DOI: 10.11883/bzycj-2016-0198
文章编号: 1001-1455(2018)02-0381-09

微小空间内丙烷/空气火焰传播特性与加氢爆燃实验*

苏 航[1,2,3,4],蒋利桥[1,2,3],曹海亮[5],刘秦飞[1,2,3,4],李言钦[5],汪小憨[1,2,3],赵黛青[1,2,3]

(1.中国科学院广州能源研究所,广东 广州 510640;
2.中国科学院可再生能源重点实验室,广东 广州 510640;
3.广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室,广东 广州 510640;
4.中国科学院大学,北京 100049;
5.郑州大学,河南 郑州 450001)

摘要: 在内径 150 mm 的圆盘狭缝微型燃烧室内,实验探讨了在常温常压下,不同当量比的丙烷/空气预混气以及掺氢的丙烷/空气混合气在电火花点火后向外传播的特性,通过高速摄影方法获得了在狭缝间距为 2.0、2.5、3.0、5.0 mm 时微燃烧室内的火焰传播形态。实验中观察到火焰传播存在光滑、皱褶和断裂三种火焰锋面形态。当量比的增加和狭缝间距的减小会使火焰更容易发生褶皱。随着火焰的传播,火焰半径逐渐增大,火焰传播速度整体呈下降趋势。火焰传播速度随着间距的减小先增大后减小,在间距 3 mm 时最大。因为壁面散热的影响,微尺度效应在降低火焰传播速度和增加火焰不稳定性方面具有重要作用。掺入氢气能提高预混气的火焰传播速度,在间距 2.5 mm 的微燃烧腔中还观察到了爆燃现象。

关键词: 微尺度燃烧;火焰传播;火焰皱褶;传播速度;爆燃
中图分类号: O389 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

与常规能量储存的能源系统相比,基于燃烧的微型能源动力系统的能量密度高、续航时间长、燃料易更换[1-2],是高能量密度便携能源的重要获取方式[3]。在微尺度空间内,由于火焰与壁面之间的相互作用,火焰传播比大尺度下要复杂得多[4]。总的来看,当前的微尺度燃烧主要集中在圆管、平板狭缝等开放空间[5-7]。对微小封闭空间内的火焰传播研究很少,对微型内燃机的指导意义有限,比如对于火焰传播中的散热影响研究基本基于理论计算。而微尺度燃烧中,燃烧室的比表面积较常规尺度大了两个数量级[8],因此微尺度燃烧过程中,散热损失会对火焰传播产生较大影响,在之前的实验中发现微尺度定容空间内火焰传播速度低于常规尺度下火焰传播速度[9-11]。

当采用层流燃烧速度比较高的燃料时,火焰传播容易加速,同时火焰传播形态容易发生转变,如 Tang 等[12]在定容燃烧弹中研究了氢气/丙烷/空气层流燃烧的特性,程关兵等[13]在氢气/丙烷/空气的爆轰性能实验研究中观察到了自持爆轰波,Wu 等[14-15]研究了毫米级管道和微米级平板狭缝中的火焰传播特性,探索了在微尺度下发生爆燃转爆轰的作用机制。

鉴于目前对于微小定容空间内的非稳态火焰传播研究较少,本文中在之前设计的一种狭缝圆盘状微型燃烧室[9-11]的基础上,期望通过实验获取微小定容空间内火焰的传播规律,并尝试在定容的小空间内实现燃料的快速燃烧。

* **收稿日期**: 2016-07-06; **修回日期**: 2017-03-23
基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2014CB239600);
国家自然科学基金项目(51336010,51176174);
广东省科技计划项目(2016A040403095,2014A050503054)
第一作者: 苏 航(1991—),男,博士研究生; **通信作者**: 蒋利桥,jianglq@ms.giec.ac.cn。

1 实验装置与方法

1.1 圆盘狭缝微型燃烧室

实验中所用圆盘狭缝微型燃烧室的直径为 150.0 mm,间距 H 可在 2.0～5.0 mm 之间调整,由两块石英玻璃盖板(d_0=230.0 mm)构成。下盖板开有一个圆形通道(d_1=3.0 mm)作为点火电极通道和进排气通道。点火电极由两根钨丝(d_2=0.2 mm)组成。石英玻璃燃烧室由一个法兰结构的紧固装置紧固密封,两块石英玻璃之间以及石英玻璃燃烧室与不锈钢之间有垫片。实验所用微尺度燃烧室及其结构尺寸如图 1 所示。

