可再生天然气脱汞装置设计及运行

王用良　吴新阳　刘改焕　陈彰兵

中国石油工程建设有限公司西南分公司， 四川　成都　610041

摘　要:为了推动天然气脱汞技术发展,降低脱汞成本,掌握可再生天然气脱汞工艺技术,有必要开展可再生天然气脱汞工艺的研究和应用。在可再生载银分子筛研发基础上,通过可再生天然气脱汞装置设计、建设及运行,实现了可再生脱汞工艺在国内天然气净化处理行业的工业应用。通过对原料气再生和产品气再生两种再生工艺中原料气、产品气、再生气汞浓度的检测和分析,说明可再生脱汞工艺稳定可靠,载银分子筛可将原料气中的汞脱除至 0.05 μg/m^3 以下,完全满足商品天然气汞浓度小于 28 μg/m^3 的指标要求;通过脱水分子筛和载银分子筛进行复配使用,能同时实现脱水脱汞功能;采用原料气作再生气时,应充分考虑再生气中高浓度的汞对载银分子筛装填量的影响;常温下钢材对汞具有一定的吸附作用,应避免常温下含汞再生气进入脱汞塔底部,造成脱汞塔切换运行后产品气汞浓度超标。相关工程经验及关键参数的获取,可为今后设计和运行可再生天然气脱汞装置提供一定的借鉴。

关键词:脱汞;天然气;可再生;载银分子筛

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2021.02.007

Design and operation of renewable mercury removal facility

WANG Yongliang, WU Xinyang, LIU Gaihuan, CHEN Zhangbing

CPECC Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China

Abstract: In order to promote the development of mercury removal technology for natural gas, reduce the cost of mercury removal and master the technology of renewable mercury removal from natural gas, it is necessary to launch a study on renewable mercury removal technology and its industrial application. Based on the research and development of renewable silver-loaded molecular sieve, the design, construction and operation of the renewable mercury removal facility are conducted, resulting in the industrial application of renewable mercury removal process in domestic natural gas purification and treatment industry. By monitoring and analyzing the mercury concentration of raw gas, product gas and regenerated gas in two types of regeneration processes, the results show that: 1) the renewable mercury removal process is stable and reliable, and the mercury content can be reduced to below 0.05 μg/m^3 in raw gas by using silver-loaded molecular sieve, which fully meets the mercury concentration requirement of commercial natural gas (I. e. less than 28 μg/m^3); 2) by combining dehydrated zeolite and silver-loaded molecular sieve, dehydration and mercury removal can be achieved simultaneously; 3) the effect of high mercury concentration in the regeneration gas on the loading of the silver-loaded molecular sieve should be fully

收稿日期:2020-11-12

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科研项目“天然气气质项目”(KY2015-05)

作者简介:王用良(1986-),男,四川成都人,工程师,硕士,主要从事石油天然气净化处理工艺设计。E-mail:wangyongl_sw@cnpc.com.cn

considered when raw gas is used as the regeneration gas; 4) at room temperature, the steel has certain adsorption effect on mercury, so we should avoid letting the mercury-containing regeneration gas enter the bottom of the mercury removal tower at room temperature, as this could result in the mercury vapor concentration of the product gas exceeding the product gas specification after switching operation of the mercury removal tower. The gain in relevant engineering experience and acquisition of key engineering parameters can provide some useful references for design and operation of renewable mercury removal facility in the future.

Keywords: Mercury removal; Natural gas; Renewable; Silver-loaded molecular sieve

0 前言

汞具有高挥发性、高毒性、强腐蚀性,天然气中的汞极易聚集在管道或设备中造成金属汞齐脆化和电化学腐蚀以及催化剂中毒等问题。因此,从环境保护、人身健康、含汞天然气的安全开发等方面考虑,必须对天然气中的汞进行脱除[1-7]。目前,国内外广泛采用的天然气脱汞工艺是以载硫活性炭、载金属硫化物氧化铝为脱汞剂的不可再生化学吸附脱汞工艺,低温脱汞工艺及以载银分子筛为脱汞剂的可再生化学吸附脱汞工艺[8-20]。不可再生化学吸附脱汞工艺在国内各含汞气田天然气处理中得到了广泛应用,但该工艺需要在脱汞塔内装填大量脱汞剂,且吸附饱和后的脱汞剂更换、处理费用较高,脱汞处理成本高。而可再生化学吸附脱汞工艺不仅脱汞剂用量少,且脱汞剂可再生循环利用,脱汞剂更换、处理成本低。通过与脱水分子筛进行复配使用,还可以简化流程,降低工程投资。

