

基于层析原理的湍流火焰三维测量综述

宋尔壮, 雷庆春*, 范 玮

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129)

摘要: 实现对湍流火焰的三维测量是人们长期追求的目标之一。近十年, 随着高速相机、激光、数值算法的高速发展, 高时空分辨的三维燃烧诊断成为可能。对基于层析原理的三维燃烧诊断技术的发展与应用现状进行综述: 首先介绍层析技术的原理以及相关算法的发展情况; 其次对实现三维层析燃烧诊断的测量系统进行综述; 再次, 按照光学信号的分类, 分别介绍层析技术结合发射光谱、激光诱导荧光、阴影/纹影、Mie 散射等进行三维燃烧测量的应用情况; 最后, 从实际应用的角度出发, 对层析三维燃烧诊断技术的发展提出展望。

关键词: 湍流燃烧; 三维测量; 层析技术

中图分类号: O643.2 文献标识码: A

A review on three-dimensional flame measurements based on tomography

SONG Erzhuang, LEI Qingchun*, FAN Wei

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Three-dimensional (3D) measurements for turbulent flame have been long desired in the combustion community. In the past decades, with the advancement in high-speed cameras, high-power lasers and computing algorithms, it becomes possible to achieve 3D combustion measurements with sufficient spatial and temporal resolution. This paper reviews the recent development and applications of such a 3D measurement technology based on tomography, so as to provide valuable references to researchers in this field. This review includes the following four parts: First, the principles and computing algorithms of tomography are introduced and reviewed. Second, the experimental measurement systems involved in the 3D tomographic measurements are classified and summarized. Third, the applications of 3D tomographic measurements are introduced including the tomographic chemiluminescence, tomographic laser-induced fluorescence and tomographic shadowgraph/schlieren. Last, we concludes the review and poses several questions for the potential development of the technique.

Keywords: turbulent combustion; 3D measurements; tomography

0 引言

湍流火焰是能源动力系统中非常普遍的现象, 认识湍流火焰的本质, 将有助于研发新型的动力装置、提升现有设备的燃烧效率及降低污染物排放。然而, 认识湍流火焰的本质是比较困难的, 这是由于湍流火焰涉及到化学反应与复杂流动在跨越不同时间与空间尺度的耦合与相互作用, 表现为湍流火焰在时间尺度瞬息万变, 在空间尺度具有复杂的三维特征。因此, 实现对湍流火焰的三维动态测量成为人们长期追求的目标^[1-2]。

近几年, 随着高速相机、激光、数值算法的飞跃发展, 具有时空分辨能力的三维燃烧诊断已经成为可能。目前, 三维湍流火焰测量技术大致可以分为两类: 第一类基于片激光扫描技术, 第二类基于层析技术。需要说明的是, 尽管全息技术与光场成像技术也可以实现火焰的三维测量且在特定的条件下具有明显的技术优势, 但这两种技术均受限于特定的场景, 比如全息技术依赖于燃烧过程中存在较大的颗粒物, 而光场成像技术适用于湍流度不太高的燃烧场景, 因此, 本文对这两种技术不作介绍, 感兴趣的读者可以参考文献[3-4]。

收稿日期: 2019-10-18; 修訂日期: 2019-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(91741108)

* 通信作者 E-mail: lqc@nwpu.edu.cn

引用格式: SONG E Z, LEI Q C, FAN W. A review on three-dimensional flame measurements based on tomography[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2020, 34(1): 1-11. 宋尔壮, 雷庆春, 范 玮. 基于层析原理的湍流火焰三维测量综述[J]. 实验流体力学, 2020, 34(1): 1-11.

片激光扫描技术,顾名思义,是先用一束片激光穿过燃烧场获得相关信号,再通过一个快速的扫描镜,将片激光扫描掠过不同的燃烧场位置,同时,高速相机记录下不同位置的二维火焰图像,将这些二维图像以扫描顺序堆叠到一起,就获得了火焰的三维结构。片激光扫描技术的开发,引起了科研人员的极大兴趣,《Science》杂志首先报道了片激光扫描技术在三维火焰结构动态测量的结果^[2]。随后,利用片激光技术进行三维火焰测量的报道如雨后春笋般涌现。该技术的优势在于可以通过灵活调节激光的波长来获得不同信号、不同燃烧特性的测量,典型的例子包括扫描法结合平面激光诱导荧光信号(Planar Laser-Induced Fluorescence, PLIF)获得燃烧中间产物自由基的三维测量^[5],结合平面米氏散射信号(Planar Mie Scattering)^[6]获得喷雾粒子或示踪粒子的三维测量,以及结合平面激光诱导白炽光信号(Planar Laser-Induced Incandescence, PLII)^[7]获得碳烟浓度的三维测量。然而片激光扫描技术的主要问题有:(1)时间和空间分辨率受到扫描频率的制约,目前报道的最快扫描频率在1kHz左右,最高的空间分辨率在毫米量级(主要受制于扫描步长),扫描频率制约了该技术在更高湍流度火焰测量中的应用;(2)该技术对测量系统要求较高,比如需要较大的光路通道,而且需要使用高频的激光器使得测量系统成本昂贵。

层析技术的原理是利用多个视角从不同角度同时记录火焰的二维信息,这些二维信息是沿着光程的路径积分信息,意味着可以采用重建算法来反演火焰的三维信息。与片激光扫描技术类似,层析技术也可以结合不同的光学信号来对不同的燃烧特性参数进行测量。比如,层析技术与LIF信号结合,实现立体激光诱导荧光(Volumetric LIF, VLIF)对各种燃烧中间产物(如OH、CH₂O、CH)的成像来获取火焰锋面结构、温度分布等信息^[8-11];层析技术与化学自发光结合,实现对火焰面结构、热释放率分布的三维测量^[12-15];层析技术与纹影/阴影相结合,实现对三维密度场的测量等^[16-17]。相对于片激光扫描技术,层析技术由于不会受到扫描频率的制约,理论上可以实现更高时空分辨率的湍流火焰三维测量,而其技术本身不受火焰发光机制的限制,可以广泛应用于不同的燃烧场景中去,有着较好的发展前景。

本文旨在对现阶段层析技术在三维湍流火焰测量中的发展与应用情况进行综述。将从以下4个方面展开:首先介绍层析技术的原理以及相关算法的发展情况;其次对实现三维层析燃烧诊断的测量系统进

行综述;再次,按照光学信号的分类,分别介绍层析技术结合发射光谱、激光诱导荧光、阴影/纹影、Mie散射等进行三维燃烧测量的应用情况;最后,从实际应用的角度出发,对层析三维燃烧诊断技术的发展提出展望。

1 层析原理与算法

1.1 概述

计算机层析成像技术于20世纪30年代提出,最早应用于医学成像领域^[18],是由低维投影数据反演高维目标的一项技术,对医学诊断的进步起了极大的促进作用。由于在解析多维空间尺度方面表现出的强大能力,层析技术逐渐被应用于多个领域,包括在20世纪80年代,该技术开始应用于燃烧过程的光学诊断,使高时空分辨的湍流燃烧三维测量成为可能。在层析三维燃烧测量过程中,首先,分布于不同角度的相机记录下火焰的二维投影图像,随后,这些图像经重建算法处理来反演火焰的三维分布。下面分别介绍层析问题的数学描述以及常见的重建算法。

