

基于RSV流程的富气乙烷回收工艺改进

蒋洪¹, 胡成星^{1,2*}

(1.西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500;

2.中国石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:为提高乙烷回收流程的抗CO₂冻堵能力,基于RSV流程提出了一种抗冻堵能力强的富气乙烷回收工艺改进流程RSVP流程。针对3种高含CO₂且气质较富的天然氣,对RSV流程和RSVP流程的总压缩功耗和CO₂冻堵裕量以及对CO₂适应性进行了对比分析。研究表明,RSV流程和RSVP流程的装置综合能耗基本相同,但RSVP流程的抗CO₂冻堵能力较强;不论原料气中CO₂摩尔分数如何变化,RSVP流程的CO₂冻堵裕量一直比RSV流程高,且对CO₂的适应性较强。对RSVP流程进行机理分析研究表明,相比脱甲烷塔顶不加重烃,加入重烃时脱甲烷塔CO₂冻堵裕量、乙烷回收率以及外输气丙烷摩尔分数均增高,脱甲烷塔上部CO₂摩尔分数下降,气相乙烷摩尔分数下降且气相甲烷摩尔分数升高,说明过冷的重烃进入脱甲烷塔顶具有吸收CO₂和冷凝乙烷组分的效果,但会导致重烃气化进入外输气中。最后对RSVP流程进行了特性分析,研究表明,预冷分离温度和液相分流比直接影响进入脱甲烷塔顶的重烃量,预冷分离温度保持在10~15℃且预冷分离器液相分流比保持在60%~80%时较为适宜。

关键词:富气;乙烷回收;工艺改进;CO₂冻堵裕量;对比分析;机理分析;特性分析

中图分类号:TE646

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)07-0206-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.07.044

Improvement of ethane recovery from rich gas process based on RSV process

JIANG Hong¹, HU Cheng-xing^{1,2*}

(1.Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

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

Abstract:In order to improve the ethane recovery process's anti ability against CO₂ freeze-plugging, RSVP, an improved process for recovering ethane from rich gas, is proposed on the basis of RSV process. As for three kinds of natural gas with high CO₂ content and rich temperament, the comparative analysis is performed for total compression power consumption and CO₂ freezing-plugging margin of RSV process and RSVP process, and the adaptability of CO₂. The research shows that RSVP process exhibits the same comprehensive energy consumption as that of RSV process, but RSVP has a stronger assistance to CO₂ freeze-blocking than RSV. No matter how the molar fraction of CO₂ in raw gas changes, RSVP always gives a higher CO₂ freeze-plugging margin than RSV, and shows a stronger adaptability to CO₂. The mechanism analysis shows that compared with the scene without addition of heavy hydrocarbons at the top of the methane removal tower, CO₂ freeze plugging margin, ethane recovery rate and the content of propane in export gas all increase when heavy hydrocarbons are added. In addition, CO₂ content at upper part of the methane removal tower also decreases, ethane content in gas phase decreases and methane content in gas phase increases, indicating that the overcooled heavy hydrocarbons entering the methane removal column has the effect of absorbing CO₂ and condensing ethane components, but will cause heavy hydrocarbon to enter the export gas. The results through analyzing the characteristics of RSVP process show that the pre-cooling separation temperature and liquid phase split ratio can directly affect the amount of heavy hydrocarbons entering the top of the methane removal tower. The pre-cooling separation temperature shall be maintained at 10~15℃ and the liquid phase split ratio in pre-cooling separator shall be kept in the range of 60%~80%.

Key words:rich gas; ethane recovery; process improvement; CO₂ freezing plug margin; comparative analysis; mechanism analysis; characteristic analysis

天然气乙烷回收常采用低温分离法,脱甲烷塔的操作温度可达-90~-110℃,当原料气中CO₂摩尔分数较高时可能会导致乙烷回收装置回收率下降及固体CO₂形成,严重时会造成乙烷回收装置发生冻堵,产生安全隐患。

