王莉, 何蓉, 雷海涛. 城镇污水处理厂污泥处理处置技术现状综述[J]. 净水技术, 2022, 41(11):16-21,69.
WANG L, HE R, LEI H T. General review of sludge treatment and disposal technology for urban WWTP[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(11): 16-21,69.

扫我试试?

城镇污水处理厂污泥处理处置技术现状综述

王 莉[1],何 蓉[2],雷海涛[1]
(1.咸阳职业技术学院建筑工程学院,陕西咸阳 712000;2.陕西至善环境工程有限公司,陕西咸阳 712000)

摘 要 随着经济社会的进步与污水处理技术的发展,城镇污水处理总量逐年增加,随之带来污水厂副产物污泥的大量产生。剩余污泥产量大、含水率高且还有可能存在致病菌、重金属等有毒有害物质超标的问题,如何有效对污泥进行处理处置并资源化,是当前研究的热点问题。文中综合了国内外公开发表的相关研究成果,概述了当前污泥脱水、调质、稳定化、热干化等处理方法,总结了几种常见污泥处置技术应用的研究现状及发展趋势;重点阐述了污泥焚烧处置的发展现状与优势,分析了污泥燃烧设备中流化床、多膛式焚烧炉和回转窑的优缺点,为未来污泥处理处置及资源化的研究提供参考。

关键词 剩余污泥 污泥处理处置 技术现状 污泥炉 污水处理厂
中图分类号:X703 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-0177(2022)11-0016-07
DOI:10.15890/j.cnki.jsjs.2022.11.003

General Review of Sludge Treatment and Disposal Technology for Urban WWTP

WANG Li[1], HE Rong[2], LEI Haitao[1]
(*1. Institute of Architectural Engineering, Xianyang Vocational Technical College, Xianyang 712000, China;*
2. Shaanxi Zhishan Environmental Engineering Co., Ltd., Xianyang 712000, China)

Abstract With the development of economic society and wastewater treatment technology, the increasing amount of wastewater causes a great increase of sludge, which is the by-product of wastewater treatment plant (WWTP). Because of the great amount of sludge yield, high water content and a large number of pathogenic bacteria and heavy metals, sludge is harmful to the environment. How to effectively treat, dispose and recycle the sludge is a focus issue in current researches. Based on relevant research publishers at home and abroad in recent years, this paper summarizes the current sludge treatment methods, such as dehydration, conditioning, stabilization and thermal drying, and analyzes the application research status and development trend of several common sludge disposal technologies. Focused on the development status and advantages of sludge incineration, this paper mainly analyzes the advantages and disadvantages of fluidized bed, multi chamber incinerator and rotary kiln in sludge combustion equipment, so as to provide reference for the research of sludge treatment, disposal and recycling in the future.

Keywords excess sludge sludge treatment and disposal technology status sludge incinerator wastewater treatment plant (WWTP)

随着城市化建设进度的加快和经济生活水平的提升,我国城镇污水排放量也逐年增长。据住建部统计数据[1],2020 年,我国城市污水年处理总量达 5.6×10^6 万 t。污泥是以污水生物法处理为主的污水处理主要副产物,研究[2]表明,污水厂每处理 1 万 t 污水产生 5~10 t 含水率为 80%的污泥。美国产生废水约为 1.29×10^9 m^3/d,每年产生 650 万 t 污泥固体[3]。截至 2019 年底,我国城镇污泥产量达到近 6 000 万 t(含水率约为 80%)。污泥具有产量大、

[收稿日期] 2022-05-11
[基金项目] 咸阳市 2021 年度科学技术研究与发展计划(2021ZDYF-GY-0032)
[作者简介] 王莉(1975—)博士,研究方向为污泥资源化,E-mail:527373918@qq.com。

