

述评与讨论

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.06.001

剩余污泥低温干化热源首选污水厂出水余温热能

郝晓地, 申展, 李季, 李爽

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 中-荷未来污水处理
技术研发中心, 北京 100044)

摘要: 污水处理剩余污泥干化焚烧已被确认为污泥处理、处置的终极手段,也是正在实践中的工程应用趋势。但是,干化热源选择对能源消耗特别是与之相应的碳排放至关重要。除非有高温余热可以利用,否则,高温干化不具可持续性。在此情形下,污泥低温干化已成为近年来国内外普遍关注的热点,特别是基于清洁能源的低温干化技术。为此,太阳能、微波源、空气源、地热源、污水源等低温干化技术受到广泛关注。相形之下,污水处理厂的出水余温热能则是一种易得而又未得到重视的低品位能源。匡算表明,水源热泵交换4℃温差所产生的热能(~60℃热水)便是污泥低温干化所需能量的3倍之多,不仅可以完全满足干化需求,而且还可助力污水处理厂实现碳中和运行。因此,污水厂出水余温热能分散式干化、集中式焚烧电热转化应该成为今后污泥干化焚烧的目标与方向。

关键词: 剩余污泥; 含水率; 低温干化; 污泥焚烧; 余温热能; 水源热泵

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)06-0001-08

Low-temperature Sludge Drying: Priority to Thermal Energy in Effluent

HAO Xiao-di, SHEN Zhan, LI Ji, LI Shuang

(Sino-Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment < Ministry of Education >, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Sludge drying and incineration have been identified as an ultimate approach to treating and disposing excess sludge from wastewater treatment, which is also a technical trend in practice. However, choosing heat sources is a decisive factor on energy consumption and associated carbon emissions. Except for economically available high-temperature source, high-temperature sludge drying is unsustainable. Under the circumstance, low-temperature sludge drying has been become a research topic recently, especially with cleaner energy. In fact, renewable heat sources, such as solar energy, microwave energy, air-source heat, geothermal heat, and wastewater source heat, are gaining more and more attentions to. Among them, thermal energy extracted from effluent in wastewater treatment plants (WWTPs) is a kind of low-grade heat, which has been easily available but neglected chronically. The previous calculated results reveal that heat exchanged from effluent with 4℃ could offer 3 times higher thermal energy (about 60℃ hot water) needed of sludge drying, which could not only meet the need of

drying energy but also achieve carbon-neutral operations of WWTPs. Thus, decentralized low-temperature sludge drying with thermal energy and centralized sludge incineration for combined heat and power (CHP) would become a developing goal for sludge treatment and disposal.

Key words: excess sludge; moisture content; low-temperature drying; sludge incineration; thermal energy; water source heat pump

城镇化快速发展伴随着污水处理以及剩余污泥产量与日俱增。数据显示,至2020年我国剩余污泥产量已突破 $6\,500\times 10^4$ t/a(以含水率80%计)^[1]。传统填埋对大中城市而言已“无地自容”;堆肥返田理论上成立,但因现实肥效问题而致农民普遍不愿使用;厌氧消化固然可以使有机质转化成甲烷(CH_4),但投资与能效似乎并不成比例,况且消化后污泥仍需进一步处理处置,再者,有机质转化为 CH_4 是一种不可持续的熵增过程^[2]。鉴于此,污泥剥离有价值的有机质(PHA、EPS/ALE)后再干化焚烧应该是终极处置方式^[2-3]。欧洲国家污泥处理处置发展历程显示,焚烧已逐渐开始占据上风,目前瑞士(100%)、荷兰(87%)、比利时(76%)、德国(74.1%)、奥地利(54%)、土耳其(49%)等国焚烧占比已超过欧洲平均值(30.7%)^[4]。

