

多流程循环流化床技术在综合能源服务中的应用

韩峰¹, 丛堃林², 李清海², 张衍国², 严矫平¹, 胡峰¹

(1. 北京热华能源科技有限公司, 北京市海淀区 100085;
2. 清华大学能源与动力工程系, 北京市海淀区 100084)

Application of Multi-pass Circulating Fluidized Bed in Integrated Energy Service

HAN Feng¹, CONG Kunlin², LI Qinghai², ZHANG Yanguo², YAN Jiaoping¹, HU Feng¹

(1. Beijing Nowva Energy Technology Co., Ltd., Haidian District, Beijing 100085, China;
2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

摘要: 园区级的清洁供热是目前综合能源服务中需要迫切解决的问题。多流程循环流化床技术采用“三床两返多流程”的结构设计, 解决了传统的循环流化床锅炉小型化的问题。工业实践证明, 多流程循环流化床锅炉可以选用生物质、工业固体废弃物、煤炭等作为燃料, 针对多种燃料的热效率达到88%~92%, 且污染物排放均达到了国家和地方标准中对排放浓度限值的要求。多流程循环流化床技术具有分散能源分散利用、多种燃料同时适用的优势, 可以有效地为园区级的综合能源服务提供帮助。

关键词: 综合能源服务; 多流程; 循环流化床技术; 生物质; 工业固体废弃物

ABSTRACT: Park level clean heating is an urgent problem to be solved in integrated energy service. The multi-pass circulating fluidized bed technology adopts a three-stage furnace structure to form a two-stage material circulation in the furnace, which solves the problem of miniaturization of traditional circulating fluidized bed boilers. The industrial practice has proved that the multi-pass circulating fluidized bed boiler can use biomass, industrial solid waste, coal and other fuels. The thermal efficiencies of various fuels reach 88%~92%, and the emissions of the pollutants meet the required permissible effluent concentrations of the national standards and local standards. The multi-pass circulating fluidized bed technology has the advantages of decentralized energy utilization and simultaneous application of multiple fuels, which can be effectively applied to park level integrated energy service.

KEY WORDS: integrated energy service; multi-pass; circulating fluidized bed technology; biomass; industrial solid waste

0 引言

随着能源生产和消费革命的推进, 传统能源企业都在寻求自身转型, 以拓展新的业务市场和新的利润增长点。综合能源服务作为能源领域转型升级的主要方向, 获得了前所未有的关注, 也孕育着巨大的市场空间。

综合能源服务是在传统的冷、热、电、燃气基础上发展起来的, 以客户为主体, 利用大数据、云计算、物联网等数字化技术, 实现多能协同供应, 最终提高能源系统效率、降低用能成本的能源服务。综合能源服务包含的内容和模式很广, 近年来分布式可再生能源、冷热电三联供、储能、能源互联网等的研究与应用受到了广泛关注^[1]。

综合能源服务对象范围很广, 目前来看, 园区级的综合能源服务是相对容易推进和落实的, 也是研究关注的重点。文献[2]从园区综合能源服务商、服务内容、商业模式、支撑技术4个方面介绍了面向园区能源互联网的综合能源服务关键问题; 文献[3]从能流分析、经济运行和环境保护的角度, 针对某多能互补系统的优化设计和运行策略进行了研究; 文献[4]对包含电、气、冷、热等其他能源的综合能源系统的能源运行特性和耦合机制进行了研究, 并建立了综合模型; 文献[5]基于公共储能的园区综合能源系统互联方案, 提

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0603901)。

Project Supported by National Key Research and Development Program (2017YFB0603901).

