

定容燃烧弹实验系统及 C₇ 燃料火焰速度测量

郑 东^{1,2}, 钟北京¹

- (1. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084;
2. 西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031)

摘 要: 设计并搭建了适用于测量高温、高压条件下层流火焰传播速度的定容燃烧弹实验系统。详细介绍了定容燃烧弹实验系统的主要子系统的构成和功能,并阐述实验数据处理方法。测量初始温度为400 K、压力为0.1 MPa和0.3 MPa, C₇ 燃料(甲苯、甲基环己烷、正庚烷)/空气层流火焰传播速度,并与现有文献结果进行了对比。结果表明:该定容燃烧弹实验系统具有较高的可靠性,不仅能够准确测量较高初始温度、不同初始压力条件下燃料/空气的层流火焰传播速度,而且能够拓宽测量火焰传播速度当量比的范围。

关 键 词: 层流火焰传播速度; 定容燃烧弹; 纹影法; 球形火焰; 马克斯坦长度

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Experimental system of constant volume combustion bomb and measurement of C₇ fuels flame speeds

ZHENG Dong^{1,2}, ZHONG Beijing¹

- (1. School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The experimental system of constant volume combustion bomb for measuring laminar flame speed under the conditions of high temperature and pressure was designed and built. The composition and function of main sub-systems, and the data processing method were introduced in detail. Moreover, at 400 K temperature and 0.1, 0.3 MPa pressures the laminar flame speeds of C₇ Fuels including toluene/methylcyclohexane/*n*-heptane were measured, and compared with existing literature results. Results indicate that the experimental system has high reliability. Using this experimental system, laminar flame speeds can be accurately measured at high temperatures and elevated pressures, meanwhile the range of equivalence ratios can be extended.

Key words: laminar flame propagation speed; constant volume combustion bomb; schlieren method; spherical flame; Markstein length

层流火焰传播速度是一维、绝热、平面火焰中未燃预混气相对火焰面的速度,是反映燃料基础燃烧特性最重要的参数之一^[1]。与此同时,层流

火焰传播速度是验证燃料化学反应机理不可或缺的数据^[2],也是湍流燃烧模型中重要的输入参数。鉴于层流火焰传播速度的重要性,国内外众多研

收稿日期:2016-02-22

基金项目:国家自然科学基金(91441113)

作者简介:郑东(1987—),男,博士生,研究领域为燃烧反应动力学。E-mail:zhengd11@yeah.net

引用格式:郑东,钟北京. 定容燃烧弹实验系统及 C₇ 燃料火焰速度测量[J]. 航空动力学报, 2017, 32(10): 2364-2370. ZHENG Dong, ZHONG Beijing. Experimental system of constant volume combustion bomb and measurement of C₇ fuels flame speeds[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(10): 2364-2370.

究者采用不同的实验系统测得大量的燃料层流火焰传播速度,其中对冲火焰^[3]、定容弹球形火焰^[4]、以及热流法平面火焰^[5]被广泛用于层流火焰传播速度的测定。

钟北京课题组^[6-7]采用对冲火焰实验台架测量了标准大气压、初始温度为 373 K 工况下异辛烷、正葵烷、甲苯和甲基环己烷液体燃料的火焰传播速度,并分析不同烃类燃料火焰传播速度的差异性。Kumar 等^[8-10]采用可加压的对冲火焰实验系统研究不同初始压力、温度条件下,正庚烷、异辛烷、甲苯、正十烷等多种液体燃料火焰传播速度和熄火极限。黄佐华课题组^[11-14]采用定容燃烧弹实验系统测量了氢气、甲烷、天然气等多种混合气体燃料的火焰传播速度和马克斯坦长度,并分析了不同工况下火焰稳定特性。Tse 等^[4,15]采用双腔定容燃烧弹实验系统测量了初始温度为 293 K 和 353 K、不同压力条件下易蒸发正戊烷燃料火焰传播速度和马克斯坦长度。Van Lipzig 等^[16-17]采用热流法平面火焰实验台架研究了标准大气压、初始温度为 298 K 和 333 K 工况下正庚烷、异辛烷、甲苯、乙醇以及混合燃料的火焰传播速度。