1.2 层析问题数学描述

为了简化叙述,这里以一个简单二维矩阵为例来描述层析重建技术的原理。假设图1中的二维矩阵代表未知的、离散后的火焰分布, $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{33}$ 为火焰内部各个离散区域的信号强度值,即所要求解的未知数。相机从任意不同角度记录该矩阵沿该光线方向的积分投影(Line-of-sight projection),相机接收到的信号强度用 b_1, b_2, b_3, b_4 表示。假设火焰产生的信号沿直线传播并被相机接收,而且每一个相机像素接收到一束光线,那么,该像素的值即等于这束光线穿过火焰区域所有信号强度的和,于是有:

$$\begin{cases} x_{11} = b_1 \\ x_{12} + x_{13} + x_{21} = b_2 \\ x_{22} + x_{23} + x_{31} = b_3 \\ x_{32} + x_{33} = b_4 \end{cases} \quad (1)$$

上述方程组也可以写成以下形式:

$$\mathbf{A}_n \mathbf{x} = \mathbf{b}_n \quad (2)$$

式中, n 代表第 n 个投影角度, \mathbf{A}_n 是该投影角度下的系数矩阵,与该投影相对于原矩阵的角度相关。如图1中的例子,该系数矩阵的规模为 4×9 ,其元素分布为:

$$\mathbf{A}_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

同样的,其他每个投影角度都将获得类似式(2)的方程组,将所有投影的方程组联合起来就构成了该层析问题的总方程组:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (3)$$

式中, \mathbf{A} 包含了所有投影角度的系数矩阵, \mathbf{b} 包含了所有相机的像素单元。

因此,求解层析问题的本质即:已知多角度相机测量得到的 \mathbf{b} ,通过相机的方位角构建系数矩阵 \mathbf{A} ,求 \mathbf{x} ,一个经典的矩阵反问题。然而,在工程实践中求解层析问题的主要挑战在于:(1)矩阵规模巨大。举一个层析火焰重建的例子,假设测试中用了 9 个投影角度,每个角度的像素数量为 512×512 ,那么式(3)中 \mathbf{b} 的长度为 $9 \times 512 \times 512 \approx 2 \times 10^6$,如果火焰 \mathbf{x} 被离散为 $128 \times 128 \times 128$ 的像素单元,那么 \mathbf{x} 的长度也大约为 2×10^6 ,这样,系数矩阵 \mathbf{A} 的规模是 $9 \times 512 \times 512 \times 128 \times 128 \approx 5 \times 10^{12}$,这对算法的高效性提出了严峻的挑战;(2)实际问题不是一个简单的线性问题。式(3)是一个线性方程组,而实际问题可能并不是一个线性问题,例如,光信号在传播的过程中极有可能会被沿光程方向存在的燃烧产物组分吸收或散射,导致系数矩阵 \mathbf{A} 本身成为所求未知数 \mathbf{x} 的非线性函数,在这种情况下,整个式(3)变成非线性方程组。

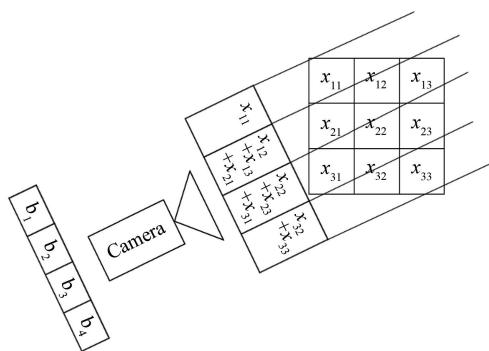


图 1 层析问题数学描述

Fig.1 Mathematical description of tomography problem

1.3 重建算法

让我们先暂时忽略上述挑战,回顾一下目前存在哪些求解上述层析问题的算法?简单归类,目前的层析算法可以分为两个大类。第一类是基于傅里叶中心切片定理(Fourier central slice theorem)的解析求解方法。该定理表明任意函数 $f(x, y)$ 在某一方向上投影的一维傅里叶变换函数等于原函数 $f(x, y)$ 的二维傅里叶变换沿同一方向过中心点直线上的值。简言之,该定理将投影结果和原函数的中心切片通过傅里叶变换建立联系,这样,就可以利用正逆傅里叶变换来重建原图像。由此定理发展出的反投影算法

具有非常广泛的应用,常见的有滤波反投影(Filtered back projection)^[19-20]、卷积反投影(Convolution back projection)^[21-22] 算法。这类算法的好处在于,它们是基于解析求解的思想,可以非常快速地进行大型矩阵反运算,然而,这类算法的问题在于它们需要大量的角度投影(上百个)才能得到精确的解析解,这个要求对于燃烧系统的应用是致命的,由于火焰是剧烈脉动的,几乎没有可能在火焰周围布置一套测量系统来实现在极短的时间内从成百个角度对火焰进行成像。关于火焰层析测量系统,下节还会作详细的介绍。

为解决解析方法的缺陷,第二类算法基于数值迭代的思想,利用少数几个角度的投影即可获得较好的重建效果。在这类算法里,广泛应用于大规模层析问题是代数重建法(Algebraic Reconstruction Technique, ART),以及在其基础上发展的联合代数重建法(Simultaneous ART, SART)和乘型代数重建法(Multiplicative ART, MART)等。ART 算法是 Gordon, Bender 和 Herman^[23] 于 1970 年提出的。ART 算法的思想非常容易理解:先任意猜测一个未知数分布 \mathbf{x}_0 ,代入式(3)以算出此时各个角度的投影 \mathbf{b}_0 (称为计算投影),显然,此时的 \mathbf{b}_0 和真实测量的 \mathbf{b}_{real} 是存在差异的,利用它们之间的差异可以修正未知数的分布,通过不断重复上述过程来得到最终的解。该算法的核心在于如何利用计算投影与真实投影的差异去修正未知数的分布,比如 ART 算法进行修正的方法是:

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \lambda_k \frac{\mathbf{b}_i - \langle \mathbf{a}_i, \mathbf{x}^k \rangle}{\| \mathbf{a}_i \|^2} \mathbf{a}_i^T \quad (4)$$

式中, k 是迭代次数, \mathbf{a}_i 是 \mathbf{A} 矩阵中的第 i 个元素, \mathbf{b}_i 是真实投影 \mathbf{b} 矩阵中的第 i 个像素, λ_k 是松弛因子。等式右边第一项是第 k 步的迭代结果,第二项是将第 k 步的计算投影与真实投影的差值分配到该像素上的结果。可见,ART 算法是把计算投影与真实投影的差值平均分配给该像素所在光线方向的所有未知元素上。然而这种修正方法会带来一个问题,即在投影角度较少时,重建结果会沿投影的光线方向产生大量噪声。MART 算法可以避免该问题,其进行修正的方法是:

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k \left(\frac{\mathbf{b}_i}{\langle \mathbf{a}_i, \mathbf{x}^k \rangle} \right)^{\lambda_k a_i} \quad (5)$$

可见,MART 算法是通过真实投影与计算投影之间的比值来修正未知数,式(5)括号里的部分代表了真实投影与第 k 步的计算投影的比值,经过松弛因子调整后,修正第 $k+1$ 步的结果。相对于 ART

