

文章编号: 1005-006X(2021)04-0012-05

煤和生物质、固废直燃耦合发电技术应用*

张世鑫^{1,2} 史 磊^{1,2} 许燕飞³ 吕 勇³ 刘海峰² 袁 野² 高洪培² 邓 磊¹
(1.西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 2.中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 3.福建华电永安发电有限公司)

摘 要: 随着全球温室气体浓度增加, 气候环境逐渐变差, 将影响人类可持续发展, 因而节能减排显得越发重要。当前的技术水平下采用燃煤耦合生物质固废发电是种可行且经济的手段, 项目组通过理论分析及工业应用, 开发了多个燃煤耦合生物质固废发电应用工艺及关键设备, 验证了利用 300 MW 循环流化床锅炉同时处理生物质 200 t/d、固废 400 t/d、污泥 200 t/d、RDF 50 t/d 的可行性。为便于掺烧管理, 开发了一种生物质直燃耦合发电系统, 包括生物质输送给料系统、防作弊系统和数据分析集控系统, 以便进行掺烧电量统计和避免掺烧作假。

关键词: 生物质; 固废; 直燃; 耦合发电; 流化床锅炉

中图分类号: TK01+9 **文献标识码:** A

Application of Power Generation by Coupling Direct-combustion of Biomass, Solid Waste and Coal

ZHANG Shi-xin^{1,2}, SHI Lei^{1,2}, XU Yan-fei³, et al.

(1. State Key Laboratory of Multi-phase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 2.Huaneng Clean Energy Research Institute, 3.Fujian Huadian Yong'an Power Co., Ltd.)

Abstract: With the increase of global greenhouse gas concentration, the climate environment is getting worse. Climate change is one of the important reasons affecting the sustainable development of mankind. Energy conservation and emission reduction are becoming more and more important for the sustainable development of mankind. Power generation by coupling direct-combustion of biomass, solid waste and coal under the current technical level is a feasible and economic method. Through theoretical analysis and industrial application, the project team developed the coupling power generation technology and the key equipment. The feasibility of burning 200t/d biomass, 400t/d solid waste, 200t/d sludge, 50t/d RDF in the 300 MW circulating fluidized bed boiler was verified. To facilitate the management of co-firing, a biomass direct combustion coupling power generation system was developed, including biomass feed system, anti-cheating system and data analysis centralized control system. Through these systems, the power counting could be realized, and the co-firing fraud could be avoided.

Key words: biomass; solid waste; direct combustion; coupling power generation; CFB boiler

2019 年 6 月至 7 月两拨热浪席卷了欧洲多国, 刷新了多国的高温记录。世界气象组织表示此现象与温室气体排放有必然联系。海平面上升和极端气候频发与温室气体浓度的不断增加关系密切。2019 年 7 月 9 日, 联合国经社理事会在联合国可持续发展高级别政治论坛发布了“2030 年可持续发展目标进展报告”, 报告指出气候变化对人类可持续发展进程具有重要影响^[1]。这意味着控制温室气体排放极其重要, 需要各国积极行动。

我国《“十三五”控制温室气体排放工作方案》对大型发电集团单位供电二氧化碳排放提出了具体要求: 到 2020 年控制在 550 g/kWh^[2]。三部委发布《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020 年)》^[3], 计划中指出: 到 2020 年现役燃煤发电机

组改造后平均供电煤耗控制低于 310 g/kWh。

而根据中电联统计数据^[4], 2018 年全国单位火电发电量二氧化碳排放约 841 g/kWh; 2018 年参与统计的 150 MW 级湿冷纯凝 CFB 机组供电煤耗为 352~379 g/kWh; 2018 年参与统计的 300 MW 级湿冷纯凝 CFB 机组供电煤耗为 325~348 g/kWh。可见, 目前大部分火电机组供电煤耗及单位二氧化碳排放均未达到目标值。在国家环保政策的压力下, 火电机组尤其是亚临界参数以下机组的生存状况日益艰难。如何实现快速减排、增强企业生存能力是目前火电机组亟待解决的问题。

目前二氧化碳减排主要途径如图 1 所示。

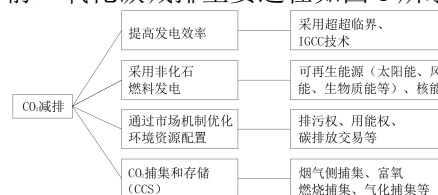


图 1 CO₂ 减排途径

收稿日期: 2020-05-06

张世鑫(1983-), 男, 硕士生, 高级工程师。陕西西安, 710049

*中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司院基金资助项目(TB-16-CERI01), 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JM-277)资助

