

# 合成气层流预混火焰加速效应实验研究

赵浩然<sup>1</sup>, 李刚<sup>1</sup>, 王金华<sup>2</sup>, 黄佐华<sup>2</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 利用定容燃烧弹可视化实验平台对合成气层流预混火焰加速效应开展了系统研究. 通过调整混合气的当量比和氧氮体积比实现自身不稳定性的解耦控制, 在此基础上研究了火焰加速阶段、临界点和火焰加速因子. 层流预混火焰的加速传播过程呈现出明显的准稳态、过渡态加速、饱和态加速3个阶段. 4种临界点的先后顺序为: 裂纹分裂临界点 $\approx$ 过渡态加速临界点 $<$ 均匀细胞化临界点 $\approx$ 饱和态加速临界点. 饱和态加速阶段的加速因子数值在1.1~1.2之间, 并未与Lewis数和密度比呈现出明显的依赖关系. 结果表明, 火焰自身不稳定性对层流火焰的加速临界点有显著促进作用, 但并不会影响饱和态阶段的火焰加速强度.

**关键词:** 火焰加速传播; 临界点; 加速因子; 层流预混火焰; 合成气

中图分类号: TK 91 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)09-1334-08

## Experimental Study on Accelerative Characteristics of Syngas Laminar Premixed Flames

ZHAO Hao-ran<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1</sup>, WANG Jin-hua<sup>2</sup>, HUANG Zuo-hua<sup>2</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China. Corresponding author: ZHAO Hao-ran, E-mail: zhaohaoran@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** A systematic investigation on accelerative characteristics of syngas laminar premixed flames is conducted using the visual experimental platform of constant volume combustion chamber. The decoupling control of self-instability is realized by adjusting the equivalence ratio and oxygen-nitrogen ratio of gas mixture, allowing for an analysis of flame acceleration stages, onsets, and acceleration exponents. Three distinct stages of laminar flame propagation outwardly are identified, namely quasi-steady, transitional acceleration, and saturated acceleration. The order of four onsets is as follows: crack branching $\approx$ transitional acceleration $<$ uniform cellularity $\approx$ saturated acceleration. The acceleration exponents in saturated acceleration stage are in the range of 1.1~1.2, showing independent on Lewis number and density ratio. The results indicate that the flame intrinsic instability can have a significant promotion on the onset of laminar flame acceleration, while it does not affect the flame acceleration strength in saturated acceleration stage.

**Key words:** flame accelerative propagation; onset; acceleration exponent; laminar premixed flames; syngas

在“双碳”背景下,氢能具有广阔的应用前景,但由于宽广的着火极限和极快的燃烧速度,实际设备中的纯氢燃烧依然存在技术问题.鉴于此,可使用富氢燃料作为过渡方式.合成气是一种典型的富氢燃料,主要成分是CO和H<sub>2</sub>,广泛用于整体煤气化联合循环(IGCC),同时是内燃

机、燃气轮机和工业燃烧器的潜在燃料<sup>[1-2]</sup>.然而,合成气在预混稀燃条件下常常会出现胞状不稳定性,进而发生火焰加速现象.特别是在高掺氢比条件下,由于H<sub>2</sub>的优先扩散作用和极快的层流燃烧速度,火焰加速现象将会更为显著.火焰加速效应会造成燃烧室的热释放率和压力升

收稿日期: 2023-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52406126); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2301024); 辽宁省自然科学基金资助项目(2024-BSBA-25); 建龙集团-东北大学青年科技创新基金资助项目(2023012600001).

作者简介: 赵浩然(1994-),男,辽宁朝阳人,东北大学讲师,博士; 李刚(1969-),男,河南信阳人,东北大学教授,博士生导师.

高率明显增大,给实际燃烧设备的热管理和安全运行带来困难.因此,有必要针对合成气在稀燃条件下的胞状不稳定性和火焰加速效应开展基础研究.

关于层流预混火焰加速效应已经开展了大量实验研究,这些研究主要集中在临界点和加速因子方面.临界点表征胞状不稳定性和火焰加速发生的起始时刻.文献中常常出现4种临界点的定义:第1种是当火焰面由于点火扰动所造成的裂纹失去自相似性并开始发生分裂的临界点,称之为裂纹分裂临界点<sup>[3-5]</sup>.第2种是火焰面均匀布满胞状结构的临界点,称之为均匀细胞化临界点.由于均匀细胞化过程相对于裂纹分裂过程更加明显且迅速,在实验观察上较容易界定,既有文献中对此临界点的研究较多<sup>[6-9]</sup>.上述2种临界点都表征了火焰面形态的变化,判断上往往具有一定的主观性.第3种是火焰传播速度开始发生急剧增大的临界点,称之为过渡态加速临界点,该临界点可根据火焰传播速度随火焰半径的变化曲线获得.与前两者相比,尽管火焰传播速度的处理过程会带来一定误差,但该临界点的获取主观依赖更小,文献中研究的也最多<sup>[10-17]</sup>.最近,火焰加速传播过程被进一步划分,火焰传播速度在急剧增大一段时间后增大速率又会有所放缓,称其为饱和态加速阶段<sup>[18]</sup>.相应地,第4种临界点称之为饱和态加速临界点.文献中对此临界点开展了初步研究,但缺乏一致性结论<sup>[19-20]</sup>.尽管一些文献对火焰加速的临界点开展了研究,但由于临界点的定义不同,不同文献的实验结果往往难以统一,有关临界点的定量化拟合则更难以实现统一.在这种情况下,有必要对不同定义下的临界点开展系统的对比区分,并在此基础上明确火焰加速效应与火焰面胞状形态演化之间的关联性.

