

项目五 固体废物的生物处理

❖ 学习目标 ❖

- (1) 了解固体废物好氧堆肥的原理及其应用。
- (2) 了解固体废物厌氧发酵的原理及其应用。
- (3) 掌握污泥的处理技术。

❖ 基础知识 ❖

一、固体废物的好氧堆肥

(一) 城市垃圾的好氧堆肥

堆肥化是指利用自然界中广泛存在的微生物，通过人为的调节和控制，促进可生物降解的有机物向稳定的腐殖质转化的生物化学过程。堆肥化的产物称为堆肥，有时也把堆肥化简称为堆肥。

好氧堆肥是在有氧的条件下，借助好氧微生物（主要是好氧菌）对固体废物进行吸收、氧化、分解。微生物通过自身的生命活动，把一部分被吸收的有机物氧化成简单的无机物，同时释放出可供微生物生长活动所需的能量，而另一部分

有机物则被合成新的细胞质，使微生物不断生长繁殖，产生出更多生物体的过程

(图 5-1)。

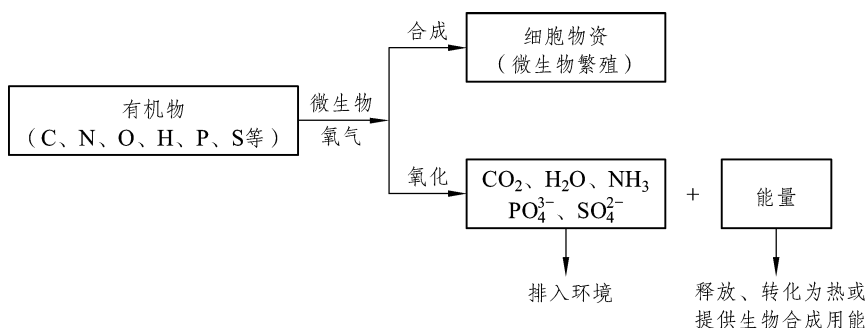


图 5-1 有机物的好氧堆肥过程

好氧堆肥的特点：利用微生物的活动，需要始终供给足够的氧气，动力消耗较高；发酵效率高，堆肥速度快，稳定化时间短，易于实现大规模工业化生产。因此，工业化堆肥一般都采用好氧堆肥的方法。

(二) 好氧堆肥过程与影响因素

1. 堆肥过程

现代化堆肥过程基本由六道工序组成：前处理、主发酵（一次发酵）、后发酵（二次发酵）、后处理、脱臭和贮存。其中主发酵和后发酵最为重要，是整个堆肥过程成功的关键。

(1) 前处理

城市生活垃圾成分十分复杂，尤其是我国垃圾大都未经分类投放，前处理就

显得非常必要。前处理主要包括分选、破碎、筛分和混合等工序。通过分选可回收废品、去除大块垃圾和部分不可堆肥物如石块、塑料、金属物等；通过破碎可以减少大块可堆肥物的尺寸，调整垃圾的粒度，增大原料的表面积，便于微生物繁殖，提高发酵速度；通过筛分获得尺寸比较一致的物料，保持一定程度的空隙率，便于通风使物料能够获得充足的氧气；混合可使不同物料成分、水分等均匀分布。除此之外，前处理有时还包括水分和养分的调节等，如添加氮、磷来调节碳氮比和碳磷比等。

(2) 主发酵

主发酵可以在露天或发酵反应器内进行，通过翻堆或强制通风向堆积层或发酵反应器内供给氧气。发酵微生物一般来自于堆肥原料本身携带的各种微生物。

堆肥开始时，首先是易分解的物质分解，产生二氧化碳和水，同时产生热量，使堆肥温度持续升高，这一阶段称升温段（由环境温度上升到 50℃）。在此阶段，起主导作用的是最适生长温度在 30~40℃ 的中温菌。随着堆肥温度的升高，最适宜温度在 45~60℃ 的高温菌取代了中温菌，它们的活动使温度进一步升高到 50℃ 以上（通常在 50~70℃），堆肥即进入高温段。高温段分解速度快、效率高，还可灭杀蛔虫卵、病原菌、孢子等。因此，保持足够高的堆肥温度和足够长的高温时间是非常重要的。在经历高温段后，堆料的温度开始降低，此时，堆肥进入降温段。当堆肥温度降至一定温度时即不再有明显的变化，表示有机物分解已接

