

# 介观尺度下活性炭微粒的光镊捕捉、点火和扩散燃烧特性研究\*

黄雪峰<sup>1)</sup> 李盛姬<sup>2)†</sup> 周东辉<sup>1)</sup> 赵冠军<sup>1)</sup> 王关晴<sup>1)</sup> 徐江荣<sup>1)</sup>

1) (杭州电子科技大学理学院, 杭州 310018)

2) (杭州电子科技大学材料与环境工程学院, 杭州 310018)

(2014年4月26日收到; 2014年5月28日收到修改稿)

为探索介观尺度下固体燃料微粒的燃烧现象, 本文提出采用光镊工具对活性炭微粒进行捕捉、悬浮、定位, 再通过激光点燃, 研究其着火及扩散燃烧特性. 介观尺度燃烧室中, 光镊捕捉  $7.0\ \mu\text{m}$  活性炭微粒的最低捕捉功率为  $3.2\ \text{mW}$ , 捕捉速率范围为  $103.7\text{—}70.0\ \mu\text{m/s}$ ; 活性炭微粒在静止气流中的最低点火功率为  $3.2\ \text{mW}$ , 颗粒的等效粒径、周长、面积和圆形度对最低点火功率影响甚微, 点火延迟时间约  $48\ \text{ms}$ , 提高点火功率, 点火延迟时间缩短, 最小点火延迟时间小于  $6\ \text{ms}$ ; 活性炭在着火后先发生无焰燃烧, 紧接着发生有焰燃烧, 无焰燃烧的扩散燃烧速率满足粒径平方直线规律, 其燃烧速率范围为  $15.0\text{—}8.0\ \mu\text{m/s}$ ; 有焰燃烧的火焰面积和强度随燃烧时间发生闪烁, 其闪烁频率约  $29.1\ \text{Hz}$ . 对于粒径为  $3.0\ \mu\text{m}$  的活性炭微粒, 从加热到完全燃烧殆尽所需时间约  $0.648\ \text{s}$ . 结果表明: 对于聚焦后的高能激光束点燃活性炭微粒的着火属于联合着火模式, 在挥发份析出之前, 活性炭非均相着火而发生无焰燃烧, 挥发份析出后被点燃发生均相着火, 火焰面始终保持圆形.

**关键词:** 微燃烧, 光镊, 固体燃料, 点火

**PACS:** 88.20.jj, 47.70.Pq

**DOI:** 10.7498/aps.63.178802

## 1 引言

随着微机械系统(MEMS)技术的发展, 因能满足可携带电子设备的长时间供电和微小型航空航天设备高性能动力源和电源的需求, 微能源系统的研究引起了广泛的重视, 如微/纳卫星、微飞行器、“陆军勇士”单兵作战系统、机器蚂蚁、移动式电子设备微能源系统等. 传统微能源系统大多基于微锂电池组进行供电, 但锂电池组供电存在诸多不足: 能量密度较低、供电时间较短、重复使用时充电时间较长等, 因此难以满足新型微能源系统体积小、重量轻、能量密度高、不间断长时间供电等的要求.

1996年, Epstein等<sup>[1]</sup>首次提出新型微能源系

统“Power MEMS”, 可产生电能  $20\ \text{W}$  和推力  $0.125\ \text{N}$ . 而后“Power MEMS”扩展到微燃料电池、微型核电池、微型热机系统等. 无论哪种系统, 从能量密度角度来看, 基于微燃烧的微能源系统非常有吸引力. 不同能量装置的能量密度分布见图1<sup>[2]</sup>. 可见, 微型硅基燃烧室的能量密度最高, 达到  $2000\ \text{MW/m}^3$ ; 如果硅基燃烧室产生的高温高压气体驱动微透平和微发电机工作, 即使热电转换效率仅  $5\%$ , 其能量密度也为目前微型锂电池的百倍.

目前, 基于微燃烧的微能源系统所使用的燃料普遍为气体燃料, 因为气体燃料的燃烧热值高, 易于点燃, 假设能量转换效率为  $20\%$ , 气体燃料燃烧的能量密度也能达到  $2000\ \text{W}\cdot\text{h/kg}$  以上. 但气体燃料不易存储、携带, 对于微型航空航天设备以及便携式设备而言是一个较大的问题. 因此存在一个疑

\* 国家自然科学基金(批准号: 51276053, 51006029)、浙江省自然科学基金(资助号: LY14E060002)和浙江省中青年学科带头人学术攀登项目(批准号: pd2013158)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: shengjili@hdu.edu.cn

问: 微燃烧燃料能否使用液体或固体微颗粒燃料? 据作者调研结果来看, 目前还基本没有见到微固体燃料颗粒在介观或微观尺度下燃烧的报道。

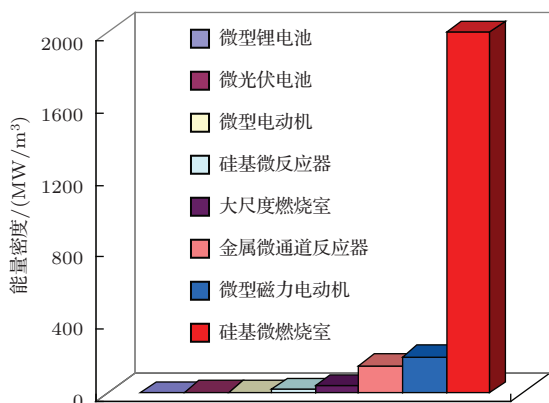


图1 (网刊彩色) 不同能量装置的能量密度分布图

微颗粒燃料的燃烧机理和操控是最重要的研究内容之一, 不仅对微燃烧研究非常重要, 而且对微颗粒燃料气化以及宏观系统中的燃烧和气化机理认识也非常重要. 关于微液体燃料在宏观燃烧系统中的燃烧机理研究主要集中在折算薄膜理论、液滴的燃烧试验系统, 包括研究单液滴在静止气流以及运动气流中的蒸发和燃烧特性, 液滴群雾化和燃烧特性等<sup>[3]</sup>. 在微燃烧系统中, 液体燃料的燃烧机理和燃烧特性与宏观有很大差异, 例如多孔介质燃烧煤油的燃烧机理中最重要的内容之一就是获取煤油液滴如何进行蒸发(何时蒸发, 蒸发速率如何, 蒸发特性如何), 显然受到多孔介质微通道等因素的干扰, 与宏观燃烧差异很大, 至今也无法确定其蒸发和燃烧机理.

