

生物质固体成型燃料燃烧监测技术与设备研究

王月乔^{1,2}, 侯书林¹, 赵立欣², 孟海波², 田宜水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, 北京100125)

摘要: 介绍了典型的生物质固体成型燃料自动燃烧器和成型燃料炉排式锅炉, 分析了国家相关设备的热工性能检测指标、污染物排放监测指标及国内外成型燃料燃烧设备的监测系统的差距, 指出我国目前存在的燃烧设备检测监测标准缺乏、不完善, 监测设备独立、单一及未成系统等问题, 提出提高燃烧效率, 建立统一的评价标准等相关建议, 以期为我国生物质固体成型燃料产业发展提供参考。

0引言

生物质能作为人类赖以生存的重要能源之一, 具有环境友好和可再生的双重属性^[1]。其中, 生物质固体成型燃料能量密度较高^[2], 易于运输, 燃烧特性明显改善^[3], 是生物质能主要利用方向之一。

20世纪30年代, 国外开始发展生物质固体成型燃料技术, 现已达到商业化应用程度。日本、美国及欧洲一些国家的生物质固体成型燃料燃烧设备已经定型, 并实现产业化经营, 在供热、供暖、干燥和发电等领域都有推广应用^{[4], [5]}。上世纪80年代, 我国开始生物质成型技术的研究^[6], 成型设备现已形成了一定的生产规模^[7], 加工制造技术也发展的较为成熟, 市场上已出现生物质锅炉等燃烧设备。

对燃烧设备进行监测是保证生物质燃烧系统正常工作的重要手段之一, 包括对输入参数、燃烧状态、排放烟尘等进行监测, 对调整燃烧设备的设置参数, 提高燃烧效率, 减少污染物排放有着重要的意义。目前, 我国多是对煤粉燃烧器或锅炉开展该方面的研究, 且监测参数较为单一, 主要集中在一次风和二次风速、燃烧室火焰、煤粉浓度等方面^{[8], [9]}。在生物质固体成型燃料燃烧设备的监测方面, 还未见诸报道。

本文拟通过对国内外生物质固体成型燃料燃烧设备及其检测、监测和控制等方面的资料进行分析, 提出存在的问题和下一步的发展方向, 以期为我国生物质固体成型燃料产业发展提供参考。

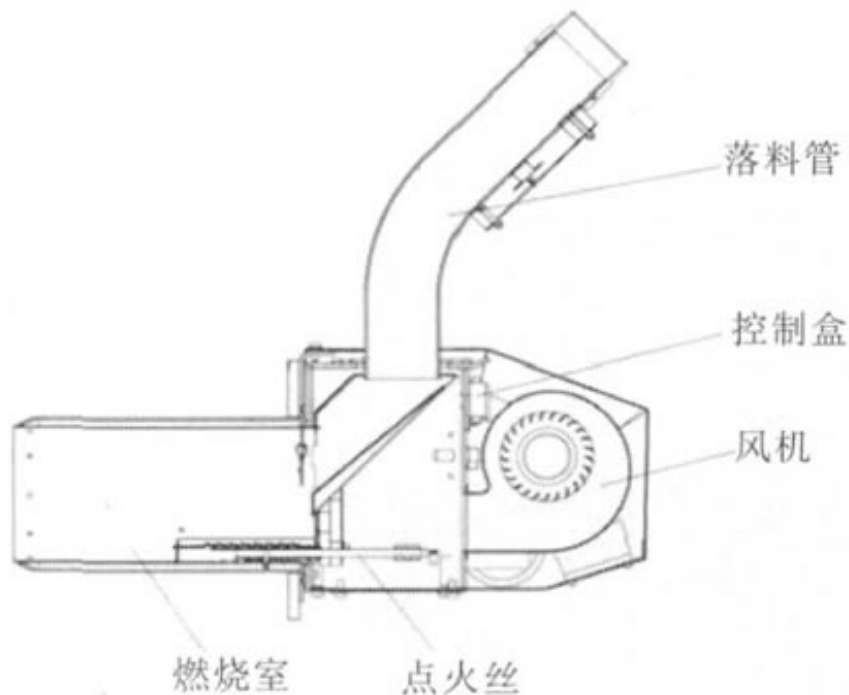
1生物质固体成型燃料燃烧设备

生物质固体成型燃料燃烧设备是一种以生物质固体成型燃料为主的高效燃烧设备, 具有燃料单一、运行稳定、热输出均匀等优点^[10]。现有的燃烧设备以生物质颗粒燃料自动燃烧器和成型燃料炉排式锅炉为主, 两种设备在结构、配套系统等方面相差很大, 应用场所亦有所不同。

