

激光诱导辐射法测定燃煤氢气火焰中碳粒子的研究

潘振艳 陈玲红 吴迎春 左磊 吴学成 岑可法

(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 对高温复杂介质微纳米尺度含碳固体颗粒成分进行快速检测研究。以高纯氢气火焰中淮南烟煤未完全燃烧为例,采用高能脉冲激光束照射火焰中的碳粒子,提出多段式指数函数拟合不同尺度受热粒子激光诱导辐射光谱时域混合信号的方法,同时结合 K_n 数判断受热粒子所处的流动区域,确定燃煤氢气火焰中初始碳烟、成熟碳烟以及焦炭或未燃尽煤粒的平均粒径分别为 7, 25, 3×10^3 nm。并根据不同火焰高度含碳颗粒成分的粒径与相对浓度变化,探索煤粉燃烧过程中微纳米尺度碳粒组分的演变特性。为高温复杂介质中超细颗粒物尺寸分布提供了一种快速、有效的检测手段。

关键词 信号处理;粒径;激光诱导辐射;多段式指数函数;煤粉;氢气火焰

中图分类号 TK01+2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0408003

Study on Measuring Carbon Particles from Coal Combustion in Hydrogen Flame Using Laser-Induced Radiation Method

Pan Zhenyan Chen Linghong Wu Yingchun Zuo Lei Wu Xuecheng Cen Kefa

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

Abstract A rapid measurement of micro-nano carbon particles within complicate combustion media is investigated. Carbon particles from pulverized coal combustion in the pure hydrogen flame are heated by a high-power pulsed laser beam. The size distribution of carbon particles is obtained using a multistage exponential function method to fit time-resolved radiation emitted by the laser-heated particles, where the flow zone is determined by K_n . The results show that three sizes of carbon particles exist and the average diameters are 7 nm, 25 nm, $3 \mu\text{m}$, respectively, which correspond to the newly-born soot, mature soot, and char or unburned coal particles. The variations of each kind of carbon particles during coal combustion are investigated according to the size and relative concentration of each particles component versus the flame height. The above method can be used as a tool for rapid detecting size distribution of multi-scale carbon particulates under the high-temperature environment.

Key words signal processing; particle diameter; laser-induced radiation; multistage exponential function; pulverized coal; hydrogen flame

OCIS codes 000.6850; 350.5340; 350.4990

1 引言

煤等化石燃料燃烧过程中易受环境气氛、温度等影响产生碳烟、焦炭等微纳米尺度固体含碳微粒。碳氢燃料燃烧过程,因氧化剂不足等原因造成燃料不完全燃烧产生乙炔、多环芳烃等碳烟前驱物,这些前驱物形成直径为 10 nm 左右的初始碳烟颗粒^[1];

初始碳烟颗粒经历表面生长和凝聚阶段,形成几十纳米至几百纳米量级的成熟碳烟颗粒^[1,2],焦炭粒径为 $1 \sim 250 \mu\text{m}$ ^[3],快速准确监测这些微粒可为研究燃烧机理、燃烧优化运行和可吸入固体颗粒污染物排放控制等提供科学依据。

高温过程中含碳颗粒尺寸分布的定量检测通常

收稿日期: 2012-11-23; 收到修改稿日期: 2012-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(51206144)和浙江省自然科学基金(LY12E06003)资助课题。

作者简介: 潘振艳(1986—),女,硕士研究生,主要从事燃煤颗粒物辐射特性方面的研究。

E-mail: panzhenyanqdu@163.com

导师简介: 陈玲红(1972—),女,博士,副教授,主要从事化石燃料燃烧机理及污染物测量与控制等方面的研究。

E-mail: chenlh@zju.edu.cn(通信联系人)

采用离线取样分析,如探针取样后进行电镜扫描等^[4],该类方法的测量结果虽然比较直观,但分析周期较长,分析过程存在一些难以解决的问题,如取样时不可避免对取样区域干扰,取样后由于温度、浓度等环境条件发生改变,很难抑制微粒动态学过程(成核作用、凝结作用与压缩作用)和化学过程,导致样品的物理、化学性质发生变化,再加上人为因素的干扰和样本的丢失等,测量数据很难反映全貌。

