

基于CH自由基发光的旋流火焰放热率 时空特性研究

王宽亮^{1,2}, 李飞¹, 刘德峰^{3,4}, 余西龙^{1,2}

(1. 中国科学院力学研究所 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049;

3. 中国航空工业集团有限公司 北京长城航空测控技术研究所, 北京 101111;

4. 中国航空工业集团有限公司 状态监测特种传感技术航空科技重点实验室, 北京 101111)

摘 要: 对不同工况下 CH_4/air 旋流火焰的放热率在时间上的热声振荡现象和空间的三维形态转变两方面进行了研究。在燃烧形态转变方面, 由于旋流火焰的复杂流场分布特性, 采用基于化学自发光的三维计算层析技术(3D-CTC), 测量了雷诺数从 5000 到 20000 的三个工况下旋流燃烧的 CH^* 发光三维火焰结构。以此表征放热率的三维分布, 实现对旋流火焰放热空间形态的测量。该诊断方法通过对旋流火焰发光在 8 个视角下的二维成像, 结合层析重建算法得到其三维 CH^* 分布信息。为验证重建保真度, 将重建后结果二维可视化与高速摄影下的二维时均结果进行对比, 结果表明重建误差在 5% 以内。研究中, 分析了不同雷诺数下放热率的空间变化规律, 结果显示所有实验工况下放热率的垂直于喷嘴方向的变化程度比沿喷嘴轴向的要剧烈; 而随着雷诺数增加, 最大的放热区表现出了明显的向后推进趋势。在旋流燃烧的热声振荡方面, 利用 CH^* 的二维高速摄影, 对旋流燃烧的放热率不稳定性进行研究, 发现放热率的振荡频率随着雷诺数的增大逐渐增加。

关 键 词: 化学自发光; 旋流火焰; 放热率; 三维计算层析技术; 燃烧不稳定性

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Study of the temporal and spatial characteristics for swirling flame heat release rate based on CH chemiluminescence

WANG Kuanliang^{1,2}, LI Fei¹, LIU Defeng^{3,4}, YU Xilong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics,
Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Engineering Science,

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Beijing Changcheng Aeronautical Measurement and Control Technology Research
Institute, Aviation Industry Corporation of China, Limited, Beijing 101111, China;

4. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Special Condition Monitoring Sensor
Technology, Aviation Industry Corporation of China, Limited, Beijing 101111, China)

Abstract: Several swirling CH_4/air diffusion flames were investigated in a gas turbine

收稿日期: 2018-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(11372329); 航空科学基金(20173432002); 中国科学院科研仪器设备研制项目(YZ201637)

作者简介: 王宽亮(1990—), 男, 博士生, 研究领域为化学发光火焰诊断技术。E-mail: wangkuanlaing@imech. ac. cn

通讯作者: 李飞(1982—), 男, 博士, 研究领域为流动/燃烧诊断技术, 超声速燃烧。E-mail: lifei@imech. ac. cn

引用格式: 王宽亮, 李飞, 刘德峰, 等. 基于CH自由基发光的旋流火焰放热率时空特性研究[J]. 航空动力学报, 2019, 34(4): 920-928. WANG Kuanliang, LI Fei, LIU Defeng, et al. Study of the temporal and spatial characteristics for swirling flame heat release rate based on CH chemiluminescence[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(4): 920-928.

model combustor via the temporal phenomenon of thermos-acoustic and the spatial flame mode transition. In the combustion mode transition, three-dimensional computed tomography of chemiluminescence (3D-CTC) technique was utilized due to the complexity of swirling combustion flow field. The 3D emissions of CH^* were measured and taken as qualitative indicators of the heat release rate under three Reynolds number conditions (from 5000 to 20000). This 3D measurement method utilized 8 multi-directional CH^* images as inputs combined with tomographic algorithms to compute the 3D distribution of CH^* intensities. In order to verify the reconstruction fidelity, the two-dimensional visualization of the reconstructed shape was compared with the time-averaged projection under high-speed photography, and the results showed that the reconstruction error was within 5%. In this study, the transitions of heat release area with Reynolds number were analyzed, and the results showed that the heat release rate changed more obviously along the nozzle radial direction than the axis direction, and the largest heat release area moved forward significantly. The thermo-acoustic study was obtained by high speed CH^* images, finding that the oscillating frequency of heat release increased with the increase of the Reynolds number.

