

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20161595

面向产品分布协调的两段提升管催化裂解多目标优化

王平^{1,2}, 杨朝合², 田学民¹

(¹ 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580; ² 中国石油大学(华东)重质油国家重点实验室, 山东 青岛 266580)

摘要: 根据两段提升管重油催化裂解过程工艺特点和经济运行要求, 基于过程机理模型, 考虑多种约束条件, 构造了同时最大化丙烯、汽油产量以及最小化干气产量的多目标操作优化问题, 并采用标准化法向约束方法求解获得了完整、均匀分布的 Pareto 最优解。仿真结果表明, 多目标优化结果可以定量地描述出丙烯、汽油和干气收率间的最优折中, 以及操作变量、约束条件对产品分布的影响, 可以为过程优化操作提供指导。

关键词: 优化; 多目标; 操作优化; 模型; 过程系统

中图分类号: TE 624

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2017) 03—0941—06

Multi-objective optimization of two-stage-riser catalytic pyrolysis for optimal trade-off in product distribution

WANG Ping^{1,2}, YANG Chaohe², TIAN Xuemin¹

(¹ College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China;

² State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China)

Abstract: Based on process characteristics and operation economic demands of heavy oil catalytic pyrolysis in two-stage riser, a multi-objective optimization model, which attempted to maximize yields of propylene and gasoline as well as to minimize yield of dry gas simultaneously, was developed with consideration of process principle model and various constraints. The model was solved by a standardized normal constraint method to formulate a complete set of uniformly distributed Pareto-optimal solutions. Numerical simulations show that the multi-objective optimization could comprehensively and quantitatively describe optimal trade-off among yields of propylene, gasoline and dry gas, as well as influence of operation variables and constraints on product distribution, which could offer guidelines for optimal operation of TMP process.

Key words: optimization; multi-objective; optimal operation; model; process systems

引 言

随着原油重质化趋势加剧以及市场对丙烯需求日益增长, 以重质油为原料经催化裂解生产丙烯已成为炼油行业重要发展方向之一^[1-2]。两段提升管

重油催化裂解多产丙烯(two-stage-riser catalytic pyrolysis of heavy oil for maximizing propylene, TMP)技术^[3]采用组合进料方式, 配合专用催化剂, 能够在多产丙烯的同时兼顾高品质汽油生产, 具有广阔的市场应用前景。为了进一步发挥生产潜力, 优化

2016-11-10 收到初稿, 2016-11-17 收到修改稿。

联系人: 田学民。第一作者: 王平 (1983—), 男, 博士, 讲师。

基金项目: 国家自然科学基金项目(21606256); 山东省自然科学基金项目(ZR2016BQ14); 青岛市应用基础研究计划项目(16-5-1-10-jch)。

Received date: 2016-11-10.

Corresponding author: Prof. TIAN Xuemin, tianxm@upc.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (21606256), the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2016BQ14) and the Research Program of Application Foundation of Qingdao (16-5-1-10-jch).

原料利用, 获取最大经济效益, 有必要开展过程操作优化等方面的研究^[4-6]。

在安全平稳运行的前提下, 企业希望 TMP 装置最大限度地生产丙烯、汽油等高价产品。为实现这一目标, 从氢元素守恒角度分析, 必须抑制干气产出^[7]。然而, 裂解反应涉及的反应种类繁多, 且多为复杂的平行-顺序反应, 各反应间的偶联性很强, 导致各产物间存在着互相关联、彼此制约的复杂关系。例如, 在一定操作范围内, 提高反应深度有助于增产丙烯, 但将造成汽油收率下降同时产生大量干气和焦炭^[8]。因此, 最大化丙烯、汽油产率和最小化干气产率 3 个目标是相互冲突、不能同时达到最优的^[9]。采用两段提升管技术, 尽管可以从工艺设计角度有效避免不同反应馏分间吸附以及反应间恶性竞争, 达到新鲜原料与循环油在各自理想条件下进行反应的目的, 但两段提升管由回炼油和循环催化剂紧密地联系在一起, 这使得不同产品收率间的耦合性变得异常复杂^[10]。

