

气 沼 外 国

第 三 集

科学技术文献出版社重庆分社

7K6

国外沼 气

第三集

农 牧 渔 业 部 沼 气 办 公 室
中 国 沼 气 协 会 编 辑
中国科学技术情报研究所重庆分所
科 学 技 术 文 献 出 版 社 重 庆 分 社 出 版
重 庆 市 市 中 区 胜 利 路 91 号
新 华 书 店 重 庆 发 行 所 发 行
科 学 技 术 文 献 出 版 社 重 庆 分 社 印 刷 厂 印 刷

开本: 787×1092毫米1/16 印张: 5.50 字数: 15 万

1984年12月第一版

1984年12月第一次印刷

科技新书目: 91—247

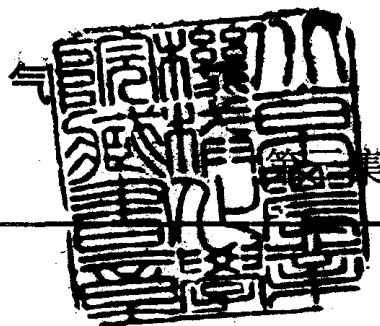
印数: 4000

书号: 16176·77

定价: 0.90 元

国外沼气

一九八四年



目 录

总 论

厌氧过程	Kerby F. Fannin 等 (1)
沼气生产的方法和比较	E. C. Price (10)
欧洲各国开发利用生物质进行沼气发酵的研究现状	E. J. Nyns等 (16)
厌氧消化工艺参数的定义和分析测量方法的建议	F. Colin等 (24)

农业沼气

猪粪厌氧消化的动力学分析及其与设计的关系	Y. R. Chen (29)
温度对粪尿厌氧消化的影响的动力学	S. Hashimoto (35)
固体分离预处理对奶牛粪便产沼气的影响	K. V. Lo等 (41)
添加剂对发酵原料生产沼气的影响	D. J. de Waart (46)
猪粪的厌氧消化: 200m ³ 全搅拌或消化器的实验	Ch. Aubart (49)
牛粪经沼气发酵后对绵羊的营养价值	K. K. Saxena 等 (51)

工业沼气

用固定化的高温产甲烷菌使富含有机酸的废水产甲烷	Tadashi Matsunaga (54)
污水和低浓度废水的厌氧处理	G. Lettinga (58)
蔬菜罐头工业废水的厌氧消化	Jean-Noel Morfaux (67)
用厌氧滤器处理制药废水	E. F. Sachs (74)
消化污泥中酚类化合物的厌氧生物降解	S. A. Boyd等 (83)

厌氧过程

Kerby F. Fannin等

概 述

关于生物量和废物转化能量的研究及实际应用, Klass¹ 曾撰文介绍过美国的现状。该文讨论了美国资金积累主要来源的预算设想。Sheaffer²阐明了,应用农业废物作为厌氧消化原料,将有助于解决环境污染问题,由此还能够产生大量的能量和肥料。他指出,将每年产生的60%的粪便和大约 400×10^6 公斤的乳清废水进行厌氧消化,就能收到年产值高达130亿美元的经济效益。Colleran³等综述了处理含高或低浓度可溶性有机物的废水的各种厌氧消化器的设计。着重谈了用厌氧过滤器来处理农业废物。并且列出了代表性系统运转和经济收益的数据。

微生物学

分类和鉴定: 从中温废水消化器中分离到了一个产甲烷菌的新种,被称为索氏丝状甲烷菌 (*Methanotherix soehngensis*)⁴。这个分离物很类似于丝状菌,早期被鉴定为索氏甲烷杆菌 (*Methanobacterium soehngensis*),并且称之为“胖杆菌”或“乙酸细菌”。已经描述了这种分离物的一些特性,包括最适生长条件、动力学数据、抗生素和抑制物的作用以及底物特异性。Huber⁵等从由地热加热的海底沉积物中分离并鉴定了一株新的产甲烷菌,称为热无机营养甲烷球菌 (*Methanococcus thermolithotrophicus*)。从猪粪消化器中分离到130株细菌,其中革兰氏阳性细菌

占优势。初步将它们分为如下几个属:消化链球菌属 (*Peptostreptococcus*)、真杆菌属 (*Eubacterium*)、拟杆菌属 (*Bacteroides*)、乳杆菌属 (*Lactobacillus*)、消化球菌属 (*Peptococcus*)、梭菌属 (*Clostridium*)和链球菌属 (*Streptococcus*)、另外还有两群菌未确定其种属⁶。这些细菌的主要发酵产物有乙酸、丙酸、琥珀酸、乳酸和乙醇。Miller⁷等从9份人粪样品中取5个来进行富集培养,观察到产生了甲烷。每个产甲烷的集富培养物都含有在形态学与免疫学特征方面类似于斯氏甲烷短杆菌 (*Methanobrevibacter smithii*) 的微生物。有一种新的平板形产甲烷菌,称为 *Methanoplanus limicola*,是从一个容纳钻井废物的沼泽地中分离到的⁸。这种微生物在 H_2-CO_2 或甲酸中生长,并且需要乙酸。

Miller和Wolin⁹报道,从产甲烷的人类中分离到的产甲烷菌,在形态、生理、免疫学等特征上都和斯氏甲烷短杆菌 (*Methanobrevibacter smithii*) 相同。这些产甲烷菌能在由不产 CH_4 的粪便中抽提的物质制成的培养基中生长。这说明提供这些粪便的个体中的这些产甲烷菌,并不因为缺乏营养或存在抑制因子而使其生长受到抑制。已经采用了一种新的培养基来改善从猪粪消化器中分离到的细菌的生长¹⁰。在这种培养基中需要添加消化器的排放液,这表明这些微生物的生长需要还不完全清楚。

新型抗血清制品,使我们能够采用抗体探针来对23株几乎包括所有属和种的产甲烷菌进行免疫学分析¹¹。证实各科产甲烷菌之间不存在交叉免疫反应。描述过从甲酸甲烷

杆菌 (*Methanobacterium formicicum*) 中得到的可溶性甲酸脱氢酶的一些性质¹²。此酶被纯化了71倍,得率为35%。有人发现热自养甲烷杆菌 (*Metanobacterium thermoautotrophicum*) 的生长以及把CO₂还原成甲烷都需要钠¹³。这种依赖性与钠的表现 K_s (大约为1mM) 是呈双曲线关系的。Stupperich和Fusch¹⁴用标记的CO₂证实热自养甲烷杆菌存在着以自养方式同化CO₂的途径。用巴氏甲烷八叠球菌 (*Methanosarcina barkeri*)¹⁵ 的细胞悬液和在生长中的细胞研究了含标记碳的甲醇或者CO₂的掺入,根据这些研究,分析了与细胞碳的合成和甲烷生长过程有关的一碳原子的代谢转移。在以H₂-CO₂-甲醇为底物生长期间,上述两种同位素都会掺入主要细胞组分中去。已有证据说明,在这些底物代谢期间,有两碳的中间产物合成。Krzycki¹⁶等用巴氏甲烷八叠球菌 (*Methanosarcina barkeri*) 研究了由乙酸或甲醇及两者的混合物转化为甲烷的代谢。乙酸代谢不受甲醇的分解代谢阻遏,在这两种底物上,对数生长期的细胞产率都是相似的。

