

汽油层流燃烧速度的测量及其替代物模型研究

徐昭华, 胡二江, 黄佐华

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对实际汽油组分复杂导致数值模拟研究困难的问题,采用球形火焰法,在定容燃烧弹上测量了初始温度分别为 358、403、448 K,初始压力分别为 0.1、0.2、0.5 MPa,当量比为 0.8~1.5 工况下,实际汽油、正庚烷、异辛烷、甲苯、异辛烷/正庚烷混合燃料(PRF)、甲苯/异辛烷/正庚烷混合燃料(TRF)的层流燃烧速度,分析了初始温度、压力以及当量比对汽油的层流燃烧速度的影响规律,对比了不同替代物模型对实际汽油的层流燃烧速度的预测结果。基于实验结果,构建了适合我国汽油的双组分和三组分汽油替代物模型,对比结果表明,在本研究的实验工况范围内,三组分汽油替代物模型比双组分汽油替代物模型能够更好预测实际汽油层流燃烧速度。应用 Chemkin 软件和 KAUST 清洁燃烧研究中心近期发展的汽油替代物机理,对本研究实验数据进行了数值仿真,该机理对实验数据给出了合理预测。利用本研究提出的汽油替代物模型,可对实际汽油的层流燃烧速度进行合理的预测。

关键词: 汽油;层流燃烧速度;实验测量;汽油替代物模型

中图分类号: TK407.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)03-0036-07

Research on the Laminar Burning Velocity and Surrogate Models of Gasoline

XU Zhaohua, HU Erjiang, HUANG Zuohua

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The spherical flame method was adopted for the problem that numerical simulation research is somewhat difficult due to the complexity of the actual gasoline composition. Laminar burning velocities of actual gasoline were measured in a constant volume bomb. Measurements were also conducted for n-heptane, iso-octane, primary reference fuels (n-heptane and iso-octane blends), and toluene reference fuel (n-heptane, iso-octane and toluene blends). Experiments were performed at the equivalence ratios from 0.8 to 1.5, initial temperatures of 358, 403 and 448 K and pressures of 0.1, 0.2 and 0.5 MPa, respectively. The effects of initial temperature, pressure and equivalence ratio on laminar burning velocity were analyzed. Based on the experimental results, primary reference fuel surrogate model (PRF) and toluene reference fuel surrogate model (TRF) were proposed. The results showed that the TRF model could better predict the laminar burning velocity of actual gasoline than the PRF model. Besides, using the software CHEMKIN and the KAUST Clean Combustion Research Center's recently developed gasoline surrogate, numerical simulation of the measured data was carried out, which gives a

收稿日期: 2018-09-08。 作者简介: 徐昭华(1996—),男,硕士生;胡二江(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91641124)。

网络出版时间: 2018-12-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181214.1153.030.html>

reasonable prediction of the measured data under the research conditions. Therefore, a reasonable numerical simulation study on actual gasoline could be carried out by using the gasoline surrogate model proposed in this study.

Keywords: gasoline; laminar burning velocity; experimental measurement; gasoline surrogate model

随着排放法规的日益严峻,汽油机朝着高效率 and 低排放方向发展,对汽油基础燃烧特性的了解对高效低污染汽油机设计十分重要。由于汽油组分的复杂性,使得直接对汽油的实验和数值研究十分困难^[1]。为了对汽油进行数值模拟研究,需要构建合理的汽油替代物模型,这不仅可以代表实际汽油中存在的重要有机化合物类别,还能够体现实际汽油的燃烧特性。

在构建汽油替代物模型时,需要先确定目标特性,同时了解如何影响发动机的燃烧特性。由于每种特性都会影响燃烧过程,因此必须考虑目标特性和燃烧性能的关系。目标特性分为物理和化学特性:物理特性如燃料挥发性会影响喷雾雾化,进而影响燃烧性能;化学特性如辛烷值会影响爆震。汽油在发动机内的燃烧过程是一个复杂的湍流燃烧过程,而层流燃烧速度是研究湍流燃烧的基础,且层流燃烧速度、马克斯坦长度等表征层流燃烧特性的参量是湍流燃烧模型计算时的输入参数,因此本文针对层流燃烧特性构建适合国产汽油的替代物模型。