近结束，这时堆料即可转入后发酵进行进一步的熟化。通常，把从堆肥开始，经升温段、高温段至降温段结束时的整个过程称为主发酵期（图 5-2）。以厨房垃圾为主体的城市生活垃圾和家畜粪尿堆肥的主发酵期一般为 3~8 d。需要注意的是，这里把温度在 50℃ 以上的时间段称为高温段，而实际上，在高温段也有温度的升高和下降，其温度也是变化的，但并没有把它们包含在升温段或降温段。

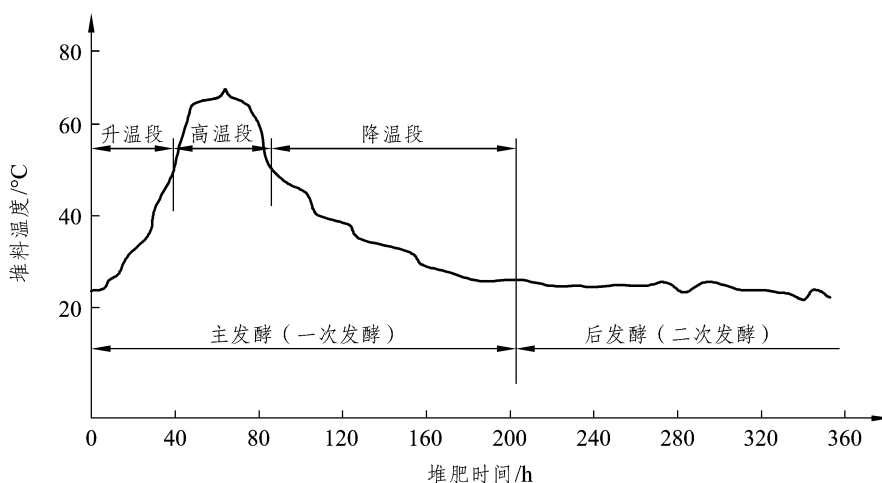


图 5-2 堆料在堆肥过程中温度的变化

(3) 后发酵

在主发酵工序中，可分解的有机物并非都能完全分解并达到稳定化状态，因此需要经过后发酵使得有机物进一步分解，变成比较稳定的物质，最终得到完全腐熟的堆肥产品。后发酵可在封闭的反应器内进行，但在敞开的场地、料仓内进行的较多。此时，通常采用条堆或静态堆肥的方式。物料堆积高度一般为 1~2 m，露天时需要有防止雨水流入的装置，后发酵有时还需要进行翻堆或通风。后发酵

期间的长短，取决于堆肥的使用情况，通常在 20~30 d。

(4) 后处理

经过二次发酵后，物料形状变细，体积也明显减少了。然而，城市生活垃圾堆肥时，在前处理工序中还没有完全去除的塑料、玻璃、金属、小石块等杂物依然存在。因此，还需要一道分选工序以去除这些杂物，根据需要，有时还要进行破碎处理，以获得符合要求的高质量的堆肥产品。

(5) 脱臭

在整个堆肥过程中，因微生物的分解，会产生有味的气体，也就是通常所说的臭气。常见的臭味气体有氨、硫化氢等。为保护环境，需要对产生的臭气进行脱臭处理。去除臭气的方法有投加化学除臭剂、生物除臭、熟堆肥或沸石吸附过滤等。

(6) 贮存

堆肥一般在春播、秋种两个季节使用，冬、夏两季生产的堆肥常需要贮存一段时间。因此，一般的堆肥厂还需要建立一个可贮存几个月生产量的仓库。堆肥可直接贮存在二次发酵仓中，也可贮存在包装袋中。要求贮存在干燥、通风的地方。