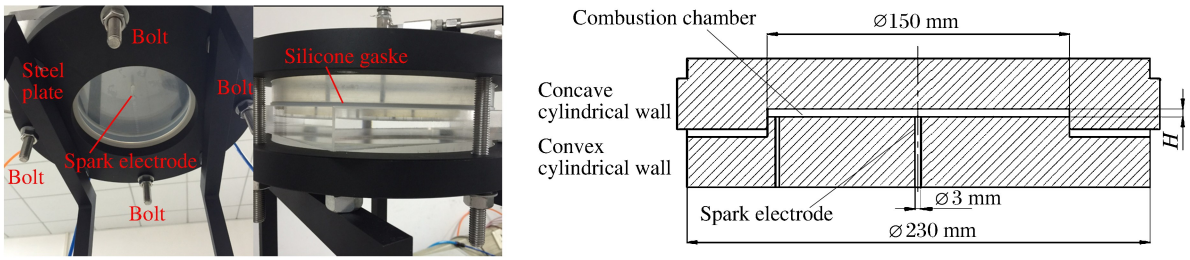


图 1 圆盘狭缝微尺度燃烧室及其结构尺寸

Fig. 1 Micro-scale chamber with its structure and size

1.2 实验系统

图 2 为实验系统示意图,所用燃料为丙烷(纯度>99.9%)和氧化剂(压缩干空气),分别由质量流量计控制(MKSGE50a 误差 0.1%,流量计使用皂膜流量计标定)。在进入燃烧室之前,丙烷和空气保证充分混合,预混气由安捷伦气象色谱仪取样分析,保证配气成分符合设计当量比要求。实验开始前,先用真空泵以 −96 kPa 的压力抽空,然后打开进气阀,以0.2 MPa的压力将丙烷/空气预混气充入燃烧室,再关闭排气阀,打开进气阀用真空泵以 −96 kPa 的压力抽空,上述过程重复 20 次,以确保燃烧室内换气干净,充入的全部是设置好当量比的新鲜预混气,最后一次充气后打开进气旁路阀,将燃烧室压力降至大气压,然后关闭阀门静置 20 min,在常温常压的初始条件下点火进行火焰传播实验。为防止浮力影响,实验装置水平放置,在石英玻璃窗下放置倾角 45°的前镀膜反射镜进行光路调整,使用高速摄像机(MEMRECAM HX-6)拍摄实验过程,曝光时间 196.6 μs,拍摄记录频率 5 000 s^{-1}。

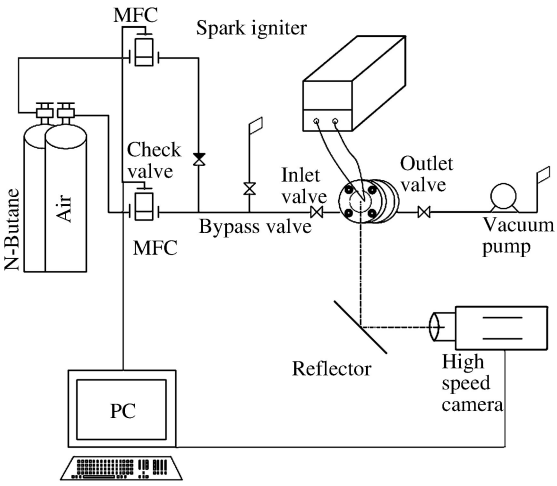


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic graph of test rig

1.3 数据处理

对拍摄的每张图片进行编程处理,其过程如图 3 所示。首先提取图片上每一点的亮点值,筛选出火焰面边界的离散点。将离散点拟合成圆,圆的半径值作为此刻火焰传播当量半径。

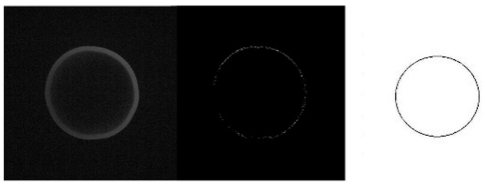


图 3 处理火焰图片过程

Fig. 3 Processing of flame propagation photo

2　实验结果及讨论

2.1　火焰基本形态

在狭缝间距 $H=2.5$ mm、当量比 $\varphi=1.10$ 时，常温常压初始条件下狭缝微型燃烧室内丙烷/空气火焰传播过程如图 4 所示。初始阶段，火焰传播呈圆形向外传播，火焰面光滑，在火焰传播 11.8 ms 时，开始出现皱褶火焰锋面，随火焰继续传播，皱褶不断发展，最后成为花瓣状火焰直至燃尽熄灭。火焰皱褶的产生由火焰不稳定性导致，由于火焰面随着局部燃烧的增强或者削弱而拉伸，火焰面会形成褶皱，甚至发生断裂[16]。

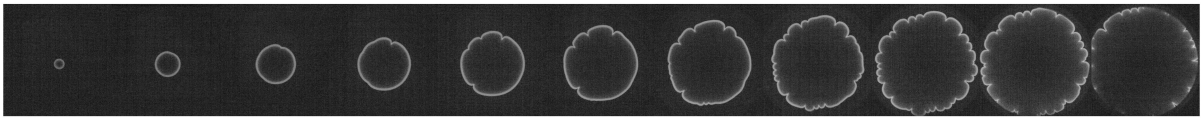


图 4　当量比为 1.10 时丙烷空气预混气的火焰传播形态演变

Fig. 4　Flame shape evolution during its propagation of propane/air mixture ($\varphi=1.10$)

