

生物质成型燃料燃烧挥发性有机物排放特性试验*

姚宗路¹ 吴同杰^{1,2} 赵立欣¹ 郭占斌² 丛宏斌¹

(1. 农业部规划设计研究院农业部农业废弃物资源化利用重点实验室, 北京 100125;

2. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

摘要: 以玉米秸秆、小麦秸秆、棉秆和木质4种生物质成型燃料为原料在生物质燃烧试验平台上,采用罐采样-GC/MS采集方法,研究分析了燃烧后烟气中的VOCs排放系数和组分,结果表明,4种生物质成型燃料的VOCs排放系数分别为0.447、1.111、0.601、0.104 g/kg,与散烧秸秆相比,成型燃料的VOCs排放系数仅为其50%;燃烧后VOCs排放组分占比最大的为卤代烃和酮,分别为49.8%和36.1%;4种生物质成型燃料燃烧VOCs排放总的臭氧生成潜势(以O₃计)分别为4.792、25.737、9.598、4.502 g/kg,臭氧生成潜势比较高的化合物依次为:苯系物、酮、烯烃和卤代烃。

关键词: 生物质成型燃料 挥发性有机物 排放特性 试验

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0235-06

Emission Characteristic of VOCs from Biomass
Molding Fuel Combustion

Yao Zonglu¹ Wu Tongjie^{1,2} Zhao Lixin¹ Guo Zhanbin² Cong Hongbin¹

(1. Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agricultural Residues, Ministry of Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China

2. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: The emission characteristic of VOCs from biomass molding fuel combustion was studied. VOCs emission factor and the components of flue gas after combustion from four kinds of biomass shaped fuel, i. e., corn straw, wheat straw, cotton stalk and wood, were analyzed on the biomass combustion experimental platform using the sample collection - GC/MS method. The results showed that the VOCs emission factors of four kinds of biomass molding fuel were 0.447, 1.111, 0.601 and 0.104 g/kg, respectively. The VOCs emission factors of biomass molding fuel were only 50% of the powder burning straw. The main types of VOCs from wood molding fuel combustion emissions were benzene series, halogenated hydrocarbon and ketones. The main kinds of VOCs from straw molding fuel combustion emissions were halogenated hydrocarbon, ketone and benzene series. The benzene content emission factor of total straw produced by lignocellulosic biomass combustion was nearly five times higher than that of VOCs emission proportion coefficient. Biomass molding fuel combustion emitted the most of hydrocarbon and ketone with contents of 49.8% and 36.1%, respectively. The ozone generating potential (O₃) of total VOCs emissions from four kinds of biomass molding fuel combustion were 4.792, 25.737, 9.598 and 4.502 g/kg, respectively. The compounds with higher ozone generating potential were benzene, ketone, olefins and halogenated hydrocarbon. The results will provide reference for industry standards built of VOCs emissions from biomass molding fuel combustion.

Key words: Biomass molding fuel Volatile organic compounds Emission characteristic Test

收稿日期: 2015-06-27 修回日期: 2015-07-26

* 北京市科技新星计划资助项目(2131105000413036)和农业部农业废弃物资源化利用重点实验室开放基金资助项目(KLERUAR2014-01)

作者简介: 姚宗路,高级工程师,博士,主要从事生物质能技术与设备开发与利用研究,E-mail: yaozonglu@163.com

通讯作者: 郭占斌,教授,博士,主要从事水稻插秧机研究,E-mail: zksxlzal@163.com

引言

生物质能是一种可再生能源,具有可再生性和环境友好性双重属性,近年来越来越受到人们重视,其消耗量已跃居第 4 位,仅次于石油、煤炭和天然气^[1]。我国具有丰富的农作物秸秆资源^[2],2013 年农作物秸秆资源量达到 8.19 亿 t^[3],综合利用率为 76%,其余 24% 被焚烧、废弃,造成严重环境问题。生物质成型燃料具有高效、洁净、点火容易、CO₂ 零排放等优点,可替代煤炭等化石燃料应用于炊事、供暖等民用领域和锅炉燃烧、发电等工业领域^[4-6]。但生物质成型燃料燃烧利用过程同其他化石燃料类似也有挥发性有机化合物 (Volatile organic compounds, VOCs) 产生。