出了多主体参与的商业运营模式；文献[6]以某工业园区为基础，建立了综合能源管理平台，实现了供能系统能源的综合梯级利用。

分布式能源服务是园区综合能源服务的重要组成部分，需要具有能源利用效率高、污染物排放低等优势。目前，天然气冷热电三联供、分布式光伏发电、分散式风力发电、地源热泵等是园区面向用户侧的主要用能形式^[7-8]。园区级的清洁供热是园区综合能源服务的一项重要内容，化工、纺织、印染、食品、医药、水泥等工业园区有着大量的供热需求。但是由于小型燃煤锅炉正在被集中取缔，有供热需求的园区侧实际用能过程中，存在着天然气仅供燃烧供热的情况，使得高品质的天然气能源存在着严重的“高能低用”问题^[9]。同时，由于我国天然气资源紧缺，价格长期呈上涨趋势，天然气锅炉经济性欠佳。文献[10]以某工业园区为例，提出了以循环流化床锅炉+背压式机组热电联产的小型分布式能源系统，具有较好的经济效益和环境效益。

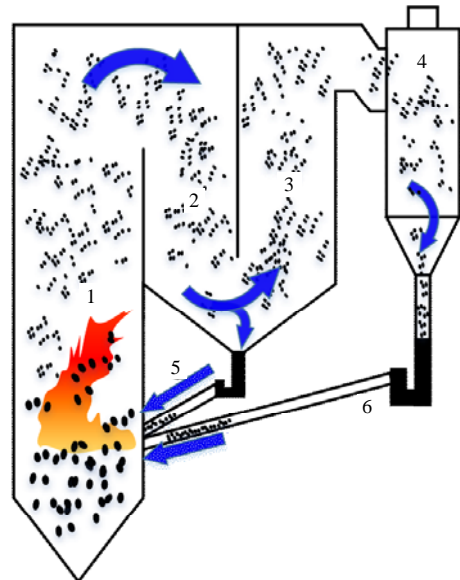
循环流化床锅炉具有燃料适应性广、燃烧效率高、污染物排放少、调节特性好等优点^[11]，但是传统的循环流化床锅炉对流态化和燃烧停留时间的要求高，在锅炉容量较小的情况下难以实现稳定燃烧，因此不适合作为园区级的综合能源服务的能源提供方式。为了解决循环流化床锅炉小型化的问题，清华大学开发了一种多流程循环流化床技术^[12]，已在国内厦门、杭州、郴州、永州等多地以及印尼、蒙古、美国等国家获得应用，运行效果得到了广泛验证，可以为园区级的综合能源服务提供能源服务。

1 多流程循环流化床技术

多流程循环流化床通过将传统循环流化床锅炉炉膛分段并进行水平多级布置，形成了由主燃室、副燃室和燃尽室组成的“三床两返多流程”结构^[13]，采用三级炉膛、两级回灰的结构设计，如图1所示。

清华大学对多流程循环流化床的物料浓度分布、物料循环、气固传热特性、热力计算方法等进行了大量理论和实验研究^[14-18]。相关研究结果

表明：多流程循环流化床技术将物料高中温复合循环与流态化原理有机结合，一方面增加了燃料燃烧时间，并采取两级物料循环，使燃料燃烧更为充分，增加了燃料的适应性；另一方面将锅炉的高温分离改为中温分离，避免了分离器的结焦。



1—主燃室；2—副燃室；3—燃尽室；4—分离器；
5—主返料系统；6—副返料系统。

图1 多流程循环流化床

Fig. 1 Multi-pass circulating fluidized bed

“三床两返多流程”的结构对生物质(稻壳、木屑、玉米芯等)、工业固体废弃物(烟梗、中药渣、咖啡渣、糠醛渣等)、煤炭(褐煤、烟煤等)都具有极强的适应性。

2 多流程循环流化床技术的应用

2.1 多流程循环流化床在生物质燃烧领域的应用

生物质能是重要的可再生能源，具有可再生、产量大、分布广的特点，在应对全球气候变化、缓解能源供需矛盾、保护生态环境等方面发挥着重要作用，是我国能源战略发展的重要组成部分。2017年，国家能源局综合司在《关于促进可再生能源供热的意见》中，明确提出要积极发展生物质能供热，在农作物秸秆资源量大的地区推行生物质热电联产集中供暖或工业供热^[19]。2019年，国家能源局综合司在《国家能源局综合司关于请报送生物质锅炉清洁供热有关情况的通知》中，明确指出生物质锅炉供热是绿色低碳清洁经济的

