

双色激光诱导炽光法结合光腔衰荡光谱技术测量 碳烟颗粒的研究

王孟, 张焰峰, 陈军*, 杨荟楠, 苏明旭, 蔡小舒

上海理工大学能源与动力工程学院上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093

摘要 基于激光诱导炽光(LII)法和光腔衰荡光谱(CRDS)技术,搭建了用于研究火焰碳烟颗粒的测量平台,并对其性能参数进行了表征。碳烟颗粒路径积分衰减系数测量结果表明,双色 LII 测试系统和 CRDS 系统相互独立。同时运行双色 LII 和 CRDS 系统,测量得到的路径积分衰减系数随着火焰高度的增加先增大后减小,两个系统的测量结果具有较好的相关性。通过优化拟合模型及去除系统噪音,获得了较好的光腔衰荡信号拟合结果。

关键词 测量; 激光诱导炽光法; 光腔衰荡光谱技术; 碳烟颗粒; 扩散火焰; 燃烧

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0304002

Measurement of Soot Particles by Two-Color Laser-Induced Incandescence Method Combined with Cavity Ring-Down Spectroscopy

Wang Meng, Zhang Yanfeng, Chen Jun*, Yang Huinan, Su Mingxu, Cai Xiaoshu
Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract Based on laser-induced incandescence (LII) and cavity ring-down spectroscopy (CRDS), we establish a measurement setup for the study of flame soot particles, and characterize the performance parameters. The measurement results of the path-integrated attenuation coefficient of soot particles show that the two-color LII test system and the CRDS system are independent of each other. When the two-color LII and CRDS systems are opened at the same time, the measured path-integrated attenuation coefficient increases first and then decreases with the increase of the height above the burner, and the measurement results of the two systems have good correlation. By optimizing the fitting model and removing the system noise, we obtain a better cavity ring-down signal fitting results.

Key words measurement; laser-induced incandescence; cavity ring-down spectroscopy; soot particles; diffusion flame; combustion

OCIS codes 120.1740; 300.1030; 300.2530

1 引言

可吸入颗粒物对人体健康有严重危害,是导致全球气候变化、酸沉降、能见度降低及光化学烟雾等重大环境问题的重要因素,同时也是我国城市首要污染物。燃烧排放如锅炉和机动车等是我国大气环境中可吸入颗粒物的主要来源,而碳烟颗粒是燃烧排放可吸入颗粒物的重要组成部分之一,因此了解碳烟颗粒的物理化学特征十分必要。

激光诱导炽光(LII)法作为一种非接触激光诊断技术,具有很高的时间和空间分辨率。1977年, Eckbreth^[1]首次提出激光加热粒子的概念。1984年, Melton^[2]发表了第一篇基于激光加热的碳烟诊断技术的文章。1995年, Will等^[3]第一次将 LII 法用于碳烟粒径定量测试。2002年, Smallwood等^[4]提出了双色激光诱导炽光(2C-LII)法,并将其用于碳烟标定,该方法具有精度高、易操作及可在线标定等优点,迅速得到广泛使用^[5]。近年来,国内何旭课

收稿日期: 2018-09-14; 修回日期: 2018-11-03; 录用日期: 2018-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(91544225, 51676130, 51776129)

* E-mail: j.chen@usst.edu.cn

题组^[6-8]也对火焰碳烟颗粒展开了实验测量与理论模型研究。

光腔衰荡光谱(CRDS)技术具有吸收光程长,及不受光源强度起伏影响的特点,适用于微弱吸收物质的定量测量,而且装置简单、操作容易、适应范围广^[9]。1998年,O'Keefe等^[10]将脉冲激光用于CRDS技术,极大地推动了该技术的发展。国内,王丹等^[11]将CRDS技术用于夜间大气中N₂O₅的测量,谈艳等^[12]将CRDS技术与激光锁频技术相结合,用于精密分子光谱的测量。

国际上,科研人员将CRDS技术与LII法结合起来用于火焰碳烟颗粒的研究中。Vander等^[13]在1999年使用CRDS技术对利用LII法测得的碳烟体积浓度进行校准。2004年,Schoemaeker Moreau等^[14]结合两者对碳烟体积浓度和多环芳烃(PAHs)进行研究,获得了其二维分布,即水平方向和竖直方向的分布。Desgroux等^[15]在2008年结合两种方法对碳烟体积浓度与燃烧压力的关系进行了研究。国内尚未见到类似结合LII法与CRDS技术进行碳烟颗粒测量研究的相关报道。

