

海上平台“膜分离 + 酸气回注”工艺技术研究

华东阳¹ 张晓敏¹ 马梦桐²

1. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452;
2. 中国石化天然气分公司华北天然气销售中心, 天津 300457

摘要: 针对海上平台天然气脱硫脱碳及废气处理问题, 提出一种“膜分离 + 酸气回注”工艺体系。分析了膜分离技术与酸气回注技术在石油化工领域应用情况, 提出采用膜分离技术对海上平台采出气进行脱硫脱碳处理, 再采用酸气回注技术将脱除的酸气回注至地层封存。结合某海上平台生产情况, 设计了“二级膜分离 + 四级压缩”酸气回注工艺, 从工艺设备成撬体积、系统生产能耗、工艺副产物处理等方面与 LO-CAT 工艺做对比。对比结果表明: “二级膜分离 + 四级压缩”酸气回注工艺设备成撬尺寸更小 (11 m × 8 m × 7 m), 系统生产能耗更低 (269.9 kW), 兼具无副产物生成、脱硫脱碳等优点。结论认为: 膜材料多样性、分离与压缩级数可调节性, 使“膜分离 + 酸气回注”工艺体系对不同油气田开发方案均有良好适用性, 在海上平台应用具有良好经济与环保前景, 国内相关领域研究有待进一步推进。

关键词: 海上平台; 天然气脱硫; 天然气脱碳; 膜分离; 酸气回注

DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2022.05.004

Study on “membrane separation + acid gas reinjection” technology on offshore platform

HUA Dongyang¹, ZHANG Xiaomin¹, MA Mengtong²

1. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin, 300452, China;
2. North China Natural Gas Sales Center, SINOPEC Natural Gas Branch, Tianjin, 300457, China

Abstract: In order to address the issues of gas desulfurization and CO₂ removal control and waste gas treatment in offshore platforms, a process system of “membrane separation + acid gas reinjection” is proposed. Firstly, the application of membrane separation technology and acid gas reinjection technology in petrochemical industry is analyzed. The paper proposed that the membrane separation technology be used to desulphurize and remove CO₂ from the gas produced on offshore platform, and then the acid gas reinjection technology be used to reinject the acid tail gas back into the formation for storage. Secondly, the “two-stage membrane separation + four-stage compression” process is designed and compared with LO-CAT process from the aspects of process equipment skid footprint, process system production energy consumption, process by-product treatment and so on. The results show that “two-stage membrane separation + four-stage compression” process equipment skid-size is smaller (11 m × 8 m × 7 m), and the

收稿日期: 2022-03-24

作者简介: 华东阳 (1996-), 男, 湖北襄阳人, 助理工程师, 硕士, 主要从事油气储运工艺设计与研究工作。E-mail: huady@cooec.com.cn

system production energy consumption is lower (269.9 kW), with simultaneous desulfurization and CO₂ removal and emits no by-product. It is concluded that with the diversified membrane material and the adjustable separation and compression stages, the “membrane separation + acid gas reinjection” technology system has good applicability to various oil and gas field development plans, and enjoys promising economic and environmental protection prospects on offshore platform application. It is recommended that this related research needs to be further promoted in China.

Keywords: Offshore platform; Natural gas desulfurization; Natural gas CO₂ removal; Membrane separation; Acid gas reinjection

0 前言

海上油气田开发成本相对较高,开发商会优先选择气质优良、离陆地较近的区块开采,并将采出气深度脱水后输至陆地净化^[1];对处理过程产生的废气及气质较差的油田伴生气会放空或燃烧,环保与经济效益均不高^[2]。

随着中国海上油气勘探开发“四个跨越”不断推进,海上高硫、高 CO₂ 油气田开发项目逐渐增多^[3-4];随着部分海上油气田开发进入中后期,采出气中酸性组分(H₂S 与 CO₂)含量上升^[5],上述原因导致在海上平台完成脱硫脱碳的需求日益增多。随着相关环保法规的出台及国家“双碳”政策不断推进^[6-7],在保障油气开采效益的同时减少 CO₂ 排放并无害化处理 H₂S 成为海上油气田开发面临的新挑战。目前,国内尚无成体系的海上平台天然气脱硫脱碳技术研究成果,仅有少数平台搭载国外引进的脱硫设备。海上平台天然气脱硫脱碳工艺选择与 H₂S、CO₂ 处理成为亟待解决问题。

