

基于 LNG 接收站冷量的冷库系统设计与经济分析

汪乘红¹, 陈叔平¹, 杨发禄², 姚淑婷¹, 金树峰¹, 陈鸿乔¹, 赵一力¹

(1. 兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050;

2. 中国石油玉门油田分公司, 酒泉 735009)

摘要: LNG 蕴含丰富的冷能, 在接收站这部分冷量通常经汽化器被海水或空气带走, 既浪费能源, 又污染周围环境。以某小型 LNG 接收站为例, 从能量梯级利用的角度出发, 设计了一种以丙烷为中间介质、体积分数 57.8% 乙二醇水溶液为载冷剂的利用 LNG 冷能的新型冷库系统, 运用 Aspen Plus 软件对其流程进行模拟, 获得了各流股的流量、温度和焓等参数, 并根据得到的数据对系统做了热力和经济性分析。结果表明: 对于供气规模 1700m³/h、供气压力 0.4MPa 的 LNG 供气系统, 每天约回收冷量 12265.34MJ, 可同时满足面积为 30m² 的低温冷库(-23 ~ -30℃)、30m² 的中温冷库(-15 ~ -20℃) 和 120m² 的高温冷库(0 ~ 2℃) 的需求; 系统 COP 和焓效率分别为 1.79 和 78.04%; LNG 与丙烷换热器焓损最大, 约占系统总焓损的 74.5%; 所设计的冷库系统年净收益约 31.02 万元, 经 4.06 年可收回成本, 将 LNG 冷能用作冷库冷源是可行的, 具有较好的经济效益。

关键词: 液化天然气; 冷量利用; 焓; 冷库

DOI:10.16711/j.1001-7100.2018.10.004

Design and economic analysis of cold storage system based on LNG receiving station cooling capacity

Wang Chenghong¹, Chen Shuping¹, Yang Falu², Yao Shuting¹, Jin Shufeng¹, Chen Hongqiao¹, Zhao Yili¹

(1. College of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. PetroChina Yumen Oilfield Company, Jiuquan 735009, China)

Abstract: LNG contains abundant cold energy. At the LNG receiving terminal, a part of the cooling capacity is usually taken away by seawater or air via vaporizer, which wastes energy and pollutes the surrounding environment. Taking a certain small LNG receiving station as an example, a new type cold storage system utilizing LNG cold energy was designed from the viewpoint of energy cascade utilization. It used propane as the intermediate fluid and ethylene glycol aqueous solution with a volume fraction of 57.8% as the secondary refrigerant. The process was simulated with Aspen Plus software. And then, the flow, temperature, and enthalpy of each stream were obtained. Based on above data, thermodynamic and economic analysis were performed. The results show that, for the LNG gas supply system with a gas supply scale of 1700m³/h and gas supply pressure of 0.4MPa, the cold storage system can recover cold energy about 12265.34MJ every day. That can meet the requirements of a low temperature cold storage(-23 ~ -30℃) of 30m², a medium temperature cold storage(-15 ~ -20℃) of 30m² and a high temperature cold storage(0 ~ 2℃) of 120m² simultaneously. The COP and the exergy efficiency of this system are 1.79 and 78.04%, respectively. The exergy loss of heat exchanger for LNG and propane is the largest, accounting for about 51% of the system total exergy loss. The annual net income of the designed cold storage system is about 31.02 ten thousand CNY and the cost can be recovered after 4.06 years. The use of LNG cold energy as cold source for cold storage is feasible and has good economic benefits.

