

沼气净化工艺在餐厨垃圾处理厂的应用

宋媛媛¹, 张淑玲¹, 马换梅²

(1. 中城院(北京)环境科技有限公司天津分公司, 天津 300074; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 以某餐厨垃圾处理项目为例介绍了沼气净化预处理工艺, 分别从沼气组分、工艺流程、主要设备、控制功能、运行成本等方面进行分析。该方案通过实际调试与生产运行, 证明沼气经净化后各指标均达到要求, 其中硫化氢的含量小于 13 ppm, 相对湿度小于 70%, 可为国内同类型项目设计提供借鉴。

关键词: 餐厨垃圾; 沼气净化; 湿法脱硫; 火炬

中图分类号: S216.4; X703; X705 文献标志码: B 文章编号: 1000-1166(2022)06-0061-07

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2022060061

Application of Biogas Purification Process in Kitchen Waste Treatment Plant / SONG Yuanyuan¹, ZHANG Shuling¹, MA Huanmei² / (1. Tianjin Branch of Cude Environmental Technology Co Ltd, Tianjin 300074, China; 2. North China Municipal Engineering Design&Research Institute Co Ltd, Tianjin 300074, China)

Abstract: This paper describes the biogas purification pretreatment technology by taking a kitchen waste treatment project as an example. Biogas component, process flow, main equipment, control function and operation cost is analyzed respectively. The scheme shows that technology parameters reach design targets after the biogas purification through the debugging and operation, including the content of hydrogen sulfide is less than 13 ppm, and relative humidity is less than 70%, which provides reference for domestic similar project design.

Key words: kitchen waste; biogas purification; wetdesulphurization; torch

在餐厨垃圾处理中, 厌氧处理过程中产生的沼气被认为是一种良好的可再生清洁能源^[1-2]。沼气的主要成分是 CH_4 和 CO_2 ^[3-4], 此外还有微量的 H_2S 、 O_2 、水汽等, 其中 CH_4 体积分数通常为 50% ~ 75%, CO_2 体积分数为 30% ~ 40%, 其他几种气体体积分数之和一般不超过 2%。沼气发电技术是一种沼气终端利用技术^[5], 沼气中因为含有 H_2S 、水汽和杂质等, 如果不经过预处理, 会直接影响发电机组的工作效率。有关的研究表明, 沼气经过预处理后, 机组的发电量增加了 70%^[5-6]。所以, 沼气体品质处理的效果如何, 会影响沼气发电的顺利进行, 从而影响收益。

1 工程概况

某餐厨垃圾处理厂餐厨垃圾处理规模 $400 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 。通过对餐厨垃圾成分的调研并对垃圾处理工艺方案的综合分析和比较, 采用餐厨垃圾预处理 +

厌氧发酵 + 沼气净化 + 沼气发电处理的工艺路线。其中, 厌氧罐产生的沼气通过管道输送至沼气净化系统, 经暂存、升压、脱硫、脱水和除尘等工艺后用于沼气发电和燃油燃气锅炉(满足全厂用热需求), 多余的沼气通过封闭式火炬系统燃烧处理。

2 工艺简介

2.1 设计规模

厌氧罐产生沼气体量为 $32000 \text{ Nm}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 考虑一定的设计富余量, 沼气净化系统的设计规模确定为 $1600 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.2 沼气组分

净化前后沼气成分见表 1。

本项目沼气经净化预处理后部分供油气锅炉使用, 满足全厂的用热需求, 部分供发电机使用。因此预处理后的气体满足锅炉及发电机对沼气体品质的要求。

收稿日期: 2022-04-21 修回日期: 2022-06-16

作者简介: 宋媛媛(1989-)女, 汉族, 河北省石家庄人, 研究生, 主要研究方向为固体废物处理, E-mail: 596186227@qq.com

表1 沼气净化前后参数表

序号	项目内容	净化前参数	净化后参数
1	进入系统沼气压力/kPa	~2.5	10~30
2	温度/℃	<35	10~30
3	CH ₄ /V%	50~70	50~70
4	CO ₂ /V%	30~50	30~50
5	H ₂ S/ppm	~5000	≤13
6	O ₂ /V%	<0.5	<0.5
7	N ₂ /V%	<1.0	<1.0
8	H ₂ O/(RH,%)	饱和	≤70
9	沼气中粉尘粒径/um	—	≤3.0
10	含尘量/(mg·Nm ⁻³)	—	<10