目前,甲苯、异辛烷和正庚烷已成为国际上公认的汽油替代物燃料必须包含的组分^[2]。Pera 等使用辛烷值与体积分数和为 1 作为约束确定了甲苯/异辛烷/正庚烷混合燃料(TRF 替代燃料)的组分比例,并对欧洲实际汽油 ULG95 进行模拟,最终得到正庚烷、异辛烷、甲苯体积分率分别为 13.7%、42.8%、43.5%的汽油替代物模型^[3]。Sarathy 等在预测实际汽油的着火延迟期时,要求替代燃料的辛烷值、H/C 与实际汽油相匹配^[4]。根据 Morgan 等提出的二阶线性模型^[5],Mannaa 等确定了辛烷值为 75、85、95 的 TRF 汽油替代燃料,提出的 TRF-85-1 替代物燃料与实际汽油的层流燃烧速度吻合较好,替代燃料的辛烷值与实际汽油的辛烷值相匹配^[6]。Jerzembeck 等在定容燃烧弹上测量了初始温度为 373 K、当量比为 0.7~1.2、初始压力为 1.01~2.53 MPa 下正庚烷、异辛烷、正庚烷/异辛烷两组分汽油替代燃料 PRF87 和商用汽油的层流燃烧速度^[7]。Sileghem 等利用平面火焰绝热燃烧器测量了商业汽油在温度为 298~358 K、当量比为 0.7~1.3 的

层流燃烧速度,同时根据甲苯、异辛烷、正庚烷单质以及汽油在不同温度下的层流燃烧速度来确定甲苯/异辛烷/正庚烷混合燃料(TRF 替代燃料)中甲苯、异辛烷和正庚烷的含量^[8]。姚春德等利用定容燃烧弹对标准汽油以及标准汽油相同辛烷值的异辛烷/正庚烷混合燃料(PRF 替代燃料)的层流火焰进行测量,比较了两种燃料在火焰传播速率、拉伸率及马克斯坦长度等方面的差异^[9]。

针对国内实际汽油的层流燃烧特性和汽油替代物模型的研究十分缺乏、利用汽油替代物模型来模拟国产汽油燃烧特性的研究十分有限的现状,本文采用球形火焰法,在定容燃烧弹上对我国实际汽油的层流燃烧速度进行了测量,分析了初始温度、压力和当量比对汽油层流燃烧速度的影响。此外,由于我国汽油与国外汽油的组分差异,基于国外汽油层流燃烧速度获得的汽油替代物模型无法准确预测我国汽油的层流燃烧速度。本文基于国产汽油的层流燃烧速度实验数据,构建了适用于国产汽油的汽油替代物模型 PRF 和 TRF,并选择 KAUST 清洁燃烧研究中心最新发展的汽油替代物机理,对本研究实验数据进行了数值仿真,该机理对本文研究工况下的实验结果给出了合理预测。

1 实验装置和计算方法

1.1 实验过程

实验研究在西安交通大学定容燃烧弹平台上展开,实验装置系统如图 1 所示。实验装置系统包括配气系统、定容燃烧弹、温度控制系统、点火设备、高速影像纹影系统和压力采集系统,其中定容燃烧弹内径为 180 mm,长为 210 mm,材质为不锈钢,两端面对称开有直径为 80 mm 的视窗,并安装石英玻璃,用来观测火焰发展过程。

实验前需根据设定的初始温度、压力和当量比,计算燃料气体、氧气、氮气分压,氧气与氮气的体积比设定为 1:3.762。由于本文选用的均为液体燃料,需要将液体燃料的气体分压换算成常温下的液体体积,计算过程如下:在实验初始条件下,首先依据理想气体状态方程 $PV=nRT$,计算得到腔体内

