

基于 Aspen HYSYS 的撬装化沼气液化流程研究

周淑霞¹, 李洋¹, 张腾², 邹英平³, 陆海程¹, 乔瑞峰¹

(1. 山东交通学院, 山东 济南 250357; 2. 中国石油大学, 新疆 克拉玛依 834000; 3. 威海市天罡仪表股份有限公司, 山东 威海 264200)

摘要: 撬装化沼气液化系统的优化设计对于沼气的开发与利用具有重要的现实意义和较高的使用价值。在深入研究小型天然气撬装系统的流程设计和工艺设计基础上, 针对沼气的特点及液化条件分析, 将撬装化设计技术引入沼气液化系统的设计中, 建立净化与液化耦合的沼气液化系统。在模块化设计的基础上, 对沼气液化系统运行中的模块构建、模块设计进行深入的探索和探索, 计算撬装化各阶段装置的性能参数。结果表明: 生物质 LNG 液化率为 0.9242, 生物质 LNG 与压缩罐装的沼气相比, 甲烷含量高、二氧化碳的含量及氮气含量低。撬装化的沼气液化系统的能耗低、液化率高、能量损失少。

关键词: 沼气; 撬装化; 模块化; 净化; 液化

中图分类号: S216.4; TK6 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-1166(2023)01-0073-06

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023010073

Study on Liquefaction Process of Skid-mounted Biogas Based on Aspen HYSYS / ZHOU Shuxia¹, LI Yang¹, ZHANG Teng², ZOU Yingping³, LU Haicheng¹, QIAO Ruifeng¹ / (1. Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China; 2. China University of Petroleum, Karamay 834000, China; 3. Weihai Tiangang Instrument Co Ltd, Weihai 264200, China)

Abstract: The optimal design of skid mounted biogas liquefaction system has important practical significance and high application value for the development and utilization of biogas. Large and medium-sized liquefaction systems have been applied in natural gas liquefaction plants. However, due to the huge equipment, it is not convenient to develop small gas fields, coalbed methane, biogas etc. The small skid-mounted liquefaction system has the characteristics of streamlined process, small equipment size, and skid-mounted device. Based on the in-depth study of the process design and process design of small natural gas skid mounted system, the skid mounted design technology is introduced into the design of biogas liquefaction system. Based on the existing modular design, the module construction and module design in the operation of biogas liquefaction system are deeply studied and explored. The biogas liquefaction system coupled with purification and liquefaction is established, the module design of the skid mounted system is carried out, and the performance data of each skid mounted device are obtained. The results show that the liquefaction rate of biomass LNG is 0.9242. Compared with biogas in compressed tank, the biomass LNG has higher methane content, lower carbon dioxide content and nitrogen content. The biogas liquefaction system has the advantages of low energy consumption, high liquefaction rate and less energy loss.

Key words: methane; skid mounted; modularization; purify; liquefied

近年来,石油、天然气等能源燃料供应紧张、价格上涨,并且过度使用会给环境带来很多不可逆转的破坏问题^[1]。在“十四五”规划中,提出我国已进入经济高质量发展的新阶段,正走在构建低碳环保、清洁高效的能源现代化社会的道路上。在“碳达峰、碳中和”目标的大背景下^[2],要将目光放在可再

生能源的系统化、高效化研发利用方面,促进可再生能源行业的高效、高质研发利用^[3]。沼气有机废物转化为高质量燃料能源,从而成为可再生清洁能源的一种,对保护环境、减少碳排放与可持续发展等问题具有很大的优势^[4]。因此研究沼气的净化与液化问题对于我国能源战略发展具有重要的意义。

收稿日期: 2022-06-16 修回日期: 2022-09-09

项目来源: 山东省高等学校科技计划项目(J16LJ56)

