

文章编号: 0253-2409(2013)10-1184-07

生物质燃烧碳烟的物化特性及生成机理研究

吕建燧, 石晓斌

(华北电力大学 环境科学与工程学院, 河北 保定 071003)

摘要:以棉花秸秆和木屑为研究对象,设定不同的燃烧工况,在管式炉中进行燃烧并采集碳烟物质,采用TEM、EDS、GC-MS等检测方法对生物质燃烧过程中生成碳烟的物化特性进行研究,并根据检测结果对碳烟生成机理进行分析和推测。检测及分析结果表明,碳烟颗粒典型形貌有胶囊状、球状、链状、网状等。燃烧工况影响燃烧过程使碳烟颗粒表现出不同的微观形貌。碳烟生长过程中伴随着颗粒的碰撞和凝并,形成形貌复杂的链状或网状颗粒聚团。生物质燃烧中碳烟主要由纤维素热裂解生成,成分包括糠醛类、酚类、醛类、呋喃、烷烃、烯烃等含碳化合物。推测碳烟生成机理为,在生物质燃烧过程中,纤维素发生化学键的断裂与重排,生成CO、CO₂和残余碳分子碎片等,而残余碳基再通过重整、脱水、碳化、断键等反应生成各种醛类、酮类等产物,醛类、酮类化合物之间通过缩聚、环化反应生成苯环结构,再进一步转化为苯酚、甲苯等化合物。

关键词: 生物质燃烧; 碳烟; 物化特性; 生成机理

中图分类号: TK16; X513 **文献标识码:** A

Physicochemical properties and formation mechanism of soot during biomass burning

LÜ Jian-yi, SHI Xiao-bin

(School of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Cotton stalk and wood scraps were burnt in a tube furnace to generate soot under different combustion conditions. Soot particles were sampled and detected by TEM, EDS and GC-MS to study their physicochemical properties, then the formation mechanics of soot during biomass burning was deduced. The results show that the typical morphological structures of soot are capsule-like, spherical, catenulated and reticular. Combustion conditions influence the burning process and result in the different morphology of the soot. The soot particles collided and coagulated during nucleation and growth of soot, which leads to formation of complicated clustered particles. During biomass burning the soot is mainly generated from pyrolysis of cellulose, which contains furfurans, phenols, aldehydes, furans, alkanes and alkenes. The formation mechanics of soot has been speculated. During burning of biomass, the chemical bonds of cellulose fractured and restructured, which generate CO, CO₂, residual carbon molecule fragments, and so on. Then residual carbon goes on a series of reactions such as reforming, dehydration, carbonization and bond-breaking to generate aldehydes and ketones. And these compounds polymerized and cyclized to form benzene ring structure, and further converted to toluenes and phenols.

Key words: biomass burning; soot; physicochemical properties; formation mechanics

碳质颗粒物是大气细颗粒物的重要组成部分,主要来源于化石燃料和生物质燃料在燃烧过程中由于不完全燃烧而排放出来的碳烟^[1]。碳烟除了降低能源利用率之外,最主要的就是其不良的环境效应^[2~5]。尽管研究者对碳烟作了很多的研究,但对燃料燃烧过程中碳烟生成的环节却知之甚少,此过程表现出的大致特征为,碳烟颗粒首先是由燃料在热化学处理过程中断裂生成的脂肪族、芳香族小分子物质通过结合反应、加成反应等化学反应生成分子量较大的多环芳烃,多环芳烃气态前驱体在凯尔

文效应下转变为粒径为1.0~2.0 nm的核态粒子,初生碳烟颗粒形成后通过与乙炔、多环芳烃及其一些自由基等的气相物质反应而进一步生长,在碳烟颗粒质量生长过程中,颗粒物质相互碰撞而进行凝并,进一步增加了颗粒物的尺寸并减少了其数量。在碳烟生成的过程中,与其形成竞争过程的是多环芳烃和碳烟颗粒的氧化,由于一氧化碳和二氧化碳的形成,多环芳烃和碳烟颗粒的质量下降^[4,5]。

上述关于碳烟生成和氧化过程的研究均来自于化石燃料尤其是气体燃料的燃烧过程,而对生物质

收稿日期: 2013-01-15; 修回日期: 2013-04-16。

基金项目: 国家自然科学基金(51176047); 河北省自然科学基金(E2012502048); 中央高校基本科研业务费(11MG52)。

联系作者: 吕建燧(1972-), 男, 宁夏中卫人, 博士, 副教授, 研究方向为煤的清洁燃烧与大气污染控制技术, E-mail: lujiany@tsinghua.

