

天然气脱水脱烃单元汞分布研究

蒋洪^{1*}, 吴昊¹, 贺江波², 王金山²

(1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610000;

2. 塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:为了研究汞在脱水脱烃单元中的分布规律, 采用 HYSYS 软件对某含汞气田天然气处理厂脱水脱烃单元进行模拟, 探讨了原料气汞浓度、乙二醇循环量、乙二醇质量分数、低温分离器进料温度及压力等条件对汞分布的影响。研究表明, 乙二醇对天然气中汞具有一定的吸收能力, 可将原料气中约 53.82% 的汞转移至乙二醇富液中, 乙二醇质量分数、乙二醇循环量越大, 低温分离器进料温度越低, 汞的转移量越大, 外输气的汞含量越低。针对脱水脱烃单元汞污染问题, 提出湿气脱汞流程及方案, 原料气经装填有负载型金属硫化物的脱汞塔吸附, 再送至脱水脱烃单元, 从源头上防止脱水脱烃单元的汞污染。

关键词:天然气; 脱水脱烃; 汞分布; HYSYS; 湿气脱汞

中图分类号: TE64

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2019)02-0222-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2019.02.050

Study on mercury distribution in natural gas dehydration and dehydrocarbon unit

JIANG Hong^{1*}, WU Hao¹, HE Jiang-bo², WANG Jin-shan²

(1. School of Oil and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610000, China;

2. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China)

Abstract: In order to study the distribution rule of mercury in dehydration and dehydrocarbon units, HYSYS software is used to simulate the dehydration and dehydrocarbon units in a certain mercury-containing gas field natural gas treatment plant. Influences of the concentration of mercury in the feed natural gas, the circulating amount of ethylene glycol, the concentration of ethylene glycol, and the temperature and pressure of feed gas to low temperature separator on the distribution of mercury are investigated. It is found that ethylene glycol has a certain absorption capacity to mercury in natural gas and about 53.82% of mercury in the raw material gas can be transferred into ethylene glycol rich liquid. Higher ethylene glycol concentration, larger ethylene glycol circulation and lower feed gas temperature at the low-temperature separator all are helpful to increase the transfer amount of mercury and cut down the mercury content in external gas. Aiming at solving the problem of mercury pollution in dehydration and dehydrocarbon units, a process and scheme removing mercury from moisture is proposed, in which the raw material gas is adsorbed by the mercury removal tower loaded with supported metal sulfide and then sent to the dehydration and dehydrocarbon units, preventing the dehydration and dehydrocarbon units from mercury contamination.

Key words: natural gas; dehydration and dehydrocarbon; mercury distribution; HYSYS; mercury removal from moisture

天然气经开采后输送至处理厂, 首先需对其进行脱水脱烃处理, 以满足外输气的水露点及烃露点要求。目前国内外已有多个气田天然气汞含量严重超标^[1-2], 对于含汞气田天然气, 由于处理厂各处理加工流程中温度、压力等参数的变化, 使处理流程各管线及设备中汞含量不尽相同, 各物流中汞浓度差别也较大^[3-6], 有必要对处理厂处理加工流程中汞的分布进行研究。为此, 选择天然气脱水脱烃单元, 借助 HYSYS 软件对汞的分布情况进行模拟, 探讨不同条件下汞在主要物流中的分布变化规律, 为脱水脱烃单元的汞污染防治提供理论指导。最后提出湿气脱汞方案, 可从源头上解决汞对处理厂各处理工艺流程的污染。

1 脱水脱烃工艺流程

脱水脱烃工艺流程主要通过 J-T 阀, 节流后大幅降低天然气温度, 多用于压力较高的凝析气田, 可同时脱除天然气中的水分及烃类, 满足外输天然气对烃水露点的要求^[7-8]。节流过程中天然气温度迅速降低, 易形成水合物, 导致管道冻堵, 需在 J-T 阀前加注水合物抑制剂, 如乙二醇、甲醇等, 改变天然气组分, 降低水合物形成温度, 保证脱水脱烃工艺流程的高效平稳运行^[9-13]。

