

## 含水量对松木燃烧产生碳烟物理化学特性的影响

史长前<sup>1,2</sup>, 司梦婷<sup>1,2</sup>, 张引弟<sup>1,2</sup>, 刘佳妮<sup>1,2</sup>, 辛玥<sup>1,2</sup>

(1. 长江大学石油工程学院, 武汉 430100;

2. 低碳催化与CO<sub>2</sub>利用全国重点实验室, 兰州 730000)

**摘要:** 为了探究不同含水量对生物质燃烧过程中产生碳烟的物化特性的影响, 本研究以常温(样品 1, 含水率 10.31%)和 105 °C 下烘干 48 h(样品 2, 含水率 1.42%)两种条件下得到的松木为燃烧原料, 收集燃烧过程中生成的碳烟, 利用高分辨率扫描电子显微镜(HRSEM)、X 射线光电子能谱(XPS)和傅里叶变换红外光谱(FT-IR)技术对收集到的碳烟形貌及结构、元素和官能团进行观察和分析。HRSEM 分析表明, 样品 1 的碳烟颗粒呈小型链状聚集, 分形维数较高, 而样品 2 主要是以簇状聚集且平均主颗粒尺寸大于样品 1。XPS 检测发现, 两种条件下产生的碳烟元素含量存在细微差异, 样品 1  $A_{sp^2}/A_{sp^3}$  的比值相对较大, 意味着未经过烘干处理后的样品反应活性更大。FT-IR 分析显示, 碳烟中含有的氢主要是以芳香烃的形态存在, 且存在取代类型为 1, 2-二取代的苯环。此外, 含水量较高的情况下, 单氢取代的芳香烃占比较大, 而双氢和三四氢取代的芳香烃相对来说占比小。因此, 经过脱水处理后的松木生物质在燃烧过程中, 燃烧得更加充分, 生成粒径较大、数量较少的碳烟, 有效减少了污染物的排放, 为生物质能源清洁高效利用提供了理论支撑。

**关键词:** 含水量; 碳烟; 生物质; 物化特性; 反应活性

中图分类号: TK16

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2025)06-0671-08

## Influence of Water Content on the Physicochemical Properties of Soot Generated in Biomass Combustion

Shi Changqian<sup>1,2</sup>, Si Mengting<sup>1,2</sup>, Zhang Yindi<sup>1,2</sup>, Liu Jiani<sup>1,2</sup>, Xin Yue<sup>1,2</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

2. National Key Laboratory of Low Carbon Catalysis and CO<sub>2</sub> Utilization, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of different water contents on the physicochemical properties of soot generated during biomass combustion, pine wood obtained at room temperature (sample 1, moisture content 10.31%) and dried at 105 °C for 48 h (sample 2, moisture content 1.42%) was used as combustion raw material to collect the soot generated during combustion. High-resolution scanning electron microscopy (HRSEM), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) were used to observe and analyze the morphology, structure, elements and functional groups of the collected soot. HRSEM analysis showed that sample 1 aggregated in small chains and had a large fractal dimension, while sample 2 mainly aggregated in clusters and its average main particle size was larger than that of sample 1. XPS showed that there was a slight difference in the content of soot under the two conditions. The  $A_{sp^2}/A_{sp^3}$  ratio of sample 1 was relatively

收稿日期: 2024-12-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52206218, 52274060).

作者简介: 史长前(2000—), 男, 硕士, 2521749574@qq.com.

通信作者: 司梦婷, 女, 博士, 副教授, simengting@yangtzeu.edu.cn.

large, which meant that the undried sample (sample 1) had higher reactivity. FT-IR analysis showed that the hydrogen contained in soot was mainly in the form of aromatic hydrocarbons, and there was a benzene ring with a substitution type of 1, 2-disubstitution. In addition, at high water content, the proportion of aromatic hydrocarbons substituted by monohydrogen is relatively large, while that by di-hydrogen, tri-hydrogen and tetra-hydrogen is relatively small. Therefore, during the combustion process of dehydrated pine biomass, the combustion is more complete, and the soot with larger particle size and less quantity is generated, which effectively reduces the emission of pollutants and provides theoretical support for the clean and efficient utilization of biomass energy.

**Keywords:** water content; soot; biomass; physicochemical properties; reactive activity

随着全球经济的快速发展,化石燃料的大量使用带来了日益严重的环境压力与能源危机. 生物质能源凭借其可再生性和广泛的可获得性,成为全球能源结构转型中的关键环节. 然而,生物质的燃烧过程中伴随着碳烟的排放. 碳烟不仅能形成污染性较强的细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>),还可能携带有害化学物质,这不仅威胁大气环境,还对人类健康构成风险,从而限制了生物质能源的可持续发展<sup>[1]</sup>.

