

激光与光电子学进展

基于相位和发射强度实现流场的分区重建

陈云云^{1,2,3*}, 段传森^{1,3}, 崔芬萍^{1,3}¹南京信息工程大学江苏省大气海洋光电探测重点实验室, 江苏 南京 210044;²南京信息工程大学江苏省大气环境与装备协同创新中心, 江苏 南京 210044;³南京信息工程大学物理与光电工程学院, 江苏 南京 210044

摘要 用折射率测量方法来获取被测流场温度分布时,应该首先确定流场成分。提出了一种联合相位和发射强度分布对流场进行区域划分的方法,以更好地确定每个区域的成分,尽可能提高温度重建的精度。选取蜡烛-空气(非预混火焰)和丙烷-空气(预混火焰)燃烧流场作为实验对象,将折射率、相位和发射强度分布进行匹配,在此基础上分析并确定两个流场不同区域的成分。通过比较基于相位分区方法(模型1)、发射强度分区方法(模型2)以及联合相位和发射强度分区方法(模型3)获得的温度结果,发现模型3的结果更合理。此外,还进一步讨论了联合相位和发射强度分布对流场进行区域划分的合理性和适用性,该结果可为基于折射率测量进行复杂流场温度重建的研究提供一些参考。

关键词 折射率; 相位分布; 发射强度分布; 温度分布

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1922001

Temperature Partition Reconstruction of Flow Field Based on Phase and Emission Intensity

Chen Yunyun^{1,2,3*}, Duan Chuansen^{1,3}, Cui Fenping^{1,3}

¹*Jiangsu Key Laboratory for Optoelectronic Detection of Atmosphere and Ocean, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;*

²*Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAET), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;*

³*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China*

Abstract Composition should be initially determined when analyzing temperature distribution using the refractive index measurement method. A method which divides the measured flow field by combining the phase and emission intensity distributions is proposed to confirm the composition of each region and significantly improve the temperature reconstruction accuracy. Candle-air (non-premixed flame) and propane-air (premixed flame) combustion flow fields are selected for the experiments. The refractive index, phase, and emission intensity distributions are matched. The composition distributions of both flow fields are analyzed and confirmed. A comparison of the temperature results obtained using the phase partition method (Model 1), emission intensity partition method (Model 2), and integrating phase and emission intensity partition method (Model 3) shows that Model 3 is the most reliable. Furthermore, the reliability and adaptability of the method are analyzed and discussed. This study provides a reference for the temperature diagnosis of complex flow fields based on refractive index measurements.

Key words refractive index; phase distribution; emission intensity distribution; temperature distribution

1 引言

高温复杂流场的参数诊断在许多领域都很重

要^[1-3]。光学计算层析(OCT)技术通常用于流场的结构可视化和参数测量^[4]。其中,干涉层析技术和叠栅层析技术是2种常用的定量测量方法。与干涉层析技

收稿日期: 2021-09-01; 修回日期: 2021-09-16; 录用日期: 2021-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(61975083)

通信作者: *yunqq321@sina.cn

术^[5-6]相比,叠栅层析技术因其较好的稳定性和较大的动态范围而闻名^[7]。从原理上来说,叠栅层析技术直接获得的是记录了被测流场折射率信息的叠栅条纹,然后,基于相关条纹信息提取算法获得相位分布^[8-9],再通过滤波反投影(FBP)算法^[10]或离散 Abel 反演算法^[11-12]等来重建出被测流场的折射率分布。最后,基于温度和被测流场的折射率之间的理论关系来反演温度分布。

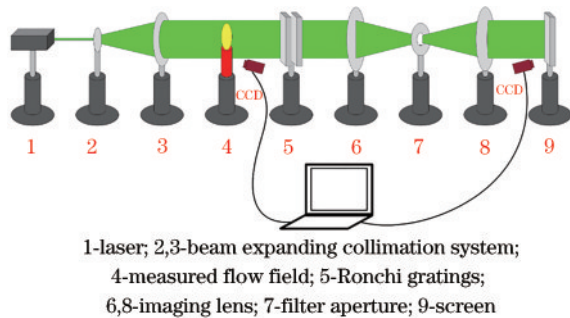
从折射率理论可知,在基于叠栅层析技术进行温度分布重建前应先确定被测流场的压强和成分。压强的影响已经被讨论过^[13],并且人们也一直关注成分对最终温度重建结果的影响^[14-15]。在基于折射率测量进行复杂流场温度重建的研究中,被测流场的成分很多时候被认为是均匀分布的^[16-18]。但实际上,流场不同区域的成分可能是不同的,相同区域成分的分布也可能是不均匀的。为此,作者团队曾利用相位分布来对流场进行区域划分^[19],在此基础上进行温度重建。这主要归功于相位非常敏感,可以很好地分辨出折射率的微小变化。然而,遗憾的是,基于相位不能很好地确定燃烧流场的真正边界。为了解决这个问题,作者团队提出基于发射强度来确定实际燃烧区域^[20]。但是,进一步研究发现,空气中的燃烧流场可能存在由空气和扩散的燃烧产物组成的混合区域。因此,仅仅基于上述分别利用相位或者发射强度来进行区域划分的方法会忽略这个混合区域,最终影响温度的重建结果。