Keywords: Liquefied natural gas, Cold energy utilization, Exergy, Cold storage

1 引言

为便于天然气储存及输送, 一般将其经脱硫、

脱酸等预处理后进行液化, 液化后体积约为气态时的 1/625。天然气的液化是高能耗过程, 生产 LNG 消耗的电能(每吨约 850kWh) 大部分以冷能

收稿日期: 2018-04-10

作者简介: 汪乘红(1992-) 男, 硕士研究生, 主要从事低温储运设备的研究工作。

通讯作者: 陈叔平(1964-) 男, 教授, 主要从事低温储运、低温传热设备的研究工作, 邮箱: chensp@lut.cn。

的形式储存在 LNG 中。LNG 在接收站经汽化器汽化后方能正常使用,汽化过程释放约 830kJ/kg 的冷能。LNG 一般通过空温式或开架式汽化器进行汽化,冷量被空气或海水带走,既浪费能源,又污染环境。若能将其用作冷库冷源,既可节省机械制冷需要的设备投资,又可减少电耗,经济及社会效益十分可观^[1,2]。

近年来,国内外学者针对 LNG 冷能用作冷库冷源的方式做了相关研究。吴集迎等^[3]设计了一种利用 LNG 冷能的冷库系统流程,并做了经济性分析,指出将 LNG 冷能用作冷库冷源是可行的,具有显著的节能效果和经济效益。Li S 等^[4]通过比较电压缩式制冷与利用 LNG 冷能的冷库发现,对于冷负荷为 306.7kW 的冷库,利用 LNG 冷能每小时可节约电耗 193kW,具有较好的节能效果。黄美斌等^[5]介绍了利用 LNG 冷能进行冷库制冷的冷媒无相变流程和有相变流程,并比较了两种流程的优缺点,结果表明无相变流程所需冷媒流量较大,流程简单;有相变流程所需冷媒流量较小,流程复杂,管径及换热设备尺寸较大。华贲等^[6]采用丙烷和乙二醇水溶液冷媒循环储存系统解决了 LNG 气化与冷用户在运行时间和空间上不同步的问题。董建凯等^[7]将冷库作为 LNG 冷能利用的第二级,并运用 HYSYS 软件做了热力学及经济性分析。

在前人研究的基础上,本文基于能量的梯级利用思想,设计了一种利用 LNG 冷能的冷库系统。运用 Aspen Plus 软件对所设计的冷库系统进行了流程模拟,获得了各流股的运行参数,计算了各设备及系统的焓损和焓效率,确定了影响系统焓效率的主要因素,并对其进行了经济性分析,以期高效利用 LNG 冷能用作冷库冷源提供参考。

2 冷库系统设计及模型建立

2.1 冷库系统工艺流程设计

通常,冷库温度维持在 -30 ~ 0℃ 即可^[8],若直接将 -162℃ 的 LNG 作为冷源用于冷库系统,较大温差传热不仅造成冷量的极大浪费,且对换热设备的机械性能带来极大挑战,为此设置中间介质换热设备来减小传热温差,即先将 LNG 的冷能传递给中间介质,再经载冷剂给冷库供冷。此外,LNG 主要用于城市燃气和发电,其汽化量随

季节和昼夜波动较大,如冬季和白天天然气需求较大,产生的冷量也多,夏季和夜晚天然气用量较少,产生的冷量也少,且冷库系统的用冷量较为稳定,故设置冷媒循环存储系统来储存 LNG 冷能,即在冷量多时通过中间介质蓄冷,冷量供应不足时,通过中间介质供冷,以解决 LNG 汽化与用冷在时间上不同步的问题。由此可见,选择合理的中间介质及载冷剂尤为重要。

2.1.1 中间介质及载冷剂选取

1) 中间介质选取

由于 LNG 温度极低,普通介质与其直接换热可能会产生凝结,故选择的中间介质凝固点不应高于 LNG 温度太多。同时,为尽可能多地回收 LNG 冷能和减少中间介质流量,中间介质的相变潜热和比热容应越大越好。表 1 为常见冷媒及其相关物性,R22 和 R23 属氟利昂制冷剂,会破坏臭氧层,且二者潜热较小,故不选用。通过进一步对比分析,发现 R410A 和丙烷满足凝固点低、且

表 1 常用冷媒及其相关物性

Tab. 1 Common refrigerants and related properties

| 工质 | R22 | R23 | R410A | 丙烷 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| 凝固点/℃ | -160.0 | -155 | -155.0 | -187.6 |
| 临界点/℃ | 96.15 | 25.90 | 72.50 | 96.80 |
| 潜热/(kJ/kg) | 233.5 | 239.5 | 256.7 | 426.0 |
| 沸点温度/℃ | -40.84 | -82.10 | -51.53 | -42.17 |
| 临界压力/MPa | 4.75 | 4.84 | 4.93 | 4.25 |
| 比热容 /(kJ/(kg·K)) | 1.40 | 6.50 | 1.69 | 2.67 |