根据相关文献报道,目前掌握可再生化学吸附脱汞技术及脱汞剂的公司主要是美国 UOP,且未在中国天然气净化处理行业进行工业应用[18-20]。为掌握这一技术,推动天然气脱汞技术发展,本文在可再生载银分子筛研发基础上,通过开展可再生天然气脱汞装置设计、建设及运行,实现了可再生脱汞工艺在国内天然气净化处理行业的工业应用,获得了相关的工程经验,为以后自主设计和运行可再生天然气脱汞装置提供了工程经验。

1 可再生天然气脱汞装置设计

1.1 原料气及产品气条件

原料气流量为 10 000 m³/d(标准工况 20 ℃,101.325 kPa),压力为 10.5 MPa,温度为 20~40 ℃。原料气组成见表 1。

产品气流量为 9 981 m³/d(标准工况 20 ℃,101.325 kPa),压力为 6.5 MPa,温度为 20~40 ℃,汞浓度<28 μg/m³,水露点<−5 ℃(操作压力下)。

表 1 原料气组成表

Tab. 1 Compositions of raw gas

组分	摩尔组成	组分	摩尔组成
C_1	94.628 5%	C_7	0.098 7%
C_2	2.926 0%	C_8	0.094 8%
C_3	0.458 7%	C_9	0.038 4%
nC_4	0.099 8%	C_{10}	0.019 9%
iC_4	0.113 0%	H_2O	0.126 7%
nC_5	0.051 1%	N_2	0.755 5%
iC_5	0.048 9%	CO_2	0.469 9%
C_6	0.063 3%	Hg	600 μg/m³

1.2 主要设计运行参数

再生气加热器出口温度 300 ℃,冷干机出口最低温度 −15 ℃,再生气量 120 m³/h,工作周期 24 h,吸附时间 12 h,再生时间 12 h。

1.3 工艺流程

设计思路:1)为保护载银分子筛,在脱汞塔前设置脱水塔,装填脱水用 4A 分子筛;2)为对比不同再生流程对脱汞效果的影响,流程中设置产品气再生及原料气再生两种流程;3)为简化流程,降低成本,采用两塔流程,一塔吸附,一塔再生;4)分别在两组脱水塔、脱汞塔进出口管线上设置程序切换阀,以实现吸附和再生运行模式的自动切换。

工艺描述:工艺流程见图 1,含汞原料气自上而下依次通过脱水塔、脱汞塔,脱水、脱汞后产品气经粉尘过滤器除去粉尘,然后进入产品气管线。采用产品气再生流程时,从粉尘过滤器出口管线上取气作再生气,再生气经电加热器加热后自下而上依次通过脱汞塔、脱水塔,从载银分子筛和 4 A 分子筛中脱附出来的汞和水进入再生气中,经空冷器、冷干机冷却后进入分离器分离,分离后进入产品气管线中。采用原料气再生流程时,从调节阀前管线取气作再生气,再生气依次经电加热器、脱汞塔、脱水塔、空冷器、冷干机、分离器后返回调节阀后原料气管线,与原料气汇合。