燃烧过程中生成并释放出碳烟的物化特性及释放过程的研究报道极少。从节能减排、开发利用替代能源的角度来讲,生物质在世界能源总消费量中占 14%,世界上约 1/2 的人口使用生物质燃料作为生活用能源,且工业领域尤其是电站锅炉采用生物质燃烧进行发电^[6]。在热化学反应过程中,生物质中的碳氢物质也会通过分子键断裂、异构化和小分子聚合等化学反应过程,释放出大量的含碳物质,即碳烟^[7]。本研究以棉花秸秆和木屑为研究对象,设定不同的燃烧工况,在管式炉中进行燃烧并采集碳烟物质,借助于 TEM、EDS、GC-MS 等检测方法对生物质燃烧过程中生成的碳烟物质进行物化特性研究,并进一步对其生成机理进行分析和阐释,以期为生物质燃烧中碳烟的减排研究奠定一定的基础。

1 实验部分

1.1 实验装置和方法

实验所用生物质燃料为自然环境下晒干的棉花秸秆和木材,作为不同种类原料的代表。碳烟生成及采样过程见图 1,管式炉为燃烧设备;采样装置为套管式水冷取样枪;过滤器中放置滤膜,滤膜采用玻

璃纤维材质,孔径为 $0.45 \mu\text{m}$ 。燃烧空气流量由转子流量计调节,接微型真空泵以提供采样动力。

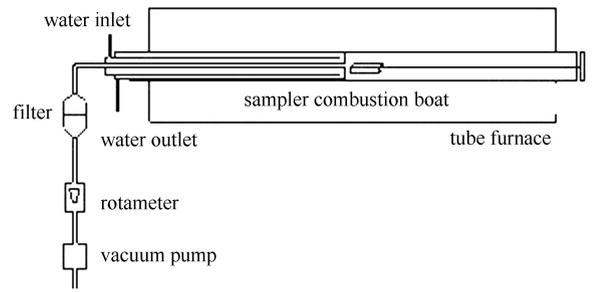


图 1 碳烟生成及采样过程示意图

Figure 1 Scheme of soot generation and sampling

每次燃烧实验取生物质燃料约 4 g,根据生物质燃料元素分析结果,计算其理论空燃比约为 11.4,所需理论空气的流量约 2.3 L/min 。实验设置了三因素、三水平的正交实验,三因素分别是燃烧时间、燃烧温度和空气流量。其中,燃烧时间通过调节取样枪进入管式炉的距离来控制,设置进入的距离为 20、30、40 cm;燃烧温度为 300、400、500 $^{\circ}\text{C}$;空气流量分别设定为 1、2、3 L/min 。正交实验表见表 1。

表 1 正交实验及检测样品列表

Table 1 Table of orthogonal test and samples for detection

Sample	No.	$t / ^{\circ}\text{C}$	Flow rate $q_v / (\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	Sample distance d / cm	TEM	EDS	GC-MS
Cotton stalk	1	300	1	20			✓
	2	300	2	30	✓		✓
	3	300	3	40			✓
	4	400	1	30			✓
	5	400	2	40	✓	✓	✓
	6	400	3	20	✓		✓
	7	500	1	40			✓
	8	500	2	30	✓		✓
	9	500	3	20			✓
Wood scraps	10	300	1	20			✓
	11	300	2	30	✓		✓
	12	300	3	40			✓
	13	400	1	30			✓
	14	400	2	40	✓	✓	✓
	15	400	3	20	✓	✓	
	16	500	1	40			✓
	17	500	2	30	✓		✓
	18	500	3	20			✓

实验所用生物质燃料首先经切割、破碎,加工为均匀的屑状物。采样滤膜经烘干、干燥后装备待用。燃烧前,用瓶装压缩空气通入炉内对炉体进行清洁 1 min,然后接通电源,设定电阻炉燃烧温度,待温度

升至设定温度并稳定 10 min 后,将称重的生物质连同瓷舟一起放入炉内,打开循环冷却水,将取样枪按照设定的采样距离放入管式炉内,设定采样流量,开始记录时间。当燃烧时间达到设定的采样时间时,

取出滤膜,称重并计算样品的质量。

1.2 透射电镜与能谱(TEM-EDS)检测

为了认识不同燃烧条件下碳烟的形貌与组成,选择几种实验条件下棉花秸秆与木屑燃烧后碳烟的样品,采用透射电镜与能谱联用进行检测,选择检测的样品见表1。检测所用的透射电镜为美国FEI公司的高分辨透射电子显微镜FEI Tecnai G20,测试条件为室温,200 kV。检测前,将附着碳烟样品的滤膜放在试管中,滴加无水乙醇浸泡,在超声仪中振荡15 min,然后用滴管吸取其中溶液滴一滴在碳膜铜网上,晾干后待测。检测时,根据需要将样品放大至适当倍数(分别放大至20、50、100、200 nm等标尺级别),聚焦,拍照。为了获取碳烟样品的组分,分别对棉花秸秆和木屑在相同燃烧条件下的两个碳烟样品作了能谱分析。

