

生物质固体成型燃料燃烧的NO和CO排放研究

赵欣¹, 李慧¹, 胡乃涛¹, 余鹏¹, 张学敏¹, 姚宗路²

(1. 中国农业大学工学院, 北京100083; 2. 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)

摘要: 针对国内固体生物质成型燃料燃烧过程中排放NO、CO分析不清晰, 影响因素研究不足等问题, 在生物质燃烧试验平台上, 采用Testo350烟气分析仪, 对木质、棉杆和玉米秸秆3种固体生物质成型燃料分别展开了燃烧的气态排放物研究, 重点研究了3种生物质成型燃料在不同燃烧器负荷和进气量下的NO和CO的排放情况。试验结果表明: 3种燃料的NO排放量均在0.05%以下, CO也不高于1%。3种燃料的气态排放物总体趋势为随着燃烧器负荷的增大, NO和CO的排放量增多, 随着进气量的增加, 气态排放物的含量减少。该研究可以为指导燃用生物质成型燃料锅炉的实际运行, 以优化生物质成型燃料的燃烧和排放提供参考。

0引言

目前的能源消耗

量中, 生物质能耗约占世界总能耗的

14%, 仅次于煤、石油、天然气, 居第四位^[1]

。我国的生物质资源也非常丰富, 随着经济的发展, 农作物秸秆产量也在逐年递增^[2], 在我国生物质资源中占据十分重要的地

位。现阶段很多地区都

没有专门用来燃用生物质燃料的设备, 造成大

量未完全燃烧的CO及NO_x等有害气体排放到大气中, 不仅造成环境污染, 还对人类的身体造成很大的危害。

生物质固体成型燃料燃烧产生的烟气种类和排放量由燃料的元素含量及燃烧工况决定。生物质燃料的元素以C、H、O为主, 含有少量的N、S, 并且N、S含量与煤等燃料相比, 几乎可以忽略不计, 排放的烟气中主要包括CO、NO、SO₂和NO₂较少^[3]

。近年来国内外均有一些对生物质成型燃料气态排放物相关的研究, 其中国外学者大多是对木质成型燃料进行研究, 而国内研究较多的是稻壳、小麦秸秆和林业废弃物等的燃烧排放情况, 对玉米秸秆、棉杆等生物质成型燃料燃烧的气态排放物研究较少^[4]

。我国的生物质成型燃料与国外的燃料在元素含量和工业分析等方面的差异使得燃烧特性和排放也不一致, 需要针对其特性进行研究^[5]。

本文运用农业部规划设计研究院研制的PB-20型生物质燃烧器, 使用3种生物质颗粒燃料, 在不同燃烧器负荷和空气流速下进行燃烧, 监测烟道气体排放状况, 分析生物质颗粒燃料的主要气态排放物特性以及设备进料进风等控制参数对气态排放物的影响。针对相应生物质颗粒燃料优选燃烧设备的最佳控制参数, 为改进气态排放状况, 减少CO、NO的排放提供理论基础, 从而达到减排的目的。

1试验部分

1.1试验燃料

我国的生物质颗粒燃料主要以农作物秸秆为主, 本次试验选择木质、玉米秸秆和棉杆3种成型生物质燃料进行对比分析。3种颗粒燃料均被压缩成圆柱型, 长度10~30mm, 直径8mm左右。对3种生物质颗粒燃料进行工业分析、元素分析、热值测量, 结果如表1所示。

表1 3种生物质颗粒燃料的成分分析、元素分析和发热量

Table 1 Component analysis, elemental analysis, and calorific value of three kinds pellets

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	碳	氢	氧	氮	硫	
木质	7.44	0.93	87.64	3.99	49.35	7.98	33.75	0.13	0.42	18977
棉杆	5.06	11.91	72.28	10.75	40.77	7.04	33.58	1.16	0.50	15966
玉米秸秆	7.13	11.88	73.81	7.18	40.47	7.00	32.18	0.92	0.43	16048

