

斜坡限制域对脱体火焰宏观形状和燃烧振荡影响 实验研究*

宋恒¹, 韩啸^{2,3,4}, 张弛^{2,3,4}, 林宇震^{2,3,4}

- 中国航空综合技术研究所, 北京 100028;
- 北京航空航天大学 航空发动机研究院, 北京 100191;
- 北京航空航天大学 航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;
- 北京航空航天大学 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191

摘要: 燃烧振荡是贫油预混火焰中广泛存在的非正常过程, 是燃烧室设计中必须避免的。其中, 脱体火焰对降低氮氧化物排放有优势, 但其燃烧振荡往往更加严重。本文在中心分级燃烧器中, 通过实验方法研究了斜坡限制域对脱体火焰燃烧振荡的被动控制效果。本文通过单反相机和高速摄像获取了火焰平均结构和瞬态图像, 并通过相平均图像和本征正交分解研究了火焰动态演变过程。结果表明, 当台阶高度为0 mm时, 不同斜坡张角的斜坡限制域均能对燃烧振荡起到非常显著的抑制效果。而在30°斜坡张角的斜坡限制域中, 随着台阶高度的增加, 抑制效果变差, 但振幅相较突扩限制域发生了明显的降低。

关键词: 燃烧室; 脱体火焰; 燃烧振荡; 被动控制; 斜坡限制域

中图分类号: V231.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2024) 05-2209042-10

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2209042

1 引言

为了满足日益严格的污染排放要求, 特别是降低氮氧化物排放, 贫预混燃烧技术在燃气轮机燃烧室得到了大量的应用^[1]。但由于贫预混火焰工作状态接近于贫熄火边界, 容易受到外界扰动而产生释热脉动, 当与系统声波耦合时, 会发生大幅周期性的压力脉动, 形成燃烧振荡(也称燃烧不稳定性)。这会严重影响燃烧室正常工作, 严重时甚至会造成结构损毁^[2-3]。为了提高贫预混火焰稳定性, 提出了中心分级的燃烧组织模式, 中心是预燃级, 主燃级围绕在外层, 形成了分层旋流火焰^[4-6]。

在中心分级燃烧室中, 在总当量比不变的情况下, 随着主预燃级之间燃料分配比例的变化, 火焰宏观结构发生转变, 其中驻定分层火焰的振荡幅值最

低, 而脱体火焰振幅最大^[7]。但是, 某些情况下, 为了进一步降低排放和避免喷嘴积碳结焦, 在航空发动机和燃气轮机燃烧室设计中, 会将火焰设计为脱体火焰^[8-9]。脱体火焰由于没有驻定的火焰根部, 火焰完全悬空, 释热脉动比驻定火焰更强, 因此这类火焰的燃烧不稳定性问题更加严重, 迫切需要有效的控制方法。

燃烧不稳定性的控制方法主要有主动控制和被动控制两类。由于主动控制需要额外的控制系统和作动机构, 目前较少应用于工程实际。被动控制没有活动部件, 在实际中得到了较多的应用。近期, Lee等^[10]采用大涡模拟研究了限制域扩张角对火焰宏观结构和燃烧振荡的影响。结果发现, 限制域扩张为45°时火焰以径向脉动为主, 与轴向声波未发生耦合, 有效抑制了压力脉动。Meadows等^[11]把多孔介质放

* 收稿日期: 2022-09-15; 修订日期: 2023-09-13。

基金项目: 航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目 (P2022-A-II-006-001); 国家自然科学基金 (52106128); 中央高校基本科研业务费专项资金 (501XTCX2023146001)。

作者简介: 宋恒, 博士, 工程师, 研究领域为燃烧振荡数据分析及处理。

通讯作者: 韩啸, 博士, 副研究员, 研究领域为燃烧振荡机理与控制。E-mail: han_xiao@buaa.edu.cn

引用格式: 宋恒, 韩啸, 张弛, 等. 斜坡限制域对脱体火焰宏观形状和燃烧振荡影响实验研究[J]. 推进技术, 2024, 45(5): 2209042. (SONG H, HAN X, ZHANG C, et al. Experimental study of effects of slope confinement on macrostructure and combustion instability of lifted flames [J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(5): 2209042.)

置在旋流燃烧器的角涡区,大幅降低了燃烧室内的压力脉动。通过流场测试发现多孔介质消除了流场角涡区,促进了燃烧室流动从全局不稳定模态转变为对流不稳定模态,用粒子图像测速技术拍摄燃烧室内的流场,发现角涡区中涡结构是驱动燃烧不稳定的主要因素。但该研究中,多孔介质也成为了新的稳火源,在原旋流火焰周围形成了一圈小的火焰^[12]。北航团队^[13-15]研究了限制域形状对旋流火焰燃烧振荡的抑制作用,通过实验测量、流场测试和火焰结构对比,发现斜坡限制域能够消除角涡区,削弱了燃烧器旋涡脱落,大幅降低了燃烧室压力脉动。此外,通过大涡模拟发现,斜坡限制域能够降低旋流火焰的火焰响应增益。但上述研究均以驻体旋流火焰为研究对象,尚无专门针对脱体火焰燃烧振荡被动控制的研究。

