

文章编号: 1000-8055(2024)01-20220150-11

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220150

含水乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料的 层流燃烧速度

刘 宇, 周 博, 谷 午, 饶大为, 马洪安, 曾 文

(沈阳航空航天大学 航空发动机学院

辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室, 沈阳 110136)

摘 要: 采用定容燃烧实验装置获得初始压力为 0.1 MPa、初始温度为 450 K、当量比为 0.8~1.4 工况下乙醇/RP-3 航空煤油预混火焰和含水乙醇/RP-3 航空煤油预混火焰的层流燃烧速度(LBVs), 并分析了乙醇掺混比、乙醇含水量、当量比等因素对混合燃料层流燃烧速度的影响。研究表明: 随着乙醇掺混比的增加, 乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料层流燃烧速度增大; 当 RP-3 航空煤油中乙醇掺混比一定时, 随着乙醇含水量的增加, 含水乙醇/RP-3 混合燃料层流燃烧速度减小。由燃烧反应动力学分析可知, 混合燃料的层流燃烧速度受动力学、热力学等的综合影响。本研究所获实验数据能够为生物乙醇燃料在航空发动机中的应用提供理论基础和技术支持。

关 键 词: 定容燃烧; RP-3 航空煤油; 含水乙醇; 层流燃烧速度(LBV); 燃烧反应动力学

中图分类号: V231; TK401

文献标志码: A

Laminar burning velocity of aqueous ethanol/RP-3 aviation kerosene mixed fuel

LIU Yu, ZHOU Bo, GU Wu, RAO Dawei, MA Hongan, ZENG Wen

(Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technique for Aviation Propulsion System,

Liaoning Province, School of Aero-engine,

Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: The laminar burning velocities (LBVs) of ethanol/RP-3 aviation kerosene and aqueous ethanol/RP-3 aviation kerosene premixed flames under the initial pressure of 0.1 MPa, initial temperature of 450 K and equivalence ratios of 0.8—1.4 were obtained by using a constant volume combustion experimental device, and the effects of ethanol blending ratio, volume fraction of water in ethanol and equivalence ratio on the LBV of the mixed fuel were analyzed. Results showed that the LBV of ethanol/RP-3 mixed fuel increased with the increase of ethanol blending ratio; when the ethanol blending ratio in RP-3 fuel was constant, the LBV of aqueous ethanol/RP-3 mixed fuel decreased with the increase of volume fraction of water in ethanol. From analysis of the combustion reaction kinetics, the LBV of the mixed fuel was affected by the combined effects of kinetics and thermodynamics. The experimental data obtained can provide a theoretical basis and technical support for the application of bio-ethanol fuel in aeroengine.

Keywords: constant volume combustion; RP-3 aviation kerosene; aqueous ethanol;
laminar burning velocity (LBV); combustion reaction kinetics

收稿日期: 2022-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(51606129); 辽宁省教育厅项目(LJKZ0181)

作者简介: 刘宇(1983—), 男, 副教授, 博士, 主要从事航空燃料燃烧特性实验及燃烧反应机理研究。E-mail: liuyu_201409@163.com

通信作者: 曾文(1977—), 男, 教授, 博士, 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, 周博, 谷午, 等. 含水乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料的层流燃烧速度[J]. 航空动力学报, 2024, 39(1): 20220150. LIU Yu, ZHOU Bo, GU Wu, et al. Laminar burning velocity of aqueous ethanol/RP-3 aviation kerosene mixed fuel[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(1): 20220150.

为应对气候变化,航空业正在积极采取各种措施减少 CO_2 温室气体排放。国际航空运输组织(IATA)预测航空业要实现 CO_2 排放降低至 2005 年一半水平,唯一办法是采用可再生燃料^[1]。生物航空燃料以可再生资源为原料生产而成,对其开发和应用不仅能够减少温室气体的排放,同时也为应对石油资源短缺、寻求航空煤油替代燃料提供了一条现实之路。

生物乙醇是用含淀粉(玉米、小麦、薯类等)、纤维素(秸秆、林木等)或糖质(甘蔗、糖蜜等)等原料经发酵蒸馏制成,由于具有辛烷值高、十六烷值低、黏度小、蒸发潜热大、含氧且燃烧热效率高等特点,可用作生物燃料。巴西、美国率先于 20 世纪 70 年代中期大力推行燃料乙醇政策。虽然我国燃料乙醇产业起步较晚,但发展迅速,目前已成为第三大生物乙醇生产国^[2]。目前,乙醇在车用发动机上应用较为广泛,全世界已有 40 多个国家和地区开发应用了乙醇汽车。我国也正式颁布了 GB18350-2001《变性燃料乙醇》和 GB-18351-2010《车用乙醇汽油》两项国家标准,并将推广应用车用乙醇汽油列入“十五”发展计划。除了用在车用发动机上,学者们也试图将生物乙醇用于燃气轮机和航空发动机中,2004 年,巴西飞机制造商恩布拉尔就试飞了一架以乙醇为燃料的单引擎小飞机,结果表明,乙醇燃料飞机比一般飞机更有力、速度更快。但由于乙醇存在热值较低等缺点,为满足航空发动机动力要求,需要将其与航空煤油调和使用,且为了更好地应用于航空发动机中,还需对乙醇/航空煤油调和燃料进行大量物理及化学性质测试^[3]。

燃料的化学性质包括各种基础燃烧特性,如着火与燃烧特性等,阐明燃料的基础燃烧特性对其在任何热动力机械中的应用都具有重要的指导意义。针对乙醇燃烧特性,目前国内外已开展大量实验研究。廖世勇等^[4]利用纹影高速摄像技术,采用定容燃烧弹实验研究了初始温度 358~500 K、当量比 0.7~1.4 工况下的乙醇/空气预混层流火焰的传播特性。刘阳训^[5]采用定容燃烧弹和 CHEMKIN 软件对乙醇/空气预混层流燃烧特性进行了实验和仿真研究。在乙醇掺混燃料的层流燃烧特性方面,胡洋洋等^[6]以一种由农作物秸秆转化来的精制生物质热裂解油(主要成分为乙醇、乙酸乙酯和丙酮)为研究对象,分别对这三种燃料及其混合燃料的层流燃烧特性进行了实验和仿真研究。

Gülder^[7]研究了甲醇、乙醇和异辛烷、空气混合物的层流燃烧速度。结果表明最大燃烧速度在当量比 1.075 时出现。Dirrennerger 等^[8]研究了加入乙醇后汽油的层流燃烧速度。结果表明其层流燃烧速度与未加乙醇时相似。Meng 等^[9]研究了异辛烷、甲苯、己烯、乙醇及其共混物在高温和高压下的层流燃烧速度。结果表明,乙醇体积分数较高时(超过 20%)会导致共混物的层流燃烧速度较高。

