# 中心分级预混旋流火焰燃烧噪声的实验研究\*

罗守博1,张耀恒2,韩啸1,王建臣1,张弛1

(1. 北京航空航天大学 航空发动机研究院 航空发动机气动热力国家级重点实验室,北京 100191;2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院,北京 100191)

摘 要:针对中心分级旋流燃烧器中预混甲烷火焰在常温常压下的燃烧噪声进行了实验研究,主要 关注实验工况和限制域结构对燃烧噪声的影响。用声级计测量了燃烧噪声声压级,用带有CH\*滤镜的单 反相机拍摄火焰的平均图像。实验结果表明,在主、预燃级空气流量恒定时,总当量比与分层比对燃烧 噪声产生了显著的影响,氢气掺入对燃烧噪声无明显影响;预燃级当量比对于燃烧噪声的产生起关键作 用,预燃级当量比越接近1.00燃烧噪声越大;相同工况下,预燃级空气流量分配越多,产生的燃烧噪声 越大。改变火焰限制域的结构,使用锥形火焰筒可以减少燃烧噪声的产生。本研究还结合带有CH\*滤镜 的摄像机拍摄的火焰图像,初步分析了燃烧噪声与火焰宏观结构之间的对应关系。

关键词:航空发动机;中心分级;旋流火焰;燃烧噪声;火焰宏观结构;预混甲烷火焰;贫预混燃烧中图分类号:TK16 文献标识码:A 文章编号:1001-4055(2023)05-2207106-09 **DOI**: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2207106

## Experimental Research on Combustion Noise of Centrally Staged Premixed Swirl Flame

LUO Shou-bo<sup>1</sup>, ZHANG Yao-heng<sup>2</sup>, HAN Xiao<sup>1</sup>, WANG Jian-chen<sup>1</sup>, ZHANG Chi<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine, Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: An experimental study on the combustion noise of a premixed methane flame in a centrallystaged swirl burner at atmospheric temperature and pressure is carried out, focusing on the effects of experimental conditions and confinement structure on the combustion noise. The combustion noise sound pressure level was measured with a sound level meter, and the time-averaged images of the flame were taken with a DSLR camera with a CH\* filter. The experimental results show that when the airflow of the main and pilot stages keeps constant, the total equivalence ratio and the stratification ratio have a significant effect on combustion noise, but the hydrogen addition seems to have no obvious effect. The pilot stage equivalence ratio plays a key role in the generation of combustion noise. As a result, the closer the pilot stage equivalence ratio is to 1.00, the greater the combustion noise. Under the same operating conditions, the combustion noise increases with the increase of the air split ratio. Changing the structure of the dump confinement with conical confinement can reduce the level of com-

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2022-07-29;修订日期: 2022-11-22。

**基金项目**:国家自然科学基金(52106128);中央军委装备发展部预研基金(6142702200305);国家科技重大专项(2017-III-0004-0028)。

作者简介:罗守博,博士生,研究领域为燃烧噪声。

通讯作者:韩 啸,博士,副研究员,研究领域为燃烧振荡机理及控制,燃烧噪声。E-mail: han\_xiao@buaa.edu.cn

引用格式:罗守博,张耀恒,韩 啸,等.中心分级预混旋流火焰燃烧噪声的实验研究[J].推进技术,2023,44(5):
 2207106. (LUO Shou-bo, ZHANG Yao-heng, HAN Xiao, et al. Experimental Research on Combustion Noise of Centrally Staged Premixed Swirl Flame[J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(5):2207106.)

bustion noise. In this study, the corresponding relationship between combustion noise and flame macrostructure was preliminarily analyzed by combining flame images captured by a camera with a CH\* filter.

