

林群慧 著

微波辅助热解污泥机理与试验

WEIBO FUZHU REJIE WUJI JILI YU SHIYAN YANJIU

研究

中国环境出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

微波辅助热解污泥机理与试验研究/林群慧著. —北京:
中国环境出版社, 2012.12
ISBN 978-7-5111-1204-0

I. ①微… II. ①林… III. ①污泥处理—研究
IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 276459 号

责任编辑 张维平
封面设计 刘丹妮

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67112738 (图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)
印装质量热线: 010-67113404

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2013 年 2 月第 1 版
印 次 2013 年 2 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 13
字 数 300 千字
定 价 42.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

编 委 会

顾 问 吴晓青

组 长 赵英民

副组长 刘志全

成 员 禹 军 陈 胜 刘海波

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

序 言

我国作为一个发展中的人口大国,资源环境问题是长期制约经济社会可持续发展的重大问题。党中央、国务院高度重视环境保护工作,提出了建设生态文明、建设资源节约型与环境友好型社会、推进环境保护历史性转变、让江河湖泊休养生息、节能减排是转方式调结构的重要抓手、环境保护是重大民生问题、探索中国环保新道路等一系列新理念新举措。在科学发展观的指导下,“十一五”环境保护工作成效显著,在经济增长超过预期的情况下,主要污染物减排任务超额完成,环境质量持续改善。

随着当前经济的高速增长,资源环境约束进一步强化,环境保护正处于负重爬坡的艰难阶段。治污减排的压力有增无减,环境质量改善的压力不断加大,防范环境风险的压力持续增加,确保核与辐射安全的压力继续加大,应对全球环境问题的压力急剧加大。要破解发展经济与保护环境的难点,解决影响可持续发展和群众健康的突出环境问题,确保环保工作不断上台阶出亮点,必须充分依靠科技创新和科技进步,构建强大坚实的科技支撑体系。

2006年,我国发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》(以下简称《规划纲要》),提出了建设创新型国家战略,科技事业进入了发展的快车道,环保科技也迎来了蓬勃发展的春天。为适应环境保护历史性转变和创新型国家建设的要求,原国家环境保护总局于2006年召开了第一次全国环保科技大会,出台了《关于增强环境科技创新能力的若干意见》,确立了科技兴环保战略,建设了环境科技创新体系、环境标准体系、环境技术管理体系三大工程。五年来,在广大环境科技工作者的努力下,水体污染控制与治理科技重大专项启动实施,科技投入持续增加,科技创新能力显著增强;发布了502项新标准,现行国家标准达1263项,环境标准体系建设实现了跨越式发展;

完成了 100 余项环保技术文件的制修订工作，初步建成以重点行业污染防治技术政策、技术指南和工程技术规范为主要内容的国家环境技术管理体系。环境科技为全面完成“十一五”环保规划的各项任务起到了重要的引领和支撑作用。

为优化中央财政科技投入结构，支持市场机制不能有效配置资源的社会公益研究活动，“十一五”期间国家设立了公益性行业科研专项经费。根据财政部、科技部的总体部署，环保公益性行业科研专项紧密围绕《规划纲要》和《国家环境保护“十一五”科技发展规划》确定的重点领域和优先主题，立足环境管理中的科技需求，积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”期间，环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目 234 项，涉及大气、水、生态、土壤、固废、核与辐射等领域，共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与，逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前，专项取得了重要研究成果，提出了一系列控制污染和改善环境质量技术方案，形成一批环境监测预警和监督管理体系，研发出一批与生态环境保护、国际履约、核与辐射安全相关的关键技术，提出了一系列环境标准、指南和技术规范建议，为解决我国环境保护和环境管理中急需的成套技术和政策制定提供了重要的科技支撑。

