

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.06.023

白龙港污泥二期烟气在线监测系统设计与调试

应基光¹, 林莉峰¹, 王丽花²

(1. 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092; 2. 上海城投污水处理有限公司, 上海 201203)

摘要: 污泥焚烧逐渐成为市政污泥处理处置的主流路线,而合理的设计和应用烟气在线监测系统是项目成功的关键之一。上海市白龙港污泥二期工程采用污泥干化焚烧的处理工艺,其烟气在线监测系统对焚烧后的烟气指标进行实时监测。为了能够稳定、准确地监测排放的烟气指标,对烟气在线监测系统的设计、仪表安装位置的选择和系统比对、标定进行了研究和分析。同时,将监测的烟气排放指标反馈到焚烧炉的工艺控制环节,以调整和优化工艺运行工况。

关键词: 污泥焚烧; 烟气在线监测; 测量原理; 反馈控制

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)06-0117-06

Design and Commissioning of CEMS for Bailonggang Phase II Sludge Project

YING Ji-guang¹, LIN Li-feng¹, WANG Li-hua²

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Chengtong Sewage Treatment Co. Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: Sludge incineration has gradually become the mainstream route of municipal sludge treatment and disposal, reasonable design and application of continuous emission monitoring system (CEMS) is one of the keys to the success of the project. Shanghai Bailonggang phase II sludge project uses sludge drying and incineration process and CEMS to monitor the emission indexes after incineration. In order to monitor the emission steadily and accurately, the design of CEMS, the selection of instrument installation position, the comparison and calibration of the system are studied and analyzed. At the same time, the CEMS data is feedback to the process control link of the incinerator to adjust and optimize the process operation condition.

Key words: sludge incineration; CEMS; measuring principle; feedback control

焚烧已逐渐成为大型城市市政污泥处理处置的主流路线。上海市对市政污水处理产生的污泥确立了“干化焚烧”为主的处理处置路线,白龙港、竹园和石洞口三大片区的污泥焚烧设施均已建成投运^[1]。污泥焚烧产生的烟气中含有大量污染物,需要进行严格的监控。参照《生活垃圾焚烧大气污

染物排放标准》(DB 31/768—2013),需设置颗粒物(PM)、一氧化碳(CO)、二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、氯化氢(HCl)等指标在线监测,用于加强污泥焚烧设施大气污染物排放的控制。

烟气在线监测系统(CEMS)安装在烟气处理后的末端,一方面可以反映烟气处理系统除尘、脱硝、

基金项目:上海市污水厂污泥绿色低碳干化焚烧关键技术研究及示范项目(19230730900)

通信作者:应基光 E-mail: yingjiguang@126.com

脱硫的效果,另一方面烟气在线监测系统的相关数据按照相关标准要求,直接通过数采仪上传监管部门,其可靠性、准确性直接影响着系统的稳定和环境的安全。因此烟气在线监测系统对焚烧项目来说至关重要。

以白龙港污泥二期干化焚烧工程为研究对象,对烟气在线监测系统的设计、安装、调试进行分析和总结,并提出了改进的建议。

1 系统的设计

1.1 白龙港污泥二期工艺

白龙港污水处理厂目前为亚洲最大规模污水处理厂,负责处理上海中心城区 1/3 污水量,白龙港污泥处理处置二期工程主要处理白龙港污水厂提标到一级 A 后 $280 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 污水处理产生的污泥,以及虹桥污水厂 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 污水处理投产后产生的污泥。污泥处理工艺为离心脱水 + 流化床干化机 + 流化床焚烧炉,烟气处理工艺为静电除尘器 + 布袋除尘器 + 湿式脱酸塔 + 物理吸附塔(见图 1)。共设 6 条干化焚烧处理线,污泥(干污泥)处理规模为 486 t/d。污水处理产生的浓缩污泥经过脱水系统,含水率降至 80% 以下。部分脱水污泥经过流化床干化机处理后,含水率降至 10% 以下,进入焚烧炉前干污泥料仓。基于焚烧炉的床温、炉膛的燃烧温度以及烟气排放的要求,干化污泥(占 60%~75%)、脱水污泥(占 15%~23%)以及部分外来半干

污泥(含水率 30%~40%,占 11%~15%)入炉混合进行焚烧,每台焚烧炉的设计干污泥处理能力为 100 t/d,烟气经处理后达到《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)。

