

# 海上平台天然气脱碳“膜分离+低温分馏”耦合工艺研究

贾辉<sup>1,2</sup>, 郑华安<sup>1,2</sup>, 杨波<sup>1,2</sup>, 高波<sup>3</sup>, 李森<sup>3\*</sup>, 田泽楠<sup>3</sup>, 陆诗建<sup>4,5\*</sup>, 罗忆梦<sup>4,5</sup>

- (1. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南 海口 570312;
2. 中国海油南海油气能源院士工作站, 海南 海口 570312;
3. 湛江南海西部石油勘察设计有限公司, 广东 湛江 524057;
4. 中国矿业大学江苏省煤基温室气体减排与资源化利用重点实验室, 江苏 徐州 221008;
5. 中国矿业大学化学与化工学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**针对海上平台天然气脱碳空间受限的问题,提出了一种“膜分离+低温分馏法”耦合工艺。结合某东方气田的生产实际,设计并开发了“膜分离+低温分馏法”耦合工艺,并开展了物理模拟实验,系统探讨了不同因素对脱碳效果的影响规律。研究表明,在相同的原料气浓度和压力条件下,“耦合工艺 I”和“耦合工艺 II”均需在较低温度下运行,才能获得 CO<sub>2</sub> 体积分数大于 95% 的高纯度产品气,同时具备较高的回收率。当压力、流量及 CO<sub>2</sub> 体积分数固定时,液化温度的升高会提高塔顶气体中 CO<sub>2</sub> 的体积分数与流量,但会导致塔釜 CO<sub>2</sub> 回收率下降;当液化压力、液化温度、气体流量及原料气 CO<sub>2</sub> 体积分数固定时,塔顶温度显著影响塔顶气体中 CO<sub>2</sub> 体积分数,而对塔釜气体影响较小;塔釜温度则对塔顶与塔釜气体中 CO<sub>2</sub> 体积分数均有较大影响。能耗分析表明,降低液化温度会增加液化能耗,而液化压力的升高则使能耗呈现先降低后升高的趋势;塔顶温度的变化对液化能耗影响较小。通过膜分离提升渗透侧气体中 CO<sub>2</sub> 的含量,可在低温分馏阶段更高效地获得高纯度产品气,同时降低能耗,展现出良好的应用潜力。

**关键词:**海上平台;天然气脱碳;膜分离;低温分馏

中图分类号:TE645

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)11-0246-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.11.042

## Research on “membrane separation+low-temperature distillation” coupling process for removing CO<sub>2</sub> from natural gas on offshore platform

JIA Hui<sup>1,2</sup>, ZHENG Hua-an<sup>1,2</sup>, YANG Bo<sup>1,2</sup>, GAO Bo<sup>3</sup>, LI Sen<sup>3\*</sup>,  
TIAN Ze-nan<sup>3</sup>, LU Shi-jian<sup>4,5\*</sup>, LUO Yi-meng<sup>4,5</sup>

- (1.Hainan Branch, CNOOC (China) Company Limited, Haikou 570312, China; 2.CNOOC South China Sea Oil and Gas Energy Academician Workstation, Haikou 570312, China; 3.Zhanjiang Nanhai Western Petroleum Survey & Design Co., Ltd., Zhanjiang 524057, China; 4.Jiangsu Key Laboratory of Coal-based Greenhouse Gas Control and Utilization, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 5.School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** To address the spatial limitation issue for natural gas decarbonization on offshore platforms, the “membrane separation+cryogenic distillation” coupling process is proposed based on the actual production of a certain Dongfang gas field. Physical simulation experiments are conducted to systematically explore the impacts of various factors on decarbonization performance. Results indicate that under identical feed gas concentration and pressure conditions, both “Coupled Process I” and “Coupled Process II” need to operate at low temperature to achieve high-purity product gas with a CO<sub>2</sub> volume fraction exceeding 95%, along with high recovery rate. An increase in liquefaction temperature can enhance the volume fraction and flow rate of CO<sub>2</sub> in the overhead gas but decreases the recovery rate of CO<sub>2</sub> in the bottom product when pressure, feed gas flow rate, and CO<sub>2</sub> volume fraction in feed gas remain constant. The overhead temperature affects significantly the volume fraction of CO<sub>2</sub> in the overhead gas but has small impact on the bottom gas when liquefaction pressure, liquefaction temperature, feed gas flow rate, and CO<sub>2</sub> volume fraction in feed gas remain fixed. Conversely, the bottom temperature affects substantially CO<sub>2</sub> volume fractions in both the overhead and bottom gases. It is found through energy consumption analysis that lowering the liquefaction temperature will lead to an increase of liquefaction energy consumption. Increasing liquefaction pressure causes energy consumption to decrease initially and rise

