

污泥碳化系统试运行及污泥炭回归土壤可行性分析

鲁涛, 朱宝飞, 石春梅, 刘丹, 池保华, 仲伟聪
(西安航天源动力工程有限公司, 陕西 西安 710100)

摘要: 介绍了10 t/d污泥碳化系统组成及运行工艺,分析了该系统的运行能耗及清洁性,在考察污泥炭相关性质的基础上对污泥炭回归土壤进行了深入讨论。运行数据表明,以含水率为80%、干基低位热值为3 871.5 kJ/kg的市政污泥为原料,系统平均热能消耗为2 728.34 MJ/t,其中污泥自身可提供能耗287.52 MJ/t,外部输入能耗为2 440.82 MJ/t,电能消耗为79.2 kW·h/t。烟气经除尘、洗涤处理,即可实现达标排放,实现污泥清洁性处置。污泥炭中重金属含量符合农用泥质、园林绿化用泥质以及土地改良用泥质标准要求。污泥炭中总养分含量为1.94%,低于园林绿化用泥质及农用泥质标准要求,优于土地改良用泥质要求。该工艺处理的污泥炭均可回归土壤,一方面实现了污泥最终消纳,另一方面实现了养分元素回收利用。

关键词: 市政污泥; 碳化; 清洁性; 能耗; 养分元素

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)21-0108-04

Test Run of Sewage Sludge Carbonization System and Feasibility Analysis of Sludge Carbon Land Use

LU Tao, ZHU Bao-fei, SHI Chun-mei, LIU Dan, CHI Bao-hua, ZHONG Wei-cong
(Xi'an Aerospace Yuan Dongli Engineering Co. Ltd., Xi'an 710100, China)

Abstract: A sewage sludge carbonization system and operational process was introduced. The operation energy consumption and the emission of pollutants were analyzed. Based on the investigation of sewage sludge carbon properties, the feasibility of sewage sludge carbon land use was discussed. The moisture content of sewage sludge feedstock was 80%, and its low calorific value was 3 871.5 kJ/kg. The average heat energy consumption of the system was 2 728.34 MJ/t, in which the syngas derived from sewage sludge was 287.52 MJ/t, the external heat quantity required was 2 440.82 MJ/t, and the power consumption was 79.2 kW·h/t. The exhaust gas reached the national standard through the dedusting system and the washing system. The heavy metals contents of sewage sludge carbon reached the control standards for agriculture use, afforestation in gardens or forest, and land improvement. The total nutrients content of the sewage sludge carbon was 1.94%, which was below the control standards for agriculture use, afforestation in gardens or forest, but was beyond the control standards for land improvement. Therefore, the sewage sludge carbon is suitable for land use and nutrients recycling.

Key words: sewage sludge; carbonization; cleanliness; energy consumption; nutrient

《“十二五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》明确规定:至“十二五”末期,重点城市污泥无害化处理处置率达到80%,其他城市达到

70%,县城及重点镇达到30%。然而,目前这一目标仍未实现,如何在当前经济、技术条件下无害化处理处置市政污泥是我国各级政府和企事业单位共同

面对的社会问题。在自然资源逐渐匮乏的时代背景下,进一步实现市政污泥的资源化、能源化利用是对市政污泥处理处置事业新的要求。

污泥炭是污泥碳化处理得到的固态产物,研究表明污泥炭具有改良土壤和碳封存作用^[1~3]。另外,污泥碳化过程中产生的可燃气可用于污泥碳化过程自身,以清洁的方式实现了污泥处理处置的资源化与能源化。因此,污泥碳化是当前最有前途的污泥处理处置技术之一。污泥碳化技术在日本已得到了广泛应用,国内已有数家企业引进了日本碳化技术,同时我国的科研机构也自主研发了各自污泥碳化技术,并建立了相关示范工程。然而,由于设备稳定性以及运行成本较高等问题,目前污泥碳化技术仍未实现大规模应用。

笔者介绍了规模为10 t/d的污泥碳化系统组成及运行工艺,对该系统的运行能耗及清洁性进行了深入讨论,并在考察污泥炭相关性质的基础上分析了污泥炭回归土壤的可行性。

1 污泥碳化中试系统

污泥碳化中试系统设计处理量为10 t/d。该系统主要包括:污泥储仓、干化炉、碳化炉、冷凝器、旋风除尘器、二次燃烧炉、废热锅炉、洗涤塔,以及螺旋输送机、风机、烟囱等,核心设备为干化炉和碳化炉(见图1)。