Key words: Aeroengine; Centrally staged; Swirl flame; Combustion noise; Flame macrostructure; Premixed methane flame; Lean premixed combustion

## 1 引 言

贫预混燃烧技术是低排放航空发动机设计中降 低NOx排放的常用技术<sup>[1]</sup>,中心分级结构是贫油预混 燃烧室设计中经常采用的一种方案,该结构设计的 燃烧器通常通过台阶结构将主、预燃级分隔开来<sup>[2]</sup>, 通过主、预燃级旋流器分别组织旋流燃烧,由外层主 燃级旋流火焰和内层预燃级旋流火焰形成的分层火 焰称为中心分级分层旋流火焰(以下简称为分层旋 流火焰)。

近年来,航空发动机噪声正在得到越来越多的 关注<sup>[3]</sup>。国际民航组织目前已开始采用第五阶段噪 声标准,对于噪声提出了更严格的要求<sup>[4]</sup>。国际上, 美国国家航空航天局针对航空器降噪提出了*N*+1, *N*+2,*N*+3三阶段的技术目标,在各功率状态下,噪声 都将大幅降低<sup>[4]</sup>。研究表明,燃烧噪声成为了涡轮喷 气发动机整体噪声在风扇和喷气噪声显著下降之后 的主要噪声来源<sup>[5]</sup>,发动机噪声中燃烧室噪声的相对 重要性不断提高,已经引起了很大的重视<sup>[6]</sup>。由于贫 油预混和分级燃烧的不稳定会带来更多噪声排放<sup>[5]</sup>, 燃烧室噪声中的直接燃烧噪声与燃烧器工况间有很 大相关性<sup>[6+8]</sup>,需要对其进行进一步研究。

国际上对于燃烧噪声的研究包括燃烧噪声的组 成<sup>[5]</sup>、燃烧噪声预测<sup>[9]</sup>、燃烧噪声制约因素<sup>[10-12]</sup>和数值 模拟方法[13]等。目前实验研究了在典型的火焰结构 下,预混和非预混条件下燃烧噪声的产生与传播。 燃烧噪声由火焰的不稳定放热波动导致的反应气体 不稳定体积膨胀产生,湍流火焰在声学上可以被视 为具有不同强度和相位的单极声源的集合,湍流脉 动加剧了气体的不稳定体积膨胀[5]。柏林工业大学 的 Nawroth 等<sup>[11]</sup>研究了混合气体整体参数对湍流射 流流场和直接燃烧噪声的影响,他们对一种无约束、 湍流、预混射流火焰进行了实验研究,得出雷诺数、 当量比和预热温度三个参数中任何一个的增加都会 导致峰值频率和整个频谱的声压级增加。釜山国立 大学的 Choi 等<sup>[14]</sup>发现了在旋流喷射预混燃烧室中, 压力脉动的跳动与局部火焰结构密切相关,导致燃 烧噪声水平高。Merk 等<sup>[9]</sup>通过 Box-Jenkins 系统在单 个宽带LES时间序列中同时识别出了燃烧噪声和火 焰动力学的模型。纽约州立大学布法罗分校的Borsuk等<sup>[12]</sup>发现旋流稳定稀薄预混燃烧室反应区放置 高强度多孔惰性介质(PIM)是一种被动控制燃烧噪 声和不稳定性的方法。

目前国际上对于旋流火焰燃烧噪声的影响因素 已经开展了比较系统的实验研究,得到了很多规律 性的结论,在抑制燃烧噪声方面也获得了一些有参 考价值的方法。但是现有实验以湍流射流火焰和单 层旋流火焰为主,对于分层旋流火焰燃烧噪声的研 究有所欠缺,而这类火焰正是低排放航空发动机所 采用的,亟待加深对该火焰燃烧噪声的理解。

本研究采用实验方法,针对中心分级结构的燃 烧室燃烧噪声的部分影响因素及进行了研究,探究 的影响因素为分层比、当量比、空气分配比、功率掺 氢比及火焰限制域,并结合带有CH\*滤镜的摄像机拍 摄的火焰图像,初步分析了燃烧噪声与火焰宏观结 构的对应关系。

