

# 中高压富气乙烷回收工艺改进

杨冬磊<sup>1\*</sup>, 李光春<sup>2</sup>, 熊林<sup>1</sup>, 李碧龙<sup>1</sup>, 彭双双<sup>1</sup>, 潘磊<sup>1</sup>, 赵程惠<sup>1</sup>

(1. 中国石油塔里木油田分公司油气运销部, 新疆 库尔勒 841000;  
2. 青海油田格尔木炼油厂, 青海 格尔木 816990)

**摘要:**对RSV工艺进行适应性分析时发现,在进行中高压富气乙烷回收时存在对原料气气质、CO<sub>2</sub>适应性差及流程热集成度低的问题。采用改变气源、多级分离、吸收塔汽提的方法来改善第二股进料气质,即采用侧线抽出脱甲烷塔上部气相来替换低温分离器气相作为第二股进料,提出带压缩和部分干气再循环的改进工艺(supplemental rectification with compression and recycle split vapor, SRCR)。对低温分离器液相进行汽提精馏、两级分离的方法来取代低温分离器气相作为第二股进料,提出带汽提的部分干气再循环工艺(recycle split vapor with gas extraction process, RSVG)、带闪蒸的部分干气再循环工艺(recycle split vapor with liquid flashing process, RSVF),通过对比功耗、改进成本及热集成度优选出RSVF工艺。对RSVF工艺进行适应性分析发现,原料气压力越大RSVF工艺越节能,并且对气质及CO<sub>2</sub>摩尔分数适应性显著增强。

**关键词:**富气;精馏;乙烷回收;工艺改进;适应性分析

中图分类号:TE646

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)01-0227-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.01.046

## Improvement of ethane recovery process for medium-high pressure rich gas

YANG Dong-lei<sup>1\*</sup>, LI Guang-chun<sup>2</sup>, XIONG Lin<sup>1</sup>, LI Bi-long<sup>1</sup>, PENG Shuang-shuang<sup>1</sup>,  
PAN Lei<sup>1</sup>, ZHAO Cheng-hui<sup>1</sup>

(1. Oil and Gas Transportation and Marketing Department, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China; 2. Golmud Refinery, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Golmud 816990, China)

**Abstract:** It is found through analyzing the adaptability analysis of recycle split vapor (RSV) process that there exist problems such as poor adaptability to the quality of feedstock gas and CO<sub>2</sub>, and low heat integration degree during recovering ethane from medium-high pressure rich gas. The quality of the second feed gas can be improved by changing gas source, employing multi-stage separation, and stripping at absorption tower. Supplemental rectification with compression and recycle split vapor (SRCR), a modified RSV process, is proposed, i. e., the gas phase at the upper part of the demethanizer is extracted by the side line to replace the gas phase from the cryogenic separator as the second feed with compression and part Improved process of dry gas recycling. RSVG (a RSV with gas extraction process) and RSVF (a RSV with liquid process) are designed, in which the method for conducting gas-lifting rectification and two-stage separation to the liquid phase of the cryogenic separator is used to replace the gas phase of the cryogenic separator as the second feed. RSVF process is considered to be the optimal one by comparing power consumption, improving cost and thermal integration degree. It is found through analyzing the adaptability of RSVF process that the higher the feed gas pressure, the more energy-saving the RSVF process, and its adaptability to gas quality and CO<sub>2</sub> content enhances significantly.

**Key words:** rich gas; distillation; ethane recovery; process improvement; adaptability analysis

天然气凝液回收是指将乙烷及以上重组分以液态的方式进行回收的过程,通过凝液回收不仅可提高外输气质量,也可解决在天然气输送过程中出现液态烃凝结堵塞的问题。

近几年,国内市场对乙烯的需求量大幅增加,2018年国内乙烯的供需缺口达到 $2.915 \times 10^4 \text{ t}^{[1-2]}$ ,而未来乙烯的需求量也会不断增加。乙烷制乙烯具有低成本、高收率的优势,因此加大对乙烷回收工艺技术的研究能够推动乙烯原料轻质化发展,进而稳定原材料价格及供应量,对国内乙烯产业健康发展具有战略性意义。