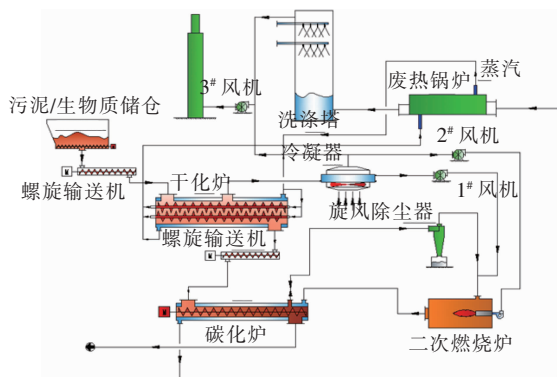


图1 污泥碳化系统示意

Fig.1 Schematic diagram of sewage sludge carbonization system

干化炉为套筒式空心桨叶蒸汽干化炉。该干化炉外筒为饱和蒸汽保温套筒,空心轴及桨叶内部为158℃饱和水蒸气,通过相变释放热量,保证整个干化过程较高的水蒸发驱动力,通过桨叶的不断搅拌翻滚,增加了污泥的蒸发表面积,保证湿污泥的内外

双侧加热,实现了污泥快速、高效干化。碳化炉作为整套污泥处理流程的主体设备,其采用套筒式回转窑结构。高温烟气首先进入外筒,烟气通过外筒与内筒干污泥换热后,干污泥被碳化,被冷却的烟气从套筒另一侧排出,污泥炭被输送至外套筒底部的出料口,并由螺旋输送机送出炉外。与普通的污泥碳化装置相比,其独特的套筒式回转窑结构使得加热更快速、均匀,从而提高了碳化效率。

2 污泥碳化工工艺

该系统污泥碳化工工艺主要包括湿污泥干化过程、干污泥碳化过程、可燃气燃烧过程、余热利用过程、湿臭气冷凝过程、烟气(可燃气)处理过程。由于试验运行所用污泥热值较低,难以维持自身运行,需要额外添加生物质作为补充能源,用于自身系统运行。

饱和蒸汽持续为湿污泥干燥提供热量。为提高干燥效率,湿污泥与生物质以一定配比混合进入干化炉协同干燥。干化过程释放的湿臭气经空气冷凝过程分为冷凝水和干臭气,冷凝水返回污水处理厂,干臭气进入二燃室。湿臭气冷凝过程中同时实现空气预热,作为二燃室配风。干污泥和生物质在碳化炉中依次协同发生水分蒸发、挥发分析出等过程,形成由CO、H₂、CH₄、C₂H₆、H₂O、CO₂等多种成分组成的可燃气。剩余物发生缩聚、聚合等反应最终获得具有多种用途的污泥炭。

碳化炉中产生的可燃气首先经过旋风除尘器净化,然后在二燃室中燃烧形成(640±10)℃的高温烟气为碳化过程提供热量。高温烟气在起炉阶段由柴油燃烧提供,系统稳定运行时,由碳化炉中产生的可燃气在二燃室中燃烧供热。高温烟气在碳化炉中释放热量后温度降低为(540±10)℃,进入余热锅炉继续释放热量生成158℃的饱和蒸汽,为污泥干化提供热量。烟气最后在洗涤塔与雾化洗涤液逆向混合,发生中和反应,脱除酸性气体后,进入烟囱达标排放。

3 试验原料

市政污泥取自西安市户县某市政污水处理厂脱水车间,污水处理工艺为改良型氧化沟工艺,污泥处置方式为卫生填埋。

收到基污泥含水率为78.5%,干基有机质含量为15.94%,低位热值为3 871.5 kJ/kg,干基污泥的C、H、N、S、O含量分别为11.22%、2.21%、1.51%、

0.29%、12.63%,挥发分、碳、灰分含量分别为26.51%、1.35%、72.14%。

4 运行能耗分析

运行能耗高导致处理成本居高不下是污泥碳化技术在我国难以推广的原因之一。运行能耗分为热能消耗和电能消耗。污泥干化碳化过程的热能消耗分为水分蒸发能耗、污泥加热能耗、污泥有机质分解能耗以及为此而发生的热损失。而水分蒸发能耗、污泥加热能耗、污泥有机质分解能耗为固定能耗,仅与污泥自身的物理化学特性有关。因此,降低污泥干化碳化过程运行能耗主要为提高干化碳化热效率,降低热损失。

