

动态传导式污泥干燥及冷凝液特性研究

张馨予^{1*}, 赵长龙¹, 张继军^{2,3}

(1. 河北工业大学化工学院, 天津 300130;

2. 河北工业大学海水资源高效利用化工技术教育部工程研究中心, 天津 300130;

3. 石家庄工大科技开发有限公司河北省蒸发结晶及干燥工程技术研究中心, 河北 石家庄 050031)

摘要:搭建了污泥动态传导式干化装置,通过模拟污泥在间歇式干燥机中的运动状态,直观地记录干燥过程中污泥特性,并对不同温度下污泥特性曲线、残余固体的燃烧热值(Q)和挥发固分(VS)及冷凝液的有机物含量(TOC)进行分析。结果表明,温度对污泥干燥有促进作用,随着温度的升高,恒速阶段干燥速率增大,脱水水分减少。温度在125℃时,污泥干燥速率降低,干化处理缓慢,污泥处理量受限。在205℃以上高温区,干燥速率提升明显,污泥内脂肪类等有机成分及纤维素、木质素等不可降解物质因高温分解而释放,TOC浓度升高,固体挥发分减少,干污泥热值降低明显,不宜采用。综合考虑干燥效率和干化后污泥再利用,动态传导式污泥干燥的最佳区域应在145~185℃的恒速阶段。干燥冷凝水TOC浓度最小值为220 mg/L,属于高浓度有机废水,需处理后排放。污泥残余固份热值较高,可作为热源性物质加以利用。

关键词:污泥动态干燥;燃烧热值;恒速阶段;冷凝液;有机物

中图分类号:X705

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2017)03-0175-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.03.042

Study on characteristics of dynamic conductive drying of sludge and condensate

ZHANG Xin-yu^{1*}, ZHAO Chang-long¹, ZHANG Ji-jun^{2,3}

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Engineering Research Center of Seawater Utilization Technology Ministry of Education, Tianjin 300130, China;

3. Shijiazhuang University Chemical Science and Technology Development Co., Ltd., Evaporation Crystallization and Drying Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: A dynamic conductive drying device is built in this study. The characteristics of the sludge in the drying process are recorded by simulating the motion state of the sludge in the wall dryer. The influences of temperatures on the sludge characteristic, calorific heating (Q) and volatile solid content (VS) of the residual solid and total organic carbon (TOC) of the condensate are studied. The results show that the drying temperature can promote the sludge drying process. With the increase of temperature, the drying rate is increased and the removal of water is decreased. When the temperature is at 125℃, the sludge drying rate is reduced, the drying treatment is slow and the sludge treatment capacity is limited. When the drying temperature is higher than 205℃, the drying rate is significantly improved. The organic components in sludge, including fats, cellulose, lignin and other non-degradable substances, are released due to pyrolysis. The amount of volatile organic solids and calorific heating value are significantly changed. Therefore, the sludge drying should choose low temperature to ensure the production as far as possible. The best sludge drying stage is the constant speed phase at the temperature of 145-185℃. The TOC of the condensate is at least 220 mg/L. Meanwhile, the condensate belongs to highly concentrated organic wastewater and must be treated before emissions. The residual solid of sludge has higher calorific heating, which can be utilized as a heat source material.

Key words: dynamic sludge drying; calorific heating; constant speed phase; condensate; organics

未经处理的污泥含水量大,结构松散,体积庞大,不便于运输和资源处理,其中大量的有机物、重金属、无机物等复杂含量对环境的危害极大,需根据污泥的特性进行处理。污泥热干化法作为一种污泥减量化、资源化的有效方法,其基本方式包括直接接触式热干化法和间接接触式热干化法^[1],其中间接式热干化因物料与干燥介质不直接接触,避免了干燥介质对物料的二次污染,易于控制而成为应用的主流。污泥的种类繁多,对污泥的干燥特性的深入研究可辅助研究者对干燥设备的设计提供便利,提

