

油田集输站轻烃脱硫工艺优化及应用

陈建兵^{1*}, 李 飞², 薄德臣¹, 高 明¹, 胡 璿¹, 李明一¹

(1. 中国石油化工股份有限公司大连石油化工研究院, 辽宁 大连 116041;

2. 中国石油独山子炼油厂, 新疆 克拉玛依 833600)

摘要:油田集输站采用碱洗脱硫方式脱除轻烃中的有机硫及无机硫,产生的碱渣增加了集输站安全环保风险。在对碱洗前后轻烃中单体硫进行详细分析的基础上,提出一种新型油田轻烃脱硫工艺,在满足产品轻烃质量指标要求的同时取消现有碱洗脱硫过程,优化了工艺流程。现场应用情况表明,轻烃中硫化氢和硫醇全部以塔顶不凝气的形式被汽提出去,轻烃中总硫含量由 0.035% 降低至 0.023%,产品蒸汽压保持在 69.5 kPa,满足产品轻烃质量指标要求。

关键词:集输站;轻烃;脱硫;工艺优化;汽提

中图分类号:TE624.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)S-0298-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.S.061

Optimization and application of light hydrocarbons desulfurization process for oilfield gathering station

CHEN Jian-bing^{1*}, LI Fei², BO De-chen¹, GAO Ming¹, HU Jun¹, LI Ming-yi¹

(1. Dalian Research Institute of Petroleum and Petrochemicals, Sinopec Corp., Dalian 116041, China;

2. PetroChina Dushanzi Petrochemical Company, Karamay 833600, China)

Abstract: An oilfield gathering station adopts the alkali washing desulfurization process to remove organic sulfur and inorganic sulfur from light hydrocarbons to ensure that total sulfur content in light hydrocarbons is less than 0.1%, but the output of alkali slag reaches 8 tons per day, which increases the safety and environmental risks for the station. Based on the data of individual sulfur in light hydrocarbons before and after alkali washing, a new desulfurization process is proposed for oilfield light hydrocarbons, which can meet the quality requirements of light hydrocarbon products and cancel the existing alkali washing desulfurization process. The field application shows that hydrogen sulfide and mercaptan in light hydrocarbons are all taken out by steam in the form of non-condensable gas at the top of the tower, total sulfur content in light hydrocarbons decreases from 0.035% to 0.023%, and the vapor pressure of the product remains at 69.5 kPa, which meets the requirements for the quality index of light hydrocarbons.

Key words: gathering station; light hydrocarbons; desulfurization; process optimization; stripping

油田伴生气是指油田在开采过程中,油层间伴随石油液体出现的气体,主要成分是甲烷,其余组分为乙烷、丙烷、碳氢重组分以及 N₂、H₂S、CO₂ 等气体^[1-2]。伴生气回收处理是指将乙烷、丙烷、丁烷和重组分从气流中分离出来,进一步加工为天然气、液化气和轻烃进行销售。伴生气中含有浓度不同的硫化物,主要为 H₂S 和有机硫化物[如羰基硫(COS)、硫醇、硫醚、二硫化碳、噻吩等^[3-4]]。天然气、液化气和轻烃等产品进行销售时必须严格控制产品中的 H₂S 含量和总硫含量,若伴生气未经脱硫处理而直接使用,不仅会对设备造成腐蚀,还会在燃烧时产生大量的硫氧化物(SO_x),排放到大气中形成酸雨,破坏生态环境。所以,伴生气在进行回收利用时必须

须经过脱硫净化处理,以满足产品硫含量控制指标要求^[5]。目前,从油田伴生气中回收天然气、轻烃等产品的工艺通常都是将伴生气经净化、压缩、冷凝、分馏等工艺过程来实现^[6]。

在原油价格处于低水平、油田效益下降的环境下,为了增加企业经济效益,将采出原油进行负压汽提操作,可获得部分油田轻烃作为产品外售^[7]。这部分轻烃由于含有大量的有机硫和无机硫、C₂ 组分,需要进行脱硫净化和稳定处理,来满足国家对轻烃的质量指标要求。现有的工艺流程为:负压凝液-碱洗-水洗-脱水-脱 C₂-脱 C₄-产品轻烃。这一工艺流程长,脱硫过程中会产生大量碱渣且难于处理,导致产品轻烃成本升高,经济效益变差^[8-9]。