2.2　当量比的影响

在狭缝间距 $H=2.0$ mm 时，丙烷/空气预混气在不同当量比下的火焰传播如图 5 所示。在当量比 $\varphi=1.00\sim1.05$ 时，燃烧强度比较低，但是火焰前锋比较光滑，在传播一段时间后，仅出现单个皱褶，火焰半径增长慢，火焰传播缓慢；在 $\varphi=1.10\sim1.35$ 时，燃烧强度有所加强，在开始阶段火焰锋面光滑，随着火焰传播出现皱褶现象，火焰皱褶不断发展，在后期形成花瓣状，并且随当量比增加，火焰皱褶出现时刻提前；在 $\varphi=1.40\sim1.45$ 时，火焰变暗，火焰传播速度变慢，褶皱在初期就开始出现，例如在 $\varphi=1.45$ 时，火焰锋面在 $t=16.2$ ms 时出现断裂现象。

图中 Le 数根据定义计算得到：

$$Le=\frac{\alpha}{D_{AB}} \tag{1}$$

式中：α 为热扩散系数，D_{AB} 为质扩散系数，可分别由下式计算获得[17]：

$$\alpha=\frac{\lambda}{\rho c_p} \tag{2}$$

$$D_{AB}=\frac{0.002\ 66\ T^{3/2}}{p M_{AB}^{1/2}\sigma_{AB}^{2}\Omega_D} \tag{3}$$

式中：λ 为导热系数，ρ 为密度，c_p 为比定压热容，p 为压力，M_A、M_B 为 A、B 的摩尔质量，$M_{AB}=2[(1/M_A)+(1/M_B)]-1$，$\sigma_{AB}$ 为特征长度，Ω_D 为扩散碰撞积分。

根据优先扩散理论，在富燃条件下，计算了少数组分 O_2 的 Le 数 Le_{O_2}。

如图 6 所示，火焰传播半径随时间增加而增大。在 $\varphi=1.10$、1.20 和 1.30 时，火焰传播半径随时间变化的曲线比较光滑，而在 $\varphi=1.00$、1.40 和 1.45 的情况时，曲线会出现不光滑现象，且整体斜率小，表明火焰传播变慢。

火焰传播速度可根据下式计算：

$$v=\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

Liao 等[18]和 Bradley 等[19]的研究表明，在常规尺度定容燃烧弹中，在点火半径 6～8 mm 的范围内，点火能量会影响火焰传播速度。在本实验中，选取点火能影响区域外火焰传播速度进行讨论。由图 7 可知，随着半径的增大，火焰传播速度整体上是下降的，并且在 0～2.5 m/s 范围内，这比常规尺度微型燃烧弹中的丙烷/空气火焰传播速度[12,20]要低。另外，火焰传播速度随着当量比减小先增大后减小，这与图 5 中的火焰传播状态相对应，火焰传播速度在 $\varphi=1.20$ 时最大，丙烷/空气的燃料特性一致[10]。

