

【航空科学与工程研究】

RP-3 航空煤油/ O_2 预混火焰不稳定性研究王恩庆¹, 饶大为², 刘晓振³, 王鹏², 刘宇², 曾文²

1. 四川燃气涡轮研究院, 四川 成都 610500;

2. 沈阳航空航天大学 辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室, 辽宁 沈阳 110136;

3. 山东航空学院 航空发动机研究所, 山东 滨州 256603)

摘要:为获得 RP-3 航空煤油不稳定燃烧特性, 采用定容燃烧实验装置开展初始压力 0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa, 初始温度 420 K、450 K、480 K, 当量比 1.0~1.7 工况下 RP-3 航空煤油/ O_2 预混火焰层流燃烧特性的实验研究。结果表明:随着初始压力和当量比增加, 火焰锋面明显由光滑变为褶皱, 内部出现胞状结构, 火焰趋于不稳定。通过分析过渡加速起始半径发现, 随着初始温度、初始压力和当量比增加, 过渡加速起始半径减小, 预混火焰的不稳定现象提前。另外, 计算扰动增长率并分析其对火焰稳定性的影响发现, 质热扩散作用对火焰稳定性的影响占据主导地位, 流体动力学作用其次。进一步研究发现, 质热扩散作用主要取决于分子扩散项, 随着当量比增加, 其值由负向正变化, 证明分子扩散作用对预混火焰不稳定影响逐渐增强。

关键词:RP-3 航空煤油; 不稳定燃烧; 过渡加速起始半径; 质热扩散作用; 流体动力学作用

中图分类号: V 231

文献标识码: A

DOI:10.13486/j.cnki.1673-2618.2024.02.002

0 引言

燃烧不稳定现象常发生于燃气轮机、航空发动机和火箭发动机等燃烧装置当中, 发生时伴随着大幅度的压力脉动, 严重威胁发动机的稳定运行及结构安全^[1-2]。为满足航空发动机动力性、经济性及排放需求, 专家提出了许多先进燃烧技术, 包括贫燃预混、分层和预蒸发燃烧技术等^[3-4]。航空发动机燃烧室内温度、压力极高, 较小扰动便能引起较大压力脉动, 当采用贫燃预混等先进燃烧技术时, 容易表现出剧烈的燃烧不稳定现象, 给发动机的稳定运行带来危害。因此, 在先进发动机燃烧室设计和研制过程中, 亟须对燃烧不稳定机理及其影响因素进行分析。然而, 由于燃烧不稳定是非常复杂的多物理化学耦合过程, 其机理和影响因素仍不清晰, 在现阶段需要通过研究火焰不稳定去认识燃烧不稳定机理。

在层流火焰中, 火焰不稳定性及其自加速性是研究火焰动力学的一个重要课题。张宁等^[5]通过乙醇预混火焰的数值模拟研究发现, 质热扩散不稳定性占据主导地位, 且随着当量比增加, 其影响发生显著变化。暴秀超等^[6]采用定容燃烧装置对氢气火焰胞状不稳定性及自加速特性进行了研究, 结果表明, 随着初始压力的增大, 不稳定性增强。胞状火焰会出现自加速, 而稳定火焰不会出现自加速。火焰加速现象在胞状结构均匀分布于火焰面后便会出现, 加速起始点与火焰临界半径一致。起始点过后, 火焰的传播速度随

收稿日期: 2023-12-24

基金项目: 辽宁省教育厅面上基金项目(LJKZ0181); 辽宁省科学技术计划项目(2022-KF-13-01)

第一作者简介: 王恩庆(1989-), 男, 甘肃武威人, 工程师, 硕士, 从事航空燃料燃烧特性及燃烧反应机理研究。

E-mail: 568779157@qq.com

时间增加而不断加速。Zhao 等^[7]对合成气球形膨胀火焰的胞状不稳定性及自加速进行了研究,结果表明,胞状不稳定性及相似加速是质热扩散不稳定、流体动力学不稳定及火焰拉伸作用的综合结果。RP-3 航空煤油是我国军用和民用的通用航空燃料,随着我国航空工业的快速发展,许多学者对其燃烧特性进行了大量的研究。曾文等^[8]在定容燃烧弹中测量了 RP-3 航空煤油的层流燃烧速度,初始压力为 0.1 MPa、0.3 MPa、0.5 MPa、0.7 MPa,初始温度为 390 K、420 K、450 K,当量比(ϕ)为 0.6~1.6 时,分析初始温度、初始压力和当量比等因素对火焰发展结构的影响。张鑫炜^[9]等在流动反应器中对压力 0.1 MPa、3.0 MPa,温度范围 550~1200 K,当量比 0.5、1.0、2.0 条件下 RP-3 航空煤油/O₂ 的氧化特性进行了试验测试;同时,在激波管中对初始压力为 0.2 MPa、1.0 MPa、5.0 MPa,温度范围 950~1500 K,当量比 0.8、3.5 条件下 RP-3 航空煤油/O₂ 的着火延迟特性进行了试验测试。结果表明,随着压力与温度的升高、当量比减小着火延迟时间逐渐缩短。

