

引文: 肖荣鸽, 庞琳楠, 刘亚龙. 天然气液化与 BOG 提氦联产工艺的设计与优化[J]. 油气储运, 2023, 42(12): 1352-1361.

XIAO Rongge, PANG Linnan, LIU Yalong. Design and optimization of co-production process of natural gas liquefaction and BOG helium extraction[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(12): 1352-1361.

天然气液化与 BOG 提氦联产工艺的设计与优化

肖荣鸽 庞琳楠 刘亚龙

西安石油大学石油工程学院·陕西省油气田特种增产技术重点实验室

摘要: 天然气液化过程中需要大量冷量,但单一的天然气液化工艺会造成冷量的浪费;LNG 在存储过程中生成的大量 BOG 气体需要及时处理,避免发生生产事故。为达到节能降耗与充分利用冷量的目的,设计了氮气循环膨胀制冷天然气液化与 BOG 深冷提氦的联产工艺,将天然气液化过程中的冷量用于 BOG 深冷提氦工艺,提高天然气液化工艺冷量的利用率。利用 HYSYS 软件对氮气循环膨胀制冷天然气液化工艺、BOG 深冷提氦工艺、联产工艺进行模拟,分析了影响工艺综合能耗及粗氦体积分数的关键参数。在粗氦体积分数保持 76.8% 的基础上,以最小综合能耗为目标,利用响应面法及遗传算法对联产工艺进行优化,得到的最优参数为: 制冷剂的高压压力 7 005 kPa、低压压力 489 kPa、流量 4 000 kmol/h,深冷塔的进料温度 -130 °C、进料压力 2 390 kPa。与单一工艺相比,联产工艺天然气液化率超过 90%、氦气回收率超过 95%、粗氦体积分数超过 76.8%;从经济性角度考虑,联产工艺总压缩功耗较单一工艺减少 4 022.71 kW,能耗降低约 23.60%;综合能耗较单一工艺减少 3 482.4 kW,能耗降低约 18.00%。新设计的联产工艺具有较好的经济性,可为天然气液化与 BOG 提氦联产的工程应用提供参考。(图 13,表 8,参 22)

关键词: 天然气液化; BOG 提氦; 联产工艺; HYSYS; 流程模拟; 设计优化

中图分类号: TE645

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)12-1352-10

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.12.004

Design and optimization of co-production process of natural gas liquefaction and BOG helium extraction

XIAO Rongge, PANG Linnan, LIU Yalong

College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University//Shaanxi Key Laboratory of Advanced Stimulation Technology for Oil & Gas Reservoirs

Abstract: Natural gas liquefaction requires massive cold energy, but the single liquefaction process can not fully utilize the cold energy, so that much of it is wasted. Besides, storing LNG generates a large amount of BOG that demands urgent care in order to prevent production accidents. Therefore, for the purpose of energy saving, consumption reduction and full utilization of the cold energy, this study proposes an innovative co-production process combining nitrogen cyclic expansion refrigeration based natural gas liquefaction and BOG cryogenic helium extraction. This study uses the HYSYS software to simulate the nitrogen cyclic expansion refrigeration based natural gas liquefaction, the BOG cryogenic helium extraction and the co-production process, and analyzes the key parameters relating to the comprehensive energy consumption and the crude helium concentration. While maintaining the crude helium concentration at 76.8%, the co-production system, with the goal of minimizing the comprehensive energy consumption, was optimized by applying the response surface method and the genetic algorithm into the process. The optimal parameters obtained were as follows: the high pressure of the refrigerant was 7 005 kPa while the low pressure was 489 kPa and the flow rate was 4 000 kmol/h. The feed temperature and the feed pressure of the cryogenic were -130 °C and 2 390 kPa respectively. In the co-production process, the natural gas liquefaction rate exceeded 90%, the helium recovery rate exceeded 95%, and the crude helium volume fraction exceeded 76.8%. Compared with the single liquefaction process, the total compression power consumption in the co-production process was reduced by about 23.6%, 4 022.71 kW in number; and the overall energy consumption was reduced by about 18.00%, 3 482.4 kW in number. The simulation results suggest that the co-production process is more cost-effective and energy-efficient. This study could provide a reference for the engineering application of the newly designed co-production process. (13 Figures, 8 Tables, 22 References)

Key words: natural gas liquefaction, BOG helium extraction, co-production process, HYSYS, process simulation, design optimization

近年来,低碳能源的应用范围愈发广泛,天然气具有优质、清洁、高效的优点,在能源消费结构中占比逐渐增大^[1-2]。天然气液化工艺是液化天然气产业链的重要组成部分,LNG适用于某些特殊油田进行存储与运输^[3-5]。LNG在存储过程中有大量的BOG生成,如果未及时处理,易导致LNG储罐及管道超压,造成严重的生产事故^[6]。天然气液化过程中需要大量冷量,但单一的天然气液化工艺会造成冷量的浪费,将其与BOG提氦工艺进行联产,即可有效降低能耗与成本,提高冷量的利用效率^[7-8]。目前,中国在BOG提氦方面取得了较大突破^[9-11],投入使用的提氦技术主要有低温法、膜分离法、变压吸附法等。低温法是应用最为广泛的提氦方法,具有较强的适应性与稳定性,且处理量大,有利于提高提氦系统的经济性^[12-13]。

为了降低天然气液化工艺及BOG深冷提氦工艺的生产成本,最大限度地回收冷量,设计了氮气循环膨胀制冷的天然气液化工艺与BOG深冷提氦联产工艺,

并利用HYSYS软件对氮气循环膨胀制冷天然气液化工艺、BOG提氦工艺及联产工艺进行了数值模拟,研究关键参数对联产工艺综合能耗的影响。为了进一步降低能耗,提高联产工艺的经济性,以最小综合能耗为目标,利用响应面法及遗传算法对联产工艺关键参数进行了优化。

1 联产工艺的设计

1.1 天然气液化工艺

天然气液化工艺主要是通过循环制冷的方法将天然气液化。目前,常用的天然气液化工艺有级联式循环制冷工艺、混合制冷剂液化工艺以及膨胀机制冷液化工艺。BOG深冷提氦时的进料温度极低,氮气的气化温度能够为BOG深冷提氦提供足够的冷量,因此天然气液化工艺选择氮气循环膨胀制冷工艺^[14],并利用HYSYS软件对其进行模拟(图1)。

