

富气乙烷回收流程混合冷剂制冷改进工艺

蒋洪¹, 李浩玉^{1*}, 胡成星², 王金波¹

(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油气田产能建设事业部, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:针对乙烷回收传统闭式混合制冷剂配比困难、运行调节复杂等现状,提出了开式混合制冷剂制冷的 GLSP 乙烷回收流程,为比较闭式、开式混合制冷剂制冷循环两者之间的差异,对两者进行热力学分析发现,开式混合制冷剂制冷的 GLSP 乙烷回收流程具有一定节能效果:综合能耗节约 0.9%, 焓损量减少约 14%, 且混合制冷剂制冷循环有效能利用略优于闭式混合制冷剂制冷循环。最后对提出的开式混合制冷剂工艺进行特性及适应性分析发现,该开式混合制冷剂制冷工艺较适合于超富气气质工况。

关键词:富气乙烷回收;闭式/开式混合冷剂;热力学分析;特性分析;适应性分析

中图分类号:TQ221.12

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)04-0218-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.04.046

Improved refrigeration process for mixed refrigerants in ethane recovery process from rich gas

JIANG Hong¹, LI Hao-yu^{1*}, HU Cheng-xing², WANG Jin-bo¹

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

2. Oil and Gas Field Productivity Construction Division, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China)

Abstract: In view of the difficulty in refrigerant blending and complex regulation in operation for traditional closed mixed refrigeration system of ethane recovery process, GLSP ethane recovery process with open mixed refrigerant refrigeration system is proposed. In order to compare differences between two systems, thermodynamic analysis is performed and it is found that GLSP ethane recovery process with open mixed refrigerant refrigeration system has a certain energy saving effect. It can save overall energy consumption by about 0.9%, and reduce exergy loss by about 14%. In addition, the effective energy utilization of the open mixed refrigerant refrigeration cycle is slightly better than that of the closed mixed refrigerant refrigeration cycle. It is found through analyzing the characteristics and adaptability that the open mixed refrigerant refrigeration process is more suitable for ultra-rich gas conditions.

Key words: ethane recovery from rich gas; closed/open mixed refrigerants; thermodynamic analysis; characteristic analysis; adaptability analysis

常规混合冷剂制冷循环常采用外加混合冷剂的闭式制冷循环,混合冷剂提供的冷量不受原料气贫富程度限制,对原料气压力无严格要求,流程简单且系统可靠性高,但是混合冷剂配比困难,运行调节复杂。针对闭式混合冷剂配比困难,本文中提出了一种混合冷剂制冷改进工艺,即采用原料气自身组分作为混合冷剂的开式混合冷剂制冷工艺。将对闭式、开式混合冷剂制冷工艺的综合能耗、焓损量及制冷循环进行对比分析,并研究新工艺特性及适应性情况。

1 制冷改进工艺

选择混合冷剂制冷的主体工艺为 GLSP (gas

and liquid subcooled process) 乙烷回收流程, GLSP 流程吸收了 GSP 流程和 LSP 流程的优点,脱甲烷塔顶进料为部分低温分离器气相(10%~30%),气质较贫进料保证了高的乙烷回收率,第二股进料采用气液混合—低温分离器少量气相(2%~5%)与低温分离器部分液相(70%~90%)混合过冷,较液相过冷节流后温度更低,保证了脱甲烷塔上部足够低的温度,有利于提高乙烷回收率,同时增强了对二氧化碳冻堵的控制能力。闭式混合冷剂制冷的制冷剂采用甲烷、乙烷、丙烷及丁烷组分混合,闭式混合冷剂制冷的 GLSP (C-GLSP) 乙烷回收流程如图 1 所示。

基于 C-GLSP 乙烷回收流程,提出了开式混合冷剂制冷的乙烷回收流程(O-GLSP),开式混合冷

收稿日期:2020-09-03;修回日期:2021-02-09

作者简介:蒋洪(1965-),男,硕士,教授,研究方向为油气集输及处理、系统能量综合利用及节能、汞污染控制;李浩玉(1995-),男,硕士生,研究方向为天然气凝液回收与能量系统的热力学分析,通讯联系人,2558193787@qq.com。

