

# RSV 乙烷回收工艺技术研究

王 宇, 陈小榆\*, 蒋 洪, 蔡棋成

(西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500)

**摘要:**对 RSV 工艺的流程特性进行研究, 重点分析了外输干气回流比、低温分离器气相分流比以及脱甲烷塔操作压力对乙烷回收率以及装置系统能耗的影响。研究表明, 增大外输干气的回流量、适当提高分离器气相的分流比以及降低脱甲烷塔操作压力能有效提高乙烷回收率。通过对 RSV 工艺的气质适应性分析发现, 该流程对不同气质的原料气适应性都较好, 乙烷回收率都能达 87% 以上, 丙烷回收率均达 99.99%。

**关键词:**凝液回收; 乙烷回收工艺; 低温冷凝法; RSV 流程

**中图分类号:**TE645; TQ028.12

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2018)02-0181-04

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.02.043

## Technical research on RSV ethane recovery process

WANG Yu, CHEN Xiao-yu\*, JIANG Hong, CAI Qi-cheng

(College of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** This paper studies the process characteristics of recycle split vapor (RSV) process, and analyzes emphatically the influences of the reflux ratio of effluent dry gas, the gas phase split ratio for the low temperature separator and the operational pressure of the demethanizer tower on the ethane recovery rate and the energy consumption of the facility system. The results show that the ethane recovery rate can be improved by increasing the reflux amount of effluent dry gas, increasing the gas phase split ratio of the separator and reducing the operational pressure of the demethanizer tower. In addition, it is found from analyzing the adaptability of RSV process against gas quality that this process exhibits good adaptability against any feed gas with ethane recovery rate exceeding 87% and propane recovery rate reaching 99.99%.

**Key words:** condensate recovery; ethane recovery process; low-temperature condensation method; recycle split vapor process

天然气中除甲烷外, 一般还含有一定量的乙烷、丙烷以及更重的烃类组分。对天然气凝液进行回收, 一方面可以控制天然气的烃露点以达到商品气质量指标, 避免在管输过程中出现气液两相流动; 另一方面, 回收的乙烷、液化石油气和稳定轻烃等产品可用作燃料和化工原料<sup>[1]</sup>。石油化学工业的龙头——乙烯, 就是用天然气凝液作为裂解原料发展起来的。乙烷作为裂解原料具有成本低、收率高和生产装置稳定性强的优点<sup>[2]</sup>。近年来, 我国坚持乙烯原料轻质化和优质化, 合理利用国内凝析气田原料气中丰富的乙烷资源, 裂解原料优化对实现乙烯工业快速发展具有重要的意义。

## 1 国内外乙烷回收工艺

目前, 国内天然气凝液回收装置主要回收丙烷, 仅有少数装置回收乙烷产品, 包括大庆油田、中原油田和辽河油田已建有天然气深冷回收装置<sup>[3-4]</sup>。但与国外相比, 国内天然气乙烷回收技术仍存在一定的差距, 为实现扩大生产规模、提高产品回收率、降低装置能耗和加强系统热集成的技术目标, 对国外先进乙烷回收工艺技术进行研究。

国外的乙烷回收装置主要采用膨胀机制冷、制冷剂制冷+膨胀机制冷的低温分离工艺, 针对不同的气质和工况, 以提高乙烷回收率、降低系统能耗为目标开发了多种乙烷回收新工艺。部分干气再循环工艺(recycle split vapor, RSV) 是美国 Ortloff 公司于 20 世纪 90 年代末在 GSP 工艺的基础上提出的一种高效乙烷回收工艺。该工艺凭借自身在乙烷回收率、操作灵活性和经济效益上的优势, 已在国外得到广泛应用, 部分 RSV 工艺应用情况如表 1 所示<sup>[5]</sup>。

