

锥形旋流器内燃料分布对模型燃烧室 近贫熄状态的影响^{*}

申小明^{1,2}, 袁怡祥^{1,2}, 谭春青^{1,2}, 余超^{1,2}, 谢鹏福¹

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190;
2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100190)

摘 要: 针对近贫熄状态, 研究锥形旋流器内燃料分布对模型燃烧室燃烧稳定的影响。在不同空气流量下对头部燃料分布A和B分别进行了锥形旋流器模型燃烧室的贫熄状态实验。结果表明: 同样的进气条件下, 分布B在贫熄时刻的过量空气系数是分布A的4倍以上, 并在可比较的实验流量范围内保持明显的优势; 分布B的火焰可以由锥形旋流器外缩入锥形旋流器内熄灭, 而分布A的火焰不能缩入旋流器内部, 只能在锥形旋流器外部以整团火焰的形态熄灭; 锥形旋流器头部中心轴线上引入的少量燃料对燃烧室近贫熄状态的压力脉动有极大影响, 分布B的压力波动幅值比分布A降低90%以上, 压力波动主频从88Hz减小到50Hz。结合数值模拟计算, 从切向涡量角度分析了近贫熄火火焰前端稳定在不同位置的原因, 比较了两种燃气分布下局部流场物理参数分布的差异, 有助于理解与认识锥形旋流器内燃料分布对燃烧稳定性的影响。

关键词: 燃烧室; 锥形旋流器; 燃料分布; 近贫熄; 过量空气系数; 压力波动

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2019) 10-2262-08

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 180756

Effects of Fuel Distribution of Conical Swirler Dome on Lean Blowout of Model Combustor

SHEN Xiao-ming^{1,2}, YUAN Yi-xiang^{1,2}, TAN Chun-qing^{1,2}, YU Chao^{1,2}, XIE Peng-fu¹

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Engineering Science, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Aiming at near lean blowout state, the effects of fuel distribution in conical swirler on combustion stability of a model combustor were studied. Lean blowout experiments on fuel distribution A and B in a conical swirler dome combustor were carried out under different air flow rates. The results show that under the same inlet air conditions, the excess air coefficient of arrange B at lean blowout is more than 4 times that of arrange A, and has obvious advantages in the range of experimental air flow rates. The flame of the arrange B can slowly shrink from the outside into the conical swirler until it is extinguished in the center of the dome, but the flame of the arrange A can only be extinguished outside the conical swirler with the shape of a whole. The amplitude of the pressure fluctuation of arrange B is reduced by more than 90% compared to arrange A, and the main frequency of

^{*} 收稿日期: 2018-12-02; 修订日期: 2019-02-20。

基金项目: 国家自然科学基金 (50876104; 51676182)。

作者简介: 申小明, 博士生, 研究领域为高效低排放燃烧室设计技术。E-mail: shenxiaoming@iet.cn

通讯作者: 袁怡祥, 博士, 高工, 研究领域为低排放和稳定性。E-mail: yuanyx@iet.cn

引用格式: 申小明, 袁怡祥, 谭春青, 等. 锥形旋流器内燃料分布对模型燃烧室近贫熄状态的影响[J]. 推进技术, 2019, 40(10): 2262-2269. (SHEN Xiao-ming, YUAN Yi-xiang, TAN Chun-qing, et al. Effects of Fuel Distribution of Conical Swirler Dome on Lean Blowout of Model Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(10): 2262-2269.)

the pressure fluctuation decreases from 88Hz to 50Hz, which indicates that the gas injected into the dome center greatly inhibits the pressure pulsation in the combustor. Combined with numerical simulation, the reasons why the front end of the flame near lean blowout is stable at different positions are explained from the perspective of azimuthal vorticity, meanwhile, the differences of physical parameters distribution in local stable combustion zones under different gas distributions are compared, which could deepen the understanding of the influence of fuel distribution on combustion stability.

Key words: Combustor; Conical swirler; Fuel distribution; Near lean blowout; Excess air coefficient; Pressure fluctuation

1 引言

近年来,随着环境保护要求日益提高,污染物排放的标准也越来越严苛。预混燃烧是降低排放的重要方法,是目前最有应用前景的燃气轮机低污染燃烧技术之一,其主要技术理念是利用预混的燃烧方式将燃烧区火焰温度约束在较低水平,从而实现低污染物排放^[1]。

锥形旋流器头部燃烧室^[2]是采用预混燃烧技术的低污染燃烧室之一,其主要特征结构是采用了锥形旋流器,与常用的径向旋流器或轴向旋流器有很大不同。锥形旋流器由两个轴线平行错位的半锥体合在一起构成,其主要特征是结构较简单,不需要旋流叶片。锥形旋流器头部燃烧室采用的预混燃烧一方面可以降低污染物排放,另一方面也容易带来燃烧不稳定问题^[3-4]。