Key words: chemiluminescence; swirl flame; heat release rate; three-dimensional computed tomography of chemiluminescence; combustion instability

旋流燃烧器是航空发动机燃烧室的重要部分,它通过高速旋转射流形成低压区,从而产生热回流以控制火焰实现稳定燃烧。该工作过程非常复杂,涉及气动、燃烧、传热传质等的交互作用。针对旋流燃烧的研究,主要以相对简单的实验室中的模型旋流燃烧器为对象,以燃烧诊断和数值模拟为研究手段。Weigand等^[1]利用旋流器模型对甲烷/空气旋流扩散火焰做了诸多的实验诊断,通过多激光普勒测速仪(LDV)测量了旋流器的流场,以OH和CH的平面激光诱导荧光(PLIF)将旋流火焰的可视化,并且利用Raman散射测量了多种组分浓度和温度。See等^[2]通过两种大涡模拟模型,研究了旋流燃烧器环境下能代表燃烧状态和湍流化学反应相互作用的建模策略。黄群星等^[3]提出了一种基于辐射能的离散重建方法,对温度及烟黑颗粒浓度联合测量,进行了三维联合重建。

放热率对于旋流器燃烧研究极为重要,是监控火焰状态控制燃烧振荡的重要依据。作为反应区的标识量,放热空间形态转变是研究的重点。如Stopper等^[4]利用对燃烧室内的流场和放热率的测量分析了燃烧反应区随物理参数的变化。热声振荡是燃烧不稳定性的外在表征,反映了发动机的工作性能。Voigt等^[5]通过对旋流燃烧放热率的脉动研究,分析了涡脱落与燃烧稳定性的耦

合关系。而Stöhr等^[6]认为,有很重要一部分放热发生在沿着旋进涡核的管状结构中,并围绕着中心线旋转。然而,目前尚没有较为可行的关于旋流火焰放热率的直接测量手段,大都采用非直接测量方法。Palie等^[7]通过假定 OH^* 正比于放热率,并利用Abel变换得到全局的分布信息,以此实现旋流火焰放热率的动态分析。Lee等^[8]利用 OH^* 和 CH^* 来标识放热,结合压力动态变化,来研究预混旋流火焰的不稳定性。钟迪等^[9]通过压力脉动分布和放热率脉动分布的关系,利用动态压力信息来重建燃气轮机燃烧室内一维放热率脉动的分布。总的来讲,采用化学自发光(OH^* 、 CH^* 和 C_2^*)标识放热率的做法最为普遍^[4,6-8,10-11]。在这几种自发光中, OH^* 在高温尾气中广泛存在,这部分发光不能表征释热率; C_2^* 仅存在于高当量比区域内;因此,本工作拟以 CH^* 的强度表示发热率强弱。通过基于化学发光的三维计算层析技术(3D-CTC)获取旋流器的三维放热分布,得到火焰空间形态。并辅助二维 CH^* 高速摄影方法,在获取火焰振荡时间特性的同时,验证三维计算层析的准确性。

3D-CTC由Floyd等^[12]提出,并尝试用于三维燃烧研究中,它是利用多视角下火焰的二维投影结合反演算法来获取三维发光信息。Kang等^[13]将成像光纤束引入3D-CTC系统中,极大方

便了成像系统的实用性。Cai 等^[14-15]使用点扩散函数模型来确定 3D-CTC 系统的物体与 CCD (charge-coupled device) 的对应关系。Wang 等^[16]等采用单透镜成像模型并提出了一种 3D-CTC 成像系统标定的方法,并将非清晰成像考虑其中。目前的 3D-CTC 视场角很小,依赖于远成像距离和较小目标火焰。若应用于大尺寸内流,需要开具很多大尺寸窗口,现实中无法实现,迫切需要扩大成像视场角。而简单的增加物镜视场角,会使得成像景深变浅,焦平面前后模糊问题严重。对此作者提出了大视场角下 3D-CTC 方法^[17],并在平面火焰进行对比验证实验。

在旋流燃烧应用方面,Mohri 等^[18]将 3D-CTC 技术应用到旋流器的三维瞬态诊断中。多个镜头均匀阵列于火焰面前的同一俯仰角下,分析了不同镜头数目对重建结果的影响。在成像模拟中,采用了光线追踪模型并在物距远大于火焰尺寸条件下(小视场角),采用了近轴近似假设。

与 Mohri 等^[18]的无窗口旋流火焰不同,本工作的诊断目标为方形玻璃窗口限制的内流火焰,更接近于燃气轮机燃烧室。首先,采用基于大视场角三维重建模型,对旋流火焰展开空间形态转换探究。利用 8 个视角下近距离、大视场 CH* 发光成像结合 ART(algebraic reconstruction technique)迭代算法,获得旋流火焰放热率三维分布,及其随雷诺数变化规律。其次,二维高速摄影(5 kHz)的时均值验证了三维重建结果的准确性,动图捕捉了火焰放热率的时间特性,获得振荡频率变化规律。两种方法的结合,实现了放热率的时间、空间特性研究。

1 实验设备及诊断方法

对旋流火焰放热率的时空特性研究中,三维空间特性的捕捉是难点。为最大限度简化 3D-CTC 系统、增强其复杂环境的适用性。采用单台 CCD 相机,结合 1 根有 8 个输入端、1 个输出端的定制光纤束,物镜为 8 个 G 透镜,具有超过 50°的成像立体角^[17]。相机(IMI 147FT)分辨率为 1388 像素×1 040 像素,像素尺寸为 6.45 μm×6.45 μm。实验中曝光时间为 60 ms,3D-CTC 重建出的是该时段内的三维平均放热率分布。由于实验设备所限,未获得高频 3D-CTC 结果。二维 CH* 高速摄影用于研究放热率时间变化特性,且可验证三维重建结果的准确性。相机型号 PHOTRON FASTCAM SA-Z,实验中帧频为 5 kHz,