污泥焚烧效率取决于污泥有机质含量及其含水率。有机质少而含水率高便需补充大量燃料助燃,从而造成额外碳排放,不利于低碳社会形成。为达到污泥自持燃烧的目的,需要根据污泥有机质含量来制定污泥脱水率目标。研究表明,要达到自持燃烧,污泥含水率大体上与其有机质含量相对应,即,有机质含量多少,脱水后应达到的污泥含水率基本上就是多少^[5]。因此,重力浓缩和机械脱水难以将原污泥99%含水率降至污泥自持燃烧所需含水率,需要在污泥机械脱水(含水率80%)的基础上继续实施深度脱水或干化技术。

污泥深度脱水技术虽然可以一步到位实现自持焚烧所需含水率,但对设备与预处理要求较高,需要化学或加热调节,导致投资、运行成本、能耗、药耗、碳排放均较高;同时,也会改变污泥特性,降低污泥焚烧效率,所以一般很少直接采用^[6]。污泥高温干化最为常见,以利用电厂、锅炉等余热为主,无余热利用的高温干化受能耗及碳排放约束而不可持续。因此,污泥干化转向低温热源技术是未来发展趋势。目前,既有污泥低温干化技术最低热源

温度局限于80℃及以上,更低温度的干化研究和相关技术仍未受到关注。为此,有必要对污泥低温干化的相关原理、优势进行总结,特别是对超低温($\leq 60^\circ\text{C}$)干化清洁热源利用与干化效率提高等技术予以概述,由此预测未来污泥超低温干化的可行性。

1 干化原理与影响因素

污泥干化是进一步降低脱水污泥含水率(80%)的方法延伸,主要利用热媒与污泥进行热量交换,以破坏污泥絮体与细胞壁,实现外部水分和内部水分挥发,从而大幅降低污泥含水率。污泥干化脱水可分为4个阶段,取决于污泥所含水分与颗粒表面作用力的强弱,依次包括自由水、间隙水、毛细水和结合水去除。有研究通过反应动力学模拟对污泥低温(40~80℃)干化过程第一和第二降速阶段进行函数拟合,揭示了污泥干化过程含水率降低随干化速率变化的趋势,如图1所示^[7-8]。

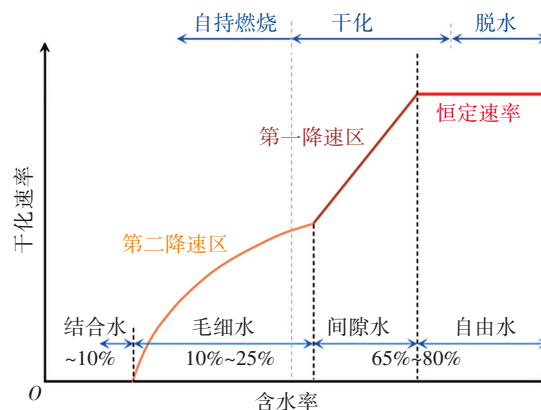


图1 污泥干化含水量降低随干化速率变化趋势

Fig.1 Reduced moisture content vs. dried rate during drying processes

污泥干化分为恒定速率阶段和下降速率阶段;恒定速率阶段主要去除自由水,因其与污泥颗粒表面作用力较弱,故含水率降低并不影响干化速率;随着水分与污泥颗粒表面作用力的增强,出现干化速率下降阶段,含水率也伴随着干化速率下降逐渐降低;其中,第一降速阶段以间隙水去除为主,第二

降速阶段主要去除毛细水。干化过程难以去除污泥结合水,这是由污泥自身特点决定的^[9]。

污泥干化影响因素可分为内部和外部两种。内部因素特指污泥自身性质,包括污泥泥质、导热系数、初始含水率、结构特征和形状与尺寸等^[8];外部因素包括导热介质种类、干化空气温度速度和设备压强等^[8]。有人验证了初始含水率对污泥干化速率的影响,通过计算一定温度范围(30~83℃)内的污泥干化导热系数,发现污泥初始含水率越高,导热系数越大,且随温度变化趋势越明显,这表明污泥在干化过程中热传导能力并非恒定,推测在经过某含水率节点时,污泥热传导能力会迅速下降,进而严重影响干化速率^[10]。也有研究表明,污泥铁含量和油脂含量会影响干化污泥成型,从而减小污泥比表面积,最终影响干化效率^[11]。通过对干化过程相关参数和变形动力学进行耦合分析,有人验证了污泥结构特征、收缩变形能力和干化速率密切相关;这表明通过观察污泥结构变化或许可以预测所处干化速率阶段,有利于实际干化中调整工艺参数。另有研究验证了污泥粒径是干化速率的主要限制因素,发现污泥颗粒分散均匀有助于提高污泥干化速率^[8]。