另外,当火焰加速发生时,火焰半径和传播时间之间近似呈幂函数关系,即 $R \sim t^\alpha$ .这里的幂指数 $\alpha$ 即为加速因子,用来表征火焰加速的快慢程度.根据分形维数假设,当层流传播火焰的加速因子数值到达1.5时,则可能发生自湍流状态转变<sup>[21]</sup>.目前基本认为层流火焰加速因子的数值范围是1~1.5,但加速因子的精确值依然难以确定,不同组的实验结果有较大差别<sup>[22-26]</sup>.一方面,随着火焰的向外传播,加速因子的数值会发生变化.过渡态加速阶段的加速因子随着火焰向外传播显著增大,饱和态加速阶段的加速因子则随着火焰半径几乎不发生变化,因而加速因子的提取结

果与半径范围密切相关.另一方面,加速因子是一个模型参数,对模型本身的依赖程度较大.文献中针对加速因子的提取发展了许多模型<sup>[23,27-29]</sup>,不同的模型会对加速因子的提取结果造成一定差别.由于加速因子本身的数值难以精确化,火焰自身不稳定性对加速因子的影响机制也尚未阐明.因此,有必要获取更多的加速因子实验数据并对其进行进一步分析.

综上,本文拟开展合成气层流预混火焰加速效应的实验研究.第一,获取火焰传播速度随火焰半径的变化规律,分析层流火焰加速传播的3个阶段变化过程;第二,分别获取4种定义下的临界点并对其进行区分,研究火焰自身不稳定性对临界火焰半径和临界Peclet数的影响,给出火焰加速临界点的经验拟合式;第三,评估加速因子提取模型,精确获取加速因子实验结果,并分析加速因子随火焰自身不稳定性的变化规律.

## 1 实验装置和工况

本研究中,合成气层流预混火焰的传播过程由定容燃烧弹结合高速纹影系统确定.实验设备主要由定容燃烧弹、进气系统、点火系统、加热系统、高速摄影系统和数据采集系统组成.燃烧弹呈柱形,内径为180 mm,内部长度为210 mm.2块直径80 mm的石英玻璃位居两侧作为光学窗口.燃烧弹外围缠绕功率为1.5 kW的加热带用于混合气的加热,并由Omega热电偶和数控表进行监测和控制.每次实验前,燃烧弹被加热到目标温度并抽真空.CO、H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>依次按分压法进气,压力主要由Rosemount压力表(最大量程1.03 MPa)进行监测.为了确保多种气体能够充分混合,进气完毕后等待10 min再进行点火.火焰传播过程由高速摄影仪Phantom V611记录,拍摄频率为10 000帧/s.实验获得的火焰传播纹影图像如图1所示,其中 $p$ 为压力, $\varphi$ 为当量比, $T_{ad}$ 为绝热火焰温度.

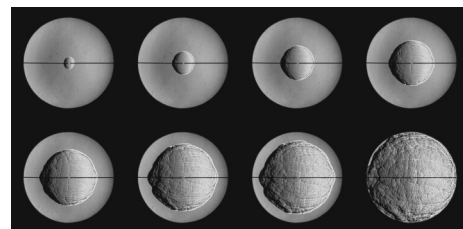


图1 火焰传播纹影图像( $p=0.3$  MPa,  $\varphi=0.8$ ,  $T_{ad}=2\ 000$  K)  
Fig. 1 Schlieren images of flame propagation  
( $p=0.3$  MPa,  $\varphi=0.8$ ,  $T_{ad}=2\ 000$  K)

实验分别选取体积分数为 35% 和 85% 的掺氢合成气,前者是合成气的典型组分,后者是为了研究高掺氢比的影响.为了使火焰加速现象更加明显,本实验中并未选择常温常压条件,而是将初始压力固定为 0.3 MPa 和 0.5 MPa,初始温度固定为 353 K.质热扩散不稳定性主要由热扩散和质扩散之间的非平衡性(Lewis 数)引起,与可燃混合气的当量比密切相关.流体动力学不稳定性主要由火焰面两侧的密度比引起,根据理想气体状态方程可知火焰面两侧的密度比取决于绝热火焰温度,后者与混合气中的氧氮体积比密切相关.因此,通过调整可燃混合气当量比和氧氮

体积比,可对 Lewis 数和密度比进行单独控制,从而在一定程度上实现质热扩散不稳定性和流体动力学不稳定性的解耦.层流火焰的相关参数由 Chemkin Pro 计算得到,选取的化学反应动力学模型由 Davis 等<sup>[30]</sup>提出,该模型为计算合成气火焰的经典动力学模型,已得到充分验证.具体的实验工况和相关火焰参数如表 1 所示.其中,有效 Lewis 数的计算公式为  $Le_{\text{eff}} = 1 + \frac{(Le_E - 1) + (Le_D - 1)A}{1 + A}$ ,  $Le_E, Le_D$  分别为充足反应物和不足反应物的 Lewis 数,  $A$  为混合气强度的表征参数,定义为  $A = 1 + Ze(\varphi - 1)$ ,  $Ze$  为泽尔多维奇数.