收稿日期:2021-01-20;修回日期:2021-04-14

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05017-004)

作者简介:陈建兵(1982-),男,硕士,副研究员,主要从事节能技术研发工作,通讯联系人,chenjianbing.fshy@sinopec.com。

本文主要针对现有轻烃回收工艺中脱硫效果较差、碱渣产量高且难于处理的问题进行研究讨论并提出解决方案。

1 集输站工艺流程

以某油田集输站作为目标进行研究。集输站工艺流程如图1所示。

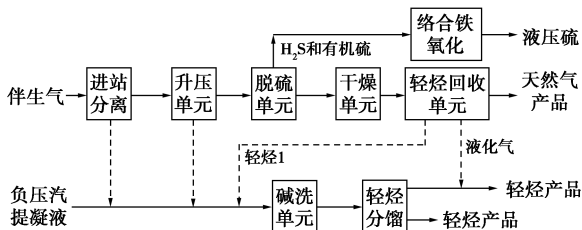


图1 某集输站50万 m^3/d 伴生气回收工艺流程图

自界区外来的原料伴生气进行三级分离后,气相进压缩机提压单元(两级压缩),升压后气体依次进入后续脱硫、干燥、低温回收、稳定等单元进行净化、分离和回收。液相经过稳定后与进站分离和提压过程产生的凝析油混合并与原油负压汽提产生的轻烃一起作为原料再次经过碱洗、稳定后(稳定塔为旧塔利用)获得产品轻烃(天然气油)。

2 集输站存在问题及原因分析

2.1 存在问题

该集输站在运行过程中生产部分油田轻烃,可作为优质原料供下游裂解装置,根据国家轻烃质量指标要求,需要控制轻烃中总硫含量小于质量分数0.1%(二类轻烃质量指标)。脱硫过程采用碱洗脱硫工艺,过程消耗碱液并生成碱渣(8 t/d),碱渣以危废形式进行处理,造成装置运行成本上升,为企业带来安全环保方面的隐患。

2.2 原因分析

从原料气中分离得到的轻烃和来自原油负压汽提单元的负压汽提凝液混合成混烃后进入碱洗单元。碱洗后的轻烃再进入轻烃分馏单元进行分离,获得液化气和轻烃产品。碱洗前后轻烃中单体硫定量分析结果如表1所示。

由表1分析结果可知,轻烃中硫化物主要为 H_2S 、噻吩和硫醇。轻烃碱洗过程仅能够脱除掉 H_2S 、甲硫醇和乙硫醇,而对于硫醚和噻吩类化合物则无法通过碱洗脱除,因此混烃中 H_2S 、甲硫醇和乙

表1 碱洗前后轻烃中单体硫定量分析结果

单体硫组分	含量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	
	碱洗前	碱洗后
硫化氢	417.6352	0
大分子硫醚噻吩	390.9026	374.2118
甲硫醇	340.5446	0
乙硫醇	175.1957	13.2080
叔丁基硫醇	0	0.7184
二甲基二硫	0	0
乙基噻吩	5.2213	5.8898
2,5-二甲基噻吩	4.4897	4.2442
己硫醇	2.7875	2.8231
C_6 硫化物	12.3038	10.7105
2,3-二甲基噻吩	0	0
3,4-二甲基噻吩	0	0
丙基噻吩	52.5443	53.1234
丁基噻吩	14.1288	15.2050
C_8 硫化物	0.7590	0.9390
甲基苯并噻吩	2.3749	2.4640
3-甲基苯并噻吩	0	0.4434
总和	1418.8874	483.9806

硫醇的存在是碱渣产生的根本原因。由于 H_2S 、甲硫醇和乙硫醇属于沸点较低的硫化物,可以通过蒸馏技术去除,从源头上避免碱液的消耗和碱渣的生成。

3 轻烃净化工艺优化技术方案

为降低碱耗、缓解环保压力,开展集输站脱硫净化工艺流程优化工作。以现有装置工艺条件为基础,在不增加大型设备的前提下,通过工艺流程调整,实现降低碱耗的目的。因此,考虑以净化天然气作为汽提气,将混烃中的 H_2S 和硫醇全部以塔顶不凝气的形式汽提出去,在脱硫单元采用脱硫剂将 H_2S 和硫醇脱除,取消碱洗单元。优化后的流程如图2所示。

