

文章编号: 1000-8055(2025)00-20250345-16

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20250345

凹腔参数对加力燃烧室火焰响应特性影响的试验研究

赵 航, 刘 勇, 张 祥

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为研究凹腔参数对航空发动机加力燃烧室内钝体/凹腔耦合火焰响应特性的影响, 以模型加力燃烧室为研究对象, 对不同凹腔长深比与后壁面倾角下的耦合火焰释热响应特性展开试验研究。试验在常温常压条件下进行, 建立了火焰传递函数(FTF), 并基于动态火焰图像重点研究了不同凹腔参数下耦合火焰的响应特性与动态特征。试验结果表明: 随着长深比的增加以及后壁面倾角的减小, 其 FTF 增益及延迟时间均减小, 系统时滞效应减弱。并且在低频扰动下耦合火焰产生向内的卷曲运动特征, 较高频时会产生多段火焰面褶皱, 出现局部熄火。此外凹腔参数的变化会改变空间中强释热脉动区域的分布, 这也是耦合火焰响应特性发生变化的内因。

关 键 词: 加力燃烧室; 凹腔参数; 钝体/凹腔耦合火焰; 火焰传递函数; 火焰响应

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Experimental study on influences of cavity parameters on flame response characteristics of afterburner

ZHAO Hang, LIU Yong, ZHANG Xiang

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to study the influences of cavity parameters on the coupled flame response characteristics of bluff body/cavity in aero-engine afterburner, the model afterburner was taken as the research object, and the coupled flame heat release response characteristics under different cavity length-to-depth ratios and rear wall inclination angles were experimentally studied. The experiment was carried out under normal temperature and pressure conditions, and the flame transfer function (FTF) was established. Based on the dynamic flame image, the response characteristics and dynamic characteristics of the coupled flame under different cavity parameters were studied. The experimental results showed that with the increase of the length-to-depth ratio and the decrease of the rear wall angle, the FTF gain and delay time decreased, and the time delay effect of the system was weakened. In addition, under low frequency disturbance, the coupled flame produced inward curling motion characteristics, and multiple flame surface folds could be generated at higher frequencies, resulting in local flameout. In addition, the change of the cavity parameters may change the distribution of the strong heat release pulsation area in the space, which is also the internal cause of the change of the coupling flame response characteristics.

收稿日期: 2025-07-22

基金项目: 航空发动机及燃气轮机基础研究项目(J2022-III-0007-0016)

作者简介: 赵航(1999—), 男, 硕士生, 主要从事燃烧不稳定研究。E-mail: zh_zhao@nuaa.edu.cn

通信作者: 刘勇(1971—), 男, 副教授, 博士, 主要从事燃烧不稳定研究。E-mail: lwz102062@126.com

引用格式: 赵航, 刘勇, 张祥. 凹腔参数对加力燃烧室火焰响应特性影响的试验研究[J]. 航空动力学报, 2025, 40(X): 20250345. ZHAO Hang, LIU Yong, ZHANG Xiang. Experimental study on influences of cavity parameters on flame response characteristics of afterburner[J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 40(X): 20250345.

Keywords: afterburner; cavity parameters; bluff-body/cavity coupled flame;
flame transfer function; flame response

加力燃烧室是目前航空发动机的重要组成部分,在各类型战斗机上有着广泛应用^[1],由于流经加力燃烧室的高速气流加剧了燃烧不稳定性,故加力燃烧室内广泛使用钝体稳定器作为火焰稳定策略^[2]。但此种单一的火焰稳定装置在应对较为恶劣的来流条件时会产生过大的流阻损失并降低发动机推力^[3],因此目前提出了凹腔与钝体稳定器相结合应用的这种有别于传统的加力燃烧室设计^[4]的新概念。

加力燃烧室中钝体/凹腔结合的结构布置,增强了燃料的掺混、提高了燃烧效率^[5],但会造成燃烧室内热声耦合更为复杂,此外采用凹腔内燃料喷注时,钝体/凹腔火焰存在相互耦合,燃烧室的火焰结构出现更多的可能性,因此针对凹腔参数对耦合火焰响应特性的影响研究亟需开展。

针对凹腔结构的加入所带来的加力燃烧室内火焰响应特性的改变,众多学者集中在单凹腔结构下有着大量研究^[6-7]。与钝体稳定器在其后方形成回流区不同,凹腔剪切层与回流区的联合作用是其稳定燃烧的主要方式^[8]。Kumar 等^[9]通过改变凹腔长深比,发现凹腔深度增加会导致剪切层厚度的降低。Micka 等^[10-11]研究了凹腔上游氢气及氢气与乙烯混合燃料横向喷注燃烧特性,发现了有凹腔剪切层与射流尾迹两种不同的火焰稳定模式,并且燃料射流后的尾迹要比凹腔回流区的稳定性弱,作者认为凹腔射流尾迹中的燃烧不稳定是导致燃烧室内整体火焰模式不稳定性的诱因。Sheffer 等^[12]研究发现凹腔长深比过大会产生旋涡的脱落而引起火焰不稳定;长深比过小则不能构造足够大的回流区来稳定火焰,作者的进一步分析结果表明:凹腔长度主要影响质量交换率而深度主要影响燃料驻留时间。汪洪波^[13]通过数值模拟研究发现凹腔长深比会影响燃烧的振荡模式,长深比大的凹腔剪切层发展充分会导致剧烈的振荡和起伏,具有垂直后壁倾角的凹腔内有高能量的压缩波纵向传播,会导致自激振荡加剧。李素芬等^[14]基于 OpenFOAM 建立的求解器进行数值仿真,针对不同凹腔深度、长度等参数对氢气在燃烧室中超声速燃烧的影响规律进行了探究,研究表明凹腔的面积和长深比均可以影响燃烧室内的燃烧效率,凹腔面积越大,燃烧反

应越剧烈、燃烧效率越高。

钝体/凹腔组合结构综合了两者强掺混效率与总压损失低的特点,在工程应用中表现极大潜力^[15-16]。除对单凹腔结构的大量研究外,部分学者也针对钝体/凹腔组合结构下的耦合机制以及凹腔结构对燃烧室性能的影响展开了研究^[17]。Hsu 等^[18]发现凹腔与支板的组合结构能够促进凹腔在中心线附近的燃气流动循环,局部回流区进一步扩大,使得增加燃料驻留时间为主导的火焰稳定模式具有较好的性能。Suneetha 等^[19]在支板燃烧室中加入了凹腔结构,并基于数值仿真研究了其中燃料的混合与燃烧特性,发现凹腔回流区的大小会随着剪切层厚度的增加而增大,这对于提高火焰稳定性有着积极意义。黄志伟^[20]通过大涡模拟研究了支板/凹腔组合式构型下燃烧室中心截面上的回流区分布,结果表明在位于燃烧室上游的支板后缘处以及支板尾缘处的凹腔内存在三处小回流区,在不同的燃烧工况下它们可以彼此孤立或者耦合成整体式的大回流区,与单钝体构型下的燃烧室相比,凹腔内的能量积聚效应能够极大促进化学反应释热。陈兴良等^[21]基于模型燃烧室对不同间距下的支板/凹腔组合稳焰器进行了三维数值模拟,其分析了支板/凹腔组合稳焰性能以及耦合作用机制,研究表明凹腔内回流区对主流有着较强的卷吸作用,而凹腔的存在将有助于混合与燃烧,并且当支板/凹腔间距缩短时,支板/凹腔组合结构耦合作用更强,燃烧稳焰性能更佳。

通过上述研究发现,目前针对凹腔结构的研究大多集中于单凹腔结构参数(如长深比等)对燃烧室内流场结构、燃烧性能、稳焰机制的影响等方面,此外还有部分研究集中在钝体/凹腔组合结构下的耦合机制、燃烧效率、组合稳焰性能等方向,缺乏该组合结构下凹腔参数对钝体/凹腔耦合火焰响应特性以及受到扰动后的火焰动力学特征的影响研究。

本文研究的主要目的是以模型加力燃烧室为研究对象,基于试验数据分析凹腔参数(长深比、后壁面倾角)的改变对钝体/凹腔耦合火焰响应特征的影响以及受扰动下的火焰动力学特征,以期研究钝体/凹腔组合结构下耦合火焰的燃烧机

理提供一定理论支持。

1 试验系统及数据分析

为研究不同凹腔参数对模型加力燃烧室内钝体/凹腔耦合火焰响应特性的影响规律,设计并进行了相关的试验工作,具体研究对象与试验测量布局如下。

1.1 研究对象

试验研究对象为如图 1 所示,其为凹腔与钝体稳定器的组合稳定器结构,其中钝体的主要参数如图 1(a)所示,其侧壁面左右对称共有 12 个燃料喷嘴(直径为 1.5 mm)。凹腔深度为 D , 长度为 L , 将长深比定义为 L/D , 后壁面倾角为 α 。此外凹腔内燃料喷嘴直径为 2 mm, 间距为 5 mm, 共 5 个, 其前方有集气腔用于连接燃料丙烷, 并保证燃料均匀喷出。

1.2 试验系统布局

测试系统的整体布局具体如图 2 所示, 主要由供气系统、声激励系统、供油系统、测量系统、模型加力燃烧室及数据采集系统构成。来流空气由左至右进入加力燃烧室, 其进口截面宽为 60 mm、高为 45 mm、轴向长度为 275 mm。试验中采用燃料为丙烷, 消除了液体燃料雾化和蒸发的复杂性, 简化了燃烧过程, 这使得在不考虑液体燃料相关变量的情况下, 能够对热声耦合机理和动态火焰响应进行着重研究, 且能较好反映释热脉动信息。丙烷由外部气瓶分两路分别供给钝体和凹腔, 再经过其上喷嘴射出与空气混合燃烧。燃烧室后方布置有 3 个且间隔 55 mm 的动态压