通过以上工艺流程处理后,原料气中的水和汞分别

被脱水分子筛和载银分子筛吸附脱除，产品气水露点和汞浓度满足指标要求；经加热再生后，分子筛吸附的水和汞解吸脱附至再生气中，经冷却分离后以液态形式沉积在分离器底部。

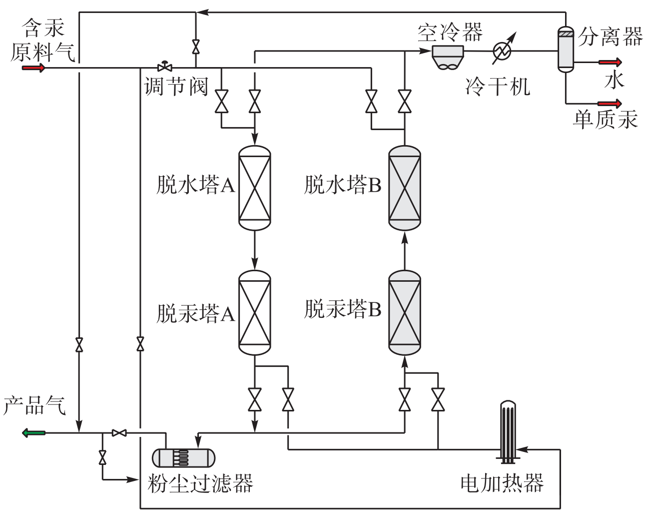

图 1　可再生天然气脱汞工艺流程示意图

Fig. 1　Schematic diagram for renewable mercury removal process of gas

1.4　设备布置

根据工艺流程，对装置进行橇装化设计，见图 2。所有设备布置在一个橇座上，橇大小为 8 000 mm ×2 500 mm，包含：脱水塔 A /B、脱汞塔 A /B、粉尘过滤器、电加热器、空冷器、冷干机、分离器等设备。

图 2　可再生天然气脱汞装置现场照片

Fig. 2　Field photo of renewable mercury removal facility

2　装置运行结果

2.1　原料气汞浓度检测

装置运行期间，采用日本 NIC 便携式测汞仪 EMP－2 每天检测一次原料气汞浓度，检测结果见图 3。由图 3 可见，原料气汞浓度一直在 275 ~ 300 μg /m³ 范围内波动。

由于实际检测到的原料气汞浓度只有设计值的一半，为了保证脱水塔、脱汞塔床层再生完全，再生时间足够，实际运行时将工作周期从 24 h 延长至 48 h。

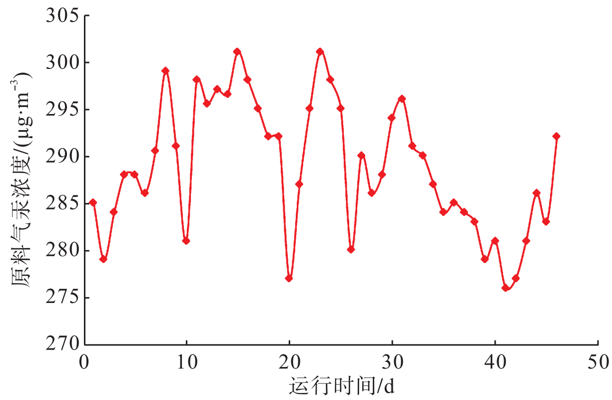

图 3　原料气汞浓度随运行天数变化曲线图

Fig. 3　Curve of mercury concentration in raw gas changing with the operating days

2.2　产品气再生流程运行效果

采用产品气再生工艺流程，再生气冷却方式只采用空冷，空冷后温度约 45 ℃，加热再生后的天然气经空冷分离后进入粉尘过滤器出口产品气管线。设定工作周期 48 h，其中吸附时间 24 h，加热时间 16 h，冷却时间 8 h，自动切换流程，装置连续运行。在粉尘过滤器出口阀前取脱水脱汞后产品气进行汞浓度检测，每个工作周期内取样 3 次，分别对应工作时间 1 h、7 h、23 h，采用俄罗斯 LUMEX 便携式测汞仪 RA－915＋对产品气汞浓度进行检测，汞浓度检测结果见图 4。

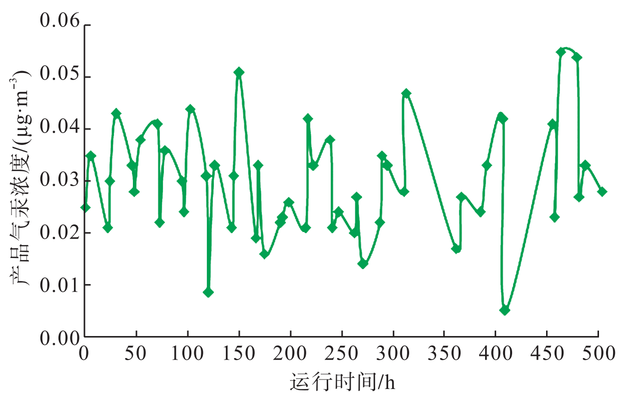

图 4　产品气再生工艺下产品气汞浓度随运行时间变化曲线图

Fig. 4　Curve of mercury concentration in product gas changing with the operating time under the product gas regeneration process