随着激光技术的不断发展,根据被测颗粒的辐射、吸收和散射等光学特性,激光技术已成为无干扰、在线检测固体微粒最具潜力的工具,比如,基于激光诱导击穿光谱法测定物质中的元素^[5~9];基于光散射法研究群粒子场中粒子直径以及浓度对侧向散射光总光强的影响^[10];还有研究者采用离散偶极子近似方法对粘附不同粒径、不同化学成分大粒子的复杂凝聚粒子的光散射特性进行了研究^[11];激光干涉粒子成像法在测定粒子尺寸及其分布方面也有报道^[12];激光消光法通过检测颗粒吸收、散射入射激光能量的程度确定被测区域颗粒物的浓度与粒径;发射光谱断层扫描法通过接收不同方向光谱辐射信息获得非均匀火焰的温度和颗粒浓度分布;激光诱导白炽光技术通过检测炭粒子吸收高能激光发出的热辐射光谱强度获得被测粒子浓度与尺寸信息。由于受热微粒的温度(3500 K~4000 K)远高于火焰温度(1000 K左右),选择合适的探测波长去除火焰等高温背景辐射的干扰,激光诱导白炽光辐射技术已应用在乙烯、丙烷等气体火焰中纳米级颗粒的定量测量^[13~16]。然而,颗粒粒径在激光加热过程中可能发生变化,对于不同尺度颗粒与周围气体环境的传热传质过程涉及连续流、自由分子流等不同模型^[17~19],在煤等燃烧过程中应用激光诱导辐射技术同时对不同尺度颗粒物定量分析的相关研究还未见报道。

本文以氢气火焰中淮南烟煤不完全燃烧为研究对象,采用激光诱导辐射技术将高能脉冲激光束直接照射火焰,被测区域中微纳米量级碳粒子温度迅速升高产生热辐射,由于受热粒子的温度并没有达到汽化温度,所以可忽略汽化造成粒子粒径的变化。结合 K_n 数确定不同尺度受热粒子的传热模型,提出多段式指数函数方程最小二乘拟合的方法,最终确定燃煤氢气火焰中不同尺度含碳粒子的粒径与浓度信息。

2 理论模型

高能量的脉冲激光束照射燃煤火焰时,不同时刻激光诱导辐射信号为碳烟、焦炭以及未燃尽煤粉

等不同尺度受热含碳颗粒辐射的累加^[18]

$$S_{\text{tot}}(t) = \sum_{i=1}^n A_i S_i(t), \quad (1)$$

式中 $S_{\text{tot}}(t)$ 为不同尺度受热含碳颗粒辐射信号的累加; S_i 为各类尺度中单个含碳粒子的激光诱导辐射强度; A_i 为相应的颗粒组分的相对体积分数; n 为被测区域中不同尺寸的受热颗粒种类; t 为时间,单位为 ns。激光脉冲结束后受热粒子的激光诱导辐射信号随时间呈指数衰减^[17], (1)式可整理成

$$S_{\text{tot}}(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp\left(\frac{t-t_0}{\tau_i}\right), \quad (2)$$

式中 t_0 为激光脉冲结束时刻,单位 ns; τ_i 为该类颗粒的衰减特征时间,单位 ns。

高能脉冲激光照射后,受热微粒的冷却速率可通过 K_n 数判断该粒子所处的流动区域:连续流($K_n < 0.1$);滑移流($0.1 < K_n < 2.0$);过渡流($2.0 < K_n < 10$);自由分子流($K_n > 10$),其中, K_n 数定义为气体平均自由程 L 与颗粒直径 d_p 的比率^[19]:

$$K_n = \frac{L}{d_p}, \quad (3)$$

式中 L 为

$$L = \frac{\mu}{P} \sqrt{\frac{\pi k_b T}{2m}}, \quad (4)$$

式中 μ 为气体动力学黏度,单位(Pa·s); P 为周围气体的压强,单位 Pa; k_b 为波尔兹曼常数,单位(J/K); T 为受热颗粒周围环境温度,单位 K; m 为气体分子质量,单位 kg。

根据(3)、(4)式可知,常压、温度约为 1000 K 的火焰中纳米量级炭粒子处于自由分子流区,微米量级的较粗粒子处于滑移流、过渡流或连续流等非自由分子流区域。Kock 等^[17]提出处于不同流动区域的信号衰减时间可表示为

$$\tau = \frac{d_p C_p \rho_p T}{3\alpha C_i P} \quad (\text{free molecular conditions}), \quad (5)$$

$$\tau = \frac{d_p^2 C_p \rho_p}{12\lambda_{\text{cond}} f(K_n)} \quad (\text{non free molecular conditions}), \quad (6)$$