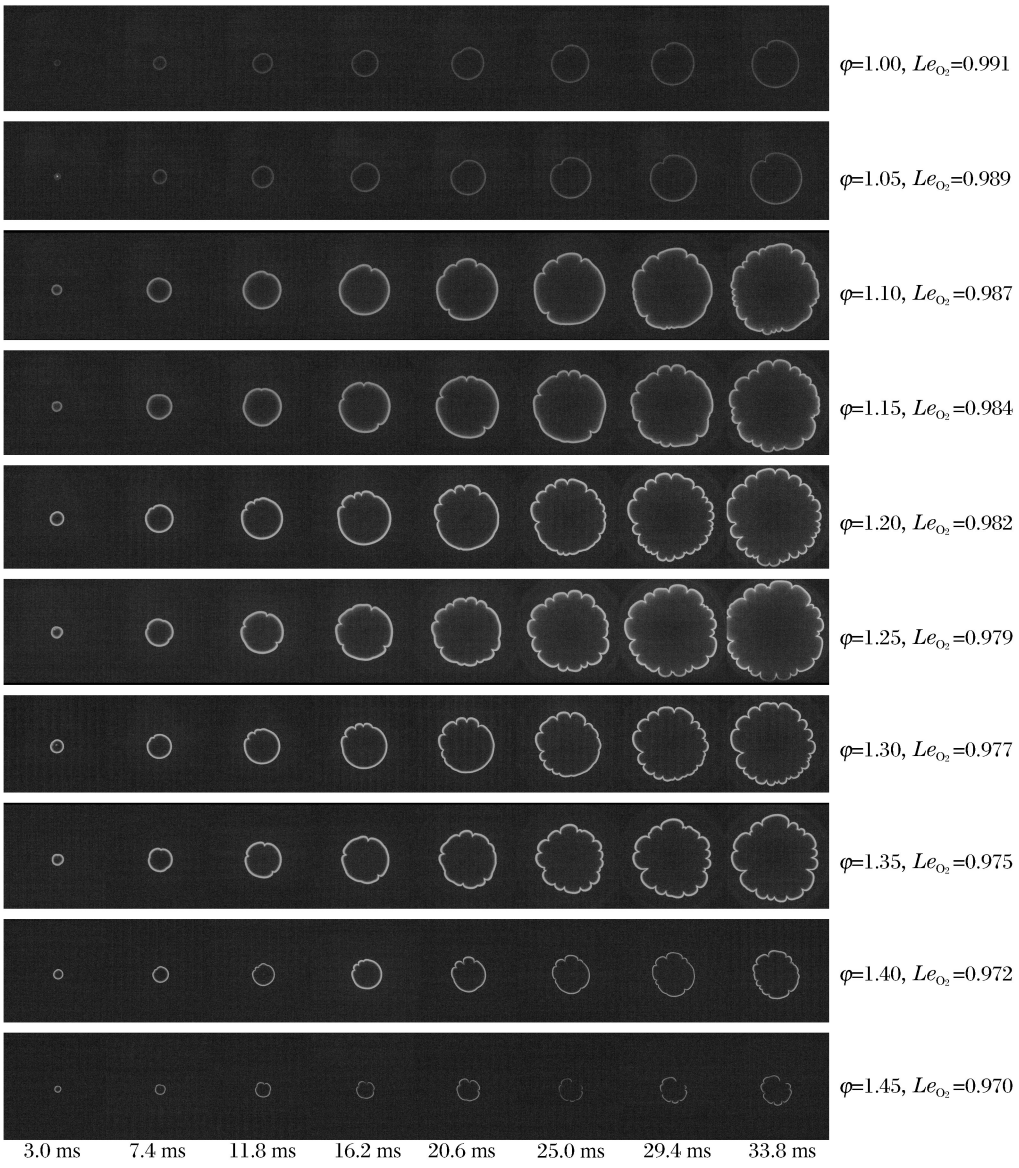


图 5 不同当量比下丙烷/空气火焰传播特性(燃烧室间距 $H=2.0$ mm)

Fig. 5 Flame propagation of propane/air flame in micro-scale chamber ($H=2.0$ mm)

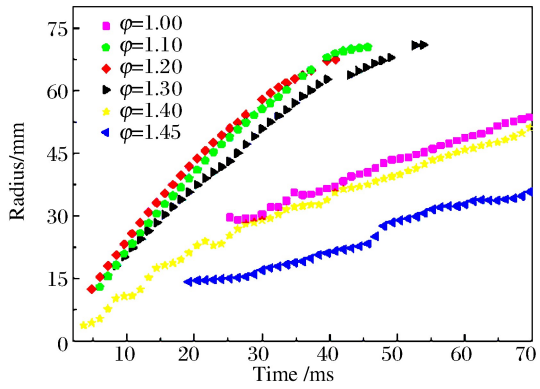


图 6 不同当量比下火焰传播半径随时间变化($H=2.0$ mm)

Fig. 6 Flame radius varying with time at different equivalence ratios ($H=2.0$ mm)

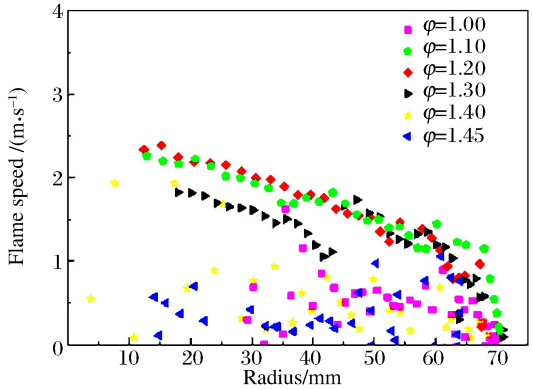


图 7 不同当量比下火焰传播速度特性($H=2.0$ mm)

Fig. 7 Flame propagation speed varying with radius at different equivalence ratios ($H=2.0$ mm)

2.3　狭缝间距的影响

实验对比了 $H=2.0$、2.5、3.0 和 5.0 mm 四种微燃烧室内火焰传播。首先，燃烧室内丙烷/空气火焰传播可燃极限当量比范围受尺度效应的影响比较明显，如图 8 所示。实验中丙烷/空气可燃极限当量比范围窄于常规尺度，在间距 2.0～3.0 mm 时，贫燃预混气（当量比 $\varphi<1$）无法形成火焰传播；随着间距增加，可燃极限当量比范围增大，主要是富燃料工况的范围增大，在 $H=5.0$ mm 时，贫燃料工况 $\varphi=0.9$ 也可以形成火焰传播。