为了控制乙烷回收装置发生CO₂冻堵,国外提

出了一些适用于含CO₂天然气的乙烷回收工艺。美国Ortloff公司开发了RSV工艺,具有乙烷回收率高、对原料气气质适应性较强的特点^[1],是目前应用较广泛的乙烷回收工艺之一^[2],但原料气中CO₂摩尔分数较高时RSV工艺存在CO₂冻堵的隐患。在RSV工艺的基础上Ortloff公司又开发了RSVE

收稿日期:2019-09-01;修回日期:2020-04-28

作者简介:蒋洪(1965-),男,硕士,教授,研究方向为油气集输及处理技术、系统能量综合利用及节能技术和汞污染控制技术;胡成星(1994-),男,硕士生,研究方向为天然气凝液回收与液化的热力学研究,通讯联系人,1101134125@qq.com。

工艺,该工艺将部分低温分离器液相掺入外输气回流过冷进入脱甲烷塔顶,改善塔上部 CO_2 固体形成情况,可提高工艺对原料气 CO_2 适应性^[3]。美国 Mark^[4]在专利(US6516631B1)中提出了一种可降低脱甲烷塔内 CO_2 摩尔分数的工艺,该工艺通过脱乙烷塔顶气相再循环进入脱甲烷塔的中部,以降低脱甲烷塔中部的 CO_2 摩尔分数,从而控制脱甲烷塔内 CO_2 冻堵问题,但增加循环压缩机的投资成本以及压缩功耗,使得整体经济效益不佳。2009年,美国 Fluor Technologies 公司的 John 等^[5]在专利(US20070300031A1)中提出了一种工艺,该工艺通过增加原料气进入膨胀机的气量,提高脱甲烷塔温度,从而提高装置的抗冻堵能力,但原料气中 CO_2 摩尔分数较高时乙烷回收率不能较高。2016年,John 等^[6]在专利(US20160187058A1)中提出一种工艺,该工艺中脱甲烷塔的侧抽物流通过冷凝脱乙烷塔顶的回流气而升温,再送回抽出位置下部,从而提高脱甲烷塔温度,提高 CO_2 冻堵裕量,但该措施导致脱甲烷塔整体温度升高,乙烷回收率大幅下降。国内外针对原料气中 CO_2 摩尔分数高且气质较富的乙烷回收工艺研究较少,并且目前控制 CO_2 冻堵问题的乙烷回收工艺多存在流程较复杂、回收率低、能耗较高的缺陷,开发出一种抗 CO_2 冻堵能力强的高效富气乙烷回收流程,对提高乙烷回收率及保证装置良好运行具有一定的实用意义。

本文中采用国内气质较富和 CO_2 摩尔分数较高的天然气,基于过冷重烃吸收 CO_2 和冷凝乙烷气体的思想,对 RSV 流程提出改进工艺——RSVP 流程,在 CO_2 摩尔分数较高的富气气质下对 2 种流程进行对比分析,说明 RSVP 流程的改进优势,并对 RSVP 流程进行机理分析和特性分析,找出 RSVP 流程改进优势的原因和确定出特性参数的适宜范围。

1 富气乙烷回收流程改进

现如今,全世界广泛采用的乙烷回收流程为 RSV 流程,对于低压富气,需增加增压单元和丙烷制冷循环,工艺流程如图 1 所示。RSV 流程采用从外输干气中分出 1 股回流至脱甲烷塔顶,由于该回流富含甲烷,对脱甲烷上部乙烷具有较好的冷凝效果,使乙烷回收率达到较高水平;然而,由于 CO_2 和乙烷的沸点较高,富气在低温分离时大部分 CO_2 和乙烷进入气相,使得脱甲烷塔中上部的 CO_2 和乙烷摩尔分数较高,乙烷回收率和 CO_2 冻堵裕量降低。

