

城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南

(试 行)

中华人民共和国住房和城乡建设部
中华人民共和国国家发展和改革委员会

二〇一一年三月

前 言

近年来，在国家节能减排和积极的财政政策作用下，城镇污水处理得到迅速发展，城镇水环境治理取得显著成效。但是必须看到，城镇污水处理过程产生的大量污泥还未普遍得到有效处理处置。这些污泥非常容易对地下水、土壤等造成二次污染，成为环境安全和公众健康的威胁，影响国家节能减排战略实施的积极效果。因此，污泥处理处置作为我国城镇减排的重要内容，必须采取有效措施，切实推进技术和工程措施的落实，满足我国节能减排战略实施的总体要求。

为指导各地城镇污水处理厂污泥处理处置设施的建设，按照无害化、资源化与低碳节能相结合的原则，因地制宜地科学选择技术路线和建设方案，住房和城乡建设部、国家发展和改革委员会共同组织编制了《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南（试行）》。

本指南编制依据国家和行业相关法律法规、标准规范，总结了近年来我国城镇污水处理厂污泥处理处置的实践经验和研究成果，借鉴了国外的先进经验，同时在编制过程中广泛地征求了有关方面的意见，对主要问题开展了专题论证，对具体内容进行了反复讨论和修改。

本指南的主要内容包括：总则、污泥的来源与性质、污泥处理处置的技术路线与方案选择、污泥处理的单元技术、污泥处置方式及相关技术、应急处置与风险管理。

本指南由住房和城乡建设部科技发展促进中心负责技术解释。请各单位在使用过程中，总结实践经验，提出意见和建议。

目 录

第一章	总则	1
第二章	污泥的来源与性质	2
第三章	污泥处理处置的技术路线与方案选择	4
第一节	国内外污泥处理处置的现状与发展趋势	4
第二节	污泥处理处置的原则与基本要求	5
第三节	污泥处理处置方案选择与评价	7
第四章	污泥处理的单元技术	13
第一节	浓缩脱水技术	13
第二节	厌氧消化技术	15
第三节	好氧发酵技术	23
第四节	污泥热干化技术	30
第五节	石灰稳定技术	35
第六节	其他技术	37
第五章	污泥处置方式及相关技术	39
第一节	污泥土地利用	39
第二节	污泥焚烧与协同处置技术	44
第三节	建材利用技术	58
第四节	污泥的填埋	60
第六章	应急处置与风险管理	63
第一节	污泥的应急处置	63
第二节	污泥处理处置的风险分析与管理	65
附录		68

第一章 总 则

1 编制目的

为落实《城镇污水处理厂污泥处理处置及污染防治技术政策（试行）》，指导全国城镇污水处理厂污泥处理处置设施更加合理地进行规划建设，为污泥处理处置技术方案选择提供依据，不断提高污泥处理处置的管理水平，防止对环境安全和公众健康造成危害，依据国家和行业相关法律法规和标准规范，编制本指南。

2 适用范围

本指南适用于城镇污水处理厂污泥处理处置技术方案选择及全过程的管理，指导污泥处理处置设施的规划、设计、环评、建设、验收、运营和管理。

3 指导思想

本指南的指导思想是针对国内污泥处理处置的实际需求，结合我国相关政策的要求和现有污泥处理处置设施的运行实践，借鉴国际上污泥处理处置的成功经验，按照安全环保、循环利用、因地制宜等重要原则，科学确定污泥处理处置设施的规划、建设和管理的技术要求。

4 规划建设的基本原则

城镇污水处理厂在新建、改建和扩建时，污泥处理处置设施的建设应执行“三同时”原则，即与污水处理设施同时规划、同时建设、同时投入运行。

应根据污泥特性选择合理的污泥处置方式。污泥处理设施的工艺及建设标准必须满足处置方式的要求。

5 过程管理的基本原则

污泥处理处置应进行全过程管理与控制。

工业废水排入市政污水管网前必须按规定进行厂内预处理，使有毒有害物质达到国家、行业或者地方规定的排放标准。污泥处理处置应根据污泥最终安全处置要求，采取必要的工艺技术措施，强化有毒有害物质的去除，并防止二次污染的产生。污泥处理处置运营单位应建立完善的检测、记录、存档和报告制度；对处理处置后的污泥及其副产物的去向、用途、用量等进行跟踪、记录和报告。

第二章 污泥的来源与性质

1 污泥的产生

城镇污水处理厂污泥是污水处理的产物，主要来源于初次沉淀池、二次沉淀池等工艺环节。每万 m^3 污水经处理后污泥产生量（按含水率 80% 计）一般约为 5~10 t，具体产量取决于排水体制、进水水质、污水及污泥处理工艺等因素。

2 污泥的性质

污泥性质主要包括物理性质、化学性质和卫生学指标等方面，污泥性质是选择污泥处理处置工艺的重要依据。

2.1 物理性质

污泥的物理性质主要有含水率、比阻等指标。

含水率是指污泥中所含水分的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，其单位为 m/kg 。通常，初沉污泥 $20\sim60 \times 10^{12} \text{ m/kg}$ ，活性污泥比阻为 $100\sim300 \times 10^{12} \text{ m/kg}$ ，厌氧消化污泥比阻为 $40\sim80 \times 10^{12} \text{ m/kg}$ 。一般来说，比阻小于 $1 \times 10^{11} \text{ m/kg}$ 的污泥易于脱水，大于 $1 \times 10^{13} \text{ m/kg}$ 的污泥难以脱水。机械脱水前应进行污泥的调理，以降低比阻。

2.2 化学性质

污泥化学性质复杂，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。

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%。

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，见表 2-1。

表 2-1 我国城镇污水处理厂污泥的植物营养成分（以干污泥计）（%）

污泥类型	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

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，见表 2-2。

表 2-2 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，见表 2-3。

表 2-3 我国 2006 年 140 个城镇污水处理厂污泥中重金属含量单位：mg/kg（干污泥）

项目	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Hg	As
平均值	2.01	219	72.3	1058	93.1	48.7	2.13	20.2
最大值	999	9592	1022	30098	6365	6206	17.5	269
最小值	0.04	51	3.6	217	20	16.4	0.04	0.78

2.3 卫生学指标

卫生学指标主要包括细菌总数、粪大肠菌群数、寄生虫卵含量等。

初沉污泥、活性污泥及消化污泥中细菌、粪大肠菌群及寄生虫卵的一般数量见，表 2-4。

表 2-4 城镇污水处理厂污泥中细菌与寄生虫卵均值表（以干污泥计）

污泥类型	细菌总数 10 ⁵ 个/g	粪大肠菌群数 10 ⁵ 个/g	寄生虫卵 10个/g
初沉污泥	471.7	158.0	23.3（活卵率 78.3%）
活性污泥	738.0	12.1	17.0（活卵率 67.8%）
消化污泥	38.3	1.2	13.9（活卵率 60%）

第三章 污泥处理处置的技术路线与方案选择

第一节 国内外污泥处理处置的现状与发展趋势

1 国外污泥处理处置的现状与发展趋势

发达国家经几十年的发展，污泥处理处置技术路线已相对成熟，相关的法律法规及标准规范已比较完善。

欧洲污泥处置最初的主要方式是填埋和土地利用。二十世纪90年代以来，可供填埋的场地越来越少，污泥处理处置的压力越来越大，欧洲建设了一大批污泥干化焚烧设施。由于污泥干化焚烧投资和运行费用较高，同时污泥中有害成分又逐步减少，使污泥土地利用重新受到重视，成为污泥处置方案的重要选择。近几年总的趋势是土地利用的比例越来越高，欧盟及绝大部分欧洲国家越来越支持污泥的土地利用。目前，德国、英国和法国每年产生的污泥（干重）分别为220万t、120万t和85万t，作为农用方向土地利用的比例分别已达到40%、60%和60%。

北美地区虽然土地资源充足，但卫生填埋总体较少，污泥处理处置的技术路线一直是农用为主，且为污泥农用做了大量安全性评价工作。目前，美国16000座污水处理厂年产710万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，用做农田肥料。另外，有17%填埋，20%焚烧，3%用于矿山恢复的覆盖。

日本由于土地限制，污泥处理处置的主要技术路线是焚烧后建材利用为主，农用与填埋为辅。近年来，日本开始调整原有的技术路线，更加注重污泥的生物质利用，逐步减少焚烧的比例。

综上，欧美国家目前比较明确的将土地利用作为污泥处置的主要方式和鼓励方向。土地利用主要包括三个方面：一是作为农作物、牧场草地肥料的农用；二是作为林地、园林绿化肥料的林用；三是作为沙荒地、盐碱地、废弃矿区改良基质的土壤改良。由于运输距离、操作难度等客观因素，污泥农用量又远高于林用和土壤改良。另外，欧美普遍采用厌氧消化和好氧发酵技术对污泥进行稳定化和无害化处理。其中50%以上的污泥都经过了厌氧消化处理。美国还另外建设了700多套好氧发酵处理设施。污泥的厌氧消化或好氧发酵为污泥的土地利用，尤其是农用提供了较好的基础。

2 中国污泥处理处置现状

随着我国城镇污水处理率的不断提高，城镇污水处理厂污泥产量也急剧增加。2009年，全国投入运行的城镇污水处理厂1992座，处理污水量280亿 m^3 ，产生含水率80%的污泥约2005万t。随着城镇化水平和污水处理量的增加，污泥量将很快突破3000万t。据不完全统计，目前全国城镇污水处理厂污泥只有小部分进行卫生填埋、土地利用、焚烧和建材利用等，而大部分未进行规范化的处理处置。污泥含有病原体、重金属和持久性有机物等有毒有害物质，未经有效处理处置，极易对地下水、土壤等造成二次污染，直接威胁环境安全和公众健康，使污水处理设施的环境效益大大降低。

第二节 污泥处理处置的原则与基本要求

1 污泥处理处置的原则

按照《城镇污水处理厂污泥处理处置及污染防治技术政策》(试行)的要求，参考国内外的经验与教训，我国污泥处理处置应符合“安全环保、循环利用、节能降耗、因地制宜、稳妥可靠”的原则。

安全环保是污泥处理处置必须坚持的基本要求。污泥中含有病原体、重金属和持久性有机物等有毒有害物质，在进行污泥处理处置时，应对所选择的处理处置方式，根据必须达到的污染控制标准，进行环境安全性评价，并采取相应的污染控制措施，确保公众健康与环境安全。

循环利用是污泥处理处置时应努力实现的重要目标。污泥的循环利用体现在污泥处理处置过程中充分利用污泥中所含有的有机质、各种营养元素和能量。污泥循环利用，一是土地利用，将污泥中的有机质和营养元素补充到土地；二是通过厌氧消化或焚烧等技术回收污泥中的能量。

节能降耗是污泥处理处置应充分考虑的重要因素。应避免采用消耗大量的优质清洁能源、物料和土地资源的处理处置技术，以实现污泥低碳处理处置。鼓励利用污泥厌氧消化过程中产生的沼气热能、垃圾和污泥焚烧余热、发电厂余热或其他余热作为污泥处理处置的热源。

因地制宜是污泥处理处置方案比选决策的基本前提。应综合考虑污泥泥质特征及未来的变化、当地的土地资源及特征、可利用的水泥厂或热电厂等工业窑炉状况、经济社会发展水平等因素，确定本地区的污泥处理处置技术路线和方案。

稳妥可靠是污泥处理处置贯穿始终的必需条件。在选择处理处置方案时，应优先采用先进成熟的技术。对于研发中的新技术，应经过严格的评价、生产性应用以及工程示范，确认

可靠后方可采用；在制订污泥处理处置规划方案时，应根据污泥处理处置阶段性特点，同时考虑应急性、阶段性和永久性三种方案，最终应保证永久性方案的实现；在永久方案完成前，可把充分利用其他行业资源进行污泥处理处置作为阶段性方案，并应具有应急的处理处置方案，防止污泥随意弃置，保证环境安全。

2 污泥处理处置设施规划建设的基本要求

污泥处理处置设施建设应首先编制污泥处理处置规划。污泥处理处置规划应与本地区的土地利用、环境卫生、园林绿化、生态保护、水资源保护、产业发展等有关专业规划相协调，符合城乡建设总体规划，并纳入城镇排水或污水处理设施规划建设规划。污泥处理处置设施应与城镇污水处理厂同时规划、同时建设、同时投入运行。

污泥处理处置应包括处理与处置两个阶段。处理主要是指对污泥进行稳定化、减量化和无害化处理的过程。处置是指对处理后污泥进行消纳的过程。污泥处理设施的方案选择及规划建设应满足处置方式的要求。在一定的范围内，污泥的稳定化、减量化和无害化等处理设施宜相对集中设置，污泥处置方式可适当多样。污泥处理处置设施的选址，应与水源地、自然保护区、人口居住区、公共设施等保持足够的安全距离。

应根据城镇排水或污水处理设施规划建设规划，结合现有污水处理厂的运行资料，确定并预测污泥的泥量与泥质，作为合理确定污泥处理处置设施建设规模与技术路线的依据。必要时，还应在污水处理厂服务范围内开展污染源调查、分析未来城镇建设以及产业结构的变化趋势，更加准确地掌握泥量和泥质资料。

污泥处理处置设施的规划建设应视当地的具体情况和所确定的应急方案、阶段性方案和永久性方案制定具体的实施方案，并处理好三种方案的衔接，同时应加快永久性方案的实施。污泥处理处置设施还应预先规划备用方案，以保证污泥的稳定处理与处置，应急处理处置方案可视情况作为备用方案。利用其他行业资源确定的污泥处理处置方案宜作为阶段性方案，不宜作为永久性方案。

污泥处理处置应根据实际需求，建设必要的中转和储存设施。污泥中转和储存设施的建设应符合《城市环境卫生设施设置标准》CJJ 27 等规定。

污泥处理处置设施建设时，相应安全设施的建设也必须执行同时规划、同时建设、同时投入的原则，确保污泥处理处置设施的安全运行。

污泥处理设施的工艺及建设标准应满足相应污泥处置方式的要求。污泥处理设施尚未满足污泥处置要求的，应加快改造，确保污泥安全处置。

3 污泥处理处置过程管理的基本要求

污泥处理处置应执行全过程管理与控制原则。应从源头开始制定全过程的污染物控制计划，包括工业清洁生产、厂内污染物预处理、污泥处理处置工艺的强化等环节，加强污染物总量控制。

工业废水排入市政污水管网前必须按规定进行厂内预处理，使有毒有害物质达到国家、行业或者地方规定的排放标准。

在污泥处理处置过程中，可采用重金属析出及钝化、持久性有机物的降解转化及病原体灭活等污染物控制技术，以满足不同污泥处置方式的要求，实现污泥的安全处置。

污泥运输应采用密闭车辆和密闭驳船及管道等输送方式。加强运输过程中的监控和管理，严禁随意倾倒、偷排等违法行为，防止因暴露、洒落或滴漏造成对环境的二次污染。城镇污水处理厂、污泥运输单位和各污泥接收单位应建立污泥转运联单制度，并定期将转运联单统计结果上报地方相关主管部门。

污泥处理处置运营单位应建立完善的检测、记录、存档和报告制度，对处理处置后的污泥及其副产物的去向、用途、用量等进行跟踪、记录和报告，并将相关资料保存5年以上。

应由具有相应资质的第三方机构，定期就污泥土地利用对土壤环境质量的影响、污泥填埋对场地周围综合环境质量的影响、污泥焚烧对周围大气环境质量的影响等方面进行安全性评价。

污泥处理处置运营单位应严格执行国家有关安全生产法律法规和管理规定，落实安全生产责任制；执行国家相关职业卫生标准和规范，保证从业人员的卫生健康；制定相关的应急处置预案，防止危及公共安全事故的发生。

第三节 污泥处理处置方案选择与评价

1 污泥处置方式的选择

污泥处置包括土地利用、焚烧及建材利用、填埋等方式。应综合考虑污泥泥质特征及未来的变化、当地的土地资源及环境背景状况、可利用的水泥厂或热电厂等工业窑炉状况、经济社会发展水平等因素，结合可采用的处理技术，合理确定本地区的主要污泥处置方式或组合。根据处置方式确定具体技术方案时，应进行经济性分析、环境影响分析以及碳排放分析。

1.1 污泥土地利用

应首先调查本地区可利用土地资源的总体状况，按照国家相关标准要求，结合污泥泥质以及厌氧消化、好氧发酵等处理技术，优先研究污泥土地利用的可行性。鼓励将城镇生活污水产生的污泥经厌氧消化或好氧发酵处理后，严格按国家相关标准进行土地利用。如果当地存在盐碱地、沙化地和废弃矿场，应优先使用污泥对这些土地或场所进行改良，实现污泥处置。用于土地改良的泥质应符合《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》GB/T24600 的规定。应对改良方案进行环境影响评价，防止对地下水以及周围生态环境造成二次污染。

当污泥经稳定化和无害化处理满足《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》GB/T 23486 的规定和有关标准要求时，应根据当地的土质和植物习性，提出包括施用范围、施用量、施用方法及施用期限等内容的污泥园林绿化或林地利用方案，进行污泥处置。

当污泥经稳定化和无害化处理达到《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质》CJ/T 309 等国家和地方现行的有关农用标准和规定时，应根据当地的土壤环境质量状况和农作物特点及《土壤环境质量标准》GB 15618，研究提出包括施用范围、施用量、施用方法及施用期限等内容的污泥农用方案，经污泥施用场地适用性环境影响评价和环境风险评估后，进行污泥农用并严格进行施用管理。

污泥土地利用方案通常包括以上三种土地利用形式，每一种形式的利用量可考虑随季节等因素进行动态调整。

当污泥以农用、园林绿化为土地利用方式时，可采用厌氧消化或高温好氧发酵等工艺对污泥进行处理。有条件的污水处理厂，应首先考虑采用污泥厌氧消化对污泥进行稳定化及无害化处理的可行性，污泥消化产生的沼气应收集利用。为提高能量回收率，可采用超声波、高温高压热水解等污泥破解技术，对剩余活性污泥在厌氧消化前进行预处理。当污水处理厂厌氧消化所需场地条件不具备，或污水处理厂规模较小时，可将脱水后污泥集中运输至统一场地，采用厌氧消化或高温好氧发酵等工艺对脱水污泥进行稳定化及无害化处理。高温好氧发酵工艺应维持较高的温度与足够的发酵时间，以确保污泥泥质满足土地利用要求。。

如污泥泥质经处理后暂不能达到土地利用标准，应制定降低污泥中有毒有害物质的对策，研究土地利用作为永久性处置方案的可行性。

1.2 污泥焚烧及建材利用

当污泥不具备土地利用条件时，可考虑采用焚烧及建材利用的处置方式。

当污泥采用焚烧方式时，应首先全面调查当地的垃圾焚烧、水泥及热电等行业的窑炉状况，优先利用上述窑炉资源对污泥进行协同焚烧，降低污泥处理处置设施的建设投资。当污泥单独进行焚烧时，干化和焚烧应联用，以提高污泥的热能利用效率。污泥焚烧后的灰渣，

应首先考虑建材综合利用；若没有利用途径时，可直接填埋；经鉴别属于危险废物的灰渣和飞灰，应纳入危险固体废弃物管理。

污泥也可直接作为原料制造建筑材料，经烧结的最终产物可以用于建筑工程的材料或制品。建材利用的主要方式有：制作水泥添加料、制陶粒、制路基材料等。污泥用于制作水泥添加料也属于污泥的协同焚烧过程。污泥建材利用应符合国家、行业和地方相关标准和规范的要求，并严格防止在生产和使用中造成二次污染。

1.3 污泥填埋

当污泥泥质不适合土地利用，且当地不具备焚烧和建材利用条件，可采用填埋处置。

污泥填埋前需进行稳定化处理，处理后泥质应符合《城镇污水处理厂污泥处置 混合填埋用泥质》GB/T 23485 的要求。污泥以填埋为处置方式时，可采用石灰稳定等工艺对污泥进行处理，也可通过添加粉煤灰或陈化垃圾对污泥进行改性处理。污泥填埋处置应考虑填埋气体收集和利用，减少温室气体排放。严格限制并逐步禁止未经深度脱水的污泥直接填埋。

2 典型污泥处理处置方案

2.1 厌氧消化后进行土地利用

该方案可有以下具体操作方案：

厌氧消化→脱水→自然干化（或好氧发酵）→土地利用（用于改良土壤、园林绿化、限制性农用）；

脱水→厌氧消化→脱水→自然干化（或好氧发酵）→土地利用（用于改良土壤、园林绿化、限制性农用）；

厌氧消化（或脱水后厌氧消化）→罐车运输→直接注入土壤（改良土壤、限制性农用）。

对于城镇生活污水为主产生的污泥，该类方案能实现污泥中有机质及营养元素的高效利用，实现能量的有效回收，不需要大量物料及土地资源消耗。厌氧消化后的污泥泥质能够达到限制性农用、园林绿化或土壤改良的标准，可优先考虑采用。

