

DOI: 10.7652/xjtuxb201407007

合成气预混层流火焰结构的实验和数值研究

卫之龙, 王金华, 舒新建, 谢永亮, 王锡斌, 黄佐华

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 利用 OH-PLIF 方法获得了当量比分别为 0.6、0.8、1.0、1.2, CO_2 或 N_2 稀释比分别为 3%、5% 时, 合成气/空气/稀释气本生灯预混层流火焰中 OH 基的分布, 结合 STAR-CD 模拟计算所得火焰中的流场和组分分布进一步分析了火焰结构。研究表明: 随着混合气当量比的增加, OH 基高浓度分布区域由火焰前锋面附近转移到火焰边缘; 混合气较稀时, 火焰前锋面附近 OH 基浓度最高且沿已燃区方向逐步递减, 火焰顶端处 OH 基浓度减小, 模拟计算结果显示火焰顶端并未发生燃料泄漏; 化学当量比下, 火焰前锋面附近和火焰边缘区域 OH 基浓度较高, 火焰前锋面附近出现了预混燃烧区和扩散燃烧区, 该区域中 OH 基呈现“W”型分布; 受 N_2 和 CO_2 稀释的影响, 混合气层流燃烧速度降低, 火焰前锋面拉长, CO_2 对火焰结构的影响比 N_2 更显著; 火焰前锋面附近 OH 基浓度减小, 扩散燃烧区 OH 基浓度增大, 说明火焰的预混燃烧有所减弱, 扩散燃烧有所加强。

关键词: 合成气; OH-PLIF 方法; STAR-CD 模拟; OH 基; 稀释气

中图分类号: TK411 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)07-0034-07

Experimental and Numerical Study on Structure of Laminar Premixed Syngas-Air-Diluents Flames

WEI Zhilong, WANG Jinhua, SHU Xinjian, XIE Yongliang, WANG Xibin, HUANG Zuohua

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The structures of laminar premixed syngas-air-diluents flames were obtained at different equivalence ratios (0.6, 0.8, 1.0, 1.2), diluents (N_2/CO_2), and dilution ratios (3% and 5%) by using OH-PLIF technique. Flame structure was analyzed on the basis of the flow field and species distribution which were calculated with STAR-CD. The results show that high OH distribution shifts towards the outer flame boundary with the increase of equivalence ratio; for lean mixture, the region of high OH radical concentration locates along the conic primary reaction boundary; OH radical concentration at the flame cone tip decreases, and the numerical simulation results show that no leakage occurs at the flame tip; for mixture at stoichiometric ratio, high OH radical concentration appears along the flame front and on the flame surface, meaning the occurrence of a premixed combustion zone and a diffusion combustion zone, and the OH distribution appears to resemble a “W” shape; due to the effects of diluents N_2 and CO_2 , the laminar burning velocity decreases, leading to the extension of the flame front, and CO_2 has a greater impact on the flame structure compared to N_2 ; OH radical concentration decreases along the flame front while increases in the diffusion zone, which means the premixed combustion is weakened while the diffusion combustion is intensified.

收稿日期: 2013-12-19。 作者简介: 卫之龙(1990—),男,硕士生;王金华(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51376004,51006080)。

网络出版时间: 2014-04-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140416.1746.006.html>

Keywords: syngas; OH-PLIF; STAR-CD; OH distribution; diluent

随着石油资源的日益减少和排放法规的日趋严格,寻找切实可行的石油替代燃料具有重要意义。甲醇由于来源丰富、可规模化生产成本较低廉,近年来便成为替代燃料研究中的一个热点。甲醇可以直接用于发动机,但是热值较汽油低,在发动机运行过程中消耗量较大^[1]。因此,提高甲醇在发动机上的热效率、改善发动机性能,成为甲醇燃料发动机研究的重点内容。利用发动机废气余热可以将甲醇裂解,从而得到合成气(H_2 和 CO 的体积比为 2:1),将其作为发动机燃料,可以提高燃料能量品位和发动机效率^[2]。