目前,学者们已对燃烧不稳定性进行了一定研究,但多集中在小分子碳氢燃料上,缺少对航空煤油等高碳数碳氢燃料燃烧不稳定性研究。基于此,本文拟采用定容燃烧实验装置对 RP-3 航空煤油/O₂ 预混火焰不稳定特性进行研究,获得拉伸火焰传播速度、过度加速起始点等特性参数,同时,分析热扩散、流体力学等因素对预混火焰不稳定性的影响。本研究有助于阐明 RP-3 航空煤油/O₂ 预混火焰不稳定性影响因素,为研究航空发动机燃烧室中的燃烧不稳定性提供一定的理论依据。

1 方法

1.1 实验装置

定容燃烧实验装置由定容燃烧弹(简称容弹)、进气系统、排气系统、控温装置、点火装置、光学测量系统等组成^[10]。图 1 为定容燃烧弹剖面图,RP-3 航空煤油点火及燃烧空间为直径 180 mm、高 180 mm 的圆柱,容弹两侧配有高透光石英玻璃视窗。实验中,O₂、Ar 由进气系统充入,燃烧后废气通过排气系统排出,对于液态 RP-3 燃料,可通过液体燃料注入阀注入定容燃烧弹内部。

实验前,首先根据 RP-3 航空煤油的平均分子式和 RP-3 航空煤油/O₂ 混合气当量比得到 RP-3、O₂ 和 Ar 的摩尔分数,获得混合气中各组分分压。由于 RP-3 航空煤油在室温下呈液态,因此,可用其密度计算体积。实验中,首先采用真空泵排出容弹内残余气体,然后依次充入 RP-3、O₂ 和 Ar。另外,还需采用温度控制装置将 RP-3 航空煤油/O₂ 混合气加热至初始温度。为确保混合气在点火时保持均匀、静止,先将充入容弹中的混合气静置 6 min,再将其点燃,点火同时触发高速摄像机对火焰发展过程进行拍摄。本文采用 Phantom V611 高速摄像机完成火焰拍摄工作,拍摄频率设定为 10 000 帧/s。实验中为了减少测量误差,每个工况实验至少重复 3 次。

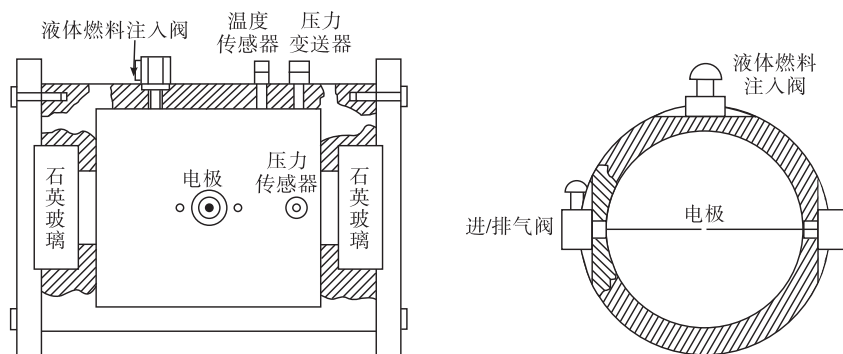


图 1 定容燃烧弹本体

1.2 测量方法

RP-3 航空煤油因产地和批次不同,其理化性质略有差别,经测量,本文所采用的 RP-3 航空煤油部分

理化特性如表 1 所示。

表 1 RP-3 航空煤油理化特性

特性参数	RP-3	特性参数	RP-3
分子式	C _{10.45} H _{19.595}	燃点/K	>698
分子量	145	十六烷值(vol)/%	42
密度(293 K)/(kg ³ ·m ⁻³)	806.0	碳(mass)/%	85.97
黏度(293 K)/(mm ² ·s ⁻¹)	≥1.25	氢(mass)/%	13.43
黏度(233 K)/(mm ² ·s ⁻¹)	≤8.0	氧(mass)/%	0
低热值/(MJ·kg)	42.8		

对于 $\phi=1$ 的混合气, RP-3 航空煤油与 O₂ 燃烧的一步化学反应方程式如下:



本文对初始压力 0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa, 初始温度 420 K、450 K、480 K, $\phi=1.0\sim 1.7$ 工况下 RP-3 航空煤油/O₂ 混合气的不稳定燃烧过程进行研究, 惰性气体 Ar 稀释度为 0.85。

