

控制凝液产品中 CO₂ 含量的乙烷回收流程改进

曾禄轩^{1*}, 蒋洪², 杨雨林³

(1. 中国石油天然气股份有限公司规划总院, 北京 100083;
2. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500;
3. 成都华润燃气设计有限公司, 四川 成都 610000)

摘要:研究了RSV流程CO₂冻堵机理和控制手段,RSV流程可以通过控制合理的工艺参数和设置预分离器的方式控制冻堵;分析了RSV流程和脱甲烷塔中CO₂的分布规律,结果表明,控制凝液产品中CO₂含量需要将脱甲烷塔下部的CO₂气化并使之进入上部;在RSV流程基础上,改进双塔RSVC流程,双塔设置可以实现脱甲烷塔顶气相对吸收塔底部液相中CO₂进行汽提,提高吸收塔中的CO₂浓度,设置预分离器可以在吸收塔气相中CO₂含量升高后控制CO₂冻堵。RSV和RSVC流程对比结果表明,RSVC流程在几乎不影响乙烷收率情况下,使凝液产品中的CO₂含量能降低约2.4%。

关键词:乙烷回收;RSV流程;CO₂冻堵;流程改进;凝液产品

中图分类号:TE64

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)01-0219-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.01.044

Improvement of ethane recovery process for controlling CO₂ content in condensate products

ZENG Lu-xuan^{1*}, JIANG Hong², YANG Yu-lin³

(1. PetroChina Planning & Engineering Institute, Beijing 100083, China;
2. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
3. Chengdu China Resources Gas Design Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: The mechanism and control methods of CO₂ freezing blockage in recycle split vapor (RSV) process are studied. As for RSV process, CO₂ freezing blockage can be controlled by controlling reasonable process parameters and setting a pre-separator. Distribution rules of CO₂ in RSV process and demethanizer are analyzed. Results show that CO₂ in the lower part of the demethanizer must be gasified and enter the upper part of that so as to control CO₂ content in the condensate products. Based on the above results and RSV process, RSVC, a modified RSV process with double towers is proposed, in which CO₂ in the liquid phase at the bottom of the absorption tower is stripped to concentrate CO₂. A pre-separator is set to control CO₂ freezing blockage once CO₂ content in the gas phase of the absorption tower rises. Comparison between RSV and RSVC processes show that RSVC process can reduce CO₂ content in the condensate products by 2.4% while it brings about little impact on the yield of ethane.

Key words: ethane recovery; RSV process; CO₂ freezing blockage; process improvement; condensate products

天然气乙烷回收是指回收天然气中的乙烷和更重的烃类组分,以增加天然气生产价值,控制输气管道中的烃露点。目前采用低分离法进行乙烷回收的技术已经较为成熟,国内也开始建设大型乙烷回收装置。

在乙烷回收过程中,原料气通常含有一定量的CO₂,对于乙烷回收流程中CO₂的问题研究主要集中在控制装置冻堵的方面,相关研究人员对CO₂冻堵机理等进行了研究,提出了合理的冻堵温度裕量,分析了影响因素和控制措施,也提出了对CO₂适应性更强的乙烷回收流程^[1-2]。随着乙烷回收技术发展,我国已掌握的RSV流程较上一代GSP等流程对

原料气CO₂含量要求更低,故一些乙烷回收装置不设置前脱CO₂单元^[3-4]。

CO₂和乙烷具有接近的沸点,回收乙烷时,大部分CO₂也随之进入到凝液产品中,凝液产品中CO₂含量较高。因此,控制凝液产品中CO₂的含量是乙烷回收装置面临的关键问题。

为保证凝液产品CO₂含量满足输送要求,需要设置后脱碳装置,凝液产品中CO₂含量越高,则脱碳系统的能耗越高,凝液产品中CO₂的存在直接影响到装置的投资、运行成本,因此降低凝液产品中的CO₂含量具有很大的节能优势。并且对于不脱碳直接采用管输的凝液产品,随气田开发时间增长,天然