关于微固体燃料的燃烧机理, 以煤为例, 主要集中在煤的热解、着火及火焰传播模型计算、特性测试以及各种控制技术. 固体燃料煤热解的几种主要试验方法包括<sup>[4,5]</sup>: 1) 固定床方法: 恒速加热固定床上的试样, 利用气相色谱或质谱分析挥发份. 2) 热天平方法: 用微量天平称量加热网栅及试样的重量变化, 控制加热速度可分析在不同温升速度下的热解特性, 采用质谱分析跟踪挥发份. 但加热导线妨碍转化率的连续测定, 金属网催化裂化可能会显著改变热解产物的成分, 表现出负失重. 3) 流化床方法: 通过气流夹带煤粉, 加热后进行产品分析和研究, 但加热速度较慢以及缺乏稳定性. 4) 自由沉降式反应器: 较难进行动力学研究. 5) 等离子体和激波管可以快速加热煤粉使之热解, 但煤粉是由周围的热气体热传导而间接加热. 6) 采用激光照

射的方法可获得很高的加热速度, 而且不存在任何干扰<sup>[6-9]</sup>.

无论是液体(油、醇类)颗粒燃料, 还是固体(煤、金属)、生物质颗粒(稻草、秸秆)及混合燃料, 其燃烧和气化试验研究方法很多, 但不同实验方法和装置得到的结果不一致、影响因素不一致, 缺乏统一的标准实验方法和实验装置, 机理的揭示不完全. 而且, 存在几个统一的难题: 1) 不能实现无干扰式操作和测试; 2) 不能同时对单颗粒和颗粒群进行定位测试; 3) 不能对亚微米级/纳米量级颗粒进行测试; 4) 不能对燃烧和气化方式进行有效操控.

由于存在上述缺陷, 本文提出采用激光光镊工具实现在介观尺度燃烧室内微颗粒燃料的捕获、操控与点燃研究. Askin 等人<sup>[10-15]</sup>对光辐射压力、辐射压力对粒子的作用、在真空中的浮运以及反馈控制实现精确定位等进行了研究, 发现米氏粒子和瑞利粒子均能够被激光捕捉. 因此利用光辐射力对粒子实现精确的定位和控制称为光镊.

由于光镊具有微米及以下量级的精确定位、选择个体、在生命状态下操作的特点, 光镊产生的 pN 量级的力正适合于生物细胞、亚细胞层次结构的研究, 所以迅速应用到了生物领域中, 显示出了强大的生命力和广阔的应用前景<sup>[16-19]</sup>. 同时在理论物理实验(原子冷却, 朱棣文等的该项工作获 1997 年诺贝尔物理学奖)<sup>[20]</sup>, 以及大气物理(气溶胶)相关研究<sup>[21]</sup>中得到了广泛应用. 许多研究人员从光镊的原理、单光镊、阵列光镊、各种属性的颗粒操控、微/纳颗粒操控、诸多领域的应用进行了研究. 利用单光镊对透明及半透明单颗粒介电小球和生物组织等的悬浮和捕捉技术进行了实验研究; 利用全息等方法制作阵列光镊, 操控颗粒群<sup>[22,23]</sup>.

本文利用光镊工具对介观尺度燃烧室内分散在静止空气中的活性炭微颗粒燃料进行捕捉、点火和扩散燃烧研究. 分别研究光镊对活性炭微粒的最低捕获功率、捕获速率、最低点火功率、点火延迟时间、着火模式、扩散燃烧速率、无焰燃烧或有焰燃烧、火焰面的形状结构和火焰闪烁频率等特性.

## 2 光镊原理及点火理论

### 2.1 光镊原理

微粒所受激光辐射压力包括梯度力和散射力, 见图 2. 梯度力来自介质微粒中的电偶极矩在不均匀电磁场中受到的力, 正比于光强梯度, 指向光强

最大处. 散射力来自光散射过程中与光子交换的动量, 沿光的传播方向. 微粒所受轴向力和径向力是梯度力和散射力在轴向和径向的合力. 根据微粒尺度与波长大小的关系, 辐射压力的计算方法不同. 当微粒尺度远大于入射光在真空中的波长时 (Mie 微粒), 可采用几何光学的近似算法 [24]. 当微粒尺度远小于入射光在真空中的波长时 (Rayleigh 微粒), 采用瑞利散射的理论进行近似计算. 对于中间微粒, 即微粒尺度与波长相近, 则通过求解麦克斯韦方程获得电磁场的方式来实现 [25-27].