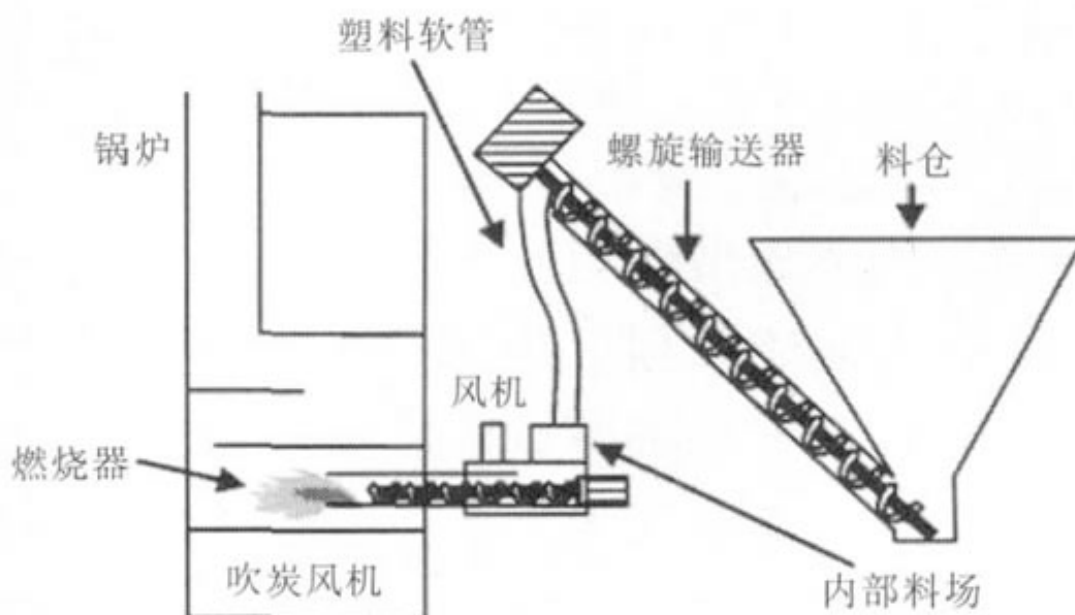
1.1生物质颗粒燃料自动燃烧器

欧盟的生物质燃烧设备以自动燃烧器为主, 与料仓、锅炉等搭配使用, 可以长时间地自动运行, 燃烧效率可达80%以上^[11]。通过与不同的热交换设备配套使用, 可实现取暖、热水、工业干燥等多种功能^[7]。

典型的生物质颗粒燃料自动燃烧器一般由点火系统、配风系统、燃烧室、清灰(排渣)系统和自动控制系统等几部分组成^[12]。图1(a)为一台典型的燃烧器, 图1(b)为生物质颗粒燃烧器的工作系统^[13]。



(a) 生物质颗粒燃料自动燃烧器



(b) 燃烧器工作系统

图 1 生物质颗粒燃料自动燃烧器及其工作系统

Fig.1 Biomass pellet automatic burner and working system

燃烧器工作时，由自控系统进行控制，点火系统和配风系统配合将燃料点燃，进料系统持续进料，配风系统鼓风，清渣系统及时清除灰渣，使得燃料在燃烧室内持续、高效燃烧。

由于燃烧器的各个输入变量是独立的，且可以通过控制相应的电机来精确控制变量值，同时在燃烧器和配套锅炉内安置火焰传感器和温度传感器，可以对点火、燃烧状态进行较为精确的监测并反馈到控制系统中，进行判断，因果关系更加明确。燃烧器可实现自动控制，连续燃烧，但其结构较为复杂、价格昂贵。另外，此类燃烧器仅适用于颗粒燃料，压块燃料由于体积较大，不适用于均匀进料的燃烧设备。

