

# 基于响应面法的轻烃回收工艺参数分析

诸林\*, 杨洋

(西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500)

**摘要:** 利用 Hysys 建立某 DHX 工艺的模拟流程, 采用响应面 BBD 法设计仿真试验方案并完成响应面模型构建, 利用所建模型进行工艺参数分析。结果表明, 低温分离器温度、膨胀机出口压力及脱乙烷塔底温度间存在较强交互作用; 对参数间交互作用起主导作用的参数并不固定, 以 C<sub>3</sub> 收率为性能指标时低温分离器温度对交互作用起主导作用, 以脱乙烷塔热负荷为性能指标时脱乙烷塔底温度对交互作用起主导作用。

**关键词:** 响应面法; 轻烃回收; 工艺参数; 交互作用

中图分类号: TE646

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2015)05-0163-04

## Analysis on parameters of NGL process based on RSM

ZHU Lin\*, YANG Yang

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

**Abstract:** The simulation process of NGL recovery is established. Box-Behnken design (BBD), one of Response Surface Methodology (RSM), is used to design the simulation experimental scheme and establish RSM model for corresponding analysis. The results show that there are strong interactions among the temperature of low temperature separator, outlet pressure of the expander and the temperature of the deethanizing column bottom. The main parameters of the interaction are not fixed. The temperature of low temperature separator is the leading parameter of interaction when C<sub>3</sub> yield is the performance indicator. In contrast, when the thermal load of deethanizing column is the performance indicator, the temperature of the deethanizing column bottom is the leading parameter.

**Key words:** RSM; NGL; process parameters; interaction

轻烃回收可控制天然气烃露点, 使天然气达到气质指标及管输气质量要求, 同时回收的轻烃可直接用作燃料和化工原料, 提高了天然气的利用率<sup>[1]</sup>。轻烃回收工艺参数对产品收率和装置能耗等性能指标具有影响, 根据影响规律找出最优的操作条件对于提高产品的收率及降低工艺过程的能耗具有重要意义。直接换热 (DHX) 法轻烃回收工艺具有 C<sub>3</sub> 收率高的优点<sup>[2]</sup>, 属于轻烃回收工艺研究中的热点之一<sup>[3-6]</sup>。在对 DHX 工艺参数的分析研究中, 较多研究者<sup>[4-6]</sup>采用单因素法分析 DHX 工艺参数对装置能耗及 C<sub>3</sub> 收率的影响规律, 而 DHX 工艺中涉及的循环过程较多, 工艺参数间存在相互影响, 采用单因素法不能对多参数间的交互作用进行分析。响应面法 (response surface methodology, RSM) 作为一种统计分析方法与试验设计相结合的回归建模方法, 可以通过多元二次回归方程拟合因素与响应值之间的函数关系, 并利用回归方程对因素间交互作用进行分析<sup>[7]</sup>。本文中利用 Hysys 建立了 DHX 轻烃回收工艺的模拟流程, 采用响应面 BBD 法设计仿真试验方案, 根据试验数据构建了性能指标与工艺参数间的响应曲面模型, 利用模型对参数交互作用进行了分析。