纤维素水解: 采用厌氧消化过程,从经加热处理的混合培养物中得到了稳定的纤维素水解酶系统¹⁷。这个酶系统既有胞内的、也有胞外的葡聚糖酶、纤维二糖酶、木聚糖酶的活性。木材(白冷杉)70%以上的碳水化合物在分级自动水解期间都会变为可溶性物质¹⁸。已证明批式消化器和连续进料的厌氧滤器有同样的转化可溶性自动水解产物的效率,大约有26%木材的化学需氧量转化为甲烷。白杨木经过部分酸水解预处理后,由酶解葡萄糖的产率将大大增加¹⁹。在一种连续流动的反应器中,也进行过这种预处理,处理温度为162℃—222℃,酸浓度为0—15%,处理时间为3.6—12.7小时。这种对酶作用的敏感性的增加,主要是由于预处理时除去了半纤维素。

产酸过程: 考察过进料中或厌氧消化期间产生挥发酸的重要性²⁰。包含有挥发性酸

的原料逐渐左右着微生物培养物的热力学,使其趋向于某种环境状态,在这种环境状态下,专性的质子还原细菌也保持着一个相应的水平。这样,当由于挥发性酸增加而造成干扰时,消化器就能够被赋予较大的稳定性。在实验室规模的废水污泥消化器中,增加乙酸镁的浓度到4000mg/升,能促进气体产生,乙酸镁浓度为1000mg/升的浓度时,促进作用最大²¹。当丙酸和丁酸与乙酸的比率不超过80:1时,产气率良好,更高比率时,气体产生就会受到抑制。Schwartz和Keller²²研究了热醋酸梭菌 (*Clostridium thermoaceticum*) 将葡萄糖转化为乙酸的过程及其对乙酸的耐受性。在理想条件下,它的倍增时间为5—7小时。游离的乙酸比乙酸盐离子或低pH值,更易抑制这种微生物。当氧化还原电位及pH值分别超过-300mV、pH6和-360mV、pH7时,这种细菌就不生长。研究厌氧消化产酸阶段的产物抑制作用,证明在葡萄糖浓度从2.5克/升增加到75克/升,稀释率从0.54减少到0.044/小时之后,生物量的产率则从16%减少到8%²³。无机营养物质浓度突然发生大的变化,能导致反应器的失效。

产甲烷过程: 对玉米秸进行半连续厌氧消化,最大的碳素转化率为78%,一级速率常数为0.045/天²⁴。在消化器中加入丁酸梭菌 (*Clostridium butyricum*) 将提高反应速率至0.053/天。供给乙酸可使一级速率常数提高到0.096/天,这就表明甲烷的产生并不是限速步骤。在热自养甲烷杆菌的细胞抽提物中加入CH₃-S-CoM可使CO₂还原成为甲烷²⁵。甲醛、丝氨酸、丙酮酸或CH₃CH₂-S-CoM也能起到同样的促进作用。巯基化合物已被肯定是CO₂还原的有效抑制物。

Robinson和Tiedje²⁶研究了瘤胃液、厌氧消化污泥和湖底沉积物中H₂消耗的 Michaelis-Menten 动力学参数。在气-液界面之间物质转移的限制作用,对于瘤胃液和厌氧消化器污泥来说需要采取稀释的方法加以克服,而沉积物则不需要。在纤维素发酵期间,

瘤胃厌氧真菌和产甲烷菌的三合培养物能导致从每克分子己糖形成两克分子甲烷和两克分子 CO_2 ²⁷。这些真菌与甲烷杆菌(*Methanobacter sp.*)或与巴氏甲烷八叠球菌(*Methanosarcina barkeri*)的共培养物能分别使每克分子己糖产生0.6和1.3克分子的 CH_4 。在三培养物中,纤维素的最高降解速率比以前报道过的细菌共培养物的降解速率要快,在16天之内完全降解。

Nagase和Matsuo²⁸研究了奶粉消化器中氨基酸降解和甲烷的产生之间的相互作用。某些氨基酸通过脱氢而被降解,产甲烷菌则起着电子受体的作用。甘氨酸能减少氯仿对氨基酸代谢的抑制作用,显然它是起电子受体的作用。Boon²⁹发现在动物废物消化器中加入乙酸或 $\text{H}_2\text{-CO}_2$ 并不能改变底物的转化过程,因为产甲烷菌能够适应并转化所加入的底物。加入氢能导致乙酸库的增加。

在有硫酸盐存在时,发现产甲烷菌与硫酸盐还原菌共存于厌氧的湖沼沉积物中³⁰。在任何时间,二者竞争的结果都是产氢速率、相关菌群的大小和硫酸盐可用性的函数。在普通脱硫弧菌(*Desulfovibrio vulgaris*)和嗜树木甲烷短杆菌(*Methanobrevibacter arborophilus*)的混合培养物中,底物亲和性(K_s 值)的不同说明由 H_2 和 CO_2 形成甲烷过程受到了抑制³¹。根据利用乙酸盐的 K_s 值,提出了关于硫酸盐还原菌,即普通脱硫杆菌(*Desulfo-bacter postgatei*)的动力学理论,它对乙酸盐的利用超过了产甲烷菌巴氏甲烷八叠球菌(*Methanosarcina barkeri*)³²。还发现硫酸盐还原菌对氢、乙酸的利用超过产甲烷菌,但对甲醇、三甲胺或甲硫氨酸等化合物则竞争不过产甲烷菌³³。

厌氧过程的稳定性

关于甲烷发酵的毒性作用,已提出了三种模型来描述,以便于控制其运行和设计反应器³⁴。已证明污泥长时间滞留可缓和毒性

问题而不至于明显降低消化效果。讨论过底物抑制和细胞循环对甲烷反应器稳定性的影响³⁵。细胞循环能增加消化器中流入物的转化作用,而使其贮留时间呈线性降低。

为了防止高含量硫酸盐废水厌氧消化期间硫化氢的形成,已发明了一种新方法³⁶。这种方法采用了一群特殊的微生物,使得在有硫酸盐存在时甲烷产率最大。Varel和Hashimoto³⁷研究了含有莫能菌素、拉沙里菌素、盐霉素和avoparcin等抗生素的动物粪便对厌氧消化的影响。发现拉沙里菌素和盐霉素的影响最小,而avoparcin和莫能菌素则在初期有抑制作用,经过一段时间适应后又恢复正常。

厌氧过程的最佳化

一般方法学: 已评价过以下三种类型的沼气搅拌技术:通风管、多路连续排放嘴和底坐式扩散箱³⁸。在清水和活性消化器这两种条件下所进行的实验证明,当设计合理时,系统的每一部分都能保持一致的容量,但要控制漂浮污泥,采用连续排放嘴更为有效。Hashimoto³⁹报道过宰牛场高温废水消化器连续混合的结果,它比每天混合2小时有略为高的甲烷产率。在真空度为38厘米水柱的条件下运转,甲烷产率也可增加5%。

已证明由大肠杆菌形成的膜组分能够从各种细菌学的生长培养基中有效地除去氧气⁴⁰。这种活性是由位于细胞质膜系统中的活性细胞色素电子传递系统所引起的。运用这种膜技术,即使有少量的空气进入,也能保持无氧环境。当借助化学凝聚作用处理含高浓度胶体蛋白质和脂类的废物时,消化器效率会大大下降⁴¹。这是由于较难接近微生物或由于底物与金属凝絮物紧密结合而使底物难受酶作用所致。从有选择地研究厌氧消化得到的运行和性能数据示于表1。

