

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201705135

# 二级环流对双级贫预混火焰熄火边界的影响

赵文华, 邱朋华, 刘 粟, 吕亚锦, 沈闻凯, 邢 畅

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为改善预混火焰的燃烧稳定性, 提出双级贫预混燃烧的火焰组织思路, 对预混气流进行不同当量比的径向分级, 使其能在较低当量比时稳定燃烧. 以一定流动条件下直管射流火焰和双级贫预混火焰的中心气流所能达到的最小稳燃当量比作为熄火边界, 实验测量并分析火焰不同组织方式和环流条件变化对熄火边界的影响. 结果表明: 布置在射流火焰外围的环流对火焰根部附近的浓度和速度分布有一定影响; 双级贫预混火焰的二级预混环流能够通过减弱外界环境气氛对锋面前预混气的稀释作用而拓宽火焰的熄火边界; 环流的预混当量比是影响火焰熄火边界的关键. 与均一当量比的直管射流火焰相比, 双级贫预混火焰能够在更低的当量比条件下稳定燃烧, 对工业上控制  $\text{NO}_x$  排放有着重要的意义.

**关键词:** 分级燃烧; 双级贫预混火焰; 熄火边界; 火焰稳定; 同轴射流

**中图分类号:** TK16 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)07-0059-07

## Influence of secondary coflow on the extinction limit of dual-stage lean premixed flame

ZHAO Wenhua, QIU Penghua, LIU Li, LÜ Yajin, SHEN Wenkai, XING Chang

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Dual-stage lean premixed combustion is proposed to improve the stability of premixed flame. It is organized by dividing premixed gas into radial stages with different equivalence ratio for the purpose of stable combustion under lower global equivalence ratio. The minimum equivalence ratio of primary gas in jet flame or dual-stage lean premixed flame is defined as extinction limit and measured experimentally, and the effect of flame manner and coflow parameters on extinction limit is investigated. The result shows that the outer coflow affects the distribution of concentration and velocity near flame root. The secondary premixed coflow in dual-stage lean premixed flame can reduce the dilution effect of outside atmosphere on the premixed gas, so the flame has a wider extinction limit. The secondary equivalence ratio is key parameter affecting extinction limit of dual-stage lean premixed flame. Comparing with uniform jet flame, the dual-stage lean premixed flame can combust under lower equivalence ratio, which is important for industrial controlling of  $\text{NO}_x$  emission.

**Keywords:** staged combustion; dual-stage lean premixed flame; extinction limit; flame stability; coaxial jet

贫预混低氮燃烧技术是工业上燃烧气体或液体燃料时控制  $\text{NO}_x$  排放的有效方法, 其核心思想是通过组织低化学当量比的预混燃烧来控制燃烧室内的火焰温度, 从而抑制热力型  $\text{NO}_x$  的生成<sup>[1-4]</sup>. 在燃气轮机上的应用实践表明该技术可将  $\text{NO}_x$  排放量控制在  $9 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$  以下<sup>[5-6]</sup>. 除此之外, 与扩散火焰相比, 预混燃烧还有着火焰长度短和燃烧效率高的优点. 然而, 采取贫预混燃烧方式的工业设备也存在容易发生热声振荡和贫态吹熄等不稳定燃烧的问题<sup>[7-8]</sup>, 这是因为在组织贫预混低氮燃烧时为控制火焰温度需将大量空气引入燃烧区, 此时火焰的预混当量比往往已接近燃料的贫燃极限<sup>[9-10]</sup>, 所以燃

烧区内的局部熄火现象增多, 进而造成火焰的燃烧稳定性下降<sup>[11-13]</sup>. 因此, 如何拓展贫预混火焰的熄火边界, 保证其在低当量比时的稳定燃烧就成为贫预混燃烧技术发展的关键<sup>[14-15]</sup>.

针对这一问题, 本文提出了双级贫预混燃烧 (Dual-stage lean premixed combustion) 的火焰组织思路, 与以往均一当量比预混燃烧方式不同的是在燃烧区中组织预混火焰的多当量比径向分级, 即将火焰分为当量比不同但都为贫预混状态的一级火焰 (Primary flame) 和二级火焰 (Secondary flame). 其中, 一级火焰的当量比较高, 便于维持整体火焰的稳定, 并为二级火焰提供热量和活性物质. 二级火焰的预混当量比较低, 处于燃料的贫燃极限之外, 所以需依靠一级火焰的支撑来维持燃烧, 但可将更多的空气引入到燃烧区内, 利于控制火焰温度以减少热力型  $\text{NO}_x$  的生成. 通过对一、二级预混气参数的合

收稿日期: 2017-05-23

基金项目: 国家自然科学基金委创新研究群体(51421063)

作者简介: 赵文华(1988—), 男, 博士研究生;

邱朋华(1973—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 邱朋华, qiuph@hit.edu.cn

