

文章编号:1000-8055(2017)12-2941-06

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2017.12.017

均三甲苯层流燃烧特性实验

文 明, 徐庆尧, 李南雷, 王殿恺

(航天工程大学 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘 要: 为了深入了解均三甲苯的层流燃烧特性及影响因素, 利用高速纹影技术和定容燃烧弹开展了相关研究, 得到了不同初始条件下的层流燃烧速度和 Markstein 长度等参数, 结合均三甲苯化学反应机理揭示了不同初始条件下导致层流燃烧速度变化的关键基元反应, 进而得到了不同初始条件下均三甲苯/空气的层流燃烧速度拟合经验公式, 最后对拟合公式进行了验证表明该经验公式能较为准确地预测不同初始条件下均三甲苯/空气的层流燃烧速度。研究结果表明: 均三甲苯/空气的层流燃烧速度与预混气体的初始温度呈正相关, 与初始压力呈负相关; Markstein 长度与预混气体的初始温度和初始压力均呈负相关。

关 键 词: 均三甲苯; 高速纹影技术; 定容燃烧弹; 层流燃烧速度; Markstein 长度

中图分类号: V41

文献标志码: A

Experiment of laminar combustion characteristics of 1,3,5-trimethylbenzene

WEN Ming, XU Qingyao, LI Nanlei, WANG Diankai

(State Key Laboratory of Laser Propulsion and Application,
Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: In order to investigate the laminar combustion characteristics of 1, 3, 5-trimethylbenzene and influence factors, the high speed schlieren technology and constant combustion bomb technology were used to carry out some experiments. The Markstein length and laminar burning speed were obtained under different initial conditions; in combination with the mechanism of the reaction of 1, 3, 5-trimethylbenzene, it revealed the key elemental reactions leading to the change of laminar burning speed under different initial conditions, and the fitting formula of laminar burning speed was built at different initial pressures and initial temperatures. The accuracy of the fitting formula was verified, and the laminar burning speed of 1, 3, 5-trimethylbenzene/air mixture under different initial conditions was calculated. The results show that the laminar burning speed of 1, 3, 5-trimethylbenzene/air mixture increases with the increase of initial temperature, and decreases with the increase of initial pressures, while Markstein length decreases with the increase of initial pressure and initial temperature.

Key words: 1,3,5-trimethylbenzene; high speed schlieren technology;
constant combustion bomb; laminar burning speed; Markstein length

收稿日期: 2017-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(51606220)

作者简介: 文明(1978—), 男, 副研究员、硕士生导师, 博士, 主要从事激光航天应用技术方面的研究。

引用格式: 文明, 徐庆尧, 李南雷, 等. 均三甲苯层流燃烧特性实验[J]. 航空动力学报, 2017, 32(12): 2941-2946. WEN Ming, XU Qingyao, LI Nanlei, et al. Experiment of laminar combustion characteristics of 1,3,5-trimethylbenzene[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(12): 2941-2946.

芳香烃化合物是化石燃料如煤、焦油、石油等的重要组成部分,这类化合物与化石燃料中的其他组成如直链烃等有着明显的区别,它们更易形成相对稳定的小分子,而且芳香烃作为替代燃料的重要组成部分,也是产生 polycyclic aromatic hydrocarbon(PAH)的重要来源^[1-4]。

前期,甲苯常作为替代燃料的重要组分来模拟航天燃料中芳香烃燃烧特性,但它并不能同时模拟航空燃料的扩散性和碳烟生成特性^[5-6]。目前,正丙苯、均三甲苯两种芳香烃异构体大分子燃料开始作为替代燃料的重要组分,既有效提高了燃料摩尔质量,又使碳烟生成过程更易于控制^[7-9]。因均三甲苯相对于正丙苯的优势在于其拥有对称的分子结构,容易构建的燃烧动力学模型,而得到广泛应用。