对于现有机组,提高发电效率难以实现。而采用 CO₂ 捕集技术,捕捉和运输成本昂贵,能耗很高,且容量有限。叶勇健等^[5]从技术现状、前景和条件进行分析后,认为当前的技术水平下采用冷热电联供或燃煤耦合生物质发电是两个可行且经济的手段,而进一步提高超超临界机组的热效率也具有现实可行性。

冷热电联供需要有一定规模且稳定的用户;采用煤和生物质耦合发电是一个快速可靠地解决煤电低碳发展的优化方案,是燃煤电厂实现温室气体减排最经济的技术选择^[6]。

对于耦合发电,《国家能源局、环境保护部关于开展燃煤耦合生物质发电技改试点工作的通知》

(国能发电力[2017]75号)^[7]提出利用现有燃煤机组协同处置废弃物(生物质、垃圾、污泥等),随后2018年发布《国家能源局、生态环境部关于燃煤耦合生物质发电技改试点项目建设的通知》(国能发电力[2018]53号)批准了84项燃煤火电厂生物质耦合发电试点工程,标志着我国较大规模地开展煤电生物质耦合发电改造工程的开始(84个试点中,农林生物质耦合58个、污泥耦合29个、垃圾耦合2个(蒸汽耦合);农林生物质耦合项目中,气化耦合55个、直燃耦合2个、蒸汽耦合1个)。

2018年12月“无废城市”概念的提出(国办发〔2018〕128号),赋予了耦合发电技术更多的社会责任。“无废城市”概念的核心为:实现固废源头减量化、资源化利用。

煤和生物质、固废耦合发电技术可以发挥大型清洁高效煤电机组技术领先优势,履行更多的社会责任。对于耦合燃料来说,相对锅炉燃料比例小,但绝对处理量较大:例如国内某300 MW机组单台锅炉燃料消耗量183 t/h,按30%掺烧比例设计,单台锅炉每天可处理1098 t垃圾,相当于一个垃圾电厂处理量,但大型发电机组效率更高。耦合发电项目可作为技改项目,利用现有发电机组及环保设施,仅进行局部改造即可进行固废协同处置,环保指标易于控制。同时,原料可以不受供应商限制,避免形成原料供应恶性竞争,有利于市场规范化。

对于煤和生物质、固废耦合发电技术,国内倾向于气化耦合工艺,主要理由为气化耦合工艺技术更便于计量和监管。然而从经济性以及技术实施难度方面考虑,直燃耦合工艺具有更强优势。为了使直燃耦合工艺更加完善,中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司(以下简称“华能清能院”)联合300 MW流化床机组用户和350 MW超临界流化床机组用户开发了多个燃煤和生物质、固废耦合发电应用工艺及关键设备,并在300 MW流化床机组进

行工业应用。

1 直燃耦合发电技术理论研究

生物质、固废的物理性质、成分与燃煤差异均较大,如何保证成功点火与燃料燃尽,输送系统如何设置、如何保证给料稳定、如何控制燃烧稳定、污染物排放能否达标是目前耦合发电技术亟待解决的问题。对于SO₂、NO_x等常规污染物,现有发电机组已经配备了完善的脱除设施,可以保证其达标排放。二噁英毒性极大,而常规燃煤机组并未考虑二噁英排放控制,如果进行耦合发电,需对二噁英生成机理及控制措施进行研究。

二噁英^[8]并不是指一种物质,而是一组多氯取代的平面芳烃类化合物,它们具有相似结构和理化特性。根据目前研究结果,焚烧生活垃圾产生二噁英的主要机理如下:

(1) 焚烧温度偏低:当焚烧温度低于800℃时,含氯乙烯等含氯塑料燃烧不完全部分极易生成二噁英;

(2) 催化剂的作用:焚烧物质中铜、钴等金属离子的存在,使得含氯、含碳物质如纸张、食物残渣等在其催化作用下直接生成二噁英。

根据二噁英的生成机理,目前采取的处理措施为:在进行垃圾焚烧时,控制炉温>800℃,控制炉内燃烧时间>2 s^[9],保证垃圾在焚烧炉内尽量燃尽,从而减少烟气中二噁英排放。在尾部烟道450~200℃阶段考虑急冷措施,降低二噁英在低温段再合成的可能性。

