

# 温州市污泥干化焚烧处理工程技术改造

李文兴<sup>1</sup>, 郑秋鹃<sup>1</sup>, 廖建胜<sup>1</sup>, 张德跃<sup>2</sup>, 崔常青<sup>2</sup>

(1. 温州市公用事业投资集团有限公司, 浙江 温州 325000; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381)

**摘要:** 温州市东片污水厂 240 t/d 污泥集中干化焚烧项目是目前国内较为系统完整的达产运行的污泥处置项目之一。针对项目调试、试运行中存在的问题,进行了工艺技术提升改造和优化运行管理的实践研究,有针对性地解决了污泥转运计量、配套设备选型、物料中间过程输送、水气灰治理、除臭等方面的问题,具有一定的示范效果和应用价值。

**关键词:** 污泥干化; 污泥焚烧; 物料输送; 载气; 飞灰; 余热利用; 脱硝

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)02-0090-06

## Technical Transformation of Sludge Drying and Incineration Treatment Project in Wenzhou City

LI Wen-xing<sup>1</sup>, ZHENG Qiu-juan<sup>1</sup>, LIAO Jian-sheng<sup>1</sup>, ZHANG De-yue<sup>2</sup>,  
CUI Chang-qing<sup>2</sup>

(1. Wenzhou Public Utility Investment Group Co. Ltd., Wenzhou 325000, China; 2. North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

**Abstract:** The 240 t/d sludge drying and incineration project of East Wastewater Treatment Plant in Wenzhou City is one of the projects with full load operation and more complete system in China. Aimed at the existing problems in the commissioning and trial operation of the project, the practice research on the process technical upgrading and operation management optimization was carried out. The problems of sludge transport and measurement, related equipment selection, material mid-process transportation, water, air and ash treatment and odor removal were solved. The project has certain demonstration effect and application value.

**Key words:** sludge drying; sludge incineration; material transportation; carrier gas; fly ash; waste heat utilization; denitrification

干化焚烧是污水厂污泥完全实现减量化、无害化、稳定化、资源化的有效处理措施之一,由于污水处理产生污泥的多样性、所处地域环境的复杂性、环保节能要求的约束性、处置目标措施的可达性等要求,污泥处置方式的选择需要坚持实事求是、因地制宜、可持续发展的技术路线原则。

浙江省温州市污泥集中干化焚烧项目(240 t/d)后期接收、调试和试运行、不达产技术改造、达产正常运行管理等经验,可为污泥处置行业提供基础

数据与技术参考。

### 1 项目概况

温州市污泥集中干化焚烧工程项目选址在温州市龙湾区兰田小陡门,温州市东片污水处理厂二期预留地内,污泥处置采用“倾斜桨叶式干化机+回旋流型流化床”的“半干化+焚烧”工艺技术,设计处理污泥量为 240 t/d,污染物排放执行《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2001),臭气排放执行《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—1993)的

二级标准,该项目于2010年10月开工建设,2013年3月进行调试与试运行。

该污泥集中干化焚烧工程按工艺流程分为污泥输送及存储系统、污泥干化系统、污泥焚烧系统、余热回收利用系统、烟气净化系统、飞灰收集系统、冷却水系统、中水处理系统等。其中,烟气净化采用“半干脱酸+膨胀反应器+袋式除尘”方式,每个系统里均涉及大量的设备和复杂的工艺控制。污泥来源为温州市东片(约80 t/d)、中心片(约100 t/d)、西片(约60 t/d)三座污水处理厂处理后收集起来的80%含水率湿污泥。主要工艺处置过程:湿污泥经过倾斜盘式桨叶干化机干化到30%含水率后,被机械设备输送到回旋流型流化床进行燃烧,产生的高温烟气经过余热锅炉转化为175℃蒸汽回送到干化机,用来干化连续投入的80%含水率的湿污泥,热量不足时在焚烧系统中添加辅助燃煤。为减少项目检修时的影响,设置了两条干化与焚烧生产线,工艺流程见图1。

