

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2022.01.015

# 利用液化天然气余冷与氨供冷的低温制冷系统性能对比

Performance comparison of cryogenic refrigeration system using LNG wasted cold and ammonia refrigeration

宁静红 王润霞 刘华阳 贾永勤

NING Jing-hong WANG Run-xia LIU Hua-yang JIA Yong-qin

(天津商业大学天津市制冷技术重点实验室, 天津 300134)

(Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

**摘要:**目的:对比研究利用液化天然气(LNG)余冷和氨供冷的低温制冷系统性能。方法:利用 MATLAB 建立两个系统的热力学和经济学模型,在基本参数下,选择适合 LNG 低温制冷系统的工质质量分数,同时分别改变冷间温度和制冷量,对两系统的热经济性进行对比分析。结果:随着乙二醇质量分数增加,LNG 质量流量、系统功耗、蓄冷量增加,制冷系统性能系数(COP)减小,而乙二醇质量流量不变;随着冷间温度的升高,系统 COP 增大,而工质质量流量、功耗随之降低。同样,随着制冷量的增大,质量流量、功耗均升高,而氨低温制冷系统 COP 不变,LNG 低温制冷系统 COP 增加,在 5~20 kW 时 LNG 低温制冷系统 COP 低于氨低温制冷系统,而 20~30 kW 时相反。经济性能对比表明:LNG 低温制冷系统的投资费用远低于氨低温制冷系统。结论:在相同工况下,利用 LNG 余冷的低温制冷系统的热力学性能和经济学性能优于传统的氨低温制冷系统。

**关键词:**制冷系统;液化天然气;氨;热力性能;经济性能

**Abstract: Objective:** To compare the performance of cryogenic refrigeration system using LNG wasted cold and ammonia cooling.

**Methods:** The thermodynamic and economic models of the two systems were established by MATLAB. Under the basic parameters, the working medium concentration suitable for LNG low-temperature refrigeration system was selected, and the cold storage temperature and refrigeration capacity were changed respectively. The thermal economy of the two systems was compared and analyzed. **Results:** With the increase of ethylene glycol concentration, LNG mass flow, system power consumption and cold

storage capacity increased, COP decreased, but ethylene glycol mass flow remained unchanged; With the increase of cold storage temperature, the system COP increased, while the working medium mass flow and power consumption decrease. Similarly, with the increase of refrigeration capacity, the mass flow and power consumption increase, while the COP of ammonia low-temperature refrigeration system remained unchanged and the COP of LNG low-temperature refrigeration system increased. In the range of 5~20 kW, the COP of LNG low-temperature refrigeration system was lower than that of ammonia low-temperature refrigeration system, and the opposite was true in the range of 20~30 kW. The comparison of economic performance showed that the investment cost of LNG cryogenic refrigeration system was much lower than that of ammonia cryogenic refrigeration system. **Conclusion:** Under the same working conditions, the thermodynamic and economic performance of the low-temperature refrigeration system using LNG wasted cold is better than that of the traditional ammonia low-temperature refrigeration system.

**Keywords:** refrigeration system; LNG; ammonia; thermal performance; economic performance

目前,国内外冷库制冷系统所用制冷剂主要分为人工合成工质和自然工质<sup>[1]</sup>。对于人工合成工质的研究方向主要集中在混合工质上,Mostafa 等<sup>[2]</sup>比较了 R404a 和 R-454C 在不同冷库热负荷和冷却水温度下的冷却能力和能耗;赵海波等<sup>[3]</sup>对用于冷库的 R1270、R134a 制冷剂的热物性参数、热力循环性能、最小惰化体积浓度进行计算分析,并与现有冷库制冷剂进行对比;对于自然工质的研究有:Choudhari 等<sup>[4]</sup>对以 R290 和 R22 为制冷剂,蒸发温度范围为 10~25 °C,冷凝温度为 45 °C 的标准蒸汽压缩循环进行分析计算,比较两种不同制冷剂下系统的热力学性能;张建一等<sup>[5]</sup>通过调查发现,在制冷剂发展动向

**基金项目:**天津市自然科学基金(编号:18JCYBJC22200)

**作者简介:**宁静红(1964—),女,天津商业大学教授,博士。

E-mail: ningjinghong@126.com

**收稿日期:**2021-07-14

中,国内外大中型冷库采用氨、CO<sub>2</sub>作为制冷剂仍是主流;然而,人工合成工质扩散到大气中的氯氟烃类会加剧臭氧的损耗及全球变暖,进而对生态环境造成不良影响。因此,将自然工质应用于制冷系统是一项长期可行的选择。其中,氨作为自然工质因绿色环保、价格低廉、单位容积制冷量大等优点而被广泛应用<sup>[6]</sup>。但传统氨蒸汽压缩制冷系统耗电量较大,间接对环境产生较大影响。

