



“十二五”国家重点图书

水体污染控制与治理科技重大专项

城镇污水处理厂 污泥处理处置技术与装备

张辰 主编
唐建国 主审

中国建筑工业出版社



“十二五”国家重点图书

水体污染控制与治理科技重大专项

城镇污水处理厂污泥处理处置 技术与装备

张 辰 主编

唐建国 主审



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

城镇污水处理厂污泥处理处置技术与装备/张辰主编.
北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 8
ISBN 978-7-112-22415-9

I. ①城… II. ①张… III. ①污泥处理 IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 147503 号

“十二五”国家重点图书
水体污染控制与治理科技重大专项
城镇污水处理厂污泥处理处置技术与装备

张辰 主编

唐建国 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路9号)
各地新华书店、建筑书店经销
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 19½ 字数: 450 千字
2018年10月第一版 2018年10月第一次印刷

定价: 88.00 元

ISBN 978-7-112-22415-9
(32292)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书全面系统地阐述了国内外污泥处理处置的主流技术和新技术进展，以及相关的技术装备。本书分为上下两篇共 16 章。上篇为基本技术理论，在梳理和分析比较国内外污泥处理处置现状和标准政策体系的基础上，围绕污泥浓缩、厌氧消化、脱水、堆肥、热干化、土地利用、焚烧等主流技术，系统介绍了污泥处理处置技术理论、工艺类型、技术要点和经验；在已经应用或具有应用前景的新技术方面，主要介绍了污泥热解、水热处理等资源化和能源化新技术。下篇为主要技术装备，系统介绍了国内外污泥处理处置装备的类型、特点和工程实践。

本书可作为污泥处理处置行业各级从业人员的入门书，可为环境工程、市政工程专业教学、设计和运行管理人员提供系统参考。

责任编辑：于 莉

责任校对：王雪竹

本书编委会

上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司

张 辰 谭学军 王磊磊 王 磊 王逸贤 段妮娜 刘战广

住房和城乡建设部科技与产业化发展中心

薛重华 石春力

同济大学

戴晓虎 戴翎翎 刘志刚

江南大学

王 硕 李 激 陈晓光 杨艳坤

中国市政工程华北设计研究总院有限公司

郭兴芳 申世峰 陈 立

南开大学

于宏兵 王启山 孙 发 于 坤 杨 楠 王 倩

前 言

随着我国城镇化水平和环境保护要求的不断提高,我国城镇污水处理能力日益增强。根据国家住房和城乡建设部的统计,截至2016年3月,我国城镇污水处理厂数量达到3910座,污水处理能力达到1.67亿 m^3/d ,相应的污泥产量为3000万~4000万 $\text{t}/\text{年}$ 。预计到2020年,我国的城镇污水处理厂污泥产量将达到6000万~9000万 $\text{t}/\text{年}$ 。

目前,城镇污水处理厂污泥处理处置已经成为政府、行业专家、公众共同关注的焦点,也逐步成为我国生态文明建设的工作重点。在“十二五”期间,我国污泥处理处置技术得到了快速发展,已有一批良好的原创性技术储备,并形成了一批代表性示范工程。但另一方面,污泥处理处置技术和装备的集成化水平仍不高,污泥的安全处置率仍较低,难以完全达到污泥的减量化、稳定化、无害化、资源化的要求。随着“十三五”规划的出台,建设资源节约型社会以及生态环境总体质量改善将得到进一步的重视,环保问题将被提升到一个新的历史高度。“水十条”也已明确提出地级及以上城市污泥无害化处理处置率应于2020年底前达到90%以上的目标。这对我国的污泥处理处置工作提出了更高要求,因此需要对国内外污泥处理处置技术和装备的现有基础和最新进展进行全面系统的梳理与总结,在此基础上提升我国污泥处理处置的总体发展水平。

