

垃圾焚烧发电趋势分析及余热锅炉技术进展

于超,郝玉刚,刘瑶

(中国恩菲工程技术有限公司,北京 100038)

[摘要] 过去十年间焚烧发电逐渐成为我国主要的城市生活垃圾处理方式,垃圾焚烧厂数量增加明显,垃圾焚烧技术发展迅速。最新公布的国家补贴退坡、生活垃圾分类等政策将对垃圾焚烧发电行业产生重要而深远的影响,倒逼企业在技术和管理等方面做出优化改革,提升企业盈利能力。本文从宏观政策、市场预期、重点技术及装备发展等三方面梳理了生活垃圾焚烧发电行业发展趋势,并对影响垃圾焚烧发电企业经济效益的高参数余热发电技术及余热锅炉装备的技术研发进展进行了介绍。通过提高垃圾吨发电量及吨上网电量是提升垃圾焚烧发电企业盈利能力的重要方向,通过数字孪生等数字化手段提高全厂及重要部件的设计水平,也是未来的发展方向。

[关键词] 生活垃圾焚烧发电;余热锅炉;高参数;高温腐蚀

[中图分类号] TF806; TK08

[文献标志码] B

[文章编号] 1003-8884(2021)03-0047-11

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2021.03.011

0 引言

垃圾焚烧是一种处理生活垃圾的方式,将生活垃圾置于高温下燃烧,利用高温氧化作用使其中的可燃废物转变为二氧化碳和水等,焚烧后的灰、渣仅为生活垃圾原体积的20%以下,从而大大减少固体废物量^[1]。垃圾焚烧发电作为发达国家广泛采用的城市生活垃圾处理方式,符合“减量化、无害化、资源化”三原则,其土地资源消耗少、处理速度快、二次污染少且能够资源再利用,成为世界主流的垃圾处理方式^[2]。我国从20世纪80年代中后期才开始采用焚烧处理生活垃圾^[3]。随着我国“垃圾围城”现象日趋严重,生活垃圾焚烧发电既是环境保护的需要,又是资源再利用的重要方式,近年来得到快速发展^[4]。“十二五”和“十三五”期间(2011-2020年),我国垃圾焚烧厂的数量增加了303%,焚烧处理量增加了577%^[5]。展望未来,2020年发布的《关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见》及其补充通知等最新政策,对行业政策进行重要调整,将推动垃圾焚烧发电行业在技术、核心装

备、商业模式、经营策略等方面不断升级创新。

1 垃圾焚烧发电行业发展趋势分析

1.1 垃圾焚烧发电行业政策分析

我国生活垃圾焚烧发展政策历程,如表1所示^[6-8]。

我国在2023年基本实现原生生活垃圾“零填埋”等政策约束下,焚烧方式将长期占主导地位^[9],是破解垃圾围城的绝对主要手段^[10],中国积极推进垃圾分类与焚烧相结合的主基调会持续几十年,不会有大调整,垃圾焚烧发电将成为未来主要的垃圾无害化处理方式^[11]。另一方面,最新公布的国家补贴退坡、垃圾分类等政策,将对垃圾焚烧发电行业产生重要而深远的影响。新政策将倒逼市场在技术和管理等方面做出优化改革^[12],通过技术进步、完善垃圾处理收费政策、提高企业运维水平等方式,提升垃圾发电企业盈利能力^[9,13]。

1.2 垃圾焚烧发电行业市场分析

2010年至2020年出现了投资垃圾发电产业的热潮。2010年我国在运行焚烧厂104座,城市生活垃圾焚烧处理量约2300万t/a;到了2019年增长到401座,处理量达1.2亿t/a。10年间,城市生活垃圾中焚烧处理占比由18.8%上升至51.2%。截至2020年6月1日,我国在运行的垃圾焚烧厂总计455座,过去5年间垃圾焚烧厂数量的年均复合增

[收稿日期] 2021-03-01

[作者简介] 于超(1984-),男,山东济南人,工程师,博士,主要从事垃圾焚烧发电工程技术研究及项目咨询工作。

[引用格式] 于超,郝玉刚,刘瑶.垃圾焚烧发电趋势分析及余热锅炉技术进展[J].有色设备,2021,35(3):47-57.

