

综 述

生物质燃烧技术综述

马文超, 陈冠益*, 颜蓓蓓, 胡艳军

(天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘 要: 利用清洁、可再生生物质能源燃烧发电技术日益受关注。本文介绍了生物质燃料特性、利用情况、当今主流燃烧技术及生物质燃烧发电概况及遇到的问题, 同时还对生物质与煤混烧技术及城市生活垃圾焚烧发电作了简单介绍。

关键词: 生物质; 生活垃圾; 燃烧技术; 流化床; 发电

中图分类号: TQ91; TQ517

文献标识码: A

文章编号: 1673-5854(2007)01-0043-06

Review on Biomass Combustion Technologies

MA Wen-chao CHEN Guan-yi YAN Bei-bei HU Yan-jun

(Faculty of Environmental Science and Engineering Tianjin University Tianjin 300072, China)

Abstract The generation of electricity by combustion process from clean and renewable biomass resource is being given more and more attention. The characteristics of biomass fuels utilization, the current mainstream combustion technology, power generation by biomass combustion, and some technical problems were introduced. The co-combustion technology of biomass with coal and urban domestic garbage combustion for power generation were also introduced simply.

Key words biomass; domestic garbage; combustion technology; fluidized bed; power generation

生物质是一种分布广、资源量丰富的清洁可再生资源, 其能源化利用过程可导致 CO₂ 零排放, 因此生物质能的研究与开发日益受到各国政府、专家、工业界的关注。目前生物质能的主要开发利用技术包括生物质的固化、气化、液化以及燃烧技术, 其能源产品包括成型固体燃料、炊事燃气、液体燃料(生物油、柴油、汽油等)、电、热(或暖气)。生物质因具有挥发分高、炭活性高, N、S 含量低(含 N 量 0.5% ~ 3%、含 S 量一般仅 0.1% ~ 0.5%), 灰分低, 生命周期内燃烧过程 CO₂ 零排放等特点, 特别适合燃烧转化利用, 是一种优质燃料^[1]。在我国, 发展生物质燃烧技术既能缓解温室效应, 又能充分利用废弃生物质资源, 改善或提高农民的生活条件, 而且对现有的燃烧设备不需作较大改动, 因此具有明显的社会意义与经济意义, 符合我国现阶段国情和生物质开发利用水平。

1 生物质资源量及国内外利用情况

生物质(biomass)是指有机物中除化石燃料外的所有来源于动、植物能再生的物质。生物质能则是指直接或间接地通过绿色植物的光合作用, 把太阳能转化为化学能后固定和贮藏在生物体内的能量。生物质包括林木废弃物(木块、木片、木屑、树枝等)、农业废弃物、水生植物、油料植物、有机物加工废料、人畜粪便及城市生活垃圾等。生物质资源量巨大, 年产量约 1460 亿吨。我国每年仅农作物秸秆(稻秆、麦秆、玉米秆等)产量可达 7.5 亿吨, 人畜粪便 3.8 亿吨, 薪柴年产量(包括木材砍伐的废弃物)约为 1.7 亿吨^[2], 农业加工残余物(稻壳、蔗渣等)约为 0.84 亿吨, 城市生活垃圾污水中的有机物约为 0.56 亿吨, 还有工业排放的大量有机废料、废渣, 每年生物质资源总量折合成标准煤约 2~4 亿吨^[3]。如果包括生

收稿日期: 2006-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50428605)

作者简介: 马文超(1982-), 女, 黑龙江鹤岗人, 硕士, 从事生物质(包括城市生活垃圾)转化利用方面的研究工作

* 通讯作者: 陈冠益, 教授, 博士生导师, 从事清洁能源的开发利用工作; 联系电话: 022-87401929 E-mail: cher@tju.edu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

活垃圾,则资源量更大。

自 1992 年世界环境与发展大会后,欧美国家开始大力发展生物质能。欧盟规划 2010 年可再生能源比例达 12%,每年可替代 2 000 万吨石油,其中成本较低的生物质能约占 80%。美国 1999 年明确提出规划到 2010 年生物制品及生物质能的产量将为当时水平的 3 倍,生物质能比达 10%。由此可见,生物质能在一些发达国家应用较为广泛。相对而言,我国在生物质能现代化利用方面的成功例子很少,相应的开发研究急需加强。在众多的转

