

微尺度碳粒的激光诱导辐射非傅里叶现象分析

陈玲红¹ 左磊¹ 吴建¹ Gérard Grehan² 岑可法¹

¹ 浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

² UMR 6614/CORIA, CNRS/Université et INSA de Rouen, Saint Etienne du Rouvray, France 76800

摘要 采用热松弛时间表征微纳米含碳粒子受热瞬间热扰动和热响应存在的时间迟滞,同时结合 K_n 数判断受热粒子所处的流动区域修正空气导热系数,建立亚微米碳粒的单相延迟双曲型瞬态激光诱导辐射传热传质模型,分析碳粒子经高能脉冲激光照射前后其温度与激光诱导辐射光谱强度的时域变化特征。重点讨论了热松弛时间与激光能量等参数对不同粒径尺度的碳粒激光诱导辐射光谱信号的影响。结果表明,热松弛时间值越大,入射激光能量越高,粒径越小,受热颗粒的激光诱导辐射光谱信号振荡幅度越强,非傅里叶效应越显著,这为采用激光诱导辐射技术进行高温环境亚微米量级含碳微粒的定量测量研究提供理论依据。

关键词 激光技术;激光诱导辐射;微尺度;碳粒;热松弛时间;非傅里叶效应

中图分类号 TK01+2 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0408005

Analysis of Non-Fourier Effect During Laser-Induced Radiation of Micro Scale Carbon Particulates

Chen Linghong¹ Zuo Lei¹ Wu Jian¹ Grèhan Gérard² Cen Kefa¹

¹ State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

² UMR 6614/CORIA, CNRS/Université et INSA de Rouen, Saint Etienne du Rouvray, France 76800

Abstract A numerical model of time-resolved laser-induced radiation model of micro-scale carbon particulates based on non-Fourier heat diffusion is developed, through adapting thermal relaxation time to present time lag between thermal disturbance and response inside particles, as well as correcting air conductivity coefficient via K_n number to judge flux region of heated particles. Theoretical temperature and radiation signal profiles of heated carbon particulate are presented, in order to discuss the effect of radiation signals of micro-scale particles on different thermal relaxations and laser fluences. The results show non-Fourier phenomenon becomes obvious in radiation signals, in the case of high thermal relaxation, high laser fluence, and small particles. The discussion of the numerical results provides guidance for laser-induced radiation technique measuring the concentration and size of micro-scale carbon particulates in high temperature environment.

Key words laser technique; laser-induced radiation; micro scale; carbon particulate; thermal relaxation time; non-Fourier effect

OCIS codes 000.6850; 120.6810; 350.5340

1 引言

近年来,激光技术应用于大气 PM_{2.5} 的测量^[1-2],激光诱导辐射白炽光(LII)技术被广泛用于气体、重油、煤粉等燃烧过程中含碳粒子的测量研究^[3-7]。研究受热颗粒的传热传质过程,建立碳粒

激光诱导白炽光辐射传递模型,有助于准确地定量分析受热颗粒浓度和粒径^[8-9]。Eckbreth^[10]和 Melton^[11]通过分析高能脉冲激光照射时碳黑颗粒的受热过程以及激光脉冲结束后受热粒子冷却过程的传热传质过程,建立纳米级碳粒的激光诱导辐射

收稿日期: 2013-10-28; 收到修改稿日期: 2013-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(51206144)、国家重点基础研究发展计划(2009CB219802)、高等学校学科创新引智计划(B08026)、浙江省自然科学基金(LY12E06003)

作者简介: 陈玲红(1972—),女,博士,副教授,主要从事化石燃烧机理、能源清洁利用、细微颗粒物检测与控制等方面的研究。E-mail: chenlh@zju.edu.cn

传递模型,给出了基于激光诱导白炽光技术测量碳粒浓度和粒径的理论基础。此后,不同研究小组对颗粒受热辐射模型的不同方面进行了完善研究,Michelsen^[12]在模型中考虑颗粒受热和冷却过程中表层氧化、融化等的影响,Liu等^[13]考虑了颗粒尺寸分布粒径分布的影响,Allouis等^[5,14]建立微米尺度的碳粒激光诱导辐射传递模型,计算重油火焰中不同结构碳粒内部温度变化。