由上述可知目前对于液体燃料火焰传播速度有一定的研究,但对于较高初始压力和初始温度条件下仍然研究不足,尤其针对实际大碳氢燃料如航空煤油、汽油的相关研究更是鲜有报道。因此鉴于定容燃烧弹实验系统可以较为容易测量较宽压力、温度范围的火焰传播速度,而且混合均与度较高。本文搭建了适用于测量液体燃料高温高压初始条件下层流火焰传播速度的定容燃烧弹实验系统,并测量 C₇ 燃料火焰传播速度,通过对比本文实验值和文献[8,10,18-19]实验值,充分验证实验系统的可靠性。

1 实验系统介绍

1.1 测量原理

可燃预混气在定容燃烧弹内的燃烧是球形火焰传播过程。在较小的燃烧区域内压力的变化相对较小,可以认为该区域内的燃烧是定压燃烧过程,而且已燃气为静止状态。因此球形火焰面速度由式(1)计算得到,式中 R_f 为时刻球形火焰面的半径。球形火焰是一个典型的拉伸火焰,其拉伸率由式(2)计算得到。

$$S_b = \frac{dR_f}{dt} \tag{1}$$

$$K = \frac{1}{A} \cdot \frac{dA}{dt} = \frac{2}{R_f} \cdot \frac{dR_f}{dt} = \frac{2}{R_f} S_b \tag{2}$$

依据马克斯坦长度理论,采用火焰面速度与拉伸率的线性形式模型如式(3),可得无拉伸层流火焰面速度 S_b^0 。根据质量守恒定律,可通过式(4)计算得到层流火焰传播速度。式中 ρ_b 和 ρ_u 分别代表已燃气体和未燃预混气体的密度。 ρ_u 可以由可燃预混气体的初始状态计算获得。而 ρ_b 则按照定压绝热过程,通过燃烧化学平衡计算得到。

$$S_b = S_b^0 - L_b K \tag{3}$$

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

1.2 定容燃烧弹实验系统

本文设计并搭建了测量燃料层流火焰传播速度的定容燃烧弹实验系统。本实验系统主要包括定容燃烧弹本体、电加热控温系统、点火控制系统、进排气系统和可视化光学测量系统。图 1 和图 2 分别为定容燃烧弹实验系统示意图和实物图。本文搭建的定容燃烧弹实验系统不仅适用于测量气体燃料的层流火焰传播速度,而且适用于测量各种液体燃料的层流火焰传播速度。实验系统测量的初始可燃预混气压力最高可达 3 MPa,初始最高温度可达 530 K,测量的参数范围均优于目前其他定容燃烧弹实验系统。下面详细介绍组要分系统的构成和功能。

定容燃烧弹本体:腔体采用 316 L 不锈钢,内腔总体积为 2.985 L。观察窗采用厚度为 30 mm、直径为 35 mm 的 JGS1 石英玻璃。通过光学测量系统所能观察到的球形火焰最大半径为 35 mm。该球形区域的体积占定容燃烧弹总体积的 6.3%,因此当火焰半径小于 35 mm 时,定容燃烧弹内压力变化很小,可以认为在可观察范围内是定压燃烧过程。

电加热温度控制系统:由于层流火焰传播速度大小与初始温度相关,而且定容燃烧弹温度的均匀对球形火焰传播过程也有很大影响。因此,需要采用较为精细的电加热温度控制系统来保证实验过程中初始温度的恒定和定容燃烧弹温度的均匀,系统主要包含温度显示器、PID(proportion-integration-differentiation)控制器、继电器、加热器、热电偶等电子器件。热电偶测得温度信号分别送给 PID 控制器,然后 PID 控制器将温度显示在显示面板上,并通过继电器控制电加热器。