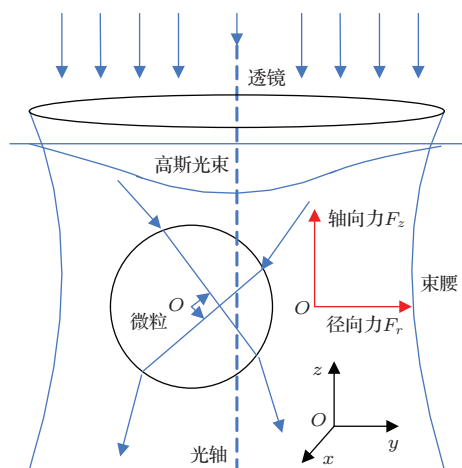


图2 微粒受高斯光束激光驱动力示意图

## 2.2 着火理论

固体燃料的着火模式随材料性质的不同而呈现出不同的特征, 根据材料的特征尺寸和点火源加热速率的不同可分为均相 (I)、非均相 (II) 和联合着火模式 (III), 见图 3 (a). Essenhigh 等人 [28] 用电加热网栅方法详细考察固体燃料煤颗粒不同粒径和加热速率下的着火过程及着火模式, 给出了一种典型的着火模式图谱, 如图 3 (b) 所示. 在加热速率 ( $< 10 \text{ K/s}$ ) 低、粒径小 ( $< 100 \mu\text{m}$ ) 的条件下, 煤粒倾向于非均相着火, 而对于大粒径煤粒 ( $> 100 \mu\text{m}$ ) 更倾向于均相着火, 当加热速率达到  $1000 \text{ K/s}$  时, 联合着火成为唯一的着火模式. 虽然其他固体燃料在被加热时没有挥发份或者挥发份很少, 但可被气化或完全氧化, 因此其着火模式也表现出这三种模式.

## 2.3 激光点火理论

点燃固体颗粒的点火源种类很多, 其中激光是最好的点火源之一, 具有单色性好, 能量集中且可

调、不易衰减、不易受环境因素影响等特点, 且不受由静电放电、射频以及感应放电引起的意外点火问题的限制. 根据能量守恒原理, 激光点火满足如下的能量方程:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = Q_r - h S_p (T_p - T_\infty) - \varepsilon \sigma S_p (T_p^4 - T_\infty^4) + \alpha Q_1, \quad (1)$$

式中, 左边为固体颗粒内能增加项, 右边第一项  $Q_r$  表示均相/非均相反应热、第二项表示对流散热、第三项表示辐射散热、第四项表示吸收的激光能量,  $m_p, c_p$  为微粒质量和定压比热容,  $T_p, T_\infty$  为微粒和环境温度,  $h$  为对流换热系数,  $S_p$  为颗粒受光面积,  $\varepsilon$  为发射率,  $\sigma$  为波尔兹曼常数.  $\alpha$  为燃料对加热激光的有效吸收系数, 取决于燃料几何系数和光谱系数, 小于 1,  $Q_1$  为激光加热能量.

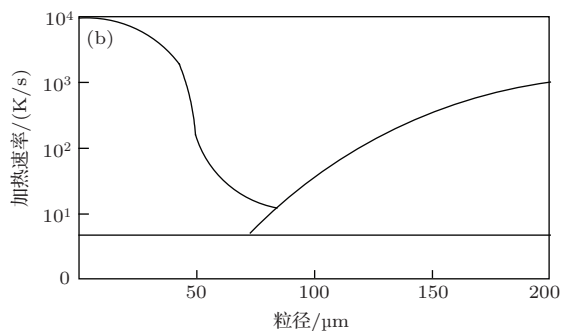
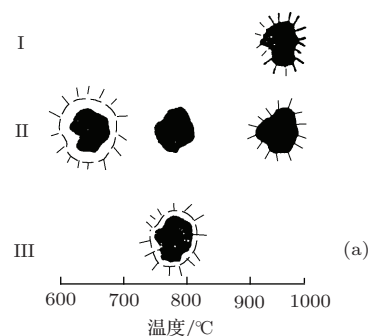


图3 固体燃料的着火模式

颗粒吸收激光能量而被加热, 当达到反应条件时与环境中的氧化剂进行化学反应而释放出反应热导致温度升高. 根据热力爆燃理论, 当颗粒获得能量对温度的梯度等于颗粒在环境中损失热量对温度的梯度, 颗粒达到临界着火点而被点燃. 当净热量 (包括化学反应的放热量) 大于损失的热量时, 颗粒能够自持燃烧. 从固体燃料获得激光加热能量到可持续点火的时间称为点火延迟时间, 是固体燃料点火的重要参数之一.



### 3 实验装置系统

#### 3.1 光镊装置

光镊捕捉微颗粒系统如图4所示. 激光器发射的光先经扩束镜扩束, 再经全反镜反射至物镜聚焦到介观尺度燃烧室中的微粒, 燃烧器放置在三维移动平台上. 用电荷耦合器 (CCD) 记录整个光镊捕获、点燃和燃烧微粒的过程. 为了消除从介观尺度燃烧室底部反射回来的激光影响成像, 在 CCD 前放置一滤光片. 激光器波长为 1064 nm, 功率范围 0—600 mW. CCD 全像素为 4608×3288, 帧率在选择成像区域 (ROI) 模式下可达到 158 帧每秒 (fps).