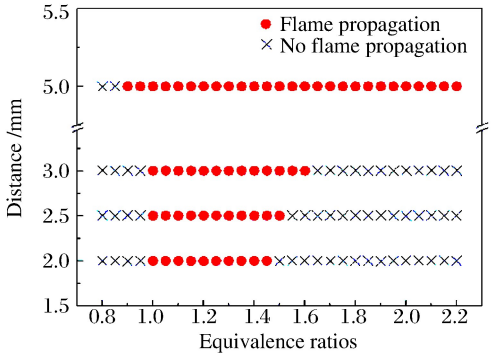


图 8　不同间距下的丙烷/空气预混火焰传播可燃极限当量比范围

Fig. 8　Flammable equivalence ratio limits of propane/air flame propagation in different gaps

其次，间距变化对火焰形态存在明显的影响，图 9 为 $\varphi=1.20$ 时不同间距燃烧室内火焰照片对比结果。随着间距的减小，火焰面的燃烧强度减弱，同时火焰锋面更早出现皱褶，且火焰面上皱褶数目也更多。

此外，燃烧室的尺度变化对火焰传播速度也存在较大影响，如图 10 所示。不同间距下，整体上火焰传播速度随半径增大而减小，而在间距 5.0 mm 燃烧室内，火焰初期存在一个明显的传播速度加速过程，在到达速度峰值后，火焰传播速度逐渐下降。并且对比三个间距下的火焰传播速度，火焰传播速度随着间距变化不是线性变化，随间距变小，火焰传播速度先增大后减小，在 $H=3.0$ mm 时最大。

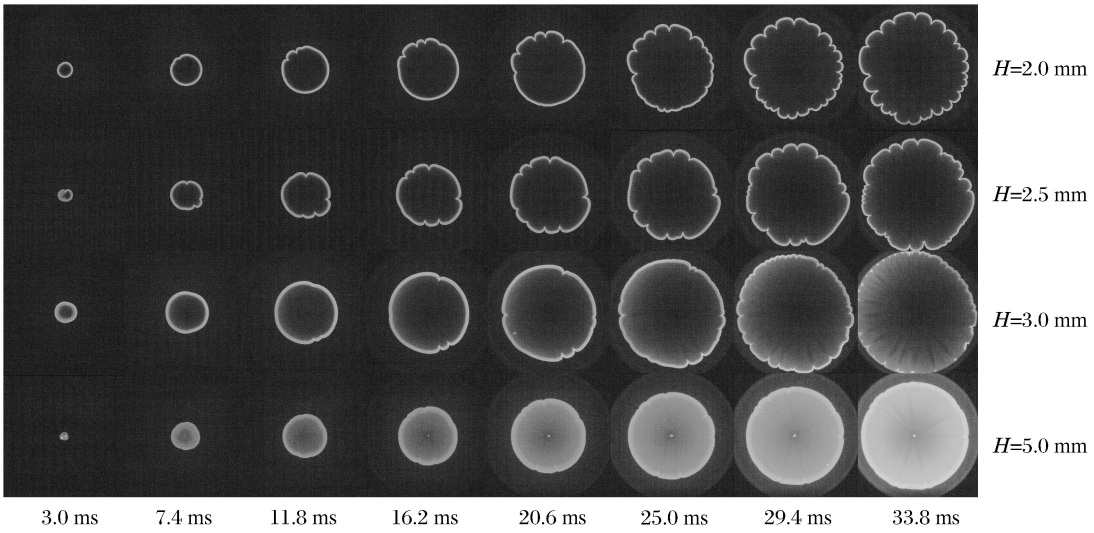


图 9　不同间距下丙烷/空气火焰传播形态（$\varphi=1.20$）

Fig. 9　Shapes of propane/air flame propagation in different gaps ($\varphi=1.20$)

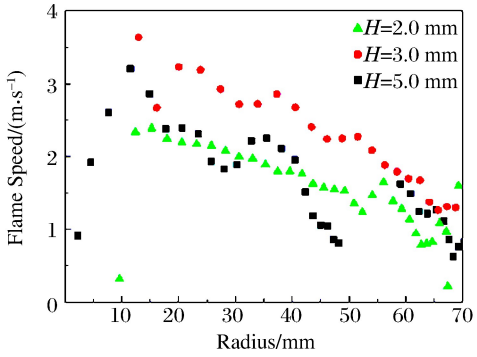


图 10 不同间距下的丙烷/空气火焰传播速度特性(φ=1.20)

Fig. 10 Flame propagation speed of propane/air in different gaps (φ=1.20)

2.4 火焰皱褶与速度特性机制分析

通过上述实验结果可知,微小定容空间内的火焰传播,燃烧室尺度越小,皱褶越容易产生。一方面,由于实验中混合气的初始状态基本为富燃状态,氧气是未燃混合气中的少数组分,有效 $Le<1$,根据优先扩散理论[10],少数组分的 $Le<1$,火焰的热扩散是不稳定的,会造成传播中火焰面皱褶发生。并且随着当量比的增加会使氧的 Le 数减小,扩散不稳定效应增强,火焰更容易产生皱褶(见图 5);如果当量比继续增大,氧的 Le 数继续减小,就会出现火焰断裂或熄灭的现象。另一方面,在燃烧室内的非稳态流动也会使火焰出现褶皱,在固定当量比下,少数组分的 Le 数相等,即热质扩散效应相同,受壁面黏性效应的影响,狭缝间火焰锋面是弯曲的[21],且随间距减小,火焰面变形越大,火焰拉伸作用越强,因而更容易产生皱褶(见图 9)。

