

生物质固体成型燃料燃烧颗粒物的数量和质量分布特性

张永亮^{1,2}, 赵立欣¹, 姚宗路^{1*}, 田宜水¹, 孟海波¹, 张学敏²

(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. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对中国生物质固体成型燃料燃烧过程中排放的颗粒物粒径分布不清、燃烧功率和空气量对颗粒物分布影响不明等问题, 该文在生物质燃烧试验平台上, 采用低压电子冲击仪 (electrical low pressure impactor) 设备, 对玉米秸秆、棉杆、木质等 3 种固体生物质成型燃料分别开展了燃烧颗粒排放研究, 重点研究了 3 种生物质成型燃料在不同功率下和不同空气量下的颗粒物的数量和质量分布。试验结果表明, 3 种燃料的颗粒物的数量峰值主要集中在 4~7 四级, 占颗粒物总数量的 70% 以上; 颗粒物质量峰值在 7 级和 12 级, 占颗粒物总质量的 50% 以上。随着功率增加, 颗粒物排放量先减小后增大, 大粒径颗粒物增多, 在 14 kW 时颗粒物排放最少。随着空气量的增加, 分布趋势不变, 颗粒物总量减少。该研究为中国生物质固体成型燃料的颗粒物排放法规的制定提供参考。

关键词: 燃料, 颗粒物, 排放控制, 生物质, 分布

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.19.023

中图分类号: S216.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-19-0185-08

张永亮, 赵立欣, 姚宗路, 等. 生物质固体成型燃料燃烧颗粒物的数量和质量分布特性[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 185-192.

Zhang Yongliang, Zhao Lixin, Yao Zonglu, et al. Distribution characteristics of number and mass for particulate emission of biomass solid fuel combustion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 185-192. (in Chinese with English abstract)

0 引言

中国具有丰富的农作物秸秆, 每年可收集秸秆总量达 6.87 亿 t, 约 2.15t 吨秸秆被焚, 其焚烧所释放的颗粒物造成了严重空气污染^[1-2]。空气中的颗粒物微粒主要以核模态、积聚模态和粗粒子模态 3 种模态存在, 其空气动力学直径在 0.01~10 μm 之间^[3-5]。据统计, 中国大气颗粒物污染主要源于煤炭和农作物燃烧、扬尘、车辆排放等, 其中煤炭和农作物燃烧约占总颗粒物的 30%^[6-7]。

生物质固体成型燃料是通过专门设备将秸秆、稻壳、木屑等农业废弃物压缩成特定形状来增加其密度的固体燃料, 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^[8-9]。

对于固体生物质燃料燃烧后的颗粒物排放问

题, 国内外都做了一些研究, 国外主要集中在木质成型燃料方面, 研究了木质成型燃料的颗粒物分布状况, 国内主要集中在生物质原始状态下燃烧后颗粒物排放总量方面, 主要研究了水稻、小麦、玉米秸秆等生物质直接燃烧生成颗粒物状况^[10-12], 但对生物质固体成型燃料燃烧过程中的颗粒物质量和数量的浓度分布等尚未研究。跟欧美的木质生物质成型燃料相比, 中国的生物质成型燃料主要以玉米秸秆、棉杆、水稻、小麦等农作物生产剩余物为主, 在工业成分、燃烧特性、污染排放的方面都和木质颗粒燃料有一定差异^[13-15]。

因此, 本文采用低压电子冲击仪 (ELPI electrical low pressure impactor), 在农业部规划设计研究院搭建的生物质固体成型燃料燃烧平台上, 对玉米秸秆、棉杆、木质 3 种生物质固体成型燃料开展燃烧试验, 对 3 种燃料燃烧后的颗粒物排放的数量和质量分布进行研究, 以期中国生物质固体成型燃料的颗粒物排放法规的制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验燃料

中国的生物质颗粒燃料主要以农作物秸秆为主, 选择目前市场上常见的玉米秸秆、棉杆、木质 3 种颗粒成型燃料作为对比分析, 所用玉米秸秆和棉杆生物

收稿日期: 2013-06-09 修订日期: 2013-08-20

基金项目: “十二五” 国家科技计划课题 (2012BAD30B0202)

作者简介: 张永亮 (1989-), 男, 河北承德人, 主要从事汽车生物燃料排放方面的研究。北京 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, 100125。北京 中国农业大学工学院, 100083。Email: 453549324@qq.com

*通信作者: 姚宗路 (1980-), 男, 山东临沂人, 工学博士, 高级工程师, 主要从事生物质资源开发利用方面研究。北京市朝阳区麦子店街 41 号农业部规划设计研究院, 100125。Email: yaozonglu@163.com

质颗粒燃料于 2012 年 12 月在北京大兴礼贤生物质颗粒燃料公司生产, 由农业部规划设计研究院研制的 485 型生物质颗粒燃料成型机压制而成, 所用木质颗

粒燃料由天津嘉海木业公司生产。颗粒燃料均压缩加工为圆柱型, 直径 8 mm, 长度 10~30 mm, 3 种生物质颗粒燃料的工业分析、元素分析、热值如表 1。

表 1 三种生物质颗粒燃料的工业分析、元素分析和发热量

Table 1 Proximate analysis, ultimate analysis, and heat value of 3 kinds of pellets