以往关于 TMP 过程操作优化问题的研究多是基于单目标优化的方法, 关注的是如何最优化丙烯生产^[11]。单目标优化只能获得一个解, 无法刻画出丙烯、汽油等产品收率间的冲突关系, 从而难以根据市场需求的变化及时做出正确的决策^[12-14]。因此, 有必要从多目标优化的角度开展过程操作优化的研

究, 为操作人员提供多个明确的优化操作方案。课题组前期研究了同时最大化丙烯产量和最小化干气产量的两目标优化问题^[15], 建立了最优操作条件与积极约束条件之间的联系, 并设计了自优化控制策略, 研究结果表明所设计的优化控制方案能够根据市场需求变化自动调整操作条件, 维持过程在最优优化状态下运行。基于前期研究, 本文以大庆炼化 10 万吨/年 TMP 中试装置为背景, 基于催化裂解集总反应动力学模型^[16-17]和 TMP 过程机理模型^[18], 构造同时最大化丙烯、汽油产量和最小化干气产量的多目标操作优化命题, 并采用标准化法向约束 (normalized normal constraint, NNC) 方法^[19]求解获得完备的 Pareto 解集。最后, 根据过程实际操作约束, 开展仿真研究验证多目标优化模型和求解方法的有效性, 进一步揭示过程优化运行规律。

1 TMP 过程概述及模型

如图 1 所示, TMP 工艺采用分段组合进料的方式达到不同性质原料油分区反应的目的^[3,7]。其中, 一段提升管由新鲜原料与回炼 C₄ 组合进料, 二段提升管由汽油、回炼油和油浆组合进料。回炼轻质油与催化剂在高温接触一定时间后由重油终止反应, 达到强化催化反应、抑制热裂解反应的目的。两个提升管共用一个沉降器和再生器, 同时处