目前国内的乙烷回收技术与国外相比有明显的差距,体现在各大油气田运行的乙烷回收装置存在流程单一、处理量小、回收率低的问题<sup>[3-6]</sup>。随着我

国天然气产业的快速发展和液化天然气需求量不断增加,乙烷产品较高的销售价格会产生巨大的利润值。目前南缘油田新开发的高产量中高压富气( $4.5 \text{ MPa} \leq P \leq 7.5 \text{ MPa}$ )板块,可规划建设乙烷回收装置,对提高天然气资源利用率及油气田经济效益具有重要意义。因此,开展中高压富气乙烷回收技术研究显得极为迫切。

## 1 中高压富气乙烷回收流程

### 1.1 RSV乙烷回收流程

Ortloff公司以气相过冷工艺为基础,将部分外输干气取代低温分离器气相作为塔顶回流,提出部分干气再循环工艺(recycle split vapor, RSV)。近几年,Ortloff公司的RSV工艺在国外油气田得到广泛

收稿日期:2020-08-01;修回日期:2020-11-06

作者简介:杨冬磊(1992-),男,硕士,主要从事天然气处理方面的研究,通讯联系人,18328516830@163.com。

应用<sup>[7]</sup>。

RSV 工艺具有如下特点<sup>[8-9]</sup>:①外输干气中超高的甲烷含量,将其作为塔顶回流提升了对塔上部气相的精馏作用,在不考虑能耗的情况下,乙烷回收率能够超过 97%;②此工艺操作灵活且易于改造,只需除去外输干气回流就可改造成气相过冷工艺。

### 1.2 RSV 乙烷回收流程适应性分析

通过对 RSV 工艺进行气质及 CO<sub>2</sub> 摩尔分数的适应性分析,找出该工艺在进行中高压富气乙烷回收时存在的局限性,为工艺改进提供思路与方向。

国内对气质的贫富划分尚无明确标准,本文中参照国外常用的一种划分标准,即规定 GPM 值 >2.5 是富气,GPM 值 ≤ 2.5 是贫气<sup>[10-11]</sup>。本文中选取的 3 种典型富气气质组分如表 1 所示。

表 1 原料气组成

气质	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	iC <sub>4</sub>
1	6.9756	0.4904	78.8131	6.9055	3.6930	1.0809
2	0.6546	1.2588	79.7181	8.3484	5.0950	1.0675
3	3.1645	0.4347	74.2657	12.4049	6.3389	1.3665
气质	nC <sub>4</sub>	iC <sub>5</sub>	nC <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7+</sub>	GPM
1	1.0408	0.4203	0.3002	0.2802	0.4128	3.92
2	2.0745	0.6546	0.3323	0.2618	0.1208	5.34
3	1.1503	0.2775	0.2256	0.1404	0.1264	6.21

Hyprotech 公司研发的 Aspen HYSYS 软件内嵌有大量的物性包及模型库,目前广泛用于原油开采、天然气集输与处理等领域。本文中采用 Aspen HYSYS 软件进行流程模拟,气液平衡模型选用 Peng-Robinson 方程。

模拟所用基础数据如下:原料气压力 6.0 MPa,温度 45℃,处理规模 500×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,外输干气压力 6.2 MPa,温度 40℃,原料气具体组成见表 1;脱甲、乙烷塔压差均取 50 kPa,理论塔板数分别取 23、24,膨胀机等熵效率及压缩机绝热效率分别取 85%、75%。控制指标为:冷箱夹点 ≥ 3.5℃,乙烷产品中甲烷组分质量分数小于 1%。本文中模拟所涉及到的基础参数及控制指标均与上述相同。

#### (1) RSV 工艺对原料气气质适应性分析

保证乙烷回收率在 93% 情况下,采用表 1 中 3 组富气研究 RSV 工艺对气质的适应性,模拟结果见表 2。

对表 2 进行分析可得出如下结论:①原料气 GPM 从 3.92 增至 6.21,装置总轴功率上升了 19.9%,变化很明显,因为气质越富,所需要的冷量增加,丙烷制冷循环压缩功显著增加,进而导致装置总轴功

