第7卷 第8期 环境工程学报 Vol. 7, No. 8
2013年8月 Chinese Journal of Environmental Engineering Aug. 2013

600 t/d新型污泥喷雾干化-焚烧示范工程污染物去除效果

汪翠萍[1] 俞其林[2] 高志永[1] 盛守祥[1,3] 吴昌敏[1,3] 王凯军[1*]
(1. 清华大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084;
2. 浙江环兴机械有限公司,杭州 310012; 3. 中持(北京)环保发展有限公司,北京 100192)

摘 要 新型污泥喷雾干化-回转窑焚烧工艺是将脱水污泥通过雾化喷嘴形成滴雾后与高温烟气并流接触达到干化后再进行焚烧的集成技术。干化过程中湿污泥中有机物的挥发及该新型工艺的运行工况和污染物减排效果成为污泥处理处置领域关注的焦点。在对污泥喷雾干化焚烧工艺原理分析基础之上,对我国600 t/d新型污泥喷雾干化焚烧示范项目进行封闭式现场取样监测,通过成分分析、毒性监测等重点对污染物去除效果进行了研究,结果表明,该工艺通过自动控制可将出口烟气温度和干化污泥温度保持较稳定的状态,分别为(96±10)℃和(72±8)℃;喷雾干化塔内不存在粉尘爆炸危险,TVOC<0.025 mg/m^3;直接干化热利用率>80%,优于间接干化;烟气排放口各指标均满足《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB18485-2001)的要求。

关键词 污泥喷雾干化-焚烧 示范工程 污染物控制 工况

中图分类号 X703 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2013)08-3196-07

Pollutant removal of a new spray drying/incineration demanstration project with capacity of 600 t/d for sludge treatment

Wang Cuiping[1] Yu Qilin[2] Gao Zhiyong[1] Sheng Shouxiang[1,3] Wu Changmin[1,3] Wang Kaijun[1]
(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Zhejiang Huanxing Machinery Co. Ltd., Hangzhou 310012, China; 3. CSD (Beijing) Environmental Protection Development Co. Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract The new spray drying/incineration process is an integrated technique which was designed based on our country's national conditions to utilize the high temperature flue gas to dry the dewatered sludge. The pollutants removal and performance of this new process has become a focus. Therefore, we determined the running performance and pollutant removal of the new sludge spray drying/incineration demonstration project with capacity of 600 t/d for sludge treatment. The results show that the temperatures of flue gas and dried sludge particles remain stable at (96±10)℃ and (72±8)℃, respectively, under the automation control. There is no dust explosion risk in the spray drying tower and TVOC concentration is below 0.025 mg/m^3. The direct contact between high temperature flue gases with spayed wet sludge makes the drying process rapid and thermal reuse efficiency as high as 80%. The indicators of the discharged flue gas can meet the Solid Waste Incineration Pollution Control Standard (GB18485-2001).

Key words sludge spray drying/incineration; demonstration project; pollutant control; performance

近年来,我国城镇污水处理能力得到了快速的发展,截至2011年底,全国设市城市、县累计建成城镇污水处理能力已达1.36亿m^3/d,污水处理率已超过75%[1],但是,污泥处理处置相对污水处理严重落后,全国污泥安全处理率不足10%[2]。因此,如何对污水污泥进行处理处置,最大限度的实现污泥"减量化、稳定化、无害化"是今后面临的重大环境治理问题。

目前,焚烧工艺被世界各国认为是污泥处理中的最佳实用技术之一[3,4]。在欧洲[5]、日本[6]等国家,该工艺已日渐成熟,它以占地面积小、减量化程

基金项目:环保公益性行业科研专项经费资助(201109001)
收稿日期:2012-06-27; 修订日期:2012-10-05
作者简介:汪翠萍(1979~),女,博士,助理研究员,主要从事污水污泥处理处置及资源化方面的研究。E-mail: crisping@163.com
* 通讯联系人,E-mail: wkj@tsinghua.edu.cn

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

度高等突出特点而著称。随着世界各国的环境条件均对废弃物处理所花费的时间和所占的空间提出了更为严格的要求,污泥焚烧技术已逐步成为污泥处理的主流技术。虽然我国在污泥焚烧的研究方面与国外相比起步较晚,然而,在国外科研应用研究基础上,国内部分科研单位结合我国国情进行了污泥焚烧工艺技术的研究,并取得了突破进展。其中"新型污泥喷雾干化-回转式焚烧炉集成技术"的工程处理能力已达到 600 t/d,为我国污泥问题的解决提供了一条可行的技术路线。