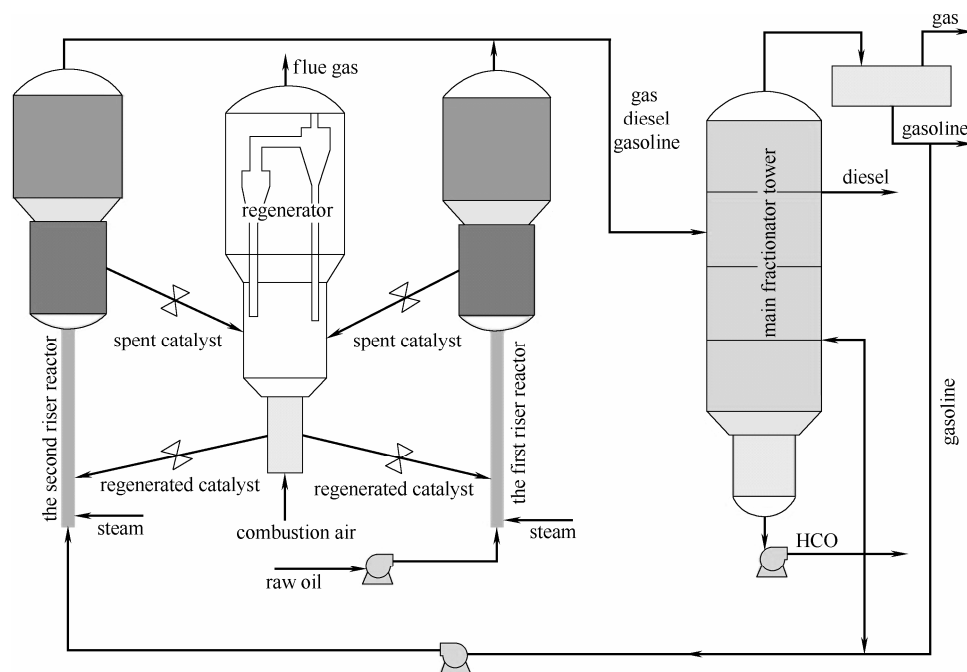


图 1 TMP 工艺流程示意图

Fig.1 Schematic diagram of TMP process

理两段产生的待生催化剂。再生器采用带烧焦罐高效再生技术烧掉积炭,为提升管内发生的裂解反应提供热量。

气相原料油在提升管底部喷嘴处与再生催化剂接触后瞬间完成反应,停留时间很短(1.1~1.5 s),因此两段提升管建模时进行拟稳态简化^[20-21]。对于带烧焦罐的高效再生器,采用轴向扩散模型来描述烧焦罐内气体与催化剂传质、传热,不考虑径向分散效应;而用气-固全反混模型描述再生密相床动态特性,建立催化剂含碳量、含氢量和再生温度动态模型以及烟气氧含量稳态模型^[22]。最终,过程模型是由循环催化剂将两段提升管拟稳态模型、沉降器汽提段动态模型和再生器动态模型连接构成,如图2所示。采用模块化方法建模,可以相对独立地辨识各子模型参数,获得扩展性良好的模型。基于大庆炼化10万吨/年中试装置运行数据的验证结果表明,所建模型可以准确预测不同操作条件下产品分布、汽油组成^[17-18],这为开展过程操作优化的研究创造了有利条件。

2 面向产品分布协调的多目标优化命题构造及求解方法

2.1 多目标优化命题构造

综合小型提升管装置实验^[7]和敏感度分析^[23]表明,影响裂解产品分布的主要因素有进料组成、催

化剂性质、停留时间、催化剂循环量和反应温度等。由于进料、催化剂以及提升管结构在实际操作中不能改变,因此选择两段提升管进料预热温度($T_{in,1}$, $T_{in,2}$)、出口温度($T_{ris,1}$, $T_{ris,2}$)、催化剂循环量($G_{cat,1}$, $G_{cat,2}$)、再生密相温度($T_{reg,2}$)、烟气氧含量($y_{O_2,reg}$)作为多目标操作优化问题的决策变量。

除了上述决策变量的上、下限边界约束外,装置运行期间还需要满足下述约束条件:

(1) 一段提升管原料转化率 $y_{conversion,1|Z=1}$ 下限(80%): 一段转化率不能过低,否则二段汽油进料将不足;

(2) 再生系统对催化剂碳含量 y_{ck} 的处理能力的上限($700 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$): 烧焦量不能过高,否则导致不完全再生;

(3) 富气压缩机负荷 KN_{gas} 上限($40 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$): 裂解气体总产量不能过高,否则压缩机工作转速容易超界;

(4) 再生烟气 $y_{CO_2,reg,2}$ 含量上限(1%): 满足低碳环保运行要求。

综合上述考虑,构建一个同时最大化两段提升管丙烯、汽油产量和最小化干气产量的多目标操作优化问题 MOP_1 , 数学描述如下

$$\min_x f_1(\mathbf{x}) = -(y_{propylene,1|Z=1}F_{oil,1} + y_{propylene,2|Z=1}F_{oil,2}) \quad (1)$$

$$\min_x f_2(\mathbf{x}) = -(y_{gasoline,1|Z=1}F_{oil,1} + y_{gasoline,2|Z=1}F_{oil,2}) \quad (2)$$

$$\min_x f_3(\mathbf{x}) = y_{drygas,1|Z=1}F_{oil,1} + y_{drygas,2|Z=1}F_{oil,2} \quad (3)$$

