

雾化气流脉动下乙醇喷雾旋流火焰特性

陈湘男¹, 谢定江¹, 马 康¹, 唐 勇¹, 李水清², 王宁飞¹, 石保禄¹

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081;

2. 清华大学 机械工程学院 能源与动力工程系, 北京 100084)

摘 要: 针对雾化气流脉动条件下乙醇喷雾旋流非稳态燃烧问题,开展了不同雾化流量下乙醇喷雾旋流火焰对雾化气流脉动响应特性的实验研究,揭示了不同脉动频率和脉宽时长下火焰长度和抬升高度的响应特性,获得了乙醇喷雾燃烧在雾化气流脉动条件下的火焰结构、温度分布等动态规律。结果表明:随着雾化流量增加,旋流火焰由附着演化为抬升;此外,雾化气流脉动影响乙醇的雾化过程,从而使附着火焰的火焰长度和抬升火焰的抬升高度发生同频振荡;在相同的实际雾化流量下,雾化气流脉动使得附着火焰平均火焰长度和抬升火焰平均抬升高度增加;同时脉动直接改变了液滴速度、尺寸和空间分布,促进了乙醇的氧化燃烧,使得整体释热率增加,而不同频率的脉动,对喷雾火焰的释热几乎无影响。

关 键 词: 气流脉动; 乙醇雾化; 旋流火焰; 火焰长度; 抬升高度

中图分类号: V231.2⁺3

文献标志码: A

Characteristics of ethanol spray flame under flow pulsation in swirl burner

CHEN Xiangnan¹, XIE Dingjiang¹, MA Kang¹, TANG Yong¹,

LI Shuiqing², WANG Ningfei¹, SHI Baolu¹

(1. School of Aerospace Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Department of Energy and Power Engineering,

School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The unsteady combustion behaviors of an ethanol spray flame perturbed by pulsations of different atomizing gaseous flows were investigated experimentally. By varying the atomizing gas flow rate, the responses of flame length and lift-off height to different pulsation frequencies and durations, as well as the flame structure and temperature distribution under flow pulsations, were examined. The results showed that the spray flame changed from attachment to lift-off as the atomizing flow-rate increased. The atomizing process of liquid ethanol was significantly affected by the flow pulsation, resulting in oscillations of flame length and lift-off height at the same frequency. Under the same atomizing flow rate, the average flame length of attached flame

收稿日期:2021-02-17

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划重点项目(91641204);国家自然科学基金(51676016);
中国博士后科学基金(2020M680379)

作者简介:陈湘男(1996—),男,硕士生,主要从事液体燃料不稳定燃烧实验研究。

通信作者:石保禄(1983—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事旋流燃烧、富氧燃烧、发动机燃烧等方面的研究。

E-mail:shibaolu@bit.edu.cn

引用格式:陈湘男,谢定江,马康,等. 雾化气流脉动下乙醇喷雾旋流火焰特性[J]. 航空动力学报,2022,37(1):67-75. CHEN Xiangnan, XIE Dingjiang, MA Kang, et al. Characteristics of ethanol spray flame under flow pulsation in swirl burner[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(1): 67-75.

and lifting height of lift-off flame increased. The droplet velocity, size and spatial distribution dominating the mixing of ethanol spray and oxidant were directly affected by flow pulsation, resulting in an enhancement of heat-release, while the effect of pulsating frequency was less significant.

Key words: flow pulsation; ethanol spray; swirling flame; flame length; lift-off height

旋流燃烧作为现代先进航空发动机和燃气轮机燃烧室主要采用的组织形式之一,其通过旋流叶片或者燃烧器结构设计,使空气或燃料以旋转方式进入燃烧室后快速完成掺混、点火和燃烧过程,具有促进油气掺混,实现火焰稳定等显著优点^[1-2]。

一般航空发动机燃烧室采取雾化燃烧的组织方式,包括燃料的喷射、雾化、蒸发、混合燃烧等过程,脉动压力场、速度场和温度场对各个子过程都会产生影响,当满足一定的相位条件时,就会激发燃烧室大幅值的振荡^[3-5]。针对喷雾燃烧室的燃烧不稳定问题,国内外开展了大量基础实验研究和理论分析。例如,李佳楠等^[6]综述了射流撞击及旋流雾化特性的研究进展,总结了背压振荡影响雾场的两个主要作用机制,其一是通过改变喷注压降影响喷射,继而影响雾化过程,其二是通过振荡的气相流场直接作用于雾场。苏凌宇等^[7]对基于液滴蒸发过程的低频不稳定燃烧激励机理进行分析,认为低频不稳定燃烧效应是蒸发时滞和化学反应放热时滞两个参数综合作用的结果。在高频热声耦合研究中,Fabrice等^[8]通过脉动阀在雾化空气端加入脉冲扰动,模拟航空发动机中两相流燃烧的热声不稳定现象,发现了雾化端的脉动会影响喷雾密度,但对粒径分布几乎无影响。Mirrat等^[9]搭建了进气端声场扰动下的旋流喷雾燃烧实验台,基于火焰描述函数分析了燃烧室的自激振荡,揭示了喷雾火焰动力学对速度场扰动的响应规律,发现了速度与热释率扰动之间的相位延迟是引起燃烧室大幅值振荡的关键因素^[9]。

而实际工作中的燃烧室面临的情况更加复杂。如在压气机进入失速和喘振状态时,进入燃烧室的空气流量和速度可能出现大幅值的脉动,使得液体燃料的雾化蒸发和掺混特性急剧改变,引发燃烧室工作失稳^[10]。特别是军用发动机在格斗机动中,飞行攻角急速改变,外加经常采用快收油门等方式规避红外追踪,导致燃烧室入口流量畸变,燃烧特性变化剧烈,很容易引发熄火等危害整机安全的现象^[11-12]。

