

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.02.017

LNG 冷能用于冷库制冷性能模拟研究

董建锴,黄 顺,李 硕,姚 杨,姜益强

(哈尔滨工业大学 热泵空调技术研究所,哈尔滨 150090)

摘 要:为使 LNG 冷能在冷库系统中得到有效利用,从 LNG 冷能梯级利用的角度出发,设计一种新型 LNG 冷能制冷的冷库系统,在 LNG 换热器端和冷库末端实现对 LNG 冷能的梯级利用,并通过 HYSYS 模拟对其进行热力学分析和经济性分析. 结果表明:该冷库系统 COP 为 1.82,烟效率为 80.2%; LNG 换热器烟损最大,约占系统总烟损的 78.9%,且随 LNG 进口温度升高而减小;系统 COP 和烟效率均随 LNG 进口温度及气化压力升高而增大;该系统投资回收期为 4.77 a,具有较好的经济效益. LNG 冷能为冷库系统冷量来源提供新的选择,在 LNG 进口端增设蓄冷设备和加压泵均能提高系统 COP 和烟效率.

关键词:液化天然气;冷能利用;烟损;HYSYS 软件;冷库

中图分类号: TE09 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)02-0103-06

Simulation study on performance of the cold storage using LNG cold energy

DONG Jiankai, HUANG Shun, LI Shuo, YAO Yang, JIANG Yiqiang

(Institute of Heat Pump and Air Conditioning of Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To use LNG cold energy in cold storage system effectively, a new cold storage system using LNG cold energy was designed from the perspective of cascade utilization of LNG cold energy, which achieved cascade utilization of LNG cold energy in the LNG exchanger and the cold storage terminal. In addition, the thermodynamics and economy performance of the system were simulated and analyzed by HYSYS, respectively. Results indicated that COP of the cold storage system was 1.82 and the exergy efficiency was 80.2%. Besides, the exergy loss of LNG exchanger was the largest, which constituted 79.8% of the total exergy loss in the system, and it decreased with the LNG inlet temperature rising. Moreover, as the LNG inlet temperature and gasification pressure increased, both COP and exergy efficiency of the cold storage system rose. The system had good economic benefits, with the payback period of 4.77 years. It was quite obvious that LNG cold energy was a new cold energy source for cold storage system and adding cold-storage equipment and pressure pump in LNG inlet terminal could improve COP and exergy efficiency.

Keywords: LNG; cold energy utilization; exergy loss; HYSYS; cold storage

目前,中国是全球第三大 LNG 进口国,仅次于日本和韩国^[1]. LNG 是气态天然气通过低温工艺液化和净化得到的低温液体混合物,常压下温度为 -162 ℃. LNG 在接收站进行再气化过程中将释放大量冷能,但在传统再气化工序中,LNG 携带的冷量被海水或空气带走,造成极大的能源浪费,而且会对周围海域或站区的环境造成冷污染. 如果能将部分 LNG 气化冷能作为冷库的冷源,既可节省压缩式制冷装置的投资,又可减少电耗,经济效益和社会效益十分可观. 针对 LNG 冷能用于冷库制冷,国内外学者做了相关研究. 黄美斌等^[2]将 LNG 与中间冷媒在低温 换热器中进行换热,被冷却的中间冷媒通过

管道进入冷库内,通过末端装置释放冷量来实现冷冻或冷藏. 吴集迎等^[3]设计了 LNG 冷能用于冷库的系统流程与运行模式,并验证了 LNG 冷能作为冷库的冷源是一种可行的方式,且具有显著的节能效果和经济效益. 刘宗斌等^[4]在传统的电压缩氨制冷工艺的基础上增加 LNG 制冷循环,结果显示该工艺冷能利用率达 87.8%,烟效率达 26.8%. Messineo 等^[5]在接收站和用冷地点之间设置中间冷媒传输系统,并选取二氧化碳作为中间冷媒介质,有效降低传输能耗. 李少中^[6]利用 HYSYS 模拟比较了电压缩氨气制冷工艺和利用 LNG 卫星站冷能的冷库烟效率,结果显示两者烟效率分别为 12.1%和 26.6%. 唐贤文等^[7]通过烟分析的方法计算了 LNG 冷能用于冷库的烟效率,结果显示最高的烟效率为 30%.

