

异辛烷/空气对冲火焰实验与计算分析^{*}

于维铭¹, 钟北京¹, 袁 振¹, 王治国²

(1. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084; 2. 装甲兵工程学院 控制工程系, 北京 100072)

摘 要: 为了解决汽油机清洁高效燃烧的难题, 需要对汽油的基础燃烧特性进行深入研究。为此选取异辛烷单一组分作为表征燃料, 对其预混层流火焰传播速度进行了实验与分析。设计并搭建了适宜液体燃料燃烧的对冲火焰试验台, 通过对异辛烷对冲火焰的实验, 获得了不同当量比下的无拉伸火焰传播速度, 发现随着当量比的增大异辛烷火焰传播速度先增大后减小, 在当量比 1.1 时火焰传播速度达到最大值。在标准大气压、初始温度为 378K 的工况下, 异辛烷最大火焰传播速度为 60.9cm/s。利用异辛烷、正庚烷、乙醇三组分燃料着火机理计算了异辛烷火焰传播速度, 并针对火焰传播速度进行灵敏度分析, 得到了控制异辛烷火焰传播速度的主要基元反应。通过实验结果与计算结果的对比, 结合文献中给出的实验数据, 对影响异辛烷火焰传播速度的主要因素进行分析, 发现初始温度提高、环境压力降低能够使异辛烷燃烧火焰传播速度提高。

关键词: 异辛烷; 对冲火焰; 火焰传播速度; 三维粒子动态分析仪 PDPA

中图分类号: V231.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2014) 01-0070-07

Experiment and Numerical Investigation on Counterflow Twin-flame of Isooctane/Air

YU Wei-ming¹, ZHONG Bei-jing¹, YUAN Zhen¹, WANG Zhi-guo²

(1. School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072)

Abstract: In order to solve the problem of clean combustion of gasoline engine, it is necessary to carry out the in-depth study of combustion characteristics of gasoline. Isooctane was selected as single component alternative fuel to do the experiments and analysis on the premixed laminar flame speed. A counterflow twin-flame test-bed suitable for liquid fuel was designed and built. Based on the counterflow twin-flame experiments of isooctane/air mixture, the unstretched flame speed of different equivalent ratios was obtained. It is noted that with the increase of equivalent ratio the flame speed of isooctane increases firstly and then decreases. When equivalent ratio is 1.1, the speed reaches the maximum value. At the condition of standard atmospheric pressure and initial temperature 378K, the maximum flame speed of isooctane is 60.9cm/s. A mechanism in which the ignition mechanism of three-component fuel consisted of isooctane, *n*-heptane and ethanol reported in the literature was used to calculate the flame speed of isooctane/air mixture, and the sensitivity analysis of flame speed was implemented to get the main elementary reactions dominating combustion rate. Based on the comparison among experimental results, calculation results and experimental data collected from the literatures, this paper analyzes the main influence factors of flame speed of isooctane/air mixture, and finds that increase of initial temperature and decrease of pressure can increase the flame

* 收稿日期: 2013-03-16; 修订日期: 2013-05-23。

基金项目: 国家自然科学基金资助 (51036004)。

作者简介: 于维铭 (1978—), 男, 博士生, 研究领域为先进燃烧与动力工程。E-mail: zhongbj@mail. tsinghua. edu. cn

speed.

Key words: Isooctane; Counterflow twin-flame; Flame speed; Phase doppler particle analyzer (PD-PA)

1 引言

目前全球汽车保有量超过10亿辆,其中中国汽车保有量已超过1亿辆。国内汽车消耗的石油每年将近1亿吨,占我国石油总消耗的27%^[1]。汽车尾气排放是环境污染的主要来源之一,汽车节能减排的任务迫在眉睫。高效清洁内燃机技术,具有成本低、污染小等优点。但是目前对于汽油燃烧的认识还停留在经验阶段^[2]。为了更好的解决汽油机清洁高效燃烧的难题,需要对汽油的基础燃烧特性进行深入的研究。异辛烷是汽油、柴油等碳烃类燃料的重要组成部分,其含量是汽油辛烷值的主要指标之一,决定了汽油的抗爆性。本文选取单一组分异辛烷作为汽油的替代燃料对其基础燃烧特性进行研究,为汽油机尤其是GDI汽油机的设计提供理论支持。