本文主要介绍用于研究层流扩散火焰的光学测量平台。该平台采用耶鲁大学的层流扩散火焰燃烧器^[16],以乙烯为燃料产生稳定的层流扩散火焰,对火焰碳烟颗粒特性展开研究,测量方法上结合了2C-LII和CRDS技术。PMT(Photomultiplier Tube)模块中的前置放大器会受到带宽的限制,与之相比,APD(Avalanche Photo Diode)模块对高频采样具有更好的响应,因此本文的LII系统采用双APD,将其用于信号的采集。通过对碳烟颗粒路径积分衰减系数的测量来验证LII系统与CRDS系统的相互独立性及测量结果的相关性。

2 原 理

2.1 LII法的基本原理

LII法的基本原理是使用脉冲激光照射碳烟颗粒云团,碳烟颗粒吸收激光的能量后温度迅速上升(4000 K左右),发出与温度相对应的黑体辐射,使用APD接收经过滤光片的辐射信号,接收到的信号大小与受激发的碳烟颗粒体积浓度成正比,该方法可以用来计算碳烟颗粒体积浓度;又因为信号的衰减速率与碳烟颗粒的比表面积相关,粒径小的碳烟颗粒具有较大的比表面积,所以其对应信号的衰减速度大于粒径较大的碳烟颗粒的,通过分析衰减速率来计算得到粒径信息。

双色LII法即通过对比分析计算同一时刻、同一颗粒云团受激光照射后经过两片不同波长滤光片的LII信号,可测得该碳烟颗粒的温度和体积浓度^[6,17]。碳烟颗粒的颗粒温度 T_p 可表示为

$$T_p = \frac{hc}{k} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \left\{ \ln \left[\frac{V_{\text{EXP1}}}{V_{\text{EXP2}}} \frac{E(m_{\lambda_2}) \lambda_1^6}{E(m_{\lambda_1}) \lambda_2^6} \right] \right\}, \quad (1)$$

式中: c 为光速; h 为普朗克常数; k 为玻尔兹曼常数; λ_1 、 λ_2 分别为两个滤光片的中心波长; V_{EXP1} 、 V_{EXP2} 为实验中不同波长下示波器的电压信号; $E(m_{\lambda_1})$ 、 $E(m_{\lambda_2})$ 为不同波长下颗粒折射率的函数,即颗粒吸收函数, m 为碳烟颗粒的复折射率。

碳烟颗粒体积浓度 f_v :

$$f_v = \frac{V_{\text{EXP}}}{\eta(\lambda) G_{\text{EXP}} l_b \frac{2c^2 h}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T_p}\right) - 1 \right]^{-1} K_e}, \quad (2)$$

式中: $\eta(\lambda)$ 为校准因子,表示测量得到的信号与实际信号的比值,可以用来表征系统在某一检测波长和某一温度下的灵敏度; G_{EXP} 为实验中APD增益; l_b 为激光与火焰相互接触的宽度; $K_e = 6\pi E(m)$,为无量纲的碳烟气溶胶吸收常数,与激发波长相关^[15]。将温度 T_p 代入(2)式,可以计算得到碳烟颗粒体积浓度。

2.2 CRDS技术的基本原理

CRDS技术主要通过测量光在高反射腔中的衰荡速率来获得腔内物质的吸收系数。其基本原理如图1所示,在一个光学腔中,两侧为两个反射率为 R 的高反(HR)镜,当将与该光学腔谐振的激光耦合到谐振腔后,腔内的激光会在两个腔镜之间来回反射从而形成振荡,光强会因腔镜透射、衍射及样品的吸收而减弱,右侧高反镜后的探测器可探测到随时间变化的透射光强,对信号进行 e 指数拟合,可以得到光腔的衰荡时间 τ 。