附着膜反应器: 各种不同的温度、流速或合成废水的浓度对厌氧附着膜扩展床反应

表1

研究厌氧消化所得到的运行及其性能数据

原 料	温度 (℃)	负 荷 (公斤VS /米 ³ ·天)	滞留时间 (天)	甲烷产量 (米 ³ /加 入的VS 公斤数)	甲烷产气 率 (V/V 培 养物·天)	甲烷含量 (克分子 %)	挥发性固 体减少%	参考文献
城市污泥								
活性物(90%)+原始物(10%)	35	2.08	17	0.21	0.44	65	31.3	73
城市污泥								
活性物(90%)+原始物(10%)	54	3.20	11.3	0.26	0.83	65	34.0	73
城市原始污泥	35	1.6	15	0.52	0.83	69	85	76
城市固体垃圾	35	—	—	0.17	—	59.4	—	78
城市固体垃圾	35	—	—	0.12	—	66.9	—	78
城市固体垃圾	35	—	—	0.12	—	68.9	—	78
城市固体垃圾	35	—	—	0.11	—	61.8	—	78
牛奶废物	28	4.9 ^a	0.5	0.75 ^b	3.68	82	82 ^c	86
漂梨废物	35	3.5 ^a	6	0.29 ^b	1.02	60	95 ^c	84
削梨废物	35	16.5 ^a	1	0.13 ^b	2.15	—	—	48
浸绿豆水	35	2.7 ^a	5.5	0.25 ^b	0.68	55	96 ^c	84
削红萝卜废物	35	7.5 ^a	2.7	0.25 ^b	1.88	60	96 ^c	84
猪场废物	24	0.53	6	0.58	0.31	77.6	58.4	90
猪场废物	24	0.92	3	0.48	0.44	76.2	54.3	90
猪场废物	24	1.57	2	0.42	0.66	76.6	54.8	90
猪场废物	24	3.28	1	0.25	0.82	82.8	46.1	90
猪圈泥浆上层液	28	19.6 ^a	3	0.29 ^b	5.68	80.85	88 ^c	86
菜牛粪	55	16.2	5	0.29	4.70	56.6	53	87
菜牛粪(50%)+糖蜜(50%)	55	11.3	6	0.30	3.39	48	68	93
菜牛粪-稻草(两阶段)	53	13.4	5	0.22	2.96	52	41	60
青贮饲料浸出物(厌氧滤器)	28	4.7 ^a	3	0.30 ^b	1.41	84	84 ^c	86
水风信子	35	1.3	12	0.23	0.31	63.4	49.7	57
水风信子	35	1.6	15	0.19	0.30	59	44	76
水风信子/污泥	35	1.6	15	0.28	0.45	63	58	76
水风信子+百慕大牧草+ MSW*污泥混合物	35	1.3	12	0.26	0.35	63	34	57
海草(USR)	35	1.6	50	0.37	0.60	55.9	—	98
海草(USR)	35	2.4	27	0.20	0.48	47.5	—	98
海草(隔流baffleflow)	35	1.6	—	0.37	0.60	55.7	—	98
海草(STR)**	35	1.6	50	0.35	0.56	57.4	—	98
海草(STR)	35	2.4	27	0.16	0.40	48.2	—	98
百慕大草	35	1.3	12	0.14	0.19	61.4	20	57
百慕大草(加N)C:N/6.3:1	35	1.3	12	0.27	0.35	59.8	37.5	57
百慕大草(加N)C:N/12.3:1	35	1.3	12	0.21	0.27	51.8	33.7	57
百慕大草(加N+P)	35	1.3	12	0.26	0.35	60.6	38.1	57
杂种白杨(批式)	35	0.03	60	0.32	0.10	—	54	99
美国梧桐(批式)	35	0.03	60	0.32	0.10	—	57	99
黑桤木(批式)	35	0.03	60	0.24	0.08	—	33	99
木 棉(批式)	35	0.03	60	0.22	0.07	—	32	99

续前表

桉 树 (批式)	35	0.03	60	0.014	<0.01	—	<1	99
火炬松木 (批式)	35	0.03	60	0.063	0.02	—	4	99
禽 粪	35	1.60	70	0.19	0.31	54	—	92
禽 粪	35	2.21	70	0.21	0.45	54	—	92
禽 粪	35	3.18	70	0.17	0.52	54	—	92
禽 粪	35	2.71	25	0.25	0.65	54	—	92
禽 粪	35	3.12	25	0.22	0.69	54	—	92
禽 粪	35	3.05	15	0.33	1.00	54	—	92
禽 粪	35	3.77	15	0.32	1.19	54	—	92
禽 粪	35	4.38	15	0.29	1.25	54	—	92
禽 粪	35	2.72	10	0.28	0.75	54	—	92
禽 粪	35	3.81	10	0.34	1.30	54	—	92
禽 粪	35	4.60	10	0.37	1.68	54	—	92
禽 粪	35	1.95	50	0.27	0.53	62.2	—	91
海 藻						—		
<i>Tetraselmis</i> (空气干燥)	35	1.0	20	0.21	0.21	—	27	96
<i>Tetraselmis</i> (空气干燥)	35	1.9	14	0.26	0.49	—	48	96
<i>Tetraselmis</i> (空气干燥)	35	1.0	20	0.33	0.33	—	37	96
<i>Tetraselmis</i> (空气干燥, 两步法)	20/35	1.95	14	0.21	0.41	—	45	96
<i>Tetraselmis</i> (空气干燥, 两步法)	20/35	4.05	14	0.19	0.77	—	36	96
<i>Tetraselmis</i> (空气干燥, 两步法)	20/35	3.95	14	0.19	0.75	—	42	96
<i>Tetraselmis</i> (新鲜)	35	1.0	20	0.33	0.33	—	37	96
紫 球 藻	35	1.0	20	0.22	0.22	—	37	96
糖 海 带	35	1.0	20	0.25	0.25	—	72	96
淡水水网藻	35	0.9— 11.36	1.6	0.22	0.20— 2.50	—	—	96
一种栅藻(<i>Scenedesmus acutus</i>)	35	1.0	20	0.20	0.20	—	45	96
水 网 藻	35	0.9	20	0.26	0.47	—	40	96

a. 负荷: 公斤COD/米²·天b. 甲烷产率: 米³/添加的COD公斤数

c. COD的减少。

*MSW为城市固体废物

**STR为标准温度和压力

器不产生明显的影响⁴²。这种高度的稳定性应归功于反应器中细菌细胞浓度异常高和微生物滞留时间超过一年。处理化工废水的下流式固定膜反应器在24小时内能接受8倍于正常的负荷率,而在过载停止后12—48小时内又回复正常⁴³。温度从35℃降到10℃,同时负荷率从16.3降到4.1公斤VS/米²·天,对于COD的去除率没有多大影响。

提出了生物膜反应器动力学的统一模型,并应用于循环和非循环的完全混合反应器、固定床反应器和流动床反应器的稳态条件⁴⁴。这些结果证明在利用动力学、生物膜生长和反应器构造之间的相互作用决定了它们的性能而不是简单地由负载因子和动力学的关系起作用。这个模型预示流动床反应器的效果优于完全混合和固定膜反应器,因为

生物膜是均匀地分布于整个反应器的，而液体的停留方式则以塞流方式停留。为预测流动床反应器中流出物的浓度，把它作为运行条件的函数，采用了一个数学模型⁴⁵。它不同于以前的模型，生物量粒子的大小不是一个必要的输入参数，而被预定为使发酵器达到稳态的处理过程的结果。