LNG 冷能在冷库中已经有许多应用,但普遍存在 LNG 冷能利用不合理、系统整体烟效率偏低的问题,且对烟效率较低的原因未进行深入分析,对于提高系统烟效率没有提出行之有效的方法. 此外,

收稿日期: 2016-03-06

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(E2015019)

作者简介: 董建锴(1982—),男,讲师,硕士生导师;
姚 杨(1963—),女,教授,博士生导师;
姜益强(1973—),男,教授,博士生导师

通信作者: 董建锴, djkehb@163.com;
姜益强, jyq7245@163.com

部分研究对单级冷库系统的焓效率进行了简单分析,但对系统的 COP 和焓效率并未给出明确的定义和计算公式. 本文所采用的 Rocca^[8-9] 定义给出了 LNG 冷能回收系统 COP 和焓效率的相应计算公式,并对公式每一项进行了详细说明,符合热力学第一定律和第二定律,具有较高的准确性. 此外, Rocca 课题组在系统焓效率方面做过许多研究, COP 和焓效率定义公式具有一定的可靠性. 本文采用 Rocca 定义的 LNG 冷能回收 COP 和焓效率对 LNG 冷能制冷的双级冷库系统进行了热力学分析和经济性分析. 介绍了 LNG 冷能制冷的冷库系统以及其模型建立方法,分析了各设备及系统的焓损和焓效率,确定影响系统整体焓效率提高的障碍环节,研究了不同 LNG 进口温度和气化压力下系统焓效率和 COP 的变化情况,最后对该系统进行了经济性分析. 以期优化设计 LNG 冷能制冷的冷库系统以及合理高效地利用 LNG 冷能、充分发挥其焓效率提供有益参考.

1 系统及模型介绍

该模拟基于以下假定:

- 1) 流程为稳态;
- 2) 状态方程为 Peng-Robinson 方程^[10], 换热器压降均为 10 kPa, 泵和压缩机效率均为 75%.

对于稳定流动的系统,某单位质量流量的工质在某一状态下的焓的定义式为

$$ex = h - h_0 - t_0(s - s_0).$$

(1)

计算基准为 $t_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_0 = 0.1\text{ MPa}$. 此处氨的基准值为 $h_0 = -2\text{ }698\text{ kJ/kg}$, $s_0 = -5.81\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$; LNG 参考值 $h_0 = -4\text{ }191\text{ kJ/kg}$, $s_0 = -5.016\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$.

1.1 系统介绍

图 1 为 LNG 冷能制冷的冷库系统流程. 选取 LNG 组分为广东 LNG 组分,见表 1. 该冷库系统设计思路主要是基于 LNG 冷能梯级利用的考虑,一方面在 LNG 换热器端实现 LNG 冷能的梯级利用, LNG 冷能的第一级用于空气分离工艺,经过空气分离后的 LNG 温度定为 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷库作为 LNG 冷能利用的第二级;另一方面在冷库末端实现 LNG 冷能的梯级利用,设置两种不同库温,库温根据食品的冷藏工艺要求确定,其值可参考 GB50072—2010《冷库设计规范》^[11],此处设置为 -2 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. 不同库温所对应冷媒的蒸发温度不同,相应的蒸发压力也不相等. 采用串联方式时,两冷库换热器中压力控制不均衡,将不能保证各换热器中实际运行的压力为额定蒸发压力,因此,两个不同库温的冷间采用并联方式,从而使 LNG 冷能在冷库系统中得到有效利

用. 冷间的设计冷负荷分别为 51.9 和 205.9 kW , 冷却末端设备分别为蒸发器 1 和蒸发器 2.

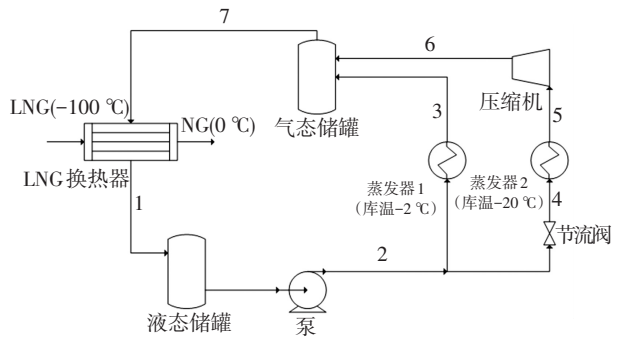


图 1 LNG 冷能制冷的冷库系统流程

Fig.1 Process of cold storage system using LNG cold energy

表 1 LNG 各组分及相应临界压力和温度

Tab.1 LNG components and the corresponding critical pressure and temperature

组分	$\varphi/\%$	临界压力/MPa	临界温度/ $^{\circ}\text{C}$
CH_4	88.77	4.64	-82.45
C_2H_6	7.54	4.88	32.28
C_3H_8	2.59	4.26	96.75
异 C_4H_{10}	0.45	3.65	134.95
正 C_4H_{10}	0.56	3.80	152.05
N_2	0.07	3.39	-146.96

