

循环流化床生物质直燃发电技术研究进展

胡 南^{1,2}, 谭雪梅^{1,2}, 刘世杰¹, 赵 冰³, 巩太义³, 王家林³, 张守玉⁴

(1. 长春工程学院 能源动力工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 清华大学 电力系统国家重点实验室, 北京 100084;

3. 华电国际电力股份有限公司天津开发区分公司, 天津 300270; 4. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要:循环流化床农林生物质直燃发电是农林生物质资源化利用的主要途径,在我国碳达峰和碳中和的战略目标下,产业发展将迎来更大的机遇,同时也面临更多的问题和挑战。为了促进循环流化床锅炉生物质发电产业的稳定、健康发展,调研了生物质直燃发电产业发展现状,梳理了循环流化床锅炉在生物质发电产业应用的技术优势,系统分析了生物质循环流化床锅炉的发展历程和关键技术突破。生物质直燃发电产业近年来在我国乃至世界范围内都得到了高速发展,“十三五”以来,我国生物质发电装机年均增长率约 20.3%。循环流化床燃烧技术由于其特有的燃料适应性、较高的燃烧效率和较低的污染物排放,适用于生物质直燃发电,目前新建的生物质发电厂普遍采用高压和超高压参数循环流化床锅炉,部分先进机组带有一次再热循环。流态重构技术在生物质循环流化床锅炉上的应用,能大幅降低机组厂用电率,进一步提高锅炉效率;通过优化燃烧温度及风量配比,NO_x原始排放得到有效控制;针对生物质燃料碱金属含量高,易于结渣沾污的问题,通过优化对流受热面,控制燃烧温度,可以有效减缓受热面沾污堵塞等问题,锅炉可用率大幅提高。目前限制生物质发电产业发展的主要因素包括运行成本较高、企业管控水平落后以及国家补贴的不确定性,随着生物质发电政府补贴的退坡,产业发展将受到一定影响。针对生物质纯燃发电经济性较差的问题,我国应发展小容量超高压参数机组,包括超高压一次再热甚至亚临界机组,可以有效提高发电效率。随着碳交易体系的建立,燃煤耦合生物质直燃发电将得到进一步发展。

关键词:循环流化床锅炉;生物质;发电;高参数;可再生能源

中图分类号:TK6 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2022)03-0032-09

Research progress on power generation of biomass direct combustion in circulating fluidized bed

HU Nan^{1,2}, TAN Xuemei^{1,2}, LIU Shijie¹, ZHAO Bing³, GONG Taiyi³, WANG Jialin³, ZHANG Shouyu⁴

(1. School of Energy and Power Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China; 2. China State Key Lab of Power System,

Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Tianjin Development Area Branch of Huadian Power International Co., Ltd., Tianjin 300270, China;

4. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Direct combustion power generation of agricultural and forestry biomass in circulating fluidized bed is the main technical route of biomass utilization. Power generation with biomass will embrace great opportunities and face more problems and challenges under the strategic goal of carbon peak and carbon neutral in China. In order to promote the development of the CFB boiler biomass power generation industry, the development status of biomass direct combustion power generation industry were investigated, the technical advantages of circulating fluidized bed boiler in biomass power generation industry were combed and the development history and key technological breakthroughs was analyzed systematically. Power generation of biomass direct combustion has developed rapidly in China and the world in recent years. The average growth rate of biomass power generation installed in China is about 20.3% each year since the 13th Five-Year Plan. CFB combustion technology is suitable for biomass due to its wide fuel adaptability, higher combustion efficiency and lower pollutant

收稿日期: 2021-06-22; 责任编辑: 常明然 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CC21062201

基金项目: 中国华电集团有限公司重大科技项目资助计划(CHDKJ19-01-88); 吉林省自然科学基金资助项目(YDZJ202101ZYTS180); 中国工程院咨询项目(2020-XY-10)

作者简介: 胡 南(1985—), 男, 江苏泗阳人, 教授, 博士。E-mail: hn04@tsinghua.org.cn

引用格式: 胡南, 谭雪梅, 刘世杰, 等. 循环流化床生物质直燃发电技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 32-40.

HU Nan, TAN Xuemei, LIU Shijie, et al. Research progress on power generation of biomass direct combustion in circulating fluidized bed[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 32-40.



移动阅读

emission. At present, high pressure and ultra-high pressure CFB boilers are commonly used in new biomass power plants, and some units are equipped with once reheat cycle. The fluidization reconstruction technology on biomass circulating fluidized bed boilers has greatly reduced the auxiliary power consumption rate of the unit and further improved the boiler efficiency. Through the optimization of combustion temperature and air volume ratio, the original emission of nitrogen oxides is effectively controlled. In view of the high content of alkali metal of biomass fuel, the problems such as contamination and blockage of heating surface can be effectively reduced by optimizing the design of convective heating surface and lowering combustion temperature, and the availability of boiler is greatly improved. The main factors restricting the development of biomass power generation industry were pointed out at present, including high operating costs, uncertainty of state subsidies and backward level of enterprise management and control. With the decline of government subsidies for biomass power generation, industrial development will be limited. In view of the poor economy of biomass pure combustion power generation, small-capacity, ultra-high parameter units including ultra-high pressure once reheat and sub-critical units should be developed, which can effectively improve the power generation efficiency. With the establishment of carbon trading system, power generation by coal coupled biomass will be further popularized.