重金属及二恶英等污染物排放特性一直以来都是污泥焚烧工艺关注的焦点。本文通过对处理能力为 600 t/d 的污泥喷雾干化-回转窑焚烧示范工程的全面分析监测,以期能够全面掌握该新型污泥干化焚烧工艺的稳定性、安全性及污染物去除效果。通过示范工程运行一年的工况的考核,本文重点对工艺的稳定性及可靠性进行考核; 通过对喷雾干化塔进行沿程取样监控,对新型干化技术的安全性能进行评价; 通过对重金属、二恶英、烟气等排放因子的监测分析,对工艺的燃烧效果及尾气净化系统的污染实际控制效果进行评价。通过上述研究力求对该新型污泥焚烧工艺进行全面的认识,为进一步的技术推广提供保障。

1　示范工程概述

1.1　工艺介绍

新型污泥喷雾干化-回转式焚烧工艺流程系统包括: 污泥接收及预处理系统; 喷雾干化系统; 回转窑焚烧系统; 烟气净化系统; 供热通风系统; 灰渣收集系统; 湿污泥除臭系统; 燃煤储存及公用工程系统。

脱水污泥通过高压泵入喷雾干化塔顶部,通过雾化喷嘴变为 30 ~ 500 μm 的雾状滴液,与焚烧后的高温烟气(>500℃) 在顶部顺流接触,经过充分的热交换,污泥得到干化,干化后的含水率为 20% 左右、粒径为 60 ~ 120 目的干化污泥从干化塔底与旋风和布袋截留的细小烟尘一起进入回转式焚烧炉焚烧,焚烧温度保持在 >850℃、停留时间 >2.5 s 条件下焚烧,焚烧后的高温烟气继续引入喷雾干化塔顶部用于污泥干化。干化塔排出的尾气分别经过旋风分离器、布袋除尘器、净化除臭塔处理后,经烟囱排放。焚烧后的残渣热酌减率≤5%,通过链运机输送至储渣槽后作为建材外运。

本示范工程关键设备参数如下:

喷雾干化塔。设计 2 个,Φ9.5 m,塔顶高约 46 m,干化过程有效高 30 m。每个塔设 8 个雾化喷头,4 用 4 备,由水气泥三路电磁阀控制,每个喷头处压缩空气用量 10 m^3/min,喷头处压力为 4 kg/cm^2。

回转式焚烧炉。设计 2 个,回转窑外径 Φ3.7 m,内径 Φ3.0 m,转筒长 21 m,倾斜度 1°,转速 1 ~ 3 r/min,污泥在窑停留时间 20 ~ 60 min 可调,电机功率 55 kW。

二燃室。二燃室采用立式结构,底部内径 Φ3.5 m,顶部内径 Φ2.4 m,高 23 m,墙体厚度 0.58 m,保障二燃室内温度不低于 850℃,气体流经时间不少于 2.5 s。

工艺特点:

(1) 热利用率高。利用焚烧高温烟气(>500℃) 直接对雾化污泥进行干燥,避免了复杂换热器的热损失,干化后废气排放温度低(70 ~ 80℃),其热利用效率可以提高到 80% 以上[7]。

(2) 有效雾化、干燥迅速。通过专利技术实现了污泥的有效雾化,且不存在堵塞及磨损的问题,干燥污泥颗粒均匀,分布合理(60 ~ 120 目),利于焚烧[7]。

(3) 喷雾干化塔安全稳定。调控污泥颗粒的干燥程度,确保安全(避免粉尘爆炸),烟气温度从 500℃迅速(<0.5 s) 降低 100℃以下,不仅可防止二恶英及其前驱物的再生,迅速干化过程不会产生挥发性有机气体,同时还能将重金属等吸附在雾化污泥中,使喷雾干化塔具有烟气预处理功能,可有效降低后续烟气净化设施的处理负荷和规模[7]。

1.2　工艺原理[8]

本技术采用的污泥喷雾干燥是借鉴脉动燃烧喷雾干燥机理,基于压力式喷嘴作用原理,利用焚烧高温烟气作为脉冲流,与污泥顺流接触,辅以压缩空气,从侧向作用,在打散污泥的同时,形成强烈湍流和复合脉动,加快污泥液滴的蒸发,避免了单独采用压力式喷嘴存在的堵塞问题。

