

引文: 张春威, 刘瑛, 孙晓, 等. 油田伴生气中 CO₂ 和轻烃的纯膜分离新技术[J]. 天然气工业, 2024, 44(4): 68-75.

ZHANG Chunwei, LIU Ying, SUN Xiao, et al. A new pure membrane separation technology for CO₂ and light hydrocarbons from oilfield associated gas[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(4): 68-75.

油田伴生气中 CO₂ 和轻烃的纯膜分离新技术

张春威 刘 瑛 孙 晓 梁全胜 王 涛 李 鹤 康宇龙

陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院

摘要: 在油田开发过程中, 大量用于驱油并伴随原油采出的 CO₂ 和轻烃(C₂~C₅)被直接排放, 不仅浪费资源, 还污染环境, 不符合 CO₂ 驱油环保理念, 回收 CO₂ 和高附加值的轻烃势在必行。为此, 通过分析某 CO₂ 捕集、利用与封存(CCUS)示范区建成后伴生气组分的变化, 优选聚乙烯胺膜、聚二甲基硅氧烷膜针对伴生气中的 CO₂ 和轻烃开展室内分离试验, 采用 PRO II 软件对伴生气分离整体流程进行了模拟仿真、开展了流程优化设计和装置试制, 确定了膜技术分离油田伴生气中 CO₂ 和轻烃的适用性, 并开展了现场试验。研究结果表明: ①随着 CCUS 示范区 CO₂ 的注入, CO₂ 对地层中的轻烃组分具有一定的萃取作用, 并导致其含量逐渐上升, 需要回收被采出至地面的 CO₂ 和高附加值的轻烃; ②聚乙烯胺膜对 CO₂ 具有强促进传递作用, CO₂ 浓度、温度、湿度为主要影响因素, CO₂ 两级分离率可达 96%; ③聚二甲基硅氧烷膜对轻烃具有良好的选择性, 碳值越高选择性越好, 压力比、温度为主要影响因素, 分离率最高可达 70%; ④聚乙烯胺和聚二甲基硅氧烷 2 种膜均具有优异的长期运行稳定性, 印证了膜法分离 CO₂ 和轻烃的能力; ⑤试制膜分离撬装装置 600 h 现场试验装置运行稳定, 分离效果和室内试验及数值模拟数据基本吻合。结论认为, 采用纯膜法分离油田伴生气中的 CO₂ 和轻烃投资低、能耗低, 节能环保, 具备长期应用的潜力。

关键词: CO₂ 驱油; 聚乙烯胺膜; 聚二甲基硅氧烷膜; 油田伴生气; 膜法分离; CO₂ 分离; 烃类分离

中图分类号: TE622.1⁺5、TE644

文献标识码: A

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2024.04.007

A new pure membrane separation technology for CO₂ and light hydrocarbons from oilfield associated gas

ZHANG Chunwei, LIU Ying, SUN Xiao, LIANG Quansheng, WANG Tao, LI He, KANG Yulong

(Research Institute, Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Natural Gas Industry, Vol.44, No.4, p.68-75, 4/25/2024. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: In the process of oilfield development, a large amount of CO₂ which is used for oil recovery and produced along with the production of crude oil and light hydrocarbons (C₂-C₅) are discharged directly, which not only wastes resources but also pollutes the environment. Obviously, it is not in line with the environmental protection concept of CO₂ flooding, so it is imperative to recover CO₂ and high value-added light hydrocarbons. In this paper, the changes in the compositions of the associated gas after the construction of a CO₂ capture, utilization, and storage (CCUS) demonstration area are analyzed. Based on this, polyvinylamine (PVAm) membrane and polydimethylsiloxane membrane are selected to conduct laboratory separation experiments on CO₂ and light hydrocarbons in associated gas. Then, PRO II software is used to simulate the overall process of associated gas separation and carry out optimal process design and trial device production. Finally, the applicability of the membrane technology to separate CO₂ and light hydrocarbons from oilfield associated gas in oil fields is clarified, and on-site tests are conducted. And the following research results are obtained. First, as CO₂ is injected into the CCUS demonstration area, it has a certain extraction effect on the light hydrocarbons in the formations while leading to a gradual increase in the compositions of light hydrocarbons. Therefore, it is imperative to recover produced CO₂ and high value-added light hydrocarbons. Second, PVAm has a strong promoting effect on CO₂ transfer, with CO₂ concentration, temperature, and humidity as the main influencing factors. The two-stage separation rate of CO₂ reaches 90%. Third, polydimethylsiloxane membrane has good selectivity for light hydrocarbons, and the higher the carbon value, the better the selectivity. Pressure ratio and temperature are the main influencing factors, and the highest separation rate can be up to 70%. Fourth, these two kinds of membranes are excellent in long-term operational stability, confirming the membrane method's ability to separate CO₂ and light hydrocarbons. Fifth, during the 600 hours of the on-site test, the experimentally produced skid-mounted membrane separation device ran smoothly, with the separation effect basically consistent with laboratory test and numerical simulation results. In conclusion, the use of pure membrane method to separate CO₂ and light hydrocarbons from oilfield associated gas is advantageous with low investment, low energy consumption, energy conservation and environmental protection, and has the potential for long-term application.