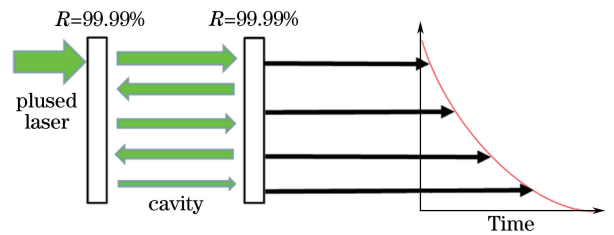


图1 CRDS和光衰荡示意图

Fig. 1 Schematic of CRDS and optical ring-down

碳烟颗粒体积浓度推导如下:

$$\tau_0 = \frac{L}{c(1-R)}, \quad (3)$$

$$\tau = \frac{L}{c \left[\int_{l_{\text{soot}}} k_{\text{soot}} dx + (1 - R) \right]}, \quad (4)$$

$$k_{\text{soot}} l_{\text{soot}} = \frac{L}{c} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right), \quad (5)$$

$$k_{\text{soot}} = \frac{K_c}{\lambda} f_v, \quad (6)$$

$$f_v = \frac{L\lambda}{cK_c l_{\text{soot}}} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right), \quad (7)$$

式中： τ 和 τ_0 分别为腔内存在和不存在消光物质时的衰荡时间； L 为腔长； l_{soot} 表示激光所经过的包含

碳烟颗粒的路径长度，该路径上碳烟颗粒的消光系数为 k_{soot} 。如果碳烟颗粒符合瑞利散射条件，其消光系数可以用(6)式来表达^[14-15]。

3 实验系统

3.1 双色 LII 及 CRDS 实验系统

整体实验系统如图 2 所示，其包含双色 LII 和 CRDS 两个实验系统。两个实验系统互相独立，可以单独进行 LII 实验或 CRDS 实验；又可以同时运行两个系统，同时获得两个实验系统的实验数据。

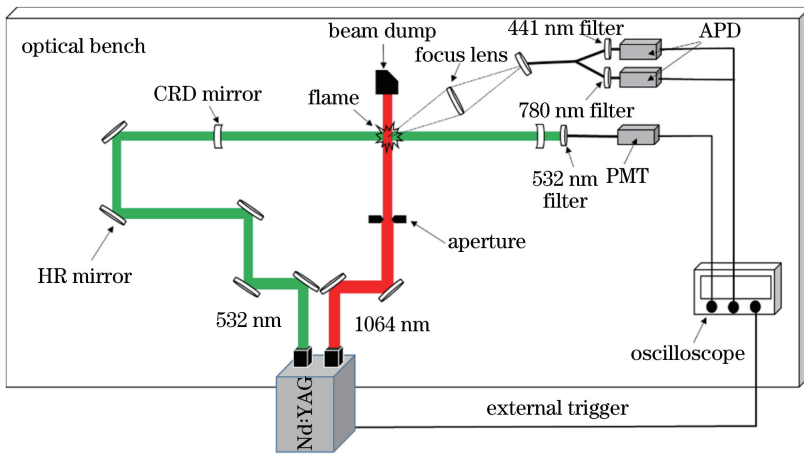


图 2 整体实验系统

Fig. 2 Overall experimental system

3.1.1 双色 LII 实验系统

双色 LII 系统布置为图 2 中红色光路，1064 nm 的脉冲激光由 Nd:YAG 激光器 (Brilliant B, Quantel, 法国) 产生，经由多个反射镜和光阑校准，在测量区域加热碳烟颗粒，最后被激光制止模块吸收。由于激光能量符合高斯分布，可利用光阑过滤杂散光。激光能量密度对 LII 信号产生的影响较大，较高的能量密度能将碳烟颗粒加热到更高的温度，获得较强的 LII 信号和更好的信噪比；但激光能量过大，会造成碳烟颗粒的气化，影响碳烟颗粒体积分数和粒径的计算。因此，激光能量要选取在一个合适的范围内。LII 信号由一个大型凸透镜聚焦在接收光纤中，Y 型光纤将光分为两路，经过两片滤光片后由 APD (C12702-12, Hamamatsu, 日本) 接收，最后在示波器上显示并储存。外触发信号由激光器产生，并同步给示波器进行采集。两片滤光片的中心波长分别为 441 nm (半峰全宽 10 nm) 和 780 nm (半峰全宽 10 nm)。选择滤光片中心波长时，主要关注以下三点：1) 在该波段探测系统具有更好的灵敏度；2) 避开气态碳分子 C_2 受激发产生荧光的影

响， C_2 荧光主要集中在 473 nm 和 563 nm 两个波段上。3) 避开本实验台上 532 nm 和 1064 nm 两个信号源的影响^[5]。本实验台上两个 APD 的光谱响应范围为 200~1000 nm，在 200~1000 nm 波段上都具有较好的灵敏度；中心波长为 441 nm 和 780 nm 时，既避开了 C_2 荧光的影响，也避开了实验台上 532 nm 和 1064 nm 两个激光对信号的干扰。

