

工业技术

混合冷剂沼气带压液化流程的设计与优化

常明亮¹,王勇^{1*},李剑峰²,王力³,华东阳¹

(1.西安石油大学石油工程学院,陕西西安710065;
2.中国石油西南油气田分公司输气管理处,四川成都610215;
3.西南石油大学石油与天然气工程学院,四川成都610500)

摘要:为了提高沼气液化的CO₂脱除指标,简化脱碳工艺,采用带压液化技术设计了一种混合冷剂沼气带压液化流程:将预处理后的沼气二级膜分离,得到高纯度CH₄流和富CO₂流,再经带压液化和精馏,得到液态CH₄和食品级液态CO₂。HYSYS流程模拟表明,对于流量为1000 kg/h、组分为60% CH₄+40% CO₂的模拟沼气,该流程可实现沼气液化率84.24%、CH₄回收率83.62%、CO₂回收率85.17%、液态CH₄产出率51.06%、液态CO₂产出率33.18%、产品总销售额7797元/h。在此基础上,建立了HYSYS & Matlab混合仿真平台,以产品比功耗为目标函数,采用序列二次规划(SQP)算法,对流程进行了优化,优化后的比功耗降低了26.8%。最后,通过调整沼气组分(CH₄ 57%~62%)和流量(920~1060 kg/h),分析了优化工况的适应性。

关键词:沼气;带压液化;混合冷剂;膜分离;HYSYS & Matlab;优化

中图分类号:TQ519

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)12-0199-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.12.042

Design and optimization of a biogas pressurized liquefaction process with mixed refrigerant

CHANG Ming-liang¹, WANG Yong^{1*}, LI Jian-feng², WANG Li³, HUA Dong-yang¹

(1.College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2.Gas Transmission Management Division, PetroChina Southwest Oilfield & Gasfield Company, Chengdu 610215, China; 3.Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract:To improve CO₂ removal index of biogas liquefaction and simplify its decarbonization process, a biogas pressurized liquefaction process with mixed refrigerant is designed. After the pretreated biogas is separated by a two-stage membrane, a high-purity CH₄ stream and a CO₂-rich stream are obtained. Liquid CH₄ and food-grade liquid CO₂ are obtained through liquefaction and distillation under pressure. HYSYS simulation shows that this process can realize a biogas liquefaction rate of 84.24%, a CH₄ recovery of 83.62%, a CO₂ recovery of 85.17%, a liquid CH₄ output rate of 51.06%, and a liquid CO₂ output rate of 33.18% when the simulated biogas has a flow of 1000 kg·h⁻¹ and a composition of 60% CH₄+40% CO₂. Based on this, HYSYS & Matlab, a co-simulation platform, is constructed. Taking the product specific power consumption as the objective function, the process is optimized by the sequential quadratic programming (SQP) algorithm. Specific power consumption reduces by 25.83% after optimization. Finally, the adaptability of the optimized conditions is analyzed by adjusting the biogas composition (CH₄ content between 57% and 62%) and flow (920-1060 kg·h⁻¹).

Key words: biogas; pressurized liquefaction; mixed refrigerant; membrane separation; HYSYS & Matlab; optimization

我国近10年来开始逐渐重视和发展沼气产业,积极推进生物质燃气行业发展。2016年国家能源局在《生物质能发展“十三五”规划》中提出到2020年初步形成一定规模的绿色低碳生物天然气产业,并形成一定规模的示范区^[1]。2018年9月,国家能源局综合司下发的《关于请上报生物天然气产业化示范储备项目的通知》提出:将建立政策支持和管

理体系,完善补贴支持政策,建设一批商业化项目,初步形成生物天然气生态循环经济新业态。然而,随着我国沼气工程逐渐向大型方向发展,丰富的沼气资源面临着后续消纳的问题,特别是在难以并入天然气管网、电网等情况下,这一问题更加突出。利用天然气液化技术将沼气液化供应给周边LNG加气站和用户是实现沼气商业化应用的一种新

收稿日期:2020-02-02;修回日期:2020-10-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51274166);陕西省教育厅科研计划项目(18JK0629);西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划项目(YCS18213069)