Keywords: CO₂ flooding; Polyvinylamine (PVAm) membrane; Polydimethylsiloxane membrane; Oilfield associated gas; Membrane separation; CO₂ separation; Hydrocarbon separation

基金项目: 陕西延长石油(集团)有限责任公司科研项目“CO₂ 驱油田采出气多功能回收利用装置研发”(编号: ycsy2021jcts-A-05)。

作者简介: 张春威, 女, 1985 年生, 高级工程师, 硕士; 主要从事碳捕集工艺、油气田地面工程方面的研究工作。地址: (710075) 陕西省西安市雁塔区唐延路 61 号。ORCID: 0009-0001-9583-714X。E-mail: 86694719@qq.com

0 引言

油田生产过程中会采出天然气, 常称之为油田伴生气, 其主要成分是甲烷, 通常还含有大量的轻烃(C₂ ~ C₅)组分。伴生气回收处理是将气流中甲烷、轻烃与其他组分分开, 然后进一步加工, 作为纯组分或天然气混合液(NGL)或液化石油气(LPG)销售, 具极高的附加值。但是, 由于受到技术手段的制约, 加之在油田开采过程中伴生气较难以控制, 很大一部分伴生气被排空或烧掉。

随着“双碳”政策的逐步推进, 大量的 CO₂ 用于驱油, 随着 CO₂ 注入量的增加, CO₂ 不可避免地随着伴生气采出。由于 CO₂ 的不可燃物性, 伴生气不经过处理则不能当作燃料利用, 只能直接放空, 这不仅浪费了资源, 还污染了环境, 不符合 CO₂ 驱油环保的理念。因此, 回收 CO₂ 驱油采出的伴生气更加迫在眉睫^[1-5]。

为此, 笔者以某 CO₂ 捕集、利用与封存(CCUS)示范区为例, 采用了纯聚合物膜分离法, 通过室内试验、数值仿真、装置试制和现场试验等手段, 开展了伴生气中 CO₂ 和轻烃的分离技术研究, 并将聚

合物膜应用于油田伴生气分离现场试验中, 取得了良好的效果。

1 注 CO₂ 后伴生气的组分变化

以某 CCUS 示范区为例, 通过 2 年的受益油井井口伴生气组分分析发现, 总体上看, 随着 CO₂ 累计注入量的增加, 受益油井伴生气组分中 CH₄ 或轻烃(C₂ ~ C₅)含量逐渐上升, 侧面印证了 CO₂ 对原油中的 CH₄、轻烃(C₂ ~ C₅)组分的萃取作用, 表现为气油比大幅度地增高。如图 1 所示, 1 号受益油井轻烃在气相中的摩尔分数稳定一段时间后大幅上升, 甲烷摩尔分数下降(图 1-a); 2 号受益油井甲烷的摩尔分数随着注入时间的增加明显上升, 轻烃则基本稳定略有下降(图 1-b); CO₂ 一旦采出后, 其在气相中的摩尔分数也会迅速上升(图 1-c), 最快在 3 个月左右可从 10% 上升至 80% 以上^[6-15]。因此, 对于伴生气的回收和利用是十分迫切的。CO₂ 驱采出气工况有别于烟道气、天然气等气体, CO₂ 驱油的井口采出压力低(约 0.2 ~ 0.8 MPa), 流量组分变化大、气源分散。因此, 需要选择适宜的方法分离回收伴生气资源。

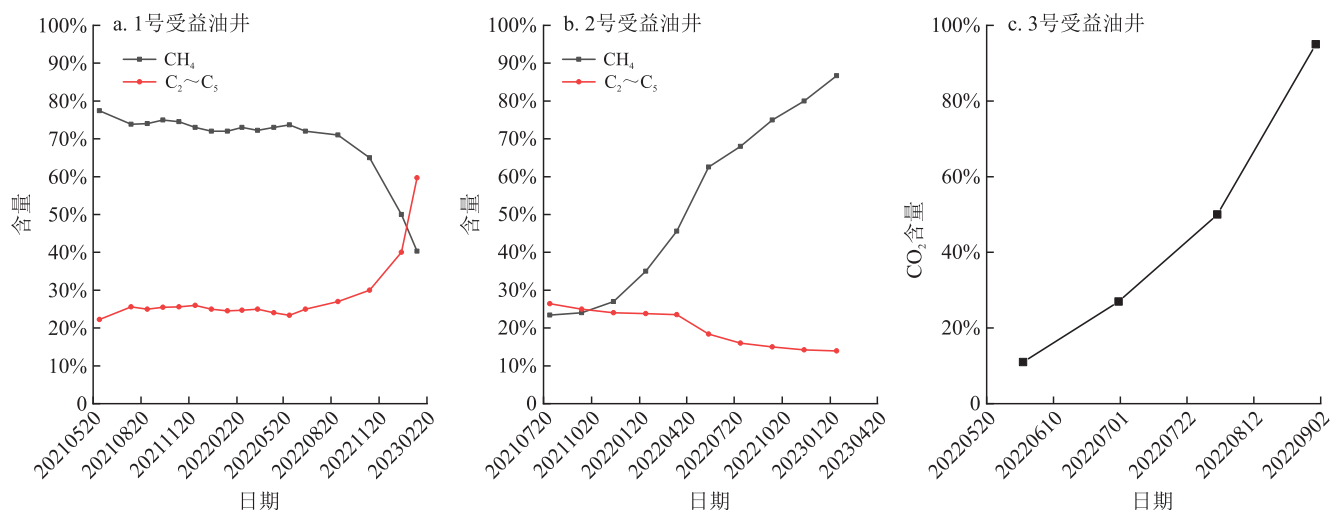


图1 受益油井甲烷与 C₂ ~ C₅ 组分含量变化图

2 分离膜影响因素

现阶段工业捕集 CO₂ 的方法主要有吸收法、吸附法、低温精馏法和膜分离法等。吸收法、低温精馏法投资大、能耗高; 吸附法运行成本高, 适用于化工厂、电厂等大规模 CO₂ 捕集; 膜分离法工艺简单、能耗低、分离过程安全环保, 非常适用于中小规模、分散采出的 CO₂ 回收^[16-23]。

