文章编号:1001-2060(2023)05-0057-08

半封闭狭窄通道内甲烷/空气预混火焰传播 不稳定性实验研究

朱稳初1,张 露2,康 鑫2

(1. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院,湖北 武汉 430063;
 2. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070)

摘 要:对长、宽、高为650 mm×400 mm×12 mm的半闭口狭窄矩形通道(海伦-肖装置)内的甲烷/空气层流预混 火焰传播过程进行了实验研究,探究当量比 φ 在 0.6~1.2 范围内、火焰传播角度 ω 在垂直向下 – 90°至垂直向上 90°区间对火焰前锋轮廓发展及非标准层流火焰速度的影响。结果表明:火焰在通道内的传播分为热膨胀、准稳态 传播和端壁效应 3 个阶段,每个阶段具有各自不同的前锋轮廓特征。由于瑞利 – 泰勒不稳定性机制的作用,所有 当量比工况下向上传播的火焰均在准稳态传播阶段中呈现出明显的锋面褶皱与胞状结构;对向下传播的火焰而 言,其在贫燃工况(φ 为 0.6,0.8)下的胞状不稳定性得到了有效抑制,而在当量比 φ = 1.0 及富燃工况(φ = 1.2) 下,该稳定性效应并不显著。火焰瞬时速度与标准层流速度的比值 U_i/U_L ,在 φ = 0.6 的极贫燃工况与其他当量比 工况下展现出明显不同的发展特性,极贫燃工况火焰向上传播时(ω = 90°), U_i/U_L 随着传播过程的进行一直增大, 直到火焰触碰壁面末端熄灭,整个过程 U_i/U_L 与火焰传播方向呈正相关关系;而对于其他当量比工况, U_i/U_L 在传播 过程中均先升高后下降,火焰触碰壁面末端熄灭前其值趋于稳定,其平均速度与标准层流速度的比值 U_a/U_L 在水 平传播(ω = 0°)时达到最大值。

关 键 词:层流预混火焰;火焰前锋轮廓;非标准层流火焰速度;火焰固有不稳定性;瑞利 – 泰勒不稳定性

中图分类号:TK16 文献标识码:A DOI:10.16146/j. cnki. rndlgc. 2023.05.007

[**引用本文格式**]朱稳初,张 露,康 鑫.半封闭狭窄通道内甲烷/空气预混火焰传播不稳定性实验研究[J]. 热能动力工程,2023, 38(5):57-64. ZHU Wen-chu, ZHANG Lu, KANG Xin. Experimental study on propagation instabilities of premixed methane/air flames in a semi-closed narrow channel[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2023,38(5):57-64.

Experimental Study on Propagation Instabilities of Premixed Methane/air Flames in a Semi-closed Narrow Channel

ZHU Wen-chu¹, ZHANG Lu², KANG Xin²

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology,

Wuhan, China, Post Code:430063;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan, China, Post Code: 430070)

Abstract: The propagation process of premixed methane/air laminar flames in a semi-closed, rectangular narrow channel in 650 mm length, 400 mm width and 12 mm height, respectively was experimentally studied. Focuses were placed on the effects of fuel/air equivalence ratios ($\varphi = 0.6$ to 1.2) and flame propagation angle ω (from -90° to 90° in vertical direction) on the flame front profiles as well as non-standard laminar flame speeds. Results show that the flame propagation process within the channel can be divided into three stages such as thermal expansion stage, quasi-steady state propagation stage and end-wall

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (51806158)

收稿日期:2023-01-08; 修订日期:2023-03-06

基金项目:国家自然科学基金(51806158)

作者简介:朱稳初(1998-),男,武汉理工大学硕士研究生.

通讯作者:康 鑫(1984 -),男,武汉理工大学副教授.

