

生物质固体成型燃料燃烧颗粒物排放分布特性

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颗粒物排放粒径分布不清、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(ELPI)设备, 对玉米秸秆、棉杆、木质等三种固体生物质成型燃料开展了燃烧颗粒排放研究, 重点研究了三种生物质成型燃料在不同功率下和不同进气量下的颗粒物的数量浓度分布和质量浓度分布。试验结果表明, 三种燃料的颗粒物的数量浓度峰值主要集中在5、6、7三级, 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, 在14KW时颗粒物排放最少。随着进气量的增加, 颗粒物总量减少。

0引言

我国具有丰富的农作物秸秆, 每年可收集秸秆总量达6.87亿吨, 约2.15亿吨秸秆被焚, 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三种模态

存在, 其空气动力学直径在0.01~10 μm之间^[3-5]

。据统计, 我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^[10-13]

, 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^[14-16]。

因此, 本文采用低压电子冲击仪(ELPI), 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、木质三种生物质固体成型燃料开展燃烧试验, 对三种燃料燃烧后的颗粒物排放的数量浓度和质量浓度开展研究。

1试验燃料和方法

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、木质三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, 颗粒燃料均压缩加工为圆柱型, 直径8mm, 长度10~30mm, 三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

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

| 原料 | 工业分析/% | | | | 元素分析% | | | | 低位发热量 /kJ·kg ⁻¹ |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|
| | M _{ad} | A _{ad} | V _{ad} | Fc _{ad} | C _{ad} | H _{ad} | N _{ad} | S _{ad} | |
| 棉秆 | 7.53 | 12.10 | 72.22 | 8.15 | 39.99 | 5.30 | 1.15 | 0.58 | 15707 |
| 玉米秸秆 | 7.64 | 12.08 | 71.03 | 9.25 | 40.66 | 5.44 | 1.10 | 0.56 | 16254 |
| 木质 | 7.45 | 1.59 | 85.24 | 5.72 | 46.75 | 6.19 | 0.26 | 0.59 | 18308 |

1.2 仪器与设备

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。实验装置示如图1。

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^[17]，最大功率为20KW的上进料式燃烧器（PB-20）。

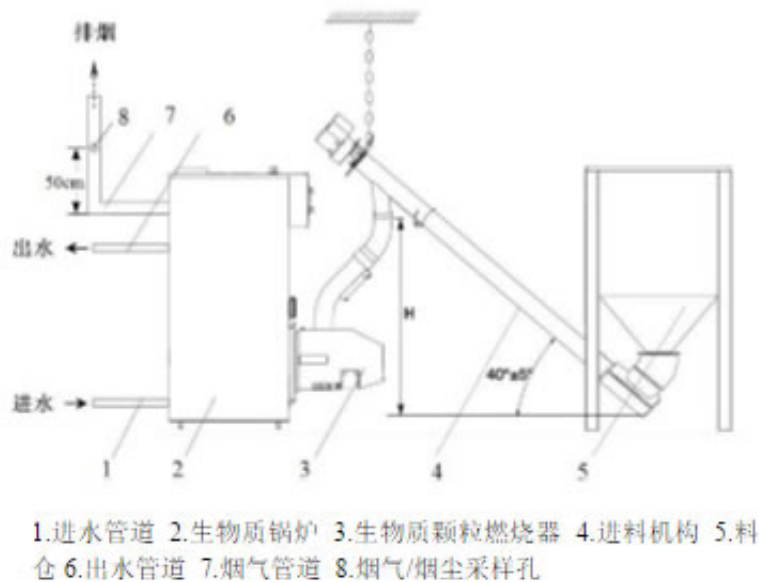


图 1 生物质燃烧试验平台

Fig.1 Biomass combustion test platform

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），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^[18]。

表 2 ELPI 的粒径分级

| Tab.1 particle size grading in ELPI | | | | μm |
|-------------------------------------|----|--------------|------|----|
| 状态 | 级别 | 粒径范围 | 直径 | |
| 核 | 1 | 0.007~0.029 | 0.02 | |
| 膜 | 2 | 0.029~0.057 | 0.04 | |
| 态 | 3 | 0.057~0.101 | 0.08 | |
| | 4 | 0.101~0.165 | 0.13 | |
| 积 | 5 | 0.165~0.255 | 0.21 | |
| | 6 | 0.255~0.393 | 0.32 | |
| 聚 | 7 | 0.393~0.637 | 0.50 | |
| | 8 | 0.637~0.99 | 0.79 | |
| 膜 | 9 | 0.990~1.610 | 1.26 | |
| | 10 | 1.610~2.460 | 1.99 | |
| 态 | 11 | 2.460~3.970 | 3.13 | |
| | 12 | 3.970~10.150 | 6.35 | |

