

甲烷/空气贫燃预混钝体火焰热释放特性分析

王海清, 刘佩进

(西北工业大学 航天学院 固体推进全国重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要: 为了研究甲烷/空气贫燃预混钝体火焰的热释放特性, 基于实验手段利用 CH^* 自由基化学发光方法研究了当量比、来流流量、频率及振幅声激励对火焰振荡特性和热释放特性的影响。实验结果表明火焰在当量比影响下存在 4 种典型模态: 局部熄灭振荡、非对称结构振荡、小尺度对称结构振荡和稳定燃烧。火焰的释热强度近似与当量比呈线性关系。其中, BVK 振荡火焰的热释放速率波动随着轴向距离的增加呈现先增大后减小的趋势, 在 $x/d=5.5$ 位置处达到最大值。而小尺度对称振荡火焰的热释放速率波动与 x/d 基本呈线性关系。研究了声激励对火焰热释放特性的影响, 发现 BVK 振荡火焰随着声激励振幅的增大而逐渐转变为大尺度对称结构振荡。火焰的热释放速率波动值总体上随着声激励振幅的增加而升高, 频率的影响具有相似的结果。在频率 35 Hz、振幅 1.0 V 的声激励下, 火焰热释放速率的波动值接近 0.6。

关 键 词: 贫燃预混燃烧; 燃烧稳定性; 当量比; 声激励; 热释放特性

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2026)02-0271-08

燃气轮机是广泛应用于发电厂和飞行器中的动力装置。绝大多数的燃气轮机利用碳氢燃料燃烧使燃烧过程更加高效和可靠, 产生更多的能量。然而, 碳氢燃料的燃烧会产生氮氧化物(NO_x)等有害污染物^[1]。以减少 NO_x 排放为目的的低污染燃烧技术得到了广泛关注, 而贫燃预混燃烧是最有前景的低污染燃烧技术之一^[2-3]。但在实际的应用中, 由于贫燃预混燃烧的工作状态接近贫燃熄火极限, 易受流动和声压扰动的影响, 产生热声振荡问题。因此, 以钝体稳焰器作为火焰稳定手段的贫燃预混燃烧技术被广泛地研究^[4-6]。

特别地, 研究贫燃预混燃烧系统振荡的基本过程需要了解系统在空间和时间上热释放分布。这是因为在流动和压力振荡的影响下, 火焰热释放在空间和时间存在不均匀性是非常可能发生的。但是, 火焰热释放很难直接进行测量。在实践中, 通常通过测量与燃烧燃料量呈比例的某些量来间接表征燃烧放热强度^[7]。其中, 表征烃火焰热释放最常用的

诊断技术之一是测量火焰的化学发光, 其原理是测量反应区中电子激发自由基的自发光辐射强度。由于 OH^* 、 CH^* 和 C_2^* 等自由基的特征寿命与燃烧器中典型产物的停留时间相比非常短, 在碳氢化合物火焰中, OH^* 、 CH^* 和 C_2^* 自由基通常用于获得有关燃烧反应过程的释热等信息^[8]。之前的研究表明^[7-9]从这些自由基发出的辐射光量与燃料消耗量呈正比, CH^* 和 OH^* 自由基辐射已被广泛用作热释放的定量测量。

Roby 等^[10]利用 CH^*/OH^* 化学发光法的相关研究表明 CH^*/OH^* 和 C_2^*/CH^* 的比率是预混湍流火焰的局部当量比的线性函数。Morrell 等^[9]的研究证明这种局部当量比的方法对于液体燃料和旋流稳定火焰具有相同的结果。Cross 等^[11]利用 CH^* 化学发光方法研究了非预混钝体火焰的热释放特性, 比较了 2 种不同燃料喷射装置间的非对称涡脱落(Bénard-von Kármán vortex street, BVK)的热释放动力学, 阐明了燃料分布和热释放对涡旋脱落过程的影响。Benjamin 等^[12]利用化学发光法研究了在火焰密度比的影响下, 钝体后流动结构模态转换现象, 发现流动结构在某些密度比范围内存在对流不稳定和全局不稳定 BVK 振荡的分岔行为。最近, Roy

收稿日期: 2025-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(U2241250)资助

作者简介: 王海清(1985—), 博士研究生

通信作者: 刘佩进(1971—), 教授 e-mail: liupj@nwpu.edu.cn

等^[13]利用 CH^* 化学发光法研究在提升当量比的实验条件下,旋流环形燃烧室系统中的火焰动力学特性变化,成功发现了存在于燃烧噪声模式与热声不稳定模式之间的一种特定间歇模式。Balasubramanian 等^[14]利用 CH^* 化学发光法研究了贫燃预混稳定钝体火焰的动力学特性,发现在固定雷诺数下降低当量比时,系统中出现的对流不稳定会引起曲张模式并转换至全局不稳定模式(BVK)。上述研究表明 CH^* 化学发光法是一种可靠的、广泛性强的火焰热释放测量手段。