effect stage, and each stage exhibits different flame-front profiles. Owing to the Rayleigh-Taylor instabilities, flame fronts of the upward-propagating ones are found to show remarkably wrinkled and cellular structures at their quasi-steady state propagation stages, for all the equivalence ratios investigated; for the downward-propagating flames, the cellular instabilities can be effectively suppressed at the fuel-lean conditions ($\varphi = 0.6, 0.8$), while this stabilizing effect is not noticeable at both the stoichiometric ($\varphi =$ 1.0) and fuel-rich conditions ($\varphi = 1.2$). Ratio of instantaneous velocity to standard laminar flame velocity U_i/U_L has quite divergent features between the extra-lean ($\varphi = 0.6$) and higher – φ conditions. For an upward-propagating flame ($\omega = 90^\circ$) at the former condition ($\varphi = 0.6$), U_i/U_L increases during the propagation process, till touching the end of the closed-wall and ending up with extinction. Also, U_i/U_L during the whole process shows a positive correlation with the flame propagation angle; however, for the higher equivalence ratios ($\varphi = 0.8, 1.0$ and 1.2), U_i/U_L increases first and then decreases, while eventually levels off, till touching the end walls. In these cases, ratio of averaged speeds to standard laminar flame velocity U_a/U_L reaches its maximum value for a horizontally propagating flame ($\omega = 0^\circ$). **Key words**: premixed laminar flame, flame front profile, non-standard laminar flame velocity, flame intrinsic instabilities, Rayleigh-Taylor instability

引 言

预混火焰在狭窄通道、管道、间隙或缝隙中的传播与燃烧的研究与多个领域相关。例如,在内燃机活塞与气缸壁之间狭缝体积中的不充分燃烧及火焰淬熄是尾气排放中碳氢化合物的主要来源^[1];工业安全生产布置的板状狭缝阻火器利用冷壁淬熄的原理达到阻燃防爆的目的^[2];另外,微机电系统的不断发展也为微型燃烧动力装置提供了潜在市场^[3]。近年来,两块平行板(中间夹有薄层可燃气体)组成的海伦 – 肖装置^[4-5]成为研究狭缝燃烧的经典装置。火焰固有不稳定性机制,如达里厄斯 – 兰道^[6]、瑞利 – 泰勒^[7]、萨夫曼 – 泰勒^[8]、扩散 – 热^[9]不稳定性会对火焰传播速度与火焰形状产生显著影响^[10-11]。

Gu 等人^[12]在研究H₂-O₂预混火焰在不同间隙 高度海伦 – 肖装置中的传播时发现了圆形非加速与 蜂窝状自加速火焰。Veiga-López 等人^[13]利用纹影 法研究不同传播方向的贫氢预混火焰在狭缝中的传 播,向上传播火焰结构呈单头状向下传播时呈双头 状结构。Fernández-Galisteo 等人^[14]通过模拟准等 压火焰在两绝热平板间的传播得出,火焰不稳定性 与热膨胀、浮升力、黏度、热扩散和分子扩散系数有 关,这些参数会影响火焰结构。王增辉等人^[15]对狭 缝通道内的强化换热问题进行了研究,结果表明,针 对不同情况增大扰动、流速及换热面的接触面积可 达到强化换热的效果。高佳佳等人^[16]对狭缝式燃 烧器燃烧特性进行实验研究发现,淡相着火较差、浓 相稳燃特性对配风敏感是造成运行效率低和安全性 差的主要原因。Shen 等人^[17]研究了通道间距和有 效 *Le* 数对焰形的影响,在窄间距下由于萨夫曼 – 泰 勒不稳定性而产生了"黏性手指"火焰。前人对火 焰在海伦 – 肖装置中传播的实验与模拟研究往往针 对特定当量比与特定火焰传播方向工况,但对于多 传播方向(角度 ω)和当量比工况下的火焰不稳定 行为缺少系统性研究。

本文对甲烷/空气预混火焰在半封闭狭缝通道 中向封闭一端传播的问题进行了实验研究。采用高 速摄像技术对火焰传播过程进行记录,系统分析了 多传播方向(角度 ω)和当量比工况下甲烷/空气预 混火焰在狭窄矩形通道内的传播不稳定性行为。

1 实验装置与步骤

实验在以海伦 - 肖装置为主体的狭缝燃烧实验 台架上进行,装置如图1所示。实验设备包括:海伦 - 肖燃烧室及其旋转系统(改变火焰传播方向)、点 火系统、进排气系统、抽真空系统、高速摄像机及数 据采集系统6部分。







图 1 实验装置 Fig. 1 Experimental device

其中,海伦 - 肖燃烧室的主体是由两块间距 H 为 12 mm,长、宽(L×W)尺寸为 650 mm×400 mm 的亚克力平行平板组成,四周同样采用亚克力板密 封,在其内部形成体积为 3.12 L 的狭缝通道。装置 点火端装有压力传感器测量气体表压(量程为-0.2 ~0.1 MPa)。燃烧室固定在 1 个由钢型支架组成 的旋转装置上,该装置用于调整火焰传播方向。点 火系统由 20 kV 点火器(电火花点火针)及外接电 源构成,点火针距离装置末端(长度方向近着火点 侧)约 50 mm。