Key words: CFB boiler; biomass; power generation; high parameter; renewable energy

0 引 言

生物质是指通过光合作用形成的各种有机体,包括动物、植物、微生物及其代谢物等。以化学能形式储存在生物质中的能量为生物质能。生物质能约占全球一次能源的 $1/10$ ^[1],是仅次于煤炭、石油和天然气的第四大能源。生物质能是生物固碳实现绿色碳减排的载体,也是唯一可储存、可运输的可再生能源,对于实现我国“碳达峰”和“碳中和”的战略目标将发挥重要作用。

生物质能的利用形式主要包括发电(含热电联产)、供热、燃气、液体燃料和固体成型燃料等。生物质发电技术包括生物质纯烧发电技术和耦合发电技术,其中生物质纯烧发电技术还可分为直接燃烧发电、气化发电和多联产发电^[2]。生物质发电技术有利于生物质大规模资源化利用,减少不当处置带来的生态环境危害,提升生物质能利用的品质。由于生物质直接燃烧技术对原料要求低、系统简单、投资和运行成本较低,我国生物质发电主要以直燃发电为主。

农林生物质直燃发电的核心装备是锅炉,主要采用循环流化床锅炉或水冷振动炉排炉。循环流化床锅炉容量理论上不受限制,蒸气参数高,发电机组整体效率高;炉膛内气-固两相流动具有极强的传热传质特性,特别适合处理不同尺寸、形状和热值的燃料,能够适应生物质燃料的复杂性和多变性;锅炉在低温条件下可以稳定燃烧,使得污染物的生成和排放更少。因此,循环流化床锅炉被认为是目前最适合大规模开发利用生物质资源的燃烧设备之一^[3-4]。近年来,以清华大学、中科院、浙江大学、哈尔滨工业大学为代表的国内高校和研究机构针对循环流化床燃生物质的相关理论研究逐步深入,国

内部分锅炉厂也积极开展生物质循环流化床锅炉的开发设计工作^[4]。通过不断的科研攻关和应用实践,锅炉可用性低、受热面沾污腐蚀、污染物控制等影响产业发展的难题逐步解决,生物质直燃循环流化床锅炉技术不断趋于成熟,满足生物质纯燃或各种比例掺烧的要求。

循环流化床锅炉农林生物质直燃发电产业在我国已发展 15 a,目前已经步入稳定发展时期。为了加快我国可再生能源发展,满足碳中和战略的技术需求,有必要对循环流化床锅炉农林生物质直燃技术的发展历程、现状和趋势进行综合梳理。基于此,笔者分析了循环流化床农林生物质直燃发电市场需求,梳理核心锅炉装备的发展历程和现状,明确产业发展存在的问题并提出相关对策建议。

1 生物质直燃发电发展现状

1.1 全球范围持续发展

全球生物质资源十分丰富,每年净生产量超过 1 700 亿 t,储存的能量约相当于世界能源年消耗量的 10 倍^[4]。生物质直燃发电技术在全球范围内应用广泛,目前在丹麦、芬兰、瑞典、荷兰等欧洲国家,以农林生物质为燃料的发电厂有 300 多座,南亚国家在以稻壳、甘蔗渣等为原料的直燃发电方面也取得了一定的进展^[2]。

截至 2020 年底,全球生物质发电累计装机容量 1.27 亿 kW,约占全球总发电量的 1.4%,主要分布在中国、巴西、美国、印度、德国和英国等国家。自 2010 年以来,装机总量年平均增长 6.3%,如图 1 所示^[5-6]。目前,全球能源消费正持续向能源清洁化转变,由于生物质能具有可再生、可存储、可运输的特点,同时生物质发电具有大规模消纳农林生物质和废弃物的优势,因此生物质发电产业拥有持续发

展的动力和广阔的发展前景。国际能源署(IEA)预测到2025年,全球生物质发电累计装机容量将达到1.93亿kW,发电量达到9218亿kWh^[5]。

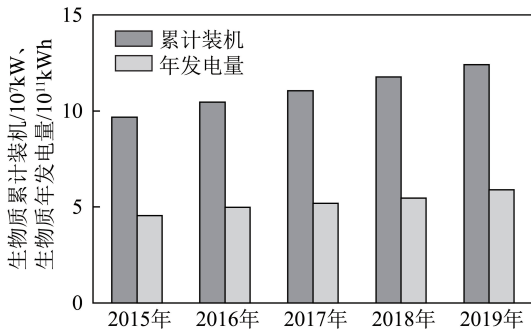


图1 全球生物质装机及发电情况

Fig.1 Global biomass power and generation capacity

1.2 国内总量快速增长

2005年12月,国内首个煤粉锅炉掺烧秸秆发电机组在华电国际十里泉发电厂投产。该项目引进丹麦秸秆燃烧技术,对1台140MW煤粉锅炉燃烧器进行改造,增加1套秸秆储存、粉碎、输送系统^[7]。2006年12月,国能单县生物质发电工程1×30MW机组投产,该项目为第1个国家级生物质直燃发电示范项目,采用丹麦BWE公司的130t/h水冷振动高温高压炉排炉。“十三五”以来,我国生物质发电产业发展迅猛,年均增长率约20.3%,处于产业化快速发展阶段,如图2所示。2020年,我国生物质发电机组累计装机2254万kW,其中农林生物质发电装机容量973万kW^[8]。农林生物质发电项目年发电量468亿kWh^[2]。在产业政策方面,国家对2021-01-01前的农林生物质发电项目统一执行0.75元/kWh的标杆上网电价。由于纯烧生物质发电机组在补贴电价计量和结算方面的优势,目前国内生物质发电以生物质纯烧发电为主。

