城镇污水处理厂污泥好氧发酵

工艺设计与运行管理指南

（征求意见稿）

中国计划出版社

二〇 年

前 言

根据中国工程建设标准化协会〔2018〕建标协字第15号文《关于印发2018年第一批协会标准制订、修订计划的通知》，制订本指南。

污泥好氧发酵作为城镇污水处理厂污泥处理的主流技术之一，可实现污泥的稳定化、无害化和资源化利用，其工艺相对简单，运行维护要求较低，也是目前国际上最常用的污泥处理方法之一。《城镇污水处理厂污泥处理处置污染防治最佳可行技术指南》（试行）（HJ-BAT-002）将污泥好氧发酵作为污泥处理处置污染防治最佳可行技术之一。《城镇污水处理厂污泥处理处置及污染防治技术政策》（试行）（建城〔2009〕23号）提出，污泥以园林绿化、农业利用为处置方式时，鼓励采用高温好氧发酵的污泥处理方式。

近年来，我国很多城市都进行了污水处理厂污泥好氧发酵的工程实践，工程规模也由小型向大中型发展，同时在臭气控制、自动控制、设备集成等方面进行了诸多技术研发和储备，实现了污泥好氧发酵成套设备国产化工程应用。国内已发布的标准包括中国工程建设协会标准《城镇污水处理厂污泥好氧发酵技术规程》（T/CECS 536-2018）、行业标准《城镇污水处理厂污泥处理技术规程》（CJJ 131-2009）、《污泥堆肥翻堆曝气发酵仓》（JB/T 11245-2012）等，规定了污泥好氧发酵在设计、施工、运行和管理方面的核心技术要求。本指南旨在进一步深化对污泥好氧发酵技术原理和工艺过程的理解，协同已发布的技术规程，指导和规范我国污泥好氧发酵的工艺设计和运行管理。本指南编制过程中，梳理、借鉴了国内外相关技术文件，调查、研究了国内典型工程案例，总结、吸纳了国内外理论和实践认知。

本指南的主要内容包括：总则、术语和定义、污泥好氧发酵工艺、污泥好氧发酵设计、污泥好氧发酵运行维护、好氧发酵产物特性及利用。

本指南由中国工程建设标准化协会城市给水排水专业委员会归口管理，由上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司负责技术解释。请各单位在使用过程中，总结实践经验，提出意见和建议。

|  |  |
| --- | --- |
| 主编单位： | 上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司 |
| 参编单位： | 郑州市污水净化有限公司 |
|  | 唐山城市排水有限公司 |
|  | 同济大学 |
|  | 上海交通大学 |
| 主要起草人： |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

中国工程建设标准化协会

20 年 月 日

目 录

[1 总则 1](#_Toc34896290)

[2 术语和定义 2](#_Toc34896291)

[3 污泥好氧发酵工艺 3](#_Toc34896292)

[3.1 原理与作用 3](#_Toc34896293)

[3.2 应用原则 4](#_Toc34896294)

[3.3 工艺类型 5](#_Toc34896295)

[3.4 工艺流程 9](#_Toc34896296)

[4 污泥好氧发酵设计 11](#_Toc34896297)

[4.1 总体设计 11](#_Toc34896298)

[4.2 工艺设计 12](#_Toc34896299)

[4.3 混料系统 17](#_Toc34896300)

[4.4 发酵系统 18](#_Toc34896301)

[4.5 供氧系统 22](#_Toc34896302)

[4.6 储存系统 23](#_Toc34896303)

[4.7 除臭系统 24](#_Toc34896304)

[4.8 自动控制系统 26](#_Toc34896305)

[5 污泥好氧发酵运行维护 28](#_Toc34896306)

[5.1 运行与维护 28](#_Toc34896307)

[5.2 监测与检测 32](#_Toc34896308)

[5.3 二次污染控制 35](#_Toc34896309)

[5.4 安全管理 36](#_Toc34896310)

[6 好氧发酵产物特性及利用 38](#_Toc34896311)

[6.1 产物特性 38](#_Toc34896312)

[6.2 产物利用 39](#_Toc34896313)

[引用标准名录 41](#_Toc34896314)

1 总则

1.0.1 编制目的

为了深化对城镇污水处理厂污泥好氧发酵技术原理和工艺的理解，提升我国污泥好氧发酵的工艺设计和运行管理水平，在查阅国内外相关技术材料、调研国内相关工程的基础上，依据国家和行业相关法律法规和标准规范，编制本指南。

1.0.2 适用范围

本指南适用于城镇污水处理厂污泥好氧发酵的工艺设计和运行管理。

2 术语和定义

**2.0.1** 污泥好氧发酵 sludge compost

在充分供氧的条件下，污泥在好氧微生物的作用下产生较高温度使有机物生物降解及无害化，最终生成性质稳定腐殖化产物的过程。

[T/CECS 536-2018，术语2.1.1]

**2.0.2**  一次发酵 primary fermentation

好氧发酵的第一阶段，微生物在好氧条件下迅速分解物料中易降解的有机组分的过程，通常包括升温、高温、降温和温度稳定阶段。

[T/CECS 536-2018，术语2.1.2]

**2.0.3** 二次发酵 secondary fermentation

一次发酵产物进一步陈化或腐熟的过程，微生物在好氧条件下以较低的速度分解物料中难降解的有机组分以及发酵中间产物。

[T/CECS 536-2018，术语2.1.3]

**2.0.4** 序批式好氧发酵 sequencing batch aerobic fermentation

按时间顺序间歇操作运行，整个好氧发酵处理过程物料固定在同一反应器中进行的发酵工艺。

[CJ/T 505-2017，术语3.1]

**2.0.5** 连续式好氧发酵 continuous aerobic fermentation

具有连续进出料功能，物料在反应器能有相对位移，不同时段的单位物料依次在设备（或同一反应器）内完成好氧发酵的工艺。

[CJ/T 505-2017，术语3.2]

**2.0.6** 耗氧速率 oxygen consumption rate

发酵物料中微生物消耗氧气的速度，可用单位时间氧气浓度变化来表示，也可用单位时间单位发酵物料中微生物消耗氧气的量来表示。

3 污泥好氧发酵工艺

3.1 原理与作用

3.1.1 污泥好氧发酵及其优缺点

污泥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，从而实现污泥稳定化、无害化和资源化的一种处理工艺。污泥好氧发酵具有以下优点：

* 代谢过程中产生热量，堆体温度可升高至55℃以上，有效杀灭病原菌、寄生虫卵和杂草种籽，提高好氧发酵产品的安全性；
* 好氧发酵处理后，污泥有机物含量降低，有机养分形态有利于植物吸收；
* 形成高质量、可销售的最终产品，无臭味，公众接受度高；
* 好氧发酵工艺对于设备和操作的要求较简单，投资和运行成本相对较低。

污泥好氧发酵也存在一些缺点：

* 好氧发酵过程需要较大的场地，如果可用土地不多或者土地价钱很高就会影响好氧发酵工艺的应用，对于高度城市化地区这一问题更为突出；
* 辅料一般需要另外购买，提高了好氧发酵工艺的运行成本；
* 好氧发酵过程需要臭气控制，操作环境较差。

3.1.2 污泥好氧发酵原理

污泥好氧发酵原理是在有游离氧存在的条件下，利用堆料中好氧微生物的代谢作用对污泥进行生物降解和生物合成。参与反应的三种主要微生物菌属包括细菌属、放线菌属和真菌属，大部分有机物的分解是由细菌完成的。好氧发酵过程中，溶解性有机质透过微生物的细胞壁和细胞膜而被微生物所吸收；固体和胶体有机质先附着在微生物体外，由微生物所分泌的胞外酶分解为溶解性物质，再渗入细胞。微生物通过氧化、还原、合成等过程，一部分被吸收的有机质氧化成简单的无机物，并释放出微生物生长活动所需要的能量；另一部分有机质转化为生物体所必需的营养物质，合成新的细胞物质，用于微生物的生长繁殖。

污泥好氧发酵过程中物质转化如图3.1-1所示。



图3.1-1 好氧发酵原理图

好氧发酵过程大致可分为以下三个阶段：

（1）中温阶段。好氧发酵过程初期，堆体基本呈15℃~45℃中温状态，嗜温微生物较活跃，并利用糖类和淀粉类等较易利用的有机质进行旺盛的代谢活动。

（2）高温阶段。当堆体温度升至45℃以上时进入高温阶段，在这一阶段，嗜温微生物受到抑制甚至死亡，取而代之的是嗜热微生物。基质中残留的和新形成的可溶性有机质继续被氧化分解，复杂的有机质如半纤维素、纤维素和蛋白质也开始被强烈分解。各种嗜热微生物的最适宜温度不同，通常在50℃左右最活跃的是嗜热真菌和放线菌；当温度上升到60℃时，真菌几乎完全停止活动，仅嗜热性放线菌和细菌活动；温度升到70℃以上时，大多数嗜热性微生物已不再适应，从而大批死亡或进入休眠状态。污泥好氧发酵的最佳温度一般为55℃~60℃，这是因为大多数微生物在45℃~65℃范围内最活跃，有利于分解有机质，其中的病原菌和寄生虫大多可被杀死，实现污泥的无害化。

（3）降温阶段。在内源呼吸后期，剩下部分较难分解的有机质和新形成的腐殖质。此时微生物的活性下降，堆体发热量减少，温度下降，嗜温微生物又占优势，对残余较难分解的有机质作进一步分解。此过程伴随着污泥水分的快速大量散失，含水率降低至40%~45%，从而完成污泥减量化。从污泥有机质转化的角度分析，胡敏酸、富里酸等腐殖质类物质的形成显示污泥达到稳定化，也为发酵产物的资源化利用创造了条件。

3.2 应用原则

污泥好氧发酵处理后的产物一般考虑以土地利用作为首要出路，因此，好氧发酵原料不应含有影响土地利用的重金属、持久性有机污染物等有毒有害物质。

污泥好氧发酵工艺使用的辅料来源应稳定，应因地制宜，尽量利用当地的废料，如秸秆、木屑、锯末、园林废弃物等，达到综合利用和处理的目的。

3.3 工艺类型

3.3.1 按发酵阶段分类

污泥好氧发酵工艺包括一次发酵和二次发酵两个阶段。

一次发酵是好氧发酵的第一阶段，即快速堆肥阶段，微生物在好氧条件下迅速分解物料中易降解的有机组分，通常包括升温、高温、降温和温度稳定过程。一次发酵的时间根据发酵型式而异。