作者简介: 周淑霞(1973-),女,汉族,山东济南人,副教授,主要从事生物质能开发及利用研究等工作, E-mail: zhou9414@126.com

大中型液化系统已应用在天然气液化工厂,由于液化装置庞大,不适合于开发小气田、煤层气、沼气等,小型撬装液化系统具有流程精简、设备尺寸小、设备易移动、易安装等优点,撬装化装置可大大减少装置占用空间,避免盲目建厂带来的不必要的经济成本损失,减少大量的现场工作量和安装时间。小型撬装液化系统将沼气集中液化制取生物质 LNG,由储气罐装运和输送,是高效利用沼气的主要途径之一。

1 净化与液化耦合流程设计

通过建立沼气液化装置的热力学模型进行关于低温液化脱除 CO_2 的理论研究与实验验证,软件仿真和实验验证数据显示, CO_2 的低温液化脱除方法不仅能充分利用液化过程中存在的冷量,又能达到脱除 CO_2 的目的^[5]。周淑霞^[6]基于热力学中的能量守恒定理与焓、熵定理,利用沼气液化后的闪蒸气体来降低压缩机出口的气体温度,减少了冷却水的使用,实验证明能量消耗最大的装置为压缩机,通过

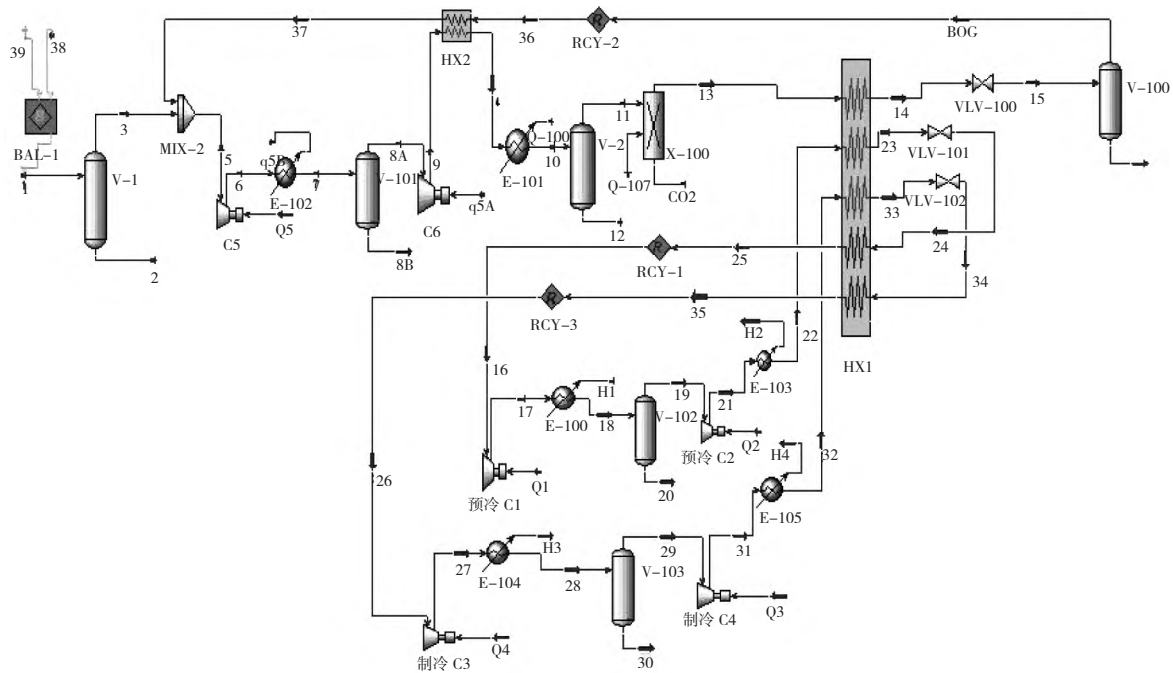
闪蒸气体替换冷却水降低压缩机出口气体温度的方法降低了压缩机的能量损耗。在天然气液化流程详细研究的基础上,分析不同液化流程的优缺点,设计了沼气液化流程,比较性能参数、优选适合的液化流程。结果表明:混合制冷剂液化流程的比能耗最小。采用混合制冷剂撬装式液化制取生物质 LNG 是净化与液化相耦合过程^[7]。

