

四氢呋喃族燃料层流燃烧特性的实验研究

陈日新, 李德华, 秦明元, 何本壮, 樊祥山, 王锡斌

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为探究高温高压条件下四氢呋喃族燃料的层流燃烧过程,利用高速摄影和纹影技术的定容燃烧弹实验,采用非线性外推方法,获得了四氢呋喃(THF)、2-甲基四氢呋喃(MTHF)、2,5-二甲基四氢呋喃(DMTHF)在初始压力为 0.1~0.4 MPa、初始温度为 373~453 K 及当量比为 0.7~1.6 下的层流燃烧特性。结果表明:3 种燃料的层流燃烧速率随初始温度升高而增大,随初始压力增大而减小,随当量比增加先增大后减小,峰值出现在当量比为 1.1 附近,三者层流燃烧速率的关系为 $S_{u,THF} > S_{u,MTHF} > S_{u,DMTHF}$;三者速率的差异主要是由于绝热火焰温度关系为 $T_{ad,THF} > T_{ad,MTHF} > T_{ad,DMTHF}$ 、热扩散率关系为 $D_{th,THF} \approx D_{th,MTHF} > D_{th,DMTHF}$ 所致。定量分析表明:层流燃烧速率与初始温度之间呈正指数幂函数关系,与初始压力呈负指数幂函数关系,三者中 MTHF 对于初始温度与压力的变化最敏感;三种燃料的火焰面不稳定性关系为 $L_{b,THF} > L_{b,MTHF} > L_{b,DMTHF}$ 。

关键词: 四氢呋喃族燃料;定容燃烧弹;非线性外推;层流燃烧特性;火焰面不稳定性

中图分类号: TK42 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202005003 **文章编号:** 0253-987X(2020)05-0017-09



OSID 码

Experimental Study on the Laminar Burning Characteristics of THF Family Fuels

CHEN Rixin, LI Dehua, QIN Mingyuan, HE Benzhuang, FAN Xiangshan, WANG Xibin

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

Abstract: To investigate the laminar burning processes of THF family fuels as alternative fuels of internal combustion engines, the laminar burning characteristics of THF family fuels, including tetrahydrofuran (THF), 2-methyltetrahydrofuran (MTHF) and 2,5-dimethyltetrahydrofuran (DMTHF), were studied under the operating conditions of initial pressure of 0.1-0.4 MPa, initial temperature of 373-453 K and equivalence ratio of 0.7-1.6 in constant volume combustion bomb using high-speed schlieren photography technique. The nonlinear extrapolation method was used to obtain the laminar burning velocity and Markstein length. The results show that the laminar burning velocities of the three fuels increase with the initial temperature, and drop with the initial pressure. Increasing the equivalence ratio, the laminar flame velocity first increases and then decreases gradually, and its peak appears near the equivalence ratio of 1.1. The laminar burning velocities and flame instability among the three fuels are in order of $S_{u,THF} > S_{u,MTHF} > S_{u,DMTHF}$ and $L_{b,THF} > L_{b,MTHF} > L_{b,DMTHF}$. The difference of the velocities is mainly due to the adiabatic flame temperature and thermal diffusivity being $T_{ad,THF} > T_{ad,MTHF} > T_{ad,DMTHF}$ and $D_{th,THF} \approx D_{th,MTHF} > D_{th,DMTHF}$, respectively. Quantitative analysis indicates that the laminar burning

velocity is a positive exponential power function with the initial temperature, while a negative exponential power function with the initial pressure. Among the three fuels, MTHF is most sensitive to the variation of initial temperature and pressure.

Keywords: THF family fuels; constant volume combustion bomb; nonlinear extrapolation; laminar burning characteristics; flame instability

近年来,随着我国能源结构的不断调整以及低碳环保概念的提出与推行,生物质燃料逐渐成为了内燃机领域内的研究热点之一。生物质涵盖农林产品或其副产品、生活垃圾等生物有机体及其新陈代谢排泄物等,有着巨大的开发潜力,是可持续能源中比重最大的能源^[1]。四氢呋喃族作为原料来源广泛的第二代生物质,具有可再生、碳中性的特征,在热物性上与汽油相似,具有较大的作为内燃机替代燃料的潜能,其中备受关注的四氢呋喃族燃料包括四氢呋喃(THF)、2-甲基四氢呋喃(MTHF)、2,5-二甲基四氢呋喃(DMTHF)。

对于四氢呋喃族燃料应用于发动机性能的研究,Rodolph等测试了MTHF/汽油混合燃料的燃烧排放特性,发现在较高掺混比下,污染物排放明显降低^[2-3]。Nasarullah等探究了生物柴油/THF/乙醇掺混燃料对发动机的动力性和排放的影响,发现随乙醇和THF的掺混比增加,热效率和比油耗等动力特性得到提升^[4-5]。在四氢呋喃族燃料的基础燃烧研究中,Jiang等利用定容燃烧弹研究了常压下MTHF在不同当量比(0.88~1.43)和温度(333、363、393 K)下的层流燃烧速率,并与乙醇和异辛烷进行了对比,总结了工况参数对MTHF层流燃烧速率的影响^[6]。樊祥山等利用定容燃烧弹对比了常压下MTHF、2-甲基呋喃和异辛烷在373 K和当量比为0.7~1.5时的层流燃烧速率,指出绝热火焰温度与化学反应机理共同决定三者层流燃烧速率的大小^[7]。之后,樊祥山等测量了MTHF和异辛烷混合燃料的层流燃烧速率,研究了初始温度、压力、当量比和掺混比对混合燃料层流燃烧速率的影响^[8]。

之前的学者对于四氢呋喃族燃料的发动机实验以及燃烧特性的研究主要集中于THF和MTHF的较低温度(298~393 K)与压力(0.1 MPa)范围,对于DMTHF以及高温高压下四氢呋喃族燃料层流燃烧特性以及差异性的分析较少,而在高温高压下的研究对于燃烧特性和燃烧数据库的积累以及实际发动机燃烧机理的研究十分重要。本文将实验范围扩展到初始压力为0.1~0.4 MPa、初始温度为373~453 K及当量比为0.7~1.6,对四氢呋喃族燃