表 1 实验工况和相关参数  
Table 1 Experimental conditions and relative parameters

$V_{\text{CO}}/V_{\text{H}_2}$	$p/\text{MPa}$	$T/\text{K}$	$\varphi$	$T_{\text{ad}}/\text{K}$	$Le_{\text{eff}}$	$\sigma$	$Ma$
65/35	0.3	353	0.6~1.0	2 000	0.92~1.03	5.09	2.10~3.46
65/35	0.3	353	1.0	1 600~2 500	$\approx 1$	4.19~6.11	2.32~5.26
65/35	0.5	353	0.6~1.0	2 000	0.92~1.03	5.09	2.06~3.51
65/35	0.5	353	1.0	1 600~2 400	$\approx 1$	4.19~5.91	2.34~4.78
15/85	0.3	353	0.6~1.0	2 000	0.72~1.08	5.06	-0.93~4.11
15/85	0.3	353	1.0	1 600~2 400	$\approx 1$	4.18~5.88	2.12~5.94

注:  $T$ —初始温度,  $Le_{\text{eff}}$ —有效 Lewis 数,  $\sigma$ —密度比,  $Ma$ —Markstein 数.

## 2 结果与讨论

### 2.1 火焰传播阶段划分

图 2 是不同 Lewis 数和密度比下的火焰传播过程.其中,  $v_b$  是已燃区的火焰传播速度,  $\sigma$  是火焰面两侧的密度比,  $v_L$  是层流燃烧速度,因此  $v_b/(\sigma \cdot v_L)$  可认为是无量纲火焰传播速度.为了消除点火和燃烧弹腔体的影响<sup>[31-32]</sup>,选取 5~35 mm 半径( $R$ )范围进行研究.可以看到,在起始阶段  $v_b/(\sigma \cdot v_L)$  几乎保持不变甚至略有下降,该阶段称为准稳态阶段.随着火焰向外传播,在某一半径下突然发生转折,此时  $v_b/(\sigma \cdot v_L)$  开始发生急剧增长,火焰加速由此开始,该阶段称为过渡态加速阶段.之后,随着火焰继续向外传播,火焰加速阶段会发生二次转折,此时火焰加速趋势突然有所放缓,该阶段称为饱和态加速阶段.值得一提的是,在某些工况下(图 2b,  $\sigma=4.19$ )仅捕捉到准稳态阶段和过渡态加速阶段,而尚未观察到饱和态加速阶段.这是因为在该工况下火焰加速出现较晚,尽管其饱和态加速阶段依然存在,但已经超出当前的实验观察范围.此外,随着 Lewis 数的减小或密度比的增大,  $v_b/(\sigma \cdot v_L)$  数值也会相应地增大,

表明此时胞状不稳定性和火焰加速有所增强.

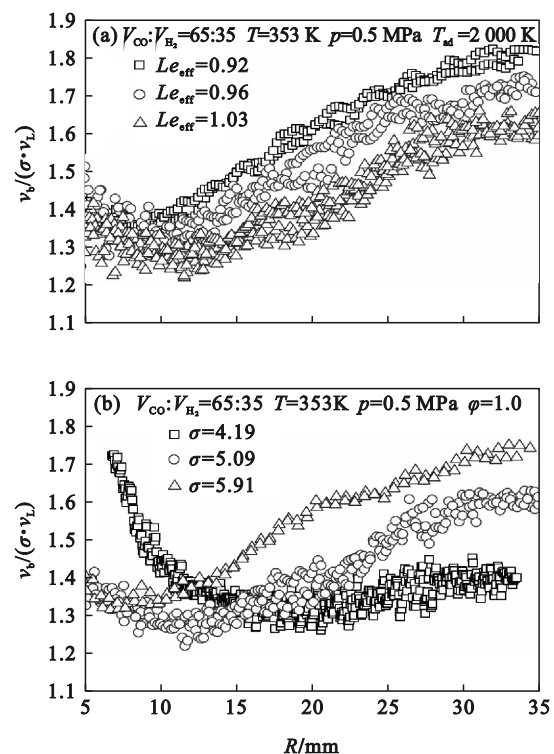


图 2 不同 Lewis 数和密度比下的火焰传播阶段  
Fig. 2 Flame propagation stages under different Lewis numbers and density ratios  
(a)—Lewis 数; (b)—密度比.

2.2 临界火焰半径

图 3 为不同有效 Lewis 数下的临界火焰半径. 控制绝热火焰温度为 2 000 K, 使得密度比几乎不变, 进而可认为将流体动力学不稳定性剥离出去, 单纯改变质热扩散不稳定性. 在这里,  $R_{cr1}$ ,  $R_{cr2}$ ,  $R_{cr3}$  和  $R_{cr4}$  分别代表裂纹分裂临界半径、均匀细胞化临界半径、过渡态加速临界半径和饱和态加速临界半径. 可以看到, 随着  $Le_{eff}$  数的减小, 4 种临界火焰半径均会相应减小. 此时非平衡质热扩散有所加强, 造成质热扩散不稳定性相应增强, 表明质热扩散不稳定性对火焰面胞状结构和火焰加速的促进作用. 对比图 3a 和图 3b, 可发现临界火焰半径随初始压力的增大而减小, 而对比图 3a 和图 3c, 可发现临界火焰半径随掺氢比的增大而减小. 这表明高压和高掺氢比下胞状不稳定性

