

# 影响 TEG 脱水装置 BTEX 排放的 工艺因素分析

刘 佳, 邓道明\*, 何思宏

(中国石油大学(北京)油气管道输送安全国家工程实验室,  
城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249)

**摘要:**为了合理设计和优化操作 TEG 脱水装置,减少 BTEX 的排放,对 TEG 脱水装置工艺过程进行模拟计算,分析了原料气压力、温度、流量,TEG 循环量,闪蒸压力、温度,汽提气量,再沸器温度,吸收塔塔板数及塔板效率对露点降和 BTEX 排放的影响。可以得出,TEG 循环量是影响 BTEX 排放的一个重要因素。BTEX 的排放量随着进气温度、闪蒸温度的增大而减小;BTEX 的排放量随着原料气压力、原料气流量、闪蒸压力、甘醇循环量、再沸温度、汽提气量的增加而增大。露点降随着进气温度、原料气流量的增加而下降;露点降随着进气压力、TEG 循环量、再沸温度、汽提气量的增加而增大。

**关键词:**页岩气;TEG 脱水;露点降;BTEX 排放;影响因素

**中图分类号:**TE868;TE644

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2015)08-0160-05

## Process factors controlling BTEX emission from TEG dehydration unit

LIU Jia, DENG Dao-ming\*, HE Si-hong

(National Engineering Laboratory for Pipeline Safety, Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas  
Distribution Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** In order to optimize the design and operation of the units and reduce the emission of BTEX, simulation computations for the natural gas TEG dehydration processes are conducted. The factors governing water dew point and BTEX emission, such as feed gas pressure, temperature and flow rate, TEG circulation rate, flash pressure and temperature, stripping gas flow rate, reboiler temperature, plate number and plate efficiency of contactor, are analyzed. The results show that the flow rate of TEG circulation is the most important factor for BTEX emission. BTEX emission goes down with the increased feed gas and flash temperature. And BTEX emission increases with the increase in the pressure and flow rate of inlet feed gas, the flash pressure, the glycol circulation rate, the reboiler temperature and stripping gas flow rate. Dew point depression goes down with the increased temperature and flow rate of feed gas, but increases with the pressure of inlet feed gas, the glycol circulation rate, the reboiler temperature and stripping gas flow rate.

**Key words:** shale gas; TEG dehydration; dew point depression; BTEX emission; impact factor

天然气的水露点决定了天然气能否安全、高效地输送(集输)。目前天然气的脱水方法较多,如固体吸附法、溶剂吸收法、冷凝分离法、膜分离法、超音速分离法等<sup>[1-2]</sup>。溶剂吸收法是目前应用最广泛的天然气脱水方法,常用的吸收溶剂有三甘醇(TEG)、二甘醇(DEG)和乙二醇(MEG)。其中,TEG脱水由于露点降大、成本低、运行可靠及经济效益好而被广泛采用<sup>[2]</sup>。

美国的页岩气革命掀起了天然气利用的新高潮,页岩气、致密气的产量已超过美国天然气总产量的一半。页岩气脱水装置存在的一个主要问题是再生塔排放气中含有挥发性芳烃化合物(BTEX——benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene)以及其他

易挥发的有机化合物(VOCs)。页岩气中BTEX的体积分数在 $10 \times 10^{-6} \sim 1\,000 \times 10^{-6}$ 。页岩气脱水广泛使用TEG装置。在TEG脱水过程中,页岩气携带的BTEX在吸收塔中同水分一道被TEG吸收。TEG加热再生时,BTEX会随水蒸汽排放到大气中,污染环境。据测算我国是页岩气资源最丰富的国家之一,页岩气开采国内已经起步,而开采带来的环境问题需要进一步研究。

2012年美国联邦环保署(EPA)修改了全国排放清单(national emissions inventory, NEI)和最大可行控制技术(maximum achievable control technology, MACT)标准,对陆上天然气处理厂VOCs和H<sub>2</sub>S的排放指标进行了修改,进一步补充了石油天然气行

