

厨余垃圾资源化利用过程异味污
染防治技术指南
(征求意见稿)
编制说明

标准编制组

2025 年 11 月

目 录

1 项目背景	1
1.1 任务来源	1
1.2 工作过程	2
2 制定标准的必要性	6
2.1 异味污染对环境和健康的影响	6
2.2 相关环保标准和环保工作的需要	8
3 制定标准的原则和依据	11
3.1 制定标准的原则	11
3.2 制定标准的依据	12
3.3 与现行法律法规、标准的关系	12
4 厨余垃圾资源化利用过程	14
4.1 厨余垃圾资源化利用相关政策要求	14
4.2 厨余垃圾与餐厨垃圾物化及异味污染特性	17
4.3 厨余垃圾资源化处理技术路线变化趋势	19
4.4 预处理过程典型特征	21
4.5 厌氧消化过程典型特征	27
4.6 好氧堆肥过程	31
4.7 饲料化处理	34
4.8 黑水虻处理典型特征	38
5 异味污染治理技术	42
5.1 各类治理技术原理	42
5.2 厨余垃圾资源化利用过程异味污染治理技术案例	48
6 标准主要技术内容说明	60
6.1 范围与术语定义	60
6.2 异味污染防治总则	61
6.3 异味产生环节与特征污染物	61
6.4 异味污染防治技术要求	61
6.5 运行维护与监测监管	64

6.6 其他	64
6.7 附录内容	64
7 标准实施预期效果	64
8 其他说明	65

1 项目背景

1.1 任务来源

随着城镇化和生活垃圾分类水平提高,我国餐厨垃圾产生量呈现出持续快速增长的态势,且增速明显高于生活垃圾整体增速。根据住建部 2023 年《中国城市环境卫生行业发展报告》,我国城市餐厨垃圾日产生量已突破 60 万吨,年产量超 2.2 亿吨,且以每年 8%~10%的速度递增,增速远超生活垃圾整体增速(约 5%)。这一增长趋势反映了我国经济发展、城镇化进程和生活方式变化对餐厨垃圾产生量的深刻影响。从历史发展轨迹来看,我国餐厨垃圾产生量的增长可以分为三个阶段。第一阶段(2010—2015 年)为起步阶段,餐厨垃圾产生量从 2010 年的约 3667 万吨增长至 2015 年的 9500 万吨,年均增速约 21.4%。第二阶段(2015—2020 年)为快速发展阶段,2020 年全国城市餐厨垃圾产量达到 12,775 万吨,年均增速约 6.1%。第三阶段(2020 年至今)为加速增长阶段,2024 年全国餐厨垃圾年产生量已突破 1.2 亿-1.8 亿吨,呈现出更加快速的增长态势。区域分布呈现出明显的不均衡特征。从全国范围来看,东部地区餐厨垃圾产生量最高,约占全国总量的 40%,其次是中部地区,占比约为 30%,西部地区占比约为 20%。从具体区域来看,华东地区作为经济最活跃、人口最密集的区域,2023 年餐厨垃圾产生量约占全国总量的 32%,其中江苏、浙江、山东三省合计占比超过 18%;华南地区紧随其后,广东一省年产生量即超过 1500 万吨,占全国总量的 12.5%以上;华北地区以北京、天津、河北为核心,合计占比约 11%;而中西部地区尽管增速较快,但基数相对较低,整体占比仍不足 30%。城市规模差异显著,超大城市和新一线城市成为餐厨垃圾产生的主要集中区域。根据住建部 2024 年统计数据,北上广深等超大城市日均产量均超 3000 吨,成都、杭州等新一线城市突破 1500 吨。以北京为例,根据相关研究,北京市每年餐厨垃圾产量约为 120 万吨,其中仅外卖包装垃圾就占到 30%。上海、北京、重庆、广州等餐饮业发达城市的餐厨垃圾日产生量达到 2000 吨以上。

我国餐厨垃圾处理能力建设经历了从无到有、从弱到强的快速发展过程,处理能力实现了跨越式增长。早期我国餐厨垃圾处理能力薄弱,2013 年全国处理能力仅 0.51 万吨/日,2017 年 10 月增至 1.87 万吨/日,复合增速达 40.35%。这一阶段的快速增长主要得益于国家政策的大力推动和试点城市的示范带动作用。进入“十三五”以来,处理能力建设进入了加速发展阶段。截至 2023 年底,全国已建成餐厨垃圾处理项目 340 余个,总处理能力达 22 万吨/日,较 2020 年增长 62%。根据《中国城市建设统计年鉴(2023 年)》,2022 年全国餐厨垃圾处理设施总处理能力达到每日 4.8 万吨,较 2020 年的 3.2 万吨增长 50%,年均复合增长率

达 22.5%。处理设施的数量和规模都实现了显著增长。截至 2024 年底，全国已建成并投入运营的餐厨垃圾处理项目共计 587 个，总设计处理能力达到每日 28.6 万吨，实际日均处理量约为 22.3 万吨，产能利用率为 77.9%，较 2023 年提升 4.2 个百分点。这一数据反映出我国餐厨垃圾处理设施建设不仅在数量上实现了快速增长，在运营效率方面也有了明显改善。处理能力的区域分布呈现出明显的不均衡特征。从区域分布看，华东、华南和华北三大区域合计处理能力占全国总量的 63.5%，其中广东省、江苏省和山东省分别以日处理能力 2.8 万吨、2.5 万吨和 2.1 万吨位居前三。中西部地区如四川、湖北、河南等地项目数量和处理规模亦呈现加速增长态势，区域发展不均衡问题逐步缓解。

餐厨垃圾由于其富含有机质和营养成分的特点，在资源化利用的过程中容易在微生物的作用下产生异味污染，对大气环境和人体健康产生危害。餐厨垃圾资源化过程通常分为预处理、生化处理以及深加工后处理等流程，配套建设垃圾渗滤液处理流程，产生的臭气应通过密闭收集和治理。目前我国餐厨垃圾资源化企业中的排放臭气通常“化学洗涤法+生物滤池法”是典型处理流程。也有部分企业加装光氧化装置、等离子装置、活性炭吸附装置等处理工艺，但由于臭气处理效果根据接触时间、微生物活性、臭气浓度波动水平、吸附能力与吸附剂填充量等多种因素相关，其处理效率能否稳定达标值得进一步分析。企业对于无组织臭气部分，特别是预处理过程的垃圾卸料过程，可能缺少无组织逸散的控制规范，因此我国的餐厨垃圾资源化项目异味投诉问题依然居高不下，是典型的厂群矛盾之一。

目前，餐厨垃圾资源化利用企业的臭气污染治理通过多技术联用等手段基本可以达到我国恶臭污染排放标准，但从如何有效控制异味污染、减少对周边居民的异味干扰角度考量，目前缺乏相关的技术指引，例如从源头的控制措施考虑、有组织臭气治理技术的相关指标参数、无组织泄漏的排查范围等角度缺少相关标准规范的指导。因此，为缓解餐厨垃圾资源化过程所产生的异味污染、加强企业异味污染治理水平、解决行业工作环境等问题，本标准从餐厨垃圾资源化利用全过程系统研究建立异味污染预防及控制最佳可行技术应用指南，为上海市乃至全国餐厨垃圾资源化利用行业提供技术借鉴。

1.2 工作过程

1.2.1 成立标准编制组

上海市环境科学研究院、上海第二工业大学、上海环境卫生工程设计院有限公司、华东师范大学、贵州大学、国家环境保护恶臭污染控制重点实验室、上海有机固废生物转化工程技术研究中心、上海市浦东新区废弃物管理事务中心、怡科罗（南京）异味控制技术有限公

司、上海黎明资源再利用有限公司、上海文鑫生物科技有限公司、上海野马环保设备工程有限公司、上海莱泰生物环保科技集团股份有限公司、上海积世实业发展有限公司、西原环保（上海）股份有限公司、上海海姆环境工程有限公司、上海康景怡生物科技有限公司、上海开鸿环保科技有限公司、埃尔可立（南京）环保科技有限公司等单位在上海市环境保护产业协会的组织下联合组建标准编制组共同编制《厨余垃圾资源化利用过程异味污染防治技术指南》，编制组拥有 7 家科研高校、1 家管理部门、2 家厨余垃圾资源化利用企业、10 家异味治理企业。

依据《中华人民共和国标准化法》、国标委及民政部《团体标准管理规定》的文件精神，根据《上海市环境保护产业协会团体标准管理办法》的相关规定，上海市环境保护产业协会组织专家对《厨余垃圾资源化利用过程异味污染防治技术指南》团体标准进行了立项评审。经评审，此项团体标准符合立项条件，批准立项（上环协综〔2024〕13 号）。同时项目名称、主要起草单位等项目信息在全国团体标准信息平台网站（<https://www.ttbz.org.cn>）予以公示。

1.2.2 召开标准开题论证报告专家论证会

为了解生态环境管理工作需求，理清标准编制思路，2024 年 4 月 4 日上海市环境保护产业协会通过线下会议+线上视频会议的方式组织召开了“《餐厨垃圾资源化利用过程异味污染防治可行技术指南》立项评审会及专家研讨会”。标准编制组邀请华东理工大学、上海大学、复旦大学、浦东新区环境管理事务中心和上海交通大学等机构 5 位同行专家组成立项审查会专家组进行技术审查。

环境管理部门和与会专家一致认为：（1）异味是典型的扰民污染，与人民群众的生活密切相关，直接影响着群众对生态环境的获得感和幸福感，已成为当前公众投诉最强烈的环境问题之一。厨余垃圾资源化利用过程作为典型常见的市政设施，长久以来异味扰民问题一直存在，在此背景下启动厨余垃圾处理行业的异味污染控制团体标准编制恰逢其时、意义重大；（2）本标准符合国家及行业相关要求，立足于降低恶臭异味投诉这一关键问题，将对指导和规范厨余垃圾资源化利用过程的异味控制起到积极作用，丰富异味污染全流程管控技术，为“十四五”期间加大力度管理恶臭异味污染提供重要抓手；（3）同意作为上海市环境保护产业协会团体标准立项报批。（4）由于最新标准《生活垃圾分类标志》（GB/T 19095-2019）中给出了厨余垃圾的定义，餐厨垃圾并未单独给出，因此建议将标准名称《餐厨垃圾资源化利用过程异味污染防治可行技术指南》标准题目修改为《厨余垃圾资源化利用过程异味污染防治技术指南》，并在后续编制过程中进一步明确标准适用的范围，梳理完善分类分质防治技术及运行维护措施。

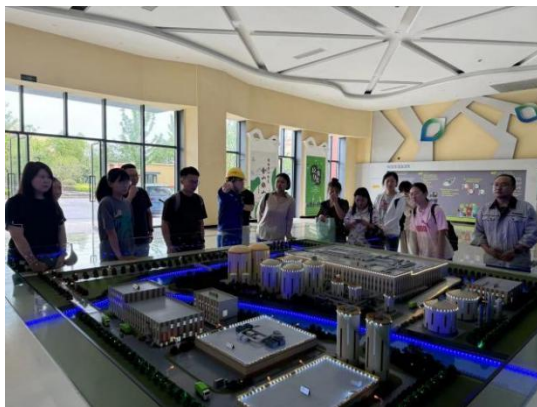
1.2.3 开展现场调研工作

2011 年到 2015 年期间，我国试点建设了 100 个厨余垃圾处理项目，处理工艺主要包括预处理阶段（如分选、粉碎和热水解等）、废物处理阶段（如厌氧消化、好氧堆肥、好氧生化处理机技术、固体堆肥+液相厌氧消化等）和产品后处理阶段（如生物柴油、热能、电力、肥料和饲料添加剂等），其中厌氧消化技术处理规模占比达到 75.9%，好氧堆肥等的处理能力占 14.2%^[1]。因此，为全面了解上海市已有各类厨余垃圾资源化利用过程和除臭技术的应用效果，编制团队于 2024 年 7 月 11 日对厨余垃圾资源化利用企业开展现场调研，重点针对厌氧消化和好氧堆肥两大类技术展开。

（1）调研案例 1：松江区天马湿垃圾处理中心

松江区天马湿垃圾处理中心厨余垃圾采用“湿式厌氧消化+沼气发电利用”处理工艺，厌氧消化技术是我国及上海市厨余垃圾的主要应用技术。主要处理流程为收运来的餐饮企业的餐饮垃圾和居民生活的厨余垃圾等湿垃圾，经过分选去除杂质后进入厌氧反应器进行厌氧消化。厌氧消化产生的沼气经过净化去除水蒸气和硫化氢后通入内燃机发电机组燃烧进行热电联产，产生的热能可用于厂区工艺系统，产生的电能除供本项目自用电外，其余电送外网销售。废弃食用油脂采用“杂质分选后提炼粗油脂”工艺，提取的粗油脂送至上海市指定的废弃油脂深加工企业进行生生产物柴油资源化利用。分选出的不可利用残渣送入天马焚烧厂焚烧处置。

企业车间及设备均采用整体密闭收集，参观通道没有异味，整体生产车间密闭效果较好。卸料大厅采用“正压送风+喷洒植物吸收液”的处置方式，车间内臭气采用分区域负压控制，设备设有单独收集系统，将收集的恶臭气体送到末端处理系统，采取“化学洗涤+植物液洗涤+生物除臭”的组合处理工艺，并设置在线监测（监测氨气和硫化氢等），末端装有活性炭除臭作为应急。



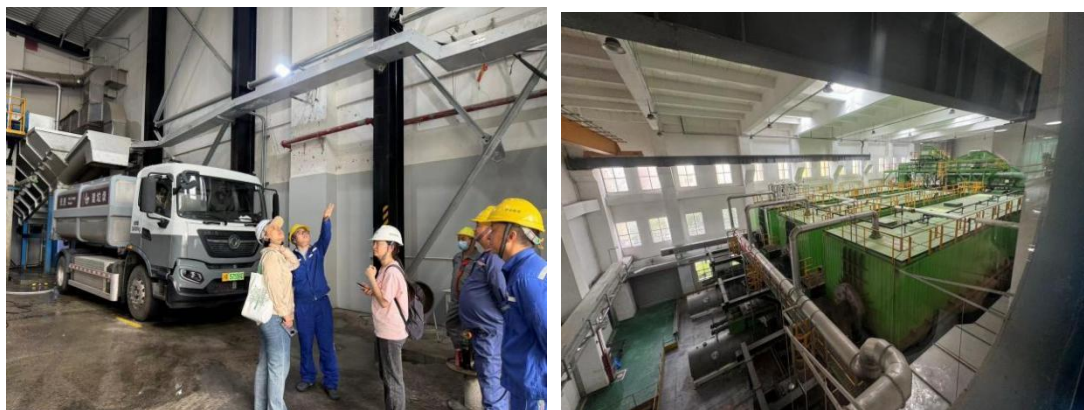


图 1-1 现场调研图片

(2) 调研案例 2：上海市闵行区餐厨垃圾资源化利用中心

闵行区餐厨垃圾资源化利用中心厨余垃圾资源化利用技术，采用“高温好氧发酵”处理技术，处理工艺流程为厨余垃圾入厂后，经预处理工序加工后与干料混拌进入生化处理机好氧发酵（温度 75°C ，时间 8-10 h），生化处理机出料后进入深加工车间制作成生化腐殖酸产品（土壤调理剂），处理周期为 1 天；根据需要进一步加工生产出有机肥及饲料。生产工艺自动化程度高，预处理工艺、生化处理车间和深加工车间的废气分别进行整体密闭收集，车间内呈现微负压，车间及生化机设备密闭全收集，收集后废气分别送往末端装置进行臭气治理。

企业按照不同区域产生的臭气，设置不同的处置工艺。一期和二期预处理段采用“酸洗+碱洗+植物液喷淋+高空排放”的处理工艺；一期生化段采用“冷却降温除尘+一级碱洗+二级植物液洗涤+离子除臭+高空排放”工艺；二期生化段采用“冷却降温除尘+一级碱洗+二级植物液+生物滤池+高空排放”工艺，同时设置活性炭应急处置工艺段。目前企业正在加装排气筒高度至 40 m，旨在减少对附近居民的恶臭影响。





图 1-2 现场调研图片

2 制定标准的必要性

2.1 异味污染对环境和健康的影响

异味污染属于大气污染范畴，具有一般大气污染的特性，同时其本身又可通过嗅觉感知及主观感觉加以表征，因此具有不同于其他大气污染物的特殊性，主要为以下几点。

（1）组分多

异味往往不是由单一物质气味引起的，而是以多种物质混合气味的形式存在。我国目前的恶臭污染物排放标准中规定的物质有 8 种，包括氨、三甲胺、硫化氢、甲硫醇、甲硫醚、二甲二硫醚、二硫化碳和苯乙烯，除了这 8 种恶臭物质之外，还有很多有机硫化物、含氧化合物（如醛、酮等）都是导致垃圾恶臭的主要成分，并且很多物质（如乙酸乙酯、乙醇等）单独存在时其气味是令人愉悦的，但当其与其他物质混合在一起后，就可能变成令人难以忍

受的恶臭。据了解，不同的恶臭物质混合后，很可能发生恶臭的加成。而人的嗅觉也是一个十分神奇的东西，不同人嗅到的气味以及气味程度往往难以用统一的标准进行描述或衡量，尤其是嗅觉的过程还包含了心理活动。

臭污染物成分复杂，产生恶臭污染行业多，垃圾处理、畜禽养殖、生物制药、石油化工、污水处理等产生的恶臭污染物质多达几万种，具有组分多、浓度低、沸点低等特点。恶臭物质发臭机理和它的分子结构有密切关系，各种化合物分子结构中的硫(=S)、巯基(—SH)和硫氰基(—SCN)，是形成恶臭的原子团，通称为“发臭团”。另有一些有机物如苯酚(C₆H₅OH)、甲醛(HCHO)、丙酮(C₂H₆C=O)和酪酸(C₃H₇-COOH)等，其分子结构中含有羟基、醛基、羰基和羧基，也散发各种臭味，起“发臭团”的作用。

表 2-1 不同“发臭团”代表的恶臭气味属性

发臭团	化学结构	物质及气味属性
醇羟基	-OH	药用酒精、医用酒精（花香）
酚羟基	-OH	丁子香酚（花香）
羰基	>CO	茉莉酮（花香）
甲酰基	-CHO	甲醛（刺激臭）、茴香醛（花香）
羧基	-COOH	醋酸（醋味）
酯基	-COOR	乙酸乙酯（果实香）
酰氧基	-CO-O-	茉莉内酯（花香）
醚	-O-	玫瑰醚（花香）、橙花醚（果实香）
氰基	-CN	十二腈（果实香）、香叶醇腈（果实香）
氨基	-NH ₂	邻氨基苯甲酸甲酯（花香）
硫醚	-S-	二甲基硫醚（恶臭）
硫氰基	-SCN	硫氰酸乙酯（洋葱臭）
异硫氰基	-NCS	异硫氰酸烯丙酯（野菜香）
硝基	-NO ₂	二甲苯麝香（麝香）

（2）嗅阈值低

嗅阈值即为能引起嗅觉的最小物质浓度，嗅阈值分为两种，一种为检知阈值，即嗅觉可以勉强感受到恶臭物质的存在，但又很难辨别出是什么气味；第二种为确认阈值，指嗅觉不仅能够感受到恶臭物质的存在，而且可以准确辨别出是什么气味。由于受试个体嗅觉灵敏度不同，一般来说对于同一种恶臭物质其嗅阈值也将不同，但总的来说会在一定的区间浮动，测试某种恶臭物质的嗅阈值，其标准为在特定的化学浓度下，50%的受试个体能够闻出气味，另外 50%不能闻出气味，我们称此浓度为恶臭物质的嗅阈值。国内应用较多的《空气质量恶臭的测定三点比较式臭袋法》（GB/T 14675-93）中所要寻找的浓度值，就是我们通常所说的检知阈值。恶臭物质嗅阈值通常很低，可达到 nL/L 级，甚至有些物质嗅阈值低于环境质量标准或卫生标准。

（3）防治难度大

人的感觉强度与恶臭物质浓度对数成对比，因此在恶臭治理过程中即使大部分恶臭成分被去除，人的嗅觉也不会感到相应程度的治理效果，即恶臭防治比一般大气污染物更困难。

（4）易受环境影响

恶臭厌恶感与恶臭物质性质、排放源强及浓度有关，但受环境、气象条件等因素影响也较大，如夏季气压低、风速小时，发生区域性污染事件的概率将明显高于冬季。

（5）对健康的影响

通常受到恶臭影响的人只要将其转移至空气清新处，可逆性影响很快就会得到缓解，但心理影响持续时间较长。国内外大量研究表明，垃圾填埋场恶臭气体的主要成分包括无机的氨气和硫化氢气体，以及部分挥发性有机硫化物（如硫醇、硫醚等）、芳香烃、饱和及不饱和烃、含氮化合物（如胺类、吡啶等）、卤代烃、含氧化合物等。高浓度的异味污染对人体呼吸、循环、消化、内分泌和神经等系统都有不同程度的损害，使人呼吸不畅、恶心呕吐、烦躁不安、头昏脑胀；高浓度恶臭爆发时，会使人失去知觉，甚至窒息死亡；长期暴露于恶臭环境中（不论恶臭强度高低）也会严重危害人的身心健康，产生致癌效应等。

2.2 相关环保标准和环保工作的需要

2.2.1 我国恶臭污染投诉情况日益突出

2021 年生态环境部印发了《2018—2020 年全国恶臭/异味污染投诉情况分析》报告，其中指出 2018—2020 年“全国生态环境信访投诉举报管理平台”接到恶臭/异味投诉举报分别为 15.3 万件、11.1 万件和 9.8 万件，各占全部环境问题投诉举报件数的 21.5%、20.8%和 22.1%。是当前公众投诉最强烈的环境问题之一。

其中垃圾处理、化工、餐饮业、金属制品业、汽修业等是主要的投诉行业。参照《国民经济行业分类》（GB/T4754-2017），恶臭/异味投诉居前十位的行业依次是垃圾处理、畜牧业、化工、橡胶和塑料制品业、餐饮业、非金属矿物制品业、金属制品业、农副食品加工业、汽修业和医药制造业，不同行业恶臭/异味投诉特点、地区分布、变化趋势和主要成因差异较大。从投诉地区分布看，2020 年举报集中在东部沿海和华北平原等人口密集、经济发达的区域，举报量最多的省份是广东省，其余位列前十位的省份依次为河南、山东、江苏、河北、湖北、辽宁、浙江、安徽、福建，这与前两年的地区投诉趋势基本一致。其中长三角地区 2020 年投诉件数为 16543 件，投诉行业主要是垃圾处理（占比 12.5%）、畜牧业（占比