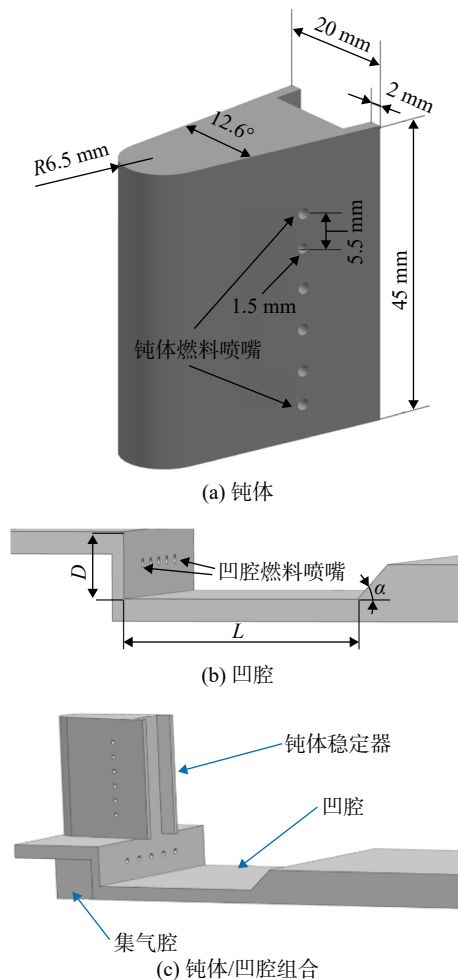


图 1 组合稳定器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of combined stabilizer

力测点。此外燃烧室侧壁面与上壁面均开窗并安装有石英玻璃, 作为动态 CH^* 火焰图像拍摄与释热脉动信号采集的窗口。

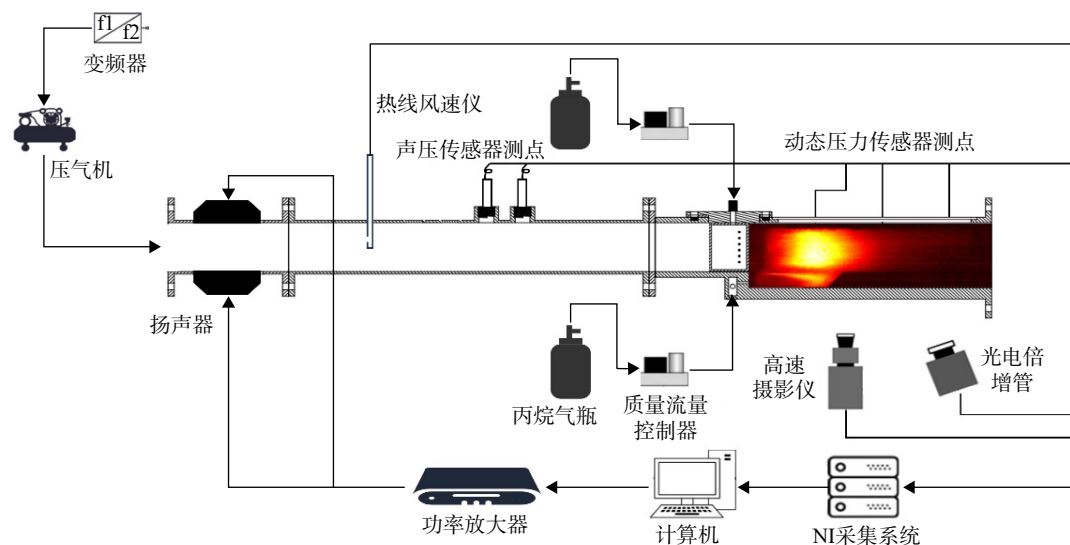


图 2 试验系统布局图

Fig. 2 Layout diagram of test system

1.3 测量系统

试验工况所需进气条件可由上游压气机供应,通过变频器调节其转速控制空气流量,并使用热线风速仪测量来流速度。燃料丙烷由外部液化气瓶供应,流量大小由质量流量控制器(AST10-HB, 0~20 SLM)调节。

声激励系统由信号发生器、两个相对布置在进气道上游的直径约为 51 mm 的扬声器(Peerless TA6FD00-08)和功率放大器(FULUODE LN-1000)组成。由 Matlab 产生单频正弦信号,声卡将其转换为模拟信号,再通过功率放大器放大后传输到扬声器,扬声器将电信号转化为声波,以向实验管路中添加声激励。为测量速度脉动,基于双麦克风风速法^[22],将两只声压传感器(MPA416,量程 127 dB)与管道内壁齐平安装。通过全局火焰

CH*化学荧光强度间接测量释热率脉动信号^[23],试验中采用(435±5)nm 带通 CH*滤光片结合光电倍增管(PMT)进行数据测量。

试验中 CH*火焰图像采用高速摄影仪(VEO 1010 型)结合甲基滤镜拍摄,曝光时间为 99 μs,帧速率为 10 kHz。以上各传感器的测试信号均接入 NI(National Instruments)多通道数据采集系统以实现同步采集,采样频率为 10 kHz。

1.4 试验工况

设计如表 1 所示的试验工况,所有工况均在常温(300 K)、常压(0.1 MPa)下进行。保持来流速度及总当量比不变,通过改变凹腔结构参数(长深比与后壁面倾角)使模型加力燃烧室内耦合火焰燃烧状态发生改变,其中燃料分配比($\dot{m}_c/\dot{m}_b$)代表凹腔燃料质量流量与钝体燃料质量流量之比。

表 1 试验工况表
Table 1 Operating parameters of the experiment

工况	长深比/ (L/D)	后壁面倾角 $\alpha/(^\circ)$	燃料分配比 ($\dot{m}_c/\dot{m}_b$)	进气速度 $u/(m/s)$	总当量比 φ	激励频率 f/Hz	激励功率 A/W
I	3	45	0.34	10	0.09	50~400 (间隔 10)	0.52~5.0
II	4	45					
III	5	45					
IV	6	45					
V	4	30	0.34	10	0.09	50~400 (间隔 10)	0.52~5.0
VI	4	60					

1.5 数据处理方法

为了深入研究不同凹腔构型对加力燃烧室内钝体/凹腔耦合火焰响应特性与动力学特征,对试验数据建立火焰传递函数(FTF),并且对高速采集的火焰图像进行了统计与分析,有伪彩色处理^[24]与 POD(proper orthogonal decomposition)分解方法^[25]等。

1.5.1 火焰传递函数

火焰传递函数(FTF,量符号记为 f_{FTF})由归一化火焰释热率脉动与归一化速度脉动的比值定义^[26],如式(1)所示:

$$f_{FTF}(\omega) = \frac{q'(\omega)/\bar{q}}{u'(\omega)/\bar{u}} = \frac{I'_{CH^*}(\omega)/\bar{I}_{CH^*}}{u'(\omega)/\bar{u}} \quad (1)$$

式中 I 为化学荧光强度, q 为火焰释热率,通过带有CH*滤光片的光电倍增管测量全局值, $\bar{q}$ 为火焰释热率的时均值, q' 为火焰释热率的脉动值, $\bar{u}$ 为燃烧室上游速度的时均值, u' 为燃烧室上游的速度脉动值。该式表示 FTF 随角频率 ω 变化的

特性。

利用双麦克风法可以通过求解上下行波波幅,获得速度脉动频谱;接着测量释热率脉动的时序信号,并通过 FFT 获得其频谱;最后分别在激励频率位置处统计速度脉动和释热率脉动的复数结果并求其比值^[27],即可得到任意激励频率下的火焰传递函数幅值和相位,可用下式描述:

$$f_{FTF}(f) = |f_{FTF}(f)|e^{j\omega\angle f_{FTF}(f)} \quad (2)$$

其中 $|f_{FTF}(f)|$ 和 $\angle f_{FTF}(f)$ 分别为火焰传递函数的增益和相位。

1.5.2 本征正交分解

POD 分解方法可通过减少数据维度简化复杂流场信息。本文通过对 CH*火焰图像的时间序列进行基于奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的 POD 分析来识别耦合火焰脉动的主要特征^[28-29]。

每个瞬时图像($M \times N$ 矩阵)通过串接其行将其重新组合成列,从而 S 张瞬时图像产生一个

$(M \times N) \times S$ 矩阵, 表示为式(3), 其中包括平均值和脉动值, 减去平均值的脉动序列可写成式(4)。

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_S] \quad (3)$$

$$P = [X'_1, X'_2, \dots, X'_S] \quad (4)$$

使用 SVD 对数据矩阵进行分解为式(5)。

$$P = UWV^T \quad (5)$$

其中 U 是代表 POD 各阶模态在空间上分布特征的空间模态矩阵; W 为反映各个空间模态所占的能量权重的特征值矩阵; V 是时间模态矩阵, 表示各个空间模态的时间演化规律。

各阶模态的能量大小可以通过特征值的平方来计算, 如式(6)所示:

$$E_i = \sigma_i^2 \quad (6)$$

其中 E_i 为第 i 阶模态的能量, σ_i 为矩阵 W 中的第 i 个奇异值。各阶模态能量的占比则通过式(7)计算。

$$e_i = \frac{E_i}{E_{\text{total}}} \quad (7)$$

式中 E_{total} 为总能量, e_i 为第 i 个模态在总能量的占比。

2 结果与分析

基于以上试验装置与测量方案, 在表 1 所列的工况下进行钝体/凹腔耦合火焰的速度脉动与释热率测量, 计算其火焰传递函数, 并对所拍摄的动态 CH^* 火焰图像进行处理, 具体内容如下。