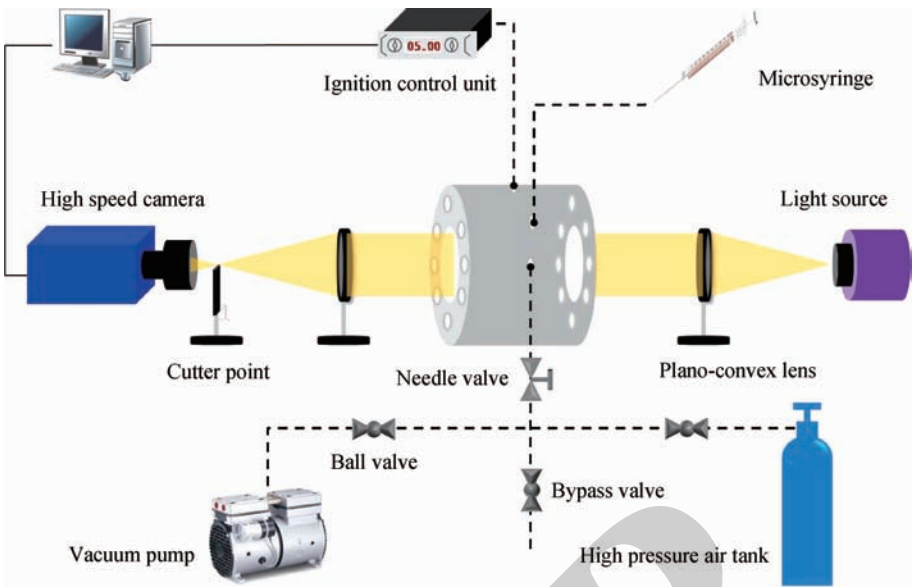


图 1 定容燃烧弹实验系统示意图

Fig. 1 Diagram of the constant volume combustion bomb experimental system

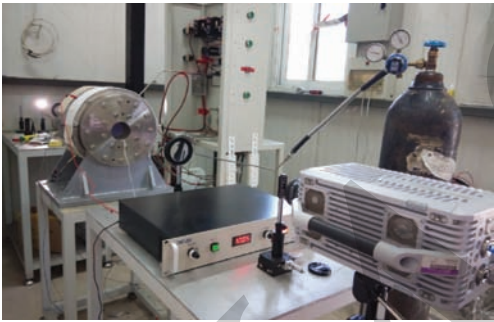


图 2 定容燃烧弹实验系统实物图

Fig. 2 Picture of the constant volume combustion bomb experimental system

可视化光学测量系统:可视化光学测量系统是定容燃烧弹实验台架最核心的子系统,其主要功能是可视化球形火焰的显示和球形火焰传播过程的记录。可视化球形火焰的显示采用纹影法,使用高速摄影机拍摄记录球形火焰传播过程。高速摄影机采用美国约克技术公司 Phantom v611 高速数字摄像机,其满负荷参数为 1280 像素×800 像素(6242 帧/s),最高拍摄速率为 680 000 帧/s。

1.3 实验操作步骤

第 1 步 光学测量系统调节主要包括光路同轴度调节、聚焦调节、刀口切光量调节以及高速摄影机调节。通过 X、Y 方向手动移动平台调节光学元件的同轴度和聚焦位置,从而获得平行光线和实现光路转化聚焦在刀口位置处。进一步综合调节刀口切光量和高速摄影机曝光等参数,直至屏幕上呈现出一个明亮、清晰、锐利的纹影图。

第 2 步 定容燃烧弹加热与控温,打开加热器供电电源,通过 PID 控制器仪表设定加热目标温度,热电偶将监测到的定容燃烧弹内腔、加热器表面、石英观察窗和定容燃烧弹壳体温度信号,实时反馈至 PID 控制器,形成温度的闭环控制系统。一段时间后定容燃烧弹本体温度从室温加热至目标温度。

第 3 步 燃料/空气可燃预混气制备包含甲苯液体燃料的注射和高压空气的充入。首先采用 Hamilton 注射器量取对应的燃料体积,由燃料注射孔打入定容弹内,并且迅速用螺栓拧紧密封燃料注射孔。然后打开进气系统通过控制主管路针阀使得空气缓慢充入内腔,并通过压力变送器实时监测内腔压力。待腔内燃料完全蒸发,并且压力显示仪表为目标压力时关闭进气系统。