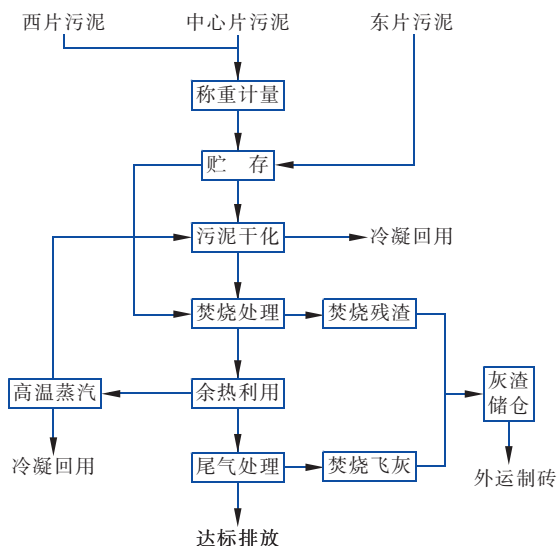


图1 污泥处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of sludge treatment process

## 2 调试运行存在的主要问题

该项目于2013年3月进入试运行,调试期间发现污泥干化焚烧处置系统存在以下问题,直接影响项目处置效果和规模能力。

① 一些工艺设备不适应温州污泥含粉沙量偏高、粘性大的特性,导致设备故障率高、损坏严重,污泥处置系统无法实现连续稳定运行,从2013年3月到2014年底,平均年运行时间不足5 000 h。

② 部分系统配置先天不足,处置车间恶臭四

逸,粉尘弥漫,部分烟气指标不能实时达标。

③ 污泥处置能力远未达到项目规模要求(240 t/d),2013年3月—12月期间,两条生产线总的处置能力只有90.81 t/d,约为设计能力的40%。

④ 污泥转运与计量设备、干化焚烧设备、粉尘除臭设备等均存在质量缺陷,亟需技术改造。

⑤ 污泥处置系统性配套欠缺,部分排放指标不能实时达标,污泥单位综合处置成本居高不下。

根据对调试、试运行阶段实际情况的分析,问题主要涉及污泥转运物联网技术应用;干、湿污泥输送;燃煤、砂循环输送;气力输灰;炉内脱硝;车间臭气治理;车间飞尘治理;载气洗涤;焚烧炉水冷渣斗堵塞;除氧器外排蒸汽余热利用等诸多方面,需要通过技术改造、工艺优化来系统性解决。

## 3 主要技术改造

### 3.1 湿污泥转运与计量物联网技术应用

根据浙江省环保厅对污泥产运及消纳处置联单管理规定,污泥转运消纳要全程监控。原项目污泥转运采用人工填单,计量采用普通汽车衡,计量过程需人工进行停车、登记、称重、数据录入等操作。整个转运与计量过程不仅耗时,差错率高,更容易产生人为偏差。为此,技术改造应用物联网技术对计量系统改造,实现自动计量与污泥运输实时监控。具体分以下三方面:

① 在污水厂污泥运出点加装轴重秤系统,运泥车辆均在污水厂先称量毛重,配上车辆前后及顶部三个方位的视频拍照,并上传服务器;泥车安装GPS卫星导航定位系统,对泥车按规定路线行驶进行跟踪,对车辆的异常进行警报;建立一车一卡身份辨识,车辆数据和称重数据相关联,方便查询使用。

② 将污泥焚烧项目原有汽车衡进行改造,成为双向RFID无人值守,在进出称重的同时进行三个方向视频拍照,实现将视频信号与计量数据的管理及WEB上传,同时与污水厂出厂的污泥毛重进行比对(污泥处置费以焚烧厂地磅为计费依据),建立异常警报。

③ 在温州市政管理处设立监控中心,污水厂和焚烧厂设操作站,加强对污水厂及污泥焚烧项目计量数据及过程的监管,监控系统主要由服务端管理软件、卫星导航定位软件、信号采集设备等组成,相关授权人员可在任何地点进行远程监控,相关数据保存2年以上,并与环保部门共享。