针对上述问题,本文提出一种“膜分离+酸气回注”工艺,即采用膜分离技术分离采出气中的 H₂S 与 CO₂,再采用酸气回注技术将 H₂S 与 CO₂ 混合气体回注至地层封存。结合某平台生产方案,采用 HYSYS 软件建立“二级膜分离+四级压缩”酸气回注工艺仿真模型,并讨论工艺经济性与研究难点。本文研究为海上平台脱硫脱碳及废气处理提供新思路。

1 膜分离与酸气回注技术简介

1.1 膜分离技术

膜分离技术是以分离膜为核心,基于膜材料选择通透性,实现混合物中不同组分分离,具有选择性强、操作简单、适用范围广、能耗低、无污染等优点^[8-9]。该技术基本原理为:在膜材料两侧压差作用下,气体分子将产生穿过膜材料的趋势;由于不同种类气体分子理化性质不同,穿过膜材料的速率不同,进而实现不同组分分离。目前,膜分离技术已在天然气脱水、脱酸、油气回收等领域得到应用。美国 Separex 公司开发的醋酸纤维素螺旋

卷式膜组件能够脱除天然气中 97% 水分,已成功应用于海上平台天然气脱水^[10]。大连欧科膜技术有限公司提出一种膜分离法天然气脱 CO₂ 工艺,能够将天然气中 CO₂ 摩尔含量由 15% ~ 60% 降至 10% 以下,已在乐东 15-1 平台得到应用^[11]。王远江等人^[12]介绍了国内某气田膜分离脱碳试验装置的应用情况,该装置最大处理量 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,可将 CO₂ 含量由 3% ~ 80% 降至 3% 以下。中国石化天津分公司设计了系统规模为 40 000 m³/h 的膜法 H₂ 回收装置,对渣油加氢排放气中的 H₂ 进行回收^[13]。

1.2 酸气回注技术

酸气回注技术是将天然气净化过程中产生的酸性气体(H₂S、CO₂等)压缩到足够压力后通过管道注入至合适地层封存^[14-15]。该技术能够代替传统硫磺回收工艺,同时处理 H₂S 与 CO₂,实现酸性气体零排放。目前,全球有近 100 个酸气回注工程,主要集中在加拿大与美国。酸气回注技术在国内研究与应用相对较少,关键技术仅由西安石油大学王寿喜教授团队等少数机构掌握,并仅在西北油田等少数单位应用^[16]。随着中国“双碳”战略的不断推进,国内油气行业碳捕集/碳封存(Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS/Carbon Capture Storage, CCS)项目商业化程度逐渐增加^[17],将油气田开发过程中产生的 CO₂ 回注封存在国内陆地油田已有较充足的应用经验与技术储备^[18-19]。中国海洋石油集团有限公司于 2021 年 8 月在南海恩平 15-1 油田开展首个海上 CO₂ 回注示范工程,并在 2022 年 3 月启动“十四五”重大科研项目 CCUS 专项。酸气回注与 CCS 相似性很高,国内酸气回注技术在研究与应用过程中可借鉴 CCS 成熟经验。在国内加大油气资源勘探开发力度与“双碳”战略的大背景下,酸气回注技术作为一种经济环保的废气处理办法,值得进一步研究与推广。

2 “膜分离+酸气回注”工艺

本文提出将膜分离技术与酸气回注技术相结合,即采用膜分离技术脱除采出气中 H₂S 与部分 CO₂,再采用

酸气回注技术将高浓度 H_2S 与 CO_2 的混合物增压回注至合适的地层中封存。工艺设计时,根据采出气组分与净化气气质指标选择合适的膜材料与膜分离级数;根据回注的地层压力设置合适的回注压力与压缩级数。膜分离技术与酸气回注技术在国内外石油化工领域均有成功应用先例,将两种技术应用于海上平台理论上可行。本节结合某平台生产情况设计了“二级膜分离+四级压缩”酸气回注工艺,并从工艺设备成撬体积、系统生产功耗等方面将之与 LO-CAT 工艺做对比。

2.1 工艺设计与仿真模拟

某海上平台日产气 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$, 采出气中 CH_4 、 H_2S 、 CO_2 、 H_2O 的摩尔分率分别为 89.6%、2.0%、3.6%、3.2%, 采出气从井口流出时压力为 750 kPa, 温度为 40°C ; 要求净化气中 H_2S 含量小于 18.07 mg/m^3 , CO_2 摩尔分率小于 3%。不同流股组分与流量见表 1, 本文设计的“二级膜分离+四级压缩”酸气回注工艺流程

