

厨余垃圾厌氧处理工艺影响因素和适应性研究

孙燕华

(中城院(北京)环境科技股份有限公司, 北京 100032)

[摘要] 目前国内厨余垃圾处理采用以厌氧发酵为主的工艺路线。本文介绍了厨余垃圾厌氧发酵处理工艺的发展历程,分析厌氧发酵处理工艺的影响因素,如含固率、温度、罐体形式、物料输送、物料搅拌以及罐顶浮渣结壳和罐底积砂等,探讨干式厌氧发酵和湿式厌氧发酵方式适应性,并指出选择干式厌氧发酵或湿式厌氧发酵工艺时需要考虑多方面的因素,如当地垃圾分类的情况、厨余垃圾的成分、前端预处理工艺等。

[关键词] 厨余垃圾;湿式厌氧;干式厌氧;含固率

[中图分类号] X799.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)06-0101-07

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.06.016

0 前言

对于餐厨垃圾,技术人员尤其是工程设计人员都有约定俗成的认识,即来自饭馆、酒店、食堂的物料,也是所谓的餐饮垃圾。餐厨垃圾处理技术规范中提到的餐厨垃圾包括餐饮垃圾和家庭厨余垃圾^[1]。厨余垃圾占城市生活垃圾总量的50%~65%^[2],是城市生活垃圾的重要组成部分。

目前,餐厨垃圾处理技术主要有破碎直排、填埋、焚烧、厌氧发酵、堆肥、饲料化、生物柴油、昆虫养殖等^[3-5]。主流资源化利用技术在我国的应用比例为:厌氧发酵74.3%,好氧堆肥13.5%,饲料化、生物柴油和昆虫养殖等约12.2%^[6]。本文以国内厨余垃圾案例分析为切入点,对比干式厌氧发酵和湿式厌氧工艺^[7],分析厌氧工艺的影响因素及适用性。

1 厨余垃圾厌氧发展历程

早期(2010年前),国内厨余垃圾基本上以好

氧堆肥为主要工艺,代表项目有上海嘉定综合处理厂、上海闵行厨余垃圾处理厂、宜昌黄家湾综合处理厂、北京阿苏卫综合处理厂等。当时垃圾分类的政策还未在全国推行,厨余垃圾也未得到有效的分类,因此这个阶段的厨余垃圾组分基本上等同于生活垃圾。堆肥这项工艺技术较为成熟,但也存在一些问题,如预处理过程相对复杂、占地较大、处理周期较长等^[8]。由于厨余垃圾这种物料有机物含量高、易腐烂、含水率高(70%~95%)、成分复杂,随着项目的运行,臭味问题慢慢地凸显,各地距离居民区近的堆肥项目基本上都存在“臭味扰民”的问题。

随着全国范围内垃圾分类工作的推进,末端厨余垃圾的处理处置设施也在逐年发展,国内已建和在建厨余垃圾厌氧消化工程增多,以“预处理-干式厌氧消化”“预处理-湿式厌氧消化”“预处理-生物水解-湿式厌氧消化”等工艺为主^[9]。厌氧处理根据物料含固率的不同分为干式厌氧和湿式厌氧^[10],通常对于含固率为8%~15%的物料采用湿式厌氧,对于含固率在15%~40%的物料采用干式厌氧。

2010年后,干式厌氧技术逐渐应用于厨余垃圾处理项目中,在一定程度上缓解了臭味这个比较直观敏感的问题。之所以选用干式厌氧,一方面是由于干式厌氧对物料组分要求不高,另一方面也是因为厨余垃圾含固率相比餐厨垃圾高,业内普遍认为厨余垃圾更适宜采用干式厌氧。干式厌氧项目主要

[收稿日期] 2024-07-11

[作者简介] 孙燕华(1983—),女,硕士,高级工程师,主要从事有机垃圾、渗滤液处理工艺设计等工作。

[引用格式] 孙燕华. 厨余垃圾厌氧处理工艺影响因素和适应性研究[J]. 绿色矿冶,2024,40(6):101-107.

SUN Yanhua. Study on influencing factors and adaptability of anaerobic treatment process of kitchen waste[J]. Sustainable Mining and Metallurgy,2024,40(6):101-107.