液化天然气(LNG)作为自然工质,能量品质极高,且高效、清洁、易储<sup>[7]</sup>,而其在汽化过程中释放的大量冷能被浪费。研究拟提出一种利用 LNG 余冷的低温制冷系统,并建立 LNG 低温制冷系统模型,通过改变乙二醇质量分数、冷间温度和系统制冷量等参数,并与氨低温制冷系统进行热力性和经济性对比,以期获得性能更优的低温制冷系统。

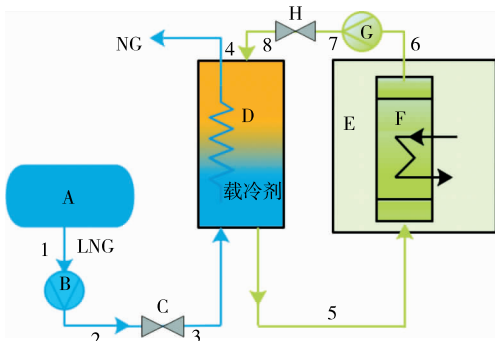
## 1 模型建立

### 1.1 系统概述

LNG 低温制冷系统分别以 LNG 和载冷剂为工作流体,图 1 和图 2 分别为该系统的工作原理图和相应的 P—h 图。

如图 1 所示:从 LNG 储蓄罐 A 输出的 LNG,由泵 B 升压经流量控制阀 C 流入蓄冷池 D 与载冷剂换热,完成汽化。升温汽化后的 LNG 可供用户使用。载冷剂在蓄冷池 D 放热温度降低,随后进入冷库 E 中的冷却空气换热器 F 完成制冷,并通过泵 G、流量控制阀 H 返回蓄冷池完成循环。

利用 LNG 余冷的低温制冷系统压焓图如图 2 所示,其中,1→2 为 LNG 在泵内的升压过程,2→3 为 LNG 在流量控制阀的等焓降压过程,3→4 为 LNG 在蓄冷器内等压吸热过程,5→6 为载冷剂在冷却空气换热器中的等压吸热过程,6→7 为载冷剂在泵内的升压过程,7→8 为载冷剂通过流量控制阀的等焓降压过程,8→5 为载冷剂在



A. LNG 储蓄罐 B. 泵 C. 流量控制阀 D. 蓄冷池 E. 冷库 F. 冷却空气换热器 G. 泵 H. 流量控制阀

图 1 利用 LNG 余冷的低温制冷系统流程图

Figure 1 Flow chart of cryogenic refrigeration system using LNG wasted cold

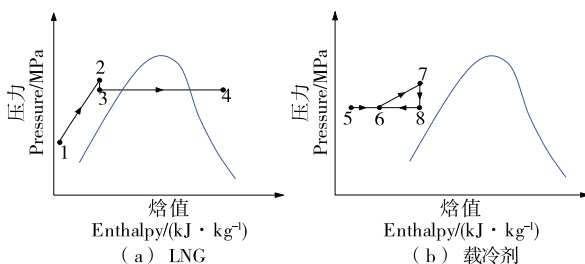


图 2 利用 LNG 冷能的低温制冷系统压焓图

Figure 2 Pressure enthalpy diagram of cryogenic refrigeration system using LNG wasted cold

蓄冷器内的等压放热过程。

为获取较低的冷间温度,氨低温制冷系统采用一级节流中间完全冷却系统。以氨为制冷剂的一级节流中间完全冷却系统模型与压焓图参考文献<sup>[8]</sup>。

### 1.2 LNG 制冷系统载冷剂选择

乙二醇凝固点低,性质稳定且热容量大<sup>[9]</sup>,因此,选择乙二醇作为 LNG 制冷系统的载冷剂。目前,质量分数为 52%,60%,80% 的乙二醇水溶液是最为常用的载冷剂,其物理性质如表 1 所示<sup>[10]</sup>。

表 1 不同质量分数乙二醇水溶液的物理性质

Table 1 Physical properties of glycol solutions with different concentrations

乙二醇质量分数/%	凝固点/℃	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
52	-38	1 062
60	-50	1 074
80	-47	1 094

### 1.3 系统假设

- (1) LNG 由纯甲烷组成。
- (2) 忽略时间、地点对系统的影响,系统循环为稳态过程。
- (3) 忽略换热管与环境之间的热交换以及乙二醇的黏度影响。
- (4) 以氨为制冷剂的一级节流中间完全冷却循环系统为理论循环。

## 2 数学模型

在上述系统模型和假设的基础上,从热力学和经济学角度分析,建立 LNG 低温制冷系统数学模型。

### 2.1 能量分析

2.1.1 工质泵 1 工质泵 1 的功耗为:

$$W_{p1} = m_{LNG} \times (h_2 - h_1), \tag{1}$$

式中:

$W_{p1}$ ——工质泵 1 的功耗,kW;

$m_{LNG}$ ——LNG 的质量流量,kg/s;