二次发酵即熟化阶段，一次发酵产物进一步陈化或腐熟，微生物在好氧条件下以较低的速度分解物料中难降解的有机组分以及发酵中间产物。由于该阶段需氧量和产热量均较低，因此强制曝气或者搅动并不重要，但实践中仍会采用曝气或翻堆以维持物料的好氧条件、抑制臭气，使堆料发酵更加均匀，水分散发较好。二次发酵一般采用条垛式发酵，周期为30~50d。

在一次发酵后是否进行二次发酵取决于发酵产物的稳定化要求，二次发酵需额外增加进出料设备，占地较大，动力消耗较多，优点是产物的稳定程度更高，避免对植物生长产生不利影响。

3.3.2 按发酵型式分类

污泥好氧发酵工艺按照发酵型式，可分为条垛式、槽式和反应器等型式。

**1、条垛式发酵**

在条垛式发酵中，污泥和辅料的混合物形成平行布置的长条垛，具有梯形或三角形断面，堆体的高度一般为1~2m，底部宽度为3~5m，上部宽度为0.5~1.5m，条垛间距宜大于0.5m，以预留翻堆机械的操作空间。

条垛式发酵可采用翻堆式或强制通风静态垛式。翻堆式通过定期翻堆来实现堆体中的有氧状态，物料充分暴露于空气，释放水分，并疏松物料以便于空气的渗入。强制通风静态垛式是在条垛式的基础上，通过强制通风向堆体中供氧，空气管路置于底部的空气渠内以保护其免受翻堆机械的破坏，如图3.3-1所示，空气可以强制向上穿过堆体，也可以向下由底部空气渠排出，强制通风静态垛式发酵能较好地控制温度和氧气浓度，发酵时间相对较短。



图3.3-1 条垛式发酵断面及平面布置

条垛式发酵可在敞开的室外或者加盖的场地进行。与其他发酵型式相比，条垛式发酵设备简单、操作方便、建设和运行费用较低；但由于堆高限制，且条垛之间需预留机械操作空间，该型式占地面积较大。当用地条件宽松、环境要求较低时，可采用条垛式发酵。

**2、槽式发酵**

槽式发酵在发酵槽中进行，发酵槽断面形状为矩形，堆体高度一般为2~3m，槽宽2.5~5m，长度在20~90m不等。相邻发酵槽之间的壁厚一般不小于0.2m。

槽式发酵的供氧方式多采用强制通风与翻堆相结合，发酵槽底部铺设曝气管用于强制通风；发酵槽墙体上设有轨道，翻抛机在轨道上运行并进行翻堆。根据物料的移动方式，槽式发酵还可分为序批式和连续式，序批式发酵将物料批量移入或移出发酵槽；连续式发酵通过翻抛机将物料从发酵槽入口向另一端持续推进，直到达到需要的停留时间再排出。

槽式发酵工艺机械化程度较高、操作简单，近年来应用较为广泛。与条垛式发酵相比，其占地面积相对较小，发酵周期较短，发酵过程中散失的臭气更易收集处理，环境影响相对较小。

**3、反应器发酵**

反应器发酵是将物料送入密封的发酵仓内，通过不间断地控制通风量和水分，使物料进行生物降解和合成转化的过程。根据污泥流态，反应器发酵可采用垂直推流式系统、水平推流式系统、搅动柜系统。垂直推流式系统中，物料从反应器上部加入，并逐渐移至反应器底部，由螺旋卸料装置排出，反应器仅曝气不搅拌；水平推流式系统与垂直推流式系统类似，物料在反应器内部不进行搅拌；搅动柜系统与推流式系统不同，物料不是以未经混合的状态在反应器内部移动，而是由机械设备定期对其进行搅拌及运输。

随着我国在污泥好氧发酵方面装备水平的提升，开发了不同类型的好氧发酵反应器并进行工程应用，包括立式发酵罐、机械滚筒、一体化智能发酵设备等。

（1）立式发酵罐：主要由反应器机架、仓体、上料系统、搅拌曝气系统、传动系统和臭气处理系统等组成，采用圆筒形发酵仓，深度在5m~8m不等，物料通过上料器送入反应器仓体内，经过发酵后，腐熟物料从下方的出料口卸出。

（2）机械滚筒反应器：主要设备包括好氧发酵滚筒、配套进出料设备、供风机及监控系统。滚筒的轴线一般呈水平或稍有倾角，物料通过倾斜的进料装置（如螺旋进料器、传送带等）输送到滚筒的进料口，滚筒以设定速度绕轴线转动物料，使物料在滚筒内被反复抄起、升高、跌落，并由进料端移动到出料端。

（3）一体化智能发酵设备：采用长方形箱体结构，主要由发酵仓体、进料布料系统、物料输送系统、匀翻系统、曝气系统、除臭系统、出料系统和智能控制系统组成，可实现全过程智能化控制。一体化好氧发酵设备也可分为序批式和连续式两类。

反应器发酵主要适用于小型污泥好氧发酵工程，其工艺集成程度高，占地面积小；机械化和自动化程度高，运行维护简单，劳动强度较小；由于系统完全封闭，臭气控制效果较好，相对于条垛式发酵和槽式发酵，环境影响更小。

3.3.3 按翻堆方式分类

污泥好氧发酵工艺按照翻堆方式，可分为静态、动态和间歇动态（半动态）。静态发酵完全不翻堆，设备简单，动力消耗省；动态发酵进行持续性的翻堆，物料不断翻滚，发酵均匀，水分蒸发好，但能耗较大；间歇动态发酵进行间歇性的翻堆，动力消耗介于静态发酵与动态发酵之间，发酵效果较为均匀，水分蒸发效果适中，是一种较为普遍采用的污泥好氧发酵方式。

传统的有机废物好氧发酵以静态发酵为主，发酵产物的质量并不稳定。废弃物进入工业化处理阶段后，污泥的性质决定了发酵过程中需要强制性供氧并及时调整堆体结构，更利于发酵进程的完成，但又不能过于频繁翻堆，避免堆体温度不足，达不到无害化要求，因此间歇式动态方式更适合污泥好氧发酵。

3.3.4 按供氧方式分类

污泥好氧发酵供氧方式包括自然通风、强制通风、翻堆等。

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，供气不均匀，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。

强制通风可准确控制风量和通风时间，有效调控污泥好氧发酵进程，促进物料腐熟。强制通风可采用循环供气方式，气体脱水后循环利用，优势在于回收热量和发酵过程中释放的氮元素，控制供气含水率，并减少臭气处理量。强制通风包括正压送风和负压抽风两种方式，可交替运行。

（1）正压送风

正压送风供氧，空气由堆体底部进入，由堆体表面散出，将堆体内部水蒸气驱至堆体外表面，有利于干燥，表层升温速度快，无害化程度高，发酵产品腐熟度高。正压送风方式可以防止曝气管道内冷凝水的积累，但臭气不易收集。

（2）负压抽风

负压抽风供氧，空气经过堆体向下抽吸至管道内，堆体中心升温较快，因此比较适合于寒冷条件或系统能量平衡的边界期。但该方式表层温度低，无害化程度较差，表层易滋生蝇类。在负压运行方式下，排出的气体可有效收集及处理，但易冷凝成腐蚀性液体，对抽风机侵蚀较严重。

翻堆有利于供氧与物料破碎，同时加快了堆体水分的蒸发；缺点是能耗较高，翻堆次数过多增加热量散发，堆体温度达不到无害化要求，且不利于臭气控制；翻堆次数过少，则不能保证物料完全好氧发酵。

对于一次发酵，宜采用强制通风联合翻堆的供氧方式，起到供氧、颗粒破碎作用，加速水分蒸发，有利于物料发酵均匀。二次发酵可采用单独翻堆供氧。

3.3.5 好氧发酵工艺发展

**1、膜覆盖好氧发酵工艺**

膜覆盖好氧发酵工艺是一种将微孔功能膜作为污泥好氧发酵处理覆盖物的工艺技术。利用功能膜的微孔特性，发酵过程产生的水蒸气和二氧化碳可以向膜外排出，而病原微生物、气溶胶等被隔离在膜内。同时，通过底部风机通风，在膜内形成一个低压内腔，使堆体内的氧气分布均匀，温度交换平衡，促进污泥中有机物的充分降解，并保证病原微生物在好氧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。由于功能膜的覆盖作用，风机供氧利用率提高，能耗较低。

在发酵型式上，条垛式发酵、槽式发酵等工艺均可与膜覆盖技术结合应用。由于功能膜具有防雨功能，可在室外建立发酵堆体，堆体高度1.5~2.5m，宽度4~7m。供氧一般采用堆体底部通风方式，采用中压离心风机供风，与常规污泥好氧发酵不同的是，各堆体宜单独设立风机，而不是单台风机供多个堆体使用，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。其他环节如预处理、进料、一次发酵、二次发酵等，与常规发酵工艺类似。

**2、超高温好氧发酵工艺**

超高温好氧发酵工艺是指在污泥好氧发酵过程中，通过添加外源嗜热微生物，在高于80℃条件下完成好氧发酵的过程。传统的污泥好氧发酵工艺高温阶段温度在55~65℃，且持续时间较短。超高温好氧发酵工艺通过向发酵物料中引入耐高温的嗜热微生物，可实现持续超高温发酵，平均温度达到80℃，最高可达100℃以上，从而促进发酵进程，提高发酵产物的腐熟度和无害化程度。超高温好氧发酵工艺一般无需添加辅料，但其发酵所需的菌剂也会导致处理成本增加。

3.4 工艺流程

污泥好氧发酵工艺流程如图3.4-1所示，主要由混合、进料、一次发酵、二次发酵、熟料加工及存贮等工序组成。一般来说，脱水污泥、返混料和辅料经过混合后进行发酵，发酵产物可进行筛分处理，筛上物作为返混料，筛下物作为熟料进行资源化利用。

一次发酵是污泥好氧发酵工程的核心工序，其他工序可根据原料性质、工艺运行特征、设备适用性能和发酵产物用途等要求，进行相应增减。组合的原则是配合一次发酵运行，提高综合处理效率和发酵产物质量，满足发酵产物处置要求，降低建设和运行成本。例如，为了促进发酵，可在发酵过程中投加菌剂；当进泥的泥质满足好氧发酵要求时，可去掉返混料的工序；当一次发酵产物可以满足处置要求时，可去掉二次发酵工序；当污泥进料含水率过高时，为降低辅料成本，可在混料前增加干化工序。