表1 我国生活垃圾焚烧发展政策历程

时间	政策名称	政策内容
2020年	《城镇生活垃圾分类和处理设施补短板强弱项实施方案》	到2023年基本实现原生生活垃圾“零填埋”,满足条件的地区加快发展以焚烧为主的垃圾处理方式。
2020年	《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》	生物质发电项目,包括农林生物质发电、垃圾焚烧发电和沼气发电项目,全生命周期合理利用小时数为82500h。
2020年	《关于有序推进新增垃圾焚烧发电项目建设有关事项的通知(征求意见稿)》	存量和增量项目的界定;增量项目范围和质量控制;以收定支的具体办法;预警机制、项目建设进度控制等。
2020年	《完善生物质发电项目建设运行的实施方案》	规定2020年申请中央补贴项目的条件,必须纳入生物质国家、省级专项规划,2020年1月20日以后全部机组并网的当年新增项目,符合法规及申报属实等条件;按项目全部机组并网时间先后次序排序,并网时间早者优先,直至入选项目所需补贴总额达到2020年中央新增补贴资金额度15亿元为止;加强投资监测预警和完善生物质发电项目补贴机制等
2020年	《关于开展可再生能源发电补贴项目清单审核有关工作的通知》	抓紧审核存量项目信息,分批纳入补贴清单。按照“成熟一批、公布一批”的原则,分阶段完成补贴清单的公布。
2020年	《关于贯彻落实促进非水可再生能源发电健康发展若干意见,加快编制生活垃圾焚烧发电中长期专项规划的通知》	要求各地提交垃圾焚烧中长期发展规划;国家可再生能源电价附加补贴资金优先用于列入专项规划的项目。
2020年	《可再生能源附加补助资金管理办法》	本办法印发后需补贴的新增可再生能源发电项目,由财政部合理确定当年新增补贴总额,国家发改委、国家能源局在不超过该年度新增补贴总额内,合理确定各类需补贴项目新增装机规模。
2020年	《关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见》	国家不再发布可再生能源电价附加目录,所有可再生能源项目通过国家可再生能源信息管理平台填报电价附加申请信息。
2017年	《生活垃圾分类制度实施方案》	加快建立分类投放、分类收集、分类运输、分类处理的垃圾处理系统,努力提高垃圾分类制度覆盖范围,将生活垃圾分类作为推进绿色发展的重要举措。
2016年	《可再生能源发电全额保障性收购管理办法》	电网企业(含电力调度机构)根据国家确定的上网标杆电价和保障性收购利用小时数,结合市场竞争机制,通过落实优先发电制度,在确保供电安全的前提下,全额收购规划范围内的可再生能源发电项目的上网电量。
2012年	《关于完善垃圾焚烧发电价格政策的通知》	以生活垃圾为原料的垃圾焚烧发电项目,均先按其入厂垃圾处理量折算成上网电量进行结算,每吨生活垃圾折算上网电量暂定为280千瓦时,并执行全国统一垃圾发电标杆电价每千瓦时0.65元(含税);其余上网电量执行当地同类燃煤发电机组上网电价。
2007年	《电网企业全额收购可再生能源电量监管办法》	电网企业应当全额收购其电网覆盖范围内可再生能源并网发电项目的上网电量,并应当严格按照国家核定的可再生能源发电上网电价、补贴标准和购售电合同,及时、足额结算电费和补贴。
2005年	《可再生能源产业发展指导目录》	垃圾焚烧发电和填埋场沼气发电基本实现商业化。
2002年	《关于推进城市污水、垃圾处理产业化发展的意见》	明确已建垃圾处理设施的城市开征垃圾处理费,专项用于项目建设与运营维护。
2000年	《当前国际鼓励发展的环保产业设备(产品)目录(第一批)》	将城市生活垃圾焚烧处理成套设备列入目录,拉开了国家鼓励生活垃圾采取焚烧发电处理方式的序幕。

长率为 15.6%^[5]。

除了国家对环保产业特别是固废处理行业的政策支持、城镇化不断推进带来的垃圾处理客观需求,形成投资热潮的重要原因还包括明确稳定的盈利预期。根据 2012 年《国家发展改革委关于完善垃圾焚烧发电价格政策的通知》,“全额上网收购电量、吨垃圾上网电量 280kW·h 以内执行 0.65 元/kW·h 电价、超发部分执行地方脱硫燃煤机组标杆上网电价”基本政策所建立的财务模型和投资收益测算,基本上能做到“资本金内部收益率不小于 8%”的预期^[14]。

在垃圾发电产业投资热潮期,研究人员对垃圾焚烧行业的发展预测较为乐观^[15]。《关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见》以及补充通知的发布,将使垃圾焚烧发电将进入“新国补”时代,让垃圾焚烧发电项目的盈利空间进一步缩

小^[16],对垃圾焚烧发电的市场预期有所调整。专家认为,“十四五”期间预计垃圾焚烧新增规模需求为 51.8 万吨/日,但考虑到政策推进程度、焚烧补贴调整、资源化水平提高及成本制约等因素影响,预计可释放空间为 22.4 万吨/日,综合我国对垃圾焚烧补贴政策的调整,以及各地垃圾焚烧项目的规划,垃圾焚烧发电行业可能会进入一个缓慢增长的阶段^[9]。

1.3 垃圾焚烧发电重点技术及装备分析

垃圾焚烧发电系统主要由垃圾接受系统、焚烧系统、余热锅炉系统、燃烧空气系统、汽轮发电系统、烟气净化系统、灰渣、渗滤液处理系统、蒸汽机冷凝水系统、废金属回收、自动控制和仪表系统等组成^[17]。焚烧炉对整体工艺路线、燃烧效率、工程造价、运营稳定性起到关键作用,而余热锅炉及其产生的过热蒸汽的参数对发电企业的经济效益有重要影响。图 1 为某机械炉排垃圾焚烧发电项目工艺路线图。