见图 1。采用 HYSYS 软件建立工艺仿真模型, 其中膜分离装置采用了 membrane 扩展单元^[20-21], 膜材料物性参数参考文献[22]。

表 1 不同流股组分与流量表

Tab. 1 Composition and flow rate of different flow strands

流股	摩尔分率				质量流量 / ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)			
	CH_4	H_2S	CO_2	H_2O	H_2S	CO_2	CH_4	
采出气	89.6%	2.0%	3.6%	3.20%	180.60	421.00	3 808.3	
一级渗余气	95.4%	0	2.3%	0.10%	0.02	241.40	3 672.6	
一级渗透气	47.4%	29.7%	22.9%	0.01%	180.50	179.60	135.6	
二级渗余气	99.9%	0	0	0.01%	0	0.02	111.8	
二级渗透气 (回注酸气)	13.6%	48.8%	37.6%	0	180.50	179.60	23.9	
净化气	95.6%	0	2.2%	0.10%	0.02	241.40	3 784.4	

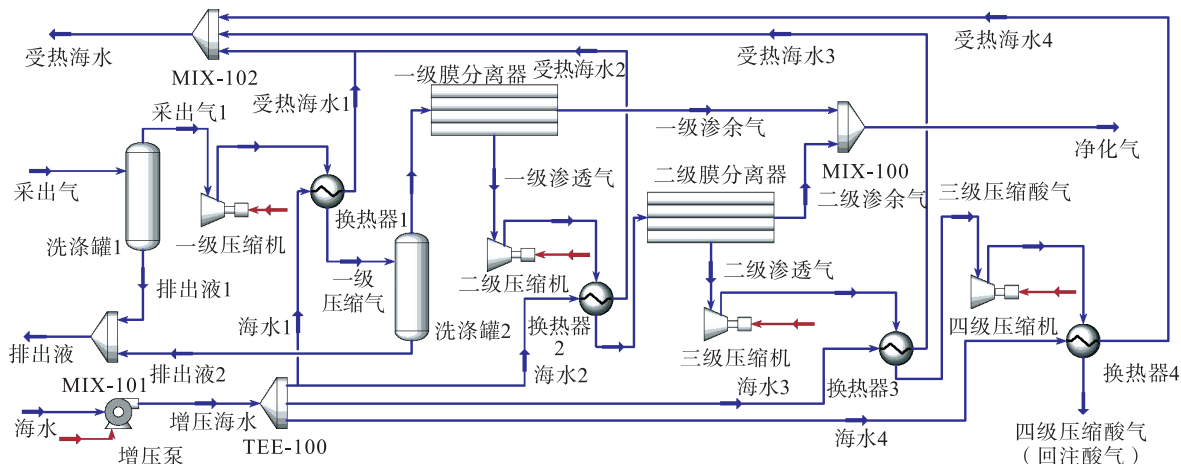


图 1 “二级膜分离+四级压缩”酸气回注工艺流程图

Fig. 1 Process diagram of “two-stage membrane separation + four-stage compression” acid gas reinjection

2.1.1 酸气预处理

采出气从井口流出时含游离水, 为避免下游设备腐蚀及膜分离器被游离水堵塞, 需脱除游离水。

2.1.2 一级增压、降温与脱水

采出气增压、降温至 1 626 kPa、 40°C 后有游离水析出, 再次脱水后输送至一级膜分离器。膜分离过程需使气体处于较低温度, 避免膜材料因高温老化。

2.1.3 一级膜分离

设置分离膜总面积为 7.7 m^2 , 分离膜两侧压差为 316 kPa; 膜分离过程中, 穿过膜材料到达低压侧的气体称为渗透气, 未穿过膜材料的气体称为渗余气。一级渗透气中 CH_4 、 H_2S 、 CO_2 摩尔分率分别为 47.4%、29.7%、22.9%; 一级渗余气中 H_2S 含量 (7.65 mg/m^3) 与 CO_2 摩尔分率 (2.3%) 均达到气质指标, 但 CH_4 回收率 (一级渗余气 CH_4 质量流量与采出气 CH_4 质量流量比值) 为