1.1 流程设计

图 1 所示为通过低温液化脱除 CO_2 、选用混合制冷剂及利用闪蒸气体降低压缩机气体温度的液化系统方案。

CO_2 去除系统、冷却循环系统和沼气液化循环系统 3 部分组成整体沼气液化系统。

CO_2 去除系统的工作原理为采用低温液化的方法脱除 CO_2 ,第一步通过气液分离器分离出水分,剩余的气体流通到压缩机,第二步通过换热器进行冷却,第三步通过气液分离器脱除液态 CO_2 ,为到达完全脱除 CO_2 的目的,第四步使气体流进分子筛,利用分子筛脱除残余 CO_2 ,最后流入液化系统当中。



注:C1、C2、C3、C4、C5、C6 为压缩机; VLV-100、VLV-101、VLV-102 为节流阀; V-100、V-101、V-102、V-103 为气液分离器; MIX-2 为混合器; E-100、E-101、E-102、E-103、E-104、E-105 为冷却器; HX1、HX2 为换热器。

图 1 净化与液化耦合的沼气液化系统

预冷回路、主制冷回路两大回路构成冷却循环回路。预冷回路主要包含 E-103 气液分离器、E-100 冷却器、预冷压缩机 C1、C2; 以乙烯、丙烷作为主要成分构成制冷剂。预冷回路采用两级压缩机构成,

通过在压缩机流程后采用冷却水冷却的级间冷却方式,从而达到减少能耗的目的^[9]。鉴于气体冷凝会出现液体的现象^[10],在第一级压缩之后通过气液分离器使气液分离。

主制冷回路主要包含 V-103 气液分离器、冷却器 E-104、E-105, 混合剂压缩机 C3、C4; 以乙烯、甲烷、氮气为主要成分构成制冷剂。通过两级压缩、级间冷却的方法, 经过压缩、冷却流程后, 通过气液分离器去除液体, 避免流入后续压缩机里面^[11]。混合制冷剂液相转化为气相时会吸收大量冷量, 从而构成冷却系统制冷回路所需的冷量补充^[12]。

在沼气液化回路中, CO₂ 脱除完全的沼气通过 LNG-100 冷箱再次冷却, 之后流经气液分离器分离出的液体称为生物质 LNG, 气体称为闪蒸气体。

1.2 流程参数初始化

沼气脱硫净化后的数据: 气体成分占比: N₂ 0.48%、CH₄ 75.68%、CO₂ 20.61%、H₂O 3.23%; 沼气入口压力: 200 kPa; 沼气入口温度: 25℃; 沼气流速: 69.5 Nm³h⁻¹; 沼气储存压力: 200 kPa。

以单位流量液化沼气生产所需的比功耗最小为目标函数, 设置为优化流程的约束条件, 从而对混合制冷剂液化流程中的参数进行优化。约束条件包括: 换热器热端面低压制冷剂处于气相区, 避免液相混合制冷剂进入压缩机^[13]; 换热器中低压制冷剂、高压制冷剂及沼气之间最小传热温差为 3 k; 换热器换热过程不能出现负温差, 各换热器的熵增要大于零; 节流阀要产生温降; 气液分离器入口流体的温度必须在泡点、露点温度之间; 混合制冷剂摩尔组分之和为 1。

混合制冷剂沼气液化流程优化设计变量为: 高压制冷剂和低压制冷剂的的压力、混合制冷剂的组分、换热器的温差。优化计算中参数步长设置为: 温度 $\Delta T = 2$ K, 压力为 $\Delta P = 100$ kPa, 组分的摩尔分率 $\Delta X = 0.01$ 。

2 撬装化沼气液化系统设计

撬装化即基于一底座固定好系统所需设备, 且同一模块固定在一起。冷却过程的冷箱通过若干冷却器相连, 设备的外部制作接头, 进而与压缩机部分连接^[14]。撬装化设备安装简单、移动方便, 可以节省管路之间的连接。因此, 撬装化沼气液化系统不仅可以节约设备成本, 又可以充分利用沼气资源。