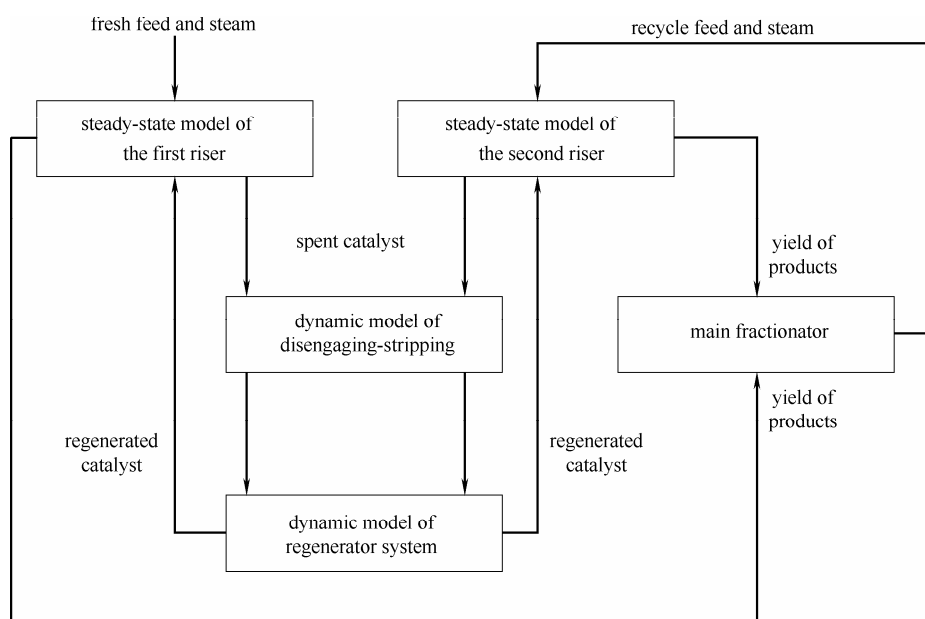


图2 TMP 过程模型框图

Fig.2 Block diagram of TMP process model

$$\text{s.t. } x_{j,\min} \leq x_j \leq x_{j,\max} \quad (4)$$

$$h(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) = 0 \quad (5)$$

$$g(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) \leq 0 \quad (6)$$

式中, $y_{\text{propylene},i|Z=1}$, $y_{\text{gasoline},j|Z=1}$, $y_{\text{drygas},i|Z=1}$, $F_{\text{oil},i}$ 分别为 $i(i=1,2)$ 段提升管出口处丙烯、汽油、干气产率和进料量, 决策变量 $\mathbf{x}$ 由再生催化剂量、进料预热温度、提升管出口温度、再生密相温度以及烟气氧含量构成, 式(4)中 $x_{j,\max}$ 和 $x_{j,\min}$ 分别代表决策变量上、下限约束, 式(5)代表过程稳态模型, $\boldsymbol{\theta}$ 为模型参数, 式(6) 代表过程运行期间, 需要额外满足的操作约束。

2.2 多目标优化问题的求解

针对多目标操作优化问题 MOP₁ 非线性程度强、约束条件多的特点, 采用 NNC 法^[19]求解以获得完整、均匀分布的 Pareto 前沿。该方法通过对多目标优化问题的可行域切割、缩减, 进而构造出一系列单目标优化问题, 然后分别求解这些单目标优化问题得到 Pareto 最优解, 具体步骤如下。

(1) 定位点(Anchor points)求取。根据问题 MOP₁, 构造单目标优化问题 SOP_{*i*}, $i=1, 2, 3$

$$\min_{\mathbf{x}} f_i(\mathbf{x}) \quad (7)$$

s.t. 式(4)~式(6)

采用序列二次规划法求解 SOP_{*i*} 得到 3 个解, 记为 $\mathbf{x}^*$, 由此得到定位点 $\mathbf{f}^* = (f_1(\mathbf{x}^*), f_2(\mathbf{x}^*), f_3(\mathbf{x}^*))$, 构成乌托邦面(Utopia plane)。

(2) 可行域标准化。按式(8)和式(9)分别计算乌托邦点(Utopia point)和最劣点(Nadir point)

$$\mathbf{f}^U = [f_1(\mathbf{x}^1), f_2(\mathbf{x}^2), f_3(\mathbf{x}^3)]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{f}^N = [f_1^N, f_2^N, f_3^N]^T \quad (9)$$

式中, $f_i^N = \max \{f_i(\mathbf{x}^1), f_i(\mathbf{x}^2), f_i(\mathbf{x}^3)\}$ 。定义矩阵 $\mathbf{L} = \mathbf{f}^U - \mathbf{f}^N = [l_1, l_2, l_3]^T$ 将目标函数按式(10)标准化

$$\bar{f}_i = \frac{f_i - f_i(\mathbf{x}^*)}{l_i} \quad (10)$$

(3) 定义乌托邦面上向量。基于标准化定位点, 定义向量

$$\bar{\mathbf{D}}_k = \bar{\mathbf{f}}^{3*} - \bar{\mathbf{f}}^{k*}, \quad k=1, 2 \quad (11)$$