算法,这样的修正只在非负值的元素上进行,可以避免沿光线的噪点出现。总体而言,代数重建法的优点在于,比起下文即将介绍的其他迭代方法,它们非常高效,可以节省几十倍的运算时间,但缺点也是显而易见的,即只能处理线性问题,对上面描述的非线性问题则无能无力。

处理非线性层析问题,可以将层析问题考虑为一个最小化问题,这样可以借鉴求解最小化问题的迭代算法来处理非线性层析问题。传统的一类算法是基于代价函数(例如 $f(x) = Ax - b$)的梯度下降原则,常见的有共轭梯度法(Conjugate gradient)^[24-27]、高斯牛顿法(Gauss-Newton technique)^[28]、Newton-Kantorovich 法^[29-30]等,然而,实际层析问题的复杂性使得其往往存在多个局部最优解,但梯度下降原则仅仅可以保证收敛到其中一个局部最优解。一些改进的迭代算法诸如模拟退火法(Simulating annealing)^[31-33]、遗传算法(Genetic algorithm)^[34]等可以克服局部解,从而收敛到全局最优解或者一个足够近似的全局最优解^[35],然而在实际应用中,这些算法将耗费惊人的计算资源。本文作者曾尝试拓展代数重建算法的能力,开发了非线性迭代重建算法(Nonlinear Iterative Reconstruction Technique, NIRT)^[36],使其在能够求解非线性层析问题的基础上,保留代数重建法的高效性。该算法在存在严重光信号吸收的喷雾场进行了验证,结果表明,该算法可以克服非线性吸收问题,重建喷雾颗粒的三维浓度分布,对比模拟退火法计算效率提高了 30 倍。

2 层析测量系统

上节介绍了层析的原理及算法,本节将主要介绍实现层析测量的实验系统与装置。根据上文可知,实现层析技术的一个重要环节在于从尽可能多的空间角度获得火焰的二维投影。为实现这一目的,研究者开发了多种适用于火焰层析测量的实验系统。

早期的层析实验系统利用单台相机,安装在一个环形轨道或机械臂上,可以绕火焰进行旋转。这样,相机每旋转一定的角度便可记录该角度下的火焰图像^[12, 37-40],该方法典型的实验系统如图 2 所示。由图可见,该实验系统的特点为成本低(单相机)、布置简单、可以获得较多的火焰图像。但是,相信已经有读者开始怀疑,在相机旋转的过程中,火焰也发生了变化。这正是该实验系统最大的缺陷:它仅适用于比较稳定的层流火焰场景。然而,对于一些特殊的湍流火焰场景,该实验系统表现出了非常好的适应性甚至

优势,例如,具有明显周期性旋转运动的旋流火焰燃烧器,由于存在固定的旋转频率,火焰在特定的角度范围内,其时均结构或分布是一定的。因此,在不同的角度测量火焰的时均信号,再进行三维重建,可以获得旋流火焰关键参数在燃烧器内的空间分布特性。图 3 展示了利用上述思想进行旋流火焰三维热释放率振荡的测量结果,图中红色和蓝色分别代表热释放率振荡为正和负的等值线,三维测量结果可以非常直观地分析旋流火焰内外剪切层位置的热释放率分布与振荡情况。该实验系统的另一优势在于,由于可以相对容易地获得比较多的角度投影,它可以实现精度非常高的三维重建,如图 3 中的三维重建,在使用 36 个角度的情况下精度可以达到 97.2 %。

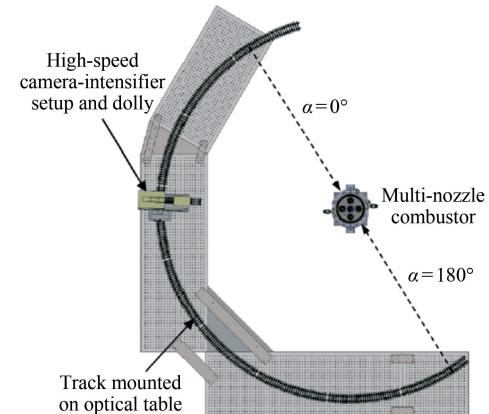


图 2 单相机旋转法实验装置示意图^[40]
Fig.2 Schematic setup of single camera rotating method^[40]

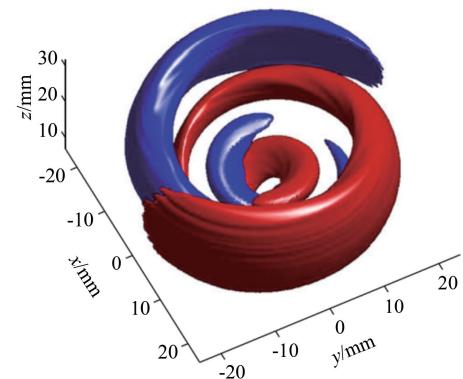


图 3 旋流火焰三维热释放率振荡分布测量结果^[39]
Fig.3 3D heat release rate perturbations in a swirl flame^[39]

尽管单相机旋转测量系统具有上述优势,但它的应用场景仍然是非常有限的,在大多数湍流火焰测量中,都需要能够解析火焰的三维瞬时特性。采用多相机测量系统不可避免。搭建多相机测量系统首先需要充足的经费购买多台相机,其次需要燃烧测试环境友好,有足够大的空间来布置多台相机。对于多相机测量系统,比较突出的例子是 Ishino^[41] 和 Mohri^[42] 及他们合作者的工作。Ishino 等自制了一套多镜头

相机组合,总镜头数量达到 40,利用该系统,实现了湍流预混火焰三维瞬时局部燃烧速率分布的测量。Mohri 等搭建了一套 24 台 CCD 相机组合的测量系统,该系统的实物图如图 4 所示。利用该系统,他们实现了对高湍流度旋流火焰(雷诺数约 15 000)的三维火焰结构瞬时测量,同时,也评估了解析复杂湍流火焰结构所需要的相机数量。可见,多相机测量系统(这里尤其指 20 台以上相机)的优势在于它可以获得更多较高的空间分辨率来解析湍流火焰的小尺度结构,但由于使用的是相对廉价的 CCD 相机,其时间重复频率是受限的,如 Mohri 等人的工作中仅获得了单帧的火焰结构三维测量结果。



图 4 多相机实验装置图^[43]

Fig.4 Experimental setup using multiple cameras^[43]

最佳的方案是同时使用多台高速相机,当然这种方案的成本是极高的。目前报道的使用高速相机数量最多的为 7 台^[44]。在高速相机数量受限的情况下,有研究者也尝试使用分光镜或光纤内窥镜与高速相机相结合来增加测量角度的数量。例如, Ruan 等^[45]通过使用 3 台高速相机和分光镜的组合实现了 6 个角度的同时测量,并重建了时间重复频率为 1 kHz 的旋流火焰结构演变。相对于分光镜,光纤内窥镜更灵活,更容易拓宽测量角度的范围,并可以适应受限、恶劣的测量环境。Ma 等^[46]使用 2 束多探头光纤内窥镜结合 2 台高速相机实现了 20 kHz 重复频率下从 8 个角度对超声速燃烧室的测量,并成功重建了超声速燃烧室中火核的形成与发展过程。Liu 等^[47]仅用 1 束多探头光纤内窥镜结合 1 台高速相机实现了 9 个角度的测量。光纤内窥镜可以同时解决高成本、系统复杂性、光路受限性的问题,极大地促进了层析技术在实际燃烧室测量中的应用。图 5 是本课题组利用光纤内窥镜对超燃冲压燃烧室进行三维测量搭建的实验系统,由图可见,2 台高速相机结合 2 束光纤内窥镜(每束有 4 个光纤探头)实现了 8 个角度对燃烧室的同时测量。然而,使用光纤内窥镜进行层析测量需要注意以下问题:首先,光纤束会造成极大的光信号损失,尤其在时间重复频率高于 10 kHz 时,光纤束造成的光信号损失会非常严重,需要认真评估测量图像