目前,对锥形旋流器头部燃烧室燃烧稳定性方面的研究只见于少量国外文献。Fernando等^[5]研究了锥形旋流器头部燃烧室内火焰稳定位置与动态压力变化的关系。Sohn等^[6]针对一个锥形旋流器头部燃烧室,通过增加进口温度的被动控制方法抑制了燃烧不稳定性,并分析了抑制机理。Zajadatz等^[7]在锥形旋流器锥顶处喷入部分燃料,发现能够显著降低燃烧室内的压力波动。Guyot等^[8]在文献[7]研究基础上,将上述通过旋流器锥顶喷入部分燃料的方案应用于燃气轮机环形燃烧室,发现燃烧室燃烧稳定性得到了明显改善。从燃烧器中心喷入部分燃料来增强燃烧稳定性常见于各种火焰稳定装置中,对比之下,锥形旋流器只需要中心喷入少量的燃料就可大幅度提高其燃烧稳定性,同时,如果燃料喷入的方式合理,预混均匀性不会变差,NO_x排放也不会增加,这是其独特之处^[7-9]。

锥形旋流器头部燃烧室采用的预混燃烧在低工况近贫熄状态下,由于负荷或燃料组分变化等原因,容易发生燃烧不稳定性现象甚至熄火,造成各种问

题。虽然已有学者对锥形旋流器头部燃烧室的燃烧稳定性开展了一些研究,但是有关燃料分布与燃烧稳定性的有限研究主要集中在燃烧室高工况负荷下,在低工况近贫熄状态下的相关研究很少,更没有具体的实验细节数据,也没有揭示各种重要特征现象。因此,需要对此开展针对性的实验研究及分析。

本研究通过改变燃料在锥形旋流器内的分布方式,在不同空气流量下开展常压贫熄实验,观察火焰现象的异同及贫熄特性的变化规律。根据测量的典型实验点的动态压力变化和数值辅助分析,探讨燃料分布方式对锥形旋流器头部燃烧室近贫熄状态的影响,为锥形旋流器内燃料布局的优化设计提供一定的参考和依据。

2 实验

2.1 实验件

国内对预混燃烧稳定性的相关研究主要集中在径向与轴向旋流器^[10-11],而锥形旋流器与径向或轴向旋流器在结构上有较大差异,因此,其贫熄特性需要开展专门的研究工作。锥形旋流器工作原理如图1所示,旋流器由两个轴线平行错位的半锥体合在一起,形成两个等宽度的空气进气狭缝,同时沿着两个半锥体的斜边分别布置两条用于通入燃料的管道,管道上开有若干小孔,用来多点喷出燃料,由若干燃料小孔喷出的燃料与从两条狭缝进入的空气呈90°角相遇后进入锥内,形成旋转的可燃混合物,在设计点状态下,当旋转可燃混合物在旋流器锥体出口面脱离时,其中心会形成一个稳定火焰的回流区,保证了点火点的稳定存在^[3]。由于锥形旋流器头部燃烧室参考资料有限,没有具体结构参数,相关研究较少。本课题组研究人员根据相关资料及设计准则设计了锥形旋流器^[12],如图2中左图所示。为方便实验中对实验现象的观察,采用石英玻璃作为火焰筒材料,锥形旋流器与内外两个圆筒形的石英玻璃火焰筒配合,组合成模型燃烧室,如图2中右图所示。模

型燃烧室轴向剖面图如图3所示,掺混空气通过内外两个石英玻璃火焰筒之间的缝隙流向火焰筒后端,再通过6个掺混孔进入到燃烧室中,与燃烧后的烟气混合,降低排气温度。

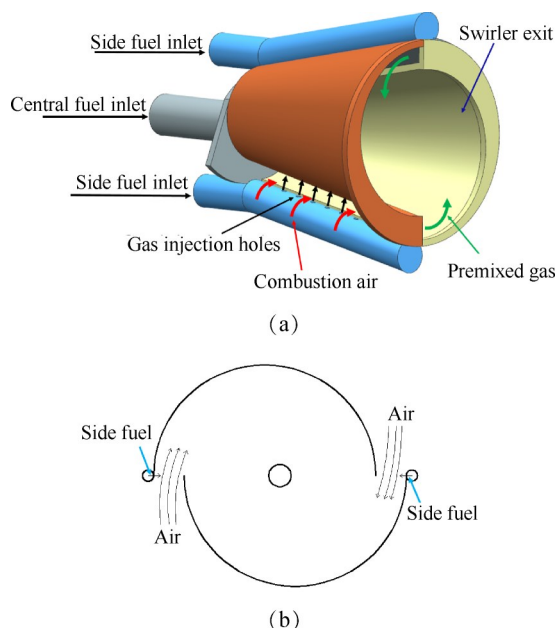


Fig. 1 Schematic diagram of the conical swirler



Fig. 2 Schematic of the conical swirler and the model combustor

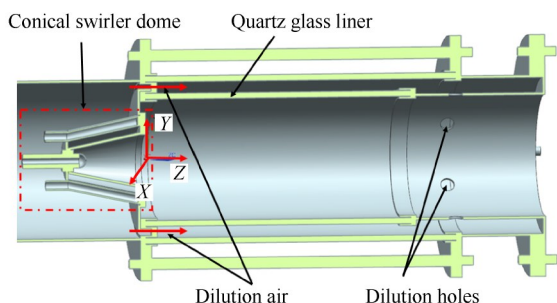


Fig. 3 Model of the combustor

2.2 两种燃料分布

根据锥形旋流器头部燃烧室实际应用的需要,针对两种典型的燃料分布方式开展研究,两种燃料分布方式见图4所示,燃料分布A(Arrange A)时锥形旋流器的中心处不引入燃料,燃料只从侧面的两个

