

氢气添加对 RP-3 航空煤油燃烧特性的影响

曾文¹, 张存杨¹, 刘宇¹, 陈保东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: 为了阐明氢气添加对国产 RP-3 航空煤油燃烧特性的影响,在定容燃烧反应器中实验测量了初始压力为 0.1 MPa、初始温度分别为 390, 420 K、当量比范围为 0.8~1.5 时 RP-3 航空煤油/氢气混合气的层流燃烧速度与马赫斯坦长度,分析了掺氢比对火焰发展结构、层流燃烧速度及马赫斯坦长度的影响. 结果表明:随着掺氢比的提高,在火焰发展过程中,火焰锋面逐渐出现裂纹或褶皱,火焰的不稳定性逐渐增强;随着混合气当量比或掺氢比的升高,RP-3 航空煤油/氢气混合气的马赫斯坦长度逐渐减小;当混合气当量比从 0.8 升高至 1.5 时,RP-3 航空煤油/氢气混合气的层流燃烧速度呈现先增加后降低的趋势,当量比为 1.2 时混合气的层流燃烧速度达到最大;同时,随着初始温度或掺氢比的升高,RP-3 航空煤油/氢气混合气的层流燃烧速度逐渐升高.

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; 掺氢比

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Effects of hydrogen addition on burning characteristics of RP-3 kerosene

ZENG Wen¹, ZHANG Cunyang¹, LIU Yu¹, CHEN Baodong¹, HU Erjiang²

(1. Faculty 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 effects of hydrogen addition on the combustion characteristics of RP-3 kerosene, the laminar burning velocity and Markstein length of RP-3 kerosene/hydrogen mixture were investigated experimentally in a constant volume combustion bomb. The experiments were performed at initial pressure of 0.1 MPa, initial temperatures of 390, 420 K and over the equivalence ratios range of 0.8—1.5. The influences of hydrogen addition ratio on the flame structure, laminar burning velocity and Markstein length were investigated. Results showed that some cracks or folds appeared on the flame front in the flame developing process, and the instability of flame increased with the growing hydrogen addition ratio. Increasing the equivalence ratio or the hydrogen addition ratio decreased the Markstein length of RP-3 kerosene/hydrogen mixture. Furthermore, with the equivalence ratio increasing from 0.8 to 1.5, the laminar burning velocity of RP-3 kerosene/hydrogen mixture increased initially and then decreased gradually. The highest laminar burning velocity was measured at fuel rich condition (the equivalence ratio was 1.2). At the same time,

收稿日期: 2015-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(51376133, 51676132)

作者简介: 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。

引用格式: 曾文,张存杨,刘宇,等. 氢气添加对 RP-3 航空煤油燃烧特性的影响[J]. 航空动力学报,2017,32(9):2049-2054. ZENG Wen, ZHANG Cunyang, LIU Yu, et al. Effects of hydrogen addition on burning characteristics of RP-3 kerosene[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(9): 2049-2054.

with the increase of initial temperature or hydrogen addition ratio, the laminar burning velocity of RP-3 kerosene/hydrogen mixture showed an increasing trend.

Key words: RP-3 kerosene; combustion stability; laminar burning velocity; Markstein length; hydrogen addition ratio

作为高超声速飞行器的动力来源,超燃冲压发动机一直面临燃料在燃烧室中充分燃烧时间受限以及高速状态下火焰难于稳定等技术问题^[1-2]。因此,超燃冲压发动机燃烧室设计过程中必须解决的关键问题为缩短航空燃料在燃烧室中的着火延迟时间及提高其燃烧速度^[3-4]。氢气作为活性燃料可在高温氧化过程中形成大量的O原子、H原子和OH活性基,其能促进航空燃料的着火、提高其燃烧反应速率。