业的相关标准。加强了小型甘醇脱水装置 BTEX 的 MACT 标准,规定实际年平均处理量低于 85000SCMD 或苯排放小于 0.9 t/a 的新建装置小于  $4.66 \times 10^{-6}$  g/(scm-ppmv),已建装置小于  $3.28 \times 10^{-4}$  g/(scm-ppmv)<sup>[3]</sup>。1996 年我国颁布的《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)也规定了苯、甲苯、二甲苯等空气污染物的最高允许排放浓度,并对一级、二级、三级地区的最高允许排放速率做出了详细规定<sup>[4]</sup>。当前,国内经济的迅猛发展带来的环境问题日益严重,国家环境保护标准对各类污染物的排放限制必将更加严格,有必要对 TEG 脱水装置 BTEX 排放的工艺因素进行分析。

## 1 模型的建立

Grizzle<sup>[5]</sup>从 3 条线路进行了脱水工艺中 BTEX

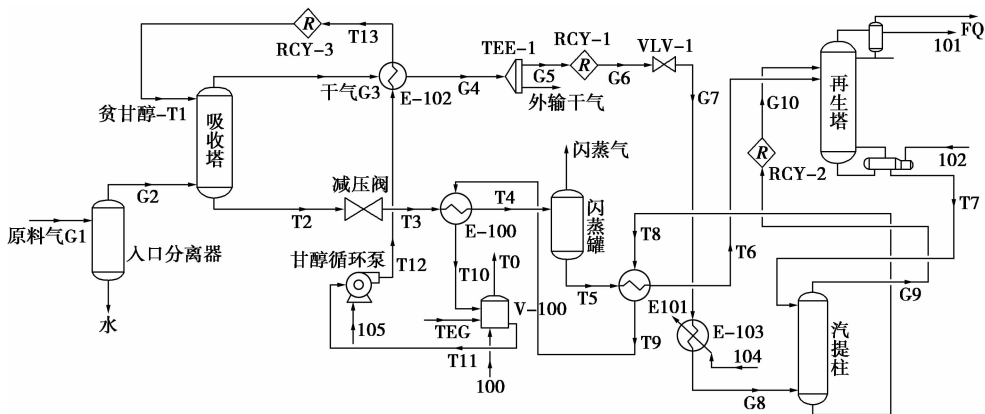


图 1 三甘醇脱水工艺流程图

模拟的基准工况是:原料气组成如表 1 所示,进料天然气温度为 36℃,压力为 5 500 kPa,日处理量 100 万 m<sup>3</sup>/d。模拟过程选用 PR 方程<sup>[6]</sup>。

表 1 原料气组成 %

组分	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	i-C <sub>4</sub>	n-C <sub>4</sub>	i-C <sub>5</sub>	n-C <sub>5</sub>
摩尔分数	90.42	4.67	1.03	0.17	0.19	0.08	0.04
组分	n-C <sub>6</sub>	n-C <sub>7</sub>	n-C <sub>8</sub>	n-C <sub>9</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>
摩尔分数	0.09	0.1	0.01	0.01	1.64	0.32	1.01
组分	Benzene	E-Benzene	xylene	Toluene			
摩尔分数	0.01	0.01	0.01	0.01			

## 2 模型的可行性验证

为说明本文中建立的 TEG 脱水装置 BTEX 排放量计算模型的合理性,将该模型得到的计算结果与 Ng 等<sup>[7]</sup>的实验结果比较,验证模型对 BTEX 气液相平衡计算的可信度。验证模拟参数同实验研究条

排放量的评估。相关研究表明,测定 TEG 富液和贫液中污染物的含量或测定脱水装置排气管中污染物的含量对 BTEX 排放量进行评估,其结果相当准确。本文中通过计算脱水装置排放物中 BTEX 含量分析 TEG 脱水装置各工艺因素的影响。

本文中建立的 TEG 法脱水工艺计算模型如图 1 所示。原料气经入口分离器脱除机械杂质、水分和凝析液,再进入吸收塔脱水,成为干气外输。贫 TEG 流经吸收塔,吸收水分成为富 TEG,富 TEG 经过换热后在闪蒸罐进行闪蒸,闪蒸出的烃等气体去往燃料气系统。闪蒸后的富 TEG 经过换热升温后流经再生塔,在塔内被重沸器内产生的向上流动的热蒸汽加热,蒸出水和少量 TEG。富 TEG 在再生装置中不断被提浓,成为贫 TEG。贫 TEG 经过缓冲罐和换热后,经泵返回吸收塔循环使用。

