



沼气生产利用技术指南（一）

一、总则

1.适用范围。本技术指南规定了厌氧发酵及沼气、沼液和沼渣的综合利用可行技术。本技术指南适用于以畜禽粪便、农作物秸秆、尾菜等农业有机废弃物为主要原料的沼气工程和沼气池，以其他有机质为原料的沼气工程参照执行。

2.术语和定义。

（1）沼气。畜禽粪便、秸秆、尾菜等农业有机废弃物，经厌氧发酵产生的可燃气体，主要成分是甲烷，是沼气工程和沼气池的主产物。

（2）沼液沼渣。畜禽粪便、秸秆、尾菜等农业有机废弃物，经厌氧发酵产生的剩余物经固液分离后，液体部分为沼液，固体部分为沼渣，是沼气工程和沼气池的副产物。

二、厌氧发酵技术工艺及设备适用性

1.湿法厌氧发酵。湿法厌氧发

酵技术工艺主要适用于粪污混合物、污水等的处理，总固体（TS）质量分数一般在20%以下。按产酸产甲烷相可分为湿法单相反应器和湿法两相反应器。国内大部分反应器均为湿法单相反应器，根据反应器效率可分为低负荷反应系统、高负荷反应系统和高效高负荷反应系统。低负荷反应系统以厌氧消化池为代表，高负荷反应系统可以将固体停留时间和水力停留时间分离，能保持大量的活性污泥和足够长的污泥龄；高效高负荷系统在将

固体停留时间和水力停留时间相分离的前提下，使固、液两相充分接触，既能保持大量污泥又能使和活性污泥之间充分混合、接触，以达到真正高效的目的。

（1）低负荷反应系统。低负荷反应系统（图1）包括常规厌氧反应器（conventional anaerobic digestion tank, CADT）、全混式反应器（continuous stirred tank reactor, CSTR）、厌氧接触消化器（anaerobic contact digester, ACP）等。

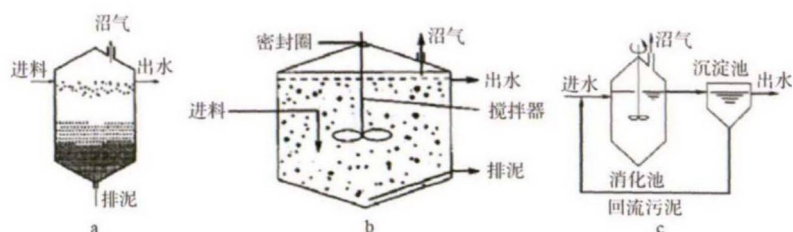


图1 低负荷反应系统

a. 常规厌氧反应器（CADT） b. 全混式反应器（CSTR） c. 厌氧接触消化器（ACP）

常规厌氧反应器 (CADT)。无搅拌装置,原料在其中呈自然沉淀状态,效率较低。常规厌氧反应器结构简单、投资小、应用广泛,适合处理高浓度、高悬浮物的有机废水,户用沼气可采用此类型。

全混式反应器 (CSTR)。全混式反应器是在常规厌氧反应器内安装了搅拌装置,效率较高,适用于高浓度及含有大量悬浮固体原料的处理,投资较小、原料适应性广,物料、温度分布均匀,原料与底物接触充分,发酵速率、容积产气率较高,但水力停留期 (hydraulic retention time, HRT) 与固体停留期 (solid retention time, SRT) 时间相同,致使反应器负荷较低。

厌氧接触消化器 (ACP)。厌氧接触消化器也是一种完全混合式厌氧反应器,反应器排出的混合液首先在沉淀池中进行固液分离,污水由沉淀池上部排出,沉淀池下部的污泥被回流至厌氧消化池内。该工艺适用于悬浮固形物 (suspended solid, SS) 浓度较高的处理,其优点是投资小、易启动、耐冲击负荷,保证了厌氧消化池内的污泥浓度,水力停留时间大大缩短,反应器的有机负荷率和处理效率较高。缺点是化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD) 去除率相对较低,出水水质也相对较差,增加后续处理工艺负担;固液分离相对困难。