(4) 在乌托邦面上产生均匀分布的点 $\bar{\mathbf{X}}_{pj}$ 。首先计算 $\bar{\mathbf{D}}_k$ 方向上的标准化步长 δ_k 为

$$\delta_k = 1/(m_k - 1) \quad (12)$$

式中, m_k 为需要设定的与 $\bar{\mathbf{D}}_k$ 方向相关的分割点的个数。为了获得分布均匀的分割点, 确定 m_1 后, 计算 $m_2 = m_1 \|\bar{\mathbf{D}}_2\| / \|\bar{\mathbf{D}}_1\|$ 。然后, 按式(13)产生均匀分布的点 $\bar{\mathbf{X}}_{pj}$

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{X}}_{pj} &= \bar{\mathbf{f}}^{1*} + \sum_{k=1}^2 p_{kj} \delta_k \bar{\mathbf{D}}_k = \\ &\bar{\mathbf{f}}^{1*} + \sum_{k=1}^2 p_{kj} \delta_k (\bar{\mathbf{f}}^{3*} - \bar{\mathbf{f}}^{k*}) = \sum_{k=1}^3 a_{kj} \bar{\mathbf{f}}^{k*} \end{aligned} \quad (13)$$

式中, p_{kj} 是以 $\bar{\mathbf{f}}^{1*}$ 为起点, 沿 $\bar{\mathbf{D}}_k$ 方向增加的步数。

(5) 计算标准化 Pareto 解。构造并求解与乌托邦面上点 $\bar{\mathbf{X}}_{pj}$ 相对应的单目标优化问题 SOP₄

$$\min \bar{f}_3$$

s.t. 式(4)~式(6)

$$\bar{\mathbf{D}}_k ([\bar{f}_1(\mathbf{x}), \bar{f}_2(\mathbf{x}), \bar{f}_3(\mathbf{x})] - \bar{\mathbf{X}}_{pj})^T \leq 0 \quad (14)$$

(6) Pareto 解的逆标准化。将步骤(5)获得的标准化 Pareto 解逆标准化

$$f_i(\mathbf{x}) = \bar{f}_i(\mathbf{x}) l_i + f_i(\mathbf{x}^*) \quad (15)$$

得到优化问题 MOP₁ 的解。

值得注意的是, 由 NNC 求得的解不能保证一定是 Pareto 最优解, 此时需要进一步检验所获得的优化解的非劣性, 剔除非 Pareto 最优解^[24-25]。

3 仿真研究

采用 NNC 算法求解 MOP₁ 时, 乌托邦面上分割数 m_k 设为 10, 由于存在 3 个优化目标, 共需要求解 1×10^3 次单目标优化问题 SOP₄, 由此产生了 1×10^3 个解, 经检验这些解的非劣性后, 最终得到 341 个 Pareto 最优解, 由此构成的 Pareto 最优前沿如图 3 所示。从图中可以看出, 随着丙烯产量的提高, 干气的产量相应升高, 而汽油产量会降低。这表明丙烯、汽油以及干气的产量之间存在着相互制约的冲突关系, 任意一个优化目标的改善(如升高丙烯产量)将使得至少另一个优化目标变差(如干气产量也相应升高), 所获得 Pareto 最优解可以全面地描述出不同优化目标之间的冲突问题, 提供给操作人员多种优化操作方案。

获得 Pareto 最优解集后, 还需要根据决策者偏好信息(如市场对丙烯需求量、下游气体分离单元操作负荷等), 从中选择出一个使各目标均得到一定满足的折中解^[26-27]。从过程系统工程的角度看, 要选择一个满意解, 还需要清楚决策变量、约束条件与 Pareto 最优解之间的关系^[28-30]。表 1 列出了图 3 中 Pareto 最优前沿的 3 个定位点(A, B, C)以及任意选出的两个 Pareto 解(D, E)对应的操作条件。其中, A 点对应丙烯和干气产量最大, 而汽油产量最小; B 点对应汽油产量最大; C 点则对应干气产量最小, 同时丙烯产量最小。从表 1 可以看出: (1) 对于全