图3.4-1 污泥好氧发酵工艺流程图

4 污泥好氧发酵设计

4.1 总体设计

4.1.1 工程规模

污泥好氧发酵工程设计日处理量应根据污泥产量或接纳污泥量确定，并充分考虑城镇污水处理厂污泥产量的波动，同时，预留合理处理余量以满足设备维护检修时的污泥处理需求。

按照日处理量，污泥好氧发酵工程规模可分为四个等级，如表4.1-1所示。

表4.1-1 污泥好氧发酵工程规模

|  |  |
| --- | --- |
| 规模等级划分 | 污泥日处理能力（t/d，以80%含水率计） |
| Ⅰ类 | ≥500 |
| Ⅱ类 | 200~500 |
| Ⅲ类 | 50~200 |
| Ⅳ类 | ＜50 |

注：Ⅱ、Ⅲ类处理能力含下限值，不含上限值，即Ⅱ类处理能力为≥200 t/d且<500 t/d、Ⅲ类处理能力含下限值，不含上限值为≥50 t/d且<200 t/d。

4.1.2 生产线设置

对于Ⅰ类、Ⅱ类规模的污泥好氧发酵工程（日处理污泥量≥200t/d，以含水率80%计），混料、输送生产线的数量不宜少于2条，以保障在部分设备出现故障时，可通过生产调度保持全厂的处理能力。

混料、输送生产线的额定处理能力可按8h/d~16h/d工作时间计算，便于合理安排工作班次，并保证必要的维护时间，同时还预留有通过延长生产线工作时间临时提高日处理能力的空间。设备选择时应根据物料容重进行处理能力校核。

4.1.3 总图布置

污泥好氧发酵工程占地面积应根据项目建设规模、处理工艺、场地条件等确定，在满足污泥好氧发酵处理效果的前提下，尽量控制占地面积。条垛式发酵和槽式发酵工程的占地面积指标宜符合表4.1-2的要求。反应器发酵工程布局更加紧密，占地面积更小。

表4.1-2 条垛式和槽式污泥好氧发酵工程占地面积指标

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 规模 | 项目与污水处理厂合建  （含新建与改、扩建项目） | | | 项目单独建设（含多个污水处理厂污泥集中处理建设项目） | | | |
| 主体工程设施  （m2/t） | 辅助工程设施（m2） | 办公管理设施（m2） | 主体工程设施（m2/t） | 辅助工程设施（m2） | 生活服务设施（m2） | 办公管理设施（m2） |
| Ⅰ类 | 60~80 | 70~80 | 25~30 | 90~110 | 650~750 | 250~300 | 400~500 |
| Ⅱ类 | 65~90 | 60~70 | 110~140 | 550~650 | 200~250 | 350~450 |
| Ⅲ类 | 70~100 | 50~60 | 15~20 | 150~180 | 500~600 | 170~200 | 300~400 |
| Ⅳ类 | 100~120 | 40~50 | 180~210 | 400~500 | 120~170 | 200~300 |

注：1 主体工程设施包括称重计量、混料、一次发酵、二次发酵、储存、供氧、除臭，由于好氧发酵产物加工和储存工序占地面积受发酵产物性质和资源化利用方式影响，主体工程占地面积指标不包含发酵产物加工和储存用地；

2 辅助工程设施包括厂内道路、供配电、给水排水、消防、通信、通风、监测控制、维修、绿化等；

3 办公管理设施包括生产管理用房、行政办公用房、传达室；

4 生活服务设施包括食堂、浴室、锅炉房、值班宿舍。

污泥好氧发酵工程的总图布置应充分考虑物料运输路线的流畅性和合理性，满足生产工艺技术要求；按功能分区布置，生产区与管理区分开布置，做到人流、物流通畅，作业管理方便。

4.1.4 其他要求

在北方寒冷地区，当环境温度较低时，不利于污泥好氧发酵堆体升温和高温期的持续，应采取措施保证污泥好氧发酵车间环境温度不低于5℃，并通过设置气体导流系统、冷凝器、冷凝水收集管路等措施，防止冷凝水回滴至发酵堆体。

污泥好氧发酵工程防火设计应符合现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016、《建筑内部装修设计防火规范》GB 50222和《建筑灭火器配置设计规范》GB 50140的有关规定。

4.2 工艺设计

4.2.1 进料要求

污泥好氧发酵一般添加辅料或返混料以调节物料含水率、孔隙率和碳氮比等，便于启动发酵以及促进发酵过程顺利完成。进料包括污泥、辅料、返混料。

**1、污泥**

进行好氧发酵处理的污泥一般为脱水污泥，有以下要求：

* 含水率≤80%；
* 有机物含量≥40%；
* 重金属、矿物油、挥发酚、总氰化物等指标应符合现行国家标准《城镇污水处理厂污泥泥质》GB 24188的规定，具体如表4.2-1所示。

表4.2-1 采用好氧发酵处理的污泥有害物质含量限值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 控制指标 | 限值 |
| 1 | 总镉 | < 20 |
| 2 | 总汞 | < 25 |
| 3 | 总铅 | < 1000 |
| 4 | 总铬 | < 1000 |
| 5 | 总砷 | < 75 |
| 6 | 总铜 | < 1500 |
| 7 | 总锌 | < 4000 |
| 8 | 总镍 | < 200 |
| 9 | 矿物油 | < 3000 |
| 10 | 挥发酚 | < 40 |
| 11 | 总氰化物 | < 10 |

**2、辅料**

污泥好氧发酵所添加辅料应具有含水率低、碳氮比高、孔隙率高、具有一定强度、颗粒分散性好等特点，需根据来源稳定性、孔隙率、容重、成本等因素确定辅料，可采用碎秸秆、木屑、锯末、花生壳粉、蘑菇土、园林修剪物等有机废弃物。辅料有以下要求：

* 不应含有玻璃、金属、石块等不可生物降解的杂物，含土等杂质量≤3%；
* 含水率≤30%，有机物含量≥60%，碳氮比≥50:1；
* 颗粒直径不宜大于2cm。

如进一步细分，辅料还可分为蓬松剂和改良剂。

蓬松剂的主要作用是提供结构性支撑，增加物料孔隙率以适合充氧，有助于降低对鼓风机风压的要求，降低能耗。蓬松剂宜采用木屑、花生壳、树枝等。

改良剂的主要作用是增加可生物降解的有机物质，并提供附加碳源，以调节物料的碳氮比。改良剂可采用作物秸秆、蘑菇渣、木屑、草炭、稻壳、棉籽饼、厩肥、园林修葺物等。

**3、返混料**

污泥好氧发酵返混料可减少辅料用量；对于投加菌剂的工艺，如超高温好氧发酵工艺等，将发酵后物料进行返混，还有助于微生物接种。返混料有以下要求：

* 含水率≤40%；
* 颗粒直径不宜大于2cm，当含有大块物料时，应将其破碎后使用。

**4、混合物料**

待处理污泥、辅料、返混料的质量配比应根据进入好氧发酵系统的混合物料和这三者的含水率、有机物含量、碳氮比经计算确定，无参数时可按照污泥、辅料、返混料的质量比为100:（10~20）:（50~60）进行配比。冬季宜适当提高辅料投加比例，提高物料的孔隙率，以利于发酵堆体升温。

进入好氧发酵系统的混合物料有以下要求：

* 含水率应为55%~65%，有机物含量不应低于40%，碳氮比应为（20~30）:1，pH值应为6~9；
* 堆积密度应为0.6 g/cm3~0.7g/cm3，孔隙率应为30%~40%；
* 结构松散、颗粒均匀、无大团块，颗粒直径不应大于2.0cm。

物料中的水分不仅为微生物所需的可溶性营养物质提供载体，而且还为发酵过程的生化反应提供良好的介质。含水率和有机物降解速率密切相关，含水率过低将导致有机物降解速率明显降低；含水率过高则会堵塞物料孔隙，导致厌氧环境的出现，不利于好氧微生物的生长繁殖，产生臭气和植物毒性物质。因此，混合物料的初始含水率需维持在适宜的范围内，以55%~65%为宜。

物料中有机物含量过低不利于功能微生物菌群的启动和发酵的快速完成，一般有机物含量不应低于40%。

微生物按照生物量的组成按比例摄取碳和氮，可利用的碳和氮的最佳比例为（20~30）:1。碳氮比过低，多余的氮将以氨的形式释放，造成一定程度上的氮素损失和臭气问题；碳氮比过高，氮不足将导致微生物生长受限，有机物的降解速率将减慢甚至在熟化期还会保持良好的活性。污泥的碳氮比一般在6~8左右，需通过辅料进行调节，但碳氮比的定量计算较复杂，原因是一些碳源转化为可利用碳源的过程相比氮源来说慢许多，不同辅料的差异也较大，如木片仅有表面薄层能够提供可利用的碳源，而锯末中的碳源非常快就可以利用。

常规脱水污泥的pH值在6~7，一般无需调节。在好氧发酵初始阶段，脂肪酸和其他低分子有机酸大量形成，导致pH值下降，随着反应进行和有机酸的分解，pH值再次升高，发酵产物的pH值通常在中性到弱碱性范围内。

混合物料需具备一定的孔隙结构，有利于空气与物料充分接触，提高好氧发酵生化反应效率，避免厌氧产生臭气；同时较好的孔隙结构可降低气体通过的阻力，减少能耗。一般而言，孔隙率在30%~40%较佳，此时有机质降解完成较为彻底，好氧发酵过程进行较为顺利。

4.2.2 物料平衡

物料平衡计算需根据进料要求确定各物料的质量配比、含水率、有机物含量，计算好氧发酵过程水分和有机物的挥发量。

以污泥100t/d（含水率80%）为例，物料平衡计算如表4.2-2所示。首先假定各物料的含水率及有机物含量，需要注意的是，不同辅料的含水率及有机物含量差异较大，需根据具体种类确定参数；在此基础上计算混合物料参数，应符合第4.2.1节的进料要求；并计算好氧发酵过程的有机物去除量和水分挥发量。

表4.2-2 物料平衡计算示例

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 物料 | 质量（t/d） | 含水率 | TS（t/d） | 有机物含量 | VS（t/d） |
| 污泥 | 100 | 80% | 20 | 50% | 10 |
| 辅料 | 15 | 15% | 12.75 | 70% | 8.925 |
| 返混料 | 50 | 40% | 30 | 40% | 12 |
| 混合料 | 165 | 62% | 62.75 | 49% | 30.925 |