表 1 RSV 工艺在国外的部分应用情况

处理厂	处理量/ (万 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	建设 时间
美国 Enable Midstream Wildhorse NGL Recovery Plant	570	2015 年
巴西 Comperj NGL Recovery Plant	1000	2014 年
加拿大 Saturn II Gas Plant	570	2013 年
乌兹别克斯坦 UGCC Project	1350	2012 年
玻利维亚 Gran Chaco NGL Plant Tr1	1500	2012 年
美国 MidMar Plant No. 3	270	2012 年
加拿大 Saturn Gas Plant	570	2011 年

收稿日期: 2017-08-18

作者简介: 王宇 (1991-), 男, 硕士生; 陈小榆 (1962-), 男, 副教授, 研究方向为流体力学、流变学、计算流体力学、油气储运, 通讯联系人, chenxiaoyu@swpu.edu.cn。

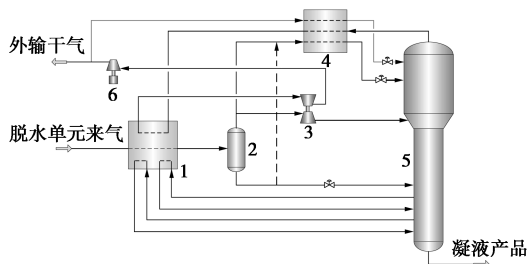
续表

处理厂	处理量/ (万 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	建设 时间
美国 Blacks Fork Train 2 NGL Recovery Plant	1000	2010 年
阿布达比酋长国 GASCO SGD Recovery Unit Train 1	950	2008 年
泰国 GSP-6	1900	2006 年

为实现我国油气田的高效开发,提高油气资源的有效利用率,以提高乙烷产品回收率、降低装置单位能耗为目标,对 RSV 乙烷工艺的流程特征进行研究,通过模拟分析该工艺对原料气气质变化的适应情况,为我国乙烷回收装置的多样化设计提供参考。

## 2 RSV 乙烷回收流程

RSV 工艺在气体过冷工艺(gas subcooled process, GSP)的基础上将压缩后的部分外输干气冷凝并节流作为回流送入脱甲烷塔顶部。回流的外输干气不断吸收气相中的乙烷及更重烃类组分,最大限度地减少乙烷和较重组分从塔顶的损失<sup>[6]</sup>。该工艺适用于压力大于 4.0 MPa 的原料气,乙烷回收率高且投资较低,对原料气气质适应性较强<sup>[7]</sup>。RSV 工艺流程如图 1 所示。



1—原料气换热器;2—低温分离器;3—透平膨胀机组;  
4—塔顶换热器;5—脱甲烷塔;6—外输气压缩机

图 1 RSV 乙烷回收工艺流程图

RSV 工艺采用外输干气回流的设计,可以使乙烷收率达到超高的水平(>96%)。同时,干气回流使流程在脱甲烷塔的操作压力较高的情况下仍有高乙烷收率,从而为脱甲烷塔提供一个更大的 CO<sub>2</sub> 冻堵裕量,降低塔顶几块塔板处形成 CO<sub>2</sub> 固体的可能性。在较高的操作压力下,与 GSP 工艺相比,RSV 有能力处理 CO<sub>2</sub> 含量更高的气体<sup>[8]</sup>。RSV 乙烷回收工艺的特点有:①操作灵活,回收率高,丙烷收率能超过 98%,乙烷收率能超过 96%;②脱甲烷塔压力设置范围大,有能力处理 CO<sub>2</sub> 含量较高的原料

气;③装置适应性强,可以在偏离设计流量的工况下运行,并保证产品的高回收率;④装置改造成本低,通过增加脱甲烷塔顶部的干气回流,GSP 工艺可以直接转换为 RSV 工艺。

## 3 RSV 乙烷工艺流程特性分析

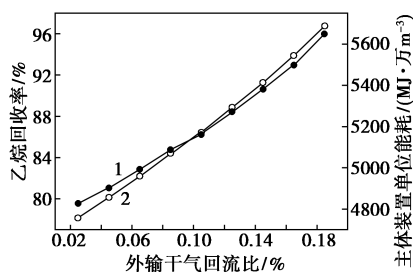
与传统乙烷回收工艺相比,RSV 工艺的最大特点在于增加了一股“回流”的外输干气作为脱甲烷塔顶进料,其次低温分离器气相分流比、脱甲烷塔操作压力也是该流程的关键性因素。本文中采用 Aspen HYSYS 软件对 RSV 乙烷回收工艺流程进行模拟,分析这些因素对乙烷回收率和主体装置单位能耗的影响。原料气进处理装置的压力为 6.0 MPa,温度为 30℃,处理量为 350×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。外输干气压力为 6.0 MPa。气质组成如表 2 所示。