9.4%)、橡胶和塑料制品业(占比 7.7%)、金属制品业(占比 5.3%)、餐饮业(占比 4.4%)。

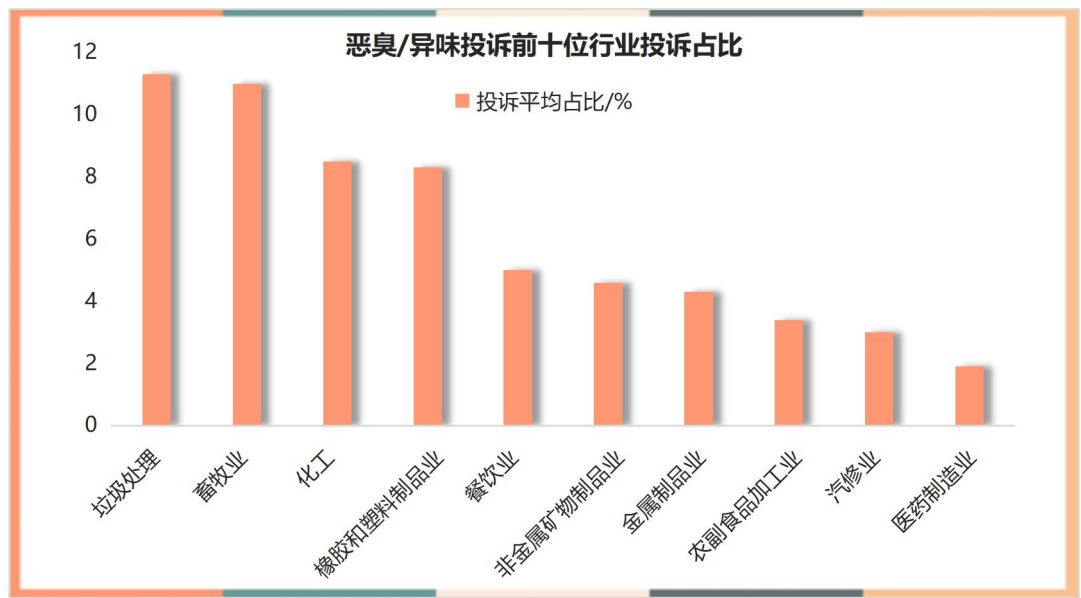


图 2-1 全国恶臭/异味投诉前十行业投诉占比

2.2.2 我国相关政策文件发力推动

随着我国大气污染防治工作精细化发展，居民生活感受势必将成为重点关注对象，由于投诉导致的恶臭异味污染治理工作也必将成为热点方向和研究领域。

1987 年《中华人民共和国大气污染防治法》发布，其中对恶臭污染防治提出相关规定。1993 年《恶臭污染物排放标准》（GB 14554-93）发布，对恶臭污染物排放有了明确的限值要求，为我国恶臭污染防治工作奠定了法律和标准依据，也成为我国恶臭污染防治的开端标识。

2014 年修订通过的《中华人民共和国环境保护法》（中华人民共和国主席令第九号）第四章第四十二条明确提出“排放污染物的企业事业单位和其他生产经营者，应当采取措施，防治在生产建设或者其他活动中产生的废气、废水、废渣、医疗废物、粉尘、恶臭气体、放射性物质以及噪声、振动、光辐射、电磁辐射等对环境的污染和危害。”

随着 2017 年《“十三五”挥发性有机物污染防治工作方案》的发布，与恶臭相关的工业源废气 VOCs 的污染研究也大幅增加。同期，恶臭污染评估监测等领域也有了更加精细化的发展，生态环境部于 2017 年发布了《恶臭污染环境监测技术规范》（HJ 905—2017），2018 年 3 月实施。新修订标准《环境空气和废气 臭气的测定 三点比较式臭袋法》（HJ 1262—2022）已于 2022 年发布，2023 年 1 月开始执行。2023 年国务院发布《空气质量持续改善行动计划》

国发〔2023〕23号）专章提出开展餐饮油烟、恶臭异味专项治理。对群众反映强烈的恶臭异味扰民问题加强排查整治工作。

表 2-2 我国恶臭污染法规政策及排放控制标准汇总表

序号	法规/政策/标准名称	发布单位	发布时间	相关内容
法律法规				
1	《中华人民共和国大气污染防治法》	全国人大常委会	1987 年、2018 年最新修正	排放污染物的企业事业单位和其他生产经营者，应当采取措施，防治恶臭气体对环境的污染和危害
2	《中华人民共和国环境保护法》2014 年修订版	全国人大常委会	1989 年、2014 年最新修订	
3	《畜禽规模养殖污染防治条例》	国务院	2014 年	从事畜禽养殖活动和畜禽养殖废弃物处理活动，应当及时对畜禽粪便、畜禽尸体、污水等进行收集、贮存、清运，防止恶臭污染
政策文件				
1	《重点区域大气污染防治“十二五”规划》（国函〔2012〕146 号）	环保部	2012 年	逐步开展有毒、恶臭等挥发性有机物的有机化工企业在线连续监测系统的建设，并与环境保护主管部门联网
2	《“十二五”时期全国污染防治工作的要点》（环办〔2011〕46 号）	环保部	2012 年	污染防治工作的要点包括加强恶臭、餐饮油烟治理，解决突出的扰民问题
3	《水污染防治行动计划》（水十条）	国务院	2015 年	主要目标提出城市建成区黑臭水体总体得到消除。
4	《“十三五”生态环境保护规划》（国发〔2016〕65 号）	国务院	2016 年	加强垃圾渗滤液处理处置、焚烧飞灰处理处置、填埋场甲烷利用和恶臭处理
5	《重点行业挥发性有机物削减行动计划》（工信部联节〔2016〕217 号）	工信部、财政部	2016 年	由于部分 VOCs 具有异味，VOCs 控制的同时也在削减异味
6	《国家环境保护标准“十三五”发展规划》（环科技〔2017〕49 号）	环保部	2017 年	修订恶臭污染物排放标准，加强恶臭控制
7	《“十三五”挥发性有机物污染防治工作方案》（环大气〔2017〕121 号）	环保部等六部委	2017 年	修订恶臭污染物排放标准。强化苯乙烯、甲硫醇、甲硫醚等恶臭类 VOCs 的排放控制；修订恶臭污染物排放标准。
8	《城市黑臭水体治理攻坚战实施方案》建城〔2018〕104 号	住房和城乡建设部、生态环境部	2018 年	进一步推进城市黑臭水体治理工作。
9	《重点行业挥发性有机物综合治理方案》（环大气〔2019〕53 号）	生态环境部	2019 年	控制 VOCs 同时兼顾恶臭污染物；恶臭类废气应进一步加强除臭处理；涉恶臭污染的工业园区和产业集群，推广实施恶臭电子鼻监控预警。
10	《关于加快解决当前挥发性有机物治理突出问题的通知》（环大气〔2021〕65 号）	生态环境部	2021 年	系统梳理涉 VOCs 类恶臭、异味扰民问题，对重点任务完成情况和问题整改情况开展“回头看”。
11	《中共中央、国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》	国务院	2021 年	加大恶臭异味治理力度。各地系统梳理……长期投诉的涉 VOCs 类恶臭、异味扰民问题。

12	《“十四五”生态环境保护综合行政执法队伍建设规划》（环执法〔2021〕113号）	生态环境部	2022年	重点地区和重点流域可根据实际需求，积极装备特种专业技术用车、……、便携式恶臭监测设备等。
13	《空气质量持续改善行动计划》国发〔2023〕23号	国务院	2023年	开展餐饮油烟、恶臭异味专项治理。对群众反映强烈的恶臭异味扰民问题加强排查整治。
14				
国家和地方标准				
1	《恶臭污染物排放标准》（GB14554-93）	国家环保局，国家技术监督局	1993年（2019年发布标准修订征求意见稿，标准收严）	
2	《青霉素类制药挥发性有机物和恶臭特征污染物排放标准》（DB13/2208-2015）	河北省环保厅	2015年	
3	《恶臭（异味）污染排放标准》（DB31/1025-2016）	上海市环保局	2016年	
4	《恶臭污染物排放标准》（DB12/059—2018）	天津市生态环境局	2018年	
5	《有机化工企业污水处理厂（站）挥发性有机物及恶臭污染物排放标准》（DB37/3161-2018）	山东省环保厅	2018年	
6	《恶臭污染环境监测技术规范》（HJ 905-2017）	生态环境部	2018年	
7	《生活垃圾填埋场恶臭污染物排放标准》（DB13/2697-2018）	河北省质量技术监督局	2018年	
8	《环境空气和废气 臭气的测定 三点比较式臭袋法》（HJ 1262—2022）	生态环境部	2023年	

3 制定标准的原则和依据

3.1 制定标准的原则

（1）遵循国家有关的法规和技术政策，标准的制定必须以国家环境保护相关法律法规、政策和规章为依据，参照《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国大气污染防治法》、环境标准管理办法及国家环境保护标准制修订工作管理办法等。

（2）在充分调研现有控制技术的基础上预测未来恶臭异味控制技术发展水平，在标准制定过程中，参照发达地区异味治理技术及相关污染源的排放限值，体现标准的先进性和前瞻性原则。

（3）本标准限值制定是在调研国内相关厨余垃圾资源化利用过程的废气治理技术运行的技术和经济指标、恶臭异味污染排放情况，另外借鉴国外先进的恶臭异味控制技术，结合环境空气质量要求和总量控制要求，提出一套客观、科学的异味污染防治技术路线，使本标准实施具有极强的可行性和可操作性。

（4）本标准制定过程中将充分借鉴国内已有技术成果、各类典型案例，结合国内工艺

和技术发展现状提出符合上海要求的厨余垃圾资源化利用过程的异味污染防治技术指南。

3.2 制定标准的依据

- (1) 《中华人民共和国环境保护法》
- (2) 《中华人民共和国大气污染防治法》
- (3) 环境标准管理办法及国家环境保护标准制修订工作管理办法
- (4) 上海市环境保护产业协会团体标准管理办法
- (5) GB 37822 挥发性有机物无组织排放控制标准
- (6) GB/T 19095 生活垃圾分类标志
- (7) HJ 1106 排污许可证申请与核发技术规范 环境卫生管理业
- (8) HJ 2026 吸附法工业有机废气治理工程技术规范
- (9) HJ 733 泄漏和敞开液面排放的挥发性有机物检测技术导则
- (10) DB 31/1025 恶臭（异味）污染物排放标准
- (11) CJJ 184 餐厨垃圾处理技术规范
- (12) CJ/T 516 生活垃圾除臭剂技术要求
- (13) CJJ 52 生活垃圾堆肥处理技术规范
- (14) T/CECS 1865 生活垃圾焚烧厂通风与除尘除臭系统设计标准
- (15) T/EERT 023 恶臭治理技术规范 干式化学滤料吸附法
- (16) T/GDAEPI 11 紫外光催化氧化法工业有机废气治理工程技术规范
- (17) GB 14554 恶臭污染物排放标准
- (18) GB/T16157 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法
- (19) HJ 2014 生物滤池法污水处理工程技术规范
- (20) HJ/T 55 大气污染物无组织排放监测技术导则
- (21) CJJ/T 243 城镇污水处理厂臭气处理技术规程
- (22) DB13/T 5363 生物和化学制药行业挥发性有机物和恶臭气体污染控制技术指南
- (23) DB11/T 835 生活垃圾填埋场恶臭污染控制技术规范

3.3 与现行法律法规、标准的关系

《中华人民共和国大气污染防治法》是恶臭异味污染控制的核心法律。其第八十条明确要求产生恶臭气体的企业事业单位等需科学选址、设置合理防护距离，安装净化装置或采取其他措施防止恶臭排放；第一百一十七条对应规定，未采取措施防止排放恶臭气体的，将被处1万-10万元罚款，拒不改正的还会被责令停工或停业整治。

《中华人民共和国环境保护法》，作为环保领域的基础性法律，其为恶臭异味污染控制提供了根本遵循。该法规定企业事业单位和其他生产经营者需防止、减少环境污染，对所造

成的损害依法承担责任。若排放恶臭等污染物影响他人环境权益,相关主体可据此主张权利,环保部门也可依据该法赋予的监管权开展恶臭污染治理执法工作。

《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》针对垃圾填埋、堆肥等固体废物处理环节易产生恶臭。该法要求固体废物处理处置单位采取防渗漏、防扬散、防恶臭等措施。例如,对生活垃圾焚烧、填埋设施,明确需配套建设恶臭治理设施,确保符合排放标准,违规排放将面临相应处罚。

《环境行政处罚办法》为恶臭异味污染违法处罚提供适用规则。其中第九条规定,若当事人一个违法行为同时违反多个环保法律条款,效力等级相同时可适用处罚较重的条款。比如企业未防恶臭排放且导致超标,同时违反《中华人民共和国大气污染防治法》多条规定时,可按此规则选择更严厉的条款处罚。

各地结合本地污染特点,出台了针对性的地方性法规细化恶臭管控要求。例如《上海市大气污染防治条例》针对餐饮、畜禽养殖、垃圾处理等本地易引发恶臭投诉的领域,进一步明确污染防治责任,细化执法主体和处罚标准;《广东省大气污染防治条例》则对化工、制革等重点行业的恶臭防护距离、治理设施运行要求作出补充规定,让恶臭污染治理更贴合地方实际情况。

从标准层面,中华人民共和国住房和城乡建设部在2012年12月发布了行业标准CJJ184-2012《餐厨垃圾处理技术规范》第七章中规范了餐厨垃圾处理工艺的要求。2018年5月1日住房和城乡建设部关于发布并实施行业产品标准《生活垃圾除臭剂技术要求》,规定了生活垃圾除臭剂的术语和定义、分类(物理型、化学型、生物型及植物型)、要求、试验方法、检验规则,以及标志、包装、运输和贮存。

《餐厨垃圾处理厂运行维护技术规程》(CJJ/T 252-2020)于2020年发布,自2021年5月1日起实施。该标准由中华人民共和国住房和城乡建设部发布,旨在规范餐厨垃圾处理厂的运行和维护。

甘肃省地方标准DB 62/T 4116-2020《餐厨垃圾厌氧消化处理技术规程》中对餐厨垃圾资源化过程中的预处理及厌氧消化技术作出污染防治要求,强调了各环节应保持密闭,无法密闭环节应有排风换气设备。深圳市地方标准DD4403/T 72-2020《餐厨垃圾处理企业安全管理要求》提出对工作场地的安全要求,提到作业场所应采取换气、除臭、灭蚊蝇、消毒等措施。

除此之外,目前国内没有对厨余垃圾资源化过程中产生异味控制的相关行业标准规范。本标准旨在从厨余垃圾资源化全过程、全环节出发,借助全生命周期管理理念,为企业异味

污染管理提供技术应用指南与借鉴，切实为缓解异味污染提供支撑，推动行业良好、有序发展。

表 3-1 现行法律及标准规范等

分类	标准或规范	编号	发布单位	主要内容
餐厨垃圾相关处理技术规范	《餐厨垃圾处理技术规范》	CJJ184-2012	住房和城乡建设部	处理技术设计规范、提出密闭及通风等要求
	《餐厨垃圾处理技术规范》	SZDB/Z 252—2017（深圳）	深圳市城市管理局提	深圳市餐厨垃圾各类处理技术要求、密闭收集要求
	《餐厨垃圾处理厂运行维护技术规程》	CJJ/T 252-2020	住房和城乡建设部	规范餐厨垃圾处理厂的运行和维护
	《城镇污水处理厂臭气处理技术规程》	CJJ/T243-2016	住房和城乡建设部	各类除臭技术设计要点
恶臭治理相关技术规范	《生物除臭滤池》	JB/T 12581-2015	工业和信息化部	生物滤池设计要求
	《污水处理中恶臭气体生物净化工艺设计规范》	DB32/T4025-2021	江苏省市场监督管理局	生物滤池和生物土壤池设计规范
	《恶臭治理技术规范 干式化学滤料吸附法》	T/EERT 023—2022	浙江省生态与环境修复技术协会	活性氧化铝和活性炭吸附技术要点
	《紫外光催化氧化法工业有机废气治理工程技术规范》	T/GDAEPI 11-2022	广东省环境保护产业协会	紫外光催化法技术设计要点
	《生物和化学制药行业挥发性有机物和恶臭气体污染控制技术指南》	DB13/T 5363-2021	河北省市场监督管理局	制药行业各类除臭技术要点

4 厨余垃圾资源化利用过程

4.1 厨余垃圾资源化利用相关政策要求

（1）全国层面政策推动

我国餐厨垃圾管理政策体系经历了从无到有、从分散到系统的发展过程，形成了较为完善的政策框架。2004 年，《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》首次将餐厨垃圾纳入法律规范畴，为后续政策制定奠定了法律基础。2010 年起，关于餐厨垃圾处理的行业政策频出，明确了对餐厨垃圾的严格管理及资源化处理路径。

政策发展可以划分为三个重要阶段。第一阶段为试点探索期（2010—2015 年），2010 年国务院办公厅发布《关于加强地沟油整治和餐厨废弃物管理的意见》，标志着我国开始系统性地关注餐厨垃圾问题。2011—2015 年，发展改革委、财政部及住房和城乡建设部分 5

批共确定 100 个城市作为餐厨垃圾资源化利用及无害化处理的试点城市。2012 年《餐厨垃圾处理技术规范》作为行业标准出台，使得餐厨垃圾处理工程建设更加规范化。

第二阶段为规范发展期（2016—2020 年），2016 年《“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划》提出，到“十三五”末，力争新增餐厨垃圾处理能力 3.44 万吨/日，城市基本建立餐厨垃圾回收和再生利用体系，规划餐厨垃圾专项工程投资 183.5 亿元。2017 年，环境保护部发布《关于进一步加强餐厨废弃物监管工作的意见》，强调要加强餐厨废弃物源头减量、资源化利用和无害化处理，建立健全餐厨废弃物监管制度。

第三阶段为全面推进期（2021 年至今），《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》成为当前最重要的政策文件。该规划明确了“十四五”时期城镇生活垃圾分类和处理设施发展的总体目标，部署了 10 个方面主要任务，包括加快完善垃圾分类设施体系、全面推进生活垃圾焚烧设施建设、有序开展厨余垃圾处理设施建设等。规划要求按照科学评估、适度超前原则，以集中处理为主，分散处理为辅，稳妥有序推进厨余垃圾处理设施建设。

（2）重点政策目标与实施效果

《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》设定了明确而具有挑战性的目标。规划要求到 2025 年，全国城市生活垃圾无害化处理率达到 99%，其中餐厨垃圾资源化利用率达到 35%以上；到 2030 年，这一比例将进一步提升至 50%以上。同时，到 2025 年中国的餐厨垃圾无害化处理率将达到 70%，资源化利用率达到 50%；到 2030 年无害化处理率将进一步提高至 85%，资源化利用率达到 65%。

处理能力建设目标更加具体和量化。根据国家发展改革委和住建部联合发布的规划，到 2025 年全国餐厨垃圾处理能力将达到 7.04 万吨/日，较 2020 年底的 3.44 万吨/日实现翻倍增长，年均复合增长率预计达到 15.4%。这一目标的设定既考虑了餐厨垃圾产生量的增长趋势，也兼顾了技术进步和资金投入的可行性。

政策实施效果呈现出积极向好的态势，但仍面临一定挑战。从处理能力建设来看，截至 2023 年底，全国已建成餐厨垃圾处理项目 340 余个，总处理能力达 22 万吨/日，较 2020 年增长 62%，显示出政策推动的显著成效。从处理率提升来看，2024 年回收处理率已接近 40%，距离 2025 年 70%的目标仍有较大差距，需要在未来一年多时间内实现大幅提升。

资源化利用水平也在稳步提升。《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》明确要求到 2025 年餐厨垃圾集中处理能力达到 7.5 万吨/日，资源化利用率提升至 60%以上。

预计到 2025 年，年处理量将突破 1.6 亿吨，2023—2030 年复合增长率（CAGR）将维持在 8.5%~10% 区间。

（3）地方政策创新与先行经验

上海作为最早实施全方位餐厨垃圾管理的城市，其经验具有重要的示范意义。上海市的做法是：政府牵头（立法、出台政策法规），环卫局管理（统筹、协调、监管、培训），企业运作（设备、设施投入，安装、运行），社区参与（垃圾收运、处置，服务）。上海市市容环境卫生管理部门先后制定颁布了《上海市餐厨垃圾处理和管理工作的试行办法》《上海市餐厨垃圾收运处置收费管理试行办法》《上海市餐厨垃圾处理管理办法》等政策法规，明确了餐厨垃圾产生、收运、处理和管理等各单位的职责，制定了各项工作具体程序、收费标准，建立起整个厨余垃圾管理与处理处置体系。

北京在政策创新方面也走在全国前列，特别是在计量收费制度方面。早在 2005 年，北京市市政市容管理委员会就发布了《北京市餐厨垃圾收集运输处理管理办法》，对北京市餐厨垃圾的收集处理做了一些框架性的规定。自 2011 年 8 月起，北京市相继发布了《关于加快推进本市餐厨垃圾和废弃油脂资源化处理工作方案》《北京市餐厨垃圾和废弃油脂排放登记管理暂行办法》等制度规定。

北京在全国率先实行非居民厨余垃圾计量收费制度，具有重要的创新意义。2021 年 9 月 30 日起，北京非居民厨余垃圾处理费（含运输、处理环节）调整为 300 元/吨（合 33 元/桶），全市所有非居民单位实行厨余垃圾计量收费。这一制度的实施强化了主体责任，以计量实现精准管控，从源头减少了浪费。

地方立法也在不断完善，为餐厨垃圾管理提供了更加有力的法律保障。近年来，北京、上海、广东、浙江等地对垃圾分类进行立法，推动人们养成垃圾分类的好习惯。例如，《北京市生活垃圾管理条例》要求，按照厨余垃圾、可回收物、有害垃圾、其他垃圾的分类进行投放；《上海市生活垃圾管理条例》将生活垃圾分为可回收物、有害垃圾、湿垃圾、干垃圾四种；《浙江省生活垃圾管理条例》将生活垃圾分为可回收物、易腐垃圾、有害垃圾、其他垃圾。

我国餐厨垃圾处理设施建设投资规模持续扩大，单个项目投资规模不断提升。国际合作项目也为我国餐厨垃圾处理设施建设提供了重要资金支持。法国开发署邵阳市餐厨垃圾处理项目总投资 22565.11 万元人民币，其中利用法开署贷款 2500 万欧元，地方配套 4539.61 万