96.4%, 即膜分离过程中损失大量 CH_4 ; 为减少 CH_4 损失, 需对一级渗余气进行二次膜分离。

2.1.4 二级增压与降温

将一级渗透气增压、降温至 3 010 kPa、 40°C 后进入二级膜分离器。

2.1.5 二级膜分离

设置分离膜总面积 1.4 m^2 , 分离膜两侧压差 400 kPa。将二级渗余气与一级渗余气混合后, 净化气中不含水, H_2S 含量 7.09 mg/m^3 , CO_2 摩尔分率 2.2%, 外输条件下无液相析出; CH_4 回收率为 99.4%。考虑到净化气中 CH_4 回收率已处于较高水平, 进一步提高 CH_4 回收率能耗高且经济性差, 故直接将二级渗透气增压回注。

2.1.6 三级增压与降温

将二级渗透气增压、降温至 4 050 kPa、 40°C 。

2.1.7 四级增压与降温

将三级压缩酸气增压、降温后出撬。结合平台生产方案与参考文献[14]与[16],设计酸气出撬压力为11 000 kPa,温度为96 ℃。

2.1.8 海水冷却

考虑到海上平台上获取海水资源较易,采用水冷方式为压缩后气体降温。入口海水温度22 ℃,整套工艺海水总循环量为17 m³/h。

2.1.9 关键设备参数

完成工艺设计与仿真计算后,计算关键设备参数,见表2。

表2 “二级膜分离+四级压缩”酸气回注工艺设备关键参数表
Tab.2 Key parameters of “two-stage membrane separation + four-stage compression” acid gas reinjection proccess equipment process equipment

设备	关键参数
洗涤罐1	罐高3.8 m,内径1.1 m
洗涤罐2	罐高5.5 m,内径1.6 m
一级压缩机	功率235.9 kW
二级压缩机	功率15.9 kW
三级压缩机	功率4.5 kW
四级压缩机	功率10.1 kW
换热器1	热负荷95.9×10 ⁴ kJ/h
换热器2	热负荷6.6×10 ⁴ kJ/h
换热器3	热负荷2.5×10 ⁴ kJ/h
换热器4	热负荷4.1×10 ⁴ kJ/h
一级膜分离器	膜总面积7.7 m ³
二级膜分离器	膜总面积1.4 m ³
增压泵	功率3.5 kW

2.2 酸气相态变化分析

一级膜分离与二级膜分离后,被压缩气体(一级渗透气、二级渗透气)组分发生变化。为保证膜分离与酸气增压过程中不会有液相析出堵塞与腐蚀设备,需对被压缩气体做相态分析。膜分离与增压过程中气体压力与温度变化情况见图2。采出气经过一级膜分离后,一级渗透气中CO₂与H₂S含量升高,一级渗透气临界温度与压力分别为18.1 ℃、10 340 kPa;二级膜分离前,一级渗透气温度始终保持在临界温度之上,不会有液相析出;二级膜分离后,二级渗透气中CO₂与H₂S含量进一步上升,临界温度与压力分别为53.3 ℃、9 346 kPa;三级压缩与四级压缩过程中会出现酸气温度低于53.3 ℃情况,但该情况下酸气压力始终低于9 346 kPa,不会有液相析出。整个膜分离与酸气增压过程中无液相析出,工艺系统无设备堵塞与酸性液体腐蚀风险。

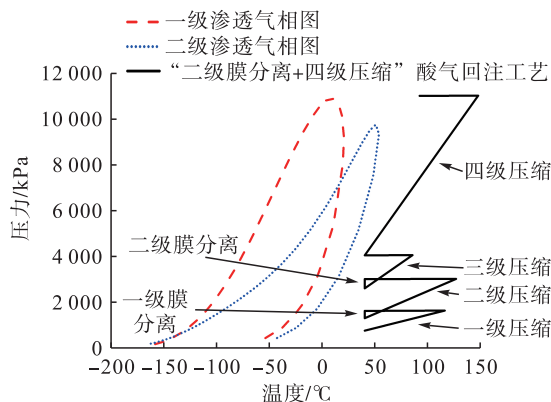


图2 工艺过程与相态分析图

Fig.2 Process and phase analysis diagram

2.3 经济技术分析

考虑到海上平台空间、重量限制、工艺设备运维保养等问题,海上平台搭载的脱硫脱碳工艺应具备如下优点:成撬体积小,以节省平台空间成本;生产能耗低,以降低生产成本;脱硫脱碳副产物易处理。2.1节中膜分离+酸气回注工艺设计基础来自某海上平台,该平台已搭载有LO-CAT工艺用于脱硫。本节分别从撬块体积、生产能耗、副产物处理等方面,将本文设计的“二级膜分离+四级增压”酸气回注工艺与已有的LO-CAT工艺作对比分析。