因此,本文拟针对脱体火焰燃烧振荡的控制问题,开展斜坡限制域用于抑制脱体火焰燃烧振荡的实验研究。

2 实验系统

2.1 分层旋流燃烧器

本文基于北航分层旋流燃烧器(BASIS, Beihang Axial Swirler Independently-Stratified Burner)^[16]开展研究。BASIS燃烧器是从真实中心分级低排放燃烧室简化而来,保留了其主要气动和结构特征,如图1(a)所示,包括预燃级旋流器、主燃级旋流器,以及将两者分隔开的台阶结构;对应的旋流数分别为0.68和0.50,旋流器的旋转方向一致,轴向位置相同。空气和甲烷在远上游的混合装置里实现预混,并通过主、预燃级通道上游的4个临界小孔进入燃烧器,确保声

学边界的清晰。主燃级旋流器外径为61 mm,旋流器距燃烧器出口30 mm。预燃级旋流通道采用收缩-扩张型面,主燃级旋流通道采用平直型面。

本文使用不同形状的石英玻璃作为限制域,与燃烧器出口相连。限制域包括两种结构,分别为突扩限制域和斜坡限制域(也称为防振环)。突扩限制域如图1(a)所示,长度为800 mm,直径为100 mm,截面形状恒定为圆形;斜坡限制域如图1(b)和(c)所示,其左端直径为61 mm,与燃烧器出口相连,并以一定的扩张角逐渐过渡到圆形限制域,圆形部分直径为100 mm,斜坡限制域总长800 mm,与突扩限制域保持一致。本文研究斜坡限制域的两个结构参数,分别是斜坡角度 $\alpha(30^\circ\sim 60^\circ)$ 和台阶高度 $H_{sc}(0\sim 13\text{ mm})$ 。

2.2 数据采集

本文的数据测试方式与文献[15]一致。压力脉动测量选用美国PCB公司的112A22传感器,其中P1直接安装在旋流器通道外壁,与通道齐平。而P2~P4沿火焰筒安装,为避免传感器过热,采用半无限长管引出并进行水冷。压力传感器采样时间为5 s,采样频率为20 kHz。火焰时均图像使用单反相机(Nikon D300)拍摄,曝光时间为1/15 s。火焰瞬时图像使用带有像增强器(UVi 1850-10-S20)的高速相机(FAST-CAM SA4)拍摄,采样频率为5 kHz,分辨率为768×768,采集图片张数约为3 000张。两个相机前均安装有CH*滤镜(430±10 nm)以获取火焰CH*分布,以表征火焰释热脉动。仪器采集和同步触发采用国家仪器DAQ系统。

2.3 实验工况

本文实验采用甲烷为燃料,空气和甲烷在燃烧器上游充分预混后进入燃烧器。空气和甲烷分别使

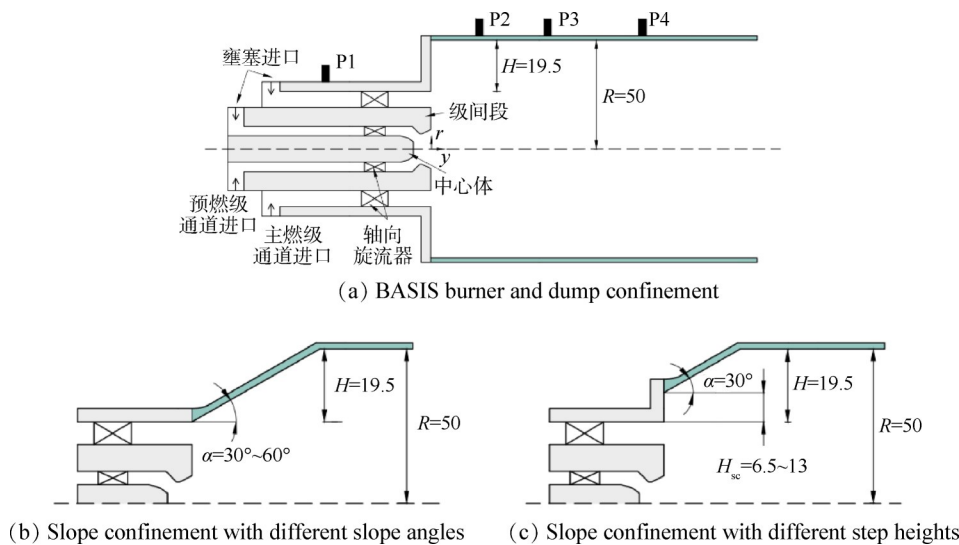


Fig. 1 BASIS burner and different confinements (mm)

用4个质量流量控制器(MFC)进行控制,可以对主预燃级的空气流量和当量比进行独立控制。空气和甲烷在上游混合装置内实现预混后,分别进入主预燃级的旋流通道,空气流量和当量比均可单独控制。预燃级和主燃级空气流量分别为2 g/s和16 g/s,空气分配比为1:8。如表1所示,本文采用6种不同的斜坡限制域结构,分别命名为SC1~6,其中SC1~4固定台阶高度为0 mm,斜坡张角从60°减小到30°;SC4~6固定斜坡张角为30°,台阶高度从0 mm变化到13 mm。采用常规突扩限制域作为对比,命名为DC。为了让火焰呈现出脱体火焰结构,结合之前的调试经验,本文将预燃级和主燃级的当量比之比(即分层比,Stratification ratio)固定为0.5,分层火焰总当量比范围为0.56~0.80,间隔为0.04,其中预燃级当量比在0.29~0.43,如表2所示。对每一个限制域结构均开展如表2所示的实验,测得7个工况点下的火焰图像、压力脉动信号和部分工况的高速摄像数据。

3 结果与讨论

不同限制域内火焰时均图像如图2所示。注意图片2(b)~(d)中的皱褶现象是由于锥面玻璃焊接工艺所造成的光线折射。可以发现,在图2(a)的常规突扩限制域里,火焰呈现典型的脱体火焰结构。但在图2(b)~(e)不同角度的斜坡限制域中,可以看出火焰基本贴合斜坡发展,在较小的斜坡角度(40°和

