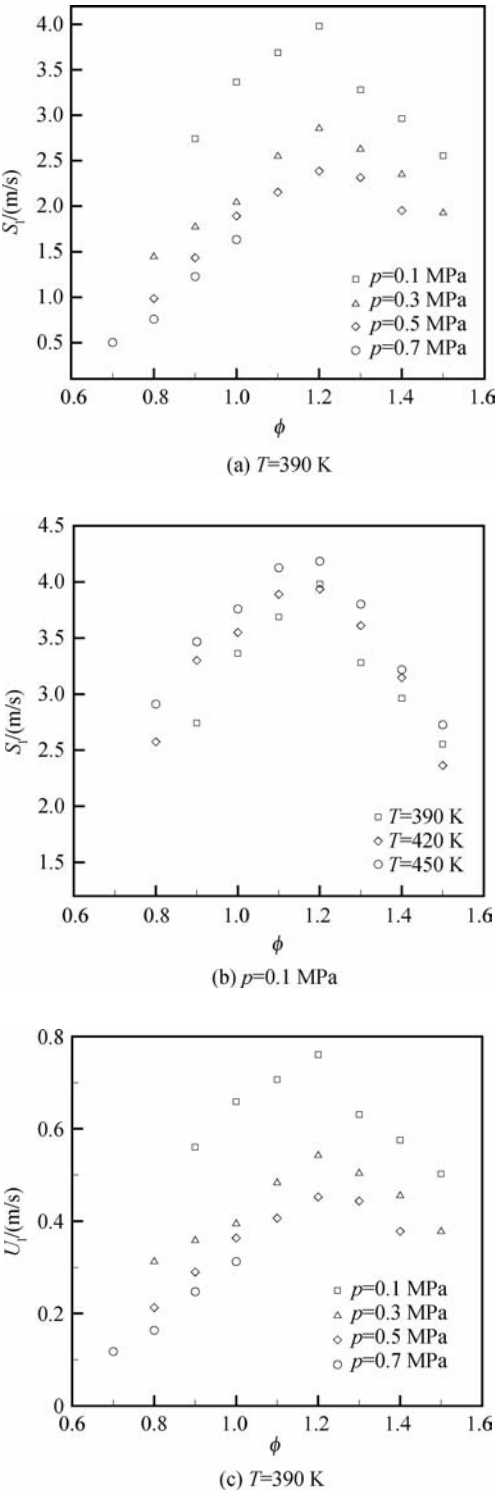
如图 9 所示,随着初始压力的提高,马克斯坦长度逐渐降低,说明提高初始压力将使火焰的不稳定性增加,这也可以从图 3 中看出.随着当量比的升高,马克斯坦长度逐渐降低,说明火焰前锋面在稀混合气处比浓混合气稳定.主要原因为:在 RP-3 航空煤油/空气混合气中,氧气的扩散系数最大.随着当量比的增加,混合气中氧气的体积分数降低,热扩散不稳定性增强,火焰趋向不稳定.

从图 9 可以看出,初始温度对马克斯坦长度的影响不明显.当当量比为 0.9~1.1 时,随着初始温度的升高,马克斯坦长度逐渐减小,火焰的不稳定性增强,但当当量比为 1.2~1.5 时,马克斯坦长度则有所增大,火焰的不稳定性减弱.产生该现象的原因为:热膨胀系数及火焰厚度都随着初始温度的升高而降低;热膨胀系数降低将增加火焰的稳定性,火焰厚度减小将增加火焰的不稳定性,两者的综合影响导致了初始温度对火焰稳定

性的影响不明显,这也可以从图 5 中看出.

3.3 层流燃烧速度

图 10 显示了不同初始压力与温度下无拉伸层流火焰传播速度与层流燃烧速度随当量比的变化趋势.从图中可以看出,随初始压力的升高、初始温度的降低,无拉伸层流火焰传播速度与层流燃烧速度逐渐降低;随着当量比的提高,无拉伸层流火焰传播速度与层流燃烧速度呈现先增加后降



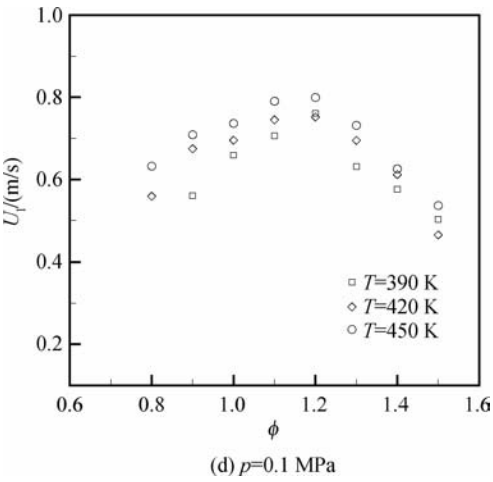


图 10 无拉伸层流火焰传播速度与层流燃烧速度随当量比的变化趋势

Fig. 10 Variations of unstretched flame speed and laminar burning velocity with equivalence ratio

低的趋势,当当量比为 1.2 时,无拉伸层流火焰传播速度与层流燃烧速度达到最大。

图 11 显示了相近工况下 RP-3 航空煤油与 Jet A^[3,9], Jet A-1^[10] 航空煤油层流燃烧速度的对比分析。

在各工况下,RP-3 航空煤油的层流燃烧速度与 Jet A, Jet A-1 航空煤油存在差异,尤其处于浓混合气时,RP-3 航空煤油的层流燃烧速度普遍高于相近工况下 Jet A 与 Jet A-1 的层流燃烧速度。存在差异的原因主要为上述几种航空煤油的物理与化学性质存在差异,同时,实验工况、实验方法与实验装置也存在差异。