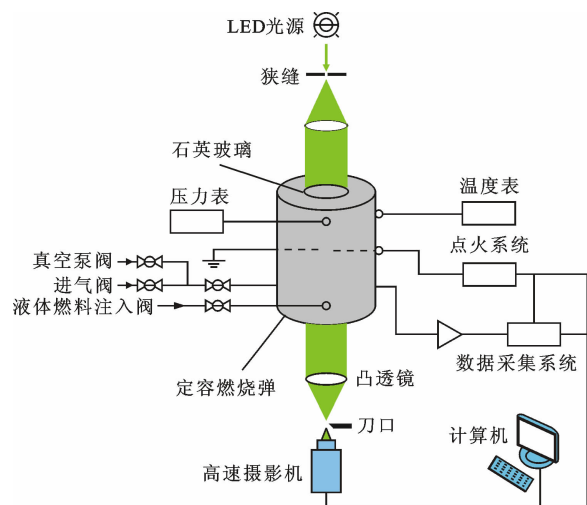


图1 实验装置简图

的气体总摩尔量;然后通过公式 $V_f = \frac{nX_f M_f}{\rho_f}$ 计算出该当量比条件下所需的燃料体积,其中 X_f 为该当量比时燃料的摩尔分数, M_f 、 ρ_f 分别为燃料相对分子质量和液态燃料的密度。

实验过程:首先,对定容燃烧弹抽真空,通过定容燃烧弹顶部的液体燃料注入阀注入液体燃料,待燃料完全蒸发和充分混合后,再依次利用配气系统通入相应分压的氧气和氮气,进气结束,混合气静置 5 min 左右,以确保气体混合均匀;然后,通过点火系统使定容燃烧弹内的中心电极产生电火花来点燃混合气,此时由于点火系统和高速摄像机的同步控制,点火的同时触发高速摄像机的拍摄(高速摄像机的拍摄频率为 10 000 帧/s),从而记录下火焰传播的过程;燃烧结束后打开排气阀门,排出燃烧废气,并对容弹内腔进行反复的高压空气冲洗,确保没有残余废气后即可进入下一个实验点。

本文的实验目的是研究当量比、初始温度和初始压力对火焰特性的影响。初始温度为 358~448 K,初始压力为 0.1~0.5 MPa,常压下当量比为 0.8~1.5,压力升高后,浓混合火焰不稳定性明显增加,加大了层流燃烧速度测量的困难,因此可测量的最大当量比变小。每个实验工况重复 3 次,经过误差分析计算,层流燃烧速度的误差在 5% 以内。

1.2 数据处理

根据文献[10],火焰半径为 6~25 mm 时,点火能量对火焰传播的影响可忽略不计。考虑到点火和压力升高的影响,选择火焰半径为 8~18 mm 之间的纹影照片,通过对高速摄像机拍下的纹影图片的处理,可得球形火焰的火焰半径随时间的变化率,即

已燃气拉伸火焰传播速度

$$S_n = \frac{dr_u}{dt} \quad (1)$$

式中: S_n 为拉伸火焰传播速度, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; r_u 为火焰半径, cm ; t 为点火后时间, s 。

考虑到火焰拉伸的影响, Frankel 等提出了已燃气无拉伸火焰传播速度 S_b 和拉伸火焰传播速度 S_n 的非线性关系^[11-12]

$$S_n = S_b - \frac{2L_b S_b}{r_u} \quad (2)$$

式中: S_b 为已燃气无拉伸火焰传播速度, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; L_b 为已燃气马赫斯坦长度, cm 。

Williams 等将火焰拉伸率 α 定义为火焰表面积 A 的对数对时间 t 的导数^[13]

$$\alpha = \frac{d(\ln A)}{dt} = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \quad (3)$$

对于球形火焰有

$$\alpha = \frac{d(\ln A)}{dt} = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{2}{r_u} \frac{dr_u}{dt} = \frac{2S_n}{r_u} \quad (4)$$

由火焰前锋面处的反应物和生成物质量守恒,可得 S_b 与层流燃烧速度 S_u 的关系式

$$S_u = \frac{\rho_b}{\rho_u} S_b \quad (5)$$

式中: ρ_b 为未燃气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_u 为已燃气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