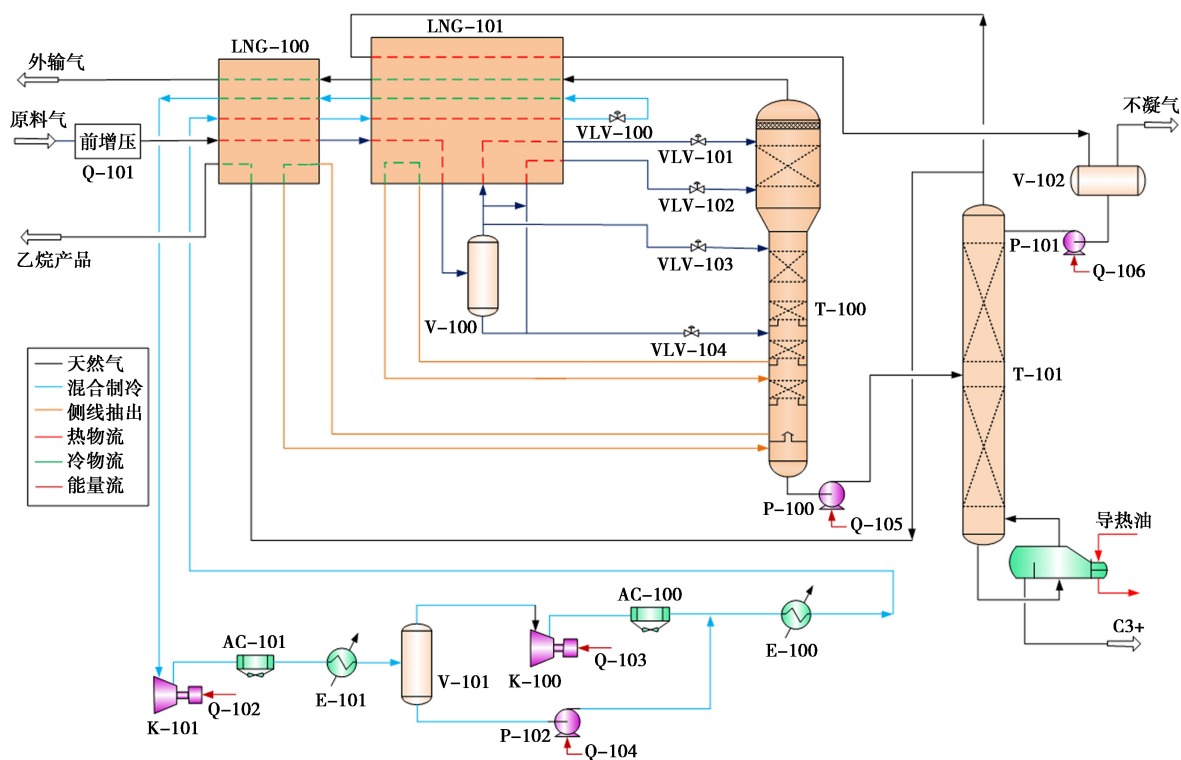


图 1 基于混合冷剂制冷工艺的 GLSP 乙烷回收流程

剂制冷的制冷剂采用从原料气中分离得到的液烃, 即从预冷分离器液相中分流部分液相作为混合冷剂

进入制冷循环,开式混合冷剂制冷的乙烷回收流程 见图 2。

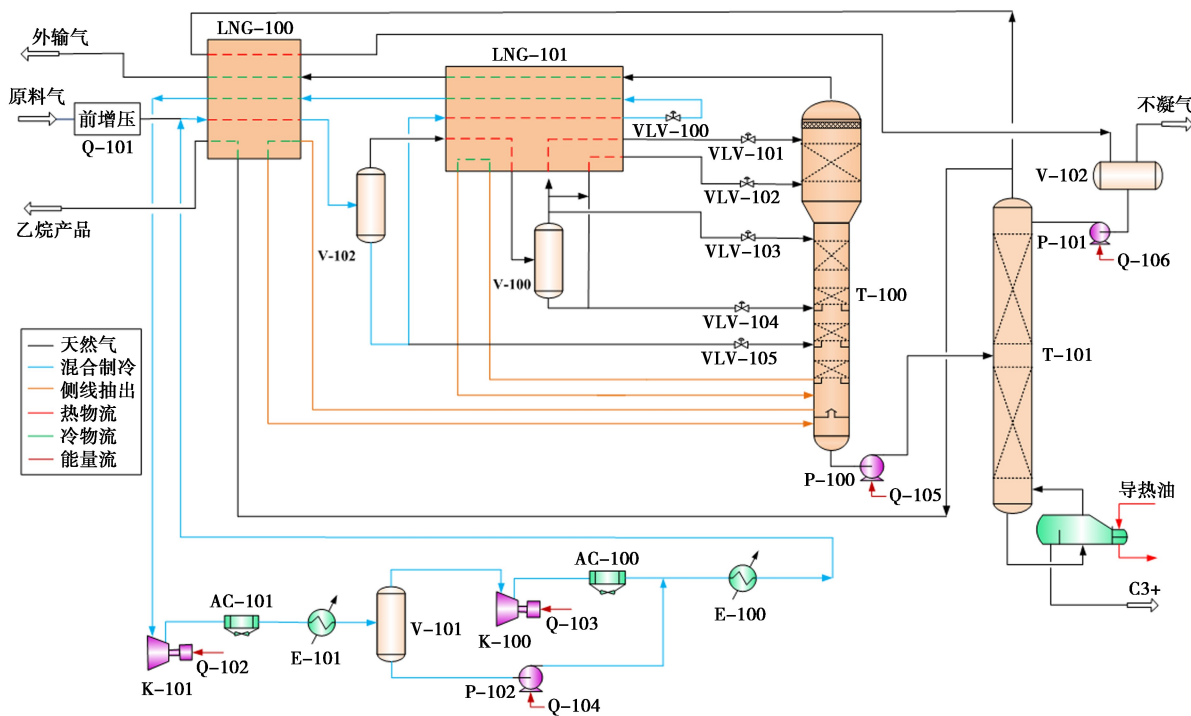


图 2 基于开式混合冷剂制冷工艺的 GLSP 流程

开式混合冷剂制冷循环工艺有如下特点。

数即可调节混合冷剂组分。

(1)混合制冷剂来源于天然气,避免了混合冷剂组分配比优化的复杂性,仅需控制分离温度等参

(2)混合冷剂制冷循环操作方便、简单灵活,只需根据气质条件调节原料气预冷分离温度和预冷分

离液相分流比来满足换热过程中的冷热物流温位匹配,调节能力较强。

(3)混合冷剂组分来源于天然气自身,既不会造成混合冷剂的浪费,也不需要单独建立冷剂储存罐,节省投资成本。

2 热力学分析

为研究闭式和开式混合冷剂制冷工艺的用能差异,采用 Aspen HYSYS 软件分别对这 2 种制冷工艺的乙烷回收流程进行流程模拟分析。流程模拟的气液平衡模型选用 Peng-Robison 方程,焓焓模型采用 Lee-Kesler 方程。原料气气质组成如表 1 所示,处理规模为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,进站压力为 0.3 MPa,进站温度为 25°C ,干气外输压力大于 1.7 MPa。

表 1 原料气气质组成 %

组分	N ₂	CO ₂	C ₁	C ₂	C ₃	i-C ₄	n-C ₄
摩尔分数	2.03	0.13	75.5	8.31	5.61	1.18	4.12
组分	i-C ₅	n-C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
摩尔分数	0.67	1.26	0.6	0.35	0.17	0.05	0.02

2.1 能耗分析

综合 SY/T 6331—2013《气田地面工程设计节能技术规范》及 GB/T 2589—2008《综合能耗计算通则》中能耗评价方法,对整个乙烷回收流程的综合能耗进行量化分析^[1-3],经过模拟计算,闭式和开式的制冷工艺能耗见表 2。