另外,在尾部烟道增加活性炭吸附装置可有效吸附二噁英,因而此装置已被广泛应用^[10]。另外,在烟气处理系统中,半干法脱硫、布袋除尘器也能有效的除去二噁英类及其前驱物。

烟气中的颗粒物粒径多在10 μm以下,而相关研究表明80%以上的颗粒态二噁英分布在细小颗粒(空气动力学当量直径 $D_{ac} \leq 2.5 \mu m$)上^[11],故颗粒物排放值高,不利于二噁英排放控制。

烟气中的硫分的二重性:Cl₂转化为HCl,可抑制芳香族取代反应,降低二噁英前驱物的生成;S与CuO反应生成CuSO₄,降低二噁英反应过程的催化活性,抑制二噁英生成^[12]。但是,S具有严重的腐蚀性,是酸雨产生的根源。

目前尚无二噁英直接在线监测设备,垃圾焚烧电厂将CO作为控制二噁英的辅助措施,控制CO排放在100 mg/Nm³以下(生活垃圾焚烧污染物控制标准GB18485-2014)。由浙江大学与浙江富春江环保科技有限公司联合研制的二噁英在线监测

系统^[13], 基于可调谐激光电离联合飞行时间质谱技术 (Laser Absorption Spectrum Tunable Ionization-Time of Flight Mass Spectrometer, LASTI-TOFMS), 可在线检查烟气中的二噁英指示物, 结合指示物与二噁英之间精确的关联模型, 间接获得二噁英的毒性当量浓度。

为研究流化床锅炉掺烧二噁英的排放情况, 华能清能院项目组在其 1 MW_{th} CFB 半工业化试验台上进行了生物质、RDF、污泥等物料进行与燃煤掺烧试验研究, 二噁英排放结果见表 1。

表 1 生物质、固废试烧试验结果

项目	试验燃料	二噁英 ng TEQ/m ³	
		测量值	平均值
永安电厂	90%无烟煤+10%RDF	0.018	0.014
		0.0058	
		0.017	
		0.004	
沈阳金山	83%锡林浩特褐煤+17%城市污泥	0.009	0.007
		0.008	
		0.009	
		0.007	
大唐下花园	城市污水处理厂的污泥、生活垃圾、餐厨垃圾和少量神华煤掺混	0.013	0.010
		0.013	

由表 1 可知, 试验各掺烧工况下, 二噁英平均值均低于 0.10 ng TEQ/m³。分析认为: 循环流化床 (CFB) 锅炉炉内燃烧温度为 880~900 ℃, 炉内因大量床料存在, 物料混燃剧烈, 同时因为物料外循环的存在 (分离器+返料器), 使得燃烧物料在炉内燃烧时间远大于 2 s。可见循环流化床锅炉正常运行参数与垃圾焚烧需控制参数相吻合, 因而在一定比例掺烧生物质、固废时二噁英排放较低。

理论研究结果表明: 生物质、固废颗粒密度比燃煤偏小、挥发份偏高, 因而进入炉内后被气流携带速度较快且较易燃烧, 导致进料口温度提升。掺烧时, 因存在密度差, 生物质较燃煤在炉内停留时间短。因而需考虑提高炉内生物质、固废的燃尽程度, 避免空预器积灰加剧及尾部烟道二次燃烧。

2 直燃耦合发电技术工艺及设备开发

华能清能院项目组通过理论分析、设备调研、数值计算及半工业化试验, 开发了多个燃煤和生物质、固废耦合发电应用工艺及关键设备, 并应用于 300 MW CFB 锅炉。工程采用低压连续气力输送工艺, 利用文丘里效应, 将破碎后的生物质、固废送至气力输送装置的负压区域, 然后通过输送管道送至锅炉返料口。此处灰浓度极高, 生物质、固废进入后与大量循环灰及床料剧烈混合并燃烧, 可以满足燃烧时间、温度、湍流毒等要求。

2.1 某 300 MW 循环流化床锅炉固废及生物质直燃耦合发电工艺及主要设备

对于现有锅炉, 本体布置空间有限, 难以使用常规的料仓加绞龙方案。此次选择使用低压连续气力输送工艺, 生物质、固废燃料经开包后通过铲车铲入进料链板, 破碎后采用皮带+气力输送系统送至炉内进行燃烧利用。系统设计 2 套皮带输送+4 套气力输送, 气力输送单管设计出力 6 t/h, 按每天 20h 计算, 输送系统单管出力 120 t/d。系统设置双线可切换: 两台破碎机破碎后的物料可送至两条输送带中的任一条, 单台设备检修时可保障系统仍可运行。破碎机出口设置出料皮带, 输送皮带采用封闭结构, 在合适位置设置带式除铁器; 输送皮带在 8 号炉卸料点设置犁式卸料器进行卸料, 卸料点封闭设置并布置除尘装置。卸料点设置摄像头, 信号传至集控 (主控+固废控制室)。因输送末端为炉膛, 炉膛为正压, 为防止烟气从炉膛通过输送管道反窜, 在发送器至炉膛之间设置两套快速阀门作为密封。