现阶段,国内外对燃烧不稳定的研究相对集

中在高频的热声耦合燃烧不稳定性方面^[13-16],学界对入口条件变化导致的燃烧不稳定现象关注相对较少,在复杂流体流量脉动对释热率脉动和火焰特性影响方面仍有较大的研究空间。其中,赵海亮^[17]等研究了燃气流量脉动条件下的射流扩散火焰,采用了纹影和直接摄像手段观察到在燃气流量低频率(10 Hz 以下)脉动工况下的火焰特征及其变化规律,分析了火焰长度脉动特征和火焰内部结构的周期发展过程,发现了低速和高速燃气脉冲的分离是单火焰燃烧不稳定的原因。崔巍^[18-19]等模拟发动机燃烧室的喘振,研究了燃气流量脉动条件下甲烷预混旋流火焰的熄火极限及等离子体主动控制方法,发现放电脉冲与流动脉动满足一定相位关系时,等离子体能扩展旋流火焰的贫燃熄火极限。

为进一步探究燃烧室入口雾化气体流量(雾化气体为氮气,表示的是雾化氮气的体积流量,文中给简称为雾化流量)脉动对喷雾旋流燃烧特性的影响规律,本文用乙醇作为液体燃料,在喷嘴雾化来流中施加脉冲扰动,分别探究了附着和抬升火焰对不同脉动频率和脉宽时长扰动的响应特性。

1 实验及测试装置

实验及测试装置如图 1 所示。A-A 截面为切向旋流燃烧器的结构示意图,燃烧器直径 $D=48$ mm,切向入口宽度 $W=1$ mm,切向入口高度 $L_s=12$ mm,空气从 4 个切向入口通入。在燃烧器的上方为长度 $L_1=300$ mm 的石英玻璃管(坐标轴 Z 表示玻璃管轴向, r 为径向),在燃烧器底部中心位置处接入德国 Schlick D4.484/0 型气液同轴雾化标准喷嘴,喷嘴出口孔径 $d=0.8$ mm。无水乙醇(体积分数为 99.9%)通过 LSP01-1A 型号注射泵注入喷嘴液体入口端,雾化氮气入口压力为 0.2 MPa,通过 D07-9E 质量流量控制器($\pm 2\%$)通入喷嘴气体入口端(本实验中的流量均为体积流量),轴向射流喷雾在燃烧室内与切向入口处的空气混合,形成喷雾旋流火焰。

流量脉动发生系统用于产生大幅值的雾化气

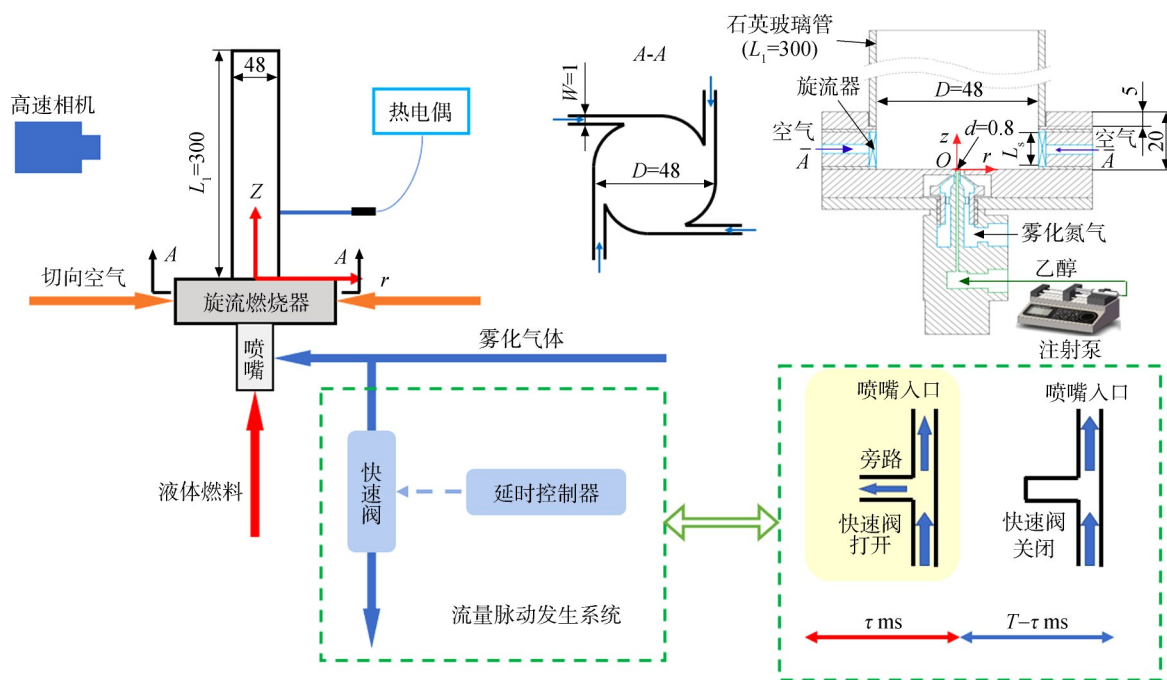


图1 实验及测试装置(单位:mm)

Fig.1 Experiment and test setup (unit:mm)

流脉动,雾化氮气经过质量流量计后连接一个三通管路,管路主路与喷嘴的气体入口端连接。三通旁路与DG645延迟发生器控制的MAC35A-ACA快速阀相连,快速阀打开时,部分氮气流经快速阀排入大气,从而使主路产生气流脉冲扰动。通过改变DG645输出的电平信号,可以控制快速阀通断时间,使得进入燃烧室的氮气产生不同的脉动扰动特性,其中 τ 表示快速阀打开时长,定义为脉宽时长, T 为快速阀两次打开之间的一个周期的时长,即脉动频率 f 的倒数。通过改变 τ 和 f ,可以产生不同频率和不同幅值的气流脉冲扰动。