有北京董村综合处理厂、厦门联谊综合处理厂、杭州天子岭厨余处理厂、宁波厨余垃圾处理厂等。

2019 以后,湿式厌氧技术逐渐被应用于厨余垃圾处理项目中。适合湿式厌氧发酵的物料含固率一般为 8% ~ 15%,相比干式厌氧发酵,湿式厌氧发酵

技术成熟,设备成本低、国产化程度高。湿式厌氧发酵的代表案例有老港湿垃圾处理厂、广州李坑综合处理厂、上海松江厨余垃圾处理厂、绍兴厨余垃圾处理厂、郑州金水厨余垃圾处理厂等。

国内厨余垃圾案例信息见表 1。

表 1 国内厨余(餐厨)垃圾案例

城市	处理厂名称	项目规模/t·d ⁻¹	处理工艺	运行时间	核心技术来源
宜昌	宜昌市黄家湾综合处理厂	200	预处理 + 好氧堆肥	2001 年	
上海	嘉定综合处理厂		预处理 + 好氧堆肥	2005 年	
北京	董村综合处理厂	450 厨余	预处理 + 干式厌氧	2007 年	法国 Valorga
上海闵行	上海闵行厨余垃圾处理厂	200 餐饮 + 200 厨余	好氧制肥	2009 年	
北京	北京阿苏卫综合处理厂	2000	预处理 + 好氧堆肥	2010 年	
上海	青浦综合处理厂		预处理 + 好氧堆肥	2010 年 1 月	
厦门	厦门联谊综合处理厂	600	预处理 + 干式厌氧	2013 年	德国 Strabag
杭州	杭州天子岭厨余垃圾处理厂	200	预处理 + 干式厌氧	2014 年 04	Dranco、蓝德
宁波	宁波厨余垃圾处理厂	一期 400,二期共 800	预处理 + 干式厌氧	2019 年	法国 Valorga
福州	福州厨余垃圾处理厂	一期 400,二期共 800	预处理 + 干式厌氧	2019 年	德国 Strabag
老港	老港湿垃圾处理厂	400 餐饮 + 600 厨余	预处理 + 干式(湿式)厌氧	2019 年 12 月	德国 TTV
重庆	洛碛餐厨处理厂	2100 餐饮 + 1000 厨余 + 600 污泥	预处理 + 干式(湿式)厌氧	2020 年 6 月	瑞士 Kompogas 普拉克 ANAMET
合肥	合肥小圣庙餐厨资源化处理项目	400 餐饮 + 400 厨余	预处理 + 干式厌氧	2020 年	德国 Strabag
广州	广州市李坑综合处理厂	厨余垃圾 1000	预处理 + 湿式厌氧	2019 年	洁绿
金山	上海金山厨余垃圾处理厂	200 餐饮 + 150 厨余	预处理 + 厌氧	2020 年	
松江	上海松江厨余垃圾处理厂	150 餐饮 + 350 厨余	预处理 + 湿式厌氧	2020 年	维尔利
嘉定	上海嘉定厨余垃圾处理厂	150 餐饮 + 350 厨余	预处理 + 湿式厌氧	2020 年 12 月	Kompogas
郑州	郑州金水厨余垃圾项目	150	预处理 + 湿式厌氧	2021 年 10 月	洁绿
绍兴	绍兴厨余垃圾处理厂	200	预处理 + 湿式厌氧	2021 年	维尔利

2 厌氧工艺影响因素分析

2.1 物料含固率

含固率影响物料的输送、搅拌、传质等过程。随着含固率的增高,物料的流动性会逐渐降低,物料的输送、搅拌、传质难度也会逐渐升高,这也是制约高含固率物料采用厌氧工艺的主要因素。刘晓兰^[11]研究了厨余垃圾干式中温厌氧发酵的运行工况,发酵罐含固率维持在 19.6% 左右,系统能维持酸碱平衡状态,产气率为 111.2 ~ 200.6 m³/t。刘

杰等^[12]研究了厨余垃圾湿式厌氧发酵稳定运行工况,物料含固率控制在 8% ~ 9%,厌氧发酵系统能够稳定运行。吴靖宇等^[13]通过工程研究发现,干式厌氧进料的含固率需保证在 30% 左右,挥发性固体含量在 75% 以上,干式厌氧发酵系统才能稳定高效运行。