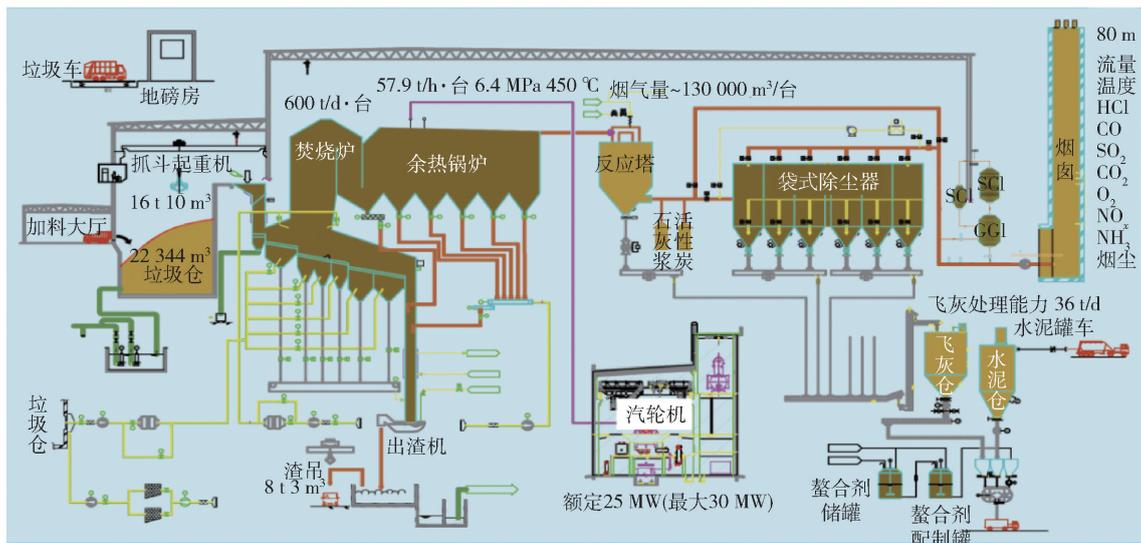


图 1 某机械炉排垃圾焚烧发电项目工艺路线图

垃圾焚烧发电行业新增市场规模有限,除了获取新增项目和对其他项目公司收购外,对于行业内公司,通过积极进行技术方案优化和加强运营管理,提高发电效率、降低吨投资成本和运营成本,成为行业内公司的重要突破方向之一^[8]。研究人员梳理了重点技术及设备研发对垃圾焚烧发电行业走高质量发展之路的重要意义^[8,9,12,13,18]。

提升垃圾焚烧发电企业盈利能力的重要方向之一是通过技术进步,提高垃圾吨发电量及吨上网电量。深圳市生活垃圾处理监管中心的数据显示,2011 至 2018 年间,我国生活垃圾焚烧发电企业的

吨垃圾上网电量均值提升了 42 kW·h。对于企业而言,垃圾焚烧发电收入可拆解为总上网电量及上网电价。因上网电价变动弹性不大,吨上网电量的提升成为改善垃圾焚烧厂经济效益的重要途径。在行业吨发电量及吨上网电量整体水平提升的影响下,垃圾焚烧厂发电收入规模有所扩大,项目运营毛利率也有所改善^[13]。

垃圾吨发电量的提升主要通过焚烧炉及余热锅炉的技术优化来实现:(1)炉排炉技术的运用:目前垃圾焚烧厂使用的焚烧技术主要包含炉排炉技术以及循环流化床焚烧炉技术。相较于流化床技术,炉

排炉技术因垃圾沥水量较多、锅炉效率较高等原因,具有更高的吨上网量。2020年,全国已运行垃圾焚烧厂492座,涉及1202台焚烧炉,其中,机械炉排炉台数占比超过86%,循环流化床台数占比不到14%^[13]; (2)中温次高压技术的运用:目前我国多采用中温中压工况的机械炉排炉运营,随着技术的更新换代,已有采用中温次高压/高压工况的机械炉排炉逐步投入使用,优化的工艺可以适应更高的热值区间,同时可以有效提高能量转换效率,进而提升吨垃圾发电量^[13,18]。

2 垃圾焚烧余热锅炉研发进展

2.1 垃圾焚烧余热锅炉定义及类型

垃圾焚烧余热锅炉是指利用垃圾焚烧释放的热量进行有效换热并产生蒸汽或热水的热力设备,由膜式水冷壁、对流管束、汽包、振打装置等组成^[3]。

垃圾焚烧余热锅炉有立式布置、卧式布置、Π式布置3种主要布置方式。曾纪进等^[19]对垃圾焚烧发电厂余热锅炉的布置方式进行研究,针对3种布置方式对锅炉燃烧效率、投资成本等的影响分析和比较了3种炉型布置方式的性能及优缺点,建议小于500t的锅炉采用立式布置,大于500t的锅炉,采用卧式布置或Π式布置。

立式锅炉为垂直顶支吊型式,燃烧炉膛位于炉排上方。锅炉的第一烟道四周敷设耐火层加以保护,有些锅炉的耐火层会敷设至烟温较低的第二烟道以避免腐蚀。裸露的水冷壁增加吸热使烟气到达过热器前温度已降低。锅炉炉膛的尺寸能够使到达过热器进口的烟温不超过600℃,以保证过热器寿命较长。烟道中的换热部件(过热器、蒸发管束和省煤器)为顺列布置,并保证足够的空间以防止堵塞,使锅炉在污染状况下也能正常运行。立式锅炉占地面积小,顺气流方向容易布置,烟气穿过换热器比较均匀,但过热器上容易积灰,影响换热效果,严重的积灰会影响锅炉的效率和寿命。随着单台炉垃圾处理量的增加,用钢量增加比较明显,造价明显增加。

卧式锅炉气流要转为水平方向进出第四烟道,烟气平均分布不如立式锅炉。卧式锅炉的蒸发器、低温过热器、中温过热器、高温过热器、省煤器都集中横向布置在第四水平烟道内,因此,其维护比较方便,能容易地从顶棚上部吊出更换。用卧式布置的

好处还有换热器不易积灰,清灰也比较容易,锅炉灰被振打或吹灰后直接掉到灰斗中,从下部排出。但卧式布置占地面积大,投资成本较大。卧式锅炉布置非常适合占地面积较大的垃圾焚烧发电厂。随着单台炉垃圾处理量的增加,用钢量增加比较明显,造价明显增加。

Π式锅炉为悬挂式锅炉,这种设计更具优势,便于安装和维护,易于从水平烟道顶棚上方更换过热器,整个过热器可以一次性更换。锅炉包括三段垂直辐射烟道和一段水平对流烟道以及一段垂直省煤器。第一烟道装有耐火材料保护层,锅炉垂直膨胀向下自由伸缩,压力部件墙壁温度均匀分布,热应力最小。水平通道包含了低、中、高温过热器以及蒸发器,管道垂直布置,所以不易积灰、清灰也容易,这点性能与卧式锅炉相近。但是,Π式炉布置的省煤器是在尾部竖井内,如果省煤器更换,更多的办法是从偏侧面抽出。Π式布置占地面积大,仅次于卧式,投资与卧式相近。

