

膜法沼气纯化系统的技术经济分析

邱天然,沈志鹏,王晋琳,程 荣,石 磊,郑 祥*
(中国人民大学环境学院,北京 100872)

摘要:针对我国主要的10万t污水处理厂100 m³/h的沼气,利用Matlab进行了二段膜法纯化系统的设计,并用运行生产能力指数法进行了技术经济分析。结果表明,100 m³/h的二段膜法沼气纯化系统总投资费用为84.9万元,年运行费用为34.8万元,单位处理能力投资为8 500元/(m³·h),单位沼气处理成本为0.35元/m³。膜组件和压缩机费用为最主要的投资成本,压缩机耗电为最主要的运行成本。处理规模从100 m³/h提高到1 000 m³/h时,膜系统的单位处理能力投资和单位处理成本均显著下降。操作压力增高,膜使用面积显著降低,但压缩机费用增大,功耗增加。

关键词:二段膜分离系统;沼气纯化;回流量;膜面积

中图分类号:TQ028.8

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)06-0157-03

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2016.06.038

Techno-economic evaluation of membrane-based biogas upgrading systems

QIU Tian-ran, SHEN Zhi-peng, WANG jin-lin, CHENG Rong, SHI Lei, ZHENG Xiang*

(School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: Two-step membrane-based biogas upgrading systems are investigated for 10 thousand tons of waste water treatment plants (WWTPs). The system is designed by Matlab and evaluated in the perspective of technic and economic by production capacity index method. The results show that, gross capital cost of the 100 Nm³/h two-step membrane-based biogas upgrading system is 849 thousand yuan. Annual total processing is 348 thousand yuan. The specific capital cost is 8.5 thousand yuan/(Nm³/h raw biogas). The specific processing cost is 0.35 yuan/Nm³. Membrane modules and compressor cost are the main capital cost, while the electricity is the main processing cost. The specific capital cost and processing cost are significantly decreased, when the processing scale of the system is increased from 100 Nm³/h to 1 000 Nm³/h. The compressor cost and electricity consumption increase with the increase of operation pressure. Meanwhile, the membrane area decreases dramatically.

Key words: two-step membrane system; biogas upgrading; backflow; membrane area

沼气高值化利用形式有沼气发电,以及将沼气纯化后替代管道天然气(SNG)和用作汽车燃料(CNG)。传统的气体分离技术包括水洗法、物理吸收法、化学吸收法、变压吸附法。膜分离法作为新型气体分离技术,与传统技术相比,具有设备简单、操作简单、占地面积小、绿色无污染、模块化等特点,因而受到了越来越多的关注。

本研究以日处理10万t污水的大、中型城市污水处理厂污泥厌氧消化沼气系统的产气为原料,产品气为SNG,对沼气处理量为100 m³/h,进气甲烷体积分数为60%的膜法沼气纯化系统进行技术经济分析,从而为决策者提供参考。

1 膜法沼气纯化系统的经济分析

1.1 膜法沼气纯化系统的构成

沼气高值化利用系统如图1,由预处理系统、膜处理系统和产气收集系统3个部分构成,预处理系统进行沼气脱硫后进入膜法沼气纯化系统,产气收

集系统根据实际用途成为车用燃料或天然气管输,决定是否进一步压缩。

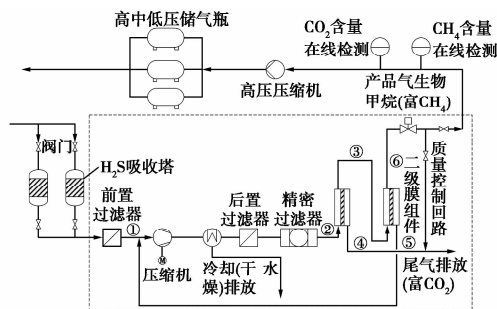


图1 沼气高值化利用系统

膜法沼气纯化系统如虚线框内部分,包括:①膜前预处理系统,以去除沼气所含水和油,防止其在膜表面冷凝对膜造成影响。由六级过滤(含压缩机前气液分离器、精密过滤器2只、超精密过滤器2只和活性炭吸附过滤器组成)和冷干机组成。②膜分离系统,进行沼气纯化,将沼气加压至工作压力,为达到产气标准,设有回流系统,二段膜组件渗余气进行