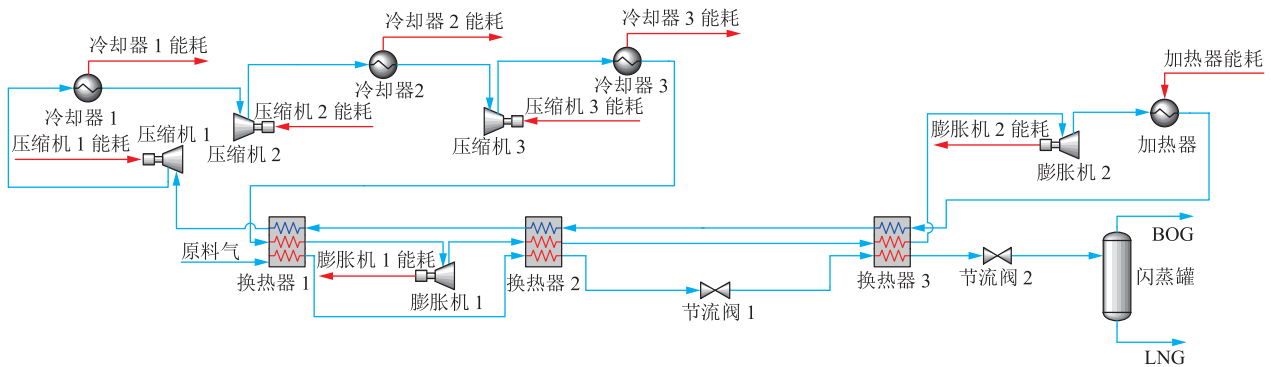


图1 氮气循环膨胀制冷天然气液化工艺模拟流程图

Fig. 1 Simulation process for nitrogen cyclic expansionrefrigeration based natural gas liquefaction technology

1.2 BOG深冷提氦工艺

BOG提氦方法主要包括闪蒸法、深冷法及闪蒸-深冷法^[15],不同BOG提氦方法均对应不同的适用范围,具有不同特点(表1)。天然气液化与BOG提氦联产工艺

表1 不同BOG提氦方法使用范围及特点表

Table 1 Application scope and characteristics of various BOG helium extraction methods

BOG提氦方法	适用范围(体积分数)		特点
	粗氦	精氦	
闪蒸法	大于80%		粗氦体积分数较大
深冷法	大于70%	大于99.999%	提氦率高,与LNG液化相结合可降低能耗,提高资源利用率
闪蒸-深冷法	大于75%	大于95.000%	提氦装置灵活,在相对较低的压力下氦气纯度相对较高,且可降低能耗

所用原料气(表2)温度为35℃、压力为 2.33×10^3 kPa、流量为693 kmol/h,因此选择深冷法作为BOG提氦方法,并利用HYSYS软件对其进行模拟(图2)。

表2 天然气液化与BOG提氦联产工艺所用原料气组成表
Table 2 Composition of feed gas for the coproduction technology integrating natural gas liquefaction and BOG helium extraction

各组份体积分数				
CH ₄	C ₂ H ₄	C ₃ H ₆	N ₂	He
91.57%	0.08%	0.01%	8.14%	0.20%

1.3 天然气液化与BOG提氦联产工艺

为了节能降耗与充分利用冷量,在单一的天然气液化与BOG提氦工艺的基础上,提出将氮气循环膨胀制冷的天然气液化工艺与BOG深冷提氦工艺进行联产(图3),即将天然气液化工艺中氮气循环制冷所提

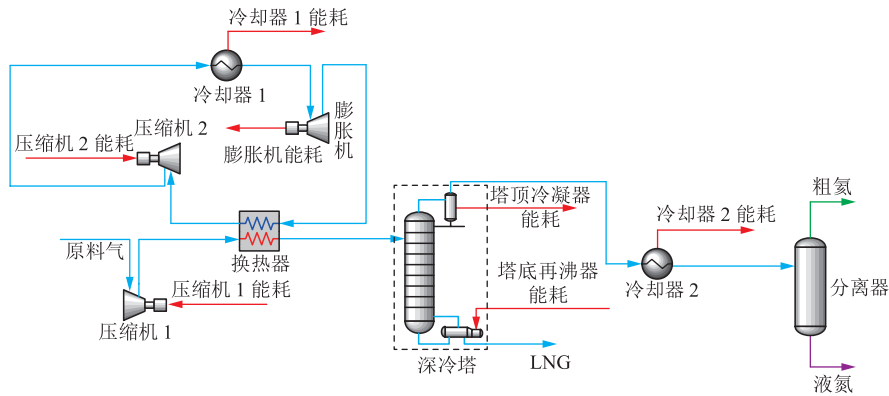


图2 BOG深冷提氦工艺模拟流程图
Fig. 2 Simulation process for BOG cryogenic helium extraction technology

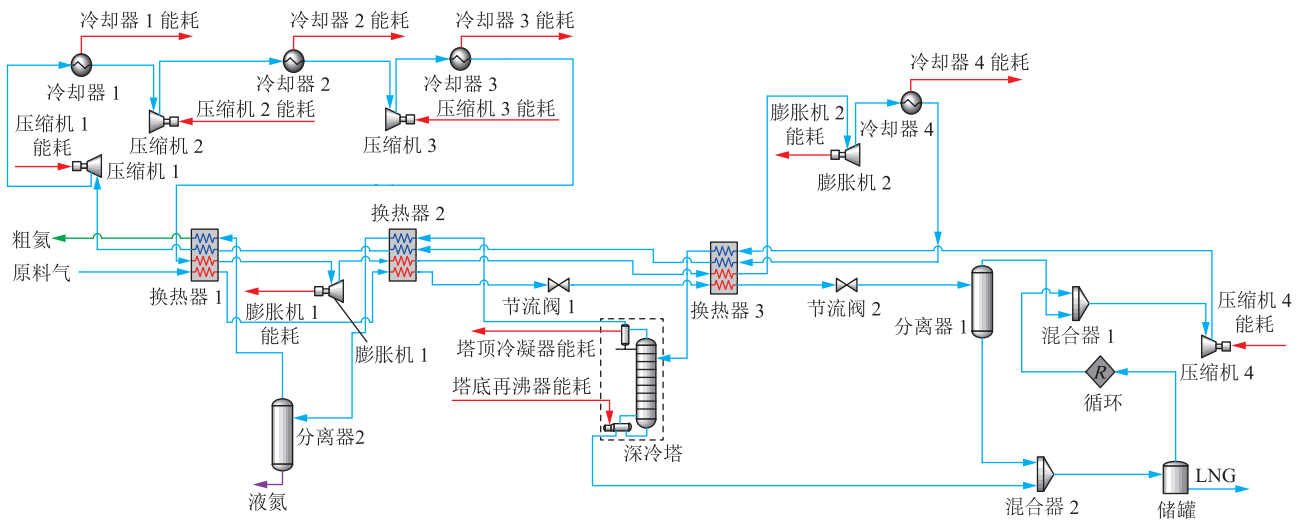


图3 天然气液化与BOG提氦联产工艺模拟流程图
Fig. 3 Simulation process for the coproduction technology integrating natural gas liquefaction and BOG helium extraction

