

基于复折射率赋值优化的碳烟比色测温法

杜新雨 李诗媛 张俊友

Optimization of colorimetric thermometry of soot based on complex refractive index assignment

DU Xinyu, LI Shiyuan, ZHANG Junyou

引用本文:

杜新雨,李诗媛,张俊友. 基于复折射率赋值优化的碳烟比色测温法[J]. 应用光学, 2025, 46(2): 364–371. DOI: 10.5768/JAO202546.0203001

DU Xinyu, LI Shiyuan, ZHANG Junyou. Optimization of colorimetric thermometry of soot based on complex refractive index assignment[J]. *Journal of Applied Optics*, 2025, 46(2): 364–371. DOI: 10.5768/JAO202546.0203001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0203001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于少模-无芯-少模光纤结构的高灵敏度折射率传感器](#)

High-sensitivity refractive index sensor based on FMF-CLF-FMF optical fiber structure

应用光学. 2023, 44(2): 462–468 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0208002>

[基于傅里叶变换频谱分析的液体折射率实时测量系统](#)

Real-time measuring system for liquid refractive index based on Fourier transform spectrum analysis

应用光学. 2023, 44(5): 1061–1067 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0503001>

[空心微瓶谐振腔的封装及折射率传感特性研究](#)

Package of hollow micro-bottle resonator and refractive index sensing properties

应用光学. 2022, 43(5): 1001–1006 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0508002>

[非轴对称光纤三维折射率测量](#)

Research on three dimensional refractive index measurement of non-axisymmetric fiber optics

应用光学. 2024, 45(6): 1314–1320 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0608001>

[折射率湿项对靶场经纬仪测高精度的影响分析](#)

Analysis of influence of refractivity wet term on height measurement accuracy of cinetheodolite

应用光学. 2024, 45(4): 790–795 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0403004>

[螺旋形塑料光纤表面等离子体共振折射率传感器](#)

Plasmon resonance refractive index sensor of spiral-shaped plastic optical fiber surface

应用光学. 2023, 44(1): 226–233 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0108002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 02-0364-08

引用格式: 杜新雨, 李诗媛, 张俊友. 基于复折射率赋值优化的碳烟比色测温法 [J]. 应用光学, 2025, 46(2): 364-371.

DU Xinyu, LI Shiyuan, ZHANG Junyou. Optimization of colorimetric thermometry of soot based on complex refractive index assignment[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 364-371.



在线阅读

基于复折射率赋值优化的碳烟比色测温法

杜新雨, 李诗媛, 张俊友

(北京科技大学 能源与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 在比色测温法中, 传统复折射率在赋值时认为波长确定的碳烟复折射率恒定, 因此采用经验公式或实验值赋值。随着碳烟机理的研究深入到更小的尺度, 此种赋值方式将导致比色测温法的计算结果出现较大误差。以光学带隙为中间桥梁, 将光学带隙和粒径间物理关系与线性插值取得的光学带隙和复折射率间的关系相结合, 构建得到复折射率与碳烟粒径的关系, 然后以此来探索比色测温法中碳烟颗粒尺度效应对复折射率的影响, 并分别采用经验公式和实验值对复折射率赋值方法进行优化。将优化后的碳烟颗粒温度计算值与激光诱导荧光法测量的温度数据进行比较, 评估两种方法的优化效果。研究结果表明: 复折射率传统赋值方法的测温结果与实验结果存在 20%~50% 的相对误差, 偏差值在 300 K~1 000 K 之间。在两种优化方法中, 基于经验公式的优化方法仅将相对误差降低了约 5%, 而基于实验值的优化方法则显著提高了火焰温度测量的精度, 测温结果的相对误差降低了约 40%。

关键词: 碳烟; 复折射率; 尺度效应; 比色测温法

中图分类号: TN247; TK16

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0203001

Optimization of colorimetric thermometry of soot based on complex refractive index assignment

DU Xinyu, LI Shiyuan, ZHANG Junyou

(School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In the colorimetric temperature measurement method, the traditional assignment of complex refractive index assumes a constant refractive index for soot at a designated wavelength, employing either empirical formulas or empirical values for assignment. However, with the study of the mechanism of soot deepens to a smaller scale, this assignment method will lead to a large error in the calculation results of colorimetric thermometry. The relationship between the complex refractive index and soot particle size was established by bridging the physical correlation between the optical band gap and particle size with the relationship between the optical band gap and complex refractive index derived through linear interpolation. The influence of the scale effect of soot particles on the complex refractive index in the colorimetric thermometry was explored through this relationship, and the complex refractive index assignment method was optimized by empirical formulas and experimental values, respectively. The optimized calculated temperature of soot particles was compared with the temperature data measured by laser-induced fluorescence to evaluate

收稿日期: 2024-01-10; 修回日期: 2024-04-11

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金项目 (06121098, 06500168)