燃料管上的两排燃料小孔进入。燃料分布B(Arrange B)在保留分布A中燃料从侧面的两排燃料小孔进入的基础上,再引入一股从锥形旋流器锥顶中心处喷入的少量燃料(引入的量不超过分布A燃料量的4.5%),即图4所示中心处的一股燃料,而燃烧空气均通过两条狭缝进入。

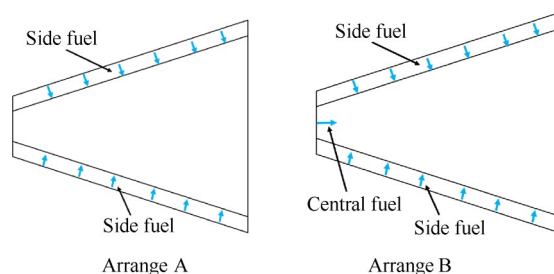


Fig. 4 Two kinds of fuel distribution

2.3 近贫熄实验

实验系统主要由空气供给系统、燃料气分配计量系统、空气电加热系统、实验监测系统、实验段和测控系统等组成。其中,燃料采用质量流量控制器(MFC)进行控制与采集,空气路流量使用涡街流量计采集,用变频器和调节阀进行调节。热电偶和压力传感器分别布置在燃烧室进口和出口处,以监测实验中每个工况的温度及压力变化情况。采用HM90高频动态压力变送器,精度为0.25%,频响为0~20kHz,安装在锥形旋流器的出口处。所有的流量、压力、温度数据由Labview软件完成信号的采集与数据的分析。

选择甲烷为燃料代替燃油,以便流量调控更容易和准确,排除雾化等其他因素的影响。贫熄特性是用来评估燃烧室低工况燃烧稳定性的一个重要指标,是指给定条件下燃烧室将要熄火时的进口气流与过量空气系数的关系^[1]。实验过程中,调节空气流量至设定值,待燃烧稳定后,逐渐减小燃气流量直至火焰熄灭,采集熄灭前几个重要节点的燃气流量值和其他参数,即为该实验工况下的一组数据。

3 实验结果与分析

3.1 分布A的贫熄实验

首先开展了燃气分布A下的近贫熄实验,在分布A时,燃烧室中的火焰大部分始终处于旋流器外的火焰筒中,在减小燃气流量接近贫熄的过程中,燃烧室中出现强烈的压力波动,并伴随有轰鸣声。火焰主体呈现出浅蓝色,临近熄火前,火焰体积稍微缩小,在锥形旋流器外以一团火焰的形态整体熄灭,图5所

示为摄像机拍摄的熄火过程中火焰的变化。

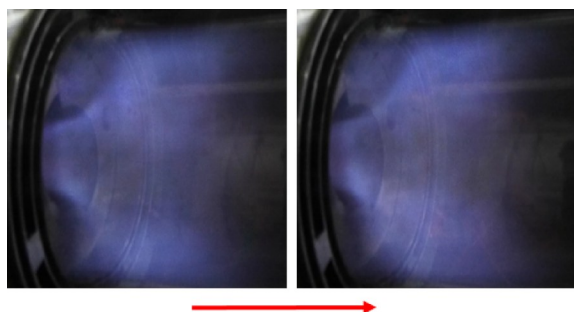


Fig. 5 Flame change of arrange A near lean blowout

燃气分布 A 贫熄时刻的过量空气系数随空气流量的变化如图 7 所示,随着空气流量增大,熄火时刻的过量空气系数减小。当空气流量大于 $97\text{m}^3/\text{h}$ 时,火焰勉强点火成功,燃烧室内即产生非常强烈的压力脉动,火焰稳定性很差,直接发生熄火,导致实验不能在更大的空气流量下继续开展。因此,分布 A 只完成了两个空气流量下的实验点 A1 和 A2 ($65\text{m}^3/\text{h}$ 和 $97\text{m}^3/\text{h}$)。

3.2 分布 B 的贫熄实验

由于燃气分布 A 近贫熄的燃烧稳定性很差,燃烧震荡强烈,因此,开展了燃气分布 B 下的近贫熄实验,期望以此增强其近贫熄燃烧稳定性。分布 B 实验过程中,燃烧室中没有出现明显的压力脉动,火焰有轻微的抖动,火焰中心处呈现出淡红色,火焰的外圈呈现出浅蓝色,火焰较为稳定。如图 6 所示,在燃气连续调小,燃烧逐渐接近熄火的过程中,火焰的体积越来越小,火焰由锥外缩入锥内,直到在锥内中心处熄火。

