

搅拌对沼气发酵的影响

苏宜虎¹, 陈晓东², 马洪需¹ (1. 安阳工学院机械系, 河南安阳455000; 2. 河南省南阳市宛城区农业局能源站, 河南南阳473100)

摘要 分析了搅拌对污泥特性的影响, 探讨了结壳形成的原因, 指出农村沼气发酵的最佳方式为两步发酵法。

关键词 沼气发酵; 搅拌; 结壳

中图分类号 S216.4 文献标识码 A 文章编号 0517 - 6611(2007) 28 - 08961 - 02

Effects of Stirring on Biogas Fermentation

SU Yi-hu et al (Department of Mechanics, Anyang College of Technology, Anyang, Henan 455000)

Abstract The effects of stirring on sludge characteristics were analyzed and the reasons for the formation of encrustation were discussed. It was pointed out that the optimum mode for the rural biogas fermentation was two-step fermentation process.

Key words Biogas fermentation; Stirring; Encrustation

早在20世纪30年代, 罗国瑞在《瓦斯库》中指出, 为避免发酵原料沉淀凝结之“弊”, 须在“库”内设置搅木, 以搅动“库”中原料。搅拌可以大幅度提高沼气产气效率已是不争的事实, 但目前由于对搅拌在沼气发酵中的作用还未完全了解, 因而根据发酵原料和发酵工艺选择最优的搅拌工艺参数尚缺乏可靠的依据; 加之沼气发酵原料来源复杂, 人们对其物理性能了解还不充分, 对现有各类搅拌器作用于这些料液中的水力性能和搅拌效果还缺乏比较标准。所以, 进一步了解沼气发酵微生物的生命习性和特征, 研究搅拌对沼气发酵机理的影响规律, 确定制取沼气最有效的搅拌手段, 对沼气发酵具有重要意义。

1 沼气发酵微生物的生长习性

1.1 产生气泡 在生长过程中, 产甲烷细菌细胞中有气泡产生。这可能是产甲烷细菌共有的特性。Zinder S.H. 等在分离高温甲烷发酵菌 CALS 1 菌株时, 发现与孙氏甲烷杆菌相似的现象, 即细菌细胞中有气泡。在其他古细菌中, 包括一些中温的巴氏甲烷八叠球菌菌株以及嗜盐细菌, 也有气泡。虽然不能肯定所有的中温发酵细菌的细胞中都有气泡, 但从发酵器中得到的所有富集物都有气泡。气泡的功能可能是起漂浮作用。CALS 1 菌株细胞在生长结束时会产生更多的气泡。这表明漂浮很可能是 CALS 1 菌株对营养物质耗竭的一种反应。当产甲烷细菌得不到足够的营养时, 其细胞内会本能地产生气泡, 并漂浮, 藉以“找”到其所需的营养。Zinder 等对分离出 CALS 1 菌株的厌养生物反应器作完全搅拌(250 r/min), 发现气泡就不能用来漂浮了。但是, 污泥中类似于甲烷发酵细菌的细胞常有大量的气泡。这说明气泡是沼气发酵微生物生长的一个重要特性。

1.2 附着生长 产甲烷细菌有在固体介质表面附着生长的习性。当发酵器内有固体介质时, 首先是营养基质和微生物在介质上吸附, 微生物逐渐增殖, 并依靠胞外聚合物等粘性物形成微生物聚合体^[1], 形成生物膜或颗粒污泥。在试验装置内加入絮状厌氧污泥和活性炭, 在中温无搅拌条件下 18 d 内可快速完成污泥的颗粒化^[2]。另外, 反应器内所形成的颗粒污泥主要是以颗粒活性炭为核心、厌氧细菌在其表面附着生长形成的。由于厌氧微生物具有附着生长的习性, 各种高

效厌氧消化器应运而生。

1.3 流动性 无论是絮状还是颗粒活性污泥都有随料液涌动而流动的性质。利用这个性质, 可以大致分离共存于发酵器底部的活性污泥和沉渣。

2 搅拌对沼气发酵微生物的影响

所谓沼气工程搅拌就是沼气池内的料液在外力作用下形成某种特定的运动形式。这种“特定的运动形式”不但直接影响料液在池内的分布, 而且直接影响沼气发酵细菌在池内的分布以及细菌的形态和生命形式。各种有关搅拌对沼气发酵微生物影响的描述都是正面的。也许, 这里有被忽视的负面影响。