收稿日期:2015-11-15;修回日期:2016-04-07

基金项目:中国人民大学科学研究基金(中央高校基本科研业务费专项资金资助)项目成果(10XNJ023)

作者简介:邱天然(1991-),男,硕士生;郑祥(1978-),男,博士,副教授,研究方向为膜分离技术与公共卫生安全,通讯联系人,010-82502065, zhengxiang7825@163.com。

回流,一段膜系统产气为生物甲烷(产品气),最终压缩进入储气罐进行储存或运输,根据需要注入管道或者作为车用燃料。二段膜组件渗透气为富含 CO₂ 尾气排放。

1.2 膜法沼气纯化系统的设计

1.2.1 系统设计理论

本研究以朱葆琳等^[1]的气体膜分离活塞流模型,利用 Matlab 编程求解膜系统各段参数;利用生产能力指数法^[2]对不同规模的设备价格进行估算,当工艺路线相同,装置规模不同时,通过已知装置 A 的价格估算装置 B 的价格。

1.2.2 系统设计的技术经济参数

天邦国家膜技术工程中心有限责任公司是国内主要 CO₂/CH₄ 膜制造商,其膜材料为聚酰亚胺,根据阮雪华等^[3]的测试数据,30℃ 时 CH₄ 渗透速率 3.5 GPU[0.095 m³/(m²·h·MPa)],CO₂ 渗透速率 112 GPU[3.0 m³/(m²·h·MPa)],为中空纤维膜组件。膜寿命为 5 年,年运行时间为 8 000 h。

将膜法沼气纯化系统的操作压力设定为 1.0 MPa。产气甲烷体积分数为 97%,以符合天然气管输和作为车用燃料的标准,并和商业公司膜分离系统产气甲烷体积分数接近。国家发改委公布的北京市天然气最高门站价格为 2.7 元/m³^[4];电价为 0.90 元/kWh^[5];全部投资来自贷款,2015 年 5 月 11 日 1 年期贷款基准利率为 5.1%;膜分离系统占地面积按 DMT 公司 Carborex 的膜分离系统计算,单位处理量占地面积为 0.1 m²/m³ × 2.5 m,即 1 m³ 沼气占地面积为 0.1 m²,其高度为 2.5 m。

1.2.3 气体膜分离系统的设计

设定二段气回流组分与进气组分相同,操作压

力为 1.0 MPa 时,产气 CH₄ 体积分数为 97.0%,尾气 CH₄ 体积分数为 40.0% 时,对应的进气 CH₄ 体积分数为 93.1%,单位膜面积处理量为 1.41 m³/(m²·h),膜面积为 48.5 m²,切割比(渗透气量/进气量)为 0.408。

对于一段膜分离,进气组分 CH₄ 为 60%,进气量为 100 m³/h,操作压力为 1.0 MPa,产气 CH₄ 体积分数为 93.1% 时,单位膜面积处理量为 1.30 m³/(m²·h),膜面积为 75.7 m²,此时尾气 CH₄ 体积分数为 12.0%,切割比为 0.107。

由此得物料衡算结果如表 1,此时 CH₄ 回收率为 91.2%,回流量为 6.6 m³/h,总膜面积 124.2 m²,产气量为 56.4 m³/h。

表 1 二段膜分离系统物料衡算

组分	1	2	3	4	5	6
CO ₂ 体积分数/%	40.0	40.0	6.9	88.0	40.0	3.0
CH ₄ 体积分数/%	60.0	60.0	93.1	12.0	60.0	97.0
气量/(m ³ ·h ⁻¹)	100	106.6	63.2	43.6	6.8	56.4
压力/MPa	1.0	1.0	1.0	常压	常压	1.0

