

研究论文

炼厂多杂质氢网络的集成

刘桂莲¹, 刘永彪^{1,2}, 冯 霄¹

(¹ 西安交通大学化学工程系, 陕西 西安 710049; ² 中国电子科技集团第 29 所, 四川 成都 610036)

摘要: 利用演化法对某炼厂多杂质氢网络进行优化。在考虑源阱之间的各种匹配可能和氢源之间的互补可能基础上, 依次求取最大匹配流量矩阵 (**M** 矩阵)、潜在匹配流量矩阵 (**P** 矩阵) 和最优匹配流量矩阵 (**O** 矩阵), 确定系统的最小公用工程消耗量为 $1495.83 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 其节约量为 $1004.17 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 占现行新氢消耗量的 40.2%。此外, 根据 **O** 矩阵确定了相应的最优氢分配网络。

关键词: 多杂质; 氢网络; 优化; 矩阵; 演化法

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2012.01.023

中图分类号: TQ 021.8

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2012) 01-0163-07

Integration of refinery hydrogen network with multiple impurities

LIU Guilian¹, LIU Yongbiao^{1,2}, FENG Xiao¹

(¹ Department of Chemical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;

² China Electronics Technology Group Corporation No. 29 Research Institute, Chengdu 610036, Sichuan, China)

Abstract: The evolutionary method is applied to optimize the hydrogen network with multiple impurities. With every match possibility and the complementary advantage of source streams considered, the maximum match flow rate matrix (**M** matrix), potential match flow rate matrix (**P** matrix), and optimal match flow rate matrix (**O** matrix) are determined in turn. The results shows that the minimum hydrogen utility consumption of this system is $1495.83 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Compared with the current hydrogen utility consumption, the saving potential is $1004.17 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, accounting for 40.2% of the utility consumption. Furthermore, the optimal network is determined according to the **O** matrix.

Key words: multiple impurities; hydrogen network; optimization; matrix; evolutionary method

引 言

随着经济的高速发展, 中国对石油资源的需求越来越大。在石油消耗增加的同时, 炼厂加工原油的性质也在发生变化, 主要表现在: ①含硫原油和重质原油的加工比例不断增大; ②原油加工深度和环境保护对油品质量的要求不断提高。因此, 加氢

工艺在石油炼制过程中得到越来越广泛的应用, 炼化企业对氢气的需求迅速增加。近 10 年来炼油企业对氢气的需求增长了 1 倍以上, 有 50%~70% 的炼油厂缺乏氢气, 严重影响了石油炼制企业油品的品质和产量。因此优化氢气网络、提高氢利用率, 对炼厂节能降耗具有重要意义^[1-2]。

夹点技术是先进的网络集成优化技术。自 20

2011-09-14 收到初稿, 2011-09-24 收到修改稿。

联系人及第一作者: 刘桂莲 (1974—), 女, 博士, 副教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21076168, 20936004);

国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB720500)。

Received date: 2011-09-14.

Corresponding author: LIU Guilian, guilianliu@mail.xjtu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (21076168, 20936004) and the National Basic Research Program of China (2012CB720500).

世纪 90 年代末,英国曼彻斯特理工大学过程集成研究中心将夹点技术推广应用到炼油厂的氢网络以来^[3],氢网络集成方法有很大的发展。2002 年,Alves 等^[4]提出了根据剩余氢率图确定氢网络的夹点和最小公用工程氢消耗量的方法。这种方法能确定系统夹点、最小氢公用工程消耗量和最小废气排放量,但需要多次迭代,计算效率低。El-Halwagi 等^[5-6]和 Zhao 等^[7]提出了适用于分析氢网络夹点的图解法,通过在杂质负荷-流量图或氢负荷-流量图上平移氢源、氢阱复合曲线确定夹点的位置、最小新氢消耗量和最大氢回用量。2005 年,Almutlaq 等^[8]针对原料回用网络提出一种代数集成方法,同样可用于确定最小氢公用工程、最小废物量、夹点位置和最大回用网络。Bandyopadhyay^[9]在夹点原理的基础上,提出了既可用于水系统也可用于氢系统的源复合曲线法。Foo 等^[10]提出利用性质级联分析(property cascade analysis, PCA)确定系统的夹点、公用工程和最大回用网络的方法,这种方法的优点在于不需要迭代计算就可以确定系统的夹点和公用工程消耗量。