干燥过程分为 3 个阶段: 第 1 阶段为污泥预热期,主要对湿污泥进行预热,同时也有少量水分汽化。污泥温度很快升到接近烟气的湿球温度; 第 2 阶段为恒速干燥阶段,是高温烟气传给污泥的热量全部用来汽化水分,污泥表面温度一直保持不变,水分则按一定速度汽化,此阶段也称表面汽化控制阶段; 第 3 阶段为降速阶段,此阶段空气提供的热量一部分用来汽

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

化水分，而大部分则用来加热污泥，使污泥表面温度升高，干燥速度降低，污泥含水量减少的很缓慢，为内部扩散控制阶段。喷雾干燥过程含水率、干燥速度、物料温度随时间的变化情况如图 1 所示。

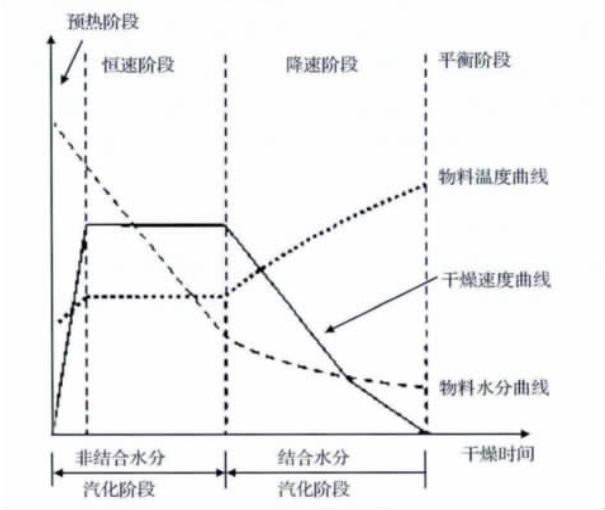

图 1 污泥喷雾干燥过程含水率、干燥速度及物料温度变化曲线

Fig. 1 Curves of moisture content, drying rate and material temperature with time during sludge spray drying process

1.3 污泥性质分析

该示范工程的污泥来自于绍兴某印染污水处理厂脱水污泥，其含水率在 81% ~91% 之间；污泥干基低位热值在 3 110 ~3 460 kcal/kg；硫含量约为4.6%（以 SO_3 计）。印染污泥由于含有染料、浆料、助剂等，成分非常复杂，其中染料的结构具有硝基和氨基化合物以及铜、铬、锌、砷等重金属元素，具有较大的生物毒性，对环境的污染很严重。

1.4 示范工程监测点位

本课题所研究的示范工程工艺流程如图 2 所示。重点从以下几方面对本项目进行监测：(1) 整个工艺各段的温度，重点研究该新型工艺的稳定性；(2) 喷雾干化塔内沿高程温度及塔内 TVOC 浓度特性，重点研究该工艺核心技术的安全性及可靠性；(3) 常规污染物排放浓度（如 HCl、烟尘浓度、黑度、NO_x、SO_2 等），重点研究该新型工艺焚烧烟气污染物控制效果；(4) 重点排放因子（二恶英和重金属）等的排放特性，重点研究该新型污泥焚烧工艺对有毒有害物质的控制效果。

2 运行工况分析研究

2.1 运行工况的稳定性研究

系统性能稳定、运行可靠是污泥焚烧工艺持续进行的保障。为了研究该新型污泥喷雾干化 - 回转窑焚烧工艺的稳定性，对工艺各工段的温度进行了长达 35 d 的封闭实验分析，见图 3。

温度是影响污泥干化和焚烧的关键因素，控制污泥干化焚烧整个工艺各工段的运行温度的稳定性才能保障系统运行良好。布袋进、出口烟气平均温度分别为 96℃和 72℃，波动幅度分别为 ±10℃和 ±8℃，