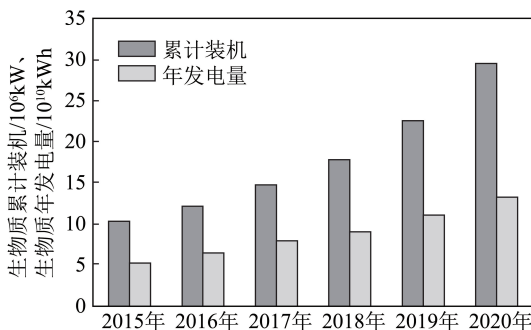


图2 我国生物质装机及发电情况

Fig.2 Biomass power and generation capacity in China

总体来讲,在全球能源消费持续向低碳化、清洁化转变的趋势下,近年来国内及全球范围内生物质能发电总量持续稳定增长,国内生物质能装机及发电量

增长速度明显高于全球平均水平,处于快速增长阶段。

2 循环流化床锅炉燃农林生物质的天然优势

2.1 循环流化床锅炉主要技术特点

欧洲针对生物质直燃技术开展的研究及应用较早,但是欧洲的生物质以木质为主,而我国生物质主要是农业生产过程中的废弃物,以玉米秸秆、稻壳为主。引进欧洲的水冷振动炉排生物质直燃技术在国内应用过程中存在锅炉效率低于设计值、NO_x排放高以及锅炉腐蚀爆管等问题^[9]。循环流化床锅炉燃烧技术兴起于20世纪六七十年代,经过多年理论研究与工程实践,建立了我国独立的循环流化床煤燃烧理论体系^[9-10]。我国在建或已投运循环流化床锅炉机组超过4000台,其中正在运行的超临界循环流化床锅炉超过40台^[11-12],目前世界上最大的循环流化床锅炉为我国自主研发制造的山西中煤平朔电厂660MW超临界循环流化床锅炉。660MW超超临界循环流化床锅炉也即将投入使用^[12-13]。循环流化床锅炉技术目前已经进入成熟发展期,适合于大规模利用生物质资源。

2.1.1 燃料适应性

国内生物质燃料的热值、水分、灰分、形状和粒径等变化范围宽,采用水冷振动炉排,在燃料特性波动较大时会出现锅炉出力不足、燃烧效率下降等问题。循环流化床锅炉内含有大量的固体循环物料颗粒,其中绝大部分是惰性的循环灰颗粒和燃料灰渣,根据燃煤循环流化床锅炉的运行经验,床料中燃料仅占1%~3%。循环流化床炉膛内气固两相流动具有极强的传热传质特性,大量高温固体颗粒可以使粒径较大、水分较高的入炉燃料迅速升温至燃点温度以上,因而燃料适应范围更广,特别适合处理不同尺寸、形状和热值的燃料,能够适应生物质燃料的多变性和复杂性。

2.1.2 燃烧效率

循环流化床锅炉燃烧效率高,一方面由于大部分循环床料中的燃料被分离器捕捉返回炉膛继续燃烧,提高了燃料在炉膛内的停留时间;另一方面,炉内床料和燃料在一次风流化和二次风的扰动作用下,传热、传质强度高,燃料与空气接触几率大,燃料的燃烧过程扩展到整个炉膛以及分离器内^[14]。典型燃用玉米秸秆的循环流化床锅炉效率为90%~92%,而燃用玉米秸秆的水冷振动炉排效率约87%~90%。

2.1.3 NO_x 原始排放

循环流化床锅炉炉膛内较强的传热传质能力,

使得燃料在相对较低的温度条件下即可稳定高效燃烧。生物质燃料挥发分高,燃点低,相比于燃煤锅炉燃烧温度可进一步降低,有效抑制热力型 NO_x 的生成。循环床料中的焦炭在颗粒团和乳化相中形成良好的还原性条件,可以进一步降低燃料型 NO_x 的生成。通过严格控制炉膛温度和炉内过量空气系数,合理选择一、二次风比例以及增加物料循环量可以进一步增强循环流化床炉膛内燃烧反应的还原性气氛,降低 NO_x 的生成^[9]。目前,部分循环流化床生物质直燃锅炉可以将 NO_x 原始排放质量浓度控制在 100 mg/m^3 内,不需投运脱硝设备即可达到环保标准。

2.1.4 负荷调节范围

循环流化床锅炉内大量的高温固体颗粒使得新入炉的燃料更容易着火,尤其对于挥发分高、燃点较低的生物质燃料,即使在较低负荷的工况下,也不会出现熄火现象,因此循环流化床锅炉的负荷调节范围更宽。

2.2 生物质 CFB 锅炉技术快速发展

燃煤循环流化床锅炉在我国经历 40 余年的发展,已经达到国际领先水平,满足生物质纯燃及与煤在多比例下掺烧的要求,为生物质循环流化床锅炉的发展奠定了良好的技术基础。2007 年 4 月,国内第 1 台生物质直燃循环流化床锅炉在中节能宿迁电厂投运,该锅炉蒸发量为 75 t/h ,中温中压。2008 年,黑龙江庆翔集团在庆安投运了 2 台同参数的循环流化床锅炉。由于当时生物质循环流化床锅炉设计和运行经验匮乏,存在上料系统堵塞、锅炉腐蚀爆管、受热面沾污等一系列问题导致锅炉可靠性低。此后,清华大学、浙江大学、中科院、哈尔滨工业大学等高校及科研院所相继投入力量进行研发,国内锅炉制造企业不断提高设计和制造水平,生物质循环流化床锅炉技术日趋成熟^[15-17]。锅炉蒸气参数不断提高,从 75 t/h 中温中压、 90 t/h 高温次高压、 130 t/h 高温高压发展至 260 t/h 高温超高压再热锅炉,同时小容量高参数锅炉越来越受到市场的青睐,包括 75 t/h 高温高压、 90 t/h 高温高压、 120 t/h 高温超高压再热锅炉,见表 1。

