

DOI: 10.7652/xjtuxb201310015

合成气纯氧高压预混湍流火焰结构研究

王金华¹, 张猛¹, 谢永亮¹, 卫之龙¹, 黄佐华¹, Hideaki KOBAYASHI²

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 流体科学研究所, 东北大学, 仙台, 宫城 980-8577, 日本)

摘要: 为了理解高压下合成气纯氧预混湍流火焰中火焰与流动的耦合作用, 利用 OH-PLIF 激光测量技术开展了高压条件下合成气纯氧预混湍流火焰结构研究, 获得了高压下预混湍流火焰前锋面结构, 得到了火焰前锋面尺度信息, 包括火焰体积、火焰面密度和火焰前锋面尺度, 并分析了预混湍流火焰前锋面与湍流尺度和层流火焰尺度的相互作用关系。研究表明: 高压预混湍流火焰前锋面为褶皱火焰面结构, 火焰面为小尺度的尖峰结构和大尺度的树干状结构互相叠加; 合成气火焰前锋面结构比甲烷混合气火焰更加精细, 尺度更小; 合成气预混湍流火焰体积较小, 放热区较小, 在预混贫燃燃气轮机燃烧室中容易产生燃烧振荡; 合成气和甲烷火焰在湍流燃烧速率上表现出不同的转折规律, 这可以通过火焰前锋面尺度和火焰自身不稳定性尺度来解释; 湍流流动对火焰前锋面的扰动受到火焰自身不稳定性尺度的限制。

关键词: 合成气; 预混湍流火焰; 湍流火焰速率; 高压

中图分类号: TK16 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)10-0087-04

Experimental Study on Turbulent Premixed Flames of Syngas Oxyfuel Mixtures at High Pressure

WANG Jinhua¹, ZHANG Meng¹, XIE Yongliang¹, WEI Zhilong¹, HUANG Zuohua¹,
Hideaki KOBAYASHI²

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

2. Institute of Fluid Science, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan)

Abstract: An experimental study on turbulent premixed CO/H₂/CO₂/O₂ flames as a model of syngas combustion was conducted to understand the flame-turbulence interaction of syngas oxyfuel turbulent premixed flames at high pressure. The instantaneous flame front structure of the turbulent premixed flames at high pressure was obtained with the OH-PLIF technique. The quantitative flame front structure parameters like flame volume, flame surface density and flame front scale were derived. The flame-turbulence interaction was analyzed for various mixtures. The results show that the flame front structure of syngas flames is much finer and has a smaller scale compared with that of CH₄/air flame. The syngas flames with the narrow heat release region tend to show combustion oscillation in the premixed-type gas turbine combustor. The bending of S_T/S_L with u'/S_L is not observed for CO/H₂/CO₂/air flames while it is observed for other flames, and one reason for this could be that the wrinkle of the flame front due to turbulence is limited by the flame intrinsic instability.

Keywords: syngas; turbulent premixed flame; turbulent burning velocity; high pressure

收稿日期: 2013-03-17。 作者简介: 王金华(1981—), 男, 讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51006080)。

网络出版时间: 2013-06-04

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130604.1445.001.html>

整体气化联合循环(IGCC)结合碳捕捉和封存技术(CCS)可以实现包括 CO₂ 在内的零排放。IGCC 可以利用各种燃料,包括煤、生物质燃料和废弃物等,将燃料在气化炉中气化,然后净化,得到合成气,其主要组分是 CO 和 H₂。合成气通过燃气和蒸汽联合循环产生电力。目前,IGCC 结合 CCS 主要有两种技术途径:一种是燃烧前碳脱除,将合成气先转化为 H₂,再利用 H₂ 燃烧发电;另一种途径是纯氧燃烧^[1-2],燃烧过程中不采用常规的空气做氧化剂,而是采用纯氧,结合废气再循环(主要成分是 CO₂ 和 H₂O),这样在燃烧过程中不产生 NO_x,而且排气中 CO₂ 浓度很高,易于分离。两种方法中纯氧燃烧被认为很有发展前景^[3]。

