

# 高浓度有机废水厌氧发酵产甲烷的高效启动策略

马 阳

新疆朗新明机电工程有限公司 新疆乌鲁木齐 830000

**摘 要:** 本文深入探讨了高浓度有机废水厌氧发酵产甲烷的高效启动策略。首先介绍了厌氧发酵产甲烷的基本原理和过程,分析了高浓度有机废水厌氧处理的特点和挑战。然后详细阐述了从接种物的选择与预处理、底物的特性与调整、反应器的启动条件优化以及过程监测与调控等多个方面的高效启动策略。通过这些策略的综合应用,旨在提高厌氧发酵系统的启动效率,缩短启动时间,增强系统的稳定性和产甲烷性能,为高浓度有机废水的有效处理和能源回收提供理论依据和实践指导。

**关键词:** 高浓度有机废水; 厌氧发酵; 甲烷生产; 启动策略

## 引言

随着工业的快速发展,高浓度有机废水的排放量日益增加。这类废水含有大量的有机污染物,若未经有效处理直接排放,将对环境造成严重污染。厌氧发酵技术作为一种高效的废水处理方法,不仅能够有效降解有机污染物,还能产生清洁能源——甲烷,实现环境效益与经济效益的统一。然而,高浓度有机废水厌氧发酵产甲烷过程的启动阶段往往面临诸多困难,如启动时间长、系统易酸化、微生物适应期长等问题,制约了该技术的广泛应用。因此,研究高浓度有机废水厌氧发酵产甲烷的高效启动策略具有重要的现实意义。

### 1. 厌氧发酵产甲烷的基本原理

厌氧发酵产甲烷是一个复杂的微生物过程,主要包括水解、酸化、乙酸化和产甲烷四个阶段。在水解阶段,复杂的大分子有机物在胞外酶的作用下被分解为小分子的溶解性有机物,如糖类、氨基酸和脂肪酸等。酸化阶段,产酸细菌将水解产物进一步转化为挥发性脂肪酸(VFAs)、醇类、氢气和二氧化碳等。乙酸化阶段,乙酸菌将丙酸、丁酸等VFAs转化为乙酸、氢气和二氧化碳。最后,产甲烷菌利用乙酸、氢气和二氧化碳等底物产生甲烷。

这四个阶段相互关联、相互影响,任何一个阶段的失衡都可能导致整个厌氧发酵系统的失败。在高浓度有机废水的厌氧处理中,由于底物浓度高,反应过程中容易积累大量的VFAs,导致系统pH值下降,抑制产甲烷菌的活性,从而影响产甲烷效率。

## 2. 高浓度有机废水厌氧处理的特点和挑战

### 2.1 高浓度有机负荷

高浓度有机废水的COD含量通常较高,这意味着单位体积废水中含有大量的有机物,对厌氧反应器的处理能力提出了很高的要求。在启动阶段,过高的有机负荷可能导致微生物无法及时适应,从而引发系统的酸化和失稳。例如,当有机负荷超过微生物的代谢能力时,产酸过程会加速,而产甲烷菌对底物的利用速度相对较慢,导致VFAs大量积累,打破厌氧发酵的平衡。

### 2.2 营养物质失衡

高浓度有机废水中往往存在营养物质失衡的问题,例如碳氮比过高,缺乏微生物生长所需的某些微量元素。碳氮比过高会使得微生物在合成细胞物质时氮源不足,影响细胞的正常生长和代谢。同时,缺乏微量元素如铁、锌、钴等,会影响微生物体内一些关键酶的活性,进而导致厌氧发酵过程的不顺畅。

### 2.3 抑制性物质

一些高浓度有机废水中可能含有抑制性物质,如重金属离子、有毒有机物等。这些物质在较低浓度下就可能对厌氧微生物的活性产生抑制作用,阻碍厌氧发酵产甲烷的启动和运行。重金属离子可以与微生物细胞内的蛋白质、酶等生物大分子结合,改变其结构和功能,使酶失活。有毒有机物如酚类、苯类化合物等,会影响微生物的细胞膜通透性和代谢途径,抑制微生物的生长和繁殖。

### 3. 高浓度有机废水厌氧发酵产甲烷的高效启动策略

#### 3.1 接种物的选择与预处理

接种物是厌氧发酵启动的关键因素之一。选择活性高、适应性强的接种物能够显著缩短启动时间。常见的接种物来源包括厌氧消化污泥、污水处理厂剩余污泥等。在选择接种物时,应优先考虑与处理废水水质相近的污泥,以提高微生物对底物的适应性。例如,处理食品加工废水时,选择来自食品加工废水处理厂的厌氧污泥作为接种物,其微生物群落可能已经适应了类似的有机物成分,能够更快地开始降解底物。