元人民币。项目建设地点位于邵阳市大祥区，占地面积为 3.15 公顷，服务范围为邵阳市东部城镇群（含市辖区及周边四县），设计日处理规模为 200 吨。

设施布局呈现出从东部沿海向中西部地区扩展的趋势。华东、华南和华北三大区域合计处理能力占全国总量的 63.5%，其中广东省、江苏省和山东省分别以日处理能力 2.8 万吨、2.5 万吨和 2.1 万吨位居前三。中西部地区如四川、湖北、河南等地项目数量和处理规模亦呈现加速增长态势，区域发展不均衡问题逐步缓解。特别是在“十四五”期间，中西部省份将成为处理能力增长的重点区域，2025—2030 年中西部省份相关新增投资规模超 280 亿元。

表 4-1 典型厨余垃圾资源化利用项目

序号	城市		厨余垃圾处理规模 (t)	主体工艺	建设情况
1	上海	上海生物能源再利用项目一期	400	厌氧消化	已建
2		上海生物能源再利用项目二期	900	厌氧消化	已建
3		上海浦东新区有机质固废处理厂	200	厌氧消化	已建
4		浦东新区有机固体废弃物综合处理厂扩建工程	300	厌氧消化	已建
5		松江区湿垃圾资源化处理项目	150	厌氧消化	已建
6	北京	海淀区餐厨厨余垃圾处理厂项目	400	厌氧消化	已建
7		南宫餐厨垃圾应急改造项目	400	厌氧消化	已建
8		北京市高安屯有机质固废处理厂	250	制微生物菌剂	已建
9	杭州	杭州市餐厨垃圾处理一期项目	200	厌氧消化	已建
10		杭州市餐厨垃圾处理二期项目	250	厌氧消化	已建
11		萧山餐厨废弃物资源化利用生产生物燃料项目	200	厌氧消化	已建
12		杭州萧山餐厨生物能源利用项目	200	厌氧消化	已建
13	重庆	余杭区镜子山资源循环利用中心	400	厌氧消化	已建
14		洛碛餐厨垃圾处理厂	2100	厌氧消化	已建
15	苏州	苏州工业园区餐厨及园林绿化垃圾处理项目	300	厌氧消化	已建

4.2 厨余垃圾与餐厨垃圾物化及异味污染特性

厨余垃圾是指居民日常生活及食品加工、餐饮服务、单位供餐等活动中产生的垃圾，包括丢弃不用的菜叶、剩菜、剩饭、果皮、蛋壳、茶渣、骨头等，其主要来源为家庭厨房、餐厅、饭店、食堂、市场及其他与食品加工有关的行业。根据《生活垃圾分类标志》

（GB/T19095—2019），厨余垃圾指易腐烂的、含有机质的生活垃圾，包括家庭厨余垃圾、餐厨垃圾和其他厨余垃圾等。其中，家庭厨余垃圾是指居民家庭日常生活过程中产生的菜帮、菜叶、瓜果皮壳、剩菜剩饭、废弃食物等易腐性垃圾；餐厨垃圾是指相关企业和公共机构在食品加工、餐饮服务、单位供餐等活动中，产生的食物残渣、食品加工废料和废弃食用油脂等；其他厨余垃圾是指农贸市场、农产品批发市场产生的蔬菜瓜果垃圾、腐肉、肉碎骨、水产品、畜禽内脏等。

Wang 等^[2]对典型厨余垃圾处理方法进行 SWOT 分析得出，通过预处理、热水解、油水

分离、厌氧消化综合处理技术可以克服使用单一处理技术带来的资源利用率低、成本高、推广应用困难等缺点。Wu 等^[3]研究表明厨余垃圾在运输过程的直接挥发、好氧生物降解和厌氧生物降解过程均会产生 VOCs。Tan 等^[4]调查了垃圾产生后 24 小时内 VOCs 的排放特征，检测到乙醇是主要化合物。Wu 等^[5]研究表明乙醇、甲硫醇和硫化氢是垃圾贮存阶段的主要污染物。张妍^[6]通过对国内三个典型的餐厨废物资源化处理厂（好氧发酵、饲料化处理技术）的生化处理设施进行恶臭排放特征分析，发现西宁、宁波和北京的餐厨垃圾处理厂垃圾卸料分选阶段臭气浓度、恶臭物质浓度检测结果均高于生化处理阶段，并且分析得出该三个典型餐厨垃圾生化处理设施的典型恶臭物质为乙醇、柠檬烯、硫化氢、甲硫醇、甲硫醚、二甲二硫醚、乙醛、乙酸乙酯等。Mao 等^[7]针对台湾的三个最大的食物垃圾好氧堆肥厂排气口、环境空气等气样进行检测，堆肥原料来自果蔬湿垃圾、生活垃圾、家禽粪便和食物垃圾等，通过测试 29 种化合物研究得出氨、胺、二甲基硫化物和乙酸是主要的恶臭来源，并且厂界的臭气浓度测试指标超过当地标准限值，说明恶臭污染是餐厨垃圾堆肥厂的一个重要问题。王攀等^[8]对国内某餐厨垃圾饲料化处理的企业进行臭气排放检测分析，研究得出垃圾破碎后的湿热处理环节臭气浓度最高，芳香烃、硫化物、烯烃、烷烃、卤代烃、酮和酯类物质的总浓度均高于其他监测点，是厂区最主要的恶臭产生点。再次，餐厨垃圾渗滤液等废水处理过程中的重要副产物——沼气，除甲烷和二氧化碳外，还含有一定浓度的硫化氢等恶臭气体，体积分数为 0.5%~1.0%^[9]，若沼气泄漏也会造成严重的恶臭污染。

厨余垃圾一般具有以下特性：

- ①厨余类含量一般>70%，分拣后厨余有机物挥发性固体含量在 80%左右。
- ②杂质含量较高，偶尔有大件硬质干扰性物件，一般杂质含量<30%。
- ③厨余垃圾含水率为 70%~80%，低于餐厨垃圾含水率。

餐厨垃圾一般具有以下特性：

- ①含水率较高，通常在 80%左右。
- ②富含淀粉、脂肪、蛋白质、纤维素等有机物，有机质含量占干重的 70%~90%，蕴含大量的生物质能。
- ③油脂含量高，达到 2%，容易被回收加工成食用油，危害民众健康安全，但如果统一回收处理后用于工业用途，其附加值较高。
- ④腐烂变质速度快，从产生到处理存在组分时空差异，同时腐烂过程易滋生病菌，直接利用和不适当的处理会造成病原菌的传播和感染。
- ⑤组分复杂，偶尔有大件硬质干扰性物件，例如丢弃的刀具、餐具等。

4.3 厨余垃圾资源化处理技术路线变化趋势

我国餐厨垃圾处理技术路线经历了从单一化向多元化、从传统技术向创新技术的演进过程。目前，较为成熟的餐厨垃圾处理技术主要包括填埋、焚烧、好氧堆肥、厌氧发酵和饲料化等，常见资源化利用主要采用的工艺可分为烘干脱水、厌氧发酵和好氧堆肥三大类。

厌氧发酵技术已成为当前的主流处理技术。厌氧发酵的基本流程为：预处理→湿式/干式厌氧（中温/高温）→沼气脱硫与提质→发电并网/制生物甲烷（车用/入管网）→消化液/渣资源化（好氧稳定化/制肥）。在中温（35-38℃）或高温（50-55℃）下发酵 15~30 天，产出沼气（甲烷含量 50%~70%），产物利用包括沼气用于发电或供热，沼渣制有机肥，沼液经处理后排放。技术优势明显，1 吨餐厨垃圾可产 80~120m³沼气（发电约 200kW·h），沼渣可作为有机肥原料（符合 NY525 标准）。厌氧发酵技术在我国的应用比例持续提升。根据中国城市环境卫生协会及国家发展改革委相关数据，2024 年全国餐厨垃圾年产生量已突破 1.3 亿吨，厌氧发酵技术已在全国超 60%的规模化处理项目中应用，2024 年相关产能达 2800 万吨/年，预计 2030 年将提升至 4500 万吨/年以上。厌氧发酵仍为主流工艺，占比达 61.3%，其产沼效率与有机肥转化率不断提升。

好氧堆肥技术作为传统技术仍在发挥重要作用。好氧堆肥的流程为：预处理→调配 C/N 与含水→好氧发酵（翻抛/曝气）→成品堆肥（或土壤改良剂）。发酵条件为物料在 55-65℃ 下发酵 5~15 天，通过翻堆和通风维持氧含量，最终产出符合 NY525 标准的有机肥。技术特点是高温发酵 55-70℃维持 7~10 天，杀灭病原菌，腐熟周期 15~20 天产出营养土（有机质≥30%）。

新兴技术如黑水虻生物转化、热解气化等正在加速发展。黑水虻（BSF）生物转化流程为：预处理分选与脱盐→调配基质→幼虫投喂转化→虫体（蛋白/油脂）与虫粪（可作有机基材）。这种技术减量快、周期短，产出具有经济价值（虫蛋白、虫油），对含油、有机质高的基质友好，装置可模块化、立体化。据行业调研，2024 年昆虫转化处理能力已突破 5000 吨/日，较 2020 年增长近 4 倍，预计到 2030 年市场规模有望达到 80 亿元。

智能化分选设备的应用显著提升了处理效率和精度。先进的填埋腐化垃圾分类处理设备首推智能分拣系统，运用高精度光谱分析、近红外扫描以及人工智能图像识别技术，设备能快速甄别垃圾中的有机物、无机物、塑料、金属等成分。智能分拣线可精准将塑料瓶归集至

可回收区，把有机质筛分出来送往后续生物处理环节，分拣准确率高达 95%以上，大幅降低人工二次分拣成本与误差。

高温好氧发酵技术在设备集成化和智能化方面取得了重要突破。某企业餐厨垃圾就地处理机（100~5000KG/D）采用"桶装上料+人工分选+撕碎压榨+高温好氧发酵+废气处理"工艺，实现一键全自动化，远程监管实时数据，少人值守。主体工艺为"预处理+好氧发酵+污水处理+臭气处理"，产出物为：粗油脂和有机营养土。

自动化和智能化处理设备正在成为行业发展的重要方向。某公司研制的一体式园林废弃物粉碎发酵处理机，通过双进料口设计与智能发酵系统的完美融合，成功实现了 7 天快速产出国家标准肥料的技术跨越。核心的发酵系统采用高温好氧发酵工艺，配备高效菌种和智能传感系统。11m³的发酵箱容量可一次性处理 2 吨物料，处理效率达到 1t/h。通过实时监测温度、湿度、氧浓度等关键参数，系统自动调节发酵环境，确保微生物处于最佳活性状态。

有机废弃物协同处理技术正在成为新的发展趋势。例如某公司的自动化、智能化、全封闭式的有机废弃物处理生产线正全面运转，畜禽粪污、秸秆等有机废弃物，经过自动化高温好氧发酵、通过功能微生物增效等自主科技化技术处理后，"摇身一变"成为生物有机肥。按照技术配方进行综合调配，调配完成后就放到发酵槽里面，进行大概 7 到 15 天的高温发酵。

表 4-2 各类技术优缺点

处理技术	运作原理	优点	缺点
粉碎直排	被处理器粉碎后的餐厨垃圾，再用水冲洗直接排入城市下水道中。	操作简单且能实现餐厨垃圾的就地处理。	凝固的油脂会堵塞城市下水道；用水、电量的增加，处理成本较大；处理总量少。
卫生填埋	在填埋场的底部和垃圾之间铺设防渗透隔层，对餐厨垃圾进行压实覆盖。	操作简单，处理总量大，运行成本较低。	耗费大量土地资源，同时填埋处理会产生大量的渗滤液和臭气。
焚烧	将餐厨垃圾放入高于 850℃的焚烧炉内进行焚烧处理。	处理量大，焚烧产生的热量可用于发电，达到资源化利用的目的。	需要耗费大量的燃料，不利于实现碳减排；产生有毒有害气体——二噁英。
好氧堆肥	在有氧条件下，通过好氧微生物的代谢活动将复杂有机物质转化为腐殖质，使其成为有机肥料的过程。	操作简单，衍生产品具有农用价值，实现资源化利用。	需进行预处理，堆肥处理时间较长，占地面积较大，衍生产品的销售不稳定。
厌氧消化	在无氧条件下，通过厌氧微生物的代谢活动降解有机物以产生沼气的过程。	技术成熟，温室气体排放较少，可实现餐厨垃圾减量化和资源化利用。	产能不足，投资较大，操作复杂，需严格控制温度、pH 值和湿度。
生物制氢	以餐厨垃圾为底物，利用暗发酵生产生物氢的生物技术。	是一种可持续的能源生产方法，低成本，过程稳定。	需严格把控时间、温度、pH 值、底物浓度和碳氮比例，处理速度慢、总产氢率低。
炼制生物油	通过酸碱催化反应、分离反应等工艺加工生物柴油。	生产及管理技术较成熟，且具有巨大的资源化潜力。	对设备要求较高且操作成本较高。
蚯蚓堆肥	在好氧堆肥的基础上，利用蚯	堆肥肥效高，能降低	堆肥周期较长，需要严格控制温

处理技术	运作原理	优点	缺点
黑水虻生物处理	蚓将餐厨垃圾消化后产生蚯蚓粪的过程。	重金属含量和碳氮比，既环保又经济。	度、pH 值、湿度和通风指标。
	先将餐厨垃圾预处理，再经过乳酸菌除臭发酵，用来喂养黑水虻，它们的排泄物可作为有机肥料。	产生具有高附加值的有机肥，资源化利用。	养殖技术尚不成熟，易产生空气污染。

4.4 预处理过程典型特征

4.4.1 厨余垃圾预处理过程

目前，国内已建成的厨余垃圾预处理工艺主要分为：

- ①破碎+筛分+生物质分离（杭州天子岭厨余垃圾处理一期工程）；
- ②破碎+两级筛分（青岛小涧西生化处理厂改扩建项目）；
- ③破碎+筛分+固液分离（上海生物能源再利用项目二期）；
- ④破碎+筛分+生物水解（上海嘉定区湿垃圾资源化处理项目）。

（1）破碎+筛分+生物质分离工艺

破碎+筛分+生物质分离工艺流程如图所示，应用于杭州天子岭厨余垃圾处理一期工程，厨余垃圾经料斗接料+板式给料机输送+人工分选+滚筒筛+生物质分离机的全量化预处理后，有机质输送至厌氧消化产沼系统。

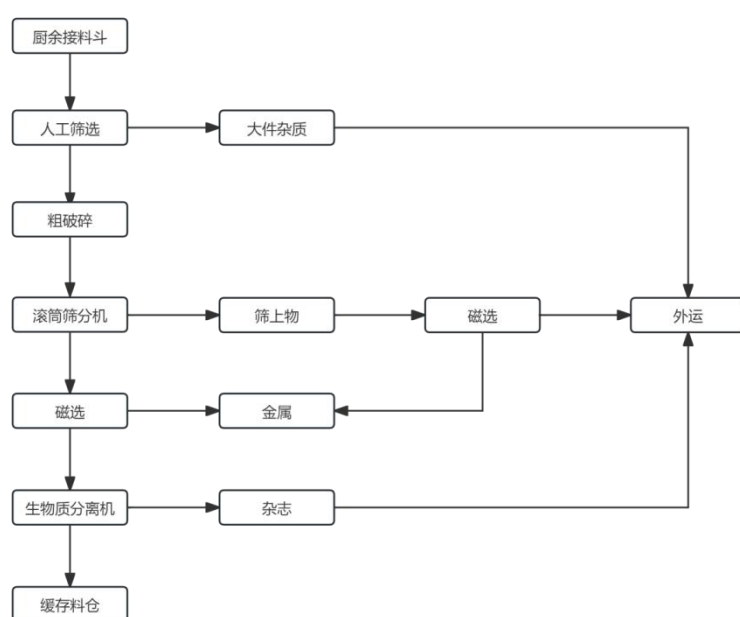


图 4-1 破碎+筛分+生物质分离工艺流程图

(2) 破碎+两级筛分工艺

破碎+两级筛分工艺流程如图所示，应用于青岛小涧西生化厂改扩建项目。收集到的厨余垃圾经接料系统后进入破碎机，将袋装的垃圾进行破碎，增大物料和后续处理设备的接触面积，破碎后的垃圾提升至滚筒筛，筛网孔径为 120mm，大于 120mm 的筛上物多为塑料袋、纸壳等高热值物料外运焚烧，筛下物主要为有机物及少量塑料、木竹等杂物，经磁选分选出金属后进入碟形筛。碟形筛筛孔孔径为 50mm，筛下物基本为有机质，送入干式厌氧中间储料仓，筛上物进入出渣间外运焚烧处置。

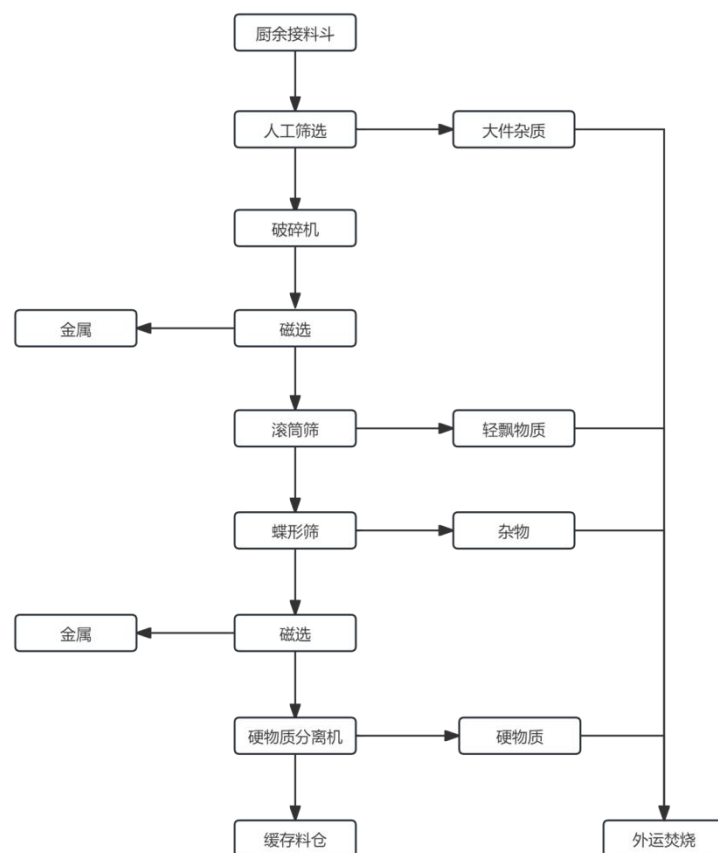


图 4-2 破碎+两级筛分工艺流程图

(3) 破碎+筛分+固液分离工艺

破碎+筛分+固液分离工艺流程如图所示，应用于上海生物能源再利用项目二期。厨余垃圾由运输车卸至垃圾料坑，由抓斗提升至垃圾进料斗，料斗内物料通过螺旋提升经磁选去除金属物质后进入粗破碎机，破碎后物料由螺旋进入碟形筛进行筛分下物进入挤压脱水机，挤压固相进入干式厌氧系统，液相进入湿式厌氧系统。

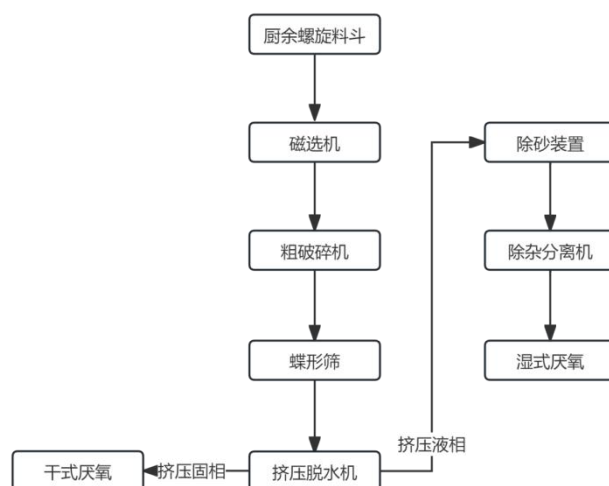


图 4-2 破碎+筛分+固液分离工艺流程图

(4) 破碎+筛分+生物水解工艺

破碎+筛分+生物水解工艺流程如图所示，应用于嘉定区湿垃圾资源化处理项目。厨余垃圾接收滤水后，滤水进入厌氧发酵系统，厨余垃圾品质不佳时进入滚筒筛进行分选，筛上物焚烧处理，筛下物进入下一单元，常规工况厨余垃圾品质较好，可直接进入磁选、人工拣选，分离出的杂物填埋，金属出售，剩余物质与餐厨垃圾预处理中分离出的大块杂质一起进入生物水解反应器进行生物水解，生物水解后有机物大部分转化至浆液中，浆液经过螺旋挤压，制浆固渣焚烧处理，挤压出的浆液进行除渣除砂，沉砂填埋处理，除渣除砂后的浆液输送至湿式厌氧发酵系统。

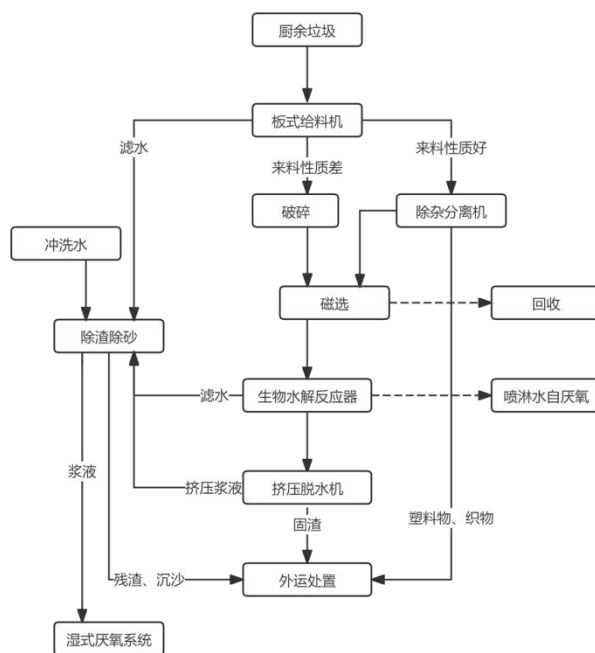


图 4-4 破碎+筛分+生物水解工艺流程图

4.4.2 餐厨垃圾预处理过程

目前，国内已建成的餐厨垃圾处理厂预处理主要工艺主要分为：

- ① 大物质分拣+精分制浆工艺（上海生物能源再利用项目一、二期）；
- ② 大物质分拣+螺旋挤压制浆工艺（深圳市东部环保电厂特殊垃圾预处理项目）；
- ③ 水力制浆工艺〔成都中心城区厨余（餐厨）垃圾无害化处理项目（三期）项目〕；
- ④ 分选破碎+湿热水解工艺。