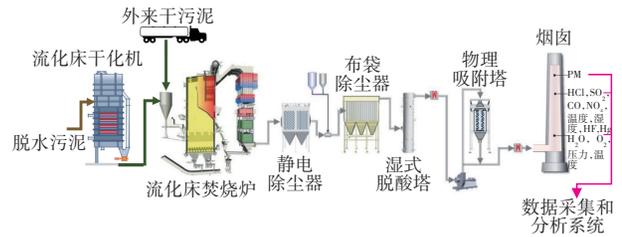


图 1 白龙港污泥二期主体处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of sludge treatment process of Bailonggang phase II sludge project

1.2 烟气在线监测系统

烟气在线监测系统通常由颗粒物监测单元、气态污染物监测单元、烟气排放参数测量单元、数据采集与处理单元等组成^[2],见图 2。颗粒物监测单元主要实时监测污泥焚烧后烟气中的颗粒物浓度,由颗粒物监测仪、反吹、数据传输等辅助部件构成;气态污染物监测单元主要监测烟气中的 SO_2 、 NO_x 、二氧化碳(CO_2)、CO、氨气(NH_3)和 HCl 等;烟气排放参数监测单元对温度、压力、湿度、流速(流量)以及含氧量等参数连续自动检测;最后通过数据采集和处理单元将监测到的数据整理、存储、归档,并传输到环保监控管理部门^[3]。

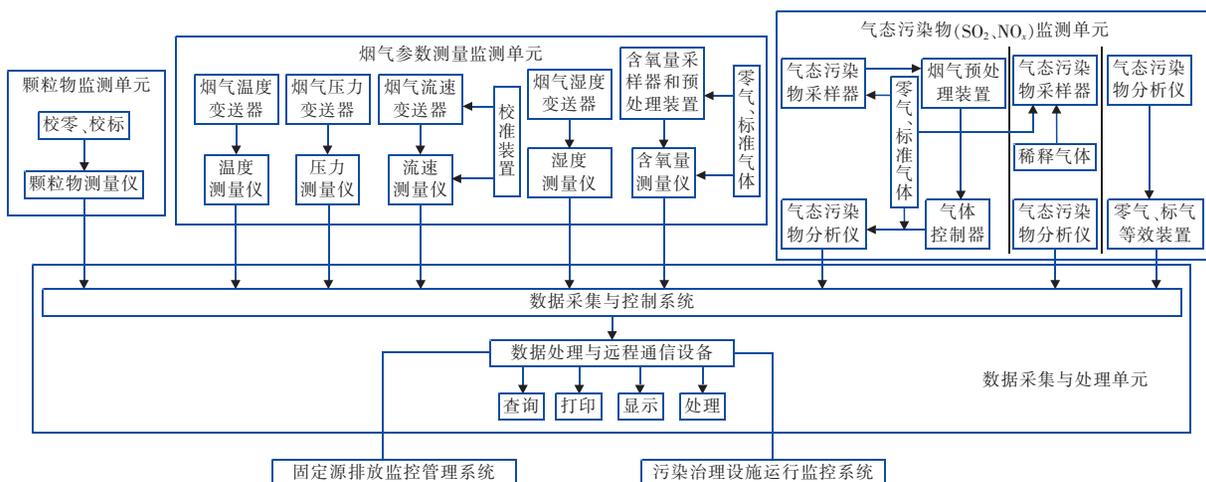


图 2 烟气在线监测系统组成

Fig.2 Composition of continuous emission monitoring system (CEMS)

1.3 污染物监测原理

气态污染物的监测是烟气在线监测系统中最

为关键的部分。气态污染物监测子系统的测量原理经历了长时间的发展,主要包括常温法、非分散

红外法、激光法、高温法、傅里叶红外法等^[4]。这些检测方法的主要测量组分和设备缺陷分析比较如表1所示。第五阶段新型傅里叶红外利用接入独有的光学滤波系统与数据分析系统,将光学滤波与光

波调制变为一体,是目前在火电厂和垃圾焚烧应用较多的测量方式^[5]。白龙港污泥二期项目烟气在线气态污染物监测子系统设计选用傅里叶红外测量原理。

表1 烟气在线气态污染物监测子系统的测量原理

Tab.1 Measuring principle of on-line gaseous pollutant monitoring subsystem for flue gas