近年来,众多学者对燃烧中碳烟生成的影响因素进行了深入研究. Vander Wal 等<sup>[2]</sup>通过实验研究发现,苯和乙炔所产生的碳烟氧化速率存在近五倍的显著差异,并且乙醇碳烟层平面曲率的增大可大幅度提升其氧化反应性. 这表明碳烟颗粒纳米结构受合成条件(如温度、时间、初始燃料等因素)的影响,进而对其氧化反应性产生作用. Al-Qurashi 等<sup>[3]</sup>实验研究显示,废气再循环(EGR)能够通过改变碳烟的物理性质和燃烧机制,有效提升碳烟的氧化反应性. Botero 等<sup>[4]</sup>聚焦于层流扩散火焰中碳烟颗粒的研究,揭示了碳烟颗粒的形貌及纳米结构与燃料类型密切相关,且其纳米结构差异主要体现在多环芳烃(PAHs)的排列和有序程度方面. McEnally 等<sup>[5]</sup>发现燃料结构与火焰条件可通过改变反应途径影响中间产物生成与转化等复杂机制,对碳烟的生成过程产生重要的影响. Trubetskaya 等<sup>[6]</sup>的研究表明,生物质类型主要影响碳烟产率、颗粒形态结构和无机成分,并且在这些影响因素中,碳烟纳米结构对反应活性的影响相对较小. 综上所述,燃料种类和火焰条件对碳烟性质的影响已被广泛研究<sup>[2-6,7-8]</sup>. 然而,现有研究主要关注燃料结构对生物质燃烧热效率和污染物排放的宏观影响,缺乏对水分如何通过改变碳烟微观结构、元素组成及官能团等特性来影响其生成机制的深入分析. 因此,研究不同含水量条件下生物质燃烧过程中碳烟生成的机制就具有重要的理论和应用价值<sup>[9]</sup>.

生物质含水量是影响燃烧效率的重要参数之一,水分的存在通过改变燃烧过程中的热力学条件和化

学反应路径,进而影响碳烟的产生. 因此,本研究实验探讨了生物质含水量对其燃烧时碳烟生成的影响. 首先,进行了两种含水量不同的生物质燃烧实验,并收集燃烧过程中产生的碳烟样品. 接着,利用高分辨率扫描电子显微镜(HRSEM)、X射线光电子能谱(XPS)和傅里叶变换红外光谱(FT-IR)对收集的碳烟样品进行分析<sup>[10-11]</sup>,进而探讨水分含量对碳烟性质的影响.

## 1 实验方法

### 1.1 实验条件

本实验采用直径为 8~10 mm 的圆柱状松木作为燃料,其元素分析结果见表 1. 首先,松木经过两种不同的前处理:一种为常温条件下,含水率为 10.31%;另一种为将松木放置在 105 °C 干燥箱中烘干 48 h,含水率为 1.42%. 然后,采用电加热炉进行燃烧实验,燃烧装置如图 1 所示. 在实验过程中,将松木放置在电加热炉上,并利用打火机引燃后燃烧.

表 1 样品的元素分析

Tab.1 Elemental analysis of samples

样品	w <sub>N</sub> /%	w <sub>C</sub> /%	w <sub>H</sub> /%	w <sub>O</sub> /%
松木	0.137	45.049	5.832	25.03

### 1.2 样品收集

如图 1(a)所示,实验使用外径为 12 mm、内径为 8 mm 的不锈钢沉积管来采集碳烟样品. 取样时,将沉积管水平放置在松木颗粒燃烧火焰的正上方,并以 10 L/min 的压缩冷气持续从沉积管的中心流过,使其冷却,火焰中的碳烟通过热沉积的方式就会附着在沉积管表面. 此后,利用刮片工具将碳烟收集并转移到密封的样品盒内,用于后面的 XPS 和 FT-IR 分析.

图 1(b)为热泳原理取样装置图,在气缸运动过程中,自锁镊子夹持着铜网,将其插入火焰中进行碳烟取样,采样过程的时长通过电磁阀精确控制. 根据热泳原理,碳烟被铜网上的碳膜吸附,收集到的碳烟

样品随后用于形貌分析. 为了确定取样时间和取样位置, 整个取样过程利用 FASTCAM Mini UX50 高速摄像机拍摄记录, 图 2 给出了高速摄像机拍摄到的

热泳取样全过程. 两种样品点燃后在 18~20 s 内火焰趋于稳定状态, 所以图 (a) 和图 (b) 两个实验收集样品的时间都是在松木条燃烧后 18 s 时开始收集.