供的冷量用于BOG提氦中。整个联产工艺主要包括天然气液化、BOG提氦以及制冷剂循环3个部分。

天然气液化与BOG提氦联产工艺流程为：原料气通过换热器1、换热器2、换热器3进行预冷后，进入分离器1中进行气液两相分离；分离出的LNG进入LNG储罐，气相与储罐中的BOG汇合后进入压缩机4加压至1 000 kPa，再由换热器3换热后进入深冷塔分离出大部分CH₄；塔顶的富氮混合气体通过换热器2换热后进入分离器2，分离器2底部分离出体积分数90%以上的液氮产品、顶部分离出体积分数75%以上的粗氦产品，粗氦产品经过换热器1换热后外输。

整个系统的冷量由氮气提供，氮气经过三级压缩冷凝后换热膨胀，为换热器1、换热器2、换热器3提供冷量。通过三级压缩可以将氮气压力大大提高，在膨胀后即可获得更多的冷量，并进行逐级压缩冷凝，可有效防止压缩机出口“温度过高”，降低压缩机过载

的风险。此外，采用多级压缩也可节省能耗，提高经济性。

2 数值模拟

对于低温气体处理系统，通常采用PR方程作为物性计算方法。PR方程不仅能够用于高精度的气液平衡计算，而且将其应用于气液两相之间的相平衡计算可获得更高的精度，因此，在进行天然气液化与BOG提氦联产工艺的模拟时使用PR方程^[16-17]。依据联产工艺关键物流参数(表3)，利用HYSYS软件对其进行模拟(图3)。

2.1 关键参数分析

天然气液化与BOG提氦联产工艺模拟主要涉及换热器、深冷塔、压缩机及膨胀机等诸多设备，影响设备的主要因素有制冷剂高压压力、制冷剂低压压力、制冷剂流量、深冷塔进料温度及压力等。

表3 天然气液化与BOG提氦联产工艺关键物流参数设置表

Table 3 Setting of key stream parameters for the coproduction technology integrating natural gas liquefaction and BOG helium extraction

关键物流	温度/°C	压力/kPa	流量/(kmol·h ⁻¹)	各组分体积分数				
				C ₁	C ₂	C ₃	N ₂	He
原料气	35.0	2 330	693.00	91.57%	0.08%	0.01%	8.14%	0.20%
压缩机1进口物流	-166.7	190	4 440.00	0	0	0	100.00%	0
冷却器3出口物流	30.0	8 400	4 440.00	0	0	0	100.00%	0
膨胀机2出口物流	-188.1	230	4 440.00	0	0	0	100.00%	0
深冷塔进口物流	-150.0	1 410	88.66	52.73%	0	0	45.71%	1.56%
粗氦	-188.0	1 370	1.74	0	0	0	23.15%	76.85%

2.1.1 制冷剂高压压力

氮气制冷剂高压压力即压缩机3的出口压力,令制冷剂流量、低压压力保持不变,将制冷剂高压压力变化区间设为7 000~9 000 kPa,分析其变化对能耗的影响(图4)。可见,制冷剂高压压力越大,压缩机压比越大,压缩机能耗会不断增加。随着制冷剂高压压力增大,膨胀机压力也会不断增加,膨胀机输出功率随之增大。

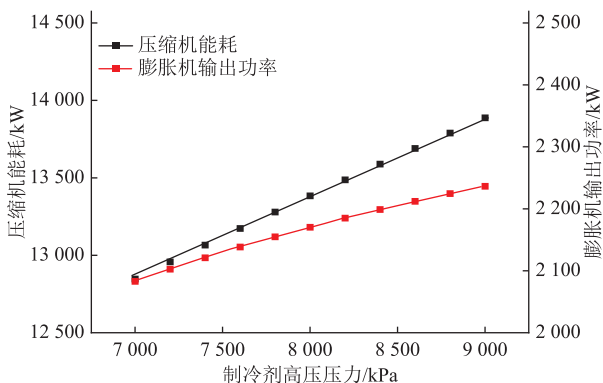


图4 天然气液化与BOG提氦联产工艺氮气制冷剂高压压力对能耗的影响曲线

Fig. 4 Influence of high nitrogen pressure on energy consumption of the coproduction technology integrating natural gas liquefaction and BOG helium extraction

2.1.2 制冷剂低压压力

氮气制冷剂低压压力即膨胀机2的出口压力,保持制冷剂流量、高压压力不变,将氮气制冷剂低压压力变化区间设置为100~500 kPa,分析其变化对能耗的影响(图5)。可见,当制冷剂低压压力增加时,膨胀机温度升高,但膨胀机制冷量下降,其输出功率也随之下降。随着制冷剂低压压力增加,压缩机压比随之增大,压缩机能耗也随之上升。

2.1.3 制冷剂流量

天然气液化与BOG提氦联产工艺流程由氮气提供全部的冷量,因此氮气的流量变化会对压缩机能耗造成影响。如果氮气流量太大,压缩机的运行则需要更多

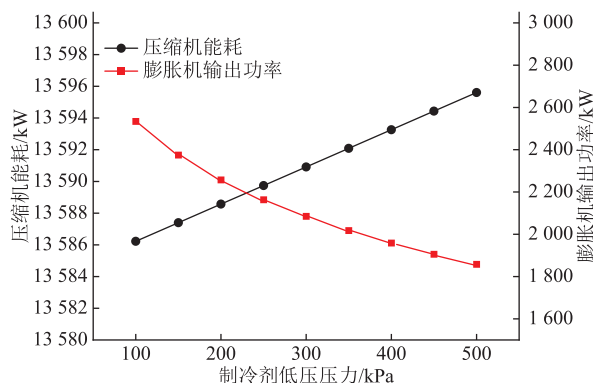


图5 天然气液化与BOG提氦联产工艺氮气制冷剂低压压力对能耗的影响曲线

Fig. 5 Influence of low nitrogen pressure on energy consumption of the coproduction technology integrating natural gas liquefaction and BOG helium extraction