为广泛共享“十一五”期间环保公益性行业科研专项项目研究成果，及时总结项目组织管理经验，环境保护部科技标准司组织出版“十一五”环保公益性行业科研专项经费系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果，具有较强的学术性和实用性，可以说是环境领域不可多得资料文献。丛书的组织出版，在科技管理上也是一次很好的尝试，我们希望通过这一尝试，能够进一步活跃环保科技的学术氛围，促进科技成果的转化与应用，为探索中国环保新道路提供有力的科技支撑。

中华人民共和国环境保护部副部长

吴晓青

2011 年 10 月

序

人类文明发展经历了原始文明、农业文明和工业文明，目前正处在工业文明向生态文明的过渡期。一些发达国家在工业化进程中创造了丰富的物质财富，但也走过了先污染后治理、以牺牲环境换取经济增长的弯路，并付出了沉痛代价。针对我国的发展实际，党和国家提出了建设生态文明的重大战略思想，把建设生态文明纳入中国特色社会主义事业的总体布局之中。这也正是我们坚定不移贯彻科学发展观的具体体现。

生态文明作为人类文明的一种新形态，其基本内涵就是尊重和保护环境。生态文明不是放弃对发展的追求，而是要在更高层次上实现人与自然、经济社会与资源环境的和谐。生态文明建设的根本宗旨和环保工作追求的目标，其高度融合的结果，都是为人民群众谋利益、谋福祉。今天我们面临的任务是既要补上工业文明的课，又要走好生态文明的路，这关系到中华民族的长远发展。所以，我们必须从更高层次、更广阔的范围来审视和解决我国的生态环境问题，从而全面推进经济社会朝着更健康、高水平、可持续的方向发展。

污染防治是环境保护工作的三大领域之一，环境保护的目的就是要实现水清天蓝地干净。环境质量的改善是环境保护的永恒主题，也是环保工作的出发点和落脚点。随着人口增长和城市规模的扩大，城市生活污水排放呈快速增长趋势，而作为污水处理后附属品的污泥急剧增加已不可避免。污泥污染物具有长期毒性和不可降解性，如果处置不当，它们将通过大气、地下水、地表水和土壤等介质进入到食物链，形成危险的二次污染源，对人类健康和生态造成危害。传统的污泥处置方法由于不能有效杜绝产生渗滤液、二噁英、甲烷气，且占地面积大，工程建设投资高等，一直是污泥污染物处理、寻求经济有效利用技术，推进污泥资源化亟待解决的课题。

林群慧博士是民盟福州市副主委、福州经济技术开发区环保局局长，1996年以来一直在环保系统工作。作为一名女同志，她在工作上兢兢业业，取得了一定成绩，工作之余，勤奋学习，努力提高自己的理论素养，并于2012年1月获得天津大学的工学博士学位，这是非常可喜的。《微波辅助热解污泥机理与试验研究》一书，就是林群慧博士在自己博士论文的基础上，经过修改和完善后的成果。该书所涉及的研究内容具有较强的创新性和可操作性，对创新污泥处理、管理机制具有重要的理论参考价值。

加强环境保护是推进生态文明建设的根本途径，环境管理创新需要在每个领域做出积极实践和大胆尝试。希望林群慧博士以本书的研究为起点，进一步认识和把握新形势下加强环境保护，推进环境管理转型的特点和规律，努力从理论和实践的結合上探寻新问题、开拓新思路、提出新举措，争取把更多的创新和研究成果呈现给我们。

是为序。

张宝文

2012年9月

目 录

1	绪论	1
1.1	污泥的基本概况	1
1.2	污泥的处理与处置	5
1.3	污泥资源化利用技术	7
1.4	微波辅助热解污泥技术研究进展	13
1.5	课题研究内容与创新点	20
1.6	本章小结	21
2	试验内容及测定方法	22
2.1	试验内容	22
2.2	试验装置	22
2.3	测试项目及分析方法	26
2.4	试验材料	28
2.5	本章小结	29
3	微波辐照条件对污泥热解产物影响研究	30
3.1	试验条件	30
3.2	微波辅助热解污泥升温特性研究	30
3.3	微波辐照条件对污泥热解主要产物性状影响	35
3.4	有机质含量对污泥热解产物的影响	39
3.5	本章小结	41
4	催化剂的应用对污泥热解产物影响研究	42
4.1	试验条件	42
4.2	催化剂对微波辅助热解污泥制备生物油的影响	42
4.3	催化剂对微波辅助热解污泥制备合成气的影响	49
4.4	催化剂对微波辅助热解污泥制备炭基吸附剂的影响	51
4.5	本章小结	54
5	微波辅助热解污泥动力学机理研究	56
5.1	神经网络原理	56
5.2	支持向量机原理	58