燃料的火焰传播速度是表征燃料燃烧特性的重要指标,也是验证其化学动力学机理准确性的重要依据之一。按照严格定义,层流火焰传播速度 S_L 必须为一维、平面、定常、层流、准绝热、预混火焰的自由传播速度。目前测定 S_L 的方法有多种,包括本生灯法、平面火焰法、标准管法、定容圆球法和对冲火焰法等。相对而言,对冲火焰更加满足 S_L 定义的要求。在测量 S_L 时,相同流量的预混气流从上下两个对称的喷嘴喷出,经点燃后,如果不考虑浮力的影响,将形成相对静止面对称的两个稳定的平面火焰。对冲火焰有效解决了火焰下边缘散热的问题,构造出一种类绝热状态,避免了大量热损失对火焰传播特性的影响。由于对冲火焰的独特优势,它被广泛应用于火焰传播和熄灭特性的基础研究中。对冲火焰法用于气体燃料燃烧特性的研究在国内有较多的研究者涉及。李博等人利用甲烷/空气混合气研究了对冲火焰流场的二维分布对层流火焰传播速度测量的影响^[3];张波等利用对冲火焰试验台开展了二甲醚火焰传播速度的实验研究^[4];王越男等利用类似试验台结合催化重整系统进行了催化重整反应对层流火焰传播速度影响的研究^[5]。国外的相关领域里,开始将对冲火焰法拓展至液体燃料燃烧特性研究。Kamal Kumar等研究者采用对冲火焰试验台测定了正癸烷、十二烷等液体燃料的火焰传播速度^[6,7];Chunsheng Ji等利用

类似方法研究了多种高碳烃类燃料火焰的传播特性和熄灭特性^[8]。但在国内采用这一方法测定液体燃料火焰传播速度的研究在文献中尚未见诸报道。

在参考其他研究者对冲火焰实验测量的基础上,本文对对冲火焰试验台的功能、系统、组成进行了详细的调研与分析,设计、搭建了适宜液体碳氢燃料的对冲火焰试验台。利用该试验台测得了标准大气压下、混合气初温为378K的异辛烷/空气预混层流火焰传播速度,并将实验结果与机理计算结合,寻找影响异辛烷燃烧火焰传播特性的主要基元反应和影响因素。

2 对冲火焰试验系统与原理

液体燃料对冲火焰试验台必须包含液体燃料加热与蒸发、气化燃料与氧化剂稳定混合、混合气保温输送的过程。据此设计,一台完备的液体燃料对冲火焰试验台应配置燃料输送源、空气输送源、空气加热装置、燃料与高温空气混合稳压装置、混合气输送系统、示踪粒子加粉装置、喷嘴系统、测量系统等机构。图1所示为对冲火焰试验台系统图。

空气经过加热器加热至预设温度,经过伴温管输送至预混腔中;燃料经由注射泵,通过特制的喷嘴进入预混腔。喷嘴采用气动喷嘴方式,由空气加压带动液体喷射雾化,雾化后的燃油在高温环境中迅速气化,与高温空气混合最终形成良好的均质预混气。高温混合气经具有保温功能的输运系统分流至上下喷嘴。喷嘴出口处设有氮气保护层,防止燃烧火焰受外部环境的干扰。流量非对称性对对冲火焰层流火焰传播速度的测量存在较大影响,试验台设置了针阀调控上下喷嘴的气流量。混合气由针阀分别进入上下两个喷嘴,点燃后稳定燃烧时,形成对冲火焰。通过改变空气流量和液体燃料流速,可以实现当量比的变化;通过旁通阀的调控,可以实现对混合气流速和燃烧火焰拉伸效应的控制。试验台使用的测量设备是丹麦丹迪(Dantec Dynamic)公司生产的三维粒子动态分析仪(PDPA)。PDPA利用多普勒原理通过测定入射光与反射光的频差获取流场信息,需要加装加粉器以添加示踪粒子。此处采用氧化钙(CaO)粉末作为示踪粒子,理论上粉末粒径可以达到10 μm 左右,