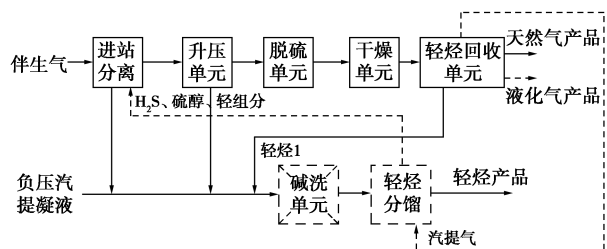


图2 集输站轻烃净化工艺流程技术方案

具体流程为负压汽提凝液与轻烃回收单元的轻烃混合后直接进入轻烃分馏单元,同时以部分净化天然气作为汽提气,将混合轻烃中含有的 H_2S 、硫醇以及轻组分以塔顶气的形式直接汽提进入进气分离罐中,与来自界区外的伴生气混合后进入后续处理单元。轻烃中硫化物随汽提气在脱硫单元利用现有复合脱硫剂脱除其中的 H_2S 和硫醇,从而保证轻烃分馏单元产品轻烃中总硫含量满足国标要求,同时实现产品轻烃蒸汽压合格(蒸汽压 <74 kPa)。

4 轻烃净化新工艺建模及参数

4.1 新工艺流程建模及计算

采用流程模拟软件对取消碱洗单元后轻烃分馏单元的新工艺流程进行建模,模拟计算结果如表 2 所示。

表 2 流程优化前后结果对比

项目	流程优化前	流程优化后
碱渣产生量/($\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)	8	0
轻烃蒸汽压/(kPa)	69.47	69.47
轻烃中 H_2S 含量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0	0
轻烃总硫含量/%	0.035	0.0245

由流程优化前后结果对比可知,通过流程优化可完全取消碱洗单元,从而不产生碱渣,轻烃分馏单元的轻烃产品蒸汽压能够满足 <74 kPa 的要求,同时轻烃产品中的 H_2S 和总硫含量能够满足轻烃产品的指标要求。

4.2 操作参数对新工艺流程的影响

影响轻烃分馏单元中稳定塔运行效果的参数主要为汽提气量、汽提气中 H_2S 含量、塔顶压力和塔顶温度,对操作参数进行分析,考察不同参数变化对轻烃脱硫效果的影响。

4.2.1 汽提气量

汽提气的作用是降低塔内气相组分分压,汽提气量越大,则组分分压越小,轻烃中总硫含量越小。但气量过大,会造成液化气组分在系统内循环,增加能耗。汽提气量由原料组成决定,以满足轻烃总硫含量指标要求为准,尽可能减少汽提气用量。通过优化计算,净化天然气量小于 $30 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 较好。

4.2.2 汽提气中 H_2S 含量控制

汽提气中 H_2S 含量受伴生气脱硫效果影响,其对轻烃汽提脱硫效果的影响见表 3。

表 3 汽提气中 H_2S 含量对轻烃总硫的影响

汽提气量/ ($\text{Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	汽提气中 H_2S 含量/($\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$)	塔底 温度/ $^{\circ}\text{C}$	轻烃中总硫 含量/%
23	112	117	0.0563
32	133	116	0.0781
45	150	116	0.0673
57	78	115	0.0549
18	11	116	0.0325
17	8	116	0.0282

从表 3 中可以看出,汽提气量对稳定塔塔底温度的影响较小,塔底温度可控制在 116°C 左右。汽提气中 H_2S 含量对产品轻烃总硫影响较大,当汽提气中 H_2S 含量超过 $50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$,产品轻烃中总硫含量超过 0.05%(国家一级轻烃质量指标要求上限)。汽提气中 H_2S 含量小于 $15 \text{ mg}/\text{Nm}^3$,产品轻烃总硫含量减少至 0.032 5%。即汽提脱硫时需要控制 H_2S 含量,以汽提气中 H_2S 含量小于 $15 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 为最佳。