表 2 2 种流程能耗主要能耗对比

前增压 流程	冷却水 用量/ (kg· h ⁻¹)	制冷循环功耗/kW			脱乙烷 塔重沸 器负荷/ kW	综合 能耗/ (GJ· d ⁻¹)	单位 能耗/ (MJ· t ⁻¹)
		K-101	K-100	P-102			
闭式	149409.8	1452	735	7	186952.8	2014	2123
开式	115259.7	1346	791	12	186251.9	1997	2106

2 种流程制冷工艺能耗对比如表 2 所示,在开式混合冷剂制冷循环中,来自原料气预冷分离器的部分液相经过冷凝、节流、蒸发提供冷量后,经压缩后与原料气混合后,导致原料气温度降低,使进入压缩机混合冷剂温度降低,进而使得一级压缩机功耗降低,较闭式混合冷剂一级压缩功耗减少了 7.3%;但是由于开式混合冷剂压缩后混入原料气,压力需不低于原料气压力,故使得制冷系统二级压缩机功耗增加,相比于闭式系统二级压缩大约增加

7.6%;开式系统较闭式系统冷却水循环量减少约 22.9%。综合混合冷剂制冷系统能耗分析可得,开式混合冷剂制冷系统较闭式制冷循环综合能耗降低约 0.8%,由此可见,在该模拟工况下,从能耗角度分析开式混合冷剂制冷循环略节能。

2.2 焓分析

上节对制冷系统能耗进行了量化分析,但是未对能量转换的不可逆性及能量品质问题进行详细分析,基于热力学第一、二定律的焓分析方法,正是用于评价整个用能系统中能量品位和用能效率问题的有效方式,通过焓分析可揭示流程中不可逆性发生的位置及数量,以判断流程能量利用的合理程度及改进潜力^[4-7]。由于前增压相同,本节就不对比两者前增压部分的焓能情况。

系统中的焓包括化学焓、物理焓、势能焓和动能焓,势能焓和动能焓很小常被忽略。以 101.325 kPa、298.15 K 为环境基准态,则单位流量物流的总焓为:

$$e_x^{\text{tot}} = e_x^{\text{ph}} + e_x^{\text{ch}} \quad (1)$$

$$e_x^{\text{ph}} = h - h_0 - T_0(S - S_0) \quad (2)$$

$$e_x^{\text{ch}} = \sum_i x_i e_i^\theta + RT_0 \sum_i x_i \ln x_i \quad (3)$$

式中, h, h_0 为物流实际状态及环境基准态下的焓, kJ/mol; S, S_0 为物流实际状态及环境基准态下的熵, J/K; x_i 为混合体系中 i 组分的摩尔分数, %; e_i^θ 为 i 物质的标准焓, kJ/kg; R 为通用气体常数, 8.314 J/(mol·K)。

表 3 列出了 2 种不同制冷方式的 GLSP 乙烷回收流程中主要设备的焓损量、焓效率及焓损比率,结合图 3 可得,2 种流程中焓损量最大的仍然是塔设备,高达 35% 以上。其次是冷箱、压缩机、节流阀及冷却器(焓损量均在 10% 左右),且焓效率相差不大。本文中提出的开式制冷循环工艺的 GLSP 乙烷回收流程焓损量略低于闭式制冷工艺,更节能,更适用于本工程气质工况。

表 3 关键设备焓损量、焓效率及永损比率计算结果

设备	闭式制冷 GLSP 流程			开式制冷 GLSP 流程		
	焓损量/ kW	焓效率/ %	焓损比 率/%	焓损量/ kW	焓效率/ %	焓损比 率/%
LNG-101	224.90	10.08	15.77	323.60	57.30	17.22
LNG-102	314.10	84.66		182.10	87.93	
VLV-202	31.00	55.88	13.40	29.59	62.50	12.45
VLV-201	13.59	75.02		14.13	69.99	
VLV-101	108.10	21.26		121.30	20.94	
VLV-203	9.46	70.97		1.92	73.40	