在实际工程应用中,当物料含固率超过 15%,就会出现上述的物料输送、搅拌、传质等制约因素,含固率越高,制约越明显,可供选择的设备也越少。

2.2 温度

温度是影响厌氧发酵过程的关键因素之一,厌氧微生物生长代谢、厌氧发酵过程中酶活性、厌氧发酵沼气产气量和产气率都会受到温度的影响。一般温度 35 ~ 40 °C 为中温厌氧, 50 ~ 60 °C 为高温厌氧。在目前的厨余垃圾处理项目中, 中温厌氧是较为普遍采用的工艺。高温厌氧消化效率高, 整体罐容小, 但高温厌氧菌群对温度、pH 值的要求更加严格, 而且容易引起氨中毒, 其运行稳定性不如中温厌氧, 因而目前国内成功运行案例较少。

厌氧消化允许的温度波动范围为 1.5 ~ 2.0 °C。如果温度变化超过 3 °C, 会抑制菌群的生物活性, 影响消化速率; 如果温度变化达到 5 °C, 产气量会大幅降低, 有机酸大量积累, 破坏厌氧系统^[14]。李月中等^[14]通过研究中高温过渡区(43 ~ 45 °C)餐厨垃圾厌氧工程案例发现, 中高温(43 ~ 45 °C)提高了厌氧转化效率, 其产气效率显著优于同类中温和高温厌氧工艺。中温过渡区有机负荷率高, 垃圾挥发性固体(VS)产气率达到 1 170 m³/t, 全混发酵 CSTR 发酵装置容积产气率达 3.0 m³/(m³·d), 且厌氧发酵不易出现氨氮抑制问题。对于大型厌氧沼气工程, 可根据不同发酵原料的特性, 选择经济合理的厌氧发酵温度, 以达到最优处理效果和最低的运行成本。

2.3 罐体形式

有机浆液厌氧(湿式厌氧)目前主要采用完全混合式厌氧反应器(CSTR)。全混式厌氧在我国也已经发展了很多年, 并且在餐厨垃圾等有机垃圾工程实践中得到了验证, 其运行状况基本稳定。有机浆液的厌氧工艺在国内有较多供应商, 但厌氧罐搅拌器、输送泵等关键设备, 仍然存在需要进口的情况。

干式厌氧技术在我国起步较晚, 虽有案例, 但运行不尽如人意, 目前市面上的技术也主要来自国外(包括从国外引进技术的国内厂家)。从国内外来看, 干式厌氧罐体形式主要有卧式推流反应器(瑞典的 Kampogas、德国的 Linde、奥地利的 TTV 等)、立式气流搅拌器(法国的 Valorga)、竖向推流反应器(比利时的 Dranco)^[15]。

2.4 物料的输送

输送环节主要涉及输送泵、阀门及管道材质的选择。随着有机浆液的含固率升高, 输送难度也逐

渐增加, 可选的输送设备也越来越少。一般高浓度废水所用的输送泵应用在这里, 会出现堵泵、泵内核心部件磨损严重等问题。目前, 对于含固率 15% 以下的有机浆料, 输送多采用螺旋输送泵。

2.5 物料的搅拌

厌氧搅拌器是厌氧系统的核心部件。厌氧发酵搅拌方式主要分为机械搅拌、水力搅拌和气动搅拌 3 种。现有厌氧发酵装置中, 超过 90% 采用的是机械搅拌。合适的搅拌强度对沼气发酵过程的稳定性和沼气产量具有积极作用^[16-19]。适度的机械搅拌可促进沼气发酵效率; 机械搅拌强度若没有控制好, 将会对微生物絮体结构造成巨大的破坏作用, 从而影响甲烷菌活性, 导致产气量低^[11, 20]。有研究表明, 当机械搅拌强度较高时(100 r/min), 其产气量甚至比不搅拌低 18%^[21]。Stroot 等^[22]研究剧烈搅拌下固体废弃物厌氧发酵的效果, 发现搅拌强度高会影响厌氧微生物的代谢, 降低干式厌氧发酵效率。相反, 间歇搅拌对絮凝体形成的影响较小, 更有利于促进细菌和古菌群落之间的连接^[23]。

