

燃生物废料流化床锅炉

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001) 别如山 李炳熙 陆慧林 杨励丹

摘要: 介绍了国内外生物质燃料开发与利用现状, 燃生物废料锅炉炉型的选择以及生物废料在流化床中燃烧存在的烧结问题及解决措施。还介绍哈尔滨工业大学研制的一系列燃生物废料流化床锅炉及其运行结果。

关键词: 生物废料; 流化床锅炉; 烧结

中图分类号: TK229.6⁺6 文献标识码: A

1 前言

生物质能在世界能源结构中占有十分重要的地位。据统计, 每年经过光合作用固定下来的生物质能约是全世界能源消耗的10倍。但目前被人们利用的仅占1.0%。估计世界大陆上生物质的年产量为 $10^{11} \sim 10^{12}$ 吨干物质。我国几种主要的生物质的产量也相当可观, 据统计, 仅农作物的秸秆每年约为5~6亿吨, 折合标准煤约2~2.4亿吨, 其中60%用于生活需要烧掉。森林每年可提供9000万吨薪柴, 但年实际开发量约为1.8亿吨。据1989年统计, 用于生活需要烧掉2.78亿吨薪柴。林业加工过程生产的边角废料每年约为2400万立方米, 折合标准煤150万吨。稻谷年产量约200兆吨, 可获得稻壳约40兆吨, 折合标准煤约20兆吨。我国居民仅维持日常生活用能, 每年就需要6亿吨标准煤, 占全国能耗的30%, 而这些能源的80%左右是由生物质能提供的。此外, 生物质能可年复一年的不断再生, 因此其能量是十分可观的。开发利用生物质能具有广阔的前景。

生物质能的利用之所以受到世界各国的高度重视, 还因为生物质是一种清洁燃料。生物质含硫量低, 含氮量不高, 所以燃烧后硫氧化物和氮氧化物的含量很低; 生物质中灰分一般也很小, 所以充分燃烧后烟尘含量极低。现在世界每年二氧化碳排放量为55亿吨, 导致明显的温室效应。生物质燃烧过程具有二氧化碳零排放的特点, 因为生物质燃烧生成的二氧化碳又可被植物吸收, 合成本身的生物质, 所以

没有增加大气中二氧化碳的含量。这对于缓解日益严重的温室效应有着特殊的意义。

从我国目前利用生物质能的状况看, 由于直接燃烧生物质能占相当的比重, 但燃烧设备落后, 热效率很低。如农用柴灶炉热效率一般为10%~20%, 先进的省柴炉灶热效率也仅在30%左右; 现在以层燃方式燃生物质的锅炉数量很少, 热效率也很低; 生物质气化炉的气化率低, 所得的燃气热值不高。因此提高这些锅炉、炉具的燃烧效率、热效率以及提高气化炉的气化率及燃气热值是急待解决的关键技术问题。对于节约能源有着极为重要的意义。

流态化燃烧具有燃烧效率高、有害气体排放少、热容量大等一系列的优点, 很适合燃水分大、热值低的生物质燃料。因此, 西方发达国家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。

国内也开始重视开发利用生物质能, 国家经贸委节约和综合利用司于1993年3月组团赴瑞典、德国就生物质能利用技术及设备进行技术考察; 我国农业部环能司、农业部国际合作司、山东省科学院能源所和福建省农村能源办公室组成考察组于1994年5~6月赴美考察美国的生物质能等可再生能源发电情况。表明国内对生物质能的开发利用非常重视。

2 国内外现状

美国目前开发利用生物质能主要通过直接燃烧生物质产生蒸汽、电力。生物质原料主要为采伐业的枝桠等废弃物、不成材的树木、造纸和木材加工的废弃物以及稻壳、甘蔗渣等。燃烧设备以引进德国的链条炉为主。在美国, 采用流化床燃烧技术利用生物质能也具有相当规模, 如美国爱达荷能源产品公司已生产出燃生物质媒体流化床锅炉, 蒸汽锅炉出力为4.5~50 t/h, 供热锅炉出力为 $1.06 \times 10^7 \sim$