2 结果与讨论

2.1 膜法沼气纯化系统的费用分析

2.1.1 总投资费用

建筑工程费用:整套装置可以安装在 1 个撬装箱体,箱体内配置防爆照明灯、自动排风系统、可燃气体报警仪。占地面积为 10 m²,高 2.5 m,选用 6 m 标准集装箱,集装箱加装钢制标准门,喷漆,造价 7.33 万元,由天津隆电公司提供。

设备购置及安装费用:膜法沼气纯化系统所需设备如表 2。

表 2 膜法沼气纯化系统主要设备投资估算表

序号	设备名称	型号	数量	单价/万元	生产厂家
1	沼气压缩机	VW-1.83/10	2	9.90	蚌埠市程鹏压缩机有限公司,1 开 1 备,级间气液分离器 0.2 万元/台,共 2 台
2	缓冲罐	C-0.6/10	1	0.18	上海申江压力容器有限公司
3	气液分离过滤器	C100-D	1	0.21	杭州科林气源设备有限公司
4	冷冻干燥机组	ADL-20F	1	1.85	杭州科林气源设备有限公司
5	精密过滤器	T400-D	2	0.21	杭州科林气源设备有限公司
6	超精密过滤器	A100-D	2	0.22	杭州科林气源设备有限公司
7	活性炭罐吸附过滤器	KHT400-D	2	0.75	杭州科林气源设备有限公司,1 开 1 备
8	膜组件(面积)	聚酰亚胺	124.2	0.15	天邦膜技术工程有限公司
9	膜系统仪器仪表及管道安装费用			23.06	膜系统仪器仪表、管道安装费用包括膜系统的 PLC 自控系统,配套电器柜和元器件,304 无缝钢管等,总费用约为压缩机和膜组件购置费的 60% ^[6]
10	总价			66.09	

总投资费用:二段膜分离系统的膜法沼气纯化的总投资费用为84.88万元,约8500元/(m³·h),对二段膜分离系统的投资总费用来说,压缩机和膜组件费用分别占投资总费用的23.3%和21.9%。

表3 膜法沼气系统的总投资费用 万元

建筑工程费	设备购置及安装费	不可预见费	利息	总计
7.33	66.09	7.34	4.12	84.88

2.1.2 总运行费用

膜法沼气纯化厂的运行费用如表4。

表4 膜法沼气纯化厂的年运行费用

序号	名称	费用/万元	备注
1	电费	13.47	压缩机额定功率15 kW,冷干机总功率2.17 kW,集装箱内防爆排风扇1.5 kW,防爆荧光灯0.04 kW,年运行8000 h
2	工资及福利	7.35	基本实现全自动化,按单人值班算,2014年电力、燃气及水的生产和供应业城镇单位就业人员年平均工资为73513元 ^[7]
3	维修费	6.61	设备购置及安装费的10% ^[6]
4	滤芯更换	0.35	包括气液分离器、精密过滤器、超精密过滤器和活性炭罐的滤芯更换费用
5	折旧费	6.99	年折旧率×固定资产原值,固定资产净残值率以5%计,除膜组件外的膜法纯化沼气设备、集装箱的折旧年限15年,折旧率为6.3%;膜组件的使用寿命为5年,折旧率为19% ^[8]
6	总计	34.77	运行时间8000 h

由此可得膜法沼气纯化厂的年运行成本约为34.8万元,折合0.43元/m³沼气或0.77元/m³生物甲烷,若不计折旧,为0.35元/m³或0.62元/m³生物甲烷,运行费用中,电费占年运行费用的38.7%。