第 4 步 设置高速摄影机拍摄参数为 608 像素×608 像素,8000 帧/s。调节高压脉冲电源点火电压为 10 kV。在函数信号发生器编辑单脉冲方波信号,然后触发高压脉冲电源点火,同时触发高速摄影机开始拍摄。

第 5 步 燃烧结束后首先打开排气管路系统,将燃烧废气排出;然后使用真空泵将残余废气进一步抽出;再利用高压空气对内腔进行彻底清扫。

2 实验数据处理

2.1 实验拍摄火焰传播过程纹影图

图 3 和图 4 分别给出了不同当量比、初始温

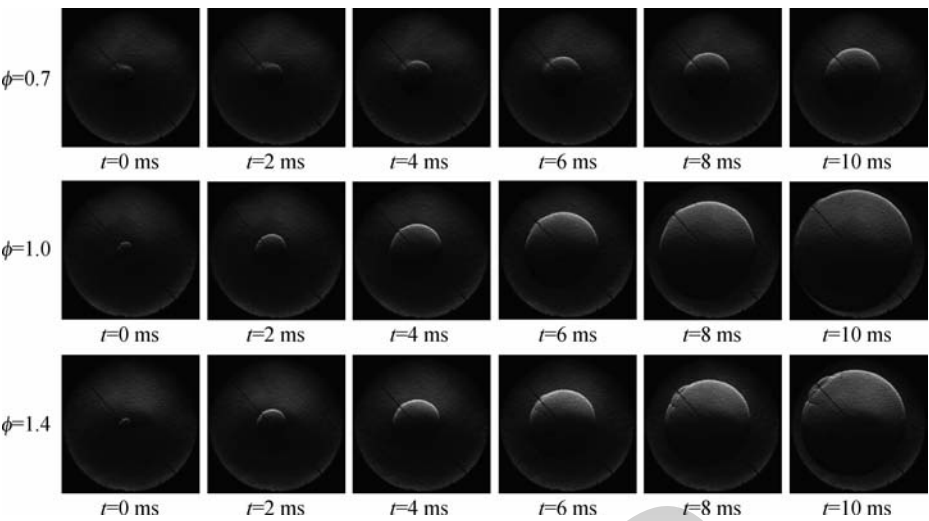


图 3 温度为 400 K、压力为 0.1 MPa 不同当量比甲苯/空气火焰传播过程的纹影图

Fig. 3 Schlieren figures of toluene/air flame propagation process at temperature of 400 K and pressure of 0.1 MPa under different equivalence ratios

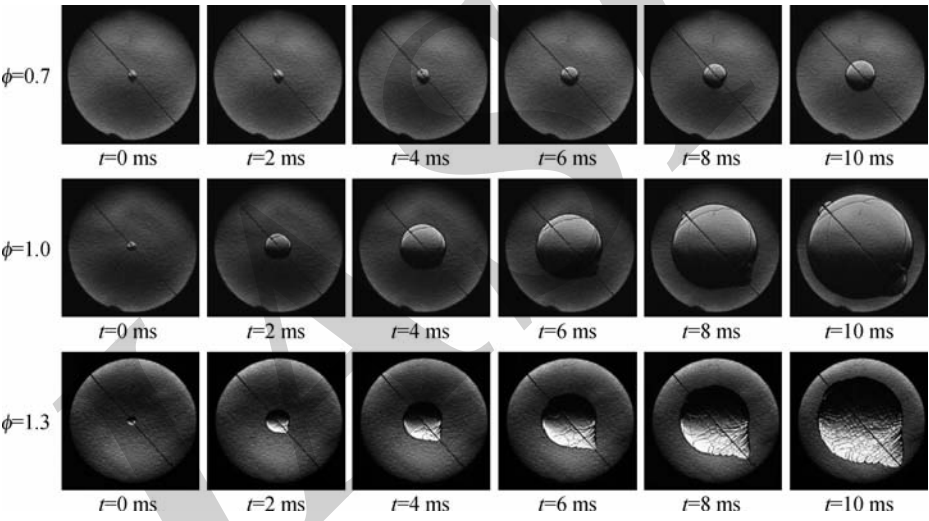


图 4 温度为 400 K、压力为 0.3 MPa 不同当量比甲苯/空气火焰传播过程的纹影图

Fig. 4 Schlieren figures of toluene/air flame propagation process at temperature of 400 K and pressure of 0.3 MPa under different equivalence ratios