分辨率为 768 像素×808 像素,对应火焰区域为 8.89 cm×9.34 cm。二维、三维测试系统采用相同的窄带滤光片(中心波长为 430 nm,半宽为 10 nm)。

图 1 为 3D-CTC 问题中的多视角成像示意图,如果以 $F(x_i, y_j, z_k)$ 表示地球坐标系的某一位置处的自发光分布强度, $I(x'_n, y'_m)$ 代表到 CCD 坐标系对应位置处的投影强度,则探测强度与分布强度间关系可以表示为如下关系式:

$$I(x'_m, y'_n) = \sum_{x_i, y_j, z_k} F(x_i, y_j, z_k) \cdot W(x_i, y_j, z_k; m, n) \quad (1)$$

式中 W 是某位置 (x_i, y_j, z_k) 处自由基的发光强度经过某视角的透镜到达 CCD 对应成像位置 (x'_n, y'_m) 处成像权重,该权重取决于成像系统的各参数并随物元坐标以及像元坐标的位置而改变。利用标定的权重矩阵以及测得的各个视角下的投影强度并结合迭代反演算法便可求出来目标区域的分布 F 。

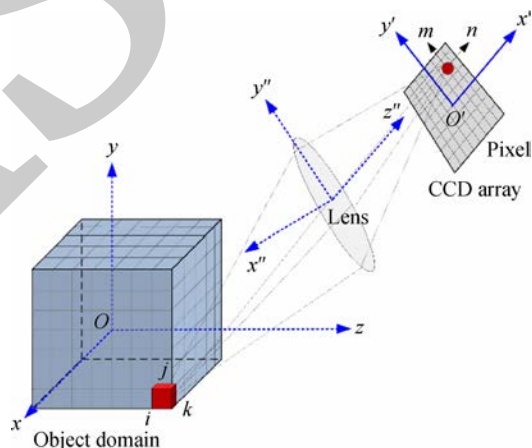


图 1 3D-CTC 系统物理示意图

Fig. 1 Physical coordinate system of the 3D-CTC setup

图 2 的左图是旋流燃烧器腔体和旋流器核的示意图,压气机提供的干燥空气由底部进口进入腔内,其中一部分从旋流器核的侧边叶片进入旋流器核,流向最内侧的喷嘴,另一部分由旋流器核的顶部叶片与腔体之间形成的通道从最外层喷嘴流出。两部分空气经由叶片并流出时都会产生切向速度,从而产生旋流。旋流器核侧面的叶片为 8 片均匀分布,对应的内侧喷嘴直径为 15 mm。旋流器核的顶部叶片为 12 个,对应的外侧喷嘴直径为 25 mm。甲烷由两路细管提供,出口是外径为 18 mm、内径为 15 mm 的同心环。空气、甲烷从

各自喷嘴出来后进入由四面石英玻璃组成的燃烧室燃烧,窗口均为宽 85 mm、高 110 mm。本文流量工况如表 1 所示,当量比均为 0.62~0.65 的富氧燃烧,雷诺数从 5 036 到 24 133 依次增大。

图 2 右图为实验系统照片,目标火焰区域为 9 cm×9 cm×7 cm 长方体(即喷嘴上方包含整个

燃烧室火焰的区域)。3D-CTC 是利用 CCD 获得的成像强度值来反推目标区域的三维发光强度值,这涉及到层析算法的秩亏问题,需要将 8 个视角尽量分散开,因此在多视角成像布局时将旋流火焰的 4 个观察窗口前各摆放 2 个镜头,而每个窗口前的 2 个镜头俯仰状态尽量拉开差距。

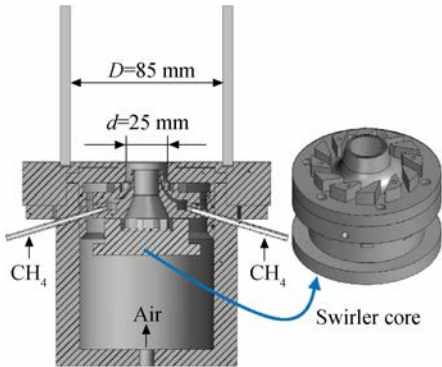


图 2 旋流燃烧器示意图及 3D-CTC 系统图(单位:mm)
Fig. 2 Model combustor and the 3D-CTC setup (unit:mm)

表 1 旋流火焰的四个流量工况
Table 1 Four flow rates of swirling flame

工况	Air		CH ₄		当量比	雷诺数
	体积流量/(L/min)	质量流量/(g/min)	体积流量/(L/min)	质量流量/(g/min)		
A	79	102.3	5.4	3.86	0.65	5 036
B	160	207.1	11.1	7.93	0.66	10 202
C	253	327.5	16.6	11.9	0.62	16 100
D	379	490.3	25.3	18.0	0.63	24 133