通过高速相机(VEO 410L)采集石英玻璃管内的火焰结构,观察喷雾旋流火焰在来流脉动作用下的响应规律。高速相机的实时图形采集软件是PCC2.8,采样帧率设定为500帧/s。为更好地表征雾化气流脉动对乙醇喷雾燃烧火焰结构的影响,采用B型热电偶进行了测温。

2 结果和分析

2.1 无扰动时火焰结构

为研究雾化气流脉动条件下的乙醇喷雾旋流火焰的响应特性,先考察无扰动时喷雾火焰的旋流燃烧特性。本文的实验研究中,乙醇流量恒定为 $q_{v,i}=10$ mL/min,切向空气流量恒定为 $q_{v,i}=120$ L/min,玻璃管内的总油气比为恒定值0.5。

图2展示了不同雾化流量 $q_{v,a}$ 下的无扰动火焰结构,为使实验研究结果更具普遍性,同时考虑燃烧器直径对旋流数和火焰直径有着直接的影响,本文使用了燃烧器直径 $D=48$ mm来无量纲化火焰长度 L 和抬升高度 H 。

如图2(a)所示,雾化流量对火焰长度的影响可以分为两个阶段:①在流量较小的时候($q_{v,a}<3.5$ L/min),雾化效果差,导致液滴尺寸很大,同时喷雾射流速度较小,需要很长的停留时间进行蒸发,火焰分布在管壁附近,增大雾化流量有助于提升局部油气比及来流速度,从而使管状层流火焰拉长。②而当雾化流量增大到一定程度($q_{v,a}>4$ L/min),液滴变得十分细化且均匀,喷射之后在旋转气流的内回流区迅速气化和燃烧,燃烧场与内回流区的强湍流场耦合,在较短的空间尺度内迅速释热,呈现为短的明亮火焰。这种由蒸发速率控制的层流向湍流火焰转捩的过程,表现为火焰位置从靠近壁面层流区转移到中心强湍流区,不同于文献[20]报道的整体流速逐渐增加导致的雷诺数和湍流强度变大^[20]。雾化流量增大使得液滴尺寸细化,均匀细化的液滴迅速蒸发,使得火焰区转移到了中心气流,壁面附着现象不再出现;同时雾化流量增加也使得射流轴向速度增加,在靠近喷嘴处的乙醇蒸气停留时间减小,内剪切层处的局部油气比减小,熄火拉伸率降低;另外由于高

速的大量来流,下游稳定火焰无法向上游传播,最终导致了火焰的抬升^[21]。

用 Matlab 编写的程序对火焰结构图进行灰度化,二值化处理后,读取最大连通区域,可以得到火焰长度 L 的量化数据,抬升高度 H 同理,图 2 (b)展示了不同雾化流量条件下的火焰长度 L 和抬升高度 H 的变化规律。根据乙醇喷雾旋流火焰对雾化流量 $q_{v,a}$ 的响应特性,把火焰分为 3 个区域,附着区,转变区和抬升区。附着火焰时,火焰长度 L 随着雾化流量 $q_{v,a}$ 的增加而增加,在雾化流量 $q_{v,a}=3.5$ L/min 时,火焰达到最大长度;雾化流量 $q_{v,a}>4$ L/min 时,火焰处于抬升状态,并且随着雾化流量 $q_{v,a}$ 的增大,火焰长度 L 逐渐减小,抬升高度 H 逐渐升高,在雾化流量 $q_{v,a}=10$ L/min 时,

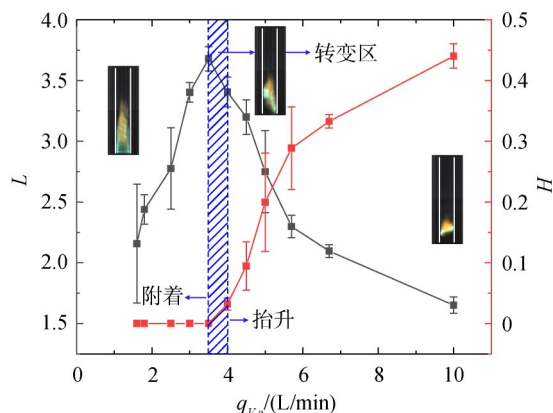
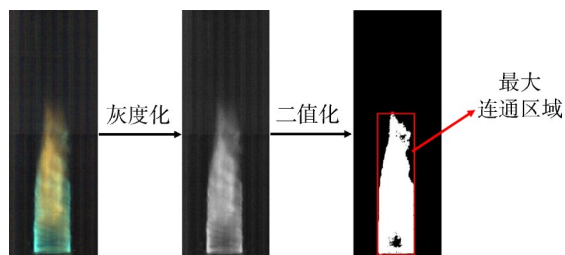
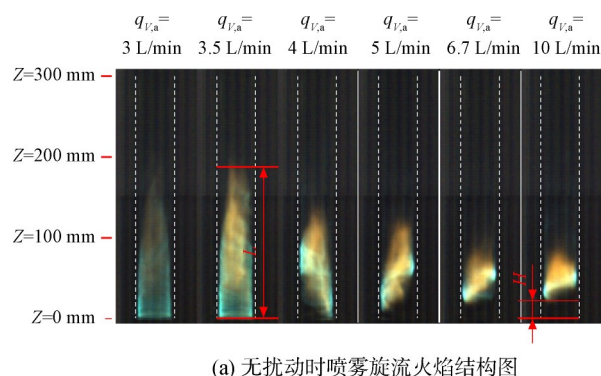