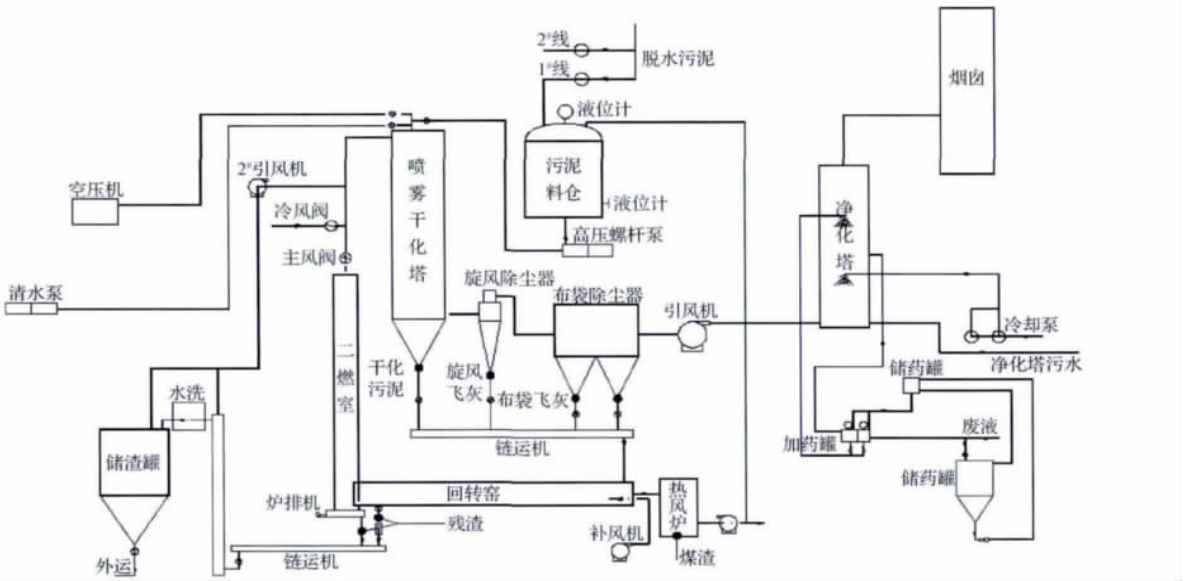

图 2 工艺流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of process flow

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

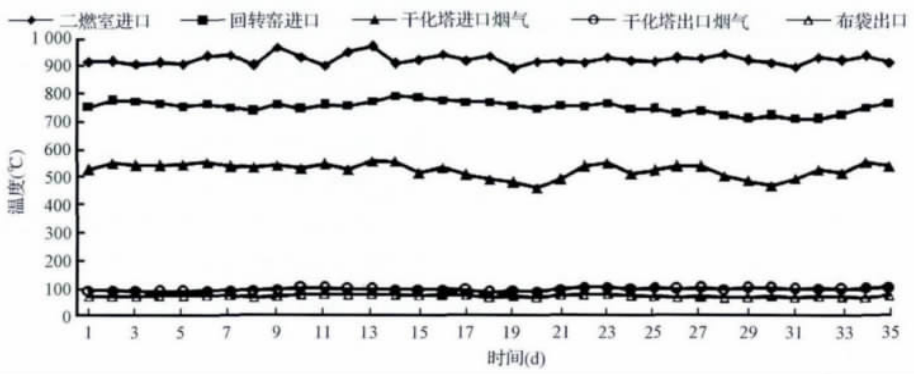

图 3　污泥喷雾干化焚烧示范工程各工段温度变化

Fig. 3　Temperature variation at different sections of the sludge spray drying-incineration demonstration project

波动较小,均处于稳定状态。而干化塔进口烟气、回转窑进口及二燃室进口的平均温度分别为 525、751 和 922℃,波动幅度分别为 ±42℃、-31 ~48℃和 -63 ~32℃,相对布袋进、出口烟气温度,其波动较大,这主要是由于脱水污泥含水率不稳定所造成。

本示范工程各工段的运行温度主要是通过污泥焚烧工艺全自动控制系统的调控来实现。全自动控制系统保证了干化焚烧工艺生产过程的安全、高效和可靠,减轻了劳动强度,改善了操作环境; 通过自控系统界面可访问现场设备,使系统具有全面灵活的通信集成特性,极大增强了系统的可维护性和扩展性。通过对脱水污泥含水率的监控及焚烧过程各点位的温度变化进行燃煤及冷风补充的调节,从而使系统温度控制在尽可能低的波动范围内,保障系统运行温度的相对稳定。

2.2　运行工况的安全性研究

污泥干燥器发生粉尘爆炸事件是影响污泥干化技术获得推广应用的主要原因之一,现有研究表明,发生粉尘爆炸必须同时具备以下 5 个方面的条件[9-11]: (1) 要有一定的粉尘浓度,最低为 60 g/m^3; (2) 要有一定的氧含量,最低含氧量应在 5% ~15% 之间; (3) 要有足够的点火源,干化污泥最低着火温度为 360 ~550℃; (4) 粉尘必须处于悬浮状态,即粉尘云状态; (5) 粉尘云要处在相对封闭的空间。只要消除其中的一个或者多个条件,粉尘爆炸就可以避免。