挥发性有机化合物是指在常温下饱和蒸气压大于 70 Pa、常压下沸点在 260℃ 以内的有机化合物^[7],对环境和人体健康具有重要的影响^[8]。VOCs 主要人为源包括移动源和固定源,固定源中又包括生活源和工业源等。生物质能燃烧过程中排放的 VOCs 是人为源的重要组成部分。国内目前针对生物质能利用产生 VOCs 的研究,主要集中在传统农村炊事采暖炉,且采用散装生物质, Zhang 等^[9]和 Tsai 等^[10]研究了我国家庭炉灶燃用薪柴、小麦秸秆和玉米秸秆等散烧生物质的非甲烷碳氢化合物和羰基化合物排放。Wang 等^[11]测试了我国民用生物质燃烧 VOCs 的排放。李兴华等^[12]研究了 5 种散装生物质在我国农村家庭炉灶上燃烧的 VOCs 排放。国外研究者主要集中研究了木质生物质燃烧 VOCs 的排放^[13-15]。目前尚无对秸秆生物质成型燃料燃烧 VOCs 排放进行系统研究。

本文选取玉米秸秆、小麦秸秆、棉秆和木质 4 种

生物质成型燃料,在已有的生物质成型燃料燃烧试验平台上,采用真空罐采样-GC/MS 方法采集燃烧后的 VOCs,并系统深入研究各种生物质成型燃料燃烧 VOCs 排放系数和各组分等,以为生物质成型燃料 VOCs 排放的行业标准制定提供参考。

1 试验材料与测试方法

1.1 试验材料

选择我国年产量大、分布广的玉米秸秆、小麦秸秆、棉秆和木质 4 种生物质,在生物质成型机上挤压得到成型燃料,直径 8 mm,长度 10 ~ 30 mm,密度在 1.0 ~ 1.2 g/cm²。4 种成型燃料工业分析和元素分析结果如表 1 所示,金属元素含量如表 2 所示。与木质成型燃料相比,秸秆成型燃料中的碱金属含量高达 3 倍以上。研究表明碱金属是导致生物质成型燃料燃烧产生结渣的主要因素,生物质成型燃料在燃烧时首先是挥发分的析出燃烧,其次是固定碳的燃烧,固定碳的燃烧伴随着燃料的破碎,形成小的燃烧颗粒,随着温度的升高燃料本身含有的矿物质开始迁移反应,其中大部分含 K 元素和 Na 元素的化合物在温度超过 500℃ 后气化,而含有 Si 元素和 Ca 元素的化合物被液化,在表面张力的作用下形成球状,这些球状物具有黏性,相互粘附最终冷却形成结渣。因外部熔融状态的金属盐起到隔绝氧气的作用,使得内部的元素碳包裹在球状熔融内部可能含有未燃尽的元素碳不能充分的燃烧,从而降低生物质成型燃料热能的利用率,造成燃料的不充分燃烧,降低单位质量燃料的发热量,相同进料量的情况下碱金属含量高的燃料燃烧产生的能量较低,燃烧室内相对温度较低,有可能影响挥发分的析出与燃烧。4 种原料的物理特性如表 3 所示。

表 1 生物质成型燃料的工业分析、元素分析(空气干燥基)和热值

原料	工业分析/%				元素分析/%				低位发热量 /(kJ·kg ⁻¹)
	水分	灰分	挥发分	固定碳	C	H	N	S	
玉米秸秆	7.37	9.47	76.03	7.11	38.50	5.49	0.79	0.53	16 065
棉秆	10.62	9.66	75.44	4.27	39.99	5.30	1.15	0.58	15 819
小麦秸秆	11.06	14.52	72.49	1.92	37.68	5.35	0.89	0.56	14 306
木质	8.61	1.81	76.03	13.53	47.90	6.56	0.54	0.54	18 480

注:表中热值为收到基检测热值。

对生物质成型燃料进行热重分析结果如图 1 所示,生物质成型燃料质量减少主要集中在 260 ~ 500℃ 之间,其中木质成型燃料失重速率最高温度区间为 260 ~ 400℃,而秸秆成型燃料主要集中在 260 ~ 350℃,说明在燃烧利用过程中木质成型燃料较秸秆成型燃料挥发分析出的温度区间更大。

1.2 试验设备与仪器

本试验主要原料为生物质成型燃料,而中国的作物秸秆灰分高、燃烧过程中容易结渣、碱金属及氯腐蚀、设备内积灰严重,因此在生物质燃烧器增加了清渣装置。试验在农业部规划设计研究院开发的生物质燃烧试验平台上完成,燃烧设备为上进料式燃