图 2 无扰动喷雾旋流火焰

Fig.2 Atomization swirling flame without flow pulsation

抬升高度最大;雾化流量为 3.5~4 L/min 之间时,火焰处于转变区,该区域内,火焰状态在附着与抬升之间转变。

2.2 火焰对雾化气流脉动的瞬态响应

火焰结构变化是火焰对脉动响应的最直观表征,因脉动时间尺度在毫秒量级,为不失真地获得火焰对脉动的响应特性,使用高速相机拍摄火焰的瞬态结构图,帧率设置为 500 帧/s,每帧曝光时间为 2 ms。以 $q_{v,a}=5$ L/min, $f=4$ Hz, $\tau=30$ ms 工况为例,此时火焰为附着状态。

考虑脉动的周期性,连续选 1 000 张高速相机拍摄的火焰结构图,以第 1 张图片为基准,用 Matlab 编写的图像相似度分辨程序依次对剩余的 999 张火焰结构图进行相似度分析(相似度系数 x 的取值范围为 0~1, Δx 为相似度系数频谱振幅),将得到的相似度数据进行快速傅里叶变换 (FFT)^[22],其频谱特性如图 3 所示,与第一张火焰结构图相似度较高的图片以 4 Hz 的主频和 8 Hz 的倍频重复出现。从频谱特征来看,火焰结构图的周期性变化是非常明显的,说明雾化气流脉动会使得火焰结构发生明显的同频振荡。

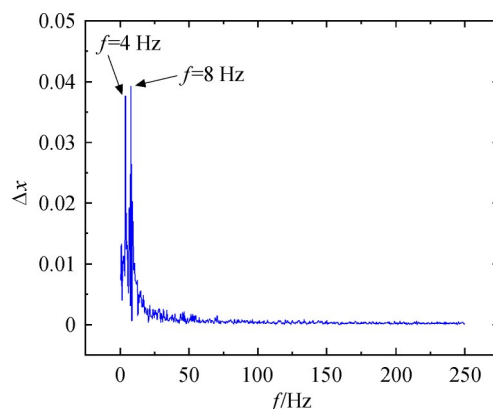


图 3 相似度频谱特性

Fig.3 Characteristics of similarity spectrum

由于较强的切向旋流作用,脉动对管内燃烧的火焰直径影响很小,同时在实验中观察到明显的火焰长度变化,因此主要对火焰长度的变化规律进行量化分析。

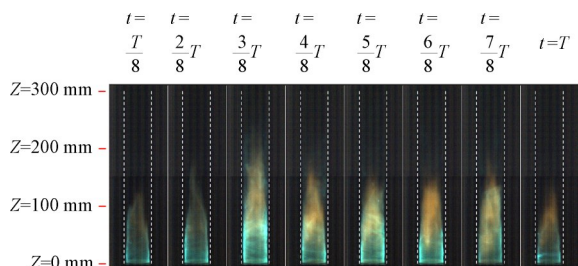
在前期的工作中,通过马尔文激光粒度分析仪测量了该喷嘴在不同乙醇和雾化流量下的索太尔平均粒径 D_{32} ,发现 D_{32} 随着雾化流量的增加而减小,随着乙醇流量的增加而增加。在工况 $q_{v,l}=11$ mL/min, $q_{v,a}=4, 6, 8, 10$ L/min 时,雾场的 D_{32} 分别为 63.51、32.9、24.42、18.98 μm ,索太尔平均粒径

D_{32} 随雾化流量增加而减小。因此在图 4(a)所示的一个脉动周期内,定性分析电磁阀打开时,雾化气体逸出,雾化流量减小,平均雾化粒径增大,单位时间内蒸发的乙醇蒸气减少,使得燃烧强度减弱;同时,尽管喷雾轴向速度降低,乙醇大液滴在管内燃烧区停留时间增加,但仍然不足以使得大液滴完全蒸发燃烧,因而一部分乙醇液滴飞溅出管外,实际参与反应的乙醇减少,导致火焰长度变短;反之,电磁阀关闭时,燃烧强度增强,火焰长度变长。

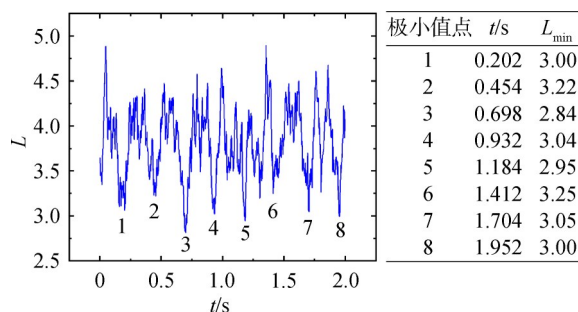
对该脉动工况 $t=2$ s 内拍摄到的 1 000 张火焰图进行处理,得到火焰长度随时间变化的规律图(图 4(b))。不考虑噪声干扰,从图中可以看出,在持续 2 s 的脉动燃烧过程中,火焰长度有 8 个明显的极小值($L_{\min}$)。把图 4(b)中的火焰长度数据进行快速傅里叶变换,其频谱特性(火焰长度频谱振幅 ΔL)如图 4(c)所示,主频 4 Hz 与脉动频率一致,说明附着火焰对脉动的瞬态响应特性表现为火焰长度随脉动的同频振荡。

同理,对于抬升火焰,来流脉动引起雾化流量脉动,使得火焰抬升高度发生振荡,以 $q_{v,a}=10$ L/min, $f=4$ Hz, $\tau=40$ ms 工况为例。