上述优化方法简单有效、易于理解,但只考虑了流量和氢浓度的约束,未考虑杂质浓度的影响,Hallale 等^[11]提出了适合于多杂质氢网络系统的最优化方法。2007 年,Zhao 等^[12]提出了适用于多杂质氢网络的杂质赤字率夹点法。这种方法用杂质复合曲线、杂质赤字率曲线确定夹点位置和最小公用工程用量,需要迭代计算,计算烦琐。2011 年,Liu 等^[13]提出的演化法克服了在夹点之上的氢源不论其浓度(氢或杂质)高低都要全部回用才能回用下一股氢源的缺点,可实现高浓度氢源和低浓度氢源的同时部分回用。这种方法不仅考虑所有杂质,而且能确定网络的最佳匹配,其优化结果通常优于其他方法的优化结果。

本文将用演化法对某炼厂的多杂质氢网络进行优化,确定最小公用工程消耗目标和相应的匹配网络。

1 演化法^[13]

多杂质氢网络的演化法基于以下假设:

- (1) 每股氢源可被分成多股与各氢阱匹配;
- (2) 氢阱各组分杂质浓度变化对氢源流量和组成影响较小,可忽略;
- (3) 混合流股各杂质浓度只受质量守恒的限制。

对于一个具有 n 股氢阱, m 股氢源和 nc 种杂质的多杂质氢网络系统,氢阱 SK_j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) 进口杂质 k 的浓度需满足以下约束

$$y_{SK_j,k} \leq y_{SK_j,k}^{\max} \quad (1)$$

式中 $y_{SK_j,k}$ 为氢阱 SK_j 中杂质 k 的浓度; $y_{SK_j,k}^{\max}$ 为氢阱 SK_j 中杂质 k 的浓度上限。

在氢网络匹配中,为节约公用工程氢,氢源和氢阱的匹配应满足最大浓度准则:为实现多杂质氢网络氢公用工程消耗量最小,应使氢阱杂质的进口浓度达到其浓度上限,即

$$y_{SK_j,k} = y_{SK_j,k}^{\max} \quad (2)$$

演化法的具体设计步骤如下。

(1) 确定最大匹配流量矩阵 氢源与氢阱匹配时,当有一种杂质的负荷达到上限,而其他杂质的负荷没有超过氢阱的负荷上限时,氢源提供给氢阱的流量即为最大匹配流量,其计算公式如下

$$M_{i,j,k} = \frac{F_{SK_j} y_{SK_j,k}^{\max}}{y_{SR_i,k}} \quad (i \in [1,m], j \in [1,n]) \quad (3)$$

$$M_{i,j} = \min(M_{i,j,k}) \quad (4)$$

式中 F_{SK_j} 为氢阱 SK_j 的流量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$; $M_{i,j}$ 为氢阱 SK_j 与氢源 SR_i 的最大匹配流量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$; $M_{i,j,k}$ 为氢阱 SK_j 中杂质 k 达到负荷上限时对应的匹配流量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$; $y_{SR_i,k}$ 为氢源 SR_i 中杂质 k 的浓度。

在最大匹配流量时,达到氢阱浓度上限的杂质为氢源与氢阱匹配的关键杂质(KI)。将所有氢源与氢阱的最大匹配流量列入矩阵中即得最大匹配流量矩阵($\mathbf{M}$ 矩阵)。

(2) 潜在匹配流量矩阵的确定 在 $\mathbf{M}$ 矩阵中,如果氢阱 SK_j 列中所有非零元素对应的关键杂质相同,可选取最大匹配流量值最大者所对应的氢源为氢阱 SK_j 的潜在匹配源,该源的潜在匹配流量($P_{i,j}$)等于最大匹配流量($M_{i,j}$),其他氢源的潜在匹配流量为 0,即

$$\begin{cases} P_{i,j} = M_{i,j} & \text{if } M_{i,j} = \max(M_{1,j}, \dots, M_{i,j}, \dots, M_{m,j}) \\ P_{i,j} = 0 & \text{if } M_{i,j} \neq \max(M_{1,j}, \dots, M_{i,j}, \dots, M_{m,j}) \end{cases} \quad (5)$$