1.3 试验参数和方法

1.3.1 试验参数

试验所测的参数为颗粒物排放的数量浓度和质量浓度。除了总颗粒数量浓度和质量浓度外，主要测不同粒径（12个级别）颗粒物的数量浓度和质量浓度。数量浓度是指在每平方厘米内含颗粒物个数。质量浓度是指在每平方米内含颗粒物质量。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 试验方法

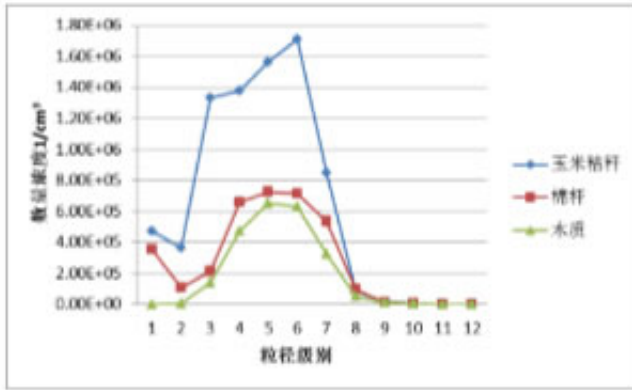
1) 在实验室平台上分别燃烧三种生物质成型燃料，通过控制进料速度从而控制进料量，标定10KW、12KW、14KW、16KW、18KW五种功率，在风机风速最大，空气量充足的情况下分别测量五种功率下颗粒物分布情况，每种功率在稳定时，测量记录30分钟。

2) 选取三种燃料颗粒物排放最佳功率，在此功率下，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 m/s、7m/s、8m/s三中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分钟。

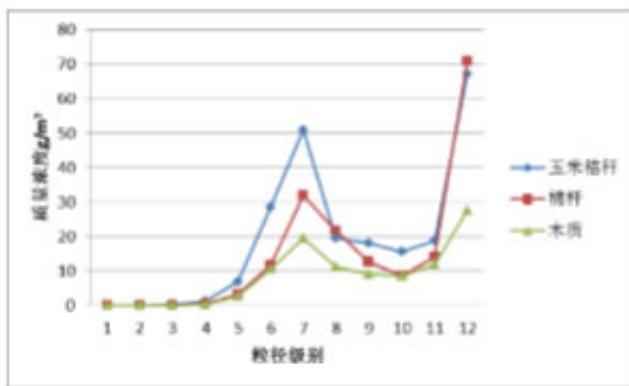
2 结果与分析

2.1 在正常标定功率下颗粒物排放分布

PB20燃烧器设计在16KW的功率下热效率最高，16KW为正常标定下的功率。三种燃料在16KW功率下的颗粒物排放分布如图2。



a 数量浓度分布



b 质量浓度分布

图 2 16KW 标定功率下三种燃料颗粒物分布

Fig.2 particle distribution of three fuel in 16KW

在16KW功率下，三种燃料的颗粒物数量总浓度分别为 $7.77 \times 10^6/\text{cm}^3$ 、 $3.41 \times 10^6/\text{cm}^3$ 、 $2.28 \times 10^6/\text{cm}^3$ 。木质最少，玉米秸秆最多。由图2-a可以看出，玉米秸秆的颗粒物数量主要集中在3、4、5、6级，峰值是第6级，棉杆和木质的颗粒物数量主要集中在4、5、6、7级，棉杆峰值在第5级，木质峰值在第5级。