1.3 气相色谱-质谱联用(GC-MS)检测

采用气相色谱-质谱联用对两种生物质燃烧后的全部碳烟样品进行了检测。样品检测前,先将玻

璃制品的离心管洗净,在马弗炉内700℃下烘干4 h。然后将采集的碳烟样品放入离心管中,加入二氯甲烷至淹没滤膜,在超声仪内放置0.5 h,取上清液移至另一个离心管内,如此反复四次,再将萃取液进行浓缩。最后将液体放入样品管,进样。

采用的色谱仪为安捷伦7890A-5970C,色谱柱为DB-5MS,毛细管柱为60 m×0.25 mm×0.25 μm,载气为He,进样量为2.0 μL,不分流。选取进样口温度为300℃,程序升温为柱温45℃,保持4 min,以4℃/min升至140℃保持2 min,以4℃/min升至305℃保持2 min。总共运行时间为72 min;离子源温度为230℃,四级杆温度为150℃,传输线温度为250℃;质谱仪采用全扫描检测模式,30~600扫描,谱库为wiley7n.1。

2 结果与讨论

2.1 TEM形貌分析

图2为碳烟的颗粒形貌照片。

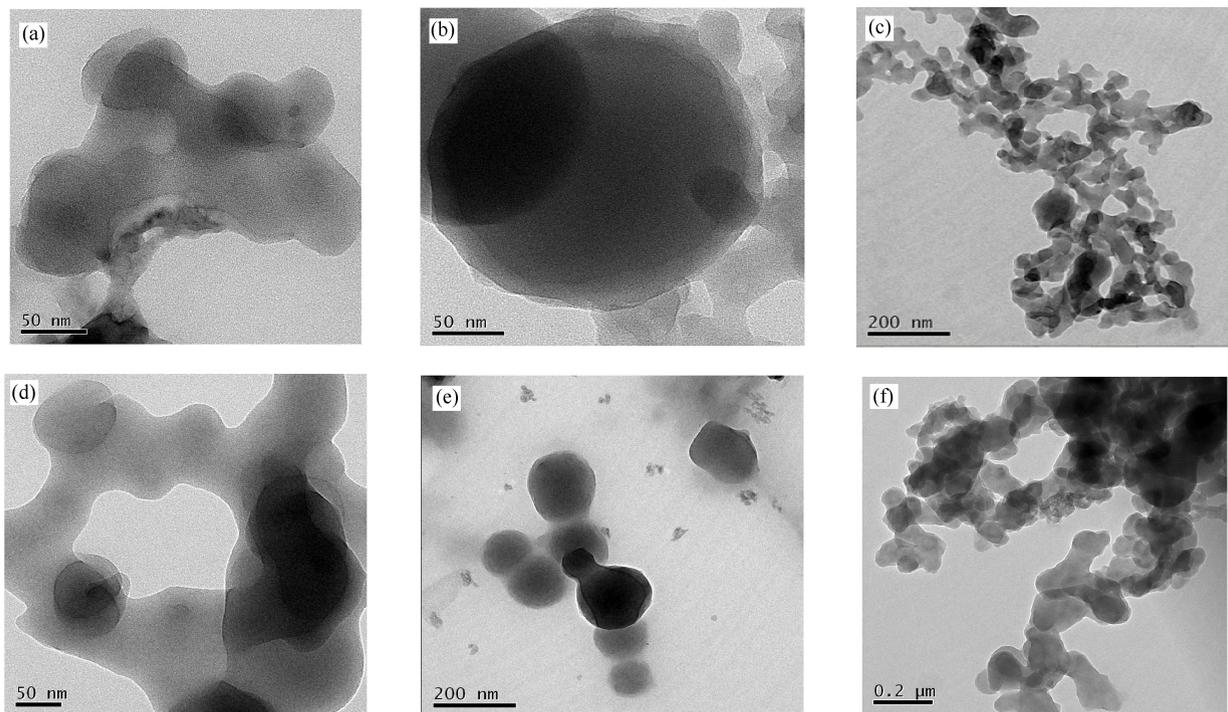


图2 碳烟的颗粒形貌照片

Figure 2 Morphological structures of soot samples

图2(a)、图2(d)是单颗粒碳烟,这些碳烟颗粒依靠一层极薄的碳膜连接在一起,其微观结构类似于胶囊状,颗粒边缘处石墨化程度较高,单个碳烟颗粒粒径大约为50 nm。图2(b)、图2(e)是低温燃烧时的碳烟颗粒,球状,粒径为200~300 nm,形态较