若在 $\mathbf{M}$ 矩阵 SK_j 列,非零元素对应的关键杂质不相同,需考虑不同关键杂质之间是否存在混合补偿优势。如果匹配源中不存在混合补偿优势,则可根据式(5)确定潜在匹配源和潜在匹配流量。若不同关键杂质存在混合补偿优势,则需计算存在混合补偿优势的氢源与该氢阱的匹配流量,并选取匹配流量最大的源为潜在匹配源。

不同关键杂质匹配源之间存在混合补偿优势必须满足以下两个条件：

① 两个不同氢源 SR_i 、 SR_l 和氢阱 SK_j 匹配时，关键杂质 $KI_{i,j}$ 和 $KI_{l,j}$ ($l = 1, 2, \cdots, m; l \neq i$) 不同；

② 两个关键杂质的浓度满足 $y_{SR_l, KI_{i,j}} < y_{SR_i, KI_{i,j}}$ ，且 $y_{SR_i, KI_{l,j}} < y_{SR_l, KI_{l,j}}$ 。

对具有混合补偿优势的氢源，根据质量衡算可以确定各自的潜在匹配流量。

把每一个氢阱的潜在匹配流量写入同一个矩阵，即得到潜在匹配流量矩阵 (P 矩阵)。

③ 最佳匹配流量矩阵的确定 当 $\sum_{j=1}^n P_{i,j} \leq F_{SR_i}$ ，且 $P_{i,j} \leq F_{SK_j}$ 时，氢阱 SK_j 和氢源 SR_i 之间的最终匹配流量 $O_{i,j} = P_{i,j}$ ；当 $P_{i,j} > F_{SK_j}$ 时，其最终匹配流量 $O_{i,j} = F_{SK_j}$ 。

当 $\sum_{j=1}^n P_{i,j} > F_{SR_i}$ ，且 $P_{i,j} > F_{SK_j}$ 时，潜在匹配流量需调整为 F_{SK_j} ，重新计算 $\sum_{j=1}^n P_{i,j}$ 。若此时 $\sum_{j=1}^n P_{i,j} \leq F_{SR_i}$ ，则可确定最佳匹配流量；若 $\sum_{j=1}^n P_{i,j}$ 仍大于 F_{SR_i} ，则需根据氢源回用率进行分流。

氢源回用率 (R) 的定义为

$$R = \frac{F_{\text{reuse}}}{F_{SK_j}} \tag{6}$$

式(6)中 F_{reuse} 表示循环回用的氢量，即为潜在匹配流量值 $P_{i,j}$ 。氢源回用率小的氢阱可优先与氢源 SR_i 匹配，氢源回用率最大的氢阱则得不到流量满足。此时，可用其他没有被完全利用或者完全没有被利用的氢源进行补充。

假设补充氢源为 $SR_c [c \in [1, m]; c \neq i]$ ，则补充流量 $MS_{c,j}$ 可由式(7) 计算。

$$\begin{cases} MS_{c,j,k} = \frac{\Delta MS_{SK_j,k}}{C_{SR_c,k}} \\ MS_{c,j} = \min(MS_{c,j,k}, F_{SR_c} - \sum_j F_{c,j}) \\ \Delta MS_{SK_j,k} = F_{SK_j} C_{SK_j,k} - \sum_i F_{SR_i} C_{SR_i,k} \end{cases} \tag{7}$$

式中 $MS_{c,j,k}$ 为考虑杂质 k 约束时氢源 SR_c 的最大补充流量。 $MS_{c,j}$ 为氢源 SR_c 对氢阱 SK_j 的最大补充流量。对于所有未完全利用和完全未利用的氢源，可根据式(7) 计算最大补充流量，选择具有最大补充流量的氢源为该氢阱的补充氢源。如果补充氢源的最大补充流量大于 $F_{SK_j} - \sum_i P_{i,j}$ ，则最终补充流量 ($FS_{c,j}$) 为 $F_{SK_j} - \sum_i P_{i,j}$ ；如果补充氢源的最大补充流量不大于 $F_{SK_j} - \sum_i P_{i,j}$ ，则最终补充流量为补充氢源的最大补充流量，即

$$FS_{c,j} = \begin{cases} \max(MS_{c,j}) & \text{if } \max(MS_{c,j}) \leq F_{SK_j} - \sum_i P_{i,j} \\ F_{SK_j} - \sum_i P_{i,j} & \text{if } \max(MS_{c,j}) > F_{SK_j} - \sum_i P_{i,j} \\ c \in [1, m]; c \neq i \end{cases} \tag{8}$$