高干燥机的性能。

现有的研究主要是静态条件下进行的,而对污泥实际动态干燥特性的研究很少,多以颗粒大小^[2]及不同形状^[3]对污泥的干燥特性差异性进行分析,或利用薄层干燥模型对污泥的干化曲线进行描述^[4]。本文中打破以往常规,以动态形式模拟污泥在旋转间歇式干燥系统中的运动,收集不同温度下干燥过程中产生的冷凝液,并对干燥残渣变化规律进行分析,以探究污泥的动态干燥特性,为间歇式干燥工艺的研究提供理论基础。

1 实验装置和方法

1.1 实验材料

实验中所用污泥来自石家庄污水处理厂,污泥呈黑色黏稠状,柔软,表面易氧化而变为灰绿色,有恶臭气味。污泥成分见表 1。

表 1 污泥干基的工业分析和元素分析 %

工业分析				元素分析				
Mad	Ad	Vd	FCd	Cd	Hd	Od	Nd	Sd
85.42	38.91	56.43	4.66	26.43	5.72	12.15	0.16	0.43

1.2 实验装置

实验装置如图 1 所示。整套装置在微负压密闭下进行,对尾气可有效回收。称取配有定量钢珠的污泥置于油浴烧瓶中,烧瓶在旋转蒸发器的带动下在恒温油浴锅内运动,污泥随烧瓶旋转均匀受热升温,与静态实验相比,增大了污泥的传热面,使污泥更有效地干化。干燥产生的蒸汽升至冷凝系统冷凝为水,滴落至冷凝水收集瓶中。气泵与冷凝器顶部相连,抽除未冷凝完全的多余尾气,通入尾气回收瓶进行尾气处理,以促进系统循环进行。

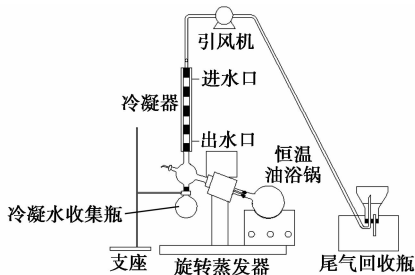


图 1 传导式污泥动态干燥装置

1.3 实验方法

按图 1 装置图搭建好整个实验系统。称取冷凝

液收集瓶和油浴瓶的净重,记为 G_1 、 G_2 。用自制针筒打取 70 g 污泥样品置油浴烧瓶中,在打取过程中,分别在污泥底部、中部及顶部铺设 2.38 mm 和 3.00 mm 的小钢珠共 50 余颗。小钢珠具有很好的传热性,在干燥过程中可起到搅拌、刮壁的作用。称取完成后,连接在旋转蒸发器上,浸浴在油浴锅的适当位置,固定转速为 20 r/min,开启气泵抽空。调整好装置,做气密性检验。

分别在 125、145、165、185、205、225℃ 温度下进行污泥油浴干燥,在冷凝液收集瓶中出现第一滴冷凝液时开始计时,每 5 ~ 10 min 记录冷凝液量,直至增加量在 30 min 内减为 1 滴为止。关闭恒温油浴锅,待冷却后关闭旋转电机和气泵,称取污泥剩余量和冷凝液质量。记各停留时间下的冷凝液及冷凝液收集瓶质量为 L_i ,按式(1)计算污泥的干基含水率:

$$X = [l_0 - (L_i - G_1)] / M_1 \quad (1)$$

$$M_1 = M_0 - l_0 \quad (2)$$

式中, X 为污泥的干基含水率,%; l_0 为实验污泥的初始含水量,kg; M_1 为实验污泥的干重,kg; M_0 为实验污泥的初重,kg。

2 实验过程中污泥形态及其变化情况

根据实验状况,污泥在加热阶段初期,表面返潮,处于糊状,达到泡点后,气泡冒出剧烈,发生自由水的蒸发,有大量冷凝水析出;随着干燥的进行,污泥表面水泡逐渐减少,呈黏稠状附着在烧瓶壁面,表面有少许孔隙,此时发生间隙水的蒸发,冷凝水量增长均匀,如图 2;污泥干燥进入降速阶段时,近壁污泥表面变干脱落,小钢珠随烧瓶旋转刮壁面,此时发生毛细水和结合水的蒸发,污泥呈球状,表面坚硬,在烧瓶中翻滚,冷凝水产出缓慢,如图 3;在干燥末期,如图 4,球状污泥收缩产生裂纹,破裂成若干