因利用现有锅炉, 为避免开孔较多, 需要尽量集中布置给料口, 提升单管出力。系统配置时, 输送皮带及破碎机出力大于输送单管出力, 而物料具有易搭桥的特性, 为避免多次转运, 项目组针对这个情况开发了连体式气力输送装置^[14] (图 2)。一套破碎输送皮带对应一套连体式气力输送装置, 解决了系统设备出力匹配问题, 同时装置设置疏松装置防止物料搭桥, 增强了系统稳定运行能力。

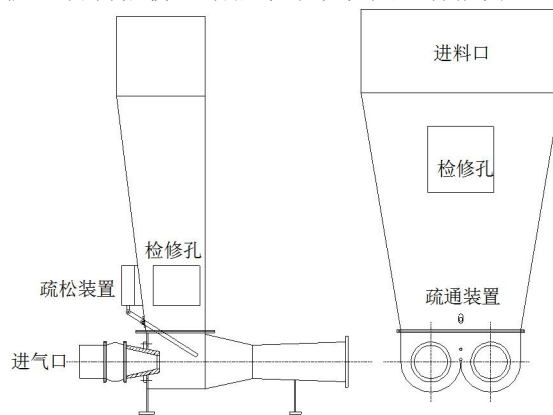


图 2 连体式气力输送装置

在系统试运过程中发现, 由于物料密度较小, 且破碎尺寸较难控制, 系统运行时会出现皮带上物料分布不均匀现象, 而不均匀的堆状物料会导致在缓冲仓位置出现搭桥现象。为解决这个问题, 项目组又开发了一种结合气力输送与绞龙的新型给料装置^[15] (图 3)。这种新型给料装置将绞龙的均匀给料特性和文丘里管的负压进料、正压出料特性灵活结合, 保证给料量稳定可控。同时, 系统进料口在气体喷射作用下呈微负压状态, 整个输送系统为封闭管道, 其粉尘、物料不易外溢, 因而系统运行环境优良, 并且气力输送管道可在现场灵活布置。



图3 一种新型给料机构

此套系统已经进行工业化应用, 其项目实景如图4所示。同时项目组还针对350 MW超临界CFB锅炉开发了一种生物质直燃耦合发电系统。



图4 流化床锅炉固废及生物质耦合发电项目实景

2.2 某350 MW超临界循环流化床锅炉燃煤耦合生物质直燃发电工艺

2.2.1 工艺方案

对于管理部门来说, 生物质耦合发电工艺最重要的是做好掺烧量计量及掺烧物管理, 以便进行掺烧电量统计和避免掺烧作假。针对此问题, 项目组开发了一种生物质直燃耦合发电系统^[6]。包括生物质输送给料系统、防作弊系统和数据分析集控系统, 如图5所示。生物质成型燃料经专用汽车衡称重后, 送入生物质厂房堆放; 再由轮式装载机或桥式抓斗起重机运至料仓内, 然后通过料仓下部布置的布料器均匀给料, 给至下方布置的皮带机; 生物质料随着皮带机的运转被带到锅炉房进行卸料, 料卸至缓冲仓后通过给料器由给料口送入锅炉内燃烧利用。

防作弊系统可实现燃煤参数设置、燃料数据分析以及系统全局监控; 系统运行时, 在燃煤参数设置画面设置并呈现燃料参数; 上料过程中利用在线热值检测系统进行在线热值检测, 得到生物质挥发分、硫分和灰分、热值, 数据分析系统将在线热值检测数据与预设的燃煤参数对比(煤与生物质成分及热值有较大差别, 可以通过其数据差别判断掺烧物是否为生物质燃料), 实时判断掺烧物料种类, 从而避免掺烧作假。利用在线称重系统进行在线称重, 得到锅炉实时掺烧量。在线热值检测数据、在

线称重数据送入集控系统, 集控系统根据燃料数据进行锅炉燃烧自动调整(或人工调整)。掺烧燃料经数据分析判断是否为生物质燃料, 如是生物质燃料, 计入生物质电量, 如不是生物质燃料, 报警提示并计入燃煤电量。