自动污泥转运系统集成称重技术、计算机技术、自动化控制技术于一体,建立物联网智能管理平台,提高工作效率,减少人为干预,提高企业信息化管理水平,为城市污泥转运管理积累了经验。

### 3.2 湿污泥输送技术改造

原接收仓至储仓的污泥输送依次由2台正压给料机、水平螺旋、长轴斜螺旋、进仓断螺旋4级串联,故障高发频发,任何一级设备出现故障或问题,都会使整个输送环节停运,从而导致整个污泥处置系统不能工作。由于80%含水率的污泥来自多座污水处理厂,污泥情况相对复杂,污泥中的杂物经常堵死接收仓下的正压给料机,故障检修时须首先清空体积为 $180\text{ m}^3$ 的接收仓内的污泥,清理难度大,检修时间长,对污泥处置厂与污水处理厂运行影响极大。另外,温州东片污水处理厂的湿污泥原设计由管道输送,污泥管道输送因流速过低,难以准确计量,用泵流量曲线核算也存在较大偏差,属地政府要求改为汽车运输称重计量。

技术改造:拆除原来各级螺旋,改用管道输送。先将原安装在温州东片污水处理厂的2台污泥螺杆泵进行减压扩量改造,将压力由 $3.6\text{ MPa}$ 改为 $2.4\text{ MPa}$ ,流量由 $240\text{ t/d}$ 改为 $360\text{ t/d}$ ;拆去2台正压给料机内螺旋,在其外壳上开孔接焊法兰,加装插板阀,螺杆泵进料器直接与插板阀用法兰连接,2台污泥泵1用1备。由于改造费用低,充分利用原有的泵与管道,改造完成后污泥输送简单可靠,维护保养方便,彻底消除了隐患。

### 3.3 干污泥输送技术改造

半干污泥从干化机输送到焚烧炉,高度提升 $13\text{ m}$ ,水平运输近 $10\text{ m}$ 。原设计由日本进口Z型刮板式提升机、储泥斗、翻板给料阀和进料螺旋组成,由于温州污泥粘性较大、粉细砂含沙量高,30%含水率泥团外干内黏,Z型刮板式提升机运行时对泥团形成碾压,使得污泥到处粘稠,经常引起刮板与链轮卡死、链条断裂,使链条从高处砸落,造成大量刮板与链条损坏变形,甚至无法恢复使用;破损的泥团提升到锥形干污泥斗又经常架桥,经常固结在推送干污泥进炉的双轴无轴螺旋输送机内壁,引起螺旋弯曲变形卡死甚至断裂。只有将干污泥含水率降至10%以内,上述问题才能得到解决,但污泥含水率降低后又会带来处理能力的大幅降低、干化机桨叶磨损加剧等问题。

技术改造:要实现干污泥顺利输送,必须“不破坏泥性”,经多次研究后采用“振动给料机+带水平段Z型斗提”组合来输送污泥。干化机下装长为 $11\text{ m}$ 振动给料机,用于接收干燥机出口污泥并输送到Z型斗提机,经Z型斗提水平垂直提升后送到双阀板翻板阀,最后经 $2.5\text{ m}$ 长耐高温振动给料机将污泥送入焚烧炉。双阀板翻板阀作用是保证污泥输送通道内部时刻隔断,避免空气进入焚烧炉使炉温降低和氧含量升高。振动给料机与干燥机、焚烧炉、翻板阀的软连接利用旧除尘布袋缝制、法兰压接,利用布袋耐高温、密闭性、柔软等特性实现隔风、隔尘、隔臭。

干污泥输送改造完成后运行稳定,几乎不需要维修,只需适时对Z型斗提水平段重叠装置的齿轮进行清理或轴承更换。

### 3.4 燃煤、砂循环输送技术改造

#### ① 燃煤输送改造

补充燃煤原设计由抛煤机抛撒入炉,由于抛煤机直接对着炉火,受热面达 $80\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ ,抛煤机主轴、桨叶与夹套内层在高温下变软,经常被煤块卡阻,并导致叶片松动掉落或内层夹套磨穿,冷却水直接喷漏进焚烧炉,严重威胁焚烧炉安全,此类事故几乎每周都要发生。加上抛煤机为非标产品,其夹套的铸造制作周期非常长,费用高,而且设备重、螺丝孔多,拆装难度非常大,管理、维修维护极其困难。