研究者尝试通过 CH 、 OH 以及 C_2 等发光强度比构建热释放速率的定量关系,实现对燃烧区域反应强度和分布的非侵入式诊断。部分研究还将化学发光信号与压力振荡相结合,用于捕捉热声耦合特征与相位关系^[15-16]。然而,现有工作仍存在若干不足:①多数研究聚焦于稳态或自激振荡火焰,对强迫扰动下化学发光响应的动态特征探讨较少;②针对贫燃条件下 BVK 振荡火焰的相干结构演化与热释放调控机制仍缺乏系统的实验验证。

另外,在具有典型全局不稳定性的振荡火焰(如 BVK 火焰)中,热释放波动与流场涡脱落之间存在强耦合关系,构成了系统自激振荡的主要物理基础^[17]。当此类系统受到外部强迫扰动作用时,其响应行为可能发生显著变化,表现出同步、分岔甚至锁频等^[18-20]复杂的非线性动力学特征。深入研究全局不稳定火焰在强迫扰动下的响应规律,对于揭示湍流燃烧系统从自激振荡向受迫同步转变的机理,以及理解热-声不稳定性的形成与控制机制具有重要的科学意义,也为发展高效稳定燃烧装置提供了实验依据。

本文利用火焰的化学发光方法测量燃烧火焰中 CH^* 自由基的自发光辐射强度,从而表征甲烷/空气贫燃预混钝体稳定火焰热释放的空间和时间分布特点。主要研究了不同当量比和来流速度对贫燃预混火焰热释放空间和时间分布上的影响。同时,将进一步引进声激励并研究其对贫燃预混钝体稳定火焰燃烧热释放振荡的影响。通过改变声激励的频率和幅值,利用火焰的化学发光方法来测量燃烧火焰中 CH^* 自发光辐射强度,并由此分析热释放在空间和时间分布上受激励改变而产生的变化。

1 试验装置和方法

甲烷/空气贫燃预混钝体火焰的燃烧稳定性试验系统如图1所示,实验系统主要由三部分组成:来流控制系统、预混钝体燃烧器和声激励系统。来流控制系统可精确控制进气量,预混钝体燃烧器可实现完全预混燃烧,声激励系统则可提供不同波形、频率、振幅的声波对来流速度进行扰动。水平放置的预混钝体燃烧器装置由预混段、声激励段、钝体燃烧室和延长段组成,如图2所示。预混段主要将空气和燃料进行充分预混,长度为840 mm。激励段为产生外部声激励的部分,长度为200 mm,通过2个对称放置的扬声器产生声波对来流进行不同程度扰动。为了进一步保证空气和燃料气体在燃烧室前充分预混,在预混段和声激励段连接处安装有蜂窝板。蜂窝板上的孔内径为1 mm,长度50 mm,不锈钢材质。其作用为:①加强空气和燃料的预混;②可起到整流的作用,保证来流速度在施加声激励扰动前不存在速度振荡;③蜂窝板孔径仅为1 mm,因此可以