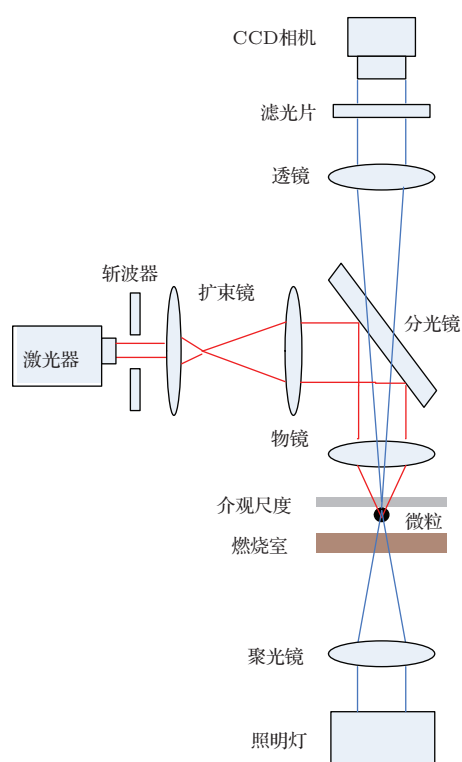


图4 光镊捕捉微粒系统示意图

#### 3.2 介观尺度燃烧系统

设计并加工了介观尺度燃烧室, 燃烧室采用光刻工艺制作, 底层为白玻璃, 上层为盖玻片. 介观尺度燃烧室的宽度为 $\sim 8$  mm, 深度为 $\sim 170$   $\mu\text{m}$ , 长度为 $\sim 20$  mm. 介观尺度燃烧室的两端与外界空气连通, 可与环境空气进行自然对流. 活性炭微粒与空气进行预混, 然后由微泵将活性炭微粒和空气混合物泵入介观尺度燃烧室, 要求以较低的速度泵入. 待介观尺度燃烧室内空气基本上处于静止状态

而进行捕捉实验. 观察活性炭微粒在介观尺度燃烧室内的分布情况, 由于本实验是针对单颗活性炭微粒的捕捉、点燃实验, 因此活性炭微粒在介观尺度燃烧室内的分散非常稀疏, 以减少颗粒间的相互影响. 介观尺度燃烧室内空气需要保持静止状态, 保证活性炭微粒的点火和燃烧完全属于扩散燃烧模式, 消除空气流动带来的干扰.

#### 3.3 活性炭材料与准备

本实验使用的活性炭由杭州恒星活性炭有限公司生产, 表观呈黑色, 颗粒状. 粒径较大的活性炭颗粒研磨后筛选出几微米至几十微米的微粒. 为了消除游离水的干扰, 活性炭微粒被置于恒温干燥箱中在 120°C 时干燥两小时后取出备用. 活性炭又称活性炭黑, 是黑色粉末状或颗粒状的无定形碳. 活性炭主成分除碳以外还含有氧、氢等元素. 其中碳含量约为 92%, 氧含量约为 5%, 氢含量约为 2%, 其他元素含量约为 1%. 活性炭在结构上由于微晶碳是不规则排列, 在交叉连接之间有细孔, 在活化时会产生碳组织缺陷, 因此它是一种多孔碳, 堆积密度低, 比表面积大. 活性炭的折射率为 $\sim 2.0$ , 密度为 $0.45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

### 4 实验结果分析与讨论

#### 4.1 活性炭微粒的光镊捕捉

称取少量预处理过的活性炭微粒与空气预混, 由微泵一起泵入介观尺度燃烧室中. 在 40× 物镜下调整载物台与物镜的距离, 使活性炭颗粒清晰成像, 可以发现活性炭颗粒很好地分散在燃烧室中. 确定光镊位置, 调节三维移动载物台将微燃烧室中的活性炭微粒移动至靠近光镊中心处, 保持距离光镊中心几个微米. 加载激光, 调节激光功率. 当激光功率调节至 3.2 mW 时, 活性炭微粒受到足够大的光镊梯度力作用, 被光镊逐渐拖曳至光镊中心. 因此可以确定捕捉活性炭的最小激光能量为 3.2 mW. 激光光镊捕捉活性炭微粒的过程记录见图5. 图5(a)—(i) 为 0—162 ms 时间内光镊对 7.0  $\mu\text{m}$  大小活性炭颗粒的捕捉情况, 将激光加载的时刻定义为 0 ms. 从图5可以看到, 活性炭颗粒受到光镊的吸引力, 向光镊位置靠拢, 并最终被光镊所捕捉. 捕捉速率先快后慢, 捕捉速率范围为 103.7—70.0  $\mu\text{m/s}$ .