限制生物产甲烷过程的因素已确定是产甲烷细菌特殊的低生长率、不溶性有机物的液化以及监测过程所使用的简单分析方法的局限性⁴⁶。有人建议采用附着膜反应器进行两阶段消化来打破这些限制。

Dahab和Young⁴⁷把培养基类型、孔径大小和形状确定为设计生产性厌氧滤器的重要因素。大多数COD的去除都与充填在反应器下部三分之一空间内的生物有关。不采用连续进料的方式，而是固体废物间歇进料，采用稳定的固定膜反应器，来处理浸豆和削梨废物能达到较高的负荷率和甲烷产率⁴⁸。在任何表面上，生物膜的厚度都取决于基质浓度、液流的流体剪切力和负荷率⁴⁹。基质的去除依赖于活性生物膜的厚度以及基质在生物膜中渗透的厚度。

污泥床反应器：比起固定膜反应器来，上流式污泥床反应器能够以较高的负荷率（至30公斤/米³·天）和较高的甲烷产率（6—9米³/米³·天）运转⁵⁰。然而，固定膜反应器比上流式污泥床反应器更能抵抗因温度和负荷所造成的突然冲击并且能较快地回复。现在认为，在35℃和50℃运行的厌氧滤器和污泥层反应器（sludge^{blanket} reactors）适合于处理来自废水处理厂的高温污泥水解液⁵¹。除了从污泥层反应器中有较多的污泥丢失外，这两种反应器的结构性能没有多少差别。据估测，联合使用热泵与厌氧消化，可节省处理这些废物所需能量费用的25%。具有好的沉降特性的污泥，对于启动上流式污泥层反应器是较好的接种物⁵²。在5个星期内能得到稳定的嗜热菌群，而负荷率迅速增加会导致丙酸浓度增加。Zoetemyer

等⁵³研究了制糖厂废水的厌氧酸化过程，这些废水主要含有蔗糖、乳糖和乙醇，在29℃时，以1米³的上流式反应器处理，停留时间为7.2—1小时。蔗糖在整个停留时间内都能被代谢掉，乳糖则需较长的停留时间，而乙醇则不被转化。曾经描述过一种处理富含乙酸的废物的上流式污泥层反应器⁵⁴。在有机负荷率为1.6公斤生化需氧量（BOD）/米³·天、水力停留时间为10小时的条件下，能获得最佳的产气量，且能除去70%的COD。

采用示踪研究法，确定了用于处理甜菜糖废水的30米³试验性处理装置和200米³原型上流式反应器的停留时间和液体分布⁵⁵。用停留时间分布曲线对液体流动形式作了模式描述，认为污泥床的高度为1.5—2.5米较合适。Van de Meer和De Vletter⁵⁶对上流式厌氧污泥层消化器中使用气-液污泥分离器的理论和实践，进行了详细的讨论。还讨论了估测其性能的办法。

两步反应器：对于COD较高的工业废水，采用两步消化过程的处理效果比常规的厌氧消化过程要好⁵⁷。报道了以较高的负荷率和较短的水力停留时间来增强废物的稳化作用和提高净能回收效率。发明了一种两步厌氧消化工艺，它运用了垂直的水解氧化还原状态、水平的甲烷相和利于细菌附着的一定孔径的陶瓷介质⁵⁸。这种反应器在温度为20°、30°和40℃时处理COD为800—2000毫克/升的稀废水，停留时间为2.0—5.5小时。观察到所产气体中甲烷含量高于90%，挥发性固形物降低80—90%。

有人研究过把充填床（packed-bed）反应器作为两步消化系统中的甲烷相消化器⁵⁹。利用来自接受颗粒基质的酸相消化器中流出液，在负荷率为1.9公斤COD/米³·天、水力停留时间为2.3天的条件下，甲烷产率为0.26米³/公斤COD。来自可溶性酸相消化器的流出物，在负荷率为6.1公斤VS/米³·天、水力停留时间为5.2天的条件下，甲烷相中的甲烷产率可达到0.41米³/公斤

COD。研究以 1:1 混合的牛粪:稻草产沼气的两阶段过程⁶⁰, 第一阶段是混合的, 停留时间为 1 天, 并且自身产热而从 40℃ 增加到 60℃。从这一阶段得到的流出液随即转移到第二阶段的搅拌槽反应器中, 并保持在 54℃。此过程整个的停留时间为 5 天, 甲烷产率为 0.22 米³/公斤加入的 VS, VS 减少 41%。

其它反应器: 以食品工业和饮料工业废物为原料, 比较了几种厌氧消化工艺的性能⁶¹。发现厌氧接触工艺具有较高的除去 COD 的效率, 达到 83—96%, 并且改变运行条件时它比其它方法更稳定。在 49℃ 用 170,000 米³ 大型消化器 (由 18 个圆锥形罐组成——编者) 所进行的高温厌氧消化试验证明, 其稳定性类似于温度控制范围在 0.8℃ 以内的中温消化过程⁶²。有人建议, 如果能严格控制温度, 消化器可以在 54℃—60℃ 运行。

乙醇发酵: 生产商品乙醇的可行性, 取决于产品的可用能量与为生产它所必须的能量之间的比例⁶³。为了降低从水中分离乙醇的费用, 采用了几种多糖类型的原料, 发现它们能吸收从水-乙醇混合物中的水。土豆和玉米等淀粉原料是最有效的。以玻璃纤维作为运动发酵单胞菌 (*Zymomonas mobilis*) 细胞支持物的附膜反应器, 能由葡萄糖-酵母膏溶液产生乙醇⁶⁴。在连续运行 28 天以后, 水力停留时间为 10—15 分钟, 流出液中乙醇最高浓度为 6.4%, 最大容量产率为 152 克/升·小时。

常用陶瓷作为醋酸杆菌属 (*Acetabacter*) 细菌细胞的支持物的附膜反应器研究由乙醇产生乙酸的过程⁶⁵。用海藻酸盐包埋的酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) 细胞的菌龄, 已证明是影响有效地发酵葡萄糖生产乙醇的限制因子之一⁶⁶。96 小时菌龄的酵母细胞大大优于 24—72 小时的细胞, 其产生最高乙醇产率的能力可保持一段较长的时间。

麦秸在水和固体的比例为 7:1 时, 经 170℃ 高温处理 30—60 分钟, 产生 70—82%

的纤维浆, 而用氢氧化钠浸提则产生 60% 的纤维浆和一部分半纤维素⁶⁷。纤维和半纤维液化经 *Pochysolen iamophilus* 和 *Saccharomyces evarum* 二种微生物发酵而产生乙醇, 其效率为 40—60%, 这表明在预处理期间会产生抑制物。

能量和经济价值的估算

Martin 和 Loehr⁶⁸ 估测了沼气生产和使用所需的投资水平, 从预期的效益来说, 表明投资是合算的。这些估测有助于估算特定系统所需的投资, 也有助于政府概算资助这项技术的投资水平。Chassin⁶⁹ 所进行的研究表明, 用农作物的剩余物来获取能量, 尤其是在土壤肥力减低了的地区, 由于改变了土壤肥力和社会经济平衡, 会增加农业生产体系的不稳定性。