在实际应用中发现,由于乙醇化学分子式含有羟基($-\text{OH}$),具有极强的亲水性,故乙醇极易吸水。同时,由于无水乙醇制备工艺复杂、成本较高,若在乙醇制备过程中省去最后的脱水精制工艺,只得到含水乙醇,则可大大降低生产的能耗和成本,因此,对含水乙醇的应用更切合实际。Xu 等^[10]进行了通过富氧燃烧加速含水乙醇的层流火焰速度的研究。结果表明当含水量从 0 增加到 20% 时,层流燃烧速度的峰值从 0.638 下降到 0.591 m/s。张尊华等^[11]在初始温度为 383 K、初始压力为 0.1 MPa 的条件下,利用定容燃烧实验装置和高速纹影摄像系统开展了含水乙醇在 0%~30% 含水体积分数和 0.8~1.6 当量比工况下与空气预混的层流燃烧特性实验。结果表明,混合气的无拉伸层流火焰传播速率和燃烧速率随含水量的增加而降低,含水乙醇/空气火焰的马克斯坦长度和前锋面的稳定性都随含水量的增加而增加。周康泉^[12]在初始温度为 388 K、初始压力为 0.1 MPa 工况下对无水乙醇和含水量(体积分数,后文同)分别为 5%、10%、20% 的乙醇进行层流燃烧实验,对含水乙醇的层流燃烧速度和火焰稳定性进行了分析。

从现有研究来看,对乙醇及含水乙醇掺混 RP-3 航空煤油混合燃料层流燃烧特性的研究极少。由于缺少相关实验数据,限制了乙醇在航空发动机中的应用。本文拟在定容燃烧弹中开展初始温度 450 K、初始压力 0.1 MPa、当量比范围 0.7~1.4、乙醇掺混比为 0~0.5、乙醇含水量为 0%~30% 工况下含水乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料的层流燃烧特性实验,获得乙醇掺混比和乙醇含水量等参数对 RP-3 航空煤油层流燃烧速度的影响,为乙醇在航空发动机中的应用提供理论基础和技术支持。

1 实验装置

本文实验装置如图 1 所示,该装置包括定容

燃烧弹本体、进排气系统、光学系统和高速摄像机等^[13]。定容燃烧弹本体为不锈钢圆柱型结构, 其内径为 180 mm, 高为 180 mm。弹体内部设有中心点火电极, 外部装有压力变送器、温度传感器、液体燃料注入阀等, 两端装有厚为 80 mm、直径为 130 mm 的石英玻璃窗, 如图 2 所示。本文

实验采用背影法(阴影法)获得火焰发展照片, 所用高速摄像机为 Phantom V611, 拍摄速度设定为 10 000 幅/s。与纹影法相比, 背影法光学系统结构简单、方便调节。另外, 与气态燃料相比, 液态燃料密度和热值较高, 采用背影法同样可以得到清晰的已燃区与未燃区边界。

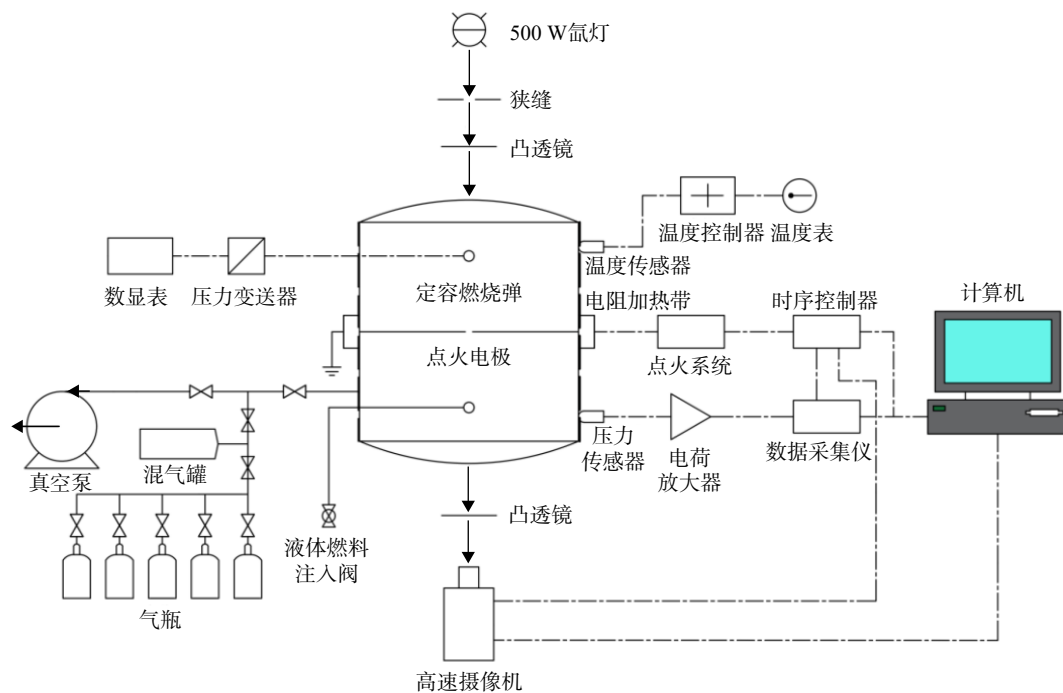


图1 定容燃烧反应装置图

Fig. 1 Schematic of constant volume combustion experimental setup

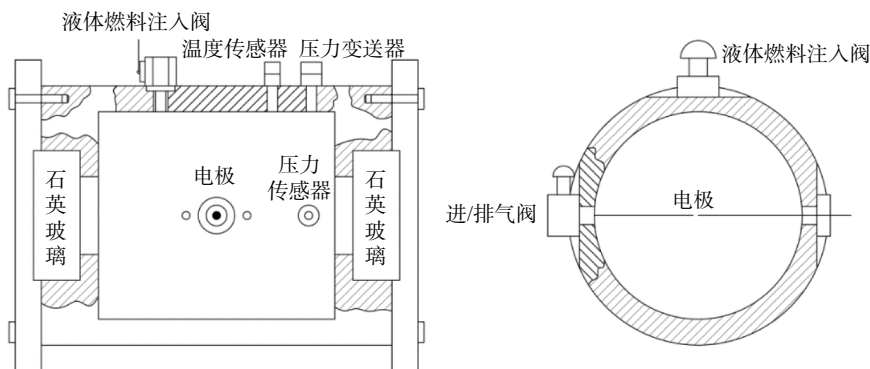


图2 定容燃烧弹截面图

Fig. 2 Cross-section view of the constant volume chamber

实验前, 计算各当量比下 RP-3 航空煤油、含水乙醇、 O_2 和 N_2 的摩尔分数。然后根据分压定律计算各组分分压, 并根据真空度和初始压力制定配气表。实验中, 抽真空后, 首先通过液体燃料注入阀将含水乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料注入到定容燃烧弹中, 所需液体燃料量由其密度、分压和容弹容积等参数决定, 然后依次充入相应

分压的 O_2 和 N_2 。注入液体燃料时, 为了保证燃料完全气化, 需注意其饱和蒸气压与其在定容燃烧弹中分压关系。注入液体燃料后, 定容燃烧弹中压力上升, 若压力上升值达到或十分接近其理论分压时, 可认为已完全蒸发。充气完毕后, 为使各组分间充分混合均匀, 还需将容弹静置一段时间。最后由中心电极点燃含水乙醇/RP-3 航空

煤油混合燃料与空气的预混气,同时,触发高速摄像机对火焰发展过程进行拍摄,获得含水乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料火焰发展特性图片。

2 实验原理

Huang、Burke 等^[14-15]指出,为排除点火能量和容积限制对火焰传播的影响,应尽量选择火焰半径 6~25 mm 所对应的火焰发展特性图片进行数据处理。本文采用此范围图片,利用非线性外推法得到无拉伸层流火焰传播速度。同时,将拟合误差作为判定火焰半径范围选择是否合理的依据,当误差较大时,可适当缩短火焰半径范围至 8~18 mm。