2. 影响因素

影响堆肥化过程的因素很多，这些因素主要包括通风供氧量、含水率、搅拌

和翻动、温度、有机质含量、颗粒度、碳氮比、碳磷比、pH 值和腐熟度等。

(1) 通风供氧量

通风的目的是为好氧微生物提供活动所必需的氧，是影响堆肥效果最重要的因素之一。通风量主要取决于堆肥原料中有机物含量、有机物中可降解成分的比例、可降解系数等。

主发酵期强制通风的经验数据如下：静态堆肥取 $0.05 \sim 0.2 \text{ m}^3 / (\text{min} \cdot \text{m}^3)$ 堆料，动态堆肥则依生产性试验确定。常用的通风方式有：① 自然通风供氧；② 通过堆内预埋的管道通风供氧；③ 利用斗式装载机及各种专用翻堆机翻堆通风；④ 用风机强制通风供氧。后两者是现代化堆肥厂采用的主要方式，两者常配合起来使用。工厂化堆肥时，一般通过自动控制装置反馈和控制通风量。由于需氧量与物料水分和温度密切相关，故可利用堆肥过程中堆温的变化进行通风量的自动控制；也可利用耗氧速率与有机物分解程度之间的关系，通过测定排气中氧的含量（或 CO_2 含量）来进行控制，排气中氧的适宜体积浓度值是 $14\% \sim 17\%$ ，可以此为指标来控制通风供氧量。

(2) 含水率

微生物需要不断吸收水分以维持其生长代谢活动，水分是否适当直接影响堆肥发酵速度和腐熟程度，所以含水率是好氧堆肥的关键因素之一。含水率过高，水就会充满物料颗粒间的空隙，使空气含量减少，而由好氧向厌氧转化，温度也

急剧下降；如果含水率过低，将使堆肥的反应速率降低。可以通过向物料中加入高含水率的其他废弃物或直接加水分以调解含水率。综合好氧堆肥的各种影响因素，可以得到最适合含水率范围为 50% ~ 60%，最佳含水率为 55%。

(3) 搅拌和翻动

物料最初的翻动和搅拌对于调解含水率至关重要。搅拌还能使物料内部营养物质和微生物的分布更为均匀。在好氧堆肥化工艺中，为了保持物料内部的好氧环境，搅拌和翻动乃是重要的操作环节。由于搅拌频率取决于含水率、废物特性和通风量等多个因素，因而很难以通过公式来计算，一般根据不同的堆肥情况确定。例如，对于物料含水率为 55% ~ 60%，堆肥时间为 15 d 的一个堆肥系统，建议在第三天进行第一次翻动。然后，应该每隔一天翻动一次，总共翻动 4 ~ 5 次。

(4) 温度

对于堆肥化系统而言，温度是影响微生物活动和堆肥工艺过程的重要因素。堆肥化过程中温度的变化受供氧状况以及发酵装置、保温条件等因素的影响。堆肥工程中温度的控制十分必要，在实际生产中往往通过温度-通风反馈系统来进行温度控制。

(5) 碳氮比 (C/N)：微生物的生长不仅需要一定量的碳、氮元素，还对碳氮比有一定要求，有机物被微生物分解速度随碳氮比而变化。研究表明，城市生活垃圾堆肥的最佳碳氮比为 (26 ~ 35) : 1。当堆肥物料的碳氮比不在此范围内

时，需通过添加其他物料进行调节。

(6) 有机质含量

有机质含量的高低影响堆料温度与通风供氧要求。如有机质含量过低，分解产生的热量不足以维持堆肥所需要的温度，既影响无害化处理，也影响堆肥成品的肥效；如果有机质含量过高，则给通风供氧带来困难，有可能产生厌氧状态。研究表明，堆料最适合的有机物含量为 20% ~ 80%。

(7) pH 值

微生物的生长需要适宜的环境条件，适宜的 pH 值可使微生物有效地发挥作用，而 pH 太高或太低都会影响微生物的活动，进而影响整个堆肥过程。一般认为 pH 值在 7.5 ~ 8.5 时，可获得最大堆肥速率。当堆肥原料的 pH 值不在此范围内时，常添加其他物料进行调节。例如，当 pH 值较低时，可添加石灰以提高 pH 值。

(8) 其他影响因素

颗粒度：颗粒尺寸即颗粒度的大小对通风供氧有重要影响。研究表明，堆肥物料颗粒的平均适宜粒度为 12 ~ 60 mm。

碳磷比 (C/P)：除了碳和氮之外，磷也是微生物必需的营养之一，它对微生物的生长也有重要的影响。堆肥原料适宜的碳磷比为 (75 ~ 100) : 1。

腐熟度：目前还没有一种比较完善且标准的堆肥产品腐熟度的测定方法。但可通过以下指标或方法对堆肥产品的腐熟度进行估计，包括：堆肥产品的温度、

可降解有机物的含量、残余有机物的含量、氧化还原电位的升高、毛壳菌属的生长、含氧量的增加以及淀粉-碘测试等。

(三) 堆肥的分类

1. 条垛式系统

条垛式是堆肥系统中最简单最古老的一种。它是将堆肥物料以条垛式堆状堆置，在好氧条件下进行发酵。垛的断面可以是梯形、不规则的四边形或三角形。条垛式堆肥一次发酵周期为 1~3 个月 (图 5-3)。