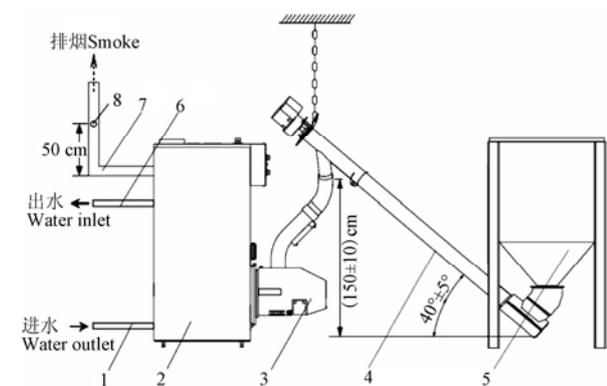
原料 Material	工业分析 Industrial analysis/%				元素分析 Elemental analysis/%				低位发热量 Lower heating value /(kJ·kg ⁻¹)
	M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	F _{C,ad}	C _{ad}	H _{ad}	N _{ad}	S _{ad}	
玉米秸秆 Corn straw	7.64	12.08	71.03	9.25	40.66	5.44	1.10	0.56	16254
棉秆 Cotton stalk	7.53	12.10	72.22	8.15	39.99	5.30	1.15	0.58	15707
木质 Wood	7.45	1.59	85.24	5.72	46.75	6.19	0.26	0.59	18308

注: M_{ad} 为一般样本水分 (Moisture); A_{ad} 为灰分 (Ash); V_{ad} 为挥发分 (Volatiles); F_{C,ad} 为固定碳 (Fixed carbon); C_{ad} 为碳元素含量 (Carbon content); H_{ad} 为氢元素含量 (Hydrogen content); N_{ad} 为氮元素含量 (Nitrogen content); S_{ad} 为硫元素含量 (Sulfur content)。

1.2 仪器与设备

1.2.1 生物质固体成型燃料燃烧试验平台

生物质成型燃料燃烧试验平台以生物质燃烧器和生物质锅炉为核心, 包括料仓, 进料装置, 风机, 控制箱, 电脑记录软件等为一体的科研平台。其中, 进料的速度以及燃烧时配风量的大小均可调可控, 在燃烧运行时, 实现自动点火, 自动配风, 自动进料, 自动清渣。试验装置示如图 1。



1. 进水管道 2. 生物质锅炉 3. 生物质颗粒燃烧器 4. 进料机构
5. 料仓 6. 出水管道 7. 烟气管道 8. 烟气/烟尘采样孔
1. Water inlet 2. Biomass piping 3. Biomass boiler 4 Feeding mechanism
5. Bin 6. Water outlet 7. Gas pipeline 8. Smoke/Dust sampling hole

图 1 生物质燃烧试验平台

Fig.1 Biomass combustion test platform

燃烧器采用由农业部规划设计研究院研发的生物质自动高效燃烧器^[16], 最大功率为 20 kW 的上进料式燃烧器 (PB-20)。

1.2.2 低压电子冲击仪

本试验的测量仪器为低压电子冲击仪 (ELPI) 和 SEMTECH 测试仪, ELPI 是芬兰坦佩雷大学开发的用于实时测量气溶胶粒径分布的仪器。其主要部件有低压级联撞击器、电晕放电器和多通道静电计等。ELPI 把颗粒物分成 12 级, 从 0.003~10 μm, 如表 2, 能够对每级的颗粒数目和质量进行瞬态记录^[17]。SEMTECH (美国 Sensors 公司研发生产) 可以测出废气各成分含量。

表 2 ELPI 的粒径分级

Table 2 Particle size grading in ELPI

状态 State	级别 Level	粒径范围 Range of particle size/μm	直径 Diameter/μm
核模态	1	0.007~0.029	0.02
	2	>0.029~0.057	0.04
	3	>0.057~0.101	0.08
积聚模态	4	>0.101~0.165	0.13
	5	>0.165~0.255	0.21
	6	>0.255~0.393	0.32
	7	>0.393~0.637	0.50
	8	>0.637~0.990	0.79
	9	>0.990~1.610	1.26
粗模态	10	>1.610~2.460	1.99
	11	>2.460~3.970	3.13
	12	>3.970~10.150	6.35

1.3 试验参数和试验设计

1.3.1 试验参数

试验所测的参数为颗粒物排放的数量和质量。除了总颗粒数量和质量外, 还测不同粒径 (12 个级别) 颗粒物的数量和质量。数量是指在每平方厘米内含颗粒物个数。质量是指在每平方米内含颗粒物的质量。所测数据能准确地反映所排放颗粒物中所包含的不同粒径级别下的数量和质量。

1.3.2 试验设计

1) 在试验室平台上分别燃烧 3 种生物质成型燃料, 通过控制进料速度从而控制进料量, 根据试验平台的功率范围标定 10、12、14、16 和 18 kW 5 种功率, 在风机风速最大 (8 m/s), 空气量充足的情况下 (过量空气系数 ≥ 2.0) 分别测量 5 种功率下废气成分和颗粒物分布情况, 每种功率在稳定时, 测量记录 30 min。

2) 选取 3 种燃料颗粒物排放最佳功率 14 kW, 在此功率下, 根据试验平台风机转速范围, 通过控制风机转速来标定空气进气量, 分别测量风机风速为 6、7、8 m/s 3 种风速下的颗粒物排放分布情况, 每种风速下燃烧稳定时, 测量记录 30 min。