结合表2设备关键参数,对“二级膜分离+四级压缩”酸气回注工艺做成撬设计,撬块尺寸为11 m×8 m×7 m;该海上平台已搭载的LO-CAT工艺设备关键参数见表3,LO-CAT工艺属于湿法脱硫,除设置有H₂S吸收塔与脱硫剂再生塔外,还包含天然气预处理设备(洗涤罐)、增压设备(泵、压缩机)、热交换设备、药剂注入设备(催化剂、pH调节剂、表面活性剂、螯合物、杀菌剂、消泡剂储罐及配套药剂泵)、硫磺回收设备(带式过滤机),撬块实际尺寸为15 m×16 m×11 m。

表3 LO-CAT工艺设备关键参数表

Tab.3 Key parameters of LO-CAT process equipment

设备	数量	关键参数
吸收塔	1座	塔高7.6 m,内径2.5 m
氧化塔	1座	塔高9.5 m,内径5.5 m
洗涤罐	2个	罐高3.9 m,内径1.3 m
闪蒸罐	1个	罐高4.9 m,内径1.3 m
循环泵	2台	总功率122.2 kW
鼓风机	1台	功率38.4 kW
压缩机	1台	功率284.5 kW
换热器	2个	总热负荷104.8×10 ⁴ kJ/h
药剂罐	6个	(罐高2.5 m;内径1.5 m)×5 (罐高0.08 m;内径0.4 m)×1
药剂泵	6台	总功率9.5 kW
带式过滤机	1台	功率4.5 kW

“二级膜分离 + 四级压缩”酸气回注工艺生产能耗主要来自气体压缩过程中压缩机做功与水泵做功,总能耗为 269.9 kW,无脱硫副产物生成,能够同时脱除 H_2S 与 CO_2 ,净化气外输前无需再次脱水,但需定期更换膜材料;LO-CAT 工艺生产能耗来自压缩机、鼓风机、泵等设备做功,总能耗为 459.1 kW,无法脱除天然气中 CO_2 ,脱硫副产物为硫磺。硫磺虽能产生一定附加值,但硫磺在平台储存及向陆地运输过程中又将产生相应支出、损耗和环境污染。此外,LO-CAT 工艺需不断注入各类化学药剂,药剂采办、运输、储存还需额外开支;脱硫后净化气含饱和水,在外输前还要进一步脱水以避免外输过程水合物生成与管道腐蚀,又增加了相关设备、人力和能耗支出。

本文设计的“二级膜分离 + 四级压缩”酸气回注工艺能够同时脱硫脱碳,在成橇体积、能耗功率等方面均优于同等脱硫效果下的 LO-CAT 工艺,“膜分离 + 酸气回注”工艺与 LO-CAT 工艺对比见表 4,“膜分离 + 酸气回注”工艺体系在海上平台脱硫脱碳领域应用具有良好经济与环保效益。

表 4 “膜分离 + 酸气回注”工艺与 LO-CAT 工艺对比表

Tab. 4 Comparison between “membrane separation + acid gas reinjection” process and LO-CAT process

工艺名称	橇块尺寸 /m	能耗功率 /kW	副产物	能否脱碳	其他支出项目
膜分离 + 酸气回注	11 × 8 × 7	269.9	无	能	膜材料更换
LO-CAT	15 × 16 × 11	459.1	硫磺	否	药剂补充、净化气脱水

2.4 工艺技术评价

膜分离技术核心是膜材料,随着各类性能优良的膜材料不断被研发,可供选择的膜材料逐渐增多;膜分离材料选择多样性使膜分离技术在石油化工领域的应用更具灵活性;在选择合适膜材料与膜分离级数情况下,膜分离技术能够应用在天然气处理的各个阶段(脱硫脱碳、不同烃组分分离等)。酸气回注技术不仅可用于酸气封存,在条件允许下可结合膜分离技术将回注酸气中 CO_2 提纯并用于驱油、驱气、压裂等方面。通过调整膜分离材料、膜分离级数与压缩级数,膜分离 + 酸气回注工艺对于不同采出气组分、不同回注地层压力均有良好适用性,该工艺对于降低生产成本、提高采收率、减少污染排放、助力“双碳”目标达成,实现“负碳”生产具有广阔前景。

目前,膜分离技术与酸气回注技术在国内天然气化工领域研究与应用相对较少,均未形成系统性、体系化研究成果,也未能得到大规模推广,更未见将两种技术组合应用相关报道,两种技术组合后应用在海上平台仍