为饱满。由图2(b)、图2(e)可知,碳烟颗粒呈聚并状,此结果与碳烟的形成过程中颗粒发生相互碰撞进而凝并的结论相符^[8]。图2(c)、图2(f)为碳烟颗粒链,长度约为100 nm~2 μm,碳烟颗粒聚集且微观结构紧密,由许多胶囊状单体堆叠在一起,而组

成聚合体的基本粒子粒径为 50 ~ 200 nm。上述碳烟颗粒形貌照片与卓建坤等^[9]研究的煤粉燃烧后碳烟颗粒的形貌相似。

如前所述,碳烟粒子的生成经历成核、表面增长、凝结、凝并和氧化等阶段,在形成“核心”后,一方面是气相组分向核心表面移附;另一方面是核心微粒间的碰撞凝聚,使碳烟粒子不断长大,近似球状。在碳烟的生长阶段,碳烟可以通过碰撞凝并在一起形成硬聚合;也可以通过碰撞以范德华力黏结在一起形成软聚合。相对于硬聚合,软聚合体在样品的超声波处理过程中重新分散开^[10],因而在电镜中无法观察到软聚合体。

图 3 为不同实验工况下碳烟形貌照片。由图 3 可知,在低温下,生成的碳烟粒子为个体的球状,外缘清晰,结构简单;随着燃烧温度升高,燃烧反应进行愈剧烈,生成碳烟单体颗粒粒径减小且不规则程度增大,颗粒间聚结、凝并程度增强,碳烟整体排列紧密,总体结构呈现链状或块状,外观形貌较为复杂。另外,在研究空气流量的影响时,发现空气流量增大可减少碳烟的生成。这是由于较高的温度和氧量有利于碳烟中有机碳的挥发、脱氢反应的进行和燃料的有效燃烧,从而使得碳烟颗粒粒径减小,并且通过颗粒之间相互碰撞凝并,形成形貌复杂的链状或网状颗粒聚团。

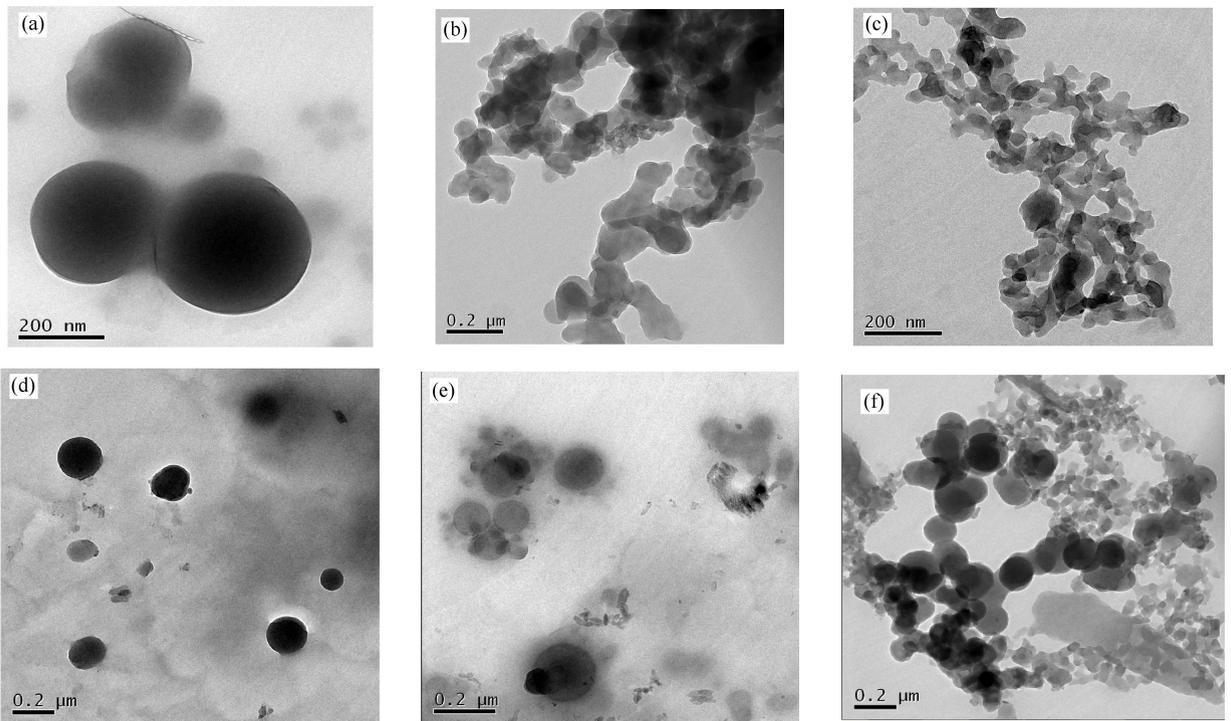


图 3 不同温度和流量下碳烟的颗粒形貌照片

Figure 3 Morphological structures of soot samples at different temperatures and flow rates