2.3 工艺选择

沼气的脱硫工艺目前主要有湿式脱硫、生物脱硫和干式脱硫3种^[7]。本项目净化后的沼气送至发电机组和锅炉燃烧,并24小时连续运行。生物脱硫的特点是运行费用低、污染物去除效果好^[8],可以脱除高浓度硫化氢,但要求稳定的工况及环境,因此当硫化氢含量及处理气量剧烈变化时脱硫效果达不到要求。同时生物脱硫的菌种需要一定的培养周期,导致系统带料调试时间长,在一定程度上可能会影响建设周期。而湿法脱硫的特点是适应性强、启动方便^[9]、脱硫效率高,对于硫化氢含量及气量的

剧烈变化适应性好,容许脱硫负荷及外部环境的急剧变化,且可以随时启动,不需要有适应期,同时应用范围广泛,可用于沼气发电、沼气提纯装置、锅炉等沼气利用设施的脱硫处理。干法脱硫结构简单、操作方便、脱硫净化度高,对较低浓度的硫化氢有较好地脱硫效果,一般用于精脱硫。所以,本项目先采用湿法进行粗脱硫,之后再通过干法进行精脱硫。

2.4 工艺流程

本项目是利用厌氧罐产生的沼气作为原料气,原料沼气经厂区内沼气管道输送至沼气净化工段,原料沼气首先通过初级过滤器,以清除沼气中的颗粒物和一部分水汽,然后进入双膜气柜进行缓冲储存。再通过罗茨风机将沼气增压至34.3 kPa,然后通过一段冷凝脱水后进入脱硫系统。脱硫采用湿法脱硫+干法脱硫相结合的方式。湿法脱硫采用碱液脱除沼气中的H₂S,沼气经湿法脱硫后的H₂S含量降至150 ppm以下。再经过二段冷凝脱水装置,将沼气中的含水率降至70%以下。之后进入二级干法精脱硫处理,将H₂S脱至13 ppm以下。最后沼气经精密过滤器除去粉尘,达到发电机组和锅炉的用气指标后送往发电机组或者锅炉房。当锅炉停炉或发电机组故障检修的情况下沼气进入封闭式火炬燃烧排放。

沼气净化工艺流程见图1。

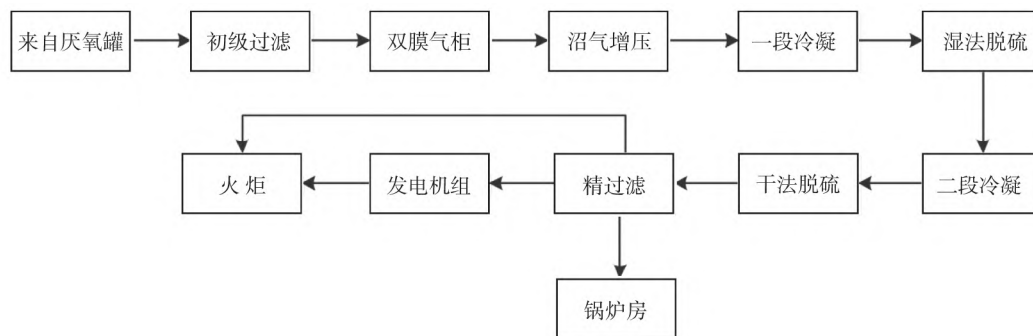


图1 沼气净化系统工艺流程图

2.5 物料衡算

来自厌氧罐进入本处理系统沼气体积为32000 Nm³·d⁻¹,根据沼气密度(1.221 kg·m⁻³)折算到质量流量为39072 kg·d⁻¹。沼气净化工艺的物料平衡如图2所示(物料衡算单位:kg·d⁻¹)。

3 主要装置

3.1 沼气储柜

本项目采用双膜气柜作为沼气贮存设备。双膜

气柜由外膜、内膜、底膜和混凝土基础组成,内膜与底膜围成的内腔用于贮存沼气,外膜和内膜之间气密。贮气柜设防爆鼓风机,风机可保持气柜内气压稳定。当内膜沼气减少的时候,外膜通过鼓风机进气保持内膜的设计压力^[10]。贮气柜抗紫外线、耐老化。内膜抗硫化氢腐蚀,抗甲烷气体渗透且不与沼气发生反应或受影响,抗拉伸强度高,保证沼气贮存安全可靠。内膜外膜配有安全水封,同时配内外膜间的甲烷检测装置。