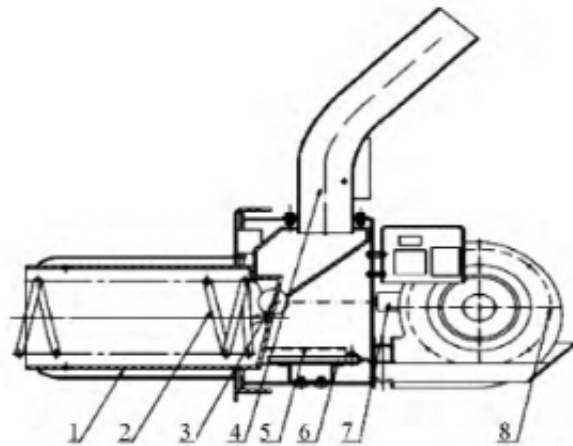
1.2 仪器与设备

1.2.1 生物质固体成型燃料燃烧试验平台

生物质固体成型燃料燃烧试验平台是以生物质燃烧器和锅炉为核心，集料仓，进料装置，控制箱，风机和记录软件等为一体的科研平台^[6]

。其中，进料的速度以及燃烧时配风量的大小均可通过操作软件来进行调控，在燃烧运行时，可以实现自动点火和配风，自动进料和清渣的功能^[7]

。其中燃烧器采用的是农业部规划设计研究院研发的生物质自动高效燃烧器，是一种上进料式的燃烧器，结构如图1所示。



1—燃烧筒；2—搅龙；3—火焰检测孔；4—进料筒；
5—点火筒；6—点火丝；7—火焰传感器；8—风机。

图1 PB20型生物质颗粒燃烧器结构示意图

Fig. 1 Biomass pellet burner structure diagram of type PB20

1.2.2 testo350烟气分析仪

试验采用的数据采集仪器为testo350烟气分析仪。配有各种传感器，标配的烟气探针长700mm，耐温为500℃。结合试验平台可以测量的数据有：出口处的O₂、CO₂

的含量以及体积分数、CO、NO、NO₂、SO₂浓度、冷却水流量及进出温度、烟道温度、烟道气体流量等烟气参数。

1.3 试验参数和试验设计

1.3.1 试验参数

本试验所测的参数为烟道气体中主要气态排放物的体积分数，燃烧过程中炉膛的温度，由此可以计算出燃烧时的过量空气系数和燃烧效率，并对NO和CO形成的因素进行分析。

1.3.2 试验设计

在生物质燃烧试验平台上分别燃烧3种生物质成型燃料，通过改变进料量来控制燃烧器负荷，高中低三种负荷对应的进料量分别为3，4，5kg/h。试验通过调整风机转速来改变空气流速，所用的风机转速可以从0调到90，但是风机采用正弦波调速，50级以下时风速过小，不能用于燃料的正常燃烧，因此选择50、70、90级三种风速，用风速仪可测得空气流速为6，7，8m/s。

2 试验结果

2.1 三种生物质成型燃料的气态排放物成分

由试验所测得的气态排放物各成分含量可知，气态排放物的成分主要是CO和NO_x，H₂S、SO₂

等有害气体成分的含量很少，原因是生物质燃料本身的S含量很少，SO₂的排放量会很低[8]。燃烧产生的NO_x通常是指NO和NO₂

，大量试验结果表明燃烧设备中产生的NO_x中90%约为NO，NO₂的含量仅占5%^[9]，所以本文主要研究CO和NO的排放规律。

2.2不同种类生物质颗粒的NO排放分析

2.2.1燃烧器负荷对NO排放影响

燃烧器负荷的不同导致NO排放的体积分数很大的差异，3种成型燃料在不同燃烧器负荷下的NO排放特性如图2所示。对于生物质成型燃料来说，燃烧生成的燃料型NO_x占NO_x