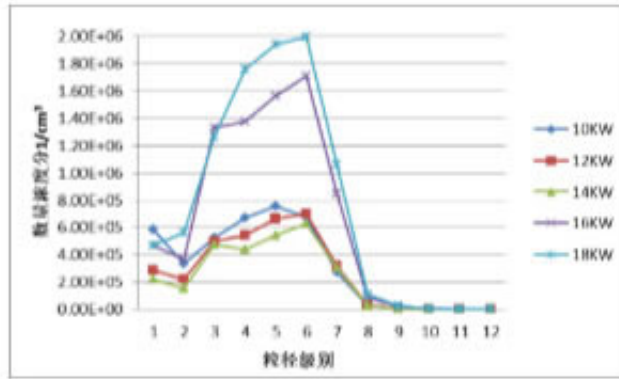
在16KW功率下，玉米秸秆、棉杆、木质燃料的颗粒物质量总浓度分别为 $227.5\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $176.2\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $101.7\text{mg}/\text{m}^3$ 。由图2-b可以看出，三种燃料的质量分布都是呈双峰状态，两个峰值都是在第7级和第12级。在此功率下三种燃料的P_{M2.5}（十级以下颗粒物）分别占总颗粒物质量的70.3%、59.5%、72.7%。

2.2功率对颗粒物排放分布影响

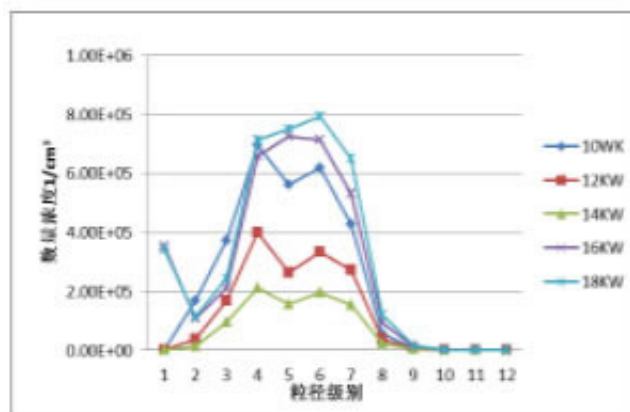
PB20燃烧器的运行功率区间为10~20KW，在空气量最大、风机风速在8.0.m/s条件下，试验分析功率对颗粒物排放分布的影响。

2.2.1三种成型燃料在不同功率下颗粒物数量浓度分布

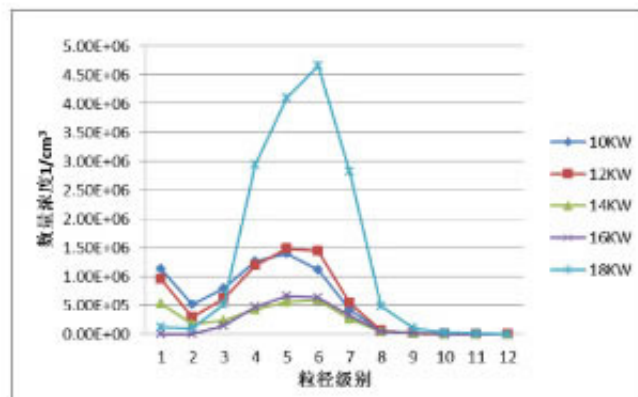
三种成型燃料在不同功率下颗粒物数量浓度分布如图3。随着进料量的增多、功率的加大，颗粒物的总数量都是先减小后增大。颗粒物分布的峰值向大粒径方向移动，表明进料量越多、功率越大，燃料燃烧后产生相对更大粒径颗粒。



a 玉米秸秆



b 棉杆



c 木质

图 3 三种成型燃料颗粒物数量浓度分布

Fig.3 particle number distribution of three molding fuel

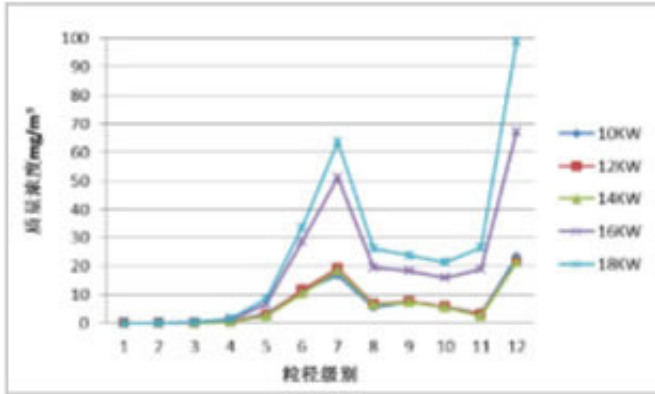
对于玉米秸秆，从图3-a可以看出，10KW时三种燃料颗粒物数量浓度呈双峰分布状态，第1级和第5级积为峰值。12 KW时，颗粒物分布的各级别数量降低，峰值出现在第6级。当功率为14KW时，颗粒物数量进一步减少，仍然呈双峰分布，峰值第3级和第6级。功率提高到16KW和18KW时，数量峰值仍为第6级。