烧器^[16],结构如图 2 所示,额定功率 60 kW^[17]。破渣清灰机构安装在燃烧内筒中,解决了生物质成型燃料在燃烧过程中的燃料推进、搅拌、破渣以及灰渣排出等问题。

表 2 生物质成型燃料中主要金属元素检测结果

Tab.2 Main metal elements in biomass molding fuel

	mg/L									
种类	Si	Rb	P	Na	Mg	K	Fe	Cs	Ca	Al
玉米秸秆	27	18	6.9	10	37	7.2	18	3.3	140	67
小麦秸秆	45	19	5.7	14	42	8.1	22	2.8	152	75
棉秆	2.2	12	3.1	11	10	2.8	3.1	3.3	82	16
木质	2.4	14	1.1	3.2	5	2	4.1	1.7	44	21

表 3 生物质成型燃料的物理特性

Tab.3 Physical properties of biomass molding fuel

种类	密度/(kg·m ⁻³)	直径/mm	长度/mm
木质颗粒	567.1	6	5~20
小麦秸秆颗粒	530.6	8	10~40
玉米秸秆颗粒	400.2	7	5~50
棉秆颗粒	418.5	7	5~30

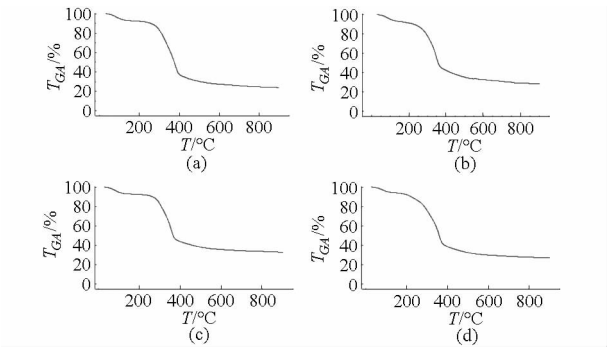


图 1 热重分析

Fig.1 Thermogravimetric analysis

(a) 木质 (b) 棉秆 (c) 小麦秸秆 (d) 玉米秸秆



图 2 上进料式燃烧器的结构示意图

Fig.2 Structure diagram of up feed burner

主要采用仪器为 Agilent 7890A-5975C 型气相色谱质谱联用仪、J2KN 型烟气分析仪、Series II 2400 型元素分析仪、ICPE-9000 型全谱 ICP 发射光谱仪、Pavl-6100 型量热仪等。采用特制罐采样-GC/MS 法对烟气中的挥发性有机物进行检测,根据 US EPA TO-15-1999 标准,检出限为 10⁻³ μg/m³。标

准气体为美国环保署 TO-14 校准标气和 PAMS 校准标气;本研究对标准气体进行 5 点标准曲线制作,各种化合物标准曲线的线性相关系数均大于 0.99^[18]。

1.3 试验参数与方法

燃烧器运行稳定后开展试验,记录烟道中烟气流速、燃烧室温度、进料量,同时使用烟气分析仪记录烟气中各气体组分数据。使用采样袋进行采样,采样完成后将采样袋中样气导入真空储气罐中送入试验室检测,定量检测烟气中 63 种 VOCs 浓度。

(1) VOCs 排放系数

采用碳平衡法计算排放系数^[19],其基本原理是燃烧的碳的质量等于以气态和颗粒态排放的碳的质量(g),即

$$C_f - C_a = C_{CO_2} + C_{CO} + C_{CH_4} + C_{NMHCs} + C_{PM} \quad (1)$$

式中 C_f 、 C_a 、 C_{CO_2} 、 C_{CO} 、 C_{CH_4} 、 C_{NMHCs} 和 C_{PM} 分别为生物质、灰样及 CO_2 、 CO 、 CH_4 、 $NMHCs$ (Non-methane hydrocarbons) 和颗粒物中碳的质量。

为了得到排放气体的净浓度,背景浓度必须予以扣除。通过式(1)可以推导出上述气态和颗粒态排放系数。VOCs 的排放系数则根据其 与 CO_2 浓度的比值予以确定。VOCs 的排放系数以燃用单位质量干基燃料的形式给出,其单位为 mg/kg。干基燃料质量公式通过燃料质量和燃料含湿量计算而得。