作者简介:常明亮(1994-),男,硕士生;王勇(1988-),男,博士,讲师,从事油气管道输送数值模拟研究,通讯联系人,wyong029@163.com。

方式^[2]。

针对沼气液化以及 CH₄-CO₂ 分离,满林香^[3]设计了醇胺法沼气脱碳工艺流程,并将回收的 CO₂ 和纯化的 CH₄ 同步液化,得到食品级液态 CO₂ 和液态 CH₄,实现了沼气的高效利用,适用于大型的沼气液化工程。周淑霞等^[4-5]先后研究了沼气中 CO₂ 低温分离流程和沼气液化流程,前者使沼气中 CH₄ 含量显著提高,后者从能耗方面比较了小型 N₂ 膨胀、混合制冷剂液化 2 套典型液化流程特点,认为混合制冷剂液化流程较适合沼气液化。李康春^[6]设计了一套沼气膜分离净化液化工艺:沼气经二级膜分离得到高纯度 CH₄ 和 CO₂,试验表明,净化后的 CH₄ 体积分数达到 99% 以上。上述研究为沼气的液化奠定了一定的理论基础。

沼气中 CH₄ 含量丰富,但较高的 CO₂ 含量却给液化带来了很大的困难。CH₄ 的临界点为 -83℃, 4.604 MPa (绝对压力), CO₂ 的临界点为 31℃, 7.382 MPa (绝对压力), CO₂ 的气固两相区最高压力为 4.860 MPa (绝对压力)^[7]。可见 CO₂ 的气固两相区的压力超出了 CH₄ 临界压力,所以不可能在不进入 CO₂ 的气固两相区的情况下使用物理方法从 CH₄-CO₂ 系统中分离出纯 CH₄,即在不进入 CO₂ 气固两相区的情况下,从 CH₄-CO₂ 系统分离出的 CH₄ 纯度是有限的。例如,在 4.93 MPa (绝对压力) 下运行,理论上可以避免固体 CO₂ 的形成,通过接近混合物的临界位置来确定 CH₄ 纯度限值,

在这种情况下,临界 CH₄-CO₂ 系统最低可含有 6% 的 CO₂,低温分离或精馏实际操作过程中为 10%~15% CO₂^[7],不能满足液化原料气对 CO₂ 含量的要求。

在常规液化流程中,LNG 温度约为常压下 -162℃,对应的 CO₂ 溶解度是 0.02%,而实际操作中要求 LNG 原料气中 CO₂ 体积分数小于 50×10⁻⁶。目前比较成熟的化学吸收法脱碳能达到此种效果,但再生能耗很大,对环境有一定的危害性。而带压液化技术^[8]通过提升液化压力来增加 CO₂ 在液态 CH₄ 中的溶解度(系统压力为 1~2 MPa 时,对应的液化温度为 -120~-100℃,根据文献^[9]知 CO₂ 的溶解度为 1%~3%),从而提高液化原料气 CO₂ 含量的脱除指标。

基于以上分析,本文中采用较为成熟的混合制冷剂液化工艺,同时引入带压液化技术和膜分离工艺,设计了一种混合冷剂沼气带压液化流程,得到满足纯度要求的液态 CH₄ 和食品级液态 CO₂。同时建立 HYSYS & MATLAB 混合仿真平台,对流程进行了模拟和优化,拟为大型沼气工程的液化工艺设计提供指导和依据。