含水率高、易腐败、恶臭等特点,富集了污水中 50%以上污染物,包括各种重金属、微量的高毒性有机物、大量致病微生物等,对生态环境造成了巨大威胁,如不妥善处理,将造成水环境、土壤的破坏,甚至威胁人类饮用水和食品安全[4]。污水处理过程“重水轻泥”,在发展污水处理能力的同时,没有同步提升污泥处理能力,导致污泥处理能力的提升远低于污泥产生量的增加,逐渐成为我国城镇污染控制领域的主要环境问题[3]。为此,国家出台一系列政策以规划和指导污泥处理处置,2015 年我国发布的“水十条”要求,完成污泥处理处置实施的改造,实现 2020 年地级市无害化处理率达到 90%以上;到 2020 年 7 月,我国发布《城镇生活污水处理设施补短板强弱项实施方案》,进一步强调改善“重水轻泥”现状,推进污泥无害化处置和资源化利用——鼓励采用“生物质利用+焚烧”处置模式等 5 项内容。“十四五”规划提出:破解污泥处置难点,实现无害化推进资源化。新增污泥无害化处理设施规模不少于 2 万 t/d,2022 年,国家发展和改革委员会、生态环境部等在《关于加快推进城镇环境基础建设的指导意见》中提出,城市污泥无害化处置在 2025 年达到 90%。然而,由于我国城镇污水处理厂中污泥处理处置技术发展时间相对较短,且污泥处理处置投资管理方面存在地域差异和针对性不强的特点,尚未形成规模化、效果良好的技术路线、设备和完善的监管体系。现阶段污泥的合理处理处置已成为制约污水处理厂良性健康发展的重要瓶颈,解决污泥处理处置问题迫在眉睫。

因此,本文结合国家高质量绿色发展重大需求,总结当前污泥处理处置技术研究现状、发展趋势,重点阐述基于焚烧的污泥处理处置技术研究现状,分析主要焚烧炉型的优缺点,为污泥焚烧处置技术的发展提供参考。

1 污泥处理处置技术现状

基于污泥成分的复杂性,实现污泥的减量化、无害化和资源化是污泥处理处置的最终目标。我国城市污水厂污泥有机质与无机质比值低于国外污泥,且污水处理工艺不同造成污泥结构、组分呈现较大差异性,适合我国国情的污泥处置处理技术比较少。根据污泥的性质及目标,污泥的处理处置可分为:1)污泥处理过程,目的是降低含水率,去除污泥中的重金属、病原微生物等有害物质,实现污泥的减容减量、稳定化和无害化,包括污泥浓缩、脱水、稳定和干化等技术;2)污泥处置过程,是将经过处理后的污泥通过填埋、土地利用、焚烧等方式实现污泥再利用和资源化的过程。

1.1 污泥处理技术现状

城市污水厂污泥的主要来源为污水处理厂初次沉淀池(含水率为 97%以上)和经过生物处理单元后二沉池的污泥(含水率为 99%以上),含水率高、体积大,对后续处理及运输造成了巨大影响。因此,常规污泥处理技术主要包括脱水处理、稳定化处理以及其他处理[4]。

1.1.1 污泥脱水处理技术

将流态的原生、浓缩或消化污泥脱除水分,污泥含水率可降低至 50%~80%,污泥脱水是污泥减容减量的重要方法[4]。当前污泥脱水主要处理方式包括:自然干化法、浓缩法、机械脱水法和造粒法等。自然干化法主要是脱除自由水;污泥浓缩用于脱除污泥的间隙水;机械脱水法通常是先投加无机盐或高分子混凝剂对污泥进行预处理,改善脱水性能后再通过板框压滤机、离心脱水机等机械设备进行脱水;造粒法适用于混凝沉淀的污泥。自然干化法、机械脱水法的脱水污泥含水率为 65%~80%,污泥浓缩、造粒法脱水污泥含水率在 95%~98%、70%。机械脱水是当前污水处理厂常用的处理方法。然而,由于污泥成分复杂,其内含大量菌胶团、微生物及结合水,如不经过任何处理,难以直接通过机械方式脱水。为了获取更高的污泥脱水处理效果,通常对污泥进行调质处理[5]。污泥调质主要是通过化学、物理或生物的方式预处理污泥,改善污泥的脱水性能,以提高污水脱水效果。物理调质是通过应力或施加能量等方式改变污泥脱水特性[6],包括热处理、冻融、超声、微波、水力调质等[6-8]。化学调质是当前主流调质方式[9],常用无机或有机化学絮凝剂,工业应用上的化学法污泥调质采用的药剂有无机药剂和有机药剂,其中,无机调质药剂主要有氢氧化钙、聚合硫酸铁、三氯化铁等;有机药剂主要是高分子聚丙烯酰胺,投加量为 0.1%~0.5%。当前也有研究将高级氧化技术用于污泥调理,如过氧化氢、铁基硫酸盐等,目前这些研究尚处于实验室研究阶段[8]。生物调质是指采用微生物、细胞提取物等改善污泥

脱水性能[10],如生物溶菌酶技术等,但调质稳定性及机制有待进一步研究。当前污泥机械脱水技术主要存在药耗大、设备易损、结合水和间隙水去除困难、需要对污泥进行预处理等问题,开发低药耗、高处理效率的污水调质技术以及研发低能耗污泥脱水干化设备是未来发展方向。