由图 4 可知，产品气再生工艺下，原料气中汞从 300 μg /m³ 脱除至 0.05 μg /m³ 以下，汞脱除率约 99.98%。装置连续运行 21 d，产品气汞浓度一直维持在 0.03 μg /m³ 左右波动，满足产品气指标要求。说明该工艺稳定可靠，长期运行能保证产品气汞浓度合格。

对脱水、脱汞后产品气水露点进行检测，结果为：操作压力下的产品气水露点＜－40 ℃。

2.3　原料气再生流程运行效果

采用原料气再生工艺流程，再生气冷却方式只采用

空冷，空冷后温度约 45 ℃，加热再生后的天然气经空冷分离后返回调节阀后管线，与原料气汇合。设定工作周期 48 h，其中吸附时间 24 h，加热时间 16 h，冷却时间 8 h，自动切换流程，装置连续运行。

2.3.1　产品气汞浓度检测

在粉尘过滤器出口阀门前取脱水脱汞后产品气进行汞浓度检测，每个工作周期内取样 3 次，分别对应工作时间 1 h、7 h、23 h，采用俄罗斯 LUMEX 便携式测汞仪 RA－915＋对产品气汞浓度进行检测，汞浓度检测结果见图 5。

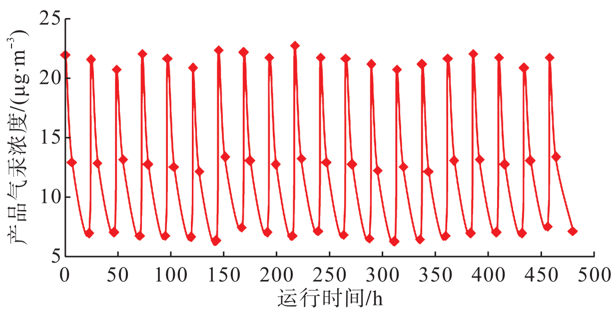

图 5　原料气再生工艺下产品气汞浓度随运行时间变化曲线图

Fig. 5　Curve of mercury concentration in product gas changing with the operating time under the raw gas regeneration process

由图 5 可知，装置连续运行 20 d，产品气汞浓度与采用产品气再生工艺的汞浓度相比，变化趋势明显不同。每个工作周期（24 h）内，切换初期（工作时间 1 h）对应的产品气汞浓度约 22 μg /m^3，随后产品气汞浓度随运行时间增加不断降低；切换末期（工作时间 23 h）对应的产品气汞浓度降至约 7 μg /m^3，流程切换至下一个工作周期后，产品气汞浓度又升高至上一个工作周期初期值 22 μg /m^3 左右，呈周期性变化。

分析出现上述结果的主要原因是：再生时高含汞的原料气从脱汞塔底部进入塔内时，导致脱汞塔底部至出口切换阀前管道吸附了大量汞，当脱汞塔工作状态由再生操作切换为吸附操作时，管道中吸附的汞被产品气带出导致产品气汞浓度升高。

2.3.2　进塔原料气汞浓度检测

在脱水塔入口取混合了返回后的再生气的原料气进行汞浓度检测，同时对装置入口原料气和分离器出口再生气进行汞浓度检测，一个工作周期内（48 h）的汞浓度检测结果见图 6。

由图 6 可知，采用原料气再生工艺，一段时间内分离器出口再生气汞浓度约 700 μg /m^3，高含汞的再生气返回原料气汇合后导致进入脱汞塔的原料气汞浓度升高，最大达到约 410 μg /m^3，明显高于装置入口原料气汞浓度 300 μg /m^3。

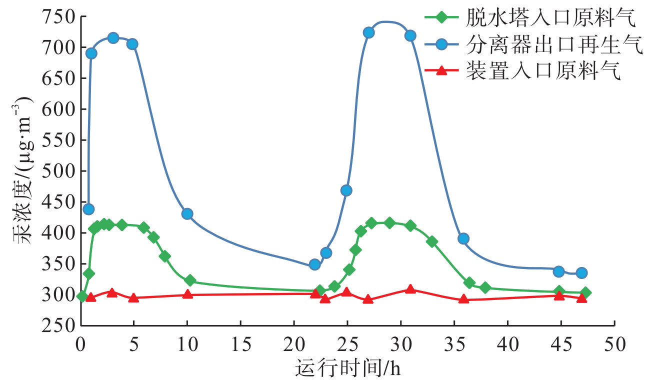

图 6　原料气再生工艺原料气及再生气汞浓度变化曲线图

Fig. 6　Curve of mercury concentration in raw gas and regeneration gas changing with the operating time under the raw gas regeneration process