在我国，针对以秸秆为原料生产的成型燃料灰含量高、易结渣等问题，农业部规划设计研究院研究开发的秸秆固体成型燃料燃烧器，采用双层燃烧筒装置，实现三级配风，添加螺旋清灰破渣机构，提高了燃烧效率，减少了污染物排放^[14]。

1.2成型燃料炉排燃烧设备

国内成型燃料燃烧器主要以炉排式生物质锅炉为主，应用面较广，但是自动化水平不高。现在最常见的是手烧炉排式锅炉，操作简单，燃料种类适用性广，压块和颗粒燃料均可。图2所示为河南农业大学研发的双层炉排生物质固体成型燃料锅炉^[15]。

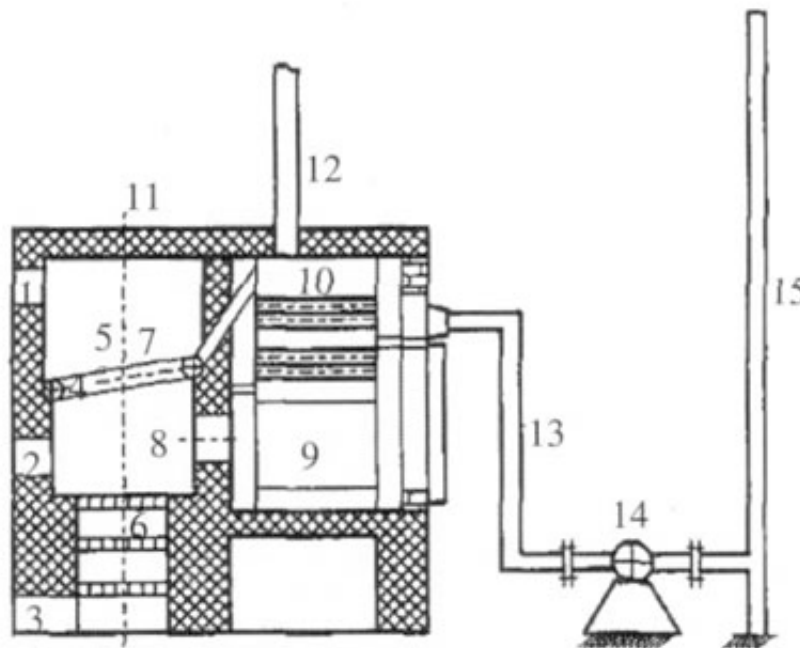


图 2 双层炉排生物质固体成型燃料锅炉

Fig.2 Double-grate biomass briquette boiler

1-上炉门;2-中炉门;3-下炉门;4-上炉排;5-辐射受热面;
6-下炉排;7-风室;8-炉膛;9-燃烬室;10-对流受热面;11-炉墙;
12-排气管;13-烟道;14-引风室;15-烟囱

生物质固体成型燃料在炉排上燃烧，上炉排的生物质屑和灰渣漏到下炉排上继续燃烧直至燃烬。成型燃料在上炉排燃烧形成的烟气和部分可燃气透过燃料和灰渣进入上、下炉排间的炉膛进行燃烧，并与下炉排燃料产生的烟气一起，通过出烟口流向燃烬室和对流受热面。炉排的燃烧方式，实现了生物质固体成型燃料的分步燃烧，缓解了生物质燃烧速度，达到燃烧需氧与供氧的匹配，使生物质固体成型燃料可以持续稳定燃烧^{[16], [17]}。