可再生供热方式，适用于中小工业园区供热和城镇供暖。

热华能源在江苏兴化兴东工业园区投资的生物质集中供热项目采用 2 台 45 t/h 多流程循环流化床锅炉(如图 2 所示)，项目采用建设-拥有-运营模式，以秸秆、稻壳等生物质资源为燃料，替代园区内原有的 30 多台分散小型燃煤锅炉，该项目也入选了国家能源局“百个城镇”生物质热电联产县域清洁供热示范项目^[20]。



图 2 燃生物质多流程循环流化床锅炉

Fig. 2 Biomass fired multi-pass circulating fluidized bed boiler

2017 年 4 月，由江苏省特种设备安全监督检验研究院对 2 台多流程循环流化床锅炉(以稻壳为燃料)进行能效测试，测试结果显示：1 号锅炉的热效率为 90.86%，2 号锅炉的热效率为 91.17%。

项目设置布袋除尘器，采用选择性非催化还原脱硝的方式脱硝。2017 年 7 月，江苏中聚检测服务有限公司对兴化项目进行了排放测试，检测结果如表 1 所示。多流程循环流化床锅炉(燃稻壳)污染物排放达到《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271—2014)中规定的重点地区燃气锅炉大气污染物浓度限值要求^[21]，彻底解决了园区内原有小

表 1 多流程循环流化床(燃稻壳)排放检测结果

Tab. 1 Flue gas emission testing results of rice husk fired multi-pass circulating fluidized bed boiler

项目	检测值	排放浓度限值
颗粒物	9.7	20
SO ₂	16	50
NO _x	115	150

型燃煤锅炉的污染问题。

2.2 多流程循环流化床在工业固体废弃物燃烧领域的应用

工业固体废弃物一般是指工业生产活动中产生的固态、半固态废弃物，如造纸行业产生的草渣、制糖行业产生的蔗渣、烟草行业产生的烟梗等。2017 年我国一般工业固体废弃物产生量为 33.15 亿 t，综合利用量为 18.12 亿 t，处置量为 7.98 亿 t。工业固体废弃物产生量大，对环境影响广泛。工业固体废弃物的处置是我国迫切需要解决的环境问题，一次能源紧缺的现状也决定了工业固体废弃物的清洁高效能源化利用势在必行。对于一些可燃性工业固体废弃物，如中药渣、烟梗、酒糟、醋渣、咖啡渣、糠醛渣等，可以进行清洁燃烧处理，一方面可以实现工业固体废弃物环保处理，另一方面可以产生蒸汽用于企业生产，降低企业生产成本。

热华能源在四川烟叶复烤有限责任公司德昌复烤厂投资建设有 1 台 15 t/h 多流程循环流化床锅炉(如图 3 所示)，项目采用建设-经营-转让模式，燃料为德昌复烤厂烟叶复烤加工过程中产生的约 6 000 t/a 的烟梗废弃物，产生的蒸汽用于德昌复烤厂的烟叶复烤生产。多流程循环流化床的技术特点有效地解决了烟梗燃烧过程中的结焦、积灰和焦油处理的问题，将烟梗变废为宝，实现了资源的综合利用；锅炉的实际热效率可维持在



图 3 燃工业固体废弃物多流程循环流化床锅炉

Fig. 3 Industrial solid waste fired multi-pass circulating fluidized bed boiler

90%左右,节约了煤的使用量,降低了生产成本;消除了烟梗废弃物储存、运输、销毁过程的费用以及造成的环境污染。

该系统中设置布袋除尘器进行除尘,采用炉内加石灰石的方式脱硫。2016年3月,四川中测凯乐检测技术有限公司对德昌项目进行了排放测试,检测结果如表2所示。多流程循环流化床锅炉(燃烟梗)污染物的排放达到GB 13271—2014中规定的燃煤锅炉大气污染物浓度限值要求。

表2 多流程循环流化床(燃烟梗)排放检测结果

Tab. 2 Flue gas emission testing results of tobacco-stem fired multi-pass circulating fluidized bed boiler