（1）大物质分拣+精分制浆工艺

大物质分拣+精分制浆包括接收单元、大物质分拣单元、精分制浆单元、除砂除杂、油水分离单元。预处理分选杂质由车辆运至焚烧厂，毛油作为产品定期外运，预处理后的液相浆料进入湿式厌氧系统。工艺流程见下图。

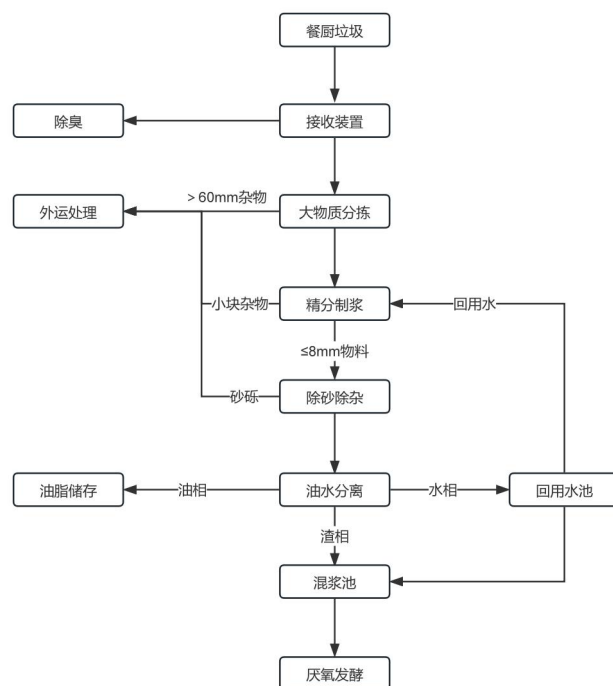


图 4-5 大物质分拣+精分制浆工艺流程图

(2) 大物质分拣+螺旋挤压制浆工艺

大物质分拣+螺旋挤压制浆预处理工艺餐厨垃圾通过大物料粗分拣，保证了餐厨垃圾物料在粗分拣过程中，最大化地将一些对后道工序设备损坏最大的硬性物质和易缠绕的纤维类轻性物质有效地分离出来，最大化地减轻后道挤压脱硝系统的处理压力；经过粗分拣系统分选后的均质有机物料送入挤压脱水系统。经过挤压后的滤液进入除砂除杂系统，并进行一级热解提油，提油后的浆液预处理后进入后续湿式厌氧系统。工艺流程见下图。

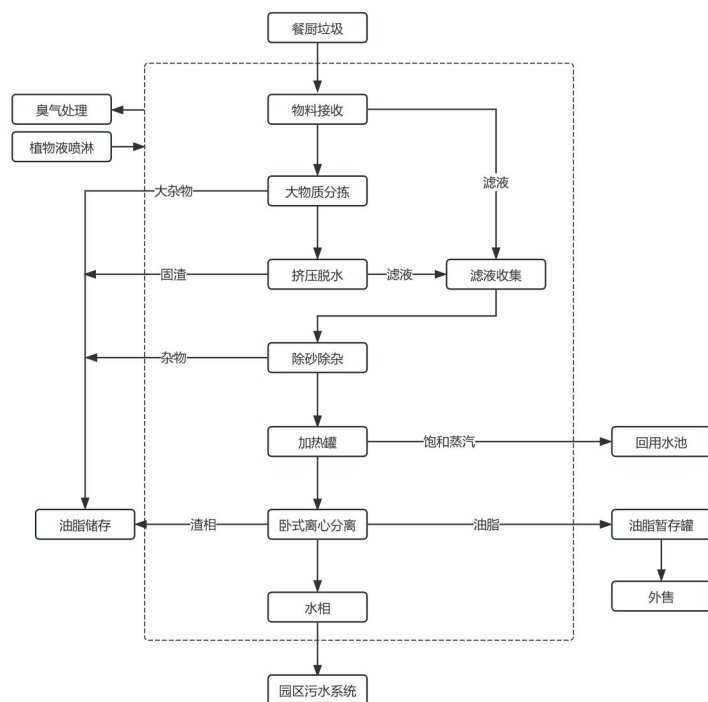


图 4-6 物质分拣+螺旋挤压制浆工艺流程图

(3) 水力制浆工艺

餐厨废弃物进场地衡称重后卸至接收料斗。物料输送至水解制浆机，滤液经管道溢流至滤水收集槽。水力制浆后的流动性浆料透过筛网后经泵输送至旋流除砂器进行初级沉砂处理，剩余固渣经过自流入提渣螺旋输送机。水力制浆后的液相经除砂除杂后进入三相分离机提油，经三相分离的固相和部分液相进入混浆池，三相分离的部分液相回流至水力制浆机，油相进入室外毛油暂存罐。工艺流程见下图。

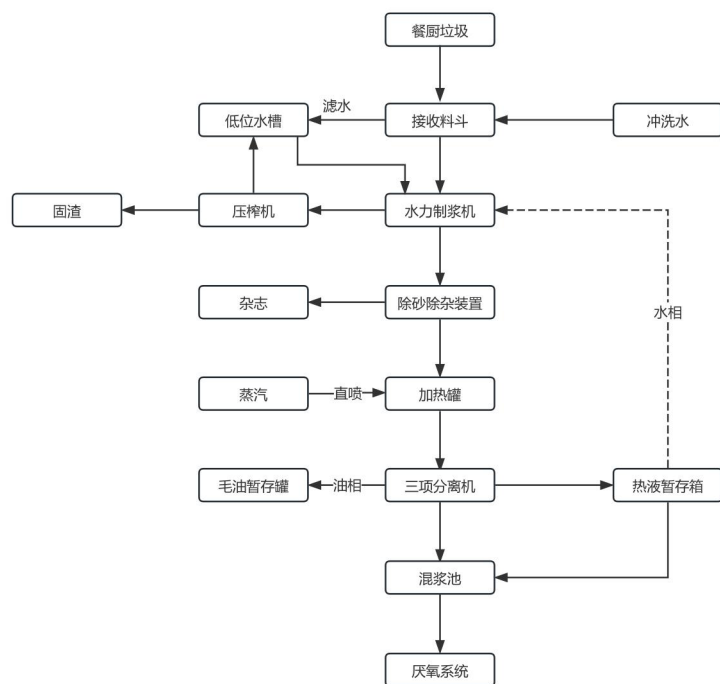


图 4-7 水力制浆工艺流程图

(4) 分选破碎+湿热水解工艺

分选破碎+湿热水解工艺系统由进料仓、提升机、分选机、破碎机、湿热罐、储料罐、卧螺离心机等组成。工艺流程见下图。

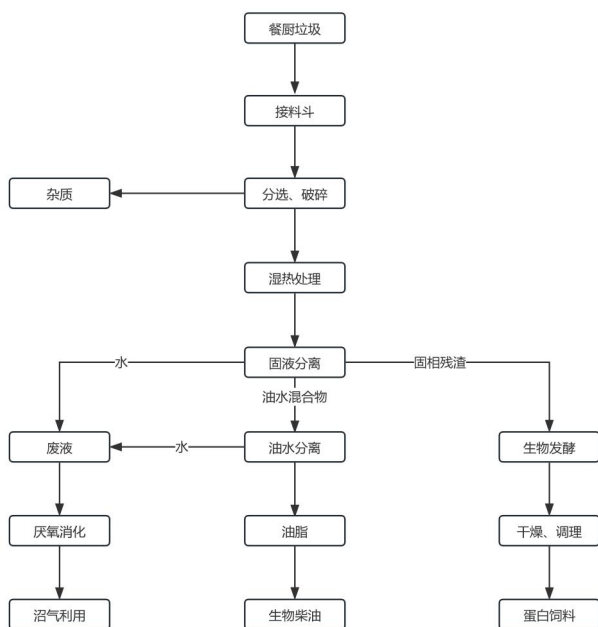


图 4-8 分选破碎+湿热水解工艺流程图

4.5 厌氧消化过程典型特征

厌氧消化工艺类型主要根据原料性质、含固率、运行温度、进料方式等参数确定。一般按照厌氧消化罐（反应器）的操作条件（如消化物的含固率、运行温度等），厌氧消化处理工艺可分为以下几类：

- ①按照固体含量可分为湿式厌氧消化、干式厌氧消化。
- ②按照温度可分为中温厌氧消化、高温厌氧消化。
- ③按照阶段数可分单相厌氧消化、两相厌氧消化。
- ④按照进料方式可分为序批式厌氧消化、连续式厌氧消化。

厌氧消化阶段是核心环节，我国主要采用中温厌氧消化工艺，温度控制在 35-38℃。经过除砂的有机浆液进入水解酸化罐进行初步降解，然后进入厌氧消化罐中进行中温消化，消化时间为 15~30 天。厌氧反应器可采用多种类型，包括 CSTR（连续搅拌反应器）、UASB（上流式厌氧污泥床）、IC（内循环反应器）等。常见厌氧消化工艺流程图如下所示。

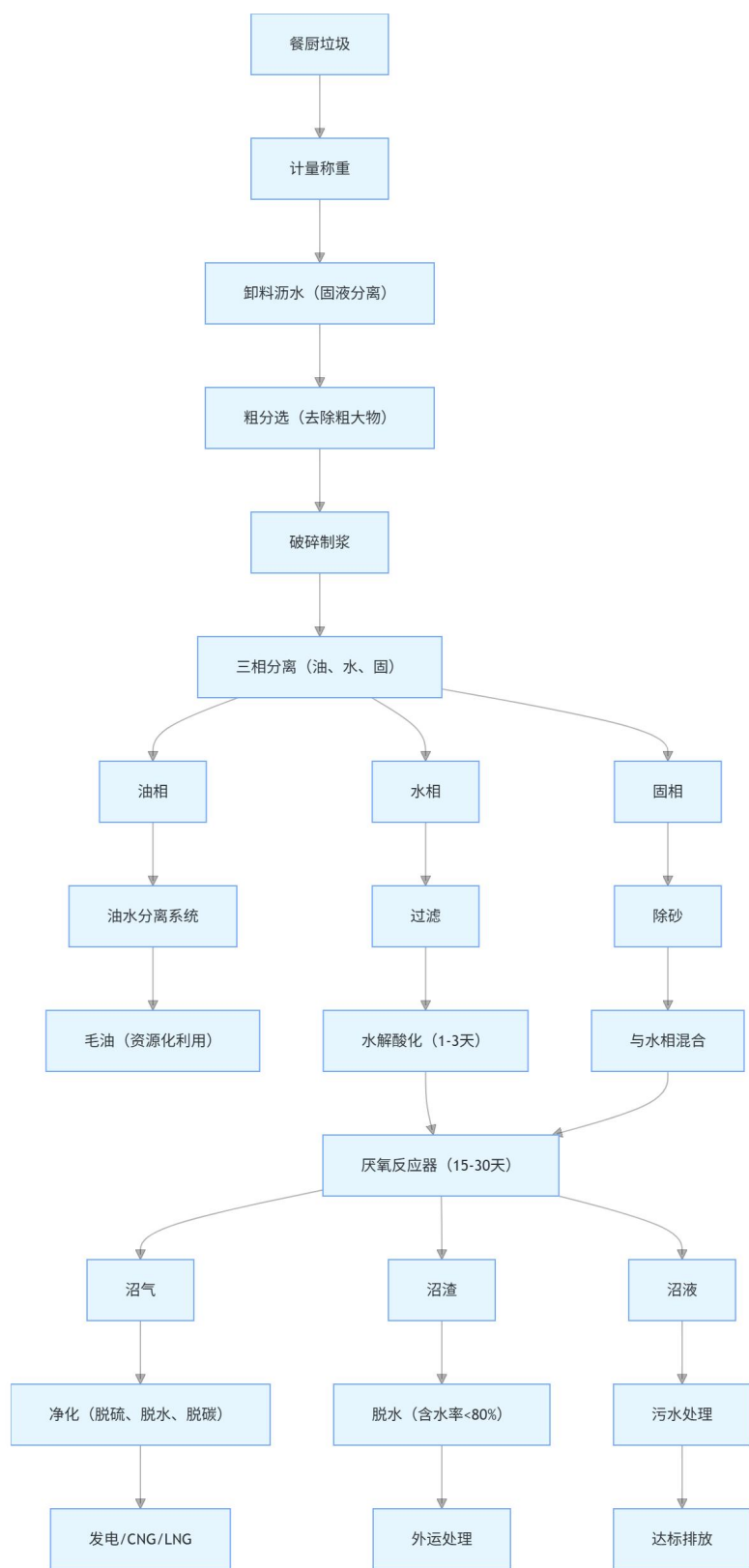


图 4-9 厌氧消化处理工艺流程图

4.5.1 技术优缺点

厌氧消化技术的主要优点包括：第一，能源回收效果显著，1 吨垃圾可产沼气 80-120 立方米，发电 150 千-200 千瓦时；第二，减量化效果好，通过厌氧微生物的作用，可将有机物质转化为沼气和少量残渣，减重减容率高；第三，资源化程度较高，不仅产生清洁能源沼气，沼渣可制作有机肥；第四，技术成熟可靠，厌氧消化技术在国内外已有数十年的应用历史，技术工艺相对成熟，运行稳定；第五，环境效益好，通过厌氧消化可减少温室气体排放，将厨余垃圾中的有机物转化为甲烷和二氧化碳，避免了有机垃圾在填埋场产生大量甲烷。

然而，厌氧发酵技术也存在明显的缺点：第一，投资成本高昂，处理 300 吨/日规模需要投资 1.5 亿-2 亿元，传统厌氧消化设备投资约 2000 万-3000 万元（100 吨/日规模）；第二，处理周期长，厌氧消化需要 15~30 天，整个工艺周期可达 20~40 天；第三，占地面积大，1 吨垃圾需要 3-5 平方米的处理场地；第四，技术要求高，需要专业的技术人员进行操作和维护，对原料的碳氮比、含水率、温度等参数要求严格；第五，存在安全风险，沼气属于易燃易爆气体，需要严格的安全管理措施；第六，沼液处理困难，沼液含有高浓度的有机物和氨氮，处理不当容易造成二次污染。

4.5.2 经济和环境效益

厌氧发酵技术的经济性体现在投资成本、运营成本和收益三个方面。投资成本方面，传统厌氧消化设备投资约 2000 万-3000 万元（100 吨/日规模），处理 300 吨/日规模需要投资 1.5 亿-2 亿元。近年来，随着技术进步和规模化生产，单位处理成本从最初的每吨 300 元降至目前的每吨 150 元以下。

运营成本包括设备运行、能源消耗、人工、维护等费用。传统技术的运营成本为 300-500 元/吨，但通过技术改进，如采用高效反应器、余热回收等措施，运营成本有望降至 100-150 元/吨。运营成本的构成主要包括：蒸汽成本、用电成本、污水处理成本、固渣处理成本、人工成本、管理费、维修费等。

收益来源主要包括：第一，沼气销售，1 吨垃圾产沼气 80-120 立方米，可发电 150 千-200 千瓦时，按照工业电价 0.8 元/千瓦时计算，每吨垃圾可产生 120-160 元的电力收益；第二，沼渣制有机肥，沼渣含有丰富的有机质和营养元素，可制成有机肥料出售；第三，碳减排收益，根据碳交易市场价格，每吨 CO₂ 当量可获得 30-50 元的收益；第四，政府补贴，根据各地政策，餐厨垃圾处理可获得 50-100 元/吨的处理补贴。综合计算，厌氧发酵技术的毛利

率可达 25%~35%。

厌氧发酵技术的环境效益主要体现在碳减排和资源循环利用两个方面。根据研究数据，厌氧消化技术的净碳排放强度为-90.82kgCO₂/t，在所有处理技术中最低，表现为碳负排放。这主要是因为厌氧消化过程中产生的沼气作为清洁能源替代了化石燃料，减少了碳排放。同时，厌氧消化避免了有机垃圾在填埋场产生大量甲烷，甲烷的全球增温潜势是二氧化碳的 28-34 倍。

在资源循环利用方面，厌氧发酵技术实现了能量和物质的双重循环。能量方面，产生的沼气可用于发电或作为燃料，实现了生物质能的高效利用。物质方面，沼渣含有机质≥45%、总养分≥5%，如果符合《有机肥料》标准，可用于改良土壤；沼液含有丰富的氮、磷、钾等营养元素，经过处理后可用于农田灌溉，实现了营养元素的循环利用。

然而，厌氧发酵过程也会产生一定的环境影响。主要包括：第一，沼气中的硫化氢等有害气体需要处理，否则会造成大气污染；第二，沼液含有高浓度的有机物和氨氮，如果处理不当会造成水体富营养化；第三，厌氧消化过程会产生少量的甲烷泄漏，虽然量很小，但甲烷的温室效应很强；第四，设备运行过程中会产生噪音和异味，需要采取相应的控制措施。

4.6 好氧堆肥过程

好氧堆肥技术是利用好氧微生物在有氧条件下分解有机物质的生物化学过程，其工艺流程包括前处理、主发酵、后发酵、后处理、脱臭及贮存等工序。经好氧发酵腐熟后的餐厨垃圾通过添加 N、P、K 等制成复混肥，可作为优质肥料施用农田。目前，常用的好氧堆肥方法主要有条堆式堆肥、仓式堆肥、动态好氧堆肥和槽式堆肥工艺。从 20 世纪 30 年代开始，现代堆肥技术已经发展出了各种完善的工艺系统和成套设备。堆肥产品主要用于园林等的土壤改良。

前处理阶段的主要任务是破碎和分选，去除不可堆肥化物质，将垃圾破碎至 12~60mm 的适宜粒径范围。具体流程为：首先进行原料收集和分类，将餐厨垃圾与辅料（农作物秸秆等）按 10:1-20:1 的质量比进行混合；然后进行破碎处理，通过破碎机将物料破碎成合适的粒径；接下来进行成分调节，调节物料的碳氮比为 25:1-35:1，含水率为 50%~60%；最后进行除杂，通过筛分、磁选等方式去除塑料、金属、玻璃等无机杂质。

主发酵阶段（一次发酵）是好氧堆肥的核心环节，可在露天或发酵仓内进行，通过翻堆搅拌或强制通风来供给氧气。发酵初期，嗜温菌（最适宜温度 30-40℃）进行分解作用；随

着堆温升高，嗜热菌（最适宜温度 45-65℃）逐渐取代嗜温菌，能进行高效率的分解。生活垃圾的好氧堆肥主发酵期约为 4~12 天。

在工业化堆肥中，55-70℃是高温菌的活跃区，也是核心温控范围。持续 70℃以上高温可在 24 小时内杀灭大肠杆菌、蛔虫卵等病原微生物以及杂草种子，确保堆肥产品安全。根据国家标准 GB7959 要求，堆体温度需≥55℃持续 15 天。实际运行中，初级发酵堆层各测试点温度均应达到 55℃以上且持续时间不少于 5 天，或达到 65℃以上持续时间不少于 3 天。

主发酵的具体操作参数包括：堆体高度 1.2~1.5 米，宽度 2~3 米，长度不限；翻堆频率根据温度调整，升温期（0-3 天）每日翻堆 1 次，高温期（4~10 天）每 2 天翻堆 1 次，降温期（11 天后）每 3 天翻堆 1 次。强制机械通风的静态堆肥工艺，堆层高度不应超过 2.5 米；当原料含水率较高时，堆层高度不应超过 2.0 米。

后发酵阶段（二次发酵）针对主发酵残留的难降解有机物（如纤维素、木质素），通过中温微生物（35-45℃）的缓慢代谢实现深度腐熟。经过主发酵的半成品必须进行后发酵，因为碳氮比过高的未腐熟堆肥施用于土壤会导致土壤呈氮饥饿状态，碳氮比过低则会分解产生氨气危害农作物生长。后发酵可在专设仓内进行，通常把物料堆积到 1~2 米高度进行敞开式后发酵，为提高效率有时仍需进行翻堆或通风。后发酵时间通常在 20~30 天以上。

后处理阶段主要是进一步去除杂质和进行产品精制。经过二次发酵后的物料中，几乎所有的有机物都被稳定化和减量化，但在前处理工序中还没有完全去除的塑料、玻璃、陶瓷、金属、小石块等杂物还要经过一道分选工序去除。可以用回转式振动筛、磁选机、风选机等预处理设备分离去除上述杂质，并根据需要进行再破碎（如生产精制堆肥）。也可以根据土壤的情况，将散装堆肥中加入氮、磷、钾添加剂后生产复合肥。

脱臭和贮存是最后两个环节。在堆肥化工艺过程中会产生氨、硫化氢、甲基硫醇、胺类等臭气物质，必须进行脱臭处理。经济实用的方法是熟堆肥氧化吸附的生物除臭法，将腐熟堆肥置入脱臭器，堆高约 0.8~1.2 米，将臭气通入系统，使之与生物分解和吸附及时作用，其氨、硫化氢去除效率均可达 98%以上。堆肥一般在春秋两季使用，夏冬两季需积存，因此堆肥化工厂需设置至少能容纳 6 个月产量的贮藏设施，以保证生产的连续进行。生产工艺流程图如下。



图 4-10 好氧堆肥工艺流程图

4.6.1 技术优缺点

好氧堆肥技术的主要优点包括：第一，技术成熟可靠，好氧堆肥技术在国内外已有长期应用历史，技术工艺成熟，操作简便；第二，投资和运行成本相对较低，相比厌氧发酵，好氧堆肥设备简单，投资成本约为厌氧发酵的 30%~40%，运行成本为 50-80 元/吨；第三，产物可实现土地利用，堆肥产品含有丰富的有机质和营养元素，可作为有机肥料改良土壤，资源化效果好；第四，过程中产生的臭气可通过收集处理得到控制，如采用生物除臭技术，氨、硫化氢去除效率可达 98%以上；第五，环境友好，好氧堆肥过程不产生沼气等易燃易爆气体，安全性高，且不会产生大量的废液。