存在许多难点,具体分析如下。

1) 气体膜分离过程中,不同种类气体分子均会产生通过膜材料的趋势,但通过速率不同,因此单次膜分离很难确保烃回收率与酸性组分脱除率同时达到较高水平(2.1 节)。工艺设计时需要综合考虑膜材料选择、膜分离级数、膜分离压差、压缩级数、烃回收率、酸性组分脱除率、橇块体积与重量、生产能耗等因素,属于系统优化问题。

2) 当回注酸气中 H_2S 含量较高时,要考虑剧毒气体 H_2S 泄漏风险及酸气含水时对设备的腐蚀隐患,增压过程中要时刻关注酸气相态变化,避免游离水析出;更要保证整个生产系统(管道、设备、井筒、储层)密封性,避免酸气泄漏对地下与地上环境造成污染。

3) 选择回注地层时,需对封存地层位置、密封性、酸气—岩石反应性、孔隙度、地层压力、地层周边资源分布等有非常详细的考察,制定相应的回注工艺(回注压力、回注总量、回注期限等);若要将酸气用于压裂或驱替,更要注意酸气对储层、水层、井筒完整性的影响。

4) 回注过程中,酸气在井筒中压力与温度将进一步提高,当酸气压力与温度同时高于临界压力与临界温度时,酸气将进入超临界状态;该状态下酸气的密度、黏度、井筒流动特性、导热特性、地层渗透特性等将显著变化,需要建立可靠的生产监测系统与准确的酸气相态分析模型。

3 结论与建议

1) 本文结合某海上平台天然气脱硫脱碳实际需求,提出“膜分离 + 酸气回注”工艺体系,该工艺体系能够满足脱硫脱碳需求的同时对 H_2S 与 CO_2 无害化处理;建立的“二级膜分离 + 四级压缩”酸气回注工艺相较于 LO-CAT 工艺设备成橇体积更小,生产能耗更低,无任何副产物生成,具有良好的经济与环保前景。

2) 膜材料选择多样性、膜分离级数与压缩级数可调整性,使“膜分离 + 酸气回注”工艺体系对各类海上油气田开发方案均有良好适用性,包括但不限于如下情况:“低、边、小、碎”油气田(群)开发,硫磺回收不经济;提纯 CO_2 用于压裂、驱油、驱气等以提高采收率;油田伴生气处理;油田火驱开发尾气处理等。

3) 膜分离技术与酸气回注技术在国外的研究与应用已较为成熟,但在国内均无成体系研究成果与应用经验,更未能将两种技术组合应用于海上油气开发;“膜分离 + 酸气回注”工艺体系前景良好,但由于涉及地层勘探、钻完井、油气集输处理、气体相态分析、管道流动保障、平台结构力学等诸多领域,该工艺体系在海上平台应用仍有多项技术难点有待攻坚,应在膜分离器与膜材料开发、酸气相

态分析与井筒流动性分析等方面加大研究。

参考文献:

- [1] 刘 渊. 某海上气田陆地终端天然气处理工艺的选择[J]. 石油规划设计, 2018, 29(5): 28-31.
LIU Yuan. Selection of natural gas treatment process for onshore terminal of an offshore gas field [J]. Petroleum Planning and Engineering, 2018, 29(5): 28-31.
- [2] 胡徐彦. 海上平台火炬放空天然气回收利用研究[J]. 广州化工, 2015, 43(4): 174-175.
HU Xuyan. Study on recycling of flaring gas from offshore platforms [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 43(4): 174-175.
- [3] 郭 伟, 李雁飞, 刘守一, 等. 海上油田伴生气脱硫工艺优化改造[J]. 石油石化节能, 2017, 7(4): 27-30.
GUO Wei, LI Yanfei, LIU Shouyi, et al. Optimization and modification of desulfurization process for offshore oilfield associated gas [J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2017, 7(4): 27-30.
- [4] 张 斌. 流花油田伴生气脱硫回收利用研究[J]. 天津科技, 2015, 42(3): 51-53.
ZHANG Bin. Desulfurization and recycle of associated gas in LiuHua oilfield [J]. Tianjin Science & Technology, 2015, 42(3): 51-53.
- [5] 刘少鹏, 吕法阳, 吕 强, 等. 海上某油田硫化氢成因及治理研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2021, 34(5): 85-90.
LIU Shaopeng, LYU Fayang, LYU Qiang, et al. Study on cause and treatment of hydrogen sulfide in an offshore oilfield [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2021, 34(5): 85-90.
- [6] 林名桢, 代晓东, 李洪言, 等. “双碳”背景下石油化工城市的发展路径——以山东省东营市为例[J]. 天然气与石油, 2022, 40(1): 115-120.
LIN Mingzhen, DAI Xiaodong, LI Hongyan, et al. The development path of petrochemical cities under the background of “peak carbon dioxide emissions” and “carbon neutrality” —taking Dongying city, Shandong province as an example [J]. Natural Gas and Oil, 2022, 40(1): 115-120.
- [7] 赵国洪, 曾 卓. 中国天然气供需形势分析与政策建议[J]. 天然气技术与经济, 2021, 15(2): 1-6.
ZHAO Guohong, ZENG Zhuo. China's natural-gas supply-demand trend and suggestions on development policies [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2021, 15(2): 1-6.
- [8] 刘建勋. 膜法天然气脱硫技术研究进展[J]. 当代化工, 2016, 45(6): 1301-1303.
LIU Jianxun. Research progress of membrane technology for natural gas desulfurization [J]. Contemporary Chemical Industry, 2016, 45(6): 1301-1303.
- [9] 朱梦影, 程 涛, 唐宁依, 等. 海上天然气除重烃方案比选[J]. 中国海洋平台, 2017, 32(5): 68-74.
ZHU Mengying, CHENG Tao, TANG Ningyi, et al. Scheme comparison and selection of heavier hydrocarbon removing for offshore gas [J]. China Offshore Platform, 2017, 32(5): 68-74.
- [10] 魏 星, 黄维菊, 陈文梅. 国内外膜分离法天然气脱水研究现状[J]. 过滤与分离, 2007, 17(4): 37-41.
WEI Xing, HUANG Weiju, CHEN Wenmei. Current researches of natural gas dehydration using membrane separation [J]. Journal of Filtration & Separation, 2007, 17(4): 37-41.
- [11] 孟兆伟, 刘 宇, 任少科. CO₂分离膜在海上平台的使用[J]. 低温与特气, 2015, 33(5): 41-44.
MENG Zhaowei, LIU Yu, REN Shaoke. The use of CO₂ separation membrane in the offshore platform [J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2015, 33(5): 41-44.
- [12] 王远江, 孟凡丽, 李海荣, 等. 某气田膜分离脱碳试验装置的研制[J]. 天然气与石油, 2013, 31(6): 45-48.
WANG Yuanjiang, MENG Fanli, LI Hairong, et al. Development of membrane separation decarbonization test unit in a gas field [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(6): 45-48.
- [13] 陈伟军. 膜分离技术在渣油加氢装置中的应用[J]. 石油化工, 2021, 50(10): 1090-1094.
CHEN Weijun. Application of hydrogen recovery by membrane separation technology in residual oil hydrogenation [J]. Petrochemical Technology, 2021, 50(10): 1090-1094.
- [14] 王寿喜, 汤 林, CARROLL J. 酸气回注技术发展现状及其在中国的应用前景[J]. 天然气工业, 2013, 33(1): 105-111.
WANG Shouxi, TANG Lin, CARROLL J. A state of the art of acid gas injection and its application prospects in China [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(1): 105-111.
- [15] 王治红, 杜竹影, 张 迪, 等. 油气田酸气回注技术进展及其应用前景[J]. 现代化工, 2019, 39(增刊1): 62-68.
WANG Zhihong, DU Zhuying, ZHANG Di, et al. Progress on acid gas reinjection in oil/gas fields and application prospects [J]. Modern Chemical Industry, 2019, 39(Suppl 1): 62-68.
- [16] 姚丽蓉, 徐 亮, 李 琦, 等. 塔河油田酸气回注与 LO-CAT 硫磺回收经济性对比[J]. 环境工程, 2019, 37(2): 40-44.
YAO Lirong, XU Liang, LI Qi, et al. Economic comparison between acid gas reinjection and LO-CAT sulfur recovery in Tahe oilfield [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(2): 40-44.