目前,有关甲醇裂解所得合成气的研究多集中在发动机实验方面^[3-5]。 H_2 特殊的强反应性和输运特性,使得大比例 H_2 的合成气在火焰面结构和火焰自身不稳定性上表现出与传统碳氢燃料的显著差异,进而影响到燃烧室内流动与火焰相互作用,最终影响发动机缸内燃烧过程。本生灯作为一种常见的燃烧器,能够提供稳定的层流火焰结构,是研究火焰结构和火焰自身不稳定性的有效手段。Jin 等利用平面激光诱导荧光研究了不同掺氢比及不同当量比对合成气本生灯预混层流火焰结构的影响^[6]。Law 等利用相机图片研究了不同碳氢燃料的预混层流本生灯火焰,分析了燃料优先扩散和火焰拉伸的耦合作用对火焰顶端结构的影响^[7-8]。Kozlovsky 等利用数值模拟计算研究了路易斯数对本生灯层流火焰结构的影响^[9]。Bouvet 等利用化学发光方法研究了 CO/H_2 在不同比例下的预混层流本生灯火焰的顶端开口现象^[10]。由上述研究可以看出,预混层流火焰结构的研究不仅可以帮助认识火焰传播、局部熄火、着火极限等基本的火焰现象,而且有利于理解优先扩散、路易斯数、火焰拉伸等因素对火焰不稳定性的影响,进而解释湍流燃烧等复杂燃烧现象。此外,作为燃料燃烧的一种常见的中间产物,OH 基广泛存在于反应区和已燃区,通常被用来界定燃烧反应区^[11],OH 基分布在一定程度上能够反映火焰的局部燃烧状况,在燃烧过程中大量存在且易于检测,因此 OH 基通常作为燃烧诊断以及燃烧分析的标定物。Makmool 等利用相机图片、化学发光方法和平面激光诱导荧光研究了液化石油气预混火焰的火焰结构,表明平面激光诱导荧光是研究火焰燃烧特性的最可靠、准确的方法^[12]。

本文利用平面激光诱导荧光(OH-PLIF)测量

预混层流本生灯火焰中间产物 OH 基的分布,并结合 STAR-CD 模拟计算结果,分析研究了预混层流火焰结构特性和火焰自身不稳定特性。考虑到发动机通常采用废气再循环(EGR)来降低燃烧温度和抑制 NO_x 的生成,本文分别采用 CO_2 和 N_2 作为稀释气,测量和分析了不同当量比和不同稀释比条件下合成气火焰的结构特性。

1 实验装置和实验过程

图 1 为实验装置示意图,由 OH-PLIF 系统、供气系统和本生灯组成。OH-PLIF 系统包括 Nd:YAG 激光器(型号为 Quanta-Ray Pro-190,频率为 10 Hz,脉冲时间为 10 ns,脉冲能量为 300 mJ)、染料激光器(Sirah PRSC-G-3000)、能量检测器、BBO 倍频器、透镜组、带有光线增强器(LavisionVC08-0094)的 CCD 相机(LaVision Image Prox)及加装 OH 带通滤波器(LaVisionVZ08-0222)的紫外线滤光镜头(Nikon Rayfact PF 10545MF-UV)。供气系统由气瓶、预混室(容积为 400 mL)和流量计(MKS 流量计,型号分别为 1179A 和 1559A,精度为 1/1 000 L/min)组成。为确保层流燃烧,混合气的 $Re < 2\ 000$ 。本生灯出口直径为 5 mm,出口长度为 30 cm(大于 50 倍管径),底部装有防止回火的单向阀。

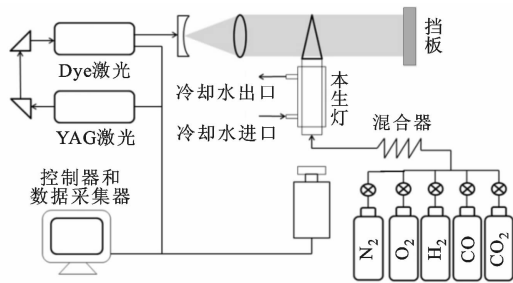


图 1 实验装置示意图

合成气由纯度(质量分数)分别为 99.99% 的 H_2 和 99.99% 的 CO 严格按照流量法以 2:1 的质量比配置而成。稀释比 ϕ_r 定义为稀释气在混合气中所占的体积分数,即

$$\phi_r = \frac{V_{\text{dilution}}}{V_{\text{dilution}} + V_{\text{air}} + V_{\text{fuel}}}$$

实验过程中,YAG 激光器产生 355 nm 的激光,经染料激光器和倍频器后波长变为 282.769 nm,该波长可用于激发 OH 基的 $A^2 \Sigma \leftarrow X^2 \Pi(1,0)$ 跃迁的 $Q1(8)$ 线,每个脉冲激光能量约为 8 mJ。脉冲激

光在通过片光镜头组后产生高约 50 mm 的片光,片光通过本生灯出口的中心轴线激发火焰中的 OH 基产生波长为 308 nm 左右的荧光。在与片光垂直的方向上安装了 ICCD 相机,通过调整拍摄延迟使相机与激光同步,从而保证 ICCD 相机可以完整捕捉到激发的荧光信号。

