

生物质直燃电厂余热在农业中的应用

任少辉¹, 胡晓炜², 胡灿², 赵渊², 李跃峰¹

(1. 武汉凯迪绿色能源开发运营有限公司, 湖北省 武汉市 430074;

2. 武汉凯迪电力工程有限公司, 湖北省 武汉市 430074)

Waste Heat Utilization of Biomass Direct-Fired Power Plant in Agriculture

REN Shaohui¹, HU Xiaowei², HU Can², ZHAO Yuan², LI Yuefeng¹

(1. Wuhan Kaidi Green Energy Development and Operation Co., Ltd., Wuhan 430074, Hubei Province, China;

2. Wuhan Kaidi Electric Power Engineering Co., Ltd., Wuhan 430074, Hubei Province, China)

摘要: 生物质直燃电厂能够清洁集中利用生物质能。降低电厂排烟温度, 充分利用电厂余热将有效提高生物质能的利用效率或为电厂开辟新的经济增长点。结合生物质直燃电厂在农村区域的特点, 探讨将电厂烟气余热充分应用到农业中的可能性。结果表明: 因地制宜地将生物质直燃电厂余热应用于生活供热、种植、养殖等农业领域, 将促进农民收入的增长和保护生态环境。

关键词: 生物质直燃电厂; 余热利用; 农业

ABSTRACT: Biomass direct-fired power plant is a clean and concentrated way to utilize bioenergy. Reducing the flue gas temperature and making full use of the waste heat of the power plant will effectively improve the utilization efficiency of bioenergy or open up a new economic growth point for the power plant. Based on the characteristics of biomass direct-fired power plants in rural areas, the possibility of applying waste heat of flue gas from power plants to agriculture was discussed. The results show that it would promote farmers' income and protect ecological environment by applying waste heat from biomass direct-fired plants to domestic heating, planting, breeding and other agricultural fields.

KEY WORDS: biomass direct-fired power plant; waste heat utilization; agriculture

0 引言

生物质能是一种优秀的可再生能源, 具有量大、易得、燃烧产物对环境友好等一系列优点, 目前我国耕地面积 15.855 亿亩, 其中农林废弃物约 11.38 亿 t, 折合标准煤约 5.6 亿 t^[1]。生物质直燃电厂是能够将秸秆、林业废弃物中的生物质能

高效清洁转化为电能的方式之一。由于其清洁利用的性能, 生物质直燃电厂在国内得到了大力发展^[2-6]。从 2007 年我国第一个农林废弃物发电项目在山东单县开工建设, 至 2016 年, 农林生物质直燃发电项目达 254 个, 并网装机容量约为 640 万 kW^[7]。预计到“十三五”结束, 全国农林生物质直燃发电装机总量将达到 700 万 kW^[8]。

1 生物质电厂余热在农业中应用的意义

由于燃料是分散的农业或林业废弃物, 与燃煤电厂相比, 生物质电厂具有其特殊性。其主要特点如下:

1) 燃料成本占据了生物质电厂运营成本的 50% 以上;

2) 为了收购燃料方便, 控制燃料成本, 生物质电厂大多都建设在农林废弃物相对较多的农村区域或城乡接合部;

3) 现有生物质电厂的排烟温度相对较高, 按某生物质电厂排烟温度为 150 °C 考虑, 与大型燃煤电厂的排烟温度相比, 有充分的可利用空间。

生物质电厂的排烟损失是锅炉损失中最大的一项。因此, 为降低燃料成本, 保证生物质直燃电厂的经济运行, 首先应该关注的是降低生物质电厂的排烟温度。本文针对生物质电厂处于农业生产领域附近的特点, 提出将生物质直燃电厂的余热因地制宜地应用到周边居民生活或农业生产范围内的方法, 不仅符合国家生物质能供热的指

导意见,也加快了生态农村的发展和建设。同时将生物质直燃电厂的低温烟气“变废为宝”,提高了生物质能的利用效率,为生物质电厂带来部分经济效益。

2 生物质直燃电厂烟气余热应用的潜力

烟气余热应用的潜力受到烟气中 SO_2 、 H_2O 等成分的制约,一旦烟气温度降低到酸露点以下,就会造成烟气管道的酸腐蚀。因此本文首先计算生物质电厂烟气的酸露点,再选用合适的设施防止酸析出对烟气管道的影响,充分利用生物质直燃电厂的余热潜力。

由于燃料收集半径在 100 km 以内,电厂的装机容量一般不超过 30 MW。烟气流量约在 $150\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 。按某生物质直燃电厂的设计数据,设计燃料的元素和工业分析如表 1 所示,各项成分的体积分数如表 2 所示。