30°)更加明显。但在图2(f)和图2(g)中,随着台阶高度的增加,火焰从贴合斜坡发展逐渐变为脱离斜坡,变得接近于图2(a)所示的常规突扩限制域中的火焰。

由于P3传感器位于火焰筒内,且比较接近于火焰,本文选择使用P3传感器的压力脉动信号进行快速傅里叶变换,提取每个工况所获得的压力脉动频谱图中的离散尖峰幅值,并用对数坐标作图,如图3所示。其中,图3(a)是斜坡角度对于振荡幅值的影响,可以看出,常规突扩方案(DC)具有较大的振幅,随着总当量比的增加,燃烧状态从稳定变为中等振幅(100 Pa以上),并在当量比超过0.68后,振幅跃升到1 kPa以上,并一直保持到总当量比0.8。相反,使用了斜坡限制域的4个方案,虽然是随着总当量比的提升压力脉动幅值略有增加,但各个总当量比的工况压力脉动幅值均未超过100 Pa,不同斜坡角度的限制域均起到了非常显著的抑制效果。台阶高度的影响如图3(b)所示,可以看出,随着台阶高度从0 mm增加到13 mm,抑制效果逐渐变差,其中总当量比0.80时,6.5 mm台阶振幅达到约700 Pa,而13 mm台阶振幅已经接近突扩限制域,但在较小总当量比时,斜坡限制域依然起到了一定的抑制效果。因此,台阶高度越小,对脱体火焰抑制作用越好。

为了更好地展示不同限制域下燃烧振荡的压力脉动信号特征,图4分别展示了总当量比0.8时各个限制域的压力脉动时序图、频谱图和相空间重构图。

Table 1 Slope confinement structure parameters

Number	Slope confinement	Slope angle $\alpha/(\circ)$	Step height H_{sc}/mm
DC	Conventional sudden enlargement	-	-
SC1	$\alpha=60^\circ, H_{sc}=0 \text{ mm}$	60	0
SC2	$\alpha=50^\circ, H_{sc}=0 \text{ mm}$	50	0
SC3	$\alpha=40^\circ, H_{sc}=0 \text{ mm}$	40	0
SC4	$\alpha=30^\circ, H_{sc}=0 \text{ mm}$	30	0
SC5	$\alpha=30^\circ, H_{sc}=6.5 \text{ mm}$	30	6.5
SC6	$\alpha=30^\circ, H_{sc}=13 \text{ mm}$	30	13

Table 2 Operating conditions

Total equivalence ratio	Stratification ratio	ϕ_{pilot}	ϕ_{main}
0.56	0.5	0.296	0.593
0.60	0.5	0.318	0.635
0.64	0.5	0.339	0.678
0.68	0.5	0.360	0.720
0.72	0.5	0.381	0.762
0.76	0.5	0.402	0.805
0.80	0.5	0.424	0.847