(2) 高负荷反应系统。高负荷反应系统包括附着膜型消化器 (如厌氧滤器、厌氧流化床和膨胀床反应器)、上流式厌氧污泥床 (up-flow anaerobic sludge bed/blanket, UASB)、塞流式反应器 (plug flow reactor, PFR) 等。

附着膜型消化器。突出特点是微生物固着于安放在消化器内的惰性介质上,在允许原料中的液体和固体穿流而过的情况下,固定微生物于消化器内,并且在较短的HRT下阻止微生物冲出,适用于处理低浓度、低SS有

机废水。

一是厌氧滤器 (anaerobic filter, AF): 是采用填充材料作为微生物载体的一种高速附着膜型消化器,优点是不需另设分离设备和搅拌设备,可以保持较高的微生物浓度,能耗低、处理效率高、运转稳定、可承受一定的负荷变化,同时出水SS较低。缺点是投资大、填料费用高、启动期较长,微生物积累易发生堵塞和短路情况。

二是厌氧流化床和膨胀床反应器 (anaerobic fluidized bed reactor, AFBF): 是采用惰性颗粒作为微生物载体的附着膜型厌氧消化器,效率更高,优点是混合状态较好、负荷变化承受力强、负荷率高、运行稳定;缺点是支持介质易被冲出而损坏泵或其他设备,有时需要脱气装置从出水中有效地分开介质颗粒和悬浮固体,能耗、投资和运行成本高。

上流式厌氧污泥床反应器 (UASB)。上流式厌氧污泥床反应器是自下而上流动的废水流过膨胀的颗粒状的污泥床。三相分离器是厌氧消化器的关键设备,由气封、沉淀区和回流缝组成,主要功能是气液分离、固液分离和污泥回流。气体通过三相分离器分流后排出反应器,固体和液体则被阻止冲出而经回流缝回流,使SRT高于HRT,产甲烷效率明显提高,适用于处理SS含量较低的有机废水。

该工艺的的优点为除三相分离器外,消化器结构简单,负荷率高,工艺的稳定性好,出水SS含量低。缺点是投资较大,三相分离器结构较为复杂,需要有效的布水器使进料均布于消化器底部;进水要求低SS含量;在高水力负荷或高SS负荷时易流失固体和微生物,运行技术要求较高。

塞流式反应器 (PFR)。塞流式反应器是一种推流式非完全混合消化器,高浓度悬浮固体原料从一端进

入,从另一端流出,原料在消化器的流动呈活塞式推移状态。在消化器内应设置挡板和卧式搅拌器,有利于微生物与料液的接触混合,提高反应速率和运行的稳定,适用于高SS废物的处理。其优点为结构简单、能耗低、投资少,尤其适用于牛粪的消化;运转方便,故障少,稳定性高。其缺点为固体物可能沉淀于底部,影响消化器的有效体积,使HRT和SRT降低,同时需要固体和微生物的回流作为接种物;温度一致性差、效率较低,易结壳。

(3) 高效高负荷反应系统。高效高负荷反应系统包括膨胀颗粒污泥床反应器 (expanded granular sludge blanket reactor, EGSB)、内循环厌氧反应器 (internal circulation, IC)、上流式污泥床过滤器 (up-flow blanket filter, UBF)、升流式固定床反应器 (up-flow solids reactor, USR) 等。

EGSB反应器与UASB反应器的结构相似,不同的是EGSB反应器采用较大的高度与直径比和很大的回流比,适用于处理SS含量较少和浓度相对较低的有机废水。该工艺的优点是占地面积较小,运行稳定,水力停留时间短,有机负荷和处理效率高。缺点是运行稳定性受温度影响较大,投资成本较高,对废水SS含量要求严格,高速的升流速度对运行条件和控制技术要求高。