(2) VOCs 臭氧生成潜势

为评价生物质燃烧排放的 VOCs 的化学活性生成臭氧的潜势,采用增量反应活性指标评价^[20],单个 VOC 物种的臭氧生成潜势 (Ozone formation potentials, O_{FP}) 为

$$O_{FP} = M_{IR} E_F \quad (2)$$

式中 O_{FP} ——单位生物质燃烧生成 O_3 的量,mg/kg
 M_{IR} ——单个 VOC 物种的最大增量反应活性,mg/kg
 E_F ——单个 VOC 物种的排放系数,mg/kg

总的臭氧生成潜势等于各 VOC 物种的臭氧生成潜势之和,对于数据库中没有的物种,取相类似物种的 M_{IR} 值^[21]。

(3) 生物质燃烧产生 VOCs 的机理

本试验采用上进料式燃烧器,燃料经上进料口进入燃烧室内,燃料依次由燃料推进螺旋、燃烧搅动螺旋和灰渣排出螺旋带动通过燃烧室,燃烧室内部温度分布从进料口开始由室温逐步升高直至 1 200℃左右。燃料在燃烧室内前进过程中温度逐步升高,至 264℃时开始析出挥发分,在氧气充足的情况下析出的挥发分开始燃烧。生物质燃烧产出的气体主要包括 H_2 、 CO 、 CO_2 及挥发性有机物^[22],其

中 95% 以上为轻烃、H₂、CO、CO₂ 等,4.5% 左右为重烃,轻烃中的键能较低,以较低的能量即可打破,而重烃中主要为芳香烃,其键能较大^[23]。生物质成型燃料燃烧过程主要是热化学反应的过程,化学反应是一个平衡的过程^[24]。生物质成型燃料燃烧产生的挥发分不能完全燃烧,剩余挥发分随着烟气排入大气中。

表 4 4 种燃料燃烧在线监测数据
Tab.4 On-line monitoring data of four kinds of fuel combustion

原料	CO ₂ 质量分数/%	CO 质量分数/%	NO 质量分数/%	NO ₂ 质量分数/%	过量空气系数	尾气流量/(m ³ ·h ⁻¹)	炉膛温度/℃
玉米秸秆	13.1	0.035 0	0.012 5	0	1.64	211	1 085
小麦秸秆	12.6	0.041 0	0.032 5	0	1.65	199	987
棉秆	12.5	0.024 0	0.021 5	0	1.56	188	1 097
木质	11.5	0.011 5	0.011 0	0	1.62	242	1 225

1.4 预试验

为研究生物质成型燃料燃烧排放 VOCs 与燃烧器功率和过量空气系数的关系,开展预试验,试验安排 6 组,每组试验安排 3 次平行,试验因素水平如表 5 所示,检测每次试验排放 VOCs 总量(取平均值)如图 3 所示,试验结果表明燃烧器运行在 70% 功率,过量空气系数为 1.25 时总 VOCs 排放量最低。因此在进行生物质成型燃料燃烧 VOCs 排放系数试验研究时燃烧器运行选择 70% 功率、过量空气系数为 1.25。

表 5 试验因素水平
Tab.5 Level of test factors

试验组别	锅炉功率	过量空气系数
1	1.0	1.25
2	1.0	1.10
3	1.0	1.40
4	0.7	1.25
5	0.7	1.10
6	0.7	1.40

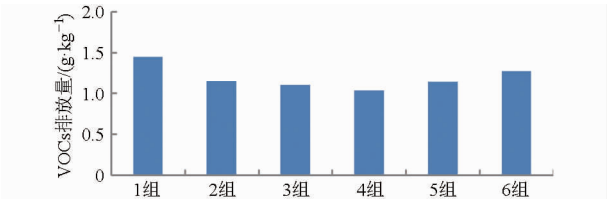


图 3 生物质成型燃料燃烧 VOCs 排放总量
Fig.3 VOCs emissions of biomass combustion

2 结果与分析

2.1 VOCs 排放系数分析

本研究对烟气 VOCs 中 63 种具有标准样品的进行定量检测。检测结果表明,达到检出限 VOCs 为 23 种,依据化学官能团种类分类可将 23 种 VOCs

(4)烟气中气体组分

烟气中的 CO、CO₂、NO_x、O₂ 和烟气流速、烟气温度等由中烟气分析仪和温度传感器记录,如表 4 所示(数据均为计算后的平均值)。不同燃料因热值和燃料自身特性的不同,在相同工况下燃烧燃烧室内的温度不同,表中炉膛温度是依据采样数据求取的平均值。