好氧堆肥技术的主要缺点包括：①餐厨垃圾特性影响，餐厨垃圾含水率通常在 80%左右，高含水率的餐厨垃圾在好氧堆肥的过程中易将整个堆垛全部空间填死，致使微生物处于厌氧状态，从而使降解速度减慢并产生硫化氢等臭气，严重影响好氧堆肥过程；餐厨垃圾中含有大量油脂和盐分，同样制约了微生物的生命活动，导致其堆肥周期延长，堆肥产品质量下降。②无法实现减量化。好氧堆肥最适宜的含水率在 50%~60%，通常要添加大量调理剂才能满足好氧堆肥的要求，这一方面增加了前处理的难度，另一方面极大增加了堆肥物的体积，通常无法真正实现餐厨垃圾的减量化。③二次污染问题。由于好氧堆肥处理过程不封闭，且需在底部进行强制通风，好氧堆肥产生的大量臭气容易造成二次污染（主要为氨气、挥发性有机污染物），给周边环境带来较大影响。④处理周期长、占地面积大。好氧堆肥通常分为一次堆肥和二次堆肥，其堆肥周期一般在一个月左右，较长的处理周期使好氧堆肥占地面积大，对于土地资源日益紧张的地区，加大了处理厂的投资费用。⑤肥料出路难。受当地肥料市场及肥料季节性需求的制约，好氧堆肥处理规模通常不宜过大，否则将面临肥料成品出路问题。

4.6.2 经济和环境效益

好氧堆肥技术的经济性具有投资低、运行成本适中、收益稳定的特点。投资成本方面，好氧堆肥设备相对简单，主要包括破碎机、翻堆机、筛分设备等，投资成本约为厌氧发酵的 30%~40%。以 100 吨/日处理规模为例，好氧堆肥的投资约为 600 万-800 万元，远低于厌氧发酵的 2000 万-3000 万元。

运营成本主要包括：设备折旧、人工工资、能耗（翻堆、通风、除臭等）、辅料（秸秆等）、维护保养等费用。根据行业数据，好氧堆肥的运行成本为 50-80 元/吨，显著低于厌

氧发酵的 300-500 元/吨。其中，人工成本占比较高，因为需要定期翻堆和监控；能耗成本主要是通风和除臭系统的电力消耗；辅料成本根据碳氮比调节需要，一般为 10-20 元/吨。

收益来源主要包括：第一，有机肥销售收入，堆肥产品可作为有机肥料出售，根据质量等级，价格在 200-500 元/吨之间；第二，土壤改良剂销售，堆肥产品可作为土壤改良剂，价格更高；第三，政府补贴，各地对有机肥生产和使用有相应的补贴政策；第四，碳减排收益，虽然好氧堆肥的碳减排效果不如厌氧发酵，但仍可获得一定的碳交易收益。综合计算，好氧堆肥的毛利率可达 30%~40%。

好氧堆肥技术的环境效益主要体现在有机物稳定化、营养元素循环和碳减排三个方面。在碳减排方面，好氧堆肥的净碳排放强度为正值，主要是因为堆肥过程中有机物氧化产生二氧化碳排放。根据研究，好氧堆肥过程中会产生 CH₄ 和 N₂O 泄漏，其中 CH₄ 泄漏因子为 4kg/t，N₂O 泄漏因子为 0.3kg/t。但相比其他处理方式，好氧堆肥仍具有一定的碳减排效果。

在资源循环利用方面，好氧堆肥实现了有机物质的稳定化和营养元素的循环。通过好氧发酵，有机物质被转化为稳定的腐殖质，同时保留了大部分营养元素。堆肥产品含有机质 ≥30%，氮、磷、钾等营养元素含量丰富，可有效改善土壤结构，提高土壤肥力。

好氧堆肥的环境影响主要包括：第一，臭气排放，堆肥过程中会产生氨、硫化氢等臭气物质，需要采取收集和处理措施；第二，渗滤液产生，在堆肥过程中会产生少量渗滤液，需要收集处理，否则会污染土壤和地下水；第三，温室气体排放，除了二氧化碳外，还会产生少量甲烷和氧化亚氮等温室气体；第四，噪声污染，翻堆机、风机等设备运行时会产生噪声。

4.7 饲料化处理

饲料化处理技术是通过特定的处理工艺，去除或杀灭餐厨垃圾中的病原微生物和有害物质，将其转化为动物饲料的技术。中国对餐厨垃圾饲料化处理有严格的标准和要求，主要工艺流程包括预处理、高温灭菌、脱水干燥、后续加工等环节。

预处理阶段是饲料化处理的关键环节，必须严格控制。首先是源头收集，餐桌剩余食物必须进行单独分类收集，严禁与其他剩余物混合收集，从存放到收集的时间不应超过 6 小时，杂物含量应小于 10%。运输过程中应采用密闭、防腐专用容器盛装，专用运输车的装载机构应与盛装容器相匹配，装料、卸料宜为机械操作。

接收与分选是预处理的核心步骤。通过人工分选和机械筛分（如滚筒筛、磁选机等），将混入的塑料、金属、玻璃、筷子、餐巾纸等非有机杂质彻底去除，杂物含量应小于 5%。

分选系统应便于清理、防卡，防止坚硬粗大物破坏设备，杂质去除率应大于 90%。

破碎制浆与固液分离是后续处理的基础。经过分选的有机垃圾被送入破碎机，粉碎成粒径均匀的细小颗粒；随后进入固液分离设备（如螺旋挤压机），分离出的液相进入油水分离系统，固相进入下一步处理。

高温灭菌阶段是确保饲料安全性的关键。经分选后的有机浆液采用高温高压进行无害化处理，具体要求为：采用 0.35-0.4MPa 蒸汽压力，温度不低于 100℃，时间不少于 30 分钟，确保细菌、病毒、真菌和寄生虫等不能检出。对于含有动物蛋白成分的餐厨垃圾，其饲料化处理工艺应设置生物转化环节，不得生产反刍动物饲料。

脱水干燥阶段的目的是降低水分含量，便于储存和运输。灭菌后进行油、水、固相三相分离，分离后固相含水率应小于 80%，油水分离率应大于 90%。然后进行烘干干燥，温度控制在 150℃以内，烘干时间为 6~8 小时，避免温度过高使物料焦化和生成有毒物质。采用物理真空无害化处理工艺时，可实现低温脱水，更好地保护营养成分。

后续加工阶段包括发酵处理和成品加工。分离后的固相通过加入微生物菌种、辅料进行微生物发酵处理，使用的微生物菌种应为《饲料添加剂品种目录》批准使用的微生物菌种，辅料应符合《饲料原料目录》的规定。发酵物料不同阶段的发酵温度、发酵时间等参数应根据工艺要求进行设定。

最后进行除杂与粉碎：配置筛分除杂设备，保证干燥冷却后物料的除杂率大于 95%；宜配置粉碎设备，粉碎机的筛片孔径可根据用户要求配置。整个处理流程可概括为：接收与分选→破碎制浆与固液分离→高温灭菌与脱水干燥→后续加工与营养调配。饲料化处理技术的工艺流程图如下。

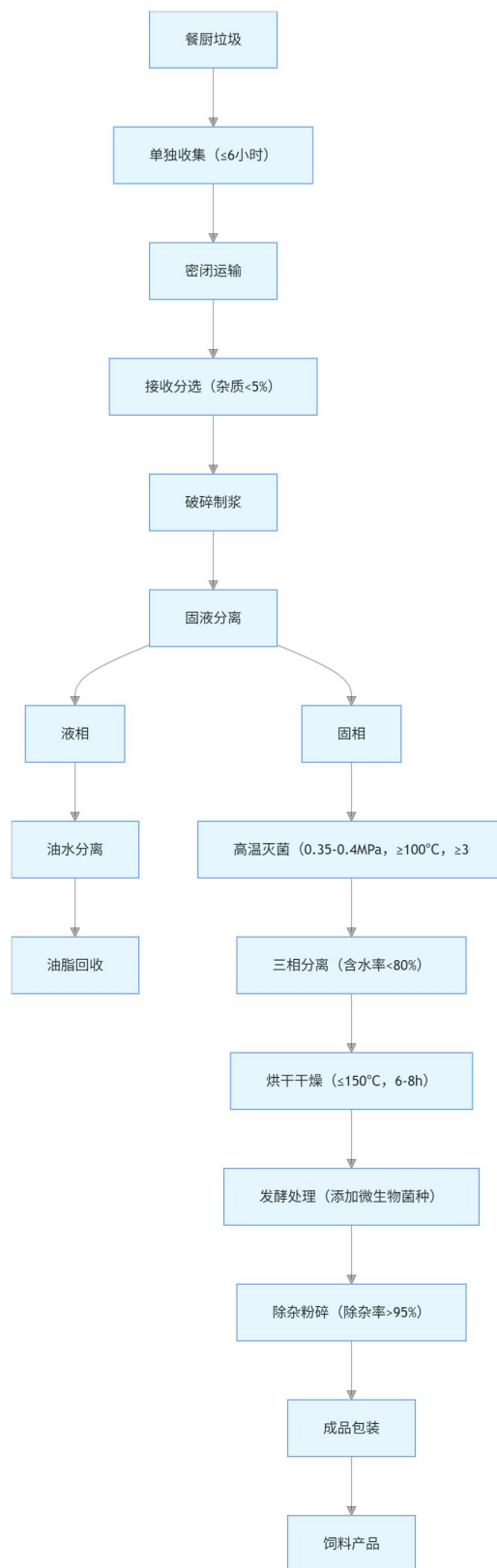


图 4-11 饲料化处理技术的工艺流程图

4.7.1 技术优缺点

饲料化处理技术的主要优点包括：第一，产品价值高，可实现餐厨废弃物中蛋白质、脂肪等营养成分的快速回收，产品可作为动物饲料，经济价值较高；第二，处理效率高，干式饲料化周期不大于 24 小时，相比厌氧发酵和堆肥，处理速度快很多；第三，资源利用率高，通过高温灭菌和微生物发酵，可将餐厨垃圾转化为高价值的蛋白饲料，实现了资源的高效利用；第四，技术相对成熟，饲料化处理技术在欧美等发达国家已有应用，技术相对成熟；第五，产品用途广泛，饲料产品可用于猪、鸡、鱼等动物养殖，市场需求大。

饲料化处理技术的主要缺点包括：第一，安全风险高，存在同源性污染风险，可能传播动物疫病；第二，政策限制严格，中国已禁止餐厨垃圾直接用于动物饲料，农业农村部发布了相关禁令，防范同源性污染；第三，技术要求高，温度、湿度控制严格，需要专业的技术人员操作和维护；第四，投资成本高，需要建设高温灭菌设备、发酵设备、干燥设备等，投资成本较高；第五，产品质量不稳定，饲料产品的质量受原料成分影响大，容易出现质量波动；第六，市场风险大，饲料市场价格波动大，且受政策影响大。

4.7.2 经济和环境效益

饲料化处理技术的经济性具有高投入、高产出、高风险的特点。投资成本方面，饲料化处理需要建设完整的生产线，包括预处理设备、高温灭菌设备、发酵设备、干燥设备、包装设备等，投资成本较高。以 100 吨/日处理规模为例，投资成本约为 2000 万-3000 万元，与厌氧发酵相当。

运营成本主要包括：设备折旧、人工工资、能耗（蒸汽、电力等）、菌种和辅料、维护保养等费用。根据行业数据，饲料化处理的运营成本约为 200-300 元/吨，高于好氧堆肥但低于传统厌氧发酵。其中，能耗成本占比较高，因为需要维持高温灭菌和发酵条件；人工成本也较高，需要专业技术人员操作；菌种和辅料成本根据配方不同，一般为 30-50 元/吨。

收益来源主要包括：第一，饲料销售收入，根据蛋白含量不同，饲料产品价格在 1500-3000 元/吨之间，显著高于其他处理方式的产品；第二，油脂销售收入，分离出的油脂可用于生产生物柴油或工业用油，价格约为 2000-3000 元/吨；第三，政府补贴，部分地区对餐厨垃圾资源化利用有补贴政策；第四，碳减排收益，虽然不如厌氧发酵，但仍有一定收益。

然而，饲料化处理面临较大的市场风险。首先是政策风险，中国已禁止餐厨垃圾直接用于动物饲料，虽然可以生产非反刍动物饲料，但政策不确定性大。其次是市场价格波动风险，

饲料市场价格受多种因素影响，波动较大。第三是质量风险，如果产品质量出现问题，可能面临巨大的赔偿责任。综合考虑，饲料化处理的毛利率可达 35%~45%，但风险较高。

饲料化处理技术的环境效益主要体现在资源高效利用和减少垃圾填埋两个方面。在资源利用方面，饲料化处理实现了餐厨垃圾中蛋白质、脂肪等营养成分的直接回收利用，避免了这些营养成分在其他处理方式中的损失。通过高温灭菌和微生物发酵，可将有机物质转化为高价值的饲料产品，资源利用率高。

在碳减排方面，饲料化处理的效果介于厌氧发酵和好氧堆肥之间。根据研究数据，饲料化处理的净碳排放强度为正值，但相比直接填埋或焚烧，仍具有一定的碳减排效果。主要原因是：第一，减少了垃圾填埋量，避免了填埋场产生甲烷；第二，生产的饲料替代了部分商品饲料，减少了饲料生产过程的碳排放；第三，处理过程中的能耗相对较低。

饲料化处理的环境影响主要包括：（1）食品安全问题。餐厨垃圾转变为家畜饲料，再次进入人类食物链，如处理过程没有达到要求，便存在极大的食品安全隐患问题。（2）对环境的影响。生产饲料工艺很难做到处理过程的全封闭，餐厨垃圾经高温蒸煮后，产生的废气中含有大量挥发性有机酸，在大气中扩散，对周边生态环境产生极大的影响。（3）对动物的影响。由于餐厨垃圾在收集运输时，对饲料的食用对象进行分类收集十分困难，所以很难避免同源性动物饲料对动物的影响。此外，餐厨垃圾经高温加热后，其中的各种油脂中酸价、过氧化值无法消除，长期食用将极大增加动物患病的概率，而餐厨垃圾中的某些病毒，例如引起疯牛病的朊病毒因其蛋白质结构极其复杂，高温无法保证将其完全杀灭，因此欧盟近年来全面禁止餐厨垃圾任何形式的饲料化行为。

4.8 黑水虻处理典型特征

黑水虻处理技术是利用黑水虻幼虫摄食餐厨垃圾，将其转化为高蛋白饲料和有机肥料的生物转化技术。作为一种新兴的处理技术，黑水虻处理具有处理周期短、资源化程度高、环境友好等特点。预处理阶段与其他技术相似，但对原料的要求更加严格。首先进行垃圾收集与分类，厨余垃圾的收集应由专门的垃圾收集人员负责，确保垃圾的及时清运。收集过程中需对垃圾进行初步分类，去除不可降解的物质，如塑料、金属等，确保进入处理系统的垃圾为可生物降解的厨余垃圾。

预处理的核心是三相分离和成分调节。在车间倒料口，转运车将餐厨垃圾倾倒入搅拌池，搅拌后的餐厨垃圾被分解为油、渣、水三个部分。利用筛分制浆机，将餐厨垃圾中的包装袋、

可乐瓶等无机物质分离出来，筛分率达 99%。分离出的水和渣加入适量木屑混合后，与孵化好的黑水虻幼虫一起投入投喂池。

黑水虻养殖对原料有特定要求：厨余垃圾需经分拣（去除塑料、金属等杂质）、粉碎（粒径 $\leq 2\text{cm}$ ）及含水率调节（60%~70%）（133）。按幼虫与底物质量比 1:5-1:10 投料，养殖密度控制在 8~10kg/m²（幼虫鲜重）。

黑水虻养殖阶段是整个工艺的核心。预处理后的有机质浆液送达投料系统，投喂给黑水虻幼虫。黑水虻幼虫在投喂池中贪婪地取食，利用其 24 小时不间断进食的特点，以 6~8 天为一个处理周期快速消解餐厨垃圾。

在接下来的 7 天里，幼虫们在投喂池中取食，体色逐渐由白转褐，标志着它们已成熟可收获。转化周期通常为 10~12 天，其间需定时翻堆（每 48 小时 1 次）以保障通气性。每天上午 10 点，工作人员驾驶着全程封闭运输的挂桶车，穿梭于城区各大街街道，对餐馆、酒店的餐厨垃圾进行挂桶、收集和运输。

虫砂分离阶段采用多种分离技术。收获后的幼虫经过烘干处理，就变成了富含营养的虫干饲料。黑水虻养殖完成后，通过多功能工作站的翻盒系统，将鲜虫和混合物从养殖盒中倒入集料漏斗，滑入皮带输送机后，经多级皮带输送机把混合物送到滚筒筛选机。

中地油科技有限公司使用自动分筛系统实现虫体、虫砂分离。利用黑水虻幼虫生长期间 24 小时不间断进食的特点，以 6 天至 8 天为一个处理周期快速消解餐厨垃圾，通过生物转化，使易腐垃圾 60%转换为高质量昆虫蛋白，40%变为虫粪有机肥。

产品加工阶段包括虫体和虫粪的进一步处理。黑水虻幼虫的后续处理可采用烘干或冻干等方式制作成虫干，虫干含水率宜低于 10%。虫粪则作为优质有机肥料，可以直接使用或进一步加工。

整个工艺流程还包括种虫培育环节，形成闭环系统。对黑水虻幼虫进行筛分，保留 1%~2%送入种蝇室育种，形成了垃圾资源化处理链闭环，真正实现了易腐垃圾 100%无害化处理。工艺流程图如下。

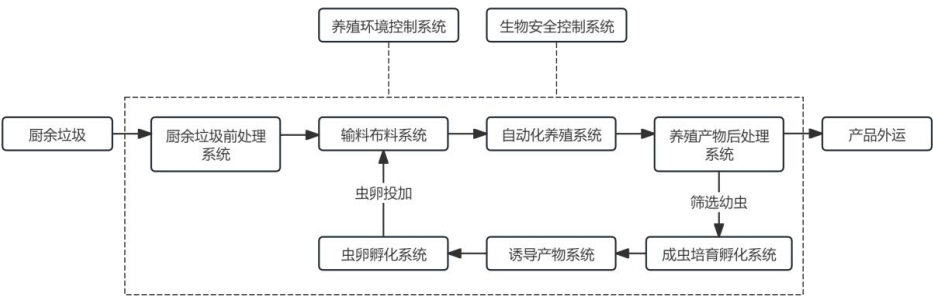


图 4-12 黑水虻处理工艺流程示意图

4.8.1 技术优缺点

黑水虻处理技术的主要优点包括：第一，处理周期短，仅需 5~7 天，相比厌氧发酵的 15~30 天和好氧堆肥的 20~40 天，处理速度大幅提升；第二，资源化程度高，黑水虻幼虫可作优质蛋白饲料，虫粪可制作有机肥，60%转换为高质量昆虫蛋白，40%变为虫粪有机肥，实现了完全资源化；第三，环境友好，黑水虻养殖无害化彻底，没有污水等二次污染产生，温室气体排放量仅为厌氧消化的 30%~40%；第四，适应性强，黑水虻转化技术对原料适应性强，能够有效处理含油率较高（ $\leq 10\%$ ）和盐分含量较高（ $\leq 3\%$ ）的厨余垃圾；第五，占地面积小，占地面积仅为传统堆肥的 1/3-1/2；第六，产品价值高，黑水虻幼虫含有 42%~45%的粗蛋白和 31%~35%的脂肪，是一种具有量产潜力的蛋白质和脂肪原料。

黑水虻处理技术的主要缺点包括：第一，技术成熟度相对较低，作为新兴技术，在大规模应用方面还需要进一步验证；第二，生物污染风险相对较高，需控制黑水虻的逃逸，防止对生态环境造成影响；第三，受季节影响大，在寒冷地区冬季需要保温设施，增加了运行成本；第四，规模化难度大，幼虫生长受粪浆来源、湿度、温度和蝇种影响，规模化养殖需控温保湿，能耗较高；第五，市场不确定性，虫蛋白和有机肥市场需求和价格存在不确定性；第六，技术要求较高，需要专业技术人员进行养殖管理。

4.8.2 经济和环境效益

黑水虻处理技术在经济性方面表现出投资适中、成本较低、收益多元化的特点。投资成本方面，黑水虻养殖设施投资强度约为传统厌氧消化的 50%~60%。以 45 吨/日处理规模为例，总投资 2073.09 万元，吨位投资 46.07 万元/吨，其中工程建设投资 1125 万元，土地 900 万元，建设期利息 48.09 万元。

主要设备投资包括：收集设备如自动化收集车、垃圾压缩设备等，预计投资约 100 万元；虫粪处理设备如分离机、干燥机等，预计投资约 50 万元；主要设备投资总额约 700 万元；建设费用包括基础设施建设、车间建设等，预计在 300 万-500 万元。

运营成本相对较低，可控制在 80-120 元/吨。运营维护费用包括设备维护、能源消耗、水电气费用等，预计每年在 100 万-200 万元。处理每吨厨余垃圾的直接成本约为 150-200 元，包括幼虫采购、设施维护、人工和能耗等费用。

黑水虻养殖的一大优势是原料成本极低。饲料成本方面，黑水虻不用喂玉米、豆粕，收集附近餐馆的厨余垃圾（免费），再混点秸秆粉（每吨 200 元），10 万只幼虫从孵化到出栏，总共吃了 500 公斤饲料，成本才 100 元；其他成本包括电费（通风、加热）、人工（每天 1 小时打理），每月合计 500 元，5 个月出栏周期总成本 2500 元。

收益来源多元化且价值较高：第一，虫体销售收入，按照 1/2 用于生产鲜虫产虫率 15%、1/2 用于生产干虫产虫率 5%，同时产生 15%粪渣，则年均收入为 735.02 万元，单吨处理收入 447.50 元；第二，虫粪销售收入，虫粪可作为有机肥料出售，价格约为 200-300 元/吨；第三，碳减排收益，黑水虻处理的碳减排效果显著，可获得碳交易收益；第四，政府补贴，部分地区对新兴技术有补贴政策。

综合计算，虫体蛋白和有机肥产品可创造 150-300 元/吨的附加收益，黑水虻处理的毛利率可达 40%~50%。根据测算，有机残渣用于昆虫养殖所产生的经济效益约为厌氧消化的两倍。

黑水虻处理技术在环境效益方面表现突出，具有碳减排效果显著、污染物排放少、资源循环利用率高等特点。在碳减排方面，黑水虻处理技术表现优异。从环境效益分析，黑水虻处理过程中的温室气体排放量显著低于厌氧消化和填埋工艺，研究显示其 CO₂ 当量排放仅为厌氧消化的 30%~40%。这一减排效果主要来源于两个方面：一是避免了有机垃圾在厌氧填埋条件下产生大量甲烷（CH₄），甲烷的全球增温潜势是二氧化碳的 28-34 倍；二是黑水虻幼虫在代谢过程中产生的二氧化碳排放量显著低于传统处理方式。