本文研究了不同当量比 ($\phi = 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$), CO_2 或 N_2 稀释比 ϕ_r 分别为 3%、5% 时的合成气预混层流火焰结构。每个工况下,ICCD 相机连续拍摄 100 张 OH 基分布照片,并将 100 张照片的平均结果用于 OH 基分布分析。

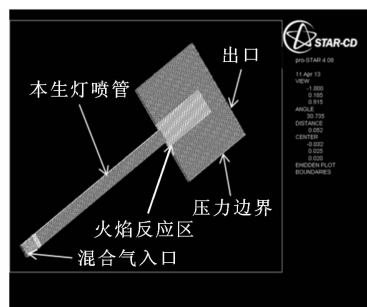
2 STAR-CD 模拟计算

利用 OH-PLIF 获得的火焰结构中 OH 基的分布是实验中重要的信息,火焰中的 OH 基分布在反应区和已燃区,单一的 OH 基分布信息不足以解释火焰结构。CFD 模拟计算可以提供较多与火焰结构相关的信息,如速度场、温度场、组分场等,利用这些丰富的数据信息、结合 OH-PLIF 实验图像,有助于分析火焰中某些现象的成因以及各因素对于火焰结构的影响和作用。

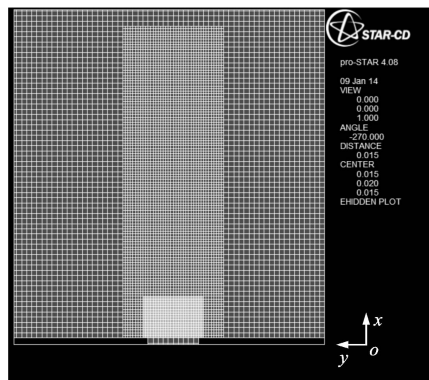
本文采用 SATR-CD 软件来模拟某些工况下合成气的预混层流火焰,本生灯模型按 1:1 比例建立。由于本生灯火焰是轴对称的三维火焰,所以可将三维火焰计算简化为二维火焰计算,计算网格为单层的六面体网格。为获得较好的模拟结果,对火焰反应区网格进行加密,最小网格尺寸为 0.2 mm,网格总数为 16 800。图 2 为模型网格的整体图和反应区局部放大图。模型中燃烧化学反应的机理采用 Scott^[13] 的 CO 和 H_2 简化机理(12 种组分,38 步基元反应)。计算时间为 0.07 s,可保证计算火焰达到稳定状态,时间步长为 10^{-6} s。初始环境条件为 $P_0 = 0.1 \text{ MPa}$, $T_0 = 298 \text{ K}$ 。

3 结果和分析

图 3 为 $Re=1\ 800$ 时合成气火焰的数码照片。由图 3 可以看出,随着当量比的增大,火焰前锋面发光强度增强且发光的颜色随之变化。这是由于随着当量比的增加,混合气中燃料比例的变化使得火焰前锋面处的反应更加激烈,锋面厚度增加,发光强度增大。 $\phi=0.6$ 时,火焰前锋面发出的蓝光是由火焰前锋面上激发态的 CH 活性基发出的; $\phi=1.2$ 时,混合气较浓,火焰前锋面发出的光略带黄光,这是含碳原子团受激发发出的^[14]。由图 3 还可以看出,随



(a) 整体图



(b) 反应区局部放大图

图 2 STAR-CD 模型网格的整体图和反应区局部放大图

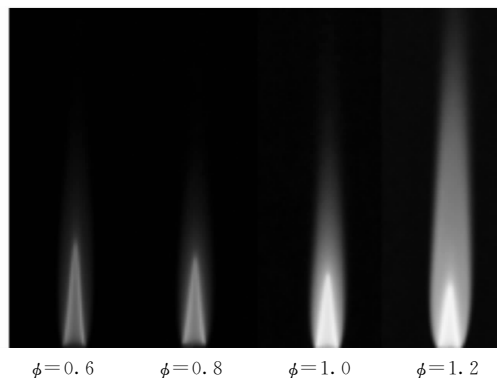


图 3 $Re=1\ 800$ 时合成气火焰数码照片

着当量比的增加,火焰前锋面高度降低。这是由于随着当量比的增加,混合气的层流燃烧加速,而混合气来流速度基本不变,使得火焰前锋面向着混合气来流方向移动,由此导致了火焰前锋面高度降低,面积减小。图 4 为火焰前锋面高度随当量比的变化,其也表现出了图 3 的变化规律。

图 5 为 $Re=1\ 800$ 时合成气火焰的 OH-PLIF 照片。图中火焰区域内颜色较深的部分代表 OH 基浓度高,中心轴附近 OH 浓度梯度最大处是火焰前锋面^[15]。由图 5 可以看出,随着当量比的增加,OH 基高浓度的分布区域由火焰前锋面附近向火焰边缘转移,呈现出了不同的分布形态。这些变化在