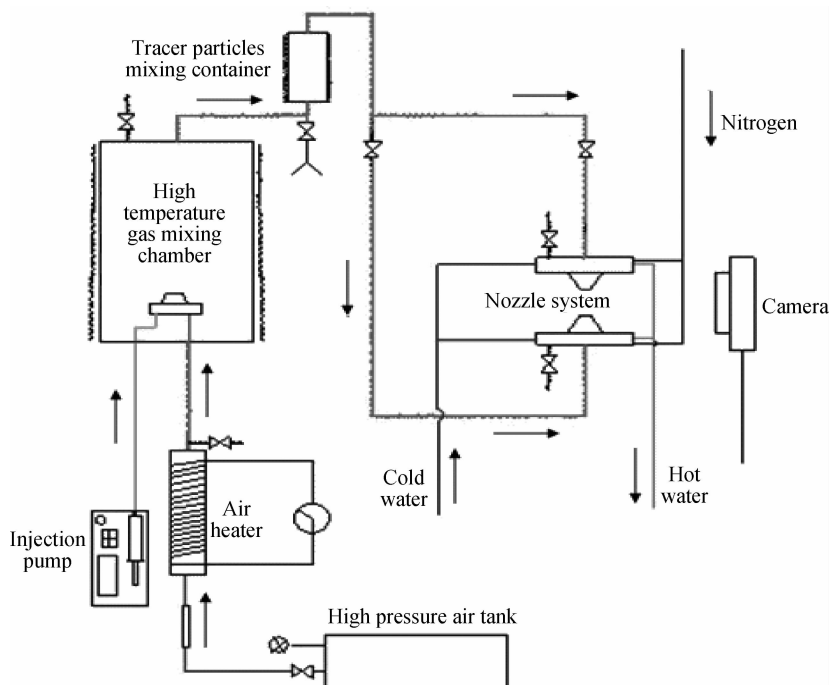


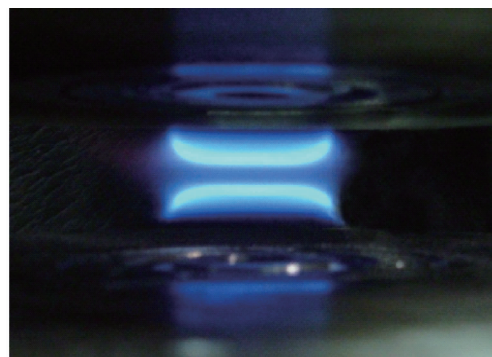
Fig. 1 System diagram of counterflow twin-flame configuration suitable for liquid-fuel

具有良好的气流跟随性。PDPA 激光器发射的激光经过发射光路探头在外部形成两束直径为 0.243mm 的交叉光线,将光束相交形成的微小测量椭球体置于对冲火焰轴向中心线上,椭球体中的粒子即为测量对象。实验中,每点采集 3000 个粒子的数据。接收探头采集到运动中粒子反射的信号,经过光电转换器处理进入电脑。经由软件处理,在显示屏上呈现出流场的信息。图 2 为试验台实物照片,左为试验台架,右为 PDPA 探头。图 3 所示为试验中拍摄的异辛烷/空气对冲火焰效果。图 3(a)为不加示踪粒子时状态;图 3(b)为添加示踪粒子时状态,橘红色为示踪粒子氧化钙受热后呈现的颜色。

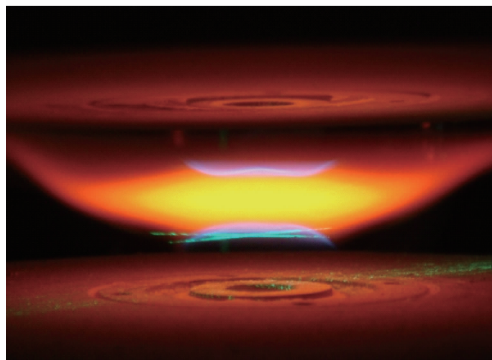


Fig. 2 Picture of counterflow twin-flame test-bed

对空气加热管温控和喷嘴内温控提供各处温度反馈采用的是铂-铂铑 13 热电偶,其内部热电偶丝



(a) Without tracer particles CaO



(b) With tracer particles CaO

Fig. 3 Counterflow twin-flame of isooctane/air mixture

直径为 0.25mm,焊点直径为 0.52mm。作为异辛烷燃料源的注射泵注射精度为 $\pm 2\%$ 。用于空气计量的浮子流量计精度为 $\pm 2.5\%$ 。依据注射泵校准和 PID 反馈调节检查,目标当量比的误差估计小于 2%。此