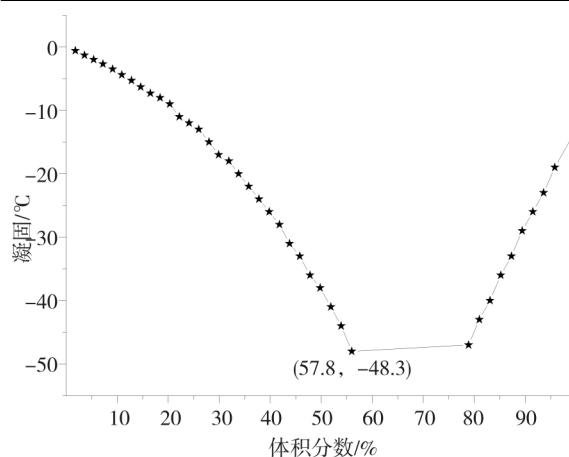


图 1 乙二醇水溶液凝固点随其体积分数变化关系

Fig. 1 The freezing point changes of ethylene glycol solution with the volume fraction

潜热和比热容大的条件,但前者价格较高,而潜热较小,因此选择丙烷做中间介质。

2) 载冷剂选取

载冷剂通过与中间介质直接换热获得冷量,然后进入冷库制冷,直接影响冷库的制冷效果。与温度较低的中间介质换热时,为避免载冷剂被凝结而产生冻堵,应选择具有较低凝固点的载冷剂。另外,载冷剂在冷库系统中一般为无相变制冷,通过显热交换来降低库温,需要的流量较大,为避免载冷剂流量过大和降低泵的功耗,选择的载冷剂还需具备比热容大、密度小、沸点高、黏度

小和导热系数大等特点。综合考虑,选择乙二醇水溶液作载冷剂较为理想。图 1 给出了乙二醇水溶液凝固点随其体积浓度变化关系^[9]。当乙二醇体积分数小于 57.8% 时,溶液凝固点随其体积分数的增加呈下降趋势,当体积分数在 57.8% ~ 80% 时,溶液凝固点略有上升,当体积分数超过 80% 后,溶液凝固点显著上升。体积分数 57.8% 的乙二醇水溶液凝固点最低(-48.3℃),可满足本设计冷库(-30℃ 以上)工作温度的要求,表 2 为其相关物理特性^[9]。

表 2 体积分数 57.8% 的乙二醇溶液物性

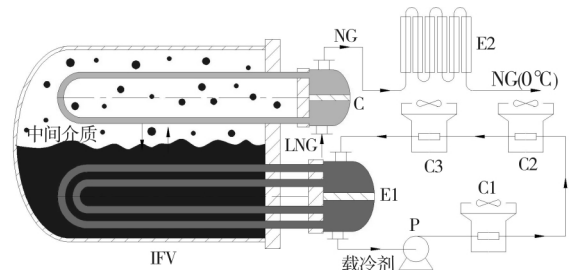
Tab. 2 The properties of ethylene glycol solution with a volume concentration of 57.8%

| 载冷剂 | 凝固点 /℃ | 沸点 /℃ | 密度 / (kg/m ³) | 比热 / (kJ/(kg·K)) | 导热系数 / (W/(m·K)) | 溶解热 /℃ | 黏度 / (mPa·s) |
|--------|--------|-------|---------------------------|------------------|------------------|--------|--------------|
| 乙二醇水溶液 | -48.3 | 110 | 1104.6 | 2.844 | 0.3 | 187 | 93.4 |