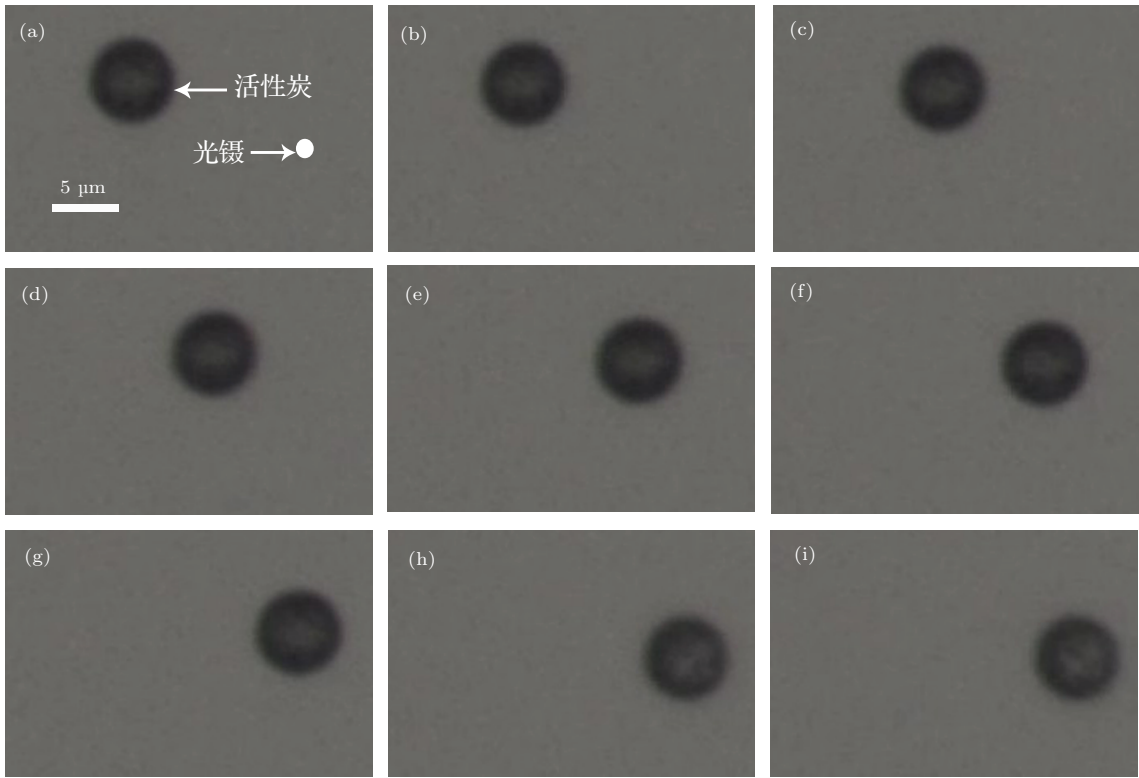


图5 光镊对活性炭微粒的捕捉过程 (40×, 3.2 mW, 158 fps) (a) 0 ms; (b) 18 ms; (c) 36 ms; (d) 54 ms; (e) 72 ms; (f) 90 ms; (g) 108 ms; (h) 126 ms; (i) 162 ms

表1 活性炭样品点火功率统计数据

样品编号	周长/ $\mu\text{m}$	面积/ $\mu\text{m}^2$	等效粒径/ $\mu\text{m}$	激光功率/mW	圆形度	样品形状
1	14.04	13.06	3.72	3.2	0.83	
2	12.80	10.77	3.36	3.2	0.83	
3	31.43	42.26	5.38	3.2	0.54	
4	15.37	18.17	4.73	3.2	0.97	
5	4.82	1.40	1.16	3.2	0.76	
6	10.84	8.69	3.21	3.2	0.93	

活性炭微粒运动过程中除受辐射压力外, 还将受到热泳力、光泳力、重力、浮力和曳力. 在激光的加热作用下, 空气受自然对流和辐射传热而存在温度梯度, 从而产生热泳力. 由于加热起始阶段, 活性炭微粒远离光镊中心, 而且微粒很小, 因此微粒两侧空气的温差极小, 其产生的热泳力极小. 当活性炭微粒逐渐靠近光镊中心, 空气温差提高, 热泳

力的作用增强. 光泳力是活性炭颗粒受到不均匀电磁作用而导致入射面和背光面出现微小热偏差而产生, 对于激光功率为几毫瓦和几微米的微粒可以忽略. 重力的数量级约  $10^{-14}$ — $10^{-13}$  N 之间, 与辐射压力相比, 重力效应影响极小. 由于气体密度极小, 因此浮力可忽略. 而活性炭微粒在运动过程中的曳力  $F_D$  为

$$F_D = -3\pi d_{\text{eff}}\mu_g v \quad (2)$$

式中  $d_{\text{eff}}$  是微粒的等效粒径,  $\mu_g$  是空气的流动黏性系数, 约  $1.461 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $v$  为微粒的运动速度. 当微粒的运动速度为  $103.7\text{--}70.0 \text{ }\mu\text{m}/\text{s}$ , 活性炭微粒所受的曳力为  $0.036\text{--}0.053 \text{ nN}$ . 在相同条件下, 活性炭所受光镊梯度力为  $1\text{--}2 \text{ nN}$ , 比曳力至少高一个数量级, 因此曳力影响极小.

## 4.2 活性炭微粒的激光点火

### 4.2.1 最低点火功率

随机选取介观尺度燃烧室内六个活性炭样品, 基本为非球形微粒, 测量六个样品的周长、面

积、等效粒径 (等效粒径 =  $4 \times \text{面积}/\text{周长}$ ) 和圆形成度 (圆形成度 =  $4 \times \pi \times \text{面积}/\text{周长的平方}$ ). 打开激光器, 对在介观尺度燃烧室内静止空气中的活性炭微粒进行点火实验研究, 六个样品的最低点火功率的统计结果见表 1. 可知, 六个样品的最低点火功率均为  $3.2 \text{ mW}$ , 因此可以判断活性炭微粒的等效粒径、周长、面积和圆形成度对最低点火功率基本没有影响.

### 4.2.2 点火延迟时间

活性炭受梯度力作用被光镊捕捉, 进而被拖曳并定位在光镊中心, 在激光加热的条件下发生点火和燃烧, 其点火和燃烧过程见图 6. 图 6(a)–(f) 记录的是  $0\text{--}384 \text{ ms}$  时间内  $\sim 3.0 \text{ }\mu\text{m}$  大小的活性炭微粒的激光点燃情况. 从图 6(a), (b) 可以看到, 活