根据 Bradley 的理论^[11], 对于球形扩散火焰, 观察到的火焰传播速度可用拉伸火焰速度表示, 其计算公式为

$$S_n = \frac{dr}{dt}.$$

式中, 瞬时平均火焰半径 $r = \sqrt{\frac{A_f}{\pi}}$, A_f 是火焰面的二维投影。为了减少点火和壁面的影响, 实验数据处理时通常选择火焰半径 6~25 mm。

火焰拉伸率 κ 表示火焰面拉伸作用对火焰传播过程的影响, 其值是 A_f 的对数对时间求导, 即

$$\kappa = \frac{d \ln A_f}{dt} = \frac{dA_f}{A_f dt}. \quad (1)$$

由于在定容燃烧弹中扩散火焰呈近球形, 因此, κ 也可以写成

$$\kappa = \frac{2dr}{dt} = \frac{2S_n}{r}. \quad (2)$$

采用线性或非线性方法^[12-16]对 $S_n-\kappa$ 曲线进行拟合, 外推至 $\kappa=0$ 处得到无拉伸火焰速度 S_l 。相关研究表明^[17], 对于 RP-3 航空煤油高碳数碳氢燃料实验数据的处理, 采用

$$S_n = S_l - \frac{2S_l L_b}{r}$$

的非线性方法优于其他方法。

2 结果与讨论

2.1 火焰传播特性

图 2 给出了初始压力 0.2 MPa、初始温度 450 K、 $\phi=1.0\sim 1.7$ 工况下 RP-3 航空煤油/O₂ 预混火焰的传播图片。如图所示, 球形火焰首先在定容燃烧弹中心形成, 然后迅速向外扩散。对比 $t=15.2$ ms 时刻火焰半径发现, $\phi=1.2$ 工况的火焰半径最大, 说明此工况下火焰传播速度最快。另外, 所有当量比工况下球形火焰的边缘均清晰可见, 但随着 ϕ 增加, 尤其是当 $\phi>1.2$ 时, 火焰锋面观察到明显的褶皱和胞状结构, 说明随着 ϕ 增加, 火焰趋于不稳定。