本书的编写紧紧围绕污泥行业的核心内容,全面系统地阐述了国内外污泥处理处置的主流技术和新技术进展,以及相关的技术装备。本书分为上下两篇共16章。上篇为基本技术理论,在梳理和分析比较国内外污泥处理处置现状和标准政策体系的基础上,围绕污泥浓缩、厌氧消化、脱水、堆肥、热干化、土地利用、焚烧等主流技术,系统介绍了污泥处理处置技术理论、工艺类型、技术要点和经验;在已经应用或具有应用前景的新技术方面,主要介绍了污泥热解、水处理等资源化 and 资源化新技术。下篇为主要技术装备,系统介绍了国内外污泥处理处置装备的类型、特点和工程实践。本书可作为污泥处理处置行业各级从业人员的入门书,可为环境工程、市政工程专业教学、设计和运行管理人员提供系统参考。

由于作者水平有限,本书疏漏、错误和不当之处在所难免,尚请读者批评、指正。

目 录

上篇 基本技术理论

| | |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 概论 | 3 |
| 1.1 污泥性质与组成 | 3 |
| 1.2 国内外污泥处理处置现状 | 3 |
| 1.2.1 国外污泥处理处置现状 | 3 |
| 1.2.2 国内污泥处理处置现状 | 5 |
| 1.3 国内外污泥处理处置标准 | 10 |
| 1.3.1 国外污泥处理处置的法律法规及相关标准 | 10 |
| 1.3.2 国内污泥处理处置的法律法规及相关标准 | 17 |
| 1.3.3 国内外污泥处理处置标准、政策差异 | 17 |
| 第 2 章 污泥浓缩 | 22 |
| 2.1 污泥浓缩理论 | 22 |
| 2.1.1 污泥浓缩目的 | 22 |
| 2.1.2 污泥水分和去除方式 | 22 |
| 2.1.3 污泥浓缩原理 | 22 |
| 2.2 污泥浓缩技术分类 | 25 |
| 2.2.1 重力浓缩 | 26 |
| 2.2.2 机械浓缩 | 26 |
| 2.2.3 气浮浓缩 | 27 |
| 第 3 章 污泥厌氧消化 | 30 |
| 3.1 污泥厌氧消化理论 | 30 |
| 3.2 污泥厌氧消化工艺 | 31 |
| 3.3 污泥厌氧消化主要影响因素 | 33 |
| 3.3.1 温度 | 33 |
| 3.3.2 pH 值 | 34 |

| | | |
|------------|------------------------|-----------|
| 3.3.3 | 营养元素 | 34 |
| 3.3.4 | 抑制物质 | 34 |
| 3.3.5 | 污泥投配率 | 37 |
| 3.3.6 | 厌氧消化系统搅拌 | 37 |
| 3.3.7 | 氢 | 38 |
| 3.3.8 | 污泥预处理 | 38 |
| 3.4 | 污泥厌氧消化沼气及沼液的处理和利用 | 38 |
| 3.4.1 | 沼气提纯和利用 | 38 |
| 3.4.2 | 沼液利用和处理 | 39 |
| 3.4.3 | 沼渣利用和处理 | 40 |
| 3.5 | 污泥厌氧消化系统设计 | 40 |
| 3.5.1 | 厌氧消化方式选择 | 41 |
| 3.5.2 | 厌氧消化池池形选择 | 41 |
| 3.5.3 | 搅拌方式选择 | 42 |
| 3.5.4 | 厌氧消化池容积计算 | 44 |
| 3.5.5 | 热工计算及加热方法 | 45 |
| 3.5.6 | 沼气产量及储气柜 | 45 |
| 3.6 | 污泥厌氧消化新技术 | 46 |
| 3.6.1 | 基于高温热水解预处理的高含固污泥厌氧消化技术 | 46 |
| 3.6.2 | 污泥高含固厌氧消化技术 | 49 |
| 3.6.3 | 共消化(协同消化)技术 | 51 |
| 第4章 | 污泥脱水 | 54 |
| 4.1 | 污泥脱水理论 | 54 |
| 4.1.1 | 污泥脱水性能及影响因素 | 54 |
| 4.1.2 | 污泥调理或调质 | 56 |
| 4.1.3 | 污泥脱水效果评价 | 57 |
| 4.2 | 污泥脱水技术分类 | 58 |
| 4.2.1 | 压滤脱水 | 58 |
| 4.2.2 | 离心脱水 | 60 |
| 4.2.3 | 螺旋压榨式脱水 | 60 |
| 第5章 | 污泥堆肥 | 62 |
| 5.1 | 污泥堆肥原理 | 62 |
| 5.2 | 污泥堆肥工艺类型 | 64 |