对于有机浆液厌氧, 保证厌氧罐内的物料均质非常关键, 若罐体内物料搅拌不均质, 易造成罐体局部酸化, 进而发展成整个罐内的酸化^[24]。有机浆料的浓度越高, 均匀搅拌难度也就越大。目前整个厌氧行业内, 适用于高含固率的厌氧搅拌器非常有限。对于干式厌氧而言, 物料搅拌的制约作用更加明显。

2.6 顶部浮渣结壳及罐底积砂

厌氧发酵过程中罐顶会产生浮渣和结壳, 如果浮渣和结壳不及时破除, 会影响沼气的顺畅排出, 进而有可能影响厌氧罐安全。另外, 厌氧罐底部经过一段时间运行会产生一定量的沉砂, 并且随着时间的延长越积越多, 影响厌氧罐的有效容积, 从而影响进料量, 严重时沉砂可能堵在出料口, 影响输送泵出料。厌氧罐顶部浮渣结壳和罐底部沉砂积累, 在一定程度上与罐内搅拌不充分、不均匀有关系, 但单纯依靠搅拌来解决这类问题又不切实际。经过工程实践, 不少厌氧供应商都摸索出一套有效破除顶部浮渣结壳和解决底部排砂的方法。况前等^[25]在厌氧罐内设置有机垃圾厌氧消化反应器浮渣除去设备, 能够高效、快速地去掉罐顶浮渣层, 保证厌氧罐的稳定运行。

综上, 厌氧发酵影响因素见表 2。

表 4 苏州某餐厨、厨余垃圾处理项目情况

项目情况	具体内容
处理规模	餐厨垃圾 350 t/d, 厨余垃圾 300 t/d
占地面积/m ²	22 678
总投资/亿元	3
工艺路线	预处理 + 厌氧 + 沼气发电 + 污水处理, 其中厌氧发酵采用湿式厌氧
沼气产量/(m ³ ·d ⁻¹)	29 000
固渣量	餐厨、厨余出渣量占进料垃圾 35% ~ 40%, 厌氧沼渣及脱水污泥约为 7% (固渣量含三相离心固渣)
补贴费/(元/t)	349

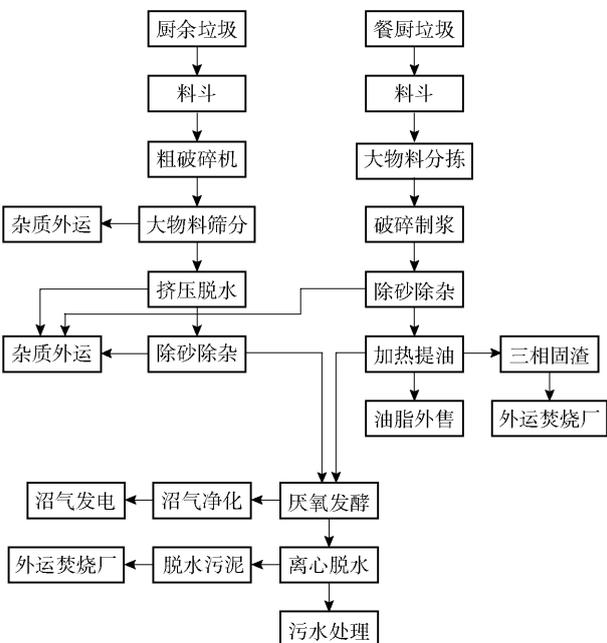


图 2 苏州某餐厨厨余项目工艺流程图

4 厨余垃圾厌氧处理方式的选择

对于厨余垃圾处理项目而言,干式厌氧或湿式厌氧的选择,早期就有一些争论,多数人认为厨余垃圾含固率高,采用干式厌氧方式更合适。但经过近几年的项目实践论证,干式厌氧的效果并不如所设想的那样理想。干式厌氧罐大部分采用直接进口,因国内厨余垃圾成分与国外厨余垃圾相比更加复杂,存在高油、高盐、杂质含量高等特点,进口厌氧罐一定程度上出现了物料搅拌不均匀,进料输送卡堵等“水土不服”的情况。采用进口干式厌氧技术,需要更多考虑我国厨余垃圾情况,促进干式厌氧发酵设备的本土化研究及应用。湿式厌氧工艺在技术、运行方面相对较成熟,目前新建的厨余项目中,湿式