的能耗,从而导致冷量损失;如果氮气流量过小,会造成系统冷量不足,使得整个流程不能顺利进行。因此,在制冷剂高压压力与低压压力保持不变的情况下,将氮气制冷剂流量变化区间设置为4 000~5 000 kmol/h,分析其变化对能耗的影响(图6)。可见,保持制冷剂压力一定,当氮气制冷剂流量增大时,压缩机的能耗会随之增加。同时,膨胀机的制冷量增加,膨胀机的输出功率也会增大。

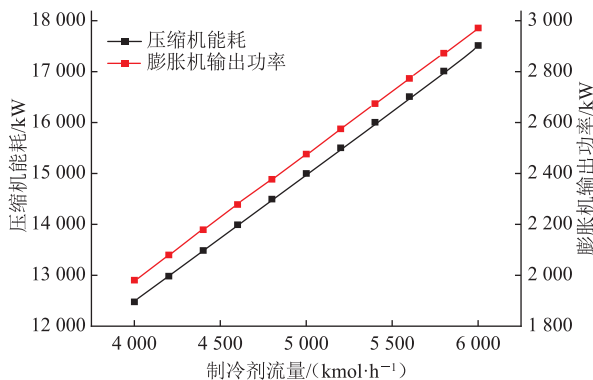


图6 天然气液化与BOG提氦联产工艺氮气制冷剂流量对能耗的影响曲线

Fig. 6 Influence of nitrogen flow on energy consumption of the coproduction technology integrating natural gas liquefaction and BOG helium extraction

2.1.4 深冷塔进料温度

深冷塔进口流股的焓值根据深冷塔的进口温度确定,当进料温度变化时,深冷塔的出料温度会随之改变,因此,进料温度对深冷塔的能耗发挥着重要作用。设定深冷塔进料温度区间为-150~-130℃,分析进料温度对深冷塔能耗、粗氦体积分数的影响。

根据深冷塔进料温度对深冷塔能耗的影响(图7)可见,当深冷塔进料温度升高时,深冷塔中的冷量不足,导致塔中重组分上移,从而造成深冷塔再沸器热负荷降低、塔顶冷凝器冷负荷增高。

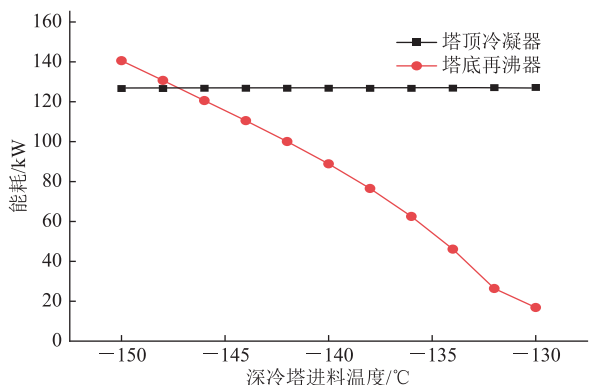


图7 深冷塔进料温度对深冷塔能耗的影响曲线
Fig. 7 Influence of the feed temperature of cryogenic tower on its energy consumption

根据深冷塔进料温度对粗氦体积分数的影响(图8)可见,当深冷塔进料温度升高时,粗氦体积分数会随之增大,但增加幅度非常小。这是由于在实际应用中,深冷塔内温度设计范围较小,因此当深冷塔温度小范围变化时,塔顶与塔底的物流几乎不受影响。

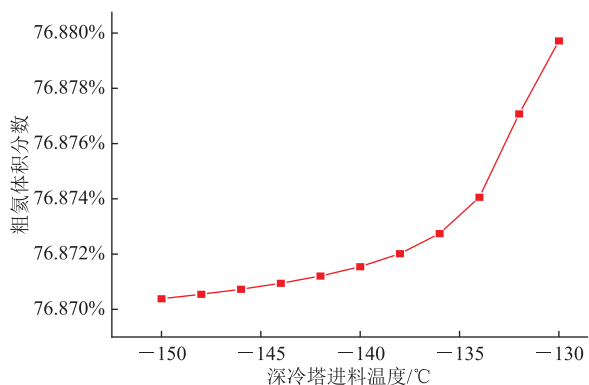


图8 深冷塔进料温度对粗氦体积分数的影响曲线
Fig. 8 Influence of the feed temperature of cryogenic tower on the concentration of crude helium

2.1.5 深冷塔进料压力

当进料压力改变时,出料参数和提氦塔的能耗也会有所改变。因此,进料压力是影响深冷塔能耗的主要参数。设定进料压力区间为1400~2400kPa,分析深冷

塔进料压力对深冷塔的能耗及氦气体积分数的影响。

根据深冷塔进料压力对塔底、塔顶能耗的影响(图9)可见,当深冷塔进料压力升高时,塔底再沸器能耗曲线呈上升趋势,而塔顶冷凝器能耗基本不变。

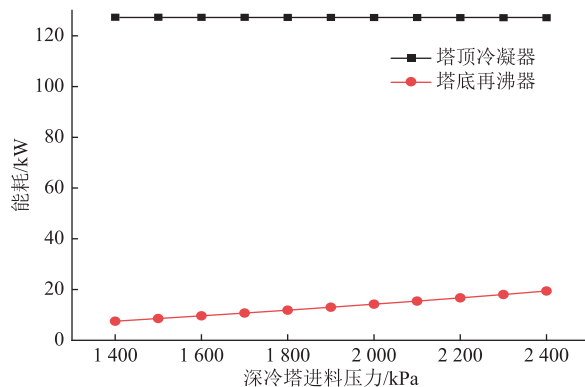


图9 深冷塔进料压力对深冷塔能耗的影响曲线
Fig. 9 Influence of the feed pressure of cryogenic tower on its energy consumption

根据深冷塔进料压力对粗氦体积分数的影响(图10)可见,当深冷塔进料压力增大时,粗氦体积分数降低,但降低趋势不太明显。这是由于当深冷塔进料压力上升时,塔顶所获得的物流就会增加,从而导致粗氦体积分数降低。

