

正十四烷层流燃烧特性的实验

刘 宇,王金铎,谷 午,马洪安,曾 文
(沈阳航空航天大学 航空发动机学院
辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室,沈阳 110136)

摘 要: 采用定容燃烧实验平台获得初始压力为 0.1 MPa、初始温度为 420、450 K 和 480 K,当量比为 0.8~1.4 工况下正十四烷/空气预混气层流燃烧速度和马克斯坦长度,并分析了初始温度、当量比等因素的影响。研究发现:初始温度和当量比的增加对预混气球形火焰稳定性影响较小,在初始温度为 480 K、当量比为 1.3 工况下,火焰内部无裂纹或胞状结构;初始温度的增加能够加快火焰传播速度,促进火焰锋面形成,其影响在稀混合气中更为显著;随着当量比的增加,正十四烷预混燃烧火焰马克斯坦长度减小,火焰稳定性变差;随着初始温度的增加,正十四烷马克斯坦长度减小,无拉伸火焰传播速度和层流燃烧速度增加,另外,与 RP-3 航空煤油层流燃烧速度对比发现,正十四烷层流燃烧速度整体偏高。
关 键 词: 层流燃烧速度; 马克斯坦长度; 正十四烷/空气预混气; 初始温度; 当量比
中图分类号: V231; TK401 **文献标志码:** A

Experiment on laminar combustion characteristics of *n*-tetradecane

LIU Yu, WANG Jinduo, GU Wu, MA Hongan, ZENG Wen
(Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technique for Aviation
Propulsion System, Liaoning Province, Shool of Aero-engine,
Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: The laminar burning velocity and Markstein length of *n*-tetradecane/air mixture were obtained under initial pressure of 0.1 MPa, initial temperatures of 420, 450 K and 480 K within a wide equivalence ratio range from 0.8 to 1.4 in a constant volume chamber, and the effects of initial temperature and equivalence ratio were analyzed. The results showed that the increase of initial temperature and equivalence ratio had little effect on the stability of the flame propagation images. Under the initial temperature of 480 K and equivalence ratio of 1.3, there was no crack or cellular structure in the flame. The effect that the increase of initial temperature can increase the flame propagation speed and promote the formation of flame front was observed, which was more significant in the lean mixture. With the increase of equivalence ratio, the Markstein length of *n*-tetradecane/air mixture decreased and the flame stability became worse. With the increase of temperature, the Markstein length decreased, and the unstretched flame speed and laminar burning velocity increased. In addition, compared with the laminar burning velocity of RP-3 kerosene, the laminar burning

收稿日期:2020-03-24
基金项目:国家自然科学基金(51606129,51676132)
作者简介:刘宇(1983—),男,副教授,博士后,主要从事航空燃料燃烧特性实验及燃烧反应机理研究。
通信作者:曾文(1977—),男,教授,博士后,主要从事航空发动机燃烧过程与排放物生成的数值研究。
E-mail:zengwen928@sohu.com

引用格式:刘宇,王金铎,谷午,等.正十四烷层流燃烧特性的实验[J].航空动力学报,2020,35(10):2036-2045. LIU Yu, WANG Jinduo, GU Wu, et al. Experiment on laminar combustion characteristics of *n*-tetradecane[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(10): 2036-2045.

velocity of *n*-tetradecane was higher under most conditions.

Key words: laminar burning velocity; Markstein length; *n*-tetradecane/air mixture; initial temperature; equivalence ratio

燃烧室是航空发动机的核心部件,在设计航空发动机燃烧室时,为满足推质比、排放等要求,有必要对其燃烧特性以及污染物生成规律进行研究。然而,通过实验直接测量燃烧室内实际燃烧情况极其困难,需要对燃烧室内油气混合物进行气液两相流动传热与燃烧过程数值计算。

在航空发动机中,航空燃料雾化蒸发,再与空气混合、点火及燃烧是一个复杂的湍流燃烧过程,强烈受控于化学反应动力学,进行数值计算时有必要采用燃烧反应机理^[1-2]。航空煤油成分非常复杂,包括正构烷烃、异构烷烃和芳香烃等多种成分,如果针对其中每种成分构建其燃烧反应机理,所构建航空煤油机理将十分庞大,当与多尺度流动耦合时,计算会变得极为困难。一种行之有效的办法是遴选出航空煤油数值模拟替代燃料,优化其组成和比例,使其具有同航空煤油相似的物理、化学特性,构建出该替代燃料的燃烧反应机理并进行必要简化^[3-5]。

正十四烷($n\text{-C}_{14}\text{H}_{30}$)是航空燃料的重要组成部分,同时也是航空燃料和柴油的主要数值模拟替代燃料,对其燃烧反应机理的构建具有重要意义。目前,已有学者构建出了正十四烷的燃烧反应机理^[6-7],但从现有报道来看,用于验证机理的实验数据还相对较少。Shen 等^[8]采用激波管实验测量了着火压力为 0.9~5.8 MPa,着火温度为 786~1396 K,当量比为 0.25、0.5 和 1.0 工况下正十四烷的着火延迟时间;Cavaliere 等^[9]采用实验方法研究了将液态正十四烷喷射到高温高压环境下的自燃特性;Zeng 等^[10]采用实验方法获得正十四烷在温度为 832~1281 K,压力为 0.004~0.1 MPa 工况下正十四烷气相裂解数据;Li 等^[11]采用对冲火焰实验台测量了初始温度为 423 K 和 443 K,当量比为 0.7、1.0 和 1.4 工况下正十四烷/空气预混气火焰的层流燃烧速度;Mzè-Ahmed 等^[12]采用射流搅拌反应器(JSR)对正十四烷在压力为 1 MPa,温度为 560~1030 K,滞留时间为 1 s,当量比为 0.5、1.0 和 2.0 工况下的氧化过程进行了研究。