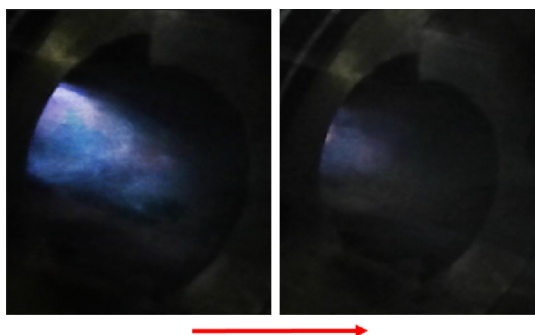


Fig. 6 Flame change of arrange B near lean blowout

图 7 为燃料分布 B 与分布 A 贫熄时刻的过量空气系数随空气流量的变化对比,图中给出了分布 B 的 5 个空气流量下 ($75\text{m}^3/\text{h}$, $97\text{m}^3/\text{h}$, $148\text{m}^3/\text{h}$, $205\text{m}^3/\text{h}$ 和 $252\text{m}^3/\text{h}$) 的实验点,相比之下,分布 B 实验过程中燃烧较为平稳,实验能开展到 $252\text{m}^3/\text{h}$ 的空气流量。针

对不同的燃料分布方式,定义贫熄调节比为贫熄时刻分布 B 的过量空气系数与分布 A 过量空气系数的比值,表征燃烧室在近贫熄状态的调节裕度。在空气流量为 $97\text{m}^3/\text{h}$ 时, A2 实验点过量空气系数是 4,而 B2 实验点是 16.9,贫熄调节比为 4.2。从曲线变化趋势上可以看到,相比分布 A,分布 B 的贫熄性能在可比较的实验流量范围内都保持明显的优势,这表明旋流器头部燃气的分布对锥形旋流器头部燃烧室的贫熄性能有重要的影响。

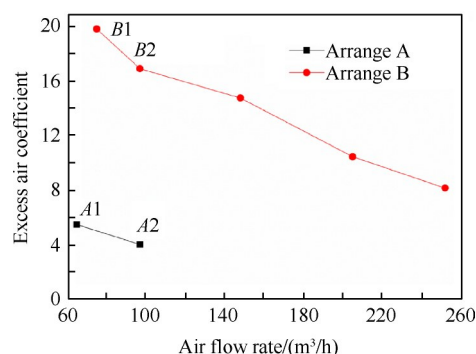


Fig. 7 Excess air coefficient of arrange A and arrange B under different air flow rates at lean blowout

4 A2, B2 实验点的数值分析

采用数值模拟对分布 A 和分布 B 两种燃气分布方式下锥形旋流器头部燃烧室的贫熄性能显著差异进行定性、趋势性辅助分析。计算模型采用与实验相同的结构和参数,由于锥形旋流器头部燃烧室结构较复杂,采用了非结构化网格,对局部复杂结构进行了加密处理,网格总数为 420 万,并进行了网格无关性验证。参考相关文献[13-14]的研究结果,采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型、标准壁面函数。选用层流小火焰模型,反应机理是基于甲烷的 26 步反应^[15]。求解器采用 FLUENT,进口边界条件是给定燃料和空气的进口质量流量,空气进口温度为 301K。坐标系原点建立在锥形旋流器出口的中心位置,Z 轴为燃烧室的轴向,如图 3 所示。

4.1 与实验火焰结构对比

图 8 和图 9 分别给出了两种燃气分布下典型实验点 A2 和 B2 在近贫熄状态下,层流小火焰模型计算得到的过燃烧室中心轴线截面上的温度云图及流线分布和实验中拍摄到的火焰结构。

从图 8 中可以看出在实验点 A2 的近贫熄状态下,高温区集中在旋流器出口上下两侧处,关于中心轴线基本对称分布,上下两部分通过旋流器出口的

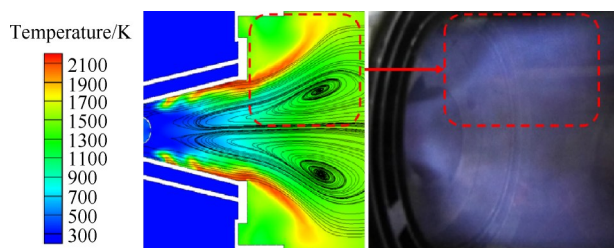


Fig. 8 Comparison between the simulation results and the flame image near lean blowout (A2)

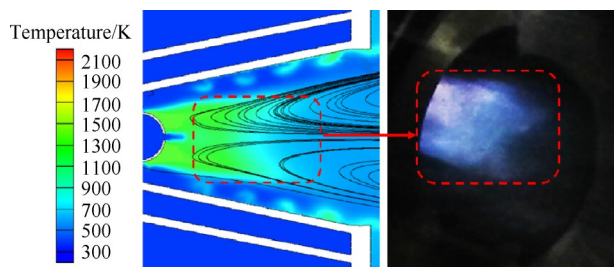


Fig. 9 Comparison between the simulation results and the flame image near lean blowout (B2)