料的层流燃烧特性及其差异性进行了研究。

1 实验设备与流程

本文采用定容燃烧弹实验测量四氢呋喃族燃料的层流燃烧特性,该实验装置包括定容燃烧弹、加热与温度控制系统、燃料注入与进排气系统、点火系统、纹影光路系统、高速摄影采集系统和压力采集系统^[9],如图1所示。定容燃烧弹为不锈钢圆柱体,两侧对称装有石英玻璃作为视窗,通过透射式高速摄影纹影法记录球形外扩火焰的发展过程,其外部分别布置有温度和压力传感器、中心电极、液体燃料注入阀、进排气阀和压力变送器等。温度和压力传感器用于对定容弹内实验工况的调整,中心电极由两块电极组成,中心对置以保证中心点火。实验用混合气的配置需根据工况设计的初始压力,利用分压定律计算出预定注入燃料体积和空气量,燃料、氧气和氮气分别通过液体燃料注入阀和进排气阀注入容弹内,压力变送器用于监测容弹内压力,保证混合气的准确配置,加热装置保证定容燃烧弹维持工况设计的初始温度,采用温度传感器监测。

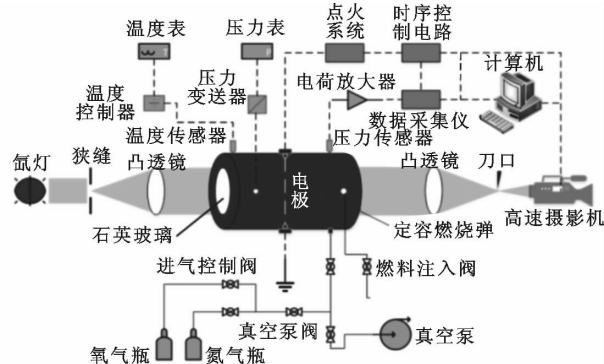


图1 层流燃烧速率测量实验装置示意图

为了对比THF、MTHF和DMTHF的层流燃烧特性,分析初始压力、初始温度与当量比 φ 对不同燃料层流燃烧过程的影响,本文设计了如表1所示的实验工况。实验使用的THF(体积分数99.9%)、MTHF(体积分数99%)、DMTHF(体积分数98%)由上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产;使用高纯度(体积分数99.999%)的氮气和氧气以体积比

1:3.76混合来代替干空气。

表 1 层流燃烧特性的实验工况

压力/ MPa	温度/K	当量比	燃料
0.1	373、423、453	0.7~1.5	THF
0.1	373、423、453	0.7~1.6	MTHF
0.1	373、423、453	0.8~1.6	DMTHF
0.2	423	0.7~1.6	THF、MTHF、DMTHF
0.4	423	0.8~1.3	THF、MTHF、DMTHF

2 实验数据处理

本文使用 MATLAB 商用数学软件编程对实验中得到的纹影图片进行处理,得到了不同时刻的火焰半径 r_f ,为了避免电极和燃烧后期未燃气压力升高对层流燃烧特性的影响,数据处理时选择的都是火焰半径在 7~25 mm 之间的照片。

对于球形扩张火焰,拉伸火焰传播速度 S_f 为火焰半径 r_f 对时间 t 的变化率^[10]

$$S_f = \frac{dr_f}{dt} \tag{1}$$

球形扩张火焰面的拉伸率 κ 为

$$\kappa = \frac{dA_f}{A_f dt} = 2 \frac{S_f}{r_f} \tag{2}$$

式中 A_f 为球形扩张火焰面面积。

根据 S_f 在大部分工况下呈现与 κ 的近似线性变化,采用线性外推方法获得无拉伸火焰传播速度 S_f^0 ^[11]。但是,通过对四氢呋喃族燃料层流燃烧实验数据的观察,对于稀燃工况, S_f 与 κ 呈现出了明显的非线性。Chen 等曾研究过不同的外推模型在数据处理中的精确度,认为在马克斯坦长度为正时,使用如下的非线性外推方法可以得到比线性外推方法更精确的结果^[12-13]

$$\ln S_f = \ln S_f^0 - \frac{2S_f^0 L_b}{r_f S_f} \tag{3}$$

式中 L_b 为马克斯坦长度,表征层流火焰对火焰面拉伸率和曲率的敏感程度,本文用于分析火焰面的总体不稳定性。

图 2 展示了 MTHF 在初始温度为 453 K,压力为 0.1 MPa,当量比分别为 0.8、0.9、1.1 的拉伸火焰传播速度随拉伸率的变化情况。从拟合优度判定系数可以看出,不同工况下非线性模型的拟合优度更高。这说明非线性模型比线性方法更为合理,尤其是在小当量比的情况下。

层流燃烧速率可由火焰面前后质量守恒获得

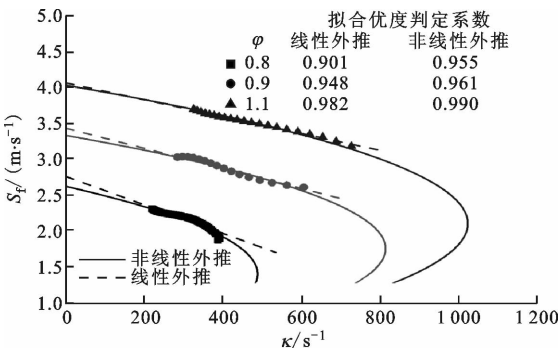


图 2 火焰传播速度线性与非线性外推方法的对比

$$S_u = S_f^0 \frac{\rho_b}{\rho_u} \tag{4}$$

式中 ρ_u 和 ρ_b 分别是未燃气和已燃气的密度。

对于火焰不稳定性,可用已燃气和未燃气的密度比 γ 来表征流体力学不稳定性,用有效路易斯数 Le_{eff} (混合气中燃料的路易斯数 Le_F 和氧的路易斯数 Le_O 的加权平均)来表征火焰面非对等扩散不稳定性,其中 Le_F 与 Le_O 为混合气的热扩散系数分别与燃料和氧在混合气中的二元质扩散系数之比。火焰厚度 δ 为非对等扩散起作用的尺度,本文将其定义为热扩散火焰厚度