需要指出的是,高能脉冲激光照射微尺度碳粒时,若入射激光的波长和受热粒子的特征尺寸长度相比拟或者是热作用时间和特征时间相比拟,热传播速度有限,导致瞬间热流密度极高、温度变化极为迅速等现象,这种不遵循或偏离傅里叶定律的热传导效应称为非傅里叶效应^[15]。高正阳等^[16]在研究激光加热煤颗粒过程中,发现锅炉燃烧器的设计须考虑煤颗粒着火前的非傅里叶导热效应。Witze等^[17]实验研究脉冲激光对颗粒辐射信号的影响,发现激光能量增加到 2.48 J/cm² 时,LII 时域辐射信号由单峰曲线转变为双峰曲线,目前为止,解释这一实验现象的模型还未见报道。本文采用热松弛时间表征含碳粒受热瞬间热扰动和热响应存在的时间迟滞,同时结合 K_n 数判断受热粒子所处的流动区域修正空气导热系数,建立亚微米量级碳粒的单相延迟双曲型瞬态激光诱导辐射传热传质模型,分析不同粒径的碳粒经高能脉冲激光照射前后其温度与辐射光谱信号的时域变化特征。

2 理论模型

Melton^[11]提出,当高能脉冲激光照射颗粒时,受热碳粒满足下述质量守恒方程,即

$$-\rho_s \frac{dd}{dt} = P \left(\frac{W_v}{2RT} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

式中 d 为碳粒直径(单位 cm); T 为碳粒温度(单位 K); ρ_s 为碳粒的密度,其值为 2.26 g/cm³; W_v 为碳蒸气分子质量,其值为 36 g/mol; R 为气体常数,其值为 8.31 J/(K·mol); P 为碳蒸汽压力,表示为

$$P = P^* \exp \left[\frac{\Delta H_v (T - T^*)}{RTT^*} \right], \quad (2)$$

式中 ΔH_v 为碳的挥发热,其值为 7.68×10^5 J/mol; T^* 为压力 P^* 碳蒸气的温度($P^* = 1.013 \times 10^5$ Pa, $T^* = 3915$ K)。

碳粒受热瞬间热扰动和热响应存在时间迟滞,引入热松弛时间消除傅里叶定律中热量传播速度无穷大的假设。热松弛时间 τ 表示微尺度下声子发生碰撞所需要的时间,理论上估计为 $10^{-6} \sim 10^{-12}$ s^[18]。结合能量守恒方程,建立单相延迟双曲型热传导模型^[19],在极坐标下一维常物性方程式可表示为

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_s c_s \tau \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = \frac{k_s}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (3)$$

式中 r 为径向距离, t 为时间, c_s 为碳粒比热容,其值为 2.41 J/(g·K); k_s 为碳粒导热系数,其值为 1.5 W/(cm·K)。

初始条件为

$$T(r, t = 0) = \theta_0, \quad (4)$$

$$d(t = 0) = d_0, \quad (5)$$

边界条件为

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad \forall t, \quad (6)$$

$$k_s \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=\frac{d}{2}} = \frac{Q_{\text{abs}}(\lambda, d)q(t)}{4} - \frac{P\Delta H_v}{W_s} \left(\frac{W_v}{2RT} \right)^{1/2} - \frac{2k_a^*}{d} (T - \theta_0) - \sigma (T^4 - \theta_0^4) \quad \forall t, \quad (7)$$

式中 d_0 为初始碳粒粒径(单位 cm); θ_0 为初始温度(单位 K); W_s 为碳粒分子质量(12 g/mol); σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数 $[5.67 \times 10^{-12}$ W/(cm²·K⁴)]; $Q_{\text{abs}}(\lambda, d)$ 为颗粒吸收效率因子; $q(t)$ 为激光时域能量密度; k_a^* 为修正后的碳粒周围空气的导热系数。