1 带压液化流程设计

为了简化研究,省略了沼气的预处理过程,认为进料气仅由 CH₄、CO₂ 2 种组分构成。如图 1 所示,带压液化流程包含 3 部分。

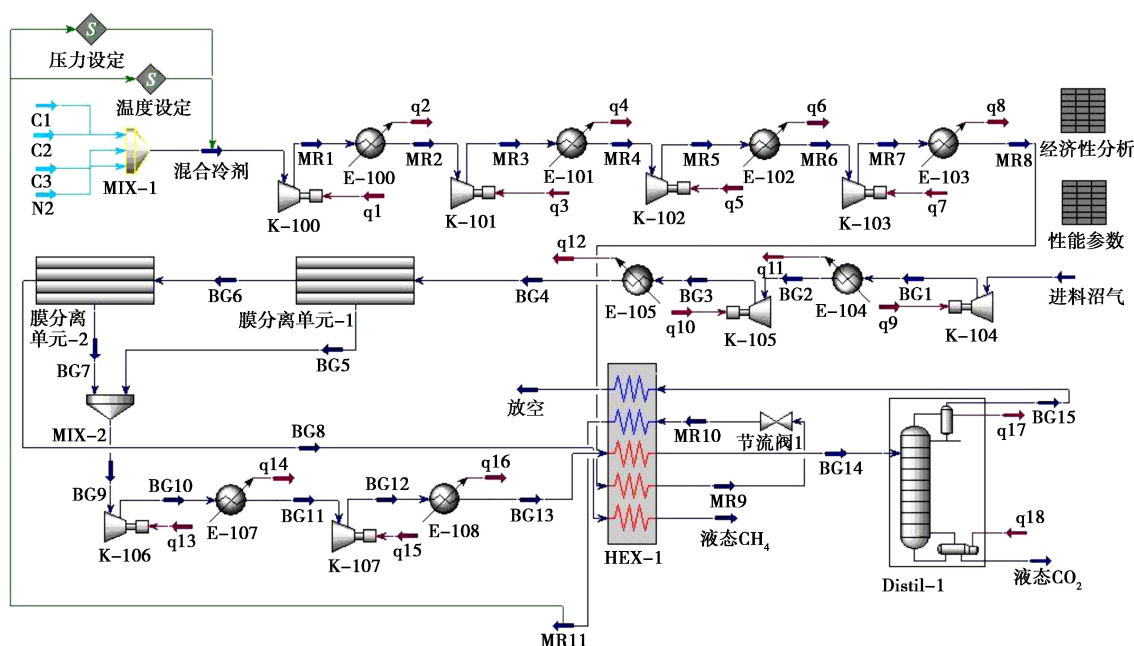


图 1 混合冷剂沼气带压液化流程

(1) 二级膜分离

膜分离法具有无相变、分离效率高、设备紧凑、可靠性高等优点^[10],可满足带压液化沼气的CO₂脱除指标,很大程度上简化了脱碳工艺流程。该方法在国内外已得到广泛应用,以醋酸纤维膜的膜分离应用最为广泛和经济。如图2所示,将原料气加压至2 MPa进入一级膜分离单元,CO₂通过聚合物膜在渗透侧富集。而保留气中主要是CH₄,体积分数一般在85%左右,再次进入二级膜分离单元,保留气中CH₄体积分数在99%左右,少量CO₂在渗透侧富集。将渗透侧富CO₂流加压至2.8 MPa后,引入冷箱预冷液化。研究表明,操作过程中分离膜两侧压力差需满足约为1 MPa条件,可保证CH₄体积分数达到99%以上^[11]。

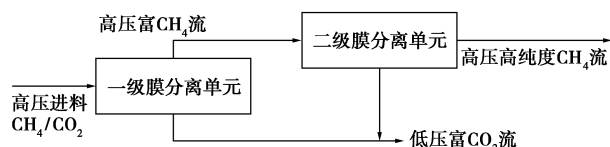


图2 CH₄/CO₂ 二级膜分离过程

(2) 混合冷剂制冷循环

混合冷剂经四级压缩、水冷器冷却后,经节流阀节流,将高纯度CH₄流和富CO₂流在冷箱中液化,高纯度CH₄流液化后进入LNG储罐带压储存。气化后的低压制冷剂回到一级压缩机入口,继续循环制冷。

(3) CO₂ 精馏提纯

将液化的富CO₂流引入精馏塔,控制塔底CH₄含量得到高纯度的食品级液态CO₂,进入CO₂成品贮罐。控制塔顶温度避免CO₂发生冰堵,将塔顶产生的少量CH₄/CO₂混合气回收冷量后放空燃烧。

根据以上工艺,基于HYSYS软件建立了上述带压液化流程模型。但是,Aspen HYSYS没有内置的气体渗透单元模块,为此,采用了“Membrane”膜分离扩展模块。该模块已被国外学者^[12-14]用于从CH₄/CO₂混合气体以及烟气中分离CO₂等方面的研究。

2 液化流程参数分析

2.1 初始参数设定及产品要求

为便于研究,假设经预处理的沼气只有CH₄、CO₂ 2种组分,组成为60% CH₄+40% CO₂,其他参数见表1。

表1 初始参数设定及产品要求

参数	值	备注
进料温度	30℃	
进料压力	500 kPa	
进料流量	1000 kg/h (868.3 m ³ /h)	
物性模拟流体包	GERG-2008	天然气热物性计算领域最为全面的计算方法,并且随着新实验数据的获得而不断扩充和完善 ^[15]
水冷器冷却温度	30℃	
水冷器/换热器压降	10 kPa	
最小换热温差	3℃	
压缩机等熵效率	85%	
压比	<3	
制冷剂	CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ , N ₂	
CH ₄ 流液化前纯度/ 液化率/液化压力	99%/1/1~2 MPa	防止液化过程中CO ₂ 发生冻堵
液态CO ₂ 纯度	>99.95%	符合食品级液态CO ₂ 国家标准 ^[16]
醋酸纤维膜	$P_{CO_2} = 2.43$ Barrer, $\alpha_{CO_2/CH_4} = 22.1$ 膜单元数=1, 膜单元面积=10 m ²	文献[17]