理选取,使双级贫预混火焰具有较均一火焰在更低的当量比下稳定燃烧的能力,从而达到既控制污染物排放又保障火焰稳定的目的。

前人对当量比非均匀分布的层流预混火焰已做过一定的研究. Kyritsis<sup>[16-18]</sup>在圆柱形直管内充入当量比沿轴向梯度变化的预混气,并在当量比较大的一端点燃使火焰在管内沿轴向传播,从而组织起分层燃烧(Stratified combustion)火焰. 结果发现各处火焰的燃烧特性较均一当量比时有很大的不同,尤其是贫燃极限可从均匀混气时的 0.5 向外扩展至 0.35. Cruz<sup>[19]</sup>与 Lecordier<sup>[20]</sup>对分层燃烧的研究也发现了相同的现象. 在另外一种当量比非均匀分布的火焰——三重火焰(Triple flame)中,火焰锋面前预混气当量比的梯度变化方向与火焰传播方向相垂直. Ruetsch<sup>[21]</sup>发现此时整体火焰的传播速度要高于化学恰当比的平面预混火焰,这一现象也是由于当量比的非均匀分布所致. Kim<sup>[22-23]</sup>通过实验测量发现燃烧区中预混气当量比的梯度变化情况将直接影响到火焰燃烧状态。

以上研究都表明当燃烧区中预混气的当量比非均匀分布时,火焰的燃烧状态并非相应均匀火焰的简单叠加,因各参数火焰间的相互影响会表现出不同的燃烧特性. 但是,分层火焰是在管内传播且无法维持稳定、静止的燃烧状态. 而在三相火焰中当量比的分布范围往往是从贫燃极限一直变化至富燃极限,这与贫预混火焰也有着很大的不同. 因此,本文以同轴射流的方式组织起双级贫预混火焰,将稳定燃烧时一级火焰能够达到的最小当量比作为熄火边界,实验研究不同环流条件下熄火边界的变化规律,从而判断双级贫预混火焰在低预混当量比燃烧时的稳燃能力和影响因素。

## 1 试验系统介绍

因为在层流状态下可避免湍流流动对火焰的影响,能够更准确地捕捉到两级火焰的作用关系和整体火焰特征,所以,本文搭建了双级火焰燃烧特性试验系统(Dual-stage combustion characteristic experimental system, DCCE),研究层流状态下的双级贫预混火焰熄火边界的变化规律. 图 1 为试验台的系统示意图. 实验中所用气体均由气瓶提供,以甲烷作为燃料,空气作为氧化剂,以四台经标定的质量流量计控制气体流量,各组分流量的不确定度在 1% 以内. 预混气进入燃烧器前先在恒温水浴中加热以保证燃烧前气体初温为 300K. 燃烧器由中心管和与之同轴布置的外环管组成,中心管的内、外径分别为 4 mm 和 6 mm,外环管的内径为 27 mm. 一级预

混气由中心管进入到燃烧区,二级预混气则通过外围的环形通道进入. 另外,为便于观察和拍摄火焰图像,中心管的出口高度较环管高出 2 mm. 环管出口处设置有不锈钢多孔网,用于稳定气体流动和均匀速度分布. 燃烧器外围布置有边长 200 mm 的正方形火焰罩以避免外界气流扰动对火焰造成影响。

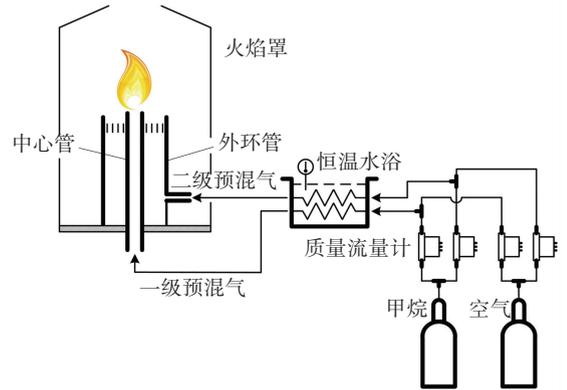


图 1 双级火焰燃烧特性试验台系统图

Fig.1 Schematic of DCCE

## 2 工况设定与试验方法

在双级贫预混火焰中,一级火焰需不断向外提供热量和活性物质来支撑二级火焰的燃烧,所以,一级火焰是保证整体火焰稳定的关键. 又因为预混火焰的化学当量比是影响其燃烧状态的重要参数,所以,本文以火焰稳定燃烧时一级火焰能达到的最小当量比作为熄火边界,研究二级环流参数变化对熄火边界的影响. 实验时一级预混气出口速度  $v_{pri}$  的变化范围为  $0.3 \sim 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在此区间内可保证锥型的火焰形态,便于观察和分析<sup>[24]</sup>. 实验过程中发现当二级环流的速度较大时,由于来流或外界扰动的加剧会使火焰发生偏斜和不规律的抖动,影响数据的准确性. 因此,实验中二级环流的出口速度  $v_{sec}$  分别设为 0.1、0.2 和 0.3 m/s,通过对不同工况下实验结果的分析来比较环流速度因素的影响. 另外,设定二级火焰的预混当量比  $\varphi_{sec}$  分别为 0.2、0.3 和 0.4,此时其已处于燃料的贫燃极限之外,需要依靠一级火焰的支撑来维持燃烧,符合双级贫预混火焰的概念设想。