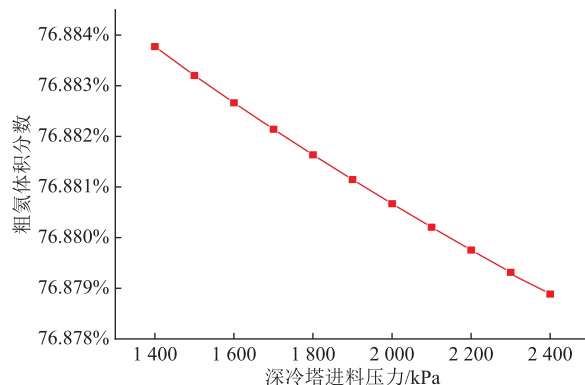


图10 深冷塔进料压力对粗氦体积分数的影响曲线
Fig. 10 Influence of the feed pressure of cryogenic tower on the concentration of crude helium

2.2 模拟结果对比

根据天然气液化与BOG提氦联产工艺模拟结果,将单一工艺与联产工艺产品组成进行对比(表4)可见,联产工艺与单一工艺的产品组成近似。

在联产工艺中,天然气液化率、提氦率及综合能耗的计算公式分别为:

$$\omega_1 = \frac{F_1}{F_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\omega_2 = \frac{f_1}{f_0} \times 100\% \quad (2)$$

表4 天然气液化工艺、BOG提氦工艺与联产工艺产品组成对比表

Table 4 Comparison of product compositions in natural gas liquefaction, BOG helium extraction and the coproduction technology

生产工艺	产品	产品各组分体积分数				
		C ₁	C ₂	C ₃	N ₂	He
天然气液化工艺	液氮	0	0	0	0	0
	LNG	96.27%	0.09%	0.01%	3.63%	0
	粗氦	0	0	0	0	0
BOG提氦工艺	液氮	0.09%	0	0	97.80%	2.10%
	LNG	83.68%	0	0	16.31%	0.01%
	粗氦	0	0	0	23.15%	76.85%
联产工艺	液氮	0.07%	0	0	97.83%	2.10%
	LNG	96.09%	0.08%	0.01%	3.82%	0
	粗氦	0	0	0	23.13%	76.87%

$$Q_{total} = Q_C + Q_E + Q_T \quad (3)$$

式中: ω_1 为天然气液化率; F_1 为节流阀 2 出口流股液相分率; F_0 为原料气液相分率; ω_2 为提氦率; f_1 为粗氦中的氦气摩尔流量, kmol/h; f_0 为原料气中的氦气摩尔流量, kmol/h; Q_{total} 为联产工艺综合能耗, kW; Q_C 为压缩机能耗(即压缩机 1~压缩机 4 能耗之和), kW; Q_E 为膨胀机能耗(即膨胀机 1 与膨胀机 2 能耗之和), kW; Q_T 为深冷塔能耗(即深冷塔塔顶及塔底能耗之和), kW。

利用式(1)~式(3)对联产天然气液化率、提氦率以及综合能耗情况进行计算(表 5)发现,在主要设备能耗方面,与单一工程相比,氮气循环膨胀制冷液化与

表5 联产工艺与两种单一工艺模拟结果对比表
Table 5 Comparison of the simulation results of the coproduction technology with the two single technologies

生产工艺	天然气液化率	提氦率	粗氦体积分数	总压缩机功率/kW	综合能耗/kW
联产工艺	90.2%	95.47%	76.87%	13 020.00	15 860.0
氮气循环膨胀制冷液化工艺	90.2%	—	—	13 440.00	15 570.0
BOG提氦工艺	—	93.55%	76.85%	3 602.71	3 772.4

BOG 提氦联产工艺具有明显的节能优势:联产工艺总压缩能耗较单一的氮气循环膨胀制冷液化工艺、BOG 提氦工艺低 4 022.71 kW,能耗降低了约 23.60%;联产工艺综合能耗较单一的氮气循环膨胀制冷液化工艺、BOG 提氦工艺低 3 482.4 kW,能耗降低了约 18.00%。

3 参数寻优

为了进一步降低系统能耗,提高天然气液化与 BOG 提氦联产工艺的经济性,对联产工艺的关键参数进行寻优。

3.1 回归模型建立

利用 Design-Expert 软件建立回归模型,选择了较为复杂的 Box-Behnken Design (BBD) 作为回归试验设计方法,使试验数据处理更精确、试验结果更可靠^[18]。根据上述各主要影响因素对系统综合能耗及粗氦体积分数影响的分析,得到各关键参数的取值范围(表 6)。

表6 天然气液化与BOG提氦联产工艺5个关键参数取值范围表

Table 6 Ranges of 5 key parameters for the coproduction technology integrating natural gas liquefaction and BOG helium extraction

制冷剂压力/kPa		制冷剂流量/(kmol·h ⁻¹)	深冷塔进料温度/℃	深冷塔进料压力/kPa
高压	低压			
7 000~9 000	2 00~500	4 000~6 000	-150~-130	1 400~2 400

由于各关键参数对粗氦体积分数影响极小,因此在粗氦体积分数不小于 76.8% 的基础上,将联产工艺系统综合能耗 Y_1 最低设为优化目标,根据各关键参数的取值范围(表 6),将制冷剂高压压力、制冷剂低压力

力、制冷剂流量、深冷塔进料温度及压力 5 个关键参数设为模型的自变量^[19](分别采用 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 表示),从而得到 BBD 响应面试验设计的 45 个试验点(表 7)。

表7 BBD 响应面 45 个试验点试验结果统计表

Table 7 Statistics on test results at 45 points on BBD response surface

试验点序号	X_1 /kPa	X_2 /kPa	X_3 /(kmol·h ⁻¹)	X_4 /℃	X_5 /kPa	Y_1 /kW
1	8 000	200	5 000	-140	2 400	17 670
2	8 000	350	5 000	-140	1 900	17 360
3	8 000	350	5 000	-130	2 400	17 310
4	7 000	350	4 000	-140	1 900	13 870
5	8 000	350	6 000	-140	1 400	20 230
6	8 000	500	6 000	-140	1 900	20 070
7	8 000	500	4 000	-140	1 900	14 300

