

# 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<sup>1,2</sup>, 赵立欣<sup>1</sup>, 姚宗路<sup>1</sup>, 田宜水<sup>1</sup>, 孟海波<sup>1</sup>, 张学敏<sup>2</sup>

(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14kW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。

## 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<sup>[1-2]</sup>。

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<sup>[3-5]</sup>

。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%<sup>[6-7]</sup>。

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、CO<sub>2</sub>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<sup>[8-9]</sup>。

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<sup>[10-12]</sup>, 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<sup>[13-15]</sup>。

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amp;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8mm, 长度10 ~ 30mm, 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

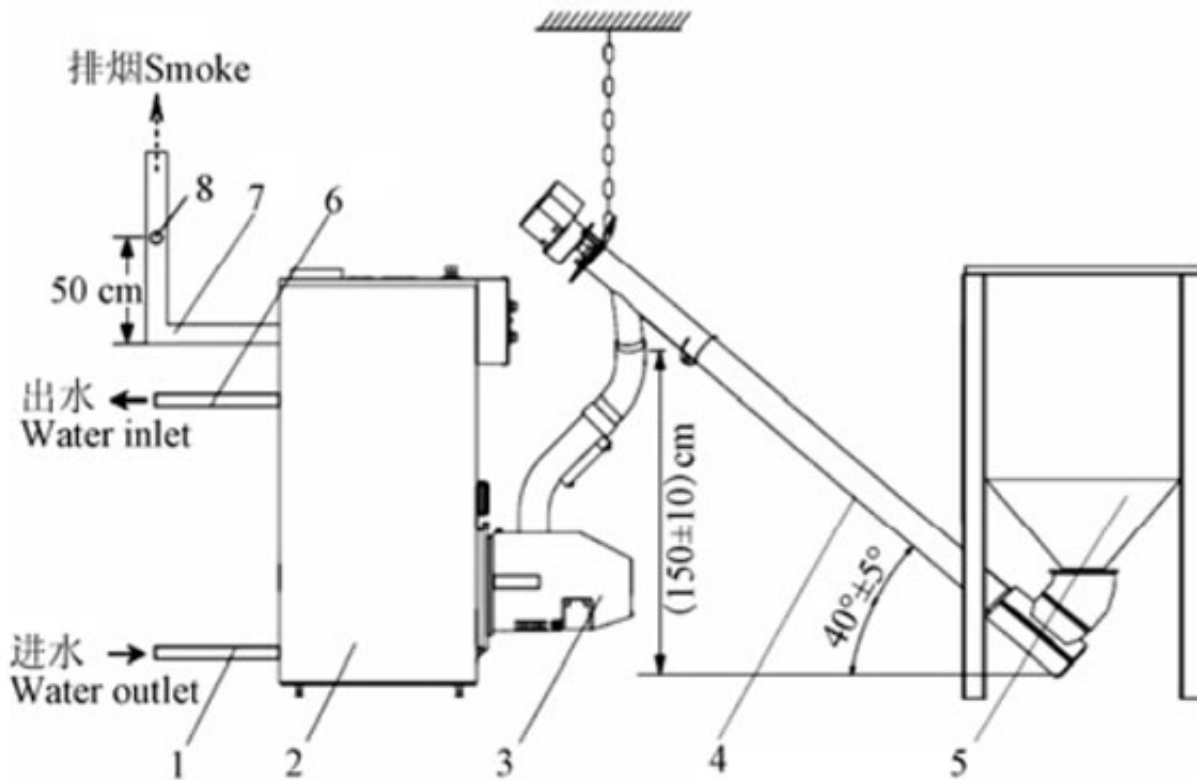
Table 1 Proximate analysis, ultimate analysis, and heat value of 3 kinds of pellets