厌氧方式的应用也越来越多。从含固率来说,湿式厌氧发酵和干式厌氧发酵之间并没有严格的分界线。在选择厌氧工艺时,应结合项目的实际情况。

对于厨余垃圾采用高温厌氧还是中温厌氧,需要考虑预处理工艺是否有加热提油环节。若无提油环节,不需要额外对物料加热蒸煮,采用中温厌氧方式更经济些;若预处理工艺中有提油环节,需要对物料加热至 80 ℃ 左右进行蒸煮提油,建议采用高温厌氧方式,预处理后的出料无需大幅降温,即可进入高温厌氧反应系统,在后续进入污水处理系统前再经过一次降温,达到污水处理所需温度。

因此,厨余垃圾处理项目在选择厌氧工艺时,需要考虑多方面的因素,如当地垃圾分类的情况、厨余垃圾的成分、前端预处理工艺等。干式厌氧发酵和湿式厌氧发酵的对比见表 5。

表 5 厨余垃圾干法厌氧和湿法厌氧对比分析

项目	湿法厌氧	干法厌氧
投资/(万元/t)	70 ~ 100	70 ~ 100
占地	适中	较湿法厌氧大
运行成本/(元/t)	300 ~ 400	350 ~ 500
预处理要求	要求较高	要求相对较低
停留时间/d	25 ~ 30	30 ~ 40
厌氧有机负荷/(kgMLVSS/m ³ ·d)	3 ~ 4	6 ~ 10
二次污染控制情况	臭气易控制,污水较多	臭气易控制,污水较少
优点	工艺成熟稳定 可以与餐饮垃圾协同处理	国外运行案例较多,对前端预处理要求低
缺点	污水产量大	①工艺复杂,运行管理及控制较为复杂; ②国内垃圾分类不好,只有 30% ~ 50% 可进入干式厌氧反应器; ③发酵不完全,沼渣产生量大,沼渣含水率高,处理难度大; ④与餐饮垃圾(湿式厌氧)无法协同