有机物去除量计算：

水分挥发量计算：

物料平衡图如图4.2-1所示。



图4.2-1 物料平衡图示例

4.2.3 能量平衡

污泥好氧发酵过程中有机物降解产生生物热能（）。热能的消耗途径包括：通入的干空气及空气中的水汽升温（、）、堆料中蒸发去除的水分潜热（）、堆料中的水分与固体物质升温（、）、反应器壁散失的传导热（）、堆体表面散失的辐射热（）以及翻堆散失的热量（），其中，水分蒸发消耗的热量占总热量的比例达到80%左右。

能量平衡如式4.2-1所示。

（式4.2-1）

由于好氧发酵过程中堆体温度、含水率均随时间变化，因此设计中较少进行能量平衡计算，但可以通过物料平衡来判断能量平衡，如式4.2-2所示。如果热量散失的速度大于产热速率，反应过程的温度将不会上升。

 （式4.2-2）

若W低于8~10，表明系统有足够热量供升温及蒸发所需；若W大于10，混合物保持湿冷状态。在上述示例中，水分挥发量/有机物去除量=66.89/9.71=6.89，因此，这一物料平衡对于能量利用来说是合理的。

4.3 混料系统

污泥由皮带机或翻斗车输送至进料混合设备，与辅料、返混料一同进行破碎、混合、搅拌，最终经均质处理形成含水率、碳氮比等参数适宜的松散小颗粒，完成污泥混料的前处理。混料系统主要包括给料、混合和输送设备。

4.3.1 给料设备

给料设备应能按比例配备进入混料设备的污泥、辅料和返混料。当采用料斗方式给料时应有防止物料架桥、起拱堵塞的措施。

滑架料仓、推架料仓是料仓给料的两种优化形式，采用液压油缸驱动的滑架或推架在料仓底部前后滑动，把物料推拉到卸料口，并破坏架桥作用。滑架料仓的物料进入可计量的卸料螺旋输送机后，可被卸至其它的接料螺旋/皮带输送机、卡车或泵送系统；推架料仓通常采用卡车接料。

4.3.2 混合设备

混合设备将污泥与辅料、返混料均匀混合后，破碎为粒径均匀的颗粒物料，以保证物料具有良好的孔隙结构，便于堆体内部通气顺畅。对于粘性污泥的混合与破碎，一般采用固定容器式混料机，主要包括立式螺旋混料机、卧式螺带混料机、双轴桨叶混料机、两段螺旋混料机等。混料设备的处理能力以40~50m3/h为宜。

（1）立式螺旋混料机

立式螺旋混料机由螺旋搅龙、混合仓和驱动装置组成，螺旋搅龙包括单螺旋、行星式和双螺旋等形式。单螺旋设于仓体的中心轴线上，对于黏性较大的污泥混料存在混合不均、效率较低的问题；行星式采用单螺旋自转的同时，由连接在仓体顶部的中心悬臂驱动形成公转，可提升混料效率；双螺旋在中心悬臂上安装两根非对称的螺旋搅龙，两个螺旋在自转的同时，绕仓体中心轴形成公转。

（2）卧式螺带混料机

卧式螺带混料机安装双层异向螺带盘绕的搅拌器轴，螺带状叶片为双层内外结构，外层螺旋将物料从两侧向中央汇集，内层螺旋将物料从中央向两侧输送，在机体内产生横向交错对流、掺混、扩散等复合运动，实现物料的快速混合。

（3）双轴桨叶混料机

双轴桨叶式混料机由两根以一定相位排列的桨叶轴、混合仓及驱动装置构成。根据两根桨叶轴排列特点，仓体一般呈W型结构。在电机驱动下，两侧轴上的桨叶分别将物料甩起旋转，在混料机的中央部位形成一个流态化的失重区，物料被提升后形成了旋转涡流，使物料快速、充分、均匀地混合。

（4）两段螺旋混料机

两段螺旋混料机结构上分为强制传输段和混合破碎段，强制传输段采用螺旋叶片，混合破碎段采用螺旋式布置弯刀，传输物料的同时对物料进行切割与抛掷，提高了混合破碎效果。

4.3.3 输送设备

输送设备主要功能是将混合好的物料送入发酵仓，并由布料机将物料均匀摊铺在堆体上部，避免堆体被压实，造成通气不畅。

污泥好氧发酵工程中的输送设备一般以皮带机为主，由于污泥物料含水率较高，输送设备应具有防粘功能，宜在皮带输送机的头部、尾部设置相适应的刮板等清扫装置，防止污泥粘结在皮带上；同时输送设备的易故障部件应便于拆卸和更换，保证物料混合后及时上堆；在易撒落位置宜装设落料挡板，防止物料撒落在输送带下；皮带输送机的倾角应小于20°，避免物料在皮带上发生滑动。带式输送机的设计应符合现行国家标准《带式输送机》GB 10595的有关规定。

4.4 发酵系统

4.4.1 一次发酵

**1、发酵仓设计**

一次发酵可采用条垛式发酵、槽式发酵或反应器发酵。

发酵仓的数量和容积，应根据进料量和发酵时间计算确定，并应预留不小于10%的处理余量。发酵仓有效容积的计算公式如下：

 （4.4-1）

式中：

*V*——发酵仓总有效容积（m3）；

——每日处理的混合物料量（t/d）；

*t*d——一次发酵时间（d）；

——混合物料堆积密度（t/m3）。

发酵堆体高度应根据供氧方式、物料含水率、有机物含量等因素确定。当采用自然通风供氧时，堆体高度宜为1.2m~1.5m；当采用机械强制通风供氧时，堆体高度不宜超过3.0m，当污泥物料含水率较高时，堆体高度不宜超过2.0m。反应器发酵的堆体高度可根据具体反应器形式确定，不受上述限制。

**2、温度和时间**

温度是影响好氧发酵过程的关键工艺参数。

高温可以促进有机物降解，增强杀灭虫卵、病原菌、寄生虫、孢子以及杂草籽的功能，同时由于温度越高水分蒸发越快，高温也有利于物料含水率下降。另一方面，微生物具有适宜的温度范围，堆体温度过高（>70℃）会对嗜高温微生物产生抑制作用，导致其休眠或死亡，影响好氧发酵的速度和效果；同时温度过高时污泥堆料发生膨胀，压缩堆料孔隙，导致供氧压力增大。

温度变化是好氧发酵和强制通风两个因素作用下平衡的结果，通风过程可以补充氧气，促进好氧微生物活动和产热，但也会带走堆体的热量，降低堆体温度。同时，温度变化引起好氧发酵过程中微生物的数量和优势种群的交替变化：好氧发酵初期，中温微生物起主导作用；进入高温期（45℃以上）后，嗜热微生物逐渐取代中温微生物；当温度过高时，微生物将会被杀死或者生长受到抑制。因此，需通过调节通风量的方式维持合理的高温水平，以利于好氧发酵的进行。

一次发酵的温度和持续时间基本要求如下：

* 堆体温度达到55℃~65℃持续时间应大于3d；
* 总发酵时间不应少于7d。

实际工程中，若采用条垛式或槽式发酵，一次发酵的时间一般在20d以上；若采用反应器发酵，一次发酵的时间根据反应器结构不同而有较大差异，范围在7~20d不等；低温季节可适当延长发酵时间。

**3、氧气浓度**

供氧方式有自然通风供氧、强制通风供氧，翻堆供氧，三种供氧方式可相互结合，形成多种供氧方式，但须保证发酵堆体中始终均匀有氧。一次发酵阶段堆体内氧气浓度应控制在5%~15%，这个最低浓度限值可保证堆体内始终均匀有氧，避免厌氧环境的形成，同时可及时提供发酵过程微生物活动的耗氧量。

4.4.2 二次发酵

二次发酵是物料的熟化过程。在这一阶段，微生物在好氧条件下以较低的速度分解物料中难降解有机组分以及发酵中间产物，未经筛选的辅料也会继续分解。

二次发酵的生物降解过程平缓，对环境条件的要求不高，因此工艺和设施可适当简化，一般采用条垛式发酵。二次发酵宜采用静态或间歇动态发酵，堆体供氧方式应根据场地条件和经济成本等因素确定，可静态布置通过鼓风机供氧，也可通过翻堆供氧。二次发酵的基本要求如下：

* 堆体温度不宜高于45℃；
* 停留时间取决于产品的应用要求，与场地空间条件也有关系，一般宜为30d~50d，以提高物料稳定化程度；
* 堆体内氧气浓度不宜低于3%。

4.4.3 翻抛设备

好氧发酵过程翻堆可以促进水分散发，使堆体温度均匀，防止物料压实，并具有辅助供氧的作用。通过翻抛，条垛或仓内的好氧发酵物料整体推移，并被打散、抛洒，与空气充分接触，提高堆体氧气含量，促进有机物分解。翻抛设备根据应用的发酵型式不同，分为条垛式翻抛机和槽式翻抛机，其中，条垛式翻抛机包括后翻式和侧翻式；槽式翻抛机包括链板式、滚筒式、桨叶式和螺旋式等。

（1）条垛式翻抛机

后翻式：工作时整机骑垮在长条形堆体上，由机架下挂装的旋转刀轴对原料实施翻抛，其特点是整机结构紧凑、受力平衡、翻抛效率高、翻抛后条垛均匀整齐。后翻式翻抛机在条垛式好氧发酵中应用广泛。

侧翻式：侧翻式翻抛机的工作原理是从堆体的一侧将物料卷进，通过无级变速传送带将物料翻动传送到翻抛机的另一侧，形成一个新的条垛。该类翻抛机可适应复杂的工作环境，主要用于二次发酵。

（2）槽式翻抛机

发酵槽的墙体上方铺有轨道，槽式翻抛机可以沿着轨道在发酵槽上前后行走，同时高速运转的翻抛机构对槽内堆料进行搅拌混合。此外，槽式翻抛机还应配备移行车联合作业，其功能主要是将翻抛机运送至指定的发酵槽，实现一台翻抛机多槽作业。不同槽式翻抛机的主要区别在于翻抛机构。