目前国内外对均三甲苯燃烧特性研究较少,潘冠福^[10]利用射流搅拌反应器(JSR)对均三甲苯在常压、温度为 700~1100 K 条件下的氧化特性进行了研究,并根据实验结果建立了新的均三甲苯氧化机理模型。Roubaud 等^[11]利用快速压缩机在温度区域为 600~900 K,最大压力为 2.5 MPa 测量了当量比 ϕ 为 0.5、1.0、1.5 条件下均三甲苯的点火延迟时间。RAO Fan 等^[12]利用激波管在温度区域为 1080~1560 K,压力区域为 0.1~2 MPa 测量了当量比 ϕ 为 0.5、1.0、1.5 条件下均三甲苯的点火延长时间。JI Chunsheng 等^[13]利用对冲燃烧台测量了均三甲苯等燃料在初始温度为 353 K,常压条件下的层流燃烧速度和熄火拉伸率。XIN Hui 等^[14]利用对冲燃烧台测量了初始温度为 400、470 K,常压下当量比为 0.7~1.4 范围内均三甲苯的层流燃烧速度和预混吹熄极限。Gudiyella 等^[15]在高压单脉冲激波管中对高温高压下(温度为 1017~1645 K,压力为 2.026~5.065 MPa)均三甲苯的氧化反应进行了研究,并构建了相应的化学机理模型。Dievart 等^[16]对均三甲苯的点火延迟时间、层流燃烧速度、预混吹熄极限和氧化产物等参数进行了测量,并构建了新的均三甲苯机理模型。然而,目前还没有关于均三甲苯层流燃烧特性及初始条件对其影响规律的详细研究。基于此,本文开展这方面研究对于了解均三甲苯燃烧特性、初始条件对其燃烧过程影响机制具有非常重要的现实意义。

1 实验方法和计算模型

本文采用定容燃烧弹法对均三甲苯的燃烧特

性进行了分析,实验设备包括定容燃烧弹、光学纹影系统、弹体加热系统和配气系统,如图 1 所示。

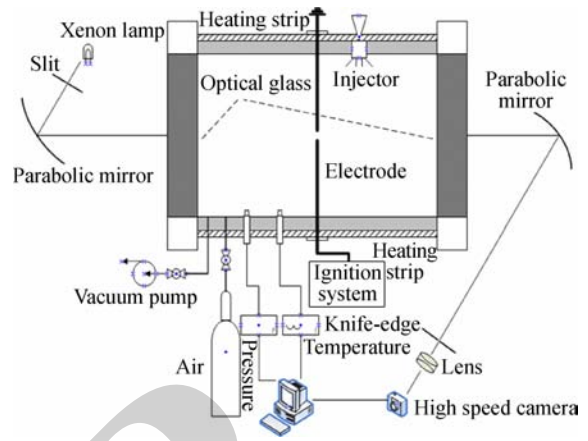


图 1 定容燃烧弹实验系统原理图
Fig. 1 Schematic of constant combustion bomb

定容燃烧弹内径为 400 mm、长度为 500 mm、厚度为 15 mm 的 316L 不锈钢构成的圆柱体,弹体上开有多个窗口,分别装有石英(JGS1)和 K9 玻璃,用于光谱和流场显示,其中两侧装有直径为 200 mm 的圆形观测窗,用于提供纹影光路,在圆柱型弹体侧面,还布置了 4 个呈 45° 的侧面窗口,其中两个成 180° 的窗口用于放置高压点火电极,另外两个分别为进气口和传感器安装孔座。

光学纹影系统由光源、凹面镜、刀口、狭缝、相机等组成。光源为 36 V 直流电源供电的 240 W 汞灯,采用“Z”字型光路,相机为 Phantom7. 11 型高速相机。在实验过程中,相机拍摄速度为 3000 帧/s,像素范围为 800 像素×800 像素,曝光时间为 20 μ s。

弹体加热系统采用硅胶加热带均匀缠绕在弹体上,最大可加热至 473 K,可通过温控系统和弹体内的热电偶精确控制加热温度,测量精度达到 ± 1 K。光学纹影系统由直径为 300 mm 圆形分立式纹影镜、高亮度光源和 PhantomV711 高速彩色摄像机组成。