K_n 数表示分子平均自由程 l (3.355×10^{-8} T·cm, 1.013×10⁵ Pa 条件下)与颗粒直径 d 的比值^[20],基于 K_n 数可判断碳粒与空气热交换过程中所处的流动区域,表 1 为常压、温度为 2000 K 环境下纳微米碳粒所处的流动区域。由文献^[21]可知,结合几何因子 G (19.42)修正碳粒周围空气的导热系数 k_a ,表示为 $k_a^* = k_a / (1 + GK_n)$,纳米级颗粒与环境换热系数明显低于宏观尺度参数^[22]。

表 1 常压、2000 K 等环境条件下,不同粒径碳粒所处的流动区域

Table 1 Flux region of different carbon particle diameters at 1.013×10⁵ Pa and 2000 K

Diameter / μm	$d > 4$	$0.2 < d < 4$	$0.04 < d < 0.2$	$d < 0.04$
K_n number	$K_n < 0.1$	$0.1 < K_n < 2$	$2 < K_n < 10$	$K_n > 10$
Flux region	Continuum region	Slip region	Transition region	Free molecular region

与激光波长 λ 、碳粒粒径 d 有关。图 2 为碳粒吸收效率因子随粒径的变化, $\lambda = 532 \text{ nm}$, 碳粒折射率 $m = 1.56 - 0.46i$ ^[24], 纳米颗粒吸收效率比微米颗粒波动明显, 碳粒在受热升温、冷却过程中, 依粒径变化采用动态吸收效率能得到精确的数值结果。

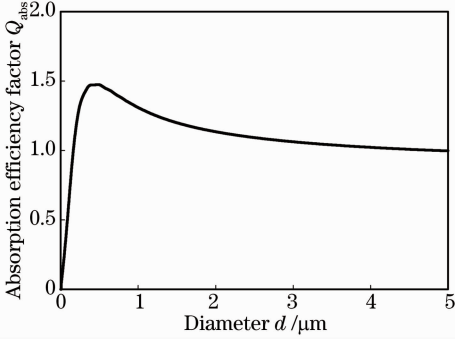


图 2 碳粒吸收效率因子随粒径的变化
($\lambda = 532 \text{ nm}$, $m = 1.56 - 0.46i$)

Fig. 2 Absorption efficiency factor versus carbon particle diameter ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $m = 1.56 - 0.46i$)

根据上述所建模型计算出单个纳米级碳粒的激光诱导辐射信号、温度、粒径等随时间的变化, 如图 3 所示, $d = 40 \text{ nm}$, $\lambda = 532 \text{ nm}$, 脉冲激光能量为三角形分布, 脉冲半峰全宽(FWHM)为 10 ns , 激光能量 $F = 1.0 \text{ J/cm}^2$, 激光峰值能量密度 $q_{\max} = 100 \text{ MW/cm}^2$, $\theta_0 = 2000 \text{ K}$, $\lambda_{\text{em}} = 600 \text{ nm}$ 。从图 3 可以看出, 辐射信号在脉冲激光能量最高时迅速达到峰值, 在激光脉冲结束后辐射信号缓慢衰减, 其结果与 Melton^[11]的研究一致。图中还发现, 碳粒在激光加热过程中快速升温, 颗粒温度超过 4000 K 时温度曲线的升温速率和升温程度受热碳升华的制约,

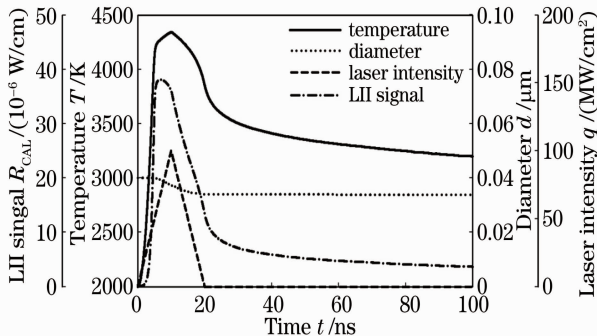


图 3 单个碳粒的温度、粒径、激光能量、以及激光诱导辐射信号随时间变化曲线 ($F = 1.0 \text{ J/cm}^2$, $d_0 = 40 \text{ nm}$, $\theta_0 = 2000 \text{ K}$, $\lambda_{\text{em}} = 600 \text{ nm}$)