化利用技术中,生物质燃烧技术无疑是最简便可行的高效利用生物质资源的方式之一。

2 生物质燃料的基本特性

2.1 生物质基本成分

生物质燃料中易燃部分主要是纤维素、半纤维素、木质素。燃烧时纤维素、半纤维素和木质素首先放出挥发分物质,最后转变成炭。几种典型的生物质组成成分见表 1^[4]。

表 1 典型生物质的组成成分

Table 1 The composition of some typical biomass

生物质 biomass	工业分析 industrial analysis/%				元素分析 element analysis/%					高位热值 $/(kJ \cdot kg^{-1})$ high heat value
	固定炭 fixed carbon	挥发分 volatile	灰分 ash	水分 moisture	碳 C	氢 H	氧 O	氮 N	硫 S	
麦秆 wheat stalk	16.65	72.48	1.85	9.02	44.65	5.24	40.72	0.28	0.08	15834
废木 waste wood	8.80	50.20	1.00	40.00						
合欢花 albizia flower	16.60	75.10	1.20	7.10	40.88	7.25	44.78	0.02		
稻壳 rice husk	25.10	51.98	16.92	6.00	35.34	5.43	35.36	1.77	0.09	13380
向日葵壳 sun-flower shell	19.88	69.13	1.88	9.11	45.62	4.42	38.21	0.57		17368
棉花秆 cotton stalk	16.89	73.00	3.18	6.93	44.90	7.50	35.47	1.20		18400
咖啡壳 coffee shell	22.74	62.87	4.40	9.99	40.62	3.74	39.15	1.52	0.14	17140
橄榄叶 olive leaf	11.96	46.30	5.34	36.40	30.02	3.82	23.34	0.89	0.19	12200

2.2 燃烧特性

试验研究发现生物质挥发物的燃烧效率比炭化物质快。燃料着火前为吸热反应;到着火温度

以后,生成气相燃烧火焰和固相表面燃烧的光辉火焰,为放热反应。具体的燃烧性能见表 2^[5]。部分生物质燃烧特性曲线如图 1~图 2 所示。

表 2 生物质燃料燃烧性能

Table 2 Combustion characteristics of biomass

生物质 biomass	升温速度 $/(^{\circ}C \cdot min^{-1})$ temperature raising rate	初始燃烧温度 $/^{\circ}C$ beginning temperature	燃烧峰温度 $/^{\circ}C$ peak temperature	燃烧末温度 $/^{\circ}C$ end temperature	燃烧峰速率 $/(mg \cdot min^{-1} \cdot mg^{-1})$ peak velocity
红松 pinus koraiensis	15	414	488	507	0.0463
烟秆 tobacco stems	15	367	410		0.1142
稻壳 rice husk	15	386	447		0.0587
蔗渣 bagasse	15	398	478	515	
玉米芯 com cob	15	384	447	508	0.0737
糠醛渣 furfural residue	15	399	449	506	0.0556

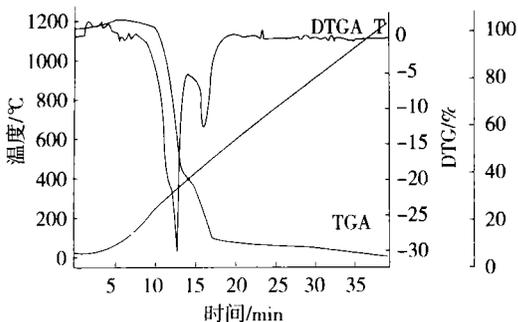


图 1 树枝的燃烧特性曲线^[6]

Fig. 1 Combustion curves of branch (TG-DTA)

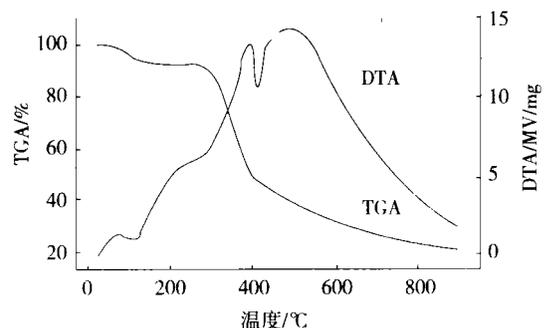


图 2 稻壳的燃烧特性曲线

Fig. 2 Combustion curves of rice husk (TG-DTA)