图 3 给出了初始压力 0.2 MPa, 初始温度 420 K、450 K、480 K, $\phi=1.3$ 工况下 RP-3 航空煤油/O₂ 预

混火焰的传播图片。如图所示,所有工况下的球形扩散火焰均不稳定, $t=20.2$ ms 时刻火焰表面呈现大量胞状结构,且随着初始温度的升高,火焰传播速度变快。

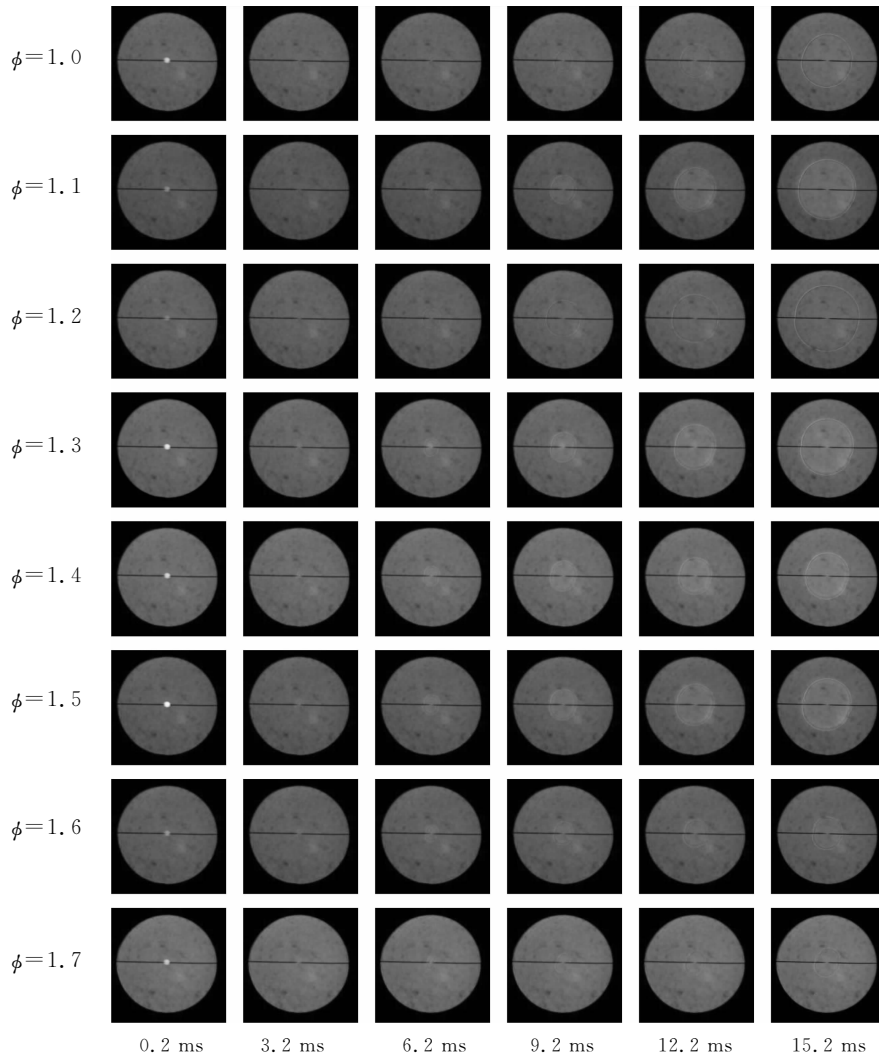


图 2 火焰发展图片 ($T=450$ K, $P=0.2$ MPa)

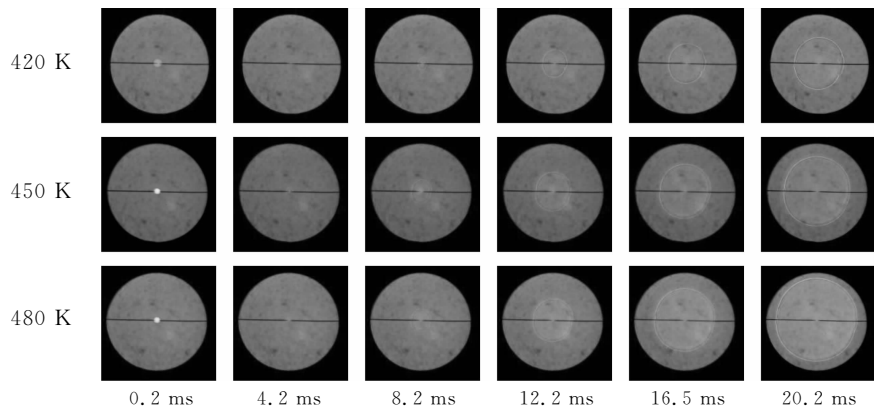


图 3 火焰发展图片 ($P=0.2$ MPa, $\phi=1.3$)

图 4 给出了初始压力 0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa, 初始温度 450 K, $\phi=1.3$ 工况下 RP-3 航空煤油/ O_2 预混火焰的传播图片。随着初始压力的增加,火焰锋面明显由光滑变为褶皱,在初始压力 0.2 MPa 和

0.3 MPa 工况时, 火焰内部呈现细小且均匀的细胞结构, 这意味着压力的增加导致了火焰表面的不稳定。

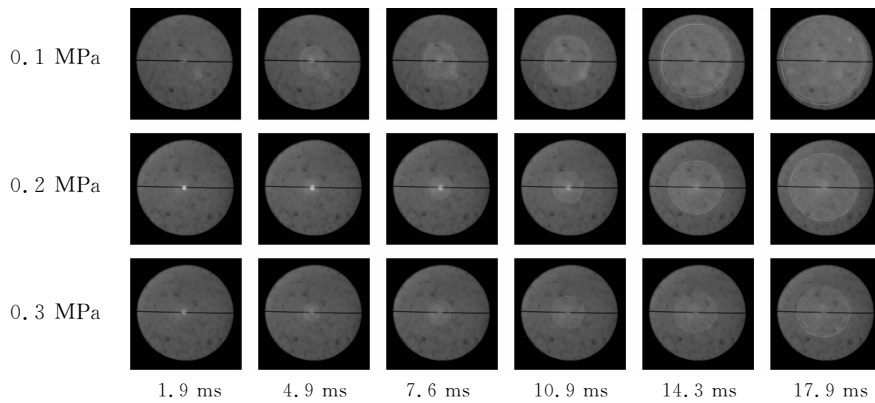


图 4 火焰发展图片 ($T=450\text{ K}, \phi=1.3$)

2.2 拉伸火焰传播速度

图 5 给出了初始温度 450 K, 初始压力 0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa, $\phi=1.0\sim 1.7$ 工况下 RP-3 航空煤油/O₂ 预混火焰拉伸火焰传播速度随火焰拉伸率的变化规律。由公式(1)(2)可知, 随着球形扩散火焰从容弹中心向壁面传播, 火焰拉伸速率逐渐减小。拉伸火焰传播速度呈现三种变化趋势: ①随着火焰拉伸率的减小先增加后降低; ②随着火焰拉伸率的减小呈现准线性增加或降低的趋势, 但增加或降低幅度较小; ③随着火焰拉伸率的减小先降低后增加。在不同初始压力工况下, 当 ϕ 较低时, 火焰传播速度变化趋势倾向于①, 而当 ϕ 较高时, 火焰传播速度变化趋势倾向于③; 随着初始压力的增加, 火焰传播速度随火焰拉伸率减小的变化趋势也倾向于③。在三种变化趋势中, ③出现了明显的拐点, 说明当球形扩散火焰传播到一定距离后, 出现明显加速。综上, 高初始压力和高 ϕ 工况下, RP-3 航空煤油/O₂ 预混火焰加速特性明显。