目前,国内外相关研究多集中于氢气添加对甲烷等低碳数小分子燃料着火与燃烧特性的影响规律上^[5-7],对高碳数大分子燃料(如航空煤油)的相关研究较少^[8-9]。直到近期,氢气添加对高碳数大分子燃料着火与燃烧特性影响的数值研究才相继得到开展。夏萌等^[10]分析了不同含氢比、气体压力和当量比下正癸烷/氢气/空气的点火延迟特性。结果表明,在温度超过临界值时,正癸烷的点火延迟时间随氢气质量比增加而缩短,说明氢气对燃烧反应起到了促进作用;当温度低于临界值时,氢气添加对燃烧反应起抑制作用,正癸烷的点火延迟时间随氢气质量比增加而延长。Hui等^[11]对正癸烷/空气混合气中添加氢气后其着火延迟时间与火焰传播速度进行了数值计算。结果表明,氢气添加能缩短正癸烷/空气的着火延迟时间,提高其层流火焰传播速度。Frolov等^[12]对正癸烷/空气、正庚烷/空气两种混合气中添加氢气后的着火延迟特性进行了数值计算。研究表明,只有当混合气的初始温度大于1050 K时,氢气添加才能缩短着火延迟时间,当温度低于1050 K时,氢气添加反而会抑制着火。到目前为止,氢气添加对国产RP-3航空煤油燃烧特性的影响等相关研究尚鲜有报道。

本文利用定容燃烧反应器实验装置对不同掺氢比、温度、压力与当量比下RP-3航空煤油/氢气混合气的火焰传播特性进行了实验测试,并分析了多工况下掺氢比对RP-3航空煤油/氢气混合气火焰前锋面燃烧稳定性与层流燃烧速度的影响。

1 实验装置与原理

曾文等^[13]对本文所采用的定容燃烧反应器

实验系统与定容燃烧弹结构进行了详细描述,Hu等^[14]对该测试系统及实验原理进行了详细阐述,在此不再赘述。

根据分压定律与掺氢比计算式,并依据RP-3航空煤油与氢气的化学分子式,计算出各工况下RP-3航空煤油、氢气与空气的体积分数,然后在容弹中依次注入RP-3航空煤油、氢气与空气,静置10 min,形成均匀混合气。

掺氢比的计算式为

$$R_{H_2} = \frac{V_{H_2}}{V_{H_2} + V_{RP-3}}$$

2 掺氢比对火焰发展特性的影响

RP-3航空煤油由C₇~C₁₆等多种链烃、环烷及芳香族化合物组成^[15],成份非常复杂。作者在先期研究中^[16],提出了由体积分数为65%的正癸烷、10%的甲苯与25%的丙基环己烷3种组分组成的混合燃料作为RP-3航空煤油的模拟替代燃料,并对比分析了该替代燃料与RP-3航空煤油的着火特性,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。

图1显示了初始温度为390 K、初始压力为0.1 MPa、当量比为1.5时不同掺氢比下RP-3航空煤油/氢气混合气的火焰发展趋势。从图中可以看出,当燃料全部为RP-3航空煤油时,点火后火焰前锋面呈球形发展且前锋面较光滑。当掺氢比为0.3时,在早期的火焰前锋面较为光滑,但随着火焰的发展,火焰前锋面开始出现裂纹或褶皱。当掺氢比为0.5时,在火焰发展的早期火焰前锋面就开始变得不光滑,并随火焰的继续发展,大量裂纹或褶皱出现在火焰前锋面上,说明此时火焰开始变得不稳定。

图2显示了初始压力为0.1 MPa、初始温度T₀分别为390,420 K、当量比φ分别为0.9,1.2与1.5时,掺氢比R_{H₂}对RP-3航空煤油/氢气混合气火焰半径r随时间t变化趋势的影响。

如图2所示,随点火后时间的延长,各工况下火焰半径均呈线性增长趋势。在不同初始温度下,当混合气当量比由0.9逐渐升高至1.5时,火焰半径的增长速度呈现先增加后降低的趋势,当混合气