每个氢阱的最终补充流量即为相应氢源和氢阱之间的最优匹配流量。把每个氢阱的最优匹配流量列入矩阵形成最佳匹配流量矩阵 (O 矩阵)。根据最佳匹配流量矩阵可以做出最终匹配网络图。

2 某炼厂氢网络数据

某炼厂的高压加氢装置、重整装置、临氢降温、白油精制和加氢处理装置组成的氢网络中共有 8 股氢源 (不包括制氢系统的新氢) 和 6 股氢阱。该系统包括 3 种主要杂质 (H_2S 、 N 和 C)，其他所有杂质可作为一种杂质，用 other 表示，具体数据如表 1 和表 2 所示。

表 1 现行工况氢源数据
Table 1 Data of hydrogen sources

Stream		Flow rate/ $m^3 \cdot h^{-1}$	Impurity concentration/ $mg \cdot L^{-1}$			
			Other	H_2S	N	C
SR_0	fresh hydrogen	2500	0.00	0.00	0.00	0.00
SR_1	outlet hydrogen of reforming unit	14000	1918.59	0.01	0.01	81.39
SR_2	outlet gas of R-509	1000	49775.36	74.84	88.88	60.92
SR_3	outlet hydrogen of membrane separation	2700	49857.74	56.13	56.13	30.00
SR_4	outlet gas of D-205	640	64998.98	1.00	0.01	0.01
SR_5	gas of II high pressure separation unit	22800	69954.05	0.94	0.01	45.00
SR_6	recycling hydrogen of I high pressure dewaxing unit	26500	1990	2.00	0.01	50.0
SR_7	outlet gas of D-102	500	80149.98	150.00	0.01	0.01
SR_8	recycling hydrogen of I high pressure treatment unit	54500	98399.65	200.00	200.00	30.00

表 2 现行工况下氢阱数据
Table 2 Data of hydrogen sinks

Stream		Flow rate/m ³ ·h ⁻¹	Upper bound of impurity concentration/mg·L ⁻¹			
			Other	H ₂ S	N	C
SK ₁	inlet hydrogen of R-501	1400	1990.00	0.01	10	100
SK ₂	inlet hydrogen of R-502	4000	3890.00	50.00	10	50
SK ₃	inlet hydrogen of Ⅱ high pressure hydrogenation unit	25000	64135.00	10.00	5	50
SK ₄	inlet hydrogen of R-201	28000	75835.00	10.00	5	50
SK ₅	inlet hydrogen of R-202	9100	81576.58	780.57	385.60	257.25
SK ₆	inlet hydrogen of R-102	56000	105305.24	194.64	200.00	50

3 多杂质氢网络的优化

根据式(3)和式(4)可计算出该氢网络系统脱杂质优化后的最大匹配流量矩阵 (**M** 矩阵)。由 **M** 矩阵可见, 氢阱 SK₁ 与各氢源匹配时的关键杂质相同, 为杂质 other。因此由最大流量准则可知氢阱 SK₁ 的潜在匹配源为氢源 SR₁, 潜在匹配流量为 1452.11 m³·h⁻¹。氢阱 SK₂、SK₃、SK₄、SK₅ 和 SK₆ 与各氢源匹配时的关键杂质不同, 因此需要考虑混合补偿优势。例如, 与氢阱 SK₂ 匹配时, 氢源 SR₆ 的关键杂质为 C, 氢源 SR₂ 的关键杂质为 other。SR₆ 中 C 的浓度为 50.0 mg·L⁻¹, 小于氢源 SR₂ 中杂质 C 的浓度; 而 SR₂ 中 other 浓度为 49775.36 mg·L⁻¹, 大于氢源 SR₆ 中 other 的浓度。因此, 氢源 SR₆ 和 SR₂ 不存在混合补偿优势。同理可以判断氢源 SR₆ 和 SR₈ 之间存在混合补偿优势。对于两组存在混合补偿优势的氢源, 根据公式质量衡算可知氢源 SR₆ 和 SR₈ 混合和氢阱 SK₂ 匹配时, 潜在匹配流量为 4000 m³·h⁻¹, 其中 SR₆ 的流量为 3922.11 m³·h⁻¹, SR₈ 的流量为 77.89 m³·h⁻¹。同理可得氢源 SR₂ 和 SR₆ 混合与氢阱 SK₂ 匹配时的潜在匹配流量为 3986 m³·h⁻¹。为尽可能多地回用现有的氢源, 选择氢源 SR₆ 和 SR₈ 混合跟氢阱 SK₂ 进行匹配。同理可以确定氢阱