内循环厌氧反应器 (IC) 集UASB反应器和流化床反应器于一身,利用反应器内所产生沼气的提升力实现发酵料液的内循环。IC反应器高度通常可达16~25米,高径比可达4~8,适用于可生化性、SS含量较少和浓度相对较低的有机废水处理。该工艺的优点是投资成本小, HRT较短,运行稳定,上升流速大,抗冲击负荷效果好,容积负荷高。缺点是在污水可生化性差时,去除率远低于UASB;当进水水质不太稳定时,易导致出水水量、水质相对不稳定,有

时可能会出现短暂不出水现象,对后序处理工艺产生影响。

UBF反应器下面是高浓度颗粒污泥组成的污泥床,上部是填料及其附着的生物膜组成的滤料层。突出优势是反应器上部空间所架设的填料,不但在其表面生长微生物,且在其空隙截留悬浮微生物,利用原有的无效容积增加了生物总量,防止生物量的突然洗出,且由于填料的存在,夹带污泥的气泡在上升过程中与之碰撞,加速了污泥与气泡的分离,从而降低了污泥的流失。

USR反应器是一种结构简单、适用于高悬浮固体原料的反应器。原料从底部进入消化器内,与消化器里的活性污泥接触,使原料得到快速消化。未消化的生物质固体颗粒和沼气发酵微生物靠自然沉降滞留于消化器内,上清液从消化器上部溢出,可提高有机物的分解率和消化器的效率,在当前畜禽养殖行业粪污资源化利用方面有较多的应用。该工艺的优点是反应器结构简单,固体物可得到较彻底的消化,SS去除率60%~70%;停留时间较长,超负荷运行时不会造成酸化,浮渣层不易堵塞,产气效率高。缺点是易出现堵塞布水管、单管布水易短流等问题;对含纤维素较高的料液,表面易结壳。沼渣沼液COD浓度含量较高,不适宜达标排放。

(4) 湿法两相厌氧发酵反应器。湿法两相厌氧发酵工艺(图2)产酸阶段和产甲烷阶段是两个独立的处理单元,各自形成产酸发酵微生物和产甲烷微生物的最佳生态条件,发挥最大的代谢能力,使整个工艺达到最好的处理效果。该工艺主要适合尾菜等易酸化原料的厌氧发酵。

2. 干法厌氧发酵。干法厌氧发酵技术工艺主要适合于处理TS质量分数达20%~50%的废弃物。与湿法工艺相比,干法工艺适应各种来源的固体有机废弃物,可以降低运行费用,并提高容积产气能力,需水量低,产生沼液少。干法反应器主要分为连续式厌氧反应器和序批式厌氧反应器(图3)两类。连续式厌氧发酵反应器国外应用最多的为卧式推流反应器和竖式反应器。序批式厌氧反应器适合TS质量分数为30%~40%的原料,底物一次加料接种后完成消化过程。反应器设计简单,操作方便,对粗糙底物与重金属耐受性强,投资少。应用最多的是车库式反应器。

三、沼气利用技术

1. 技术路径。沼气经净化后贮存,可以直接用于发电、供热、供气等,也可提纯用于车用燃气、城镇燃气等,见图4。

2. 沼气净化。沼气净化主要是为了去除沼气中的水分、二氧化碳

和硫化氢。

(1) 沼气脱水。沼气脱水方法主要有冷凝法、吸附法、吸收法等。

冷凝法。主要是利用压力变化引起温度变化,使水蒸气冷凝。该法具有普适性,且投资和运行成本较低,冷却之前压缩沼气可进一步提高冷凝效率。冷凝法脱水效果并不能完全满足并入天然气管网的要求,可通过沼气净化技术(变压吸附、脱硫吸附)弥补。