表 1 循环流化床生物质锅炉系列参数

Table 1 Steam parameters of biomass CFB boiler

机组类型	主蒸气流量/ ($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	主蒸气压力/ MPa	主蒸气温度/ ℃
中温中压	35~75	3.82	450
中温次高压	60~90	5.29	450
高温高压	60~130	9.81	540
高温超高压再热	120~380	13.70	540

总体而言,由于循环流化床锅炉燃料适应性强、燃烧效率高、 NO_x 原始排放低以及负荷调节范围宽等优势,在技术上较适合生物质直燃发电,目前已经成为生物质直燃发电的主力。吉林省能源“十三五”期间规划的单机 30 MW 以上等级生物质发电机组中,采用循环流化床锅炉的项目占比 85% 以上。

3 生物质循环流化床锅炉关键技术

早期循环流化床燃煤锅炉的结构不适应生物质燃料物理特性、燃烧特性和结渣沾污特性,锅炉运行周期仅 $5 \sim 10 \text{ d}$ 。对此,众多学者和工程技术人员在炉内气固流态化、 NO_x 排放控制、炉内防沾污腐蚀等方面进行了深入的理论研究及实践探索。

3.1 气固流化特性

循环流化床锅炉炉膛内气固流化特性决定燃料燃烧、受热面传热,进而决定锅炉出力及性能。生物质颗粒或碎片通常尺寸较大、密度较小、粒径分布较宽以及形状不规则。同时,生物质燃料水分和挥发分均较高,在炉膛内受热干燥及脱挥发分过程中迅速变形^[18]。因此,生物质的流化特性相比煤有很大差异。

基于生物质颗粒的特殊流化特性,在生物质循环流化床锅炉运行过程中需要在炉内添加另一种固体颗粒,一般是某种惰性介质,如河沙、炉渣等,以促进生物质颗粒的流化和燃烧。PILAR 等^[19-20]测定了不同粒径和密度的颗粒混合物的临界流化速度 U_{mf} ,发现传统的 U_{mf} 预测式均不能给出可靠的结果。RAO 等^[21]测定了生物质颗粒和砂粒混合物的临界流化速度 U_{mf} 。发现混合物的 U_{mf} 随生物质占比的增加而增大,随砂粒密度和粒径的增大而增大,并引入混合物有效密度 $\rho_{p,eff}$ 和有效颗粒直径 $d_{p,eff}$ 的概念,给出 U_{mf} 预测式:

$$U_{mf} = \frac{d_{p,eff}^2(\rho_{p,eff} - \rho_g)g}{1.650u_g}, \quad (1)$$

其中, u_g 为流化风速, m/s ; ρ_g 为气体密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度。部分学者针对更高风速下生物质与床料混合的流态特性进行了试验研究^[22-24],发现炉膛内整体气固流动规律与常规颗粒流动无明显差别,颗粒与生物质的混合与分层情况取决于生物质颗粒的性状。但是,由于生物质进入高温炉膛后,迅速干燥脱挥发分而变形,对炉膛内气固流动的影响几乎可以忽略。

传统循环流化床锅炉在燃用劣质煤和低成本污染控制方面具有一定优势,但早期实践中存在厂用电率高和可用率低的问题。相比于煤粉锅炉,循环

流化床锅炉需要更高的一次风压以实现床料流化和物料循环,因此厂用电比同容量煤粉炉高2%~3%^[9]。清华大学基于对循环流化床锅炉气固流态化和反应过程的深入探索,提出了“定态设计”理论,归纳总结了循环流化床锅炉流态图谱^[25]。在此基础上提出“流态重构”理论,减少密相区无效床料的存量,保证参与循环的有效床料存量,从而增强了水冷壁换热,降低了床层压力,减轻了床料对水冷壁的磨损^[25-27]。实践证明,采用该技术的循环流化床锅炉机组厂用电率可以从7%~8%降至4%~5%,机组可用率大大提高^[28]。基于“流态重构”理论,针对生物质循环流化床锅炉选取合适的炉膛惰性床料的粒度,通过优化分离器阻力,合理控制循环灰粒度和床压,可以有效减少锅炉密相区磨损、降低一次风机功耗、提高燃烧及换热效果。

3.2 NO_x 排放控制

NO_x 是生物质燃烧过程中产生的主要气体污染物,学者针对循环流化床锅炉生物质燃烧过程 NO_x 生成机理进行了大量研究^[29-36]。生物质燃烧过程及 N 元素迁徙过程如图 3 所示,约 80% 的燃料 N 作为挥发分 N 释放出来,转变为焦油中的 N 和含 N 的气体组分,其余部分为焦炭 N。燃料 N 经过复杂反应后,转变为 NO、NO₂ 以及 N₂^[32]。

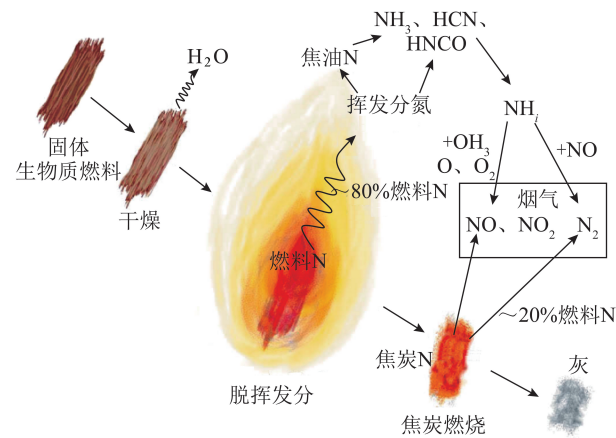


图3 生物质燃烧过程及N元素迁徙过程^[32]

Fig.3 Release of fuel-bound nitrogen and main reaction pathways of nitrogen during biomass combustion^[32]