为研究脱水脱烃工艺流程中汞的分布规律, 选取某天然气处理厂中脱水脱烃单元作为研究对象, 其原料气基础条件如下: 压力 10.7 MPa, 温度 40℃,

收稿日期: 2018-07-26; 修回日期: 2018-12-04

作者简介: 蒋洪 (1965-), 男, 副教授, 研究方向为天然气集输处理技术及含汞污水、污泥处理技术, 通讯联系人, jijos@163.com。

汞质量浓度 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,单套装置处理量 $500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,原料气组分(干基)见表1。

表1 原料气组成 %

N ₂	CO ₂	C ₁	C ₂	C ₃	i-C ₄
0.00581	0.00690	0.98081	0.00531	0.00042	0.00007
n-C ₄	i-C ₅	n-C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
0.00010	0.00004	0.00004	0.00004	0.00027	0.00007
C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄
0.00003	0.00002	0.00002	0.00003	0.00001	0.00001

天然气脱水脱烃工艺流程见图1,来自集气装置的湿天然气经入口分离器将部分游离水和液烃初步脱除,在气-气换热器前注入乙二醇防止发生冻堵,初步降温后经节流阀节流,降低压力的同时大幅降低天然气温度,送入低温分离器进行气液分离。分离后外输气经换热后输送至下游用户。入口分离器排出液相送至闪蒸罐闪蒸,闪蒸气送至低温分离器,凝液送至凝液处理单元。经低温分离器分离后的乙二醇富液经过换热器升温至50℃,送至醇烃分离器,与再生后的乙二醇贫液换热至70℃,送至乙二醇再生装置,再生后贫液重新注入初步分离后的原料气中。

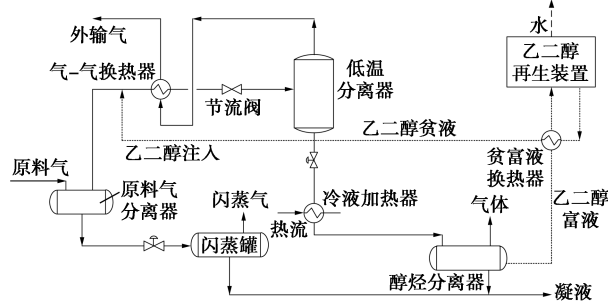


图1 脱水脱烃工艺流程

2 脱水脱烃装置汞分布模拟

HYSYS 软件可对石油与天然气类工程设计计算进行模拟预测,具备完善的热力学物性体系,包含 20 000 多个纯组分,大量混合物交换作用参数,可对含汞天然气工艺流程进行相对准确的模拟分析。

根据该气田处理厂脱水脱烃单元工艺流程及运行参数,采用 HYSYS 软件进行模拟,模拟过程采用 Peng-Robinson 模型,通过相平衡的计算,可相对精确地估算汞在烃类、水、醇类等溶剂中的溶解度,对汞在脱水脱烃装置工艺流程中的分布规律进行探究^[14-16]。模拟过程中不考虑热损失及管道中的汞

吸附、汞渗透等。脱水脱烃装置主要运行参数见表2,HYSYS 模拟流程见图2,主要物流中汞的含量见表3。

表2 脱水脱烃装置主要运行参数

项目	工艺参数
原料气压力/kPa	10700
原料气温度/℃	40
原料气含水量/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	158.66
乙二醇贫液质量分数/%	85
乙二醇富液质量分数/%	71
低温分离器进料压力/kPa	7360
低温分离器进料温度/℃	-15.91
乙二醇再生塔理论塔板数/块	4
再生塔重沸器温度/℃	144
再生塔冷凝器温度/℃	45
乙二醇损耗量/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	0.81
外输气流量/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	498.86
外输气温度/℃	29.76
外输气压力/kPa	7260