表 1 某生物质电厂燃料成分分析

Tab. 1 Analysis of fuel components in a biomass power plant

元素分析(收到基)/%					工业分析(收到基)/%					$Q_{\text{低位}}/$
C	H	O	N	S	M	A	V	FC	(MJ/kg)	
28.74	3.37	23.29	0.50	0.03	40.24	3.83	45.04	10.89	9.63	

表 2 各项成分的体积分数

Tab. 2 Volume ratio of components

$\varphi(\text{CO}_2)/$	$\varphi(\text{N}_2)/$	$\varphi(\text{O}_2)/$	$\varphi(\text{H}_2\text{O})/$	$\varphi(\text{SO}_2)/$	$w(\text{HCl})/$	飞灰
%	%	%	%	%	(mg/m^3)	份额/%
2.277	62.924	3.856	20.938	0.005	<100	80

生物质烟气中的硫酸露点暂没有相关文献报道,本文中生物质烟气的硫酸露点暂按燃煤电厂烟气中酸露点的计算方法进行,根据苏联 1973《锅炉机组热力计算标准方法》计算,其中水露点 $t_{\text{H}_2\text{O}}$ 的计算公式^[9]如下:

$$t_{\text{H}_2\text{O}} = -1.2012 + 8.4064\varphi_{\text{H}_2\text{O}} - 0.4749\varphi_{\text{H}_2\text{O}}^2 + 0.01042\varphi_{\text{H}_2\text{O}}^3 = 62.25\text{ }^\circ\text{C} \quad (1)$$

将燃料收到基的灰分和硫分进行折算,并带入水露点的计算数值可得硫酸露点 $t_{\text{H}_2\text{SO}_4}$:

$$t_{\text{H}_2\text{SO}_4} = t_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{125\sqrt[3]{S^n}}{1.05^{\alpha A^n}} = 89.83\text{ }^\circ\text{C} \quad (2)$$

式中: $\varphi_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水蒸气的体积分数, %; S^n 为燃料

低位热值折算到 $4\,186\text{ kJ}/\text{kg}$ 时的硫分; A^n 为燃料低位热值折算到 $4\,186\text{ kJ}/\text{kg}$ 时的灰分; α 为飞灰份额。

生物质中氯元素比煤中氯元素含量大,因此有必要考察盐酸露点的影响。根据李小龙^[10]的研究,盐酸的酸露点也与烟气中的水分和 HCl 的质量浓度有关。暂时将烟气中 HCl 质量浓度按 $100\text{ mg}/\text{m}^3$ 计算,并根据下列盐酸露点计算公式,得到该烟气的盐酸露点为

$$t_{\text{HCl}} = -90.01 + 1.566\varphi_{\text{HCl}}^{0.408} + 188.38\varphi_{\text{H}_2\text{O}}^{0.141} - 1.48\varphi_{\text{HCl}}^{0.408}\varphi_{\text{H}_2\text{O}}^{0.141} = 63.08\text{ }^\circ\text{C} \quad (3)$$

式中 φ_{HCl} 为 HCl 的体积分数, 10^{-6} 。

为充分利用该生物质电厂烟气的余热,建议利用方式可以通过两级换热器,第一级换热器选用燃煤电厂目前常用的烟气冷却器,材质采用 ND 钢、Corten 钢等具有一定抗低温腐蚀性能的金属^[11],出口烟气温度在硫酸露点的 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,如本电厂可采用 $(95\pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$ 。考虑到生物质电厂烟气中水蒸气的体积分数大于燃煤电厂烟气中水蒸气的体积分数,二级换热器采用以 PE、FEP 等为材质的氟塑料耐腐蚀换热器^[12]。氟塑料换热器有其特有优势: 1) 氟塑料是已知固体材料中表面自由能最低的材料之一,几乎所有材料不能黏附在其表面,由于其表面分子对其他分子吸引力小,因而摩擦因数非常小(静、动摩擦因数与钢的比值均为 0.04),对流体产生的流动摩擦阻力也较小; 2) 根据已经采用的氟塑料换热器的经验,氟塑料换热器中每个模块都设有冲洗母管,独立控制,会采用定期以及人工的方式清洗换热器中积灰; 3) 也可以采用两路氟塑料换热器模块,一用一备,更好地清洗内部,该方式能有效解决受热面积灰问题。氟塑料换热器也在燃煤电厂中被用于提取电厂烟气中的凝结水,如在大唐国际锡林浩特电厂烟气冷凝提水工程中的氟塑料冷凝装置最大冷凝水回收量为 $78.8\text{ t}/\text{h}$ 。结合生物质电厂烟气中水分含量较高的特点,将烟气温度降低到酸露点以下,充分利用烟气的显热及部分水蒸气冷凝的潜热,如本条件下可以考虑将最终烟气温度降至 $55\text{ }^\circ\text{C}$,如图 1 所示。