收稿日期:2020-03-16;修回日期:2020-11-04

作者简介:曾禄轩(1995-),男,硕士,从事油气田地面工程专业方向的研究工作,通讯联系人,zengluxuan@petrochina.com.cn。

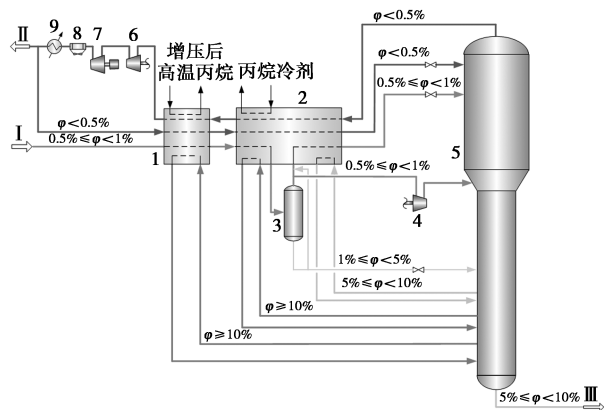
气中 CO_2 含量增高,引起凝液产品中 CO_2 含量增加,会大大降低管输过程的效率。

为解决低温分离法回收的凝液产品中高 CO_2 含量导致能耗高或输送效率低的问题,进一步改进控制凝液产品中 CO_2 含量的流程则十分必要,并且要求改进的流程在能控制凝液产品中 CO_2 含量的同时,乙烷回收率不能明显下降且能耗不能过度增大。

1 RSV 乙烷回收流程

部分外输气再循环工艺 (recycle split vapor, RSV) 是由美国 Orloff 公司开发的高效乙烷回收工艺,该流程于 2000 年在美国 Patterson-UTI 能源公司位于路易斯安纳州的 Pelican 气体处理厂首次得到使用^[5]。

RSV 乙烷回收工艺流程如图 1 所示,此流程的主要特征是将部分外输气送入塔顶换热器冷凝后,节流闪蒸作为回流进入脱甲烷塔顶部,构成一个以甲烷为主的制冷循环,调节其流量可控制乙烷回收率。脱甲烷塔自上往下的第二股进料为低温分离器气相(也可混合部分液相)经过冷冷箱降温节流进入脱甲烷塔中上部,产生低温位的冷量,同时液烃可吸收气相中的乙烷和 CO_2 。



1—预冷冷箱;2—主冷箱;3—低温分离器;4—膨胀机组膨胀端;
5—脱甲烷塔;6—膨胀机组增压端;7—外输压缩机;8—空冷器;
9—水冷器;I—原料气;II—外输气;III— C_2 +凝液

图中 φ 指物流中的 CO_2 摩尔分数

图 1 RSV 流程及其 CO_2 分布

RSV 流程采用外输气回流、多股进料的设计,流程的乙烷回收率可以灵活调节,且可达到超高的水平($>96\%$)^[6-7]。此流程具有高回收率高能耗的特点。

国内塔里木油田、长庆油田的大型乙烷回收装

置也都采用了此流程^[8],故本文中主要以 RSV 为基础进行分析和改进。为便于定量的计算分析,本文中选取某凝析气处理厂进料条件为基础,以 RSV 流程为例,利用 HYSYS 软件模拟得出优化参数如表 1 所示。

表 1 RSV 流程关键参数

关键工艺参数项目	参数值
外输气回流分流比/%	12
低温分离器气相过冷比/%	19.4
低温分离器温度/°C	-53
膨胀机出口	
压力/MPa	2.7
温度/°C	-83.73
脱甲烷塔	
塔顶压力/MPa	2.6
塔顶温度/°C	-99.0
脱甲烷塔最小 CO_2 冻堵余量/°C	9.3
外输压缩机功率/kW	19902
丙烷制冷循环轴功率/kW	2266
总轴功/kW	22169
乙烷收率/%	95.40

表 2 为本文中定量分析所需的原料气组成,原料气压力 5 MPa,温度 25°C,处理量为 $800 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,外输气压力为 5.2 MPa,要求外输气压力为 6.2 MPa, CO_2 冻堵裕量高于 5°C,乙烷回收率高于 95%。

表 2 模拟研究的原料气组成 %

组分	摩尔分数	组分	摩尔分数
N_2	1.4301	$n\text{-C}_4$	0.2670
CO_2	0.9030	$i\text{-C}_5$	0.0790
C_1	89.2415	$n\text{-C}_5$	0.0610
C_2	6.2903	C_6	0.0460
C_3	1.3901	C_7+	0.0390
$i\text{-C}_4$	0.2530		