2.2 垃圾焚烧余热锅炉工作过程

2.2.1 化学反应及传热传质过程

垃圾在焚烧炉及余热锅炉内的物质运动与能量传递与转化的基本过程如表2所示^[3]。

2.2.2 余热锅炉受热面布置^[3]

针对垃圾特性不稳定的特点,采用蓄热能力大的自然循环余热锅炉。自然循环是利用不受热的下降管内的水与单面受热的上升管(即水冷壁)内的汽水混合物之间的密度差所产生的不平衡力推动汽水混合物向上流动形成的循环。自然循环余热锅炉的回路包括汽包、下降管、多组并列的上升管即水冷壁和对流蒸发器、多级过热器及喷水减温器、省煤器等,见图2。汽包内的水经不受热的下降管、下分配联箱进入水冷壁,水冷壁内被加热成的汽水混合物向上流动,经过上联箱返回汽包,汽水混合物在汽包内进行汽水分离;饱和水与省煤器来的锅炉给水混合,再经下降管、水冷壁自然循环;饱和水与省煤器来的锅炉给水混合,再经下降管、水冷壁自然循环;饱和蒸汽顺序通过对流蒸发器、多级过热器及两级过热器之间的减温器达到所需要品质的过热蒸汽,最终通过蒸汽主管送出。

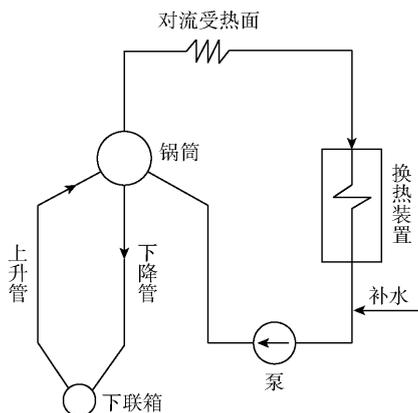
2.3 垃圾焚烧余热锅炉部件组成

典型垃圾焚烧余热锅炉主要由循环系统、吸热系统、燃烧系统和其他辅助系统构成。

表2 垃圾焚烧炉及余热锅炉内的物质运动与能量传递与转化的基本过程^[3]

基本物质宏观与微观运动过程		
原始物质	能量特征	物质运动表现形式
生活垃圾	吸热 < 放热	水分蒸发; 有机物析出挥发分转化为高温烟气(含携带的固定碳); 固定碳转化为炉渣;无机物与炉渣混合排出焚烧炉
锅炉给水	吸热	水→汽水混合物→饱和蒸汽→过热蒸汽
燃烧空气	助燃	参加反应部分进行燃烧过程;过量部分混入烟气

能量传递与转化过程		
原始物质	能量特征	物质运动表现形式
生活垃圾	燃烧	化学能以热能的形式释放,表现为具有高温的烟气与残余灰渣
高温烟气	能量传递	高温烟气的热能通过受热面传递给被加热介质(即工质),表现为烟气温度降低
水汽	能量转化	工质通过吸热由液态水转化为蒸汽,表现为蒸汽具有焓与熵

图2 垃圾焚烧余热锅炉汽水循环原理图^[3]

2.3.1 水冷壁

水冷壁是在炉膛顶部或侧面布置的用以吸收炉内辐射热、增加锅炉换热面积并降低炉壁温度的水管群,其上端和下端分别与汽包和下部集箱相连。



(a) 成品实物图



(b) 现场安装图

图3 垃圾焚烧余热锅炉水冷壁

敷设水冷壁可以大大降低炉墙耐火材料的温度,这样就可以适当减小炉墙的厚度以简化锅炉结构。此外,炉内温度的降低还能有效防止结焦。随着垃圾热值和余热锅炉工质参数的不断提高,水冷壁已成为大型城市生活垃圾焚烧锅炉不可缺少的主要受热面。图3(a)是水冷壁及集箱实物,图3(b)是现场安装水冷壁及上集箱。

2.3.2 对流管束

在锅炉内除水冷壁外,还需布置大量对流蒸发受热面,即锅炉管束。大型生活垃圾焚烧炉配套的余热锅炉系统中,锅炉管束一般包括汽包、水包或下集箱和蒸发管群,主要作用是产生饱和蒸汽。

汽包是产生饱和蒸汽、实现汽水分离的场所。现代锅炉的汽包都用吊箍悬挂在炉顶大梁上,利于自由膨胀,垃圾焚烧余热锅炉多采用不受烟气直接冲刷的外置单汽包。图4(a)为汽包成品,图4(b)



(a) 成品实物图

(b) 现场安装图

图4 垃圾焚烧余热锅炉汽包

为汽包现场安装施工。

汽包是由钢板制成的长圆筒形压力容器,由筒身和两端的封头组成。汽包内部主要构造为汽水分离装置,利用机械方式或离心力去除蒸汽中所含的水分,此外还设置给水、加药、排污、取样等装置;汽包外部需装设蒸汽引出管和阀门、水位计、压力计、温度计及安装装置等。

蒸发管群包括上升管和下降管,其上端连接汽包,下端连接水包或下集箱,维持炉水循环。考虑到飞灰在蒸发管群上积聚造成的影响,必须在蒸发管群中设置清灰装置以减少飞灰的积聚。

2.3.3 过热器

蒸汽进入汽轮发电机组发电。锅炉设置过热器能提高蒸汽焓值,从而增加汽轮发电机组的效率。在电厂锅炉中,过热器一般布置在高温辐射区,吸收高温烟气的热量。但在城市生活垃圾焚烧锅炉中,由于烟气中含有大量的腐蚀性成分,在高温环境中会对管材造成严重的腐蚀,因此,一般将过热器设置在对流区中。