为了更好地应用于现场, 笔者优选了聚乙烯胺(PVAm) CO₂ 复合膜和聚二甲基硅氧烷(PDMS)有机蒸气分离膜(VOC_s膜), 并根据某 CCUS 示范区的伴生气实际组分对分离膜材料开展了分离影响因素分析实验^[24-27]。

2.1 聚乙烯胺膜

聚乙烯胺是一种典型的反应选择机制膜材料, 具有大量的活性载体, 对 CO₂ 具有强促进传递作用,

因而具有良好的 CO_2 渗透选择性，其大规模工业化应用潜力较大。

实验采用聚砜超滤膜 (PSf) 作为支撑层，以 PDMS 作为中间层，以 PVAm 作为分离层主体材料，自制 PPPS (PVAm-PAAS-PVA-SDS)、PDMS、PSf 分离复合膜，其中通过增强层间相容性和表面交联性成功制备了高 CO_2 分离性能的 PPPS。在实验室搭建油田伴生气 CO_2 膜分离实验装置，研究了原料气相对湿度、温度和 CO_2 浓度对复合膜分离性能的影响及复合膜的长期稳定性能。

在 25°C 和 0.15 MPa 的原料气温度压力下，笔者研究了原料气的相对湿度对复合膜混合气 (CO_2/CH_4 混合比 45:55) 分离性能的影响 (图 2-a)。如图中所示，随着原料气相对湿度的增大， CO_2 渗透速率大幅度增加，由于混合气体在分离膜表面存在竞争吸附作用，水分子促进了 CO_2 在复合膜表面的吸附，导致 CH_4

在膜表面的吸附能力降低， CO_2/CH_4 分离因子增大 (分离因子表示某一单元分离操作或某一分离流程将 2 种物质分离的程度)。当原料气达到饱和湿度时，复合膜的分离性能最高。

图 2-b 为在 0.15 MPa 的原料气压力下原料气温度对复合膜 CO_2/CH_4 分离性能的影响评价图。随着测试温度的升高，水的饱和蒸气压增大，导致原料气中水分含量也随之上升， CO_2 渗透速率缓慢增加； CH_4 在膜中的扩散系数随着温度的增加而明显增大。因此， CH_4 在膜中的渗透速率随着测试温度的升高而显著增大，最终导致 CO_2/CH_4 分离因子迅速降低。

图 2-c 为原料气 CO_2 浓度对复合膜 CO_2/CH_4 分离性能的影响评价图。随着原料气中 CO_2 分压的增大，促进传递对渗透速率的贡献不断减小， CO_2 的渗透速率不断降低；和图 2-a 相似，由于混合气体的竞争性吸附作用， CH_4 的渗透速率也不断降低， CO_2/CH_4 分离因子增大。

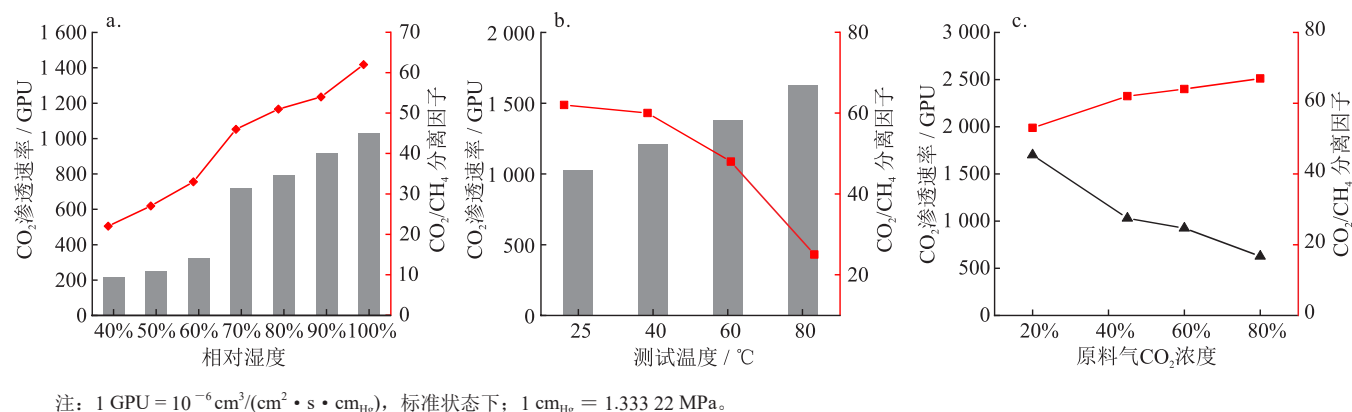


图 2 原料气相对湿度、温度和 CO_2 浓度对复合膜分离性能的影响图

图 3 为复合膜的长期稳定性分析图。前 30 h 的原料气为含 45% CO_2 的混合气 (A 段)，在第 30 h 时，将原料气更换为含 79% CO_2 的混合气 (B 段)，在第