本文通过沼气的性质与泡露点、低温分离 CO₂ 技术^[15]、液化流程优选、损失分析, 进行撬装化设计。

2.1 沼气出口撬装

因沼气液化系统所需设备较多, 整体液化系统

撬装化时应先进行模块化处理。沼气中存在不同成分的杂质, 初步净化时遴选合适的工艺^[16]。

沼气存有少量的 H₂S、O₂、H₂、CO、N₂ 以及其他碳氢化合物(C_mH_n)等。第一步将沼气导入封闭的水容器中, 脱除掉 H₂S、部分 CO₂ 等杂质; 第二步流经盛有沸石的密闭容器中, 吸附 CO₂、N₂ 及 H₂O 杂质; 第三步利用分子筛根据分子的直径, 阻碍大分子通过, 达到吸附净化的作用。流程如图 2 所示。

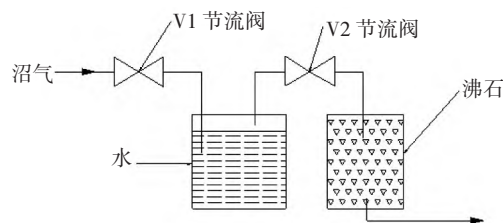


图2 沼气出口模块

2.2 分离二氧化碳撬装

由于 CO₂ 杂质含量较高, 通过沼气出口模块后, 还有部分 CO₂ 残余, 因此仍需对 CO₂ 进行脱除。压缩机 K-1、K-101、混合器 MIX-2、气液分离器 V-1、V-2、V-101 和分子筛 X-100 组成 CO₂ 去除撬装装置。

2.3 预冷撬装

在周淑霞^[5]液化流程的优选中, 可以看出, 带预冷的混合制冷剂液化流程比能耗低于单级混合制冷剂液化流程, 因此在净化与液化耦合的撬装化中设计了预冷撬装。预冷撬装的作用是对净化后的沼气和主制冷系统进行预冷。预冷压缩机 C1、C2, 冷却器 E-100、E-103 和气液分离器 V-102 组成预冷撬装系统。

2.4 制冷撬装

周淑霞^[6]对液化流程研究比较发现, 采取两级压缩机制冷时, 带预冷循环的液化流程不仅比能耗较低, 且符合各级循环制冷的要求, 所以采用带预冷混合制冷剂的循环流程, 混合压缩机 C2、C4, 气液分离器 V-103 和冷却器 E-104、E-105 组成主混合制冷剂撬装。

2.5 冷箱撬装

换热器是对液化系统能耗影响较大的一个因素, 在流程中属于重要装置, 故制取生物质 LNG 液化流程中选择多冷箱合并方式, 通过 1 个大冷箱装置进行制冷^[17]。冷箱撬装主要包括 LNG-100 换热器, V-100 气液分离器和节流阀 VLV-100、VLV-

101、VLV-102 等几部分。

3 液化系统计算结果

3.1 系统性能参数

利用 Aspen HYSYS 软件、PR 方程对图 1 的沼气液化系统进行仿真计算,得到各装置性能参数数据^[18]。沼气液化制取生物质 LNG 装置日处理量为 2000 Nm³; 预冷压缩机 C1 的入口压力为 200 kPa, 出口压力为 780 kPa, 流量为 72.68 Nm³·h⁻¹; 预处理压缩机 C2 的入口压力为 780 kPa, 出口压力为 3950 kPa, 流量为 72.01 Nm³·h⁻¹; 压缩机 C3 的入口压力为 200 kPa, 出口压力为 850 kPa; 压缩机 C4 的入口压力为 840 kPa, 出口压力为 3990 kPa; 压缩机 C5 的入口压力为 200 kPa, 出口压力为 780 kPa; 压缩机 C6 的入口压力为 850 kPa, 出口压力为 3000 kPa。流程中设备的主要性能参数如表 1 所示。