$h_1, h_2$ ——LNG 在状态点 1 和 2 的焓值, kJ/kg。

2.1.2 工质泵 2 工质泵 2 的功耗为<sup>[11]</sup>:

$$W_{p2} = \frac{m_{EG} \times H \times g \times \rho}{\eta_p}, \quad (2)$$

式中:

$W_{p2}$ ——工质泵 2 的功耗, kW;

$m_{EG}$ ——乙二醇的质量流量, kg/s;

$g$ ——重力加速度, m/s<sup>2</sup>;

$\rho$ ——乙二醇密度, kg/m<sup>3</sup>;

$\eta_p$ ——泵的等熵效率, %;

$H$ ——泵 2 的扬程, m。

2.1.3 流量控制阀 假定 LNG 和乙二醇流经控制阀的降压过程均为等焓过程, 即:

$$h_2 = h_3, \quad (3)$$

$$h_7 = h_8, \quad (4)$$

式中:

$h_2, h_3$ ——LNG 在状态点 2、3 的焓值, kJ/kg;

$h_7, h_8$ ——乙二醇在状态点 7、8 的焓值, kJ/kg。

2.1.4 冷却空气换热器 冷却空气换热器的换热量为乙二醇在冷库内的制冷量:

$$Q = m_{EG}(h_6 - h_5), \quad (5)$$

式中:

$Q$ ——冷却空气换热器的换热量, kW;

$h_5, h_6$ ——乙二醇在状态点 5、6 的焓值, kJ/kg。

2.1.5 蓄冷器 根据能量守恒原理, LNG 在蓄冷器内的吸热量等于乙二醇在冷库内的制冷量和泵 2 的功耗<sup>[12]</sup>, 如式(6)所示。

$$Q_x = m_{LNG} \times (h_4 - h_3) = Q + W_{p2}, \quad (6)$$

式中:

$Q_x$ ——蓄冷器吸热量, kW;

$h_4$ ——LNG 在状态点 4 的焓值, kJ/kg。

2.1.6 系统性能系数 系统的性能系数按式(7)计算:

$$C_{OP,LNG} = \frac{Q}{W_{p1} + W_{p2}}, \quad (7)$$

式中:

$C_{OP,LNG}$ ——系统性能系数。

氨一级节流中间完全冷却循环相关计算详见文献<sup>[8]</sup><sup>81-83</sup>。

## 2.2 经济性分析

LNG 低温制冷系统的总投资费用  $C_{total1}$ <sup>[13]</sup> 包括设备投资费用、工质投资费用、环境费用以及运行成本, 如式(8)所示。

$$C_{total1} = C_{LNG,inv} + C_{LNG,f} + C_{LNG,env} + C_{LNG,0}, \quad (8)$$

式中:

$C_{total1}$ ——LNG 低温制冷系统的总投资费用, 元;

$C_{LNG,inv}$ ——LNG 低温制冷系统的设备投资费用, 元;

$C_{LNG,f}$ ——LNG 低温制冷系统的工质投资费用, 元;

$C_{LNG,env}$ ——LNG 低温制冷系统的环境费用, 元;

$C_{LNG,0}$ ——LNG 低温制冷系统的运行成本, 元。

氨低温制冷系统总投资费用  $C_{total2}$  包括设备投资费用、工质投资费用、运行成本, 如式(9)所示。

$$C_{total2} = C_{ammion,inv} + C_{ammion,f} + C_{ammion,0}, \quad (9)$$

式中:

$C_{total2}$ ——氨低温制冷系统总投资费, 元;

$C_{ammion,inv}$ ——氨低温制冷系统的设备投资费用, 元;

$C_{ammion,f}$ ——氨低温制冷系统的工质投资费用, 元;

$C_{ammion,0}$ ——氨低温制冷系统的运行成本, 元。

其中设备投资费用为:

$$C_{inv} = \sum_n C_n, \quad (10)$$

式中:

$C_{inv}$ ——设备投资费用, 元;

$C_n$ ——LNG 低温制冷系统和氨低温制冷系统各设备的投资费用, 元。

两低温制冷系统的设备投资费用分别列于表 2 和表 3。

表 2 LNG 低温制冷系统设备投资费用方程<sup>†</sup><sup>[14-16]</sup>

Table 2 Investment cost equation of LNG cryogenic system equipment

部件	投资费用(元)方程
泵	$C_p = 5154.8 \times (W_p/10)^{0.26} \times [(1-\eta_p)/\eta_p]^{0.5}$
流量控制阀	$C_{ev} = 19.3305 \times 114.5 m_{out}$
蓄冷器	$C_{cst} = 19266.065 \times (A_X)^{0.6}$
冷却空气换热器	$C_h = 837.655 \times (A_h/0.093)^{0.78}$
LNG 储蓄罐	$C_{vessel} = 10^{-1} \times 50.569 \exp[2.631 + 1.3673(\ln V_{vessel}) - 0.06309(\ln V_{vessel})^2]$