2 三维重建结果及分析

2.1 多视角成像系统标定

为确定物体目标与成像坐标之间的关系,采用了引文[17]中的标定方法。将毛玻璃放于三维位移台上,借助激光器的在毛玻璃的漫反射作为空间点光源,同时确定多视角下,空间点与像位置的坐标关系。

目标空间坐标系(x, y, z)与像坐标系($x'',$

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \epsilon & \sin \epsilon & 0 \\ -\sin \epsilon & \cos \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos \phi \\ 1 & -\sin \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

由表 2 中的标定系数可见,每两个视角的旋转角相近,而俯仰角则正负交替。每个视角的镜头与目标区域中心点的垂直距离在 14 cm 至 17 cm 之间,偏移距离(T_x, T_z)则较小。

y'', z'')的对应关系可以通过三维坐标系的旋转平移得到,坐标系的旋转主要对应于三个欧拉角,这里定义为旋转角度(ϵ)、俯仰角(ϕ)、自旋角(θ),坐标系的平移可以又平移向量参数(T_x, T_y, T_z)表示。其中坐标系的变换关系可以由下列公式(2)表示,其中向量 T_y 又定义为物距,表示对是镜头平面与目标中心的垂直距离。该坐标变换的详述部分可参考文献[16-17]。

图 3 为 B 工况下,单次拍摄同时获得的 8 视角成像。CCD 曝光时间为 60 ms,得到的是火焰在该时间段内的积分亮度分布,是一种平均三维分布信息。将 A、B、C 工况下的各自 8 个视角二

维光强分布作为输入值,结合表 2 中的标定物象 的三维重建火焰结果。
关系参数,采用 ART 迭代算法得到如图 4~图 6

表 2 多视角成像系统标定结果
Table 2 Calibration results of multi-directional system

视角编号	旋转/(°)	俯仰/(°)	自旋/(°)	物距/mm	x 偏移量/mm	z 偏移量/mm
1	178.18	-9.20	-10.36	162.18	-6.07	-5.69
2	176.04	24.58	41.62	169.53	-20.89	-10.82
3	98.58	12.83	-44.05	135.84	2.84	9.81
4	93.14	-5.97	81.04	151.66	0.58	8.11
5	82.66	14.04	-84.16	156.43	6.97	-3.87
6	353.35	-5.89	30.28	152.89	-7.52	5.24
7	8.05	25.24	-22.01	159.35	-1.57	-12.95
8	87.12	-8.32	-37.20	149.54	5.57	3.72

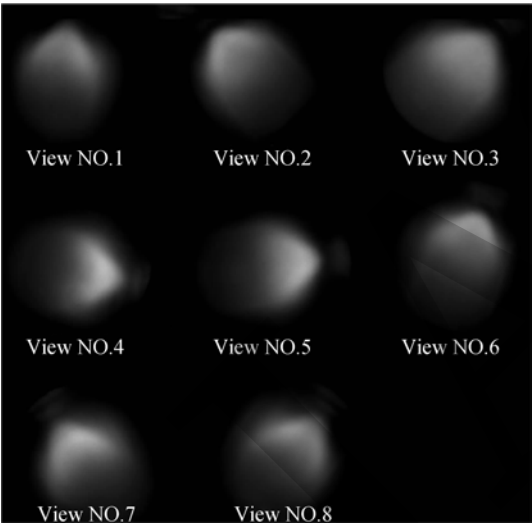


图 3 旋流火焰的多视角瞬时投影
Fig. 3 Simultaneous multi-directional projections of the swirling flame

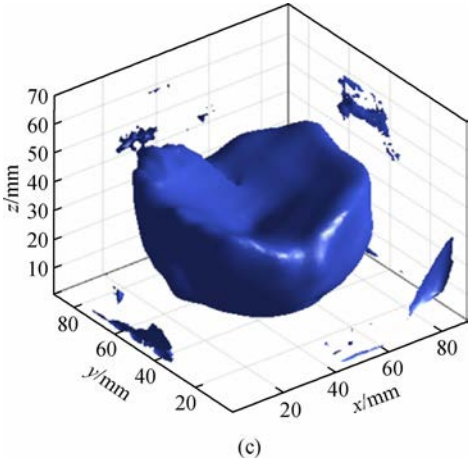
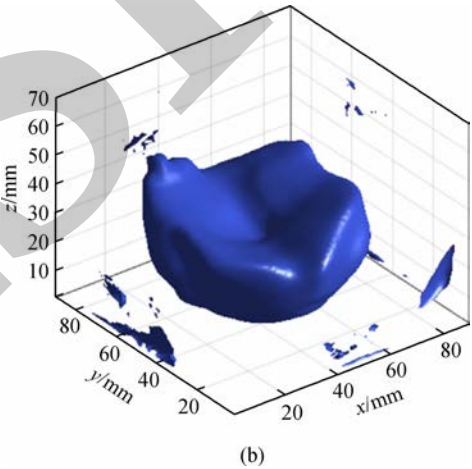
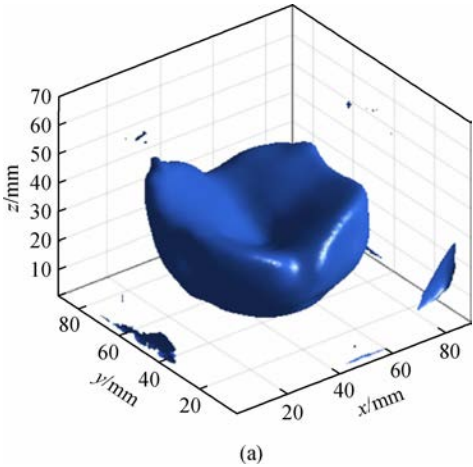