50 h 时恢复为含 45% CO_2 的混合气 (C 段)。在 A、B 和 C 共 3 个测试段中，复合膜均保持稳定的 CO_2/CH_4 分离性能，表明复合膜具有良好的长期稳定性能。

2.2 聚二甲基硅氧烷膜

针对轻烃 ($\text{C}_2 \sim \text{C}_5$) 分离，目前使用较多的膜材料为聚二甲基硅氧烷 (PDMS)，其具有大的自由体积，透气性能很好，且对挥发性有机物有较高的选择透过性。采用实验室自制的 3 种不同分离层厚度的 PDMS 膜，针对油田伴生气质，选择在纯气分离中效果最好的 PDMS 膜，根据某 CCUS 示范区现场伴生气组分数据，研究了压力、温度、流量对分离过程中的渗透气影响及 PDMS 膜长期应用的稳定性。

根据现场伴生气组成，实验室内配比了伴生气组成 (表 1)，温度为 20°C ，压力为 0.4 MPa ，剩余气与渗透气流量比控制为 1.0，即两路气体流量相当。

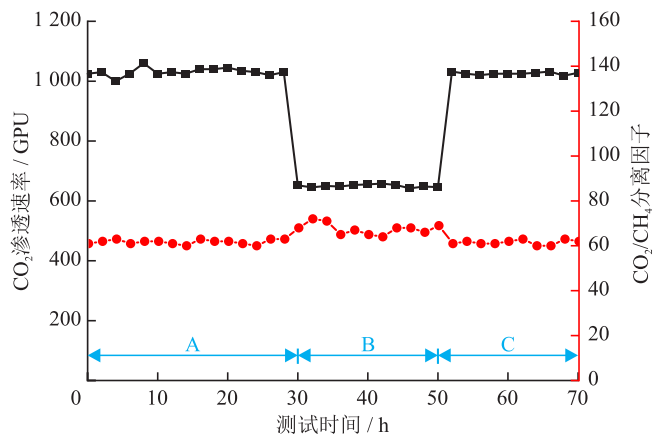


图 3 复合膜长期稳定性评价图

表 1 实验室内配置伴生气组成数据表

组分	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂
含量	41.76%	14.08%	19.90%	9.20%	6.50%	1.09%	7.47%

实验主要为了研究压力比对分离过程中的渗透气影响，压力比指高压侧与低压侧的压力比值。

图 4 展示了压力比对烃类分离的影响。从图中可以看出，随着压力比的增加，PDMS 膜处理后的轻烃分离率逐渐增加；对低碳烃类而言，因为其与

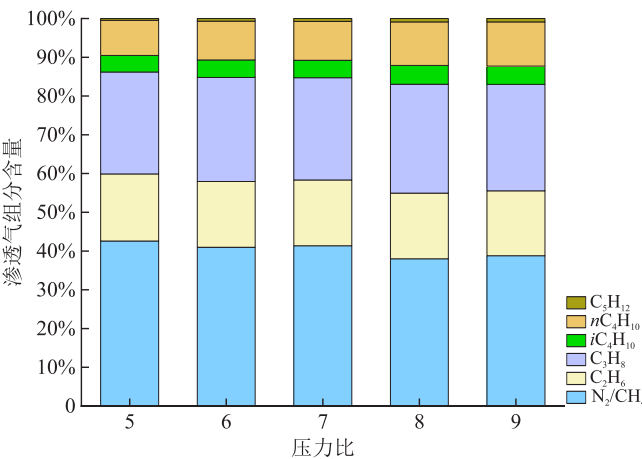
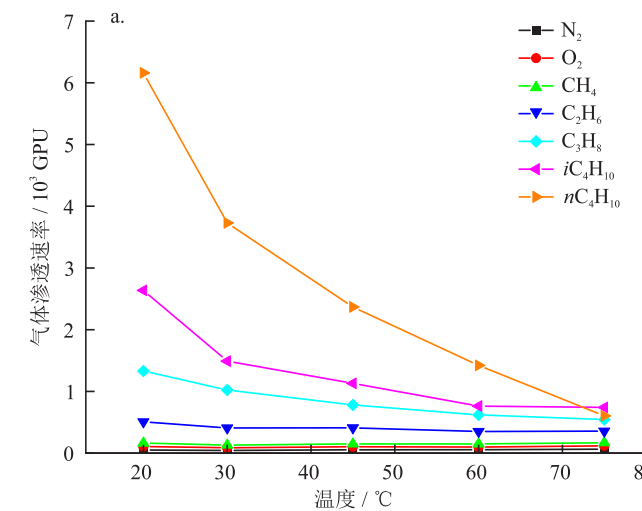


图 4 不同压力比条件下 PDMS 膜处理后的渗透气组分变化图



甲烷的分离系数较低，其渗透分离更多地受到分离系数的影响，压力比增加对其浓缩程度影响不明显；对高碳烃类，压力比则表现出了更为明显的影响，即有利于渗透侧的浓度提升，这主要是因为高碳烃类对甲烷的分离系数较高，压力比的作用更为明显。

考虑到温度会对气体在 PDMS 膜内的溶解与扩散产生较为明显的影响，即气体在膜内的渗透系数会发生改变，为了获得相关数据，从室温（20 ℃）到 75 ℃ 范围内研究了几种纯气组分的渗透分离性能（图 5）。

从图 5 中可以看出，随着温度的增加，氮气、氧气以及甲烷的渗透速率都表现出一定的增加，乙烷、丙烷、丁烷以及戊烷等气体的渗透速率出现了明显的降低，而且气体碳分子链越长，这种趋势更加明显。