项目	检测值	排放浓度限值
颗粒物	14.6	50
SO ₂	295	300
NO _x	169	300

2.3 多流程循环流化床在煤燃烧领域的应用

煤炭是我国最主要的一次能源,2018年在我国一次能源结构中的占比为58%。虽然我国一直在重点区域实施煤炭消费总量控制,并且依法淘汰10 t/h以下的燃煤小锅炉,但是国家能源委员会也明确指出供暖保供要“宜电则电、宜气则气、宜煤则煤”,进一步扭转了以往清洁供暖就是去煤化的思维。多流程循环流化床锅炉在煤的清洁燃烧利用上有突出优势。

热华能源在富阳海通管庄有限公司富阳工厂投资建设有1台15 t/h多流程循环流化床锅炉(如图4所示),项目采用合同能源管理模式,替代工厂原有的10 t/h和6 t/h的燃煤链条锅炉。2017年2月,对锅炉进行了能效测试,锅炉的热效率为89.30%。

该系统中采用高效布袋除尘器的除尘工艺,并采用炉内石灰石粗脱硫+尾部碱液精脱硫的2级脱硫工艺,采用低温、分级燃烧+选择性非催化还原脱硝的两级脱硝工艺。2017年3月,浙江鼎清环境监测技术有限公司对富阳项目进行了排放测试,检测结果如表3所示。多流程循环流化床(燃煤)的排放达到GB 13271—2014中规定的重点地区燃气锅炉大气污染物特别排放限值要

求,同时也达到浙江省《燃煤电厂大气污染物排放标准》(DB33/2147—2018)中规定的燃煤发电锅炉大气污染物排放浓度限值要求^[22],满足超低排放的要求。



图4 燃煤多流程循环流化床锅炉

Fig. 4 Coal fired multi-pass circulating fluidized bed boiler

表3 多流程循环流化床(燃煤)排放检测结果

Tab. 3 Flue gas emission testing results of coal fired multi-pass circulating fluidized bed boiler

项目	检测值	排放浓度限值	
		(GB 13271—2014)	(DB 33/2147—2018)
颗粒物	8.2	20	10
SO ₂	30	50	35
NO _x	45	150	50

3 多流程循环流化床技术在综合能源服务中的应用案例

基于多流程循环流化床技术对于多种燃料的适用性,以及高效率、低排放的特点,热华能源将多流程循环流化床锅炉应用于园区级的综合能源服务,根据园区的发展规划及实际用能需求进行多流程循环流化床锅炉的设计和建设,可以提

供冷热电三联产,实现能源梯级利用、提高能源综合利用率、减少环境污染。

图5为多流程循环流化床锅炉在江苏兴化兴东工业园脱水果蔬产业园的综合能源服务项目。该项目按照“统一规划、分步实施”的原则进行设计和建设。项目一期,建设2×45 t/h生物质多流程循环流化床锅炉,已于2017年1月建成投产,实现了兴东工业园区脱水果蔬产业园的生物质集中供热;项目二期,将2×45 t/h生物质多流程循环流化床锅炉扩容到2×55 t/h,新建1×6 MW抽凝发电机组,新建1×25 t/h燃气锅炉(备用),实现热电联产,目前已经启动,预计于2020年底实现并网发电;项目三期,拟建冷冻物流园,对生物质能源进行梯级利用,实现冷热电三联产。



图5 多流程循环流化床锅炉综合能源服务项目

Fig. 5 Integrated energy service project of multi-pass circulating fluidized bed boiler

4 结论

多流程循环流化床技术具有“多燃料混烧”的特点,针对多种燃料的热效率达到88%~92%,且污染物排放均达到了排放浓度限值的要求,实现了生物质、可燃工业固体废弃物、煤炭等多种燃料的清洁高效燃烧,有效解决了传统工业锅炉燃料适用范围窄、原始污染物排放高的问题。园区级的综合能源服务可以根据当地的资源条件,在一年内根据燃料的供应情况选择合适的生物质资源、工业固体废弃物或者煤炭作为燃料,实现多种燃料混烧。在分散能源的分散利用基础上,可以有效平抑某一种燃料短缺引起的价格波动,降低综合燃料成本。