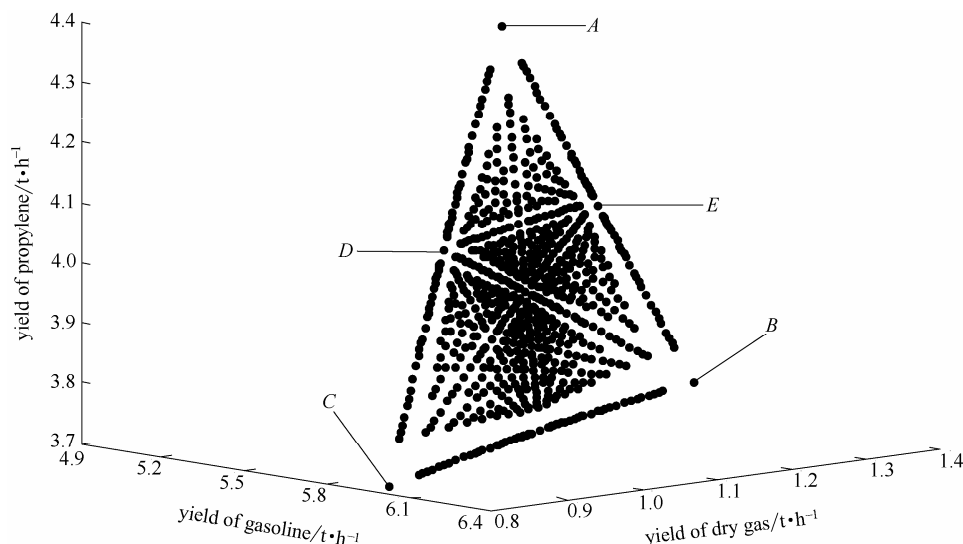
图3 NNC法求解MOP₁获得的Pareto前沿Fig.3 Pareto frontier found by NNC method for MOP₁

表1 Pareto最优解对应的操作条件

Table 1 Operation conditions corresponding to Pareto-optimal solutions

Operation condition	Solution A	Solution B	Solution C	Solution D	Solution E
$f_1/t \cdot h^{-1}$	4.31	3.86	3.70	4.02	4.08
$f_2/t \cdot h^{-1}$	4.97	6.33	5.96	5.48	5.65
$f_3/t \cdot h^{-1}$	1.34	1.10	0.82	1.07	1.22
$G_{cat,1}/kg \cdot s^{-1}$	40.22	47.68	35.56	38.31	43.33
$G_{cat,2}/kg \cdot s^{-1}$	28.44	18.00	18.00	22.71	22.78
$T_{reg,2}/K$	953.15	953.15	953.15	953.15	953.15
$T_{riser,1Z=1}/K$	776.75	796.69	763.00	771.25	786.91
$T_{riser,2Z=1}/K$	807.68	773.41	772.44	790.50	793.13
$y_{O_2,reg,2}/\%$	1.00	1.00	3.42	2.16	1.00
$y_{conversion,1Z=1}/\%$	83.56	87.84	80	82.31	85.87

Note: Numbers in bold font indicate active constraints.

部的 Pareto 最优解，再生密相温度($T_{reg,2}$)始终位于其约束下限边界(953.15 K)上，因为这有助于提高汽油比，强化催化裂解反应、抑制热裂解反应；(2) B 点和 C 点对应的二段催化剂循环量($G_{cat,2}$)均处于其约束下限边界($18 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)上，这是因为二段进料包括回炼的粗汽油，降低剂油比能够抑制汽油馏分发生二次反应，此时尽管可以保障汽油生产，但丙烯产量偏低；(3) A、B、E 3 个点对应的烟气氧含量($y_{O_2,reg,2}$)处于其约束下限边界(1%)上，此时，3 个操作点的反应条件相对苛刻，具有较高的反应深度，将产生大量的干气和焦炭，再生烧焦耗氧量升高。