1.1.2　污泥稳定化处理

污泥稳定化处理的实质是通过可控的物理、生物或化学手段,改变污泥易发生无序生化反应的状态,以降解污泥中的有机物质,将不稳定的有机物转化为较稳定物质,降低污泥二次污染风险的同时,为污泥后续处理处置尤其土地利用提供条件[11]。污泥稳定化的方法主要有污泥消化、碱稳定、污泥堆肥等。污泥消化包括好氧消化,是指经过好氧微生物将污泥中的悬浮有机物部分降解为更稳定的有机化合物以及无机物的过程;厌氧消化通过污泥厌氧发酵,从而产生沼气,达到减量化、资源化的目的;污泥碱稳定化处理是指将氧化钙、镁盐、粉煤灰等同脱水污泥混合,通过污泥 pH 和温度的升高来实现污泥的杀菌、脱水;污泥堆肥主要是将污泥与有机质混合,通过控制生物种类、pH、温度等使其进行有氧高温发酵。国外发达国家大型污水处理厂通过厌氧消化等稳定化技术实现污水厂能源及资源回收;小型污水厂则采用好氧消化技术[12]。与国外污泥处理处置发展水平相比,我国污泥稳定化处理与发达国家存在差异,厌氧消化技术在污泥稳定化处理方面占重要地位。近些年,随着对污泥处理处置的重视,越来越多污泥稳定化新技术也层出不穷[13],包括污泥固化稳定化技术、污泥氧化稳定化技术(包括湿法氧化法、氯氧化法等)、污泥等离子体处理获取可燃气体 CO 等,对稳定化机理进行研究、优化工艺、提高效率的同时节能降耗,是未来污泥稳定化技术发展和工业化应用的方向。

1.1.3　污泥热干化处理

污泥热干化是通过热调理过程破坏污泥胶体,实现活性污泥生物细胞破壁,析出生物内部水、毛细水、附着水,杀灭病毒细菌等活性有害物质。经热干化的污泥具有较强的稳定性,对环境影响小。

1.2　市政污泥处置技术研究现状及发展趋势

我国污泥具有地域性特点,污泥处置方式应该根据各地区污泥的性质进行选择。目前,我国对于污泥处置主要为填埋、堆肥、焚烧、土地利用等方式。截至 2020 年底,我国污泥处理处置现状如图 1 所示。

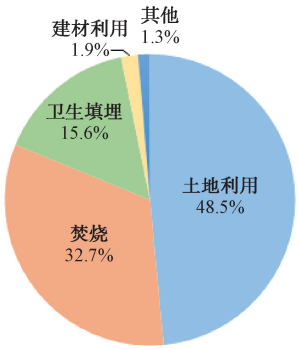

图 1　我国污泥处置现状[14]

Fig. 1　Present Situation of Sludge Disposal at Home[14]

1.2.1　卫生填埋

卫生填埋是污泥最传统的处置方式,有单独填埋、混埋及特殊填埋等方式,适于污泥的大批量处理。我国常将脱水污泥同生活垃圾混埋。由于污泥卫生填埋具有卫生指标要求不高、操作简便且成本低等特点,目前我国约 16%的污泥进行卫生填埋处置。然而,污泥填埋产生的渗滤液对周边土地和水体带来极大污染,且造成磷资源的浪费,加剧温室效应。随着污泥产量的逐年增长,卫生填埋场地占据土地资源,各国逐步禁止。我国《地下水管理条例》(2021 年)第 40 条中明确指出禁止利用污泥填废弃矿坑等。尽管卫生填埋存在很多问题,由于当前污泥处置能力不足且污泥资源化消纳途径尚未完全打通,污泥填埋并不能被其他处置方式完全取代。目前卫生填埋的主要发展方向为渗滤液的处理、填埋气的利用、防渗材料的研发等[15]。

1.2.2　土地利用

污泥中含有大量有机营养成分和微量元素,可通过一定处理后进行土地利用,是污泥资源化利用的方式之一,主要包括农业利用、园林绿化利用以及土地改良等。污泥组成成分中含有对植物、土壤有害的病原菌、重金属等,直接土地利用会造成土壤及地下水的污染。美国专门制定了污泥土地利用相关的法规[16];日本则成立了污泥还田委员会[17];目前我国约 48.5%的污泥用于土地利用。污泥堆肥后或无害化处理后再利用是土地利用的主要方式,具