4.2.3 塔顶温度

在一定的操作压力下,塔顶温度与不凝气质量和冷却水负荷相关,影响关系如表 4 所示。

表 4 塔顶操作温度对稳定塔的影响

塔顶冷凝气 相分率	塔顶 温度/ $^{\circ}\text{C}$	不凝气质量流量/ ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	冷却水流量/ ($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)
0.2	68.15	24	2.534
0.3	70.08	36	2.426
0.4	71.88	48	2.321
0.5	74.00	60	2.217
0.6	75.18	72	2.116

从表 4 中可以看出,通过调节塔顶冷却水量可以控制塔顶温度以及塔顶不凝气的流量,由于循环冷却水用量很少,不会对稳定塔造成较大的运行成本负荷,优化空间并不显著。塔底轻烃中 H_2S 含量始终保持在 $5 \text{ mg}/\text{L}$ 以下。

4.2.4 操作压力

在进料温度一定的条件下,对塔顶操作压力进行调整,结果如表 5 所示。

从表 5 可以看出,操作压力对稳定塔的影响较大,压力越高,则塔顶、塔底温度越高,塔底热负荷越大,能耗越大,但同时塔底轻烃中液化气组分含量越

表5 塔顶操作压力对稳定塔的影响

压力/ MPa	塔顶冷负荷/ kW	塔底热负荷/ kW	塔顶 温度/℃	塔底 温度/℃	液化气组分 含量/%
0.2	28.11	192.45	67.45	107.24	7.860
0.4	27.01	213.40	74.20	117.33	7.838
0.6	25.96	232.85	79.30	136.58	7.950
0.8	24.91	251.90	81.20	165.02	7.990
1.0	23.87	268.44	84.96	182.80	8.020

高。由计算结果可知,稳定塔的操作压力不宜过高,控制在0.2~0.4 MPa较为理想,可以保证产品轻烃的蒸汽压合格。

5 工业应用效果

轻烃汽提脱硫工艺参数如表6所示。

表6 轻烃汽提脱硫工艺操作参数

项目	工艺参数	项目	工艺参数
进料量/(t·h ⁻¹)	2.55	塔底温度/℃	117
进料位置	两段填料间	塔顶压力/MPa	0.24
进料温度/℃	45	塔顶采出量/(t·h ⁻¹)	0.1~0.15
塔内填料/m ³	2.3	汽提气量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	22
塔顶温度/℃	73~75	塔内压降/kPa	30

本项目于2018年4月对集输站轻烃净化工艺流程实施优化改造,改造前后效果对比如表7所示。运行结果表明,流程优化后可完全取消油田混合轻烃碱洗脱硫工艺,轻烃中的H₂S和硫醇全部以塔顶不凝气的形式被汽提出去,总硫含量由0.035%降低至0.023%,满足轻烃质量指标要求。工艺运行稳定,能够满足长周期运行要求。

表7 改造前后轻烃质量对比

项目	改造前	改造后
碱渣产生量/(t·d ⁻¹)	8	0
轻烃蒸汽压/(kPa)	69.47	69.47
轻烃中H ₂ S含量/(mg·L ⁻¹)	0	0
轻烃总硫含量/%	0.035	0.023

改造后工艺操作条件比原有操作条件更加缓和,工艺操作参数如表8所示。进料温度由60℃降低到45℃,塔顶操作压力由1.4 MPa降至0.24 MPa,塔顶控制温度由63℃升至73℃,在实际运行过程中减少了塔顶冷却系统负荷,降低了塔顶空冷