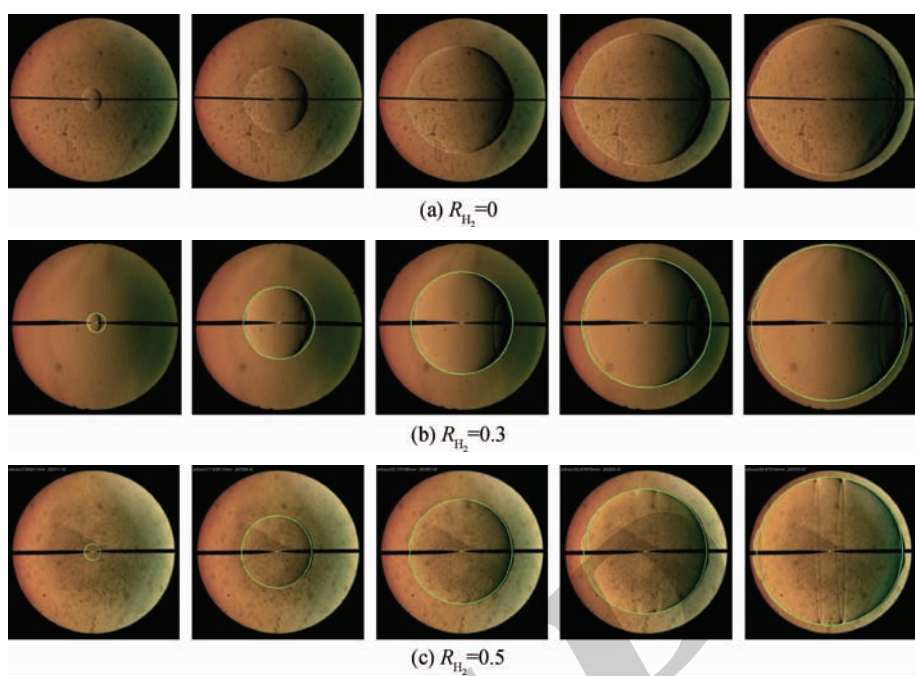


图 1 掺氢比对火焰发展特性的影响

Fig. 1 Effects of hydrogen addition ratio on flame propagation characteristics

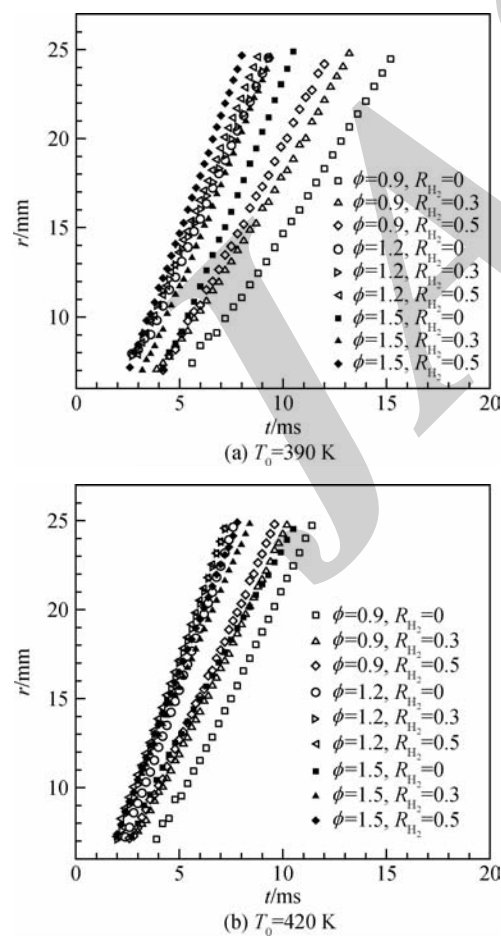


图 2 掺氢比对火焰半径随时间变化趋势的影响

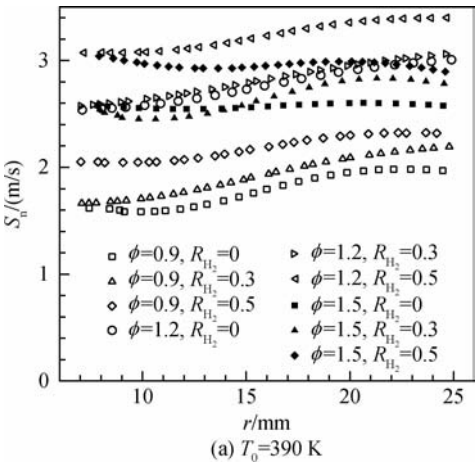
Fig. 2 Effects of hydrogen addition ratio on evolutions of flame radius versus time