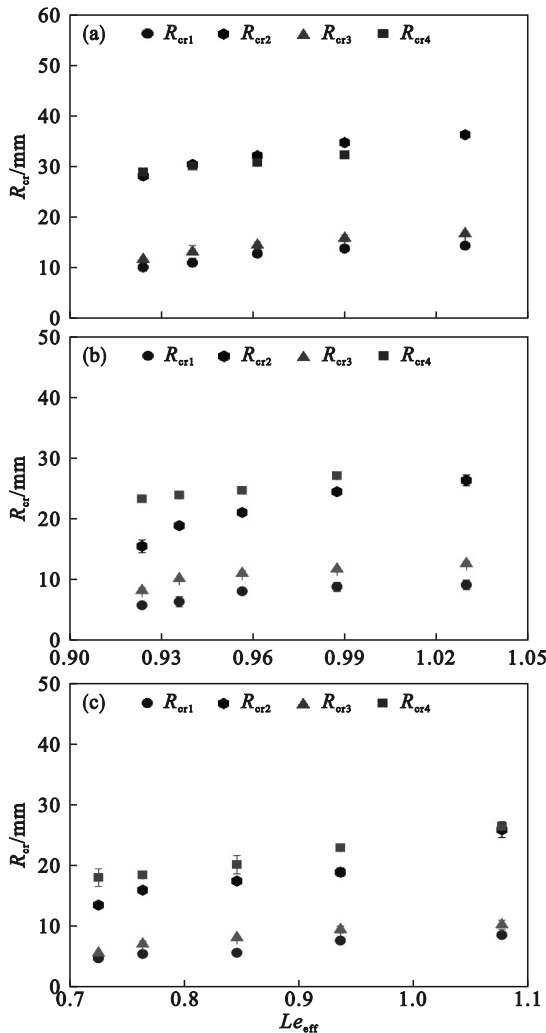


图 3 不同有效 Lewis 数下的临界火焰半径

Fig. 3 Critical flame radii under different effective Lewis numbers

- (a) —  $V_{CO}:V_{H_2}=65:35, T=353 K, p=0.3 MPa$ ;
- (b) —  $V_{CO}:V_{H_2}=65:35, T=353 K, p=0.5 MPa$ ;
- (c) —  $V_{CO}:V_{H_2}=15:85, T=353 K, p=0.3 MPa$ .

图 4 是不同密度比下的临界火焰半径. 控制混合气的当量比为 1, 相应的 Lewis 数也约为 1, 可近似认为消除了质热扩散不稳定性的影响, 单纯改变流体动力学不稳定性. 可以看到, 随着密度比的增大, 4 种临界火焰半径均会相应减小. 此时流体动力学不稳定性有所增强, 从而表明流体动力学不稳定性对火焰面胞状结构和火焰加速的促进作用. 此外, 图 4 中临界火焰半径随压力和掺氢比的变化规律与图 3 相同, 即高压和高掺氢比下的临界火焰半径会有所减小.

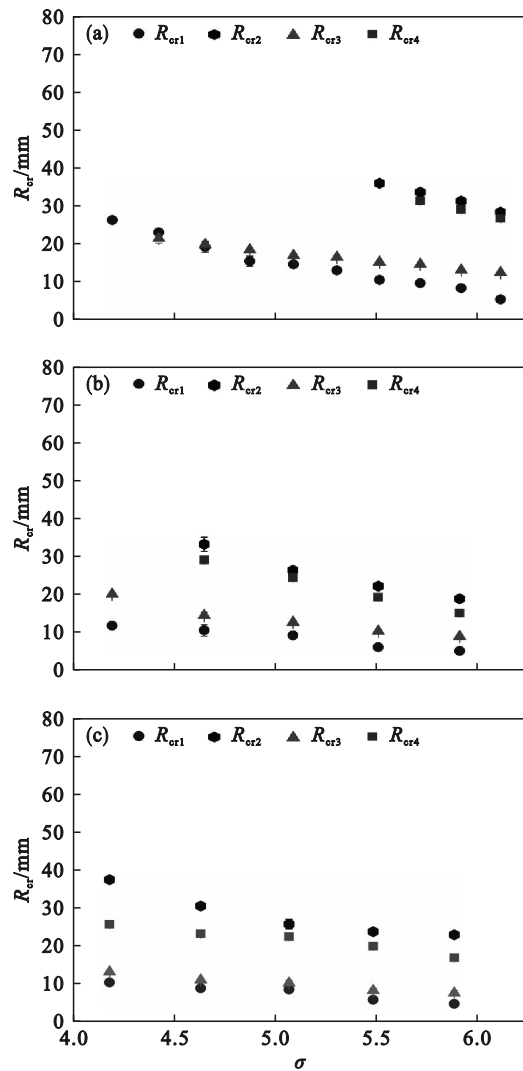


图 4 不同密度比下的临界火焰半径

Fig. 4 Critical flame radii under different density ratios

- (a) —  $V_{CO}:V_{H_2}=65:35, T=353 K, p=0.3 MPa$ ;
- (b) —  $V_{CO}:V_{H_2}=65:35, T=353 K, p=0.5 MPa$ ;
- (c) —  $V_{CO}:V_{H_2}=15:85, T=353 K, p=0.3 MPa$ .