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 <sup>-1</sup> )
	M <sub>ad</sub>	A <sub>ad</sub>	V <sub>ad</sub>	F <sub>C,ad</sub>	C <sub>ad</sub>	H <sub>ad</sub>	N <sub>ad</sub>	S <sub>ad</sub>	
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<sub>ad</sub>为一般样本水分 (Moisture)；A<sub>ad</sub>为灰分 (Ash)；V<sub>ad</sub>为挥发分 (Volatiles)；F<sub>C,ad</sub>为固定碳 (Fixed carbon)；C<sub>ad</sub>为碳元素含量 (Carbon content)；H<sub>ad</sub>为氢元素含量 (Hydrogen content)；N<sub>ad</sub>为氮元素含量 (Nitrogen content)；S<sub>ad</sub>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20kW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<sup>[17]</sup>。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18kW5种功率，在风机风速最大（8m/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30min。

2) 选取3种燃料颗粒物排放最佳功率14kW，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、8m/s3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30min。

## 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8m/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 <sub>2</sub> %	CO%	NO%	NO <sub>2</sub> %	O <sub>2</sub> %	颗粒物数量 Particulate matter number/(个·cm <sup>-3</sup> )	颗粒物质量 Particulate matter mass/(mg·m <sup>-3</sup> )	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 <sup>6</sup>	77.3	2.5
	12	9.5	0.055	0.02	0.0007	11.1	3.27×10 <sup>6</sup>	78.9	2.0
	14	11.0	0.038	0.0288	0.00117	9.0	2.80×10 <sup>6</sup>	74.8	1.7
	16	16.3	5.752	0.0187	0.00071	4.7	7.77×10 <sup>6</sup>	227.5	1.3
棉杆 Cotton stalk	18	16.0	5.5754	0.0170	0.00086	3.8	9.19×10 <sup>6</sup>	303.8	1.2
	10	10.0	0.059	0.03	0	11.0	2.91×10 <sup>6</sup>	90.8	2.0
	12	13.0	0.03	0.0335	0	9.0	1.52×10 <sup>6</sup>	60.7	1.7
	14	14.2	0.021	0.034	0	7.2	0.85×10 <sup>6</sup>	44.0	1.5
木质 Wood	16	17.3	3.2	0.015	0	3.0	3.41×10 <sup>6</sup>	176.0	1.2
	18	18.0	3.325	0.02	0	2.0	3.74×10 <sup>6</sup>	197.8	1.1
	10	9.0	0.17	0.008	0	10.8	6.68×10 <sup>6</sup>	115.2	2.0
	12	11.5	0.1456	0.009	0	9.1	6.59×10 <sup>6</sup>	155.0	1.7
木质 Wood	14	15.0	0.088	0.0095	0	6.8	0.28×10 <sup>6</sup>	77.4	1.5
	16	17.0	0.09	0.008	0	2.9	2.28×10 <sup>6</sup>	101.7	1.2
	18	18.3	2.9	0.0036	0	1.2	1.59×10 <sup>6</sup>	962.0	1.1