针对正十四烷层流燃烧特性实验数据相对匮乏的现状,本文拟采用定容燃烧实验装置获得初始压力为 0.1 MPa,初始温度为 420、450 K 和

480 K,当量比为 0.8~1.4 工况下正十四烷层流燃烧速度和马克斯坦长度,该项研究不仅可以了解正十四烷层流燃烧特性,同时也能验证正十四烷燃烧反应机理提供可靠实验数据。

1 实验装置

本文通过定容燃烧实验平台获得正十四烷层流燃烧速度,如图 1 所示,该实验平台主要包括定容燃烧弹本体、灯源及平行光路、进油进气装置、加热装置、高速摄像机和数据处理系统等^[13]。图 2 为定容燃烧弹横截面示意图,弹体为 304 不锈钢材质,采用圆柱形结构,经计算内腔容积约为 4.3 L。弹体内部装有中心点火电极,外部装有 Rosemount 压力变送器、K 型温度传感器、进排气阀及液体燃料注入阀等,弹体两侧装有高透光石英玻璃视窗(直径为 130 mm),用以观察火焰发展过程。实验中,采用阴影法获得火焰发展图片,所使用高速摄像机型号为 Phantom v611,拍摄速率为 10 000 帧/s。

实验前,根据初始工况条件、当量比、燃料分子式($\text{C}_{14}\text{H}_{30}$)以及分压定律得到正十四烷、 O_2 和 N_2 各组分分压,并根据实验当日真空度和大气压制定配气表。实验中,需将正十四烷气态分压换算成其液态体积,通过液体燃料注入阀注入到定容燃烧弹中,然后依次充入相应分压的 O_2 和 N_2 。配气结束后,将容弹静置一段时间,以确保各组分气体混合均匀。最后,启动点火系统,使中心电极产生微小火花点燃预混气,并同步触发高速摄像机,获得火焰发展的连续图片。为了减小实验误差,对同一工况重复完成 3 次实验,取平均值获得层流燃烧速度。考虑到仪表误差以及充入容弹的混合气当量比偏离理论值所引起的误差,本文获得的层流燃烧速度误差在 1~4.5 cm/s 之间^[14]。

2 实验原理

考虑到点火能量、容积限制以及压力升高等因素对火焰传播速度的影响,本文对火焰半径 8~18 mm 之间的火焰发展图片进行数据处理^[15-16]。通过球形扩散火焰半径随时间的变化关系,得到拉伸火焰传播速度 S_n ^[17]。

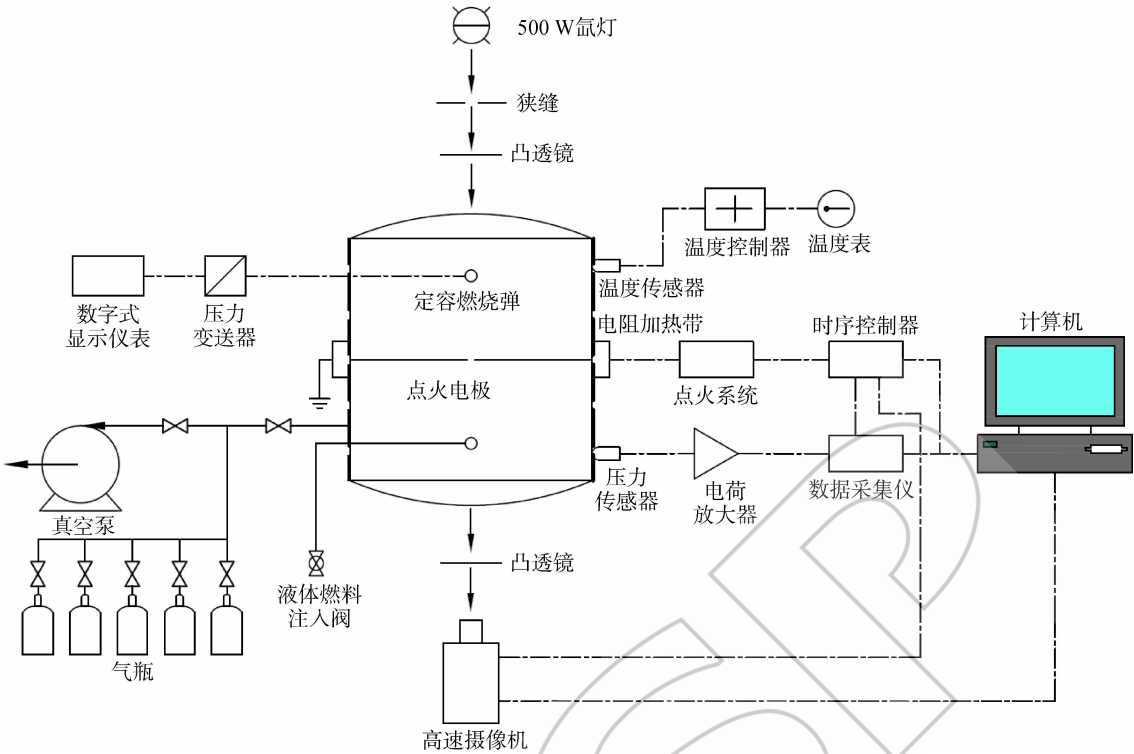


图 1 定容燃烧反应实验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental setup for constant volume combustion