链板式：采用高强度链式传动、滚动支撑的托板结构及耐磨曲面齿刀，通过翻抛履带快速旋转带动物料翻抛。

滚筒式：通过与发酵槽同宽的旋转筒来翻动物料，滚筒周边安装若干刀片，用于搅拌破碎物料，滚筒可实现双向转动搅拌。

桨叶式：通过安装在转动轴上的桨叶对物料进行拨动、搅拌。

螺旋式：通过与减速机相连的双螺旋装置，将底部物料向上升运并向后移动。

随着污泥好氧发酵装备的不断发展，翻抛机设备的翻抛能力一般在800m3/h以上，最大可达到3000m3/h；操作宽度不宜超过5m；匀翻深度0~2m；行走速度在1.5~2.5m/min，过快或过慢均不利于翻抛完成和堆体升温；移行车的行走速度建议选择4.5~5.0m/min为宜。翻抛设备应根据发酵型式、翻堆物料量、翻堆频次、堆体宽度、堆体高度等因素进行选型。

4.4.4 布料及出料设备

混合物料由带式输送机或装载机送至发酵仓上的布料机，经均匀布料至仓内，也可用装载机进行输送堆料。布料机适用于槽式发酵，利用发酵槽墙体上架设的轨道前后运动，布料机在发酵仓上的行走速度建议为4.5~5.0 m/min，速度过快会导致铺料不均匀，速度过慢会造成上料堆积。

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。一般采用皮带机作为出料设备。皮带机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，缺点是铲车进入发酵槽可能导致曝气孔堵塞。

4.5 供氧系统

4.5.1 系统布置

供氧系统布置应保证供氧布气均匀性、降低管路阻力损失，并预留设备安装检修空间，鼓风机或抽风机与堆体距离宜为1.0m~3.0m。

鼓风机或抽风机与堆体之间的空气通道可采用管道或气室的形式，采用穿孔管或布气板进行布气，宜在上方铺垫陶粒和15cm~30cm厚的膨松剂以利于布气；当采用穿孔管布气时，支管间距宜为0.8m~2.5m。设计中应尽可能减少管道或气室的弯曲、变径和分叉，以减少压力损失。

当采用抽风机时，考虑到负压抽风排出空气的温度一般为30~50℃，含饱和水蒸气且带有臭味，释放的冷凝水具有腐蚀性，因此，应采用耐腐蚀的排气导管，可采用不锈钢、PVC或玻璃钢等材质，并在抽风机前设置渗滤液收集设施。

4.5.2 风量和风压

强制通风是污泥好氧发酵的重要调控手段，可以起到提供氧气、带走热量和水分的作用。强制通风量应维持在一个合适的范围，通风量过小，污泥中的微生物得不到充足氧气而影响好氧发酵过程，难以维持高温，影响水分的去除效果和物料的无害化程度；通风量过大，不仅增加运行成本，也会使堆体温度下降过快，影响微生物的好氧发酵作用。

强制通风的风量宜按下式计算：

*Q*=*R*×*V* （4.5-1）

式中：

*Q*—强制通风量（m³/min）；

*R*—单位时间内每立方米堆体通风量（m3/（min·m3），宜取0.05~0.20；

*V*—污泥好氧发酵堆体容积（m³）；

强制通风的风压宜按下式计算：

*P*=（*P*1+ *P*2+ *P*3）×λ （4.5-2）

式中：

*P*—鼓风风压（kPa）；

*P*1—鼓风机出口阀门压力损失（kPa）；

*P*2—管道及气室压力损失（kPa）；

*P3—*气流穿透污泥好氧发酵堆体的压力损失（kPa），取值不宜低于3 kPa/m堆体高度；

λ—供氧系统风压余量系数，宜取1.05~1.10。

供氧设备包括罗茨风机、高压离心风机、中低压风机等，应根据风压和风量要求选择。在污泥好氧发酵工程中，罗茨风机应用最广，单台风机可为多个发酵仓通风供氧，设备利用率更高。在风机功率选择上，以120~150m3/h为宜，功率过高可能导致堆体升温困难，功率过低则可能造成供氧不足。供氧系统的设计还应考虑提供一系列风量，具体方式包括采用变频设备、开启不同数量的风机等。

4.5.3 供氧控制方式

污泥好氧发酵过程的供氧控制方式主要可分为时间控制、温度反馈控制、O2或CO2控制、O2/CO2-温度联合控制等，这些控制方式可通过定时器、简单编程模块以及计算机来实现。

时间控制是通过定时控制器对供氧设备的启停进行定时控制，操作简单、投资费用低，但对好氧发酵过程的控制能力较差，有机物分解较慢，好氧发酵时间较长，特别是在高温阶段容易产生堆体过热现象。

在时间控制的基础上结合温度反馈控制，即在好氧发酵初期采用定时控制，随后采用温度反馈控制，根据堆体温度来调节供氧设备的启停，保证堆体温度处于设定区间内。温度反馈控制能够较好地控制好氧发酵过程，有机物分解较快，有利于缩短好氧发酵时间。

O2 -温度联合控制，通过多个温度和氧气传感器来反馈控制，使有机物的分解在各个阶段都达到最大，投资和运行费用相对较高。

4.6 储存系统

污泥好氧发酵工程应设计污泥、辅料、返混料和发酵产物的储存区域，区域面积应根据物料的储存量及可用空间区域确定。

4.6.1 污泥储存

污泥储存包括脱水污泥（含水率约80%）和返混料（含水率约40%）。

污泥料仓应具有耐腐蚀、耐压和不与所储存的污泥发生反应等特性。污泥料仓一般由仓体、液压动力站、液压驱动的滑架或推架单元、液压驱动的闸板阀等卸料设备组成。仓体可设计为圆形或方形，不论何种形式，其基本要求是在连续生产中物料的储存不产生由于吸湿、压实或化学反应所导致的结块，并避免物料的架桥、起拱现象。滑架或推架能够破坏架桥作用，保证物料及时排出。

脱水污泥料仓的设置，还应符合以下要求：

* 数量不宜少于2个；
* 有效容积宜按2d~7d处理污泥量确定，以确保生产系统连续运行；
* 仓内应保持微负压状态（-50Pa~-100Pa），防止有害气体逸出；
* 脱水污泥未经过稳定化处理，堆置过程中易发生厌氧反应导致甲烷积累，应设置CH4、H2S等可燃气体检测及报警装置，甲烷浓度控制在1%以下；
* 由于湿污泥呈半固体状态，不易流动，仓内各个点的污泥液面高低差异较大，应多点设置料位检测仪。

对于设置在室外的污泥料仓，北方地区还应采取料仓保温措施。

4.6.2 辅料储存

辅料的储存量应根据辅料来源并结合实际情况确定，宜为5d~7d的投加量。

辅料一般比较松散，料仓应具有防拱结功能。由于辅料粉尘较多，为了减少粉尘，同时保护设备不受湿冷季节的影响，辅料的卸料和传送设施可安装于封闭区域中，应充分考虑防火防爆要求，且应配备灭火器等消防器材。

4.6.3 发酵产物储存

发酵产物的使用具有季节性，受消纳途径影响较大，因此，应设计发酵产物储存空间，也可将发酵产物储存与二次发酵结合考虑。发酵产物应储存在通风、防雨、防浸水、防吹散的设施内，设计存储量宜为15d~30d的出料量，可根据发酵产物消纳情况和用地条件适当延长。

4.7 除臭系统

4.7.1 除臭要求

对于污泥好氧发酵系统，当氧气充足时，物料中的有机成分如蛋白质等，在好氧菌的作用下会产生NH3等刺激性气体；当氧气不足时，厌氧菌会将有机物分解为中间氧化产物，如含硫化合物（H2S、SO2、硫醇类等）、含氮化合物（胺类、酰胺类等）。主要的致臭物质来自厌氧过程，但即使在充分好氧的条件下，堆体也会产生少量致臭物质，如氨、乙酸、丙酮酸、柠檬酸等。

因此，污泥好氧发酵工程的设计应包括臭气控制内容，除臭设施应与项目主体工程同时设计、施工以及投入运行。

作业区臭气污染物的允许浓度，应符合现行国家标准《工业企业设计卫生标准》GBZ1和《工作场所有害因素职业接触限值 第1部分：化学有害因素》GBZ2.1的有关规定。厂区内臭气污染物集中收集、处理后的有组织排放源及厂界臭气污染物的无组织排放应符合现行国家标准《恶臭污染物排放标准》GB 14554的有关规定。

4.7.2 臭气源控制

臭气源控制主要包括臭气源隔离、过程控制两方面。

臭气源隔离措施包括在卸料池设置液压启闭盖，仅在卸料时开启；卸料厅使用电动堆积门配合风幕，减少卸料产生的臭气外溢；使用电动幕帘隔开发酵仓与车间其他区域，使发酵仓形成独立的密闭空间，在发酵仓上方抽气形成微负压，防止臭气逸出；在堆体表面覆盖熟料，以减少堆体臭气的释放等。

好氧发酵过程控制一方面是改善混合物料配比和物理结构，如通过加入外源添加剂改善物料的C/N比值、空隙率等；另一方面是通过调节供氧量，控制堆体温度、氧气浓度等关键影响因子，优化好氧发酵过程运行，避免堆体局部产生厌氧状态，减少臭气的产生和释放。

4.7.3 收集与处理

污泥好氧发酵工程臭气污染物的收集和处理应符合现行行业标准《城镇污水处理厂臭气处理技术规程》CJJ/T 243的有关规定。

臭气风量计算是合理设计收集和处理设施的基础。宜根据污泥好氧发酵处理流程划分除臭分区，并根据人员活动、臭气浓度等因素确定各个分区的换气频率，建议发酵区的换气次数至少每小时6次，混合及储存区域的换气次数至少每小时12次，以保证操作人员的健康和安全。在臭气产生量最大的发酵环节，可采用隔墙或电动卷帘门等方式将不同发酵仓进行分隔，以利于臭气的收集。需要注意的是，由于发酵堆体温度较高，根据曝气量计算发酵区臭气量时，应考虑温度升高而引起的臭气体积膨胀现象；此外，翻堆瞬间大量臭气会集中释放，臭气量设计时应予以充分考虑。

臭气收集的风压计算应考虑除臭空间负压、臭气收集风管沿程和局部损失、除臭设备自身阻力、臭气排放管风压损失，并应预留安全余量。各并联收集风管的阻力宜保持平衡，各吸风口宜设置带开闭指示的阀门，以便于风量平衡和操作管理。