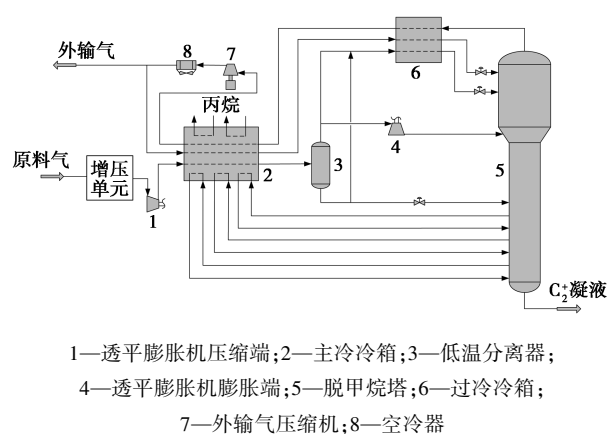


图1 RSV乙烷回收工艺流程

为了提高富气情况下 RSV 流程的乙烷回收率和抗 CO_2 冻堵能力,本文中基于过冷重烃吸收乙烷和 CO_2 的思想,提出一种高效的富气乙烷回收流程——带闪蒸的部分干气再循环工艺流程(recycle split vapor with precooling separation process),以下简称 RSVP 流程,工艺流程如图 2 所示。

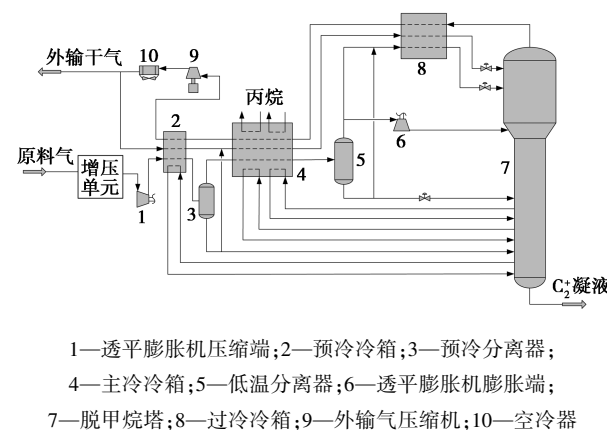


图2 RSVP乙烷回收工艺流程图

相对 RSV 流程,RSVP 流程改进之处在于:采用预冷分离器分离出富气中的重组分,富含重组分的凝液部分过冷后进入脱甲烷塔上部,对 CO_2 和乙烷气体进行吸收和冷凝,具有较高的乙烷回收率水平和抗 CO_2 冻堵能力。

2 乙烷回收流程对比分析

为说明改进流程的优势,本文中采用 HYSYS 软件对 RSV、RSVP 乙烷回收流程进行模拟计算并对比分析。模拟计算时,通过合理控制流程的关键工艺参数(包括外输干气回流比、低温分离器温度、物流分流比等),在保持 2 种流程的乙烷回收率相同,对比 2 种流程的能耗和脱甲烷塔 CO_2 冻堵裕量。

2.1 模拟条件

本文中原料气采用富气气质,组成见表 1。气质贫富仅基于天然气中乙烷或丙烷组分的摩尔分数。如果乙烷及以上组分的摩尔分数大于 10%且丙烷以上组分的摩尔分数大于 4%,则天然气是富气^[7]。原料气的进气压力为 0.3 MPa,温度为 25℃,处理量为 $300 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,外输干气压力大于 1.8 MPa。流程模拟的气液平衡模型选用 Peng-Rob1son 方程,焓焓模型采用 Lee-Kesler 方程,模拟条件主要控制参数见表 2。

表 1 富气气质组成(摩尔分数) %

气质组成	N ₂	CO ₂	C ₁	C ₂	C ₃	i-C ₄	n-C ₄
富气一	0.655	2.059	78.918	8.348	5.096	1.068	2.075
富气二	3.009	2.050	72.852	8.224	5.552	1.168	4.077
富气三	0.151	2.027	66.877	9.384	8.808	3.192	4.966

气质组成	i-C ₅	n-C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
富气一	0.655	0.383	0.332	0.262	0.121	0.020	0.010
富气二	0.663	1.246	0.592	0.343	0.163	0.045	0.016
富气三	1.655	1.411	0.919	0.452	0.139	0.018	0.001

表 2 模拟条件主要控制参数

参数	数值	参数	数值
脱甲烷塔压降/kPa	30	冷箱压降/kPa	30
脱甲烷塔塔板数/块	26	空冷器出口温度/℃	50
脱乙烷塔压降/kPa	30	膨胀机绝热效率/%	85
脱乙烷塔塔板数/块	26	压缩机绝热效率/%	75
冷箱夹点温度/℃	4.0	乙烷回收率/%	95