对于棉杆成型燃料，如图3-b，10KW、12KW、14KW功率下颗粒物数量浓度都呈双峰分布状态，在第4级和第6级达到两个峰值。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。16KW时峰值变为第5级，18KW时的分布峰值在第6级。

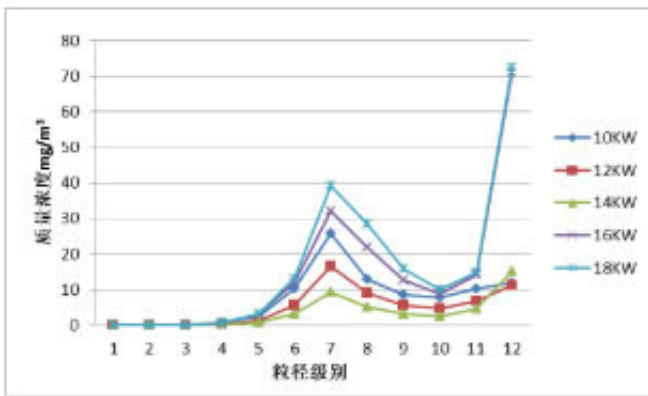
对于木质燃料，如图3-c三种工况下，分布成双峰状态，第1级核模态颗粒和第5级积聚模态颗粒出现峰值，功率增加，数量分布有向大粒径方向转移趋势。当功率提高到16WkW和18KW时，三种燃料的颗粒物总数量急剧增多，颗粒物数量的峰值都转变为第6级。

2.2.2 三种成型燃料在不同功率下颗粒物质量浓度分布

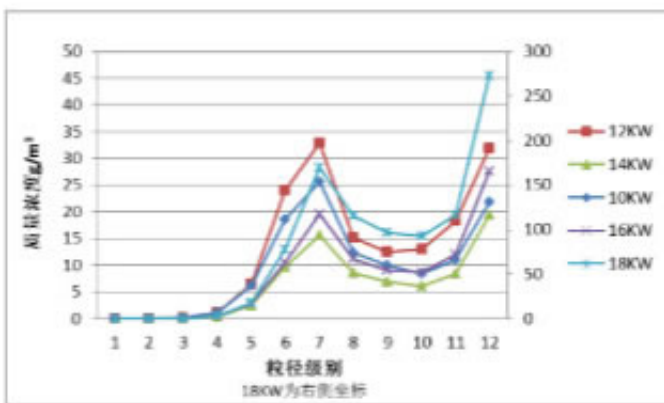
三种成型燃料在不同功率下颗粒物质量浓度分布如图4。



a 玉米秸秆



b 棉杆



c 木质

图 4 三种成型燃料颗粒物质量浓度分布

Fig.4 particle mass distribution of three molding fuel

从图4上可以看出，在所有功率下，三种燃料的颗粒物的质量分布都是一个趋势，有2个峰值。

对于玉米秸秆成型燃料，如图4-a，当功率在10KW、12KW、14KW时，功率的增加对颗粒物质量分布影响不大，总质量浓度在74~79mg/m³之间，16KW和18KW的颗粒物总质量急剧升高，总量分别为227.5mg/m³和303.8mg/m³，5种功率峰值分别是第7级和第12级。虽然大功率下颗粒物的质量浓度急剧增加，但是总体分布趋势没有发生太大变化。在5种工况下PM_{2.5}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，如图4-b，在10KW、12KW、14KW功率下，颗粒物各级质量浓度都随功率的增加而减少，总质量浓度在44~90.9mg/m³。10KW和12KW功率下，颗粒物质量浓度的峰值在第7级颗粒物，在14KW时，质量浓度分布出现了双峰值，为第7级和第12级。16KW和18KW功率下颗粒物总质量浓度明显提高，总量分别为175mg/m³和197.8mg/m³，分布呈双峰状态，峰值依然为第7级和第12级。棉杆燃料在五种工况下PM_{2.5}分别占总颗粒物的76%、70%、54.7%、52.7%、55.6%。