(上接第 174 页)

[2] Arash Arami-Niya, Wan Mohd Ashri Wan Dauda, Farouq S Mjalli, et al. Production of microporous palm shell based activated carbon for methane adsorption; Modeling and optimization using response surface methodology[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2012, 90(6): 776 - 784.

[3] Ryckebosch E, Drouillon M, Vervaeren H. Techniques for transformation of biogas to biomethane[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(5): 1633 - 1645.

[4] Ofori-Boateng C, Kwofie E M. Water scrubbing: A better option for biogas purification for effective storage[J]. World Applied Sciences, 2009, 5: 122 - 125.

[5] Rasi S, Lantela J, Rintala J. Upgrading landfill gas using a high pressure water absorption process[J]. Fuel, 2014, 115: 539 -

543.

[6] Lantela J, Rasi S, Lehtinen J, et al. Landfill gas upgrading with pilot-scale water scrubber: Performance assessment with absorption water recycling[J]. Applied Energy, 2012, 92: 307 - 314.

[7] 韩德刚, 高执棣, 高盘良. 物理化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 113 - 114.

[8] 全国天然气标准化技术委员会. GB 18047—2000. 车用压缩天然气[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.

[9] 丁键, 杨祝红, 陆小华, 等. 二段式吸收塔强化水洗技术提纯沼气过程[N/OL]. 化工学报, (2016-07-20)[2016-08-30]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1946.TQ.20160720.1550.004.html>.

[10] 刘畅, 马春燕, 陆小华. 大中型沼气工程高压水洗提纯工艺的模拟[J]. 可再生能源, 2014, 32(7): 1028 - 1032. ■



图2 呈黏滞状贴于瓶壁

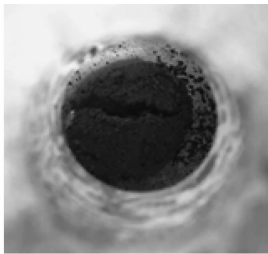


图3 近壁污泥脱落抱团

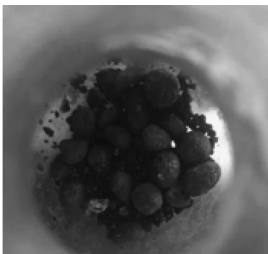


图4 破裂呈小球状

小球,冷凝水产出有一跳跃,后减为零。

3 实验结果与分析

3.1 干燥温度对污泥干燥特性的影响

由图5可知,随温度的升高,污泥含水率的下降速度加快。125℃相比其他温度干燥速率明显平缓,干燥到相同含水率所需时间长,污泥处理量受到限制,要达到预先工艺要求需要加大设备面积才能满足。185℃以上曲线干燥斜率大,干燥时间短,其中205℃与225℃具有类似的干燥曲线,降至相同含水

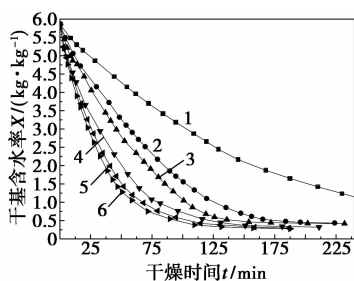


图5 不同温度下污泥含水率随时间的变化曲线

率所用时间接近。可见干燥温度的提高对干燥的进行有促进作用,但升至一定温度后,达到相同含水率的时间差将减小。高温所需热能比较高,耗能量大,对设备要求高,当缩短的干燥时间不足以补偿温度升高所增加的能耗,升温就显得没有意义。就干燥速率而言,应尽量采用较低温度干燥,使内部水分扩散速率与表面气化速率接近,污泥干燥温度选取在145~205℃比较适宜。