注:本文中原料气、物流点及设备操作的压力均为绝对压力。

2.2 流程对比分析

流程对比主要从脱甲烷塔 CO₂ 冻堵裕量与能耗进行分析,能耗以主体装置的压缩功进行衡量。在 3 组富气气质下,2 种乙烷回收流程的对比情况见表 3,2 种乙烷回收流程的抗 CO₂ 冻堵能力对比结果如表 4 所示。

表 3 2 种乙烷回收流程对比情况

原料气气质	富气一		富气二		富气三	
	RSV	RSVP	RSV	RSVP	RSV	RSVP
原料气前增压压力/MPa	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
原料气进冷箱压力/MPa	5.126	5.208	5.168	5.223	5.018	5.128
预冷分离温度/℃	—	14	—	16	—	18
预冷分离器液相流比/%	—	68	—	50	—	56
低温分离温度/℃	-47	-47	-46	-46	-43	-43

低温分离冷凝率/%	28.30	24.10	33.82	25.26	52.48	41.32
低温分离器液相分流比/%	71	85	73	80	66	54
外输干气回流比/%	8.38	7.0	8.40	7.5	13.36	14.62
脱甲烷塔压力/MPa	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
脱甲烷塔 CO ₂ 冻堵裕量/℃	1.611	5.776	1.858	6.324	2.551	7.060
丙烷损失量/(kg·h ⁻¹)	7.3	74	45.5	90.9	33	176
制冷循环压缩机功/kW	2054	1905	2143	2101	3327	3320
回流气压缩机功/kW	412	335	395	344	581	632
原料气压缩机功/kW	14749	14749	14622	14622	14417	14417
总压缩功/kW	17216	16990	17160	17067	18326	18170
乙烷回收率/%	95.00	95.00	95.00	95.00	95.00	95.00
丙烷回收率/%	99.94	99.40	99.67	99.34	99.88	99.36
外输气热值/(MJ·m ⁻³)	37.44	37.41	36.78	36.69	37.89	37.72

表 4 2 种乙烷回收流程抗 CO₂ 冻堵能力对比结果图/℃

流程	富气一	富气二	富气三
RSV 流程	1.611	1.858	2.551
RSVP 流程	5.776	6.324	7.060

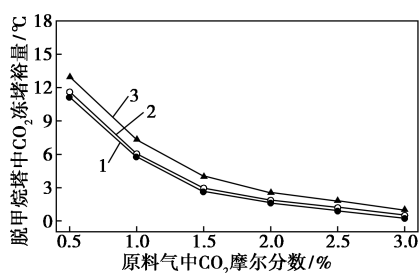
由表 3 可知,原料气气质越富,RSV 流程和 RSVP 流程的总压缩功耗均越大。RSVP 流程的总压缩功耗略低于 RSV 流程 200 kW 左右,占总压缩功的 1%左右,2 种流程的总压缩功基本相同。

由表 4 可知,RSVP 流程的抗 CO₂ 冻堵能力明显高于 RSV 流程,CO₂ 冻堵裕量高 4℃ 以上。并且,原料气气质越富,2 种流程的 CO₂ 冻堵裕量均越高,但 RSVP 流程的 CO₂ 冻堵裕量比 RSV 流程高得更多。

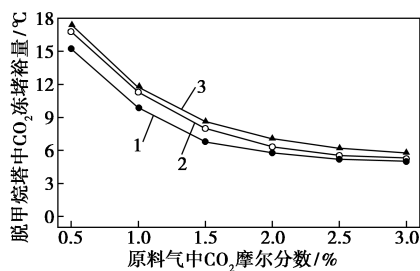
2.3 流程适应性分析

为说明 RSVP 流程的抗 CO₂ 冻堵能力强的优势,对 2 种流程进行适应性分析。适应性分析主要分析原料气中 CO₂ 摩尔分数变化对 2 种流程的抗 CO₂ 冻堵能力的影响,3 种富气下 CO₂ 摩尔分数对 RSV 流程和 RSVP 流程的 CO₂ 冻堵裕量影响如图 3 所示。