对比 4 种临界火焰半径, 可以发现: 裂纹分裂临界半径和过渡态加速临界半径几乎相等, 而均匀细胞化临界半径和饱和态加速临界半径几乎相等, 即  $R_{cr1} \approx R_{cr3} < R_{cr2} \approx R_{cr4}$ , 这表明火焰面形态的转

变和火焰传播速度的转变存在对应关系,从而说明火焰加速的发生本质上是由火焰面形态的变化所引起.点火成功后,首先会在可燃混合气的中心形成一个火核,同时点火扰动使得火核表面产生些许裂纹.当火焰半径很小时,尽管流体动力学不稳定性与质热扩散不稳定性仍然存在,但由于此时火焰的正拉伸很强,对胞状不稳定性具有抑制作用,使得火焰表面近似呈现光滑状态,即便有裂纹也是以自相似形态发展.此时火焰传播速度几乎保持不变甚至略有下降,火焰传播处于准稳态阶段.随着火焰的向外传播,火焰半径不断增大,火焰正拉伸不断减弱,直到某一时刻,火焰正拉伸的抑制作用不再能够抵消流体动力学不稳定性与质热扩散不稳定性的促进作用,火焰表面的裂纹开始出现分裂,造成火焰面积的增大.火焰传播速度开始加快,火焰传播进入过渡态加速阶段.随着火焰的继续向外传播,裂纹分叉逐渐形成细胞状结构,且胞状结构的最大尺度不断变大,最小尺度不断变小,直到某一时刻其最小尺度到达截断尺度(约为火焰面厚度),火焰表面的胞状结构呈均匀化分布,火焰面积的增大速率有所放缓.相应地,火焰传播速度的增大也有所放缓,火焰传播进入饱和态加速阶段.此后,火焰表面的胞状结构不断地增大、分裂、增大、分裂……周而复始形成串级结构.

### 2.3 临界 Peclet 数

通过调整当量比和氧氮体积比可实现 Lewis 数和密度比的单独控制,但同时火焰面厚度也在变化.为了消除火焰面厚度的影响,可选择利用火焰面厚度对临界火焰半径进行无量纲化处理,即  $Pe_{cr} = R_{cr}/l_f$  ( $l_f$  是层流火焰面厚度),从而得到临界 Peclet 数 ( $Pe_{cr}$ ),结果如图 5 所示.根据上述分析可知,火焰面形态的变化和火焰传播速度的变化相对应,但由于火焰面形态临界点的判断带有一定主观性,因此这里用过渡态加速临界点和饱和态加速临界点计算 Peclet 数,其中  $Pe_{cr3}$  和  $Pe_{cr4}$  分别代表过渡态和饱和态加速的临界 Peclet 数.可以看到,临界 Peclet 数随着有效 Lewis 数的减小而减小,与临界火焰半径的变化趋势相同.临界 Peclet 数随着密度比的增大而增大,与临界火焰半径的变化趋势相反.临界 Peclet 数由临界火焰半径和火焰面厚度两者共同决定,随着密度比的增大,火焰面厚度也会相应减小,当火焰面厚度的变化幅度高于临界火焰半径的变化幅度时,临界 Peclet 数反而会有所增大.此外,与临界火焰

半径不同的是,不同初始压力和掺氢比下的临界 Peclet 数不再出现明显差别,表明临界火焰半径随不同初始压力和掺氢比的变化主要受到火焰面厚度的影响.

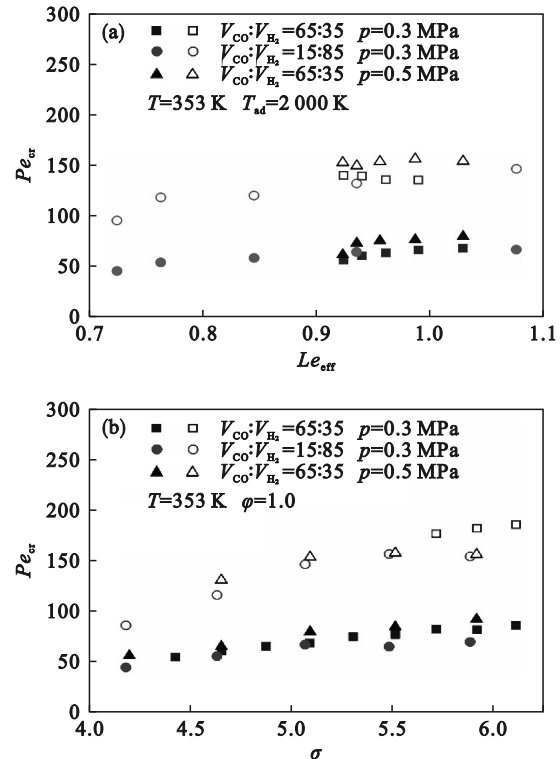


图 5 临界 Peclet 数实验结果 (实心点:  $Pe_{cr3}$ ; 空心点:  $Pe_{cr4}$ )

Fig. 5 Experimental results of critical Peclet numbers (solid:  $Pe_{cr3}$ ; hollow:  $Pe_{cr4}$ )

(a)—Lewis 数; (b)—密度比.

在此基础上,使用 Markstein 数 ( $Ma$ ) 对火焰加速临界点进行经验拟合,以定量表征火焰加速临界点随火焰自身不稳定性的变化规律. Markstein 数是 Markstein 长度无量纲化后的结果,表征了火焰传播速度与火焰拉伸之间的敏感性. Markstein 数与 Lewis 数之间有很强的依赖关系,但也会受到密度比和压力的影响,是一个耦合了多种因素的代表参数,适用于火焰加速临界点的经验拟合.由于某些实验工况的准稳态过程很短,给实验提取 Markstein 数带来困难,这里选用 Addabbo 等<sup>[33]</sup>的理论公式来计算得到 Markstein 数,并最终对过渡态加速临界 Peclet 数和饱和态加速临界 Peclet 数进行拟合,结果如图 6 所示.可以看到,2 种临界 Peclet 数均随着 Markstein 数的增大而增大,且在当前实验范围内近似呈线性关系.进一步研究可发现,在定量上饱和态加速临界 Peclet 数约为过渡态加速临界

Peclet 数的 2 倍,即  $Pe_{cr4} \approx 2Pe_{cr3}$ . 这表明层流火焰加速过程可能并非只有过渡态和饱和态两个阶段,而是呈周期性不断变化的. 根据上述的研究结果可知,火焰加速由火焰面形态的演变所引起的,而火焰面的形态演变可看作是单个大胞—增长—分裂—再增长—再分裂……的周期性演变过程,因此火焰加速过程也应该符合周期性规律. 从这个角度来说,当前结果可为火焰加速的周期性变化提供佐证.