外,用于本实验的 PDPA 速度测量的精度是 $\pm 1.25\%$ 。实测喷嘴出口温度波动幅度为 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。经测算,整个实验设备的测量结果误差约为 ± 5 。

3 异辛烷火焰传播速度测量与结果

试验台喷嘴系统喷嘴直径为 10mm,上下间距为 20mm。根据实验需求,一般将蒸发器加热温度设置在较燃料沸点温度高出 50°C ,并确保整个试验台加热设备、保温系统温度不超过燃料着火点。由于异辛烷的沸点为 $98\sim 99^\circ\text{C}$,燃点为 418°C ,本实验将喷嘴出口处温度预设设为 115°C ,为此将空气加热器、混合稳压腔、保温管道等处温度设置为 150°C 。喷嘴之间距离较近导致对冲火焰对喷嘴出口有一定的影响,以及由于反馈调节导致的加热装置温度升降惯性,使得出口混合气存在一定的温度浮动。实验过程中,实测喷嘴出口温度约为 $115\pm 5^\circ\text{C}$ 。

在当量比 $0.7\sim 1.5$ 的熄灭极限范围内,对实验进行分组。基于浮子流量计控制精度不高,实验过程中保持空气流量固定一个值为一组实验,单独改变液体燃料量以改变当量比。对冲火焰存在负拉伸效应,实验过程中需保证拉伸率在极限拉伸率范围内,由此对空气流量进行估算,取空气流量分别为 $0.65\text{ m}^3/\text{h}$, $0.70\text{ m}^3/\text{h}$, $0.75\text{ m}^3/\text{h}$, $0.80\text{ m}^3/\text{h}$, $0.85\text{ m}^3/\text{h}$, $0.90\text{ m}^3/\text{h}$ 进行分组。根据化学方程式计算出不同当量比下相应的异辛烷流量,在每个空气流量下可以得到一组不同当量比的实验结果。改变空气流量,即得到了对应当量比下不同拉伸率的实验结果。

图 4 所示为当量比 1.1,空气流速 $0.70\text{ m}^3/\text{h}$ 时对冲火焰流场中心线上速度场分布曲线图。可以看到预混气从喷嘴出口喷出,流速约 1.55 m/s ,随后由于流场的扩张,流速逐渐降低,当到达火焰面上表面时,流速降到最低,为 0.754 m/s ,之后由于受热温度提高流场速度增大,在火焰面下表面附近流场速度达到最大,此后由于滞止效应再次降低,在上下喷嘴中心平面处,流场速度降为零。

根据 Law C K 在文献中提出的理论,流场速度曲线上第一个最低点处流场与火焰处于平衡,此点的速度即为在当前拉伸率下的火焰传播速度^[9,10],由此可以得到此工况下 $S_L = 0.754\text{ m/s}$;此处的火焰拉伸率近似为靠近此点处的负速度梯度,根据这一定义进行线性拟合,得到此处拉伸率为 0.17810 s^{-1} 。其中,图 4 拟合公式中 y 为纵坐标值, x 为横坐标值。

同理,可以得到当量比为 1.1,在 $0.65\text{ m}^3/\text{h}$,

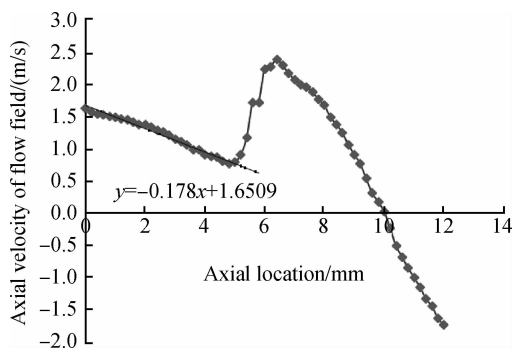


Fig. 4 Velocity field distribution of equivalent ratio 1.1, air flux $0.70\text{ m}^3/\text{h}$

$0.75\text{ m}^3/\text{h}$, $0.80\text{ m}^3/\text{h}$, $0.85\text{ m}^3/\text{h}$, $0.90\text{ m}^3/\text{h}$ 五种不同空气流速时不同拉伸率下的火焰传播速度。将测得的当量比为 1.1 时多个火焰传播速度绘制在图 5 中,线性外推至拉伸率为零处,即可得到当量比为 1.1 时的无拉伸火焰传播速度 S_L^0 。从图中可以得出,该速度值为 60.9 cm/s 。同样,图 5 拟合公式中 y 为纵坐标值, x 为横坐标值。