## 2 实验方法

#### 2.1 实验系统

本研究采用燃烧器为BASIS(Beihang axial swirler independently stratified burner)。这个燃烧器是具 有台阶隔离段的独立分层旋流燃烧器,包含了中心 体(Center body)、预燃级轴向旋流器(Inner swirler)、 台间隔离段(Lip)和主燃级轴向旋流器(Main swirler)。实验火焰限制域采用直径为100mm,长度为 200mm的光学玻璃管。玻璃管一端与头部旋流器连 接,另一端通向大气。采用了200mm玻璃火焰限制 域,保证了光学可观测性的同时,避免了火焰和系统 声学模态产生自激热声振荡<sup>[15-17]</sup>,从而确保实验中测 量得到的是旋流火焰所发出的直接燃烧噪声。燃烧 器示意图如图1(a)所示。

实验在常温常压下进行。实验采用完全预混的 甲烷和空气为燃料,但具有不同的空气流量和当量 比,部分工况掺混氢气。对空气使用标准孔板流量 计监测流量,对甲烷采用质量流量控制器(Sevenstar, CS200)。实验中空气进口温度为310K,基础工况为 主燃级空气流量10g/s,预燃级空气流量2g/s,主、预燃 级别当量比相同。



(a) Schematic of the BASIS burner



Fig. 1 Schematic of BASIS burner experiment

## 2.2 测量仪器和方法

测量系统示意图如图1(b)所示。测量系统由两部分组成,用声级计来测量燃烧噪声声压级,选用杭州爱华仪器有限公司的AWA5636基本型声级计,满足2级精确度要求<sup>[18]</sup>,实验过程中选择实时A计权与慢档位(1000ms),依据国家标准<sup>[19]</sup>,测量位置与气流轴向成90°方向,测距取0.5m。使用配有带通(430±5)nm滤光CH\*滤镜的尼康D610全画幅单反相机来拍摄火焰平均图像,相机具体参数为快门1/2s,ISO200,光圈f为2.2。

#### 2.3 噪声测量依据

本实验选择3级简易级测量方法<sup>[20]</sup>,对标准测量 位置的噪声值进行背景噪声修正后得到燃烧噪声。

首先在仅流通气体不进行燃烧条件下进行测量,得到背景流动噪声;然后点燃预混气进行测量, 修正后除去背景噪声影响得到燃烧噪声。

背景噪声修正值K<sub>1A</sub>用如下公式计算,即

 $K_{IA} = -10 \log(1 - 10^{-0.1\Delta L})$  (1) 式中  $\Delta L$  为测得噪声与背景噪声声压级数值之差,若  $\Delta L$ >10dB,则 $K_{IA}$ 取0。

## 3 结果与讨论

#### 3.1 总当量比对噪声影响分析

实验探究总当量比对燃烧噪声的影响。实验全

程保持主燃级空气流量 10g/s,预燃级空气流量 2g/s。 当量比 φ 定义为:燃料的油气比与化学恰当比的比 值;下标"m"代表主燃级,下标"p"代表预燃级,下标 "g"代表总当量比。分层比 SR(Stratification ratio)定 义为:预燃级与主燃级的当量比的比值。图 2 给出了 分层比为 0.00, 1.00, 2.00时, 变化总当量比时燃烧噪 声的变化规律。



如图 2 所示,不同分层比下,燃烧噪声随总当量 比变化趋势差异明显,分层比为 0.00 时,所体现的为 主燃级的燃烧噪声变化,燃烧噪声随总当量比增加 呈现先上升后下降的趋势;当分层比为 1.00 时,主、 预燃级别当量比相同,燃烧噪声随总当量比增加呈 现递增趋势;分层比为 2.00 时,燃烧噪声受预燃级影 响较为明显,随总当量比增加呈现先下降后上升趋 势。为进一步理解其中规律,结合火焰图像进行分 析,火焰图像如图 3 所示。

在图中将噪声最大的工况图片用红色边框标 注,下同。本文中提到高亮释热中心,是由主、预燃 级火焰主体或二者之一产生,对应图1(a)中蓝色和 红色图形示意的主、预燃级火焰主体,选取图3(c)中 总当量比0.65火焰图像进行椭圆虚线标注。