作者简介: 杜新雨 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事氮气掺混甲烷燃烧碳烟生成机理研究。E-mail: M202110134@xs.ustb.edu.cn

通信作者: 张俊友 (1993—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光热辐射反问题研究。E-mail: zhangjunyou@ustb.edu.cn

the optimization effect of the two methods. The experimental results indicate that the temperature measurement results based on the traditional assignment method of complex refractive index exhibit a relative error of 20% to 50% compared to the experimental results, with the deviation falling within the range of 300 K to 1 000 K. Among the two proposed optimization methods, the approach based on empirical formulas only marginally reduces the relative error by about 5%. In contrast, the optimization method relying on experimental values significantly enhances the accuracy of flame temperature measurements, reducing the relative error by approximately 40%.

Key words: soot; complex refractive index; scale effect; colorimetric thermometry

引言

碳烟是全球第二大温室效应形成因素(仅次于CO₂)^[1],它的大量排放会危害人体健康,进而引发肺部疾病^[1]。碳烟作为常见的碳氢燃料燃烧污染物,其粒径与其成熟度相关,一般认为粒径大于40 nm的碳烟为成熟碳烟^[2]。近年来,随着碳烟生成机理研究向更小物理尺度发展^[3],纳米碳烟颗粒成为关注重点。成熟碳烟的生成需要经历气相前驱体、初生态纳米碳烟等阶段,其中初生态纳米碳烟(粒径小于23 nm)是调控碳烟生成的关键阶段。在碳烟测量数据中,温度是影响火焰中碳烟形成的关键因素。研究表明,如果存在温度变化,即使在两个相近的温度区间内,碳烟的生长机理也存在着本质区别^[4]。因此,准确获取碳烟温度是解析火焰中碳烟形成机理的基础。

在比色测温法^[5-6]中,复折射率是碳烟光学诊断技术中的重要参数,其赋值的准确性将直接决定测量精度。传统复折射率赋值认为波长确定的碳烟复折射率恒定,采用固定的经典数值或经验公式赋值。碳烟复折射率受尺度效应^[7]的影响,其值并非定值,复折射率的经典数值和经验公式不适用于纳米碳烟的复折射率赋值。

CORBIN J C 等人^[8]研究表明,碳烟的光学特性受自身粒径影响较大。MICHELSEN H A^[9]通过将密度和粒径建立联系,构建粒径与碳氢比之间的关系,给出了碳烟的密度、比热和温度与碳氢比之间的关系。KELESIDIS G A 等人^[10]指出,由于未成熟碳烟内有机碳的光散射导致光学特性变化,故使光学模型计算碳烟数据时存在较大偏差。KELESIDIS G A 等人对比了532 nm 及1 064 nm 波长下的碳烟光学带隙与复折射率线性插值,研究碳烟成熟情况对其光吸收的影响,提供了计算不同成熟情况下碳烟复折射率的思路^[11]。

本文为量化复折射率尺度效应的影响,以光学带隙为中间桥梁,在200 nm~1 400 nm 的波长范

围内构建碳烟粒径与复折射率间的关系,利用实验测量的碳烟粒径计算复折射率,从而优化纳米碳烟颗粒复折射率的赋值方式,提高比色测温计算精度。其中,任意波长下初生碳烟的复折射率采用极化率计算。成熟碳烟的复折射率分为两种思路:经验公式和实验测量值。对于后者而言,常用激光器波长已有通用的实验测量值,而对于不常用波长,因为复折射率最终参与比色测温计算,需要转化为吸收函数,所以直接由实验测得的碳烟质量吸收截面与吸收函数间关系计算比色测温结果。因此,根据成熟碳烟复折射率取值方法,形成了两种优化方式:基于经验公式的优化方式和基于实验值的优化方式。最后,使用火焰的测量数据^[12]来评估两种优化方式的效果。

1 比色测温法及复折射率赋值优化

1.1 比色测温法

碳烟颗粒生长过程中与周围燃烧场进行热量交换,两者温度近似,碳烟颗粒发出的辐射强度与自身温度密切相关^[13]。因此,比色测温法通过测量辐射强度在两个不同波长处的比值,从而获取温度,辐射强度由基于维恩公式简化后的普朗克定律^[14]表示:

$$I = \varepsilon_{\lambda_s} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \exp(\frac{hc}{\lambda_s k_B T})} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\lambda_s} = \frac{4\pi DE(m)}{\lambda_s} \quad (2)$$

$$E(m) = -\text{Im}\left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}\right) \quad (3)$$

式中: I 为辐射强度; ε_{λ_s} 为单色辐射系数; D 为碳烟颗粒粒径; h 为普朗克常数,其值为6.626 070 15×10⁻³⁴ J·s; c 为光速,其值为3×10⁸ m/s; λ_s 为测量辐射强度时选取的波长; k_B 为玻尔兹曼常数,其值为1.380 606 49×10⁻²³ J/K; T 为碳烟温度; $E(m)$ 为给定