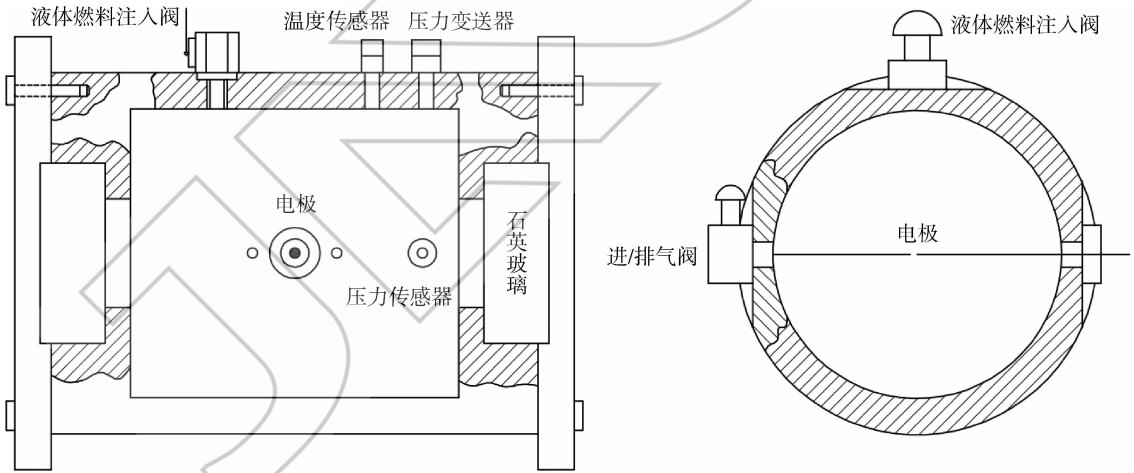


图 2 定容燃烧弹横截面示意图

Fig. 2 Cross-section view of the constant volume chamber

$$S_n = \frac{dr}{dt} \tag{1}$$

式中 r 为火焰半径, t 为从点火到火焰发展到该位置所经历的时间。

为消除球形火焰在传播中所受拉伸作用的影响, 定义了火焰拉伸率 κ , 其大小为火焰前锋面无穷小面积的对数值对时间的变化率。对于球形扩散火焰, 可将 κ 与 S_n 的关系表示成

$$\kappa = \frac{d \ln A}{dt} = \frac{2dr}{dt} \cdot \frac{1}{r} = \frac{2S_n}{r} \tag{2}$$

式中 A 为球形火焰前锋面表面积。

为获得无拉伸火焰传播速度 S_l 和马克斯坦长度 L_b 等参数, Frankel 等^[18] 和 Chen 等^[19] 提出了一种拟合 S_n - κ 之间关系的非线性方法, 对具有正马克斯坦长度的燃烧火焰, 能够得到较为准确的 S_l 和 L_b 。

$$S_n = S_l - S_l L_b \frac{\kappa}{S_n} \tag{3}$$

令 $\kappa=0$, 得到无拉伸火焰传播速度 S_l , 式中

L_b 用于表征燃烧稳定性。

根据火焰锋面处质量守恒定律,可以得到燃料的层流燃烧速度 U_l

$$U_l = \frac{\rho_b S_l}{\rho_u} \tag{4}$$

式中 ρ_b 为已燃区混合气密度, ρ_u 为未燃区混合气密度。

3 实验结果与分析

3.1 火焰发展图片

图 3 为初始压力 p 为 0.1 MPa, 初始温度分别为 420、450 K 和 480 K, 当量比为 0.9、1.1 和 1.3 工况下正十四烷/空气预混气火焰发展特性图片, 图中 t 表示时间。如图所示, 初始球形火焰