项目	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段	第五阶段
测量原理	常温法	常温法	常温法	高温法	新型傅里叶红外法
	稀释法	非分散红外法	非分散红外法	滤波红外法	
			离子电极法	传统傅里叶红外法	
测量组分	SO ₂ /NO _x /CO/O ₂ /CO ₂	SO ₂ /NO _x /CO/O ₂ /CO ₂	SO ₂ /NO _x /CO/O ₂ /HCl/CO ₂	SO ₂ /NO _x /CO/O ₂ /HCl/CO ₂	SO ₂ /NO _x /CO/O ₂ /CO ₂ /HCl/氟化氢(HF)
			激光法	激光法	
设备缺陷	工况影响大,腐蚀严重,堵塞严重,不能测量HCl/HF	腐蚀严重,堵塞严重,不能测量HCl/HF	腐蚀严重,堵塞严重,易耗品多,维护不便	微量HF测量是难点	目前最理想的测量方法

1.4 烟气在线监测系统设计

白龙港污泥二期工程设计6条污泥干化焚烧线,相应设置了6套烟气在线监测系统。每一套烟气在线监测系统都是独立的,能够分别监测烟气流量、温度、压力、湿度、氧浓度、烟尘颗粒物、HCl、SO₂、NO_x(至少包含NO及NO₂)、CO、HF和CO₂等。白龙港污泥二期气态污染物监测子系统测量流程图见图3。

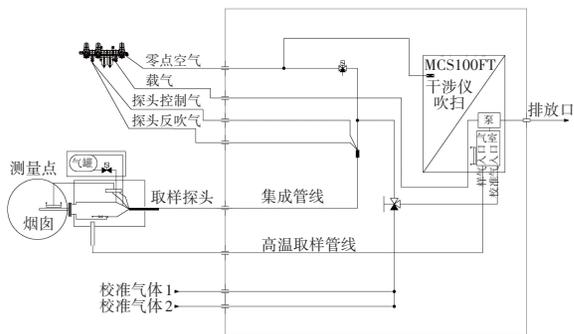


图3 白龙港污泥二期气态污染物监测子系统测量流程图
Fig.3 Flow chart of gaseous pollutant monitoring subsystem measurement of Bailonggang phase II sludge project

每套烟气在线监测系统配置仪表传感器(激光前散法超低粉尘仪、温度、压力、流量、氧化锆等)、PLC柜(傅里叶变换红外分析系统)、工控机、数采仪以及辅助系统(伴热管线、压缩空气、吹扫装置等)。为了能够准确、稳定地在线监测烟气排放的各项指标,在烟囱附近设计了烟气在线监测小屋(见图4)。

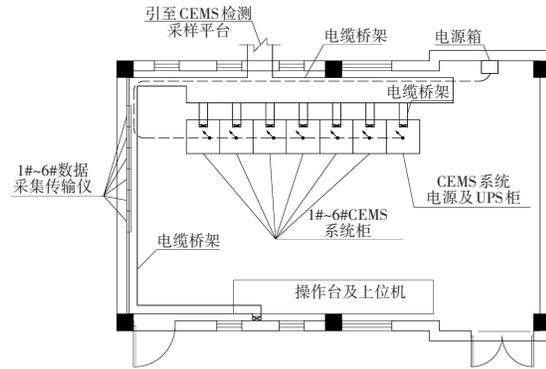


图4 白龙港污泥二期烟气在线监测小屋布置
Fig.4 Layout of cabinets for on-line monitoring of sludge flue gas in Bailonggang phase II sludge project

数据处理和分析系统能进行数据运算、统计、存贮、事件分类处理、数据合理性检查和删除指定的记录,具有可靠性、可维修性、可扩展性的特点。硬件能存贮不低于5年以上的监测1h平均值及24h平均值、监测系统相关工况参数数据,并能检索、在屏幕上显示出来。预留与环保监测部门和监管部门进行数据通信的接口(包括硬件和软件),并将数据稳定有效地传至环保监测部门和监管部门,直至正常投用。所有监测实时数据和报警信号以及系统综合故障状态、标定状态信号接入中控室。

2 烟气在线监测系统的安装

为使烟气在线监测系统能更真实准确地掌握实时排放状况,必须选择有代表性的、烟气流场相对稳定的断面点位来安装烟气在线监测仪表。烟气安装位置的选择遵循以下原则:

选取代表性强可以反映烟气排放且混合均匀的位置;尽可能使用较少的仪器来达到排放测量的要求;取样需靠近参比方法取样孔;方便登台,便于日常维护。烟囱上的烟气在线仪表安装示意图 5。另外,系统的供电电源必须保证可靠的接地并具有接地保护,反吹气源必须正确安装,否则仪表将无法正常工作。

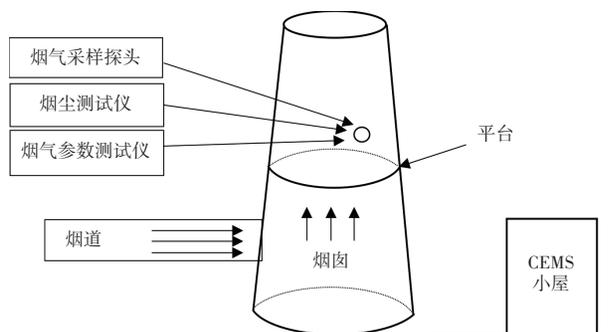


图 5 烟气在线仪表安装位置(烟囱)

Fig.5 Installation location of on-line flue gas instrument in Bailonggang phase II sludge project

3 烟气在线监测系统的调试

烟气在线监测系统安装完成以后,需进行调试才可投入使用。调试内容包括系统整体技术性能测试、仪表比对和校准两个方面。烟气在线监测系统调试是为了验证其安装和性能是否符合要求,验证仪表的测量精确、稳定性是否达到相关设计要求。

3.1 烟气在线监测系统调试

在系统开机调试前,电源箱内所有的空气开关都应该处在断开状态,所有的接线和设备的绝缘都符合要求;然后通电(最好是各个部件分别进行,在对系统进行通电前将仪表先关掉,等到系统各部件都正常运行后约 5 min 再将仪表打开),检查系统的设备状态是否正常,通信是否正常,在进行校准之前,检查确认系统预热已经达到预定的要求,以免影响校准精度;最后对烟气在线监测系统进行校准和标定。

根据《固定污染源烟气(SO₂、NO_x、颗粒物)排放连续监测技术规范》(HJ 75—2017),烟气氮氧化物、硫化物的标定按照环保局要求,一般采用标定样气高(80%~100%)、中(50%~60%)、低(20%~30%)三个量程来进行标定,亦可采用多点进行标定(具体需要进行设置)。

同时对数据处理功能进行验证,数据处理功能可将测量的 HCl、HF、CO、CO₂、SO₂、NO_x、H₂O、NH₃、O₂、CH₄、N₂O、尘的工况值(经过 O₂ 浓度的折算)计算成标态的干气(尘)值。按照《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB/T 16157—1996)或《锅炉烟尘测试方法》(GB 5468—1991)的规定,采用基准氧含量将实测值折算为基准氧含量排放浓度,再计算成排放总量。该系统能够制作日报表、月报表和年报表。根据需要,还能制作图形、表格、曲线、条形图、棒图和时间轴分时图表等。

3.2 仪表比对和校准

依据《固定污染源烟气(SO₂、NO_x、颗粒物)排放连续监测系统技术要求及检测方法》(HJ 76—2017),在现场工艺正常运行工况下,污泥干化焚烧的烟气排放技术性能指标需要满足表 2 中的比对指标。

表 2 污泥干化焚烧的烟气排放技术性能指标

Tab.2 Technical performance indexes of flue gas emission with sludge drying and incineration