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 ^[16]

$$S_n = dr/dt \quad (1)$$

式中 r 为火焰半径, t 为时间。

火焰拉伸率 κ 为火焰表面上一个无限小面积的对数值对时间的变化率

$$\kappa = d(\ln A)/dt = dA/(A \cdot dt) \quad (2)$$

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

$$\kappa = 2 \cdot dr/(r \cdot dt) = 2S_n/r \quad (3)$$

Frankel、Chen 等^[17-18]提出的非线性外推方法对于具有正马赫数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

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

利用式(3)与式(4)可以获得 S_n 与 κ 的非线性关系

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

式中 S_l 为无拉伸层流火焰传播速度, L_b 为马赫斯坦长度。

根据在火焰前锋面上的质量守恒,有

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

式中 ρ_u 与 ρ_b 分别为未燃区与已燃区混合气密度。

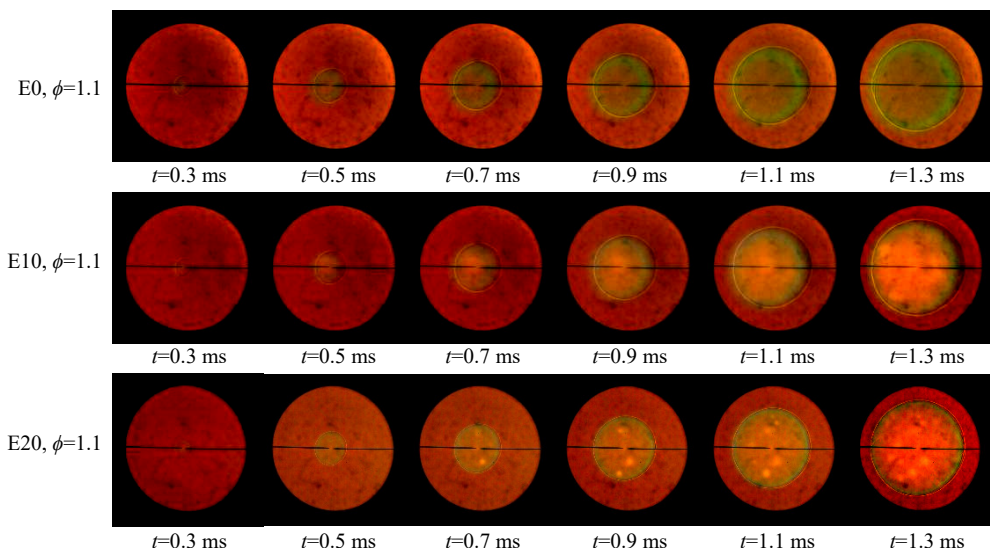
由式(6)可获得层流燃烧速度 U_l

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

3 实验结果与分析

3.1 火焰发展图片

图3为在初始压力为 0.1 MPa、初始温度为 450 K、乙醇掺混比为 0~0.5、当量比 1.1 工况下乙醇/RP-3 航空煤油预混火焰发展图片,其中乙醇掺混比为 0、0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5,分别用 E0、E10、E20、E30、E40、E50 表示,图片下时间表示从火花点火到该火焰位置所经历的时间。如图所示,初始球形火焰首先在定容燃烧弹中心形成,然后迅速扩散到壁面。随着乙醇掺混比的增加,球形火焰的边缘仍然清晰可见,没有出现明显的皱纹,也没有观察到明显的细胞结构,说明随着乙醇掺混比的增加,火焰保持稳定。对比同一时刻火焰锋面位置发现,随着乙醇掺混比的增加火焰半径逐渐增大,说明随着乙醇掺混比的增加火焰传播速度增加。



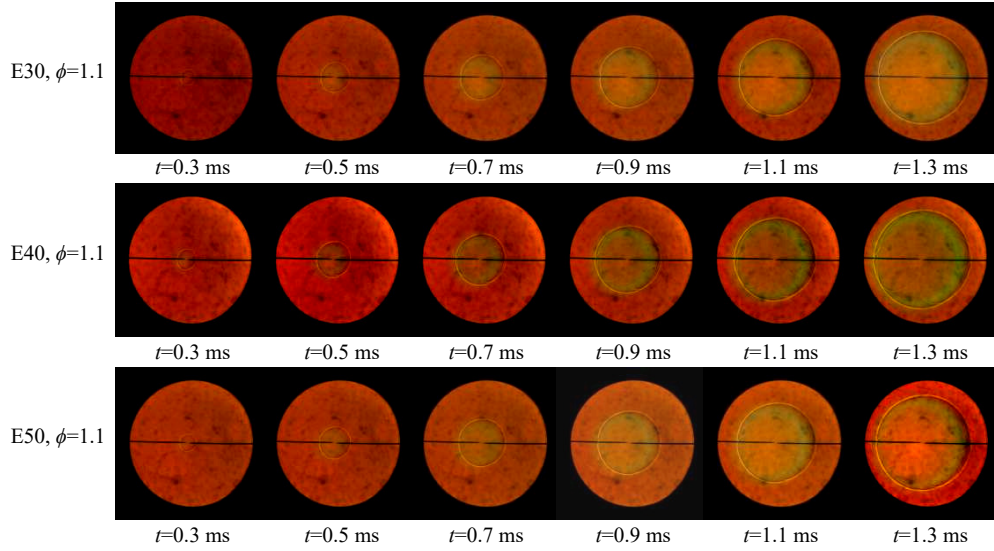
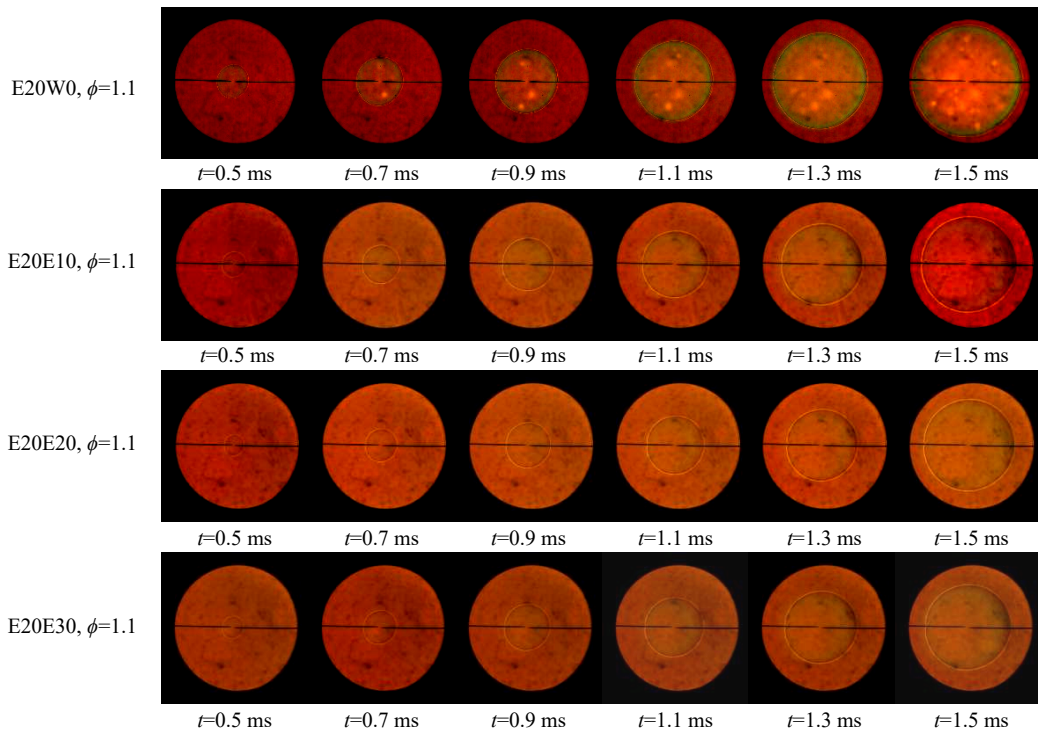
图 3 乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料火焰发展特性图片 ($p_{\text{ini}}=0.1 \text{ MPa}$, $T_{\text{ini}}=450 \text{ K}$)Fig. 3 Flame propagation images of ethanol/RP-3 aviation kerosene mixed fuel ($p_{\text{ini}}=0.1 \text{ MPa}$, $T_{\text{ini}}=450 \text{ K}$)