的信噪比;其次,光纤束的使用虽然增加了测量角度,但比起多相机系统,其能提供的有效像素大大降低了,这也会对最终的重建质量产生影响。

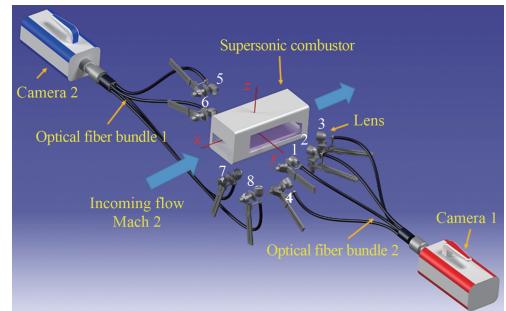


图 5 利用光纤内窥镜对超燃冲压燃烧室进行三维测量实验装置图

Fig.5 Experimental setup for 3D measurements in a supersonic combustor using optical fiber endoscopes

3 层析技术的应用

根据测量信号产生机制的不同,层析技术可以获得不同燃烧特性的三维测量结果。本节将通过火焰信号的分类,包括火焰自发光信号、激光诱导荧光信号、阴影/纹影信号、Mie 散射信号,对目前层析技术的燃烧三维测量应用情况进行综述。需要说明的是,层析技术的另外一大类应用是与吸收光谱信号相结合来测量燃烧场的温度、压力以及组分浓度等信息,本文不对其作过多介绍,主要基于以下两方面考虑:当前利用层析吸收光谱技术的研究工作主要集中于二维切面测量,另外,目前已经有关于层析吸收光谱技术非常详细的综述论文以及专著,感兴趣的读者可参考文献[48-50]。

3.1 层析技术结合发射光谱

火焰相对于其他流体,最大的特征是其本身可以发出信息量非常大的光谱信号,因此,在不使用外部光源情况下,仅仅通过测量其自发发射光谱信号就可以反演很多的火焰特性。火焰的这一特点,使得层析技术目前最广泛的应用,就是通过与火焰自发发射光谱信号相结合来反演相关燃烧特性。

火焰的自发发射光谱信号主要包含两部分,一部分是化学发光信号,一部分是热辐射信号。在燃烧化学反应过程中,会产生多种自由基组分,这些自由基组分处于极不稳定的状态,在其外层电子发生跃迁的过程中,会发出化学发光信号。大部分自由基分子具有独特的光谱特征,因此,对这些化学发光信号进行测量,就有可能反演出产生这些发光信号的自由基的组分分布,进而能够预测相关的火焰特性参数。化学发光信号的波长大多分布在紫外区和可见光区,常见的化学发光自由基组分及其波长分布为:OH^{*} (307.8 nm)、

CH^* (431.2 nm)、 C_2^* (516.5 nm)、 CO_2^* (350~500 nm)。对这些组分的化学发光信号进行测量,可以提取火焰结构^[45, 47, 51-54]、热释放率分布^[39]等信息。另外,对于化石燃料燃烧,其主要产物碳烟具有很高的温度,会释放出热辐射信号,该信号是宽谱信号,波长覆盖可见光和红外区,利用碳烟的热辐射信号,可以反演碳烟的体积分数和火焰的温度分布^[55]。

利用化学发光测量火焰结构,一般是通过测量特定组分的浓度分布,在此基础上来提取火焰锋面轮廓。回顾火焰结构的基础理论^[56]可知, CH^* 自由基存在于快速化学反应区(即火焰锋面区),而 OH^* 自由基存在于毗邻火焰锋面的产物区,因此, CH^* 和 OH^* 经常被用来提取火焰的锋面结构。作为典型工作之一,弗吉尼亚理工大学的 Ma 等^[51]利用 CH^* 信号对高端流度预混火焰的三维结构进行了测量,并在此基础上获得了火焰面的三维曲率分布,重建的时间重复频率为 5 kHz,空间分辨率约为 0.55 mm,他们同时提出,随着高速相机感光技术的不断提升,未来三维火焰测量的时间重复频率可以很容易达到 20 kHz,空间分辨率达到 0.25 mm。剑桥大学的 Worth 等^[13]利用 OH^* 信号测量了 2 个预混燃烧器并联后的火焰结构,并从三维结构的变化揭示出大尺度火焰-涡团的相互作用。

本课题组也利用 CH^* 和 C_2^* 化学发光信号对不同航空动力系统中的火焰三维结构进行了大量三维测量研究。图 6 是针对一个亚声速射流火焰进行三维测

量的例子,火焰由一个热伴流射流燃烧器产生,中心射流内径为 1 mm,喷注纯乙烯,喷注压力为 1.2×10^5 Pa,射流出口速度约为 170 m/s,中心射流周围是直径为 80 mm 的热伴流,由贫燃的乙烯/空气燃烧产生,当量比为 0.48。在此工况下,整个火焰的高度约为 30 cm,图 6 对应的测量区域为中心射流上方 12~18 cm 的区域。测量的时间重复频率达到 15 kHz,空间分辨率达到 0.4 mm,在该时空分辨率下,可以充分解析出这种复杂、高速火焰的动态结构演变特性及小尺度涡的结构特性。比如,图 6 中 $t=0$ ms 时刻,在视野的左下方出现了类似火核的结构,该火核不断增大并向主火焰区运动,在 $t=1.6$ ms 时刻融入主火焰区,并形成类似“火舌”的结构,该“火舌”结构在 $t=3.2$ ms 时刻完全融入主火焰。另外,在 $t=3.2$ ms 时刻,主火焰区的中部位置,火焰有明显被周围流体拉伸的情况,在流体拉伸作用下,周围空气被卷吸入主火焰区,使火焰内部形成一个涡团结构,如图 6(d)所示($t=4.8$ ms 时刻)。可见,基于化学发光的层析测量可以充分地解析高速火焰的复杂结构及其动态演变特性,为进一步研究这种火焰的不稳定性、火焰-涡团相互作用提供了有用的数据支撑。

另外,如前所述,由于 CH^* 和 OH^* 自由基是在快速反应过程中产生的,其组分的浓度可以反映当地的化学反应剧烈程度,进而反映化学反应热释放率,因此,这 2 种组分也经常被用于三维局部热释放率的测量研究中^[39]。