研究表明,炉膛温度是影响循环流化床燃烧过程中 NO_x 生成的主要因素。为实现对锅炉 NO_x 排放控制,应严格控制炉膛燃烧温度不高于 900 ℃^[33]。影响 NO_x 生成及还原的另一个重要因素是氧化还原气氛。试验证明,流化床燃烧过程中 NO_x 的还原主要与 CO 在焦炭表面发生^[34-36]。

通过优化炉内床料粒径,减少密相区大颗粒,增加循环灰颗粒,提升二次风比例和单股二次风穿透

能力,可以改善炉膛内氧气分布的均匀性。由于一次风份额降低,密相区还原性气氛增强,同时二次风口的上移致使下部还原气氛的空间增大,对 NO_x 的生成具有很好的抑制作用^[33,37]。

3.3 受热面防积灰、腐蚀

沾污及腐蚀问题一直是影响生物质能源化利用的关键问题之一^[38-40]。生物质中钾元素和氯元素含量相对较高,是引起结渣、积灰及腐蚀的主要原因。生物质燃烧过程中,钾元素在高温区域容易以气态形式释放,进一步与烟气、飞灰及金属相互作用,形成复杂的盐覆盖在对流受热面上^[38]。碱性化合物还可能与硅的化合物生成易熔的共晶体,形成有黏性的灰层,促进积灰层的快速增长,在短时间内甚至可以堵塞对流受热面的烟气走廊^[41],如图 4 所示。



图4 生物质锅炉受热面沾污

Fig.4 Biomass boiler heating surface fouling

学者针对对流受热面积灰沾污问题进行了研究。WANG 等^[42]发现锅炉管束错排时,随着烟气流速的降低,循环流化床锅炉受热面结渣沾污程度呈正比减少。温度对碱金属的气态释放影响最为显著^[43]。受热面沾污可分为高温灰沉积和低温灰沉积 2 种类型。低温灰沉积主要出现在温度可能低于酸露点或水露点的管壁表面上,如锅炉省煤器、管式空预器;高温灰沉积主要发生在温度处于灰粒变形温度下某一范围内的高温对流受热面上,由沉积的灰粒经化学反应和积灰层烧结面形成,如锅炉低温过热器。

针对生物质结渣、沾污问题,国内外学者对添加剂、共燃、化学预处理、涂层等进行了大量研究,通过改变生物质利用过程中含钾氯化物和硫酸盐的生成和转化过程以达到抗结渣的效果^[44-47]。针对燃料的处理办法成本相对较高,对锅炉进行优化设计更加可行。实践证明,锅炉低温过热器、省煤器采用顺列大间距布置,以降低烟气流速,缓解沾污;空气预热器卧式顺列小管箱布置,可以有效降低积灰沾污带来的危害^[37]。

气态 HCl 以及积灰中的熔融态 KCl 均是引起积灰腐蚀问题的主要物质^[48],对金属管道造成严重腐蚀,甚至引起泄漏或爆管,如图 5 所示。MVLLER 等^[49]指出提高生物质流化床燃烧炉的温度会明显加快生物质灰的结渣速度以及加剧结渣的严重程度,因此合理控制炉内温度可以有效防止生物质锅炉沾污腐蚀问题。刘志等^[41]研究发现管束迎风面的积灰倾向弱于背风面,这是因为烟气对迎风面的冲刷作用强于其携带灰颗粒的撞击作用,不利于灰颗粒的沉积和腐蚀。基于这一特性,控制受热面腐蚀可以充分利用循环流化床炉膛中存在高浓度物料的特点,处于炉膛中的受热面始终受到循环物料的不断冲刷,能够有效抑制炉内沾污问题。因而将壁温较高的受热面布置在炉膛,可以有效缓解高温受热面的结垢腐蚀问题,这是循环流化床燃烧生物质所具有的独特优势^[37]。



图 5 生物质锅炉受热面腐蚀

Fig.5 Biomass boiler heating surface corrosion

随着对生物质燃烧机理研究的不断深入,在炉内气固流态化、污染物排放控制、炉内防结渣沾污等方面取得了实质性突破,循环流化床燃生物质的关键技术相继得到解决,可以满足纯燃生物质及不同比例掺烧的需要。目前部分运行管理较好的机组,连续运行周期甚至达到 200 d 以上,非计划停炉的情况持续减少。

4 面临的问题及对策

我国农林生物质资源丰富,作为碳中性的可再生能源技术,生物质能源化利用还有很大的发展空间。然而,目前农林生物质发电产业尚未得到充分发展,发展规模低于预设目标,主要问题包括经济效益、产业政策以及企业自身等多方面因素。

4.1 农林生物质发电成本高

在我国垃圾发电发展现状好于农林生物质发电。垃圾发电除享受上网电价补贴外,还享受地方政府支付的垃圾处理费,因此经济效益较好,近年来增长很快,总量高于农林生物质发电。农林生物质

在发电成本方面处于明显劣势,主要由于以下几方面:

1) 燃料成本高。生物质电厂与燃煤电厂不同,秸秆燃料产自附近耕地,来源分散。秸秆能量密度低,运输成本高,通常经济运输半径仅为 100 km 左右。按照秸秆散料的市场价格,单位热值成本高于煤炭。目前部分电厂自购秸秆收割打包设备,直接从耕地收割、打包、运输秸秆,解决了农民收割问题,也可以大幅降低燃料成本。