2 乙烷回收流程 CO_2 固体控制措施

2.1 乙烷回收流程 CO_2 冻堵条件

纯 CO_2 在温度低于 -56°C 条件下即可形成固体,天然气中由于 CO_2 与烃类(主要是甲烷)的相平衡关系,其生成固体的温度较纯 CO_2 更低。

美国气体供应商协会 GPA 对 $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ 体系进行了研究,通过对 $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ 体系定性相图和 CO_2 在 $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ 体系中溶解性数据进行分析^[9], CO_2 固

体形成的机理可以归纳为:①CO₂ 固体从气相中结霜析出;②CO₂ 固体从液体中结晶析出^[1]。

在温度、组成一定的情况下,随着体系压力的升高,CO₂ 固体形成温度升高,易形成 CO₂ 固体。形成 CO₂ 固体必要条件可归纳为:足够高的压力;足够低的温度;足够高的 CO₂ 浓度^[10]。

2.2 RSV 流程控制冻堵方法

(1) 影响乙烷流程冻堵的主要参数

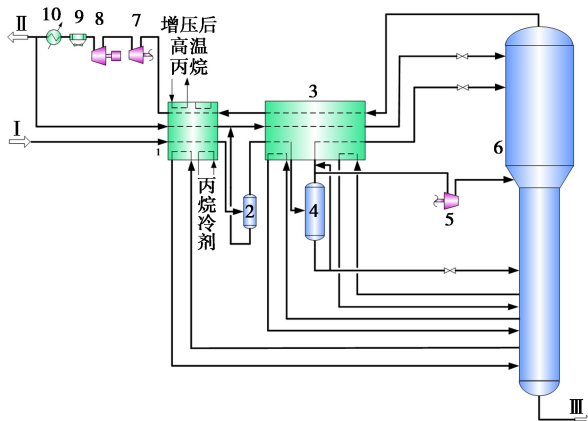
在原料气条件和流程一定的情况下,控制 CO₂ 冻堵的主要因素是流程中合理的操作参数,而对于 RSV 流程中控制 CO₂ 冻堵的流程参数,已有详细的研究结果。

相关研究表明,在高压贫气条件下,RSV 流程对 CO₂ 摩尔分数低于 2% 的原料气具有一定的控制冻堵的能力。为避免乙烷回收装置 CO₂ 固体形成,从流程中的工艺参数出发,影响因素包括脱甲烷塔压力、低温分离器温度、低温分离器气相过冷量,低温分离器液相过冷量、外输气回流量以及改变进料位置^[1]。

参数调节来说,控制冻堵最主要的方法是提高脱甲烷塔压力、降低低温分离器温度,以及增加低温分离器液相过冷量。

(2) RSV 流程增设预分离器

控制 CO₂ 冻堵的主要方法是在脱甲烷塔中上部注入重烃组分,RSV 流程重组分的来源主要为低温分离器液相,故可以通过设置预分离器冷凝原料气中的重组分,将更多重组分加入回流的外输气,可以起到更好的控制冻堵的作用,流程如图 2 所示。

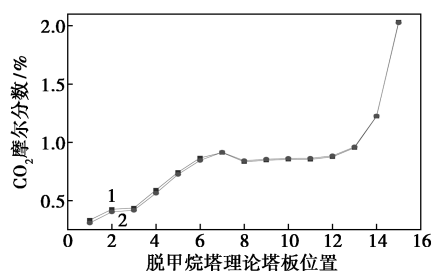


1—预冷冷箱;2—预分离器;3—主冷箱;4—低温分离器;
5—膨胀机组膨胀端;6—脱甲烷塔;7—膨胀机组增压端;
8—外输压缩机;9—空冷器;10—水冷器;
I—原料气;II—外输气;III—C₂+凝液

图 2 增设预分离器的 RSV 流程

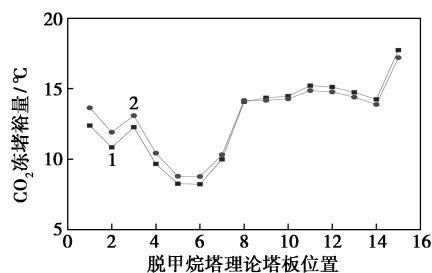
为分析增设预分离器后乙烷回收流程控制冻堵能力的变化,主要考察脱甲烷塔上部(15 块塔板)的冻堵裕量变化。

利用 HYSYS 软件模拟增设预分离器的 RSV 流程,保持关键参数同表中不变,考察增设预分离器后其中气相 CO₂ 含量和 CO₂ 冻堵裕量的变化,结果如图 3、图 4 所示。