2.2 好氧发酵后进行土地利用

该方案有以下具体操作方案：

脱水→高温好氧发酵→土地利用（用于土壤改良、园林绿化、限制性农用）；

脱水→高温好氧发酵→园林绿化等分散施用。

对于城镇生活污水为主产生的污泥，该类方案能实现污泥中有机质及营养元素的高效利

用。好氧发酵后的污泥泥质能够达到限制性农用、园林绿化或土壤改良的标准，是较好的选择。

2.3 工业窑炉协同焚烧

该方案有以下具体操作方案：

脱水或深度脱水→在水泥窑、热电厂或垃圾焚烧炉协同焚烧；

脱水→石灰稳定→在水泥窑协同焚烧利用。

利用工业窑炉协同焚烧污泥其本质仍属于焚烧，但利用现有窑炉，可降低建设投资，缩短建设周期。

当污泥中的有毒有害物质含量很高，且有可供利用的工业窑炉情况下，可优先将工业窑炉协同焚烧作为污泥的阶段性处理处置方案。如污泥中有毒有害物质在较长时期内不可能降低时，应规划独立的干化焚烧系统作为永久性处置方案。

2.4 机械热干化后进行焚烧

该方案有以下具体操作方案：

脱水或深度脱水→热干化→焚烧→灰渣建材利用；

脱水或深度脱水→热干化→焚烧→灰渣填埋。

干化焚烧减量化和稳定化程度较高，占地面积较小。当污泥中的有毒有害物质含量很高且短期不可能降低时，该方案可作为污泥处理处置可行的选择。

2.5 石灰稳定后进行填埋

该方案有以下具体操作方案：

脱水→石灰稳定→堆置→填埋；

脱水→石灰稳定→填埋。

石灰稳定可实现污泥的稳定化和无害化。

用石灰稳定后的污泥可实现消毒稳定、并提高污泥的含固率，处理后的污泥进行填埋可阻止污染物质进入环境，但需要大量的石灰物料消耗和土地资源的消耗，且不能实现资源的回收利用。

当污泥中有毒有害污染物质含量较高，污水处理厂内建设用地紧张，而当地又有可供填埋的场地时，该方案可作为阶段性、应急或备用的处置方案。

2.6 脱水污泥直接填埋（过渡阶段方案）

该方案有以下具体操作方案：

深度脱水→填埋；

脱水→添加粉煤灰或陈化垃圾对污泥进行改性处理→填埋。

该方案占用土地量大，且导致大量碳排放。当污泥中有毒有害污染物质含量较高，污水处理厂内建设用地紧张，而当地又有可供填埋的场地时，该方案可作为阶段性、应急或备用的过渡阶段处置方案。

3 典型污泥处理处置方案的综合评价

在确定最终的污泥处理处置方案时，应对所选方案进行环境影响、技术经济等方面的综合分析。对于较大规模的污泥处理处置设施，还应对处理处置方案进行碳排放综合评价，尽量实现污泥的低碳处理处置。

本指南本章对各种污泥处理处置方案进行的经济性分析与评价，以及后面各章中对各种方案提出的投资费用及运行费用估算分析，均是基于对目前国内部分典型污泥处理处置工程总结分析的结果，仅供对技术方案进行经济分析时参考。各地在研究确定具体的污泥处理处置工程投资和运行费用时，应结合本地实际，依据可行性研究报告进行详细测算。

典型污泥处理处置方案的综合分析评价，见表 3-1。

表 3-1 典型污泥处理处置方案的综合分析评价

典型处理处置方案		厌氧消化+ 土地利用	好氧发 酵+土地 利用	机械干化+ 焚烧	工业窑炉协 同焚烧	石灰稳定+ 填埋	深度脱水+ 填埋
最佳适用的污泥种类		生活污水污 泥	生活污 水污泥	生活污水及 工业废水混 合污泥	生活污水及 工业废水混 合污泥	生活污水及 工业废水混 合污泥	生活污水及 工业废水混 合污泥
环境安全 性评价	污染因子	恶臭 病原微生物	恶臭 病原微 生物	恶臭 烟气	恶臭 烟气	恶臭 重金属	恶臭 重金属
	安全性	总体安全	总体安 全	总体安全	总体安全	总体安全	总体安全
资源循环 利用评价	循环要素	有机质 氮磷钾 能量	有机质 氮磷钾	无机质	无机质	无	无
	资源循环 利用效率 评价	高	较高	低	低	无	无
能耗物耗 评价	能耗评价	低	较低	高	高	低	低
	物耗评价	低	较高	高	高	高	高
技术经济 评价	建设费用	较高	较低	较高	较低	较低	低
	占地	较少	较多	较少	少	多	多
	运行费用	较低	较低	高	高	较低	低

在进行碳排放综合评价时，可参照联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）于 2006

年出版的《国家温室气体调查指南（卷5，废弃物）》（Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories（Vol 5, Waste））中提出的计算方法，来计算不同处理处置过程的碳排放量。未经稳定处理的污泥进行填埋处置是一个高水平碳排放过程。通常，每吨湿污泥可产生400~600 kg二氧化碳当量的直接碳排放。其他典型处理处置方案的碳排放水平均低于污泥直接填埋。在这些典型处理处置过程中，消耗化石能源产生的间接排放是主要的碳排放源，不同过程存在较大的差别。污泥处理处置过程的碳汇来源主要有两部分：一是对厌氧消化以及热转化过程产生的能源进行利用形成的直接碳汇；二是稳定化的污泥进行土地利用时，由于营养质增加降低化肥施用量，以及持水性增强降低灌溉需求形成的间接碳汇。按照IPCC的计算方法，污泥厌氧消化后进行土地利用的方案碳汇可大于碳源，实现负排放。典型污泥处理处置方案的碳排放分析，见表3-2。

表 3-2 典型污泥处理处置方案的碳排放分析

处理处置方案	碳排放分析		总体碳评价
厌氧消化+土地利用	碳源	电耗间接碳排放； 絮凝剂消耗间接碳排放； 燃料消耗直接或间接碳排放； 甲烷直接排放； 一氧化二氮直接排放。	负碳排放
	碳汇	沼气替代化石燃料的碳汇； 土壤的直接碳捕获； 替代氮肥与磷肥的碳汇。	
好氧发酵+土地利用	碳源	电耗间接碳排放； 絮凝剂消耗间接碳排放； 燃料消耗直接或间接碳排放； 甲烷直接排放； 一氧化二氮直接排放。	低水平碳排放
	碳汇	土壤的直接碳捕获； 替代氮肥与磷肥的碳汇。	
机械热干化+焚烧 工业窑炉协同焚烧	碳源	电耗间接碳排放； 絮凝剂消耗间接碳排放； 燃料消耗直接或间接碳排放； 甲烷直接排放； 一氧化二氮直接排放。	中等水平碳排放
	碳汇	焚灰替代石灰等建材原料的碳汇； 焚灰替代磷肥的碳汇。	
石灰稳定+填埋	碳源	电耗间接碳排放； 石灰消耗间接碳排放。	中等水平碳排放
	碳汇	无	
深度脱水+直接填埋	碳源	电耗间接碳排放； 絮凝剂消耗间接碳排放； 甲烷直接排放； 一氧化二氮直接排放。	高水平碳排放
	碳汇	填埋气替代化石燃料的碳汇。	

第四章 污泥处理的单元技术

第一节 浓缩脱水技术

1 原理与作用

污泥浓缩的作用是通过重力或机械的方式去除污泥中的一部分水分，减小体积；污泥脱水的作用是通过机械的方式将污泥中的部分间隙水分离出来，进一步减小体积。浓缩污泥的含水率一般可达 94%~96%。脱水污泥的含水率一般可达到 80% 左右。

2 应用原则

污泥浓缩和脱水工艺应根据所采用的污水处理工艺、污泥特性、后续处理处置方式、环境要求、场地面积、投资和运行费用等因素综合确定。

3 常规浓缩与脱水

3.1 浓缩工艺的主要类型及特点

污泥浓缩的方法主要分为重力浓缩、机械浓缩和气浮浓缩。目前经常采用重力浓缩和机械浓缩。

重力浓缩电耗少、缓冲能力强，但其占地面积较大，易产生磷的释放，臭味大，需要增加除臭设施。初沉池污泥用重力浓缩，含水率一般可从 97%~98% 降至 95% 以下；剩余污泥一般不宜单独进行重力浓缩；初沉污泥与剩余活性污泥混合后进行重力浓缩，含水率可由 96%~98.5% 降至 95% 以下。

机械浓缩主要有离心浓缩、带式浓缩、转鼓浓缩和螺压浓缩等方式，具有占地省、避免磷释放等特点。与重力浓缩相比电耗较高并需要投加高分子助凝剂。机械浓缩一般可将剩余污泥的含水率从 99.2%~99.5% 降至 94%~96%。

3.2 脱水工艺主要类型及特点

机械脱水主要有带式压滤脱水、离心脱水及板框压滤脱水等方式。

带式脱水噪声小、电耗少，但占地面积和冲洗水量较大，车间环境较差。带式脱水进泥含水率要求一般为 97.5% 以下，出泥含水率一般可达 82% 以下。

离心脱水占地面积小、不需冲洗水、车间环境好，但电耗高，药剂量大，噪声大。离心

脱水进泥含水率要求一般为 95%~99.5%，出泥含水率一般可达 75%~80%。

板框压滤脱水泥饼含水率低，但占地和冲洗水量较大，车间环境较差。板框压滤脱水进泥含水率要求一般为 97% 以下，出泥含水率一般可达 65%~75%。

螺旋压榨脱水和滚压式脱水占地面积小、冲洗水量少、噪声低、车间环境好，但单机容量小，上清液固体含量高，国内应用实例尚不多。螺旋压榨脱水进泥含水率要求一般为 95%~99.5%，出泥含水率一般可达 75%~80%。

4 污泥深度脱水

所谓深度脱水是指脱水后污泥含水率达到 55%~65%，特殊条件下污泥含水率还可以更低。目前，我国城镇污水处理厂大都无初沉池，且不经厌氧消化处理，故脱水后的污泥含水率大都在 78%~85% 之间。高含水率给污泥后续处理、运输及处置均带来了很大的难度。因此，在有条件的地区，可进行污泥的深度脱水。

深度脱水前应对污泥进行有效调理。调理作用机制主要是对污泥颗粒表面的有机物进行改性，或对污泥的细胞和胶体结构进行破坏，降低污泥的水分结合容量；同时降低污泥的压缩性，使污泥能满足高干度脱水过程的要求。

调理方法主要有化学调理、物理调理和热工调理等三种类型。化学调理所投加化学药剂主要包括无机金属盐药剂、有机高分子药剂、各种污泥改性剂等。物理调理是向被调理的污泥中投加不会产生化学反应的物质，降低或者改善污泥的可压缩性。该类物质主要有：烟道灰、硅藻土、焚烧后的污泥灰、粉煤灰等。热工调理包括冷冻、中温和高温加热调理等方式，常用的为高温热工调理。高温热工调理可分成热水解和湿式氧化两种类型，高温热工调理在实现深度脱水的同时还能实现一定程度的减量化。

目前，各种调理方法与主要机械脱水方式相结合的脱水效果，见表 4-1。

表 4-1 各种调理方法与主要机械脱水方式相结合的脱水效果

序号	脱水机械		
	调理方式	带式压滤机或者离心脱水机泥饼含水率 (%)	板框压滤机泥饼泥饼含水率 (%)
1	采用有机高分子药剂	70~82	65-75
2	采用无机金属盐药剂	-	65~75
3	采用无机金属盐药剂和石灰	-	55~65
4	高温热工调理	50~65	< 50
5	化学和物理组合调理	50~65	< 50

5 浓缩脱水单元可能引起的二次污染及控制要求

污泥浓缩和脱水过程产生大量恶臭气体，主要产生源为储泥池、浓缩池、污泥脱水机房以及污泥堆置棚或料仓。脱水机房恶臭气体不易散发，是污泥浓缩脱水过程臭气处理的重点区域。

应根据环境影响评价的要求采取除臭措施。新建污水厂应对浓缩池、储泥池、脱水机房、污泥储运间采取封闭措施，通过补风抽气并送到除臭系统进行除臭处理，达标排放；针对除臭的改建工程应根据构筑物的情况进行加盖或封闭，并增设抽风管路及除臭系统。一般采用生物除臭方法，必要时也可采用化学除臭等方法。

第二节 厌氧消化技术

1 原理与作用

厌氧消化是利用兼性菌和厌氧菌进行厌氧生化反应，分解污泥中有机物质，实现污泥稳定化非常有效的一种污泥处理工艺。污泥厌氧消化的作用主要体现在：

(1) 污泥稳定化。对有机物进行降解，使污泥稳定化，不会腐臭，避免在运输及最终处置过程中对环境造成不利影响；

(2) 污泥减量化。通过厌氧过程对有机物进行降解，减少污泥量，同时可以改善污泥的脱水性能，减少污泥脱水的药剂消耗，降低污泥含水率；

(3) 消化过程中产生沼气。它可以回收生物质能源，降低污水处理厂能耗及减少温室气体排放。

厌氧消化处理后的污泥可满足国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB18918中污泥稳定化相关指标的要求。

2 应用原则

污泥厌氧消化可以实现污泥处理的减量化、稳定化、无害化和资源化，减少温室气体排放。该工艺可以用于污水厂污泥的就地或集中处理。它通常处理规模越大，厌氧消化工艺综合效益越明显。

3 厌氧消化工艺

3.1 厌氧消化的分类

1) 中温厌氧消化

中温厌氧消化温度维持在 $35^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，固体停留时间应大于 20d，有机物容积负荷一般为 $2.0\sim 4.0\text{ kg/m}^3\cdot\text{d}$ ，有机物分解率可达到 35%~45%，产气率一般为 $0.75\sim 1.10\text{ N m}^3/\text{kgVSS}$ （去除）。

2) 高温厌氧消化

高温厌氧消化温度控制在 $55^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，适合嗜热产甲烷菌生长。高温厌氧消化有机物分解速度快，可以有效杀灭各种致病菌和寄生虫卵。一般情况下，有机物分解率可达到 35%~45%，停留时间可缩短至 10~15d。缺点是能量消耗较大，运行费用较高，系统操作要求高。

3.2 传统厌氧消化工艺流程与系统组成

传统厌氧消化系统的组成及工艺流程，如图 4-1 所示。当污水处理厂内没有足够场地建设污泥厌氧消化系统时，可将脱水污泥集中到其他建设地点，经适当浆液化处理后再进行污泥厌氧消化，其系统的组成及工艺流程图，如图 4-2 所示。

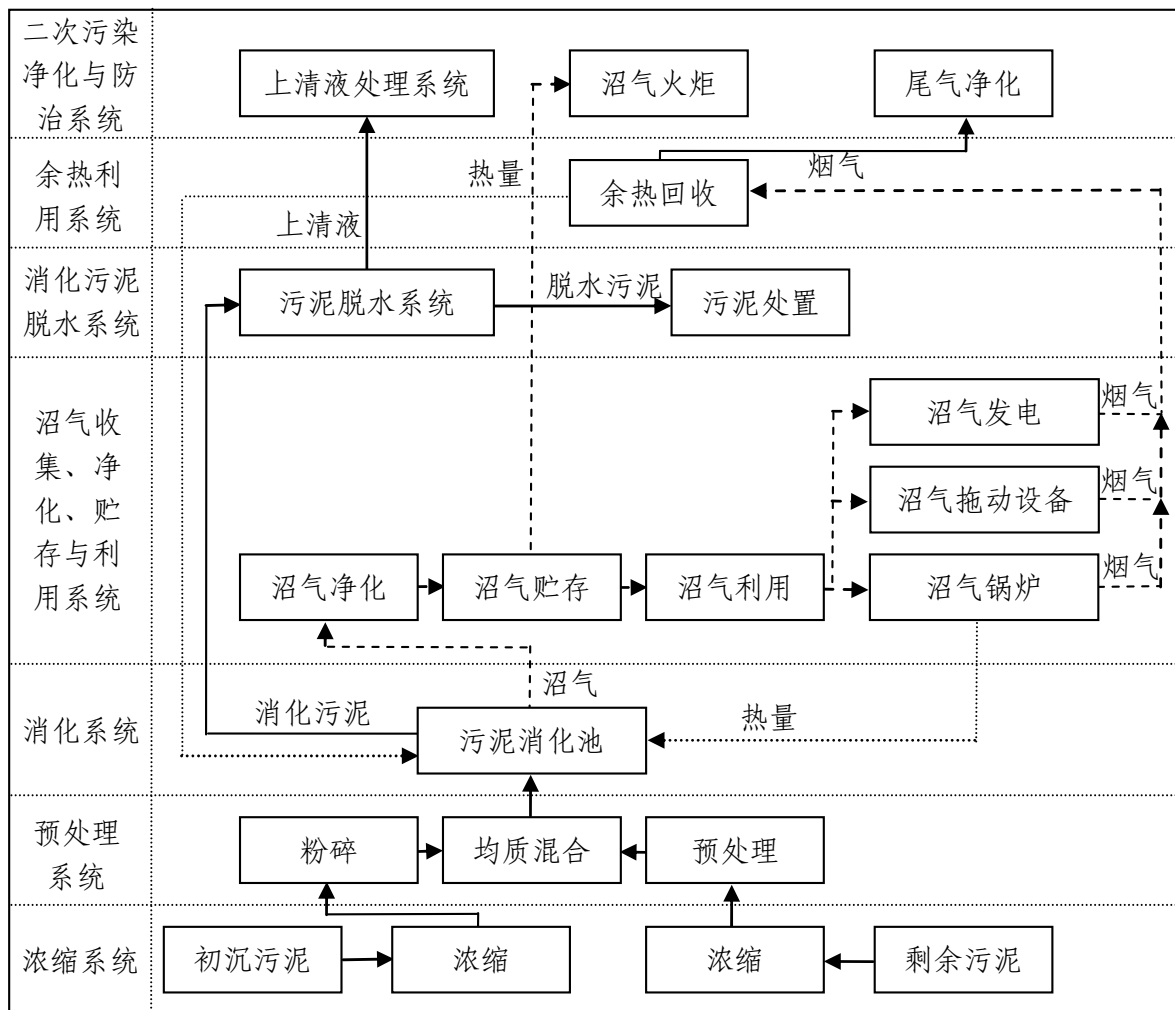


图 4-1 传统污泥厌氧消化工艺流程图

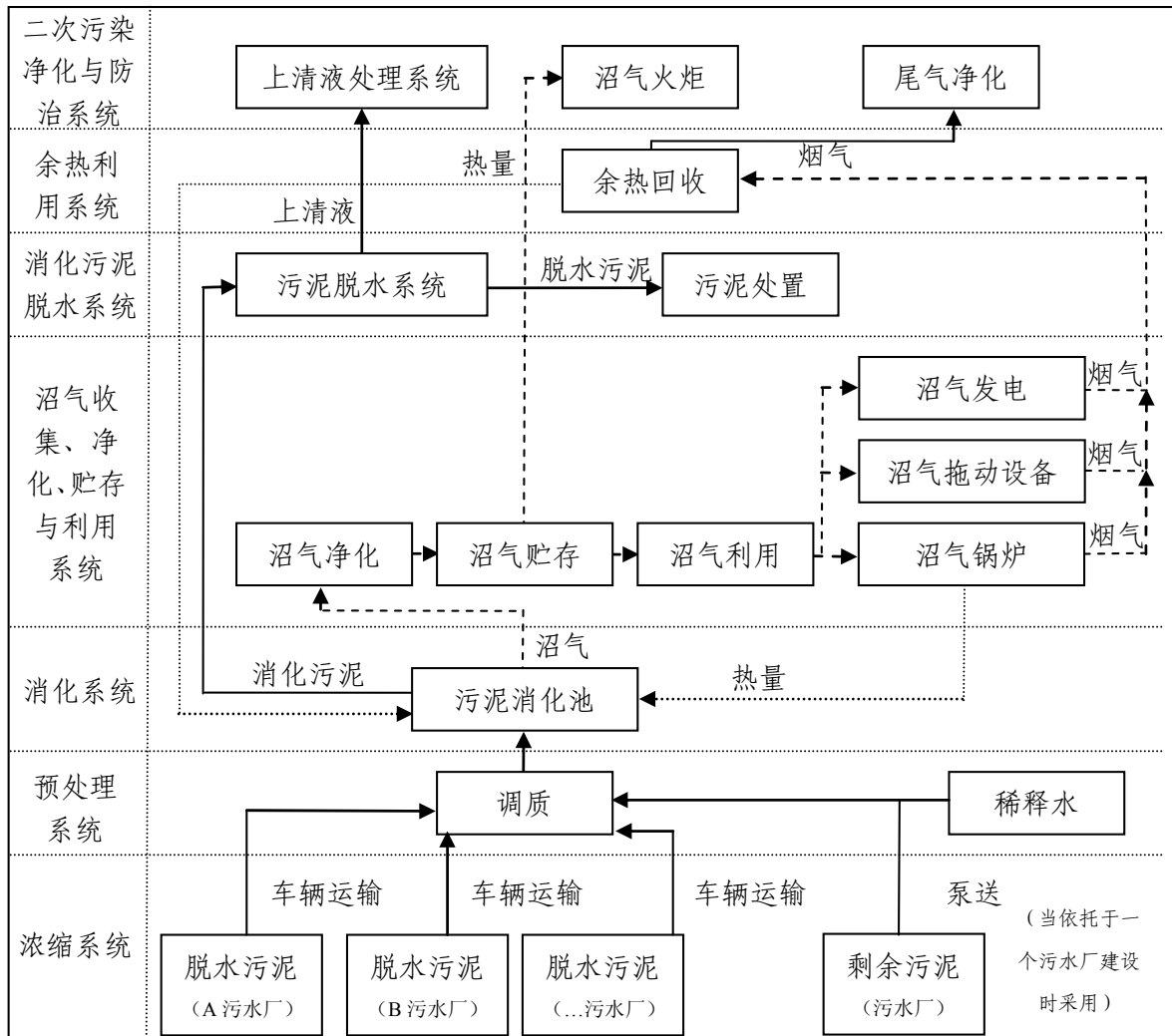


图 4-2 脱水污泥厌氧消化工艺流程图

传统污泥厌氧消化系统主要包括：污泥进出料系统、污泥加热系统、消化池搅拌系统及沼气收集、净化利用系统。

消化池通常有蛋形和柱形等池形，可根据搅拌系统、投资成本及景观要求来选择。池体可采用混凝土结构或钢结构。在全年气温高的南方地区，消化池可以考虑不设置保温措施，节省投资。沼气搅拌系统可根据系统的要求选择沼气搅拌或机械搅拌。