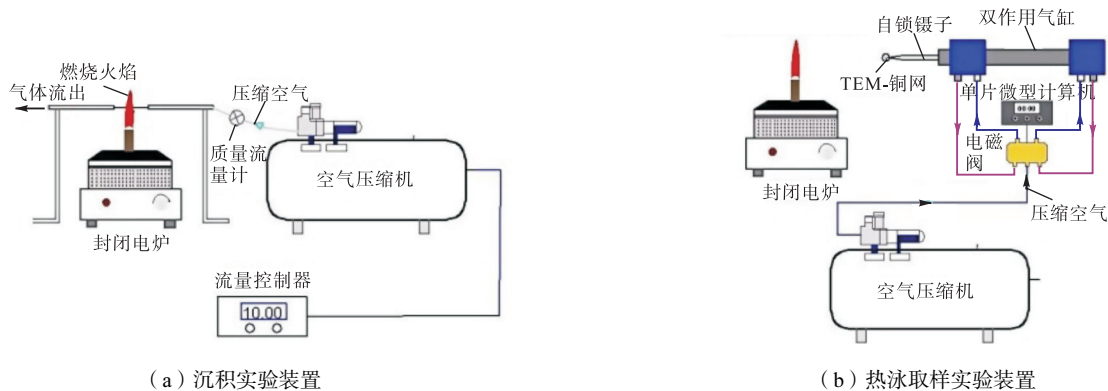


图 1 实验装置示意  
Fig.1 Experimental setup

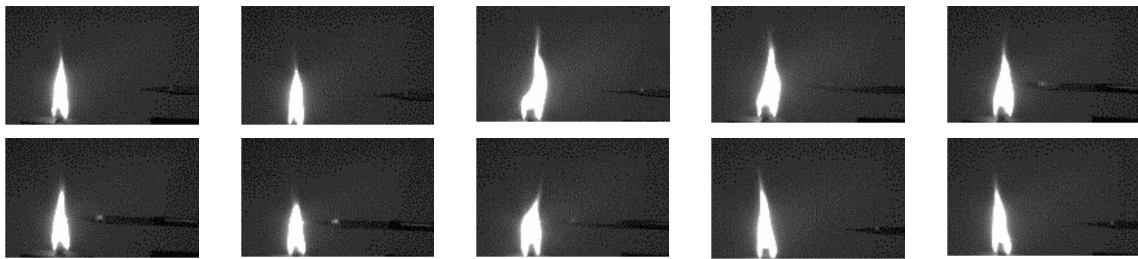


图 2 高速摄像机拍摄的热泳取样过程图像  
Fig.2 Thermophoresis sampling process taken by a high-speed camera

### 1.3 碳烟形貌结构表征

为了获得碳烟团聚体的结构和分形维数, 利用 Image 软件对高分辨率下碳烟的 SEM 图进行测量, 包括碳烟平均主颗粒直径  $D_p$ 、最大投影长度  $L$ 、投影面积  $A_a$ , 每个团聚体包含的主颗粒数  $N$  从团聚体投影面积  $A_a$  获得:

$$N = K_a \left( \frac{A_a}{A_p} \right)^{\alpha_a} \quad (1)$$

其中,  $A_p$  是主颗粒截面积,  $A_a$  是团聚体投影面积,  $\alpha_a = 1.09$ ,  $K_a = 1.15$ .

分形维数和指前因子通过  $N$  和  $L/D_p$  的最小二乘线性拟合得到, 拟合公式如下:

$$N = K_L \left( \frac{L}{D_p} \right)^{D_f} \quad (2)$$

式中:  $K_L$  为预相关因子,  $D_f$  是分形维数.

$$K_f = K_L \left( \frac{D_f + 2}{D_f} \right)^{D_f/2} \quad (3)$$

式中:  $K_f$  为指前因子, 反映了碳烟团聚体的结构紧凑程度, 其无量纲特性与分形维数共同影响碳烟的氧化反应速率.

碳烟产率的计算公式如下:

$$f_v = 0.78 \delta \frac{d_p^{0.82} \sum_i A_i^{1.09}}{t_c A_i} \quad (4)$$

式中:  $\delta$  代表比例因子(无量纲);  $A_i$  为 TEM 图像的总面积;  $t_c$  为取样时间.

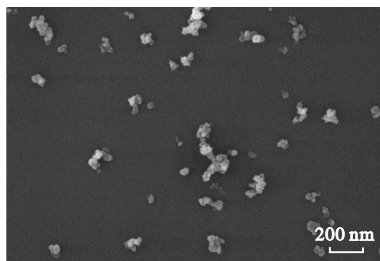
### 1.4 碳烟物化特性表征

本实验使用 X 射线光电子能谱(XPS)分析仪对碳烟样品的元素组成和表面官能团进行分析. 元素分析结果见表 1. 在 XPS 分析中, 首先在结合能范围 0~1350 eV 内、以 100 eV 的扫描步长进行全谱扫描, 以获得样品的勘测扫描数据. 随后, 针对 C1s 谱段, 设置结合能范围为 279~298 eV、扫描步长为 50 eV, 进一步分析碳烟样品表面的碳元素状态. 采用 Nicolet iS50R 傅里叶红外光谱仪(配备 DLATGS 检测器)对碳烟样品进行分析, 以获得两种样品的红外光谱数据. 具体操作如下: 取 100 mg 的 KBr 与 1 mg 收集的碳烟样品, 充分混合并研磨至细粉. 将研磨后的样品压片, 使用 10 MPa 的压力并保持 30 s, 直至样品呈现半透明状态. 然后, 将制备好的样品置于光谱仪中进行红外光谱分析. 在每次测量中, 设置扫描范围为 4000~400  $\text{cm}^{-1}$ , 扫描次数为 32 次, 分辨率为 4.0  $\text{cm}^{-1}$ .