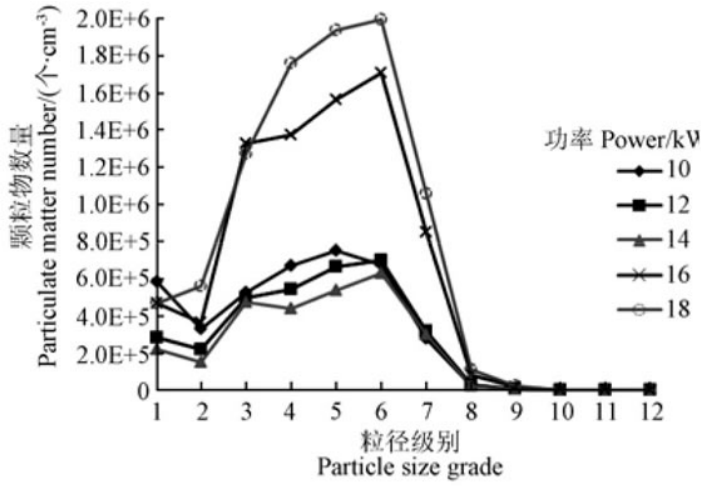
### 2.2功率对颗粒物排放分布影响

PB20燃烧器的运行功率区间为10~20kW，风机风速在8.0m/s时，即过量空气系数 2.0条件下，试验分析功率对颗粒物排放分布的影响。

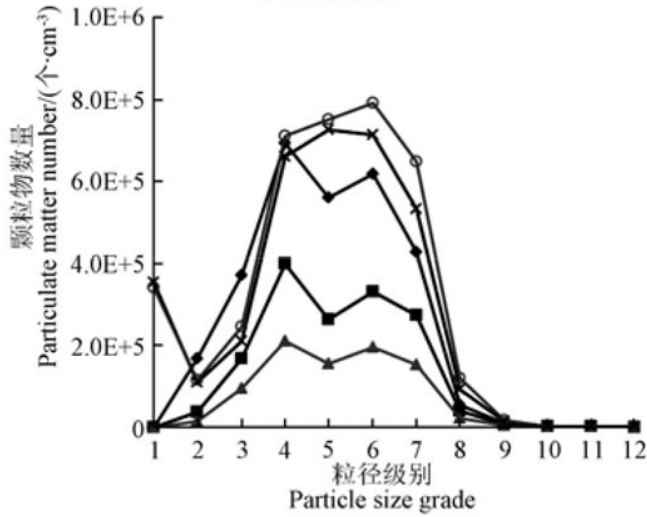
#### 2.2.1三种成型燃料在不同功率下颗粒物数量分布

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。

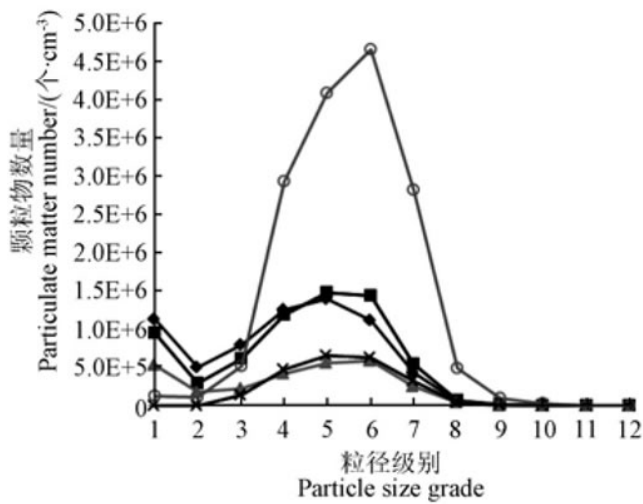




a. 玉米秸秆  
a. Corn straw



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

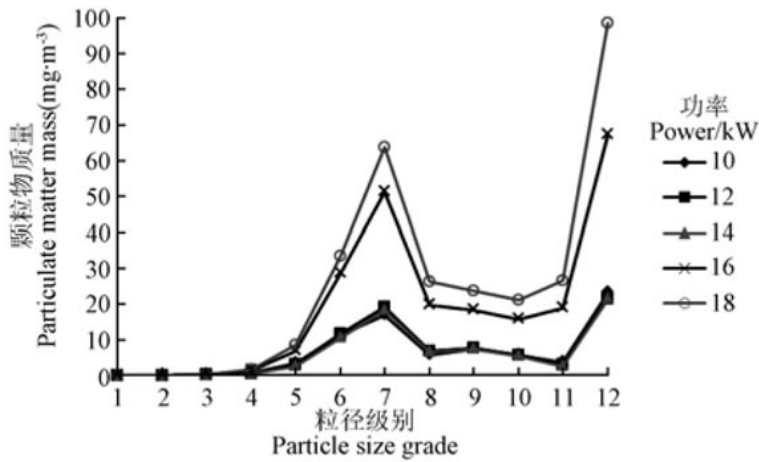
对于玉米秸秆（图2a），10kW时，颗粒物数量峰值在第5级。12kW时，颗粒物分布的各级别数量降低，峰值出现在第6级。当功率为14kW时，颗粒物数量进一步减少，呈双峰分布，峰值第3级和第6级。功率提高到16和18kW时，数量峰值仍为第6级。