回流区桥接,实验中火焰结构也有相似特点。在图9中,实验点B2的近贫熄状态下,高温区分布和实验点A2有明显的不同,高温区较小且主要集中在旋流器内部的中心轴线附近,由于此时火焰缩入锥内,为了能够拍摄到火焰形状,图9右侧的火焰照片是从45°角拍摄的,可以看到,火焰的分布位置及大小和实验结果基本一致。总之,两个实验点下计算结果与实验结果比较吻合,可进行定性分析。

4.2 切向涡量分析

由实验结果(见图5和6)可知,燃气在头部不同分布方式的典型实验点A2和B2的火焰稳定位置发生了重大的改变,对燃烧稳定性和其他物理参数分布会产生重要影响,需要分析其位置发生变化的原因。下面将利用数值模拟结果,从涡量分布的角度对火焰稳定位置的变化进行定性分析和解释。

鉴于本文采用的锥形旋流器火焰稳定的原理是依靠旋流器出口处附近发生涡破碎形成回流区来稳定火焰,涡破碎的位置影响火焰稳定的位置。因此使用涡量输运方程来描述流场,涡量输运方程可以表达涡量的输运、产生和消耗^[16]

$$\frac{D\omega}{Dt} = (\omega \cdot \nabla)U - \omega(\nabla \cdot U) + \frac{1}{\rho^2}(\nabla\rho \times \nabla p) + \nu \nabla^2 \omega \quad (1)$$

式中右边第一项表示由于流场的速度梯度引起涡线的拉伸和弯曲,从而改变涡量,该项同时存在于冷态和热态流场中。第二项代表流体微团体积膨胀引起的涡量大小变化,仅存在于热态流场中。第三

项代表由于火焰膨胀或倾斜产生的斜压扭矩,仅存在于热态流场中。第四项表示粘性耗散引起的涡量变化,在高雷诺数流动中,可忽略不计。

根据Biot-Savart原理^[17],负切向涡量会诱导一个与主流方向相反的负轴向速度 w_{ind} ,当负切向涡量足够大时,其诱导的负轴向速度 w_{ind} 将会导致轴向速度减小到出现滞止点并触发Vortex breakdown(VB),最终形成稳定的回流区。

$$w_{ind}(z) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{r^{*2} \eta(r^*, z^*)}{[r^{*2} + (z - z^*)^2]^{3/2}} dr^* dz^* \quad (2)$$

式中 η 为切向涡量, r 为径向坐标, z 为轴向坐标, r^* 和 z^* 表示特征尺寸的相对值。该式表达了诱导的负轴向速度 w_{ind} 与切向涡量 η 的变化关系。

由于两种燃气分布方式下,火焰的形态及稳定的位置不同,一种稳定在锥内,另一种稳定在锥外,而分界面就是旋流器的出口截面,因此可以通过对该截面上的切向涡量进行详细比较来分析燃气分布的不同造成的流场变化。

图10所示冷态工况下,在旋流器出口处半径方向,A2和B2的切向涡量分布基本一致。冷态工况下,式(1)中右边第一项表示的流场的速度梯度决定切向涡量的大小,由于这两个实验点空气流量相等(燃气流量相比空气流量很小),因此其冷态流场分布基本一致,切向涡量分布基本相同。

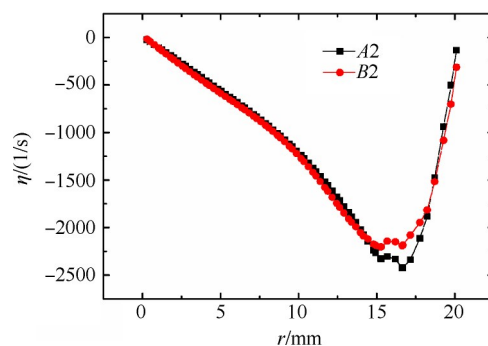


Fig. 10 Azimuthal vorticity distribution of case A2 and B2 on Y axis at swirler exit under cold condition

图11所示热态工况下,在旋流器出口处半径方向,实验点A2和B2的切向涡量分布出现了较大差异,A2的最大负切向涡量的绝对值为4527s⁻¹,B2的最大负切向涡量的绝对值为3329s⁻¹,后者相比前者减小了36%。由式(2)可知,负切向涡量与负轴向速度 w_{ind} 的大小成正比关系,因此,相比实验点A2,B2由负切向涡量诱导的负轴向速度的绝对值 $|w_{ind}|$ 也大幅度减小,锥内 $|w_{ind}|$ 的减小有利于在锥内中心轴线处形成低速区。

同时,实验点B2燃气分布下,从中心轴线处引入的一股沿轴线正向的燃气与较小流速的回流相遇,在旋流器内部某个轴向位置处形成了新的滞止点并触发VB,最终形成稳定的回流区,为火焰稳定创造了流场条件;而实验点A2由于诱导产生的 $|w_{ind}|$ 太大,无法在锥内同样位置处形成类似的滞止点和低速区。