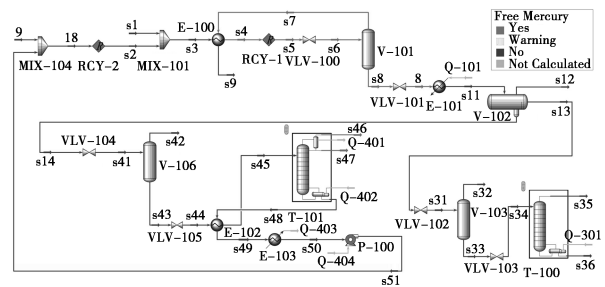


图2 脱水脱烃 HYSYS 模拟流程

表3 主要物流中汞的含量

主要物流	温度/℃	压力/kPa	摩尔流量/($\text{kmol} \cdot \text{h}^{-1}$)	质量流量/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	汞质量流量/($\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$)
原料气	40.00	10700	8688.75	142960.00	41.67
外输干气	29.76	7260	8678.29	142633.00	22.43
醇烃分离器气相	50.00	1980	0.60	10.90	0.08
凝析油	50.00	1980	1.19	159.31	0.64
乙二醇富液	50.00	1980	26.28	957.53	18.56
乙二醇贫液	45.00	10700	17.60	799.19	0.00
再生塔塔顶气相	46.74	130	0.06	2.48	14.92
再生塔塔顶液相	45.01	130	8.62	155.83	3.64

由含汞天然气脱水脱烃装置 HYSYS 模拟结果, 可得出烃水露点装置的汞分布规律如下。

(1) 原料气汞含量 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 经处理后外输干气汞浓度降低至 $107.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 占原料气汞流量的 55.24%; 乙二醇富液中汞的质量流量为 $22.43 \text{ g}/\text{h}$, 占原料气汞流量的 53.82%。可见乙二醇对汞具有较强的吸收效果。

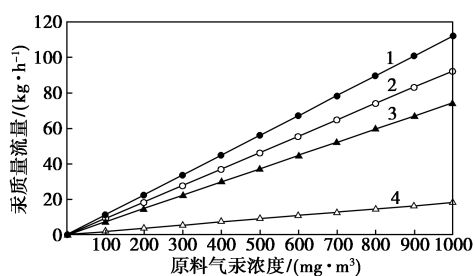
(2) 乙二醇富液汞流量为 $18.56 \text{ g}/\text{h}$; 再生塔塔顶气相汞流量为 $14.92 \text{ g}/\text{h}$, 占乙二醇富液总汞流量的 80.39%; 塔顶液相汞流量 $3.64 \text{ g}/\text{h}$, 占乙二醇富液总汞流量的 19.61%; 而乙二醇贫液中汞的浓度几乎为 $0.00 \text{ g}/\text{h}$ 。可见乙二醇富液再生过程中的高温精馏过程有利于乙二醇贫液对汞的解吸。

(3) 原料气经预冷后温度降低至 -2°C , 此时汞以游离态存在, 易吸附于管道中, 造成安全隐患。

3 不同操作条件下的汞分布模拟

3.1 不同原料气汞浓度下的汞分布规律

为研究脱水脱烃工艺原料气中不同汞浓度下主要物流中汞的分布规律, 根据表 2 中基本条件, 将原料气汞浓度由 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 增加至 $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 原料气汞浓度对各物流中汞含量的影响见图 3。经对比分析后发现, 脱水脱烃装置各物流点汞流量均随原料气汞浓度增加而变大, 呈线性关系, 各物流点汞分布规律基本保持不变。



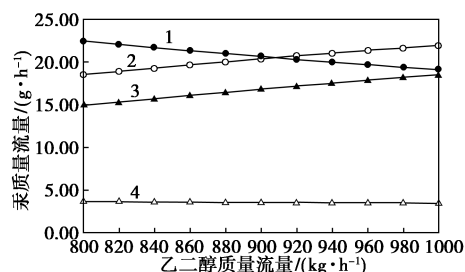
1—外输干气; 2—乙二醇富液; 3—塔顶气相; 4—塔顶液相

图 3 原料气汞浓度对物流汞含量影响

3.2 不同乙二醇循环量下的汞分布规律

为研究脱水脱烃工艺不同乙二醇循环量下主要物流中汞的分布规律, 根据表 2 中基本条件, 将乙二醇循环量由 $800 \text{ kg}/\text{h}$ 增加至 $1000 \text{ kg}/\text{h}$, 乙二醇质量流量对各物流中汞含量的影响见图 4。经对比分析后发现, 乙二醇循环量每增加 $20 \text{ kg}/\text{h}$, 乙二醇富液将多吸收汞 $0.35 \text{ g}/\text{h}$, 外输干气中汞流量会降低 $0.36 \text{ g}/\text{h}$, 具有一定的脱汞效果。随着乙二醇富液