臭气处理以生物处理为主，也可采用化学洗涤。生物除臭工艺包括生物过滤、生物滴滤、生物洗涤，生物滤池应用较多，填料可采用筛分后的熟化污泥、土壤、沙、泥炭和木屑等，臭气需预湿化，占地面积大；生物滴滤的填料为各种多孔且比表面积大的惰性物质，富集的微生物量多，占地面积小；生物洗涤将臭气物质吸收到液相后再由微生物转化。化学洗涤可采用酸洗或氧化洗涤，酸洗使用硫酸（或柠檬酸、生物菌液等）作为洗涤药剂，主要功能为去除氨气；氧化洗涤使用次氯酸钠作为洗涤药剂，主要功能为去除硫化氢及少量有机臭气。

4.8 自动控制系统

4.8.1 系统功能

污泥好氧发酵工程应配备自动控制系统，控制系统由中央控制室和现场控制站组成，包括操作平台、自动实时采集及反馈控制软件、便携式仪表等。

自动控制系统应具备以下三方面功能：

（1）数据显示、处理、记录、分析和传输

数据包括：混料系统中混料机、皮带输送机等设备的工作参数；发酵系统中供氧设施的供氧频率、堆体温度和氧气浓度、环境臭气浓度等工艺参数；除臭系统中除臭风机、循环水泵、电动阀门等设备的工作参数。

（2）工艺参数异常和设备故障报警

好氧发酵堆体温度、氧气含量等主要工况参数，宜根据工艺情况设置相应的报警参数，在工况参数偏离正常运行范围时进行报警；硫化氢、氨气等有害气体浓度超过安全阈值时进行报警，安全阈值应符合国家现行工业企业设计卫生标准和工作场所化学有害因素职业接触限值的有关规定；对于电源、气源和设备故障也应设置报警。

（3）自动化监测和反馈控制

通过对温度、氧气、臭气浓度等好氧发酵过程关键工艺参数进行自动采集与实时监测，进行反馈性工艺参数调整，以达到精确控制发酵参数、缩短发酵周期、促进污泥发酵腐熟的目的，提高发酵效率和工艺稳定性。监测探头可采用自动拔插，即物料上堆完成后，监测探头自动插入堆体并开始采集数据。

4.8.2 仪表要求

已形成工程应用经验的监测探头有温度探头、氧气探头、氨气探头、硫化氢探头和VOCs（可挥发性总有机物）探头等。考虑到污泥好氧发酵车间粉尘含量高、空气湿度大，且含有一些腐蚀性气体，在现场安装的控制仪表应满足防尘、防水和防腐蚀要求，防护等级不应低于IP55。特别是堆体内湿度较高、并且可能由于局部厌氧而产生NH3、H2S等腐蚀性气体，因此与物料直接接触的仪表应具备耐湿热、耐腐蚀等要求，保证监测数据的准确性。氧气在线监测仪表应符合现行行业标准《好氧堆肥氧气自动监测设备》CJ/T 408的有关规定。

5 污泥好氧发酵运行维护

5.1 运行与维护

5.1.1 系统运行

**1、混料系统**

混料系统开启前应确认污泥料仓、返混料仓、辅料料仓内装有物料；螺旋、皮带输送机上应无异物，皮带应无跑偏现象，主动轮和从动轮应无异物缠绕。

混料系统应避免物料混合不均匀，造成后续发酵堆体温度和氧气浓度空间差异大，影响好氧发酵效果。混料系统运行过程中，应巡检料仓物料拱结、皮带跑偏、输送设备和混合设备过载等情况，巡检频率不宜少于1次/天。

混料系统工作结束后，应检查下列项目：

* 污泥料仓的闸板阀完全关闭；
* 皮带机滚筒无粘结物料；
* 皮带机旁无散落物料；
* 混合设备内无粘结物料和缠绕物。

在物料配比方面，应根据环境温度变化优化辅料投加策略。如夏季堆体升温快，可增加返混料并减少辅料投加量；冬季堆体升温速度慢，可减少返混料比例、增加辅料比例，从而适当降低混合物料的含水率，减小物料堆积密度，保证污泥好氧发酵处理效果。

**2、发酵系统**

发酵系统布料前应保持曝气孔畅通，宜在曝气孔上方铺垫陶粒和15cm~30cm厚的辅料。布料时应保证物料厚度均匀。在不影响供氧效率的前提下，冬季低温条件下宜适当增大堆体体积，以利于堆体内部物料的保温。起垛时可在堆体表层覆盖10cm~20cm的发酵产物，以防止臭气扩散；冬季环境温度较低时，也可在堆体表层覆盖发酵产物，起到保温作用。

发酵过程中，应根据发酵阶段、堆体温度等因素及时翻堆，避免堆体内存在局部厌氧或局部过热现象，保证好氧发酵处理效果。当采用间歇动态翻堆方式时，翻堆频率应符合下列规定，冬季低温条件下可适当降低翻抛频率，减小热量损失。

* 发酵升温期，堆体温度首次上升至65℃时，宜翻堆一次；
* 发酵高温期，堆体温度保持在55℃~65℃，宜每2d~5d翻堆一次，当堆体温度超过65℃时应及时翻堆；
* 发酵降温期，堆体温度低于55℃以后，宜每7d~12d翻堆一次；当堆体温度下降至35℃以下，且连续两天温度差不超过±2℃时，宜停止翻堆。

翻抛设备在运行前应检查发酵仓壁、堆体和翻堆机运行轨道上是否有异物，在翻抛设备运行中应随时巡查。

污泥好氧发酵结束时，堆体温度应与环境温度趋于一致，且没有令人不悦的气味，发酵产物的颜色应为棕褐色。发酵产物的控制指标及限值应符合表5.1-1的要求。

表5.1-1 污泥好氧发酵产物控制指标及限值

|  |  |
| --- | --- |
| 控制指标 | 限值 |
| 含水率（%） | ＜40 |
| 耗氧速率[（O2%）/min] | 一次发酵：0.2~0.3  二次发酵：＜0.1 |
| 粪大肠菌群菌值 | ＞1.0×10-2 |
| 种子发芽指数（%） | 用于农用地：＞70  用于园林绿化和林地：＞60 |

**3、供氧系统**

合理控制物料的通风量对于生产高质量和稳定的发酵产品至关重要。好氧发酵过程中，宜通过传感设备实时监测堆体温度、氧气浓度，及时调整通风量和通风频率，使物料温度保持在55℃~65℃之间直至达到病原体控制的要求。当病原体控制要求达到后，将温度维持在50℃~55℃，可使物料最快地达到干燥及稳定。

通风量的调控还应根据不同的发酵阶段有所差异。在发酵初期，通风的主要目的是满足供氧，使发酵反应顺利进行，通风量较小以利于堆体快速升温；在高温期，应增大通风量以控制堆体温度，并满足好氧发酵微生物的需氧量；在降温期，应维持一定的风量以吹脱水分，降低含水率。对于序批式好氧发酵，通风量随时间变化；对于连续式好氧发酵，沿堆体纵向不同位置即代表了不同发酵阶段，通风量应沿程变化。

冬季和夏季温度差异较大，尤其在北方城市，相同的通风量对于堆体温度的影响也存在较大差别，因此还应根据环境温度变化调整曝气策略。夏季环境温度高，堆体升温速度快，适当大的曝气量可以加快物料发酵过程，曝气量控制应以提高物料腐熟程度为目的；冬季环境温度低，堆体升温速度慢，过量曝气会导致发酵失败，曝气量控制应以提高物料发酵温度为目的。表5.1-2显示了某污泥好氧发酵工程在不同月份的供氧策略。

表5.1-2 某好氧发酵工程不同月份的供氧策略

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 月份 | | 曝气时间（h/d） | 平均曝气量  （m3/（m3·h）） | 曝气方式 |
| 12月~2月 | 气温＜0℃ | 6 | 6.5 | 曝气15min，间隔45min |
| 气温＞0℃ | 8 | 8.7 | 曝气20min，间隔40min |
| 3月~5月和9月~11月 | | 12 | 13.0 | 曝气10min，间隔10min |
| 6月~8月 | | 12 | 13.0 | 曝气30min，间隔30min |

**4、储存系统**

料仓在正式进料之前，应先空载运行，检查输送设备的旋转方向、各种阀门的开启状态，以防止误操作。料仓停用时，应将仓内沉积的物料彻底清理干净。

物料的存放时间不宜过长，尤其是脱水污泥，在料仓内长时间储存，有可能造成沉积、干化、板结，给输送带来困难。辅料应尽量保持干燥。通过机械振动、搅拌等方式，可使物料在料仓内均匀储存，避免发生堵挂现象。料仓储存量不得大于总容量的90%。

**5、除臭系统**

污泥好氧发酵过程中，应通过优化运行，减少臭气的源头释放。当存在过度臭味时，应通过查找相关工艺原因，及时调整运行参数，可参考表5.1-3。

表5.1-3 导致过度臭味与工艺相关的原因

|  |  |
| --- | --- |
| 工艺环节 | 可能原因 |
| 混合 | 混合物料过湿或过密会导致孔隙率过低；  低碳氮比的混合物料会产生多余的氨气；  混合物料不均匀会导致充氧不均； |
| 堆体结构 | 堆体过高，空气无法穿透整个堆体，导致厌氧；  条垛式发酵表面未覆盖具有过滤臭味作用的覆盖层； |
| 曝气 | 不充分的曝气或鼓风机过长的关闭状态导致厌氧发生；  不充分的曝气导致堆体过高从而增加臭味的产生； |
| 熟化 | 发酵产物未达到稳定或熟化，堆体温度较高并产生臭气，可通过翻堆或强制通风方式改善。 |

臭气的收集应保证好氧发酵过程中蒸发的水分和臭气及时排出，尤其是冬季，堆体温度和室温差距较大，如果水汽无法及时排出，易重新凝结并流回发酵仓内，导致物料含水率提高和设备腐蚀。此外，集气输送管道内的冷凝水也应及时排除。

生物除臭设施的运行应符合下列要求：

* 根据所处理气体的温度和湿度、填料持水性能、臭气物质去除效果变化，确定最佳的喷淋频率和喷淋量；
* 定期监测生物过滤和生物滴滤处理装置的填料层压降，当填料层压降异常升高时，应分析原因并及时采取措施；
* 定期监测生物过滤和生物滴滤填料层渗出液或循环喷淋液的pH值、SS和COD，并根据渗出液水质变化调整喷淋系统的运行条件；
* 定期检查填料层，出现板结、压实、破碎等情况时，及时处理、补充或更换填料；
* 定期检查喷头堵塞情况，及时清洁或更换堵塞的喷头；
* 生物除臭宜连续运行。当不需连续运行时，可定期通气并喷淋，避免填料层产生厌氧区或干燥板结。