Fig. 3 Theoretical profiles of temperature, diameter, laser intensity and LII signal versus time for a single soot particulate ($F = 1.0 \text{ J/cm}^2$, $d_0 = 40 \text{ nm}$, $\theta_0 = 2000 \text{ K}$, $\lambda_{\text{em}} = 600 \text{ nm}$)

温度达到峰值后呈现一定幅度的衰减, 在此过程中颗粒粒径约减少 20% 。

Beyer^[25]基于激光诱导白炽光技术采用 532 nm 激光(FWHM 为 14.7 ns)测量气体火焰中($\theta_0 = 2000 \text{ K}$)直径为 15 nm 碳粒的受热峰值温度 T_p , 根据模型得到数值结果, 如图 4 所示, 可以看出, 计算结果与测量结果的相对误差小于 5% 。

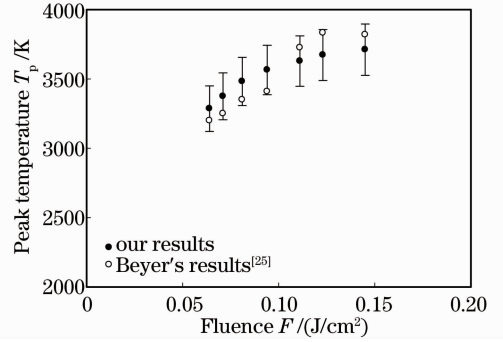


图 4 激光诱导白炽光法受热碳粒计算、测量峰值温度随能量的变化($d = 15 \text{ nm}$, $\theta_0 = 2000 \text{ K}$)

Fig. 4 Comparison between simulated peak temperature and measured peak temperature of heated carbon particles using method of LII ($d = 15 \text{ nm}$, $\theta_0 = 2000 \text{ K}$)

图 5 为微米级受热碳粒内部 ($r^* = 2r/d$) 温度随时间的变化, 其中 $d_0 = 4.0 \text{ }\mu\text{m}$, $F = 2.5 \text{ J/cm}^2$, $q_{\max} = 250 \text{ MW/cm}^2$, 其余参数与图 2 相同。颗粒内部不同位置的温度有所不同, 外层温度呈先上升, 即激光脉冲加热过程中达到峰值, 随后逐渐冷却的变化特征; 脉冲持续时间内, 越靠近颗粒内部中心, 其温度越滞后, 这与文献[14]中的结果一致。

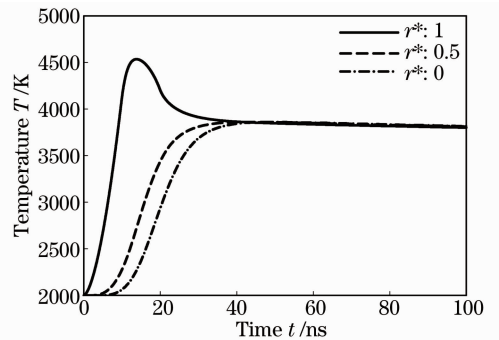


图 5 受热微米级颗粒不同位置处温度时间变化曲线 ($F = 2.5 \text{ J/cm}^2$, $d_0 = 4 \text{ }\mu\text{m}$, $\theta_0 = 2000 \text{ K}$)

Fig. 5 Theoretical profiles of temperature versus time for micro particle at different radial positions ($F = 2.5 \text{ J/cm}^2$, $d_0 = 4 \text{ }\mu\text{m}$, $\theta_0 = 2000 \text{ K}$)