2.2 流程参数及性能指标

衡量液化流程性能的主要指标是比功耗和液化率。本文中定义流程的比功耗:

$$w = (W_{\text{制冷剂}} + W_{\text{原料气}} + W_{\text{富CO}_2} + W_{\text{精馏塔}}) / (M_{\text{CH}_4} + M_{\text{CO}_2}) \quad (\text{kWh/kg}) \quad (1)$$

沼气液化率:

$$\gamma = [(M_{\text{CH}_4} + M_{\text{CO}_2}) / W_{\text{原料气}}] \times 100\% \quad (2)$$

CH₄ 回收率:

$$x_{\text{rec,CH}_4} = (1 - M_{\text{放空的CH}_4} / M_{\text{原料气中的CH}_4}) \times 100\% \quad (3)$$

CO₂ 回收率:

$$x_{\text{rec,CO}_2} = (1 - M_{\text{放空的CO}_2} / M_{\text{原料气中的CO}_2}) \times 100\% \quad (4)$$

液态CH₄ 产出率:

$$\eta_{\text{CH}_4} = (M_{\text{CH}_4} / M_{\text{原料气}}) \times 100\% \quad (5)$$

液态CO₂ 产出率:

$$\eta_{\text{CO}_2} = (M_{\text{CO}_2} / M_{\text{原料气}}) \times 100\% \quad (6)$$

式中, $W_{\text{制冷剂}}$ 、 $W_{\text{原料气}}$ 、 $W_{\text{富CO}_2}$ 分别为制冷剂压缩功、原

料气膜分离前压缩功、富 CO₂ 流预冷液化前压缩功, kW; $W_{\text{精馏塔}}$ 为精馏塔热耗, kW; $M_{\text{原料气}}$ 为原料气质量流量, kg/h; $M_{\text{原料气中的CH}_4}$ 为原料气中 CH₄ 质量流量, kg/h; $M_{\text{原料气中的CO}_2}$ 为原料气中 CO₂ 质量流量, kg/h; $M_{\text{放空的CH}_4}$ 为放空气中 CH₄ 质量流量, kg/h;

$M_{\text{放空的CO}_2}$ 为放空气中 CO₂ 质量流量, kg/h; M_{CH_4} 为液态 CH₄ 质量流量, kg/h; M_{CO_2} 为液态 CO₂ 质量流量, kg/h; w 为比功耗, kWh/kg。

根据前面所述,并参考文献[18],表 2 给出了基本案例下的流程关键参数模拟结果。

表 2 流程关键参数模拟结果

变量	MR_Com	MR7	MR10	BG3	BG5	BG6	BG8	BG14	PLiqCH ₄	LiqCO ₂
T/°C	0.9708	83.81	-125	89.83	29	30	30	-30	-108	-9.442
P/MPa	0.2	3.5	0.21	2	1	1.98	1.97	2.78	1.96	2.7
F/(kmol·h ⁻¹)	118.5	118.5	118.5	36.72	13.2	23.52	18.75	17.97	18.75	12.18
CH ₄ /Mole-Frac	0.2390	0.2390	0.2390	0.6	0.1201	0.8693	0.9823	0.2011	0.9823	0.0004
CO ₂ /Mole-Frac	0	0	0	0.4	0.8799	0.1307	0.0177	0.7989	0.0177	0.9996
C ₂ H ₆ /Mole-Frac	0.1116	0.1116	0.1116	0	0	0	0	0	0	0
C ₃ H ₈ /Mole-Frac	0.5889	0.5889	0.5889	0	0	0	0	0	0	0
N ₂ /Mole-Frac	0.0605	0.0605	0.0605	0	0	0	0	0	0	0

此时流程中 HEX-1 的最小换热温差为 3.298°C, 流程比功耗为 0.407 4 kWh/kg, 沼气液化率为 84.24%, CH₄ 回收率为 83.62%, CO₂ 回收率为 85.17%, 液态 CH₄ 产出率为 51.06%, 液态 CO₂ 产出率为 33.18%。

3 流程优化

3.1 目标函数和约束条件

以流程比功耗为目标函数,以换热器最小换热温差不小于 3°C, 返回一级压缩机的低压制冷剂气相分率等于 1, 压比不大于 3, CH₄ 带压液化率为 1, 二级膜分离 CH₄ 纯度和液态 CO₂ 纯度满足表 1 为约束条件, 优化变量包括制冷剂流量、制冷剂压缩机出口压力及节流后温度。为了提升优化效率, 减少优化变量数目, 只考虑混合冷剂四级压缩出口压力 χ 为压缩机出口压力(冷剂高压)优化变量, 其他级压缩出口压力不被视为独立的优化变量, 由 χ 根据等比压缩最优理论计算, 最终的目标函数及约束条件如式(7)、式(8)所示。

$$\begin{cases} \min f(X) = (W_{\text{制冷剂}} + W_{\text{原料气}} + W_{\text{富CO}_2} + W_{\text{精馏塔}}) / \\ (M_{\text{CH}_4} + M_{\text{CO}_2}) (\text{kWh/kg}) \end{cases} \quad (7)$$