度为 400 K、压力为 0.1 MPa 和 0.3 MPa 条件下甲苯/空气火焰随记录时间 t 的传播发展过程的纹影图。由图 3 和图 4 可见 3 种当量比 ϕ 条件下均能获得球形度较高、清晰锐利的球形火焰传播过程纹影图。而且定性分析可见 3 种当量比条件下火焰传播速度先增大后减小。比较图 3 和图 4 可见压力为 0.3 MPa 时火焰传播过程变缓,且火焰传播的不稳定性增强。当量比为 1.3 时在可观测范围内火焰由层流火焰发展为细胞状结构的湍流火焰。

2.2 实验数据处理

通过编写 Matlab 程序对拍摄的纹影图像进

行后处理,获得火焰半径随时间的变化曲线。进一步通过式(1)和式(2)计算得到球形火焰速度和火焰拉伸率的变化关系,如图 5 给出实验测量初始温度为 400 K、压力为 0.3 MPa、当量比为 0.7 时甲苯/空气的火焰速度随拉伸率变化曲线。由图 5 可见在较小拉伸率时火焰速度出现逆趋势的快速下降,这是因为球形火焰发展至一定的半径时受到内腔影响,使得火焰速度出现明显下降趋势。而在其余范围火焰速度随拉伸率均呈现较高的线性关系。因此在线性回归时需要剔除这部分数据点。线性回归得到无拉伸火焰速度为 122.5 cm/s,进而通过式(5)计算得到层流火焰传播速度为 23.9 cm/s。

$$S_u^0 = S_b^0 \frac{\rho_b}{\rho_u} = 112.5 \times 0.195 = 23.9 \text{ cm/s}$$

(5)

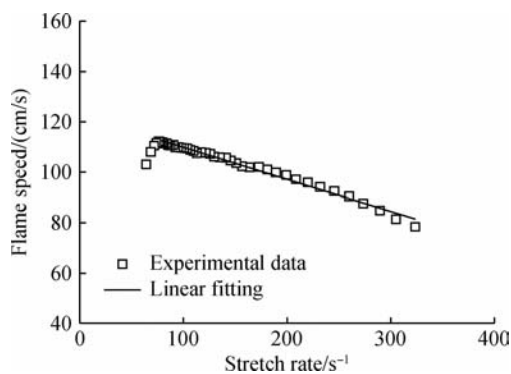


图 5 火焰速度随拉伸率变化

Fig. 5 Flame speed varying with stretch rate

2.3 实验误差分析

本实验系统测量层流火焰传播速度的实验误差主要来源于实验系统测量误差和数据处理引起的误差。实验测量系统的误差包含液体燃料体积测量误差和空气压力压测量误差。液体燃料体积测量采用 Hamilton 高精度微量注射器,其精度为 1%。空气压力压测量采用高精度压力变送器,其精度为 0.5%。因此由式(6)可计算得到由液体燃料体积测量误差和空气压力压测量误差所引起的当量比总误差范围为±1.5%。

$$\frac{\Delta \phi}{\phi} = \frac{\Delta M_{\text{fuel}}}{M_{\text{fuel}}} + \frac{\Delta M_{\text{air}}}{M_{\text{air}}} = 1.5\%$$

(6)

数据处理引起的误差主要包含拟合火焰半径的标准误差和火焰速度线性回归的标准误差。其中拟合火焰半径的标准误差控制在 1% 以内,若误差超出 1% 则需对边缘检测方法进行调整。火焰速度线性回归的标准误差同样也控制在 1% 以内,若误差超出 1% 说明数据点波动太大,需对该工况重新进行测量。因此由式(7)可计算得到由数据处理引起的误差所引起的层流火焰传播速度总误差范围为±2%。

$$\frac{\Delta S_u^0}{S_u^0} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta S_b^0}{S_b^0} \leq 2\%$$

(7)