1—无预分离器;2—增设预分离器

图 3 RSV 流程增设预分离器前后 CO₂ 含量逐板分布



1—无预分离器;2—增设预分离器

图 4 RSV 流程增设预分离器前后冻堵塔板裕量对比

分析图 3 中的结果可知,增设预分离器后,脱甲烷塔低温环境下,天然气中的重烃组分对气相中的 CO₂ 具有一定的吸收作用^[11]。脱甲烷塔顶部 1~7 块板气相中 CO₂ 摩尔分数降低,冻堵裕量都有所提高。

由图 4 可知,最小的冻堵裕量发生在第 6 块塔板的位置,增加预分离器后,冻堵裕量由 8.22℃ 增加至 8.76℃,冻堵裕量提高了 0.54℃。

根据以上分析结果可知,控制 RSV 流程中 CO₂ 冻堵措施可归纳为:①工艺参数方面可以通过合理控制脱甲烷塔压力、低温分离器温度和低温分离器液相过冷量以控制脱甲烷塔上部的 CO₂ 冻堵;②在低温分离器前设置预分离器,将预分离出的凝液汇入回流的外输气中,利用重烃组分的吸收作用,降低上部塔板气相中 CO₂ 含量。

3 乙烷回收流程 CO₂ 分布

3.1 流程中 CO₂ 的分布

基于表中的模拟结果,采用 HYSYS 软件进一步分析 RSV 流程中的 CO₂ 分布规律,分析流程中脱甲烷塔相关物流的 CO₂ 核销分数,结果如图 1 所示,流程的原料气和产品中 CO₂ 组分流量及其占原料气中 CO₂ 之比见表 3。

表 3 RSV 流程原料气及产品 CO₂ 流量及占比

物流名称(流程图标号)	CO ₂ 的质量流量/(kg·h ⁻¹)	CO ₂ 占比/%
原料气(I)	10324	110.00
外输干气(II)	3474	33.65
C ₂ +凝液(IV)	6850	66.35

分析计算图表结果可知:①由图 1 可知,CO₂ 在低温分离器中大部分被分离到液相中,进而进入脱甲烷塔中下部,使得流程中低温段的 CO₂ 含量得到控制。②由表可知,流程中脱甲烷塔冻堵裕量为 9℃,高于允许值 5℃,故流程中脱甲烷塔低温部分 CO₂ 含量具有进一步提高的潜力。③由于 CO₂ 与乙烷具有相似的物理性质,在脱甲烷塔中与甲烷得到了分离。表 3 中原料气中的 CO₂ 主要富集在乙烷气中(占 65.74%),其余部分进入到外输气中,在丙烷及更重的液态烃中只含有痕量的 CO₂(含量在 1×10⁻⁷级别)。

故控制凝液产品中的 CO₂ 核心问题在于将 CO₂ 更多地送入到外输气中。

3.2 脱甲烷塔中 CO₂ 的分布

为控制 CO₂ 流向,需要分析脱甲烷塔中的 CO₂ 分布规律,模拟所得的流程中脱甲烷塔 CO₂ 逐塔板分布情况见图 5,图中理论板数自上而下编号。

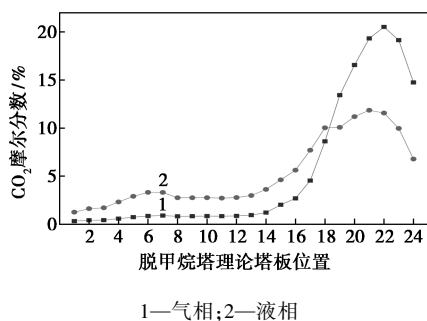


图 5 脱甲烷塔逐板 CO₂ 含量分布

分析图 5 可知:①液相中 CO₂ 在脱甲烷塔底部被加热后气化,塔板下部气相中 CO₂ 含量很高,摩尔分数可达 20%以上,但随着塔板上移动,气相 CO₂

含量逐渐减少。②在脱甲烷塔顶部几块塔板中,由于低温冷凝和液相中重烃吸收作用,气相中 CO₂ 大量被吸收进入液相中,向脱甲烷塔下部流动,这便引起了脱甲烷塔顶流出的外输气中 CO₂ 摩尔分数极低(约 0.33%)。