因此,本研究提出联合被测流场的相位和发射强度分布来进行区域划分的方法,此方法能够很好地确认出空气和扩散的燃烧产物组成的混合区域。相关研究成果预计可为基于折射率测量进行复杂流场温度重建的研究提供一些参考。

2 实验和结果

2.1 实验装置

图 1 是联合叠栅与发射层析技术的系统示意图。在这项研究中,所用激光器的型号为 LSR532NL-400 mW,探测波长为 532 nm。透镜 2 和透镜 3 构成一个扩束准直系统,它们的焦距分别为 3 mm 和 300 mm,直径分别为 4 mm 和 50 mm。元件 5 由 2 个



1-laser; 2,3-beam expanding collimation system;
4-measured flow field; 5-Ronchi gratings;
6,8-imaging lens; 7-filter aperture; 9-screen

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set up

Ronchi 光栅组成,光栅有效尺寸为 50 mm×50 mm,光栅常数为 0.2 mm,这是此实验系统的关键元件。为了获得具有良好对比度的叠栅条纹,2 个光栅之间的距离应为 Talbot 距离的整数倍^[21],本次实验中距离为 13.2 mm。透镜 6 和 8 是成像透镜,直径为 75 mm,焦距为 300 mm。从第 2 个光栅的背面到光屏是典型的 4f 系统。实验系统中,一个电荷耦合器件相机(CCD, MER-125-30UC)用于记录叠栅条纹以进行相位提取和折射率重建,而另一个用于记录被测流场以重建发射强度。

2.2 实验结果

为了使研究更具有代表性,本研究选择了非预混火焰(蜡烛-空气)和预混火焰(丙烷-空气)进行实验,如图 2 所示,相应的叠栅条纹如图 3 所示。

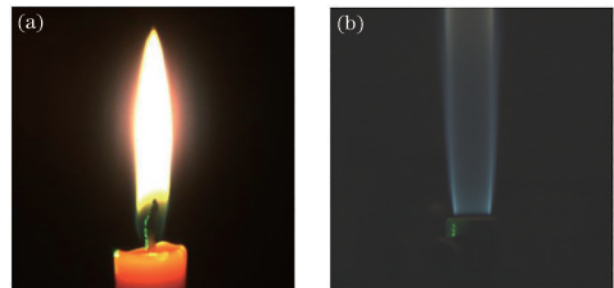


图 2 被测流场。(a) 蜡烛-空气火焰; (b) 丙烷-空气火焰

Fig. 2 Measured flow field. (a) Candle-air flame;
(b) propane-air flame

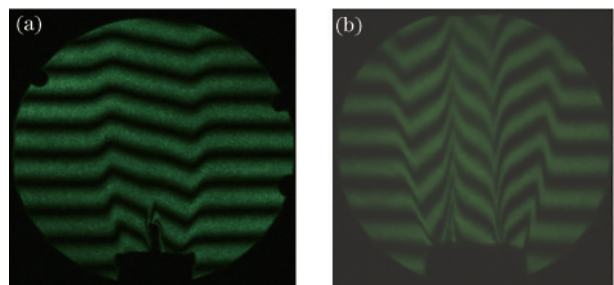


图 3 叠栅条纹。(a) 蜡烛-空气火焰; (b) 丙烷-空气火焰

Fig. 3 Moiré fringes. (a) Candle-air flame; (b) propane-air flame

3 参数分布

3.1 相位分布

基于多重网格相位展开的傅里叶变换方法^[8]用于从图 3 给出的叠栅条纹中提取相位信息,其结果如图 4 所示。

图 4 表明被测流场的结构可以通过相位分布来反映,从图中能够清晰地看出 2 种火焰结构上的差异,且不难看出都具有良好的对称性。为方便讨论,选择在图 4 中标记的 2 个横截面进行折射率重建和温度反演。对于蜡烛-空气火焰,2 个横截面距离火焰底部高分别为 17.6 mm (横截面 1) 和 19.8 mm (横截面 2)。对于丙烷-空气火焰,它们与喷嘴的距离分别为 9.6 mm (横