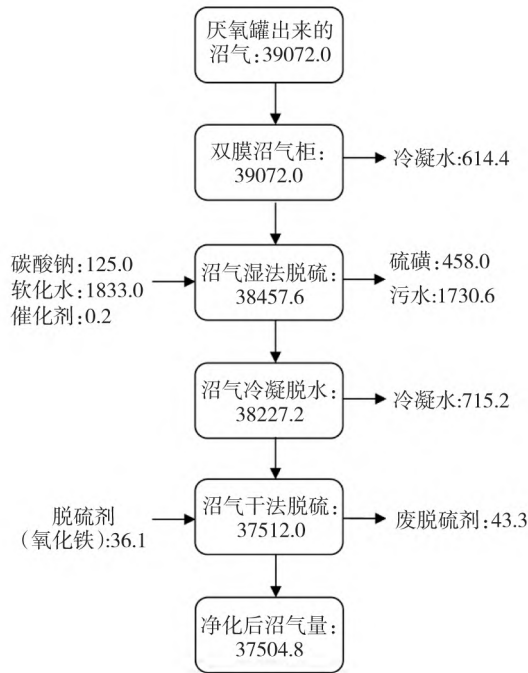


图2 沼气净化系统物料平衡图

3.2 湿法脱硫系统

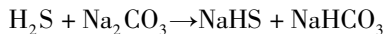
湿法脱硫工艺采用的是吸收氧化法,吸收氧化法是湿法脱硫中比较典型的工艺,该法是利用碱液吸收沼气中的硫化氢,在适宜条件下,同时有催化剂的参与完成碱液循环再生的过程。

湿法脱硫工艺流程主要由硫化氢的吸收、吸收液的再生、硫磺的回收3个基本单元组成。

3.2.1 硫化氢的吸收

原料沼气从塔底进入脱硫塔,自下而上与塔顶进入的吸收液(贫液)进行逆流接触反应。

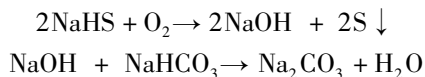
吸收过程中发生的主要化学反应为^[11]:



3.2.2 吸收液的再生

吸收了H₂S的贫液汇集到脱硫塔底部成为富液,然后进入再生塔进行再生反应。

再生过程中发生的主要化学反应式为:



再生后的吸收液进入贫液罐,由贫液泵打到脱硫塔顶部进行喷淋。再生过程生成的单质硫以硫泡沫形式溢流进入硫泡沫槽。

3.2.3 单质硫的回收

将富集到硫泡沫槽中的硫泡沫由硫泡沫泵输送至板框压滤机,固液分离后回收副产品硫磺,过滤分离所得清液返回到富液罐回收循环使用。



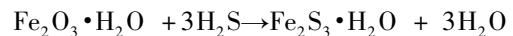
图3 湿法脱硫图

本项目设置湿法脱硫系统1套(见图3),包括脱硫塔、再生塔、富液槽、贫液槽、硫泡沫槽、碱液配置槽、泵送系统、压滤机、硫化氢采样与监测系统、液位控制系统等。湿法脱硫后的H₂S的含量不大于150 ppm。

3.3 干法脱硫塔

干法脱硫是指通过脱硫剂完成对沼气中硫化氢的去除。其中氧化铁的应用非常广泛^[12]。在常温下沼气通过脱硫剂床层,沼气中的硫化氢与活性氧化铁接触,生成三硫化二铁。干法脱硫常用于低含硫气体的处理^[13]。

脱硫反应为:



干法脱硫塔设计为2台,一用一备,交替使用(见图4)。当观察到脱硫剂变色,或系统压力损失过大时,交替使用另一个脱硫塔。干法脱硫后的H₂S的含量不大于13 ppm。



图4 干法脱硫图

3.4 封闭式火炬

火炬采用内燃式暗火火炬,火炬燃烧温度760℃~1100℃,燃烧率98%~99%,且保证能够在甲烷体积浓度为50%时,火炬在10%~110%的流量范围内稳定燃烧。

紧急火炬接收到操作信号后,火炬就会点燃。当火炬的温度高于1100℃或低于760℃时火炬就会

自动关闭,同时若火焰探测器没有探测到火焰,也应自动关闭火炬。火炬在关闭状态下,燃烧器处于小火苗燃烧(长明灯),为火炬点火做准备。本项目选用1套处理量为 $1600 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 的地面封闭火炬,在沼气不能正常利用时开启。