对于棉杆成型燃料（图2b），10、12、14kW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、18kW时，分布峰值在第6级，说明颗粒物粒径变大。

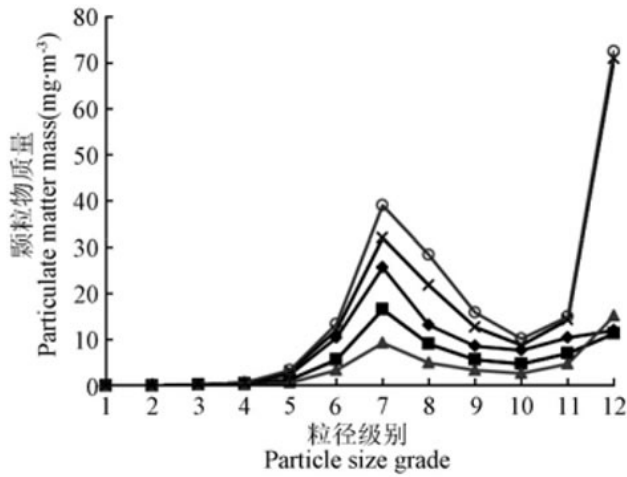
对于木质燃料（图2c），前4种工况下，分布呈双峰状态，第1级和第5级颗粒出现峰值，功率增加，数量分布有向大粒径方向转移趋势。当功率提高到18kW时，3种燃料的颗粒物总数量急剧增多，颗粒物数量的峰值都转变为第6级。

### 2.2.2 三种成型燃料在不同功率下颗粒物质量分布

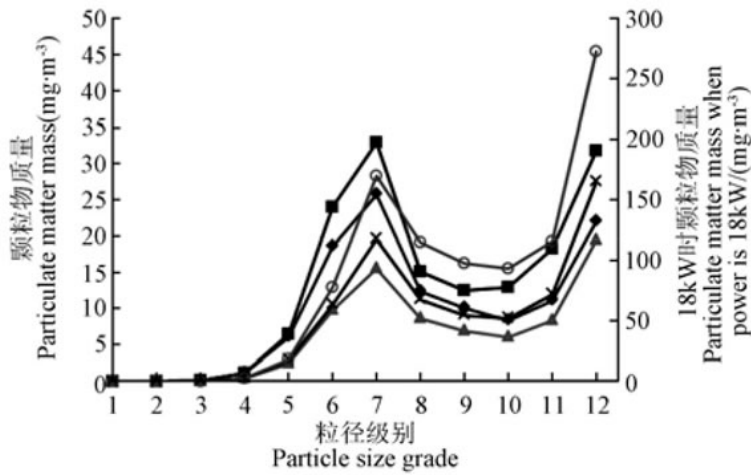
3种成型燃料在不同功率下颗粒物质量分布如图3。随着功率增加，颗粒物的质量先减小后增大，但大粒径颗粒物质量所占比例增加。



a. 玉米秸秆  
a. Corn straw



b. 棉杆  
b. Cotton stalk



c. 木质  
c. Wood

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<sub>2.5</sub>（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12kW功率下，颗粒物质量的峰值在第7级，在14、16、18kW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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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14kW时颗粒物排放最少，14kW时，在风速为6、7和8m/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。