当量比为 1.2 时,火焰半径增长速度最快。在不同初始温度下,当混合气当量比为 0.9 与 1.5 时,随着掺氢比的升高,火焰半径的增长速度明显加快;但是,当混合气当量比为 1.2 时,随着掺氢比由 0 升高至 0.5 时,火焰半径的增长速度变化不明显。

同时,初始温度对火焰半径增长速度的影响也较为明显,当初始温度由 390K 升高至 420K 时,各工况下火焰半径的增长速度都得到提升。

图 3 显示了初始压力为 0.1 MPa、初始温度分别为 390 与 420 K、当量比分别为 0.9, 1.2 与 1.5 时,掺氢比对 RP-3 航空煤油/氢气混合气拉伸火焰传播速度 S_n 随火焰半径变化趋势的影响。

如图 3 所示,随着混合气中氢气体积分数的提高,在不同当量比与温度下,拉伸火焰传播速度



(a) $T_0=390\text{ K}$

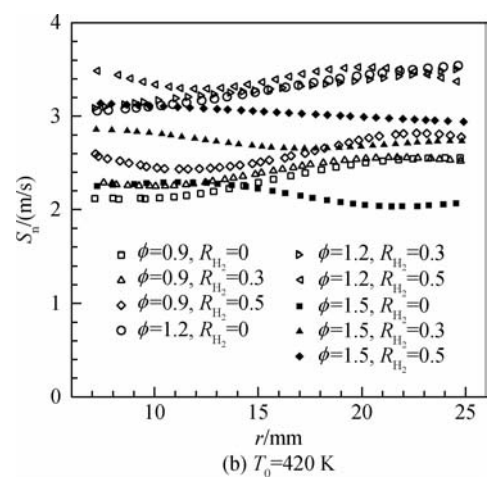


图 3 掺氢比对拉伸火焰传播速度随火焰半径变化趋势的影响

Fig. 3 Effects of hydrogen addition ratio on variations of stretched flame velocity with flame radius

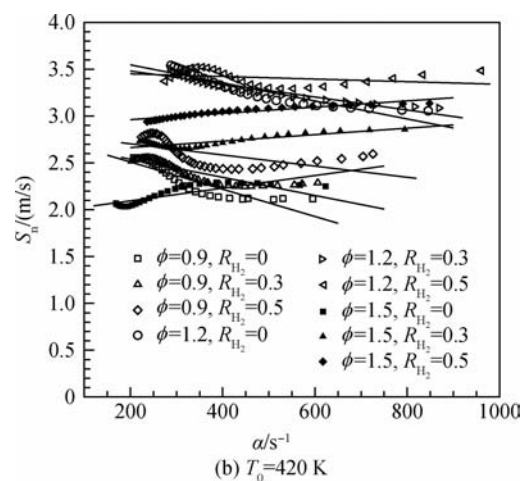


图 4 掺氢比对拉伸火焰传播速度随拉伸率变化趋势的影响

Fig. 4 Effects of hydrogen addition ratio on variations of stretched flame velocity with stretch rate

明显得到提升,这说明氢气添加能明显提高 RP-3 航空煤油的火焰传播速度。同时,当初始温度为 390 K、当量比分别为 0.9 与 1.5 时,不同掺氢比条件下随火焰半径的增加,拉伸火焰传播速度呈先下降后上升的趋势。但是,当当量比为 1.2 时,不同掺氢比条件下拉伸火焰传播速度随火焰半径的增加呈准线性关系,且不断增加。当初始温度升高至 420 K 时,除当量比为 0.9 时不同掺氢比下拉伸火焰传播速度随火焰半径的变化趋势与初始温度为 390 K 时相似,其他工况下的变化趋势则较为不同。

图 4 显示了初始压力为 0.1 MPa、初始温度分别为 390 与 420 K、当量比分别为 0.9、1.2 与 1.5 时,掺氢比对 RP-3 航空煤油/氢气混合气拉伸火焰传播速度随拉伸率 α 变化趋势的影响。