图5(a)为过热器管成品,图5(b)为现场安装蛇形管式过热器及其集箱。



(a) 成品实物图

(b) 现场安装图

图5 垃圾焚烧余热锅炉过热器

2.3.4 省煤器

省煤器是汽水系统中的承压部件,其设置目的是利用锅炉尾部烟气的热量加热锅炉给水,一般安装在锅炉烟气通道的末端,利用烟气余热加热锅炉给水以增加回收余热,提高锅炉热效率,同时加热锅炉给水还可降低给水与汽包饱和水之间的温度差,降低对汽包产生的热应力。由于垃圾热值不稳定,为保证进入对流受热面时有足够高的、稳定的烟气温度,要允许部分工质在省煤器内气化的可能,因此目前大型城市生活垃圾焚烧锅炉基本采用钢管式省煤器,也称沸腾式省煤器。图6(a)是蛇形管式省煤器成品,图6(b)是直管式省煤器。

2.4 高参数余热锅炉研发及应用情况

在国内已运行的垃圾焚烧发电厂中,垃圾焚烧锅炉的蒸汽参数主要选用中参数。国内第一个采用高参数的广州李坑垃圾焚烧发电一厂(6.5 MPa、450℃)2005年10月点火试运行,至今已运行十余年。近年来,国内垃圾焚烧领域的投建方在投建项目中开始逐步采用高参数,设备厂家的高参数设备供货业绩也逐步增加,且已有多个项目在正常稳定运行。

张晓斌等^[20]统计了2015—2017年国内主要垃

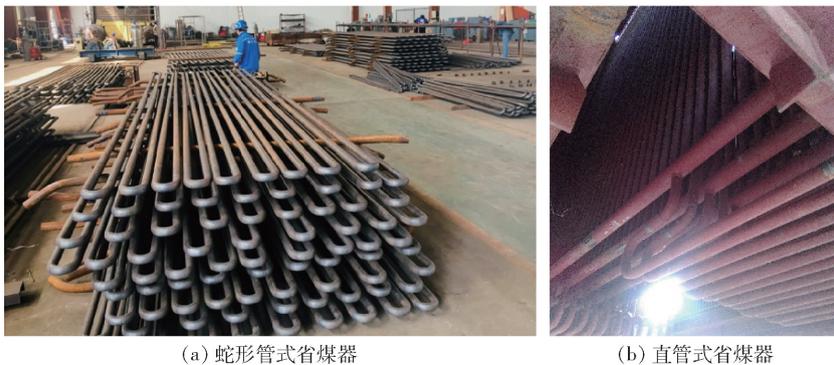


图6 生活垃圾焚烧余热锅炉省煤器

圾焚烧发电项目投建方的高参数项目业绩。截至2017年12月,国内已投运和在建的高参数垃圾焚烧发电项目约有30个,参数等级集中在6.4 MPa、450 °C/485 °C和5.3 MPa、485 °C,各参数系列占比如图7所示。

余热锅炉设备厂家的高参数垃圾焚烧余热锅炉的供货业绩也日益增加。图8为2013~2017年某

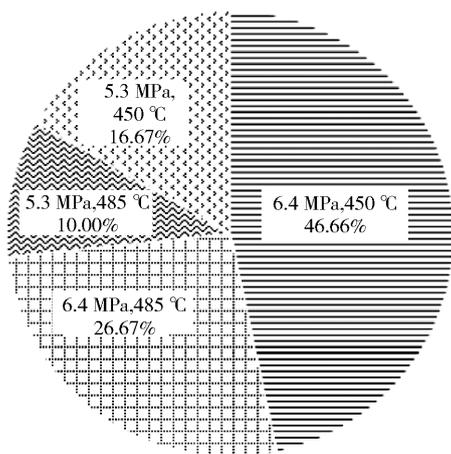


图7 国内已投运及在建高参数垃圾焚烧发电项目参数统计(截至2018年)

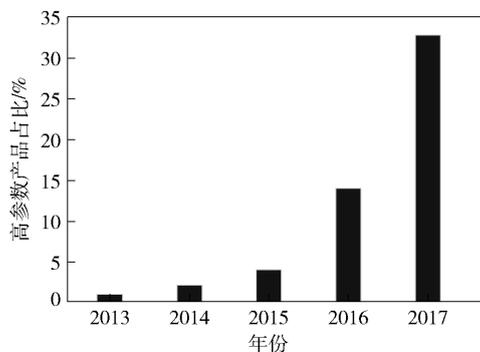


图8 某余热锅炉设备厂家高参数产品供货情况

余热锅炉设备厂家高参数产品供货情况。由图中可知,2013—2017年的垃圾焚烧余热锅炉供货业绩中,高参数余热锅炉占比逐步上升为30%左右。

近几年随着行业发展,国内投资企业及余热锅炉厂家普遍投入高参数生活垃圾焚烧发电系统及余热锅炉装备研发,已逐渐形成多规模系列化产品。表3为国内垃圾焚烧龙头企业高参数发电系统性能,表4为某余热锅炉制造企业垃圾焚烧余热锅炉研发进度。

表3 龙头企业高参数垃圾焚烧余热发电系统性能

参数	焚烧线规模	全厂热效率	入炉吨发
中温中压4 MPa/400 °C	350~400 t/d	21.8%	450 kW·h/t
中温次高压6.4 MPa/450 °C	350 t/d	25%	525 kW·h/t
中温次高压中间再热6.4 MPa/450 °C/430 °C	500 t/d	26.7%	595 kW·h/t
中温超高压中间再热13 MPa/430 °C/410 °C	750 t/d	30%	697 kW·h/t