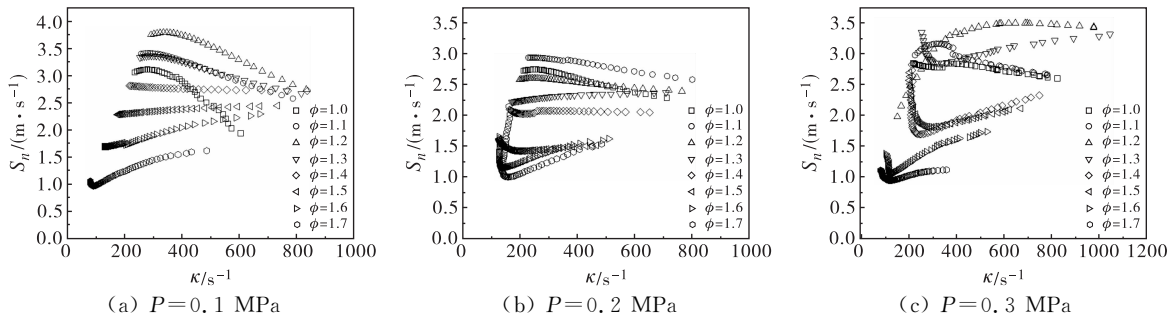


图 5 拉伸火焰传播速度随拉伸率变化趋势 ($T=450\text{ K}$)

图 6 给出了初始压力 0.2 MPa, 初始温度 420 K、450 K、480 K, $\phi=1.0\sim 1.7$ 工况下 RP-3 航空煤油/O₂ 预混火焰拉伸火焰传播速度随火焰拉伸率的变化规律。

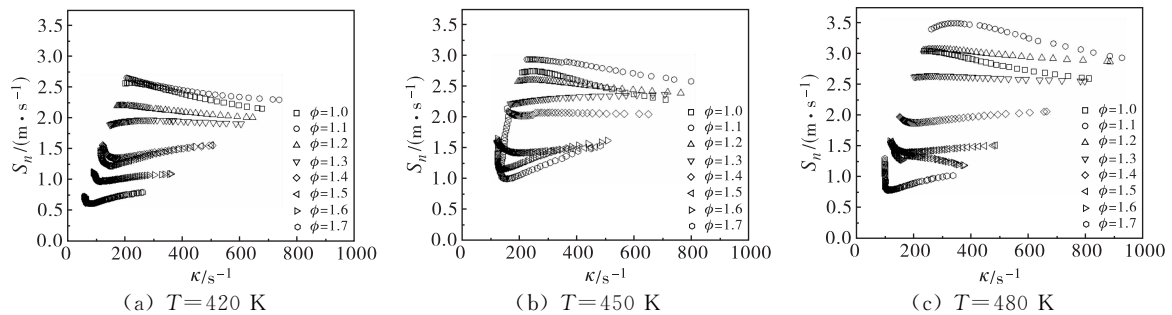


图 6 拉伸火焰传播速度随拉伸率变化趋势 ($P=0.2\text{ MPa}$)

如图所示, 拉伸火焰传播速度呈现的三种变化趋势不受初始温度的影响, 拉伸火焰传播速度在 $\phi =$

1.4~1.7 工况下都观察到随着火焰拉伸率减小先降低后增加的变化趋势。对比初始温度 420 K 和 450 K 工况下曲线拐点对应的拉伸率发现,随着初始温度的增加,拐点对应的拉伸率略有增加。对于球形扩散火焰来说,半径越小,拉伸率越大。图 6 说明随着初始温度增加,扩散火焰在更小半径下出现了不稳定现象。

2.3 过度加速起始点

关于火焰胞状结构起始点的定义大约有三种方式:裂纹分支、均匀胞状结构和过渡加速起始点。裂纹分支起始点是指火焰面受扰动后失去稳定开始产生大裂纹的时刻,均匀胞状结构起始点是指大裂纹发展成胞状结构,并均匀分布在火焰表面的时刻。裂纹分支和均匀胞状结构起始点的定义需要通过肉眼观察火焰传播图片来确定,无法进行量化,因此许多学者采用了便于量化的过渡加速起始点分析火焰胞状不稳定性^[6-7]。如图 4、图 5 所示,拉伸火焰传播速度曲线中拐点位置被定义为过渡加速起始点(高 ϕ 下拐点更为明显),对应的火焰半径被定义为过渡加速起始半径。