Crawford⁷⁰ 评价了用充填床厌氧消化器处理经加温液体的经济效益, 这些液体来自一个热处理装置, 该装置以 1400 米³/天的速度处理由一个 2.1 米³/秒的废水处理厂所产生的污泥。据报道, 总投资和运行费用分别为 450,000 和每年 50,000 美元, 气体的年产值估计为 60,000 美元。还报道了采用所推荐的设计方案和运行参数, 猪粪消化器所需要的能量和投资⁷¹。这些运行参数为: 负荷率 4 公斤 VS/米³·天, 温度为 30—35℃, 停留时间为 15 天。一些消化器能提供建筑物全部的电力需求和 93% 的热量需求, 而且能以投资总额 10% 的年效益在 12 年内全部收回消化器的投资。Jackson⁷² 提供了用于土豆加工废物厌氧消化的设计方案, 并谈到了投资的经济效益。

厌氧消化方法的应用

城市废水: 90% 活性污泥和 10% 原始污泥的混合物于 54℃ 下在 8,900 米³ 大规模的高温消化器中运转, 停留时间为 11.3 天⁷³。流

出物的质量比得上用中温消化器所得到的结果,而甲烷产率和产气率(分别为 $0.26 \text{ 米}^3/\text{每公斤加入的VS}$ 和 $0.83 \text{ 米}^3/\text{米}^3 \cdot \text{天}$)高于中温消化器(分别为 $0.21 \text{ 米}^3/\text{每公斤加入的VS}$ 和 $0.44 \text{ 米}^3/\text{米}^3 \cdot \text{天}$)。它的能量需求比中温消化增加120%,完全可以由增产的气体来补偿。

采用了一种厌氧附着膜扩展床反应器处理合成废水,以便确定它是否可以用于将颗粒性有机物转化为气体⁷⁴。结果表明,在负荷率高至 $7.3 \text{ 公斤VS}/\text{米}^3 \cdot \text{天}$ 时,大约有75%的原料COD转化为气体。描述过一种厌氧-好氧联合处理方法,即ANAMET系统,用它处理各种浓度的废水⁷⁵。需要改进的地方有提高厌氧阶段的负荷率、更好地了解养料和全部物质的比率(the food-to-mass ratio)和营养需求以及为何除去难于降解的COD等。厌氧消化的基础性研究工作(baseline)是用水风信子、原始污泥和水风信子与污泥的混合物(3:1,干重)进行的,根据原料分析计算出的甲烷的理论产率分别为44、82和57次⁷⁶。由污泥得到的甲烷产率的实验值为 $0.52 \text{ 米}^3/\text{每公斤加入的VS}$,这是已报道过的最高水平。

城市固体废物: 经过处理的垃圾的产气量大大高于未经处理的垃圾。经处理的垃圾中,在3个月内约有50%可生物降解的城市固体废物(MSW)被降解。甲烷产率为 $0.14 \text{ 米}^3/\text{公斤干的MSW}$ 。影响总产气量和产气率的参数有含水量、pH、细菌群落、营养物和MSW的物料分布。容积密度或压实程度能提高甲烷产气率,但不能提高其总产气量。用分离不同原料的方法和降低颗粒大小的技术,可从四个方面取得垃圾燃料(RDF)²⁸。经酸处理颗粒变小的原料,在批式消化时产气率最低,这是因为水解作用损失了可生物降解物质的缘故。

加工废物: VS含量为5,500—25,000毫克/升的食品加工废物容易用表面积和体积比大约为 $150 \text{ 米}^2/\text{米}^3$ 的下流式固定膜反应器

来进行处理⁷⁹。甲烷产率在 35°C 时大约为 $0.25\text{—}0.3^3/\text{每公斤加入的VS}$,处理效率为60—75%。用附着膜扩展床反应器,在 35°C 、水力滞留时间为13.8—16.4小时的条件下,对乳清进行了厌氧消化。在负荷率为 $8.2\text{—}22 \text{ 公斤}/\text{米}^3 \cdot \text{天}$ 的条件下,使COD降低61—92%⁸⁰。据认为,该体系的能量平衡是:乳酪制造厂所需能量的约46%来自厌氧消化所产生的甲烷。Szendrey⁸¹等用一个体积为 $13,250 \text{ 米}^3$ 的下流式附着膜反应器来处理老姆酒厂酿酒废物,在该反应器中,装有约 $10,000 \text{ 米}^3$ 的塑料充填基质,其表面积大约有109公顷(ha)。运行费用,用气体燃料来表示,估计每产生百万千焦耳热能约为1.90美元。

厌氧氧化塘过滤系统(anaerobic lagoon-filter system)在793天后积累的污泥为加入VSS的7.76%⁸²。当温度从 10°C 升至 20°C 时,污泥的衰减率(decay rates)和污泥的积累率都成倍增加。在实验室规模所得到处理土豆加工废水的运转数据已用于设计和建造 $50 \text{ 米} \times 104 \text{ 米} \times 7 \text{ 米}$ 的原型消化器⁸³。这种消化器是由一个由膜复盖长条形土地构成,以便收集气体和控制气味。设计的COD平均除去率大约为71%,但问题是制作这种气密性封盖妨碍获得可靠的产气数据。

在实验室和小规模试验中,证明用厌氧消化来稳化绿色蔬菜罐头废物是可行的⁸⁴。COD的除去效率为90—98%,甲烷产率为每公斤加入的COD产生 $0.25\text{—}0.3 \text{ 米}^3$ 。厌氧流化床反应器常用于处理中等浓度的乳酪素乳清渗透液⁸⁵。除去效率随着有机物负荷率的增加而减少,但是每单位微生物群体的除去率则随着有机物负荷率的增加而增加。比起搅拌罐反应器系统来,其营养需求低得多,因此不需要补加氮和磷。流化床反应器运转时,挥发酸的浓度应在1,000—2,000毫克/升之间,pH值保持在6.9—8.3。

农业废物: Colleran等⁸⁶研究了猪圈泥浆、牛奶废物、青贮物的流出物、两步法消

化的稻草、NaOH 处理的稻草和青草等的厌氧滤器处理, 滞留时间为0.5—3天, 可溶性废物的COD降低可达80—88%。

利用实验室规模的收集牲口排泄物的发酵罐, 用一个无应力的消化器所达到的最大负荷率, 温度为35℃时为7公斤VS/米³·天, 55℃时为20公斤VS/米³·天⁸⁷。在55℃达到最高甲烷产气率(6.11米³/米³·天), 滞留时间为4天。发酵中得到的最高甲烷产率为0.42米³/公斤加入的VS。

建造了一个体积为283米³, 以奶牛排泄物为原料的消化器, 根据实验室批式反应器所得到的动力学参数使其运行, 可望它每年以12%的回收率产生 21.6×10^{11} 焦耳能量⁸⁸。稀释的猪圈废物的厌氧生物过滤作用表明, 在负荷率为2.5—4.0公斤COD/米³·天和水力滞留时间为1天的条件下, COD除去70—90%, 甲烷产率为0.16米³/公斤除去的COD⁸⁹。已有人提出过除去COD的动力学模型。已证明甲烷产量和固体物减少量比得上中温高效率消化器的厌氧滤器, 可有效地处理稀释的猪圈废物⁹⁰。在滞留时间为1—2天之间、负荷率为4公斤VS/米³·天到2公斤VS/米³·天之间的条件下, 观察到VS减少50%, 甲烷产率为0.45—0.62米³/公斤降解的VS。对于负荷率和滞留时间的变化, 此滤器将迅速地作出反应。

容纳稀禽粪(11.4%TS)的96.7米³消化器, 在负荷率为1.95公斤VS/米³·天时, 可望产生92%的气体⁹¹。大约总输出能量的37%需用于加热、混合和开动吸泵。关于以家禽类为原料的消化器的其它研究证明, 在负荷率为4.6公斤VS/米³·天, 滞留时间为10天的条件下, 最大的产气率为3.1米³/米³·天⁹²。能量分析表明, 在负荷率为4.4公斤VS/米³·天时所产生的气体至少有25%用于动力消耗。Hashimoto⁹³发现, 水力滞留时间和挥发性固体物负荷率相同的情况下, 装有