3 C₇ 燃料火焰传播速度测量

采用上述定容燃烧弹实验系统和数据处理方法,测量不同烃类燃料/空气层流火焰传播速度。其中 3 种烃类 C₇ 燃料分别为芳香烃类/甲苯、环烷烃类/甲基环己烷、链烷烃类/正庚烷。扩充 C₇ 燃料/空气层流火焰传播速度实验数据,同时与大

量现有文献[8,10,18-19]结果进行了对比,充分验证本文实验系统的可靠性。

如图 6 和图 7 分别给出了初始温度为 400 K,压力为 0.1 MPa 和 0.3 MPa 甲苯/空气火焰传播速度本文实验结果与文献[8,10,18]结果。由图 6 可见压力为 0.1 MPa 下当量比在 0.7~1.0 范围内本文实验测量值与 Kumar 等^[8]、Ji 等^[18]、Hui 等^[10]采用对冲火焰实验系统测量的结果均一致。而当量比大于 1.0 时本文测量值与 Sung 等的测量值比较一致,相比较而言 Kumar 等的测量值略微偏大,Ji 等的测量略微偏小。由图 7 可见压力 0.3 MPa 条件下本文实验测量结果与 Sung 等的测量结果在整个当量比范围内都比较接近。而且本文将甲苯/空气火焰传播速度当量比的范围拓宽到 0.6~1.4。

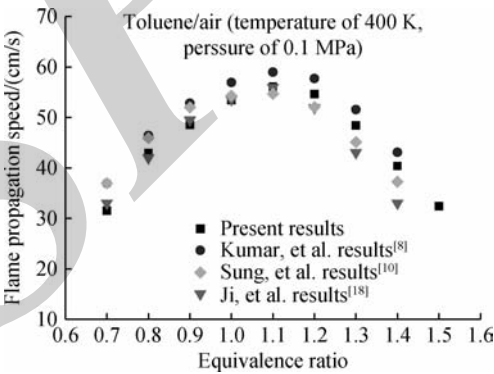


图 6 温度为 400 K、压力为 0.1 MPa 甲苯/空气火焰传播速度本文测量值与文献[8,10,18]的值

Fig. 6 Measured results and Ref. [8,10,18] results of toluene/air laminar flame propagation speeds at temperature of 400 K and pressure of 0.1 MPa

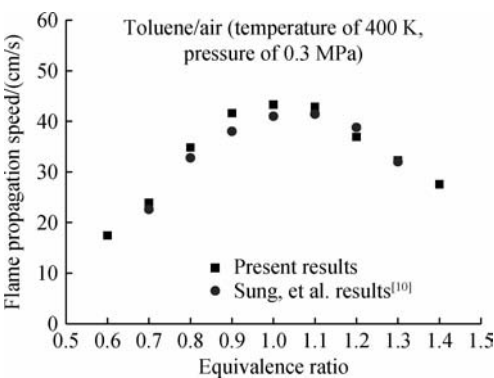


图 7 温度为 400 K、压力为 0.3 MPa 甲苯/空气火焰传播速度本文测量值与文献[10]的值

Fig. 7 Measured results and Ref. [10] results of toluene/air laminar flame propagation speeds at temperature 400 K and pressure of 0.3 MPa

图 8 所示为初始温度为 400 K,压力为 0.1 MPa 甲基环己烷(MCH)/空气火焰传播速度本文实验测量值与文献[8,18,19]测量值。由图 8 可见在当量比 0.7~1.1 范围内本文实验结果与 Kumar 等^[8]和 Ji 等^[18]采用对冲火焰实验系统,以及 Deepti 等^[19]采用定容燃烧弹实验系统测量的结果均一致。在当量比大于 1.1 时 Kumar 等的测量值略微偏大,Ji 等的测量略微偏小,本文测量值和 Deepti 等的测量值分布在中间位置。同样本文将甲基环己烷/空气火焰传播速度当量比的范围拓宽至 0.6~1.5。