2.1.2 冷库系统工艺流程介绍

图 2 为利用 LNG 冷能制冷的冷库系统工艺流程。本系统主要由中间介质汽化器 IFV、空温式汽化器 E2、泵 P 及冷库 C1、C2、C3 构成,选取丙烷为中间介质,体积分数 57.8% 的乙二醇水溶液为载冷剂。其中,中间介质汽化器由冷凝器 C 和蒸发器 E1 组成。LNG 汽化过程中,载冷剂进入蒸发器 E1 与管外低沸点的中间介质丙烷进行热交换,丙烷吸热汽化,载冷剂获得冷量;汽化后的丙烷在 IFV 上部与冷凝器 C 中的 LNG 换热, LNG 在管内吸热汽化,丙烷在管壁上被冷凝,汽化后的 LNG 进入空温式汽化器 E2 过热至供气温度,最后经供气前处理进入天然气管网;从蒸发器 E1 出来的载冷剂经低温泵 P 加压后依次进入冷库 C1、C2 和 C3 制冷,释放冷量后再次进入蒸发器 E1 加热中间介质,完成载冷剂和中间介质的循环,实现 LNG 汽化与冷库制冷同步运行。在中间介质汽化器与冷库 C1 间设置液体泵,以保证载冷剂的正常循环。

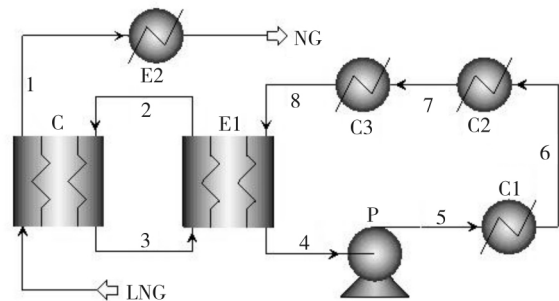
本设计根据食品冷藏工艺要求设计规格相近的三种冷库,分别为低温冷库 C1(-23 ~ -30℃)、中温冷库 C2(-15 ~ -20℃) 和高温冷库 C3(0 ~ 2℃)^[8]。由于整个过程为无相变制冷,且冷库规格相当,库温依次升高,故在流量相同的载冷剂通过三种冷库时产生的温升差别不大,因此



NG - 天然气; E2 - 空温式汽化器; C - 冷凝器; E1 - 蒸发器; P - 泵; C1 - 低温冷库; C2 - 中温冷库; C3 - 高温冷库; IFV - 中间介质汽化器

图 2 LNG 冷能制冷的冷库系统流程

Fig. 2 Process of cold storage system utilizing LNG cold energy



NG - 天然气; E2 - 空温式汽化器; C - 冷凝器; E1 - 蒸发器; P - 泵; C1 - 低温冷库; C2 - 中温冷库; C3 - 高温冷库

图 3 Aspen plus 模拟流程

Fig. 3 Process of Aspen plus simulation

考虑将三种冷库按温度由低到高串联起来,实现

载冷剂的串联化运行,使管路和载冷剂系统化,同时实现冷能的梯级利用。进入冷凝器 C 的 LNG 温度、压力和流量分别为 -150℃、0.4MPa 和 1178.1kg/h。

2.2 冷库系统模型建立

图 3 为建立的冷库系统 Aspen plus 模拟流程,状态方程选用 Peng - Robinson 方程,为便于计算,本模拟做了如下假设: 1) 稳态流动; 2) 所有