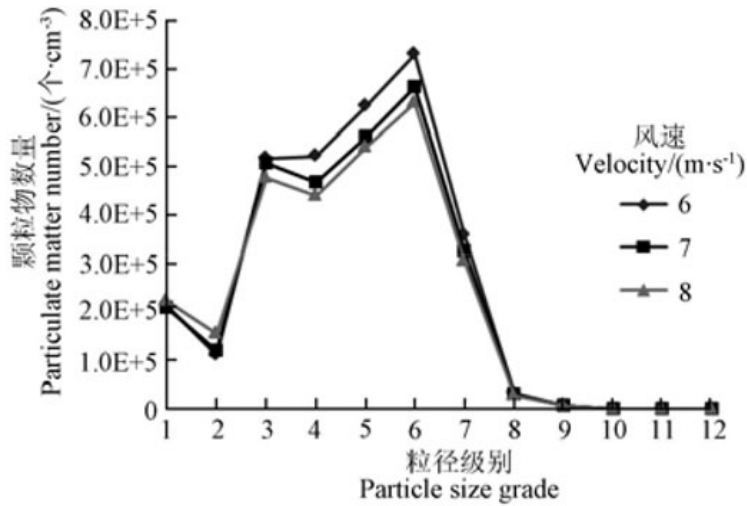
#### 2.3.1不同进气量下三种燃料颗粒物数量分布3种成型燃料在不同进气量下的颗粒物数量分布如图4。

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8m/s时，颗粒物总量最小。风速从6m/s增加到8m/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%。

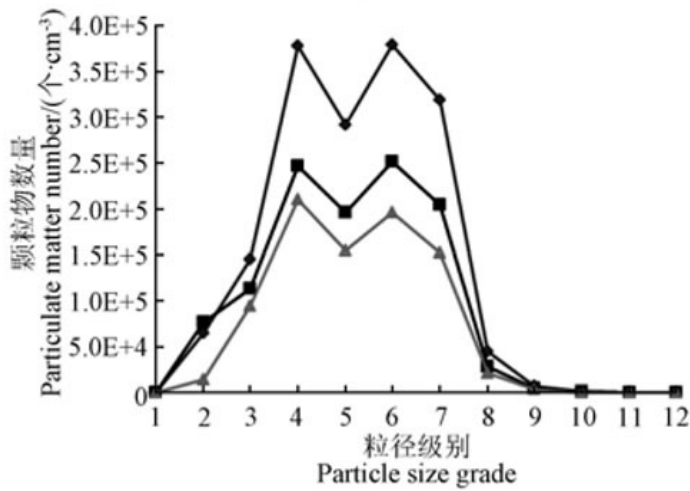
棉杆成型燃料（图4b），空气量对颗粒物数量分布趋势无影响，峰值在第4级和第6级，风速增加，颗粒物总数量下降。风速从6m/s增加到8m/s，过量空气系数从1.1提高到1.5，3种模态颗粒物数量都减少了50%左右。

木质燃料（图4c），在风速为7m/s时（过量空气系数1.3），颗粒物排放最小。风速从6m/s增加到7m/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%。