2.1 速度脉动结果

受试验管道声学特征影响, 相同激励功率下扬声器所引起的 $u'/\bar{u}$ (无量纲速度脉动) 与频率相关^[30], 为了获得不同频率下相同的速度扰动幅值, 本文首先建立了 $u'/\bar{u}$ 与扬声器功率和激励频率之间的关系。以工况 II 为例, 通过扬声器对进气施加 0.52~5.0 W (将 5.0 W 对应 100% 功率) 功率, 不同频率 (50~400 Hz) 的扰动, 求解各激励下速度脉动响应如图 3 所示, 其中不同颜色的点表示不同激励功率下的速度脉动幅值。

提取速度脉动 $u'/\bar{u}$ 的激励幅值与频率, 对上游气流施加相应激励。图 4 为外激频率 150 Hz 时声压信号 (Mic1)、燃烧室动态压力信号 (p_2)、释热率信号 (I_{CH^*}) 的时域值以及 FFT (快速傅里叶变换) 后的频谱对比。燃烧室内压力和释热信号均在给定的激励下产生了相应脉动特征, 且存在一定的延迟响应, 具体如图 4(a) 所示, 且频域图

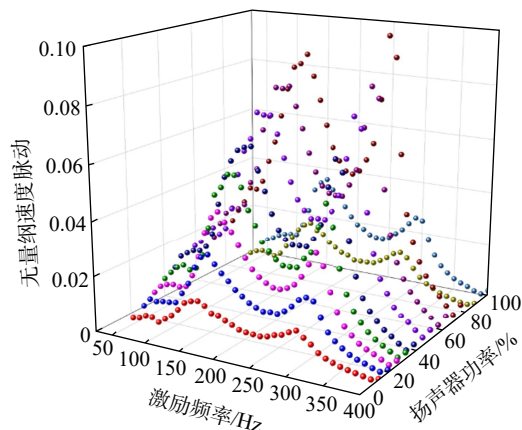


图 3 不同激励功率下燃烧室进口速度脉动响应特性
Fig. 3 Velocity fluctuation response characteristics of combustion chamber inlet under different excitation power

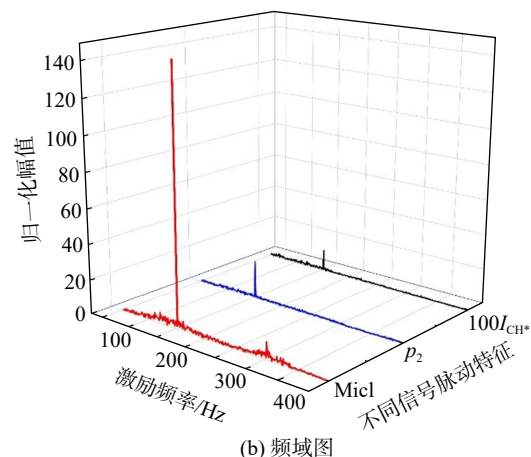
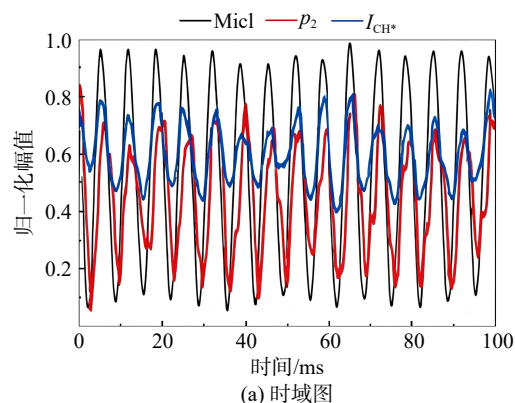


图 4 声压信号、燃烧室压力与火焰释热率的时域和频域对比图

Fig. 4 Time domain and frequency domain comparison of sound pressure signal, combustion chamber pressure and flame heat release rate

中各信号均存在明显的 150 Hz 主频。

如上所述对来流施加激励扰动后, 测量燃烧室内释热率脉动响应情况, 具体如图 5 所示, 其中

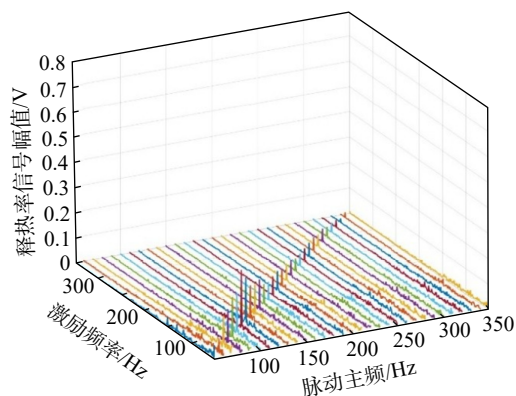


图5 燃烧室内释热率脉动响应情况

Fig. 5 Pulsation response of heat release rate in combustion chamber

不同颜色对应不同频率下的激励信号。在给定的速度扰动幅度 $u'/\bar{u}=0.02$ 下的不同频率激励信号, 燃烧室内释热脉动信号均有对应主频。

由此得到激励频率附近所需的速度脉动特性以及所对应的释热脉动信号的响应特征, 再求得两者的比值即为火焰传递函数。

2.2 火焰响应特征

在不同凹腔结构参数下开展试验, 计算并提取了速度扰动幅度 $u'/\bar{u}=0.02$ 时所对应火焰传递函数, 并对高速拍摄的 CH* 火焰图像进行时均处理。此外, 为了对火焰结构的变化进行定量分析, 定义火焰长度 l 进行研究。通过沿流动方向的无量纲光强分布, 绘制释热率分布曲线如图 6 所示。以达到火焰 20% 最大光强位置作为测量区间, 并以此火焰前后两点之间的距离定义为火焰长度 l 。

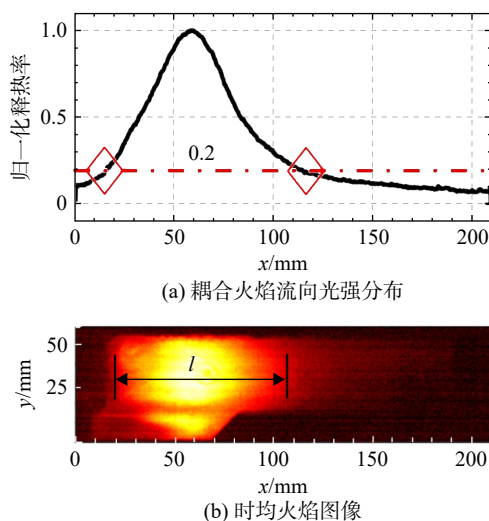
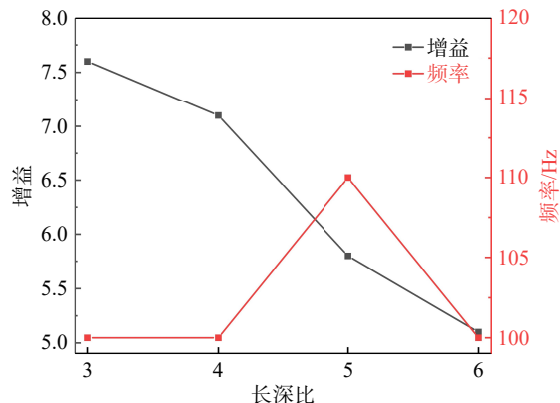
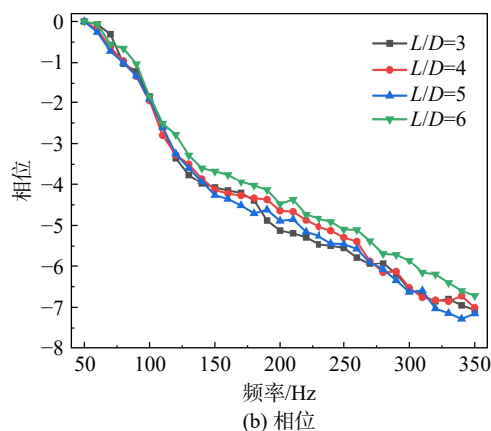
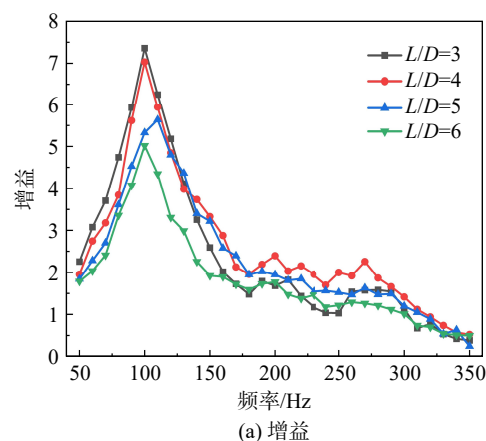


图6 无激励下工况 II 时均火焰结构与释热分布

Fig. 6 Time-averaged flame structure and heat release distribution under condition II without excitation

2.2.1 不同长深比

如图 7 所示为速度扰动幅度 $u'/\bar{u}$ 时, 燃烧室内不同长深比下的火焰传递函数以及峰值增益与峰值频率的变化情况。其中图 7(a) 为火焰传递函数的增益值 (Gain), 表示火焰释热率脉动对给定速度扰动的放大程度。与单钝体非预混火焰的 FTF 常规测量结果 (双峰特征) 不同, 凹腔结构的加入改变系统声学模态, 使得钝体/凹腔耦合火焰增益曲线呈现单峰特性, 增益在 90~120 Hz 区间 (图 7(c)) 内存在极大值。此外如图 7(c) 所示,