通过对本示范项目的监测分析,喷雾干化塔内最高粉尘浓度不会超过 5 g/m^3,即使全部干化污泥均作为粉尘计,根据实测烟气量及干化污泥量计算最大似然粉尘含量为 43.2 g/m^3,仍达不到最低爆炸浓度; 喷雾干化塔内烟尘温度均处于 200℃以下(见图 4),低于污泥最低着火温度; 喷雾干化塔采取了高温烟气与雾化污泥液滴并流直接接触的干燥方式,高温烟气和雾化污泥液滴均从干化塔塔顶顺流直下,颗粒物不可能处于悬浮状态。由此可见,多个条件均不能满足爆炸条件,因此,该新型污泥喷雾干化塔内不存在粉尘保障的危险。

2.3　喷雾干化塔工况分析

干化塔进口高温烟气的温度直接影响污泥的干化效果,若温度过低会造成污泥干化不充分,干化污泥含水率高,使得后续焚烧过程中辅助燃料用量增大、回转窑窑炉内易形成结渣等现象; 若温度过高,会造成干化塔出口烟气温度过高,加剧尾气净化设备的腐蚀。因此,控制干化塔进口烟气温度是本工艺的关键所在。

本工艺由于原始脱水污泥的含水率波动较大,通过及时调控喷雾干化塔塔顶补风口的补风量来控制干化塔进口高温烟气温度。进塔混合烟气温度在 462 ~557℃变化(见图 3),始终保持在喷雾干化塔设计能够承受的 450 ~570℃范围之内,排出尾气温度始终保持在 100℃左右,确保了干化塔的干化效果和系统稳定性。图 4 和图 5 分别为喷雾干化塔取样点示意图和喷雾干化塔温度变化曲线图,当高温烟气与雾化污泥同时进塔后,系统内温度在距塔顶 2 m 的范围内迅速下降至 200℃以下,表明雾化污泥液滴表面水分迅速蒸发,从取样表观观察,污泥呈现粉末状颗粒,已基本干化。由于监测点位间隔距离基本相同,因此,在高温烟气进气量和进泥量及干化塔设计参数不变的情况下,在喷雾干化塔各高度测定的温度基本可直接用作

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

干化速率曲线,因此这也说明在最初接触的 2 m 内干化速率最快,充分利用了高温烟气的热值,利用率达 80% 以上[7],成为该工艺区别与以往间接干化的关键。

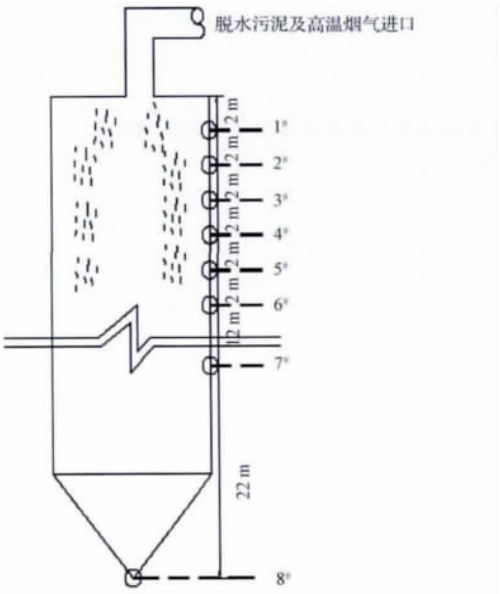

图 4 喷雾干化塔取样点示意图

Fig. 4 Sketch of sampling positions on spray dryer

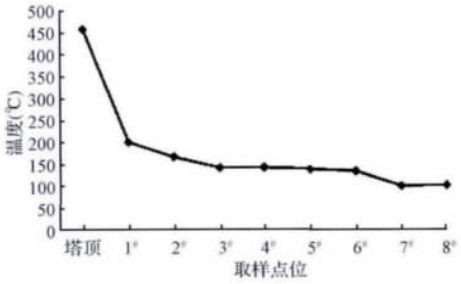

图 5 喷雾干化塔沿程温度变化曲线

Fig. 5 Curve of temperature variation along with height of spray dryer

2.4 干化塔内 TVOC 特性研究

由于污泥成分复杂,有机物含量高,因此,污泥干化过程污染物的排放近年来逐步被广泛关注[2]。新型污泥喷雾干化装置属于直接干燥,在高温烟气与污泥直接接触过程中,挥发性有机物释放和排放特性是人们关注的焦点之一,为此在现场进行了系统的测试研究,分析了干化塔内 TVOC 变化情况见图 6 所示。