分为烷烃、烯烃、卤代烃、苯系物、酯类、酮类、其他等 7 类。依据式(1)中的计算方法得出表 6 中给定生物质成型燃料燃烧 23 种 VOCs 及其分类化合物的排放系数。

结果表明玉米秸秆、小麦秸秆、棉秆、木质 4 种生物质成型燃料燃烧 VOCs 排放系数分别为 0.447、1.111、0.601、0.104 g/kg。

从 VOCs 排放总量上分析,木质成型燃料燃烧排放的 VOCs 总量为秸秆成型燃料燃烧排放 VOCs 总量的 20%。这主要是由于木质成型燃料挥发分含量高,固定碳含量高,在燃烧室内燃烧挥发分易于挥发燃烧,热值高燃烧室内的温度高,在过量空气系数适合的情况下 VOCs 燃烧更充分。

氯甲烷是生物质燃烧排放的标识性 VOC 化合物,木质,小麦秸秆,玉米秸秆和棉秆 4 种生物质成型燃料燃烧排放的氯甲烷分别为:0.496、6.35、11.5、10.2 mg/kg,其中木质生物质成型燃料燃烧排放氯甲烷远低于秸秆颗粒燃料。

燃烧室内的温度检测结果表明,燃烧室温度与排放系数呈反比关系。燃烧室内温度高,进入燃烧室内的生物质成型燃料挥发分析出更迅速,燃烧更充分,相对 VOCs 排放系数低,因此如果降低生物质成型燃料燃烧利用过程中的 VOCs 排放系数,在设计燃烧器时应考虑提高燃烧室内的温度。

2.2 VOCs 组分排放系数分析

与散烧生物质(秸秆、薪柴等)相比^[11-12],秸秆成型燃料的 VOCs 排放系数仅为散烧秸秆排放系数的 50% 左右,木质成型燃料燃烧 VOCs 排放系数为薪柴直接燃烧的 10% 左右。研究结果表明秸秆成型燃料燃烧排放 VOCs 系数较大者依次为氯甲烷、苯、丙酮、甲苯。木质成型燃料燃烧排放 VOCs 系数较大者依次为甲苯、氯甲烷、丙酮、甲基乙基酮。

表 6 生物质成型燃料燃烧 VOCs 排放系数

Tab.6 VOCs emission factors of biomass molding fuel combustion					mg/kg
化合物 种类	木质	小麦 秸秆	玉米 秸秆	棉花 秸秆	
苯		113.430	205.022	64.860	
甲苯	39.607		67.872	21.369	
1,2,4-三甲苯	5.808		2.427	0.188	
1,2,5-三甲苯			0.545		
乙苯		2.073	7.174	1.786	
对间一二甲苯	0.424	4.677	23.527	8.805	
邻二甲苯	1.956	0.813	3.833		
苯乙烯	0.303	2.090	6.541	4.888	
1-乙基-4-甲基苯	1.734		1.178		
苯系物	49.832	9.652	113.096	37.036	
正庚烷			4.572	1.582	
正己烷			7.455	1.833	
环己烷		1.973			
烷烃		1.973	12.027	3.415	
1,3-丁二烯	3.711	2.504	11.042	25.443	
烯烃	3.711	2.504	11.042	25.443	
三氯甲烷	2.581	0.398			
氯甲烷	20.005	210.608	404.417	319.600	
二氯甲烷	3.186	1.294			
氯乙烯	0.403	10.779	3.868	4.042	
卤代烃	26.176	223.079	408.285	323.642	
丙酮	15.690	63.017	227.528	87.420	
甲基乙基酮	6.171	2.023	126.248	54.520	
甲基正丁基酮			126.248	2.695	
酮类	21.861	65.040	480.025	144.635	
乙酸乙酯	3.449				
酯类	3.449				
二硫化碳			1.688		
四氢呋喃		0.879		1.206	
其他		0.879	1.688	1.206	

注：表中数据为实际检测达到检出限。

将 4 种生物质成型燃料 VOCs 排放系数依据不同官能团分类,归一化得到不同官能团种类的质量分数,如图 4 所示。木质成型燃料燃烧 VOCs 排放主要种类依次为苯系物、卤代烃和酮类。秸秆成型燃料燃烧 VOCs 排放主要种类依次为卤代烃、酮类和苯系物。木质生物质成型燃料燃烧产生苯系物排放系数占总 VOCs 排放系数比重高出秸秆近 5 倍。总的来看,生物质成型燃料燃烧排放 VOCs 最为丰富的主要是卤代烃和酮,分别占 VOCs 总排放系数的 49.8% 和 36.1%。