火焰传播速度等于燃料层流燃烧速度加上火焰锋面之前的法向未燃气流动速度[22]。层流燃烧速度与燃料当量比密切相关,如图 7 所示,火焰传播速度随当量比变化与丙烷/空气火焰层流燃烧速度特性一致。而图 7 和图 10 均表明火焰传播速度随半径增大而减小的特性,这是受多方面因素的共同作用造成的:首先,燃烧反应受温度的影响非常大,仅考虑燃烧室上下圆形表面散热的话,已燃烧区域散热面积与火焰半径 R_f 平方正相关,$S \approx 2\pi R_f^2$,而火焰面消耗燃料体积与火焰半径呈正相关性,$\Delta V \approx 2\pi R_f \delta_f H$,式中 δ_f 为火焰面厚度。表面散热和燃烧热释放之比与火焰半径和间距之比为正相关,即 $Q_{loss}/Q \propto S/\Delta V \propto R_f/H$,因此,随着火焰的传播,散热面积的增大,火焰传播速度是受到抑制的。其次,随着火焰传播,燃烧放热使得燃烧室内压力增加,进一步降低了火焰的传播速度。

随着燃烧室的尺度减小,火焰传播速度并不是单调下降,而是在间距 3 mm 时最大(见图 10),这表明空间尺度对火焰传播有着显著的影响。由于已燃热气体膨胀会推动火焰锋面之前的未燃气向前运动,壁面的黏性边界层效应对狭缝间未燃气流动可能起着重要作用,在合适的间距下,火焰锋面前沿狭缝主流区未燃气速度会达到某个最大值[21],从而使得火焰传播速度最大。

2.5 掺氢的影响

图 11 为间距 2.5mm、丙烷/空气当量比为 1.0 时,分别掺入体积分数 φ_{H_2}=0%、7.8%、13.2%和 18.0%的 H_2 的预混气燃烧过程。随着 H_2 的掺入,火焰传播速度明显比未掺入的速度要快而且燃烧强度也随之增加。在 φ_{H_2}=13.2%时,发生了爆燃现象,伴随有震动和尖啸声。图 12 为四种掺比预混气的火焰传播速度,可以看出,掺入 H_2 之后,火焰传播速度明显加快,其中 φ_{H_2}=13.2%、18%时的速度达到了 8 m/s 左右。

掺入 H_2 后,初期火焰传播速度快,并且火焰不稳定性增强,表现在褶皱的数量和大小都有所增加,因而增加了燃烧反应面积,使得燃烧强度增加,放热量也随之增加。这与常规尺度下定容燃烧弹中,丙烷/空气掺氢比例小于 40%时,火焰传播过程中表面基本光滑的情况不同[23]。火焰传播后期,燃烧室内压力和温度迅速升高,使得残留未燃预混气同时自燃,从而产生了爆燃,这与内燃机末端未燃气体引发

爆燃机理一致[24]。图 12 表明，掺入 13.2% 的 H_2 的曲线虽然整体呈下降趋势，但在半径 33～52 mm 的过程中有一个的加速过程，使得燃烧室压力和温度继续升高，从而引发了爆燃。随着掺入 H_2 比例的增加，爆燃现象没有出现，一方面是由于预混气已经处于富燃状态，燃料的继续添加即当量比增加会降低反应速率，如图 12 所示，虽然初期速度与掺入 13.2% 的 H_2 相当，但掺入 18% 的 H_2 火焰传播曲线始终是下降的，燃烧室内没有发生爆燃；另一方面，掺入的 H_2 自燃温度高于丙烷，受燃烧室内的压力和温度条件限制，过浓的掺氢比例反而不易引发末端自燃，因此没能产生爆燃。