表 2 不同原料气气质下 RSV 乙烷回收工艺模拟结果

GPM 值	3.92	5.34	6.21
外输干气回流比/%	13.5	14.9	17
CO <sub>2</sub> 最低冻堵余量/℃	14.68	7.9	17.16
总轴功率/kW	8461.3	9259.4	10148.1

率上升过快;②原料气气质较富且塔压较高时会造成塔底温度过高,原料气不足以提供热量,则需增设外加热源,影响流程的经济性。

#### (2) RSV 工艺对原料气中 CO<sub>2</sub> 摩尔分数适应性分析

在模拟过程中发现气质越富流程对 CO<sub>2</sub> 适应性越强,因此取表 1 中气质 1 作为基础气质,通过改变 CO<sub>2</sub> 摩尔分数分析对 RSV 工艺的影响,结果见表 3。

表 3 不同 CO<sub>2</sub> 摩尔分数下 RSV 乙烷回收工艺模拟结果

CO <sub>2</sub> 摩尔分数/%	0.5	1	1.5
外输干气回流比/%	13.5	13.5	13.5
CO <sub>2</sub> 最低冻堵余量/℃	13.95	7	5.32
总轴功率/kW	8461.3	8540.2	8360
乙烷回收率/%	93	93	90.82

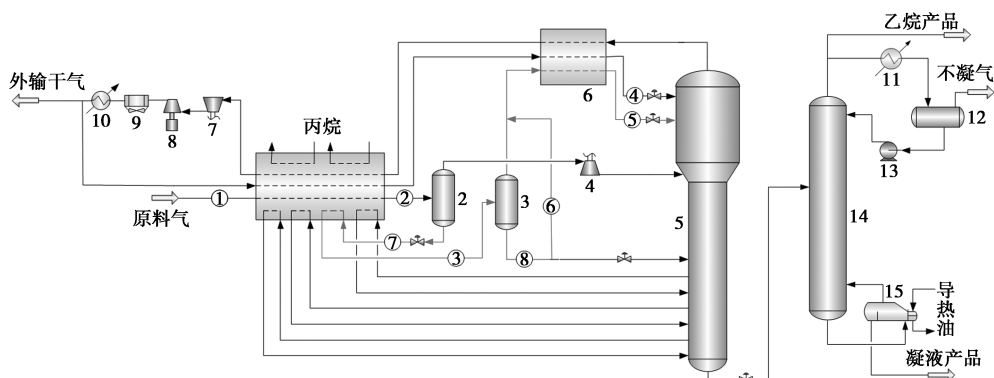
对表 3 进行分析可得出如下结论:①随着原料气中 CO<sub>2</sub> 摩尔分数增至 1.5%,乙烷回收率降至 90.82%,可见 RSV 工艺对 CO<sub>2</sub> 适应性较差,因为随着 CO<sub>2</sub> 摩尔分数的增加,通过提高脱甲烷塔压力及引入重烃来防止 CO<sub>2</sub> 结冰,导致乙烷收率降低;②脱甲烷塔第二股进料将大量的 CO<sub>2</sub> 带入脱甲烷塔上部,造成进料口上下各塔板气相中 CO<sub>2</sub> 摩尔分数增加,不利于 CO<sub>2</sub> 冻堵控制。

## 2 中高压富气乙烷回收流程改进

基于精馏原理,将 RSV 作为基础工艺,通过采用改变气源、多级分离、吸收塔汽提的方法提高脱甲烷塔第二股进料中 CH<sub>4</sub> 摩尔分数的同时降低 CO<sub>2</sub> 摩尔分数,在一定乙烷回收率的情况下,来减少外输干气回流比,达到提高 CO<sub>2</sub> 适应性及节能降耗的目的。