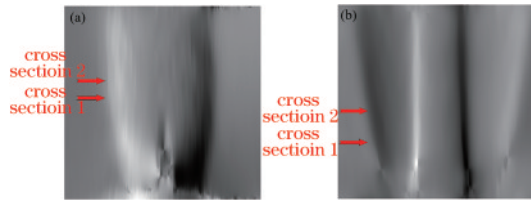


图 4 相位分布。(a) 蜡烛-空气火焰；(b) 丙烷-空气火焰

Fig. 4 Phase distribution. (a) Candle-air flame;

(b) propane-air flame

截面 1) 和 17.3 mm (横截面 2)。

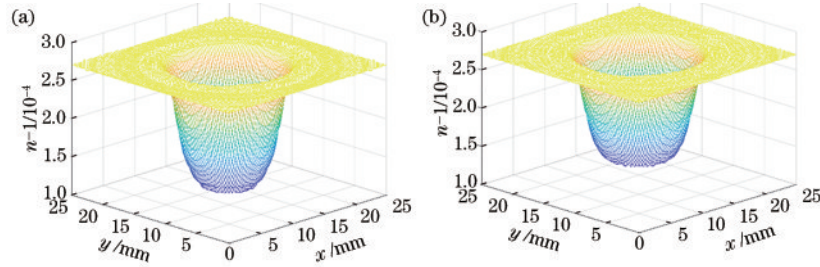


图 5 折射率分布(蜡烛-空气火焰)。(a) 横截面 1; (b) 横截面 2

Fig. 5 Refractive index distribution (candle-air flame). (a) Cross section 1; (b) cross section 2

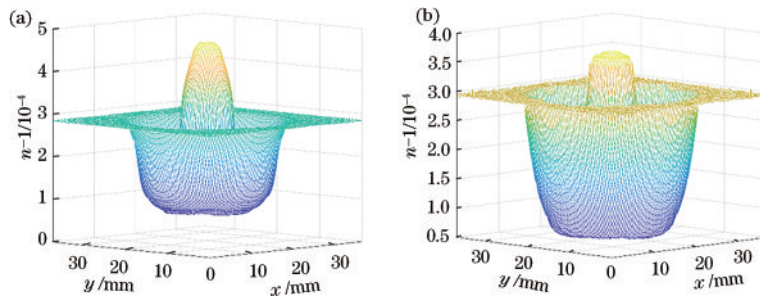


图 6 折射率分布(丙烷-空气火焰)。(a) 横截面 1; (b) 横截面 2

Fig. 6 Refractive index distribution (propane-air flame). (a) Cross section 1; (b) cross section 2

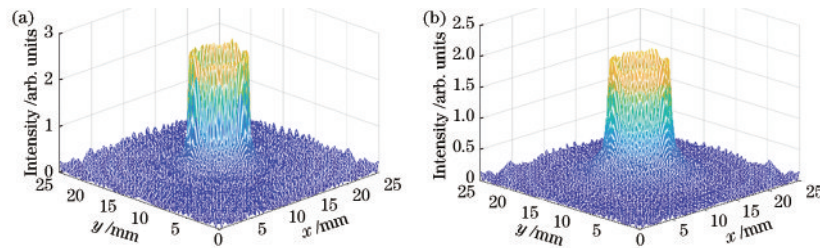


图 7 发射强度分布(蜡烛-空气火焰)。(a) 横截面 1; (b) 横截面 2

Fig. 7 Emission intensity distribution (candle-air flame). (a) Cross section 1; (b) cross section 2

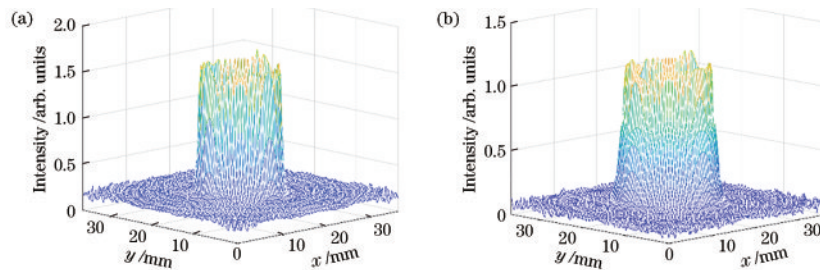


图 8 发射强度分布(丙烷-空气火焰)。(a) 横截面 1; (b) 横截面 2

Fig. 8 Emission intensity distribution (propane-air flame). (a) Cross section 1; (b) cross section 2