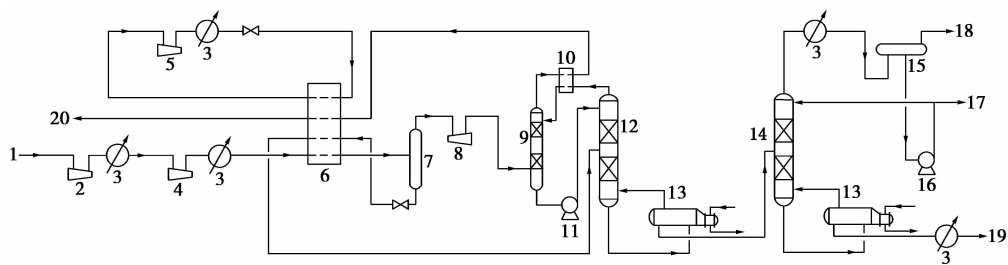
## 1 工艺流程简介

DHX 轻烃回收工艺流程如图 1 所示。经过干燥的原料气经二级增压后进入冷箱 1 与丙烷、干气及液烃进行换热, 然后在低温分离器中进行气液分离, 分离出的气相经膨胀机后进入重吸收塔下部, 与顶部进入的液烃逆流接触; 液相经节流阀后返回冷箱 1 进行换热, 换热后进入脱乙烷塔下部。重接触塔底部液烃通过液烃泵进入脱乙烷塔顶部, 在塔底重沸器的作用下脱出乙烷。脱乙烷塔顶脱出气体进入冷箱 2 与干气换热后进入重吸收塔顶部, 塔底液相自压进入脱丁烷塔中部, 最终得到轻油和液化气。出冷箱 2 的干气进入冷箱 1 与原料气换热后外输。

本文中利用 Hysys 对 DHX 工艺流程进行模拟, 选择 Peng-Robinson 方程作为热力学方程。原料气的进气压力为 4 MPa, 温度为 14℃, 处理量为 110 万 m<sup>3</sup>/d, 组成见表 1<sup>[8]</sup>。

表 1 原料气(干基)组成表

组分	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	iC <sub>4</sub>
摩尔分数/%	0.4166	0.3734	84.6862	8.2840	4.0341	0.6271
组分	nC <sub>4</sub>	iC <sub>5</sub>	nC <sub>5</sub>	nC <sub>6</sub>	nC <sub>7</sub>	nC <sub>8</sub>
摩尔分数/%	0.9870	0.1407	0.1752	0.1636	0.1116	0.0005



1—原料气;2—一级压缩机;3—冷凝器;4—二级压缩机;5—丙烷制冷压缩机;6—冷箱 1;7—低温分离器;  
8—膨胀机;9—重吸收塔;10—冷箱 2;11—液烃泵;12—脱乙烷塔;13—重沸器;14—脱丁烷塔;15—回流罐;  
16—回流泵;17—液化气;18—不凝气;19—轻油;20—干气

图 1 DHX 轻烃回收工艺流程图

## 2 响应面建立

$C_3$  收率及设备能耗是衡量 DHX 轻烃回收工艺装置运行状态的重要指标<sup>[3-6]</sup>,因此本文中选取  $C_3$  收率及主要设备脱乙烷塔的能耗作为性能指标,采用  $CH_4$  平衡法<sup>[9]</sup>对  $C_3$  收率进行计算。影响  $C_3$  收率及脱乙烷塔能耗的主要参数包括低温分离器温度、膨胀机出口压力、重吸收塔塔顶温度、脱乙烷塔底温度<sup>[5]</sup>,在冷箱 2 换热面积不变的情况下,重吸收塔塔顶温度的改变主要通过调节其他工艺参数实现,因此选取低温分离器温度、膨胀机出口压力及脱乙烷塔底温度作为研究参数。以低温分离器温度、膨胀机出口压力及脱乙烷塔底温度等研究参数构建因素水平表(表 2),参考文献[5-6]为研究参数设置不同水平,依据因素水平表进行试验方案设计。

表 2 工艺参数的因素水平表

因素水平	低温分离器 温度/°C	膨胀机出口 压力/kPa	脱乙烷塔底 温度/°C
-1	-50	650	45
0	-35	950	65
1	-20	1250	85

BBD 法是二阶响应面的一种三水平设计方法,能够以较少的试验次数回归出响应面模型。该设计采用二阶的响应面模型<sup>[10]</sup>,其基本形式如下:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i x_i + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

式中, $y$  为响应值; $x_i, x_j$  为自变量; $\beta_0$  为常数项; $\beta_i$  为一次项系数; $\beta_{ii}$  为二次项系数; $\beta_{ij}$  为交互作用项系数; $\varepsilon$  为误差项。