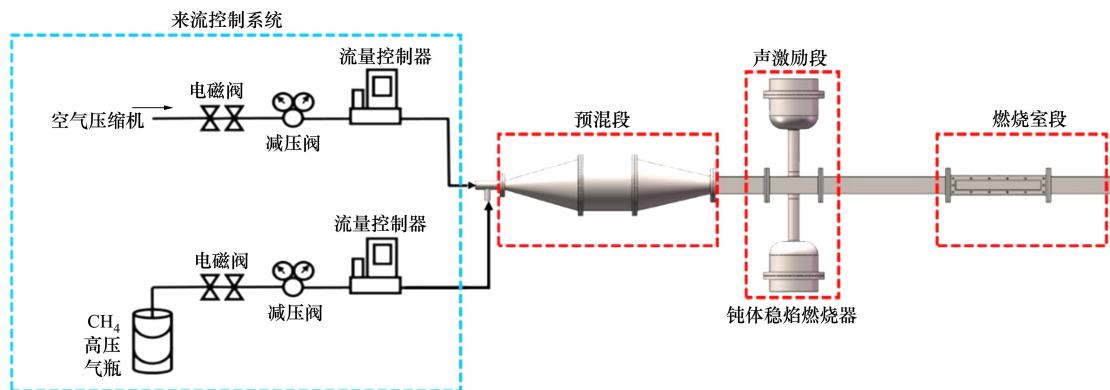


图1 甲烷/空气贫燃预混钝体火焰的燃烧实验系统示意图

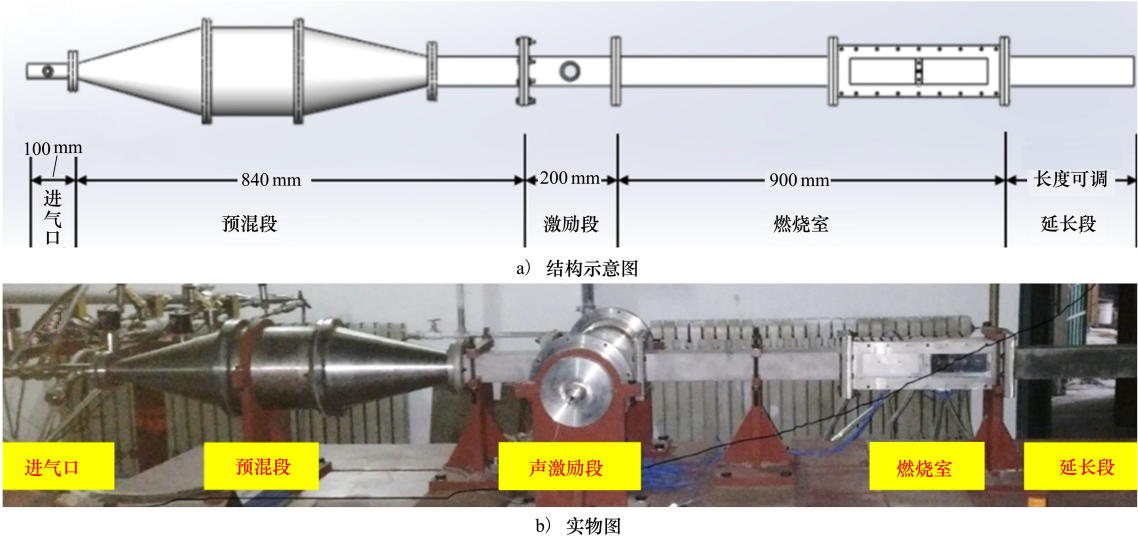


图 2 预混钝体燃烧器装置

作为壁面处理,充当燃烧室的声边界,避免声波向上传播。燃烧室部分由耐高温不锈钢方管组成,其截面尺寸为 60 mm×60 mm,并开有耐高温光学玻璃观察窗,钝体后燃烧室长度为 150 mm。圆柱形钝体直径为 10 mm。此时火焰在这种燃烧室构型下处于燃烧室端口处,燃烧产生的声波振荡无法形成反射而作用于火焰,从而将声场与燃烧场解耦,着重研究流动稳定性(涡脱落)对预混燃烧过程的影响。

燃料为纯度 99.9% 的甲烷,氧化剂为空气,空气由空气压缩机提供。来流燃料和空气流量由精度为 0.01 L/min 的气体质量流量控制器精确控制,钝体预混燃烧器预混段部分用于燃料和空气的充分完全预混。声激励段由 2 个水平对称放置的扬声器组成,并由函数发生器和功率放大器控制扬声器的频率、幅值以及波形(本文实验中采用正弦波激励)。在预混段和声激励段之间安装孔径为 0.1 mm 的蜂窝板进行整流,避免其他条件对速度振荡的干扰。实验点火方式为在钝体后安装电火花塞,点燃预混气体,火焰稳定在钝体后。

由于本文的研究对象为甲烷/空气贫燃预混火焰,其燃烧状态接近熄火极限,火焰本身的化学发光较弱,OH^{*} 含量较低,且一般 CMOS 相机在其发射频段的探测效率很低,因此本文主要采用探测 CH^{*} 化学发光法对火焰进行测量。CH^{*} 强度通常与局部热释放速率相关,其变化可反映火焰反应区的空间结构与强度特征。化学发光测试装置示意图如图 3 所示。该测试系统由高速 CMOS 相机、像增强器、

带通滤波片、同步控制器以及计算机数据采集系统组成。实验中采用的高速相机型号为 Photron FASTCAM SA-Z,其最大分辨率 1 024×1 024。像增强器型号为 Lambert-Hicat。带通滤波片的中心波长为 427 nm,带宽为 10 nm。实验中高速相机的设置参数如表 1 所示。