2) 单机规模小,投资、运行成本高。绝大部分农林生物质直燃发电厂单机规模在 100 MW 以下,远低于大型燃煤电站,单位发电功率投资成本高。目前新建的生物质发电厂普遍采用高压和超高压参数,部分机组带有一次再热循环,发电效率相比中温中压技术得以提高,但相比于大型燃煤电站,依然较低。厂用电率一般在 10% 以上,供电效率低于 30%。2019 年,全国 6 000 kW 及以上火电厂供电标准煤耗 306.4 g/kWh,先进的 1 000 MW 二次再热机组供电煤耗已经低至 260 g/kWh 以下,但常规高压参数的生物质发电机组供电煤耗达到 400 g/kWh 以上,远高于燃煤发电机组。

3) 锅炉可用率相对较低。在国内可研单位和锅炉制造企业的共同努力下,纯燃生物质锅炉容量、参数和可用率明显改善,但生物质燃料的特殊性导致锅炉可用率仍然低于燃煤机组。

4.2 政府补贴退坡

由于生物质燃料成本高,且可再生能源电价补贴及政府增值税返还政策造成应收账款数额高,返还时间存在不确定性,因此生物质发电项目普遍存在较大现金流压力^[50]。2020 年 9 月,财政部、发展改革委、国家能源局联合发布了《完善生物质发电项目建设运行的实施方案》,规定自 2021-01-01 起,规划内已核准未开工、新核准的生物质发电项目全部通过竞争方式配置并确定上网电价;新纳入补贴范围的项目补贴资金由中央地方共同承担,分地区合理确定分担比例,中央分担部分逐年调整并有序退出。同月,三部委发布了《关于<关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见>有关事项的补充通知》,通知明确农林生物质发电全生命周期合理利用小时数为 82 500 h,补贴电量在此基础上进行计算。上述文件表明国家层面对生物质发电项目的补贴已经开始启动逐步退出机制。

4.3 企业管控水平有待提高

目前生物质发电企业以民营企业居多。相比于大型火力发电企业(以国企为主),生物质发电企业

在机组运行管控水平方面经验和水平不足。锅炉运行过程中,效率低、污染物排放高甚至很多运行事故是由于操作不当造成的。严格按照运行规程进行负荷调节、严格控制炉温、合理配风、合理吹灰,是保障机组安全高效运行的关键。此外,生物质发电企业在人力资源管控方面能力不足,在引进人才、培养人才、留住人才方面,缺少系统的管理体系,部分企业管理松散。

5 结语与展望

农林生物质发电在国内历经 15 a 发展,到目前为止,投产项目达 400 余家,循环流化床锅炉技术和设备制造水平及运行管理水平得到飞速发展。大力推动生物质能利用,有助于我国实现绿色低碳发展。我国生物质极具发展潜力,生物质直燃发电可以深入开发利用农业剩余价值,助力农业强国建设。尽管发展过程中面临一些问题和挑战,但是在我国碳中和目标的大背景下,循环流化床农林生物质直燃发电产业通过不断发掘自身潜力,提高企业盈利水平。为此,对产业和技术发展提出如下建议:

1) 重点发展小容量、高参数循环流化床农林生物质直燃发电机组。一方面,提高循环蒸汽参数、增加再热循环可以提高发电机组效率,有效解决发电效率偏低的问题;另一方面,由于秸秆燃料来源分散,选择小容量机组,可以减少生物质消耗,减小燃料收购覆盖面,降低运输成本。因此,针对生物质纯燃发电效率低、成本高的问题,我国应发展小容量超高参数机组,目前越来越多超高压一次再热机组投入运行,下一步应进一步发展小容量亚临界机组,有效提高企业综合效益。

2) 2020-12-31,生态环境部印发《碳排放权交易管理办法(试行)》。目前,全国碳市场的交易系统基本建设完成。随着碳交易的逐步开展,涉及产业不断拓宽。由于生物质燃料的零碳性质,其成本将在碳交易体系中体现出巨大优势,未来生物质与煤的直燃耦合将有更大的发展空间。

3) 2017年12月,国家发改委和能源局发布了《促进生物质能供热发展的指导意见》,强调要大力发展县域农林生物质热电联产,到2020年,生物质热电联产装机容量超过1200万kW。但目前来看,没有达到预期目标。生物质能热电联产就地收集原料、就地加工转化、就近消费,构成城镇分布式清洁供热体系,既减少农村秸秆露天焚烧,又提供清洁电力和热力,带动生物质能转型升级。我国中小型燃煤供热锅炉数量较多,清洁燃料替代任务较重,生物

质能供热在终端消费环节直接替代燃煤,有较大发展空间。热电联产机组可以提高热力系统综合效率,供热可以提高企业收入。

参考文献(References):