根据研究数据，黑水虻养殖过程中 CH₄ 和 N₂O 排放量相对较少，分别约为 0.4g/t 和 8.6g/t(135)。厨余垃圾处理技术项目的净碳排放强度从低到高为：厌氧消化（-90.82kg/t）〈发酵产酸（-81.04kg）〉〈三相分离协同焚烧（-80.96kg）〉〈喂养黑水虻（-41.78kg）〉〈直接混合焚烧（-3.01kg）〉。虽然黑水虻处理的碳减排效果不如厌氧硝化，但其正值的净碳排放强度表明仍具有碳减排效果。

在污染物减排方面，黑水虻处理表现出色。每吨餐厨垃圾消解所需电量较厌氧消化、焚烧等处置模式下降约 30%，总碳、总氢、总硫、总氮、总磷排放大幅下降，其中总硫、总氮元素减排率分别达 74.1%、61.9%。

在资源循环利用方面，黑水虻处理实现了物质的高效转化。通过生物转化，使易腐垃圾 60%转换为高质量昆虫蛋白，40%变为虫粪有机肥，真正实现了 100%无害化处理。黑水虻幼虫含有 42%~45%的粗蛋白和 31%~35%的脂肪，是一种优质的蛋白质和脂肪原料，可以作为动物蛋白饲料直接喂给鸡、鸭、鱼；幼虫干燥后也可作为鱼粉等；而黑水虻幼虫的粪便

干燥后可以作为肥料。

5 异味污染治理技术

5.1 各类治理技术原理

厨余垃圾的臭气处理，任一单一的除臭技术很难满足除臭指标。目前，主流的厨余垃圾除臭工艺为化学洗涤+生物滤池，并辅以其他的除臭技术。

5.1.1 洗涤法

化学洗涤工艺常采用循环泵将加药系统投加的 10% 的 NaClO 溶液、10%~30% 的 HCl （或 H_2SO_4 溶液、10%~30% 的 NaOH 溶液于洗涤塔的填料中逆向循环喷淋洗涤，化学药剂与臭气组分中的 NH_3 、 H_2S 、甲硫醇、甲硫醚等发生酸碱中和反应、氧化还原等反应，一般控制除臭系统化学洗涤的液气比为 $1\sim 2\text{L}/\text{m}^3$ ，停留时间为 $1\sim 2\text{s}$ 。

工程实践中，碱洗塔同时投加 NaOH 溶液和 NaClO 溶液时，期望控制循环液同时高 $\text{pH}11\sim 12$ 及高 $\text{ORP}500\sim 800\text{mV}$ ，而在常州、西安、上海等多个餐厨除臭调试过程中，发现药剂投加过程中，当 $\text{pH}>10$ 时，大量投加次氯酸钠溶液， ORP 依然很难达到 700mV 以上，即存在碱性强而氧化能力不足的状况，既造成药剂投加的浪费，又难以达到满意的氧化效果。研究表明：对于极高浓度的臭气应该设置单独的氧化塔，氧化塔 pH 控制为 $8\sim 10$ ，可将 ORP 控制为 800mV 以上的高氧化性电位水平。

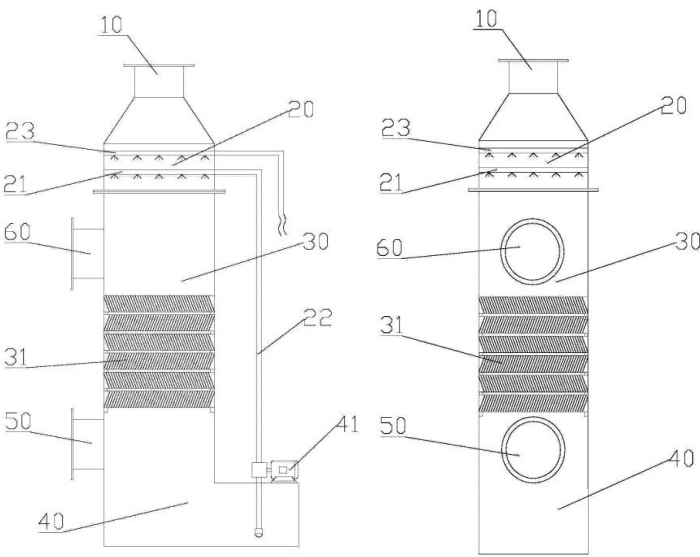


图 5-1 某喷淋塔专利示意图

5.1.2 生物除臭法

生物除臭工艺是将恶臭污染物吸附于填料或吸收于循环液中,利用微生物将恶臭污染物进行生物降解。生物滤池处理厨余垃圾臭气主要利用硫化细菌将含 H_2S 、 CH_3SH 、 $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ 、 $(\text{CH}_3)_2\text{S}_2$ 、 CS_2 等含硫化合物氧化为 H_2SO_4 利用硝化细菌将 NH_3 、 $(\text{CH}_3)_3\text{N}$ 等含氮化合物氧化为 HNO_3 , 因此, 正常运行的生物滤池 pH 会持续降低, 需要定期排水或中和。生物滤池的填料有树皮、木屑、陶粒、火山岩、竹炭、活性炭、聚氨酯悬浮球等。

工程实践中, 厨余垃圾生物滤池的停留时间一般为 15~25s, 流速 $<0.1\text{ m/s}$, 生物滤池总体造价高, 臭气处理效率低, 主要由于生物菌的培养周期长, 维护难度高, 需要定期投加营养物质。生物菌培养可采用工业的菌种或厨余垃圾污水处理的硝化池的清液做菌源。由于厨余垃圾收运和生产基本为白天进行, 造成臭气浓度 24h 内波动性大, 臭气中的恶臭气体不足以提供足够的营养物质, 菌种的培养与维护难度大, 导致运行的厨余垃圾除臭系统存在无菌或少菌现象。 采用额外添加营养物质的方法具有一定的成效, 但需消耗碳源等营养物质, 运行成本较高。

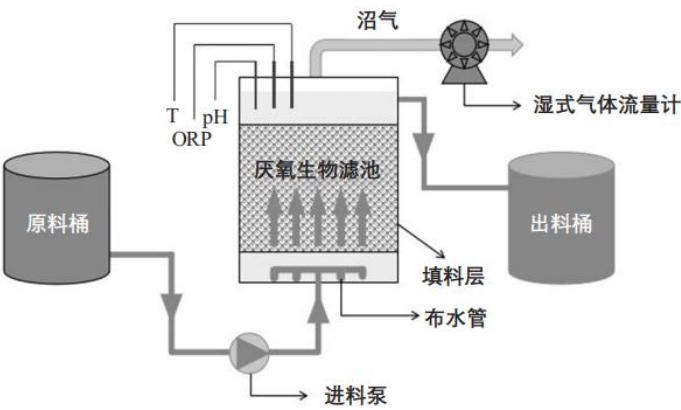


图 5-2 厌氧型生物滤池装置工艺流程图[10]

5.1.3 光催化法

光催化法是利用光源照射在半导体催化剂表面,当辐射能大于禁带宽度($E_g=hc/\lambda_{MAX}$), 半导体的价带(VB)电子被激发跃迁至导带(CB), 产生光生电子(e^-)和光生空穴(h^+)。空穴与吸附于催化剂表面的 OH-和 H_2O 发生反应生成 $\cdot\text{OH}$, 同时光生电子与 O_2 反应生成单线态氧自由基^[1], 二者均具有强氧化性, 可以氧化降解恶臭污染物, 降解产生 H_2O 、 CO_2 。常用的光催化剂包括 TiO_2 、 SiO_2 、 ZnO 等^[12], TiO_2 因价廉易得被广泛采用。

光催化法广泛应用 185、254nm 的真空紫外灯, 但受限于紫外线能量强度, 单位时间内

光解能量不足，仅适用 20~200ppm 或更低浓度臭气处理^[13]，水蒸气和 O₂ 竞争吸收 185nm 波长的紫外光，相对湿度 30%~65%产生氧化性强于臭氧和活性氧的·OH，湿度超过 70%时，效率降低；风速高于 6m/s 时绝对湿度降低，·OH 产生量绝对值减少，脱除效率极低，适宜的风速<2m/s，停留时间 10s^[14]。

工程实践中，光催化的湿度难以控制，紫外灯的质量参差不齐，光催化剂覆膜的活性范围窄、抗湿度能力弱，光催化设备的布局 and 结构不合理，导致餐厨垃圾臭气处理中采用的光催化设备效率极低。摸查早期承建的多个餐厨厂，如萧山、台州等项目，根据反馈光催化设备基本无除臭效果。

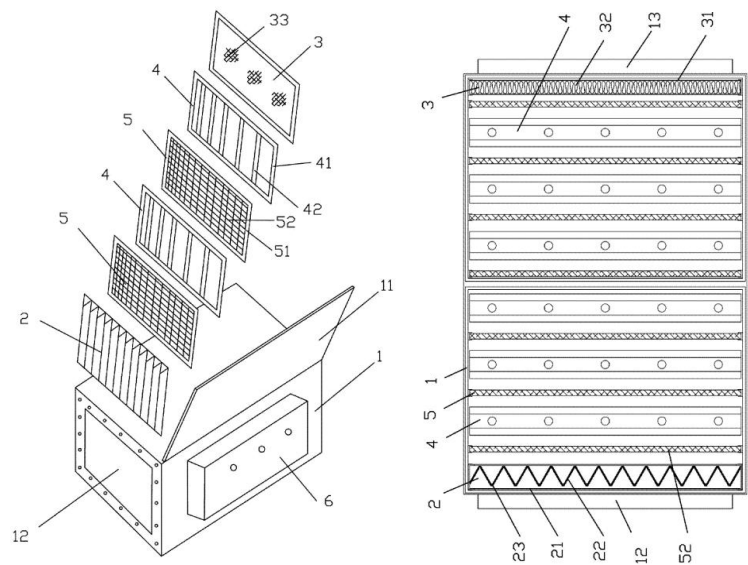


图 5-3 某气体光处理设备箱体设计^[15]

5.1.4 植物液喷雾法

植物液喷雾机理复杂，主要利用植物中的活性成分与臭气分子发生加成反应、氧化还原反应、中和反应、缩合反应等使异味分子的结构发生变化，变成无毒、无味的物质，从而达到除臭效果^[16]。植物液喷雾包括空间雾化处理工艺、集中收集处理工艺、本源喷洒处理工艺^[17]。

工程实践中，植物液喷雾对空间臭源具有一定的周期掩蔽性，仅对于操作人员常工作之处起到一定的臭气缓和作用，市场上的植物液种类和品质参差不齐，价格昂贵，稀释倍数从 30~300，而对于集中处理的植物液洗涤塔未见报道具有较高的除臭效率。另外，对比酸、碱洗涤塔可以通过 pH 计与 PLC 联锁控制碱液的加药量，而臭气集中处理的植物液洗涤塔并无相关的控制量化参数，无法有效控制植物液的投加量。

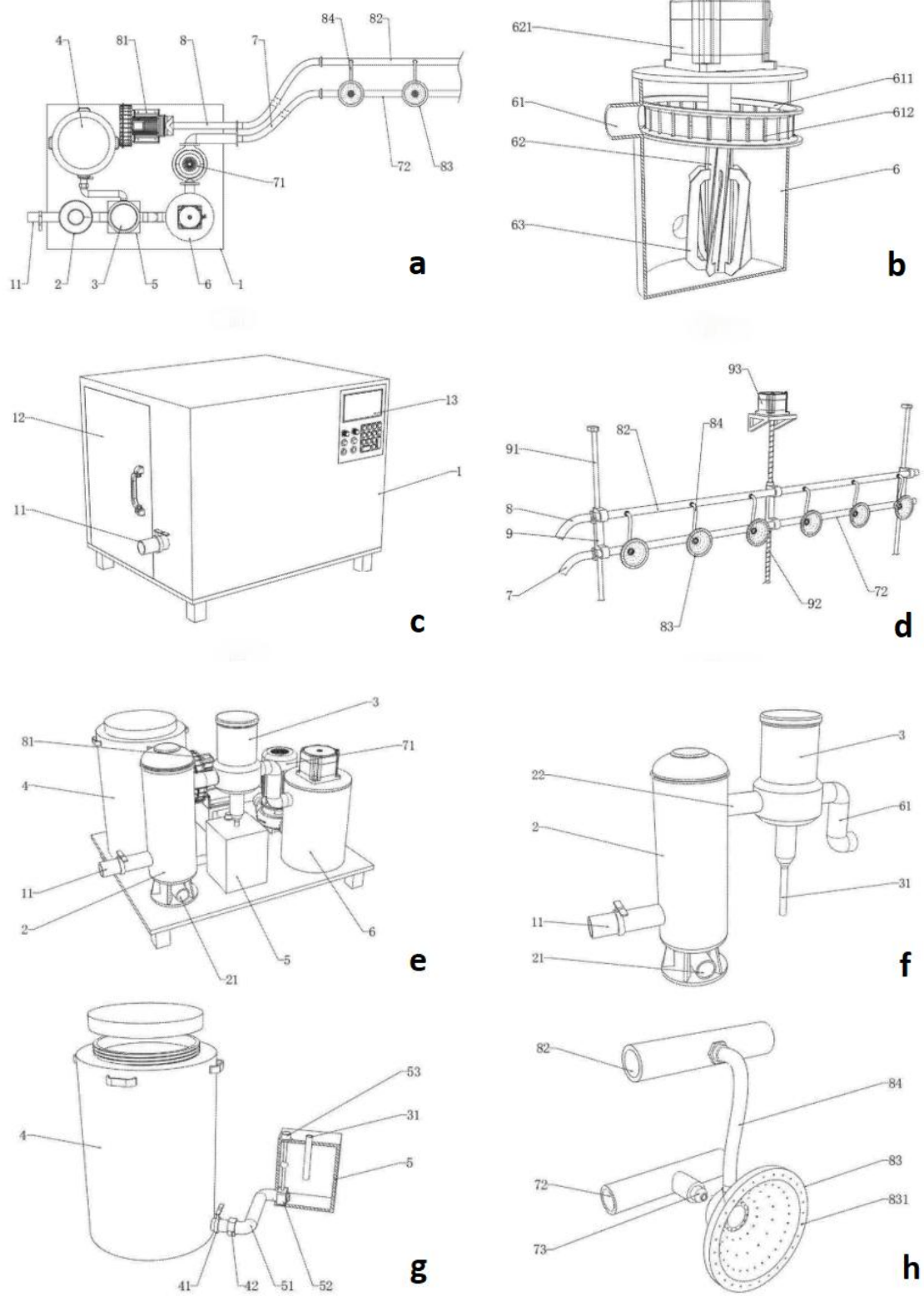


图 5-4 某植物液喷淋专利设施示意图

5.1.5 吸附法

吸附法是最常用的物理除臭技术之一,其原理是利用吸附剂的吸附功能使恶臭物质由气相转移至固相。常用的吸附剂包括活性炭、硅胶、分子筛、活性氧化铝等。活性炭吸附法在臭气治理中应用最为广泛,具有吸附容量大、去除效率高的特点。活性炭的多孔结构提供了巨大的比表面积,能够有效吸附各种恶臭物质。研究表明,活性炭对硫化氢、甲硫醇等含硫化合物具有良好的吸附效果,对苯系物等 VOCs 也有较好的去除能力。然而,活性炭吸附法也存在一些局限性,如吸附容量有限、需要定期更换、废活性炭的处理处置等问题。为了克服这些缺点,研究者开发了化学浸渍活性炭,通过在活性炭表面负载化学试剂来提高对特定恶臭物质的吸附能力和选择性。

活性炭吸附是利用活性炭发达的孔隙结构和巨大的比表面积,可以广泛用于脱除水中的溶解性有机物、微污染物及一些大气中的污染气体。由于臭气中的水蒸气含量远高于臭气中 VOC 的含量,水蒸气具有较高的相对压力和较小的分子量,导致水蒸气更容易扩散,被活性炭优先吸附,而后部分 VOC 在已吸附水蒸气的活性炭上吸附、取代部分水,且当相对湿度大于 50%时,水蒸气会大幅抑制强极性的 VOC 吸收^[18]。周剑峰等^[19]以不溶于水的二氯甲烷和可溶于水的乙醇为研究对象,分别研究了含水、不含水、吸附饱和和水活性炭下的吸附穿透曲线发现吸附水蒸气饱和的活性炭对不溶于水的二氯甲烷基本无吸附,蒸气压力较高的水蒸气较不溶于水的二氯甲烷具有更高的吸附能力水蒸气对活性炭吸附可溶于水的乙醇基本无影响。

工程实践中,餐厨臭气不仅具有较高的湿度,而且存在不溶于水的恶臭气体如甲硫醚、甲硫醇、二甲基二硫等,该类气体采用酸碱洗涤很难根除,是引起臭气浓度不达标的重要因素。考虑到活性炭的更换成本高及废弃活性炭的处理,一些活性炭洗涤塔仅被要求布置于洗涤塔或生物滤池之后做深度处理或应急处理使用,而实际上夹带大量机械水的饱和湿气被活性炭吸附饱和,已大幅降低活性炭的平衡吸附量,部分活性炭塔底部经常出现冷凝水滴液的情形,不仅降低了不可溶于水的臭气的吸附能力,而且导致活性炭塔几乎无除臭能力甚至失效。鉴于此,活性炭吸附前需要严格除湿,如增加干式过滤器,但由此会增加系统运行的阻力。另外,活性炭表面可以引入憎水基团,增加不溶于水的 VOC 的吸附。

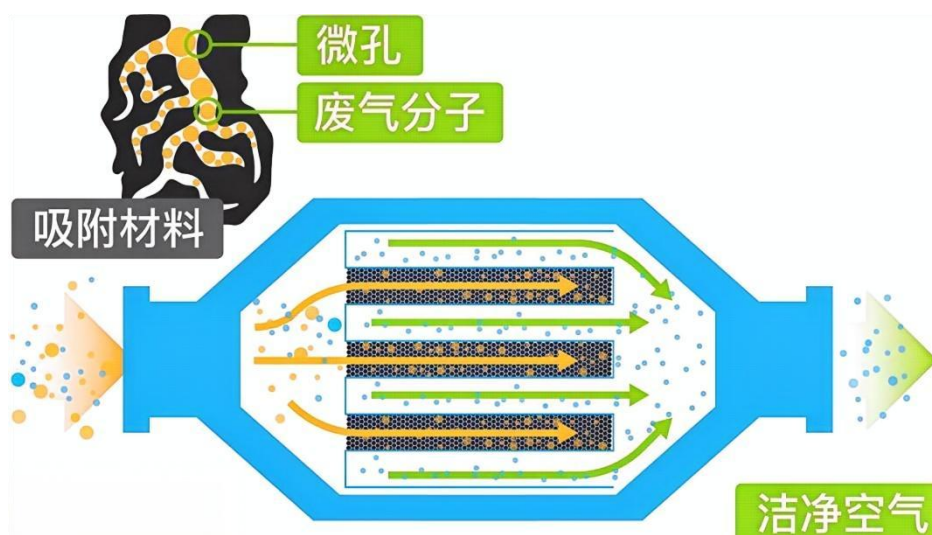


图 5-5 吸附法原理示意图

5.1.6 等离子法

等离子技术，类似静电除尘器，利用高电压放电将气体分子击穿，产生电子、离子、自由基和中性粒子，如 O_3 、 $\cdot O$ 、 $\cdot OH$ 等，具有超强的氧化性，将恶臭气体氧化成 SO_2 、 NO_x 、 CO_2 、 H_2O 等^[20]。李华琴等^[21]研究了低温等离子技术在不同输入电压条件下对 $0.5\sim 1m^3/h$ 含 H_2S 臭气的脱除影响，等离子体内停留时间为 $10.6s$ ，输入电压自 $1.2kV$ 提高到 $8.56kV$ 等离子体对硫化氢的脱除率自 7.9% 提高至 93.6% ，检测的 O_3 浓度由 $8.3ppm$ 提升至 $168ppm$ 。翁林钢等^[22]研究了低温等离子技术在不同功率条件下对 $1840m^3/h$ 含柠烯、甲硫醇丙醛、乙醛、硫化氢、乙醇、氨等餐厨的外排臭气，输入功率自 $5kW$ 提高至 $20kW$ 时，各臭气污染物降解率上下限自 32% 提高至 90.5% ，尾气中的 O_3 逃逸浓度自 $3.5mg/m^3$ 提升至 $15.2mg/m^3$ ，污染物的停留时间自 $0.8s$ 提升至 $2.8s$ 时，降解率在升高。

工程实践中，餐厨臭气较少采用等离子技术，主要由于等离子焰达到高的脱除率，不仅需保证较高的输入电压，足够的停留时间，耐腐蚀性的极板，而且易产生 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 O_3 等二次污染，导致投资和运行成本均较高。

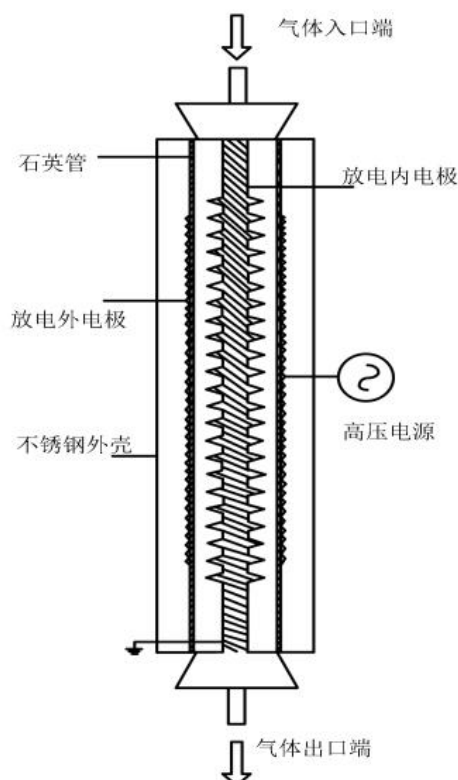


图 5-6 等离子体反应器示意图[23]