件,表 2 和表 3 分别给出了实验条件和物料组成。表 4 对比了模拟结果和实验结果。表 5 列出了表 4 中实验和模拟计算结果的最大相对偏差。由表 5 可以看出,模拟计算的结果虽与实验结果有偏差,但在允许范围内。综上,认为本模型可用于分析影响 BTEX 排放的工艺因素。

表 2 实验条件

	吸收塔	闪蒸罐	再沸器
温度/℃	25	75	204.4
压力/kPa	6895	689	162

表 3 实验物料组成(摩尔分数) %

	C <sub>1</sub>	Benzene	E-Benzene	xylene	Toluene	H <sub>2</sub> O	TEG
吸收塔	41.100	0.146	0.011	0.110	0.123	17.920	40.590
闪蒸罐	4.720	0.236	0.018	0.177	0.198	28.989	65.662
再沸器	0.179	0.339	0.026	0.256	0.286	8.747	90.167

表 4 实验结果和相应模拟结果(摩尔分数) %

	C <sub>1</sub>	Benzene	E- Benzene	xylene	Toluene	H <sub>2</sub> O	TEG
<b>吸收塔</b>							
气相							
实验	99.9835	0.0085	0.00033	0.00227	0.00512	—	0.00028
模拟	99.96	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00
液相							
实验	2.0826	0.2422	0.0182	0.1823	0.2038	29.7913	67.4796
模拟	1.73	0.23	0.02	0.18	0.20	29.90	67.74
<b>闪蒸罐</b>							
气相							
实验	99.6359	0.2024	0.00656	0.0447	0.1094	* *	0.00104
模拟	99.58	0.20	0.01	0.04	0.11	0.06	0.00
液相							
实验	0.2363	0.2468	0.0185	0.1858	0.2077	30.3296	68.7752
模拟	0.25	0.25	0.02	0.19	0.21	30.32	68.76
<b>再沸器</b>							
气相							
实验	22.5764	6.5695	0.3218	2.4899	4.3194	58.4185	5.1946
模拟	22.58	6.48	0.32	2.49	4.32	58.62	5.19
液相							
实验	0.0288	0.3154	0.0276	0.2725	0.2828	8.8884	90.1845
模拟	0.03	0.32	0.03	0.27	0.28	8.89	90.18

表 5 最大相对偏差

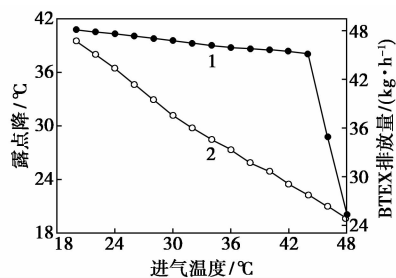
	吸收塔	闪蒸罐	再沸器
气相	0.000235	0.00056	0.0136
液相	0.05	0.058	0.087

### 3 BTEX 的排放影响因素分析

#### 3.1 原料气进气温度

一般情况下,原料气进气温度一定,但原料气温度是 TEG 脱水的关键参数之一。当温度过低时,TEG 黏度增大,使塔板效率降低,吸收塔压力和甘醇的损耗增大。当温度过高时,天然气露点降减小,影响脱水效果<sup>[8]</sup>。因此,规范推荐<sup>[8]</sup>原料气进塔温度一般控制在 20~48℃。由图 2 可以看出,当原料气进气温度低于 44℃时,随着温度的增大露点降有所减小,但影响不大。当温度高于 44℃时,天然气中水的气相组分比例增大,增加了脱水装置的负荷,增大了甘醇的气化损失(设置贫甘醇进塔温度高于