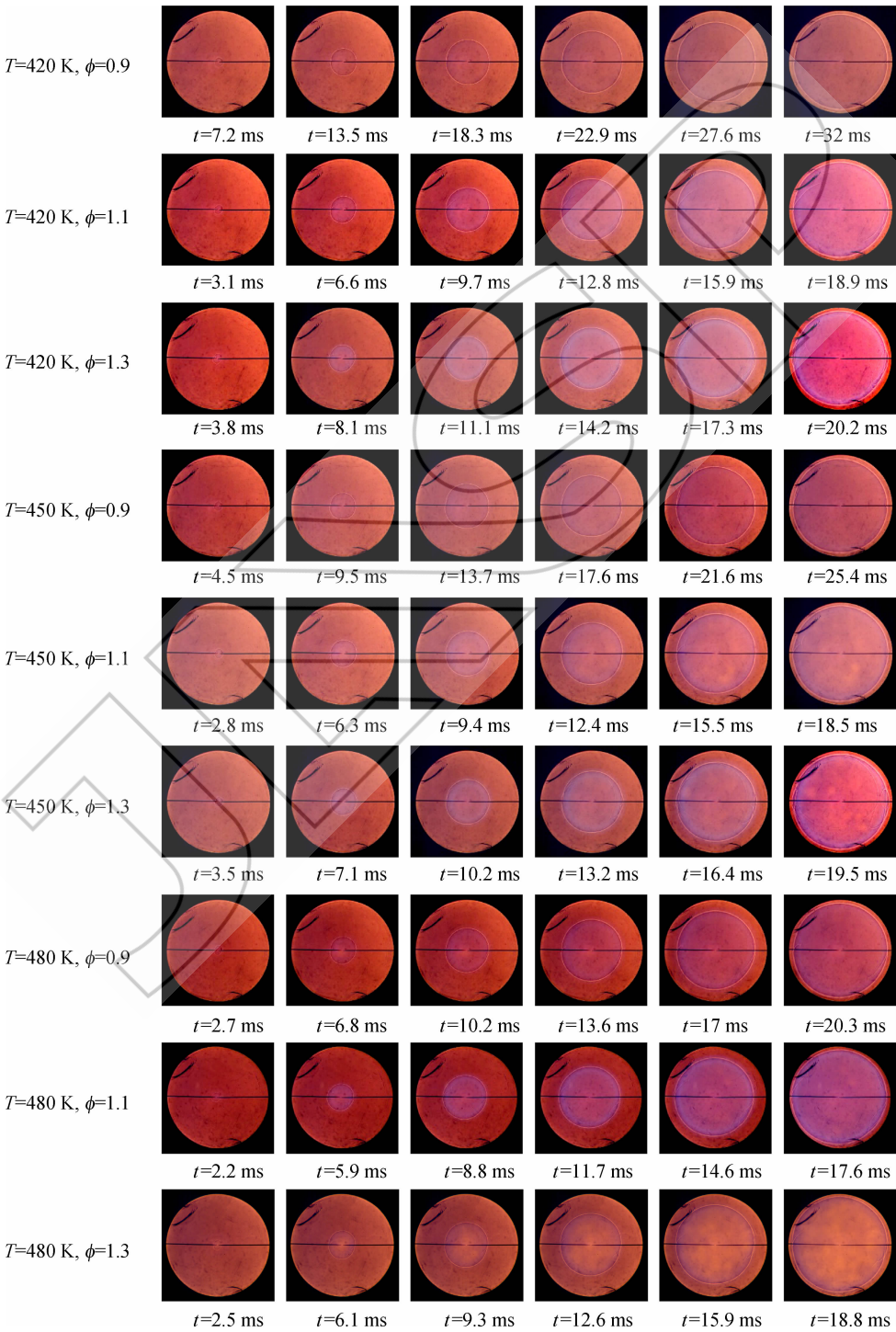


图 3 火焰发展特性图片 ($p=0.1\text{ MPa}$)

Fig. 3 Images of flame propagation characteristics ($p=0.1\text{ MPa}$)

锋面形成于容弹中心,随后快速向壁面扩散。随着初始温度和当量比增加,球形火焰边缘仍清晰可见,火焰锋面未出现明显褶皱,内部无裂纹或胞状结构,说明火焰仍保持稳定。

图 3 中图片下面标注的时间代表从电极点火到该火焰位置所经历的时间。对比相同初始温度、不同当量比工况下同一火焰半径对应的时间发现,当量比为 1.1 时火焰传播速度最快。这与大多数燃料最大层流燃烧速度所对应的当量比一致。

3.2 火焰传播速度

图 4 为火焰半径随时间的变化趋势。如图所示,在 8~18 mm 范围内,火焰半径与时间基本呈线性关系。进一步观察发现,不同工况曲线的区别在于其斜率和形成 8 mm 稳定火焰锋面所需的时间不同。在当量比为 0.9 时,随着初始温度的增加,曲线斜率明显增大,说明火焰传播速度变快,同时,形成 8 mm 稳定火焰锋面的时间提前,说明初始温度的增加有利于更快形成稳定火焰锋面;在当量比为 1.1 时,观察发现 3 条曲线斜率基本一致,且曲线间距离很近,说明此时初始温度增加对火焰传播速度和火焰

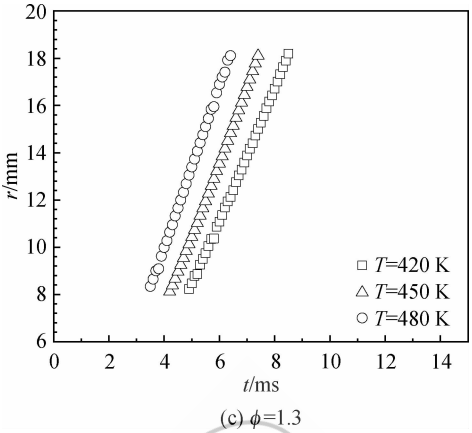
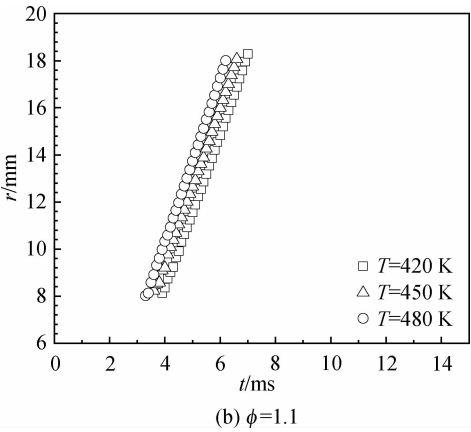
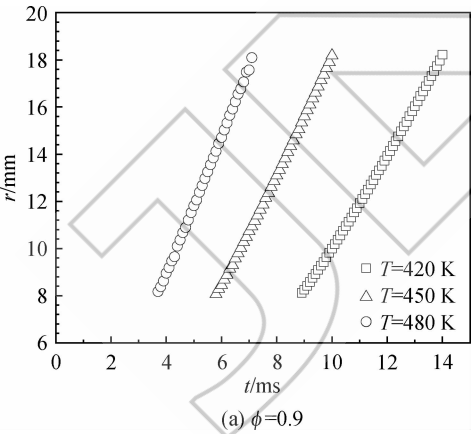
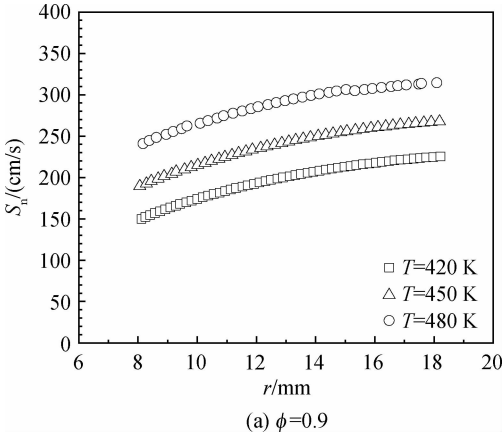


图 4 火焰半径随时间的变化趋势 ($p=0.1\text{ MPa}$)
Fig. 4 Trend of flame radius versus time ($p=0.1\text{ MPa}$)

锋面形成影响不大;在当量比为 1.3 时,初始温度对火焰传播速度和火焰锋面形成的影响与当量比为 0.9 时相似,只是此时初始温度的影响没有当量比为 0.9 时明显。