†  $\eta_p$  为泵的等熵效率, %;  $m_{out}$  为流量控制阀出口质量流量, kg/s;  $A_X, A_h$  分别为蓄冷器、冷却空气换热器换热面积, m<sup>2</sup>;  $V_{vessel}$  为储蓄罐体积, m<sup>3</sup>。

表 3 氨低温制冷系统设备投资费用方程<sup>†</sup><sup>[17-18]</sup>

Table 3 Investment cost equation of ammonia cryogenic system equipment

部件	投资费用(元)方程
低压压缩机	$C_{LPC} = 65511.6 \times W_{ed}^{0.67}$
高压压缩机	$C_{HPC} = 62013.53 \times W_{eh}^{0.67}$
流量控制阀	$C_{ev} = 12.887 \times 114.5 \times m_{out}$
冷凝器	$C_{cond} = 3328.847 \times A_{cond} + 268.45$
蒸发器	$C_{eva} = 991.944 \times A_{eva} + 231.915$
中间冷却器	$C_{IC} = 9266.397 \times A_{IC}^{0.65}$

†  $W_{ed}, W_{eh}$  为低压级、高压级压缩机轴功, kW;  $m_{out}$  为流量控制阀出口质量流量, kg/s;  $A_{cond}, A_{eva}, A_{IC}$  分别为冷凝器、蒸发器、中间冷却器换热面积, m<sup>2</sup>。

环境投资费用的具体计算<sup>[18-19]</sup>：

$$C_{CO_2} = m_{CO_2} \times C_{CO_2 \text{ penalty}} / 1\ 000, \quad (11)$$

$$m_{CO_2} = t \times W_p \times F_{ac,CO_2} / 1\ 000, \quad (12)$$

式中：

$C_{CO_2}$ ——环境投资费用，元；

$C_{CO_2 \text{ penalty}}$ ——CO<sub>2</sub> 生产的惩罚成本，假设为

580 元/t；

$m_{CO_2}$ ——一年内系统产生的 CO<sub>2</sub>，kg；

$t$ ——一年内系统运行的时间，h；

$F_{ac,CO_2}$ ——污染物因素，设置为 46.62 g/(kW·h)；

$W_p$ ——系统的耗电，kW。

工质投资费用<sup>[14]</sup>：

$$C_f = 3\ 600 \times m_f \times c_f, \quad (13)$$

式中：

$C_f$ ——工质投资费用，元；

$m_f$ ——工质的质量流量，kg/s；

$c_f$ ——工质成本，元。

根据目前中国 LNG、乙二醇以及氨的交易价格，设置工质成本分别为 3.29、7.86、3.16 元/kg。

年度运行和维护成本费用：

$$C_0 = aC_{inv}, \quad (14)$$

式中：

$C_0$ ——年度运行和维护成本费用，元；

$C_{inv}$ ——系统设备投资费用，元；

$a$ ——系统部件运行和维护成本比，取 0.06。

### 3 运行结果分析与讨论

LNG 低温制冷系统热力参数如表 4 所示。

#### 3.1 乙二醇质量分数对 LNG 低温制冷系统性能的影响

通过计算，不同乙二醇质量分数下 LNG 低温制冷系统的热力学性能参数对比如表 5 所示。可以看出，乙二醇质量流量不变，随着乙二醇质量分数增加，LNG 质量流量、蓄冷量和功耗均增加，而制冷系统性能系数 (COP) 减小。这是由于在相同的基本参数下，冷却空气换热器的乙二醇进出口温度及压力不随乙二醇质量分数而改变，因此 5 点和 6 点乙二醇的焓差一定，乙二醇质量流量一定。乙二醇的密度随其质量分数的增加而增加，则泵 2 功耗及蓄冷量均增加。在 3 和 4 两点温度和压力一定的情况下，当蓄冷量增加时，LNG 质量流量随之增加，进而

表 4 LNG 低温制冷系统热力参数<sup>[20-23]</sup>

Table 4 Thermodynamic parameters of LNG cryogenic refrigeration system

参数	单位	数值
LNG 进口温度 $t_1$	℃	-162
LNG 进口压力 $p_1$	MPa	0.1
LNG 出口温度 $t_4$	℃	-50
2 点压力 $p_2$	MPa	0.5
4 点压力 $p_4$	MPa	0.45
库温与乙二醇的传热温差 $\Delta t$	℃	10
泵 2 的扬程 $H$	m	50
泵 2 的等熵效率 $\eta_p$	%	65
冷间温度 $T$	℃	-25

使得泵 1 功耗更大。在功耗及蓄冷量的综合影响下，系统 COP 随乙二醇质量分数的升高而降低。明显的，乙二醇质量分数越大需要的工质投资越大，进而增加了经济费用。因此，系统以 52% 乙二醇水溶液作为载冷剂。