首先分析分层比为0.00时,此时预燃级当量比为0.00,纯空气流过,没有火焰,此时的火焰图像如图3(a)所示。由图3(a)可以观察到,总当量比为0.70, 主燃级火焰明亮,噪声最大,在火焰下游存在两个高 亮释热中心,是主要的噪声源。噪声声压级随着总 当量比的增大先增加后减小,峰值在总当量比为 0.70,此时主燃级当量比约为0.85,越远离该当量比 噪声越小。

其次分析分层比为1.00时,主、预燃级别当量比 相同,不存在当量比梯度,火焰随着当量比的增大变 得明亮,噪声也越来越大,火焰图像如图3(b)所示。



Fig. 3 Flame images with different  $\varphi_{s}$ 

此时声压级变化趋势大致与总当量比成正相关,随 着当量比接近1.00而逐渐增大,主、预燃级当量比与 总当量比相等,当量比从0.55变化为0.50时,声压级 出现大幅下降。

最后分析分层比为 2.00 工况。随着当量比增加,燃烧的功率增加,噪声增强。分层比为 2.00 时, 总当量比为 0.55,0.60,0.65 时噪声声压级处于较高 水平,发现此时预燃级当量比接近 1.00。总当量比大 于等于 0.60 时,噪声随当量比增加逐渐减小,此时预 燃级当量比远离 1.00,火焰图像如图 3(c)所示。

从火焰图像观察来看,噪声较大时火焰分层明

显,并存在明显的高亮的释热中心,该释热中心就是 火焰主要的噪声源。预燃级声起主要影响作用,越 接近1.00则噪声越大;预燃级当量比较小时,主燃级 当量比对于噪声起主要影响作用。

## 3.2 分层比对噪声影响分析

在总当量比分别固定为0.6,0.7,0.8时,分层比 的变化对噪声的影响如图4所示。从图4中可以看 出,在固定总当量比时,燃烧噪声声压级随着分层比 的增加均呈现先增大后减小的趋势,峰值对应的声 压级均接近87dB,但是峰值出现的分层比不同,总当 量比越大,峰值出现的分层比就越小。



Fig. 4 Combustion noise with different SRs

图 5 给出了在总当量比分别固定为 0.6,0.7,0.8 时,不同分层比对应的主、预燃级当量比。图 5 中相 同形状符号的大小与燃烧噪声大小正相关,将燃烧 噪声峰值出现的位置实心标记,可以发现,峰值出现 时,预燃级当量比为最接近 1.00 时工况,此时预燃级 当量比较主燃级当量比对于燃烧噪声有更大的影 响,预燃级当量比越接近 1.00,噪声越大,越远离 1.00,噪声越小;主燃级当量比较为分散,表明噪声峰 值与主燃级当量比关系不大。

CH\*滤镜下的火焰图像如图6所示。CH\*自发光



Fig. 5 Variation of combustion noise distribution with  $\varphi_m$ and  $\varphi_n$  under different  $\varphi_o$ 

强度越大,则产生的噪声越大。在声音最大位置处, 火焰分层明显,预燃级火焰极为明亮,并且在火焰下 游有着两个明显的高亮区域,即为火焰的释热中心, 这是主要的噪声源。



Fig. 6 Flame images with different SRs

另外,总当量比为0.60,0.70时,曲线在分层比很低时声音会先减小而后增大,在分层比约为0.50时声音达到最小。现象产生原因可能是分层比与当量比均较小时,预燃级当量比很小,此时主燃级当量比 对噪声的影响起主要作用。随着分层比增大,主燃级当量比减小,远离当量比0.85,所以声音会减小。 分层比继续变大,预燃级当量比超过了0.6,那么预燃级当量比起主要作用,预燃级当量比和变大接近于1.00,声音又会增大,因此在过程中出现了极小值。