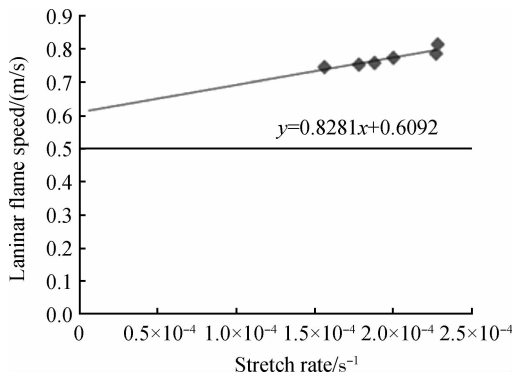


Fig. 5 Unstrained flame speed S_L^0 of equivalent ratio 1.1

重复上述实验步骤,可以得到其他当量比下的无拉伸火焰传播速度。图 6 为整理后的无拉伸火焰传播速度随当量比变化的曲线图。

从图中可以看到,随着当量比的增大,火焰传播速度呈先增大后减小的趋势。在当量比 1.1 附近,火焰传播速度达到最大,最大火焰传播速度为 60.9 cm/s 。以空气作为氧化剂的可燃混合气,由于氮气的稀释作用,火焰传播速度最大值出现在富燃料一侧,即当量比稍大于 1 处。究其原因可能有,最高燃烧温度也偏向于富燃气区域;在燃气比较富裕的情况下,火焰中的自由基 H , OH 等浓度较大,链锁反应断链率较小,使燃烧反应速度较快。在本实验中,异辛烷/空气混合物的火焰传播速度最大值 60.9 cm/s 出

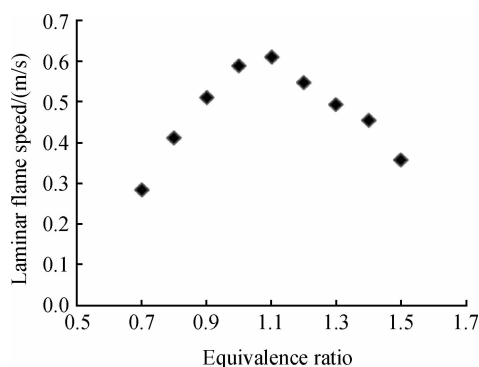


Fig. 6 Unstrained flame speed S_L^0 with different equivalent ratios

现在当量比 1.1 处,这一结果是符合相关理论的。

4 异辛烷火焰传播速度计算与分析

本节通过计算与分析寻找影响异辛烷火焰传播速度的主要因素。计算选用的机理为异辛烷、正庚烷、乙醇三组分燃料着火的化学动力学模型^[11]。此机理以 Ra 简化模型为基础,利用路径分析法从 Marinov 详细乙醇机理中提取乙醇反应机理,将二者整合后通过灵敏度分析法进行修正,最终得到的机理包括 50 组分和 193 个反应。该机理对不同初始温度下的着火延迟时间进行了详细的标定,能够对单组分燃料、双组分燃料以及三组分燃料的燃烧情况进行准确的预测。

采用三组分机理,在 Chemkin 软件中使用 Premixed Laminar Flame-Speed Calculation 模块对异辛烷火焰传播速度进行计算,边界条件设定与实验一致,即环境压力为标准大气压、混合气出口温度为 378K,当量比范围为 0.7 ~ 1.5。图 7 显示了计算结果与实验结果,空心图标为计算结果(3Component result),实心图标为实验结果(Experiment result)。可以看出,计算结果与实验结果发展趋势相同,吻合度较高。在当量比较小时,计算结果稍大,从当量比 1.0 开始,计算结果较实验结果稍小。从当量比 1.4 开始,在变化趋势上,计算结果向下的趋势越发明显,与实验结果的偏差也在增大。考虑到液体燃料对冲火焰试验台的系统复杂性和操作复杂性,燃料蒸发脉动和加热设备温度波动均可能对对冲火焰流场造成较大的干扰,同时考虑到环境温度的变化对火焰辐射散热的影响,可以认为这两种数据的差异基本处于误差范围内,是可以接受的。因此可以说,该机理在计算异辛烷火焰传播速度上具有较好的准确性和可靠性,