### 2.1 RSVF 乙烷回收流程

对低温分离器液相进行两级分离的方法来取代低温分离器气相作为脱甲烷塔第二股进料提出带闪蒸的部分干气再循环工艺流程(RSVF 流程),工艺流程如图 1 所示。



1—原料气预冷冷箱;2—低温分离器;3—闪蒸罐;4—透平膨胀机膨胀端;5—脱甲烷塔;6—过冷冷箱;  
7—透平膨胀机压缩端;8—外输气压缩机;9—空冷器;10—水冷器;11—塔顶冷凝器;12—塔顶回流罐;  
13—塔顶回流泵;14—脱乙烷塔;15—塔底重沸器

图1 带物流点的RSFV乙烷回收工艺流程

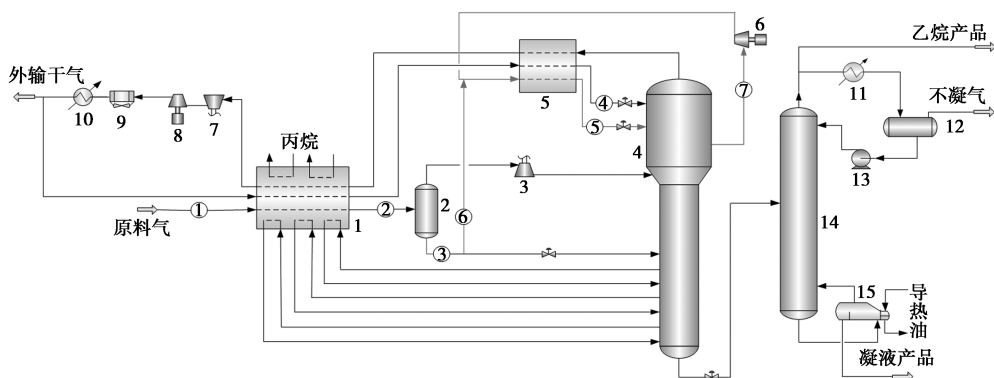
RSFV改进工艺具有以下特点:①采用多级分离的方法,将低温分离器液相节流降温后进入原料气预冷冷箱换热升温,再通过闪蒸罐有效分离出二氧化碳、乙烷及以上重组分,高含甲烷的闪蒸罐气相进入脱甲烷塔上部,同时较低的低温分离器温度也降低了膨胀机出口温度,提高了脱甲烷塔内的分离效果,乙烷回收率显著增加;②经过闪蒸分离,第二股进料中 $\text{CO}_2$ 摩尔分数显著降低,使得脱甲烷塔顶部 $\text{CO}_2$ 摩尔分数较RSV工艺相比明显减少,同时闪蒸罐少量液相与闪蒸气混合有效提高了脱甲烷塔

$\text{CO}_2$ 冻堵裕量;③充分利用节流后低温分离器液相的冷量,在原料气预冷冷箱与原料气换热升温,提高了系统热集成度,降低了丙烷制冷量。

## 2.2 SRCR乙烷回收流程

借鉴SRC工艺将塔上部侧线气相作为塔顶回流的特点,采用改变气源的方法用脱甲烷塔上部抽出的气相代替低温分离器气相作为脱甲烷塔上部第二股进料提出带压缩和部分干气再循环的改进工艺(SRCR流程),工艺流程如图2所示。

SRCR改进工艺具有以下特点:①低温分离器



1—原料气预冷冷箱;2—低温分离器;3—透平膨胀机膨胀段;4—脱甲烷塔;5—过冷冷箱;6—侧线压缩机;  
7—透平膨胀机压缩段;8—外输气压缩机;9—空冷器;10—水冷器;11—塔顶冷凝器;12—塔顶回流罐;  
13—回流泵;14—脱乙烷塔;15—脱乙烷塔底重沸器

图2 带物流点的SRCR乙烷回收工艺流程

气相全部进入膨胀机,可增加膨胀机制冷量;②对原料气气质有很好的适应性,可通过调节侧线抽出位置、抽出量以及侧线压缩机出口压力的方法,灵活控制乙烷收率,并且气质GPM值越小,装置能耗越低。