换热设备压降均为 10kPa,泵和电机的效率分别为 75% 和 90%。

3 结果与讨论

3.1 热力分析

表 3 为该冷库系统各流程参数,各能流参数如表 4 所示。

表 3 利用 LNG 冷能的冷库系统各物流参数

Tab.3 Logistic parameters of cold storage system using LNG cold energy

| 物流 | 温度/℃ | 压力/MPa | 流量/(kg/h) | 焓/(kJ/kg) | 熵/(kJ/(kg·K)) | 焓/(kJ/kg) |
|-----|---------|--------|-----------|-----------|---------------|-----------|
| LNG | -150.00 | 0.4 | 1178.10 | -5513.16 | -11.35 | 653.30 |
| 1 | -60.53 | 0.39 | 1178.10 | -4878.20 | -6.69 | 428.26 |
| 2 | -20.56 | 0.22 | 1509.1 | -2451.46 | -6.53 | 33.39 |
| 3 | -80.23 | 0.22 | 1509.1 | -2980.66 | -8.70 | 87.02 |
| 4 | -48.28 | 0.26 | 3948.12 | -10939.95 | -8.59 | 87.02 |
| 5 | -48.28 | 0.30 | 3948.12 | -10939.87 | -8.59 | 68.25 |
| 6 | -32.34 | 0.29 | 3948.12 | -10899.21 | -8.42 | 68.25 |
| 7 | -18.18 | 0.28 | 3948.12 | -10861.74 | -8.26 | 32.07 |
| 8 | -5.13 | 0.27 | 3948.12 | -10774.29 | -7.93 | 15.83 |

表 4 利用 LNG 冷能的冷库系统各能流参数

Tab.4 Logistic energy flow parameters of cold storage system using LNG cold energy

| 能流 | C | E1 | C1 | C2 | C3 | P |
|-----------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 热负荷或功率/kW | 221.85 | 177.48 | 47.40 | 47.28 | 47.28 | 0.058 |

表 5 系统及各设备的焓损和焓效率

Tab.5 The exergy loss and efficiency of system and each equipment

| 设备 | L_{ex}/kW | $\eta_{ex}/\%$ |
|--------|-------------|----------------|
| 冷凝器 C | 18.32 | 84.10 |
| 蒸发器 E1 | 4.62 | 90.24 |
| 冷库 C1 | 0.84 | 97.27 |
| 冷库 C2 | 0.3 | 97.92 |
| 冷库 C3 | 0.5 | 93.00 |
| 泵 P1 | 0.008 | 100.0 |
| 系统 | 24.60 | 78.04 |

系统能效 COP 定义为供给系统能量的回收百分比,用来表示复杂能量利用系统的效率。根据表 3 和表 4 中数据计算得系统的 COP 为 1.79,其并不能具体反映系统内部各设备的能耗情况,应对系统进行焓分析。表 5 为根据表 3、表 4 的数据计算得到的各设备及系统的焓损 L_{ex} 和焓效率 η_{ex} 。

由表 5 数据可知,该利用 LNG 冷能制冷的冷库系统焓效率为 78.04%,较普通机械式制冷的冷库系统不到 30% 的焓效率高出许多^[10],主要是由于在冷库端将不同温位的冷库串联起来,实现了冷量的梯级利用,提高了冷能利用率。

图 4 为根据表 5 数据绘制的各设备焓损占系统总焓损的比例图,泵焓损很小,故忽略不计。由

图 4 可看出冷凝器 C 焓损最大,约 74.5%,蒸发器 E1 次之,约 18.8%,主要是由于 LNG 与丙烷、丙烷与乙二醇溶液换热时的温差较大^[10],减小传热温差可降低焓损,提高冷能利用效率。

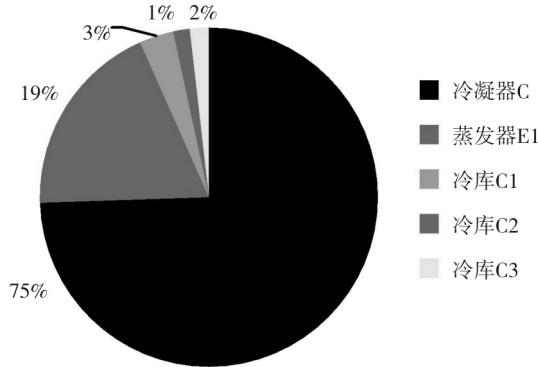


图 4 各设备焓损比例

Fig. 4 Exergy loss ratio of each equipment

表 6 冷库及食品相关参数

Tab. 6 The related parameters of cold storage and food

| 冷库 | 冷负荷 Q/kW | 比热 C_p $/(\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}))$ | 温差 ΔT $/^{\circ}\text{C}$ | ρ_s $/(\text{kg}/\text{m}^3)$ | η |
|----|----------------------|--|--------------------------------------|--|--------|
| C1 | 47.40 | 3.48 | 45 | 470 | 0.4 |
| C2 | 47.28 | 3.27 | 54 | 400 | 0.4 |
| C3 | 47.28 | 3.35 | 25 | 230 | 0.4 |