采用准稳态法测定一级火焰的熄火边界<sup>[25]</sup>,实验步骤如下:首先,在燃烧器的一、二级通道内分别通入流速为  $v_{pri}$ 、当量比为 1 的一级预混气和相应工况的二级气流,并于出口处点燃. 待火焰稳定后,在保证其他参数不变的前提下逐渐降低一级预混气的当量比直至火焰熄灭,记录熄灭前火焰稳定燃烧时所能达到的最小当量比  $\varphi_{ex}$ . 则  $\varphi_{ex}$  即为相应二级环流条件下一级火焰在速度  $v_{pri}$  时的熄火边界。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 二级空气环流对熄火边界的影响

首先研究二级环流对火焰周围流场的影响. 当环管中的二级气流为空气时, 其并不会参与到燃烧反应中, 主要改变的是一级火焰周围的速度分布. 图 2 为以空气作为二级环流时, 一级火焰熄火边界的分布, 并将其与无环流单管射流火焰时的结果进行对比. 从图 2 中可发现二级空气环流的存在使一级火焰的熄火边界向上移动, 且环流速度越大则移动幅度也就越大, 但当一级火焰速度较低时, 各工况下的熄火边界曲线却趋向于重合.

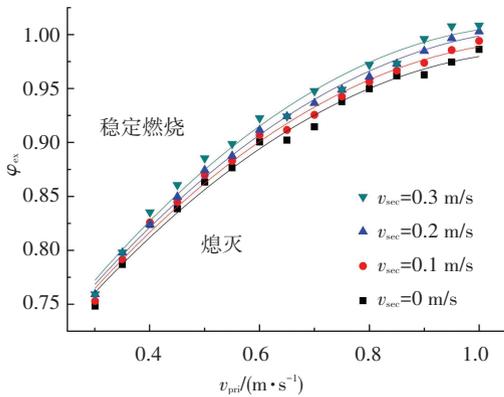


图 2 二级空气环流对熄火边界的影响

Fig.2 Influence of secondary air coflow on the extinction limit

Lewis 和 von Elbe<sup>[26]</sup> 认为层流状态下直管射流火焰稳定的关键在于火焰根部气体流动速度和火焰传播速度的平衡. Glassman<sup>[22]</sup> 和 Law<sup>[27]</sup> 在相应文献中也沿用了这一理论. 如图 3 所示, 对于中心管长度大于 10 倍管径的直管层流射流火焰, 可认为出口处的气流速度满足边界无滑移的泊肃叶流动分布, 而喷口附近的火焰传播速度则受预混气参数和喷管壁面猝熄作用的共同影响. 所以, 当管内气流平均速度为  $v_{pri1}$  时, 出口处的气体流动速度分布曲线可与火焰传播速度曲线  $S_{Li}$  相切而形成平衡点, 满足火焰稳定的条件. 当管内平均流速增加到  $v_{pri2}$  时, 原平衡被打破并使火焰移向下游. 此时, 由于火焰与喷口壁面的距离增大而使猝熄影响减弱, 在图 3 中表现为火焰传播速度曲线向射流边界方向的移动, 于是在位置 2 处重新建立速度的平衡. 但是, 由于预混气与环境气氛存在着浓度差, 所以当预混气离开喷口后会因组分物质的扩散输运而受到外界大气的稀释, 且稀释程度与火焰离喷口的高度呈正相关性. 因此, 在中心气流流速不断增加后将达到一种临界状态: 如果继续加快管内气体流速, 则火焰传播速度曲线因稀释的加强而开始向远离射流边界的方向移动, 由于无法在下游位置再次形成平衡点而

使火焰最终被吹熄. 此时, 预混气流的浓度和速度参数即为射流火焰的极限熄火条件.