器电耗。塔底控制温度由168℃降低至114℃,塔底热负荷由285 kW降至192 kW,节约能耗约93 kW。

表8 轻烃汽提脱硫工艺长周期运行数据

日期	混烃 流量/ (t·h ⁻¹)	汽提气 流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	天然气 温度/ ℃	塔顶 温度/ ℃	塔底 温度/ ℃	总硫 含量/ %
2018/4/10	6.0	22	33.0	73.6	114.0	0.023
2018/5/11	6.0	23	33.0	74.8	114.3	0.024
2018/6/12	6.6	24	33.0	74.2	115.2	0.022
2018/7/11	6.6	22	33.5	74.5	116.0	0.023
2018/8/10	7.0	22	33.0	73.7	113.5	0.025
2018/9/11	6.8	22	32.0	74.2	114.2	0.021
2018/10/15	6.8	24	31.0	74.7	115.2	0.023
2018/11/10	6.2	25	31.0	74.8	116.5	0.023
2018/12/14	6.4	25	30.5	73.5	114.3	0.024
2019/1/11	6.6	25	31.0	73.5	114.0	0.026
2019/2/15	6.4	26	31.0	74.3	114.5	0.028
2019/3/10	6.6	25	31.0	73.6	114.6	0.021
2019/4/15	7.0	25	32.0	73.7	114.8	0.023
2019/5/11	6.8	24	34.0	73.8	114.8	0.025
2019/6/16	6.6	23	33.4	74.5	114.0	0.027
2019/7/10	6.4	22	33.0	76.2	114.0	0.026
2019/8/15	6.4	22	33.0	75.2	115.0	0.027
2019/9/10	6.2	21	31.0	74.1	115.0	0.029
2019/10/11	6.6	22	32.0	75.5	115.5	0.022
2019/12/12	6.8	22	31.0	74.6	116.2	0.023
2020/1/14	7.0	22	31.0	74.5	114.8	0.023
2020/2/13	6.4	22	33.0	74.6	115.4	0.028

6 结论

(1)轻烃净化工艺改造后的长周期运行结果表明,采用混烃汽提脱硫工艺可以脱除原料轻烃中的H₂S及甲硫醇、乙硫醇等有机硫,稳定塔塔底产品轻烃中总硫含量可以减少至0.03%以下,满足稳定轻烃国家质量指标要求(轻烃总硫含量<0.05%),且稳定塔运行平稳。

(2)采用混烃汽提脱硫工艺取代原碱洗工艺,并对原工艺流程进行优化,从源头上取消轻烃碱洗过程,避免产生大量碱渣。可有效解决油田轻烃净化过程存在的碱渣难于处理的问题,为油田集输站的高效运行提供了技术支撑。

(下转第306页)