5.3	逐步聚类回归原理	60
5.4	模型构建与预测分析	63
5.5	本章小结	72
6	微波辅助热解污泥产物利用效益分析	74
6.1	效益分析方法	74
6.2	微波辅助热解污泥产物的质量分配	75
6.3	微波辅助热解污泥的能量平衡	76
6.4	本章小结	76
7	结论与展望	78
7.1	结论	78
7.2	展望	79
	参考文献	80
附 录		91
附录 1	国务院办公厅关于印发“十二五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划的通知	93
附录 2	GB 18485—2001 生活垃圾焚烧污染控制标准	107
附录 3	HJ/T 335—2006 环境保护产品技术要求 污泥浓缩带式脱水一体机	113
附录 4	HJ 576—2010 厌氧-缺氧-好氧活性污泥法 污水处理工程技术规范	120
附录 5	HJ 577—2010 序批式活性污泥法污水处理工程技术规范	144
附录 6	HJ 578—2010 氧化沟活性污泥法污水处理工程技术规范	171

1 绪论

1.1 污泥的基本概况

随着经济的发展和城市人口的增多,环境污染问题日益严重,城市生活污水排放量呈快速增长。据环境保护部统计,截至 2010 年年底,我国已经投入运行的城镇污水处理设施达到 2 832 座,污水日处理能力 1.25 亿 t,日处理污水 9 625 万 t^[1]。有研究预测,到 2015 年我国城市生活污水排放量将达到 3.446×10^{10} t,2020 年城市生活污水排放量将达到 4.024×10^{10} t^[2]。污泥是污水处理后的附属品,将随着污水处理量的不断增加而增加,全国城镇污水处理厂产生干污泥约 180 万 t/a (含水 80%污泥 900 万 t),预计未来 5 年,每年将产生干污泥 540 万 t (含水 80%污泥 2 700 万 t)^[2]。

污泥是污水处理过程中产生的一种含水率很高的絮状(或固态、半固态、液态)泥状的废弃物,表面呈深亮黑色,是一种由有机残片、细菌菌体、无机颗粒、胶体等组成的极其复杂的非均匀质体^[3]。污泥成分包括混入生活污水或工业废水中的泥砂、纤维、动植物残体等固体颗粒及其凝结的絮状物、有多种微生物形成的菌胶团及其吸附的有机物、重金属元素和盐类、少量的病原微生物、寄生虫卵等综合固体物质。研究表明,污泥污染物往往具有长期毒性和不可降解性,若不加处理而有序排放,将通过大气、地下水、地表水和土壤等介质进入食物链,成为危险的二次污染源,对人类健康和生态造成危害^[4]。同时,污泥中由于含有大量有机物、丰富的氮、磷等营养物质,可作为“第二资源”而备受关注^[5]。

自 1906 年第一座双层沉淀池诞生以来,污泥处理和处置技术已有 100 多年的历史。传统的污泥处置方式主要包括填埋、焚烧、投海、堆肥等,这些方式虽然能够削减污泥量,但填埋和焚烧处置方法由于产生渗滤液、二噁英、甲烷气、占地面积大以及工程建设投资高等问题已经不是污泥处置的主流技术;污泥投海威胁海洋生态系统和食物链,也并没有从根本上解决问题。另外,污泥处理的投资和运行费用巨大,可占整个污水处理厂投资运行费用的 30%~50%。目前,我国每年排放干污泥为 550 万~600 万 t,且在不断增加,作为可再利用物质,目前的资源化率不足 10%^[3]。降低污泥处理成本的有效手段之一是通过适当资源化处理使其获得附加经济效益,反补到污水处理总成本中,既避免了污泥的二次污染,也降低了污水处理成本,促进循环经济的发展。因此,寻求经济有效的污泥处理利用技术具有重要的意义。污泥资源化处理将是未来污泥处理的主流发展方向,受到广泛关注。