收稿日期:2025-01-14;修回日期:2025-08-29

基金项目:中国海洋石油有限公司综合科研项目(KJZH-2023-2203)

作者简介:贾辉(1982-),硕士,高级工程师,研究方向为采油气工艺, jiahui@cnoc.com.cn;李森(1998-),硕士,工程师,研究方向为CCUS工艺, 通讯联系人, lisen12@cnoc.com.cn;陆诗建(1984-),博士,教授,研究方向为CO<sub>2</sub>捕集与资源化利用, 通讯联系人, lushijian@cumt.edu.cn。

then.Changes in overhead temperature have small impact on liquefaction energy consumption.Enhancing the CO<sub>2</sub> content in the permeate gas via membrane separation allows for more efficient production of high-purity product gas in the cryogenic distillation stage while reducing energy consumption ,demonstrating significant application potential.

**Key words:** offshore platform; natural gas decarbonization; membrane separation; low temperature fractionation

随着全球能源转型加速及“双碳”目标推进,天然气作为清洁化石能源地位凸显<sup>[1]</sup>。我国海上天然气资源丰富,约占全球总量三分之一<sup>[2]</sup>,但高含CO<sub>2</sub>气田开发导致外输气CO<sub>2</sub>浓度上升,需脱碳满足国家一类气标准(CO<sub>2</sub>体积分数≤3%)<sup>[3]</sup>。因此,发展高效、紧凑的脱碳技术成为行业迫切需求。

海上平台脱碳可显著降低管道建设与维护成本,并便于CO<sub>2</sub>封存或回注<sup>[4]</sup>。受平台空间和复杂工况限制<sup>[5]</sup>,亟需开发占地面积小、经济可持续的脱碳工艺。现有技术中,膜分离法因装置简单、操作灵活已应用于海上气田,但存在预处理要求高、烃损失大、能耗高等不足。醇胺法与膜耦合工艺可降低能耗和设备体积,但仍存在流程复杂、需配套脱水等问题<sup>[6-17]</sup>。

低温分馏技术可直接获得液态CO<sub>2</sub>,流程简单,具备良好应用潜力。本文中基于某气田项目,建立“膜分离+低温分馏”耦合工艺的HYSYS仿真模型,并开展室内物理模拟实验,以期为海上平台天然气脱碳提供技术参考。

## 1 海上平台天然气脱碳工艺设计

### 1.1 海上平台天然气脱碳技术适应性分析

#### 1.1.1 膜分离法

膜分离技术利用分离膜的选择透过性,在压差驱动下实现气体分离,具有能耗低、操作简便、占地小等优点,已广泛应用于天然气脱碳、脱水和油气回收等领域。乐东15-1气田的膜脱碳装置年处理能力 $8 \times 10^4$  t,预处理和膜撬块结构紧凑,但存在单级膜烃损失率高(约15%)、CO<sub>2</sub>脱出浓度较低(约80%)的问题,需通过预处理控制重烃和水分以提升膜寿命与分离效率。东方某气田CO<sub>2</sub>回注需求达 $175 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,初步预估各装置尺寸较小,满足海上平台空间限制,但因回注要求CO<sub>2</sub>浓度高于80%,单级膜分离难以达标,因此考虑采用膜与其他工艺耦合的技术,以兼顾脱碳效率与空间优势<sup>[18-20]</sup>。

#### 1.1.2 低温分馏法

低温分馏法在高压低温条件下液化原料气,并利用组分间挥发度差异通过精馏脱除CO<sub>2</sub>。该方法无需引入其他分离介质,可直接获得高纯度液态CO<sub>2</sub>,适用于CO<sub>2</sub>浓度高(体积分数>80%)的场景,

流程简单、效率高。但对于中低浓度CO<sub>2</sub>(如东方某气田约40%),该方法需多级分馏,能耗与成本显著增加,经济性较差。相比之下,单级膜分离虽结构紧凑,但CH<sub>4</sub>损失较大,且难以同时保证净化气和渗透气中CO<sub>2</sub>的高浓度;两级膜工艺虽可提升效果,却需增加循环压缩机和冷却设备,导致占地和投资上升。