1.2 模型建立

图 2 为该冷库系统的 HYSYS 模拟流程. 根据冷间的设计温度以及换热器的传热温差,为使各冷间能维持相应的温度,工质氨在蒸发器 1 和蒸发器 2 处的蒸发温度分别定为 -9 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,相应的蒸发压力分别为 0.3 和 0.12 MPa ,此处的蒸发压力和蒸发温度并非一恒值,因为在 HYSYS 中换热器计算需要设置一定的压降,蒸发过程并非严格的恒温恒压过程.

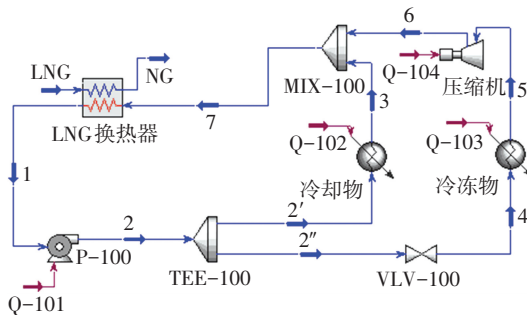


图 2 HYSYS 模拟流程

Fig.2 Process of HYSYS simulation

依据热力学第一定律和第二定律分别得到系统能效和焓效率.

系统能效 COP (coefficient of performance) 定义为

$$\text{COP} = \frac{Q_1 + Q_2 + Ex_{\text{NG}}}{Q_{\text{LNG}} + W_{\text{pump}} + W_{\text{com}}}.$$

(2)

式中: Q_{LNG} 为 LNG 输入冷量, kW; Q_1 为蒸发器 1 输出冷量, kW; Q_2 为蒸发器 2 输出冷量, kW; W_{pump} 为泵输入功, kW; W_{com} 为压缩机输入功, kW; Ex_{NG} 为出口 NG 的焓值, kW.

各设备及系统的焓损和焓效率计算如下:

LNG 换热器

$$Ex_{\text{loss,LNG}} = Ex_{\text{LNG}} + Ex_7 - Ex_{\text{NG}} - Ex_1, \quad (3)$$

$$\eta_{\text{ex,LNG}} = \frac{Ex_{\text{NG}} + Ex_1}{Ex_{\text{LNG}} + Ex_7}. \quad (4)$$

蒸发器 1

$$Ex_{\text{loss,eva1}} = Ex_{2'} - \left(1 - \frac{T_{\text{eva1}}}{T_0}\right) Q_1 - Ex_3, \quad (5)$$

$$\eta_{\text{ex,eva1}} = \frac{\left(1 - \frac{T_{\text{eva1}}}{T_0}\right) Q_1 + Ex_3}{Ex_{2'}}. \quad (6)$$

蒸发器 2

$$Ex_{\text{loss,eva2}} = Ex_4 - \left(1 - \frac{T_{\text{eva2}}}{T_0}\right) Q_2 - Ex_5, \quad (7)$$

$$\eta_{\text{ex,eva2}} = \frac{\left(1 - \frac{T_{\text{eva2}}}{T_0}\right) Q_2 + Ex_5}{Ex_4}. \quad (8)$$

压缩机

$$Ex_{\text{loss,com}} = W_{\text{com}} + Ex_5 - Ex_6, \quad (9)$$

$$\eta_{\text{ex,com}} = \frac{Ex_6}{W_{\text{com}} + Ex_5}. \quad (10)$$

膨胀阀

$$Ex_{\text{loss,exp}} = Ex_{2''} - Ex_4, \quad (11)$$

$$\eta_{\text{ex,exp}} = \frac{Ex_4}{Ex_{2''}}. \quad (12)$$

泵

$$Ex_{\text{loss,pump}} = Ex_1 + W_{\text{pump}} - Ex_2, \quad (13)$$

$$\eta_{\text{ex,pump}} = \frac{Ex_2}{Ex_1 + W_{\text{pump}}}. \quad (14)$$

系统

$$Ex_{\text{loss,system}} = Ex_{\text{LNG}} + W_{\text{pump}} + W_{\text{com}} - Ex_{\text{NG}} - \left(1 - \frac{T_{\text{eva1}}}{T_0}\right) Q_1 - \left(1 - \frac{T_{\text{eva2}}}{T_0}\right) Q_2, \quad (15)$$

$$\eta_{\text{ex,system}} = \frac{Ex_{\text{NG}} + \left(1 - \frac{T_{\text{eva1}}}{T_0}\right) Q_1 + \left(1 - \frac{T_{\text{eva2}}}{T_0}\right) Q_2}{Ex_{\text{LNG}} + W_{\text{pump}} + W_{\text{com}}}. \quad (16)$$