为直观解释初始温度、当量比对正十四烷/空气预混气火焰传播速度的影响,图 5 给出火焰传播速度随火焰半径的变化趋势。如图所示,火焰半径在 8~18 mm 范围内,定容弹中火焰传播速度不为定值,随着球形火焰向外扩散,火焰传播速度增加。分析原因可知,随着火焰锋面外推,已燃区积聚的热量越来越多,相比于燃烧反应区内的化学反应的影响,已燃区膨胀推动火焰锋面对火焰传播速度的贡献更大,而此时未燃区温度和压力受容弹壁面影响较小,因此综合来看,火焰传播速度增加。

另外,如图 5 所示,相同火焰半径对应的火焰传播速度(也称为当地火焰锋面传播速度)也受初始温度影响。随着初始温度增加,当地火焰锋面传播速度增加,这进一步表明初始温度增加会促进火焰锋面的传播。



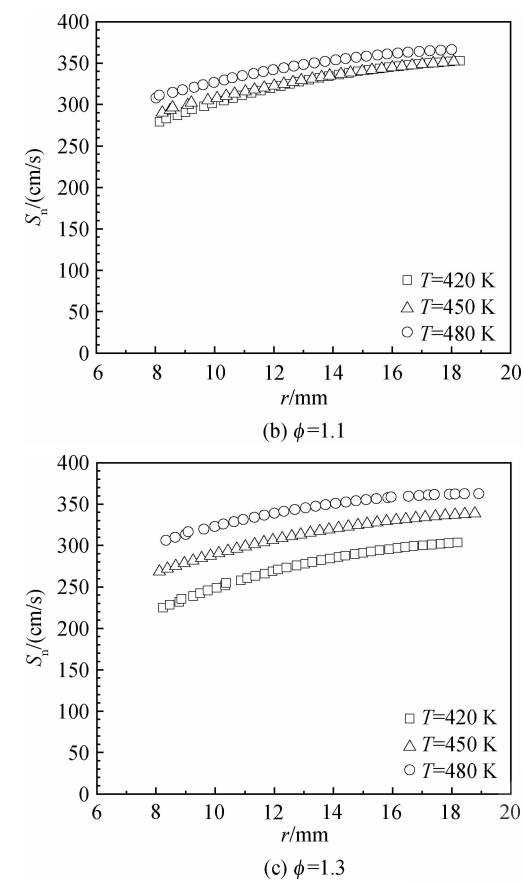


图 5 拉伸火焰传播速度随火焰半径的变化趋势
($p=0.1\text{ MPa}$)

Fig. 5 Trend of stretched flame speed versus flame radius ($p=0.1\text{ MPa}$)

由燃烧理论可知,火焰传播速度正比于 $(\alpha Le)^{1/2} \exp(-T_a/2T_{ad})$ 。其中 α 为热扩散系数, Le 为路易斯数, T_a 为活化温度, T_{ad} 为绝热火焰温度。式中 $(\alpha Le)^{1/2}$ 代表扩散作用对火焰传播速度的影响, T_a 和 T_{ad} 分别代表动力学、热力学因素的

影响, $\exp(-T_a/2T_{ad})$ 被称为阿累尼乌斯因子,用以表示热力学和动力学的综合影响。

表 1 计算得到影响火焰传播速度的主要特性参数。如表所示,在 3 种当量比工况下,随着初始温度增加, $(\alpha Le)^{1/2}$ 、 T_{ad} 和阿累尼乌斯因子均呈增加趋势。可知,随着初始温度的增加,扩散作用以及热力学、动力学因素都在促进火焰传播速度的增大。同时,相比于当量比为 1.1 时,当量比为 0.9 和 1.3 工况的 $(\alpha Le)^{1/2}$ 和阿累尼乌斯因子随初始温度增加变化较为明显,说明初始温度对当量比为 0.9 和 1.3 工况火焰传播速度影响更为显著,这与图 4、图 5 分析结果一致。

由于球形火焰在传播过程中会受到火焰表面拉伸作用的影响,因此,图 5 中的火焰传播速度也称作拉伸火焰传播速度。拉伸作用的大小由火焰拉伸率 κ 来度量,由式(2)可知,在火焰发展初期,拉伸率值较大,随着火焰的传播,拉伸率逐渐减小,当火焰传播至无穷远处时,火焰拉伸率近似为 0,此时的拉伸火焰传播速度与无拉伸火焰传播速度为同一值。本文采用非线性拟合方法,通过式(3)拟合 $S_n-\kappa$ 关系曲线,获得无拉伸火焰传播速度,同时获得马克斯坦长度。图 6 给出了正十四烷拉伸火焰传播速度与火焰拉伸率的非线性拟合曲线。如图所示,在不同当量比工况下,拉伸火焰传播速度随火焰拉伸率变化趋势略有不同。当当量比为 0.9 时,随着火焰拉伸率增加,拉伸火焰传播速度急剧减小,而当量比为 1.1 和 1.3 时,拉伸火焰传播速度随火焰拉伸率变化相对平缓。说明火焰拉伸率变化对稀混合气拉伸火焰传播速度的影响较为显著。

表 1 火焰传播速度影响因素的特性参数 ($p=0.1\text{ MPa}$)

Table 1 Characteristic parameters influencing the flame speed ($p=0.1\text{ MPa}$)

当量比	初始温度/K	$(\alpha Le)^{1/2}$	T_a /K	T_{ad} /K	$\exp(-T_a/2T_{ad})$
0.9	420	0.971	23928	2264	0.00507
	450	1.023	23247	2280	0.00611
	480	1.075	22830	2296	0.00693
1.1	420	0.512	22432	2349	0.00844
	450	0.539	22496	2364	0.00859
	480	0.566	22597	2380	0.00867
1.3	420	0.501	22166	2223	0.00684
	450	0.527	22068	2244	0.00732
	480	0.552	21989	2265	0.00779