2.3.3　产品气水露点检测

采用原料气再生工艺时，对原料气经脱水塔、脱汞塔后的产品气水露点进行检测，结果见表 2。根据检测结果可知，采用原料气再生工艺下的产品气满足水露点＜－5 ℃要求。

表 2　原料气再生工艺下产品气水露点测试结果表

Tab. 2　Water dew point test results of product gas under the raw gas regeneration process

吸附时间 /h	产品气水露点 /℃
0.5	－24.4
5.5	－28.0
47.0	－17.6

3　管道对汞的吸附能力测试

为了验证采用原料气再生工艺时切换初期产品气汞浓度偏高的原因分析是否合理，考察了管道对天然气中汞的吸附能力。将工艺流程切换至产品气再生流程，检测产品气管线中的汞浓度并将其维持在 0.05 μg /m^3 左右，采用 300 ℃脱水、脱汞后产品气对脱水塔 B、脱汞塔 B 充分再生，切换流程：关闭两台脱水塔顶部及脱汞塔 A 底部所有切换阀，打开脱汞塔 B 底部所有切换阀。维持原料气流量 420 m^3 /h，原料气经电加热器、脱汞塔 B 底部切换阀后去粉尘过滤器并外输。该流程中天然气不经过脱水分子筛和载银分子筛床层，电加热器处于不加热状态，天然气所经过的管道材质为 16 Mn，设备材质为 Q245R。

在粉尘过滤器出口管线上进行取样分析，结果见图 7。原料气汞浓度一直维持在 270～280 μg /m^3 范围波动，而粉尘过滤器出口气经 6 h 左右的吸附，汞浓度逐渐从 130 μg /m^3 升高至 270 μg /m^3，与装置原料气汞浓度相当，说明碳钢管道对天然气中汞的吸附能力较强。

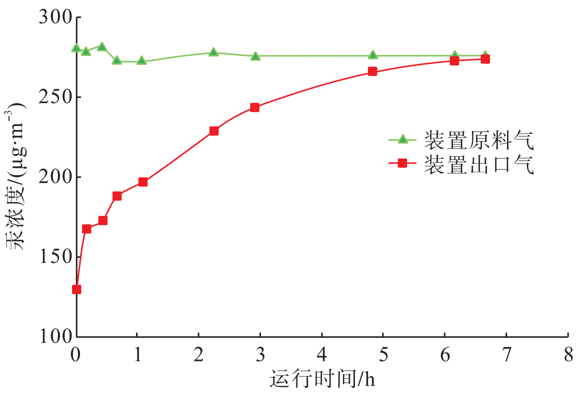

图 7　装置原料气及出口气汞浓度与时间关系曲线图

Fig. 7　Curve of mercury concentration in raw gas and outlet gas changing with the operating time

4　结论与建议

1)采用产品气作再生气,载银分子筛可将原料气中的汞脱除至 0.05 μg/m^3 以下,完全满足商品天然气汞含量小于 28 μg/m^3 的指标要求。

2)采用产品气再生工艺和原料气再生工艺,20 d 左右的运行中产品气汞浓度变化趋势基本稳定,说明可再生脱汞工艺是稳定可靠的。

3)通过脱水分子筛和载银分子筛复配使用,可共用再生系统,同时实现脱水脱汞。

4)采用原料气再生工艺时,因再生气汞浓度高,若再生气返回原料气中,应充分考虑再生气中高浓度的汞对载银分子筛装填量的影响,避免在吸附时间内床层穿透,产品气汞浓度超标。

5)因常温下钢材对汞具有一定的吸附作用,采用原料气作再生气时,应避免常温下含汞再生气进入脱汞塔底部,造成脱汞塔切换运行后产品气汞浓度超标。

参考文献:

[1] 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.
JIANG Hong, WANG Yang. The control technology for mercury contamination of Hg-containing natural gas [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2012, 41 (4): 442-444.

[2] 羊东明,刘　强,李亚光.5083 铝合金换热器汞腐蚀机理及脱汞工艺[J].腐蚀与防护,2010,31(9):715-717.
YANG Dongming, LIU Qiang, LI Yaguang. Mechanism of mercury corrosion and technology of mercury removal of 5083 aluminum alloy heat-exchanger [J]. Corrosion & Protection, 2010, 31 (9): 715-717.