甲烷/空气混合物当量比 φ 由两个 Sevenstar 公司生产的 D07-7K 型质量流量控制器控制,其量程分别为 2 和 5 L/min。在 1 个内部填充钢丝棉的气体混合器中进行气体预混,之后通入燃烧室内部。在燃烧室进气口前安装了 Witt 阻火器防止装置回火。排气系统管路与进气口位于燃烧室同一侧,抽

气(真空)系统与排气系统共用部分管路,并以三通 阀作为两者分界。高速摄像机(Phantom V710L)由 安装在 PC 端的 PCC 系统进行触发,拍摄参数为 1 280×800 像素、1 000 帧/s,以确保在暗室内拍摄 图像清晰。

实验过程为:利用真空泵将装置内部抽至真空; 打开进气球阀进气,直至混合气压力高于大气压约 0.002 MPa,以避免外界空气回流;充气完成后关闭 所有阀门,便可启动点火器进行点火,同时打开排气 阀门以保证燃烧尾气顺利流出,以及燃烧室压力恒 定。进行3次独立重复实验,并全程利用高速摄像 机记录火焰传播过程影像。

2 实验数据处理

为对火焰传播过程进行定量分析,对实验得到 的原始图片进行了后处理。首先,导出图片各像素 点灰度的原始数据,提取每帧图像中最大灰度值的 通道宽度方向坐标 $y = (y_1, y_2, \dots, y_{800})$ 所对应的通 道长度方向坐标 $x = (x_1, x_2, \dots, x_{800})$,将 x 值视为此 刻火焰前锋轮廓的位置。以该轮廓为界,将燃烧室 中气体分成已燃与未燃两部分,并分别加以计算。 之后便可计算某相邻时刻(帧数)火焰传播的瞬时 速度 U_i :

$$U_i = \frac{1}{W \cdot H} \frac{(V_i - V_{i+1})}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中:W—宽度方向尺寸,m;H—高度方向尺寸,m; dt—相邻帧数两张图片的拍摄间隔时间,s;V—剩余 未燃气体所占体积,m³;角标 i—当前帧数序号。

之后对瞬时速度进行时间平均,即可得平均速度 U_a:

$$U_{\rm a} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} U_i$$
 (2)

式中:N-该传播过程的图片总数。

3 结果与分析

3.1 火焰结构

3.1.1 火焰前锋的发展过程

以 φ = 1.0,水平传播(ω = 0°)工况为例介绍火 焰在狭窄通道内传播的发展过程。PPC 软件导出的 原始影像叠加图及处理后的火焰前锋轮廓叠加图如 图 2 所示。可以看出,从点火开始至沿长度方向远

离着火点侧的端壁熄灭,火焰前锋轮廓发展经历了 3个过程:热膨胀阶段,该阶段发生于电火花点火 (t=5 ms)至火焰初次接触沿宽度方向的侧壁面之 前(t=42 ms),火焰传播特征与经典的球形火焰类 似,球形锋面内部已燃气体进行热膨胀,前锋表面光 滑:准稳态传播阶段,在火焰前锋触及到装置沿宽度 方向侧壁面的一瞬间(t=68 ms),火焰前锋上立刻 出现大量小尺度火焰褶皱,热膨胀流场从几乎径向 的流型突然转变为更接近于单向的流型(指向排气 端),这是导致此阶段不稳定性开始产生的重要原 因,此阶段初期火焰前锋轮廓极不稳定,会出现细胞 的合并与分裂,但细胞动态行为随着火焰的继续传 播减弱,火焰前锋轮廓最终趋于稳定(t = 179 ms); 端壁效应阶段,该阶段发生在火焰锋面开始接 触到沿长度方向远离着火点侧的装置末端时(t= 207 ms),之后火焰前锋面积减少,瞬时速度逐渐降 低直至火焰完全熄灭(t = 246 ms)。