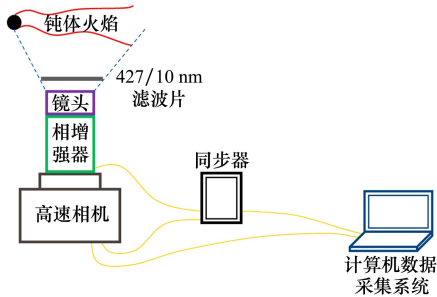


图 3 CH^{*} 化学发光法测试装置示意图

表 1 相机设置参数

类型	参数
采样率/(frame · s ⁻¹)	2 000
曝光时间/s	1/2 000
图片位深/bit	8
分辨率	1 024×512
图片采集数量	5 000
像素尺寸/(mm · pixel ⁻¹)	0.182

需要说明的是,本文主要关注不同当量比与流

量条件下钝体贫燃火焰热释放特性的相对变化规律。所有实验均在相同的装置与测量条件下进行,并对典型工况进行多次重复实验,结果具有良好的可重复性,因此可能存在的系统性误差在不同工况间保持一致,对比分析结果具有较高的可靠性。

2 结果讨论与分析

2.1 无声激励下火焰热释放特性分析

在实验过程中,可以通过控制空气和甲烷二者的流量实现对流速度和当量比的改变。图4为空气流量为300 L/min(约 $5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)时,改变当量比得到的4种典型火焰 CH^* 化学发光图像,其中红色圆点代表钝体所在位置,蓝色箭头代表来流方向。观察4种典型火焰振荡 CH^* 化学发光图像,发现在钝体后都存在一部分区域(黄色框内)无 CH^* 自由基的存在。另外,与BVK振荡火焰(见图4b))相比,当火焰为小尺度(见图4c))对称振荡和稳定模态(见图4d))时,剪切层处的 CH^* 含量明显高于其他区域,这说明提高当量比对钝体后上下两侧剪切层的燃烧释热强度有显著影响。

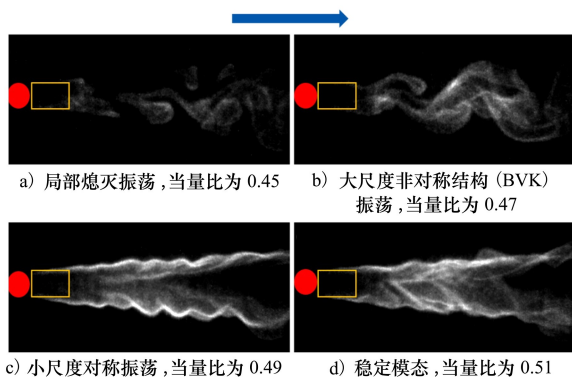


图4 4种典型火焰结构的 CH^* 化学发光图像

同时,实验表明当量比的微小改变对火焰振荡结构会有较大影响。并且,两模态间起始边界并不十分明确,尤其是当火焰为局部熄灭振荡模态时,火焰结构极其不稳定。BVK振荡火焰和小尺度对称振荡火焰的结构相对比较稳定,并存在明显的振荡周期——空气流量为300 L/min时,BVK振荡和小尺度对称振荡火焰的振荡频率为50 Hz左右。因此,本文主要对BVK振荡火焰和小尺度对称振荡火焰模态进行分析。