1.1.1 污泥的分类

污泥的种类很多,分类比较复杂,目前一般可以按照以下方法分类。

(1) 按来源分：污泥主要有生活污水污泥、工业废水污泥和给水污泥。

(2) 按处理方法和分离过程分，污泥可分为以下几类：①初沉池污泥，指污水以及处理过程中产生的沉淀物；②活性污泥，指活性污泥法处理工艺二沉池产生的沉淀物；③腐殖污泥，指生物膜法（如生物滤池、生物转盘、部分生物接触氧化池等）污水处理工艺中二次沉淀池产生的沉淀物；④化学污泥，指化学强化一级处理（或三级处理）后产生的污泥。

(3) 按污泥的不同产生阶段分：①生污泥，指从沉淀池（包括初沉池和二沉池）排出来的沉淀物或悬浮物的总称；②消化污泥，指生污泥经厌氧分解后得到的污泥；③浓缩污泥，指生污泥经浓缩处理后得到的污泥；④脱水干化污泥，指经脱水干化处理后得到的污泥；⑤干燥污泥，指经干燥处理后得到的污泥。

1.1.2 污泥的组成

污泥的成分很复杂，它包括混入生活污水或工业废水中的泥砂、纤维、动植物残体等固体颗粒及其凝结的絮状物、有多种微生物形成的菌胶团及其吸附的有机物、重金属元素和盐类、少量的病原微生物、寄生虫卵等综合固体物质。

污泥的主要特征是含水率高，有机物含量高，容易腐化发臭，并且颗粒较细，比重较小，呈胶质状液体状态。污泥中含有植物生长所需要的氮、磷、钾等营养元素以及维持植物正常生长发育的多种微量元素和能改良土壤结构的有机物及腐殖质；同时也含有多种病原菌、寄生虫卵、重金属及某些难降解的有机物。由于污水来源，污水处理工艺及季节的不同，污泥的组成差异较大。中国城市污水处理厂污泥的成分特点如表 1-1 所示^[6]。

表 1-1 中国城市污水处理厂污泥的成分特点

成分	特点
脂肪、碳水化合物	脂肪含量低（约 20%），VSS、碳水化合物（淀粉、糖类、纤维）含量高（高于 50%）
污泥的 C/N 比	污泥的含氮量高，一般在 3%左右，污泥的 C/N 比维持在 10%~20%的范围内
pH 和酸碱度	污泥的 pH 和总碱度基本在正常的范围内，pH 6.5~7.0，总碱度 16~26 mg/L
重金属离子	重金属离子含量较高
肥分	污泥中富含的氮磷钾是农作物必需的肥料成分，有机腐殖质初次沉淀污泥含 33%，消化污泥含 35%，腐殖污泥含 47%，是良好的土壤改良剂
污泥的热值	污泥中含有大量的有机物和一定量的纤维木质素，脱水后的污泥发热量约为 836 kJ/kg 具有较高的热值，在一定含水率下具有自持燃烧和用做能源的可能性

1.1.3 污泥的物理性质

污泥重要的物理特性为污泥含水率和比阻等指标。污泥含水率是指污泥中所含水分的质质量与污泥质量之比。初沉污泥的含水率通常为 97%~98%；活性污泥的含水率通常为 99.2%~99.8%；污泥经浓缩之后，含水率通常为 94%~96%；经脱水之后，可使含水率降低到 80%左右。