3.3 厌氧消化新技术

在污泥消化过程中，可通过微生物细胞壁的破壁和水解，提高有机物的降解率和系统的产气量。近年来，开发应用较多的污泥细胞破壁和强化水解技术，主要是物化强化预处理技术和生物强化预处理技术。

(1) 基于高温热水解（THP）预处理的高含固污泥厌氧消化技术

该工艺是通过高温高压热水解预处理（Thermal Hydrolysis Pre-Treatment），以高含固的脱

水污泥（含固率 15%~20%）为对象的厌氧消化技术。工艺采用高温（155℃~170℃）、高压（6 bar）对污泥进行热水解与闪蒸处理，使污泥中的胞外聚合物和大分子有机物发生水解、并破解污泥中微生物的细胞壁，强化物料的可生化性能，改善物料的流动性，提高污泥厌氧消化池的容积利用率、厌氧消化的有机物降解率和产气量，同时能通过高温高压预处理，改善污泥的卫生性能及沼渣的脱水性能、进一步降低沼渣的含水率，有利于厌氧消化后沼渣的资源化利用。

该工艺处理流程，如图 4-3 所示。此工艺已在欧洲国家得到规模化工程应用。

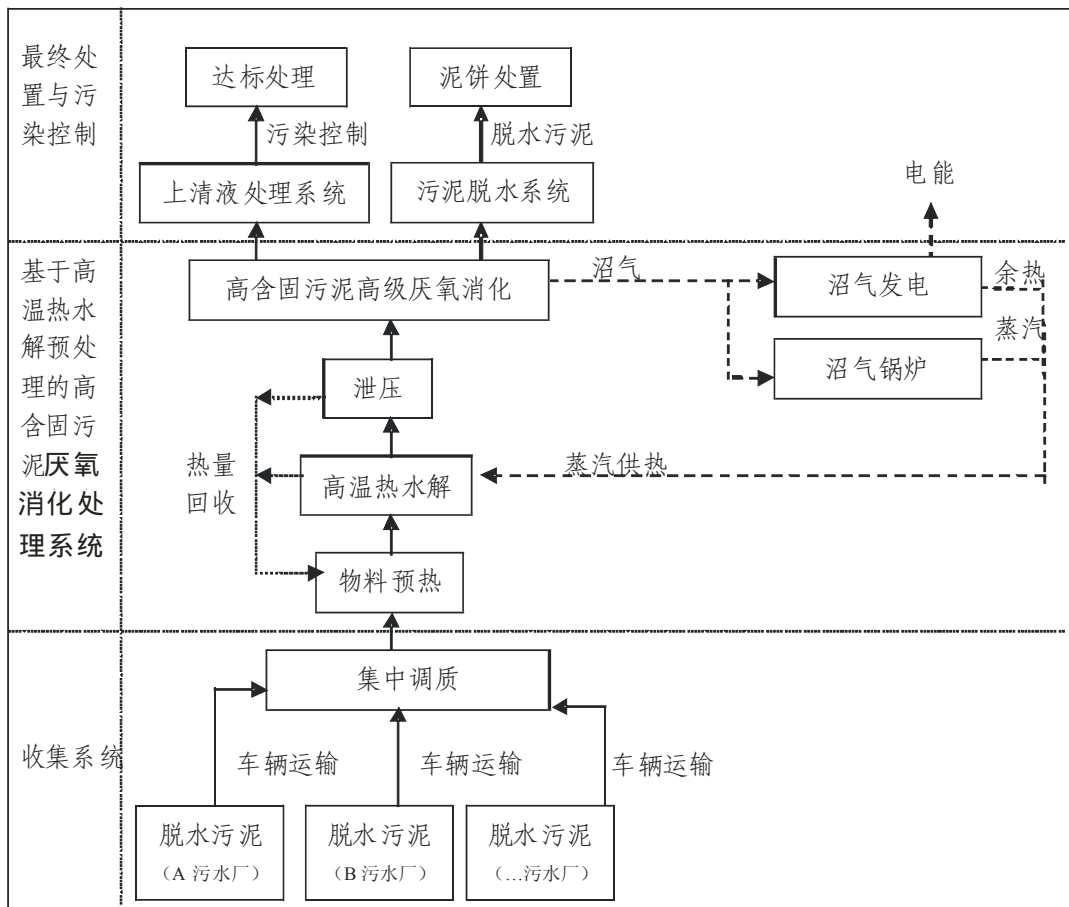


图 4-3 基于高温高压热水解预处理的高含固城市污泥厌氧消化流程图

(2) 其他强化厌氧消化预处理技术

其它强化厌氧消化预处理技术有：

生物强化预处理技术。它主要利用高效厌氧水解菌在较高温度下，对污泥进行强化水解或利用好氧或微氧嗜热溶胞菌在较高温下，对污泥进行强化溶胞和水解。

超声波预处理技术。它利用超声波“空穴”产生的水力和声化作用破坏细胞，导致细胞内物质释放，提高污泥厌氧消化的有机物降解率和产气率。

碱预处理技术。它主要是通过调节 pH，强化污泥水解过程，从而提高有机物去除效率和

产气量。

化学氧化预处理技术。它通过氧化剂如臭氧等，直接或间接的反应方式破坏污泥中微生物的细胞壁，使细胞质进入到溶液中，增加污泥中溶解性有机物浓度，提高污泥的厌氧消化性能。

高压喷射预处理技术。它是利用高压泵产生机械力来破坏污泥内微生物细胞的结构，使得胞内物质被释放，从而提高污泥中有机物的含量，强化水解效果。

微波预处理技术。微波预处理是一种快速的细胞水解方法，在微波加热过程中表面会产生许多“热点”，破坏污泥微生物细胞壁，使胞内物质溶出，从而达到分解污泥的目的。

4 沼气的收集、贮存及利用

4.1 沼气的性质

沼气成份包括 CH_4 、 CO_2 和 H_2S 等气体。甲烷的含量为 60%~70%，决定了沼气的热值； CO_2 含量为 30%~40%； H_2S 含量一般为 $0.1\sim 10\text{g}/\text{Nm}^3$ ，会产生腐蚀及恶臭。沼气的热值一般为 $21000\sim 25000\text{ kJ}/\text{Nm}^3$ ，约 $5000\sim 6000\text{ kcal}/\text{m}^3$ 及 $6.0\sim 7.0\text{ kWh}/\text{Nm}^3$ ，经净化处理后可作为优质的清洁能源。

4.2 沼气收集、净化与纯化

1) 沼气的收集与储存

沼气是高湿度的混合气，具有强烈的腐蚀性，收集系统应采用高防腐等级的材质。

沼气管道应沿气流方向设置一定的坡度，在低点、沼气压缩机、沼气锅炉、沼气发电机、废气燃烧器、脱硫塔等设备的沼气管线入口、干式气柜的进口和湿式气柜的进出口处都需设置冷凝水去除装置。在消化池和贮气柜适当位置设置水封罐。由于沼气产量的波动以及沼气利用的需求，沼气系统需设置沼气贮柜来调节产气量的波动及系统的压力。沼气贮柜有高压（ $\sim 10\text{bar}$ ），低压（ $30\sim 50\text{mbar}$ ）和无压三种类型。沼气贮柜的体积应根据沼气的产量波动及需求波动来选择。储存时间通常为 6~24h。为了保证，可根据沼气利用单元的压力要求，在沼气收集系统中设置压力提升装置。

2) 沼气净化

沼气在利用之前，需进行去湿、除油和脱硫处理。

去湿和除油处理常采用沉淀物捕集器和水沫分离器（过滤器）来去除沼气中的水沫和沉淀物。

应根据沼气利用设备的要求选择沼气脱硫方法。脱硫有物化法和生物法两类。物化法脱硫主要有干法和湿法两种。干式脱硫剂一般为氧化铁。湿法吸收剂主要为 NaOH 或 Na₂CO₃ 溶液。生物脱硫是在适宜的温度、湿度和微氧条件下，通过脱硫细菌的代谢作用将 H₂S 转化为单质硫。

3) 沼气纯化

厌氧消化产生的沼气含有 60%~70% 的甲烷，经过提纯处理后，可制成甲烷浓度 90%~95% 以上的天然气，成为清洁的可再生能源。

沼气纯化过程一般沼气经初步除水后，进入脱硫系统，脱硫除尘后的气体在特定反应条件下，全部或部分除去二氧化碳、氨、氮氧化物、硅氧烷等多种杂质，使气体中甲烷浓度达到 90%~95% 以上。

4.3 沼气利用

消化产生的沼气一般可以用于沼气锅炉、沼气发电机和沼气拖动。沼气锅炉利用沼气制热，热效率可达 90%~95%；沼气发电机是利用沼气发电，同时回收发电过程中产生的余热。通常 1 Nm³ 的沼气可发电 1.5~2.2 kWh，补充污水处理厂的电耗；内燃机热回收系统可以回收 40%~50% 的能量，用于消化池加温。沼气拖动是利用沼气直接驱动鼓风机，用于曝气池的供氧。

将沼气进行提纯后，达到相当于天然气品质要求，可作为汽车燃料、民用燃气和工业燃气。

5 厌氧消化系统的运行控制和管理要点

5.1 运行控制要点

1) 系统启动

消化池启动可分为直接启动和添加接种污泥启动两种方式。通过添加接种污泥可缩短消化系统的启动时间，一般接种污泥量为消化池体积的 10%。通常厌氧消化系统启动需 2~3 个月时间。

消化系统启动时先将消化池充满水，并加温到设计温度，然后开始添加生污泥。在初始阶段生污泥添加量一般为满负荷的五分之一，之后逐步增加到设计负荷。在启动阶段需要加强监测与测试，分析各参数以及参数关系的变化趋势，及时采取相应措施。

2) 进出料控制

连续稳定的进出料操作是消化池运行的重要环节。进料浓度、体积及组成的突然变化都会抑制消化池性能。理想的进出料操作是 24h 稳定进料。

3) 温度

温度是影响污泥厌氧消化的关键参数。温度的波动超过 2℃ 就会影响消化效果和产气率。因此，操作过程中需要控制稳定的运行温度，变化范围易控制在±1℃ 内。

4) 碱度和挥发酸

消化池总碱度应维持在 2000~5000 mg/L，挥发性有机酸浓度一般小于 500 mg/L。

挥发性有机酸与碱度反映了产酸菌和产甲烷菌的平衡状态，是消化系统是否稳定的重要指标。

5) pH 值

厌氧消化过程 pH 值受到有机酸和游离氨，以及碱度等的综合影响。消化系统的 pH 值应在 6.0~8.0 之间运行，最佳 pH 值范围为 6.8~7.2。当 pH 值低于 6.0 或者高于 8.0 时，产甲烷菌会受到抑制，影响消化系统的稳定运行。

6) 毒性

由于 H₂S、游离氨及重金属等对厌氧消化过程有抑制作用。因此，厌氧消化系统的运行要充分考虑到此类毒性物质的影响。

5.2 安全管理

为了防止沼气爆炸和 H₂S 中毒，需注意以下事项：

(1) 甲烷 (CH₄) 在空气中的浓度达到 5%~14% (体积比) 区间时，遇明火就会产生爆炸。所以，在贮气柜进口管线上、所有沼气系统与外界连通部位以及沼气管压缩机、沼气锅炉、沼气发电机等设备的进出口处、废气燃烧器沼气管进口处都需要安装消焰器。同时，在消化池及沼气系统中还应安装过压安全阀、负压防止阀等，避免空气进入沼气系统；

(2) 沼气系统的防爆区域应设置 CH₄/CO₂ 气体自动监测报警装置，并定期检查其可靠性，防止误报；

(3) 消化设施区域应按照受限空间对待。参照行业标准《化学品生产单位受限空间作业安全规范》AQ 3028 执行；

(4) 定期检查沼气管路系统及设备的严密性，发现泄漏，应迅速停气检修；

(5) 沼气贮存设备因故需要放空时，应间断释放，严禁将贮存的沼气一次性排入大气；放空时应认真选择天气，在可能产生雷雨或闪电的天气严禁放空。另外，放空时应注意下风向有无明火或热源；

(6) 沼气系统防爆区域内一律禁止明火，严禁烟火，严禁铁器工具撞击或电焊操作。防

爆区域内的操作间地面应敷设橡胶地板，入内必须穿胶鞋；

(7) 防爆区域内电气装置设计及防爆设计应遵循《爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范》GB 50058 相关规定；

(8) 沼气系统区域周围一般应设防护栏、建立出入检查制度；

(9) 沼气系统防爆区域的所有厂房、场地应符合国家规定的甲级防爆要求设计。具体遵循《建筑设计防火规范》GB 50016，并可参照《石油化工企业设计防火规范》GB 50160 相关条款。

6 二次污染控制和要求

6.1 消化液的处理与磷的回收利用

污泥消化上清液(沼液)中含有高浓度的氮、磷(氨氮 300~2000 mg/L, 总磷 70~200 mg/L)。沼液肥效很高，有条件时，可作为液态肥进行利用。

针对污泥上清液中高氮磷、低碳源的特点，可采用基于磷酸铵镁(鸟粪石)法的磷回收技术和厌氧氨氧化工艺的生物脱氮技术，对污泥消化上清液进行处理，以免加重污水处理厂水处理系统的氮磷负荷，影响污水处理厂的正常运行。

6.2 消化污泥中重金属的钝化耦合

污泥中的重金属主要以可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、硫化物及有机结合态和残渣态五种形态存在。其中，前三种为不稳定态，容易被植物吸收利用；后两种为稳定态，不易释放到环境中。污泥中锌和镍主要以不稳定态的形式存在；铜主要以硫化物及有机结合态存在；铬主要以残渣态存在；汞、镉、砷、铅等毒性大的金属元素几乎全部以残渣态存在。在污泥的厌氧消化过程中，硫酸盐还原菌、酸化细菌等能促使污泥中硫酸盐的还原和含硫有机质的分解，而生成 S^{2-} 离子。所生成的硫离子能够与污泥中的重金属反应生成稳定的硫化物，使铜、锌、镍、铬等重金属的稳定态含量升高，从而降低对环境造成影响。另外，温度、酸度等环境条件的变化， CO_3^{2-} 等无机物以及有机物与重金属的络合；微生物的作用，同样可以引起可交换的离子态向其他形态的转化，使重金属的形态分布趋于稳定态。从而它们可以达到稳定、固着重金属的作用。

6.3 臭气、烟气、沼气和噪声处理

厌氧消化池是一个封闭的系统，通常不会有臭气逸出，但是污泥在输送和贮存过程会有臭气散发。对厌氧消化系统内会散发臭气的点应进行密闭，并设排风装置，引接至全厂统一

的除臭装置中进行处理。

沼气燃烧尾气污染物主要为 SO_2 和 NO_x ，排放浓度应遵守相关标准的要求。

当沼气产生量高于沼气利用量时或沼气利用系统未工作时，沼气应通过废气燃烧器烧掉。

沼气发电和沼气拖动设备会产生噪声，产生噪声的设备应设在室内，建筑应采用隔音降噪处理。人员进入时，需戴护耳罩。

7 投资与成本的评价及分析

国内污泥消化系统运行好的项目较少，采用的关键设备和配套设施主要依赖进口。因此，目前的投资与运行费用统计尚不具有典型性。

投资成本与系统的构成、污泥性质、自动化程度、设备质量等因素相关。一般情况下，厌氧消化系统的工程投资约为 20~40 万元/t 污泥（含水率 80%）（不包括浓缩和脱水）。若采用更多进口设备，投资成本将会增加。

厌氧消化直接运行成本约 60~120 元/t 污泥（含水率 80%）（不包括浓缩和脱水），折合吨水处理成本约 0.05~0.10 元/t。考虑沼气回收利用后，可节省部分运行成本。

第三节 好氧发酵技术

1 原理与作用

好氧发酵通常是指高温好氧发酵，是通过好氧微生物的生物代谢作用，使污泥中有机物转化成稳定的腐殖质的过程。代谢过程中产生热量，可使堆料层温度升高至 55℃ 以上，可有效杀灭病原菌、寄生虫卵和杂草种籽，并使水分蒸发，实现污泥稳定化、无害化、减量化。

2 应用原则

污泥好氧发酵处理工艺既可作为土地利用的前处理手段，又可作为降低污泥含水率，提高污泥热值的预处理手段。

污泥好氧发酵厂的选址应符合当地城镇建设总体规划和环境保护规划的规定；与周边人群聚居区的卫生防护距离应符合环评要求。

污泥好氧发酵工艺使用的填充料可因地制宜，利用当地的废料（如秸秆、木屑、锯末、枯枝等）或发酵后的熟料，达到综合利用和处理的目的。

3 好氧发酵工艺与设备

3.1 一般工艺流程

好氧发酵工艺过程主要由预处理、进料、一次发酵、二次发酵、发酵产物加工及存贮等工序组成，如图 4-4 所示。污泥发酵反应系统是整个工艺的核心。

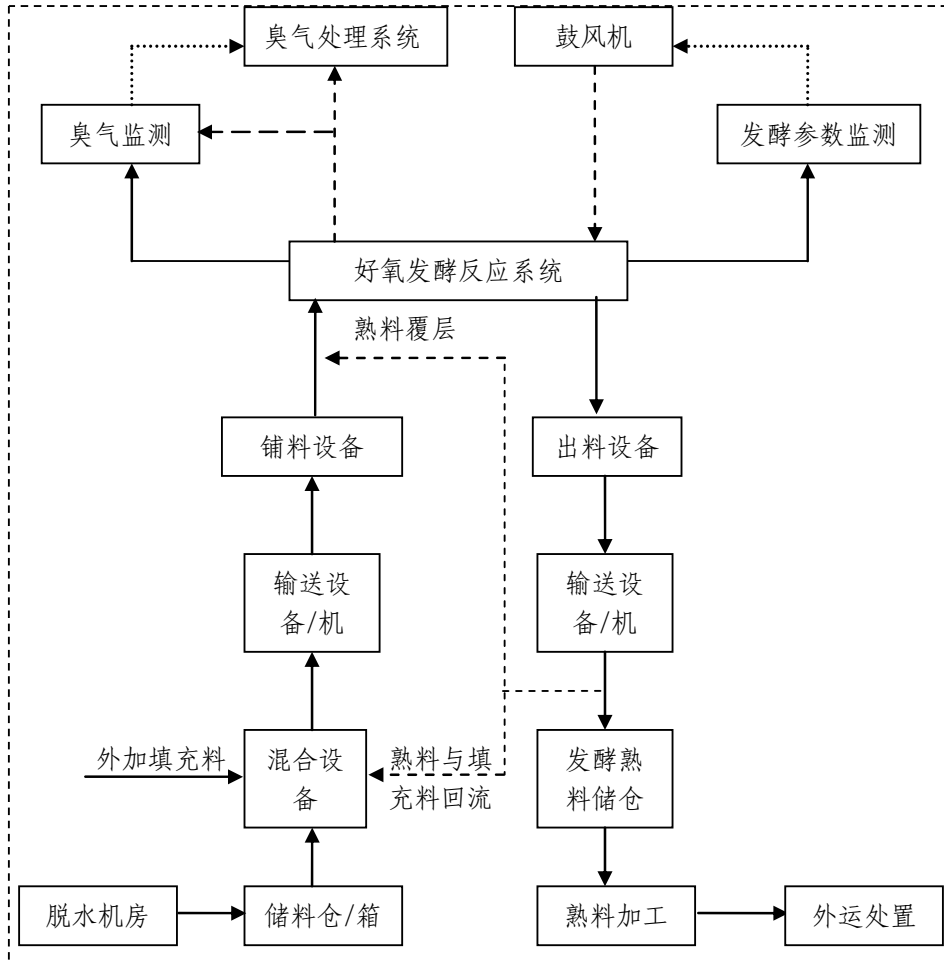


图 4-4 污泥好氧发酵工艺流程

3.2 好氧发酵的工艺类型

发酵反应系统是污泥好氧发酵工艺的核心。工艺流程选择时，可根据工艺类型、物料运行方式、供氧方式的适用条件，进行合理的选择使用，灵活搭配构成各种不同的工艺流程。

1) 工艺类型

工艺类型分一步发酵工艺和两步发酵工艺。一步发酵优点是工艺设备及操作简单，省去部分进出料设备，动力消耗较少；缺点是发酵仓造价略高，水分散发、发酵均匀性稍差。两步发酵工艺优点是一次发酵仓数少，二次发酵加强翻堆效应，使堆料发酵更加均匀，水分散发较好；缺点是额外增加出料和进料设备。