5.1.7 燃烧法

燃烧法是通过强氧化反应降解可燃性恶臭物质的方法，包括热力燃烧法和催化燃烧法两种。热力燃烧法是在高温下恶臭物质与燃料气充分混合，实现完全燃烧，适用于处理高浓度、小气量的可燃性气体。催化燃烧法是在催化剂的作用下，利用高温或紫外线等能源，将臭气分子氧化分解为无臭物质。蓄热式热力氧化炉（RTO）是一种高效的燃烧技术，其原理是在高温下将废气中的有机物（VOCs）氧化成对应的二氧化碳和水，从而净化废气，并回收废气分解时所释放出来的热量。三室 RTO 废气分解效率可达 99% 以上，热回收效率达 95% 以上。

5.2 厨余垃圾资源化利用过程异味污染治理技术案例

5.2.1 案例一：旋错式吸收+活性炭吸附+常温定向循环氧化技术

治理技术介绍：

一体化废气治理和臭气超低排放组合装置分为两个部分，旋错式吸收除尘一体化装置和活性炭吸附与常温定向循环氧化装置。

（1）旋错式吸收除尘一体化装置

旋错式吸收除尘一体化装置是一体化非标设备。其原理是通过湿式除尘和吸收协同原理，有微量颗粒物作为雾滴凝核，促进水雾变成水滴，从而更好地去除颗粒物与消除废气中的酸碱气雾。对废气进行除酸雾处理时，废气从距浆液池液面一定距离的入口管道引进旋流塔内，逆流向上运动，与旋流塔顶部喷嘴雾化喷射出的微小液滴相接触，发生吸收反应。湿式旋流除尘器在湿法除尘的同时，利用水吸收和酸碱中和可以有效去除酸碱类的气态污染物，并增加空气湿度，为后续的氧化提供羟基自由基。

（2）活性炭吸附常温定向循环氧化再生装置

活性炭吸附装置采用特殊的炭层设计，不同于常规吸附装置的水平放置。这种活性炭放置的方式在更换活性炭时，可以实现活性炭自动滑落收集，减少换炭的工作量和难度。专用去异味的活性炭主要进行异味保护，只要有异味穿透就需进行再生。

将活性炭吸附和常温定向循环氧化系统（常温再生）组成一个循环体系，常温定向循环氧化系统中有臭氧（氧化物质）和臭氧分解催化剂。

常温定向循环氧化系统主要原理：氧化剂在紫外光的辐射下产生氧化能力较强的羟基自由基，羟基自由基可诱发一系列的自由基链反应，几乎无选择地直接攻击气体中的各种污染物，直至将污染物降解为二氧化碳和水，整个过程不产生任何有毒有害的残留物，实现零污染物、零废物排放。

通过闭路循环把羟基自由基带到活性炭表面与有机物发生氧化反应，把大分子有机物转化为小分子有机物，小分子有机物扩散到气体中，因为是闭路循环，小分子有机物与气体中羟基自由基充分发生反应，使小分子有机物分解成二氧化碳和水，从而使活性炭再生，再生后活性炭重新投入使用，从而实现活性炭重复使用。

整个再生过程为闭路循环，循环气体不排入大气中，持续在活性炭吸附常温定向循环氧化再生装置中循环，装置运行期间再生产生的尾气不需要进行处理。

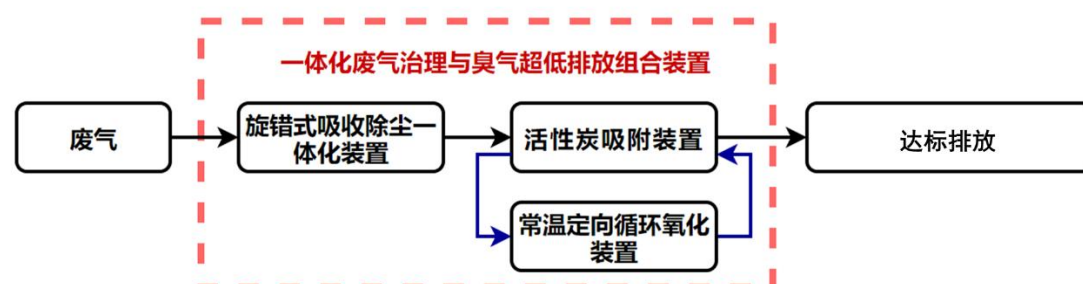


图 5-7 一体化废气治理与臭气超低排放组合装置示意图

关键控制参数：

项目臭气来源：缺氧池，脱水机房，储泥池

表 5-1 治理效果

采样位置	项目	采样时间	检测结果 (无量纲)	检测结果最大值 (无量纲)
北片厂区一体化除臭装置 排放口	臭气浓度	11:16	85	97
		15:06	97	
		19:19	85	

5.2.2 案例二：余杭镜子山餐厨和厨余综合处理车间异味治理工程

治理技术介绍：

镜子山资源循环利用中心项目是杭城第五座大型生活垃圾转运站、临平区首座大型生活垃圾资源化利用项目。项目配套建设生活垃圾转运、易腐垃圾资源化利用及沼气发电三个板块，设计处理厨余废弃物 400 吨/日，餐厨废弃物 400 吨/日，生活垃圾压缩转运 1500 吨/日。本工程异味治理对象为厨余餐厨车间，车间针对生产工艺特点分高浓度处理、低浓度处理。其中，高浓度处理范围包括餐厨垃圾处理区、厨余垃圾处理区、污泥脱水区及厌氧区，总风量为 12 万 m³/h，分为两套，单套处理风量为 6 万 m³/h，采用“碱洗+酸洗+生物滤池+活性炭吸附”组合工艺。

关键控制参数：

主要设备工艺参数：

单套处理风量：60000 m³/h

材质：FRP

停留时间：碱洗 2 s+酸洗 2 s+生物滤池 25 s+活性炭吸附 1 s

成本能耗：

处理系统运行费用主要为电费和药剂费用。总装机功率 180 kW，包括离心风机 132 kW，生物段循环水泵 7.5 kW，酸洗段循环水泵 7.5 kW。该套系统 24 h 运行，则每天的用电量为 402 kW·h。按照电费 1 元/（kW·h）、运行系数 0.85 计算出每月的电费约 144000 元。系统所加药剂主要为 30%氢氧化钠、30%硫酸、10%次氯酸钠，分别按照 1380 元/t、1000 元/t、950 元/t 计算出每月药剂费用约为 30000 元。系统每月运行费用约为 174000 元。

治理效果：

本工程进气中硫化氢平均浓度约为 0.2~20 mg/m³，氨气平均浓度为 15~30 mg/m³，综合

臭气浓度超过 8000（无量纲）；经过两级生物处理后，硫化氢去除率可达到 99.9%以上，氨气去除率可超过 95%，臭气浓度可降至 100~300（无量纲）。

5.2.3 案例三：深圳市光明区某餐厨垃圾处理厂异味治理工程

治理技术介绍：

本工程处理对象为深圳市光明区某餐厨垃圾处理厂餐厨垃圾过程中产生的异味气体。该厂日处理餐厨垃圾量 100 t~110 t，餐厨垃圾成分复杂，有机物一般以蛋白质、脂肪与多糖类（淀粉、纤维素等）有机物形式存在，有机物在发酵、腐烂、分解过程中，会逐渐产生多种异味气体污染物。通过气相色谱法质谱仪（GC-MS）测定可知，餐厨垃圾厂异味废气的主要成分为丙酮、乙酸乙酯等。本工程异味治理总风量为 30000 m³/h。

关键控制参数：

主要设备工艺参数：

处理风量：30000 m³/h

材质：FRP

停留时间：生物3 s+生物10 s+生物12 s

成本能耗：

该套异味处理系统运行费用主要为电费，总装机功率105 kW，包括离心风机60 kW，第一段循环水泵7.5 kW，第二段循环水泵7.5 kW，第三段循环水泵7.5 kW。该套系统24 h运行，则每天的用电量为1980 kW·h。按照电费1元/（kW·h）、运行系数0.85计算出每月的电费50490元。

治理效果：

本工程进口VOCs浓度为5-25 mg/m³，进口H₂S浓度0-9 mg/m³时，VOCs去除率可达95%以上，H₂S去除率可达99.9%。

5.2.4 案例四：宁波鄞州定桥垃圾中转站异味治理工程

治理技术介绍：

本工程处理对象为宁波某城市垃圾中转站渗滤液处理设施运行过程中产生的异味气体。该垃圾中转站总建筑面积1.2万平方米，建筑总投资1.14亿元，设计垃圾处理规模680 t/d，主要转运包含餐厨垃圾、厨余垃圾等城市生活垃圾。垃圾中转过程中会产生大量渗滤液，渗滤液处理设施运行过程中会产生大量硫化氢、氨气、TVOC等异味气体，影响周边居民群众的正常生活。本工程主要对渗滤液处理设施运行过程中产生的硫化氢、氨气、TVOC等异味气体进行治理，处理风量为4000 m³/h。

采用生物滤池形式，以硫化氢、氨气、TVOC等异味分子为食物来源的微生物附着生长在生物滤池的填料表面，微生物将异味污染物一方面降解为二氧化碳、水等小分子物质，另一方面转化为能量供自身生长繁殖，从而达到异味防治的目的。采用两级生物处理工艺。第一级停留时间为20 s，第二级停留时间为10 s。

关键控制参数：

主要设备工艺参数：

处理风量：4000 m³/h

材质：FRP

停留时间：生物20 s+生物10 s

成本能耗：

处理系统运行费用主要为电费，总装机功率28 kW，包括离心风机5.5 kW，第一段循环水泵7.5 kW，第二段循环水泵3.75 kW。该套系统24 h运行，则每天的用电量为402 kW·h。按照电费1元/（kW·h）、运行系数0.85计算出每月的电费10251元。

治理效果：

本工程进气中硫化氢平均浓度约为15.18~30.35 mg/m³，TVOC平均浓度约为55.48~73.98 mg/m³，综合臭气浓度超过10000（无量纲）；经过两级生物处理后，硫化氢出口浓度0.035 mg/m³，去除率可达到99.9%以上，TVOC去除率可超过80%，臭气浓度可降至200~300（无量纲）。

5.2.5 案例五：闵行区餐厨垃圾资源化利用中心异味治理工程

治理技术介绍：

企业按照不同区域产生的臭气，设置不同的处置工艺。一期和二期预处理段采用酸洗+碱洗+植物液喷淋+高空排放的处理工艺；一期生化段采用冷却降温除尘+一级碱洗+二级植物液洗涤+离子除臭+高空排放；二期生化段采用冷却降温除尘+一级碱洗+二级植物液+生物滤池+高空排放的工艺，同时设置活性炭应急处置工艺段。

注入式高能氧簇技术

注入式高能氧簇设备是一款新型工业除臭设备，设备经过多年研发、试验最终成型后推向市场。设备整体采用一体化结构，占地面积小、安装维护方便、操作简单，同时具有能耗低、无二次污染的特点。

高能氧簇原理是首先通过特殊板式发生器产生的大量高能电子e⁻，将空气中的氮气（N₂）充能形成激发态（N₂*），氮气激发态与空气中的氧气产生氧自由基，氧自由基再与空气中

水分子产生羟自由基等活性物质；活性物质通过风机注入管道，吹入废气烟道内，再与废气中的挥发性有机物（VOCs）以及各类恶臭气体产生氧化反应将其分解。

关键控制参数：

（1）高能氧簇设备（实验机）

规格：900×1000×1000 mm；

用电要求：380V，2KW，出口直接110 mm。

（2）离心风机

规格：700×700×700 mm；

额定风量：2000 m³/h；

用电要求：380 v，2.2 kW，风压：1500 Pa。

（3）水洗塔（实验用）

规格：1500×φ800×2800 mm；

保有水量500 kg。

治理效果：

表 5-2 进气口浓度

臭气浓度	排放浓度	无量纲	309	416	309
硫化氢	排放浓度	mg/m³		0.040	
	排放速率	kg/h		2.4×10 ⁻⁴	
氨	排放浓度	mg/m³		2.11	
	排放速率	kg/h		6.41×10 ⁻⁴	
甲硫醇	排放浓度	mg/m³	12.3×10 ⁻³	18.7×10 ⁻³	27.0×10 ⁻³
	排放速率	kg/h	3.74×10 ⁻⁶	5.68×10 ⁻⁶	8.21×10 ⁻⁶

表 5-3 出气口浓度

臭气浓度	排放浓度	无量纲	173	229	229
硫化氢	排放浓度	mg/m³		0.028	
	排放速率	kg/h		1.70×10 ⁻⁵	
氨	排放浓度	mg/m³		1.20	
	排放速率	kg/h		7.27×10 ⁻⁴	
甲硫醇	排放浓度	mg/m³	4.6×10 ⁻³	2.1×10 ⁻³	4.3×10 ⁻³
	排放速率	kg/h	2.79×10 ⁻⁶	1.27×10 ⁻⁶	2.61×10 ⁻⁶

5.2.6 案例六：松江区天马湿垃圾处理中心异味治理

治理技术介绍：

松江区天马湿垃圾处理中心厨余垃圾采用“湿式厌氧消化+沼气发电利用”处理工艺，厌氧消化技术是我国及上海市厨余垃圾的主要应用技术。主要处理流程为收运来的餐饮企业的餐饮垃圾和居民生活的厨余垃圾等湿垃圾，经过分选去除杂质后进入厌氧反应器进行厌氧消化。厌氧消化产生的沼气经过净化去除水蒸气和硫化氢后通入内燃机发电机组燃烧进行热电联产，产生的热能可用于厂区工艺系统，产生的电能除供本项目自用电外，其余电送外网销售。废弃食用油脂采用“杂质分选后提炼粗油脂”工艺，提取的粗油脂送至上海市指定的废弃油脂深加工企业进行生生产物柴油资源化利用。分选出的不可利用残渣送入天马焚烧厂焚烧处置。

企业车间及设备均采用整体密闭收集，参观通道没有异味，整体生产车间密闭效果较好。卸料大厅采用“正压送风+喷洒植物吸收液”的处置方式，车间内臭气采用分区域负压控制，设备设有单独收集系统，将收集的恶臭气体送到末端处理系统，采取“化学洗涤+植物液洗涤+生物除臭”的组合处理工艺，并设置在线监测（监测氨气和硫化氢等），末端装有活性炭除臭作为应急。

5.2.7 案例七：上海黎明资源再利用有限公司异味控制

治理技术介绍：

餐饮垃圾经预处理后，进行厌氧处理，湿式厌氧系统采用中温厌氧消化系统，厌氧消化温度在35℃左右，设计采用蒸汽换热对厌氧消化反应器进行保温加热。湿式厌氧消化产生的沼气经过收集及输送系统送至沼气系统净化处置。

沼气系统主要包括沼气预处理系统、火炬系统和沼气发电系统：

（1）沼气预处理系统

厌氧反应产生的沼气经过粗过滤单元，去除沼气中所含的固体颗粒物及部分冷凝水后进入生物脱硫塔进行脱硫处理，之后将沼气送至后续的冷水机组及干式脱硫单元进一步对沼气进行脱水脱硫处理；通过生物脱硫及干式脱硫两级脱硫处理后，沼气存储于双膜沼气储柜（一期），储气柜主要起缓冲及暂存作用。干法脱硫后的沼气经初过滤、风机增压和精过滤除尘后发电上网。

（2）火炬系统

沼气是易燃易爆的气体，根据《石油化工企业设计防火规范》（GB 50160-2018）、《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）、《大气污染物综合排放标准》（GB 16297-1996）要

求，需要设置后备处理措施，多余的气体可以由火炬燃烧处理。在紧急情况下，火炬会负责将整个系统内所有的沼气燃烧处理，满足全部气体产量的处置需要，避免因沼气泄漏而导致的消防问题。本工程拟采用封闭式火炬，火炬系统主要由塔体、阻火器等组成，同时，还包括连接的管道、阀门、测量仪表及控制调节设备。

(3) 沼气发电系统

经沼气净化系统净化后的沼气送至沼气发电机组，发电机组设3台1.2 MW的内燃发电机+3台脱硝装置+3台余热锅炉。发电机出口电压10.5 kV，发电机的烟气进入SCR脱硝系统，净化后的烟气进入余热锅炉换热，换热后的烟气经15 m高的排气筒排出室外，排气筒末端设消声器，排气筒高度及采样口设置符合要求。

5.2.8 案例八：预洗+二级生物+化学洗涤+活性炭吸附治理技术

(1) 高浓度臭气治理工艺

高浓度臭气主要来自料坑、除渣间、均质罐、干式厌氧、各车间设备及浆料池，且高浓度臭气中含有恶臭因子浓度很高，故采用“预洗+二级生物+化学洗涤+活性炭吸附”多种组合工艺来完成除臭。

①预洗涤处理

对收集过来的高浓度臭气进行初步碱洗处理，并经过排污、换水循环洗涤，可将一部分恶臭物质初步去除。

②生物除臭

生物除臭可同时处理多种恶臭污染物，且运行成本低，不产生二次污染，故将生物除臭作为第一级除臭工艺。

③化学洗涤

利用含氢氧化钠、次氯酸钠的溶液作为吸收剂，在洗涤塔内与臭气通过传质过程，发生酸碱中和、氧化等反应，从而将恶臭物质从气相中去除。

④活性炭吸附

以活性炭作为吸附剂，对臭气进行吸收和浓集，使处理后气体达标排放，通常放于末端工艺进行低浓度的臭气处理。

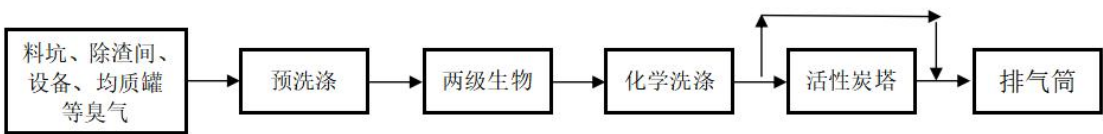


图 5-8 高浓度除臭系统工艺流程

（2）低浓度臭气治理工艺

低浓度臭气主要来自各个生产车间的空间收集，空间里的臭气浓度相对较低，采用三级洗涤（化学洗涤+植物液洗涤+草酸洗涤）的工艺方式即可满足低浓度臭气处理要求。

①化学洗涤

利用碱液/酸液作为吸收剂，在洗涤塔内与臭气通过传质过程发生化学反应，从而将恶臭物质从气相中去除。

②植物液洗涤

针对臭气源特点，用天然植物液配置控制及消除异味的专属工作液，使臭气和植物液在设备中经过酸碱反应、催化氧化反应、路易斯酸碱反应、酯化反应、吸附与溶解等，将其恶臭污染物分解成无毒或低毒害物质，从而达到控制及消除异味的目的。植物液是从多种天然植物的花、茎、根、叶中浮取汁液，经过专业配方和工艺制成，其化学、物理性质应稳定，产品无毒、不属于放射性物品、不含对皮肤产生刺激的成分。可根据臭气源的不同，选择不同型号的植物液进行复配。

③草酸洗涤

草酸洗涤作为最后一道保障，主要去除前两级没有完全去除的氨。收集的臭气中氨的含量较高，且难以去除至环评要求，使用草酸洗涤，可有效去除氨，达到环评要求。

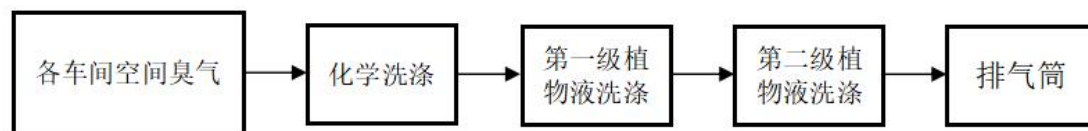


图 5-9 低浓度除臭系统工艺流程

关键控制参数：

（1）预洗涤工艺参数

臭气停留时间 ≥ 2 s；

洗涤设备空塔流速 ≤ 1.5 m/s；

滤床喷淋密度为 7 m³/m²；

设计处理风量为 52000 m³/h；

pH值通常为碱性。

（2）生物除臭工艺参数

高浓度臭气停留时间 ≥ 38 s（ 19 s+ 19 s）；

pH值为 $6.5\sim 9.5$ ；

单层填料层高度为1.5~2.0 m（生物过滤）；不大于5.0 m（生物滴滤）；

生物滴滤喷淋水量液气比0.05~0.3 L/m³；

生物过滤池池底材质为玻璃钢，板平均厚度应≥8 mm，填料层的压力损失不大于400 Pa/m；生物滤料使用寿命大于8年，整体使用寿命≥10年。

（3）化学洗涤工艺参数

臭气停留时间≥2秒；

洗涤设备空塔流速≤1.5 m/s，运行阻力低；

吸收塔填料的比表面积大于100 m²/m³，液气比大于1 L/m³；

设计处理风量为52000 m³/h；

雾滴粒径≥5μm时，截留效率>99%，除雾装置应采用耐腐蚀材料制作。

（4）活性炭吸附工艺参数

装置附件均为不锈钢304材料；

采用颗粒状活性炭填料，颗粒粒径为2 mm~4 mm；

填料段风速≤0.3 m/s，设备总压降≤500 Pa；

臭气停留时间为2-5 s；

活性炭堆比重为0.35-0.55 g/cm³；

活性炭强度需≥80%~95%；

活性炭比表面积为590-1500 m²/g；

活性炭层的填充密度为350 kg/m³~550 kg/m³；

填料厚度宜为0.5~0.8 m；

活性炭除臭适用于废气温度不超过40℃；

颗粒活性炭过滤流速宜按0.2 m/s~0.6 m/s；

蜂窝状活性炭时过滤流速宜按0.7 m/s~1.2 m/s。

治理效果：

整体设备的总净化风量为312000 m³/h，可将高浓度臭气处理至国家规定的可排放标准。设备箱体具有足够强度和刚度，箱体顶部加带有排气孔的顶盖。设备外形美观，可24小时连续运行，使用寿命可达10年以上。

高浓度一体化除臭设备应用后的特征恶臭污染物去除效率≥95%、排气筒臭气浓度为300-400（无量纲），达到国二排放标准。其中设备对各种污染物的排放浓度水平和排放速率水平均满足上海市《恶臭（异味）污染物排放标准》（DB31/1025-2016）。

5.2.9 案例九：生物过滤+除臭剂喷淋治理技术

治理技术介绍：

利用微生物的代谢活动，将废气中的有机物和无机恶臭组分分解甚至矿化，从而达到净化恶臭的目的。微生物菌群具有代谢类型多样，繁殖世代周期长、抗冲击负荷能力强以及驯化周期短等特点。废气通过湿润、多孔和充满活性微生物的过滤器时，被吸附、吸收，最终被微生物降解。结合循环液系统添加ECOLO专有营养液高效脱硫、除氨及脱炭菌种等强效工艺，配合ECOLO高压雾化系统，有效解决异味治理提标难题，并达到优化排气源周边环境的目的。