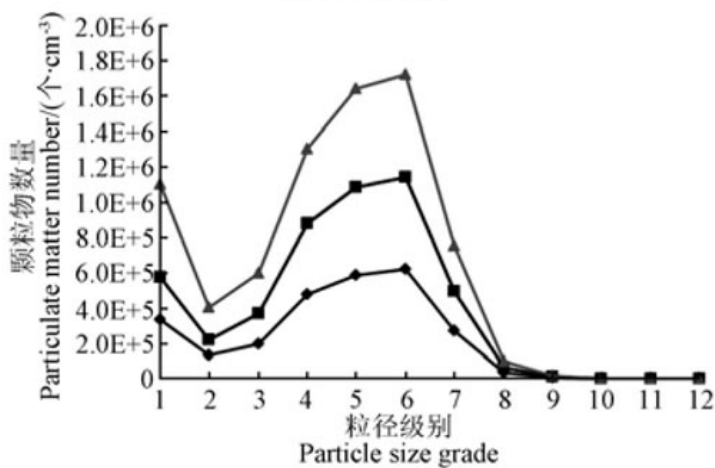




a. 玉米秸秆  
a. Corn straw



b. 棉杆  
b. Cotton stalk

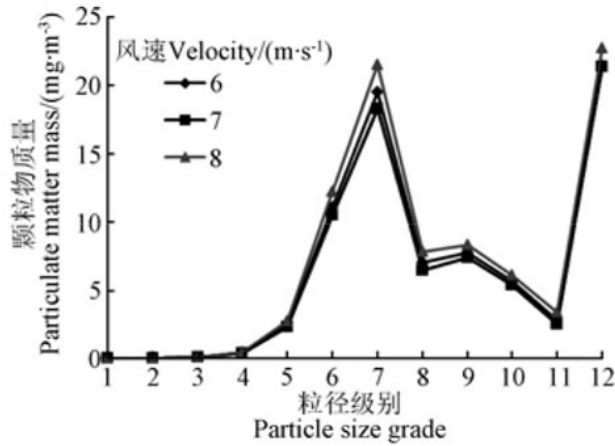


c. 木质  
c. Wood

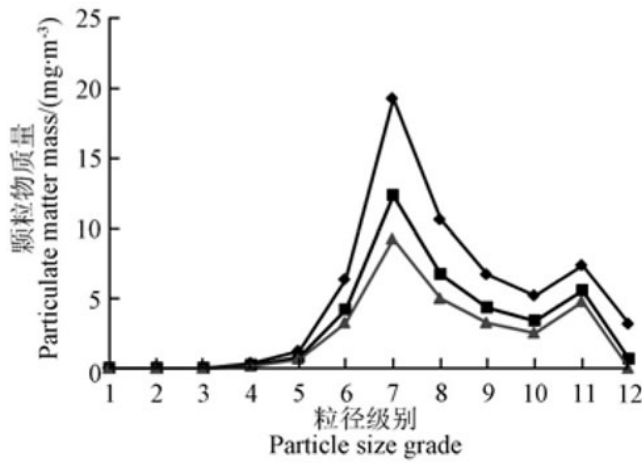
图4 进风量对三种生物质成型燃料颗粒物数量浓度影响  
Fig.4 Influence of air to three biomass fuel particle number concentration

### 2.3.2 三种成型燃料在不同进气量下颗粒物质量分布

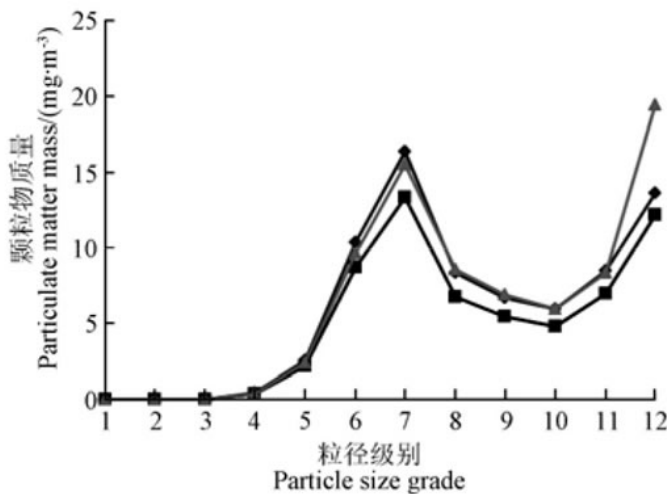
3种成型燃料在不同进气量下的颗粒物质量分布如图5。



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。风风速从6m/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%。

PM2.5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6m/s增加到8m/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。PM2.5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6m/s时颗粒物最多和7m/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%。PM2.5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℃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100~600nm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1μm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、14kW3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℃，排烟温度分别为105、123和144℃。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、18kW时，炉膛温度在1000℃左右，排气温度180℃以上，3种燃料燃烧时的过量空气系数急剧下到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18kW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<sup>[26]</sup>。并且，清渣螺旋频繁的搅拌灰渣，掀起的扬灰也是造成粗模颗粒物增多的一个因素。

在14kW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，粗模颗粒物也增多。

## 3结论

1) 在不同功率下（10、12、14、16和18kW），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14kW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<sub>2.5</sub>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8m/s时颗粒物排放最少。木质的在7m/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.
- [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.
- [3]HJ3095-1982，大气环境标准[S].
- [4]霍雨佳.PM<sub>2.5</sub>对人体健康的危害[J].生命与灾害，2011(12)：15.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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)：288-194.
- [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.
- [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 PM2.5 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.

[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 .

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/107545.html>