续表

试验点序号	X_1/kPa	X_2/kPa	$X_3/(\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1})$	$X_4/^\circ\text{C}$	X_5/kPa	Y_1/kW
8	8 000	350	6 000	-150	1 900	20 360
9	8 000	500	5 000	-140	1 400	17 140
10	8 000	200	5 000	-130	1 900	17 520
11	7 000	350	5 000	-130	1 900	16 550
12	8 000	200	4 000	-140	1 900	14 650
13	7 000	350	5 000	-140	2 400	15 700
14	7 000	200	5 000	-140	1 900	16 930
15	8 000	500	5 000	-140	2 400	17 220
16	8 000	350	5 000	-140	1 900	17 360
17	8 000	500	5 000	-130	1 900	17 080
18	9 000	350	5 000	-140	1 400	17 950
19	9 000	350	4 000	-140	1 900	14 950
20	9 000	350	5 000	-140	2 400	18 040
21	8 000	350	5 000	-140	1 900	17 360
22	8 000	350	5 000	-140	1 900	17 360
23	8 000	350	5 000	-140	1 900	17 360
24	7 000	350	6 000	-140	1 900	19 440
25	8 000	350	4 000	-150	1 900	14 520
26	8 000	350	5 000	-150	1 400	17 410
27	8 000	350	6 000	-140	2 400	20 320
28	9 000	500	5 000	-140	1 900	17 830
29	7 000	500	5 000	-140	1 900	16 490
30	9 000	350	5 000	-130	1 900	17 900
31	8 000	500	5 000	-150	1 900	17 270
32	7 000	350	5 000	-150	1 900	16 740
33	8 000	350	6 000	-130	1 900	20 170
34	9 000	200	5 000	-140	1 900	18 270
35	8 000	200	5 000	-140	1 400	17 580
36	8 000	200	6 000	-140	1 900	20 600
37	9 000	350	6 000	-140	1 900	21 050
38	8 000	350	4 000	-130	1 900	14 330
39	8 000	350	4 000	-140	1 400	14 390
40	8 000	350	4 000	-140	2 400	14 470
41	8 000	200	5 000	-150	1 900	17 710
42	8 000	350	5 000	-130	1 400	17 180
43	7 000	350	5 000	-140	1 400	16 610
44	9 000	350	5 000	-150	1 900	18 080
45	8 000	350	5 000	-150	2 400	17 450

利用 Design-Expert 软件对数据(表 7)进行回归分析,得到的回归模型为:

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & 2\ 416.408\ 3 + 0.619\ 5 X_1 - 2.065\ 8 X_2 + \\
 & 1.772\ 5 X_3 - 0.675\ X_4 - 2.373\ 9 X_5 + 1 \times 10^{-16} X_1 X_2 + \\
 & 0.000\ 133 X_1 X_3 + 0.000\ 25 X_1 X_4 + 0.000\ 5 X_1 X_5 - \\
 & 0.000\ 3 X_2 X_3 + 1.043\ 8 \times 10^{-15} X_2 X_4 - 0.000\ 033 X_2 X_5 - \\
 & 5.157\ 82 \times 10^{-17} X_3 X_4 + 5 \times 10^{-6} X_3 X_5 + 0.004\ 5 X_4 X_5 - \\
 & 0.000\ 091 X_1^2 + 0.003\ 083 X_2^2 + 0.000\ 019 X_3^2 + 0.068\ 75 X_4^2 - \\
 & 0.000\ 276 X_5^2
 \end{aligned} \tag{4}$$

3.2 模型分析

利用 Design-Expert 软件对所建立的回归模型进行分析,即可得到联产工艺关键参数的回归模型内部残差分析图(图 11),并对比 Design-Expert 预测值与

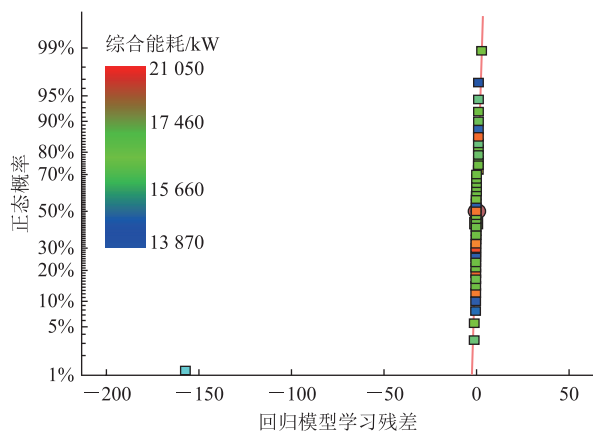


图 11 利用 Design-Expert 得到的联产工艺关键参数的回归模型内部残差分析图

Fig. 11 Internal residual analysis on the regression model of the key parameters of the co-production process obtained with Design-Expert

HYSYS 模拟计算的 实际值(图 12)。可见,在忽略由于软件误差而产生的异常点的情况下,其他各点近似成一条直线(图 11),这表明该回归模型内部呈正态分布。同时,Design-Expert 生成的预测值与 HYSYS 模拟计算实际值较为接近(图 12),因此所建优化模型可靠^[20]。

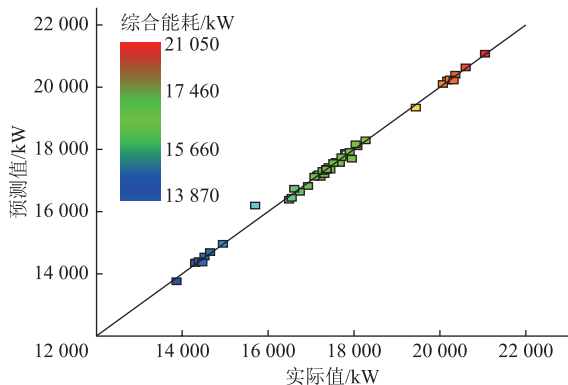


图 12 回归预测值与实际值对比图

Fig. 12 Comparison of the regression forecast value with the measured value

对所建立的回归模型利用 Design-Expert 软件进行方差及拟合分析发现:回归模型的 P 值(即衡量控制组与试验组差异的指标)小于 0.000 1,其远小于 0.05,表明回归模型的显著性极高;回归模型的修正决定系数为 0.986 6,表明这 5 个关键因素对综合能耗的影响达到 98.66%;校正相关系数为 0.993 9,与修正相关系数之差小于 0.2,表明回归模型具有较好的回归性,能够解释 99.39%的响应值变化;信噪比为 74.657,其远大于 4,也表明该回归模型具有较强的可信度^[20]。

表 8 天然气液化与 BOG 提氦联产工艺关键参数及能耗优化结果表

Table 8 Optimized results of the key parameters and energy consumption of the co-production process integrating natural gas liquefaction and BOG helium extraction