污泥比阻为单位过滤面积上，过滤单位质量的干固体所受到的阻力。初沉污泥通常为

$(20\sim60)\times10^{12}$ mg/kg, 活性污泥比阻通常为 $(100\sim300)\times10^{12}$ mg/kg, 厌氧消化污泥比阻通常为 $(40\sim80)\times10^{12}$ mg/kg。一般来说, 比阻小于 1×10^{12} mg/kg 的污泥易于脱水, 大于 1×10^{13} mg/kg 的污泥难以脱水^[7]。

1.1.4 污泥的化学性质

污泥化学性质复杂, 是影响污泥处理处置技术方案选择的主要因素, 包括挥发分、植物营养成分、热值、重金属含量等。

污泥挥发分是污泥最重要的化学性质, 决定了污泥的热值与可消化性。一般情况下, 初沉污泥挥发性固体的比例为 50%~70%, 活性污泥为 60%~85%, 经厌氧消化后的污泥为 30%~50%。与国外发达国家相比, 我国城市污水污泥有机物含量偏低, 并且碳水化合物含量高而脂肪类含量低^[8]。

污泥的植物营养成分主要取决于污水水质及其处理工艺。我国污水处理厂污泥中植物营养成分总体状况如表 1-2 所示。

表 1-2 国内城市污水处理厂污泥的植物营养成分 (以干污泥计)

污泥种类	总氮 (TN) /%	磷 (P_2O_5) /%	钾 (K) /%
初沉污泥	2.0~3.4	1.0~3.0	0.1~0.3
活性污泥	3.5~7.2	3.3~5.0	0.2~0.4
消化污泥	1.6~3.4	0.6~0.8	—

污泥的热值与污水水质、排水体制、污水及污泥处理工艺有关。各类污泥的热值如表 1-3 所示。

表 1-3 各类污泥的热值

污泥类型	热值 (以干污泥计) / (MJ/kg)
初沉污泥	15~18
初沉污泥与剩余活性污泥混合	8~12
厌氧消化污泥	5~7

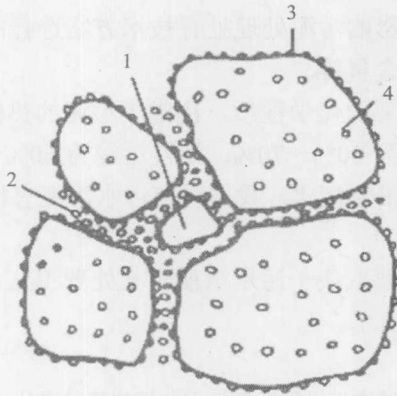
污泥中的有毒有害物质主要指重金属和持久性有机物等物质。我国 2006 年 140 个城镇污水处理厂污泥中重金属含量如表 1-4 所示^[4, 8]。

表 1-4 2006 年我国 140 个城镇污水处理厂污泥中重金属含量 (干污泥)

项目	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Hg	As
平均值/ (mg/kg)	2.01	219	72.3	1 058	93.1	48.7	2.13	20.2
最大值/ (mg/kg)	999	9 592	1 022	30 098	6 365	6 206	17.5	269
最小值/ (mg/kg)	0.04	51	3.6	217	20	16.4	0.04	0.78

1.1.5 污泥中的水分

污泥的含水率为 96%~98%，体积很大。污泥中水的成分呈现混合状态，包括间隙水、毛细结合水、表面吸附水、内部结合水等。污泥中水分组成如图 1-1 所示。



1—间隙水；2—毛细结合水；3—表面吸附水；4—内部结合水

图 1-1 污泥中水分的存在形式

(1) 间隙水：被大小污泥固体包围的间隙水，并不与固体直接结合，因而相对容易分离。污泥中间隙水约占污泥含水量的 70%，只需在中间调节池中停留几个小时，其容积就能显著减少。借助于自然重力场或者机械产生的人工力场（采用浓缩或者气浮方式）用较小的力可分离间隙水。