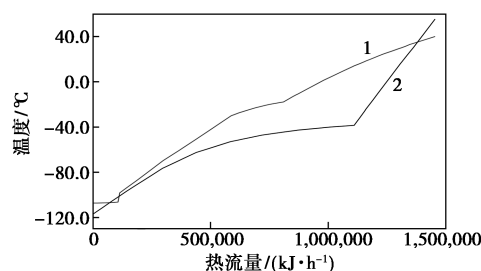
$$\begin{cases} X = [q_{c_1} \quad q_{c_2} \quad q_{c_3} \quad q_{N_2} \quad \chi \quad \mu] \\ \min.\text{approach}(\text{HEX} - 1) - 3 \geq 0 \\ (p_{\text{MR1}}/p_{\text{MR_Com}}, p_{\text{MR3}}/p_{\text{MR2}}, p_{\text{MR5}}/p_{\text{MR4}}, p_{\text{MR7}}/p_{\text{MR6}}) \in [1, 3] \end{cases} \quad (8)$$

式中, X 为自变量矩阵, 结合液化流程, 包括冷剂 CH₄ 流量 q_{c_1} 、冷剂 C₂H₆ 流量 q_{c_2} 、冷剂 C₃H₈ 流量

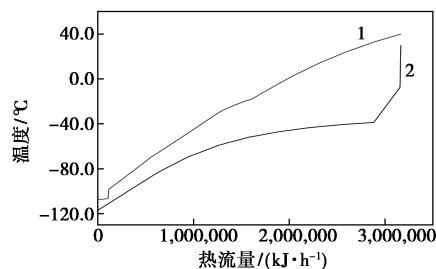
q_{c_3} 、冷剂 N₂ 流量 q_{N_2} 、混合冷剂一级压缩出口压力 p_{MR1} 、混合冷剂二级压缩出口压力 p_{MR3} 、混合冷剂三级压缩出口压力 p_{MR5} 、混合冷剂四级压缩出口压力 χ 、混合冷剂节流后温度 μ 。

3.2 变量限

取基本案例中冷剂变量的 1.3 倍作为变量上限, 0.5 倍作为变量下限, 此时下限的换热器的换热曲线重合度较高(较低的能耗), 上限的换热曲线距离较远(较高的能耗), 如图 3 所示。最佳的换热曲线应处于该范围内^[18], 最终的变量上下限见表 3。



(a) 变量下限



(b) 变量上限

1—热流换热曲线; 2—冷流换热曲线

图 3 变量下限和变量上限的换热曲线

表 3 变量限

变量	基本案例值	上限	下限
$q_{C_1}/(\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1})$	28.32	36.816	14.16
$q_{C_2}/(\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1})$	13.22	17.186	6.61
$q_{C_3}/(\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1})$	69.77	88.4	34
$q_{N_2}/(\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1})$	7.17	9.3184	3.584
χ/MPa	4.8	5.2	3.2
$\mu/^\circ\text{C}$	-117	-110	-130

3.3 优化过程

HYSYS 自带的稳态优化器可进行流程优化,但对于变量比较多的流程,经常发生优化结果不满足约束的问题,故而将优化过程转移到 MATLAB^[19]。通过创建 ActiveXcom 服务器可实现 2 个程序之间有效的信息交互。使用 MATLAB 进行流程优化有 2 大优点:一方面可以轻松满足约束并允许自定义优化例程;另一方面,在优化过程中可进行详细的输出显示。本研究采用序列二次规划算法(SQP)求解 $\min f(X)$, 确定变量最优解。详细优化过程如图 4 所示,SQP 算法迭代过程见图 5。