(a): cotton stalk, 300 °C, 2 L/min; (b): cotton stalk, 400 °C, 3 L/min; (c): cotton stalk, 500 °C, 2 L/min;
(d): wood scraps, 300 °C, 2 L/min; (e): wood scraps, 400 °C, 3 L/min; (f): wood scraps, 500 °C, 2 L/min

2.2 能谱分析

能谱检测结果见图 4。图 4(a)、图 4(b) 分别为 5 号、14 号样品的能谱检测图及分析结果。由图 4(a)、图 4(b) 可知,两种燃料在相同条件下燃烧后碳烟样品中主要元素为 C、O,其余为 Na、Si、S、K 和 Ca。由图 4 中数据显示,棉花秸秆燃烧得到的碳烟样品中,碳的含量高于其在木屑的碳烟样品中的含量,而氧含量却相反。表明这两种燃料在相同燃烧条件下其燃尽率、碳烟组成及含量等都有所不同。

2.3 GC-MS 分析

根据 GC-MS 检测图进行谱库检索,综合考虑匹配度和生物质裂解产物,扣除背景后得到所有样品的检测结果。由检测结果可知,不同生物质燃烧后碳烟成分有所不同,但主要组成物包括有糠醛类、酚类、醛类、呋喃、烷烃、烯烃等。这与 Teresa 等^[11]关于生物质热解产物燃烧过程中丁子香酚、糠醛、左旋聚葡萄糖等对碳烟的生成发挥着重要作用的描述是一致的。从生物质燃烧过程来看,在开始燃烧阶段,

首先是吸附水以蒸发形式释放出来,随后生物质发生解聚及“玻璃化转变”现象。随着温度升高,挥发性气体、液体焦油和固体焦炭等逐渐释出。其中,大量烷烃、烯烃的存在是由于贫氧导致这些物质不能够被充分的燃烧和氧化。而酚类、酮类、醛类物质的存在则证明在碳烟颗粒的形成过程中经历了表面氧化过程,这与已知的理论是相符的^[4]。酚类化合物

可能来自于生物质聚合物主链上醚键的断裂。由于生物质自身物理化学结构的复杂性,生成的酚类化合物含有很多官能团,如甲氧基和烷基等^[12]。列出与能谱分析相对应的5号和14号样品的检测结果,分别见表2和表3,表2和表3中列出了此两种碳烟样品中匹配度较高的一些化合物的名称。

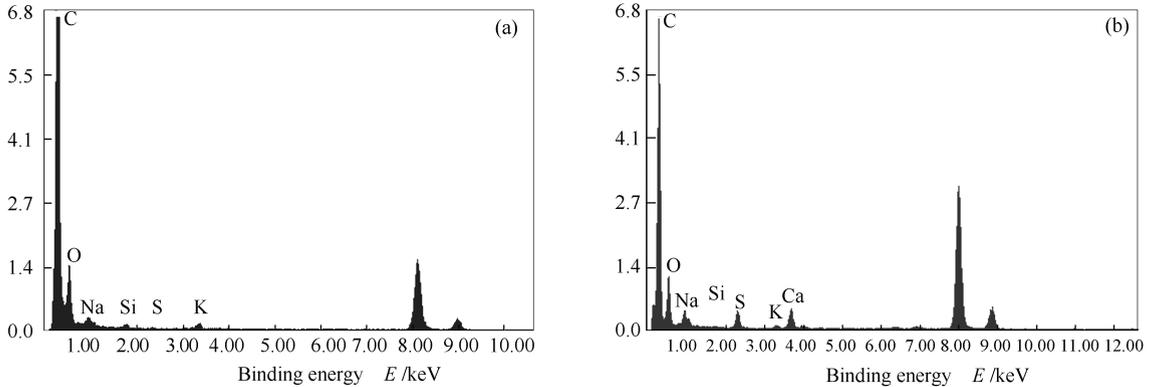


图4 生物质燃烧碳烟样品能谱分析

Figure 4 EDS analysis of soot samples

(a): O: 7.2%, Na: 0.4%, Si: 0.3%, S: 0.1%, K: 0.5% ;