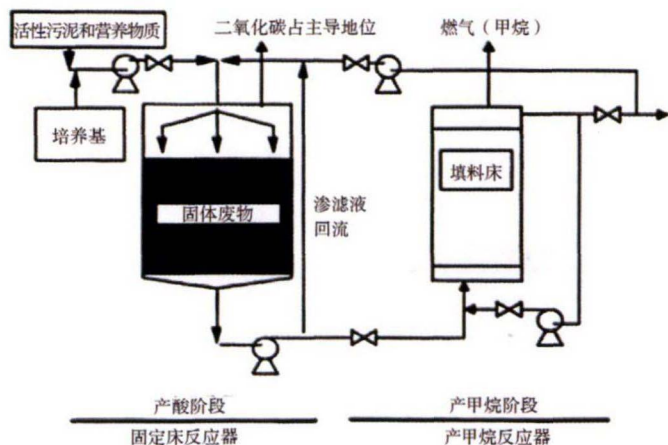
吸附法。主要是通过化学吸附、物理吸附的方式实现沼气中水分的脱除。常用吸附材料可选择二氧化硅、氧化铝、氧化镁、活性炭或沸石等。该方法适用于中小型沼气工程的沼气脱水,通过增加温度或降低压力可使吸附材料再生。通常是两台装置并列运行,一台用于吸收,一台用于再生。

吸收法。主要是利用乙二醇、二甘醇、三甘醇或可吸湿盐类等吸收剂,实现沼气水分脱除。该方法适用于较高流量(500立方米/小时)的沼气脱水,可以作为沼气提纯并网的预处理方法。

(2) 沼气脱硫。沼气脱硫主要包括干法脱硫、湿法脱硫、物理脱硫和生物脱硫。

干法脱硫。可采用化学吸附法、化学吸收法和催化加氢法三种。一是化学吸附法可采用活性炭和分子筛等脱硫剂吸附气体中的硫化物;二是化学吸收法可采用氧化铁、氧化锌等脱硫剂与气体中的硫化氢反应,将硫化物脱除;三是催化加氢法即采用钴钼、镍钼等催化剂,使有机硫转化为硫化氢,然后将其脱除。氧化铁脱硫法是常用的干法脱硫方法,最佳反应温度为25~50℃,该法硫化氢去除效率高(一般大于99%)、投资低、操作简单。缺点是对水敏感,脱硫成本较高,再生放热,床层有燃烧风险,反应表面随再生次数而减少,释放的粉尘有毒。

湿法脱硫。可采用氧化法和吸收法。氧化法可采用氨水法等,吸收法可采用烷基醇胺法、碱性溶液法等。



◎图2 湿法两相厌氧发酵反应器

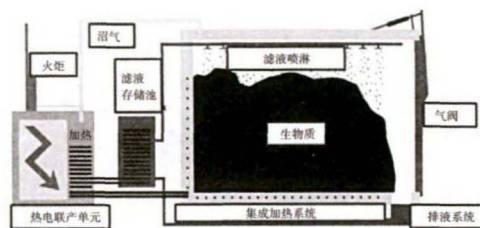


图3 干法序批式厌氧反应器

碳酸钠吸收法是常用的湿法脱硫方法，该法既可脱除硫化氢，也可脱除二氧化碳，设备简单、运行经济；缺点是一部分碳酸钠变成了重碳酸钠，吸收效率降低，另有一部分变成硫酸盐而被消耗。

物理脱硫。常用有机溶剂作为吸收剂，具体可采用聚乙二醇二甲醚法、冷甲醇法、活性炭吸附法等。活性炭吸附法是较为常用的物理脱硫技术，适用于硫化氢含量 $<0.3\%$ 的气体，去除效率高，操作温度低，但投资和操作费用高，再生成本高，同时单质硫易沉积在孔道里难以清理。

生物脱硫法。生物脱硫法是利用无色硫细菌，如氧化硫硫杆菌、氧化亚铁硫杆菌等，在微氧条件下将硫化氢氧化成单质硫的方法。该方法去除效率高，大规模使用时运行成本低，适合于规模化沼气工程使用，但处理过程中有可能会引入氧气和氮气。几种常用脱硫工艺比较见表1。

3. 沼气储存。沼气储气柜一般分为低压湿式储气柜、低压干式储气柜和高压干式储气柜三种类型。

(1) 低压湿式储气柜。低压湿式储气柜国内技术成熟，虽然造价较高，但运行可靠、管理方便并具有输送沼气所需的压力。具体分为螺旋导

轨储气柜、外导架直升式储气柜、无外导架直升式储气柜。一是螺旋导轨储气柜一般适合作大型储气柜，优点是用钢材较少；缺点是抗倾覆性能不好，对导轨制造、安装精度要求高。

二是外导架直升式储气柜一般适合作中小型储气柜，优点是加强了储气柜的刚性，抗倾覆性好，导轨制作安装容易；缺点是外导架比较高，施工时高空作业和吊装工作量较大，钢耗比同容积的螺旋导轨储气柜略高。