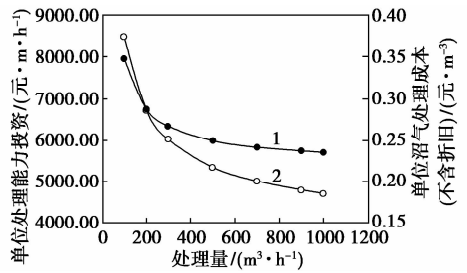
2.1.3 经济效益

假定系统产气作为天然气进行管道运输,年收益为121.8万元,年净收益为87.0万元。二段气体膜分离系统的投资回收期(静态)为:84.9/87.0=0.88,约为11.7个月。

2.2 影响投资与运行费用的相关因素研究

2.2.1 处理规模对投资与运行费用的影响

处理规模增大,在膜系统不变的情况下,将使得投资与运行费用进一步减小。从图2看出随着处理规模的增大,单位处理能力投资额从8500元/(m³·h)下降到4700元/(m³·h),而单位沼气处理成本从0.35元/m³下降到0.24元/m³。

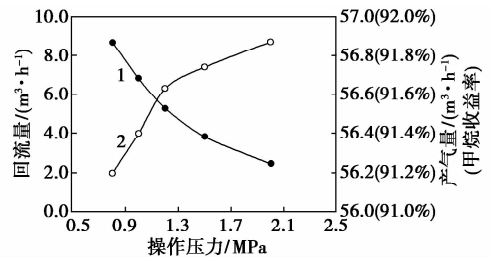


1—单位沼气处理成本(不含折旧);2—单位处理能力投资

图2 处理规模对投资与运行成本的影响

2.2.2 操作压力对投资和运行费用的影响

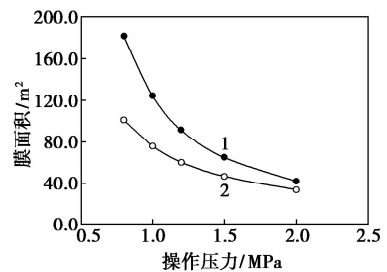
操作压力的增大对投资与运行费用的影响主要体现在,对装置材料以及设备的耐压能力要求有所提高,压缩机的功耗增加,以及膜面积减小。当操作压力不超过1.6 MPa时,所使用的膜前处理设备和管道材料等的耐压性能均为1.6 MPa;但当压力超过1.5 MPa时,需要使用三级压缩机,其价格增高幅度较大。



1—回流量;2—产气量(甲烷收益率)

图3 操作压力对回流量和产气量(甲烷收益率)的影响

当产气CH₄体积分数不变的情况下,操作压力从0.8 MPa提高到2.0 MPa时,回流量和产气量随操作压力的变化如图3,由于产气CH₄体积分数不变,因此甲烷收益率与产气量相关,从90.9%增至91.9%,随着操作压力的增大而进一步趋于平缓,但回流量随着操作压力的增大从8.7 m³/h减小至2.4 m³/h。总膜面积和一段膜面积相差亦减小,如图4,说明在操作压力较低时,二段与单级膜分离系