但是整个燃烧设备没有自动控制设备，也未安装监控系统，且污染物排放量较大，与国外的相关产品还有很大差距。

2 燃烧设备的监测指标和标准

生物质固体成型燃料燃烧设备的燃烧情况优劣，需要明确监测指标，根据标准进行评判。目前，国内并没有针对生物质成型燃烧设备的燃烧测试标准，一般可参考《工业锅炉热工性能试验规程（GB 10180-2003）》和《锅炉大气污染物排放标准（GB 13271-2001）》，主要从热工性能方面，判断生物质固体成型燃料燃烧设备的燃烧性能以及烟气排放污染物排放等。

2.1 热工性能检测指标

针对生物质固体成型燃料的特性，可选取主要热工性能指标如表1所示。

表 1 主要热工性能指标
Table 1 Main thermodynamic parameters

参数名称	符号	单位	定义或特征
传热系数(炉排式)	K	$\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	反映锅炉传热能力的重要指标(生物质颗粒燃烧器可不用计算) ^[18]
炉排面积/体积热负荷(炉排式) q_v/q		$\text{kW} \cdot \text{m}^{-3}/\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$	燃烧放热强烈程度的热力特性参数(针对炉排形式的生物质锅炉) ^[18]
正平衡效率	η_1	%	指锅炉有效利用热量与单位时间内所消耗燃料的输入热量的百分比，它表明燃料输入炉内的热量被有效利用的程度 ^[18]
反平衡效率	η_2	%	通过确定锅炉各项热量损失，根据热平衡方程确定的锅炉效率，即 $\eta_2 = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \%$ ^[18]
排烟热损失	q_2	%	燃烧过程中的排放烟气热量损失 ^[18] ，测量数据，计算可得
气体不完全燃烧热损失	q_3	%	燃烧过程中的空气不完全燃烧的热量损失 ^[18] ，测量数据，计算可得
固体不完全燃烧热损失	q_4	%	燃烧过程中的生物质燃料未完全燃烧的热量损失 ^[18] ，测量数据，计算可得
散热损失	q_5	%	燃烧过程中热量从设备中散发流失的热量损失 ^[18] ，常由燃烧设备功率决定
灰渣物理热损失	q_6	%	燃烧过程中形成灰渣的热量损失 ^[18] ，测量数据，计算可得
过量空气系数			过量空气系数是锅炉质量的重要特征之一，其值的大小说明了燃烧设备和锅炉运行的完善程度；不合理会影响燃料的正常燃烧，导致燃烧不完全或热量降低，同时影响烟尘排放浓度 ^[18]

通过对传热系数、各项热损失等热工参数的监测和计算，对排烟、气体不完全燃烧、固体不完全燃烧等各项热损失数据的分析，研究人员能够判断影响锅炉热效率的因素，发现锅炉或燃烧器在结构、燃烧方式、进料、配风、排烟及辅机配置等方面的问题，有针对性地进行改进，以消除锅炉缺陷，提高热效率。

2.2 污染物排放监测指标

大气

污染物排

放是衡量燃烧设备

性能的重要指标之一。生物质燃料不

完全燃烧会产生大量的CO，并伴有NO₁NO₂

以及大量的烟尘，这些污染物排放到大气中，会对空气造成不良影响，损害人类的健康。另一方面，大气污染物排放量也是计算气体不完全燃烧热损失的重要参量，是燃烧设备的燃烧效率的决定因素之一。监控燃烧设备的烟气、烟尘排放，可以确定生物质燃料的燃烧状况，然后可以对控制参数进行调整。

生物质固体成型燃料燃烧设备的烟气种类和排放量由生物质固体成型燃料的元素含量和燃烧工况决定。尽管成型燃料种类繁多，但生物质燃料元素还是以C，H，O为主，如表2所示^[20]

，并有少量的N，

S，但是N，S含量跟煤等燃料相比，

几乎可以忽略不计，排放烟气中主要包括CO₂，CO及较少的SO₂，NO_x

，这正是生物质燃料的优点之一，在环境保护上有很重要的意义。

表 2 主要生物质颗粒燃料的元素分析

Table 2 Elemental analysis of several kinds of biomass pellets

原料	C	H	O	N	S
棉秆	38.33	4.74	24.98	1.55	0.29
麦秸	43.46	5.66	31.12	0.74	0.28
玉米秸	44.92	5.77	31.26	0.98	0.21
红松	47.39	5.89	30.75	0.23	0.10
木屑+花生壳(1:4)	43.83	5.45	27.46	0.86	0.02