有过程简单、产物可作农肥和土壤改良剂等特点,但肥效较低,污泥中污染物还会污染土地、影响植物生长[18]。此外,堆肥对于污泥的减量效果有限、周期较长且易产生臭气。目前我国污泥土地利用产业面临的主要问题为缺乏工程应用技术规范指南、缺乏风险评价和管理体系、缺乏相应政策等[19]。

1.2.3 建材利用

剩余污泥中含有丰富的有机物以及硅、铝、铁等无机成分,在污泥中添加一定量的粉煤灰、高岭土等无机辅料后进行建材生产是一种经济有效的资源化方法,可以烧结砖、制轻质陶粒、制水泥等建材[20],不仅可以解决污泥处理费用高、处理处置困难及对环境造成二次污染隐患的问题,更符合循环经济的发展理念,可产生一定的经济效益,有效利用资源达到保护环境的目的。但当前由于符合建材生产要求的污泥产量少,在制作建材的过程中添加大量无机辅料作为骨架,成本高、使用范围小且污泥成分复杂,用于生产污泥建材工艺不同对其性能影响较大,而我国尚缺乏污泥建材规范生产和检测相关标准规范。更重要的是,目前尚未形成完备的污泥再生建材产品出路,市场流通不足,导致污泥建材利用受限。为促进污泥资源化发展,在污泥建材利用方面的研究将集中于优化辅料配比以降低建材生产成本,研制以污泥为主料的新型建材,完善污泥再生建材生产技术标准规范及检测标准,并制定产业政策开拓建材利用市场。

1.2.4 污泥焚烧

污泥焚烧处置通常是在一定温度、有氧条件下对污泥进行焚烧,使污泥中的有机物发生燃烧反应,转化为二氧化碳、氮气、无机灰分等物质,是目前最彻底、最快速的污泥处置方式,能彻底实现污泥减量化,可最大限度减少污泥容积,将市政污泥体积减小70%~80%;彻底实现污泥稳定化与无害化,完全消除病毒和病原菌并将其转化成更为稳定的无机灰分[21]。污泥经过焚烧后,可将自身的热值转化为热能用于市政污泥的干化,或转化为电能用于发电[22]。污泥灰中富含磷,可从污泥焚烧灰分中提取高品位磷以缓解当前磷资源危机[23]。研究者[24]发现黑麦草施加市政污泥焚烧灰后,与对照组相比,施加市政污泥焚烧灰的黑麦草磷吸收明显增加。焚烧具有占地面积小、处理效率高且无害化彻底的优点,欧洲国家及日本早年就开始实施污泥焚烧处置,如图2所示。随着填埋场地逐年变少,我国对污泥土地利用出台了严格政策,污泥焚烧的处置方式被逐渐重视,目前我国现有32.7%的污泥进行焚烧处置。污泥焚烧方式分为单独焚烧和共焚烧。其中,单独焚烧是指将污泥在辅助燃料下放入焚烧炉内进行焚烧。由于我国市政污泥热值较低,污泥与其他有机废物如秸秆等进行共焚烧后,增加了灰分中的土壤有效磷,且对各类作物的试验中效果均较好,尤其油料作物。将经过干化处理的污泥进行焚烧,能量赤字、处理成本以及投资成本与传统工艺相比更低[25],是一种作为极具前景的污泥处置方式。

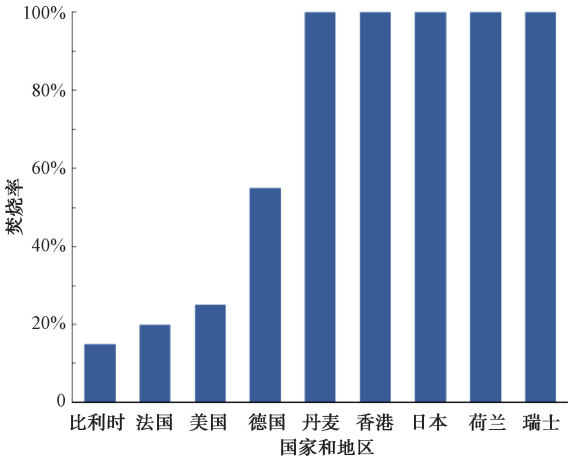

图2 不同国家和地区污泥焚烧率[13]

Fig. 2 Sludge Incineration Rate in Different Countries and Regions[13]