1.32×10^8 kJ/h。80 年代末至 90 年代初期, 美国利用流化床燃烧技术开发大型燃废木循环流化床发电锅炉。例如, 由美国 CE 公司利用鲁奇技术设计生产的两台循环流化床锅炉, 分别安装于 Fresno 和 Rocklin, 出力为 100 t/h, 蒸汽压力为 8.7 MPa, 过热蒸汽温度 515 °C, 热功率 78 MW 分别于 1988、1989 年投运; 另外两台热功率为 71 MW 的循环流化床燃废木料锅炉装在 Mecca 于 1992 年投运。B & W 公司也有燃木柴流化床锅炉在运行。目前美国已有近 1000 家燃木材电厂在运行, 装机容量达 6 500 MW。预计到 2000 年以前生物质能(废木、木屑、稻谷壳和甘蔗渣等可燃生物燃料)发电总装机容量达 12 000 MW。

瑞典是高度发达的工业化国家, 由于煤、石油资源贫乏, 能源主要依赖进口石油。但瑞典森林资源丰富, 森林覆盖率达 58%, 为了利用本国资源, 减少石油进口, 瑞典非常重视生物质能的开发利用。生物质能的利用量已占全国总能耗的 16.1%, 达到 55 亿 kW·h, 其中的相当部分就是将树枝、树叶、树皮、森林废弃物、锯屑和泥炭等削片、切碎, 然后运送到热电厂, 在大型流化床锅炉中燃烧而得以利用的。尽管这些燃料的含水量有时高达 50%~60%, 但锅炉的热效率仍可达到 80%。瑞典另一个利用生物质能的方式就是将生物质送入循环流化床气化炉进行气化, 产生的燃气通过燃气轮机发电, 采用联合循环。这样的系统热效率高, 目前此种方式单机容量已达 80 MW。

丹麦为了减少二氧化碳的排放, 计划每年燃烧 700 万吨干草, 8 万吨木屑, 采用芬兰奥斯龙公司生产的高倍率循环流化床锅炉, 将干草与煤以 6:4 的比例送入炉内燃烧。锅炉参数: 出力为 100 t/h, 蒸汽压力为 90 MPa, 过热蒸汽温度 490 °C, 热功率为 80 MW。

从我国目前利用生物质能的状况看, 由于直接燃烧生物质能占相当的比重, 但燃烧设备落后, 热效率很低, 造成生物质能源的极大浪费。国内部分锅炉制造厂家设计采用链条炉燃烧生物质废料, 发现热效率低, 出力不足, 锅炉炉体大, 炉排易烧坏。为此, 哈尔滨工业大学从 80 年代末期开始研究采用流化床燃烧技术开发利用生物质能。已完成生物质媒体流化床流化特性的研究; 提高燃烧效率的研究; 燃生物质媒体流化床锅炉结构的研究; 生物质气化燃气的热值、产率和生物质在流化床中气化产生烧结现象的研究以及生物废料燃气热力联产关键技术的研究。

研究。已和国内四个锅炉厂家合作, 研制开发了 4、10、12.5、14 t/h 燃稻谷壳、废木与木屑、甘蔗渣及棕榈空果穗等生物废料流化床锅炉 11 台^[1]。其中 4 台 4 t/h 燃稻谷壳流化床锅炉、两台 12.5 t/h 燃甘蔗渣流化床锅炉出口泰国; 一台 14 t/h 燃棕榈空果穗流化床锅炉于 1997 年出口马来西亚, 一台 4 t/h 燃木屑流化床锅炉于 1998 年出口非洲加纳, 进入国际市场, 深受用户好评。三台 10 t/h 燃废木与木屑流化床锅炉在外资企业运行六年多来, 一直满发、稳定、高效率, 节约了大量能源, 创造了很高的经济效益, 用户十分满意, 该炉于 1995 年获得国家专利, 于 1998 年获得中国航天工业总公司部级科技进步二等奖。