(c) 不同长深比下的峰值增益与峰值频率变化图

图7 不同长深比下的火焰传递函数

Fig. 7 Flame transfer function under different length-to-depth ratio

随凹腔长深比的增大, 增益的单峰值在逐渐减小, 这表明较大长深比的结构下耦合火焰对上游速度扰动愈发不敏感, 整体系统稳定性提高。

图 7(b) 为火焰传递函数相位(phase)曲线, 其与 $u'/\bar{u}$ 和 $u'/\bar{u}$ 之间的延迟时间有关, 相位差(相位的斜率)对应于延迟时间大小。随着长深比的增加, FTF 相位曲线斜率逐渐缩小, 这说明系统时滞减小。这是由于凹腔不断增加的长深比加剧了燃烧室内的掺混燃烧反应, 火焰传播速度加快, 延迟时间缩短, 火焰响应速度增加。

此外对相同功率时 100 Hz(增益峰值频率)外激励扰动下的加力燃烧室内动态压力信号进行分析, 并通过快速傅里叶变换得到了如图 8 所示的不同长深比下 100 Hz 外激频率的压力脉动幅值变化图。随着长深比的增加, 燃烧室内压力脉动幅值不断下降, 与增益峰值的变化相对应, 再次说明了较大的长深比能提高燃烧系统的稳定性。

为了进一步研究长深比的变化对加力燃烧室内火焰释热响应的影响, 对试验中拍摄的高速火焰图像进行分析。如图 9 所示为不同长深比下的

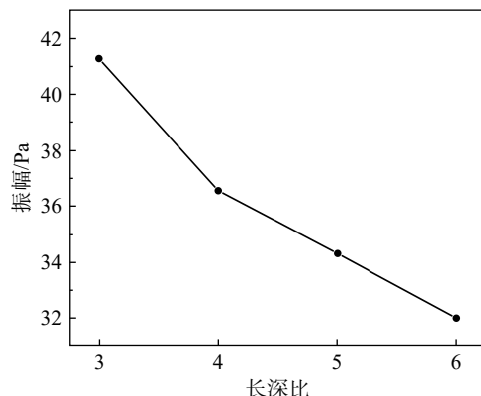


图 8 不同长深比下燃烧室压力脉动幅值变化

Fig. 8 Change of pressure fluctuation amplitude in combustion chamber under different length-depth ratios

无激励扰动时的时均 CH^* 火焰图像, 以及沿高度方向上绘制的归一化释热率分布曲线。图中直观的看到加力燃烧室内全局火焰由钝体火焰与凹腔火焰两者耦合而成的, 释热区域集中在钝体后方回流区以及凹腔倾角与钝体底部射流交界处。

图 10 定量展示了不同长深比下的耦合火焰长度(l)变化以及凹腔内火焰归一化释热最大值

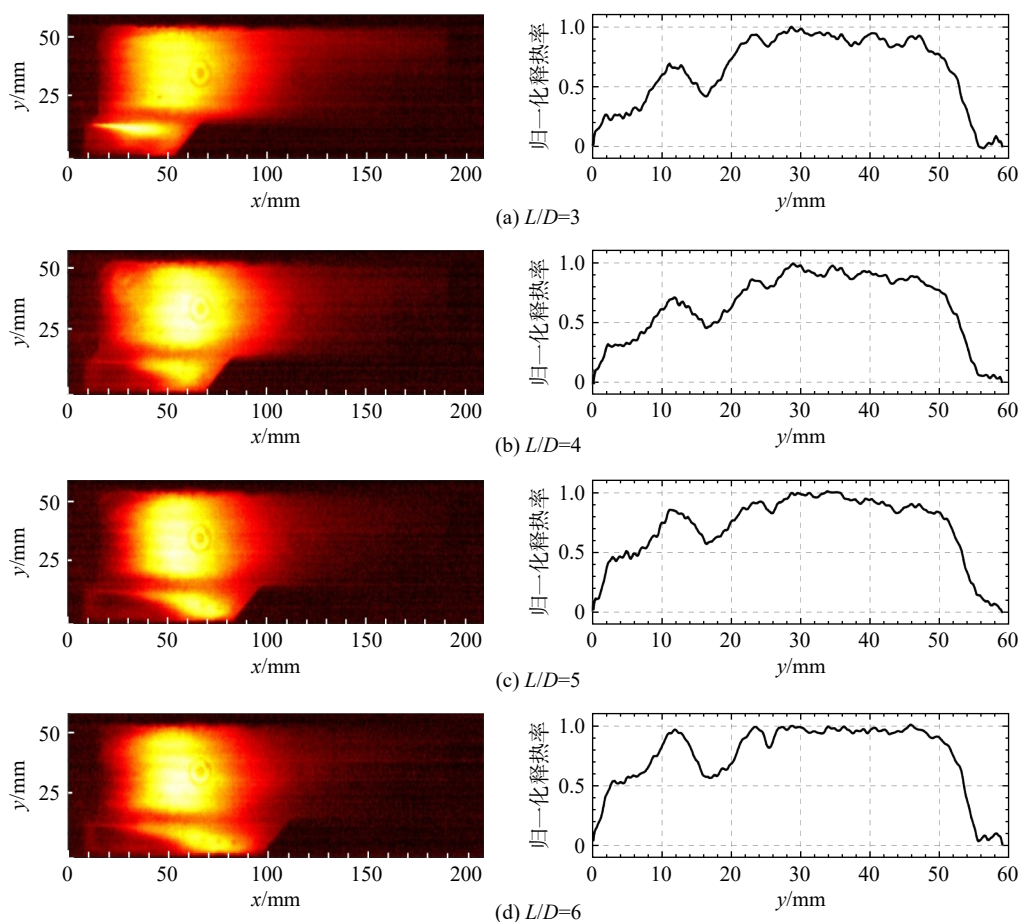


图 9 不同长深比下的时均 CH^* 火焰图像和释热分布曲线

Fig. 9 Time-averaged CH^* flame images and heat release distribution curves at different aspect ratios

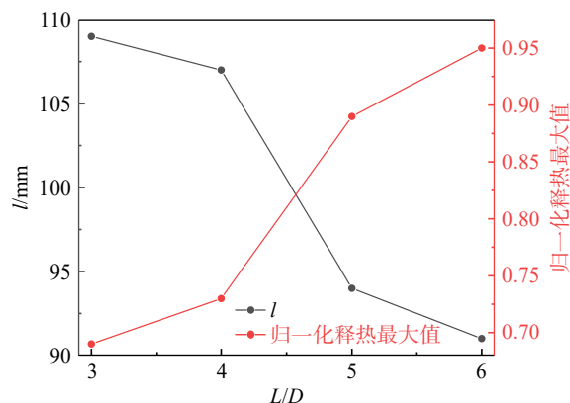


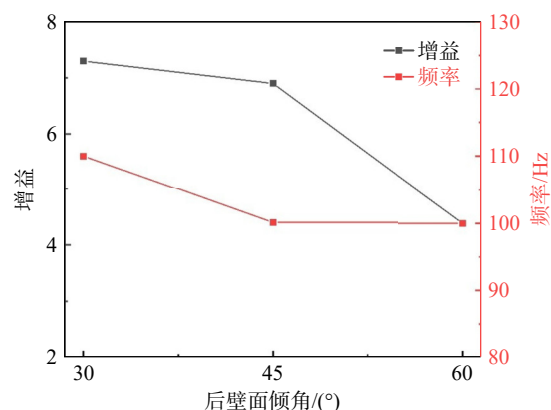
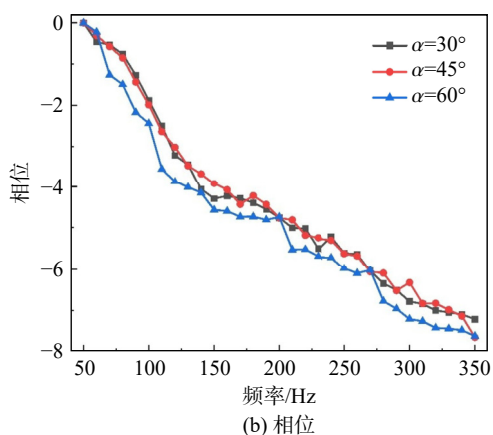
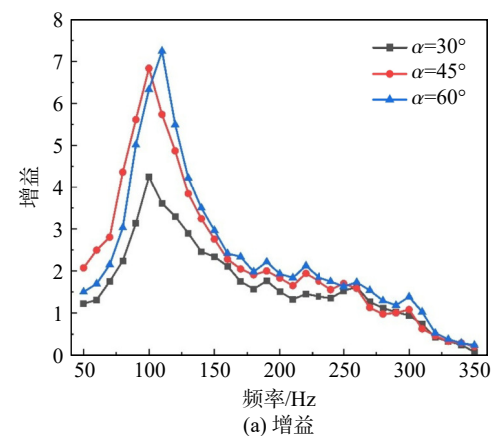
图 10 不同长深比下的火焰长度和凹腔内释热峰值变化

Fig. 10 Changes of flame length and heat release peak in cavity under different length-to-depth ratios

的变化,随着长深比的增加,直接影响回流区的面积不断增大并增强燃料与空气的掺混,使得燃料在前方快速燃烧,火焰长度缩短。此外在较大长深比的凹腔结构下,会导致钝体后方主流向凹腔回流区掺混卷吸,加剧凹腔火焰的燃烧,凹腔局部释热峰值增加,其在图 9 中也表现为凹腔内火焰的释热极值不断升高。