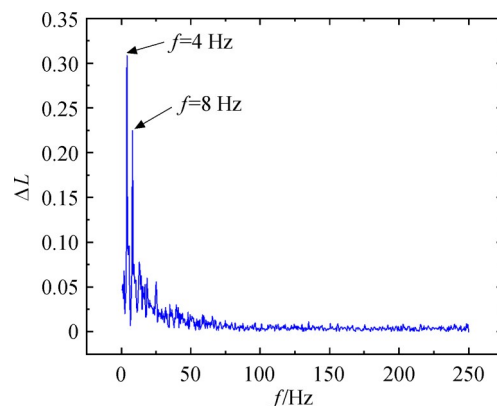
图 5(a)展示了抬升火焰在一个周期内的火焰结构变化过程。由于旋流的作用,火焰底部型面有明显切向坡度,且坡度指向随旋流而变化。在一个脉动周期内,电磁阀打开时,雾化气体逸出,平均雾化粒径增大,单位时间内蒸发的乙醇蒸气减少,同时喷雾轴向速度降低,反应物气流速



(a) 一个周期内火焰结构



(b) 火焰长度



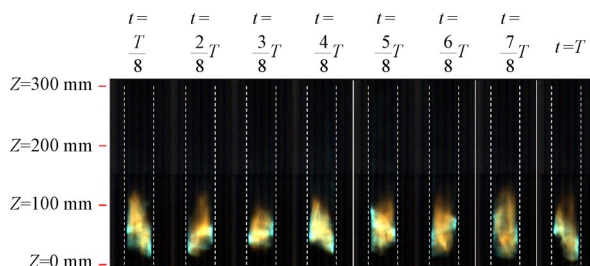
(c) 火焰长度频谱

图 4 附着火焰对脉动的瞬态响应

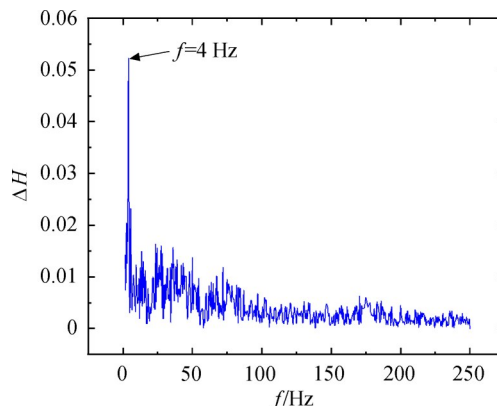
Fig.4 Transient response of attached flame to pulsations

度小于湍流燃烧速率,导致火焰抬升高度降低;电磁阀关闭时,实际雾化流量不变,火焰抬升高度恢复。

对该脉动工况 $t=2$ s 内拍摄到的 1 000 张火焰图进行处理,将得到的火焰抬升高度数据进行快速傅里叶变换,其频谱特性(抬升高度频谱振幅 ΔH)如图 5(b)所示,主频 4 Hz 与脉动频率一致,说明抬升火焰对脉动的瞬态响应特性表现为火焰抬升高度随脉动的同频振荡。



(a) 一个周期内火焰结构



(b) 火焰抬升高度频谱

图 5 抬升火焰对脉动的瞬态响应

Fig.5 Transient response of lifted flame to pulsation

综上所述,雾化气流脉动通过影响乙醇喷雾的雾化过程,使得火焰对脉动的瞬态响应表现为附着火焰的火焰长度和抬升火焰的抬升高度随脉动同频振荡。

2.3 火焰对雾化气流脉动的时均响应特性

脉动发生时,部分雾化气体逸出,导致实际雾化流量(通入喷嘴的雾化气体量)减小,同时也会使得液滴尺寸和空间分布发生扰动,因此实际雾化流量和液滴粒径分布的扰动都可能对喷雾火焰产生影响。

如图 6 所示,选取两种无扰动工况作为对比,雾化流量分别为 $q_{v,a}=5\text{ L/min}$ 和 $q_{v,a}=10\text{ L/min}$ 。对无扰动工况雾化端分别施加 4 Hz 和 8 Hz 不同脉宽时长的扰动,得到附着火焰平均火焰长度 $\bar{L}$ 和抬升火焰平均抬升高度 $\bar{H}$ 对脉动的时均响应特性。

雾化流量为 $q_{v,a}=5\text{ L/min}$,无扰动时,火焰处于抬升状态,当施加脉动后,脉宽时长从 20 ms 开始,火焰变为附着(图 6(a))。因此,脉宽时长从

0 ms(无扰动)到 20 ms 时,火焰由抬升变为附着,火焰长度显著增加。在 20~50 ms 时,随着脉宽时长的增大,雾化气体逸出增加,实际雾化流量减小,导致火焰长度减小。在脉宽时长相同时,脉动频率越大,逸出气体量越多,火焰长度越小。同样的,雾化流量为 $q_{v,a}=10\text{ L/min}$,无扰动时,火焰处于抬升状态,当施加脉动后,火焰抬升高度降低,相同脉宽时长条件下,脉动频率越大,抬升高度越小(图 6(a))。

通过以上分析得知,实际雾化流量对平均火焰长度和抬升高度有着显著的影响,但无法得知火焰结构对脉动的时均响应特性。为进一步量化分析火焰对脉动的时均响应特性,需要准确得到不同脉动工况下的逸出雾化气体量,以便与实际雾化流量相同的无扰动火焰对比,排除实际雾化流量这个变量对火焰结构的影响。由于旁路流量为非匀速流动,为了便于分析,采用流经旁路的平均流量作为研究参数。本研究采用七星华创 D08-8CM 型流量积算仪对旁路流出的平均流量进行测量,流量计量程范围为 0~10 L/min (0 °C, 101 325 Pa,标准状况下)。

表 1 列出了所有实验工况下的实际雾化流量,定义雾化效率 $\eta=q_{v,b}/q_{v,a}$ 。雾化效率与脉宽时长和脉动频率的乘积 τf 呈负相关, τf 乘积越大,逸出气体量越大,实际雾化流量越小,平均雾化粒径越大,轴向喷雾速度越小,雾化效率越低;在乘积相同时,逸出空气量相同,此时的雾化效率相同。