2.5 高温腐蚀及其解决方案

垃圾焚烧锅炉的腐蚀主要有炉排的腐蚀、受热面的高温腐蚀及低温腐蚀。据报道,有垃圾焚烧炉

的过热器投运100天即遭到严重腐蚀,也有垃圾焚烧厂运行5000h后发现水冷壁管子腐蚀^[21]。在余热锅炉所有受热面中,承受最高温度的末端过热器

的管子发生烟气腐蚀的危险最大。受热面的腐蚀速率与温度的关系如图 9 所示。

表 4 某余热锅炉制造企业垃圾焚烧余热锅炉研发进度

年份	研发内容
2000	400 t/d CFB 垃圾焚烧余热锅炉
2011	500 t/d 垃圾焚烧余热锅炉
2014	750 t/d 垃圾焚烧余热锅炉
2015	850 t/d 垃圾焚烧余热锅炉
2016	高参数(6.4 MPa, 450 ℃)再热垃圾余热锅炉
2019	1 000 t/d、高参数(6.4 MPa, 485 ℃)垃圾焚烧余热锅炉

针对余热锅炉蒸汽参数提高后的高温腐蚀问题,可采取以下应对措施:

(1)增强密封:减少内外管穿墙,减小开孔,合理设计锅炉整体密封,减少炉膛无组织风漏入,有助

于降低炉内过量空气系数,并更利于燃烧的组织及炉内空气动力场的优化,使炉膛内的温度场分布更合理,从而有效降低高温腐蚀的发生风险。

(2)合理清灰:考虑受热面积灰为造成高温腐蚀的主要影响因素,如炉内二三烟道受热面积灰造成的传热恶化,将导致水平烟道入口处烟温过高,从而造成过热器处的烟温高于设计值,导致过热器的高温腐蚀;在炉内 1、2、3 烟道的适当位置设置弹簧振打清灰装置,并预留喷淋清灰接口,必要时增设喷淋清灰系统;在过热器上同时设置弹簧振打清灰和蒸汽吹灰装置,以达到理想的清灰效果,由此降低因积灰导致高温腐蚀的风险;

(3)防腐堆焊:相关分析研究表明,垃圾焚烧余热炉的高温腐蚀,主要是由垃圾成分中的 Cl 引起的高温氯化腐蚀,在高温烟气区域采用 INCONEL625 镍基堆焊可有效抑制或缓解高温氯化腐蚀。

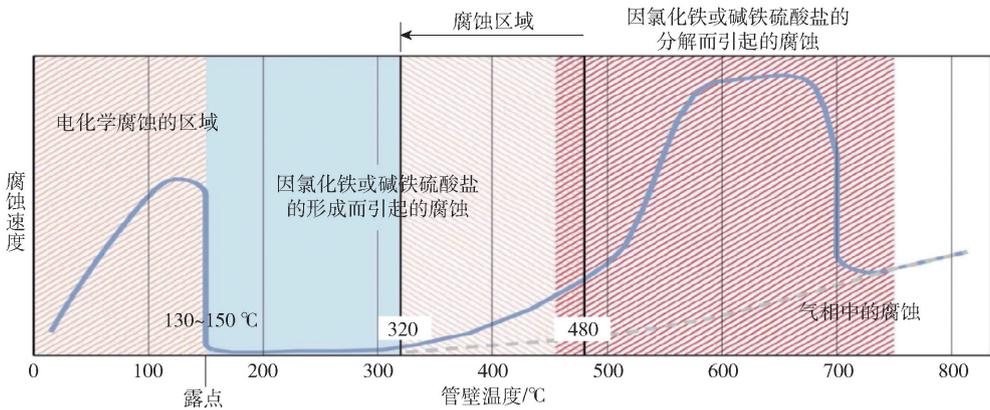


图 9 受热面的腐蚀速率与温度的关系

2.6 垃圾焚烧余热锅炉技术进展

2.6.1 锅炉部件设计采用新工艺

(1)提高过热蒸汽参数的屏式过热器:文献^[22]提出一种用于高温高压(9.8 MPa、540 ℃)垃圾焚烧炉的屏式过热器,主体由受热管屏和特殊高导热可塑料构成。屏式过热器位于垃圾焚烧炉第 2 烟道上部,工作时,来自锅筒的饱和蒸汽依次经过低温过热器、中温过热器、高温过热器,然后通过连接管进入屏式过热器。每两级过热器之间设置 1 个喷水减温器,可灵活调整进入下级过热器的蒸汽温度及保证主蒸汽出口温度在要求范围内,减温水来自锅炉给水母管。烟气热量主要以辐射方式传递到屏式过热器,然后依次通过特殊高导热可塑料及管子加热管内蒸汽至 540 ℃。

(2)增加循环水量及循环力的角管式锅炉:常规的自然循环锅炉汽水混合物通过汽包循环,角管式锅炉则在上部集合管内进行汽水分离,所以也从再循环管循环,本设计可以在减轻汽包内汽水分离负担的同时,增加余热锅炉的循环水量及循环力;图 10 为角管式锅炉和常规水管锅炉水循环的比较。

2.6.2 利用数字化设计手段提高设计及施工效率

据报道^[23],国内某设计研究院利用数字孪生模型,改扩建垃圾焚烧技改项目,设计周期从两个月缩短到 45 天,为设计院节省了 31% 的人力成本,施工现场图纸会审问题减少 90%,大大提高了准确性。三维数字化设计正逐渐成为垃圾焚烧电系统及余热锅炉的重要设计手段。图 11 为国内某高参数垃圾焚烧项目余热锅炉三维设计图。