合成气纯氧燃烧是 IGCC 结合 CCS 中燃气轮机的关键科学问题,其混合气是 CO/H₂/CO₂/O₂。合成气富含氢气,其热物性和输运特性与传统碳氢燃料相差很大,CO/H₂/CO₂/O₂ 混合气中含有大比例 CO₂,研究表明,CO₂ 将参与燃烧化学反应,对燃烧过程产生与 N₂ 相比显著不同的影响。预混湍流燃烧是先进贫燃预混燃气轮机中的燃烧方式,CO/H₂/CO₂/O₂ 混合气特殊的物理化学性质和大比例 CO₂ 对燃烧流动与燃烧化学反应过程产生显著影响,需要开展深入的实验基础研究工作,为燃气轮机设计提供理论基础。

本文利用平面激光诱导荧光(OH-PLIF)测量技术^[4-5],测量高压下 CO/H₂/CO₂/O₂ 混合气预混湍流火焰前锋面结构,并与 CO/H₂/CO₂/空气和 CH₄/空气对比,获得湍流火焰速率,分析合成气和湍流强度对高压预混湍流燃烧的影响。

1 实验装置和方法

实验在日本东北大学流体科学研究所高压燃烧实验装置^[6]中进行,图 1 给出了实验装置示意图。CO/H₂/CO₂/O₂ 混合气预混湍流火焰稳定在预混湍流燃烧本生灯出口(本生灯出口直径为 20 mm),在本生灯出口上游 40 mm 处放置湍流产生孔板来产生各向同性湍流。湍流流场通过热线测速仪测量,并采用各向同性湍流假设计算获得湍流特征参数,包括 Kolmogorov 尺度 η_k 、积分尺度和湍流强度 u' 等。本生灯放置在高压容器内,通过通入和流出大量的高压空气来形成稳定的高压环境,同时带走燃烧热量,保持高压容器内新鲜空气环境。利用 OH-PLIF 测量技术获得火焰瞬时前锋面图片,将 560 张 OH-PLIF 图片火焰前锋位置的平均值作为

火焰前锋面平均位置。将火焰图片定量后处理,得到火焰前锋面定量尺度信息,包括火焰体积 V_f 、火焰面密度 Σ 、火焰前锋面分形尺度 ϵ_i 等。图 2 给出了火焰面抽取后的平均等值线,利用内火焰锋面角度($\langle c \rangle = 0.1$),采用角度法得到湍流火焰速率 S_T 。

CO/H₂/CO₂/O₂ 混合气中 $x_{CO_2} = 0.55$,对于 CO/H₂/CO₂/空气混合气, $x_{CO_2}/(x_{CO} + x_{H_2} + x_{CO_2}) = 0.3$,合成气组分为 $x_{CO}/x_{H_2} = 65/35$,其中 x 为气体在混合气中的摩尔分数。实验压力为 0.5 MPa,温度为 25℃。表 1 给出了混合气和火焰物性参数,其中 ϕ 为当量比, S_L 为层流火焰速率, T_{ad} 为绝热火焰温度, δ_L 为层流火焰厚度, Le_{eff} 为有效路易斯数。为了对比研究 3 种混合气湍流燃烧特性,通过调节当量比使 3 种混合气的 S_L 基本保持不变。