3.1.2 CRDS 实验系统

在同一个光学实验平台上 (图 2)，利用安装有二倍频头的 Nd:YAG 激光器，发射波长为 532 nm 的脉冲激光。在两面高反镜 ($R > 99.99\%$, CRD532-1025-100, Semrock, 美国) 的作用下，激光在长为 0.8 m 的腔中来回振荡，最后信号被装有 532 nm 滤光片的 PMT (CH253, Hamamatsu, 日本) 所接收，并在示波器上显示和储存。示波器在接收到激光器的外触发信号后会对数据进行采集。

3.2 燃烧器

实验所使用的燃烧器为耶鲁大学的层流扩散火焰燃烧器^[16]，如图 3 所示。燃烧器由 6061 铝合金加工制成，表面可以采用阳极氧化工艺进行处理。

燃烧器中心燃料管内径为 4 mm, 外层空气室内径为 74 mm。乙烯(体积分数大于 99.9%)从燃烧器下方进入燃料管, 在燃烧器上方被点燃。压缩空气从燃烧器侧面 4 个接头进入空气室, 经过用于稳流的玻璃珠与蜂窝陶瓷板后离开燃烧器, 玻璃珠的直径为 3 mm, 可以通过换用不同孔径的蜂窝陶瓷板来改变空气流速。

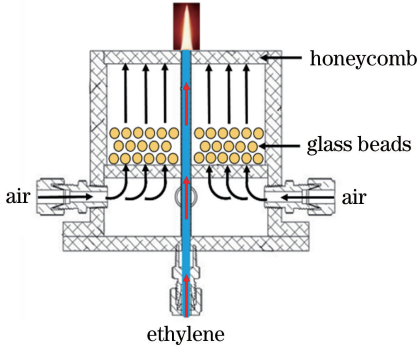


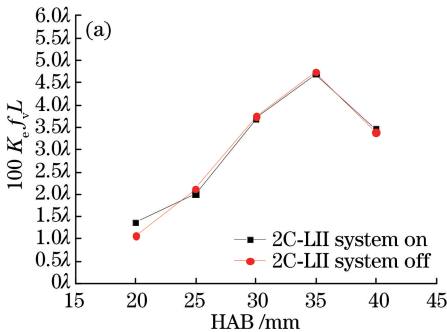
图 3 燃烧器
Fig. 3 Burner

4 分析与讨论

在某一高度上, 双色 LII 系统和 CRDS 系统的信号强度与碳烟体积分数相关。当激光经过宽度为 $2W$ 的火焰时, 双色 LII 系统和 CRDS 系统的路径积分衰减系数可以用 $\int_{-W}^W \frac{K_e f_v dx}{\lambda}$ 来表示^[13]。

根据(2)式, 双色 LII 系统的路径积分衰减系数可表示为

$$\eta(\lambda_1)G_{\text{EXP}} \frac{\int_{-W}^W \frac{f_v K_{e1} dx}{\lambda_1}}{V_{\text{EXP}}} = \frac{2c^2 h}{\lambda_1^4} \left[\exp\left(\frac{hc}{k\lambda_1 T_p}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (8)$$



式中: λ_1 和 K_{e1} 分别为双色 LII 系统所使用激光的波长及该波长下的碳烟气溶胶吸收常数。

根据(7)式, CRDS 系统的路径积分衰减系数可表示为

$$\int_{-W}^W \frac{f_v K_{e2} dx}{\lambda_2} = \frac{L_{\text{CRDS}}}{c} \left[\frac{1}{\tau(\lambda_2)} - \frac{1}{\tau_0(\lambda_2)} \right], \quad (9)$$

式中: λ_2 和 K_{e2} 分别为 CRDS 系统所使用激光的波长及该波长下的碳烟气溶胶吸收常数, L_{CRDS} 为 CRDS 系统的腔长。

4.1 双色 LII 系统与 CRDS 系统的相互独立性

调整双色 LII 系统与 CRDS 系统的出射激光, 使两束激光互相垂直且都经过火焰中心线, 设定空气流量为 120 L/min, 乙烯气体流量为 0.2 L/min, 双色 LII 系统的激光能量密度为 334 mJ/cm²。使用两个系统测量计算不同燃烧器出口高度 (HAB) 下碳烟颗粒的路径积分衰减系数。