生物质颗粒燃烧还会排放出烟尘。烟尘的主要组成部分是生物质固体成型燃料中的灰分和未完全燃烧产物中的细小颗粒^[21]

。2011年11月，北京持续的灰霾天气，引起了公众对PM2.5（细颗粒物，直径小于或等于2.5 μm）的重视。PM2.5的主要来源是人为排放，其中燃烧释放的烟尘为重要因素，SO₂和NO_x亦可以转化为PM2.5^[22]

。PM2.5浓度高会影响大气能见度，造成灰霾天气^[23]

，对人体呼吸系统和心血管系统造成伤害^[24]

。而生物质固体成型燃料的燃烧会释放大量的细小颗粒物，因此对烟尘的监测则非常必要。

大气污染物排放监控重点在于使用高灵敏度的仪器测

量CO₂，CO，NO，NO₂和烟尘排放量，参照国家标准，对比其排放差距。表3为《锅炉大气污染物排放标准GB 13271-2001》的规定项目^[25]

的总结，从表中可知，该标准规定的项目和数据均较少，远不能涵盖锅炉的烟尘、烟气排放的种类，不能满足环境管理和环境质量控制的要求。

表 3 《锅炉大气污染物排放标准》的规定项目

Table 3 Projects of *Emission Standard of Air Pollutants for Coal-burning Oil-burning Gas-fired Boiler*

规定项目	锅炉大气污染物排放标准
烟尘最高排放浓度及黑度	针对 3 类分区、3 种燃料、两个时段有所规定,20 组数据
烟尘最初排放浓度及黑度	针对燃煤锅炉有所规定,16 组数据
SO ₂ 和 NO _x 最高排放浓度	针对 4 种燃料、两个时段有所规定,SO ₂ 8 组数据、NO _x 3 组数据
空气系数折算值	3 组数据

根据相关标准控制和监测生物质固体成型燃料燃烧设备,一方面可以提高使用效率和稳定性,改善系统的安全性能;另一方面,优化燃烧状态,节省使用过程中的经济成本,如降低生物质固体成型燃料的消耗量、降低电力消耗、减少人力成本等,达到节能的目的;其三,改进排烟状况,减轻气体和固体不完全燃烧的程度,降低结渣率,可以大大减少CO/NO的排放率,很大程度上减轻污染物质的产生,达到减排的目的。

3燃烧设备的监测和控制系统

生物质固体成型燃料燃烧设备的监控系统,不仅仅担负着对该设备燃烧效果的评判,并且对燃烧设备的过程控制有着重要的作用:通过监控系统可以了解燃烧的哪种热损失较高,从而相应地操作控制系统以改善燃烧状态;通过试验、科学的数据分析得出总结性的规律——燃料的适应性,对不同物理特性的燃料使用不同的模式进行控制;将设备的控制系统和监控系统相连接,对整套燃烧设备进行反馈控制,达到自动调节至最优状态的目的。

国内外对燃烧设备的性能情况的研究侧重点有所不同。欧美国家的燃烧技术已经成熟,实现了产业化生产,制定了相关行业标准,研究的侧重点主要是生物质燃料燃烧的烟气排放,其测控设备也相对完善和智能化。国内对这方面的研究则比较少,在燃烧设备的热力性能上有所涉及,测试系统不成体系,各个参数单独测量。

3.1国外情况

国外的生物质锅炉系统的监测和控制系统是从1910年的通风自动调节起步的。随着技术、经济等因素的增长,从以调节器为辅

助的手动控制,发展到

模拟控制系统,再到分立元件电子模拟系统,

集成电路控制及数字控制^[26]

,现阶段国外的监测和控制系统已经发展成熟。但生物质固体成型燃料燃烧的气体排放物及其影响因素尚未研究清楚。

在监测和控制系统方面,国外通常监控不同灰度和碱金属等含量的燃料的燃烧排放物,重点为一氧化碳(CO)、二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、氯化氢(HCl)、有机气体碳(OGC)、细灰颗粒(PM1)、碱金属细颗粒等^{[27]~[29]},针对排放量分析其影响因素。