测量波长下的碳烟吸收函数, m 为给定测量波长下的碳烟复折射率, 由实部折射率 n 和虚部吸收系数 k 组成, 其表达式^[7]为

$$m = n - ik \quad (4)$$

在实际测量过程中, 首先需要测得测量点处两个波长 λ_{s1} 和 λ_{s2} (本章节中下标 1、2 均为对应的两个波长)下的辐射强度, 带入式(1)中, 得到两个测量波长下的辐射强度与温度间的关系; 之后将两式对比, 整理得到所测温度^[15]如式(5)所示。由此可见, 复折射率 m 为比色测温法计算时的重要参数, m 的准确性决定了测温结果的精度。

$$T = \frac{hc(\lambda_{s1} - \lambda_{s2})}{\lambda_{s1}\lambda_{s2}k_B(\ln\frac{I_1}{I_2} - \ln\frac{E(m_1)}{E(m_2)} - 6\ln\frac{\lambda_{s2}}{\lambda_{s1}})} \quad (5)$$

1.2 复折射率赋值方式的优化路线

在比色测温法中, 复折射率采用经验公式或经验值进行赋值, 但由于碳烟的复折射率受尺度效应的影响, 其值与碳烟颗粒的粒径有关^[16], 采用传统赋值方法会导致比色测温结果出现较大误差。然而碳烟粒径与复折射率间并无直接的物理关系, 而光学带隙分别与粒径和复折射率存在直接的物理关系, 并且碳烟粒径的测量比光学带隙的测量更简易, 所以构建以光学带隙为桥梁的纳米碳烟复折射率和粒径之间的关系, 可获取火焰中不同粒径纳米碳烟的复折射率。基于上述思路, 复折射率赋值方式的优化路线如图 1 所示。

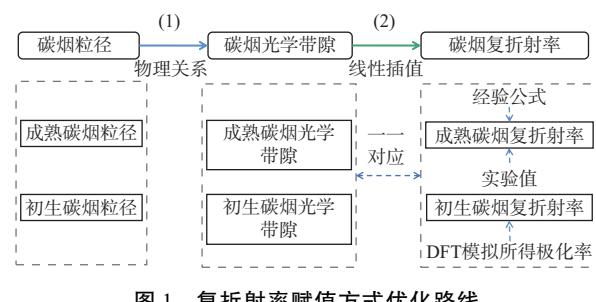


图 1 复折射率赋值方式优化路线

Fig. 1 Optimized route for complex refractive index assignment method

具体优化路线主要分为两步:

1) 建立碳烟粒径与光学带隙的关系

将实验测得的碳烟粒径带入到式(6)^[17]中, 得到粒径对应的光学带隙为

$$E_g = E_{g(mature)} + \frac{h^2}{8\pi D_m^2} \left(\frac{1}{m_e^*} - \frac{1}{m_h^*} \right) - \frac{1.8e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r D_m} \quad (6)$$

式中: E_g 为光学带隙; $E_{g(mature)}$ 为成熟碳烟的光学带隙; m_e^* 为有效电子质量, 其值为 $0.052m_0$; m_h^* 为

空穴电子质量, 其值为 $0.038m_0$; m_0 为电子质量, 其值为 9.10956×10^{-31} kg; ϵ_0 为真空介电常数, 其值为 $8.854187817 \times 10^{-12}$ F/m; ϵ_r 为相对介电常数, 其值取 2.97^[17]; e 为电子电荷, 其值为 1.6×10^{-19} C; D_m 为碳烟的电迁移率直径, 与碳烟粒径的关系如式(7)^[18]所示:

$$D_m = N^{1/2.22} D \quad (7)$$

式中 N 为碳烟数密度。

2) 建立光学带隙与复折射率的关系

某波长下的碳烟复折射率与光学带隙间的关系可通过线性插值表示, 表达式如式(8)所示:

$$\frac{m - m_1}{E_g - E_{g1}} = \frac{m_2 - m_1}{E_{g2} - E_{g1}} \quad (8)$$

式中: 下标 1、2 分别对应成熟碳烟和初生碳烟。成熟碳烟和初生碳烟的光学带隙已知, 分别为 0.25 eV 和 0.6 eV^[10]。而某波长下的成熟碳烟复折射率和初生碳烟复折射率为未知, 二者数值可通过以下两种路线获取:

1) 成熟碳烟复折射率

成熟碳烟的复折射率有两种赋值方式: 经验公式和实验测量值。由这两种赋值方式, 进而发展出两种优化路径。

经验公式^[7]如式(9)和式(10)所示, 可以计算任意波长下的成熟碳烟复折射率:

$$n = 1.811 + 0.1263 \ln \lambda + 0.027 \ln^2 \lambda + 0.0417 \ln^3 \lambda \quad (9)$$

$$k = 0.5812 + 0.1212 \ln \lambda + 0.2309 \ln^2 \lambda - 0.01 \ln^3 \lambda \quad (10)$$

而实验值赋值较为复杂, 对于实验常用波长 (532 nm、1 064 nm 等), 成熟碳烟复折射率已有实验测出, 可以直接使用。若测量波长为不常用波长, 可根据光学带隙值及波长选取质量吸收截面值^[10], 代入式(11)计算吸收函数 $E(m)$, 用于比色测温计算。

$$E = \frac{C_{MA} \times \lambda \times \rho}{6\pi} \quad (11)$$

式中: ρ 为碳烟的密度; C_{MA} 为质量吸收截面。

2) 初生碳烟复折射率

初生碳烟的复折射率较难测量, 可通过极化率与复折射率之间的关系^[19]求取。两者关系的表达式如式(12)所示:

$$\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} = \frac{\alpha}{3\epsilon_0 V_p} \quad (12)$$

式中: α 为极化率; V_p 为颗粒体积, 颗粒近似为球体。

对于极化率, MOULIN F 等人^[20]构建初生碳烟模型, 通过原子点偶极相互作用的方法模拟得

到了碳烟极化率。本文根据常用测量波长范围($200\text{ nm} \sim 1400\text{ nm}$)及能量与波长之间的关系,选取碳烟极化率曲线 $0 \sim 5\text{ eV}$ 部分,拟合计算得到初生碳烟极化率曲线。同时为保证能量与波长对应的正确性,将文献[11]中 532 nm 和 1064 nm 波长对应的初生碳烟复折射率通过公式反推,得到极化率与原值的比较,如图2所示,可看出 532 nm 和 1064 nm 波长下的极化率与原值吻合良好。

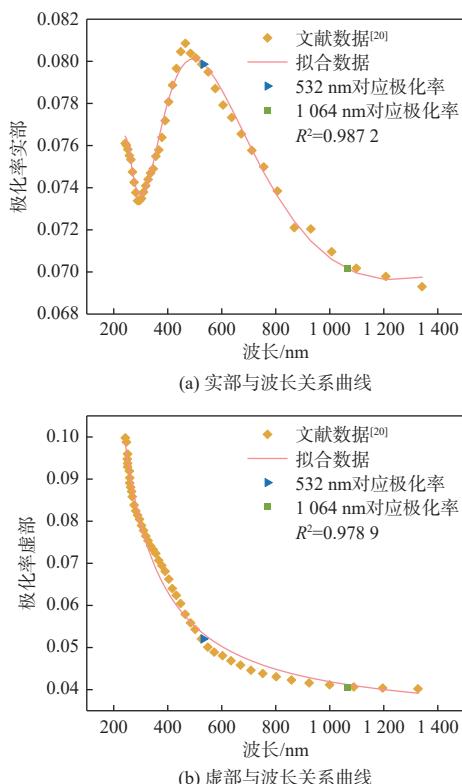


图2 初生碳烟的极化率与波长关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between polarizability and wavelength of nascent soot

通过上述两种路线,可求得某波长下的成熟碳烟复折射率和初生碳烟复折射率,带入到式(8)中即可得到碳烟复折射率与光学带隙间的关系。

将路线1中的光学带隙值代入碳烟复折射率与光学带隙间关系,即可求得某波长下任意成熟情况的碳烟复折射率,实现对复折射率赋值的优化。

2 实验分析

2.1 优化结果评价

为评估采用经验公式和实验值对复折射率赋值优化的效果,将优化前后的碳烟温度计算值与独立于复折射率建模的激光诱导荧光法(LIF)测量的温度数据^[12]进行比较。根据优化方式的不同,

将未优化测温结果的碳烟复折射率和成熟碳烟复折射率的取值方式分为两种:经验公式优化方式的两种复折射率均由经验公式赋值;实验值优化方式根据波长分为两种方式:对于常用波长,两种复折射率均由实验测量值赋值,对于不常用波长,由式(11)求得吸收函数用于比色测温计算。

优化前后的温度数值选取文献[12]的数据计算。文中火焰为当量比(燃料完全燃烧的理论空气量与实际供给空气量之比)1.75的常压正丁烷/氧/氮预混火焰,稳定在一个 60 mm 直径的多孔Holthuis燃烧器上。碳烟的电迁移率直径 D_m 采用扫描电迁移率颗粒物粒径谱仪测量,温度由LIF测量,火焰自发辐射强度由ICCD接收器测量。其中,LIF测温法具有非侵入和高时空分辨率的测量优势,且经实验证明,其测温精度与接触式测温精度近似^[21],因此选取LIF作为真值的测温方法。而电迁移率直径测量时为区域平均电迁移率直径,可以较大幅度地减少碳烟不同尺度分布带来的误差,保证计算的精确性。选取距离燃烧器入口高度(HAB) 5 mm 、 7 mm 和 10 mm 处数据进行评估。火焰在这三处的温度数值分别为 1673 K 、 1620 K 和 1566 K ,碳烟的电迁移率直径分别为 6.06 nm 、 7.81 nm 和 10.44 nm ,粒径均较小,满足比较优化效果的要求。