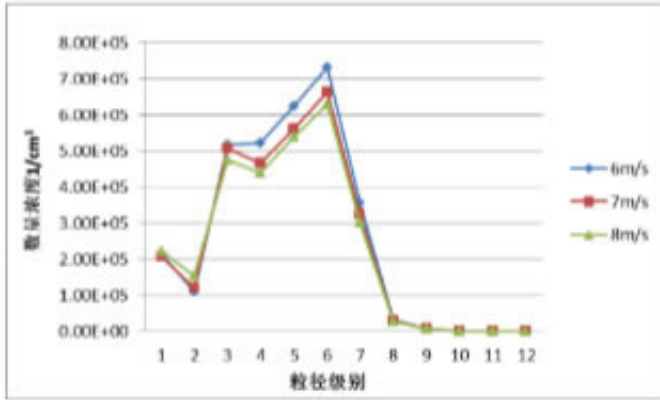
对于木质成型燃料，如图4-c，5种功率下颗粒物总质量浓度分别为115mg/m³、155mg/m³、77.5mg/m³、101.8mg/m³、962mg/m³。五种功率下颗粒物质量浓度分布都呈双峰分布，分别在第7级和第12级颗粒物出现峰值。在10KW、12KW、14KW功率下，随着功率增加颗粒物各级质量浓度降低，14KW达到最佳排放状态，16KW功率下各级颗粒物比14KW最大升高50%。当功率为18KW时，颗粒物质量浓度急剧增多，木质燃料排放的PM_{2.5}在五种工况下分别占总颗粒物的71.3%、67.7%、64%、61.3%、59.5%。

2.3 进气量对燃料颗粒物排放分布的影响

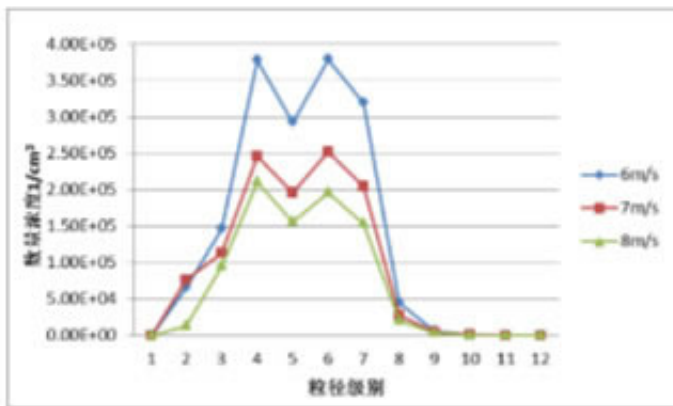
在相同功率下，不同的风机风速会导致不同的空气量与燃料的配比。更多的空气能使燃料燃烧后的颗粒物进一步被氧气氧化，从而改变颗粒物的数量和分布。而且，风速不同改变燃烧器内部的气流运动，改变燃烧环境，对颗粒物的生成和分布也产生一定影响。选择14KW最佳燃烧功率下，研究空气量对颗粒物排放的影响。