图 4 A、B、C 工况的火焰三维轮廓重建结果
Fig. 4 3D profile of flames for A, B and C operating conditions

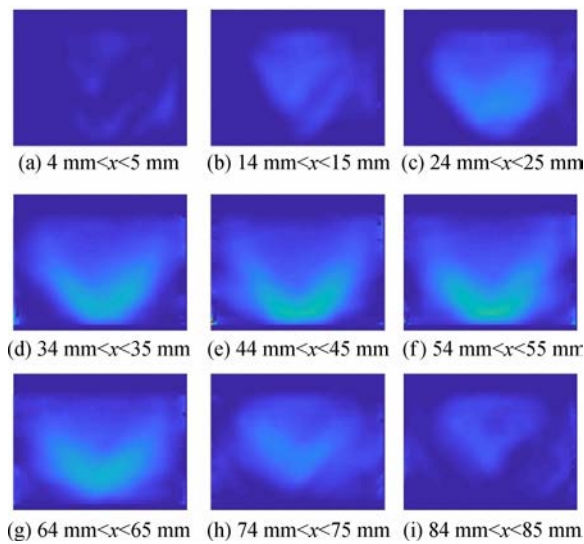


图 5 工况 B 火焰的重建结果内部切片展示
Fig. 5 Cross-sections of flame for B operating condition

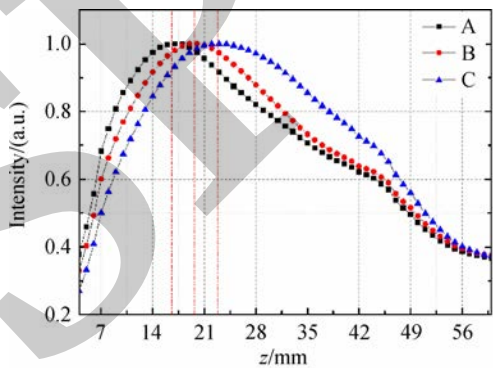
2.2 三维重建结果

A、B、C 工况中的 3 个雷诺数下重建得到的火焰三维轮廓如图 4 所示;3 种工况下,轮廓形状与大小区别不大,主要的放热区(发光区)在 $z < 40\text{ mm}$ 的空间区域。

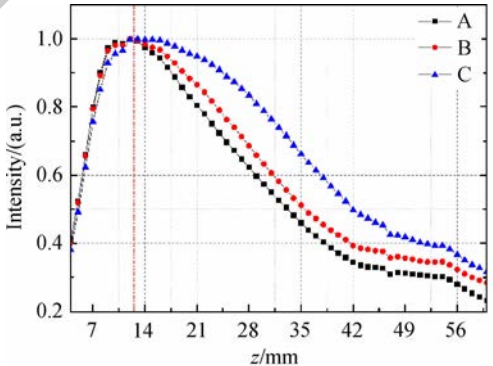
除轮廓外,3D-CTC 的主要优势在于可以获得放热率的内部空间分布情况。图 5 是工况 B 的重建结果的内部切片,通过沿 x 轴不同位置的光强分布可以看出,主要放热区是在内部回流区外侧的 V 型结构中。其他区域也有一定亮度(放热),但强度远小于该 V 字形区域,该形状正是由涡核旋进在时间上的积分产生的。

为便于量化对比分析 3 种工况下的旋流火焰的放热规律,将水平方向与竖直方向强度变化进行了对比。如图 6 所示,图 6(a)和图 6(b)分别对比了沿火焰喷嘴(图 4 中的 z 轴)方向的强度分布。图 6(a)是自下而上的每一层(x - y 平面)分布的叠加,能够反应旋流火焰放热的流向整体分布特性。由图可见,3 个工况的火焰表现出了明显的区别,工况 A、B、C 下火焰沿 z 轴方向最大放热位移依次出现在 17、20、23 mm 三个位置处,这说明了随着甲烷和空气量的增多最大的放热高度表现出了明显的后移趋势,即火焰长“高”了。图 6(b)是过喷嘴中心的切面($y = 45\text{ mm}$ 平面)上的每一线(x 线)的分布强度沿 z 轴方向上的变化规律,该切面的最大放热分布在 12 mm 高度附近,也随流量出现后移,但不如图 6(a)明显。当高度超过最大放热区后,放热减小的趋势则随着流量的增大而放缓。