#### 3.2 冷间温度对两低温制冷系统性能的影响

冷间温度因存储货物种类的不同而改变，进而影响系统的热经济性能，如图 3~图 5 所示。当冷间供冷温度升高时，两系统的工质质量流量、功耗和投资费用均降低，系统的 COP 升高。且就系统 COP 来说，LNG 低温制冷系统大于氨低温制冷系统。

对于 LNG 低温制冷系统，冷间温度升高，乙二醇在空气冷却换热器进出口焓差增加，导致其质量流量及泵 2 功耗降低使得蓄冷量降低，同时 LNG 在蓄冷器进出口焓差不变的条件下，其质量流量及泵 1 功耗降低，COP 升高。对于氨低温制冷系统，随着冷间温度升高，相应的蒸发温度升高，在制冷量不变的情况下，氨质量流量随之减小。另外，蒸发温度提高导致蒸发压力提高，压缩机压缩比降低，因此压缩机功耗减小，COP 增加。

同时根据计算，随着冷间温度的升高，LNG 低温制冷系统中除冷却空气换热器投资费用增加其他项投资费用均减少，并且在氨低温制冷系统中除压缩机和膨胀阀费用降低其他费用均增加，由于压缩机投资费用约占总投资费用的 77.08%，所以整体费用呈下降趋势。如图 6 所示，相比之下，LNG 低温制冷系统的总投资费用远低于氨

表 5 不同质量分数乙二醇下 LNG 低温制冷系统性能参数对比

Table 5 Comparison of performance parameters of LNG cryogenic system with different mass fraction of glycol

质量分数/ %	乙二醇质量流量/ (kg·s <sup>-1</sup> )	LNG 质量流量/ (kg·s <sup>-1</sup> )	功耗/ kW	蓄冷量/ kJ	COP
52	2.23	0.051 3	7.57	31.78	3.96
60	2.23	0.051 7	7.60	31.80	3.95
80	2.23	0.052 2	7.64	31.84	3.93

低温制冷系统,充分表明 LNG 低温制冷系统结构简单,减少了传统电驱动冷库中的压缩机、冷凝器等设备,极大地节省了投资费用,充分利用 LNG 汽化过程的冷能,可以节约能源、保护环境。实际应用中,在满足贮存食品冷藏保鲜需求条件下,冷间温度尽可能提高。

### 3.3 制冷量对两低温制冷系统性能的影响

当制冷量变化范围为 5~30 kW,如图 7~图 9 所示,

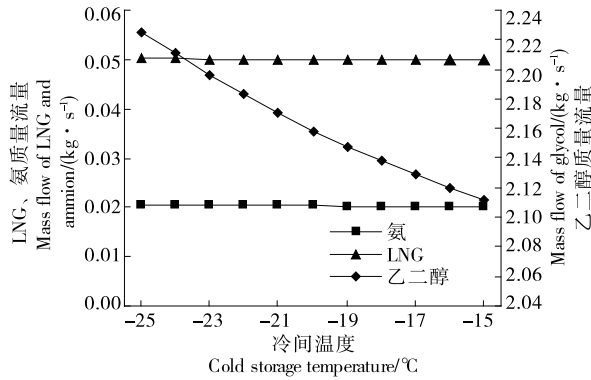


图 3 冷间温度对系统工质质量流量的影响

Figure 3 Effects of cold storage temperature on mass flow of working fluid in the systems

随着制冷量的增大,工质质量流量和功耗均升高,而氨低温制冷系统 COP 不变,LNG 低温制冷系统 COP 增加,且制冷量在 5~20 kW 时氨低温制冷系统 COP 高于 LNG 低温制冷系统,而在 20~30 kW 时相反。这是因为当制冷量增加时,需要乙二醇向冷间内提供的冷量增加,同时蓄冷器需要的冷量增加,则乙二醇和 LNG 质量流量随之增加。LNG 低温制冷系统功耗由 5.81 kW 增加至 7.92 kW,

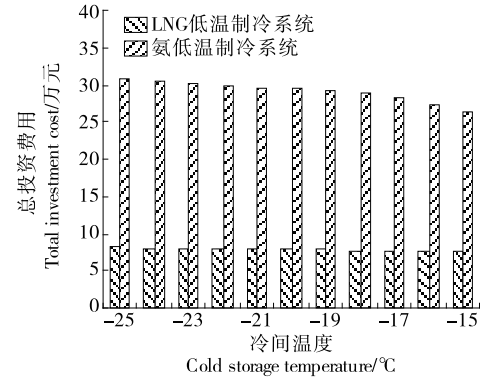


图 6 冷间温度对系统投资费用的影响

Figure 6 Effects of cold storage temperature on investment cost of the systems

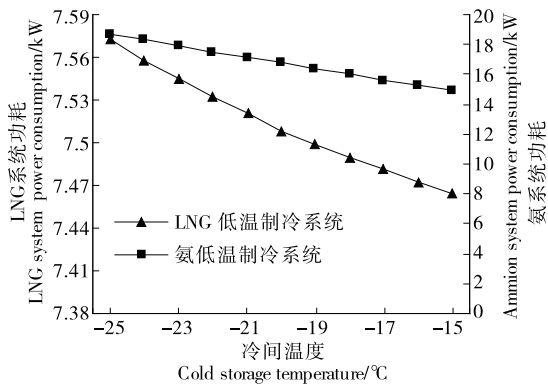


图 4 冷间温度对系统泵功耗的影响

Figure 4 Effects of cold storage temperature on pump power consumption of the systems