图 6 表示激光脉冲结束时颗粒内部温度分布, 可以看出, 受热颗粒内部存在明显的温度梯度, 外层温度约为 4000 K , 中心温度为 2500 K 左右。

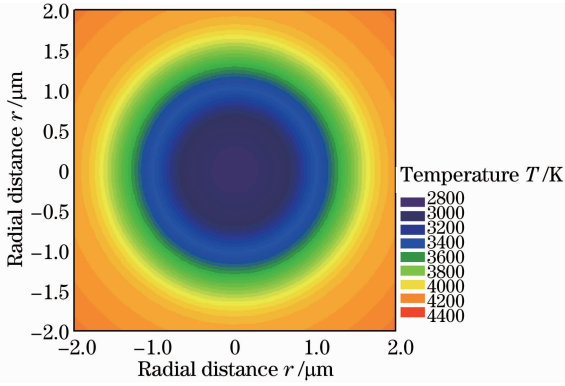


图6 激光脉冲结束时受热碳粒的内部温度分布
($F=2.5 \text{ J/cm}^2$, $d_0=4 \text{ }\mu\text{m}$, $\theta_0=2000 \text{ K}$, $t=20 \text{ ns}$)

Fig. 6 Temperature profiles for carbon particulate at end of laser pulse ($F=2.5 \text{ J/cm}^2$, $d_0=4 \text{ }\mu\text{m}$, $\theta_0=2000 \text{ K}$, $t=20 \text{ ns}$)

图7为不同粒径($d_0=0.1\sim 2.0 \text{ }\mu\text{m}$)碳粒的归一化激光诱导辐射强度时域变化计算结果,可以看出,脉冲加热过程中受热颗粒的辐射信号到达峰值的时间随着颗粒直径的增加而增加,激光脉冲结束后,受热微粒辐射信号的衰减速率随着颗粒粒径的增加而减慢。为此,根据不同尺度碳粒激光诱导辐射信号的衰减速率特性可以确定碳粒尺寸,研究辐射信号有助于确定多尺度碳粒组分的粒径信息。

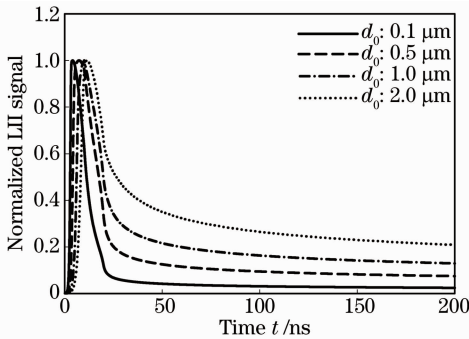


图7 纳微米碳粒的归一化激光诱导辐射时域信号曲线
($F=2.5 \text{ J/cm}^2$, $\theta_0=2000 \text{ K}$, $\lambda_{em}=600 \text{ nm}$)

Fig. 7 Theoretical normalized LII time decay of carbon particles with different diameters ($F=2.5 \text{ J/cm}^2$, $\theta_0=2000 \text{ K}$, $\lambda_{em}=600 \text{ nm}$)

3.2 热松弛时间

文献[18]中提出微尺度导热过程中估计热松弛时间为 $10^{-6}\sim 10^{-12} \text{ s}$,值得指出的是,热松弛时间确切值的研究目前为止还未见报道。这里,分别选取 $\tau=0, 0.5, 1.0 \text{ ns}$ 分析热松弛时间值对激光诱导辐射时域信号的影响。图8为不同松弛时间下纳米颗粒的激光诱导辐射时域信号, $d_0=30 \text{ nm}$, $\lambda=532 \text{ nm}$, FWHM 为 10 ns , $F=1.0 \text{ J/cm}^2$, $\theta_0=$

2000 K , $\lambda_{em}=600 \text{ nm}$ 。由图8可知, $\tau=0 \text{ ns}$ 时辐射信号在 5 ns 时达到峰值, 20 ns 内快速衰减到背景辐射强度; $\tau=0.5 \text{ ns}$ 时辐射信号出现双峰, 峰值强度增幅 40% ; $\tau=1.0 \text{ ns}$ 时辐射信号为多峰曲线, 峰值强度增幅 50% 。这说明热松弛时间越大, 纳米级的碳粒辐射信号的振荡幅度越大, 非傅里叶效应越显著, 该结果与 Witze 等[17] 在丙烷火焰中测得的激光诱导辐射信号多峰现象一致。根据 K_n 数判断纳米颗粒与环境换热过程所处的流动状态为自由分子流区域, 微尺度瞬态导热情形下纳米颗粒受热后的温度变化与传统情形不同, 非傅里叶效应影响显著。