续表

设备	闭式制冷 GLSP 流程			开式制冷 GLSP 流程		
	烟损量/ kW	烟效率/ %	烟损比 率/%	烟损量/ kW	烟效率/ %	烟损比 率/%
VLV-102	295.80	43.10		192.20	45.63	
VLV-104	—	—		6.73	43.54	
K-101	275.70	81.01	12.35	264.60	80.36	14.22
K-100	146.30	80.08		152.80	80.68	
T-201	1079.00	80.28	41.12	729.90	85.75	35.85
T-301	325.80	78.46		323.00	79.46	
E-100	59.19	25.65	2.45	42.75	24.48	2.22
E-101	24.60	29.00		22.32	30.26	
AC-101	263.80	79.94	14.91	244.90	80.60	18.04
AC-102	245.60	84.87		284.80	82.41	
合计	3416.94	76.36	100.00	2937.64	80.16	100.00

O-GLSP 流程中塔器的烟损占比 35.82%, 低于 C-GLSP 流程的 38.72%, 主要差异在于脱甲烷塔烟损量, O-GLSP 流程增加预分离器从经过预冷器的原料气中分离出原料气部分液相, 一者为制冷循环提供制冷剂, 避免混合冷剂配比等烦琐步骤; 二者原料气部分液相直接进入脱甲烷塔, 减少了原流程中低温分离器液相进塔流量, 使脱甲烷塔温位匹配更合理, 烟损量降低, 烟效率升高, 进而更节能。2 个不同制冷流程中的冷箱和节流阀烟损相差不大, 由于开式制冷工艺中增加 1 股进塔物流, 相比闭式多 1 个节流阀, 故开式工艺节流阀烟损量略高于闭式工艺(约 6.7 kW)。

2.3 制冷循环分析

本文中提出的开式制冷循环工艺烟损及烟效率低于原有闭式制冷循环, 制冷循环主要设备包括压缩机、冷箱、水冷器以及空冷器等, 乙烷回收工艺及制冷循环各关键设备烟损如表 4 所示。由表 4 可知, 本文中 2 个流程烟损差主要在于塔器设备, 开闭式混合冷剂制冷循环部分烟损几乎相等。

表 4 制冷循环各类关键设备烟损统计 kW

项目	压缩机	冷箱	水冷器	空冷器	节流阀	合计
闭式制冷循环	422.0	335.9	83.79	509.4	295.8	1646.89
开式制冷循环	417.4	329.5	65.07	529.7	192.2	1533.87

可以从能耗和烟利用角度对制冷循环进行量与质分析, 即制冷循环制冷系数和可用烟性能系数, 制冷系数(COP)是指单位功耗所能获得的冷量, 即为制冷剂在冷箱(蒸发器)中吸收的热量(Q_{ev})与压缩机对制冷剂增压所消耗的功(W_{co})之比^[8-9]; 从烟利

用角度可用烟性能系数($ECOP$)来描述^[10-11]。 $ECOP$ 的计算公式如式(4)所示:

$$ECOP = \text{Exergy provided} / \text{Work input} \quad (4)$$

开式混合冷剂制冷循环从预冷原料气中抽出部分液相作为制冷剂, 避免了闭式混合冷剂配比困难等问题。2 个制冷循环 COP 及 ECOP 见表 5, 由表可知本文中提出的开式混合冷剂制冷循环 COP 及 ECOP 均略高于闭式制冷循环, 这得益于开式混合冷剂来自于温位更低的预冷原料气液相, 闭式混合冷剂循环量及蒸发温度均高于开式混合冷剂制冷循环, 使制冷压缩功略高于开式混合制冷, 进而 COP 及 ECOP 略低。

表 5 制冷循环能量利用指标

项目	COP	ECOP
闭式制冷循环	2.34	0.62
开式制冷循环	2.46	0.68

根据以上对于开式及闭式混合冷剂制冷工艺的 GLSP 乙烷回收流程进行能耗、烟及制冷循环分析, 本文中提出的开式混合冷剂制冷循环的能耗及烟损均低于闭式混合冷剂制冷循环, 具有一定的节能效果。