由图 3 可知:①随着原料气中 CO₂ 摩尔分数逐渐增多,RSV 流程和 RSVP 流程的 CO₂ 冻堵裕量均下降,但 RSVP 流程的 CO₂ 冻堵裕量一直比 RSV 流程高,且 CO₂ 冻堵裕量大于 5℃,抗 CO₂ 冻堵能力明显强于 RSV 流程。②随着富气气质变富,重组分摩尔分数变多,RSVP 与 RSV 流程的 CO₂ 冻堵裕量均增加。



(a) RSV 流程



(b) RSVP 流程

1—富气一;2—富气二;3—富气三

图3 3种富气下CO₂含量对2种流程CO₂冻堵裕量影响

3 改进流程机理分析

相对RSV流程,RSVP流程的改进之处在于向外输回流气中混入重烃组分一起进入脱甲烷塔顶。为说明RSVP流程抗CO₂冻堵优势的原因,对RSVP流程进行机理分析。机理分析时,改变是否向脱甲烷塔顶加入重烃,观察RSVP流程的乙烷回收率、脱甲烷塔各个塔板上CO₂冻堵裕量以及外输干气中丙烷等重烃含量的变化情况,并分析脱甲烷塔上部各个塔板CO₂、甲烷及乙烷气相摩尔分数变化情况。

3种富气下RSVP流程中脱甲烷塔顶是否加入重烃对脱甲烷塔CO₂冻堵裕量、乙烷回收率以及外输气中丙烷摩尔分数的影响情况如表5所示,是否加入重烃对脱甲烷塔上部塔板CO₂摩尔分数影响情况如图4所示,是否加入重烃对脱甲烷塔上部塔板气相甲烷及乙烷摩尔分数影响情况如图5所示。

表5 脱甲烷塔顶是否加重烃对RSVP流程的影响情况

原料气气质	富气一		富气二		富气三	
	加烃	不加烃	加烃	不加烃	加烃	不加烃
冻堵裕量/℃	5.776	0.0083	6.431	-1.296	7.060	-1.580
乙烷回收率/%	95.00	90.204	95.01	88.93	95.00	84.18
外输气中丙烷流量/(kg·h ⁻¹)	74.0	10.3	90.9	32	175.6	15.7

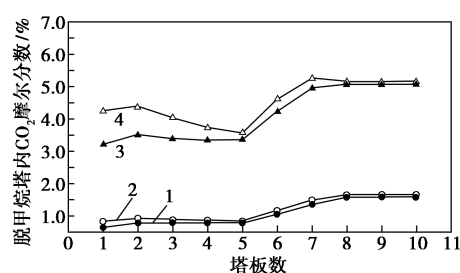
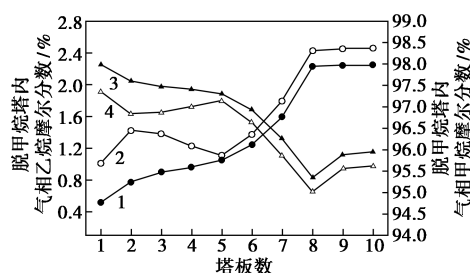
1—加入重烃气相中;2—不加重烃气相中;
3—加入重烃液相中;4—不加重烃液相中图4 是否加重烃对脱甲烷塔内CO₂摩尔分数的影响1—加入重烃气相中乙烷;2—不加重烃气相中乙烷;
3—加入重烃液相中甲烷;4—不加重烃液相中甲烷

图5 是否加重烃对脱甲烷塔内气相乙烷/甲烷摩尔分数的影响

由表4可知:①相比脱甲烷塔顶不加重烃,加入重烃时乙烷回收率和CO₂冻堵裕量均较高,说明向脱甲烷塔顶加入重烃既能提高乙烷回收率又能提高CO₂冻堵裕量。②相比不加重烃,向塔顶加入重烃时外输气中丙烷摩尔分数明显增大,说明向塔顶加入重烃在提高乙烷回收率和CO₂冻堵裕量的同时重烃损失量增加。