Aipro Vapor微雾化系统是通过微雾化头的专利技术，把ECOLO植物精油雾化成不到1微米超微颗粒，是传统的雾化颗粒的几十分之一。这些更小、更轻和更高量的微粒增加了精油分子和异味分子之间的碰撞和吸收几率，通过一系列的化学反应，达到分解或消除异味的目的。

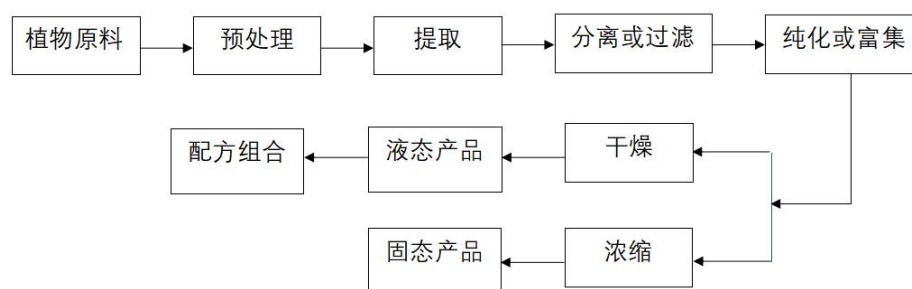


图 5-10 ECOLO 植物精油制备示意图

关键控制参数：

（1）洗涤塔工艺

洗涤塔（器）的直径宜小于4.0m；

空塔流速可取0.6- 1.5m/ s；

废气在填料层停留时间可取1~3s；

填料的选择应具有较大的比表面积和良好的润湿性；耐腐蚀要求的运行环境，填料材质宜选用陶瓷或PP、PE等塑料；

填料层压力损失宜为0.15kPa/m-0. 60kPa/m；

填料层洗涤液喷淋密度不宜小于10m³/(m²•h) ；

填料孔隙率宜为0.45-0.95；

单层填料高度不宜大于1.2m（当填料层总高度大于1.2m时，可采用分段布设）。

（2）生物过滤和生物滴滤工艺

空塔停留时间不宜小于15s；

空塔气速不宜大于300m/h；

单层填料层高度不宜大于3m，

硫化氢负荷不宜高于5g/(m³·h)；

生物过滤池填料的使用寿命不宜低于3年，生物滴滤池填料的使用寿命不宜低于8年；

生物过滤池填料在设计空塔流速下的初始压力损失不宜大于1000Pa；

生物滴滤和生物过滤除臭喷洒及洗涤喷淋的补充水宜采用污水处理厂出水；

喷淋水不宜含有对微生物有害的物质（喷淋前宜设置过滤器）；

生物滴滤池喷淋循环液的pH值宜为6-9；

喷淋水量按液气比0.05L/m³， -0.3L/m³计算；

（3）活性炭吸附工艺

活性炭吸附单元的空塔停留时间宜为2～5s；

性炭料宜采用颗粒活性炭，颗粒粒径宜为3～4mm；孔隙率宜为50%～65%，比表面积不宜小于900m²/ g；

活性炭层的填充密度宜为350kg/m³-550kg/m³；

活性炭可采用分层并联布置方式，填料层厚度宜为0.3m～0.5m。

（4）Airpro Vapor微雾化设备技术

该设备尺寸固定，参考如下：

表 5-4 AirProVapor 设备参数

AirProVapor 设备参数	
Vapor 微雾化喷箱数量	1-3
单个喷嘴流量（mL/h）	17
压力（m）	5.6
雾化射程（m）	0.8
管线长度（m）	≤30
外形尺寸（cm）	40 × 28 × 16.5
重量（kg）	5.4
电压（V）	220
功率（W）	125

表 5-5 ECOLO 废气治理工程经典案例

用户单位	工艺	主要参数	详细介绍
------	----	------	------

用户单位	工艺	主要参数	详细介绍
1 扬州东晟固废环保处理有限公司	酸碱洗+除雾+活性炭吸附塔+植物液雾化	洗涤段有效停留时间：≥1s 液气比≥1.5L/m ³	场景：车间废气（料坑、上料平台、破碎间、燃料站、灰渣房、暂存库） 总风量：100000 m ³ /h×2 套 污染物浓度：未检测 排放浓度：达标排放
2 阜阳天邦食品有限公司	植物液洗涤	洗涤段有效停留时间：≥1s 液气比≥2.0L/m ³	场景：待宰圈废气 总风量：53000 m ³ /h 污染物浓度：未检测 排放浓度：达标排放
3 阜阳天邦食品有限公司	UV 光催化氧化+植物液洗涤	UV 段装机功率：10.8kW 洗涤段有效停留时间：≥1s 液气比≥2.0L/m ³	场景：加工间废气（酶解吸附间、废弃物暂存间、车间） 总风量：20000 m ³ /h 污染物浓度：未检测 排放浓度：达标排放
4 新疆上和恒瑞环境有限公司	生物滤池（碱洗+水洗+生物处理）+活性炭吸附	碱洗段有效停留时间：≥2s 水洗段有效停留时间：≥1s 生物段有效停留时间：≥15s	场景：污水处理站废气 总风量：40000 m ³ /h 污染物浓度：未检测
5 塞拉尼斯（南京）化工有限公司	生物滤池（碱洗+水洗+生物处理）+活性炭吸附	碱洗段有效停留时间：≥2s 水洗段有效停留时间：≥1s 生物段有效停留时间：≥16s	场景：污水处理站废气 总风量：15000 m ³ /h 污染物浓度：（约 230mg/m ³ ）未检测 排放浓度：非甲烷总烃约 10mg/m ³
6 河南心连心化学工业集团股份有限公司	酸洗+生物滤池（预处理+生物处理）	酸洗段有效停留时间：≥12s 预处理段有效停留时间：≥2s 生物处理有效停留时间：≥15s	场景：污水处理站废气、氨水装车废气 氨水装车风量：60m ³ /h 总风量：18000 m ³ /h 污染物浓度：氨 35000ppm，其余未检测 排放浓度：氨<20ppm

6 标准主要技术内容说明

6.1 范围与术语定义

范围：因为参考生活垃圾（含餐厨废弃物）、生活污水处理污泥集中处理（除焚烧、填埋以外的），日处理能力50吨及以上的城镇粪便集中处理等类型采用环评简化管理，因此本标准参考制定适用于处理规模50t/d以上的厨余垃圾资源化利用过程，包括预处理、厌氧消化、好氧发酵及配套处理等环节的异味污染防治，明确其作为企业环境管理与技术选择的参

考依据，其他垃圾资源化利用过程可参照执行。

术语定义：界定了厨余垃圾、预处理过程、厌氧消化过程等核心术语，统一行业认知，采用行业内常规表达方式，其中关键术语引用《生活垃圾分类标志》（GB/T19095-2019）等现有标准，确保定义准确性与一致性。

6.2 异味污染防治总则

明确本标准为“源头控制优先、过程控制结合末端治理、技术适用性与经济性并重、系统化治理与智能化监控”四大原则，为标准后续技术要求提供总体指导框架，明确异味污染防治的核心思路与方向。

6.3 异味产生环节与特征污染物

通过调研与综述系统梳理了各个类型厨余垃圾资源化利用过程中预处理、厌氧消化、好氧发酵及配套处理（废水处理、沼气处理、沼渣处理、深加工处理）等过程的异味产生节点，明确各环节异味浓度差异，并按照典型特征污染物浓度高低顺序列出主要特征污染物，为针对性防治提供基础数据支撑。

6.4 异味污染防治技术要求

该部分内容主要聚焦源头、无组织臭气排放控制和有组织臭气治理三个方面，借鉴国内已有各类技术标准与规范、欧盟垃圾处理行业最佳可行技术指南、国内外文献、其他行业有关异味治理技术相关标准规范、企事业单位创新技术等多个方面，系统梳理了源头、无组织臭气排放控制和有组织臭气治理的最优解决方案。

6.4.1 源头控制技术

主要从自动化水平高、密闭效果好、运输路线设计合理等各方面考量，特别建议企业可以在项目之初做好源头的设计，例如生产装置宜采用自动化程度高、密闭效果好的设备和装置，可以减少人为活动带来的异味逸散。好氧发酵宜选择密闭输送设备和一体化处理设备，减少中间环节造成的厨余垃圾暴露。选用密封性较好的各类设备，如带双层密封的门，废气连接管安装密闭性垫圈，处理过程采用低泄漏的泵、压缩机及搅拌器等设备。适当设计整体工艺管道布局，设计最小化管道运行长度，减少物料输送管道的法兰和阀门等连接件的数量，宜使用重力转移物料以便减少物料扰动，降低物料转移过程中的下降高度。优化设计运输车辆的交通路线，尽量减少垃圾车的停留时间，并且设置轮胎冲洗环节，减少车辆将异味带离厂区。保持设施清洁，定期清洁表面、设备和交通路线，减少异味物质残留。包括采用密闭化、自动化设备，优化管道布局与运输路线，减少物料扰动与异味逸散。

6.4.2 无组织排放防治技术

主要明确分类收集要求，按异味浓度高低制定不同换气次数与收集方式；提出密闭效果提升、车间环境异味控制及泄漏排查措施，确保无组织排放得到有效管控。

首先明确了要进行分类回收，优先识别并按照异味污染浓度高低分类密闭收集，异味浓度高的生产装置应提高换气次数，可提高至8次/小时及以上（有些案例采用24次），异味浓度高的也建议换气次数在2.5次以上，并且最好采用整体密闭负压收集，无整体密闭条件的可采用集气罩收集。因为在《挥发性有机物无组织排放控制标准》（GB 37822-2019）中VOCs废气收集系统排风罩（集气罩）的设置应符合 GB/T 16758 的规定，规定采用外部排风罩的，距排风罩开口面最远处的 VOCs 无组织排放位置控制风速不应低于 0.3m/s，为了提升异味收集的效果，因此本标准建议异味浓度高的区域集气罩口风速应大于0.6m/s，异味浓度低的区域集气罩口风速应大于0.5m/s。

同时考虑到厨余垃圾资源化利用过程中沼气产生必不可少，沼气中常常夹带高浓度恶臭物质，因此控制好沼气的无组织泄漏也是非常关键和重要的环节，因此提出厨余垃圾厌氧消化罐、废水厌氧罐（池）沼气收集风量设计应大于等于沼气产生量，并送往沼气处理、储存、焚烧发电等处理系统，且沼气收集、储存、处理装置区域应按照相关要求制定安全管理制度。同样的提出有关密闭效果提升的规定，如各类涉及厨余垃圾处理过程的车间可设置两道自动感应门，大门处可设置气密门等措施，减少无组织排放。厨余垃圾处理过程中低浓度异味气体可考虑循环利用至好氧曝气、废水池曝气、车间内送风等过程，减少整体异味气体排放量。收集系统收集气量宜考虑混合区域的工作范围、车辆进出、人员进出等各类流程，气量宜能够控制所有可预见的排放。设计足够的沼气回收系统、储存系统容量，避免沼气处理装置故障时未经处理直接排放。建议在出入口处，布设风幕，阻止异味扩散；有条件情况下，设置有毒气体报警仪保障人身安全。

无组织控制中加入了车间环境异味控制要求，因为有垃圾处理单位由于车间内部异味严重等问题也采用多种异味控制方法，本标准部分纳入考虑。例如参考标准CJJ 52-2014的规定，有人工作业的密闭废气收集车间，应有送新风和排风措施，其中新风量不宜小于30 m³/（h·人）。车间整体密闭的送风量宜按排风量的85%计算，送、排风机常开启设置备用，并按照T/CECS 1865-2025规定设置安全报警装置。厨余垃圾卸料和储存区域内部、生化处理工艺装置旁、深加工区域旁、厨余垃圾各类处理车间厂区环境等可安装局部除臭剂雾化喷淋系统，异味污染浓度较高时、异味投诉时开启喷雾装置，减少无组织异味污染，除臭剂安全性和性能指标应满足CJ/T 516的规定。调研市场上较为优秀的除臭剂品牌及其处理效果，得出除臭剂

喷洒设备应具有良好的雾化性能，才能更好地附着异味物质，因此提出雾化后液滴半径不宜大于40 μm ，在雾化喷嘴之下5 m的平面，单个喷嘴的喷雾面积不宜小于3 m^2 ，雾滴应能均匀地覆盖到臭气扩散区域，并且针对性地提出了有关除臭剂使用的相关建议。

6.4.3 有组织排放防治技术

有组织排放治理技术通常是企业、环保治理单位最关心的环节，因此本章节重点介绍了技术选用的原则和顺序，并且针对高浓度、低浓度异味气体分别推荐各类组合治理技术，各类治理技术的参数也均提取自目前治理效果较为优秀的治理案例，可为企业技术选型提供具体参考。

（1）技术选用原则指出，应针对生产过程中各工艺环节、各生产设备废气的异味污染源浓度高低，进行分类收集，分别设计换气次数。根据异味浓度高低选择适宜的组合技术进行处理，针对高浓度异味气体应采用处理规模匹配、异味去除效率高的组合式治理技术。基于目前市场主流，推荐组合技术顺序宜采用“预洗涤处理技术+生物处理技术+深度处理技术”，（其中由于生产工艺已经有预处理过程，因此废气治理技术中为了区分，命名为预洗涤处理技术）。根据异味气体的浓度水平择优选择多层次、多技术的组成。并且厨余垃圾资源化利用项目实际经营区域可能涉及异味投诉、影响周边居民等情景应加大异味处理效率，提高设施运行效果，降低排气筒异味污染物的排放水平，执行严于排放标准的相关限值要求。

（2）技术选用顺序中重点对已有的、普适性的除臭技术按照推荐程度进行简要介绍，其中燃烧除臭技术在厨余垃圾除臭应用中极为少见，但由于燃烧技术净化水平高、运行费用较低，如果附近有垃圾焚烧厂、焚烧装置等，也可以考虑将浓度较高的臭气进行燃烧处理。

（3）针对高浓度异味污染组合治理技术，本标准建议采用多种组合技术，常规生物法的除臭效率有限，可能有50%以内，为了实现进一步达标，应持续增加吸附法、光催化氧化法、等离子体法、化学催化氧化法、除臭剂法等各类除臭工艺，以上工艺市场上均有产品，并且各类案例证明在确保各类参数有效的情况下，是可以实现较好的除臭效果，因此标准也将恶臭控制优秀案例的技术参数进行总结归纳。除此之外，臭气进入各类深度处理技术前应根据实际情况开展除湿除尘等工作，因为湿度较高的情况下各类除臭效果均会降低。

（4）针对低浓度异味污染组合治理技术，降低了技术要求，也有案例通过2级洗涤工艺实现低浓度异味的去除。

（5）技术参数的设置。厨余垃圾的有组织废气第一道工序通常都是碱洗，最常用药剂主要有氢氧化钠、次氯酸钠等，较好的技术会配有洗涤循环系统、自动投药系统、电气控制系统，技术参数通过案例总结得出，停留时间 $\geq 2\text{s}$ ， $0.5\text{m/s} \leq \text{空塔流速} \leq 1.5\text{m/s}$ ，液气比 $\geq 2.0\text{L/m}^3$ ，

pH值范围8~10区间, ORP $\leq$ 500mV有较好的除臭效果。生物法主要采用生物滤池或生物洗涤池, 技术停留时间 $\geq$ 30s, pH值范围6.5~9.5区间, 流速 $\leq$ 0.2m/s。吸附法最常用活性炭等材料, 标准HJ2026有活性炭吸附的详细规定, 吸附塔气体停留时间 $\geq$ 2s, 气体流速 $\leq$ 1.0m/s, 压降损失 $\leq$ 2kPa, 吸附余量控制 $\geq$ 5%。光氧化法推荐采用185nm的真空紫外灯, 光催化氧化法满足标准T/GDAEPI 11的有关规定。紫外灯寿命 $\geq$ 50000h, 灯间距 $\leq$ 100mm, 正常运行状态下, 紫外灯损坏数量 $\leq$ 总数量的20%。进气湿度 $\leq$ 70%, 停留时间 $\geq$ 3s, 流速 $\leq$ 1.5m/s。等离子体法推荐反应区应采用耐腐蚀材料, 等离子体寿命 $\geq$ 30000h, 反应区气体流速 $\leq$ 3m/s, 停留时间 $\geq$ 3.0s, 交流电压范围10-30 kV。化学催化氧化法提出应负载化学氧化催化剂的吸附材料, 例如干式化学滤料(基材为氧化铝)、改性活性炭、陶瓷滤网(例如纳米蜂窝结构、三维多孔结构), 同时建议满足标准T/EERT 023的有关规定。附塔气体停留时间 $\geq$ 1.5s, 气体流速 $\leq$ 1.2m/s, 压降损失 $\leq$ 2kPa, 吸附余量控制 $\geq$ 5%, 至少负载一种化学催化材料, 催化剂有效期不少于1个月。除臭剂喷淋法提出可采用植物型除臭剂、高分子化合物类型除臭剂等, 应配有雾化效果好的喷淋装置。除臭剂满足标准CJ/T 516的有关规定。停留时间 $\geq$ 1s, 空塔流速 $\leq$ 1.5m/s, 液气比 $\geq$ 1.5L/m³, 即用状态下除臭剂有效成分含量 $\geq$ 10%。

6.5 运行维护与监测监管

明确异味治理装置的运维管理要求, 规定有组织排气筒自行监测频次, 推荐安装在线监测装置; 制定异味污染投诉应急管控方案, 强化安全管理要求, 确保治理设施稳定运行与环境安全。

6.6 其他

标准最后提出鼓励新型高效异味治理技术研发与应用, 适时开展技术评估, 并动态更新本技术指南。

6.7 附录内容

附录A为厨余垃圾资源化利用工艺流程及异味产生节点示意图, 直观展示异味关键产生环节; 附录B列出主要异味物质及产生浓度参考值, 为污染状况判断与治理效果评估提供依据。

7 标准实施预期效果

本标准的实施将为厨余垃圾资源化利用企业提供系统、规范的异味污染防治技术指导, 有助于企业优化治理方案, 提升异味污染治理效果, 减少污染物排放, 改善区域环境质量。

同时,标准将为环境监管部门提供明确的技术依据,规范行业环境管理行为,推动行业绿色低碳发展。此外,标准的实施还将引导行业聚焦技术创新,促进新型高效异味治理技术的研发与应用,提升行业整体环保水平与可持续发展能力。

8 其他说明

本标准为首次发布,无历史版本。标准实施过程中,将根据行业技术发展、环保政策调整及实际应用反馈,适时开展修订工作,确保标准的科学性、适用性与时效性。本标准不具备强制性。

参考文献

-
- [1] 邓俊.餐厨垃圾无害化处理与资源化利用现状及发展趋势[J].环境工程技术学报,2019,9(06):637-642.
- [2] WANG Hanxi, XU Jianling, SHENG Lianxi. Study on the comprehensive utilization of city kitchen waste as a resource in China[J]. Energy, 2019.
- [3] WU T, WANG X, LI D, et al. Emission of volatile organic sulfur compounds (VOSCs) during aerobic decomposition of food wastes[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(39):5065-5071.
- [4] TAN H, YAN Z, YUE L, et al. Emission characteristics and variation of volatile odorous compounds in the initial decomposition stage of municipal solid waste[J]. Waste Management, 2017, 68(10):677-687.
- [5] WU Chuangdong, SHU Mushui, LIU Xuan, et al., 2020. Characterization of the volatile compounds emitted from municipal solid waste and identification of the key volatile pollutants. Waste Manag. 103, 314-322.
- [6] 张妍, 王元刚, 卢志强, 等.我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析[J].环境科学, 2015, 36(10):3603-3610.
- [7] MAO Ifang, TSAI Chungjung, SHEN Shuhung, et al. Critical components of odors in evaluating the performance of food waste composting plants[J]. The Science of the Total Environment, 2006, 370(2-3):323-329.
- [8] 王攀, 黄燕冰, 袁传胜, 等.国内成功运营的餐厨垃圾处理厂臭气排放特征研究[J].环境工程学报, 2014, 8(02):624-630.
- [9] 阮仁俊, 李家乐, 欧坤轩, 等.RSI-MO 工艺对沼气脱硫的影响及微生物种群分析[J].中国环境科学, 2021, 41(04):1909-1916.
- [10] 江亚斌, 魏新庆, 张根升, 等.厌氧生物滤池处理焚烧厂垃圾渗沥液试验研究[J].环境卫生工程, 2019, 27(06):68-71.
- [11] 于然. TiO₂ 光催化复合分离膜的制备及其在 UV / H₂O₂ 协同作用下的水处理性能[D]. 大连理工大学, 2018.
- [12] 汪剑峰. 无极紫外灯光解氧化去除恶臭污染中硫化氢的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010: 1-8, 43-47.
- [13] 刘璇, 臧冰, 侯越, 等. 典型垃圾处理设施异味污染研究进展 [J]. 环境卫生工程, 2019, 27(3):1-5.
- [14] 成志明, 林吉凡, 张海鹰. 影响 UV 光催化处理效率的几个主要原因[J]. 科技创新导报, 2018, 15(7):107-108.
- [15] 专利申请号: 201010172862.4, 名称: 一种紫外光催化氧化除臭装置
- [16] 周立新, 钟继超, 杜尊众. 植物除臭剂的研究与应用进展[J]. 湖北大学学报(自然科学

版) , 2020, 42(6) :644-648, 668.

[17] 林杰, 张倚马, 张明剑, 等.垃圾压缩中转站植物液除臭设计[J].中国环保产业, 2013(2):45-47.

[18] 高华生, 汪大羣, 叶芸春, 等, 空气湿度对低浓度有机蒸气在活性炭上吸附平衡的影响[J].环境科学学报, 2002(2):194-198.

[19] 周剑峰, 吴祖成.不同条件对活性炭吸附挥发性有机物的影响[J].浙江大学学报(理学版), 2013, 40(2):201-206.

[20] 邹克华, 严义刚, 刘咏, 等.低温等离子体治理恶臭气体研究进展[J].化工环保, 2008(2):127-131.

[21] 李华琴, 何觉聪, 陈洲洋, 等.低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究[J].环境科学, 2014, 35(4):1256-1262

[22] 翁林钢, 张帅, 叶青, 等.低温等离子体技术用于餐厨垃圾恶臭气体治理的中试研究[J].环境科技, 2021, 34(3):34-37.

[23] 钟黄蓉.低温等离子体协同催化降解甲苯的实验研究[D].中国石油大学(华东), 2020.