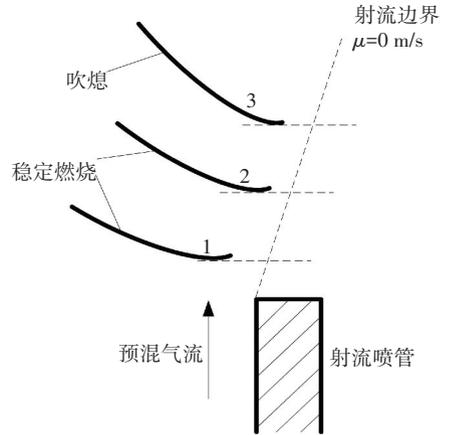
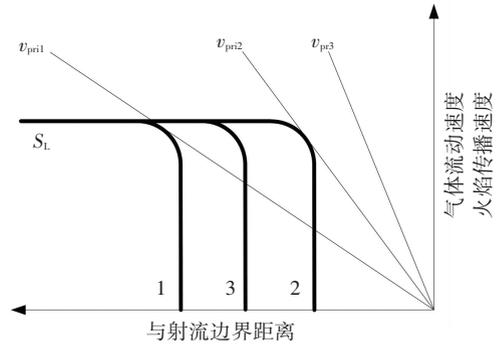


图 3 层流射流火焰的稳定原理<sup>[22]</sup>

Fig.3 Schematic illustration of laminar jet flame stability

本文参考以上的速度平衡理论对双级贫预混火焰熄火边界的变化规律进行分析. 由于所研究区域的尺度较小, 所以为方便分析可将喷口附近由气流轴向速度分量  $\mu = 0 \text{ m/s}$  各点连线所形成的射流边界, 以及射流边界内的速度分布近似为线性<sup>[28-29]</sup>. 因而, 如果没有二级环流而只进行一级的单管射流燃烧时, 中心管附近的流动速度分布如图 4(a) 所示. 但对于双级火焰, 环管中的二级气流同样会形成射流边界, 并与一级气流的射流边界于下游某处汇合, 形成如图 4(b) 所示的汇流区. 显然, 汇流区的存在使得一级火焰边缘的气流流速加快, 而该处又是射流火焰形成稳定点火环的关键位置<sup>[30]</sup>. 所以, 为保证火焰稳定就需要更高的火焰传播速度来与之平衡, 因此造成一级火焰的熄火边界向预混当量比较大的方向发生移动. 但是, 当一级气流或二级气流的速度较低时, 相应射流边界的外扩程度也随之减小, 汇流区位置移向下游, 如图 4(c) 所示. 其对一级火焰熄火边界的影响也将减弱. 所以, 在图 2 中二级环流的速度越大则熄火边界受到的影响也越大, 并且当一级火焰流速较低时, 各工况曲线也将趋于一致.

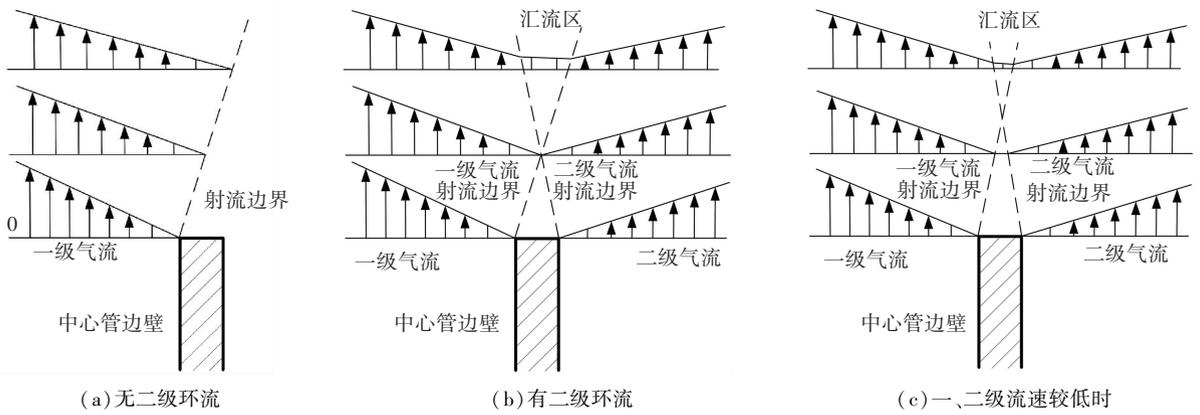


图4 二级环流对喷嘴附近流场分布的影响

Fig.4 Influence of secondary coflow on the velocity distribution near nozzle

通过以上的分析可认为二级环流对火焰周围流场的影响主要是加快了火焰根部附近的气流速度,从而增大了一级火焰维持稳定燃烧的最小预混当量比,造成熄火边界曲线上移,火焰稳定能力变差。

### 3.2 二级预混气环流对熄火边界的影响

图5为以空气和不同当量比的预混气作为二级环流时的火焰形态,各工况中一级预混气的浓度和

速度参数以及二级气流的速度参数保持一致。从图5中可看出当布置二级预混气环流时,一级火焰的外围将形成一层二级环焰。一部分的二级预混气在经过环焰锋面时发生了燃烧反应,而其他部分则从环焰外围直接流走。二级气流的预混当量比对环焰形状有明显影响,当量比越大则环焰直径也越大。