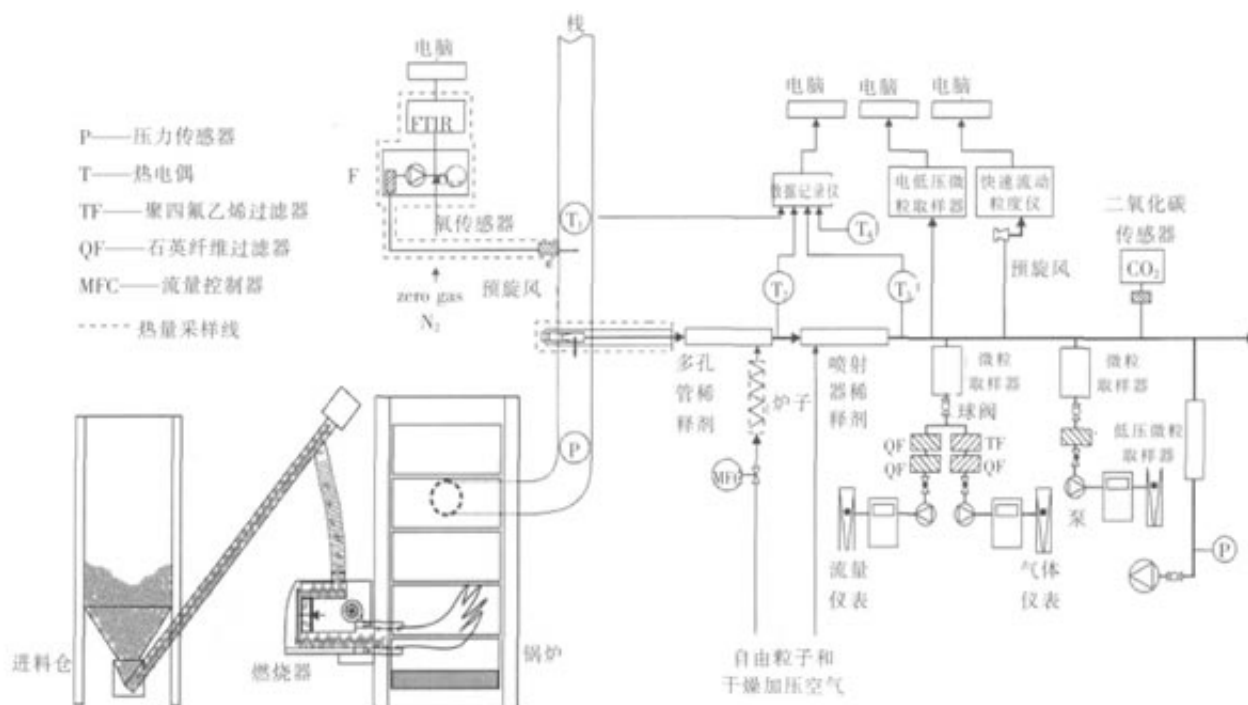


图3 燃烧设备排放气体的采集控制系统

Fig.3 Acquisition and controlling system of emissions from combustion equipments

图3是芬兰某实验室的燃烧设备排放气体的采集控制系统^[29]。

燃烧器的进料系统由一个连接在燃烧器控制系统上的完全自动进料控制器控制。设置较完善的燃烧控制器保证了不同的燃料在相同的状态下燃烧。在排放管道中，放置多个不同的气体化学传感器，并安置多个微粒取样器，各个装置分别由电脑终端控制，采集处理数据高效且准确，保证了气体采集的连续性和精确性以及控制器的最优性能和效率。