3 生物质燃烧技术及发电

3.1 工业锅炉燃烧技术

目前开发适用于各种工业锅炉生物质燃烧技术, 是生物质能有效利用的重要途径。下面主要介绍几种传统的锅炉燃烧技术和新兴的流化床燃烧技术。

3.1.1 传统的锅炉技术 传统的层燃技术是指生物质燃料铺在炉排上形成层状, 与一次配风相混合, 逐步地进行干燥、热解、燃烧及还原过程, 可燃气体与二次配风在炉排上方的空间充分混合燃烧, 可分为炉排式和下饲式。

炉排式: 炉排形式种类较多, 包括固定床、移动炉排、旋转炉排和振动炉排等, 可适于含水率较高, 颗粒尺寸变化较大以及水分含量较高的生物质燃料, 具有较低的投资和操作成本, 一般额定功率小于 20MW。在丹麦, 开发了一种专门燃烧已经打捆秸秆的燃烧炉, 采用液压式活塞将一大捆的秸秆通过输送通道连续地输送至水冷的移动炉排。由于秸秆的灰熔点较低, 通过水冷炉墙或烟气循环的方式来控制燃烧室的温度, 使其不超过 900°C ^[7]。国内生活垃圾发电厂几乎都采用这种炉型燃烧。

下饲式: 作为一种简单廉价的技术, 广泛的应用于中、小型系统, 燃料通过螺旋给料器从下部送至燃烧室, 简单、易于操作控制, 适用于含灰量较低和颗粒尺寸较小的生物质燃料。

3.1.2 流化床燃烧技术 20 世纪 80 年代初兴起的循环流化床燃烧技术, 具有燃烧效率高、有害气体排放易控制、热容量大等一系列优点。流化床锅炉适合燃用各种水分大、热值低的生物质, 具有较广的燃料适应性; 燃烧生物质流化床锅炉是大规模高效利用生物废料最有前途的技术之一。根据生物质原料的不同特点, 分为鼓泡流化床技术 (BFB) 和循环流化床技术 (CFB)。

鉴于流化床锅炉的上述优点, 西方发达国家早已采用流化床燃烧技术利用生物质能。美国、瑞典、德国、丹麦等工业化国家生物质能利用技术已居世界领先地位。国内哈尔滨工业大学早在 1991 年就进行了生物质燃料的流化床燃烧技术研究; 浙江大学提出了用于不同规模、各种炉型的生物质燃烧系统的生物质利用转化方案。另外, 为了提高生物质在小型燃烧装置上的利用效率,

浙江大学还致力于成型燃烧技术和流化床混烧技术的研究。

浙江大学陈冠益等^[8]设计了一台 35 t/h 稻壳流化床锅炉, 并给出了稻壳在流化床燃烧时流化、混合和着火特性的研究结果, 具体如图 3~图 4 所示。阎常峰等^[9]设计了变截面管式布风流化床用以研究不同颗粒粒度、不同床层高度、不同截面流速、布风的均匀性以及非平衡布风时颗粒的流化特性, 为测试燃烧所需物料的流化特性对焚烧的着火、气化、稳定燃烧及污染物生成特性提供基础数据。Amestoa 等^[10]分析比较了循环流化床和鼓泡流化床技术的特点及其适用场合。主要