式中 d_p 为颗粒的直径,单位 m; C_p 为颗粒的比热容,单位 2.41 J/(g·K); ρ_p 为颗粒的密度,单位 2.26 g/cm³; α 为调节因子; C_i 为气体的热流速率; λ_{cond} 为周围空气的导热系数; $f(K_n)$ 为修正系数,定义为^[20,21]

$$f = 1 + \frac{2(9\gamma - 5)(\gamma + 1)}{\alpha} K_n, \quad (7)$$

式中 γ 为比热比。

3 实验过程

3.1 实验对象

实验用煤粉为干燥后的淮南烟煤,其工业分析和元素分析见表 1,煤粉经磨碎筛分后的粒径为 50~64 μm 。

表 1 淮南烟煤的工业分析与元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of tested coal

Proximate analysis				
$M_{ad}/\%$	$V_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$FC_{ad}/\%$	$Q_{b,ad}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
1.39	14.47	28.52	55.62	27068
Ultimate analysis				
$C_{ad}/\%$	$H_{ad}/\%$	$N_{ad}/\%$	$S_{t,ad}/\%$	$O_{ad}/\%$
67.01	4.15	0.97	0.77	11.24

燃烧器结构如图 1 所示,外管内径为 75 mm,内管外径为 40 mm,喷管内径 2 mm。同心管的外管接高纯氢气,流量为 6 L/min,最外管接高纯氮气,流量为 4 L/min,主要目的是减少空气的扩散,为煤粉燃烧提供富燃料环境(氧气不充足),使煤粉燃烧产生碳烟颗粒。煤粉由振动器的频率控制下粉量,并由氮气携带进入氢气火焰中进行不充分燃烧。燃煤氢气火焰如图 2 所示,氢气燃烧产生淡蓝色火焰,其中橘红色火焰区域为煤粉燃烧产生的煤烟区域。

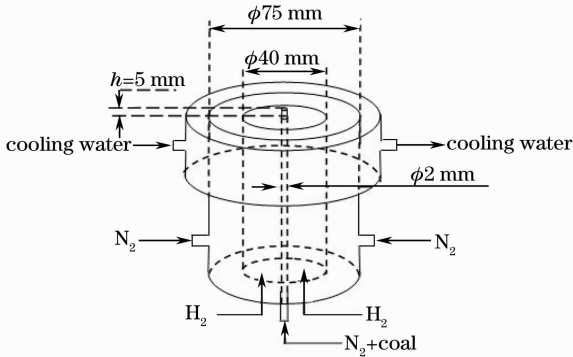


图 1 燃烧炉结构图

Fig. 1 Structure of combustion burner

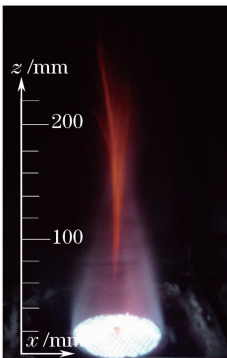


图 2 燃煤氢气火焰

Fig. 2 Coal combustion in hydrogen flame

氢气火焰温度采用铂铑 30-铂铑 6 型热电偶进行测量,热电偶直径约为 1 mm,热电偶的热接点相对火焰体积约小于 0.1%^[22],火焰温度的修正公式可表示为^[23]

$$T_g = T_r - [\xi \sigma (T_s^4 - T_r^4) / h], \quad (8)$$

式中 T_r 为热电偶的指示值,单位 K; T_g 为火焰的实际温度,单位 K; ξ 为热电偶的辐射率,取为 0.2; σ 为玻尔兹曼常数; h 为对流换热系数,单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_s 为环境温度,单位 $^{\circ}\text{C}$ 。

图 3 为不同火焰高度时气体火焰温度的径向分布,可以看出火焰温度分布基本呈轴对称。图 4 为沿轴向氢气火焰温度的分布,火焰的最高温度为 1400 K,火焰高度大于 40 mm 时,气体火焰的温度随着火焰高度的增加而降低。淮南烟煤热解温度为 653 K~1273 K^[24],火焰位置在 0~200 mm 范围内煤粉所处的温度环境为 750 K~1400 K。