4 沼气净化系统控制功能

4.1 膜气柜的控制

气柜采用 PLC 控制。系统可显示内膜高度、内膜容积、外膜压力、内外膜水封液位、风机和电磁阀状态等信息。气柜具备安全可靠的联锁控制系统。内膜位置检测:采用物位探测器,能输出内膜高度信号至 PLC。由 PLC 输出高位和低位控制点以辅助控制火炬的启停。气柜上的所有监测仪表均采用防爆产品。能根据膜内外压差,自动注入或排出内外膜间的空气,平衡内外膜压力,并能将相关监测信号、系统运行状态信号、报警信号等上传到上一级控制单元。

4.2 湿法脱硫系统的控制与调节

脱硫系统采用 PLC 控制,具有远程液位监控、调节功能,减少现场人员操作,保证系统安全、降低劳动强度。脱硫液循环系统设液位远传检测装置,可以由上位机实时监控现场液位情况,并有低限、高限报警。贫、富液循环系统设流量计,检测流量状况,并设调节阀,可根据沼气体量及脱硫效果,进行远程调控。从多方面保障生产安全、正常、稳定、高效、低耗、环保运行。

4.3 火炬的控制

双皮膜储气柜内膜物位高度控制火炬的启停,净化系统末端沼气管道上的压力信号控制火炬燃烧器的开度大小,随着末端沼气管道上的压力下降,火炬开度自动逐级减小。当双膜气柜的物位高度达到90%时(高位),开启火炬,这时火炬应处于最小开度,如果罗茨风机后压仍然不断上升,火炬再逐级开大;当双膜气柜的物位高度处于10%时(低位),系统自动关闭火炬。同时,火炬还能够自动完成点火、运行监测、自动停机等的远程就地控制功能。能够自动实现安全监测(熄火保护、断电安全保护、燃烧器和阻火器防止回火)、连锁控制。在事故或者紧急状态下,能够自动停机并切断气源。控制系统具有数据存储、历史数据查询功能,具有手动、自动运行功能。

4.4 压力控制与流量调节

沼气净化系统入口的沼气压力约为2.5 kPa,考

虑安全性和经济性,出口压力在满足后续工艺要求的情况下要尽可能小,这样可以保证安全、降低电机功率,节省运行成本^[14]。因此,沼气风机的升压能力只要克服后续脱硫等设备及管道阻力,并且能够满足发电机组的用气压力即可,最低要求达到34.3 kPa。

沼气风机采用变频控制。来自沼气净化系统的出口压力信号通过 PLC 自动调节变频器的输出电流从而控制风机转速,保证供气压力稳定。变频技术要求单机实现在20%~100%负荷范围的流量连续调节。沼气风机采用防爆风机,防爆型式为隔爆型,防爆等级可以采用不低于规范要求的II A级防爆等级。

5 沼气净化系统的特点

(1) 沼气经增压净化后具有向发电机组和锅炉可靠供气的自动化操作功能。

(2) 火炬具有启动前和关闭后的自动清扫功能,以确保火炬的安全运行。

(3) 需在沼气净化工段可能存在可燃、有毒气体泄露的场所设置气体报警检测系统,包括可燃和有毒气体的固定监测和报警,保证系统安全可靠长期运行。

(4) 为了确保沼气净化装置区的安全生产,结合工艺运行实际情况,在生产区域设置视频监控系统。操作人员在控制室内通过彩色液晶监视器观察到各生产区域景象,及时发现各种危险状况采取相应措施。

(5) 为了使厂区环境气味达到环保要求,气柜稳压风机外排气体和脱硫液再生的排气需经净化除臭后排放。

6 主要设备选型

6.1 双膜气柜

根据《大中型沼气工程技术规范》GB/T51063—2014^[15]第4.5.2条第2款要求:储气容积应能满足用气的均衡性,当缺乏相关资料时应符合下列规定:“发电机组连续运行时,储气容积宜按发电机日用气量的10%~30%确定”。