3.2 折射率分布

基于相位分布,可以通过FBP算法^[10]重建被测流场的折射率分布,相关3D折射率分布结果如图5、图6所示。

3.3 发射强度分布

发射强度分布也可以通过FBP算法提取,其最终3D分布如图7、图8所示。

图7和图8表明蜡烛-空气火焰的发射强度分布直径小于丙烷-空气火焰,这与图3的蜡烛-空气火焰直径

小于丙烷-空气火焰的结果是匹配的。因此,上述结果进一步证明被测流场的发射强度分布确实可以很好地显示流场真实的燃烧边界。

4 分析与讨论

4.1 区域划分

将折射率、发射强度和相位的径向分布相匹配以划分流场,根据相位分布能够区分出空气和混合区域的边界,根据发射强度分布能够确定出混合区域(或未

燃烧区域)和燃烧区域的边界,文中两类被测流场的分区结果如图 9、图 10 所示。

从图 9 可知,蜡烛-空气火焰可以分为 3 个区域。区域 1 代表周围的参考空气场,空气是此区域的主要成分;区域 3 是完全燃烧区域,CO₂、H₂O 和 N₂ 是主要成分。之前经常被忽略的区域 2 是空气和从区域 3 扩散过来的燃烧产物组成的混合区域。此混合区域中空气和燃烧产物的比例是不断变化且难以测量的,但由于两者的比例对重建的结果影响有限,为方便计算,本

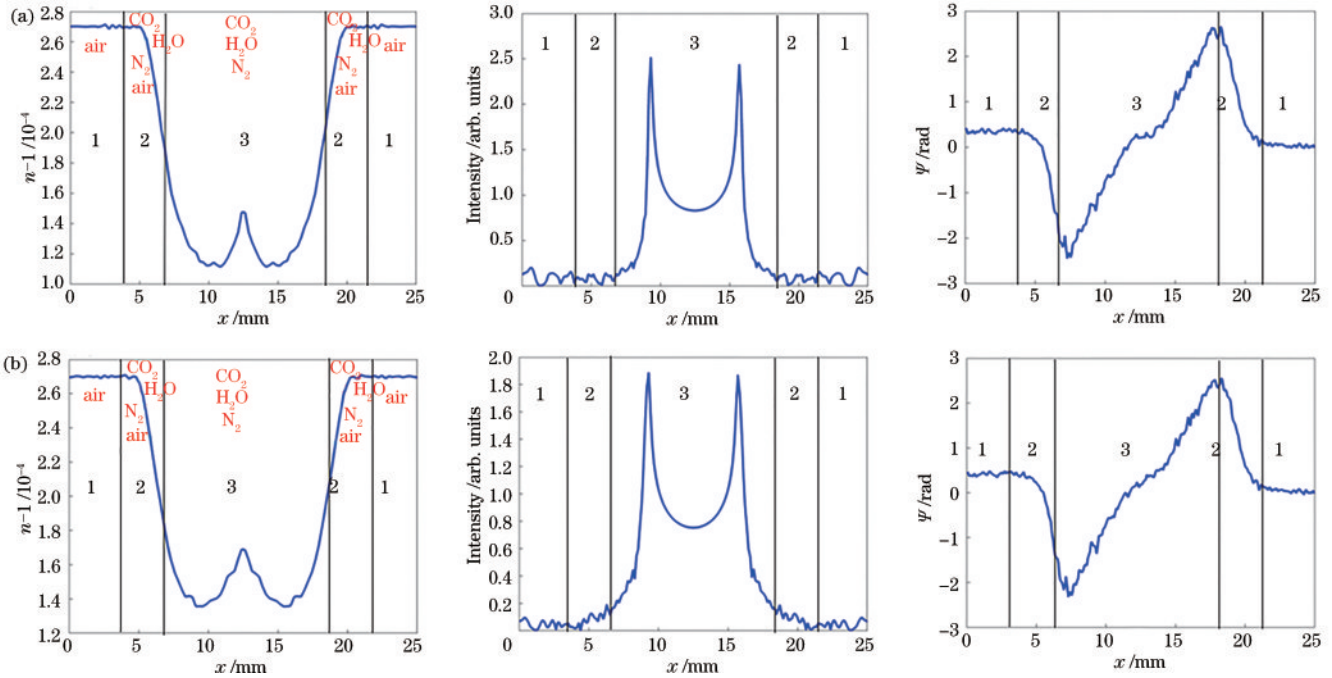


图 9 区域划分(蜡烛-空气火焰)。(a) 截面 1; (b) 截面 2

Fig. 9 Region partition (candle-air flame). (a) Cross section 1; (b) cross section 2