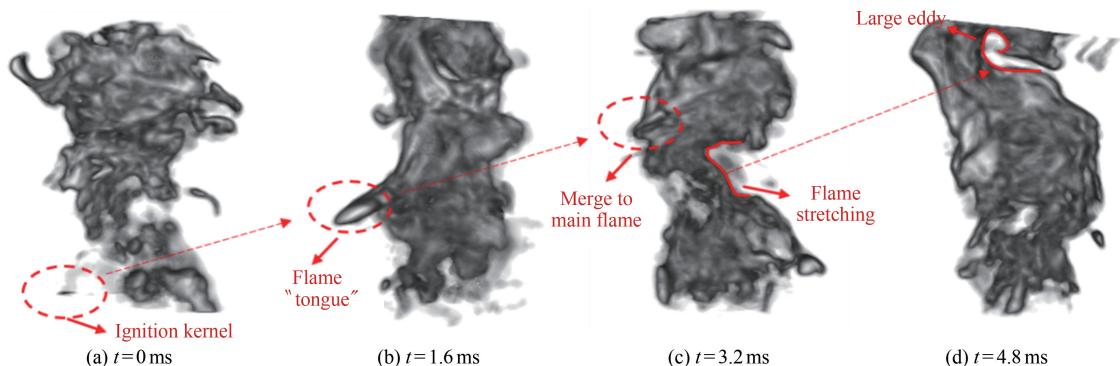


图 6 亚声速射流火焰三维结构随时间演变

Fig.6 Time evolution of 3D flame structure of a subsonic jet flame

与化学发光机制不同,燃烧产物中的碳烟由于热辐射也会发光,碳烟热辐射的光谱范围更广,覆盖可见光和红外区。如果利用窄通滤镜或彩色 CCD 相机,获得 2 个不同波段的碳烟辐射信号,就有可能应用层析技术重建出碳烟的三维体积分数和火焰的三维温度场^[57],这种方法称为“双波长法”。例如,利用重建的碳烟双波长信号,火焰的温度可以表示为^[58]:

$$T = c_2 \left(\frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_G} \right) / \left[\ln \frac{I(\lambda_G, T)}{I(\lambda_R, T)} + \ln(S_\lambda) + \ln \left(\frac{\epsilon_R}{\epsilon_G} \right) + \ln \left(\frac{\lambda_G}{\lambda_R} \right)^5 \right] \quad (6)$$

式中, T 是温度, c_2 是第二普朗克常数, $I(\lambda_R, T)$ 和 $I(\lambda_G, T)$ 是重建的 2 个波段的碳烟信号强度分布,这里假设筛选的 2 个波段的中心波长分别为

$\lambda_R = 650 \text{ nm}$, $\lambda_G = 550 \text{ nm}$, $S_\lambda = (S_{\lambda R}/S_{\lambda G})$ 表示测量系统对 2 种波长的感光度修正系数, ϵ_R 和 ϵ_G 表示碳烟发射这 2 种波段光谱的发射系数, 在气体燃料火焰中, 碳烟颗粒的粒径分布为 $0.005 \sim 0.1 \mu\text{m}$, 远小于选择的波长, 因此, 碳烟可以被认为是灰体, 在不同波段的发射率是相同的 ($\epsilon_R/\epsilon_G \approx 1$)。由此可见, 通过重建碳烟热辐射信号可以反演火焰的温度等信息。Hossain 等^[57, 59] 利用碳烟热辐射信号分别重建了低湍流度扩散火焰的三维碳烟体积分数和三维温度场, 并将重建的温度与热电偶所测温度进行对比, 发现不确定度不超过 9%。

3.2 层析技术结合激光诱导荧光技术

如上所述, 尽管利用发射光谱进行层析测量的装置与操作相对简单, 但发射光谱得到的火焰信息大多是定性的, 如果要定量地反演火焰特性参数, 需要利用激光诱导荧光技术。可以说, 平面激光诱导荧光技术(PLIF)仍然是目前研究火焰最重要的手段之一。根据需要, PLIF 可以通过调节激光波长实现对特定组分的精确测量, 而且, 目前已经建立了比较完善的多种荧光信号与组分浓度的反演模型^[60]。由于 PLIF 技术可以获得火焰中多种低浓度组分的高精度测量, 使其可以对很多火焰的关键特性进行反演, 这方面的内容可以参考文献^[61], 此处不再赘述。近几年, 由于高能、高频激光技术的发展, PLIF 技术的能力也得到了质的飞跃, 例如, 在克服传统的重复频率受限方面, 近期的文献^[62] 报道了 100 kHz 重复频率下的 CH_2O -PLIF 在超声速凹腔燃烧室的测量。

在空间分辨方面, 研究者很早就在尝试将 PLIF 的平面测量拓展为空间测量, 如引言所述的片激光扫描技术即是这方面的尝试。2016 年, 弗吉尼亚理工大学的 Ma 等^[36] 首次基于层析原理实现了湍流预混火焰 CH 基的立体激光诱导荧光(VLIF)测量。在 VLIF 测量中, 激光束被透镜组整形为体激光源, 用

来整场激发 CH 基的 C-X 跃迁信号。为评估 VLIF 测量的能力, 他们利用相同的火焰同时进行了 VLIF 和 PLIF 测量, 并将 VLIF 获得的火焰结构直接与 PLIF 进行对比, 结果表明, 在空间分辨率上, 虽然 VLIF(0.4 mm)不如 PLIF(0.15 mm), 但其提供了空间 3 个方向的信息; 通过比较火焰锋面长度, VLIF 重建的误差低于 8%^[63]。图 7 是 Ma 等^[63] 进行的 VLIF 重建以及与 PLIF 进行对比的结果。

此后, 美国空军实验室连续报道了高重复频率的 VLIF 测量。他们首先对高频 VLIF 测量精度的影响因素进行了评估, 发现激光能量密度、时间频率和相机角度数量是影响重建质量的重要因素^[64]。在此基础上, 他们利用 OH 基的 $\text{A}_2\Sigma^-\leftarrow\text{X}_2\Pi(1-0)$, Q1(9) 激发带进行了 OH 组分三维分布的定量测量, 并以此反演得到了火焰的三维结构^[8]。接着, 他们进一步利用 OH 诱导荧光, 筛选出 2 条激发线, 通过双色法进行了三维温度场的重建^[65]。实验中 2 束激光经过偏振分光镜后在空间上重叠, 且时间上相差 500 ns, 实现与荧光发射重叠的光谱的时间分离。4 台增强型高速相机分布于火焰两边, 从 8 个方向采集 2 个波段的 OH 跃迁信号。实验同时发现 Q1(5) 的 OH 信号存在于低温和高温区, 表现出更宽的空间分布; 而 Q1(14) 的 OH 信号处于较高能级, 更靠近火焰前锋的高温区域。

由于 VLIF 在组分自由基三维测量中表现出的强大能力, 它被尝试用于信号更微弱的点火过程火核的三维测量。Pareja 等^[11] 首次利用 VLIF 技术研究了甲烷射流扩散火焰中自点火火核的时空演变过程。测量中激光器的工作频率和高速相机重复频率都达到 10 kHz, 利用如前所述的相机-分光镜实验系统获得了 8 个角度的 OH 基诱导荧光信号。他们利用大量的重建数据, 对火核出现的位置进行了分析与预测。