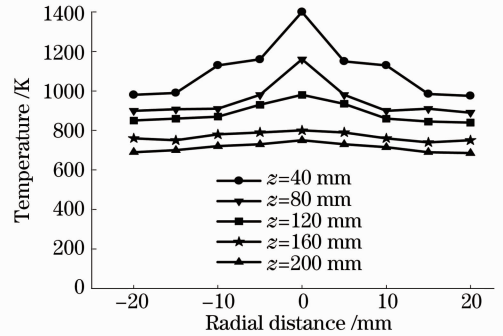


图 3 氢气火焰的温度径向分布

Fig. 3 Radial temperature profile of H_2 flame

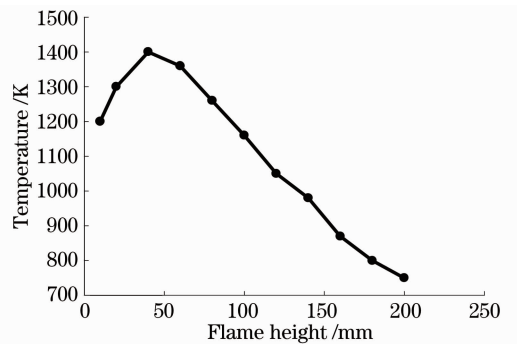


图 4 不同氢气火焰高度轴心温度分布

Fig. 4 Center line temperatures profile at different H_2 flame heights

3.2 实验光路系统

实验光路系统如图 5 所示,激光波长为 1064 nm,脉冲频率为 10 Hz、脉宽为 10 ns 的 Nd:YAG 脉冲激光束经狭缝为 3 mm 的正交光阑后(水平放置的光阑 A 和垂直放置的光阑 B),焦点光斑的尺寸变为 0.09 cm^2 ,激光能量密度变为

0.1 J/cm², 照射至氢气火焰, 与入射激光束成 90° 方向放置凸球透镜(材料为 K9, 焦距 $f=150$ mm), 该透镜与被测火焰相距 2 倍焦距, 透镜的另一侧 2 倍焦距处放置加载 500 V 高压的光电倍增管(响应时间为 3 ns), 光电倍增管之前放直径为 5 mm 的光阑和(600±5) nm 的窄带滤镜。光电倍增管将接收到的辐射光信号经高压放大后转换成电信号接入采样频率为 6 GHz 的示波器。实验过程中, 采用激光诱导辐射信号下降沿触发。

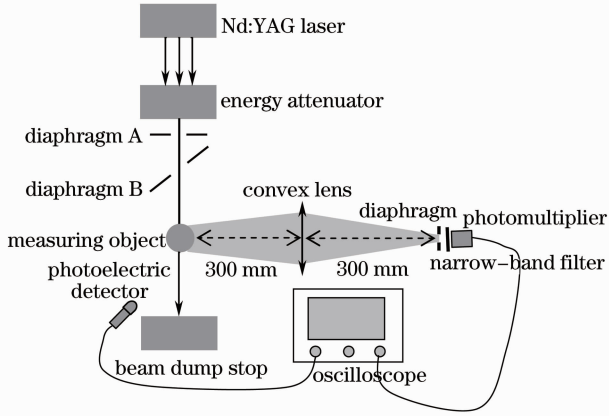


图 5 实验系统示意图
Fig. 5 Sketch of experimental system

4 结果与讨论

图 6 为燃煤氢气火焰高度为 160 mm 处的激光诱导辐射信号, 灰色为若干随机选取的单脉冲激光诱导辐射信号, 黑色为 128 个激光脉冲平均信号。可以看出, 不同激光脉冲下测得的单激光诱导辐射信号时间变化趋势基本一致, 为减少噪声等引起的随机误差, 下文均采用 128 个不同脉冲的激光诱导辐射信号平均值进行分析。