## 2.3 RSVG乙烷回收流程

对低温分离器液相进行气提精馏的方法来取代

低温分离器气相作为第二股进料,提出带汽提的部分干气再循环工艺流程(RSVG流程),工艺流程如图3所示。

## 2.4 流程模拟对比

保证乙烷回收率在93%情况下,各流程模拟结果见表4。

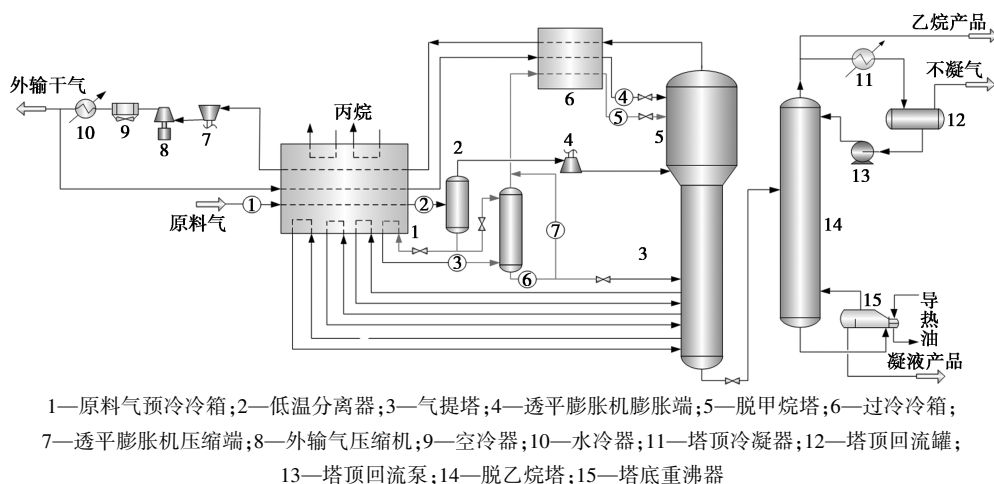


图 3 带物流点的 RSVG 乙烷回收工艺流程

表 4 2 种气质下 RSV、SRCR、RSVG 及 RSVF 乙烷回收工艺模拟结果

项目	GPM 3.92				GPM 6.21			
	RSV	SRCR	RSVG	RSVF	RSV	SRCR	RSVG	RSVF
外输干气回流比/%	13.5	10	9.7	9.5	17	13	12.3	12.2
脱甲烷塔第二股进料/%								
CO <sub>2</sub> 摩尔分数	0.581	0.556	0.532	0.515	0.501	0.468	0.448	0.436
CH <sub>4</sub> 摩尔分数	80.3	90.64	89.53	88.75	71.5	83.4	79.69	78.99
脱甲烷塔压力/MPa	2.8	2.8	2.8	2.8	2.7	2.7	2.7	2.7
CO <sub>2</sub> 最低冻堵余量/℃	14.7	15.7	16.3	16.2	17.09	17.16	17.94	17.91
总轴功率/kW	8461.3	8426.3	8255.7	8230.1	10148.1	10113	9574.7	9536.2

对表 4 进行分析可得出如下结论。

(1) 保证乙烷回收率在 93% 的情况下, 原料气 GPM 为 3.92 时, 与 RSV 工艺相比, SRCR、RSVG、RSVF 工艺总压缩功耗分别降低了 35.0、205.6、231.2 kW。原料气 GPM 为 6.21 时, 与 RSV 工艺相比, SRCR、RSVG、RSVF 工艺总压缩功耗分别降低了 35.1、573.3、611.9 kW, 可见 RSVF 工艺最节能, 并且气质 GPM 值越大, 节能效果越明显。

(2) 当原料气 GPM 为 6.21 时, 与 RSV 工艺相比, SRCR、RSVG、RSVF 工艺脱甲烷塔第二股进料中 CH<sub>4</sub> 组分摩尔分数均有增加, 该股进料气化制冷效果增加, 使外输干气回流比分别由 17% 降至 13%、12.3%、12.2%。同时 3 种工艺的甲烷塔第二股进料中 CO<sub>2</sub> 摩尔分数均有降低, 使得脱甲烷塔最低冻