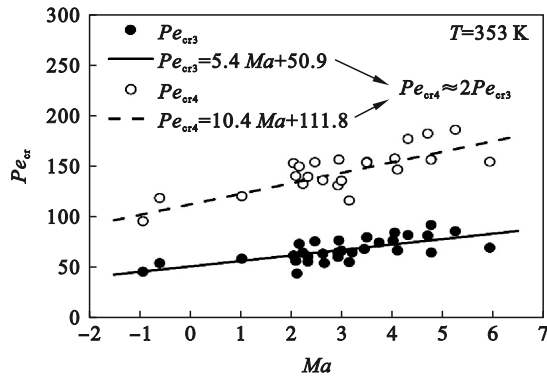


图 6 合成气临界 Peclet 数经验拟合关系式  
Fig. 6 Empirical fitting formula of critical Peclet numbers of syngas

### 2.4 火焰加速因子

为了定量表征火焰加速传播的快慢程度,有必要提取火焰加速因子. 加速因子是一个模型参数,针对加速因子提取的研究已经提出了很多模型. 这里,选取 Filyand 等<sup>[27]</sup>的优化模型:

$$R = R_{cr} + A \cdot (t - t_{cr})^\alpha$$

其中:  $R$  表示火焰半径;  $R_{cr}$  表示过渡态加速的临界火焰半径;  $t_{cr}$  表示临界半径所对应的时间;  $A$  和  $\alpha$  均由拟合得到,  $A$  表示拟合数,  $\alpha$  表示加速因子. 相比其他模型,该模型可消除点火过程对提取结果的影响,但同时会引入临界火焰半径的误差. 因此,在正式提取加速因子之前,需要对该模型开展评估,结果如图 7 所示. 图中的横纵坐标均为对数坐标,斜率即为加速因子数值. 从图 7a 中可以看出,随着火焰半径选取范围的拓宽,最终提取的加速因子结果会相应增大,这主要是因为当火焰进入过渡态加速阶段之后,加速因子并非稳态而是随着火焰的向外传播呈增长态势. 从图 7b 中可以看到,不同火焰传播阶段的加速因子提取结果也会不同. 饱和态加速阶段提取的加速因子结果较大,而过渡态加速阶段提取的加速因子结果较小. 而从图 7c 中可以看到,尽管临界火焰半径的误差会对加速因子提取有一定影响,但该模

型对临界火焰半径并没有想象中那么敏感,临界点的些许浮动只对加速因子的提取结果造成轻微变化. 因此,当前评估结果证明了 Filyand 模型的可靠性. 另外,由于过渡态加速阶段的加速因子处于不断增大的非稳态过程,而饱和态加速阶段的加速因子几乎为定值,因此选取饱和态加速阶段进行加速因子提取.

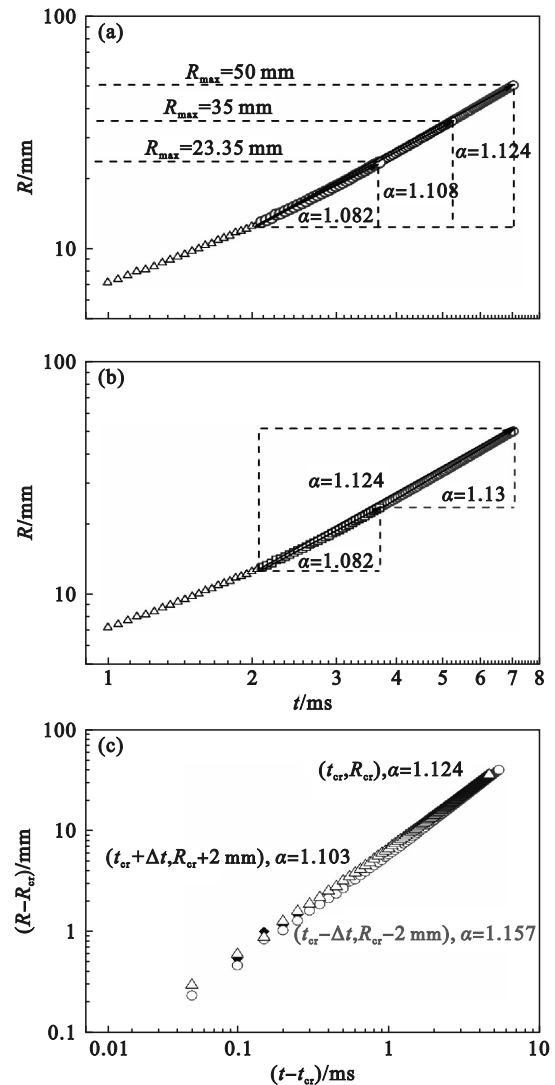


图 7 加速因子提取模型的评估

Fig. 7 Evaluation of acceleration exponent model  
(a) 火焰半径范围影响; (b) 火焰传播阶段影响;  
(c) 临界半径误差影响.