2.3 VOCs 排放的臭氧生成潜势分析

根据排放系数及式(2),计算得出玉米秸秆、小麦秸秆、棉秆和木质 4 种生物质成型燃料燃烧排 VOCs 产生的臭氧生成潜势(以 O₃ 计)分别为: 4.792、25.737、9.598、4.502 g/kg。生物质成型燃

料燃烧排放 VOCs 臭氧生成潜势质量百分比分布如图 5 所示。臭氧生成潜势比较高的化合物种类依次为:苯系物、酮类和烯烃,其中苯系物贡献基本在 40% 以上。秸秆成型燃料燃烧排放 VOCs 中,臭氧生成潜势高的单个化合物依次为:甲基乙基酮、苯、甲苯、甲基正丁基酮和对-二甲苯;木质燃烧排放 VOCs 中,臭氧生成潜势高的单个化合物依次为:甲苯、1,2,4-三甲苯、1,3-丁二烯、邻二甲苯。

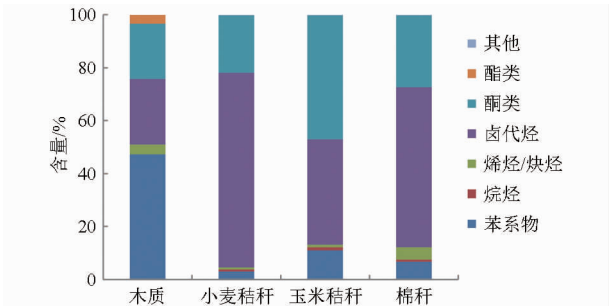


图 4 生物质成型燃料燃烧 VOCs 物种分布

Fig.4 VOCs species distribution of biomass
molding fuel combustion

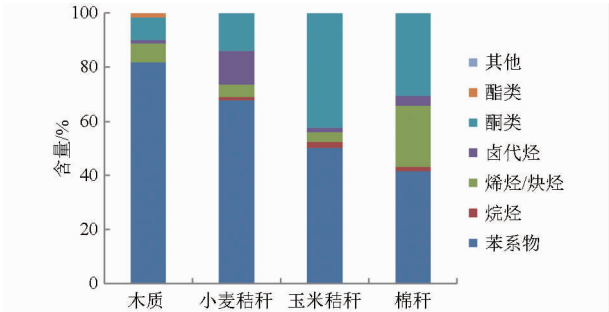


图 5 生物质成型燃料燃烧排放 VOCs 臭氧生成潜势分布

Fig.5 Ozone generating potential distribution of VOCs
emissions from biomass shaping pellet fuel combustion

3 结论

- (1) 试验研究了 4 种生物质成型燃料的 VOCs 排放特性,得到了玉米秸秆、小麦秸秆、棉秆和木质 VOCs 排放系数分别为 0.447、1.111、0.601、0.104 g/kg,秸秆成型燃料燃烧 VOCs 排放量高于木质成型燃料;生物质成型燃料燃烧 VOCs 排放量低于生物质燃料在家庭炉灶散烧的 VOCs 排放量。
- (2) 生物质成型燃料燃烧排放 VOCs 中,按化学官能团分含量最为丰富的种类是卤代烃和酮,含量均在 25% 以上;秸秆与木质成型颗粒燃料燃烧排放 VOCs 种类中除了烷烃和酯类不同之外,其他的化合物种类相同,含量(质量百分比)相差不大。
- (3) 玉米秸秆、小麦秸秆、棉秆和木质成型颗粒燃料燃烧排放总 VOCs 的臭氧生成潜势(以 O₃ 计)分别为 4.792、25.737、9.598、4.502 g/kg;臭氧生成潜势比较高的物种依次为:苯系物、酮、烯烃和卤代烃。