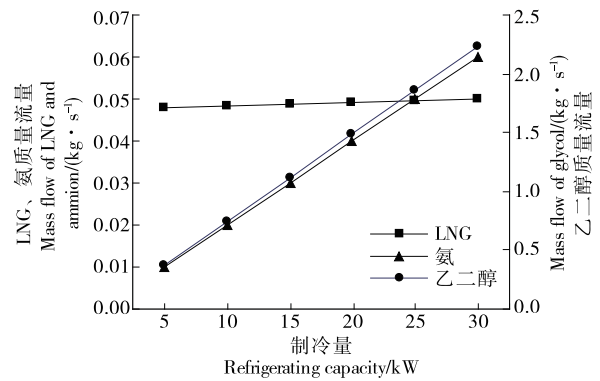


图 7 冷库制冷量对系统工质质量流量的影响

Figure 7 Effects of refrigerating capacity of cold storage on mass flow of working fluid in the systems

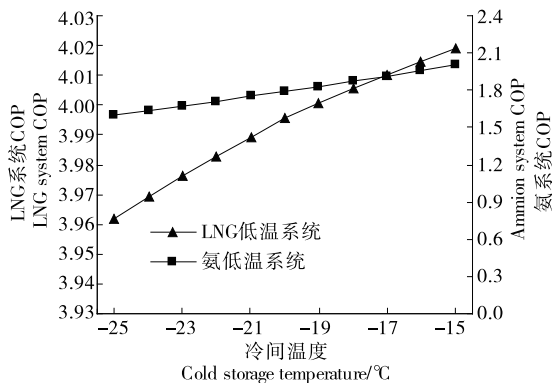


图 5 冷间温度对系统 COP 的影响

Figure 5 Effects of cold storage temperature on COP of the systems

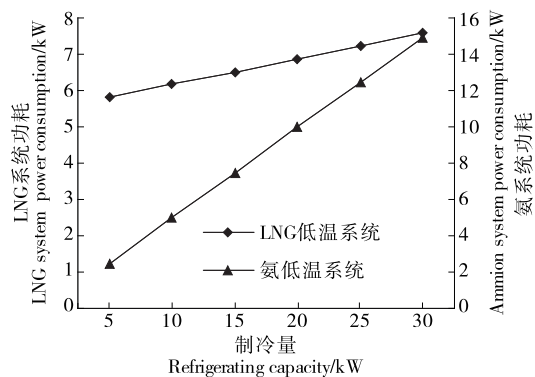


图 8 冷库制冷量对系统泵功耗的影响

Figure 8 Effects of refrigerating capacity of cold storage on pump power consumption of the systems



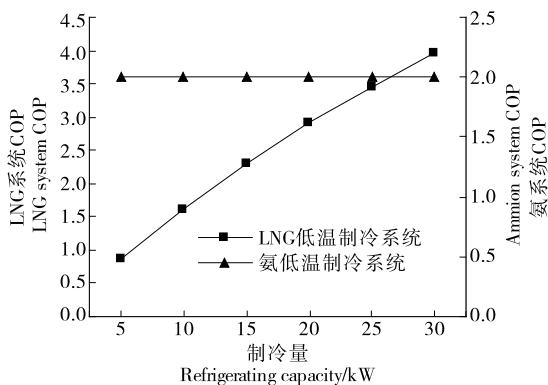


图 9 冷库制冷量对系统 COP 的影响

Figure 9 Effects of refrigerating capacity of cold storage on COP of the systems

提升幅度明显低于制冷量,则 COP 呈升高趋势。同样,氨低温制冷系统质量流量和功耗变化原理如上。而氨系统制冷量的改变没有引起各点焓值变化,因此 COP 不变。

图 10 为两低温制冷系统总投资费用估算的对比。LNG 低温制冷系统的总投资费用为 90 814~143 393 元,而氨低温制冷系统总投资费用则为 181 075 ~ 659 369 元。随着制冷量的升高,各工质质量流量增大,两个系统的设备投资费用以及运行维护费用均增加,使得两系统总投资费用增加,并且 LNG 低温制冷系统总投资费用仍远低于氨低温制冷系统。随着制冷量的提高,LNG 低温制冷系统比氨低温制冷系统要节省 1~3 倍的投资费用,因此 LNG 低温制冷系统大大提高了制冷系统的经济性能,更具有实际意义。