比例为50:50、75:50、100:0的粪和糖蜜混合物的高温消化器产甲烷率将分别是最高、中等和最低的。原料的生物降解性越高, 产甲烷率就越高。在粪中加入糖蜜, 导致流出液中氨在总氮中所占比例的减少。

有人曾就大型和小规模生物转化设备对于由干的农产品残余物生产甲烷的潜在作用作过假设⁹⁴。实验数据表明, 当固体物浓度为32%时, 产甲烷作用即达到极限, 然而水解作用却可继续进行, 到固体浓度达到约60%。在开始的污泥浓度为28%时, 200天内批式转化效率可达到可降解物的90%。还提供了系统的适用性和经济学数据。

能源作物: Samson 和 LeDuy⁹⁵评论了螺旋藻(*Spirulina*)在半连续进料的有搅拌设备的罐式反应器中的中温厌氧消化。两步厌氧消化, 上流式产甲烷消化器即采用第一步为渗滤液化, 随后的装置适合于将藻类转化为甲烷⁹⁶。发现温度和负荷对第一阶段的影响并不影响整个甲烷形成过程。6种藻类的生物产甲烷过程表明, 其甲烷产率为每公斤加入的VS产0.2—0.33米³。Stafford⁹⁷等发表了有关由能源作物和农作物废弃物生产甲烷的原型单元装置的发明摘要。有人从设备、消化器的性能和成本效果等方面评述了许多种消化器设计。Fannin等⁹⁸在研究巨藻的厌氧消化时, 发现上流式固体反应器和析流反应器甲烷产率都较高, 每公斤加入的VS达到0.37米³, 而且比一般带搅拌的罐式反应器的工艺稳定性更好。Jerger⁹⁹等证明, 杂种白杨的厌氧消化, 其甲烷产率接近于每公斤加入的VS 0.31米³。他们的研究采用了几种树, 以半连续式和批式进料两种消化器来进行, 有效降解木质素含量高的原料, 需要很长的固体滞留时间。参考文献99篇(略)。

马克森译自《Journal WPCF》, 1983, 55(6),

623—632, 程光胜校

沼气生产的方法和比较

E. C. Price

摘 要

从生物量制取沼气有各种不同的方法：如全混合法和分层法、厌氧接触工艺、上流式厌氧污泥层、生物转盘、填充塔和附着生长流化床。本文对各种方法优缺点进行了讨论，并提出了使用意见。一般说来，悬浮生长装置适用于固态物质含量高的废水，附着生长装置适用于可溶性有机物及小规模处理。要根据废水的特性、数量和产生的地点来选取发酵装置。本文对提高产气量而进行的预处理的方法和发酵温度也进行了讨论。

前 言

天然气的主要成份是甲烷，它是目前使用的一种最清洁、污染最小的燃料。美国目前能源消耗的大约25%是由天然气供给的。约有半数的家庭把天然气用于室内取暖，它还可用来开动烘干机、空调机、洗碟机，在整个的应用领域，取代了比天然气昂贵五至十倍的电力。甲烷输送管道体系包括35万哩地下高压管道和65万哩干管道，连接着4500万用户。该体系还和由多数抽光了的地下井组成的贮气系统相联接，它的容纳量要远大于目前的用气量。从生物量中产生的沼气也可输入该天然气网路中，目前俄克拉何马州的一些饲养场和加利福尼亚州的一个垃圾坑填场正在这样做。

对有机废物进行处理时，应根据所需设备的基本投资以及管理费用和通风、泵送、加热、污泥脱水等所耗能量及能否产生可供使用或出售的付产品等多种因素来选取最经济的方法。

在好氧处理中，一般使有机物通过柠檬酸循环氧化产生 CO_2 同时产生大量能量。通常，氧化的结果是细胞加速生长和发酵原料的迅速降解，同时产生大量污泥。在厌氧消

化中，原料中大量的化学能量被保存在产生的甲烷中，只有少量能量可用于细胞的生长，导致细胞生长速度缓慢，生成污泥量少。由于甲烷菌生长缓慢，因此所需的水力滞留期和细菌滞留期都比好氧消化要长。当采用细菌再循环后，即使是很稀的废水也可以进行厌氧处理，但需要建设较大的反应器，因此，必须考虑它的经济性。

一般认为废水中BOD大于3,000和COD大于4,000的情况下，采用厌氧法比好氧法在经济上较合算。如COD浓度在20,000mg/l以上，厌氧法的成本只有好氧法的25%。从经济性方面考虑，厌氧法中COD浓度的上限目前尚未确定。但当COD浓度在50,000mg/l以上时采用蒸发和回收固体的方法处理，在经济性方面可能与用厌氧法处理不相上下。

简言之，与好气法相比厌氧法的优点是：

1. 通过应用产生的甲烷，可以回收能源。
2. 可以承受高负荷的有机物。
3. 产生的污泥较少。
4. 不需要曝气，可节省能源。
5. 当负荷COD在4,000—50,000mg/l之间时，经济效益较好。

缺点是：

1. 消化器必须加热。
2. 对环境变化比较敏感。
3. 甲烷菌生长缓慢，所需滞留期较长。
4. 处理BOD含量小于 3,000mg/l 的废水时，经济上可能会不合算。

在具体情况下，进行厌氧处理和能量回收是否可能，取决于许多从属性的因素：

1. 废水的数量。
2. 废水的连续性（有些水果、蔬菜罐头，厂的废水季节性很强）。
3. 含有毒物质的废水可能需要的特殊的预处理。
4. 需要进行预处理，以提高生物降解能力。
5. 由于有些废物的物理特性而产生的一些特殊问题：如起泡沫、浮渣等。
6. 废物的运输费用。

装置的分类

厌氧消化装置可分为两类：悬浮生长式，其微生物悬浮在反应器的液体中；附着生长式，其微生物成膜状地附着在某种支持物上生长。人们根据废物的特性来选用最适宜的消化器。

悬浮生长系统(Suspended Growth Systems)

悬浮生长系统在操作方法上可分为无搅拌式(分层)、混合式、复合式。当固体物从第二级的分层反应器循环回到全混合式的第一级反应器中时，这种系统被称为“接触工艺”。上流式厌氧污泥层反应器也属于悬浮生长系统。

无搅拌（常规速率）反应器是分层的（图1），加热与否均可，固体负荷率通常在 0.03—0.10 磅 VSS/ft³/天，这是一种分批反应器，周期性地进出料，滞留期30—60天。用于乡村和农业方面的这种系统有不同的形式，将在本文“应用”部分再讨论。