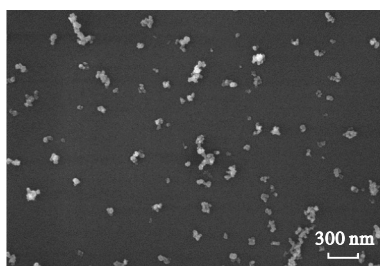
## 2 结果与讨论

### 2.1 含水量对碳烟纳米形貌的影响

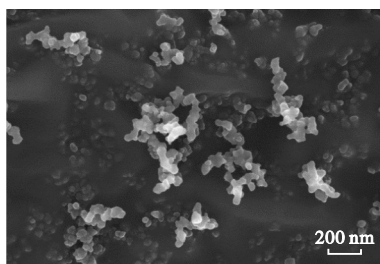
图 3 给出了样品 1 和样品 2 碳烟的 HRSEM 图像. 可以明显看出, 样品 2 碳烟的重叠性更高, 因此部分碳烟在 HRSEM 图像中呈现出灰色, 并且样品 2 的单颗粒尺寸明显大于样品 1. 另外, 样品 1 主要以小型链状聚集, 样品 2 主要是以簇状聚集<sup>[12]</sup>. 这表明与未经过烘干处理的松木相比, 烘干后的松木燃烧产



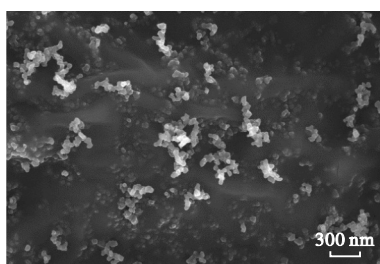
(a) 样品 1 碳烟, 50 000 倍



(b) 样品 1 碳烟, 30 000 倍



(c) 样品 2 碳烟, 50 000 倍

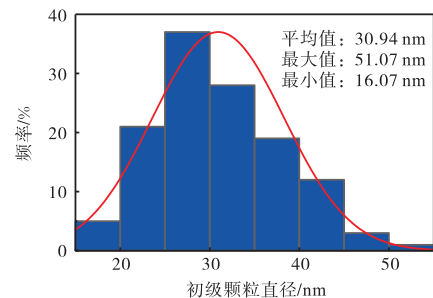


(d) 样品 2 碳烟, 30 000 倍

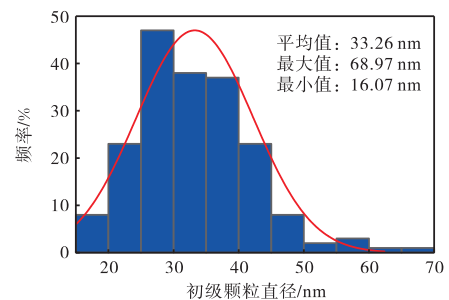
图 3 碳烟的 HRSEM 图像  
Fig.3 HRSEM image of soot

生的碳烟具有更高的聚结性能<sup>[13-14]</sup>. 这是由于高含水量的生物质燃烧时, 水分的蒸发吸收大量热量, 导致燃烧不完全, 此时生成的碳烟颗粒含有更多的有机碳, 而有机碳比无机碳更容易形成表面平滑的颗粒, 从而不容易聚集<sup>[12,15]</sup>.

两种碳烟放大 50 000 倍后, 利用 Image 软件测出具有代表性的碳烟聚集体初级颗粒尺寸<sup>[11,16]</sup>, 结果如图 4 所示. 可以发现样品 2 最大粒径大于样品 1, 而两个样品的最小粒径一样大, 这说明经过高温脱水处理后的松木燃烧时可能会促进 PAH(多环芳烃)的生长<sup>[17-18]</sup>, 从而得到较大尺寸的初级颗粒. 从图 4 中还可以发现, 样品 1 的初级颗粒粒径主要集中在 25 ~ 35 nm 之间, 平均值为 30.94 nm, 而样品 2 的粒径就较为均匀, 主要集中在 30 ~ 40 nm 之间, 平均值为 33.26 nm.