参 考 文 献

- 1 陈彦宏,武佩,田雪艳,等. 生物质致密成型燃料制造技术研究现状[J]. 农机化研究,2010,32(1):206-211.
Chen Yanhong, Wei Pei, Tian Xueyan, et al. The state of the art on density technologies of biomass briquette [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(1):206-211. (in Chinese)
- 2 姚向君,田宜水. 生物质能资源清洁转化利用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- 3 毕于运,高春雨,王亚静,等. 中国秸秆资源量估算[J]. 农业工程学报,2009,25(12):211-217.
Bi Yuyun, Gao Chunyu, Wang Yajing, et al. Estimation of straw resources in China [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 211-217. (in Chinese)
- 4 姚宗路,崔军,赵立欣,等. 瑞典生物质颗粒燃料产业发展现状与经验[J]. 可再生能源,2010,28(6):26-32.
Yao Zonglu, Cui Jun, Zhao Lixin, et al. Development status and experience of biomass pellet fuel in Sweden [J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(6):26-32. (in Chinese)
- 5 罗娟,侯书林,赵立欣,等. 生物质颗粒燃料燃烧设备的研究进展[J]. 可再生能源,2009,27(6):90-95.
Luo Juan, Hou Shulin, Zhao Lixin, et al. The research progress of pellet burning equipments[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(6):90-95. (in Chinese)
- 6 田宜水,孟海波. 农作物秸秆开发利用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- 7 郝吉明,马广大. 大气污染控制工程[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- 8 沈国锋. 室内固体燃料燃烧产生的碳颗粒物和多环芳烃的排放因子及影响因素[D]. 北京:北京大学,2012.
- 9 Zhang J F, Smith K R. Emissions of carbonyl compounds from various cook stoves in China [J]. Environmental Science & Technology, 1999, 33(14): 2311-2320.
- 10 Tsai S M, Zhang J F, Smith K R, et al. Characterization of non-methane hydrocarbons emitted from various cook stoves used in China [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(13): 2869-2877.
- 11 Wang S X, Wei W, Du L, et al. Characteristics of gaseous pollutants from biofuel-stoves in rural China [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(27): 4148-4154.
- 12 李兴华,王书肖,郝吉明. 民用生物质燃烧挥发性有机化合物排放特征[J]. 环境科学, 2011, 32(12):3515-3521.
Li X H, Wang S X, Hao J M. Characteristics of volatile organic compounds emitted from biofuel combustion in China [J]. Environmental Science, 2011, 32(12):3515-3521. (in Chinese)
- 13 Margarita Evtyugina, Celia Alves, Ana Calvo, et al. VOC emissions from residential combustion of southern and mid-European woods [J]. Atmospheric Environment, 2014, 83:90-98.
- 14 Ilarri Lusini, Pallozzi E, Corona P, et al. Novel application of a combustion chamber for experimental assessment of biomass burning emission [J]. Atmospheric Environment, 2014, 94:117-125.
- 15 Fan Zhihua, Paul Lioy, Charles Weschler, et al. Ozone-initiated reactions with mixtures volatile organic compounds under simulated indoor conditions [J]. Environment Science Technology, 2003, 37(27):1811-1821.
- 16 张学敏,张永亮,姚宗路,等. 不同进料方式燃烧器对生物质燃料颗粒物排放特性的影响 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(12):200-207.
Zhang Xuemin, Zhang Yongliang, Yao Zonglu, et al. Effect of burner with different feeding modes on emission characteristics of biomass molding fuel particle [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(12):200-207. (in Chinese)
- 17 赵立欣,霍丽丽,田宜水,等. 一种生物质锅炉破渣装置: 中国, CN201410216375.1[P]. 2014-05-16.
- 18 Wang S X, Wei W, Du L, et al. Characteristics of gaseous pollutants from biofuel-stoves in rural China [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(27):4148-4154.
- 19 喻赣湘. 基于碳平衡法的排气直采式油耗测量系统研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.
- 20 Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 1994, 44: 881-899.
- 21 魏巍. 中国人为源挥发性有机化合物的排放现状及未来趋势[D]. 北京:清华大学,2009.
- 22 牛永红,马黎军,陈义胜,等. 下吸式气化炉木屑高温蒸汽气化制取富 H₂ 实验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4):189-194.
Niu Yonghong, Ma Lijun, Chen Yisheng, et al. Performance of downdraft gasifiers for hydrogen-rich gas by high temperature steam gasification of biomass [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):189-194. (in Chinese)
- 23 董玉平,郭飞强,董磊,等. 生物质热解气化技术[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2):44-49.
Dong Yuping, Guo Feiqiang, Dong Lei, et al. Study on biomass gasification technology [J]. Engineering Science, 2011, 13(2): 44-49. (in Chinese)
- 24 姚昆. 木质和秸秆类成型燃料热解炭化特性的试验研究[D]. 长沙:中南大学,2014.