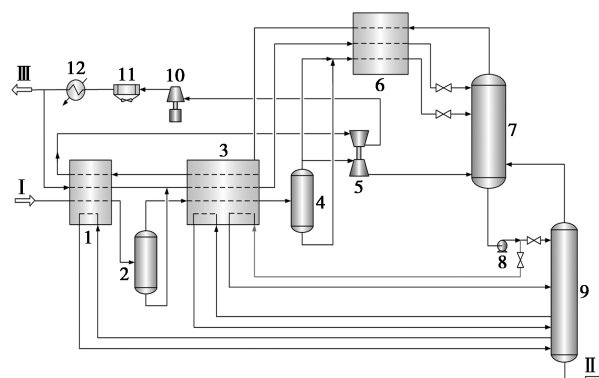
分析 CO₂ 在乙烷回收流程和脱甲烷塔中的分布规律,控制凝液产品中 CO₂ 含量的基本思路是设法将脱甲烷塔下部的 CO₂ 气化,并使其进入脱甲烷塔中上部。

4 控制凝液产品中 CO₂ 含量流程改进

为解决典型的 RSV 流程在控制凝液产品 CO₂ 含量方面的不足,从脱甲烷塔的 CO₂ 分布角度出发,对流程进行改进,提出双塔的乙烷回收流程,以控制 CO₂ 的流向,开发高效的控制凝液产品 CO₂ 含量的 RSVC 流程(recycle split vapour control process)。

4.1 控制凝液产品中 CO₂ 流程

RSVC 流程如图 6 所示,原料气经预冷冷箱冷凝后进入预分离器,预分离器的液相主要为原料气中所含的丙烷及丙烷以上重组分,故液相作为防冻剂加入回流的外输气中,预分离器气相经主冷箱冷却后进入低温分离器,RSVC 流程低温分离器气相和 RSV 流程相同,大部分进入膨胀机膨胀制冷,少部分经过过冷冷箱冷凝后作为吸收塔的第二股进料。低温分离器液相重组分含量较高,故将其混入低温分离器气相中,混合作为脱甲烷塔第二股进料。吸收塔底部液相经吸收塔底泵增压后分为 2 股,一股直接进入脱甲烷塔顶部,另一股经过主冷箱复热



1—预冷冷箱;2—预分离器;3—主冷箱;4—低温分离器;
5—透平膨胀机组;6—过冷冷箱;7—吸收塔;8—吸收塔底泵;
9—脱甲烷塔;10—外输气压缩机;11—空冷器;12—水冷器;
I—脱水后原料气;II—C₂+凝液;III—外输气

图 6 控制凝液产品 CO₂ 含量的流程
(RSVC 流程)

后进入脱甲烷塔中部,脱甲烷塔的塔底重沸器和侧线重沸器依次与原料气换热,以回收冷量。

RSVC 流程控制凝液中 CO₂ 含量的主要机理如下。

(1)通过双塔设置,将原 RSV 流程中的精馏段与提馏段分离,分流部分液体进入主冷箱气化,将精馏段液相中 CO₂ 气化,该设计既可作为脱甲烷塔侧线重沸器来加强脱甲烷塔热集成,又让液烃升温气化,CO₂ 随气相自下而上流动而积聚在脱甲烷塔内上部几块塔板上,从而减少脱甲烷塔重沸器上方几块塔盘液相中 CO₂ 含量。

(2)脱甲烷塔顶气相可对吸收塔底部液相中 CO₂ 进行汽提,提高脱甲烷塔上部和吸收塔中的 CO₂ 浓度,有效降低天然气凝液产品中 CO₂ 含量。

(3)剩余的吸收塔底部液烃进入脱甲烷塔顶部,富含甲烷的液烃可有效吸收脱甲烷塔顶气相中的乙烷及乙烷以上的液烃,从而提高装置乙烷回收率。

(4)由于 CO₂ 大量进入吸收塔的气相中,使吸收塔气相发生 CO₂ 冻堵的可能性增大,故 RSVC 流程通过对原料气进行 2 次分离,将分离出的液烃分别加入回流外输气和低温分离器气相中,分别作为吸收塔的第一二股进料,重烃进入吸收塔顶部有利于控制吸收塔的 CO₂ 冻堵。