1.3 数值模拟验证

为了对本研究所提出的汽油替代燃料的层流燃烧速度进行验证,利用 CHEMKIN-PRO 中的 Premix 程序^[14]模拟计算了汽油替代燃料的层流燃烧速度,并将其与实测得到的层流燃烧速度进行对比。数值模拟选用的机理为 KAUST 清洁燃烧研究中心最新发展的汽油替代物机理^[15],包含 574 个组分和 3 379 个反应,可用于模拟异辛烷、正庚烷、甲苯及其混合物的燃烧特性。为了确保数值仿真结果的精度,计算过程中考虑了多组分输运模型和 Soret 扩散,网格参数 GRAD 和 CURV 的值设置为 0.02,网格数设置为 1 000。

2 实验结果与分析

2.1 定容燃烧弹的验证

为了验证实验系统的可靠性,测量了异辛烷/空气在初始温度为 358 K、初始压力为 0.1 MPa、当量比为 0.8~1.5 下的层流燃烧速度,并与文献[6,16-17]进行对比,如图 2 所示。本文实验值与文献实验值一致,表明本文的实验系统能够准确测量火焰传

播速度,具有高可靠性和稳定性。

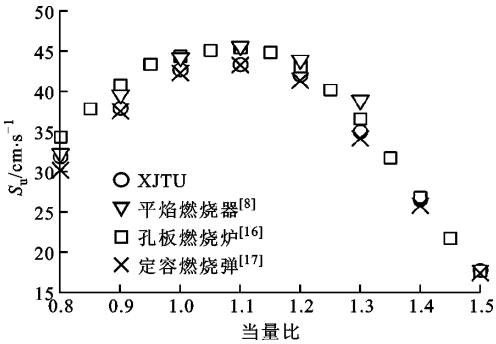


图2 异辛烷/空气的层流燃烧速度

2.2 汽油的层流燃烧速度

由于实际汽油的组分复杂,通常包含几百种物质,加上类型、产地造成的差异,所以对实际汽油燃烧性质的实验和数值模拟研究变得十分困难。实际汽油的组分主要有直链烷烃、异构烷烃、环烷烃、烯烃、芳烃和含氧化合物,表 1 给出了本文选取的国产汽油与国外汽油的组分信息对比。由表 1 可知,不同类型汽油的组分差异十分明显,其中国外汽油中异构烷烃的含量要比国产汽油含量高 10% 以上,直链烷烃和烯烃的含量也有明显的差异,且国外汽油中没有含氧组分,而国产汽油中有较多的含氧组分。

表 1 汽油组分的质量分数

组分	质量分数/%			
	汽油	Exxon 708629-60 ^[8]	FACE C ^[18]	FACE A ^[18]
直链烷烃	8.10	10.37	22.07	10.57
异构烷烃	27.46	40.20	70.29	86.12
芳烃	37.02	34.39	5.39	0.38
环烷烃	5.32	9.39	1.71	2.48
烯烃	17.4	5.65	0.42	0.42
含氧化合物	3.85	0	0	0

图 3 给出了初始温度为 358 K、初始压力为 0.1 MPa 时国产汽油与国外汽油的层流燃烧速度对比,其中 FACE C 汽油来自沙特阿拉伯国家石油公司,Exxon 708629-60、TAE7000 汽油来自美国 and 欧洲。由图 3 可知,与国外汽油相比,我国汽油的层流燃烧速度在低当量比时偏小,在高当量比时偏大,表明汽油的层流燃烧速度与汽油的产地、组分有很大关系。因此,适用于国外汽油的汽油替代物模型并不能适用于我国汽油,需构建适用于我国汽油的替代物模型。