根据表 2 采用 BBD 法设计的试验方案及依据试验方案进行仿真模拟计算得到的试验结果如表 3

所示,根据表 3 中数据利用最小二乘法进行参数估计,得到响应面回归模型如表 4 所示。

表 3 试验方案和试验结果

序号	试验方案			试验结果	
	低温分离 器温度/°C	膨胀机出 口压力/kPa	脱乙烷塔 底温度/°C	$C_3$ 收 率/%	脱乙烷塔 热负荷/kW
1	0	0	0	92.7410	1448.8
2	1	1	0	56.2316	898.3
3	-1	0	1	61.3585	8150
4	1	-1	0	79.3156	1735.5
5	-1	0	-1	95.9769	914
6	1	0	-1	65.5082	461
7	0	1	-1	82.8894	354.8
8	0	-1	1	62.7472	8704
9	1	0	1	53.9560	6043
10	-1	-1	0	96.4219	2462
11	0	-1	-1	94.4225	570
12	0	1	1	59.8499	7472
13	-1	1	0	95.9572	1167.6

表 4 响应面模型

模型响应项目	响应面模型
$C_3$ 收率 $Y_1$ /%	$Y_1 = 92.74 - 11.84A - 4.75B - 12.61C - 5.65AB + 5.77AC + 2.16BC - 8.27A^2 - 2.49B^2 - 15.27C^2$
脱乙烷塔热负荷 $Y_2$ /kW	$Y_2 = 1448.8 - 444.48A - 447.35B + 3508.65C + 114.3AB - 413.5AC - 254.2BC - 133.07A^2 + 250.13B^2 + 2576.28C^2$

注:A 代表低温分离器温度,B 代表膨胀机出口压力,C 代表脱乙烷塔底温度。

表 5 为响应面模型的分析结果。 $P$  值可用于判定模型响应值与回归方程关系的显著性, $P$  值越小则显著程度越高, $P \leq 0.05$  说明影响显著<sup>[10]</sup>。从表

5中可以看出各模型的 $P$ 值均小于0.05,由此可知模型响应值与回归方程关系显著性较高。信噪比可以反映模型计算精度,数值越大代表模型的计算结果与试验结果越吻合,且计算精度符合要求的模型信噪比数值通常应大于4<sup>[11]</sup>。表5中各模型的信噪比都大于4,说明模型计算结果与试验结果的吻合程度较高。模型的回归系数 $R^2$ 可以反映出工艺参数对响应值的影响能力, $C_3$ 收率与脱乙烷塔热负荷的变化分别有98.17%与99.11%,是由所选工艺参数的改变引起的。由以上分析可知模型可以较好地描述工艺参数与响应值之间的真实关系。

表5 响应面模型分析

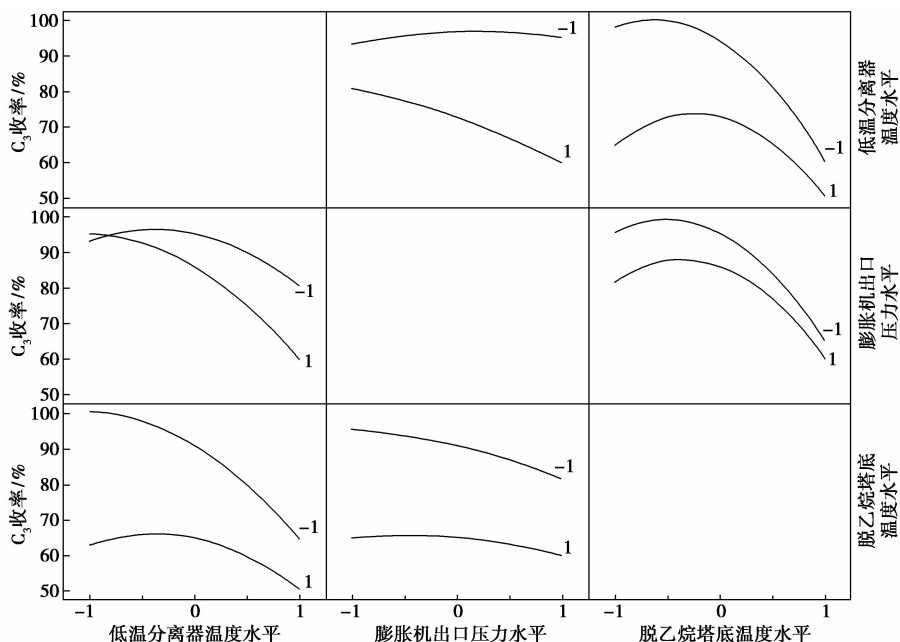
模型响应项目	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F值	P值	信噪比	回归系数 $R^2$
$C_3$ 收率/%	3458.94	9	384.33	17.89	0.0185	12.028	0.9817
脱乙烷塔热负荷/kW	122800000	9	13650000	37.07	0.0064	15.283	0.9911