3.1.2 各工况下火焰前锋的演化特征差异

图 3 为不同当量比和不同火焰传播方向工况 (即 φ 为 0.6~1.2,火焰传播方向分别为竖直向下 (ω = -90°)、45°向下(ω = -45°)、水平(ω = 0°)、 45°向上(ω = 45°)、竖直向上(ω = 90°))下,甲烷/ 空气预混火焰在海伦 – 肖装置中传播时火焰前锋 的演变过程。图 3 各工况拍摄区域的实际尺寸为 656 mm×410 mm。

如图 3(a)所示,在极贫燃 $\varphi = 0.6$ 、 $\omega = 0°$ 工况, 从准稳态传播阶段的开始(火焰锋面接触到装置宽 度方向两侧壁面),火焰前锋出现许多胞状结构,火 焰前锋倾斜直至传播到装置末端。这是由于极低当 量比下通道内燃烧强度较低,达里厄斯-兰道不稳 定性较弱,使得火焰难以维持对称结构继而向一侧 倾斜。对于 $\omega = -90^{\circ}$ 工况,由于低密度气体位于高 密度气体上方,此时瑞利-泰勒效应发挥稳定火焰 锋面的作用:一方面,在准稳态传播阶段时锋面并未 出现类似水平工况的明显倾斜;另一方面,随着传播 的进行,瑞利-泰勒效应的稳定作用也抑制着胞状 结构的生成,使得火焰锋面更平坦。对于 $\omega = -45^{\circ}$ 工况,由于体积力在火焰传播方向分量的减小,瑞利 - 泰勒稳定作用减弱,使得火焰锋面在后期传播过 程中出现了一定起伏,但相较于 $\omega = 0^{\circ}$ 工况仍较为 平坦。对于 $\omega = 90^{\circ}.45^{\circ}$ 工况,传播过程火焰形态较 为相似,火焰前锋面积较水平传播情况有大幅增长。 由于此时低密度气体位于高密度气体下方,瑞利-泰勒效应发挥不稳定性作用.火焰在准稳态传播时 其锋面也有大量褶皱/胞状结构出现。另外,两种角 度工况下,火焰锋面均出现了以"小波谷"为中心的 近似对称状的双峰结构,该结构也有效抑制了火焰 不对称倾斜形态的出现。

如图 3(b)所示,在 φ =0.8, ω =0°工况,由于燃烧强度的提高,火焰水平传播的锋面倾斜程度已较 φ =0.6时大大减弱。对于 ω = -90°, -45°工况, 在准稳态传播阶段前期瑞利 - 泰勒稳定性作用较 φ =0.6时更为显著,火焰锋面也更为平坦;但在准 稳态传播阶段后期,由于达里厄斯 - 兰道不稳定性 效应增强(在增大的燃烧强度下,锋面前后密度差 异更大),火焰锋面出现局部波峰波谷的较大尺度 褶皱。对于 ω =90°,45°工况,在达里厄斯 - 兰道与 瑞利 - 泰勒不稳定性的共同作用下,火焰前锋在传 播时呈现出大、小尺度胞状结构并存的形态。

如图 3(c)所示,在 φ = 1.0 工况下沿各方向传播的火焰呈现出类似的锋面演化特征。在准稳态传播阶段 前期,锋 面较为平坦;在传播中后期,火焰锋面产生了大量"手指"状不稳定结构。但对于 $\omega = -90^{\circ}$ 工况,由于随着当量比的升高,火焰燃烧强度也随之增强,达里厄斯 – 兰道效应占据主导,故瑞利 – 泰勒效应也并未体现出对不稳定性结构的明显抑制作用。





Fig. 3 Evolution picture of flame front in different flame propagation directions at $\varphi = 0.6 \sim 1.2$ (656 mm ×410 mm)

如图 3(d)所示,富燃工况 φ = 1.2 与化学计量 空燃比工况 φ = 1.0 相比,其火焰传播特征大致相 似。燃烧强度增加后达里厄斯 – 兰道效应起主导作 用,瑞利 – 泰勒效应同样对于向下传播的火焰并未 体现出稳定锋面结构的作用。两者主要差异在于: 对于 ω = 0°工况,前者锋面在准稳态传播初始阶段 出现了大量且界限清晰的小尺度胞状结构;对于 ω = 90°工况,前者锋面在准稳态传播结束阶段出现 了更大尺度褶皱的波谷。