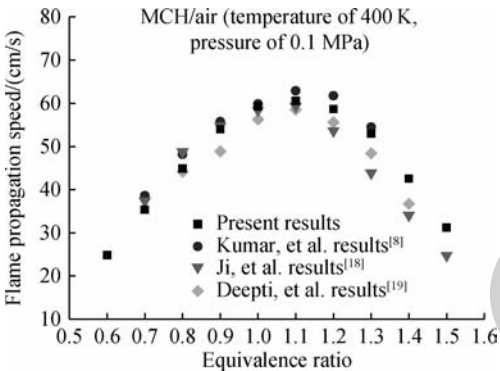


图 8 温度为 400 K、压力为 0.1 MPa 甲基环己烷/空气火焰传播速度本文测量值与文献[8,18,19]的值
Fig.8 Measured results and Ref. [8,18,19] results of MCH/air laminar flame propagation speeds at temperature of 400 K and pressure of 0.1 MPa

如图 9 给出了初始温度为 400 K,压力为 0.1 MPa 正庚烷/空气火焰传播速度本文实验测量结果与文献[8]测量结果。目前文献针对该工况只有 Kumar 等^[8]采用对冲火焰实验系统的测量值,因此只对比 Kumar 等的实验结果。由图 9 可见当量比在 0.7~1.1 范围内本文实验测量值与 Kumar 等的测量值一致,而在当量比大于 1.1 时 Kumar 等的测量值大于本文测量值,这一分析结果与甲苯、甲基环己烷分析结果类似。针对 Kumar 等的测量值在当量比大于 1.1 均偏大,可能的原因是富燃时对冲火焰实验系统中燃料没有完全蒸发,使得实际燃烧时其当量比小于理论值,从而造成该理论当量比下火焰传播速度偏大。而本文定容燃烧弹实验系统均是等待燃料完全蒸发、充分混合之后才点火,避免这一问题出现。

上述对比分析结果表明,本文定容燃烧弹实验系统具有较高的可靠性,不仅能够准确测量较高初始温度、不同初始压力条件下燃料/空气的层流火焰传播速度,而且能够拓宽甲苯/空气、甲基

环己烷/空气火焰传播速度当量比的范围。

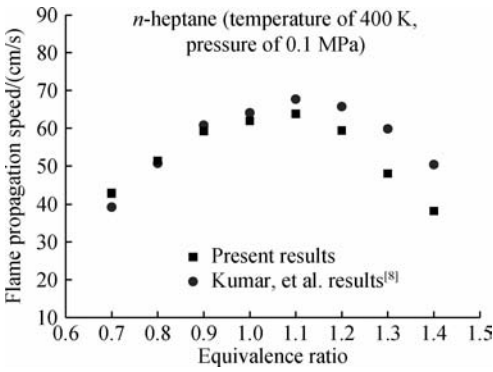


图 9 温度为 400 K、压力为 0.1 MPa 正庚烷/空气火焰传播速度本文测量值与文献[8]的值
Fig.9 Measured results and Ref. [8] results of n-heptane/air laminar flame speeds at temperature of 400 K and pressure of 0.1 MPa

4 结 论

本文设计并搭建了适用于测量液体燃料高温、高压条件下层流火焰传播速度的定容燃烧弹实验系统。详细介绍了定容燃烧弹实验系统的主要子系统的构成和功能,并阐述实验数据处理方法。

测量初始温度为 400 K、压力为 0.1 MPa 和 0.3 MPa,C₇ 燃料(甲苯、甲基环己烷、正庚烷)/空气层流火焰传播速度,扩充 C₇ 燃料/空气层流火焰传播速度实验数据,并与大量的文献[8,10,18-19]结果进行了对比验证。对比分析结果表明,本文定容燃烧弹实验系统具有较高的可靠性,不仅能够准确测量较高初始温度、不同初始压力条件下燃料/空气的层流火焰传播速度,而且能够拓宽测量火焰传播速度当量比的范围。

参考文献:

[1] 汤成龙,金春,何佳佳,等. 丙烷-氢气-空气预混层流燃烧特性研究[J]. 工程热物理学报,2009,30(6):1075-1079.
TANG Chenglong, JIN Chun, HE Jiajia, et al. Laminar combustion characteristics of premixed propane/hydrogen/air flames [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009,30(6):1075-1079. (in Chinese)
[2] LAW C K, SUNG C J, WANG H, et al. Development of comprehensive detailed and reduced reaction mechanisms for combustion modeling[J]. AIAA Journal, 2003,41(9): 1629-1646.
[3] DAVIS S G, WANG H, BREINSKY K, et al. Laminar flame speeds and oxidation kinetics of benene-air and toluene-air flames[J]. Symposium (International) on Combustion, 1996,26(1):1025-1033.