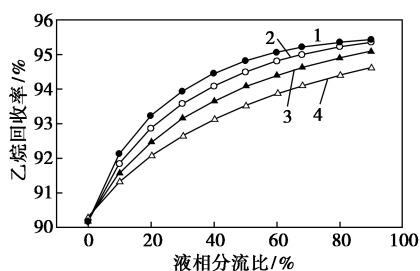
由图4可知,脱甲烷塔顶加入重烃时各个塔板上气液两相中CO₂摩尔分数明显低于不加重烃时,说明加入重烃对脱甲烷塔上部的CO₂具有吸收效果,越接近塔顶重烃加入口,吸收效果越明显。

由图5可知,相比脱甲烷塔顶不加重烃,加入重烃时脱甲烷塔上部各塔板上气相乙烷摩尔分数均较低且气相甲烷摩尔分数均较高,越接近塔顶重烃加入口,气相乙烷和甲烷摩尔分数差距越大,说明加入重烃对脱甲烷塔顶气相中的乙烷具有冷凝效果,能减小外输干气中乙烷组分摩尔分数,提高乙烷回收率。

4 改进流程特性分析

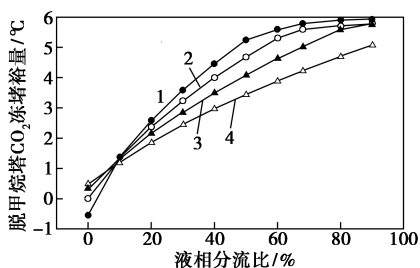
RSVP流程的特性是向脱甲烷塔顶加入重烃,这能提高乙烷回收率和CO₂冻堵裕量,但会引起脱甲烷塔顶干气中的丙烷摩尔分数增高,增加了丙烷

等重烃损失。为控制丙烷等重烃损失量在合理范围内,需对 RSVP 流程进行特性分析,特性参数为预冷分离器温度和液相分流比。原料气气质为富气一时,预冷分离温度和预冷分离器液相分流比对乙烷回收率和脱甲烷塔 CO_2 冻堵裕量及外输气中丙烷流量的影响如图 6~图 8 所示。



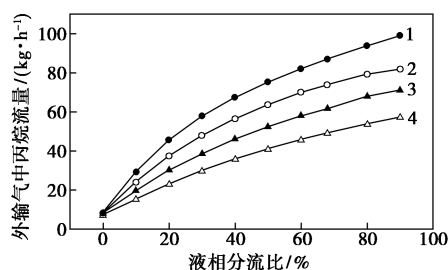
预冷温度:1—10℃;2—14℃;3—18℃;4—22℃

图 6 预冷分离器温度和液相分流比对乙烷回收率的影响



预冷温度:1—10℃;2—14℃;3—18℃;4—22℃

图 7 预冷分离器温度和液相分流比对 CO_2 冻堵裕量的影响



预冷温度:1—10℃;2—14℃;3—18℃;4—22℃

图 8 预冷分离器温度和液相分流比对丙烷损失量的影响

由图 6 可知:①预冷分离温度越低,乙烷回收率越高,这是因预冷分离温度越低,预冷分离器液相越大,同一液相分流比下进入脱甲烷塔顶的重烃量越多,对塔顶气相乙烷的冷凝效果越好。②随着预冷分离器液相分流比增加,乙烷回收率逐渐增高,但增幅逐渐变缓,最终保持在 95% 左右,这是因随着液相分流比增加,进入脱甲烷塔顶的重烃增多,重

烃对气相中乙烷冷凝越多,但重烃过多时,气相中乙烷摩尔分数微小,重烃对乙烷的冷凝效果减弱。

由图 7 可知:①当预冷分离器液相分流比为零,即不向脱甲烷塔顶加入重烃时,预冷分离温度越低,脱甲烷塔内 CO_2 冻堵裕量越低,这是因预冷分离温度越低,预冷分离器液相量越大,更多的重烃进入脱甲烷塔下部,对脱甲烷塔上部的 CO_2 吸收效果减小。②随着预冷分离器液相分流比增加,进入脱甲烷塔顶的重烃增多,脱甲烷塔内 CO_2 冻堵裕量逐渐增高,但增幅逐渐变缓,最终保持在 5~6℃。这是因随着液相分流比增加,进入脱甲烷塔顶的重烃增多,重烃对 CO_2 吸收效果越大,但重烃过多时,脱甲烷塔上部 CO_2 摩尔分数微小,重烃对 CO_2 的吸收效果减弱。