总排放

的65%~80%

，此外生物质燃料在燃烧时既有挥发分的均相燃烧，又有残焦的多相燃烧，形成挥发分NO_x和焦炭NO_x^[10]。

产生NO_x的主要影响因素为温度、氧浓度、燃料性质，本文主要从以下几个方面来进行分析。

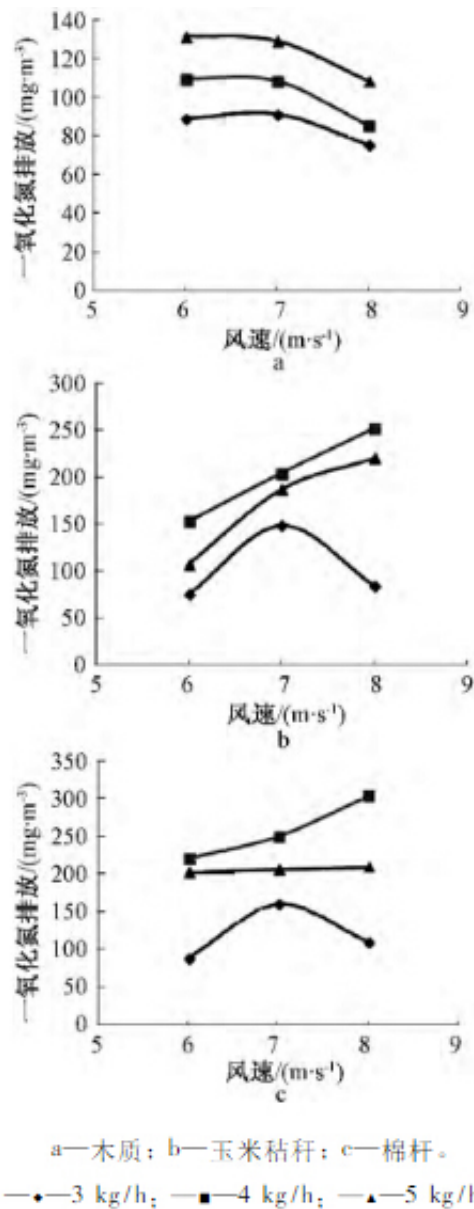


图2 三种生物质成型燃料的 NO 排放

Fig. 2 NO emission from three kinds of biomass briquette

图2a木质颗粒的NO排放说明，进料量增多时燃烧器负荷增大，NO的排放量也相应增大。原因是进料量增大时，挥发分析出量变多，然而木质颗粒燃料在几种工况下的过量空气系数均在1.6以上，燃烧所需要的氧气量充足，这段时间内产生的NO增多。

图2b玉米秸秆颗粒的NO排放显示出总体情况是NO生成量随着进料量的增加先增大后减小。当燃烧器负荷处于中小阶段时，过量空气系数都大于1.5，氧气量充足，挥发分的燃烧都比较完全，排放的NO也会随之增多。但是当进料量增加到5kg/h时，过量空气系数会减小到1.2以下，氧气量不足，不仅挥发分氮不易转化为NO，而且由于此时挥发分含量较高，挥发分氮的相互复合反应以及对NO的还原反应增强，造成NO排放量下降。

图2c棉秆的NO排放整体趋势表明，燃烧器负荷对NO排放的影响与玉米秸秆颗粒的排放规律相似，排放量都是随着燃烧器负荷的增加先升高后降低。

2.2.2 空气流速变化对NO排放影响

木质颗粒，3种燃烧器负荷下，空气流速从6m/s增大到7m/s时，NO浓度降低幅度较少，原因是虽然空气流速的增大

会使燃料与空气的混合时间减少，但燃烧器内的温度依然保持较高，NO生成量虽会有所降低，但是并不明显。由于燃料氮释出并转变成NO_x需要一定的反应时间，当空气流速继续增加到8m/s时，挥发分与空气的混合时间不足，NO的生成量相应的减少，同时空气流速的加快会使燃烧器内的温度降低，也会抑制NO的生成。

玉米秸秆颗粒，燃烧器在小负荷条件下时，空气流速从6m/s增加到7m/s，氧气量的增加使玉米秸秆颗粒的燃烧充分，NO排放也增大。增加到8m/s时，由于进料量较小，会有挥发分气体还未来得及燃烧就被气流迅速吹出，滞留时间不足以形成NO，使NO的生成量减小。中高负荷时，NO的生成量均是随着空气流速的增加而增加。原因是空气流速的增加使氧气量增大，燃烧变得充分，从而NO排放增多。此外过量空气系数的升高，可以降低玉米秸秆的结渣现象的发生，减少焦炭中的氮被表面的CO还原成N₂现象的发生，增加NO的排放量^[11]。

棉秆颗粒，在小负荷时，空气流速对生成NO的影响也与玉米秸秆颗粒一致，因为棉秆颗粒的挥发分含量与玉米秸秆颗粒相差不大。燃烧器在中等负荷下，NO的排放量随空气流速的变化与玉米秸秆颗粒相同。继续增大燃烧器负荷，NO的排放量大致保持不变，这说明在一定范围内，棉秆的NO排放基本上不受空气流速变化的影响，因为棉秆燃料本身的黏性大，容易结渣成块，受气体流速影响较小。