3.2国内情况

国内针对生物质固体成型燃料燃烧设备的燃烧效果的测控系统还未见诸报道。现有的分析结果多是由单一仪器测量所得。进行一次参数测量通常会用到烟尘（气）测试仪、综合燃烧分析仪、数字热电偶温度计、水银温度计、压力计、米尺、秒表等。测量的独立，采集点的不同，不能保证连续性；不同仪器的灵敏度不同，也不能保证测量数据的精确性。而且采集完数据还需另行计算所需参数，以获得热工特性等结果。

图4展示了国内常用的烟气

烟尘测量仪器。其中：（a）应用3102H型烟尘（气）测试仪^[30]

主要用来测量烟尘排放量，每次抽样2~5min，需要人工装卸抽样管和过滤纸桶，采集后的数据也需要人工测量，费时费力；（b）为英国产烟气测量仪^[31]，可对烟气中的CO₂，CO，SO₂，NO_x进行分别测量监控，并间隔固定时间记录，该仪器只需在开始和结束的时候安装抽样管即可，无需其他操作。



(a)应用 3102H 型烟尘(气)测试仪



(b)KM9106 综合燃烧分析仪

图 4 国内常用的测量燃烧设备的烟气烟尘的仪器

Fig.4 Instruments of measuring the flue gas and dust from
combustion equipments

目前，国内的生物质固体成型燃料的燃烧及相关监测设备还没有形成产业化、一体化。国内的生物质固体成型燃料燃烧设备以炉排式锅炉为主，它难以控制输入参数，输出结果缺乏准确性及可比性，这也是燃烧状态监控发展没有方向性的主要原因之一。

4存在的主要问题

4.1缺乏技术标准

国家已颁布了《工业锅炉节能监测方法GB/T 15317-94》、《工业锅炉热工性能试验规程GB/T 10180-2003》、《锅炉大气污染物排放标准GB 13271-2001》等,但还没有针对生物质固体成型燃料颁布相关标准。目前,在对生物质固体成型燃料燃烧设备的效率和效果进行评价的时候仅参考煤炭的相关要求,实践中缺乏针对性。

4.2燃烧过程的监测系统发展不完善

国内相关研究大多是针对生物质成型、热解等领域,对燃烧设备,特别是其燃烧效率的研究甚少。相关的监测系统测试测量的方式方法没有一体化,均是由单独的设备进行测量,既不能全程检测燃烧过程,也不能同步取得烟尘烟气数据,测量方式粗糙不精确。燃烧设备的低自动化程度,某种程度上也限制了整体性监测系统的发展。

5结论与建议

欧美等国家的生物质固体成型燃料燃烧技术研发早,设备成熟、效率高、自动化程度高,目前利用领域极为广泛,已形成产业化发展。而我国该行业处于起步阶段,且国情复杂,燃烧设备多样,监控系统少有研究,对于生物质燃烧系统的效率评价也未形成标准体系。为此,提出以下建议。

(1) 针对现有设备的问题,可以借鉴国外的先进燃烧技术,对燃烧设备进行结构优化,实现自动控制,使之从硬件上提高燃烧效率;针对生物质颗粒燃料燃烧系统,设计相应的测控系统,监测、控制燃烧状态,提高整个系统的自动化程度,从软件上提高燃烧效率,减少污染物排放。

(2) 制定生物质固体成型燃料燃烧设备的监测、检测和效率评价标准。有国家标准作为准则,在相关研究中,对相关试验结果的判断就可以规范化和统一化,从而得到具有广泛适应性的结论,也有利于设备生产的更加规范和可靠,有助于市场向成熟和产业化的方向发展。

参考文献:

- [1]JUAN F GONZ LEZ, CARMEN M GONZ Á LEZ-GARC Í A, et al.Combustion optimisation of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler[J].Biomass and Bioenergy, 2004, 27: 145-154.
- [2]姚向军, 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]霍丽丽, 侯书林, 赵立欣, 等.生物质固体成型燃料技术及设备研究进展[J].安全与环境学报, 2009, 9(6): 27-31.
- [4]PALLAV PUROHIT, ARUN KUMAR TRIPATHI, TARA CHANDRA KANDPA.Energetics of coal substi-tution by briquettes of agricultural residues[J].Energy, 2006, 31: 1321 – 1331.
- [5]MARGARET K MANN, PAMELA L SPATH.Life cycle as sessment of a biomass gasification combineel 2 cyclepower system[M].Beijing: China Environmental Science Press, 2000.
- [6]张百良, 樊峰鸣, 李保谦, 等.生物质成型燃料技术及产业化前景分析[J].河南农业大学学报, 2005, 39(1): 111-114.
- [7]刘圣勇, 陈开碇, 张百良.国内外生物质成型燃料及燃烧设备研究与开发现状[J].可再生能源, 2008(4): 14-15.
- [8]张云鹏, 安静, 李景波.煤粉燃烧器在线监测系统的应用[J].计算机与应用化学, 2005, 22(11): 960-962.
- [9]姜志锋, 王兴龙.大型电站锅炉燃烧可视化监测与闭环控制系统研究[J].能源工程, 2011(5): 23-26.
- [10]SJA AK VAN LOO, JAAP KOPPEJAN, 田宜水, 姚向君译.Handbook of biomass combustion and co-firing[M].北京: 化学工业出版社, 2008.63-75.

- [11]陈永生, 沐森林, 朱德文, 等. 生物质成型燃料产业在我国的发展[J]. 太阳能学报, 2006 (4): 16-18.
- [12]徐飞, 侯书林, 赵立欣, 等. 生物质颗粒燃料燃烧技术发展现状及趋势[J]. 安全与环境, 2011, 11 (1): 70-74.
- [13]LINDA S BAFVER, MARIE RONNBACK, BO LECKNER, et al. Particle emission from combustion of oat grain and its potential reduction by addition of lime-stone or kaolin[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90: 353-359.
- [14]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]. 农业机械学报, 2010, 41 (11): 89-93.
- [15]赵迎芳, 梁晓辉, 徐桂转, 等. 生物质成型燃料热水锅炉的设计与试验研究[J]. 河南农业大学学报, 2008, 21 (4): 108-111.
- [16]苏超杰, 罗志华, 李文雅, 等. 生物质成型燃料燃烧设备热力特性参数测试[J]. 节能技术, 2006, 24 (3): 220-224.
- [17]刘圣勇. 生物质成型燃料燃烧设备研制与试验研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2003.
- [18]GB10180-2003, 工业锅炉热工性能试验规程[S].
- [19]姜晓娟. 过量空气系数的重要性[J]. 煤炭技术, 2004, 23(12): 6-7.
- [20]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.
- [21]程紫润. 烟尘的生成与燃烧[J]. 环境科学研究, 1990, 3 (4): 48-55.
- [22]谭知还. 关于PM2.5的10个问答[EB/OL]. <http://www.guokr.com/blog/75605/>, 2011-11-27.
- [23]美国环保局. Visibility[EB/OL]. <http://www.epa.gov/visibility/>, 2011-11-9.
- [24]美国环保局. Health[EB/OL]. <http://www.epa.gov/air/particlepollution/health.html>, 2011-11-9.
- [25]GB13271-2001, 锅炉大气污染物排放标准[S].
- [26]杨绍胤. 锅炉热工检测与控制系统设计探讨[J]. 能源工程, 1985 (4): 28-29.
- [27]DAVID ESKILSSON, MARIE RONNBACK. Optimization of efficiency and emissions in pellet burners[J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27: 541-546.
- [28]MARIA OLSSON, JENNICA KJALLSTAND. Emissions from burning of softwood pellets[J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27: 607-611.
- [29]JARKKO TISSARI, OLLI SIPPULA, JYRKI KOUKI, et al. Fine particle and gas emissions from the combustion of agricultural fuels fired in a 20 kW burner[J]. Energy and Fuels, 2008, 22 (3): 2033-2042.
- [30]中国化工仪器网. 应用 3102H 型烟尘 (气) 测试仪[EB/OL]. <http://www.chem17.com/st122277/product626684.html>, 2011-12-20.
- [31]中国化工仪器网. KM9106 综合燃烧分析仪[EB/OL]. <http://www.chem17.com/Product/detail/6919359.html>, 2011-12-20.

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/115686.html>