2.2.2 不同后壁面倾角

如图 11 所示为速度扰动幅度 $u'/\bar{u}$ 时,燃烧室内不同后壁面倾角 α 下的火焰传递函数以及峰



(c) 不同后壁面倾角下的峰值增益与峰值频率变化图

图 11 不同后壁面倾角下的火焰传递函数

Fig. 11 Flame transfer function under different rear wall inclination angles

值增益与峰值频率的变化情况。增益曲线依旧呈现为单峰特征,其峰值频率在 90~120 Hz 区间内,这与前文中不同凹腔长深比下测量的增益曲线特征相似,进一步说明了该特征与凹腔结构的存在有关。随着倾角的减小,增益值逐渐降低,较大的后倾角会导致燃料的驻留时间缩短,凹腔内燃料与钝体后的回流区掺混不充分,耦合火焰结构不稳定,更容易受到外在条件的扰动,燃烧系统稳定性下降。此外相位曲线斜率随后倾角增大而增加,表明系统时滞增加,同样说明了在较大的凹腔后壁面倾角下,燃烧室内的燃料与空气混合不充分,火焰响应时间增加。

同样对相同功率时 100 Hz(增益峰值频率)外激励扰动下的加力燃烧室内动态压力信号进行处理分析,得到如图 12 所示结果。由图可得,随着凹腔后壁面倾角的增加,燃烧室内压力脉动幅值不断增加,与火焰传递函数的增益峰值的变化趋

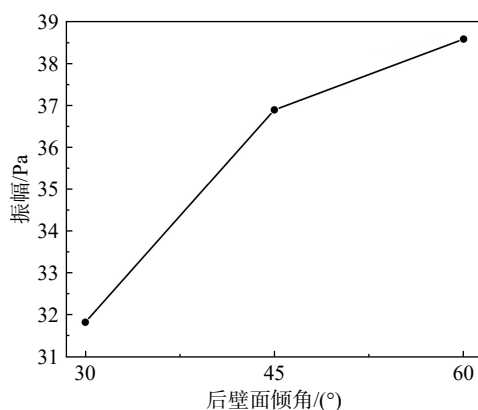


图 12 不同后壁面倾角下燃烧室压力脉动幅值变化

Fig. 12 Change of pressure fluctuation amplitude in combustion chamber under different rear wall inclination angles

势相对应, 燃烧室内热声耦合加剧, 整体系统稳定性降低, 再次证明后壁面倾角的增大加剧了耦合火焰的不稳定性。

对拍摄的高速火焰图像进行分析, 如图 13 所示为不同后壁面倾角下的无激励扰动时的时均 CH^* 火焰图像, 以及沿高度方向上绘制的归一化

释热率分布曲线。此外图 14 具体展示了随后壁面倾角增大加力燃烧室内的火焰长度也在不断增加。这是由于较小的后壁面倾角增大了凹腔后方处的释热集中区的面积, 加剧了凹腔内燃料与主流的掺混, 从而形成较为短促但释热剧烈的耦合火焰结构。

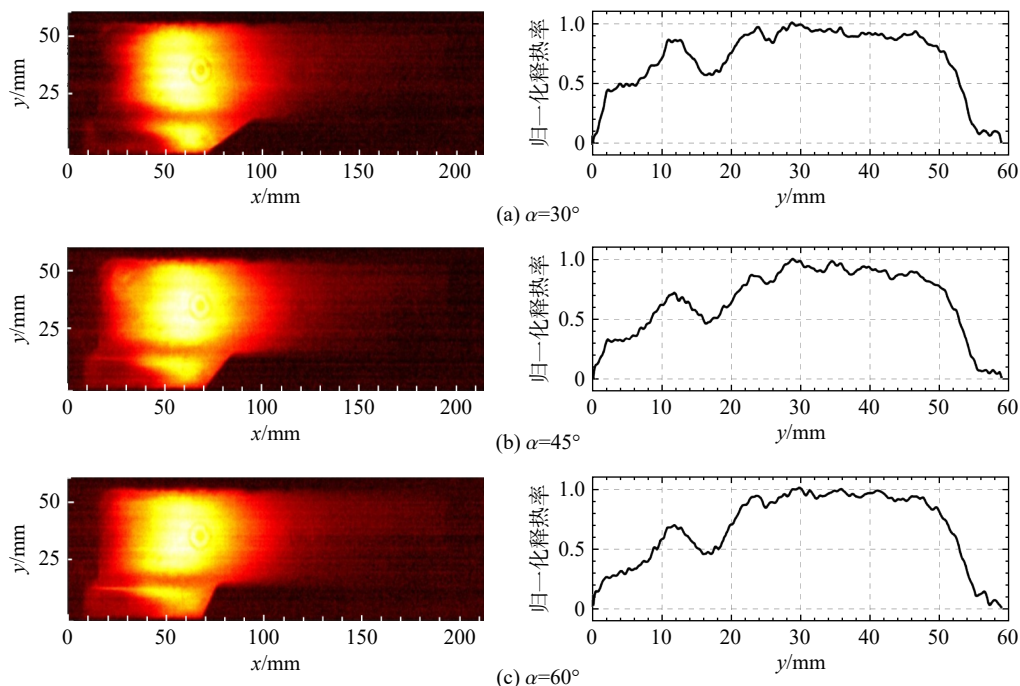


图 13 不同后壁面倾角下的时均 CH^* 火焰图像和释热分布曲线

Fig. 13 Time-averaged CH^* flame images and heat release distribution curves at different rear wall inclination angles

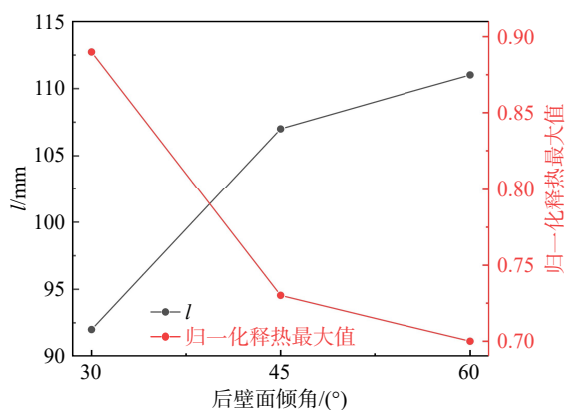


图 14 不同后壁面倾角下的火焰长度和凹腔内释热峰值变化

Fig. 14 Changes of flame length and heat release peak in cavity under different rear wall inclination angles

但同时由于较小后壁面倾角下凹腔内的燃料大量与钝体后主流掺混燃烧, 故而提高了凹腔火焰的释热峰值, 在图 14 中表现为随后倾角的增大, 凹腔火焰的释热极值减小。

2.3 火焰动力学

为研究钝体/凹腔组合结构下耦合火焰的动力学特征, 对试验中拍摄的高速 CH^* 火焰图像进行处理分析, 以得到在不同外激励下耦合火焰的动态结构变化及不同凹腔参数下模型加力燃烧室内火焰的脉动特征。

2.3.1 火焰动态结构

选择工况 II、速度脉动为 0.02 且在不同外激励频率(100、150、200、300 Hz)下侧向窗口的 CH^* 火焰图像进行相平均分析(如图 15 所示), 并伴以燃烧室上方窗口的火焰图像进行辅助分析(如图 16 所示), 以期获得不同凹腔结构火焰响应的共性规律。

如图 15 和图 16 所示, 钝体火焰在 100 Hz 激励扰动下, 钝体火焰前部会出现轻微的脉动褶皱, 随后褶皱向后发展, 钝体两侧射流火焰会向内产生轻微弯曲。随着激励频率增加到 150 Hz, 钝体两侧射流火焰会在特定位置火焰会向内卷吸, 并