2 结果与分析

2.1 三种生物质成型燃料的废气成分

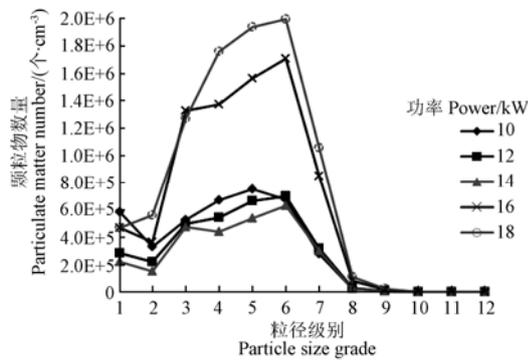
在试验各功率下，风机风速调最大 8 m/s，待燃烧稳定时，用 ELPI 和 SEMTECH 测得颗粒物和废气成分如表 3。

表 3 三种燃料废气成分
Table 3 Gas composition of three fuels

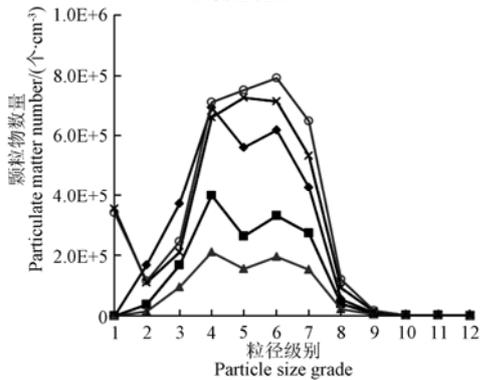
原料 Material	功率 Power/kW	CO ₂ /%	CO/%	NO/%	NO ₂ /%	O ₂ /%	颗粒物数量 Particulate matter number/(个·cm ⁻³)	颗粒物质量 Particulate matter mass/(mg·m ⁻³)	过量空气系数 Excess air ratio
玉米秸秆 Corn straw	10	8.0	0.083	0.0196	0.00223	13.2	3.85×10 ⁶	77.3	2.5
	12	9.5	0.055	0.02	0.0007	11.1	3.27×10 ⁶	78.9	2.0
	14	11.0	0.038	0.0288	0.00117	9.0	2.80×10 ⁶	74.8	1.7
	16	16.3	5.752	0.0187	0.00071	4.7	7.77×10 ⁶	227.5	1.3
	18	16.0	5.5754	0.0170	0.00086	3.8	9.19×10 ⁶	303.8	1.2
棉杆 Cotton stalk	10	10.0	0.059	0.03	0	11.0	2.91×10 ⁶	90.8	2.0
	12	13.0	0.03	0.0335	0	9.0	1.52×10 ⁶	60.7	1.7
	14	14.2	0.021	0.034	0	7.2	0.85×10 ⁶	44.0	1.5
	16	17.3	3.2	0.015	0	3.0	3.41×10 ⁶	176.0	1.2
	18	18.0	3.325	0.02	0	2.0	3.74×10 ⁶	197.8	1.1
木质 Wood	10	9.0	0.17	0.008	0	10.8	6.68×10 ⁶	115.2	2.0
	12	11.5	0.1456	0.009	0	9.1	6.59×10 ⁶	155.0	1.7
	14	15.0	0.088	0.0095	0	6.8	0.28×10 ⁶	77.4	1.5
	16	17.0	0.09	0.008	0	2.9	2.28×10 ⁶	101.7	1.2
	18	18.3	2.9	0.0036	0	1.2	1.59×10 ⁶	962.0	1.1

2.2.1 三种成型燃料在不同功率下颗粒物数量分布

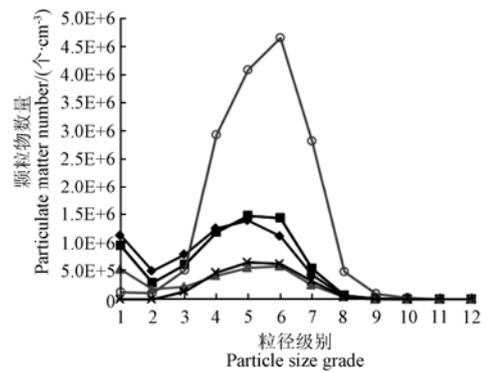
3 种成型燃料在不同功率下颗粒物数量分布如图 2。随着功率的加大，颗粒物的总数量都是先减小后增大。颗粒物分布的峰值向大粒径方向移动，表明进料量越多、功率越大，燃料燃烧后产生相对更大粒径颗粒。



a. 玉米秸秆
a. Corn straw



b. 棉杆
b. Cotton stalk



c. 木质
c. Wood

图 2 三种成型燃料颗粒物数量分布

Fig.2 Particle number distribution of three molding fuel

对于玉米秸秆（图 2a），10 kW 时，颗粒物数量峰值在第 5 级。12 kW 时，颗粒物分布的各级别数量降低，峰值出现在第 6 级。当功率为 14 kW 时，颗粒物数量进一步减少，呈双峰分布，峰值第 3 级和第 6 级。功率提高到 16 和 18 kW 时，数量峰值仍为第 6 级。

对于棉杆成型燃料（图 2b），10、12、14 kW 功率下颗粒物数量都呈双峰分布状态，在第 4 级和第 6 级出现 2 个峰值。虽然随着功率增加颗粒物排放数量减少，但是总体数量分布趋势没有过多变化。16、18 kW 时，分布峰值在第 6 级，说明颗粒物粒径变大。