表 1 流程主要性能参数

| 装置性能 | 参数 | 装置性能 | 参数 |
|-----------------------------|--------|---|-------|
| 压缩机 C1 耗功/kW | 4.123 | 低压制冷剂流量/(Nm ³ ·h ⁻¹) | 64.55 |
| 压缩机 C2 耗功/kW | 3.876 | 高压制冷剂流量/(Nm ³ ·h ⁻¹) | 96.83 |
| 压缩机 C3 耗功/kW | 4.428 | 冷却水负荷 E1/(kJ·h ⁻¹) | 18050 |
| 压缩机 C4 耗功/kW | 5.221 | 冷却水负荷 E2/(kJ·h ⁻¹) | 17490 |
| 压缩机 C5 耗功/kW | 4.704 | 冷却水负荷 E-100/(kJ·h ⁻¹) | 16800 |
| 压缩机 C6 耗功/kW | 4.619 | 冷却水负荷 E-103/(kJ·h ⁻¹) | 44860 |
| 比能耗/(kWh·Nm ⁻³) | 0.455 | 冷却水负荷 E-104/(kJ·h ⁻¹) | 20850 |
| 换热器 HX2 平均温度/K | 14.1 | 冷却水负荷 E-105/(kJ·h ⁻¹) | 29500 |
| 液化率 | 0.9242 | 比水负荷/(kJ·Nm ⁻³) | 2123 |

由表 1 可以看出,沼气液化流程的比能耗为 0.455,液化率为 0.9242,沼气液化后 N₂ 含量为 0.63%、CH₄ 含量为 99.37%。根据计算结果可以得出:沼气液化制取生物质 LNG 比能耗较低,液化过程中设备正常运行,为沼气液化中选取设备、系统正常运行提供了理论基础。