当雾化流量 $q_{v,a}=5\text{ L/min}$ 时,施加脉动后,实际雾化量都不超过 3.5 L/min,对比无扰动喷雾火焰结构可知,火焰会由抬升变为附着,并且随着 τf 的增大,实际雾化流量的减小,雾化效率降低,附着火焰平均长度 $\bar{L}$ 也会减小。当雾化流量 $q_{v,a}=10\text{ L/min}$ 时,施加脉动后,实际雾化流量都大于 3.5 L/min,对应于无扰动喷雾抬升火焰,随着 τf 增大,实际雾化流量的减小,平均抬升高度 $\bar{H}$ 会降低。逸出气体量测量实验说明,实际雾化流量对火焰状态的影响显著,而雾化场液滴尺寸和分布的扰动对火焰的影响将在文中第 2.4 节进行阐述。

2.4 参数分析

本节将在实际雾化流量相同的条件下,只研究火焰对脉动的时均响应特性。

对应于表 1 中不同脉动条件下的实际雾化体

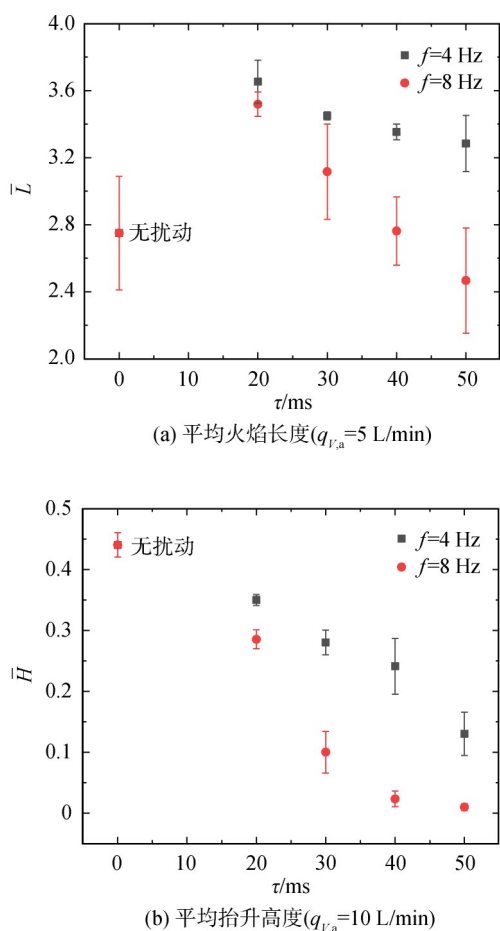


图 6 火焰对脉动的时均响应特性

Fig.6 Time-averaged response of flame to pulsation

表 1 不同雾化气流脉动下的实际雾化流量($q_{v,i}=10\text{ mL/min}$, $q_{v,i}=120\text{ mL/min}$)

Table 1 Actual atomization flow rate under different atomization flow pulsations ($q_{v,i}=10\text{ mL/min}$, $q_{v,i}=120\text{ mL/min}$)

雾化流量 $q_{v,a}/$ (L/min)	脉动频率 f/Hz	脉宽时长 τ/ms	逸出气体流量/ (L/min)	实际雾化流量 $q_{v,b}/$ (L/min)	雾化效率 $\eta/\%$
5	0	0	0	5	100
5	4	20	1.5	3.5	70
5	4	30	2	3	60
5	4	40	2.3	2.7	54
5	4	50	2.5	2.5	50
5	8	20	2.3	2.7	54
5	8	30	2.7	2.3	46
5	8	40	3	2	40
5	8	50	3.2	1.8	36
10	0	0	0	10	100
10	4	20	3.3	6.7	67
10	4	30	4.3	5.7	57
10	4	40	5	5	50
10	4	50	5.3	4.7	47
10	8	20	5	5	50
10	8	30	5.5	4.5	45
10	8	40	6	4	40
10	8	50	6.2	3.8	38

积流量,图 7 中黑色曲线表示无扰动工况下平均火焰长度对雾化流量变化的响应特性,红色曲线表示实际雾化流量与无扰动雾化流量相同的条件下,施加脉动后平均火焰长度的变化规律。3.5 L/min 为临界雾化流量,实际雾化流量小于临界雾化流量时,喷雾燃烧为附着火焰;反之为抬升火焰。

在火焰附着时,施加脉动后,平均火焰长度相比无扰动时增加。这可能是由于雾化气脉动改变了液滴尺寸和分布,引起了局部油气比的扰动,使得原先不可燃区域有了合适的油气混合,变得可燃。在火焰抬升时,脉动强化了燃烧场与内回流区湍流场的耦合,同时抬升区域(不可燃区域)拉伸率进一步增大,使得火焰抬升高度增加^[23]。

在实际雾化流量相同的条件下,分别选取无扰动工况($q_{v,a}=2.7\text{ L/min}$, $f=0\text{ Hz}$, $\tau=0\text{ ms}$),脉动工况 1($q_{v,a}=5\text{ L/min}$, $f=4\text{ Hz}$, $\tau=40\text{ ms}$),脉动工况 2($q_{v,a}=5\text{ L/min}$, $f=8\text{ Hz}$, $\tau=20\text{ ms}$)这 3 种工况,在轴向位置 $Z=25,85,145\text{ mm}$ 处进行测