洗涤除臭设施的运行应符合下列要求：

* 应对洗涤液的流量、温度、pH值等参数定期检查；
* 洗涤系统出现结垢、堵塞、短流等情况时，应查明原因并及时采取措施；
* 洗涤系统长时间停机时，应清洗处理设备，并保证系统通风。

**6、自动控制系统**

自动控制系统的数据传输应符合现行行业标准《污染源在线自动监控（监测）系统数据传输标准》HJ/T 212的有关规定。运行过程中应密切关注自动控制系统的数据变化并进行相关分析，及时调整运行参数，确保污泥好氧发酵系统在最佳工况下运行。自动控制系统的数据记录应及时存档，并保存3年以上。

5.1.2 系统维护

操作人员应按要求巡视检查污泥好氧发酵设施、设备的运行状况，检查各种机电设备的运转部位有无异常的噪声、温升或振动，各类管线是否完好畅通，以及各类仪表是否工作正常，并进行日常维护保养和大、中、小修，同时及时记录维护和检修的原因、时间、内容及验收情况等。

设施、设备维修前，应做好必要的检查，并制定维修方案及安全保障措施；修复后应及时组织验收，合格后方可交付使用。维护保养应按照操作规程和维修保养规定执行；使用过程中应保持清洁，及时处理跑、冒、滴、漏、堵等问题；根据不同机电设备要求，应定期添加或更换润滑剂，并妥善处置更换出的润滑剂；经常检查和紧固各种设备连接件，定期更换易损件，可减少设备突发故障。

应定期检查和维护料仓仓体和钢结构架，做好内外防腐。

应每日检查供氧系统曝气量是否正常，保证管路畅通。

自动控制系统的在线仪表应定期进行校准和维护，保证测量精度和灵敏度。

5.2 监测与检测

5.2.1 进出物料检测

污泥好氧发酵工程运行时，应对进出物料进行计量，并按实物干重进行生产统计，核定产出。

进料污泥的检测指标和频率可根据表5.2-1确定，检测方法应符合现行行业标准《城市污水处理厂污泥检验方法》CJ/T 221的有关规定。

表5.2-1 进料污泥检测指标和频率

|  |  |
| --- | --- |
| 分析周期 | 分析项目 |
| 每日 | pH值 |
| 含水率 |
| 有机物含量 |
| 每月 | 总氮 |
| 总磷 |
| 总钾 |
| 重金属 |
| 每季度 | 矿物油 |
| 挥发酚 |
| 总氰化物 |

辅料的检测指标和频率可根据表5.2-2确定，当辅料的来源或者性质发生变化时应增加检测。

表5.2-2 辅料检测指标和频率

|  |  |
| --- | --- |
| 分析周期 | 分析项目 |
| 每季度 | 含水率 |
| 有机物含量 |
| 重金属 |

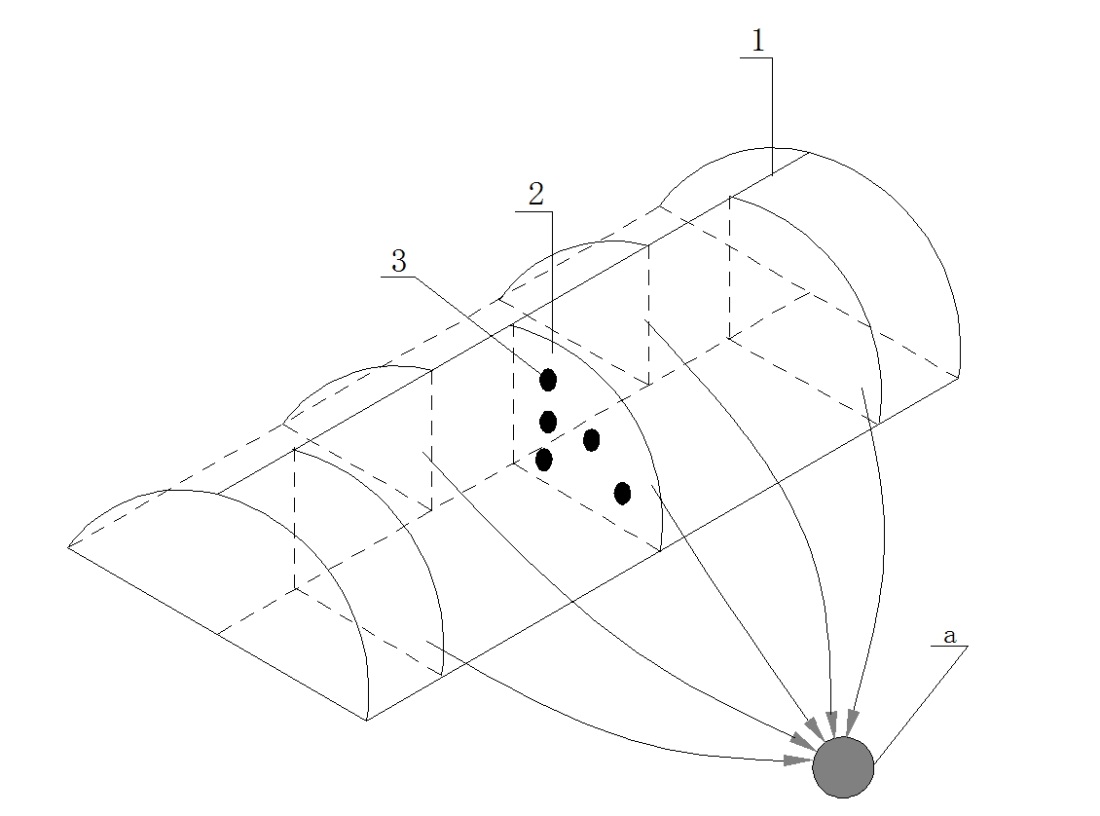
好氧发酵产物的检测指标和检测方法应符合现行国家标准《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》GB/T 23486、《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》GB/T 24600和《城镇污水处理厂污泥处置 林地用泥质》CJ/T 362等有关标准的规定，具体处置方式不同，检测指标也有所不同，如园林绿化用泥质对苯并[a]芘、种子发芽指数有限值要求，土地改良用泥质则对总氰化物、多氯联苯等有限值要求。检测频率可根据表5.2-3确定。

表5.2-3 好氧发酵产物检测指标和频率

| 分析周期 | 分析项目 |
| --- | --- |
| 每日 | pH值 |
| 含水率 |
| 有机物含量 |
| 每月 | 总氮 |
| 总磷 |
| 总钾 |
| 重金属 |
| 粪大肠菌群 |
| 种子发芽指数 |
| 每季度 | 有机污染物（矿物油、挥发酚、总氰化物、苯并[a]芘、多氯联苯等） |

污泥好氧发酵产物的取样方法应符合下列要求：

* 采用多点取样，单个样品重量不小于1kg；
* 对于连续式好氧发酵，应在一次出泥时间内取4个污泥样品；
* 对于序批式好氧发酵，应根据堆体长度均匀选取5个垂直于堆体径向中线的取样断面，取样断面应依次分布于堆体径向中线两侧；每个取样断面应均匀设置5个取样点，污泥好氧发酵取样示意图如图5.2-1所示；
* 将所取样品快速等体积混匀，再用四分法缩分，即将样品混合堆成圆锥，按“十”字形将圆锥切成四份，取对角线的两份，为一次缩分；再将对角线的两份样品混合堆成圆锥，按“十”字形切成四份，取对角线的两份，依此类推重复3~5次，缩分后的样品量应满足至少3次重复检测需要。



1——堆体径向中线；2——取样断面；3——取样点

图5.2-1 污泥好氧发酵产物取样示意图

5.2.2 过程监测与检测

污泥好氧发酵过程中应对发酵堆体的温度、氧气浓度、耗氧速率进行检测，宜采用自动监测、多点监测。

一次发酵堆体温度宜进行在线监测；二次发酵的堆体温度可定期检测，检测频次可根据需要确定。参照现行行业标准《生活垃圾堆肥处理技术规范》CJJ 52的有关规定，温度监测点不应少于3个，在堆体中分层或分区设置，避免采用单一温度监测点的局限性。

堆体氧气浓度宜进行在线监测。耗氧速率可根据不同时间堆体氧气浓度的下降求得。没有条件进行在线监测时，堆体氧气浓度和耗氧速率的检测频率不应小于1次/d，耗氧速率的检测方法应符合现行行业标准《城镇污水处理厂污泥处理 稳定标准》CJ/T 510的有关规定。

5.2.3 环境监测

作业区环境监测内容包括臭气（H2S、NH3）、噪声、粉尘浓度、蝇类密度等；厂界环境监测内容包括臭气和噪声。

监测方法和频率应符合下列要求：

* H2S、NH3监测应符合国家现行有关工作场所空气中有害物质监测的采样规范的有关规定；
* 噪声监测应符合现行国家标准《工业企业噪声测量规范》GBJ 122的有关规定；
* 粉尘浓度监测应符合现行国家标准《作业场所空气中粉尘测定方法》GB 5748的有关规定；
* 蝇类密度监测可采用捕蝇笼诱捕法，频率宜为每月2次~3次。

5.3 二次污染控制

5.3.1 水污染物

污泥好氧发酵过程中会产生大量的渗沥液，其COD、BOD和氨氮等污染物浓度较高，COD浓度在2000~6000mg/L，BOD5浓度在60~4500 mg/L。因此，污泥接收区、混料区、发酵处理区、发酵产物储存区的地面及周边车行道应进行防渗处理，并设置渗沥液收集处理设施，条垛式好氧发酵采用露天方式时还需考虑场地雨水，防止对土壤和地下水等造成污染。

污泥好氧发酵过程中产生的渗滤液可经预处理后输送至污水处理厂，也可单独处理达标后排放。前者适用于自有污泥好氧发酵的污水处理厂；后者适用于独立的污泥好氧发酵工程，目前并无针对污泥液的处理标准，可按照现行国家标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB 18918和《污水排入城镇下水道水质标准》GB/T 31962规定执行。