3.2 冷箱性能分析

对流程中的温度、冷热流、换热面积等变量因素进行仿真^[19],利用 Aspen HYSYS 软件、PR 方程模拟结果见下图。

由图 3、图 4 可见,冷箱内的换热面积、热流同温度成正比关系,冷热曲线成平行线趋势,可以得出冷热流程的温差在近似相等情况下变动,减小了损失。

由图 5 可见,冷箱内冷热温差随温度上下浮动,可见主制冷剂、沼气、预冷制冷剂之间进行热交换

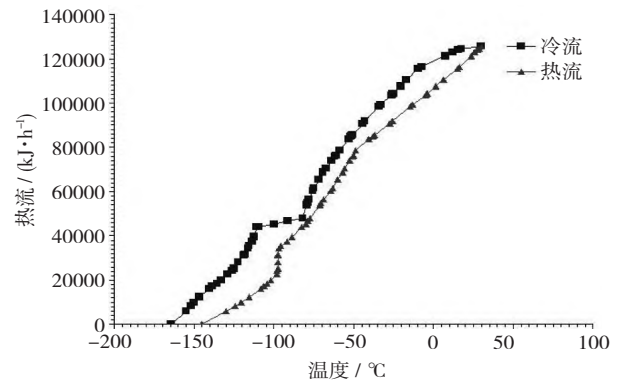


图 3 冷箱内温度与热流关系曲线

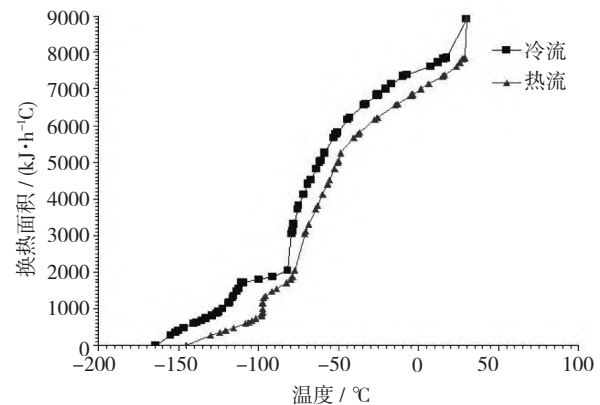


图 4 冷箱内温度与换热面积关系曲线

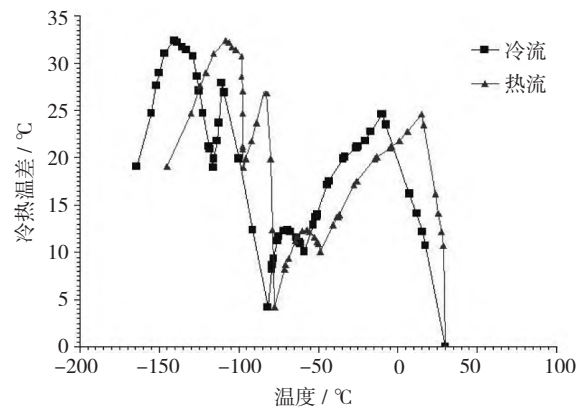


图 5 冷箱内冷热温差曲线

时,伴随温度波动。冷热温差于液化系统的冷能损失成正比关系。

3.3 系统降低能耗方法

液化流程中采取以下方式来减少系统的能耗。

(1) 利用高效压缩机、压缩机级间加冷却是一种减少能耗方式之一。

(2) 对主混合制冷剂和沼气液化回路通过预冷装置进行预冷。

(3) 对于系统中的冷量利用,一种方法是预处

理中的沼气冷却所需冷量来自于冷却循环回路的冷量；另一种是通过沼气液化后的冷量和脱除 CO₂ 的沼气进行热量交换,从而减少系统中冷却水的使用。

3.4 系统各节点参数

表 2 所示为液化系统优化后各节点的工艺参

数。表中各数据为沼气液化系统中压缩机、换热器和节流阀的选型提供了理论依据,表 2 中节点 1、3、4、5、6、7、8、9、10、11、13、14、15、36、37 为不同阶段的沼气;节点 2、12 为水;节点 16~25 为丙烷、乙烯制冷剂;节点 26~35 为氮气、甲烷及乙烯制冷剂。