表 2 原料气组成 %

组分	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	iC <sub>4</sub>
摩尔分数	1.02	0.35	88.29	7.41	1.50	0.30
组分	nC <sub>4</sub>	iC <sub>5</sub>	nC <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7+</sub>	
摩尔分数	0.31	0.13	0.09	0.15	0.45	

### 3.1 外输干气回流比的影响

图 2 为乙烷收率及主体装置单位能耗随外输干气回流比的变化曲线。由图可知,通过增加外输干气的回流比,RSV 工艺能够获得超高的乙烷回收率(>96%)。这是因为,随着外输干气回流比的不断增大,脱甲烷塔顶回流量也越来越大,这股进料几乎是纯甲烷,对塔内逆流而上的气相进行精馏,不断吸收气相中的乙烷及更重烃类组分,大幅提高乙烷回收率。但是,外输干气回流量的增加也会造成进入外输压缩机的气体流量增大,外输压缩机的轴功率随之增加,导致主体装置单位能耗不断增大。由此可以得出,通过调节外输干气回流比,RSV 工艺可



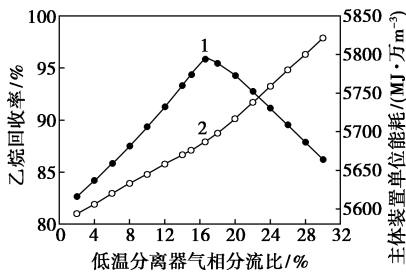
1—乙烷回收率;2—主体装置单位能耗

图 2 乙烷回收率及主体装置单位能耗随外输干气回流比的变化曲线

以达到超高的凝液产品回收率,但是高回收率也伴随着高能耗需求。

### 3.2 低温分离器气相分流比的影响

从RSV乙烷回收工艺流程图中看出,低温分离器部分气相不进入膨胀机而是在节流过冷后直接送入脱甲烷塔上部,减少膨胀机进料量能提高乙烷回收装置的处理能力,从而增强装置对原料气处理量的适应性<sup>[9]</sup>。图3为乙烷收率及主体装置单位能耗随低温分离器气相分流比的变化曲线。由图3可知,增加过冷气相的比例可以显著提高乙烷回收率,随着分离器过冷气相的比例不断增大,乙烷收率先不断上升,在分流比达到16.6%时乙烷收率达到最大,为96.0%。但是,再进一步增大气相分流比时,乙烷收率反而逐渐下降了。这是因为,进入脱甲烷塔上部的过冷气相中甲烷组分含量高(>80%),能够吸收塔上部气相中的乙烷及更重烃类组分,从而大幅提高乙烷回收率。但由于塔顶外输气能提供回流气相和过冷气相的冷量是有限的,过大的分流比造成过冷气相的入塔温度上升,导致这股物流对塔上部气相中的重烃组分的吸收效果变差,乙烷回收率随之下降。此外,随着分流比的不断增大,膨胀机组提供给压缩端的轴功率下降了3%,外输气压缩机轴功率上升了1.2%,导致主体装置单位能耗有所上升。