双膜气柜的储气量 V 计算如下:

$$V = Q \times 10\% = 32000 \times 0.1 = 3200 \text{ m}^3 \text{ (按日用气量的10\%)}$$

$$V = Q \times 30\% = 32000 \times 0.3 = 9600 \text{ m}^3 \text{ (按日用}$$

气量的 30%)

因此,为充分考虑发电机组和锅炉的用气均衡性,沼气储柜有效容积设计为 5000 m³,储气压力 1.2 kPa,在规范允许的范围内,气柜的外膜直径为 23430 mm, H = 18000 mm。气柜膜材采用双面 PVC/PVDF 涂层的沼气专用进口膜材。

6.2 沼气罗茨风机

选用优质沼气加压罗茨风机,罗茨风机风量需满足处理能力不小于 1600 Nm³·h⁻¹,压力需克服净化工段阻力损失(湿法脱硫+冷凝脱水+干法脱硫+输送管道的总阻力损失最大为 4 kPa)的前提下满足后端发电机组和锅炉的用气压力需求。因此,采用的沼气罗茨风机的风量为 27.92 m³·min⁻¹,压力约为 34.3 kPa,同时一用一备。风机内部采用镍镀防腐材料涂层,以抵御沼气的硫腐蚀,并采用进口的填料密封件,以达到完善的密封效果。

6.3 湿法脱硫塔

6.3.1 脱硫塔直径

进入脱硫塔的沼气流:

$$G_0 = 1600 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

脱硫前沼气中硫化氢的量:

$$c_1 = 7.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} (5000 \text{ ppm})$$

湿法脱硫后沼气中硫化氢的量:

$$c_2 = 0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} (150 \text{ ppm})$$

H₂S 的脱除量:

$$G_1 = \frac{G_0(c_1 - c_2)}{1000} = 11.78 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

溶液循环量

$$L_T = 1.3G_1/S = 69.60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \text{ 取 } 70 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

式中: S 为溶液硫容量,取 0.22 kg·m⁻³。

通过设计手册中泛点速度计算图(见图 5)计算液泛速度。

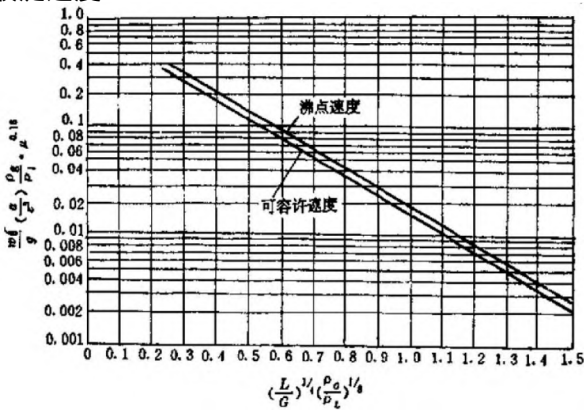


图 5 泛点速度计算图

图中: w_0 为液泛速度 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; L 为液体质量流速 $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1} \text{L}^{-1}$; G 为气体质量流速 $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1} \text{G}^{-1}$; ρ_g 为气体密度 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_l 为液体密度 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; a 为填料比表面积 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$; ε 为填料孔隙率,%; μ 为液体粘度 $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

$$\left(\frac{L}{G}\right)^{1/4} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{1/8} = \left(\frac{55 \times 1050}{1600 \times 1.221}\right)^{1/4} \left(\frac{1.221}{1050}\right)^{1/8} = 1.00$$

由图 1 可得:

$$\frac{W_0^2}{g} \left(\frac{\alpha}{\varepsilon^3}\right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right) \mu^{0.18} = 0.013$$

因此, $W_0 = 0.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

操作气速:

$$W_1 = 0.5W_0 = 0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

吸收塔直径:

$$D = \sqrt{\frac{1600 \times (273 + 35)}{0.785 \times 0.16 \times 3600 \times 1.34 \times 273}} = 1.73 \text{ m}$$

因此,脱硫塔的直径取 1.8 m。

6.3.2 脱硫塔高度

吸收过程传质系数 K_G :

$$K_G = Aw^{1.3} Na^{0.1} B^{-0.01} = 20 \times 0.16^{1.3} \times 5^{0.1} \times \left(\frac{70}{1600 \times 1.221}\right)^{-0.01} = 0.24$$