## 3.3 空气分配比对噪声影响分析

空气分配比*ASR*(Air split ratio)定义为:预燃级与主燃级的空气质量流量的比值。保持总空气流量为12g/s,变化预燃级、主燃级空气分配比为1:4,1:6,1:8,总当量比为0.55,0.60,0.65,分层比0.00~3.0进行实验。

总当量比分别为0.55,0.60和0.65时,不同的空 气分配比对于噪声的影响如图7所示。在不同空气 分配比下,噪声先出现一极小值,然后随分层比先变 大后变小,这符合之前的相关规律。在分层比为 0.00,0.50时,空气分配比对于噪声影响不明显,当量 比变大时,空气分配比增大;即预燃级分配得到的空 气增多,在相同的工况条件下,噪声就越大,这对于 不同总当量比的趋势是一致的。

对于图7中的所有工况,空气流量总量和总当量 比不变,燃烧总功率恒定。当分层比较小时,预燃级 当量比较小,对于噪声的产生不起主要作用,分层比 增大,预燃级当量比变大,对噪声起主要影响作用。



Fig. 7 Combustion noise with different ASRs

随空气分配比增加预燃级空气流量上升,预燃级空 气流速增加,湍流更强,造成预燃级火焰的释热脉动 增加,同时预燃级功率升高,所以在相同工况下,空 气分配比越大,产生的噪声也就越大。

选取总当量比为0.65时的火焰图像进行分析, 如图8所示。先从横向对比,在同一空气分配比下, 噪声峰值处均存在显著明亮的释热中心。然后进行 纵向对比,自下而上随着预燃级分配空气不断增多, 明亮的预燃级火焰区域变大,释热中心向火焰下游 移动且越来越明亮,噪声越来越大。

#### 3.4 掺氢条件下的噪声影响分析

实验过程中在每个工况点保持总燃烧功率不变



Fig. 8 Flame images with different ASRs ( $\varphi_{a}$ =0.65)

时主燃级掺混不同比例的氢气,选取主燃级当量比 为 0.50, 0.55, 0.60。这里选用功率掺氢比 HPR(Hydrogen power ratio)作为掺氢比例的衡量,其定义为: 主燃级掺混氢气与主燃级总燃料的热值比值。采用 功率掺氢比便于直接计算掺氢燃烧所减少的碳排 放。本文按照主燃级的功率比例分别掺氢 0%, 5%, 10%, 15%, 20%。其中, 20% 的功率掺氢比对应了 43.78% 的体积掺氢比。

首先分析燃烧功率恒定掺混氢气对于噪声的影响。实验过程中将每个工况下不同掺氢比例下的噪声声压级分别测出,结果对比分析如图9所示。观察图9可知,主、预燃级当量比一定,维持功率恒定时掺氢比的变化对噪声影响并不明显。以掺氢比0.00,0.05,0.10,0.15,0.20为自变量*X*,以24组工况下不同掺氢比下的噪声为因变量*Y*,做统计学相关度计算得本实验工况范围内,掺氢比与燃烧噪声的相关系数的绝对值均小于0.05,因此认为在保证总燃烧功率相同时,在掺氢比0~20%内,燃烧噪声和掺氢比没有关系,掺混氢气对于噪声没有显著影响。从另一个角度而言,总燃烧功率不变,变化掺氢比,声压级基本不变,这说明在一定范围内,氢气与甲烷燃烧产生能量中转化为声能的比率可能是相似的。

其次,进一步分析主、预燃级当量比对于噪声的 影响。据上述分析,总功率不变时,掺氢比对于噪声 没有显著影响,所以为使结果更加严谨可靠,将每组 工况数据中不同掺氢比的测量结果进行平均做进一 步分析。

图 10给出了主燃级当量比 0.50,0.55,0.60时,燃 烧噪声随预燃级的变化规律。从图 10中可以看出, 当预燃级当量比大于等于 0.60时,主燃级当量比不 同的三条曲线几乎重合,难以分辨,这表明主燃级当 量比在 0.50~0.60区间内时其变化对噪声影响不大, 噪声大小主要由预燃级决定,此时噪声声压级随着 预燃级当量比的增大而增大,在预燃级当量比在