图 7 为不同火焰高度下激光诱导辐射测量结果。从图中可以看出, 激光照射后受热颗粒达到辐

射强度峰值的时间均约为 10 ns, 随后衰减时间在不同火焰高度略有不同。

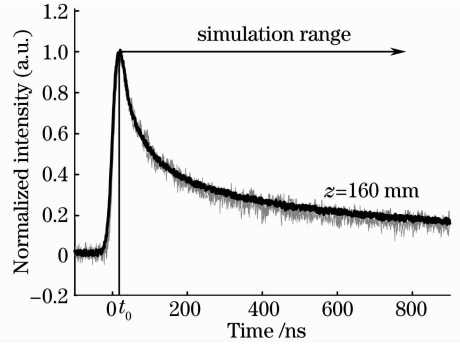


图 6 氢气火焰煤粉燃烧归一化的激光诱导辐射信号

Fig. 6 Normalized laser-induced radiation signals of pulverized coal combustion in hydrogen flame

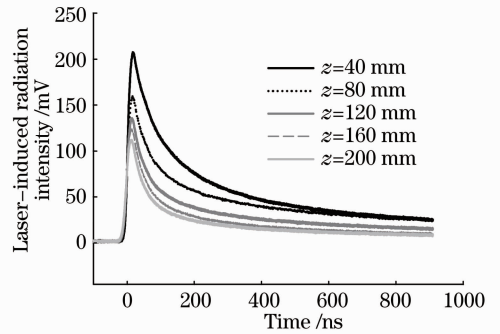


图 7 不同燃煤氢气火焰高度下激光诱导辐射时域信号

Fig. 7 Time-resolved laser-induced radiation signals at different hydrogen and coal flame heights

辐射信号峰值对应时刻设为 t_0 , 如图 6 所示, 拟合区域为大于辐射信号到达峰值后的区域。根据(2)式选取不同的 n 值拟合结果如表 2 所示, ξ 为采用指数函数拟合激光诱导辐射信号的拟合度。可以看出, 一段式($n=1$)拟合度不到 50%; 随着 n 值增加, 拟合度随之增加, 三段式拟合效果最佳, 拟合度均在 98% 以上, $n=4$ 时拟合度有所下降。

表 2 燃煤氢气火焰激光诱导辐射信号的拟合结果

Table 2 Simulation results of laser-induced radiation signals of coal combustion in H₂ flame by different exponential functions

n	A_1	$\xi / \%$	τ_1 / ns	$\xi / \%$	A_2	$\xi / \%$	τ_2 / ns	$\xi / \%$	A_3	$\xi / \%$	τ_3 / ns	$\xi / \%$	A_4	$\xi / \%$	τ_4 / ns	$\xi / \%$
1	0.28	42	145	26												
2	0.56	56	80	78	0.29	90	884	81								
3	0.90	99	33	98	0.31	99	152	100	0.18	100	1130	100				
4	0.79	88	36	96	0.14	90	150	90	0.27	90	160	89	0.13	89	1000	86

根据上述分析, 采用三段式指数函数对不同火焰高度的激光诱导辐射信号进行拟合, 图 8 可知, 不同火焰高度的衰减特征时间(τ_1 、 τ_2 、 τ_3)基本保持不变, 分别为 40、150、1200 ns。据(5)、(6)式确定颗粒

粒径分别为 7、25、 3×10^3 nm, 这与文献中提到的煤粉燃烧核生成的纳米级碳烟粒子、凝并或表面生长的成熟碳烟粒子、焦炭或未燃尽煤粉等微米级粒子一致^[1~3]。

由(2)式知系数 A_i 与第 i 类尺寸的颗粒浓度相关,随着火焰高度的增加,如图 8 所示, A_i 值表现有所不同:1) A_1 值随之逐渐增加,即纳米量级的颗粒物浓度逐渐增加,喷入火焰中煤粉并没有在燃烧器喷嘴出口立即燃尽,而是沿着火焰高度不断核生成初始碳烟颗粒,初始碳烟颗粒同时发生凝并集聚, A_1 的值随火焰高度增加而大幅度增加,并没有减少,这可能是由于初始碳烟颗粒的凝并速度小于初始碳烟颗粒的产生速度;2) A_2 值缓慢减少,即随着

煤粉热解时间的增加,粒径为几十纳米量级的颗粒物缓慢减少,这可能是由于相应的碳颗粒进一步燃尽消失所致,进一步的燃烧机理正在研究中;3) A_3 值一开始迅速增加,这可能是由于喷嘴附近小部分煤粉燃烧产生焦炭,大部分煤粉还未燃烧;火焰高度为 60~80 mm, A_3 值保持不变,这一阶段为煤粉燃烧产生焦炭粒子;火焰高度大于 100 mm 时, A_3 值急剧减小,这是由于该阶段煤粉与焦炭等微米级粒子逐渐燃尽。