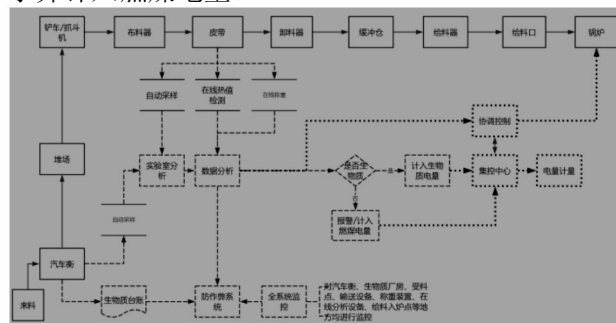


图5 一种生物质直燃耦合发电系统

2.2.2 关键设备

因生物质密度较低, 常规称重装置难以对系统掺烧量进行准确测量, 系统采用了高精度阵列式皮带秤; 同时, 为判断掺烧物料是否为生物质, 系统采用了在线热值检测设备。

(1) 在线计量采用高精度阵列式皮带秤

在皮带机水平段设置生物质在线计量装置。在线计量采用最新技术的高精度阵列式皮带秤, 高精度阵列式皮带秤是将多个称重单元(1—N)顺序串联安装在皮带机上, 组成一个阵列。利用相邻称重单元数据差异消除皮带张力影响, 增加有效重量信号, 降低皮带张力占重量信号比例。从而使称重系统精度大幅提升。系统可将瞬时流量等信号远传输出至集控室, 同时皮带机采用变频控制, 运行人员可根据生物质使用量控制皮带转速, 从而控制系统出力。

(2) 生物质在线热值检测

系统采用高能脉冲激光(LCAS)^[17](Laser Combined Auto-location device Spectrum)在线快速检测设备对生物质燃料进行在线检测, 实现对燃料的发热量、挥发分和灰分的实时检测, 并将检测数据同步上传。实时为生产系统提供准确数据, 以便判断是否为生物质燃料, 调整燃烧操作参数, 保证锅炉运行效率。并且燃料测量数据可追溯, 形成数据库, 可以存储上传, 便于生物质燃料在线管理。

3 直燃耦合发电技术应用

3.1 掺烧后污染物排放情况

根据项目竣工环境保护验收监测报告(华测厦环验字[2019]第007号), 掺烧工况为: 5月24日全天使用燃煤3371 t, 掺烧工业固废396 t、生物质196.8 t、污泥194.4 t、RDF 45.6 t, 掺烧比例24.7%。

掺烧时主要污染物排放数据如下: SO_2 排放浓度 12 mg/Nm^3 (标, $6\%\text{O}_2$), NO_x 排放浓度 37 mg/Nm^3 (标, $6\%\text{O}_2$), CO 排放浓度 40 mg/Nm^3 (标, $6\%\text{O}_2$), 颗粒物排放浓度 4.6 mg/Nm^3 (标, $6\%\text{O}_2$), 二噁英排放浓度不高于 $0.00051 \text{ ng TEQ/m}^3$ 。可见, 烟气中各项污染物排放浓度均能满足当前相关标准限值要求。

3.2 工艺优势

3.2.1 投资小、收益大

以 300 MW 循环流化床锅炉固废及生物质直燃耦合发电项目为例, 项目总投资 4414 万元, 年运行成本约 1325 万元, 综合经济效益约 2426 万元/年; 项目可实现年处置一般工业固废 12 万吨, 年替代标煤约 8.55 万吨。而新建一座同等处理量的处理厂, 如需达到同等处理效果, 投资动辄上亿。

3.2.2 燃料杂、胃口大

由于大型循环流化床锅炉炉膛热容大, 炉膛高度较高, 对生物质、固废等燃料适应性较强。利用 300 MW 循环流化床锅炉机组可同时掺烧生物质、固废共计 850 t/d (其中生物质 200 t/d 、固废 400 t/d 、污泥 200 t/d 、RDF 50 t/d)。掺烧比例不超过锅炉总燃料的 30% , 但此处理量已与一座小型垃圾电厂处理量相当。

3.2.3 市场竞争力强

生物质、固废产量随着季节变化而不断变化, 产量少时, 机组可少量掺烧甚至不掺烧, 其正常运行不受影响。因此本工艺可以不受物料供应商限制, 避免供应商故意抬价而导致市场混乱。同时, 电厂可作为生物质、固废兜底消纳单位, 其市场控制能力较强, 方便管理部门进行协调。