| | | |
|------------|---------------|-----------|
| 5.2.1 | 好氧静态堆肥 | 64 |
| 5.2.2 | 条垛式堆肥 | 65 |
| 5.2.3 | 反应器堆肥 | 65 |
| 5.2.4 | 堆肥工艺比较 | 66 |
| 5.3 | 污泥堆肥新技术 | 67 |
| 5.3.1 | 污泥堆肥自动化技术 | 67 |
| 5.3.2 | 污泥堆肥除臭技术 | 69 |
| 5.3.3 | 污泥堆肥重金属控制技术 | 69 |
| 第6章 | 污泥热干化 | 71 |
| 6.1 | 污泥热干化特点 | 71 |
| 6.2 | 污泥热干化机理 | 72 |
| 6.3 | 污泥热干化工艺类型 | 73 |
| 6.3.1 | 热干化工艺分类 | 73 |
| 6.3.2 | 热干化工艺类型 | 74 |
| 6.4 | 污泥热干化污染物排放类型 | 82 |
| 6.4.1 | 热干化冷凝水 | 82 |
| 6.4.2 | 热干化尾气 | 83 |
| 6.5 | 污泥热干化安全性 | 83 |
| 6.5.1 | 粉尘爆炸 | 83 |
| 6.5.2 | 污泥自燃 | 84 |
| 第7章 | 污泥土地利用 | 86 |
| 7.1 | 概述 | 86 |
| 7.2 | 污泥土地利用方式 | 87 |
| 7.2.1 | 污泥农用 | 87 |
| 7.2.2 | 污泥林用 | 88 |
| 7.2.3 | 土地改良 | 88 |
| 7.3 | 污泥土地利用泥质要求 | 89 |
| 7.3.1 | 理化性质 | 89 |
| 7.3.2 | 养分和有机质含量 | 90 |
| 7.3.3 | 卫生学指标 | 92 |
| 7.3.4 | 重金属含量 | 93 |
| 7.3.5 | 有机污染物含量 | 94 |
| 7.3.6 | 腐熟度要求 | 94 |