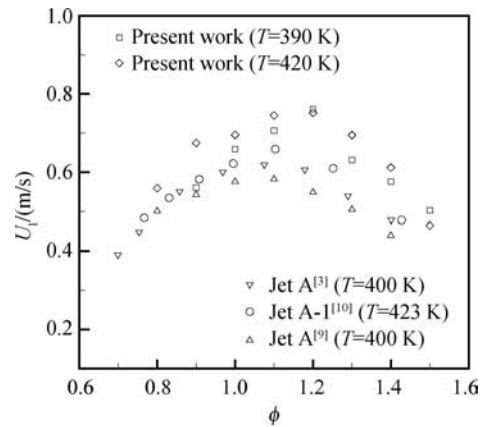


图 11 RP-3 航空煤油、Jet A, Jet A-1 航空煤油层流燃烧速度的对比 ($p=0.1$ MPa)

Fig. 11 Experimentallaminar burning velocities of Chinese RP-3 kerosene, Jet A and Jet A-1 ($p=0.1$ MPa)

4 结 论

本文利用定容燃烧反应器实验装置对 RP-3 航空煤油在初始温度分别为 390, 420, 450 K、初始压力分别为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 MPa、当量比范围为 0.6~1.6 条件下的层流燃烧特性与燃烧稳定性进行了测量,并分析了初始压力、温度与当量比对 RP-3 航空煤油层流燃烧特性的影响,得到如下结论:

1) RP-3 航空煤油的层流燃烧速度与马赫斯坦长度随初始压力的升高而逐渐下降;随着初始压力的升高,火焰前锋面厚度减小,流体力学不稳定性得到增强,导致火焰稳定性变差。

2) RP-3 航空煤油的层流燃烧速度随当量比的增大呈现先增加后降低的趋势,当当量比为 1.2 时,层流燃烧速度达到最大。同时,随着当量比的增加,马赫斯坦长度逐渐变小,火焰稳定性变差。

3) 随着初始温度的升高,RP-3 航空煤油的层流燃烧速度逐渐增大;但是,初始温度对马赫斯坦长度的影响不明显,当当量比为 0.9~1.1 时,随着初始温度的升高,马赫斯坦长度逐渐减小,但当当量比为 1.2~1.5 时,马赫斯坦长度则有所增大。

参考文献:

[1] Edwards T, Maurice L Q. Surrogate mixtures to represent complex aviation and rocket fuels[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(2): 461-466.

[2] Riesmeier E, Honnet S, Peters N. Flamelet modeling of pollutant formation in a gas turbine combustion chamber using detailed chemistry for a kerosene model fuel[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(4): 899-905.

[3] Kumar K, Sung C J, Hui X. Laminar flame speeds and extinction limits of conventional and alternative jet fuels[J]. Fuel, 2011, 90(3): 1004-1011.

[4] Bosschaart K J, Lph D G. The laminar burning velocity of flames propagating in mixtures of hydrocarbons and air measured with the heat flux method[J]. Combustion and Flame, 2004, 136(3): 261-269.

[5] Weiss M, Zarzalis N, Suntz R. Experimental study of Markstein number effects on laminar flamelet velocity in turbulent premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2008, 154(4): 671-691.

[6] Gu X J, Haq M Z, Lawes M, et al. Laminar burning velocity and Markstein numbers of methane-air mixtures[J]. Combustion and Flame, 2000, 121(1): 41-58.

[7] Far E K,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.

[8] Far E K,Moghaddas A,Metghalchi H,et al. The effect of diluent on flame structure and laminar burning speeds of JP-8/oxidizer/diluent premixed flames[J]. Fuel, 2011, 90 (4):1476-1486.

[9] Singh D,Nishiie T I,Qiao L. Laminar burning speeds and Markstein numbers of n-decane/air,n-decane/O₂/He,Jet-A/air and S-8/air flames[R]. AIAA 2010-951,2010.

[10] 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(9):401-410.

[11] Hu E J, Huang Z H, He J J, et al. Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane-hydrogen-air flames [J]. International Journal of Hydrogen and Energy, 2009, 34 (11): 4876-4888.

[12] 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.

[13] 范学军,俞刚. 大庆 RP-3 航空煤油热物性分析[J]. 推进技术,2006,27(2):187-192.

FAN Xuejun,YU Gang. Analysis of thermophysical properties of daqing RP-3 aviation kerosene[J]. Journal of Propulsion Technology,2006,27(2):187-192. (in Chinese)

[14] ZENG Wen,LI Haixia,CHEN Baodong,et al. Experimental and kinetic modeling study of ignition characteristics of Chinese RP-3 kerosene[J]. Combustion Science and Technology,2015,187(3):396-409.

[15] 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(1):176-198.

[16] 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.

[17] Burke M P,Chen Z,Ju Y,et al. Effect of cylindrical confinement on the determination of laminar flame speeds using outwardly propagating flames [J]. Combustion and Flame,2009,156(4):771-779.

[18] Kwon O C,Rozenchan G,Law C K. Cellular instabilities and self-acceleration of outwardly propagating spherical flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2002, 29(2):1775-1783.

[19] Bechtold J K,Matalon M. The dependence of the Markstein number on stoichiometry[J]. Combustion and Flame, 2001,127(1):1906-1913.

(编辑:叶 青)