表 2 沼气液化流程中节点的值

| 节点 | 温度/℃ | 压力/kPa | 摩尔焓 | 摩尔熵 | 摩尔流量 | 气相分率 |
|----|--------|--------|------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------|
| | | | (J·mol ⁻¹) | (J·mol ⁻¹ ·℃) | (Nm ³ ·h ⁻¹) | |
| 1 | 25.00 | 200.0 | -1.464e+005 | 178.2 | 69.50 | 1.000 |
| 2 | 25.00 | 200.0 | -2.862e+005 | 53.73 | 1.164 | 0.0000 |
| 3 | 25.00 | 200.0 | -1.441e+005 | 180.3 | 68.34 | 1.0000 |
| 4 | 150.1 | 299.0 | -1.336e+005 | 190.3 | 72.01 | 1.0000 |
| 5 | 25.00 | 200.0 | -1.395e+005 | 180.3 | 70.41 | 1.0000 |
| 6 | 159.7 | 780 | -1.342e+005 | 180.3 | 70.41 | 1.0000 |
| 7 | 30.00 | 780 | -1.398e+005 | 168.0 | 72.68 | 1.0000 |
| 8 | 30.00 | 780 | -1.384e+005 | 169.1 | 69.87 | 1.0000 |
| 9 | 165.4 | 3000 | -1.333e+005 | 172.1 | 72.01 | 0.996 |
| 10 | 30.00 | 3000 | -1.391e+004 | 156.2 | 71.72 | 1.000 |
| 11 | 30.00 | 3000 | -1.385e+004 | 170.4 | 148.0 | 1.0000 |
| 12 | 30.00 | 3000 | -2.860e+005 | 55.18 | 0.2845 | 0.000 |
| 13 | 30.00 | 3000 | -7.421e+004 | 154.8 | 57.280 | 1.0000 |
| 14 | -145.0 | 2990 | -8.741e+004 | 84.18 | 57.28 | 0.0000 |
| 15 | -154.2 | 200 | -8.741e+004 | 85.18 | 57.28 | 0.0759 |
| 16 | 30.00 | 200 | -1.198e+004 | 169.0 | 64.55 | 1.0000 |
| 17 | 112.6 | 850 | -1.956e+005 | 172.4 | 64.55 | 1.000 |
| 18 | 28.00 | 840 | -1.262e+004 | 155.5 | 64.55 | 1.0000 |
| 19 | 28.00 | 840 | -1.262e+004 | 155.1 | 64.55 | 1.0000 |
| 20 | 28.00 | 840 | -1.402e+005 | 66.65 | 0.000 | 0.0000 |
| 21 | 123.9 | 3950 | -2.125e+004 | 158.7 | 64.55 | 0.9396 |
| 22 | 30.00 | 3950 | -2.327e+004 | 112.2 | 64.55 | 0.0523 |
| 23 | -80.00 | 3940 | -3.399e+004 | 69.31 | 64.55 | 0.000 |
| 24 | -81.30 | 200 | -3.399e+005 | 70.44 | 64.55 | 0.0181 |
| 25 | 30.00 | 200 | -1.198e+004 | 169 | 64.55 | 1.0000 |
| 26 | 11.90 | 199 | -1.592e+005 | 175.2 | 96.83 | 1.000 |
| 27 | 147.0 | 850 | -1.057e+004 | 178.5 | 96.83 | 1.000 |
| 28 | 30.00 | 850 | -1.539e+004 | 165.1 | 96.83 | 1.0000 |
| 29 | 30.00 | 850 | -1.539e+005 | 165.1 | 96.83 | 1.000 |
| 30 | 30.00 | 850 | -1.563e+004 | 0.000 | 0.000 | 0.0000 |
| 31 | 180.7 | 3990 | -4.051e+004 | 168.6 | 96.83 | 1.0000 |
| 32 | 28.00 | 3990 | -1.620e+004 | 150.3 | 96.83 | 1.000 |
| 33 | -145.0 | 3980 | -3.041e+004 | 78.64 | 96.83 | 0.000 |
| 34 | -164.1 | 200 | -3.041e+004 | 81.87 | 96.83 | 0.2282 |
| 35 | 11.90 | 199 | -3.041e+004 | 175.2 | 96.83 | 1.000 |
| 36 | -15.42 | 200 | -7.321e+004 | 145.9 | 4.345 | 1.0000 |
| 37 | 25.00 | 200 | -6.715e+004 | 176.9 | 4.345 | 1.000 |

4 生物质 LNG 与压缩罐装 CNG 比较

沼气采用压缩罐装的方式,需利用为 3~4 级压

缩机进行压缩,压缩过程中压力可达到 20 MPa。通过本流程所生产的液化沼气与沼气压缩罐装沼气 CNG (Compressed Natural Gas)^[20] 相对比,如表 3 所示。

表3 沼气液化 LNG 与压缩罐装 CNG 比较

| 项目 | 液化沼气(LNG) | 压缩罐装沼气(CNG) |
|----------------------|-----------|-------------|
| CH ₄ 含量/% | 99.37 | 72.82 |
| CO ₂ 含量/% | 0 | 16.42 |
| N ₂ 含量/% | 0.63 | 9.93 |
| 储存压力/MPa | 0.2 | 20 |

由表3可见,通过分析仿真计算结果可以得到:液化之后的沼气,其甲烷含量远大于压缩罐装沼气的26.7%,CO₂含量及N₂含量远小于压缩罐装沼气中CO₂、N₂的含量。

5 结论

将撬装化设计技术引入沼气液化系统的设计中,在现有模块化设计的基础上,对沼气液化系统运行中的模块构建、模块设计进行深入的研究和探索。建立净化与液化耦合的沼气液化系统,进行了撬装化系统的模块设计,得出各撬装化装置的性能数据。采用序贯模块法、PR方程对系统中各个节点的参数进行数值计算,得出沼气净化与液化相耦合的全流程节点的温度、压力、摩尔焓、摩尔熵、摩尔流量、气相分率和气液两相组分的摩尔分数。结果表明:生物质LNG液化率为0.9242,该装置的能耗成本仅为0.455 kWh·Nm⁻³,相当于每0.25元·m⁻³天然气。液化后生物质LNG中CH₄含量99.33%,N₂含量0.63%,CO₂含量0.04%。LNG中CH₄含量高于压缩罐装的沼气(CNG)26.7%,CO₂含量及N₂含量均低于压缩罐装沼气。