图 6 表明随着污泥在干化塔中与高温烟气的充分接触,塔内 TVOC 浓度始终保持在很低的浓度范围内,在 0.01 ~ 0.025 mg/m^3 之间,远远低于室内空气质量 TVOC 排放标准 0.6 mg/m^3,因此不会对生产环境造成影响。这从另一个方面说明在喷雾干燥过程温度迅速下降,没有造成污泥中挥发性组分的大量释放。此外,从大气排放标准的角度,鉴于我国尚未出台 TVOC 的排放标准,故根据欧盟的标准,该浓度远远小于 10 mg/m^3(欧盟 TOC 最高允许浓度),因此污泥喷雾干化技术对挥发性有机物并没有影响。

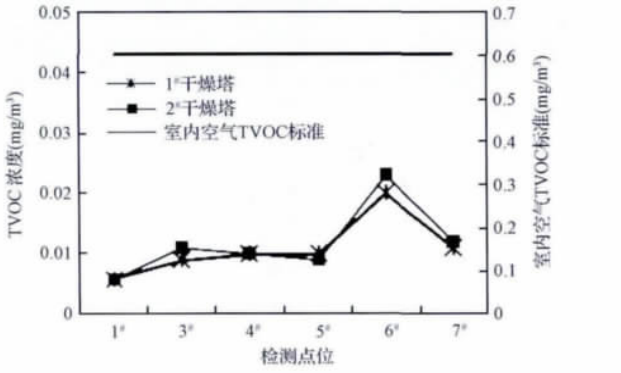

图 6 喷雾干化塔内沿程 TVOC 浓度变化

Fig. 6 Concentration variation of TVOC along with height of spray dryer

3 焚烧污染物排放特性

污泥焚烧会产生大量的污染物,如酸性气体(HCl、SO_x)、颗粒物、重金属及二恶英等有毒有害物质[7]。这些物质若不经过适当的处理将会产生严重的二次污染。我国污泥焚烧的研究起步较晚,如何控制这些污染物还没有全面、系统的研究,还需要进一步加大研究。本文对新型污泥喷雾干化焚烧示范工程污染物排放特性进行研究,深入分析污染物排放控制措施的有效性。

3.1 常规污染物排放特性

本污泥焚烧示范工程烟气处理工艺为:旋风除尘器 + 活性炭喷射 + 布袋除尘器 + 喷淋洗涤塔(NaOH + 水两级喷淋)。分别对工艺正常运行,碱液喷淋塔检修未投加碱液等不同工况监测进行研究,总排放口各主要污染物浓度见表 1 所示。

由表 1 可以看出,该新型工艺在正常运行工况下,各指标均达到了 GB18485-2001 的标准。旋风除尘器能截留粒径在 10 μm 左右以及更大粒径的颗粒物[12],结构简单,作为烟气除尘的预处理,对

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　主要污染物排放浓度

Table 1　Emission concentrations of main pollutants　　(mg/m^3)

样品	烟尘	SO_2	HCl	NO_x	Hg	Cd	Pb	CO	林格曼黑度
A	50.9	231	12.7	380	0.0043	0.016	0.164	94.1	Ⅰ级
B	26.9	6759	24.6	300.6	0.0085	*	0.508	82.0	Ⅰ级
GB18485-2001	80	260	75	400	0.2	0.1	1.6	150	Ⅰ级

注: A 为正常运行排放口烟气; B 为喷淋塔检修未投加碱液时总排放口烟气; 数据均按标准状态下含 11% O_2 的干尾气为参考值换算后的值; * 为低于仪器检测值,取仪器检测线值 1.5×10^{-5} L。

后续除尘装置起到了适当的保护作用; 布袋除尘器能捕集粒径大于 0.5 μm 的粉尘[13],作为二级除尘达到了显著的除尘效率,同时对重金属也有一定的处理效果,如 Hg 和 Cd。本示范工程的喷雾干化塔内粉尘浓度约为 5 g/m^3,出口烟尘浓度为 50.9 mg/m^3,因此除尘效率约为 99%。表面本示范工程选用旋风除尘器 + 布袋除尘器的两级除尘从理论和实际都显示其适合污泥焚烧厂烟气除尘处理。