对于木质燃料（图 2c），前 4 种工况下，分布呈双峰状态，第 1 级和第 5 级颗粒出现峰值，功率

增加, 数量分布有向大粒径方向转移趋势。当功率提高到 18 kW 时, 3 种燃料的颗粒物总数量急剧增多, 颗粒物数量的峰值都转变为第 6 级。

2.2.2 三种成型燃料在不同功率下颗粒物质量分布

3 种成型燃料在不同功率下颗粒物质量分布如图 3。随着功率增加, 颗粒物的质量先减小后增大, 但大粒径颗粒物质量所占比例增加。

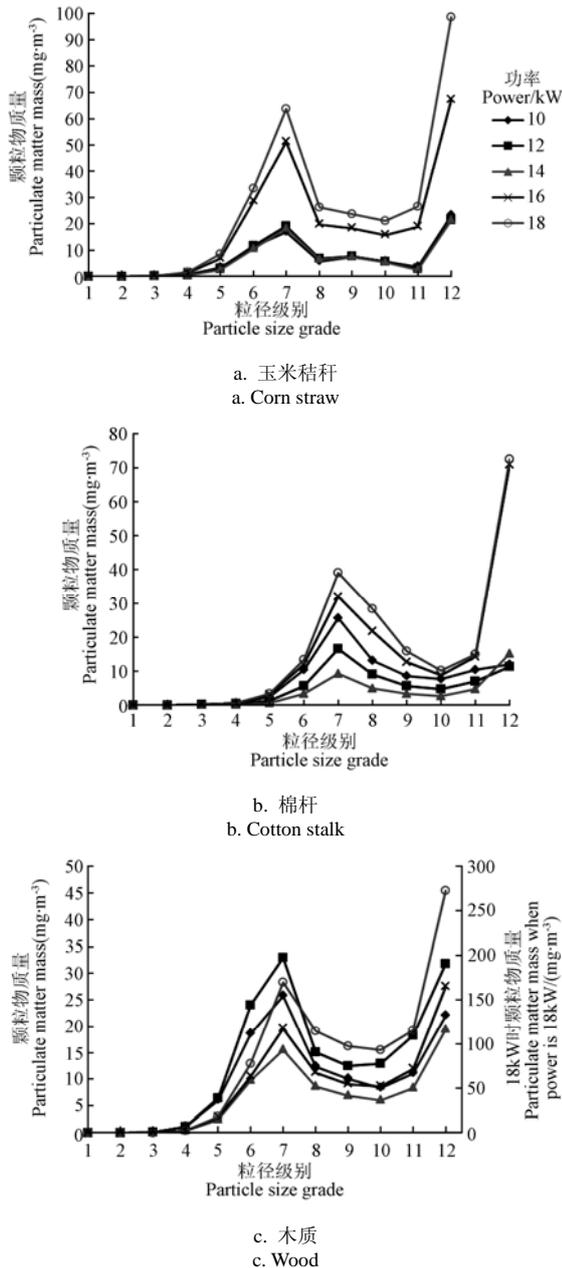


图 3 三种成型燃料颗粒物质量浓度分布
Fig.3 Particle mass distribution of three molding fuel

对于玉米秸秆成型燃料(图 3a), 5 种功率下颗粒物质量峰值分别是第 7 级和第 12 级。虽然大功率下颗粒物的质量急剧增加, 但是总体分布趋势没有发生太大变化。通过计算, 在 5 种工况下 PM_{2.5} (10 级以下) 质量占总颗粒物分别为 65.6%、68.8%、

68.7%、62.2% 和 58.8%。

对于棉杆成型燃料(图 3b), 10 和 12 kW 功率下, 颗粒物质量的峰值在第 7 级, 在 14、16、18 kW 时, 质量浓度分布出现了双峰值, 为第 7 级和第 12 级。通过计算, 棉杆燃料在 5 种工况下 PM_{2.5} 质量分别占总颗粒物的 76%、70%、54.7%、52.7%、55.6%。

对于木质成型燃料(图 3c), 5 种功率下颗粒物质量分布都呈双峰分布, 分别在第 7 级和第 12 级颗粒物出现峰值。计算后, PM_{2.5} 质量在 5 种工况下分别占总颗粒物的 71.3%、67.7%、64%、61.3%、59.5%。

2.3 进气量对燃料颗粒物排放分布的影响

在相同功率下, 不同的风机风速会导致不同的过量空气系数。更多的空气能使燃料燃烧后的颗粒物进一步被氧气氧化, 从而改变颗粒物的数量和分布。而且, 风速不同改变燃烧器内部的气流运动, 改变燃烧环境, 对颗粒物的生成和分布也产生一定影响。由以上功率对颗粒物排放影响试验可知 14 kW 时颗粒物排放最少, 14 kW 时, 在风速为 6、7 和 8 m/s 时, 玉米秸秆燃料的过量空气系数分别为 1.3、1.5、1.7, 棉杆的过量空气系数分别为 1.1、1.3、1.5, 木质燃料的过量空气系数分别为 1.1、1.3、1.5。因此选择在 14kW 功率下, 研究空气量对颗粒物排放的影响。