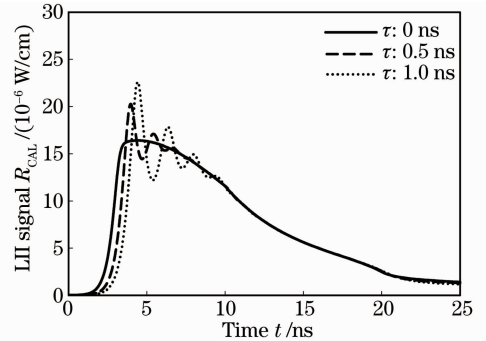


图8 不同热松弛时间下纳米颗粒辐射时域信号曲线
($F=2.5 \text{ J/cm}^2$, $d_0=30 \text{ nm}$, $\theta_0=2000 \text{ K}$, $\lambda_{em}=600 \text{ nm}$)
Fig. 8 Theoretical LII signal profiles versus time for nano particle with different thermal relaxation time ($F=2.5 \text{ J/cm}^2$, $d_0=30 \text{ nm}$, $\theta_0=2000 \text{ K}$, $\lambda_{em}=600 \text{ nm}$)

图9为微米颗粒($d_0=5 \text{ }\mu\text{m}$)的激光诱导辐射时域信号计算结果,激光参数同图8。可以发现,辐射信号强度几乎不受松弛时间的影响,均在 15 ns 时达到峰值,随后呈一定幅度衰减,可以解释为,处于连续流区域的微米颗粒几乎不受非傅里叶效应影响。

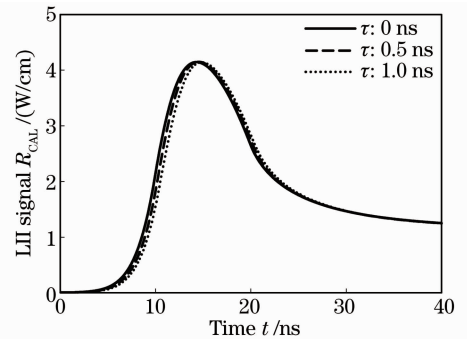


图9 不同热松弛时间下微米颗粒辐射时域信号曲线
($F=2.5 \text{ J/cm}^2$, $d_0=5 \text{ }\mu\text{m}$, $\theta_0=2000 \text{ K}$, $\lambda_{em}=600 \text{ nm}$)
Fig. 9 Theoretical LII signal profiles versus time for micro particle with different thermal relaxation times ($F=2.5 \text{ J/cm}^2$, $d_0=5 \text{ }\mu\text{m}$, $\theta_0=2000 \text{ K}$, $\lambda_{em}=600 \text{ nm}$)

3.3 入射激光能量

激光能量对颗粒辐射信号影响强烈,由文献[26]可知,激光能量较低时,受热颗粒温度未达到碳升华温度,颗粒维持完整形态;随着激光能量的增加,颗粒受热到达甚至超过其升华温度,微粒部分发生汽化,导致质量损失。针对受非傅里叶效应影响明显的纳米颗粒,根据上述模型计算不同入射激光能量下受热颗粒的温度、辐射信号随时间的变化值,