式中: K_G 为传质系数 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{atm}^{-1}$; A 为经验参数,取 $A = 20$; W 为吸收塔操作气速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; Na 为溶液中 Na_2CO_3 含量,取 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; B 为吸收过程液气比。

吸收过程平均传质推动力:

$$\Delta p_m = \frac{p_1 - p_2}{\ln \frac{p_1}{p_2}} = \frac{0.0067 - 0.0002}{\ln \frac{0.0067}{0.0002}} = 0.00185 \text{ atm}$$

式中: p_1 为脱硫塔入口气相 H₂S 分压, atm; p_2 为脱硫塔出口气相 H₂S 分压, atm。

所需要的传质面积:

$$F_p = \frac{G_1}{K_G \times \Delta p_m} = 2843 \text{ m}^2$$

填料高度:

$$H_p = 1.2 \times F_p / 0.785D^2a = 5.4 \text{ m}$$

因脱硫塔还需考虑一些附属结构包括液体分布装置、塔顶、塔釜、人孔等,综合考虑得出脱硫塔总高度 $H = 13680 \text{ mm}$ 。根据计算和实际设备设计要求,脱硫塔尺寸为 DN 1800 × 13680 mm,材质选用 316。

6.4 再生槽

再生槽直径:

$$D_1 = \sqrt{G_A / 0.785A_1} = 2.3 \text{ m}$$

式中: G_A 为空气量(取 $4 \text{ m}^3 \text{ 空气} \cdot \text{m}^{-3} \text{ 喷淋液}$) $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; A_1 为吹风强度(取 $70 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \text{ m}^{-2}$), $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \text{ m}^{-2}$;

扩大部分直径:

$$D_2 = 1.4D_1 = 3.2 \text{ m}$$

再生槽高度:

$$H_T = H_1 + H_2 + H_3 = 5.8 \text{ m}$$

式中: H_1 为再生槽有效高度, m;

$$H_1 = \frac{L_T \times \tau}{0.785D_1^2 \times 60} = 2.8 \text{ m}$$

式中: τ 为停留时间取 10 min ; H_2 为喷射器出口至槽底距离, m; H_3 为扩大部分高度, m。

因此确定再生槽尺寸: $\Phi 3200 \text{ mm}$, $H = 5800 \text{ mm}$, 材质选用 FRP。

6.5 富液槽、贫液槽

根据工程经验, 贫液槽停留时间选择 10 min , 则:

$$V = \frac{1.2L_T \times \tau}{60} = 14 \text{ m}^3$$

富液槽、贫液槽直径 D 为 2.6 m , 则贫液槽高度

$$H = \frac{V}{0.75 \times 0.785 \times D^2} = 3518 \text{ mm}, \text{取 } 3600 \text{ mm}。$$

因此富液槽、贫液槽尺寸: $\Phi 2600 \times 3600 \text{ mm}$, 材质选用 FRP。

6.6 干法脱硫塔

干法脱硫塔进口硫化氢:

$$X_1 = 227.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} (150 \text{ ppm})$$

干法脱硫塔出口硫化氢:

$$X_2 = 20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} (13 \text{ ppm})$$

单位时间脱硫量:

$$m = (X_1 - X_2) \times G_0 = 0.33 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

单个脱硫塔脱硫剂填充量:

$$M = 1.1 \times \frac{m \times 4320}{f \times 1000} = 7.8 \text{ t}$$

式中: 硫容 f 取 20% , 脱硫剂更换周期至少为 180 d 。

单塔脱硫剂填充容积:

$$V = \frac{M}{\rho} = 10.4 \text{ m}^3$$

式中: 堆密度 ρ 取 $0.75 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$

根据塔设备一般计算经验选择高径比 3 , 脱硫塔直径 2000 mm , 填料高度 3312 mm , 脱硫塔总高度 6000 mm 。

因此确定干法脱硫塔尺寸 $\text{DN } 2000 \times 6000 \text{ mm}$, 脱硫剂总装填量为 7.8 t , 单塔更换周期 180 d 。