焚烧烟气中 SO_2 和 HCl 等酸性气体在正常运行工况下,通过湿法脱酸工艺,喷水去除 HCl 和喷纯碱以去除 SO_2 和进一步去除 HCl,最终达到排放要求。而在喷淋塔检修未喷碱的工况下,出口 HCl 和 SO_2 分别是正常工况下的 2 倍和 26 倍,此时 HCl 仍然在标准范围内。如此高浓度的 SO_2 主要是由于本项目中脱水污泥在脱水过程中投加了含硫絮凝剂致使含硫量高达 4.6%。由此建议我国在推广污泥焚烧工艺时要与脱水工艺相结合,尽量减少脱水过程中含硫及含氯絮凝剂类药剂的投加量。

3.2　二恶英排放特性

污泥焚烧过程中产生的二恶英也是限制污泥焚烧技术推广的重要原因,二恶英通常在焚烧过程中以气态或者沉积在飞灰上排出。本污泥新型喷雾干化-焚烧示范工程中二恶英分析结果见图 7。本工艺选用带有活性炭吸附剂的布袋除尘器处理焚烧后的二恶英,其去除率(不考虑旋风除尘部分)达到了 64.3%,要远高于金宜相等学者研究布袋除尘器去除二恶英的效率 39.7%[14]。总排放口烟气样品中二恶英浓度为 0.017 $ngTEQ/Nm^3$,符合 GB18485-2001 标准的排放要求。通过对焚烧后飞灰中的二恶英浓度分析发现,旋风除尘器和布袋除尘器飞灰中二恶英浓度分别为 32 ngTEQ/kg 和 100 ngTEQ/kg。因本新型工艺中捕集下来的飞灰不外排,而是与干化污泥一同利用密闭的链运机输送至焚烧系统,在 850℃以上焚烧实现二恶英的彻底分解,因此避免了飞灰的二次污染问题。

由于旋风前负压不能采样,因此按旋风二恶英去除率为布袋的 32% 进行推导,可以推测旋风前烟气中二恶英浓度约为 0.0844 $ngTEQ/Nm^3$。虽然本示范工程所处理污泥为印染污泥被列为危险废物,然而焚烧结果表明二恶英水平很低,这可能是由于脱水污泥中硫含量较高(达到 4.6%),大量研究表明,硫的存在能抑制二恶英的生成[15-17]。

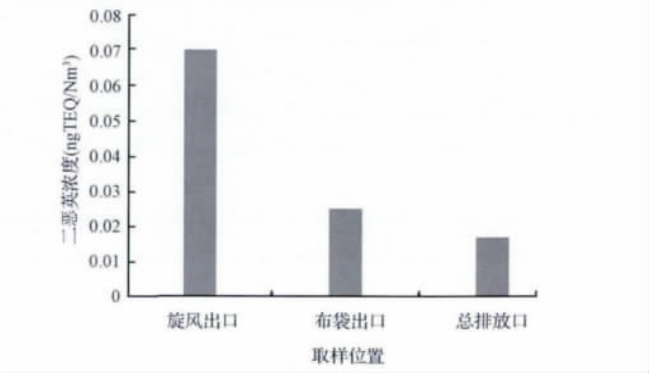

图 7　烟气中二恶英浓度变化

Fig. 7　Concentration variation of dioxin in flue gas

4　结　论

本文通过对 600 t/d 新型污泥喷雾干化焚烧示范工程的分析监测,研究和探讨了该工艺持续运行的系统安全性、稳定性,各种污染物的排放特性,得出如下结论:

(1) 该新型污泥喷雾干化-焚烧示范工程通过自动控制将出口烟气温度和干化污泥温保持较稳定的状态,分别为(96 ± 10) ℃和(72 ± 8) ℃;

(2) 喷雾干化塔实现了 80% ~ 90% 含水率的脱水污泥直接干化,在最初 2 m 的接触距离内水分快速蒸发,干化过程迅速,热利用率高达 80% 以上,不会产生有毒有害挥发性有机污染物(TVOC < 0.025 mg/m^3),也不存在粉尘保障的危险;

(3) 焚烧后尾气处理工艺方案合理,处理效果好,处理后各项指标满足 GB18485-2001 的标准。

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参 考 文 献

[1] 席欣欣,徐鸿魁,王鹏,等. 城镇污水处理厂污泥处理处置技术综述// 2011 年全国给水排水技术信息网年会论文集, 2011. 44-46
Xi Xinxin, Xu Hongkui, Wang Peng, et al. Review of treatment and diposal technologies of the sewage sludge from municipal wastewater treatment plants//Processings of the 2011 National Water and Wastewater Technology Information Network, 2011. 44-46(in Chinese)