2 污泥焚烧处置

2.1 污泥焚烧处置现状

与煤相比,污泥具有含水量高(脱水后为80%~85%)、挥发性固体高以及热值低的特点,直接进入焚烧炉会导致一系列问题,如温度下降、点火延迟和炉膛温度波动[26]。因此,通常情况下,将脱水后的污泥进行干化处理后(质量分数干化至10%~30%)进行焚烧,即单焚烧。研究人员[27]将鼓泡流化床干燥器和循环流化床焚烧炉结合起来,焚烧产生的能量用于污泥干化,可处理含水量约为80%的污泥。杭州某焚烧示范项目利用干燥和焚烧结合方式处理100 t/d未消化污泥(含水量为80%),燃烧效率高,可减少污染物排放。也有学者[28]提出了一种新型的余热回收系统,其产出高温高压的蒸汽通过汽轮机做功产出电能,可以有效利用余热。由于湿污泥

含水量较高,在流化床焚烧过程中会产生过热蒸汽,可将其转化为电能或热能。部分研究[29]利用湿污泥直接进行焚烧,而随着温度升高,其焚烧过程依次为干燥、脱挥发油、挥发物燃烧和焦炭燃烧,尾气中NO_x的排放占比更少。

为提高污泥热值,将污泥与燃料进行协同焚烧,可降低共焚烧着火温度和提高燃烧效率以维持污泥稳定燃烧,同时还具有降低有害气体的排放等作用[30]。共焚烧过程中影响焚烧性能的因素主要是污泥/生物质以及燃料的热值、水分含量和灰分组成。这些因素影响了热输出、燃烧所需空气量、产生的烟气量、粉尘浓度和颗粒分布。研究者们主要利用污泥与煤、城市固体废物[31]或水泥原料等混合燃烧,不仅解决污泥含水量高无法维持自燃的问题,而且有效减少了燃烧的污染排放。

近年来,我国约有 35 家水泥厂采用共焚烧处理市政污泥,其中大部分位于东部和南部[32]。在水泥窑中添加污泥有助于降低污泥处理的运行成本,且可资源化利用。在我国广西,采用水泥窑协同处置污泥的量占污泥处置总量的 35.34%[33];在武汉,污泥进入石灰窑混烧是未来较长一段时间内污泥的主要消纳方式,可处理含水率为 80% 的污泥 14 105 t/d[34];广东省的污泥处置主要是水泥窑协同焚烧与建材利用为主。英法两国 20% 的污泥进行焚烧;丹麦 30% 的污泥焚烧处置;奥地利为焚烧和农用各占 1/2;而荷兰几乎全部焚烧处置[35]。经济和环境的优势使得美国、欧洲和日本等发达国家或地区广泛采用水泥窑中市政污泥的协同处理[36]。日本由于国土面积狭小,63% 的污泥进行焚烧处置。全世界每年生产约 170 万 t 污泥焚烧灰[37],其中德国 55% 的污泥进行焚烧处置,每年产生 30 万 t 污泥焚烧灰[38],新加坡在 2016 年生产 5 万 t 污泥焚烧灰。污泥焚烧灰中富含的磷、镁和钙等大量植物营养素增强了其作为肥料生产替代磷源的潜力,也使其成为重要的含磷二次资源。已有研究和实践[39]证明,二噁英、NO_x和重金属等污染物可通过控制焚烧温度>800 ℃来抑制,也可用尾气净化装置去除。

但该方法存在以下问题:1)污泥含水率与掺烧率对焚烧设备热效率影响大;2)为满足一定焚烧条件,焚烧设备烟气排量大、锅炉效率低、烟气系统磨损严重;3)焚烧成本高,且污泥中所含部分重金属在高温作用下迁移至空气中,焚烧过程会产生二噁英等污染物,对环境造成威胁,焚烧过程污染控制是重要研究方向;4)焚烧过程能量释放过多,如何提高焚烧过程能量回收。这些问题对焚烧工艺及设备有较高要求。

2.2　污泥焚烧处置设备

目前,国内外应用最广泛的污泥焚烧设备主要有:机械炉排式焚烧炉、回转窑式焚烧炉、流化床式焚烧炉。与传统的多炉膛焚烧炉(一般 925 ℃)相比,流化床燃烧炉(一般 750 ℃)成本更低、效率更高、环境性能更好,因此,被认为是全球市政污泥焚烧的最佳可用技术[39]。