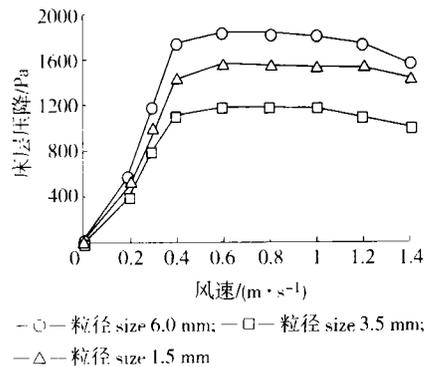


图 3 稻壳、石英砂和煤混合的流化特性曲线

Fig 3 The fluidized curves of rice husk, sand and coal blends

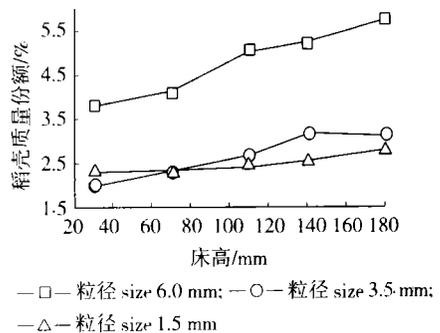


图 4 稻壳、石英砂和煤混合后的稻壳质量分布

Fig 4 Rice husk mass distribution in blends of rice husk, sands and coal

结论有: 1) CFB 技术较 BFB 技术有相对较高的燃烧效率; 2) CFB 技术 CO_2 、 CO 排放较 BFB 技术降低 5% ~ 10%; 3) 提高生物质的份额有助于提高燃烧份额和减少环境污染; 此外, 也研究了温度、流化速度对生物质燃烧效率的影响以及 CO 的排放情况, 并收集了焚烧炉、旋风分离器以及布袋除尘器的底灰, 对其物理成分进行了分析。加

拿大 McCann在对生物质鼓泡流化床焚烧炉设计回顾时,评述了法国和北美制造的典型生物质鼓泡流化床锅炉典型设计参数,水分和灰分的影响,污染气体的排放,并分析比较了鼓泡流化床和传统炉排炉的优缺点。

3.2 生物质与煤混烧技术

将生物质如木材或农林废弃物与煤混合燃烧,既可将废物高效利用,又能降低 NO_x 的排放。因为生物质的含氮量比煤少,而且水分使燃烧过

程冷却,减少了 NO_x 的热形成。同时由于生物质的活性强,和煤混烧显示出良好的协同性。目前生物质与煤混燃技术在欧洲和美国利用较多,是研究的热点之一。

中国矿业大学的阎凡飞、张明旭等^[11]对生物质和煤混合燃烧过程进行了仔细的研究。根据燃烧过程,得出了生物质和煤的混合燃烧特性曲线如图 5 所示。

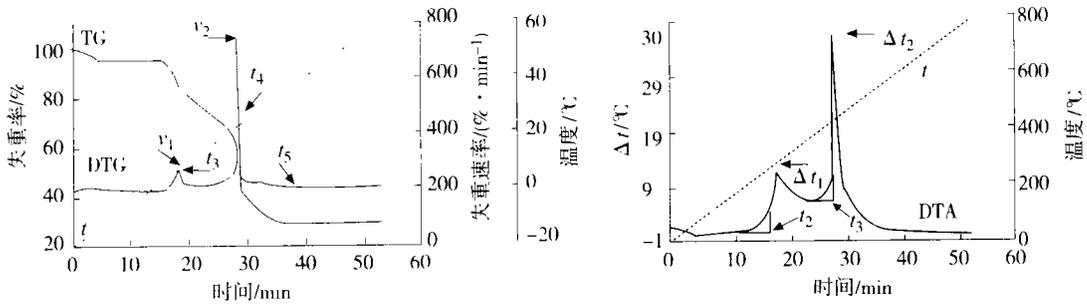


图 5 生物质和煤混合燃料燃烧曲线特征参数示意图

Fig. 5 Combustion curves of biomass and coal blends

美国得克萨斯大学的 Sami^[12]综述了生物质与煤混烧的特性,混烧时 NO_x 、 SO_x 排放量较低,并有效地降低了 CO_2 的排放量。此外,混烧还能降低燃料消耗、减少化学组分对水和土壤的污染。同时也提出了有待解决的问题: 1)含碱的生物质灰处理须引起高度注意; 2)在焚烧炉内燃烧的生物质最大粒径尺寸需要进一步研究; 3)现有的给料器系统需要重新组装,因为生物质燃料相对于

煤的热值较低,为达到同热量供给,需提高给料器的传递速率。

黑龙江新兴选煤厂的张云利等^[13]作了生物质与煤混烧不同比例对燃烧速度的影响试验。选用 15% ~ 40% 锯末无烟型煤,在 850 °C 的马弗炉中,全开门燃烧时,测出在不同燃烧阶段的平均燃烧速率,试验数据见表 3。