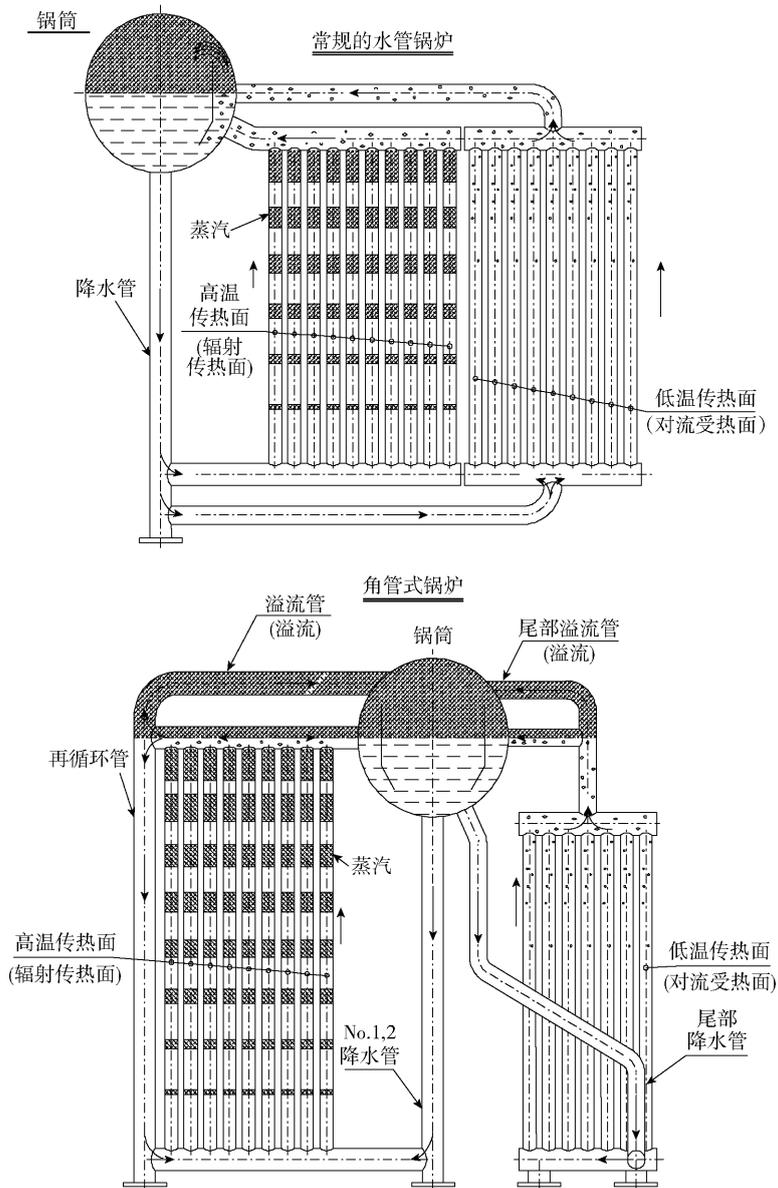


图 10 角管式锅炉和一般水管锅炉水循环的比较

2.6.3 中国恩菲生活垃圾焚烧锅炉研发应用简介

中国恩菲是国内顶尖的有色行业余热锅炉设计单位,对多种炉型、多种金属冶炼过程产生的各类复杂烟气成分均有工程设计成功案例。中国恩菲还是我国最早进入垃圾焚烧发电行业的咨询设计、技术研究及工程实施的单位之一,现已成为国内唯一一家集垃圾焚烧发电项目投资、咨询设计、设备成套工程承包、建设和运营于一体的具备综合甲级资质的能源环境领域服务商。国内生活垃圾焚烧发电厂环保排放标准日趋严格、提高吨垃圾发电量的必要性显著增强,都对垃圾焚烧发电系统及余热锅炉提出

更高的设计要求。因此,中国恩菲探索将有色行业余热锅炉工程设计积累的丰富经验及技术专利,应用在垃圾焚烧行业^[24-25]。

中国恩菲自主研发的垃圾焚烧余热锅炉具有处理能力大、热效率高、参数得到提升等优点。目前已实现 4.0 MPa、450 °C 参数锅炉的安全运行;处理能力提高 20% 以上;蒸汽发电效率提高 2% ~ 4%。

3 结语

本文从宏观政策、市场预期、重点技术及装备发展三方面梳理了生活垃圾焚烧发电行业发展趋势,

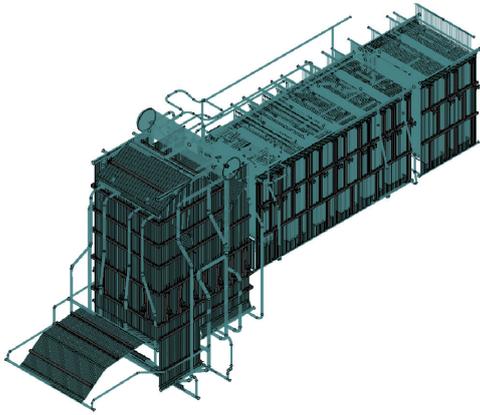


图 11 垃圾焚烧余热锅炉三维设计图

对影响垃圾焚烧发电企业经济效益的高参数余热发电技术及余热锅炉装备的研究情况进行了综述,得到如下结论:

(1)中国积极推进垃圾分类与焚烧相结合的主基调会持续几十年,不会有大的调整,垃圾焚烧发电将成为未来主要的垃圾无害化处理方式,同时最新公布的国家补贴退坡、垃圾分类等政策,将对垃圾焚烧发电行业产生重要而深远的影响。

(2)新政策将倒逼市场在技术和管理等方面做出优化改革,通过技术进步、完善垃圾处理收费政策、提高企业运维水平等方式,提升垃圾发电企业盈利能力。

(3)提升垃圾焚烧发电企业盈利能力的重要方向之一是通过技术进步,提高垃圾吨发电量及吨上网电量。中温次高压、中温超高压、蒸汽再热等技术及相应的余热锅炉已经逐渐在垃圾焚烧工程中得到应用,提高发电蒸汽参数是重要的发展方向,同时,采用数字孪生等数字化手段提高系统及装备的设计及施工水平也是未来的行业发展趋势。