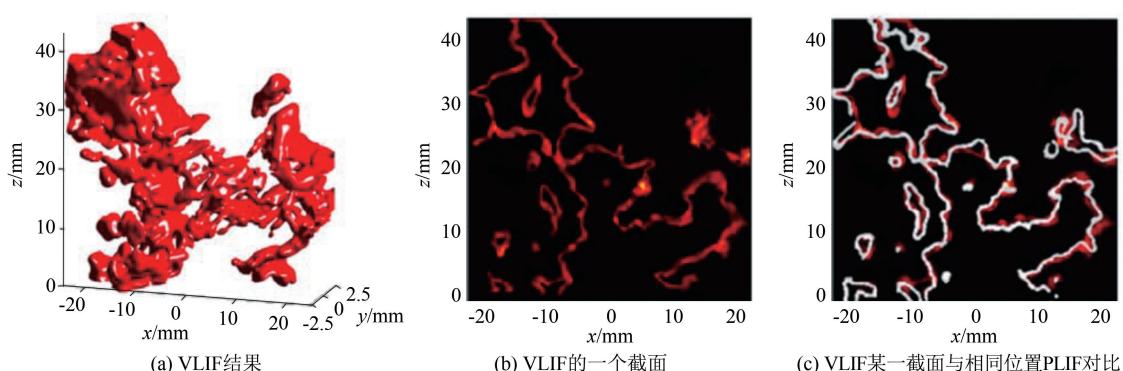


图 7 湍流预混火焰的 VLIF 与 PLIF 测量结果^[63]

Fig.7 Simultaneous VLIF and PLIF measurements on a turbulent premixed flame^[63]

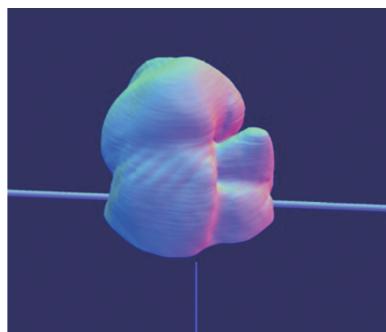
总的来说,VLIF 作为较新的技术,目前的应用实例仍比较少,另外,该技术对设备的要求非常高,在一定程度上也限制了其更广阔的应用。

3.3 层析技术结合阴影/纹影技术

阴影/纹影技术广泛应用于燃烧场的密度测量中^[66-67],其原理是当有光线经过燃烧场时,燃烧产物的密度梯度造成当地折射率变化,这些折射率信息被相机采集,进而可以用来反演燃烧场的密度和温度分布。由于该技术基于光线折射的理论,要求每个探测器都要与光源的光线传播方向平行,这对层析纹影系统的搭建带来了麻烦,因为这意味着要为每个视角的相机配备独立的光源。例如,Ishino 等^[17, 68]搭建了 20 个相机配备 20 个光源的层析纹影系统,系统的复杂性可想而知。他们利用该系统研究了电火花点燃富燃预混燃气时火核的形成与发展情况。燃气为丙烷-空气预混气体,当量比为 1.4。在层流和湍流气流中的火核密度分布如图 8 所示,由图可见,由于纹影系统可以相对容易地获得足够强的信号,故其重建结果可以分辨非常精细的火核结构:在层流情况下,火核的形态近似呈球形,且有一对深纹,这被认为是由电火花的电极引起的,而在湍流情况下火核的形态呈现出复杂的褶皱情况。与之相类似的层析阴影系统,还可以测量喷雾场的三维结构,三维的喷雾结构被发现比二维结果能更好地估算局部喷雾的穿透深



(a) 层流中的火核



(b) 湍流中的火核

图 8 层析纹影测量三维火核形态^[17]

Fig.8 3D structures of flame kernel measured by tomographic schlieren^[17]

度和破碎长度尺度^[69]。如果将阴影系统中的照明光源改为能量较强的激光,则可以实现层析 Mie 散射测量,所不同的是,在层析 Mie 散射测量中,激光使喷雾颗粒在各个方向上都产生散射信号,因此,不再需要光源与相机一一对应。层析 Mie 散射在利用示踪粒子追踪火焰锋面的位置和运动上有较好的应用^[70]。

为了降低层析纹影/阴影系统的复杂性,有研究者尝试将层析技术与背景纹影技术相结合来测量火焰的密度分布,在压力均匀的情况下,可以通过气体状态方程算出温度分布。与纹影技术外部光源直接通过火焰不同,背景纹影技术利用一系列带有特殊图案(如点阵图)的板子作背景,这些图案经过不均匀的火焰密度场的折射而发生扭曲,相机实际记录了图案经过火焰的扭曲度,通过与没有扭曲的图案对比可以反演出火焰的密度分布^[67]。在此技术中,只需要用外部光源照亮背景板,因此,可以大大地降低光源的数量。Nicolas 等^[71]使用 4 盏 500 W 功率的卤素灯和 12 台 CCD 相机重建了多种射流(包括蜡烛燃烧)的三维密度分布。另外值得一提的是,他们在 GPU 上实现了层析问题的并行计算,大大提升了重建效率。Grauer 等^[16]使用 12 盏 LED 灯和 23 台 CCD 相机搭建的层析背景纹影系统对本生灯预混湍流火焰进行了测量,由于测量的视野覆盖了整个火焰,获得了全场的密度分布,进而实现了三维的温度分布测量。类似这种开放湍流火焰,由于该技术可以获得精度较高的三维密度和温度数据,对于验证湍流模型具有重大意义。

4 总结与展望

本文从算法、实验系统和应用情况等方面综述了基于层析原理的三维火焰测量技术的发展现状,总结如下:

(1) 进行层析测量需要重建算法能够同时解决大规模数据快速运算和处理非线性问题。目前,基于改进的代数重建算法可以基本适应这两方面的要求。另外值得一提的是,最近,有学者提出将层析技术与深度学习算法相结合来加速三维重建的运算,甚至可以对火焰三维特性的演变进行预测^[72],这有可能是层析算法发展的一个新的方向。

(2) 传统的层析测量系统需要较高的成本与足够大的布置空间,使得其在工程实际中的应用比较困难。使用光纤内窥镜是解决该问题的一个思路,但光纤内窥镜会造成较大的光信号损失及像素数量损失,

最终导致时空分辨率的降低。目前,利用低成本光纤内窥镜的成像空间分辨率可达0.4 mm,时间分辨率可以达到20 kHz,未来发展高透过率的多角度光学镜头有望进一步扩展时空分辨能力。

(3) 层析技术结合发射光谱、激光诱导荧光、阴影/纹影、Mie散射等火焰信号可以获得湍流火焰本质的许多关键参数,也可以为验证湍流模型提供有效的数据支撑。然而,对多参数光信号的三维同时测量仍比较困难,这有赖于高功率、多光谱激光器的发展以及多角度采集系统的更小型化。

(4) 层析技术在真实燃烧室环境的应用仍面临很大挑战。首先,真实燃烧室环境的高温高压使激光诱导荧光信号容易发生淬灭,在此情况下,可以考虑化学自发光信号,并建立高温高压下化学自发光与组分浓度之间的关系;其次,高温高压使观察玻璃窗变厚,此时需要考虑厚玻璃窗带来的光学畸变影响;另外,在测试过程中,液体燃料燃烧容易污染玻璃,对测量结果造成非常大的干扰,未来发展视窗气膜隔绝技术有望解决这方面的问题。