该系统的优点是：所需设备简单，成本投资相对较低；翻堆时堆肥易于干燥，填充剂易于筛分和回用；长时间的堆腐使产品的稳定性较好。但条垛式系统的缺点也比较明显：占地面积大，堆腐周期长，需要大量的翻堆机械和人力，同其他堆肥系统相比，该系统需要更加频繁的监测才保证通风和温度要求。



图 5-3 条垛式系统

2. 强制通风静态垛系统

条垛式系统堆肥时产生强烈的臭味和大量的病原菌，研究人员在条垛式系统加上通风系统，成为强制通风静态垛系统。它能更有效确保高温和病原菌灭活。它不同于条垛式系统之处在于堆肥过程中不是通过物料翻堆而是通过强制通风方式向堆体供氧。强制通风静态垛系统常用于湿度较大的物料或混有城市固体废物的物料堆肥。在此系统中，在堆体下部设有一套管路，与风机相连。穿孔通风管道可置于堆肥场地表面或地沟内，管路上铺一层木屑或其他填充料，使布气均匀。然后在这层填充料上堆放堆肥物料，成为堆体，在最外侧覆盖上过筛或未过筛的堆肥产品进行隔热保温（图 5-4）。

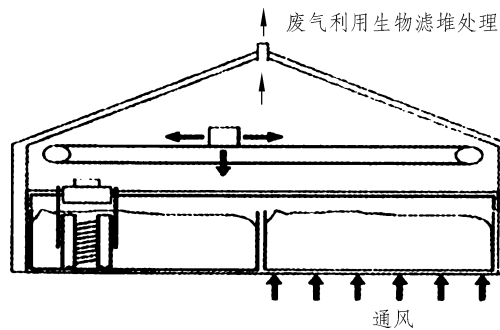


图 5-4 强制通风静态垛系统

强制通风静态垛系统的优点是：设备投资较低；与条垛式系统相比，温度及通风条件得到更好的控制；堆腐的时间相对较短，一般为 2~3 周；填充料较少，占地较少；产品稳定性好，能更有效地杀灭病原菌及控制臭味。但是通风静态垛

系统易受气候条件的影响。

3. 反应器系统

反应器堆肥系统，是将堆肥物料密闭在反应器，即发酵装置内，控制通风和水分条件，对物料进行生物降解和转化，也称发酵仓系统。

同条垛式系统、强制通风静态垛系统相比，反应器堆肥系统设备占地面积小，能进行很好的过程控制；堆肥过程不受气候条件的影响；可对废气进行统一收集处理，解决臭味问题，防止对环境的二次污染；可对热量进行回收利用。但也存在不利因素：首先是对堆肥的投资和运行、维护费用很高，其次是堆肥周期短，堆肥的产品会有潜在的不稳定性。

(四) 堆肥的质量标准

我国还没有正式出台堆肥质量标准，可参照欧盟堆肥质量标准。

在欧洲各国，肥料在数量、要求和限值等方面的质量标准各不相同。在奥地利、德国、荷兰、西班牙、瑞典自愿的和法定的肥料标准是根据重金属含量划分的。在奥地利、比利时、丹麦、德国、意大利、西班牙和瑞典，原材料类型起决定作用。在澳大利亚、德国、卢森堡和西班牙，是用腐熟度来确定划分等级。在奥地利和德国，是按照应用划分肥料的类型。

1. 重金属含量

重金属含量见表 5-1。

表 5-1 欧洲肥料标准的重金属限值

单位：mg/kg

国家	质量标准	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
奥地利	有机废物管理条例等级 A	1	70	150	0.7	60	120	500
比利时	农业部	1.5	70	90	1	20	120	300
丹麦	农业部	0.4	—	1000	0.8	30	120	400
德国	有机废物管理条例类型 II	1.5	100	100	1	50	150	400
爱尔兰	拟定标准	1.5	100	100	1	50	150	350
卢森堡	环保部	1.5	100	100	1	50	150	400
荷兰	等级“标准肥料”	1	50	60	0.3	20	100	200
西班牙	等级 A (草案)	2	100	100	1	60	150	400
瑞典	RVF 质量要求	1	100	100	1	50	100	300
英国	TCA 质量标志	1.5	100	200	1	50	150	400
瑞士	联邦管理条例 OHW	1	100	100	1	30	120	400