为了更加明确地分析空气流量大小和当量比对

火焰热释放强度的影响,本文利用 CH^* 自由基发光强度来表征火焰的释热强度,对不同当量比和流量下的火焰燃烧区域 CH^* 进行计算,得到结果如图5所示。

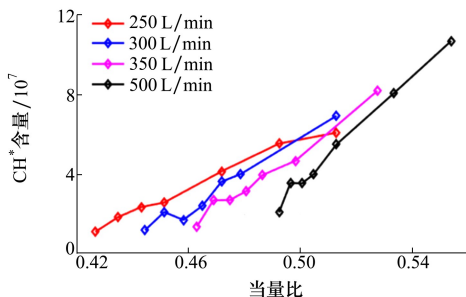


图5 不同流量和当量比下火焰的 CH^* 含量比较

图5中对应每一流量下,均包含4种典型火焰振荡模态。可以发现,火焰的 CH^* 含量与当量比呈近似线性关系,随着当量比的增加而升高。在不同流量下,处于熄灭边缘的火焰(局部熄灭振荡模态,低当量比),火焰的热释放强度随流量增加略有增加,但差别不明显,这说明空气流量对局部熄灭振荡火焰模态的热释放影响较小。但是在不同流量下,对于在升高当量比之后处于稳定模态的火焰(不同当量比),流量的增加明显增强了火焰的热释放强度。同时,对于同一当量比、不同流量的火焰(如当量比为0.5时),空气流量越小,火焰的热释放强度越高。造成这一现象的原因主要与贫燃火焰的流动以及化学耦合特性有关。当空气流量降低时,来流速度减小、停留时间增加,混合气在反应区的反应更充分,导致局部热释放强度升高。同时,低流量条件下湍流强度相对减弱,火焰结构更加集中, CH^* 发射区域更为明显。相反,在高流量条件下,湍流增强与稀释效应使火焰反应区被拉伸,导致平均 CH^* 强度减弱。但在当量比 >0.5 时出现不同,250 L/min的 CH^* 强度反而低于300和350 L/min。此时,湍流-化学耦合效应具有明显非线性:在极贫燃烧条件下,降低流量会显著增加气相停留时间并提高局部反应程度;但随着当量比增大至接近中性燃烧,化学反应速率对停留时间的敏感性下降,湍流增强与传质限制可能成为主导因素,从而使 CH^* 与流量的定性关系改变。其次,流量变化会引起火焰锚固位置和反应区形状的移动,导致相机/探测视场内的积分强度不能直接代表总体燃烧强度。最后,不可忽视测量学的因素:在较高当量比或不同流量条件

下,光学吸收、散射或相机/滤光片响应非线性均可能引起观测偏差。

如前所述,燃烧不稳定性的诱发机理与火焰热释放振荡密切相关。当量比波动、涡脱落等扰动因素首先引起火焰热释放速率的波动,进而导致声压振荡,并通过声-热反馈形成正反馈环路。因此,热释放速率的波动是导致热声不稳定的直接根源。基于此,本文对火焰热释放速率波动特性进行了深入分析。

为便于定量描述,本文首先对热释放速率波动进行定义。实验中采用 CH^* 化学发光图像表征火焰的热释放强度, CH^* 发光强度可视作火焰局部热释放速率的相对指标。对于实验得到的 n 帧 CH^* 化学发光图像序列(CH^* 图像帧数取 $n=5\,000$),将第 i 帧火焰图像的 CH^* 强度记为 Q_i ,则该火焰的平均释热强度可以表示为

$$Q_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n} \tag{1}$$

对于第 i 帧图像,其热释放速率波动值即为

$$Q'_i = |Q_i - Q_0| \tag{2}$$

则该火焰的平均热释放速率波动值可表示为

$$Q'_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Q'_i}{n} \tag{3}$$

图 6 显示了不同流量下,BVK 振荡火焰(见图 6a))和小尺度对称振荡火焰(见图 6b))的平均热释放速率波动值在不同轴向位置上的变化,旨在展示不同轴向位置处非正常热释放的分布特征。平均热释放速率波动值的范围:BVK(大尺度非对称)振荡火焰 0.10~0.24,小尺度对称振荡火焰 0.02~0.12。本文中波动值已按对应位置的平均热释放速率归一化,因此为无量纲数值。横坐标 x/d 表示钝体距离与钝体直径的比值。以流量为 300 L/min 时为例,可以发现 BVK 振荡火焰和小尺度对称振荡火焰平均热释放速率波动值沿轴向位置上的分布呈现完全不同的趋势。对于 BVK 振荡火焰,其平均热释放速率波动值随着与钝体距离的增加呈现先增大后减小的趋势,大约在 $x/d=5.5$ 的位置处达到最大值。这一现象主要与钝体尾迹区的涡脱落与火焰面耦合强度有关:在近场区域,回流主导而波动较弱;在中下游区域,剪切层卷吸与涡脱落引起的火焰扰动最为显著;而在更下游处,涡结构扩散、火焰面波

动衰减,导致热释放速率波动减弱。

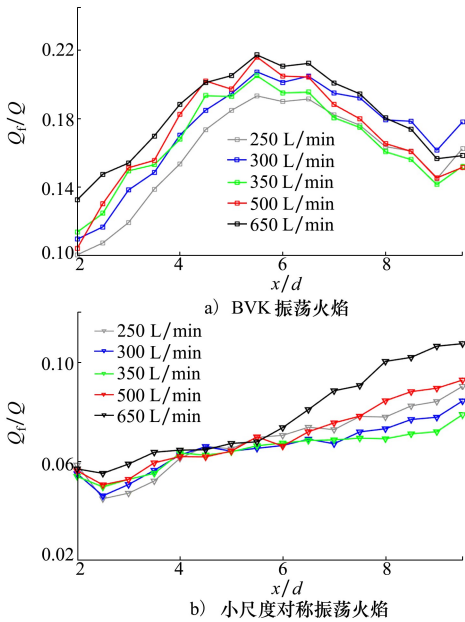


图 6 平均热释放速率波动值沿轴向方向变化

而对于小尺度对称振荡火焰模态,其平均热释放速率波动值与 x/d 基本呈线性关系。同时,比较 2 种不同振荡模态的火焰,BVK 振荡火焰的平均热释放速率波动值明显大于小尺度对称振荡火焰,具体而言,BVK 火焰的局部最大值约为 0.20,而小尺度振荡火焰约为 0.08。这也说明增加当量比可以抑制火焰自身的热释放速率振荡强度。