汞流量的增加, 再生塔塔顶气相和液相中汞流量也相应提高, 但由于循环量增大, 使得富液及再生塔塔顶气相、液相汞浓度反而减小。乙二醇对汞具有一定的溶解性, 改变乙二醇循环量可在一定程度上影响脱水脱烃工艺各物流点的汞浓度。

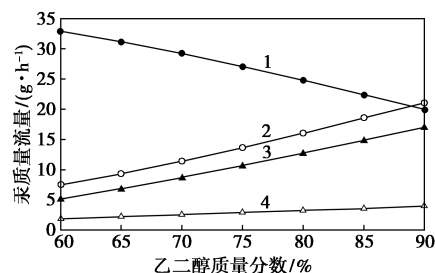


1—外输干气; 2—乙二醇富液; 3—塔顶气相; 4—塔顶液相

图 4 乙二醇循环量对物流汞含量影响

3.3 不同乙二醇质量分数下的汞分布规律

为研究脱水脱烃工艺不同乙二醇循环量下主要物流中汞的分布规律, 根据表 2 中基本条件, 将乙二醇质量分数由 60% 增加至 90%, 乙二醇质量分数对各物流中汞含量的影响见图 5。经对比分析后发现, 乙二醇质量分数每增加 5%, 乙二醇富液将多吸收汞 $1.8 \sim 2.5 \text{ g}/\text{h}$, 呈增长趋势。随乙二醇质量分数的提高, 再生塔塔顶气液两相浓度有所提高, 使得塔顶气相汞浓度显著升高。通过提高乙二醇质量分数, 乙二醇对汞的吸收量增量约为 $0.0625 \text{ g}/\text{kg}$ (汞/乙二醇), 而提高乙二醇循环量所提高的单位乙二醇吸收量增量为 $0.0225 \text{ g}/\text{kg}$ (汞/乙二醇), 可见提高乙二醇质量分数相比于提高循环量更有利于汞从气相至乙二醇富液中的转移。



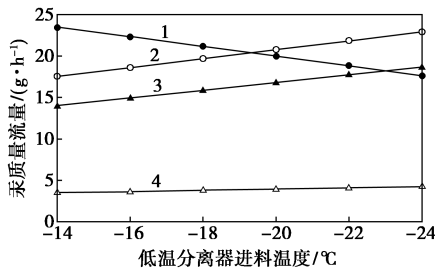
1—外输干气; 2—乙二醇富液; 3—塔顶气相; 4—塔顶液相

图 5 乙二醇质量分数对物流汞含量影响

3.4 不同低温分离器进料温度下的汞分布规律

根据表 2 中基本条件, 将低温分离器进料温度由 -14°C 降低至 -24°C , 低温分离器进料温度对各物流中汞含量的影响见图 6。经对比分析后发现, 每降低 1°C , 外输气汞流量可减小 $0.58 \text{ g}/\text{h}$, 乙二醇富

液汞流量将增加 0.54 g/h,温度降低使得气相中更多汞转移至乙二醇富液及烃液中。对于乙二醇再生单元,温度降低导致乙二醇富液汞浓度升高,使得塔顶气相占富液总汞浓度比从 79.95% 提高至 81.58%,故乙二醇富液浓度升高,再生塔塔顶气液两相汞流量比逐渐增大。

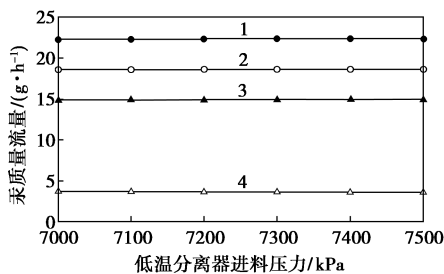


1—外输干气;2—乙二醇富液;3—塔顶气相;4—塔顶液相

图6 低温分离器进料温度对物流汞含量影响

3.5 不同低温分离器进料压力下的汞分布规律

根据表2中基本条件,将低温分离器进料压力由 7 000 kPa 提高至 7 500 kPa,低温分离器进料压力对各物流中含汞含量的影响见图7。经对比分析后发现,外输干气及乙二醇富液中汞流量基本保持不变,对脱水脱烃工艺汞的整体分布影响较小。