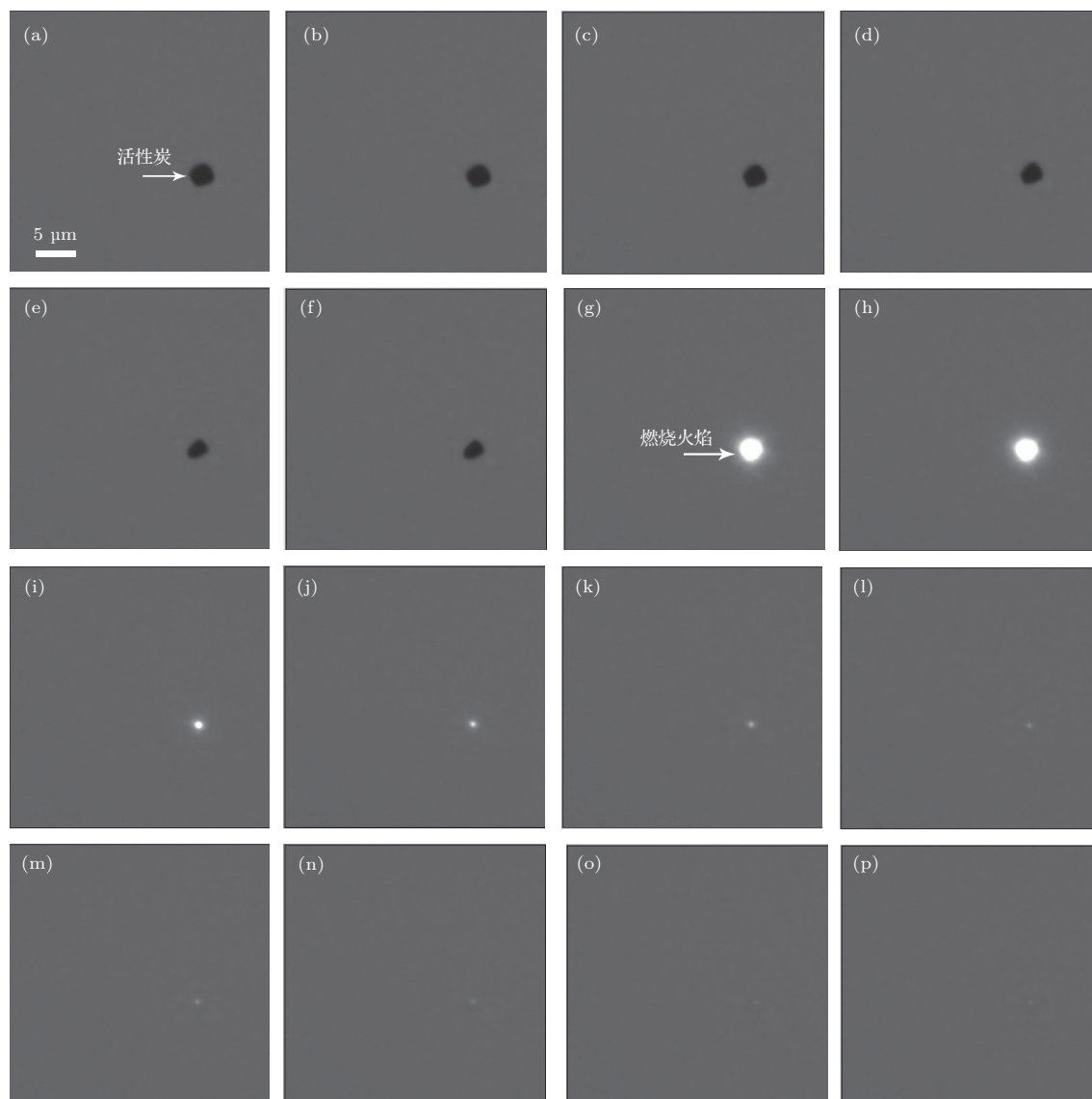


图 6 活性炭微粒在介观尺度燃烧室内静止空气流中的激光点火过程 ( $40\times$ ,  $3.2 \text{ mW}$ ,  $158 \text{ fps}$ ) (a)  $0 \text{ ms}$ ; (b)  $48 \text{ ms}$ ; (c)  $72 \text{ ms}$ ; (d)  $96 \text{ ms}$ ; (e)  $120 \text{ ms}$ ; (f)  $144 \text{ ms}$ ; (g)  $150 \text{ ms}$ ; (h)  $156 \text{ ms}$ ; (i)  $162 \text{ ms}$ ; (j)  $174 \text{ ms}$ ; (k)  $186 \text{ ms}$ ; (l)  $198 \text{ ms}$ ; (m)  $222 \text{ ms}$ ; (n)  $246 \text{ ms}$ ; (o)  $330 \text{ ms}$ ; (p)  $384 \text{ ms}$

性炭微粒首先发生氧化反应, 其面积基本不变. 活性炭的成分除碳(C)之外, 还含有少量氧(O)、氢(H)、硫(S)、氮(N)、氯(Cl). 因此在氧化反应过程中, 活性炭微粒也发生热解. 由于起始温度较低, 活性炭微粒发生无焰燃烧, 见图6(c)—(f), 活性炭微粒粒径逐渐变小. 将活性炭颗粒被捕捉后, 打开激光器加热时刻定义为点火初始时刻0 ms, 活性炭微粒面积发生变化的时刻为活性炭点火发生无焰燃烧开始的时刻, 因此活性炭微粒的点火延迟时间为~48 ms. 提高激光点火功率至数十毫瓦, 活性炭微粒在介观尺度燃烧室内静止空气流中的点火延迟时间低于6 ms. 虽然激光点火功率进一步提高后, 还可缩短点火延迟时间, 但由于CCD的最小响应时间为6 ms, 因此仅能判断最小点火延迟时间小于6 ms.

### 4.3 扩散燃烧速率

当固体颗粒发生均相燃烧时, 其颗粒的燃烧速率与燃烧时间通常满足 $\tau-d^2$ 规律, 即固体颗粒燃料的燃烧时间与其粒径的平方成正比关系. 在静止空气中, 当活性炭微粒被点燃后发生无焰燃烧, 其扩散燃烧速率统计结果见图7. 燃烧时间与活性炭微粒粒径的平方满足线性关系  $\tau = -d^2/41.29 + 11.236$ , 相关系数为0.981. 统计活性炭微粒粒径的变化, 其燃烧速率范围在15.0~8.0  $\mu\text{m/s}$ .