将测量得到的碳烟粒径信息^[12]带入式(6)中计算光学带隙,之后将光学带隙代入光学带隙和复折射率线性插值公式,求出该处粒径对应的复折射率,然后结合该火焰的自发辐射强度,计算出最终的比色测温结果。将优化前后的温度计算值与LIF测量的温度数据进行比较,评估两种方法的优化效果。并将优化前后复折射率的数值差异 w 及温度测量的相对误差 v ,作为这两种优化方法的评估指标,则有:

$$w = (m_{\text{mature}} - m)/m \times 100\% \quad (13)$$

$$v = (T - T_{\text{exp}})/T_{\text{exp}} \times 100\% \quad (14)$$

式中: m 和 T 为优化后的结果; m_{mature} 为成熟碳烟复折射率; T_{exp} 为LIF测得的数值。

2.2 基于经验公式优化复折射率赋值的效果

通过章节1.2所述的方式,评估基于经验公式优化复折射率赋值的效果。为减少测量误差,测量波长应间隔一定距离选取,同时由于测量数据的限制($400\text{ nm} \sim 800\text{ nm}$),波长仅选取 450 nm 、 532 nm 、 750 nm 和 800 nm 进行组合计算。将计算结果与LIF实验结果^[12]进行比较,得到图3所示结

果。图 3 中 4 种组合下的优化前后结果差异较小,且都与实验结果存在较大差异,这表明该方法的优化效果不佳。图 4 为经验公式优化复折射率赋值前后实部和虚部的差异。但是由图 4 可知,复折射率实部优化后偏差最高可达 200%,虚部则可达 600% 以上,说明基于尺度效应对复折射率赋值的优化仍有效。在比较经验公式的复折射率值与实验测量的复折射率值后(以波长为 532 nm 的成熟碳烟为例,实部偏差为 4.3%,虚部偏差为 21.2%),推测优化效果不佳是由于经验公式受当时实验条件影响,不能精准取值,使得计算出的成熟碳烟复折射率与现代实验测量存在偏差。此外,5 mm 处的数值更贴近 LIF 数据,可能是受气体辐射噪声影响,使得该位置测量波长间的辐射信号比偏大。

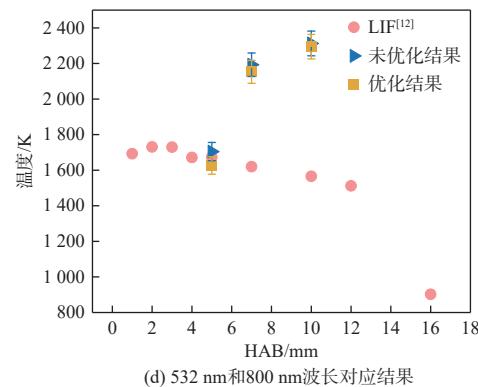
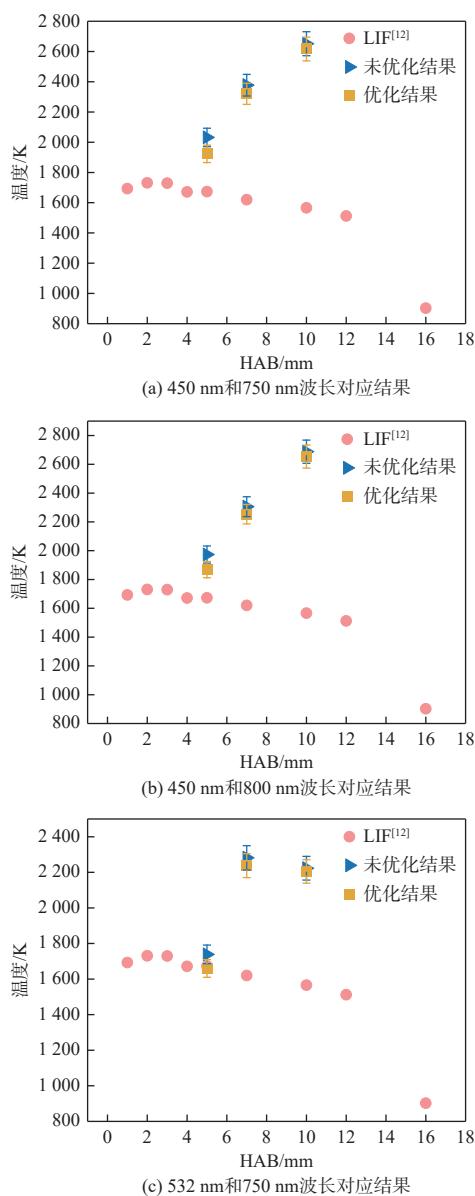