根据上述烟气成分计算,每小时烟气通过一

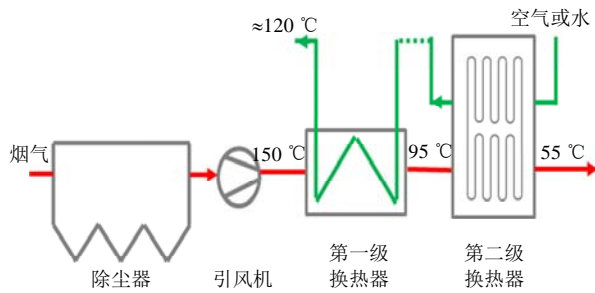


图1 生物质直燃电厂余热利用示意图

Fig. 1 Diagram of biomass direct-fired power plant waste heat utilization

级换热器可释放热量约 11 703 906.64 kJ，通过二级换热器可释放显热 8 466 709.94 kJ，55 °C 时水蒸气饱和分压为 15.84%，水蒸气冷凝 6 140 kg/h，释放潜热 14 459 700 kJ/h^[13]。因此，如果充分回收一台 30 MW 生物质直燃机组的余热，可新增供热能力约 9 000 kW。

3 生物质直燃电厂烟气余热应用的途径

采用两级换热器，可将电厂烟气的余热用来加热空气和热水。可根据需要通过将热风或热水串联的方式得到最高温度约为 120 °C 的热产品。根据当地农业的特色，可以将余热最终应用于家用生活热水、干燥、种植、畜牧及沼气发酵等行业。

1) 农村供暖。广大农村地区在冬季仍以烧散煤的方式取暖，这也是雾霾产生的主要原因之一。铺设供暖管道为广大农户实行集中供暖，是目前能改造传统供暖方式的有效途径。生物质发电厂建设在农村附近，是优质清洁的集中热源。在生物质直燃电厂邻近的城镇、乡镇、新农村建设中短供热管道，形成局部供热管网系统。采用生物质电厂蒸汽为农户提供供热和生活热水，用烟气余热的深度利用提供补充，不仅管道铺设成本低，沿途热量损失少，同时利用清洁生物质能资源也可以优化农村环境。按照供热指标为 80 W/m² 计算，采用电厂烟气余热可以为约 11 万 m² 的住宅提供集中供暖。因此这种高效利用生物质电厂余热的手段，可改善农民的生活环境，提高农民的生活质量，为实现社会主义新农村建设添砖加瓦。

2) 农产品干燥。干燥是农产品重要的保藏方法之一，通过将农产品中的部分水分除去，降低

其水分活度，从而有效地抑制微生物的生长繁殖，达到食品长期保藏的目的。热风干燥是最为传统和最常用的干燥方法之一，果蔬^[14]、香菇^[15]、鱼类^[16]等的热风干燥也得到了不少学者的关注。目前常用的热风干燥机都是采用外加热源或电加热的方式，如果将干燥机房建在生物质直燃电厂旁边，充分利用生物质电厂烟气余热产生的热量，将会大大降低干燥成本。以 30 MW 的生物质电厂烟气余热估算，可节省标煤用量约 1 000 kg/h。采用电厂的余热也可以使干燥设备 24 h 连续运转，不但使生产过程连续进行，而且通过降低设备运转成本及产品的生产量，可以更快回收前期投入。

3) 温室供暖。温室是现代农业生产性建筑设施，它可以改变植物生产环境，为植物生长创造最佳条件，避免外界四季变化和恶劣气候对其造成不利影响。目前常用的温室加热方式有燃煤、燃油热水或少量的热风锅炉。依托生物质直燃电厂周边的供热管道，加铺少量的管道到温室中，并根据种植的作物分配温室内的热水管道。与传统的热水温室相比，不需要加设锅炉房等附属措施，降低了设备投资；同时也比热风温室中温度分布更均匀，对农作物的生长条件更有优势。按照上海某采用燃煤热水机组的现代化大棚，供热指标按 45 W/m² 估算，采用生物质电厂余热热水的供暖方式可供约 20 万 m² 的大棚使用，并节省燃煤机组投资约 50 万元。温水浸泡也同样会提升种子的发芽率和育苗的成功率。因此从生物质余热获得的热水可以推动高档的跨季节果蔬、花卉和菌类的种植和育苗，为社会提供高品质蔬菜或花卉资源，对农业种植也有很好的促进作用。

4) 技术养殖。生物质电厂无论是从地理位置还是从盈利模式上都更贴近农户。热水养殖是近些年兴起的一种增加养殖种类、加快成熟速度的新型养殖方式。其中美国更是从 20 世纪 70 年代就开始通过电厂余热发展水产养殖，几乎所有的鱼类、甲壳类均能通过电厂余热来养殖。国内也是利用电厂余热水养殖罗氏沼虾^[17]、鲟鱼^[18]以及甲鱼等具有高经济优势的种类。据报道，某电厂余热水养殖场充分利用电厂排放的余热水，通过流水化、高密度养殖淡水白鲢、罗非鱼等暖水性