2. 有机污染物

目前，只有丹麦关注堆肥中的有机污染物，并且有明确限制标准。其他国家发现的有机污染物程度都很低，并未对污染情况进行分析。

3. 卫生要求

在奥地利，每当一家堆肥厂刚运行不久或每次设备的重大更新之后，都要对堆肥处理过程进行监控。在正常的废物分解过程中，堆肥物料的温度必须在 4 d

内达到 64 °C。

在德国，选择的堆肥过程必须使产品满足卫生要求。堆肥厂必须能够证明卫生的有效性，这通常可通过记录每天的温度实现。在敞开的堆肥处理系统中，需要 2 周超过 55 °C，或 1 周超过 65 °C。在封闭系统中 1 周超过 60 °C 就够了。在新的《德国有机废物管理条例》(BioAbfV—1998 年 10 月) 中，要求采用直接和间接的过程控制方式以及终端产品检测 (检测是否有沙门菌) 对有机废物处理产品进行流行病菌和植物病菌的清除。

比利时是最先制定相关的卫生标准的国家之一。丹麦也制定了两种标准化的工艺类型来保证卫生，堆肥需要在 55 °C 以上停留 2 周以上，消毒要保证在 70 °C 停留 1 h。因为堆肥厂技术的变化，荷兰在 1998 年制定了一项新的卫生规定，替代了之前的每个堆肥厂的保证卫生的办法新规定的一般工艺参数为：堆肥至少 8 周，其中 4 周进行供氧，翻堆 2 次，50~60 °C。荷兰独立的认证机构 (KIWA) 监督必要的工艺参数和严格实施。

今后欧洲的卫生标准和要求预计会得到推广。基于此，德国新的堆肥管理条例的最新修订稿要求每隔 2 年对整个堆肥厂进行卫生检测。奥地利可能效仿并且根据新堆肥法令的草案计划对销售点的堆肥包装实施进一步的卫生控制。

4. 其他质量方面

达到对重金属、有机污染物限制、卫生要求及其他要求，是颁发证书（荷兰）或肥料质量标准（奥地利、比利时、德国、瑞典）的前提条件。

（五）好氧堆肥的应用实例

银川市污泥堆肥处理工程实例：银川市污水处理厂采用强制静态通风发酵装置处理脱水污泥，其流程见图 5-5。经水分调节后的脱水污泥进入好氧静态堆肥装置，好氧发酵成为性状良好的腐殖颗粒，然后按照不同农肥标准添加一定比例的氧、磷、钾等化肥原料，通过粉碎、搅拌后进入造粒装置，成型后经干燥、筛分成为成品，成品包装后入库或出售。

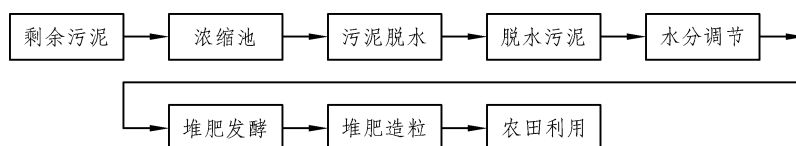


图 5-5 污泥处理和处置流程

工程采用银川市污水处理厂的脱水污泥，其含水率为 79.83%，挥发性有机物含量为 49.12%（干基）。为使污泥适于堆肥，需对其含水率进行调节。首先采用自然晾晒降低含水率，再添加调理剂，基本可以达到进入堆肥装置的含水率（55%~60%）的要求。所用调理剂为牛、羊、鸡粪；谷物加工产生的麸皮和谷糠；20 mm 长的农作物秸秆、造纸厂的麦秆等。调理剂按 5~8 kg/t 污泥（含水率 60%左右）的量配比。堆肥垛规模为 59.0 m×4.5 m×2.4 m，堆肥垛底部有 4 个曝气棒及布气板，

分别采用 $0.79 \text{ m}^3 / (\text{min} \cdot \text{m}^3)$ 、 $1.3 \text{ m}^3 / (\text{min} \cdot \text{m}^3)$ 两种通风量。