原料气进塔温度 6℃),同时甘醇溶液的脱水能力降低,导致天然气的露点降急剧减小。从气液相平衡的角度讲,随着温度的升高,气相向液相的物质传递减弱,BTEX 在 TEG 中的溶解度减小,脱水装置的 BTEX 排放量减小。在满足页岩气脱水要求的情况下,适当增大原料气进气温度既可以降低页岩气在吸收塔中析烃的风险,又可以减小 BTEX 的排放量。

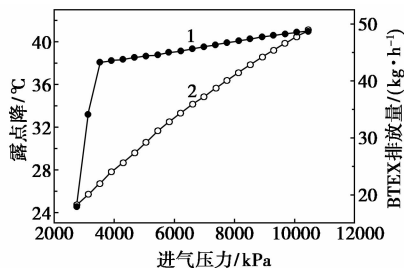


1—露点降;2—BTEX 排放量

图 2 原料气进气温度对 BTEX 排放量和露点降的影响

#### 3.2 原料气进气压力

天然气进吸收塔压力受上游工况影响,压力过小时天然气露点降达不到要求,规范<sup>[8]</sup>推荐处于 2~10 MPa 之间。由图 3 可以看出,当压力小于 3.5 MPa 时,天然气露点降随着压力的增加而急剧增大;当压力超过 3.5 MPa 时,压力对天然气露点降影响不大。由气液相平衡理论知,随着压力的增大,物系中气相向液相的物质传递增强,BTEX 在 TEG 中的溶解度增大,BTEX 的排放量不断递增。在满足脱水要求下,脱水装置在较低压力下运行,可以减小 BTEX 的排放,在页岩气集输系统中,应合理设计增压时机。



1—露点降;2—BTEX 排放量

图 3 原料气进气压力对 BTEX 排放量和露点降的影响

#### 3.3 原料气流量

一般情况下,原料气流量受上游生产井的影响,气量是在一定范围内波动的。气量对脱水效果的影

响由吸收塔的结构决定。对于塔板式吸收塔,原料气量过大时,塔板上会发生“吹液”现象,严重影响脱水效果,原料气量一般在 80% ~ 120% 波动;对于填料塔,液体以润湿膜的形式流过填料表面,原料气量对脱水效果的影响不大。如图 4 所示,原料气量增加,脱水装置的负荷增大,天然气的脱水效果变差,天然气露点降低,但露点降总的变化幅度不大。原料气量增加,吸收塔内气相 BTEX 增大,BTEX 向液相 TEG 的传质增强,TEG 中 BTEX 的溶解度增大,导致脱水装置的 BTEX 的排放量增大。

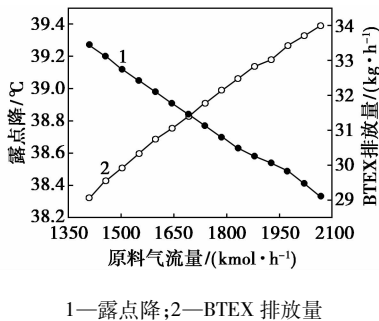


图 4 原料气流量对 BTEX 排放量和露点降的影响

### 3.4 TEG 循环量

TEG 型天然气脱水装置的 TEG 循环量一般为 15 ~ 30 L/kg。由图 5 可知,当吸收塔塔板数和贫甘醇浓度一定时,天然气脱水效果随着 TEG 循环量的增大而有一定改善。由于 TEG 对 BTEX 有很强的亲和力,随着 TEG 循环量的增加,TEG 富液所携带的 BTEX 显著增加,使脱水装置的 BTEX 排放量急剧增大。在满足天然气脱水要求的情况下,减小 TEG 循环量可以有效控制 BTEX 的排放。

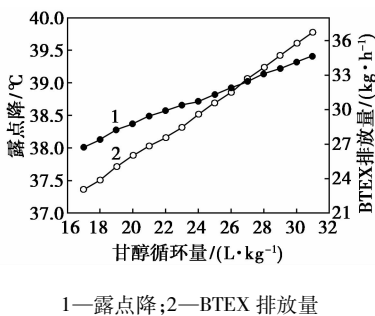


图 5 TEG 循环量对 BTEX 排放量和露点降的影响

### 3.5 闪蒸压力、温度

在吸收塔中,TEG 吸收水分时也吸收了页岩气携带的轻烃组分。进行闪蒸分离时,会有部分轻烃从 TEG 中分离。通过闪蒸可以分离出一部分烃蒸气,烃蒸气可以用作汽提气,或者直接燃烧给重沸器