[2] 仇保兴. 中国城镇水务"十二五"发展战略与主要任务. 给水排水, 2011,1(2) : 6-7
Qiu Baoxing. The developing strategy and major tasks for the twelve-five plan of munnicipal water supply in China. Water & Wastewater Engineering, 2011,1(2) : 6-7(in Chinese)

[3] Lin H., Ma X. Simulation of co-incineration of sewage sludge with municipal solid waste in a grate furnace incinerator. Waste Management, 2012,32(3) : 561-567

[4] Roy M. M., Dutta A., Corscadden K., et al. Review of biosolids management options and co-incineration of a biosolid-derived fuel. Waste Management, 2011, 31 (11) : 2228-2235

[5] Kelessidis A., Stasinakis A. S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewages-ludge in European countries. Waste Management, 2012,32 (6) : 1186-1195

[6] Jung C. H., Matsuto T., Tanaka N., et al. Metal distribution in incineration residues of municipal solid waste (MSW) in Japan. Waste Management, 2004,24(4) : 381-391

[7] 王凯军,俞金海,俞其林. 新型污泥干化/焚烧技术的试验研究. 中国给水排水, 2008,24(11) : 43-46
Wang Kaijun, Yu Jinhai, Yu Qilin. Experimental study on new drying/incineration process for sludge treatment. China Water & Wastewater, 2008,24(11) : 43-46(in Chinese)

[8] 潘永康,王喜忠,刘相东. 现代干燥技术(第 2 版) . 北京: 化学工业出版社, 2007

[9] 张二强,张礼敬,陶刚,等. 粉尘爆炸特征和预防措施探讨. 中国安全生产科学技术, 2012,8(2) : 88-92
Zhang Erqiang, Zhang Lijing, Tao Gang, et al. Preliminary study on characteristics and preventive measures of the dust explosion. Journal of Safety Science and Technology, 2012,8(2) : 88-92(in Chinese)

[10] 刘后金. 粉尘爆炸的限值. 冶金安全, 1984,(2) : 53
Liu Houjin. The limit values of dust explosion. Industrial Safety and Environmental Protection, 1984,(2) : 53(in Chinese)

[11] HSE. OC-847/9. Control of health and safety risks at sewage sludge drying plants (rotary and vertical dryers) . UK: Health and Safety Executive, 2005

[12] 张峥. 关于提高旋风除尘器除尘效率的探讨. 企业导报, 2011,(6) : 276-277
Zhang zheng. Discussion on the improvement of the collection efficiency of the cyclone seperator. Guide to Business, 2011,(6) : 276-277(in Chinese)

[13] 李茹雅,祁君田,殷焕荣,等. 布袋除尘器过滤效率影响因素研究. 热力发电, 2012,41(1) : 6-7
Li Ruya, Qi Juntian, Yin Huanrong, et al. Affecting factors upon filtering efficiency of bag filters. Thermal Power Generation, 2012,41(1) : 6-7(in Chinese)

[14] 金宜英,聂永丰,田洪海,等. 布袋除尘器和活性炭滤布对烟气中二恶英类的去除效果. 环境科学, 2003,24 (2) : 143-146
Jin Yiying, Nie Yongfeng, Tian Honghai, et al. Removal efficiency of dioxins in flue gas from MSW incineration by using bag house and activated carbon filter/adsorbor. Environmental Science, 2003,24(2) : 143-146(in Chinese)

[15] 王飞,朱小玲,李博,等. 污泥干化焚烧过程中污染物排放的研究. 给水排水, 2011,37(5) : 22-26
Wang Fei, Zhu Xiaoling, Li Bo, et al. Study on the pollutants emission in sludge drying and incineration. Water & Wastewater, 2011,37(5) : 22-26(in Chinese)

[16] Ralf L. L., Friedrich W., Theodor P. Combustion dioxin supression in municipal solid waste incineration with sulphur additives. Chemosphere, 1992,25(7-10) : 1409-1414

[17] Gulletl B. K., Brace K. R., Beach L. O. Effect of sulfur dioxide on the formation mechanism of polychlorinated dibenzdioxin and dibenzofuran in municipal waste combustors. Environmental Science and Technology, 1992, 26 (10) : 1938-1943

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net