$$\delta = \frac{\lambda}{\rho_u c_p S_u} = \frac{D_{th}}{S_u} \tag{5}$$

式中: λ 和 D_{th} 分别为未燃气体的导热系数和热扩散率; c_p 为未燃气体的比定压热容。

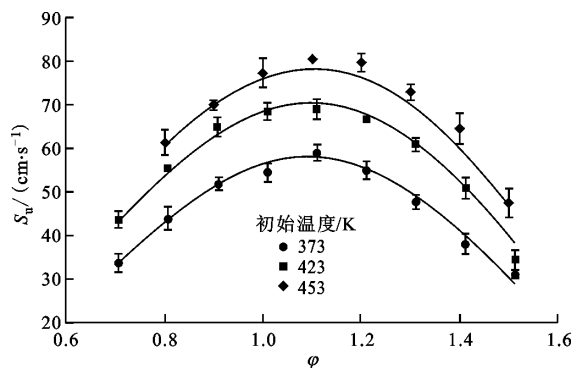
3 结果与分析

通过实验数据处理获得 3 种四氢呋喃族燃料的层流燃烧速率和马克斯坦长度后,本章首先总结不同当量比、初始温度、初始压力 and 不同燃料的层流燃烧速率规律,然后从燃料的理化性质方面解释层流燃烧速率规律,并对工况参数对 3 种燃料层流燃烧速率的敏感程度进行量化,最后对 3 种燃料火焰面不稳定性规律进行总结。

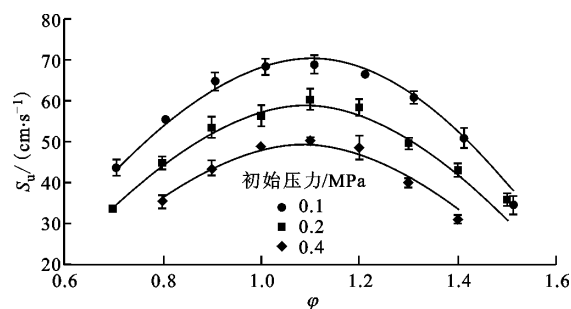
3.1 不同工况下四氢呋喃族燃料的层流燃烧速率

图 3 展示了不同工况下四氢呋喃族燃料的层流燃烧速率。从图 3 可以看出: 3 种燃料在相同初始温度与压力下,层流燃烧速率都在当量比为 1.1 附近时达到最大值,并随着混合气变浓或者变稀,层流燃烧速率降低;层流燃烧速率随着初始温度升高而增大,随初始压力的升高而减小。图 4 展示了 3 种四氢呋喃族燃料在初始压力为 0.1 MPa,温度分别为 373、453 K 下以及初始压力为 0.1、0.4 MPa,温度为 423 K 下的层流燃烧速率。可以发现,在相同

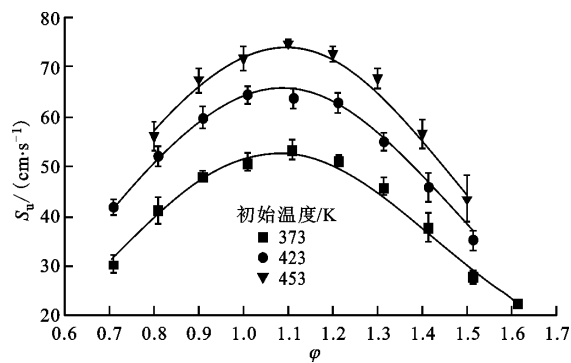
的当量比、初始温度与压力下,3种燃料层流燃烧速率的规律总体呈现为 $S_{u,THF} > S_{u,MTHF} > S_{u,DMTHF}$ 。在当量比为 1.1 附近、初始温度为 423 K、压力为 0.1 MPa 下,THF 的层流燃烧速率最高,MTHF 次之,DMTHF 最低,分别为 69、62.61 和 59.49 cm/s,而