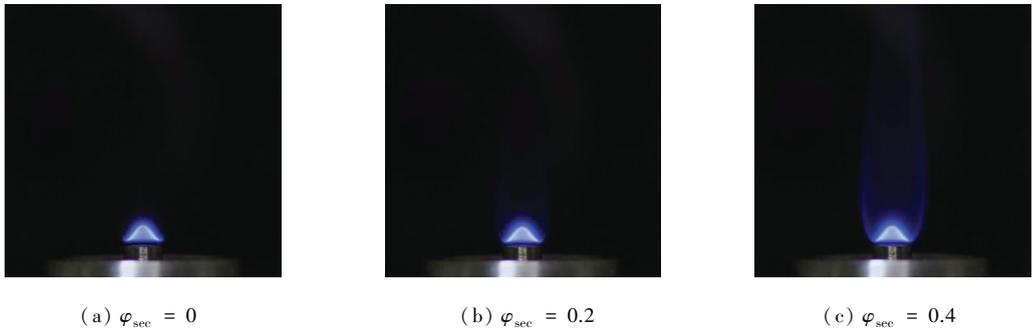


图5 二级环流在不同当量比时的双级贫预混火焰形态

Fig.5 Shape of dual-stage lean premixed flame under different secondary equivalence ratio

当环管中的二级气流为一定当量比的预混气时,除流动外其所自身发生的燃烧反应也会对整体火焰产生影响。图6分别为0.1、0.2和0.3 m/s的二

级预混气环流在不同预混当量比时一级火焰的熄火边界。结果显示布置二级预混气环流后,熄火边界曲线向下发生移动,并且 $\phi_{sec}$ 越大则移动幅度也越大。

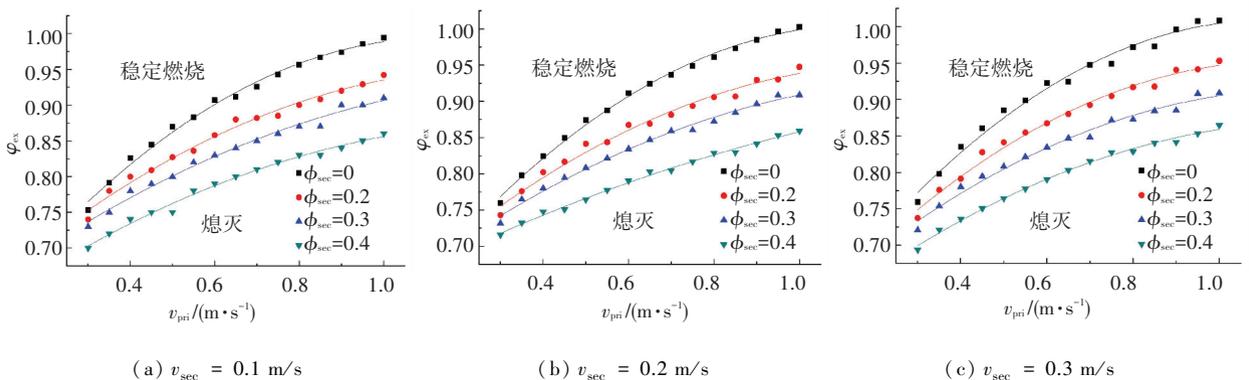


图6 不同环流条件时双级贫预混火焰的熄火边界

Fig.6 Extinction limit of dual-stage lean premixed flame under different coflow

由于二级预混气环流的存在, 中心喷管出口处的一级预混气与周围气氛的燃料浓度差减小, 所以一定程度上降低了火焰根部径向上燃料的浓度梯度. 因而, 当火焰远离喷口时可削弱外界气氛通过扩散过程对火焰根部的稀释影响. 所以在图 7 中当一级预混气流速由  $v_{pri2}$  提升至  $v_{pri3}$  时, 火焰传播速度曲线会继续保持着向射流边界方向移动的趋势, 最终在 3 的位置处与流速曲线相切, 重新达到使火焰稳定的条件. 这就解释了图 6 中当二级气流为预混气时, 其对一级火焰熄火极限的影响规律. 而当气体流速较低时, 火焰与喷口的距离较近, 壁面的猝熄影响远大于二级气流对火焰根部传播速度的加强. 所以图中各曲线在  $v_{pri}$  较低时趋于一致.

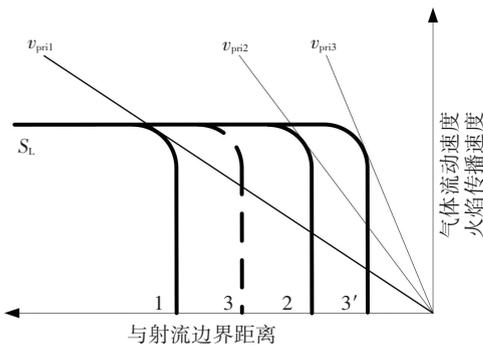


图 7 二级预混环流对火焰稳定的影响

Fig.7 Influence of secondary premixed coflow on flame stability

图 5 中各工况下的火焰都处于稳定燃烧状态,

但当二级环流的预混当量比不同时火焰根部与中心管出口的距离也随之改变. 通过图 5 中像素点的亮度变化确定火焰锋面, 进而计算出当二级预混当量比为 0、0.2 和 0.4 时的火焰吹起高度分别为 0.71、0.58 和 0.52 mm, 即二级环流的预混当量比越大则火焰与喷口距离就越小. 这是由火焰根部的燃料浓度、气流速度和猝熄强度三者相互平衡的结果. 相应的变化趋势也与前文通过速度平衡使火焰稳定的推论一致, 从侧面证明了分析的可靠性.