提供燃料。闪蒸压力一般在 0.25 ~ 0.55 MPa,闪蒸温度一般在 38 ~ 82°C。

由图 6 可以看出,闪蒸压力和闪蒸温度对天然气的露点降基本没有影响。由图 6(a)可以看出,闪蒸压力越低越有利于 TEG 中轻烃的分离,减少再生塔中 TEG 所携带的 BTEX。因此,BTEX 的排放量随着闪蒸压力的增大而增大。由图 6(b)可以看出,温度越高,闪蒸分离出的 BTEX 越多,进入再生塔的 BTEX 则会相应减少。BTEX 的排放量随着闪蒸温度的增加而减小。适当提高闪蒸温度,降低闪蒸压力,可以减少脱水装置 BTEX 的排放量。一些 TEG 脱水装置取消了闪蒸罐,这不利于环保。

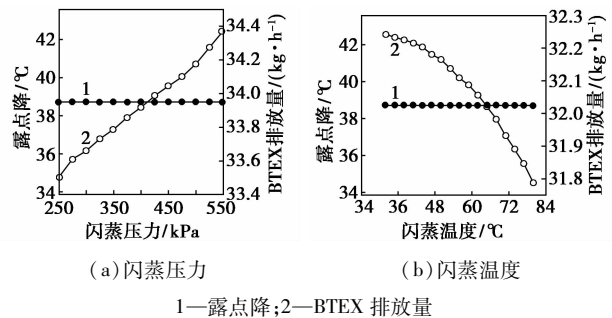


图 6 闪蒸压力和闪蒸温度对 BTEX 排放量和露点降的影响

### 3.6 汽提气量

采用汽提可以得到较高浓度的贫甘醇,一般汽提气量为 0.02 ~ 0.05 m<sup>3</sup>/L。由图 7 可以看出,BTEX 排放量和页岩气的露点降随着汽提气量的增加而增大。汽提气降低了再生塔中水蒸汽和 BTEX 的分压,TEG 溶液中水大量气化,提高 TEG 贫液浓度,增大 BTEX 液相向气相传质。

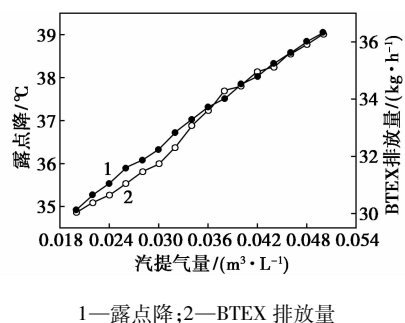


图 7 汽提气量对 BTEX 排放和露点降的影响

### 3.7 再沸温度

由于 BTEX 化合物的常压沸点为 80 ~ 140°C,在闪蒸罐内只有少量的 BTEX 从 TEG 中分离出来。TEG 在重沸器内被加热再生时,没有从 TEG 中闪蒸分离的 BTEX 则与水分一起进入大气。贫 TEG 浓

度随着重沸器温度增加而增大。由图 8 可以看出,天然气的露点降和 BTEX 排放量都随着再沸温度的升高而增大。

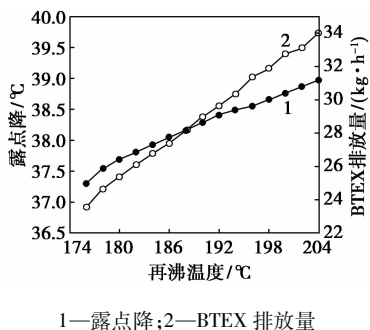


图 8 再沸温度对 BTEX 排放和露点降的影响

### 3.8 塔板数

吸收塔设计时,塔板数是一个主要参数,合理地确定吸收塔塔板数对脱水深度、制造成本有很大影响。由图 9 可以看出,当吸收塔理论塔板数小于 5 块时,页岩气露点降和 BTEX 的排放量随着塔板数的增加急剧增大;当吸收塔理论塔板数大于 5 块时,页岩气露点降和 BTEX 排放量基本不随着塔板数的增加而增加。实际工程常取 2 块塔板数。