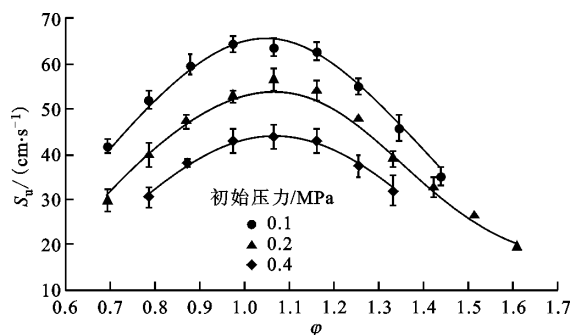
(a) THF, 0.1 MPa



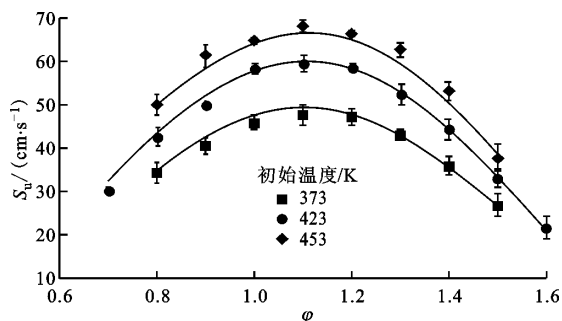
(b) THF, 423 K



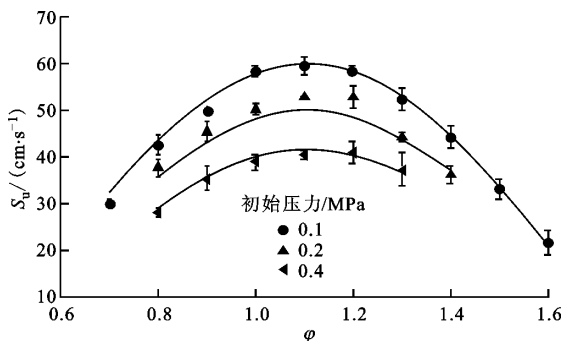
(c) MTHF, 0.1 MPa



(d) MTHF, 423 K

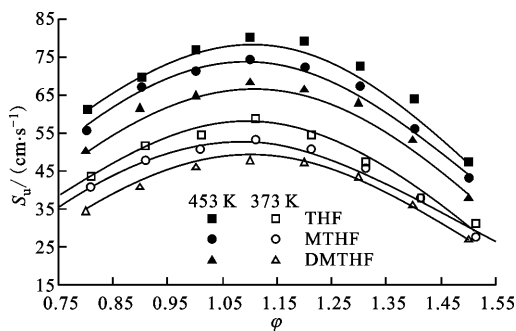


(e) DMTHF, 0.1 MPa

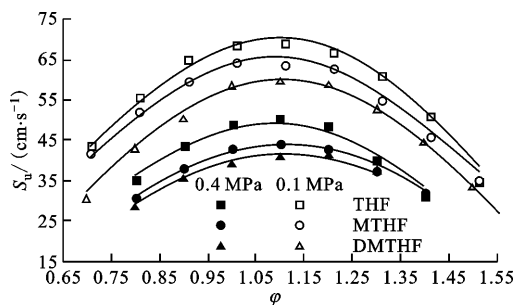


(f) DMTHF, 423 K

图3 不同工况下四氢呋喃族燃料的层流燃烧速率



(a) 0.1 MPa



(b) 423 K

图4 不同四氢呋喃族燃料的层流燃烧速率对比

相同工况下汽油的层流燃烧速率为 $64.9 \text{ cm/s}^{[14]}$,处在 THF 与 MTHF 之间。从这一角度来说,3种燃料与汽油都较为相近,有利于应用到汽油发动机中。至于三者的层流燃烧速率对初始温度和压力的

敏感程度,将在后文通过燃料理化特性和层流燃烧速率公式拟合作进一步分析。

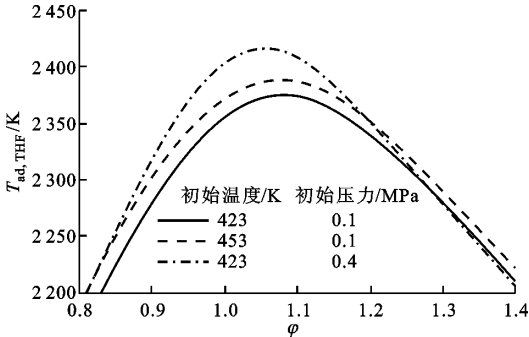
3.2 不同工况下四氢呋喃族燃料的理化特性

根据稳态层流预混火焰以及层流燃烧速率理论,对层流燃烧速率有影响的混合气理化特性主要包括绝热火焰温度、热扩散系数、质扩散系数和化学反应活性,即工况因素通过影响燃料理化特性间接影响层流燃烧速率。

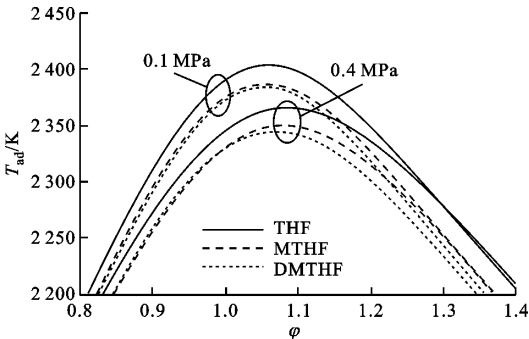
层流燃烧速率与混合气的绝热火焰温度有密切的关系,提高绝热火焰温度,能够提高化学反应速率、扩散特性以及未燃区的预热,从而提高层流燃烧速率。图 5a 展示了不同温度与压力下 THF 的绝热火焰温度随当量比的变化情况,绝热火焰温度由软件 CHEMKIN 计算得到。绝热火焰温度随当量

比变化十分明显,最高绝热火焰温度出现在当量比为 1.0~1.1 的区间。这是由于混合气偏浓可以释放出更多的燃烧焓,同时不完全燃烧产物的增多可以抑制完全燃烧产物的高温裂解吸热反应,最终使得绝热火焰温度更高。绝热火焰温度最大值对应的当量比随初始温度变化不大,但是随着初始压力的升高向小当量比方向移动,这是由于混合气发生完全燃烧的比例增加所致。图 5b 展示了 3 种燃料在初始压力分别为 0.1、0.4 MPa 下的绝热火焰温度,可以发现 $T_{ad,THF} > T_{ad,MTHF} > T_{ad,DMTHF}$ 。这也说明了绝热火焰温度是造成 3 种燃料层流燃烧速率差异的原因之一。对绝热火焰温度影响最大的因素是混合气的低热值 Q_L ,从图 5c 看到,3 种燃料混合气在初始温度为 298 K、压力为 0.1 MPa 下的低热值关系为 $Q_{L,THF} > Q_{L,DMTHF} \approx Q_{L,MTHF}$ 。由此可见,THF 的绝热火焰温度大大超过 MTHF 和 DMTHF 的最重要的原因是其混合气的低热值更高。DMTHF 的低热值与 MTHF 接近,但是在浓混合气下绝热火焰温度更低,这可能是因为两者不完全燃烧程度以及燃烧产物比热容的差异综合导致。