对接种物进行预处理可以进一步提高其活性。例如,通过加热、超声、化学处理等方法可以破坏污泥的结构,释放出胞内的酶和微生物,增加微生物与底物的接触面积。加热预处理可以改变污泥中微生物的细胞膜结构和酶的活性,在适当的温度下(如 50 – 60℃处理一定时间),可以激活一些嗜热微生物,提高其代谢活性。超声处理则通过超声波的空化效应,破碎污泥颗粒,使内部的微生物释放出来,增强微生物与底物的相互作用。化学处理可以使用一些表面活性剂或氧化剂,改善污泥的表面性质,促进微生物的生长和代谢。

此外,对接种物进行驯化也是一种有效的预处理方式。将接种物在含有目标废水的环境中进行逐步培养,使微生物逐渐适应高浓度有机废水的特性,提高其对底物的降解能力。驯化过程可以采用逐步增加废水浓度的方式,让微生物有足够的时间适应新的环境条件,同时筛选出能够高效降解目标废水的微生物菌群。

#### 3.2 底物的特性与调整

了解底物的特性对于优化厌氧发酵过程至关重要。在启动前,应对高浓度有机废水的水质进行全面分析,包括 COD、BOD、碳氮比、pH 值、重金属离子和有毒有机物含量等。根据分析结果,对底物进行适当调整。

对于碳氮比过高的废水,可以通过添加含氮物质(如尿素、铵盐等)来调节碳氮比,使其达到适宜微生物生长的范围(一般为 20 – 30:1)。同时,也可以考虑添加一些富含微量元素的物质,如微量元素溶液,以满足微生物生长的需求。例如,在废水中添加适量的硫酸亚铁、硫酸锌等化合物,补充微生物生长所需的铁、锌等元素。

此外,还可以通过稀释废水的方式降低有机负荷,避

免在启动初期对微生物造成过大的冲击。但稀释倍数需要根据实际情况进行合理控制,既要保证微生物能够适应底物浓度,又不能过度稀释导致处理效率低下。对于含有抑制性物质的废水,可采用物理、化学或生物方法去除或降低抑制性物质的浓度,减轻其对微生物的抑制作用。物理方法如吸附、沉淀等可以去除部分重金属离子;化学方法如氧化还原反应可以将有毒有机物转化为相对无害的物质;生物方法如利用特定的微生物菌群对抑制性物质进行降解或转化。

#### 3.3 反应器的启动条件优化

##### 3.3.1 温度

温度是影响厌氧发酵产甲烷的重要因素之一。不同的微生物菌群在不同的温度范围内具有最佳的生长和代谢活性。根据温度范围,厌氧发酵可分为低温(15 – 25℃)、中温(30 – 40℃)和高温(50 – 60℃)发酵。在启动阶段,应根据所选用的微生物菌群和实际情况选择合适的温度。一般来说,中温发酵具有较高的处理效率和稳定性,应用较为广泛。保持反应器内温度的稳定是确保厌氧发酵正常进行的关键,可通过加热装置或保温措施来实现。例如,采用水浴加热或电加热的方式维持反应器内温度在设定值附近,同时使用保温材料对反应器进行包裹,减少热量散失。

##### 3.3.2 pH 值

产甲烷菌对 pH 值的变化非常敏感,适宜的 pH 值范围通常为 6.5 – 7.5。在高浓度有机废水厌氧发酵过程中,由于 VFAs 的积累,容易导致系统 pH 值下降。因此,在启动阶段需要密切监测 pH 值,并通过添加碱性物质(如碳酸氢钠、氢氧化钠等)来调节 pH 值,维持系统的酸碱平衡。同时,也可以考虑采用一些缓冲体系来增强系统的 pH 缓冲能力,减少 pH 值的波动。例如,在反应器中添加一定量的碳酸氢盐缓冲溶液,当 VFAs 产生导致 pH 值下降时,缓冲溶液可以中和酸性物质,稳定 pH 值。

##### 3.3.3 水力停留时间(HRT)

水力停留时间是指废水在反应器内的平均停留时间。在启动初期,适当延长 HRT 可以增加微生物与底物的接触时间,有利于微生物对底物的适应和降解。随着反应器的启动和微生物活性的提高,可以逐渐缩短 HRT,以提高反应器的处理能力。但 HRT 过短可能导致底物不能充分被降解,影响产甲烷效率。例如,在启动的前几周,可以将 HRT 设置为 15 – 20 天,让微生物有足够的时间适应底物并建立稳

定的菌群结构。之后,根据处理效果和微生物活性,逐步将HRT缩短至10-12天。

### 3.4 过程监测与调控

在厌氧发酵产甲烷的启动过程中,实时监测关键参数并进行有效的调控是确保系统稳定运行的重要手段。需要监测的参数包括COD、VFAs、pH值、产气量、甲烷含量等。

通过监测COD的去除率可以了解反应器对有机物的降解能力;监测VFAs的浓度和组成可以判断发酵过程是否正常,当VFAs浓度过高时,可能预示着系统即将发生酸化;监测pH值可以及时调整系统的酸碱平衡;监测产气量和甲烷含量可以评估产甲烷效率。