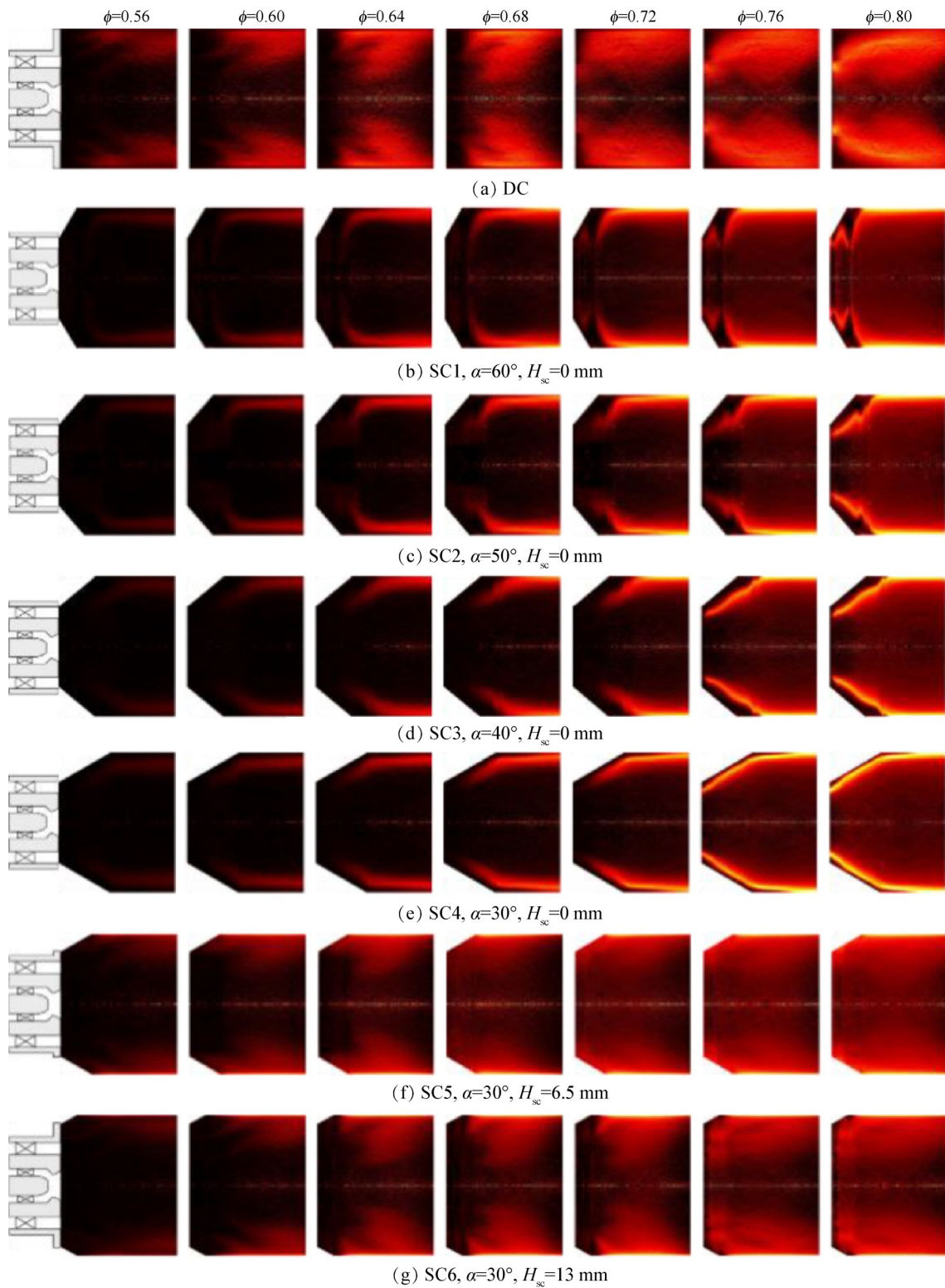


Fig. 2 Variations of flame macrostructure with total equivalence ratio in the conventional dump confinement and the slope confinement with different slope heights

如图 4(a)所示,在常规突扩限制域总当量比 0.8 时,压力脉动呈现周期性脉动,峰峰值达到约 7 kPa,其频谱图上表现为窄带尖峰,频率为 210 Hz,在相空间轨迹表现为具有较小带宽的封闭圆环,表明该工况压力脉动达到了极限环状态,形成了典型的燃烧振荡。

然而,在不同斜坡角度的 SC1~4 限制域中,压力脉动时序图均呈现不完全的周期性脉动,其中 60° 和 50° 斜坡角度在频谱图上没有明显的离散尖峰,而在 40° 和 30° 虽然在 200 Hz 附近存在一定的尖峰,但幅值均低于 100 Pa。从相空间重构看,4 个张角的限制域的

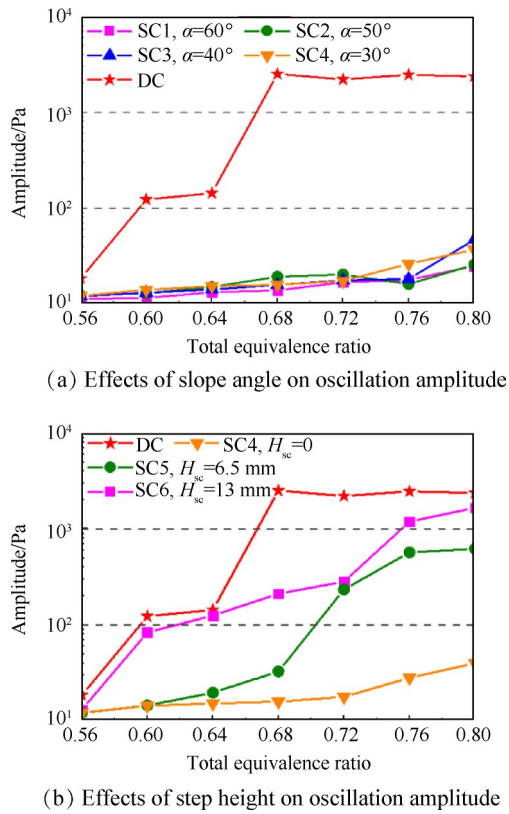


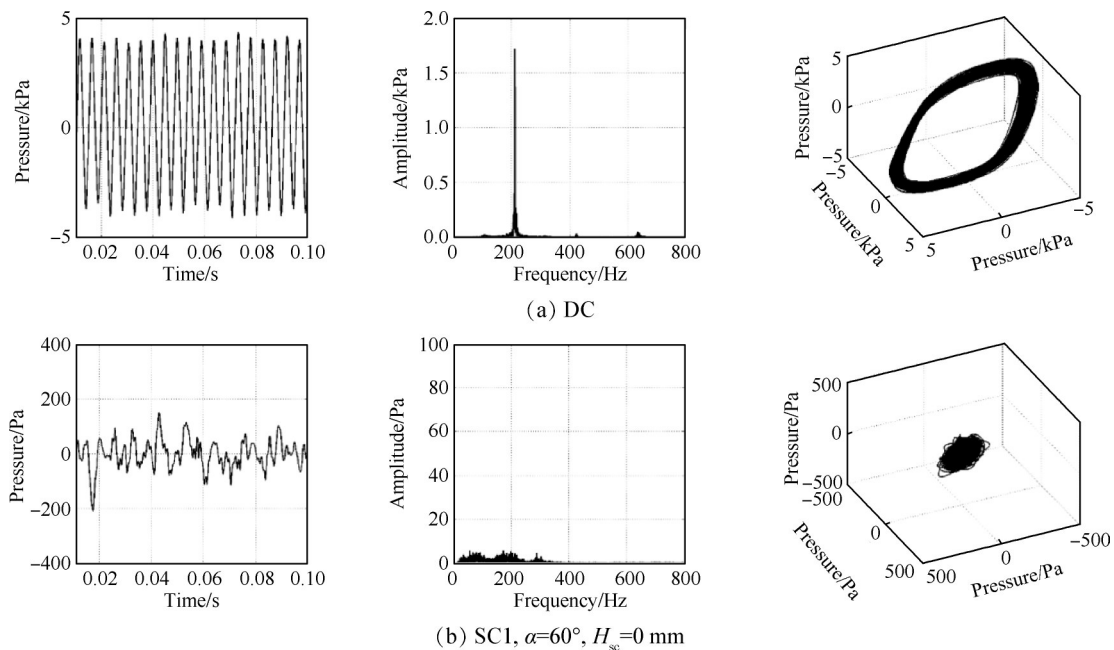
Fig. 3 Dependence of pressure fluctuation amplitude on different slope confinements