2.1 搅拌可能对沼气发酵微生物产生的负面影响 有的搅拌方式如机械搅拌和液流搅拌可能会引起压力或发酵器内局部压力的增加。有研究表明, 发酵器内压力过高或处于变压状态对产气有一定的影响。农业部成都沼气科学研究所的一项研究(表1)表明, 压力过高或压力的动荡都将对沼气发酵不利。这种不利的影响可能是微不足道的, 要远小于搅拌给它带来的正面影响。

表1 沼气压力和产气量的关系

组别	沼气压力 kPa	产气量 m ³	百分比 %
1	0 ~5.88	179.59	100
2	1.96	191.66	106
3	0	212.09	118

采用压缩沼气所进行的气搅拌能明显提高产气量。但是, 根据生化反应原理, 甲烷是沼气发酵的终产物, 甲烷的加入势必抑制甲烷化的进程。也许这种抑制作用较小。而沼气中二氧化碳的压入, 可能使氢分压降低, 从而大大加速甲烷化进程。

2.2 搅拌对厌氧活性污泥形态的影响 在有沼气循环下, 反应器内原有颗粒污泥在 2 d 内几乎全部解体, 解体后的絮状污泥仍具有良好的活性和沉降性能; 增加负荷继续运行一段时间后, 絮状污泥与活性炭又能重新形成颗粒污泥^[2]。不同的搅拌强度既能毁膜, 又能成膜, 并且决定了生物膜的厚度和污泥颗粒的大小。研究表明, 一定的水力条件和营养物浓度等最终会决定颗粒污泥个体的大小, 其粒径在一定范围内呈正态分布^[3]。颗粒污泥是在水力筛选的作用下形成的。颗粒污泥的沉降性能与颗粒污泥的大小、密度、温度以及水

力学特性有密切的关系。

2.3 搅拌对厌氧活性污泥活性的影响 产甲烷细菌在营养缺乏时会产生气泡而上浮。搅拌可以破坏这种漂浮作用,并使细菌在料液的紊流状态下尽快获得营养。细菌的附着生长习性使其在发酵器内大部分以生物膜的形式存在^[1]。生物膜厚度受控于有机负荷率和水力条件。此时,膜内的传质过程是沼气发酵的限速步骤。微生物在种群上是共生的。在一定搅拌强度内,搅拌能够有效改善反应器内的混合传质效果,强化微生物之间的生物链,从而提高污泥的活性。但过烈的搅拌可能会危及细菌的生存。有人认为,搅拌的速率不能超过 5 m/s ^[4],因为这是微生物生命的极限速率。另外,由于搅拌器以及水流的剪切作用、固体原料与污泥颗粒以及污泥颗粒之间碰撞和摩擦作用等,会使生物膜脱落或使颗粒污泥破碎而影响其沉降性能,但对污泥的活性影响不大。

3 沼气发酵的搅拌机理

3.1 固体有机质的沼气发酵 在以农作物秸秆、杂草、禽畜粪便等为原料进行沼气发酵时,在无搅拌的情况下,发酵料液明显地分为3层,即上层为结壳层,中层为清液层,下层为沉渣层。大多数研究认为,搅拌是通过打破料液分层现象,增加微生物与原料的接触面,均匀发酵温度和料液浓度,从而提高产气率。实际上,搅拌的主要作用在于打破结壳层。由于微生物的自适应性,如漂浮、附着生长、流动性等均可使微生物适应料液分层现象,只是产气率较低。而结壳层的形成是影响沼气发酵的主要障碍。