同时,由图 6 可知,空气流量的变化同样会对火焰的热释放速率波动产生影响,但是该影响与轴向位置的不同对热释放速率振荡的影响相比较小。并且,在某一特定位置上(如 $x/d=7$),热释放速率振荡的值与空气流量值并不具有特定的线性关系。

2.2 声激励下火焰热释放特性分析

由 2.1 节观察到的火焰 CH^* 自由基化学发光图像可以发现:在当量比为 0.47 时,火焰为大尺度非对称结构(BVK)震荡,火焰振荡结构稳定,并存在明显的振荡周期。因此,本文选择对大尺度非对称结构(BVK)振荡火焰模态施加正弦波声激励,探究不同的声激励频率和幅值对火焰热释放特性的影响。

图 7 为在频率 50 Hz,振幅 0~0.20 V 的声激励下,BVK 振荡火焰模态的 CH^* 自由基化学发光图像。实验观察发现,随着声激励振幅的逐渐升高,火焰振荡模态发生明显变化,由非对称结构变为大尺

度对称结构。这说明声激励幅值的大小会影响钝体后火焰的振荡模态,当幅值足够大时,钝体后的涡脱落由非对称涡脱落(BVK)转变为对称结构的涡脱落。

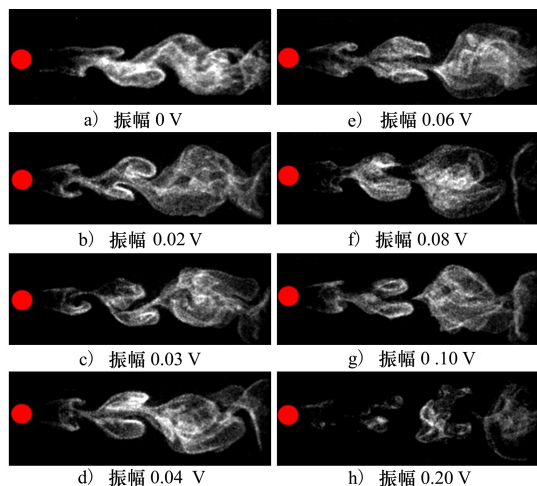


图 7 不同幅值激励下,BVK 振荡火焰的模态变化(声激励频率为 20 Hz,当量比为 0.47,空气流量为 300 L/min)

对于声激励振幅而言,在火焰由非对称结构转变为对称结构的过程中,显然存在一定的模态转换区域。实验发现,在幅值由 0.02 V 增大至 0.04 V 的

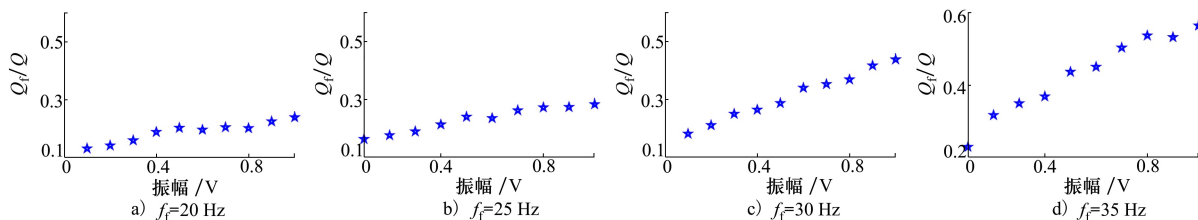


图 8 典型 BVK 火焰在不同声激励下的热释放速率波动变化(当量比为 0.47,空气流量为 300 L/min)

比较不同频率声激励下的热释放速率波动值,可以发现在同一振幅声激励下,频率越高,火焰的热释放速率波动值越大。火焰在振幅为 1.0 V,频率为 20 Hz 的声激励下,其热释放速率波动值为 0.25;而当频率为 35 Hz 时,热释放速率波动值接近 0.6。实验结果说明,频率的增高可以使 BVK 振荡火焰的热释放速率振荡幅值升高,对声激励幅值的响应变大。从热释放的角度来说,高频的声激励使得火焰更加不稳定。