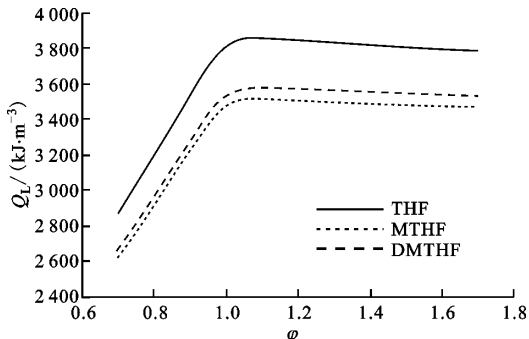
图 6 给出了 3 种燃料混合气在初始温度为 373 K、压力为 0.1 MPa 下的热扩散率 D_{th} 和不足反应物的质扩散率 D_m ,这两个热物性参数采用分子理论进行估算获得^[15-16]。由图 6 可以看到,3 种燃料的热扩散率随当量比增加而降低,质扩散率在当量比 1.0~1.1 附近随当量比增加而增加,说明当量比的提升会降低混合气的热扩散率以及提升质扩散率。 D_{th} 表征混合气的导温能力, D_{th} 的增大可以加速火焰面热量的导出,虽然会使得火焰面温度降低,但是综合来看,可使得预混区温度升高,提升层流燃烧速率。 D_m 的增大虽然使得反应区中反应物的浓度可在更长时间内维持不变,增加放热量,但是质扩散所带来的热通量会降低预热区的温度,降低未燃区反



(a)不同初始温度与压力下 THF 的绝热火焰温度



(b)不同燃料的绝热火焰温度



(c)不同燃料的低热值

图 5 不同工况下燃料绝热火焰温度与低热值对比

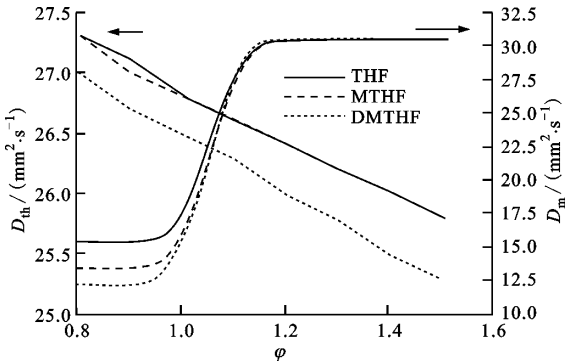


图 6 THF、MTHF 和 DMTHF 的热扩散率和质扩散率对比

应物浓度,最终导致层流燃烧速率减小。三者热扩散率规律呈现为 $D_{th,THF} \approx D_{th,MTHF} > D_{th,DMTHF}$,质扩散率表现为 $D_{m,THF} > D_{m,MTHF} > D_{m,DMTHF}$,说明 THF 和 MTHF 的层流燃烧速率受质扩散带来的负面影响比 DMTHF 更大,而三者层流燃烧速率规律与热扩散率一致,说明层流燃烧速率主要受热扩散率带来的正面影响。

当量比的提升一方面会使得绝热火焰温度先提升后下降,且在当量比为 1.0~1.1 时达到峰值,这与层流燃烧速率随当量比变化的规律一致;另一方面,当量比的提升会降低混合气热扩散率,提升质扩散率,降低层流燃烧速率。初始温度对层流燃烧速率的影响,一方面是由于混合气的热扩散会随着温度的升高而提升($D_{th} \propto T$),另一方面是由于绝热火焰温度随初始温度的提升而升高,反应强度略微加强($\omega \propto e^{-1/T}$),但是会导致混合气的质扩散得到提升($D_m \propto T^{3/2}$),降低层流燃烧速率,而总的来说层流燃烧速率会得到提升。压力虽然对绝热火焰温度有提升作用,对反应物浓度和化学反应活性有正面作用($\omega \propto p^n$),但是对组分扩散和导温($D_m \propto p^{-1}$, $D_{th} \propto p^{-1}$)有负面作用,总体而言对层流燃烧速率产生负面影响($S_u = p^{n/2-1}$)。3 种燃料的绝热火焰温度关系为 $T_{ad,THF} > T_{ad,MTHF} > T_{ad,DMTHF}$,热扩散率关系为 $D_{th,THF} \approx D_{th,MTHF} > D_{th,DMTHF}$,但质扩散率表现为 $D_{m,THF} > D_{m,MTHF} > D_{m,DMTHF}$,总的来说使得三者层流燃烧速率呈现 $S_{u,THF} > S_{u,MTHF} > S_{u,DMTHF}$ 的规律。

3.3 四氢呋喃族燃料层流燃烧速率影响因素的

定量分析

为了量化工况参数对层流燃烧速率的影响,本文根据层流燃烧速率和工况参数的规律,采用最小二乘法对层流燃烧速率和工况参数进行了拟合,拟合公式为^[17]

$$S_u = S_{u,ref} (T/T_{ref})^\alpha (p/p_{ref})^\beta$$
$$S_{u,ref} = A + B(\varphi - \phi) + C(\varphi - \phi)^2 + D(\varphi - \phi)^3 + E(\varphi - \phi)^4$$
$$\alpha = F + G(\varphi - \phi) + H(\varphi - \phi)^2 + I(\varphi - \phi)^3$$
$$\beta = J + K(\varphi - \phi) + L(\varphi - \phi)^2$$

}

(6)

式中: $S_{u,ref}$ 表示参照工况 423 K、0.1 MPa 下的层流燃烧速率; α 表示温度指数; β 表示压力指数; $A \sim L$ 以及 ϕ 都是待拟合系数。表 2 给出了 3 种四氢呋喃族燃料层流燃烧速率的拟合参数,从平均误差与最大误差可以看出拟合效果较好。