观察图6特性曲线可以看出,185℃以上温度相比于其他干燥温度,干燥速率相差较大。在污泥干燥的恒速阶段,主要受气化速率和载气状态的影响。干燥温度的升高,使得污泥干燥速率增大,脱除水分减少^[5]。由式(3)可知,这是因为高温使得传热温差变大,在相同的气化面A下,污泥热通量增大,促进了污泥表面水分的气化速率,使得干燥速度增快。当污泥内部水分扩散速率小于表面水分的气化速率,污泥干燥进入降速阶段^[6]。此阶段干燥温度越高,干燥速率曲线越陡,降速过程的速率变化越快。但在降速阶段,污泥耗能量大,干燥过程较难进行。由式(4)开尔文定律可知,污泥颗粒间水分越少,毛细半径越小,液面分压 P_2 越小,热介质推动水分扩散的推动力就越小,此阶段不适宜污泥干化的进行。所以污泥干燥应在满足产量的前提下,尽量选在恒速阶段脱水量大的温度区间,由图5、图6可知宜选在125~185℃。

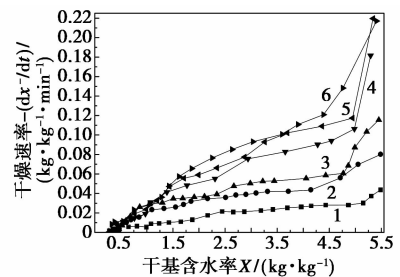


图6 不同温度下污泥的干燥速率曲线

$$\phi = KA\Delta T \quad (3)$$

$$RT\ln(p_2/p_1) = 2\gamma M\cos\theta/pr \quad (4)$$

式中, R 为气体常数; p_1 为饱和蒸汽压,Pa; p_2 为毛细液面蒸汽分压,Pa; γ 为液面张力,N; r 为毛细管半径,mm; M 为摩尔质量,g/mol。

3.2 冷凝液的特性分析

为研究温度对污泥特性的影响,对其冷凝液进行检测分析。

由图7可知,污泥冷凝水TOC浓度随干燥温度

的升高而增长,浓度最小值达到 220 mg/L,属于高浓度有机废水,需处理达标后才可排放。在 125 ~ 145℃ 和 165 ~ 205℃ 有 2 个明显跨越,这是因为脂肪族化合物等生物低分子可降解物质在低温阶段(125℃ 以下)已基本挥发完全,蛋白质、生物死细胞等高分子有机聚合物进一步溶水水解,发生脱羧反应^[7]。当温度达到 165 ~ 185℃ 时,促进了脂肪族等更多的有机成分的释放,导致冷凝液有机物含量升高^[8-9]。温度持续增长至 205℃ 时,纤维素、木质素等不可降解物质因高温分解挥发^[10]。因此,干燥温度的升高,对污泥中有机碳的分解有促进作用,高温干燥增加了污泥冷凝液的处理的难度,不宜采用。

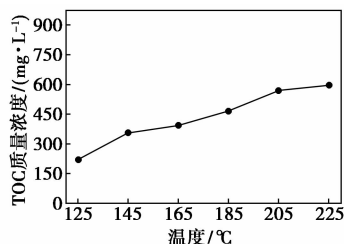


图 7 不同温度下 TOC 浓度变化

由图 8 可知,污泥剩余固分燃烧热值较高,具有很高的利用价值。燃烧热值随温度的变化与其固体挥发分具有相同趋势,即剩余固分中有机物的含量对其燃烧热值有一定的影响。与冷凝液中 TOC 浓度类似,其变化在 145 ~ 185℃ 减小缓慢,在 125 ~ 145℃ 及 185 ~ 205℃ 有明显降低现象。为获得高热值污泥,干燥温度不宜过高。结合前文污泥干燥特性的研究分析,可以认为,在满足生产的前提下,动态传导式污泥干燥温度应尽量采用较低温度干燥,宜选在 145 ~ 185℃ 的恒速阶段进行。