过程中,火焰由非对称结构逐渐转变为对称结构,但 2 种结构又同时存在,直到幅值增大至 0.06 V 时,火焰才转变为稳定的对称振荡模态。当火焰锁定为大尺度对称振荡后,随着声激励幅值的增大,火焰 CH^* 分布由连续型分布转变为局部分离分布,即火焰出现局部熄灭的现象,而当继续增大声激励幅值,火焰将完全熄灭。因此,在声激励下,BVK 振荡火焰经历了 2 次模态转换。

图 8 给出了不同频率和幅值的声激励下,典型 BVK 振荡火焰的热释放速率波动变化,这里的火焰热释放速率波动是轴向平均值。对于某一声激励频率下,火焰的热释放速率波动值总体上随着声激励振幅的增加而变大。但是,可以发现热释放速率波动值随幅值变化的斜率明显存在不同,可以大致分为 3 个阶段:热释放速率波动值随着声激励振幅的增加先以较快速率升高,而后增加变得缓慢,最后又以较大斜率逐渐升高。这一变化说明其中可能出现了模态转换现象,与图 7 得出的结论一致,火焰结构的变化同样经历了 2 次模态转换。因此,在火焰由非对称结构转变为对称结构过程和火焰对称结构出现分离过程中,火焰的热释放速率波动值变化较快,而在火焰保持对称结构振荡的阶段,热释放速率波动值变化较慢。

3 结 论

本文基于 CH^* 自由基化学发光方法对甲烷/空气贫燃预混钝体燃烧热释放特性展开研究,分析了不同当量比和流量对火焰热释放和振荡特性的影响,并进一步探究了 BVK 振荡火焰在声激励下的模态转换现象和热释放振荡规律。得出如下结论:

1) 火焰在当量比的影响下存在 4 种典型振荡模态:局部熄灭振荡(当量比为 0.45),非对称结构振荡(当量比为 0.47),小尺度对称结构振荡(当量

比为 0.49) 和稳定燃烧模态(当量比为 0.51)。

2) 火焰的释热强度与当量比呈近似线性关系。其中, BVK 振荡火焰的热释放速率波动随着轴向距离的增加呈现先增大后减小的趋势, 在约 $x/d = 5.5$ 位置处达到最大值, 而小尺度对称振荡火焰的热释放速率波动与 x/d 的值基本呈线性关系。

3) 声激励对火焰热释放特性和振荡有着显著的影响。BVK 振荡火焰随着声激励幅值的增大而逐渐转变为大尺度对称结构振荡, 并且声激励幅值增高使得 BVK 振荡火焰的热释放速率波动值升高,

火焰燃烧更加不稳定。固定声激励振幅下, BVK 振荡火焰的热释放速率对越大的声激励频率越敏感, 反映在其速率的波动幅度随声激励频率的增大而增大。

本文的研究工作重点在于通过实验手段系统揭示钝体贫燃火焰的热释放特性及其变化规律, 建立了可重复、可验证的实验数据库。研究结果为理解钝体稳焰的热释放调控机制提供了实验依据, 也可为后续 RANS/LES 耦合燃烧模型的验证与改进提供基础数据支撑。

参考文献:

- [1] MCCARTHY J E. Aviation and climate change [R/OL]. (2009-08-04) [2025-06-15]. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc462125/m1/1/high_res_d/R40090_2009Aug04.pdf.
- [2] DOWLING A P. The challenges of lean premixed combustion [C] // Proceedings of the International Gas Turbine Congress, 2003: 2-7.
- [3] LIEUWEN T, YANG V. Combustion instabilities in industrial gas turbines: solar turbines' experience [J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2015, 210(1): 29-42.
- [4] 吴昀辉, 傅宸, 高怡, 等. 声激励下旋流钝体火焰的非线性响应实验 [J]. 航空动力学报, 2022, 37(9): 1872-1885.
WU Yunhui, FU Chen, GAO Yi, et al. Experiment on nonlinear response of swirling bluff-body flame with external acoustic forcing [J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(9): 1872-1885. (in Chinese)
- [5] SHANBHOUE S J, HUSAIN S, LIEUWEN T. Lean blowoff of bluff body stabilized flames: Scaling and dynamics [J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2009, 35(1): 98-120.
- [6] LIEUWEN T, SHANBHOUE S, KHOSLA S, et al. Dynamics of bluff body flames near blowoff [C] // 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2007.
- [7] NAJM H N, PAUL P H, MUELLER C J, et al. On the adequacy of certain experimental observables as measurements of flame burning rate [J]. Combustion & Flame, 1998, 113(3): 312-332.
- [8] LEE J G, SANTAVICCA D A. Experimental diagnostics for the study of combustion instabilities in lean premixed combustors [J]. Journal of Propulsion & Power, 2003, 19(5): 735-750.
- [9] MORRELL R, SEITZMAN J, WILENSKY M, et al. Interpretation of optical flame emissions for sensors in liquid-fueled combustion [C] // 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2001.
- [10] ROBY R J, REANEY J E, JOHNSON E L. Detection of temperature and equivalence ratio in turbulent premixed flames using chemiluminescence [C] // Proceedings of the 1998 International Joint Power Generation Conference, 1998.
- [11] CROSS C, FRICKER A, SHCHERBIK D, et al. Dynamics of non-premixed bluff body-stabilized flames in heated air flow [C] // ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air, 2010: 875-884.
- [12] BENJAMIN E, JACQUELINE O, MATTHEW J, et al. Density ratio effects on reacting bluff-body flow field characteristics [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2012, 706(3): 219-250.
- [13] ROY A, SINGH S, NAIR A, et al. Flame dynamics during intermittency and secondary bifurcation to longitudinal thermoacoustic instability in a swirl-stabilized annular combustor [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 6221-6230.
- [14] BALASUBRAMANIAN M, KUSHWAHA A, et al. Global hydrodynamic instability and blowoff dynamics of a bluff-body stabilized lean-premixed flame [J]. Physics of Fluids, 2021, 33(3): 034103.
- [15] ZHANG G, YANG N, WANG Y, et al. Combustion instabilities of bluff-body stabilized liquid spray flames coupled with pressure oscillations in the fuel line [J]. Combustion and Flame, 2025, 273: 113911.
- [16] MOON K, CHOI Y, KIM K T. Experimental investigation of lean-premixed hydrogen combustion instabilities in a can-annular combustion system [J]. Combustion and Flame, 2022, 235: 111697.

- [17] O'CONNOR J. Understanding the role of flow dynamics in thermoacoustic combustion instability[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2023, 39(4): 4583-4610.
- [18] GUAN Y, YIN B, YANG Z, et al. Forced synchronization of self-excited chaotic thermoacoustic oscillations[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2024, 982: 268185470.
- [19] MORGANS A S, YANG D. Thermoacoustic instability in combustors[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2025, 57(1): 9-33.
- [20] LIU Y, WU X, ZHANG L, et al. Interaction between external forcing modes and self-excited thermoacoustic modes in a single-element liquid rocket engine: bifurcation routes to period-2 oscillation [J]. Aerospace Science and Technology, 2025, 164: 110424

Analysis of heat release characteristics of methane/air lean premixed bluff-body flames

WANG Haiqing, LIU Peijin

(National Key Laboratory of Solid Rocket Propulsion, School of Astronautics,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To investigate the heat release characteristics of methane/air lean premixed bluff-body flames, this study employs experimental methods based on CH^* chemiluminescence to examine the effects of equivalence ratio, inlet flow rate, and acoustic excitation with varying frequencies and amplitudes on flame oscillation behavior and heat release dynamics. Experimental results reveal four typical flame oscillation modes influenced by the equivalence ratio: local extinction oscillation, asymmetric structure oscillation, small-scale symmetric structure oscillation, and stable combustion. The heat release intensity increases approximately linearly with the equivalence ratio. For BVK (von Kármán vortex shedding) oscillating flames, the fluctuation in heat release rate initially increases and then decreases along the axial direction, peaking around $x/d = 5.5$. In contrast, for small-scale symmetric oscillating flames, the heat release rate fluctuation shows a nearly linear increase with x/d . The influence of acoustic excitation on the flame's heat release behavior was also investigated. It was found that with increasing excitation amplitude, BVK-type oscillations gradually transition into large-scale symmetric structure oscillations. Overall, the amplitude of heat release rate fluctuations increases with the acoustic excitation amplitude; a similar trend is observed with respect to frequency. Under an excitation of 35 Hz and 1.0 V, the fluctuation amplitude of the heat release rate approaches 0.6.

Keywords: lean premixed combustion; combustion stability; equivalence ratio; acoustic excitation; heat release characteristics

引用格式:王海清, 刘佩进. 甲烷/空气贫燃预混钝体火焰热释放特性分析[J]. 西北工业大学学报, 2026, 44(2): 271-278.

WANG Haiqing, LIU Peijin. Analysis of heat release characteristics of methane/air lean premixed bluff-body flames[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2026, 44(2): 271-278. (in Chinese)