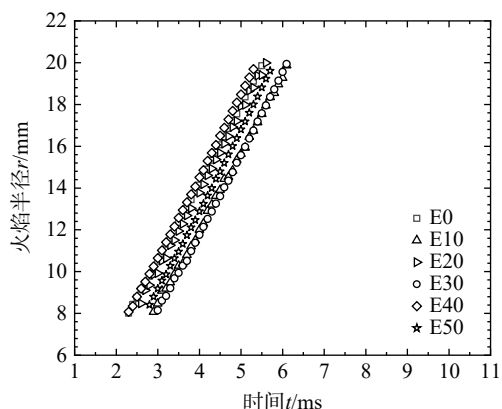
图 4 为初始压力 p_{ini} 为 0.1 MPa、初始温度 T_{ini} 为 450 K、含水乙醇掺混比为 0.2、当量比为 1.1 工况下含水乙醇/RP-3 航空煤油预混火焰发展图片, 其中含水乙醇的含水量为 0、10%、20% 和 30%, 不同含水量率的含水乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料分别用 E20W0、E20W10、E20W20、E20W30 表示。从图中可以看出, 所有工况下火焰锋面在其发展过程中均保持光滑状态, 说明燃

烧较为稳定。对比同一时刻火焰锋面位置发现, 随着乙醇含水量的增加火焰半径逐渐变小, 说明随着乙醇含水量的增加火焰传播速度逐渐减小。

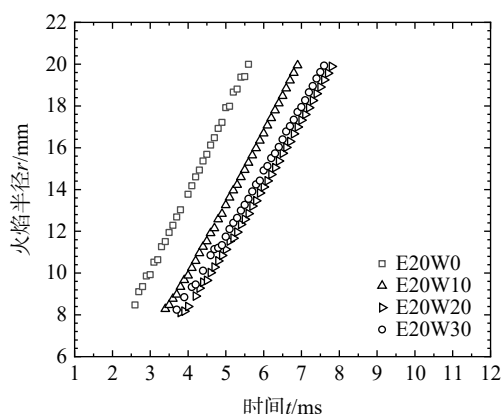
3.2 火焰传播速度

图 5 为含水乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料火焰半径随时间变化趋势, 横坐标是火花点火到火焰位置所经过的时间, 纵坐标是火焰半径。本文采用自编程软件测量火焰半径, 并进行光顺和拟

图 4 含水乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料火焰发展特性图片 ($p_{\text{ini}}=0.1 \text{ MPa}$, $T_{\text{ini}}=450 \text{ K}$)Fig. 4 Flame propagation images of aqueous ethanol/RP-3 aviation kerosene mixed fuel ($p_{\text{ini}}=0.1 \text{ MPa}$, $T_{\text{ini}}=450 \text{ K}$)



(a) 乙醇/RP-3航空煤油混合燃料



(b) 含水乙醇/RP-3航空煤油混合燃料

图 5 火焰半径随时间的变化趋势

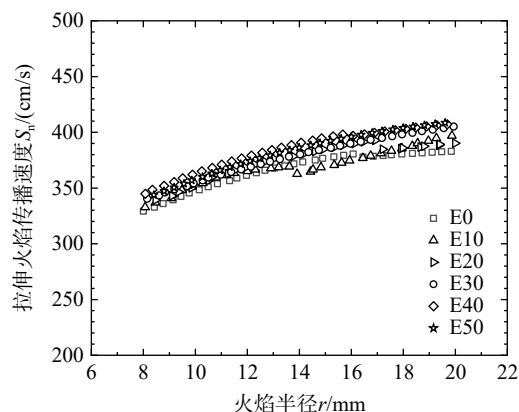
(p_{ini}=0.1 MPa, T_{ini}=450 K, φ=1.1)

Fig. 5 Change of flame radius versus elapsing time

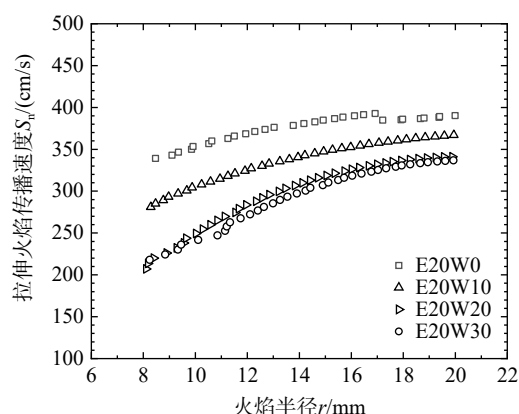
(p_{ini}=0.1 MPa, T_{ini}=450 K, φ=1.1)

合处理。如图所示,时间与火焰半径呈明显的准线性关系。随着乙醇掺混比的增加,不同的乙醇掺混比混合燃料火焰半径扩散至 8 mm 所需的时间略有不同,介于 2.2~3 ms 之间,说明乙醇掺混对初始火焰形成影响不大。而随着乙醇含水量的增加,火焰形成时间有所增大,说明乙醇含水量增加使得火焰形成速度变慢。

图 6 为含水乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料拉伸火焰传播速度随火焰半径变化趋势。随着火焰半径的增加,拉伸火焰传播速度有所增加。在当量比为 1.1 时,同一火焰半径处含水乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料拉伸火焰传播速度随乙醇燃料掺混比的增加而增加,而随乙醇含水量的增加而明显减小。拉伸火焰传播速度是指在火焰拉伸作用下,火焰锋面相对于静止燃烧室壁面的运动速度,受流体动力学、化学反应动力学和热力学等综合因素影响,乙醇燃料掺混及乙醇含水量的增加不仅影响绝热火焰温度、反应活化能,同时也影响



(a) 乙醇/RP-3航空煤油混合燃料



(b) 含水乙醇/RP-3航空煤油混合燃料

图 6 火焰传播速度随火焰半径的变化趋势

(p_{ini}=0.1 MPa, T_{ini}=450 K, φ=1.1)

Fig. 6 Change of stretched flame speed versus flame radius

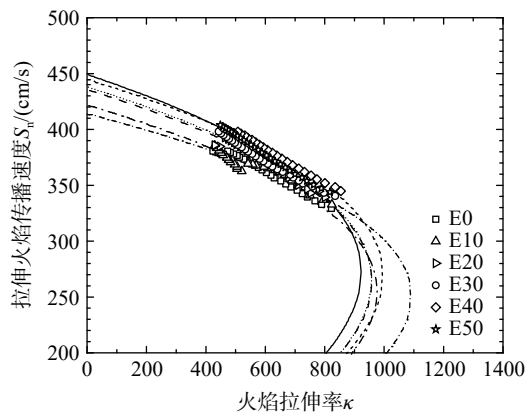
(p_{ini}=0.1 MPa, T_{ini}=450 K, φ=1.1)