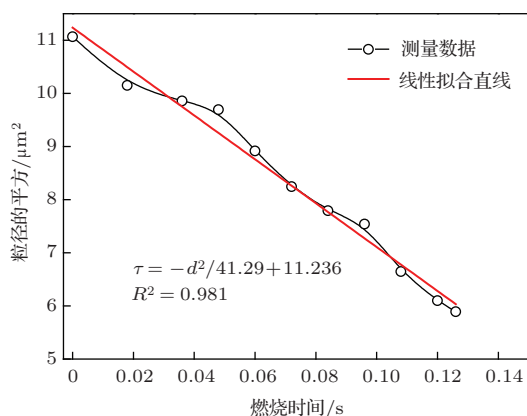


图7 活性炭微粒粒径的平方与燃烧时间的关系曲线

### 4.4 燃烧火焰面

随着燃烧的进行, 活性炭微粒释放出大量的反应热加速其挥发份析出, 在激光的点火作用下, 挥发份发生有焰燃烧, 其结果见图6(g)—(p). 从

图6(g)—(p)中可以发现活性炭微粒的燃烧火焰面形状均为圆形, 可见活性炭微粒在挥发份析出之后发生均相点火和燃烧. 随着活性炭燃料的消耗, 火焰逐渐变弱, 其火焰面积也逐渐变小直至完全消失. 统计火焰面面积随时间的变化情况, 见图8. 图8中红色的圆点和红色的曲线为有焰燃烧开始54 ms内(即燃烧时间0.132—0.186 s)燃烧火焰逐渐减小的过程. 显然, 发生有焰燃烧后, 6 ms内火焰面积达到最大, 随着燃烧的推进(约12 ms), 火焰面积迅速衰减, 之后火焰面积缓慢衰减至最小. 但由于激光保持打开状态, 持续加热活性炭微粒, 因此活性炭微粒开始发生第二次着火和燃烧, 火焰面积又变大然后衰减至最小. 而后又发生多次燃烧, 火焰面积反复发生变化直至活性炭微粒燃烧殆尽. 图8中蓝色的星号和蓝色的曲线为多次反复燃烧时的火焰面积, 其中箭头标记的数字1—15代表发生反复燃烧的次数.

由于活性炭是一种结构上由于微晶碳的不规则排列, 在交叉连接之间有细孔, 在活化时会产生组织缺陷的多孔性物质, 导致燃烧的不稳定, 即燃烧过程中出现反复燃烧.

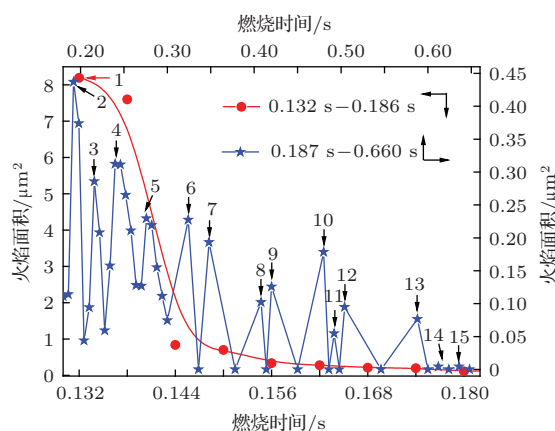


图8 (网刊彩色) 活性炭微粒微燃烧火焰面与火焰闪烁频率的统计结果

### 4.5 燃烧火焰闪烁频率

从点亮激光器加热活性炭微粒开始至活性炭微粒完全燃烧殆尽耗时0.648 s, 为点火延迟时间、无焰燃烧和有焰燃烧时间之和. 从活性炭微粒有焰燃烧实验过程中发现, 燃烧火焰面从大变小, 而后又从小变大, 出现多次反复. 从图8中统计的结果可知, 火焰面积出现许多极大值和极小值点, 即为火焰闪烁的拐点. 图8中极大值出现的次数为15次, 持续时间为~0.516 s, 因此燃烧火焰的闪烁频



率为 29.1 Hz.

## 5 结 论

在介观尺度下固体燃料微粒的点火和燃烧特性研究可进一步提高对燃烧机理的认识, 并拓宽基于微燃烧的微能源系统在介观尺度或微尺度范围内的应用. 固体微粒的着火和燃烧特性研究需要对微粒进行捕捉、悬浮, 因此需要选择非接触式工具和测试手段, 以减小外界对特性研究的干扰.

本文利用光镊工具对介观尺度燃烧室内静止空气流中的活性炭微粒进行捕捉、点火和燃烧研究, 其具体的结论包括:

1. 光镊工具能够有效对具有强吸收的燃料微粒进行捕捉和悬浮, 其捕捉距离与激光能量、光束束腰和粒径以及微粒和环境气体属性有关. 对于  $7.0\ \mu\text{m}$  活性炭微粒在最低捕捉功率为 3.2 mW 时, 其捕捉速率为  $103.7\text{--}70\ \mu\text{m/s}$ .

2. 在介观尺度燃烧室内静止空气流中, 固体燃料微粒的最低点火功率主要取决于燃料的成分和化学属性, 受微粒粒径、周长、面积和圆形度等的影响甚微. 活性炭微粒的最低点火功率为 3.2 mW, 点火延迟时间约 48 ms, 提高点火功率, 点火延迟时间缩短, 最小点火延迟时间小于 6 ms; 利用高能激光束快速点火, 含挥发分的燃料微粒着火为联合着火模式. 在挥发份析出之前, 活性炭非均相着火而发生无焰燃烧, 挥发份析出后被点燃发生均相着火. 对于挥发份含量极低的固体微粒, 其着火为非均相着火模式.