图 4 给出了我国汽油的层流燃烧速度在不同初始压力(0.1、0.2、0.5 MPa)与不同初始温度(358、

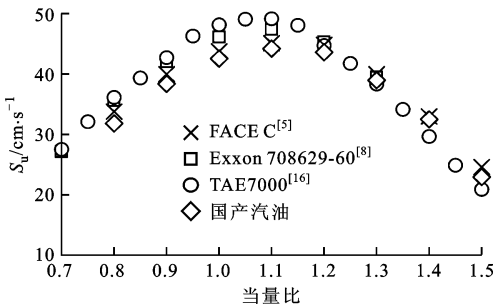
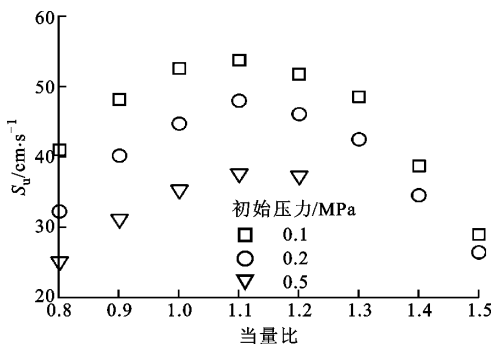
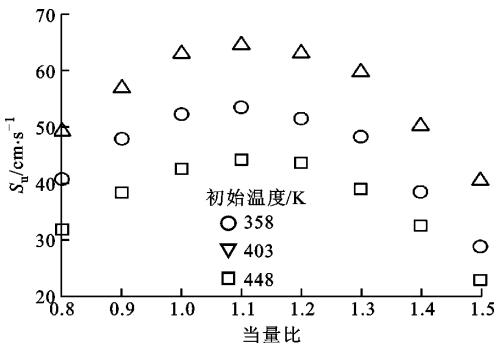


图 3 国产汽油与国外汽油的层流燃烧速度对比

403、448 K)下随当量比的变化。由图 4 可知:在相同初始温度下,汽油的层流燃烧速度随着初始压力的升高而呈逐渐降低的趋势;在相同初始压力条件下,汽油的层流燃烧速度随着初始温度的升高而逐渐增大。然而,初始温度和初始压力的改变,并没有影响其层流燃烧速度在当量比 1.1 处达到最大,随着压力升高和当量比增大,火焰稳定性变差。球形火焰表面在发展过程中会出现细胞状结构,而对表面出现细胞状结构的火焰图片进行处理得到的火焰传播速度有较大的误差,因此,初始压力为 0.5 MPa 条件下的层流燃烧速度实验数据只取到当量比为 1.2 时。



(a) 初始温度为 403 K



(b) 初始压力为 0.1 MPa

图 4 汽油的层流燃烧速度随当量比的变化

2.3 汽油替代物模型的构建

分别构建替代燃料 PRF 和 TRF 来预测国产汽

油的层流燃烧特性,所构建的 PRF 为异辛烷和正庚烷的混合燃料,通过一定的体积比例混合来匹配汽油的辛烷值。替代燃料 TRF 为异辛烷、正庚烷和甲苯的混合燃料,需选取 3 个约束条件来确定这三组分的比例。首先考虑各组分的体积比之和为 1,由于辛烷值是衡量汽油抗爆性的重要指标,且国产汽油的标号是由研究法辛烷值(RON)表征,故将 RON 作为替代物的模拟目标值之一;替代燃料应对实际汽油的相对分子质量进行一定的匹配模拟,所选取的最后一个约束方程为相对分子质量的约束方程。在利用研究法辛烷值作为模拟目标时,本文采用三阶 TOM 模型^[19]来确定 TRF 组分比例,该模型考虑 3 个变量间的相互作用,预测结果远优于一阶和二阶模型,分析表明 TOM 模型比 MLbV 模型^[6]的误差要小。本文提出的汽油替代燃料模型中各组分及其体积分数如表 2 所示,实验选用的汽油和汽油替代物燃料的部分理化特性如表 3 所示。

表 2 汽油替代燃料的组分及含量

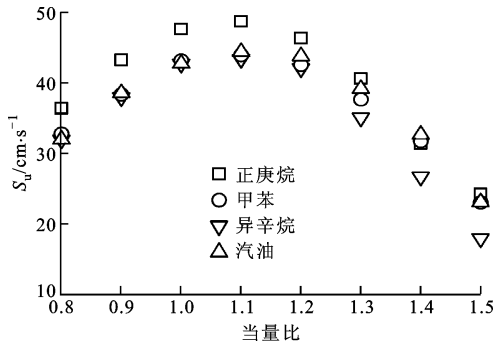
汽油替代燃料	甲苯 体积分数	异辛烷 体积分数	正庚烷 体积分数
PRF-92	0	92%	8%
TRF-92	60.66%	16.69%	22.65%