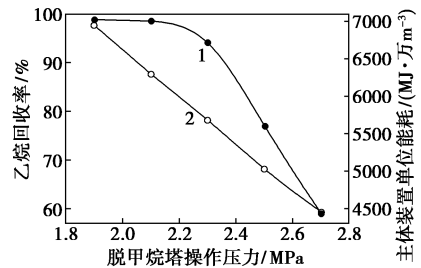
1—乙烷回收率;2—主体装置单位能耗

图3 乙烷收率及主体装置单位能耗随低温分离器气相分流比的变化曲线

### 3.3 脱甲烷塔操作压力的影响

图4为乙烷收率及主体装置单位能耗随脱甲烷塔操作压力的变化曲线。从图4中可以看出,随着脱甲烷塔操作压力的降低,乙烷回收率得到了显著提高。其中,当塔压低于2.0 MPa时,乙烷回收率更是达到了接近99%的超高水平。这是因为,脱甲烷塔的操作压力越低,乙烷回收装置通过膨胀机和节流阀获得的冷量越足,低温分离器和脱甲烷塔的温度随之降低,乙烷回收率不断提高。但当脱甲烷塔压力过低时,膨胀机的膨胀比过大,这会造成设

备投资成本增大、系统冷量过剩、脱甲烷塔底重沸器负荷大和系统能耗显著增加等问题。另一方面,当脱甲烷塔操作压力太高,脱甲烷塔塔底气液两相焓值接近,引起它们的热力学性质相似,导致气液分离效率变差,造成乙烷回收率明显下降。此外,脱甲烷塔的压力升高带来塔顶外输干气的压力随之升高,引起外输气压缩机的轴功率大幅下降,塔压从1.9 MPa升至2.7 MPa的过程中,干气外输压缩功率降低了39.7%,从而致使主体装置单位能耗也大幅下降。由此可以得出,应根据气质情况将脱甲烷塔的操作压力控制在一定范围内,一般为1.38~2.76 MPa<sup>[10]</sup>。



1—乙烷回收率;2—主体装置单位能耗

图4 乙烷收率及主体装置单位能耗随脱甲烷塔操作压力的变化曲线

## 4 RSV工艺对不同气质的适应性分析

为了研究气质组成对RSV乙烷回收工艺的影响,由贫至富选择5组不同的原料气气质进行模拟分析。原料气的进气压力为6.0 MPa,温度为30℃,处理量为 $600 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。外输干气压力为5.0 MPa。气质组成如表3所示。

表3 5种原料气气质组成(摩尔分数) %

原料气气质	1	2	3	4	5
N <sub>2</sub>	1.43	1.02	0.92	0.15	0.18
CO <sub>2</sub>	0.90	0.35	0.37	1.57	1.64
C <sub>1</sub>	89.24	88.56	86.56	81.14	76.59
C <sub>2</sub>	6.29	7.41	7.26	9.52	9.19
C <sub>3</sub>	1.39	1.49	3.12	4.45	6.78
iC <sub>4</sub>	0.25	0.29	0.64	0.80	1.87
nC <sub>4</sub>	0.27	0.30	0.59	1.39	2.55
iC <sub>5</sub>	0.08	0.12	0.12	0.03	0.57
nC <sub>5</sub>	0.06	0.08	0.08	0.43	0.42
C <sub>6</sub>	0.05	0.13	0.10	0.39	0.15
C <sub>7+</sub>	0.04	0.24	0.24	0.12	0.04

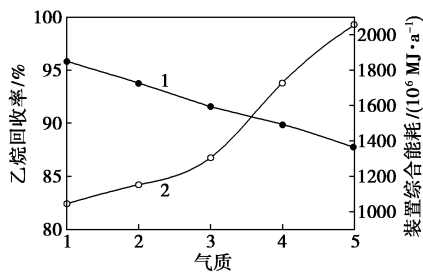
通过 5 种不同贫富的气质对 RSV 流程进行模拟计算,控制合理的流程关键参数(包括外输干气回流比、低温分离器气相分流比以及脱甲烷塔操作压力)以保证流程获得不同气质下的最高乙烷回收率,模拟结果如表 4 所示。