配气系统首先用加热带覆盖在燃烧弹体外部,然后将直接将气体或液体燃料注入燃烧弹内,通过温控系统控制加热带给弹体加温,使燃料充分蒸发,燃烧完成后,排气则采用双级真空泵结构,分别为德国莱宝旋片泵 SV100B 和罗兹泵 WAU501,实现对燃烧弹抽真空。

实验过程为:首先按照道尔顿分压定律将空气注入弹体内,液态均三甲苯利用注射器通过弹体上方注射口注入,然后将温控系统调到指定温

度并加热弹体,使均三甲苯充分蒸发。将完全蒸发的混合燃气保持温度静置 10 min,再利用电火花发生器点燃混合气体,同时触发高速相机,动态记录并存储球形火焰的纹影图像。最后利用开发

的 Matlab 程序处理纹影图像,计算出均三甲苯在给定条件下的层流燃烧速度。图 2 为燃烧过程中球形火焰传播过程图像和 Matlab 处理后对应的图像。

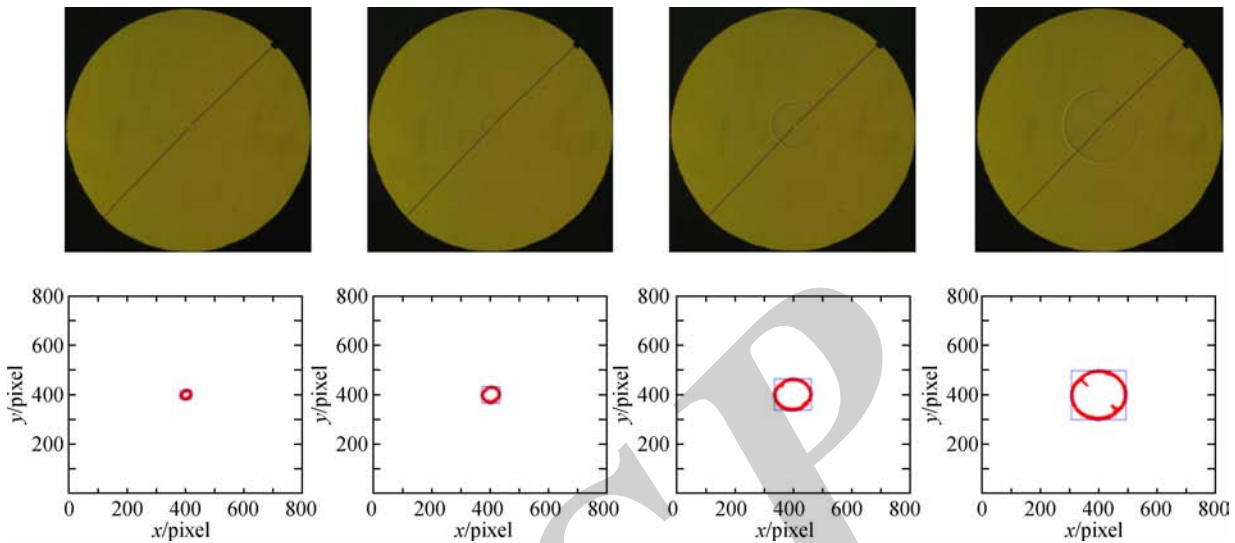


图 2 典型层流火焰传播纹影图像和程序处理后对应图像

Fig. 2 Typical schlieren photo and photo processing of the laminar flame propagation

2 实验结果与分析

2.1 Markstein 长度

Markstein 长度反映了火焰速度对火焰面拉伸率的敏感程度,已燃气体的 Markstein 长度存在如式(1)所示关系。

$$S_n = S_l - L_b \alpha \tag{1}$$

式中定义 S_n 为拉伸火焰传播速度, S_l 为无拉伸火焰传播速度, α 为火焰拉伸率, L_b 为已燃气体的 Markstein 长度。

将 S_n 外推至 $\alpha=0$ 处,就可以得到 S_l ,并且拟合直线在 (α, S_n) 坐标系上的斜率的相反数即为 L_b 。

图 3 为初始压力 $p_u=100\text{ kPa}$,初始温度 T_u 分别为 353、373、400 K 条件下,已燃气体 Markstein 长度随燃空当量比 ϕ 的变化规律。