表 3 生物质含量对燃烧速率的影响¹⁾

Table 3 The influence of biomass content in blends on the combustion velocity

燃烧时间 /min burning time	燃烧温度 /°C burning temperature	15% 的锯末 saw dust			20% 的锯末 saw dust			30% 的锯末 saw dust			40% 的锯末 saw dust		
		dm	rdm	vdm									
0~25	635	2.11	23.28	0.086	3.61	38.20	0.144	3.73	37.96	0.149	4.00	39.81	0.160
33~43	739	0.49	5.13	0.049	0.53	5.61	0.053	0.55	5.59	0.055	0.54	5.37	0.054
52~62	821	0.39	4.66	0.043	0.50	5.29	0.050	0.50	5.09	0.050	0.49	4.88	0.049
72~82	883	0.38	4.22	0.039	0.42	4.44	0.042	0.41	4.17	0.041	0.41	4.08	0.041
92~102	918	0.29	4.11	0.038	0.40	4.23	0.040	0.38	3.87	0.038	0.36	3.58	0.036
112~122	878		3.14	0.029	0.30	3.17	0.030	0.28	2.85	0.028	0.29	2.89	0.029

1) dm: 锯末型煤燃烧量,在某段时间内型煤燃烧和挥发质量, g burned content of mixture of biomass and coal. Combustible and volatile weight of mixture in the certain time; g; rdm: 可燃物相对燃烧速率,在某段时间内型煤燃烧和挥发质量相对于可燃物和挥发物的质量百分数,%; relative burning rate of mixture; relative percent of combustible and volatile weight in the mixture compared with the total combustible and volatile weight in the certain time, %; vdm: 平均燃烧速率,在某段时间内单位时间内型煤燃烧和挥发的物质质量,单位为 g/min; burning rate of mixture; combustible and volatile weight of mixture per unit time, g/min.

3.3 生物质燃烧发电

生物质直燃发电技术由于其成本低,利用量大,一直被各国重视。在我国,直燃生物质发电技

术主要在有稳定生物质原料来源的制糖厂和林木加工企业使用较多。英国 F browatt 电站的 3 台额定负荷为 12.7、13.5 和 38.5 MW 的锅炉,每年

直接使用 750 000 t 的家禽粪, 发电量足够 100 000 个家庭使用; 并且禽粪经燃烧后重量减轻 90%, 便于运输, 作为一种肥料在全英、中东及远东地区销售^[14]。

由于生物质中含有大量的水分(有时高达 60% ~ 70%), 在燃烧过程中大量的热量以汽化潜热的形式被烟气带走排入大气, 燃烧效率低, 浪费了大量的能量。为了克服单燃生物质发电的缺点, 当今使用较多的是利用大型电厂的设备, 将生物质与煤混燃发电。大型电厂混燃发电能够克服生物质原料供应波动的影响, 在原料供应充足时进行混燃, 在原料供应不足时单燃煤。利用大型电厂混燃发电, 无需或只需对设备进行很小的改造, 能够利用大型电厂的规模经济, 热效率高。

现在欧美一些国家都基本使用热电联合生产技术(CHP), 锅炉设计基本全部采用流化床技术。CHP 工艺中发电效率在 30% ~ 40%, 但是它有 80% 的潜力可控。瑞典和丹麦实行利用生物质进行热电联产的计划, 使生物质在提供高品位电能的同时, 满足供热的需求。丹麦政府已明令电力行业必须每年焚烧 140 万吨生物质, 一般是在流化床炉上混烧或在炉排炉上全烧稻秆。

美国的生物质燃烧发电工作比较先进, 相关的生物质发电站有 350 多座, 发电装机总容量达 700 MW, 提供了大约 6.6 万个工作岗位, 据有关科学家估计, 到 2010 年生物质发电将达到 13 000 MW 装机容量, 可安排 17 万多就业人员。2002 年日本提出计划 2010 年生物质能发电达 330 MW。我国“十五”国家科技攻关计划提出要推广建成 MW 级电站 10 座以上, 发电成本在 0.25 元 / kWh 左右^[15]。