表 7 冷库计算吨位及面积

Tab. 7 The calculation tonnage and area of cold storage

| 冷库 | 计算吨位/t | 面积/ m^2 |
|----|--------|------------------|
| C1 | 26.15 | 30 |
| C2 | 23.13 | 30 |
| C3 | 48.78 | 120 |

3.2 冷量分析

对于供气规模 $1700\text{m}^3/\text{h}$ 、供气压力 0.4MPa 的 LNG 供气系统,每天可回收 12265.34MJ 的冷量。以冷库 C1、C2 和 C3 分别用于冷冻鱼虾、鲜猪肉及冷藏苹果为例,取冷库高度为 4.5m ,根据式(1)、式(2)结合表 6 中相关参数^[8],计算得各温位冷库的计算吨位及面积如表 7 所示。

$$Q = GC_p \Delta T \quad (1)$$

$$G = V \rho_s \eta \quad (2)$$

式中: Q 为冷库负荷, kW ; G 为冷库计算吨位; C_p 为食品定压比热容, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$; ΔT 为冷

库与食品的初始温差, $^{\circ}\text{C}$; V 为冷库公称容积, m^3 ; ρ_s 为食品的计算密度, kg/m^3 ; η 为冷库容积利用系数。

3.3 经济性分析

3.3.1 初始投资及运行费用

系统中各设备的初始投资费用按经验公式(3)计算^[12]:

$$\log_{10} PEC = K_1 + K_2 \log_{10} X + K_3 (\log_{10} X)^2 \quad (3)$$

式中: PEC 为设备造价,美元; X 为换热器换热面积或泵的输入功率, m^2 或 kW ; K_1 、 K_2 、 K_3 为经验常数,具体取值见表 8。

表 8 各设备的 K_1 、 K_2 及 K_3 经验值

Tab. 8 K_1 、 K_2 、 K_3 empirical values of each equipment

| 设备 | 变量 X | K_1 | K_2 | K_3 |
|-----|--------------------|--------|---------|--------|
| 换热器 | 换热面积/ m^2 | 4.6656 | -0.1557 | 0.1547 |
| 蒸发器 | 换热面积/ m^2 | 4.6656 | -0.1557 | 0.1547 |
| 泵 | 输入功率/ kW | 3.3892 | 0.0536 | 0.1538 |

经 Aspen plus 软件模拟得到的中间介质汽化器 IFV 换热面积为 5.34m^2 ,蒸发器 C1、C2 和 C3 的换热面积分别为 1.65 、 1.58 和 1.43m^2 ,泵的输入功率为 0.058kW ;通过式(3)计算得到各设备的造价,按 1 美元 = 6.31 元人民币计算,具体数值见表 9。

表 9 各设备造价

Tab. 9 The values of each equipment cost

| 设备 | IFV | C1 | C2 | C3 | 泵 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 造价/万元 | 26.92 | 17.46 | 17.59 | 17.86 | 3.1 |

另外,需 LNG 储罐 1 个,约 2 万元,中间介质、载冷剂、管道及阀门等费用总计约 15 万元。经合计,该利用 LNG 冷能的冷库系统一次性投资费用约 99.93 万元,系统全年运行及维护费用按各设备总造价的 20% 计算,约 19.98 万元。

3.3.2 冷量收益

冷量收益根据式(4)计算^[13]:

$$C_{QT} = 82.85 C_e \cdot \exp(-0.0217T) \quad (4)$$

式中: C_{QT} 为温度 T 下单位冷量价格,元/MJ; C_e 为工业电价,元/MJ; T 为热力学温度, K ;

按工业电价 0.8 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ (约 0.22 元/MJ)计算,在冷库温度为 -30 、 -15 和 2°C 下分别计算

得单位冷量价格为 0.093、0.067 和 0.047 元/MJ。

以每年 360 天,每天工作 24h 计算,在现有冷库负荷下,计算得到该 LNG 冷能利用系统冷量年回收收益为 51 万元,冷量回收收益与系统年运行费用的差值即为年净收益,约 31.02 万元。