混合气路易斯数,最终影响火焰传播速度。

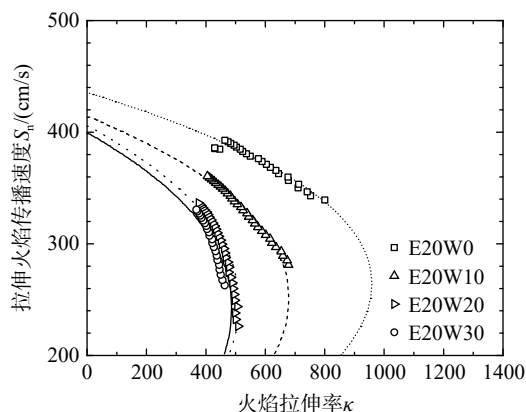
图 7 给出了实验工况下拉伸火焰传播速度 S_n 与火焰拉伸率 κ 之间的关系。对于球形扩散火焰,因火焰表面弯曲,火焰拉伸作用对火焰传播速度的影响不可避免。一般认为,只有当火焰传播至无限远处,火焰表面近似于平面时,拉伸作用才能被忽略。如图 7 所示,在所有工况下, S_n 随 κ 的增加而减小。本文采用 Kelley、Law^[19] 在 2009 年提出了拉伸火焰传播速度与火焰拉伸率的非线性拟合方法对实验数据进行拟合。拟合式如下:

$$\left(\frac{S_1}{S_n}\right)^2 \ln\left(\frac{S_1}{S_n}\right) = -\frac{2L_b\kappa}{S_n} \quad (8)$$

拟合曲线上, $\kappa=0$ 时的拉伸火焰传播速度称为无拉伸火焰速度 S_1 , 用来表征火焰的稳定性。从图 7 中可以看出,在当量比为 1.1 时,随着乙醇掺混比的增加,无拉伸火焰传播速度 S_1 增大;随着乙醇含水量的增加,无拉伸火焰传播速度 S_1 减小。



(a) 乙醇/RP-3航空煤油混合燃料



(b) 含水乙醇/RP-3航空煤油混合燃料

图7 拉伸火焰传播速度随火焰拉伸率的变化趋势

($p_{\text{ini}}=0.1 \text{ MPa}$, $T_{\text{ini}}=450 \text{ K}$, $\phi=1.1$)

Fig. 7 Change of stretched flame speed versus flame stretch rate

($p_{\text{ini}}=0.1 \text{ MPa}$, $T_{\text{ini}}=450 \text{ K}$, $\phi=1.1$)

3.3 层流燃烧速度

层流燃烧速度是燃料的一项重要参数,它反映了可燃混合物的理化性质,决定了实际燃烧系统中燃料/空气混合物的燃烧速率。相比于火焰传播速度 S_n 和 S_t ,层流燃烧速度 U_l 在基础研究和工程研究上都具有重要意义。因此,本文主要对 U_l 进行讨论。

图8(a)为在初始压力为0.1 MPa、初始温度为450 K、乙醇掺混比为0~0.5工况下乙醇/RP-3航空煤油混合燃料的层流燃烧速度。其中虚线和实线分别为乙醇掺混比为0和0.5工况下实验数据的拟合曲线。与单组分燃料相同,混合燃料的层流燃烧速度随当量比的增加先增大后减小,在当量比为1.1时最大,且随着混合燃料中乙醇掺混比的提高,有增大趋势。对比文献[20-23]中RP-3航空煤油及乙醇实验数据发现,在相似工况下,乙醇燃料的层流燃烧速度普遍高于航空煤油的层流燃烧速度。本文在初始压力0.1 MPa、初

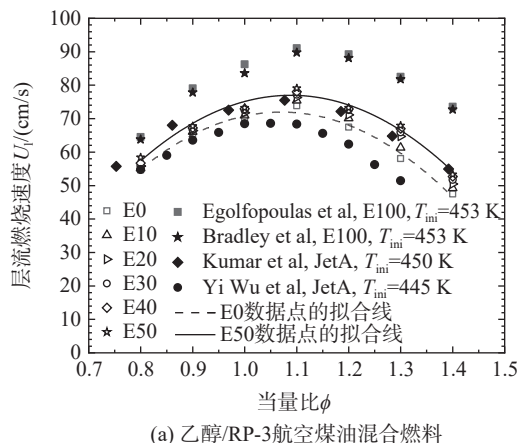
始温度450 K工况下的实验数据与Kumar等[22]实验数据吻合较好。

图8(b)为初始压力为0.1 MPa、初始温度为450 K、当量比为1.1时RP-3航空煤油掺混0.2含水乙醇时的层流燃烧速度。其中虚线和实线分别为乙醇含水量30%和0工况下实验数据的拟合曲线。如图所示,随着乙醇含水量的增加,层流燃烧速度有减小趋势。分析原因可知,随着乙醇含水量增加,一方面水气化吸热,降低了绝热火焰温度,另一方面,水的掺混还会影响燃料的化学反应动力学以及流体动力学特性等。

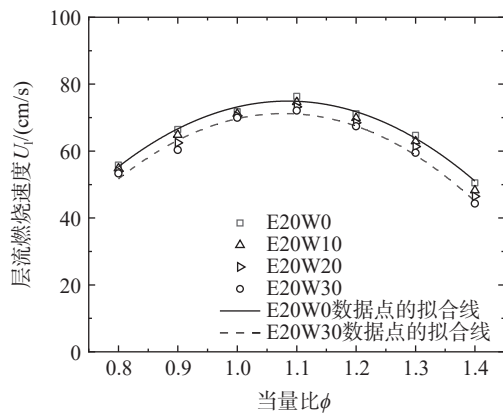
乙醇掺混对RP-3航空煤油层流燃烧速度的影响可分为扩散效应、热效应和动力学效应等[24]。采用一步整体反应,层流燃烧速度的影响因素可表示为[25-26]

$$U_l \sim (\alpha Le)^{1/2} \exp(-T_a/2T_{ad}) \quad (9)$$

其中 α 是热扩散系数, Le 是路易斯数, T_a 是活化温度, T_{ad} 是绝热火焰温度。式中 $(\alpha Le)^{1/2}$ 、 T_a 、 T_{ad} 分



(a) 乙醇/RP-3航空煤油混合燃料



(b) 含水乙醇/RP-3航空煤油混合燃料

图8 层流燃烧速度随当量比的变化趋势

($p_{\text{ini}}=0.1 \text{ MPa}$, $T_{\text{ini}}=450 \text{ K}$)

Fig. 8 Change of LBV versus equivalent ratio

($p_{\text{ini}}=0.1 \text{ MPa}$, $T_{\text{ini}}=450 \text{ K}$)