表 3 汽油及替代物的部分理化特性

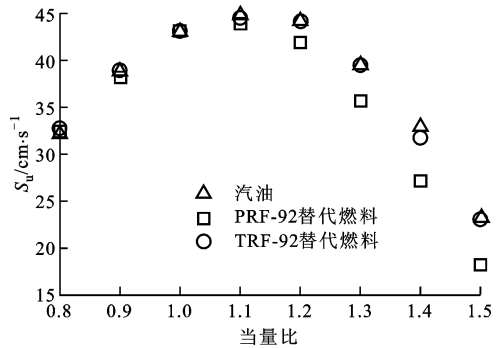
燃料	辛烷值	平均相对分子质量	密度/ $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$
汽油	92	96.347	0.744
PRF-92	92	112.980	0.689
TRF-92	92	96.353	0.795

为了验证本文所提汽油替代物模型的可靠性,测量了初始温度为 358 K、初始压力为 0.1 MPa、当量比为 0.8~1.5 下异辛烷、正庚烷、甲苯、PRF-92 替代燃料和 TRF-92 替代燃料的层流燃烧速度,并与实际汽油的层流燃烧速度进行比较,如图 5 所示。由图 5a 可知,异辛烷、正庚烷、甲苯 3 种燃料中,正庚烷的层流燃烧速度最大,异辛烷的最小,而甲苯和汽油的层流燃烧速度在异辛烷和正庚烷两者之间,因此选用甲苯、正庚烷、异辛烷作为汽油替代物组分来预测汽油的层流燃烧特性。由图 5b 可知,PRF-92 替代燃料与汽油的层流燃烧速度在贫燃料混合物时吻合较好,而在富燃料混合物时,汽油的层流燃烧速度明显比 PRF-92 替代燃料高,这与文献[7]测量的结果相一致。由图 5b、5c 可知,TRF-92 替代燃料与汽油在初始温度为 358、403 K 和初始压力为

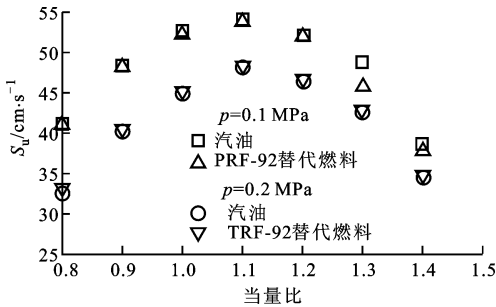
0.1、0.2 MPa 的条件下,二者的层流燃烧速度在实验测量的当量比下均吻合较好,表明本文所提 TRF-92 替代物模型可以用来预测国产汽油的层流燃烧速度。



(a)初始温度为 358 K、初始压力为 0.1 MPa 工况下汽油与替代物单质燃烧速度对比



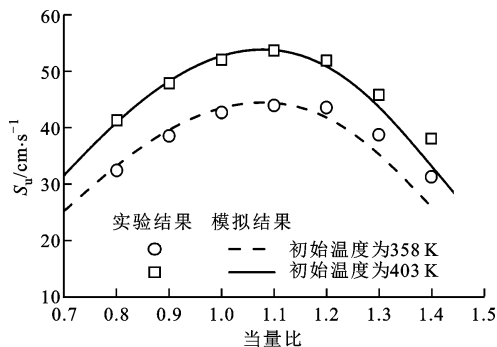
(b)初始温度为 358 K、初始压力为 0.1 MPa 工况下汽油与替代物燃烧速度对比



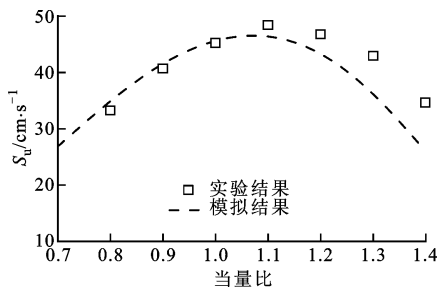
(c)初始温度为 403 K 时,汽油与替代物燃烧速度对比
图 5 异辛烷、正庚烷、甲苯、PRF-92 替代燃料、TRF-92 替代燃料和汽油的层流燃烧速度对比