表示工质由蒸发器到冷凝器之间的压降,包括设备压降、储罐进出口压降和管路压降。

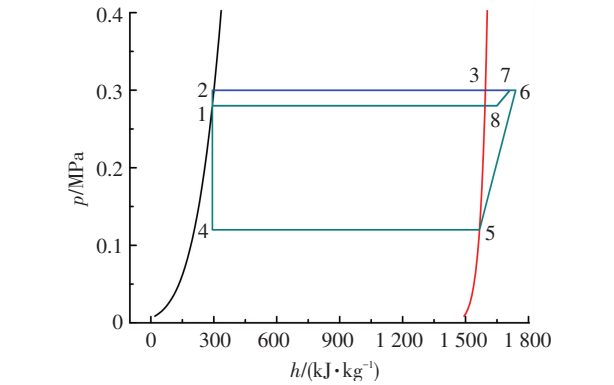


图 3 LNG 冷能制冷的冷库系统压焓图

Fig.3 p - h diagram of cold storage system using LNG cold energy
LNG 冷能制冷的冷库系统相应的流程参数通过 HYSYS 模拟输出的结果如表 2 所示。

通过 HYSYS 软件模拟的系统各能流结果见表 3。

表 2 LNG 冷能制冷的冷库系统各物流参数
Tab.2 Logistic parameters of cold storage system using LNG cold energy

物流	$t/^{\circ}\text{C}$	p/MPa	流量/ ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	焓/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	熵/ ($\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	焓/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
LNG	-100.00	7.00	2 005.0	-4 864	-9.757	740.5
NG	0.00	6.99	2 005.0	-4 353	-7.416	553.6
1	-10.60	0.28	713.7	-4 109	-11.660	333.2
2	-10.60	0.30	713.7	-4 109	-11.660	333.2
3	-9.75	0.29	140.5	-2 779	-6.606	156.3
4	-29.60	0.12	573.2	-4 109	-11.640	327.2
5	-31.40	0.11	573.2	-2 815	-6.291	26.4
6	52.00	0.29	573.2	-2 647	-6.157	154.5
7	40.00	0.29	713.7	-2 673	-6.238	152.6

表 3 LNG 冷能制冷的冷库系统各能流参数
Tab.3 Energy flow parameters of cold storage system using LNG cold energy

能流	LNG 换热器	蒸发器 1	蒸发器 2	泵	压缩机
换热量或功率/kW	284.700	51.900	205.900	0.008	26.900

由式(2)可计算得到 LNG 冷能制冷的冷库系统 COP 为 1.82. 此时能效比并不能反映系统内部真实的能耗情形,应对系统进行焓分析。

根据表 2 和表 3 中的数据,通过式(3)~(16)可计算出 LNG 冷能制冷的冷库系统及其设备的焓损和焓效率,具体数据如表 4 所示。

由表 4 可知,该 LNG 冷能制冷的冷库系统焓效率达 80.2%,较一般冷库不到 30%^[6-7]的焓效率高许多. 一方面是由于该冷库作为 LNG 冷能利用的第二级,一定程度上实现了能量和能质的匹配;另一方面是由于该冷库实现两种不同温度的冷库并联,一定程度上实现了冷能的梯级应用,充分利用了 LNG 冷能. 蒸发器 1 较蒸发器 2 焓效率提高了

2 结果与讨论

2.1 热力学分析

图 3 为工质氨压焓图,其中氨的压焓图饱和曲线数据来自 REFPROP 8.0. 蒸发和冷凝过程按照严格的恒压过程,但是由蒸发器到冷凝器之间需设置一定的压降来表示设备、管路等的总压降. 7-8 过程

14%,因此,不同库温的冷间并联设置可以有效提高冷库系统整体的焓效率,并且拥有几种库温的冷库系统可以满足多种需求,实现多功能化. 由于不同食品具有最适贮藏温度,即库温有多种选择,该冷库系统只选择了两种常见的库温-20 和-2 ℃ 进行研究分析,因此,可在该系统的基础上增加-40、+10 ℃ 等库温进行分析,设计三级及以上冷库系统,这也将是日后研究内容的一部分.