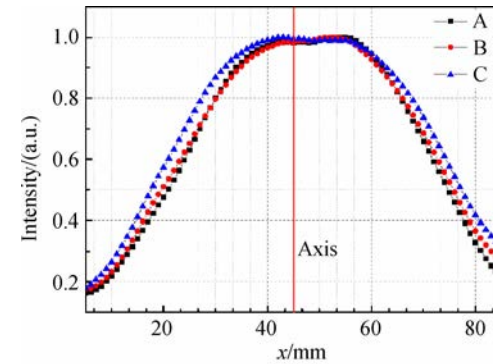
图 6(c)和图 6(d)分别对比了垂直于火焰喷嘴方向(沿 x 轴)的强度分布,图 6(c)表示的是侧面每一层(y - z 平面)的强度叠加,从整体上看,流量大的工况下,放热率的径向分布要比流量小的工况下稍宽,即,火焰变“胖”了。但对比图 6(a)可知,燃料、氧化剂在流动中的剧烈剪切掺混,使得放热率沿着径向要比沿流向的变化梯度更大。图 6(d)是轴向高度为 12 mm 处的侧面分布情况,能够反映最强放热区,从图中可以看出放热主要集中在喷嘴轴线左右 30 mm 范围内,且 3 种火焰的主要放热区并没有明显的不同,只是在边缘处放热率随着流量的增大而增大。因此,流量对放热区的径向尺寸影响较小,主要影响放热量的绝对强度和其流向分布特征。



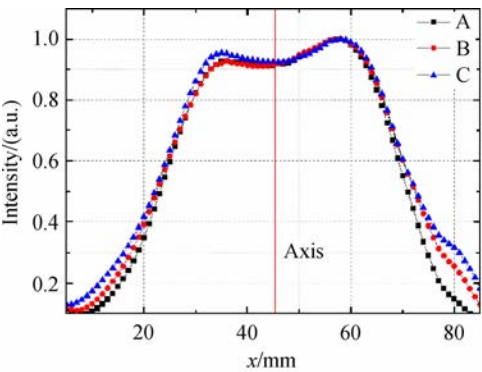
(a) 归一化的(x - y 平面)的总放热强度随高度 z 的变化



(b) $y = 45\text{ mm}$ 平面上的(x 线)总放热强度随高度 z 的变化



(c) 每一层(y - z 平面)的总放热强度随横向 x 的变化,喷嘴轴线位于45 mm处



(d) 12 mm高度切平面的放热强度随横向x的变化
(z=20 mm)

图 6 流量对放热区形状变化的影响
Fig. 6 Effect of the flow rate conditions on the shape transition of heat release

2.3 三维重建与二维结果对比

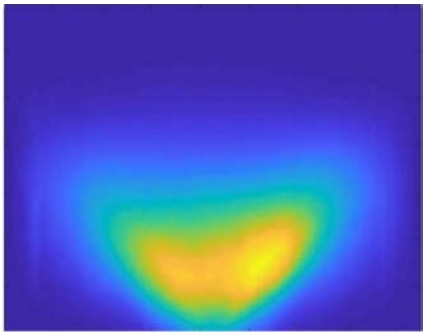
由于没有其他三维测试技术互相对比,评估 3D-CTC 重建结果普遍采用数值方法。通过虚构一个标准分布,利用计算出的多视角下二维成像(作为实验结果处理),重建三维目标并与虚构的标准分布相对比。然而,由于实验中的数据噪声的存在,该方法仅适于重建程序的准确性评估,无法验证实验结果精度。因此,实验结果的准确评价大都采用将三维结果在某视角二维化后,直接与二维拍摄结果对比^[15,17]。

为了验证三维结果的准确度,对重建的分布进行沿 x 轴叠加获得其 $y-z$ 平面的二维可视化(与表 2 中各视角均不同),并与同工况(工况 B)下的二维高速摄影平均结果对比,如图 7 所示。

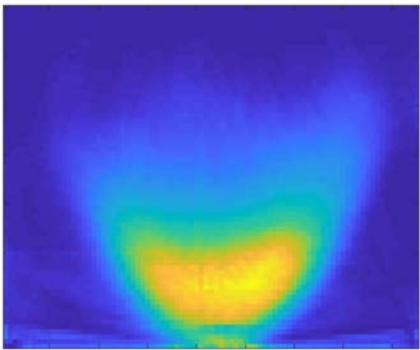
可以看出,两者在形态和尺寸上十分接近。为量化相似度,将两者的分布强度分别无量纲化,并二维插值为同样像素数,然后定义误差函数如下:

$$E_{\text{error}} = \frac{\sum |p_{\text{measurement},yz} - p_{\text{compute},yz}|}{N_{\text{pixel}}} \quad (3)$$