从图 3 中可以看出,Markstein 长度随着燃空当量比的提高而逐渐降低为负值,这是因为随着燃空当量比的提高,预混气体的热传输特性和 Lewis 数降低,火焰由热扩散稳定状态转为热扩散不稳定状态。同一当量比条件下,随着初始温度的提高,Markstein 长度降低,火焰前锋面的稳定性降低,说明提高初始温度会使热扩散稳定性降低。

图 4 为初始温度为 353 K,初始压力分别为

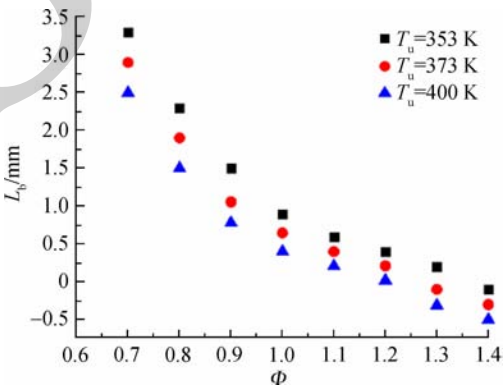


图 3 不同初始温度下的 Markstein 长度变化
($p_u=100\text{ kPa}$)

Fig. 3 Markstein length at different initial temperatures
($p_u=100\text{ kPa}$)

50、100、150 kPa 条件下,已燃气体 Markstein 长度随燃空当量比的变化规律。

从图 4 可以看出,在同一当量比条件下,Markstein 长度值随着初始压力的升高而有所减小。这是因为随着初始压力的提高,火焰的厚度相应减小,伴随火焰的传播火焰前锋表面将更容易形成流体动力学蜂窝状结构,火焰的不稳定性进一步增加。

2.2 层流燃烧速度

层流燃烧速度是可燃混合气最基本、最重要

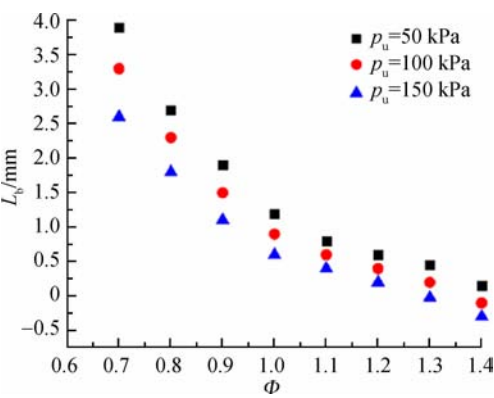


图 4 不同初始压力下的 Markstein 长度变化
($T_u=353\text{ K}$)
Fig. 4 Markstein length at different initial pressures
($T_u=353\text{ K}$)

的物理化学特性参数,它是可燃混合气系统的扩散性、放热能力以及化学反应速度的综合反映。

层流燃烧速度可以根据已燃区和未燃区火焰前锋面上质量守恒获得^[17]

$$A_b \rho_b S_l = A_u \rho_u u_1 \tag{2}$$

式中定义 A_b 、 A_u 分别代表已燃区和未燃区的火焰面积, ρ_b 为已燃气的密度, ρ_u 为未燃气的密度, u_1 为预混燃气的层流燃烧速度。由于火焰面厚度很薄,远小于火焰半径,可将火焰前锋内外两侧的火焰面面积看做近似相等。根据质量守恒方程有

$$u_1 = \frac{\rho_b}{\rho_u} S_l \tag{3}$$

图 5(a) 所示为初始温度为 400 K, 初始压力为 100 kPa 下本文均三甲苯/空气层流燃烧速度实验值与 XIN Hui^[14] 和 Pascal 等^[16] 的实验结果对比。可以发现本文实验数据与其他两组数据变化规律较为一致,层流燃烧速度在当量比 0.7~1.4 出现先增后减趋势,最大值都出现在当量比 1.1 附近,三组数据误差在 $\pm 5\text{ cm/s}$ 范围内,吻合较好。