表 4 LNG 冷能制冷的冷库系统及其设备焓损和焓效率
Tab.4 Exergy loss and exergy efficiency of cold storage system using LNG cold energy and its equipment

设备	Ex_{loss}/kW	$\eta_{ex}/\%$
LNG 换热器	68.300	84.6
泵	0.008	100.0
蒸发器 1	0.980	92.4
蒸发器 2	9.900	81.0
压缩机	6.500	79.1
膨胀阀	0.960	98.2
系统	86.600	80.2

根据表 4 中的数据,计算 LNG 冷能制冷的冷库系统各设备的焓损比例,其分布情况如图 4 所示,由于泵的焓损很小,可以忽略不计. 由图 4 可知,LNG 冷能制冷的冷库系统焓损最大的设备是 LNG 换热器,约占 78.9%,主要是因为进入换热器中氨与 LNG 的温度相差太大. 图 5 给出了不同 LNG 进口温度下该冷库系统焓损、LNG 换热器焓损及其比例的变化情况,系统焓损、LNG 换热器焓损及其比例随 LNG 进口温度升高呈近似线性减小趋势,系统焓损由 145.5 kW 减小至 58.5 kW,降低了 59.8%,LNG 换热器焓损由 126.7 kW 减小至 39.7 kW,降低了 68.7%,LNG 换热器焓损比例由 87.1% 减小至 67.9%,降低了 21.9%. LNG 进口温度升高,虽然 LNG 换热器焓损比例仍较大,占系统焓损绝大部分,但 LNG 换热器及系统焓损减小幅度较大,因此,LNG 进口温度的升高对减小 LNG 换热器和系统焓损有很大的促进作用. 蒸发器 2 的焓损占 11.4%,蒸发器 1 焓损占 1.1%,即冷冻库冷藏库焓损为冷却库冷藏库的 10 倍,除了温差等不可逆因素外,还因为前者工质流量是后者的 4 倍. 压缩机焓损占 7.5%,主要在于其有一个绝热效率,此处取 HYSYS 里该单元操作的默认值 75%. 阀和泵的焓损均较小,膨胀阀处的焓损在于工质膨胀后压力的降低,而泵处的焓损则在于其存在一个绝热系数 75%.

通过对 LNG 冷能制冷的冷库系统各设备焓损大小的分析,可知提高该系统整体焓效率的障碍环节主要在 LNG 换热器端,其次是在冷库换热器端. LNG 进入换热器的温度为-100 ℃,而氨进入换热器的温度为 40 ℃,冷热流体换热温差太大,导致焓损较大,焓效率难以提高. 图 6 给出了不同 LNG 进口温度下该冷库系统焓效率的变化情况,系统焓效率随 LNG 进

口温度升高呈近似线性增加趋势,由 64.6% 增加至 90.1%,提高了 39.5%,因此,可以在 LNG 进口端加一个蓄冷设备蓄存部分 LNG 冷量来提高其进口温度,从而提高 LNG 冷能利用焓效率. 增加 LNG 进口温度不仅能提高系统焓效率,也能提高系统的 COP,图 7 给出了不同 LNG 进口温度下该冷库系统 COP 的变化情况. 系统 COP 随 LNG 进口温度升高呈近似二次方增加趋势,由 1.54 增加至 2.38,提高了 54.5%,主要原因在于出口天然气焓值增加.

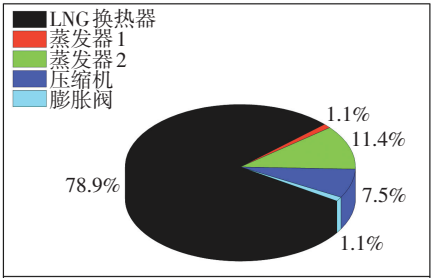


图 4 LNG 冷能制冷的冷库系统焓损分布

Fig.4 Exergy loss distribution of cold storage system using LNG cold energy

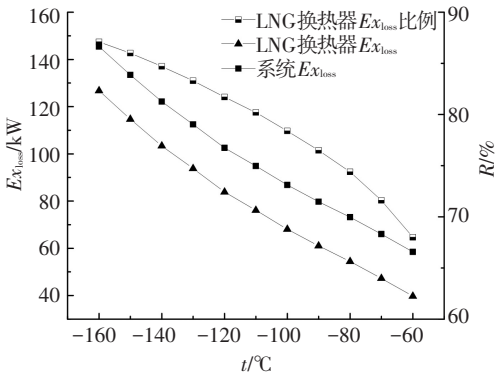


图 5 LNG 换热器焓损及其比例随 LNG 进口温度变化曲线

Fig.5 Exergy loss and its proportion of LNG exchanger under different LNG inlet temperature