3. 对于含有挥发份的固体燃料微粒, 在介观尺度燃烧室内静止空气流中的燃烧速度符合粒径平方直线规律. 活性炭微粒均相着火发生有焰燃烧, 火焰面保持为圆形, 火焰面的大小和强度出现波动和闪烁.

## 参考文献

- [1] Epstein A H, Senturia S D, Anathasuresh G 1997 *International Conference on Solid State Sensors and Actuators* Chicago, June 16–19, 1999 p753
- [2] Mehra A, Ay'on A A, Waitz I A 1999 *J Microelectromech. S.* **8** 152
- [3] Williams A 1973 *Combust. Flame* **2** 1
- [4] Cen K F 2002 *Advanced Combustion* (Hangzhou: Zhejiang University Press) p241 (in Chinese) [岑可法 2002 高等燃烧学 (杭州: 浙江大学出版社) 第 241 页]
- [5] Maswadeh W, Arnold N S, McClennen W H 1993 *Energy Fuels* **7** 1006
- [6] Qu M C, Ishigaki M, Tokuda M 1996 *Fuel* **75** 1155
- [7] Wong B A, Gavalas G R, Flaganf R C 1995 *Energy Fuels* **9** 484
- [8] Granier J J, Pantoya M L 2004 *Combust. Flame* **138** 373
- [9] Poinot T, Candel S, Trouvé 1995 *Prog. Energy Combust. Sci.* **21** 531
- [10] Ashkin A 1970 *Phys. Rev. Lett.* **2** 4
- [11] Ashkin A, Dziedzic J M 1975 *Science* **187** 4181
- [12] Ashkin A, Dziedzic J M 1997 *App. Phys. Lett.* **30** 202
- [13] Ashkin A, Dziedzic J M 1977 *Phys. Rev. Lett.* **38** 23
- [14] Ashkin A, Dziedzic J M 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 1245
- [15] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E 1986 *Opt. Lett.* **11** 5
- [16] Abbondanzieri E A, Greenleaf W J, Shaevitz J W 2005 *Nature* **438** 460
- [17] Dumont S, Cheng W, Serebrov V 2006 *Nature* **439** 105
- [18] Chiou P Y, Ohta A T, Wu M C 2005 *Nature* **436** 370
- [19] Utkur M, Jan S, Winston T 2008 *Lab. Chip.* **8** 12
- [20] Chu S 1998 *Rev. Mod. Phys.* **70** 3
- [21] Burnham D R, McGloin D 2006 *Opt. Exp.* **14** 9
- [22] Leonardo R D, Leach J, Mushfique H 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 134502
- [23] McGloin D 2006 *Phil. Trans. R. Soc. A* **364** 3521
- [24] Gauthier R C, Wallace S 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 9
- [25] Kim J S, Lee S S 1983 *J. Opt. Soc. Am.* **7** 3
- [26] Chang S, Lee S S 1985 *J. Opt. Soc. Am. B* **2** 11
- [27] Barton J P, Alexander D R, Schaub S A 1989 *J. App. Phys.* **66** 4594
- [28] Essenhigh R H, Misra M K, Shaw D W 1989 *Combust. Flame* **77** 3



# Trap, ignition, and diffusion combustion characteristics of active carbon micro-particles at a meso-scale studied by optical tweezers\*

Huang Xue-Feng<sup>1)</sup> Li Sheng-Ji<sup>2)†</sup> Zhou Dong-Hui<sup>1)</sup> Zhao Guan-Jun<sup>1)</sup>  
Wang Guan-Qing<sup>1)</sup> Xu Jiang-Rong<sup>1)</sup>

1) (School of Science, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

2) (College of Materials and Environmental Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

( Received 26 April 2014; revised manuscript received 28 May 2014 )

## Abstract

To study combustion characteristics of solid fuels at the meso-scale, this paper presents a study on trap, ignition, and diffusion combustion characteristics of active carbon micro-particles at a meso-scale by optical tweezers. In the meso-scale combustor, minimum trap power for active carbon micro-particles with a diameter of 7.0  $\mu\text{m}$  is 3.2 mW, and the trap velocity is in the range of 103.7—70.0  $\mu\text{m/s}$ . The active carbon micro-particles in static air flow can be ignited when the laser power is 3.2 mW. The effective diameter, perimeter, area and roundness of the particles have little effect on the minimum power for ignition. The ignition delay time is  $\sim 48$  ms for active carbon micro-particles with a diameter of 3.0  $\mu\text{m}$ , and it will decrease till below 6 ms with increasing laser power. After ignited, the active carbon micro-particle shows flameless combustion first. The diffusion combustion velocity agrees with the diameter square linear-relationship, and the velocity is of 15.0—8.0  $\mu\text{m/s}$ . Then the active carbon micro-particle continues to carry out combustion reactions with bright flames repetitiously, and the flash frequency is 29.1 Hz. For the active carbon micro-particle with a diameter of 3.0  $\mu\text{m}$ , it can burn out thoroughly in an overall time  $\sim 0.648$  s (including the heating and combustion processes). Results demonstrate that ignition of the active carbon micro-particle heated by high power density laser belongs to the combined ignition mode. Before volatile matter precipitates, the active carbon micro-particle is ignited heterogeneously and carries out a flameless combustion. However, after the volatile components are precipitated, it is ignited homogeneously, and the combustion flame always shows a spheroid shape.

**Keywords:** micro-combustion, optical tweezers, solid fuels, ignition

**PACS:** 88.20.jj, 47.70.Pq

**DOI:** 10.7498/aps.63.178802

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51276053, 51006029), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. LY14E060002), and the Young and middle-aged leading academic climbing project of Zhejiang Province, China (Grant No. pd2013158).

† Corresponding author. E-mail: shengjili@hdu.edu.cn