3.1.1 结壳问题。当给沼气池装料时,由于装料时原料与接种污泥之间以及原料液与发酵器之间的冲撞摩擦等,会使接种污泥呈细小颗粒状分布于发酵器中。当料液分层现象形成后,一部分污泥粘附在上层浮渣和漂浮的原料之上;一部分悬浮于清液层;大部分则沉淀在发酵器底部,也自然分为3层。在结壳层,由于纤维素的水解速度小于产酸和产甲烷速度,附着生长性的微生物会首先吸收动物粪便中的可溶性营养生长繁殖,并在悬浮的惰性介质表面形成生物膜。随着水解作用的加强,甲烷化进程进一步活跃。Marris 和 Jewell 在研究纯纤维素粒状有机物时发现,水解反应主要是由悬浮微生物完成而不是附着微生物^[1]。悬浮微生物和附着微生物在结壳层构成统一的食物链。胞外酶反应产生的溶解物质被附着微生物吸收,而附着微生物的分布又直接影响胞外酶的产生。当在水环境中形成的键能抵御水解作用时,生物膜会在固体原料表面生长。生物膜本身是被胞外粘性物包围或粘附在介质表面的微生物的聚合物,膜厚度的增加主要依赖于产生的胞外聚合物而不完全是微生物数目的增加^[5]。生物膜过厚将产生2个结果:膜内微生物会因为不能及时得到营养而自溶,漂浮性增加;膜与膜之间会相互粘连,影响通透性。在反应器底部,营养消耗殆尽的细小微生物会产生气泡而上浮并聚集在结壳层下部;产生的沼气也会因为结壳层通透性的降低而在结壳层下部积聚,二者都将导致结壳层上浮。位于液面之上的原料及生物膜则在厌氧的气室中缩水、变硬,形成坚硬的结壳。随着结壳层下部气泡和沼气的增多,结壳层逐渐上浮,坚硬的结壳逐渐增厚。多年的观察发现,常温下,以人畜粪便为主要发酵原料的沼

气池,如果没有破壳措施,1年后结壳的厚度为 $18\sim 25\text{ cm}$;以杂草稻草为主要发酵原料的沼气池,1年后结壳厚度为 $25\sim 35\text{ cm}$ 。结壳的形成导致池内产生的沼气集聚受阻,有效容积和贮气室减小,原料利用率降低,产气量减少。结壳严重时,往往会使一座沼气池变成病池、废池。

3.1.2 搅拌对固体有机质发酵的影响。研究表明,在发酵器中,处于悬浮状态的主要是水解细菌和产酸细菌,附着生长的主要是产甲烷菌,而待水解发酵的也正是处于漂浮状态的秸秆等固体原料。上层的水解产物以其浓度梯度为动力向外扩散,使产甲烷菌自然获取营养。而搅拌能以强制扩散的方式使产甲烷菌尽快获取营养,从而加快产气速度。但是,在搅拌条件下,完全混合状态的固体有机质发酵不可能在发酵器内滞留较多的活性污泥,因为破碎的颗粒污泥很容易随大、小出料而流失。如果搅拌工艺操作不当,那么新鲜原料也很容易随出料而流失。因此,对于采用连续或半连续的农村沼气发酵工艺,目前报道的有关“强回流”、生物搅拌、棍棒手动搅拌等搅拌手段所起的作用也主要是破壳,因为其搅拌的强度较小,虽起到一定的传质效果,但其强度不可能打破料液分层现象,达不到强化传质的要求。如果能够防止结壳,那么搅拌也许不是最重要的。只要保持结壳层在液面之下,且沼气能够顺利逸出,就能有效防止结壳,如采用“休池”的方法或在方形池内设置压浮导渣板。尽管如此,搅拌对沼气发酵所起的作用还是不能忽视的,特别对于大中型沼气池,适度的搅拌可以使新旧料液混合均匀,使微生物与营养物质充分接触,促进生化反应;可以使得固体物质在料液中分散、悬浮,增加与微生物的接触面,促进这些物质的消化,同时还可避免这些物质沉积或浮面而结壳;可以消除料液浓度和温度的不均匀现象;可以改变发酵器内料液中物相的关系。

3.2 搅拌对可溶性有机物发酵的影响 对于可溶性有机物的发酵,现多采用第2代和第3代消化器。这类消化器的共同特点是在反应器内能够形成并积累高浓度、高活性的厌氧污泥,同时反应区内有机物与活性污泥的相对运动使其达到很好的混合传质效果。由于该类消化器的效率与传质效率密切相关,因此搅拌的主要作用是强化传质。发酵采用的温度越高,微生物消耗有机质的速度就越快,传质作用就越突出,特别是采用沼气循环进行的搅拌能够明显提高产气率。这是因为沼气循环可以加快反应器内溶液中的溶解氢由液体向气体传递,能够有效降低反应体系中的氢分压^[6],从而促进甲烷化进程。如,四川乐至酒厂在 $2\ 000\text{ m}^3$ 高温发酵器中,采用沼气循环搅拌,在10次对比试验中产气量提高 56.32% 。