5 展望

从厌氧发酵技术发展角度来说,未来有望实现更高效的微生物菌种选育和优化,提高产气效率和有机物降解率。新型的厌氧发酵反应器设计将不断

涌现,具备更好的混合、传质和传热性能,进一步提升处理效果和稳定性。智能化监测和控制系统的运用,能够实时精准调控发酵条件,保障工艺的稳定运行。

厨余垃圾厌氧处理工程中仍有些问题需要进一步研究探索。对于规模小、产沼气量小、采用沼气发电不经济的项目,要探索沼气的高附加值利用方式,如厌氧制备碳源、厌氧制氢、厌氧制乙醇等。目前利用厨余垃圾沼渣制肥,该方法一方面受厂区用地限制难以做到资源化利用,另一方面其产品销路也受限,目前在国内只能进入焚烧厂焚烧处理,但由于沼渣热值较低,焚烧厂接受也较为困难,因此应进一步拓展其利用途径,探索环境安全性条件下沼渣高温堆肥制备有机肥的方法,提高沼渣资源化利用率。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 餐厨垃圾处理技术规范: CJJ184—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [2] 王小铭, 陈江亮, 谷萌, 等. “无废城市”建设背景下我国餐厨垃圾管理现状、问题与建议[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(6): 1-10, 15.
- [3] 焦敏娜, 任秀娜, 王权, 等. 垃圾分类背景下易腐有机垃圾资源化处理模式探讨[J]. 环境卫生工程, 2022, 30(1): 28-35, 40.
- [4] 吕凡, 章骅, 郝丽萍, 等. 易腐垃圾就近就地处理技术浅析[J]. 环境卫生工程, 2020, 28(5): 1-7.
- [5] 靳晨曦, 孙士强, 盛维, 等. 中国厨余垃圾处理技术及资源化方案选择[J]. 中国环境科学, 2022, 42(3): 1240-1251.
- [6] JIN C, SUN S, YANG D, et al. Anaerobic digestion: An alternative resource treatment option for food waste in China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 779: 146397.
- [7] 刘建伟, 夏雪峰, 葛振. 城市有机固体废弃物干式厌氧发酵技术研究和应用进展[J]. 中国沼气, 2015, 33(4): 10-17.
- [8] 蒋建国, 耿树标, 罗维, 等. 2020年中国垃圾分类背景下厨余垃圾处理热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 261-276.
- [9] XING B S, CAO S F, HAN Y L, et al. Stable and high-rate anaerobic co-digestion of food waste and cow manure: optimisation of start-up conditions[J]. Bioresource Technology, 2020, 307: 123195.
- [10] 林聪. 沼气技术理论与工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [11] 刘晓兰. 干式厌氧发酵处理厨余垃圾的工况分析[J]. 节能与环保, 2022(5): 44-46.
- [12] 刘杰, 陈婷, 王瑾瑾, 等. 溧水天山厨余垃圾处理项目稳定运行工况分析[J]. 广东化工, 2021, 48(24): 123-125.
- [13] 吴靖宇, 张爱军, 杨吉祥, 等. 厨余垃圾含固率对干式厌氧发酵工艺在实际工程应用中的影响及控制[J]. 中国沼气, 2024, 42(1): 70-74.
- [14] 李月中, 谭婧, 宫亚斌, 等. 中高温过渡区餐厨垃圾厌氧工程案例剖析[J]. 中国给水排水, 2021, 10(20): 106-110.
- [15] 刘建伟, 夏雪峰, 葛振. 城市有机固体废弃物干式厌氧发酵技术研究和应用进展[J]. 中国沼气, 2015, 33(4): 10-15.
- [16] DUAN Q, ZHAO Y A N, YANG S H U, et al. Experimental device for monitoring mixing and stirring in biogas fermentation process: 204058468[P]. 2014-12-31.
- [17] STROOT P G, MCMAHON K D, MACKIE R I, et al. Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions—I. digester performance[J]. Water Research, 2001, 35(7): 1804-1816.
- [18] LINDMARK J, THORIN E, BEL FDHILA R, et al. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 40: 1030-1047.
- [19] ZHANG J, MAO L, NITHYA K, et al. Optimizing mixing strategy to improve the performance of an anaerobic digestion waste-to-energy system for energy recovery from food waste[J]. Applied Energy, 2019, 249: 28-36.
- [20] ZHANG J, QI Q, MAO L, et al. Mixing strategies-Activated carbon nexus: Rapid start-up of thermophilic anaerobic digestion with the mesophilic anaerobic sludge as inoculum [J]. Bioresource Technology, 2020, 310: 123401-123401.
- [21] SINDALL R, BRIDGEMAN J, CARLIELL-MARQUET C. Velocity gradient as a tool to characterise the link between mixing and biogas production in anaerobic waste digesters[J]. Water Science and Technology, 2013, 67(12): 2800-2806.
- [22] STROOT, MCMAHON, MACKIE, et al. Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions—I. digester performance [J]. Water Research, 2001, 35(7): 1804-1816.

- [23] KARIYAMA I D, ZHAI X, WU B. Influence of mixing on anaerobic digestion efficiency in stirred tank digesters: A review[J]. *Water Research*, 2018, 143: 503 – 517.
- [24] 赵佳奇, 范晓丹, 邱春生, 等. 厨余垃圾厌氧消化处理难点及调控策略分析[J]. *环境工程*, 2020, 38(12):143 – 148.
- [25] 况前, 曾祖刚, 何永全. 有机垃圾厌氧消化反应器浮渣除去设备研究及开发[J]. *低碳世界*, 2016(6): 11 – 12.
- [26] 李阳青, 张云霞, 于森, 等. 厨余垃圾中温干式厌氧发酵系统调试阶段工况分析[J]. *环境卫生工程*, 2023, 31(6):69 – 73.

Study on Influencing Factors and Adaptability of Anaerobic Treatment Process of Kitchen Waste

SUN Yanhua

(CUCDE Environmental Technology Co. Ltd. , Beijing 100032, China)

Abstract: At present, the domestic kitchen waste treatment adopts the process route based on anaerobic fermentation. This paper introduced the development process of anaerobic fermentation treatment process of kitchen waste, analyzed the influencing factors of anaerobic fermentation treatment process, such as solid content, temperature, tank form, material transportation, material stirring, tank top scum crust and tank bottom sand, etc., discussed the adaptability of dry anaerobic fermentation and wet anaerobic fermentation, and pointed out that many factors need to be considered when choosing dry anaerobic fermentation or wet anaerobic fermentation process, such as local garbage classification, kitchen waste composition, pretreatment process, etc.

Key words: kitchen waste; wet anaerobic; dry anaerobic; solid content