因此,结合膜分离的预处理优势与低温分馏的高效提纯能力,采用“膜分离+低温分馏”耦合工艺,可在满足高浓度CO<sub>2</sub>脱除要求的同时,显著降低设备占地与投资成本,是目前东方某气田脱碳的理想选择。

### 1.2 “膜分离+低温分馏”耦合工艺设计

#### 1.2.1 工艺设计基础

东方某气田原料气组分参数见表1。气田产气量 $500 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,进入脱CO<sub>2</sub>系统前压力5 MPa,温度40℃,回注气CO<sub>2</sub>体积分数要求在95%以上。工艺设计中搭载有回注泵,可将脱CO<sub>2</sub>过程产生的废气回注地层封存,实现海洋气田开发“碳捕集+碳回注”一体化。

表1 原料气组分

组分	体积分数/%	组分	体积分数/%
CO <sub>2</sub>	45.61	i-C <sub>4</sub>	0.04
N <sub>2</sub>	8.97	n-C <sub>4</sub>	0.04
C <sub>1</sub>	44.51	i-C <sub>5</sub>	0.02
C <sub>2</sub>	0.55	n-C <sub>5</sub>	0.01
C <sub>3</sub>	0.17	C <sub>6</sub> +	0.09

#### 1.2.2 “膜分离+低温分馏”耦合工艺模拟

本研究采用了HYSYS软件的membrane扩展模块建立“膜分离+低温分馏”耦合仿真模型,该模块需要输入的参数包括膜面积、不同气体组分的渗透系数、渗透气压力以及渗余气压力。“膜分离+低温分馏”耦合脱CO<sub>2</sub>工艺流程如图1所示。

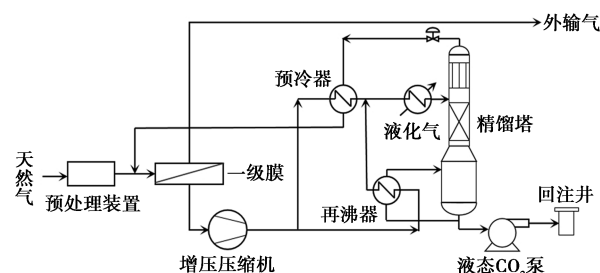


图1 “膜分离+低温分馏法”耦合工艺流程

## 2 物理模拟测试实验分析

### 2.1 实验材料

CO<sub>2</sub> (体积分数 99.99%)、CH<sub>4</sub> (体积分数 99.99%)、N<sub>2</sub> (体积分数 99.99%)、气体调压阀、流量计 (0~30 L/min)、背压阀 (0~10 MPa)、冷却液循环泵、精馏塔、低温泵、分离膜;本次研究采用的分离膜来自于大连化物所,膜组件尺寸为:ID 0.2 m, L1.5 m,膜面积 0.5 m<sup>2</sup> (单只膜 0.5 m<sup>2</sup>,膜组 2.5 m<sup>2</sup>)。

### 2.2 实验条件与方法

实验参数:二氧化碳体积分数分别为 40%、50%;低温分馏温度分别为-30、-20、-15、-5℃;低温分馏压力分别为 2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 MPa。

实验步骤:①将配好的混合气调节至设定流量,通入混气罐,加压后经压缩机送入储气罐,并启动水泵对气体冷却。②调整气体压力和流量至实验设定值,使混合气在膜分离器中进行分离,通过压力表控制分离压力,流量计监测渗透侧与渗余侧流量,并检测两侧气体组成。③将膜分离渗透侧气体压缩后存入储气罐,通过背压阀和流量计调节进入液化器

气体流量与压力。④通过冷却循环泵控制液化器温度和流量,调整系统压力以实现 CO<sub>2</sub> 液化,液化后气体进入精馏塔,通过调节塔顶冷凝器与塔底再沸器压力,确保气液两相稳定输出。⑤检测塔顶与塔底产品流量并取样分析。按设定参数重复实验。