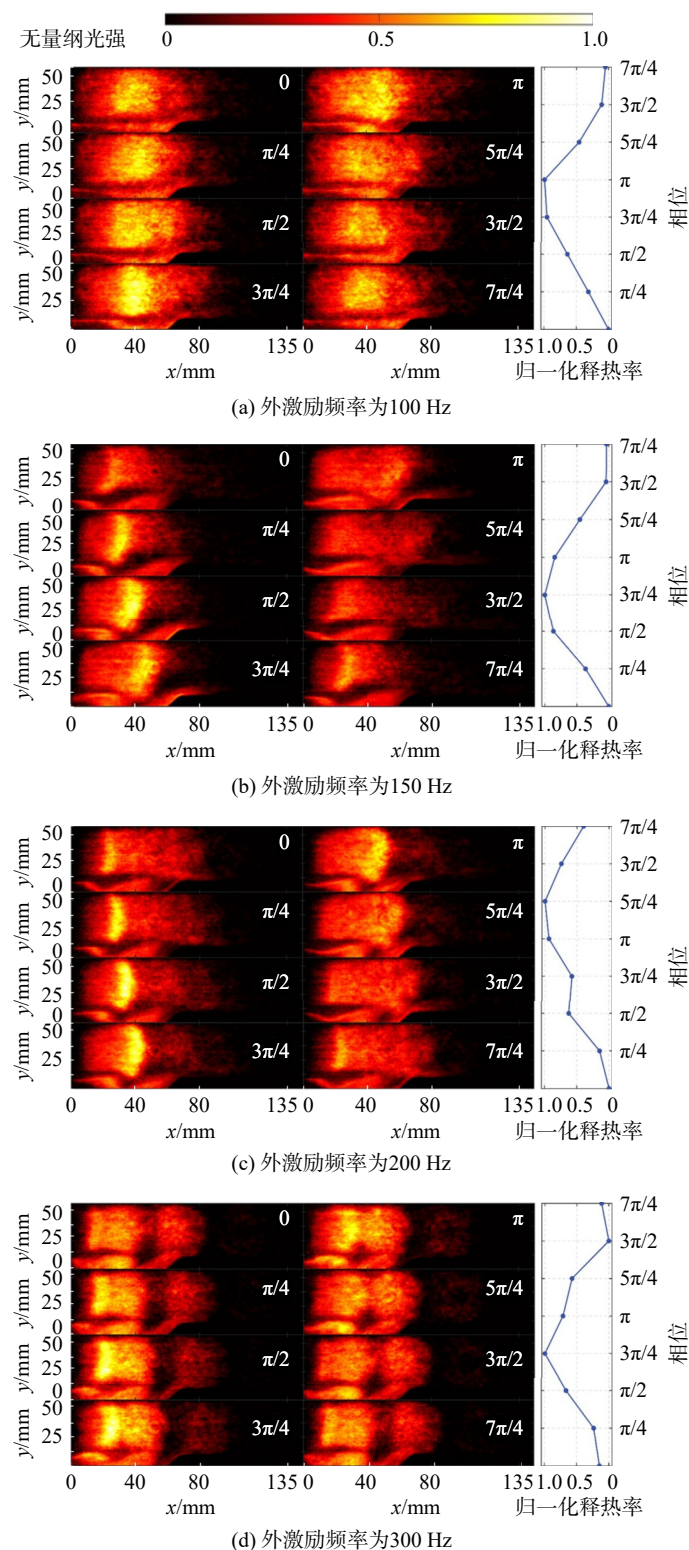


Fig. 15 Average CH* flame image and heat release curve of each phase in a cycle at different excitation frequencies under condition II (lateral window)

结合图 15 和图 16 所展示的耦合火焰的动态

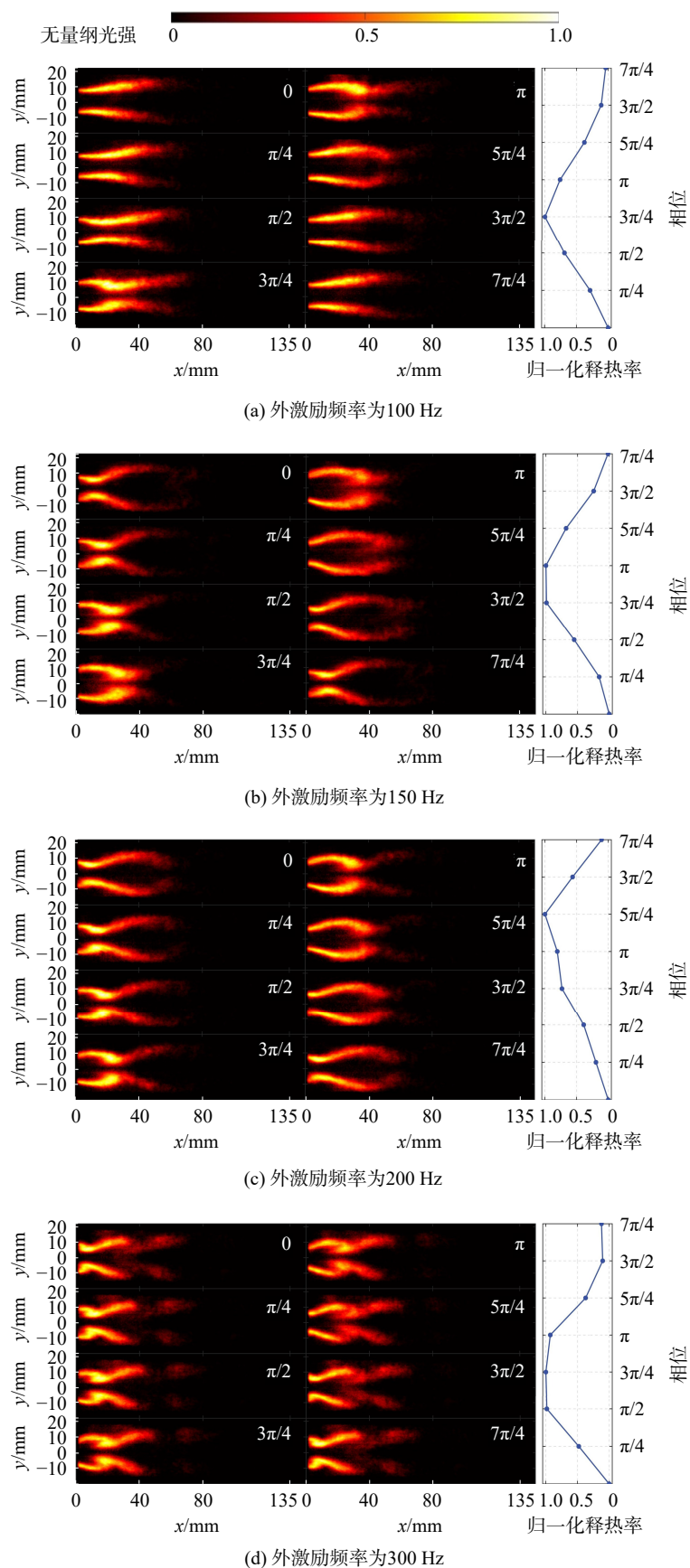


图 16 工况 II 下不同激励频率时一个周期内各个相位相平均 CH* 火焰图像与释热曲线(上方窗口)

Fig. 16 Average CH* flame image and heat release curve of each phase in a cycle at different excitation frequencies under condition II (upper window)

特性,可得到不同凹腔参数下的耦合火焰对不同频率扰动下的响应呈现相似的规律。即在较低频率下钝体两侧火焰会向内产生大尺度卷吸,并掺混交互,局部的释热极大增强,并且在主流的作用下还会带动凹腔火焰产生强烈掺混和内卷,图像上表现出夹断的趋势。随着相位的发展,耦合火焰卷曲变形会逐渐恢复,而卷曲处火焰由于向下游发展缺乏燃料供应,燃烧无法持续进行,从而全局释热率迅速减小,而新的褶皱将重新生成进入下一个周期。

此外随着激励频率的不断增大,火焰面的波动也会随之增大。当激励频率达到 300 Hz 时,火焰会产生火焰面的多段褶皱,出现整体耦合火焰面的夹断。在其他相位还有释热的局部极小值,这与低频下的火焰释热特征明显不同,这是由于扰动频率的增加,使得火焰面上的褶皱将其分成了多段,空间上燃料输运受限,导致了局部熄火现象的产生。

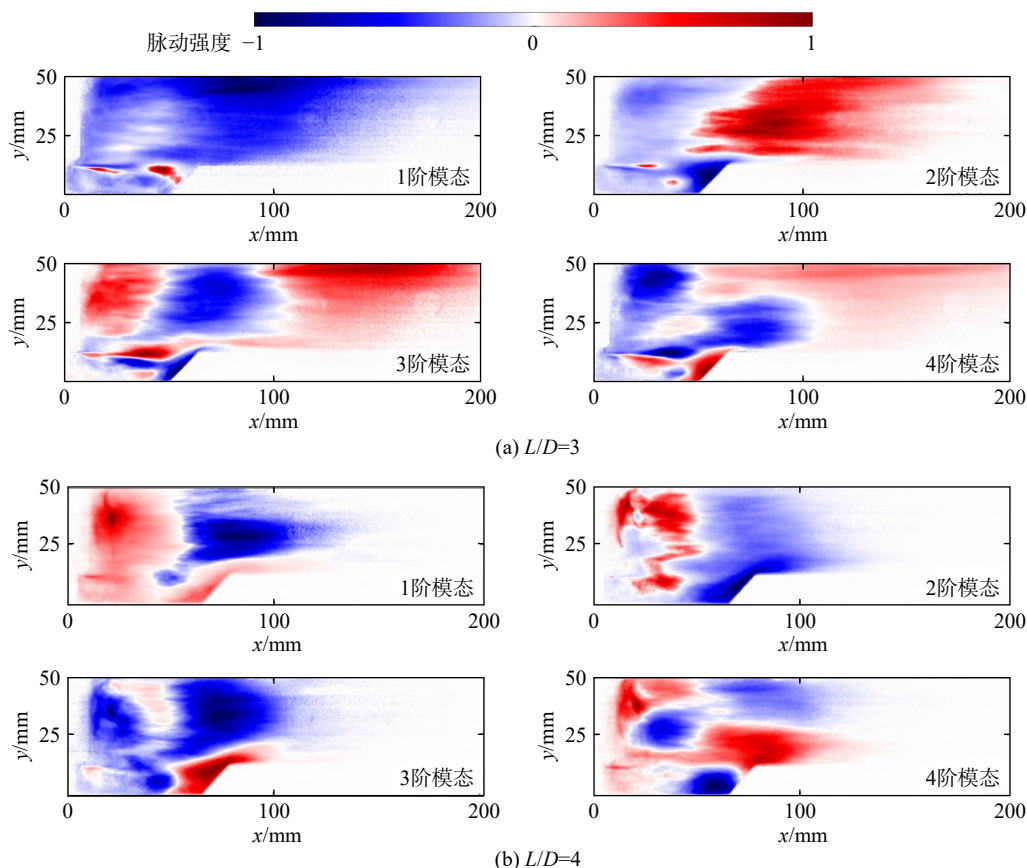
2.3.2 火焰脉动特征

为进一步分析改变凹腔参数下燃烧室内耦合火焰的脉动特征,对不同凹腔长深比、不同凹腔后倾角且 $u'/\bar{u}=0.02$ 时 100 Hz 外激励(增益峰值频率)下的高速 CH^* 火焰图像进行 POD 分解。计算