[3] 王卫平,王子军.石油和天然气中汞的赋存状态及其脱除方法[J].石油化工腐蚀与防护,2010,27(3):1-4.
WANG Weiping, WANG Zijun. Species and removal methods of mercury in petroleum and natural gas [J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2010, 27 (3): 1-4.

[4] 何富均.汞对天然气处理装置中冷箱的影响[J].天然气技术,2010,4(2):53-55.
HE Fujun. Effect of mercury on cold box in natural gas processing unit [J]. Natural Gas Technology, 2010, 4 (2): 53-55.

[5] 蒋　毅,陈次昌,刘世齐,等.天然气中汞对处理系统中铝材的腐蚀研究[J].天然气工业,2010,30(4):120-122.
JIANG Yi, CHEN Cichang, LIU Shiqi, et al. A study on the mercury corrosion on the aluminum made equipment in natural gas processing plants [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30 (4): 120-122.

[6] 刘支强,蒋　洪,朱　聪,等.天然气中的汞腐蚀[J].石油与天然气化工,2010,39(6):533-537.
LIU Zhiqiang, JIANG Hong, ZHU Cong, et al. Mercury corrosion in natural gas [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2010, 39 (6): 533-537.

[7] 陈　浦,荣少杰,董飞跃,等.天然气中汞的危害及脱汞方法探讨[J].化学工程与装备,2014(7):205-208.
CHEN Pu, RONG Shaojie, DONG Feiyue, et al. Harm of mercury in natural gas and methods of mercury removal [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2014 (7): 205-208.

[8] 黄俊梅.天然气中汞的脱除技术[J].工业催化,2014,22(11):890-892.
HUANG Junmei. Progress in mercury removal technologies for natural gas [J]. Industrial Catalysis, 2014, 22 (11): 890-892.

[9] 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.
NIU Rui, JIANG Hong, CHEN Qian. A discussion on processes for removal of mercury from mercury-contained natural gas [J]. Natural Gas Chemical Industry, 2016, 41 (2): 59-63.

[10] 段世文.天然气脱汞装置设计的思考与建议[J].油气田地面工程,2016,35(12):36-39.
DUAN Shiwen. Consideration and suggestion on design of mercury removal equipment [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2016, 35 (12): 36-39.

[11] 夏静森,王遇东,王立超.海南福山油田天然气脱汞技术[J].天然气工业,2007,27(7):127-128.
XIA Jingsen, WANG Yudong, WANG Lichao. Natural gas hydragyrum (Hg) rejecting technique in Fushan oilfield of Hainan province [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27 (7): 127-128.

[12] 李　明,付秀勇,叶　帆.雅克拉集气处理站脱汞工艺流程改造[J].石油与天然气化工,2010,39(2):112-114.
LI Ming, FU Xiuyong, YE Fan. Improving techniques process of mercury removed in Yakela gas condensate treating station [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2010, 39 (2): 112-114.

[13] 王　智.雅克拉集气处理站天然气脱汞工艺研究[J].石油工程建设,2011,37(3):39-40.
WANG Zhi. Process research on mercury removal from natural gas at Yakela gas gathering station [J]. Petroleum Engineering Construction, 2011, 37 (3): 39-40.

(下转第 47 页)