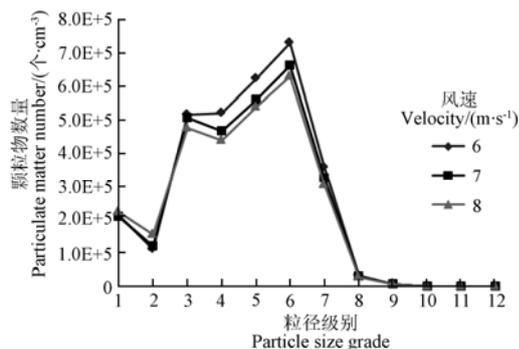
2.3.1 不同进气量下三种燃料颗粒物数量分布

3 种成型燃料在不同进气量下的颗粒物数量分布如图 4。

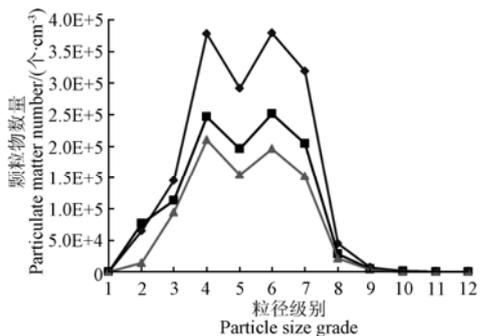
玉米秸秆成型燃料(图 4a), 进风量对颗粒物数量分布趋势无影响, 峰值都是第 3 级和第 6 级, 但颗粒物总体的数量呈下降趋势, 在风速为 8 m/s 时, 颗粒物总量最小。风速从 6 m/s 增加到 8 m/s, 过量空气系数从 1.3 提高到 1.7, 第 1、2 级的核模态颗粒物数量增加了 11.8%, 3~9 级积聚模态颗粒物数量减少 13.2%, 10~12 级粗模态颗粒物数量减少 12.7%。

棉杆成型燃料(图 4b), 空气量对颗粒物数量分布趋势无影响, 峰值在第 4 级和第 6 级, 风速增加, 颗粒物总数量下降。风速从 6 m/s 增加到 8 m/s, 过量空气系数从 1.1 提高到 1.5, 3 种模态颗粒物数量都减少了 50% 左右。

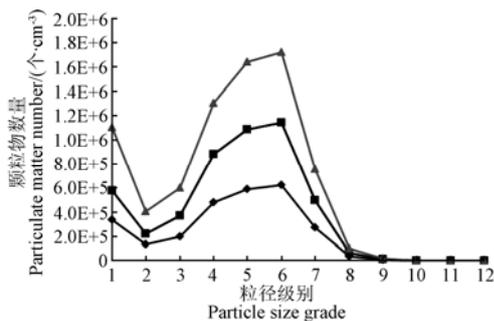
木质燃料(图 4c), 在风速为 7 m/s 时(过量空气系数 1.3), 颗粒物排放最小。风速从 6 m/s 增加到 7 m/s, 1、2 级的核模态颗粒物数量降低了 30.4%, 3~9 级积聚模态颗粒物数量减少 15.8%, 10~12 级粗模态颗粒物数量减少 14.8%。



a. 玉米秸秆
a. Corn straw



b. 棉杆
b. Cotton stalk

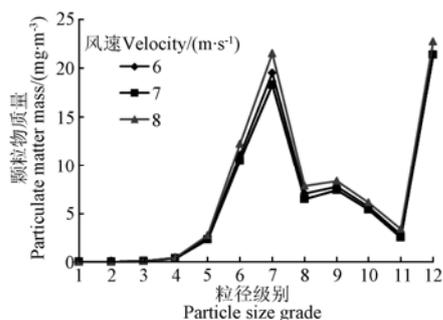


c. 木质
c. Wood

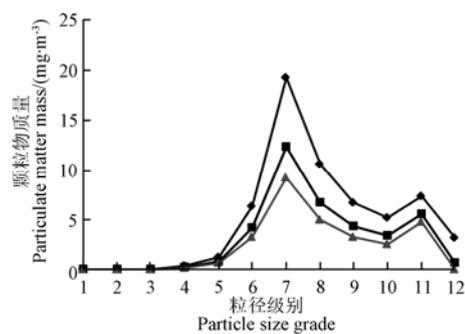
图 4 进风量对三种生物质成型燃料颗粒物数量浓度影响
Fig.4 Influence of air to three biomass fuel particle number concentration

2.3.2 三种成型燃料在不同进气量下颗粒物质量分布

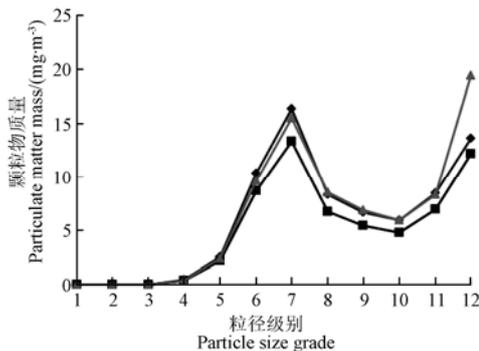
3 种成型燃料在不同进气量下的颗粒物质量分布如图 5。



a. 玉米秸秆
a. Corn straw



b. 棉杆
b. Cotton stalk



c. 木质
c. Wood

图 5 进风量对三种生物质成型燃料颗粒物质量影响
Fig.5 Influence of air to three biomass fuel particle mass concentration

空气量对玉米秸秆燃料颗粒物排放的质量分布影响(图 5a), 颗粒物质量峰值都在第 7 级和第 12 级。风速从 6 m/s 增加到 8m/s, 过量空气系数从 1.3 提高到 1.7, 第 1、2 级核模态颗粒物的质量量升高 29%, 3~9 级积聚模态的颗粒物质量浓度降低 14.4%, 10~12 级粗模态颗粒物质量降低 9%。PM_{2.5} 的质量降低 14%。