#### 4 结论

(1) 当液化天然气低温制冷系统冷间温度为  $-25^{\circ}\text{C}$ ,制冷量为 30 kW 时,随着乙二醇质量分数增加,乙二醇质量流量不变,液化天然气质量流量由  $0.0513\text{ kg/s}$  增加到  $0.0522\text{ kg/s}$ ,对应蓄冷量增加  $0.02, 0.04\text{ kW}$ ,功耗增大

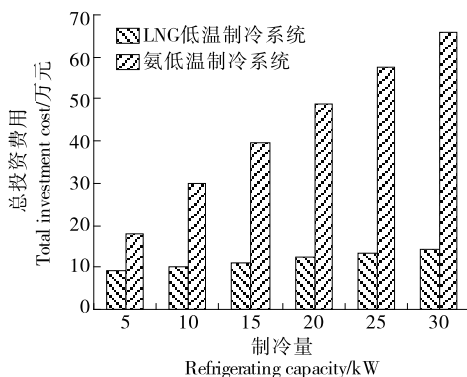


图 10 冷库制冷量对系统投资费用的影响

Figure 10 Effects of refrigerating capacity of cold storage on investment cost of the systems

$0.03, 0.04\text{ kW}$ ,制冷性能系数减少  $0.25\%, 0.51\%$ 。

(2) 当冷间温度为  $-25\sim-15^{\circ}\text{C}$  时,随着冷间温度的升高,除制冷性能系数有所升高之外,两低温制冷系统的质量流量、功耗均出现降低的趋势;两系统的投资费用也随着冷间温度的升高而减少,同时液化天然气低温制冷系统的投资费用明显低于氨低温制冷系统。

(3) 当制冷量为  $5\sim30\text{ kW}$  时,随着制冷量升高,两系统质量流量、功耗均升高,液化天然气低温制冷系统制冷性能系数增大,而氨低温制冷系统制冷性能系数保持不变,在  $5\sim20\text{ kW}$  时,氨低温制冷系统制冷性能系数大于液化天然气低温制冷系统。随着制冷量增大,液化天然气低温制冷系统比氨低温制冷系统要节省 1~3 倍的投资费用,因此利用乙二醇作为载冷剂对液化天然气进行冷能回收对低温制冷系统有实际意义。

(4) 目前液化天然气接收站通常设置在港口附近,对于冷库的冷冻冷藏也存在一定的区域局限性,不能在全国范围内推广。利用液化天然气余冷系统上的难点在于液化天然气和乙二醇换热温差大,对换热器的要求较高,需综合考虑两种流体换热对换热器材料的影响,因此合适的载冷剂以及更有效的液化天然气运输是将液化天然气余冷应用于冷库冷冻冷藏系统上的关键。

#### 参考文献

- [1] 詹仙争. 新型环保制冷剂丙烷的性能及应用[J]. 化工生产与技术, 2012, 19(3): 33-35.  
ZHAN Xian-zheng. Performance and application of new environmental protection refrigerant propane[J]. Chemical Production and Technology, 2012, 19(3): 33-35.
- [2] MOSTAFA A, HASSANAIN M, ELGENDY E. An experimental study of R-454C pull-down performance as a drop-in-refrigerant in a walk-in cold store system[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 130: 170-178.
- [3] 赵海波, 吴坤, 陈金, 等. 冷库用混合制冷剂性能研究[C]// 第八届全国食品冷链大会论文集. 北京: 中国制冷学会, 2012: 4.  
ZHAO Hai-bo, WU Kun, CHEN Jin, et al. Study on the performance of mixed refrigerants for cold storage[C]// Proceedings of the 8th National Food Cold Chain Conference. Beijing: China Refrigeration Society, 2012: 4.
- [4] CHOUDHARI C S, SAPALI S N. Performance investigation of natural refrigerant R290 as a substitute to R22 in refrigeration systems[J]. Energy Procedia, 2017, 109: 346-352.
- [5] 张建业, 徐颖. 国内外大中型冷库制冷剂的现状和发展动向[J]. 制冷学报, 2009, 30(4): 51-57.  
ZHANG Jian-yi, XU Ying. Current situation and development trend of refrigerants in large and medium-sized cold storage at home and abroad[J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(4): 51-57.
- [6] PACHAI A C, 齐晓霞, 奚晔, 等. 氨制冷系统的安全设计和维护分析[J]. 制冷技术, 2014, 34(3): 1-7.