7 项目运行记录参数

选取生产运行过程中的八次运行记录参数, 见表 1 所示。由表可知, 脱硫后硫化氢的含量均小于 13 ppm , 相对湿度均小于 70% 。

表 1 项目运行记录参数表

沼气		脱硫前数据			脱硫后数据					
出气量	气柜压力	温度	压力	H ₂ S	温度	压力	H ₂ S	CH ₄	CO ₂	相对湿度
(Nm ³ ·h ⁻¹)	kPa	°C	kPa	ppm	°C	kPa	ppm	%	%	%
826	0.70	25	0.5	2764	27	28	7	60	39	58
910	0.70	24	0.5	2878	29	29	6	61	38	55
1120	0.71	26	0.6	3122	24	28	7	60	39	60
1213	0.72	25	0.6	2964	20	30	5	60	39	62
963	0.70	28	0.5	3135	27	28	7	60	39	58
1080	0.71	26	0.6	3250	29	28	6	60	39	55
972	0.70	22	0.5	3126	24	29	6	61	38	60
1138	0.71	28	0.6	2958	26	30	5	60	39	58

8 运行成本分析

本项目运行成本具体分析如表 2 所示。

其中自来水单价按 $3.40 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ 计、电费按每度 0.62 计。由表 2 可知, 每 1 Nm^3 产品气的脱硫运行费用约为 0.09 元 。

表2 运行成本分析表

项目	耗量	单价	费用
水	2.2 t·d ⁻¹	3.40 元·t ⁻¹	7.48 元·d ⁻¹
电量	1727 kWh·d ⁻¹	0.62 元·kWh ⁻¹	1070.74 元·d ⁻¹
纯碱	125 kg·d ⁻¹	3 000.00 元·t ⁻¹	375.00 元·d ⁻¹
催化剂	200 g·d ⁻¹	500 000.00 元·t ⁻¹	100.00 元·d ⁻¹
干法脱硫剂	250 kg·d ⁻¹	8000 元·t ⁻¹	2000.00 元·d ⁻¹
合计	3553.22 元·d ⁻¹		

9 结论

笔者以实际工程为例,介绍了某餐厨垃圾项目沼气净化系统的工艺流程、主要设备选型、工艺特点、控制功能和运行成本等。实践表明该工艺技术成熟可靠、自动化程度高、运行费用低、可操作性强,最大限度地实现了沼气的利用,使之在今后同类型的工程中具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 刘广青,董仁杰,李秀金. 生物质能源转化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [2] 杨森林,许云,赵晓辉,等. 生物脱硫在沼气净化中的研究进展[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(1): 14-17.
- [3] 江皓,吴全贵,周红军. 沼气净化提纯生物甲烷技术与应用[J]. 中国沼气, 2012, 30(2): 6-19.
- [4] 刘京,刘志丹,袁宪正. 沼气生产及利用-瑞典经验

- [J]. 中国沼气, 2008, 26(6): 38-50.
- [5] 刘伟,王欣,徐晓秋,等. 沼气发电工程沼气净化技术研究[J]. 黑龙江科学, 2013, 4(10): 26-28.
- [6] 方祖华,杨华昌,彭爱华,等. 小型沼气发电机组的开发及应用[J]. 可再生能源, 2010, 28(01): 119-121.
- [7] 贾斌,靳登超,鲍振博,等. 沼气净化中脱硫技术的研究进展[J]. 天津农学院学报, 2016, 23(02): 57-59.
- [8] 王智鹏,桑义敏,徐超,等. 生物法去除厌氧发酵所产沼气中的 H₂S[J]. 环境工程学报, 2017, 11(11): 5923-5929.
- [9] 张云飞,范晶俊,钱燕君,等. 沼气湿法脱硫技术研究进展[J]. 能源环境保护, 2014, 28(1): 19-21.
- [10] 方建锋. 沼气利用技术在餐厨垃圾处理项目中的应用[J]. 江西建材, 2016, 18: 75-76.
- [11] 孟现辉,周金国. 脱硫技术在沼气净化中的应用[J]. 清洗世界, 2021, 37(1): 17-18.
- [12] 韩芳. 沼气净化技术及储存方式优化分析-以沼气工程为例[J]. 中国沼气, 2012, 30(3): 50-53.
- [13] 陈沛全,曾彩明,李娴. 沼气净化脱硫工艺的研究进展[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(4): 125-129.
- [14] 袁晓宇,袁晓杰. 沼气预处理系统在某污水处理厂的应用[C]. 中国环境科学学会 2021 年科学技术年会-环境工程技术创新与应用分会场论文集(一) 中国会议, 2021, 50-53.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 51063—2014 大中型沼气工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.