0.90~1.00区间内达到了最大值,与前文规律一致。

当预燃级当量比等于0.5时,噪声相较当量比0.6 时会出现显著下降,噪声相对很小,此时噪声随主燃 级当量比的增大而变大,说明此时主燃级对噪声影 响占主要地位。

下面选取主燃级当量比0.60,预燃级当量比由 0.30递增到1.10,递增额为0.10,掺氢比为15%和0% 两组工况火焰图像进行分析,如图11所示。

从定性分析来看,随着预燃级当量比不断增大, 火焰燃烧噪声不断增大的同时发光强度也不断增强,验证了火焰燃烧噪声与发光强度关系的结论。 在预燃级当量比为1.00时噪声最大,火焰分层十分



Fig. 10 Combustion noise with different  $\varphi_{p}$ 

明显,预燃级火焰最为明亮,并且在预燃级火焰下游 出现了两个明显的高亮区域,为火焰的释热中心 区域。



(b) *HPR*=0%,  $\varphi_m$ =0.60 Fig. 11 Flame images with different  $\varphi_n$ 

按照前文结论,由于功率不变时掺氢比对于燃 烧噪声影响不明显,所以在火焰图像上表现发光强 度差距不明显。选取相同工况下的不同掺氢比的两 组火焰进行对比,如图12所示。

随着掺氢比例的不断增加,火焰的长度显著缩短,形态发生了明显的变化,发光强度无显著的变化,这进一步验证了之前的结论。



(b)  $\varphi_m = 0.55$ ,  $\varphi_p = 0.70$ Fig. 12 Flame images with different *HPRs* 

## 3.5 火焰限制域对噪声影响分析

为了研究火焰限制域结构对燃烧噪声的影响, 本文采用进口倾斜角度30°~45°的锥形筒(Slope confinement,SC)与直筒(Dump confinement,DC)进行对 比试验;限制域结构示意图如图13所示。



Fig. 13 Schematic of SC and DC

分别选取总当量比为0.60,0.80,分层比为1.00, 0.00进行对比实验,试验结果如图14,15所示。从 图14,15中可看出,使用锥形筒时,噪声的变化趋势 与直筒相同,多数工况下,锥形桶的噪声都比直筒要 小2~3dB;平均降低噪声2dB,对于分层比为0的情况 下平均降低3dB噪声,降低噪声效果最显著。

取分层比为1.00当量比不断变大的工况进行火 焰宏观结构分析,火焰图像如图16所示。从图16中 可看出,使用锥筒时,火焰伸展更充分,角涡区被消 除,导致主燃级火焰湍流脉动更小,释热中心比直筒 在各个对应工况下亮度更低,噪声更小。以上分析 表明,通过采用逐渐扩张的锥形限制域,有助于降低 旋流火焰的燃烧噪声。



Fig. 14 Comparison of combustion noise distribution between SC and DC under the same *SR* 



Fig. 15 Comparison of combustion noise distribution between SC and DC under the same  $\varphi_a$ 



Fig. 16 Comparison of flame images between SC and DC under the same  $\varphi_a$  (SR=100)

## 4 结 论

本文以北航 BASIS 燃烧器为实验平台,开展了中 心分级旋流火焰的燃烧噪声试验研究,分析了工况 条件和结构参数对燃烧噪声的影响,得出以下几点 结论:

(1)当预燃级当量比不小于0.6时,其对于噪声的产生相较于主燃级有更重要的影响,预燃级当量比越接近于1.00,所产生的燃烧噪声就越大。

(2)空气分配比恒定,总当量比在0.6~0.8时,噪 声随着分层比的变化趋势大致均为先增大后减小, 总当量比越大则峰值所对应的分层比越小,而峰值本身为87dB左右,受总当量比影响不明显。