2.2.1　流化床焚烧处置技术

流化床焚烧炉具有单位面积处理能力大、加入流化床的固体细粒可瞬间分散均匀、床内温度易于控制、建造费用低、技术成熟、能量回收潜力好等特点,被广泛用于 SS 的焚烧。相较于其他炉型中物料的层燃形式,流化床焚烧炉炉内物料燃烧时可呈现出沸腾状态,在炉内形成良好的分散效果,可在短时间内完成污泥颗粒的焚烧,达到良好的传热传质效果。但目前仍存在配套的烟气设备腐蚀、布袋除尘器腐蚀、干化机磨损等问题。在流化床焚烧炉焚烧之前,污泥需经过干化预处理,再进行尾气处理。目前,上海竹园、白龙港、成都市、浦东污泥干化焚烧、常州市武进区生活污水处理厂等均采用污泥流化床焚烧炉处置污泥,其烟气余热可为污泥干化提供热源,实现了能源回收利用。流化床焚烧炉的类型主要包括气泡床、循环床、多重床、喷流床、压力床。前两者已经商业化应用,后者还处于研究开发阶段。其中,气泡床多用于处理城市废物及污泥;循环床多用于处理有害工业废物。

在鼓泡式流化床焚烧炉中,物料从投料口进入燃烧区,通过调节底部的布风流速,使得物料呈现沸腾状态。燃烧时间与物料粒度的 1~2 次方成正比,因此,焚烧炉在投料口会添加拨散器,减少物料的团聚。布风板上方载有惰性介质(如石英砂)借着燃烧器点火以及风箱的送风使得物料均匀受热。鼓泡式流化床焚烧炉的优点是燃烧速度快、物料停留时间短、焚烧热量可供物料的水分蒸发且事故率低,能够适应各种易燃煤种和低热值、高水分的燃料,但对烟气除尘配套要求高。学者们[40]在流化床焚烧处置技术污泥燃烧热解特性、凝聚结团特性、焚烧过程烟

气污染控制等方面做了大量研究工作,并对污泥灰渣处理提出建议,促进了流化床污泥焚烧技术的发展。

2.2.2 多膛式焚烧处置技术

多膛式焚烧炉又称为立式多段焚烧炉。污泥随着炉膛的齿耙进入炉膛内后,通过每层的孔洞进入下层,呈螺旋状轨迹。顶部为污泥的干燥区,可使污泥含水率降至40%以下,中部为污泥焚烧区,下部为冷却段,起冷却并预热空气的作用。挥发分气体顺孔洞向上从废气口排出,燃烧后残渣及灰分顺排灰口排出,而小颗粒物质会随气流运动堵塞排气口,进而影响燃烧效果。多膛式焚烧炉历史较长,积累了丰富的使用经验,但由于操作复杂、处理缓慢、燃烧能力及气体排放标准提高等原因逐步失去竞争力。

2.2.3 回转窑焚烧处置技术

污泥水泥窑协同处置已经成为我国污泥热化学处理处置的手段之一,多用于危险废物焚烧处,目前已建成污泥协同处置设施的水泥熟料生产线30~40条[41]。针对顺流式的回转窑,污泥从进料端进入窑内焚烧。物料进入筒体后沿轴向以及筒体切线方向出料端移动。污泥在投加前根据不同的预处理手段选择不同的水泥窑投加点。污泥水泥窑协同处置具有有机物分解彻底、二次污染少、焚烧灰即成为产品一部分、环境经济效益明显等特点,是污泥无害化处置的方法之一。但与流化床焚烧炉相比,污泥水泥窑仍存在对污泥类型适应能力较弱(决定焚烧温度高低)、需设置烟气燃尽室(温度>1 100 ℃)、处理有害物质等不足。而焚烧过程焦油、重金属及烟气等污染的控制及低温低能耗焚烧装置的研发与改进、焚烧灰渣的处理将是未来研究的热点。

3 结论与展望

随着污水处理技术的发展及对安全环保的要求,污泥的处理处置是当前城镇污水处理厂亟待解决的关键。作为一种有价值的资源,污泥进行减量化、无害化处理后再利用,可满足污水处理厂可持续发展的需求。结合我国污泥特性,以污泥处理技术为基础,发展污泥资源化处理处置技术是未来发展的方向。污泥焚烧由于其占地小、处理效率高且回收热能和灰分无机资源等优势,可能是未来最具潜力的污泥处理处置方式。各地区应因地制宜,根据各地经济、技术等特点选择合适的污泥处置方式。目前,我国污泥焚烧处理的技术尚未成熟,仍然存在二次污染、处理费用较高、焚烧灰渣的资源利用等方面问题,高效低耗焚烧炉的研制、热能利用、提高污泥热值的生物质耦合污泥共焚烧技术将是将成为污泥资源化技术主要研究方向。未来,随着我国环境领域科技工作的推进,污泥焚烧技术将凭借自身的优势得到广泛的应用。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房与城市建设部. 2020年城乡建设统计年鉴[EB/OL]. (2021-10-12)[2022-03-01]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/index.html.