2) 物料运行方式

按物料在发酵过程中运行方式分为静态发酵，动态发酵，间歇动态发酵。静态发酵设备简单、动力消耗省。动态发酵物料不断翻滚，发酵均匀，水分蒸发好，但能耗较大。间歇动态发酵较均匀，动力消耗介于静态发酵与动态发酵之间。

3) 发酵堆体结构形式

发酵堆体结构形式主要分为条垛式和发酵池式。

条垛式堆体高度一般 1~2 m，宽度一般 3~5 m。条垛式设备简单，操作方便，建设和运行费用低，但堆体高较低，占地面积较大。由于供氧受到一定的限制，发酵周期较长，堆体表面温度较低，不易达到无害化要求，卫生条件较差。当用地条件宽松、外界环境要求较低时，可选用条垛式，此方式也适用于二次发酵。

发酵池式发酵仓为长槽形，发酵池上小下大，侧壁有 5°倾角，堆高一般控制在 2~3 m，设施价格便宜，制作简单，堆料在发酵池槽中，卫生条件好，无害化程度高，二次污染易控制，但占地面积较大。

4) 供氧方式

供氧方式有自然通风、强制通风、强制抽风、翻堆、强制通风加翻堆。

自然通风能耗低，操作简单。供氧靠空气由堆体表面向堆体内扩散，但供氧速度慢，供气量小，易造成堆体内部缺氧或无氧，发生厌氧发酵；另外堆体内部产生的热量难以达到堆体表面，表层温度较低，无害化程度较低，发酵周期较长，表层易滋生蚊蝇类。需氧量较低时（如二次发酵）可采用。

强制通风的风量可精确控制，能耗较低，空气由堆体底部进入，由堆体表面散出，表层升温速度快，无害化程度高好，发酵产品腐熟度高。但发酵仓尾气不易收集。

强制抽风的风量易控制，能耗较低，但堆体表层温度低，无害化程度差，表层易滋生蝇类。堆体抽出气体易冷凝成的腐蚀性液体，对抽风机侵蚀较严重。

翻堆有利于供氧与物料破碎，但翻堆能耗高，次数过多增加热量散发，堆体温度达不到无害化要求。次数过少，不能保证完全好氧发酵。一次发酵翻堆供氧宜与强制供氧联合使用。二次发酵可采用翻堆供氧。

强制通风加翻堆，通风量易控制，有利于供氧、颗粒破碎和水份的蒸发及堆体发酵均匀。但投资、运行费用较高，能耗大。

5) 发酵温度

温度是影响发酵过程的关键工艺参数。高温可以加快好氧发酵速率，更有利于杀灭病原体等有害生物，但温度过高（>70℃），对嗜高温微生物也会产生抑制作用，导致其休眠或死

亡，影响好氧发酵的速度和效果。因此，好氧发酵过程中要避免堆体温度过高，以确保嗜高温微生物菌群的最优环境条件，从而达到加速发酵过程，增强杀灭虫卵、病原菌、寄生虫、孢子以及杂草籽的功能。

频繁的动态翻抛不利于维持高温，会大大延长达到腐熟和无害化的时间，增加能耗和运行成本。

通风过程可以补充氧气，促进好氧微生物活动和产热，但与此同时也会带走堆体的热量，从而降低堆体温度。

3.3 好氧发酵工艺设备

1) 混合—破碎设备

该设备将脱水污泥与填充料均匀混合后，破碎为粒径均匀的颗粒物料，以保证发酵过程中良好的通风性能。混合设备主要为混料机，其运行功率建议选择 40~50 m³/h 为宜。

2) 输送—铺料设备

经过混合后的物料经过输送设备，送入铺料机，并将物料置入相应的发酵仓。一般情况下，输送设备与铺料设备相联接，铺料设备将物料均匀铺入堆体上部，避免堆体压实。铺料机建议选择行走速度为 4.5~5.0 m/min，可堆高度 1.5~2.0 m 为宜。

输送设备应具有防粘功能，易耗部件应易于拆卸和更换。主要输送设备包括皮带机和料仓。成套化的输送—铺料设备适合应用于大中型污泥好氧发酵工程，宜与自动化控制系统相结合，以保证工艺运行的稳定性。

3) 翻抛设备

污泥发酵过程需通过翻抛设备辅助完成供氧，调整堆体结构，均匀温度。对于中等规模污泥发酵厂，采用的翻抛机工作参数建议选择 250~300 m³/h，操作宽度不宜超过 5 m，最大翻抛深度为 2 m，行走速度在 1.5 m/min。同时还应配备移行车，其功能主要为将翻抛机运送至作业位置，移行车的行走速率建议选择 4.5~5.0 m/min 为宜。

4) 出料设备

发酵过程结束后，可通过出料设备，将熟料输送至仓外，以便进一步处置。目前一般采用皮带机作为出料设备。皮带机一般适用于对工艺自动化运行要求较高的大中型污泥好氧发酵工程，小型污泥好氧发酵可采用铲车出料或人工出料。

5) 供氧设备

在污泥好氧发酵工艺中，应用最多的供氧设备有罗茨风机、高压离心风机、中低压风机

等。强制供风方式中，根据风压风量要求，宜采用罗茨风机为宜，一台风机可为多个发酵仓供风。

6) 监测仪器

污泥高温好氧发酵工艺运行过程中，为保证发酵充分并避免臭气污染，应进行在线监测。在线监测的主要指标是臭气指标(NH_3 、 H_2S)和工艺指标(温度、氧气浓度)。需要配备 NH_3 、 H_2S 、温度、氧气浓度的在线监测仪器。仪器材料应选择以耐腐蚀、灵敏度高、操作简便的金属类探头为主。

7) 自动控制操作系统

大中型污泥发酵工程应配备自动控制操作系统，以便达到精确控制发酵参数，缩短发酵周期，促进污泥发酵腐熟。该系统包括操作平台、自动实时采集及反馈控制软件、便携式设备等等。

3.4 新型膜覆盖高温好氧发酵工艺

膜覆盖高温好氧发酵工艺是一种将微孔功能膜作为脱水污泥好氧发酵处理覆盖物的工艺技术。

覆盖功能膜的堆体在鼓风的作用下，在膜内形成一个低压内腔，从而使堆体供氧均匀充分，温度分布均匀，可以确保发酵物的卫生化水平，保证致病性微生物在发酵过程中得到有效杀灭，大大减少敞开式堆体工艺由于局部易发生厌氧而导致的臭气产生。

由于功能膜的微孔特性，覆盖在发酵体上，发酵中的水蒸气和 CO_2 可以自由排出，而致病性微生物、气溶胶等被有效隔离。功能膜同时还具有防雨功能，因此可以在室外建立发酵堆体。

膜覆盖高温好氧发酵工艺的堆体可采用条垛式、发酵池式或筒仓式。堆体高度一般1.5~2.5 m，宽度一般4~7 m。供氧一般采用堆体底部通风方式，采用中压离心风机供风。各堆体宜单独设立风机，并根据堆体的工艺指标(温度、氧气浓度)对风机进行实时控制。由于功能膜的覆盖作用，风机供氧利用率提高，风机功率较小，能耗低。

膜覆盖高温好氧发酵工艺由预处理、进料、一次发酵、二次发酵等工序组成。膜覆盖高温好氧发酵工艺发酵产品卫生化程度高、腐熟均匀。

4 好氧发酵设计与运行控制

4.1 预处理

脱水污泥好氧发酵前须进行适当的预处理，以调节适宜的含水率、碳氮比（C/N）等参数，并破碎成较小的颗粒。

污泥发酵前，脱水污泥必须与填充料进行混合、破碎。混合破碎后物料的颗粒直径应 ≤ 20 mm，含水率为 55%~60%，有机质含量 $\geq 35\%$ ，C/N 在 20:1~30:1，pH 值应调整至 6.0~8.0 之间。

与脱水污泥混合的填充料要求具有含水率低、C/N 比值高、具有一定的强度、颗粒分散性好的特点。可利用剪枝、落叶等园林废弃物和秸秆、木屑、锯末等有机废弃物，或利用已发酵的熟料作为回填料。

4.2 发酵工艺参数与操作条件

1) 卫生学要求

应达到无害化卫生要求，符合现行国家相关卫生标准。

2) 工艺设计参数

供气系统设计要求：供气方式有自然通风供气、强制通风供气，翻堆供气。在工程中三种供气方式可相互结合，形成多种供气方式，但须保证发酵堆体中始终均匀有氧。一次发酵堆体氧气浓度应在 5% 以上。

发酵仓设计要求：采用风机强制供气时，堆体高度不宜超过 3.0 m，当污泥物料含水率较高时，堆体高度不宜超过 2 m。一次发酵推荐采用发酵池式发酵。

工艺参数监控：温度、氧气、水分、C/N、臭气是影响好氧发酵过程的关键工艺参数。大中型发酵工程应对关键工艺参数进行在线监测和调控，以提高发酵效率和工艺稳定性，达到更好的臭气控制和节能减排效果。对原始污泥和发酵产品的理化性质和卫生学指标也应根据需要进行必要的检测。

进出料设计要求：进料应均匀铺料，防止出现堆体物料挤压；采用布气板系统，可有效避免物料压实，造成的通气不畅。

3) 一次发酵操作条件

发酵堆体中的温度、氧气浓度、耗氧速率监测间隔应以分钟计。条件允许时，建议采用自动采集与实时监测系统获取参数信息，保证发酵通风风量的及时调整。一次发酵堆体氧浓度不低于 5%，温度应保持在 55 °C 以上，持续时间不少于 6d，总发酵时间不少于 7d。一次发酵结束时，发酵污泥须满足表 4-2 中的相关指标。

表 4-2 发酵结束时发酵污泥相关指标

指标	要求
外观	深棕褐色、无臭、呈松散状、不招引苍蝇
卫生指标	蛔虫卵死亡率大于 95% 粪大肠菌值大于 0.01
耗氧速率	0.2 (O ₂ %) /min ~0.3 (O ₂ %) /min
含水率	45%以下
种子发芽试验	无抑制效应，种子发芽指数大于 60%

4.3 二次发酵工艺参数与操作条件

二次发酵堆体温度建议不高于 45℃，二次发酵周期一般在 30~50d。二次发酵推荐采用条垛式发酵。二次发酵结束时，发酵污泥须满足表 4-3 中的相关指标。

表 4-3 二次发酵结束时发酵污泥相关指标

外观	灰褐色、无臭、呈松散状、不招引苍蝇
耗氧速率	0.1 (O ₂ %) /min 以下
含水率	45%以下
种子发芽试验	无抑制效应，种子发芽指数大于 80%

5 二次污染控制要求

1) 作业环境要求

作业区的监测项目应包括噪声、粉尘、恶臭气体 (H₂S、NH₃ 等)、细菌总数 (空气); 厂内外环境的监测项目应包括大气中单项指标 (CO₂、CO、NO_x、飘尘、总悬浮颗粒物)、地面水水质、噪声、蝇类密度和臭级。污泥不宜在厂内外场地上裸卸，场地上散落污泥必须每日清扫; 发酵车间构筑物应具有防雨、隔音、防腐功能; 应配置换气装置和排水设施; 厂内应采取灭蝇措施; 在发酵过程中应保证全过程好氧，减少臭气产生; 发酵厂宜全封闭运行，发酵车间内需保持微负压，并设计良好的通风条件。恶臭污染物控制建议采用生物除臭法。恶臭气体 (H₂S、NH₃ 等) 的允许浓度，应符合现行国家标准《工业企业设计卫生标准》GBZ1、《工作场所有害因素职业接触限值》GBZ2 和《恶臭污染物排放标准》GB 14554 的规定。

2) 脱水污泥和发酵产物的储存和输送要求

应避免脱水污泥的长时间储存，脱水污泥储存时间不宜超过 12h; 脱水污泥的输送应有良好的衔接，避免污泥散落，尽可能减少臭气污染的发生; 应设置污泥发酵产物仓库，仓库容量应按能存储 30d 以上污泥发酵产品来设置。

6 高温好氧发酵工艺的成本评价与分析

根据机械化和自动化水平、工程规模的不同，投资成本可按 25~45 万元/t 污泥 (含水率

真 80%含水率)·d 进行估算(不含征地费)。

考虑人工、能耗、调理剂、药剂、设备折旧、维修等因素,运行成本大致为 120~160 元/t 污泥(含水率 80%)。

根据处理规模的不同,发酵装置的型式、机械化程度的不同,处理工艺所需的土地面积也不同,一般占地面积可按 150~200 m²/t 污泥(80%含水率)进行估算。

第四节 污泥热干化技术

1 原理与作用

为满足污泥后续处置要求,需要进一步降低常规机械脱水污泥的含水率。污泥的热干化是指通过污泥与热媒之间的传热作用,脱除污泥中水分的工艺过程。

2 应用原则

应根据处置的需要和实际条件选择干化的类型和工艺技术。热干化工艺应与余热利用相结合,不宜单独设置热干化工艺。可充分利用污泥厌氧消化处理过程中产生的沼气热能、垃圾和污泥焚烧余热、热电厂余热或其他余热干化污泥。

3 污泥干化工艺与设备

3.1 一般工艺流程

污泥热干化系统主要包括储运系统、干化系统、尾气净化与处理、电气自控仪表系统及其辅助系统等。污泥热干化系统的一般工艺流程,如图 4-5 所示。

储运系统主要包括料仓、污泥泵、污泥输送机等;干化系统以各种类型的干化工艺设备为核心;尾气净化与处理包括干化后尾气的冷凝和处理系统;电气自控仪表系统包括满足系统测量控制要求的电气和控制设备;辅助系统包括压缩空气系统、给排水系统、通风采暖、消防系统等。

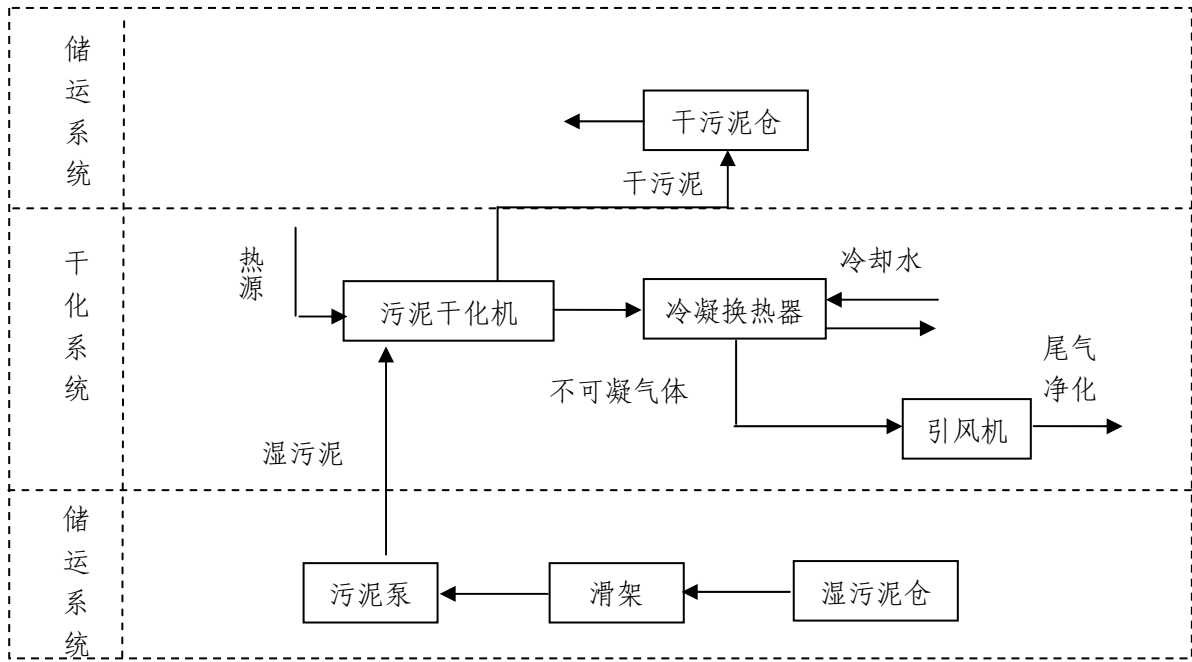


图 4-5 污泥热干化工艺流程

3.2 工艺与设备

1) 工艺设备类型

根据热量传递方式的不同，污泥干化设备分为直接加热和间接加热两种方式。考虑到系统的安全性和防止二次污染，推荐采用间接加热的方式。

2) 干化工艺设备

目前应用较多的污泥干化工艺设备包括流化床干化、带式干化、桨叶式干化、卧式转盘式干化、立式圆盘式干化和喷雾干化等六种工艺设备。干化工艺和设备应综合考虑技术成熟性和投资运行成本，并结合不同污泥处理处置项目的要求进行选择。

① 流化床干化

流化床干化系统中污泥颗粒温度一般为 $40^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ ，系统氧含量 $<3\%$ ，热媒温度 $180^{\circ}\text{C}\sim 220^{\circ}\text{C}$ 。推荐采用间接加热方式，热媒常采用导热油，可利用天然气、燃油、蒸汽等各种热源。流化床干化工艺既可对污泥进行全干化处理，也可半干化，最终产品的污泥颗粒分布较均匀，直径 $1\sim 5\text{ mm}$ 。

流化床干化工艺设备单机蒸发水量 $1000\sim 20000\text{ kg/h}$ ，单机污泥处理能力 $30\sim 600\text{ t/d}$ （含水率以 80% 计）。可用于各种规模的污水处理厂，尤其适用于大型和特大型污水处理厂。干化效果好，处理量大；国内有成功工程经验可以借鉴。但投资和维修成本较高；当污泥含沙量高时应注意采用防磨措施。

② 带式干化

带式干化的工作温度从环境温度到 65℃，系统氧含量<10%；直接加料，无需干泥返混。带式干化工艺设备既可适应于污泥全干化，也适用于污泥半干化。出泥含水率可以自由设置，使用灵活。在部分干化时，出泥颗粒的含水率一般可在 15%~40%之间，出泥颗粒中灰尘含量很少；当全干化时，含水率小于 15%，粉碎后颗粒粒径范围在 3~5 mm。带式干化工艺设备可采用直接或间接加热方式，可利用各种热源，如天然气、燃油、蒸汽、热水、导热油、来自于气体发动机的冷却水及排放气体等。

带式干化有低温和中温两种方式。低温干化装置单机蒸发水量一般小于 1000 kg/h，单机污泥处理能力一般小于 30 t/d（含水率以 80%计），只适用于小型污水处理厂；中温干化装置单机蒸发水量可达 5000 kg/h，全干化时，单机污泥处理能力最高可达约 150 t/d（含水率以 80%计），可用于大中型污水处理厂。由于主体设备为低速运行，磨损部件少，设备维护成本很低；运行过程中不产生高温和高浓度粉尘，安全性好；使用比较灵活，可利用多种热源。但单位蒸发量下设备体积比较大；采用循环风量大，热能消耗较大。

③ 桨叶式干化

桨叶式干化通过采用中空桨叶和带中空夹层的外壳，具有较高的热传递面积和物料体积比。污泥颗粒温度<80℃，系统氧含量<10%，热媒温度 150℃~220℃。一般采用间接加热，热媒首选蒸汽，也可采用导热油（通过燃烧沼气、天然气或煤等加热）。干污泥不需返混，出口污泥的含水率可以通过轴的转动速度进行调节，既可全干化，也可半干化。全干化污泥的颗粒粒径小于 10 mm，半干化污泥为疏松团状。

桨叶式干化工艺设备单机蒸发水量最高可达 8000 kg/h，单机污泥处理能力达约 240 t/d（含水率以 80%计），适用于各种规模的污水处理厂。结构简单、紧凑；运行过程中不产生高温和高浓度粉尘，安全性高；国内有成功的工程经验可以借鉴。但污泥易黏结在桨叶上影响传热，导致热效率下降，需对桨叶进行针对性设计。

④ 卧式转盘式干化

卧式转盘式干化既可全干化，也可半干化。全干化工艺颗粒温度 105℃，半干化工艺颗粒温度 100℃；系统氧含量<10%；热媒温度 200℃~300℃。采用间接加热，热媒首选饱和蒸汽，其次为导热油（通过燃烧沼气、天然气或煤等加热），也可以采用高压热水。污泥需返混，返混污泥含水率一般需低于 30%。全干化污泥为粒径分布不均匀的颗粒，半干化污泥为疏松团状。

卧式转盘式干化工艺设备单机蒸发水量为 1000~7500 kg/h，单机污泥处理能力为 30~225 t/d（含水率以 80%计），适用于各种规模的污水处理厂。结构紧凑，传热面积大，设备占地面