双级贫预混火焰由处于中心的一级火焰和外围的二级环流共同构成, 预混气环流的存在显著地拓展了中心一级火焰的熄火边界. 虽然有部分的二级预混气未参与燃烧反应, 但由于二级预混气的当量比较低, 所以二级气流中参与了燃烧反应的燃料和空气量的计入将使预混火焰的整体当量比进一步降低. 综上所述, 双级贫预混火焰能够在保证火焰稳定燃烧的前提下将更多的空气引入到燃烧区中, 这对在工业上控制  $\text{NO}_x$  的排放将有着重要作用.

### 3.3 二级环流参数变化对熄火边界的影响

表 1 列出了出口平均流速为 0.4 m/s、0.6 m/s 和 1.0 m/s 的一级火焰在不同二级环流条件下的熄火边界以及相应的统计数据. 其中  $\bar{\varphi}_{ex}$ 、 $s$ 、 $\bar{\varphi}_{ex}/s$  分别是当二级预混气环流具有相同当量比和不同流速时双级贫预混火焰熄火边界的平均值、标准差和标准差系数.

表 1 不同环流条件下双级贫预混火焰的熄火边界

Tab.1 Extinction limits of dual-stage lean premixed flame under different coflow conditions

$v_{pri} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\varphi_{sec}$	$v_{sec} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			$\bar{\varphi}_{ex}$	$s$	$\bar{\varphi}_{ex} / s$
		0.1	0.2	0.3			
0.4	0.2	0.8	0.8	0.79	0.80	4.71E-03	0.59%
0.4	0.3	0.78	0.78	0.78	0.78	1.11E-16	0.00%
0.4	0.4	0.74	0.75	0.74	0.74	4.71E-03	0.63%
0.7	0.2	0.88	0.88	0.89	0.88	4.71E-03	0.53%
0.7	0.3	0.85	0.86	0.85	0.85	4.71E-03	0.55%
0.7	0.4	0.81	0.8	0.82	0.81	8.16E-03	1.01%
1.0	0.2	0.94	0.95	0.95	0.95	4.55E-03	0.48%
1.0	0.3	0.91	0.91	0.91	0.91	0.00E+00	0.00%
1.0	0.4	0.86	0.86	0.86	0.86	0.00E+00	0.00%

从表 1 的数据可看出, 对于双级贫预混火焰, 如在保持其他参数不变的前提下改变二级预混气环流的出口平均流速, 则火焰的熄火边界变化幅度很小. 通过计算可发现, 此时  $\varphi_{sec}$  变化的标准差系数  $\bar{\varphi}_{ex}/s$  多在 1% 以下. 据此可认为双级贫预混火焰中二级预混气环流的速度因素对熄火边界几乎无影响. 从表 1 中还可发现, 当二级环流的预混当量比发生改

变时熄火边界却有着明显的变化. 实验测得无环流状态下平均流速为 1.0 m/s 的单管射流火焰的  $\varphi_{ex}$  为 0.99. 但当在外围布置二级预混气环流后其熄火边界却显著降低, 二级预混当量比越高则降低程度也越大, 最大降幅可达到 13.1%. 以上现象的原因是由于甲烷/空气预混气的施密特数为 0.7 左右. 此时, 在火焰根部附近由于甲烷分子扩散输运对燃烧

的影响程度要远大于二级环流通过动量传递改变流场分布对火焰的影响。所以,当以预混气作为二级环流时,二级预混当量比就成为决定熄火边界变化的关键因素。

通过以上的分析和对比可认为:在双级贫预混燃烧时二级环流同时影响着一级火焰根部的流动速度与火焰传播速度,其对喷口附近速度分布的加速作用可使熄火边界曲线向上移动,但二级预混气自身的可燃性却可加强火焰根部对来流速度变化的适应能力,拓展稳燃边界,其中二级气流的预混当量比是决定火焰稳定性的关键。

## 4 结 论

双级贫预混燃烧是通过将不同参数的预混火焰进行组合而实现低当量比条件下稳定燃烧和控制  $\text{NO}_x$  排放的燃烧组织方式,各火焰间的相互影响决定着整体火焰的燃烧特征,其中一级火焰是支撑整体火焰稳定燃烧的关键。本文以层流状态下双级贫预混火焰稳定燃烧时一级火焰所能达到的最小当量比作为熄火边界,实验研究二级环流参数的变化对其的影响,结论如下:

1) 与均一当量比的直管射流预混火焰相比,以同轴射流方式组织的双级贫预混火焰在层流状态下可明显拓宽火焰的熄火边界,降低一级火焰稳定燃烧的最小当量比,最大降幅可达到 10% 以上。

2) 在双级贫预混火焰中,因一、二级气流射流边界的叠加而形成汇流区,汇流区内火焰根部附近的气流速度。因此,以空气做二级环流时一级火焰需更快的火焰传播速度来与流速平衡,造成熄火边界向较大当量比方向的移动。

3) 二级预混气环流可减弱火焰根部受外界气氛稀释的影响,从而加强一级火焰对来流速度变化的适应能力,所以双级贫预混火焰较单管射流火焰有更宽的熄火边界。

4) 二级环流的预混当量比是决定着双级贫预混火焰稳燃能力的关键,二级预混当量比越大则熄火边界也越宽。相较而言,环流速度的影响却基本可以忽略。

## 参 考 文 献

[1] 朱彤, 饶文涛, 刘敏飞, 等. 低  $\text{NO}_x$  高温空气燃烧技术[J]. 热能动力工程, 2001, 16(93): 321, 328-330, 353. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2060.2001.03.027.  
ZHU Tong, RAO Wentao, LIU Minfei, et al. Low  $\text{NO}_x$  combustion technology of high-temperature air[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2001, 16(93): 321, 328-330, 353. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2060.2001.03.027.

[2] 邵卫卫, 赵岩, 刘艳, 等. 燃气轮机燃烧室预混燃烧器天然气燃料/空气掺混均匀性研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 795-803. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.15240.  
SHAO Weiwei, ZHAO Yan, LIU Yan, et al. Investigation of fuel/air mixing uniformity in a natural gas premixed burner for gas turbine combustor applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 795-803. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.15240.

[3] 康振亚, 郑洪涛, 贾翔羽, 等. 微型燃气轮机燃烧室预混结构性能研究及改进[J]. 燃气轮机技术, 2013, 26(1): 21-26. DOI: 10.16120/j.cnki.issn1009-2889.2013.01.008.  
KANG Zhengya, ZHENG Hongtao, JIA Xiangyu, et al. Research and improvement of performance of micro-turbine combustor premixing structure[J]. Gas Turbine Technology, 2013, 26(1): 21-26. DOI: 10.16120/j.cnki.issn1009-2889.2013.01.008.

[4] 石黎, 付忠广, 沈亚洲, 等. 值班燃料比对环形燃烧室内  $\text{NO}_x$  生成影响的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6156-6163. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.151543.  
SHI Li, FU Zhongguang, SHEN Yazhou, et al. Numerical simulation of pilot fuel percentage on  $\text{NO}_x$  formation in an annular combustion chamber[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6156-6163. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.151543.

[5] 萨仁高娃. 燃气轮机干式低  $\text{NO}_x$  燃烧室的性能数值模拟分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2006.  
SAREN Gaowa. Numerical simulation and studies on the performance of the gas turbine Dry Low  $\text{NO}_x$  combustor[D]. Huhhot: Inner Mongolia University of Technology, 2006.

[6] 蒋洪德, 任静, 李雪英, 等. 重型燃气轮机现状与发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2014(29): 5096-5102. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.29.011.  
JIANG Hongde, REN Jing, LI Xueying, et al. Status and development trend of the heavy duty gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2014(29): 5096-5102. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.29.011.

[7] 田颖, 徐纲, 宋权斌, 等. 贫燃料预混燃烧的回火特性研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(5): 871-874. DOI: 10.3321/j.issn:0253-231X.2006.05.048.  
TIAN Ying, XU Gang, SONG Quanbin, et al. Flashback characteristics of lean premixed combustion[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(5): 871-874. DOI: 10.3321/j.issn:0253-231X.2006.05.048.

[8] 房爱兵. 燃气轮机合成气燃烧室燃烧稳定性的实验研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2007.  
FANG Aibing. Investigation of combustion instability in syngas combustor of gas turbine[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2007.

[9] 冯冲, 祁海鹰, 谢刚, 等. 干式低  $\text{NO}_x$  燃气轮机燃烧室的燃料/空气预混均匀性问题分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(17): 9-19. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2011.17.013.  
FENG Chong, QI Haiying, XIE Gang, et al. Analysis on the issue of fuel/air premixing uniformity of the dry low  $\text{NO}_x$  gas turbine combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(17): 9-19. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2011.17.013.

[10] LIEUWEN T C, YANG V. Gas turbine emissions[M]. New York: Cambridge University Press, 2013.