3.2.4 基础条件优良, 便于推广

中国目前的大型循环流化床锅炉技术较为成熟, 同时数量较多, 分布较广, 且多数亚临界及以下机组存在单位 CO_2 排放及供电煤耗高等问题, 生存压力较大。而直燃耦合发电技术可利用现存大型循环流化床锅炉机组及其环保设施进行局部改造后进行工艺实现, 避免了重复投资, 社会效益及环保效益优良。当前的机组条件及国家政策耦合发电工艺推广提供了优良的基础条件。

4 结论

为了使直燃耦合工艺更加完善, 华能清能院开发了多个燃煤和生物质、固废耦合发电应用工艺及关键设备, 并在 300 MW 流化床机组进行工业应用。应用结果表明: 利用 300 MW 循环流化床锅炉固废及生物质直燃耦合发电工艺可同时处理生物质、固废 850 t/d (其中生物质 200 t/d 、固废 400 t/d 、污泥

200 t/d 、RDF 50 t/d)。系统运行环保测试结果表明: 烟气中 NO_x 排放均低于 50 mg/m^3 , SO_2 排放均低于 35 mg/m^3 , 二噁英的排放浓度低于 0.1 ng TEQ/m^3 , 各污染物排放均满足相关环保标准。

生物质、固废直燃耦合发电技术可实现大规模处理生物质、固废物料, 快速实现节能减排目标。福建永安 $2 \times 300 \text{ MW}$ CFB 锅炉生物质掺烧及“城市固废综合利用”项目已被列入福建省先进环保实用技术示范工程, 并通过生态环境部环境发展中心“无废城市”建设试点先进适用技术评审 (第一批)。

利用流化床机组进行生物质、固废协同处置, 适应物料: 具有一定热值的一般固体废物 (危险废物除外), 如园林绿化垃圾、农林废弃物、河道漂浮物、生活垃圾 (衍生燃料)、大件垃圾、城市污泥、衣物边角料等。项目组针对生物质、固废耦合发电开发了多个关键设备及工艺方案, 可供业内人士参考。 □

参 考 文 献

- [1] 钟声. 应对气候变化亟须负责任行动[N]. 人民日报, 2019-07-12(3).
- [2] “十三五”控制温室气体排放工作方案[J]. 中国战略新兴产业, 2016, (23): 14.
- [3] 《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)》[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2015, (5): 65~71.
- [4] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告[R]. 2019.
- [5] 叶勇健, 龙辉. 煤电机组应对二氧化碳减排的策略[J]. 上海电力学院学报, (4): 315~321.
- [6] 毛健雄. 燃煤耦合生物质发电[J]. 分布式能源, (5): 50~57.
- [7] 国家能源局. 环境保护部关于开展燃煤耦合生物质发电技改试点工作的通知[R/OL]. [2020-2-10]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto84/201712/t20171204_3065.htm.
- [8] 乔俊飞, 郭子豪, 汤健. 面向城市固废焚烧过程的二噁英排放浓度检测方法综述[J]. 自动化学报, 1~26.
- [9] 张世鑫, 许燕飞, 吕勇, 等. 垃圾衍生燃料焚烧技术研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(6): 184~191.
- [10] 耿静, 吕永龙, 贺桂珍, 等. 垃圾焚烧发电厂二噁英控制方案的技术经济分析[R]. 浙江省环境保护科学设计研究院, 2012.
- [11] 李煜婷. 焚烧烟气和大气中二噁英类气-固分布比较研究[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2015.
- [12] 石宜双. 硫对垃圾焚烧过程中二噁英生成的抑制作用的研究[D]. 浙江大学, 2005.
- [13] 尚凡杰, 蔡杭庆, 陈涛, 等. 一种二恶英在线检测系统机柜[P]. ZL 2017 2 1295971.9.
- [14] 张世鑫, 刘海峰, 赵鹏勃, 等. 一种连体式气力输送装置[P]. ZL 2017 2 1149474.8.
- [15] 张世鑫, 刘海峰, 赵鹏勃, 等. 一种新型给料机构[P]. ZL 2017 2 1514754.4.
- [16] 张世鑫, 刘海峰, 赵鹏勃, 等. 一种生物质直燃耦合发电系统[P]. ZL 2018 2 0422309.3.
- [17] 赵勇刚, 杨传博, 冀树春, 等. 基于高能脉冲激光的煤质在线检测移动扫描平台的研究与设计[J]. 电子设计工程, 2019, 27(4): 70~73.

编辑: 闻 彰