优化前后	制冷剂压力/kPa		制冷剂流量/ ($\text{kmol} \cdot \text{h}^{-1}$)	深冷塔进料温度/ $^{\circ}\text{C}$	深冷塔进料压力/ kPa	装置综合能耗/ kW	粗氦体积分数
	高压	低压					
优化前	8 400	230	4 440	-150	1 410	15 860	76.87%
优化后	7 096	489	4 000	-130	1 450	11 693	76.89%

4 结论

(1)将天然气液化工艺与 BOG 提氦工艺联产,通过制冷得到粗氦、LNG 及液氮 3 种产品,充分利用制冷剂冷量,达到了节约资源及设备投资成本的效果,同时能够避免 LNG 存储过程中由于 BOG 的产生而引起的生产事故。

3.3 模型求解

在粗氦体积分数保持 76.8%的基础上,以综合能耗最小为目标,利用遗传算法对联产工艺系统的影响参数进行优化^[21]。设置种群规模为 100、最大遗传代数为 1 000、交叉因子为 0.8、变异因子为 0.1,在优化流程中,必须保证种群在终止条件前有所“进化”,即目标函数在优化过程中要逐渐收敛(图 13)^[22]。

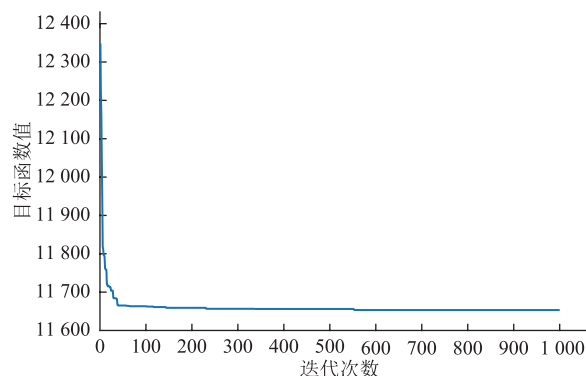


图 13 遗传算法适应度曲线图

Fig. 13 Adaptation curve of genetic algorithm

由此,得到天然气液化与 BOG 提氦联产工艺 5 个关键参数的最终优化结果为:制冷剂高压压力为 7 096 kPa,制冷剂低压压力为 489 kPa,制冷剂流量为 4 000 kmol/h ,深冷塔进料温度为 -130°C ,深冷塔进料压力为 1 450 kPa。将遗传算法优化后的参数代入 HYSYS 软件,模拟得到装置综合能耗为 11 693 kW,模型预测结果 11754 kW 与之相近,误差为 0.05%,可见遗传算法计算所得预测结果较为准确。由此,可以得到关键参数及能耗的优化结果(表 8)。

(2)与单一工艺相比,天然气液化与 BOG 提氦联产工艺能耗显著降低,其总压缩能耗降低了约 23.60%、综合能耗降低了约 18.00%、天然气液化率达 90%以上、氦气回收率达 95%以上、粗氦体积分数达 76.8%以上,具有较好的实际应用价值。

(3)天然气液化与 BOG 提氦联产工艺具有很好的经济性,为天然气液化和 BOG 提氦联产的工艺应用

提供了参考。但该联产工艺的冷量利用率及系统能耗还存在优化的空间,后续研究可进一步降低天然气液化与BOG提氦联产工艺的综合能耗。

参考文献:

- [1] 宋晨辉,肖峻,陈潜,屈玉清,秋泽楷,李航.天然气管网系统的输气能力曲线[J].中国石油大学学报(自然科学版),2022,46(2):160-167. DOI:10.3969/j.issn.1673-5005.2022.02.017.
SONG C H, XIAO J, CHEN Q, QU Y Q, QIU Z K, LI H. Gas transmission capability curve of natural gas pipeline system[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(2): 160-167.
- [2] LUNKOVA L G, MELNIKOVA G S, GULKOVA A N, LAPSHIN V D. The natural gas liquefaction technology for Small-Scale LNG[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 459: 052094. DOI: 10.1088/1755-1315/459/5/052094.
- [3] 刘淼儿,单卫光,朱建鲁,刘金华,李恩道.基于GA-BP模型的混合制冷剂天然气液化装置运行参数优化分析[J].中国海上油气,2023,35(2):195-201. DOI:10.11935/j.issn.1673-1506.2023.02.021.
LIU M E, SHAN W G, ZHU J L, LIU J H, LI E D. Operation parameters optimization analysis of mixed refrigerant cycle natural gas liquefaction unit based on GA-BP model[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(2): 195-201.
- [4] MEHRPOOYA M, SADAGHIANI M S, HEDAYAT N. A novel integrated hydrogen and natural gas liquefaction process using two multistage mixed refrigerant refrigeration systems[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(3): 1636-1653. DOI: 10.1002/er.4978.
- [5] ZHU J L, ZHANG W, LI Y X, JI P, WANG W C. Experimental study of flow distribution in plate-fin heat exchanger and its influence on natural gas liquefaction performance[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 155: 398-417. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.020.
- [6] 李昊,吴晓南,苟珈源,宋俊平.单级混合制冷剂天然气液化工艺热经济学分析与评价[J].油气储运,2022,41(10):1210-1217. DOI:10.6047/j.issn.1000-8241.2022.10.012.
LI H, WU X N, GOU J Y, SONG J P. Thermoeconomic analysis and evaluation of single-stage mixed-refrigerant natural gas liquefaction process[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(10): 1210-1217.
- [7] 彭超,王鸿达,侯旭光,王宏帅,吕宏爽,刘攀攀,等. LNG接收站BOG联合处理运行方案优化[J].油气储运,2023,42(6):624-631. DOI:10.6047/j.issn.1000-8241.2023.06.003.
PENG C, WANG H D, HOU X G, WANG H S, LYU H S, LIU P P, et al. Optimization of BOG mixing treatment process in LNG terminal[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(6): 624-631.
- [8] 周军,徐东阳,梁光川,王璿清,王涛.联产乙烷天然气提氦工艺的经济性与适用性分析[J].石油化工,2023,52(2):229-236. DOI:10.3969/j.issn.1000-8144.2023.02.014.
ZHOU J, XU D Y, LIANG G C, WANG X Q, WANG T. Economic and applicability analysis of extraction process of Helium from natural gas with coproduction of ethane[J]. Petrochemical Technology, 2023, 52(2): 229-236.
- [9] 张丽萍,巨永林.天然气及液化天然气蒸发气提氦技术研究进展[J].天然气化工-C1化学与化工,2022,47(5):32-41. DOI:10.3969/j.issn.1001-9219.2022.05.005.
ZHANG L P, JU Y L. Research progress of helium extraction of natural gas and liquefied natural gas boil-off gas[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2022, 47(5): 32-41.
- [10] 荣杨佳,王成雄,赵云昆,胡成星,饶冬,诸林.天然气轻烃回收与提氦联产工艺[J].天然气工业,2021,41(5):127-135. DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2021.05.014.
RONG Y J, WANG C X, ZHAO Y K, HU C X, RAO D, ZHU L. Co-production process of light hydrocarbon recovery and Helium extraction from natural gas[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(5): 127-135.
- [11] 郑佩君,谢威,白菊,蔡治礼,王璨,彭楠,等.气体分离膜技术在天然气提氦中的研究进展[J].膜科学与技术,2022,42(6):168-177. DOI:10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2022.06.021.
ZHENG P J, XIE W, BAI J, CAI Z L, WANG C, PENG N, et al. Research progress and prospect of membrane gas separation technology for helium recovery from natural gas[J]. Membrane Science and Technology, 2022, 42(6): 168-177.
- [12] 张丽萍,巨永林.基于深冷技术的液化天然气蒸发气提氦流程优化分析[J].低温工程,2023(2):97-106. DOI:10.3969/j.issn.1000-6516.2023.02.013.
ZHANG L P, JU Y L. Optimization analysis of helium extraction process from LNG-BOG using cryogenic technology[J]. Cryogenics, 2023(2): 97-106.
- [13] 郭子江,尹晨阳,马国光,熊好羽,杜双.基于BP神经网络的低