根据表 2 中各系数计算得到了温度指数与压力

指数如图 7 所示。温度指数在工况范围内为正数,说明层流燃烧速率与初始温度呈正指数幂函数关系,且温度指数在较稀或较浓混合气范围比在当量混合气附近更大,层流燃烧速率对温度变化更为敏感;MTHF 的温度指数在当量比为 0.8~1.4 的范围内相对于 THF 和 DMTHF 更高,也就是说 MTHF 的层流燃烧速率对于温度变化更加敏感。3 种燃料的压力指数在工况范围内为负数,说明层流燃烧速率与初始压力呈负指数幂函数关系,其中 THF 和 DMTHF 压力指数的绝对值在稀或浓混合气范围比在当量混合气附近更大,层流燃烧速率对压力变化更为敏感,而 MTHF 压力指数的绝对值随当量比增大先增大,在当量比为 1.2~1.4 时基本维持稳定。这说明 MTHF 的层流燃烧速率在稀混合气下对压力变化更加敏感,在浓混合气下敏感性比当量混合气小。在当量比为 0.6~1.2 的范围内,MTHF 压力指数的绝对值在 3 种燃料中最大,其层流燃烧速率对压力变化更加敏感。

表 2 3 种四氢呋喃族燃料层流燃烧速率的拟合参数

拟合参数	数值		
	THF	MTHF	DMTHF
ϕ	1.057	1.055	1.061
A	70.694	66.040	60.157
B	18.112	14.380	16.394
C	-205.918	-210.645	-185.003
D	-44.832	-30.651	-15.040
E	151.239	264.445	91.635
F	1.505	1.724	1.528
G	0.082	0.416	0.030
H	3.588	2.523	3.633
I	-0.572	-4.518	-4.014
J	-0.254	-0.291	-0.262
K	-0.021	0.143	0.032
L	-0.568	-0.329	-0.350
平均误差/%	1.238	0.933	1.084
最大误差/%	3.078	2.582	2.604

从拟合公式中可以看出,当量比是通过参考工况的层流燃烧速率 $S_{u,ref}$ 、温度指数 α 与压力指数 β 对层流燃烧速率造成影响的。 $\varphi = \phi$ 时的层流燃烧速率基本相当于该初始温度与压力工况下的峰值层流燃烧速率,从表 2 可以发现 THF 的参考工况层流燃烧速率最高,MTHF 次之,DMTHF 最小,三者的温度指数与压力指数的绝对值都是 MTHF 最

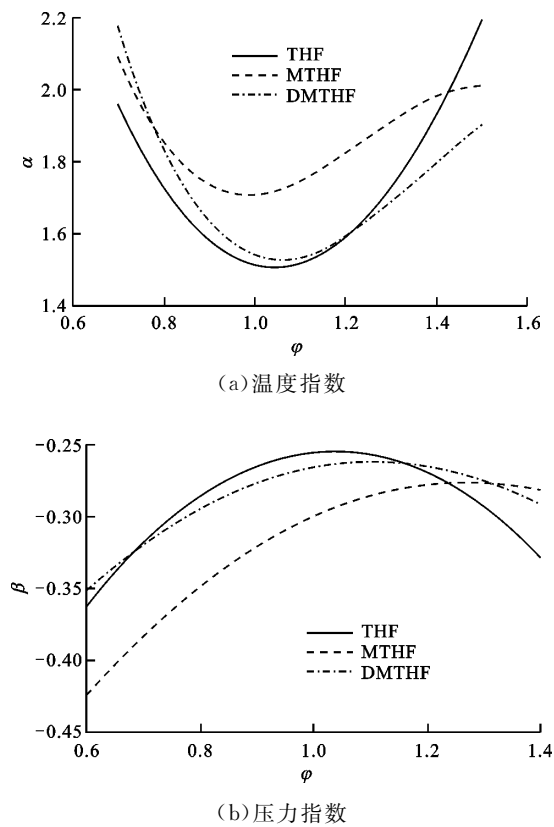


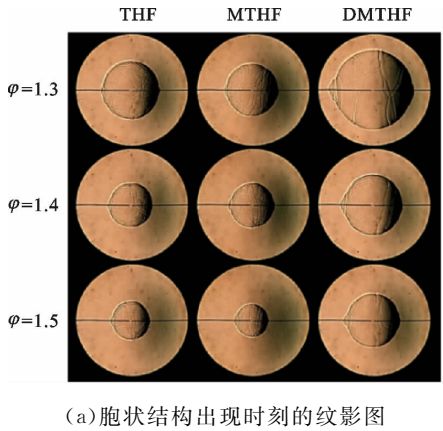
图 7 3 种燃料在不同当量比下的温度指数和压力指数

大,THF 与 DMTHF 相近,说明 MTHF 对于初始温度与压力的敏感性最强,从图 7 也能够得到相同的结论。

3.4 四氢呋喃族燃料的火焰面不稳定性对比

图 8a 展示了初始温度为 423 K、压力为 0.4 MPa、当量比为 1.3~1.5 时,3 种燃料的不稳定性出现时刻的纹影照片,该时刻之后,裂纹之间平滑的火焰面上逐渐出现细小的胞状结构,表明火焰面由稳定向不稳定转变。图 8b 展示了火焰面由稳定转为不稳定时的半径,在此称为临界半径 r_c ,可以看到浓混合气下三者的火焰面不稳定性关系为 $r_{c,THF} \approx r_{c,MTHF} > r_{c,DMTHF}$ 。马赫斯坦长度表征火焰面总体不稳定性,理论上马赫斯坦长度 $L_b > 0$ 意味着火焰面总体上是稳定的,并且在这个范围内马赫斯坦长度越大,火焰面总体稳定性越好。图 9 展示了 3 种燃料的马赫斯坦长度在初始温度为 423 K,压力为 0.1、0.4 MPa 的变化情况,可以看到 3 种燃料的马赫斯坦长度在初始压力为 0.1 MPa、当量比小于 1.1 的区间内大于 0,呈现出 $L_{b,THF} > L_{b,MTHF} > L_{b,DMTHF}$ 的规律。在初始压力为 0.1 MPa、当量比大于 1.1 以及初始压力为 0.4 MPa、整个实验当量比范围内,马赫斯坦长度接近于 0,三者的大小关系不