积较省。但可能存在污泥附着现象，干化后成疏松团状，需造粒后方可作肥料销售；在国内暂没有工程应用。

⑤ 立式圆盘式干化

立式圆盘式干化又被称为珍珠造粒工艺，仅适用于污泥全干化处理，颗粒温度 $100^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，系统氧含量 $<5\%$ ，热媒温度 $250^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 。采用间接加热，热媒一般只采用导热油（通过燃烧沼气、天然气或煤等加热）。返混的干污泥颗粒与机械脱水污泥混合，并将干颗粒涂覆上一层薄的湿污泥，使含水率降至 $30\%\sim 40\%$ 。干化污泥颗粒粒径分布均匀，平均直径在 $1\sim 5\text{ mm}$ 之间，无须特殊的粒度分配设备。

立式圆盘式干化工艺设备的单机蒸发水量一般为 $3000\sim 10000\text{ kg/h}$ ，单机污泥处理能力从 $90\sim 300\text{ t/d}$ （含水率以 80% 计），适用于大中型污水处理厂。结构紧凑，传热面积大，设备占地面积较省；污泥干化颗粒均匀，可适应的消纳途径较多。仅适用于全干化，对导热油的要求较高；在国内暂没有应用。

⑥ 喷雾干化

喷雾干化系统是利用雾化器将原料液分散为雾滴，并用热气体（空气、氮气、过热蒸汽或烟气）干燥雾滴。原料液可以是溶液、乳浊液、悬浮液或膏糊液。干燥产品根据需要可制成粉状、颗粒状、空心球或团粒状。

喷雾干化采用并流式直接加热，既可用于污泥半干化，也可用于全干化，且无须污泥返混。脱水污泥经雾化器雾化后，雾化液滴粒径在 $30\sim 150\mu\text{m}$ 之间。热媒首选污泥焚烧高温烟气，其次为热空气（通过燃烧沼气、天然气或煤等产生），也可采用高压过热蒸汽。采用污泥焚烧高温烟气时，进塔温度为 $400^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ ，排气温度为 $70^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$ ，污泥颗粒温度小于 70°C ，干化污泥颗粒粒径分布均匀，平均粒径在 $20\sim 120\mu\text{m}$ 之间。

喷雾干化工艺设备的单机蒸发能力一般为 $5\sim 12000\text{ kg/h}$ ，单机处理能力最高可达 360 t/d （含水率以 80% 计），适用于各种规模的污水处理厂。干燥时间短（以 s 计），传热效率高，干燥强度大采用污泥焚烧高温烟气时，干燥强度可达 $12\sim 15\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ ，干化污泥颗粒温度低，结构简单，操作灵活，安全性高，易实现机械化和自动化，占地面积小。但干燥系统排出的尾气中粉尘含量高，有恶臭，需经两级除尘和脱臭处理。国内已有工程实例可借鉴。

3.3 尾气净化与处理

污泥干化后的尾气包括水蒸汽和不可凝气体（臭气），需首先进行分离。水蒸汽通过冷凝装置冷凝后处理，不可凝气体（臭气）外排。干化尾气冷凝装置可采用喷淋塔或冷凝器。

4 设计与工艺控制

4.1 设计和运行控制要点

1) 污泥热干化程度的选择应遵循下列原则：利用干化工艺自身的技术特点；整个干化通过污泥与热媒之间的传热作用和后续处置系统投资和运行成本应最低；考虑污泥形态（松散度和粒度）对污泥输送、给料系统和后续处置设备的适应性。

2) 按照干化热源的成本，从低到高依次如下：①烟气；②燃煤；③蒸汽；④燃油；⑤沼气；⑥天然气。一般来说间接加热方式可以使用所有的能源，其利用的差别仅在温度、压力和效率。直接加热方式，则因能源种类不同，受到一定限制。其中燃煤炉、焚烧炉的烟气量大，又存在腐蚀性污染物，较难使用。

3) 与干化设备爆炸有关的三个主要因素是氧气、粉尘和颗粒的温度。不同的工艺会有些差异，但总的来说必须控制的安全要素是：流化床式和立式圆盘式的氧气含量小于 5%，带式、桨叶式和卧式转盘式的氧气含量小于 10%；粉尘浓度小于 60 g/m^3 ；颗粒温度小于 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

4) 湿污泥仓中甲烷浓度控制在 1% 以下；干泥仓中干泥颗粒的温度控制在 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下。

5) 为避免湿污泥敞开式输送对环境造成影响，应采用污泥泵和管道将湿污泥密封输送入干化机。干化机出料口须设置事故储存仓或紧急排放口，供污泥干化机停运或非正常运行时，暂存或外排。

6) 沙石混入污泥对干化设备的安全性存在着负面影响。对于含沙量较大的污泥，可通过增加耐磨裕量、降低转动部件转速等措施降低换热面的磨损。特别是采用导热油作为热媒介质时，须十分注意。

4.2 二次污染控制要求

污泥干化后蒸发出的水蒸汽和不可凝气体（臭气）需进行分离。水蒸汽通过冷凝装置冷凝后处理。焚烧厂的废水经过处理后应优先回用。当废水需直接排入水体时，其水质应符合《污水综合排放标准》GB 8978 的规定。

为防止污泥干化过程中臭气外泄，干化装置必须全封闭，污泥干化机内部和污泥干化间需保持微负压。干化后污泥应密封储存，以防止由于污泥温度过高而导致臭气挥发。干化厂恶臭污染物控制与防治应符合《恶臭污染物排放标准》GB 14554 的规定。

干化厂的噪声应符合《城市区域环境噪声标准》GB 3096 和《工业企业厂界噪声标准》GB 12348 的规定，对建筑物内直接噪声源控制应符合《工业企业噪声控制设计规范》GBJ 87

的规定。干化厂噪声控制应优先采取噪声源控制措施。厂区内各类地点的噪声控制宜采取以隔音为主，辅以消声、隔振、吸音的综合治理措施。

5 投资和运行成本的评价及分析

投资成本是由系统复杂程度、设备国产化率等因素决定的。一般情况下，若有可利用的余热能源，热干化采用国产设备时，单位投资成本在 10~20 万元/t 污泥（含水率 80%）；若干化设备采用进口设备，单位投资成本在 30~40 万元/t 污泥（含水率 80%）。

污泥热干化的运行成本是由众多因素所决定的，例如干化热源的价格、最终干化污泥的含水率、是否需单独建设尾气净化系统等，难以转化到具体金额。各干化设备的具体能耗，如表 4-4 所示。

表 4-4 各种干化设备的具体能耗

干化设备	热量消耗	电耗
流化床	720 kcal/kg 蒸发水量	100~200 kWh/t 蒸发水量
带式	760 kcal/kg 蒸发水量	50~55 kWh/t 蒸发水量
桨叶式	688 kcal/kg 蒸发水量	50~80 kWh/t 蒸发水量
卧式转盘式	688 kcal/kg 蒸发水量	50~60 kWh/t 蒸发水量
立式圆盘式	690 kcal/kg 蒸发水量	50~60 kWh/t 蒸发水量
喷雾式	850 kcal/kg 蒸发水量	80~100 kWh/t 蒸发水量

第五节 石灰稳定技术

1 原理与作用

通过向脱水污泥中投加一定比例的生石灰并均匀掺混，生石灰与脱水污泥中的水分发生反应，生成氢氧化钙和碳酸钙并释放热量。石灰稳定可产生以下作用：

1) 灭菌和抑制腐化。温度的提高和 pH 的升高可以起到灭菌和抑制污泥腐化的作用，尤其在 $\text{pH} \geq 12$ 的情况下效果更为明显，从而可以保证在利用或处置过程中的卫生安全性；

2) 脱水。根据石灰投加比例（占湿污泥的比例）的不同（5%~30%），可使含水率 80% 的污泥在设备出口的含水率达到 74.0%~48.2%。通过后续反应和一定时间的堆置，含水率可进一步降低；

3) 钝化重金属离子。投加一定量的氧化钙使污泥成碱性，可以结合污泥中的部分金属离子，钝化重金属；

4) 改性、颗粒化。可改善储存和运输条件，避免二次飞灰、渗滤液泄漏。

2 应用原则

污泥的石灰稳定技术可以做为建材利用、水泥厂协同焚烧、土地利用、卫生填埋等污泥处置方式的处理措施。

采用石灰稳定技术应考虑当地石灰来源的稳定性、经济性和质量方面的可靠性。

3 石灰稳定工艺与系统组成

3.1 工艺流程

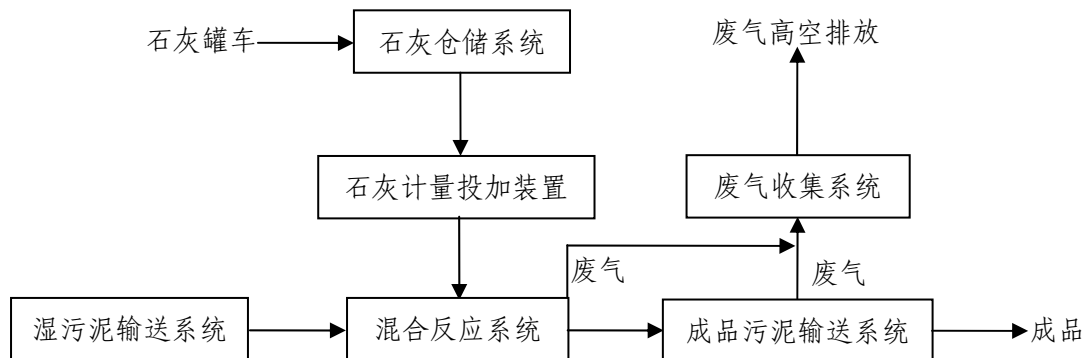


图 4-6 石灰稳定工艺系统流程图

3.2 系统组成

1) 输送系统（包括湿泥及成品污泥输送）

一般可选择螺旋输送机或带式输送机，应采用全封闭结构，以防止污泥散发的臭气排放到大气中，影响操作环境，危害操作人员的健康。

2) 石灰仓储与计量给料系统

石灰料仓用来暂时储存罐车运送来的石灰粉料。设有破拱装置、仓顶布袋除尘器、料位器等。

计量给料系统应确保在混合反应器开启后，石灰能持续、定量输送至混合反应器内。主要由进料斗、进料料位监测和出料装置、计量投加装置等组成。

3) 干化混合反应系统

作为石灰干化稳定工艺的核心设备，其运行表现直接影响整个项目效果。目前一般选择传统卧式混合搅拌反应器，主要由混合圆筒、工作轴、搅拌元件、在线监测装置等组成。

4) 废气收集及处理系统

污泥石灰稳定工艺中，废气主要特点是高温、高湿、高粉尘浓度、低有毒气体浓度。它

的主要成分为水蒸气、石灰粉尘、氨气，温度约为 30℃~50℃。针对该类废气，一般选择湿式喷淋塔或增加净化单元可满足处理需求。

4 设计与运行控制

1) 石灰掺混比例

根据污泥含水率、石灰活性及最终处置方式差异，石灰掺混比例可在 30% 以内调整。不同加钙量的脱水效果，见表 4-5。

表 4-5 加钙处理后污泥温度、pH 值及含固量变化（原始污泥含固率 22.7%）

编号	石灰与污泥的重量比 (%)	温度 (°C) (处理后 30 分钟测量)	在相应时间后的含固率 (%)		pH 值
			50 小时	一周	
1	2	28	30.8	33.1	12.5
2	4.6	30	35.9	38.0	12.6
3	6.9	43	39.2	41.4	12.6
4	9	45	48.1	未测	12.6
5	11	58	51.7	未测	12.6
6	14.4	59	54.8	未测	12.6

2) 混合物料的后续反应

石灰—污泥在快速混合后反应仍将不同程度地持续数小时至数天，设计中应优化工艺条件有利于污泥的后续反应及水蒸汽的蒸发，可以通过设计混合物料堆置设施（一般为 5~10d 混合物料的堆置空间）为其进一步的反应提供有利条件，但要考虑粉尘及有毒有害气体的控制。

5 投资及运行成本的评价与分析

相对污泥热干化、焚烧等处置方式，污泥石灰稳定工艺基建投资较低，根据规模及混合设备选型不同，固定资产投资约为 2~4 万元/t 污泥（含水率 80%）。

目前国内工程实例较少，工艺直接运行费用主要由石灰、电、人工、设备维护等费用组成。根据石灰掺混比例不同，单吨运行成本约为 50~150 元，其中，石灰消耗可占到总运行费用的 70%~90%。

第六节 其他技术

1 污泥热解处理技术

污泥热解技术是指污泥中有机质在缺氧条件下加热到一定温度裂解，转化为燃油、燃气、污泥碳和水的技术。根据污泥热解温度和产物的不同，污泥热解处理技术可以分为污泥气化技术、污泥油化技术和污泥炭化技术三大类。

污泥热解技术具有污泥中能量有效回收利用、温室气体排放减少、重金属得以固化、避免二噁英的产生、占地少、运行成本低等特点。

2 污泥水热处理技术

水热处理技术是将污泥加热，在一定温度和压力下使污泥中的粘性有机物水解，破坏污泥的胶体结构，改善脱水性能和厌氧消化性能的技术，也称热调质。

水热处理技术按照处理过程是否通入氧化剂，把水热处理分成热处理（也称为热水解）和湿式氧化两种。热处理没有氧化剂通入，而湿式氧化需要向反应器内通入氧化剂。水热处理按照反应温度和压力的不同，又分为低压、中压、高压氧化以及超临界氧化。按照添加催化剂与否，分为催化氧化和非催化氧化。

水热处理技术可与多种污泥处理、处置技术直接对接、联合使用。经过水热处理后的污泥脱水性能大幅度提高，经机械脱水可获得低含水率的泥饼，为污泥的处理和处置提供了基础；水热处理后污泥可进行高效率的厌氧消化，将污泥中的有机质充分转化为沼气；同时，针对水热处理上清液可引入水处理的高效厌氧工艺中，整体提高污泥处理系统效率；污泥中病原微生物在高温高压环境下被彻底杀灭。

第五章 污泥处置方式及相关技术

第一节 污泥土地利用

1 原理与作用

经无害化和稳定化处理后的污泥及污泥产品，以有机肥、基质、腐殖土、营养土等形式可用于农业、林业、园林绿化和土壤改良等方面，使污泥中的有机质及氮磷等营养资源得以充分利用，同时污泥也可得以有效处置。

2 应用原则

污泥必须经过厌氧消化、好氧发酵等稳定化及无害化处理后，才能进行土地利用。

未经稳定化处理的污泥进行农用时，可造成烧苗现象。污泥经稳定化及无害化处理后，有机污染物得到部分降解，重金属活性得到钝化，通过无害化过程产生的热量将污泥中大肠杆菌、病原菌和虫卵等灭杀，杂草种子灭活，降低了污泥在进行土地利用时的卫生和环境风险，并提高了植保安全性。

3 泥质要求

1) 养分与有机质

以有机肥料形式用于农业用途（包括农田、果园和牧草地等）的污泥，其氮磷钾（ $N+P_2O_5+K_2O$ ）含量应不低于 20 g/kg，有机质含量不低于 200 g/kg。以基质形式用于农业用途（包括草坪基质、容器育苗基质、苗木基质等）的污泥，其氮磷钾总量不低于 40 g/kg，有机质含量不低于 240 g/kg。用于园林绿化和林地用途的污泥，其氮磷钾总量不低于 30 g/kg，有机质含量不低于 200 g/kg。用于土壤改良和植被恢复途径的污泥，其养分与有机质含量，原则上不做要求。

2) 重金属

用于农业用途的污泥重金属限值须符合《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质》CJ/T309 标准的要求，可分为 A 级和 B 级污泥。A 级污泥要求较为严格，可用于蔬菜和粮食作物等食物链作物和纤维作物、饲料作物、油料作物等非食物链作物；B 级污泥对重金属限量适度放宽，但只能用于纤维作物、饲料作物、油料作物等非食物链作物。用于园林绿化和林地的污

泥重金属限值须符合《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》GB/T 23486 标准的要求。用于沙荒地、盐碱地和矿山废弃地土壤改良的污泥重金属含量应符合《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》CJ/T 291 标准的要求。

3) 物理性质

用于农业用途的污泥，粒径不应高于 10 mm，无粒径大于 5 mm 的杂物。用于育苗基质的污泥其容重应低于 0.8 g/cm^3 ，总孔隙度和持水孔隙度分别不低于 60%和 40%，电导率小于 3 ms/cm ，pH 应在 6.0~8.0 之间。

4) 腐熟度

以种子发芽指数作为污泥腐熟度的量化指标。用于农业用途的污泥种子发芽指数不低于 60%。园林绿化和林地用途的污泥种子发芽指数不低于 50%。用于基质途径的污泥其种子发芽指数不低于 75%。

5) 卫生指标

进行土地利用处置的污泥蛔虫卵死亡率应不低于 95%，粪大肠菌群值不低于 0.01。

4 土地利用的方式与方法

4.1 依据土地周围环境条件并结合处理方法选择具体的操作方式

湿污泥直接进行土地利用时，有耕作层施用、深层施用等操作方式。当用于污泥处置的土地远离人群，周围环境不敏感时，可在耕作层直接施用。如周围环境敏感，污泥在土地上摊铺后，应及时深翻至耕作层以下，避免恶臭污染。国外有的城市还将未经脱水的泥浆直接注入耕作层。好氧发酵的污泥施用条件较好，一般可在耕作层直接施用。

4.2 依据应用对象对养分的需求特性合理确定污泥施用量

污泥中的氮磷钾无机养分主要以有机态类型存在，因此污泥的养分释放特性以长效和缓释为主。同时，污泥有机态养分中又以易矿化态类型为主，在施用后速效养分释放较其他有机物料更为迅速，因此又兼具速效性。在进行土地利用时，建议考虑应用对象的养分需求特性，对于生长周期较长，特别是需要贮藏养分（如果树、林地等）的应用对象，适当提高污泥用量与添加比例。而对于生长周期较短的作物，适当降低污泥用量。涉及移栽环节的作物，在移栽后应适当增加污泥用量，保证缓苗的养分需求。以基质形式开展土地利用，适当提高污泥添加比例，甚至可全量使用污泥，以保证满足育苗期的充足养分需求。

4.3 不同应用对象的一般施用量

1) 农用为主的有机肥料

以有机肥料形式进行污泥农业应用，其应用对象包括林木、果树、花卉，在一定的限制条件下，也可用于麦谷类粮食作物等，一般作为基肥（底肥）进行应用，也可作为追肥施用。

施用量应根据作物养分需求、土壤养分供应特性和土壤环境容量综合确定，一般作物年度施用量范围控制在 $4\sim 8\text{ kg/m}^2$ 。对于由污泥制成的有机无机复合（混）肥，由于化肥成分的添加，可适当降低施用量。蔬菜和粮食作物在收获前 $30\sim 40\text{d}$ 不应再施用污泥有机肥料。

2) 育苗基质

育苗基质的应用范围包括：蔬菜育苗、林木育苗、花卉育苗等适宜工厂化操作的容器育苗。

对于以育苗基质为途径的土地利用方式，可将污泥视为营养土使用，建议适量提高污泥添加比例，一般占育苗基质体积的 $50\%\sim 70\%$ ，特别是林木育苗基质，可全部采用腐熟污泥作为基质原料。

3) 园林与公路绿化

园林绿化应用对象包括城市绿化带、公园绿化、行道绿化、公路护坡、隔离带及转盘绿化等。

一般园林绿化年度施用量应控制在 $4\sim 8\text{ kg/m}^2$ ，对于公路绿化和树木类可适当提高至 $8\sim 10\text{ kg/m}^2$ 。施用方式以沟施和穴施为主。