相轨均呈现心圆盘结构,未达到极限环状态,表现为宽频噪声。这表明这 4 个限制域均未发生燃烧振荡,斜坡限制域起到了显著的抑制效果。但图 4(f)和图 4(e)中,当台阶高度为 6.5 mm 和 13 mm 时,压力脉动重新呈现周期性,峰峰值分别为约 2 kPa 和约 4 kPa。在频谱图中出现了频率约为 220 Hz 的离散尖

峰,振幅分别为约 640 Pa 和约 1 700 Pa,而相空间重构也出现了窄带极限环,表明这两个限制域中出现了燃烧振荡,但幅度比常规突扩限制域中小,说明带台阶的斜坡限制域起到了一定的抑制作用,但未能完全消除燃烧振荡。

为了更好地揭示火焰在脉动周期内的运动过程,利用高速摄像所获得的连续火焰瞬时图像,采用相平均处理,获得了如图 5 所示的一个周期内的相平均火焰图像。如图 5(a)所示,常规突扩限制域中呈现了大尺度的火焰脉动,从 0° 开始,火焰靠近旋流器出口,向下游传播的过程中逐渐变大变亮,在 180° 时达到最大;随后在 240° 时火焰面出现断裂,右半部分在 300° 时向下游脱离,而左半部分向上游退缩,在 360° 时火焰退缩到旋流器出口。总体而言,运动特征为轴向周期性的“脱体-复燃”过程。由于火焰脉动造成的释热脉动驱动了燃烧室压力脉动,因此造成了强烈的燃烧振荡。然而,在 SC1~4 不同角度的斜坡限制域中,火焰在各个相位均保持了稳定,火焰结构和亮度无明显变化,这表明不同角度的斜坡限制域均能对脱体火焰火焰面起稳定作用,进而减小了释热脉动,抑制了燃烧振荡的发生。相反地,在 6.5 mm 和 13 mm 台阶的斜坡限制域中,火焰呈现与突扩限制域中类似的轴向周期性“脱体-复燃”的运动形式,但是 180° 相位时最大释热量比突扩限制域低,这也与其压力脉动幅值是吻合的,表明这两个限制域中存在大尺度火焰脉动,但幅值比突扩限制域有所降低。