为了验证 PDMS 膜应用于烃类分离过程的稳定性，采用 PDMS 膜，在 20 ℃ 以及流量比为 0.5 的情况下，开展了 500 h 稳定性试验，期间原料气和压力略有调整，按照每 24 h 取样 1 次，实验数据如表 2、3 所示。从表中数据可以看出，所采用的 PDMS 膜具有较好的长期稳定性，在测试时间内膜的分离性能整体表现稳定。

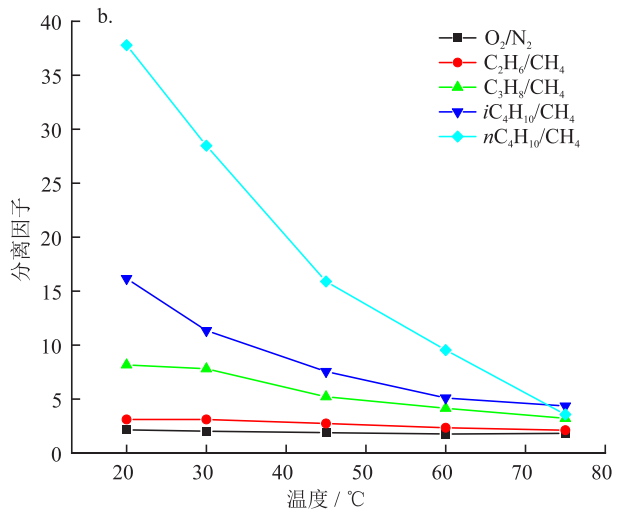


图 5 温度对 PDMS 膜纯气渗透性能和分离性能的影响图

3 分离工艺优化设计

因为现场采用的是 CO₂ 和轻烃 2 种分离膜的组合工艺，所以气质组分中加入了 CO₂ 组分，并对其他组分进行了等比例离散（表 4）。

实验参数设置：工作温度为 30 ℃，入口压力为

0.5 MPa，入口流量为 10 m³/h。伴生气进入一级压缩机，增压至目标压力后进入一级 CO₂ 膜组件。一级分离后渗透气继续二级增压后进入二级 CO₂ 膜组件；剩余气进入 VOC_s 膜组件（图 6）。利用 PRO II 软件进行建模，CO₂ 分离膜一级膜面积为 23.00 m²，二级膜面积为 5.00 m²，VOC_s 膜面积为 12.56 cm²，通

表 2 500 h 稳定性试验剩余气组分数据表

编号	压力 /MPa	剩余气流量 / (mL · s ⁻¹)	剩余气组分的体积含量					
			N ₂ /CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂
1	0.40	0.54	61.85%	13.64%	14.70%	7.21%	2.10%	0.50%
2	0.40	0.57	60.74%	13.84%	15.21%	7.36%	2.24%	0.61%
3	0.40	0.58	59.59%	14.30%	15.57%	7.64%	2.30%	0.61%
4	0.38	0.62	60.89%	13.64%	15.29%	7.35%	2.12%	0.70%
5	0.34	0.51	58.03%	13.68%	15.48%	7.75%	4.41%	0.66%
6	0.32	0.48	57.58%	13.63%	15.65%	7.62%	4.71%	0.82%
7	0.30	0.45	57.24%	13.56%	15.92%	7.81%	4.63%	0.83%

注：N₂/CH₄ 指 N₂ 和 CH₄ 的混合物，下同。

表 3 500 h 稳定性试验渗透气组分数据表

编号	压力 /MPa	剩余气流量 / (mL · s ⁻¹)	渗透气组分的体积含量					
			N ₂ /CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂
1	0.40	1.16	25.59%	15.73%	28.49%	15.75%	12.38%	2.06%
2	0.40	1.20	25.73%	15.84%	28.85%	15.59%	12.14%	1.85%
3	0.40	1.21	25.49%	15.99%	28.45%	15.86%	12.21%	2.00%
4	0.38	1.21	24.63%	15.93%	28.83%	16.03%	12.55%	2.03%
5	0.34	1.01	25.72%	15.98%	28.48%	15.64%	12.19%	1.99%
6	0.32	0.94	26.23%	16.00%	28.38%	15.68%	11.81%	1.91%
7	0.30	0.89	26.84%	15.90%	28.07%	15.79%	11.60%	1.81%

表 4 伴生气组分数据表

组分	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	iC ₅ H ₁₂	nC ₅ H ₁₂	C ₆₊	CO ₂	O ₂	N ₂
含量	19.50%	5.56%	8.83%	1.20%	2.64%	0.48%	0.34%	0	57.73%	0.62%	3.08%

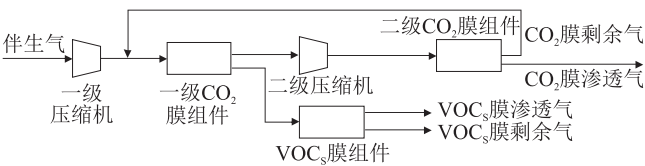


图 6 膜分离工艺模拟流程图

过实际工况模拟，CO₂ 两级分离率达到 96%，轻烃（C₂ ~ C₅）分离率 70%（表 5）。

4 膜分离装置现场应用

根据模拟的工艺流程研发了一套集合聚乙烯胺膜和聚二甲基硅氧烷膜的井口伴生气分离装置，可在注 CO₂ 井口实现伴生气的 CO₂、轻烃和甲烷的分离。该装置为国内首套膜法分离 CO₂ 井口伴生气的装置，