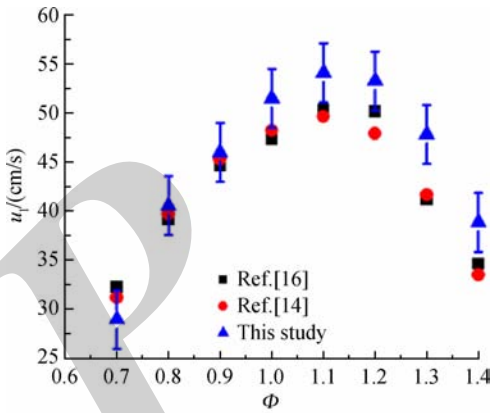
图 5(b) 所示为初始温度为 353 K、不同初始压力下的均三甲苯/空气层流燃烧速度。由图可知,层流燃烧速度随着初始压力的增大而减小,这主要是因为随着初始压力的增大,消耗活性基的链终止反应,如 $\text{C}_9\text{H}_{12} + \text{OH} \rightleftharpoons \text{C}_9\text{H}_{11} + \text{H}_2\text{O}$ 得到加强,而产生活性基的链分支反应,如 $\text{CH}_3\text{O} + \text{M} \rightleftharpoons \text{CH}_2\text{O} + \text{H} + \text{M}$ 得到抑制,宏观表现为层流燃烧速度随着初始压力增大而减小。

图 5(c) 所示为初始压力为 100 kPa, 不同初始温度下的均三甲苯/空气层流燃烧速度。由图可知,层流燃烧速度随着初始温度的增大而增大,这

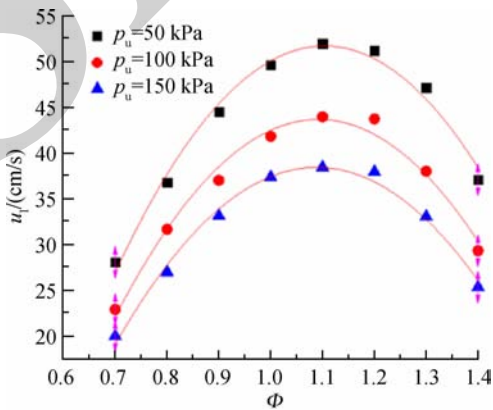
是因为提高初始温度会相应提高绝热火焰温度,进而提高层流燃烧速度。

将初始温度为 353 K、初始压力为 100 kPa 条件下的层流燃烧速度(u_{10})拟合为当量比 Φ 的函数,表示如下:

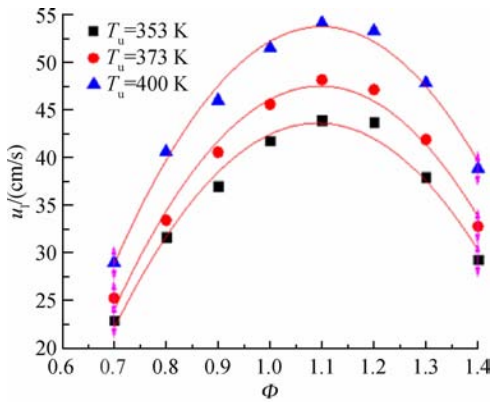
$$u_{10} = -139.84184\Phi^2 + 305.37819\Phi - 123.08384 \tag{4}$$



(a) 三组实验值对比, $T_u=400\text{ K}$, $p_u=100\text{ kPa}$



(b) 不同初始压力下的层流燃烧速度, $T_u=353\text{ K}$



(c) 不同初始温度下的层流燃烧速度, $p_u=100\text{ kPa}$

图 5 层流燃烧速度随当量比的变化
Fig. 5 Laminar burning speed varying with equivalent ratio

图 5 较为详细直观地给出了不同初始温度和初始压力对均三甲苯/空气层流燃烧速度的影响规律。可以看出层流燃烧速度与初始温度呈正相关,而与初始压力呈负相关。

在初始温度 $T_u>300\text{ K}$ 时,层流燃烧速度存在如下的经验公式^[18]:

$$u_l = u_{l0} \left(\frac{T_u}{T_{u0}} \right)^\gamma \left(\frac{p_u}{p_{u0}} \right)^\beta \tag{5}$$