三是无外导架直升式储气柜结构简单，导轨制作容易，钢材消耗小于有外导架直升式储气柜，但其抗倾覆性能最低，一般仅用于小的单节储气柜。

(2) 低压干式储气柜。低压干式储气柜可分为筒仓式储气柜、低压单膜/双膜储气柜和低压储气袋。一是筒仓式储气柜可大大减少基础荷重，在储气柜底板及侧板全高 $1/3$ 的下半部要求气密，而侧板全高 $2/3$ 的上半部分及柜顶不要求气密，可以设置洞口以便工作人员进入活塞上部进行检查和维修。此类储气柜主要采用稀油密封和柔膜密封的方式进行气体密封。

二是低压单膜储气柜由抗紫外线的双面涂覆聚偏氟乙烯 (polyvinylidene fluoride, PVDF) 涂层的外膜材料制作，特点是单层结构，

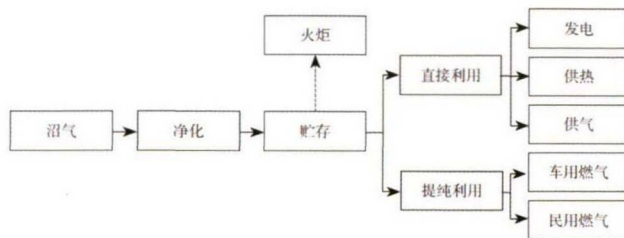


图4 沼气利用技术路径

保温效果好于钢结构，但差于双层膜结构。双膜储气柜采用双层构造，内层采用沼气专用膜，外层采用抗老化的外膜材料，同时可以起到保持外形和保证恒定工作压力的作用。

三是低压储气袋材质可采用进口塑胶，为了满足储气袋的安全使用，可在储气袋外围建有圆筒形钢外壳，较典型的是利浦储气柜。

(3) 高压干式储气柜。高压干式储气柜系统主要由缓冲罐、压缩机、高压干式储气柜、调压箱等设备组成。缓冲罐容积应根据厌氧发酵装置产气量而定，一般情况下以 $20\sim30$ 分钟升降一次为宜。压缩机应采用防爆电源，以保证系统的安全运行，所选择压缩机的流量应大于发酵装置产气量的最大值，但不宜超过太多，以免造成浪费。在北方应建压缩机房，以确保压缩机在寒冷条件下能够正常工作。高压储气柜内的压力一般为 0.8 兆帕，应选择有相关资质厂家生产的产品，并在当地安检进行备案。

储气柜的容积应按需要的最大调节容量决定。用于民用的储气容积可按日平均供气量的 $50\%\sim60\%$ 确定。用于发电机组连续运行时，储气容积宜按发电机日用气量的 $10\%\sim30\%$ 确定；发电机组间断运行时，储气容积宜大于间断发电时间的用气总量。用于提纯压缩时，储气容积宜按日用气量的 $10\%\sim30\%$ 确定。确定气柜单体积时，应考虑气柜检修期间供气系统的调度平衡，对于不间断供气的用户，气柜数量不宜少于 2 个。(供稿：国家畜禽养殖废弃物资源化利用科技创新联盟)

表1 常用脱硫工艺比较

	氧化铁法脱硫	湿法脱硫	活性炭吸附法	生物脱硫
脱硫设备投资	中等	大	大	中等
占地面积	大	中等	中等	中等
吸收剂成本	低	中等	高	大规模使用时成本低
是否需要解吸剂	需要	需要	需要且较难	需要且较难
再生成本	较高	高	高	高，再生较难
剩余物处理成本	较高	高	高	较高
脱净率	90%~99%	80%~90%	96%~99%	95%~99%