从图 4 可以看出,在各工况下,拉伸火焰传播速度随拉伸率的增加并不呈线性关系。同时,当

初始温度为 390 K、当量比为 1.5、掺氢比为 0.5 时拉伸火焰传播速度随拉伸率的增加逐渐升高,说明此时马克斯坦长度为负值(斜率的相反数),火焰已变得不稳定;当初始温度为 420 K、当量比为 1.5 时,各掺氢比下拉伸火焰传播速度随拉伸率的增加逐渐升高,说明这些工况下马克斯坦长度均为负值,火焰不稳定。

3 掺氢比对燃烧稳定性的影响

马克斯坦长度 L_b 能反映出火焰前锋面的稳定情况。当火焰前锋面处于稳定状态时,马克斯坦长度为正值;当火焰前锋面处于非稳定状态时,马克斯坦长度为负值,并随该值的增大火焰不稳定性增强^[17-18]。

图 5 显示了初始压力为 0.1 MPa、初始温度

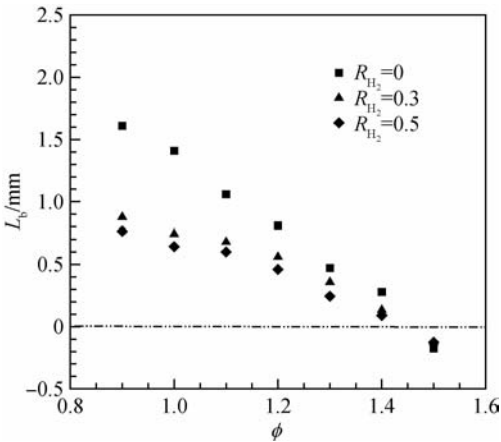
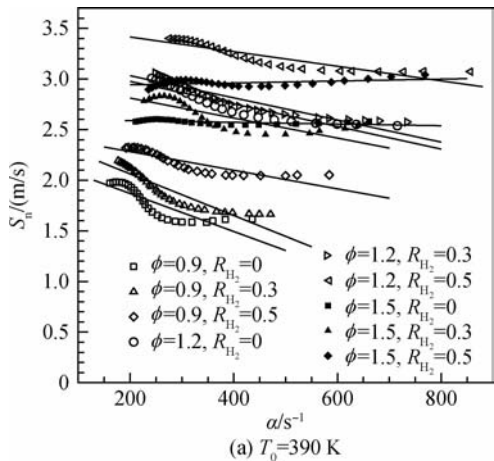


图 5 掺氢比对马克斯坦长度随当量比变化趋势的影响

Fig. 5 Effects of hydrogen addition ratio on variations of Markstein length with equivalence ratio

为 420 K 时,掺氢比对 RP-3 航空煤油/氢气混合气马赫斯坦长度随当量比变化趋势的影响。

从图 5 可以看出,马赫斯坦长度随当量比的降低而逐渐增大,说明稀混合气状态时火焰前锋面较浓混合气状态时稳定。同时,当当量比升高至 1.5 时,马赫斯坦长度为负值,说明在该当量比工况下,火焰已经变得不稳定。同时,从图 7 可以看出,在各当量比工况下,马赫斯坦长度随掺氢比的增加而逐渐减小,火焰前锋面的稳定性变差。因此,增大混合气当量比或提高掺氢比都将降低混合气的马赫斯坦长度 L_b ,使火焰的不稳定趋势增强。

4 掺氢比对层流燃烧速度的影响

图 6 显示了初始压力为 0.1 MPa、初始温度分别为 390 K 与 420 K 时,掺氢比对 RP-3 航空煤油/氢气混合气的无拉伸层流火焰传播速度 S_l 与层流燃烧速度 U_l 随当量比变化趋势的影响。

从图 6 可以看出,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低的趋势,在当量比为 1.2 时达到最大。同时,