- 温提氦工艺优化[J]. 天然气化工-C1 化学与化工, 2020, 45(1): 51-56. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9219.2020.01.011.
- GUO Z J, YIN C Y, MA G G, XIONG H Y, DU S. Optimization of low temperature extraction process based on BP neural network[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2020, 45(1): 51-56.
- [14] 许继宗, 李雪飞, 袁崇亮, 王永忠, 张军良, 郭昊乾, 等. 浓缩煤层气深冷液化提氦工艺研究[J/OL]. 洁净煤技术: 1-12[2023-05-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20230411.1128.002.html>.
- XU J Z, LI X F, YUAN C L, WANG Y Z, ZHANG J L, GUO H Q, et al. Research on helium extraction process by cryogenic liquefaction of enriched coalbed methane[J/OL]. Clean Coal Technology: 1-12[2023-05-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20230411.1128.002.html>.
- [15] 蒋洪, 陈泳村, 程祥. 低含氦天然气提氦联产 LNG 工艺设计与分析[J]. 低碳化学与化工, 2023, 48(4): 169-175. DOI: 10.12434/j.issn.2097-2547.20220329.
- JIANG H, CHEN Y C, CHENG X. Process design and analysis of extracting helium from low helium natural gas and co-producing LNG[J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2023, 48(4): 169-175.
- [16] 钱欣, 戴国华, 李国豪, 万宇飞, 那凤祎, 杨纯. 基于遗传算法的三甘醇脱水系统减碳策略[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(2): 16-22. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3426.2023.02.003.
- QIAN X, DAI G H, LI G H, WAN Y F, NA F Y, YANG C. Carbon emission reduction strategy of TEG dehydration based on genetic algorithm[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2023, 52(2): 16-22.
- [17] 王金波, 白宸瑞, 宋晓娟, 李东欣. 新型天然气提氦工艺模拟与分析[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(1): 58-68. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3426.2023.01.010.
- WANG J B, BAI C R, SONG X J, LI D X. Simulation and analysis of a novel process for extracting helium from natural gas[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2023, 52(1): 58-68.
- [18] 李子元, 李长俊, 贾文龙, 张财功, 李佳忆. 基于响应面法的 SCORE 丙烷回收工艺参数优化[J]. 天然气化工-C1 化学与化工, 2022, 47(6): 155-161. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9219.2022.06.022.
- LI Z Y, LI C J, JIA W L, ZHANG C G, LI J Y. Optimization of SCORE process parameters for propane recovery based on response surface methodology[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2022, 47(6): 155-161.
- [19] 王晓磊, 吕小明, 廖明旺, 谢虎, 陈云涛, 胡锋, 等. 基于响应面分析法的天然气乙烷回收工艺参数优化[J]. 天然气化工-C1 化学与化工, 2022, 47(2): 122-128. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9219.2022.02.018.
- WANG X L, LYU X M, LIAO M W, XIE H, CHEN Y T, HU F, et al. Parameters optimization for natural gas ethane recovery process based on response surface methodology[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2022, 47(2): 122-128.
- [20] 吴松, 高城, 申权, 李东升, 崔军峰, 雷洋, 等. 南堡联合站轻烃回收工艺参数优化研究[J]. 石油与天然气化工, 2022, 51(3): 56-64. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3426.2022.03.009.
- WU S, GAO C, SHEN Q, LI D S, CUI J F, LEI Y, et al. Optimization of light hydrocarbon recovery process parameters in Nanpu combined station[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2022, 51(3): 56-64.
- [21] 曾金繁, 巨永林. 采用醇胺法的沼气脱碳工艺流程模拟及优化[J]. 现代化工, 2021, 41(8): 224-229. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2021.08.045.
- ZENG J F, JU Y L. Process simulation and parameter optimization of alkanolamine route for removing CO₂ from biogas[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(8): 224-229.
- [22] 李昊, 吴晓南, 苟珈源, 宋俊平. 单级混合冷剂天然气液化工艺优化及分析[J]. 天然气化工-C1 化学与化工, 2021, 46(4): 84-89, 113. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9219.2021.04.014.
- LI H, WU X N, GOU J Y, SONG J P. Optimization and analysis of single-stage mixed-refrigerant natural gas liquefaction process[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2021, 46(4): 84-89, 113.

(收稿日期: 2023-05-29; 修回日期: 2023-07-24; 编辑: 李在蓉)

基金项目: 西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划立项项目“一种天然气提取精氦并联产 LNG 的工艺”, YCS23121001。

作者简介: 肖荣鸽, 女, 1978 年生, 教授, 2014 年博士毕业于西安理工大学水力学及河流动力学专业, 现主要从事天然气处理与加工、油气田地面工程与多相管流技术等方向的研究与教学工作。地址: 陕西省西安市雁塔区电子二路 18 号, 710065。电话: 13572960817。Email: xiaorongge@163.com

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