如图 4(a) 所示, 黑色方点连线表示开启双色 LII 系统时, CRDS 系统在不同的 HAB 上测得的路径积分衰减系数; 红色圆点连线表示关闭 LII 系统时, CRDS 系统不同的 HAB 上测得的路径积分衰减系数。结果显示, 开启和关闭双色 LII 系统两种情况下: $h_{\text{HAB}}=20$ mm 时, 路径积分衰减系数分别为 1.37 和 1.06; $h_{\text{HAB}}=25$ mm 时, 路径积分衰减系数分别为 2.01 和 2.12; $h_{\text{HAB}}=30$ mm 时, 路径积分衰减系数分别为 3.70 和 3.74; $h_{\text{HAB}}=35$ mm 时, 路径积分衰减系数分别为 4.69 和 4.73; $h_{\text{HAB}}=40$ mm 时, 路径积分衰减系数分别为 3.46 和 3.39。图 4(b) 中, 横坐标为开启双色 LII 系统时, CRDS 系统测得的路径积分衰减系数; 纵坐标表示相对应 HAB 上关闭双色 LII 系统情况下, CRDS 系统测得的路径积分衰减系数。线性拟合得到的相关性系数为 0.95。从图 4 可以看出, 在本平台上, 当开启 CRDS 系统

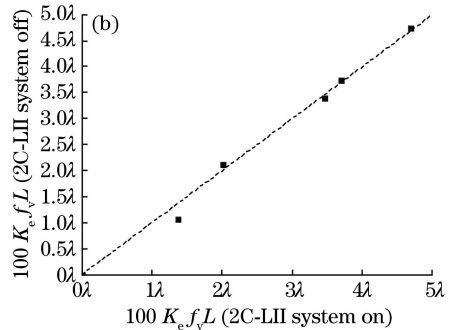


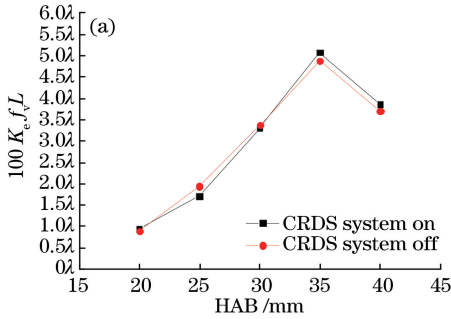
图 4 打开和关闭双色 LII 系统情况下, CRDS 系统的测量结果。(a) 路径积分衰减系数; (b) 线性拟合

Fig. 4 Measurement results of CRDS system with 2C-LII system on and off.

(a) Path-integrated attenuation coefficient; (b) linear fitting

对碳烟颗粒进行测量实验时,是否开启双色 LII 系统对测量结果的影响可以忽略。

如图 5(a)所示,黑色方点连线表示开启 CRDS 系统时,双色 LII 系统在不同的 HAB 上测得的路径积分衰减系数;红色圆点连线表示关闭 CRDS 系统时,双色 LII 系统在不同的 HAB 上测得的路径积分衰减系数。结果显示,开启和关闭 CRDS 系统两种情况下: $h_{\text{HAB}}=20$ mm 时,路径积分衰减系数分别为 0.95 和 0.90; $h_{\text{HAB}}=25$ mm 时,路径积分衰减系数分别为 1.71 和 1.94; $h_{\text{HAB}}=30$ mm 时,路径



积分衰减系数分别为 3.30 和 3.37; $h_{\text{HAB}}=35$ mm 时,路径积分衰减系数分别为 5.01 和 4.89; $h_{\text{HAB}}=40$ mm 时,路径积分衰减系数分别为 3.87 和 3.71。图 5(b)中,横坐标为开启 CRDS 系统时,双色 LII 系统测得的路径积分衰减系数;纵坐标表示在相对应的 HAB 上关闭 CRDS 系统情况下,LII 系统测得的路径积分衰减系数。线性拟合得到的相关性系数为 0.99。从图 5 可以看出,在本平台上,当开启双色 LII 系统对碳烟颗粒进行测量实验时,是否开启 CRDS 系统对测量结果的影响可以忽略。

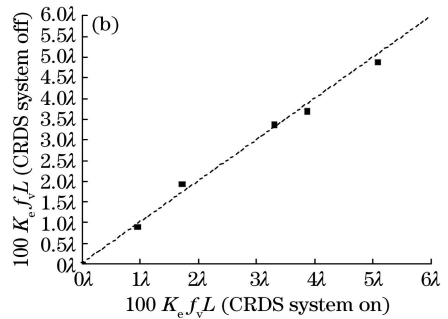


图 5 打开和关闭 CRDS 系统情况下,双色 LII 系统的测量结果。(a)路径积分衰减系数;(b)线性拟合

Fig. 5 Measurements results of 2C-LII system with CRDS system on and off.