技术改造:通过研究发现,给煤螺旋到抛煤机存有 $2\text{ m}$ 多落差,中间输煤管道倾斜角度 $>70^\circ$ ,燃煤可以自行滑进焚烧炉。拆除抛煤机,制作安装一个带抛物面的溜槽,带夹套,通二次风冷却,为防止燃煤在溜槽内堆积,引入一次风吹扫;用耐高温不锈钢板将焚烧炉安装口封小 $1/2$ ,减少对溜槽的热辐射。该部分技术改造工作完成已有两年,从未发生过故障及燃煤阻塞。改造前抛煤机外壳经常发红,现溜槽夹套可用手触摸,而且不需检修,不需用电,取得了非常好的效果。

#### ② 砂循环改造

冷渣器与振动筛筛检出来的砂在回收过程中主要存在4个问题:a. 振动筛经常出现炉渣卡阻上层筛条,需要人工开箱清理;b. 砂提升机返料多,大量回落砂提底部;c. 砂提链条运行时晃动幅度大,上下链斗、链斗与外壳经常刮碰;d. 上下轴固定方式不可靠,经常跑位。



技术改造:对问题 a,将上层筛条方钢(尺寸为 6 mm × 4 mm,间距为 50 mm)改为  $\varnothing 25$  mm 圆钢条,改善炉渣滑动条件,堵塞现象基本消除。对问题 b,在砂出口增加舌板,大幅减少返料;对问题 c,用角钢增加链条行走轨道,消除晃动;对问题 d,改变上下轴固定方式,由螺丝紧固改为拉杆锚固。技术改造完成后,整个砂循环稳定顺畅,基本无故障。

### 3.5 气力输灰技术改造

该工程原只在布袋除尘器集灰斗安装了气力输灰装置,将飞灰输送到室外灰仓。余热锅炉、省煤器、膨胀反应器及炉砂外排均用星型卸灰阀放灰,手推车接收运送。7 个排放点飞灰排放与收集占用了大量的人力,并且飞灰四处飞扬,排出的飞灰温度高,易引燃手推车轮胎,操作环境恶劣,环境污染严重。

技术改造:对 7 个排放点全部采用气力输灰,将飞灰统一送入飞灰仓。增配 1 台空压机、1 台 4 m<sup>3</sup> 储气罐、7 台浓相发送器(仓泵)。对余热锅炉、省煤器、膨胀反应器 3 个飞灰收集点,根据空间高度限制,采用改良型锥盘式仓泵,高度仅 40 cm,并将 3 点串联一起,根据生产经验设定输送程序,既保证飞灰输送效果又节省工程费用。对于炉砂外排输送,根据炉砂粒度大、磨损剧烈的特点,采用耐高温 QY 型仓泵,出料与排气阀门采用双道滑阀,管道采用双套管,线路设计时尽量减少弯头。将飞灰仓卸灰系统星型卸灰阀改为干灰散装阀,在下料漏斗口安装流化板,防止飞灰桥接,同时配套灰罐车一台,实现飞灰密闭运输。技术改造工作完成后,只需更换部分易磨损件即可,实现自动操控,节省人力,厂区卫生环境也大为改观。

### 3.6 炉内脱硝技术改造

原处置系统是通过严格控制氧含量来抑制 NO<sub>x</sub> 生成,实际运行中 NO<sub>x</sub> 有时会超标,特别是 2016 年开始执行《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)后,相关指标大幅降低的情况下难以保证全部达标排放。

综合考虑锅炉结构特点与原料供应等因素,增加炉内脱硝,采用以 20% 氨水作为脱硝还原剂的 SNCR 脱硝工艺。补充增加了氨水储存、输送供应、分配、还原剂喷射系统,同时设置围堰、喷淋洗眼等设施。氨水投加点设在焚烧炉水平截面最小的折焰角处,确保氨逃逸率  $\leq 10$  mg/L;脱硝装置能快速启