3.3.3 动态投资回收期

动态投资回收期按式(5)计算^[14]:

$$\sum_{t=0}^{P_1} (C_1 - C_0)_t (1 + i_c)^{-t} = P \quad (5)$$

式中: P 为初投资,万元; P_1 为动态投资回收期; i_c 为基准折现率; C_1 为现金流入量,万元; C_0 为现金流出量,万元。

该利用 LNG 冷能的冷库系统初始投资为 99.93 万元,年净收益为 31.02 万元,假定其生命周期为 15 年,基准折现率为 10%,得

$$(C_1 - C_0) \cdot \frac{(1 + i_c)^{P_1} - 1}{i_c \cdot (1 + i_c)^{P_1}} = P \quad (6)$$

经计算得 $P_1 = -\lg \left(1 - \frac{P \cdot i_c}{(C_1 - C_0)} \right) / \lg(1 + i) = 4.06a$,即系统经 4.06 年可收回成本。

4 结论

针对供气量 1700m³/h、供气压力 0.4MPa 的 LNG 供气系统,设计了一种利用 LNG 冷能的冷库系统,在对其运用 Aspen plus 软件模拟的基础上,做了热力分析和经济性分析,得出如下结论:

(1) 系统每天回收冷量约 12265.34MJ,可同时满足面积为 30m² 的低温冷库(-23 ~ -30℃)、30m² 的中温冷库(-15 ~ -20℃) 和 120m² 的高温冷库(0 ~ 2℃) 的需求。

(2) 冷凝器 C 焓损最大,蒸发器 E1 次之,分别占系统总焓损的 74.5% 和 19%,减小传热温差可降低焓损。

(3) 系统初始投资约 99.93 万元,年净收益 31.02 万元,经 4.06 年可收回成本,将 LNG 冷能直接用于冷库制冷是可行的,具有较好的经济效益。

参考文献

- [1] 杨勇,陈贵军,王娟,等. 基于液化天然气(LNG)接收站冷量的空分流程模拟研究[J]. 节能,2014(6):23-27.
- [2] Saeid M, John M, Jaleel V, et al. Handbook of liquefied natural gas[M]. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2013.
- [3] 吴集迎,马益民,陈仕清. LNG冷能用于冷库的系统设计及分析[J]. 集美大学学报(自然版),2010,15(1):44-47.
- [4] Li S. Simulation and analysis on the cold storage process with LNG cryogenic energy[J]. Guangdong Chemical Industry, 2010:1-5.
- [5] 黄美斌,林文胜,顾安忠. 利用 LNG 冷能的低温冷库流程比较[J]. 制冷学报,2009,30(4):58-62.
- [6] 华贲. 大型 LNG 接收站冷能的综合利用[J]. 天然气工业,2008,28(3):38-42.
- [7] 董建锴,黄顺,李硕,等. LNG 冷能用于冷库制冷性能模拟研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2017,49(2):103-108.
- [8] 中华人民共和国商务部. 冷库设计规范[M]. 北京:中国计划出版社,2010.
- [9] Engineers R A C. 2014 ASHRAE handbook - refrigeration[M]. Atlanta: ASHARE Publishing, 2014.
- [10] 唐贤文,王聪,杨泽亮. 广东 LNG 冷能及其在冷库中应用的焓分析[J]. 能源与节能,2012(5):12-13.
- [11] 葛轶群,章学来,赵兰,等. LNG 冷能的梯级利用[J]. 制冷技术,2006(3):14-16.
- [12] Heberle F, Bassermann P, Markus Preifinger, et al. Exergoeconomic optimization of an organic rankine cycle for low-temperature geothermal heat sources[J]. International Journal of Thermodynamics, 2012,15(2):119-126.
- [13] 陈敏. LNG 冷能用于发电和空调供冷工艺开发及优化[D]. 广州:华南理工大学,2013.
- [14] 胡茂生,丰艳萍,谢英亮,等. 技术经济分析理论与方法[M]. 北京:冶金工业出版社,2009:50-52.