2 低温干化优势

传统污泥热干化常采用复合带式、流化床式、圆盘式和空心桨叶式等设备,以热空气、导热油和燃气热风炉等作为热传导介质,利用电能或化石燃料内能将传导介质加热至200℃以上^[8]。该技术相对成熟、应用广泛,但设备投资、能耗、运行费用较高,而且高温干化往往会导致干燥污泥破碎,颗粒粉尘伴随有机物挥发,导致污泥热值下降,降低后续焚烧与热电联产(CHP)效率,严重时还存在爆炸风险和尾气污染问题。

面对日益突出的能源危机和环境压力,污泥干化应转向低能耗成本方向发展。对此,低温(<80℃)甚至超低温(≤60℃)干化技术显示出其与众不同的优越性:

① 节能减排。传统污泥高温干化一般通过消耗大量电能和化石燃料以提供较高的干化温度(一般为180~250℃,最高可达700℃),能耗成本占其总运行成本的80%以上。低温干化一般利用太阳能、微波能、热泵热源(空气源、地热源、污水源)等低品位热源进行污泥干化,节能效益显著,运行

成本明显降低,可大量减少碳排放量^[12]。

② 安全性高。污泥高温热干化复杂的干燥工况会导致大量有机物和污泥粉尘挥发,当达到一定含氧量和燃点条件时,极易引发污泥自燃和粉尘爆炸事故^[13]。低温干化工艺则不会突破点火能量壁垒,可避免爆炸风险,提高设备安全性。

③ 生态环保。干化温度处于100~300℃时,污泥中挥发性有机物和恶臭气体(烷类、芳烃类、酯类、苯系物、NH₃、H₂S等)极易进入导热介质、冷凝水或大气环境,造成环境污染^[13]。低温干化可有效避免上述有毒、有害尾气释放,提高冷凝水出水水质,降低环境负效应,提高污泥干化可持续性。

④ 建设、运行成本低。高温干化系统必须配备严格的除尘、除臭、冷凝水处理系统^[14]。低温干化过程因其污泥粉尘、有害尾气产量较少,污泥自燃爆炸风险较低,冷凝水出水水质相对较高,可相应降低设备材质要求(热泵换热器和干化装置耐腐蚀性、防锈性)、尾气和冷凝水处理要求、系统密闭性、昂贵惰性气体(降低干化设备含氧量)和防爆检测设备使用,从而减少初期投资和后期运维成本。

3 低温干化热源

相对于传统的高温干化,污泥低温干化主要缺陷在于干化效率较低。虽然可以相对灵活地结合各类热源来满足不同地区和资源条件的污泥干化需求,但是,只有结合清洁或低碳热源才能显示低温干化在应用方面的优势。目前,太阳能、微波能、热泵热源等相对清洁环保的干化热源(见图2)正逐步获得关注。



Fig.2 Heat sources for low-temperature sludge drying

3.1 太阳能

太阳能是自然清洁能源,工程常采用干化床和干化温室将污泥含水率从85%降至5%~30%^[15]。其中,温室形式的干化效率较高,场地构建和日常维护费用相对也较低。但是,不同地理位置和季节气候(影响太阳辐射强度和空气温度)均会限制太阳能的干化效率,阻碍其广泛应用。因此,太阳能干化更适于气候、温度、光照适宜或对于干化目标含水率要求不严苛的地区^[15]。希腊已有太阳能污泥干化成功案例,它验证了太阳能干化在气候温暖地区具有较好的应用前景^[16]。但因太阳能干化效率较低,必须辅以额外能源供应系统方可缩短污泥干化时间^[17]。