图 7(a)和(b)分别给出了初始压力 0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa,初始温度 450 K, $\phi=1.0\sim 1.7$ 工况以及初始压力 0.2 MPa,初始温度 420 K、450 K、480 K, $\phi=1.0\sim 1.7$ 工况下 RP-3 航空煤油/O₂ 预混火焰过渡加速起始半径随 ϕ 变化趋势。如图 7(a)所示,随着 ϕ 和初始压力增加,过渡加速起始半径减小,说明预混火焰较早出现了裂纹、胞状结构等不稳定现象。火焰过渡加速起始半径的减小说明随着 ϕ 和初始压力增加,预混火焰趋于不稳定。如图 7(b)所示,从初始温度对过渡加速起始半径的影响来看,随着初始温度的增加,过渡加速起始半径减小,预混火焰趋于不稳定,但与初始压力相比,其对过渡加速起始半径影响并不显著,尤其当初始温度从 450 K 增加至 480 K 时,影响极小。

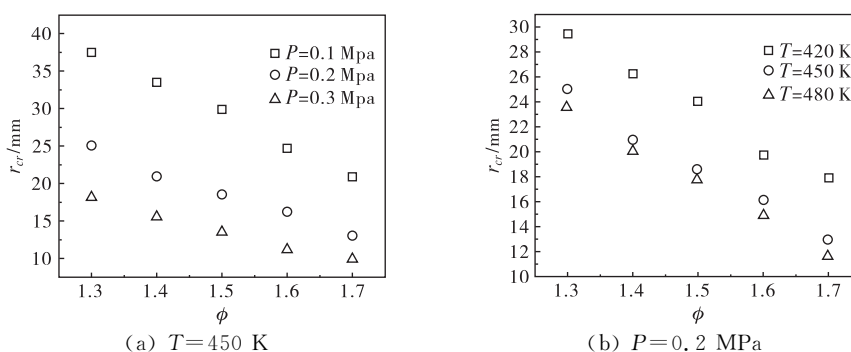


图 7 火焰过渡加速起始半径随 ϕ 变化趋势

2.4 火焰不稳定性分析

为了定性研究 RP-3 航空煤油预混火焰不稳定性问题,采用线性理论获得火焰表面无量纲扰动增长率 \bar{A} ,计算公式如下^[18]:

$$\bar{A} = \omega - \frac{\Omega}{Pe}, \tag{3}$$

$$\omega = [a - b + \sqrt{(b-a)^2 - 4ac}] / 2a, \tag{4}$$

$$\Omega = B_1 + \frac{Ze(Le_{eff} - 1)}{\sigma - 1} B_2.$$

式中: ω 为流体动力学不稳定性项; $-\frac{\Omega}{Pe}$ 为质热扩散不稳定性项; a, b, c 为无量纲中间量; B_1 和 B_2 分别为热扩散项和分子扩散项的系数; σ 为热扩散率; Le_{eff} 为有效刘易斯数; Ze 为泽尔多维奇数,是化学反应过程中的无量纲的全局活化能; Pe 为佩克莱数,是一个无量纲数。

通过式(4)理论计算得到的扰动对数增长率,其正值和负值可分别代表火焰的稳定和不稳定状态。当扰动对数增长率为零时,得到的 Pe 为临界佩克莱数,相应的可以得到一个临界波数 n_c 。图 8 分别给出了初始压力 0.2 MPa、初始温度 450 K、 $\phi=1.0\sim 1.7$ 工况;初始压力 0.2 MPa,初始温度 420 K、450 K 和

480 K, $\phi=1.3$ 工况; 初始压力 0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa, 初始温度 450 K, $\phi=1.3$ 工况下, RP-3 航空煤油/O₂ 预混火焰佩克莱数 Pe 的半岛结构。图 8 中, 被半岛包围的地方代表不稳定区域, 而半岛以外的地方代表稳定区域, 半岛顶部对应的值被定义为临界佩克莱数 Pe_{cr} 。如图 8(a) 所示, 随着 ϕ 增加, 引起火焰胞状不稳定的波数范围增大, 同时, 临界佩克莱数变小, 临界佩克莱数所对应的临界波数略有降低(基本在 10 左右), 当 $Pe > 1500$ 时, 对应波数的下分支基本重叠, 说明随着 ϕ 增加, 火焰不稳定性主要受到质热扩散效应影响。另外, 如图 8(b) 和 (c) 所示, 与 ϕ 相比, 初始压力和温度对 $n-Pe$ 曲线及临界佩克莱数的影响并不明显。