堵余量有所增加。与 RSV 流程相比, RSVG 流程需增加吸收塔, 但 RSVF 流程仅增加闪蒸分离器, 改进成本更低。因此, 经过能耗、改进成本对比分析, 推荐采用 RSVF 工艺作为中高压富气乙烷回收的改进方案。

### 3 改进工艺适应性分析

选用多组压力、GPM 值、CO<sub>2</sub> 摩尔分数的富气, 对 RSVF 工艺进行适应性分析, 量化其对原料气压力、气质及 CO<sub>2</sub> 的适应范围。

#### 3.1 改进工艺对原料气压力适应性分析

取气质 3 为原料气, 压力分别为 4.5、5.5、6.5、7.5 MPa 的富气, 研究 RSV、RSVF 工艺对原料气压力的适应性, 结果见表 5。

表 5 GPM 6.21 气质下 2 种工艺的模拟结果

项目	4.5 MPa		5.5 MPa		6.5 MPa		7.5 MPa	
	RSV	RSVF	RSV	RSVF	RSV	RSVF	RSV	RSVF
第二股进料中甲烷摩尔分数/%	67.89	68.02	69.9	76.72	74.57	84.28	76.29	87.79
总轴功率/kW	13967	13690	10266	9913	9712	9102	8976	8248
乙烷回收率/%	94	94	94	94	96	96	96	96

从表 5 可以看出: ①当原料气压力为 6.5、7.5、5.5、4.5 MPa 时, 在相同乙烷回收率下, 与 RSV 工

艺相比, RSVF 工艺脱甲烷塔第二股进料中甲烷摩尔分数分别由 74.57%、76.29%、69.91%、67.89%

增至 84.28%、87.79%、6.72%、68.01%，气化分离效果先大幅增加后有所减弱，总压缩功耗分别降低了 6.28%、8.39%、3.43%、1.99%，节能效果先显著后减弱；②当原料气压力 $<4.5$  MPa 时推荐采用 RSV 工艺，原料气压力 $\geq 4.5$  MPa 时推荐采用 RSVF 工艺，同时原料气压力越高，RSVF 工艺的节能效果越显著。

### 3.2 改进工艺对原料气气质适应性分析

保证乙烷回收率在 95% 情况下，取表 1 中富气研究改进工艺对原料气气质的适应性，模拟结果见表 6。

表 6 不同气质采用 RSVL 改进工艺的模拟结果

原料气气质 GPM	3.92	5.34	6.21
外输干气回流比/%	14.4	12	12.9
脱乙烷塔重沸器负荷/kW	4193.75	6113.25	6819
总轴功率, kW	8378.25	8998.5	9627
主体装置单位能耗/(MJ·10 <sup>4</sup> m <sup>-3</sup> )	4695.7	4778.9	4958.6

从表 6 可以看出：随着气质 GPM 值从 3.92 增至 6.21，乙烷回收率均可控制在 95%，总轴功率分别增加了 7.4%、14.9%，与 RSV 工艺相比，表明改进工艺对气质贫富的适应性显著提高，同时相同气质下总压缩功耗及增速显著降低。

### 3.3 改进工艺对 CO<sub>2</sub> 适应性分析

取表 1 中气质 1 为基础气质，改变 CO<sub>2</sub> 的摩尔分数，研究 CO<sub>2</sub> 摩尔分数对改进工艺的影响，结果见表 7。

表 7 原料气 GPM 3.92 在不同 CO<sub>2</sub> 摩尔分数下的改进工艺模拟结果

CO <sub>2</sub> 摩尔分数/%	1.0	1.5	2.0	2.5
外输干气回流比/%	11.4	11.92	12.6	11.4
总轴功率/kW	8179.9	8321.6	8497.7	8374.9
脱乙烷塔热负荷/kW	4436.7	4683.5	4918.1	5056.7
主体装置单位能耗/(MJ·10 <sup>4</sup> m <sup>-3</sup> )	4695.7	4778.9	4958.6	4813.1
乙烷回收率/%	95	95	93	90.2