(3)甲烷掺混氢气实验发现,总功率相同时掺混 氢气对于噪声无明显影响,这说明甲烷与氢气燃烧 产生声能的转化率可能相近。

(4)燃烧室限制域使用锥形火焰筒代替直筒,能 够在大多数工况下减小2~3dB燃烧噪声,这可能是由 于使用锥筒时,火焰伸展更充分,角涡区被消除,导 致主燃级火焰湍流脉动更小。

**致** 谢:感谢国家自然科学基金、中央军委装备发展部 预研基金和国家科技重大专项的资助。

#### 参考文献

- [1] 张 弛,林宇震,徐华胜,等.民用航空发动机低排 放燃烧室技术发展现状及水平[J].航空学报,2014, 35(2):332-350.
- [2] 王欣尧,韩 啸,林宇震,等.中心分级旋流火焰中 热声不稳定分岔现象研究[J].燃烧科学与技术, 2021,27(4):382-387.
- [3] 王敬忱. 航空发动机燃烧室噪声识别方法研究[D]. 天津:中国民航大学, 2014.
- [4] 闫国华,焦 形.航空发动机核心机适航进近噪声预测[J].科学技术与工程,2020,20(10):4154-4159.
- [5] Dowling A P, Mahmoudi Y. Combustion Noise [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(1): 65–100.
- [6] Duran I, Moreau S, Nicoud F, et al. Combustion Noise in Modern Aero-Engines [J]. Aerospace Lab, 2014(7): 1-11.
- [7] 焦 形.近远状态下发动机核心噪声的动态估计[D]. 天津:中国民航大学,2015.
- [8] Tam C K W, Bake F, Hultgren L S, et al. Combustion Noise: Modeling and Prediction [J]. CEAS Aeronautical Journal, 2019, 10(1): 101-122.
- [9] Merk M, Gaudron R, Silva C, et al. Prediction of Combustion Noise of an Enclosed Flame by Simultaneous Identification of Noise Source and Flame Dynamics [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37 (4): 5263-5270.
- [10] Smith T J B, Kilham J K. Noise Generation by Open Turbulent Flames [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1963, 35(5): 715-724.
- [11] Nawroth H, Paschereit C O. The Impact of Global Parameters of the Gas Mixture on Flow Field and Direct Combustion Noise of a Turbulent Jet Flame [C]. Grapevine: Texas 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017.
- [12] Borsuk A, Williams J, Meadows J, et al. Swirler Effects on Passive Control of Combustion Noise and Instability in

a Swirl-Stabilized Combustor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137(4).

- [13] Pillai A L, Kurose R. Numerical Investigation of Combustion Noise in an Open Turbulent Spray Flame[J]. Applied Acoustics, 2018, 133: 16-27.
- [14] Choi G M, Tanahashi M, Miyauchi T. Control of Oscillating Combustion and Noise Based on Local Flame Structure [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 1807-1814.
- [15] 张 弛,陶 超,韩 啸,等.速度脉动下分层旋流 火焰动态传播结构提取[J].推进技术,2021,42(1): 173-184. (ZHANG Chi, TAO Chao, HAN Xiao, et al. Extraction of Propagation Structure on Stratified Swirl Flame Dynamics under Velocity Fluctuation[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(1): 173-184.)
- [16] Taamallah S, LaBry Z A, Shanbhogue S J, et al. Thermo-Acoustic Instabilities in Lean Premixed Swirl-Stabilized Combustion and Their Link to Acoustically Coupled and Decoupled Flame Macrostructures [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 3273-3282.
- [17] Palies P, Durox D, Schuller T, et al. Nonlinear Combustion Instability Analysis Based on the Flame Describing Function Applied to Turbulent Premixed Swirling Flames
  [J]. Combustion and Flame, 2011, 158 (10): 1980–1991.
- [18] GB/T 3785.1-2010, 电声学声级计[S].
- [19] GB/T 4759-2009, 内燃机排气消声器测量方法[S].
- [20] GB/T 17248.3, 声学机器和设备发射的噪声采用近似 环境修正测定工作位置和其他指定位置的发射声压级 [S].

(编辑:白 鹭)