4 结 论

考虑到 TMP 各产品收率之间存在着相互依赖、

彼此制约的冲突关系，构造了同时最大化丙烯、汽油产量和最小化干气产量的多目标操作优化问题，并采用 NNC 算法求解获得了全面、均匀分布的 Pareto 最优解集。仿真研究表明，多目标优化结果能够清晰刻画出不同产品收率之间复杂的冲突关系，揭示出过程优化运行规律，可为生产装置实施操作优化提供依据和指导。

References

- [1] HOLLADAY J D, HU J, KING D L, *et al.* An overview of hydrogen production technologies[J]. Catal. Today, 2009, **139**(4): 244-260.
- [2] 王志喜, 王亚东, 张睿, 等. 催化裂解制低碳烯烃技术研究进展[J]. 化工进展, 2013, **32**(8): 1818-1824.
WANG Z X, WANG Y D, ZHANG R, *et al.* Advances of catalytic pyrolysis for producing light olefins[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, **32**(8): 1818-1824.
- [3] 李春义, 袁起民, 陈小博, 等. 两段提升管催化裂解多产丙烯研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, **31**(1): 118-121.
LI C Y, YUAN Q M, CHEN X B, *et al.* Maximizing yield of propylene by two-stage-riser catalytic pyrolysis of heavy oil[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, **31**(1): 118-121.
- [4] ENGELL S. Feedback control for optimal process operation [J]. J. Process. Contr., 2007, **17**(3): 203-219
- [5] CHAI T Y, QIN S J, WANG H. Optimal operational control for complex industrial processes[J]. Annu. Rev. Control., 2014, **38**(1): 81-92.
- [6] 钟伟民, 祁荣宾, 杜文莉, 等. 化工过程运行优化研究进展[J]. 化学反应工程与工艺, 2014, **30**(3): 281-288.
ZHONG W M, QI R B, DU W L, *et al.* An overview on chemical process operation optimization[J]. Chem. React. Eng. Technol., 2014, **30**(3): 281-288.
- [7] LI C Y, YANG C H, SHAN H H. Maximizing propylene yield by two-stage riser catalytic cracking of heavy oil[J]. Ind. Eng. Chem. Res.,