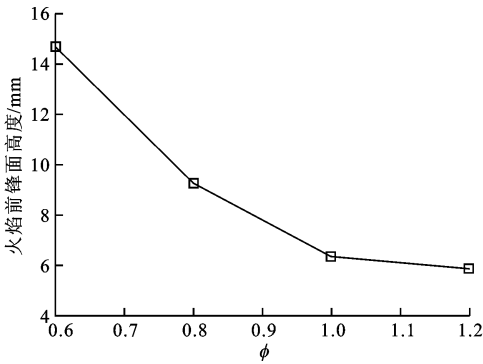


图 4 火焰锋面高度随当量比的变化

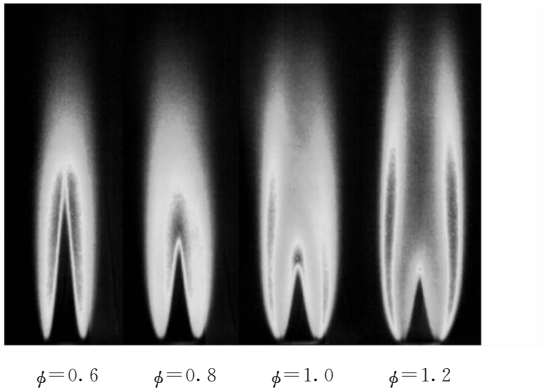


图 5 $Re=1\ 800$ 时合成气火焰 OH-PLIF 照片

普通数码照片中是观察不到的,反映了 OH-PLIF 技术表征火焰锋面结构的优势。在混合气较稀的条件下,OH 基主要分布于火焰前锋面附近;在混合气较浓的条件下,OH 基不仅分布于火焰前锋面附近,而且在火焰边缘也有较高浓度的分布,且随着当量比增加浓度有所提高,这说明此时火焰形成了预混燃烧区和扩散燃烧区。此外,混合气较稀时,OH 基的分布出现了顶端开口,而在化学当量比条件下,OH 基出现了“W”型的分布。

顶端开口是层流本生灯火焰的一个经典现象,该现象的研究对于更好地理解火焰燃烧特性具有重要意义。本实验中, $\phi=0.6$ 条件下数码照片并未表现出明显的顶端开口,但是在 OH-PILF 图片中 OH 基分布出现了顶端开口,这说明此时火焰虽然没有出现顶端开口,但是顶端燃烧强度已经有所降低,所以 OH 基分布出现了顶端开口。图 6 为 $\phi=0.6$ 时合成气火焰 OH-PILF 照片及 STAR-CD 模拟结果。由图 6a 可以看出,OH 基表现出了相同的分布趋势,并且顶端开口存在,表明 STAR-CD 模拟计算结果可较为准确、定性地反映实际燃烧情况。由于 OH 基的分布是化学反应与输运共同作用的结果,因此解释 OH 基在顶端开口需要考虑两方面的影