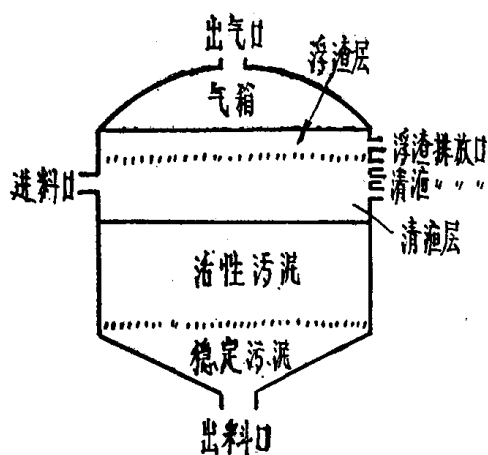


图1 标准速率（分层）消化器

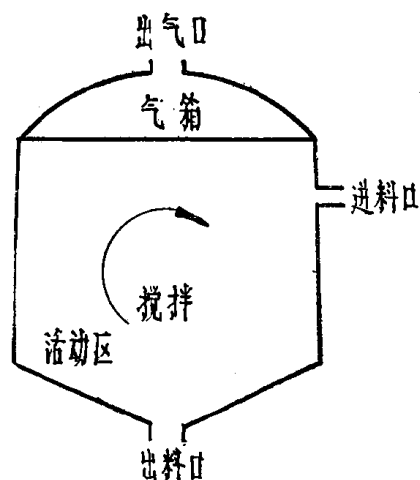


图2 高速（完全混合）消化器

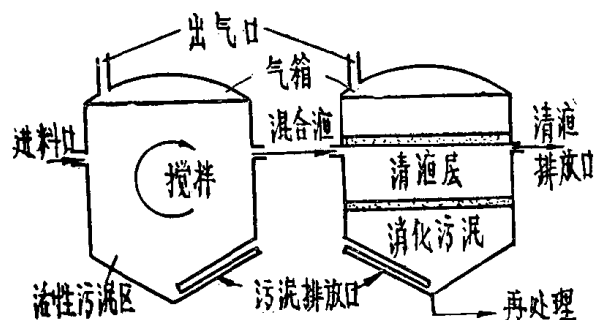


图3 两步厌氧消化器

全混合（高速）反应器，适用于高负荷 0.1—0.2 磅 VSS/ft³/天和短滞留期15—20天（图2），通常需要加热（30°—35°）和连续操作，以碳浓度计算的一般速度常数为0.086/天（无搅拌反应器为0.054/天）。串联的多级搅拌反应器（最多到40级）已被证明在短滞留期情况下能获得高的甲烷产量。全搅拌

和无搅拌反应器也可以串联使用(图3),其中分层反应器用来进行固体分离。如果将一部分沉淀的污泥再送回第一级反应罐(如在活性污泥法中那样)这便是厌氧接触工艺(图4),这种方法可以增加废物稳定的速度,提高产气量。临界固体物滞留期以10天为宜。

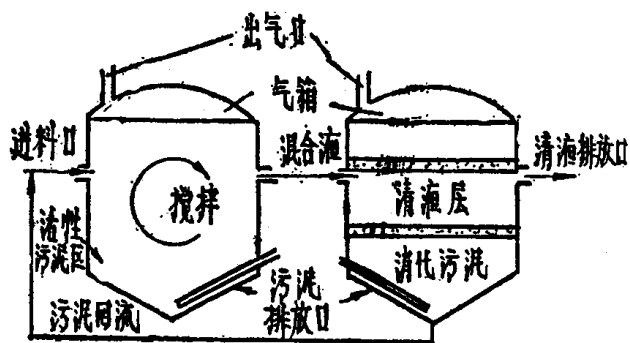


图4 厌氧接触消化器

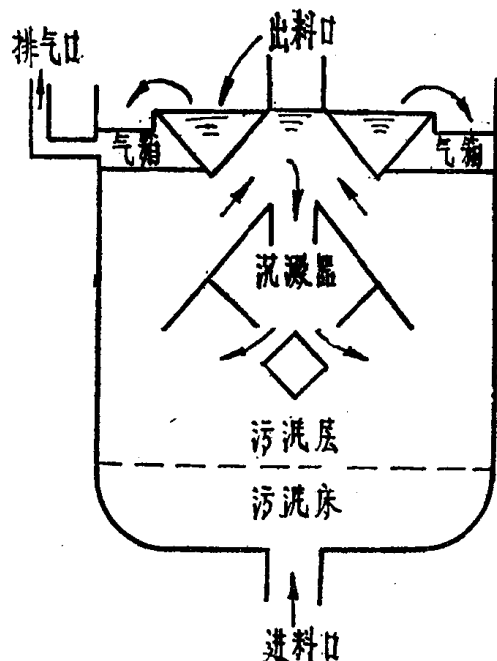


图5 上流式污泥层反应器

人们根据厌氧污泥易于沉淀的特性,发展了上流式厌氧污泥层(床)反应器(UASB)(图5)。污泥易于沉淀,或许是因为其颗粒呈卵形和大概其中含有硫化铁使密度增高的原因。这对于防止反应器出现“洗脱”是很重要的。混合是通过反应器中料液的循环和气泡的上升来进行的。沉淀器设置在反应器之内。由于沉淀器中的料液是分层流动的,滞

留期很短,可预防气体的形成。经稠化的污泥不断地被送回反应器。UASB反应器能够承受高有机物负荷和高水力负荷,而不会发生故障。但当沉淀器中水流的线速度超过了污泥的沉降速度,或当输入污泥量超过再循环污泥量时,就会出现超负荷。当负荷率为 $10-25\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{天}$,水力滞留期为5—6小时,温度为 30°C 时,去除率可以达到90%。

附着生长系统(Supported Growth Systems)

附着生长系统是反应器中的微生物作为生物质依附于反应器中的某种物质上生长。这样可以提供较长的固体(微生物)滞留时间和充分适应了的生物量,防止在水力滞留时间短的情况下出现“洗脱”。随着微生物的新陈代谢,附着的生物膜逐渐变厚,直到营养物质不能渗透到与支承物相接触的菌体上为止。这时,这部分生物膜就会脱落,并随出料液流走。因此,需要一个最后沉淀间。由于这种污泥易于沉淀,所以,沉淀间不必很大。生物膜脱落时的厚度在一定程度上可通过水力方法(剪切应力)加以控制。附着生长系统包括浸没式生物转盘、上流式厌氧过滤器和流化床。

生物转盘(图6),由许多旋转的聚乙烯波纹盘组成。为了缩小盘面上各点运动速度的差异,波纹盘直径小(50cm),但几个装置可以一起运转。直径47cm的波纹盘的典

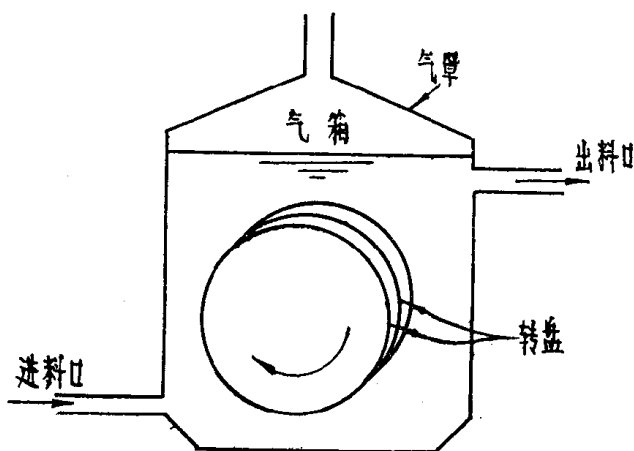


图6 浸没式(生物)转盘

型旋转速度是13rpm(转/分)。活性生物量附着在反应器壁和转盘上,其基质去除率与生物量面积成正比。这种装置已被证明能有效处理高浓度可溶性基质。建议采用的水力滞留期为4.4—8.8小时。