2.3不同种类生物质颗粒的CO排放分析

2.3.1燃烧器负荷对生物质燃料的CO排放影响

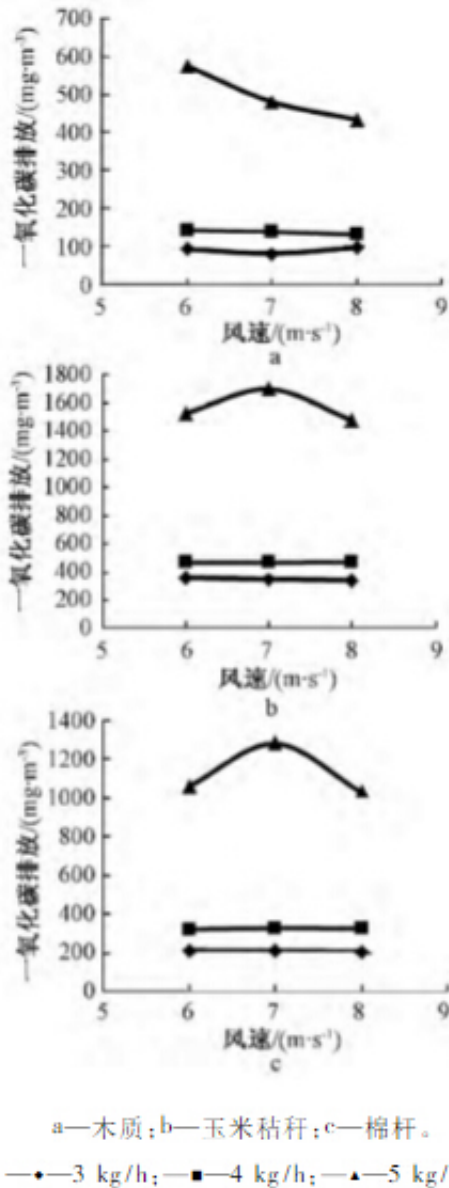


Fig. 3 CO emission from three kinds of biomass briquette

图3a木质颗粒，燃烧器负荷处于中小负荷时，CO的排放值较低。若燃烧器在高负荷下，烟道中的CO会急剧升高，因为进料量的增加使得过量空气系数减小，空气量明显偏小，生物质颗粒燃烧不充分，从而造成CO排放偏高。

图3b玉米秸秆颗粒，当进料量分别为3，4kg/h时，CO的排放值较小。若燃烧器负荷增大到使进料量为5kg/h，生物质颗粒的增多本身会引起灰渣量增多，加之空气量不够，固定碳与氧气的接触不充分，导致燃烧不充分，

CO排放也会增多。图3c棉秆颗粒，在燃烧器中小负荷下，排放的CO值变化也不大。而当进料量为5kg/h时，负荷的增大会使过量空气系数减小到1.2以下，此外由于棉秆的灰分含量较多，燃烧不充分会导致棉秆颗粒燃烧时结渣增多，又会减少固定碳与氧气的接触，生成的CO会大幅度增多。

2.3.2 空气流速对生物质燃料的CO排放影响

木质颗粒，燃烧器在小负荷下进料量较少，氧气量充足，燃料燃烧充分，整体来看空气流速对CO排放量的影响不大。在小负荷下空气流速为8m/s时，燃烧器内气流运动很快，未完全燃烧的挥发分气体被吹进烟道中，造成CO排放值稍微升高。

玉米秸秆颗粒，燃烧器在中小负荷下，空气流速的变化对其影响较小。若燃烧器负荷处于最大，生物质颗粒的增多会引起灰渣量增多，加之空气量不够，固定碳与氧气的接触不充分，燃烧不充分，CO排放也比中小负荷高，且CO的排放值在空气流速7m/s的工况下为最高。将空气流速调为6m/s，可以减缓燃烧器内的气流运动，增加固定碳与氧气的接触时间，减少CO的生成。空气流速增加到8m/s，可以增加进气量，提高过量空气系数，CO排放也会比与7m/s时少一些。

棉秆颗粒，燃烧器在中小负荷下，CO的生成量随着空气流速的变化不大，此时过量空气系数变化不大，空气流速的变化对燃烧效率的影响不明显，所以排放的CO值变化也不大。增大燃烧器负荷，过量空气系数减小到1.2以下，此外由于棉秆的灰分含量较多，燃烧不充分会导致燃烧时结渣增多，又会减少固定碳与氧气的接触，生成的CO会大幅增多。此种燃烧器负荷下，空气流速对产生CO的影响与玉米秸秆类似，7m/s时，排放量为最低。增加和减小空气流速都会促进CO的生成，但是影响不大。