明显。这是因为在这些工况下三者火焰面不稳定性都强,使得三者马赫斯坦长度都比较接近,差异性不明显。考虑到实验的不确定性,从临界半径得到的 3 种燃料火焰面不稳定性差异规律与由马赫斯坦长度得到的规律,能够说明三者火焰面不稳定性总体呈现为 $THF > MTHF > DMTHF$ 。



(a) 胞状结构出现时刻的纹影图

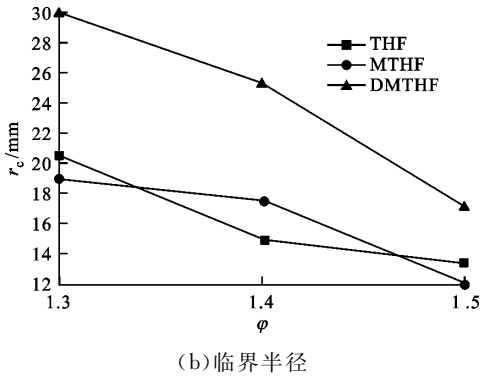


图 8 3 种燃料的不稳定性对比

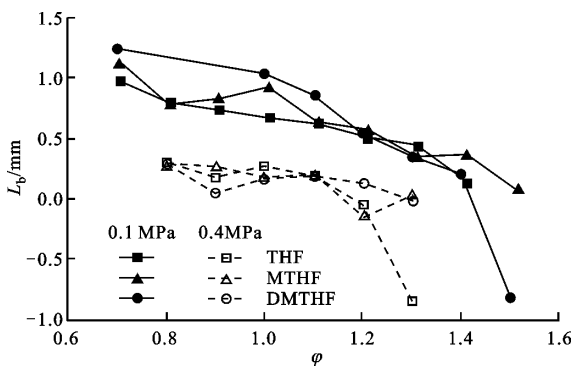
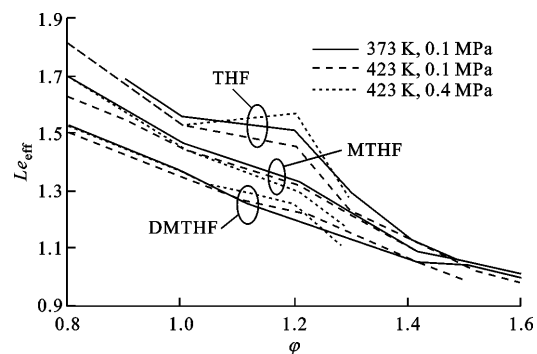


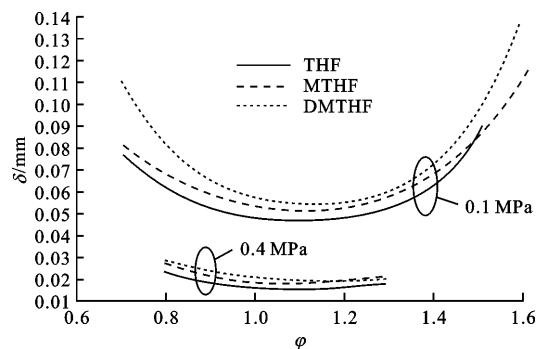
图 9 THF、MTHF 和 DMTHF 的马赫斯坦长度对比

火焰不稳定主要来源于非对等扩散因素和流体动力学因素,体积力因素在燃烧速率快的情况下忽略不计。非对等扩散因素来自于质量和热量的不等扩散作用,用有效路易斯数来表征,有效路易斯数越小,说明非对等扩散不稳定性越强。流体动力学因素是已燃混合气与未燃混合气之间的热膨胀率,用

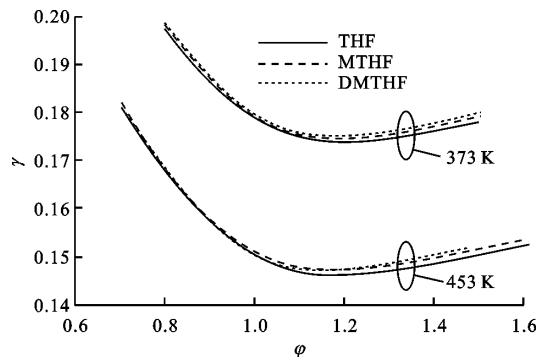
密度比 γ 来表征,密度比越大代表着流体力学不稳定性越强。非对等扩散起作用的尺度为火焰厚度,当非对等扩散起稳定作用时,火焰面厚度的增大将会增强火焰面的稳定性。不同的工况参数以及3种燃料的燃烧特性主要是通过非对等扩散不稳定性、流体力学不稳定性以及火焰厚度来影响火焰面的不稳定性。图10展示了3种燃料的有效路易斯数、初始温度 423 K 下的火焰厚度以及初始压力为 0.1 MPa 下的密度比,三者的有效路易斯数和火焰厚度的关系为 $Le_{\text{eff, THF}} < Le_{\text{eff, MTHF}} < Le_{\text{eff, DMTHF}}$ 与 $\delta_{\text{THF}} < \delta_{\text{MTHF}} < \delta_{\text{DMTHF}}$,说明三者的非对等扩散不稳定性关系是 $\text{THF} > \text{MTHF} > \text{DMTHF}$ 。密度比相近,说明



(a) 有效路易斯数



(b) 火焰厚度



(c) 密度比

图10 3种燃料有效路易斯数、火焰厚度以及密度比的对比

三者的流体力学不稳定性相近,这就是3种燃料火焰面不稳定性的关系是 $\text{THF} > \text{MTHF} > \text{DMTHF}$ 的原因。

4 结 论

本文使用定容燃烧弹在初始压力为 0.1~0.4 MPa、初始温度为 373~453 K、当量比为 0.7~1.6 下对3种四氢呋喃族燃料 THF、MTHF、DMTHF 的层流燃烧特性进行了实验研究,得到主要结论如下。