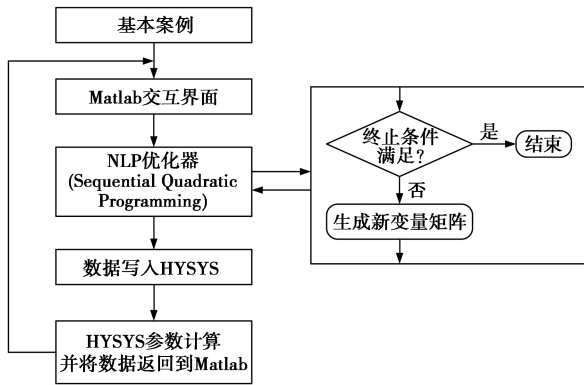


图 4 SQP 算法的流程优化过程

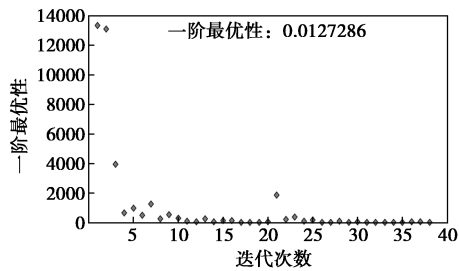


图 5 SQP 算法迭代过程

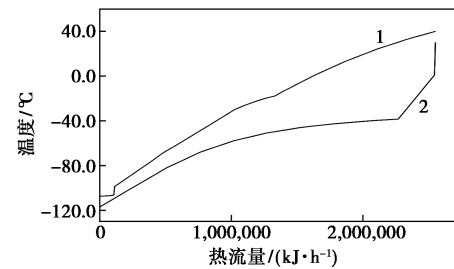
3.4 结果及分析

在 MATLAB & HYSYS 混合仿真平台的基础上,采用 SQP 优化算法对液化工艺过程的比功耗进行

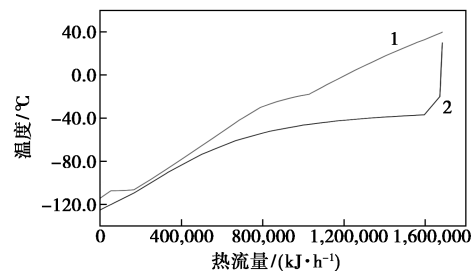
优化,目标函数及变量的最优解如表 4 所示。比功耗降为 0.298 2 kWh/kg,与优化前相比降低了 26.8%,优化后热冷流换热曲线更加接近,表明优化后的换热器具有较高的传热效率,制冷剂的冷能得到充分利用。图 6 为 HEX-1 优化前与优化后的换热曲线。

表 4 SQP 算法优化结果

目标函数及变量	优化前	优化后
$w/(\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1})$	0.4074	0.2982
$q_{C_1}/(\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1})$	28.32	14.84
$q_{C_2}/(\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1})$	13.22	7.945
$q_{C_3}/(\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1})$	69.77	47.00
$q_{N_2}/(\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1})$	7.168	4.74
χ/MPa	3.5	4.796
$\mu/^\circ\text{C}$	-117	-125



(a) 冷热流体的换热曲线(优化前)



(b) 冷热流体的换热曲线(优化后)

1—热流换热曲线;2—冷流换热曲线

图 6 SQP 算法优化前后 HEX-1 的换热曲线

4 优化工况适应性分析

根据当前市场情况,LNG 和食品级液态 CO_2 的价格分别约为 4.4、12 元/kg,则整个工艺的产品总销售额 S 为:

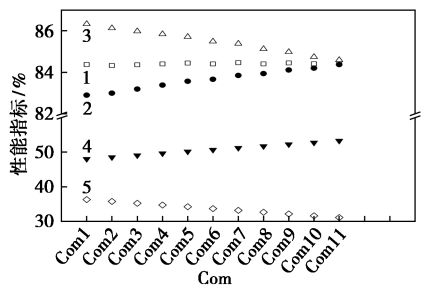
$$S = 4.4 \times M_{\text{CH}_4} + 12 \times M_{\text{CO}_2} (\text{元}/\text{h}) \quad (9)$$

经计算,对应于 1 000 kg/h 的进料气,优化工况的产品总销售额 $S = 7\,797$ 元/h。沼气的品质组成和生产速率受温度、搅拌方式、原料配比等因素的影

响^[20]。基于此,在换热器最小换热温差处于 2~4℃ 的条件下(保证较高的换热效率),改变模拟沼气中 CH₄/CO₂ 组分(见表 5)和沼气流量,分析优化工况的适应性。结果表明,随着沼气中 CH₄ 体积分数从 57% 增加到 62% (CO₂ 含量从 43% 减少到 38%),沼气液化率和比功耗基本不变,CH₄ 回收率和液态 CH₄ 产出率分别提升 1.48%、5.26%,CO₂ 回收率和液态 CO₂ 产出率分别下降 1.74%、5.17% (见图 7),产品总销售额减少了 453 元/h (见图 8)。因为随着组分的变化,膜分离模块获得的气体流量和组分发生了变化,具体表现为高纯度 CH₄ 流量增加,富 CO₂ 流量减少,受价格影响,产品总销售额减少。