由表 7 可以看出：①随着 CO<sub>2</sub> 摩尔分数 1.0% 增至 2.5%，乙烷回收率有所降低但均保持在 90% 以上，CO<sub>2</sub> 摩尔分数较低时，乙烷回收率均可达到 95%，丙烷回收率接近 100%，表明 RSVF 工艺对 CO<sub>2</sub> 摩尔分数的适应性显著提高；②随着 CO<sub>2</sub> 摩尔分数的增加，在保证乙烷产品质量前提下，只能通过提高脱乙烷塔塔压及塔顶回流比的手段来满足乙烷产品要求，因此会造成脱乙烷塔塔底热负荷的不断增加，单位主体能耗分别增加了 117.4、80.9、277.9 MJ/10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。

## 4 结论

(1) 综合 RSV 工艺适应性分析结果，得出解决 CO<sub>2</sub> 摩尔分数适应性差、装置总压缩功耗高的方法，以改善脱甲烷塔第二股进料气质为方向，采用改变进料气源、两级分离、汽提精馏的措施提出 RSVF、RSVG 工艺，借鉴 SRC 工艺侧线抽出特点及改变气源的方式提出 SRCR 工艺，3 种改进工艺均有效提高第二股进料中 CH<sub>4</sub> 摩尔分数，大幅降低了外输干气回流比，前 2 种工艺也可有效降低第二股进料中 CO<sub>2</sub> 摩尔分数，脱甲烷塔冻堵裕量有所增加。

(2) 在 GPM 为 3.92 和 6.21 的条件下，与 RSV 工艺相比，RSVF 工艺节能空间最大，总压缩功耗分别降低了 231.2、611.9 kW，脱甲烷塔冻堵裕量分别提高了 1.5、0.8℃，可见 GPM 值越大，RSVF 工艺节能效果越明显，再考虑投资成本，推荐选用 RSVF 工艺。

(3) RSVF 工艺对原料气压力适应性好，适用于原料气压力 $>4.5$  MPa 的工况条件，同时原料气压力越高，RSVF 工艺节能效果越显著。RSVF 工艺对气质贫富及 CO<sub>2</sub> 摩尔分数的适应性显著增强，随着气质变富总压缩功耗及其增速显著降低，当 CO<sub>2</sub> 摩尔分数 $\leq 2\%$  时，乙烷回收率均在 93% 以上。

## 参考文献

- [1] 周鑫. 国内外乙烯产业发展趋势研判[J]. 当代石油石化, 2019, (8): 22-29.
- [2] 杨志宝, 金秀华, 肖杰. 2017 年国内外乙烯工业发展态势分析[J]. 化学工业, 2018, (4): 22-26.
- [3] 王品刚. 天然气凝液回收工艺[J]. 油气田地面工程, 2007, 26(8): 56-56.
- [4] 汪宏伟, 蒲远洋, 钟志良. 膨胀制冷轻烃回收工艺参数优化分析[J]. 天然气与石油, 2010, 28(1): 24-28.
- [5] 晏硕, 熊伟. 轻烃回收装置防止 CO<sub>2</sub> 冻堵技术探讨[J]. 化学工程与装备, 2013, (8): 80-83.
- [6] 李建刚. 中原油田第三气体处理厂改扩建工程技术总结[J]. 石油与天然气化工, 2002, 31(2): 63-66.
- [7] Ortloff engineers, Ltd. gas processing plants licensed to use ortloff technology[EB/OL]. [2019-06-17]. <https://www.ortloff.com/files/GasPPLicAll.pdf>.
- [8] 蒋洪, 何愈歆, 杨波, 等. 天然气凝液回收工艺 RSV 流程的模拟与分析[J]. 天然气化工, 2012, 37(2): 65-68.
- [9] 王宇, 陈小榆, 蒋洪, 等. RSV 乙烷回收工艺技术研究[J]. 现代化工, 2018, 38(2): 181-184.
- [10] Jin C, Lim Y. Economic evaluation of NGL recovery process schemes for lean feed compositions[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2018, 129: 297-305.
- [11] Jin C, Lim Y. Optimization and economic evaluation of integrated natural gas liquids (NGL) and liquefied natural gas (LNG) processing for lean feed gas[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 149: 1265-1273. ■