结果见图 17 和图 18。POD 分解结果中各阶模态的能量大小由大到小排序,故主要分析能量占比最高的前 4 阶 POD 模态结果(由上往下依次为 1 阶~4 阶模态),并于图中标明各阶模态下的脉动主频。图中红蓝区域数值绝对值较大,代表模态中该区域对脉动的贡献较大,同一个模态中红蓝色区域呈现此消彼长的关系,类似于脉动幅值的波峰与波谷。

首先对不同凹腔长深比下 100 Hz 激励的 CH^* 火焰图像进行 POD 分解,具体如图 17 所示。耦合火焰剧烈脉动结构由两部分构成:一是钝体尾缘靠上方的区域,这是由于钝体稳定器在此处形成了回流区并且钝体下方凹腔结构产生的径向回流加剧了钝体尾缘区域的燃烧,增强了局部释热脉动;二是后倾角处凹腔火焰与钝体底部射流火焰相互耦合的区域,这是两者掺混增强燃烧的结果,也是带凹腔的加力燃烧室内具有共性的释热响应特征。

但由前两阶模态的结果可得,随着长深比的不断增加,剧烈释热脉动的区域由钝体后方的扰流区逐渐转变为凹腔后倾角处的回流区域。凹腔长深比的增加直接增大了凹腔回流区的面积,同时改变了加力燃烧室内强释热脉动区域在空间中



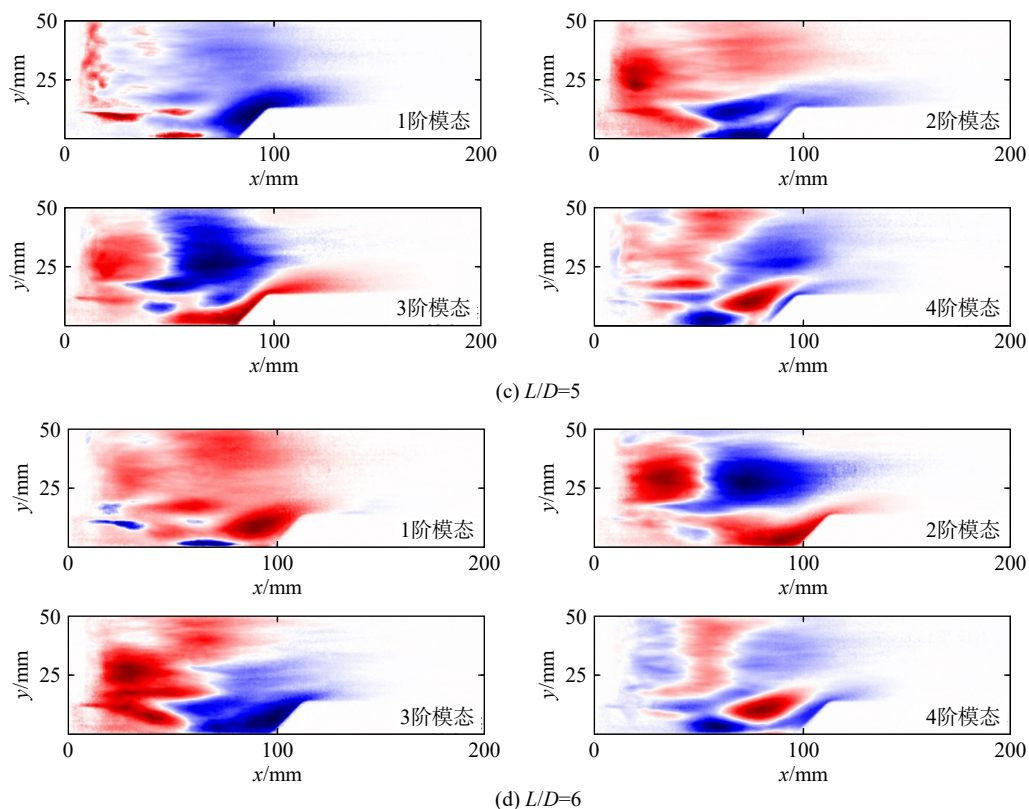
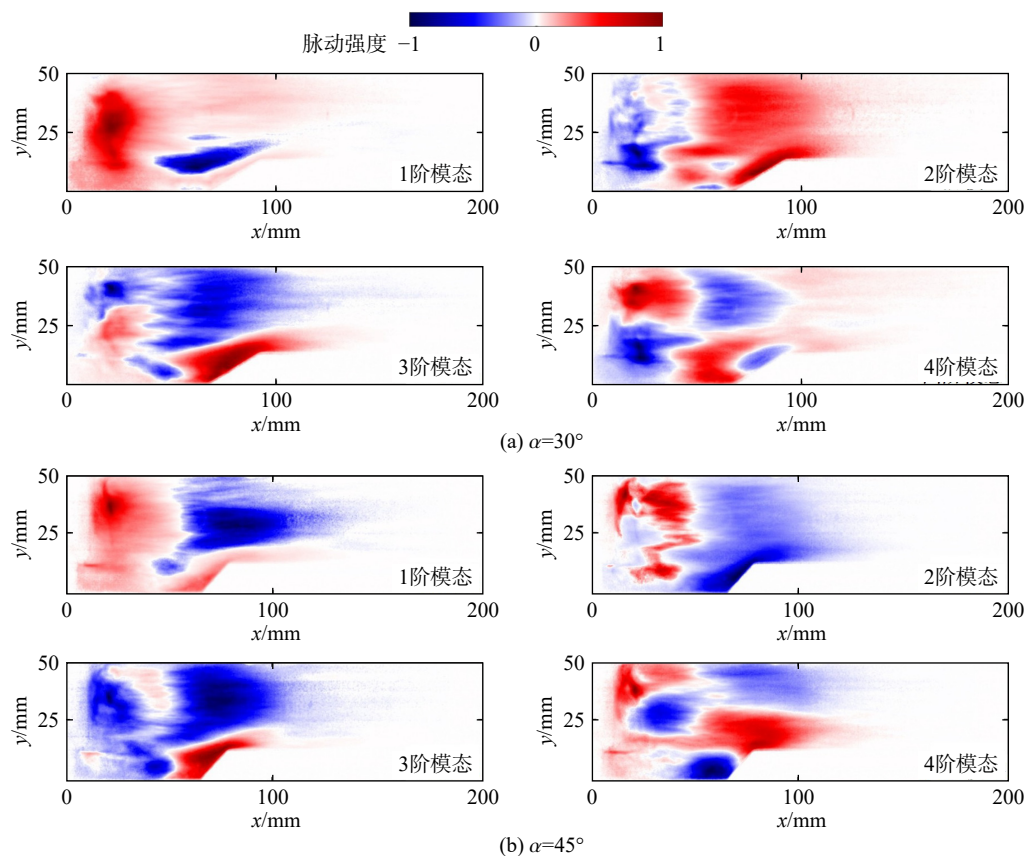


图 17 100 Hz 激励时不同长深比下前 4 阶 POD 分解结果

Fig. 17 POD decomposition results of the first four orders under different length-to-depth ratio under 100 Hz excitation



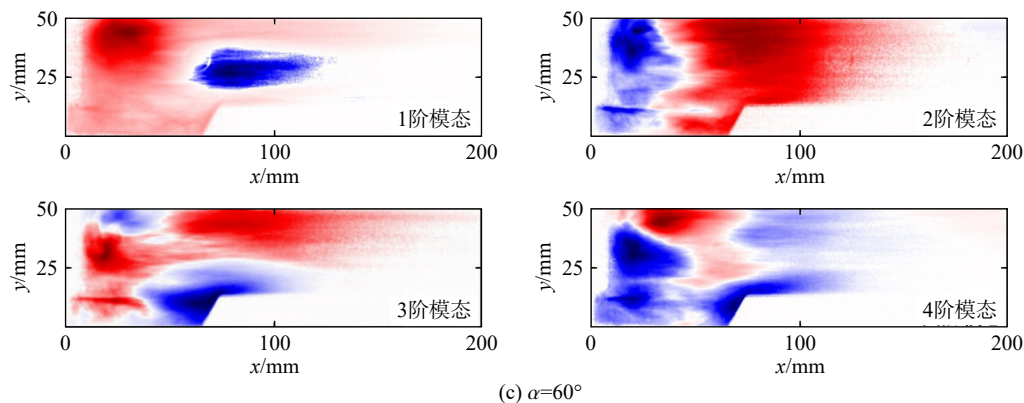


图 18 100 Hz 激励时不同后壁面倾角下前 4 阶 POD 分解结果

Fig. 18 POD decomposition results of the first four orders under different rear wall inclination angles under 100 Hz excitation

的分布位置,这也是组合结构下耦合火焰对上游扰动响应发生变化的内因。

此外在 100 Hz 外激励下不同凹腔长深比的前两阶模态呈现出明显的纵向拉伸和脉动,这是该加力燃烧室内耦合火焰受到外激励下的典型脉动特征。3、4 阶模态中可以观察到凹腔回流区与钝体后方扰流区域存在径向方向的脉动,这对应了加入凹腔结构后所产生的自下而上的气流径向回流特征,这也解释了 POD 分解结果的前两阶模态中钝体尾缘后方强脉动区域的产生原因。