### 2.3 结果与讨论

#### 2.3.1 单只高压膜+低温分馏实验

表 2 的实验结果表明,采用“膜分离+低温分馏”耦合工艺处理 CO<sub>2</sub> 体积分数为 40% 的原料气时,膜分离可使渗透侧 CO<sub>2</sub> 体积分数提升至 73.5%。该气体在 2 MPa、-30℃ 或 3 MPa、-20℃ 条件下经低温分馏后,产品中 CO<sub>2</sub> 体积分数均超过 95%,且在 3 MPa、-20℃ 时回收率更高。对于 CO<sub>2</sub> 体积分数为 50% 的原料气,膜分离后渗透气 CO<sub>2</sub> 体积分数达 81.5%,在 3 MPa、-20℃ 条件下分馏可获得 95.4% 的 CO<sub>2</sub> 产品,回收率为 55.4%;而在相同压力、较高温度(如-15℃ 或 -5℃)下操作时,尽管产品体积分数略有上升(96.1% 或 95.8%),但回收率显著降低(21.7% 或 18.6%)。实验说明,在原料气 CO<sub>2</sub> 浓度和分馏压力一定时,需在较低温度下操作方可同时实现高纯度(≥95%)与较高回收率。

表 2 单只膜+低温分馏实验结果

膜分离结果				低温分馏结果					
原料气 CO <sub>2</sub> 体积分数/%	渗透侧流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	渗余侧流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	渗透侧 CO <sub>2</sub> 体积分数/%	温度/ ℃	低压力/ MPa	塔顶流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	塔底流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	塔底气 CO <sub>2</sub> 体积分数/%	CO <sub>2</sub> 回收率/ %
40	2.6	7.4	73.5	-30	2	2.3	0.3	95.2	14.9
40	2.6	7.4	73.5	-20	3	2.1	0.5	95.0	24.9
50	3.8	6.3	81.5	-20	3	2.0	1.8	95.4	55.4
50	3.8	6.3	81.5	-15	3	3.1	0.7	96.1	21.7
50	3.8	6.3	81.5	-15	4	1.5	2.3	92.6	68.8
50	3.8	6.3	81.5	-5	4	3.2	0.6	95.8	18.6

#### 2.3.2 高压膜组+低温分馏实验

在“膜+低温分馏”组合实验中,考察了低温分馏条件对分离效果的影响。原料气(CO<sub>2</sub> 体积分数 60%,压力 5 MPa,流量 50 L/min)经膜分离后,得到渗透气(压力 0.5 MPa,流量 14.7 L/min,CO<sub>2</sub> 体积分数 82.4%),该气体压缩后进入低温分馏单元提纯。

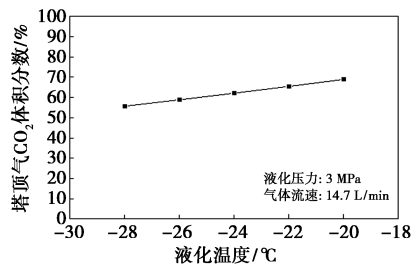
##### (1) 液化温度的影响

在压力 3 MPa、流量 14.7 L/min 条件下,随液化温度升高,塔顶气中 CO<sub>2</sub> 体积分数及流量均逐渐

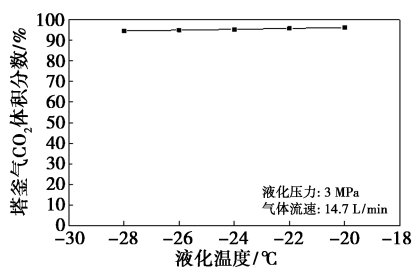
增大[图 2(a)],因温度上升导致 CO<sub>2</sub> 液化率降低,更多 CO<sub>2</sub> 留存于气相。同时,塔釜产品中 CO<sub>2</sub> 纯度也随之提高[图 2(b)]:-28℃ 时为 94.5%, -20℃ 时达 96.1%。温度较高时,其他气体组分液化减少,从而提升了釜液中 CO<sub>2</sub> 含量。然而,随温度上升,CO<sub>2</sub> 回收率逐渐下降[图 2(c)],塔釜产品流量减小。

综合表明,在 3 MPa 下选择-24℃ 左右的液化温度,可在保证塔釜 CO<sub>2</sub> 体积分数高于 95% 的同时,维持较高的回收率,是实现高纯度与高产量平衡