空气量对棉杆燃料颗粒物排放的质量分布影响(图 5b), 颗粒物质量峰值都在第 7 级。风速从 6 m/s 增加到 8 m/s, 过量空气系数从 1.1 提高到 1.5, 3 种模态颗粒物数量都减少了 50% 以上。PM_{2.5} 的质量降低 51.5%。

空气量对木质燃料颗粒物排放的质量分布影响(图 5c), 颗粒物质量峰值都在第 7 级和第 12 级。风速 6 m/s 时颗粒物最多和 7 m/s 时颗粒物最少相比较, 第 1 级和第 2 级核模态颗粒物的质量升高 36%, 3~9 级积聚模态的颗粒物质量降低 18%, 10~12 级粗模态颗粒物质量降低 14.3%。PM_{2.5} 的质量降低 18%。

2.4 讨论

在不同功率下 3 种生物成型燃料的颗粒物数量分布主要集中在 4~7 级的积聚模态的颗粒物, 占总数量的 70% 以上。3 种燃料的颗粒物质量分布除

了积聚模态还有 10~12 级的粗模态颗粒物, 2 种形态的颗粒物的质量占总质量的 90% 以上。这是因为颗粒物的形成主要有两部分, 一部分是由 K_2SO_4 、 KCl 等碱金属盐在温度超过 $500^\circ C$ 时通过结核、聚集、长大等过程结合而成, 这种颗粒物主要是亚微米颗粒物, 粒径在 $100\sim 600\text{ nm}$ 之间^[18-20]。另一部分颗粒物的形成主要是燃料中所含有的 Ca 、 Si 等耐高温金属不易燃烧, 在燃烧过程中形成颗粒较大的超微米颗粒物, 粒径在 $1\ \mu m$ 以上^[21-23]。3 种生物质燃料的颗粒物排放分布规律恰好符合这一特性。

在 10、12、14 kW 3 种功率下, 玉米秸秆燃烧的过量空气系数分别为 2.5、2.0、1.7, 棉杆和木质的过量空气系数都分别为 2.0、1.7、1.5。3 种空功率下炉膛温度分别为 770 、 820 和 $900^\circ C$, 排烟温度分别为 105 、 123 和 $144^\circ C$ 。3 种生物质成型燃料的颗粒物总体数量都随着功率的增大而降低。这 3 个功率下, 影响颗粒物的因素主要是温度, 由于空气充足, 燃料所排放的颗粒物会随着排气过程继续燃烧, 并且炉膛温度和排烟温度增高, 使得颗粒物的布朗运动增加, 相互撞击频率增加, 积聚模态的颗粒物减少, 粗模态颗粒物增加^[24-25], 总体数量下降。但是继续增大功率, 颗粒物无论数量还是质量都急剧上升, 这主要是因为进料量增多, 虽然炉膛温度升高, 但是空气不足, 在 16、18 kW 时, 炉膛温度在 $1000^\circ C$ 左右, 排气温度 $180^\circ C$ 以上, 3 种燃料燃烧时的过量空气系数急剧下降到 1.2 以下, 排气氧气比例下降至 4% 以下, 燃料燃烧不完全, 积聚模态颗粒物和粗模态颗粒物不能在排气中被多余的氧气氧化燃烧, 对颗粒物影响主要因素为氧气, 温度影响减弱。

当功率增大到 16 和 18 kW 时, 进料量增多, 燃烧温度高, 使得燃料极易结渣, 在燃烧过程中, 清渣螺旋加快清渣, 燃料在炉膛中停留时间变短, 造成燃料燃烧不充分, 粗颗粒物增多^[26]。并且, 清渣螺旋频繁的搅拌灰渣, 掀起的扬灰也是造成粗模态颗粒物增多的一个因素。

在 14 kW 时, 3 种燃料随着风机风速的增大、过量空气系数的增加, 颗粒物的数量和质量都成下降趋势。过量空气系数增加, 对于玉米秸秆而言, 使得核模态颗粒物增加, 积聚模态颗粒物和粗模态颗粒物减少; 对于棉杆而言, 使得 3 种模态颗粒物都减少; 对于木质成型燃料而言, 核模态颗粒物增多, 积聚模态颗粒物减少, 粗模态颗粒物增多, 呈两头变多中间变少趋势。

风量增大, 使得颗粒物的数量和质量都减少, 这是因为过量空气系数增加, 氧气充足, 使得燃烧器内氧气变多, 燃料可以充分燃烧, 即使没有在燃

烧器内燃烧尽的较大颗粒物, 也可在排气过程中继续被氧化燃烧成小的颗粒物, 甚至燃尽。所以随着风速增加, 玉米秸秆和木质成型燃料的积聚模态颗粒物减少, 核模态颗粒物增加, 棉杆燃料 3 种模态颗粒物都减少。但是木质的粗模态颗粒物增加了, 这是因为木质燃料挥发分和含碳量比另外 2 种高, 当大风速时, 加速挥发分和碳粒生成, 碳粒高速运动, 增加碰撞的几率, 凝聚成一定的粗模态颗粒物。而且木质燃料燃烧后不易结渣, 燃烧后剩余物多为很轻的灰尘^[27], 风速增大, 排气中扬尘增多, 所以木质燃料随着风速增大, 粗模态颗粒物也增多。