由图 8 可知:随着预冷分离器液相分流比增加,外输气中丙烷流量也增高,并且预冷分离温度越低,外输气中丙烷流量越高。这是因预冷分离器液相分流比增加和预冷分离温度降低均会使进入脱甲烷塔顶的重烃量增多,重烃通过自身气化来吸收 CO_2 和冷凝乙烷,使得外输气中丙烷摩尔分数升高,外输气中丙烷流量在 50~100 kg/h。

综合分析图 6~图 8 可知,RSVP 流程通过向脱甲烷塔顶加入重烃保持较高的乙烷回收率和 CO_2 冻堵裕量,但增加外输气中丙烷等重组分摩尔分数。预冷分离温度保持在 10~15℃ 且预冷分离器液相分流比保持在 60%~80% 时较为适宜。

5 结论

(1) 富气中重烃含量多且冷凝率高,基于 RSV 流程提出了一种抗 CO_2 冻堵能力强的富气乙烷回收流程——RSVP 流程,该流程采用预冷分离器分离出富气中的重烃,部分重烃与外输回流气一起进入脱甲烷塔顶部,能提高脱甲烷塔抗 CO_2 冻堵能力。

(2) 不论原料气中 CO_2 摩尔分数如何变化,RSVP 流程的 CO_2 冻堵裕量均比 RSV 流程高 4℃ 以上;原料气气质越富,RSVP 流程的 CO_2 冻堵裕量比 RSV 流程高得越多,RSVP 流程的抗 CO_2 冻堵能力明显强于 RSV 流程。

(3) RSVP 流程通过向脱甲烷塔顶加入重烃,降低了脱甲烷塔顶 CO_2 摩尔分数和气相乙烷摩尔分数,说明重烃对 CO_2 具有吸收作用且对气相乙烷具有冷凝作用,能提高脱甲烷塔抗 CO_2 冻堵能力和乙烷回收率。

(下转第 216 页)

3 结论

设计沉淀+反渗透+纳滤多级组合工艺处理氯化钛渣,由实验数据可知本工艺不仅可使氯化钛渣废水达标排放,更可回收利用金属离子,实现固废资源化。根据各单元水质分析结果,得出以下结论。

(1)氯化钠的最终浓度为 79 092.5 mg/L,约为 7.9%,与最终目标 8% 只差 0.1%,可以说实验基本成功。因为考虑到工厂连续化大批量生产,盐的浓度会逐渐循环越来越高,在工厂中较容易实现 8%。

(2)各种金属离子以及硫酸根离子浓度均未超过上限,表明出水的纯度也达到了目标要求。

(3)在纳滤工艺中,目标离子氯离子的截留率较高,达到了 37.67%。因为纳滤膜本不能截留住氯离子,但是由于氯离子浓度较高,且设备压力不够,所以氯离子有小部分被截留在纳滤浓液中。但是由于该工艺为闭路循环,所以氯离子还在整个体系之中,没有浪费。

参考文献

- [1] 廖鑫,杨绍利,马兰,等.钛白粉制备技术的研究及发展[J].粉末冶金技术,2019,(2):147-152.
- [2] Meng Jiaqing, Wu Jiexia, Zhu Jianhong, et al. Worldwide patent distribution of titanium dioxide by chlorination process[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2014, 46(1): 11-13, 16.
- [3] Liu Feisheng, Xie Gang, Yu Zhanliang, et al. Research and development of titania powders by chlorination technology[J]. Materials Review, 2014, 28(15): 113-118.
- [4] He Siqi, Peng Tongjiang, Sun Hongjuan. Titanium recovery from Ti-bearing blast furnace slag by alkali calcination and acidolysis[J]. JOM, 2019, 71(9): 3196-3201.
- [5] Lakshmanan V I, Sridhar R, Chen J, et al. Development of mixed-chloride hydrometallurgical processes for the recovery of value metals from various resources[J]. Transactions of the Indian

Institute of Metals, 2016, 69(1): 39-50.