(b): O: 8.1%, Na: 0.7%, Si: 0.2%, S: 1.9%, K: 0.5%, Ca: 3.3%

表2 5号样品所含化合物

Table 2 Compounds in No. 5 soot sample

No.	Retention time <i>t</i> /min	Compound name	No.	Retention time <i>t</i> /min	Compound name
1	15.897	phenol	13	28.644	3-ethenyl-4-isopropylcyclohexanone
2	17.821	3-methyl-1,2-cyclopentanedione	14	28.740	2-methoxy-4-vinylphenol
3	19.791	3-methylphenol	15	28.952	2,3,4-trimethylhexane
4	20.33	2-hydroxyanisole	16	29.940	2-methyl-1,4-menzenediol
5	20.753	cyclopropyl carbinol	17	30.107	2,6-mimethoxy-phenol
6	23.326	2-ethyl-phenol	18	30.395	3,4-mimethoxy-phenol
7	24.314	2-methoxy-4-methylphenol	19	31.172	4-ethylcatechol
8	24.416	1,2-benzenediol	20	31.896	4-hydroxy-3-methoxy-benzaldehyde
9	25.366	ethyl cyclopropanecarboxylate	21	32.127	2-methoxy-4-(1-propenyl)-phenol
10	26.758	3-methoxy-1,2-benzenediol	22	33.430	1,2,4-trimethoxybenzene
11	27.406	2-methoxy-benzeneethanol	23	33.674	2-methoxy-4-(1-propenyl)-phenol
12	27.816	4-methyl-1,2-benzenediol	24	34.848	1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-ethanone

2.4 生物质燃烧碳烟生成机理

生物质作为有机含碳物质,其化学组成主要为纤维素、半纤维素、木质素、提取物和少量无机矿物类成分。纤维素、半纤维素和木质素相互穿插交织构成复杂的高聚合物,可以在热解、燃烧等热化学处理过程中断裂开。其中,纤维素作为生物质中最重

要的组成部分,由许多β-D-吡喃式葡萄糖通过β-1,4-苷键连接形成的线型高聚物,其简单分子式为(C₆H₁₀O₅)_n,约占生物质组分的40%~50%。当生物质被加热后,在200~260℃时半纤维素首先热解,然后纤维素在240~350℃时热解,木质素在250~500℃热解^[13]。相对于其他两种组成部分,纤维素

作为生物质中最重要的组成部分,其燃烧行为在很大程度上可反映出生物质整体的燃烧规律。

1965 年, Kilzer 等^[14]提出了一个被很多研究所广泛采用的纤维素热分解的反应途径。首先,纤维素在 200 ~ 280 °C 经脱水作用生成脱水纤维素,脱水纤维素进一步分解产生炭和 CO、CO₂、H₂O 等一些气体物质。在略高的温度下,与脱水纤维素反应相竞争的是一系列相继的纤维素解聚反应,其主要产物是左旋葡聚糖,左旋葡聚糖发生二次反应后,主要

生成焦油物质和挥发性气体^[15]。而焦油即碳氢化合物的气态前驱体在凯尔文效应下凝结成的碳烟核态粒子与生成的水混合后形成的复杂混合物。

根据 GC-MS 的检测结果,结合纤维素燃烧反应的模型,对生物质燃烧生成碳烟的过程进行分析,推理并概括此过程如下。

推测生物质燃烧过程中碳烟生成过程,具体见图 5。

表 3 14 号样品所含化合物
Table 3 Compounds in No. 14 soot sample

No.	Retention time <i>t</i> /min	Compound name	No.	Retention time <i>t</i> /min	Compound name
1	15. 877	phenol	13	24. 307	2-methoxy-4-methyl- phenol
2	16. 840	3-methyl-hydantoin	14	25. 340	1,4:3,6-dianhydro-alpha-d-glucopyranose
3	17. 808	2-hydroxy-3-methyl-2-cyclopenten-1-one	15	25. 712	5-hydroxymethylfuraldehyde
4	18. 925	2-methyl- phenol	16	26. 771	3-methoxy-1,2-benzenediol
5	19. 778	4-methyl- phenol	17	27. 406	4-ethyl-2-methoxy-phenol
6	19. 958	4-methyl-2-heptene	18	27. 726	4-methyl-1,2-benzenediol
7	20. 323	2-methoxy-phenol	19	28. 323	2-acetylcyclopentanone
8	20. 785	<i>N</i> -methyl-1,3-propanediamine	20	28. 637	4-(3-thienyl)-2-butanone
9	21. 279	3-hydroxy-2-methyl-4-pyrone	21	28. 721	2-methoxy-4-vinylphenol
10	21. 491	3-ethyl-2-hydroxy-2-cyclopenten-1-one	22	30. 094	2,6-dimethoxy-phenol
11	22. 652	2,4-dimethyl-phenol	23	30. 376	3,4-dimethoxy-phenol
12	23. 313	4-ethyl-phenol	24	31. 127	4-ethylcatechol