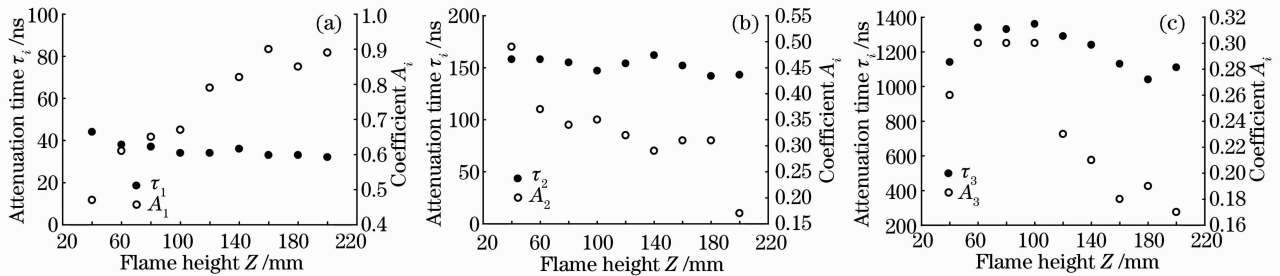


图 8 不同粒径颗粒的衰减时间和相对体积分数沿氢气火焰轴向高度的变化。

(a) τ_1 和 A_1 ; (b) τ_2 和 A_2 ; (c) τ_3 和 A_3

Fig. 8 Evolution of attenuation time and relative volume fraction to particles along hydrogen-flame axial height.

(a) τ_1 and A_1 ; (b) τ_2 and A_2 ; (c) τ_3 and A_3

5 结 论

煤等化石燃料燃烧过程产生的固体微粒成分较为复杂,通常包括不同粒径量级的含碳颗粒物,如纳米级的初生碳烟,几十纳米至几百纳米、甚至几微米的碳烟聚集体,焦炭,未燃尽的碳氢化合物等。本文以燃煤氢气火焰中不同尺度的固体燃烧介质为研究对象,采用高能脉冲激光直接照射火焰,结合 K_n 数判断受热颗粒所处的流动区域,提出多段式指数函数方程对受热含碳粒子的激光诱导辐射信号进行拟合的方法,最终确定了燃煤氢气火焰中同时存在粒径分别为 7 nm、25 nm、3 μm 的三类含碳微粒组分,同时,通过拟合方程得到的系数 A_i 确定了上述不同颗粒组分在煤粉燃烧过程中的变化规律。

通过上述方法可干扰、快速地获取火焰等高温环境中多尺度含碳颗粒组分的粒径及浓度信息,通过标定可进一步确定亚微米尺度颗粒物组分的绝对浓度值,最终为探索煤等化石燃料的燃烧机理、实时检测、优化燃烧过程及研究可吸入固体颗粒污染物排放控制等提供科学依据。

参 考 文 献

1 J. Ma, T. H. Fletcher, B. W. Webb. Thermophoretic sampling of coal-derived soot particles during devolatilization[J]. *Energy & Fuels*, 1995, **9**(5): 802~808

2 Wang Qingcheng, Luo Yonghao, Lu Fang *et al.*. Investigation on coal-derived soot in coal combustion system [J]. *Boiler Technology*, 2007, **38**(2): 35~39
王清成, 罗永浩, 陆方等. 煤燃烧系统中碳黑的研究进展[J]. *锅炉技术*, 2007, **38**(2): 35~39

3 Zheng Chuguang Liu Zhaohui. Dispersion Medium Optical Properties and Radiation Heat Transfer[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996
郑楚光, 柳朝晖. 弥散介质的光学特性及辐射传热[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996

4 Lou Chun, Chen Chen, Sun Yipeng *et al.*. Review of soot measurement in hydrocarbon-air flames [J]. *Scientia Sinica: Technologica*, 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

5 Sun Lanxiang, Yu Haibin, Xin Yong *et al.*. On-line monitoring of molten steel compositions by laser-induced break down spectroscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0915002
孙兰香, 于海斌, 辛勇等. 基于激光诱导击穿光谱的钢液成分在线监视[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0915002