3 结 论

1) 在不同功率下 (10、12、14、16 和 18 kW), 玉米秸秆、棉杆、木质 3 种成型燃料的颗粒物排放数量和质量都随着功率的增高先减小后增大, 在 14 kW 功率下颗粒物排放最少, 过量空气系数在 1.5~1.7 时, 最利于燃料燃烧, 颗粒物最少。

2) 3 种成型燃料颗粒物数量峰值主要集中在 4~7 级, 占总颗粒物数量的 70% 以上; 颗粒物质量峰值在 7 级和 12 级, 占颗粒物总质量 50% 以上。PM_{2.5} 质量在颗粒物中所占的比例也随着功率的增加出现 10%~20% 的减少。

3) 进气量对颗粒物分布趋势基本无影响, 只改变排放总量。风速增大, 过量空气系数越大, 棉杆的变化幅度大于玉米秸秆和木质。玉米秸秆和棉杆的颗粒物总量都随着进气量增大而减少, 在 8 m/s 时颗粒物排放最少。木质的在 7 m/s 时颗粒物排放最少。随着进气量增大, 玉米秸秆的核模态颗粒物增多, 积聚模态和粗模态颗粒物减少, 木质的核模态和粗模态颗粒物增多, 积聚模态颗粒物减少, 棉杆燃料 3 种模态颗粒物都减少。

[参 考 文 献]

- [1] 农业部新闻办公室. 全国农作物秸秆资源调查与评价报告[J]. 农业工程技术: 农产品加工, 2011(2): 1-5. News Office of Ministry of Agriculture. Investigation and evaluation report of national crop straw resources[J]. Agricultural Engineering Technology: Agrotechny 2011(2): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [2] 朱建春, 李荣华, 杨香云, 等. 近 30 年来中国农作物秸秆资源量的时空分布[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(4): 139-145. Zhu Jianhua, Li Ronghus, Yang Xiangyun, et al. Spatial and temporal distribution of crop straw resources in 30 years in China[J]. Journal of Northwest A and F University: Natural Science, 2012, 40(4): 139-145. (in Chinese with English abstract)
- [3] HI3095-1982, 大气环境标准[S].

- [4] 霍雨佳. PM_{2.5} 对人体健康的危害[J]. 生命与灾害, 2011(12): 15.
Huo Yujia. The harm of PM_{2.5} to human health[J]. Life and Disaster, 2011(12): 15. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘岩磊, 孙岚, 张英鸽. 粒径小于 2.5 微米可吸入颗粒物的危害[J]. 国外医学: 药学分册, 2011, 38(6): 428—431.
Liu Yanlei, Sun Lan, Zhang Yingge. Hazards of inhalable particulates PM_{2.5} on human health[J]. International Journal of Pharmaceutical Research, 2011, 38(6): 428—431. (in Chinese with English abstract)
- [6] 胡敏, 唐倩, 彭剑飞, 等. 我国大气颗粒物来源及特征分析[J]. 环境与可持续发展, 2011, 36(5): 15—19.
Hu Min, Tang Qian, Peng Yuefei, et al. Study on characterization and source apportionment of atmospheric particulate matter in China[J]. Environment and Sustainable Development, 2011, 36(5): 15—19. (in Chinese with English abstract)
- [7] 吕建焱, 李定凯, 吕子安. 燃烧过程颗粒物的形成及我国燃烧源分析[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(5): 43—47.
Lv Jianyan, Li Dingkai, Lü Zian. PM formation from combustion and the analysis of combustion sources in our country[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006, 7(5): 43—47. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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 resreach progress of pellet burning equipments[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(6): 90—95. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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.
- [10] Zhang Hefeng, Cheng Tiantao, Chen Jianmin. A laboratory study of agricultural crop residue combustion in China: Emission Factors and Emission inventory[J]. Atmospheric Environment, 2008(42): 8432—8441.
- [11] 张鹤丰. 中国农作物秸秆燃烧排放气态、颗粒态污染物排放特征的实验室模拟[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
Zhang Hefeng. A Laboratory Study on Emission Characteristics of Gaseous and Particulate Pollutants Emitted from Agricultural Crop Residue Burning in China[D]. Shanghai: Fudan University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [12] Shen Guofeng, Shu Tao. Reductions in emissions of carbonaceous particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons from combustion of biomass pellets in comparison with raw[J]. Fuel Burning Environ Sci Technol, 2012(46): 6409—6416.
- [13] 吴创之, 周肇秋, 阴秀丽, 等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 91—99.
Wu Chuangzhi, Zhou Zhaoqi, Yin Xiuli, et al. Current status of biomass energy development in China[J]. Transactions of the Chinese Society Agricultural Machinery(Transactions of the CSAM), 2009, 40(1): 91—99. (in Chinese with English abstract)
- [14] 姚宗路, 赵立欣, Ronnbckm, 等. 生物质颗粒燃料特性及其对燃烧的影响分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 97—102.
Yao Zonglu, Zhao Lixin, Ronnbckm, et al. Comparison on characterization effect of biomass pellet fuel on combustion behavior[J]. Transactions of the Chinese Society Agricultural Machinery(Transactions of the CSAM), 2010, 41(10): 97—102. (in Chinese with English abstract)
- [15] 田宜水. 生物质固体成型燃料产业发展现状与展望[J]. 农业工程技术·新能源产业, 2009(3): 20—26.
Tian Yishui. The development status and prospect of biomass solid forming fuel industry[J]. Agricultural Engineering Technology, 2009(3): 20—26. (in Chinese with English abstract)
- [16] 徐飞, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物质颗粒燃料热风点火性能的试验研究[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 288—294.
Xu Fei, Zhao Lixin, Meng Haibo, et al. Experimental study on hot-air ignition of biofuel pellets[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2011, 27(7): 288—294. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张劲, 王凤滨, 高俊华. 电子低压冲击仪的颗粒物测试[J]. 汽车工程师, 2009(2): 41—45.
Zhang Jin, Wang Fengbin, Gao Junhua. A study on particulates of automotive using electrical low pressure impactor[J]. Auto Engineering, 2009(2): 41—45. (in Chinese with English abstract)
- [18] Christensen K A. The Formation of Submicron Particles From the Combustion of Straw[D]. Lyngby Denmark, Technical University of Denmark, 1995.
- [19] Johansson L S, Tullin C, Leckner B, et al. Particle emissions from biomass combustion in small combustors[J]. Biomass and Bioenergy, 2003(25): 435—446.
- [20] Linda S Bafver, Bo Leckner, Claes Tullin, et al. Particle emissions from pellets stoves and modern and old-type wood stoves[J]. Biomass and Bioenergy, 2011(35): 3648—3655.
- [21] Song Shaojie, Wu Ye, Jiang Jingkun, et al. Chemical characteristics of size-resolved PM_{2.5} at a roadside environment in Beijing, China[J]. Environmental Pollution, 2012(161): 215—221.
- [22] Yele Sun, Guoshun Zhuang, Ying Wang, et al. The air-borne particulate pollution in Beijing: Concentration, composition, distribution and sources[J]. Atmospheric Environment, 2004(38): 5991—6004.
- [23] Linda S Johansson, Bo Leckner, Claes Tullin, et al. Properties of particles in the fly ash of a biofuel-fired circulating fluidized bed (CFB) boiler[J]. Energy and Fuels, 2008(22): 3005—3015.