| | | |
|------------|-------------------|------------|
| 7.4 | 污泥土地利用技术要点 | 94 |
| 7.4.1 | 污泥施用方法 | 94 |
| 7.4.2 | 污泥施用地点 | 95 |
| 7.4.3 | 污泥施用年限和施用率 | 97 |
| 7.4.4 | 污泥土地利用的监测 | 100 |
| 7.4.5 | 污泥土地利用的存档和报告 | 101 |
| 7.5 | 污泥农用 | 101 |
| 7.5.1 | 污泥农用的考虑因素 | 101 |
| 7.5.2 | 污泥农用方法和时间安排 | 102 |
| 7.5.3 | 污泥农用的施用率 | 103 |
| 7.6 | 污泥林用 | 109 |
| 7.6.1 | 污泥林用的考虑因素 | 109 |
| 7.6.2 | 污泥林用对树木的影响 | 110 |
| 7.6.3 | 污泥林用的施用时段 | 111 |
| 7.6.4 | 污泥林用的时间安排 | 112 |
| 7.6.5 | 污泥林用的施用率 | 112 |
| 7.7 | 污泥沙漠改良利用 | 116 |
| 7.7.1 | 污泥沙漠改良利用对土壤和植物的影响 | 116 |
| 7.7.2 | 污泥沙漠改良利用的植物选取 | 118 |
| 7.7.3 | 监测和监管 | 120 |
| 第8章 | 污泥焚烧 | 122 |
| 8.1 | 污泥单独焚烧 | 122 |
| 8.1.1 | 流化床焚烧 | 122 |
| 8.1.2 | 回转窑式焚烧 | 126 |
| 8.1.3 | 立式多膛焚烧 | 126 |
| 8.1.4 | 电动红外焚烧 | 128 |
| 8.2 | 水泥窑协同焚烧 | 129 |
| 8.2.1 | 水泥窑协同焚烧方法 | 130 |
| 8.2.2 | 水泥窑协同焚烧工艺流程 | 131 |
| 8.3 | 热电厂协同焚烧 | 131 |
| 8.3.1 | 湿污泥直接掺煤混烧 | 132 |
| 8.3.2 | 热电厂烟气余热干化后掺煤混烧 | 132 |
| 8.4 | 生活垃圾协同焚烧 | 133 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 第 9 章 污泥处理处置新技术 | 136 |
| 9.1 污泥热解技术 | 136 |
| 9.1.1 技术概况 | 136 |
| 9.1.2 热解工艺及产物 | 138 |
| 9.1.3 热解技术特点及展望 | 144 |
| 9.2 污泥水热处理技术 | 144 |
| 9.2.1 亚/超临界水氧化技术 | 145 |
| 9.2.2 湿式氧化技术 (WAO) | 146 |

下篇 主要技术装备

| | |
|------------------------------|-----|
| 第 10 章 污泥浓缩装备 | 151 |
| 10.1 离心浓缩机 | 151 |
| 10.1.1 卧式螺旋离心浓缩机 | 151 |
| 10.1.2 笼型离心浓缩机 | 153 |
| 10.2 带式浓缩机 | 154 |
| 10.3 转筒式浓缩机 | 155 |
| 10.4 螺压式浓缩机 | 157 |
| 第 11 章 污泥厌氧消化装备 | 159 |
| 11.1 厌氧消化预处理装备 | 159 |
| 11.1.1 污泥预热装备 | 159 |
| 11.1.2 粉碎筛分预处理装备 | 160 |
| 11.1.3 高温热水解预处理装备 | 160 |
| 11.2 厌氧消化罐 | 164 |
| 11.2.1 利浦厌氧消化罐 | 164 |
| 11.2.2 污泥分级分相厌氧消化装置 | 166 |
| 11.3 污泥搅拌机 | 171 |
| 11.3.1 沼气搅拌装备 | 171 |
| 11.3.2 机械搅拌装备 | 171 |
| 11.3.3 污泥泵循环搅拌装备 | 173 |
| 11.4 沼气脱硫设备 | 173 |
| 11.4.1 干法脱硫设备 | 173 |
| 11.4.2 湿法脱硫设备 | 174 |

| | | |
|---------------|----------------------|------------|
| 11.4.3 | 生物法脱硫设备 | 174 |
| 11.5 | 沼气储存设备 | 176 |
| 11.5.1 | 低压湿式储气柜 | 176 |
| 11.5.2 | 低压干式储气柜 | 177 |
| 11.5.3 | 高压干式储气柜 | 179 |
| 11.6 | 沼气发电机 | 179 |
| 11.7 | 沼气锅炉 | 181 |
| 第 12 章 | 污泥脱水装备 | 183 |
| 12.1 | 带式压滤机 | 183 |
| 12.2 | 卧式螺旋离心脱水机 | 186 |
| 12.3 | 叠螺式污泥脱水机 | 193 |
| 12.4 | 厢式隔膜压滤机 | 196 |
| 12.5 | 超高压弹性压榨机 | 203 |
| 12.6 | 低温真空脱水干化设备 | 206 |
| 12.7 | 螺旋压榨式脱水机 | 213 |
| 第 13 章 | 污泥堆肥装备 | 217 |
| 13.1 | 污泥翻抛机 | 217 |
| 13.1.1 | 条垛式翻抛机 | 217 |
| 13.1.2 | 槽式翻抛机 | 218 |
| 13.2 | 进料混合装备 | 222 |
| 13.2.1 | 料仓 | 222 |
| 13.2.2 | 混料机 | 223 |
| 13.2.3 | 布料机 | 227 |
| 13.3 | 一体化智能好氧发酵设备 | 228 |
| 13.4 | 滚筒动态好氧发酵装备 | 231 |
| 第 14 章 | 污泥热干化装备 | 237 |
| 14.1 | 超圆盘干化机 | 237 |
| 14.2 | 桨叶干化机 | 242 |
| 14.3 | 流化床干化机 | 245 |
| 14.4 | 薄层干化机 | 249 |
| 14.5 | 带式干化机 | 261 |
| 14.6 | 两段式污泥干化机 | 262 |