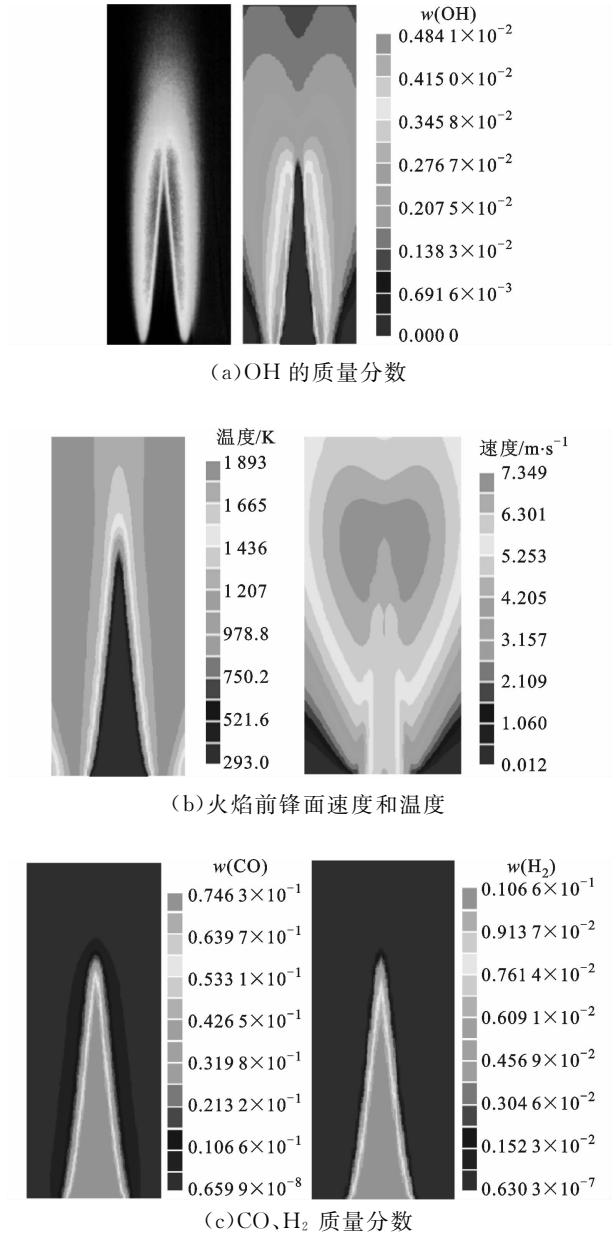


图 6 $\phi=0.6$ 时合成气火焰 OH-PLIF 照片及 STAR-CD 模拟结果

响:①本生灯层流火焰在火焰前锋面顶端处拉伸率达到最大,导致此处混合气中优先扩散作用加强,使得在火焰前锋面顶端的燃烧强度降低;②火焰前锋面速度随着火焰前锋面高度的升高而增大,且在锋面顶端达到最大值,速度方向是由预混燃烧区指向扩散燃烧区,所以锋面顶端的 OH 基受到的输运影响较强。火焰温度可以直接反映燃烧的剧烈程度^[7],因此可以根据已燃区温度分布来判断燃烧强度。由图 6b 可以看出,火焰前锋面顶端的最高温度较低,这说明火焰前锋面顶端的燃烧强度减小。综合以上两方面可知:前锋面顶端具有较大的拉伸率,由此加强了优先扩散的影响,导致该处燃烧强度降

低,OH 基的生成量较其他反应区域有所减少,这是造成 OH 基顶端开口的主要原因;受速度场输运的影响,OH 基的浓度减小,这进一步加剧了顶端开口。由图 6c 中 CO 及 H₂ 的分布还可以看出,顶端开口并未伴随锋面顶端处的燃料泄漏,这与之前的研究结果是一致的^[9]。

在 $\phi=0.8$ 的条件下,顶端开口消失。这是由于随着当量比的增加,火焰前锋面高度降低,火焰顶端前锋面的曲率半径增大,使得锋面顶端附近拉伸率减小,由此削弱了顶端结构对质量扩散的促进作用;混合气中燃料比例增大,导致火焰顶端的优先扩散作用削弱。因此,顶端开口在该情况下消失。

在化学当量比条件下,OH 基出现了“W”型分布,了解“W”型分布的成因可以更好地理解燃烧微观过程,实现调整参数对火焰的控制。图 7 为合成气火焰 OH-PLIF 照片与 STAR-CD 模拟计算的 CO 和 H₂ 分布。由图 7 可以看出:在 $\phi=0.8$ 条件下,CO 和 H₂ 可以在火焰前锋面附近基本消耗掉,因此该条件下 OH 基在火焰前锋面附近浓度较高;在 $\phi=1.0$ 条件下,火焰前锋面附近 H₂ 可以完全消耗掉,但是火焰前锋面附近 CO 未能完全消耗,出现了明显的扩散现象。利用 CHEMKIN 2.0 和 GRI-mech 3.0 机理^[16]可以对 H₂ 和 CO 总反应率进行计算,图 8 为 $\phi=1.0$ 时合成气火焰中 H₂ 和 CO 总