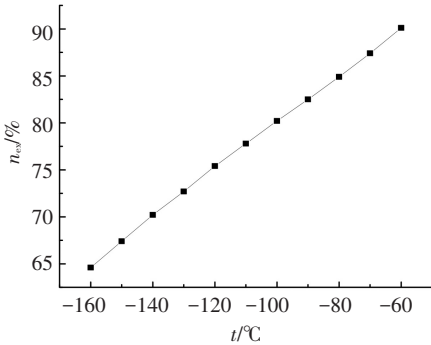


图 6 冷库系统焓效率随 LNG 进口温度变化曲线

Fig.6 Exergy efficiency of cold storage system under different LNG inlet temperature

常压下 LNG 气化温度为-162 ℃,其能量品位很高,若直接应用于不需如此低温的冷库,在换热过程中必然造成大量的焓损失,因此,冷库不适合作为 LNG 冷能利用的第一级,需要对 LNG 冷能进行

梯级利用,以期达到合理用能,使焓损失尽量减小. LNG 冷能第一级可用作空气分离工艺,经过换热后 LNG 的温度在-100 ℃左右,第二级可以用来制取干冰,换热后 LNG 的温度在-55 ℃左右,第三级可用于该冷库制冷. 对于一些设计温度较低的冷库不能直接利用经过两级利用后的 LNG 冷能,需要用 LNG 冷能的第二级甚至第一级,因此,需要根据冷库的设计温度对 LNG 冷能进行合理地梯级利用. 此外,氨的凝固点为-77.7 ℃,不能制取更低的温度,需要根据冷库设计温度选择合适的制冷剂.

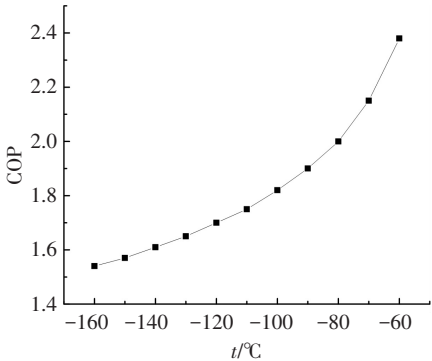


图 7 冷库系统 COP 随 LNG 进口温度变化曲线
Fig.7 COP of cold storage system under different LNG inlet temperature

该冷库系统采用 LNG 先加压后气化的方式,此方式也是 LNG 调峰站采用的加压方式^[12]. 图 8 给出了不同 LNG 气化压力下该冷库系统焓效率的变化情况,其中取 2.5 MPa 为起始气化压力是因为 LNG 在压力为 2 MPa、温度为-100 ℃时仍为气液两相流. 系统焓效率随 LNG 气化压力增加而增大,2.5 MPa 到 4.5 MPa 段焓效率增加较快,由 67.0% 升至 75.3%,从 5 MPa 之后焓效率增长缓慢,由 76.5% 增至 81.4%. 起始端焓效率增加较快是因为焓损减小速率较快,同理,5 MPa 至 8 MPa 段焓效率增加缓慢是因为焓损减小速率较慢. 提高 LNG 的进口压力,可以改变 LNG 气化温度,从而有效提高系统整体的焓效率,因此,可以在 LNG 进口端增设一个加压泵来调整 LNG 进口压力.

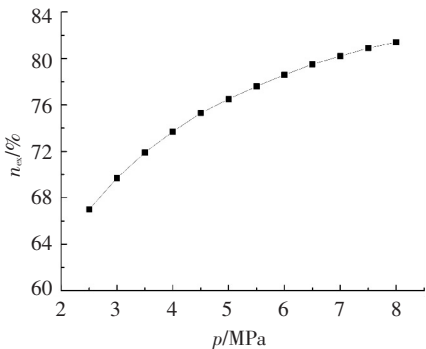


图 8 冷库系统焓效率随 LNG 气化压力变化曲线
Fig.8 Exergy efficiency of cold storage system under different LNG gasification pressure

图 9 给出了不同 LNG 气化压力下该冷库系统 COP 的变化. COP 随 LNG 气化压力增加呈近似线性增加趋势,由 1.50 升高至 1.89,提高了 26%,主要原因在于出口天然气焓值增加. 提高 LNG 气化压力能够提高该冷库系统的焓效率,还能提高该冷库系统的 COP,但压力升高也对 LNG 换热器和管道的承压能力提出更高要求,会增大投资费用,因此,需要综合考虑该冷库的收益和投资,选择合适的气化压力.