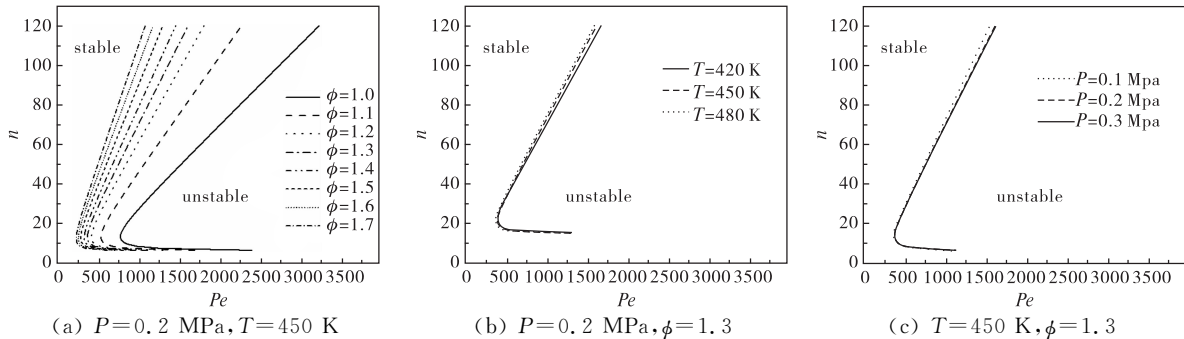


图 8 胞状不稳定的半岛结构

火焰胞状结构是流体动力学和质热扩散作用综合影响所致。为确定哪一因素占主导地位, 图 9 给出了在初始压力 0.2 MPa、初始温度 450 K、 $\phi=1.0\sim 1.7$ 工况下, 公式 (3) 中各项随 ϕ 的变化趋势。流体动力学参数 ω 取决于热膨胀率 σ , 质热扩散作用参数 $-\Omega/Pe$ 取决于 $-B_1/Pe$ 和 $-Ze(Le_{eff}-1)B_2/[Pe(\sigma-1)]$ 。 $-B_1/Pe$ 和 $-Ze(Le_{eff}-1)B_2/[Pe(\sigma-1)]$ 分别代表热扩散作用和分子扩散作用。其中, 对分子扩散起关键作用的参数是有效路易斯数 Le_{eff} 。图 9 中所有数据均在 $Pe=236.1406, n=13$ 的临界条件下计算得到。

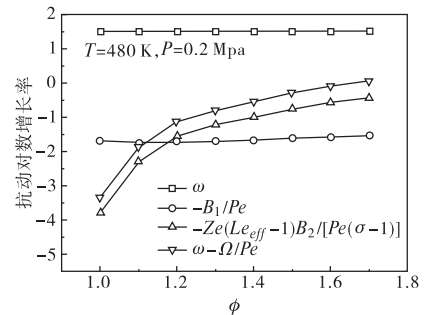


图 9 扰动对数增长率中各项值随当量比的变化趋势

从图 9 可以看出, 在整个 ϕ 范围内, ω 和 $-B_1/Pe$ 随着 ϕ 的增加变化很小。 ω 值为正, 说明流体动力学作用在 $\phi=1.0\sim 1.7$ 内均促使火焰不稳定。 $-B_1/Pe$ 值为负, 说明热扩散作用在 $\phi=1.0\sim 1.7$ 内促进火焰稳定。与 ω 和 $-B_1/Pe$ 不同, $-Ze(Le_{eff}-1)B_2/[Pe(\sigma-1)]$ 对 ϕ 较为敏感, 随着 ϕ 增加, 该项绝对值逐渐减小, 尤其在 $\phi=1.0\sim 1.2$ 时, 减小尤为明显, 当 ϕ 增加至 1.7 后, 其绝对值逐渐趋于 0, 说明随着 ϕ 增加, 分子扩散项对火焰稳定性起到主导作用, 分子扩散作用的变化是导致火焰不稳定的主要原因。如图 9 所示, 在流体动力学和质热扩散综合作用下, 当 $\phi < 1.6$ 时, 增长率为负值, 而当 $\phi > 1.6$ 时, 增长率为正值, 增长率由负值向正值的转变说明随着 ϕ 增加, RP-3 航空煤油/O₂ 预混火焰逐渐趋于不稳定。

3 结论

采用定容燃烧实验装置对初始压力 0.1 MPa、0.2 MPa 和 0.3 MPa, 初始温度 420 K、450 K 和 480 K, $\phi=1.0\sim 1.7$ 工况下 RP-3 航空煤油/O₂ 预混火焰进行了实验研究, 分析其胞状不稳定性特性。(1) 随着初始压力和 ϕ 增加, 预混火焰不稳定性明显增强。当 ϕ 增至 1.3 时, 各初始温度、初始压力工况下预混火焰均已不稳定。(2) 随着初始压力和初始温度的增加, 过渡加速起始半径减小, 预混火焰趋于不稳定。与初始温度相比, 初始压力变化对过渡加速起始半径影响更为显著。(3) 随着 ϕ 增加, 临界佩克莱数减小, 说明火焰趋于不稳定。另外, 不同工况半岛结构下分支基本重叠, 说明火焰不稳定性主要受到质热扩散效应