图 8 是不同 Lewis 数和密度比下的饱和态加速因子. 在当前实验观察范围内,35% 掺氢比的合成气在 0.3 MPa 工况尚未进入饱和态加速阶段,这里仅对另外 2 种工况的加速因子进行提取. 可以看到,所有工况下的加速因子数值均大于 1,范围在 1.1~1.2 之间,远未达到自湍流状态的建议数值. 同时,尽管火焰加速临界点会明显受到 Lewis 数和密度比的影响,但当前实验中加速因

子并未与 Lewis 数和密度比表现出明显的依赖关系. 不同初始压力和掺氢比下的加速因子也没有表现出明显不同. 与此类似, Yang 等<sup>[18]</sup>的实验结果表明  $H_2/O_2/N_2$  层流火焰的饱和态加速因子与 Lewis 数、密度比和压力等因素无关. 这表明尽管火焰自身不稳定性会对火焰加速临界点产生显著影响, 但一旦进入饱和态加速阶段后, 火焰加速的强度却趋向于一个定值, 而不再受到火焰自身不稳定性的明显影响. 根据火焰加速与火焰面形态的对应关系可知, 饱和态阶段的加速因子与火焰自身不稳定性没有明显的依赖关系, 这也侧面说明饱和态加速阶段的火焰面演化过程并未受到火焰自身不稳定性的明显影响. 只要进入饱和态加速阶段, 不同实验条件下的胞状尺寸和数量的变化规律很可能是相同的. 当前, 受限于纹影图像的分辨率以及图像处理代码的精度, 有关火焰面形态演化规律的定量化研究依然较少. 火焰面形态的定量表征可为火焰加速的研究结论提供重要佐证, 后续可专门对此开展相关工作.

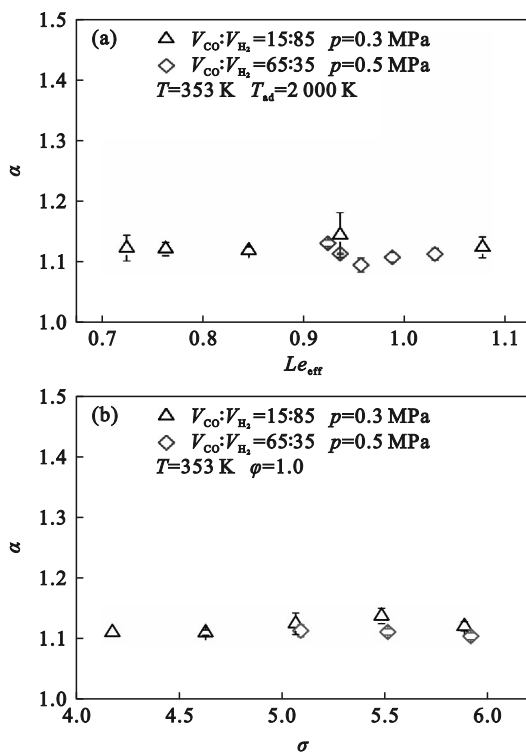


图 8 不同 Lewis 数和密度比下的加速因子  
Fig. 8 Acceleration exponents under different Lewis numbers and density ratios

(a)—Lewis 数; (b)—密度比.

### 3 结 论

1) 层流预混火焰的传播过程可分为准稳态、

过渡态加速、饱和态加速 3 个阶段, 在准稳态阶段火焰传播速度变化较小, 在过渡态加速阶段火焰传播速度迅速增大, 在饱和态加速阶段火焰传播速度增大明显放缓.

2) 4 种临界点存在两两对应关系, 即裂纹分裂临界点  $\approx$  过渡态加速临界点  $<$  均匀细胞化临界点  $\approx$  饱和态加速临界点, 表明层流火焰的加速效应主要由火焰面形态演化所引起的.

3) 临界火焰半径随 Lewis 数的减小而减小, 随密度比的增大而减小, 表明质热扩散不稳定性 and 流体动力学不稳定性会促进火焰面胞状结构和火焰加速的发生. 临界 Peclet 数与  $Ma$  之间近似呈线性正相关, 且饱和态加速临界 Peclet 数约为过渡态加速临界 Peclet 数的 2 倍, 这可为层流火焰加速的周期性变化提供依据.

4) 饱和态加速因子数值在 1.1~1.2 之间, 并未与 Lewis 数和密度比呈现出明显的依赖关系, 表明火焰自身不稳定性仅会影响层流火焰加速的临界点, 却不会影响饱和态火焰加速的强度.