项目	比对指标
氮氧化物/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	排放浓度 $\geq 250(513\text{ mg/m}^3)$ 时,相对准确度 $\leq 15\%$
	$50(103\text{ mg/m}^3)\leq$ 排放浓度 $< 250(513\text{ mg/m}^3)$ 时,绝对误差不超过 $\pm 20(41\text{ mg/m}^3)$
	$20(41\text{ mg/m}^3)\leq$ 排放浓度 $< 50(103\text{ mg/m}^3)$ 时,相对误差不超过 $\pm 30\%$
	排放浓度 $< 20(41\text{ mg/m}^3)$ 时,绝对误差不超过 $\pm 6(12\text{ mg/m}^3)$
颗粒物/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	排放浓度 > 200 时,相对误差不超过 $\pm 15\%$
	$100 <$ 排放浓度 ≤ 200 时,相对误差不超过 $\pm 20\%$
	$50 <$ 排放浓度 ≤ 100 时,相对误差不超过 $\pm 25\%$
	$20 <$ 排放浓度 ≤ 50 时,相对误差不超过 $\pm 30\%$
	$10 <$ 排放浓度 ≤ 20 时,绝对误差不超过 ± 6
	排放浓度 ≤ 10 时,绝对误差不超过 ± 5
二氧化硫/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	排放浓度 $\geq 250(715\text{ mg/m}^3)$ 时,相对准确度 $\leq 15\%$
	$50(143\text{ mg/m}^3)\leq$ 排放浓度 $< 250(715\text{ mg/m}^3)$ 时,绝对误差不超过 $\pm 20(57\text{ mg/m}^3)$
	$20(57\text{ mg/m}^3)\leq$ 排放浓度 $< 50(143\text{ mg/m}^3)$ 时,相对误差不超过 $\pm 30\%$
	排放浓度 $< 20(57\text{ mg/m}^3)$ 时,绝对误差不超过 $\pm 6(17\text{ mg/m}^3)$
流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	> 10 时,相对误差不超过 $\pm 10\%$; ≤ 10 时,相对误差不超过 $\pm 12\%$
烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对误差不超过 ± 3
烟气含湿量/ $\%$	≤ 5 时,绝对误差不超过 ± 1.5 ; > 5 时,相对误差不超过 $\pm 25\%$
含氧量/ $\%$	≤ 5 时,绝对误差不超过 ± 1 ; > 5 时,相对准确度不超过 $\pm 15\%$

按照《固定污染源排气中颗粒物测定与气体污染物采样方法》(GB/T 16157—1996)的参比方法要求,流速、烟温、湿度、颗粒物数据均不少于5个(每个数据是指该测试断面的平均值),含氧量、HCl、

CO、NO_x和SO₂数据均不少于9个,并取测试平均值与同时段的烟气在线监测平均值进行准确度计算。以白龙港污泥二期工程中一条焚烧线的比对为例,其比对结果分别见表3、4。

表3 白龙港污泥二期烟气在线监测系统比对结果(一)

Tab.3 Comparison results of flue gas on-line monitoring system of Bailonggang phase II sludge project (part 1)

项目	实际对比测定	组1	组2	组3	组4	组5	平均值	绝对误差
烟温/°C	CEMS均值数据	127.11	127.08	127.19	127.26	127.28	127.18	0.46
	参比法数据	126.3	126.9	126.5	126.7	127.2	126.72	
流速/(m·s ⁻¹)	CEMS均值数据	9.18	9.24	9.16	9.16	9.13	9.17	
	参比法数据	9.1	9.4	8.8	8.9	9.3	9.1	
含湿量/%	CEMS均值数据	14.01	14.03	13.95	13.84	13.27	13.82	
	参比法数据	13.8	13.9	14.1	14.2	13.3	13.9	
颗粒物/(mg·m ⁻³)	CEMS均值数据	1.52	1.49	1.5	1.52	1.72	1.55	0.23
	参比法数据	1.3	1.1	1.6	1.4	1.2	1.32	

注: 流速的相对准确度为0.77%。

表4 白龙港污泥二期烟气在线监测系统比对结果(二)

Tab.4 Comparison results of flue gas on-line monitoring system of Bailonggang phase II sludge project (part 2)

项目	含氧量/%		HCl/(mg·m ⁻³)		CO/(mg·m ⁻³)		氮氧化物/(mg·m ⁻³)		SO ₂ /(mg·m ⁻³)	
	CEMS均值数据	参比法数据	CEMS均值数据	参比法数据	CEMS均值数据	参比法数据	CEMS均值数据	参比法数据	CEMS均值数据	参比法数据
组1	6.6	6.7	0.98	未检测	0	0	103.9	108	20	16.8
组2	6.3	6.5	0.96	未检测	0	0	106.5	106	11	10.9
组3	7.4	7.4	0.98	未检测	0	0	108.6	109	12	11.8
组4	7.5	8.0	0.97	未检测	0	0.1	113.2	112	8	8.3
组5	7.6	7.6	0.92	未检测	0	0.2	109.4	109	11	11.6
组6	7.3	7.4	0.97	未检测	0	0	91.6	92	11	11.6
组7	8.7	8.7	1.00	未检测	0	0.1	117.5	118	18	17.2
组8	9.4	9.5	1.12	未检测	0	0.1	112.9	110	16	17.0
组9	9.2	9.2	1.10	未检测	0	0.3	120.2	121	16	16.2
平均值	7.8	7.9	1.00	未检测	0	0.09	109.3	109.4	20	13.5