practice energy metering and pricing of natural gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38 (10): 128-134.
[3] 高立新,陈赓良,李 劲,等.天然气能量计量的溯源性[M].北京:石油工业出版社,2015.
GAO Lixin, CHEN Gengliang, LI Jin, et al. Traceability of energy determination for natural gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
[4] 周 理,陈赓良,潘春锋,等.天然气发热量测定的溯源性[J].天然气工业,2014,34(11):122-127.
ZHOU Li, CHEN Gengliang, PAN Chunfeng, et al. Traceability of the calorific value measurement of natural gas [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34 (11): 122-127.
[5] 陈赓良.天然气能量计量的溯源性与不确定度评定[J].石油与天然气化工,2017,46(1):83-90.
CHEN Gengliang. Traceability of energy determination for natural gas and estimation of measuring uncertainty [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2017, 46 (1): 83-90.
[6] 周 理,陈赓良,郭开华.对天然气推荐性国家标准GB/T 31253的讨论[J].2017,37(12):87-91.
ZHOU Li, CHEN Gengliang, GUO Kaihua. A discussion on the Chinese national standard GB/T 31253: from recommendatory(GB/T) to guidance(GB/Z) [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37 (12): 87-91.
[7] 于亚东.化学测量的溯源性[M].北京:中国计量出版社,2006.
YU Yadong. Traceability of the chemical measurement [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2006.
[8] 仝 浩,韩永志.标准物质及其应用技术[M].北京:中国标准出版社,2003.
TONG Hao, HAN Yongzhi. Reference material and its application technology [M]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
[9] 陈赓良.对天然气分析中测量不确定度评定的认识[J].天然气工业,2012,32(5):70-73.
CHEN Genliang. A discussion on the evaluation of measurement uncertainty in natural gas analysis [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32 (5): 70-73.
[10] 戴万能,秦朝葵,郭 超,等.一种天然气组成分析结果的不确定度评定方法[J].石油与天然气化工,2011,40(1):79-82.
DAI Wanneng, QIN Chaokui, GUO Chao, et al. Uncertainty evaluation on composition analysis results of natural gas by gas chromatography [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2011, 40 (1): 79-82.
[11] 林 敏,庞小坤,夏宝丁,等.天然气组分含量分析的不确定度评定[J].云南化工,2013,40(3):58-61.
LIN Min, PANG Xiaokun, XIA Baoding, et al. Uncertainty analysis on the natural gas component content [J]. Yunnan Chemical Technology, 2013, 40 (3): 58-61.
[12] 闫文灿,王 池,裴全斌,等.气相色谱法测量天然气热值的不确定度评定[J].计量学报,2018,39(2):280-284.
YAN Wencan, WANG Chi, PEI Quanbin, et al. Uncertainty evaluation on the calorific value of natural gas by GC [J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39 (2): 280-284.
[13] 王 强,杨培培,乔亚芬.基于Top-down法评估天然气中组分测量不确定度[J].石油与天然气化工,2019,48(3):98-103.
WANG Qiang, YANG Peipei, QIAO Yafen. Uncertainty evaluation of determination of components in natural [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2019, 48 (3): 98-103.
[14] LEE J, KWON S, JOUNG W, et al. Measurement of calorific value of methane by calorimetry using metal burner [J]. International Journal of Thermophysics, 2017, 38 (11): 171.

(上接第40页)

[14] 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.
JIANG Hong, LIU Zhiqiang, YAN Qituan, et al. A simulation study of the mercury distribution in the low-temperature gas separation process [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31 (3): 80-84.
[15] 王用良,李海荣,赵海龙,等.天然气J-T阀节流制冷工艺脱汞因素探讨[J].天然气与石油,2013,31(4):29-32.
WANG Yongliang, LI Hairong, ZHAO Hailong, et al. Discussion on J-T valve throttle refrigeration technology used for natural gas demercuration [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31 (4): 29-32.
[16] ABU E E, MAHGOUB M I, NABAWI M, et al. Egyptian gas plant employs absorbents for Hg removal [J]. Oil & Gas Journal, 2006, 104 (46): 52-58.
[17] 贺江波,吴 昊,王胜军.天然气低温分离工艺中汞的分布特征及控制措施[J].天然气化工,2019,44(3):71-76.
HE Jiangbo, WU Hao, WANG Shengjun. Distribution characteristics and control measures of mercury in low-temperature separation process of natural gas [J]. Natural Gas Chemical Industry, 2019, 44 (3): 71-76.
[18] 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.
JIANG Hong, LIANG Jinchuan, YAN Qituan, et al. Technology of mercury removal from natural gas [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2011, 40 (1): 26-31.
[19] 熊光德,汤晓勇.天然气脱汞新技术[J].天然气与石油,2011,29(5):36-40.
XIONG Guangde, TANG Xiaoyong. New technologies of mercury removal from natural gas [J]. Natural Gas and Oil, 2011, 29 (5): 36-40.
[20] 严启团,蒋 斌,韩中喜,等.天然气脱汞工艺方案探讨[J].天然气化工.C1化学与化工,2018,43(2):87-92.
YAN Qituan, JIANG Bin, HAN Zhongxi, et al. A discussion on processes for mercury removal from natural gas [J]. Natural Gas Chemical Industry, 2018, 43 (2): 87-92.