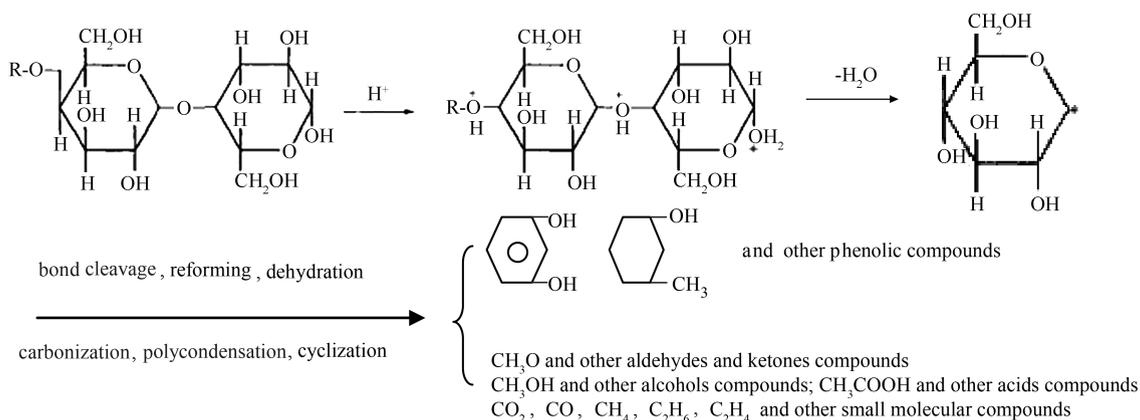


图 5 生物质燃烧碳烟生成机理示意图

Figure 5 Formation mechanism of soot during biomass burning

生物质燃料加热后,生物质中的纤维素由于受热发生解聚反应,形成活性纤维素,而后通过纤维素糖基单元脱水形成烯酮糖,继而相邻单元上羟基氢发生转移导致糖苷键断裂,形成聚合度较小的左旋葡聚糖、左旋葡烯酮糖或者左旋葡萄糖单体^[16]。

纤维素大分子生成的左旋葡聚糖和左旋葡烯酮糖等进一步裂解,生成其他类型的含碳物质。Ono 等^[17]通过研究发现,裂解的中间产物为低聚糖、葡萄糖和果糖等,其推测认为,首先由纤维素中糖环之间的醚键断裂生成低聚糖,再降解为葡萄糖,最后生

成5-羟甲基糠醛。表3所示的GC-MS检测结果中也报告包含5-羟甲基糠醛,另外还包括有糠醛、呋喃和苯酚等化合物。当温度继续升高时,纤维素发生化学键的断裂与分子重排。活性纤维素中的1,5-缩醛键的断裂导致开环,C-O和C-C键的断裂形成大量的CO、CO₂和四碳分子碎片,而四碳碎片再通过一系列的重整、脱水、碳化、断键等反应生成各种醛类、酮类等产物,醛类、酮类化合物之间通过缩聚、环化反应生成苯环结构,该结构进一步转化为苯酚、甲苯等化合物形式。本研究GC-MS得到的检测结果也验证了此推理。

3 结论

生物质燃烧中释放出的碳烟颗粒典型形貌有胶囊状、球状、链状、网状等。燃烧工况影响生物质中有机碳的挥发、脱氢反应的进行和燃料的有效燃烧,

使碳烟颗粒表现出不同的微观形貌。碳烟生长过程中伴随着颗粒的碰撞和凝并,形成形貌复杂的链状或网状颗粒聚团。能谱分析显示碳烟中主要元素为C、O、Na、K、Si和S。

生物质燃烧释放的碳烟主要由纤维素热裂解生成,不同生物质燃烧释放出的碳烟成分有所不同,但主要组成包括有糠醛类、酚类、醛类、呋喃、烷烃、烯烃等含碳有机化合物。

生物质燃烧释放的碳烟是由纤维素经解聚、断键、重整、脱水、碳化、缩聚及环化等反应过程而生成。在此过程中,纤维素发生化学键的断裂与分子重排,生成CO、CO₂和残炭分子碎片等,而纤维素残余碳基再通过一系列的重整、脱水、碳化、断键等反应生成各种醛类、酮类等产物,醛类、酮类化合物之间通过缩聚、环化反应生成苯环结构,再进一步转化为苯酚、甲苯等化合物。