主要包括除油稳压装置、预处理撬、膜分离撬和增压回收撬 4 个部分（图 7），除油稳压装置可实现气液分离，防止井口间隙产生的液体混合物进入设备；预处理撬通过空冷装置控制温度脱除重烃组分；膜分离撬通过 CO₂ 分离膜组件、轻烃分离膜组件分离 CO₂、甲烷和轻烃；增压回收撬可将 CO₂ 加压后储存至储罐，分离后的轻烃可通过增压泵进行压缩储存。其中 CO₂ 采用二级分离，组件 4 根，轻烃采用一级分离，组件 2 根，处理规模为 240 m³/d。

该装置连续 600 h 平稳运行。由于实验井尚未大规模产 CO₂，CO₂ 入口浓度低于 5%，而室内试验 CO₂ 分离前浓度为 60%，因此现场的浓度远低于实验室。即使在 CO₂ 浓度很低的情况下，仍达到了很好的分离效果，CO₂ 一级（渗透气）平均分离浓度 50%，二级（渗透气）平均分离浓度可达 90%，轻

表 5 膜分离工艺模拟结果数据表

名称	温度 / °C	压力 / kPa	总流量 / (m ³ · h ⁻¹)	组分含量							
				CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	N ₂	C ₅ H ₁₂	O ₂
原料气	30	500	10.00	58.70%	20.10%	5.10%	6.70%	3.69%	3.63%	1.08%	1.01%
一级 CO ₂ 膜分离剩余气	30	500	4.07	9.93%	46.63%	10.73%	13.66%	7.52%	8.54%	2.19%	0.78%
一级 CO ₂ 膜分离渗透气	30	110	6.02	87.56%	7.94%	0.34%	0.08%	0.04%	2.28%	0.01%	1.74%
二级 CO ₂ 膜分离剩余气	30	500	3.54	56.81%	30.47%	1.55%	0.38%	0.21%	7.94%	0.06%	2.58%
二级 CO ₂ 膜分离渗透气	30	110	2.48	96.19%	1.70%	0.02%	0	0	0.68%	0	1.42%
轻烃分离膜剩余气	30	500	1.21	1.05%	68.59%	5.97%	3.17%	0.23%	20.19%	0.01%	0.78%
轻烃分离膜渗透气	30	110	2.81	4.47%	38.04%	15.44%	22.34%	12.95%	2.72%	3.80%	0.24%

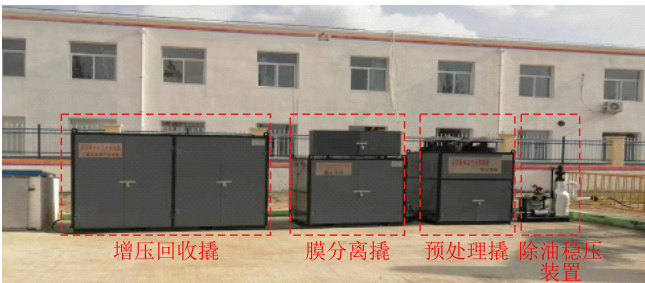


图 7 膜法分离撬装置现场照片

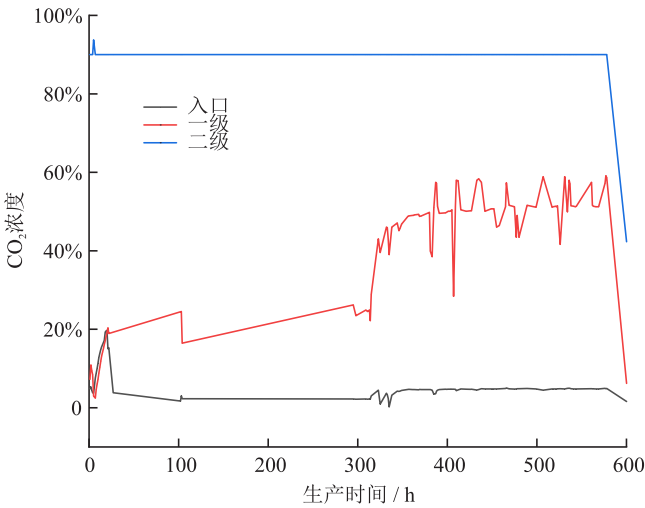


图 8 二级膜分离 CO₂ 浓度变化图

烃分离率 70% (图 8), 累计轻烃采出量 389×10^4 L、CO₂ 采出量 18.2×10^4 L (图 9)。说明膜分离效果显著超预期, 现场试验印证了室内试验和数据仿真的结果。同时, 装置除油和预处理模块无需动力属于自力式装置, 无能耗; 主要能耗为压气机 (0.5 MPa) 和远传仪表电耗, 耗电量很低。综上表明, 采用膜法分离 CO₂ 驱油井口伴生气是适用的, 成本低、能耗低、分离效果较好。