2.4 讨论

通过对比在相同的燃烧器负荷和相同空气流速下3种燃料的NO平均排放值可以发现，木质颗粒的NO排放最低，棉秆颗粒的最高，玉米秸秆颗粒介于二者之间。从元素分析数据中可知木质燃料中的N元素含量仅为0.13%，比棉秆（1.16%）和玉米秸秆（0.92%）要低很多。虽然燃料中不同含量的N以不同的形式存在，但总体而言N含量越高，NO排放量也越高。而与玉米秸秆颗粒相比较，棉秆颗粒的燃烧温度为1283K要高于玉米秸秆的燃烧温度1259K，同时N元素的含量也高于玉米秸秆颗粒，因此NO的排放量是3种燃料中最高的。

CO是一种不完全燃烧的产物，其产生主要受燃烧时燃烧器内混合气浓度的影响。总体来看，比较3种生物质颗粒燃烧排放的CO值为玉米秸秆颗粒 > 棉秆颗粒 > 木质颗粒。木质颗粒的长度稍小，密度也相对较小，颗粒结构比较松散，并且不易结渣，在燃烧器内燃烧的会干净透彻，因此烟道气体中的CO含量是3种燃料中最低的。玉米秸秆颗粒由于燃烧时容易结渣，燃烧器内部局部混合气浓度较大，造成缺氧使CO作为未燃产物生成，因此CO排放量最高。

3 结论

1) 从3种成型燃料燃烧排放物来看，木质颗粒NO排放量均是随着燃烧器负荷的增大而升高，但升高幅度不是很大，玉米秸秆颗粒和棉秆颗粒在中等负荷下，生成的NO量最多。空气流速对NO排放的影响也不同，相同的燃烧器负荷下，木质颗粒的NO排放随着空气流速增大而减小；玉米秸秆颗粒在小负荷下，排放量随着空气流速的增大先升高后降低，在中高负荷时，则随着空气流速增大而升高；棉秆颗粒在中等负荷时，生成的NO随着空气流速的增大而增多，在大负荷时燃烧生成的NO量基本不变。

2) 3种燃料的CO排放量均是随着燃烧器负荷的增加而增大，CO排放规律类似的差异之处在于：当燃烧器负荷较大时，木质颗粒的CO排放量随着空气流速的增大而降低，玉米秸秆和棉秆颗粒2种燃料则是在空气流速变大时，排放量先增加后减小。从燃烧的结渣状况来看，玉米秸秆颗粒的结渣状况较为严重，这是由于玉米秸秆碱金属氧化物含量较高，比较容易熔融，从而结焦^[12]。

参考文献

[1]Matti Parikka.Global biomass fuel resources[J].Biomass and Bioenergy, 2004, 27 (6) : 613-620.

[2]袁振宏, 吴创之, 马隆龙, 等.生物质能利用原理与技术[M].北京:北京化学工业出版社, 2005.

[3]王月乔.生物质颗粒自动燃烧器燃料适应性试验研究[D].北京:中国农业大学, 2013.

[4]张方时.玉米秸秆层燃特性的试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.

[5]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.农产品加工, 2009 (3) : 20-26.

[6]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浓度分布特性[J].农业工程学报, 2013, 29 (19) : 185-192.

[7]罗娟, 侯书林, 赵立欣, 等.典型生物质颗粒燃料燃烧特性试验研究[J].农业工程学报, 2010, 26 (5) : 220-226.

[8]王翠苹,李定凯,王凤印,等.生物质成型颗粒燃料燃烧特性的试验研究[J].农业工程学报,2006,22(10):174-177.

[9]黄波.生物质成型燃料用于取暖炉的燃烧特性[D].长沙:中南大学,2011.

[10]岑可法,姚强,骆仲泐,等.燃烧理论与污染控制[M].北京:机械工业出版社,2004.

[11]李晓,张林华,崔永章,等.玉米秸秆颗粒燃料燃烧特性的试验研究[J].节能,2012(1):28-31.

[12]任敏娜,崔永章,李晓,等.八种生物质颗粒燃烧特征分析[J].山东建筑大学学报,2012,27(3):298-301.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/106962.html>