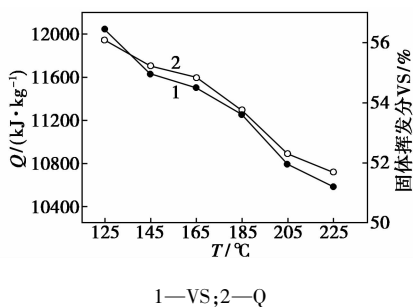


图 8 污泥剩余固份燃烧热值和 VS 变化情况

4 结论

(1) 温度对污泥干燥特性的影响明显,高温对污泥干燥有促进作用,温度越高,干燥速率越大。在 125℃ 干燥缓慢,设备干燥效率降低,污泥处理量受

限。205℃ 与 225℃ 具有类似干燥曲线,但高温所需热能大,设备要求高,实际生产中不易达到。就干燥速率而言,污泥干燥温度宜选在 145 ~ 185℃。

(2) 污泥干燥在降速阶段耗能量大,干燥过程推动力小,较难进行。污泥宜在恒速阶段进行水分的脱除,此阶段污泥干燥速率随温度的升高而加快,除去的水分随温度的升高而减少。温度在 125 ~ 185℃ 时,恒速阶段时间长,水分脱除量大。

(3) 污泥剩余固分具有较高的燃烧热值,可将其作为热源性物质加以利用。温度对污泥中有机碳的分解有促进作用。但高温(205℃ 以上)干燥会使污泥冷凝液处理难度增加,且残余固分热值相对降低,不宜采用。

(4) 污泥干燥过程中产生的冷凝水有机物浓度高,最小值为 220 mg/L,属于有机废水,需处理后排放。

(5) 污泥干燥应在满足生产的前提下,尽量采用较低温度干燥,使内部水分扩散速率与表面气化速率接近,增大恒速干燥阶段蒸发水量,有助于降低能耗,降低污泥表面升温导致有机物挥发的风险。污泥间壁干燥最佳阶段宜在 145 ~ 185℃ 下的恒速阶段进行。

参考文献

- [1] 朱晓婉,邓文义,王飞,等. 桨叶式干燥机热干燥处理制革污泥的排放特性[J]. 化工学报,2008,59(8):2083-2088.
- [2] 马学文,翁焕新. 温度与颗粒大小对污泥干燥特性的影响[J]. 浙江大学学报:工学版,2009,43(9):1661-1666.
- [3] 李爱民,曲艳丽,杨子贤,等. 污水污泥干燥过程中表观形态变化及水分析出特性[J]. 化工学报,2004,55(6):1011-1015.
- [4] 魏瑞军,余权恒. 污泥干燥特性及动力学模型分析[J]. 山东化工,2014,43(9):1-4.
- [5] Ruiz T, Wisniewski C. Correlation between dewatering and hydro-textural characteristics of sewage sludge during drying[J]. Separation and Purification Technology,2008,61(2):204-210.
- [6] 胡爱娟,路春美,王迎亚,等. 加热条件下含湿多孔介质中液体分布及机理[J]. 工程热物理学报,2016,37(7):1544-1548.
- [7] 姜瑞勋. 污泥低温薄层干燥及污染物析出特性研究[D]. 大连:大连理工大学,2008.
- [8] Conesa J A, Marcilla A, Moral R, et al. Evolution of gases in the primary pyrolysis of different sewage sludges[J]. Thermochemical Acta,1998,313(1):63-73.
- [9] 邓明佳,罗辉,张婧赢,等. 污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究[J]. 环境科学,2014,35(8):2897-2902.
- [10] Werther J, Ogada T. Sewage sludge combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science,1999,25(1):55-1. ■