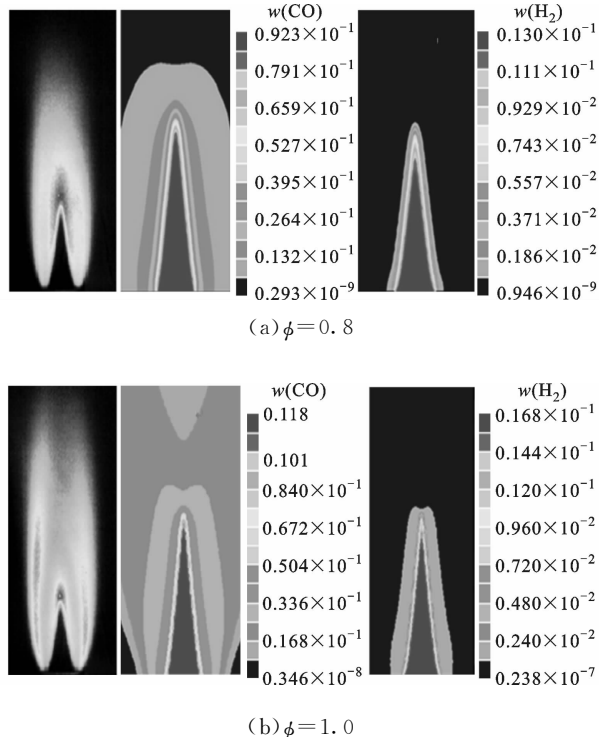


图 7 合成气火焰 OH-PLIF 照片与 STAR-CD 模拟计算的 CO 和 H₂ 分布

反应率。由图 8 可以看出,在化学当量比条件下, H₂ 总反应率及其峰值低于 CO,说明在该条件下,相较于 CO, H₂ 在锋面附近可以更快地与混合气中的 O₂ 迅速反应且完全消耗掉,而 CO 与混合气中 O₂ 反应较慢,不能在锋面附近快速、完全消耗掉,从而向外扩散且与环境中的 O₂ 继续进行反应,形成扩散燃烧。因此,火焰反应区分为预混燃烧区和扩散燃烧区,OH 基呈现出“W”型分布。

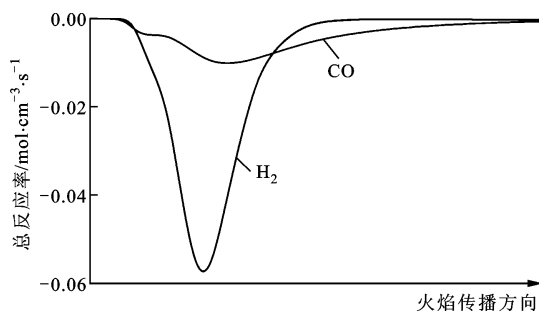


图 8 $\phi=1.0$ 时合成气火焰中 H₂ 与 CO 的总反应率

图 9 为 $Re=1\ 800$ 、 $\phi=1.0$ 时不同 N₂ 稀释比下的合成气火焰 OH-PLIF 照片。由图 9 可以看出,随着 N₂ 稀释比的增加,火焰前锋面拉长,前锋面附近及顶端聚集的 OH 基浓度降低,火焰边缘的 OH 基浓度明显增加。这是由于混合气中的 N₂ 本身不参与反应,但吸收热量,而 N₂ 稀释比增加会导致反应物的放热量减少,燃烧产物的吸热量增多,从而使火焰温度降低, H₂ 及 CO 反应速率随之降低。因此,火焰前锋面附近的反应强度削弱,火焰层流燃烧速度降低,导致火焰前锋面拉长。火焰温度降低,在火焰前锋面附近 H₂ 和 CO 因反应强度降低而不能完全消耗掉,且扩散到火焰边缘,导致扩散燃烧加剧。

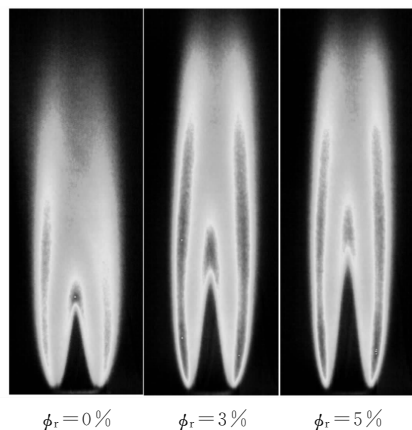


图 9 $Re=1\ 800$ 、 $\phi=1.0$ 时不同 N₂ 稀释比下的合成气火焰 OH-PLIF 照片

图 10 为 $Re=1\ 800$ 、 $\phi=1.0$ 、 $\phi_r=5\%$ 时不同稀

释气下的火焰 OH-PLIF 照片。由图 10 可以看出,混合气在掺混 CO₂ 之后,火焰前锋面进一步拉长,火焰前锋面附近的 OH 基浓度进一步降低,火焰边缘 OH 基浓度有所增加。这是由于掺混 CO₂ 对火焰结构的影响与掺混 N₂ 的影响基本相同,CO₂ 的吸热能力比 N₂ 更强,因此对火焰温度及反应速率的影响更大。CO₂ 掺混比例的增加会抑制 CO 的氧化反应,导致预混燃烧减弱,扩散燃烧增强。