[11] 李国能, 周昊, 李时宇, 等. 化学当量比对旋流燃烧器热声不稳定特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(8): 18-23. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2008.08.010.  
LI Guoneng, ZHOU Hao, LI Shiyu, et al. Influence of equivalence

- ratio on characteristics of thermoacoustic instability in a swirl combustor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(8): 18-23. DOI: 10.13334/j.0258-8013.psee.2008.08.010.
- [12] MCMANUS K R, POINSOT T, CANDEL S M. A review of active control of combustion instabilities[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1993, 19(1): 1-29. DOI: 10.1016/0360-1285(93)90020-F.
- [13] 谢法, 张珊珊, 蒋洪德. 入口流动参数脉动对燃气轮机燃烧室燃烧不稳定的影响[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(7): 1561-1565. DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.2015.07.004.  
XIE Fa, ZHANG Shanshan, JIANG Hongde. Effects of inlet flow parameters oscillation on combustion instability of gas turbine combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(7): 1561-1565. DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.2015.07.004.
- [14] 王海连. 贫燃预混旋流燃烧不稳定性大涡模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.  
WANG Hailian. Large eddy simulation of dynamics of lean premixed swirling combustion[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [15] 邢畅, 邱朋华, 刘栗, 等. 过贫当量比下贫预混旋流燃烧室点火燃烧特性[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(7): 63-68. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201603132.  
XING Chang, QIU Penghua, LIU Li, et al. Combustion characteristics of ignition processes for lean premixed swirling combustor at ultralow equivalence ratios[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(7): 63-68. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201603132.
- [16] KANG T, KYRITSIS D C. A combined experimental/computational investigation of stratified combustion in methane-air mixtures[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(11): 2769-2774. DOI: 10.1016/j.enconman.2007.07.018.
- [17] KANG T, KYRITSIS D C. Departure from quasi-homogeneity during laminar flame propagation in lean, compositionally stratified methane-air mixtures [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1): 1075-1083. DOI: 10.1016/j.proci.2006.07.051.
- [18] KANG T, KYRITSIS D C. Methane flame propagation in compositionally stratified gases[J]. *Combustion. Sci. and Tech*, 2005, 177: 2191-2210. DOI: 10.1080/00102200500240836.
- [19] PIRES DA CRUZ A, DEAN A M, GREEDA J M. A numerical study of the laminar flame speed of stratified methane/air flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28: 1925-1932. DOI: 10.1016/S0082-0784(00)80597-4.
- [20] BALUSAMY S, CESSOU A, LECORDIER B. Laminar propagation of lean premixed flames ignited in stratified mixture[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161: 427-437. DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.08.023.
- [21] RUETSCH G R, VERVISCH L, LINAN A. Effects of heat release on triple flames[J]. *Phys Fluids*, 1995, 7(6): 1447-1454. DOI: 10.1063/1.868531.
- [22] KIM N I, SEO J I, OH K C, et al. Lift-off characteristics of triple flame with concentration gradient[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30: 367-374. DOI: 10.1016/j.proci.2004.07.001.
- [23] KIM N I, SEO J I, GUAHK Y T, et al. The propagation of tribrachial flames in a confined channel [J]. *Combustion and Flame*, 2006, 147: 168-179. DOI: 10.1016/j.combustflame.2006.04.001.
- [24] GLASSMAN I, YETTER R A. *Combustion [M]*. Burlington: Academic Press Inc, 2008.
- [25] 张杨. 合成气/空气贫燃层流预混火焰的传播和熄灭特性的研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.  
ZHANG Yang. Propagation and extinction studies of laminar lean premixed syngas / air flames [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [26] LEWIS B, von ELBE G. *Combustion, flames and explosions of gases [M]*. New York and London: Academic Press Inc, 1961.
- [27] LAW C K. *Combustion Physics [M]*. New York: Cambridge University Press, 2006.
- [28] 黄夏, 黄勇, 王方, 等. 采用速度匹配法研究本生灯火焰的稳定点位置[J]. *燃烧科学与技术*, 2011, 17(1): 72-77.  
HUANG Xia, HUANG Yong, WANG Fang, et al. Anchoring point of a Bunsen flame by velocity-matching method[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2011, 17(1): 72-77.
- [29] 黄夏, 黄勇, 巩帆. 本生灯层流预混火焰稳定点与熄火机理[J]. *北京航空航天大学学报*, 2013, 39(10): 1325-1330. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2013.10.025.  
HUANG Xia, UANG Yong, GONG Fan. Anchoring point and blow-off mechanism of Bunsen laminar premixed flame [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39(10): 1325-1330. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2013.10.025.
- [30] 傅维镛, 张永廉, 王清安. *燃烧学 [M]*. 北京: 高等教育出版社, 1989.  
FU Weibiao, ZHANG Yonglian, WANG Qing'an. *Combustion [M]*. Beijing: Higher Education Press, 1989.

(编辑 王小唯)