3.2 非标准层流火焰速度

3.2.1 瞬时速度

图 4 为不同当量比及传播角度下瞬时速度与标 准层流火焰速度的比值 U_i/U_L随时间的变化。当量 比 φ = 0.6,0.8,1.0,1.2 时其标准层流火焰速度 U_L 分别为 0.13,0.24,0.37,0.32 m/s^[18]。在传播过程 中,U_i/U_L呈现出小范围内一定幅度的波动。这是 由于狭缝内燃烧放热产生的压力波在气体中传播、 遇到端壁后反射,入射波与反射波彼此相互作用对 火焰施加影响的缘故,属于热声耦合不稳定性作用 的结果^[11]。但另一方面来说,该种不稳定性并不会 改变速度的总体变化趋势,其变化原因主要在于传 播过程中前锋面形状的变化。

如图 4 (a) 所示, 极贫燃 $\varphi = 0.6$ 、传播角度 $\omega = -90^{\circ}, -45^{\circ}$ 工况,热膨胀阶段速度快速增加, U₁/U₁的值在5.85 附近波动;火焰锋面触碰到侧壁 面进入准稳态传播阶段(t分别为210,216 ms),瞬 时速度迅速下降,在t分别为 320,360 ms 时 U_i/U_1 小于临界值 1,在t = 384 ms 达到最低值,此时火焰 锋面中心处形成较深波谷,随着火焰继续传播,其速 度稍有升高,锋面中间位置附近波谷逐渐合并,并使 火焰趋于平坦, U₁/U₁分别趋于稳定值 0.38 和 0.62,直至触碰端壁(t分别为3114,1902 ms)后火 焰逐渐熄灭。而对于 $\omega = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 工况, 在传播 过程中速度一直不断上升,U_i/U_L高于临界值的时 刻分别为62,84,120 ms。在触碰端壁前(t分别为 1 236,894,780 ms), U₁/U₁最大值分别为 6.69(ω= 0°),9.23(ω=45°),8.85(ω=90°),最后火焰前锋 触碰壁面末端逐渐熄灭。



图 4 各当量比、不同火焰传播方向下 U_i/U_L随时间的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of U_i/U_L with time under different equivalent ratios and different flame propagation directions

如图 4 (b) 所示, $\varphi = 0.8$ 工况下。对于 $\omega = -90^{\circ}$, -45°工况, 热膨胀阶段 U_i/U_L 快速增加, 随 后其值分别稳定在 15. 29, 16. 04 附近, 进入准稳态 传播阶段(t分别为 75, 80 ms), U_i/U_L 迅速下降随后 均稳定在 3. 33 附近, 最后分别在 t = 379, 446 ms 时 刻 U_i/U_L 低于临界值。对于水平传播工况, 其 U_i/U_L 先快速增加稳定在 12. 92 附近, 随后进入准稳态传 播阶段(t = 108 ms), U_i/U_L 快速下降, 其值最终稳定 在 5. 42 附近, 在 t = 323 ms 时刻 U_i/U_L 低于临界值。 对于 $\omega = 90^{\circ}$, 45° 工况, 其 热膨胀 阶 段 U_i/U_L 分别为 8. 75, 12. 5, 准稳态稳定传播阶段(t分别为 115,109 ms) U_i/U_L 分别为4.58,5.00,在各传播方向上其火焰分别在296,359,262,303,298 ms 时触碰壁面末端进入端壁效应阶段, U_i/U_L 低于临界值的时刻分别为310,323 ms,皆在端壁效应阶段。

如图 4(c)、(d) 所示, 在化学计量空燃比 $\varphi =$ 1.0 与富燃 $\varphi = 1.2$ 工况, 其 U_i/U_L 曲线变化趋势与 $\varphi = 0.8$ 类似, 对于 $\omega = -90^{\circ}$ 工况, 热膨胀阶段 U_i/U_L 分别为 11.46、5.47, 准稳态阶段开始后(t 分 别 72、184 ms)稳定 U_i/U_L 值分别为 3.62、1.72; 对于 $\omega = -45^{\circ}$ 工况, 热膨胀阶段的 U_i/U_L 值分别为 13.97,13.31,进入准稳态阶段(t 分别为 68,86 ms) 后 U_i/U_L 值为 1.36,2.82;对于 $\omega = 0^{\circ}$ 工况,热膨胀 阶段的 U_i/U_L 值分别为 12.49,8.59,进入准稳态传 播阶段 (t 分别为 66,144 ms)后 U_i/U_L 值为 3.92, 2.82;对于 $\omega = 45^{\circ}$ 工况,热膨胀阶段的 U_i/U_L 值分别 为 14.59,14.75,进入准稳态传播阶段(t 分别为 71, 70 ms)后 U_i/U_L 值为 3.41,1.97;对于 $\omega = 90^{\circ}$ 工况, 其热膨胀阶段的 U_i/U_L 值分别为 11.08,9.00,进入 准稳态传播阶段(t 分别为 98,96 ms)后 U_i/U_L 值为 2.59,1.22。不计初始阶段,两当量比、任意传播角 度工况下均在端壁效应末期,其 U_i/U_L 低于临界值。 $\varphi = 1.0$ 各传播方向的端壁效应阶段起始时间 t 分 别为 218,203,190,217,265 ms, $\varphi = 1.2$ 时其时间 t分别为 434,345,310,251,380 ms。