图 3 基于经验公式优化复折射率赋值的比色测温法效果

Fig. 3 Effect of colorimetric thermometry based on empirical formula optimization of complex refractive index assignment

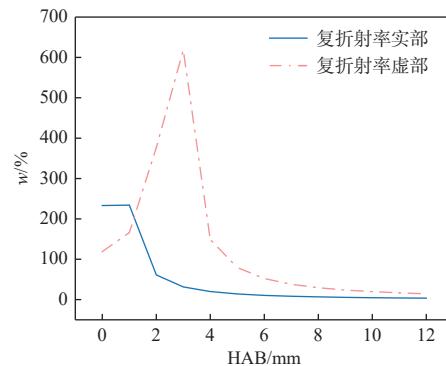


图 4 经验公式优化复折射率赋值前后实部和虚部的差异

Fig. 4 Difference between real part and imaginary part before and after optimization of complex refractive index assignment by empirical formula

为更好地分析优化效果,选取图 3(a)中数据绘制优化前后比色测温结果与 LIF 测量值间的相对误差图,如图 5 所示。

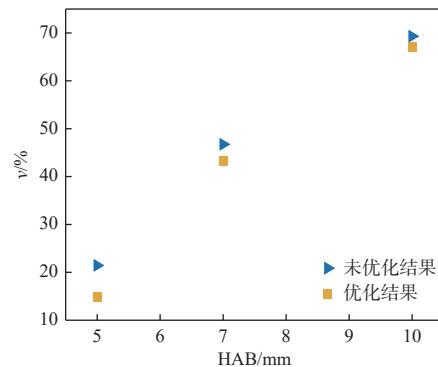


图 5 基于经验公式优化复折射率赋值的比色测温结果优化前后的测量误差

Fig. 5 Measurement errors before and after colorimetric thermometry results optimized by empirical formula for complex refractive index assignment

图5中优化结果与未优化结果相比,误差仅降低了5%左右,优化效果较差。同时,图5也反映出纳米碳烟火焰采用传统碳烟复折射率赋值的比色测温结果与实际差异较大,相对误差最高可达70%,说明采用传统赋值的比色测温法测量纳米碳烟火焰时误差极大,进一步说明优化碳烟复折射率赋值方式的必要性。

2.3 基于实验值优化复折射率赋值的效果

通过章节1.2所述的方式,评估基于实验值优化复折射率赋值的效果。为保证常用波长计算结果的准确性,首先将计算得到的波长为532 nm和1 064 nm对应的复折射率与光学带隙插值公式,与文献[11]中的插值公式进行对比,如图6所示。两个波长下插值公式的计算结果与文献结果相差均不足1%,结果吻合良好。

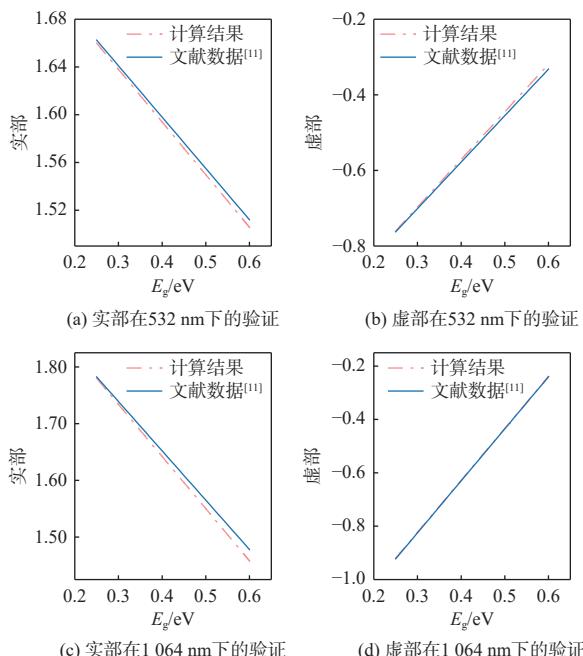


图6 复折射率与光学带隙插值公式的对比

Fig. 6 Verification of interpolation formula between complex refractive index and optical band gap

选取波长532 nm和750 nm(受测量波长范围限制,保证波长间隔,避免因间隔过小导致误差)进行计算,结果如图7所示,未优化结果距离LIF测量值较远,而优化结果更接近LIF测量值。HAB为5 mm处的值依旧受气体辐射噪声的影响,距离测量值较近。