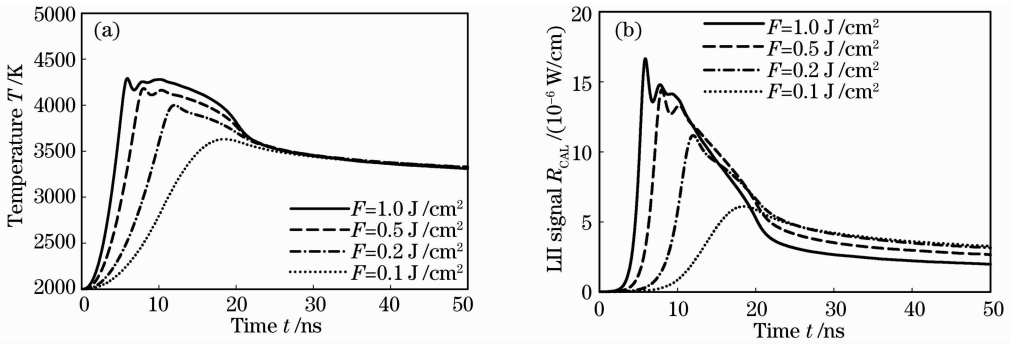


图 10 不同激光能量下受热纳米级粒子的(a)温度和(b)辐射信号的时域变化

($d_0=30$ nm, $\theta_0=2000$ K, $\lambda_{em}=600$ nm, $\tau=0.5$ ns)

Fig.10 Theoretical (a) temperature and (b) LII signal profiles versus time for nano particle with different laser fluences

($d_0=30$ nm, $\theta_0=2000$ K, $\lambda_{em}=600$ nm, $\tau=0.5$ ns)

4 结 论

建立亚微米量级碳粒的单相延迟双曲型激光诱导辐射传热传质模型,采用热松弛时间表征含碳粒子受热瞬间热扰动和热响应存在的时间迟滞,结合 K_n 数判断受热粒子所处的流动区域,修正空气导热系数,研究碳微粒经高能脉冲激光照射前后其温度与辐射光谱信号的时域变化特征,得出如下结论:

1) 微尺度瞬态导热过程中,非傅里叶效应导致辐射信号出现振荡,热松弛时间越大,非傅里叶效应越明显,信号振荡幅度越强。

2) 非傅里叶效应下颗粒粒径对辐射信号影响强烈,纳米颗粒辐射信号振荡明显,微米颗粒辐射信号振荡不明显。

3) 激光能量对纳米颗粒非傅里叶效应影响强烈,激光能量高于 0.2 J/cm²,直径为 30 nm 的颗粒受热后其温度超过碳升华温度,非傅里叶效应开始显现,辐射信号曲线出现振荡,振荡幅度随激光能量的增强而增强。

上述研究结果为进一步开展高温环境亚微米量级含碳微粒激光诱导辐射定量测量研究提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 He Tao, Hou Lujian, Lü Bo, *et al.*. Study of accuracy of lidar inversion PM_{2.5} concentration[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0113001.
何涛,侯鲁健,吕波,等.激光雷达探测反演PM_{2.5}浓度的精度研究[J].中国激光,2013,40(1):0113001.
- 2 Chen Tao, Zhao Yujie, Liu Dong, *et al.*. Inversion of micro-pulse lidar signals with a new calibration method[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0514001.
陈涛,赵玉洁,刘东,等.微脉冲激光雷达探测大气气溶胶定标反演新方法[J].中国激光,2012,39(5):0514001.
- 3 C Schulz, B F Kock, M Hofmann, *et al.*. Laser-induced incandescence: recent trends and current questions[J]. Applied Physics B, 2006, 83(3): 333–354.
- 4 Chen Linghong, Wu Fa, Wang Yong, *et al.*. Soot size determination in a turbulent flame based on time-division average fitting of temporal laser-induced incandescence signal[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(11): 2169–2172.
陈玲红,吴法,王勇,等.基于时域激光诱导辐射确定湍流火焰烟黑粒径[J].浙江大学学报(工学版),2010,44(11):2169–2172.
- 5 C Allouis, F Beretta, A D'Alessio. Sizing soot and micronic carbonaceous particle in spray flames based on time resolved LII[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2003, 27(4): 455–463.
- 6 J Hayashi, N Hashimoto, N Nakatsuka, *et al.*. Soot formation characteristics in a lab-scale turbulent pulverized coal flame with simultaneous planar measurements of laser induced incandescence of soot and Mie scattering of pulverized coal[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34: 2435–2443.
- 7 L Chen, K Cen, A Garo, *et al.*. A 3D numerical simulation of laser-induced incandescence of soot particles in coal combustion