为了进一步研究火焰动态过程,这里使用本征正交方法 (Proper Orthogonal Decomposition)^[17-18]对火



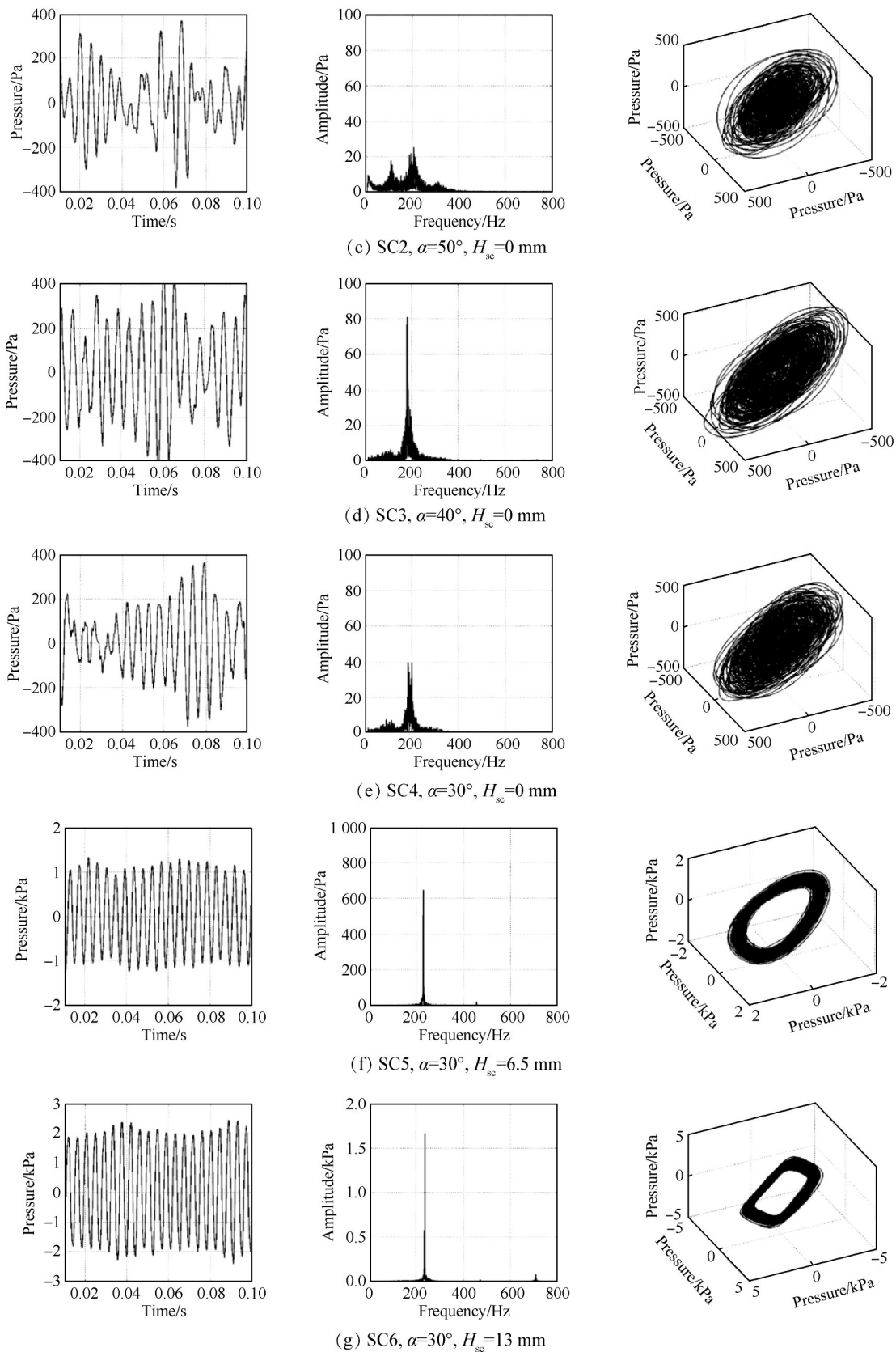


Fig. 4 Comparison between dump confinement and slope confinements when the total equivalence ratio equals to 0.8

焰图像进行处理,提取火焰的主要运动模式,如图6所示,其中模式0为平均火焰图像,模式1和模式2为能量最大的前两个模式,体现了火焰的主要动态特

征。图6(a)展示了突扩限制域的火焰模式分解,由模式1和模式2可以发现,火焰模式分布呈现明显的轴向分布。与图5(a)里火焰的轴向往复运动吻合。

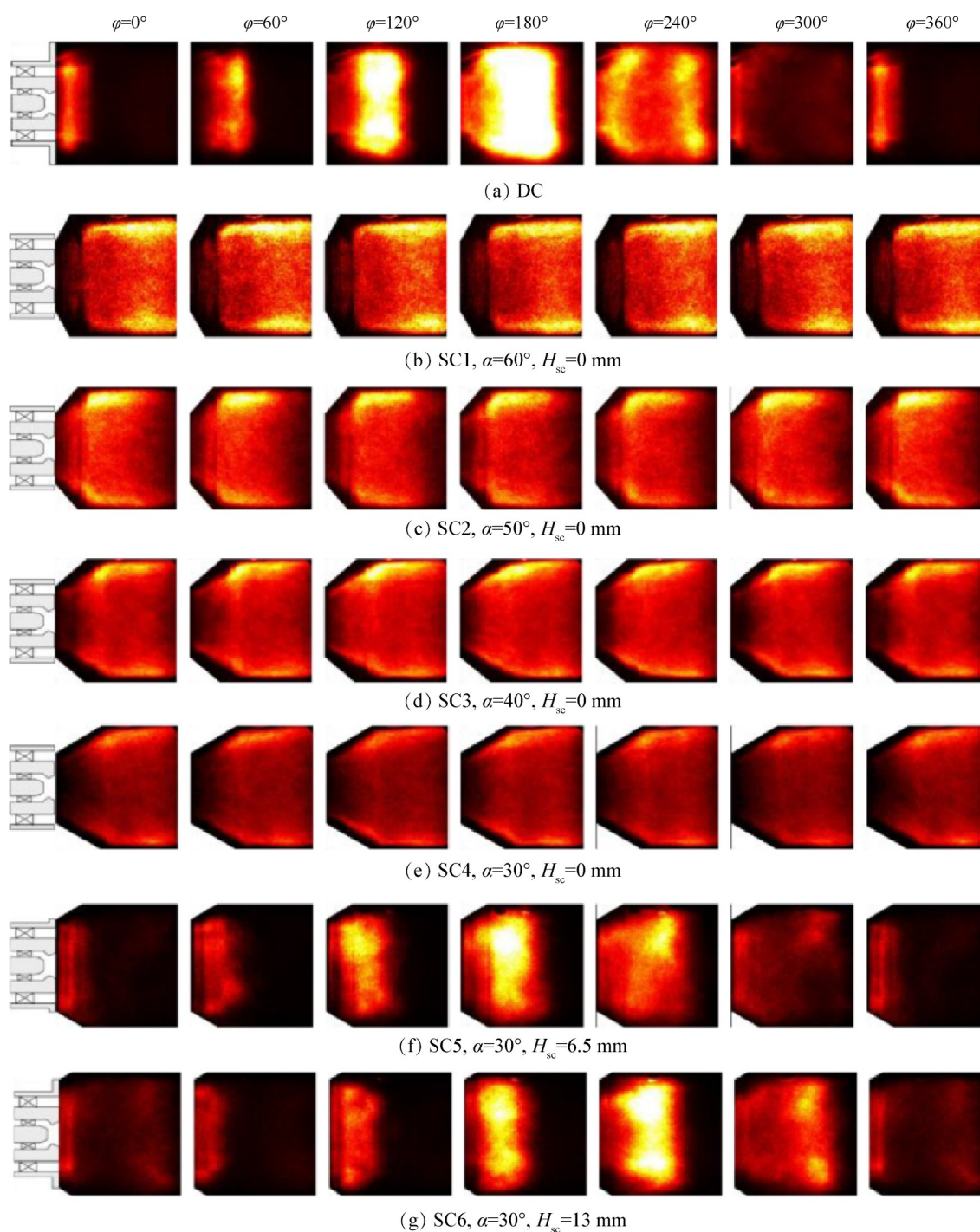


Fig. 5 Phase averaged flame images with various confinements at total equivalence ratio equals to 0.72