3.2.2 平均速度

各当量比 φ 与不同传播方向(角度 ω)下火焰 平均速度与标准层流火焰速度比值 U_a/U_L的变化曲 线及其对应误差如图 5 所示。对于 φ = 0.6 的贫燃 火焰,随着火焰传播角度 ω 在 - 90°~90°范围内变 化,U_a/U_L的值从 0.64 逐渐增加到 2.67,呈现出与 传播方向角 ω 的正相关关系。这与瑞利 - 泰勒不 稳定性作用程度紧密相关:火焰向上传播时,瑞利 -泰勒效应使火焰失稳,锋面产生的胞状褶皱结构扩 大了火焰传播面积,继而增大了火焰传播速度;而火 焰向下传播时,瑞利 - 泰勒稳定效应促使火焰锋面 趋于平坦稳定,有限的锋面面积使得其火焰传播速 度处于较低的水平。

在其他当量比工况下, U_a/U_L 与火焰传播方向 角 ω 呈现出非单调关系。以当量比 φ = 1.0 工况为 例, ω = -90°工况时 U_a/U_L 的值为 5.01, ω = 0°工况 时达到最大值 6.43, ω = 90°工况时,又降低至 4.16。 产生这一现象的主要原因是:随着当量比的增加,燃 烧强度增加,此时瑞利 – 泰勒稳定效应减弱,而达里 厄斯 – 兰道效应开始发挥主导作用。因此,对于燃 烧强度较高的向上传播火焰(ω = 90°),由于瑞利 – 泰勒不稳定性作用效果并不显著,故其 U_a/U_L 低于 水平工况(ω = 0°)。

在 $\varphi = 0.8$ 与 1.2 工况 U_a/U_L 随火焰传播方向 的变化与化学计量空燃比的情况类似:当火焰传播 方向角 ω 为 – 90°, – 45°,0°,45°及 90°时, U_a/U_L 在 $\varphi = 0.8$ 时依次为 3.59,3.93,4.88,4.46 和 3.97;在 *φ* = 1.2 下依次为 2.19, 2.92, 3.92, 3.52 和 2.84。



图 5 不同角度及当量比下的 U_a/U_L变化曲线及对应误差 Fig. 5 Variation curve of U_a/U_L and its corresponding error under different angles and equivalent ratios

4 结 论

(1)火焰在半闭口狭窄通道中的传播主要分3 个阶段:热膨胀阶段,发生于点火后至火焰初次接触 侧壁面之前,火焰传播特征与经典的球形火焰类似, 表面光滑;准稳态传播阶段,火焰前锋触碰沿宽度方 向侧壁面后到其触碰长度方向远离着火点壁面末端 之前,初始阶段锋面结构由于火焰细胞动态行为极 不稳定,随后该行为减弱,火焰锋面以稳定结构传 播;端壁效应阶段,火焰接触远离着火点侧端壁,此 时锋面向残留未燃气体移动直至燃料耗尽,火焰 熄灭。

(2)对于向下传播火焰,低密度气体位于高密 度气体上方,瑞利-泰勒效应可发挥稳定作用,但其 仅在贫燃工况时作用显著,使锋面较为平坦。这主 要是由于燃烧强度低的时候(当量比低),瑞利-泰 勒效应起较强作用,但随着燃烧强度增加,达里厄斯 -兰道效应发挥主导作用。对于向上传播火焰,低 密度气体位于高密度气体下方,瑞利-泰勒效应发 挥不稳定作用,使火焰锋面出现大量褶皱与胞状 结构。