- products[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2009, 10(9): 1320–1326.
- 8 H A Michelsen, L Liu, B F Kock, *et al.*. Modeling laser-induced incandescence of soot: a summary and comparison of LII models [J]. Applied physics B, 2007, 87(3): 503–521.
- 9 Lou Chun, Chen Chen, Sun Yipeng, *et al.*. Review of soot measurement in hydrocarbon-air flames [J]. Science China: Technological Sciences, 2010, 40(8): 946–958.
娄春, 陈辰, 孙亦鹏, 等. 碳氢火焰中碳黑检测方法评述 [J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(8): 946–958.
- 10 A C Eckbreth. Effects of laser-modulated particulate incandescence on Raman scattering diagnostics [J]. Journal of Applied Physics, 1977, 48(11): 4473–4479.
- 11 L A Melton. Soot diagnostics based on laser heating [J]. Appl Opt, 1984, 23(12): 2201–2208.
- 12 H A Michelsen. Understanding and predicting the temporal response of laser-induced incandescence from carbonaceous particles [J]. The Journal of Chemical Physics, 2003, 118: 7012–7045.
- 13 F Liu, G J Smallwood, D R Snelling. Effects of primary particle diameter and aggregate size distribution on the temperature of soot particles heated by pulsed lasers [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2005, 93(1): 301–312.
- 14 C Allouis, F Rosano, F Beretta, *et al.*. A possible radiative model for micronic carbonaceous particle sizing based on time-resolved laser-induced incandescence [J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(3): 401–410.
- 15 K K Tamma, X Zhou. Macroscale and microscale thermal transport and thermo-mechanical interactions: some noteworthy perspectives [J]. Journal of Thermal Stresses, 1998, 21(3-4): 405–449.
- 16 Gao Zhengyang, Yan Weiping, Liu Zhong. The simulation of non-Fourier heat diffusion effect of coal particles under rapid heating condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 141–145.
高正阳, 阎维平, 刘忠. 煤颗粒在快速升温过程中非傅立叶导热效应的计算研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 141–145.
- 17 P O Witze, S Hochgreb, D Kayes, *et al.*. Time-resolved laser-induced incandescence and laser elastic-scattering measurements in a propane diffusion flame [J]. Applied Optics, 2001, 40(15): 2443–2452.
- 18 J Ordóñez-Miranda, J J Alvarado-Gil. Thermal wave oscillations and thermal relaxation time determination in a hyperbolic heat transport model [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(11): 2053–2062.
- 19 Zhang Zhe, Liu Dengying. Advances in the study of non-Fourier heat conduction [J]. Advances in Mechanics, 2000, 30(3): 446–456.
张浙, 刘登瀛. 非傅里叶热传导研究进展 [J]. 力学进展, 2000, 30(3): 446–456.
- 20 Liu Jing. Micron/Nanometer Scale Heat Transfer Theory [M]. Beijing: Science Press, 2001. 135–137.
刘静. 微米/纳米尺度传热学 [M]. 科学出版社, 2001. 135–137.
- 21 Pan Zhenyan, Chen Linghong, Wu Yingchun, *et al.*. Study on measuring carbon particles from coal combustion in hydrogen flame using laser-induced radiation method [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0408003.
潘振艳, 陈玲红, 吴迎春, 等. 激光诱导辐射法测定燃煤氢气火焰中碳粒子的研究 [J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0408003.
- 22 B F Kock, T Eckhardt, P Roth. In-cylinder sizing of Diesel particles by time-resolved laser-induced incandescence (TR-LII) [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(2): 2775–2782.
- 23 D R Snelling, G J Smallwood, F Liu, *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.
- 24 W H Dalzell, A F Sarofim. Optical constants of soot and their application to heat-flux calculations [J]. J Heat Transfer, 1969, 91(1): 100–104.
- 25 V Beyer. A Study of Laser-Induced Incandescence under High Vacuum Conditions [D]. UK: Cranfield University, 2006. 180.
- 26 H A Michelsen, P O Witze, D Kayes, *et al.*. Time-resolved laser-induced incandescence of soot: the influence of experimental factors and microphysical mechanisms [J]. Applied Optics, 2003, 42(27): 5577–5590.

栏目编辑: 宋梅梅