(a) Path-integrated attenuation coefficient; (b) linear fitting

综上所述,在该平台上同时开启双色 LII 和 CRDS 系统进行实验时,两个系统相互之间对测量结果的影响可以忽略,可认为双色 LII 系统和 CRDS 系统互相独立。

4.2 双色 LII 系统与 CRDS 系统测量结果的相关性

同时利用双色 LII 系统与 CRDS 系统对层流扩散火焰碳烟颗粒进行测量,计算得到不同 HAB 上的路径积分衰减系数,结果如图 6 所示。图 6 中,黑色方点连线为不同 HAB 上双色 LII 系统测得的路径积分衰减系数,红色圆点连线及蓝色三角连线皆为不同 HAB 上 CRDS 系统测得的路径积分衰减系数,两者区别在于采用的腔衰荡信号拟合模型不同。碳烟颗粒路径积分值在燃烧器的出口位置路径积分衰减系数较小,这是因为乙烯气体在燃烧器出口燃烧后首先会生成多环芳烃(PAH),PAH 是碳烟颗粒产生的前驱物质;随着高度的升高,PAH 逐渐团聚生成碳烟颗粒,路径积分衰减系数也逐渐变大;在火焰的尾端,碳烟颗粒与空气获得充分接触,燃烧变得完全,路径积分衰减系数随着碳烟颗粒浓度的下降而下降。这与其他的实验结果较为相似^[13],但路径积分衰减系数的最大值与相对应的火焰高度位置有所不同,初步判断是火焰燃烧工况的不同(如空燃比)所造成的。

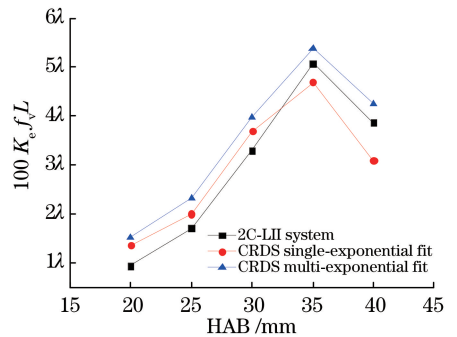


图 6 路径积分衰减系数与 HAB 的关系

Fig. 6 Path-integrated attenuation coefficient versus HAB

当对 CRDS 系统测得的衰荡时间采用单指数拟合模型时,两个实验系统测得的路径积分衰减系数在 HAB 为 20, 25, 30 mm 三个点上具有较好的一致性,CRDS 系统测得的路径积分衰减系数都略高于双色 LII 系统的测量值;但是在 $h_{\text{HAB}}=35$ mm 和 40 mm 两个点上,CRDS 系统测得的路径积分衰减系数要略低于双色 LII 系统的测量值。

由于在 CRDS 系统中, PMT 的非线性响应、系统的电子噪声,及光腔的多空间模式都可能造成电压衰减,这些 τ_{noise} 会使 PMT 测量得到的 τ_{sample} 呈现出多指数衰减^[18-19],所以需要选取适当的拟合模型及拟合范围。通过对实验中衰荡时间拟合残差进行

分析,发现单指数衰减模型的拟合残差与文献[20]的结果较为相似,判断是 CRDS 系统中 PMT 的前置放大器的带宽效应造成了多指数衰减。因 τ_{noise} 远小于系统衰荡时间,针对这种情况可以采用去除头部信号并选用多指数拟合的方法来去除 τ_{noise} ,减小拟合残差,优化 CRDS 系统的数据处理结果。