如图 18 所示,为 100 Hz 外激励时不同后壁面倾角下高速动态 CH* 火焰图像的前 4 阶 POD 分解结果。

与前文所述相似,燃烧室内耦合火焰剧烈脉动结构依旧由钝体后方扰流区与凹腔后倾角回流区域两部分构成。但从前两阶模态结果可得,随着后壁面倾角的不断增大,凹腔后倾角处的回流区域强释热脉动区域逐渐消失,而钝体后方的扰流区域内释热脉动增强,且核心脉动区域不断上移。这是由于凹腔后倾角增大导致了凹腔后倾角处回流区逐渐下沉,面积缩小,极大地削弱了凹腔回流区的释热脉动。并且由于凹腔回流区的减小,钝体后方主流与凹腔内燃料的掺混燃烧也被削弱,由此钝体后方扰流的核心释热脉动区域出现了上移。如上所述,凹腔后壁面倾角的变化也间接改变了加力燃烧室内空间中强脉动区域的分布位置,再次证明了这是耦合火焰对上游扰动响应发生变化的诱因。

此外图 18 中前两阶模态也呈现出明显的纵向拉伸脉动,其 3、4 阶模态中依旧有着由于凹腔与钝体后方扰流区域之间垂直方向的回流特征而产生的径向脉动,这表明了由凹腔结构的加入而

带来的燃烧场中的共性特征,并不会随着凹腔参数的改变而消失。

3 结 论

以模型加力燃烧室为研究对象,基于试验数据研究分析了不同长深比及不同凹腔后壁面倾角下凹腔参数的变化对钝体/凹腔耦合火焰响应特性的影响以及受扰动下耦合火焰的动力学特征,得到以下结论:

1) 在外激励条件下,钝体/凹腔耦合火焰的 FTF 增益曲线呈现单峰特征(100~110 Hz 区间内存在最大值),随着长深比的增加以及后壁面倾角的不断减小,整体增益值均减小,相位曲线斜率(延迟时间)同样减小,系统时滞效应减弱。

2) 钝体/凹腔耦合火焰在不同频率扰动下有不同的动态响应。低频时会产生向内的卷曲运动特征,局部释热率急剧增强,并向后扩展,而在较高频扰动下,会产生多段火焰面褶皱,出现火焰面的夹断以及局部熄火现象。

3) 凹腔参数的变化会改变加力燃烧室内强释热脉动区域的分布位置。凹腔长深比的增加会增强凹腔后倾角回流区处的释热脉动,而后壁面倾角的增大则会加剧钝体后方扰流区的释热响应,这说明了凹腔参数变化时所导致的空间中强释热脉动区域的改变是耦合火焰响应特性发生变化的内因。

参考文献:

- [1] 金如山,索建秦.先进燃气轮机燃烧室[M].北京:航空工业出版社,2016.
JIN Rushan, SUO Jianqin. Advanced gas turbine combustor[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [2] 程豫洲.燃烧不稳定机理及其影响因素的全可压缩数值模

- 拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- CHENG Yuzhou. Study on fully compressible numerical simulation of combustion instability mechanism and its influencing factors[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [3] 张孝春, 孙雨超, 刘涛. 先进加力燃烧室设计技术综述[J]. 航空发动机, 2014, 40(2): 24-30, 60.
- ZHANG Xiaochun, SUN Yuchao, LIU Tao. Summary of advanced afterburner design technology[J]. Aeroengine, 2014, 40(2): 24-30, 60. (in Chinese)
- [4] 陈翔, 王一搏, 刘云鹏, 等. 加力燃烧室火焰稳定装置流阻特性数值研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(7): 62-71.
- CHEN Xiang, WANG Yibo, LIU Yunpeng, et al. Numerical study on flow resistance characteristics of flame holder in an afterburner [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(7): 62-71. (in Chinese)
- [5] GU Hongbin, CHEN Lihong, WANG Dan, et al. Experimental investigation on coupling characteristics of cavity flameholder and strut jet: AIAA 2012-5961 [R]. Tours, France: AIAA, 2012.
- [6] MA Guangwei, SUN Mingbo, LI Fan, et al. Effect of fuel injection distance and cavity depth on the mixing and combustion characteristics of a scramjet combustor with a rear-wall-expansion cavity[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 182: 432-445.
- [7] MAHTO N K, CHOUBEY G, SUNEETHA L, et al. Effect of variation of length-to-depth ratio and Mach number on the performance of a typical double cavity scramjet combustor[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 128: 540-550.
- [8] WANG Hongbo, WANG Zhenguo, SUN Mingbo, et al. Large eddy simulation based studies of jet-cavity interactions in a supersonic flow[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93: 182-192.
- [9] KUMAR M, VAIDYANATHAN A. On shock train interaction with cavity oscillations in a confined supersonic flow[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 90: 260-274.
- [10] MICKA D, TORREZ S, DRISCOLL J. Heat release distribution in a dual-mode scramjet combustor-measurements and modeling: AIAA 2009-7362 [R]. Bremen, Germany: AIAA, 2009.
- [11] MICKA D J, DRISCOLL J F. Stratified jet flames in a heated (1390K) air cross-flow with autoignition[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(3): 1205-1214.
- [12] SHEFFER S G, MARTINELLI L, JAMESON A. Simulation of supersonic reacting hydrocarbon flows with detailed chemistry[J]. *Combustion Science and Technology*, 1998, 136(1): 55-80.
- [13] 汪洪波. 超声速燃烧凹腔剪切层非定常特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- WANG Hongbo. Study on unsteady characteristics of shear layer in supersonic combustion cavity[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [14] 李素芬, 林姿含, 东明. 凹腔结构对氢气超声速燃烧影响数值模拟[J]. 热科学与技术, 2021, 20(4): 395-402.
- LI Sufen, LIN Zihan, DONG Ming. Numerical simulation of the effect of concave cavity structure on supersonic hydrogen combustion[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2021, 20(4): 395-402. (in Chinese)
- [15] SUNEETHA L, RANDIVE P, PANDEY K M. Numerical investigation on implication of dual cavity on combustion characteristics in strut based scramjet combustor[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(60): 32080-32094.
- [16] SUNEETHA L, RANDIVE P, PANDEY K M. Numerical investigation on implication of strut profile on combustion characteristics in a cavity based scramjet combustor[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 170: 623-636.
- [17] LAKKA S, RANDIVE P, PANDEY K M. Implication of geometrical configuration of cavity on combustion performance in a strut-based scramjet combustor[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 178: 793-804.
- [18] HSU K Y, CARTER C D, GRUBER M R, et al. Experimental study of cavity-strut combustion in supersonic flow[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(6): 1237-1246.
- [19] SUNEETHA L, RANDIVE P, PANDEY K M. Numerical investigation on mixing behavior of fuels inreacting and non-reacting flow condition of a cavity-strut based scramjet combustor[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(31): 16718-16734.
- [20] 黄志伟. 超声速来流下的动态燃烧机理研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- HUANG Zhiwei. Study on dynamic combustion mechanism under supersonic inflow[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018. (in Chinese)
- [21] 陈兴良, 景婷婷, 朱韶华, 等. 支板/凹腔组合稳焰器耦合机制研究[J]. 推进技术, 2022, 43(11): 210462.
- CHEN Xingliang, JING Tingting, ZHU Shaohua, et al. Coupling mechanism of strut/cavity combined flame stabilizer[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(11): 210462. (in Chinese)
- [22] KIM K T, LEE J G, QUAY B D, et al. Spatially distributed flame transfer functions for predicting combustion dynamics in lean premixed gas turbine combustors[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(9): 1718-1730.
- [23] NORI V N, SEITZMAN J M. CH chemiluminescence modeling for combustion diagnostics[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1): 895-903.
- [24] 聂彝. 伪彩色在图形图像处理中的应用[J]. 电子制作, 2012, 20(12): 129.
- NIE Ben. Application of pseudo-color in graphic image processing [J]. Practical Electronics, 2012, 20(12): 129. (in Chinese)
- [25] 赖安卿, 刘云鹏, 付尧明, 等. 振荡燃烧火焰图像处理[J]. 燃烧科学与技术, 2020, 26(1): 10-17.
- LAI Anqing, LIU Yunpeng, FU Yaoming, et al. Image processing of combustion oscillating flame[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2020, 26(1): 10-17. (in Chinese)
- [26] 赵妍, 刘勇, 赵航, 等. 喷嘴布局对钝体非预混火焰响应特性影响的试验研究[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2024, 37(3): 37-45.
- ZHAO Yan, LIU Yong, ZHAO Hang, et al. Experimental study on the influence of nozzle layout on the response characteristics of bluff body non-premixed flames[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2024, 37(3): 37-45. (in Chinese)
- [27] ÅBOM M, BODÉN H. Error analysis of two-microphone measurements in ducts with flow[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1988, 83(6): 2429-2438.
- [28] 赵航, 刘勇, 葛鑫坤, 等. 燃料分布对钝体火焰燃烧不稳定边界影响的试验研究[J/OL]. 航空动力学报, 2025: 1-14. (2025-05-14) [2025-07-09]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20240841>.
- ZHAO Hang, LIU Yong, GE Xinkun, et al. Experimental study on effects of fuel distribution on combustion instability boundary of bluff-body flames[J/OL]. Journal of Aerospace Power, 2025: 1-14.

- (2025-05-14) [2025-07-09]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20240841>. (in Chinese)
- [29] 葛鑫坤, 王旭怀, 刘勇, 等. 旋流器参数对燃烧不稳定边界影响研究[J]. 燃烧科学与技术, 2025, 31(1): 81-93.
GE Xinkun, WANG Xuhuai, LIU Yong, et al. Research on the influence of swirler parameters on combustion instability boundary[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2025, 31(1): 81-93. (in Chinese)
- [30] ARMITAGE C A, BALACHANDRAN R, MASTORAKOS E, et al. Investigation of the nonlinear response of turbulent premixed flames to imposed inlet velocity oscillations[J]. *Combustion and Flame*, 2006, 146(3): 419-436.

(编辑: 王碧琚)