(2) 毛细结合水：在高度密集的细小污泥固体颗粒周围的水，由于产生毛细现象，可以构成如下几种结合水：①间隙毛细结合水：充满于固体与固体之间空间的间隙毛细结合水；②楔形毛细结合水：在固体颗粒的接触面上由于毛细压力的作用结合成楔形毛细结合水；③裂隙毛细结合水：充满于固体本身裂隙中的毛细水。毛细水约占污泥总水分的 20%，要去除毛细压力作用下的结合水，需施以与毛细水表面张力的合力相反的作用力，如利用离心力、负压、电渗力或热渗力等。

(3) 表面吸附水：黏附在细小污泥或小颗粒表面上的水。要使胶体状颗粒的结合水与固体分离是十分困难的，而分离吸附水则更为困难。需要采用絮凝剂辅助进行分离，并借助于外界机械产生的较大压力差或者机械力场分离毛细水和附着水。

(4) 内部结合水：微生物细胞内部的液体。一部分污泥被包围在微生物的细胞膜中，间隙水、毛细水、吸附水等都是外部液体，而细胞液则是内部液体。要去除内部水，必须破坏细胞膜。而使用机械方法是无法去除，但可以通过好氧或厌氧菌的作用，使细胞在污泥中进行生物分解，或采用高温加热和冷冻等措施。这时，内部水成了外部液体的形式。吸附水和内部水共占污泥水分的 10%，由于与污泥颗粒结合紧密，只能用人工加热、干化焚烧等方法才能将其去除^[7, 9]。

1.2 污泥的处理与处置

城市污泥处理与处置主要是以污泥减量化、稳定化、无害化和资源化为目的的。

(1) 减量化: 就是减少污泥最终处置前的体积, 从而降低污泥的处理费用。污泥减量化通常分为质量的减少和过程的减少, 质量减少的方法主要是通过稳定和焚烧, 污泥体积减小的方法主要是通过污泥浓缩、污泥脱水两个步骤来实现。

(2) 稳定化: 即通过物理化学或生物处理, 进一步减少污泥含水量, 杀灭污泥中的细菌、病原体, 消除臭味, 是污泥中的各种成分处于相对稳定状态的一个过程。需要采用生物好氧或厌氧消化工艺, 或添加化学药剂等方法, 是污泥中的有机组分转化成稳定的最终产物, 避免在污泥的最终处置过程中造成二次污染的可能性。

(3) 无害化: 采用适当的工程技术去除、分解或者“固定”污泥中的有毒、有害物质(如重金属、有机污染物)及消毒杀菌等, 使处理后的污泥在最终处置中不会对环境造成冲击, 防止意想不到的污染物在不同介质之间的转移, 更具有安全性和可持续性, 不会对环境造成危害。

(4) 资源化: 就是在处理污泥的过程中变废为宝、变害为利、达到污泥综合利用、保护环境的目的。污泥资源化的特征是: 环境效益高、生产成本低、生产效益高、能耗低。

污泥通常在污水处理厂内经过浓缩、脱水、厌氧消化等处理得到一般含水率为 75%~80% (带式脱水 80%, 离心脱水 75%) 泥饼。然后厂内处理得到的泥饼外运后进行最终处置, 传统的处置方式包括填埋、焚烧、排海等。

1.2.1 污泥浓缩

污泥浓缩的目的是使污泥初步减少体积, 缩小后续处理构筑物的容积或设备容量。污泥浓缩主要是缩减污泥的间隙水。活性污泥含水率高达 99% 左右, 浓缩后含水率可降为 95%~97%, 近似糊状, 初步达到污泥的减量化。当污泥含水率由 99% 降至 96% 时, 污泥体积缩小到原来的 1/4。目前, 污泥浓缩的方法主要有重力浓缩法、气浮浓缩法、机械浓缩法 (包括带式重力浓缩法和离心浓缩法), 还有微孔浓缩法、隔膜浓缩法和生物浮选浓缩法等^[10-13]。