同时对式(5)进行变换,且两边取对数得

$$\ln\left(\frac{u_l}{u_{l0}}\right) = \gamma \ln\left(\frac{T_u}{T_{u0}}\right) + \beta \ln\left(\frac{p_u}{p_{u0}}\right) \tag{6}$$

式中参考层流燃烧速度 u_{l0} 、参考初始温度 T_{u0} 和参考初始压力 p_{u0} 均已知, u_l 、 T_u 、 p_u 为满足初始温度 $T_u>300\text{ K}$ 的层流燃烧速度、初始温度和初始压力,然后利用二元线性回归方法就可以得到拟合指数 γ 和 β 如表 1 所示。

表 1 不同当量比下的 β 和 γ 值

Table 1 β and γ at different equivalence ratios

Φ	u_{l0}	γ	β
0.8	31.677 60	2.035 08	-0.351 23
1	41.788 37	1.949 07	-0.245 76
1.2	43.687 37	1.993 93	-0.265 61
1.4	29.332 82	2.144 79	-0.345 22

进一步将 γ 和 β 拟合为当量比 Φ 的函数,如下所示:

$$\gamma = 3.542\,33 - 3.069\,97\Phi + 1.480\,44\Phi^2 \tag{7}$$

$$\beta = -1.642\,78 + 2.543\,94\Phi - 1.156\,75\Phi^2 \tag{8}$$

最后将式(7)、式(8)代入式(5)中,即可得到均三甲苯/空气的层流燃烧速度拟合公式。

将本文在初始压力为 100 kPa、初始温度为 400 K 和初始温度为 353 K、初始压力为 150 kPa 条件下的两组均三甲苯/空气层流燃烧速度拟合公式所得到的计算结果与实验值进行对比,如图 6 所示。

由图 6 可知,在初始温度 $T_u>300\text{ K}$ 条件下,实验值与计算值吻合较好。在初始温度为 400 K 数据组当量比为 0.9 处有最大误差为 3.27 m/s,相对误差约 7%;在初始温度为 353 K 数据组当量比为 1.2 处有最小误差为 0.05324 m/s,相对误差约为 0.1%。因此可以说明本文的均三甲苯/空气层流燃烧速度拟合公式较为合理,可以应用于今后的工程实践中。

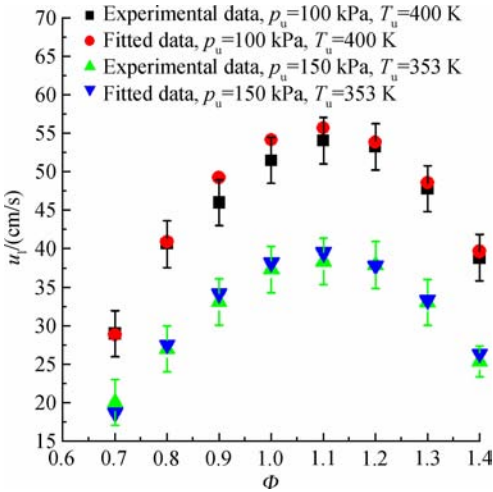


图 6 计算值与实验值对比
Fig. 6 Comparison of experimental data and calculative data

3 结 论

通过本文开展的均三甲苯/空气层流燃烧特性实验,可以得到如下结论:

- 1) 均三甲苯/空气的已燃气体 Markstein 长度与初始温度、初始压力和当量比均呈负相关的变化规律,因为这三个初始条件的增加都会降低预混气体的热传输特性,导致其转为热扩散不稳定状态。
- 2) 均三甲苯/空气层流燃烧速度与初始温度呈正相关,与初始压力呈负相关,随着当量比的增大而先增大后减小,最大值在当量比为 1.1 时,并从化学机理方面对其进行了解释,找到了关键基元反应。
- 3) 本文拟合得到的均三甲苯/空气层流燃烧速度经验公式经过与实验数值进行对比,吻合较好,最大相对误差为 7%,最小相对误差为 0.1%,可以应用于今后的工程实践中。

参考文献:

[1] ANDRAE J C G. Development of a detailed kinetic model for gasoline surrogate fuels[J]. Fuel, 2008, 87 (10/11): 2013-2022.