图 7(a)和 7(b)为对 CRDS 系统衰荡信号使用单指数拟合模型所得的拟合结果以及拟合残差,

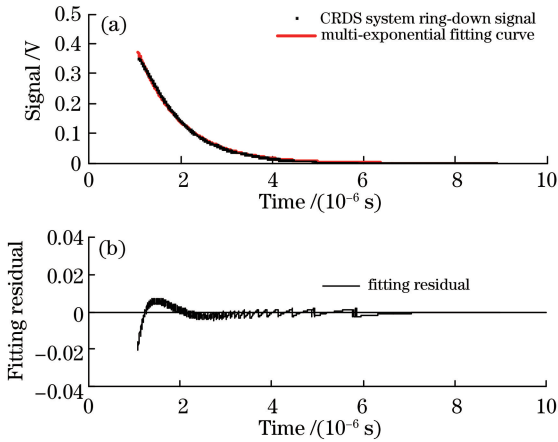


图 7(c)和 7(d)为对去除衰荡信号的头部信号采用多指数拟合模型所得的拟合结果及拟合残差。从结果可以看出,采用去除头部信号和多指数拟合模型的方法,有效地优化了拟合结果,缩小了拟合残差。图 6 中,使用多指数拟合模型后,CRDS 系统测得的路径积分衰减系数与双色 LII 系统的测量结果在 35 mm 和 40 mm 的 HAB 上获得了更好的一致性。

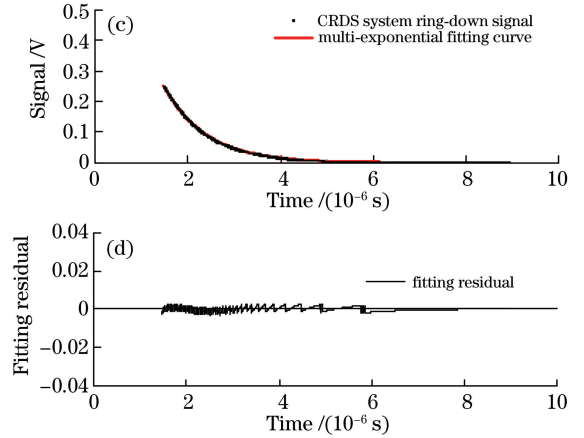


图 7 $h_{\text{HAB}} = 35 \text{ mm}$ 时,CRDS 系统衰荡时间的拟合结果及拟合残差。(a)单指数拟合模型下,腔衰荡信号的拟合结果;(b)单指数拟合模型下,腔衰荡信号的拟合残差;(c)多指数拟合模型下,腔衰荡信号的拟合结果;(d)多指数拟合模型下,腔衰荡信号的拟合残差

Fig. 7 Fitting results and residuals of CRDS system ring-down time with $h_{\text{HAB}} = 35 \text{ mm}$. (a) Cavity ring-down signal fitting result under single-exponential fitting model; (b) fitting residual of cavity ring-down signal under single-exponential fitting model; (c) cavity ring-down signal fitting result under multi-exponential fitting model; (d) fitting residual of cavity ring-down signal under multi-exponential fitting model

5 结 论

联和搭建了双色 LII 系统和 CRDS 系统装置,介绍了用于该实验台的扩散火焰燃烧器。基于该扩散火焰燃烧台进行了双色 LII 系统和 CRDS 系统的对比实验,两系统可互相独立;路径积分衰减系数的测量计算结果具有较好的相关性,说明可同时运行双色 LII 系统和 CRDS 系统对层流扩散火焰产生碳烟颗粒的特性进行研究。本系统通过优化拟合模型及去除系统噪音的方法获得了较好的腔衰荡信号拟合结果。

该平台具备同时运行双色 LII 系统和 CRDS 系统的能力,准备进一步测量火焰不同位置以获得碳烟颗粒的二维分布信息,利用双色 LII 系统测量计算碳烟颗粒的粒径信息,再结合 Mie 理论模拟计算碳烟颗粒的消光系数;同时利用 CRDS 系统测量计算消光系数的实验值,通过消光系数的模拟值和实验值的一致性对比,可针对碳烟颗粒开展光学性质闭合研究。

参 考 文 献

- [1] Eckbreth A C. Effects of laser-modulated particulate incandescence on Raman scattering diagnostics [J]. Journal of Applied Physics, 1977, 48(11): 4473-4479.
- [2] Melton L A. Soot diagnostics based on laser heating [J]. Applied Optics, 1984, 23(13): 2201-2208.
- [3] Will S, Schraml S, Leipertz A. Two-dimensional soot-particle sizing by time-resolved laser-induced incandescence [J]. Optics Letters, 1995, 20(22): 2342-2344.
- [4] Smallwood G J, Dan C, Gareau D, et al. Concurrent quantitative laser-induced incandescence and SMPS measurements of EGR effects on particulate emissions from a TDI diesel engine [J]. Sae Technical Papers, 2002, 111:1345-1360.
- [5] Schulz C, Kock B F, Hofmann M, et al. Laser-induced incandescence: recent trends and current questions [J]. Applied Physics B, 2006, 83(3): 333-354.