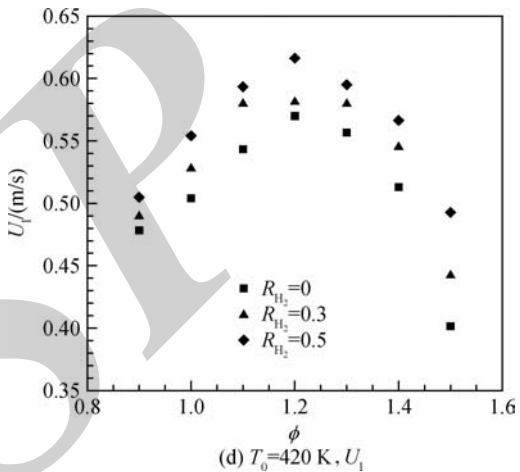
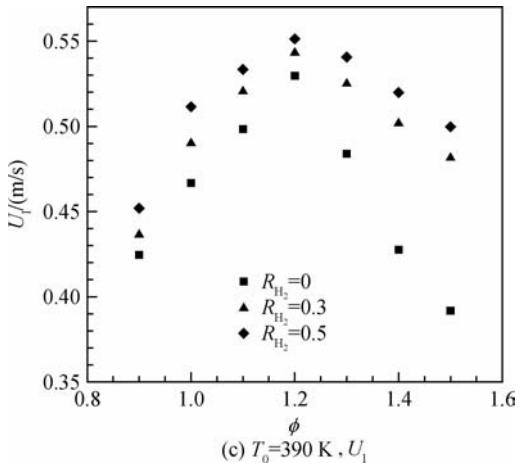
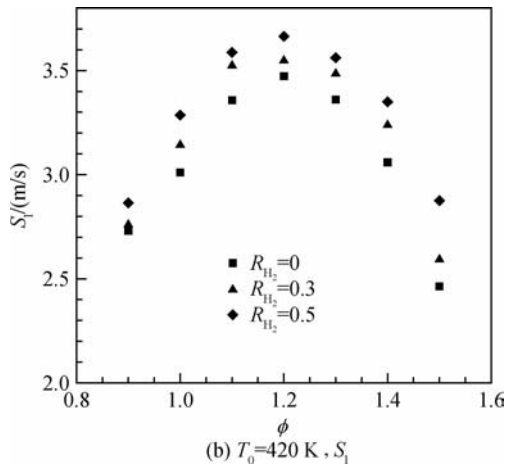
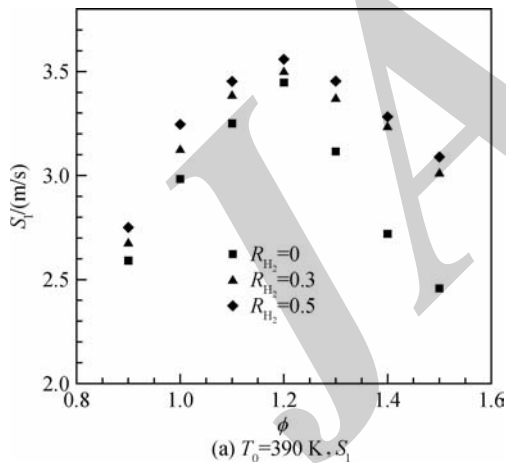


图 6 掺氢比对无拉伸层流火焰传播速度与层流燃烧速度随当量比变化趋势的影响
Fig. 6 Effects of hydrogen addition ratio on variations of unstretched laminar flame velocity and burning velocity with equivalence ratio

随着初始温度或掺氢比的升高,各当量比工况下无拉伸层流火焰传播速度与层流燃烧速度逐渐升高。

5 结 论

对 RP-3 航空煤油/空气混合气在初始温度分别为 390 与 420 K、初始压力为 0.1 MPa、当量比范围为 0.8~1.5 条件下氢气添加对其火焰发展特性的影响进行了实验测试,并分析了不同工况下掺氢比对 RP-3 航空煤油/空气混合气燃烧特性的影响。得到如下结论:

- 1) 在各工况下火焰半径均随时间呈线性变化关系。在不同初始温度下,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,在当量比为 1.2 时增长速度最快;同时,随着掺氢比的升高,火焰半径的增长速度明显加快。

2) 在各掺氢比工况下,随着混合气当量比的升高,RP-3 航空煤油/氢气混合气的马赫斯坦长度逐渐降低,说明稀混合气状态时火焰前锋面较浓混合气状态时稳定。同时,在各当量比工况下,随着掺氢比的增加,RP-3 航空煤油/氢气混合气的马赫斯坦长度逐渐减小,火焰的不稳定性增强。