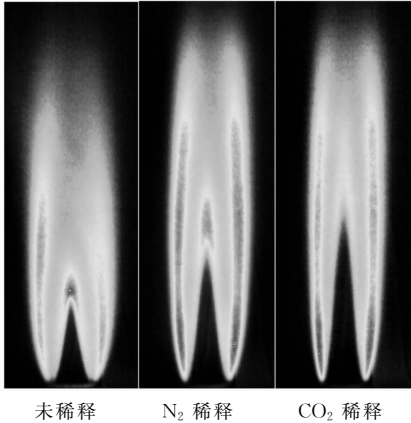


图 10 $Re=1\,800$ 、 $\phi=1.0$ 、 $\phi_r=5\%$ 时不同稀释气下的火焰 OH-PLIF 照片

图 11 为 $\phi=1.0$ 时火焰前锋面高度及层流火焰速度随 ϕ_r 的变化。由层流本生灯计算层流火焰速度公式 $S_L=u\sin(\theta/2)$ 可知,出口气体速度保持不变时,层流火焰速度越小, θ 越小,从而火焰前锋面越高。

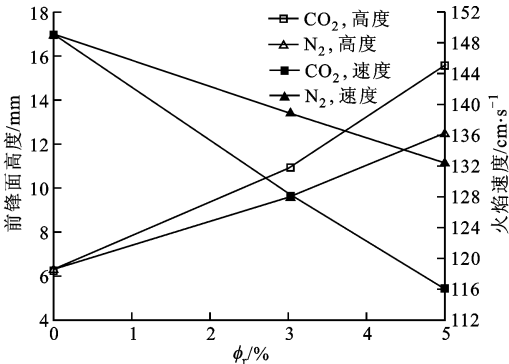


图 11 $\phi=1.0$ 时火焰前锋面高度及层流火焰速度随 ϕ_r 的变化

由图 11 可以看出,由于掺混 CO₂ 和 N₂,层流火焰速度下降,火焰前锋面高度上升。在相同稀释比下,相比于掺混 N₂,掺混 CO₂ 对层流火焰速度的影响更显著,火焰前锋面高度增加更显著。

4 结 论

利用 OH-PLIF 激光测量技术获得了合成气/

稀释气本生灯预混层流火焰 OH 基分布,利用 STAR-CD 对火焰中的流场和组分分布进行了模拟计算,结合 OH-PLIF 实验图像研究了火焰前锋面结构,得到的主要结论如下。

(1)混合气在较稀条件下,OH 基主要分布在火焰前锋面附近且向已燃区方向发展,浓度呈现逐步递减的趋势。因火焰前锋面顶端拉伸率最大,此处混合气中优先扩散作用加强,火焰前锋面顶端的燃烧强度降低,OH 基的生成量减少,加之锋面顶端输运的影响,OH 基顶端出现开口。模拟计算结果显示,此时并未伴随顶端燃料泄漏。

(2)化学当量比条件下,混合气 OH 基在火焰前锋面附近,火焰边缘区域浓度较高。H₂ 的净消耗率远大于 CO,H₂ 在火焰前锋面附近很快完全消耗掉,而 CO 不能在火焰前锋面被完全消耗而发生扩散,所以火焰出现预混燃烧区和扩散燃烧区,OH 基呈现“W”型分布。

(3)掺混 N₂ 和 CO₂ 会导致火焰前锋面拉长,同时 OH 基浓度在火焰锋面附近减小,在扩散燃烧区增大,说明火焰的预混燃烧有所减弱,扩散燃烧有所加剧。在相同稀释比下,CO₂ 由于具有更强烈的吸热能力和对 CO 氧化反应的抑制作用,所以对火焰结构的影响比 N₂ 更显著。

参考文献:

[1] AOLAH G, GOEPPERT A, PRAKASH S G K, et al. Beyond oil and gas: the methanol economy [M]. Weinheim, Germany: Wiley, 2006: 179-230.

[2] 冯春晃,高孝洪. 甲醇裂解燃料点燃式发动机的研究 [J]. 内燃机学报, 1989, 7(2): 151-157.

FENG Chunhuang, GAO Xiaohong. Researches on spark ignition engine fueled with dissociated methanol [J]. Transactions of CSICE, 1989, 7(2): 151-157.

[3] 姚春德,徐元利,杨建军,等. 甲醇裂解气对点燃式发动机性能影响研究 [J]. 工程热物理学报, 2009, 30(2): 353-356.

YAO Chunde, XU Yuanli, YANG Jianjun, et al. Effects of dissociated methanol on performance of SI engine [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(2): 353-356.

[4] 杨成,王炳辉,励金祥,等. 柴油机进气预混微量甲醇裂解气的试验研究 [J]. 车用发动机, 2009, 3: 77-81.