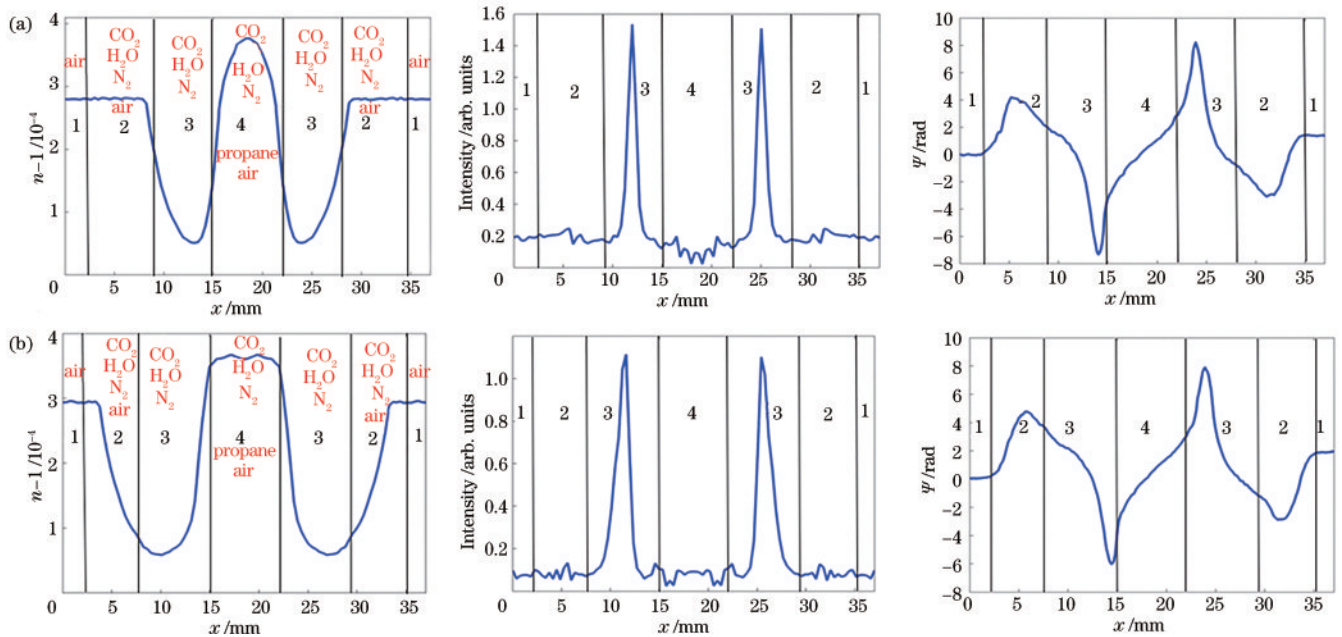


图 10 区域划分(丙烷-空气火焰)。(a) 截面 1; (b) 截面 2

Fig. 10 Region partition (propane-air flame). (a) Cross section 1; (b) cross section 2

文假设空气和燃烧产物的比例为 1 : 1。

丙烷-空气火焰可分为 4 个区域,如图 10 所示。区域 1 也是周围的参考空气场;区域 3 是丙烷-空气完全燃烧的产物,因此 CO₂、H₂O 和 N₂ 是其主要成分。区域 4 没有燃烧,因此其成分为丙烷、空气和从区域 3 扩散过来的燃烧产物^[16]。最后,区域 2 是被忽略的由空气与从区域 3 扩散过来的燃烧产物组成的混合区域。

4.2 温度重建

普通气体流场的折射率模型可以描述为^[22]

$$n - 1 = \frac{1}{L} \left(A + \frac{B}{\lambda^2} \right) \frac{P}{\kappa T}, \quad (1)$$

式中: n 为折射率; L 为洛喜密脱常数 ($2.687 \times 10^{-19} \text{ cm}^{-3}$); λ 为探测波长; A 和 B 为与流场成分有关的常数; κ 为玻尔兹曼常数; P 和 T 分别为被测流场的压强和温度。

式(1)表明,一旦确定了每个区域的成分并且已知压强,就可以基于分区模型重建被测流场的温度分布^[23]。由于之前研究过压强对温度重建的影响^[13],为了方便计算,认为每个区域压强都等于环境压强,也就是一个大气压,对于蜡烛-空气燃烧流场,可表示为