(a) 样品 1



(b) 样品 2

图 4 两种类型碳烟聚集体的初级颗粒直径分布

Fig.4 Primary particle diameter distribution of two types of soot aggregates

通过使用 Image 软件结合非线性拟合方法获得碳烟的分形参数<sup>[19]</sup>, 拟合结果如图 5 所示. 从图中可以看出, 样品 1 的分形维数大于样品 2, 但其指前因子却低于样品 2. 指前因子与化学反应速率相关, 因此, 在两种样品反应活化能相近的情况下, 可以推测样品 2 的反应速率略高于样品 1. 而分形维数反映碳烟在空间中所呈现出的形态复杂状况, 结合图 3 的结果, 发现样品 1 碳烟颗粒呈现出更加复杂且粗糙的形貌, 样品 2 的碳烟颗粒则呈现出较为均匀和规则的球

形. 另外, 表 2 显示, 样品 2 的碳烟产率小于样品 1, 这可能是由于高水分含量的燃料在燃烧过程中需要消耗额外的能量来蒸发水分, 导致燃烧不完全, 从而增加了碳烟产量<sup>[14,20-21]</sup>.

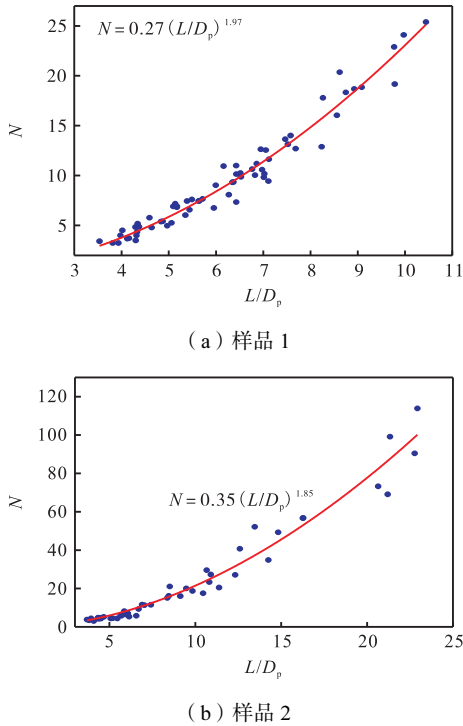


图 5  $N$  与  $L/D_p$  自定义非线性拟合  
Fig.5 Custom nonlinear fitting of  $N$  and  $L/D_p$

表 2 碳烟的分形维数、指前因子

样品	分形维数	指前因子	碳烟产率/%
1	1.97	0.27	24.6
2	1.85	0.35	20.2

### 2.2 含水量对碳烟表面性质的影响

图 6 为两种碳烟样品 XPS 测量光谱图, 两种不同含水量下的碳烟样品含有大量的碳、较多的镁和氧以及少量的钠和钙还有微量的钾、氯、硅、铝和硫<sup>[13]</sup>. 样品 1 碳烟的钾和碳元素含量比样品 2 高, 这是因为低含水量松木燃烧较完全, 大部分碳元素被氧化, 且低含水量燃烧时温度较高, 钾元素更多地被蒸发或转化成其他的物质. 两个样品的其余元素含量基本相同, 即经过烘干脱水处理对于碳烟组分的影响并不明显. 为了获得  $sp^2$  和  $sp^3$  碳键和氧官能团的相对百分比的信息, 使用 XPS peak 4.15 软件对两个样品的 C1s 扫描进行了去卷积拟合, 结果如图 7 所示.

如图 7 所示, 样品 1 和样品 2 的  $sp^2$  (石墨化碳) 占比最多, 其次是  $sp^3$  (无定形碳). 另外, 样品 2 (经过烘干脱水处理) 中的  $sp^2$  和  $sp^3$  含量都远高于样品 1 中的含量, 这说明当生物质中水分含量较高时, 它会

吸收燃料的热量来蒸发水分, 从而降低燃烧温度和燃烧效率, 使得产生碳烟中的  $sp^2$  和  $sp^3$  值降低. 其次,  $sp^3$  与  $sp^2$  峰的面积之比 ( $A_{sp^3}/A_{sp^2}$ ) 代表了无定形碳与石墨碳的相对含量<sup>[22]</sup>, 在一定程度上反映了燃烧反应的活性, 可以看出样品 1 的反应活性远远大于样品 2.

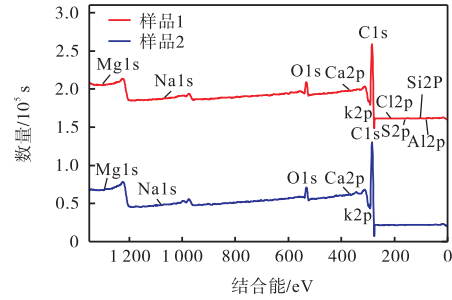
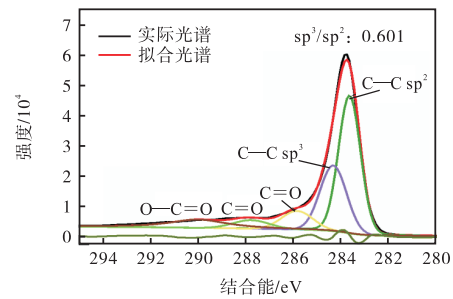
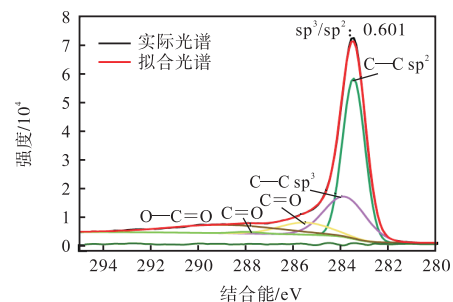