对于台阶高度为 0 mm 的不同张角斜坡限制域,如图 6(b)~(e)所示,火焰主要模态结构贴合限制域斜坡段分布,且模态强度显著低于图 6(a)所示的突扩限制域。图 6(b)的模态 1 和模态 2 几乎不存在明显的模态分布。图 6(c)~(e)的模态 1 出现轴向分布,且锥面扩张段和平直段呈反相分布;而在模态 2 出现一定的旋转分布,即模态沿中轴线出现上下反相分布。对于台阶高度为 6.5 mm 和 13 mm 的斜坡限制域,如

图 6(f)和图 6(g)所示,火焰模态呈现轴向分布,与图 5(f)和图 5(g)中吻合。上述分析表明,突扩限制域中和具有较大台阶的斜坡限制域中,发生振荡时脱体火焰运动以轴向模态为主,而台阶高度为 0 mm,不同角度的斜坡限制域中,火焰主要模态贴合斜坡段发展,不存在明显轴向分布,模态分布更为平缓。

总结上述实验结果,可以发现当斜坡限制域台阶高度为 0 mm 时,在宽当量比范围内角度 30° ~ 60° 均

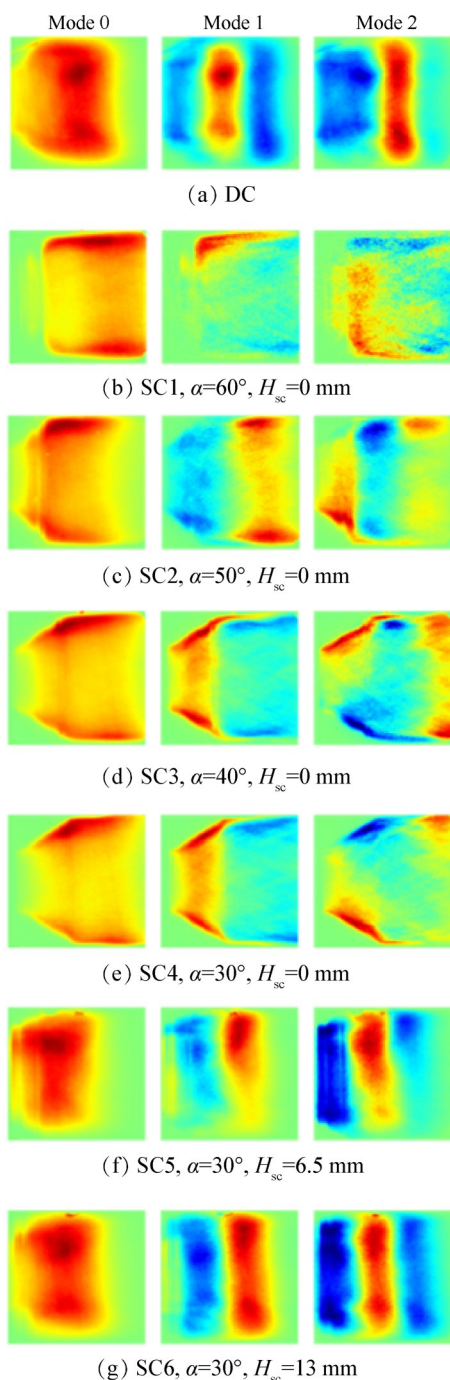


Fig. 6 Comparison of POD results of flame images of various confinements at the total equivalent ratio equals to 0.80

能起到显著的抑制效果,压力脉动未达到极限环状态,火焰无明显脉动,呈现出稳定燃烧。当斜坡限制域台阶高度增加时,抑制效果削弱,压力脉动达到极限环,火焰呈现轴向脉动,但幅值和强度均低于常规突扩限制域,表明斜坡限制域起到一定的抑制效果,只是未能达到完全抑制的效果。

简要分析上述结果,初步认为脱体火焰的释热脉动机理主要来自角落区旋涡与火焰的相互作用。

当台阶高度为0 mm时,不同角度的斜坡限制域均能较好地消除或削弱角落区旋涡,让火焰贴合斜坡段发展(见图2(b)~(e)),减弱旋涡与火焰相互作用,进而抑制燃烧振荡。相反,当增加台阶高度时,角落区旋涡出现,火焰难以完全贴合斜坡段,存在与突扩限制域中类似的旋涡与火焰作用机理,进而出现燃烧振荡被减弱但无法完全避免的情况。

4 结论

本文采用实验方法,在中心分级燃烧器中研究了斜坡限制域对脱体火焰燃烧振荡的抑制效果,取得了如下结论:

(1)常规突扩限制域中,脱体火焰出现了强烈燃烧振荡,压力脉动达到极限环状态,火焰动态以周期性“脱火-复燃”过程,以轴向模态为主。

(2)在台阶高度为0 mm的斜坡限制域中,不同角度的斜坡限制域均能完全抑制燃烧振荡,压力脉动未达到极限环,火焰贴合斜坡段发展,未出现明显脉动。

(3)在角度30°的斜坡限制域中,随着台阶高度的增加,抑制效果变差,压力脉动出现极限环,火焰出现轴向脉动,但幅值低于常规突扩限制域,表明具有台阶的斜坡限制域起到了一定的抑制作用。

上述研究表明,对于脱体火焰,斜坡限制域能够起到抑制振荡的作用,其中最关键参数是台阶高度。本文研究对于实际应用中开展燃烧室设计具有一定的指导作用。

致谢:感谢航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目、国家自然科学基金和中央高校基本科研业务费专项资金的资助。