参考文献:

- [1] KYCHAKOFF G, PAUL P H, VAN CRUYNINGEN I, et al. Movies and 3-D images of flowfields using planar laser-induced fluorescence[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(13): 2498-2500.
- [2] YIP B, LAM J K, WINTER M, et al. Time-resolved three-dimensional concentration measurements in a gas jet [J]. *Science*, 1987, 235(4793): 1209-1211.
- [3] NG R, LEVOY M, BRÉDIF M, et al. Light field photography with a hand-held plenoptic camera [J]. *Computer Science Technical Report CSTR*, 2005, 2(11): 1-11.
- [4] TROLINGER J D, HEAP M P. Coal particle combustion studied by holography[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(11): 1757-1762.
- [5] CHO K Y, SATIJA A, POURPOINT T L, et al. High-repetition-rate three-dimensional OH imaging using scanned planar laser-induced fluorescence system for multiphase combustion[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(3): 316-326.
- [6] HARKER M, HATTRELL T, LAWES M, et al. Measurements of the three-dimensional structure of flames at low turbulence[J]. *Combustion Science*, 2012, 184(10-11): 1818-1837.
- [7] HULT J, OMRANE A, NYGREN J, et al. Quantitative three-dimensional imaging of soot volume fraction in turbulent non-premixed flames[J]. *Experiments in Fluids*, 2002, 33(2): 265-269.
- [8] HALLS B R, HSU P S, JIANG N, et al. kHz-rate four-dimensional fluorescence tomography using an ultraviolet-tunable narrowband burst-mode optical parametric oscillator [J]. *Optica*, 2017, 4(8): 897-902.
- [9] LI T, PAREJA J, FUEST F, et al. Tomographic imaging of OH laser-induced fluorescence in laminar and turbulent jet flames[J]. *Measurement Science*, 2017, 29(1): 015206.
- [10] MA L, LEI Q, IKEDA J, et al. Single-shot 3D flame diagnostic based on volumetric laser induced fluorescence (VLIF) [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 4575-4583.
- [11] PAREJA J, JOHCHI A, LI T, et al. A study of the spatial and temporal evolution of auto-ignition kernels using time-resolved tomographic OH-LIF [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(2): 1321-1328.
- [12] FLOYD J, KEMPF A. 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] WORTH N A, DAWSON J R. Tomographic reconstruction of OH* chemiluminescence in two interacting turbulent flames [J]. *Measurement Science*, 2012, 24(2): 024013.
- [14] LI X, MA L. Volumetric imaging of turbulent reactive flows at kHz based on computed tomography[J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 4768-4778.
- [15] LI X, MA L. Capabilities and limitations of 3D flame measurements based on computed tomography of chemiluminescence[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(3): 642-651.
- [16] GRAUER S J, UNTERBERGER A, RITTLER A, et al. Instantaneous 3D flame imaging by background-oriented schlieren tomography[J]. *Combustion and Flame*, 2018, 196: 284-299.
- [17] ISHINO Y, HAYASHI N, ISHIKO Y, et al. Schlieren 3D-CT reconstruction of instantaneous density distributions of spark-ignited flame kernels of fuel-rich propane-air premixture[C]// ASME 2016 Heat Transfer Summer Conference collocated with the ASME 2016 Fluids Engineering Division Summer Meeting and the ASME International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, Washington D C, USA, 2016.
- [18] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理:第3版[M]. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 北京:电子工业出版社, 2017.
- [19] BEST P, CHIEN P, CARANGELO R, et al. Tomographic reconstruction of FT-IR emission and transmission spectra in a sooting laminar diffusion flame: species concentrations and temperatures[J]. *Combustion and Flame*, 1991, 85(3-4): 309-318.
- [20] MOHAMAD E J, RAHIM R A, IBRAHIM S, et al. Flame imaging using laser-based transmission tomography[J]. *Sensors Actuators A: Physical*, 2006, 127(2): 332-339.
- [21] EMMERMAN P, GOULARD R, SANTORO R, et al. Multiangular absorption diagnostics of a turbulent argon-methane jet[J]. *Journal of Energy*, 1980, 4(2): 70-77.
- [22] SNYDER R, HESSELINK L. Measurement of mixing fluid flows with optical tomography[J]. *Optics Letters*, 1988, 13(2): 87-89.
- [23] GORDON R, BENDER R, HERMAN G T. Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1970, 29(3): 471-481.
- [24] BELKEBIR K, CHAUMET P C, SENTENAC A. Influence of multiple scattering on three-dimensional imaging with optical diffraction tomography[J]. *JOSA A*, 2006, 23(3): 586-595.
- [25] MAIRE G, DRSEK F, GIRARD J, et al. Experimental demonstration of quantitative imaging beyond Abbe's limit with optical diffraction tomography[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(21): 213905.