动投入,在负荷调整时有良好的适应性,能在锅炉最低稳燃负荷工况和锅炉最大连续蒸发量(BMCR)工况之间的任何负荷实现持续安全运行,满足锅炉负荷变化率要求,不增加烟气阻力;不增加锅炉维护和检修时间;对锅炉热效率影响低于 0.5%。进行脱硝改造后的 NO<sub>x</sub> 浓度远低于新国标限定的值,并且 SO<sub>2</sub> 浓度也降至 20 mg/Nm<sup>3</sup> 以下。

### 3.7 车间臭气治理技术改造

原设计认为整个干化系统为微负压,臭气不会外逸到车间,在实际运行中发现:干污泥排出提升机过程、洗涤水外排都会夹带出许多臭气,特别是载气引风机或二次风机一旦出现故障,干化系统就变负压为正压,整个车间就“臭不可闻”。另外,污泥接收仓与储仓采用离子除臭,收效甚微。

技术改造:首先将部分洗涤后载气(约 30%)改为焚烧炉二次风焚烧,同时设计安装了一套生物滴滤床除臭系统(见图 2,含预洗降温),将干污泥出口、振动给料机、洗涤废水排放井、泥仓以及洗涤塔出口管道(干化机故障时用)接入该除臭系统。生物滴滤床额定处理气量为 5 000 m<sup>3</sup>/h,能短时间承受 50% 过载能力,保证干化系统正压破坏时臭气得到处理;风机变频控制,静压为 2 kPa;排气筒高度约 27 m,屋顶排放。该除臭系统安装完成后,每月只需进行补放水、调节 pH 值和 COD 等维护。每季对排气筒排气进行取样监测,排放均符合 GB 14554—1993 二级标准,改造后车间基本无臭味。

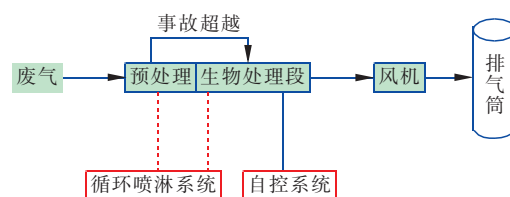


图2 生物滴滤床除臭系统

Fig. 2 Odor removal system by biofilter

### 3.8 车间飞尘治理技术改造

原车间内飞尘严重,气力输灰管道的磨损会引起飞灰外逸,气力输砂仓泵平衡阀等故障会使压缩空气在整个管路里窜动,引起砂提、储砂罐等处飞灰外逸,不燃物筛分外排时也会产生大量飞灰,同时石灰等辅料投加时又易产生扬尘。

技术改造:另外设计安装了一台布袋除尘器,将上述易漏灰处用管道接入新增布袋除尘器,使各漏灰点时刻保持负压。布袋除尘器流量为 6 500 Nm<sup>3</sup>/

h, 过滤面积为  $130 \text{ m}^2$ , 过滤风速为  $1 \text{ m/s}$ , 布袋材质为无纺布。在除尘器灰斗下部安装一台锥盘式气力输灰装置, 直接将收集起来的灰尘送入飞灰仓。另外, 在每个楼层都预留数个吸灰口, 用于车间日常清理。加装除尘器后, 车间飞尘状况大幅改善。

### 3.9 载气洗涤技术改造

原洗涤塔内的结构形式:  $\text{Ø}65 \text{ mm}$  “十”字型不锈钢管, 在  $\text{Ø}65 \text{ mm}$  不锈钢管上钻数个直径为  $8 \text{ mm}$  的喷孔作为喷淋装置; 洗涤塔中部卷铺斜波纹塑料填料作为缓冲。该喷淋装置存在较大缺陷: ① 填料层受水不均, 在喷淋管进口处出水大, 远离进口处基本不喷水; ② 填料容易被冲垮甚至腐烂; ③ 由于载气里含有少量泥灰, 喷淋水小处的填料基本被泥糊住, 导致洗涤塔出口载气温度远高于设计温度; ④ 洗涤后的载气携带大量水分进入载气循环风机, 引起载气循环风机及电机故障, 必须每隔数小时停运载气循环风机排水。