SK₃、SK₄、SK₅ 和 SK₆ 潜在匹配流量, 具体如潜在匹配矩阵 (**P** 矩阵) 所示。

由 **P** 矩阵可见, 对于氢源 SR₁, 所有氢阱的潜在匹配流量加和为 9552.11 m³·h⁻¹, 而其流量为 14000 m³·h⁻¹, 因此氢源 SR₁ 可以满足氢阱 SK₁ 和 SK₅ 的潜在匹配流量要求。另外, 由于氢阱 SK₁ 的流量仅为 1400 m³·h⁻¹, 因此其与氢源 SR₁ 最佳匹配流量为 1400 m³·h⁻¹。对于氢源 SR₂, 其总流量为 1000 m³·h⁻¹, 恰好等于其与氢阱 SK₅ 的潜在匹配流量为 1000 m³·h⁻¹, 故氢源 SR₂ 能满足氢阱 SK₅ 的潜在匹配流量需求。氢源 SR₃ 的所有潜在匹配流量加和为 58489.67 m³·h⁻¹, 远大于其现行流量 2700 m³·h⁻¹。由式(6)可知, SK₄ 与该氢源匹配时的回用率为 0.089, 小于 SK₆ 和该氢源匹配时的回用率 (其值为 1)。因此, SK₄ 可优先与 SR₃ 匹配, 其最优匹配量等于其潜在匹配流量 2489.67 m³·h⁻¹, 而氢阱 SK₆ 与 SR₃ 的匹配流量为 210.34 m³·h⁻¹, 小于潜在匹配流量。同理可以确定氢源 SR₄ 和 SR₇ 的分流。分流后的各源阱之间的最佳匹配量见矩阵 **O'**。

SR₃、SR₄ 和 SR₇ 的分流造成 SK₃、SK₄ 和 SK₆ 未能得到足够的匹配流量。而氢源 SR₁、SR₅、SR₆ 和 SR₈ 尚有剩余。为增大氢源的回用, 还需考虑这 3 个氢阱所需的补充氢源和补充流量。

	SK ₁	SK ₂	SK ₃	SK ₄	SK ₅	SK ₆
SR ₁	1452.11(other)	2457.30(C)	15358.15(C)	17201.13(C)	28762.44(C)	34402.26(C)
SR ₂	55.97(other)	312.60(other)	1406.39(N)	1575.16(N)	14913.94(other)	45961.92(C)
SR ₃	55.88(other)	312.09(other)	2226.97(N)	2494.21(N)	14889.30(other)	93333.33(C)
SR ₄	42.86(other)	239.39(other)	24667.69(other)	32667.90(other)	11420.90(other)	83532.08(other)
SR ₅	39.83(other)	222.43(other)	22920.40(other)	30353.93(other)	10611.92(other)	62222.22(C)
SR ₆	1400.00(other)	4000.00(C)	25000.00(C)	28000(C)	46819.50(C)	56000.00(C)
SR ₇	34.76(other)	194.14(other)	1666.67(H ₂ S)	1866.67(H ₂ S)	9261.97(other)	67741.75(other)
SR ₈	27.98(other)	156.27(other)	625.00(N)	700(N)	7455.53(other)	54529.48(other)

Note: Key impurity of each match is listed in bracket besides corresponding maximum match flow rate.