2.3.1 不同进气量下三种燃料颗粒物数量浓度分布

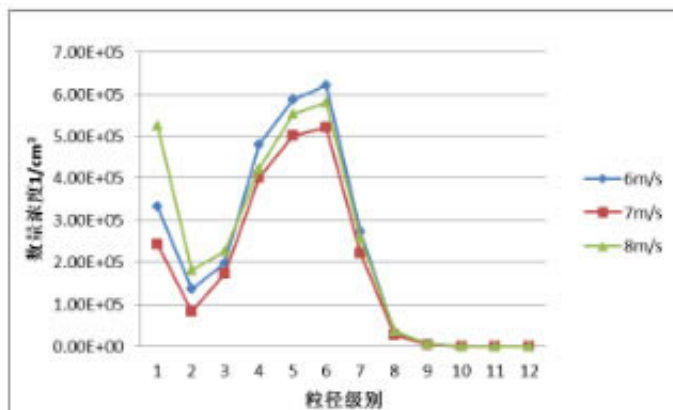
三种成型燃料在不同进气量下的颗粒物数量浓度分布如图6。



a 玉米秸秆



b 棉杆



c 木质

图 5 进风量对三种生物质成型燃料颗粒物数量浓度影响

Fig.6 Influence of air to three biomass fuel particle number concentration

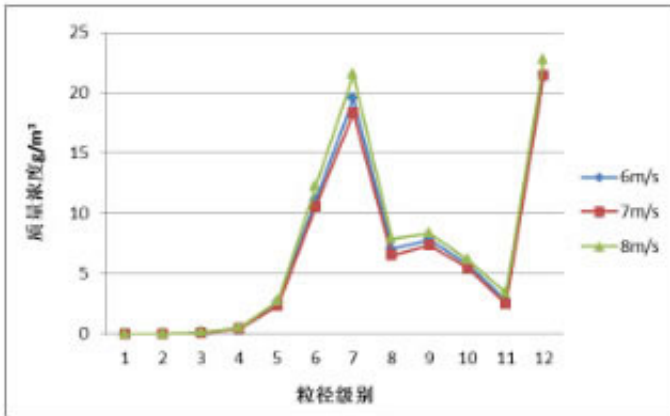
玉米秸秆成型燃料图5-a，进风量对颗粒物数量分布趋势无影响，峰值都是第3级和第6级，但颗粒物总体的数量浓度呈下降趋势，在风速为8m/s时，颗粒物总量最小。风速从6m/s增加到8m/s，第1、2级的核模态颗粒物数量浓度增加了11.8%，3~9级积聚模态颗粒物数量浓度减少13.2%，10~12级粗模态颗粒物数量浓度减少12.7%。

棉杆成型燃料图5-b，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，颗粒物总数量浓度下降，在风速为8m/s时，颗粒物总量最小。风速6m/s时颗粒物最多和8m/s时颗粒物最少相比较，第1级和第2级的核模态颗粒物数量浓度减少了78.8%，3~9级积聚模态颗粒物数量浓度减少46.4%，10~12级粗模态颗粒物数量浓度减少47.6%。

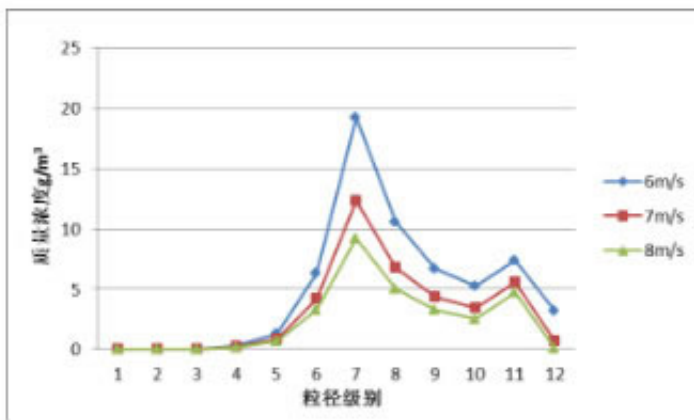
木质燃料图5-c，在风速为7m/s时，颗粒物排放最小。风速6m/s时颗粒物最多和7m/s时颗粒物最少相比较，第1级和第2级的核模态颗粒物数量浓度降低了30.4%，3~9级积聚模态颗粒物数量浓度减少15.8%，10~12级粗模态颗粒物数量浓度减少14.8%。

2.3.2 三种成型燃料在不同进气量下颗粒物质量浓度分布

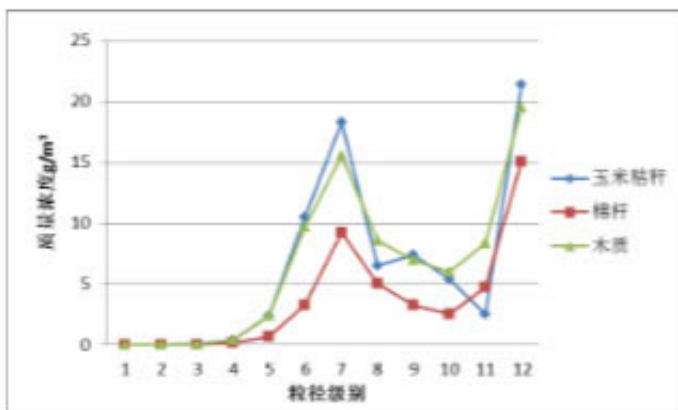
三种成型燃料在不同进气量下的颗粒物数量浓度分布如图7。



a 玉米秸秆



b 棉杆



c 木质

图 6 进风量对三种生物质成型燃料颗粒物质量浓度影响

Fig.6 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浓度分布影响图6-a，颗粒物质量峰值都在第7级和第13级。风速8m/s时颗粒物最多和7m/s时颗粒物最少相比较，第1、2级核模态颗粒物的质量浓度升高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浓度降低9%。PM2.5的质量浓度降低14%。