- [26] MOLINARI M, COX S J, BLOTT B H, et al. Comparison of algorithms for non-linear inverse 3D electrical tomography reconstruction[J]. *Physiological Measurement*, 2002, 23(1): 95.
- [27] MOGHADDAM M, CHEW W C. Nonlinear two-dimensional velocity profile inversion using time domain data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(1): 147-156.
- [28] FANG W. A nonlinear image reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography [J]. *Measurement Science Technology*, 2004, 15(10): 2124.
- [29] JOACHIMOWICZ N, MALLORQUI J J, BOLOMEY J C, et al. Convergence and stability assessment of Newton-Kantorovich reconstruction algorithms for microwave tomography [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1998, 17(4): 562-570.
- [30] JIANG H, PAULSEN K D, OSTERBERG U L, et al. Optical image reconstruction using frequency-domain data: simulations and experiments[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1996, 13(2): 253-266.
- [31] CAI W, EWING D J, MA L. Application of simulated annealing for multispectral tomography[J]. *Computer Physics Communications*, 2008, 179(4): 250-255.
- [32] MA L, LI X, SANDERS S T, et al. 50 kHz-rate 2D imaging of temperature and H₂O concentration at the exhaust plane of a J85 engine using hyperspectral tomography[J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 1152-1162.
- [33] MA L, CAI W. Numerical investigation of hyperspectral tomography for simultaneous temperature and concentration imaging[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(21): 3751-3759.
- [34] HSIAO C T, CHAHINE G, GUMEROV N. Application of a hybrid genetic/Powell algorithm and a boundary element method to electrical impedance tomography [J]. *Journal of Computational Physics*, 2001, 173(2): 433-454.
- [35] CORANA A, MARCHESI M, MARTINI C, et al. Minimizing multimodal functions of continuous variables with the "simulated annealing" algorithm Corrigenda for this article is available here[J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1987, 13(3): 262-280.
- [36] LEI Q, WU Y, XU W, et al. Development and validation of a reconstruction algorithm for three-dimensional nonlinear tomography problems[J]. *Optics Express*, 2016, 24 (14): 15912-15926.
- [37] YONG Y, TIAN Q, GANG L, et al. Recent advances in flame tomography[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2012, 20(2): 389-399.
- [38] WORTH N A, DAWSON J R. Tomographic reconstruction of OH* chemiluminescence in two interacting turbulent flames [J]. *Measurement Science Technology*, 2012, 24(2): 024013.
- [39] MOECK J P, BOURGOIN J F, DUROX D, et al. Tomographic reconstruction of heat release rate perturbations induced by helical modes in turbulent swirl flames [J]. *Experiments in Fluids*, 2013, 54(4): 1498.
- [40] SAMARASINGHE J, PELUSO S J, QUAY B D, et al. The three-dimensional structure of swirl-stabilized flames in a lean premixed multinozzle can combustor[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 138(3): 031502.
- [41] ISHINO Y, OHIWA N. Three-dimensional computerized tomographic reconstruction of instantaneous distribution of chemiluminescence of a turbulent premixed flame[J]. *JSME International Journal Series B Fluids Thermal Engineering*, 2005, 48(1): 34-40.
- [42] 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.
- [43] KHAJIEH M, SIMON G, JONATHAN S, et al. Instantaneous 3D imaging of highly turbulent flames using computed tomography of chemiluminescence[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(26): 7385-7395.
- [44] WU Y, XU W, LEI Q, et al. Single-shot volumetric laser induced fluorescence (VLIF) measurements in turbulent flows seeded with iodine[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33408-33418.
- [45] RUAN C, YU T, CHEN F, et al. Experimental characterization of the spatiotemporal dynamics of a turbulent flame in a gas turbine model combustor using computed tomography of chemiluminescence[J]. *Energy*, 2019, 170: 744-751.
- [46] MA L, LEI Q, WU Y, et al. From ignition to stable combustion in a cavity flameholder studied via 3D tomographic chemiluminescence at 20 kHz [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 165: 1-10.
- [47] LIU H, SUN B, CAI W. kHz-rate volumetric flame imaging using a single camera[J]. *Optics Communications*, 2019, 437: 33-43.
- [48] CAI W, KAMINSKI C F. Tomographic absorption spectroscopy for the study of gas dynamics and reactive flows[J]. *Progress in Energy Combustion Science*, 2017, 59: 1-31.
- [49] LIU X, WANG G, ZHENG J, et al. Temporally resolved two dimensional temperature field of acoustically excited swirling flames measured by mid-infrared direct absorption spectroscopy [J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 31983-31994.
- [50] 宋俊玲, 洪延姬, 王广宇. 燃烧场吸收光谱断层诊断技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- SONG J L, HONG Y J, WANG G Y. Combustion field absorption spectrum tomography [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [51] MA L, WU Y, LEI Q, et al. 3D flame topography and curvature measurements at 5 kHz on a premixed turbulent Bunsen flame[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 166: 66-75.
- [52] UNTERBERGER A, RÖDER M, GIESE A, et al. 3D instantaneous reconstruction of turbulent industrial flames using Computed Tomography of Chemiluminescence (CTC) [J]. *Journal of Combustion*, 2018, 5373829.
- [53] WISEMAN S M, BREAR M J, GORDON R L, et al. Measurements from flame chemiluminescence tomography of forced laminar premixed propane flames[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 183: 1-14.
- [54] SAMARASINGHE J, PELUSO S J, QUAY B D, et al. The three-dimensional structure of swirl-stabilized flames in a lean premixed multinozzle can combustor[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 138(3): 031502.
- [55] HUANG Q X, WANG F, LIU D, et al. Reconstruction of soot temperature and volume fraction profiles of an asymmetric flame using stereoscopic tomography [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(3): 565-573.
- [56] TURNS S R. An introduction to combustion[M]. New York: McGraw-Hill College, 1996.

- [57] HOSSAIN M M, LU G, SUN D, et al. Three-dimensional reconstruction of flame temperature and emissivity distribution using optical tomographic and two-colour pyrometric techniques [J]. Measurement Science Technology, 2013, 24(7): 074010.
- [58] STASIO S D, MASSOLI P. Influence of the soot property uncertainties in temperature and volume-fraction measurements by two-colour pyrometry[J]. Measurement Science Technology, 1994, 5(12): 1453.
- [59] HOSSAIN M M, LU G, YAN Y. Soot volume fraction profiling of asymmetric diffusion flames through tomographic imaging[C]//Proceeding of IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST). 2014.
- [60] KOHSE-HÖINGHAUS K, JEFFRIES J B. Applied combustion diagnostics[M]. New York: Taylor and Francis, 2002.
- [61] 刘晶儒,赵新艳,叶锡生,等.激光光谱技术在燃烧流场诊断中的应用[J].光学精密工程,2011,19(2): 284-296.
- LIU J R, ZHAO X Y, YE X S, et al. Application of laser spectroscopy in combustion flow field diagnosis[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19 (2): 284-296.
- [62] MILLER J D, PELTIER S J, SLIPCHENKO M N, et al. Investigation of transient ignition processes in a model scramjet pilot cavity using simultaneous 100 kHz formaldehyde planar laser-induced fluorescence and CH* chemiluminescence imaging [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36 (2): 2865-2872.
- [63] MA L, LEI Q, CAPIL T, et al. Direct comparison of two-dimensional and three-dimensional laser-induced fluorescence measurements on highly turbulent flames[J]. Optics Letters, 2017, 42(2): 267-270.
- [64] HALLS B R, THUL D J, MICHAELIS D, et al. Single-shot, volumetrically illuminated, three-dimensional, tomographic laser-induced-fluorescence imaging in a gaseous free jet [J]. Optics Express, 2016, 24(9): 10040-10049.
- [65] HALLS B R, HSU P, ROY S, et al. Two-color volumetric laser-induced fluorescence for 3D OH and temperature fields in turbulent reacting flows[J]. Optics Letters, 2018, 43(12): 2961-2964.
- [66] SCHWARZ A. Multi-tomographic flame analysis with a schlieren apparatus[J]. Measurement Science Technology, 1996, 7(3): 406.
- [67] SETTLES G S, HARGATHER M J. A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques [J]. Measurement Science Technology, 2017, 28(4): 042001.
- [68] ISHINO Y, HAYASHI N, RAZAK I F B A, et al. 3D-CT (computer tomography) measurement of an instantaneous density distribution of turbulent flames with a multi-directional quantitative schlieren camera (reconstructions of high-speed premixed burner flames with different flow velocities) [J]. Flow, Turbulence Combustion, 2016, 96: 819-835.
- [69] KLINNER J, WILLERT C. Tomographic shadowgraphy for three-dimensional reconstruction of instantaneous spray distributions [J]. Experiments in Fluids, 2012, 53(2): 531-543.
- [70] UPTON T, VERHOEVEN D, HUGDINS D. High-resolution computed tomography of a turbulent reacting flow [J]. Experiments in Fluids, 2011, 50(1): 125-134.
- [71] NICOLAS F, TODOROFF V, PLYER A, et al. A direct approach for instantaneous 3D density field reconstruction from background-oriented schlieren (BOS) measurements [J]. Experiments in Fluids, 2016, 57(1): 13.
- [72] HUANG J Q, LIU H C, CAI W W. Online in situ prediction of 3-D flame evolution from its history 2-D projections via deep learning[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 875, R2.

作者简介:

宋尔壮(1996-),男,重庆南岸人,博士研究生。研究方向:燃烧诊断。通信地址:陕西省西安市长安区东祥路1号西北工业大学长安校区动力与能源学院(710129)。E-mail: sez@mail.nwpu.edu.cn



(编辑:李金勇)