$$P = \begin{matrix} & SK_1 & SK_2 & SK_3 & SK_4 & SK_5 & SK_6 \\ \begin{matrix} SR_1 \\ SR_2 \\ SR_3 \\ SR_4 \\ SR_5 \\ SR_6 \\ SR_7 \\ SR_8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1452.11 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 8100.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1000.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 2489.67 & 0.00 & 56000.00 \\ 0.00 & 0.00 & 22789.89 & 22510.33 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 3922.11 & 704.77 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1505.34 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 77.89 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \end{matrix}$$
$$O' = \begin{matrix} & SK_1 & SK_2 & SK_3 & SK_4 & SK_5 & SK_6 \\ \begin{matrix} SR_1 \\ SR_2 \\ SR_3 \\ SR_4 \\ SR_5 \\ SR_6 \\ SR_7 \\ SR_8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1400.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 8100.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1000.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 2489.67 & 0.00 & 210.34 \\ 0.00 & 0.00 & 0 & 640 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 3922.11 & 704.77 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 500 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 77.89 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

根据式(7)，可计算出氢源 SR_1 、 SR_5 、 SR_6 和 SR_8 对氢阱 SK_3 、 SK_4 和 SK_6 的最大补充流量，如表 3 所示。根据式(8)，可知氢阱 SK_3 的补充氢源为 SR_5 ，最大补充流量为 $22327.48 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。氢阱 SK_4 的最大补充氢源为 SR_5 ，最大补充流量为 $22800 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。但由于 SR_5 已有 $22327.48 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 补充给氢阱 SK_3 ，因此该氢源能补充给氢阱 SK_4 的最大流量为 $472.52 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。用氢源补充后，氢阱 SK_4 的各杂质负荷仍未达到上限，因此还有回用其他氢源的潜力。同样根据式(7)和式(8)可依次确定氢源 SR_6 和氢源 SR_1 可作为该氢阱的补充氢源，最大补充流量分别为 21873.12、

$2496.61 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。同理，可确定氢阱 SK_6 的补充氢源为 SR_8 和 SR_1 ，最大补充量分别为 54422.11、 $1367.55 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

各氢阱的补充流量即为其与相应氢源的最佳匹配流量。据此，可得系统的最佳匹配流量矩阵 (O 矩阵)。氢阱的流量与各氢源 (不包括新氢) 提供的流量之差即为该氢阱的新氢消耗量，具体数值见 O 矩阵 SR_0 行。系统总的新氢消耗量为 $1495.83 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，比现行网络节约 $1004.17 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，占现行新氢消耗量的 40.2%。

根据 O 矩阵，可确定最佳匹配氢网络矩阵，如图 1 所示。在图中，每一条带有箭头的水平线代表一股氢源或氢阱 (氢源的箭头指向右方，氢阱的箭头指向左方)。每个阱的匹配关系由一条垂线表示。有匹配关系的源和阱均以圆圈表示，具体匹配量由圆圈旁的数字表示。例如，图 1 中最右侧的垂线连接阱 SK_6 和源 SR_1 、 SR_3 、 SR_8 ，其匹配量分别为 1367.55 、 210.34 、 $54422.11 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

表 3 源阱最大补充流量表

	Maximum supplement flowrate/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$				$F_{SK_j} - \sum_i F_{i,j}$
	SR_1	SR_5	SR_6	SR_8	
SK_3	4447.89	22327.48	21873.12	624.94	23795.23
SK_4	4447.89	22800.00	21873.12	1.24	24870.33
SK_6	4447.89	22800.00	21873.12	54440.17	55789.66

$$O = \begin{matrix} & SK_1 & SK_2 & SK_3 & SK_4 & SK_5 & SK_6 \\ \begin{matrix} SR_1 \\ SR_2 \\ SR_3 \\ SR_4 \\ SR_5 \\ SR_6 \\ SR_7 \\ SR_8 \\ SR_0 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1400.00 & 0.00 & 0.00 & 2496.61 & 8100.00 & 1367.55 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1000.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 2489.67 & 0.00 & 210.34 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 640.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 22327.48 & 472.52 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 3922.11 & 704.77 & 21873.12 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 500.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 77.89 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 54422.11 \\ 0.00 & 0.00 & 1467.75 & 28.08 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