$$T = \begin{cases} T_1 = \frac{1}{L} \left(A_{\text{air}} + \frac{B_{\text{air}}}{\lambda^2} \right) \frac{P}{\kappa(n_1 - 1)} & (\text{region 1}) \\ T_2 = \frac{1}{L} \left(A_{\text{mix}} + \frac{B_{\text{mix}}}{\lambda^2} \right) \frac{P}{\kappa(n_2 - 1)} & (\text{region 2}), \\ T_3 = \frac{1}{L} \left(A_3 + \frac{B_3}{\lambda^2} \right) \frac{P}{\kappa(n_3 - 1)} & (\text{region 3}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{式中,} \begin{cases} A_{\text{mix}} = \frac{22}{358} A_{\text{CO}_2} + \frac{23}{358} A_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{134}{358} A_{\text{N}_2} + \frac{179}{358} A_{\text{air}} \\ B_{\text{mix}} = \frac{22}{358} B_{\text{CO}_2} + \frac{23}{358} B_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{134}{358} B_{\text{N}_2} + \frac{179}{358} B_{\text{air}} \\ A_3 = \frac{22}{179} A_{\text{CO}_2} + \frac{23}{179} A_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{134}{179} A_{\text{N}_2} \\ B_3 = \frac{22}{179} B_{\text{CO}_2} + \frac{23}{179} B_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{134}{179} B_{\text{N}_2} \end{cases} .$$

对于丙烷-空气燃烧流场,可表示为

$$T = \begin{cases} T_1 = \frac{1}{L} \left(A_{\text{air}} + \frac{B_{\text{air}}}{\lambda^2} \right) \frac{P}{\kappa(n_1 - 1)} & (\text{region 1}) \\ T_2 = \frac{1}{L} \left(A_{\text{mix}} + \frac{B_{\text{mix}}}{\lambda^2} \right) \frac{P}{\kappa(n_2 - 1)} & (\text{region 2}) \\ T_3 = \frac{1}{L} \left(A_3 + \frac{B_3}{\lambda^2} \right) \frac{P}{\kappa(n_3 - 1)} & (\text{region 3}) \\ T_4 = \frac{1}{L} \left(A_4 + \frac{B_4}{\lambda^2} \right) \frac{P}{\kappa(n_4 - 1)} & (\text{region 4}) \end{cases}, \quad (3)$$

$$\text{式中,} \begin{cases} A_{\text{mix}} = \frac{3}{54} A_{\text{CO}_2} + \frac{4}{54} A_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{20}{54} A_{\text{N}_2} + \frac{27}{54} A_{\text{air}} \\ B_{\text{mix}} = \frac{3}{54} B_{\text{CO}_2} + \frac{4}{54} B_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{20}{54} B_{\text{N}_2} + \frac{27}{54} B_{\text{air}} \\ A_3 = \frac{3}{27} A_{\text{CO}_2} + \frac{4}{27} A_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{20}{27} A_{\text{N}_2} \\ B_3 = \frac{3}{27} B_{\text{CO}_2} + \frac{4}{27} B_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{20}{27} B_{\text{N}_2} \\ A_4 = \gamma \left(\frac{4}{11} A_{\text{C}_3\text{H}_8} + \frac{7}{11} A_{\text{air}} \right) + (1 - \gamma) \left(\frac{3}{27} A_{\text{CO}_2} + \frac{4}{27} A_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{20}{27} A_{\text{N}_2} \right) \\ B_4 = \gamma \left(\frac{4}{11} B_{\text{C}_3\text{H}_8} + \frac{7}{11} B_{\text{air}} \right) + (1 - \gamma) \left(\frac{3}{27} B_{\text{CO}_2} + \frac{4}{27} B_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{20}{27} B_{\text{N}_2} \right) \end{cases},$$

γ 为空气和丙烷混合物的摩尔分数^[19]。

根据上述分区模型,可以获得 2 个被测流场的温度分布。为了验证该分区方法的优势,将相位分区方法(模型 1)^[19]、发射强度分区方法(模型 2)^[20]以及本文提出的联合相位和发射强度分区方法(模型 3)获得的温度分布进行对比,结果如图 11、12 所示。

4.3 合理性与适用性

4.3.1 合理性

如图 11 所示,对于蜡烛-空气火焰的温度分布来说,区域 1 和区域 3 的温度结果在 3 种模型中没有差异。但是,对于迄今为止被忽略的区域 2,这 3 个模型的温度结果存在明显差异。