(1)通过对由实验数据处理获得的不同工况下层流燃烧速率的分析,发现3种物质的层流燃烧速率都是随初始温度升高而增大,随初始压力增大而减小,随当量比增加先增大后减小,峰值在当量比为 1.1 附近。3种燃料的层流燃烧速率关系为 $S_{u, \text{THF}} > S_{u, \text{MTHF}} > S_{u, \text{DMTHF}}$ 。

(2)3种燃料的绝热火焰温度关系为 $T_{\text{ad, THF}} > T_{\text{ad, MTHF}} > T_{\text{ad, DMTHF}}$,热扩散率关系为 $D_{\text{th, THF}} \approx D_{\text{th, MTHF}} > D_{\text{th, DMTHF}}$,这是三者层流燃烧速率呈现 $S_{u, \text{THF}} > S_{u, \text{MTHF}} > S_{u, \text{DMTHF}}$ 规律的原因。

(3)对3种燃料层流燃烧速率进行拟合定量分析,发现三者层流燃烧速率与初始温度呈正指数幂函数关系,与压力呈负指数幂函数关系。对于温度敏感性,三者层流燃烧速率在稀或浓混合气下比当量混合气对初始温度变化更为敏感。对于压力敏感性,THF 与 DMTHF 在稀或浓混合气下比当量混合气对初始压力变化更为敏感,MTHF 在稀混合气下对压力变化最敏感。三者中,MTHF 对温度与压力的变化最敏感。

(4)从马克斯坦长度的变化趋势来看,3种燃料火焰面不稳定性的关系是 $L_{b, \text{THF}} > L_{b, \text{MTHF}} > L_{b, \text{DMTHF}}$,临界半径也能支持这个结论,这是由于三者的有效路易斯数和火焰厚度的关系为 $Le_{\text{eff, THF}} < Le_{\text{eff, MTHF}} < Le_{\text{eff, DMTHF}}$ 与 $\delta_{\text{THF}} < \delta_{\text{MTHF}} < \delta_{\text{DMTHF}}$,即三者非对等扩散不稳定性关系为 $\text{THF} > \text{MTHF} > \text{DMTHF}$ 所致。

参考文献:

- [1] International Energy Agency. Renewables 2018: market analysis and forecast from 2018 to 2023 [R/OL]. [2019-10-30]. <https://www.iea.org/renewables/2018/>.
- [2] RUDOLPH T W, THOMAS J J. NO_x , NMHC and CO emissions from biomass derived gasoline extenders

- [J]. Biomass, 1988, 16(1): 33-49.
- [3] LUCAS S V, LOEHR D A, MEYER M E, et al. Exhaust emissions and field trial results of a new, oxygenated, non-petroleum-based, waste-derived gasoline blending component: 2-methyltetrahydrofuran [C/OL] // International Fuels and Lubricants Meeting and exposition. [2019-11-10]. DOI: 10.4271/932675.
- [4] NASRULLAH R G. Effect of ethanol and tetrahydrofuran on performance and emission characteristics of ci engine fuelled with methyl ester of jatropha [J]. International Journal of Engineering Research and Technology, 2014, 4(1): 251-257.
- [5] NASRULLAH M, GOPAL K R. Effect of tetrahydrofuran on performance and emission characteristics of ci engine fuelled with methyl ester of jatropha [J]. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2014, 3(3): 752-757.
- [6] JIANG Y, XU H, MA X, et al. Laminar burning characteristics of 2-MTHF compared with ethanol and isooctane [J]. Fuel, 2017, 190: 10-20.
- [7] FAN X, YANG K, JIAO X, et al. Laminar burning characteristics of 2-methyltetrahydrofuran compared with 2-methylfuran and isooctane [C] // 11th Asia-Pacific Conference on Combustion. Sydney, NSW, Australia: Combustion Institute, 2017: 2018190517 1261.
- [8] WANG X, FAN X, YANG K, et al. Laminar flame characteristics and chemical kinetics of 2-methyltetrahydrofuran and the effect of blending with isooctane [J]. Combustion and Flame, 2018, 191: 213-225.
- [9] 张志远, 黄佐华, 郑建军, 等. 高温高压条件下乙醇-空气-稀释气预混气层流燃烧特性研究 [J]. 内燃机学报, 2010, 28(2): 103-108.
- ZHANG Zhiyuan, HUANG Zuohua, ZHENG Jianjun, et al. Study on premixed laminar combustion characteristics of ethanol-air-diluted mixtures at elevated pressures and temperatures [J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(2): 103-108.
- [10] LAMOUREUX N, DJEBAÏLI-CHAUMEIX N, PAILLARD C E. Laminar flame velocity determination for H_2 -air-He- CO_2 , mixtures using the spherical bomb method [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2003, 27(4): 385-393.
- [11] BRADLEY D, GASKELL P H, GU X J. Burning velocities, Markstein lengths, and flame quenching for spherical methane-air flames: a computational study [J]. Combustion and Flame, 1996, 104(1/2): 176-198.
- [12] CHEN Z. On the extraction of laminar flame speed and Markstein length from outwardly propagating spherical flames [J]. Combustion and Flame, 2011, 158(2): 291-300.
- [13] 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.
- [14] SILEGHEM L, ALEKSEEV V A, VANCOILLIE J, et al. Laminar burning velocity of gasoline and the gasoline surrogate components iso-octane, n-heptane and toluene [J]. Fuel, 2013, 112(3): 355-365.
- [15] 樊祥山, 孙德魁, 王井山, 等. 利用分子理论估算四氢呋喃的热物理特性参数 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(3): 44-49.
- FAN Xiangshan, SUN Dekui, WANG Jingshan, et al. Estimation for thermal properties of tetrahydrofuran with molecule theory [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(3): 44-49.
- [16] POLING B E, PRAUSNITZ J M, CONNELL J P O. The properties of gases and liquids [M]. 5th ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2001: 9.
- [17] METGHALCHI M, KECK J C. Burning velocities of mixtures of air with methanol, isooctane, and indolene at high pressure and temperature [J]. Combustion and Flame, 1982, 48: 191-210.

(编辑 荆树蓉)