- [6] 余代权.四氯化钛生产中废渣的回收利用实践[J].钛工业进展,2002,(1):42-46.
- [7] 涂弈州,李慧强,杨平.工业废水中重金属离子处理方法与零排放分析概述[J].四川化工,2015,18(2):47-49.
- [8] 陈红盛,叶裕才,白庆中,等.聚合物辅助陶瓷膜处理重金属废水[J].膜科学与技术,2005,25(6):45-50.
- [9] Nuray Ates, Nigmet Uzal. Removal of heavy metals from aluminum anodic oxidation wastewaters by membrane filtration[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(22): 22259-22272.
- [10] Tao Shan, Xu Yandong, Gu Jianqiang, et al. Preparation of high-efficiency ceramic planar membrane and its application for water desalination[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2018, 7(2): 117-123.
- [11] 刘祥,李琛.膜分离工艺在重金属废水处理中的研究现状[J].四川化工,2013,(4):16-19.
- [12] Chougui A, Zaiter K, Belouatek A, et al. Heavy metals and color retention by a synthesized inorganic membrand[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2014, (7): 817-822.
- [13] Ali A, Ahmed A, Gad A. Chemical and microstructural analyses for heavy metals removal from water meida by ceramic membrane filtration[J]. Water Sci Technol, 2017, 75(2): 439-450.
- [14] 刘欢,何德文,朱佳.陶瓷膜短流程工艺处理重金属废水[J].化工进展,2015,34(9):3467-3471,3494.
- [15] Laure Dramas, Jean-Philippe Croue. Ceramic membrane as a pre-treatment for reverse osmosis: Interaction between marine organic matter and metal oxides[J]. Desalination and Water Treatment, 2013, 51: 7-9.
- [16] Yurcjevskii E B, Solodyannikov V V. Computational-experimental verification of technologies of utilizaiton of the concentrate formed in the reverse osmosis water demineralization cycle[J]. Thermal Engineering, 2018, 65(7): 487-492.
- [17] Dr Ahmed F Al-Alawy, Miqat Hasan Salih. Comparative study between nanofiltration and reverse osmosis membranes for the removal of heavy metals from electroplating wastewater[J]. University of Baghdad Engineering Journal, 2017, 23(4): 1-21.
- [18] Liu Feini, Zhang Guoliang, Meng Qin, et al. Performance of nanofiltration and reverse osmosis membranes in metal effluent treatment[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2018, 16(3): 441-445. ■

(上接第 210 页)

(4)RSVP 流程保持较高的乙烷回收率和 CO₂ 冻堵裕量是以增加外输气中丙烷等重组分摩尔分数为代价。预冷分离温度保持在 10~15℃且预冷分离器液相分流比保持在 60%~80%较为适宜。

参考文献

- [1] Campbell R E, Wilkinson J D. Hydrocarbon gas processing: US, 5568737A[P]. 1996-10-29.
- [2] Foglietta J H, Haddad H, Mowrey E R, et al. Cryogenic process utilizing high pressure absorber column: US, 6712880B2[P]. 2004-03-30.
- [3] Getu M, Mahadzir S, Long N V D, et al. Techno-economic analysis of

potential natural gas liquid (NGL) recovery processes under variations of feed compositions[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91(7): 1272-1283.

- [4] Mark A. Hydrocarbon gas processing: US, 6516631B1[P]. 2001-08-10.
- [5] John Mark, Santa Ana. Ethane recovery methods and configurations for high carbon dioxide content feed gases: US, 20070300031 A1[P]. 2007-12-27.
- [6] John Mark, Santa Ana. Ethane recovery methods and configurations: US, 20160187058A1[P]. 2016-06-30.
- [7] Tahmasebi S, Abbasabadi A B, Chasemi N, et al. Investigation of various feed conditions on NGL recovery plant energy and exergy performance: A case study[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 22: 83-89. ■