3 炉型的选择

生物质燃料的一般特点是水分很高、灰分很小、挥发份很高、发热值偏低。用粉状燃烧时, 首先应将其制成粉末。由于生物废料是非脆性材料, 磨制时易生成纤维团而不是粉状, 而且需要预先干燥, 而干燥高水分的生物质燃料要消耗大量的热。一般可切成碎片在煤粉、油或气体燃烧室内燃烧。这样使锅炉结构、燃料制备系统和锅炉运行复杂化, 且不经济。

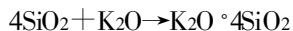
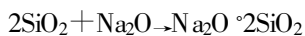
层燃锅炉属层状燃烧, 生物质燃料通过给料斗送到炉排上时, 不可能象煤那样均匀分布, 容易在炉排上形成料层疏密不均, 从而形成布风不匀。薄层处空气短路, 不能用来充分燃烧; 而厚层处, 需要大量空气用于燃烧, 由于这里阻力较大, 因而空气量较燃烧所需的空气量为少, 这种布风不均将不利于燃烧和燃尽。由于生物质的挥发份很高, 在燃烧的开始阶段, 挥发份大量析出, 需要大量空气用于燃烧, 如这时空气不足, 可燃气与空气混合不好将会造成气体不完全燃烧损失急剧增加。同时, 由于生物质比较轻, 容易被空气吹离床层而带出炉膛, 这样造成固体不完全燃烧损失很大, 因而燃烧效率很低。另一方面当生物质燃料含水率很高时, 水份蒸发需要大量热量, 干燥及预热过程需时较长, 所以, 生物质燃料在床层表面很难着火, 或着火推迟, 不能及时燃尽, 造成固体不完全燃烧损失很高, 导致锅炉燃烧效率、热效率很低, 实际运行的层燃炉热效率有的低达 40%。另一方面, 一旦它燃尽后, 由于灰分很少, 不能在炉排上形成一层灰, 以保护后部的炉排不被过热, 从而导致炉排被烧坏。采用流化床燃烧方式,

密相区主要由媒体(河沙或石英沙)组成,生物燃料通过给料器送入密相区后,首先在密相区与大量媒体充分混合,密相区的惰性床料温度一般在 850 °C ~ 950 °C 之间,具有很高的热容量,即使生物质含水率高达 50% ~ 60%,水份也能够被迅速蒸发掉,使燃料迅速着火燃烧。加上密相区内燃料与空气接触良好,扰动强烈,因而燃烧效率有显著提高。因此,流化床燃烧方式最适合含高水分生物废料的燃烧。

4 烧结现象

目前生物废料在燃烧过程中,可能发生烧结现象。烧结与温度、流化风速和气氛有关,但温度是影响烧结的最主要因素。稻草的烧结温度在 680 °C 左右,玉米秆的烧结温度在 740 °C 左右,高粱秆的烧结温度在 680 °C^[2]。随着温度的升高,烧结块尺寸增大,数量增多,硬度增强。对于稻草,温度在 700 °C 以上,便出现烧结块阻塞的现象,高粱秆在 760 °C 以上出现阻塞,而玉米秆则在 800 °C 以上仍可保持较好的燃烧。

单纯的灰是不能起粘剂作用的。砂的熔点及灰熔点都高于 1 000 °C,而实验及实际运行表明在 700 °C 就会发生烧结。一般认为,出现这种现象的原因是生物质灰中富含钾和钠,这些元素的化合物与砂中的 SiO₂ 反应,生成低熔点的共晶体,熔化的晶体沿砂的缝隙流动,将砂粒粘结,形成结块,破坏流化。反应方程式如下:



另外,参考煤烧结产生的化学机理,认为灰的酸、碱氧化物含量比是决定烧结温度的一个主要原因。其中 Al₂O₃ 对烧结的产生有抑制作用,Al₂O₃ 比 SiO₂ 更易与碱金属化合物反应,其产物熔点高。因此,灰中铝元素含量高,则可减少 SiO₂ 与碱金属发生反应的机会,避免烧结现象发生。

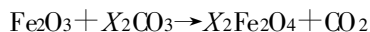
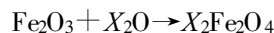
稻草灰中的钾、钠元素含量偏低,与上述原理不符。其烧结块结构也与上面两者不同,说明其形成的化学机理是不同的。稻草中碳转化率低的原因,认为与其高的 SiO₂ 含量有关^[3]。在 700 °C ~ 800 °C 时, SiO₂ 体积构向面结构转化,在此过程中,碳原子成为填充原子,形成牢固的碳硅结合,即使在 1 200 °C,也无法将其中的碳氧化^[4]。这种碳硅结合,使稻草灰连接在一起,形成蓬松的烧结块,破坏正常流化。

5 防止烧结的对策

分析烧结形成原因是为了找出解决办法。一方面,从锅炉结构因素入手,合理布置燃烧系统及炉膛受热面,保证运行温度不过高,尤其注意控制稀相区的温度。另一方面,寻找适宜的惰性床料或添加剂以抑制低熔点共晶体的形成。

不同的元素对烧结的影响是不同的。因此可以选择富含抑制烧结元素的床料,提高了烧结发生的温度,以保证正常流化。

目前,以其价格低、易获得、且不易烧结而成为主要供选择的替代床料有 Al₂O₃、Fe₂O₃,尤其是 Fe₂O₃ 比 SiO₂、Al₂O₃ 更易与碱金属氧化物、盐反应,反应式如下:



其中, X 为碱金属元素钾或钠

X₂Fe₂O₄ 的熔点为 1 135 °C,远高于运行温度,因此可防止烧结的产生,南斯拉夫的 Borislav D. Grubor 等学者比较了 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 三种物质做床料的效果。发现以 SiO₂ 为床料燃烧生物质时,在 700 °C 就出现烧结,800 °C 时相当严重。而用 Fe₂O₃ 做床料时,当灰中钾、钠总含量超过 20%,且床温在 900 °C 以上时,只有很小的结块,Al₂O₃ 的效果则介于二者之间,在 800 °C 时出现烧结,900 °C 时与 SiO₂ 作床料,床温 800 °C 时的烧结一样严重^[5]。在我们设计的燃生物废料流化床锅炉中,采取了适宜的措施,还没有用户反映床料烧结问题。

6 运行结果

从 80 年代末期开始研究采用流化床燃烧技术开发利用生物质,先后与长春锅炉厂、长沙锅炉厂、营口锅炉总厂、天山锅炉厂研制开发燃甘蔗渣、稻壳、板厂废料和棕榈空果穗等生物废料流化床锅炉。与长春锅炉厂合作研制的两台 12.5 t/h 燃甘蔗渣锅炉经德国 BAY 公司销往泰国;与长沙锅炉厂合作研制的 4 台 4 t/h 燃稻壳锅炉也已出口泰国,与营口锅炉总厂合作开发的 4 t/h 燃板厂废料锅炉出口西非加纳;14 t/h 燃棕榈空果穗锅炉出口马来西亚,深受国外用户的好评。另外与营口锅炉总厂合作研制的三台 10 t/h 燃废木与木屑流化床锅炉(设计参数为:

锅炉蒸发量 $D=10 \text{ t/h}$; 工作压力 $P=1.25 \text{ MPa}$; 过热蒸汽温度 $t''=350 \text{ }^\circ\text{C}$; 设计效率 $\eta=80.86\%$, 装在大连金州外资企业常荣、常盛合板有限公司。经测试, 燃烧效率达 99% , 锅炉热效率达 83% , 这两个主要技术指标已达到国际先进水平。该锅炉是辽宁省科委火炬计划和辽宁省机械委新产品计划项目, 于 1995 年 12 月荣获辽宁省优秀新产品银奖, 填补了国内空白。1996 年被国家经贸委列为国家级重点新产品试产计划。1998 年获得中国航天工业总公司部级科技进步二等奖。

参考文献:

[1] 别如山, 鲍亦令, 杨励丹, 等. SHF10-1.25/350 废木材流化床锅

炉的研制[J]. 工业锅炉, 1996(4): 2-4.