- [24] Kayes D, Hochgreb S. Mechanisms of particulate matter formation in spark ignition engines: Effect of Engine Operating Conditions[J]. *Environmental Science and Technology*, 1999, 33(22): 3957—3967.
- [25] de Best C J J M, van Kemenade H P, Brunner T, et al. Particulate emission reduction in small-scale biomass combustion plants by a condensing heat exchanger[J]. *Energy and Fuels*, 2008(22): 587—597.
- [26] 姚宗路, 孟海波, 田宜水, 等. 抗结渣生物质固体颗粒燃料燃烧器研究[J]. *农业工程学报*, 2010, 41(11): 89—93.
Yao Zonglu, Meng Haibo, Tian Yishui, et al. Design and experiment on anti slagging biomass pellet fuel burner[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2010, 41(11): 89—93. (in Chinese with English abstract)
- [27] 罗娟, 侯书林, 赵立欣, 等. 典型生物质颗粒燃料燃烧特性试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 220—226.
Luo Juan, Hou Shulin, Zhao Lixin, et al. Experimental study on combustion and emission characteristics of biomass pellets[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(5): 220—226. (in Chinese with English abstract)

Distribution characteristics of number and mass for particulate emission of biomass solid fuel combustion

Zhang Yongliang^{1,2}, Zhao Lixin¹, Yao Zonglu^{1*}, Tian Yishui¹, Meng Haibo¹, Zhang Xuemin²

(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 of China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The development of biomass solid fuel is one of the effective ways to reduce crop residue waste and coal combustion. However, the distribution about particulate emission of biomass solid fuel under combustion condition has no precise data. More specifically, there is no clear relationship between two variations (burning power and air content) and performance of particle distribution. In terms of different types of solid biomass fuels - corn straw, cotton stalks and wood, this paper focuses on characteristics about particulate emission of these three biomass fuels under the combustion test platform condition by using electrical low pressure impactor (ELPI). The solid biomass fuels manufactured and developed by Chinese Academy of Agricultural Engineering were compressed into a cylinder with diameter of 8 mm, length of 10~30 mm. In the first experiment, waste gas and particle distribution can be measured through combustion of such three biomass fuels. To be more precise, burning power as variation controlled by adjusting the feeding quantity was set to 10, 12, 14, 16 and 18 kW, and records lasted 30 minutes after the stable power. The result of the first experiment showed the particle emission of three kinds of fuels was the least at the power of 14 kW. To further explore the relationship between air content and distribution of particulate, in the second experiment the air intake as the variation was set to 6, 7, 8 m/s under the power of 14 kW condition. In this experiment, waste gas and particle distribution was measured and recorded in 30 minutes by ELPI at each wind speed after stable combustion. The measuring instrument, ELPI, which divided particles range into 12 grades, from 0.003~10 μm , can record each class of particle number and mass instantaneously. It focused on the particles' number concentration distribution and mass concentration distribution of three kinds of biomass forming fuel. The results showed that the peak particle number concentration of three kinds of fuels mainly concentrated in 4, 5, 6, 7 levels, which were more than 70% in the total number of particulate matters. The distributions of peak particle mass concentration were in 7 and 12 levels that were more than 50% in the total mass of particulate matters. With the increase of power, particulate matter emissions dropped at the beginning and then rose, crude membrane particles matter increased, and proportion of PM_{2.5} in the particles reduced 10%~20%. When the air content increased, PM decreased, but distribution trend remained. When excess air ratio was 1.5~1.7, the combustion of three kinds of solid biomass fuel was the best, and the particulate matters was the least.

Key words: fuels, particles, emission control, biomass, distribution

(责任编辑: 张俊芳)