对于试验系统,可燃气体在二燃室中燃烧产生的高温烟气首先用于污泥碳化供热,释放热量后进入余热锅炉,将热量传递给水蒸气后用于污泥干燥。从热利用流程上分析,高温烟气经过了碳化炉、余热锅炉两级梯级利用,通过优化设计增加碳化炉、余热锅炉的换热面积,增强保温措施,提高系统热效率。对于污泥蒸汽干燥,而非烟气干燥,主要基于以下原因考虑:相比于烟气干燥,蒸汽干燥的换热面积显著降低,热介质流动阻力也显著降低,进而降低了电能消耗。

在系统总能耗一定的基础上,可以采用生物质、燃煤而非天然气、柴油作为补充能源,以降低运行成本。按照该系统运行数据测算,平均热能消耗为2 728.34 MJ/t,其中污泥自身可提供能耗287.52 MJ/t,外部输入能耗为2 440.82 MJ/t(通过补充0.39 t/t生物质实现;生物质是含水率为15%的木糠,平均干基热值约为16.8 MJ/kg),电能消耗为79.2 kW·h/t。

5 清洁性分析

污泥本身为一种固体废弃物,具有一定污染性,因此在污泥处置过程中需要特别关注处置过程的清洁性,避免二次污染。该工艺从原理上即为一种清洁性污泥处置方式:首先,污泥干化过程为间壁式蒸汽干化,相比于接触式干化,干燥臭气量显著降低,经冷凝后,冷凝水排入污水厂处理,剩余臭气进入二燃室,在高温下完成对污染物的焚毁处理;其次,污泥碳化过程为还原性气氛,减少了 SO_2 、 NO_x 、二噁英污染物的产生;再者,可燃气体燃烧过程为气相燃烧,同样减少了粉尘、 NO_x 、二噁英污染物的生成。针对污泥自身热值较低,添加生物质或煤炭等辅助能源,

由于生物质或煤炭与污泥发生相同的还原性气氛碳化,可燃气体相燃烧,同样具有良好的清洁性。因此,经低成本的除尘、碱洗处理,即可实现烟气达标排放,实现污泥清洁性处置。该系统排放烟气中污染物含量如下:烟尘为0.01 mg/m³、烟气黑度为1级格林曼黑度、CO为30 mg/m³、 NO_x 为16.9 mg/m³、 SO_2 为37.3 mg/m³、HCl为4.2 mg/m³、汞为0.003 4 mg/m³、镉为0.002 mg/m³、铅为0.02 mg/m³,均符合《城镇污水处理厂污泥处置 单独焚烧用泥质》(GB/T 24602—2009)中污泥焚烧炉大气污染物排放标准。

6 污泥炭性质及回归土壤可行性分析

市政污泥含有大量有机质、养分元素,土地利用一直是市政污泥资源化利用的重要方向之一^[4]。厌氧消化、堆肥、碳化等污泥处置过程的产品(产物)其最终用途仍是回归土壤。而污泥较高的含水率以及病菌、虫卵、重金属等有毒有害污染物的存在,限制了正常的污泥回归土壤。为此,我国先后制定了《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质》(CJ/T 309—2009)、《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(CJ 248—2007)和《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》(CJ/T 291—2008),用以规范污泥回归土壤方面的应用。

对于污泥炭,由于经过了高温处理,几乎不存在水分,病菌、虫卵也得到了彻底的灭活处理。污泥、污泥炭中重金属含量及相关标准限值见表1。可以看出,污泥中所有重金属含量均符合B类农用泥质标准、园林绿化用泥质标准以及土地改良用泥质标准,但Cu、Hg以及Ni含量超过了A类农用泥质标准。经生物质调质及碳化处理后,Pb、Cu、Zn、Cd、Cr、Hg、Ni、As含量分别降低了49.72%、50.20%、47.21%、50.99%、54.14%、54.32%、57.76%、56.41%,符合各类农用泥质、园林绿化用泥质和土地改良用泥质标准要求。经碳化处理后,污泥炭中养分元素含量有所降低,氮、磷、钾含量分别为6.61、2.51、5.83 g/kg,但仍具有一定肥效,水解氮、有效磷和速效钾含量分别为484.2、2.89、1 277.16 mg/kg。污泥炭中总养分含量为1.94%,虽低于园林绿化泥质及农用泥质标准要求,但优于土地改良用泥质要求。因此该工艺处理的污泥炭均可回归土壤,一方面实现污泥最终消纳,另一方面实现养分元素回收利用。