TRF-92 替代燃料的数值模拟与实验数据的对比结果如图 6 所示。由图 6 可知,在较低当量比时模拟结果与实验测量结果吻合较好,在较高当量比时,模拟结果比实验测量结果偏高,数值模拟结果能够在不同初始温度、压力的情况下对本研究所提汽油替代燃料 TRF-92 的层流燃烧速度做出合理预

测。因此,结合本研究提出的汽油替代物模型和KAUST提出的汽油替代物机理,可对实际汽油的层流燃烧速度进行合理预测。



(a) $p=0.1$ MPa



(b) $p=0.2$ MPa

图6 TRF-92 替代燃料层流燃烧速度的实验值与模拟值对比

3 结 论

本文在定容燃烧弹上对初始温度分别为 358、403、448 K,初始压力分别为 0.1、0.2、0.5 MPa,当量比为 0.8~1.5 条件下的国产汽油的层流燃烧速度进行了测量,分析了初始温度、压力以及当量比对汽油层流燃烧特性的影响,并提出了适用于国产汽油的替代物模型,主要结论如下。

(1) 本文获得了不同初始条件下国产汽油的层流燃烧速度,表明汽油的层流燃烧速度随着压力的升高而减小,随着当量比的增大呈现先升高后降低的趋势,随着温度的升高而增大。

(2) 基于实验测量结果,构建了适合我国汽油的双组分(PRF-92)和三组分(TRF-92)汽油替代物模型。通过对比实际汽油和汽油替代燃料的层流燃烧速度,表明替代燃料速度能够在本研究实验工况范围较好地预测实际汽油的层流燃烧速度,而替代燃料 PRF-92 仅在低当量比时与实际汽油的层流燃烧速度吻合较好。

(3) 利用汽油替代燃料的反应动力学机理进行

数值模拟分析并与实验值进行比较,可知机理能够在整个实验工况对实验数据给出合理预测。因此,结合本研究提出的汽油替代物模型和汽油替代物机理,可对实际汽油的层流燃烧速度进行合理预测。

参考文献:

- [1] SARATHY S M, FAROOQ A, KALGHATGI G T. Recent progress in gasoline surrogate fuels [J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2018, 65: 67-108.
- [2] ANDRAE J C G. Development of a detailed kinetic model for gasoline surrogate fuels [J]. *Fuel*, 2008, 87 (10/11): 2013-2022.
- [3] PERA C, KNOP V. Methodology to define gasoline surrogates dedicated to auto-ignition in engines [J]. *Fuel*, 2012, 96(7): 59-69.
- [4] SARATHY S M, KUKKADAPU G, MEHL M, et al. Ignition of alkane-rich FACE gasoline fuels and their surrogate mixtures [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(1): 249-257.
- [5] MORGAN N, SMALLBONE A, BHAVE A, et al. Mapping surrogate gasoline compositions into RON/MON space [J]. *Combustion & Flame*, 2010, 157 (6): 1122-1131.
- [6] MANNAA O, MANSOUR M S, ROBERTS W L, et al. Laminar burning velocities at elevated pressures for gasoline and gasoline surrogates associated with RON [J]. *Combustion & Flame*, 2015, 162 (6): 2311-2321.
- [7] JERZEMBECK S, PETERS N, PEPIOT-DESJARDINS P, et al. Laminar burning velocities at high pressure for primary reference fuels and gasoline: experimental and numerical investigation [J]. *Combustion & Flame*, 2009, 156(2): 292-301.
- [8] 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.
- [9] 姚春德, 王阳, 宋金瓯, 等. 汽油与异辛烷/正庚烷的燃烧特性分析 [J]. *内燃机学报*, 2009(2): 116-120.
YAO Chunde, WANG Yang, SONG Jinou, et al. Analysis of gasoline and iso-octane with N-heptane flames [J]. *Transactions of CSICE*, 2009(2): 116-120.
- [10] HUANG Z, QIAN W, YU J, et al. Measurement of laminar burning velocity of dimethyl ether-air premixed mixtures [J]. *Transactions of CSICE*, 2007, 86(15): 2360-2366.