别代表乙醇及含水乙醇对 RP-3 航空煤油层流燃烧速度的扩散、动力学和热效应影响。

路易斯数 Le 定义为热扩散系数 α 与质量扩散系数 D_m 之比。

$$Le = \alpha / D_m \tag{10}$$

式中

$$\alpha = \lambda / (\rho_u c_p) \tag{11}$$

在初始压力为 0.1 MPa、初始温度为 450 K、当量比为 1.1 工况下,影响乙醇/RP-3 混合燃料层流燃烧速度相关参数如表 1 所示,影响含水乙醇/RP-3 混合燃料层流燃烧速度相关参数如表 2 所示。其中,未燃混合气的导热系数 λ 、密度 ρ_u 、比定压热容 c_p 和绝热火焰温度 T_{ad} 由气体状态方程和热力学平衡计算得到, T_a 为活化能和气体常数 R 之比。

表 1 乙醇/RP-3 混合燃料层流燃烧速度影响因素 ($p_{ini}=0.1\text{ MPa}$ 、 $T_{ini}=450\text{ K}$ 、 $\phi=1.1$)

Table 1 Factors affecting LBV of ethanol/RP-3 mixed fuel ($p_{ini}=0.1\text{ MPa}$, $T_{ini}=450\text{ K}$, $\phi=1.1$)

工况	$\lambda/10^{-3}(\text{J}/(\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{s}))$	$\rho_u/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$c_p/(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	$\alpha/(\text{cm}^2/\text{s})$	Le	$E_a/(\text{J}/\text{mol})$	T_a/K	T_{ad}/K
E0	32.6	0.826 5	1 117.87	0.352 9	0.823 4	214 755	25 829	2 355
E10	32.6	0.825 7	1 118.50	0.353 0	0.823 7	212 814	25 595	2 352
E20	32.6	0.824 9	1 119.13	0.353 2	0.824 0	210 097	25 268	2 349
E30	32.6	0.824 0	1 119.92	0.353 3	0.824 4	208 715	25 102	2 345
E40	32.6	0.823 0	1 120.76	0.353 5	0.824 8	206 708	24 861	2 341
E50	32.6	0.821 9	1 121.64	0.353 7	0.825 2	205 738	24 744	2 337

表 2 含水乙醇/RP-3 混合燃料层流燃烧速度影响因素 ($p_{ini}=0.1\text{ MPa}$ 、 $T_{ini}=450\text{ K}$ 、 $\phi=1.1$)

Table 2 Factors affecting LBV of aqueous ethanol/RP-3 mixed fuel ($p_{ini}=0.1\text{ MPa}$, $T_{ini}=450\text{ K}$, $\phi=1.1$)

工况	$\lambda/10^{-3}(\text{J}/(\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{s}))$	$\rho_u/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$c_p/(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	$\alpha/(\text{cm}^2/\text{s})$	Le	$E_a/(\text{J}/\text{mol})$	T_a/K	T_{ad}/K
E20W0	32.6	0.824 9	1 119.21	0.353 2	0.824 0	210 097	25 268	2 349
E20W10	32.6	0.823 9	1 120.63	0.353 1	0.823 9	210 198	25 281	2 345
E20W20	32.65	0.823 0	1 122.10	0.353 5	0.824 8	210 734	25 345	2 341
E20W30	32.65	0.822 0	1 123.61	0.353 5	0.824 7	211 533	25 441	2 337

$$T_a = \frac{E_a}{R} \tag{12}$$

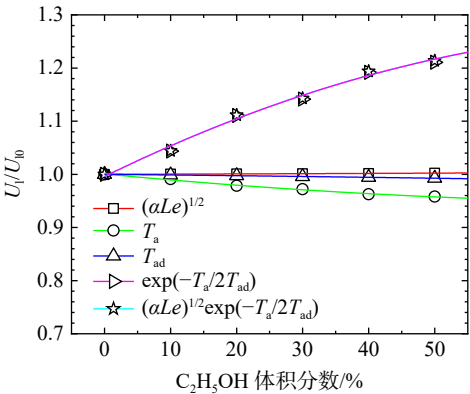
式中 E_a 为混合燃料的活化能,由 Law、Sung 等^[25]理论计算得到

$$E_a = -2R \frac{\partial (\ln \rho_u U_l)}{\partial (1/T_{ad})} \tag{13}$$

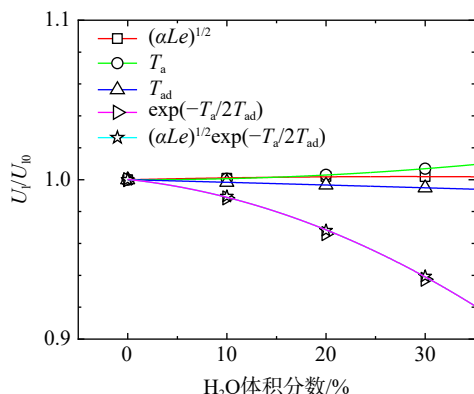
同时,计算中采用了乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料的燃烧反应机理。

图 9(a)为当量比为 1 : 1 时,各影响因素随乙醇掺混比增加的变化情况,数值已进行归一化处理。所谓归一化处理,是以乙醇掺混比为 0 时的层流燃烧速度 U_0 为基准,将其他工况的层流燃烧速度与其相除,值大于 1 代表增加,值小于代表减小。由图可知,随着乙醇掺混比的增加, $(\alpha Le)^{1/2}$ 几乎保持不变,说明燃烧过程中热扩散率与质量扩散率的比值几乎不受乙醇掺混比增加的影响。

由于乙醇的热值低于 RP-3 航空煤油,随着乙醇的掺混比的增加, T_{ad} 略有降低,而由于活化能 E_a 的降低, T_a 显著降低。本文将 $\exp(-T_a/2T_{ad})$ 定义为 Arrhenius 因子,它是反映动力学和热效应综合影响的重要参数。如图 9(a)所示,随着乙醇掺混比



(a) 乙醇/RP-3航空煤油混合燃料



(b) 含水乙醇/RP-3航空煤油混合燃料

图9 层流燃烧速度影响参数的变化趋势

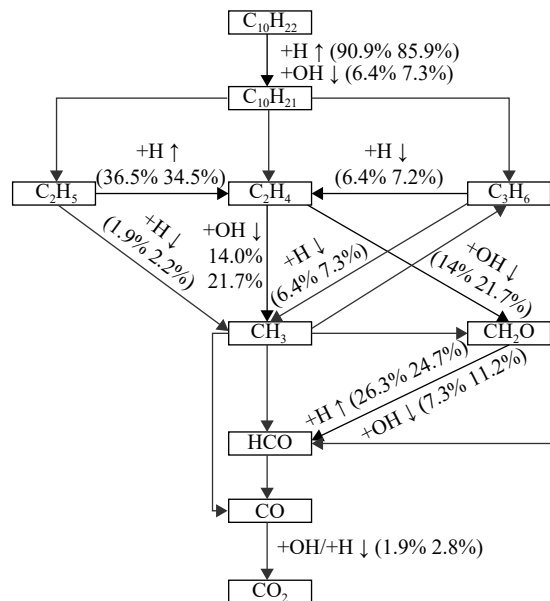
Fig. 9 Change of the factors related to LBV

的增加, Arrhenius 因子显著增加, 其变化与层流燃烧速度 U_l 一致, 表明乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料的层流燃烧速度 U_l 是动力学和热效应综合作用的结果, 其值随乙醇掺混比的增加而增加。