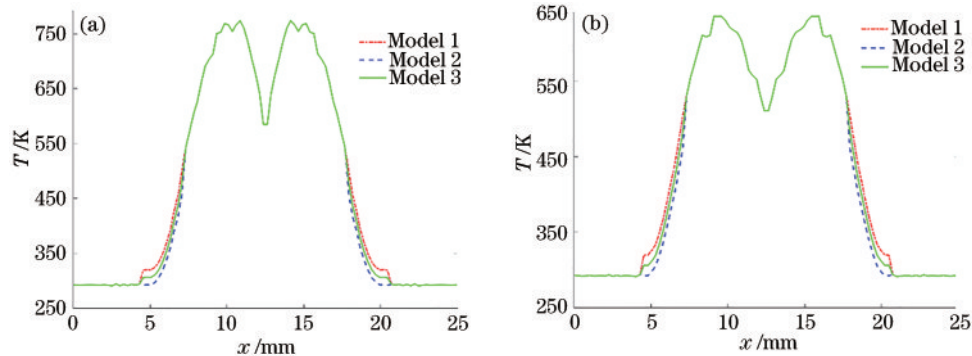


图 11 温度分布(蜡烛-空气火焰)。(a) 截面 1; (b) 截面 2

Fig. 11 Temperature distribution (candle-air flame). (a) Cross section 1; (b) cross section 2

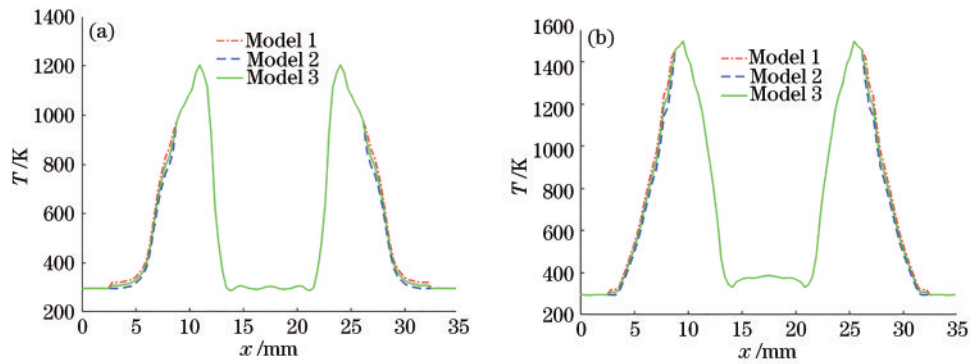


图 12 温度分布(丙烷-空气火焰)。(a) 截面 1; (b) 截面 2

Fig. 12 Temperature distribution (propane-air flame). (a) Cross section 1; (b) cross section 2

图 12 中的丙烷-空气火焰温度分布结果表明,区域 1、区域 3 和区域 4 中的温度结果在 3 种模型中没有差异,主要温度分布区别也在区域 2 中。该区域到目前为止也一直被忽略。重建温度时,对于模型 1,区域 2 的成分被认为是完全燃烧的产物。对于模型 2,区域 2 的成分被视为加热的空气。事实上,根据模型 3 可知,区域 2 应该是由被加热空气和燃烧产物的混合物组成,这是图中区域 2 出现明显不同的温度分布的主要原因。

总之,以上结果表明,本文采用的新分区方法对于区分流场的不同区域是合理的。

4.3.2 适用性

本文采用的新分区方法具有以下适用性:

1) 被测流场必须是发光流场,因为该方法需要通过发射强度分布来获得流场真实的燃烧区域边界;

2) 预混火焰和非预混火焰均适用,但分区情况可能会有不同,具体不同区域的成分也可能不同;

3) 理论上,只要满足条件 1) 和 2), 就可以使用本研究提出的新方法重建温度分布。但是,还有一个非常重要的前提,就是应该有合适的流场折射率模型用来进行温度重建。

总之,确定流场的成分是一个非常复杂的问题。比如,文中假设了新确定的混合区域中空气和燃烧产物的比例为 1:1。在今后的研究中,应该进一步寻找此区域具体的比例分布。还有,如果周围的参考流场不是空气,则应调整所涉及区域的成分。因此,需要进一步研究以探索成分对流场参数重建的影响。

5 结 论

在本文的研究中,将相位、发射强度和折射率的径向分布进行匹配,将流场划分为不同的区域,以提高温度重建的准确性。在此方法的基础上,确定了一直被忽略的混合区域的范围。然后,基于新提出的分区方法(模型 3),重建出 2 类典型被测流场的温度分布。通过将其结果与其他 2 种已报道的区域划分方法(模型 1 和模型 2)获得的温度分布进行比较,发现在区域 2 中出现

的温度分布差异更加明显,而其他区域不太明显。与以前的区域划分方法相比,本文提出的新分区方法可以更准确地确定出混合区域 2 的范围,而这个区域之前一直是被忽略的。总之,相关结果可证明新提出的区域划分方法(模型 3)的优势,且这项工作可以为各种高温复杂流场的结构可视化和参数诊断提供一些参考。