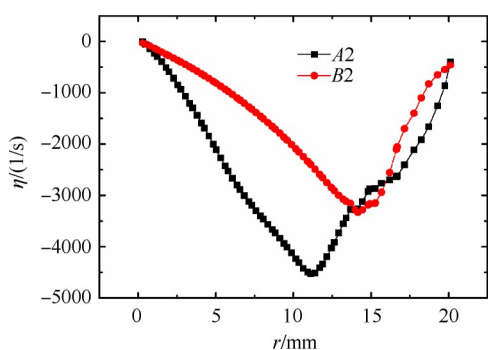


Fig. 11 Azimuthal vorticity distribution of case A2 and B2 on Y axis at swirler exit under hot condition

上述分析表明,不同的燃气分布在近贫熄状态下,负切向涡量的分布发生了变化,进而改变了流场分布,即涡破碎点(回流区前滞止点)和回流区的位置,最终为火焰稳定在不同的局部区域创造了必要的流场条件。这也解释了两种燃气分布方式下,火焰稳定在不同位置的流场原因。

4.3 局部稳燃区分析

为了进一步分析两种燃气分布的贫熄特性出现差异的原因,图12给出了实验点A2和B2在旋流器头部区域 $X=0$ 截面处的温度、流线及当量比分布叠加图,其中,云图表示温度分布,蓝色的等值线表示当量比分布,黑色的带箭头的流线表示流场分布。

对于分布A,如图12(a)所示,混合物在P1区(旋流器出口处)着火,然后传播至P2区,形成燃烧烟气,一部分燃烧烟气进入回流区P3,回流到P4区,携带上新鲜的低当量比($\Phi=0.1$)混合气,二者随流混合加热到P1区,再在P1区进行新一轮点火,之后重复前面的过程。P1区(Zone 1)是再点火区域,对燃烧的稳定性的影响。在贫熄过程中,保证进口空气流量不变,随着燃气流量下降,放热量减小,P1区温度下降,进入回流区的混合气体有部分未完全燃烧成分,使回流区内气流温度逐渐降低,同时造成火焰传播速度降低,点火区域P1逐渐缩小,经过多次往返循环后,这一现象会进一步恶化,最终导致达不到再点火条件,火焰熄灭。

对于分布B,如图12(b)所示,中心燃料气从锥顶

以点喷射形式进入锥形旋流器后,与两侧狭缝进入的旋流空气相遇,形成有一定预混程度的混合气,混合气沿轴向运动,在旋流器轴向的中心位置处与部分回流烟气相遇并引燃,此处即是再点火区,即是图中所示的Zone 2。从图中可以看到,Zone 2位于回流区前边界,也即处于正向流动的混合气与逆向流动的回流烟气的交界附近,流速较低,这为稳定着火提供了良好的条件。

火焰在燃烧室中稳定燃烧,必须要有能够稳定点火的区域,稳定的点火区域存在的必要条件至少包括(1)适当的当量比分布;(2)较高的温度分布;(3)合适的气流流速分布。下文将对这两种典型燃气分布的再点火区域Zone 1和Zone 2内的温度、当量比和流速进行逐个分析。如图12(a)所示,Zone 1内的流速约为30m/s~50m/s,温度约为1300K~1950K,当量比为0.5~0.9,该区域内温度和当量比均适合于火焰稳定,但是该区域内气流流速较高,不利于火焰的稳定,对实验参数的变化较为敏感,稳燃难度较大。如图12(b)所示,Zone 2内的流速约为2m/s~10m/s,温度约为1200K~1800K,当量比为0.3~1.0,该区域内流速较低,温度较高,当量比处于化学恰当比附近,有利于形成稳定的点火区。

对比稳燃区Zone 1和稳燃区Zone 2,分析可知,Zone 2位于旋流器内部,区域较小,火焰在近贫熄时,随着燃料量的减小,火焰可以由锥形旋流器外缩入旋流器内部,保证火焰在局部小区域内稳定不熄火,进而提升燃烧室的贫熄性能。相比于Zone 2,Zone 1的区域面积较大,导致火焰散热量较大,同时,该处流速也较高,稳燃条件苛刻。

通过上述分析可知,两种燃气分布的火焰再点火区所处的条件明显不同,这是造成它们贫熄特性出现较大差异的原因。

5 A2,B2实验点动态压力的对比测量

贫熄性能的变化,压力波动的变化在其中起重要作用,既是原因,又是结果,因此,有必要对由于燃料分布不同可能引起压力波动程度的不同进行定量测量。采用动态压力传感器采集了两种燃料分布方式下典型实验点A2和B2的动态压力变化,并进行对比分析。

图13和图14分别给出空气流量为97m³/h时,A2和B2实验点的脉动压力波形及频谱分析。由图可见,A2实验点的压力脉动波形较为规则,压力脉动主频为88Hz,脉动压力最大幅值达到12.572kPa;而B2