### 3 工艺参数交互作用分析

利用建立的响应面模型对工艺参数的交互作用进行分析。参数交互作用对 $C_3$ 收率及脱乙烷塔热负荷的影响如图2、图3所示。由图2可以看出,在膨胀机出口压力较高的情况下, $C_3$ 收率随低温分离器温度增加而减小的速度高于膨胀机出口压力较低的情况,由图3可以看出,当脱乙烷塔底温度较高

时,脱乙烷塔热负荷会随着低温分离器温度增加而下降,而当脱乙烷塔底温度较低时低温分离器温度对脱乙烷塔热负荷的影响不大,可见工艺参数对性能指标的影响能力会受到其他参数的影响,参数间存在较强的交互作用,多个工艺参数通过交互作用共同对性能指标产生影响。此外,由图2可以看出,在低温分离器温度处于不同水平时膨胀机出口压力对 $C_3$ 收率的影响规律变化较大,而脱乙烷塔底温度处于不同水平时膨胀机出口压力对 $C_3$ 收率的影响规律变化不大,可见不同参数对其他参数的影响能力不同。

参数间交互作用的程度可由参数在其他参数处于不同水平时对性能指标的影响规律曲线来判断,两曲线越平行,则因素间交互作用越小,反之交互作用越大。对比图2、图3可以发现,当以 $C_3$ 收率为性能指标时,低温分离器温度与膨胀机出口压力、低温分离器温度与脱乙烷塔底温度的交互作用均较大,而膨胀机出口压力与脱乙烷塔底温度的交互作用较小,低温分离器温度是交互作用中起主导作用的参数,该参数变化对 $C_3$ 收率的影响最大,是最主要的影响因素,而以脱乙烷塔热负荷为性能指标时脱乙烷塔底温度与其余参数的交互作用较大,是交互作用中起主导作用的参数,对脱乙烷塔热负荷影响最大,可见当性能指标不同时对交互作用起主导作用的参数不同,在工艺优化工作中应优先考虑调整起主导作用的参数。