参 考 文 献

- [1] 张倚成, 韩永康, 周亚, 等. 基于机器学习对火焰温度场和 CO_2 浓度场的同步重建[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2312003.
Zhang Y C, Han Y K, Zhou Y, et al. Machine-learning-based reconstruction of flame temperature and CO_2 concentration fields[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2312003.
- [2] Wang X, Wu D L, Pan G P. Use of Moiré tomography to measure the temperature field of the flame of a pyrotechnical composition from its infrared radiation[J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2001, 37: 440-442.
- [3] 刘铁根, 于迅, 王双, 等. 高温环境下光纤法布里-珀罗微腔传感技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306002.
Liu T G, Yu X, Wang S, et al. Fiber-optic Fabry-Perot sensing technology in high-temperature environments: a review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306002.
- [4] Zhang B, Luan B L, Dong J, et al. Simultaneous deflection tomography and PIV measurements of non-premixed combustion[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 127: 105944.
- [5] Qi C B, Zheng S, Zhou H C. Experimental investigation on gas-phase temperature of axisymmetric ethylene flames by large lateral shearing interferometry[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 115: 104-111.
- [6] Agarwal S, Kumar V, Shakher C. Temperature measurement of wick stabilized micro diffusion flame under the influence of magnetic field using digital holographic interferometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 102: 161-169.
- [7] Sun N, Song Y, Wang J, et al. Volume Moiré

- tomography based on double cross gratings for real three-dimensional flow field diagnosis[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(34): 8081-8089.
- [8] 张斌, 宋晔, 宋一中, 等. 基于相位展开和一种新的迭代重建算法的流场莫尔层析术[J]. *中国激光*, 2006, 33(4): 531-536.
Zhang B, Song Y, Song Y Z, et al. Flow field Moiré tomography based on phase unwrapping and a new iterative reconstruction algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(4): 531-536.
- [9] Chakraborty T, Petrucci J C. Optical convolution for quantitative phase retrieval using the transport of intensity equation[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(1): A134-A141.
- [10] 宋晔, 张斌, 贺安之. 偏折层析的滤波反投影算法及误差分析[J]. *光学学报*, 2006, 26(11): 1657-1665.
Song Y, Zhang B, He A Z. Filtered back-projection algorithm of deflection tomography and error analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11): 1657-1665.
- [11] Seifert M, Gallersdörfer M, Horn F, et al. Measurement and simulative proof concerning the visibility loss in X-ray Talbot-Lau Moiré imaging[J]. *Journal of Instrumentation*, 2017, 12(12): T12007.
- [12] Hauke C, Anton G, Hellbach K, et al. Enhanced reconstruction algorithm for moiré artifact suppression in Talbot-Lau X-ray imaging[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2018, 63(13): 135018.
- [13] Chen Y Y, Yu Y, Chen X, et al. Feasibility of optical computerized tomography for measuring the species concentration distribution of flow fields[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 95: 35-41.
- [14] Qin X, Xiao X D, Puri I K, et al. Effect of varying composition on temperature reconstructions obtained from refractive index measurements in flames[J]. *Combustion and Flame*, 2002, 128(1/2): 121-132.
- [15] Gawlowski M, Kelly K E, Marcotte L A, et al. Determining the effect of species composition on temperature fields of tank flames using real-time holographic interferometry[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(23): 4625-4636.
- [16] Tieng S M, Lin C C, Wang Y C, et al. Effect of composition distribution on holographic temperature measurement of a diffuse flame[J]. *Measurement Science and Technology*, 1996, 7(4): 477-488.
- [17] Zhang B, Zhao M M, Liu Z G, et al. Flame four-dimensional deflection tomography with compressed-sensing-revision reconstruction[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 83: 23-31.
- [18] 张斌, 肖立辉, 侯俊庆, 等. 旋流火焰三维温度场与速度场的同时激光测量[J]. *中国激光*, 2021, 48(3): 0304002.
Zhang B, Xiao L H, Hou J Q, et al. Simultaneous laser measurement of three-dimensional temperature and velocity fields in swirling flame[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(3): 0304002.
- [19] Chen Y Y, Zheng G G, Gu F, et al. Flow field's temperature partition reconstruction based on its phase distribution[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(10/11): 2501-2505.
- [20] Chen Y Y, Wang J, Wang Q H, et al. Integrating moiré and emission tomography to visualize and diagnose high-temperature flow fields[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2721-2723.
- [21] Rasouli S, Niry M D, Rajabi Y, et al. Applications of 2-D Moiré deflectometry to atmospheric turbulence[J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2014, 7(4): 651-657.
- [22] Allen C W. *Astrophysical quantities*[M]. London: Athlone Press, 1973.
- [23] Chen Y Y, Huang X G, Wen Y, et al. The diagnostic study of optical tomography for high-temperature flow fields in the open system[J]. *Optics Communications*, 2015, 344: 21-26.