[2] 郝晓地, 于文波, 时琛, 等. 污泥焚烧灰分磷回收潜力分析及其市场前景[J]. 中国给水排水, 2021, 37(4): 5-10.

[3] 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方向思考[J]. 给水排水,2021, 57(3): 1-5.

[4] 李雄伟, 李俊, 李冲, 等. 我国污泥处理处置技术应用现状及发展趋势探讨[J]. 中国给水排水, 2016, 32(16): 26-30, 35.

[5] 姚焱中, 孙云鹏, 吴倩倩, 等. 近十年间污泥预处理技术研究前沿及热点——基于WoS数据库的文献计量分析[J]. 人民珠江, 2021, 42(10): 82-90.

[6] 毛华臻. 市政污泥水分分布特性和物理化学调理脱水的机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

[7] GOATE P R, THANEKAR P D, OKE A P. Strategies to improve biological oxidation of real wastewater using cavitation based pre-treatment approaches[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 64: 105016. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105016.

[8] HU K, JIA S Q, YANG C, et al. Combined freesing-thawing pretreatment and microbial electrolysis cell for enhancement of highly concentrated organics degradation from dewatered sludge [J]. Bioengineered, 2020, 11(1): 301-310.

[9] 倪晓棠, 魏源送, 王亚炜, 等. 过氧化氢-敏化剂强化污泥微波预处理溶胞效果的研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(12): 4623-4628.

[10] 何强斌, 张小松, 于海洋. 高效生物絮凝剂在城市污水处理厂污泥调质处理中的应用[J]. 能源环境保护, 2016, 30(4): 31-34.

[11] 戴晓虎. 城镇污水处理厂污泥稳定化处理的必要性和迫切性的思考[J]. 给水排水, 2017, 43(12): 1-5.

[12] 周乃然, 温超, 程刚. 城市污水厂污泥稳定化技术研究进展[J]. 应用化工, 2016, 45(3): 547-550.

[13] YANG G, ZHANG G M, WANG H C. Current state of sludge production management treatment and disposal in China[J]. Water Research, 2015, 78: 60-73. DOI: 10.1016/j.watres.2015.04.002.

(下转第69页)

工, 2020, 47(4): 134-136.
[22] 刘康, 薛念涛, 李建民, 等. CASS 反应器内反硝化聚磷菌处理生活污水的性能[J]. 环境工程学报, 2018, 12(9): 2483-2489.
[23] 马建强, 王广卿. CASS 工艺特点及优缺点分析[J]. 河南建材, 2011(4): 94-95.
[24] 李宏罡, 张玲, 张宝杰. 运用调整 CASS 工艺运行周期策略处理不同水质污水的研究[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(5): 115-117.
[25] 吴飞, 王立亮, 苏忆波, 等. 曝气方式及排水比对 CASS 稳定化运行的影响[J]. 水处理技术, 2019, 45(8): 120-124.
[26] MATSUMOTO S, ISHIKAWA D, SAEKI G, et al. Microbial population dynamics and community structure during the formation of nitrifying granules to treat ammonia-rich inorganic wastewater[J]. Microbes Environment, 2010, 25(3): 164-170. DOI: 10.1264/jsme2.ME10107.
[27] 孙正庭, 李锋. 自然循环水处理系统的应用试验[J]. 能源环境保护, 2010, 24(3): 20-23.
[28] HE Q, SONG Q, ZHANG S, et al. Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in an aerobic granular sequencing batch reactor with mixed carbon sources: Reactor performance, extracellular polymeric substances and microbial successions[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 331: 841-849. DOI: 10.1016/j.cej.2017.09.060.