- [6] Wang Y, Yao Q, He X, *et al.* Electric field control of soot distribution in flames using laser-induced incandescence[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(8): 34-39.
王宇, 姚强, 何旭, 等. 用激光诱导可见光法测量电场影响下火焰碳烟颗粒浓度的分布变化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(8): 34-39.
- [7] He X, Ma X, Wang J X. Quantitative soot concentration measurement of flame by laser induced incandescence[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2009, 15(4): 344-349.
何旭, 马骁, 王建昕. 用激光诱导炽光法定量测量火焰中的碳烟浓度[J]. 燃烧科学与技术, 2009, 15(4): 344-349.
- [8] Chen L H, Zuo L, Wu J, *et al.* Analysis of non-Fourier effect during laser-induced radiation of micro scale carbon particulates [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0408005.
陈玲红, 左磊, 吴建, 等. 微尺度碳粒的激光诱导辐射非傅里叶现象分析[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0408005.
- [9] Herbelin J M, Mckay J A, *et al.* Sensitive measurement of photon lifetime and true reflectances in an optical cavity by a phase-shift method [J]. Applied Optics, 1980, 19:144-147.
- [10] O'Keefe A, Deacon D A G. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources [J]. Review of Scientific Instruments, 1988, 59(12): 2544-2551.
- [11] Wang D, Hu R Z, Xie P H, *et al.* Measurement of nitrogen pentoxide in nocturnal atmospheric based on cavity ring-down spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0901001.
王丹, 胡仁志, 谢品华, 等. 基于腔衰荡光谱技术测量夜间大气中五氧化二氮[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0901001.
- [12] Tan Y, Wang J, Tao L G, *et al.* Precise parameters of molecular absorption lines from cavity ring-down spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0911002.
谈艳, 王进, 陶雷刚, 等. 光腔衰荡光谱方法测量分子的高精密谱线参数[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0911002.
- [13] Vander Wal R L, Ticich T M. Cavity ringdown and laser-induced incandescence measurements of soot [J]. Applied Optics, 1999, 38(9): 1444-1451.
- [14] Schoemaeker Moreau C, Therssen E, Mercier X, *et al.* Two-color laser-induced incandescence and cavity ring-down spectroscopy for sensitive and quantitative imaging of soot and PAHs in flames [J]. Applied Physics B, 2004, 78(3/4): 485-492.
- [15] Desgroux P, Mercier X, Lefort B, *et al.* Soot volume fraction measurement in low-pressure methane flames by combining laser-induced incandescence and cavity ring-down spectroscopy: effect of pressure on soot formation [J]. Combustion and Flame, 2008, 155(1/2): 289-301.
- [16] Smooke M, McEnally C, Pfefferle L, *et al.* Computational and experimental study of soot formation in a coflow, laminar diffusion flame [J]. Combustion and Flame, 1999, 117(1/2): 117-139.
- [17] Snelling D R, Smallwood G J, Liu F S, *et al.* A calibration-independent laser-induced incandescence technique for soot measurement by detecting absolute light intensity [J]. Applied Optics, 2005, 44(31): 6773-6785.
- [18] Vander Wal R L. Calibration and comparison of laser-induced incandescence with cavity ring-down [J]. Symposium on Combustion, 1998, 27(1): 59-67.
- [19] Baynard T, Lovejoy E R, Pettersson A, *et al.* Design and application of a pulsed cavity ring-down aerosol extinction spectrometer for field measurements [J]. Aerosol Science and Technology, 2007, 41(4): 447-462.
- [20] Smith J D, Atkinson D B. A portable pulsed cavity ring-down transmissometer for measurement of the optical extinction of the atmospheric aerosol [J]. The Analyst, 2001, 126(8): 1216-1220.
- [21] Thompson J E, Smith B W, Winefordner J D. Monitoring atmospheric particulate matter through cavity ring-down spectroscopy [J]. Analytical Chemistry, 2002, 74(9): 1962-1967.