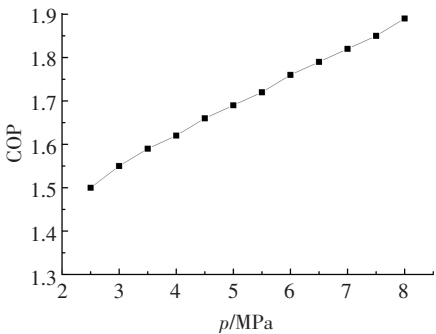


图 9 冷库系统 COP 随 LNG 气化压力变化曲线
Fig.9 COP of cold storage system under different LNG gasification pressure

2.2 经济性分析

2.2.1 初投资和运行费用

该冷库系统的初投资由各设备的造价组成,设备造价相应的经验公式如下^[13]:

$$\lg C_{PE} = K_1 + K_2 \lg X + K_3 (\lg X)^2. \quad (17)$$

式中: C_{PE} 为设备造价,美元; X 为换热面积(换热器)或输入功率(泵/压缩机), m^2 或 kW ; K_1 、 K_2 、 K_3 为常数,具体值见表 5^[13].

表 5 各设备的 K_1 、 K_2 、 K_3 参数值

Tab.5 K_1 , K_2 , K_3 parameter values of each equipment				
设备	变量 X	K_1	K_2	K_3
LNG 换热器	换热面积/ m^2	4.665 6	-0.155 7	0.154 7
泵(一开一备)	输入功率/ kW	3.389 2	0.053 6	0.153 8
蒸发器 1 和 2	换热面积/ m^2	4.665 6	-0.155 7	0.154 7
压缩机	输入功率/ kW	2.625 9	1.439 8	-0.177 6

泵和压缩机的输入功率见表 3,HYSYS 稳态模拟只能给出换热系数与换热面积乘积值,因此,换热器的面积需要进行估算. 根据文献[14]中换热系数的估计值,LNG 换热器换热系数取 $5\,000\,W/(m^2\cdot K)$,蒸发器换热系数取 $2\,000\,W/(m^2\cdot K)$,从而计算 LNG 换热器、蒸发器 1 和蒸发器 2 换热面积分别为 2.27 、 3.7 和 $10.3\,m^2$. 由式(17)计算得相应设备的造价,见表 6.

表 6 各设备造价估算值

Tab.6 Estimated values of each equipment cost					
设备	LNG 换热器	泵	蒸发器 1	蒸发器 2	压缩机
金额/万元	27.54	5.13	27.37	30.00	13.55

注:取美元对人民币汇率为 1 美元=6.46 元人民币
其他初投资费用:储罐(1 个储液罐、2 个储气

罐)按 2 万元/个计算,总计 6 万元,冷媒及管道、阀门等部件费用总计 15 万元。经计算得,系统设备一次性投资总计 124.59 万元。全年运行和维护费用按系统设备初投资的 20% 计算,共 24.92 万元。

2.2.2 回收冷量效益

该冷库系统对 LNG 冷能回收效益可以根据陈敏^[15]拟合的温度 T 下的单位冷能价格公式进行计算

$$C_{Q_T} = 82.85C_e \cdot \exp(-0.0217T).$$

式中: C_{Q_T} 为温度 T 下单位冷能价格,元/MJ; C_e 为工业电价,元/MJ; T 为温度,K。

以工业用电价格 0.8 元/(kW·h) (0.22 元/MJ) 计算,以蒸发器蒸发温度 -9 和 -30 °C 分别计算得单位冷能价格为 0.060 和 0.093 元/MJ。

根据冷却物冷藏间和冷冻物冷藏间冷负荷计算值,可得到 LNG 冷库回收冷量效益。将冷却物冷藏间和冷冻物冷藏间回收冷量效益加总,得到年平均回收冷量收益值为 59.02 万元,求回收冷量收益值与年运行费用的差值得到每年净收益 34.1 万元。

2.2.3 动态投资回收期

动态投资回收期定义式^[16]为

$$\sum_{t=0}^{P'_t} (C_t - C_0)_t (1 + i_c)^{-t} = 0.$$

式中: P'_t 为动态投资回收期,a; i_c 为基准折现率; C_t 为现金流入量,万元; C_0 为现金流出量,万元; $(C_t - C_0)_t$ 为第 t 年现金流量值,万元。