3 特性及适应性分析

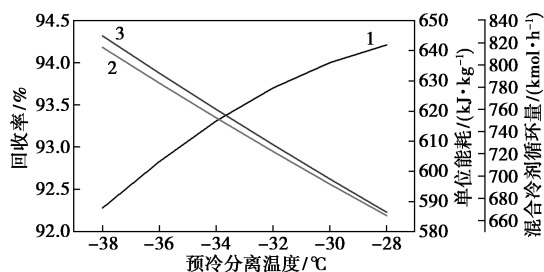
3.1 特性分析

本部分采用上文提到的气质及工况条件对本文中提出的开式制冷工艺的 GLSP 流程进行模拟分析, 以研究开式流程原料气预冷分离温度、预冷分离器液相分流比对乙烷回收流程能耗及回收率的影响规律, 对该工艺的关键特性进行分析评价。

(1) 预冷分离温度

当原料气预冷分离温度变化时, 经过预分离的气液相流量随之变化, 进而影响脱甲烷塔各股进料和制冷系统制冷剂循环量, 最终影响乙烷回收率及装置单位能耗。在各参数均调节至较优的情况下, 选取 $-38 \sim -28^\circ\text{C}$, 并以 2°C 为步长, 选取 5 组温度作为原料气预分离温度, 不同预分离温度下开式 GLSP 乙烷回收流程回收率、单位能耗及制冷剂循环量变化情况见图 3。由图可知随着原料气预分离温度降低, 乙烷回收率不断降低, 主要原因在于更多原料气预冷液化后直接进入脱甲烷塔, 脱甲烷塔塔顶回流的冷量减少导致回收率降低, 预分离液相增加伴随制冷剂循环量增加, 导致制冷循环压缩机功耗增加, 进而使装置单位能耗增大。基于以上分析, 该开式

流程应该在保证回收率一定的情况下,尽可能降低预分离温度,保证较低装置单位能耗,本工程确定回收率不小于 94%,选定了预分离温度为 -30°C ,得较低的装置单位能耗。

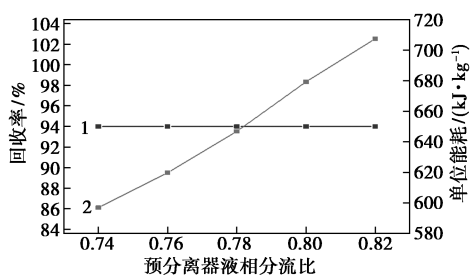


1—回收率;2—单位能耗;3—混合制冷剂循环量

图 3 预冷分离温度影响变化关系曲线

(2) 预冷分离器液相分流比

原料气预冷后天然气中较重组分富集到预冷分离器液相中,调节预冷分离器液相分流比即调节制冷剂循环量,制冷剂循环量变化对回收率及单位能耗影响变化见图 4。由图 4 可知原料气回收率几乎不随预冷分离器液相分流比变化而变化,这是因为该液相从脱甲烷塔下部进塔,温度较高故对回收率影响较小。但随着液相分流比增大,装置单位能耗不断增加,冷箱换热效果变差,造成冷量过剩,焓损增大。



1—回收率;2—单位能耗

图 4 预冷分离器液相分流比影响变化关系曲线

3.2 适应性分析

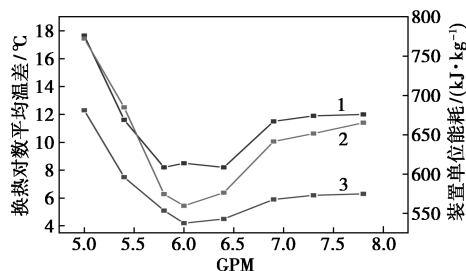
为研究开式混合制冷剂工艺在工业加工过程中的适用性,本文中对各种原料气工况进行适应性分析,对工程实践提供具体的可靠的模拟分析结果^[12]。