参考文献:

- [1] 袁艳文,刘昭. 生物质沼气工程发展现状分析[J]. 江苏农业科学,2021,49(6):28-33.
- [2] 罗尔呷,张宇,冯祎宇,等. 我国沼气产业发展的历程、现状和未来方向研究—基于河南漯河地区的典型案例[J]. 中国农业资源与区划,2021,43(5):132-142.
- [3] 胡涛,赵源坤. 欧盟沼气利用的经验及对中国的启示[J]. World Environment,2021(4):74-77.
- [4] 韩瑞萍,尚伟,张少鹏,等. 中小型沼气工程分散沼气源集中利用模式探讨[J]. 中国沼气,2015,33(4):62-65.
- [5] 周淑霞. 基于 Aspen HYSYS 方法的制冷剂液化沼气流程优化分析[J]. 中国沼气,2015,33(4):57-61.
- [6] 周淑霞. 基于 Aspen HYSYS 方法沼气液化流程设计及分析[J]. 中国沼气,2015,33(1):70-74.
- [7] 周淑霞,董玉平,张玉林,等. 沼气混合制冷剂循环液化流程与设备焓分析[J]. 农业机械学报,2011,42(12):138-142.
- [8] 周淑霞,董玉平,张玉林,等. 基于 Aspen HYSYS 的沼气中 CO₂ 气体低温液化分离技术[J]. 农业机械学报,2011,42(8):111-116.
- [9] 曹红忠. 甲烷液化深冷分离生产工艺的比较分析[J]. 工艺技术,2020(16):255-256.
- [10] 杨文,郭悠悠,曹学文. 新型小型天然气液化流程[J]. 天然气化工,2020,45(3):61-65.
- [11] Baccioli A, Antonelli S M, Frigo U. Small scale bio-LNG plant: Comparison of different biogas upgrading techniques[J]. Applied Energy,2018(217):328-335.
- [12] 常明亮,王勇,李剑峰. 混合制冷剂沼气带压液化流程的设计与优化[J]. 现代化工,2020,40(12):199-205.
- [13] Chenghao Li, Siyang Zheng, Yufeng Chen, Et al. Proposal and parametric analysis of an innovative natural gas pressure reduction and liquefaction system for efficient exergy recovery and LNG storage[J]. Energy,2021:223.
- [14] 李贺松,董宪莹,高杨,等. 小型撬装 LNG 装置液化工艺对比分析[J]. 天然气与石油,2015,33(3):49-53.
- [15] 何婷,林文胜. 基于余热利用的活化 MDEA 法脱除 CO₂ 的天然气液化系统[J]. 化工学报,2021,72(S1):453-460.
- [16] Bahram G, Armin E, Masoud Z. Thermodynamic and economic evaluation of biomethane and carbon dioxide liquefaction process in a hybridized system of biogas upgrading process and mixed fluid cascade liquefaction cycle[J]. Process Safety and Environmental Protection,2021(115):222-243.
- [17] Marco S, Mariano P, Gabriele C, Et al. Theoretical evaluation and optimization of a cryogenic technology for carbon dioxide separation and methane liquefaction from biogas[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering,2019(62):132-143.
- [18] 付阳,李自力,崔淦. 含氧煤层气液化 HYSYS 模拟及安全性分析[J]. 天然气化工,2015,40(6):75-82.
- [19] Jianjun Chen, Dan Li. A sustainable syngas cryogenic separation process combined with ammonia absorption refrigeration pre-cooling cycle[J]. Journal of Cleaner Production,2021,313(1):1-25.
- [20] Spitoni M, Mariano P, Gabriele C. Theoretical evaluation and optimization of a cryogenic technology for carbon dioxide separation and methane liquefaction from biogas[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering,2019(62):132-143.