一次发酵完成后，将出料翻堆、混匀，使微生物重新接种，然后进行二次堆肥发酵，从而使在一次发酵中未分解完全的一些较难分解的有机物得以继续分解。二次发酵采用室内平地堆积，堆高 1 m，堆长 2 m，堆宽 2 m。生污泥的大肠菌值在 $10^7 \sim 10^9$ ，蛔虫卵数在 3800 ~ 37 000 个/kg，经过在发酵池中 7 天的高温发酵，出料的大肠菌数 $\leq 10^2$ ，蛔虫卵为 0，完全可以达到无害化的效果。

上述堆肥产物可以作为有机复混肥的添加辅料，其投加率一般为 5% ~ 10%。在常用的复混肥圆盘造粒生产线中，物料要经过混合、粉碎、成型、烘干、筛分等多个工艺段。在烘干段成型的肥料要在 $95 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘烤约 20 min，确保进一步杀灭残存的病原微生物。

二、固体废物的厌氧发酵

(一) 厌氧发酵原理

厌氧发酵，也叫厌氧消化，是废弃物在厌氧条件下通过厌氧微生物的代谢活动而被稳定化，同时伴有甲烷和 CO_2 产生的过程。

厌氧发酵是实现有机固体废物无害化、资源化的一种有效的方法。厌氧消化通过人为控制，加速有机物质的稳定，使有机废弃物无害化；还可通过厌氧分解

产生沼气，获得可再生的能源，实现有机废弃物的资源化。

至今关于厌氧发酵的生化过程有三种见解，即两段理论、三段理论和四段理论。两段理论、三段理论较为人们熟知，本书主要介绍四段理论。图 5-6 为有机物厌氧发酵的理论。

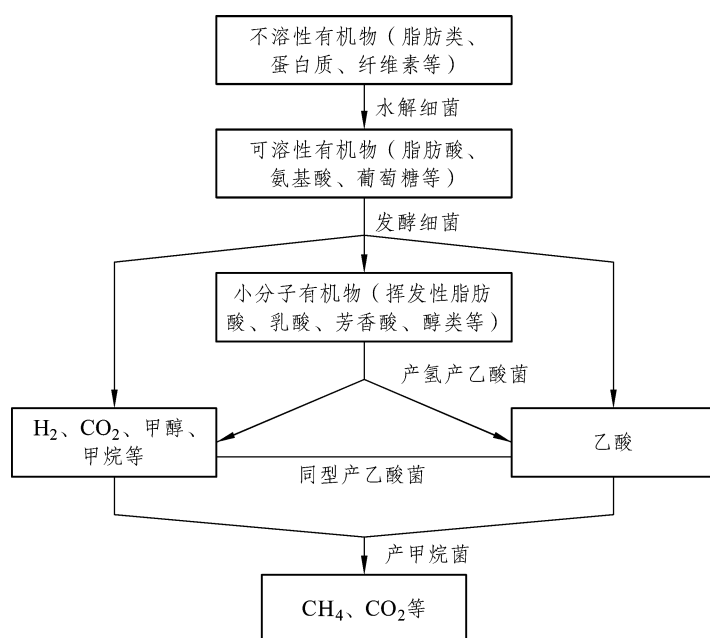


图 5-6 有机物厌氧发酵理论

1. 水解阶段

水解是复杂的非溶解性的聚合物被转化为简单的溶解性单体或二聚体的过程。高分子有机物因分子量巨大，不能透过细胞膜，因此不能为细菌直接利用。有机物厌氧分解菌产生胞外酶将大分子有机物水解为能够被微生物利用的小分子有机物。在厌氧分解菌的作用下，多糖分解成单糖；蛋白质转化成肽和氨基酸；

脂肪转化成甘油和脂肪酸。

水解过程通常较缓慢，影响水解速度与水解程度的因素很多，包括水解温度、有机质在反应器内的保留时间、有机质的组成、有机质颗粒的大小、pH 值、氨的浓度、水解产物的浓度等。

2. 发酵阶段

在发酵阶段，水解阶段产生的小分子化合物在发酵细菌的细胞内转化为更简单的、以挥发性脂肪酸为主的末端产物。因此，这一过程也称为酸化阶段。与此同时，发酵细菌也利用部分物质合成新的细胞物质，因此未酸化废物厌氧处理时产生更多的剩余污泥。