鱼类, 年产鲜鱼 75 万 kg 以上, 年产值 650 多万元。依照美国电厂利用余热养殖的经验, 每年能收回整个投资额的 15%~20%^[19]。如果生物质直燃电厂在动物禽类养殖厂附近, 余热热水可以提供人工孵化的热水, 保证孵化的成功率^[20]。动物粪便也可以送往生物质电厂燃烧, 或者是由生物质电厂余热热水提供温度以实现粪便的高温发酵, 增加沼气的产率^[21], 实现生态循环。因此, 采用生物质电厂的余热热水发展养殖业是同时为电厂和农户创收的干净、清洁方式。

4 结论

通过回收生物质直燃电厂烟气中余热, 实现农村供暖、农产品干燥、温室供暖、技术养殖等多途径应用, 具有节能、环保、创收的优点。如果按照生物质余热只在冬季应用计算, 年节省标煤约 4000t, 相当于减排二氧化硫 76t, 烟尘 6.3t, 氮氧化物 36t, 二氧化碳 7200t, 渣 249t。因此, 非常有必要因地制宜地推广生物质直燃电厂余热在农业中的应用。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2017 年中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017: 17-20.
- [2] 向鹏, 吴跃明, 祁超, 等. 生物质气化-燃煤耦合发电电气化模型研究[J]. 分布式能源, 2018, 3(1): 1-6.
- [3] 龙辉, 黄晶晶. “十三五”燃煤发电设计技术发展方向分析[J]. 发电技术, 2018, 39(1): 13-17.
- [4] 刘久斌, 朱红霞, 崔晓波. 我国电厂热工自动化的回顾、现状和展望[J]. 发电技术, 2018, 39(1): 18-22.
- [5] 潘宁, 陈祎, 刘蔚, 等. 生物燃气发电项目控制系统的分散控制与集中管理[J]. 华电技术, 2018, 40(2): 7-9.
- [6] 纪晓军, 王雨晴. 电改新形势下新能源消纳市场机制设计[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(6): 76-79.
- [7] 中国生物质能联盟. 2016 中国生物质发电企业排名报告[R]. 北京: 中国生物质能联盟, 2017.
- [8] 国家能源局. 生物质能发展“十三五”规划[R]. 北京: 国家能源局, 2016.
- [9] 蒋安众, 王罡, 石书雨, 等. 锅炉烟气酸露点温度计算公式的研究[J]. 锅炉技术, 2009, 40(5): 11-14.
- [10] 李小龙. 生物质烟气低温特性及生物质干燥特性实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [11] 王荣, 张建成, 童立根. ND 钢热管寿命实验及与碳钢热管对比实验研究[J]. 南京化工大学学报, 1995, 17(4): 88-93.
- [12] 胡清, 孙少鹏, 田鑫, 等. 氟塑料换热器技术的应用进展研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(4): 23-25.
- [13] 李慧君, 王树众, 张斌, 等. 冷凝式燃气锅炉烟气余热回收可行性经济分析[J]. 工业锅炉, 2003(2): 1-5.
- [14] 张建军, 王海霞, 马永昌, 等. 辣椒热风干燥特性的研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 298-301.
- [15] 郭凯, 芮汉明, 周礼娟. 香菇热风干燥过程中香气形成机理初探[J]. 食品与发酵工业, 2007, 33(10): 62-65.
- [16] 段振华, 张愨, 汤坚. 鳙鱼的热风干燥规律研究[J]. 水产科学, 2004, 23(3): 29-32.
- [17] 王兴礼. 电厂余热水养殖罗氏沼虾技术[J]. 淡水渔业, 2003, 33(4): 39-40.
- [18] 赵西才, 蒋效祥. 余热水工厂化养殖史氏鲟技术研究[J]. 渔业现代化, 2006(4): 8-10.
- [19] 邹立忠. 美国利用电厂余热水发展水产养殖[J]. 世界农业, 1982(2): 47-48.
- [20] 李峥嵘, 刘递多, 刘凯. 冷凝热回收技术在孵化设备中的应用分析[J]. 中国家禽, 2015(12): 65-67.
- [21] 浦绍瑞, 钱红亮, 马春燕, 等. 畜禽粪便高温发酵与秸秆热化学处理工艺的耦合[J]. 化工学报, 2015(6): 2220-2226.

收稿日期: 2019-10-09。

作者简介:



任少辉

任少辉(1988), 男, 硕士, 工程师, 主要从事生物质发电机组高效低能耗技术与污染物控制, renshaohui@hust.edu.cn。

(责任编辑 尚彩娟)