4 沼气发酵搅拌工艺的选择

对于可溶性废水的厌氧消化,现多采用沼气循环搅拌。由于运行经验较多,在此不再赘述。值得注意的是,结构简单、效率高、能耗低的穿流式搅拌器^[7]在沼气发酵应用的报道中未见到。

对于固体有机质沼气发酵的搅拌,其目的主要是产生均匀的组成,促进生化反应,改变物相之间的关系。对于易于漂浮的固体有机质,采用机械式搅拌也许是较好的选择。在

(上接第8962页)

厌氧发酵罐中的机械搅拌器主要有轴向和径向推进两种形式。轴向推进更适用于以秸秆、杂草、禽畜粪等为原料的沼气发酵,因为它能有效防止物料漂浮;在发酵搅拌过程中轴流浆比径向圆盘涡轮浆具有传质率高、搅拌功率低、混合效果好等优点^[8]。从节能和搅拌效果角度来看,机械搅拌(特别是导管式)适宜于卵形发酵器^[9]。

固体有机质沼气发酵的搅拌会产生一对难以调和的矛盾,即对于连续或半连续发酵工艺来讲,会导致污泥和新鲜原料的流失;但如果不搅拌,则传质速度难以提高。解决这一矛盾的较好方法是采用两步发酵法。有人认为,两步发酵割裂了微生物之间的依存关系。这种认识是片面的。事实上,在无搅拌的条件下,悬浮的水解和产酸细菌与漂浮的固体原料主要是在发酵器的上部完成水解,沉降性能良好的活性污泥是在底部完成甲烷化的,而中间的清液层则起到为甲烷菌传递营养、解除水解菌反馈抑制的通道作用。两步发酵法实际上模拟了整个发酵过程,即两步发酵是通过在酸化池深化原料的预处理度而加快产气速度的。采用两步发酵至少有以下好处:解决了出料难和结壳两大难题;可以很方便地采取有效措施加快水解反应速度,从而提高整体反应速度创造条件;甲烷化池能够使用高效节能的第2代或第3代消化器,加快甲烷化进程。

5 结语

搅拌是沼气发酵工艺中的重要操作单元。搅拌装置是整个沼气发酵工艺的高耗能装置。搅拌工艺设计恰当与否,不仅关系到实际发酵效果,而且会影响整体工艺的经济性。但是,搅拌工艺又是理论研究尚不成熟的一种单元操作,新的搅拌理论体系尚未建立^[7]。所以,关于沼气发酵搅拌工艺的研究值得业内人士更多的关注。

参考文献

- [1] 温军杰,胡勤海,陈欢林.厌氧流化床生物膜形成及脱落研究进展[J].中国沼气,2004,22(2):12-16.
- [2] 李建平,左剑恶.沼气循环厌氧颗粒污泥床反应器的运行特性[J].中国沼气,2006,24(3):6-10.
- [3] 李克勋,许智华,张振家.水力作用对颗粒污泥形成的影响[J].中国沼气,2003,21(1):12-14.
- [4] 徐曾符.沼气工艺学[M].北京:农业出版社,1981.
- [5] GARCIA MORALES J L, ROMERO L I, SALES D. Influence of operational conditions on biofilm specific activity of an anaerobic fluidized bed reactor[J]. Water Sci Tech, 2003,47(5):197-200.
- [6] JEAN CLAUDE F, SERGE R G. Impact of liquid to gas hydrogen mass transfer on substrate conversion efficiency of an upflow anaerobic sludge bed and filter reactor[J]. Enzyme Microb Technol, 1995,17(12):1085-1086.
- [7] 刘静,向群,王能勤.新型穿流式搅拌器的搅拌机理分析及实验研究[J].西南交通大学学报,1999,34(3):295-299.
- [8] 胡长鹰.轴流式生化搅拌器的研制进展[J].食品与机械,2001,30(5):33-34.
- [9] 牛学义.卵形污泥消化池及其搅拌系统的选择[J].中国给水排水,1999,15(15):59-61.