为更好地分析优化效果,计算优化前后结果与LIF测量值^[12]的相对误差,并做图进行比较,

如图8所示。图8中未优化结果与实验结果的相对误差最高可达50%,而优化结果与实验结果的相对误差最大不到10%,降低了40%的误差,优化效果良好。这是由于该火焰初生态碳烟较多,导致碳烟复折射率与成熟碳烟复折射率差异较大,优化后的碳烟复折射率更接近碳烟复折射率实际值,使得火焰温度测量结果更加精确。纳米碳烟复折射率与成熟碳烟复折射率差异如图9所示,复折射率实部和虚部与成熟碳烟复折射率差异均较大,虚部差异最为明显,最高可达1 600%。因此,如果仍忽略复折射率尺度效应进行测量,将导致温度结果出现较大的误差。这表明纳米碳烟复折射率赋值方式亟需进行优化,以保证能准确研究火焰温度与碳烟生成的关系,从而抑制碳烟生成。

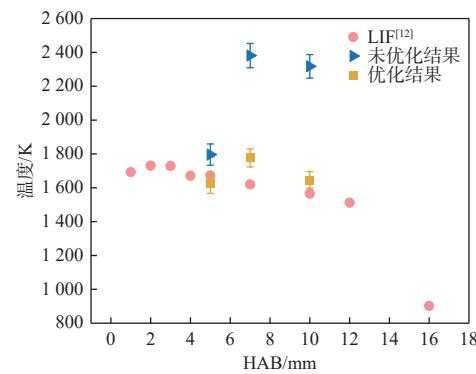


图7 基于实验值优化复折射率赋值的比色测温法效果

Fig. 7 Effect of colorimetric thermometry based on experimental values optimization of complex refractive index assignment

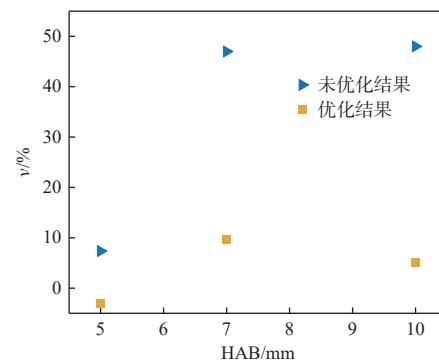


图8 基于实验值优化复折射率赋值的比色测温结果优化前后的测量误差

Fig. 8 Measurement errors before and after colorimetric thermometry results optimized by experimental values for complex refractive index assignment

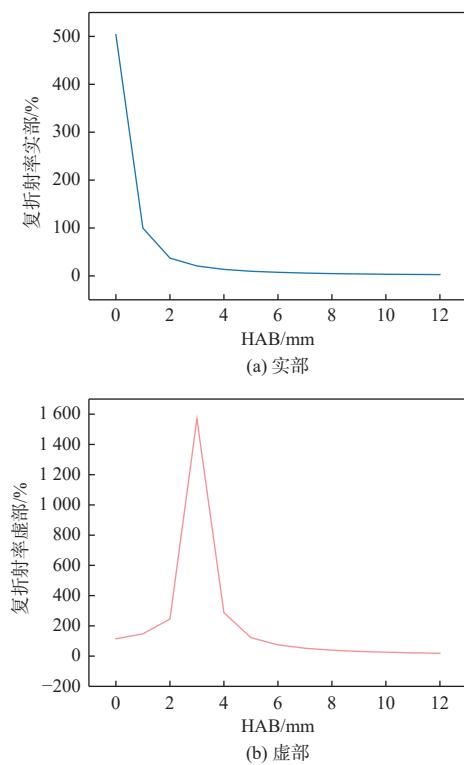


图 9 纳米碳烟相对于成熟碳烟的复折射率实部和虚部差异(实验值优化方法)

Fig. 9 Difference in real part and imaginary part of complex refractive index of nanoscale soot relative to mature soot (experimental value optimization methods)

3 结论

尺度效应显著影响纳米碳烟颗粒复折射率的取值,进而影响纳米碳烟测量数据的精度。本文将粒径作为碳烟成熟情况的实际标度,以光学带隙作为中间桥梁,构建碳烟粒径与复折射率间关系(在 200 nm~1 400 nm 波长范围内建立了粒径与复折射率间关系),并分别基于经验公式和实验值发展了两种复折射率赋值优化方法。基于真实火焰数据和比色测温法,研究了 400 nm~800 nm 波长范围内两种方式的优化效果,得出以下结论。

采用复折射率的传统赋值方法,本文所测火焰中碳烟比色测温结果的相对误差均在 20%~50% 区间内。这表明,基于尺度效应对碳烟复折射率赋值方法进行优化十分必要。

对于本文所测火焰,与基于复折射率传统赋值方法的比色测温结果相比,采用经验公式的复折射率赋值优化方法仅将比色测温结果的相对误差降低 5% 左右。但采用该优化方法后复折射率值与之前相比偏差较大,说明有必要基于尺度效应