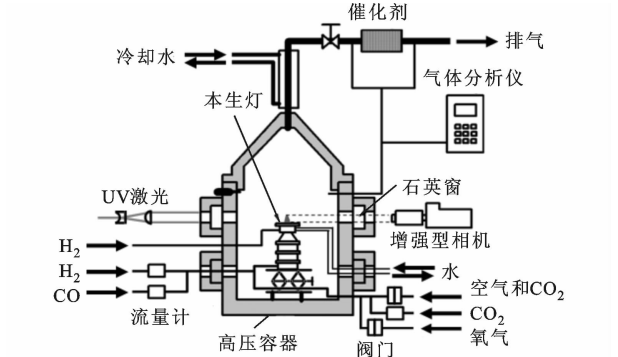


图 1 高压燃烧实验装置示意图

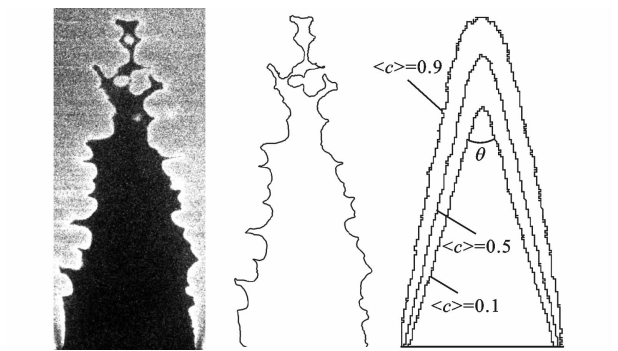


图 2 火焰前锋面抽取和湍流火焰速率计算

表 1 混合气和火焰物性参数

气体组分	ϕ	$S_L/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	T_{ad}/K	δ_L/mm	Le_{eff}
CO/H ₂ /CO ₂ /O ₂	1.0	18.5	2 044	0.024	0.663
CO/H ₂ /CO ₂ /空气	0.7	18.4	1 888	0.029	0.605
CH ₄ /空气	1.0	18.8	2 253	0.024	1.048

2 实验结果和分析

图 3 给出了 3 种典型的混合气预混湍流火焰 OH-PLIF 图片。可以看出,高压下预混湍流火焰前

锋面都呈现凹凸褶皱结构,CH₄ 火焰前锋面尺度较大,为较小的凹向未燃区凹结构和较大的凸向未燃区凸结构叠加,其中凹结构为尖峰结构,而凸结构为较大尺度的树干状结构。对于合成气火焰,火焰前锋面尺度明显减小,火焰前锋面呈现大量凹向未燃区的尖峰结构。这是由于合成气火焰有效路易斯数远小于 1,火焰自身不稳定性的影响导致火焰对湍流扰动的响应更积极,产生更褶皱的火焰前锋面结构。同时,CO/H₂/CO₂/O₂ 混合气火焰比 CO/H₂/CO₂/空气混合气火焰前锋面更加精细。

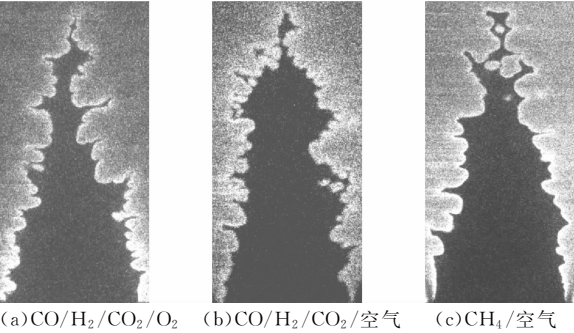


图 3 3 种混合气预混湍流火焰的典型 OH-PLIF 图片
($u'/S_L \leq 0.55$)

图 4 给出了 3 种混合气预混湍流火焰面体积。火焰面体积表征火焰面的放热区域,由图 2 给出的火焰面平均等值线计算获得。将火焰面看作对称结构,将 $\langle c \rangle = 0.1$ 到 $\langle c \rangle = 0.9$ 间的面积旋转积分得到火焰面体积。可以看出,合成气火焰体积远小于甲烷火焰,表明合成气预混湍流燃烧具有较小的放热空间。前期研究工作表明,较小的放热空间容易造成预混湍流燃烧的燃烧振荡。这说明合成气在先进的贫燃预混燃烧方式的燃气轮机中容易造成燃烧振荡。同时,CO/H₂/CO₂/O₂ 混合气火焰比 CO/H₂/CO₂/空气混合气火焰体积大,这是由于 CO/H₂/CO₂/O₂ 混合气火焰中存在大比例的 CO₂。作者前期研究工作表明,废气再循环增大火焰体积主要是因为 CO₂,而不是 H₂O^[7]。

图 5 给出了火焰面密度。火焰面密度表征火焰

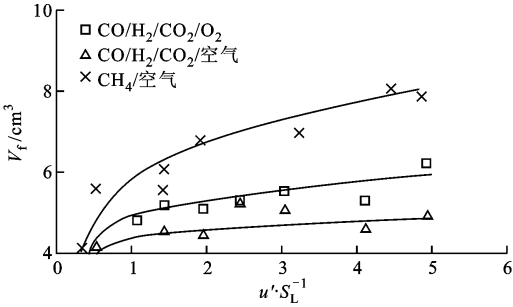


图 4 3 种混合气预混湍流火焰面体积

前锋面褶皱程度,定义为单位面积内火焰前锋面的长度,可以看出,合成气的火焰面密度大于甲烷火焰,这是由于前述合成气火焰前锋面结构精细引起的。后续尺度分析中将会讨论火焰前锋面尺度。