1—外输干气;2—乙二醇富液;3—塔顶气相;4—塔顶液相

图7 低温分离器进料压力对物流汞含量影响

4 湿气脱汞方案

由模拟结果可知,原料气中近半数汞转移至乙二醇富液中,经乙二醇再生流程转移至再生塔塔顶气相和液相中,使得两者汞浓度极高,为避免对周边环境及工作人员造成严重危害,需对含汞气体及含汞污水进行脱汞处理后方可燃烧或外排。针对脱水脱烃工艺中的汞污染问题,推荐采用湿气脱汞工艺^[17-21],在脱水脱烃单元前增设脱汞塔,从脱水脱烃工艺源头处将汞脱除,可同时解决乙二醇再生气、再生塔塔顶液相汞含量高、不易处理等难题,湿气脱汞工艺流程见图8。

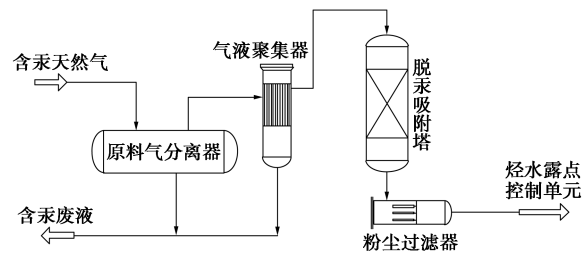


图8 湿气脱汞工艺流程

湿气脱汞工艺中关键设备为脱汞吸附塔,吸附塔中填料对进料中含水量、重烃含量较为敏感,当原料气含饱和水或重烃含量较高时,易发生毛细冷凝现象,使吸附塔内吸附剂板结成块,降低脱汞吸附能力。故需在脱汞吸附塔前增设原料气分离器及气液聚集器,对原料气中游离水和烃类进行分离,以保证 99.9% 脱除直径大于 0.3 μm 的液滴,同时将液态烃质量分数降低至 10% 以下,同时需保证脱汞吸附塔气体进料温度至少高于其水露点 5℃。以表2中数据为基础,设计湿气脱汞吸附塔技术参数见表4。

表4 湿气脱汞吸附塔设计结果

计算参数	计算结果值	计算参数	计算结果值
脱汞深度/(μg·L ⁻¹)	10	高径比	1.60
床层质量/t	19.80	工作压力(绝压)/kPa	10700
床层体积/m ³	30.46	工作温度/°C	40
床层直径 D/mm	2.89	设计压力/kPa	12800
床层高度 H/mm	4.63	设计温度/°C	60
脱汞剂填充密度/(kg·m ⁻³)	650	接触时间/s	>100

脱汞吸附塔内填料推荐选用负载型金属硫化物,通过氧化铝等载体上负载的金属硫化物与汞发生化学反应,生成难挥发、化学性质稳定的辰砂(HgS),整个过程反应速度快、脱汞效率高。其载体多选用对湿度、高分子化合物不太敏感的活性氧化铝,通过优化氧化铝载体孔隙尺寸可提高金属硫化物吸附汞的效率,防止气相发生毛细冷凝现象,增加汞与活性物质的接触空间,使得负载型金属硫化物脱汞剂对含水量较高的天然气具有更强的适应性,经处理后气体汞浓度可满足外输干气中要求的 28 μg/m³。

5 结论

针对含汞气田天然气脱水脱烃单元,利用 HYSYS 油气加工模拟软件,根据某气田天然气组分

等参数,仿真模拟了炅水露点工艺的静态运行流程,在此基础上研究了汞在脱水脱炅单元中的分布规律,得出如下结论:

(1)乙二醇溶液对天然气中的汞具有一定的吸收效果,经低温分离后外输气汞浓度可降低至原料气汞浓度的一半左右。乙二醇再生过程中重沸器温度较高(144℃),可将汞从乙二醇富液中完全解吸,约 80.39% 的汞随再生塔塔顶再生气排出,19.61% 的汞随再生塔塔顶液相排出,乙二醇贫液中汞含量几乎为 0。

(2)通过对不同原料气汞浓度条件下的脱水脱炅装置工艺流程进行模拟发现,原料气汞浓度增加,各物流点汞浓度均呈线性增加,但外输气中汞不会向乙二醇富液中转移,流程中汞的分布规律不变。

(3)增大乙二醇循环量、乙二醇质量分数均可提高乙二醇对汞的吸收能力,使外输气中汞向乙二醇富液中转移,从而降低外输气汞浓度。在乙二醇增加量相同条件下,提高乙二醇质量分数对汞的吸收能力(0.062 5 g/kg)比提高乙二醇循环量对汞的吸收能力(0.022 5 g/kg)影响更大。