影响。(4)分析对数增长率中各项随 ϕ 变化可知,代表质热扩散作用的分子扩散项对 ϕ 变化较为敏感,是导致火焰不稳定的主要因素。

参考文献:

- [1] O'CONNOR J, VISHAL A, TIMOTHY L. Transverse combustion instabilities: acoustic, fluid mechanic, and flame processes[J]. *Progress in energy and combustion science*, 2015, 49: 1-39.
- [2] 仝照旭, 韩启祥. 钝体火焰稳定器后燃烧不稳定数值模拟[J]. *航空发动机*, 2023, 49(1): 81-88.
- [3] 赵坚行. 民用发动机污染排放及低污染燃烧技术发展趋势[J]. *航空动力学报*, 2008(6): 986-996.
- [4] 张弛, 林宇震, 徐华胜, 等. 民用航空发动机低排放燃烧室技术发展现状及水平[J]. *航空学报*, 2014, 35(2): 332-350.
- [5] 张宁, 张帆, 钟生辉, 等. 乙醇预混火焰胞状不稳定性的数值模拟和理论研究[J]. *内燃机工程*, 2020, 41(2): 25-31.
- [6] 暴秀超, 刘福水, 张正芳. 不同初始压力下氢气燃烧的胞状不稳定性及自加速性[J]. *燃烧科学与技术*, 2014, 20(1): 38-43.
- [7] ZHAO H, WANG J, BIAN Z, et al. Onset of cellular instability and self-acceleration propagation of syngas spherically expanding flames at elevated pressures[J]. *International journal of hydrogen energy*, 2019, 44(51): 27995-28006.
- [8] 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.
- [9] 张鑫炜, 曾文, 胡斌, 等. RP-3 航空煤油/O₂ 的氧化与着火特性研究[J]. *航空动力学报*, 1-9[2023-12-10]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20220381>.
- [10] 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.
- [11] BRADLEY D, HICKS R A, LAWES M, et al. The measurement of laminar burning velocities and Markstein numbers 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(1/2): 126-144.
- [12] WU C K, LAW C K. On the determination of laminar flame speeds from stretched flames[J]. *Symposium (International) on combustion*, elsevier, 1985, 20(1): 1941-1949.
- [13] MARKSTEIN G H. Experimental and theoretical studies of flame-front stability[J]. *Dynamics of curved fronts*, 1988: 413-423.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] KELLEY A P, LAW C K. Nonlinear effects in the extraction of laminar flame speeds from expanding spherical flames[J]. *Combustion and flame*, 2009, 156(9): 1844-1851.
- [17] LIU Y, GU W, WANG J D, et al. Laminar burning velocity of microalgae oil/RP-3 premixed flame at elevated initial temperature and pressure[J]. *Fuel*, 2022, 309: 122081.
- [18] MATALON M. Intrinsic flame instabilities in premixed and nonpremixed combustion[J]. *Annual review of fluid mechanics*, 2007, 39: 163-191.

Study on the Instability of RP-3 Aviation Kerosene/O₂ Pre-mixed Flame

WANG Enqing¹, RAO Dawei², LIU Xiaozhen³, WANG Peng², LIU Yu², ZENG Wen²

(1. *Sichuan Turbine Research Institute, Chengdu 610500, China;*

2. *Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technique for Aviation Propulsion System, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;*

3. *Aero Engine Research Institute, Shandong University of Aeronautics, Binzhou 256603, China)*

Abstract: In order to obtain the unstable combustion characteristics of RP-3 aviation kerosene, experiments are carried out in a constant volume chamber to study the unstable combustion process of RP-3/O₂ premixed flame at initial pressures of 0.1 MPa, 0.2 MPa and 0.3 MPa, initial temperatures of 420 K, 450 K and 480 K and over a wide equivalence ratio range from 1.0 to 1.7. Results show that with the increase of initial pressure and equivalence ratio, the flame front obviously changes from smooth to folded, and cellular structure appears inside, which indicates that the flame tends to be unstable. The study on initial radius of transition acceleration indicates that with the increase of initial temperature, initial pressure and equivalence ratio decreases, which means that the instability of premixed flame is advanced. By calculating the disturbance growth rate and analyzing its influence on flame stability, it is found that the effect of mass and heat diffusion on flame stability is dominant, and the effect of hydrodynamics is secondary. The mass-thermal diffusion mainly depends on the molecular diffusion term. With the increase of the equivalence ratio, its value changes from negative to positive, which indicates that the molecular diffusion has an enhanced effect on the instability of premixed flame.

Keywords: RP-3 aviation kerosene; unstable combustion; initial radius of transition acceleration; mass-thermal diffusion; hydrodynamics

(责任编辑: 唐立平)