3. 产乙酸阶段

发酵阶段的末端产物（挥发性脂肪酸、乳酸、芳香酸等）在产乙酸阶段进一步转化为乙酸、氢气、碳酸、甲醇、甲酸以及新的细胞物质。

4. 产甲烷阶段

产甲烷阶段，产甲烷菌通过两个途径将产乙酸阶段的产物转化为甲烷、二氧化碳和新的细胞物质。一是利用乙酸产生甲烷，二是利用氢气和二氧化碳生成甲烷。在一般的反应器中，大部分的甲烷是由乙酸直接分解而来的。

需要指出的是，上述四个阶段并不是间隔性发生，而是瞬时连续发生的。有些文献中常把这四个阶段简化为两个阶段，酸性发酵阶段（包括水解、酸化和产乙酸阶段）和甲烷发酵阶段（包括产甲烷阶段）。

（二）厌氧发酵影响因素

影响厌氧发酵过程的因素有很多，其中主要有厌氧条件、消化温度、pH值、营养物质、接种物、有毒物质和搅拌等。

1. 厌氧条件

厌氧消化是有机物在无氧条件下被微生物分解与细胞合成的生物学过程。这些微生物主要包括产甲烷菌和不产甲烷菌两大类。产酸阶段的微生物大多数是厌氧菌，需要在厌氧的条件下才能把复杂的有机物质分解成简单的有机酸等。而产气阶段的产甲烷细菌是专性厌氧菌，氧对产甲烷细菌有毒害作用，因而需要严格的厌氧环境。

2. 温 度

厌氧消化可在较广泛的温度范围内进行（4~65℃）。一般来说，在一定范围内，温度愈高微生物活性愈强。低温时，虽然厌氧消化也可进行，但消化的效率低、速度慢、产气量少。甲烷菌对温度的急剧变化非常敏感，温度上升过快或出

现很大温差时会对产气量产生不良影响。所以厌氧消化过程还要求温度相对稳定，一天内的温度变化保持在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 内为宜。

3. pH 值

厌氧微生物适宜在弱碱性环境生长，它的最佳 pH 值范围是 6.8~7.4。在厌氧消化过程中，消化液的 pH 值是变化的。但厌氧微生物具有保持中性环境、进行自我调节的能力，因此，在 pH 值变化不大时，微生物可通过自身进行 pH 值的调节；但当 pH 值变化过大、微生物自我调节功能不起作用时，就需要通过添加酸性或碱性物质加以调节，常用的 pH 调节剂有石灰等。

4. 营养物质

厌氧消化过程本质上是微生物的培养、繁殖过程，待消化的有机废物是微生物的营养物质。在厌氧消化过程中，各种微生物需要不断地分解有机物，从中吸收营养和获得生命活动所需的能量。因此，有机废物中含有的营养物质的种类和数量就显得非常重要。微生物生长所必需的营养成分主要包括碳、氮、磷以及其他微量元素等。除了需要保持足够的营养“量”之外，还需要保持各营养成分之间合适的比例，为微生物提供“足量”且“平衡”的养分，一般认为，厌氧消化原料合适的碳氮比为 $(20 \sim 30) : 1$ ，磷含量（以磷酸盐计）一般要求为有机物量的 $1/1\ 000$

为好。

除了常量营养成分外，在消化物料中添加少量有益的化学物质，也有助于促进厌氧发酵，提高产气量和原料利用率。研究表明，在消化液中添加少量的硫酸锌、钢渣、碳酸钙、炉灰等，均可不同程度地提高有机物的分解率、产气量和甲烷含量。

5. 接种物

厌氧消化中菌种数量的多少和质量的好坏直接影响厌氧反应。反应器中厌氧微生物的数量和种类不够时，则需要从外界人为添加微生物。这种含有丰富厌氧微生物的活性污泥或发酵液等即是通常所说的“接种物”。添加接种物可有效提高消化液中微生物的种类和数量，从而提高反应器的消化能力，加快有机物的分解速度，提高产气量，还可使开始产气的时间提前。

6. 有毒物质

固体废物中含有多种废弃物，成分非常复杂，其中含有一些对微生物有毒性或对其生长活动有抑制作用的物质。这些毒性物质的存在会对厌氧消化产生不利的影响，严重时可导致厌氧消化系统无法运行。

7. 搅 拌