- [11] FRANKEL M L, SIVASHINSKY G I. On quenching of curved flames [J]. *Combustion Science & Technology*, 1984, 40(5/6): 257-268.
- [12] CHEN Z. On the extraction of laminar flame speed and Markstein length from outwardly propagating spherical flames [J]. *Combustion & Flame*, 2011, 158(2): 291-300.
- [13] WILLIAMS B F A. *Combustion theory* [M]. Boston, USA: Addison-Wesley, 1965.
- [14] KEE R J. A Fortran program for modeling steady laminar one-dimensional premixed flames [J]. *Sandia Report*, 1985, 143(5): 65.
- [15] PARK S, WANG Yu, CHUNG S H, et al. Compositional effects on PAH and soot formation in counter-flow diffusion flames of gasoline surrogate fuels [J]. *Combustion & Flame*, 2017, 178: 46-60.
- [16] DIRRENBARGER P, GLAUDE P A, BOUNACEUR R, et al. Laminar burning velocity of gasolines with addition of ethanol [J]. *Fuel*, 2014, 115(1): 162-169.
- [17] KELLEY A P, LIU W, XIN Y X, et al. Laminar flame speeds, non-premixed stagnation ignition, and reduced mechanisms in the oxidation of iso-octane [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(1): 501-508.
- [18] SARATHY S M, KUKKADAPU G, MEHL M, et al. Ignition of alkane-rich FACE gasoline fuels and their surrogate mixtures [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(1): 249-257.
- [19] 郑朝蕾, 覃炎忻. 汽油替代物辛烷值预测与组分比例确定模型 [J]. *西南交通大学学报*, 2015, 50(3): 523-528.
- ZHEN Zhaolei, QIN Yanxin. Prediction model for octane number and component proportions of gasoline surrogate fuel [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2015, 50(3): 523-528.

(编辑 赵炜)

(上接第19页)

- [12] 蔡永林, 席光, 樊宏周, 等. 任意曲面叶轮五坐标数控加工刀具轨迹生成 [J]. *西安交通大学学报*, 2003, 37(1): 77-80.
- CAI Yonglin, XI Guang, FAN Hongzhou, et al. Tool-path planning for 5-axis numerical control machining of arbitrary surface impeller [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2003, 37(1): 77-80.
- [13] ZOU Qiang, ZHANG Juyong, DENG Bailin, et al. Iso-level tool path planning for free-form surfaces [J]. *Computer-Aided Design*, 2014, 53: 117-125.
- [14] HU Pengchen, TANG Kai. Five-axis tool path generation based on machine-dependent potential field [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2016, 29(6): 636-651.
- [15] ZHANG Ke, TANG Kai. Optimal five-axis tool path generation algorithm based on double scalar fields for freeform surfaces [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83: 1503-1514.
- [16] DMG MORI Group. NT4300DCG/1500SZ technical information [EB/OL]. [2018-06-16]. <http://cn.dmgmori.com>.
- [17] DP Technology Corp. ESPRIT application case [EB/OL]. [2018-06-16]. <https://www.espritam.com/solutions/technology/5-axis-pinch-milling>.
- [18] 王建录, 成冰, 赵万华, 等. 汽轮机长叶片型面双刀加工刀位轨迹优化算法 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(9): 65-71.
- WANG Jianlu, CHENG Bing, ZHAO Wanhua, et al. New planning algorithm of tool path for long turbine blades machining with twin-cutters [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(9): 65-71.
- [19] LU Dun, LIU Jun, ZHAO Wanhua, et al. Tool path generation for turbine blades machining with twin tool [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, 139: 1-10.
- [20] LEE Y S. Mathematical modeling using different end-mills and tool placement problems for 4-and 5-axis NC complex surface machining [J]. *International Journal of Production Research*, 1998, 36(3): 785-814.

(编辑 赵炜)