1—总膜面积;2—一段膜面积

图4 操作压力对膜面积的影响

2 GE水煤浆气化工工艺的设计优化

2.1 高压氮气系统

高压氮气用于开、停车及发生故障时对气化炉和与烧嘴相连的氧气管线、煤浆管线进行吹扫和保护。本装置采用新的高压氮气系统设计方案,原、新

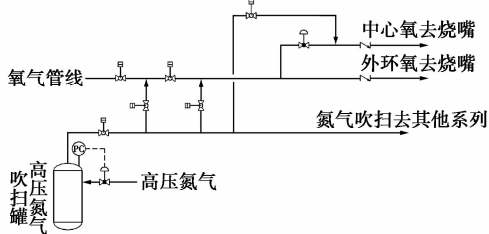


图2 原高压氮气系统流程

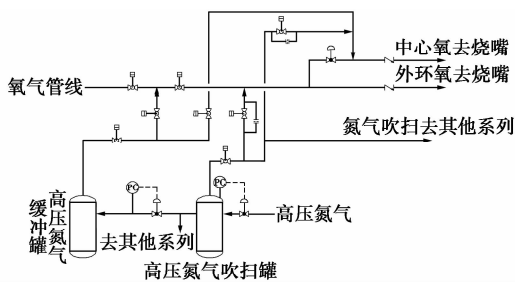


图3 新高压氮气系统流程

高压氮气系统流程分别如图2、图3所示。

从图2、图3的流程对比可以看出,与原设计相比,新的高压氮气系统有3点变化:①每一个气化炉系列都配备一个专用的高压氮气缓冲罐;②增加了从高压氮气缓冲罐到中心氧的吹扫管线;③氮气吹扫管线上增加开关阀旁路。

新的高压氮气系统保留了从高压氮气吹扫罐到外环氧和中心氧的吹扫管线,增加了开关阀旁路,并设置限流孔板,可以为氧气管线提供大流量和小流量吹扫2种形式。大流量吹扫通过开关阀进行,小流量吹扫通过开关阀旁路限流孔板进行。高压氮气缓冲罐不仅可以对氧气管线进行吹扫,而且一旦气化炉停车,上下游氧气切断阀关闭,可以向阀门管线迅速充氮,形成“氮塞”。高压氮气缓冲罐通过压力调节阀始终维持一定压力,即使在高压氮气吹扫罐由于连续吹扫、用气量大等原因出现压力降低的情况下,也不会受到影响,保证“氮塞”压力稳定,防止氧气倒回,为装置的安全运行提供了更多的安全保证。

2.2 氧气支管材质及管径

氧气高压输送有相当大的危险性,由于概算限制,本装置最初只有氧气阀门及靠近烧嘴的阀门后

(上接第159页)

统相比更有优势,随着操作压力增大,该二段膜分离过程逐渐与单级膜分离过程接近。

当操作压力提高至1.5 MPa,膜分离系统投资成本为84.25万元,年运行成本为36.07万元,年净收益为86.4万元,与1.0 MPa时的膜分离系统相当。

3 结论

膜法分离沼气纯化系统中最主要的投资费用为膜组件和压缩机购置费用,最重要的运行费用为电费。

100 m³/h的膜法沼气纯化系统总投资费用为84.9万元,年运行费用为34.8万元,单位处理能力投资为8 500元/(m³·h),单位沼气处理成本为0.35元/m³,产气甲烷体积分数为97%,产气量为56.4 m³/h,甲烷回收率为91.2%。

处理规模的提高能够有效降低膜系统的投资与运行费用。操作压力和膜性能也是影响膜系统投资与运行费用的重要因素。操作压力增高,膜使用面

积显著降低,但压缩机费用增大,功耗增加。

参考文献

- [1] 朱葆琳,蒋国梁.中空纤维膜N₂-H₂分离器分离性能计算方法[J].化工学报,1987,(3):281-292.
- [2] Rautenbach R.膜工艺-组件和装置设计基础[M].北京:化学工业出版社,1998:352-353.
- [3] 阮雪华,贺高红,肖武,等.生物甲烷膜分离提纯系统的设计与优化[J].化工学报,2014,(5):1688-1695.
- [4] 中华人民共和国国家发改委.各省(区、市)天然气最高门站价格表[EB/OL].2015. <http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201502/W020150228330543391443.pdf>.
- [5] 国家电网.北京市最新电价表[EB/OL].2015. <http://www.95598.cn/static/html//sas/BM05003-2015022486026286.shtml>.
- [6] Shao P, Dal-Cin M, Kumar A, et al. Design and economics of a hybrid membrane-temperature swing adsorption process for upgrading biogas[J]. Journal of Membrane Science, 2012, 413:17-28.
- [7] 国家统计局.2014年不同岗位平均工资水平有较大差距[EB/OL].2015. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201505/t20150527-1110637.html>.
- [8] 阮雪华,贺高红,肖武,等.生物甲烷膜分离提纯系统的设计与优化[J].化工学报,2014,(5):1688-1695. ■