能够对异辛烷火焰传播速度进行精确的预测。

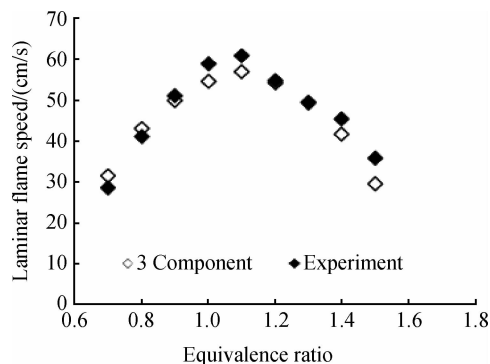


Fig. 7 Calculated results and experimental results

4.1 影响异辛烷火焰传播速度的主要基元反应

为了对影响火焰速度的因素进行深入的分析,采用三组分机理对异辛烷火焰传播速进行灵敏度分析。选取灵敏度系数最大的前 10 个反应,如表 1 所列。灵敏度系数为正的,表示该反应对异辛烷火焰传播速度起促进作用;反之,表示该反应对异辛烷火焰传播速度起抑制作用。

Table 1 Reactions whose influence factor is ranked in the top ten

Item	Reactions considered
R108	$C_3H_6 + O = CH_2CO + CH_3 + H$
R129	$H_2O + M = H + OH + M$
R125	$OH + H_2 = H + H_2O$
R39	$H + O_2 (+M) = HO_2 (+M)$
R63	$C_3H_6 = C_2H_3 + CH_3$
R130	$HCO + H = CO + H_2$
R126	$HCO + M = H + CO + M$
R77	$C_3H_6 + H = C_3H_5 + H_2$
R122	$CO + OH = CO_2 + H$
R123	$H + O_2 = O + OH$

采用三组分机理模型针对层流火焰速度进行灵敏度分析,可以识别显著影响层流火焰速度的基元反应。图 8 给出了当量比为 1.0,初始温度为 378K 下的异辛烷/空气燃烧火焰传播速度灵敏度分析结果。敏感性分析表明,影响异辛烷燃烧速度的主要反应为 R122, R123 以及 R77。其中 R122, R123 对异辛烷的燃烧速度有较大正影响, R77 对异辛烷的燃烧速度有较大负影响。R122 消耗自由基 OH, 不仅生成大量的自由基 H, 而且在 CO_2 产生的同时也释放出大量的热能。R123 是一个链分支反应, 消耗自由基 H 生成大量自由基 O, OH。释热和链分支反应促成的自由基成倍增长导致燃烧反应速率提高, 火焰传播速度加快, 因此这两个反应在整个燃烧进程中火焰传播速度提高上扮演着重要的角色。R77 则消耗了 H 自由

基,对反应速率起到了抑制作用。

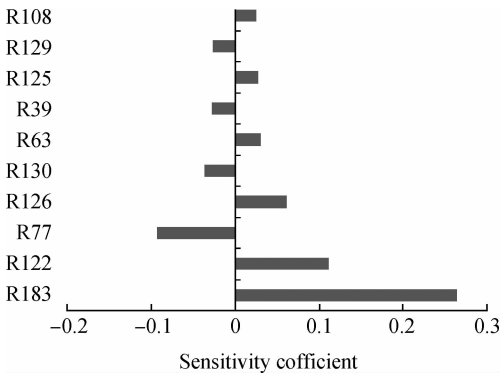


Fig. 8 Sensitivity coefficients of laminar flame speed

4.2 温度对异辛烷火焰传播速度的影响

理论和实验研究都显示,火焰传播速度受燃料/氧化剂混合气的初始温度影响。图 9 所示为本实验测得的异辛烷火焰传播速度与文献中实验结果^[12-15]的对比。不同的初始温度下,火焰传播速度随当量比变化的趋向是相同的。不同点在于随着初始温度的提高,异辛烷火焰传播速度有较明显的提高,且随着当量比的变化,初始温度对火焰传播速度影响先增大后减小。在当量比为 1.1 时,初始温度对火焰传播速度的影响最大。本实验出口混合气温度设定为 378K,在所有给出的实验数据中初温最高,所测得的实验结果与文献实验结果相比,火焰传播速度都有所增加。随着温度的提高,化学反应速率加快,火焰传播速度加快。这样的实验结果是比较合理的。