参考文献

- [1] 于娜,魏永杰,胡敏,曾立民,张远航.北京城区和郊区大气细粒子有机物污染特征及来源解析[J].环境科学学报,2009,29(2):243-251.
(YU Na, WEI Yong-jie, HU Min, ZENG Li-min, ZHANG Yuan-hang. Characterization and source identification of ambient organic carbon in PM_{2.5} in urban and suburban sites of Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(2): 243-251.)
- [2] LIGHTY J S, VERANTH J M, SAROFIM A F. Combustion aerosols: Factors governing their size and composition and implications to human health[J]. J Air Waste Manage Assoc, 2009, 50(9): 1565-1611.
- [3] DAVID M B, RAVID R. Deposition of fractal-like soot aggregates in the human respiratory tract[J]. J Aerosol Sci, 2011, 42(6): 372-386.
- [4] RICHTER H, HOWARD J B. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and their growth to soot-A review of chemical reaction pathways[J]. Prog Energy Combust Sci, 2000, 26(4/6): 565-608.
- [5] 吕建懿,翁清龙. 乙烯/空气反扩散火焰中气体温度及碳烟体积分数的分布特征[J]. 化学学报, 2011, 69(8): 1011-1016.
(LU Jian-yi, WENG Qing-long. Distribution characteristics of gas temperature and soot fraction volume in ethylene/air inverse diffusion flame[J]. Acta Chim Sinica, 2011, 69(8): 1011-1016.)
- [6] SOMMERSACHER P, BRUNNER T, OBERNBERGER I. Fuel indexes: A novel method for the evaluation of relevant combustion properties of new biomass fuels[J]. Energy Fuels, 2012, 26(1): 380-390.
- [7] FITZPATRICK E M, JONES J M, POURKASHANIAN M, ROSS A B, WILLIAMS A, BARTLE K D. Mechanistic aspects of soot formation from the combustion of pine wood[J]. Energy Fuels, 2008, 22(6): 3771-3778.
- [8] MARICQ M M. Physical and chemical comparison of soot in hydrocarbon and biodiesel fuel diffusion flames: A study of model and commercial fuel[J]. Combust Flame, 2011, 158(1): 105-116.
- [9] 卓建坤,李水清,宋蕾,姚强. 煤粉燃烧火焰区域中碳烟的结构和行为[J]. 燃烧科学与技术, 2009, 15(1): 74-81.
(ZHUO Jian-kun, LI Shui-qing, Song Qiang, YAO Qiang. Structure and behavior of soot in pulverized-coal flame[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2009, 15(1): 74-81.)
- [10] STANMORE B R, BRILHAC J F, GILOT P. The oxidation of soot: A review of experiments, mechanisms and models[J]. Carbon, 2001, 39(15): 2247-2268.
- [11] TERESA B M, JACQUELINE M W, EMMA M F, JENNY M J, ALAN W. In situ study of soot from the combustion of a biomass pyrolysis intermediate-eugenol-and n-decane using aerosol time of flight mass spectrometry[J]. Energy Fuels, 2010, 24(1): 439-445.
- [12] 付鹏. 生物质热解气相产物释放特性和焦结构演化行为研究[D]. 华中科技大学博士论文, 2010: 1-151.
(FU Peng. Study on gas release characteristics and char structural evolution during pyrolysis and gasification of biomass[D]. Huazhong University of Science and Technology, 2010: 1-151.)
- [13] DEMIRBAS A. An overview of biomass pyrolysis[J]. Energy Sources, 2002, 24(5): 471-482.
- [14] KILZER R J, BROIDO A. Speculations on the nature of cellulose pyrolysis[J]. Pyrolytics, 1965, 2: 151-163.
- [15] ANTAL M J, FRIEDMAN H, ROGERS F E. Kinetic of cellulose pyrolysis in nitrogen and steam[J]. Combust Sci Technol, 1980, 21(3/4): 141-152.
- [16] 许洁,颜涌捷,李文志,王君,陈明强. 生物质裂解机理和模型(I)—生物质裂解机理和工艺模式[J]. 化学与生物工程, 2007, 24(12): 1-4.
(XU Jie, YAN Yong-jie, LI Wen-zhi, WANG Jun, CHEN Ming-qiang. Review of mechanism and model of biomass pyrolysis (I)-mechanism and technical patterns of biomass pyrolysis[J]. Chemistry and Bioengineering, 2007, 24(12): 1-4.)
- [17] ONO H, YAMADA T. Cellulosic materials-potential source for adhesive[J]. Chem Adhesion, 2000, 74: 44-49.