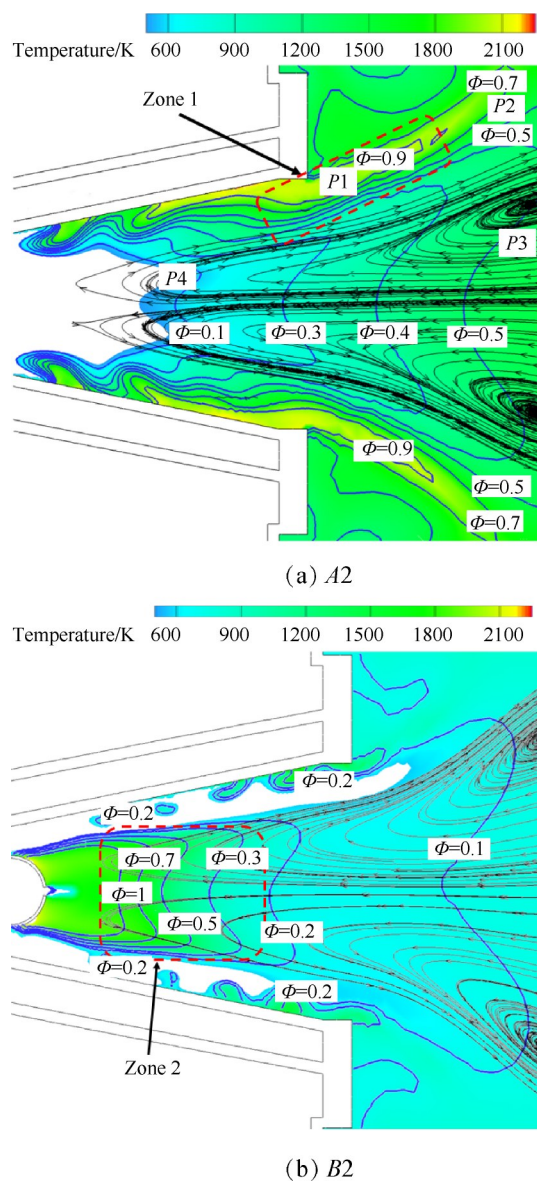


Fig. 12 Distribution of temperature, equivalent ratio and streamline of case A2 and B2

实验点的压力波形变化不规则,压力脉动主频为50Hz,脉动压力最大幅值只有59Pa, B2的最大压力幅值比A2降低了90%以上,脉动主频降低了38Hz。压力波动幅值的大幅度降低有利于燃烧稳定性,使B2的贫熄性能优于A2。

对于所激发的不稳定压力波动幅值和频率,取决于燃烧室系统的结构和工况参数, A2和B2实验点除了头部中心处燃气分布的不同,结构参数和进气条件完全一致,这表明旋流器中心引入的少量燃气对锥形旋流器头部燃烧室内的压力脉动有重要影响,压力波动幅值的降低,有助于贫熄性能的提升。由于其相关参量相互影响,机理复杂,需要从另一个侧面开展进一步研究。

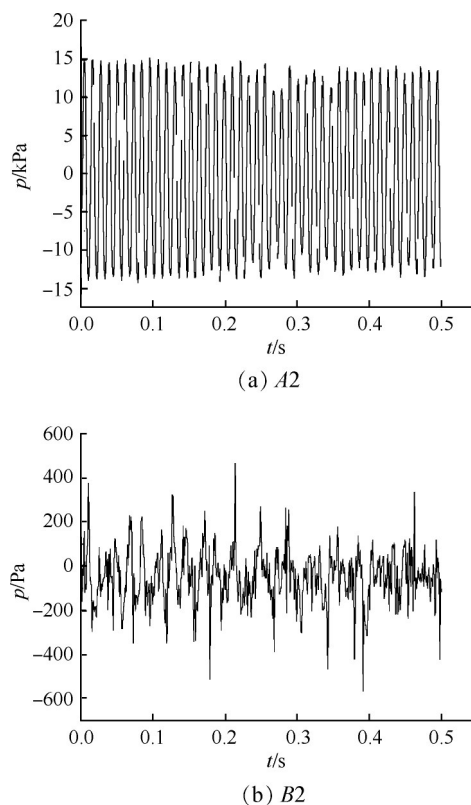


Fig. 13 Dynamic pressure of case A2 and B2

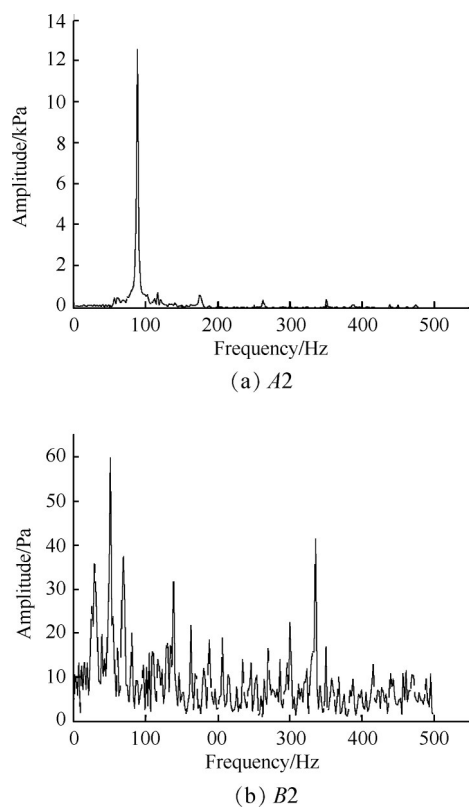


Fig. 14 Spectrum analysis of case A2 and B2

6 结论

综上所述,主要结论如下:

(1)同样的进气条件下,分布B在贫熄时刻的过

量空气系数是分布A的4倍以上,并在可比较的实验流量范围内都保持明显的优势;分布B的火焰可以由锥形旋流器外缩入锥形旋流器内熄灭,而分布A的火焰不能缩入旋流器内部,只能在锥形旋流器外部以整团火焰的形态熄灭。

(2)两种燃气分布下贫熄性能出现较大差异的原因:一方面是它们的涡破碎点(回流区前滞止点)和回流区的位置不同,另一方面是它们的再点火区域处于不同的位置,并且其内部的流场物理参数及温度分布不同。

(3)锥形旋流器内燃料分布的不同对燃烧室近贫熄状态的压力脉动有重要影响,分布B的压力波动最大幅值比分布A降低了90%以上,压力波动主频从88Hz减小到50Hz,这有助于贫熄性能的提升。

致谢:感谢国家自然科学基金资助。

参考文献:

- [1] Lefebvre A H, Gas Turbine Combustion[M]. Philadelphia: Taylor & Francis, 1999.
- [2] Sattelmayer T, Felchlin M P, Haumann J, et al. Second-Generation Low Emission Combustors for ABB Gas Turbines; Burner Development and Tests at Atmospheric Pressure[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1992, 114(1): 118-125.
- [3] Dobbeling K, Hellat J, Koch H. 25 Years of BBC/ABB/Alstom Lean Premix Combustion Technologies[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2007, 129(1): 2-12.
- [4] 杨亚晶, 李晓亚, 谢伟. 贫预混燃烧室燃烧稳定性的数值研究[J]. *推进技术*, 2017, 38(11): 2562-2571. (YANG Ya-jing, LI Xiao-ya, XIE Wei. Numerical Study on Combustion Stability in a Lean Premixed Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(11): 2562-2571.)
- [5] Fernando B, Felix G, Bruno S. Combustion Dynamics Linked to Flame Behaviour in a Partially Premixed Swirled Industrial Burner[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2008, 32(7): 1344-1353.
- [6] Sohn C H, Cho H C. Numerical Analysis of Combustion Instability and Its Suppression in Gas Turbine Combustor with Swirlers Modeled on EV Premix Burners[R]. *ASME 2005-GT-68162*.
- [7] Zajadatz M, Lachner R, Bernero S, et al. Development and Design of Alstom's Staged Fuel Gas Injection Burner for NO_x Reduction[R]. *ASME 2007-GT-27730*.
- [8] Guyot D, Meeuwissen T, Rebhan D. Staged Premix Combustion in Alstom's GT24 Gas Turbine Engine [R]. *ASME 2012-GT-70102*.
- [9] Paschereit C, Flohr P, Knöpfel H, et al. Combustion Control by Extended Burner Fuel Lance [R]. *ASME 2002-GT-30462*.
- [10] 付镇柏, 林宇震, 张弛, 等. 中心分级燃烧室进场工况燃油分级方式试验研究[J]. *推进技术*, 2014, 35(1): 77-86. (FU Zhen-bo, LIN Yu-zhen, ZHANG Chi, et al. Experimental Investigation on Fuel-Staging Mode of Internally-Staged Combustor under Approach Condition[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(1): 77-86.)
- [11] 邢畅, 邱朋华, 刘栗, 等. 燃料预混特性对燃烧室燃烧特性的影响[J]. *推进技术*, 2016, 37(11): 2114-2119. (XING Chang, QIU Peng-hua, LIU Li, et al. Effects of Fuel Premixed Characteristics on Combustion Characteristics of Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(11): 2114-2119.)
- [12] 余超. 中低热值气体燃料锥型稳燃装置数值和实验研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2014.
- [13] Flohr P, Schmitt P, Paschereit C O. Mixing Field Analysis of a Gas Turbine Burner [R]. *IMECE 2002-39317*.
- [14] Cho C H, Baek G M, Sohn C H, et al. A Numerical Approach to Reduction of NO_x Emission from Swirl Premix Burner in a Gas Turbine Combustor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 59(1): 454-463.
- [15] 侯凌云, 杨成仁, 傅维标. 小火焰模型在贫燃预混火焰中的研究[J]. *工程热物理学报*, 2003, 24(5): 873-876.
- [16] 段冬霞, 崔玉峰, 房爱兵, 等. 旋流强度对甲烷/空气预混火焰 CIVB 回火的影响[J]. *推进技术*, 2017, 38(6): 1327-1334. (DUAN Dong-xia, CUI Yu-feng, FANG Ai-bing, et al. Effects of Swirl Strength on Combustion Induced Vortex Breakdown Flashback in Methane/Air Premixed Flames[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(6): 1327-1334.)
- [17] Kiesewetter F, Konle M, Sattelmayer T. Analysis of Combustion Induced Vortex Breakdown Driven Flame Flashback in a Premix Burner with Cylindrical Mixing Zone [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2007, 129(4): 929-936.

(编辑: 史亚红)