(4)低温分离器进料温度的降低,可较大程度降低外输气汞流量[0.58 g/(℃·h)],有利于外输气中汞向乙二醇富液中的转移,而低温分离器进料压力对汞的影响较小。

(5)提出湿气脱汞方案,在低温分离器前方设置脱汞塔,塔内采用负载型金属硫化物吸附剂,载体为氧化铝,可一定程度上防止毛细冷凝现象。脱汞塔前需去除直径 0.3 μm 以上的液滴,降低炅类含量至 10% 以下,并保证脱汞塔进料温度高于其水露点 5℃ 以上。

参考文献

- [1] 蒋洪,梁金川,严启团,等.天然气脱汞工艺技术[J].石油与天然气化工,2011,40(1):26-31.
- [2] Cao H, Jiang H, Tao Y, *et al.* Technology transformation of hydrocarbon and water dew point control process in Kelameili gas field[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2013, 42(4): 336-342.
- [3] 蒋洪,刘支强,严启团,等.天然气低温分离工艺中汞的分布模拟[J].天然气工业,2011,31(3):80-84.
- [4] 张凌轩,蒋洪,张磊.不同天然气处理装置的汞分布研究[J].现代化工,2018,38(1):201-205.
- [5] Ma G, Dong W, Ma J, *et al.* Research on hydrocarbon dew point control method of output gas in condensate gas field[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2015, 44(3): 19-22.
- [6] Qi Y, Song D, Wang G. Application of throttling expansion in natural gas hydrocarbon dew point control process[J]. Natural Gas & Oil, 2011, 29(3): 27-29.
- [7] Shi B, Qian Y, Wang H, *et al.* Calculation method of water content/water dew point of natural gas[J]. Oil & Gas Storage & Transportation, 2012, 31(3): 188-192.
- [8] Rincón M D, Jiménez-Junca C, Duarte C R. A novel absorption process for small-scale natural gas dew point control and dehydration[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2016, 29: 264-274.
- [9] 申雷昆,蒋洪.天然气脱水脱炅问题探讨[J].石油化工应用, 2017, 36(4): 136-140.
- [10] 申雷昆. KS 气田天然气处理工艺技术研究[D].成都:西南石油大学,2017.
- [11] 刘子兵,刘祎,王遇冬.低温分离工艺在榆林气田天然气集输中的应用[J].天然气工业,2003,(4):103-106.
- [12] 蒋洪,郑贤英.低处理量乙二醇再生工艺改进[J].石油与天然气化工,2012,41(2):183-186.
- [13] 蒋洪,杨昌平,朱聪.天然气脱水装置工艺分析与改进[J].天然气化工:C1 化学与化工,2009,34(6):49-53.
- [14] Du T, Xiao C, Cheng L. Analysis on factors responsible for nonconformity of hydrocarbon dew point control unit and corresponding improvement measures[J]. Natural Gas & Oil, 2015, 33(6): 25-29.
- [15] 蒋洪,单永康,郭永刚,等.三甘醇脱水酸性组分分布研究[J].天然气化工:C1 化学与化工,2018,(3):55-58.
- [16] 张世坚,蒋洪.天然气脱碳装置中汞分布研究[J].现代化工, 2017, 37(7): 192-195.
- [17] Ezzeldin M F, Gajdosechova Z, Masod M B, *et al.* Mercury speciation and distribution in an Egyptian natural gas processing plant[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(12): 10236-10243.
- [18] 牛瑞,蒋洪,陈倩.含汞设备汞污染控制技术[J].油气田地面工程,2016,35(6):83-87.
- [19] 牛瑞,蒋洪,陈倩.含汞天然气脱汞工艺方案研讨[J].天然气化工:C1 化学与化工,2016,41(2):59-63.
- [20] Wilhelm S M, Safri S. Mercury in SE Asia produced fluids-holistic approach to managing offshore impacts[C]. International Petroleum Technology Conference. International Petroleum Technology Conference, 2008.
- [21] 蒋洪,王阳.含汞天然气的汞污染控制技术[J].石油与天然气化工,2012,41(4):442-444. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志,邮发代号 82—67。