1.2.2 污泥稳定

污泥稳定处理的目的是降解污泥中的有机质, 进一步减少污泥的含水量, 杀灭污泥中的细菌、病原体, 消除臭味, 使污泥中的各种成分处于相对稳定状态的一个过程。目前国内最常用的污泥稳定方法是厌氧消化和好氧消化, 污泥堆肥正处于不断研究阶段, 而热解和化学稳定方法由于技术和经济、能耗的原因而很少被采用。据统计, 我国污泥采用好氧消化技术和厌氧消化技术的比例分别为 2.81% 和 38.04%, 未采用稳定化措施占 55.70%^[14-17]。

污泥好氧消化是利用微生物的内源呼吸作用来实现污泥的稳定, 出现于 20 世纪 50 年代。当污泥系统中可供微生物利用的基质浓度很低时, 微生物会进行内源代谢, 自身氧化分解, 以获取维持自身生长所需要的能量, 这也称为微生物的隐性生长。在此过程中, 污

泥中的有机质被分解为二氧化碳、水等小分子物质,从而使污泥得到有效的处理处置。好氧消化法有以下优点:①对悬浮物的去除效率高;②上清液中的 BOD 浓度较低;③处理后的污泥产物无臭,污泥较稳定;④运行安全,操作管理方便;⑤处理效率高。但污泥好氧消化需要的能耗较高,为缩短消化时间,提高污泥好氧消化的效率,在污泥好氧消化前,需对污泥进行预处理^[15-17]。

污泥厌氧消化由于其高效的能量回收和较低的环境影响,成为目前国际上应用最为广泛的污泥稳定化和资源化的处理方法。它可以使污泥中挥发性悬浮固体含量减少 30%~50%,从而使污泥达到稳定,并有利于后续的脱水处理。厌氧消化是利用兼性菌和厌氧菌进行厌氧生化反应,分解污泥中的有机物质的一种污泥处理工艺。该过程是由多种微生物参与的复杂过程。

1.2.3 污泥脱水

污泥经浓缩、消化后,尚有 90%以上含水率,且易腐败发臭,需对污泥做干化与脱水处理。污泥脱水的主要目的是使固体富集,减少污泥体积,便于后续的处理、处置和利用。污泥中的自由水分基本上可以在污泥浓缩过程中被去除,而内部水一般难以分离,所以污泥脱水去除的主要是污泥颗粒间的毛细水和颗粒表面的吸附水。

污泥机械脱水以过滤介质两面的压力差作为推动力,使污泥水分被强制通过过滤介质,形成滤液,而固体颗粒被截留在介质上,形成滤饼,从而达到脱水的目的。根据造成压力差形成推动力的方法的不同,可以将污泥机械脱水分为三类:①在过滤介质的一面形成负压进行脱水;②在过滤介质的一面加压进行脱水,即压滤脱水;③造成离心力实现泥水分离,即离心脱水。

干化和干燥是污泥深度脱水的一种形式,其所应用的污泥脱水能量主要是热能。干化、干燥是使热能传递至污泥中的水,并使其汽化的过程。使用自然热能(太阳能)的干化过程称为自然干化;使用人工能源当热源的则称污泥干燥。由于污泥干燥能耗相当高(去除每千克水的能耗为 3 000~3 500 kJ),因此污泥干燥仅适用于脱水污泥的后续深度脱水^[12]。

1.2.4 污泥填埋

污泥经过简单的灭菌处理直接倾倒入低地或谷地制造人工平原是污泥填埋处置的基本方式,也是我国主要的处置方法。污泥填埋操作简单,投资费用小,处理费用低,适应性强,但侵占土地严重。如果防渗技术不够,填坑中含有的各种有毒有害物质,会通过雨水的侵蚀和渗漏造成土壤污染和地下水污染。近年来,由于渗滤液对地下水的潜在污染和城市用地的减少等原因,卫生填埋的处理技术标准要求越来越高,污泥填埋处置所占的比例越来越小,许多国家和地区甚至坚决反对新建填埋场^[18]。