上流式厌氧过滤器需要为生物膜提供支承物。支承物可采用砂砾、拉西环、石灰石片、毛玻璃、聚苯乙烯珠、甚至牡蛎壳等。牡蛎壳和石灰石填充物能提高过滤器的缓冲能力。根据报导,对于COD 10,000mg/l的高浓度废物采用这种处理方法去除率好。增加水力滞留时间(HRT)可以提高有机物的去除率。当HRT为10—24小时时,COD去除率为70—80%,而当HRT为10天或10天以上时,COD去除率可达97%。通常使用再循环来增加HRT,同时也可减小冲击负荷的影响。加入表面活性剂(即非离子活性剂吐温-20),可增加产气量达40%,这可能是由于提高了从生物量中分离出气泡的能力,也可能是由于活化了细胞膜。上流式厌氧过滤器可作处理城市污水的辅助性措施,也可用于处理高浓度的可溶性商业废水。这种装置不仅可在中温范围内工作,也可在20℃—26℃的范围内工作。

流化床生物膜反应器(FBBR)是一种附着生长系统,微生物依附在能自由活动的载体颗粒上生长,形成一层微生物膜。这种反应器中单位容积内可得到的表面积比填充床或生物转盘反应器都高。废液用足以冲动介质层(由砂、木炭或合成材料构成)的速度向上流动,穿过介质层并带动其中的颗粒向上运动。设计人员所能控制的可变量,除圆筒形反应器的高度和媒介层的容许扩展面积外,只有媒介物的特性,如大小、密度等。而这些参数又反过来决定上流液的速率、填料的孔隙度和生物膜的厚度。在一定操作条件下,媒介物的大小和密度具有最佳值。太小会使填充床过度扩大,生物量的浓度降低,因而会降低原料去除率;而太大也会减少有效表面积并降低生物量浓度。在上流速率

一定的条件下,增加填料的密度可以使床膨胀减少,从而达到较高的微生物浓度,这样就能提高基质去除率。缺点是冲动较重的填充物需要花费较多的能量。

已经证明,这些装置在低温(10°—20℃)下能够达到较高的有机物去除率,而且能够在短滞留期(几个小时)、高有机物负荷(8kg COD/m³·天 以下)的条件下,处理较低浓度(COD 600 mg/l)的废水。高浓度原料有时导致填充床漂浮。这表明气态产物的扩散可能对反应速度是一个限制,因为,如果气体产生速度超过了扩散速度,就会形成气泡,使反应过程受到破坏。可以利用再循环来稀释高COD废水。同其他附着生长系统一样,FBBR要求废水中只含有少量的悬浮固体。

应 用

处理工厂污泥

污水处理场,特别是活性污泥处理装置正在大量地产生着废水污泥。最近已作出规定:废水污泥不准再向海洋倾倒,都必须再进行二次处理。这样导致污泥产量增加,必须找出一个能够被接受的处理方法。厌氧消化是提高这些污泥稳定性的方法之一,用这种方法可以消除生污泥中的臭气、病原体、腐败性和其他有害的性质。

通过厌氧消化从污泥中制取甲烷作为污水处理厂的能源,这并不是新闻。早在四十年代、五十年代在许多城市早就已广泛应用,但到六十年代,由于电力变得便宜,而逐渐被淘汰。由于好氧消化器操作方便,不易发生故障,所以一度取代了厌氧消化器。但好气消化器需要消耗能源。后来由于能源价格的上涨,使人们对污泥厌氧消化再度感到兴趣。因为产生的甲烷既能用于消化器本身加热,又能满足整个工厂大部分动力的需要。

由于高浓度污泥需要用悬浮生长系统处理,这种消化器在美国广泛应用。或单独使

用、或联合使用分层法、全混合法、接触稳定法。虽然预热处理上清液一般是返回处理厂前部，但还是建议使用上流式过滤器以减轻重点设备的负荷量。

由于污泥处理部分占废水处理场投资的30—40%和管理费用50%，因此目前还在继续进行研究，以找出更好的处理方法。污泥经过180℃30分钟的热解，可以提高对污泥的生物降解能力（可以提高产气量和减少污泥数量）改进脱水功效，控制臭味和消毒，经过热解的废液再进行厌氧发酵，由于提高生物降解能力从而增加产气量。因此可以提高净能量的产量。

在消化器中添加活性碳(45kg/天)，可以全面提高处理功效，减少氯的使用量。所用去的碳的费用比节省下来的过滤器化学添加剂、劳力和氯的费用低。人们还进行了用太阳能加热，在2—3个大气压下，厌氧和好气两个阶段联合处理的研究。

消化器产的气主要用于自身加热。据估计在温暖气候条件下，直接加热用气占产气量的大约30%。耗气量的多少取决于很多因素，包括隔热、位置、气候、曝光。虽然利用气体发动机、汽轮机或其他热源的余热可使消化器所产沼气用于其他用途，但常规的用沼气直接加热的热水热交换系统效率大约只有70%。伦敦的两个主要污水处理工厂、Beckton和Mogden，1971至1972年产气量分别为2,220,000和2,030,000 ft³/天，虽然有少量经提纯后出售，但几乎是全部用于驱动双燃料发动机或汽轮机，以开动空气压缩机和发电机。它们能为污水处理厂提供总耗能量80—90%。

在纽约的Westchester县投资83,000,000美元的Yonkers Joint处理工厂示范了使用废热和污泥气的效率。污泥气用于产蒸汽和热量并作为双燃料（92%沼气、8%柴油）发动机的燃料，这种发动机用于开动鼓风机，处理厂用去所产沼气的90%，其中10%产蒸汽，90%作为发动机燃料。这家工厂在利用

回收热量方面也做了努力。发动机的废气(1200°F)用于产蒸汽，能满足全部建筑物热量需要的20%。通过热交换器，从发动机水套和润滑油中回收的能量来给消化器加热。估计Yonkers工厂每年节省的燃料费大约为600,000美元。

畜粪

现代密集型畜牧业是将动物关在饲养场中喂养的，这里便是从动物废物中制取沼气的理想地点。虽然畜牧场上各种动物的粪便产量多少不等，但总的来看，每头猪的粪要比人的粪多得多，所以拥有一千头猪的畜牧场所遇到的废物处理问题相当于一个四千人口的城镇。根据饲料以及牲畜的种类、大小的不同，每磅干粪的产气量很不一样。动物粪便由于木质纤维素含量比人粪多，所以难于被微生物分解。据报导，家禽粪厌氧消化率为50—70%，猪粪50—60%，奶牛粪10—26%。猪、牛粪中加入NaOH进行预处理，可提高降解能力170%。这种处理要求加入大约8%的NaOH溶液（浓度为5%），让其发生反应，14天后再进行中和消化。虽然温度在中温范围以下时分解较慢，但消化过程还是令人满意的。与在一定气候条件下加温所耗能量的多少相比，大型反应器的总的经济性如何对一种设计的优劣起决定性作用。

一种叫做“Anox”的将动物废物转化为甲烷的装置估计价值为3万美元，其消化器容积为1500m³，可消化大约120m³的猪粪。气体用于发电，其效率约为1KW/hr/150头猪。固体在脱水后作肥料使用，上清液用臭氧处理。在经济性方面，与贷款96,099美元相比较，每年的副产品价值为62,250美元。

在美国俄克拉荷马(美国中南部之一州)的Guyman的产热工程，日加工牛粪500吨，不仅生产液态肥料，还产甲烷气，日产提纯到可用管道输送程度的沼气160,000ft³，而且从干固体中获牛饲料。研究表明，回收的生物量作为一种高蛋白饲料，其效果可与大豆粉相比，可作为补充饲料。