- 2007, **46**(14): 4914-4920.
- [8] 刘熠斌, 赵辉, 杨朝合, 等. 催化裂解条件下丙烯的二次反应[J]. 中国石油大学学报, 2009, **33**(3): 153-157.
- LIU Y B, ZHAO H, YANG C H, *et al.* Secondary reaction of propylene under conditions of catalytic pyrolysis[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, **33**(3): 153-157.
- [9] 魏晓丽, 毛安国, 张久顺, 等. 石脑油催化裂解反应特性及影响因素分析[J]. 石油炼制与化工, 2013, **44**(7): 1-6.
- WEI X L, MAO A G, ZHANG J S, *et al.* Study on reaction characteristics and influence factors of naphtha catalytic cracking [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2013, **44**(7): 1-6.
- [10] YUAN Z H, WANG P, YANG C H. Steady-state multiplicity analysis of two-stage-riser catalytic pyrolysis processes [J]. Comp. Chem. Eng., 2015, **73**(6): 49-63.
- [11] WANG P, TIAN X M, YANG C H, *et al.* Economics-oriented NMPC of two-stage-riser catalytic pyrolysis processes for maximizing propylene yield [J]. IFAC- Papers On-line, 2015, **48**(8): 32-37.
- [12] MARLER R T, ARORA J S. Survey of multi-objective optimization methods for engineering[J]. Struct. Multidiscip. O., 2004, **26**(6): 369-395.
- [13] 李鸿亮, 陆金桂, 侯卫锋, 等. 基于混合遗传算法的催化重整过程多目标优化[J]. 化工学报, 2010, **61**(2): 432-438.
- LI H L, LU J G, HOU W F, *et al.* Multi-objective optimization based on hybrid genetic algorithm for naphtha catalytic reforming process[J]. CIESC Journal, 2010, **61**(2): 432-438.
- [14] WANG X, TANG L. Multiobjective operation optimization of naphtha pyrolysis process using parallel differential evolution[J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2013, **52**(40): 14415-14428.
- [15] 王平, 赵辉, 杨朝合. 基于多目标优化的两段提升管重油催化裂解自优化控制[J]. 化工学报, 2016, **67**(8): 3491-3498.
- WANG P, ZHAO H, YANG C H. Self-optimizing control based on multi-objective optimization for heavy oil catalytic pyrolysis in two-stage riser[J]. CIESC Journal, 2016, **67**(8): 3491-3498.
- [16] LIU Y B, CHEN X B, ZHAO H, *et al.* Establishment of kinetic model for catalytic pyrolysis of Daqing atmospheric residue [J]. Chinese. J. Chem. Eng., 2009, **17**(1): 78-82.
- [17] 郭菊花. 重油两段催化裂解多产丙烯集总动力学模型的初步研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2008.
- GUO J H. Primary study of the lumped kinetic model for heavy oil cracking into propylene by two-stage-riser technology[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2008.
- [18] 王平, 赵辉, 杨朝合. 面向过程控制的两段提升管重油催化裂解动态建模[J]. 化工学报, 2016, **67**(8): 3499-3506.
- WANG P, ZHAO H, YANG C H. Process control oriented dynamic modeling for two-stage-riser catalytic pyrolysis of heavy oil[J]. CIESC Journal, 2016, **67**(8): 3499-3506.
- [19] MESSAC A, MATTSON C A. Generating well-distributed sets of Pareto points for engineering design using physical programming[J]. Optim. Eng., 2002, **3**(4): 431-450.
- [20] ARBEL A, HUANG Z, RINARD I H, *et al.* Dynamic and control of fluidized catalytic crackers(1): Modeling of the current generation of FCC's[J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2002, **34**(4): 1228-1243.
- [21] PINHEIRO C I C, FERNANDES J L, DOMINGUES L, *et al.* Fluid catalytic cracking (FCC) process modeling, simulation, and control[J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2012, **51**(1): 1-29.
- [22] 罗雄麟, 袁璞, 林世雄. 催化裂化装置动态机理模型(II): 再生器部分[J]. 石油学报(石油加工), 1998, **14**(2): 61-65.
- LUO X L, YUAN P, LIN S X. Dynamic model of fluid catalytic cracking unit (II): Regenerator section [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 1998, **14**(2): 61-65.
- [23] YUAN Z H, WANG P, YANG C H, *et al.* Systematic control structure evaluation of two-stage-riser catalytic pyrolysis processes[J]. Chem. Eng. Sci., 2015, **126**(2): 309-328.
- [24] MATTSON C A, MULLUR A A, MESSAC A. Smart Pareto filter: obtaining a minimal representation of multiobjective design space[J]. Optim. Eng., 2004, **36**(6): 721-740.
- [25] ANTIPOVA E, POZO C, GUILLÉN-GOSÁLBEZ G, *et al.* On the use of filters to facilitate the post-optimal analysis of the Pareto solutions in multi-objective optimization[J]. Comp. Chem. Eng., 2015, **74**(3): 48-58.
- [26] RANGAIAH G P, SHARMA S, SREEPATHI B K. Multi-objective optimization for the design and operation of energy efficient chemical processes and power generation[J]. Current Opinion in Chemical Engineering, 2015, **10**(11): 49-62.
- [27] WANG J J, JING Y Y, ZHANG C F, *et al.* Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making[J]. Renew. Sust. Energ. Rev., 2009, **13**(9): 2263-2278.
- [28] DEB K. Unveiling innovative design principles by means of multiple conflicting objectives[J]. Optim. Eng., 2003, **35**(35): 445-470.
- [29] SKOGESTAD S. Control structure design for complete chemical plants [J]. Comp. Chem. Eng., 2004, **28**(1/2): 219-234.
- [30] YUAN Z H, ZHANG N, CHEN B Z, *et al.* Systematic controllability analysis for chemical processes [J]. AIChE Journal, 2012, **58**(10): 3096-3109.