YANG Cheng, WANG Binghui, LI Jinxiang, et al. Experimental study of diesel engine fueled with diesel blended with dissociated methanol gas [J]. Vehicle

- Engine, 2009, 3: 77-81.
- [5] 方葛文, 高孝洪. 点燃式发动机掺烧甲醇裂解气的研究 [J]. 内燃机学报, 1993, 11(2): 131-136.
FANG Gewen, GAO Xiaohong. Study on spark-ignition engine fueled with gasoline blended with dissociated methanol gas [J]. Transactions of CSICE, 1993, 11(2): 131-136.
 - [6] FU J, TANG C L, JIN W, et al. Study on laminar flame speed and flame structure of syngas with varied compositions using OH-PLIF and spectrograph [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(3): 1636-1643.
 - [7] MIZOMOTO M, ASAKA Y, IKAI S, et al. Effects of preferential diffusion on the burning intensity of curved flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1985, 20(1): 1933-1939.
 - [8] LAW C K, ISHIZUKA S, CHO P. On the opening of premixed Bunsen flame tips [J]. Combustion Science and Technology, 1982, 28(3/4): 89-96.
 - [9] KOZLOVSKY G, SIVASHINSKY G I. On open and closed tips of Bunsen burner flames [J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 1994, 6(2/3): 181-192.
 - [10] BOUVET N, CHAUVEAU C, GÖKALP I, et al. Characterization of syngas laminar flames using the Bunsen burner configuration [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(1): 992-1005.
 - [11] QUANG V N, PHILLIP H P. The time evolution of a vortex-flame interaction observed via planar imaging of CH and OH [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1996, 26(1): 357-364.
 - [12] MAKMOOL U, JUGJAI S, TIA S. Structures and performances of laminar impinging multiple premixed LPG-air flames [J]. Fuel, 2013, 112(10): 254-262.
 - [13] 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.
 - [14] 蒋德明, 陈长佑, 杨嘉林, 等. 高等车用内燃机原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006.
 - [15] KALMTHOUT E V, VEYNANTE D, CANDEL S. Direct numerical simulation analysis of flame surface density equation in non-premixed turbulent combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1996, 26(1): 35-42.
 - [16] SMITH G P, GOLDEN D M, FRENKLACH M, et al. GRI Mech-3.0 [EB/OL]. [2013-11-20]. <http://www.mw.berkeley.edu/grimech/>.

[本刊相关文献链接]

- 陈朝阳, 张春化, 陈昊, 等. 当量比对二甲醚氧化分解过程的影响. 2014, 48(5): 32-36 + 77. [doi: 10.7652/xjtuxb201405006]
- 魏若男, 周蓉芳, 周竹杰, 等. 双电极点火时间间隔对天然气-空气预混合气层流燃烧的影响. 2014, 48(1): 7-12. [doi: DOI:10.7652/xjtuxb201401002]
- 康婵, 杨星, 刘杰, 等. 负电场下点电极和网状电极对预混稀燃火焰的影响. 2014, 48(1): 31-36. [doi: 10.7652/xjtuxb201401006]
- 张猛, 王金华, 谢永亮, 等. CH_4/H_2 /air 预混湍流火焰前锋面结构探测. 2013, 47(11): 14-18. [doi: 10.7652/xjtuxb201311003]
- 王金华, 张猛, 谢永亮, 等. 合成气纯氧高压预混湍流火焰结构研究. 2013, 47(10): 87-90. [doi: 10.7652/xjtuxb201310015]
- 孟祥文, 杨星, 康婵, 等. 直流电场对预混 $CH_4/O_2/N_2$ 火焰传播特性影响的试验研究. 2013, 47(7): 13-17. [doi: 10.7652/xjtuxb201307003]
- 张进华, 李婷, 王孙安, 等. 可变视场下的火灾探测算法. 2012, 46(10): 29-35. [doi: 10.7652/xjtuxb201210006]
- 唐安东, 孟祥文, 周蓉芳, 等. 非均匀电场对火焰传播速率的影响. 2012, 46(9): 16-20. [doi: 10.7652/xjtuxb201209004]
- 周蓉芳, 魏若男, 周竹杰, 等. 点火能量对天然气空气预混合气层流燃烧的影响. 2012, 46(7): 21-25. [doi: 10.7652/xjtuxb201207005]
- 刘德新, 刘斌. 二次喷油优化直喷汽油机冷启动排放特性的研究. 2012, 46(1): 13-18. [doi: 10.7652/xjtuxb201201003]
- 刘亦夫, 刘兵, 刘亮, 等. 天然气缸内直喷发动机在不同喷射和点火时刻下的排放与燃烧特性. 2011, 45(5): 12-16. [doi: 10.7652/xjtuxb201105003]
- 高辉, 吴筱敏, 高忠权, 等. 盲源分离法在火花塞离子电流信号分离中的应用. 2010, 44(1): 22-26. [doi: 10.7652/xjtuxb201001006]

(编辑 苗凌)