- PACHAI A C, QI Xiao-xia, XI Ye, et al. Safety design and maintenance analysis of ammonia refrigeration system[J]. Refrigeration Technology, 2014, 34(3): 1-7.
- [7] YAN Ping, WILLIAM Yang, LIU Qin, et al. Application tests of a new-type LNG rapid gasification unit[J]. Natural Gas Industry B, 2017, 4(1): 25-29.
- [8] 王志远, 盛伟. 制冷原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- WANG Zhi-yuan, SHENG Wei. Refrigeration principle and application[M]. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [9] 常嘉琳, 唐培亮. 乙二醇水溶液作为冷/热媒的应用[J]. 制冷与空调, 2013, 13(5): 84-87.
- CHANG Jia-lin, TANG Pei-liang. Application of glycol aqueous solution as cooling/heating medium[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2013, 13(5): 84-87.
- [10] 刘光启, 马连湘, 向曙光. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 541-583.
- LIU Guang-qi, MA Lian-xiang, XIANG Shu-guang. Data manual of chemical properties[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 541-583.
- [11] 闫双, 张晓. 化工离心泵扬程的选择[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(8): 114.
- YAN Shuang, ZHANG Xiao. Selection of chemical centrifugal pump head[J]. Chemical Design Communication, 2018, 44(8): 114.
- [12] 李坤, 李俊明, 马进, 等. 大型冷库中不同制冷系统能效对比的理论分析[J]. 冷藏技术, 2020, 43(4): 19-24.
- LI Kun, LI Jun-ming, MA Jin, et al. Theoretical analysis of energy efficiency comparison of different refrigeration systems in large refrigerators[J]. Refrigeration Technology, 2020, 43(4): 19-24.
- [13] JIANG Run-hua, YIN Hui-bin, PENG Ke-wen, et al. Multi-objective optimization, design and performance analysis of an advanced trigenerative micro compressed air energy storage system[J]. Energy Convers Manage, 2019, 186(1): 323-333.
- [14] RASHIDI H, KHORSHIDI J. Exergoeconomic analysis and optimization of a solar based multigeneration system using multi-objective differential evolution algorithm[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 170: 978-990.
- [15] RAZMI A, SOLTANI M, AGHANAJAFI C, et al. Thermodynamic and economic investigation of a novel integration of the absorption recompression refrigeration system with compressed air energy storage (CAES) [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 187: 262-273.
- [16] LI Rui-xiong, WANG Huan-ran, YAO Er-ren, et al. Thermo-economic comparison and parametric optimizations among two compressed air energy storage system based on kalina cycle and ORC[J]. Energies, 2016, 10: 1-19.
- [17] EBADOLLAHI M, ROSTAMZADEH H, PEDRAM M Z, et al. Proposal and assessment of a new geothermal based multigeneration system for cooling, heating, power, and hydrogen production, using LNG cold energy recovery [J]. Renewable Energy, 2019, 135: 66-87.
- [18] SANAYE S, SHIRAZI A. Four E analysis and multi-objective optimization of an ice thermal energy storage for air-conditioning applications[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(3): 828-841.
- [19] KESHTKAR M M, TALEBIZADEH P. Multi-objective optimization of cooling water package based on 3E analysis: A case study[J]. Energy, 2017, 134: 840-849.
- [20] 吴集迎, 马益民. 利用 LNG 梯级冷能的冷库系统构建与载冷剂选择[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2012, 17(2): 126-130.
- WU Ji-ying, MA Yi-min. Construction of cold storage system using LNG cascade cold energy and selection of refrigerant[J]. Journal of Jimei University (Natural Science Edition), 2012, 17(2): 126-130.
- [21] SHINOZAWA H, HIROOKA T. Power generation using cold potential of LNG in multicomponent fluid Rankin cycle[J]. Advance in Cryogeny, 1981, 7: 971-978.
- [22] XUE Xiao-di, GUO Cong, DU Xiao-ze, et al. Thermodynamic analysis and optimization of a two-stage organic Rankine cycle for liquefied natural gas cryogenic exergy recovery[J]. Energy, 2015, 83: 778-787.
- [23] 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.
- DONG Jian-kai, HUNG Shun, LI Shuo, et al. Simulation study on refrigeration performance of LNG cold energy in cold storage[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(2): 103-108.

(上接第 77 页)

- [12] 施元旭, 张水锋, 潘项捷, 等. 超高效液相色谱串联质谱法测定豆芽中恩诺沙星、环丙沙星残留量的不确定度评定[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 37-42.
- SHI Yuan-xu, ZHANG Shu-feng, PAN Xiang-jie, et al. Evaluation of uncertainty in determination of enrofloxacin and ciprofloxacin residues in bean sprouts by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 37-42.
- [13] 龙锦林, 王春丽, 陶银凤, 等. 高效液相色谱法测定植物油中

- 游离棉酚的不确定度评定[J]. 食品与机械, 2021, 37(4): 76-79.
- LONG Jin-lin, WANG Chun-li, TAO Yin-feng, et al. Uncertainty evaluation for determination of free gossypol in vegetable oil by high performance liquid chromatography [J]. Food & Machinery, 2021, 37(4): 76-79.
- [14] 中国合格评定国家委员会. 测量不确定度要求的实施指南: CNAS-GL06-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019: 1-137.
- China National Conformity Assessment Committee. Implementation Guidelines for measurement Uncertainty requirements: CNAS-GL06-2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019: 1-137.