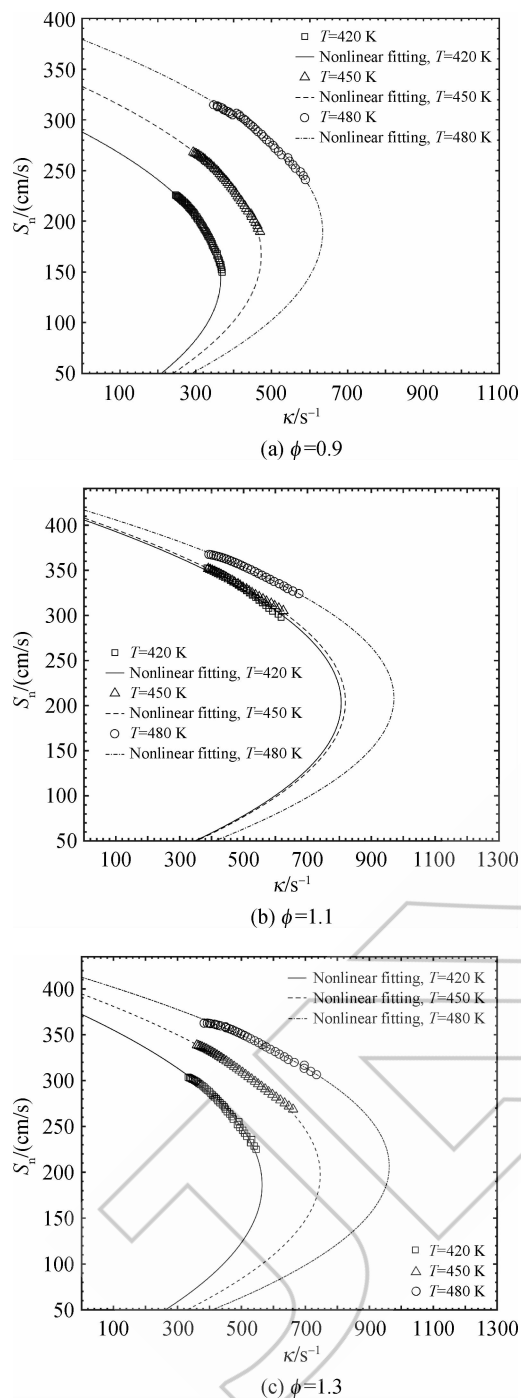


图 6 拉伸火焰传播速度随火焰拉伸率的变化趋势
($p=0.1\text{ MPa}$)
Fig. 6 Trend of stretched flame speed versus flame stretch rate ($p=0.1\text{ MPa}$)

3.3 马克斯坦长度

马克斯坦长度是判断燃烧稳定性的重要参数。由式(3)可知,当火焰锋面出现微小扰动时,若马克斯坦长度为正,拉伸火焰传播速度将比未受扰动时降低,从而抑制了扰动,火焰趋于稳定,且马克斯坦长度值越大,抗扰能力越强,火焰越稳定;反之,若马克斯坦长度为负,则受扰动处的拉

伸火焰传播速度比未扰动时加快,从而加速了扰动,火焰趋于不稳定,且马克斯坦长度绝对值越大,火焰越不稳定。

图 7 给出初始压力为 0.1 MPa,初始温度为 420、450 K 和 480 K,当量比为 0.8~1.4 工况下正十四烷/空气预混气燃烧火焰马克斯坦长度随当量比的变化趋势。从图中可以看出,所有工况下马克斯坦长度均为正值,且随着当量比增加,马克斯坦长度减小,说明正十四烷/空气预混气由稀到浓变化时,火焰稳定性变差。另外,分析初始温度对马克斯坦长度影响发现,随着初始温度增加,马克斯坦长度减小,说明初始温度增加会导致火焰稳定性变差。

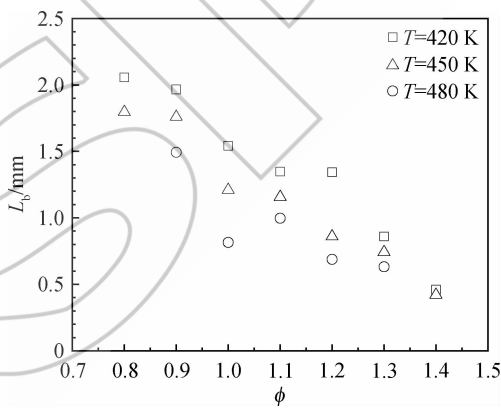


图 7 马克斯坦长度随当量比的变化趋势
Fig. 7 Trend of Markstein length versus equivalent ratio

相关研究指出,火焰稳定性受体积力、流体动力学和热扩散等多因素影响。由于正十四烷热值高、火焰传播速度快,由图 3 可知,所有工况下,球形火焰均未出现明显上浮,因此,可排除体积力影响。

由燃烧理论可知,马克斯坦长度 L_b 正比于 $Ze(Le-1)\sigma\delta$,其中 Ze 为泽尔多维奇数, σ 为热膨胀系数, δ 为火焰厚度。

燃烧反应区边界的密度变化以及燃烧反应区的厚度是影响流体动力学不稳定的主要因素,可用热膨胀系数 σ 和火焰厚度 δ 这两个参数来度量。路易斯数 Le 用来表征热-质扩散作用对燃烧稳定性的影响。如表 2 所示,随着初始温度增加,影响马克斯坦长度的 4 个参数 Ze 、 $Le-1$ 、 σ 和 δ 均呈减小趋势,说明随着初始温度增加,马克斯坦长度 L_b 减小,火焰趋于不稳定。

3.4 层流燃烧速度

图 8 给出初始温度为 420、450 K 和 480 K 工

表 2 马克斯坦长度影响因素的特性参数 ($p=0.1\text{ MPa}$)

Table 2 Characteristic parameters influencing the Markstein length ($p=0.1\text{ MPa}$)