对复折射率赋值方法进行优化。测温精度提升较小,可能是受当时实验条件影响,经验公式不能精准取值,使计算出的成熟碳烟复折射率与本实验真实值存在偏差。与基于复折射率传统赋值方法的比色测温结果相比,采用实验值的复折射率赋值优化方法将比色测温结果的相对误差降低了 40% 左右。这是由于实验火焰初生态纳米碳烟较多,导致碳烟复折射率与成熟碳烟复折射率差异较大,优化后的碳烟复折射率取值更接近碳烟复折射率的实际值,使得火焰中碳烟温度测量结果更加精确。

本文提出的复折射率赋值方法具有降低实验次数、提高测量精度的优点,为碳烟的光学测温精度优化提供了可行方案。

参考文献:

- [1] RAMAN V, FOX R O. Modeling of fine-particle formation in turbulent flames[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2016, 48: 159-190.
- [2] KELESIDIS G A, NEUBAUER D, FAN L S, et al. Enhanced light absorption and radiative forcing by black carbon agglomerates[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(12): 8610-8618.
- [3] WANG H. Formation of nascent soot and other condensed-phase materials in flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(1): 41-67.
- [4] ZHOU Y, WANG M, HE Q, et al. Experimental investigation on the size-dependent maturity of soot particles in laminar premixed ethylene burner-stabilized stagnation flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023, 39(1): 1147-1155.
- [5] 刘莹奇. 空间目标红外双波段比色测温法精度分析[J]. 应用光学, 2013, 34(4): 648-652.
- LIU Yingqi. Accuracy analysis of infrared dual-band colorimetric thermometry for space targets[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(4): 648-652.
- [6] 陶伟, 吴国俊, 关云天. 比色测温在陶瓷生产中的应用研究[J]. 应用光学, 2012, 33(5): 940-943.
- TAO Wei, WU Guojun, GUAN Yuntian. Research on the application of colorimetric temperature measurement in ceramic production[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(5): 940-943.
- [7] CHANG H, CHARALAMPOULOS T T. Determination of the wavelength dependence of refractive indices of

- flame soot[J]. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1990, 430(1880): 577-591.
- [8] CORBIN J C, JOHNSON T J, LIU F, et al. Size-dependent mass absorption cross-section of soot particles from various sources[J]. *Carbon*, 2022, 192: 438-451.
- [9] MICHELSSEN H A. Effects of maturity and temperature on soot density and specific heat[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(1): 1197-1205.
- [10] KELESIDIS G A, BRUUN C A, PRATSINIS S E. The impact of organic carbon on soot light absorption[J]. *Carbon*, 2021, 172: 742-749.
- [11] KELESIDIS G A, PRATSINIS S E. Soot light absorption and refractive index during agglomeration and surface growth[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(1): 1177-1184.
- [12] BETRANCOURT C, AUBAGNAC-KARKAR D, MERCIER X, et al. Experimental and numerical investigation of the transition from non sooting to sooting premixed n-butane flames, encompassing the nucleation flame conditions[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 243: 112172.
- [13] 曾志斌. 基于火焰图像求取温度场的双色法测温系统设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
ZENG Zhibin. Design of two-color temperature measurement system based on temperature field obtained by flame image[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [14] MICHELSSEN H A, LIU F, KOCK B F, et al. Modeling laser-induced incandescence of soot: a summary and comparison of LII models[J]. *Applied Physics B*, 2007, 87: 503-521.
- [15] 元金浩. 甲烷富燃火焰激光诱导炽光碳烟分布测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
QI Jinhao. Study on the measurement method of laser induced incandescent light soot distribution in methane-enriched flame[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [16] WAN K, SHI X, WANG H. Quantum confinement and size resolved modeling of electronic and optical properties of small soot particles[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(1): 1517-1524.
- [17] LIU C, WAN K, SINGH A V, et al. Ionization energy of flame-synthesized carbon nanoparticles[C]//10th US National Combustion Meeting of the Eastern States Section of the Combustion Institute. New York: IEEE, 2017(25): 23-26.
- [18] KELESIDIS G A, PRATSINIS S E. A perspective on gas-phase synthesis of nanomaterials: process design, impact and outlook[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 421: 129884.
- [19] ZANGMEISTER C D, RADNEY J G, DOCKERY L T, et al. Packing density of rigid aggregates is independent of scale[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(25): 9037-9041.
- [20] MOULIN F, DEVEL M, PICAUD S. Optical properties of soot nanoparticles[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2008, 109(10): 1791-1801.
- [21] 赵学礼. 激光诱导荧光技术(LIF)应用于温度场测量的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.
ZHAO Xueli. Application of laser-induced fluorescence (LIF) in temperature field measurement[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.