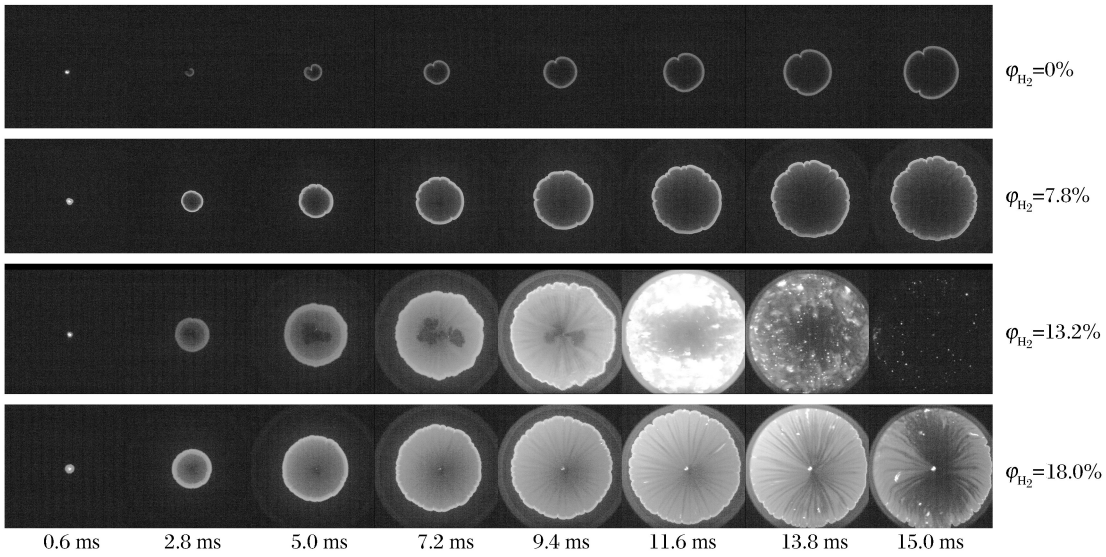


图 11　当量比为 1.00 时丙烷/空气掺入氢气火焰传播特性

Fig. 11　Shapes of flame propagation of C_3H_8/H_2/air mixture (φ=1.00)

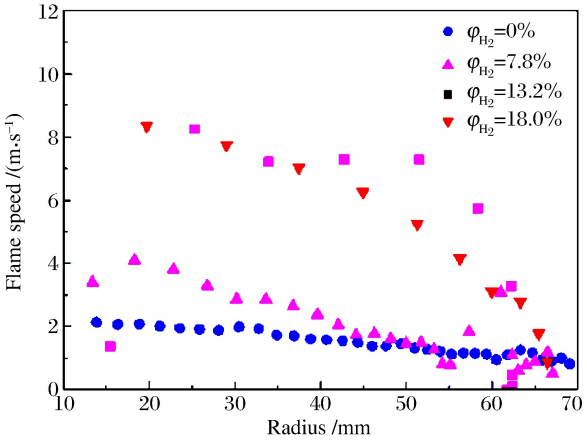


图 12　不同掺氢比下丙烷/空气火焰传播速度特性(φ=1.00)

Fig. 12　Flame propagation speed of C_3H_8/H_2/air mixture (φ=1.00)

3　结　论

实验研究了常温常压下间距 2.0～5.0 mm 的狭缝圆盘状微燃烧室内丙烷/空气火焰传播及加氢爆燃特性，得到如下结论：

(1)在直径 150 mm 的微型定容燃烧室内，丙烷/空气预混气的火焰传播出现光滑、褶皱和断裂三种现象。随着当量比增加和间距减小，褶皱出现位置更早。热质扩散不稳定和流体力学不稳定是褶皱产生的主要原因。

(2)在直径 150 mm 的微型定容燃烧室内,随火焰传播半径增大,火焰传播速度整体是下降的。火焰传播速度随着间距的减小,先增大后减小,在间距 3.0 mm 时最大。随间距尺度减小,火焰传播速度呈现先增大后减小的趋势,散热和狭缝内壁面黏性边界层效应耦合可能是主要原因。微尺度带来的火焰与壁面之间的相互作用是原因之一,燃烧室内压力增加也是另一个主要原因。

(3)在丙烷/空气预混气中掺入适当比例的氢气会在狭缝微型燃烧室内出现爆燃现象,该装置可以作为一种研究爆燃发生机制的新手段。

参考文献:

[1] MARUTA K. Micro and mesoscale combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011,33(1):125-50.

[2] JU Y, MARUTA K. Microscale combustion: technology development and fundamental research[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011,37(6):669-715.

[3] DUNN-RANKIN D, LEAL E M, WALTHER D C. Personal power systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2005,31(5/6):422-65.

[4] WALTHER D C, AHN J. Advances and challenges in the development of power-generation systems at small scales [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011,37(5):583-610.

[5] XIAO H, HE X, DUAN Q, et al. An investigation of premixed flame propagation in a closed combustion duct with a 90° bend[J]. Applied Energy, 2014,134:248-256.

[6] YANG H, FENG Y, WANG X, et al. OH-PLIF investigation of wall effects on the flame quenching in a slit burner[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013,34(2):3379-86.

[7] ZHENG K, YU M, ZHENG L, et al. Experimental study on premixed flame propagation of hydrogen/methane/air deflagration in closed ducts[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017,42(8):5426-5438.

[8] 范爱武,姚洪,刘伟.微小尺度燃烧[M].北京:科学出版社,2012:7-16.

[9] 苏航,蒋利桥,曹海亮,等.微型定容燃烧腔内 C_2～C_4 烷烃/空气火焰传播[J].化工学报,2016,67(11):4574-4579.
SU Hang, JIANG Liqiao, CAO Hailiang, et al. Flame propagation of C_2—C_4 hydrocarbons/air mixture in a constant-volumemicro-chamber[J]. CIESC Journal, 2016,67(11):4574-4579.