3.2 微波热源

微波干化是一种新兴的污泥干化技术,其实质是将电磁能转化为污泥内能蒸发水分,从而达到干化污泥的目的。污泥微波干化原理如图3所示^[18],在不同的微波波长和频率工况下,污泥极性分子(如水分子)产生反作用力(如弹力、内摩擦力和分子作用力)以抵抗变化磁场的偶极矩作用,导致分子内能上升,从而使水分逐渐蒸发,实现污泥干化目的。

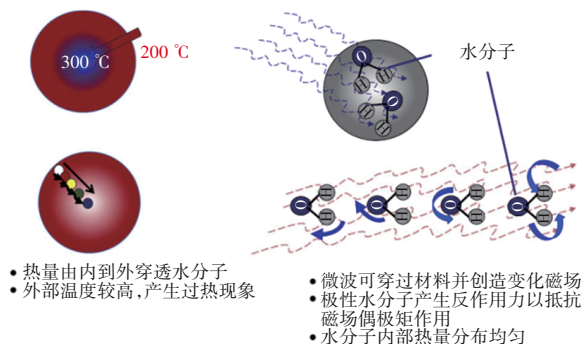


图3 微波干化原理

Fig.3 Principles of microwave sludge drying

微波干化具有以下独特优势:①干化效率高。电磁波可穿透污泥颗粒,定向加热极性水分子、提高污泥内部水分子通量,从而加快污泥干化速率^[19]。②碳排放因子低。微波可将电磁辐射能定向转化为水分子内能,减少热能耗散,提高能源利用效率,属于低碳技术^[20]。③设备启停响应速度更快。微波干化可通过控制电磁场启停和强度实现干化条件改变,且无需预热,可减少余热浪费^[20]。④设备损耗小。微波辐射不影响非极性材料制备

的干化设备主体,可减少非核心干化组件的能源损耗。⑤工艺臭味少。微波可杀灭污泥中的大多数致病菌,减少有毒有害气体排放^[21]。

简言之,污泥微波干化技术优势独特。但是,目前实现其广泛的工程应用仍存在技术瓶颈,微波功率升级和电磁能-内能转化效率提高应是未来重点研究方向^[21]。

3.3 热泵热源

热泵技术的发展拓展了低品位热源与污泥低温干化相结合的应用前景。自20世纪70年代以来,欧、美、日等国针对热泵干化技术开展了大量研究,我国于80年代引入并改进了该技术。因热源干化温度较低(接近自然干化),所以早期多用于木材干燥。近年来该技术又逐渐发展应用于食品和农副产品干燥,获得了较好的经济效益。目前也有部分研究将其应用于污泥处理、处置,利用热泵低品位热源干化污泥,可进一步进行焚烧及热电联产。根据热泵热源不同,可分为空气源热泵、地热泵和水源热泵等。

3.3.1 空气热源

空气源热泵是利用逆卡诺循环原理回收空气中的低品位热能,从而将低温空气转化为干热空气。实际工程中常将空气热源用于食品、木材、烟草等行业进行物料干燥,也有研究尝试将其用于污泥低温干化。常用热泵干化系统是以蒸发器和压缩机作为核心蒸发/加热组件,搭配膨胀阀、循环风机和干燥室等干燥部件干化污泥^[12]。研究^[22]表明,以空气源热泵出风作为污泥干化热传导介质(温度约65~70℃),可将污泥含水率由80%降低至20%~40%。此研究还评价了3种污泥脱水形式(药剂深度脱水、热干化和空气源热泵干化)的效果和成本,表明空气源热泵可大幅减少化石燃料消耗,有效减少化学药剂使用量。

3.3.2 地热泵

地热能相对太阳能等几乎不存在供应间歇期,因此,在能量持续供应方面更具优势。根据温度不同,地热能可划分为高品位热能(>150℃)、中品位热能(100~150℃)和低品位热能(<100℃)。显然,高品位热源适合用于发电传输,不能发电的低品位热源可因地制宜就近实现冬季供暖、污泥干化等目的^[23]。