[参考文献]

[1] 聂永丰,岳东北. 固体废物热力处理技术[M]. 北京:化学工业出版社,2015.
 [2] 北极星垃圾发电网. 垃圾焚烧发电是世界主流的垃圾处理方式. [EB/OL]. [2020-11-21]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20201121/1117212.shtml>
 [3] 白良成. 生活垃圾焚烧处理工程技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
 [4] 南剑. 国内外垃圾焚烧发电行业综述分析及政策建议[J]. 基层建设. [EB/OL]. [2018-12-22]; <https://www.qikanchina.net/periodical/catalog/3653392>.
 [5] 北极星垃圾发电网. 中国垃圾焚烧发电行业政策规划发

展历程分析. [EB/OL]. [2020-12-18]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20201218/1123339.shtml>
 [6] 北极星垃圾发电网. 2021年中国垃圾焚烧发电行业最新政策汇总一览. [EB/OL]. [2021-01-08]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20210108/1128105.shtml>
 [7] 北极星电力网新闻中心. 垃圾焚烧发电行业深度报告:复盘与展望 垃圾发电的进阶之路. [EB/OL]. [2020-04-21]. <http://news.bjx.com.cn/html/20200421/1065176.shtml>
 [8] 北极星垃圾发电网. 垃圾焚烧发电进入运营高峰期 市场扩张和运营效率成核心关注点. [EB/OL]. [2020-11-11]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20201111/1115264.shtml>
 [9] 北极星垃圾发电网. 垃圾焚烧发电企业如何应对国补退坡? 市场又将如何变化? [EB/OL]. [2020-12-27]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20201227/1125320.shtml>
 [10] 北极星垃圾发电网. 垃圾焚烧国补腰斩:看白酒如何提振产业信心. [EB/OL]. [2020-10-22]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20201022/1111189.shtml>
 [11] 姚美娇. 三部委联合印发《城镇生活垃圾分类和处理设施补短板强弱项实施方案》,明确加快发展垃圾焚烧处理——垃圾“零填埋”发电增空间. 中国能源报 [N/OL]. [2020-10-12]. http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2020-10/12/content_2013033.htm
 [12] 北极星垃圾发电网. 生物质发电国补退坡方案的8点思考. [EB/OL]. [2020-09-21]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20200921/1105575.shtml>
 [13] 北极星垃圾发电网. 后补贴时代下 垃圾焚烧企业盈利改善来自何方? [EB/OL]. [2020-11-16]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20201116/1116085.shtml>
 [14] 北极星电力网新闻中心. 垃圾发电新政后财务模型和收益测算. [EB/OL]. [2020-10-26]. <http://news.bjx.com.cn/html/20201026/1111969.shtml>
 [15] 北极星固废网. 2018—2022年中国垃圾发电设备行业分析. [EB/OL]. [2018-04-10]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20180410/890728.shtml>
 [16] 北极星垃圾发电网. 2020年垃圾焚烧发电市场:约380亿项目被谁瓜分了? [EB/OL]. [2021-01-08]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20210108/1128067.shtml>
 [17] 柴晓利,赵爱华,赵由才. 固体废物焚烧技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
 [18] 北极星固废网. 垃圾发电补贴取消? 现在还不是时候. [EB/OL]. [2019-02-22]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20190222/964544.shtml>
 [19] 曾纪进,陈国艳,段翠九. 余热锅炉布置方式对垃圾焚

- 烧发电厂性能的影响[J]. 广东电力, 2014, 27(1): 1-4 + 12.
- [20] 张晓斌, 戴小东, 熊君霞等. 垃圾焚烧发电项目余热锅炉中参数和高参数的对比分析[J]. 能源研究与信息. 2018, 34(4): 195-201.
- [21] 潘葱英. 垃圾焚烧炉内过热器区 HCl 高温腐蚀研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [22] 邓昌梅. 新型屏式过热器在高温高压垃圾焚烧炉中的应用[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(3): 54-56 + 60.
- [23] 北极星垃圾发电网. 上海市机电设计研究院利用数字孪生模型 改扩热电垃圾焚烧技项目. [EB/OL]. [2021-02-09]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20210202/1133850.shtml>.
- [24] 李玉焯, 王文波. 生活垃圾焚烧发电项目的节能与碳减排分析[J]. 有色冶金节能, 2014, 30(3): 37-41.
- [25] 魏烈旭. 重金属工业固废余热锅炉设计及余热利用[J]. 有色冶金节能, 2019, 35(5): 54-57.
- [26] 姜廷伟, 刘超. 垃圾焚烧炉烟气干法脱硫[J]. 中国有色冶金, 2007(3): 63-65.

Trend of China's Municipal Incineration Industry and Recent Development of Waste-to-energy Boiler

YU Chao, HAO Yu-gang, LIU Yao

Abstract: In the last decade municipal incineration becomes the main technology of municipal waste management in China. The number of municipal incineration plants increases marvelously and technologies corresponding to incineration and waste-to-energy achieve great improvement. The newest published national policies such as abolishment of financial subsidy and classification of municipal waste will impact the incineration industry remarkably for long, forcing the municipal incineration enterprises to make improvements in technology and business management for better economic benefits. In this paper, the trend of China's municipal incineration industry was analyzed first according to national policy, market estimate and research on key technology and equipment, and then the development of waste-to-energy technology and waste heat boiler with higher steam parameters was introduced, that's because the profit of waste-to-energy plants relies on the level of boiler steam parameters. Increasing the power generation of per ton waste incineration through technology development is the main objective for municipal enterprises, as well as the improvement of design through digitization method such as digital twin technology.

Key words: municipal incineration; waste-to-heat boiler; higher steam parameter; high temperature corrosion