4) 林地

包括自然形成的森林和人工速生林等。

一般年度施用量控制在 $6\sim 8\text{ kg/m}^2$ 。施用方式以穴施为主。

5) 草坪

适用于人工建植的带土生产和无土生产的草坪。

年度施用量一般应控制在 $5\sim 10\text{ kg/m}^2$ ，最高不宜超过 12 kg/m^2 。施用方式以撒施为主。

6) 生态修复与植被恢复

适合在矿山废弃地、退化土地和植被无法生长的沙荒地施用。

年度施用量一般应结合恢复工程条件而确定，一般不高于 3 kg/m^2 ，可在施用后的污泥覆盖层上种植恢复性植物。施用方式以覆盖和机械掺混为主。

5 土地利用的环境风险与管理

对于污泥土地利用，应进行全过程的风险管理与控制。全过程风险控制流程，见图 5-1。

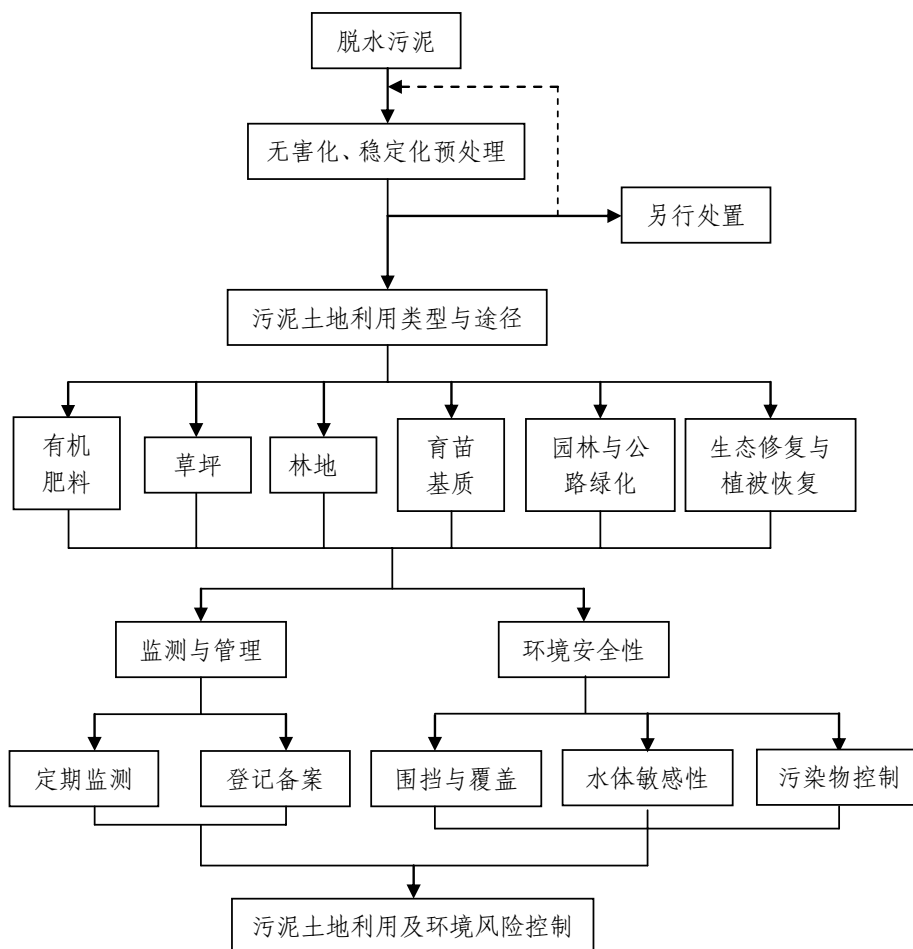


图 5-1 污泥土地利用环境风险控制流程图

5.1 重金属与有机污染物风险

污水处理过程中约有 50% 的污染物聚集在污泥中，特别是重金属一直以来成为公众对污泥担忧的问题所在。实际上，随着污水处理工艺的提高和时间推移，我国污泥重金属含量正呈现逐年降低趋势，污泥土地利用的重金属风险也在逐渐降低。区域内污泥土地利用，应结合土壤重金属背景信息开展，规划和分级适宜污泥土地利用的区域。同时，通过厌氧消化、好氧发酵或添加钝化剂等措施，可以有效降低污泥土地利用的重金属风险。多环芳烃 (PAHs)、多氯联苯 (PCBs)、有机氯农药 (OCPs) 等有机污染物通过厌氧消化或好氧发酵可部分降解，减少土地利用时向土壤和作物的转移。因此，采取有针对性的预处理措施，可一定程度上降低重金属和有机污染物的土地利用风险。最重要的是要进一步强化源头控制和管理，严格限

制有毒有害的工业废水排入市政下水道。

5.2 病原体

污泥中含有大量细菌、病毒、蛔虫卵，其中一部分为人畜共患病源，因此在污泥土地利用之前，需进行无害化处理。但大部分病虫害的致死温度均在 50℃~60℃，与污泥高温好氧及厌氧发酵的温度要求相符合，因此只要经过高温好氧及厌氧发酵等高温（55℃，5~7d）处理，污泥中病菌、虫卵均得以灭杀（活），实现土地利用病虫害风险最低化。

5.3 杂草

污泥中含有的杂草种籽较多，主要源于生活污水夹杂的果蔬种籽，其外壳坚硬，在污水处理过程中并未失活，因此沉淀在污泥中仍具有潜在发芽能力。在进行污泥土地利用，特别是在草坪和育苗基质上应用时，应考虑由此可能造成的生物风险。污泥中的杂草有可能成为入侵草种，影响土地利用效果。

5.4 盐害

污泥中盐离子成分复杂且含量较高，特别是氯化钠（NaCl）含量达到普通土壤的 20~40 倍，已超过普通作物的盐分忍耐范围。因此，在污泥土地利用时，应考虑采取辅助措施，如淋洗脱盐、加大喷灌水量等，降低盐分含量，减少其应用对作物的负面影响。

5.5 对水体的影响

在重要水源地类型的湖库周围 1km 范围内，不宜进行污泥土地利用。在洪水频繁爆发区域，不建议污泥进行土地利用。在饮用水源地周边和地下水位较高地区，污泥土地利用的施用量应遵循减半原则。在水、冰或雪覆盖地区进行污泥土地利用之前，应该确保径流得到有效控制。禁止在敏感性水体附近区域内，超量和过量施用污泥。

5.6 围挡与覆盖

污泥土地利用的场地平面与水平面角度不大于 15°，在坡度大于 15°的坡地上进行污泥土地利用时，应在下坡处建立有效围挡措施，防治污泥溢流和雨水冲刷造成污染。用于生态修复和植被恢复的污泥，在施用后应进行土壤覆盖，避免污泥过度积累影响恢复效果。在园林绿化和林地等途径进行土地利用时，应将施用后的污泥翻入土内，混合覆盖。

5.7 定期监测

污泥进行土地利用，应委托有资质的环境评价机构对污泥土地利用进行土壤、水体和大

气方面的长期定点监测，其监测数据记录保存时间不低于6年。监测指标应包括：重金属（主要为汞、砷、镉、铅、镍、铬、铜和锌）、化学需氧量（COD）、硝态氮、苯并（α）芘、矿物油和多环芳烃类（PAHs），还应包括苍蝇密度和大肠杆菌群总数等。监测频率应依据污泥施用量确定，原则上不低于每季度一次。

5.8 记录备案

污泥在进行土地利用时，污泥产出单位应记录污泥产品去向，同时污泥使用单位应定期向污泥监管单位汇报，建立和完善污泥土地利用登记制度和跟踪体系，保证污泥去向和使用有据可查。对污泥土地利用环境监测数据，应及时上报当地环保主管部门进行备案。

6 土地利用成本分析与经济效益评价

污泥土地利用涉及的成本与经济效益因不同用途而异，具体可参见表5-1。表中并未考虑污泥无害化和稳定化处理成本，若增加此项处理成本，则其投入将相应增加150~250元/t污泥（含水率80%）；此表也未考虑污泥土地利用后的作物收获与产品产出收入，同时也不包括因未来物价水平波动可能造成的收支调整。总体而言，在条件许可的情况下，相比于污泥其他处置方式，土地利用是比较经济可行的途径之一。特别是污泥作为有机肥料、园林与公路绿化和林地等途径进行土地利用时，其经济效益较为明显。它可结合区域背景，作为污泥土地利用的推荐途径。如果将应用面积和规模考虑在内，草坪和生态与植被恢复，则是合适的污泥土地利用途径，其污泥消纳量较大，应用前景广泛。

表5-1 污泥土地利用的成本分析与经济效益评价 单位：t污泥（含水率45%~50%）

用途	有机肥料	育苗基质	生态修复与植被修复	草坪	园林与公路绿化	林地
成本	包装，20元 加工，120元 运费，80元	包装，20元 运费，80元	运费，160元	运费，80元	包装，20元 运费，80元	运费，160元
节支	替代有机肥 1吨，600元	替代常规基质 1吨，300元	替代修复材料 2吨，200元	替代土壤或 基质1吨， 300元	替代有机肥 1吨，500元	替代有机肥 1吨，500元
净效益	380元	200元	40元	220元	400元	340元

第二节 污泥焚烧与协同处置技术

污泥焚烧包括单独焚烧，以及与工业窑炉的协同焚烧。

1 单独焚烧

1.1 原理与作用

污泥焚烧是利用污泥中的热量和外加辅助燃料，通过燃烧实现污泥彻底无害化处置的过程。单独焚烧是指单独建设焚烧设施对污泥进行的焚烧。与工业窑炉的协同焚烧是指利用已有的工业窑炉焚烧污泥。

1.2 应用原则

污泥单独焚烧应与热干化设施联建，充分利用污泥的热值和焚烧热量。单独焚烧设施应与人群聚居区保持足够的安全距离，符合城乡建设总体规划。

1.3 工艺与设备

1) 一般工艺流程

污泥焚烧系统通常包括储运系统、干化系统、焚烧系统、余热利用系统、烟气净化系统、电气自控仪表系统及其辅助系统等。污泥焚烧的一般工艺流程，如图 5-2 所示。

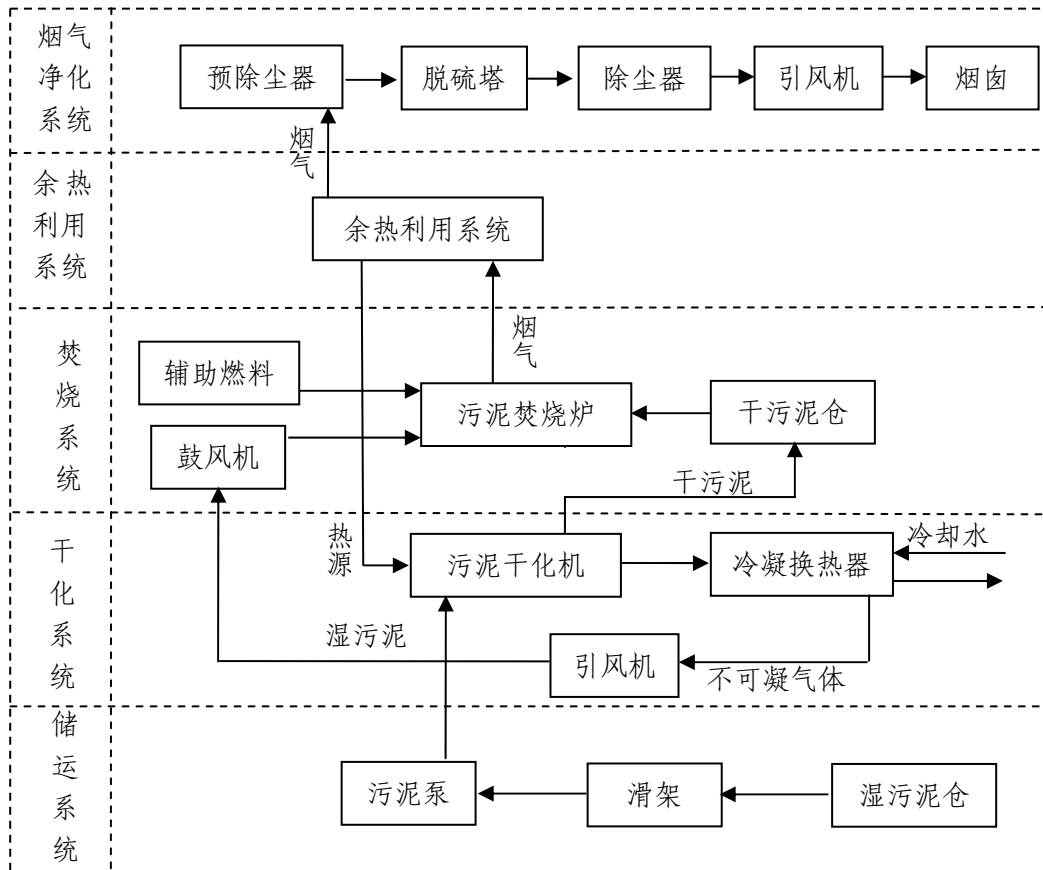


图5-2 污泥焚烧工艺流程

污泥干化系统和焚烧系统是整个系统的核心；储运系统主要包括料仓、污泥泵、污泥输送机；烟气净化系统主要包括脱硫塔、自动喷雾系统、活性炭仓、除尘器、碱液系统等；电气自控仪表系统包括能满足系统测量控制要求的电气和控制设备；辅助系统包括压缩空气系统、给排水系统、通风采暖、消防系统等。对于较小规模的污泥处理处置设施，可采用污泥干化焚烧一体化设备。

2) 主要工艺设备类型与参数

污泥焚烧炉主要包括流化床焚烧炉、回转窑式焚烧炉和立式多膛焚烧炉。立式多膛焚烧炉的焚烧能力低、污染物排放较难控制；回转窑式焚烧炉的炉温控制困难、对污泥发热量要求较高；流化床焚烧炉结构简单、操作方便、运行可靠、燃烧彻底、有机物破坏去除率高，目前已经成为主要的污泥焚烧设备。

流化床焚烧炉的基本工作原理是，利用炉底布风板吹出的热风，将污泥悬浮起呈沸腾（流化）状进行燃烧。一般采用惰性床料进行蓄热、流化，再将污泥加入到流化床中与高温的床料接触、传热进行燃烧。流化床污泥焚烧炉通常采用绝热的炉膛，下部设有分配气体的布风板，炉膛内壁衬耐火材料，并装有一定量的床料。气体从布风板下部通入，并以一定速度通过布风板，使床内床料沸腾呈流化状态。污泥从炉侧或炉顶加入，在流化床层内进行干燥、粉碎、气化等过程后，迅速燃烧。烟气中夹带的床料和飞灰，一般用除尘器捕集。床料可返回流化床内。

流化床焚烧炉的典型技术指标，应符合下列要求：（1）污泥处理量应满足设计要求，波动范围宜为 65%~125%；（2）流化床焚烧炉密相区温度宜为 850℃~950℃；（3）排烟温度大于 180℃。

带式污泥干燥焚烧一体机是将带式污泥干化与焚烧镶嵌同一装置内，适用于较小规模的污泥处理处置。带式污泥干燥装置由上、中、下三层排列的输送带组成。脱水污泥由螺旋输送机送至泥条机，由泥条机旋转压制成泥条均匀地铺设在上输送带，污泥在上输送带的尾端被投至中输送带上，再由中输送带的尾端投到下输送带上，然后继续向前输送至出料口。在上输送带上方安装抽风装置，抽吸焚烧炉的热能和厢体外的干燥空气，使热能和空气从装置的下部进入，穿流整个输送带，带走污泥内的水分。用干化后的污泥进焚烧炉燃烧。污泥燃烧的热能输入干燥厢体用于干燥湿污泥所需的热能。

1.4 干化焚烧系统的能量平衡和余热利用

1) 污泥的热值

实验室测试污泥热值结果多为空气干燥基低位热值 $Q_{ad, net}$ (kJ/kg), 对于含水率为 M_{ar} (%) 的湿污泥, 其热值按照式 (5-1) 进行换算:

$$Q_{ar, net} = (Q_{ad, net} + 23M_{ad}) \frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}} - 23M_{ar} \quad (5-1)$$

式中: $Q_{ar, net}$ ——含水率为 M_{ar} %的湿污泥低位热值, kJ/kg;

$Q_{ad, net}$ ——空气干燥基低位热值, kJ/kg;

M_{ad} ——空气干燥基的含水率, %。

若实验室测试结果为绝干污泥低位热值, 则 $M_{ad}=0$ 。

2) 干化后污泥量

经过干化后的污泥量通过式 (5-2) 计算:

$$A_2 = A_1 \cdot \frac{100 - M_1}{100 - M_2} \quad (5-2)$$

式中: A_1 ——干化前湿污泥量, kg/h;

M_1 ——干化前湿污泥含水率, %;

A_2 ——干化后干污泥量, kg/h;

M_2 ——干化后干污泥含水率, %。

3) 热干化的耗热量

对于一个热干化系统, 其耗热量按式 (5-3) 进行估算:

$$q_{gh} = (A_1 M_1 / 100 - A_2 M_2 / 100) \cdot \frac{C_v \cdot (T_2 - T_1) + r_{T_2}}{\eta_{gh} / 100} \quad (5-3)$$

式中: q_{gh} ——热干化系统耗热量, kJ/h;

C_v ——水的平均比热, 取4.187, kJ/(kg·°C);

T_1 ——污泥的初始温度, 通常取为20, °C;

T_2 ——水汽化的温度, 常压下取100, °C;

r_{T_2} —— T_2 时水的汽化潜热, 常压下为2261, kJ/kg;

η_{gh} ——干化机的热效率, %。

4) 辅助热量的计算

污泥焚烧后产生的热量可以通过式（5-4）计算：

$$q_{gl} = A_2 \cdot Q_{2,ar,net} \cdot \eta_{gl} / 100 \quad (5-4)$$

式中： q_{gl} ——焚烧炉产生的热量，kJ/h；

A_2 ——入炉污泥量，即为干化后污泥量，kg/h；

$Q_{2,ar,net}$ ——入炉污泥低位热值，即为干化后污泥低位热值，kJ/kg；

η_{gl} ——焚烧炉的热效率，%。

如果焚烧炉产生热量 $q_{gl} >$ 干化系统耗热量 q_{gh} ，则不需要辅助燃料；如果焚烧炉产生热量 $q_{gl} <$ 干化系统耗热量 q_{gh} ，则需要的辅助热量为 $q_{gh} - q_{gl}$ （kJ/h），根据辅助燃料的热值可进一步计算辅助燃料的消耗量。

根据以上计算方法，若脱水污泥含水率80%，干化到含水率40%入炉焚烧，污泥干化机和污泥焚烧炉的热效率均为85%，则只有污泥干基低位热值达到约13510 kJ/kg（即3227 kcal/kg）才不需要辅助燃料。

5) 余热利用

考虑到整个污泥干化焚烧系统的经济性和尾气处理的要求，焚烧炉产生的高温烟气应通过余热锅炉进行利用，可以加热水蒸汽、导热油和空气等干化热源和燃烧辅助热风。

1.5 设计与工艺控制

1) 焚烧炉所采用耐火材料的技术性能应满足焚烧炉燃烧气氛的要求，质量应满足相应的技术标准，能够承受焚烧炉工作状态的交变热应力；

2) 焚烧炉的设计应保证其使用寿命不低于10万运行小时；焚烧炉应有适当的冗余处理能力，进料量应可调节；

3) 焚烧炉应设置防爆门或其它防爆设施；

4) 必须配备自动控制和监测系统，在线显示运行工况和尾气排放参数；

5) 确保焚烧炉出口烟气中氧气含量达到6%~10%（干气）；

6) 焚烧炉密相区温度宜为850℃~950℃；

7) 由于污泥焚烧烟气中含湿量较大，为有效防止积灰和腐蚀，焚烧炉排烟温度宜大于180℃。

1.6 二次污染控制要求

为有效控制二次污染,污泥焚烧泥质须满足《城镇污水处理厂污泥处置 单独焚烧用泥质》CJ/T 290的规定。焚烧产生的烟气、炉渣、飞灰及噪声均应进行监测与控制。

1) 烟气

污泥焚烧后的烟气成分与污泥成分密切相关。常规污染物主要有NO_x、SO₂和烟尘等。污泥中的氯含量较生活垃圾更低,污泥焚烧所产生的二噁英通常低于生活垃圾。污泥焚烧后重金属大多数都富集在飞灰中。

对SO₂的控制,有多种方法可供选择,主要有炉内脱硫,以及湿法、干法和半干法等尾部脱硫方法。污泥焚烧的脱硫方法可采用“炉内脱硫+半干法脱硫”。根据国外使用经验,也可以采取湿法脱硫。

用于烟尘控制的除尘设备主要有旋风除尘器、静电除尘器和布袋除尘器。污泥焚烧尾气除尘推荐使用布袋除尘器。

控制污泥焚烧重金属排放的主要方法有:通过余热利用系统使烟气降温,烟气中的重金属自然凝聚成核或冷凝成粒状物质,随后,采用除尘设备捕集;将尾气通过湿式洗涤塔,除去其中水溶性的重金属化合物;通过布袋除尘器可吸附部分重金属颗粒,另一部分重金属可喷射活性炭等粉末,吸附重金属形成较大颗粒后,被除尘设备捕集。

控制污泥焚烧烟气中二噁英排放的主要方法有:在燃料中添加化学药剂阻止二噁英的生成;在燃烧过程中提高“3T”(湍流Turbulence、温度Temperature、时间Time)作用效果,通过旋转二次风等布置方式使污泥与空气充分搅拌混合,维持足够的燃烧温度和3 s以上的停留时间,减少二噁英前驱物的生成;在尾气处理过程中喷射活性炭粉末等吸附二噁英类物质而被除尘设备捕集;布袋除尘器对二噁英也有一定的吸附作用。

流化床污泥焚烧炉通常不需采用额外的脱硝技术即可满足相关标准要求的限值。如需进一步控制NO_x的排放,推荐采用选择性非催化还原法(SNCR),能达到30%~70%的脱除效率。

应严格控制焚烧工艺过程,并对烟气必须采取综合处理措施,其烟气排放浓度须满足《生活垃圾焚烧污染控制标准》GB 18485的规定。

2) 炉渣与飞灰

炉渣与飞灰应分别收集、贮存、运输,并妥善处置。符合要求的炉渣可进行综合利用。飞灰应按《危险废物鉴别标准》GB 5085.1-3的规定进行鉴定后,妥善处置;属于危险废物的,应按危险废物处置;不属于危险废物的,可按一般固体废物处理。

3) 噪声

焚烧厂的噪声应符合《城市区域环境噪声标准》GB 3096和《工业企业厂界噪声标准》GB 12348的规定，对建筑物内直接噪声源控制应符合《工业企业噪声控制设计规范》GB J87的规定。焚烧厂噪声控制应优先采取噪声源控制措施。厂区内各类地点的噪声控制宜采取以隔音为主，辅以消声、隔振、吸音的综合治理措施。