(1) 原料气气质适应性

由于开式制冷循环的制冷剂来自原料气,原料气气质变化即混合制冷剂组成发生变化,进而影响主体工艺制冷过程,并最终影响能耗及回收率。

在保证乙烷回收率为 94%。冷箱夹点最小为 3.5°C 的前提下,原料气气质变化对冷箱换热对数平均温差和回收装置单位能耗的影响曲线如图 5 所

示,随着 GPM 越大即原料气气质越富(尤其 GPM>6.0),主体装置能耗不断增加,冷热换热曲线匹配相对合理,2 个热集成冷箱对数平均换热温差均小于 12°C ,但是随着气质越贫(尤其对于富气和贫气)主体装置能耗和预冷冷箱换热对数平均温差显著增加,而且该冷箱夹点很难控制,这是因为天然气气质越贫,用于制冷循环的制冷剂高温位的组成越少,低温位的组成越多,为满足预冷冷箱换热曲线匹配要求导致混合制冷剂循环量增大,进而装置单位能耗增加。

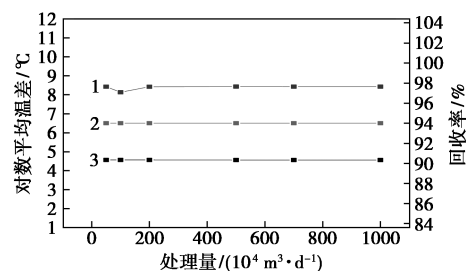


1—预冷冷箱换热对数平均温差;2—单位能耗;
3—主冷冷箱换热对数平均温差

图 5 原料气气质变化对预冷冷箱及单位能耗的影响

(2) 处理能力适应性分析

本乙烷回收装置处理能力为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (40°C , 2.84 MPa),为研究本装置处理能力适应性,选择 50、100、200、500、700、1 000 万 m^3 原料气来模拟分析本文中提出的开式混合制冷剂体系的适应能力,本装置回收工艺冷箱换热效果及回收率随处理量变化关系见图 6,由图可知,当原料气处理量不断增加时,不改变其他参数,本装置均能保证超过恒定 94%的回收率,且 2 个冷箱换热效果均无较大变化,均能保持夹点温度为 3.5°C 左右,换热对数平均温差 $<9^{\circ}\text{C}$,故本装置对原料气气量变化的适应性较强。



1—预冷冷箱换热对数平均温差;2—回收率;
3—主冷冷箱换热对数平均温差

图 6 原料气处理量影响变化曲线

4 结论

(1) 针对闭式混合冷剂组成配比困难、运行调节复杂等现状,提出了制冷剂来源于天然气的开式制冷循环工艺,避免了混合冷剂组分配比优化的复杂性,开式制冷工艺仅需控制分离温度等参数来调节混合冷剂组分;避免了原料气气质及运行工况条件变化牵扯到的混合冷剂重新配比及优化等烦琐步骤。

(2) 开式混合冷剂制冷循环操作方便、简单灵活,只需根据气质条件调节原料气预冷分离温度和预冷分离器液相分流比来满足换热过程中的冷热物流温位匹配,调节能力较强;开式混合冷剂制冷的冷剂组分来源于天然气自身,既不会造成混合冷剂的浪费,也不需要单独建立冷剂储存罐,节省投资成本。

(3) 对闭式和开式混合冷剂制冷循环工艺进行热力学分析发现,开式混合冷剂制冷循环能耗及焓损失都略低于闭式混合冷剂制冷循环,具有一定的节能作用。

(4) 提出的开式混合冷剂制冷工艺比较适合于超富气质的原料气,且对处理量变化的适应性较强,故该改进工艺可用于低压超富气(低压油田伴生气)的其他乙烷回收流程,值得推广应用。

参考文献

[1] 国家发展和改革委员会资源节约和环境保护司.GB/T 2589—

(上接第 217 页)

下降,弯曲模量和拉伸屈服强度分别提升了 300、5 MPa,结晶温度提升了 7℃,热变形温度提升了 15℃,各向收缩率比较均一,且与普通的均聚料 Z30S 相比^[14-15],物性指标优越、外观更漂亮、加工性好。均聚注塑聚丙烯的成功试生产为聚烯烃生产企业今后大规模稳定生产和产品牌号性能的优化提供了一定的参考价值。