技术改造见图3。将原喷淋管改为椭圆“日”字型, 喷淋管分三层, 在喷淋管上安装  $0.5 \text{ 寸}$  ( $12.5 \text{ mm}$ ) 螺旋实心锥喷嘴, 洗涤塔上部增加除雾器 (图中红色长方形)。除雾段主要起到拦阻水汽作用, 下部的洗涤段起降温洗涤作用, 中间加入易清洗与放取的直径为  $5 \text{ cm}$  的不锈钢球形填料, 上下用不锈钢网固定, 防止填料流失。

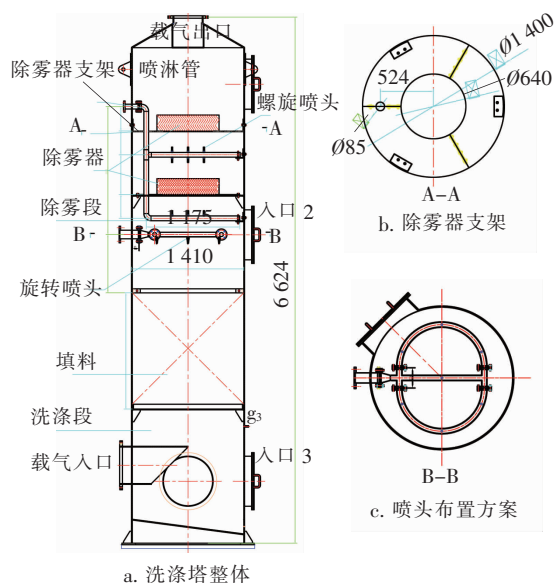


图3 洗涤塔的技术改造

Fig.3 Technical innovation of washing tower

为防止中水的杂物堵塞螺旋实心锥喷嘴, 在滤后水总管上安装袋式过滤器。同时为进一步减少载

气中的冷凝水, 在洗涤塔出口安装一个  $\text{Ø}0.8 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$  的旋风分离器, 分离器下部设存水箱, 箱体安装阀门与视镜, 当存水多时能不影响整个洗涤系统运行便可进行排水。

### 3.10 焚烧炉水冷渣斗堵塞技术改造

炉顶湿泥通过  $\text{Ø}150 \text{ cm}$  无缝钢管送入焚烧炉, 因污泥流速较慢, 进炉时易凝结成泥团, 导致污泥流化燃烧不彻底而结焦, 形成大块陶状焦体, 当其从焚烧炉两侧的水冷渣斗排出时, 经常将水冷渣斗堵死, 使得不燃物无法排出, 需停炉清空炉床, 由维修人员进入炉底将水冷渣斗中的陶焦取出, 不仅费时费力, 而且停炉启炉花费非常大。

技术改造: 在炉顶进泥口末端 (防止污泥重新粘结) 焊装一“井”字型格挡, 防止入炉形成大泥团, 使污泥充分流化燃烧, 彻底解决了水冷渣斗堵塞问题, 每年可节省数十万元维修费用。

### 3.11 除氧器外排蒸汽余热利用技术改造

余热锅炉产生的蒸汽通入干化机后, 降温冷凝的水汽经除氧器除氧后再回余热锅炉。由于回流冷凝水流量不均, 大量蒸汽从除氧器排放口排入大气; 同时从洗涤塔回干化机载气管道较长 (室外段  $> 20 \text{ m}$ ), 且未做保温, 当气温低时, 载气在回干化机过程中冷凝, 有大量冷凝水直接流进干化机, 降低了干化机产量。