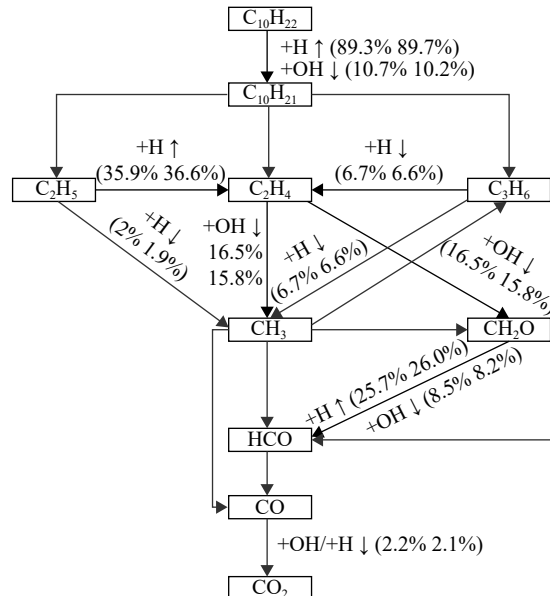
图 9(b) 为当量比 1:1 时, 各影响因素随乙醇含水量增加的变化情况。随着掺混乙醇含水量的增加, $(\alpha Le)^{1/2}$ 几乎保持不变, 说明热扩散率与质量扩散率的比值同样不受乙醇含水量增加的影响。随着乙醇含水量增加, 由于水的热值低于 RP-3 航空煤油和乙醇, 混合燃料燃烧后 T_{ad} 略有降低, 但由于活化能 E_a 升高, T_a 显著升高。如图 9(b) 所示, 随着乙醇含水量的增加, Arrhenius 因子显著降低, 导致混合燃料层流燃烧速度 U_l 降低。

3.4 反应路径分析

为了深入了解乙醇掺混对 RP-3 航空煤油层流燃烧速度 U_l 的影响, 本文进行了反应路径分析, 如图 10 所示, 图中括号中的百分数表示分解率, 图 10(a) 给出了乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料燃烧过程中的反应路径图。将正癸烷 $C_{10}H_{22}$ 作为 RP-3 航空煤油的数值模拟替代燃料, 通过化学反应动力学软件 CHEMKIN 计算分析乙醇掺混对 RP-3 航空煤油燃烧过程的影响。图 10(a) 为在距离为 0.498 mm、温度为 1280 K 左右时, 不同乙醇掺混比的反应路径。其中 0.498 mm 是指从反应路径分析所在位置到未燃反应面的距离, 本文的反应路径分析在该位置进行, 其温度约为 1280 K, 反应较为充分, 反应路径中涉及燃烧过程中主要的反应物、中间产物和最终产物, 便于开展乙醇掺混对反应过程的影响研究。如图所示, 链式反应首先从 $C_{10}H_{22}$ 脱氢开始, 活性自由基 H 和 OH 使 $C_{10}H_{22}$ 脱氢成为 $C_{10}H_{21}$, 然后通过裂解反应



(a) 乙醇/RP-3航空煤油混合燃料(E0、E50)



(b) 含水乙醇/RP-3航空煤油混合燃料(E20W0、E20W30)

图10 混合燃料反应路径

Fig. 10 Reaction path of the mixed fuel

$C_{10}H_{21} \rightleftharpoons 2C_3H_6 + C_2H_5 + C_2H_4$, 使 $C_{10}H_{21}$ 快速裂解成 C_3H_6 、 C_2H_5 、 C_2H_4 等小分子碳氢燃料。活性自由基 H 和 OH 进一步通过 $C_2H_5 + H \rightleftharpoons 2CH_3$ 、 $C_2H_4 + OH \rightleftharpoons CH_2O + CH_3$ 、 $C_3H_6 + H \rightleftharpoons C_2H_4 + CH_3$ 等基元反应, 使小分子碳氢燃料分解为 CH_3 和 CH_2O 等, 最后通过脱氢过程生成 HCO, 最终生成 CO 和 CO_2 。

从图 10 中可以看出, 随着乙醇掺混比的增加, 更多的 OH 活性自由基参与到基元反应 $C_{10}H_{22} + OH \rightleftharpoons C_{10}H_{21} + H_2O$ 中, $C_{10}H_{22}$ 分解率由 6.4% 提高到 7.3%。另外, 由反应路径可知, $C_2H_4 + OH \rightleftharpoons CH_2O + CH_3$ 是生成关键中间产物 CH_2O 的主要基元反应,

乙醇掺混比增加使更多的 C_2H_4 直接反应生成 CH_2O 。上述分析表明,乙醇掺混比的增加能够加速 CH_3 和 CH_2O 等关键中间产物的生成,这是乙醇促进 RP-3 航空煤油层流燃烧速度 U_l 增大的主要原因。

图 10(b)给出了含水乙醇/RP-3 混合燃烧的反应路径图。如图所示,其反应途径与图 10(a)基本相同。随着乙醇含水量的增加,参与中间反应的 OH 活性自由基减少。在基元反应 $C_{10}H_{22} + OH \rightleftharpoons C_{10}H_{21} + H_2O$ 中, $C_{10}H_{22}$ 的分解率由 10.7% 降低到 10.2%。在 $C_2H_4 + OH \rightleftharpoons CH_2O + CH_3$ 中, C_2H_4 生成 CH_2O 也相应减少。上述分析表明,乙醇含水量的增加减慢了 CH_3 和 CH_2O 的生成,这是含水量增加导致含水乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料层流燃烧速度 U_l 减小的主要原因。

如前所述,活性自由基 H、O 和 OH 在燃烧过程中起着关键作用。图 11(a)给出了随着乙醇掺混比的增加, H、O 和 OH 摩尔分数的碳归一化值的变化趋势。结果表明,随着乙醇掺混比的增加, H、O、OH 摩尔分数均增大。说明在燃烧过程中

产生了更多的活性自由基,从而提高了混合燃料的层流燃烧速度 U_l 。图 11(b)给出了随着乙醇含水量的增加, H、O 和 OH 摩尔分数的碳归一化值的变化趋势。结果表明,随着乙醇含水量的增加, H、O、OH 摩尔分数均减小。说明在燃烧过程中产生活性自由基变少,从而降低层流燃烧速度 U_l 。活性自由基 H、O 和 OH 摩尔分数的变化趋势与层流燃烧速度的变化趋势一致。

4 结 论

为研究乙醇及含水乙醇掺混对 RP-3 航空煤油层流燃烧速度 U_l 的影响,本文在定容燃烧弹中,对初始压力为 0.1 MPa、初始温度为 450 K 工况下含水乙醇/RP-3 混合燃料层流燃烧速度 U_l 进行了实验研究,得到如下结论:

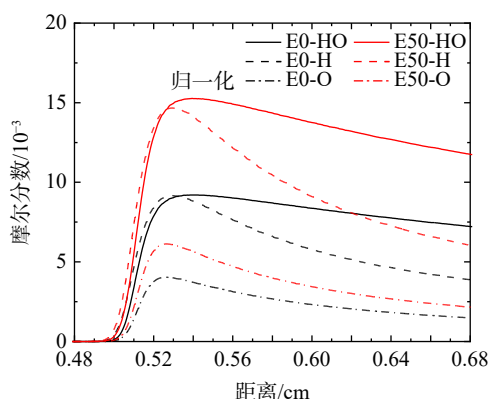
1) 随着乙醇掺混比的增加,乙醇/RP-3 混合燃料层流燃烧速度 U_l 增大。随着乙醇含水量的增加,含水乙醇/RP-3 混合燃料层流燃烧速度 U_l 减小。