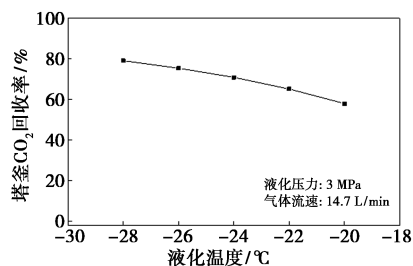
的较优条件。



(a) 液化温度对塔顶 CO<sub>2</sub> 体积分数的影响



(b) 液化温度对塔釜 CO<sub>2</sub> 体积分数的影响



(c) 液化温度对塔釜 CO<sub>2</sub> 回收率的影响

图2 液化温度对低温分馏结果的影响

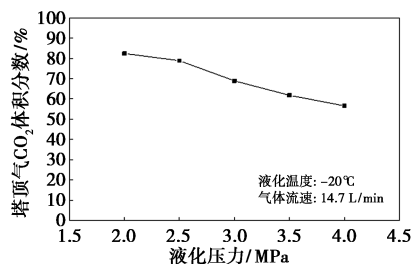
## (2) 液化压力的影响

图3(a)是不同压力时塔顶 CO<sub>2</sub> 体积分数的变化曲线。在温度固定为 -20°C、流量为 14.7 L/min 的条件下,当压力为 2 MPa 时,CO<sub>2</sub> 体积分数为 82.4%,表明气体尚未液化;压力升至 4 MPa 时,该值降至 56.6%。达到液化条件后,随着压力进一步升高,塔顶 CO<sub>2</sub> 体积分数逐渐降低,同时气体流量减少。这是由于在恒定温度下,升高压力增强了气体液化能力,使更多 CO<sub>2</sub> 进入液相。

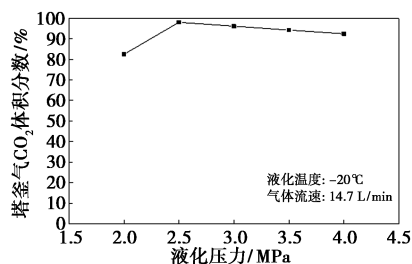
图3(b)为不同液化压力下塔釜 CO<sub>2</sub> 体积分数的变化曲线。在 2 MPa 和 -20°C 条件下,塔釜 CO<sub>2</sub> 体积分数与膜分离后的渗透气一致(82.4%),进一步证实气体未发生液化。达到液化条件后,随着压力增大,塔釜产品中 CO<sub>2</sub> 体积分数逐渐下降:在 2.5 MPa 时达到最高值 98.0%,而在 4 MPa 时降至 92.4%。较高压力下,部分其他气体也被液化,导致 CO<sub>2</sub> 含量相对降低。

图3(c)为不同液化压力下塔釜 CO<sub>2</sub> 回收率的变化曲线。实验结果表明,提高液化压力可提升

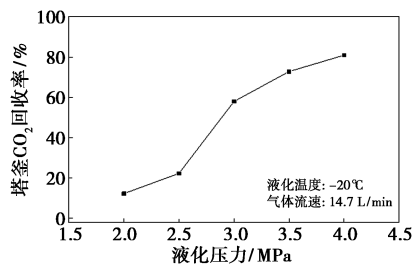
CO<sub>2</sub> 回收率。压力增大使更多 CO<sub>2</sub> 被液化,塔釜产品流量增加,从而提高了回收率。



(a) 液化压力对塔顶 CO<sub>2</sub> 体积分数的影响



(b) 液化压力对塔釜 CO<sub>2</sub> 体积分数的影响



(c) 液化压力对塔釜 CO<sub>2</sub> 回收率的影响

图3 液化压力对低温分馏结果的影响

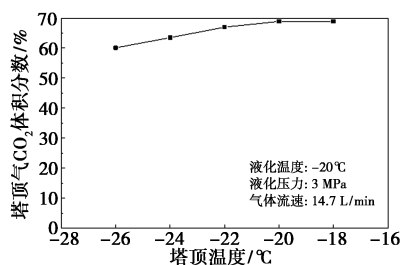
## (3) 塔顶温度对低温分馏结果的影响

图4(a)是不同塔顶温度下塔顶 CO<sub>2</sub> 体积分数的变化曲线。在液化压力、温度、气体流速及原料气组成恒定的条件下,塔顶温度对塔顶气体中 CO<sub>2</sub> 体积分数具有显著影响。当塔顶温度高于液化温度时,CO<sub>2</sub> 体积分数与气体流量基本保持不变;而当塔顶温度低于液化温度时,随着温度降低,塔顶 CO<sub>2</sub> 体积分数和气体流量均下降,原因是低温促使更多 CO<sub>2</sub> 被液化并进入液相产品。