4) 臭气

焚烧厂恶臭污染物控制与防治应符合《恶臭污染物排放标准》GB 14554的规定。焚烧生产线运行期间，应采取有效控制和治理恶臭物质的措施。焚烧生产线停止运行期间，应采取相应措施防止恶臭扩散到周围环境中。

1.7 投资及运行成本的评价与分析

投资成本是由系统复杂程度、设备国产化率等因素决定的。一般情况下，若干化和焚烧系统均采用国产设备，干化焚烧项目的投资成本在30~50万元/t污泥（含水率80%）；若干化设备采用进口设备，焚烧等其他设备均采用国产设备，干化焚烧项目的投资成本在50~70万元/t污泥（含水率80%）。若采用更多的进口设备，投资成本将增加。

国内污泥干化焚烧实际运行的项目较少，采用的设备和配套的烟气处理设施标准差异较大，因此，目前的运行费用统计尚不具有典型性。一般而言，若采用进口的流化床干化机和国产的流化床焚烧系统，运行成本约为170~250元/t污泥（含水率以80%计，不包括固定资产折旧），其中燃煤和用电的消耗约占55%~65%，导热油、自来水、石灰石、消石灰、石英砂、活性炭、氮气等损耗费用共计约5%。若采用国产的空心浆叶式干化机和国产的流化床焚烧系统，运行成本约为120~200元/t污泥（含水率以80%计，不包括固定资产折旧），其中燃煤和用电的消耗约占65%~70%。

2 污泥的水泥窑协同处置

2.1 原理与作用

污泥的水泥窑协同处置是利用水泥窑高温处置污泥的一种方式。水泥窑中的高温能将污泥焚烧，并通过一系列物理化学反应使焚烧产物固化在水泥熟料的晶格中，成为水泥熟料的一部分，从而达到污泥安全处置的目的。

利用水泥窑对污泥进行协同处置，具有以下作用：

有机物彻底分解，污泥得以彻底的减容、减量和稳定化；燃烧后的残渣成为水泥熟料的一部分，无残渣飞灰产生，不需要对焚烧灰另行处置；回转窑内碱性环境在一定程度内可抑制酸性气体和重金属排放；水泥生产过程余热可用于干化湿污泥；回转窑热容量大、工作状态稳定，污泥处理量大。

2.2 应用原则

利用水泥窑协同处置污泥必须建立在社会污泥处置成本最优化原则之上，如果在生态和经济上有更好的回收利用方法时，则不要将污泥使用在水泥窑中。同时，污泥的协同处置应保证水泥工业利用的经济性。

水泥窑协同处置污泥应确保污染物的排放，不高于采用传统燃料的污染物排放与污泥单独处置污染物排放总和。协同处置污泥水泥窑产品必须达到品质指标要求，并应通过浸析试验，证明产品对环境不会造成任何负面影响。

利用水泥窑协同处置污泥作为跨行业的协同处置方式，应保证从产生到处置完成良好的记录追溯，在全处置过程确保污染物的达标排放和有关人员健康和安 全，确保所有要求符合现有的国家法律、法规和制度。能够有效地对废物协同处置过程中的投料量和工艺参数进行控制，并确保与地方、国家和国际的废物管理方案协调一致。

2.3 水泥窑协同处置的主要方式

城镇污水处理厂污泥可在不同的喂料点进入水泥生产过程。常见的喂料点是：窑尾烟室、上升烟道、分解炉、分解炉的三次风风管进口。污泥焚烧残渣可通过正常的原料喂料系统进入，含有低温挥发成分（例如烃类）的污泥必须喂入窑系统的高温区。

通常，湿污泥经过泵送直接入窑尾烟室；利用水泥窑协同处置干化或半干化后的污泥时，在窑尾分解炉加入；外运来的污泥焚烧灰渣，可通过水泥原料配料系统处置。

利用水泥窑废热干化污泥，与通常的污泥热干化系统相同。

2.4 利用水泥窑直接焚烧处置湿污泥

含水率在60%~85%的市政污泥可以利用水泥窑直接进行焚烧处置

利用水泥窑直接焚烧污泥可在水泥窑窑尾端烟室或上升烟道设置喷枪。水泥窑应进行如下改造：（1）窑尾烟室耐火材料改用抗剥落浇注材料；（2）水泥窑窑尾上升烟道增设压缩空气炮，以便清理结皮；（3）水泥窑窑尾分解炉缩口应做相应调整；（4）对窑尾工艺收尘

器进行改造；（5）窑内通风面积扩大5%~10%。

2.5 利用水泥窑焚烧处置干化或半干化的污泥

干化或半干化后的污泥发热量低、着火点低、燃烧过程形成的飞灰多、燃烧时间短，不适合作为原料配料大规模利用，应当尽可能在分解炉、窑尾烟室等高温部位投入，以保证焚毁效果。

来自干污泥储存仓的污泥经皮带秤计量后，经双道锁风阀门进入分解炉，分解炉内部增设污泥撒料盒，在撒料盒下方设置压缩空气进行吹堵和干污泥的抛洒分散。如干污泥仓布置离窑尾较远，也可采用气动输送，利用罗茨风机作为动力，经管道输送进入分解炉，干污泥燃烧采用单通道喷管即可。

2.6 污泥焚烧灰渣替代水泥生产原料利用

在污泥焚烧灰渣作为替代原料利用之前，应仔细评估硫、氯、碱等物质可能引起系统运行稳定性有害元素总输入量对系统的影响。这些成分的具体验收标准，应根据协同处置污泥性质和窑炉具体条件，现场单独进行确定。

2.7 二次污染控制要求

利用水泥窑直接焚烧湿污泥主要的环境问题为烟气的排放。污染物的排放控制应符合《生活垃圾焚烧污染控制标准》GB 18485的规定。

3 污泥的热电厂协同处置

3.1 原理与作用

采用热电厂协同处置，既可以利用热电厂余热作为干化热源，又可以利用热电厂已有的焚烧和尾气处理设备，节省投资和运行成本。

3.2 应用原则

在具备条件的地区，鼓励污泥在热力发电厂锅炉中与煤混合焚烧；热电厂协同处置应不对原有电厂的正常生产产生影响；混烧污泥宜在35 t/h以上的热电厂（含热电厂和火电厂）燃煤锅炉上进行。在现有热电厂协同处置污泥时，入炉污泥的掺入量不宜超过燃煤量的8%；对于考虑污泥掺烧的新建锅炉，污泥掺烧量可不受上述限制。

3.3 热电厂协同处置的主要方式

热电厂协同处置的主要方式有：湿污泥（含水率80%）直接加入锅炉掺烧，和干化或半干化（含水率40%以下）后的污泥进入循环流化床锅炉或煤粉炉焚烧。

选用电厂余热作为干化热源，与通常热干化系统相同。

3.4 湿污泥直接掺烧

1) 工艺流程

湿污泥直接掺烧的主要工艺流程，见图5-3。

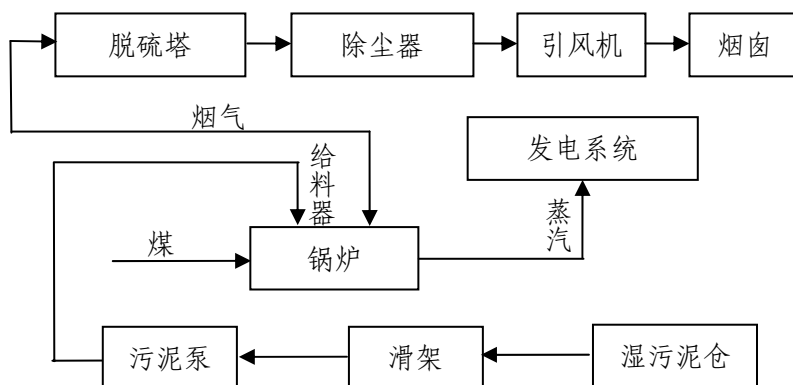


图 5-3 湿污泥直接掺烧工艺流程

2) 设计与运行控制

湿污泥给入炉膛的位置宜采用炉顶给料；若采用炉膛中部给料，给料器需设置水冷装置。湿污泥直接掺烧须对原锅炉的尾部受热面进行适当改造，以防止烟气中灰分、酸性气体和湿含量升高导致的受热面积灰、磨损和腐蚀。

掺烧后焚烧炉膛温度不得低于850℃。由于烟气中湿含量增加，为防止尾部积灰和腐蚀，排烟温度应适当提高。

3.5 污泥干化后混烧

1) 工艺流程

污泥干化后入炉混烧的主要工艺流程，见图5-4。

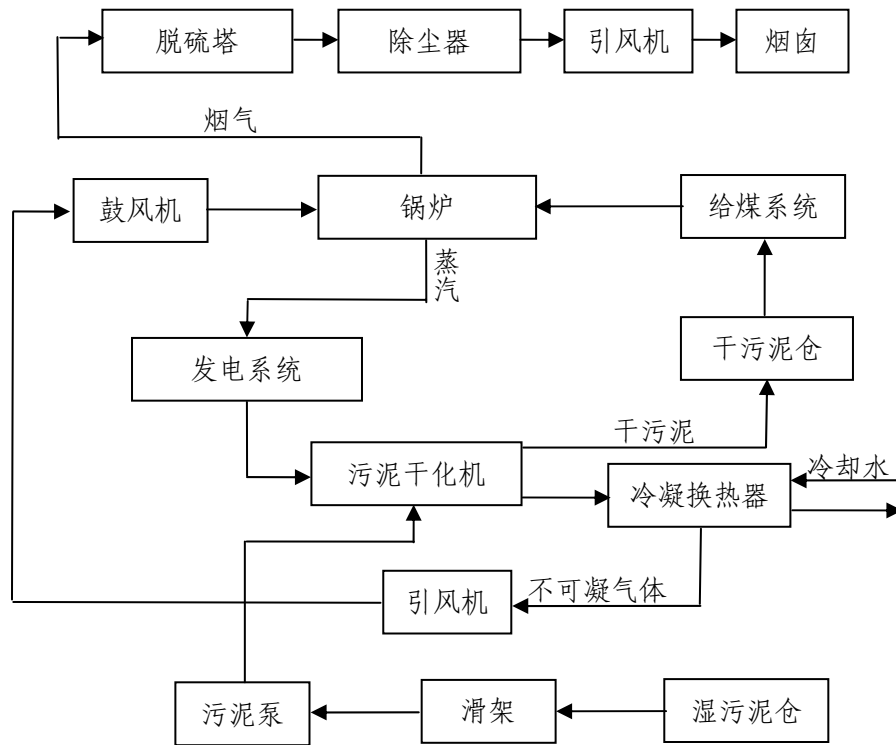


图5-4 污泥干化后混烧工艺流程

2) 设计与运行控制

污泥干化后可进入电厂原有的输煤系统。为防止污泥混入后造成原有给煤系统堵塞，污泥需干化至半干化（含水率40%以下），干化后污泥形态应疏松。为防止污泥干化污染原有电厂的烟气，推荐采用间接式污泥干化设备。

掺烧后焚烧温度不得低于850℃。

3.6 二次污染控制要求

为有效控制二次污染，污泥焚烧泥质须满足《城镇污水处理厂污泥处置 单独焚烧用泥质》CJ/T 290的规定。焚烧产生的烟气、炉渣、飞灰及噪声均应进行监测与控制。

1) 臭气

污泥储存仓应密闭，并采用微负压设计，将臭气送入炉膛高温分解。为防止污泥干化过程中臭气外泄，干化装置必须全封闭，污泥干化机内部和污泥干化间需保持微负压。干化后污泥应密封储存，以防止由于污泥温度过高而导致臭气挥发。干化后分离出的不可凝气体（臭气）须送入炉膛高温分解。

焚烧厂恶臭污染物控制与防治应符合《恶臭污染物排放标准》GB 14554的规定。

2) 烟气

对于排放的烟气，应核算大气污染物排放限值。

火力发电厂燃煤锅炉掺烧污泥时，各种大气污染物排放限值可通过污泥和煤的烟气份额进行换算，对烟气中排放的二噁英应进行总量控制。

3) 灰渣

炉渣与飞灰应分别收集、贮存、运输，并妥善处置；符合要求的炉渣可进行综合利用。飞灰应按《危险废物鉴别标准》GB 5085 进行鉴定后，妥善处置。属于危险废物的，应按危险废物处置；不属于危险废物的，可按一般固体废物处理。

4) 废水

污泥干化后蒸发出的水蒸汽和不可凝气体（臭气）需进行分离。水蒸汽通过冷凝装置冷凝后处理。焚烧厂的废水经过处理后应优先回用。当废水需直接排入水体时，其水质应符合《污水综合排放标准》GB 8978 的规定。

5) 噪声

焚烧厂的噪声应符合《城市区域环境噪声标准》GB 3096 和《工业企业厂界噪声标准》GB 12348 的规定，对建筑物内直接噪声源控制应符合《工业企业噪声控制设计规范》GBJ 87 的规定。焚烧厂噪声控制应优先采取噪声源控制措施。厂区内各类地点的噪声控制宜采取以隔音为主，辅以消声、隔振、吸音的综合治理措施。

3.7 投资与运行成本的评价与分析

干化后污泥在热电厂协同处置，投资成本是由干化设备的选型、设备国产化率等因素决定的。一般情况下，若湿污泥储存仓、污泥泵和干化系统均采用国产设备，投资成本在 10~15 万元/t 污泥（含水率 80%）左右；若干化设备采用进口设备，投资成本在 30~40 万元/t 污泥（含水率 80%）左右。

若采用国产的空心浆叶式干化机，运行成本约为 100~180 元/t 污泥（含水率 80%，不包括固定资产折旧），其中电耗约 55~60 kWh/污泥（含水率 80%）。

4 污泥与生活垃圾混烧

4.1 原理与作用

污泥干化后具有一定热值，将污泥干化后与生活垃圾混烧，既可以利用垃圾焚烧厂的余热作为干化热源，又可以利用垃圾焚烧厂已有的焚烧和尾气处理设备，节省投资和运行成本。

4.2 应用原则

污泥和生活垃圾混合焚烧，应采用干化技术将污泥含水率降至，与生活垃圾相似的水平，不宜将脱水污泥与生活垃圾直接掺混焚烧。

优先考虑采用生活垃圾焚烧余热干化污泥，不宜选用一次优质能源作为干化热源。

4.3 干化后污泥与垃圾混烧

1) 工艺流程

混烧污泥的生活垃圾焚烧厂，除建设满足国家规定的生活垃圾焚烧系统外，污泥焚烧的主要工艺流程，见图 5-5。

2) 设计与运行控制

采用污泥与生活垃圾混合焚烧，应为污泥的输送和给料配备专门的设备，不宜与生活垃圾共用。污泥干化推荐采用间接式污泥干化设备。采用污泥和生活垃圾混合焚烧，应选择流化床焚烧炉进行处理。焚烧炉的设计应考虑污泥焚烧飞灰量大，对尾部受热面和烟气净化系统的影响。

混烧的焚烧温度不得低于 850℃。

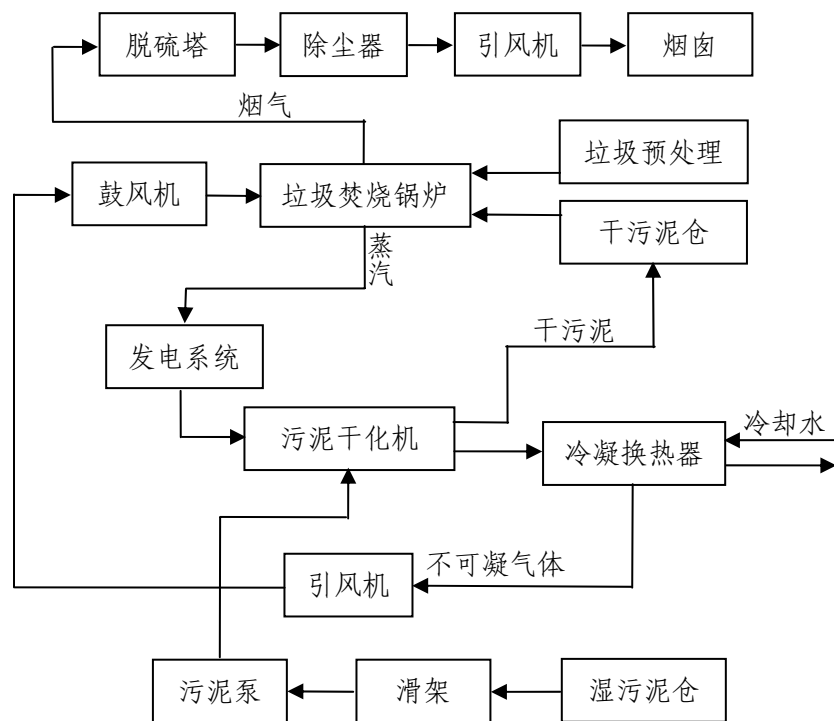


图 5-5 污泥和垃圾混合焚烧工艺流程

4.4 二次污染控制要求

污泥与生活垃圾混合焚烧产生的废气、废水、废渣和噪声均应进行监测与控制。

1) 臭气

污泥储存仓应密闭，并采用微负压设计，将臭气送入炉膛高温分解。为防止污泥干化过程中臭气外泄，干化装置必须全封闭。污泥干化机内部和污泥干化间需保持微负压。干化后污泥应密封储存，以防止由于污泥温度过高而导致臭气挥发。干化后分离出的不可凝气体（臭气）须送入炉膛高温分解。焚烧厂恶臭污染物控制与防治应符合《恶臭污染物排放标准》GB 14554 的规定。

2) 焚烧烟气

最终排入大气的烟气中污染物排放限值，应取污泥单独焚烧污染物排放限值和生活垃圾单独焚烧污染物排放限值中的低者。目前参照《生活垃圾焚烧污染控制标准》GB 18485 的规定。

3) 灰渣

炉渣与飞灰应分别收集、贮存、运输，并妥善处置；符合要求的炉渣可进行综合利用。飞灰参照《生活垃圾焚烧污染控制标准》GB 18485 的规定进行处理。

4) 废水

污泥干化产生的水蒸汽和不可凝气体（臭气）需进行分离。水蒸汽通过冷凝装置冷凝后进行废水处理。焚烧厂的废水经过处理后应优先回用，高浓度的废液也可采取喷入焚烧炉膛进行焚烧处理。经处理后的废水需直接排入水体时，其水质应符合《污水综合排放标准》GB 8978 的规定。

5) 噪声

焚烧厂的噪声应符合《城市区域环境噪声标准》GB 3096 和《工业企业厂界噪声标准》GB 12348 的规定。对建筑物内直接噪声源控制应符合《工业企业噪声控制设计规范》GBJ 87 的规定。焚烧厂噪声控制应优先采取噪声源控制措施。厂区内各类地点的噪声控制宜采取以隔音为主，辅以消声、隔振、吸音的综合治理措施。

4.5 成本分析

投资成本是由新增设备的选型、设备国产化率等因素决定的。一般情况下，若污泥储存仓、污泥干化机、污泥输送和给料设备等均采用国产设备，投资成本在 10~15 万元/t 污泥（含

水率 80%) 左右; 若干化设备采用进口设备, 投资成本在 30~40 万元/t 污泥 (含水率 80%) 左右。

若采用干化污泥与生活垃圾混合焚烧, 采用国产的空心浆叶式干化机时, 视干化后污泥含固率不同, 其运行成本约为 100~180 元/ t 污泥 (含水率 80%计, 不包括固定资产折旧), 其中电耗约 55~60kWh/ t 污泥 (含水率 80%)。

第三节 建材利用技术

污泥的建材利用主要是指以污泥作为原料制造建筑材料, 最终产物是可以用于工程的材料或制品。建材利用的主要方式有: 污泥用于水泥熟料的烧制 (即水泥窑协同处理处置)、污泥制陶粒等。污泥用于水泥熟料的烧制详见本章第二节《污泥焚烧与协同处置技术》的内容, 本节主要介绍制陶粒技术。

1 污泥制陶粒

1.1 原理与作用

污泥是一种粘土质资源, 用来配料生产陶粒 (用作轻骨料配制轻骨料混凝土), 可在高温焙烧过程中使污泥得以彻底稳定, 并固化重金属, 充分利用污泥中的土质资源。

1.2 应用原则

污泥陶粒不宜用于人居及公共建筑。

污泥陶粒在烧制过程中固化了污泥中的重金属, 应当限制其中的重金属含量和浸出毒性。重金属浸出限制值可参照表 5-2 的要求执行。其他有害物质含量应符合表 5-3 的规定。污泥陶粒的技术要求应符合国家标准《轻集料及其试验方法 第 1 部分: 轻集料》GB/T17431.1 的有关规定。

表 5-2 污泥建材利用重金属浸出限制建议值

检验项目	浸出液最高允许浓度, ug/L		
	严格环境条件 (地下水防护等)	特殊环境 (公园、工业区等)	一般环境
Hg	0.2	0.5	10
Cd	2.0	10	50
As	10	10	100
Cr	15	30	350
Pb	20	40	100