[2] DOOLEY S, WON S H, MARCOS CHAOS, et al. A jet fuel surrogate formulated by real fuel properties[J]. Combustion and Flame, 2010, 157 (12): 2333-2339.

[3] GAIL S, DAGAUT P. Experimental kinetic study of the oxidation of *p*-xylene in a JSR and comprehensive detailed chemical kinetic modeling [J]. Combustion and Flame, 2005, 141 (3): 281-297.

[4] TIAN Zhenyu, PITZ W J, FOURNET R, et al. A detailed

kinetic modeling study of toluene oxidation in a premixed laminar flame[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 233-241.

[5] 曾文,陈欣,马洪安,等. RP-3 航空煤油层流燃烧特性的实验[J]. 航空动力学报, 2015, 30(12): 2888-2896.

ZENG Wen, CHEN Xin, MA Hongan, et al. Experiment on laminar combustion characteristics of RP-3 kerosene [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30 (12): 2888-2896. (in Chinese)

[6] COMANDINI A, DUBOIS T, CHAUMEIX N. Laminar flame speeds of *n*-decane, *n*-butylbenzene, and *n*-propylcyclohexane mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(1): 671-678.

[7] ZHAO Long, CHENG Zhanjun, YE Lili, et al. Experimental and kinetic modeling study of premixed *o*-xylene flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(1): 1745-1752.

[8] ELDEEB M A, AKIH-KUMGEH B. Investigation of 2,5-dimethyl furan and iso-octane ignition[J]. Combustion and Flame, 2015, 162(6): 2454-2465.

[9] MANNAA O, MANSOUR M S, ROBERT W L, et al. Laminar burning velocities at elevated pressures for gasoline and gasoline surrogates associated with RON [J]. Combustion and Flame, 2015, 162(6): 2311-2321.

[10] 潘冠福. 低阶不饱和烃和均三甲苯的氧化研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.

PAN Guanfu. Oxidation study of low-rank unsaturation hydrocarbons and 1, 3, 5-trimethylbenzene [D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)

[11] ROUBAUD A, MINETTI R, SOCHET L R. Oxidation and combustion of low alkylbenzenes at high pressure: comparative reactivity and auto-ignition [J]. Combustion and Flame, 2000, 121(3): 535-541.

[12] RAO Fan, LI Bin, LI Ping, et al. Shock-tube study of the ignition of gas-phase 1, 3, 5-trimethylbenzene in air [J]. Energy and Fuels, 2014, 28(11): 6707-6713.

[13] JI Chunsheng, DAMES E, WANG Hai, et al. Propagation and extinction of benzene and alkylated benzene flames [J]. Combustion and Flame, 2012, 159(3): 1070-1081.

[14] XIN Hui, DAS A K, KUMAR K, et al. Laminar flame speeds and extinction stretch rates of selected aromatic hydrocarbons [J]. Fuel, 2012, 97(8): 695-702.

[15] GUDIYELLA S, BREZINSKY K. High pressure study of 1, 3, 5-trimethylbenzene oxidation [J]. Combustion and Flame, 2012, 159(11): 3264-3285.

[16] DIEVART P, KIM H H, WOO S H, et al. The combustion properties of 1, 3, 5-trimethylbenzene and a kinetic model [J]. Fuel, 2013, 109(7): 125-136.

[17] 蒋德明. 内燃机燃烧排放学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2011.

[18] METGHALCHI M, KECK J C. Burning velocities of mixtures of air with methanol, isooctane, and indolent at high pressures and temperatures [J]. Combustion and Flame, 1982, 48(3): 191-210.

(编辑: 陈 越)