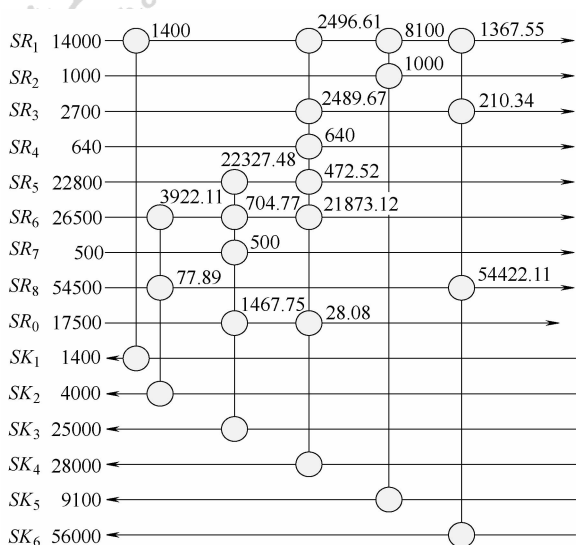


图 1 最佳匹配氢网络

Fig. 1 Optimum hydrogen distribution network

4 结 论

本文用多杂质演化法对某炼厂的氢网络进行了优化,得出以下结论。

(1) 优化后系统的新氢消耗量可从现行的 $2500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 降为 $1495.83 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 节约量为 $1004.17 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 占现行新氢消耗量的 40.2%。

(2) 采用演化法不仅可以计算出最小新氢用量,还可设计出对应的最优氢分配网络。

(3) 多杂质氢网络的优化是有效的、可行的。

(4) 但在氢网络系统中,制约氢源使用的因素,除了氢浓度、杂质浓度和流量外,还有压力。本文未考虑压力因素,应在进一步集成优化时考虑该因素。

符 号 说 明

F_{reuse} ——循环回用的氢量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$

F_{SK_j} ——氢阱 SK_j 的流量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$

F_{SR_i} ——氢源 SR_i 的流量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$

$FS_{c,j}$ ——氢阱 SK_j 的补充流量

$KI_{i,j}$ ——氢阱 SK_j 与氢源 SR_i 匹配时的关键杂质

$KI_{l,j}$ ——氢阱 SK_j 与氢源 SR_l 匹配时的关键杂质

$M_{i,j}$ ——氢阱 SK_j 与氢源 SR_i 的最大匹配流量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$

$M_{i,k}$ ——氢阱 SK_j 中杂质 k 达到负荷上限时的匹配量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$

$MS_{c,j}$ ——氢源 SR_c 对氢阱 SK_j 的最大补充流量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$

$MS_{c,j,k}$ ——考虑杂质 k 约束时氢源 SR_c 的最大补充流量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$

$O_{i,j}$ ——氢阱 SK_j 与氢源 SR_i 的最佳匹配流量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$

$P_{i,j}$ ——氢阱 SK_j 与氢源 SR_i 的过程的潜在匹配流量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$