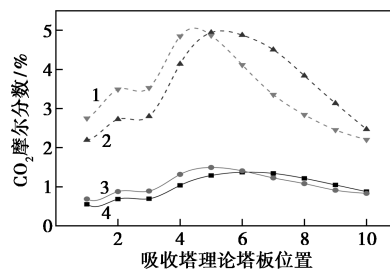
4.2 改进流程控制凝液产品 CO₂ 效果对比

为研究改进的 RSVC 流程的技术特点,选取 2 组 CO₂ 含量较高的凝析气田气作为研究对象,原料气中 CO₂ 摩尔分数为 1%,利用 HYSYS 软件模拟相同原料气条件下的 RSV 流程和 RSVC 流程,计算基础条件和对比计算结果见表 4。RSV 流程脱甲烷塔顶部 10 个理论板和 RSVC 流程吸收塔内 CO₂ 分布如图 7 所示。

表 4 RSVC 流程与 RSV 流程对比(气质代号 203)

流程	RSV	RSVC
外输气回流分液比/%	8	10.5
低温分离器气相过冷分液比/%	23	23
低温分离器液相分液比/%	10	55
低温分离器温度/℃	-53	-52
预分离器温度/℃	—	-25
脱甲烷塔		
塔顶压力/MPa	2.6	2.6
塔顶温度/℃	-98.6	-97.5
塔底温度/℃	9.5	12.1

丙烷制冷压缩功/kW	2266	1824
外输压缩功/kW	19902	20460
总轴功/kW	22169	22294
乙烷回收率/%	94	93
丙烷回收率/%	99.9	99.8
塔底产品摩尔分数/%		
C ₁ /C ₂	1.62	1.54
CO ₂	6.55	4.13



1—RSVC 流程液相;2—RSV 流程液相;
3—RSVC 流程气相;4—RSV 流程气相
RSVC 流程为吸收塔塔板,RSV 流程为脱甲烷塔前 10 块理论板

图 7 RSVC 流程和 RSV 流程上 CO₂ 含量逐板分布

由表 4、图 7 可知:①RSVC 流程的吸收塔上部气相中的 CO₂ 摩尔分数明显高于 RSV 流程,由此可知,与 RSV 流程相比,更多的 CO₂ 进入到塔顶部气相中,使得外输气中 CO₂ 摩尔分数升高。②RSVC 流程在几乎不影响乙烷收率情况下,凝液产品中的 CO₂ 摩尔分数能降低约 2.4%。RSVC 流程可根据凝液产品 CO₂ 回收率和原料气 CO₂ 变化实现与 RSV 流程的切换,操作灵活。

运用 RSVC 流程可降低凝液产品中的 CO₂ 摩尔分数,对不脱碳管输的凝液产品可以提高管输效率,对于设置了凝液产品后脱碳单元的装置,则可降低乙烷产品脱碳装置的运行费用。

5 结论

从 CO₂ 冻堵角度出发,分析了控制 RSV 流程冻堵的流程改进手段,再对 RSV 流程和脱甲烷塔中 CO₂ 分布进行分析,确定了流程改进思路,最后提出 RSVC 流程,具体结论如下。

(1)研究了 RSV 乙烷回收流程冻堵发生机理和控制方法,提出除控制合理工艺参数外,可在 RSV 流程中设置预分离器,利用重烃组分的吸收作用,降低上部塔板气相中 CO₂ 摩尔分数,起到控制冻堵的作用,冻堵裕量可提高 0.5℃ 以上。

(下转第 226 页)

来调节树脂性能。

结合文献资料,克拉玛依市天利恒华石化有限公司经过小试实验和工业装置验证,最终确定以二甲苯为溶剂的 TL 助催化剂/ AlCl_3 催化剂体系进行聚合反应,通过控制反应温度,可有效调整树脂的软化点。

由表 3 可知,采用以上催化体系及投料比,在不同的反应温度可以制备不同软化点的树脂,而且收率较高,色相 ≤ 4 。

表 3 不同反应温度下软化点变化

聚合温度/ $^{\circ}\text{C}$	收率/%	软化点/ $^{\circ}\text{C}$	色相(加氏色标)
45~50	88.6	92.0	3 ⁻
45~50	88.0	93.5	2 ⁺
50~55	86.4	101.0	3 ⁻
50~55	88.2	106.0	4

注:间戊二烯 746 mL(500 g),二甲苯 575 mL(500 g), AlCl_3 /间戊二烯 0.5%(质量分数),TL/ AlCl_3 0.1 mol;聚合时间 3 h;常压聚合。