技术改造: 在室外载气管道外做一个夹层, 夹层与载气管中设不影响蒸汽流动的固定支撑, 夹层外用石棉铝皮保温, 将除氧器外排蒸汽减压至  $0.095 \text{ MPa}$  ( $0.1 \text{ MPa}$  及以上属于压力容器) 后接入夹层, 利用外排蒸汽余热对回干化机的载气进行升温, 增加载气的载水能力, 以充分利用蒸汽的余热, 将蒸汽传热降温后的冷凝水回收至软水箱再次利用。改造后, 干化机处理量提升可观 (约  $5 \text{ t/d}$ ), 余热利用后除氧器蒸汽基本无外排, 同时又节约了可观的水资源。

## 4 经验总结

① 对于干化焚烧工艺, 应充分考虑污泥焚烧处置工艺和安全的特殊性, 对项目的污泥性质应有足够的认识, 使项目选择的设备和工艺尽可能适应泥性, 从而最大程度减少设备故障, 提高污泥处置量, 降低污泥处置成本。

② 强化污泥泥性与排放指标的关联度, 保证飞灰和水气排放符合相关控制标准。

③ 污泥干化焚烧干化段产生的载气量大、臭气含量高,将其作为二次风焚烧是最好的除臭方法,同时项目设计时必须考虑异常情况臭气的治理。

④ 污泥焚烧后飞灰量大,一般占湿污泥量的10%以上,密度小易飞扬。飞灰的收集与最终处置应有系统性,必须考虑其综合利用。故应从源头控制污泥质量,防止飞灰成为危险废弃物,从而大幅拉高污泥处置费用。

⑤ 污泥干化载气的洗涤需水量较大,洗涤水与干化蒸发量比一般超过5:1,故项目建设必须充分考虑洗涤水取用与最终处理,最好比邻污水厂建设,利用其尾水及污水处理功能,来降低污泥干化处置成本。

## 5 结论

通过技术改造消缺,使本污泥处置项目生产能力达到并超过了240 t/d的工程规模;运行时间>8 200 h/a,实现了持续稳定运行;烟气排放符合新国家标准;残渣和飞灰得到良好的综合利用,顺利通过环保验收;运行成本比改造前降低60%以上,实现了立项时确定的工程目标,为国内干化焚烧污泥处置工艺的运行提供了示范性案例和成功经验。

## 参考文献:

- [1] 李东鹏,高洪培. 循环流化床条件下贫煤掺烧高水分污泥的燃烧特性试验研究[J]. 洁净煤技术,2006,12(2):56-59.
- [2] CECS 250:2008,城镇污水污泥流化床干化焚烧技术规程[S]. 北京:中国计划出版社,2008.



作者简介:李文兴(1972-),男,浙江金华人,大学,工程师,从事城市污水处理和污泥处置工作。

E-mail:411365333@qq.com

收稿日期:2016-09-05

(上接第89页)

性炭约为1.0元/m<sup>3</sup>,人工费约为0.4元/m<sup>3</sup>,不计设备折旧,直接运行费用约为5.5元/m<sup>3</sup>。

## 4 结论

采用Fenton+MBR膜生物反应器+臭氧催化氧化工艺对成分复杂、高浓度有机物、难降解的丁苯橡胶生产废水具有良好的处理效果,处理后出水水质能够稳定达到天津市《污水综合排放标准》(DB 12/356—2008)的二级排放标准。该工艺系统抗冲击负荷能力强,运行稳定,可为橡胶行业乃至石化行业废水处理提供参考。

## 参考文献:

- [1] 马承愚,彭英利. 高浓度难降解有机废水的治理与控制[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [2] 黎华恒,张平,严丹燕. 芬顿(Fenton)高级氧化技术在废水处理上的研究发展[J]. 能源与环境,2012,(3):73-74.

- [3] 林仁漳,陈玉成,魏世强. 高浓度难降解有机废水的催化氧化技术及其进展[J]. 环境污染治理技术与设备,2002,3(5):49-54.
- [4] 肖文胜,徐文国. 组合填料-膜生物反应器处理生活污水生产性试验[J]. 水处理技术,2006,32(11):71-73.



作者简介:李立春(1981-),女,天津人,工程师,主要从事工业废水处理技术研究。

E-mail:lilichun1981@126.com

收稿日期:2016-10-25