R ——氢源回用率

$y_{SK_j,k}$ ——氢阱 SK_j 中杂质 k 的浓度

$y_{SK_j,k}^{\text{max}}$ ——氢阱 SK_j 中杂质 k 的浓度上限

$y_{SR_i,KI_{i,j}}$ ——氢源 SR_i 中关键杂质 $KI_{i,j}$ 的浓度

$y_{SR_i,KI_{l,j}}$ ——氢源 SR_i 中关键杂质 $KI_{l,j}$ 的浓度

$y_{SR_l,KI_{i,j}}$ ——氢源 SR_l 中关键杂质 $KI_{i,j}$ 的浓度

$y_{SR_l,KI_{l,j}}$ ——氢源 SR_l 中关键杂质 $KI_{l,j}$ 的浓度

$y_{SR_i,k}$ ——氢源 SR_i 中杂质 k 的浓度

References

- [1] Zhang Yi (张毅), Yang Yongrong (阳永荣), Liu Jun (刘军), Guo Hongxin (郭宏新), Tang Yinggang (唐应刚). Hydrogen network management in refinery [J]. *Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section* (石油学报: 石油加工), 2004, **20** (1): 58-62
- [2] Yan Jun (严钧), Hong Zhigang (洪志刚). Optimization of the refinery hydrogen system//The conference on the hydrogen producing, reusing and management of refinery [C]. Beijing: China Academic Journals (CD Edition) Electronic Publishing House, 2008: 214-215
- [3] Alves J J. Analysis and design of refinery hydrogen distribution systems [D]. Manchester: UMIST, 1999
- [4] Alves J J, Towler G P. Analysis of refinery hydrogen distribution systems [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2002, **41** (23): 5759-5769
- [5] Kazantzi V, El-Halwagi M M. Targeting material reuse via property integration [J]. *Chemical Engineering Progress*, 2005, **101** (8): 28-37
- [6] El-Halwagi M M, Gabriel F, Harell D. Rigorous graphical targeting for resource conservation via material recycle/reuse Networks [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2003, **42** (19): 4319-4328
- [7] Zhao Z H, Liu G L, Feng X. New graphical method for the integration of hydrogen distribution systems [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2006, **45** (19): 6512-6517
- [8] Almutlaq A M, Kazantzi V, El-Halwagi M M. An algebraic approach to targeting waste discharge and impure fresh usage via material recycle/reuse networks [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2005, **7** (4): 294-305
- [9] Bandyopadhyay S. Source composite curve for wastewater reduction [J]. *Chem. Eng. J.*, 2006, **125** (2): 99-110

- [10] Foo D C Y, Kazantzi V, El-Halwagi M M, *et al.* Surplus diagram and cascade analysis technique for targeting property-based material reuse network [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2006, **61** (4): 2626-2642
- [11] Hallale N, Moore I, Vauk D. Hydrogen optimization at minimal investment[J]. *Petroleum Technology Quarterly*, 2003, **Q1**: 83-90
- [12] Zhao Z H, Liu G L, Feng X. The integration of the

hydrogen distribution system with multiple impurities [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2007, **85** (A9): 1295-1304

- [13] Liu G L, Tang M Y, Feng X, Lu C X. Evolutionary design methodology for resource allocation networks with multiple impurities [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2011, **50**: 2959-2970

信息与交流

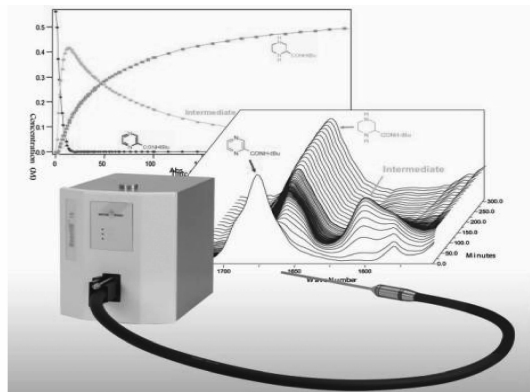
梅特勒-托利多鼎力支持第七届全国有机化学学术会议

2011年11月13~15日,第七届全国有机化学学术会议在南京召开。本届大会由中国化学会,国家自然科学基金委员会主办,南京大学与江苏省化学化工学会承办。大会期间,国内外有机化学及相关领域的专家就有机化学最新成就展开了广泛深入的探讨。

在线反应分析领域的权威——梅特勒-托利多,鼎力赞助本届大会,并在大会上展示了 EasyMax™ 自动化学合成反应器及 ReactIR™ 微流通池。会中,梅特勒-托利多自动化化学部的产品经理刘慧敏博士就“应用 ReactIR™ 实时原位反应分析技术进行金属催化转化的机理和动力学研究”发表了演讲。



图为梅特勒-托利多自动化化学部产品经理刘慧敏博士在会中发表演讲



图为梅特勒-托利多 ReactIR™ 在线分析系统

作为化学学科中最具有创造性的研究领域,有机合成化学已成为推动有机化学发展进程中不可或缺的重要组成部分。梅特勒-托利多的 ReactIR™ 实时在线反应分析系统是监测化学反应过程的理想工具,它采用便携式设计,灵敏度高,抗震性强,适用于有机合成实验室苛刻的工作环境。只需将 ReactIR™ 探头插入反应体系中就可以实现实时原位监测,无需取样和样品制备,消除“取样”导致的分析时间滞后和误差。它采用特征性强的中红外光谱技术,结合 iC IR™ 反应分析和 iC Kinetics™ 动力学分析软件,帮助研究人员进行反应机理和动力学研究、反应终点监控、组分浓度在线监测、结晶过程过饱和度在线监控等,广泛应用于化学化工、制药、高分子材料等行业的研发实验室。