1.2.5 污泥焚烧

污泥焚烧是将脱水污泥直接送入焚烧炉焚烧,是“最彻底”的污泥处理方法。它能使有机物全部炭化,有效杀死病原体,最大限度地减少污泥体积;且占地小,自动化水平高不受外界条件影响。焚烧可以达到最大限度减量的目的,但焚烧后的灰分,目前还没有合理的处理方法;焚烧过程中产生的烟气还会造成二次污染;且污泥焚烧处理成本昂贵。日

本和美国污泥焚烧比例较高,欧洲污泥焚烧也占到总处理量的 10%左右,而我国仅为 3.45%,不足英国的一半,西班牙的 1/3,美国的 1/6,日本的 1/15^[19, 20]。

1.2.6 污泥投海

某些沿海地区采用污泥投海的方式来处置污泥,但污泥投海并未从根本上解决环境问题,同时也造成了海洋污染,对海洋生态系统和人类食物链造成威胁,引发全球环境问题,因而遭到强烈的反对^[20]。

1.3 污泥资源化利用技术

随着环保技术的不断进步,污泥的资源化处理技术已经兴起,目前比较成熟的技术包括:污泥肥料化技术、污泥建材化技术、污泥燃料化技术和污泥热解技术等。

1.3.1 污泥肥料化技术

污泥肥料化技术主要将污泥与调理剂(锯末、秸秆、树叶、粪便、垃圾)及膨胀剂(木屑、秸秆、花生壳、玉米芯等)在一定条件下(pH、C/N、通气、水分、温度)进行堆沤,利用细菌、放线菌、真菌等微生物作用,促进可被生物降解有机物可控制地向稳定的腐殖质转化的生物学过程。污泥经堆肥化处理,病原菌、寄生虫卵、杂草种子几乎全部被杀死,无臭味,重金属有效态含量降低,速效养分含量增加,是一种性质稳定的生物肥料。污泥堆肥化过程有好氧堆肥和厌氧堆肥两种。经过堆肥的污泥地质疏松、容量减小、可被植物利用的营养成分增加^[21, 22]。目前,污泥堆肥主要用于城市园林绿地,为其养护提供廉价有机肥,避开食物链。污泥堆肥施入土壤后能改变土壤理化性质,调节土壤 pH,促进团粒结构的形成,改善土壤透水性、蓄水保肥性、通气性及耕作性。施用污泥堆肥的草坪土壤,其吸热、吸水与保水、保温能力增大,草坪发芽率较普通肥料处理高。我国城市绿地面积每年新增 5.5 万 hm^2 ,按 90 t/hm^2 施用污泥作为有机肥,全国城市绿化需要施用污泥近 500 万 t ^[23]。

为提高污泥农用效果,污泥-化肥复合肥系列产品也被研发出来,其工艺流程为:污泥→风干脱水→高温脱水灭菌→化学脱水→投配无机肥→破碎筛选→造粒→烘干→冷却筛选→成品。在上述工艺流程中,风干脱水采用自然晾晒,节约能耗,高温脱水灭菌在烘干机中进行,温度 400~420℃,在保证有机质不会分解的前提下杀灭病菌、病毒和寄生虫卵,并且利用化学脱水脱除多余的水分,减少高温脱水能量耗费。污泥-化肥复合肥价格大致与无机复合肥持平,使用后作物产量提高 5%左右^[24]。

目前,污泥肥料化技术尚存在一定环境风险,有研究表明,土壤中的重金属含量随污泥堆肥施用量的增加而明显提高^[24],说明污泥堆肥仍需在抑制重金属浸出方面进行深入研究。防止有害重金属含量超标或其植物有效态含量提高,是污泥堆肥今后需要集中解决的重要问题。

1.3.2 污泥建材化技术

污泥建材化是污泥资源化技术的重要发展方向之一。污泥含有机物 40%~70%,无机