地热能更适合于偏远地区或海岛污水处理厂

的供热和污泥干化。众多远离内陆、土地面积有限且水体生态环境管理严苛的岛屿地区并不具备完善的供电设施,常常需要依靠柴油发电方式来满足其污水、污泥处理能源需求。在条件允许的情况下,地热开发可有效解决该问题^[23-24]。例如,意大利南部 Ischia 岛利用地热已经实现污水处理的能源自给自足目标,并完成了污泥原位干化处置,每年减少 682 t/a 碳排放;此外,还有约 30% 的地热盈余电能(高品位热源发电)向外输出,创造了额外经济收益^[23]。

3.3.3 污水余温热能

居家生活污水排出楼宇后具有比进入楼宇自来水更高的温度。水的比热大且容重高,单位体积的水降温 1℃理论上可释放出 1.16 kW/m³ 热量,远远高于空气热源(0.000 39 kW/m³ 空气)。因为目前城市集中式污水处理厂的普及率已经很高,所以在污水处理厂出水处实施集中热源提取最为经济有效,而且还可避免前端原位提取热量,造成冬季进水水温较低而影响污水生物处理效果^[25]。

研究^[25]表明,提取 4℃温差,1 m³ 出水理论上可产生 4.64 kW·h/m³ 电当量的热,水源热泵(COP=3.5)的实际转化热量仅为 1.77 kW·h/m³ (<80℃)。计算结果表明,我国剩余污泥(含水率 80%)干化至自持焚烧含水率(约 50%)所需热量为 0.61 kW·h/m³。这意味着污水余温热能不仅可提供污泥干化所需的全部热能,还存在相当盈余热量输出(>1 kW·h/m³),同时还可获得相应碳交易额来抵消自身碳排放,完全实现污水处理碳中和运行^[5,25]。如果实施分散式干化、集中式(邻避效应)焚烧,相当于将不能发电的低品位热能转化为可发电的高温热能(>800℃),

可进一步助力污水处理厂的碳中和运行,甚至使其化身为“能源工厂”^[5,25]。

3.4 综合评价

污泥低温干化并不存在技术瓶颈,关键在于热源选择,结合清洁能源使用则是低温干化的发展方向,否则,低温干化在效率、时间等方面难以比拟高温干化。太阳能和空气热源虽具有节能优势,但受限于污水处理厂面积和地域差别,难以满足全部能源需求;同时,受地区温度、气候和光照强度等环境条件影响,这两种热源应用稳定性不高,并不适用于大多数污水处理厂。微波干化能源转化效率较高,但目前广泛工业应用仍存在一些技术瓶颈,况且微波应用需要电能。地热源进行污泥低温干化具有良好潜力,但局限于某些特殊场景,很多时候需要“靠天吃饭”,并不具有普适性。尽管存在多种干化形式耦合的研究,如通过清洁能源为微波提供热源而实现污泥低温干化^[26],但这些研究和假设仅停留在初步阶段,还需进一步验证其现实应用的可能性和经济可行性。比较而言,污水余温热能潜力巨大,是一种名副其实的清洁能源,其经济性和生态性并存。利用污水余温热能进行污泥原位干化处理,一方面可以克服厂外热源输送导致的热能损耗,另一方面污泥干化后的大幅减量还可以减少污泥外运处理能耗和相应碳排放。

综合考虑污水处理厂的热源种类、有效场地使用面积、系统设备投资、原位干化优势和热泵技术效率等因素,对不同热源形式进行定性评价,结果汇总^[13,15,21-24]见表 1。可以看出,低品位余温热能干化在技术、经济方面具有明显优势,是理想的干化低温热源。

表 1 不同热源污泥低温干化技术定性评价

Tab.1 Qualitative evaluation of different heat source for low-temperature sludge drying