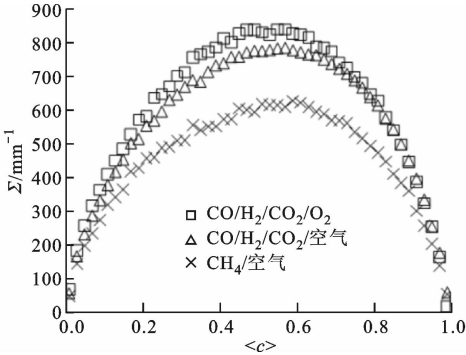


图 5 3 种混合气预混湍流火焰面密度($u'/S_L \leq 0.55$)

图 6 给出了 S_T/S_L 和 u'/S_L 的关系。对于 CH₄/空气混合气, S_T/S_L 随着 u'/S_L 的增加而增加,在 u'/S_L 为 3.5 附近增幅变缓。这种转折现象是碳氢燃料的普遍现象。然而,对于 CO/H₂/CO₂/空气混合气火焰,在实验范围内没有观察到转折现象,对于 CO/H₂/CO₂/空气混合气火焰,转折现象发生在 u'/S_L 约为 4.0 附近。对于褶皱火焰面模式的预混湍流火焰, S_T/S_L 随 u'/S_L 的增加(由于受到湍流的扰动)火焰前锋面尺度减小,火焰面面积增加。转折现象表明强湍流扰动火焰前锋面趋于极限,这种极限现象是由于预混湍流火焰中流动与火焰化学反应相互耦合作用的结果。

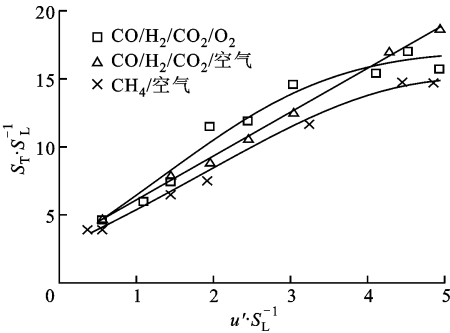


图 6 3 种混合气 S_T/S_L 和 u'/S_L 的关系

图 7 给出了预混湍流火焰的各种尺度关系,包括火焰前锋面分形尺度 ϵ_i ,火焰自身不稳定性尺度 l_i ,湍流涡平均直径 l_v ,最新的直接数值模拟(DNS)表明, l_v 约为 $10\eta_k$ ^[8]。其中火焰前锋面分形尺度 ϵ_i 表征火焰前锋面的最小尺度。火焰自身不稳定性尺度 l_i 表征流体力学不稳定性与质量热扩散不稳定性的综合作用,根据非线性稳定发展理论计算获得^[9-10]。可以看出,随着湍流雷诺数的增加,湍流涡尺度减小,引起火

焰前锋面尺度减小,从而增加火焰前锋面面积,导致 S_T 增加。作者前述研究表明,对于碳氢燃料, S_T/S_L 随着 R_λ 的增加先近似线性增加,然后发生转折,增幅较为平缓,转折处 ϵ_i 接近于 l_i [11]。图中可以看出,对于 $\text{CH}_4/\text{空气}$ 混合气火焰,转折发生在 $S_T/S_L = 3.5$ 处,这时 ϵ_i 达到最小值,接近 l_i 。然而,对于 $\text{CO}/\text{H}_2/\text{CO}_2/\text{空气}$ 混合气火焰, ϵ_i 比 $\text{CH}_4/\text{空气}$ 火焰小, l_i 显著小于 ϵ_i 。 $\text{CO}/\text{H}_2/\text{CO}_2/\text{空气}$ 混合气火焰 ϵ_i 在实验范围内随 R_λ 的增加还没有达到最小值,因此 S_T/S_L 没有出现转折现象。对于 $\text{CO}/\text{H}_2/\text{CO}_2/\text{空气}$ 混合气火焰,转折现象发生在 $u'/S_L = 4.0$ 和 $R_\lambda = 180$ 处, $\text{CO}/\text{H}_2/\text{CO}_2/\text{O}_2$ 火焰的 l_i 和 ϵ_i 比 $\text{CO}/\text{H}_2/\text{CO}_2/\text{空气}$ 混合气火焰更小,但是在 $R_\lambda = 200$ 处附近, ϵ_i 接近于 l_i ,导致了 S_T/S_L 的转折现象。