当量比	初始温度/K	Ze	$Le-1$	σ	δ/mm
0.9	420	8.609	1.9217	5.779	0.05280
	450	8.422	1.8992	5.394	0.05223
	480	8.283	1.8793	5.057	0.05160
1.1	420	7.797	-0.1693	6.173	0.04472
	450	7.723	-0.1766	5.762	0.04470
	480	7.623	-0.1831	5.401	0.04465
1.3	420	6.831	-0.1871	6.150	0.05299
	450	6.623	-0.1950	5.740	0.05264
	480	6.392	-0.2032	5.382	0.05208

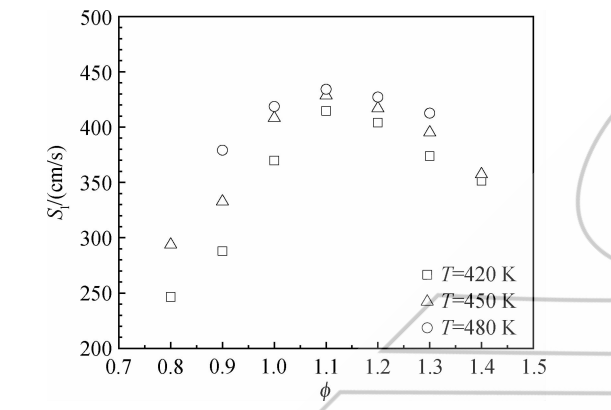


图 8 无拉伸火焰传播速度随当量比的变化趋势

Fig. 8 Trend of unstretched flame speed versus equivalent ratio

况下正十四烷/空气预混气无拉伸火焰传播速度随当量比的变化趋势。如图所示,随着当量比增加,无拉伸火焰传播速度先增大后减小,在当量比为 1.1 时达到峰值。无拉伸火焰传播速度以当量比为 1.1 时为中心呈左右非对称结构,在当量比小于 1.1 时,其对当量比变化较为敏感,随当量比增加快速上升,而在当量比大于 1.1 时,随当量比增加下降较慢。另外,比较初始温度的影响发现,随着初始温度增加,无拉伸火焰传播速度增加。这主要是因为随着初始温度增加,绝热火焰温度增加,而绝热火焰温度是影响火焰传播速度的主要因素,其增加将导致无拉伸火焰传播速度增加。

图 9 给出正十四烷/空气预混气层流燃烧速度 U_l 随当量比的变化趋势,同时对比文献中的实验数据及机理计算值,另外,也将 RP-3 航空煤油的层流燃烧速度放入其中进行对比。如图所示,正十四烷层流燃烧速度变化趋势与其无拉伸火焰

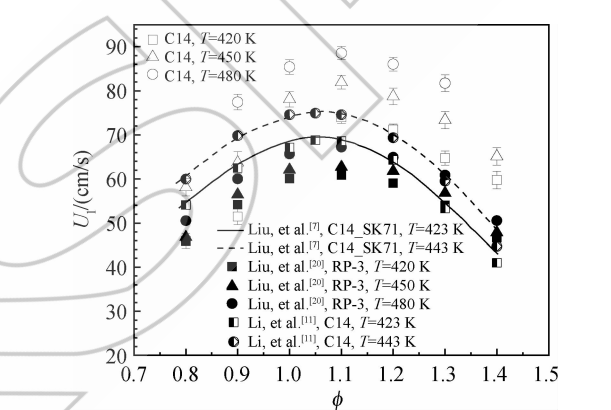


图 9 层流燃烧速度随当量比的变化趋势

Fig. 9 Trend of laminar burning velocity with equivalent ratio

传播速度一致。随着初始温度增加,层流燃烧速度增加。进一步分析发现,初始温度对层流燃烧速度的影响在稀混合气下较为显著。

与 Li 等^[11]实验数据对比发现,本文获得的正十四烷层流燃烧速度偏大,这可能和采用的实验装置有关。与相同工况 RP-3 航空煤油层流燃烧速度对比发现^[20],正十四烷层流燃烧速度整体偏高。在当量比为 1.1 处,初始温度为 420、450 K 和 480 K 的正十四烷层流燃烧速度分别高于 RP-3 航空煤油 13.07、19.19、21.3 cm/s。分析原因可知,标准航油的组成中包含着正构烷烃、异构烷烃、环烷烃和芳香烃等多种成分。而其中的环烷烃和芳香烃受 C-C 双键影响,层流燃烧速度较低,导致标准航油的层流燃烧速度比正十四烷低很多。

正十四烷是航空煤油的重要组成,同时也是航空煤油数值模拟替代燃料的主要遴选组分之

一。本文获得实验工况正十四烷层流燃烧速度,所获实验数据能够用于验证正十四烷燃烧反应机理,并为进一步构建航空煤油燃烧反应机理,耦合机理对航空发动机燃烧过程进行 CFD 仿真计算提供前提。

4 结 论

本文在定容燃烧实验装置中完成正十四烷/空气预混气层流燃烧特性实验,分析初始温度和当量比对其层流燃烧速度和马克斯坦长度的影响,得出如下结论:

1) 随着初始温度和当量比增加,火焰发展图片仍保持清晰光滑边缘,说明初始温度和当量比增加对正十四烷燃烧稳定性影响不大,没有导致火焰内部出现裂纹或胞状结构。

2) 初始温度增加能够加快火焰传播速度,促进火焰锋面形成。对比初始温度在当量比为 0.9、1.1 和 1.3 工况下作用效果发现,其影响在稀混合气时更为明显。

3) 正十四烷/空气预混气由稀到浓变化时,马克斯坦长度减小,火焰稳定性变差。另外,随着初始温度增加,马克斯坦长度减小,说明初始温度增加会导致火焰稳定性变差。

4) 正十四烷/空气预混气层流燃烧速度在当量比为 1.1 时出现峰值,且随着初始温度增加而增加。与 RP-3 航空煤油层流燃烧速度对比发现,正十四烷层流燃烧速度整体偏高。