热 源	干化效率指标		能源/资源指标		经济/环境指标			其他
	含水率/%	干化时间	占地面积	能源消耗	运行费用	设备投资	环境影响	
太阳能	10~30	较长	大	低	低	较低	较低	气候影响程度很大
微波热源	<20	短	小	低	低	较高	较低	工程化应用存在技术瓶颈
空气热源	10~40	较长	小	低	低	较低	较低	维护费用较高
地热源	<10	一般	小	低	较低	较高	较低	地理局限严重
污水余温热能	<10	一般	小	低	低	较低	较低	笔者中试研究进行中
低温真空结合热泵	<15	较短	小	较高	高	高	较低	密闭性要求高
污泥低温射流技术	<30	较短	小	较高	较高	较高	较低	尾气处理严格,射流干燥阻力较大

4 低温干化效率

清洁热源可以解决低温干化热源问题,但低温干化设备投资和运行成本还取决于低温干化效率。显然,相对高温干化,低温干化效率势必降低,需要进一步提高干化效率,具体措施如下:

① 提取胞外聚合物(EPS)降低污泥持水能力

EPS是污泥絮体表面细胞分泌、溶出、裂解组成的大分子有机物集合体,其在絮体表面可形成稳定的网状结构捕捉大量水分,是影响污泥物理化学特性(如絮凝、沉淀、脱水性)的关键因素。根据分层理论和对外部剪切变化的敏感程度,不同结构EPS的含量、组分和亲疏水基团存在差异^[27]。提取EPS有助于破坏污泥絮体稳定的水合结构,促进胞内结合水释放;同时,对EPS关键组分(如多糖蛋白结构、氨基酸等)的破坏或提取可导致絮体亲水官能团失活,削弱EPS结合水的能力,从而改变污泥脱水性能,提高干化效率^[28]。

② 预处理/调理改变污泥物化特性

常规物理化学手段可对污泥进行有效调理^[29-30],通过中和污泥表面负电荷,降低絮体网络结构强度,可提高疏水性,进而提高污泥水分流失速率。然而,传统化学药剂效果不佳,且会增加污泥处理的间接碳排放与运行成本;部分无机药剂还会降低污泥有机质含量;新型高级调理技术(如Fenton氧化和铁基高级氧化处理等)也并非节能环保的应用技术^[28,31]。相反,众多研究表明,通过添加天然有机固废(如锯末屑、木屑、麦渣、稻壳生物炭等)可明显改善污泥脱水性能^[32-33]。这些物质可改变污泥流变特性,形成蓬松骨架结构和疏松多孔的干化水通道;同时,也会增强污泥疏水性,加速水分流失;而且添加有机固废还会增加污泥有机质含量,从而降低污泥干化自持焚烧目标含水率,减少干化所需时间。

简言之,一方面可考虑在污泥干化前提取EPS以改变污泥持水能力(这也将增加污泥资源化效益),另一方面可通过“低碳”预处理措施改变污泥理化特性,最终提高污泥低温干化效率。

5 结语

污泥干化焚烧已被确定为污泥处置及其资源化、能源化的终极选择,关键在于污泥脱水后干化方式的选择。高温干化除有可用余热的场景选择

外,自加热高温显然因能耗、碳排放较高并不可取。为此,低温干化技术应该被关注,特别是使用清洁能源的低温干化技术。在此方面,污水处理出水余温热能利用优势明显,是一种潜力巨大但仍未有效开发的清洁能源;水源热泵仅从4℃出水温差中转化的低温热能便可以提供污泥低温干化所需全部能量,而且在满足整个污水处理厂碳中和运行需要后仍有盈余热量输入社会。

因此,污水厂出水余温热能利用应该是污泥低温干化技术的发展方向。实践中,可在污水处理厂内利用出水余温热能实施分散式干化污泥,在邻避效应原则下采用集中式焚烧污泥。这种超低温干化后焚烧的方式相当于将所交换出的不能发电的低品位热能,通过焚烧间接转化为可以发电的高品位热能。另一方面,冬季污水厂出水余温热能交换还可以使出水温度接近受纳水体温度,实现生态排水目的。

参考文献:

- [1] 戴晓虎,张辰,章林伟,等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J]. 给水排水, 2021, 47(3): 1-5.
DAI Xiaohu, ZHANG Chen, ZHANG Linwei, *et al.* Thoughts on the development direction of sludge treatment and resource recovery under the background of carbon neutrality[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(3): 1-5 (in Chinese).
- [2] HAO X D, WU D Q, LI J, *et al.* Making waves: a sea change in treating wastewater—why thermodynamics supports resource recovery and recycling [J]. Water Research, 2022, 218: 118516.
- [3] HAO X D, LI J, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* Energy recovery from wastewater: heat over organics [J]. Water Research, 2019, 161: 74-77.
- [4] EUROSTAT. Sewage sludge production and disposal from urban wastewater (in dry substance (d. s.)) [EB/OL]. (2022-01-12) [2022-06-15]. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/ten00030>. 2017&2018.
- [5] 郝晓地,陈奇,李季,等. 污泥干化焚烧乃污泥处理/处置终极方式[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4): 35-42.
HAO Xiaodi, CHEN Qi, LI Ji, *et al.* Ultimate approach to handle excess sludge: incineration and drying [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 35-42 (in

- Chinese).
- [6] CAO B D, ZHANG T, ZHANG W J, *et al.* Enhanced technology based for sewage sludge deep dewatering: a critical review [J]. *Water Research*, 2021, 189: 116650.
- [7] 谢蕴江, 吴中华, 吴龙, 等. 城市污水处理厂污泥低温对流干燥动力学特性[J]. *天津科技大学学报*, 2012, 27(4): 52-56.
XIE Yunjiang, WU Zhonghua, WU Long, *et al.* Kinetic characteristics of low temperature convective drying of sludge from municipal sewage treatment plant [J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2012, 27(4): 52-56 (in Chinese).
- [8] BENNAMOUN L, ARLABOSSE P, LÉONARD A. Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 28: 29-43.
- [9] 李博. 污泥高效干化方法及干化焚烧系统的优化运行研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 5-8.
LI Bo. Study on Efficient Sludge Drying Method and Optimal Energy Efficiency of Sludge Drying-incineration Combined System[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 5-8 (in Chinese).
- [10] 王永川, 郑皎, 方静雨, 等. 污泥干化过程中导热系数的试验研究[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(3): 703-707.
WANG Yongchuan, ZHENG Jiao, FANG Jingyu, *et al.* Experimental study on thermal conductivity during sludge drying[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2015, 36(3): 703-707 (in Chinese).
- [11] 王平, 黄鸥. 污泥热干化工艺设计重点问题探讨[J]. *给水排水*, 2012, 38(5): 23-28.
WANG Ping, HUANG Ou. Probe into the key points of the sludge thermal drying engineering design[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 38(5): 23-28 (in Chinese).
- [12] GOH L J, OTHMAN M Y, MAT S, *et al.* Review of heat pump systems for drying application [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(9): 4788-4796.
- [13] 吴青荣, 张绪坤, 王高敏. 城市污泥低温干化技术研究进展[J]. *环境工程*, 2017, 35(3): 127-131.
WU Qingrong, ZHANG Xukun, WANG Gaomin. Advances on low temperature drying technology of municipal sewage sludge [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(3): 127-131 (in Chinese).
- [14] 杨汉文, 王建国, 李冲, 等. 市政污泥干化焚烧技术应用工程案例[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(12): 136-140.
YANG Hanwen, WANG Jianguo, LI Chong, *et al.* Application project of municipal sludge drying and incineration technology [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(12): 136-140 (in Chinese).
- [15] BENNAMOUN L. Solar drying of wastewater sludge: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(1): 1061-1073.
- [16] MATHIOUDAKIS V L, KAPAGIANNIDIS A G, ATHANASOULIA E, *et al.* Sewage sludge solar drying: experiences from the first pilot-scale application in Greece [J]. *Drying Technology*, 2013, 31(5): 519-526.
- [17] MAYIS K, AYŞEGÜL A, SANIN F D. Evaluation of solar sludge drying alternatives by costs and area requirements[J]. *Water Research*, 2015, 82: 47-57.
- [18] TYAGI V K, LO S L. Microwave irradiation: a sustainable way for sludge treatment and resource recovery [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 18: 288-305.
- [19] BHATTACHARYA M, BASAK T. A review on the susceptor assisted microwave processing of materials [J]. *Energy*, 2016, 97: 306-338.
- [20] KOUCHAKZADEH A, SHAFEEI S. Modeling of microwave-convective drying of pistachios [J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51(10): 2012-2015.
- [21] KOCBEK E, GARCIA H A, HOOIJMANS C M, *et al.* Microwave treatment of municipal sewage sludge: evaluation of the drying performance and energy demand of a pilot-scale microwave drying system[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 742: 140541.
- [22] 何志锋, 安平林, 袁博威, 等. 空气源热泵干化应用于污泥减量化研究初探[J]. *山东工业技术*, 2017(13): 65-66.
HE Zhifeng, AN Pinglin, YUAN Bowei, *et al.* Preliminary study on the application of air source heat pump drying in sludge reduction [J]. *Shandong Industrial Technology*, 2017(13): 65-66 (in Chinese).
- [23] DI FRAIA S, MACALUSO A, MASSAROTTI N, *et al.* Energy, exergy and economic analysis of a novel geothermal energy system for wastewater and sludge treatment [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 195: 533-547.