该 LNG 冷能冷库系统初投资为 124.59 万元,年净收益为 34.1 万元,假定该项目生命周期为 15 a,基准折现率为 10%,得

$$-P + A \cdot \frac{(1 + i_c)^{P'_t} - 1}{i_c \cdot (1 + i_c)^{P'_t}} = 0.$$

式中: P 为初投资,万元; A 为年净收益,万元。

计算得 $P'_t = -\lg(1 - \frac{P \cdot i_c}{A}) / \lg(1 + i) = 4.77$ a。系

统经 4.77 a 可回收其成本。

3 结 论

1) 该冷库系统 COP 为 1.82, 焓效率为 80.2 %, 其中焓效率较一般利用 LNG 冷能的冷库系统高。

2) LNG 换热器处焓损最大, 占系统总焓损 78.9%, 提高 LNG 进口温度可有效减小其焓损。

3) 系统 COP 和焓效率均随 LNG 进口温度升高而增加, 且均随 LNG 气化压力升高而增加, 在 LNG 进口端增设蓄冷设备和加压泵均能有效提高系统焓效率。

4) 该冷库系统经 4.77 a 可回收成本, 具有较好的经济效益。

参考文献

- [1] 邵峰, 钱铮, 赵喆. 全球 LNG 市场供需发展新特点及新动向[J]. 国际石油经济, 2013 (6): 26-31.
GAO Feng, QIAN Zheng, ZHAO Zhe. New features and new trends of global LNG market supply and demand development[J]. International Petroleum Economy, 2013 (6): 26-31.
- [2] 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.
HUANG Meibin, LIN Wensheng, GU Anzhong. Process comparison of low temperature cold storage using LNG cold energy[J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(4): 58-62.
- [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(自然科学版), 2010 (1): 44-47.
WU Jiying, MA Yimin, CHEN Shiqing. Design and analysis of cold storage system using LNG cold energy[J]. Journal of Jimei University (Natural Science Edition), 2010(1): 44-47.
- [4] 刘宗斌, 郑惠平, 尚巍, 等. LNG 卫星站冷能利用项目开发[J]. 煤气与热力, 2010, 30(9): 1-5.
LIU Zongbin, ZHENG Huiping, SHANG Wei, et al. Development of cold energy utilization project in LNG satellite station[J]. Gas and Heat, 2010, 30(9): 1-5.
- [5] MESSINEO A, PANNO G. LNG cold energy use in agro-food industry: A case study in Sicily[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2011, 3(1): 356-363.
- [6] 李少中. 利用 LNG 冷能的冷库工艺模拟及分析[J]. 广东化工, 2010, 37(7): 250-251.
LI Shaozhong. Simulation and analysis on the cold storage process with LNG cold energy[J]. Chemical Industry in Guangdong, 2010, 37(7): 250-251.
- [7] 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.
TANG Xianwen, WANG Cong, YANG Zeliang. Guangdong LNG cold energy and exergy analysis on its applications in the coldstorage[J]. Energy and Energy Conservation, 2012(5): 12-13.
- [8] ROCCA L V. Cold recovery during regasification of LNG part one: Cold utilization far from the regasification facility [J]. Energy, 2010, 35(5): 2049-2058.
- [9] ROCCA L V. Cold recovery during regasification of LNG part two: Applications in an agro food industry and a hypermarket [J]. Energy, 2011, 36(8): 4897-4908.
- [10] PENG D Y, ROBINSON D B. A new two-constant equation of state [J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1976, 15(1): 59-64.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 冷库设计规范: GB50072—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-rural Construction of the People's Republic of China. Code for design of cold storage: GB50072—2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [12] PIORO I L, KHARTABIL H F, DUFFEYR B. Heat transfer to supercritical fluids flowing in channels—empirical correlations (survey)[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 230(1): 69-91.
- [13] HEBERLE F, BASSERMANN P, PREIBINGER M, et al. Exergo-economic optimization of an organic Rankine cycle for low-temperature geothermal heat sources[J]. International Journal of Thermodynamics, 2012, 15(2): 119-126.
- [14] XUE X, GUO C, DU X, et al. Thermodynamic analysis and optimization of a two-stage organic Rankine cycle for liquefied natural gas cryogenic energy recovery[J]. Energy, 2015, 83: 778-787.
- [15] 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.
CHEN Min. Development and optimization of power generation and air-conditioning using LNG cold energy[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [16] 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.
HU Maosheng, FENG Yanping, XIE Yingliang, et al. Technology economic analysis theory and method[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 50-52.

(编辑 刘 彤)