| | | |
|---------------|------------------------|------------|
| 14.7 | 转鼓式干化机 | 265 |
| 14.8 | 太阳能干化装备 | 266 |
| 第 15 章 | 污泥焚烧装备 | 268 |
| 15.1 | 流化床焚烧炉 | 268 |
| 15.2 | 回转窑式焚烧炉 | 274 |
| 15.3 | 立式多膛焚烧炉 | 277 |
| 15.4 | 电动红外焚烧炉 | 279 |
| 第 16 章 | 污泥处理处置新装备 | 280 |
| 16.1 | 绞压式高干压滤机 | 280 |
| 16.2 | 污泥热解装备 | 282 |
| 16.3 | 污泥水热处理装备 | 287 |
| 16.3.1 | 亚/超临界水氧化装备 | 287 |
| 16.3.2 | 湿式氧化装备 | 288 |
| 设备供应商 | | 292 |
| 参考文献 | | 293 |

上
篇

基本技术理论

第 1 章 概 论

1.1 污泥性质与组成

城镇污水处理厂污泥主要来源于初次沉淀池、二次沉淀池等污水处理工艺环节，是污水在生化、物化处理过程中的副产物，主要由有机残片、细菌菌体、无机颗粒、胶体等组成，具有亲水性强、可压缩性能差、脱水性能差的特点。通常情况下，污水处理厂初次沉淀池和二次沉淀池产生的污泥含水率高达 99% 以上，其有机物含量高、易腐化发臭、密度较小，是一种呈胶状液态，介于液体和固体之间的浓稠物，可以用泵运输，但它很难通过沉降进行固液分离。

有机物是污泥的重要组成部分，其在污泥中多以胞外聚合物（EPS）的形式存在，多呈稳定的多孔网状聚合结构。有研究表明，活性污泥质量的 80%、总有机物的 50%~90%、污泥干重的 15% 都来自于 EPS，因此 EPS 是污泥有机物的主要组成部分。污泥 EPS 主要包括了微生物絮体、微生物水解及衰亡产物以及附着在微生物絮体上的污水中的有机物等，该类物质主要以 C 和 O 组成的高分子多糖、蛋白质、核酸、腐殖酸类复杂有机化合物及油脂等形式存在，是污泥中最主要的碳源物质。

污泥兼有资源性和危害性的双重特性。一方面，污泥中含有氮、磷等营养物质和大量有机质，使其具备了制造肥料和作为生物质能源的基本条件；另一方面，污泥中含有大量病毒微生物、寄生虫卵、重金属、特殊有机物等有毒有害物质，存在严重的二次污染隐患。因此，如何在有效处理处置污泥污染物的同时，从中最大化地获得有价值的物质，是当前环境领域中研究的一个重点方向。

1.2 国内外污泥处理处置现状

1.2.1 国外污泥处理处置现状

各国对污泥的处理处置方式差异明显，如美国 16000 座污水处理厂年产 750 万 t 污泥（干重）中约 60% 经厌氧消化或好氧发酵处理成生物固体用作农田肥料，另外有 17% 填埋，20% 焚烧，3% 用于矿山恢复的覆盖。