(续表)

检验项目	浸出液最高允许浓度, ug/L		
	严格环境条件 (地下水防护等)	特殊环境 (公园、工业区等)	一般环境
Cu	50	100	300
Zn	50	100	300
Ni	4	50	200

表 5-3 有害物质规定

项目名称	指标规定	备注
含泥量, %	≤ 3	结构用轻集料 ≤ 2
泥块含量, %	≤ 1	结构用轻集料 ≤ 0.5
煮沸质量损失, %	≤ 5	-
烧失量, %	≤ 5	-
硫化物和硫酸盐含量 (按 SO ₃ 计), %	≤ 1.0	-
有机物含量	不深于标准色	如深于标准色, 按 GB/T 17431.2 中 19.6.3 的规定执行
氯化物 (以氯离子含量计) 含量, %	≤ 0.02	-
放射性	符合 GB6566 的规定	-

1.3 工艺流程与运行控制

1) 配料

污泥中二氧化硅等成分含量少, 有机质含量较高, 不宜直接烧制陶粒。因此, 要烧制出合格的陶粒制品, 应根据不同类型污泥的化学成份与特性, 通过与粘土、粉煤灰、页岩等其它原料混合配料, 使陶粒原料化学组成满足表 5-4 的要求。

表 5-4 陶粒原料的化学成分要求

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO+MgO	K ₂ O+Na ₂ O
含量, %	48~79	8~25	3~12	1~12	0.5~7

此外, 原料的化学组成还应满足下式的要求:

$$\frac{SiO_2 + Al_2O_3}{Fe_2O_3 + CaO + MgO + FeO + Na_2O + K_2O} = 3.5 \sim 10$$

有关陶粒用污泥技术标准和规范可暂参考现行标准, 如《城镇污水处理厂污泥处置 制砖用泥质》CJ/T 289等。

2) 工艺流程

污泥制陶粒的典型生产工艺流程如下:

原料计量→混碾搅拌→造粒→过筛→进窑→烘干→预热→焙烧→冷却→分级→入库→检验→出厂

3) 运行控制

在一般情况下，宜控制污泥含水率不大于80%，并调整配料用水量；含水率80%的污泥掺量不宜超过30%。

在污泥制陶粒的生产过程中，应控制好预热和焙烧这两个关键工序。预热可避免直接焙烧导致陶粒炸裂，并可利用污泥中有机质的燃烧热值；陶粒焙烧工序直接影响陶粒产品的性能，烧制温度在1100℃~1200℃之间为宜。

1.4 二次污染控制要求

污泥烧制陶粒过程中，污泥中一些重金属容易造成污染。生产过程中应进行技术控制，并制定控制性标准；污泥中可能存在其它污染物，如放射性污染物、有机污染物等，应建立安全生产制度并制订控制性标准。污泥焚烧的烟气排放控制要求，应满足《生活垃圾焚烧污染控制标准》GB 18485的要求。

1.5 成本评价及分析

利用污泥制陶粒可以免加有机质材料，减少粘土的用量，且污泥成本低廉；当工业废料（包括污泥）掺量超过30%时，产品可以享受国家一定的税收优惠政策。目前市场普通陶粒售价为250~300元/m³，污泥陶粒售价可降低5%~10%。因此，利用污泥制陶粒可以降低生产成本，具有较好的经济效益。

第四节 污泥的填埋

污泥填埋有单独填埋、与垃圾合并填埋两种方式。国外有污泥单独填埋场的案例。目前国内主要是与垃圾混合填埋。另外，污泥经处理后还可作为垃圾填埋场覆盖土。

1 应用原则

污泥与生活垃圾混合填埋，污泥必须进行稳定化、卫生化处理，并满足垃圾填埋场填埋土力学要求；且污泥与生活垃圾的重量比，即混合比例应≤8%。

污泥用于垃圾填埋场覆盖土时，必须对污泥进行改性处理。可采用石灰、水泥基材料、工业固体废弃物等对污泥进行改性。同时也可通过在污泥中掺入一定比例的泥土或矿化垃圾，

混合均匀并堆置 4d 以上，以提高污泥的承载能力并消除其膨润持水性。

2 污泥与生活垃圾混合填埋

2.1 混合填埋的泥质标准

污泥与生活垃圾混合填埋时，必须降低污泥的含水率，同时进行改性处理。改性处理可通过掺入矿化垃圾、黏土等调理剂，以提高其承载力，消除其膨润持水性。避免雨季时，污泥含水率急剧增加，无法进行填埋作业。混合填埋污泥泥质标准应满足《城镇污水处理厂污泥处置 混合填埋用泥质》GB/T 23485 和《生活垃圾填埋场污染控制标准》GB 16889 要求。

2.2 混合填埋方法及技术要求

污泥与生活垃圾混合填埋应实行充分混合、单元作业、定点倾卸、均匀摊铺、反复压实和及时覆盖。填埋体的压实密度应大于 1.0 kg/m^3 。每层污泥压实后，应采用黏土或人工衬层材料进行日覆盖。黏土覆盖层厚度应为 20~30 cm。

混合填埋场在达到设计使用寿命后应进行封场。封场工作应在填埋体上覆盖黏土或其他人工合成材料。黏土的渗透系数应小于 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ，厚度为 20~30 cm，其上再覆盖 20~30 cm 的自然土作为保护层，并均匀压实。填埋场封场后还应覆盖植被，同时在保护层上铺设一层营养土层，其厚度根据种植植物的根系深浅而确定，一般不应小于 20 cm，总覆土应在 80 cm 以上。

填埋场封场应充分考虑堆体的稳定性与可操作性、地表水径流、排水防渗、覆盖层渗透性和填埋气体对覆盖层的顶托力等因素，使最终覆盖层安全长效，填埋场封场坡度宜为 5%。

污泥与生活垃圾混合填埋场必须为卫生填埋场，具体建设标准及要求详见《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17。

3 污泥作为生活垃圾填埋场覆盖土

3.1 用作覆盖土的污泥泥质标准

污泥用作覆盖土的污泥泥质标准应满足《城镇污水处理厂污泥处置 混合填埋用泥质》GB/T 23485 和《生活垃圾填埋场污染控制标准》GB 16889 要求。

表 5-5 作为垃圾填埋场覆盖土的污泥基本指标

序号	控制项目	限值
1	含水率	< 45 %
2	臭度	< 2级 (六级臭度)
3	施用后苍蝇密度	< 5只 / (笼·日)
4	横向剪切强度	> 25 kN/m ²

污泥用作垃圾填埋场终场覆盖土时，其泥质基本指标除满足表 5-5 要求外，还需满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB 18918 中卫生学指标要求，同时不得检测出传染性病原菌。

3.2 用作覆盖土的方法及技术要求

1) 日覆盖应实行单元作业，其面积应与垃圾填埋场当日填埋面积相当。

2) 改性污泥应进行定点倾卸、摊铺、压实。覆盖层的厚度在经过压实后的应不小于 20 cm，压实密度应大于 1000 kg/m³。

3) 在污泥中掺入泥土或矿化垃圾时应保证混合充分，堆置时间不小于 4 d，以保证混合材料的承载能力大于 50 kPa。

4) 污泥入场用作覆盖材料前必须对其进行监测。含有毒工业制品及其残物的污泥、含生物危险品和医疗垃圾的污泥、含有毒药品的制药厂污泥及其他严重污染环境的污泥不能进入填埋场作为覆盖土，未经监测的污泥严禁入场。

5) 其他技术要求及处理措施详见《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17。

4 投资与运行成本的分析与评价

对于新建垃圾填埋场，总投资为 16~26 元/m³库容，按填埋期 20 年考虑，折合 18 万元/t 污泥（垃圾）。运行成本为 70~80 元/t 污泥（垃圾）；如按运输距离在 50 km 以内核算，总成本为 100~125 元/t 污泥（垃圾）。

第六章 应急处置与风险管理

第一节 污泥的应急处置

目前，污泥处理处置设施的规划建设普遍滞后于污水处理设施。在污泥处理处置设施建成投入使用前，应采取适当的应急处置措施，严禁将污泥随意弃置。

1 常用处理处置措施及采用原则

常用的污泥应急处置措施为简易存置。简易存置措施可分为两种：（1）在汛期降雨频繁，且场地开放、无围挡的条件下，将污泥直接堆置成有序的条垛，采取石灰和塑料薄膜双重覆盖的措施，最大限度的降低臭味散失和苍蝇孳生。（2）在旱季降雨较少，且场地封闭、有围墙的条件下，将污泥先自然摊晒 5~7 d，降低含水率后再堆成条垛存置。摊晒过程中严密覆盖石灰，堆成条垛后严密覆盖沙土，以减小臭味散失。

简易存置后的污泥，经检测后如符合相关的泥质标准，如《城镇污水处理厂处置 混合填埋用泥质》GB/T 23485 标准、《城镇污水处理厂处置 土地改良用泥质》CJ/T 290 标准等，则可采用混合填埋、土地改良等方式进行最终处置，避免长期堆放。经检测后如无法满足相关的泥质标准，则应在污泥处理处置设施建成投产后，再将存置污泥回运，进行规范处置。

污泥应急处置措施仅限于污泥处理处置设施建成以前使用，一旦设施建成，必须立刻停止使用。

污泥应急处置的场地应选择在远离人群集聚区、农业种植区和环境敏感区域。当场地面积紧张、降雨频繁时，宜采用第（1）种操作方式；当场地面积宽敞，降雨较少时，宜采用第（2）种操作方式。

2 简易存置方式（一）的操作及管理控制要点

2.1 操作模式

- 1) 在临时场地中规划好用于卸泥的区域，利用挖掘机依次挖出多条平行浅沟，沟深约 0.5m、宽约 3~5 m；
- 2) 将挖出来的土方均匀堆置在浅沟两侧，压实后形成等高的挡墙；
- 3) 引导运泥车将污泥依次卸入指定的浅沟内，形成条垛；
- 4) 在条垛表面均匀覆盖生石灰，厚度约 1~2 cm，覆盖必须彻底，不许有污泥外露；

- 5) 使用塑料薄膜将整个条垛严密覆盖，并将四边压紧，防止臭味外泄和苍蝇接触；
- 6) 定期在薄膜表面喷洒灭蝇药剂，进一步控制苍蝇孳生。

2.2 管理控制要点

- 1) 浅沟之间至少留出 0.5m 的间隔，以便后续操作。
- 2) 压实后的挡墙务必确保强度，防止堆置的污泥挤塌外溢。
- 3) 在进行撒灰覆膜操作时应注意铺撒全面、覆盖严密，勿留死角。
- 4) 每日进行场地巡查，发现薄膜损坏及时修补，避免污泥外露。
- 5) 每日监测场地苍蝇密度，发现显著增加时立刻停止进泥，并在全场范围内进行集中、连续的喷药，直至苍蝇密度恢复正常后再开始进泥。
- 6) 在揭膜将污泥取出时，需选择风量较大，气压较高的天气进行。揭膜人应站在上风口往下风口顺序揭膜，防止有毒气体瞬间释放致使操作人员中毒。
- 7) 堆置后的污泥装车外运时，须严格控制操作面积，做到随揭膜随装车，装车完毕立刻重新严密覆盖，避免污泥外露。

3 简易存置方式（二）的操作及管理控制要点

3.1 操作模式

- 1) 在场地中事先规划好用于卸泥的区域，一般为长方形；
- 2) 引导污泥运输车将污泥均匀、有序的卸入指定的区域内，利用机械设备将污泥均匀摊开至 5~10 cm 厚，；
- 3) 在污泥表面均匀覆盖生石灰，厚度约 1~2 mm，覆盖必须彻底，不许有污泥外露；
- 4) 自然晾晒 5~7 d，污泥含水率降至 60%左右后，利用机械设备集中收拢，在指定位置堆成条垛；
- 5) 条垛表面严密覆盖沙土，厚度约 3~5 cm；
- 6) 定期对操作场地喷洒灭蝇药剂。

3.2 管理控制要点

- 1) 污泥卸入场地后需立刻摊开，避免长期堆放产生臭味。
- 2) 晾晒至含水率满足要求后，需立即堆成条垛，提高场地利用率。
- 3) 将污泥收拢堆垛的过程中，要严格控制操作面积，减少臭味释放。
- 4) 每日监测场地苍蝇密度，发现显著增加时立刻停止进泥，并在全场范围内进行集中、

连续的喷药，直至苍蝇密度恢复正常后再开始进泥。

5) 存置后的污泥装车外运时，须严格控制作业面积，逐个条垛依次操作。

第二节 污泥处理处置的风险分析与管理

1 安全风险分析与管理

1.1 安全风险因素分析

污泥处理处置过程中，除机械伤害、触电事故等常见安全风险外，还存在一些特殊的安全风险，包括：

1) 污泥中含有较丰富的有机质，在汇集、管道输送过程中，由于有机质的腐败，其中部分硫转化成硫化氢，在某些场合如通风不良，硫化氢积聚，造成空气中硫化氢浓度过高，危害作业（巡检）人员的健康。

2) 湿污泥在储存过程中发生厌氧消化，生成甲烷等易燃气体，如不及时排除，在湿污泥储存仓中积累，有燃烧爆炸的危险。

3) 干污泥在长期储存过程中，被空气中的氧缓慢氧化导致温度升高，温度升高反过来又促使氧化加快，当温度升到自燃温度（约 180 °C）之后就会引起干污泥自燃。

1.2 安全风险管理措施

1) 通风和防暑

为防范生产场合有害气体和高温，需采取以下通风和防暑降温措施：在生产厂房采取自然通风或机械通风等通风换气措施，中央控制室和值班室等设置空调系统。污泥焚烧炉炉壁和管道系统必须具有良好的耐温隔热功能，外表温度低于 60 °C。

2) 防爆

脱水污泥储存设施和干污泥料仓均有一定的尾气排出，当两条线的排出尾气汇入排出总管后，应避免尾气直接排放，污染环境。在工艺设计中，在可能有燃爆性气体的室内设自然通风及机械通风设施，使燃爆性气体的浓度低于其爆炸下限。

污泥消化池顶部、沼气净化房、沼气柜等构筑物内的电气和仪表、照明灯具应选用隔爆型。电缆采用铠装电缆支架明敷或桥架敷设，绝缘线穿钢管敷设。

3) 防火

在正常生产情况下，污泥处理处置设施一般不易发生火灾，只有在操作失误、违反规程、

管理不当及其他非常生产情况或意外事故状态下，才可能由各种因素导致火灾发生。因此，为了防止火灾的发生，或减少火灾发生造成的损失，根据“预防为主，消防结合”的方针，在设计上应根据《建筑设计防火规范》GB 50016 采取防范措施。

2 环境风险分析与管理

2.1 环境风险因素分析

污泥处理处置工程可使污泥予以妥善处置，但对工程周围环境也会产生一定的影响。

1) 重金属和有机污染物

工业废水含量高的城镇污水处理厂污泥可能含有较多的重金属离子或有毒有害化学物质，如可吸附性有机卤素（AOX）、阴离子合成洗涤剂（LAS）、多环芳烃（PAHs）、多氯联苯（PCBs）、多溴联苯醚（PBDEs）等。

2) 病原微生物和寄生虫卵

未经处理的污泥中含有较多的病原微生物和寄生虫卵。在污泥的应用中，它们可通过各种途径传播，污染土壤、空气、水源，并通过皮肤接触、呼吸和食物链危及人畜健康，也能在一定程度上加速植物病害的传播。

3) 臭气

污泥处理处置很多环节都会有较强的臭气产生。污水处理厂内产生臭气的主要设施有污泥调蓄池、污泥浓缩脱水机房、污泥液调节池、污泥干化等设施。污泥填埋、污泥土地利用等厂外处置环节也会有臭气产生。在污泥运输和储存过程中，也不可避免会有臭味散发到大气中，势必会影响周围地区。

2.2 环境风险管理措施

1) 污泥重金属和有机污染物的控制

应加强污泥中重金属等有毒有害物质的源头控制和源头减量。监督工业废水按规定在企业内进行预处理，去除重金属和其他有毒有害物质，达到《污水排入城市下水道水质标准》CJ 3082标准的要求。污泥土地利用尤其应密切注意污泥中的重金属含量，要根据农用土壤背景值，严格确定污泥的施用量和施用期限。

2) 病原微生物和寄生虫卵的控制

首先，应加强污泥的稳定化处理，使得污泥中的大肠菌群数等指标满足《城镇污水厂污染物排放标准》GB 18918等标准的要求，其次，为了保护公众的健康以及减少疾病传播的潜

在危险，需建立一系列的操作规范和制度，如在污泥与公众可能接触的场所需设置警示标志等。

3) 臭味对环境的影响及缓解措施

一般来说污泥散发的臭味在下风向100 m内，对人的感觉影响明显。在300 m以外，则臭味已嗅闻不到。因此，必须满足300 m的隔距，才能有居住区。另外，为改善厂区工人的操作条件，污泥接受仓在车辆卸泥完成后应及时封闭，防止臭气逸出。

附录

编制依据

- 1、《城镇污水处理厂污泥处理处置及污染防治技术政策（试行）》
- 2、《城市环境卫生设施设置标准》CJJ 27
- 3、《室外排水设计规范》GB 50014
- 4、《城镇污水处理厂运行、维护及其安全技术规程》
- 5、《化学品生产单位受限空间作业安全规范》AQ 3028
- 6、《爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范》GB 50058
- 7、《石油化工企业设计防火规范》GB 50160
- 8、《粪便无害化卫生标准》GB 7959
- 9、《工业企业设计卫生标准》GBZ1
- 10、《工作场所有害因素职业接触限值》GBZ2
- 11、《恶臭污染物排放标准》GB 14554
- 12、《污水综合排放标准》GB 8978
- 13、《城市区域环境噪声标准》GB 3096
- 14、《工业企业厂界噪声标准》GB 12348
- 15、《生活垃圾填埋场污染控制标准》GB 16889
- 16、《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17
- 17、《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB 18918
- 18、《城市生活垃圾卫生填埋处理工程项目建设标准》（建标[2001]101号）
- 19、《生活垃圾焚烧污染控制标准》GB 18485
- 20、《危险废物鉴别标准》GB 5085
- 21、《水泥工业大气污染物排放标准》GB 4915
- 22、《危险废物焚烧污染控制标准》GB 18484
- 23、《废物焚烧 2000/76/EC 指令》
- 24、《轻集料及其试验方法 第一部分：轻集料》GB/T 17431.1
- 25、《烧结普通砖》GB 5101
- 26、《烧结多孔砖》GB 13544
- 27、《烧结空心砖》GB 13545

- 28、 《固化类路面基层和底基层技术规程》 CJJ/T 80
- 29、 《土壤固化剂》 CJ/T 3073
- 30、 《危险废物填埋污染控制标准》 GB 18598
- 31、 美国《污泥利用处置标准》
- 32、 欧盟《污泥农用指导规程》
- 33、 英国《污泥农业土地利用指南》
- 34、 《地下水质量标准》 GB 5750
- 35、 《地下水环境监测技术规范》 HJ/T 164
- 36、 《土壤环境质量标准》 GB 15618
- 37、 《土壤环境监测技术规范》 HJ/T 166
- 38、 《安全色》 GB 2893
- 39、 《安全标志》 GB 2894
- 40、 《火电厂大气污染物排放标准》 GB 13223
- 41、 《污水排入城市下水道水质标准》 CJ 3082
- 42、 《城镇污水处理厂污泥泥质》 GB24188
- 43、 《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》 GB/T 23486
- 44、 《城镇污水处理厂污泥处置 混合填埋用泥质》 GB/T 23485
- 45、 《城镇污水处理厂污泥处置 单独焚烧用泥质》 GB24602
- 46、 《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》 GB24600
- 47、 《城镇污水处理厂污泥处置 制砖用泥质》 CJ/T289
- 48、 《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质》 CJ/T309
- 49、 《建筑设计防火规范》 GB 50016
- 50、 《城镇污水处理厂污泥处置 分类》 GB/T23484

主编单位: 住房和城乡建设部科技发展促进中心
中国人民大学

参编单位: 上海市市政工程设计研究总院
中国科学院地理科学与资源研究所
浙江大学
北京市市政工程设计研究总院
北京市排水集团有限责任公司
同济大学
重庆大学
清华大学
城市污染控制国家工程研究中心
中国建筑科学研究院建筑材料研究所
中国农业科学院农业资源与农业区划研究所
天津水泥工业设计研究院有限公司
北京中持绿色能源环境技术有限公司

主要起草人: 杨 榕 王洪臣 陈同斌 张 辰 孔祥娟
唐建国 黄 鸥 严建华 张建新 何 强
杭世珺 戴晓虎 王 伟 许国仁 谭学军
王 飞 刘洪涛 崔希龙 高廷耀 董 滨
周 健 王国华 孙 晓 池 涌 高 定
黄群星 杨茂东 戴前进 刘伟岩 桂 萌
李国建 周增炎 丁 威 郭向勇 韦庆东
柴宏祥 薛重华 任海静 李 博 张 成
纪宪坤 李海龙 沈序辉 胡芝娟 翟丽梅
刘宏斌 邹国元 左 强 李彩斌 王立宁
吴 飞 乔 玮 高兴保 孙轶斐 洪建灵