4 结论

根据实验研究和生产验证,在生产以间戊二烯为主要原料的碳五石油树脂过程中,在采用固相催化剂中,可通过改变原料组成,调节原料配比的方

式,达到控制碳五石油树脂指标的目的。当采用复合催化剂体系时,可通过调整反应温度来达到控制碳五石油树脂指标的目的。

参考文献

- [1] 聂鑫垚,姚鸿儒,李政,等. C_9 石油树脂对高黏度改性沥青性能的影响[J].石油学报:石油加工,2019,35(1):176-182.
 - [2] 柳彩霞,陈鸣鸣,毛兵. C_5 石油树脂的合成研究[J].石化技术与应用,2008,26(1):27-30.
 - [3] 崔译戈,浅析 C_5 石油树脂合成及改性研究[J].化学工程与装备,2017,(12):250-251.
 - [4] 韩丹丹.石油树脂的官能化改性工艺及性能研究[D].北京:北京化工大学,2016.
 - [5] 林浩. C_5 石油树脂的研究及应用[J].合成树脂及塑料,2006,23(2):81-84.
 - [6] 胡银磊.石油树脂的改性及合成技术[J].生物化工,2016,2(1):35-37.
 - [7] 祁颖,李峰.间戊二烯石油树脂改性研究[J].化工时刊,2013,27(7):39.
 - [8] 杜新胜,张建平,柳彩霞,等.影响 C_5 石油树脂性能的因素[J].上海涂料,2012,50(8):40-43.
 - [9] 何伟连,龙雪梅. C_5 石油树脂的研究与应用[J].化工管理,2018,(19):50-53.
 - [10] 王军.石油树脂的生产与应用进展[J].化学与粘合,2003,(5):34-37.
 - [11] 林浩. C_5 石油树脂的研究及应用[J].合成树脂及塑料,2006,23(2):81-84.■
- (上接第 223 页)
- (2) RSV 流程中,由于 CO_2 和乙烷具有接近的沸点, CO_2 主要集中在脱甲烷塔下部和流程的高温段,故控制凝液产品中 CO_2 摩尔分数的基本思路是设法将脱甲烷塔下部的 CO_2 气化,并使其进入脱甲烷塔中上部。
 - (3) 将原 RSV 流程中的精馏段与提馏段分离,设置为双塔 RSVC 流程,RSVC 流程可根据需求实现与 RSV 流程的切换。脱甲烷塔顶气相可对吸收塔底部液相中 CO_2 进行汽提,提高吸收塔中的 CO_2 浓度,降低脱甲烷塔底部及凝液产品中 CO_2 摩尔分数。RSV 和 RSVC 流程对比结果表明,RSVC 流程在几乎不影响乙烷收率和能耗情况下,凝液产品中的 CO_2 摩尔分数能降低约 2.4%。
- ## 参考文献
- [1] 蒋洪,杨雨林,陈小榆,等.RSV 乙烷回收影响 CO_2 固体形成因素分析[J].低温工程,2019,(4):59-65.
 - [2] 杨雨林,陈小榆,何光芒,等.RSV 乙烷回收控制 CO_2 冻堵工艺改进[J].现代化工,2019,39(7):189-193.
 - [3] Pitman R, Hudson H, Wilkinson J, et al. Next Generation processes for NGL/LPG recovery[C]. Dallas, Texas: GPA, 1998.
 - [4] 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):65-6,78.
 - [5] Roy E, John D, Hank M. Hydrocarbon gas processing: US, 5568737 [P]. 1996-10-29.
 - [6] 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.
 - [7] Huebel R R, Malsam M G. New NGL-recovery process provides viable alternative[J]. Oil & Gas Journal, 2012, 110(2): 88-95.
 - [8] 周璇.我国首套大型化天然气乙烷回收工艺包面世[J].天然气与石油,2019,37(2):14.
 - [9] Gas Processors Suppliers Association. Engineering data book [M]. 12th Ed. Gas Processors Suppliers Association, 2004: 433-439.
 - [10] 蒋洪,汤林.天然气凝液回收技术 [M]. 北京:石油工业出版社,2019.
 - [11] 杨婉玉,李越,李亚军.天然气轻烃回收工艺设计及操作参数的优化[J].化工进展,2015,34(10):3589-3594.■