其中 $P_{\text{measurement},yz}$ 代表二维拍摄得到的 yz 坐标处



(a) 二维高速摄影的时均结果



(b) 三维重建的二维可视化结果

图 7 B 工况下 3D-CTC 重建结果的二维可视化与拍摄对比
Fig. 7 Comparison of the results between 3D-CTC and 2D photograph for for B operating condition

的时均结果, $P_{\text{compute},yz}$ 代表 3D-CTC 结果 yz 坐标处的二维可视化结果, N_{pixel} 为像素数目,最终得到两者平均每个像素有 4.51% 的差别,说明三维重建结果与二维高速摄影结果的一致性。

3 二维动态火焰分析

前面通过 3D-CTC 方法得到的是放热率在长时间下所展现出的三维分布形态,能够直观的获得燃烧器在长时间工作时主要产热区。而对于旋流火焰的高速动态变化是通过对 CH^* 的侧面二维高速摄影(5 kHz, 曝光时间 0.2 ms)获得。为探究更大雷诺数范围内放热率动态变化的规律,采用工况 D 流量状态代替 A 工况进行对比分析,这样雷诺数变化从 10 202 到 24 133,而 B、C、D 三种工况的放热率振荡差别表现出明显的不同。

首先是进动涡环的变化研究,通过高速摄影得到的 CH^* 发光分布变化能够发现信号在喷口的上方围绕着喷嘴环形运动的周期性规律,为了便于表述这种运动周期,将得到的二维发光信号进行按强度进行伪彩色处理。如图 8 所示,为 D 工况下旋流火焰短时间段的动态发展过程,选取火焰右侧出现明显集中亮度的时刻为零时刻,之后右侧亮度会逐渐变暗,依次在左半侧出现亮区域,当右侧再次变亮时,旋进涡核恰好围绕喷嘴经历了 1 个周期,大约历时 3.0 ms,对应于图 8 中的第 3 幅图。此外通过图 8 的高频二维发光信号与图 5 三维重建得到的切片分布对比可以发现,高速运动的放热核心在由三维重建所确立的主要放热区内循环往复。

关于放热率的周期性振荡,参考文献[19]的

做法,通过总放热率强度的峰值出现频率表示,对拍摄到的 CH^{*} 发光进行强度的求和,并将 20 ms 时间段内的强度进行归一化处理,得到如图 9 所示的 B、C、D 工况下放热率的变化周期变化。从图中可以看出,尽管每个工况下的火焰放热强度峰值并不相同,但是峰值间的时间间隔比较稳定,且随着流量而改变,其中 B、C、D 工况的时间峰值间隔分别为 4.32、3.77、3.15 ms,与之对应的放热率振荡频率分别是 231.48、265.25、317.46 Hz,有理由认为在实验工况内,热声振荡频率随着雷诺数的增大逐渐增加。

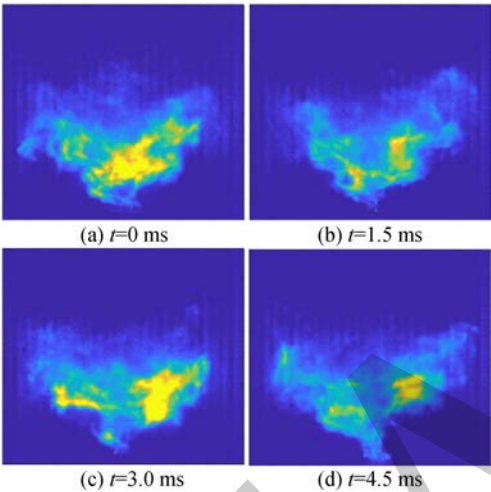


图 8 工况 D 火焰的放热区随特征时间的变化展示
Fig. 8 Typical time sequence of the integrated heat release rate for D operating condition

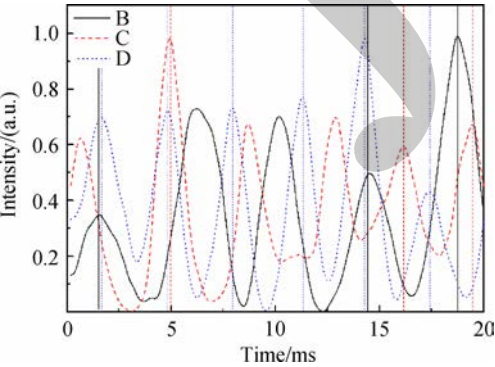


图 9 B、C、D 工况的放热率强度随时间变化
Fig. 9 Temporal history of the heat release rate for B, C, D operating condition