2) 随着乙醇掺混比的增加, $\exp(-T_a/2T_{ad})$ 显著增加,随着乙醇含水量的增加, $\exp(-T_a/2T_{ad})$ 显著降低。 $\exp(-T_a/2T_{ad})$ 变化趋势与混合燃料层流变化趋势一致,说明混合燃料层流燃烧速度受到动力学和热力学综合作用的影响。

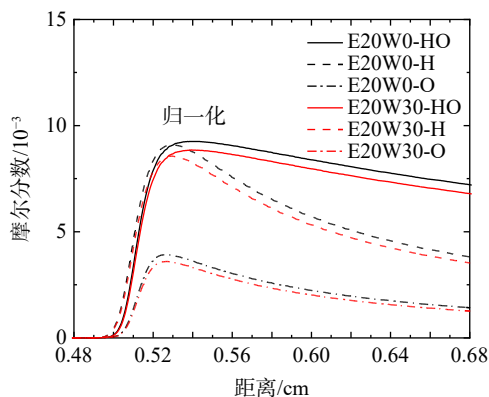
3) 随着乙醇掺混比的增加, H、O、OH 等活性自由基浓度的增加,导致燃烧过程中重要中间产物 CH_3 、 CH_2O 和 HCO 生成增加,促进了乙醇/RP-3 混合燃料层流燃烧速度 U_l 增加。而随着乙醇含水量的增加,由于 H、O、OH 等活性自由基浓度减少,导致含水乙醇/RP-3 混合燃料层流燃烧速度 U_l 减小。

参考文献:

- [1] 刘宇, 汤卓, 孙震, 等. 小球藻油/RP-3 航空煤油混合燃料的层流燃烧特性[J]. 航空动力学报, 2019, 34(8): 1663-1670.
LIU Yu, TANG Zhuo, SUN Zhen, et al. Laminar combustion characteristics of chlorella oil/RP-3 kerosene mixed fuel[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(8): 1663-1670. (in Chinese)
- [2] 曹运齐, 刘云云, 胡南江, 等. 燃料乙醇的发展现状分析及前景展望[J]. 生物技术通报, 2019, 35(4): 163-169.
CAO Yunqi, LIU Yunnyun, HU Nanjiang, et al. Current status and prospects of fuel ethanol production[J]. Biotechnology Bulletin, 2019, 35(4): 163-169. (in Chinese)
- [3] 诸逢佳, 刘建周. 航空生物燃料的现状与研制前景展望[J]. 能源与环境, 2011(4): 19-21.
ZHU Fengjia, LIU Jianzhou. Present situation and development prospect of aviation biofuel[J]. Energy and Environment, 2011(4): 19-21. (in Chinese)



(a) 乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料



(b) 含水乙醇/RP-3 航空煤油混合燃料

图 11 活性自由基的摩尔分数($p_{mi}=0.1$ MPa, $T_{mi}=450$ K)

Fig. 11 Mole fraction of active radical
($p_{mi}=0.1$ MPa, $T_{mi}=450$ K)

- [4] 廖世勇, 井明科, 程前, 等. 乙醇—空气预混层流火焰特性的试验研究[J]. 内燃机学报, 2007, 25(5): 469-474.
LIAO Shiyong, JING Mingke, CHENG Qian, et al. Experimental study on the premixed laminar flames for ethanol-air mixtures[J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(5): 469-474. (in Chinese)
- [5] 刘阳训. 乙醇-丙酮-空气预混层流燃烧特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
LIU Yangxun. Research on laminar flame characteristics of ethanol-acetone-air mixture[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [6] 胡洋洋. 乙醇、乙酸乙酯和丙酮混合燃料的层流燃烧特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
HU Yangyang. Research on laminar burning characteristics of ethanol, ethyl acetate, acetone and their blend fuels[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [7] GÜLDER Ö L. Laminar burning velocities of methanol, ethanol and isooctane-air mixtures[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1982, 19(1): 275-281.
- [8] DIRRENBARGER P, GLAUDE P A, BOUNACEUR R, et al. Laminar burning velocity of gasolines with addition of ethanol[J]. *Fuel*, 2014, 115: 162-169.
- [9] MENG Zhongwei, LIANG Kun, FANG Jia. Laminar burning velocities of iso-octane, toluene, 1-hexene, ethanol and their quaternary blends at elevated temperatures and pressures[J]. *Fuel*, 2019, 237: 630-636.
- [10] XU Cansu, LIU Weinan, XIE Cheng, et al. Accelerating laminar flame speed of hydrous ethanol via oxygen-rich combustion[J]. *Bio Energy Research*, 2021, 14(2): 634-644.
- [11] 张尊华, 李格升, 沈宇, 等. 含水乙醇-空气预混层流燃烧特性的试验[J]. 内燃机学报, 2013, 31(1): 59-64.
ZHANG Zunhua, LI Gesheng, SHEN Yu, et al. Experiment on premixed laminar combustion characteristics for hydrous ethanol-air mixtures[J]. Transactions of CSICE, 2013, 31(1): 59-64. (in Chinese)
- [12] 周康泉. 容弹上用定容法测量层流燃烧速度的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
ZHOU Kangquan. The research of measuring the laminar burning velocity using CVM in the constant volume burning vessel[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [13] HU Erjiang, HUANG 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.
- [14] HUANG Zuohua, WANG Qian, YU Jinrong, et al. Measurement of laminar burning velocity of dimethyl ether-premixed mixtures[J]. *Fuel*, 2007, 86(15): 2360-2366.
- [15] BURKE M P, CHEN Zheng, JU Yiguang, 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.
- [16] 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(1/2): 126-144.
- [17] FRANKEL M L, SIVASHINSKY G I. On effects due to thermal expansion and lewis number in spherical flame propagation[J]. *Combustion Science and Technology*, 1983, 31(3/4): 131-138.
- [18] CHEN Z, JU Y. Theoretical analysis of the evolution from ignition kernel to flame ball and planar flame[J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2007, 11(3): 427-453.
- [19] 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.
- [20] BRADLEY D, LAWES M, MANSOUR M S. Explosion bomb measurements of ethanol-air laminar gaseous flame characteristics at pressures up to 1.4 MPa[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(7): 1462-1470.
- [21] EGOLFOPOULOS F N, DU D X, LAW C K. A study on ethanol oxidation kinetics in laminar premixed flames, flow reactors, and shock tubes[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1992, 24(1): 833-841.
- [22] KUMAR K, SUNG C J, HUI Xin. Laminar flame speeds and extinction limits of conventional and alternative jet fuels[J]. *Fuel*, 2011, 90(3): 1004-1011.
- [23] WU Yi, MODICA V, YU Xilong, et al. Experimental investigation of laminar flame speed measurement for kerosene fuels: jet A-1, surrogate fuel, and its pure components[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(2): 2332-2343.
- [24] TANG C L, HUANG Z H, LAW C K. 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.
- [25] LAW C K, SUNG C J. Structure, aerodynamics, and geometry of premixed flamelets[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2000, 26(4/5/6): 459-505.
- [26] WU Fujia, KELLEY A P, TANG Chenglong, et al. Measurement and correlation of laminar flame speeds of CO and C₂ hydrocarbons with hydrogen addition at atmospheric and elevated pressures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(20): 13171-13180.

(编辑: 王碧琨)