2010 年，欧洲污泥焚烧占 27%，预计 2030 年达到 30%。污泥经适当处理后农用在欧洲普

遍推广应用,如2010年统计数据显示,欧盟27国污泥农用的比例为39%,根据污泥农用情况,可以发现荷兰、奥地利、希腊、比利时、瑞典、芬兰、德国西南部分州基本不农用;英国、法国、意大利、西班牙、丹麦、挪威以及卢森堡对农用持鼓励政策,如英国、丹麦和挪威进行农用的污泥分别占到了其污泥产量的75%、70%和78%。波兰污泥排放量约为 80×10^4 t/年,与西欧相比,波兰更多的是采用高温厌氧消化(产生沼气)、机械脱水与用溶胞产物脱水干化相结合的处理方法,污泥经过脱水/干化后,使用沼气产生的能量焚烧,回收灰分中的磷,最后剩余的灰分可用于建筑行业作为建材使用。俄罗斯主要采用自然干化床处理,封闭干化床一般被用于寒冷潮湿的地区,或用于要求减少占地空间和消除气味的地区。土耳其污泥处理处置采用包括浓缩、稳定、脱水和干化在内的现代化处理技术,同时通过焚烧将灰分回用于建筑材料。德国每年产生的污泥为220万t(干重),大于5000t污水处理厂设有厌氧消化处理系统,污水处理厂电耗的40%~60%则由污泥厌氧消化产生的沼气提供;英国和法国每年产生的污泥为120万t和85万t,60%的污水处理厂有厌氧稳定处理,以回收污泥中的生物质能。

欧盟各成员国中采用填埋方法处置污泥比例最低者为英国(8%),最高者为希腊、卢森堡(90%);在污泥农用方面,比例最低者为希腊、爱尔兰(10%),最高者为法国(60%);进行污泥焚烧比例最低者为意大利(1%),最高者为丹麦(24%)。欧盟最近正在修改废物处理法令,要求欧盟所有国家都必须遵循该法令。最初的法令(86/278/EEC)只要求将废物处理分为3个等级,即再使用、再循环与土壤恢复。考虑到公众对废物处理分3个等级能否满足环境保护的质疑,欧盟于2006年把此法令的3个等级增加到了5个等级,即环境保护、再使用、再循环、土壤恢复和最终处置,并相应制定了严格的标准,以尽可能地降低污泥填埋给环境带来的不利影响,特别是对地表水、地下水、土壤、空气和公众健康的影响。此标准定义了废物的不同分类(市政废物、危险废物、无危险废物和难降解废物),并且规定了废物的处置地点和填埋方式(表面填埋和深度填埋)。

西欧各国通过严格的法规控制简单的污泥处理处置方法,倡导污泥农用,在保护土壤、消除污泥不利影响的同时,最大限度地发挥污泥回用于农业的使用价值。欧洲环保委员会在环境保护法令中指出,污泥回用于农业必须是安全的,污泥中不应含有对农作物有害的病原菌。然而,民众却对这种污泥管理策略颇有微词,甚至提出了严重质疑。公众担心污泥农用对环境的不利影响主要体现在:(1)不能满足农作物的营养要求;(2)不利于对地表水、地下水的保护;(3)污泥中的氮可能造成地下水的污染。对于工业废水处理过程中产生的污泥,因其含有重金属等有害成分而不宜农用,否则会在一段时间内影响土壤结构,对农作物和人类健康造成极大危害。在这种情况下,可采用污泥焚烧处置,但处置成本较高,而且还会破坏污泥本身的肥料价值。尽管如此,有关污泥焚烧的处置方法在欧洲的一部分地区还是受到了相当程度的重视,往往与垃圾焚烧一并考虑。

日本和韩国以前采用的污泥处理处置技术主要包括焚烧、热干化、堆肥及填海,如韩国曾将大量的污泥(77%)进行填海处置。由于热干化和焚烧处理的能耗极高,且为满足严格的尾