空气量对棉杆燃料颗粒物排放的质量浓度分布影响图6-b，颗粒物质量峰值都在第7级。风速6m/s时颗粒物最多和8m/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浓度降低76.7%，3~9级积聚模态的颗粒物质量浓度降低50.6%，10~12级粗模态颗粒物质量浓度降低53%。PM2.5的质量浓度降低51.5%。

空气量对木质燃料颗粒物排放的质量浓度分布影响图6-c，颗粒物质量峰值都在第7级和第13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浓度升高36%，3~9级积聚模态的颗粒物质量浓度降低18%，10~12级粗模态颗粒物质量浓度降低14.3%。PM2.5的质量浓度降低18%。

2.4 讨论

在五种不同功率下三种生物成型燃料的颗粒物数量浓度分布主要集中在4~7级的积聚模态的颗粒物，占总数量的70%以上。三种燃料的颗粒物质量浓度分布除了积聚模态还有10~12级的粗模态颗粒物，两种形态的颗粒物的质量浓度占总质量浓度的90%以上。在10KW、12KW、14KW三种功率下，三种生物质成型燃料的各级颗粒物都随着功率的增大而降低，这是由于功率增大，导致炉膛温度升高(分别为770、820、900)，从而排烟温度升高(分别为105、123、144)，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，并且由于功率增加，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^[18,19]，总体的数量下降。但是继续增大功率，颗粒物无论数量浓度还是质量浓度都急剧上升，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，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造成的。

在14KW时，三种燃料随着风机风速的增大、进气量的增加，颗粒物的数量浓度和质量浓度都成下降趋势。对于玉米秸秆而言，风速增加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，风速增加使得三种模态颗粒物都减少。对于木质成型燃料而言，虽然总体趋势是颗粒物随进气量增大而减少，但并不是绝对的线性的关系。风速变大时，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浓度和质量浓度都减少，这是因为进气量增加，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粗颗粒物，也可在排气过程中继续氧化燃烧成小的颗粒物。所以玉米秸秆和木质成型燃料随着风速增加，积聚模态颗粒物减少，核模态颗粒物增加。由于木质燃料挥发分和含碳量比另外两种高，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，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) 在标定功率16KW工况下，玉米秸秆颗粒物排放最大，其次是棉杆，木质最小。玉米秸秆的颗粒物数量主要分布在3-6级，棉杆和木质的颗粒物数量主要分布在4-7级。三种燃料的颗粒物质量主要是双峰分布，都在第7级和第12级。

(2) 在不同功率下，三种成型燃料的颗粒物排放数量浓度和质量浓度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。三种成型燃料颗粒物数量峰值物峰值主要集中在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。PM2.5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，进气量增多，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。玉米秸秆和木质的核模态颗粒物随着进气量增大而增多，积聚模态和粗模态相反。

[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]HI3095—82, 大气环境标准[S].
- [4]霍雨佳.PM2.5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, 王锴一, 王淑兰, 柴发合.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.
- [10]He feng Zhang, Xing nanye, Tiantao Cheng, Jianmin Chen.Alaboratory study of agriculturalcrop residue combustion in China:Emission Factors and Emissioninventory.[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].复旦大学, 2009.
- [12]Da wei Hu, Xing nanye, He feng Zhang, etc. Nano-sizeDistribution of Aerosol from Agricultural Residues Burning and Matched to Optical Properties:ALaboratory Study Environment[J]ScienceandTechnolog, Submitted.
- [13]GuofengShen, Shu Tao. Reductions in Emissions ofCarbonaceous Particulate Matter andPolycyclic Aromatic Hydrocarbons from Combustion of BiomassPellets inComparison with Raw[J]Fuel Burning. Environ. Sci. Technol. 2012, 46, 6409 – 6416.
- [14]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
- [15]姚宗路, 赵立欣, Ronnbckm, 孟海波, 罗娟, 田宜水.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.
- [16]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.
- [17]徐飞, 赵立欣, 孟海波, 侯书林, 田宜水.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.
- [18]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.
- [19]Kayes D, Hochgreb S. Mechanisms of Particulate MatterFormation in Spark-Ignition Engines. 1. Effect of Engine Operating Conditions[J]. Environmental Science and Technology. 1999, 33(22): 3957-3967.
- [20]C.J.J.M.de Best, H.P.van Kemenade, T, etc. ParticulateEmission Reduction in Small-Scale BiomassCombustionPlants by a Condensing Heat Exchanger[J]Energy & Fuels 2008, 22, 587 – 59.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/105762.html>