表 5 CH₄/CO₂ 组成

Com	摩尔分率(CH ₄ /CO ₂)	Com	摩尔分率(CH ₄ /CO ₂)
Com1	0.57/0.43	Com7	0.6/0.4
Com2	0.575/0.425	Com8	0.605/0.395
Com3	0.58/0.42	Com9	0.61/0.39
Com4	0.585/0.415	Com10	0.615/0.385
Com5	0.59/0.41	Com11	0.62/0.38
Com6	0.595/0.405		



1— γ ; 2— x_{rec,CH_4} ; 3— x_{rec,CH_4} ; 4— η_{CH_4} ; 5— η_{CO_2}

图 7 几个指标随组分变化的情况

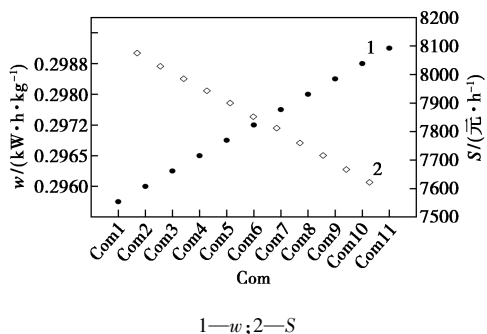
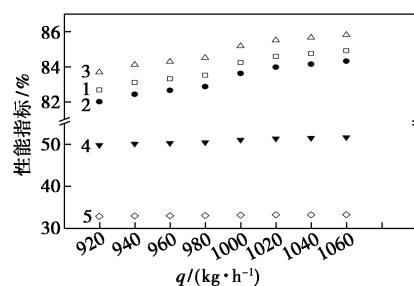


图 8 比功耗和产品总销售额随组分变化的情况

沼气流量 M_{BC} 从 920 kg/h 增加到 1 060 kg/h,沼气液化率、CH₄ 回收率、CO₂ 回收率、液态 CH₄ 产出率和液态 CO₂ 产出率分别提升 2.24%、2.31%、

2.13%、1.84%、0.39% (见图 9),比功耗降低了 0.036 2 kWh/kg,产品总销售额增加了 1 231 元/h (见图 10)。因为随着流量的增加,膜分离模块获得的气体流量和组分发生了变化,具体表现为高纯度 CH₄ 流量增加,富 CO₂ 流量增加,产品总流量增加,显然产品总销售额增加,而由式(1)知比功耗降低。



1— γ ; 2— x_{rec,CH_4} ; 3— x_{rec,CH_4} ; 4— η_{CH_4} ; 5— η_{CO_2}

图 9 几个指标随沼气流速变化的情况

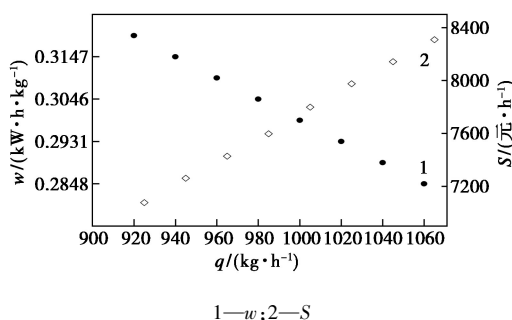


图 10 比功耗和产品总销售额随沼气流速变化的情况

5 结论

设计了一种混合冷剂沼气带压液化流程,并使用 HYSYS 软件模拟了该流程,同时建立了 HYSYS & MATLAB 混合仿真平台,使用 SQP 算法对流程进行了优化,最后分析了优化工况的适应性,得到以下结论。

(1)设计的混合冷剂沼气带压液化流程可以实现带压 LNG 和食品级液态 CO₂ 的制备。HYSYS 流程模拟表明,基本案例条件下的沼气液化率为 84.24%,CH₄ 回收率为 83.62%,CO₂ 回收率为 85.17%,液态 CH₄ 产出率为 51.06%,液态 CO₂ 产出率为 33.18%,产品总销售额达到 7 797 元/h;优化后的带压液化流程比功耗降为 0.298 2 kWh/kg,与优化前相比降低了 26.8%。