图 6 碳烟样品的 XPS 测量光谱  
Fig.6 XPS measurement spectra of soot samples



(a) 样品 1



(b) 样品 2

图 7 碳烟样品的 C1s 峰的高分辨率 XPS 光谱及组分曲线拟合

Fig.7 High-resolution XPS spectra of the C1s peak of the soot sample with curve fitting of the components

### 2.3 含水量对碳烟基团的影响

两种样品的 FT-IR 的光谱图如图 8 所示, 大致分为 4 个区: ①4 000 ~ 2 500  $cm^{-1}$ , 称为 X—H (X 为 C、N、O、S 等) 的伸缩振动区; ②2 500 ~ 2 000  $cm^{-1}$ , 称为三键和累计双键的伸缩振动区; ③2 000 ~ 1 500  $cm^{-1}$ , 称为双键的伸缩振动区; ④1 600 ~ 400  $cm^{-1}$ , 称为 X—H 变形振动区和其他单键伸缩振动区. 如图 8 所

示,两种样品在  $1800 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$  范围内吸收强度大,而在  $2500 \sim 3000 \text{ cm}^{-1}$  范围内吸收强度并不明显,因此可初步判断碳烟样品中的化合物属于芳香族而不是脂肪族<sup>[23]</sup>. 由于最左侧的伸缩振动峰处于  $4000 \sim 3000 \text{ cm}^{-1}$  之间,因此在波长为  $3423 \text{ cm}^{-1}$  处,存在 C—H 的伸缩振动峰,更加确定了可能会有芳香化合物的存在. 在  $1390 \text{ cm}^{-1}$  处也存在一个特征峰,由此断定样品中存在苯环,并且在  $770 \sim 730 \text{ cm}^{-1}$  之间存在一个特征峰,据此可判断苯环的取代类型是 1,2-二取代. 在波长为  $1853 \sim 1724 \text{ cm}^{-1}$  处,存在若干个特征峰,表明此处可能存在 C=O 双键伸缩振动峰,又因为在  $1332 \sim 1047 \text{ cm}^{-1}$  之间存在两个强峰,因此可以确定此处的 C=O 双键是酯基. 此外,在  $1623 \text{ cm}^{-1}$  处有个明显的特征峰,可以推断此处存在 C=C 双键伸缩振动峰,而且样品 1 在此处峰的强度大于样品 2,说明含水量较高的情况下会生成更多 C 原子,这正好与 XPS 的结果相吻合. 又因为在波长为  $935 \sim 512 \text{ cm}^{-1}$  处存在特征峰,且该特征峰在  $910 \text{ cm}^{-1}$  特征值范围内存在,因此可以判定其为单取代的 R—CH=CH<sub>2</sub>.