参考文献

[1] Busico V, Cipullo R. Microstructure of polypropylene [J]. Progress in Polymer Science, 2001, 26(3): 443-533.
 [2] Moore E P. Polypropylene handbook [Z]. Munich: Hanser, 1996.
 [3] Galli P, Vecellio G. Polyolefins: The most promising large-volume materials for the 21st century [J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 2004, 42, 396-415.
 [4] 洪定一. 聚丙烯—原理、工艺与技术 [M]. 2 版. 北京: 中国石化出版社, 2011.
 [5] 包璐璐, 韩李旺, 杨廷杰, 等. 聚丙烯生产工艺技术及其产品进

2008. 综合能耗计算通则 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

- [2] SY/T 6331—2013. 气田地面工程设计节能技术规范 [S].
 [3] 杨雨林, 陈小榆, 何杰, 等. 乙烷回收改进流程用能分析 [J]. 石油与天然气化工, 2019, 48(4): 61-68.
 [4] 王强, 邓寿禄. 设备与工艺过程的用能分析及节能途径 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2012.
 [5] 全国能源基础与管理标准化技术委员会. GB/T 14909—2005. 能量系统焓分析技术导则 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
 [6] Shin J, Yoon S, Kim J K. Application of exergy analysis for improving energy efficiency of natural gas liquids recovery processes [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75: 967-977.
 [7] Chen J, Havtun H, Palm B. Conventional and advanced exergy analysis of an ejector refrigeration system [J]. Applied Energy, 2015, 144: 139-51.
 [8] Tirandazi B, Mehrpooya M, Vatani A, et al. Exergy analysis of C₂ recovery plants refrigeration cycles [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2011, 89: 676-89.
 [9] Jiang Hong, Zhang Shijian, Jing Jiaqiang, et al. Thermodynamic and economic analysis of ethane recovery processes based on rich gas [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 148: 105-119.
 [10] Azhar M, Siddiqui M A. Exergy analysis of single to triple effect lithium bromide-water vapour absorption cycles and optimization of the operating parameters [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 180: 1225-46.
 [11] Ust Y, Arslan F, Ozsari I, et al. Thermodynamic performance analysis and optimization of DMC (Dual Miller Cycle) cogeneration system by considering exergetic performance coefficient and total exergy output criteria [J]. Energy, 2015, 90: 552-559.
 [12] Mashhadi, Somaye, Maddah, 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. ■
 [13] 展 [J]. 广州化工, 2019, (14): 14-16.
 [6] 胡清, 秦永宁, 马智, 等. 细旦丙纶专用聚丙烯生产工艺的优化 [J]. 石油化工, 2005, 34(11): 36-39.
 [7] 美利肯 Hyperform HPN 聚丙烯成核剂获 UL 认证 [J]. 塑料工业, 2019, 47(11): 82.
 [8] Sun M M, Gao D L, Zhang H B, et al. Toughening effects of nucleating agent on impact polypropylene copolymer [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(17): 8705-8713.
 [9] 张跃飞, 辛忠. 聚丙烯透明成核剂的开发与进展 [J]. 中国塑料, 2002, (10): 11-15.
 [10] 王克智, 李训刚, 代燕琴. 成核剂与聚烯烃的结晶改性 [J]. 中国塑料, 2001, (11): 3-7.
 [11] 黄兆阁, 冯绍华, 邱桂学, 等. 成核剂对聚丙烯结晶形态和力学性能的影响 [J]. 塑料工业, 2003, (5): 41-42.
 [12] 董莉, 李丽, 段宏义, 等. α 成核剂对聚丙烯力学性能与结晶性能的影响 [J]. 合成树脂及塑料, 2019, 36(2): 53-56.
 [13] 马文辉, 陈旭, 韩振刚, 等. 聚丙烯成核剂研究进展 [J]. 合成材料老化与应用, 2017, 46(3): 114-118.
 [14] 魏晓峰, 胡涛. 聚丙烯 Z30S 专用料的开发与工业化生产 [J]. 中国高新技术企业, 2011, (7): 53-54.
 [15] 李佰章. DQC 催化剂在 Z30S 生产中的应用 [J]. 中国石油和化工, 2012, (7): 37-38. ■