注: 含氧量、CO、氮氧化物、SO₂的相对准确度分别为2.68%、2.6%、0.63%、7.13%。

按照污泥干化焚烧的烟气排放技术性能指标要求,白龙港污泥二期烟气在线监测系统比对结果均符合设计规范的要求。

4 对工艺运行的反馈修正

烟气在线监测系统主要用于监测烟气的排放是否达标,同时监测数据可以反映系统的运行效果,因此将烟气排放指标反馈到焚烧炉的工艺控制环节,调整和优化工艺的运行工况。白龙港污泥二期项目主要在以下几方面进行了烟气在线指标和系统运行的联动:

① 焚烧炉配备选择性非催化还原法(SNCR)

系统^[6],以降低NO_x排放量。由于需要消耗尿素和喷水,SNCR系统对锅炉经济运行有负面效果,同样会降低锅炉效率和稀相区/后燃室温度。运行过程中可根据烟气在线NO_x的数据,对SNCR系统进行实时的调整,以最经济的方式达到最小的NO_x排放。

② 采用碱液脱酸法,使得烟气洗涤后酸性气体(SO₂、HCl和HF)含量大大降低,但是该法会消耗大量碱液,在运行成本中占很大比例。运行过程中根据烟气在线酸性气体的实时数据,通过控制脱酸塔系统的pH值优化碱液的投加和消耗,实现节能降耗。

③ 通过控制供风量来调节炉膛的空燃比,使燃烧充分,从而降低CO的排放量。由于过量的空气会降低整个系统的热效率,因此可以通过烟气在线系统实时数据,将供风量调整在最合适的数值。

5 结语

随着国内污泥干化焚烧的不断发展,大众对焚烧后烟气的排放也更为关注。国家对烟气污染物排放的控制越来越严格,对在线监测结果的监管也越来越严格。以白龙港污泥二期干化焚烧工程为例,从设计角度对烟气在线监测系统组成、设备的布置和安装进行了介绍;从设备的调试角度对烟气在线监测系统的数据处理、仪表的比对与校准进行了论述;通过分析脱硝、脱硫、除尘的工艺流程,将烟气排放指标与焚烧工艺进行联动控制。在线烟气监测系统的设计、安装、调试和运行等方面的经验总结,可为类似工程的设计和建设提供参考。

参考文献:

- [1] 林莉峰,王丽花.上海市竹园污泥干化焚烧工程设计及试运行总结[J].给水排水,2017,43(1):15-21.
LIN Lifeng, WANG Lihua. Engineering design and trial operation summary of Zhuyuan sludge drying and incineration project in Shanghai [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43 (1) : 15-21 (in Chinese).
- [2] 王辉.烟气连续排放监测系统研究[D].保定:华北电力大学,2016.
WANG Hui. Research on Continuous Emission Monitoring System of Flue Gas [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2016(in Chinese).
- [3] 张弛.烟气连续监测系统关键技术的研究[D].天津:天津大学,2012.
ZHANG Chi. Research on Key Technologies of Continuous Monitoring System for Flue Gas [D]. Tianjin:Tianjin University, 2012(in Chinese).
- [4] 范典.烟气连续在线监测系统CEMS的设计与研究[J].长春理工大学学报(自然科学版),2014,37(2):90-93.
FAN Dian. Design and research of continuous emission monitoring system [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 37(2):90-93(in Chinese).
- [5] 张帅,钱江,李传新,等.傅里叶变换红外光谱技术在多组分烟气在线监测中的应用[J].大气与环境光学学报,2016,11(1):31-36.
ZHANG Shuai, QIAN Jiang, LI Chuanxin, et al. Application of FTIR spectroscopy in on-line monitoring of multi flue gas [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2016, 11 (1) : 31-36 (in Chinese).
- [6] 史磊,张世鑫.循环流化床锅炉SNCR脱硝技术优化改造[J].洁净煤技术,2018,24(6):107-111.
SHI Lei, ZHANG Shixin. Optimization of SNCR denitration technology in circulating fluidized bed boiler [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(6) : 107-111 (in Chinese).

作者简介:应基光(1984-),男,浙江诸暨人,硕士,工程师,主要从事污水、污泥处理等工作。

E-mail:yingjiguang@126.com

收稿日期:2021-04-13

修回日期:2021-06-01

(编辑:衣春敏)

做好水文监测分析预报,保障国家水安全