多流程循环流化床技术实现了循环流化床技

术的小型化,可以实现多种燃料的清洁高效利用,将传统的化石能源与可再生能源完美结合起来,可为园区级的综合能源服务提供有效支撑。

参考文献

- [1] 张治新, 陆青, 张世翔. 国内综合能源服务发展趋势与策略研究[J]. 浙江电力, 2019, 38(2): 1-6.
- [2] 戚艳, 刘敦楠, 徐尔丰, 等. 面向园区能源互联网的综合能源服务关键问题及展望[J]. 电力建设, 2019, 40(1): 127-136.
- [3] Li M, Mu H, Li N, et al. Optimal design and operation strategy for integrated evaluation of CCHP (combined cooling heating and power) system[J]. Energy, 2016, 99: 202-220.
- [4] Wang D, Liu L, Jia H, et al. Review of key problems related to integrated energy distribution systems [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 130-145.
- [5] 王旭东, 丁一, 马世乾, 等. 园区综合能源系统互联安全性与运营模式研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 286-293.
- [6] 王琴明. 工业园区智慧能源管理系统的探索与应用 [J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(1): 68-70.
- [7] 国旭涛, 蔡洁聪, 韩高岩, 等. 分布式能源技术与发展现状[J]. 分布式能源, 2019, 4(1): 52-59.
- [8] 任江波, 孙仲民, 顾乔根, 等. 计及储能全寿命周期运维的综合能源系统优化配置[J]. 广东电力, 2019, 32(10): 71-78.
- [9] 陈曦. 分布式能源系统在工业联产中的应用研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [10] 林世平. 工业园区小型分布式能源系统应用研究 [J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2011, 7(2): 103-106.
- [11] 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.
- [12] 张衍国, 姚忠建, 李清海, 等. 一种卧式循环流化床燃烧设备及其循环燃烧方法: 200510126362.6 [P]. 2006-06-14.
- [13] 张衍国, 李清海, 蒙爱红, 等. 一种多流程循环流化床锅炉: 201010110352.4[P]. 2011-07-20.

- [14] 李清海, 甘超, 冯衡, 等. 卧式循环流化床回料器性能实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19(3): 193-199.
- [15] 李清海, 周晓彬, 陈庚, 等. 卧式循环流化床锅炉燃烧的数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(3): 353-357.
- [16] 向杰, 李清海, 张衍国, 等. 卧式循环流化床锅炉压降和颗粒体积分数分布[J]. 动力工程学报, 2014, 34(4): 253-259.
- [17] 丛堃林, 李清海, 韩峰, 等. 多流程卧式循环流化床气固流动的传热特性[J]. 燃烧科学与技术, 2018, 24(4): 31-38.
- [18] 丛堃林, 李清海, 鲁伟, 等. 多流程循环流化床锅炉热力计算方法研究[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 139-147.
- [19] 国家能源局. 国家能源局综合司关于征求对《关于促进可再生能源供热的意见》的函[EB/OL]. (2017-04-18)[2019-09-23]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201704/t20170424_2779.htm. 2017-04-18.
- [20] 国家能源局. 国家能源局关于开展“百个城镇”生物质热电联产县域清洁供热示范项目建设的通知[EB/OL]. (2018-01-19)[2019-09-23]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201802/t20180211_3116.htm.
- [21] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 锅炉大气污染物排放标准: GB 13271—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [22] 浙江省人民政府. 燃煤电厂大气污染物排放标准: DB33/2417—2018[S]. 杭州: 浙江省环境保护厅, 2018.

收稿日期: 2019-11-25.

作者简介:



韩峰

韩峰(1987), 男, 博士, 工程师, 研究方向为生物质等劣质燃料的热利用及其在分布式能源中的应用等, hanfeng@nowva.com.cn;



丛堃林

丛堃林(1988), 男, 博士研究生, 研究方向为节能热力设备的研发与设计、燃料燃烧特性等, congkunlin@qq.com;



李清海

李清海(1972), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为传热、生物质气化与燃烧、污染物控制与脱除技术等, liqh@tsinghua.edu.cn;



张衍国

张衍国(1968), 男, 博士, 教授, 研究方向为劣质燃料的燃烧、余热利用、固体燃料的热转化等, zhangyanguo@tsinghua.edu.cn.

(责任编辑 辛培裕)