4 结 论

将大视场角 3D-CTC 重建方法应用到旋流火焰放热率三维分布诊断,并对不同雷诺数工况下

的放热率进行了对比。该 3D-CTC 方法了基于大视场角的成像模型,利用光纤传像束-相机系统,同时得到旋流火焰在 8 个角度下近距离拍摄的 CH^{*} 投影值,对其三维重建其并标识放热率的三维分布。通过对比旋流火焰在不同雷诺数下的放热率三维外形、沿旋流火焰的轴向、径向分布的异同,分析放热率随雷诺数的三维变化规律。结果显示,在实验工况范围内,雷诺数对放热率的空间分布特征影响不大;放热率的峰值随着流量的增大有明显的上移现象,火焰流向尺寸随流量增加,而径向尺寸则较不敏感。结合 CH^{*} 自发光的 5 kHz 二维高速摄影方法,分析了放热率的周期性振荡规律,结果表明在实验工况下,雷诺数增大的同时放热率的振荡频率也随变大。

参考文献:

[1] WEIGAND P, MEIER W, DUAN X R, et al. Investigations of swirl flames in a gas turbine model combustor: I flow field, structures, temperature, and species distributions[J]. Combustion and Flame, 2006, 144 (1/2): 205-224.

[2] SEE Y C, IHME M. Large eddy simulation of a partially-premixed gas turbine model combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(2): 1225-1234.

[3] 黄群星,余渡江,蔡旭,等. 旋流火焰温度及烟黑颗粒浓度分布的联合重建研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (20): 80-87.

HUANG Qunxing, YU Dujiang, CAI Xu, et al. Temperature and soot volume fraction distributions reconstruction for swirling flame[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33 (20): 80-87. (in Chinese)

[4] STOPPER U, AIGNER M, MEIER W, et al. Flow field and combustion characterization of premixed gas turbine flames by planar laser techniques[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 131(2): 021504. 1-021504. 8.

[5] VOIGT T, HABISREUTHER P, ZARZALIS N. Simulation of vorticity driven flame instability using a flame surface density approach including markstein number effects [R]. ASME Paper GT2009-59331, 2009.

[6] STÖHR M, SADANANDAN R, MEIER W. Phase-resolved characterization of vortex-flame interaction in a turbulent swirl flame[J]. Experiments in Fluids, 2011, 51(4): 1153-1167.

[7] PALIES P, DUROX D, SCHULLER T, et al. The combined dynamics of swirler and turbulent premixed swirling flames[J]. Combustion and Flame, 2010, 157 (9): 1698-1717.

[8] LEE H J, KIM K T, LEE J G, et al. An experimental study on the coupling of combustion instability mechanisms in a

lean premixed gas turbine combustor[R]. ASME Paper GT2009-60009,2009.

[9] 钟迪,朱民,李启明,等. 燃气轮机燃烧室内热声反问题求解方法研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(1):195-203.

ZHONG Di,ZHU Min,LI Qiming,et al. Study of solving method on the inverse thermo-acoustic problem in the combustion chamber of gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(1):195-203. (in Chinese)

[10] BOXX I,STÖHR M,CARTER C,et al. Temporally resolved planar measurements of transient phenomena in a partially pre-mixed swirl flame in a gas turbine model combustor[J]. Combustion and Flame,2010,157(8):1510-1525.

[11] RENAUD A,DUCRUIX S,SCOUFLAIRE P,et al. Flame shape transition in a swirl stabilised liquid fueled burner [J]. Proceedings of the Combustion Institute,2015,35(3):3365-3372.

[12] FLOYD J,KEMPF A M. Computed tomography of chemiluminescence (CTC):high resolution and instantaneous 3-D measurements of a Matrix burner[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2011,33(1):751-758.

[13] KANG M W,WU Y,MA L. Fiber-based endoscopes for 3D combustion measurements; view registration and spatial resolution[J]. Combustion and Flame,2014,161(12):3063-3072.

[14] CAI Weiwei,LI Xuesong,LI Fei,et al. Numerical and experimental validation of a three-dimensional combustion diagnostic based on tomographic chemiluminescence[J]. Optics Express,2013,21(6):7050-7064.

[15] CAI Weiwei,LI Xuesong,MA Llin. Practical aspects of implementing three-dimensional tomography inversion for volumetric flame imaging [J]. Applied Optics,2013,52(33):8106-8116.

[16] WANG Jia,SONG Yang,LI Zhenhua,et al. Multi-directional 3D flame chemiluminescence tomography based on lens imaging[J]. Optics Letters,2015,40(7):1231-1234.

[17] WANG Kuanliang,LI Fei,ZENG Hui,et al. Three-dimensional flame measurements with large field angle[J]. Optics Express,2017,25(18):21008-21018.

[18] MOHRI K,GÖRS S,SCHÖLER J,et al. Instantaneous 3D imaging of highly turbulent flames using computed tomography of chemiluminescence[J]. Applied Optics,2017,56(26):7385-7395.

[19] STEINBERG A M,BOXX I,STÖHR M,et al. Flow-flame interactions causing acoustically coupled heat release fluctuations in a thermo-acoustically unstable gas turbine model combustor[J]. Combustion and Flame,2010,157(12):2250-2266.

(编辑:李岩梅)