- [2] 杨励丹, 李海军, 鲍亦令, 等. 生物质在流化床中燃烧时的烧结现象[J]. 新能源, 1997, 19(8): 13-16.
- [3] Sabur D, Jenkins B M, Vafaei M. *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.
- [4] Ganesh A, Grover P D, Lyster P V R. Combustion and gasification characteristics of rice husk[J]. **Fuel**, 1992, 71(8): 889-894.
- [5] Gubor B D, Oka S N, Ilic M S. *et al.* Biomass FBC combustion-bed agglomeration problems[C]. **Fluidized Bed Combustion**, ASME 1995, 1(1): 515-522.

(复 编辑)

(上接第 343 页)

- [3] Sambil I. Hardware being readied for prototype testing in advanced turbine systems[J]. **Gas Turbine World**, 1998, 28(1): 36-41.
- [4] Movchan B A. EB-PVD technology in the gas turbine industry: present and future[J]. **JOM**, 1996, 11: 40-44.
- [5] Farmer R. Reheat GTs boost 250 and 365-MW combined cycle efficiency to 58% [J]. **Gas Turbine World**, 1993, 23(5): 18-23.
- [6] Sambil I. Commercial catalytic Combustion system on-line at California utility[J]. **Gas Turbine World**, 1998, 28

(6): 22-24.

- [7] Романов В И, Дикий Н А. Изотермиярование процесса сжатия воздуха в компрессоре и его влияние на характеристики двигателя азотурбинного типа [J]. ПТЭМ, Теплотехника, 1998, 20(6): 45-50.
- [8] McNeely M. Intercooling for LM6000 gas turbines[J]. **Diesel & Gas Turbine Worldwide**, 1998, 30(6): 42-45.
- [9] Fulton K. Marine WR-21 succeeds in 500-hour ICR production engine test program[J]. **Gas Turbine World**, 1997, 27(6): 22-26.
- [10] Farmer R. Superheated steam injection

rivals combined cycle power performance [J]. **Gas Turbine World**, 1998, 28(4): 12-17.

- [11] Gas Turbine Power for Cruisers [J]. **Diesel & Gas Turbine Worldwide**, 1998, 30(6): 38-39.
- [12] Wabash River Successfully demonstrates commercial IGCC [J]. **Modern Power Systems**, 1996, 16(7): 37-40.
- [13] Fulton K. Russian bomber and transport jets groomed for gas pipeline pumping [J]. **Gas Turbine World**, 1993, 23(3): 13-22.

(复 编)

简 讯

轴承视油杯断流处理

汽轮发电机组大都在轴承壳体上安装了便于工作人员监视轴承回油情况的视油杯, 用此帮助监督、判断轴承工作情况是否正常。

我厂 NO.3 机组在(开机或停机)低转速时, 有一部轴承视油杯中油流情况清晰可辨, 但在(工作转速)较高转速时, 视油杯中却不见油流。其原因分析有二:

1) 轴承顶间隙和两侧间隙过大, 因而耗油量增大, 泄压快, 回油从轴承两端相对开阔的间隙中捷径流回油室。压头不足便出现断流。

2) 机组转速(工作转速)较高情况下, 轴承回油量大, 流速高, 形成一定的射流抽吸作用, 使轴承回油压力降低。加之回油受到位于轴承上半连通视油杯进油孔的高频切割, 难以形成具有一定正压力的通往视油杯的回油路径, 致使回油从阻力最小处(轴承两端)排出。与此相反, 机组起动或停机过程, 因其转速较低, 轴承回油射流抽吸作用力小, 回油压力衰减的较少, 加之轴承上半通往视油杯的小油孔, 对轴承回油切割的频率低, 利于形成具有一定正压力的通往视油杯的油流形成连续油路。故此, 视油杯中可见油流。