(下转第37页)

- LIU Xinye. Prediction and control of severe slug flow in subsea mixed transportation pipeline [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2011.
- [11] 张伟宁. 一种控制长距离外输海管段塞流的方法[J]. 石油和化工设备, 2020, 23(4): 100-103.
- ZHANG Weining. A method for controlling slug flow in long-distance offshore pipeline [J]. Petro & Chemical Equipment, 2020, 23(4): 100-103.
- [12] 李丙贤, 李勇, 龚俊, 等. 段塞流捕集技术在海上平台应用探索[J]. 中国设备工程, 2021(增刊1): 73-74.
- LI Bingxian, LI Yong, GONG Jun, et al. Application of slug flow capture technology in offshore platform [J]. China Plant Engineering, 2021(Suppl 1): 73-74.
- [13] BøE A. Severe slugging characteristics, part 1: Flow regime for severe slugging; part 2: Point model simulation study [C]//presented at Selected Topics in Two-Phase Flow, Trondheim, Norway, March 1981.
- [14] 马华伟, 何利民, 罗小明, 等. 下倾—立管系统中严重段塞流现象的周期特性[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(5): 787-791.
- MA Huawei, He Limin, LUO Xiaoming, et al. The period characters of severe slugging in declination-riser pipe system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(5): 787-791.
- [15] 董兴, 王殿武, 万伯宏. 海上油田段塞流影响分析及控制措施[J]. 内江科技, 2016, 37(1): 50-51.
- DONG Xing, WANG Dianwu, WAN Bohong. Influence analysis and control measures of slug flow in offshore oilfield [J]. Neijiang Science & Technology, 2016, 37(1): 50-51.
- [16] 马亮. 海洋集输管道严重段塞流控制管理[J]. 化工管理, 2016(9): 126.
- MA Liang. Control and management of severe slug flow in offshore gathering and transportation pipeline [J]. Chemical Enterprise Management, 2016(9): 126.
- [17] 赵晓东, 李文博, 于晓洋. 海底油气混输管道严重段塞流的控制[J]. 内蒙古石油化工, 2016, 42(9): 48-49.
- ZHAO Xiaodong, LI Wenbo, YU Xiaoyang. Control of severe slug flow in submarine oil-gas mixed transportation pipeline [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2016, 42(9): 48-49.
- [18] 陈丽, 丁杰, 周鹏, 等. 海底油气混输管道严重段塞流的问题分析[J]. 油气储运, 2009, 28(5): 10-14.
- CHEN Li, DING Jie, ZHOU Peng, et al. Analysis of severe slug flow in subsea oil-gas multiphase pipelines [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28(5): 10-14.
- [19] 周宏亮, 郭烈锦, 李清平, 等. 用于节流控制的立管严重段塞流模型研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(6): 1109-1113.
- ZHOU Hongliang, GUO Liejin, LI Qingping, et al. An ODE model for severe slugging control in pipeline-riser systems [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(6): 1109-1113.
- [20] 吴肇. 混输海管严重段塞流的控制[J]. 山东工业技术, 2014(16): 73-74.
- WU Jiang. Control of severe slug flow in mixed transportation sea pipeline [J]. Shandong Industrial Technology, 2014(16): 73-74.

(上接第31页)

- [17] 张颖, 郭嘉宁, 李慧明. 油气领域碳捕集与封存利用技术综述[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(23): 191-192.
- ZHANG Ying, GUO Jianing, LI Huiming. A review of carbon capture and storage technologies in oil and gas field [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2021, 41(23): 191-192.
- [18] 叶航, 刘琦, 彭勃. 基于二氧化碳驱油技术的碳封存潜力评估研究进展[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(2): 107-116.
- YE Hang, LIU Qi, PENG Bo. Research progress in evaluation of carbon storage potential based on CO₂ flooding technology [J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(2): 107-116.
- [19] 田巍. 低渗油藏 CO₂ 驱产气回注可行性研究[J]. 河南科学, 2020, 38(5): 797-802.
- TIAN Wei. Feasibility Study on reinjection of produced gas from CO₂ flooding in low permeability reservoirs [J]. Henan Science, 2020, 38(5): 797-802.
- [20] 常明亮, 王勇, 李剑峰, 等. 混合制冷剂沼气带压液化流程的设计与优化[J]. 现代化工, 2020, 40(12): 199-205.
- CHANG Mingliang, WANG Yong, LI Jianfeng, et al. Design and optimization of pressurized liquefaction process of mixed refrigerant biogas [J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(12): 199-205.
- [21] AHSAN M, SWEENEY OM, HUSSAIN A. Development of user-defined extension for the simulation of membrane process in Aspen HYSYS [J]. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 2017, 35(1): 35-45.
- [22] GEORGE G, BHORIA N, ALHALLAQ S, et al. Polymer membranes for acid gas removal from natural gas [J]. Separation and Purification Technology, 2016, 158: 333-356.