图2 工艺参数交互作用对轻烃回收工艺 $C_3$ 收率的影响

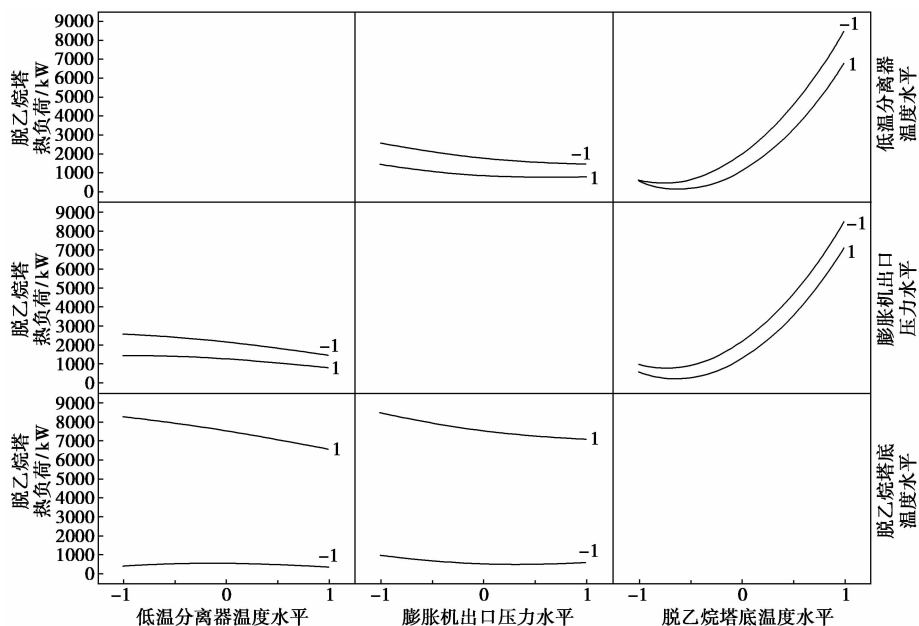


图 3 工艺参数交互作用对脱乙烷塔热负荷的影响

## 4 结论

(1) 基于响应面法对 DHX 轻烃回收工艺参数进行了分析, 结果表明, 低温分离器温度、膨胀机出口压力、脱乙烷塔底温度间存在较强交互作用, 不同参数对其余参数的影响不同。

(2) 对参数间交互作用起主导作用的参数并不固定, 当以  $C_3$  收率为性能指标时, 低温分离器温度对参数交互作用起主导作用, 是影响  $C_3$  收率的最主要参数; 当以脱乙烷塔热负荷为性能指标时脱乙烷塔底温度对参数交互作用起主导作用, 是影响脱乙烷塔热负荷的最主要参数, 在工艺优化工作中应优先考虑调整起主导作用的参数。

## 参考文献

[1] 诸林. 天然气加工工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 229-230.

- [2] Khan S A. Process improves  $C_3^+$  recovery[J]. Hydrocarbon Processing, 1985, (5): 75-76.
- [3] 邓燕芳. 天然气 DHX 轻烃回收工艺的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
- [4] 赵学波. 轻烃回收装置 DHX 工艺研究(II)——膨胀机出口压力的影响[J]. 石油化工高等学校学报, 1997, 10(1): 8-10.
- [5] 胡文杰, 朱琳. “膨胀机+重接触塔”轻烃回收工艺的优化[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 96-100.
- [6] 黄思宇, 吴印强, 朱聪, 等. 高尚堡天然气处理装置改进与运行优化[J]. 石油与天然气化工, 2014, 43(1): 17-23.
- [7] 崔大明, 张益波, 付璐, 等. 响应面法优化超声法提取枸杞中总黄酮工艺[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(3): 55-59.
- [8] 罗琴. 锦州某天然气处理厂轻烃回收工艺优化技术[D]. 东营: 中国石油大学, 2011: 6-9.
- [9] 付秀勇, 文军红, 叶帆, 等. 用  $CH_4$  平衡法计算装置轻烃收率的新方法[J]. 石油与天然气化工, 2007, 36(3): 185-188.
- [10] 试验设计与 Design-Expert, SPSS 应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 155-156.
- [11] 吴波, 陈长华, 杨琳. 洛伐他汀发酵培养基配方优化及 15 L 罐放大[J]. 中国抗生素杂志, 2007, 32(7): 409-413. ■

## 阿克苏诺贝尔“永续家园”可持续发展战略

阿克苏诺贝尔一贯践行可持续发展理念。在产品的生产过程中, 阿克苏诺贝尔装饰漆以消耗更少的资源、提升管理效率为目标。在供应链运营方面, 阿克苏诺贝尔装饰漆高度关注供应商的安全、健康和环保表现, 并与供应商展开密切合作, 旨在降低整条供应链的能耗。此外, 阿克苏诺贝尔装饰漆还通过打造一流的环保绿色生产基地, 成就国内节能低碳、高效率低成本运营的典范工厂。

2014 年 8 月奠基的成都邛崃工厂是阿克苏诺贝尔在中国最大的装饰漆生产基地之一, 遵循企业最高的可持续发展、健康、环境和社会安全标准。2014 年年初, 阿克苏诺贝尔广州白云分厂投产, 整个厂区倡导“绿色足迹”, 如在生产流程中, 利用太阳能对高粘度的原材料进行加热, 每年能减少碳排放约 48.5 t, 更在成品储存仓库增加顶棚天窗, 节约大量的照明用能源, 每年实现减少碳排放 26.5 t。(孟宪雯)