(3) 极贫燃情况 $\varphi = 0.6$ 时的 U_a/U_L 与传播方 向角 ω 呈正相关关系,而在其他 3 种当量比情况下 ($\varphi = 0.8, 1.0, 1.2$),随着传播方向角 ω 从 – 90°以 45°角间隔逐步变化到 90°, U_a/U_L 先升高后降低,在 水平方向传播($\omega = 0^\circ$)时达到最大值。

参考文献:

- [1] LAW C K. Combustion physics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [2] 宋占兵. 预混火焰在狭缝中的传播机理与熄灭条件的研究
 [D]. 大连:大连理工大学,2005.
 SONG Zhan-bing. Study on propagating mechanism and quenching of premixed flames in narrow channels[D]. Danlian; Dalian Uni-

versity of Technology,2005.

- [3] JU Y, MARUTA K. Microscale combustion: technology development and fundamental research [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 37(6):669 – 715.
- [4] VASIL'EV A. From the Hele-shaw experiment to integrable systems; a historical overview [J]. Complex Analysis and Operator Theory, 2009, 3(2):551-585.
- [5] ALEXEEV M M, SEMENOV O Y, YAKUSH S E. Experimental study on cellular premixed propane flames in a narrow gap between parallel plates [J]. Combustion Science and Technology, 2018, 191(7):1256-1275.
- [6] LANDAU L. On the theory of slow combustion [J]. Dynamics of Curved Fronts, 2012, 19:403 - 411.
- [7] MARKSTEIN, GEORGE H. Nonsteady flame propagation [M]. Brussels: Pergamon Press, 1964.
- [8] SAFFMAN P G, TAYLOR G I. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid [J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A; Mathematical and Physical Sciences, 1958, 245 (1242); 312 - 329.
- [9] SIVASHINSKY G I. Diffusional-thermal theory of cellular flames
 [J]. Combustion Science and Technology, 1977, 15(3/4):137 145.

- KANG S H, BAEK S W, IM H G. Effects of heat and momentum losses on the stability of premixed flames in a narrow channel[J].
 Combustion Theory and Modelling, 2006, 10(4):659-681.
- [11] VEIGA-LÓPEZ F, MARTÍNEZ-RUIZ D, FERNÁNDEZ-TAR-RAZO E, et al. Experimental analysis of oscillatory premixed flames in a Hele-Shaw cell propagating towards a closed end[J]. Combustion and Flame, 2019, 201(3):1-11.
- [12] GU G, HUANG J, HAN W, et al. Propagation of hydrogen-oxygen flames in Hele-Shaw cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(21):12009 - 12015.
- [13] VEIGA-LÓPEZ F, KUZNETSOV M, MARTÍNEZ-RUIZ D, et al. Unexpected propagation of ultra-lean hydrogen flames in narrow gaps[J]. Physical Review Letters, 2020, 124(17): 1-6.
- [14] FERNÁNDEZ-GALISTEO D, KURDYUMOV V N, RONNEY P D. Analysis of premixed flame propagation between two closelyspaced parallel plates [J]. Combustion and Flame, 2018, 190(4):133-145.
- [15] 王增辉,贾斗南,刘瑞兰. 狭缝通道两相流强化换热研究综述
 [J]. 热能动力工程,2002,17(4):329-331.
 WANG Zeng-hui, JIA Dou-nan, LIU Rui-lan. An overview of the intensified heat exchange research of two-phase flows in a narrow-gap channel [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2002,17(4):329-331.
- [16] 高佳佳,刘鹏远,徐鹏志,等.基于 DBEL 技术超临界"W"火 焰锅炉狭缝式燃烧器煤粉着火燃烧特性研究[J]. 热能动力 工程,2015,30(5):768-774.

GAO Jia-jia, LIU Peng-yuan, XU Peng-zhi, et al. Study of the ignition and combustion characteristics of pulverized coal in the slit type burners of a supercritical "W"-shaped boiler based on the DBEL technology[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2015, 30(5):768 – 774.

- [17] SHEN S, WONGWIWAT J, RONNEY P. Flame propagation in quasi-2D channels: stability, rates and scaling [C]//AIAA Scitech 2019 Forum, 2019.
- [18] GU X J, HAQ M Z, LAWES M, et al. Laminar burning velocity and Markstein lengths of methane-air mixtures [J]. Combustion and Flame, 2000, 121 (1/2):41 - 58.

(丛 敏 编辑)