根据以上分析, 对该轴承采取了如下措施:

1) 趁机组小修, 调整轴承间隙, 使其符合蓝图指标。

2) 在上半轴承瓦片回油槽处, 顺时针方向攻钻一只大致与水平线夹角成 30° 左右的直径 5 mm 小孔, 以引导轴承回油顺轴颈转势不间断的通往视油杯。

轴承经此调整、小改, 视油杯再无断流情况发生, 达到了预期目的。

(王 金 明 稿)

大型汽轮机控制系统的技术现状及发展= **Technical Status Quo and Development Trend of Control Systems of Large-sized Steam Turbines** [刊, 汉] / WENG Yi-wu (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 333 ~ 335, 359

This paper describes the current technical level of control systems of large-sized steam turbines and analyzes some existing issues to be dealt with. With a variety of proposals offered for their resolution the author forecasts the development trend of the above-mentioned control systems. **Key words:** large-sized steam turbine, control system, digital electro-hydraulic control system

我国的燃气—蒸汽联合循环发电技术前景良好= **Bright Prospects for the Development of Gas and Steam Turbine Combined Cycle Plant-based Power Generation Technology in the People's Republic of China** [刊, 汉] / TU Shan, MAO Jing-ru, SUN Bi (Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi, China, Post Code 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 336 ~ 338

In connection with the energy-source structure and energy policy of the People's Republic of China the authors point out that the construction of gas and steam turbine combined cycle plants represents a major and cost-effective avenue for enhancing electrical power generation efficiency and resolving environmental pollution-related issues. This is especially so in the case of an integrated gasification gas-steam combined cycle (IGCC) plant and a pressurized fluidized bed combustion combined cycle (PFBC-CC) plant, the two types of coal-fired combined cycle power generation technology universally recognized as having the best potential for further development. The present paper briefly covers the major aspects of each type of the above-mentioned technology. **Key words:** combined cycle plant, gas and steam turbine combined cycle plant, supercharged fluidized bed combined cycle plant, new energy sources, development

燃气轮机的技术和应用: 现状和展望= **Current Status and Future Prospects of Gas Turbine Technology and Its Applications** [刊, 汉] / Ji Gui-ming, LIU Chang-he (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 339 ~ 343, 347

Based on a broad overview of the recent developments of gas turbine technology and its applications the authors give a comprehensive and systematic account of the state-of-the-art advances of the said technology in various engineering sectors. Analyzed is the trend of its technical development and applications, specifically, likely advances and prospects of development in the People's Republic of China. Some decisive steps for the development and consolidation of the gas turbine industry in China are also proposed and briefly discussed. **Key words:** gas turbine, design, technology, applications, power engineering

燃生物废料流化床锅炉= **Biomass-fired Fluidized Bed Boilers** [刊, 汉] / BIE Ru-shan, LI Bing-xi, LU Hui-lin, et al (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 344 ~ 347

This paper depicts the current status of development and utilization of biomass both at home and abroad and methods for the selection of biomass-fired boiler types. The measures adopted for resolving the agglomeration problems related to biomass-firing are proposed along with a brief description of a series of biomass-fired fluidized bed boilers developed by the Harbin Institute of Technology as well as their operation experiences. **Key words:** biomass, fluidized bed boiler, agglomeration

高温空气燃烧新型锅炉及特性分析= **A New Type of High Temperature Air-fired Boiler and An Analysis of Its Specific Features** [刊, 汉] / JIANG Shao-jian, PENG Hao-yi, AI Yuan-fang, et al (Department of Applied Physics and Heat Engineering, China National Southern University, Changsha, Hunan, China, Post Code: 410083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 348 ~ 351