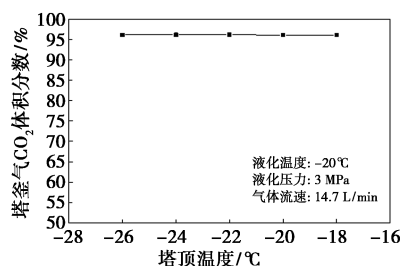
图4(b)是不同塔顶温度下塔釜 CO<sub>2</sub> 体积分数的变化曲线。在相同恒定条件下,塔顶温度对塔釜气体中 CO<sub>2</sub> 体积分数影响较小,但会促使塔釜产品流量增加,表明降低塔顶温度有助于提高液相产品产量。

图4(c)是不同塔顶温度时塔釜 CO<sub>2</sub> 回收率的变化曲线。当塔顶温度高于液化温度时,回收率保持稳定;一旦低于液化温度,回收率随温度下降而显著上升。结果表明,在操作参数固定的情况下,降低

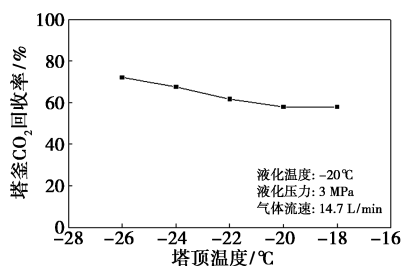
塔顶温度可有效提升 CO<sub>2</sub> 的回收率。



(a) 塔顶温度对塔顶 CO<sub>2</sub> 体积分数的影响



(b) 塔顶温度对塔釜 CO<sub>2</sub> 体积分数的影响



(c) 塔顶温度对塔釜 CO<sub>2</sub> 回收率的影响

图 4 塔顶温度对低温分馏结果的影响

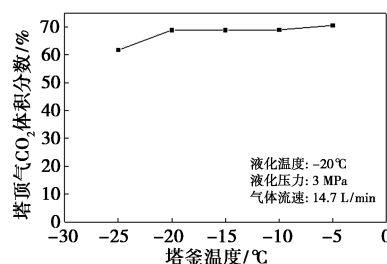
#### (4) 塔釜温度对“膜+低温分馏”结果的影响

图 5(a) 是不同塔釜温度下塔顶 CO<sub>2</sub> 体积分数的变化曲线。在液化压力、液化温度、气体流速和原料气组成恒定的条件下,塔釜温度对塔顶 CO<sub>2</sub> 体积分数具有显著影响。当塔釜温度低于液化温度时,塔顶 CO<sub>2</sub> 体积分数和气体流量均降低,原因是整体塔温下降促使更多气体被液化;而当塔釜温度高于液化温度时,随着温度上升,更多液相产品气化,其中部分 CO<sub>2</sub> 进入气相,导致塔顶 CO<sub>2</sub> 体积分数和气体流量增加。

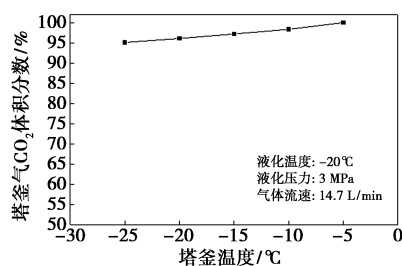
图 5(b) 是不同塔釜温度下塔釜 CO<sub>2</sub> 体积分数的变化曲线。塔釜温度对塔釜产品中 CO<sub>2</sub> 体积分数影响显著。温度低于液化温度时,塔釜 CO<sub>2</sub> 体积分数降低,塔顶流量减小而塔釜产品流量增大,因低温使部分塔顶气体液化进入塔釜;温度高于液化温度时,随着温度升高,CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub> 等气体更易气化,而 CO<sub>2</sub> 相对富集,使得塔釜产品 CO<sub>2</sub> 体积分数上升,但气体总流量减少,从而实现 CO<sub>2</sub> 的净化。