3.4 城市生活垃圾焚烧发电

上述所探讨的主要是以木质素及农林废弃物为主的生物质, 城市生活垃圾作为生物质的一种, 因其组成的复杂性和特殊性, 在此单独考虑解决方法。

全球每年新增生活垃圾 100 多亿吨, 我国垃圾产量已达 1.4 亿吨 / 年, 并以每年 8% ~ 10% 的速度递增, 因此解决垃圾问题刻不容缓。燃烧技术能达到很好的减容、减量目的, 并可将其产生的能量用于发电, 因此成为处理城市生活垃圾的主要方法之一。

中科院广州能源所的赵松等^[16]对垃圾衍生

燃料(RDF)在流化床中不同工况下的污染物 NO_x 生成进行了实验研究, 结果表明: 污染物 NO_x 的产生与 RDF 本身的成分组成、燃烧温度、过量空气系数、二次风有密切联系; 二次风的通入和过量空气系数保持在 1.1 都能降低 NO_x 的产生。

浙大的金余其等^[17]在电加热流化床炉中研究了典型垃圾可着火组分挥发分析出及焦炭燃烧特性, 并考察了水分、床温等因素对燃烧的影响, 同时还研究了垃圾中高水分组分的焚烧特点。研究表明聚合物类废弃物挥发分析出质量速率要比生物质类废弃物快, 废弃物的挥发分析出速率要比煤快得多; 挥发分析出时间随床温的升高而近指数降低, 水分的增加会延迟挥发分的析出, 但可加速焦炭的燃烧; 生物质类废弃物焦炭的表观燃烧速率随直径的增大而减小; 高水分组分焚烧时不产生明显火焰, 近似一个水球蒸发, 焚烧时间与等效表面积、体积直径成正比。

4 生物质燃烧过程中的问题

在生物质燃烧过程中, 因生物质含有较多的水分和碱性金属物质(尤其是农作物秸秆), 燃烧时易引起积灰结渣损坏燃烧床, 还可能发生烧结现象。烧结与温度、流化风速和气氛有关, 但是温度是影响烧结的最主要因素。稻草的烧结温度在 680 °C, 玉米秆的烧结温度在 740 °C, 高粱秆的烧结温度在 680 °C。随着温度的升高, 烧结块尺寸增大, 数量增多, 硬度增强^[18]。此外, 生物质在燃烧开始时期, 挥发分释出迅速, 可能造成燃烧的揣动和间断。

加拿大的 Ergudenler 等^[19]对麦秆气化的烧结现象进行了试验研究, 得出除温度外, 风量也对烧结有影响。美国加利福尼亚大学的 Salour^[20]对稻草烧结现象进行了研究, 着重分析了灰含量对烧结产生的影响。哈尔滨工业大学的杨励丹研究了稻草、玉米秆、高粱秆在燃烧时, 床料温度、灰含量、停留时间对烧结的影响。停留时间的影响主要表现在结块的硬度和尺寸上。Sugita 等^[21]研究了稻壳灰活性与其煅烧温度之间的关系以及工程上的可行性, 并提出了一种制备高活性稻壳灰的新方法——两段煅烧法, 以避免烧结。

为防止积灰结渣、烧结腐蚀问题发生, 可以考虑如下措施^[22]: 可将生物质原料与煤炭或泥炭混

合燃烧,后者比例不小于 30%;管道材料要使用具有抗腐蚀功能的富铬钢材或者镀铬;尽可能使用较低的蒸汽温度;如有可能,使用淋溶过的生物质原料,如农作物收割后置于田间,经过雨淋和风干后再使用。

目前,主要的燃烧床床料有 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 , 尤其是 Fe_2O_3 比 SO_2 、 Al_2O_3 更易与碱金属氧化物、盐反应。南斯拉夫的 Boristav 等^[23] 比较了 Fe_2O_3 、 SO_2 、 Al_2O_3 三种物质作床料的效果。Bapat 等也着重报道了如何降低和克服床料凝结、床壁间、过热器管结渣以及受热面结垢的方法。提出的尝试方法有: 1) 采用其他替代物质如白云石、长石、菱镁土及石灰石等作床料; 2) 采用添加剂; 3) 混入煤或褐煤等其他燃料。