[4] TSE S D, ZHU D, LAW C K. Optically accessible high-pressure combustion apparatus[J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(1): 233-239.

[5] BOSSCHAART K J, DE GOEY L P H. Detailed analysis of the heat flux method for measuring burning velocities [J]. Combustion and Flame, 2003, 132(1/2): 170-180.

[6] 于维铭, 钟北京, 袁振, 等. 异辛烷/空气对冲火焰实验与计算分析[J]. 推进技术, 2014, 35(1): 70-76.
YU Weiming, ZHONG Beijing, YUAN Zhen, et al. Experiment and numerical investigation on counterflow twin-flame of iso-octane/air[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(1): 70-76. (in Chinese)

[7] 于维铭, 袁振, 钟北京. 正癸烷/甲苯/甲基环己烷火焰传播速度实验研究[J]. 推进技术, 2014, 35(11): 1544-1550.
YU Weiming, YUAN Zhen, ZHONG Beijing, et al. Experimental study on flame speed of *n*-decane/toluene/methylcyclohexane[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(11): 1544-1550. (in Chinese)

[8] KUMAR K, SUNG C J. Flame propagation and extinction characteristics of neat surrogate fuel components[J]. Energy and Fuels, 2010, 24(7): 3840-3849.

[9] HUI X, DAS A K, KUMAR K, et al. Laminar flame speeds and extinction stretch rates of selected aromatic hydrocarbons[J]. Fuel, 2012, 97: 695-702.

[10] HUI X, SUNG C J. Laminar flame speeds of transportation-relevant hydrocarbons and jet fuels at elevated temperatures and pressures[J]. Fuel, 2013, 109: 191-200.

[11] 胡二江, 何佳佳, 黄佐华, 等. 氢气-空气-稀释气混合气层流燃烧速度的测定和火焰稳定性分析[J]. 科学通报, 2008, 53(20): 2514-2525.
HU Erjiang, HE Jiajia, HUANG Zuohua, et al. Measuring laminar flame speed and analysis flame stability of premixed hydrogen/air flames[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(20): 2514-2525. (in Chinese)

[12] 刘岩, 苗海燕, 黄佐华, 等. 甲烷含量对模拟煤层气层流燃烧速度的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2011, 17(4): 337-342.
LIU Yan, MIAO Haiyan, HUANG Zuohua, et al. Influence of methane concentration on laminar burning velocity of simulated coal-bed gas[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2011, 17(4): 337-342. (in chinese)

[13] HUANG Z, ZHANG Y, ZENG K, et al. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures[J]. Combustion and Flame, 2006, 146(1/2): 302-311.

[14] MIAO J, LEUNG C W, HUANG Z, et al. Laminar burning velocities, Markstein lengths, and flame thickness of liquefied petroleum gas with hydrogen enrichment[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(24): 13020-13030.

[15] KELLEY A, SMALLBONE A, ZHU D, et al. In experimental measurement of *n*-pentane flame speeds at elevated pressures and temperatures [R]. Ann Arbor, MI, USA: The 6th US National Combustion Meeting, 2009.

[16] VAN LIPZIG J P J, NILSSON E J K, DE GOEY L P H, et al. Laminar burning velocities of *n*-heptane, iso-octane, ethanol and their binary and tertiary mixtures[J]. Fuel, 2011, 90(8): 2773-2781.

[17] 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: 355-365.

[18] JI C, EGOLFOPOULOS F N. Flame propagation of mixtures of air with binary liquid fuel mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 955-961.

[19] DEEPTI S, NISHIIIE T, QIAO L. In laminar flame speeds and markstein lengths of *n*-decane/air, *n*-decane/O₂/He and MCH/air flames [R]. Champaign, Illinois, USA: Technical Meeting of the Central States Section of the Combustion Institute, 2010.

(编辑:王碧珺)