[10] 苏航,蒋利桥,曹海亮,等.微型定容燃烧腔内丙烷/空气火焰传播特性[J].内燃机学报,2016,34(3):268-273.
SU Hang, JIANG Liqiao, CAO Hailiang, et al. Flame propagation characteristics of propane/air premixed in amicro constant volume chamber[J]. Transactions of CSICE, 2016,34(3):268-273.

[11] JIANG L Q, SU H, YANG H L, et al. Flame propagation characteristics of n-butane/air mixture in a micro gap constant volume chamber[C]// 10th Asia-Pacific Conference on Combustion 2015. Beijing, China: Combustion Institute, 2015.

[12] TANG C, HE J, HUANG Z, et al. Measurements of laminar burning velocities and Markstein lengths of propane-hydrogen-air mixtures at elevated pressures and temperatures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008,33(23):7274-7285.

[13] 程关兵,李俊仙,李书明,等.氢气/丙烷/空气预混气体爆轰性能的实验研究[J].爆炸与冲击,2015,35(2):249-254.
CHENG Guanbing, LI Junxian, LI Shuming, et al. An experimental study on detonation characteristics of binary fuels hydrogen/propane/air mixture[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(2):249-254.

[14] WU M H, Wang C Y. Reaction propagation modes in millimeter-scale tubes for ethylene/oxygen mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011,33(2):2287-2293.

[15] WU M H, Kuo W C. Transition to detonation of an expanding flame ring in a sub-millimeter gap[J]. Combustion & Flame, 2012,159(3):1366-1368.

[16] MANTON J, VON ELBE G, LEWIS B. Nonisotropic propagation of combustion waves in explosive gas mixtures and the development of cellular flames[J]. The Journal of Chemical Physics, 1952,20(1):153-157.

[17] POLING B E, PRAUSNITZ J M, O'CONNELL J P. The properties of gases and liquids[M]. New York: Mcgraw-hill, 2001.

[18] LIAO S Y, JIANG D M, GAO J, et al. Measurements of Markstein numbers and laminar burning velocities for natural gas-air mixtures[J]. Energy & Fuels, 2004,18(2):316-326.

[19] BRADLEY D, GASKELL P H, GU X J. Burning velocities, Markstein lengths, and flame quenching for spherical methane-air flames: a computational study[J]. Combustion and Flame, 1996,104(1):176-198.

[20] 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.

[21] GAMEZO V N, ORAN E S. Flame acceleration in narrow channels: applications for micropropulsion in low-gravity environments[J]. AIAA Journal, 2006,44(2):329-336.

[22] BRADLEY D, SHEPPART C G W, WOOLLEY R, et al. The development and structure of flame instabilities and cellularity at low Markstein numbers in explosions[J]. Combustion & Flame, 2000,122(1/2):195-209.

[23] 汤成龙. 氢气/气体燃料层流燃烧特性及液滴碰撞动力学基础研究[D]. 西安：西安交通大学，2011.

[24] AFFLECK W S, FISH A. Knock: flame acceleration or spontaneous ignition? [J]. Combustion & Flame, 1968, 12(3):243-252.

Characteristics of propane/air flame propagation and propane/hydrogen/air detonation in a micro chamber

SU Hang [1,2,3,4], JIANG Liqiao [1,2,3], CAO Hailiang [5], LIU Qinfei [1,2,3,4], LI Yanqin [5], WANG Xiaohan[1,2,3], ZHAO Daiqing[1,2,3]

(1. *Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640, *Guangdong, China*;
2. *CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou* 510640, *Guangdong, China*;
3. *Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou* 510640, *Guangdong, China*;
4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
5. *School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou* 450001, *Henan, China*)

Abstract: An experimental study on the characteristics of propane/air and propane/hydrogen/air flame propagation, at ambient temperature and pressure, was carried out in a narrow-gapped micro-chamber shaped like a disk and 150 mm in diameter, which was ignited by a spark igniter; photographs of the flame propagation were obtained with a high-speed camera at a gap distance of 2.0, 2.5, 3.0 and 5.0 mm, respectively; and the flame was observed to be smooth, wrinkled, and broken. As the flame equivalence ratio increases or the height of the gap decreases, the flame wrinkles occur earlier. The flame speed in the micro-chamber was slightly lower than that in the conventional-scale chamber, and it gradually decreased as the flame radius increased. As the gap height decreased, the flame propagation speed increased at first and then decreased, reaching the maximum at the gap height of 3 mm in the micro-chamber. As the heat loss increased, the micro scale effects played an important role in reducing the flame speed and enhancing the flame instability. Addition of hydrogen raised the flame propagation speed, and led to the detonation observed in the micro-chamber at a gap width of 2.5 mm.

Keywords: microscale combustion; flame propagation; flame wrinkles; flame speed; detonation

(责任编辑　曾月蓉)