根据监测结果,采取相应的调控措施。例如,当VFAs浓度升高、pH值下降时,可以通过减少进水量、增加接种物量或添加碱性物质来调节;当产气量下降或甲烷含量降低时,可能需要检查温度、营养物质等条件是否适宜,并进行相应的调整。此外,还可以通过监测微生物群落结构的变化,了解微生物的生长和代谢情况,为优化调控策略提供依据。例如,采用高通量测序技术分析微生物群落组成,及时发现优势菌群的变化,针对不同菌群的需求调整运行参数。

除了上述常规监测和调控手段外,还可以利用一些先进的技术和方法来优化厌氧发酵过程。例如,采用在线传感器实时监测反应器内的各项参数,实现自动化控制;运用数学模型对厌氧发酵过程进行模拟和预测,提前制定应对策略,提高系统的稳定性和可靠性。

### 4. 案例分析

某食品加工厂产生的高浓度有机废水,COD含量约为10000mg/L,碳氮比为35:1。采用厌氧反应器处理该废水,为实现高效启动,采取了以下策略:

选择附近污水处理厂的厌氧消化污泥作为接种物,接种量为反应器有效容积的30%。对接种物进行了为期10天的驯化,驯化过程中逐渐增加废水的比例。同时,在废水中添加了适量的尿素,将碳氮比调整为25:1。

反应器启动初期,将温度控制在35℃,pH值维持在7.0左右,HRT设置为10天。在启动过程中,每天监测COD、VFAs、pH值、产气量和甲烷含量等参数。随着启动进程的推进,逐渐调整HRT和有机负荷。

经过30天的启动运行,反应器的COD去除率达到80%以上,产气量稳定,甲烷含量达到65%左右,系统实现了

高效启动并稳定运行。

## 5. 发展趋势与展望

### 5.1 技术创新方向

随着对环境保护和能源需求的不断增长,高浓度有机废水厌氧发酵产甲烷技术将朝着更高效、更稳定的方向发展。在技术创新方面,一方面,新型反应器的研发将成为重点。例如,通过改进反应器的结构设计,提高微生物与底物的混合效率,增加传质效果,从而提升厌氧发酵的整体性能。另一方面,微生物强化技术也将得到更多关注。利用基因工程技术对厌氧微生物进行改造,提高其对高浓度有机废水的耐受性和降解能力,或者筛选和培养具有特殊功能的微生物菌群,优化微生物群落结构,有望进一步提高产甲烷效率。

### 5.2 与其他技术的集成

未来,高浓度有机废水厌氧发酵产甲烷技术将更多地与其他处理技术进行集成。与好氧处理技术结合,可以实现对废水更彻底的处理,降低出水的有机物含量,达到更高的排放标准。同时,与膜分离技术集成,可以有效分离发酵产物,提高甲烷的纯度,并且可以实现微生物的截留,维持反应器内较高的微生物浓度,增强系统的稳定性。

### 5.3 政策支持与市场前景

随着环保政策的日益严格和对清洁能源的需求增加,高浓度有机废水厌氧发酵产甲烷技术将迎来更广阔的市场前景。政府在推动节能减排、鼓励清洁能源发展等方面的政策支持,将为该技术的推广应用提供有力保障。同时,企业对降低废水处理成本、实现资源回收利用的需求也在不断增长,这将促使更多的企业采用厌氧发酵产甲烷技术处理高浓度有机废水。

## 6. 结论

高浓度有机废水厌氧发酵产甲烷的高效启动是一个复杂的系统工程,需要综合考虑接种物、底物、反应器条件以及过程监测与调控等多个方面。在实际应用中,应根据不同废水的特性和处理要求,灵活运用这些高效启动策略,以实现高浓度有机废水的有效处理和能源回收。未来,还需要进一步深入研究厌氧发酵微生物的代谢机制和群落结构,开发更加先进的启动技术和调控手段,推动高浓度有机废水厌氧发酵产甲烷技术的不断发展和完善。

### 参考文献:

[1]周鑫,赵瑞强,韩晋.优化C/N促进高浓度含氮有机

- 废水同步产甲烷、硝酸盐短程还原耦合厌氧氨氧化 [J/OL]. 水厌氧处理性能及机理研究 [D]. 湖南大学, 2023.  
中国环境科学, 1-9 [3] 朱明. 高浓度有机废水厌氧发酵反应动力学的神经网络求解方法 [J]. 工业用水与废水, 2021, 52(01): 31-35.
- [2] 聂文凯. 壳聚糖 / 磁铁矿复合材料强化高浓度有机废