参考文献:

- [1] 马洪安,解茂昭,曾文,等.航空发动机燃烧室燃烧过程与排放物生成的反应动力学数值模拟[J].航空动力学报,2013,28(2):297-306.
MA Hongan,XIE Maozhao,ZENG Wen,et al. Reaction kinetic numerical simulation of combustion process and emission formation in aero-engine combustor[J]. Journal of Aerospace Power,2013,28(2):297-306. (in Chinese)
- [2] 蔡文祥,赵坚行,胡好生,等.数值研究环形回流燃烧室紊流燃烧流场[J].航空动力学报,2010,25(5):993-998.
CAI Wenxiang,ZHAO Jianxing,HU Haosheng,et al. Numerical research of turbulent combustion in reversed-type annular combustor[J]. Journal of Aerospace Power,2010,25(5):993-998. (in Chinese)
- [3] 肖保国,杨顺华,赵慧勇,等. RP-3 航空煤油燃烧的详细和简化化学动力学模型[J].航空动力学报,2010,25(9):1948-1955.
XIAO Baoguo,YANG Shunhua,ZHAO Huiyong,et al. Detailed and reduced chemical kinetic mechanisms for RP-3 aviation kerosene combustion[J]. Journal of Aerospace Power,2010,25(9):1948-1955. (in Chinese)
- [4] 郑东,于维铭,钟北京. RP-3 航空煤油替代燃料及其化学反应动力学模型[J].物理化学学报,2015,31(4):636-642.
ZHENG Dong,YU Weiming,ZHONG Beijing. RP-3 aviation kerosene surrogate fuel and the chemical reaction kinetic model[J]. Acta Physico-Chimica Sinica,2015,31(4):636-642. (in Chinese)
- [5] 戴超,王亚军,颜应文,等.一种基于敏感性分析的 RP-3 替代燃料简化机理[J].南京航空航天大学学报,2015,47(4):579-587.
DAI Chao,WANG Yajun,YAN Yingwen,et al. Reduced mechanism of surrogate fuel for RP-3 kerosene based on sensitivity analysis[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2015,47(4):579-587. (in Chinese)
- [6] CHARLES K W, WILLIAM J P, OLIVIER H, et al. A comprehensive detailed chemical kinetic reaction mechanism for combustion of *n*-alkane hydrocarbons from *n*-octane to *n*-hexadecane[J]. Combustion and Flame,2009,156(1):181-199.
- [7] 刘建文,姚通,钟北京,等.正十四烷低温点火及燃烧机理的构建和简化[J].推进技术,2017,38(1):119-124.
LIU Jianwen,YAO Tong,ZHONG Beijing,et al. Development and reduction of *n*-tetradecane mechanism for low temperature ignition and combustion[J]. Journal of Propulsion Technology,2017,38(1):119-124. (in Chinese)
- [8] SHEN H S, STEINBERG J, VANDEROVER J, et al. A shock tube study of the ignition of *n*-heptane, *n*-decane, *n*-dodecane, and *n*-tetradecane at elevated pressures[J]. Energy and Fuels,2009,23(5):2482-2489.
- [9] CAVALIERE A, CIAJOLO A, D'ANNA A, et al. Autoignition of *n*-heptane and *n*-tetradecane in engine-like conditions[J]. Combustion and Flame,1993,93(3):279-286.
- [10] ZENG M R, YUAN W H, LI W, et al. A comprehensive experimental and kinetic modeling study of *n*-tetradecane combustion[J]. Energy and Fuels,2017,31(11):12712-12720.
- [11] LI B, LIU N, ZHAO R, et al. Flame propagation of mixtures of air with high molecular weight neat hydrocarbons and practical jet and diesel fuels[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2013,34(1):727-733.
- [12] MZÉ-AHMED A, DAGAUT P, DAYMA G, et al. Experimental study of the oxidation of *n*-tetradecane in a jet-stirred reactor (JSR) and detailed chemical kinetic modeling[J]. Combustion Science and Technology,2014,186(4/5):594-606.
- [13] HU E J, HUANG Z H, HE J J, et al. Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane/hydrogen/air flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2009,34(11):4876-4888.
- [14] ZENG W, LIU J, LIU Y, et al. The effect of hydrogen addition on the combustion characteristics of RP-3 kerosene/air premixed flames[EB/OL]. [2020-02-04]. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.041>

org/10.3390/en10081107.

[15] HUANG Z,WANG Q,YU J,et al. Measurement of laminar burning velocity of dimethyl ether-air premixed mixtures[J]. Fuel,2007,86(15):2360-2366.

[16] BURKE M P,CHEN Z,JU Y G,et al. Effect of cylindrical confinement on the determination of laminar flame speeds using outwardly propagating flames[J]. Combustion and Flame,2009,156(4):771-779.

[17] BRADLEY D,HICKS R A,LAWES M,et al. The measurement of laminar burning velocities and Markstein lengths for iso-octane/air and iso-octane/*n*-heptane/air mixtures at elevated temperatures and pressures in an explosion bomb[J]. Combustion and Flame,1998,115(1):126-144.

[18] FRANKEL M L,SIVASHINSKY G I. On effects due to thermal expansion and Lewis number in spherical flame propagation[J]. Combustion Science and Technology,1983,31(3/4):131-138.

[19] 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.

[20] 刘宇,孙震,汤卓,等. 初始温度对 CH₄/RP-3 航空煤油混合燃料层流燃烧特性的影响[J]. 航空动力学报,2019,34(2):348-356.

LIU Yu,SUN Zhen,TANG Zhuo,et al. Effects of initial temperature on the laminar combustion characteristics of CH₄/RP-3 mixed fuel[J]. Journal of Aerospace Power,2019,34(2):348-356. (in Chinese)

(编辑:王碧珺)