### 参考文献:

- [1] Sahoo B B, Sahoo N, Saha U K. Effect of  $H_2$ : CO ratio in syngas on the performance of a dual fuel diesel engine operation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 49: 139-146.
- [2] 雷宇, 徐纲, 房爱兵, 等. 燃气轮机合成气燃烧室动态特性的实验研究 [J]. *工程热物学报*, 2005, 26(6): 1057-1060.  
(Lei Yu, Xu Gang, Fang Ai-bing, et al. Experimental investigation on the dynamic characteristics of a gas turbine combustor firing syngas [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005, 26(6): 1057-1060.)
- [3] Kwon O C, Rozenchan G, Law C K. Cellular instabilities and self-acceleration of outwardly propagating spherical flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(2): 1775-1783.
- [4] Kim W, Imamura T, Mogi T, et al. Experimental investigation on the onset of cellular instabilities and acceleration of expanding spherical flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(21): 14821-14828.
- [5] Kim W, Sato Y, Johzaki T, et al. Experimental study on self-acceleration in expanding spherical hydrogen-air flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(27): 12556-12564.
- [6] Law C K, Jomaas G, Bechtold J K. Cellular instabilities of expanding hydrogen/propane spherical flames at elevated pressures: theory and experiment [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(1): 159-167.
- [7] Jomaas G, Law C K, Bechtold J K. On transition to cellularity in expanding spherical flames [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 583: 1-26.
- [8] Liu F S, Bao X C, Gu J Y, et al. Onset of cellular instabilities in spherically propagating hydrogen-air premixed laminar flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(15): 11458-11465.

- [9] 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.  
(Bao Xiu-chao, Liu Fu-shui, Zhang Zheng-fang. Cellular instability and self-acceleration of hydrogen combustion at various initial pressure [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2014, 20(1): 38-43.)
- [10] Xie Y L, Wang J H, Cai X, et al. Self-acceleration of cellular flames and laminar flame speed of syngas/air mixtures at elevated pressures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(40): 18250-18258.
- [11] Bauwens C R, Bergthorson J M, Dorofeev S B. Experimental study of spherical-flame acceleration mechanisms in large-scale propane-air flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(2): 2059-2066.
- [12] Okafor E C, Nagano Y, Kitagawa T. Experimental and theoretical analysis of cellular instability in lean  $H_2-CH_4$ -air flames at elevated pressures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(15): 6581-6592.
- [13] Katsumi T, Aida T, Aiba K, et al. Outward propagation velocity and acceleration characteristics in hydrogen-air deflagration [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(11): 7360-7365.
- [14] Kim W K, Mogi T, Kuwana K, et al. Self-similar propagation of expanding spherical flames in large scale gas explosions [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(2): 2051-2058.
- [15] Wang G Q, Li Y Y, Li L, et al. Experimental and theoretical investigation on cellular instability of methanol/air flames [J]. *Fuel*, 2018, 225: 95-103.
- [16] 陈雪阳.富氢燃烧球形膨胀火焰不稳定性与胞状化特性研究[D].武汉:华中科技大学,2019.  
(Chen Xue-yang. Study on instability and cell characteristics of spherical expansion flame with hydrogen-rich combustion [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.)
- [17] 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 Er-jiang, He Jia-jia, Huang Zuo-hua, et al. Measurement of laminar combustion velocity and flame stability analysis of hydrogen-air-diluent gas mixture [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(20): 2514-2525.)
- [18] Yang S, Saha A, Wu F J, et al. Morphology and self-acceleration of expanding laminar flames with flame-front cellular instabilities [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 171: 112-118.
- [19] Cai X, Wang J H, Zhao H R, et al. Flame morphology and self-acceleration of syngas spherically expanding flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(36): 17531-17541.
- [20] Cai X, Wang J H, Bian Z J, et al. On transition to self-similar acceleration of spherically expanding flames with cellular instabilities [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 215: 364-375.
- [21] Gostintsev Y A, Istratov A G, Shulenin Y V. Self-similar propagation of a free turbulent flame in mixed gas mixtures [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1988, 24(5): 563-569.
- [22] Wang J H, Xie Y L, Cai X, et al. Effect of  $H_2O$  addition on the flame front evolution of syngas spherical propagation flames [J]. *Combustion Science and Technology*, 2016, 188(7): 1054-1072.
- [23] Wu F J, Jomaas G, Law C K. An experimental investigation on self-acceleration of cellular spherical flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(1): 937-945.
- [24] Bradley D, Cresswell T M, Puttock J S. Flame acceleration due to flame-induced instabilities in large-scale explosions [J]. *Combustion and Flame*, 2001, 124(4): 551-559.
- [25] Bradley D, Sheppard C G W, Woolley R, et al. The development and structure of flame instabilities and cellularity at low Markstein numbers in explosions [J]. *Combustion and Flame*, 2000, 122(1/2): 195-209.
- [26] 孙作宇,刘福水,暴秀超.球形氢气层流预混火焰传播特性研究[J].工程热物理论,2013,34(12):2413-2417.  
(Sun Zuo-yu, Liu Fu-shui, Bao Xiu-chao. Propagation characteristics of spherical laminar hydrogen-air premixed flame [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(12): 2413-2417.)
- [27] Filyand L, Sivashinsky G I, Frankel M L. On self-acceleration of outward propagating wrinkled flames [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1994, 72(1/2): 110-118.
- [28] Ashurst W T. Darrieus-Landau instability, growing cycloids and expanding flame acceleration [J]. *Combustion Theory and Modelling*, 1997, 1(4): 405-428.
- [29] Liberman M A, Ivanov M F, Peil O E, et al. Self-acceleration and fractal structure of outward freely propagating flames [J]. *Physics of Fluids*, 2004, 16(7): 2476-2482.
- [30] Davis S G, Joshi A V, Wang H, et al. An optimized kinetic model of  $H_2/CO$  combustion [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(1): 1283-1292.
- [31] 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.
- [32] Chen Z, Burke M P, Ju Y G. Effects of Lewis number and ignition energy on the determination of laminar flame speed using propagating spherical flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1): 1253-1260.
- [33] Addabbo R, Bechtold J K, Matalon M. Wrinkling of spherically expanding flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(2): 1527-1535.