表 1 污泥、污泥炭中重金属含量及相关标准限值

Tab.1 Contents and criterion limits of heavy metals in sewage sludge carbon mg · kg⁻¹

项 目		Pb	Cu	Zn	Cd	Cr	Hg	Ni	As
污泥		157.46	625.715	356.877	2.065	320.231	4.217	147.789	7.241
污泥炭		79.171	311.609	188.391	1.012	146.873	1.926	62.433	3.156
农用泥质	A 级	300	500	1 500	3	500	3	100	30
	B 级	1 000	1 000	3 000	15	1 000	15	200	75
园林绿化用泥质	酸性	300	800	2 000	5	600	5	100	75
	中碱性	1 000	1 500	4 000	20	1 000	15	200	75
土地改良用泥质	酸性	300	800	2 000	5	600	5	100	75
	中碱性	1 000	1 500	4 000	20	1 000	15	200	75

7 结 论

以含水率约为 80%、干基低位热值为 3 871.5 kJ/kg 的市政污泥为原料,该污泥碳化系统平均热能消耗为 2 728.34 MJ/t,其中污泥自身提供能耗 287.52 MJ/t,外部输入能耗为 2 440.82 MJ/t,电能消耗为 79.2 kW · h/t。烟气经除尘、碱洗处理,即可以实现达标排放,实现污泥清洁性处置。经生物物质调质及碳化处理后,污泥炭中 Pb、Cu、Zn、Cd、Cr、Hg、Ni、As 含量分别降低了 49.72%、50.20%、47.21%、50.99%、54.14%、54.32%、57.76%、56.41%,符合各类农用泥质、园林绿化用泥质以及土地改良用泥质标准要求。污泥炭中养分元素含量有所降低,氮、磷、钾含量分别为 6.61、2.51、5.83 g/kg,但仍具有一定肥效,水解氮、有效磷和速效钾含量分别为 484.2、2.89、1 277.16 mg/kg。污泥炭中总养分含量为 1.94%,虽低于园林绿化用泥质及农用泥质标准要求,但优于土地改良用泥质要求。该工艺处理的污泥炭均可回归土壤,一方面实现了污泥最终消纳,另一方面也实现了养分元素回收利用。

参考文献:

[1] 张千丰,王光华. 生物炭理化性质及对土壤改良效果的研究进展[J]. 土壤与作物,2012,1(4):219-226.
Zhang Qianfeng, Wang Guanghua. Research progress of physiochemical properties of biochar and its effects as soil amendments[J]. Soil and Crop,2012,1(4):219-226 (in Chinese).
[2] Yuan H R, Lu T, Wang Y Z, et al. Sewage sludge biochar: Nutrient composition and its effect on the leaching of soil nutrients[J]. Geoderma,2016,267:17-23.

[3] 鲁涛,袁浩然,王亚琢,等. 热解温度对污泥生物炭稳定性及养分淋溶特性影响[J]. 化工学报,2015,66(7):2664-2669.
Lu Tao, Yuan Haoran, Wang Yazhuo, et al. Influence of pyrolysis temperature on biochar stability and leaching properties of nutrients contained in biochar[J]. CIESC Journal,2015,66(7):2664-2669(in Chinese).
[4] 郭广慧,杨军,陈同斌,等. 中国城市污泥的有机质和养分含量及其变化趋势[J]. 中国给水排水,2009,25(13):120-121.
Guo Guanghui, Yang Jun, Chen Tongbin, et al. Concentrations and variation of organic matter and nutrients in municipal sludge of China[J]. China Water & Wastewater, 2009,25(13):120-121(in Chinese).



作者简介:鲁涛(1984-), 男, 陕西富平人, 博士, 工程师, 主要从事市政污泥、含油污泥以及生活垃圾等固体废弃物处置技术研发工作。

E-mail:casclutao@126.com

收稿日期:2018-01-12