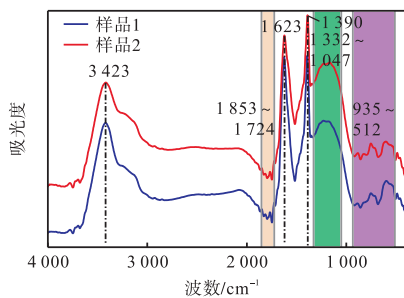


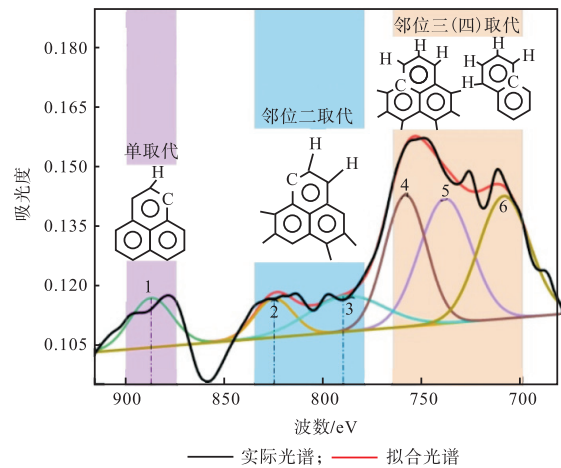
图 8 碳烟样品的 FT-IR 光谱

Fig.8 FT-IR spectra of soot samples

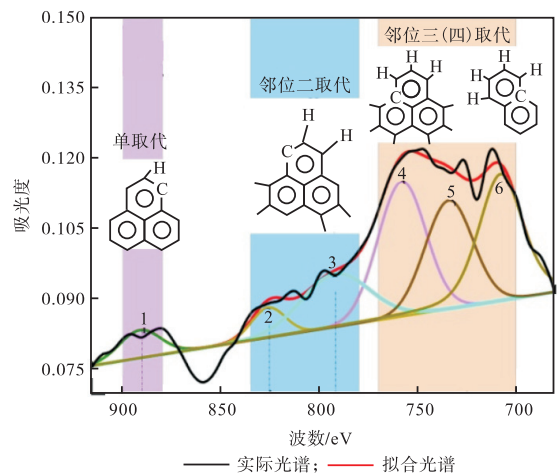
在波长为  $935 \sim 512 \text{ cm}^{-1}$  范围内的峰是由单氢或者是相邻氢的苯环面外弯曲振动引起的. 由图 8 可以看出,在此范围内的峰具有明显的凸起,满足芳香烃的定量分析. 按照吸收波长可以将此范围的峰大概分为三部分: 波长在  $890 \sim 870 \text{ cm}^{-1}$  范围内的峰称为单取代氢; 波长在  $850 \sim 810 \text{ cm}^{-1}$  范围内的被称为邻位二取代氢; 波长在  $790 \sim 720 \text{ cm}^{-1}$  范围内的被称为邻位三(四)取代氢. 为了便于分析,使用 XPS Peak 4.1 软件对  $935 \sim 512 \text{ cm}^{-1}$  范围内的峰进行光谱解卷积,样品 1、样品 2 的曲线拟合结果如图 9 所示. 样品 1 的吸光度普遍大于样品 2,表明样品 1 具有较高的浓度,这正好反映图 7 中的结果(样品 1 燃烧生成碳烟的碳原子数量大于样品 2). 随着波数的减少,样品 2 吸光度的上升速率高于样品 1,这是因为低含水量燃烧产生高温环境,导致生成颗粒较大、聚结度更

高的碳烟颗粒,这些较大颗粒具有较强的红外吸收能力<sup>[24-25]</sup>,这与表 3 中样品 2 碳烟峰面积占比更大的结果相一致. 另外,计算了不同峰的面积与总峰面积之间的比值:  $A_{\text{单取代}}/A_{\text{总}}$ 、 $A_{\text{邻位二取代}}/A_{\text{总}}$  和  $A_{\text{邻位三(四)取代}}/A_{\text{总}}$ ,如表 3 所示.

表 3 显示了两种碳烟样品的特征,两种碳烟样品的单取代氢和双取代氢的百分比都小于三四取代氢. 这表明碳烟芳香烃的主要存在形式是邻位三四取代. 表 3 中显示了随着样品的含水量减少,碳烟中的单取代氢的百分比减小,而双取代和三四取代氢的百分比随着含水量的降低而升高. 这是由于水分可以影响碳烟基团的化学反应性,它可能与官能团发生氢键或其他形式的相互作用,改变取代氢的稳定性和反应活性. 因此,在松木生物质燃料燃烧之前需适当控制其含水量.



(a) 样品 1



(b) 样品 2

图 9 样品 1 和样品 2 的 FT-IR 光谱在  $916 \sim 680 \text{ cm}^{-1}$  范围内的解卷积

Fig.9 Deconvolution of the FT-IR spectrum of sample 1 and sample 2 in the range of  $916 \sim 680 \text{ cm}^{-1}$

表 3 峰面积比

Tab.3 Peak area ratio

样品	$(A_{\text{单取代}}/A_{\text{总}})/\%$	$(A_{\text{部位二取代}}/A_{\text{总}})/\%$	$(A_{\text{部位三(四)取代}}/A_{\text{总}})/\%$
1	8.5	17.3	74.2
2	4.7	20.8	75.0

注： $A_{\text{总}}$  为 6 个峰面积之和。

### 3 结 论

本研究通过实验研究了两种不同含水量下的松木燃烧对生成的碳烟性质的影响。首先,从两种含水量的松木燃烧火焰中收集了碳烟样品。随后,利用 HRSEM 对碳烟的形貌和结构进行分析和观察,并利用 XPS、FT-IR 技术对收集到的碳烟的化学性质进行分析和观察,得到如下结论:

(1)HRSEM 结果显示,两种碳烟的聚集集体有很大差异。样品 1 主要呈小型链状聚集,样品 2 主要是呈簇状聚集,且样品 2 的平均主颗粒尺寸大于样品 1;同时,样品 1 的分形维数比样品 2 大,呈现出更复杂、更粗糙的形貌特征。

(2)XPS 结果发现经过烘干处理和未处理后产生的碳烟所含有的元素差异并不明显。另外,样品 1 的  $A_{\text{sp}_3}/A_{\text{sp}_2}$  远大于样品 2,说明未经过烘干处理后的样品反应活性更大。

(3)从 FT-IR 的光谱图可知,碳烟中的氢主要以芳香烃的形态存在。在波长为  $1623\text{ cm}^{-1}$  处的特征峰表明,含水量较高时更容易生成 C 原子。此外,含水量较高的情况下,单氢取代的芳香烃占比较大,而双氢和三四氢取代的芳香烃相对来说占比较小。