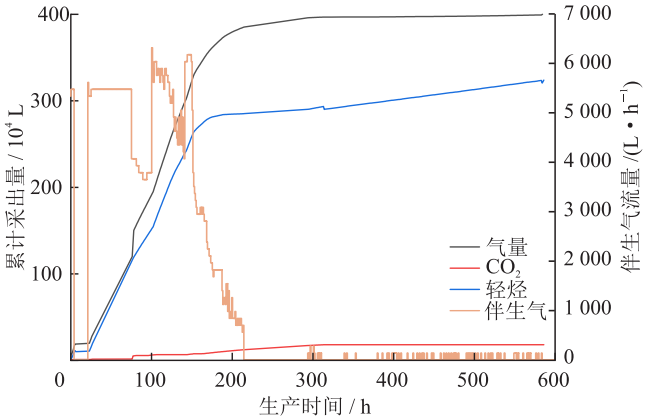


图 9 累计采出气量、CO₂ 采出量和轻烃量图

5 结论

- 1) 随着某 CCUS 示范区 CO₂ 注入量和注入时间的积累, CO₂ 将不可避免采出地面, CO₂ 对地层的轻烃具有一定的萃取作用, 会导致轻烃组分逐渐上升, 因此, 回收 CO₂ 和高附加值的轻烃势在必行。
- 2) 优选聚乙烯胺膜和聚二甲基硅氧烷膜分离油田井口伴生气中的 CO₂ 和轻烃 (C₂ ~ C₅), 适用于含水、压力低、组分和流量变化范围大的井口伴生气工况, 实现低能耗、节能环保分离。
- 3) 组合膜分离工艺可实现 CCUS 示范区伴生气中的 CO₂ 和轻烃的分离, 并且 CO₂ 两级分离率达到 90%, 轻烃分离率 70%, 分离效果远超过预期, 对于下一步的推广和应用提供了很好的技术支撑。
- 4) 采用纯膜法分离工艺对 CO₂ 驱油田伴生气中的 CO₂ 和轻烃同时进行分离, 大幅度降低能耗和成本, 提高环保性。伴随着能源行业节能环保要求的逐渐提高, 该工艺方法的应用前景必将越来越广阔。

参 考 文 献

- [1] CHAKRAVARTI S, GUPTA A, HUNEK B. Advanced technology for the capture of carbon dioxide from flue gases[C]//First National Conference on Carbon Sequestration, Washington, D.C.: National Energy Technology Laboratory, 2001: 1-11.
- [2] 碳中和下的延长石油 CCUS 项目发展之路[J]. 非常规油气, 2021, 8(2): 100.
The development path of extending oil CCUS projects under carbon neutrality[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(2): 100.
- [3] 张烈辉, 曹成, 文绍牧, 等. 碳达峰碳中和背景下发展 CO₂-EGR 的思考[J]. 天然气工业, 2023, 43(1): 13-22.
ZHANG Liehui, CAO Cheng, WEN Shaomu, et al. Thoughts on the development of CO₂-EGR under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(1): 13-22.
- [4] 李颖, 马寒松, 李海涛, 等. 超临界 CO₂ 对碳酸盐岩储层的溶蚀作用研究[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(3): 288-295.
LI Ying, MA Hansong, LI Haitao, et al. Dissolution of supercritical CO₂ on carbonate reservoirs[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(3): 288-295.
- [5] 崔传智, 闫大伟, 姚同玉, 等. CO₂ 驱前缘运移规律及气窜时机预测方法——以胜利油田 G89-1 区块为例[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(5): 741-747.
CUI Chuazhi, YAN Dawei, YAO Tongyu, et al. Prediction method of migration law and gas channeling time of CO₂ flooding front: A case study of G89-1 Block in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(5): 741-747.
- [6] 韩永嘉, 王树立, 张鹏宇, 等. CO₂ 分离捕集技术的现状与进展[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 79-82.
HAN Yongjia, WANG Shuli, ZHANG Pengyu, et al. Current status and advances in CO₂ separation and capture technology[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 79-82.
- [7] 陆诗建, 曹伟, 孙岳涛, 等. 油田 CO₂ 驱采出气中 CO₂ 循环回收技术进展[J]. 天然气化工 (C1 化学与化工), 2016, 41(6): 105-109.
LU Shijian, CAO Wei, SUN Yuetao, et al. Progress in CO₂ recycling technology for CO₂ flooding produced gas of oilfields[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2016, 41(6): 105-109.
- [8] 张书勤, 胡耀强, 张春威, 等. 油井采收气中 CO₂ 分离技术[J]. 应用化工, 2018, 47(6): 1241-1245.
ZHANG Shuqin, HU Yaoqiang, ZHANG Chunwei, et al. CO₂ separation technology from oil well gas[J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(6): 1241-1245.
- [9] 孙晓, 张春威, 胡耀强, 等. 某油田 CO₂ 驱伴生气杂质对回注条件的影响[J]. 天然气化工 (C1 化学与化工), 2021, 46(2): 65-70.
SUN Xiao, ZHANG Chunwei, HU Yaoqiang, et al. Effect of associated gas impurities of CO₂ flooding in an oilfield on reinjection conditions[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2021, 46(2): 65-70.
- [10] ZHANG Chunwei, XIAO Sun, WANG Tao, et al. Analysis of physical property fitting and variation law of associated gas containing light hydrocarbon in CO₂ flooding[C]//Proceedings Volume 12030, Third International Conference on Optoelectronic Science and Materials, Hefei: SPIE, 2021: 120301V.
- [11] 郭建军, 陈践发, 师生宝, 等. 油田气组分分析方法——多维色谱法[J]. 天然气工业, 2008, 28(4): 49-51.
GUO Jianjun, CHEN Jianfa, SHI Shengbao, et al. A new approach to analysis of associated gas component: Multidimensional gas chromatography[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(4): 49-51.
- [12] ZHANG Chunwei, SHENG Menglong, HU Yaoqiang, et al. Efficient facilitated transport polymer membrane for CO₂/CH₄ separation from oilfield associated gas[J]. Membranes, 2021, 11(2): 118.
- [13] 聂向荣, 江绍静, 余华贵. 基于套管气监测数据的 CO₂ 运移特征研究[J]. 非常规油气, 2017, 4(3): 59-62.
NIE Xiangrong, JIANG Shaojing, YU Huagui. Study on CO₂ migration features based on casing gas monitoring data[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4(3): 59-62.
- [14] 袁钟涛, 杨胜来, 张政, 等. 特低渗油藏注 CO₂ 吞吐适应性评价及规律模拟[J]. 非常规油气, 2022, 9(5): 85-92.
YUAN Zhongtao, YANG Shenglai, ZHANG Zheng, et al. Adaptability evaluation and regular simulation of CO₂ injection huff and puff in ultra-low permeability reservoirs[J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9(5): 85-92.
- [15] 刘丽, 姜宏, 杨丽芸, 等. 采用变压吸附技术与膜分离技术回收聚乙烯尾气中的轻烃[J]. 天然气化工 (C1 化学与化工), 2018, 43(1): 89-91.
LIU Li, JIANG Hong, YANG Liyun, et al. Combination of pressure swing adsorption and membrane separation technologies to recover light hydrocarbons in polyethylene tail gas[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2018, 43(1): 89-91.
- [16] 张卫风, 王秋华, 方梦祥, 等. 膜吸收法与化学吸收法分离烟气中 CO₂ 的试验比较[J]. 动力工程, 2008, 28(5): 759-763.
ZHANG Weifeng, WANG Qiuhua, FANG Mengxiang, et al. Experimental comparison of flue gas CO₂ separation with membrane absorption and chemical absorption[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(5): 759-763.
- [17] 史博会, 王靖怡, 廖清云, 等. 多法联用 CO₂ 捕集提纯工艺模