表 4 不同气质下的 RSV 流程主要模拟参数

原料气气质	1	2	3	4	5
外输干气回流比	0.135	0.145	0.150	0.155	0.170
低温分离器温度/℃	-41.023	-39.30	-37.00	-36.00	-33.50
低温分离器气相分流比	0.173	0.160	0.150	0.125	0.103
脱甲烷塔塔压/MPa	2.30	2.20	2.10	1.90	1.80
脱乙烷塔重沸器能耗/kW	4149	4850	4943	7244	7886
脱丁烷塔重沸器能耗/kW	1505	1614	3440	5567	9602
丙烷制冷压缩机功率/kW	1062.5	1295.5	1921.3	3156.5	4509.5
外输气压缩机能耗/kW	6587	7071	7188	8332	8371
乙烷回收率/%	95.82	93.78	91.58	89.87	87.70
丙烷回收率/%	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99
装置综合能耗/ (10 <sup>6</sup> MJ·a <sup>-1</sup> )	1043.97	1152.26	1304.70	1728.93	2055.03

注:装置综合能耗主要包括脱乙烷塔和脱丁烷塔重沸器能耗、外输气压缩机、丙烷制冷压缩机及泵功耗。

从表 4 中数据分析可得,RSV 乙烷回收工艺对不同贫富的原料气适应性都较好,乙烷回收率都能达 87% 以上,丙烷回收率均达 99.99%。随着原料气气质逐渐变富,低温分离器气相流量逐渐减小,RSV 流程通过膨胀机获得的冷量随之减小。此时,为了获得较高的乙烷回收率就必须增加外输干气回流比、增加丙烷制冷压缩机功率以及降低脱甲烷塔操作压力以获得更多的系统冷量,这势必会带来装置综合能耗的增加。由图 5 可以看出,原料气气质直接影响 RSV 工艺能够达到的最大乙烷回收率,若气质越贫,越容易得到更高的乙烷回收率,且装置综合能耗越低。



1—乙烷回收率;2—主体装置单位能耗

图 5 乙烷收率及主体装置综合能耗随原料气气质的变化曲线

## 5 结论

通过对 RSV 乙烷回收工艺的研究,可以得出以下几个结论。

(1) RSV 工艺的特点是通过将压缩后的外输干气“分流”,利用部分干气冷凝节流后作为脱甲烷塔顶回流。这股回流物能够对塔内逆流而上的气相进行精馏,不断吸收气相中的乙烷及更重烃类组分,从而大幅提高乙烷回收率。

(2) 通过对 RSV 的流程特性分析,适当地增加外输干气回流量和低温分离器气相分流比,以及降低脱甲烷塔操作压力均可以有效提高乙烷回收率。通过调节流程关键参数,RSV 工艺可以达到超高的乙烷回收率(>96%),但是高回收率也伴随着高能耗需求。

(3) 通过对 RSV 工艺的适应性分析,RSV 流程在不同贫富的气质条件下均能达到较高的乙烷回收率,工艺对原料气的适应性较强,是一种乙烷回收率高、适应范围广的高效乙烷回收流程。

## 参考文献

- [1] 刘刚.天然气凝液回收技术发展现状[J].油气田地面工程,2008,27(5):1-2.
- [2] 王松汉.乙烯装置技术与运行[M].北京:中国石化出版社,2009.
- [3] 张勇,武艳,范冠军,等.大型轻烃回收工艺的应用与优化[J].化工时刊,2007,21(9):24-27.
- [4] 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):63-66,51.
- [5] Orloff Engineers, Ltd. gas processing plants licensed to use ortloff-technology[EB/OL]. [2017-07-21]. <http://www.ortloff.com/files/GasPPLicAll.pdf>, 2014.
- [6] 蒋洪,蔡棋成.高压天然气乙烷回收高效流程[J].石油与天然气化工,2017,46(2):6-11.
- [7] Campbell R E, Wilkinson J D. Hydrocarbon gas processing: US, 5568737A[P]. 1996-10-29.
- [8] Pitman R N, Hudson H M, Wilkinson J D. 1998. Next generation-processes for NGL/LPG recovery [A]. In: Presented at the 77th Annual Convention of the Gas Processors Association[C]. DallasTX, 1998.
- [9] 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:C1 化学与化工,2012,37(2):65-68.
- [10] Gas Processors Suppliers Association. GPSPA engineering data books [C]. 13th Ed. Gas Processors Suppliers Association, Canada: Energy Processing, 2012:423. ■