参考文献

- [1] 黄勇,林宇震,樊未军,等. 燃烧与燃烧室[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009.
- [2] HUANG Y, YANG V. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(4): 293-364.
- [3] 翁方龙,周少伟,朱民. 基于描述函数的燃烧振荡建模与仿真[J]. 推进技术, 2021, 42(10): 2306-2314. (WENG F L, ZHOU S W, ZHU M. Modeling and simulation of combustion oscillations based on describing function method [J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(10): 2306-2314.)
- [4] HAN X, LAERA D, MORGANS A S, et al. The effect of stratification ratio on the macrostructure of stratified

- swirl flames: experimental and numerical study[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2018, 140(12).
- [5] 李乐, 索建秦, 于涵, 等. 中心分级多点直喷燃烧室冷态流动特性研究[J]. *推进技术*, 2021, 42(6): 1339-1350. (LI L, SUO J Q, YU H, et al. Non-reaction flow characteristic of concentric staged multi-point direct injection combustor [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(6): 1339-1350.)
- [6] 刘易安, 郭志辉, 张漫. 中心分级燃烧室雾化特性试验研究[J]. *推进技术*, 2019, 40(8): 1824-1831. (LIU Y A, GUO Z H, ZHANG M. Experimental investigation on spray characteristic of internally-staged combustor [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(8): 1824-1831.)
- [7] HAN X, LAERA D, MORGANS A, et al. Flame macrostructures and thermoacoustic instabilities in stratified swirling flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2018, 37(4): 5377-5384.
- [8] BELL J B, DAY M S, LIJEWSKI M J. Simulation of nitrogen emissions in a premixed hydrogen flame stabilized on a low swirl burner[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(1): 1173-1182.
- [9] 赖正鑫, 肖隐利, 宋文艳. 基于PaSR模型的低旋流燃烧大涡模拟[J]. *推进技术*, 2020, 41(10): 2260-2275. (LAI Z X, XIAO Y L, SONG W Y. Large eddy simulation of low swirl combustion based on PaSR model [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(10): 2260-2275.)
- [10] LEE C E, PARK S H, HWANG C H. Numerical study of the effect of inlet geometry on combustion instabilities in a lean premixed swirl combustor[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(11): 5293-5303.
- [11] MEADOWS J, AGRAWAL A K. Time-resolved PIV of lean premixed combustion without and with porous inert media for acoustic control[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(4): 1063-1077.
- [12] ALLEN J, FISHER B T, AGRAWAL A K. Effect of porous insert on flame dynamics in a lean premixed swirl-stabilized combustor using planar laser-induced fluorescence[R]. AIAA 2016-0242.
- [13] SONG H, HAN X, LIN Y Z, et al. The effect of the corner recirculation zone on separated stratified swirling flames and combustion instabilities[R]. ASME GT-2019-90436.
- [14] SONG H, LIN Y Z, HAN X, et al. The thermoacoustic instability in a stratified swirl burner and its passive control by using a slope confinement [J]. *Energy*, 2020, 195: 116956.
- [15] 宋恒, 刘玉治, 王欣尧, 等. 限制域形状对分层火焰和燃烧不稳定性的影响[J]. *推进技术*, 2022, 43(8): 210282. (SONG H, LIU Y Z, WANG X Y, et al. Effects of confinement shapes on stratified flames and combustion instabilities [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8): 210282.)
- [16] HAN X, LAERA D, YANG D, et al. Flame interactions in a stratified swirl burner: flame stabilization, combustion instabilities and beating oscillations[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 212: 500-509.
- [17] BERKOOZ G, HOLMES P, LUMLEY J L. The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows [J]. *Annual review of fluid mechanics*, 1993, 25(1): 539-575.
- [18] 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 C, TAO C, HAN X, et al. Extraction of propagation structure on stratified swirl flame dynamics under velocity fluctuation [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(1): 173-184.)

(编辑:梅瑛)

Experimental study of effects of slope confinement on macrostructure and combustion instability of lifted flames

SONG Heng¹, HAN Xiao^{2,3,4}, ZHANG Chi^{2,3,4}, LIN Yuzhen^{2,3,4}

(1. AVIC China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China;

2. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-Thermodynamics, Beihang University, Beijing 100191, China;

4. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Combustion instability is a common unsteady process in lean premixed flame, which is dangerous to the combustor and should be carefully suppressed. Specifically, lifted flame has advantages in reducing NO_x emission, but tends to undermine the combustion instability behaviors. In the present work, the passive control of slope confinements on combustion instabilities for the lifted flame is studied experimentally in a centrally-staged combustor. Time-averaged flame macrostructures and transient images are captured by a single-lens reflex camera and a high-speed camera, respectively. The flame dynamics are analysed by phase-averaged flame images and proper orthogonal decomposition. The results show that slope confinements with step height equal to 0 mm and multiple angles can significantly suppress combustion instability. Although the suppressing effect on combustion instabilities becomes weak with the increase of the step height in a 30° slope confinement, the amplitude decreases significantly compared with the conventional dump confinement.

Key words: Combustor; Lifted flame; Combustion instability; Passive control; Slope confinement

Received: 2022-09-15; **Revised:** 2023-09-13.

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2209042

Foundation items: Research was funded by the Science Center for Gas Turbine Project (P2022-A-II-006-001); National Natural Science Foundation of China (52106128); Fundamental Research Funds for the Central Universities (501XTCX2023146001).

Corresponding author: HAN Xiao, E-mail: han_xiao@buaa.edu.cn