- [1] IEA. Bioenergy [EB/OL]. (2020-11-09) [2021-02-01]. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/bioenergy>.
- [2] 电力规划设计总院. 中国低碳化发电技术创新发展年度报告[M]. 北京:人民日报出版社,2021:86-95.
- [3] 李建锋,郝继红,吕俊复,等. 循环流化床锅炉掺烧生物质前景研究[J]. 电站系统工程,2007,23(6):37-39.
LI Jianfeng, HAO Jihong, LYU Junfu, et al. The prospect of co-combustion of biomass in the CFB boiler[J]. Power System Engineering, 2007, 23(6): 37-39.
- [4] 向柏祥,张缦,吴玉新,等. 100 MWe 生物质循环流化床锅炉的开发[J]. 锅炉技术,2013,44(4):27-32.
XIANG Baixiang, ZHANG Man, WU Yuxin, et al. Development of 100 MWe biomass circulating fluidized bed boiler[J]. Boiler technology, 2013, 44(4): 27-32.
- [5] IEA. Bioenergy power generation [EB/OL]. (2020-06-01) [2021-07-08]. <https://www.iea.org/reports/bioenergy-power-generation>.
- [6] IRENA. Renewable energy statistics 2021[M]. Abu Dhabi: The International Renewable Energy Agency, 2021.
- [7] 刘启明,金廷海,郭春燕. 首台秸秆混燃发电机组投产[N]. 中国电力报,2005-12-20(4).
- [8] 国家能源局. 2020年度全国可再生能源电力发展监测评价报告[R/OL]. (2021-05-31) [2021-06-20]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-06/20/c_1310039970.htm.
- [9] 周北安,张伟. 某生物质电厂运行及设计问题解析及改进意见[J]. 锅炉制造,2019(4):37-39.
ZHOU Beian, ZHANG Wei. Some biomass plant question about design and running and ameliorative advice [J]. Boiler Manufacturing, 2019(4): 37-39.
- [10] 岳光溪,吕俊复,徐鹏,等. 循环流化床燃烧发展现状及前景分析[J]. 中国电力,2016,49(1):1-13.
YUE Guangxi, LYU Junfu, XU Peng, et al. The up-to-date development and future of circulating fluidized bed combustion technology[J]. Electric Power, 2016, 49(1): 1-13.
- [11] 胡南,徐梦,张缦,等. CFB 锅炉大型化气固流动非均匀性研究进展[J]. 洁净煤技术,2020,26(3):1-8.
HU Nan, XU Meng, ZHANG Man, et al. Research on non-uniformity of gas-solid flow in large-scale CFB boilers[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(3): 1-8.
- [12] 凌文,吕俊复,周托,等. 660 MW 超超临界循环流化床锅炉研究开发进展性[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2515-2523.
LING Wen, LYU Junfu, ZHOU Tuo, et al. Research and development progress of the 660MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2515-2523.
- [13] 蔡润夏,吕俊复,凌文,等. 超(超)临界循环流化床锅炉技术

- 的发展[J]. 中国电力,2016,49(12):1-7.
- CAI Runxia, LYU Junfu, LING Wen, et al. Progress of supercritical and ultra - supercritical circulating fluidized bed boiler technology[J]. Electric Power,2016,49(12):1-7.
- [14] 胡南,徐梦,杨海瑞,等. 循环流化床锅炉炉膛横向温度非均匀性模型研究[J]. 洁净煤技术,2019,25(2):102-107.
- HU Nan, XU Meng, YANG Hairui, et al. Modeling study on lateral temperature non - uniformity in CFB boiler furnace [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25 (2) : 102 - 107.
- [15] 别如山,鲍亦令,杨励丹,等. 燃生物质流化床锅炉[J]. 节能技术,1997(2):5-7.
- BIE Rushan, BAO Yiling, YANG Lidan, et al. Biomass CFB boiler [J]. Energy Conservation Technology, 1997 (2) : 5 - 7.
- [16] 曹习功. 75 t/h 生物质循环流化床锅炉的开发设计[J]. 工业锅炉,2017,163(3):20-23.
- CAO Xigong. Design of 75 t/h Biomass-fired circulating fluidized bed boiler [J]. Industrial Boilers, 2017, 163 (3) : 20 - 23.
- [17] 李诗媛,吕清刚,王东宁,等. 生物质直燃循环流化床发电锅炉设计准则和运行分析[J]. 可再生能源,2012(12):96-100.
- LI Shiyuan, LYU Qinggang, WANG Dongning, et al. Design and operation of biomass direct-fired circulating fluidized bed boilers [J]. Renewable Energy Resources, 2012 (12) : 96 - 100.
- [18] CUI H, GRACE J R. Fluidization of biomass particles: A review of experimental multiphase flow aspects [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62 : 45 - 55.
- [19] PILAR Aznar M, GRACIA-GORRIA F A, CORELLA J. Minimum and maximum velocities for fluidization for mixtures of agricultural and forest residues with second fluidized solid. I. Preliminary data and results with sand-sawdust mixtures [J]. International Chemical Engineering, 1992, 32 : 95 - 102.
- [20] PILAR Aznar M, GRACIA-GORRIA F A, CORELLA J. Minimum and maximum velocities for fluidization for mixtures of agricultural and forest residues with a second fluidized solid. II. Experimental results for different mixtures [J]. International Chemical Engineering, 1992, 32 : 103 - 113.
- [21] RAO T R, BHEEMARASETTI J V Ram. Minimum fluidization velocities of mixtures of biomass and sands [J]. Energy, 2012, 26 : 633 - 644.
- [22] MIAO Q, WANG C, WU C Z, et al Fluidization of sawdust in a cold model circulating fluidized bed: Experimental study [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 24 : 335 - 341.
- [23] 王储,周肇秋,阴秀丽,等. 木屑在循环流化床中的流动特性研究[J]. 太阳能学报,2010,31(4):501-506.
- WANG Chu, ZHOU Zhaoqiu, YIN Xiuli, et al. Study of hydrodynamic characteristics of sawdust in a circulating fluidized bed [J]. Acta Energetica Sinica, 2010, 31 (4) : 501 - 506.
- [24] 李双江. 流态化生物质燃烧冷态实验研究 [D]. 杭州:浙江大学,2008.
- [25] YUE G, LU J, ZHANG H, et al. Design theory of circulating fluidized bed boilers [C] // Proceedings of the 18th International Conference of FBC. Toronto: 18th International Conference of FBC. 2005:135-146.
- [26] YANG H, ZHANG H, LU J, et al. Novel CFB boiler technology with reconstruction of its fluidization state [C] // Proceedings of the 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Beijing: [s. n.], 2009:195-199.
- [27] HU N, ZHANG H, YANG H, et al. Effects of riser height and total solids inventory on the gas-solids in an ultra-tall CFB riser [J]. Powder Technology, 2009, 196 (1) : 8 - 13.
- [28] 杨石,杨海瑞,吕俊复,等. 基于流态重构的低能耗循环流化床锅炉技术[J]. 电力技术,2010,19(2):9-16.
- YANG Shi, YANG Hairui, LYU Junfu, et al. The lower energy consumption CFB technology based on state specification design theory [J]. Electric Power Technology, 2010, 19 (2) : 9 - 16.
- [29] 李竞岚. 循环流化床锅炉氮氧化物生成机理的实验与模型研究 [D]. 北京:清华大学,2016.
- [30] 李予安. 生物质固体燃料流化床燃烧 NO_x 排放模拟研究 [D]. 杭州:浙江大学,2020.
- [31] 柯希玮,蒋苓,吕俊复,等. 循环流化床燃烧低污染排放技术研究展望 [J]. 中国工程科学, 2021, 23 (3) : 120 - 128.
- KE Xiwei, JIANG Ling, LYU Junfu, et al. Prospects for the low pollutant emission control of circulating fluidized bed combustion technology [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23 (3) : 120 - 128.
- [32] VAINIO E. Fate of fuel-bound nitrogen and sulfur in biomass-fired Industrial boilers [D]. Finland: Abo Akademi University, 2014.
- [33] 李竞岚,杨海瑞,吕俊复,等. 节能型循环流化床锅炉低氮氧化物排放的分析 [J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19 (4) : 293 - 298.
- LI Jingli, YANG Hairui, LYU Junfu, et al. Low NO_x emission characteristic of low energy consumption CFB boilers [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19 (4) : 293 - 298.
- [34] ARMESTO L, BOERRIGTER H, BAHILLO A, et al. N₂O emissions from fluidized bed combustion [J]. Fuel, 2003, 82 (15) : 1845 - 1850.
- [35] DIEGO L F, LONDONO C A, WANG X S, et al. Influence of operating parameters on NO_x and N₂O axial profiles in a circulating fluidized bed combustor [J]. Fuel, 1996, 75 (8) : 971 - 978.
- [36] ZHAO J S, BRERETON C, GRACE J R, et al. Gas concentration profiles and NO_x formation in circulating fluidized bed combustion [J]. Fuel, 1997, 76 (9) : 853 - 860.
- [37] 张建春,顾君苹,张曼,等. 纯燃生物质循环流化床锅炉设计与运行 [J]. 锅炉技术, 2018, 49 (1) : 28 - 32.
- ZHANG Jianchun, GU Junping, ZHANG Man, et al. The design and operation of a pure biomass-fired circulating fluidized bed boiler [J]. Boiler Technology, 2018, 49 (1) : 28 - 32.
- [38] 黄东东,张守玉,常明,等. 高钠煤灰烧结特性研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2021, 27 (1) : 83 - 94.
- HUANG Dongdong, ZHANG Shouyu, CHANG Ming, et al. Research progress on sintering characteristics of high sodium coal ash [J]. Clean Coal Technology, 2021, 27 (1) : 83 - 94.
- [39] 刘宏宇,张守玉,宋晓冰,等. 抗结渣生物质燃料研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2020, 26 (1) : 22 - 31.
- LIU Hongyu, ZHANG Shouyu, SONG Xiaobing, et al. Advance in