#### 参考文献:

- [1] Wang X, Bai S, Jin Q, et al. Soot formation during biomass pyrolysis: Effects of temperature, water-leaching, and gas-phase residence time[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2018, 134: 484-494.
- [2] Vander Wal R L, Tomasek A J. Soot oxidation: Dependence upon initial nanostructure[J]. *Combustion and Flame*, 2003, 134(1/2): 1-9.
- [3] Al-Qurashi K, Boehman A L. Impact of exhaust gas recirculation(EGR) on the oxidative reactivity of diesel engine soot[J]. *Combustion and Flame*, 2008, 155(4): 675-695.
- [4] Botero M L, Chen D, González-Calera S, et al. HRTEM evaluation of soot particles produced by the non-premixed combustion of liquid fuels[J]. *Carbon*, 2016, 96: 459-473.
- [5] McEnally C S, Pfefferle L D, Atakan B, et al. Studies of aromatic hydrocarbon formation mechanisms in flames: Progress towards closing the fuel gap[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006, 32(3): 247-294.
- [6] Trubetskaya A, Jensen P A, Jensen A D, et al. Effects of several types of biomass fuels on the yield, nanostructure and reactivity of soot from fast pyrolysis at high temperatures[J]. *Applied Energy*, 2016, 171: 468-482.
- [7] Garnayak S, Gadgil H, Kumar S. Effect of 2-butanone addition to ethylene fuel on soot formation in counterflow diffusion flames using newly proposed soot model[J]. *Combustion and Flame*, 2024, 267: 113572.
- [8] Qin Y, Zhang Y, Chen Y, et al. Minimum oxygen supply rate for smouldering propagation: Effect of fuel bulk density and particle size[J]. *Combustion and Flame*, 2024, 261: 113292.
- [9] Qin Y, Chen Y, Zhang Y, et al. Modeling smothering limit of smoldering combustion: Oxygen supply, fuel density, and moisture content[J]. *Combustion and Flame*, 2024, 269: 113683.
- [10] Si M, Liu J, Chang K, et al. Evolution of physico-chemical characteristics of soot in a single coal combustion flame[J]. *Combustion and Flame*, 2024, 260: 113243.
- [11] Si M, Liu J, Zhang Y, et al. Effect of co-combustion of coal with biomass on the morphology of soot[J]. *Renewable Energy*, 2024, 226: 120374.
- [12] Hua Y, Xiang X, Qiu L, et al. Effect of ammonia addition on the morphology and nanostructure evolution of soot particles in ethylene co-flow diffusion flames[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2023, 110: 101356.
- [13] Si M, Cheng Q, Yuan L, et al. Physical and chemical characterization of two kinds of coal-derived soot[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 238: 111759.
- [14] Khare R, Vlatakis P, Von Langenthal T, et al. Experimental investigation of the effect of hydrogen addition on the sooting limit and structure of methane/air laminar counterflow diffusion flames[J]. *Fuel*, 2022, 324: 124506.
- [15] Song Y, Su S, Chen Y, et al. Effects of moisture on soot generation and ignition of coal particle: Investigation and evaluation with OH-planar laser induced fluorescence[J]. *Energy*, 2023, 278: 127949.
- [16] Köylü Ü Ö, Faeth G M. Structure of overfire soot in buoyant turbulent diffusion flames at long residence

- times[J]. *Combustion and Flame*, 1992, 89(2): 140-156.
- [17] Garnayak S, Selvaraj P, Lee B J, et al. A computational investigation of pressure effects on soot formation in counterflow diffusion flames of methane in MILD conditions[J]. *Combustion and Flame*, 2025, 272: 113863.
- [18] Wang Y, Gu M, Liu D, et al. Soot growth mechanism in  $C_2H_2$  combustion with  $H_2$  addition: A reactive molecular dynamics study[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(23): 8696-8706.
- [19] Pang Y, Chen M, Wang Y, et al. Morphology and fractal dimension of size-resolved soot particles emitted from combustion sources[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2023, 128(6): e2022JD037711.
- [20] Safar M, Lin B J, Chen W H, et al. Catalytic effects of potassium on biomass pyrolysis, combustion and torrefaction[J]. *Applied Energy*, 2019, 235: 346-355.
- [21] Richter F, Jervis F X, Huang X, et al. Effect of oxygen on the burning rate of wood[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 234: 111591.
- [22] Chang Q, Gao R, Li H, et al. Effect of  $CO_2$  on the characteristics of soot derived from coal rapid pyrolysis[J]. *Combustion and Flame*, 2018, 197: 328-339.
- [23] Russo C, Stanzione F, Tregrossi A, et al. Infrared spectroscopy of some carbon-based materials relevant in combustion: Qualitative and quantitative analysis of hydrogen[J]. *Carbon*, 2014, 74: 127-138.
- [24] 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.
- [25] Chen M, Qi D, Yang K, et al. Plasma treatment on flame soot: View from nanostructure and reactivity of soot[J]. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 2024, 33(4): 1-10.