(2)对于流量为 1 000 kg/h,组分为 60% CH₄+40% CO₂ 的模拟沼气,优化工况的产品总销售额

$S=7\ 797$ 元/h。沼气流量不变, CH_4 体积分数从 57% 增加到 62%, 沼气液化率和比功耗基本不变, CH_4 回收率和液态 CH_4 产出率分别提升 1.48%、5.26%, CO_2 回收率和液态 CO_2 产出率分别下降 1.74%、5.17%, 产品总销售额减少了 453 元/h; 沼气组分不变, 流量从 920 kg/h 增加到 1 060 kg/h, 沼气液化率、 CH_4 回收率、 CO_2 回收率、液态 CH_4 产出率、液态 CO_2 产出率分别提升 2.24%、2.31%、2.13%、1.84%、0.39%, 比功耗降低了 0.036 2 kWh/kg, 产品总销售额增加 1 231 元/h。

(3) 该流程避免了复杂的化学脱碳工艺, 减少了设备初始投资和长期运营成本, 充分利用了沼气中的碳资源。虽然产品较高的压力和 CO_2 含量会增加后续的储运成本, 但对于大型沼气源来讲, 其消纳地点运输距离较短, 产品可以得到即时利用, 对该流程具有很强的适应性。

该流程的产品具有很高的经济价值, 在本文中研究的基础上, 可考虑原料成本、预处理成本、生产设备折旧、人工成本、动力消耗、生产过程损耗等与产品总销售额的差值, 以及税收等因素对流程经济效益的影响, 开展进一步地研究。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会官网. 生物质能发展“十三五”规划 [EB/OL]. (2016-10-01). [2020-02-01]. http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201708/t20170809_857320.html.
- [2] 金伟, 仓万虎, 李怀正, 等. 沼气的利用方法及液化压缩应用分析 [J]. 中国沼气, 2011, 29(2): 13-18.
- [3] 满林香. 生物质能源气体中 CH_4 和 CO_2 的液化回收技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [4] 周淑霞, 董玉平, 张玉林, 等. 基于 Aspen HYSYS 的沼气中 CO_2 气体低温液化分离技术 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 111-116.
- [5] 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.
- [6] 李康春. 沼气制取生物质 LNG 工艺研究与应用 [D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [7] Gas Processors Suppliers Association. GPSA engineering data book [M]. 12th ed. Tulsa: Twelfth Edition, 2004.
- [8] Xiong X J, Lin W S, Gu A Z. Design and optimization of offshore natural gas liquefaction processes adopting PLNG (pressurized liquefied natural gas) technology [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016; S1875510016300919.
- [9] Shen T T, Gao T, Lin W S, et al. Determination of CO_2 solubility in saturated liquid $\text{CH}_4 + \text{N}_2$ and $\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6$ mixtures above atmospheric pressure [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2012, 57(8): 2296-2303.
- [10] 史惠杰, 徐泓, 浦鹏, 等. 膜分离提纯沼气中试试验 [J]. 中国沼气, 2015, 33(1): 36-40.
- [11] 邹雪娜, 褚立强, 徐徜徉. CO_2/CH_4 分离膜技术在沼气提纯中的应用研究进展 [J]. 膜科学与技术, 2014, 34(5): 125-132.
- [12] Ahsan M, Sweeney O M, Hussain A. Development of user-defined extension for the simulation of membrane process in Aspen HYSYS [J]. SIGMA Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 2017, 35(1): 35-45.
- [13] Hoorfar M, Alcheikhhamdon Y, Chen B. A novel tool for the modeling, simulation and costing of membrane based gas separation processes using Aspen HYSYS: Optimization of the CO_2/CH_4 separation process [J]. Computers & Chemical Engineering, 2018, 117(2): 11-24.
- [14] Ahmad F, Lau K K, Lock S S M, et al. Hollow fiber membrane model for gas separation: Process simulation, experimental validation and module characteristics study [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015, 21: 1246-1257.
- [15] 宫克勤, 王卓智, 贾永英. LNG 及其他流体储运过程热力学研究综述 [J]. 科学技术与工程, 2013, (35): 10549-10559.
- [16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 1886.228—2016. 食品安全国家标准 食品添加剂 二氧化碳 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [17] George G, Bhorla N, Alhallaq S, et al. Polymer membranes for acid gas removal from natural gas [J]. Separation and Purification Technology, 2016, 158: 333-356.
- [18] Khan M S, Lee M. Design optimization of single mixed refrigerant natural gas liquefaction process using the particle swarm paradigm with nonlinear constraints [J]. Energy, 2013, 49: 146-155.
- [19] Khan M S, Lee S, Lee M. Optimization of single mixed refrigerant natural gas liquefaction plant with nonlinear programming [J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2012, 7(S1): S62-S70.
- [20] Kougias P G, Angelidaki I. Biogas and its opportunities—A review [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2018, 12(3): 1-12. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志, 邮发代号 82—67。