- 拟[J]. 天然气工业, 2021, 41(5): 110-120.
- SHI Bohui, WANG Jingyi, LIAO Qingyun, et al. Simulation of multi-method CO₂ capture and purification process[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(5): 110-120.
- [18] 张足斌, 王冬旭, 王海琴, 等. CO₂-EOR 采出气双产品回收工艺分析与优化[J]. 石油与天然气化工, 2016, 45(2): 39-42.
- ZHANG Zubin, WANG Dongxu, WANG Haiqin, et al. Numerical analysis and optimization of double products recovery process for CO₂-EOR associated gas[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2016, 45(2): 39-42.
- [19] 程佳, 陈斯宇, 吴刘磊, 等. 古近系低渗透油藏伴生气回注方案可行性研究[J]. 非常规油气, 2020, 7(3): 82-89.
- CHENG Jia, CHEN Siyu, WU Liulei, et al. Feasibility study on the case of re-injection of associated natural gas in Paleogene low permeability reservoirs[J]. Unconventional Oil & Gas, 2020, 7(3): 82-89.
- [20] SRIDHAR S, SMITHA B, AMINABHAVI T M. Separation of carbon dioxide from natural gas mixtures through polymeric membranes: A review[J]. Separation & Purification Reviews, 2007, 36(2): 113-174.
- [21] 王志, 张莉莉, 张颖, 等. 分离 CO₂ 的促进传递膜[J]. 膜科学与技术, 2003, 23(4): 166-171.
- WANG Zhi, ZHANG Lili, ZHANG Ying, et al. Facilitated transport membranes for CO₂ separation[J]. Membrane Science and Technology, 2003, 23(4): 166-171.
- [22] 曹义鸣, 左莉, 介兴明, 等. 有机蒸气膜分离过程[J]. 化工进展, 2005, 24(5): 464-470.
- CAO Yiming, ZUO Li, JIE Xingming, et al. Membrane separation processes for VOC recycling[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2005, 24(5): 464-470.
- [23] 陈雷, 李东泽, 刘刚, 等. 甲烷—氮气分离膜研究进展及展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 120-130.
- CHEN Lei, LI Dongze, LIU Gang, et al. Research progress and prospect of CH₄/N₂ separation membranes[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(5): 120-130.
- [24] 王保国, 吕宏凌, 杨毅. 膜分离技术在石油化工领域的应用进展[J]. 石油化工, 2006, 35(8): 705-710.
- WANG Baoguo, LYU Hongling, YANG Yi. Application of membrane separation technology in petrochemical industry[J]. Petrochemical Technology, 2006, 35(8): 705-710.
- [25] 时钧, 袁权, 高从堦. 膜技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 494-495.
- SHI Jun, YUAN Quan, GAO Congjie. Membrane technical manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 494-495.
- [26] 陈浩, 瞿如敏, 王霞, 等. 膜法分离燃煤烟气中 CO₂ 的研究进展[J]. 膜科学与技术, 2014, 34(3): 135-139.
- CHEN Hao, QU Rumin, WANG Xia, et al. Research progress of CO₂ separation from flue gas by membrane[J]. Membrane Science and Technology, 2014, 34(3): 135-139.
- [27] 张春威, 杨博, 李鹤, 等. 聚酰亚胺中空纤维膜对油田伴生气中二氧化碳分离性能的研究[J]. 膜科学与技术, 2018, 38(4): 93-98.
- ZHANG Chunwei, YANG Bo, LI He, et al. Performance of polyimide hollow fiber membrane for CO₂ recycling from oil field associated gas[J]. Membrane Science and Technology, 2018, 38(4): 93-98.

(修改回稿日期 2024-02-02 编辑 陈古明)



本文互动