5.3.2 大气污染物

污泥好氧发酵微生物分解有机物时产生臭气，应通过源头控制削减臭气，并收集后集中处理，作业区应保持通风，H2S、NH3等浓度应符合国家现行有关工业企业设计卫生标准的有关规定。对于混料、翻堆、筛分等易产生粉尘的生产环节，应采取除尘措施，并最大程度减少操作人员在工作场所的暴露。厂内应采取灭蝇措施。

5.3.3 噪声

污泥好氧发酵过程中的噪声主要来源于混料设备、翻堆设备和通风设备等，应采取消声、隔振、减噪等措施进行防治，厂界噪声应符合现行国家标准《工业企业厂界环境噪声排放标准》GB 12348的有关规定。

5.4 安全管理

5.4.1 管理制度

操作人员必须经过培训、考核合格后上岗，必须熟悉好氧发酵处理工艺和设施、设备的运行要求及技术指标。特种作业人员（如电工等）应持证上岗。操作人员上岗时应佩戴劳动保护用品，如在发酵车间工作时应佩戴防尘保护用品，取样人员应戴塑胶手套，避免直接与污泥接触，并严格执行相应岗位的安全操作规程。对于有限空间、高处、临时用电、电气倒闸操作等危险作业，按照相关管理制度严格执行审批手续，安排专人负责现场安全管理，确保安全措施的落实。

污泥好氧发酵工程的料仓、辅料仓、返混料仓、混料机、发酵车间、除臭设备、气体收集管道、工程分区和厂房等设施和设备应设置明显标识，在潜在的坠落、触电、火灾、绞伤、中毒、窒息等危险处应设置警示标识。

针对潜在事故隐患源的分布、发生事故的可能性及其严重程度，应制定事故隐患的现场管理制度，制订中毒、火灾爆炸、机械伤害等各类安全事故的应急预案，建立应急救援组织，配备应急救援器材。建立事故应急机制的目的是通过有效的应急救援行动，尽可能降低事故的后果，包括人员伤亡、财产损失和环境破坏。事故应急预案明确了在突发事故发生前、发生过程中及结束后相应的策略和资源准备等。每年应至少进行一次演练，通过演练发现预案的不足，改善各应急部门和人员之间的协调，提高应急人员的熟练程度和技术水平，提高整体应急反应能力。

5.4.2 防中毒

污泥在储存过程中可能发生厌氧消化，生成甲烷、硫化氢等气体，在某些场合如通风不良，有毒有害气体积聚，易危害操作人员健康。因此，在进入污泥料仓或除臭系统的封闭环境内进行检修维护前，需对有毒有害气体含量进行检测，并强制通风，操作人员必须佩戴防护装置，并在可靠的监护下进行操作，以确保检修时维修人员的安全。

5.4.3 防火防爆

正常生产情况下，污泥好氧发酵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。例如，脱水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，在料仓中积累，有燃烧爆炸的风险；发酵产物在储存过程中，未分解完全的有机物继续降解导致温度升高，可能引起自燃。根据防火防爆要求，物料存储区和生产区内严禁吸烟和使用明火，必须动火时应报相关部门批准后方可作业；消防器材应放在易取用的明显位置，按当地消防主管部门要求，定期检查其效用，且不得擅自挪用。

5.4.4 防机械伤害

污泥好氧发酵的大容量重型机械设备和传送设备较多，存在事故隐患，运行操作和维护中应注意以下事项：

* 设备启动和运行时，操作人员不得靠近、接触转动部位；
* 设备启停时，应按照操作规程要求的注意事项、程序及动作进行操作，设备运转工况稳定，各种仪表指示正常后，操作人员方可离开；
* 设备急停开关必须保持完好有效状态，当设备运行中遇有紧急情况时，可采取紧急停机措施；
* 设备停机检修时，应首先关闭相关的前序设备，并将信息传至中央控制室或后序设备；应切断电源，并应在开关处悬挂维修和禁止合闸的标志牌，以防止其他人员合闸误操作，造成人员伤亡事故；
* 设备维护工作必须在设备完全冷却下来后进行。

6 好氧发酵产物特性及利用

6.1 产物特性

污泥好氧发酵通过微生物的生物代谢作用，使污泥中的有机物转化成稳定的腐殖质，实现污泥稳定化、无害化和资源化。从表观上看，好氧发酵产物的温度与环境温度趋于一致，一般不再明显变化；应具有土壤气味，而没有令人不悦的气味；颜色应为棕褐色；含水率在35%~45%之间，含水率过高会增加运输费用并引起臭味，含水率过低则会引起粉尘。

腐熟度和稳定性是衡量好氧发酵产物质量的尺度，两者既存在关联，又各有侧重。腐熟度指好氧发酵中的有机物经过矿化、腐殖化过程最后达到稳定的程度，侧重于产物施用对植物生长的影响，未完全腐熟的好氧发酵产物会产生有机酸抑制种子发芽，当在土壤中分解时，会消耗氮从而争夺氮源，抑制植物生长。稳定性是反映有机物降解的一种状态，侧重于产物施用对周围环境的影响，根据微生物的活动（如微生物呼吸和能量释放）来判断稳定性，主要可从产物表观、O2消耗速率、CO2释放速率、NO3-N含量变化以及病原菌数量变化等方面进行评价。我国对于污泥好氧发酵产物的稳定指标及其限值可参考现行行业标准《城镇污水处理厂污泥处理 稳定标准》CJ/T 510的有关规定。

耗氧速率反映了好氧发酵过程中微生物活性变化，是好氧发酵产物稳定程度的重要指标，一次发酵结束时，产物耗氧速率应小于0.2~0.3（O2%）/min；二次发酵结束时，耗氧速率应为0.1（O2%）/min以下。国外相关标准规范采用不同的计量单位，如美国*Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*提出3mgCO2/g.d的有机碳呼吸速率表明发酵产物不会散发腐臭味，也不会造成植物毒性；加拿大*Guidelines for Compost Quality*则规定发酵产物稳定或腐熟的必要条件是呼吸速率≤400mgO2/kgVS·h，或二氧化碳释放率≤4mgCO2/gVS·d。

种子发芽指数是评价好氧发酵产物腐熟度最具说服力的方法，通过发芽率和根系长度的测定值与在水培中的背景参照物的测量值进行对比，并以百分比表示。我国污泥处置泥质标准对于种子发芽指数要求达到60%~70%以上，也有研究表明种子发芽指数达到80%~85%以上才达到完全腐熟。需要注意的是，不同植物对植物毒性的承受能力和适应性差异较大。

在病原菌方面，好氧发酵过程中产生的热量能灭杀粪大肠菌、蛔虫卵等有害生物，好氧发酵产物的粪大肠菌一般低于1000MPN/g。

由于好氧发酵产物一般以土地利用作为首要出路，因此产物利用时，还需要考虑重金属的环境污染风险。研究表明，随着城市工业废水排放的控制及清洁技术的应用，我国污水处理厂污泥重金属含量呈现出显著的降低趋势。同时重金属的环境风险不仅与总量有关，更大程度上由其形态分布所决定。重金属形态可分为可交换态、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。可交换态易于被作物吸收，其含量虽低但生物有效性较大；碳酸盐结合态对pH值的变化敏感，在酸性条件下易溶解释放；铁锰氧化物结合态在还原条件下较易释放；硫化物及有机结合态包括重金属硫化物沉淀及与各种有机质结合的重金属，是相对稳定的形态；残渣态为非有效态，在自然条件下不易释放。污泥好氧发酵处理后重金属总量并不会发生显著变化，但其生物有效性会在一定程度上降低，也可通过添加重金属钝化剂，促使重金属由活性较高的结合形态向活性较低的结合形态转化，从而减少后续土地利用时污泥所含重金属由土壤向植物的迁移量，降低污泥土地利用的环境污染风险。

好氧发酵产物中的可溶性盐是对作物产生毒害作用的重要因素之一，主要由有机酸盐类和无机盐等组成，采用电导率表征。污泥中盐分含量较高，一般可达到普通土壤盐分的30~40倍；在好氧发酵高温阶段迅速降低；在降温过程中由于硝化细菌重新活化，电导率再次增加。由于过多的盐度会阻碍种子发芽，好氧发酵产物利用时应注意电导率满足相关标准要求。

6.2 产物利用

污泥好氧发酵产物一般进行土地利用，作为维持和构建土壤腐殖质的来源，可以保持土壤的正常结构，增加砂土的保水性能，以及粘土的充氧及排水性能；同时提高土壤的营养保持能力，减少氮磷钾的流失，提供必要的植物微生物营养。产物利用的主要途径包括农用、园林与公路绿化、林地、草坪、育苗基质和生态修复与植被恢复等。具体选择哪种利用方式应与当地的产业结构、规划背景相结合，同时在工程建设前应明确。

污泥好氧发酵产物进行土地利用时，其泥质指标、施用范围、施用量和跟踪监测应符合现行国家标准《农用污泥污染物控制标准》GB 4284、《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》GB/T 23486、《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》GB/T 24600和住建部标准《城镇污水处理厂污泥处置 林地用泥质》CJ/T 362的有关规定，同时根据当地的土壤环境质量状况和作物特点，提出细化的施用和监测方案，避免产生环境或者人体健康风险。

引用标准名录

《农用污泥污染物控制标准》GB 4284

《作业场所空气中粉尘测定方法》GB 5748

《带式输送机》GB 10595

《工业企业厂界环境噪声排放标准》GB 12348

《恶臭污染物排放标准》GB 14554

《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB 18918

《城镇污水处理厂污泥泥质》GB 24188

《建筑设计防火规范》GB 50016

《建筑灭火器配置设计规范》GB 50140

《建筑内部装修设计防火规范》GB 50222

《工业企业噪声测量规范》GBJ 122

《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 第1部分：化学有害因素》GBZ2.1

《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》GB/T 23486

《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》GB/T 24600

《污水排入城镇下水道水质标准》GB/T 31962

《生活垃圾堆肥处理技术规范》CJJ 52

《城镇污水处理厂臭气处理技术规程》CJJ/T 243

《城市污水处理厂污泥检验方法》CJ/T 221

《城镇污水处理厂污泥处置 林地用泥质》CJ/T 362

《好氧堆肥氧气自动监测设备》CJ/T 408

《城镇污水处理厂污泥处理 稳定标准》CJ/T 510

《污染源在线自动监控（监测）系统数据传输标准》HJ/T 212

《城镇污水处理厂污泥好氧发酵技术规程》T/CECS 536-2018