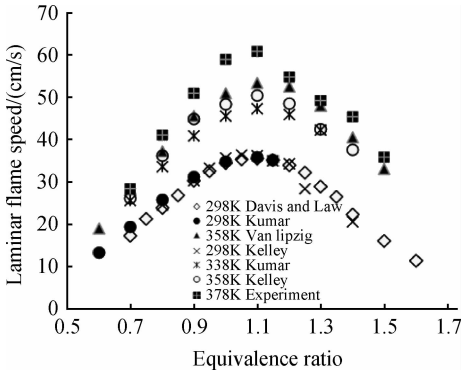


Fig. 9 Flame speed of different initial temperature

根据火焰传播速度的这一特性,本文利用实验结果和文献数据,对不同温度、当量比下的火焰传播速度进行计算拟合,提出如下拟合公式

$$\frac{S_L^{\circ}(T,A/F)}{S_L^{\circ}(378K,A/F)} = \left(\frac{T}{378K}\right)^n \tag{1}$$

$$S_L^{\circ}(T,A/F) = S_L^{\circ}(378K,A/F) \left(\frac{T}{378K}\right)^n \tag{2}$$

$$n = \text{minimizing} \sum_{A/F} \sum_T \left[S_L^{\circ}(378K,A/F) - \frac{S_L^{\circ}(T,A/F)}{(T/378K)^n} \right]^2$$
,式中 S_L° 为无拉伸层流火焰传播速度, T 为混合气初始温度, A/F 为空气-燃料比, n 为指数。

采用了 4 个不同初始温度下的 8 组实验数据,计算得出 $n = 1.85$ 。图 10 为利用公式计算得出的混合气初温为 298K 的结果与文献中实验结果对比。可以认为,拟合出的结果与文献中的实验结果相比误差不大,尤其是在当量比小于 1 的部分。当量比为 1.3 之后,拟合出的结果较实验结果稍大。这可能是两个原因造成的:其一,由于非均质燃烧效应,作为基准量的实验结果在当量比较大时,可能存在一定误差;其二,该拟合公式在高当量比的部分使用性较差。整体而言,该拟合公式具有一定的实用价值。

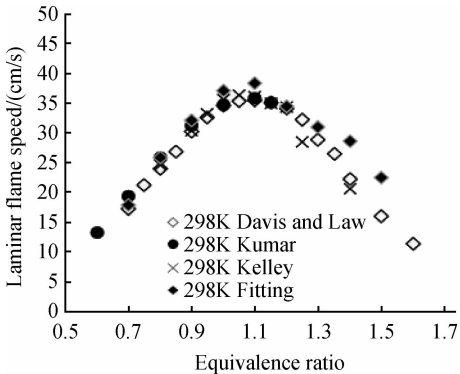


Fig. 10 Comparison between fitting results and numerical values in literatures

4.3 压力对异辛烷火焰传播速度的影响

由于实验方法和实验条件的限制,本文仅对 1 个大气压下的异辛烷火焰传播速度进行测量。对文献的调研发现,不同压力下燃料火焰传播速度的研究较少涉及,目前尚无文献对异辛烷火焰传播速度与环境压力之间关系的研究。本文利用机理分析对异辛烷在不同压力下的火焰传播速度进行计算,有一定的探索意义。

如图 11 所示,为 0.05MPa,0.1MPa,0.15MPa 不同压力下异辛烷火焰传播速度曲线图,计算的初始温度为 378K。0.05MPa,1.5MPa 下的数据来自三组分机理计算结果,0.1MPa 下的数据为实验结果。图中可以看到,随着压力的增大,异辛烷火焰传播速度是减小的。

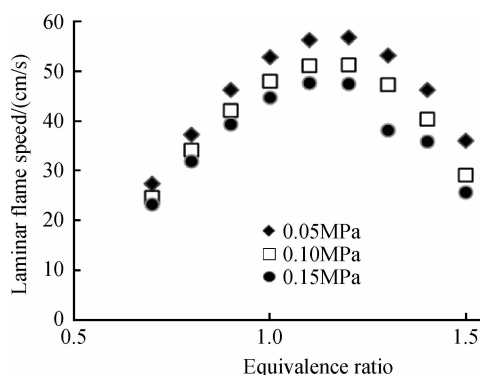


Fig. 11 Flame speed at different pressure

5 结 论

本文通过对异辛烷/空气对冲火焰的实验与计算分析,得到以下结论:

(1)设计、搭建了液体燃料对冲火焰试验台,对异辛烷对冲火焰传播速度进行了实验测量。研究发现,随着当量比的增大,异辛烷火焰传播速度先增大后减小。当量比为 1.1 时,火焰传播速度达到最大值。在标准大气压、初始温度为 378K 的工况下,异辛烷能够达到的最大火焰传播速度为 60.9 cm/s。

(2)选用异辛烷、正庚烷、乙醇三组分燃料着火的化学动力学机理模型,对异辛烷的火焰传播速度进行计算,并与实验结果进行比对,证明该机理对异辛烷火焰传播速度的计算较为准确、可信。

(3)利用三组分机理对异辛烷火焰传播速度进行了灵敏度分析,找出了对异辛烷火焰传播速度影响较大的基元反应。

(4)利用机理分析及实验数据,对影响异辛烷火焰传播速度的主要因素进行了分析,包括温度、压力等。分析表明,提高初始温度、减小环境压力能够提高火焰传播速度。根据本实验及文献资料中的实验结果,本文拟合出火焰传播速度随当量比和温度变化的经验公式,并对公式进行验证,结果表明该公式有一定的实用价值。

致 谢:感谢郑东博士在论文撰写中给予的帮助。

参考文献:

- [1] 深圳商报. 全球汽车总保有量突破十亿辆中国位居第二[EB/OL]. http://news.ifeng.com/gundong/detail_2011_09/14/9169511_0.shtml, 2012-11-12.
- [2] Yajima J. Year Book-Gasoline Engine[J]. *Journal of JSAE*, 2009, 63(8):93-99.

- [3] 李 博,田雪沁. 对冲火焰流场的二维分布对层流火焰传播速度测量的影响[J]. *工程热物理学报*, 2011, 4(1):703-706.
- [4] 张 波,傅维标. 二甲醚火焰传播速度的实验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2005, 11(2):163-166.
- [5] 王越男,覃 川,傅维标. 催化重整反应对层流火焰传播速度的影响[J]. *燃烧科学与技术*, 2002, 8(5):426-430.
- [6] Kamal Kumar, Chih-Jen Sung, Xin Hui. Laminar Flame Speeds and Extinction Limits of Conventional and Alternative jet Fuels [J]. *Fuel*, 2011, 90(5):1004-1011.
- [7] Kamal Kumar, Chih-Jen Sung. Laminar Flame Speeds and Extinction Limits of Preheated *n*-Decane/O₂/N₂ and *n*-Dodecane/O₂/N₂ Mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 2007, 151(8):209-224.
- [8] Chunsheng Ji, Enoch Dames. Propagation and Extinction of Premixed C5-C12 *n*-Alkane flames [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(7):277-287.
- [9] Law C K. *Combustion Physics* [M]. UK: Cambridge Press, 2006.
- [10] Law C K, Zhu D L, Yu G, et al. Propagation and Extinction of Stretched Premixed Flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1986, 21(1):1419-1426.
- [11] 郑 东,钟北京. 异辛烷/正庚烷/乙醇三组分燃料着火的化学动力学模型[J]. *物理化学学报*, 2012, 28(9):2029-2036.
- [12] Van Lipzig J P J, Nilsson E J K, de Goeij L P H, et al. Laminar Burning Velocities of *n*-Heptane, iso-Octane, Ethanol and their Binary and Tertiary Mixtures [J]. *Fuel*, 2011, 90(11):2773-2781.
- [13] Davis S G, Law C K. Laminar Flame Speeds and Oxidation Kinetics of iso-Octane-Air and *n*-Heptane-Air Flames [C]. London: Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 1998:521-527.
- [14] 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(11):501-508.
- [15] Kumar K, Freeh J E, Sung C J, et al. Laminar Flame Speeds of Preheated iso-Octane/O₂/N₂ and *n*-Heptane/O₂/N₂ Mixtures [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(7):28-36.
- [16] Kumar G K, Mittal G, Sung C J, et al. An Experimental Investigation on Ethylene/O₂/Diluent Mixtures: Laminar Flame Speeds with Preheat and Ignition Delays at High Pressures [J]. *Combustion and Flame*, 2008, 153(8):43-54.

(编辑:梅 瑛)