3) 在各掺氢比工况下,随着混合气当量比的提高,RP-3 航空煤油/氢气混合气的层流燃烧速度呈现先增加后降低的趋势,在当量比为 1.2 时达到最大;同时,随着初始温度或掺氢比的升高,各当量比工况下 RP-3 航空煤油/氢气混合气的层流燃烧速度逐渐升高。

参考文献:

[1] MARSHALL L,BAHM C,CORPENING G,et al. Overview with results and lessons learned of the X-43A mach 10 flight[R]. AIAA-2005-3336,2005.

[2] HANK J,MURPHY J,MUTZMAN R. The X-51A scramjet engine flight demonstration program[R]. AIAA-2008-2540,2008.

[3] 韦宝禧,欧东,闫明磊,等.超燃燃烧室等离子体点火和火焰稳定性能[J].北京航空航天大学学报,2012,38(12):1572-1576.

WEI Baoxi,OU Dong,YAN Minglei,et al. Ignition and flame holding ability of plasma torch igniter in a supersonic flow[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2012,38(12):1572-1576. (in Chinese)

[4] 兰宇丹,何立明,丁伟,等.活性粒子对 H₂/Air 混合物燃烧的影响[J].航空动力学报,2010,25(2):326-330.

LAN Yudan,HE Liming,DING Wei,et al. Study of active particles influences on combustion of H₂/Air mixture[J]. Journal of Aerospace Power,2010,25(2):326-330. (in Chinese)

[5] ZHANG Y J,HUANG Z H,WEI L J,et al. Experimental and modeling study on ignition delays of lean mixtures of methane,hydrogen,oxygen,and argon at elevated pressures[J]. Combustion and Flame,2012,159(3):918-931.

[6] TANG C L,HUANG Z H,LAW C K,et al. Determination,correlation,and mechanistic interpretation of effects of hydrogen addition on laminar flame speeds of hydrocarbon-air mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2011,33(1):921-928.

[7] ZHENG S Z,ZHANG X,XU J,et al. Effects of initial pressure and hydrogen concentration on laminar combustion characteristics of diluted natural gas-hydrogen-air mixture[J]. International Journal of Hydrogen Energy,

2012,37(12):12852-12859.

[8] FRENILLOTA J P,CABOTA G,CAZALENS M,et al. Impact of H₂ addition on flame stability and pollutant emissions for an atmospheric kerosene/air swirled flame of laboratory scaled gas turbine[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2009,34(9):3930-3944.

[9] DONG L. Kinetic analysis of the chemical effects of hydrogen addition on dimethylether flames [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2014,39(24):13014-13019.

[10] 夏萌,林宇震,张驰.正十烷/氢气/空气点火延迟特性数值分析[J].中国矿业大学学报,2014,43(4):721-725.

XIA Meng,LIN Yuzhen,ZHANG Chi. Effects of hydrogen addition on self-ignition of *n*-decane/air premixed flames[J]. Journal of China University of Mining and Technology,2014,43(4):721-725. (in Chinese)

[11] HUI X,ZHANG C,XIA M,et al. Effects of hydrogen addition on combustion characteristics of *n*-decane/air mixtures[J]. Combustion and Flame,2014,161(9):2252-2262.

[12] FROLOV S M,MEDVEDEV S N,BASEVICH V Y,et al. Self-ignition of hydrocarbon-hydrogen-air mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2013,38(1):4177-4184.

[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 study on laminar burning characteristics of RP-3 kerosene [J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(12):2888-2896. (in Chinese)

[14] 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 Energy,2009,34(11):4876-4888.

[15] 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)

[16] ZENG W,LI H X,CHEN B D,et al. Experimental and kinetic modeling study of ignition characteristics of Chinese RP-3 kerosene[J]. Combustion Science and Technology,2015,187(1):396-409.

[17] 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.

[18] BECHTOLD J K,MATALON M. The dependence of the Markstein length on stoichiometry[J]. Combustion and Flame,2001,127(1/2):1906-1913.