(上接第 21 页)

[14] 孙东晓, 董志强, 刘学明, 等. 污泥基生物炭的制备技术及环境应用与研究热点[J]. 净水技术, 2021, 40(8): 16-25.
[15] WEI L, ZHU F, LI Q. Development, current state and future trends of sludge management in China: Based on exploratory data and CO_2 - equivalent emissions analysis[J]. Environment International, 2020, 144(3): 106093. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106093.
[16] 李伟, 李让玲, 李博文, 等. 水热预处理对不同污泥性质及厌氧消化性能的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 326-333.
[17] 安叶, 张义斌, 黎攀, 等. 我国市政生活污泥处置现状及经验总结[J]. 给水排水, 2021, 57(s1): 94-98.
[18] 徐正巧. 污水处理厂污泥处理资源化利用技术探究[J]. 节能与环保, 2020(3): 64-65.
[19] 黄岚, 封莉, 杜子文, 等. 我国城市污泥土地利用瓶颈问题分析与对策研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(20): 31-36.
[20] 周玲, 廖传华. 污泥建材化利用的现状[J]. 中国化工装备, 2019, 21(4): 3-6.
[21] 郝晓地, 郭小媛, 时琛, 等. 污泥焚烧灰分磷回收 Ash Dec 工艺及其研究进展[J]. 中国给水排水, 2022, 38(14): 17-24.
[22] 刘贝贝, 林伟龙. 环境影响评价中公众参与问题的应对策略分析[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(8): 139-141.
[23] ELMI A, AL-KHALDY A, ALOLAYAN M. Sewage sludge land application: Balancing act between agronomic benefits and environmental concerns[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 250: 119512. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119512.
[24] FANG L, WANG Q, LI J S, et al. Feasibility of wet-extraction of phosphorus from incinerated sewage sludge ash (ISSA) for phosphate fertilizer production: A critical review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2020, 51(9): 939-971. DOI: 10.1080/10643389.2020.1740545.
[25] 次瀚林, 王先恺, 董滨. 不同污泥干化焚烧技术路线全链条碳足迹分析[J]. 净水技术, 2021, 40(6): 77-82, 99.
[26] 赵发敏, 李兴杰, 冯楠, 等. 污泥处理处置技术的应用研究及进展[J]. 有色冶金节能, 2021, 37(6): 50-54.
[27] JOSEPH C A, KHIARI L, GALLICHAND J, et al. Influence of sludge incineration ash on ryegrass growth and soil phosphorus status[J]. Pedosphere, 2019, 29(1): 70-81.
[28] 刘宇佳, 王飞, 赵旭东. 污泥干化焚烧新型余热回收系统的热力性能分析[J]. 热能动力工程, 2020, 35(5): 245-252.
[29] LIANG Y, XU D H, FENG P, et al. Municipal sewage sludge incineration and its air pollution control[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 295: 126456. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.126456.
[30] 王飞, 张盛, 王丽花. 燃煤耦合污泥焚烧发电技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 82-94.
[31] 吴江, 余凌洁, 张会, 等. 污泥与煤炭掺烧的特性及其研究进展[J]. 上海电力学院学报, 2019, 35(2): 107-110, 148.
[32] SUN Y, CHEN G, YAN B, et al. Behaviour of mercury during Co-incineration of sewage sludge and municipal solid waste[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 253: 119969. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.126456.
[33] 潘振, 梁志超, 田冬梅, 等. 广西城市污水处理厂污泥产生及处置现状分析[J]. 能源环境保护, 2020, 34(2): 105-108.
[34] 李尔, 曾祥英. 武汉市主城区污水厂污泥处理处置现状及展望[J]. 中国给水排水, 2021, 37(18): 8-13.
[35] 陈懋喆. 欧盟 15 国污水污泥产生量与处理处置方法对比[J]. 能源环境保护, 2019, 33(1): 6-12.
[36] XU J C, LI P, CAO H, et al. Application status of co-processing municipal sewage sludge in cement kilns in China[J]. Sustainability, 2019, 11(12): 3315. DOI: 10.3390/su11123315.
[37] 畅萧, 曾薇, 王保贵, 等. 从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷[J]. 环境科学, 2019, 40(9): 4169-4176.
[38] 胡维杰. 城镇污水污泥燃煤电厂协同焚烧技术解析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(8): 24-31. .
[39] 郝晓地, 陈奇, 李季, 等. 污泥焚烧无须顾虑尾气污染物[J]. 中国给水排水, 2019, 35(10): 8-14.
[40] 应基光, 林莉峰, 邵钦. 基于鼓泡流化床的污泥焚烧保护控制[J]. 中国给水排水, 2021, 37(10): 133-137.
[41] 杭世珺, 关春雨, 戴晓虎, 等. 污泥水泥窑协同处置现状与展望(上)[J]. 给水排水, 2019, 55(4): 39-43, 49.