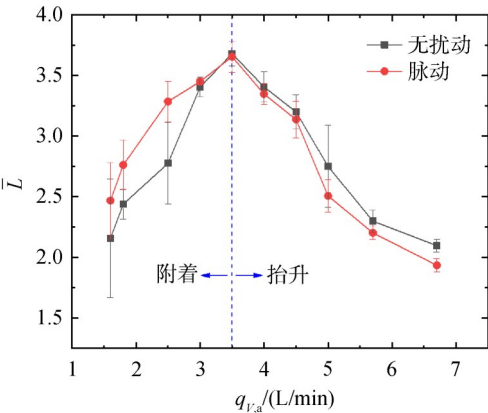


图 7 实际雾化流量相同条件下脉动与无扰动火焰长度对比

Fig.7 Comparison of pulsating and undisturbed flame length in case of the same actual atomization flow rate

温,其管内径向温度 T 分布如图 8 所示。

从管中心到管壁,以火焰区为分界面,火焰区内部是高温低密度的燃气,火焰区与壁面之间是

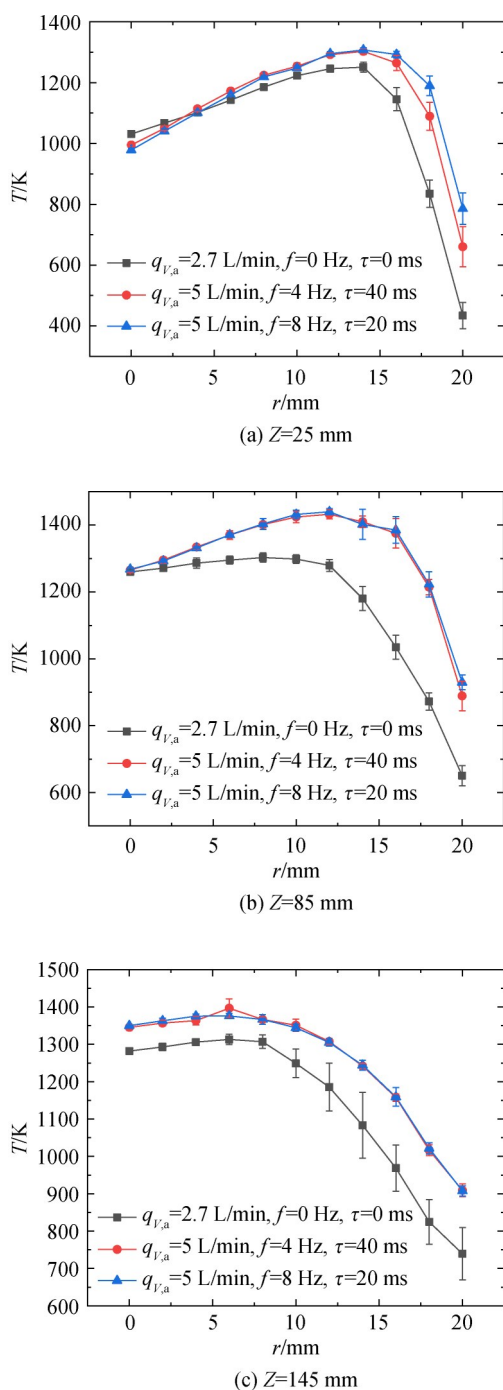


图8 3种工况下管内温度径向分布

Fig.8 Radial temperature distribution of three cases in the tube

低温高密度的未燃气体,火焰锋面稳定在来流速度与燃烧速度平衡位置处,因此火焰温度径向分布先增加后减小,火焰锋面处为温度峰值,即典型的旋流管状火焰温度分布^[24-27]。施加了雾化气脉动后,直接改变了液滴粒径和分布,影响了蒸发和油气混合,局部油气比发生扰动。从测温结果分析来看,喷雾燃烧的管内温度高于无扰动燃烧火

焰温度,即整体释热率更高,空间内释热更加充分,说明脉动对乙醇燃烧有一定的促进作用。而工况2和工况3(实际雾化流量相同,脉动频率不同)下,管内温度分布几乎一致,说明不同频率的脉动对喷雾火焰的释热几乎无影响。

3 结 论

为了分析雾化气流脉动下乙醇喷雾旋流燃烧特性,本文在喷嘴雾化气体入口端引入周期性扰动,开展了不同脉动频率和脉宽时长下乙醇喷雾旋流非稳态燃烧的实验研究,分别获得了附着和抬升火焰对来流脉动的瞬态和时均响应特性随雾化流量、脉动频率和脉宽时长的变化规律,主要结论如下:

1) 无扰动时,随着雾化流量的增加,火焰由附着转变为抬升,转变区临界雾化流量为 3.5 L/min,且附着火焰的火焰长度和抬升火焰的抬升高度都随雾化流量增加而增加。

2) 雾化气流脉动影响乙醇的雾化过程,使得附着火焰的火焰长度和抬升火焰的抬升高度发生同频振荡;随着 τf 的增大,实际雾化流量减小,雾化效率降低,附着火焰的平均火焰长度和抬升火焰的平均抬升高度都会减小。

3) 在实际雾化流量相同的条件下,雾化气流脉动改变了喷雾液滴尺寸,速度和空间分布,引起了局部油气比的扰动,一定程度上促进了乙醇与氧化剂的混合燃烧,使得燃烧强度增大,整体释热率增加。同时,脉动还会使得附着状态下平均火焰长度增加和抬升火焰的平均抬升高度增加,而其中的影响机制仍有待深入分析。

参考文献:

- [1] 张俊,涂晓波,陈爽,等.贫燃预混旋流火焰 PIV 和 OH-PLIF 瞬态同步测量[J].航空动力学报,2020,35(10):2046-2055.
ZHANG Jun, TU Xiaobo, CHEN Shuang, et al. Instantaneous and simultaneous PIV and OH-PLIF measurement for lean premixed swirl flame[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(10):2046-2055. (in Chinese)
- [2] GUPTA A K, LILLEY D G, SYRED N. Swirl flows, energy and engineering science series[M]. London: Abacus Press, 1984.
- [3] 黄玉辉.液体火箭发动机燃烧稳定性理论、数值模拟和实验研究[D].长沙:国防科技大学,2001.
HUANG Yuhui. Theoretical numerical simulation and experimental investigations of combustion instability in liquid rocket engine[D]. Changsha: National University of Defence