图 5(c) 是不同塔釜温度对 CO<sub>2</sub> 回收率影响的

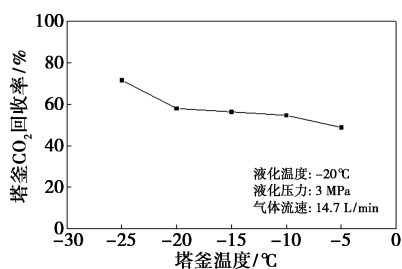
变化曲线。具体而言,在塔釜温度为 -20°C 时,CO<sub>2</sub> 体积分数为 96.1%,回收率为 57.9%;在 -25°C 时,体积分数为 95.1%,回收率升至 71.5%;而在 -5°C 时,体积分数达到 99.9%,但回收率降至 48.8%。结果表明,降低塔釜温度可提高回收率,但体积分数略有下降;提高塔釜温度可显著提升产品纯度,但回收率降低,主要因产品总流量减少。因此,在实际操作中需根据产品纯度与回收率的权衡选择适宜塔釜温度。



(a) 塔釜温度对塔顶 CO<sub>2</sub> 体积分数的影响



(b) 塔釜温度对塔釜 CO<sub>2</sub> 体积分数的影响



(c) 塔釜温度对塔釜 CO<sub>2</sub> 回收率的影响

图 5 塔釜温度对低温分馏结果的影响

### 3 能耗分析

表 3 对 CO<sub>2</sub> 体积分数为 60% 的原料气在特定工况(压力 5 MPa, 流量 50 L/min; 渗透气压力 0.5 MPa, 流量 14.7 L/min, CO<sub>2</sub> 体积分数 82.4%) 下经“膜分离+低温分馏”过程的能耗进行了初步分析。结果表明,相同膜分离条件下所得的渗透气,在不同液化条件下能耗存在差异。随液化温度降低,能耗因制冷需求增加而上升;液化压力升高则使能耗先降后升,原因在于压力提高初期产品回收率增加,但超过一定压力后压缩机功耗显著增大。塔顶温度降

低对总能耗影响较小,因制冷耗电增加与产品产量提升相互抵消。塔釜温度升高可提高产品纯度,但导致产量下降,能耗变化无明显规律。

表3 膜分离+低温分馏耦合工艺能耗初步分析结果

液化压力/ MPa	液化温度/ ℃	塔顶温度/ ℃	塔釜温度/ ℃	塔釜 CO <sub>2</sub> 体积分数/ %	塔釜流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	能耗/ (kW·kg <sup>-1</sup> )
3.0	-20	-20	-20	96.1	7.3	2.1
3.0	-22	-22	-22	95.7	8.2	2.4
3.0	-24	-24	-24	95.3	9.0	2.7
3.0	-26	-26	-26	94.9	9.6	3.1
3.0	-28	-28	-28	94.5	10.1	3.4
2.0	-20	-20	-20	82.4	1.8	6.4
2.5	-20	-20	-20	98.0	2.7	4.6
3.0	-20	-20	-20	96.1	7.3	2.1
3.5	-20	-20	-20	94.2	9.4	1.9
4.0	-20	-20	-20	92.4	10.6	2.0
3.0	-20	-18	-20	96.1	7.3	1.9
3.0	-20	-20	-20	96.1	7.3	2.1
3.0	-20	-22	-20	96.1	7.8	2.2
3.0	-20	-24	-20	96.1	8.5	2.2
3.0	-20	-26	-20	96.1	9.1	2.2
3.0	-20	-20	-5	95.1	9.1	2.1
3.0	-20	-20	-10	96.1	7.3	1.9
3.0	-20	-20	-15	97.2	7.0	2.0
3.0	-20	-20	-20	98.3	6.7	2.1
3.0	-20	-20	-25	99.9	5.9	1.8

#### 4 结论与建议

综上所述,本研究对2种耦合工艺的实验比较表明,在原料气 CO<sub>2</sub> 体积分数和压力相同的条件下,需在较低温度下运行方可获得 CO<sub>2</sub> 体积分数高于95%的高纯度产品气,并同时实现较高回收率。具体而言,当压力、流量和 CO<sub>2</sub> 体积分数固定时,升高液化温度会提高塔顶气的 CO<sub>2</sub> 体积分数和流量,但导致塔釜回收率下降;在液化压力、温度、气体流量和原料气组成恒定的情况下,塔顶温度显著影响塔顶气的 CO<sub>2</sub> 体积分数,而对塔釜气含量影响较小;塔釜温度则同时对塔顶和塔釜的 CO<sub>2</sub> 体积分数具有明显影响。在膜分离阶段,膜面积成倍增加对渗透气 CO<sub>2</sub> 体积分数提升有限,但可大幅提高处理气量。膜组件本身结构紧凑、操作灵活,特别适合空间受限的海上平台应用。耦合工艺实验显示,“膜分离+低温分馏”系统运行稳定,结果与各单元独立实验一致,体现了该工艺的高可行性与可靠性。能耗分析表明,降低液化温度将增加能耗,而提高液化