6 Shen Qinmei, Zhou Weidong, Li Kexue. Quantative elemental analysis using laser induced breakdown spectroscopy and neuro-genetic approach[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0315001
沈沁梅, 周卫东, 李科学. 基于遗传神经网络的激光诱导击穿光谱元素定量分析技术[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0315001

7 Wang Junqiao, Zhang Xinzhen, Sun Liping *et al.*. Laser-induced deposition of silver nanoparticles films and microstructures onto glass substrates [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0107001
王俊俏, 张心正, 孙立萍等. 激光诱导银纳米颗粒薄膜和微结构[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0107001

8 Lu Cuiping, Liu Wenqing, Zhao Nanjing *et al.*. Influence of laser energy and repetition rate on characteristic of laser-induced soil plasmas[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0215002

- 鲁翠萍, 刘文清, 赵南京 等. 激光能量及重复频率对土壤等离子体特性的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(2): 0215002
- 9 Zhong Ziming, Lu Jidong, Zheng Jianping *et al.*. Study on properties of plasma spectroscopy of laser-induced carbon materials with different chemical forms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1230001
- 钟子铭, 陆继东, 郑建平 等. 激光诱导不同化学形态碳等离子体光谱特性研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(12): 1230001
- 10 Yuan Xingqi, Gao Wenyong, Zhang Mingjun. Total intensity property for multiple particles side scattered laser radiation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(7): 072901
- 袁兴起, 高文英, 张明军. 多粒子场侧向散射总光强性质研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(7): 072901
- 11 Lei Chengxin, Wu Zhensen, Feng Dongtai. A study of light scattering properties of complex soot aggregates[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(10): 102601
- 类成新, 吴振森, 冯东太. 复杂烟尘凝聚粒子的光散射特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(10): 102601
- 12 Lü Qieni, Ge Baozhen, Chen Yiliang *et al.*. Particle sizing and size distribution measurement of alcohol spray by interferometric particle imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0308003
- 吕且妮, 葛宝臻, 陈益亮 等. 激光干涉粒子成像乙醇喷雾场粒子尺寸和粒度分布测量[J]. 中国激光, 2011, **38**(3): 0308003
- 13 C. Schulz, B. F. Kock, M. Hofmann *et al.*. Laser-induced incandescence: recent trends and current questions[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**(3): 333~354
- 14 B. Axelsson, R. Collin, P. Bengtsson. Laser-induced incandescence for soot particle size measurements in premixed flat flames[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(21): 3683~3690
- 15 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]. *J. 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信号分段平均拟合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
- 16 L. Chen, Z. Pan, K. Cen *et al.*. Laser-induced emission of ultrafine particulates evolved by pulverized coal pyrolysis[C]. Denver; ASME 2011 Power Conference, 2011
- 17 B. F. Kock, Th. Eckhardt P. Roth. In-cylinder sizing of diesel particles by time-resolved laser-induced incandescence (TR-LII) [J]. *Proceeding of the Combustion Institute*, 2002, **29**(2): 2775~2782
- 18 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]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2002, **13**(3): 401~410
- 19 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]. 北京: 科学出版社, 2001. 135~137
- 20 Wang Fei, Yan Jianhua, Ma Zengyi *et al.*. Simulation on soot concentration measurement with laser induced incandescence[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, **26**(7): 6~11
- 王飞, 严建华, 马增益 等. 运用激光诱导发光法测量碳黑粒子浓度的模拟计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, **26**(7): 6~11
- 21 Chen Changcun, Weng Guoping. Vacuum System Engineering Basic and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 1985. 28
- 陈昌存, 翁国屏. 真空系统工程基础与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985. 28
- 22 Yan Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 436
- 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 436
- 23 Lü Chongde. Thermal Parameter Measurement and Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. 103
- 吕崇德. 热工参数测量与处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 103
- 24 Xu Chaofen, Xiang Jun, Sun Lushi *et al.*. Effect of the pyrolysis and CO₂ gasification characteristics of coal from Huainan on pyrolysis temperature[J]. *Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2010, **38**(11): 100~104
- 徐朝芬, 向军, 孙路石 等. 热解温度对淮南煤热解与 CO₂ 汽化特性的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, **38**(11): 100~104

栏目编辑:何卓铭