- [24] CALISE F, DI FRAIA S, MACALUSO A, *et al.* A geothermal energy system for wastewater sludge drying and electricity production in a small island[J]. *Energy*, 2018, 163: 130–143.
- [25] 郝晓地, 叶嘉洲, 李季, 等. 污水热能利用现状与潜在用途[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(18): 15–22.
HAO Xiaodi, YE Jiazhou, LI Ji, *et al.* Status and potential applications of thermal energy from wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(18): 15–22 (in Chinese).
- [26] GUO J L, ZHENG L, LI Z F. Microwave drying behavior, energy consumption, and mathematical modeling of sewage sludge in a novel pilot-scale microwave drying system [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 777: 146109.
- [27] SHENG G P, YU H Q, LI X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, 28(6): 882–894.
- [28] LIANG J L, ZHOU Y. Iron-based advanced oxidation processes for enhancing sludge dewaterability: state of the art, challenges, and sludge reuse [J]. *Water Research*, 2022, 218: 118499.
- [29] NIU M Q, ZHANG W J, WANG D S, *et al.* Correlation of physicochemical properties and sludge dewaterability under chemical conditioning using inorganic coagulants [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 144: 337–343.
- [30] CHEN Z, ZHANG W J, WANG D S, *et al.* Enhancement of activated sludge dewatering performance by combined composite enzymatic lysis and chemical re-flocculation with inorganic coagulants: kinetics of enzymatic reaction and re-flocculation morphology [J]. *Water Research*, 2015, 83: 367–376.
- [31] LIU H, YANG J K, ZHU N R, *et al.* A comprehensive insight into the combined effects of Fenton's reagent and skeleton builders on sludge deep dewatering performance [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 258/259: 144–150.
- [32] LIU H B, XIAO H, FU B, *et al.* Feasibility of sludge deep-dewatering with sawdust conditioning for incineration disposal without energy input [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 313: 655–662.
- [33] WU Y, ZHANG P Y, ZHANG H B, *et al.* Possibility of sludge conditioning and dewatering with rice husk biochar modified by ferric chloride [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 205: 258–263.

作者简介: 郝晓地(1960–), 男, 山西柳林人, 博士, 教授, 从事市政与环境工程专业教学与科研工作, 主要研究方向为污水生物脱氮除磷技术、污水处理数学模拟技术、可持续环境生物技术。现为国际水协期刊 *Water Research* 区域主编(Editor)。

E-mail: haoxiaodi@bucea.edu.cn

收稿日期: 2022-06-18

修回日期: 2022-06-25

(编辑: 丁彩娟)

贯彻《中华人民共和国水法》, 依法治水管水