- the research on slag-resistant biomass briquette preparation[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(1): 22-31.
- [40] 范浩东, 单雄飞, 张曼, 等. 生物质流化床结渣、沾污特性及抑制方法研究进展[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(1): 1-6.
FAN Haodong, SHAN Xiongfei, ZHANG Man, et al. Research progress on slagging, fouling characteristics and its prevention method of biomass fluidized bed[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(1): 1-6.
- [41] 刘志, 雷秀坚, 汪佩宁, 等. 循环流化床锅炉生物质与煤混烧积灰腐蚀试验[J]. 热力发电, 2015(7): 50-54.
LIU Zhi, LEI Xiujian, WANG Peining, et al. Experimental study on ash deposition and corrosion in a CFB boiler co-firing biomass with coal[J]. Thermal Power Generation, 2015(7): 50-54.
- [42] WANG H, ZHENG Z M, GUO S, et al. Investigation of the initial stage of ash deposition during oxy-fuel combustion in a bench-scale fluidized bed combustor with limestone addition[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(6): 3623-3631.
- [43] 张志昊. 生物质热转化过程中碱金属元素迁移的研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [44] STEENARI B M, LINDQVIST O. High-temperature reactions of straw ash and the anti-sintering additives kaolin and dolomite[J]. Biomass Bioenergy, 1998, 14: 67-76.
- [45] WERKELIN J, SKRIFVARS B J, ZEVENHOVEN M, et al. Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels[J]. Fuel, 2010, 89: 481-493.
- [46] LI Y S, SPIEGEL M, SHIMADA S. Corrosion behaviour of various model alloys with NaCl-KCl coating[J]. Mater Chemical Physics, 2005, 93: 217-223.
- [47] 余滔. 添加剂对生物质燃烧灰沉积和腐蚀特性的影响规律研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [48] 黄芳. 秸秆燃烧过程中受热面沉积腐蚀问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [49] MVLLER M, WOLF K, SMEDA A, et al. Release of K, Cl and S species during co-combustion of coal and straw[J]. Energy & Fuels, 2006, 20(4): 1444-1449.
- [50] 张东旺, 范浩东, 赵冰, 等. 国内外生物质能源发电技术应用进展[J]. 华电技术, 2021, 43(3): 70-75.
ZHANG Dongwang, FAN Haodong, ZHAO Bing, et al. Development of biomass power generation technology at home and abroad[J]. Huadian Technology, 2021, 43(3): 70-75.