5 生物质燃烧技术的发展趋势与展望

近 20 年来,我国在生物质能燃烧利用方面取得了长足的进步;但与发达国家相比,无论技术层面还是应用层面仍有很大差距。为进一步促进我国生物质能产业的发展,建议政府的有关部门制定优惠政策,研究经济高效的燃烧技术,促进建立生物质燃料收集、预处理和配送体系,鼓励建设和使用生物质发电系统,即与煤混合燃烧发电系统,这将对我国社会经济和环境持续协调发展起到重大深远的影响。我们相信由于生物质的可再生性、环境友好性及对全球气候异常的抑制作用,大力发展生物质能利用及燃烧发电技术前景良好且意义重大。

参考文献:

[1] 肖军,段菁春,王华,等. 生物质利用现状 [J]. 安全与环境工程, 2003 10(1): 11-14
 [2] 蒋剑春. 生物质能源应用研究现状与发展前景 [J]. 林产化学与工业, 2002 22(2): 75-80
 [3] 宋永利,杨丽华. 工业锅炉生物质燃烧技术 [J]. 节能技术, 2003 21(3): 44-45
 [4] 李晓东. 生物质流化床燃烧技术 [C] // 第八届循环流化床会议, 杭州, 2005 41-45
 [5] 江淑琴. 生物质燃料的燃烧与热解特性 [J]. 太阳能学报,

1995, 16(1): 40-48
 [6] 刘豪,邱建荣,董学文,等. 生物质与煤混烧的燃烧特性研究 [J]. 热能动力工程, 2002(9): 451-454
 [7] 田宜水. 生物质燃烧综述 [C] // 2004 年中国生物质能技术与可持续发展研讨会, 长沙, 2004: 111-118
 [8] 陈冠益,方梦祥,骆仲决,等. 生物质流化床的试验研究及设计要点 [J]. 热力发电, 1999(5): 19-23
 [9] 阎常峰,李海滨,赵松,等. 垃圾焚烧管式布风流化床的冷态试验 [J]. 化学工程, 2005 33(2): 55-58
 [10] ARMESTOA L, BAHILLOA A, VEIDNEN B K, et al Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed [J]. Biomass and Bioenergy, 2002(23): 171-179
 [11] 闵凡飞,张明旭. 生物质与不同变质程度煤混合燃烧特性的研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2005 34(2): 236-241
 [12] SAM IM, ANNAMALA IK, WOOLDRIDGE M. Co-firing of coal and biomass fuel blends [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2001 (27): 171-214
 [13] 张云利,刘坤,孙丽丽. 生物质型煤燃烧特性的研究 [J]. 煤炭技术, 2003 22(6): 114-115
 [14] 张殿军,陈之航. 生物质燃烧技术的应用 [J]. 能源研究与信息, 1999 15(3): 15-21
 [15] 武全萍,王桂娟,李业发. 生物质洁净能源利用技术 [J]. 能源与环境, 2004(2): 41-43
 [16] 赵松,李海滨,阎常峰,等. 垃圾衍生燃料 (RDF) 流化床燃烧过程中 NO_x 的实验研究 [C] // 2004 年中国生物质能技术与可持续发展研讨会, 长沙, 2004: 111-118
 [17] 金余其,严建华,池涌,等. 城市垃圾典型组分流化床燃烧特性的试验研究 [J]. 动力工程, 2004 4(2): 266-270
 [18] 别如山,李炳熙. 燃生物废料流化床锅炉 [J]. 热能动力工程, 2000 15(4): 344-347
 [19] ERGUDENLER A, GHALY A E. Agglomeration of silica sand in a fluidized bed gasifier operating on wheat straw [J]. Biomass and Bioenergy, 1993 4(2): 135-137
 [20] SALOUR D, JENKINS B M, VAFAEIM, et al Control of in-bed agglomeration by fuel blending in a pilot scale straw and wood fueled AFBC [J]. Biomass and Bioenergy, 1993, 4(2): 117-133
 [21] SUGITA S. Fundamental study on the effective utilization of rice husk ash as concrete materials [C] // Hokkaido Hokkaido University, 1996
 [22] 董宏林, RANDERSON P F, SLATER F M. 生物质能源转换新技术及其应用 [J]. 宁夏农林科技, 1999(6): 10-17
 [23] BORISAV D G, SMEON N O, MLADEN S et al Biomass FBC combustion bed agglomeration problems [J]. Fluidized Bed Combustion, 1995 (1): 515-522