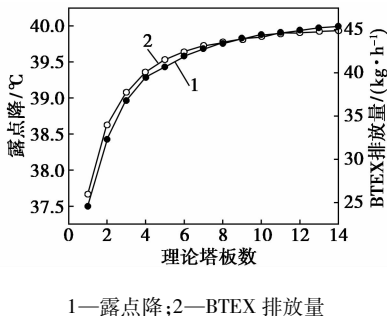
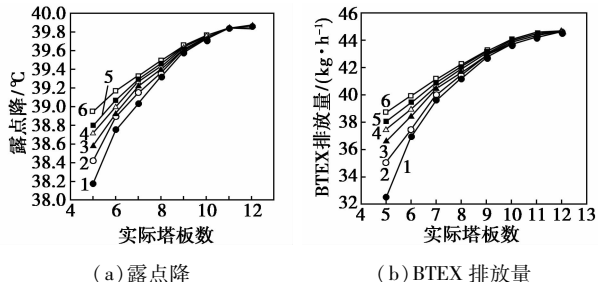


图 9 理论塔板数对 BTEX 排放和露点降的影响

### 3.9 塔板效率



塔板效率:1—15%;2—20%;3—25%;4—30%;5—35%;6—40%

图 10 塔板效率对露点降和 BTEX 排放量的影响

在实际操作中,常常要考虑塔板的效率。本模型分析了塔板效率对露点降和 BTEX 排放量的影响,如图 10(a)、(b)所示。可以看出,当塔板数小

于 7 时,天然气露点降和 BTEX 的排放量随着塔板效率的增加而增大;当塔板数大于 7 时,天然气露点降和 BTEX 的排放量基本不随塔板效率的变化而变化。

## 4 结论

通过改变 TEG 脱水装置的工艺参数,计算了不同工况下再生塔顶的 BTEX 排放量,可以得到如下结论。

(1)在满足天然气脱水要求的情况下,增大原料气进气温度、降低原料气进气压力可减少 BTEX 的排放。

(2)BTEX 的排放量随着原料气流量的增加而增大。

(3)TEG 循环量是影响 BTEX 排放量的一个最重要因素,减少 TEG 循环量可以有效控制 BTEX 的排放。

(4)适当提高闪蒸温度、降低闪蒸压力,可以减少脱水装置 BTEX 的排放量。

(5)增大汽提气量和重沸温度可以提高 TEG 浓度,但在不改变甘醇循环量的情况下,BTEX 的排放量随着汽提气和重沸温度的增大而增加。

## 参考文献

[1] 蒋文明,刘中良,刘恒伟,等. 新型天然气超音速脱水净化装置现场试验[J]. 天然气工业,2008,28(2):136-138.

[2] Netusil M, Dittl P. Comparison of three methods for natural gas dehydration[J]. Natural Gas Chemistry, 2011, 20(5):471-476.

[3] U. S. EPA. 40 CFR Parts 60 and 63. Oil and natural gas sector; New source performance standards and national emission standards for hazardous air pollutants reviews; Final rule[Z]. Federal Register, 77(159), Aug. 16, 2012.

[4] GB 16297—1996. 大气污染物综合排放标准[S].

[5] Grizzle P L. Glycol mass-balance method scores high for estimating BTEX, VOC emissions[J]. Oil and Gas Journal, 1993, 91(22):61-70.

[6] Darwish N A, Al-Mehaideb R A, Braek A M, et al. Computer simulation of BTEX emission in natural gas dehydration using PR and RKS equations of state with different predictive mixing rules[J]. Environmental Modeling & Software, 2004, 19(10):957-965.

[7] Ng H-J, Chen C-J, Razzaghi M. Vapor-liquid equilibria of selected aromatic hydrocarbons in triethylene glycol[J]. Fluid Phase Equilibria, 1993, 82:207-204.

[8] SY 0602—2005 (API Spec 12GDU:1990, IDT). 甘醇型天然气脱水装置规范[S]. ■