- technology for integrated nutrient removal and phosphorus recovery: Environmental and economic life cycle performance[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 749: 141465.
- [6] 刘向荣, 简德武, 简爽. 高排放标准下城镇污水处理厂的提标改造探讨[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(20): 19-25.
- [7] 杨鹏, 高诗琦. AAO+MBR 工艺在城市污水处理厂提标改造的运用[J]. *广东化工*, 2019, 46(23): 94-96.
- [8] Anker Y, Mualem D, Gimburg A, *et al.* Application of an innovative venturi type aeration array as part of the restoration and upgrading of an obsolete wastewater treatment plant [J]. *APCBEE Procedia*, 2014, 10: 120-125.
- [9] Amin M M, Taheri E, Ghasemian M, *et al.* Proposal of upgrading isfahan north wastewater treatment plant: An adsorption/bio-oxidation process with emphasis on excess sludge reduction and nutrient removal[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 255: 120247.
- [10] Di I C, Del M G, Bertanza G, *et al.* Upgrading small wastewater treatment plants with the sequencing batch biofilter granular reactor technology: Techno-economic and environmental assessment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 148: 606-615.
- [11] 蒲贵兵, 吕波, 靳俊伟, 等. 重庆市某污水处理厂扩建、提标改造工程[J]. *水处理技术*, 2013, 39(2): 119-122, 126.
- [12] 袁挺. 上向流式反硝化滤池在高含氮城镇污水处理厂提标改造工程中的设计与运行实践[J]. *广东化工*, 2020, 47(1): 104-105, 103.
- [13] 伍波, 叶昌明. 上向流反硝化深床滤池模块化标准件用于大型污水厂[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(18): 99-101.
- [14] 潘振, 罗剑云, 梁程钧. 改良氧化沟工艺污水处理厂提标改造工程实践[J]. *工业用水与废水*, 2020, 51(1): 70-73.
- [15] 刘鲁建, 董俊, 张岚欣, 等. 膜生物反应器-大孔树脂脱氮工艺在污水处理厂提标改造工程中的应用[J]. *工业用水与废水*, 2020, 51(1): 44-47, 69.
- [16] 王晓磊, 押玉荣, 吴江渤, 等. DN/CN 强化脱氮技术在污水厂提标改造中的应用[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(11): 15-20.
- [17] 张双, 陈贵生, 杨仁凯, 等. 高密度沉淀池在污水处理厂提标改造工程的应用[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(24): 80-84.
- [18] 钟敏. 连续流砂滤池在城镇污水处理厂提标改造中的应用[J]. *广东化工*, 2020, 47(8): 112-113, 102.
- [19] Barca C. Modelling hydrodynamics of horizontal flow steel slag filters designed to upgrade phosphorus removal in small wastewater treatment plants [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 8: 349-356.
- [20] 张子潇, 魏屹, 王京涛, 等. MBBR 工艺用于工业区污水处理厂的提标改造[J]. *给水排水*, 2020, 56(5): 112-117, 122.
- [21] 周亚梁, 黄东月. 南方某污水处理厂提标改造工艺运行优化[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(8): 113-118.
- [22] 王旦一. 城镇污水处理厂“一级 A”提标改造工程实例[J]. *广东化工*, 2020, 47(14): 125-126.
- [23] 严潇南. 城镇污水处理厂类 IV 类水标准提标改造工程实例[J]. *工业用水与废水*, 2020, 51(4): 74-76.
- [24] Wu C, Li Y, Zhou Y, *et al.* Upgrading the Chinese biggest petrochemical wastewater treatment plant: Technologies research and full scale application [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 633: 189-197.
- [25] 陈林. 滤布滤池在城镇污水处理厂提标改造中的应用[J]. *工业用水与废水*, 2019, 50(5): 48-50.
- [26] 陈金灿, 陈永军, 张权沛. MBBR 氧化沟/超滤/O₃ 工艺用于工业区污水厂提标改造[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(2): 69-73.
- [27] 周祯领, 吴迪, 韩文杰, 等. MBBR 镶嵌氧化沟在某污水处理厂的提标效果分析[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(17): 1-6.
- [28] 肖先念, 唐霞, 孙伟, 等. 南方某典型污水处理厂提标改造内部调控及工艺探讨[J]. *给水排水*, 2020, 56(5): 73-77.
- [29] 唐霞, 庞博, 肖先念, 等. 某大型污水处理厂提标改造的思考[J]. *广东化工*, 2015, 42(13): 198-199.
- [30] 吴飞, 徐剑新, 李模权, 等. 前置加药 A²/O+高效沉淀工艺用于园区污水处理厂的提标改造[J]. *水处理技术*, 2019, 45(12): 137-140.
- [31] 李易寰, 张慧旻, 王艳红, 等. 不同水处理工艺在污水处理厂中的应用[J]. *水处理技术*, 2020, 46(8): 135-140.
- [32] 李激, 王燕, 罗国兵, 等. 城镇污水处理厂一级 A 标准运行评估与再提标重难点分析[J]. *环境工程*, 2020, 38(7): 1-12. ■

(上接第 301 页)

参考文献

- [1] 刘志强. 浅议轻烃脱硫加工工艺[J]. *科技咨询*, 2010, (5): 121.
- [2] 张卫明, 张桂岩, 贾振勇. 低压气小气量轻烃回收工艺技术探讨[J]. *河南化工*, 2011, (22): 25-26.
- [3] 胥金江, 韩薇, 杨肇琰, 等. 新疆油田伴生气增压脱水工艺的应用与优化[J]. *化工技术与开发*, 2011, 35(6): 4-7.
- [4] 李宏, 胡泓. CNG 母站与轻烃回收装置合建站工艺流程优化[J]. *石油工程建设*, 2009, 30(2): 6-11.
- [5] 孙青冶, 孙胜勇. 天然气浅冷装置轻烃稳定系统工艺流程优化[J]. *中国外资*, 2012, (13): 216-225.
- [6] 熊运涛, 吴学东, 郭庆生, 等. 天然气净化脱硫研究进展[J]. *当代化工*, 2013, 42(3): 288-290.
- [7] 王开岳. 天然气脱硫脱碳工艺发展进程的回顾[J]. *油气加工*, 2011, 29(1): 15-20.
- [8] 郑佳, 侯建平, 高波, 等. 碱洗脱硫在塔河油田天然气凝液回收中的应用[J]. *油气田地面工程*, 2016, 35(1): 12-13.
- [9] 张力, 田彩君, 胡景磊. 混合轻烃碱洗脱硫在塔河油田成果应用[J]. *山东化工*, 2014, 43(1): 85-89. ■