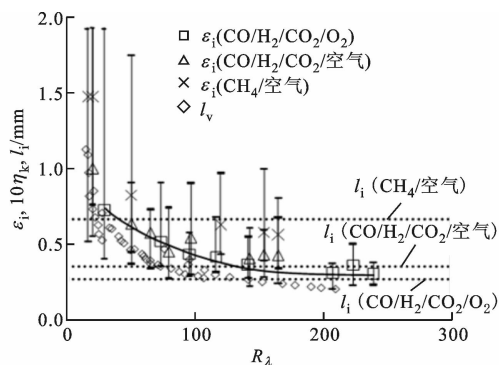


图7 3种混合气预混湍流火焰的尺度关系

3 结 论

(1) 高压预混湍流火焰前锋面为褶皱火焰面结构,火焰面为小尺度的尖峰结构和大尺度的树干状结构互相叠加。合成气火焰前锋面结构比甲烷混合气火焰更加精细,尺度更小。

(2) 合成气预混湍流火焰体积较小,放热区较小,在预混贫燃燃气轮机燃烧室中容易产生燃烧振荡。

(3) 合成气和甲烷火焰在湍流燃烧速率上表现出不同的变化规律,这可以通过火焰前锋面尺度和火焰自身不稳定性尺度来解释。湍流流动对火焰前锋面的扰动受到火焰自身不稳定性尺度的限制。

参考文献:

- [1] 邢桂菊. 纯氧燃烧及其天然气-纯氧燃烧特性 [J]. 工业炉, 2002, 24(1): 1-5.
XING Guiju. Pure oxygen combustion and natural-gas pure oxygen combustion property [J]. Industrial Furnace, 2002, 24(1): 1-5.
- [2] 张霞, 童莉葛, 王立, 等. 富氧燃烧技术的应用现状分析 [J]. 冶金能源, 2007, 26(6): 41-45.

- ZHANG Xia, TONG Lige, WANG Li, et al. The application and analysis of oxygen-enriched combustion [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2007, 26(6): 41-45.
- [3] WALL T F. Combustion processes for carbon capture [J]. Proceedings of Combustion Institute, 2007, 31: 31-47.
- [4] 穆克进, 张彦, 惠鑫, 等. 运用 OH-PLIF 方法探测预混火焰锋面结构 [J]. 工程热物理学报, 2008, 29(4): 711-714.
- MU Kejin, ZHANG Yan, HUI Xin, et al. Observing the structure of premixed flame front by OH-PLIF method [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(4): 711-714.
- [5] 何勇, 王智化, 杨丽, 等. H_2 含量和湍流强度对典型烟煤合成器火焰结构影响测量的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(5): 28-33.
HE Yong, WANG Zhihua, YANG Li, et al. Study on effects of H_2 fraction and turbulent intensity on the flame structure of typical coal gasification syngas by OH-PLIF measurements [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(5): 28-33.
- [6] KOBAYASHI H, NAKASHIMA T, TAMURA T, et al. Turbulence measurements and observations of turbulent premixed flames at elevated pressures up to 3.0 MPa [J]. Combustion and Flame, 1997, 108(1/2): 104-117.
- [7] KOBAYASHI H, YATA S, ICHIKAWA Y, et al. Dilution effects of superheated water vapor on turbulent premixed flames at high pressure and high temperature [J]. Proceedings of Combustion Institute, 2009, 32: 2607-2614.
- [8] TANAHASHI M, KANG S J, MIYAMOTO T, et al. Scaling law of fine scale eddies in turbulent channel flows up to $Re_\tau = 800$ [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2004, 25(3): 331-340.
- [9] YUAN J, JU Y G, LAW C K. On flame-front instability at elevated pressures [J]. Proceedings of Combustion Institute, 2007, 31: 1267-1274.
- [10] SIVASHINSKY G I. Instabilities, pattern formation, and turbulence in flames [J]. Fluid Mechanics, 1983, 15: 179-199.
- [11] KOBAYASHI H, SEYAMA K, HAGIWARA H, et al. Burning velocity correlation of methane/air turbulent premixed flames at high pressure and high temperature [J]. Proceedings of Combustion Institute, 2005, 30: 827-834.

(编辑 杜秀杰 荆树蓉)