压力则使能耗先降后升,塔顶温度变化对能耗影响较轻微。提高膜分离阶段渗透气的 CO<sub>2</sub> 体积分数,有助于提升后续低温分馏的产品纯度并降低总能耗。放大实验进一步验证了耦合工艺规律的一致性,表明该工艺具备良好的可放大性和工业应用潜力。

#### 参考文献

- [1] 陈颖,杨鹤,梁宏宝,等.天然气脱硫脱碳方法的研究进展[J].石油化工,2011,40(5):565-570.
- [2] 陶致成.13X分子筛在海上天然气净化脱 CO<sub>2</sub> 的研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2018.
- [3] 中华人民共和国国家能源局.GB 17820—2018.中国标准书号[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [4] 景凤江,宋春华.二氧化碳埋存技术在我国海上气田的应用与思考[J].油气藏评价与开发,2011,1(5):20-23,28.
- [5] Wen C, Li B, Ding H, et al. Thermodynamics analysis of CO<sub>2</sub> condensation in supersonic flows for the potential of clean offshore natural gas processing[J]. Applied Energy, 2022, 310: 118523.
- [6] Babar M, Bustam M A, Ali A, et al. Thermodynamic data for cryogenic carbon dioxide capture from natural gas: A review[J]. Cryogenics, 2019, 102: 85-104.
- [7] Huang W, Zheng D, Xie H, et al. Hybrid physical-chemical absorption process for carbon capture with strategy of high-pressure absorption/medium pressure desorption[J]. Applied Energy, 2019, 239: 928-937.
- [8] Myers T G, Font F, Hennessy M G. Mathematical modelling of carbon capture in a packed column by adsorption[J]. Applied Energy, 2020, 278: 115565.
- [9] Budhathoki S, Ajayi O, Steckel JA, et al. High-throughput computational prediction of the cost of carbon capture using mixed matrix membranes[J]. Energy & Environmental Science, 2019, 12: 1255-1264.
- [10] 李林源,陈文峰,胡蓉,等.海上平台 CO<sub>2</sub> 脱除工艺应用及对比[J].石油和化工设备,2023,26(3):27-31.
- [11] 陈万贵,于同川,郭志成,等.海上平台天然气脱酸工艺探索[J].山东化工,2024,(5):50-53.
- [12] 华东阳,张晓敏,马梦桐.海上平台“膜分离+酸气回注”工艺技术研究[J].天然气与石油,2022,40(5):26-31,37.
- [13] 谢金秋,陈绍凯,朱海山,等.海上气田天然气脱碳工艺技术方研究[J].山东化工,2022,51(10):44-47,50.
- [14] 许友好,李浩天,刘昌呈.“双碳”目标下石油炼制技术研发策略与工业实践[J].石油炼制与化工,2024,55(1):171-179.
- [15] 朱红钧,李英媚,陈俊文,等.“双碳”目标下中国石油企业绿色低碳路径[J].天然气工业,2024,44(4):180-189.
- [16] 武强,涂坤,曾一凡.“双碳”目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考[J].科学通报,2023,68(15):1884-1898.
- [17] 马永生,蔡勋育,罗大清,等.“双碳”目标下我国油气产业发展的思考[J].地球科学,2022,47(10):3501-3510.
- [18] 谷俊男,邢心语,李磊,等.膜法脱除烟气中二氧化碳的工艺技术研究进展[J].现代化工,2023,43(S1):81-84.
- [19] 陈斌,吴梦莉,樊雄,等.利用膜分离技术捕集燃烧后烟气 CO<sub>2</sub> 的工艺研究及应用现状[J].膜科学与技术,2023,43(6):232-242.
- [20] 易砖,朱国栋,刘洋,等.膜分离在石油化工领域中的应用:现状、挑战及机遇[J].水处理技术,2022,48(8):7-13. ■