- Technology, 2001. (in Chinese)
- [4] HARRJE D T, REARDON F H. Liquid propellant rocket combustion instability[R]. NASA SP-194, 1972.
- [5] O'CONNOR J, ACHARYA V, LIEUWEN T. Transverse combustion instabilities: acoustic, fluid mechanic, and flame processes[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2015, 49:1-39.
- [6] 李佳楠, 雷凡培, 周立新, 等. 液体火箭发动机背压振荡环境下的雾化特性研究进展[J]. 推进技术, 2019, 40(11): 2401-2419.
- LI Jianan, LEI Fanpei, ZHOU Lixin, et al. Recent advances of atomization characteristics under oscillating backpressure conditions in liquid rocket engines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(11):2401-2419. (in Chinese)
- [7] 苏凌宇, 丰松江, 聂万胜, 等. 基于燃料液滴蒸发过程的液体火箭发动机低频不稳定燃烧激励机理分析[R]. 山东青岛: 高等学校工程热物理第20届全国学术会议, 2014.
- [8] FABRICE G, PIERRE G, OLAF D, et al. Influence of pulsed entries on a spray generated by an air-blast injection device: an experimental analysis on combustion instability processes in aeroengines[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1):91-98.
- [9] MIRAT C, DUROX D, SCHULLER T. Stability analysis of a swirl spray combustor based on flame describing function[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 3291-3298.
- [10] DAY I J. Active suppression of rotating stall and surge in axial compressors[J]. Journal of Turbomachinery, 1993, 115(1): 40-47.
- [11] AKDAG R, ALTILAR T. A comparative study on practical evasive maneuvers against proportional navigation missiles[J]. AIAA-2005-6352, 2005.
- [12] 王东南. J-7 型飞机空中意外停车及起动[J]. 飞行力学, 1989(1):78-81.
- [13] YOU D, HUANG Y, YANG V. A generalized model of acoustic response of turbulent premixed flame and its application to gas-turbine combustion instability analysis[J]. Combustion Science and Technology, 2005, 177(5/6): 1109-1150.
- [14] IDAHOSA U, SAHA A, XU C, et al. Non-premixed acoustically per turbed swirling flame dynamics[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(9):1800-1814.
- [15] CANDEL S, DUROX D, SCHULLER T, et al. Progress and challenges in swirling flame dynamics[J]. Comptes Rendus Mécanique, 2012, 340(11/12):758-768.
- [16] CANDEL S, DUROX D, SCHULLER T, et al. Dynamics of swirling flames[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46(1):147-173.
- [17] 赵海亮, 由长福, 徐旭常, 等. 燃气流量低频脉动下的火焰结构特征[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(8): 1071-1074.
- ZHAO Hailiang, YOU Changfu, XU Xuchang, et al. Flame characteristics during low frequency fuel flow-rate oscillations[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44(8):1071-1074. (in Chinese)
- [18] CUI W, REN Y, LI S. Stabilization of premixed swirl flames under flow pulsations using microsecond pulsed plasmas[J]. Journal of Propulsion and Power, 2019, 35(1):1-11.
- [19] 崔巍. 等离子体激励下的旋流火焰动力学控制机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- CUI Wei. Mechanisms of swirl flames control using plasma actuation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018. (in Chinese)
- [20] 陆嘉, 廖光焯, 陶常法. 甲烷射流扩散火焰结构试验研究[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(6):164-168.
- LU Jia, LIAO Guangxuan, TAO Changfa. Experimental study of flame shape of methane jet diffusion flame[J]. Journal of Safety and Environment, 2010, 10(6): 164-168. (in Chinese)
- [21] JELLA S E, WONG W Y K, STEINBERG A M, et al. Attached and lifted flame stabilization in a linear array of swirl injectors[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4):6279-6287.
- [22] 赵晓尧, 石保禄, 李博, 等. 高氧气浓度甲烷不稳定燃烧实验研究[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(2):474-481.
- ZHAO Xiaoyao, SHI Baolu, LI Bo, et al. Investigation on the instability of methane/oxygen combustion under high oxygen concentration[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(2):474-481. (in Chinese)
- [23] 余彼, 赵晓尧, 马康, 等. 声场扰动下预混旋流管状火焰动态响应特性[J]. 航空动力学报, 2020, 35(8):1655-1663.
- YU Xiao, ZHAO Xiaoyao, MA Kang, et al. Characteristics of premixed swirling tubular flame under acoustic perturbation[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(8):1655-1663. (in Chinese)
- [24] ISHIZUKA S, HAGIWARA R, SUZUKI M, et al. Combustion characteristics of a tubular flame burner[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers: Part B, 2000, 66(652):3226-3232.
- [25] ISHIZUKAS S, MOTODAMARI T, SHIMOKUTI D. Rapidly mixed combustion in a tubular flame burner[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(1):1085-1092.
- [26] SHI B, PENG W, LI B, et al. CO₂ diluted propane/oxygen combustion in a rapidly mixed tubular flame burner[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(3):4261-4268.
- [27] 彭维康, 赵晓尧, 初庆钊, 等. 基于急速混合管状火焰技术的丙烷富氧燃烧[J]. 航空动力学报, 2017, 32(11):76-84.
- PENG Weikang, ZHAO Xiaoyao, CHU Qingzhao, et al. Oxy-fuel combustion of propane in a rapidly mixed tubular flame burner[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(11): 76-84. (in Chinese)

(编辑:王碧珩)